

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YENİ NESİL PM/HTS-ALÜMİNYUM RAYLI ELEKTRODİNAMİK (EDL)
MAGLEV ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ELEKTROMANYETİK KUVVET
PARAMETRELERİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Hakkı MOLLAHASANOĞLU

MAYIS 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“Yeni Nesil PM/HTS-Alüminyum Raylı Elektrodinamik (EDL) Maglev Ulaşım Sistemlerinin Elektromanyetik Kuvvet Parametrelerinin Nümerik ve Deneysel Yöntemlerle Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu doktora tez çalışması, 122F432 kodlu TÜBİTAK 1001 Projesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FBA-2024 16040 ve FBA-2024-11081) kapsamında desteklenmiştir. Bu vesileyle, TÜBİTAK’a ve Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’a ve yürütücüsü olduğu TÜBİTAK 1001 projesinde bana bursiyer olarak çalışma fırsatı veren ve bu süreçte bilimsel birikiminden faydalandığım Prof. Dr. Ufuk Kemal ÖZTÜRK’e teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Murat ABDİOĞLU’na, akademik gelişimime olduğu kadar sosyal yaşantıma da dokunan Prof. Dr. Emre ÖZKOP’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana inanan, desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili annem ve babam Emine-Faik MOLLAHASANOĞLU ile Arş. Gör. Emin MOLLAHASANOĞLU’na sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Akademik serüvenimin yanı sıra, hayatımın her anında yanımda olan ve tüm yoğunluğuma sabırla katlanan sevgili eşim ve meslektaşım Merve’ye en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Fedakârlığı, anlayışı ve koşulsuz desteğiyle yalnızca bu zorlu süreci değil, tüm hayat yolculuğunu benim için anlamlı ve değerli kılmıştır. Sevgili kızlarım Nihal ve Elif’e ise, her zaman bana ilham veren, varlıklarıyla bu sürecin en güçlü motivasyon kaynağı olan güzel yürekleri için teşekkür ederim.

Bu tezi, eğitimimize çok önem veren ve bu yönde bizi daima motive eden babam Faik MOLLAHASANOĞLU’na ithaf ediyorum.

Hakkı MOLLAHASANOĞLU

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yeni Nesil PM/HTS-Alüminyum Raylı Elektrodinamik (EDL) Maglev Ulaşım Sistemlerinin Elektromanyetik Kuvvet Parametrelerinin Nümerik ve Deneysel Yöntemlerle Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/05/2025

Hakkı MOLLAHASANOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Çözüm Yaklaşımı, Organizasyonu ve Katkısı	3
1.3. Maglev Ulaşım Sistemlerinin Genel Tanıtımı.....	5
1.4. Maglev Sistemlerin Çalışma Prensipleri ve Sınıflandırılması.....	7
1.4.1. Elektromanyetik Levitasyon (EML)	8
1.4.2. Elektrodinamik Levitasyon (EDL).....	10
1.5. Maglev Sistemlerde Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler (HTS).....	13
1.6. Alüminyum Ray Tabanlı EDL Maglev Sistemleri ve Elektromanyetik Kuvvet Parametreleri.....	14
1.7. Literatür Özeti	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	32
2.1. Girdap Akımları ve Elektromanyetik Kuvvet Oluşumu: Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemler için Kuramsal Temel	33
2.2. PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemi için Gerçekleştirilen Nümerik Çalışmalar	37
2.2.1. PM ve Farklı Geometrilerdeki Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu	38
2.2.2. PM-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu.....	40
2.2.3. HTS-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu	41

2.3.	PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemi için Gerçekleştirilen Deneysel Çalışmalar	44
2.3.1.	PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Dinamik Ölçüm Sisteminin Tasarımı ve İmalatı	45
2.3.2.	Dinamik Kuvvet Ölçüm Sistemi için PLC ve SCADA Tabanlı Veri Toplama ve Kontrol Mekanizmalarının Oluşturulması	51
2.3.3.	Kuvvet, Pozisyon ve Hız Verilerinin Eşzamanlı Ölçüm ve İşlenmesi	52
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	55
3.1.	Nümerik Sonuçlar.....	55
3.1.1.	PM ve Farklı Geometrilerdeki Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi	56
3.1.2.	PM-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi	65
3.1.3.	HTS-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi	70
3.2.	Deneysel Sonuçlar	72
3.2.1.	PM-Alüminyum ray konfigürasyonunun EDL Sistemlerindeki Deneysel Performansının Belirlenmesi.....	73
3.2.2.	HTS-Alüminyum ray konfigürasyonunun EDL Sistemlerindeki Deneysel Performansının Belirlenmesi.....	82
3.2.3.	Bakır ve HTS Şerit Bobinlerin Elektromanyetik Performansının Değerlendirilmesi.....	91
3.3.	Nümerik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	98
4.	SONUÇLAR.....	103
5.	ÖNERİLER.....	105
6.	KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

YENİ NESİL PM/HTS-ALÜMİNYUM RAYLI ELEKTRODİNAMİK (EDL) MAGLEV ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ELEKTROMANYETİK KUVVET PARAMETRELERİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Hakkı MOLLAHASANOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ
2025, 111 Sayfa

Bu tez çalışmasında, kalıcı mıknatıs (PM), yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) ve bobin kaynaklı manyetik alanlarla etkileşimli çalışan, modüler yapıda ve ölçüme uygun bir alüminyum ray tabanlı elektrodinamik levitasyon (EDL) sistemi geliştirilmiştir. Sistem, farklı manyetik kaynaklara karşı kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini hem sayısal (COMSOL Multiphysics ile) hem de deneysel olarak analiz edebilme yeteneğine sahiptir. Yüksek hızlı deneysel düzeneğin kurulmasıyla 320 km/sa eşdeğeri hızlarda ölçümler gerçekleştirilmiş, bu veriler teorik ve nümerik modellerle karşılaştırılmıştır. Çalışma; HTS'nin akı tuzaklama kapasitesi, boşluklu ray geometrisi optimizasyonu ve pasif kuvvet üretimi gibi birçok özgün katkı sunmakta olup, yerli ve yenilikçi Maglev sistemlerinin geliştirilmesine bilimsel ve mühendislik temelli önemli bir zemin sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrodinamik levitasyon, Kalıcı mıknatıs, Maglev, Manyetik kuvvet, Yüksek sıcaklık süperiletken

PhD. Thesis

SUMMARY

NUMERICAL and EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC FORCE PARAMETERS OF NEW GENERATION PM/HTS-ALUMINIUM RAIL ELECTRODYNAMIC (EDL) MAGLEV TRANSPORT SYSTEMS

Hakkı MOLLAHASANOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronic Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Halil İbrahim OKUMUŞ
2025, 111 Pages

In this doctoral study, a modular aluminum-rail-based electrodynamic levitation (EDL) system was developed, capable of interacting with various magnetic field sources including permanent magnets (PM), high-temperature superconductors (HTS), and coil-based configurations. The system enables detailed investigation of lift and drag forces through both numerical (via COMSOL Multiphysics) and experimental methods. A high-speed experimental setup, simulating speeds equivalent to 320 km/h, was constructed and equipped with SCADA-integrated PLC control, multi-axis force sensors, cryogenic cooling, and precise motion tracking systems. Measurements taken at varying speeds and levitation gaps were compared with theoretical and numerical models to validate the system. Key contributions include the validation of passive force generation mechanisms (without active field excitation), optimization of slotted rail geometries, analysis of HTS flux pinning effects on levitation, and the design of a modular test infrastructure. Overall, this study provides original and comprehensive data supporting the advancement of innovative and domestically developed Maglev technologies from both scientific and engineering perspectives.

Key Words: Electrodynamic levitation, Permanent magnet, Maglev, Magnetic force, High-temperature superconductors

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tez kapsamında irdelenen çıktıların sembolik gösterimi.....	4
Şekil 2. Tezin planlaması.....	5
Şekil 3. Maglev sistemlerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi: (a) levitasyon sistemi, (b) itme (tahrik) sistemi ve (c) kılavuzlama sistemi	7
Şekil 4. EML çalışma prensibi (Guerrieri 2023).	9
Şekil 5. EDL çalışma prensibi (Guerrieri 2023).....	11
Şekil 6. EDL sistemlerin fiziksel modelinin şematik gösterimi	15
Şekil 7. EDL sistemlerinde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hıza bağlı tipik davranışı (Beauloye & Dehez 2023)	18
Şekil 8. Üç eksenli manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi (Abdioglu vd. 2015).....	22
Şekil 9. Yana asılan HTS Maglev dairesel test parkurunun panoramik görünümü (a), PMA (b-1) ve prototip araç (b-2) (Zhou vd. 2016).....	26
Şekil 10. SCML-03 Maglev dinamik test sisteminin ana bölümünün fotoğrafı (Wang vd. 2008)	26
Şekil 11. Brezilya Federal University of Rio de Janeiro’da geliştirilen Maglev-Cobra aracı. (a) Maglev vagonunun bir metrelik kesiti ve içerisindeki araştırmacılar (b), manyetik kılavuzlama yolu üzerinde askıda duran ve içerisinde YBCO külçe süperiletkenler bulunan bir kriyostat, (c) Maglev-Cobra vagonu), (d) kampüs içerisindeki 200 m uzunluklu yol (Mattos vd. 2016)	27
Şekil 12. MagTranS adlı manyetik taşıma sisteminin görünümü (D’Ovidio vd. 2008)	28
Şekil 13. (a) Tek yolcu taşıma kapasiteli Süper-Maglev aracı (b) Maglev Test yolunun panoramik görüntüsü ve (c) HTS-ETT sisteminin şematik görüntüsü (Deng vd. 2016)	29
Şekil 14. Ultra yüksek hızlı Maglev test sisteminin şematik gösterimi (Deng vd. 2021)	30
Şekil 15. EDL test sisteminin elektrik motoru ile karşılaştırılması (Han & Kim 2016)	34
Şekil 16. EDL sistemin fiziksel modeli.....	35
Şekil 17. COMSOL nümerik simülasyon arayüzü ve parametreler	38
Şekil 18. Tam (a) ve periyodik kaviteasyonlu (b) alüminyum raylı Maglev dinamik kaldırma konseptinin şematik gösterimi	39
Şekil 19. COMSOL yazılımında gerçekleştirilen nümerik simülasyon parametreleri (a), oluşturulan topoloji (b) ve COMSOL tasarımı (c)	40

Şekil 20. COMSOL yazılımında gerçekleştirilen nümerik simülasyon parametreleri (a), durağan durumda (b) ve hareketli durumda (c) gerçekleştirilen manyetik alan tuzaklama simülasyonuna ait ağ yapısı (mesh) görünümü	42
Şekil 21. HTS-alüminyum ray EDL sisteminin iki bileşenli nümerik modelleme yapısı	43
Şekil 22. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik özellikler ölçüm sisteminin şematik görünümü.....	45
Şekil 23. HTS-Alüminyum raylı Maglev dinamik ölçüm prototipinin genel görünümü	49
Şekil 24. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi kontrol ünitesi	52
Şekil 25. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi SCADA arayüzü	53
Şekil 26. Kuvvet kalibrasyon grafiği (z-ekseni).....	54
Şekil 27. 100 m/sn hızdaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve PM dizisinin doluluk faktörüne bağlı LDR oranı (b).....	57
Şekil 28. PM'ler ve farklı kalınlıktaki alüminyum raylar arasındaki kaldırma (a) ve sürüklenme (b) kuvveti eğrileri.....	58
Şekil 29. Maksimum 100 m/sn hızdaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve alüminyum rayın kalınlığına bağlı olarak LDR oranı (b)	58
Şekil 30. Farklı genişlikteki alüminyum ray ile kalıcı mıknatıslar arasındaki kaldırma kuvveti (a) ve sürüklenme kuvveti (b) eğrileri	59
Şekil 31. 100 m/sn'de kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ile alüminyum ray genişliğine bağlı LDR oranı (b)	60
Şekil 32. Kalıcı mıknatıslar ile farklı iç genişliklerde boşluklara sahip alüminyum ray arasındaki kaldırma kuvveti (a) ve sürüklenme kuvveti (b) grafikleri	61
Şekil 33. 100 m/sn'de alüminyum raydaki boşluğun genişliğine (w_{Al_in}) bağlı kaldırma- sürüklenme kuvveti (a) ve LDR oranı (b)	61
Şekil 34. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %10'una karşılık gelen 6 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve LDR oranı	62
Şekil 35. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %20'sine karşılık gelen 12 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve LDR oranı.....	62
Şekil 36. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %60'sine karşılık gelen 36 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve LDR oranı.....	63
Şekil 37. Alüminyum rayın farklı boşluk genişlikleri için boşluk uzunluğuna bağlı LDR/maliyet oranı	64
Şekil 38. PMA-Alüminyum ray topolojisi için tasarlanan PM konfigürasyonu	65
Şekil 39. PMA-alüminyum ray topolojisi için 10 mm hareket yüksekliğinde elde edilen manyetik akı yoğunluğu (akı çizgileri) ve akım yoğunluğu	

dağılımları: Durağan ($v=0$) durumda (a), 140 km/sa hızda (b), 270 km/sa hızda (c).....	66
Şekil 40. PMA-alüminyum ray topolojisi için 15 mm hareket yüksekliği ve 270 km/sa hızda elde edilen manyetik akı yoğunluğu (akı çizgileri) ve akım yoğunluğu dağılımları.....	67
Şekil 41. PMA-Alüminyum ray topolojisi için nümerik simülasyonlar sonucunda elde edilen manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi.....	68
Şekil 42. PMA-Alüminyum ray topolojisi için 5 mm hareket yüksekliğinde elde edilen manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi.....	69
Şekil 43. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi.....	71
Şekil 44. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi.....	71
Şekil 45. Lazer yer değiştirme sensörünün EDL sistemine montajı	73
Şekil 46. Yüksüz alüminyum rayın çeşitli hızlarında ölçüm noktasının düşey doğrultudaki bağıl hareketi	74
Şekil 47. Yüklü (PMA) durumda alüminyum rayın çeşitli hızlarında ölçüm noktasının düşey doğrultudaki bağıl hareketi	75
Şekil 48. PMA-Alüminyum ray topolojisi için tasarlanan farklı PM konfigürasyonları.....	76
Şekil 49. PMA'nın kuvvet sensörüne montajı ve sistem görüntüsü	77
Şekil 50. Kon-a dizilimi için manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi	78
Şekil 51. Kon-b dizilimi için manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi	79
Şekil 52. Kon-c dizilimi için manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi	80
Şekil 53. Tez çalışmasında kullanılan külçe YBCO HTS malzemelere ait fotoğraf.....	82
Şekil 54. Manyetik akı tuzaklama çalışmaları için oluşturulan farklı PMA konfigürasyonları	83
Şekil 55. Külçe HTS'de manyetik akı tuzaklama düzeneği ve Kon-4a konfigürasyonuna ait PMA dizilimi	84
Şekil 56. PMA-1 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları.....	85
Şekil 57. PMA-2 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları.....	85

Şekil 58. PMA-3 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları	86
Şekil 59. PMA-4 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları	87
Şekil 60. PLA malzemeden imal edilen yeni kriyostatın genel görünümü	88
Şekil 61. HTS-Alüminyum ray dinamik manyetik kuvvet ölçüm düzeneği	88
Şekil 62. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi	89
Şekil 63. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi	89
Şekil 64. EDL sisteminde vagon içerisinde 4 sıra yerleştirilmiş külçe HTS'lerin iki sıra alüminyum ray üzerindeki şematik çizimi	90
Şekil 65. Bakır-şerit bobin için PLA malzemeden imal edilen bobin kalıbının teknik çizimi (a), (b), önden (c) ve üstten (d) çekilmiş fotoğrafı	92
Şekil 66. Bakır şerit bobininde farklı akımlara bağlı olarak manyetik alan dağılımı ölçüm düzeneği	92
Şekil 67. Bakır şerit bobine uygulanan akımın 60 A değerine kadar elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları	93
Şekil 68. Kısa devre, üç sarımlı HTS bobin. Bobini sarmak için kullanılan bobin kalıbının teknik çizimi (a), uçları lehimlenerek birleştirilen HTS bobin (b), kalıba yerleşik haldeki HTS bobin (c)	94
Şekil 69. Üç sarımlık HTS bobine uygulanan farklı akımlar için bobin yüzeyinde oluşan manyetik alanın ölçüldüğü deney düzeneği	95
Şekil 70. 3 sarımlı HTS bobine uygulanan akımın 100 A değerine kadar elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları	96
Şekil 71. 120 A uygulandığında HTS bobinde meydana gelen bölgesel yanma	97
Şekil 72. HTS ve bakır bobinlerin manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması	98
Şekil 73. PMA – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde kaldırma kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması	99
Şekil 74. PMA – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde sürüklenme kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması	99
Şekil 75. Manyetik akı tuzaklanmış HTS – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde kaldırma kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması	100

Şekil 76. Manyetik akı tuzaklanmış HTS – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde sürüklenme kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması	101
---	-----



TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sayısal hesaplamalar için PM-EDL sisteminin fiziksel parametreleri.....	39
Tablo 2. PM-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi teknik özellikleri	46
Tablo 3. PM-HTS Maglev dinamik ölçüm prototipi kullanılan malzeme listesi	47
Tablo 4. Farklı PM boyutlarına karşılık gelen dolgu faktörü değerleri.....	57
Tablo 5. Farklı konfigürasyonlar için 1475 rpm hızında elde edilen kuvvet değerler	81
Tablo 6. PMA'nın ölçeklenmiş uygulamalarındaki teorik kaldırma kuvveti.....	81
Tablo 7. Tek HTS ve 4 m uzunluktaki vagona yerleştirilmiş HTS set için EDL sistemindeki manyetik kuvvet değerleri	91
Tablo 8. Çalışmada kullanılan 2. Nesil (2G) YBCO HTS şerit özellikleri	93

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ	: Elektriksel iletkenlik
γ	: Dolgu faktörü
λ	: Dalga boyu
v	: Hız
B	: Manyetik akı yoğunluğu
E	: Elektrik alan
F	: Kuvvet
F_D	: Sürüklenme kuvveti (Drag force)
F_G	: Kılavuz kuvveti (Guidance force)
F_L	: Kaldırma kuvveti (Levitation force)
H_c	: Kritik manyetik alan
J	: Akım yoğunluğu
J_c	: Kritik akım yoğunluğu
T_c	: Sıfır elektrik direnci
W_{PM}	: Kalıcı mıknatıs ağırlığı
AA	: Alternatif akım
BSCCO	: Bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit
EDL	: Elektrodinamik levitasyon
DA	: Doğru akım
EML	: Elektromanyetik levitasyon
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)
Gap	: Hareket yüksekliği
HTS	: Yüksek sıcaklık süperiletken (High temperature superconductor)
K	: Kelvin
LDR	: Kaldırma/Sürüklenme Oranı (Lift-to-Drag Ratio)
LIM	: Lineer indüksiyon motor
LTS	: Düşük sıcaklık süperiletken (Low temperature superconductor)
LWR	: Kaldırma/Ağırlık Oranı (Lift-to-Weight Ratio)
Maglev	: Manyetik kaldırma (Magnetic levitation)
PLA	: Polilaktik asit (Polylactic Acid)

PLC	: Programlanabilir lojik kontrolör
PM	: Kalıcı mıknatıs (Permanent magnet)
PMA	: Kalıcı mıknatıs dizisi (Permanent magnet array)
SCADA	: Gözetleyici kontrol ve veri toplama sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)
SCM	: Süperiletken mıknatıs (Superconductivity magnet)
T	: Tesla
YBCO	: İtiryum baryum bakır oksit



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde, küreselleşen dünyada, enerji ve ulaşım; ekonomik büyüme, toplumsal gelişim ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen iki önemli unsurdur. Ulaşım sektörü, en büyük enerji tüketicilerinden biridir ve bu enerji genellikle fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bu fosil yakıtlara olan bağımlılık, sera gazı emisyonlarına neden olarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Ulaşım, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %23'ünden sorumludur (IEA 2023). Özellikle, karayolu taşıtları büyük miktarda bu kirliliğe sebep olmaktadır. Şehirler büyüdükçe ve nüfus arttıkça, hızlı, güvenilir ve verimli ulaşım sistemlerine olan talep de artmaktadır. Geleneksel ulaşım yöntemleri, bu talebi sürdürülebilir şekilde karşılamakta zorlanmaktadır. Bu durum, küresel enerji güvenliği, iklim değişikliği ve hava kalitesi üzerinde önemli etkiler yaratır. Dünyadaki gelişmiş ülkeler daha temiz ve verimli enerji kaynaklarına geçmeye çalışırken, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi kritik bir hale gelmiştir. Bu bağlamda, raylı ulaşım sistemleri, yüksek enerji verimliliği, düşük karbon salınımı ve uzun ömürlü altyapıları ile öne çıkmaktadır. Geleneksel raylı sistemler, özellikle şehir içi ve şehirlerarası ulaşımında güvenilir ve çevre dostu bir seçenek sunarken, daha ileri teknolojilere yönelik ihtiyaç artmaktadır.

Bu teknolojiler arasında yer alan Maglev (Magnetic + Levitation: Manyetik kaldırma) ulaşım sistemleri, raylarla fiziksel temas olmaksızın araçları elektromanyetik kuvvetler kullanarak kaldıran ve iten sistemler olup, sürtünmesiz hareket sağlayarak enerji verimliliğini daha da artırmakta ve ulaşım sürelerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Saatte 600 km'yi aşan hızlara ulaşabilmesi, kısa mesafeli uçuşlara alternatif olarak sunularak havayolu ulaşımındaki yoğunluğu azaltabilir. Ayrıca, Maglev trenlerinin raylara fiziksel temas etmemesi nedeniyle, sürtünmenin ortadan kalkması, enerji kaybını asgari düzeye düşürdüğü gibi mekanik aşınmanın olmamasından dolayı da sistemin bakım ihtiyacının azalmasına neden olur. Bu da hem trenlerin hem de altyapının uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Mekanik temas olmaması, aynı zamanda gürültü kirliliğinin asgari düzeye inmesini sağlar, bu da Maglev sistemlerini, yoğun nüfuslu alanlar için ideal kılmaktadır.

Günümüzün enerji odaklı dünyasında, enerji kullanımını ve çevreye olan zararlı etkileri en aza indiren ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi hayati önemdedir. Elektrifikasyona

dayalı demiryolu sistemleri, yolcu ve yük taşımacılığı için sürdürülebilir ve yüksek enerji verimliliğine sahip bir çözüm sunar. Ancak, teknolojinin ilerlemesi ile daha hızlı, verimli ulaşım sistemlerine olan ihtiyaç arttıkça, Maglev ulaşım sistemleri ulaşım sektöründe kritik bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Yüksek hıza ve enerji verimliliği sahip Maglev sistemleri, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak ulaşımında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Pek çok ülke modern ve enerji verimliliğine sahip ulaşım altyapılarına yatırım yaparken, Maglev sistemleri küresel ulaşımın geleceğinin şekillendirilmesinde önemli bir rol üstlenme potansiyeline sahiptir.

Maglev ulaşım sistemlerinin olgunlaşması ve ticarileşmesi sürecinde test prototipleri hayati bir rol oynar. Bu prototipler, elektrodinamik ve elektromanyetik kaldırma prensiplerinin gerçek çalışma koşullarında doğrulanmasına olanak tanıyarak (Özbek vd. 2021); farklı manyetik düzenlemeler, ray malzemeleri ve hız aralıkları için kaldırma, sürüklenme kuvveti ve dinamik kararlılık parametrelerinin deneysel olarak ölçülmesini sağlar. Elde edilen veriler, kuramsal modellerin ve nümerik simülasyonların güvenilirliğini artırır, belirsizlikleri ve model sapmalarını ortaya koyar. Ayrıca prototip altyapıları, gerçek zamanlı veri toplama ve kontrol sistemleri entegrasyonu sayesinde tasarım, test ve geri besleme döngülerini hızlandırır, böylece araştırma ve geliştirme süreçlerinde iteratif iyileştirmelere imkân verir (Ma vd. 2015; Deng vd. 2022; Feng vd. 2023). Ölçek büyütme çalışmalarında erken aşamada edinilen deneysel bulgular, maliyet ve güvenlik analizlerinin doğruluğunu destekleyerek Maglev sistemlerinin endüstriyel uygulamalara adaptasyonunu kolaylaştırır. Bu nedenle, deneysel prototip geliştirme ve test altyapısı, Maglev araştırmalarında hem temel bilimsel değer taşıyan bulguların elde edilmesini hem de teknolojinin pratik uygulamalara güvenle aktarılmasını mümkün kılar.

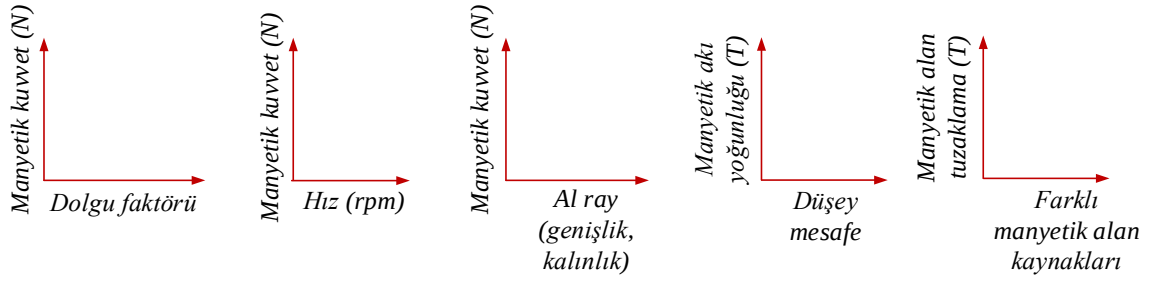
Bu tez çalışmasında, yüksek hızlı Maglev sistemlerinin geliştirilmesine yönelik olarak hem nümerik hem de deneysel doğrulama çalışmalarını içeren kapsamlı bir araştırma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, özgün bir laboratuvar ölçekli test altyapısı geliştirilmiş ve bu sistem aracılığıyla farklı parametrelerin kaldırma, sürüklenme kuvveti ve dinamik kararlılık üzerindeki etkileri deneysel olarak gözlemlenmiştir. Sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması yoluyla, kuramsal yaklaşımların geçerliliği değerlendirilmiş ve sistem performansına dair bütüncül bir bakış açısı sunulmuştur. Elde edilen bulgular, Maglev teknolojisinin yerli ve özgün bileşenlerle geliştirilmesine katkı sunarken, benzer sistemlerin tasarımı ve ölçeklenebilirliği açısından da önemli bilimsel veriler sağlamaktadır.

1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Çözüm Yaklaşımı, Organizasyonu ve Katkısı

Tezin; motivasyonu, amacı, izlenen çözüm yaklaşımı, organizasyonu ve katkıları, günümüzün enerji ve ulaşım alanındaki sürdürülebilirlik gereksinimlerini karşılama zorunluluğundan doğmuştur. Küresel sera gazı emisyonlarının azaltılması ve kentleşmenin hızla ilerlediği günümüzde, hızlı, verimli ve çevre dostu ulaşım teknolojileri kritik önem taşımaktadır. Elektrodinamik levitasyon (EDL) temelli Maglev sistemleri, sürtünmesiz çalışma ve saatte 600 km'ye varan hız potansiyeliyle bu ihtiyacı karşılayabilecek bir alternatif sunmaktadır.

Bu çerçevede, tezin temel amacı, farklı manyetik alan kaynakları ve alüminyum ray kombinasyonu ile geliştirilen yeni nesil EDL Maglev sistemlerinin elektromanyetik kuvvet parametrelerini nümerik ve deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda, önce farklı kalıcı mıknatıs dizilimlerinin ve boşluklu ray topolojilerinin kaldırma/sürüklenme kuvveti oranı (LDR, Lift to drag ratio) üzerindeki etkisi sayısal simülasyonlarla irdelenmiş; ardından, modüler yapıya sahip Delta AS300 Programlanabilir Lojik Kontrolör (PLC, Programmable Logic Controller) ve kullanıcı dostu Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition) arayüzü ile kontrol-veri toplama altyapısını içeren özgün bir dinamik ölçüm prototipi tasarlanıp imal edilmiştir. Prototip üzerinde güç aralığı 10–120 A, çalışma yükseklikleri 10–15 mm ve farklı kalıcı mıknatıs dizi (PMA, Permanent Magnet Array) topolojileri kullanılarak kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çözüm yolu olarak; ilk aşamada sonlu elemanlar yöntemine dayanan COMSOL Multiphysics tabanlı nümerik simülasyonlar ile boşluklu ray geometrileri optimize edilmiş, belirlenen ray geometrisine uygun olarak manyetik alan kaynakları ile alüminyum ray arasında manyetik kuvvet performansları değerlendirilmiştir. İkinci aşamada dinamik EDL test sistemi donanımı ve kontrol yazılımı geliştirilmiş; üçüncü aşamada yüksek sıcaklık süperiletkenlerin (HTS, High Temperature Superconductor) blokların manyetik akı tuzaklama özellikleri, bakır şerit ve HTS bobinlerin akı yoğunluğu profilleri deneysel olarak ölçülmüştür. Bu tez kapsamında Şekil 1'de sembolik olarak gösterilen araştırmalar gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Tez kapsamında irdelenen çıktıların sembolik gösterimi

Tezin organizasyonu ise beş ana bölümde yapılandırılmıştır: Birinci bölümde, çalışmanın motivasyonu, amacı, kapsamı ve katkısı ortaya konulmuş; Maglev ulaşım sistemlerinin genel yapısı, çalışma prensipleri ve sınıflandırılması detaylandırılmıştır. Elektromanyetik ve elektrodinamik kaldırma türleri ayrı başlıklar altında incelenmiş, ayrıca HTS malzemelerin ve alüminyum rayların bu sistemlerdeki rolü açıklanmıştır. Bölümün sonunda güncel literatür özeti verilerek tez çalışmasının bilimsel bağlamı oluşturulmuştur.

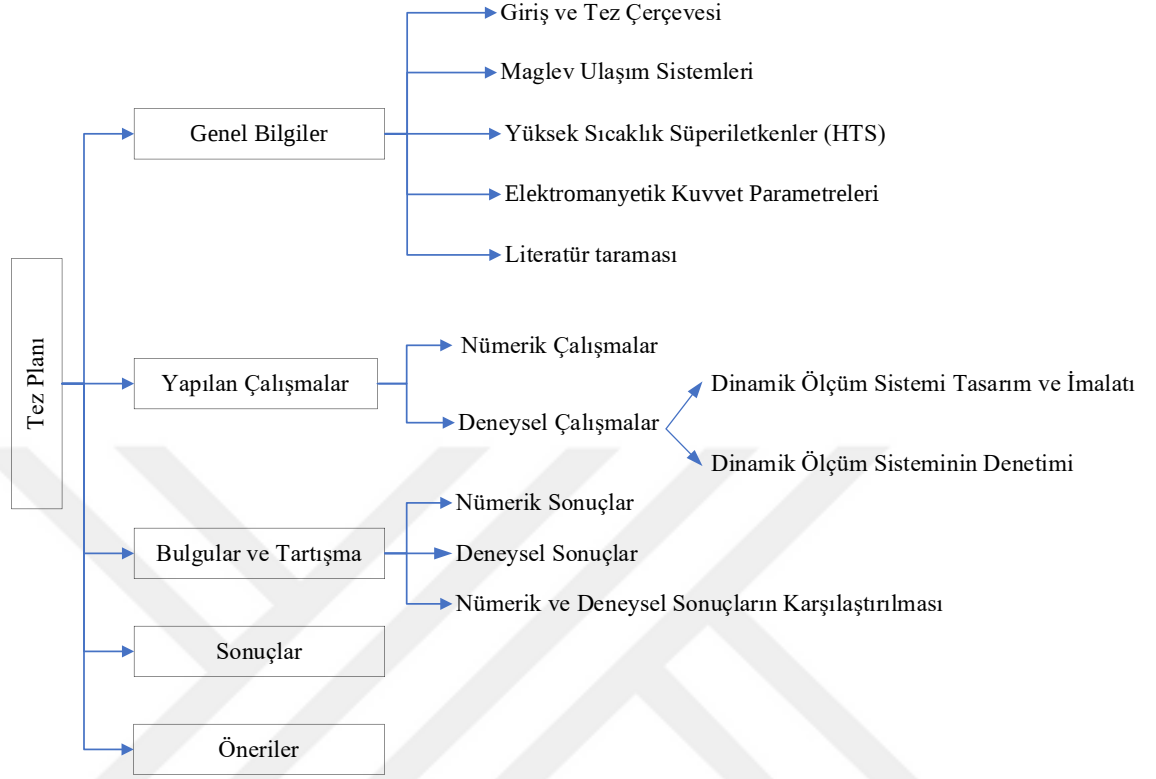
İkinci bölüm, çalışmada yürütülen teorik, nümerik ve deneysel faaliyetleri içermektedir. Bu kapsamda, öncelikle girdap akımlarının oluşumu ve elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanmasına yönelik temel yaklaşımlar ele alınmış; ardından farklı kalıcı mıknatıs (PM, Permanent Magnet) ve HTS–alüminyum ray konfigürasyonları için gerçekleştirilen nümerik simülasyon çalışmaları sunulmuştur. Deneysel kısımda ise özgün olarak geliştirilen yüksek hızlı EDL Maglev test sistemi, bu sistemin mekanik ve yazılımsal altyapısı, kontrol mekanizmaları ve veri toplama yapısı ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, nümerik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Farklı ray ve mıknatıs kombinasyonları için elde edilen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ile sistem kararlılığına dair değerlendirmeler, literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Dördüncü bölüm, çalışmadan elde edilen temel sonuçları özetlemektedir. Burada özellikle HTS–alüminyum ray sistemlerinin EDL performansı açısından avantajları, sınırlamaları ve gelecekteki uygulamalara dair çıkarımlar vurgulanmıştır.

Beşinci bölümde, çalışmadan elde edilen deneyimlere dayalı olarak gelecek araştırmalara yönelik öneriler sunulmuştur. Bu öneriler hem deneysel sistemlerin geliştirilmesine hem de modelleme yaklaşımlarının iyileştirilmesine yöneliktir.

Şekil 2’de tez planlaması açıkça gösterilmektedir.



Şekil 2. Tezin planlaması

Bu çalışmada, alüminyum raylı EDL Maglev sistemleri için özgün bir dinamik deney seti sunulmaktadır. Akademik alanda, boşluklu ray topolojileri ve HTS akı tuzaklama performansı hakkında sayısal sonuçlar sunulurken; mühendislik boyutunda, modüler SCADA/PLC kontrollü prototip mimarisi, benzer test altyapıları için referans teşkil etmektedir. Ayrıca, optimize edilmiş PM/HTS-alüminyum ray topolojileri, Maglev sistemlerinin enerji verimliliğine katkı sunabilecek ve üretim maliyetleri açısından potansiyel avantajlar sağlayabilecek çeşitli ticari entegrasyon olanakları barındırmaktadır.

1.3. Maglev Ulaşım Sistemlerinin Genel Tanıtımı

Maglev sistemleri, trenlerin manyetik kuvvetler yardımıyla raylar üzerinde sürtünmesiz olarak hareket ettiği bir ulaşım teknolojisidir. Bu teknolojinin gelişimi, 20. yüzyılın başlarına dayanır. İlk Maglev aracı patentini, 1902'de Alman Alfred Zehden almış ve tamamen manyetik itiş gücüne dayalı bir lineer motor ile mekanik bir süspansiyon

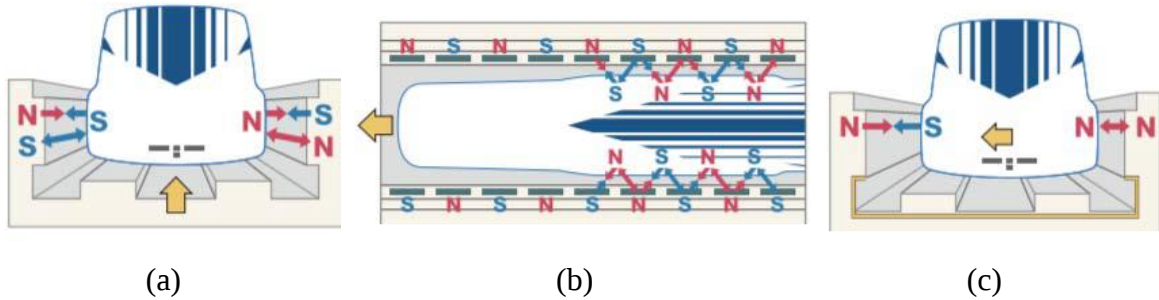
sistemini kullanmıştır (Zehden 1905). İkinci Maglev patentini ise 1910'da Fransız Emile Bachelet almış olup, manyetik kaldırma ile yatay ve dikey yönde yönlendirilmiş bir silindirik gövdeyi, yüksek hızlarda hareket ettirmek amacıyla tasarlanmıştır (Bachelet 1912). 1922'de Alman mühendis Hermann Kemper elektromanyetik levitasyon ilkesini önermiş ve Ağustos 1934'te Maglev teknolojisi için ilk patenti almıştır. Bu patent, Maglev tasarımı için ayrıntılı bir mühendislik uygulamasıydı (Gou 2018). Bu erken buluşlar, Maglev trenleri için temel teknolojiyi sağlamış, ancak II. Dünya Savaşı nedeniyle 1960'lara kadar kullanılmamıştır. 1970'lerde Japonya, Almanya ve ABD bu teknolojiyi araştırmaya başladı. Japonya'nın JR-Maglev ve Almanya'nın Transrapid projeleri, Maglev teknolojisinin gelişiminde önemli dönüm noktaları olarak kabul edilmektedir. Japonya'nın JR-Maglev projesi, 1960'ların sonunda başladığı araştırmaların bir sonucu olarak, 1990'larda Yamanashi Test Pisti'nde hız ve güvenilirlik testlerine geçiş yapmış ve 2003 yılında 581 km/sa hıza ulaşarak dünya rekoru kırmıştır (Kusada vd. 2007). Almanya'nın Transrapid projesi ise 1969'da başlatılmış olup, 1984 yılında Emsland test pistinde ilk denemelere geçilmiştir. Bu proje kapsamında Transrapid-07 modeli, 1993 yılında 450 km/sa hızına ulaşarak dikkate değer başarılar elde etmiştir (Lee vd. 2006). JR-Maglev ve Transrapid projeleri, sadece yüksek hız testleri ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda güvenlik, enerji verimliliği ve operasyonel stabilite gibi parametreler üzerinde de detaylı çalışmalar yürütmüş, Maglev teknolojisinin sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olabileceğini kanıtlamıştır. İlk ticari Maglev hattı 1984 yılında İngiltere'de Birmingham'da kısa mesafeli olarak hizmete girerken, modern anlamda yüksek hızlı ilk Maglev hattı ise 2004 yılında Çin'in Şanghay kentinde devreye alınarak bu alanda önemli bir kilometre taşı olmuştur (Liu vd. 2015). Almanya'nın geliştirdiği Transrapid-08 teknolojisi kullanılarak inşa edilen Şanghay Maglev Hattı, şehir merkezini Pudong Uluslararası Havalimanı'na bağlayarak 35 kilometrelik mesafeyi yalnızca 7-8 dakikada katetmektedir. Bu hatta ulaşılabilen 431 km/sa azami hız, sistemin ticari alandaki başarı potansiyelini göstermiştir (Zhao & Zhai 2002).

Günümüzde Maglev teknolojisi, özellikle Asya ve Avrupa'da yüksek hızlı ulaşımında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmeye devam etmektedir ve bu kapsamda, farklı ülkelerde çeşitli ticari ve kentsel projelerle faaliyete geçmiştir. İlk örneklerden biri olan Birmingham Maglev hattı (Pollard 1984), 2003 yılına kadar hizmet vermiştir. 2005'te Japonya, Linimo Maglev trenini Aichi Eyaleti'nde kentsel ulaşımında düşük hızda hizmete sokarak, Maglev'in kentsel ortamlardaki potansiyelini göstermiştir (Thorstrand 2020). Güney Kore'nin Incheon Havaalanı Maglev hattı (Park vd. 2009) ve Çin'in Changsha

Maglev Express hattı (Liang vd. 2020), orta hızlı Maglev teknolojisini kentsel ulaşımaya uyarlayarak, sessiz ve çevre dostu özellikleriyle şehir içi hareketliliği artırmaktadır. 2017 yılında devreye giren Pekin S1 hattı da Maglev teknolojisinin kentsel altyapıyla entegrasyonunu sağlamıştır (Lin & Sheng 2018). Dünyanın en hızlı ticari hattı olan Şanghay Maglev Hattı, şehir merkezini havalimanına saatte 431 km hıza ulaşarak bağlarken; 2024'te açılan Guangdong Qingyuan Maglev hattı, turist taşımacılığına yönelik geliştirilmiştir (Huang vd. 2024). Bu projeler, Maglev'in seyahat süresini kısaltma, konforu artırma ve çevresel etkiyi azaltma gibi avantajlarını gözler önüne sermektedir. Ayrıca, yüksek enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve hız avantajları ile bu teknoloji, ileriye dönük olarak umut vadeden bir alan olarak araştırılmaktadır.

1.4. Maglev Sistemlerin Çalışma Prensipleri ve Sınıflandırılması

Maglev sistemleri, elektromanyetik prensiplere dayalı olarak araçların sürtünmesiz ve yüksek hızda hareket etmesini sağlayan ileri teknoloji ulaşım sistemleridir. Bu sistemlerin işleyişi, üç temel kuvvetin türetilmesine bağlıdır: Levitasyon (kaldırma), itme ve kılavuz kuvvetleri. Şekil 3'te gösterilen bu kuvvetler aracın yüzeyden yükselmesini, hızlanmasını ve belirlenen ray hattında güvenli bir şekilde yönlendirilmesini sağlamaktadır (The Superconducting Maglev 2021).



Şekil 3. Maglev sistemlerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi: (a) levitasyon sistemi, (b) itme (tahrik) sistemi ve (c) kılavuzlama sistemi

Şekil 3(a)'da gösterilen levitasyon kuvveti, aracın mekanik temas olmaksızın yerden kaldırılması ve sabit bir yükseklikte tutulması prensibine dayanır. Bu süreçte, manyetik alan oluşturan elektromıknatıslar aracılığıyla, aracın kılavuz yola göre belirli bir yükseklikte asılı kalması sağlanır. İki mıknatıs arasındaki manyetik çekim ve itme kuvvetleri, aracın dengesini ve süspansiyonunu sağlar. Manyetik levitasyon trenlerinde, elektromanyetik

çekme veya elektrodinamik itme sistemleri kullanılarak aracın yerçekimi kuvvetine karşı bir kaldırma kuvveti oluşturulmakta ve böylece levitasyon sağlanmaktadır. Elektromıknatısların hassas kontrolü ile araç, kılavuz yolun üzerinde yaklaşık 1 cm gibi dar bir boşlukla asılı kalır.

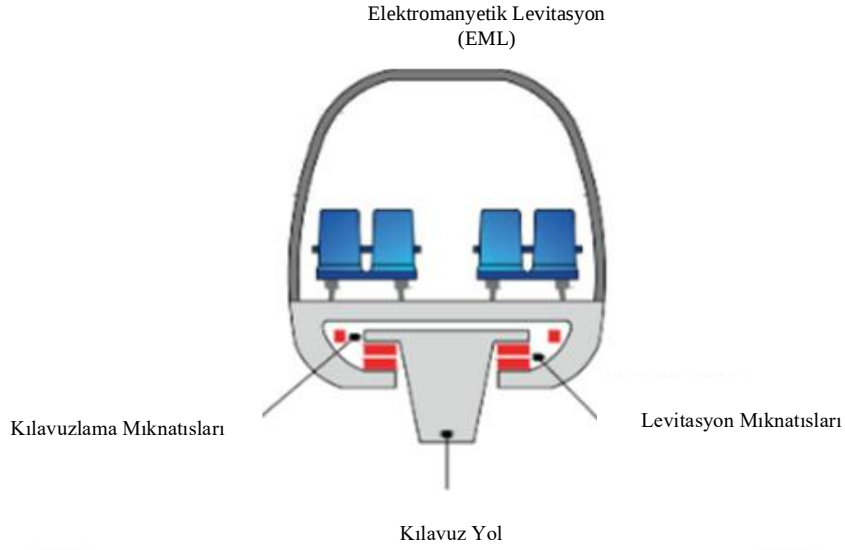
Şekil 3(b)'de Maglev sistemlerinin itme sistemi verilmektedir. Burada, ileriye dönük hareket, itme kuvveti aracılığıyla sağlanır ve elektrik motorlarının çalışma prensibine benzer. Burada kılavuz yol üzerindeki motor sargıları stator işlevi görürken, araç üzerindeki elektromıknatıslar rotor görevini üstlenir. Motor sargılarına verilen alternatif akım, treni hareket ettiren ve hızlandıran bir manyetik alan oluşturur. Manyetik kutuplar, aracın maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde hassas kontrol sistemleriyle yönetilir. Aracın durdurulması veya frenlenmesi ise ters yönde manyetik kuvvet uygulanarak sağlanır.

Şekil 3(c)'de gösterildiği gibi Maglev sistemlerinde, aracın yanal stabilitesi ve ray üzerinde doğrusal hareketi, yanal kılavuz kuvvet ile sağlanır. Yanal kılavuzluk, aracın kılavuz yol boyunca doğru konumda kalmasını ve sapmasını önler. Elektromanyetik sistemlerde bu işlem, kılavuz yolun yan taraflarına yerleştirilen bobinler tarafından sağlanır. Alternatif akım verilen bu bobinler, araç üzerinde bulunan manyetik alan kaynakları ile etkileşerek aracın yanal olarak sabit kalmasını sağlayan çekme ve itme kuvvetleri oluşturur. Böylece araç, sapma olmaksızın belirlenen ray hattında ilerler.

Bu kuvvetlerin her biri, aracın temas olmaksızın yüzey üzerinde güvenli ve yüksek hızda ilerlemesine imkân tanır. Geleneksel çelik ray teknolojisine göre Maglev sistemlerinin sunduğu düşük sürtünme avantajı, daha yüksek hız, enerji verimliliği ve sessiz çalışma imkânı sağlar. Maglev sistemleri iki manyetik alan arasındaki çekici manyetik kuvvete dayanan elektromanyetik levitasyon (EML) itici manyetik kuvvete dayanan elektrodinamik levitasyon (EDL) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.4.1. Elektromanyetik Levitasyon (EML)

EML sistemleri, trenin kılavuz yol üzerinde manyetik çekim kuvveti yardımıyla havada askıda tutulmasını sağlayan bir levitasyon teknolojisidir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, İki zıt kutuplu elektromıknatıs arasında oluşan çekim kuvveti, ferromanyetik ray üzerinde trenin temas etmeden askıda kalmasını ve hareket etmesini sağlar.



Şekil 4. EML çalışma prensibi (Guerrieri 2023).

EML, özellikle düşük hızlardan itibaren levitasyon sağlama kapasitesine sahiptir; bu özelliği, elektrodinamik levitasyon sistemlerinden ayıran önemli bir avantajdır. Ancak EML'nin manyetik kuvvetin doğası gereği kararsız yapısı nedeniyle, ray ile elektromıknatıslar arasındaki hava boşluğunu denetlemek için hassas kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Genellikle bu boşluk yaklaşık 10 milimetre civarındadır ve hız arttıkça bu boşluğun kararlılığını sağlamak daha zor hale gelir. Levitasyon kuvveti ise Denklem 1'de verilen ifadeden türetilir.

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{2g^2} \quad (1)$$

Burada μ_0 manyetik geçirgenlik, N sarım sayısı, A manyetik devre kesit alanı I , bobinden geçen doğru akımın büyüklüğü ve g hava boşluğudur. Bu ters-kare bağımlılık, boşluğun küçülmesiyle kuvvetin hızla artacağını gösterir. Boşluk toleransı ve manyetik devrenin lineer olmayan karakteri, EML'yi kontrol açısından kararsız kılar ve yüksek hassasiyetli algılama ile hızlı kontrol eylemleri gerektirir. Bu yüzden, EML sistemlerinde, levitasyon ve yanal kılavuzluk işlevlerinin kontrolü farklı şekillerde yapılandırılabilir. Örneğin, Alman Transrapid sistemi, levitasyon ve yanal kılavuzluk fonksiyonlarını ayrı ayrı kontrol ederken (Meins vd. 1988), Kore UTM ve Japonya HSST sistemleri (Suzuki vd. 1984), bu fonksiyonları entegre bir yapı içinde birleştirmiştir. Transrapid'in ayrık yapıdaki

kontrol sistemi, yüksek hızlarda daha fazla stabilite sağlar, ancak daha karmaşık bir kontrol mekanizmasını gerektirir. Buna karşılık, entegre yapı düşük hızlar ve düşük maliyetli uygulamalar için daha uygundur; çünkü bu tür bir sistem, hava boşluğunu ve yanal stabiliteyi aynı anda kontrol eden bir yapıya sahiptir ve güç tüketimini de azaltır.

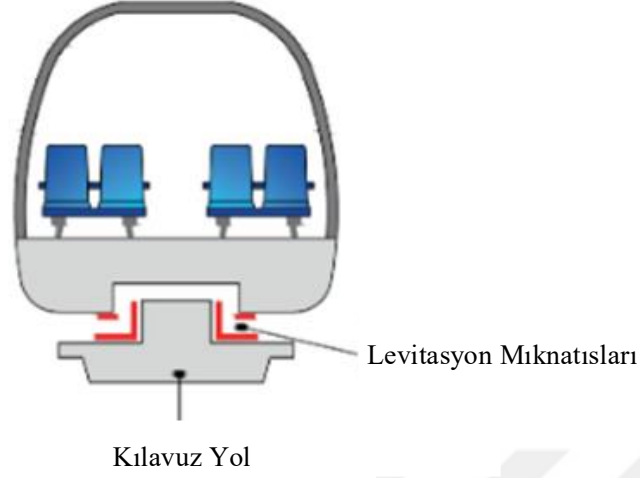
EML'nin performansını artırmak için süperiletken materyallerin kullanımının etkin bir çözüm sunduğu yapılan araştırmalarla kanıtlanmıştır (Li vd. 2024). Süperiletkenler, geleneksel elektromıknatıslara kıyasla daha güçlü manyetik alanlar oluşturabilir ancak soğutma sistemine ihtiyaç duyduğundan maliyeti artırır. Bununla birlikte, MagneMotion'ın M3 Maglev sistemi gibi uygulamalarda (Thornton vd. 2004), elektromıknatıslarla birlikte kalıcı mıknatısların kullanımı, levitasyon kuvvetinin yanı sıra kılavuz kuvveti sağlamak için de yararlıdır. Bu sistemde kalıcı mıknatıslar, elektromıknatısların oluşturduğu manyetik hava boşluğunu dengelemek için kullanılır ve 20 milimetrelilik bir hava boşluğu yaratır.

Sonuç olarak, EML sistemlerinde trenin havada stabil bir şekilde askıda kalması, mıknatıslar ile ray arasındaki manyetik çekim kuvvetinin hassas kontrolüne dayalıdır. Sistemin düşük hızlarda stabilite sağlama yeteneği, kontrollü bir manyetik hava boşluğu sayesinde mümkün olur. Ancak yüksek hızlarda bu denetim daha zorlaşmakta ve sistem karmaşıklığı artmaktadır. Geleneksel elektromıknatısların kullanımı EML sistemlerini daha ekonomik hale getirmekte, fakat yüksek hızlı operasyonlarda süperiletken teknolojisinin kullanımı sistem verimliliğini artırmak için önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

1.4.2. Elektrodinamik Levitasyon (EDL)

EDL sistemleri, Maglev tren teknolojisinde kullanılan bir yöntem olup, temel olarak aracın ve kılavuz yolun manyetik alan etkileşimi ile askıya alınmasını sağlar. Bu yöntemde araç üzerinde yer alan süperiletken mıknatıslar ve iletken kılavuz yol arasında manyetik bir itme kuvveti üretilir, bu kuvvet aracın havaya kalkmasını sağlar. Şekil 5'te EDL sisteminin genel çalışma prensibi verilmektedir.

Elektrodinamik Levitasyon (EDL)



Şekil 5. EDL çalışma prensibi (Guerrieri 2023)

EDL'nin avantajlarından biri, sistemin doğal olarak kararlı olmasıdır; bu nedenle EML sisteminde olduğu gibi hassas hava boşluğu kontrolü gerekmemektedir. EDL'de yaklaşık 10 cm'lik bir hava boşluğu korunur ve bu, yüksek hızlarda hareket eden bir sistemin stabilitesini artırır. Ancak bu itme kuvvetini elde edebilmek için trenin minimum bir hızda (100 km/sa) hareket etmesi gereklidir; düşük hızlarda yeterli manyetik kuvvet sağlanamadığından tren tekerleklerle desteklenir. Tren belirli bir hız eşiğini (yaklaşık 100 km/sa) aştıktan sonra araç altındaki mıknatıs düzeni ile alttaki iletken alüminyum ray arasında indüklenen girdap (eddy) akımlarının etkileşimiyle levitasyonu ve itmeyi aynı anda sağlar. Araç altındaki kalıcı mıknatıs veya süperiletken mıknatıs dizilimi; iletken alüminyum ray ve ray içinde dolaşan girdap akımları bir araya gelerek hem dikey (levitasyon) hem de eksenel (itme) kuvvetlerini oluşturur. Üretilen kuvvetler, manyetik alan vektörü $\mathbf{B}_m$ ile indüklenen akım yoğunluğu vektörü $\mathbf{J}_{eddy}$ arasındaki vektörel çarpımın integrali Denklem 2'de gösterildiği gibi tanımlanır.

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{J}_{eddy} \times \mathbf{B}_m) dV \quad (2)$$

Bu ifade, EDL sistemlerinde levitasyon kuvvetinin fiziksel kökenini açıklayan temel vektörel ifadedir. Bu denklem, Lorentz kuvveti integrali olarak bilinir ve bir hacim içindeki toplam elektromanyetik kuvveti hesaplamak için kullanılır.

EDL sistemleri, pasif kararlılık ilkesi ve geniş hava boşluğu toleransıya, manyetik levitasyon teknolojileri arasında kendine özgü bir konfigürasyona sahiptir. Bu sistemlerin en ayırt edici özelliklerinden biri, kılavuz ray ile araç altındaki mıknatıs dizilimi arasındaki mesafenin 50–150 mm gibi büyük değerlere çıkarılabilesidir. Böylece, kontrol elektroniğine duyulan gereksinim asgari düzeye iner; sistem, indüklenen girdap akımlarının yarattığı manyetik geri besleme sayesinde doğal olarak dengede kalır. Hava boşluğu ölçümü ve düzenlemesi için karmaşık sensör-aktüatör döngülerine ihtiyaç duyulmadığından hem sistem maliyeti hem de bakım karmaşıklığı azalır.

Tüm bu avantajlara rağmen EDL sistemlerinin bazı operasyonel sınırlamaları da bulunmaktadır. Bunlardan biri, levitasyon kuvvetinin etkin biçimde oluşabilmesi için gerekli olan asgari hız eşiğidir. Yukarıda da bahsedildiği gibi, araç, ray üzerinde indüklenen girdap akımlarının yeterli manyetik kuvveti oluşturacağı yaklaşık 100 km/sa hıza erişmeden önce, ek mekanik destek (lastik tekerlekler veya ikincil süspansiyon birimleri) olmaksızın dengede kalamaz. Bu özellik, sistemin düşük hızlardaki kullanımını kısıtlar ve başlatma, durma veya yoğun trafik koşullarında hibrit taşıma çözümlerini zorunlu kılar.

Manyetik sürükleme ve enerji kayıpları, EDL'nin performansını belirleyen bir diğer kritik unsurdur. Rayda indüklenen girdap akımlarına bağlı olarak ortaya çıkan manyetik sürükleme (drag) kuvveti, hız arttıkça önce yükselir, maksimumunu takip eder ve ardından azalır. Buna karşılık aerodinamik sürükleme kuvveti, hızın karesiyle doğru orantılı biçimde sürekli artar. Dolayısıyla tahrik sistemi hem manyetik hem de aerodinamik sürükleme bileşenlerinin toplamına karşı koyabilecek güçte tasarlanmalıdır; aksi halde yüksek hızlı seyirler sırasında enerji verimliliği önemli ölçüde düşer.

Mıknatıs seçimi de EDL tasarımında başlıca karar değişkenlerinden biridir. Kalıcı mıknatıslar, ek enerji kaynağı gerektirmeyen pasif bir yapı sunar; ancak manyetik güç yoğunluğu sınırlamaları nedeniyle genellikle küçük çaplı uygulamalarla sınırlı kalır. Buna karşın, Halbach dizilimi gibi özel konfigürasyonlar manyetik verimi artırmak için kullanılmaktadır. Süperiletken mıknatıslar ise yüksek manyetik akı tuzaklama veya yüksek akım taşıma kapasiteleri sayesinde son derece yüksek manyetik alan şiddetleri yaratma kapasitesine sahiptir, fakat sıvı helyumla soğutma, buharlaştırma ve altyapı maliyetleri operasyon süresince stratejik zorluklar doğurur.

Sonuç olarak, EDL sistemleri geniş hava boşluğu ve pasif kararlılık avantajlarıyla yüksek hızlı, uzun hatlı uygulamalar için elverişlidir. Ancak asgari hız eşiği, manyetik ve aerodinamik sürüklenme etkileri ile mıknatıs tipine bağlı maliyet ve karmaşıklıklar, operasyonel kısıtlar olarak gündeme gelir. Bu denge, sistem tasarımında altyapı, enerji yönetimi ve işletme stratejilerine ilişkin titiz optimizasyon gerektirir.

1.5. Maglev Sistemlerde Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler (HTS)

Maglev sistemleri, geleneksel raylı sistemlere kıyasla daha düşük bakım maliyetleri ile sürtünmesiz, yüksek hızlı ulaşım sağlama yetenekleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri yeni nesil Maglev sistemlerinin geliştirilmesinde çok önemli bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Eşsiz elektromanyetik özellikleri, özellikle de kritik bir sıcaklığın altında direnç göstermeden akım taşıma yetenekleri, onları elektromanyetik sistemlerde kullanılan geleneksel malzemelere üstün bir alternatif olarak konumlandırmaktadır. İtiryum Baryum Bakır Oksit (YBCO) ve Bizmut Stronsiyum Kalsiyum Bakır Oksit (BSCCO) gibi HTS malzemeleri, sıvı azotun kaynama noktasının (~ 77 K) üzerindeki kritik sıcaklıkları ile karakterize edilir. Bu, onları sıvı helyumla ($\sim 4,2$ K) soğutma gerektiren düşük sıcaklık süperiletkenlerine (LTS) kıyasla daha pratik ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirir. HTS'nin başlıca özellikleri şunları içerir:

- Sıfır Elektrik Direnci (T_c): HTS malzemeleri sıfır direnç göstererek kayıpsız akım iletimine olanak sağlar.
- Yüksek Kritik Manyetik Alan (H_c): HTS, yüksek güç uygulamaları için gerekli olan yüksek manyetik alan koşulları altında çalışabilir.
- Manyetik Akı Çizgilerinin Sabitlemesi: Bu özellik, Maglev sistemlerinde kaldırma kararlılığı için kritik olan manyetik bozulmalara karşı kararlılıklarını artırır.

HTS malzemeleri, havaya kaldırma ve itme için çok önemli olan güçlü ve kararlı manyetik alanlar üretmek için kullanılır. Kalıcı mıknatıslardan gelen manyetik akı veya iletken raylardaki indüklenmiş alanlarla etkileşime giren güçlü manyetik alanlar üreterek, aracı kaldıran ve ray ile fiziksel teması ortadan kaldıran itici bir kuvvet oluşturarak havalanmayı kolaylaştırır. Ek olarak, HTS malzemeleri manyetik akı çizgilerini sabitleyerek, yanal stabiliteyi sağlayarak ve aracın istenmeyen yer değiştirmesini önleyerek kılavuzlamaya katkıda bulunur. EDL sistemlerinde, HTS malzemeleri ayrıca ileri hareket için gerekli itme kuvvetini üretmek üzere ray bobinleriyle etkileşime girerek tahrik

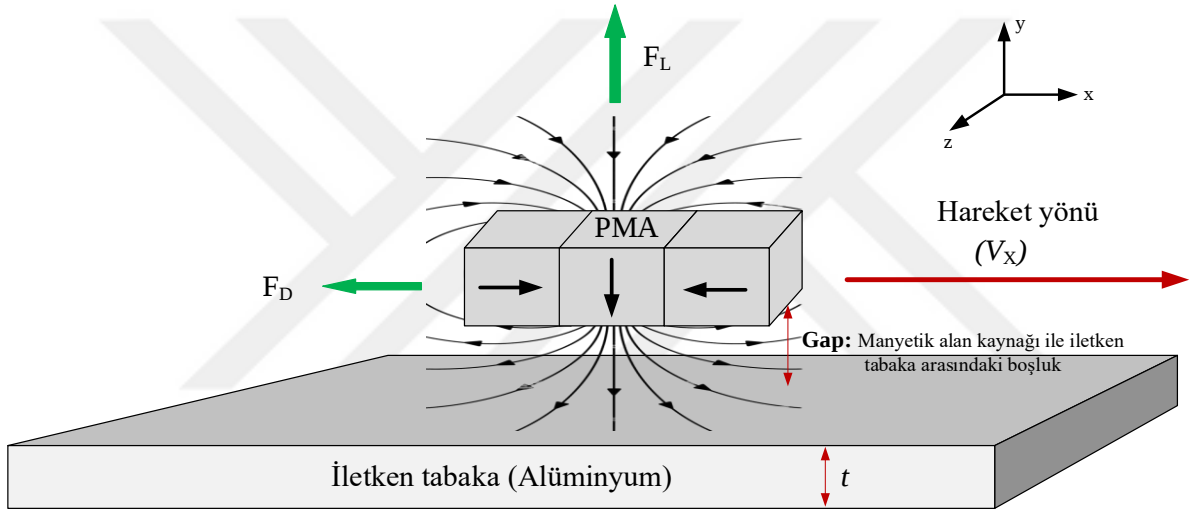
verimliliğini artırır. Maglev sistemlerinde HTS'nin avantajları arasında enerji kayıplarının en aza indirilmesi sayesinde verimliliğin artırılması ve yüksek kritik akım yoğunluğu (J_c) sayesinde daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip olması sayılabilir. Bu da daha fazla manyetik alan üretmeye yarayarak trenin taşıma kapasitesini artırır. Bununla birlikte, HTS'nin daha geniş ölçekte uygulanmasında, üretim ve işlemenin yüksek malzeme maliyetleri, HTS şeritlerin ve tellerinin mekanik kırılganlığı, dinamik sistemlerde istikrarlı bir kriyojenik ortamı sürdürmenin karmaşıklığı ve alternatif akım koşulları altında verimliliği azaltan alternatif akım (AA) kayıpları gibi zorluklar devam etmektedir. HTS üretimindeki son gelişmeler, özellikle ikinci nesil (2G) HTS şerit ile, akım yoğunluğu, mekanik sağlamlık ve ölçeklenebilirlik gibi performans ölçütlerini önemli ölçüde geliştirerek Maglev sistemlerinde ticari uygulanabilirlik için yollar açmıştır. Güncel araştırmalar, HTS bobin tasarımlarını optimize etmeye, HTS'yi hibrit sistemlerde kalıcı mıknatıslar ve diğer malzemelerle entegre etmeye, daha verimli ve kompakt kriyojenik sistemler geliştirmeye ve performansı ve ekonomik fizibiliteyi doğrulamak için büyük ölçekli testler yapmaya odaklanmaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, Maglev sistemlerinde devrim yaratma konusunda büyük bir potansiyele sahiptir ve kaldırma, yönlendirme ve tahrik konularında eşsiz faydalar sunmaktadır. Zorluklar devam etse de HTS teknolojisi ve kriyojenik sistemlerde devam eden ilerlemeler bu engelleri istikrarlı bir şekilde ele almaktadır. HTS teknolojisinin Maglev taşımacılığına entegrasyonu, yalnızca mevcut sistemlerin performans sınırlarını aşmakla kalmayıp, aynı zamanda geleceğin ultra yüksek hızlı, enerji açısından son derece verimli ve tamamen sürdürülebilir ulaşım altyapılarının temelini oluşturma potansiyeline sahiptir.

1.6. Alüminyum Ray Tabanlı EDL Maglev Sistemleri ve Elektromanyetik Kuvvet Parametreleri

Alüminyum ray tabanlı EDL sistemlerinde levitasyon yani kaldırma olgusu, hareketli bir manyetik alan kaynağının (kalıcı mıknatıs, HTS veya bobin vb.) sabit bir iletken yüzey üzerinde hareket etmesiyle oluşan elektromanyetik etkileşimlere dayanmaktadır. Bu sistemin temel fiziksel ilkesi, manyetik alanın zamana bağlı değişimiyle iletken malzeme içerisinde indüklenen girdap akımlarının (eddy currents) oluşmasıdır. Bu akımlar, manyetik alanın kaynağı ile etkileşime girerek itici karakterde bir elektromanyetik kuvvet üretir. Oluşan bu kuvvetin dikey bileşeni, taşıyıcı sistemin fiziksel olarak raydan yukarıya doğru

kaldırılmasını sağlayan kaldırma kuvvetini (levitasyon kuvveti) meydana getirirken; yatay bileşeni ise hareket yönünün tersine etki eden sürüklenme kuvveti (drag force) olarak ortaya çıkar.

Elektrodinamik sistemlerin bu temel işleyişi ve kuvvetlerin yönsel dağılımı, kavramsal olarak Şekil 6’da sunulmaktadır. Bu şekilde, hareketli bir mıknatıs dizisinin sabit alüminyum ray üzerinde oluşturduğu manyetik alanla etkileşime giren girdap akımları sonucu ortaya çıkan kaldırma (yukarı) ve sürüklenme (hareket yönünün tersine) kuvvetleri şematik biçimde gösterilmektedir. Bu yapı, EDL sistemlerinin fiziksel mekanizmasını anlamak açısından temel bir model sunmaktadır.



Şekil 6. EDL sistemlerin fiziksel modelinin şematik gösterimi

Bu sistemde, kalıcı mıknatıs dizisi iletken bir plaka üzerinde belirli bir hızla hareket ettiğinde, bu hareket sonucunda PMA'nın oluşturduğu değişken manyetik alan, iletken plakada girdap akımları indükler. Bu akımlar, kendi manyetik alanlarını oluşturarak, kaynak manyetik alanla karşılıklı bir etkileşime girer. Burada oluşan kaldırma kuvveti, tam olarak bu iki manyetik alanın etkileşiminden kaynaklanan itici bir kuvvettir. Bu durum, Faraday'ın Elektromanyetik İndüksiyon Yasası temel alınarak açıklanabilir (Han & Kim 2016):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Burada, $\mathbf{E}$, iletken tabaka içerisinde indüklenen elektrik alanı, $\mathbf{B}$, manyetik akı yoğunluğunu, $\partial/\partial t$ ise zamanla değişimi ifade etmektedir. EDL sistemi içerisinde, manyetik alan kaynağı (burada PMA), sabit bir iletken yüzey üzerinde (burada Alüminyum) $\mathbf{v}$ hızı ile hareket ettiğinde, hareketli manyetik alanın etkisiyle $\mathbf{E}$ ile $\mathbf{B}$ arasında Denklem 4'teki gibi bir ifade elde edilebilir.

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

Bu elektrik alan, iletken malzemenin elektriksel iletkenliği (σ) ile birleştiğinde, Ohm yasasına göre girdap akımı yoğunluğu oluşturur ($\mathbf{J}$) ve bu değer Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

Denklem (4) ifadesi Denklem (5) içerisine yerleştirildiğinde, indüklenen akım yoğunluğu şu şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

Şekil 3'te verilen sistemde, PMA dizisinin yalnızca x-ekseninde doğrusal hareket ettiği varsayılırsa, vektörel çarpımın sonucu olarak akım yoğunluğu bileşenleri aşağıdaki gibi olur:

$$J_x = 0, J_y = -\sigma v B_z, J_z = \sigma v B_y \quad (7)$$

Bu durumda; x- hareket yönünde akım oluşmaz ($J_x = 0$), y- yönündeki akım yoğunluğu B_z bileşenine, z-yönündeki akım yoğunluğu ise B_y bileşenine bağlıdır. İndüklenen bu akımlar, sistemdeki manyetik alanla etkileşime girerek Lorentz kuvveti bileşenleri, vektörel çarpımın determinant formunda hesaplanmasıyla Denklem 8 ile ifade edilmektedir.

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & -\sigma v B_z & \sigma v B_y \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (8)$$

Burada verilen determinantın sonucunda elde edilen kuvvet bileşenleri, sırasıyla x, y ve z yönlerinde, Denklem 9-11'de verilmektedir.

$$F_x = F_D = -\sigma v(B_z^2 + B_y^2) \quad (9)$$

Bu denklem, hareket yönünde oluşan sürüklenme kuvvetini (drag force, F_D) temsil eder. Sürüklenme kuvveti, sistemin enerji kaybına neden olan bir karşı kuvvet olarak etki eder ve performansın iyileştirilmesi açısından minimize edilmesi gereken bir parametredir.

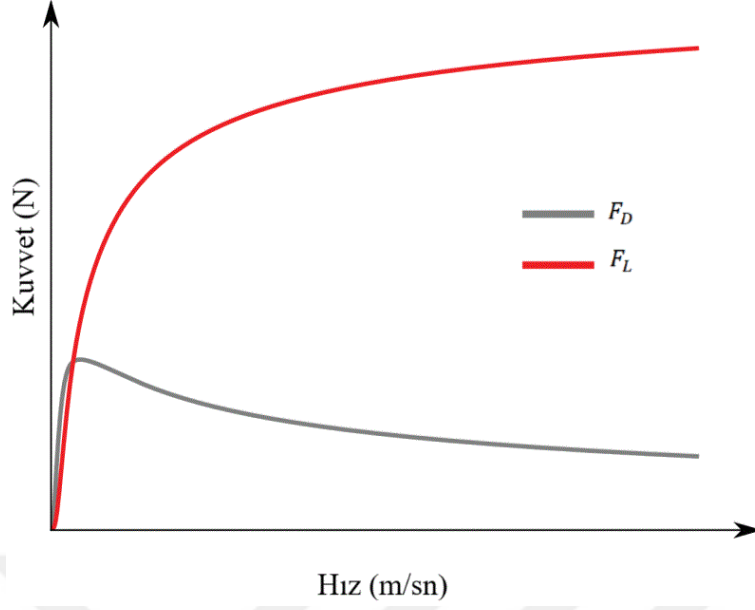
$$F_y = F_L = \sigma v(B_x B_y) \quad (10)$$

Bu bileşen, sistemin taşıyıcısını ray düzleminden yukarı doğru iten kaldırma kuvvetini (levitation force, F_L) tanımlar. Levitasyonun başarılı bir şekilde sağlanabilmesi için bu kuvvetin büyüklüğü sistem kütlesini dengeleyecek düzeyde olmalıdır.

$$F_z = F_G = \sigma v(B_x B_z) \quad (11)$$

Bu bileşen ise sistemin yanal kararlılığıyla ilgili olan yönlendirme kuvvetidir (guidance force, F_G) ve yüksek hızlarda meydana gelebilecek yanal sapmaları sönmölemek ve sistemin ray üzerindeki stabil konumunu korumak açısından önem taşır. Özellikle, kaldırma kuvvetini arttırmak ve sürüklenme kuvvetini aynı anda azaltmak için B_x değerinin maksimum, B_y değerinin minimum olması gerektiği söylenebilir.

Bu kuvvetlerin büyüklüğü ve yönü, doğrudan doğruya manyetik alan kaynağı ile iletken yüzey arasındaki görelî hıza bağılıdır. Hız arttıkça iletkende indüklenen girdap akımlarının şiddeti artmakta, dolayısıyla sistemin kaldırma kapasitesi de artış göstermektedir. Bu nedenle kaldırma kuvveti, sistemin hızına bağılı olarak dinamik bir karaktere sahiptir. Aynı şekilde, sürüklenme kuvveti de önce artmakta, belirli bir hız değerinde maksimuma ulaşmakta ve ardından yüksek hızlarda düşüş eğilimi göstermektedir. Şekil 7'de verilen bu hız-bağımlı davranış, EDL sistemlerinin verimliliği ve enerji performansı açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 7. EDL sistemlerinde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hıza bağlı tipik davranışı (Beauloye & Dehez 2023)

Şekil 7’de görüldüğü üzere, hızın arttığı durumlarda kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin dinamik davranışı farklılaşmaktadır. Kaldırma kuvveti, hızla birlikte monotonik olarak artarken, asimptotik bir maksimum değere ulaşma eğilimindedir. Buna karşılık, sürüklenme kuvveti ilk olarak hızla birlikte artmakta, belirli bir eşik değerde maksimuma ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır. Bu karakteristik davranış, elektromanyetik sistemlerde itici kaldırma mekanizmasını mümkün kılmakta ve yüksek hızlı manyetik kaldırma uygulamaları için arzu edilen bir özellik sunmaktadır.

Alüminyum ray tabanlı EDL sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek amacıyla literatürde iki farklı parametre kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, sistemin belirli bir hızda ne kadar etkili çalıştığını ifade eden Kaldırma/Sürüklenme Oranı (Lift-to-Drag Ratio, LDR) olup, şu şekilde tanımlanır:

$$LDR = \frac{F_L}{F_D} = \frac{\text{Levitasyon kuvveti}}{\text{Sürüklenme kuvveti}} \quad (12)$$

İkinci performans belirleme parametresi ise, belirli bir mıknatıs hacmi ya da kütlesi ile elde edilebilecek kaldırma kapasitesini tanımlayan Kaldırma/Ağırlık Oranı (Lift-to-Weight Ratio, LWR) olup şu denklemle ifade edilir:

$$LWR = \frac{F_L}{W_{PM}} = \frac{\text{Levitasyon kuvveti}}{\text{Mıknatıs ağırlığı}} \quad (13)$$

Burada, W_{PM} kalıcı mıknatıs ağırlığını ifade etmektedir. Ayrıca, bu performans kriterlerinin dışında, literatürde mıknatıs maliyeti başına kaldırma kuvveti, mıknatıs ağırlığına göre manyetik akı yoğunluğunun karesi gibi başka oranlar da tanımlanmıştır. Ancak bu tür ölçütler de esasen LDR ve LWR ile doğrudan ilişkilidir (Flankl vd. 2018; Hu vd. 2021). LWR, mıknatıs hacmine ve dolayısıyla sistem maliyetine bağlıyken, LDR sistemin çalışma verimliliğini ve operasyonel performansını yansıtır. Bu nedenle, hangi kriterin ön plana alınacağı, uygulamanın amacına bağlı olarak değişmektedir. Yük, hız profili veya enerji tüketimi gibi küresel performans ölçütleri açısından her iki parametre de bütünleşmiş biçimde dikkate alınabilir (Kublin vd. 2021).

Bu tez kapsamında, sistem performansının hızla birlikte değişen dinamik koşullar altında değerlendirilebilmesi ve özellikle yüksek hızlı taşımacılık uygulamaları için enerji verimliliğinin öncelikli hedef olması nedeniyle, performans kriteri olarak LDR tercih edilmiştir. LDR, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranını ifade ederek, sistemin manyetik kaldırma verimini doğrudan yansıtır. Bu LDR oranından faydalanılarak sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını minimize etmeye yönelik tasarımsal optimizasyonlar gerçekleştirilebilir. Bu yönüyle LDR, özellikle levitasyonun sürdürülebilirliği ve sistemin genel etkinliği açısından en uygun değerlendirme ölçütü olarak kabul edilmiştir.

1.7. Literatür Özeti

Maglev sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, sistemin fiziksel işleyişine, kullanılan manyetik elemanlara ve kontrol yapısına bağlı olarak farklı kategorilere ayrılabilir. Literatürdeki çeşitliliği daha sistematik şekilde ele alabilmek amacıyla, Maglev araştırmaları genellikle üç ana grupta incelenmektedir: Elektromanyetik Levitasyon sistemleri, Elektrodinamik Levitasyon sistemleri ve süperiletken (pinning) tabanlı sistemler. Her bir sistem tipi, sahip olduğu kaldırma prensibi, kararlılık özellikleri, kontrol gereksinimleri ve mühendislik zorlukları açısından farklılık göstermektedir. Bu gruplama hem teorik modelleme hem de deneysel uygulamalara odaklanan çalışmaları sınıflandırmak için kapsamlı bir temel sunmaktadır. Bu çerçevede:

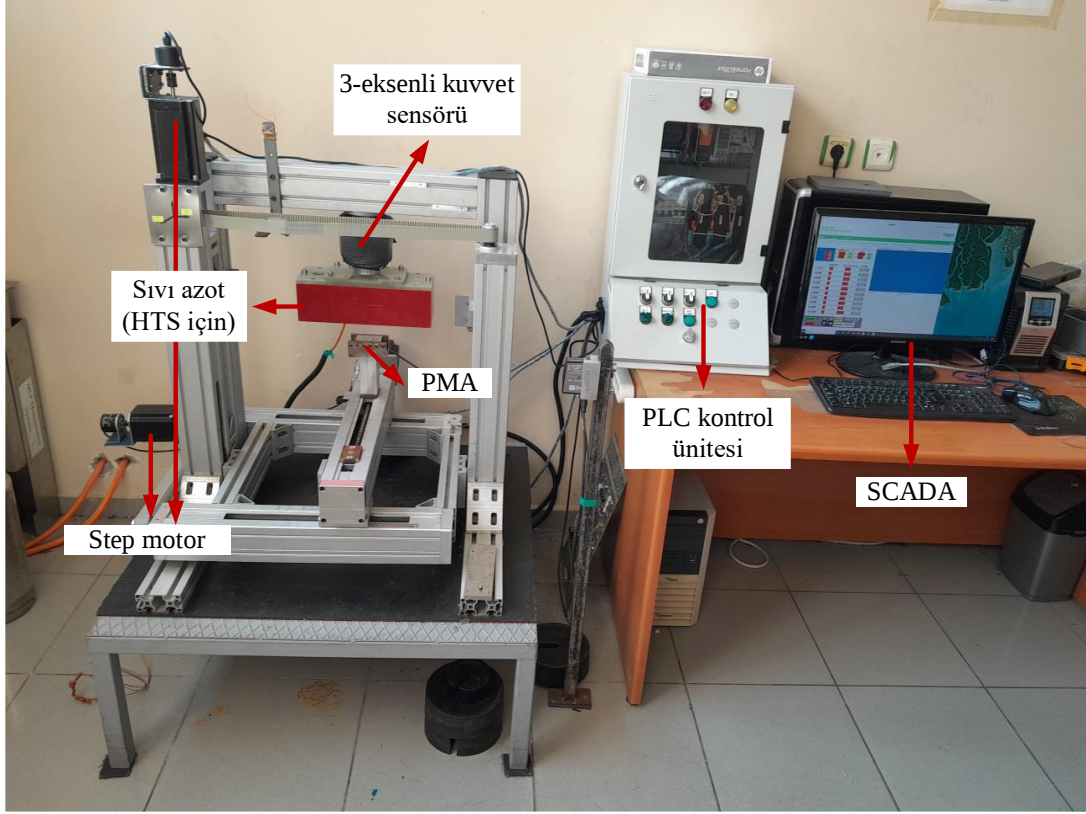
- EML sistemleri, elektromıknatıslarla raydan yukarı çekme prensibine dayalı olup aktif kontrol ve sürekli enerji tüketimi gerektiren yapılarıyla öne çıkmaktadır.
- EDL sistemleri, hareketle birlikte oluşan girdap akımları ve karşılıklı manyetik kuvvetlerle temasız kaldırma sağlayan ve özellikle yüksek hızlı uygulamalarda tercih edilen sistemlerdir.
- Süperiletken temelli sistemler ise akı sabitleme (flux pinning) etkisine dayalı olarak pasif kararlılık sağlayan, düşük enerji tüketimine sahip ancak kriyojenik soğutma gibi özel gereksinimleri olan sistemlerdir.

Literatürde, Maglev sistemleriyle ilgili bugüne dek pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olup, bu alandaki araştırmalar günümüzde de yoğun biçimde devam etmektedir (Peng vd. 2025; Wang vd. 2025a; b). Bu kapsamda, bir kitap çalışmasında manyetik levitasyon teknolojilerine temel ilkelerden en son gelişmelere kadar kapsamlı bir bakış sunulmuş; tarihsel gelişim, temel prensipler, karşılaşılan teknik zorluklar ve özellikle hava boşluğu kontrolü ile sistem stabilitesi gibi kritik konular ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca, Maglev teknolojisinin yalnızca raylı ulaşımında değil, yüksek hızlı asansörlerden uzay fırlatma sistemlerine kadar birçok alandaki potansiyel uygulamaları da ele alınmıştır (Han & Kim 2016; Wu vd. 2021). Ancak, bu tez kapsamında özellikle ulaşım teknolojilerindeki Maglev sistemlere odaklanılmaktadır. Günümüzde artan kentleşme, çevresel sürdürülebilirlik ihtiyacı ve hızlı ulaşım talepleri, geleneksel raylı ulaşım sistemlerinin yerini daha verimli, çevre dostu ve yüksek hızlı alternatiflere bırakmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Dolayısıyla, manyetik kaldırma teknolojisi, ray ile taşıyıcı arasında fiziksel temas gerektirmeksizin hareket sağlayarak, sürtünmeyi, aşınmayı, gürültüyü ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltan yenilikçi bir ulaşım çözümü olarak öne çıkmaktadır. Maglev sistemleri, sağladığı avantajlar sayesinde kentsel raylı sistemlerden yüksek hızlı tren projelerine kadar geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir (Yaghoubi 2013).

EML sistemleri üzerine yapılan literatür çalışmaları, sistemin kaldırma kararlılığı, hava boşluğu kontrolü ve enerji tüketimi gibi parametreler üzerinde yoğunlaşmaktadır (Bohn & Steinmetz 1984; Xu vd. 2023). Bu çalışmalar kapsamında, levitasyon performansının gerçek zamanlı optimizasyonu hedeflenmiş ve asal çarpanlara ayırma temelli bir algoritma geliştirilmiştir. Bunu yaparken, kusurlu bilinen bir modele dayanarak yalnızca giriş-çıkış verileri kullanılmıştır (Xu vd. 2023). EML sistemlerinde levitasyonun kararlılığı ve güvenliği açısından kontrol stratejileri üzerine yapılan çalışmalar da büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, bir çalışmada elektromanyetik levitasyon sistemlerinin kontrol

performansını artırmaya yönelik mevcut kontrol teknikleri kapsamlı biçimde incelenmiş; ayrıca, bu yöntemlerin avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Pandey & Adhyaru 2023). EML sistemlerinde kontrol ve optimizasyon çalışmaları literatürde yaygın olarak yer bulsa da bu tez kapsamında özellikle Maglev test sistemlerinin manyetik performans karakteristiklerine odaklanılmıştır. Buradan yola çıkarak, yapılan bir çalışmada düşük hızlı Maglev trenlerinin orta hız seviyelerine çıkarılması hedeflenmiş ve özellikle Çin’de kullanılan Changsha Maglev Express sistemine ait veriler temel alınarak elektromıknatıs modüllerinde yüksek hızda meydana gelen kaldırma kuvveti düşüşleri ve manyetik doyumluk etkileri üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, doyumluk problemini azaltacak şekilde optimize edilmiş yeni bir elektromıknatıs tasarımı önerilmiş ve trenin ön kısmındaki levitasyon dengesizliğini azaltmak amacıyla üç kontrollü bir elektromıknatıs sistemi geliştirilmiştir (Ding vd. 2019). Maglev sistemlerinin taşıma kapasitesi ve hareket stabilitesini belirleyen düşey kaldırma kuvveti, yanal kılavuzlama kuvveti ve manyetik sertlik (stiffness) değerlerini artırmak amacıyla, yapılan bir çalışmada araç üzerinde yardımcı kalıcı mıknatısların kullanıldığı ve çok yüzeyli kalıcı mıknatıslı ray yapısıyla birlikte uygulanan hibrit bir düzenleme araştırılmıştır. Öncelikle, farklı alanlı soğutma yüksekliklerinde bu hibrit düzenlemenin kaldırma kuvveti, yönlendirme kuvveti ve sertlik performansları incelenmiştir. Ardından, araç üzerindeki yardımcı mıknatıslar ile ray arasındaki itici kuvvetin artmasına bağlı olarak oluşan kararsızlıkları dengelemek ve optimum bir manyetik alan ortamı sağlamak amacıyla bu yardımcı mıknatısların düşey konumu 0, 2 ve 4 mm olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 25 mm alan soğutma yüksekliğinde daha yüksek kaldırma ve yönlendirme kuvvetlerinin elde edildiğini göstermekte ve önerilen hibrit çok yüzeyli düzenlemenin Maglev sistemlerinin pratik uygulanabilirliğini artırmada etkili olduğu ortaya koyulmuştur (Ozturk vd. 2023). EML sistemleri ağırlıklı olarak elektromıknatıs teknolojisine dayanmakla birlikte, bu sistemlerin performansını artırmaya yönelik olarak süperiletken malzeme kullanımıyla ilgili çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları da literatürde yer almaktadır (Tsuchiya & Ohsaki 2000; Zhang vd. 2004). Başka bir çalışmada, Abdioğlu ve arkadaşları, süperiletken Maglev sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla bir test sistemi geliştirilmiş ve farklı kalıcı mıknatıslı ray düzenlerinin yönlendirme kuvveti, kaldırma kuvveti ve manyetik sertlik üzerindeki etkileri farklı soğutma yüksekliklerinde incelenmiştir. YBCO süperiletkenler ve yardımcı kalıcı mıknatıslar kullanılarak üç kutuplu Halbach düzeninde performans iyileştirilmiş; sonlu elemanlar yöntemiyle manyetik alan dağılımları

analiz edilmiştir. Ayrıca, maliyet-etkinlik değerlendirmesi yapılmış ve sistem verimliliğini etkileyen temel parametreler ortaya konmuştur. Şekil 8’de geliştirilen test sistemi gösterilmektedir.



Şekil 8. Üç eksenli manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi (Abdioglu vd. 2015)

Benzer bir çalışmada, HTS Maglev sistemlerinin manyetik özelliklerini incelemek amacıyla gelişmiş bir kuvvet ölçüm sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Test sistemi; çeşitli sensörler, 3-boyutlu hareketli platform, otomatik kontrollü mekanik tahrik ünitesi ve veri toplama/işleme yazılımından oluşmaktadır. Sistem, HTS kütlenin hareketi sırasında kaldırma ve yönlendirme kuvvetleri ile manyetik alanın eş zamanlı ve yüksek hassasiyetli ölçümünü sağlayabilmektedir. Farklı şekil ve boyutlardaki kalıcı mıknatıslı veya elektromanyetik raylarla HTS malzeme arasındaki etkileşimi analiz etmeye uygundur. Esnek platform yapısı ve yüksek hassasiyetli sensörleri sayesinde, külçe HTS ile mıknatıslı ray arasındaki levitasyon karakteristikleri detaylı biçimde değerlendirilebilmektedir (Wen vd. 2020). Önceki çalışmaların büyük çoğunluğunda ölçümler yalnızca sıvı azot sıcaklığında gerçekleştirilmişken, Çelik tarafından tasarlanan bir test sisteminde, 20 K ile 300 K arasında herhangi bir sıcaklıkta çalışabilmekte ve böylece düşük geçiş sıcaklığına sahip

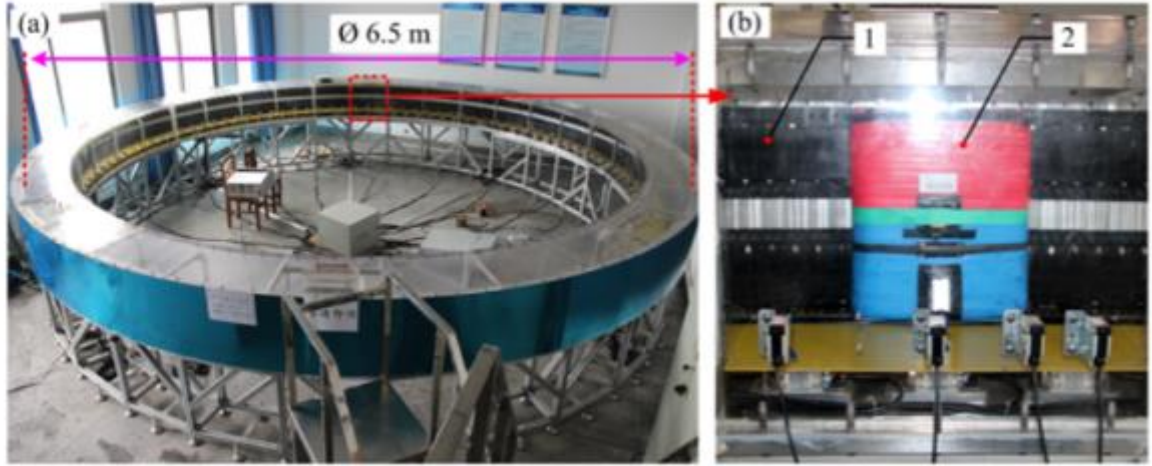
süperiletkenlerin karakterizasyonuna olanak sağlamaktadır. Sistem; düşey harekete karşı düşey kuvvet, yatay kuvvete karşı yatay hareket, sabit mesafede sıcaklığa bağlı düşey kuvvet ve zamana bağlı düşey kuvvet ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, sıcaklık değişimine bağlı manyetik sertlik ölçümleri de bu sistem aracılığıyla yapılabilmektedir (Celik 2016). Ancak, bu tür statik sistemler, gerçek çalışma koşullarını yansıtan hız ve ivme gibi dinamik etkileri değerlendirmede yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, EML sistemleri yüksek enerji tüketimi, karmaşık kontrol gereksinimleri ve dış etkenlere karşı yüksek hassasiyet gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Bu nedenlerle, son yıllarda manyetik levitasyon sistemlerinin dinamik davranışlarını inceleyebilecek test altyapılarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar artış göstermiştir (Deng vd. 2025). Bu bağlamda, pasif kararlılık özelliği, daha az kontrol gereksinimi ve yüksek hız potansiyeli sayesinde EDL sistemleri hem akademik araştırmalarda hem de mühendislik uygulamalarında öne çıkmaya başlamıştır. Bir sonraki paragrafta, EDL sistemlerine yönelik literatürde yer alan temel çalışmalar ve bu sistemlerin manyetik kuvvet karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesine yönelik yaklaşımlar ele alınmaktadır.

Bu doğrultuda, bir çalışmada, elektrodinamik levitasyon tekniğinin, değişken bir manyetik alan ile iyi bir iletken arasındaki etkileşim sonucu oluşan itici kuvvetlerden yararlanarak levitasyon sağladığı ifade edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, Maglev araçlarına uygulanan elektrodinamik levitasyon prensiplerini öğretici bir biçimde sınıflandırmak ve bu tekniğin anlaşılmasına katkı sağlamaktır (França vd. 2021). EDL sistemlerine yönelik literatürde, kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıs kombinasyonlarına dayalı hibrit yapıların manyetik kuvvet üretim performanslarını değerlendiren bir çalışmada iletken bir plaka üzerinde hareket eden kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıs tabanlı hibrit Halbach dizilimine sahip bir EDL sisteminin üç boyutlu analitik modeli sunulmuştur. Hibrit Halbach diziliminin iletken plakayı keserek ilerlemesi sırasında oluşan üç boyutlu girdap akımı kuvvetleri, kaynak manyetik akı yoğunluğunun y-bileşenine dayalı ikinci mertebe vektörel potansiyel yöntemiyle türetilmiştir. Elde edilen analitik ifadelerin doğruluğu, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Ayrıca, sistemde kaldırma kuvvetine etki eden temel parametrelerin etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir (Luo vd. 2020). Benzer şekilde, bir çalışmada Inductrack konseptine dayalı küçük ölçekli bir manyetik levitasyon sisteminin davranışı incelenmiş; sürekli bir bakır ray üzerinde hareket eden prototip üzerinde oluşan sürükleme ve kaldırma kuvvetleri düşük hızlı rejim için analitik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların teorik hesaplamalarla yüksek uyum içinde olduğu

gösterilmiş, ayrıca üç boyutlu sayısal simülasyonlarla kenar etkilerinin önemi vurgulanmış ve bu veriler kullanılarak sistemin yüksek hızlardaki performansı öngörülmeyle çalışılmıştır (Íñiguez & Raposo 2009). Maglev sistemlerine yönelik çalışmalarda, levitasyon teknolojilerinin dinamik davranışlarının incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, bir çalışmada Maglev sisteminin halka şeklindeki bir test hattı üzerindeki dinamik karakteristikleri değerlendirilmiş ve sistemin güvenliği ile kararlılığı elektrodinamik levitasyon çerçevesinde ele alınmıştır. Deneysel olarak yatay sapma ve levitasyon yüksekliği gibi güvenlik parametreleri ölçülmüş; düşük alan-soğutma yüksekliğinin, levitasyon kararlılığını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, sistemin titreşim davranışı analiz edilmiş ve Çin Ulusal Standardı GB5599-85'e göre değerlendirilerek aracın dinamik stabilitesinin yüksek olduğu belirlenmiştir (Deng vd. 2017). Benzer bir çalışmada, Maglev sistemlerinde PMA kaynaklı değişken dış manyetik alanların kaldırma kuvvetine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Döner PMA düzeneğiyle farklı hızları simüle eden bu çalışmada, artan hızla birlikte kaldırma kuvvetinde azalma, azalan hızla ise hafif artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, EDL tabanlı sistemlerin tasarımında dinamik alan değişimlerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Liu vd. 2010). EDL sistemleri yalnızca klasik Maglev uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, son yıllarda Hyperloop gibi yenilikçi ulaşım teknolojilerinde de temel bir bileşen haline gelmiştir. Bu kapsamda, bir çalışmada yüksek hızlı ve sürdürülebilir ulaşım konsepti olan Hyperloop sistemlerinde kullanılan elektrodinamik levitasyon yapısının kararsız doğasına odaklanılmış ve bu yapının pasif bileşenlerle deneysel olarak stabilize edilmesi önerilmiştir. Geliştirilen indirgenmiş ölçekli bir test düzeneği aracılığıyla, pasif Maglev sistemlerine ilişkin sayısal modeller doğrulanmış; hem yarı-statik hem de dinamik test senaryoları oluşturulmuştur. Yarı-statik testler model parametrelerinin ayarlanmasına olanak sağlarken, dinamik testler sistemdeki kararsız davranışı simüle ederek önerilen dengeleme yönteminin doğrulanmasını mümkün kılmıştır. Zaman ve frekans alanındaki deneysel veriler aracılığıyla sistem yanıtı analiz edilmiş ve önerilen yaklaşımın geçerliliği ortaya konmuştur (Tramacere vd. 2024). Elektrodinamik levitasyon sistemlerine yönelik literatürde, özellikle alüminyum ray ve kalıcı mıknatıs etkileşimleri temelinde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin analizi önemli bir yer tutmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen deneysel modeller ve kuvvet ölçüm sistemleri, Maglev teknolojisinin yüksek hızlı ve kararlı çalışma koşulları altındaki davranışını anlamada önemli katkılar sağlamaktadır. Bu tez kapsamında yürütülen çalışma da alüminyum ray tabanlı EDL Maglev sistemlerinin yanı sıra, süperiletken malzeme

kullanımını da içermektedir. Dolayısıyla, kaldırma kuvvetinin pasif olarak kararlılık kazandığı, akı sabitleme etkisinin ön planda olduğu süperiletken sistemler ile ilgili yapılan çalışmalar, doğrudan bu tezin kapsamı ile ilişkili ve karşılaştırmalı değerlendirme açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bir sonraki paragrafta süperiletken pinning etkisine dayalı Maglev sistemlerine yönelik literatürde öne çıkan çalışmalar ele alınacaktır.

Pinning etkisine dayalı HTS Maglev sistemleri, aktif kontrol gerektirmeksizin sağladıkları pasif kararlılık ve düşük enerji tüketimi ile sürdürülebilir ulaşım teknolojileri arasında ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerde, süperiletken bloklar ile kalıcı mıknatıslı ray yapıları arasındaki etkileşim sonucu oluşan kaldırma kuvveti hem kaldırma hem de kılavuzlama işlevlerini aynı anda gerçekleştirebilmektedir. Bu bağlamda gerçekleştirilen bir çalışmada, halka şeklindeki yüksek sıcaklık süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki etkileşim, dondurulmuş görüntü yaklaşımı kullanılarak modellenmiş ve radyal tip yatak benzeri bir levitasyon konfigürasyonu için sertlik parametresi analiz edilmiştir (Sivrioglu & Cinar 2007). Buna ek olarak, başka bir çalışmada ise, yüksek hızlı eğimli viraj koşullarında levitasyon ve kılavuz kuvvetleri arasındaki etkileşimi optimize etmek amacıyla, ray segmentlerine göre değişen kalıcı mıknatıs polarizasyonlarına sahip çok yüzeyli bir PMG ray yapısı önerilmiş; HTS-PM etkileşimi COMSOL Multiphysics yazılımında H-formülasyonu ile modellenmiş ve levitasyon performansı hem sonlu eleman analizleri hem de serbest düşme deneyleriyle doğrulanarak, önerilen yapının yüksek hızlı maglev sistemleri için uygun bir aday olduğu ortaya konmuştur (Sivrioglu vd. 2021). Yine bir çalışmada, HTS-PMA etkileşimine sahip yandan askılı bir sistemde, yönlendirme kuvvetinin statik ve dinamik kararlılığı hem teorik hem deneysel olarak analiz edilmiş ve optimize edilmiş YBCO dizilimi ile sistemin 102 km/sa hızla, 6,5 m çapında bir halka test hattı üzerinde kararlı çalıştığı gösterilmiştir; bu test düzeneği Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Yana asılan HTS Maglev dairesel test parkurunun panoramik görünümü (a), PMA (b-1) ve prototip araç (b-2) (Zhou vd. 2016)

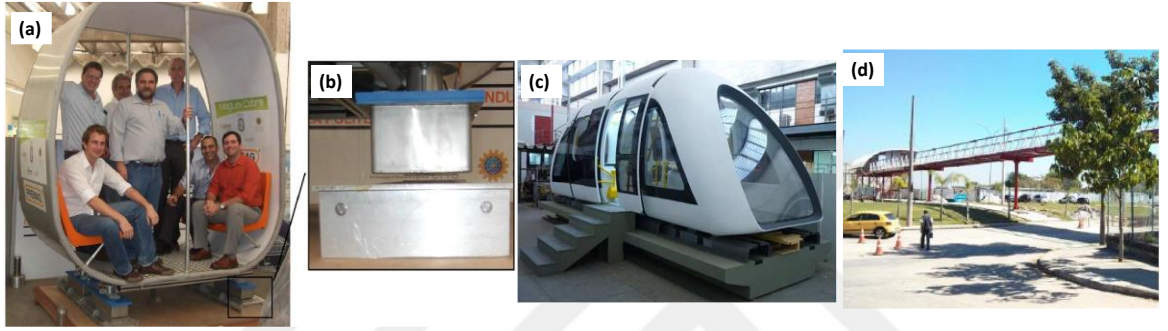
Benzer şekilde, Southwest Jiaotong Üniversitesi'nde geliştirilen SCML-03 test sistemi kullanılarak, 1500 mm çapında döner bir PMA düzeneğiyle 300 km/sa'ya kadar levitasyon performansı değerlendirilmiş, üç eksenli kuvvet sensörleri aracılığıyla hassas kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve söz konusu test sistemi Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. SCML-03 Maglev dinamik test sisteminin ana bölümünün fotoğrafı (Wang vd. 2008)

Pinning etkili süperiletken sistemlerin pratik uygulamalarına odaklanan bir diğer çalışmada, yaklaşık 38 m uzunluğunda ve 12 m çapında dairesel bir test pisti üzerine

yerleştirilen nadir toprak mıknatıslarından oluşan ray yapısı üzerinde çalışan taşıyıcı sistemin, 42 km/sa üzerindeki hızlarda kararlı bir şekilde çalıştığı deneysel olarak gösterilmiştir (Okano vd. 2006). Sistemin şehir içi ulaşım ölçekli uygulamalarına yönelik olarak geliştirilen MagLev-Cobra projesinde ise, YBCO süperiletken bloklar ve Nd-Fe-B mıknatıslar arasındaki pinning etkisine dayanan dört modüllü tam ölçekli araç, bir üniversite kampüsü içerisinde kurulan 200 metrelik açık hava test hattında başarıyla çalıştırılmış; hızlanma, frenleme ve sabit hız koşullarında gerçekleştirilen testlerde kullanılan taşıma platformu Şekil 11’de detaylı olarak verilmektedir.



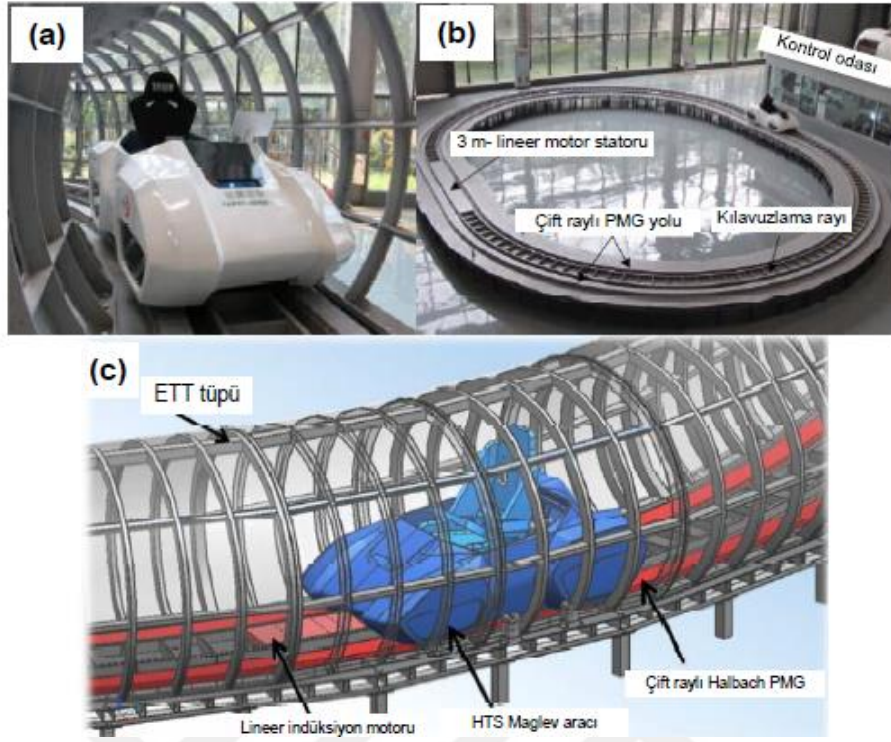
Şekil 11. Brezilya Federal University of Rio de Janeiro’da geliştirilen Maglev-Cobra aracı. (a) Maglev vagonunun bir metrelik kesiti ve içerisindeki araştırmacılar (b), manyetik kılavuzlama yolu üzerinde askıda duran ve içerisinde YBCO külçe süperiletkenler bulunan bir kriyostat, (c) Maglev-Cobra vagonu), (d) kampüs içerisindeki 200 m uzunluklu yol (Mattos vd. 2016)

MagTranS adı verilen farklı bir pinning tabanlı süperiletken taşıma sisteminde hem kaldırma hem de yönlendirme işlevini üstlenen “V” şeklinde kendini dengeleyen süperiletken modüller tasarlanmıştır; bu modüller ile ölçekli prototip üzerinde yapılan levitasyon testleri ve sayısal sonlu eleman analizlerine dayalı sonuçlar değerlendirilmiştir. Söz konusu modül ve test düzeneği ise Şekil 12’de sunulmuştur.



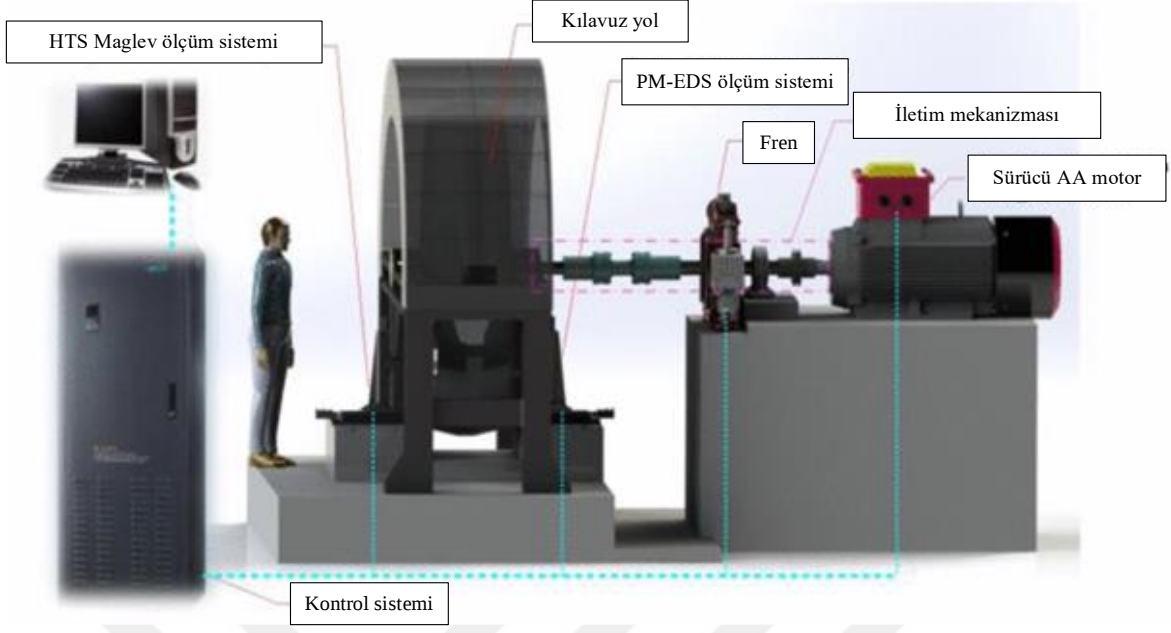
Şekil 12. MagTranS adlı manyetik taşıma sisteminin görünümü (D'Ovidio vd. 2008)

HTS bloklarında meydana gelebilecek levitasyon arızalarının sistem dinamiğine etkisini inceleyen bir çalışmada ise, kritik akım, sıcaklık ve manyetik alan değişimleri dikkate alınarak geliştirilen modelle, bir veya birden fazla levitasyon noktasında oluşabilecek arıza senaryolarının, levitasyon yüksekliği, yuvarlanma ve sapma açısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Yin vd. 2025). Southwest Jiaotong Üniversitesi Uygulamalı Süperiletkenlik Laboratuvarı tarafından, Şekil 13'te gösterilen 45 metrelik "Süper-Maglev" adlı halka test hattı geliştirilmiştir (Deng vd. 2016). 2,2 m uzunluğunda ve 1,1 m genişliğindeki araç, yolcu başına 10–20 mm kaldırma yüksekliği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. 6 m eğrilik yarıçapına ve 0,77 m palet açıklığına sahip PMA yapısı üzerinde araç, doğrusal asenkron motor ile 50 km/sa hıza ulaşabilmektedir.



Şekil 13. (a) Tek yolcu taşıma kapasiteli Süper-Maglev aracı (b) Maglev Test yolunun panoramik görüntüsü ve (c) HTS-ETT sisteminin şematik görüntüsü (Deng vd. 2016)

Yüksek hızlı uygulamalara yönelik geliştirilen başka bir çalışmada, Halbach diziliimli PMA ve alüminyum rayların, dikey dönen bir rotor yapısı içine entegre edildiği ve 600 km/sa hıza uygun olarak tasarlanan bir test düzeneği oluşturulmuştur; bu sistemin yapısal tasarımı ve işleyişi Şekil 14’te detaylandırılmıştır.



Şekil 14. Ultra yüksek hızlı Maglev test sisteminin şematik gösterimi (Deng vd. 2021)

Bu test düzeneği, bağıl hız oluşturmak için kılavuz yol rotasyonu yöntemini kullanır. Deneysel hız olan 600 km/sa altında istikrarlı çalışmasını sağlamak için geliştirme hızı standardı 700 km/sa çıkarılmıştır. Test teçhizatının ölçüm sistemi elektromanyetik vibratör, üç eksenli kuvvet sensörü, titreşim sensörü, lazer yer değiştirme sensörü, servo motor vb. ile donatılmıştır. Böylece, HTS pinning levitation ve sabit mıknatıslı EDL'nin dinamik kaldırma özellikleri üzerinde daha kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilebilir. Ultra yüksek hızlı Maglev test düzeneğinin geliştirilmesi, Maglev teknolojisinin araştırma ve mühendislik uygulamalarının teşvik edilmesinde önemli bir rol oynayacak olan HTS Maglev ve sabit mıknatıslı EDL'nin araştırılması için gerekli deneysel koşulları sağlayabilir.

Tüm bu çalışmalar, pinning tabanlı süperiletken Maglev sistemlerinin hem temel fiziksel prensiplerini hem de uygulamaya dönük mühendislik ve güvenlik bileşenlerini deneysel olarak ortaya koymakta; özellikle levitasyon kararlılığı, rezonans davranışı, arıza toleransı ve sistem ölçeklenebilirliği gibi başlıklar açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Bu tez çalışması, literatürde yer alan mevcut Maglev araştırmalarından farklı olarak hem alüminyum ray geometrisinin hem de kalıcı mıknatıs, külçe HTS, bakır ve HTS bobin gibi farklı manyetik alan kaynaklarının modüler bir test platformu üzerinde karşılaştırmalı olarak incelendiği özgün bir deneysel düzenek sunmaktadır. Ayrıca sistem, 320 km/sa hıza

karşılık gelen dönme hızlarına ulaşabilen dairesel alüminyum ray yapısı, PLC–SCADA tabanlı gerçek zamanlı kontrol altyapısı ve çok eksenli kuvvet ölçüm sistemleriyle donatılarak, EDL sistemlerinin dinamik kuvvet karakteristiklerini yüksek doğrulukla analiz edebilecek şekilde tasarlanmıştır. İmal edilen bu test sistemi, yalnızca kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini değil, aynı zamanda rezonans etkileri, kuvvet dalgalanmaları ve manyetik sertlik gibi parametreleri de deneysel olarak ortaya koyarak literatüre yenilikçi katkılar yapabilecek şekilde tasarlanmıştır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, Maglev ulaşım sistemlerinin elektromanyetik kuvvet parametrelerini sistematik olarak analiz edebilmek ve bu sistemlerin daha verimli, düşük maliyetli ve sürdürülebilir yapılandırmalarını geliştirmek amacıyla kapsamlı bir araştırma süreci yürütülmüştür. Bu doğrultuda ilk olarak, deneysel çalışmaların yürütülmesine olanak sağlayacak özgün bir test altyapısı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Alüminyum ray tabanlı, modüler yapıya sahip EDL Maglev ölçüm sistemi, hem yüksek doğrulukla kuvvet ölçümleri gerçekleştirebilecek hem de farklı manyetik alan kaynaklarıyla uyumlu olacak şekilde yapılandırılmıştır. Sistem, SCADA destekli Delta AS300 serisi PLC altyapısı, çok eksenli kuvvet sensörleri, kriyojenik soğutma sistemi ve yüksek hassasiyetli pozisyon-hız izleme birimleri ile donatılmıştır. Bu özgün prototip, sadece klasik PM ve HTS uygulamaları değil; aynı zamanda bobin temelli manyetik alan kaynaklarıyla da çalışabilen çok amaçlı ve genişletilebilir bir platform niteliğindedir.

Deneysel düzeneğin oluşturulmasının ardından hem deneylerin yönlendirilmesi hem de sistem davranışlarının teorik temellerle açıklanabilmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) dayalı COMSOL yazılımında nümerik simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, alüminyum ray geometrisinin (kalınlık, genişlik, farklı geometrik tasarım vb.) ve farklı manyetik alan kaynaklarının sistem performansı üzerindeki etkileri parametrik olarak analiz edilmiştir. Kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve bu kuvvetlerin oranı olan LDR performans göstergesi, farklı hız ve hareket yüksekliklerinde değerlendirilmiş ve sistemin optimum çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

Nümerik analizleri takiben, sistemin gerçek çalışma koşullarındaki tepkilerini gözlemleyebilmek amacıyla geniş kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, prototip sistem üzerinde farklı hareket hızlarında ve açıklık mesafelerinde, farklı manyetik alan kaynağı topolojileri kullanılarak kuvvet-zaman, hız-zaman ve konum-zaman verileri toplanmıştır. Elde edilen bu veriler, nümerik simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak modelleme doğruluğu test edilmiş, HTS ve PMA tabanlı levitasyon sistemlerinin dinamik davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, manyetik akı tuzaklama kapasitesi, levitasyon kararlılığı ve sistemin elektromanyetik kuvvet üretme kapasitesi bakımından farklı konfigürasyonlar arasındaki farklar da ortaya konulmuştur.

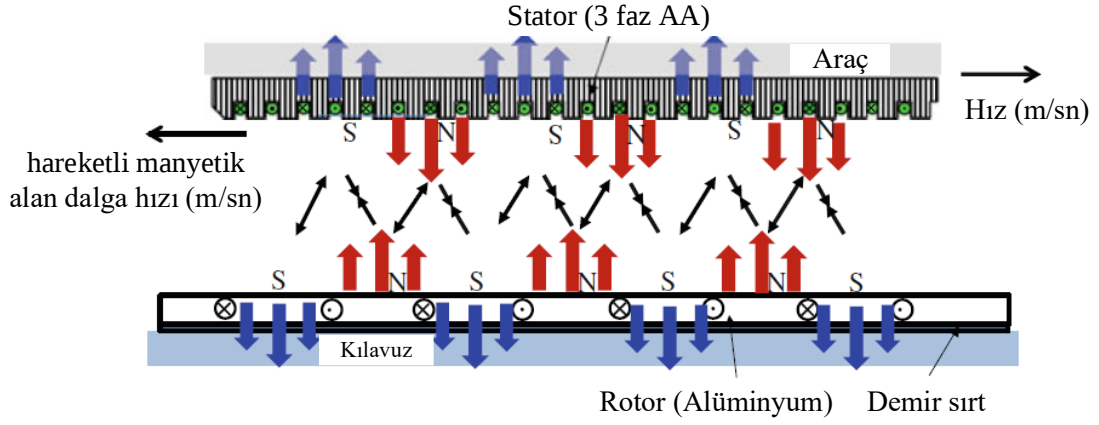
Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen alüminyum raylı HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi prototipi, yalnızca mevcut literatürdeki boşlukların giderilmesine katkı sağlamakla kalmayıp; aynı zamanda gelecekteki Maglev ve Hyperloop benzeri yüksek hızlı raylı taşıma sistemleri araştırmaları için sağlam, ölçeklenebilir ve güvenilir bir deneysel altyapı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, yeni nesil Maglev sistemlerinin yerli ve özgün tasarım bileşenleriyle geliştirilmesine yönelik önemli bir referans çerçevesi oluşturmıştır.

2.1. Girdap Akımları ve Elektromanyetik Kuvvet Oluşumu: Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemler için Kuramsal Temel

Bu çalışmada geliştirilen alüminyum ray tabanlı EDL sistemlerinin tasarımında ve analizinde, manyetik alan kaynakları ile hareketli iletken ray yüzeyi arasındaki göreceli hareket sonucu oluşan girdap akımı temelli kuvvet üretim mekanizmasından yararlanılmıştır. Sistemlerin elektromanyetik davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi ve simülasyon ve deneysel ortamlarda elde edilen sonuçların fiziksel karşılıklarının anlaşılabilmesi adına, öncelikle bu temel etkileşim mekanizması ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Bu mekanizma, doğrusal bir indüksiyon motorun ürettiği lineer kuvvetlere benzer; ancak burada motorun “sabit” ve “dönen” parçaları doğrusal geometrik düzenlemeyle yeniden tanımlanmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen EDL test sisteminde:

- Manyetik alan kaynağı (PMA/HTS bobin dizisi), yüzey üzerinde sabit bir manyetik akı oluşturur.
- Alüminyum ray, bu sabit akı içinde hareket ettiğinde girdap akımları indüklenir. Bu akımlar, Faraday’ın indüksiyon kanununa göre $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ tanımlanır.
- İndüklenen akımın yoğunluğu ve dağılımı, rayın iletkenliği, kalınlığı ve göreceli hızına bağlıdır.
- Bu akımların oluşturduğu manyetik alanla kaynak manyetik alan arasındaki etkileşim, Lorentz kuvveti ($\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$) şeklinde kendini gösterecek; burada $\mathbf{J}$, ray içindeki akım yoğunluğu, $\mathbf{B}$ ise kaynak manyetik alan vektörüdür.
- Sonuç olarak ortaya çıkan manyetik kuvvet, dikey yönde “kaldırma” ve hareket yönüne zıt “sürükleme” bileşenlerine ayrılır.

Bu tez kapsamında imal edilen test sistemi elektromekanik açıdan değerlendirildiğinde, klasik bir doğrusal motor konfigürasyonu ile yapısal benzerlik göstermektedir. Sistem içerisinde yer alan manyetik alan kaynakları, klasik motor terminolojisinde “stator” işlevi görürken; bu manyetik yapıların karşısına yerleştirilen alüminyum ray ise bir “rotor” gibi davranmaktadır. Ancak burada önemli bir fark söz konusudur: Geleneksel lineer indüksiyon motorlarında (LIM), üç fazlı AA sargılar vasıtasıyla üretilen hareketli manyetik alan, karşısındaki iletken plakada (örneğin alüminyumda) girdap akımlarını indükleyerek itme kuvveti üretir. Şekil 15’te bu prensip kavramsal olarak sunulmuştur.



Şekil 15. EDL test sisteminin elektrik motoru ile karşılaştırılması (Han & Kim 2016)

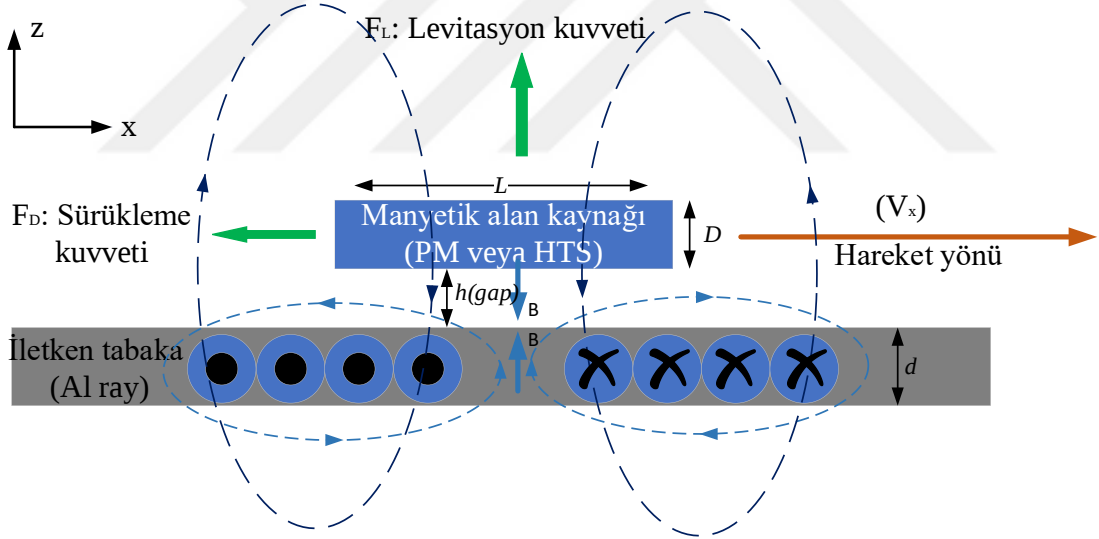
Şekilde, taşıt üzerinde yer alan üç fazlı sargılarla oluşturulan hareketli manyetik alan ile ray üzerine yerleştirilmiş alüminyum plakada oluşan girdap akımları arasındaki etkileşim sonucu bir itme kuvveti ortaya çıkmakta ve taşıt ivmelendirilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen sistemde ise klasik LIM yapısının aksine aktif bir manyetik alan üretimi söz konusu değildir. Bunun yerine, sabit mıknatıslar, HTS veya DA (Doğru Akım) kaynaklı süperiletken bobinlerle oluşturulan statik manyetik alanın etkisiyle, alüminyum rayın göreceli hareketi sonucu iletkende girdap akımları oluşur. Bu bağlı hareket, alüminyum ray üzerinde Lorentz kuvvetinin doğmasına ve buna bağlı olarak kaldırma ve itme kuvvetlerinin üretilebilmesine imkân tanır. Böylece klasik LIM sistemlerinde hareketli alanla sağlanan kuvvet üretimi, bu sistemde hareketli iletken yapı (ray) ile elde edilmiş olur. Bu yönüyle sistem, klasik LIM prensibini tersine çeviren bir yaklaşımla çalışmakta, elektromanyetik kuvvet üretimini pasif bir şekilde gerçekleştirmektedir.

Sonuç olarak, sistemin bu yapısı aktif elektriksel uyarma gerektirmeden kuvvet üretimi sağlayarak yapısal sadelik ve enerji verimliliği açısından avantaj sunar. Ayrıca Şekil 15’te gösterilen klasik LIM yapısına fonksiyonel benzerliği ile, deneysel EDL uygulamaları için hem teorik hem de pratik bir referans oluşturmaktadır.

EDL sistemlerinde, kalıcı mıknatıslar, yüksek sıcaklık süperiletkenleri, bakır bobinler ve HTS şerit bobinler gibi çeşitli manyetik alan kaynakları, alüminyum gibi yüksek iletkenlikli ray yüzeyleri üzerinde belirli bir çalışma yüksekliğinde (gap) hareket etmektedir. Bu çalışmada kullanılan yapıların tümünde, bu göreceli hareket nedeniyle ray üzerinde zamanla değişen manyetik alan etkisiyle girdap akımları indüklenmiş; bu akımların kaynağın manyetik alanı ile etkileşimi neticesinde hem kaldırma (levitasyon) hem de sürüklenme (drag) kuvvetleri ortaya çıkmıştır.

Şekil 16’da sunulan fiziksel model, nümerik simülasyon ve deneysel analizlerimizde temel alınan yapı geometrisine karşılık gelmektedir (Moon 2008).



Şekil 16. EDL sistemin fiziksel modeli

Modelde, x ekseninde ilerleyen manyetik alan kaynağı (örneğin PM veya HTS) nedeniyle, alüminyum rayda oluşan girdap akımları, Lenz yasası gereği manyetik alan değişimine karşı koyacak şekilde bir karşı alan oluşturur. Bu karşı alan ile kaynak alan arasındaki elektromanyetik etkileşim sonucu, y ekseninde kaldırma kuvveti ve x ekseninde, harekete zıt yönde bir sürüklenme kuvveti meydana gelmektedir.

Bu kuvvetlerin teorik olarak ifade edilmesine yönelik literatürde yaygın olarak kullanılan analitik modeller, bu çalışmada hem ön modelleme aşamasında hem de deneysel verilerin değerlendirilmesinde referans alınmıştır. Sistem parametreleri ile ilişkili olarak kaldırma (F_L) ve sürüklenme (F_D) kuvvetleri Denklem 14-15'te gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$F_z = F_L = \frac{B_0^2 \omega \rho \tau}{\mu_0} \frac{1}{\beta_n + 1} e^{-2\beta h} \quad (14)$$

$$F_x = F_D = \frac{B_0^2 \omega \rho \tau}{\mu_0} \frac{\beta_n}{\beta_n + 1} e^{-2\beta h} \quad (15)$$

Burada, vakumun manyetik geçirgenliği (μ_0), elektromanyetik alanın boşluktaki yayılım özelliklerini tanımlar ve uluslararası sabit bir değere sahiptir. B_0 , kullanılan manyetik alan kaynağın (PM, HTS veya bobin) oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. ω , bu manyetik alan kaynağının ray üzerindeki enine (genişlik) boyutunu, ρ , sistemde karşılıklı yerleştirilen kutup çiftlerinin sayısını, τ ise bu kutuplar arasındaki aralığı ifade etmektedir.

Analitik çözümde kullanılan $\beta=\pi/\tau$ ifadesi, sistemin dalga vektörü karakterini belirlerken, h parametresi çalışma yüksekliği olup, manyetik alan kaynağı ile ray yüzeyi arasındaki hava boşluğunun yüksekliğini tanımlar. Derinlik parametresi olarak tanımlanan $\eta = \sqrt{\lambda/\pi\mu\sigma v}$ girdap akımlarının iletken ray içerisindeki nüfuz derinliğiyle ilişkilidir ve sistemin elektromanyetik tepki hızını etkileyen bir bileşendir. Bu bağıntıda yer alan μ , ray malzemesinin manyetik geçirgenliğini; σ , rayın elektriksel iletkenliğini ve v , manyetik kaynağın ray yüzeyine göre göreceli hızını temsil eder. Ayrıca $\lambda=2\tau$ olup manyetik alan kaynağının bir karakteristiğini yansıtır.

Bu tez kapsamında, sistemin performansını nicel olarak değerlendirmek üzere kaldırma kuvvetinin (F_L) sürüklenme kuvvetine (F_D) oranı olarak tanımlanan LDR temel performans göstergesi olarak benimsenmiştir. LDR, yalnızca kaldırma kuvvetinin yeterliliğini değil, aynı zamanda oluşan sürtünme kaynaklı enerji kayıplarının düzeyini de yansıttığı için, özellikle yüksek hızlı taşımacılık senaryolarında sistemin enerji verimliliği açısından kritik bir ölçüttür. LDR değeri, Denklem 16 verilen matematiksel ifade ile tanımlanır.

$$LDR = \frac{F_L}{F_D} = \frac{1}{\beta_n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\pi \mu \sigma \lambda v} \quad (16)$$

Bu ifade, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranını ifade eder ve LDR değerinin yüksek olması, sistemin daha verimli bir manyetik levitasyon sağladığı anlamına gelir. Özellikle bu çalışmada, LDR değerinin; hız (v), hareket yüksekliği (h), ray iletkenliği (σ) ve manyetik alan konfigürasyonu gibi temel elektromanyetik parametrelere olan bağımlılığı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Böylece, elde edilen LDR profilleri aracılığıyla hem simülasyon ortamında hem de deneysel doğrulamalarla sistemin optimum çalışma koşulları belirlenmiş ve enerji kayıplarını minimize edecek tasarımsal iyileştirmeler yapılmıştır.

Tüm bu parametreler birlikte değerlendirildiğinde, sistemin kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin büyüklüğü ile birlikte, hız, mesafe ve malzeme özelliklerine bağlı performans eğilimlerinin anlaşılmasına olanak sağlar. Bu nedenle, bu değişkenlerin hassas biçimde tanımlanması ve simülasyonlarda doğru şekilde kullanılması hem teorik modelleme sürecinin hem de deneysel karşılaştırmaların başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

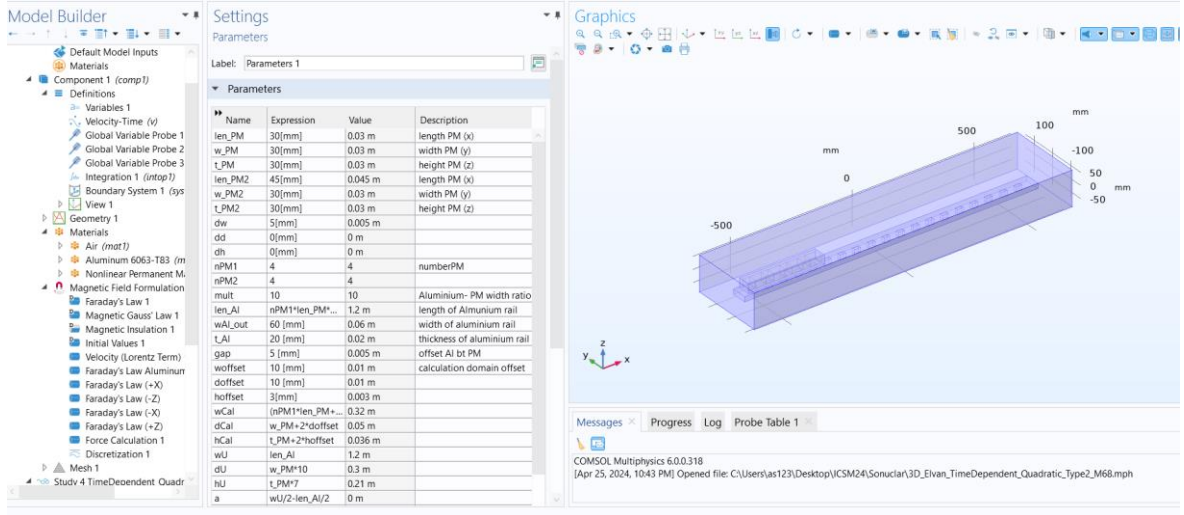
2.2. PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemi için Gerçekleştirilen Nümerik Çalışmalar

Bu bölümde, EDL sistemine ilişkin gerçekleştirilen nümerik analizler sunulmaktadır. Nümerik simülasyonlar, sonlu elemanlar yöntemine dayanan COMSOL Multiphysics 6.1 yazılımının “Magnetic Fields (mf)” fizik arayüzü kullanılarak yürütülmüştür. Modelleme sürecinde, kalıcı mıknatısların manyetizasyon yönleri ve manyetik alan şiddetleri Faraday yasası çerçevesinde tanımlanmış; sistemdeki hareket etkileri ve hız bileşenleri ise Lorentz terimi üzerinden modellenmiştir. EDL sisteminin nominal çalışma koşullarını temsil edecek şekilde, taşıyıcı sistemin hızı 0–1100 km/sa aralığında tanımlanmış ve farklı ray-mıknatıs konfigürasyonlarının elektromanyetik kuvvet üretme performansları bu kapsamda analiz edilmiştir. İlk olarak, PM ve farklı geometrik yapıdaki alüminyum ray konfigürasyonları değerlendirilmiş ve optimum ray parametreleri belirlenmiştir. Bu optimum konfigürasyonlar, izleyen tüm nümerik analizlerde referans olarak kullanılmıştır. Devamında, sırasıyla PM-Alüminyum ray ve HTS-Alüminyum ray konfigürasyonlarının EDL sistemlerindeki manyetik kuvvet performansları sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmalar, sistemin tasarım parametrelerinin elektromanyetik kuvvet üretimi üzerindeki

etkilerinin anlaşılmasına ve deneysel çalışmalara temel teşkil edecek referans geometrilerin belirlenmesine katkı sağlamıştır.

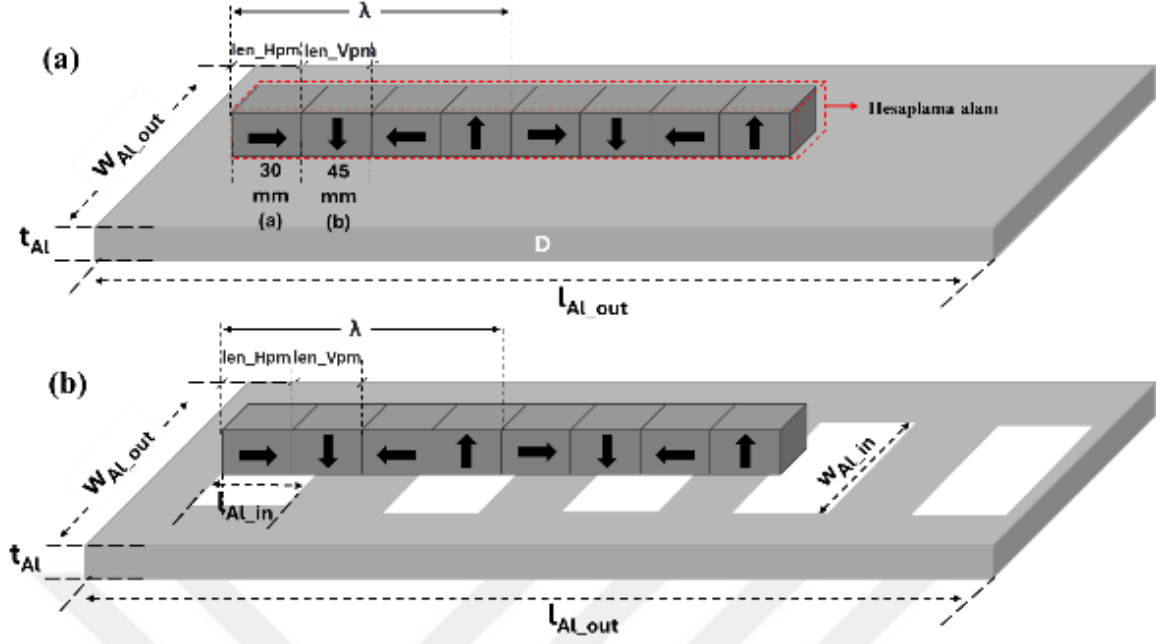
2.2.1. PM ve Farklı Geometrilerdeki Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu

Bu çalışmada, kalıcı mıknatıs ve farklı alüminyum ray düzenlemelerinin EDL sistemlerindeki performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 17’de gösterilen COMSOL 6.1 arayüzünde nümerik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. COMSOL nümerik simülasyon arayüzü ve parametreler

Nümerik simülasyon çalışması kapsamında, Şekil 18'de verilen topoloji COMSOL 6.1 arayüzünde oluşturulmuştur.



Şekil 18. Tam (a) ve periyodik kaviteasyonlu (b) alüminyum raylı Maglev dinamik kaldırma konseptinin şematik gösterimi

Buradaki hesaplamalar COMSOL programında üst PM dizisi etrafında 1 mm kalınlığında bir hesaplama alanı tanımlanarak yapılmıştır (Şekil 18(a)'da kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir). Üst PM dizisi, alt alüminyum rayın geometrik merkezi ile çakışacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle, hesaplamalar Tablo 1'de belirtilen 1200 mm uzunluğundaki alüminyum ray uzunluğu dikkate alınarak elde edilmiştir.

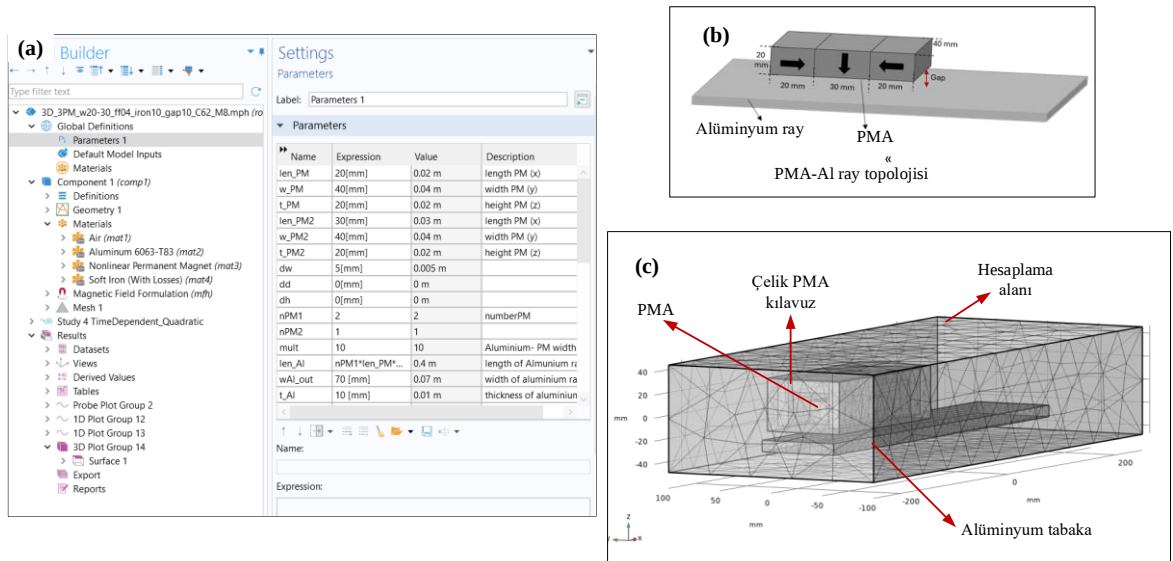
Tablo 1. Sayısal hesaplamalar için PM-EDL sisteminin fiziksel parametreleri

Parametre	Tanım	Değer
$l_{en_H_{PM}}$	Yatay PM uzunluğu (x)	30 mm
$w_{H_{PM}}$	Yatay PM genişliği (y)	30 mm
$t_{H_{PM}}$	Yatay PM yüksekliği (z)	30 mm
$l_{en_V_{PM}}$	Dikey PM uzunluğu (x)	45 mm
$w_{V_{PM}}$	Dikey PM genişliği (y)	30 mm
$t_{V_{PM}}$	Dikey PM yüksekliği (z)	30 mm
l_{en_Al}	Alüminyum ray uzunluğu	1200 mm
w_{Al_out}	Alüminyum ray genişliği	40-60 mm
t_{Al}	Alüminyum ray kalınlığı	5-25 mm

Sayısal simülasyonlar COMSOL Multiphysics 6.2'de “Manyetik Alan Formülasyonu (mfh)” fiziğinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, 100 m/s çalışma hızında farklı alüminyum ray düzenlemelerinin EDL Maglev Sistemleri üzerindeki etki ve maliyet analizine odaklanmaktadır. Çalışmamızda 100 m/s hızın tercih edilmesinin temel nedeni, bu hızın hem EDL sistemlerinin optimum performansını değerlendirmek için uygun bir referans olması hem de ticari taşımacılık uygulamalarındaki hızlar için uygun olmasıdır. Bu hızda manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ile LDR değerleri arasındaki ilişki net bir şekilde analiz edilebilmekte ve sonuçlar diğer Maglev ve yüksek hızlı tren çalışmaları ile karşılaştırılabilir hale gelmektedir. Bu nümerik simülasyon çalışmasında, her bir mıknatısın kalıcı mıknatıslanma değeri $B_r = 1.42$ T ve alüminyum rayın elektrik iletkenlik değeri $\sigma = 3 \times 10^7$ S/m olarak alınmıştır.

2.2.2. PM-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu

Bir önceki bölümde, optimum ray parametreleri belirlendikten sonra, bu kısımda, kalıcı mıknatıs ve alüminyum ray düzenlemelerinin EDL sistemlerindeki performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Nümerik simülasyon çalışması kapsamında, **Şekil 19'da** verilen topoloji COMSOL arayüzünde oluşturulmuştur.



Şekil 19. COMSOL yazılımında gerçekleştirilen nümerik simülasyon parametreleri (a), oluşturulan topoloji (b) ve COMSOL tasarımı (c)

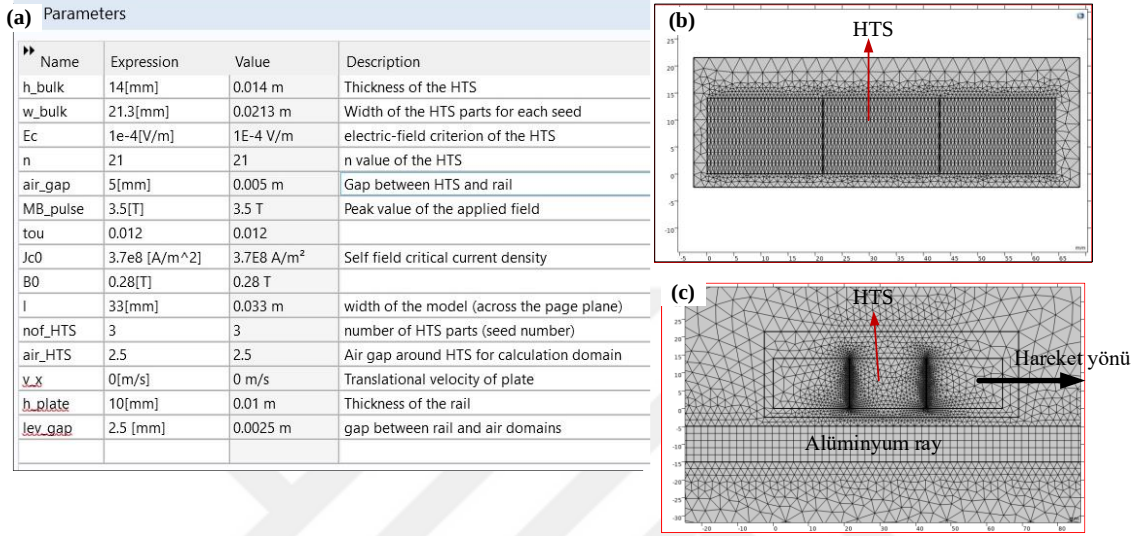
Bu nümerik analizler, COMSOL 6.1 yazılımının Magnetic Fields (mf) fizik arayüzü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, PMA ile alüminyum ray konfigürasyonu için manyetik akı yoğunluğu dağılımları (akı çizgileri) ile alüminyum ray üzerinde oluşan girdap akımı yoğunlukları hesaplanmıştır. İlk aşamada, sistemin durağan konumda olduğu varsayımı altında manyetik alan dağılımları incelenmiş; ardından taşıyıcının 270 km/sa doğrusal hızla hareket ettiği üç farklı hareket yüksekliğinde (10 mm, 12 mm ve 15 mm) için analizler yapılmıştır. Burada, taşıyıcının hızını modellemek amacıyla Rotating Machinery, Magnetic (rmm) fizik arayüzü de entegre edilmiştir. Her ne kadar bu fizik arayüzü esasen döner makine bileşenlerinin elektromanyetik davranışlarını analiz etmek için geliştirilmiş olsa da, hızlı hareket eden taşıyıcıyı temsil etmek üzere sabit bir açısal hız bileşeni tanımlanarak sistemin lineer hareketi modellenmiştir. Bu yöntem sayesinde, taşıyıcının göreceli hareketi sırasında alüminyum ray içinde indüklenen girdap akımı yoğunluklarının ve bunların oluşturduğu elektromanyetik kuvvet bileşenlerinin (kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri) dinamik olarak gözlemlenmesi mümkün olmuştur.

Elde edilen sonuçlar, mıknatısların yönlendirilmiş manyetizasyon karakteristiklerinin ray ile olan etkileşimini, hızın etkisiyle iletken rayda indüklenen girdap akımı dağılımlarını ve düşey açıklık mesafesinin elektromanyetik kuvvet büyüklükleri üzerindeki rolünü karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Bu analizler, EDL sistemlerinde performans optimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir.

2.2.3. HTS-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının EDL Sistemlerindeki Performansının Sayısal Simülasyonu

Bu bölümde, HTS ve alüminyum ray bileşenlerinden oluşan EDL sistem konfigürasyonlarının elektromanyetik kuvvet üretim performansı, detaylı nümerik simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. HTS malzemelerinin manyetik akı tuzaklama (flux trapping) yeteneği sayesinde klasik kalıcı mıknatıs sistemlerine göre çok daha yüksek levitasyon kuvvetleri üretilebilmesi mümkündür. Bu doğrultuda gerçekleştirilen nümerik çalışmalar, HTS'lerin manyetik alanla uyarılması süreci ve bu sürecin ardından alüminyum ray üzerindeki yüksek hızlı hareketleri esnasında ortaya çıkan kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin analizi üzerine odaklanmıştır. Yapılan simülasyonlar, EDL sisteminin yüksek hızlardaki performansını değerlendirme açısından önem arz etmektedir.

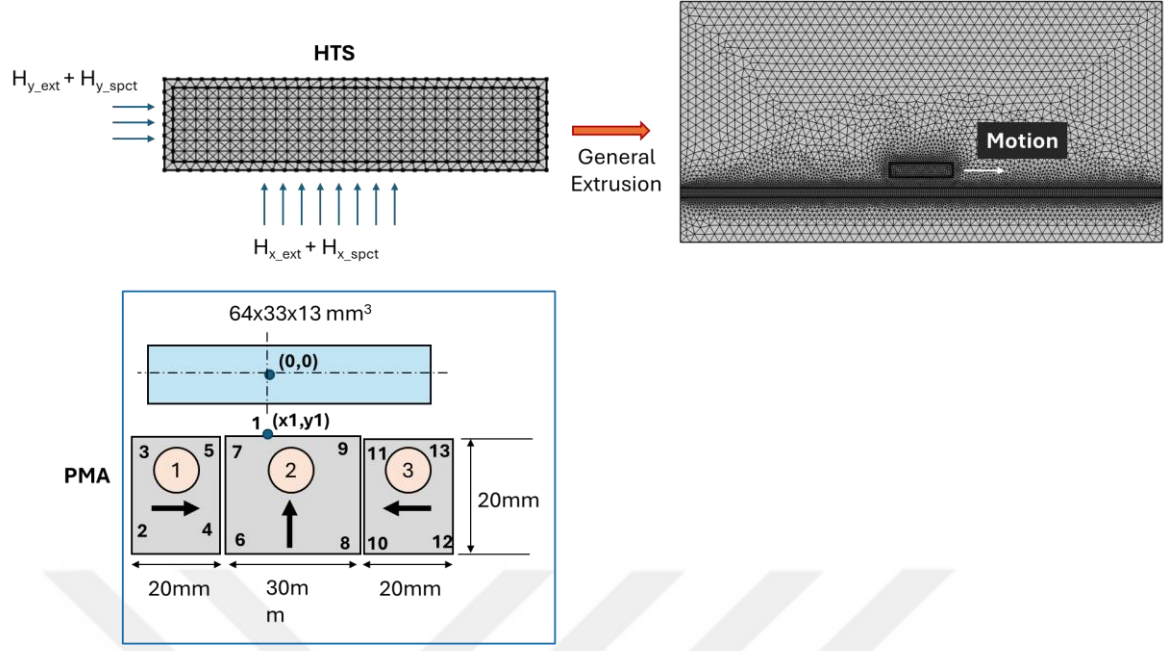
HTS–alüminyum ray konfigürasyonuna ait elektromanyetik kuvvetlerin nümerik olarak belirlenebilmesi amacıyla, COMSOL Multiphysics 6.1 yazılımında iki aşamalı (iki bileşenli) bir sayısal modelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Şekil 20’de, bu ilk modelleme adımına ait COMSOL arayüz parametreleri ve kullanılan ağ yapısı (mesh) gösterilmektedir.



Şekil 20. COMSOL yazılımında gerçekleştirilen nümerik simülasyon parametreleri (a), durağan durumda (b) ve hareketli durumda (c) gerçekleştirilen manyetik alan tuzaklama simülasyonuna ait ağ yapısı (mesh) görünümü

Burada, hem süperiletkenin manyetik akı tuzaklama sürecini hem de dinamik etkileşim esnasında oluşan kuvvet bileşenlerini kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Şekil 21’de bu iki aşamalı modelleme süreci ve kullanılan ağ yapısı görsel olarak sunulmaktadır.

İlk adımda, Component 1 altında HTS'nin durağan haldeyken maruz kaldığı dış manyetik alanı nasıl tuzakladığı modellenmiştir. Bu adım, HTS malzemenin manyetik karakteristiklerinin doğru biçimde tanımlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu süreçte kullanılan mesh yapısı, manyetik akı yoğunluğunun lokal değişimlerini yüksek doğrulukla çözümleyebilecek biçimde rafine edilmiştir. HTS içerisine nüfuz eden manyetik alan dağılımı bu bileşende hesaplanmakta ve bir sonraki aşamaya veri aktarımı için hazır hale getirilmektedir.



Şekil 21. HTS–alüminyum ray EDL sisteminin iki bileşenli nümerik modelleme yapısı

İkinci aşamada, Component 2 kapsamında HTS ile alüminyum ray arasındaki hareketli etkileşim modellenmiştir. Burada Rotating Machinery Magnetic (RMM) fizik ara yüzü tercih edilmiştir. RMM modülü sayesinde, fiziksel olarak hareket eden bir HTS modeli oluşturmaya gerek kalmadan, alüminyum ray üzerinde tanımlı bir hız alanı uygulanarak hareket etkisi oluşturulmuştur. HTS'nin statik kaldığı bu modelde, rayın belirli bir hızda (örneğin 270 km/sa) ilerlediği varsayılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, hareketli sistemlerin Lorentz kuvvetine dayalı etkileri v alanı üzerinden doğrudan tanımlanmış ve hesaplanan akı dağılımlarıyla elektromanyetik kuvvet bileşenleri elde edilmiştir.

İki bileşen arasındaki bağlantı, General Extrusion operatörü kullanılarak sağlanmıştır. Component 1’de elde edilen manyetik akı dağılımı, Component 2’ye üç boyutlu bir veri transferi şeklinde aktarılmış ve böylece akı tuzaklanmış HTS’nin gerçekçi bir başlangıç koşulu ile alüminyum rayla etkileşimi sağlanmıştır. Bu bağlamda, HTS içerisindeki manyetik alanın korunumu ve zamansal olarak değişmeyen karakteri, modelin doğruluğunu artırıcı bir unsur olarak ele alınmıştır.

Şekil 21’de üst bölümde, HTS’nin manyetik akı tuzaklama simülasyonuna ait mesh yapısı (sol) ve bu yapıdan elde edilen verilerle oluşturulan dinamik etkileşim bölgesi (sağ) görülmektedir. Alt kısımda ise, HTS altında kullanılan üç farklı PMA konfigürasyonu ve bu dizilimlerin koordinat düzlemine göre yerleşimi sunulmuştur. Bu manyetik dizilimler,

tuzaklanan akının dağılımını belirleyen temel unsurlar arasında yer almakta olup, kuvvet performansı üzerinde doğrudan etkilidir.

Bu iki bileşenli modelleme yaklaşımı, HTS temelli levitasyon sistemlerinin hem başlangıç koşullarında manyetik davranışını hem de hareketli alüminyum ray ile etkileşim sonucunda oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini yüksek doğrulukla ortaya koymakta; aynı zamanda fiziksel deneylerle doğrudan karşılaştırılabilir parametrik sonuçlar üretmektedir.

Bu çalışmalar, HTS temelli EDL sistemlerinin yüksek hızlı manyetik levitasyon taşıma sistemlerinde kullanılabilirliğini artırmak için önemli bir adım teşkil etmekte ve deneysel doğrulamalar için sağlam bir sayısal temel sunmaktadır.

2.3. PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Sistemi için Gerçekleştirilen Deneysel Çalışmalar

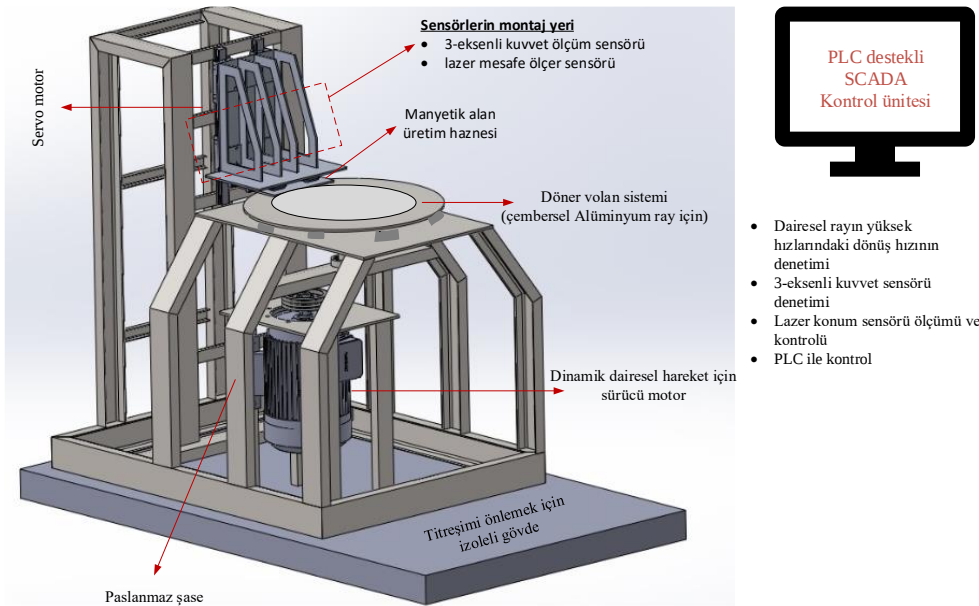
Bu bölümde, EDL prensibine dayalı Maglev sistemlerinin performans parametrelerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Geliştirilen sistem, özellikle PM/HTS-alüminyum ray etkileşimlerinin dinamik olarak incelenmesini sağlayan modüler ve özgün bir test altyapısını kapsamaktadır. Deneysel düzenek; kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin eşzamanlı ölçümünü mümkün kılan üç eksenli kuvvet sensörü, konum ve hız belirleme sistemleri, kriyojenik soğutma donanımı ve PLC/SCADA tabanlı veri toplama ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin imal edilmesinden sonraki aşamada ilk deneysel ölçümlere geçilmiştir. İlk olarak farklı PM konfigürasyonlarının alüminyum ray üzerinde farklı hareket yüksekliği ve hızlarda oluşturduğu elektromanyetik kuvvetler ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Sonrasında, HTS malzemelerin kriyojenik ortamda manyetik akı tuzaklama kapasiteleri ölçülmüş; ardından bu bileşenlerin alüminyum ray üzerinde farklı hareket yüksekliği ve hızlarda oluşturduğu elektromanyetik kuvvetler ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca, sistemde kullanılabilecek, HTS bobinler ve bakır şerit bobinlerin ürettiği manyetik akı yoğunlukları farklı akım değerleri altında ölçülmüş ve bu yapıların potansiyel manyetik alan oluşturma yetenekleri karşılaştırılmıştır. Bu bobinler ile doğrudan kaldırma veya sürüklenme kuvveti ölçümü yapılmamış olmakla birlikte, üretilen manyetik alan dağılımları gelecekteki aktif tahrik sistemlerine yönelik ön değerlendirme niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmaların temel amacı, nümerik modellemelerle öngörülen elektromanyetik kuvvet değerlerinin deneysel doğrulamasını sağlamak ve sistem performansına dair kapsamlı bir veri seti elde etmektir. Aşağıdaki alt başlıklarda, deney düzeneğinin mekanik ve elektronik bileşenleri, yazılım altyapısı, veri toplama mekanizmaları ve gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına ilişkin detaylı bilgiler sunulmaktadır.

2.3.1. PM/HTS-Alüminyum Raylı EDL Maglev Dinamik Ölçüm Sisteminin Tasarımı ve İmalatı

Maglev sistemlerinde kullanılan farklı manyetik alan kaynaklarının (örneğin PM, HTS vb.) ve alüminyum ray konfigürasyonlarının, elektromanyetik kuvvet parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla, bu kuvvetlerin belirli bir hız aralığında dinamik olarak ölçülmesine olanak tanıyan özgün bir deneysel düzenek tasarlanmıştır. Şekil 22’de şematik görünümü sunulan bu ölçüm sistemi, döner volan mekanizması ile elde edilen göreceli hareket, hassas kuvvet sensörleri, konumlandırma sistemleri ve yüksek sıcaklık süperiletken modülleri ile entegre edilmiş bir alüminyum ray yapısını içermektedir. Böylelikle, farklı topolojiler için elde edilen manyetik kuvvet performansı, belirli hız ve çalışma yüksekliği koşullarında deneysel olarak incelenebilmekte, elde edilen veriler sistem tasarımı ve optimizasyonu açısından önemli geri bildirimler sunmaktadır.



Şekil 22. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik özellikler ölçüm sisteminin şematik görünümü

Şekilde gösterilen Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik özellikler ölçüm sisteminin teknik detayları Tablo 2’de sunulmaktadır. Bu sistem, yüksek hızlı Maglev uygulamalarına yönelik olarak hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinin dinamik koşullarda hassas biçimde ölçülebilmesini sağlayacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Dairesel formdaki alüminyum ray yapısı, yüksek devirle döndürülerek doğrusal hıza dönüştürülebilmekte ve böylece 300 km/sa üzeri hızlarda levitasyon koşulları deneysel olarak simüle edilebilmektedir.

Tablo 2. PM-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi teknik özellikleri

Parametre	Değer
Dairesel rayın çapı	1000 mm
Maksimum dönüş hızı	1658 rpm
Maksimum lineer hız	320 km/sa
Maksimum düşey kuvvet	2200 N
Maksimum düşey kuvvet hassasiyeti	± 1 N
Maksimum yanal kuvvet	1100 N
Maksimum yatay kuvvet hassasiyeti	$\pm 0,5$ N
Maksimum düşey hareket mesafesi	220 mm
Maksimum yatay hareket mesafesi	60 mm
Konum sensörünün maksimum düşey ölçüm aralığı	1350 mm
Konum sensörünün maksimum yatay ölçüm aralığı	1350 mm
Konum hassasiyeti	0,05 mm
Titreşim ölçüm aralığı	± 50 g
Titreşim ölçüm hassasiyeti	100 mV/g

Tez kapsamında geliştirilen EDL Maglev test prototipinin üretim süreci hem sistemin işlevsel gereksinimlerini karşılayacak hem de deneysel ölçümlerde yüksek hassasiyet sağlayacak şekilde planlanmıştır. Bu doğrultuda, kullanılan malzemeler [Tablo 1’de](#) belirtilen teknik gereklilikler ve deneysel ihtiyaçlar doğrultusunda belirlenmiştir. [Tablo 2’de](#) ayrıntılı olarak sunulan malzeme listesi, prototipin performans testlerinde levitasyon, sürüklenme kuvveti ve kaldırma-sürüklenme oranı gibi parametrelerin doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesine imkân tanıyan temel bileşenleri içermektedir. Sistem, düşey ve yatay

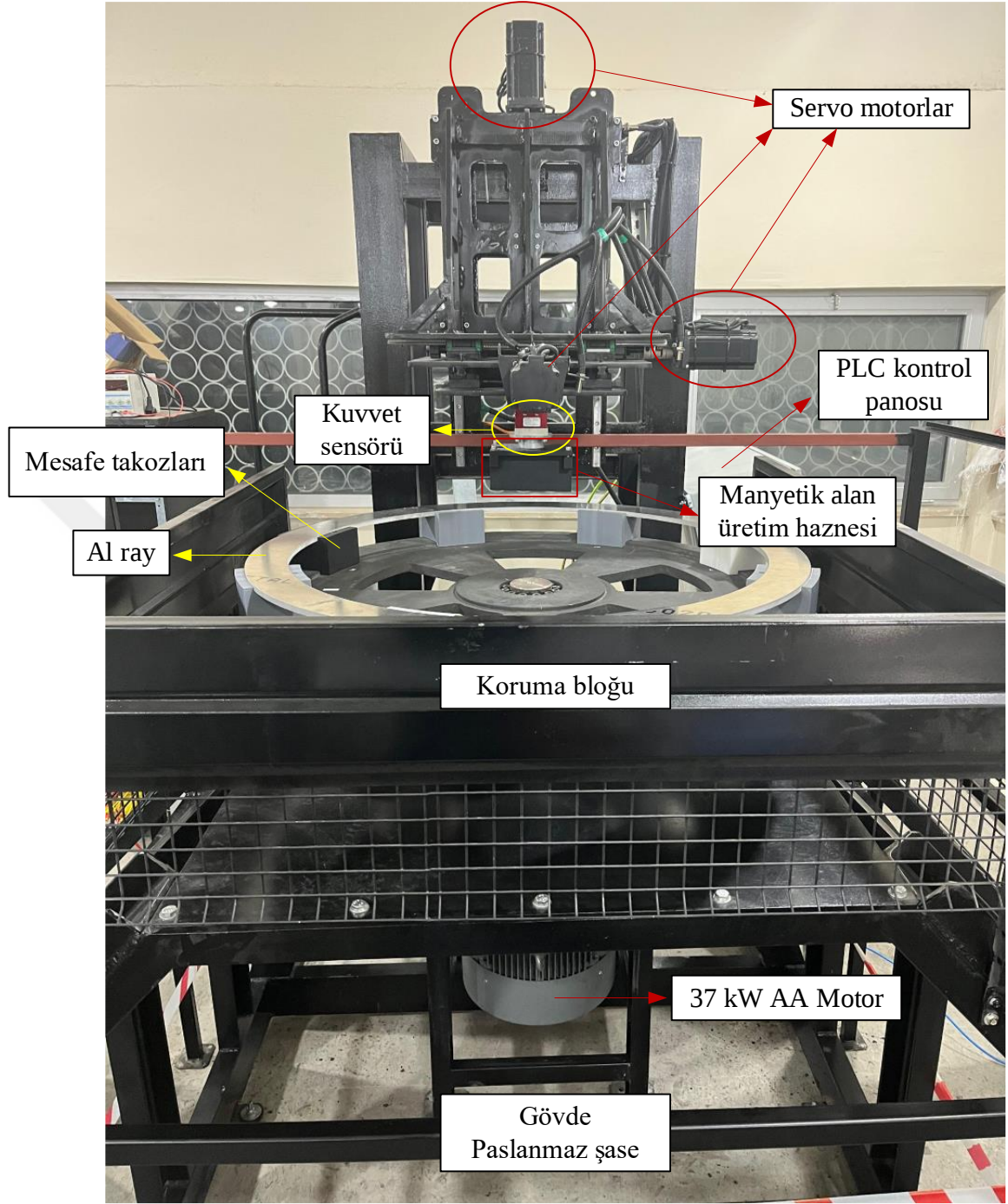
eksenlerde eşzamanlı kuvvet ölçümü yapabilen çok eksenli sensör yapısı, yüksek hassasiyetli konum ve titreşim algılama birimleri ile donatılmıştır. Konum ve hız ölçümleri, sistemin levitasyon kararlılığı ve dinamik tepkilerini ayrıntılı olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, tüm donanım bileşenleri SCADA tabanlı kullanıcı arayüzü üzerinden kontrol edilmekte olup, PLC (Delta AS300) temelli birimlerle veri toplama, gerçek zamanlı izleme ve sistem güvenliği sağlanmaktadır. Bu seçimler, sistemin hem nümerik simülasyonlarla uyumlu hem de deneysel doğrulamalara elverişli olmasını sağlamıştır.

Tablo 3. PM-HTS Maglev dinamik ölçüm prototipi kullanılan malzeme listesi

Malzeme	Özellikler	Kullanım Alanı
Alüminyum Ray	Farklı kalınlıklarda, yüksek iletkenlik	Alüminyum Ray
Servo motor	15,9 Nm tork, 5 kW güç	Manyetik alan kaynağı ünitesinin yatay x, y ve düşey z-eksenlerindeki hareketinin sağlanmasında kullanılabilir
Sürücü DC motor	3000 rpm, 37 kW, 380 V (Trifaze)	Alüminyum ray için yüksek hızlı dairesel hareketi sağlamada kullanılacak
Futek MTA400 Sensörler	3-eksenli kuvvet sensörü	Üç eksen, aynı anda yüksek hassasiyette manyetik kuvvet ölçümünde kullanılacak
Futek IAA100 Amplifier	-	Yük hücresinden (load cell) alınan kuvvet veri sinyallerinin güçlendirilmesinde kullanılacak
Yüksek akım DA güç kaynağı	Giriş: 220/380 V Çıkış: 340 A, 10 V	Bakır ve HTS bobin uygulamasında kullanılacak
Nd-Fe-B Kalıcı Mıknatıslar	40×20×20 mm ³ boyutlarında, 0,5 T yüzey alanı	PMA
Külçe YBCO HTS	65×34×13 mm ³ boyutlarında	Manyetik alan kaynağı
HTS Şeritler	0,1 mm kalınlık, 12 mm genişlik, 2G YBCO	Manyetik alan kaynağı olarak HTS bobinlerin üretiminde kullanılacak

Bu tablo, alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm prototipinin tasarım ve üretiminde ihtiyaç duyulan malzemeleri, özelliklerini ve kullanım alanlarını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu malzemeler, prototipin yüksek hassasiyetle çalışmasını sağlamak, manyetik alan kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmak ve dinamik ölçüm sisteminin güvenilirliği ile verimliliğini artırmak amacıyla titizlikle seçilmiştir.

Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen ve belirtilen teknik özellikler doğrultusunda imalatı tamamlanan HTS-Alüminyum raylı Maglev dinamik ölçüm prototipi hem tasarım süreçlerinin doğruluğunu hem de teorik yaklaşımların deneysel olarak test edilebilirliğini ortaya koyması açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 23' te, HTS-Alüminyum raylı Maglev dinamik ölçüm prototipinin genel görünümü sunulmaktadır.



Şekil 23. HTS-Alüminyum raylı Maglev dinamik ölçüm prototipinin genel görünümü

Bu görsel, prototipin fiziksel yapısı, bileşenlerin yerleşimi ve sistemin çalışma prensiplerine ilişkin genel bir fikir sunmaktadır. Prototipin tasarımında kullanılan paslanmaz malzemeler, sistemin dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırmayı amaçlamaktadır. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemindeki yüksek hızlı dairesel hareketin sağlanması için GAMAK marka, 37 kW gücünde, 1500 devir/dakika hızında çalışan ve 380

V ile beslenen bir sürücü motor tercih edilmiştir. Bu motor, frekans konvertörü kullanılarak farklı hızlarda dönecek şekilde kontrol edilmekte ve volanın hareketini sağlamaktadır. Motorun sürülmesi için VFD370CP4EB-21 DELTA CP2000 inverter motor sürücü kullanılmış olup, motorun sisteme entegrasyonu tarafımızca başarı ile gerçekleştirilmiş ve sürücü bağlantıları yapılmıştır.

Dinamik ölçüm sistemi içerisinde sürücü motorun çalışması sırasında oluşabilecek titreşimleri minimize etmek amacıyla, motor ana şaseden ayrı bir montaj düzenine yerleştirilmiştir. Ayrıca sürücü motor ile volan arasındaki bağlantı, kayış-kasnak sistemiyle sağlanarak direkt temas önlenmiş ve böylece titreşim seviyesi en aza indirilmiştir. Volanın tasarımında ağırlığın optimize edilmesi ve sürücü motor performansının artırılması amacıyla, orta kısımlar dengeli bir şekilde boşaltılmış ve balans özellikleri dikkate alınmıştır. Dairesel hareket sırasında güvenliği sağlamak için volanın etrafına bir koruma bloğu eklenmiştir.

Sistemin manyetik üretim haznesinin montaj edileceği bölüm, dinamik ölçüm sisteminde kritik bir bileşen olarak tasarlanmıştır. Bu bölümde, manyetik kuvvet sensörünün montajı da gerçekleştirilmiştir. Manyetik üretim haznesinin x, y ve z eksenlerinde hareket etmesini sağlamak için üç farklı servo motor kullanılmıştır. Servo motorların hareketlerini hassas bir şekilde kontrol etmek için CWDS86C enkoderli step motor sürücüleri tercih edilmiştir. Bu sürücüler, motorların pozisyonlarını gerçek zamanlı izleme ve herhangi bir kayma veya pozisyon hatasını düzeltme yeteneği sağlayarak sistemin yüksek hassasiyetle çalışmasını mümkün kılmaktadır. CWDS86C sürücüsünün başlıca özellikleri arasında kapalı döngü kontrolü, yüksek tork ve hız, hızlı tepki ve sıfır hız kararlılığı bulunmaktadır.

Kuvvet verilerinin yüksek hassasiyetle alınabilmesi için sisteme, ± 1 N düşey ve $\pm 0,5$ N yanal kuvvet hassasiyetine sahip, düşeyde maksimum 2200 N, yatayda ise maksimum 1100 N ölçüm kapasitesine sahip FUTEK MTA400 kuvvet sensörü monte edilmiştir. Bu sensör, dinamik ölçüm sisteminde doğruluk ve güvenilirlik sağlamaktadır.

Bu entegre tasarım deneysel çalışmalarda sistemin performansını en üst düzeye çıkaracak şekilde geliştirilmiş olup, alüminyum raylı-HTS Maglev sistemlerinin ileri düzey analiz ve uygulamalarında kullanılmak üzere optimize edilmiştir.

2.3.2. Dinamik Kuvvet Ölçüm Sistemi için PLC ve SCADA Tabanlı Veri Toplama ve Kontrol Mekanizmalarının Oluşturulması

Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen HTS-Alüminyum raylı Maglev dinamik ölçüm sisteminin etkin bir şekilde çalıştırılabilmesi, veri toplama ve kontrol süreçlerinin güvenilir bir şekilde yönetilebilmesi amacıyla özgün bir PLC yazılımı ve SCADA arayüzü geliştirilmiştir. Bu sistem, ölçüm sırasında dinamik kuvvet, pozisyon ve hareket verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlamaktadır. PLC yazılımı, sistemin donanım bileşenleri ile uyumlu çalışarak motor kontrolü, sensör verilerinin işlenmesi ve güvenlik mekanizmalarının entegrasyonunu mümkün kılarken; SCADA arayüzü, kullanıcı dostu bir platform üzerinden veri analizi ve sistem parametrelerinin kolayca ayarlanabilmesini sağlamaktadır. Aşağıda, bu yazılım ve arayüz tasarım süreçleri ile ilgili detaylar sunulmaktadır.

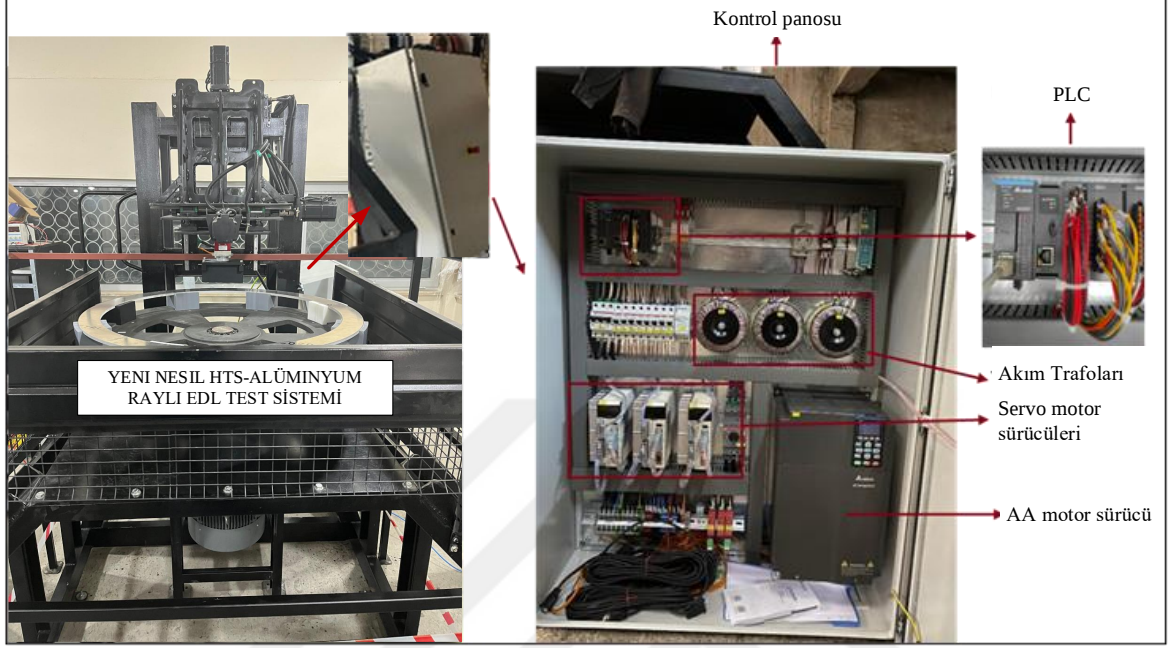
Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi, gelişmiş bir kontrol ve veri toplama altyapısına sahiptir. Bu sistemin kontrol mekanizması, Delta marka AS300 model PLC ile sağlanmıştır. Delta AS Serisi, yüksek performansı ve modüler yapısıyla öne çıkan kompakt bir PLC çözümüdür. Sistemde kullanılan PLC, 32 bit SoC işlemcisi sayesinde hızlı bir çevrim süresi (40K adım/ms) sunmakta ve 1.024 giriş/çıkış birimi desteklemektedir. Ayrıca, Ethernet ve CANopen gibi haberleşme protokollerini entegre olarak destekleyerek, sistemin farklı bileşenleri arasındaki iletişimi kolaylaştırmaktadır. PLC'nin başlıca özellikleri şunlardır:

- Program kapasitesi: 128k adım
- Veri kayıtları: 60k kelime
- Maksimum genişleme modülü desteği: 32
- Haberleşme desteği: Dahili Ethernet ve CANopen
- Puls kontrolü: Maksimum 6 eksen (200 kHz)

PLC ve SCADA tabanlı bu sistemde, Modbus TCP protokolü kullanılarak sürücü ve kontrol birimleri ile güvenilir bir haberleşme altyapısı oluşturulmuştur. SCADA arayüzü, kullanıcı dostu bir tasarımla sistem verilerinin izlenmesini ve kontrolünü sağlar. Bu yazılım, dinamik ölçüm sırasında kritik parametrelerin (kuvvet, pozisyon, hız vb.) gerçek zamanlı izlenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılmaktadır.

PLC ve SCADA altyapısının yazılım geliştirme süreçlerinde, Delta marka PLC ve sürücüler ile ABB marka şalt ürünleri temin edilmiş ve EDL test sistemine tarafımızca başarılı bir şekilde entegre edilmiştir. Sistem, sürücü motor kontrolünden servo motorların

adımlarının hassas bir şekilde izlenmesine kadar geniş bir kontrol kapasitesine sahiptir. Sistem genel hatlarıyla Şekil 24’te gösterilmiştir.



Şekil 24. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi kontrol ünitesi

2.3.3. Kuvvet, Pozisyon ve Hız Verilerinin Eşzamanlı Ölçüm ve İşlenmesi

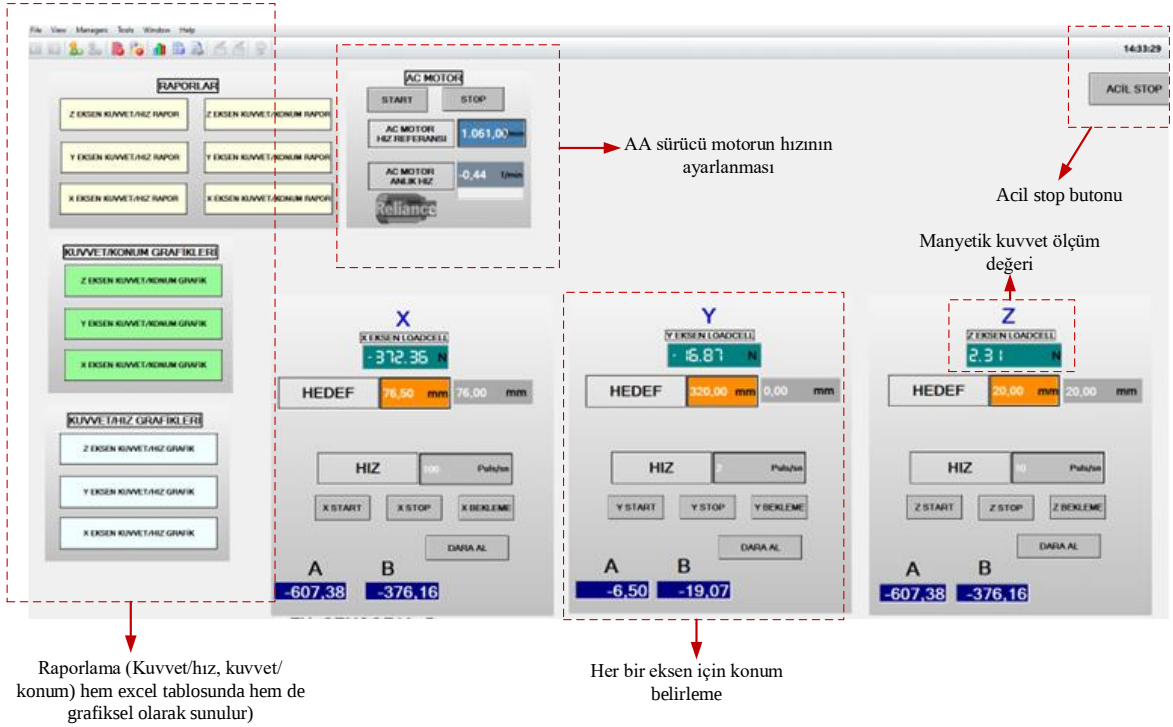
Dinamik ölçüm sisteminde, kuvvet, pozisyon ve hız gibi kritik verilerin eşzamanlı olarak toplanması ve işlenmesi için CWDS86C model enkoderli step motor sürücüsü kullanılmıştır. Bu sürücü, kapalı döngü kontrolü sağlayarak motorun konumunu gerçek zamanlı olarak izlemekte ve herhangi bir kayma veya hata durumunda anlık düzeltme yapmaktadır. Söz konusu sürücünün başlıca avantajları şunlardır:

- Yüksek tork ve hız kapasitesi
- Hızlı tepki süresi
- Sıfır hız kararlılığı
- Geniş giriş gerilim aralığı: 20-90VAC veya 30-110VDC

Dinamik ölçüm sisteminde, kuvvet ölçümleri için ± 1 N düşey ve $\pm 0,5$ N yanal hassasiyete sahip FUTEK MTA400 kuvvet sensörleri tercih edilmiştir. Bu sensörler,

düşeyde maksimum 2200 N, yatayda ise maksimum 1100 N kuvvet ölçme kapasitesine sahiptir ve yüksek doğruluk sunmaktadır.

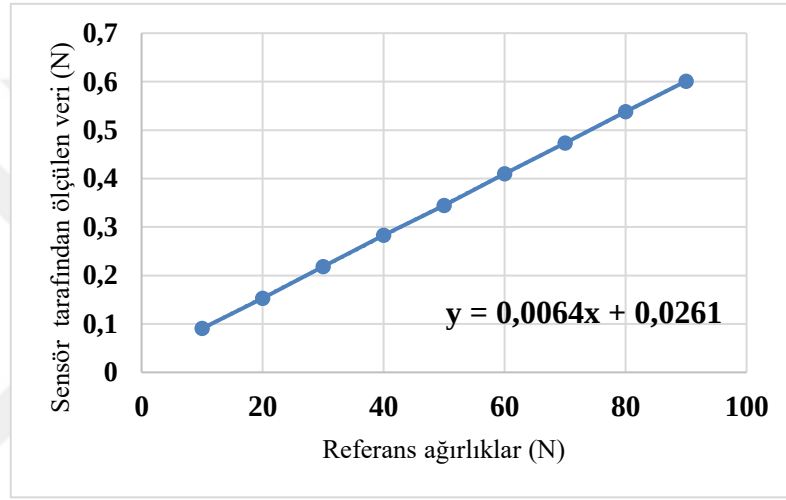
Sistem, sürücü motorun hız ve devrini kullanıcı tarafından ayarlanabilir hale getirerek deneylerde esnekliğe olanak tanımaktadır. SCADA yazılımı, elde edilen verileri görselleştirme (grafikler) ve analiz etme (rapor oluşturma) yetenekleriyle bu süreci desteklemektedir. SCADA arayüzünün kullanıcı dostu yapısı ve işlevsel özellikleri, Şekil 25'te detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 25. Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi SCADA arayüzü

Şekil 25'te sunulan Alüminyum raylı-HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi SCADA arayüzü, yüksek doğruluk ve hassasiyetle çalışan PLC ve SCADA tabanlı bir yapıya sahiptir. Bu sistem, Maglev teknolojilerinin deneysel analizleri için güçlü bir altyapı sunarak, yenilikçi ve etkili çözümler sağlamaktadır. Geliştirilen arayüz, x, y ve z eksenlerinde kuvvet ölçümleri yapabilme kapasitesine sahip olup, sistemin farklı yönlerdeki performansını detaylı bir şekilde analiz edebilme olanağı tanımaktadır. Ayrıca, sürücü motorunun hız ve devir ayarları, kullanıcı tarafından kolaylıkla değiştirilebilir bir yapıya sahiptir. Böylece, alüminyum ray yolunun hızı ayarlanabilmektedir. Bu özellik, sistemin esnekliği ve farklı deneysel senaryolara uyum sağlama kapasitesini artırmaktadır.

Test sisteminin ölçüm doğruluğunu sağlamak amacıyla, deneysel düzene uyarlanmış bir kalibrasyon uygulanmıştır. Bu çerçevede, Delta AS300 PLC yazılımı, sensörlerden gelen ham verileri uygun birim dönüşümlerinden geçirerek işlemiş ve enkoder geri bildirimi ile konum doğruluğunu teyit etmiştir. Kalibrasyon sürecinde, kuvvet sensörü çıkışlarının gerçek fiziksel büyüklüklere karşılık geldiğini doğrulamak için sertifikalı referans ağırlıklar ile takometre tarafından onaylanmış hız profilleri kullanılmıştır. Şekil 26’da, dikey (z) ekseninde ölçülen ve gerçek değerler arasındaki ilişki fonksiyonunu gösteren kuvvet kalibrasyon grafiği sunulmaktadır.



Şekil 26. Kuvvet kalibrasyon grafiği (z-ekseni)

SCADA arayüzü, elde edilen veriler doğrultusunda grafik oluşturma ve raporlama yetenekleriyle, verilerin görselleştirilmesini ve daha etkili analizlerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Geliştirilen kontrol ve veri toplama mekanizmaları, gelecekteki tasarım ve optimizasyon süreçlerine önemli katkılar sağlamakta, Maglev sistemleri için ileriye dönük gelişmelerin önünü açmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen alüminyum ray tabanlı EDL Maglev test sistemi kullanılarak gerçekleştirilen nümerik ve deneysel analizlerin sonuçları bütüncül biçimde sunulmaktadır. Çalışmalarda, kalıcı mıknatıs, HTS bloklar ve bobin temelli (HTS bobin ve bakır şerit bobin) manyetik alan kaynaklarının, farklı geometrik ve konfigürasyonlar altında sistem performansına etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Bulgular, sistematik bir yaklaşımla iki ana başlık altında sınıflandırılmıştır: Nümerik simülasyon sonuçları ve deneysel ölçüm sonuçları. İlk aşamada, farklı PM ve HTS konfigürasyonlarının ve çeşitli alüminyum ray geometrilerinin sistem üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu analizlerde, kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve LDR (Lift-to-Drag Ratio) gibi temel performans göstergeleri değerlendirilmiş; hız, hareket mesafesi ve ray geometrileri gibi değişkenlerin elektromanyetik kuvvet üretimi üzerindeki etkileri modellenmiştir.

Devam eden kısımda ise deneysel test sistemi kullanılarak farklı konfigürasyonlara ait gerçek zamanlı kuvvet ve konum ölçümleri gerçekleştirilmiştir. PM dizilimlerinin ve HTS blokların farklı hareket yüksekliği ve hız değerleri altındaki davranışları detaylı biçimde incelenmiş, deneysel bulgular nümerik analizlerle karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, HTS bobin ve bakır şerit bobinler için doğrudan kuvvet ölçümleri yapılmamakla birlikte, bu kaynakların farklı akım değerleri altında ürettikleri manyetik akı yoğunlukları deneysel olarak belirlenmiştir. Bu veriler, aktif manyetik sürüş sistemlerinin gelecekteki tasarımları açısından ön bilgi sağlamaktadır.

Bölüm sonunda, seçilmiş konfigürasyonlara ait nümerik ve deneysel bulgular karşılaştırmalı olarak ele alınmış, modelleme doğruluğu ve sistem davranışları arasındaki tutarlılık değerlendirilmiştir. Bu analizler, sistemin karakteristik elektromanyetik performansını ortaya koyarak, gelecekteki tasarım optimizasyonları için temel teknik girdileri sağlamaktadır.

3.1. Nümerik Sonuçlar

Bu bölümde, farklı manyetik alan kaynaklarının ve ray geometrilerinin alüminyum tabanlı EDL sistemleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yürütülen nümerik

simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar sistematik olarak sunulmaktadır. COMSOL Multiphysics 6.1 kullanılarak gerçekleştirilen bu simülasyonlarda, “Magnetic Fields (mf)” ve “Rotating Machinery, Magnetic (rmm)” modülleri aracılığıyla hem durağan hem de yüksek hızlı dinamik koşullarda sistemin kaldırma ve sürüklenme kuvveti profilleri detaylandırılmıştır. İlk olarak, farklı kalıcı mıknatıs dizilimlerinin boşluklu ve boşluksuz alüminyum raylarla etkileşimi modellenmiştir; ardından, çeşitli PMA topolojilerinin oluşturduğu manyetik alan dağılımlarının LDR üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Takiben, HTS yapılarının manyetik akı tuzaklama potansiyelleri ile bu yapılarla oluşturulan alüminyum ray konfigürasyonlarının elektromanyetik kuvvet üretim karakteristikleri analiz edilmiştir. Elde edilen nümerik bulgular, hem teorik modellerin doğruluğunu teyit etmekte hem de deneysel çalışmalara zemin hazırlayarak sistemin optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

3.1.1. PM ve Farklı Geometrilerdeki Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi

Bu kısımda, EDL sistemleri için farklı alüminyum ray topolojileri ve sabit mıknatıs düzenlemelerinin optimum geometrik parametrelerini belirlemek için nümerik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu nümerik simülasyon çalışmaları kapsamında, farklı alüminyum ray geometrilerinin manyetik alan dağılımı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Özellikle tam alüminyum ray (boşluksuz) ve boşluklu alüminyum ray konfigürasyonları, sabit durumda ve 100 m/sn hızında olmak üzere iki farklı senaryo altında değerlendirilmiştir.

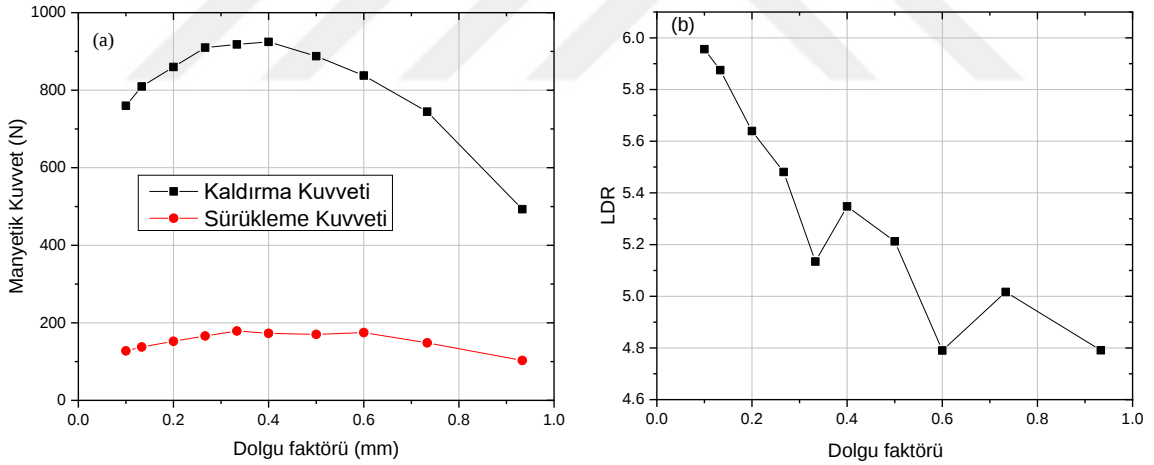
İlk olarak, tez kapsamında, COMSOL 6.1 yazılımında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen nümerik simülasyonlarda, alüminyum ray ve kalıcı mıknatıs kombinasyonları incelendikten sonra maliyet verimliliği için alüminyum raylarda boşluklar oluşturularak aynı simülasyonlar tekrarlanmıştır. İlk olarak, modellemede, optimum dolgu faktörü (γ) değeri belirlenmiştir. Dolgu faktörü, Denklem 17'de verildiği gibi yatay PM'lerin uzunluğunun (a) yarım manyetik alan kaynağı dalga boyuna (λ) oranı olarak tanımlanabilir (Şekil 18).

$$\gamma = \frac{2a}{2(a+b)} = \frac{a}{0.5\lambda} \quad (17)$$

Tablo 4'te gösterilen, farklı boyutlardaki PM'ler ve Denklem 17 kullanılarak, hesaplanan farklı dolgu faktörleri için 100 m/sn maksimum hızdaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ve ilgili LDR oranı değerleri Şekil 27'de verilmiştir.

Tablo 4. Farklı PM boyutlarına karşılık gelen dolgu faktörü değerleri

$l_{en-H_{PM}}$ (mm)	$l_{en-V_{PM}}$ (mm)	Dalga boyu, λ (mm)	Dolgu Faktörü
7.5	67.5	150	0.10
10	65	150	0.13
15	60	150	0.20
20	55	150	0.27
25	50	150	0.33
30	45	150	0.40
37.5	37.5	150	0.50
45	30	150	0.60
55	20	150	0.73

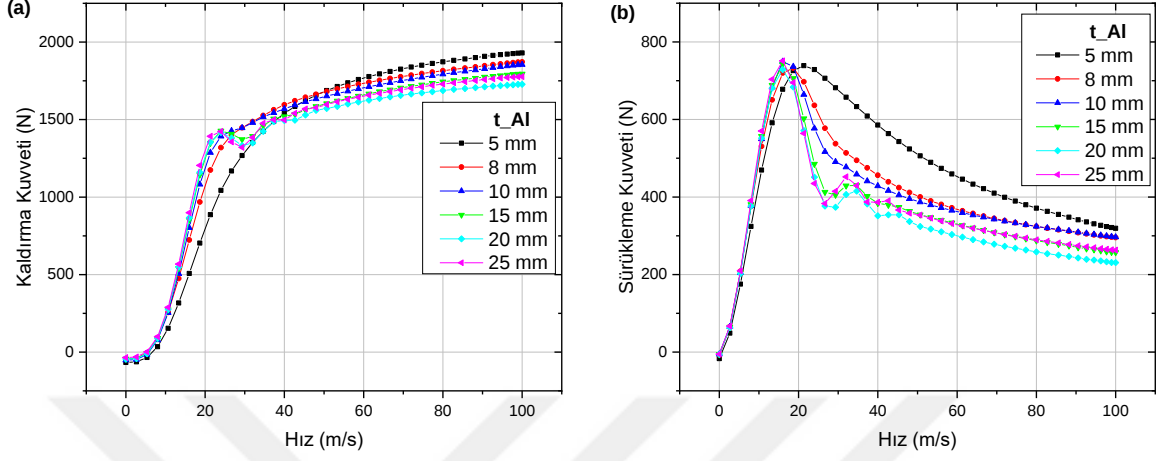


Şekil 27. 100 m/sn hızdaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve PM dizisinin doluluk faktörüne bağlı LDR oranı (b)

Buradan faydalanarak, optimum dolgu faktörü 0,40 olarak belirlenmiştir çünkü bu değerde, kaldırma kuvveti en yüksek ve sürüklenme kuvveti orta düzeydedir. Bu dolgu faktörü değeri, bu çalışmanın geri kalanındaki sayısal simülasyonlar için referans alınmıştır.

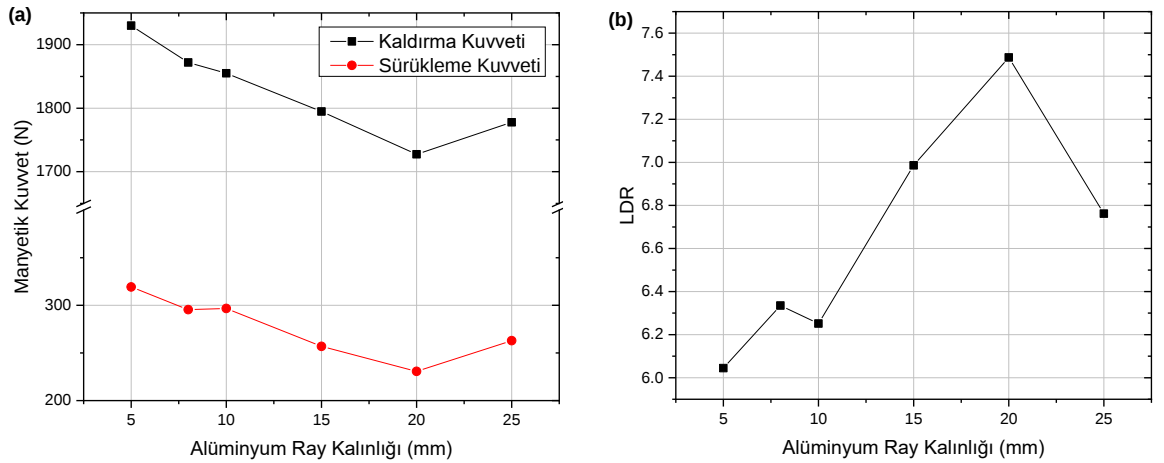
Yapılan nümerik simülasyon çalışmalarında daha sonra, alüminyum rayın optimum kalınlığını belirlemek için farklı alüminyum kalınlıkları (5, 8, 10, 15, 20 ve 25 mm) için hıza

bağlı kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. PM'ler ve farklı kalınlıktaki alüminyum raylar arasındaki kaldırma (a) ve sürüklenme (b) kuvveti eğrileri

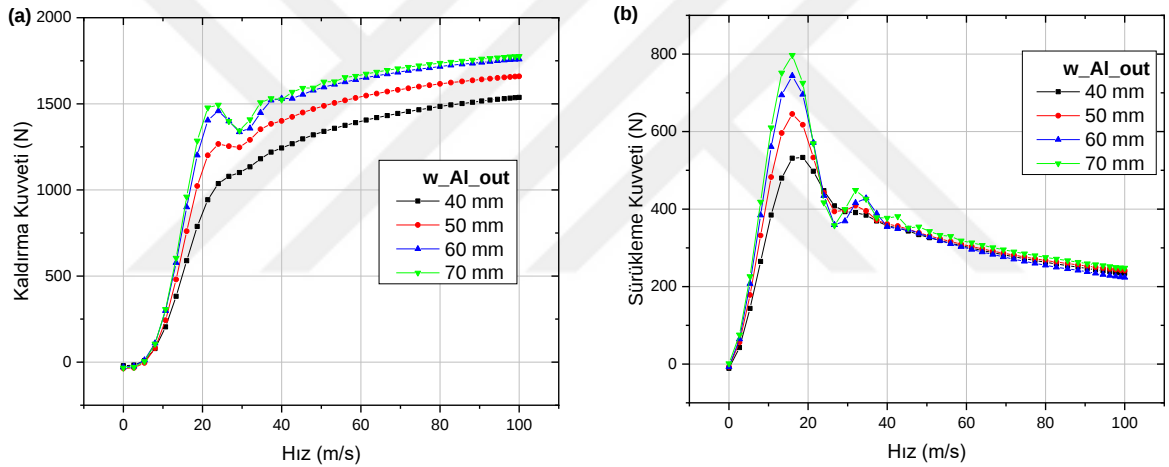
Şekil 28(a)'da görüldüğü üzere hız arttıkça ve kaldırma kuvveti artmaktadır. Ayrıca artan hız ile sürüklenme kuvveti değerinin önce arttığı sonra azaldığı Şekil 28(b)'den görülmektedir. Optimum alüminyum kalınlığının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için Şekil 28 kullanılarak manyetik kuvvet (kaldırma ve sürüklenme kuvveti) ve LDR değerlerinin alüminyum kalınlığına bağlı olarak değişimi Şekil 29'da çizilmiştir.



Şekil 29. Maksimum 100 m/sn hızdaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri (a) ve alüminyum rayın kalınlığına bağlı olarak LDR oranı (b)

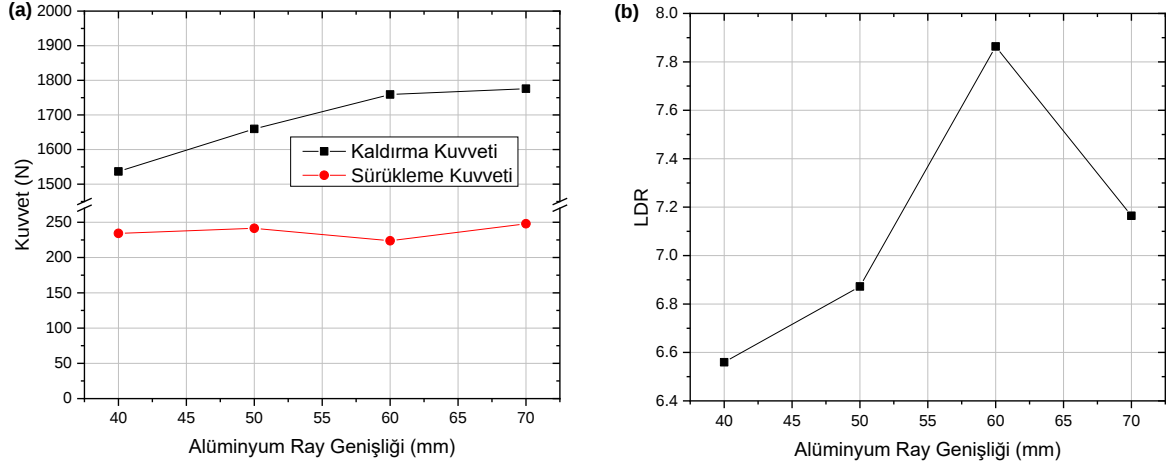
Optimum alüminyum ray kalınlığı, Şekil 29'da gösterildiği üzere, 20 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, en yüksek LDR değerine ve en düşük sürüklenme kuvveti değerine sahip olan noktayı temsil etmektedir. LDR değerlerinin ray kalınlığına bağlı değişimi, alüminyum rayın elektriksel iletkenliği (σ) ile alüminyum kalınlığı, etkileşimdeki mıknatısın dalga boyu ve kalınlığı arasındaki ilişkiye işaret etmektedir. Daha düşük sürüklenme kuvveti değeri, özellikle yüksek hızlarda seyahat sırasında ani enerji tüketiminin azaltılması açısından önemlidir, çünkü sürüklenme kuvveti, hız ve tüketilen güç $P = vF_{\text{sürüklenme}}$ denklemiyle ifade edilmektedir.

Optimum ray kalınlığının belirlenmesinin ardından, alüminyum rayın optimum genişliğini belirlemek amacıyla sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 30'da sunulmuştur.



Şekil 30. Farklı genişlikteki alüminyum ray ile kalıcı mıknatıslar arasındaki kaldırma kuvveti (a) ve sürüklenme kuvveti (b) eğrileri

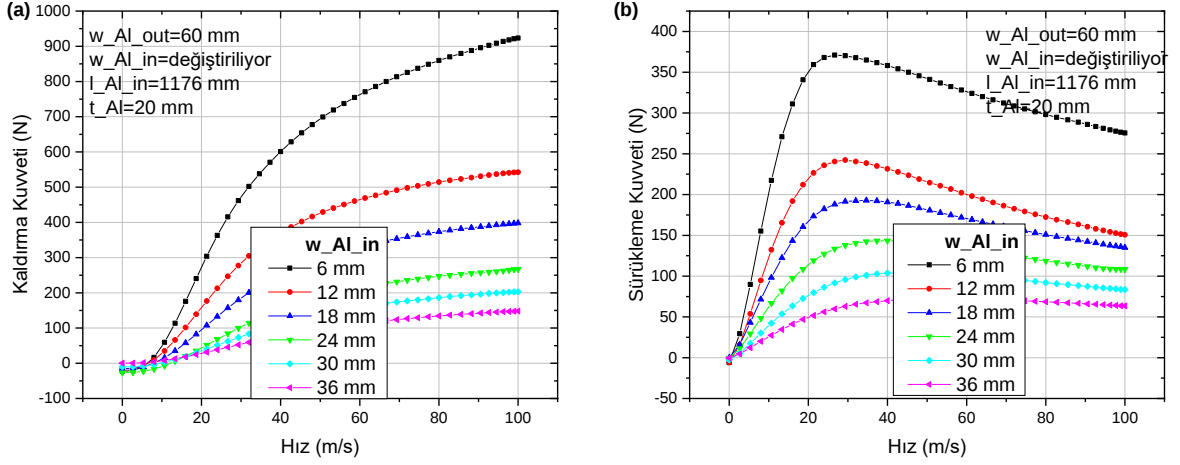
Alüminyum rayın optimum genişliğini doğru bir şekilde belirleyebilmek amacıyla, 100 m/s hızında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, manyetik kuvvet ve LDR değerlerinin alüminyum genişliğine bağlı değişimi Şekil 30 temel alınarak Şekil 31'de yeniden verilmektedir.



Şekil 31. 100 m/sn'de kaldırma ve sürüklemeye kuvvetleri (a) ile alüminyum ray genişliğine bağlı LDR oranı (b)

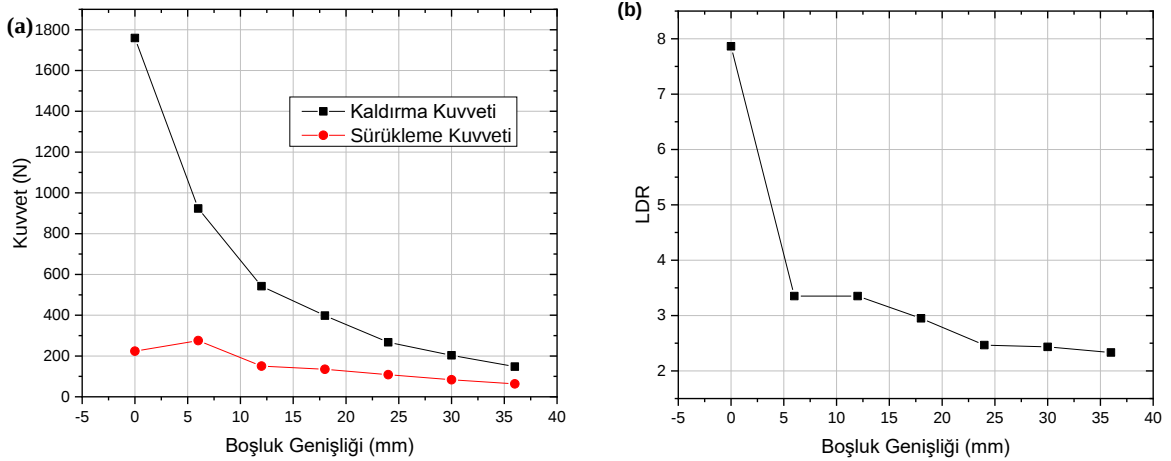
Şekil 31 değerlendirilerek, optimum ray genişliği 60 mm olduğu belirlenmiştir. Bu genişlik değeri, LDR değerinin maksimum olduğu noktayı temsil etmektedir. Bu durum, manyetik kaldırma sistemlerinin verimliliği açısından oldukça önemlidir, çünkü maksimum LDR değeri, sistemin kaldırma kuvvetini artırırken aynı zamanda sürüklemeye kuvvetini minimum seviyeye indirerek enerji verimliliğini optimize etmektedir. Belirlenen bu genişlik değeri, tezin devamında yapılan tüm simülasyonlar için temel parametre olarak kullanılacaktır.

Alüminyum levhanın optimum kalınlık ve genişlik değerlerinin belirlenmesinden sonra, sistemin maliyetini azaltmaya yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu kapsamda, alüminyum levha üzerinde çeşitli boyutlarda boşluklar oluşturulması önerilmiştir. Bu boşluklar, alüminyum malzeme kullanımını azaltarak hem üretim maliyetlerini düşürmeyi hem de sistem ağırlığını azaltmayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra, boşlukların manyetik kuvvetler üzerindeki etkisi değerlendirilerek performansın kabul edilebilir düzeyde tutulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, farklı uzunluk ve genişliklerde boşluklara sahip alüminyum levhalar üzerinde sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, boşluklu alüminyum levhalar için kaldırma ve sürüklemeye kuvvetleri analiz edilmiştir. Bu analizlerde, boşluklu alüminyumun (bkz. Şekil 18(b)) iç genişlik değerleri (w_{AL_in}) 6 mm, 12 mm, 18 mm, 24 mm, 30 mm ve 36 mm olacak şekilde seçilmiştir. Her bir genişlik için elde edilen kaldırma ve sürüklemeye kuvveti verileri, sistemin performansı üzerindeki etkilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla Şekil 32'de görselleştirilmiştir.



Şekil 32. Kalıcı mıknatıslar ile farklı iç genişliklerde boşluklara sahip alüminyum ray arasındaki kaldırma kuvveti (a) ve sürüklemeye kuvveti (b) grafikleri

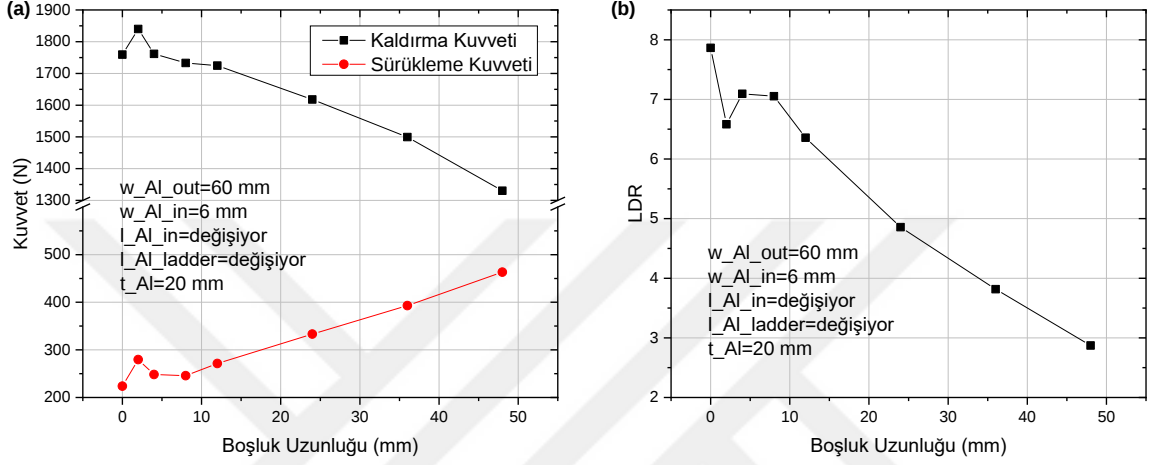
Burada, boşluğun uzunluğu (l_{Al_in}), toplam ray uzunluğunun %98'ine karşılık gelen 1176 mm olarak tasarlanmış ve bu parametre, yapılan analizlerde esas alınmıştır. Bu tasarım, boşlukların ray performansı üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bulguların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak adına, Şekil 33'te boşluk genişliğinin manyetik kuvvet ve LDR üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz, Şekil 32'den elde edilen veriler temel alınarak ve 100 m/sn hızında gerçekleştirilmiştir.



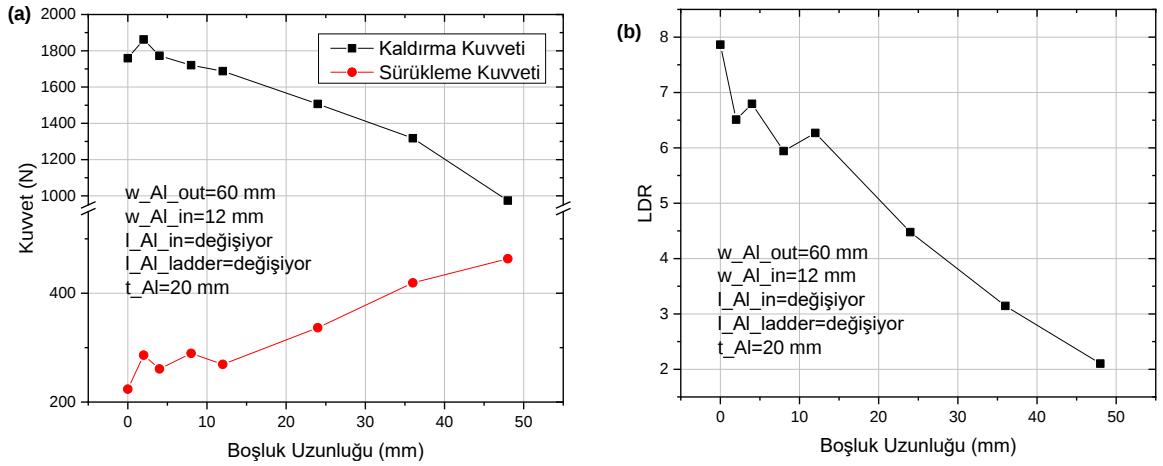
Şekil 33. 100 m/sn'de alüminyum raydaki boşluğun genişliğine (w_{Al_in}) bağlı kaldırma-sürüklemeye kuvveti (a) ve LDR oranı (b)

Şekil 33'teki sonuçlara dayanarak, daha doğru bir karşılaştırma yapmak ve PM-EDL sistemleri açısından yüksek performans ve düşük maliyet elde etmek amacıyla 6 mm, 12 mm

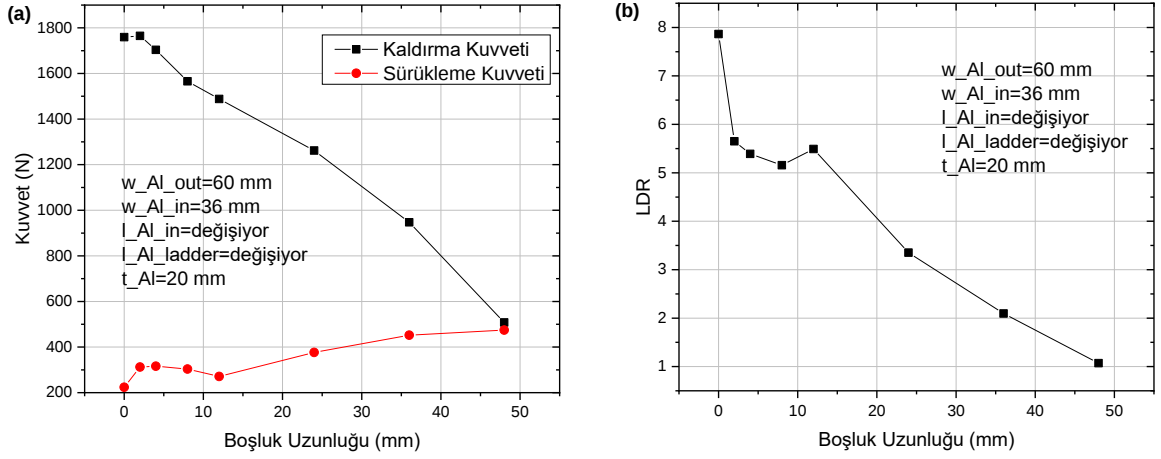
ve 36 mm olmak üzere üç değer seçilerek ek ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde, merdiven tipi (ladder) boşlukların birim uzunluğu (l_{Al_ladder}) 60 mm olarak sabitlenmiştir. Ardından, alüminyum ray üzerindeki boşlukların optimum uzunluklarını (l_{Al_in}) belirlemek için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 34-36'da alüminyum ray üzerinde farklı hacimlerde oluşturulan boşluklar için elde edilen manyetik kuvvet ve LDR değerleri sunulmuştur.



Şekil 34. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %10'una karşılık gelen 6 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürüklemeye kuvvetleri (a) ve LDR oranı

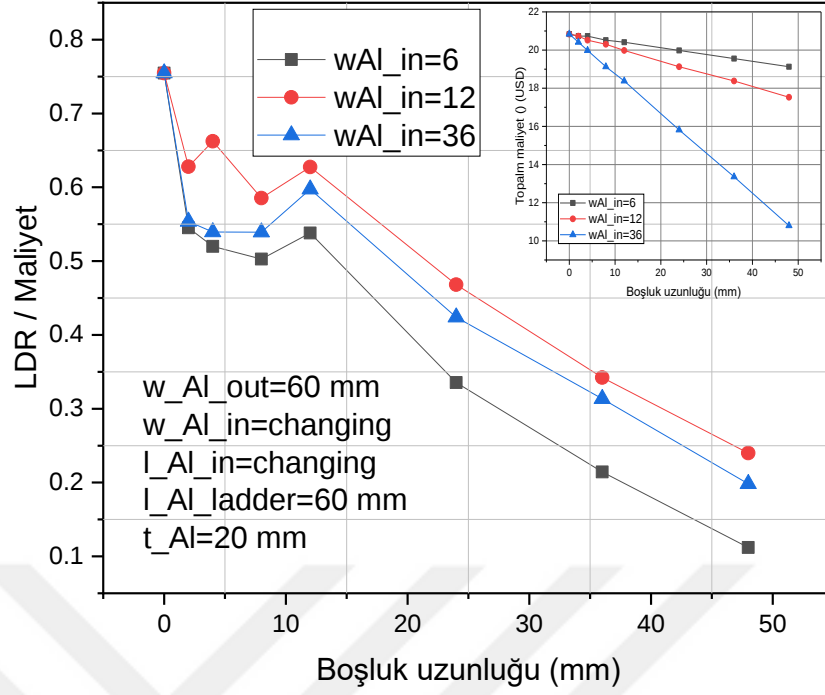


Şekil 35. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %20'sine karşılık gelen 12 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürüklemeye kuvvetleri (a) ve LDR oranı



Şekil 36. Maksimum 100 m/sn hızında, boşluk genişliği toplam ray genişliğinin %60'sine karşılık gelen 36 mm olan alüminyum rayda, boşluk uzunluğuna bağlı kaldırma ve sürükleme kuvvetleri (a) ve LDR oranı

Şekil 34-36 birlikte incelendiğinde, boşluk uzunluğu (l_{Al_in}) 2 mm olduğunda sürükleme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Bu durum, boşluk uzunluğunun sistem üzerinde ek bir direnç oluşturduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak, LDR değerinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili şekiller analiz edildiğinde, boşluk uzunluğunun 12 mm olduğu durumda, boşluk miktarı artmasına rağmen, LDR değerinin önceki değerlere göre yükseldiği görülmektedir. Bu grafiklerdeki veriler kullanılarak her topoloji için maliyet hesaplanmış ve Şekil 37 oluşturulmuştur. Bu şekil, boşluk uzunluğuna bağlı olarak LDR/maliyet oranının değişimini göstermektedir. Buradaki amaç, PM manyetik alan kaynağına sahip EDL sistemlerinde düşük maliyetle yüksek kaldırma performansı elde etmektir.



Şekil 37. Alüminyum rayın farklı boşluk genişlikleri için boşluk uzunluğuna bağlı LDR/maliyet oranı

LDR/maliyet oranı, boşluklu alüminyum rayın ilgili uzunluğu için LDR değerinin, 1,2 m uzunluğundaki alüminyum rayın (farklı hacimlerdeki topolojilerle) maliyetine bölünmesiyle elde edilmiştir. Maliyet hesaplamalarında, 1 kg alüminyum külçe fiyatı 2.67 USD olarak alınmıştır (*Aluminium PRICE Today | Aluminium Spot Price Chart | Live Price of Aluminium per Ounce | Markets Insider* 2025). Şekil 37 incelendiğinde:

- Boşluk genişliği (w_{Al_in}) 12 mm olduğunda, tüm boşluk uzunlukları için LDR/maliyet oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- w_{Al_in} 36 mm olduğu durum analiz edildiğinde, (l_{Al_in}) 12 mm noktasındaki LDR/maliyet oranının diğer (l_{Al_in}) değerlerinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Boşluk bulunmayan ($w_{Al_in} = 0$) 1000 km çift şeritli bir alüminyum rayın maliyeti 17,34 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Boşluk uzunluğu 12 mm olduğunda, çıkarılan alüminyum miktarı nedeniyle sağlanan tasarruf:

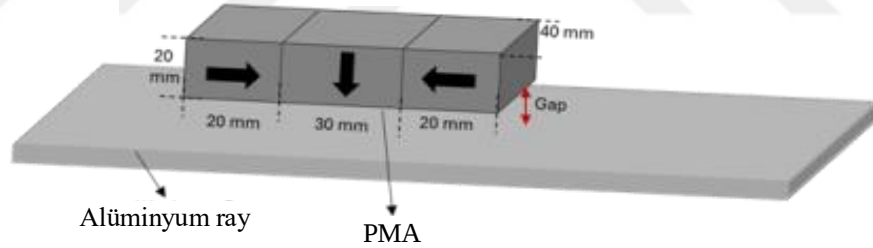
- $w_{Al_in} = 12$ mm için 834 bin dolar,
- $w_{Al_in} = 36$ mm için yaklaşık 2,44 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, LDR/maliyet oranı $w_{Al_in} = 12$ mm için daha yüksek görünse de, tasarruf edilen maliyet göz önüne alındığında, $w_{Al_in} = 36$ mm ve $l_{Al_in} = 12$ mm durumunun PM-EDL sistemleri için daha uygun olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmalar, manyetik kaldırma sistemlerinde hem ekonomik hem de teknik açıdan optimum tasarımların geliştirilmesine yönelik önemli bir adım sunmaktadır. Boşlukların alüminyum levhanın kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri üzerindeki etkileri, sistem performansı ile maliyet arasındaki dengeyi anlamak için detaylı olarak incelenmiştir.

3.1.2. PM-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi

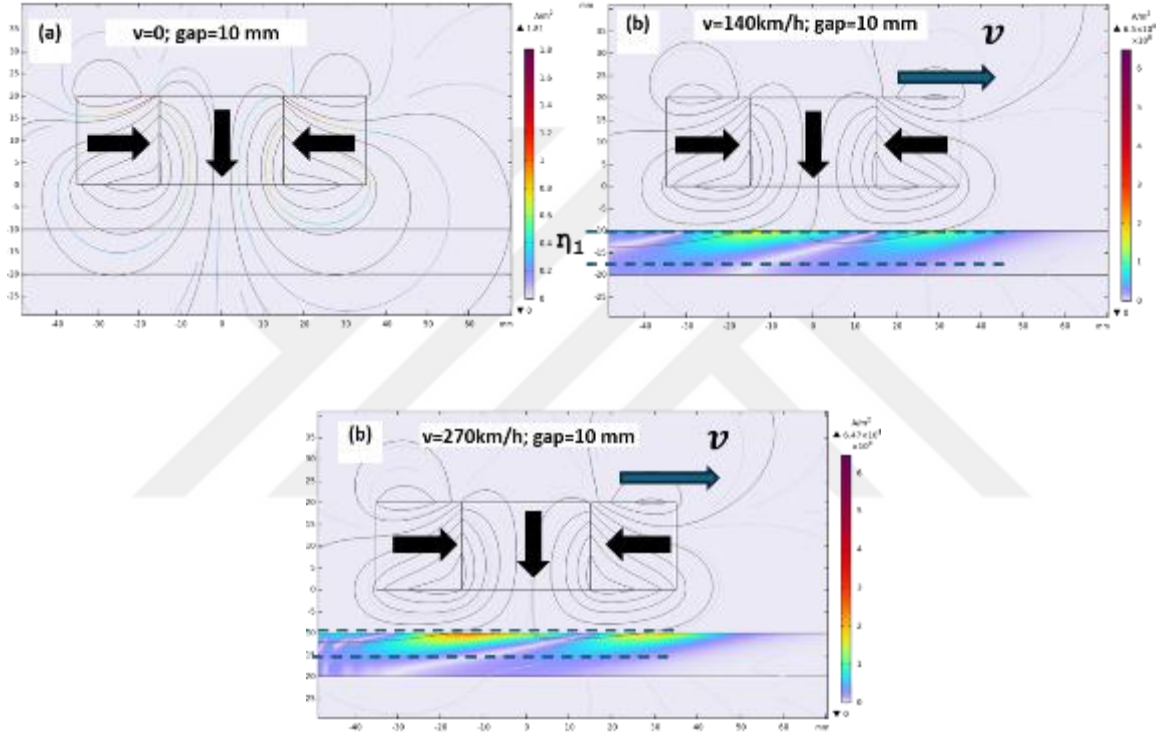
Bu kısımda, 2.2.2 başlığında verilen PM-Alüminyum ray topolojileri için elde edilen nümerik analiz sonuçları yer almaktadır. Bu kapsamda Şekil 38’de gösterilen PMA-alüminyum ray topolojisi tasarlanmış ve sistematik olarak test edilmiştir. Alüminyum ray kalınlığı 10 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 38. PMA-Alüminyum ray topolojisi için tasarlanan PM konfigürasyonu

Nümerik çalışmalar, COMSOL Multiphysics 6.1 yazılımı kullanılarak “Magnetic Fields (mf)” fizik arayüzünde gerçekleştirilmiş olup, analizlerde hareketli taşıyıcının 270 km/sa lineer hızda ilerlediği kabul edilmiştir. Manyetik alan kaynakları olarak neodimyum tabanlı NdFeB mıknatıslar kullanılmış ve taşıyıcı-alt sistem ile ray arasındaki etkileşim üç farklı çalışma yüksekliğinde (10 mm, 12 mm ve 15 mm) için modellenmiştir. Simülasyonlarda girdap akımı kaynaklı kuvvet bileşenleri, Lorentz kuvvet yasası $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ temel alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen kuvvet değerleri, sistemin kaldırma kapasitesini ve hareket yönündeki enerji kayıplarını temsil eden parametreler olarak değerlendirilmiştir.

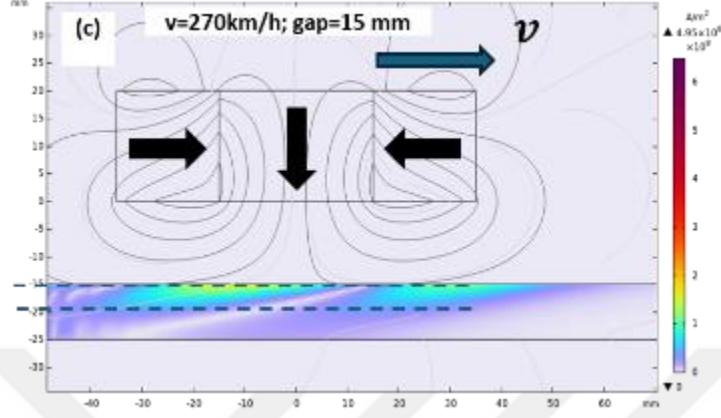
Bu kapsamda, ilk olarak, Şekil 38’de gösterilen topolojiye ait elektromanyetik alan davranışı detaylı biçimde analiz edilmiştir. COMSOL Multiphysics ortamında yürütülen bu analizlerde, sistemin hem kararlı durumda ($v = 0$) hem de 270 km/sa lineer hızda çalıştığı dinamik durumda oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımları (akı çizgileri) ve girdap akımı kaynaklı akım yoğunluğu dağılımları elde edilmiştir. Şekil 39’da sunulan bu dağılımlar, taşıyıcı-alt sistem ile alüminyum ray arasındaki elektromanyetik etkileşimin hareket yüksekliği mesafesine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.



Şekil 39. PMA-alüminyum ray topolojisi için 10 mm hareket yüksekliğinde elde edilen manyetik akı yoğunluğu (akı çizgileri) ve akım yoğunluğu dağılımları: Durağan ($v=0$) durumda (a), 140 km/sa hızda (b), 270 km/sa hızda (c)

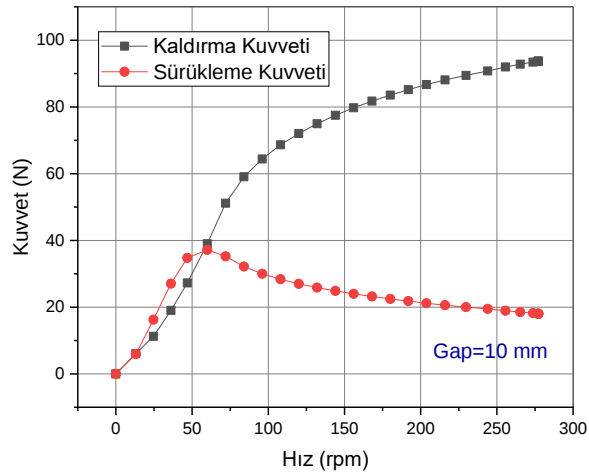
10 mm hareket yüksekliğinde, PMA diziliminin oluşturduğu manyetik akı çizgilerinin iletken ray yüzeyine, hız arttıkça, daha yoğun ve sık şekilde yönlendiği, dolayısıyla daha yüksek bir manyetik bağlanma etkisi yarattığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ray içerisinde daha yoğun ve sınırlandırılmış bir girdap akımı üretimiyle sonuçlanmakta, bu da kaldırma kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, Şekil 40’ta gösterilen 15 mm düşey hareket mesafesinde ise manyetik akı çizgilerinin ray yüzeyine olan nüfuz derinliği azalmış, manyetik bağlanma zayıflamış ve dolayısıyla indüklenen akım yoğunluklarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Dinamik durumda elde edilen sonuçlar, sistem hızlandıkça akı

izgilerinde öne doğru bir eğilme ve girdap akımlarında asimetrik bir dağılım oluştuğunu da ortaya koymakta olup, bu etkileşim sürükleme kuvveti bileşenlerinin fiziksel kökenini açıklamada önemli bir gösterge olmuştur.

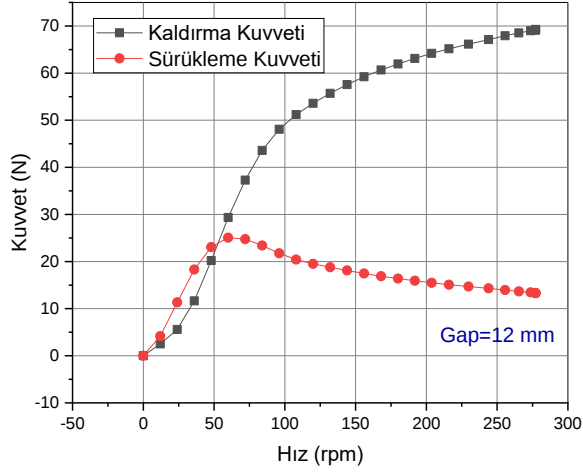


şekil 40. PMA-alminym ray topolojisi için 15 mm hareket yüksekliği ve 270 km/sa hızda elde edilen manyetik akı yoğunluğu (akı çizgileri) ve akım yoğunluğu dağılımları

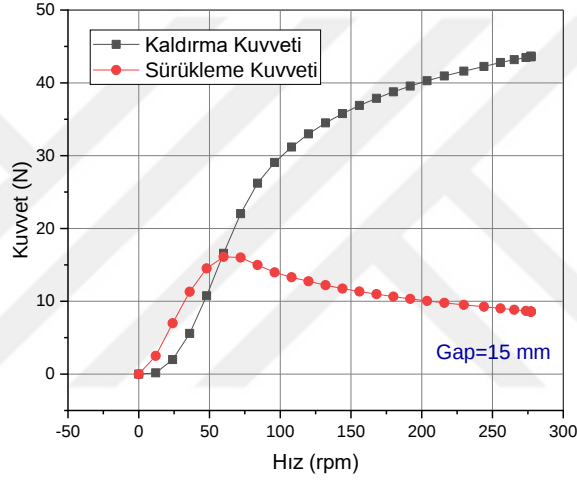
Daha sonra, şekil 38’de gösterilen topolojiye ait kuvvet değerlerini belirlemek için yapılan analizlerin sonuçları, yani bu konfigürasyon için elde edilen kaldırma ve sürükleme kuvvetleri şekil 41’de sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)

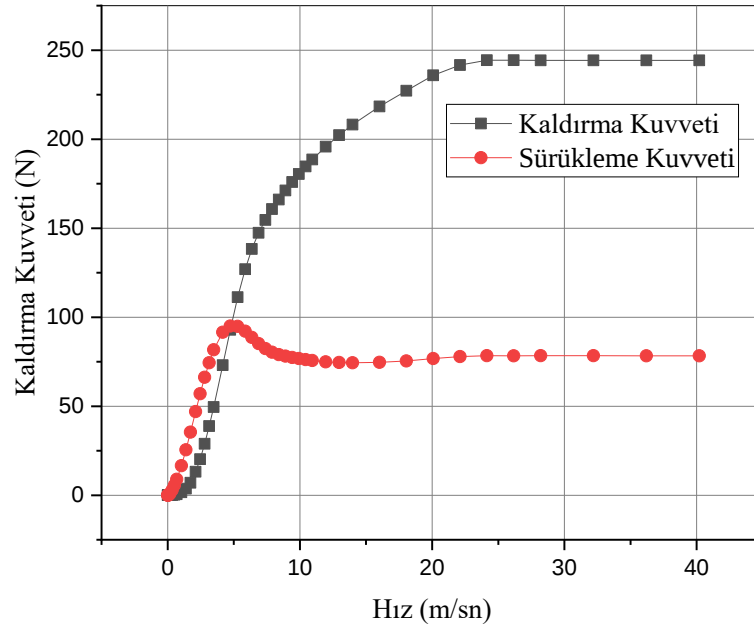
Şekil 41. PMA-Alüminyum ray topolojisi için nümerik simülasyonlar sonucunda elde edilen manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

10 mm hareket yüksekliğinde ile 85 N kaldırma ve 20 N sürüklenme kuvveti, 12 mm hareket yüksekliğinde ile 70 N kaldırma ve 12 N sürüklenme kuvveti, 15 mm hareket yüksekliğinde ile ise 43 N kaldırma ve 9 N sürüklenme kuvveti elde edilmiştir. Bu bulgular, hareket yüksekliğinin artmasıyla birlikte hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinde belirgin bir azalma meydana geldiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle kaldırma kuvvetindeki düşüş oranı, sistemin manyetik alan yoğunluğu ile ray üzerindeki etkileşim alanı arasındaki ilişkinin mesafeye bağlı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, sürüklenme kuvvetindeki azalma, düşey mesafeye bağlı olarak manyetik alanın Denklem 9'da ifade edildiği gibi B_z , B_y bileşenlerinin ve iletken ray içerisindeki girdap akımlarının

zayıflaması ile ilişkilendirilebilir. Bu sonuçlar, düşük açıklık mesafelerinde daha yüksek kaldırma kapasitesi sağlanabileceğini ancak bu durumun aynı zamanda daha yüksek sürüklenme kuvveti ve dolayısıyla daha fazla enerji kaybı ile sonuçlanabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, sistemin LDR performansının hareket yüksekliğine bağlı olarak optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu oranın analizi, yalnızca kaldırma kuvvetinin büyüklüğünü değil, aynı zamanda bu kuvvetin elde edilmesi sırasında oluşan sürüklenme kayıplarını da dikkate alarak sistemin genel verimliliğini ortaya koymaktadır.

Bu bölümde, ilave olarak 5 mm hareket yüksekliği için de nümerik simülasyon gerçekleştirilmiş ve bu yükseklikte sistemin elektromanyetik kuvvet üretimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 5 mm gibi düşük hareket yüksekliklerinde yüksek kaldırma kuvvetlerinin oluşması beklenir; ancak bu yükseklik seviyesinde deneysel ölçüm yapmak, hem manyetik kaynakların ray yüzeyine çok yakın olması hem de sistemin yüksek hızda stabil çalışmasının zorlaşması nedeniyle oldukça güçtür. Bu nedenle, bu yükseklik için deneysel çalışmalardan ziyade sadece sonlu elemanlar yöntemiyle yürütülen nümerik analizlerden elde edilen veriler dikkate alınmıştır.

Şekil 42’de, PMA–alüminyum ray konfigürasyonu için 5 mm hareket yüksekliğinde gerçekleştirilen nümerik simülasyonlar sonucunda elde edilen manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin, hareket hızına bağlı değişimi sunulmaktadır.



Şekil 42. PMA-Alüminyum ray topolojisi için 5 mm hareket yüksekliğinde elde edilen manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Grafik incelendiğinde, özellikle düşük hızlarda dahi kaldırma kuvvetinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı; ancak buna karşılık sürüklenme kuvvetinin de göreceli olarak arttığı görülmektedir. Bu durum, levitasyon açısından avantajlı görünse de sürüklenme kuvvetinin artması nedeniyle enerji verimliliği açısından sistem tasarımında dikkatli bir optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir.

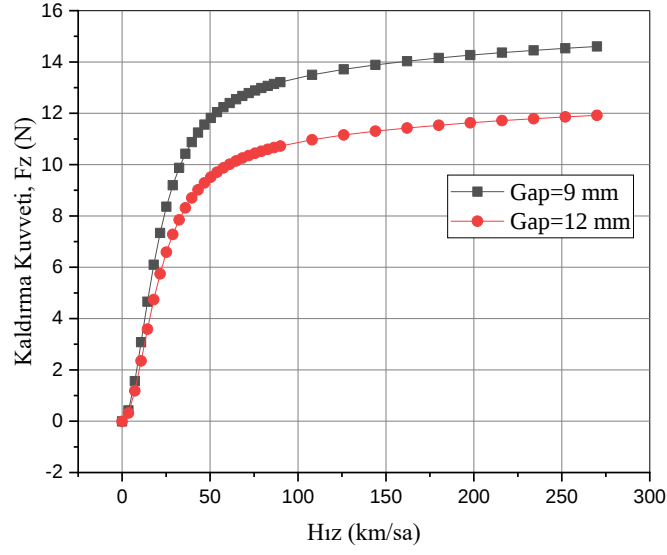
Ayrıca, düşük açıklıkta elde edilen bu yüksek kaldırma kuvveti, EDL sistemlerinde düşey hareket mesafesi ile kaldırma kuvveti arasındaki ters orantılı ilişkiyi de açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, gerçek uygulamalarda 5 mm gibi düşük hareket seviyeleri, yapısal toleranslar, mekanik güvenlik ve sistemin dinamik kararlılığı açısından tercih edilmemektedir. Bu nedenle, literatürde ve endüstriyel Maglev sistemlerde genellikle 10 mm ve üzeri hareket yükseklikleri tercih edilmelidir.

Bu analizle birlikte, sistemin hareket mesafesine duyarlılığı daha geniş bir perspektifte değerlendirilmiş; düşük hareket seviyelerinde oluşan yüksek kaldırma potansiyelinin sınırları nümerik olarak ortaya konmuştur.

3.1.3. HTS-Alüminyum Ray Konfigürasyonlarının Nümerik Simülasyonlar ile EDL Sistemlerindeki Performansının Belirlenmesi

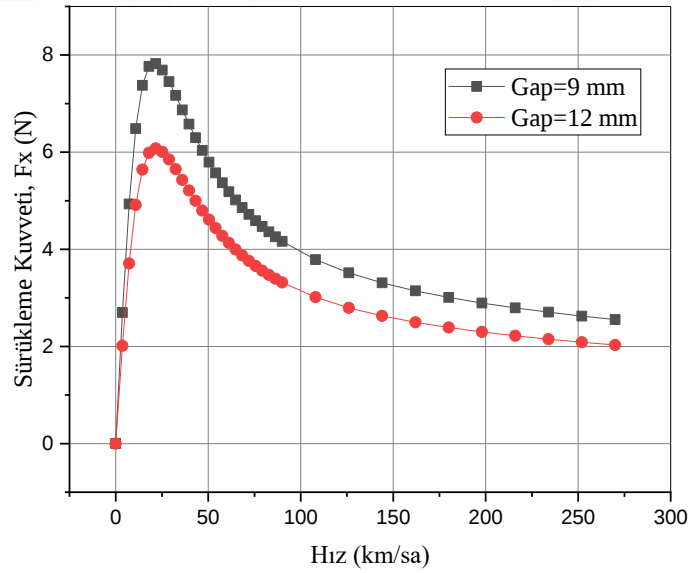
Bu bölümde, manyetik akı tuzaklamış HTS yapıların, alüminyum ray üzerindeki EDL performansı, COMSOL Multiphysics 6.1 yazılımı kullanılarak yürütülen nümerik analizlerle detaylandırılmıştır. Simülasyonlar, iki ana bileşenden oluşan ve ardışık olarak çalışan bir modelleme yapısına dayanmaktadır. İlk bileşende, HTS içerisinde manyetik akının tuzaklanması modellenmiş; ikinci bileşende ise bu manyetik akı dağılımının hareketli iletken ortam (alüminyum ray) ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkan kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır.

Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hız bağımlılığına ilişkin elde edilen nümerik sonuçları, Şekil 43 ve Şekil 44'te sırasıyla grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 43. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Şekil 43'te 9 mm gap yüksekliğinde 270 km/sa hızda ölçülen manyetik kaldırma kuvveti 14,6 N, 12 mm hareket yüksekliği için elde edilen diğer ölçüm ise 11,9 N olarak rapor edilmiştir.



Şekil 44. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Şekil 44'te ise karşılık gelen sürüklenme kuvvetleri sırasıyla 2,5 N ve 2 N olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, hareket yüksekliği azaldıkça hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir.

3.2. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, HTS ve PMA ile yapılandırılmış alüminyum raylı EDL sistemlerine ait deneysel bulgular sistematik olarak sunulmaktadır. Nümerik simülasyonlarla elde edilen teorik öngörülerin pratik geçerliliğinin test edilmesi ve sistemin gerçek çalışma koşullarındaki performans karakteristiklerinin ortaya konması amacıyla özgün bir yüksek hızlı EDL test altyapısı geliştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, farklı manyetik alan kaynaklarının (PMA, HTS, HTS bobin, bakır bobin) alüminyum ray ile etkileşiminden doğan kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçülmesine odaklanmıştır. Bu amaçla, modüler yapıda tasarlanan ve SCADA destekli PLC kontrol sistemleriyle donatılan dinamik ölçüm düzeneği hem kuvvet verilerini hem de pozisyon ve hız bilgilerini eşzamanlı olarak kaydedebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Deneyler, farklı hareket yüksekliklerinde ve hızlarda gerçekleştirilmiş; elde edilen kuvvet-zaman eğrileri ile sistemin dinamik yanıtları detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

Bölümde ilk olarak, PMA-Alüminyum ray konfigürasyonlarının farklı düzenlemeler altında deneysel performansları değerlendirilmiştir. Ardından, HTS blokların manyetik akı tuzaklama yetenekleri, farklı PMA dizilimleriyle karşılaştırmalı olarak ele alınmış; bu yapıların alüminyum ray ile oluşturduğu kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hız ve hareket yüksekliği değişkenleri cinsinden analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, HTS'nin kararlı manyetik alan üretme kapasitesinin, özellikle yüksek hızlarda sistem performansını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir.

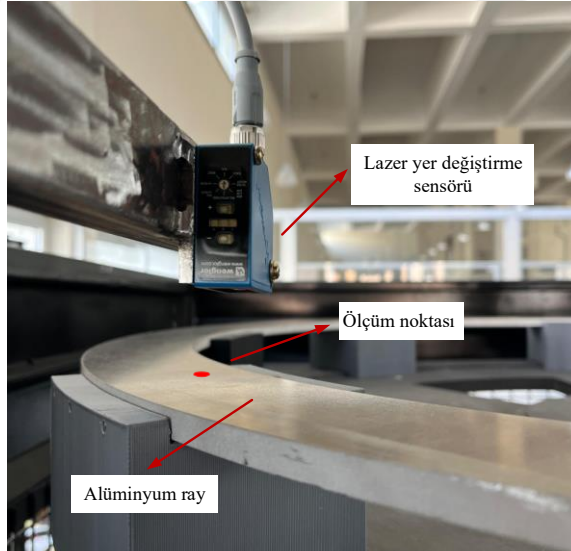
Sonrasında, bakır şerit bobinler ve kısa devre HTS bobinler kullanılarak, alternatif manyetik alan kaynaklarının EDL performansına etkileri araştırılmıştır. Bobinlere uygulanan farklı akım seviyelerinde elde edilen manyetik akı yoğunlukları ölçülmüş ve ilgili kuvvet-tepki analizleri sunulmuştur. Özellikle HTS bobinlerin, bakır şeritlere göre daha yüksek akı yoğunluğu üretmesi ve buna bağlı olarak daha yüksek kaldırma kuvvetleri sağlaması dikkat çekici bir bulgu olarak ortaya çıkmıştır.

Bu bölümde sunulan deneysel bulgular, tez kapsamında geliştirilen nümerik modellerin geçerliliğini test etmenin yanı sıra, Maglev sistemlerinde kullanılan farklı

manyetik bileşenlerin performans karşılaştırmalarını yapabilmek açısından da önemli bir zemin sunmaktadır. Ayrıca geliştirilen dinamik test sistemi, gelecekteki benzer çalışmalar için teknik bir referans niteliği taşımakta ve farklı konfigürasyonların etkinliğini test edebilecek esneklikte tasarlanmıştır.

3.2.1. PM-Alüminyum ray konfigürasyonunun EDL Sistemlerindeki Deneysel Performansının Belirlenmesi

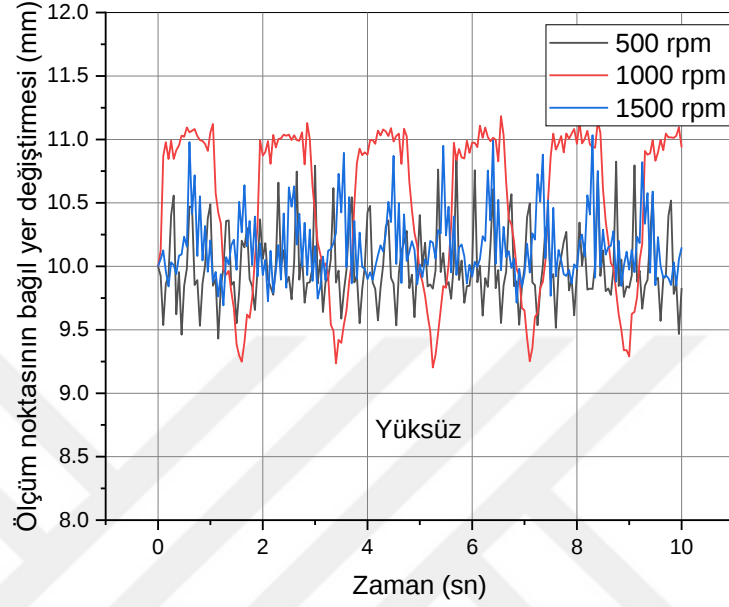
Bu bölümde, Nd-Fe-B kalıcı mıknatıslar kullanılarak oluşturulan çeşitli kalıcı mıknatıs dizilimlerinin alüminyum ray tabanlı elektrodinamik levitasyon sistemindeki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Ancak bu deneylere geçmeden önce EDL ölçüm sisteminde yatay ekseninde dönen alüminyum rayın, dikey (z-yönündeki) yer değiştirmesi farklı çalışma koşullarında incelenmiştir. Burada asıl amaç, yüksek hızlara çıkılacağı için EDL sistemindeki ölçümlerin sistem hata payı içerisinde kalmasının test edilmesidir. Bunun için, EDL test sistemine, Şekil 45'te gösterildiği gibi Wenglor marka lazer doğrusal yer değiştirme sensörü eklenmiştir.



Şekil 45. Lazer yer değiştirme sensörünün EDL sistemine montajı

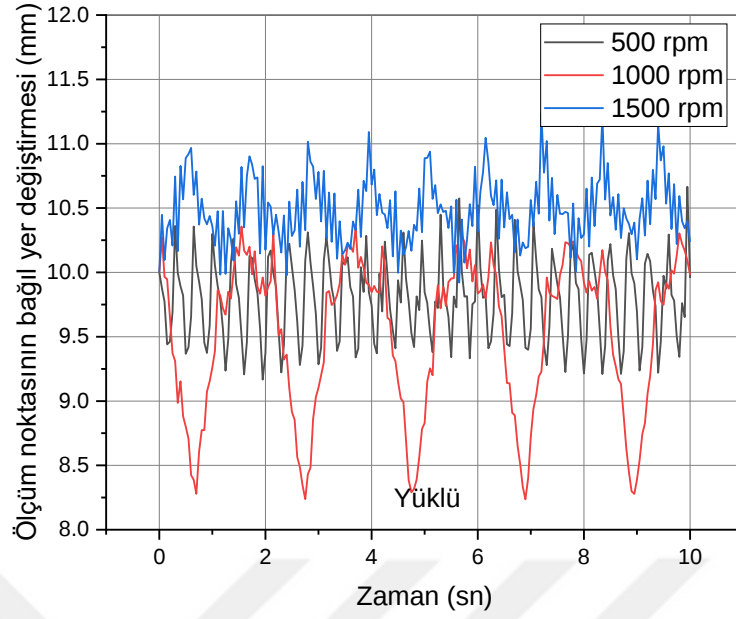
İlk deney düzeneğinde, herhangi bir manyetik alan kaynağı kullanılmadan ölçümler gerçekleştirilmiş; bu koşul “yüksüz durum” olarak adlandırılmıştır. Alüminyum ray, 500 rpm (≈ 94 km/sa), 1000 rpm (≈ 188 km/sa) ve 1500 rpm (≈ 283 km/sa) hızlarında döndürülerek, her bir hız değeri için maksimuma ulaşılmasını takiben ilk 10 saniyelik zaman

aralığında düşey konumdaki (z) sapma değeri kaydedilmiştir. Elde edilen zamana bağlı göreceli yer değiştirme değerleri Şekil 46’da gösterilmiştir. Yüksüz durumda, dikey yer değiştirme ortalama olarak sırasıyla 1,0 mm, 1,8 mm ve 1,1 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 46. Yüksüz alüminyum rayın çeşitli hızlarında ölçüm noktasının düşey doğrultudaki bağıl hareketi

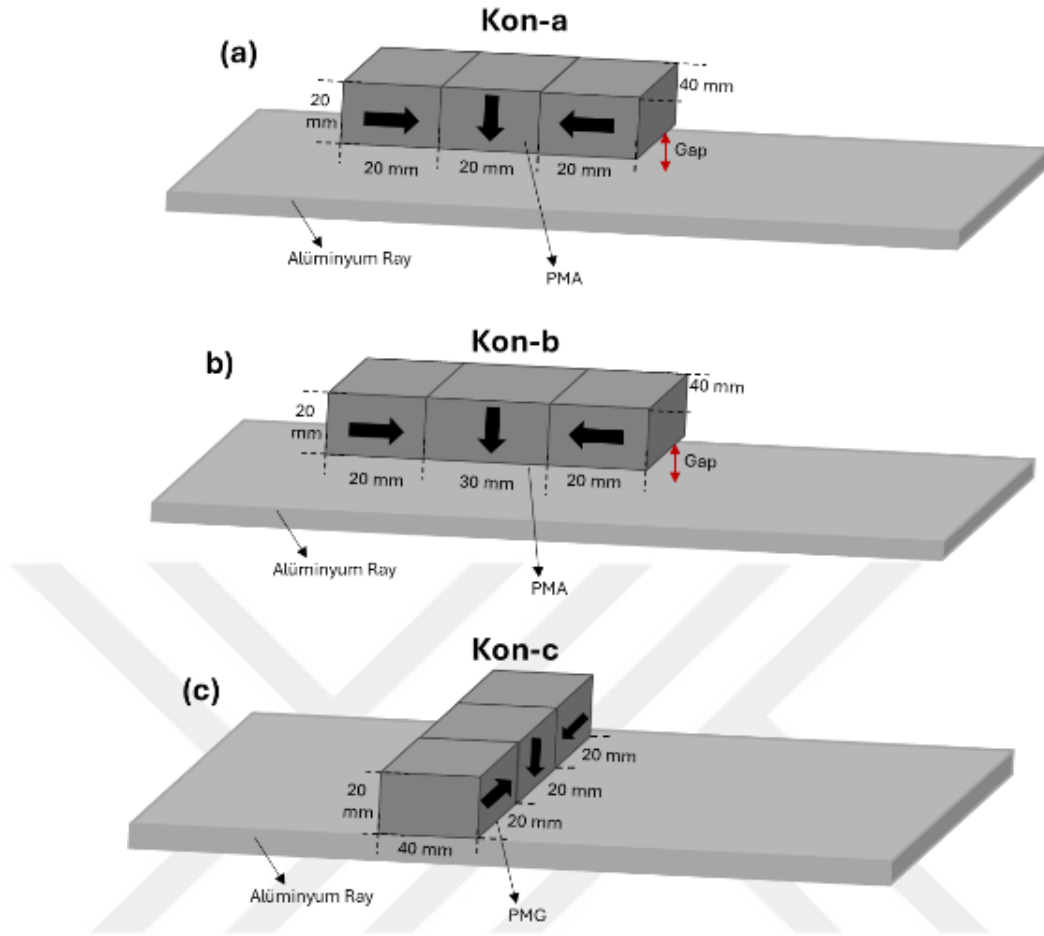
Bir sonraki adımda, aynı ölçüm protokolü PMA–alüminyum ray konfigürasyonu altında tekrarlanmıştır. Bu “yükli” duruma ilişkin sonuçlar da Şekil 47’de gösterildiği gibi kaydedilmiştir. Yüklü koşulda, dikey yer değiştirme değerleri 500 rpm’de 1,0 mm, 1000 rpm’de 2,0 mm ve 1500 rpm’de 1,0 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 47. Yüklü (PMA) durumda alüminyum rayın çeşitli hızlarında ölçüm noktasının düşey doğrultudaki bağıl hareketi

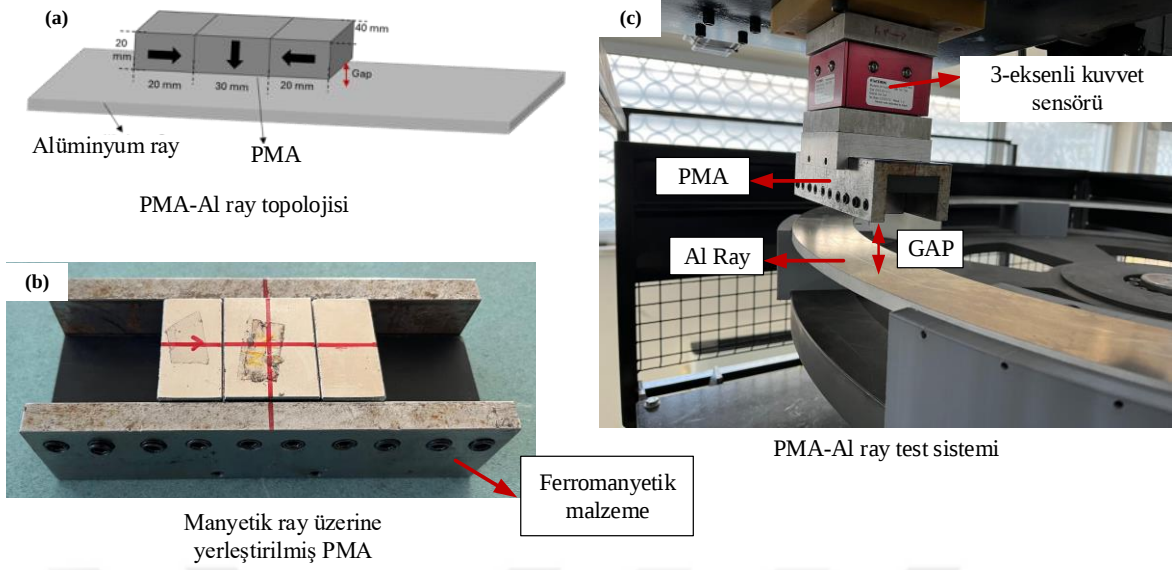
Hem yüklü hem de yüksüz durumlarda ölçülen dikey yer değiştirme değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, sistemin nominal çalışma noktasındaki kararlı konumunu koruyabildiğini göstermektedir. Buna karşın, 1000 rpm hızında yük altında ölçülen 2,0 mm'lik artış, sistemin bu hız bölgesinde kendi doğal frekansına yakın bir rezonans durumuna girdiğine işaret etmektedir. Bu gözlem, tasarlanan EDL ölçüm sisteminin dinamik tepkisinin, modüler yapısındaki elastik-elektrik bağlantı elemanlarının titreşim karakteristikleriyle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

EDL test sisteminin konum ve titreşim hassaslığı test edildikten sonra, PMA-Al ray ölçümlerine geçilmiştir. Bu kapsamda üç farklı PMA konfigürasyonu tasarlanmış ve sistematik olarak test edilmiştir. Tasarımı yapılan üç farklı kalıcı mıknatıs dizilimi, Şekil 48'de gösterilmektedir. Alüminyum ray kalınlığı 10 mm olarak seçilmiştir.



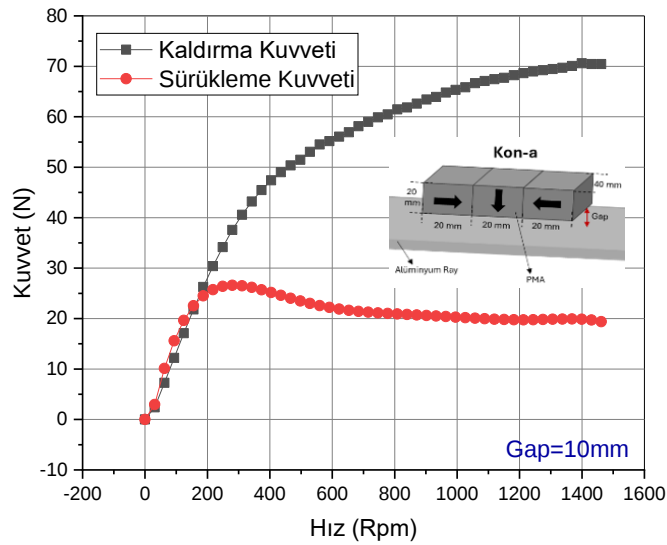
Şekil 48. PMA-Alüminyum ray topolojisi için tasarlanan farklı PM konfigürasyonları

Bu dizilimlerin her biri, 20 mm x 40 mm x 20 mm boyutlarında üç özdeş Nd-Fe-B mıknatısın yumuşak ferromanyetik malzemeden imal edilen bir kılavuz içine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu mıknatıs grupları daha sonra kuvvet sensörüne monte edilerek, Şekil 49’da gösterildiği gibi alüminyum raylı HTS Maglev dinamik ölçüm sistemine entegre edilmiştir.

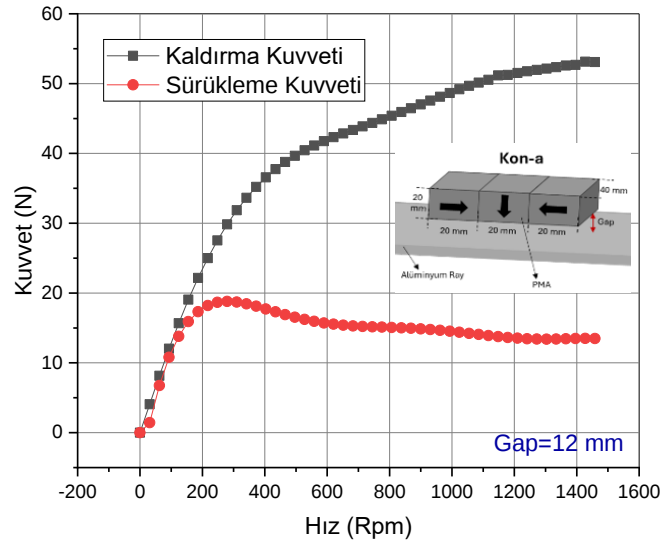


Şekil 49. PMA'nın kuvvet sensörüne montajı ve sistem görüntüsü

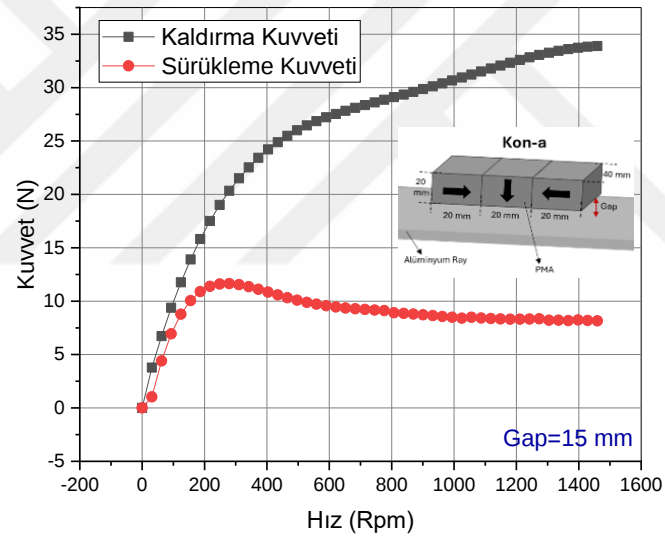
Her bir PMA konfigürasyonu için, mıknatıslar ile alüminyum ray arasına 10 mm, 12 mm ve 15 mm olmak üzere üç farklı hareket yüksekliği (gap) bırakılarak manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ölçülmüştür. Ölçümler, Alüminyum ray hızının 0'dan 1475 rpm'ye kadar sürekli artırıldığı bir hız aralığında gerçekleştirilmiş ve veriler SCADA sistemi ile kaydedilmiştir. Kon-a (Konfigürasyon-a) dizilimi için elde edilen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri Şekil 50'de gösterilmiştir. 10 mm gap ile 74 N kaldırma ve 20 N sürüklenme kuvveti, 12 mm gap ile 56 N kaldırma ve 14 N sürüklenme kuvveti, 15 mm gap ile ise 34 N kaldırma ve 5 N sürüklenme kuvveti elde edilmiştir.



(a)



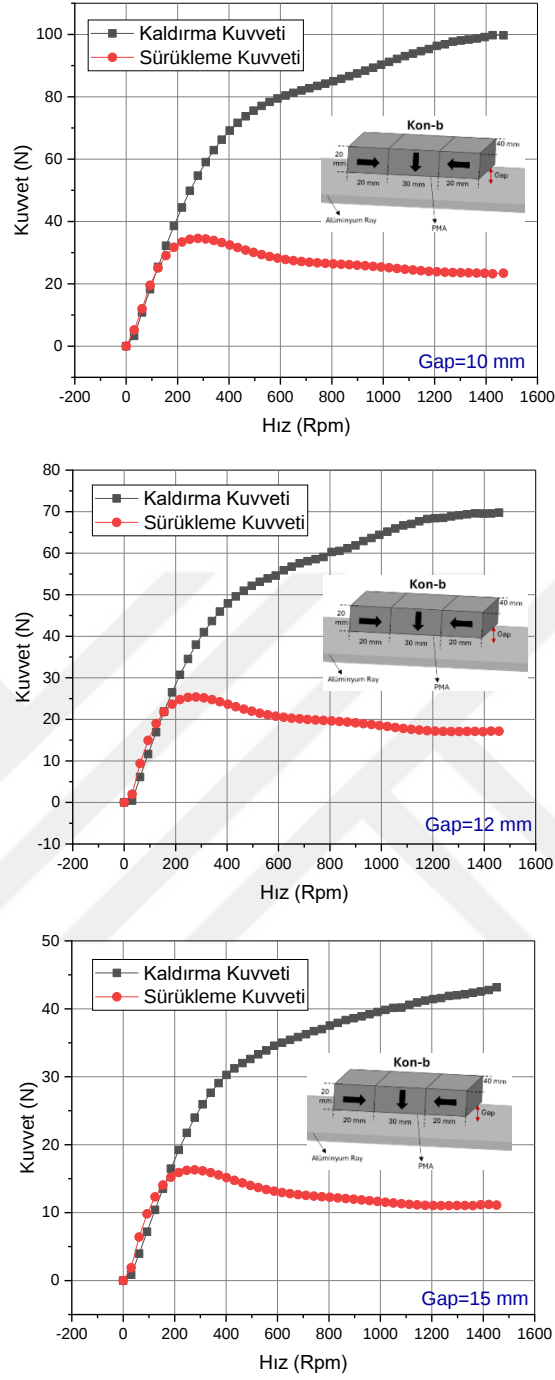
(b)



(c)

Şekil 50. Kon-a dizilimi için manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Kon-b dizilimi için ölçülen sonuçlar Şekil 51’de sunulmuştur. 10 mm gap ile 103 N kaldırma ve 23 N sürüklenme kuvveti; 12 mm gap ile 71 N kaldırma ve 17 N sürüklenme kuvveti; 15 mm gap ile ise 48 N kaldırma ve 10 N sürüklenme kuvveti kaydedilmiştir.



Şekil 51. Kon-b dizilimi için manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Kon-c dizilimi için elde edilen ölçümler Şekil 52’de verilmiştir. 10 mm gap ile 65 N kaldırma ve 16 N sürüklenme kuvveti; 12 mm gap ile 48 N kaldırma ve 9 N sürüklenme kuvveti; 15 mm gap ile ise 32 N kaldırma ve 6 N sürüklenme kuvveti gözlemlenmiştir.

sonuçlar, daha küçük hava boşluklarının daha yüksek kaldırma kuvvetleri ürettiğini, ancak bunun beraberinde daha yüksek sürüklenme kuvveti getirdiğini göstermektedir. Bu nedenle, Maglev sistemlerinde optimal tasarımın belirlenmesi, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri arasındaki dengeye bağlıdır. Bu bağlamda Kon-b gap-10 konfigürasyonu, en güçlü kaldırma performansına sahip olmakla birlikte, sürüklenme kuvveti açısından da dikkatle değerlendirilmelidir.

Tablo 5. Farklı konfigürasyonlar için 1475 rpm hızında elde edilen kuvvet değerleri

Konfigürasyon	GAP	Kaldırma Kuvveti (N)	Sürüklenme Kuvveti (N)
Kon-a	10	74	20
Kon-a	12	56	14
Kon-a	15	34	5
Kon-b	10	103	23
Kon-b	12	71	17
Kon-b	15	48	10
Kon-c	10	65	16
Kon-c	12	48	9
Kon-c	15	32	6

Tablo 6’da ise, PMA’nın 4 metre uzunluğundaki bir vagona iki sıra halinde yerleştirilmesi durumunda elde edilebilecek toplam kaldırma kuvveti hesaplanmıştır. 0,6 T manyetik alan değerine sahip bir mıknatısla, 12 mm gap mesafesinde Kon-b dizilimi kullanılarak 71 N kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Bu yapı, 40 adet modülden oluşan bir vagona uygulandığında toplamda yaklaşık 16.272 N kaldırma kuvveti elde edileceği hesaplanmıştır.

Tablo 6. PMA’nın ölçeklenmiş uygulamalarındaki teorik kaldırma kuvveti

Manyetik Alan (T)	GAP	Manyetik Kuvvet (N)		Manyetik Kuvvet (N)		Manyetik Kuvvet (N)	
		(Kon-a)		(Kon-b)		(Kon-c)	
		Deney	Vagon	Deney	Vagon	Deney	Vagon
$B_1 = 0,6$	10	74	16920	103	23541	65	14800
	12	56	14980	71	16272	48	12755
	15	34	9160	48	10948	32	8605

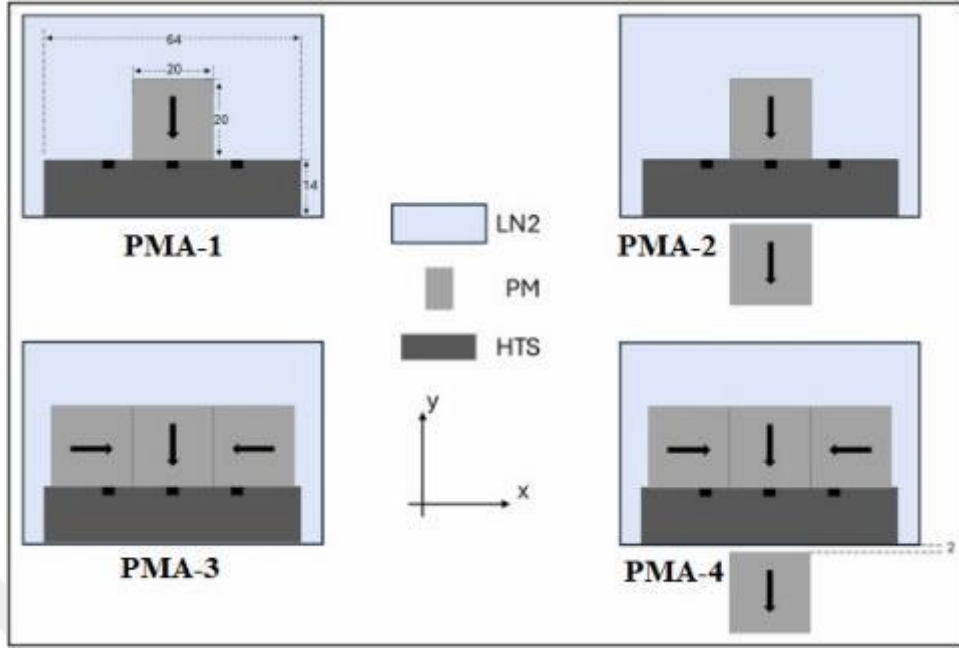
3.2.2. HTS-Alüminyum ray konfigürasyonunun EDL Sistemlerindeki Deneysel Performansının Belirlenmesi

Bu bölümde, HTS materyaller ile alüminyum raylı elektrodinamik levitasyon sistemlerinin birlikte kullanımına ilişkin deneysel çalışmalar, manyetik kuvvet karakterizasyonları ve sistem performans analizleri sunulmaktadır. Çalışmalar, HTS’lerde manyetik akı tuzaklama verimliliğini artırmak ve elde edilen kuvvet çıktılarının sistem performansına etkisini değerlendirmek üzere yürütülmüştür. Bu çalışmada kullanılan, külçe HTS fotoğrafları Şekil 52’de verilmiştir. YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) malzemeden top-seed-melt-growth (üstten-çekirdeklemeli-eritme-büyütme) yöntemi ile üretilmiş olan HTS’ler üç çekirdekli dikdörtgen prizma şekilli olup boyutları 64 mm x 34 mm x 14 mm’dir.



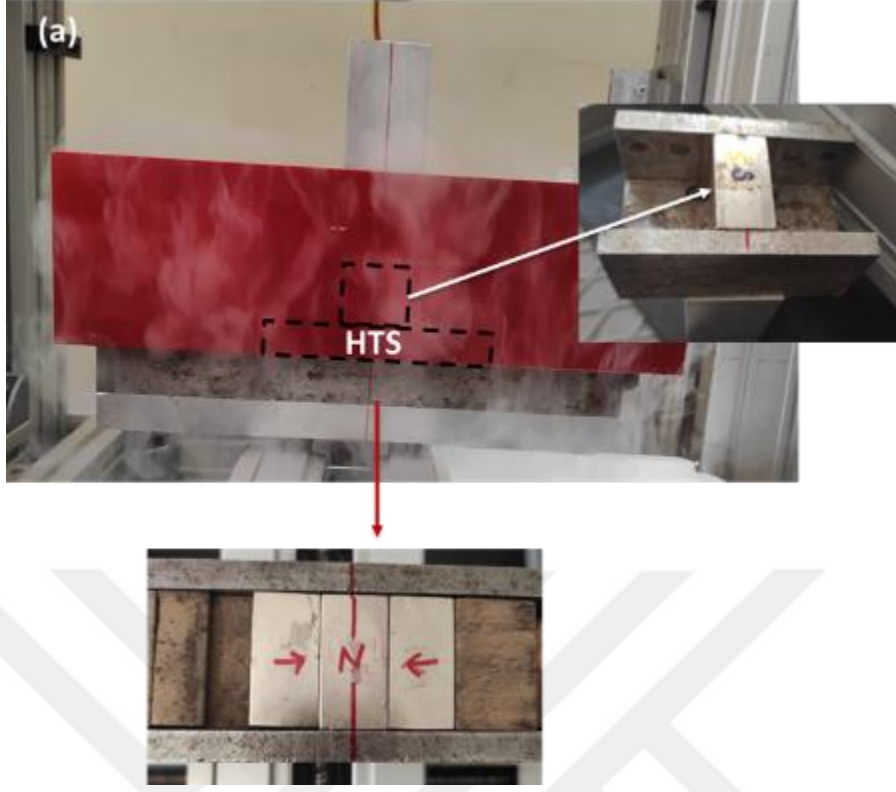
Şekil 53. Tez çalışmasında kullanılan külçe YBCO HTS malzemelere ait fotoğraf

Bu bölümde, ilk olarak, çeşitli kalıcı mıknatıs dizilimlerine sahip PMA kullanılarak, HTS numunelerinde manyetik akı tuzaklama verimliliği değerlendirilmiştir. Deneysel düzeneğe ait genel konfigürasyonlar Şekil 54’te sunulmuştur. Farklı PMA topolojileriyle yapılan çalışmalarda, HTS yüzeyinden belirli yüksekliklerde ölçülen düşey manyetik alan yoğunluğu (B_z) bileşeni, tuzaklanan akının dağılımına ilişkin önemli bulgular sağlamıştır.



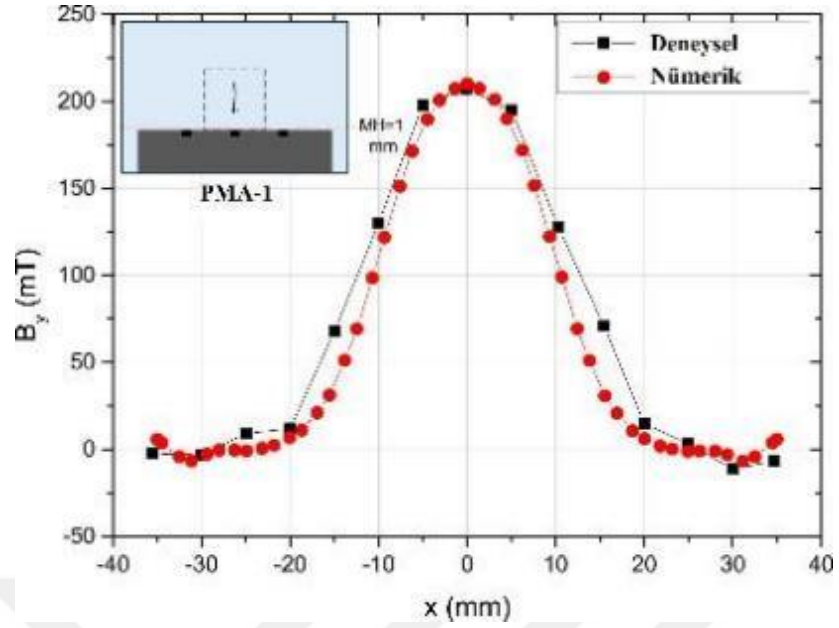
Şekil 54. Manyetik akı tuzaklama çalışmaları için oluşturulan farklı PMA konfigürasyonları

Manyetik akı tuzaklama deneyleri, Şekil 55'te gösterilen düzenek kullanılarak yürütülmüştür. Deney düzeneklerinde, öncelikle taban kalınlığı 2 mm olan numune kabına yerleştirilen külçe HTS, alttaki PMA üzerinde simetrik konumda sabitlenmiştir. Ek PM içeren konfigürasyonlarda ise ilgili mıknatıslar, HTS üzerine simetrik biçimde yerleştirilmiştir. Soğutma aşamasında, numune kabı sıvı azotla doldurularak HTS'in sıcaklığı kesintisiz olarak 10 dk boyunca 77 K'ye kadar düşürülmüştür. Ardından numune, sıcaklık artışını önlemek amacıyla ikinci yalıtımlı bir kaba hızlıca aktarılmış ve bu kaba da ek sıvı azot ilave edilmiştir. Ölçümler; HTS'in üst yüzeyinden 1 mm yükseklikte ve yatay doğrultuda her 5 mm'de bir olacak şekilde gerçekleştirilmiş; düşey manyetik akı yoğunluğu, 0.1 mT çözünürlüğe sahip Hall problu Gaussmetre ile kaydedilmiştir.



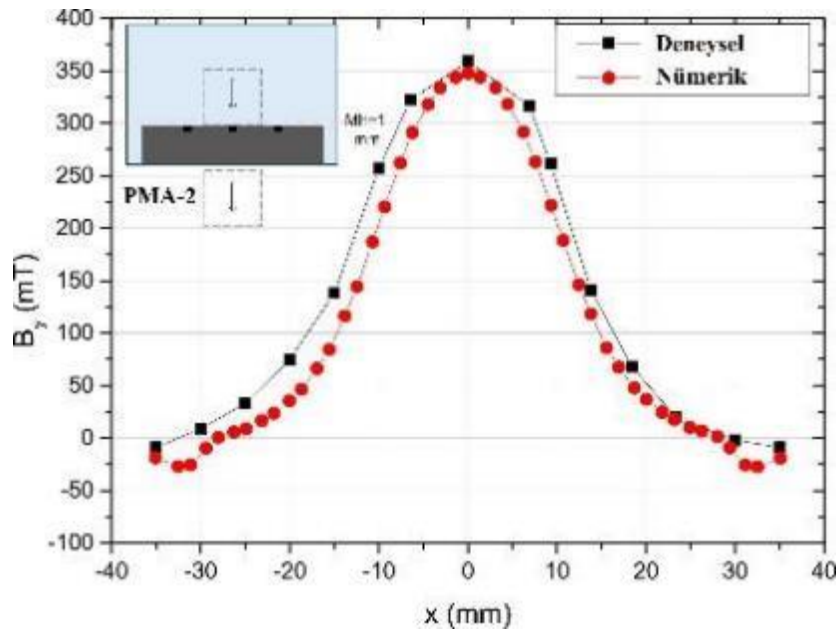
Şekil 55. Külçe HTS’de manyetik akı tuzaklama düzeneği ve Kon-4a konfigürasyonuna ait PMA dizilimi

PMA-1 konfigürasyonunda, yüzeyden 1 mm yükseklikte yapılan ölçümlerde, deneysel olarak 207 mT, simülasyonla ise 210 mT tepe manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Bu ölçümler, Şekil 56’da sunulmakta olup, deneysel ve simülasyon eğrileri arasında yüksek düzeyde bir tutarlılık olduğu görülmektedir. Aynı konfigürasyonda kullanılan PM’in tepe akı yoğunluğu 378 mT olarak ölçülmüş ve HTS’nin bu değerin yaklaşık %55’ini tuzaklayabildiği belirlenmiştir.



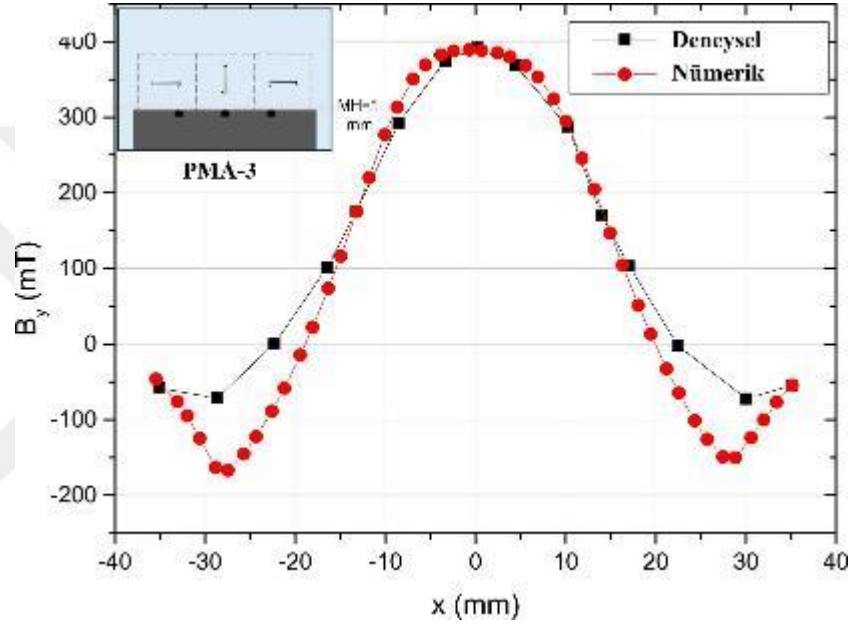
Şekil 56. PMA-1 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları

PMA-2 düzenlemesinde, daha güçlü bir mıknatıs kullanımı nedeniyle HTS'nin tuzakladığı akı miktarı artmıştır. DeneySEL veriler, bu konfigürasyonda 359 mT'lik tepe değeri gösterirken, simülasyon sonucu 348 mT olarak hesaplanmıştır. Şekil 57'de grafiksel olarak gösterilmiştir. PMA-2'nin manyetik akı tepe değeri 463 mT olarak belirlenmiştir.



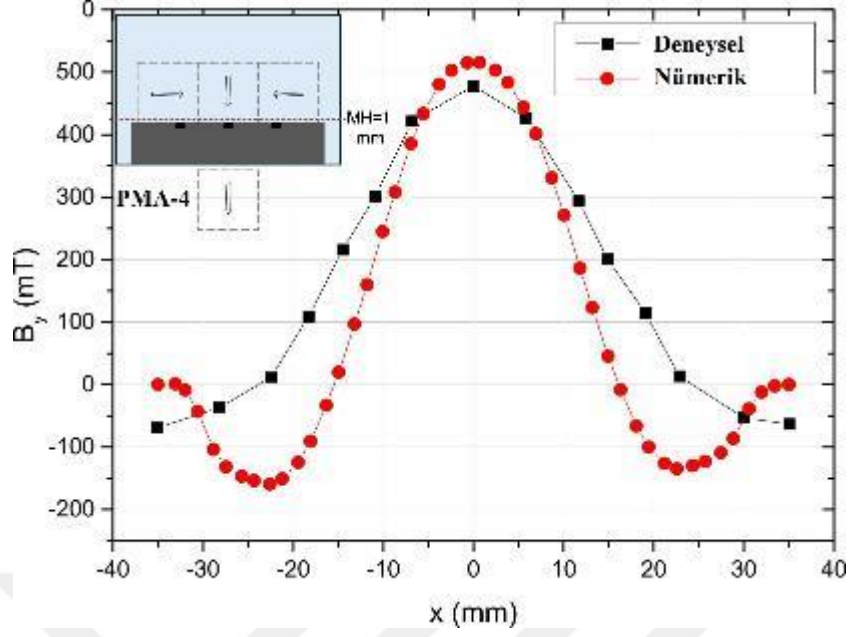
Şekil 57. PMA-2 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları

PMA-3 konfigürasyonunda, Halbach tipi dizilim kullanılarak elde edilen akı profili incelenmiştir. Şekil 58’de gösterildiği gibi, HTS yüzeyinden 1 mm yükseklikte yapılan ölçümlerde, deneysel olarak 392 mT, simülasyonla ise 389 mT sıkışmış akı değeri rapor edilmiştir. Bu konfigürasyon için toplam manyetik alan 770 mT olarak ölçülmüş ve HTS’nin yüksek miktarda akı tuzaklayabildiği gözlemlenmiştir. Ancak simülasyonla deney arasında, özellikle HTS sınır bölgelerinde sapmalar gözlemlenmiş olup bu durum, modelin iki boyutlu sınırlamalarıyla açıklanabilir.



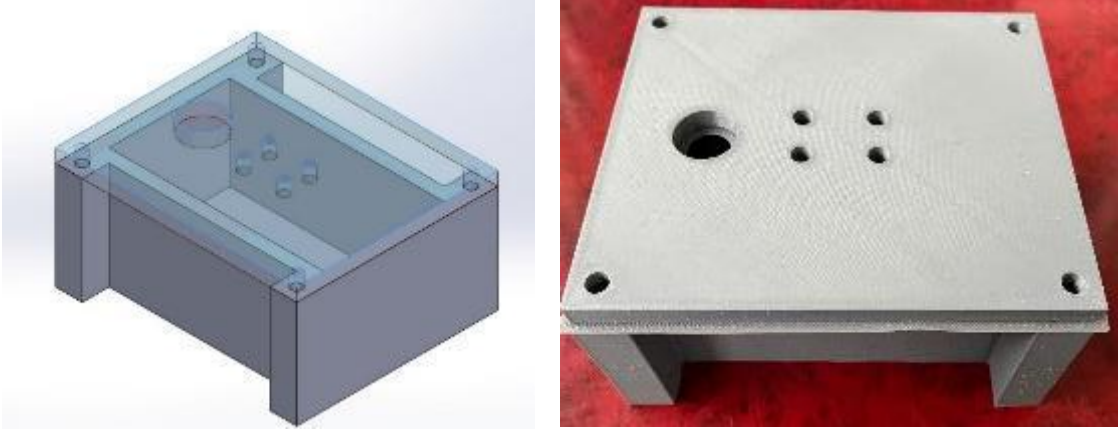
Şekil 58. PMA-3 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları

PMA-4 konfigürasyonunda, ilave PM yerleşimiyle daha da güçlü bir manyetik alan oluşturulmuştur. Elde edilen veriler, Şekil 59’da gösterildiği gibi, deneysel olarak 478 mT, simülasyonla ise 515 mT maksimum tuzaklanmış akı değerini göstermektedir. PMA-4 için manyetik alan tepe değeri 869 mT’ye ulaşmış ve bu konfigürasyonun en yüksek mutlak akı üretimini sağladığı belirlenmiştir. Ancak buna rağmen, verimlilik açısından PMA-2’nin gerisinde kalmıştır.



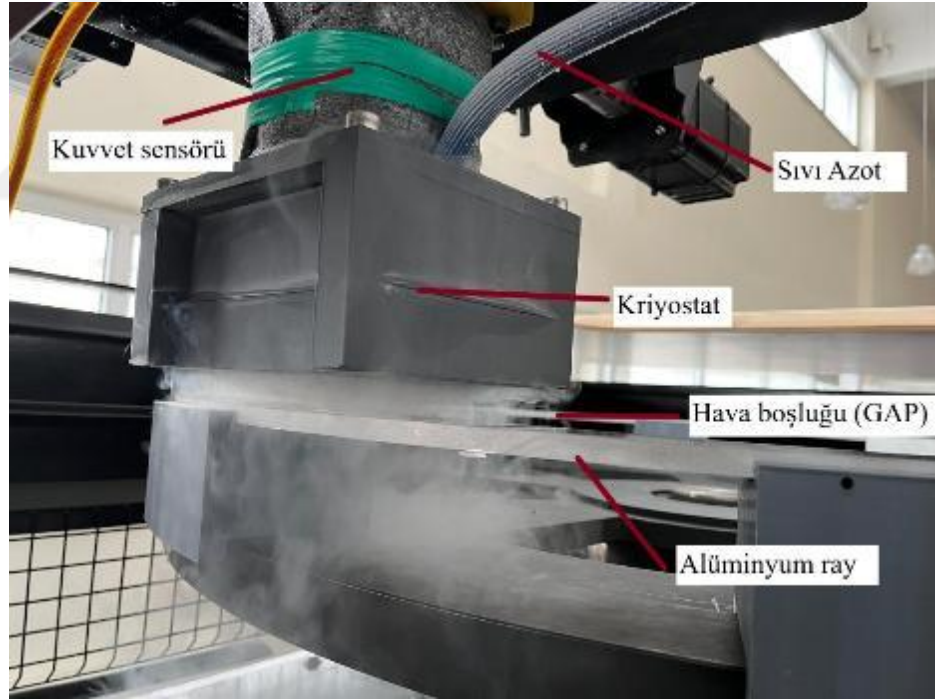
Şekil 59. PMA-4 konfigürasyonu kullanılarak HTS yüzeyinin 1 mm üzerindeki noktada elde edilen tuzaklanmış manyetik akı yoğunlukları

Manyetik akı yoğunlukları incelendikten sonra, bu çalışma kapsamında, manyetik kuvvet ölçümleri, EDL test sistemine entegre edilen dinamik manyetik kuvvet ölçüm düzeneği ile gerçekleştirilmiş ve sistemin dinamik yanıtları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Statik ölçümlerde yüksek sıcaklık külçe süperiletkenin soğutulmasında alüminyum kriyostat kullanılmış olmakla birlikte, dinamik koşullarda alüminyum rayın yüksek hızlarda hareketi, kriyostat tabanında girdap akımları oluşturmuş; bu durum ölçümlerin hassasiyetini düşürerek tutarsız veri üretimine neden olmuştur. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla manyetik alan kaynaklı indüklenmiş akımları minimize eden yeni bir kriyostat tasarlanmış ve PLA (Polylactic Acid) malzemeden imal edilmiştir. Tasarlanan kriyostatın genel görünümü Şekil 60'ta sunulmaktadır.



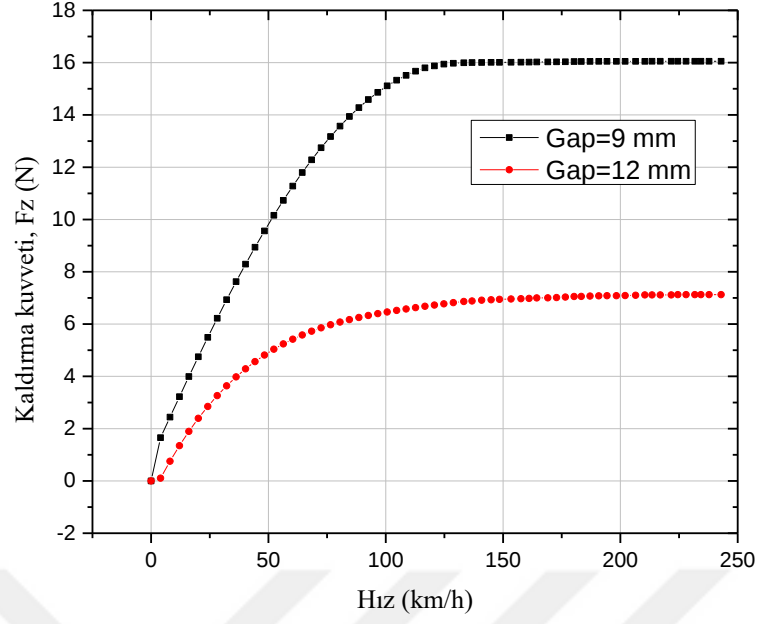
Şekil 60. PLA malzemedan imal edilen yeni kriyostatın genel görünümü

Kriyostatın imalatını takiben, Şekil 61’de gösterildiği üzere cihaz, alüminyum raylı HTS Maglev dinamik manyetik kuvvet ölçüm düzeneğine başarılı biçimde monte edilmiştir.



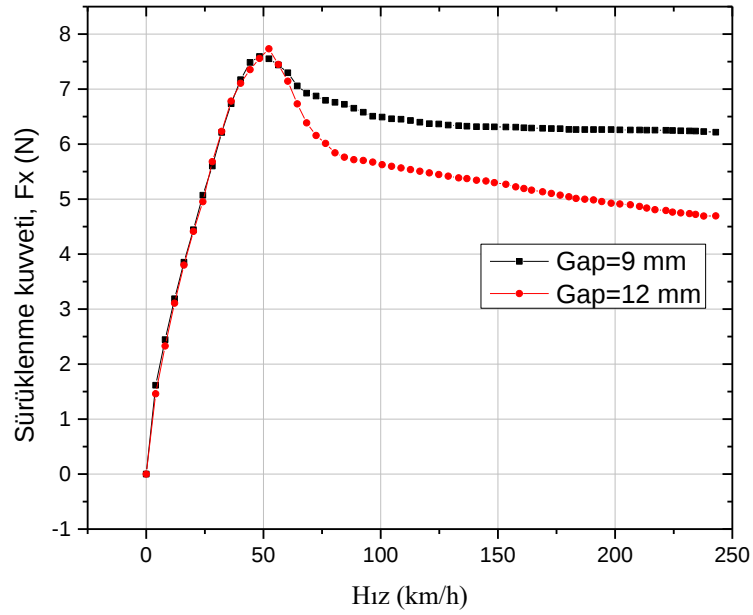
Şekil 61. HTS-Alüminyum ray dinamik manyetik kuvvet ölçüm düzeneği

Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hız bağımlılığına ilişkin deney sonuçları, Şekil 62 ve Şekil 63’te sırasıyla grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 62. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik kaldırma kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

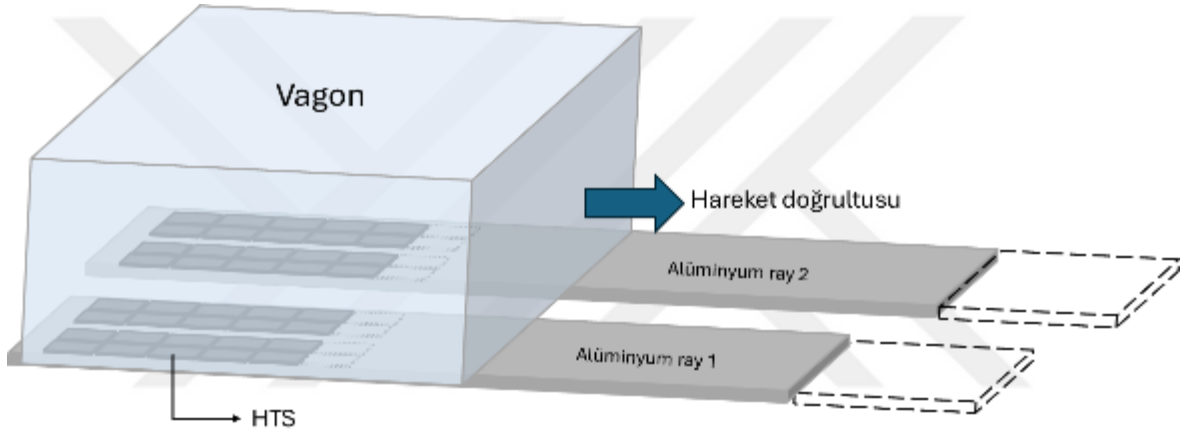
Şekil 63'te 12 mm gap yüksekliğinde 1475 rpm (278 km/sa) hızda ölçülen manyetik kaldırma kuvveti 16,1 N, aynı gap için elde edilen diğer ölçüm ise 7,3 N olarak rapor edilmiştir.



Şekil 63. Manyetik akı tuzaklanmış HTS ile alüminyum ray arasında, farklı hareket yüksekliklerinde oluşan manyetik sürüklenme kuvvetinin hareket hızına bağlı değişimi

Şekil 63'te ise karşılık gelen sürüklenme kuvvetleri sırasıyla 6,1 N ve 4,6 N olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, hareket yüksekliği azaldıkça hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir.

Şu ana kadar yürütülen deneysel çalışmalar prototip düzeyinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen manyetik kuvvet verileri gerçek bir tren uygulamasına uyarlanacak hesaplamalar için temel teşkil etmektedir. Vagon ölçeğindeki konfigürasyonda, Şekil 64'te gösterildiği üzere dört sıra $64 \times 33 \times 14 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki HTS modüller, her biri iki sıra 4 m uzunluğunda alüminyum ray üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 64. EDL sisteminde vagon içerisinde 4 sıra yerleştirilmiş külçe HTS'lerin iki sıra alüminyum ray üzerindeki şematik çizimi

Manyetik kuvvet değerleri ise Denklem 18'te verilen ifadeden faydalanarak hesaplanmıştır. İlgili denklemden de görüleceği üzere manyetik kuvvet değeri manyetik akının karesiyle orantılı olarak değişmektedir.

$$F = \int \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) dA \quad (18)$$

Bu denklemden faydalanılarak, tek bir numune için tuzaklanan manyetik alan değeri 0,25 T'den 1,5 T'ye çıktığında, 12 mm hareket yüksekliğinde kaldırma kuvveti 7,3 N'dan 263 N'a yükselirken; aynı parametreler tüm vagon düzenlemesi için 1825 N'dan 65750 N'a çıkmaktadır. Tablo 7'de de görüleceği gibi daha yüksek manyetik alan değerlerinde (örneğin $B = 2 \text{ T}$) 12 mm gap'de tek numune için 467 N, vagon ölçeğinde ise 116750 N ($\approx 11,9 \text{ ton}$)

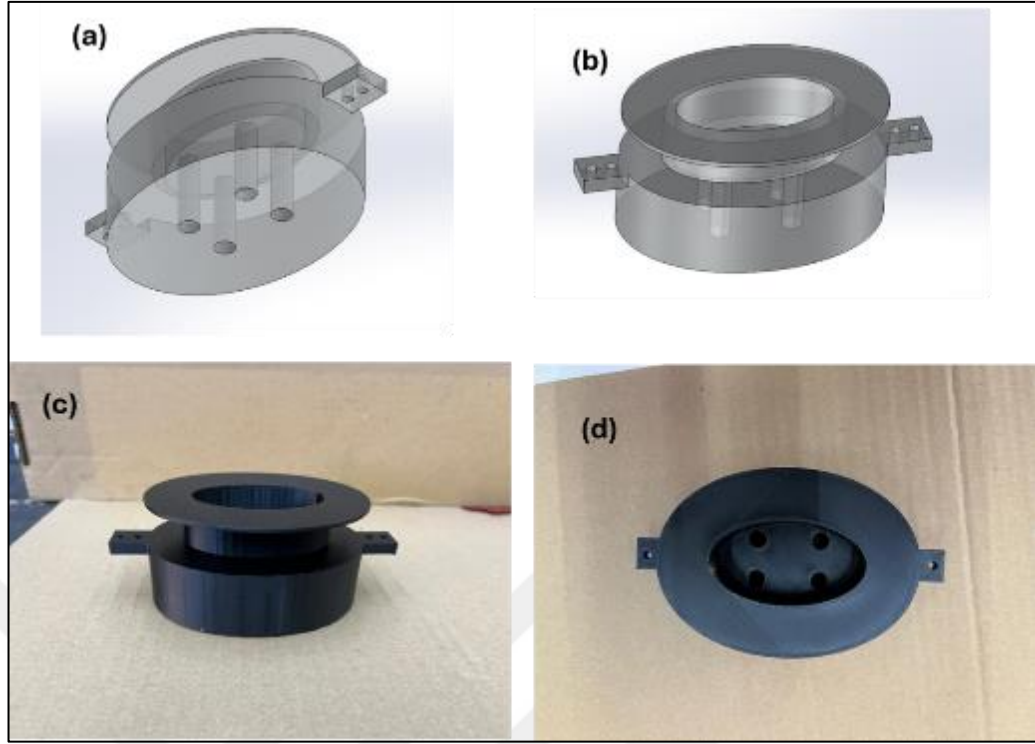
kuvvet elde edilmektedir. Benzer şekilde, 9 mm gap’de $B = 0,75$ T olduğunda tek numune için 135 N, vagon için 33750 N ($\approx 3,44$ ton) değerine ulaşılmaktadır. Bu bulgular, dinamik EDL test sistemimizde prototip koşullarda elde edilen deneysel verilerin, gerçek vagon konfigürasyonlarına ölçeklendiğinde dahi yüksek kaldırma kapasitesi sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Tek HTS ve 4 m uzunluktaki vagona yerleştirilmiş HTS set için EDL sistemindeki manyetik kuvvet değerleri

Manyetik Alan (T)	<i>GAP</i>	Deneysel Manyetik Kuvvet, N (Tek Süperiletken için)	Manyetik Kuvvet, N (4 m uzunluktaki vagon için)
$B_1 = 0,25$	9	15	3750
	12	7,3	1825
$B_2 = 0,7$	9	135	33750 (3,44 ton)
	12	65,7	16425 (1.68 ton)
$B_3 = 1,5$	9	540	135000 (13,8 ton)
	12	263	65750 (6,7 ton)
$B_3 = 2$	9	960	240000 (24,5 ton)
	12	467	116750 (11,9 ton)

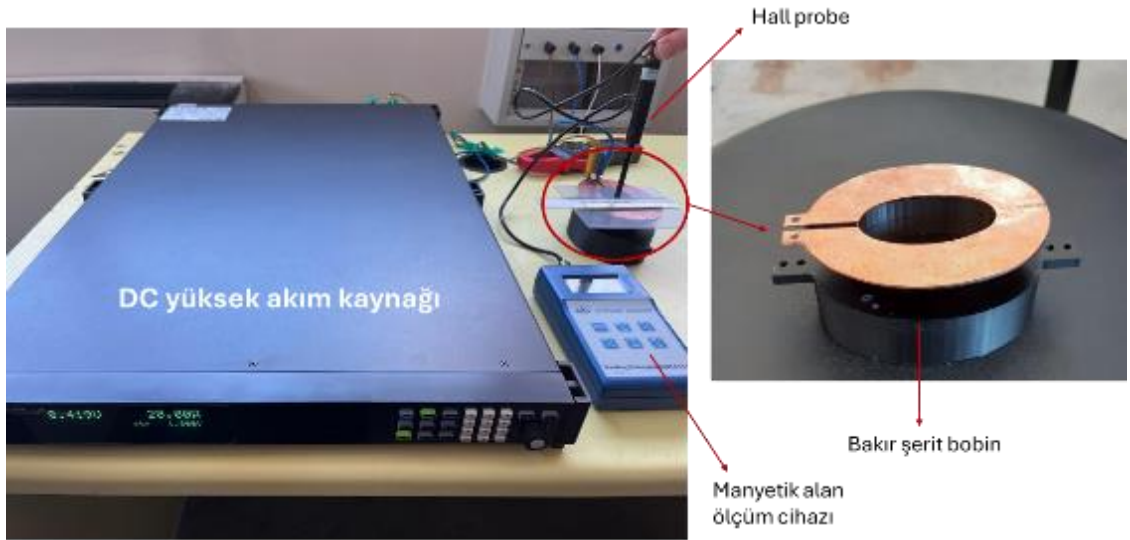
3.2.3. Bakır ve HTS Şerit Bobinlerin Elektromanyetik Performansının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, kriyojenik soğutma gerektirmeyen bakır şerit bobinler ile HTS bobinlerin elektromanyetik performansları deneysel veriler ışığında kıyaslanmıştır. İlk olarak bakır şerit bobinler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, Şekil 65’te gösterilen ve PLA malzemeden 3D yazıcıyla üretilen bobin kalıbına sarılan bakır şerit bobinler oluşturuldu.



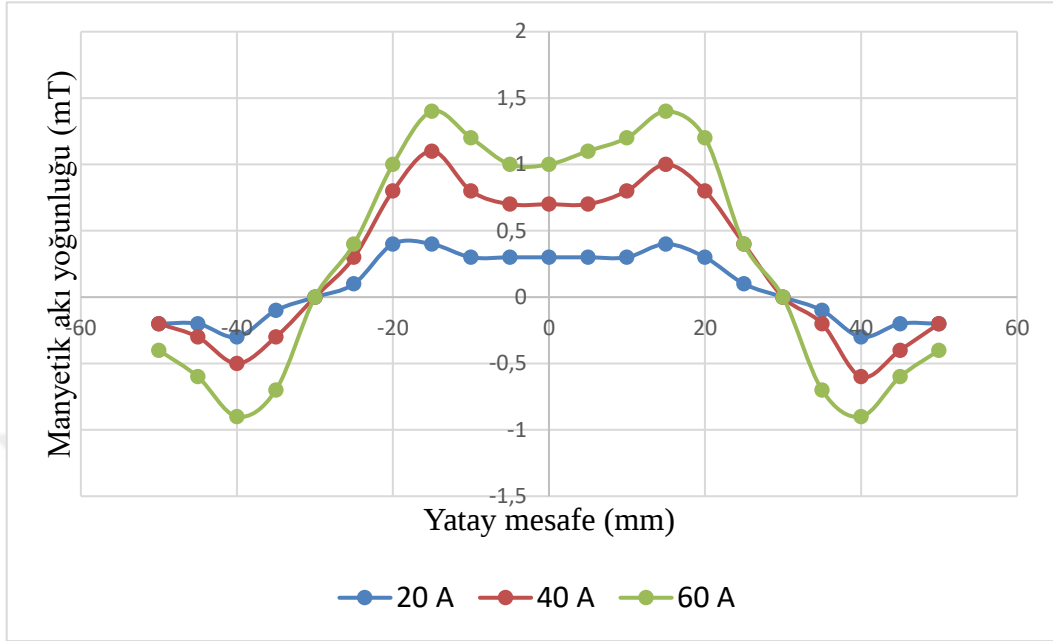
Şekil 65. Bakır-şerit bobin için PLA malzemeden imal edilen bobin kalıbının teknik çizimi (a), (b), önden (c) ve üstten (d) çekilmiş fotoğrafı

Daha sonra, farklı akım seviyelerinde (20, 40, 60 A) manyetik akı yoğunluğu profilleri oluşturularak Hall probu aracılığıyla ölçülmüştür. Bakır şerit bobininde farklı akımlara bağlı olarak manyetik alan dağılımı ölçüm düzeneği Şekil 66’da verilmektedir.



Şekil 66. Bakır şerit bobininde farklı akımlara bağlı olarak manyetik alan dağılımı ölçüm düzeneği

60 A'ye kadar uygulanan akım değerlerinde elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 67'de verilmiştir.



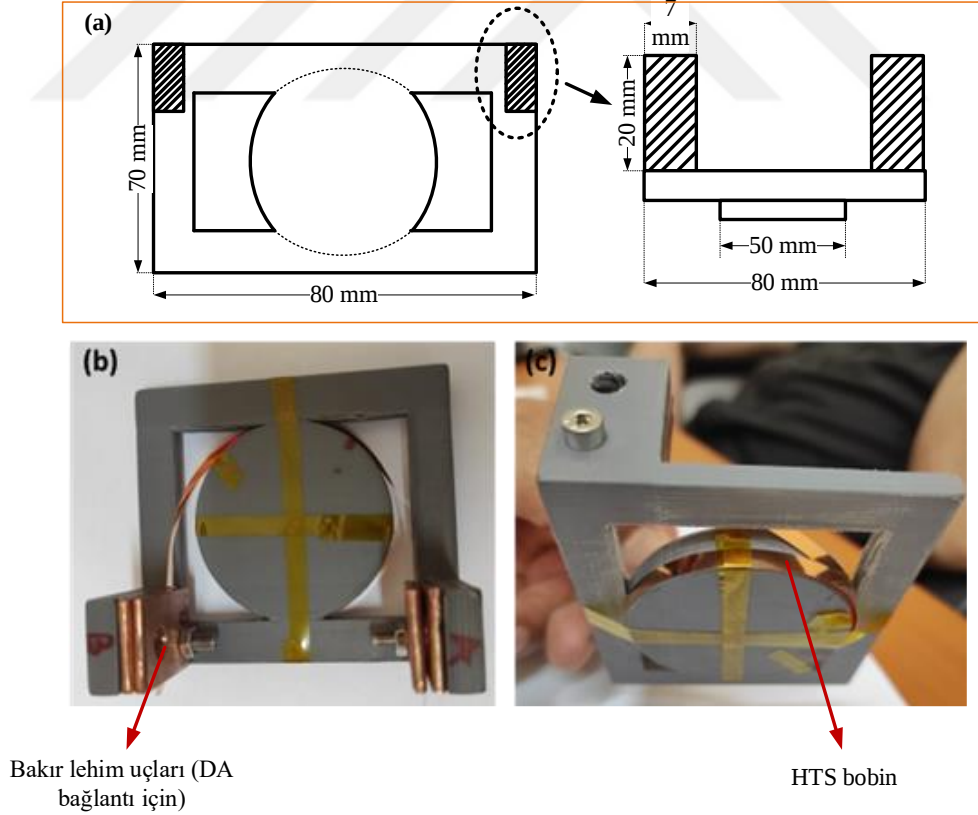
Şekil 67. Bakır şerit bobine uygulanan akımın 60 A değerine kadar elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Buna karşılık, HTS bobin düzenlemelerinde, öncelikle tek sarımlı HTS bobin oluşturuldu. Kullanılan HTS 2. Nesil (2G) YBCO malzemeden imal edilmiş olup (Houbart vd. 2022) SuperOx firması tarafından üretilmiştir. HTS şeridin fotoğrafı ve özellikleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Çalışmada kullanılan 2. Nesil (2G) YBCO HTS şerit özellikleri

Fotoğraf	Parametre	Özellik
	Üretici firma	SuperOx
	Genişlik	4 mm
	HTS malzeme	YBCO
	Minimum kritik akım (IC), (77 K, self field)	>150 A
	Kaplama	5 µm bakır, her iki yüzeyde
	Altlık malzeme	Hastelloy
	Minimum eğrilik yarıçapı	40 mm

HTS bobin üretimine, üç sarımlı bobinle başlanmıştır. Bu kapsamda, 2 Nesil YBCO şeritler kullanılmıştır. Şekil 68, yüksek akım uygulamaları için tasarlanmış üç sarımlı HTS bobinin sarım işlemi sırasında kullanılan bobin kalıbının teknik çizimini ve şeridin kalıba yerleştirilip bakır levhalara sabitlenmiş hâlinin üstten ve alttan görünüşlerini göstermektedir. Yüksek sıcaklık süperiletken şeritlerin mekanik açıdan son derece hassas olması ve dış etkenlerle süperiletkenlik özelliklerinin bozulma riski taşıması nedeniyle, sargı esnasında şeridin minimum eğrilik yarıçapının korunması kritik önem arz etmektedir. Ayrıca, şeride doğrudan temasın en aza indirilmesi ve sarım sırasında herhangi bir mekanik gerilmenin uygulanmaması gereklidir. Bu doğrultuda, asıl HTS şeritle aynı genişlikte (4 mm) kâğıt şeritler hazırlanarak çok sayıda ön deneme yapılmıştır. Son adımda, bu lehimli üç sarımlı bobin, kriyojenik dayanımı yüksek PLA malzemeden 3D yazıcıyla üretilen bobin kalıbına sarılmıştır. Şekil 68(b) ve 68(c)'de görüldüğü üzere şeritte hiçbir hasar oluşmaması ve bobin uçlarının bakır levhalara eksiksiz tutturulması, daha fazla sarımlı bobinlerde de yüksek akım ve dolayısıyla yüksek manyetik kuvvet elde edilebileceğinin göstergesidir.



Şekil 68. Kısa devre, üç sarımlı HTS bobin. Bobini sarmak için kullanılan bobin kalıbının teknik çizimi (a), uçları lehimlenerek birleştirilen HTS bobin (b), kalıba yerleşik haldeki HTS bobin (c)

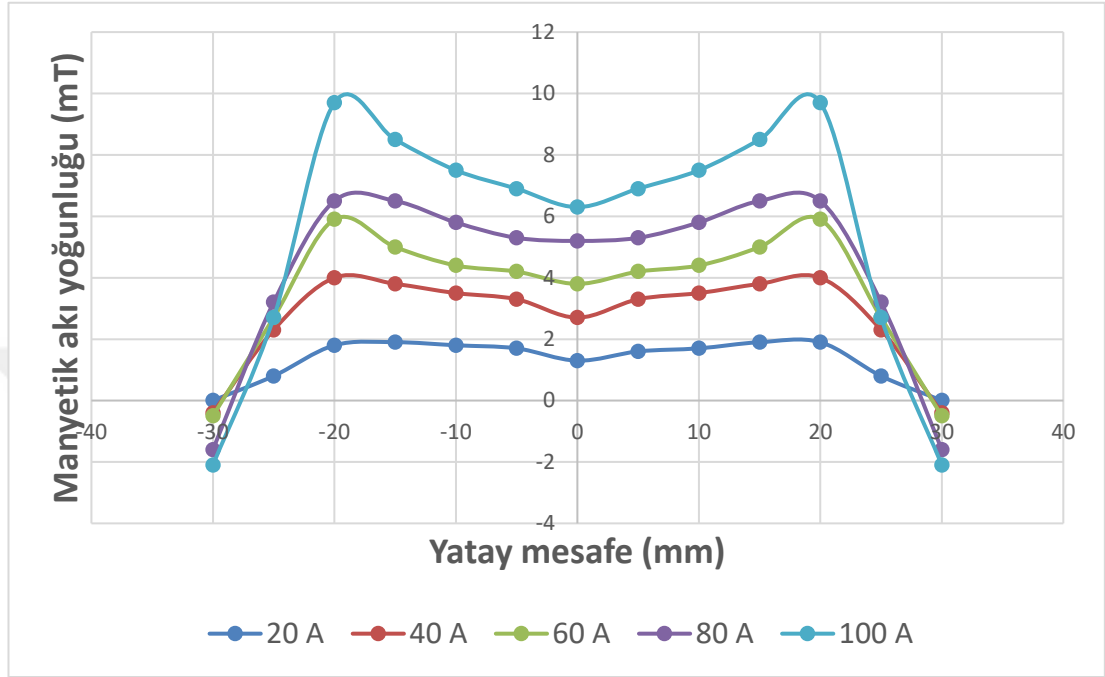
Yüksek akım altında bobin yüzeyinde oluşan manyetik alan profilini belirlemek üzere Şekil 69'daki deney düzeneği kurulmuştur. Deney sırasında HTS bobin, sıvı azot içinde soğutulmuş ve programlanabilir DA güç kaynağı ile aşamalı olarak 120 A'e kadar akım uygulanmıştır. Kullanılan ITECH IT-M3903C-10-340 modeli yüksek akım DC güç kaynağı, EDL ölçüm sistemi kapsamındaki testler için özel olarak seçilmiştir. Söz konusu güç kaynağının başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Geniş Çıkış Aralığı: 0-10V gerilim, 0-340A akım ve $\pm 3,4$ kW güç kapasitesi ile geniş bir test yelpazesine sahiptir.
- Çift Yönlü Güç Akışı: Device Under Test (DUT) ile şebeke arasında kesintisiz enerji transferi yaparak verimli bir çalışma sağlar.
- Yüksek Verimlilik ve Çevreci Tasarım: Enerji rejenerasyon teknolojisi sayesinde elektrik tüketimini ve soğutma ihtiyacını azaltarak enerji verimliliği sağlar.
- CC/CV Önceliği: Sabit akım (CC) veya sabit voltaj (CV) çalışma modları arasında öncelik belirleme imkânı sunar.
- Ayarlanabilir Çıkış Empedansı: Farklı test senaryolarına uyum sağlamak için çıkış empedansı ayarlanabilir.
- Güvenilir Şebeke Bağlantısı: Şebekenin durumunu otomatik algılayarak güvenli bir bağlantı sağlar.
- Gelişmiş Koruma Mekanizmaları: Aşırı gerilim (OVP), aşırı akım ($\pm$ OCP), aşırı güç ($\pm$ OPP), aşırı sıcaklık (OTP) ve ani elektrik kesintilerine karşı koruma sistemlerine sahiptir.



Şekil 69. Üç sarımlık HTS bobine uygulanan farklı akımlar için bobin yüzeyinde oluşan manyetik alanın ölçüldüğü deney düzeneği

Şekil 70, üç sarımlı HTS bobine uygulanan akım 100 A'ye kadar yükseltildiğinde elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımlarını ortaya koymaktadır.



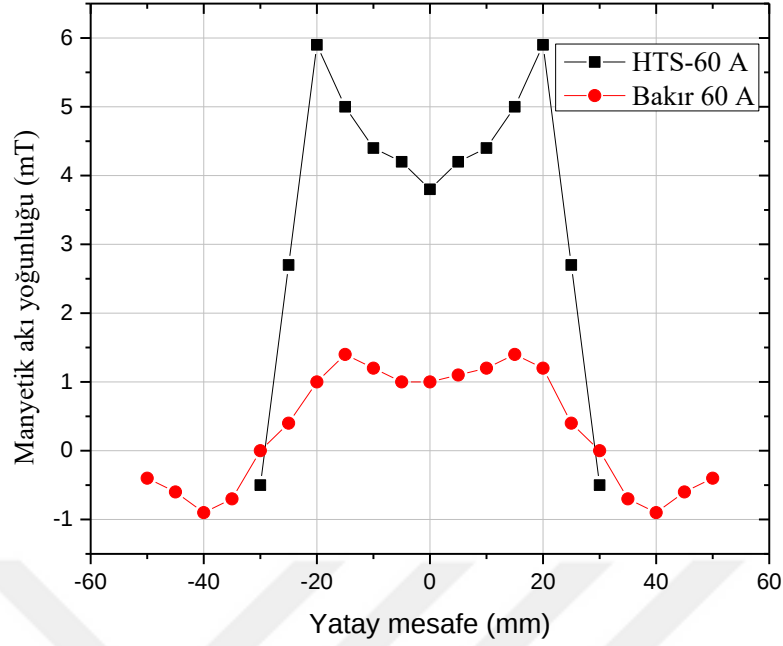
Şekil 70. 3 sarımlı HTS bobine uygulanan akımın 100 A değerine kadar elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Uygulanan akım 120 A'ye ulaştığında ise, bobin şeridindeki yerel kusur nedeniyle ısınma ve şeritte yanma gözlemlenmiş (bkz. Şekil 71), bu da bobin malzemesi üzerindeki kritik akım yoğunluğu sınırlarının aşıldığını göstermektedir.



Şekil 71. 120 A uygulandığında HTS bobinde meydana gelen bölgesel yanma

Şekil 72’de, HTS ve bakır bobinlerin her ikisini de 60 A sürekli akım uygulanması koşulunda elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere, uygulanan akım miktarı her iki bobin için aynı olmasına rağmen, yüksek sıcaklık süperiletken bobinin yüzeyinde ölçülen manyetik akı yoğunluğu değerleri, bakır bobininkilerden kayda değer biçimde daha yüksektir. Bu fark, bir yandan HTS malzemesinin ideal iletkenlik özelliği sayesinde elektrik direncinden kaynaklanan enerji kayıplarının neredeyse sıfıra indirgenmesine, diğer yandan da daha dengeli ve yoğun bir akım dağılımına olanak tanıyan süperiletkenlik olgusuna dayanmaktadır. Ayrıca, HTS bobinin manyetik akı çizgilerini daha sıkışık ve homojen bir biçimde yönlendirmesi, manyetik alan şiddetini artırarak bobin çevresindeki akı yoğunluğunu yükseltmiştir. Buna karşın, bakır bobinde oluşan I^2R kayıpları ve iletkenlik sınırları, benzer akım seviyelerinde dahi daha düşük akı yoğunluk değerlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu sonuçlar, özellikle Maglev uygulamalarında HTS bobinlerin daha yüksek kaldırma ve tahrik kuvvetleri üretebilme potansiyelini vurgulamaktadır.



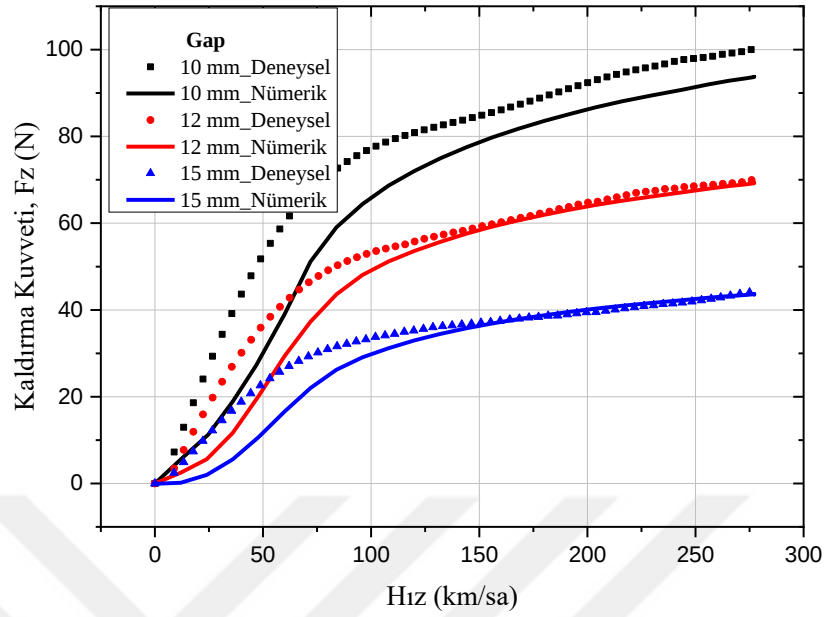
Şekil 72. HTS ve bakır bobinlerin manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması

Sonuç olarak, bakır şerit bobinler EDL uygulamaları için sınırlı etkinlik sunarken; HTS bobinlerin yüksek akı üretme ve dinamik kuvvet elde etme potansiyeli sayesinde elektrodinamik Maglev sistemlerinde daha üstün performans sağlayacağı açıktır.

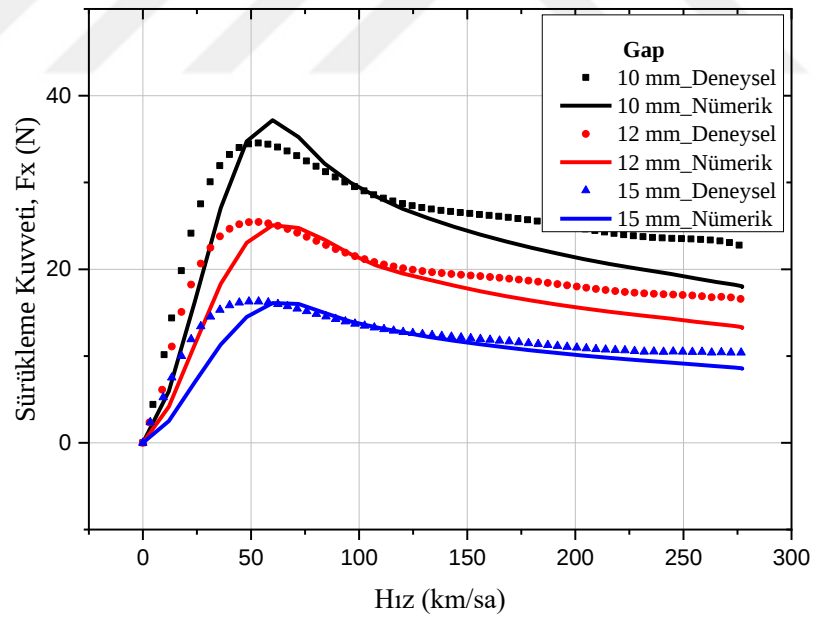
3.3. Nümerik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde, farklı hareket yüksekliklerinde (10 mm, 12 mm ve 15 mm) gerçekleştirilen nümerik ve deneysel çalışmalar temelinde, iki farklı manyetik alan kaynağına sahip EDL sisteminin performans analizine yer verilmektedir. Bu kapsamda, önce kalıcı mıknatıs dizisi (PMA) – alüminyum ray konfigürasyonuna, ardından yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) – alüminyum ray konfigürasyonuna ait kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki konfigürasyon için yapılan analizlerde, sistemin 0–275 km/sa aralığındaki dinamik performans karakteristikleri değerlendirilmiş ve ilgili nümerik modellemelerin doğruluğu deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

PMA dizisine sahip EDL sisteminde, nümerik ve deneysel kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hızla birlikte değişimi Şekil 73 ve Şekil 74'te gösterilmektedir. Şekil 73'te farklı hareket mesafelerinde elde edilen kaldırma kuvveti değerleri; Şekil 74'te ise aynı koşullar altında gözlemlenen sürüklenme kuvvetleri sunulmuştur.



Şekil 73. PMA – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde kaldırma kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması

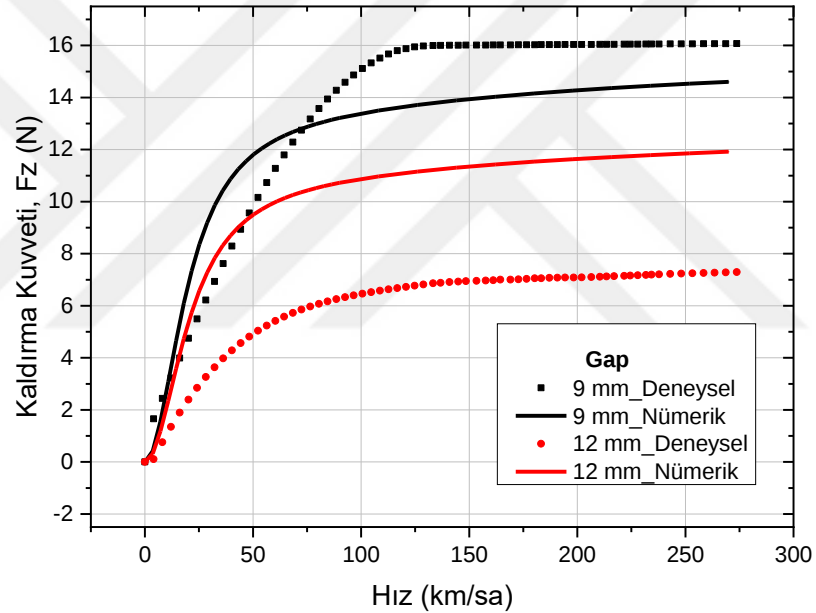


Şekil 74. PMA – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde sürüklenme kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması

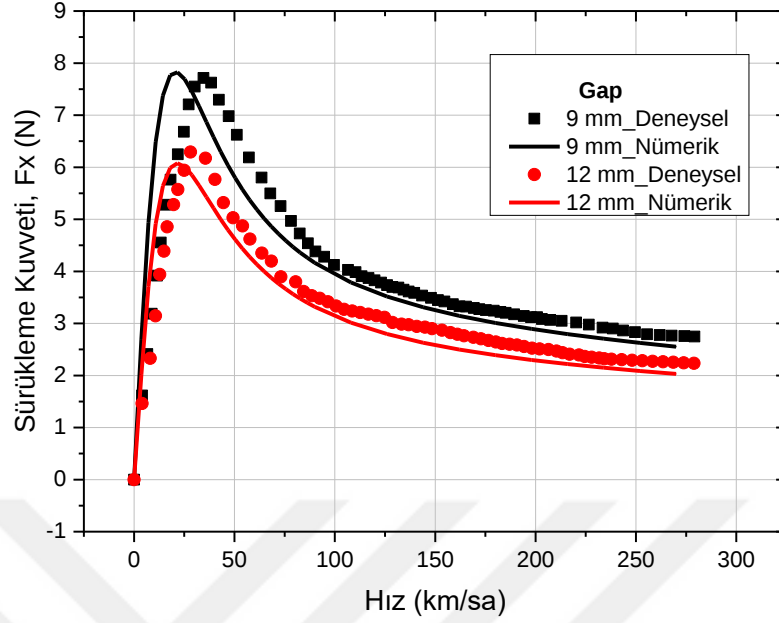
Bu sonuçlar, PMA-alüminyum ray konfigürasyonuna ait nümerik ve deneysel kaldırma/sürüklenme kuvvetlerinin büyük ölçüde birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Elde edilen verilerden de görüleceği üzere, hareket yüksekliği arttıkça hem

kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, teorik olarak da beklenen bir eğilimi teyit etmektedir; zira levitasyon kuvveti, mıknatıs ile ray arasındaki mesafenin artmasıyla birlikte manyetik akı yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak düşmektedir.

Şekil 75 ve 76’da ise manyetik akı tuzaklamış HTS ve alüminyum ray konfigürasyonuna sahip EDL sisteminde, farklı hareket yüksekliklerinde (9 mm ve 12 mm) elde edilen nümerik ve deneysel kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin karşılaştırması sunulmaktadır. Bu kapsamda, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar tabanlı nümerik simülasyon sonuçları ile, dinamik ölçüm sistemi prototipi üzerinden elde edilen deneysel bulgular 0- 275 km/sa aralığında değerlendirilmiştir.



Şekil 75. Manyetik akı tuzaklanmış HTS – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde kaldırma kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması



Şekil 76. Manyetik akı tuzaklanmış HTS – Alüminyum ray konfigürasyonunda, farklı hareket yüksekliklerinde sürüklenme kuvvetinin nümerik ve deneysel karşılaştırması

HTS konfigürasyonu için sürüklenme kuvveti değerleri, nümerik ve deneysel sonuçlar arasında yüksek bir tutarlılık göstermektedir. Ancak kaldırma kuvveti açısından, özellikle 12 mm hareket mesafesinde belirgin bir sapma gözlemlenmiştir. HTS–alüminyum ray konfigürasyonunda özellikle 12 mm hareket mesafesinde gözlemlenen kaldırma kuvveti sapması, süperiletken sistemin deneysel koşullara duyarlılığından kaynaklanmaktadır. Nümerik modellemelerde HTS içerisindeki manyetik akı tuzaklanması ideal ve homojen dağılıma sahip bir yapı varsayımı ile ele alınmakta olup, bu durum gerçek deneysel koşullarda tam olarak sağlanamamaktadır. Deneysel sistemde süperiletkeninin göreceli hareketten dolayı süperiletken içerisinde eddy akım kayıplarının olması ve kriyojenik soğutmanın HTS yüzeyinde homojen olmaması gibi parametreler, özellikle daha geniş hareket yüksekliklerinde (örneğin 12 mm) kaldırma kuvvetini azaltıcı yönde etkide bulunmaktadır. Ayrıca, süperiletken modül ile alüminyum ray arasındaki geometrik hizalanma hataları, deneysel düzende kaçınılmaz biçimde oluşabilmekte ve bu da sistemin simetrik manyetik etkileşim yapısını bozarak kaldırma kuvvetini düşürebilmektedir. Tüm bu faktörler, HTS sistemlerinde statik levitasyon ölçümlerinde gözlemlenen kaldırma kuvveti sapmalarının temel nedenleri arasında yer almakta ve literatürde de sıklıkla rapor edilen

deneysel varyasyonlarla tutarlılık göstermektedir. Bu bağlamda, HTS içeren sistemlerin nümerik ve deneysel doğrulamaları yapılırken, süperiletkenliğe özgü fiziksel hassasiyetlerin dikkatle ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Öte yandan, sürüklenme kuvvetlerinin nümerik ve deneysel verilerle oldukça benzer sonuçlar vermesi, modellemede kullanılan iletkenlik, hız ve geometri parametrelerinin gerçek sistemle uyumlu şekilde belirlendiğini göstermektedir. Bu durum, girdap akımı kaynaklı frenleme davranışının sayısal modellemede başarılı biçimde temsil edildiğini ortaya koymaktadır.

PMA-alüminyum ray arasındaki deneysel ve nümerik kuvvet verileri arasındaki farkların oldukça düşük seviyelerde olması, PMA konfigürasyonunun geometrik sadeliği, manyetik alan dağılımının daha öngörülebilir olması ve sistemde süperiletken gibi çevresel hassasiyetlere açık bir bileşenin bulunmamasıyla açıklanabilir. Bu nedenle, HTS sistemine kıyasla PMA konfigürasyonunda nümerik modelleme daha yüksek doğrulukta sonuçlar üretmiştir.

Sonuç olarak, her iki konfigürasyon için yapılan karşılaştırmalı analiz, nümerik modelin deneysel verilerle yüksek uyum içerisinde çalıştığını göstermiş; bununla birlikte HTS konfigürasyonlarında deneysel ve nümerik sonuçlar arasında görülen kaldırma kuvveti sapmalarının, süperiletken davranışın doğasında bulunan parametre hassasiyetinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. PMA sistemi ise düşük manyetik kuvvet üretme potansiyeline karşın, özellikle kaldırma kuvveti üretiminde daha stabil ve tahmin edilebilir bir performans göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, EDL tabanlı alüminyum raylı HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi önce tasarlanıp imal edilmiş; ardından modüler yapıya sahip Delta AS300 PLC ve kullanıcı dostu SCADA arayüzünden oluşan kontrol-veri toplama altyapısıyla donatılarak kuvvet, pozisyon ve hız gibi kritik parametrelerin gerçek zamanlı ölçümü mümkün kılınmıştır. Deneysel prototip, farklı PMA topolojileri, HTS ve bakır bobinler ile 10–120 A akım aralığında ve farklı hareket yüksekliklerinde test edilerek aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

- Sayısal simülasyonlar kapsamında alüminyum rayda farklı boşluk genişlikleri (6, 12, 18, 24, 30 ve 36 mm) için hem dinamik kaldırma/sürükleme kuvvetleri hem de malzeme tüketimi analiz edilmiştir. Bu topolojilerin LDR/maliyet oranları incelendiğinde, %20’lik boşluk genişliğinin hem teknik performans (yüksek kaldırma/sürükleme oranı) hem de ekonomik verimlilik (tasarruf/maliyet dengesi) açısından en uygunu olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, sayısal simülasyon sonuçları, boşluklu alüminyum rayların hem sistem verimliliğini artıracaklarını hem de üretim maliyetlerinde önemli ölçüde düşüş sağlayacaklarını ortaya koymaktadır.
- PMA-EDL sistemi için üç farklı konfigürasyon (Kon-a, Kon-b, Kon-c) için manyetik kuvvet ölçüm deneyleri yapılmıştır. Kon-b (10 mm gap) konfigürasyonunda en yüksek kaldırma kuvveti 103 N, sürükleme kuvveti 23 N olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, 4 m’lik vagon ölçeğine ölçeklenmiş teorik kaldırma kuvvetleri farklı gap değerlerinde karşılaştırılmıştır.
- Farklı PMA konfigürasyonlarıyla oluşturulan PMA-alüminyum ray levitasyon ve sürükleme kuvveti deney sonuçlarının, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan nümerik simülasyonlarla benzer sonuçlar vermesi, kullanılan sayısal yöntemin tutarlılığını ve deneysel sonuçları ifade etmedeki başarısını gösterir. Kullanılan sayısal yöntemdeki yaklaşım, bu alandaki araştırmacıların, ileriki deneysel çalışmalarını daha başarılı ve düşük maliyetle kurgulamalarına imkân verir.
- HTS-EDL sistemi için yapılan deneylerde, farklı PMA topolojileri altında HTS bloklarında 200–407 mT aralığında kararlı akı tuzaklama gerçekleşmiş, bu değerler literatürdeki benzer çalışmalara yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca, tek numune için

maksimum 467 N kaldırma kuvveti, dört metre uzunluğundaki vagona ölçeklendiğinde 116750 N ($\approx 11,9$ ton) değerine ulaşılmıştır.

- HTS şerit bobin ile tek sarımlı HTS bobin uygulamalarında 60 A akımda elde edilen manyetik akı yoğunluğu, bakır şerit bobine göre dört kat daha daha yüksek bulunmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen modüler EDL tabanlı alüminyum raylı HTS Maglev dinamik ölçüm sistemi hem sayısal simülasyonlar hem de kapsamlı deneysel testler aracılığıyla doğrulanmış; boşluklu ray topolojilerinin verimlilik ve malzeme tasarrufu sağladığı, Kon-b düzenlemesinin en yüksek kaldırma performansını sunduğu, HTS blokların kararlı akı tuzaklama kapasitesi gösterdiği ve HTS bobinlerin bakır bobinlere kıyasla çok daha yüksek manyetik akı yoğunluğu ürettiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak hem temel bilimsel araştırmalar hem de geleceğin yüksek hızlı Maglev/Hyperloop uygulamaları için bu prototip, güvenilir bir test altyapısı olarak işlev görecektir; ilerleyen çalışmalarda optimizasyon, ölçekleme ve ticari entegrasyon süreçlerine sağlam bir referans sağlayacaktır.

5. ÖNERİLER

Bu doktora çalışması kapsamında geliştirilen özgün HTS-Alüminyum ray tabanlı elektrodinamik levitasyon (EDL) Maglev dinamik ölçüm sistemi hem literatürdeki önemli boşlukları doldurmakta hem de gelecekte yürütülecek Maglev ve Hyperloop temelli araştırmalar için sağlam bir deneysel altyapı sunmaktadır. Gerek laboratuvar ölçeğinde elde edilen deneysel bulgular, gerekse nümerik modelleme ve manyetik analiz sonuçları, bu sistemin hem akademik hem de ticarî bağlamda uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu bağlamda, çalışmanın çıktıları doğrultusunda gelecekte yapılabilecek araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yönelik öneriler aşağıda disiplinler arası ve sistematik bir yaklaşımla sunulmaktadır:

- Geliştirilen prototip farklı hız seviyeleri (≥ 500 km/sa ve üzeri) ve değişken ray-topoloji parametreleri (örneğin, ray kalınlığı, genişliği, boşluk oranı) altında sistematik şekilde test edilebilir. Bu çalışmalar, kaldırma/sürüklenme kuvvetlerinin hız ve geometrik konfigürasyonlara bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koyacak ve LDR performans grafiklerinin çıkarılmasına olanak sağlayacaktır.
- HTS bobin geometrisi (sarım sayısı, şekil vb.) ve PMA düzenlemelerinin sayısal simülasyonlarla (COMSOL, ANSYS vb.) yeniden optimize edilerek deneysel doğrulamaların prototip üzerinde yapılabilir.
- Sektör iş birlikleri ile endüstriyel raylı sistem koşullarında (özgün ray profilleri, taşıyıcı yük simülasyonu) pilot deneylerin gerçekleştirilmesi yapılabilir. Bu sayede prototip, akademik yayınlar kadar potansiyel ticarî uygulamalar için de güvenilir bir test sistemi haline getirilebilir.
- Prototip, hem kriyojenik (20–80 K) hem de oda sıcaklığına yakın (77–300 K) koşullarda test edilerek HTS malzemenin farklı sıcaklıklardaki performansı karşılaştırılabilir.
- Tünel içi vakumlu boru deneyleri ile ≥ 600 km/sa hızlarda Hyperloop senaryoları test edilerek ayrışma ve sönümlenme dinamikleri incelenebilir ve AA kayıplarını minimize eden şerit-tel tasarımları üzerinde araştırmalar yürütülebilir.
- Elektrik mühendisliği açısından, yüksek akım-kritik akım aralığında HTS malzemelerin pasif ve aktif soğutma çözümlerinin (Helyum, Sıvı Azot vb.) karşılaştırmalı değerlendirilmesi yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdioglu, M., Ozturk, K., Gedikli, H., Ekici, M. & Cansiz, A. (2015). Levitation and guidance force efficiencies of bulk YBCO for different permanent magnetic guideways. *Journal of Alloys and Compounds*, 630, 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.044>
- Aluminium PRICE Today | Aluminium Spot Price Chart | Live Price of Aluminium per Ounce | Markets Insider (2025). <https://markets.businessinsider.com/commodities/aluminum-price> [2025-04-19]
- Bachelet, E., Levitating transmitting apparatus. US1020942A. (1912). <https://patents.google.com/patent/US1020942A/en> [2024-10-24]
- Beauloye, L. & Dehez, B. (2023). Permanent Magnet Electrodynamic Suspensions Applied to MAGLEV Transportation Systems: A Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9 (1), 748-758. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3193296>
- Bohn, G. & Steinmetz, G. (1984). The electromagnetic levitation and guidance technology of the “transrapid” test facility Emsland. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20 (5), 1666-1671. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063246>
- Celik, S. (2016). Design of magnetic levitation force measurement system at any low temperatures from 20K to room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 662, 546-556. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.230>
- Deng, Z., Li, J., Zhang, W., Gou, Y., Ren, Y. & Zheng, J. (2017). High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation Vehicles: Dynamic Characteristics While Running on a Ring Test Line. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12 (3), 95-102. <https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2700493>
- Deng, Z., Shi, H., Chen, Y., Ke, Z., Liang, L., Liu, X., Li, K. & Zhang, W. (2025). A cost-effective linear propulsion system featuring PMEDW for HTS maglev vehicle: design, implementation, and dynamic test. *Measurement*, 240, 115618. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115618>
- Deng, Z., Zhang, W., Kou, L., Cheng, Y., Huang, H., Wang, L., Chen, J., Ke, Z. & Ma, Q. (2021). An Ultra-High-Speed Maglev Test Rig Designed for HTS Pinning Levitation and Electrodynamic Levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31 (8), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3094449>
- Deng, Z., Zhang, W., Wang, L., Wang, Y., Zhou, W., Zhao, J., Lu, K., Guo, J., Zhang, W., Zhou, X., Wang, S., Ma, Q., Floegel-Delor, U. & Werfel, F.N. (2022). A High-Speed Running Test Platform for High-Temperature Superconducting Maglev. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32 (4), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3143474>

- Deng, Z., Zhang, W., Zheng, J., Ren, Y., Jiang, D., Zheng, X., Zhang, J., Gao, P., Lin, Q., Song, B. & Deng, C. (2016). A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (6), 1-8. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2555921>
- Ding, J., Yang, X. & Long, Z. (2019). Structure and control design of levitation electromagnet for electromagnetic suspension medium-speed maglev train. *Journal of Vibration and Control*, 25 (6), 1179-1193. <https://doi.org/10.1177/1077546318813405>
- D'Ovidio, G., Crisi, F. & Lanzara, G. (2008). A "V" shaped superconducting levitation module for lift and guidance of a magnetic transportation system. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 468 (14), 1036-1040. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.154>
- Feng, Y., Zhao, C., Zhai, W., Tong, L., Liang, X. & Shu, Y. (2023). Dynamic Performance of Medium Speed Maglev Train Running Over Girders: Field Test and Numerical Simulation. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 23 (01), 2350006. <https://doi.org/10.1142/S0219455423500062>
- Flankl, M., Wellerdieck, T., Tüysüz, A. & Kolar, J.W. (2018). Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*, 12 (3), 357-364. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0480>
- França, T.N., Shi, H., Deng, Z. & Stephan, R.M. (2021). Overview of Electrodynamic Levitation Technique Applied to Maglev Vehicles. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31 (8), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3089104>
- Gou, J. (2018). Development Status and Global Competition Trends Analysis of Maglev Transportation Technology Based on Patent Data. *Urban Rail Transit*, 4 (3), 117-129. <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0087-3>
- Guerrieri, M. (2023). *Fundamentals of Railway Design*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24030-0>
- Han, H.-S. & Kim, D.-S. (2016). *Magnetic Levitation*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7524-3>
- Houbart, M., Fagnard, J.-F., Dular, J., Dennis, A.R., Namburi, D.K., Durrell, J.H., Geuzaine, C., Vanderheyden, B. & Vanderbemden, P. (2022). Trapped magnetic field distribution above a superconducting linear Halbach array. *Superconductor Science and Technology*, 35 (6), 064005. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac68a7>
- Hu, Y., Long, Z., Zeng, J. & Wang, Z. (2021). Analytical Optimization of Electrodynamic Suspension for Ultrahigh-Speed Ground Transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57 (8), 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3082686>
- Huang, H., Li, H., Sun, Y., Hu, X., Huang, H., Li, H., Sun, Y. & Hu, X. (2024). *Development and Challenges of Maglev Transportation*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007211>

- IEA – International Energy Agency (2023). <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021,1-36> [2025-05-02]
- Íñiguez, J. & Raposo, V. (2009). Laboratory scale prototype of a low-speed electrodynamic levitation system based on a Halbach magnet array. *European Journal of Physics*, 30 (2), 367. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/2/016>
- Kublin, T., Grzesiak, L., Radziszewski, P., Nikoniuk, M. & Ordyszewski, Ł. (2021). Reducing the Power Consumption of the Electrodynamic Suspension Levitation System by Changing the Span of the Horizontal Magnet in the Halbach Array. *Energies*, 14 (20), 6549. <https://doi.org/10.3390/en14206549>
- Kusada, S., Igarashi, M., Nemoto, K., Okutomi, T., Hirano, S., Kuwano, K., Tominaga, T., Terai, M., Kuriyama, T., Tasaki, K., Tosaka, T., Marukawa, K., Hanai, S., Yamashita, T., Yanase, Y., Nakao, H. & Yamaji, M. (2007). The Project Overview of the HTS Magnet for Superconducting Maglev. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17 (2), 2111-2116. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.899691>
- Lee, H.-W., Kim, K.-C. & Lee, J. (2006). Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42 (7), 1917-1925. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.875842>
- Li, H., Hu, C., Dai, T., Li, Z., Hu, Y. & Zhang, P. (2024). A Multi-Module HTS Inductive Pulse Power Supply With Wide Current Pulse Output. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34 (8), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3463508>
- Liang, X., Jiang, T., Hong, Y., Zhang, J., Jiang, M. & Wang, Z. (2020). Vibration Response Analysis of Simply Supported Box Girder Bridge-Maglev Train in Accelerated Test of Changsha Maglev Express. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020 (1), 9563747. <https://doi.org/10.1155/2020/9563747>
- Lin, G. & Sheng, X. (2018). Application and further development of Maglev transportation in China. *Transportation Systems and Technology*, 4 (3), 36-43. <https://doi.org/10.17816/transsyst20184336-43>
- Liu, L., Wang, J., Deng, Z., Li, J., Zheng, J., Ma, G. & Wang, S. (2010). Levitation Force Transition of High-Tc Superconducting Bulks in Varying External Magnetic Field. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 20 (3), 920-923. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2041645>
- Liu, Z., Long, Z. & Li, X. (2015). *Maglev Trains: Key Underlying Technologies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45673-6>
- Luo, C., Zhang, K., Zhang, W. & Jing, Y. (2020). 3D Analytical Model of Permanent Magnet and Electromagnetic Hybrid Halbach Array Electrodynamic Suspension System. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15 (4), 1713-1721. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00449-y>
- Ma, W., Song, R., Xu, J., Zang, Y. & Luo, S. (2015). A Coupling Vibration Test Bench and the Simulation Research of a Maglev Vehicle. *Shock and Vibration*, 2015 (1), 586910. <https://doi.org/10.1155/2015/586910>

- Mattos, L.S., Rodriguez, E., Costa, F., Sotelo, G.G., de Andrade, R. & Stephan, R.M. (2016). MagLev-Cobra Operational Tests. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (3), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524473>
- Meins, J., Miller, L. & Mayer, W.J. (1988). The high speed Maglev transport system TRANSRAPID. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24 (2), 808-811. <https://doi.org/10.1109/20.11347>
- Moon, F.C. (2008). *Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation*. John Wiley & Sons.
- Okano, M., Iwamoto, T., Furuse, M., Fuchino, S. & Ishii, I. (2006). Running Performance of a Pinning-Type Superconducting Magnetic Levitation Guide. *Journal of Physics: Conference Series*, 43 (1), 999. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/244>
- Ozturk, U.K., Abdioglu, M. & Mollahasanoglu, H. (2023). Magnetic Force Performance of Hybrid Multisurface HTS Maglev System With Auxiliary Onboard PMs. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33 (3), 1-6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3237762>
- Özbek, R., Rümeyisa, Ö., Çodur, M.Y. & Yasin, Ç.M. (2021). Comparison of hyperloop and existing transport vehicles in terms of security and costs. *Modern Transportation Systems and Technologies*, 7 (3), 5-29. <https://doi.org/10.17816/transsyst2021735-29>
- Pandey, A. & Adhyaru, D.M. (2023). Control techniques for electromagnetic levitation system: a literature review. *International Journal of Dynamics and Control*, 11 (1), 441-451. <https://doi.org/10.1007/s40435-022-00971-z>
- Park, D.Y., Shin, B.C. & Han, H. (2009). Korea's Urban Maglev Program. *Proceedings of the IEEE*, 97 (11), 1886-1891. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030247>
- Peng, C., Zhou, X., Yang, B., Liu, X. & Deng, Z. (2025). Levitation Performance Evolution of HTS Maglev Systems Under Thermally Induced Magnetic Irregularities in Permanent Magnet Guideways. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3563015>
- Pollard, M.G. (1984). Maglev-a British first at Birmingham. *Physics in Technology*, 15 (2), 61. <https://doi.org/10.1088/0305-4624/15/2/I04>
- Sivrioglu, S. & Cinar, Y. (2007). Levitation analysis of a ring shaped permanent magnet–high temperature superconductor vertical bearing system. *Superconductor Science and Technology*, 20 (6), 559. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/6/012>
- Sivrioglu, S., Yildiz, A.S. & Bedirbeyoğlu, M.I. (2021). A new guideway design for the HTS Maglev vehicles considering curve negotiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1975 (1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1975/1/012030>
- Suzuki, S., Kawashima, M., Hosoda, Y. & Tanida, T. (1984). HSST-03 system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20 (5), 1675-1677. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063210>

- The Superconducting Maglev (2021). https://global.jr-central.co.jp/en/company/_pdf/superconducting_maglev.pdf [2024-10-29]
- Thornton, R., Clark, T., Wieler, J., Perreault, B., Eggers, W., & MagneMotion (2004). MagneMotion urban maglev : final report. (MA-26-7077-02.04.2). <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16183> [2025-04-24]
- Thorstrand, A. (2020). Maglev deployment in winter climate. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-276706> [2025-05-02]
- Tramacere, E., Pakštys, M., Galluzzi, R., Amati, N., Tonoli, A. & Lembke, T.A. (2024). Modeling and experimental validation of electrodynamic maglev systems. *Journal of Sound and Vibration*, 568, 117950. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117950>
- Tsuchiya, M. & Ohsaki, H. (2000). Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (5), 3683-3685. <https://doi.org/10.1109/20.908940>
- Wang, J., Wang, S., Deng, C., Zeng, Y., Zhang, L., Deng, Z., Zheng, J., Liu, L., Lu, Y., Liu, M., Lu, Y., Huang, Y. & Zhang, Y. (2008). A High-Temperature Superconducting Maglev Dynamic Measurement System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18 (2), 791-794. <https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920568>
- Wang, S., Li, H., Wang, L., Deng, Z., Miao, P., Sugiura, T. & Xu, J. (2025a). Nonlinear resonance characteristics in HTS pinning maglev systems based on multiscale method and experimental test. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 226, 112367. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112367>
- Wang, Z., Yang, H., Lei, W. & Zheng, J. (2025b). Multi-parameter refinement mechanical properties measurement of high temperature superconducting bulk array for maglev system. *Measurement*, 251, 117249. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117249>
- Wen, Y., Xin, Y., Hong, W. & Zhao, C. (2020). A Force Measurement System for HTS Maglev Studies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (7), 5018-5026. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2954016>
- Wu, H., Zeng, X.-H. & Gao, D.-G. (2021). Periodic Response and Stability of a Maglev System with Delayed Feedback Control Under Aerodynamic Lift. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 21 (03), 2150040. <https://doi.org/10.1142/S0219455421500401>
- Xu, Y., Zhao, Z., Yin, S. & Long, Z. (2023). Real-Time Performance Optimization of Electromagnetic Levitation Systems and the Experimental Validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (3), 3035-3044. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3167154>
- Yaghoubi, H. (2013). The Most Important Maglev Applications. *Journal of Engineering*, 2013 (1), 537986. <https://doi.org/10.1155/2013/537986>

- Yin, M., Li, Y., Wang, Z., He, Y., Li, H. & Deng, Z. (2025). Dynamic Analysis of Levitator Failure in HTS Pinning Maglev Vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 35 (4), 1-9. <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3551342>
- Zehden, A., Electric traction apparatus. US782312A. (1905). <https://patents.google.com/patent/US782312A/en> [2024-10-24]
- Zhang, G., Fang, Y., Song, F., Zhu, G. & Wang, Z. (2004). Optimal design and FEM analysis of the superconducting magnets of EMS-MAGLEV models using Bi-2223 tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14 (2), 1850-1853. <https://doi.org/10.1109/TASC.2004.830881>
- Zhao, C.F. & Zhai, W.M. (2002). Maglev Vehicle/Guideway Vertical Random Response and Ride Quality. *Vehicle System Dynamics*, 38 (3), 185-210. <https://doi.org/10.1076/vesd.38.3.185.8289>
- Zhou, D., Cui, C., Zhao, L., Zhang, Y., Wang, X. & Zhao, Y. (2016). Static and dynamic stability of the guidance force in a side-suspended HTS maglev system. *Superconductor Science and Technology*, 30 (2), 025019. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/30/2/025019>

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı MOLLAHASANOĞLU, İlköğrenimini Eskipazar İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2009 yılında Trabzon-Araklı Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında başladığı, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında lisans derecesi ile mezun oldu. Mezuniyetinin ardından İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSKİ Yenikapı Atıksu Arıtma Tesisinde Elektrik Mühendisi unvanı ile çalışarak mesleki deneyim kazanmaya başlamıştır. 2018 yılında Çoruh Elektrik Dağıtım A.Ş.'de şebeke operasyonları alanında çalışmıştır. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2020 yılında "Tek Fazlı Şebekeden Bağımsız Transformatörsüz H5 Evirici Uygulaması" başlıklı teziyle mezun olmuştur. Aynı yıl doktora programına kabul edilmiş olup, 2019 yılından itibaren Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Desteklenen Projeler:

1. Yeni Nesil Elektrodinamik (ED-Levitation) Hyperloop/Maglev Temassız Alüminyum Raylı Ulaşım Sistemlerinin Elektromanyetik Kuvvet Parametrelerinin Nümerik ve Deneysel Yöntemlerle Araştırılması-TÜBİTAK1001 Projesi-Bursiyer.
2. HTS-Alüminyum Raylı Elektrodinamik Maglev Sisteminin Manyetik Kuvvet ve Diğer Dinamik Karakteristiklerinin 6-Eksenli Kuvvet Sensörü ile İncelenmesi-BAP Projesi-Araştırmacı.
3. HTS-Alüminyum Raylı Elektrodinamik Maglev Ölçüm Sisteminin Tasarımı ve PLC Kontrolü-BAP Projesi-Araştırmacı.
4. Toplumsal Olaylara Müdahalede İnsansız Hava Aracı (TOMHA) Yapımı ve Analizleri-BAP Projesi-Araştırmacı.
5. Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi-TÜBİTAK1002 Projesi-Araştırmacı.

SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Makaleler:

1. Mollahasanoğlu, H., Abdioğlu, M., Öztürk, U. K., Okumuş, H. İ., Coşkun, E., & Genç, A., (2025). Numerical Investigation of EDS Maglev Systems in Terms of Performance and Cost for Different PMs-Aluminum Rail Arrangements. JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM, cilt.38, 1-11.
2. Abdioğlu, M., Öztürk, U. K., Güner, S. B., Öztürk, M., Mollahasanoğlu, H., & Yanmaz, E., (2023). Enhancing magnetic levitation and guidance force and weight efficiency of high-temperature superconducting maglev systems by using sliced bulk YBCO. International Journal of Applied Ceramic Technology , cilt.20, sa.6, 3766-3774.
3. Mollahasanoğlu, H., Mollahasanoğlu, M., & Özkop, E., (2024). Comparative study of single-phase multilevel cascaded transformerless inverters with different modulation methods. ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY-AN INTERNATIONAL JOURNAL-JESTECH, cilt.51.
4. Öztürk, U. K., Abdioğlu, M., Ozkat, E. C., & Mollahasanoglu, H., (2023). Extended 2-D Magnetic Field Modeling of Linear Motor to Investigate the Magnetic Force Parameters of High-Speed Superconducting Maglev. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, cilt.33, sa.4.
5. Mollahasanoğlu, M., Mollahasanoğlu, H., & Okumuş, H. İ., (2024). A New PWM Technique for Three-Phase Three-Level Neutral Point Clamped Rectifier. Arabian Journal for Science and Engineering , cilt.49, sa.5, 6521-6530.
6. Ozturk, U. K., Abdioglu, M., & Mollahasanoğlu, H., (2023). Magnetic Force Performance of Hybrid Multisurface HTS Maglev System With Auxiliary Onboard PMs. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, cilt.33, sa.3.
7. Toren, M., & Mollahasanoglu, H., (2023). Comparative Implementation of Thermoelectric Coolers in Transformer Cooling. ELECTRIC POWER COMPONENTS AND SYSTEMS.
8. Mollahasanoğlu, M., Mollahasanoğlu, H., & Okumuş, H. İ., (2023). New modified carrier-based level-shifted PWM control for NPC rectifiers considered for implementation in EV fast chargers. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences , cilt.31, sa.7, 1254-1275.

9. M. Tören ve H. Mollahasanoğlu, "Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance," Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt.38, sa.3, ss.1389-1401, 2023.
10. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2023). Comparison of Heuristic Approaches in Weight Optimization of Different Power Levels Transformers. IETE JOURNAL OF RESEARCH, cilt.69, sa.5, 2266-2280.

Diğer Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

1. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2024). Short circuit and load flow analysis of the central feeder of Rize province in DIgSILENT software Rize province. Turkish Journal of Electromechanics and Energy, cilt.9, sa.3, 85-94.
2. Mollahasanoğlu, H., & Özkop, E., (2024). Experimental and Simulated Investigation of a Single-Phase Transformerless H5 Inverter Topology. JORDAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, cilt.10, sa.1, 103-121.
3. Mollahasanoğlu, M., Mollahasanoğlu, H., & Okumuş, H. İ., (2024). Evaluation of three-phase neutral-point-clamped PFC rectifier implemented with isolated DC-DC converters for EV fast charger. PAMUKKALE UNIVERSITY JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES-PAMUKKALE UNIVERSITESI MUHENDISLIK BILIMLERI DERGISI, cilt.30, sa.4, 463-469.
4. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., Çepni, M., & Kına, M., (2023). Evaluation of the performance of an unmanned aerial vehicle with artificial intelligence support and Mavlink protocol designed for response to social incidents response. International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers, cilt.11, sa.2, 88-93.
5. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2023). Gri Kurt Optimizasyon Algoritması ile Güç ve Dağıtım türü Transformatörlerin Ağırlık Optimizasyonu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt.12, sa.1, 96-103.
6. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2022). Investigation of Electric Motors in Electric and Hybrid Vehicles and Estimation of Changes in CO2 Emissions: A Sample of Turkey. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, cilt.9, sa.3, 1082-1097.

7. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2021). Termoelektrik Soğutma Sisteminin Alternatif Transformatör Soğutma Sistemi Olarak Performansı. *European Journal of Science and Technology*, cilt.32, 498-507.

Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar:

1. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Nasuhbeyoğlu, H., (2024). Development of ECG Analysis Program Using Matlab Interface for Heart Rhythm Disorder Detection. VIII. International Health, Engineering and Sciences Congress (ss.74-81). İzmir, Türkiye.
2. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2023). Optimization of BLDC Traction Motor Parameters in Electric Vehicles with Whale Optimization Algorithm. 5th International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'23) (ss.9). Trabzon, Türkiye.
3. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2023). THE EFFECT OF NANOPARTICLE FLUID COOLERS ON THE LIFE AND PERFORMANCE OF DISTRIBUTION TYPE TRANSFORMERS. 5th International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'23) (ss.10-19). Trabzon, Türkiye
4. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Toran, S. E., (2022). Investigation of the Effects of Different Temperature Performance Types of Magnet on Motor Performance Parameters in PMBLDC Gearless Motor from Electric Vehicle Traction Motors. 10th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'22) (ss.73). Van, Türkiye.
5. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., Çepni, M., & Kına, M., (2022). Unmanned Aerial Vehicle Designed for Response to Social Incidents and Performance Investigation. 10th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'22) (ss.272-276). Van, Türkiye.
6. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Kaya, S. M., (2022). Cooling System Design and Control of Battery Management System of Electric Vehicles. 3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ss.1025-1026). Konya, Türkiye.
7. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2021). Determination of Optimum Stator and Rotor Resistance Values for Obtaining Parameters of Three Phase Induction Motor

- by Taguchi Method. 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (ss.440-444). Bursa, Türkiye.
8. Tören, M., & Mollahasanoğlu, H., (2021). Investigation of Thermoelectric Cooler System Effect on Induction Motor Performance . 2021 17th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power systems (ELMA) (ss.1-10). Sofija, Bulgaristan.
 9. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Tağıl, M., (2020). Investigation Of The Thermoelectric Coolers Effects On Life Cycle Of Transformers. 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (ss.221-225). Bursa, Türkiye.
 10. Mollahasanoğlu, H., & Özkop, E., (2019). Tek Fazlı Şebeke Bağlantılı Transformatörsüz H5 Evirici Denetimi. II. Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi (ss.131-136). Konya, Türkiye.

Kitap & Kitap Bölümleri:

1. Mollahasanoğlu, H., Öztürk, U. K., & Abdioğlu, M., (2024). Maglev ve Hyperloop Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Geleceğin Yüksek Hızlı Taşımacılık Çözümleri. Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde İleri Araştırmalar (ss.36-55), Afyonkarahisar: Yaz Yayınları.
2. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Güzel, C. B., (2024). Monocrystalline Vs. Polycrystalline: A Case For Optimal Solar Power Design İn Turkey. Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde İleri Araştırmalar (ss.1-21), Afyonkarahisar: Yaz Yayınları.
3. Tören, M., Mollahasanoğlu, H., & Toran, S. E., (2022). Investigation of The Effects of Different Temperature Performance Types Of Magnet On Motor Performance Parameters in PMBLDC Gearless Motor from Electric Vehicle Traction Motors. Current Studies in Electrical Electronics and Computer Engineering (ss.119-131), İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti.