

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

**YÜKSEK TAŞIMA KAPASİTELİ SÜPERİLETKEN MAGLEV  
KRİYOSTAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

**MUHAMMET İSLAM BEDİRBEYOĞLU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2021**

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

**YÜKSEK TAŞIMA KAPASİTELİ  
SÜPERİLETKEN MAGLEV KRİYOSTAT  
SİSTEMİNİN TASARIMI VE  
OPTİMİZASYONU**

**MUHAMMET İSLAM BEDİRBEYOĞLU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI  
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU**

**GEBZE  
2021**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DESIGN AND OPTIMIZATION OF  
HIGH CARRYING CAPACITY  
SUPERCONDUCTING MAGLEV  
CRYOSTAT SYSTEM**

**MUHAMMET İSLAM BEDİRBEYOĞLU**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU**

**GEBZE**  
**2021**

<b>GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</b>	<b>YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU</b>
----------------------------------	--------------------------------------

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05/02/2021 tarih ve 2021/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/06/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Muhammet İslam BEDİRBEYOĞLU'nun tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### **JÜRİ**

ÜYE  
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

ÜYE : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Ali Suat YILDIZ

### **ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu çalışmada manyetik olarak havalanmış (maglev) trenlerin kriyostatında ve doğrusal manyetik yatak sistemlerinde kullanılan süperiletkenin kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri incelenmiştir. Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti (stiffness) değerlerini yükseltmek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada ilk olarak manyetik kılavuzlama yolu (PMG) için farklı bir mıknatıs dizilim tasarımı geliştirildi. Bu tasarımın oluşturulması için COMSOL Multiphysics 5.5 paket programı ile farklı PMG'lerin manyetik alan modellemesi yapıldı. PMG'lerin yüksek sıcaklık süperiletkenine (HTS) etkisini gözlemlemek için yine COMSOL Multiphysics 5.5 paket programı ile simülasyonlar yapıldı. Simülasyonlar sonucunda oluşturulan üç yüzeyli PMG'nin (3-S maglev) tek yüzeyli PMG'ye göre manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin artırılmasında ve maglev sistemlerinin taşıma kapasitelerinin geliştirilmesinde faydalı olduğu sonucuna varıldı. Son olarak tek kişilik bir maglev treninde kullanılabilirliği göstermek amacıyla değişken manyetik kuvvet sabitleri kullanarak MATLAB Simulink programında maglev treninin dinamik simülasyonu yapılmıştır. HTS Maglev treninin viraj performansını araştırma amaçlı yapılan dinamik simülasyonları sonucu üç yüzeyli levitasyon sağlayan PMG'nin en etkili olduğu sonucuna varıldı.

**Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık süperiletken, yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) maglev treni, levitasyon kuvveti, kılavuzlama kuvveti, manyetik katılık katsayısı, sonlu elemanlar yöntemi simülasyonu, viraj performansı.**

## SUMMARY

In this work, levitation and guidance forces of superconductor which is being used in superconductor maglev trains and linear magnetic bearings. Different configurations of permanent magnet guideway (PMG) has been designed in order to increase the values of Maglev systems' magnetic levitation force, magnetic guidance force and magnetic force stiffness. Developing of the designing PMGs performed by modelling made in COMSOL Multiphysics 5.5 program. The effect of PMGs on the high temperature superconductors (HTS) is observed by the carrying out simulations again in COMSOL Multiphysics 5.5 program. Simulation results verifies that three surface levitation PMG (3-S maglev) is better than single surface levitation PMG in increasing levitation and guidance forces and decided that 3-S maglev is more beneficial in developing the load carrying capacity of maglev systems. Finally to show the usability of designed cryostats, a dynamic simulation has been made in MATLAB simulink program which includes a one person maglev train that has variant magnetic stiffness Dynamic simulations carried out to investigate the curve performance of HTS maglev train and results showed that three surface levitation PMG was most efficient.

**Key Words: High Temperature Superconductor (HTS), High Temperature Superconductor Maglev Train, Levitation Force, Guiding Force, Magnetic Stiffness Coefficient, Finite Element Method Simulation, Curve performance.**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, YBCO süperiletkeni kullanılarak oluşturulan kriyostatlara sahip maglev treninin taşıma kapasitesini geliştirmek amacıyla üç yüzeyli manyetik ray hattı geliştirilmiştir. Bu geliştirmenin en yüksek düzeyde olması için optimizasyon araştırmaları yapılmıştır.

TÜBİTAK tarafından 217M320 numaralı bilimsel ve teknolojik araştırma projesi ile desteklenen çalışmalar Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Manyetik Levitasyon Laboratuvarında gerçekleştirildi.

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemediği, tecrübeleriyle ve bilgisiyle beni her zaman desteklediği için danışmanım Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU'na,

Bütün çalışmam boyunca yardımcı olup beni bilgilendiren ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali Suat YILDIZ'a, beni destekleyen ve bana her zaman yardımda bulunan Arş. Gör. Erhan ÖZÇARE'ye,

ve bana bu süre boyunca tahammül gösteren, her zaman gerek maddi gerekse manevi desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Süperiletkenlik ve Meissner Etkisi	1
1.2. Süperiletkenlerin özellikleri	3
1.2.1. I. ve II. Tip Süperiletkenler	3
1.2.2. Süperiletkenlerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri	6
1.3. Kriyostat ve Özellikleri	7
1.4. Süperiletken Maglev Treni ve Özellikleri	8
1.5. Literatür Özeti, Tezin Amacı ve Katkısı	8
2. MANYETİK LEVİTASYON BENZETİMİ	11
2.1. Modelleme ve Benzetim	11
2.2. Manyetik Kaldırma Kuvvetinin Hesaplanması	22
2.3. Manyetik Kılavuzlama Kuvvetinin Hesaplanması	23
2.4. Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması	25
2.4.1. Dikey Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması	25
2.4.2. Yatay Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması	25
2.5. Geliştirilmiş Yöntem	26
2.5.1. İki Boyutlu Simulasyonda Geliştirilmiş Yöntem	27
2.5.2. Üç Boyutlu Simülasyonda Geliştirilmiş Yöntem	28
2.6. Manyetik Ray Hattının Miknatis Boyut Optimizasyonu	29
2.7. Tek ve üç yüzeyli levitasyonun karşılaştırılması	34
2.7.1. Çalışma Yüksekliği Araştırması	34
2.7.2. Manyetik Kaldırma Kuvvetinin Karşılaştırılması	36

2.7.3. Manyetik Kılavuzlama Kuvvetinin Karşılaştırılması	38
2.7.4. Kriyostatın Değişken Dikey Katılık Katsayısını Bulma	40
2.7.5. Kriyostatın Yatay Katılık Katsayısını Bulma	41
3. SÜPERİLETKEN MAGLEV TREN MODELLEMESİ	43
3.1. Sistemin Lagrange Hareket Denklemleri ile modellenmesi	45
3.2. Sistemin Durum Uzay Modelinin elde edilmesi	48
3.3. Sistemin Yer-Kök Grafiği	50
4. DEĞİŞKEN KATILIK KATSAYILARIYLA SÜPERİLETKEN MAGLEV TREN BENZETİMİ	52
4.1. Süperiletken Maglev Treni 1. Simülasyon çalışması	53
4.2. Süperiletken Maglev Treni 2. Simülasyon çalışması	55
4.3. Süperiletken Maglev Treni 3. Simülasyon çalışması	60
5. SONUÇLAR	63
6. ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	67
EKLER	68

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
$\nabla$	: Nabla operatörü
$\zeta$	: Sönüm oranı
$\mu_0$	: Hava/YSS geçirgenliği
$\rho$	: Direnç
$\omega_n$	: Doğal frekans
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	: Maglev treninin x,y ve z eksenine ile arasındaki açı
$\varphi$	: Faz açısı
$A$	: Sistem matrisi
$B$	: Manyetik indüksiyon
$B$	: Giriş matrisi
$B_0$	: Kim model parametresi
$c$	: Sönüm sabiti
$C$	: Çıkış matrisi
$C_t$	: Giriş matrisi sönüm terimleri matrisi
$D$	: İleri besleme matrisi
$e$	: Euler sayısı (2.71828)
$E$	: Elektrik alan vektörü
$E_c$	: Kritik akım ölçütü
$F$	: Kuvvet
$FC$	: Manyetik alanlı soğutma
$FCH$	: Manyetik alanlı soğutma yüksekliği
$F_x$	: x yönündeki kuvvet (kılavuzlama kuvveti)
$F_y$	: y yönündeki kuvvet (levitasyon kuvveti)
$H$	: Manyetik alan vektörü
$H$	: Manyetik alan vektörü
$H_0$	: Manyetik alan sabiti
$H_c$	: Kritik manyetik alan
$H_{c1}$	: Alt kritik manyetik alan
$H_{c2}$	: Üst kritik manyetik alan
HTS/YSS	: Yüksek sıcaklık süperiletkeni

Hz	: Hertz
$I_x, I_y, I_z$	: x,y ve z eksenlerine göre maglev treninin kütle ataletleri
J	: Akım yoğunluğu
$J_c$	: Kritik akım yoğunluğu
$J_{c0}$	: Sıfır-akım kritik akım yoğunluğu
$K_t$	: Giriş matrisi katılık terimleri matrisi
$K_x$	: Yatay manyetik katılık sabiti
$K_y$	: Dikey manyetik katılık sabiti
m	: metre
M	: Manyetizasyon
m	: Kütle
Maglev	: Manyetik levitasyon
MH	: Ölçüm yüksekliği
PM/KM	: Kalıcı mıknatıs
PMG/ MKY	: Manyetik kılavuzlama yolu
s	: Saniye
T	: Sıcaklık
$T_c$	: Kritik sıcaklık
v	: Çizgisel hız
WH	: Çalışma yüksekliği
ZFC	: Manyetik alansız soğutma

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Şekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: Meissner etkisi: Süperiletkenin maruz kaldığı manyetik alanı dışarılaması.	1
1.2: Tarihler gere keşfedilen süperiletkenlerin kritik sıcaklık değışimi.	2
1.3: Nb <sub>3</sub> Sn ve Nb-Ti için süperiletkenliğe geçiş eğrileri.	4
1.4: (a) I. tip ve (b) II. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alanın sıcaklığa bağı değışimini gösteren diyagram.	5
1.5: Ortalama manyetizasyonun I. tip (a) ve II. tip (b) süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana göre değışimi.	5
1.6: Bir mıknatıs yüksek sıcaklık süperiletkenin (HTS) üzerinde temas etmeden hava durmaktadır.	6
1.7: Bir maglev treni için oluşturulan kriyostat örneği.	7
1.8: (a) Literatürde kullanılan tek kutuplu PMG, (b) sunulan yeni hallbach dizilimli çift kutuplu PMG.	8
1.9: (a) İki tip PMG için manyetik alan karşılaştırması, (b) iki tip PMG için levitasyon kuvveti karşılaştırması.	9
1.10: Üç yüzeyli levitasyonlu YSS maglev treni.	9
1.11: Tek kişilik maglev taşıtının üç boyutlu görünüşü.	10
2.1: Süperiletken ve kalıcı mıknatıstan oluşan manyetik yatak görseli. Kesikli çizgi simülasyon sınırını göstermektedir. Kalıcı mıknatıs simülasyon alanının içinde değildir.	11
2.2: Kalıcı mıknatısın 5 mm yukarisından hesaplanan manyetik alan değerlerinin karşılaştırılması.	12
2.3: Farklı iki simülasyon yönteminin simülasyon bölgelerinin ağ örgülü hali. (a) Mıknatıslı ve hareketli ağ örgülü yöntem, (b) Mıknatıssız yöntem.	13
2.4: Alansız soğutma için oluşturulmuş simülasyon şeması. (a) COMSOL programı, (b) senaryonun şematik gösterimi.	16
2.5: Mıknatısın dikey yönde yaptığı hareketin grafiği.	17

2.6:	Süperiletken içindeki akım dağılımlarının yöntemlere göre karşılaştırılması. (a) Mıknatıslı, (b) mıknatıssız.	21
2.7:	Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	23
2.8:	YSS külçelerinin bazı yatay hareket aralıklarındaki ( $\pm 5$ , $\pm 22$ , $\pm 70$ ) kılavuzlama kuvveti eğrileri.	24
2.9:	İki boyutlu geliştirilmiş yöntem modeli.	27
2.10:	Üç boyutlu geliştirilmiş yöntem modeli.	28
2.11:	Geliştirilmiş yöntem ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.	29
2.12:	Farklı mıknatıs dizilimleri ve manyetik alan çizgileri. (a) Üç mıknatıslı tek yönlü, (b) üç mıknatıslı hallbach, (c) beş mıknatıslı tek yönlü, (d) beş mıknatıslı hallbach.	30
2.13:	Tek ve üç yüzeyli levitasyon durumları. (a) Tek kutup 1-S, (b) tek kutup 3-S, (c) çift kutup 1-S, (d) çift kutup 3-S.	31
2.14:	Karşılaştırmada kullanılacak ve mıknatıs kesit alanı için referans seçilen çift kutuplu ve tek kutuplu PMG.	32
2.15:	Çift ve tek kutuplu 3-S PMG'lerin optimizasyon sonuçları.	33
2.16:	(a) Çift kutup 3-S PMG, (b) Tek kutup 3-S PMG. Optimizasyon sonrasında elde edilen kalıcı mıknatısların boyutları ve magnetizasyon yönleri.	34
2.17:	COMSOL'da oluşturulan kriyostatın serbest düşme deplasmanı.	35
2.18:	Kriyostat dikey deplasmanına uydurulan sönümlü sinüs dalgasının grafiği.	36
2.19:	Levitasyon kuvveti ölçüm senaryosunun temsili görseli.	37
2.20:	4 adet PMG'ye ait elde edilen levitasyon kuvvetlerinin grafikleri.	38
2.21:	Levitasyon kılavuzlama kuvveti ölçüm senaryosunun temsili görseli.	39
2.22:	Çift kutup 3-S PMG'ye ait kılavuzlama kuvveti eğrisi.	40
2.23:	Çift kutup 3-S PMG'ye ait levitasyon kuvveti ve dikey katılık katsayısının mesafeye göre değişimini gösteren grafikler.	41
2.24:	Çift kutup 3-S PMG'ye ait kılavuzlama kuvveti eğrisi ve yatay katılık sabiti grafikleri.	42
3.1:	Tek kişilik süperiletken maglev treninin üç boyutlu görseli. (a) Önden görünüş, (b) yandan görünüş, (c) üstten görünüş.	44

3.2:	Süperiletken maglev trenine ait yer kök haritası.	51
4.1:	Süperiletken maglev treninin simulink modelinin şematik gösterimi.	52
4.2:	Geçiş eğrili ray hattı, geçiş eğrisiz ray hattı profilleri ve eğriliklerinin değişim grafikleri.	53
4.3:	Trenin viraj hareketini modellemek için kullanılan iki farklı merkezkaç ivmesinin zamana göre değişimi.	54
4.4:	Trenin karşılaştırma yapılan iki ray hattı üzerindeki hareket değişimleri.	55
4.5:	Trenin karşılaştırma yapılan iki ray hattı üzerindeki yatay ivme değişimi.	56
4.6:	Geçiş eğrili ve süperelevasyonlu ray hattındaki süperelevasyonun zamana göre değişimi.	56
4.7:	Geçiş eğrili iki ray hattında trene etkileyen merkezkaç ivmesi.	57
4.8:	Süperelevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin deplasmanlarındaki, açılarındaki ve katılık değerlerinin değişimi.	57
4.9:	Süperelevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin yatay ivmelerindeki değişimi.	58
4.10:	Süperelevasyonlu ray hattında ilerleyen trenin 4 adet PMG'nin üzerindeki trenin deplasman, açı ve katılık değişimleri.	59
4.11:	Süperelevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin yatay ivmelerindeki değişimi.	59
4.12:	(a) Manyetik ray hattının üstten görünüşü, (b) eğrilik değişimi (rad/m), (c) süperelevasyon değişimi.	60
4.13:	Manyetik ray hattı üzerinde 165 m/s sabit hız değerinde ilerleyen trene etkileyen merkezkaç kuvveti değişimi.	61
4.14:	Maglev treninin yüksek hızda (165 m/s) hazırlanan ray hattı üzerindeki deplasmanlarının, açılarının ve katılık değerlerinin değişimi.	62
4.15:	Maglev treninin yüksek hızda (165 m/s) hazırlanan ray hattı üzerindeki yatay ve dikey ivme değişimi.	62

## TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: İki boyutlu simülasyon bölgeleri, boyutları ve merkez konumları.	15
2.2: Süperiletken ve kalıcı mıknatıs ile ilgili parametreler.	16
2.3: İki boyutlu mıknatıssız YSS simülasyon bölge boyutları ve konumları.	18
2.4: Simülasyonda kullanılan parametreler.	19
2.5: Yer değiştirme fonksiyonu ve mıknatısın köşe noktalarının konumu.	20
2.6: Simülasyon bölgelerine göre değişken tanımlamaları.	20
2.7: Soğutma yüksekliğine göre levitasyon kuvvet değerleri.	22
2.8: Durumların levitasyon kuvvetlerinin azami değerleri.	33
2.9: Levitasyon kuvvetlerine ait iskelet fonksiyonlarının katsayıları.	38
2.10: Maglev treninin tüm PMG'lere ait yatay katılık katsayıları.	42
3.1: Süperiletken maglev trenin dinamik simülasyonlarda kullanılacak olan parametre değerleri.	43
3.2: YSS maglev treninin parametreleri.	45
3.3: K ve C matrislerinin elemanlarının değerleri.	49
3.4: $K_t$ ve $C_t$ matrislerinin elemanlarının değerleri.	50
3.5: Yer-Kök grafiğinde kök değerleri.	51

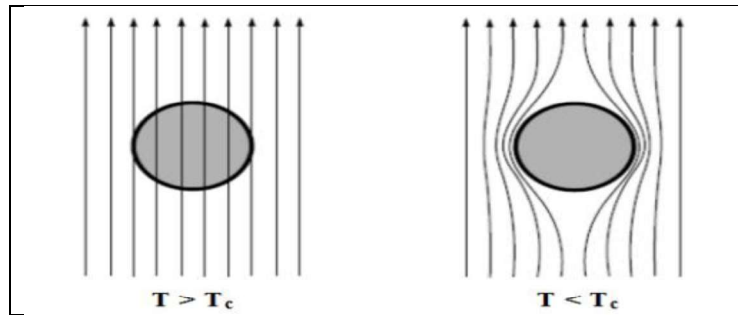
# 1. GİRİŞ

## 1.1. Süperiletkenlik ve Meissner Etkisi

Sıcaklıkları belirli bir seviyenin altına inen bazı maddelerin elektriksel dirençlerinin sıfıra inmesi olayına süperiletkenlik adı verilir. Bu özellik ilk kez 1911 yılında H. K. Onnes tarafından cıvanın 4.2 K sıcaklığına kadar soğutulmasıyla gözlemlenmiştir [Onnes, 1911]. Onnes sıcaklığın düşmesiyle metalin direncinin azalmasını beklerken 4,2 K'de bu direncin sıfıra düştüğünü gözlemledi. Bu tarihlere kadar metallerin elektriksel dirençlerinin mutlak sıfırda (-273 K) sıfıra ulaşacağı biliniyordu, fakat bu sıcaklığa inmeden de bu olayın gözlemleneceği bilinmiyordu. Bu olayla birlikte süperiletkenliği sağlayan olan elektriksel ve manyetik özellikler üzerine yapılan çalışmaların sayısı artmaya başlamıştır.

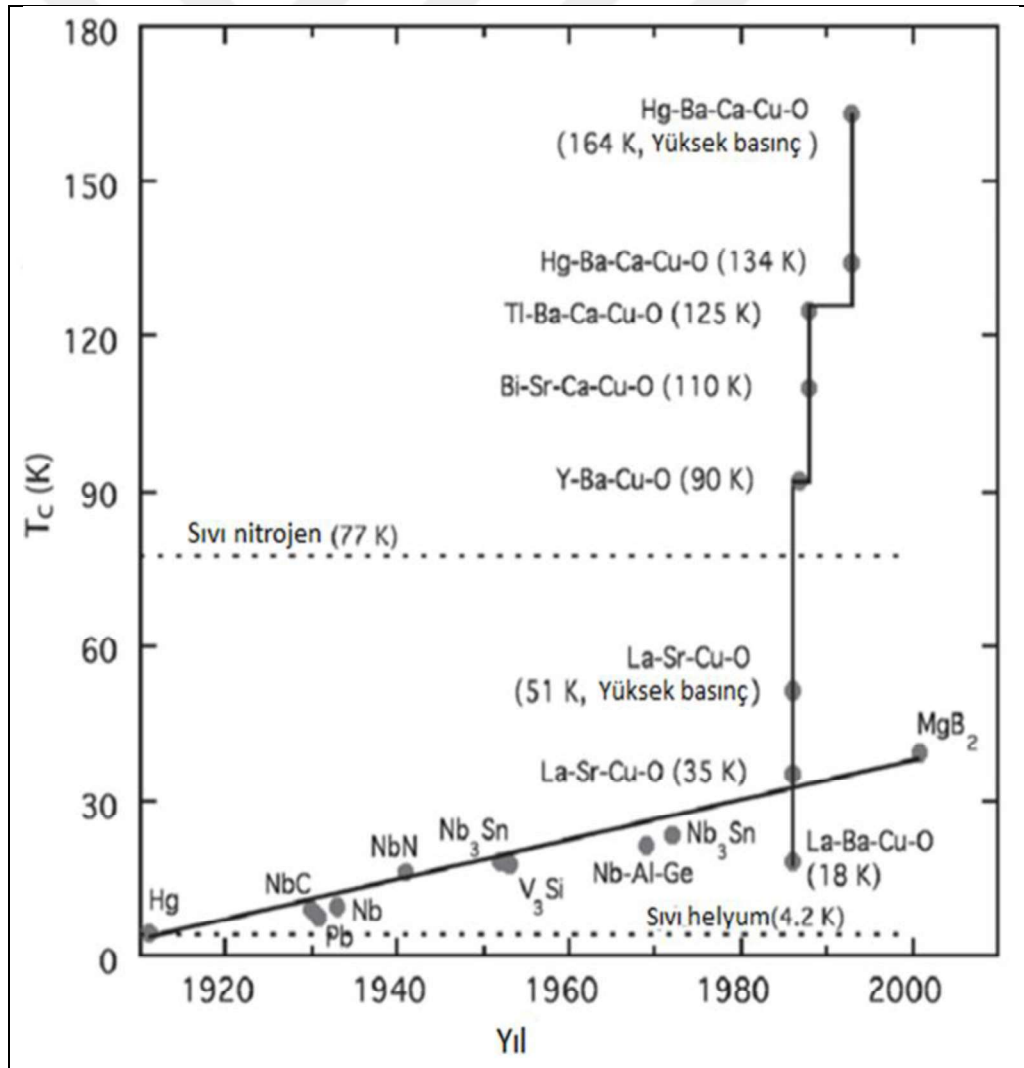
Cıvanın elementinin süperiletkenlik özelliği gösteren ilk element oluşunun ardından kurşun ve kalay gibi diğer elementlerinde bu özelliğe sahip olduğu keşfedildi. Kritik geçiş sıcaklığı en yüksek olan element Niyobyum (Nb)'dir (9,3 K).

Kritik sıcaklığın altında elektrik dirençlerinin sıfır olmasının yanı sıra süperiletkenlerin diğer ilgi çekici ve bu çalışmayı ilgilendiren özelliği ise manyetik akıyı dışarılamalarıdır. 1933 yılında W.H. Meissner ve R. Ochsenfeld adlı iki bilim adamı manyetik alana maruz kalarak soğutulmuş bir süperiletkenin  $H_c$  denilen kritik bir manyetik alandan daha büyük alanlarda manyetik alanı dışarılama özelliğini kaybettiklerini gözlemlediler. Süperiletkenlerin manyetik özellikleri ile ilgili çalışmalar yapan Bean, 1964 yılında alınganlık ve manyetizasyon eğrilerinden faydalanılarak süperiletkenlerin kritik akım yoğunluğunun hesaplanabileceği fikrini öne attı.



Şekil 1.1: Meissner etkisi: Süperiletkenin maruz kaldığı manyetik alanı dışarılaması.

1980'li yıllara kadar süperiletkenlikle ilgili birçok çalışmalar yapılmasına ve kayda değer gelişmeler olmasına rağmen o zamana kadar üretilmiş süperiletken malzemelerin kritik geçiş sıcaklığının altına kadar soğutulabilmesi için sadece sıvı helyum kullanılıyordu. 1986 yılında yüksek sıcaklık süperiletkenliği hakkında yapılan çalışmalar Bednorz ve Müller'in La-Ba-Cu-O sisteminde 30 K değerinde kritik geçiş sıcaklığının bulunmasıyla hız kazandı. Chu ve grubu, Bednorz ve Müller'in çalışmalarını bir adım öteye götürerek lantanyum yerine itriyum kullanarak çok daha yüksek bir kritik geçiş sıcaklığına (92 K) sahip olan YBCO adlı bileşiği elde ettiler. Bu çalışma sayesinde sıvı helyumdan ziyade sıvı azot sıcaklığında (77 K) süperiletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir ve bu olay çalışmalara muazzam bir hız sağlamıştır. Bundan sonraki yakın tarihlerde oluşturulan birçok farklı bileşik sayesinde daha yüksek geçiş sıcaklığına sahip malzemeler üretilmiştir.



Şekil 1.2: Tarihler göre keşfedilen süperiletkenlerin kritik sıcaklık değişimi.

Süperiletkenliğin keşfinden bu yana kadar yapılan bütün çalışmaların genel amacı kritik geçiş sıcaklığının oda sıcaklığına çıkarılıp günlük hayatta birçok alanda kullanmaya yönelik olmuştur. Hem elektrik enerjisinin dirençsizlik özelliği sayesinde enerji kaybı olmadan taşınabilme fikriyle hem de maruz kaldığı manyetik akıyı dışarılama özelliğiyle süperiletkenler için birden çok kullanım alanı oluşmuştur.

Günümüzde elektromıknatis kullanılarak oluşturulmuş manyetik yataklar ve manyetik olarak havalanmış trenler mevcuttur. Bu sistemler sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını aza indirme avantajının yanı sıra karmaşık olmaları nedeniyle güvenilirlik sorunları ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar gibi dezavantajlara sahiptir. Süperiletken esaslı çalışan sistemlerin ise herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymaması, çevre dostu olmasıyla birlikte daha yüksek güvenilirlik söz konusudur. Bu çalışmanın da bir amacı olan süperiletken temelli manyetik yataklar ve manyetik olarak havalanmış trenler (MAGLEV trenleri) fikri günümüzde hala birçok bilim adamı tarafından araştırılıp geliştirilmektedir.

## 1.2. Süperiletkenlerin özellikleri

Malzemelerin süperiletkenliğe geçmesi ve bu özelliğini muhafaza edebilmesi için sıcaklığının kritik sıcaklığın altına inmesinin yanında başka koşullarında oluşması gerekir. Bu koşullar üç adettir ve bunlar kritik sıcaklık ( $T_c$ ), kritik manyetik alan ( $H_c$ ) ve kritik akım yoğunluğudur ( $J_c$ ). Her malzemeye özgün olan bu değerler malzemenin malzemeye değişmektedir. Kritik akım şiddeti maddenin boyutsal ve yapısal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Eğer süperiletken numuneye kritik manyetik alan değerinden daha fazla değerde manyetik alan etki ederse süperiletkenlik özelliğini yitirir ve normal dirençli haline geri döner. Aynı şekilde belli bir değer üstüne kritik akım malzemenin süperiletkenlik özelliğini engelleyeceğinden bu değerler çalışma koşulları açısından önem taşımaktadır [Moon, 2004]. Şekil 1.3'te bunun örneğini gösteren grafik mevcuttur.

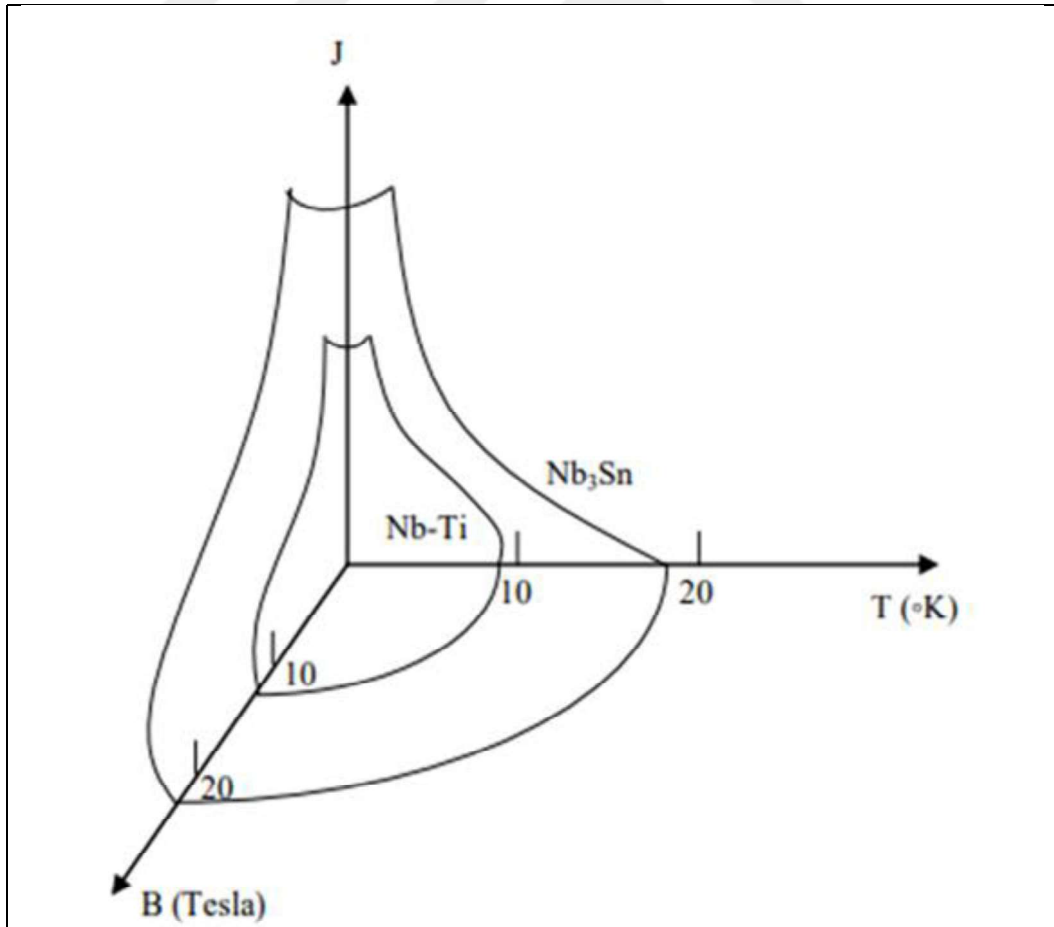
### 1.2.1. I. ve II. Tip Süperiletkenler

Manyetik alan altındaki tepkilerine göre süperiletkenler iki farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar I. ve II. tip süperiletken olarak adlandırılır. I. tip

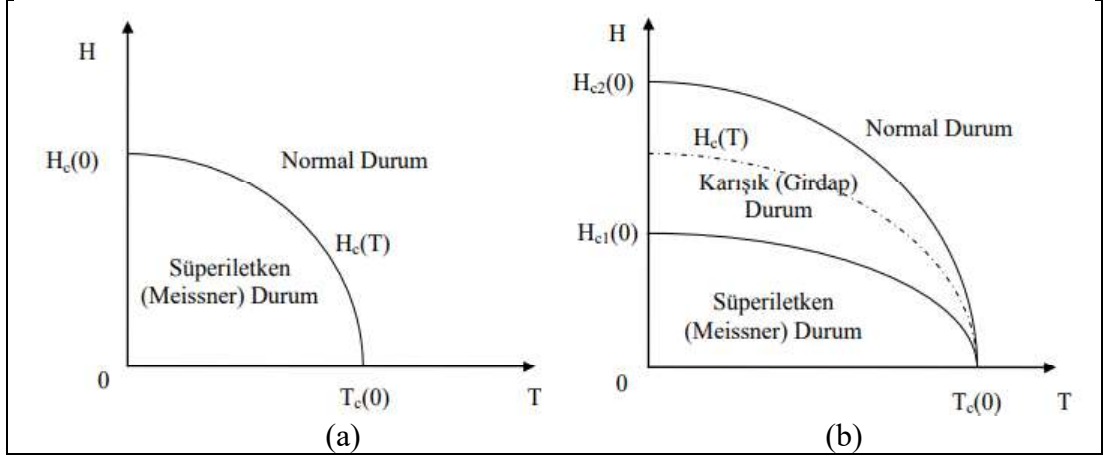
süperiletkenlerde, maruz kalınan manyetik alan  $H < H_c$  durumunda nüfuz derinliği haricinde içerideki her yerde manyetik akı dışarılaması gerçekleşir. Nüfuz derinliği ihmal edilmesi durumunda malzeme içindeki manyetik akı için,

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.1)$$

bağıntısı yazılabilir. Denklemden  $M$ , manyetizasyon veya birim hacimdeki manyetik moment,  $\mu_0$  ise boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Malzemeye özgü ve sıcaklığa bağlı olan kritik manyetik alan  $H_c$ . I. tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alandan daha büyük olması durumunda ( $H < H_c(T)$ ) malzemenin tümünde ortalama manyetik akı yoğunluğu  $B = 0$  olacağından (Meissner olayı) 1.1 ifadesinden manyetizasyon uygulanan manyetik alanla aynı şiddette olup uygulanan manyetik alanla aynı şiddette olup ters işaretlidir ( $M = -H$ ). Şekil 1.4 (a), I. tip süperiletkenler, şekil 1.4 (b) ise II. tip süperiletkenlerin manyetik alan değerinin sıcaklığa göre değişimini göstermektedir.

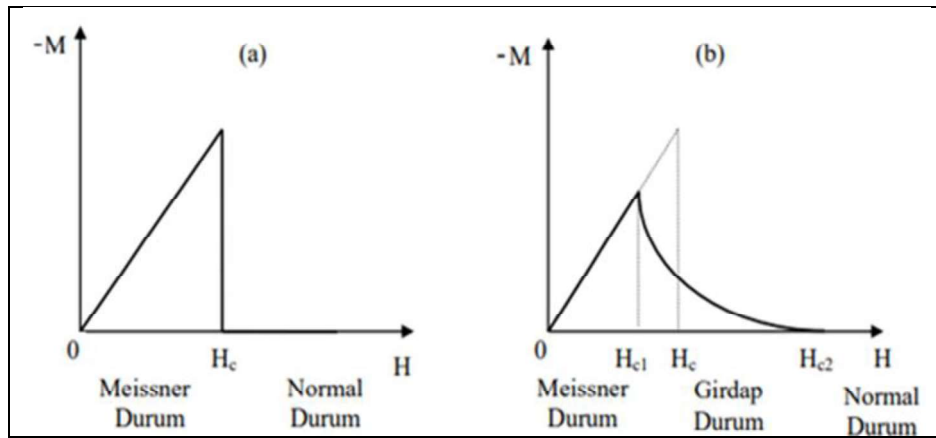


Şekil 1.3: Nb<sub>3</sub>Sn ve Nb-Ti için süperiletkenliğe geçiş eğrileri.



Şekil 1.4: (a) I. tip ve (b) II. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlı değişimini gösteren diyagram.

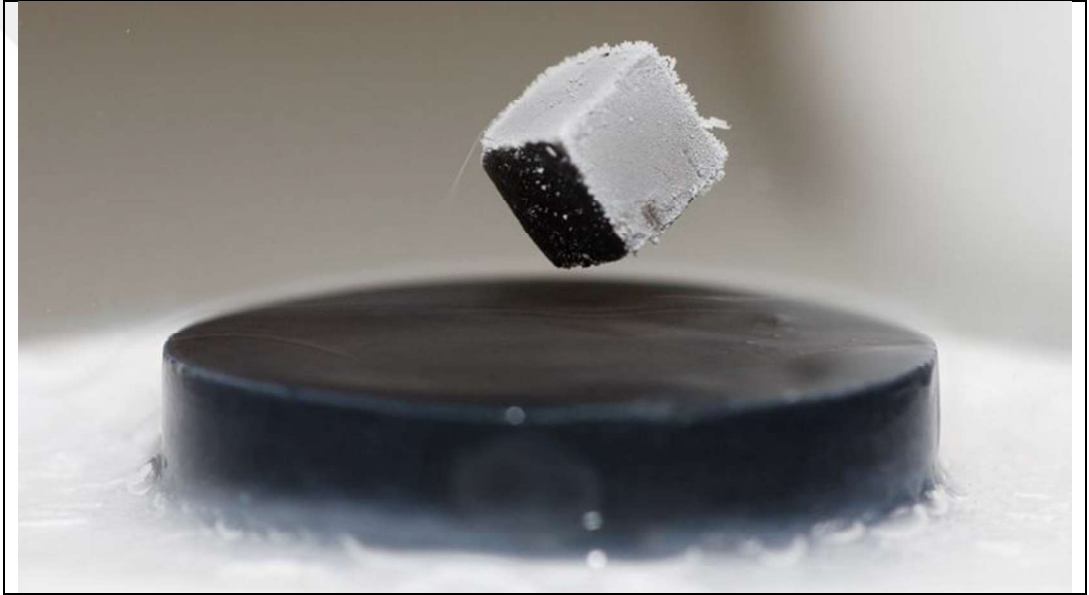
Şekil 1.4 (b)'de görüldüğü üzere uygulanan manyetik alan alt ve üst kritik manyetik alan arasında ise ( $H_{c1} < H < H_{c2}$ ) süperiletken karışık hale (mixed state) geçmiş olur. Bu karışık halde malzemenin içinde ortalama manyetik akı yoğunluğu  $B$  artık sıfıra eşit değildir ve  $B \leq \mu_0 H$  olan bir denge değerine eşittir. Alt kritik alan şiddeti  $H_{c1}$ 'in üzerinde olan numune akı girdaplarına sahip karışık duruma dönüşür. II. tip süperiletkenin maruz bırakıldığı manyetik alan şiddeti alt kritik manyetik alan değerini aştıkça akı göbekleri birbirine yaklaşır ve ortalama akı yoğunluğu artmış olur. Süperiletkenin karışık durumdan normal hale geçtiği yüksek manyetik alan şiddetine üst kritik alan ( $H_{c2}$ ) denilir. Şekil 1.5'te ortalama manyetizasyonun I. ve II. tip süperiletkenlerdeki uygulanan manyetik alana göre değişimini belirtir [Rose-Innes, 1980].



Şekil 1.5: Ortalama manyetizasyonun I. tip (a) ve II. tip (b) süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana göre değişimi.

## 1.2.2. Süperiletkenlerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri

Bir cismin fiziksel bir destek olmaksızın havada asılı kalma olayına manyetik kaldırma kuvveti denir. Bu özellik mühendisliği ilgilendiren bir problem olan sürtünmeden kaynaklı enerji kaybı konusunda güzel bir çözüm oluşturmuştur. Sürtünme sonucu oluşan enerji kaybını %100 önlemese de ihmal edecek bir seviyeye getirmesi bilim adamlarının bu konu hakkında çalışma ilgisini artırmıştır.  $YBa_2Cu_3O_7$  (Y123) bileşiğinin 93 K'de süperiletkenlik özelliğine sahip olarak manyetik cisimleri havada tutmasının keşfedilişinden sonra bu alandaki çalışmalara yoğunlaşmıştır. Şekil 1.6'da temassız şekilde süperiletken üzerinde duran mıknatıs göstermektedir.



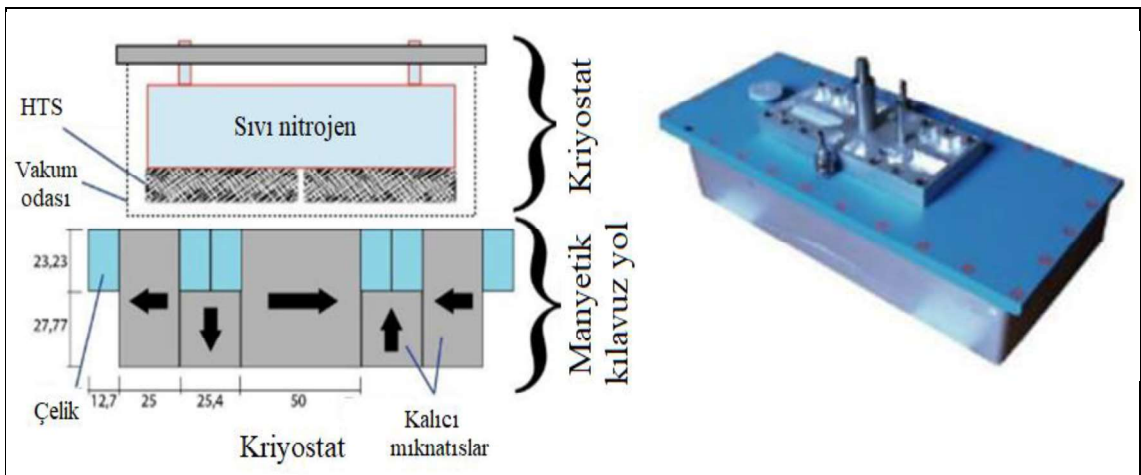
Şekil 1.6: Bir mıknatıs yüksek sıcaklık süperiletkenin (HTS) üzerinde temas etmeden hava durmaktadır.

Soğutma durumunun süperiletken ve mıknatıs arasındaki kaldırma kuvvetini etkileyen tek etken değildir. Bununla birlikte daha önce de belirtildiği gibi boyut, sayı ve konfigürasyon haricinde süperiletkenin kritik akım yoğunluğu, süperiletken ve mıknatısın birbirine göre olan konumları da oldukça önemlidir [Ma et al., 2003]. Konumun kaldırma kuvvetine etkisini araştırmak için hem düşey yönde hem de yatay yönde birçok deneysel çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Yapılan birçok çalışmada kaldırma kuvvetinin mıknatıs ve süperiletken madde arasındaki mesafeye göre üstel bir şekilde değiştiği hesaplandı [Chang et al., 1990].

### 1.3. Kriyostat ve Özellikleri

Süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti özelliğinden faydalanılabilmesi için sıcaklığının kritik geçiş sıcaklığının altında muhafaza edilmesi gerekmektedir. Kriyojenik sıcaklıklarda süperiletken tarafından oluşturulan sistemlerin kararlı bir şekilde çalışması için sürekli soğutulması gerektiği için sıvı helyum ve sıvı nitrojen (LN<sub>2</sub>) kullanılmaktadır. Sıvı azot sıcaklığında süperiletkenlik özelliğinin gerçekleştirilebilmesi çalışmalara kolaylık ve hız sağlamıştır.

Uzun süreli soğutma ve çalışma için süperiletkenlerin sıvı azot ile birlikte muhafaza edilmesi gerekmektedir. Literatürde resmileşmemiş olsa da bunun için tasarlanmış hazneye kriyostat adı verilmektedir. Oluşturulan bu hazne sayesinde manyetik yatak, manyetik olarak havalanmış tren gibi sistemlere çalışma olanağı sağlanmıştır. Werfel ve arkadaşları içinde 24 adet külçe YBCO süperiletkeni kullanarak oluşturdukları yaklaşık 17 kilogram ağırlığındaki kriyostat ile 2500 N'luk kaldırma kuvvetini 5-10 mm mesafe ile elde etmeyi başarmışlardır. Çalışma süresini artırmak amaçlı olarak kriyostatın içine ayrıca vakum boşluğu oluşturularak çalışma süresini 24 saatin üstüne çıkarabilmişlerdir [Werfel et al., 2012]. Daha uzun çalışma süresi ve daha yüksek manyetik kaldırma kuvveti için kriyostat geliştirme çalışmalarını günümüzde hala devam etmektedir. Bu çalışmada ise kriyostatın içindeki HTS'ler çift sıra halinde dizilmiş olacak şekilde manyetik ray hattı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kriyostatın boyutları HTS ve manyetik ray hattının boyutlarına göre değişmektedir.



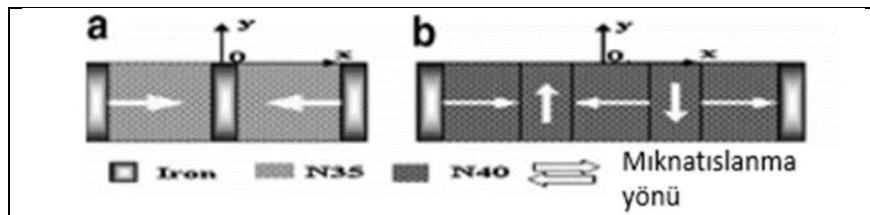
Şekil 1.7: Bir maglev treni için oluşturulan kriyostat örneği.

## 1.4. Süperiletken Maglev Treni ve Özellikleri

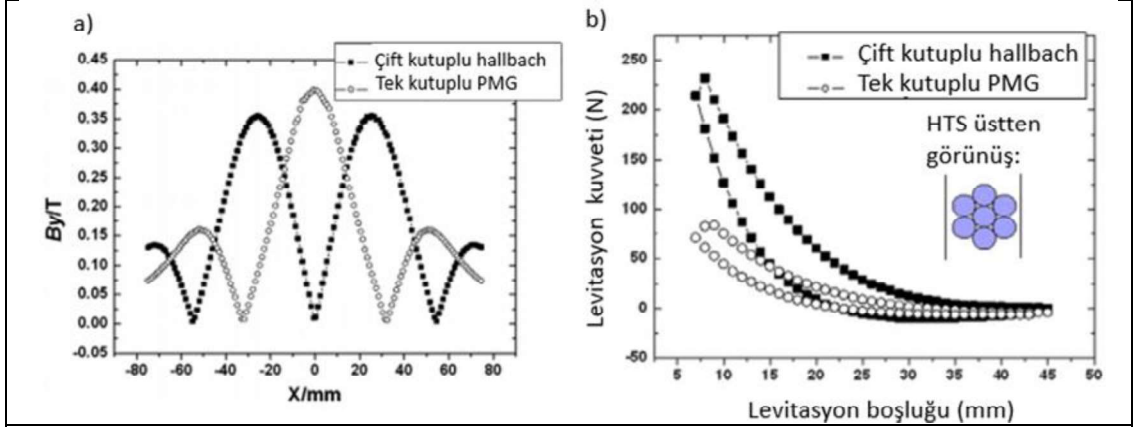
Maglev treni; süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti özelliğinden yararlanılarak oluşturulan manyetik kılavuz yol üzerinde temassız hareket eden ulaşım aracıdır. Kılavuz ray hattını oluşturmak için kalıcı mıknatıs veya elektromıknatıs kullanılmaktadır. Bu çalışmada üzerinde durulacak olan maglev treni süperiletkenler kullanılarak elde edilmiş kriyostatin, kalıcı mıknatıs kullanılarak oluşturulmuş olan manyetik kılavuz yol üzerinde temassız olarak hareket edendir, yani süperiletken maglev trenidir [Lee et al., 2016].

## 1.5. Literatür Özeti, Tezin Amacı ve Katkısı

H. Jing ve arkadaşları maglev araçlarının levitasyon performansını geliştirmek için çift kutuplu hallbach dizilimli manyetik ray hattı öne sürmüşlerdir. Hallbach PMG olarak adlandırılan manyetik ray hattı hakkında çalışmalar yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak literatürde kullanılan tek kutuplu manyetik ray hattı ile teklif edilen çift kutuplu hallbach PMG'nin manyetik alan karşılaştırması yapılmıştır ve çift kutuplu hallbach PMG'nin daha geniş yüksek-alana sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu iki farklı tipteki manyetik ray hattının levitasyon kuvveti aynı HTS miktarı ve durumu için elde edilip karşılaştırılmıştır. Bu levitasyon kuvveti ölçümü deneysel olarak gerçekleştirilmiş olup ayrıca farklı soğutma yükseklikleri deneyerek farklı levitasyon boşluklarında ölçüm yapılmıştır. Son yapılan çalışmada HTS'lerin manyetik ray hattının genişliğine oranının etkisi de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sunulan çift kutuplu manyetik ray hattının levitasyon kuvvetini arttırdığı kesin olarak kanıtlanmıştır [Jing et al., 2007]. Aşağıda bu çalışmayla ilgili görseller yer almaktadır.

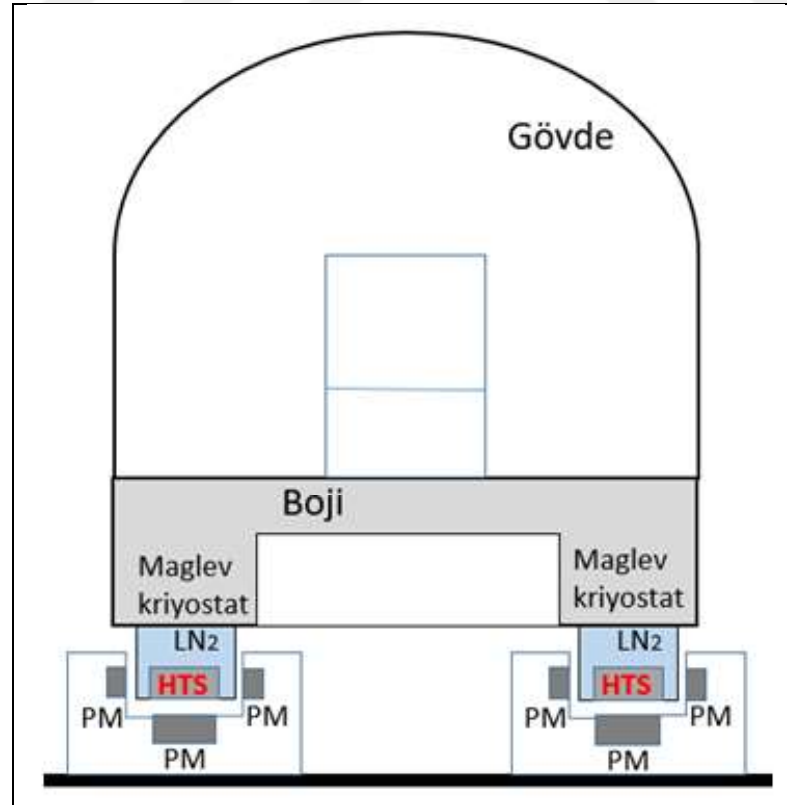


Şekil 1.8: (a) Literatürde kullanılan tek kutuplu PMG, (b) sunulan yeni hallbach dizilimli çift kutuplu PMG.



Şekil 1.9: (a) İki tip PMG için manyetik alan karşılaştırması, (b) iki tip PMG için levitasyon kuvveti karşılaştırması.

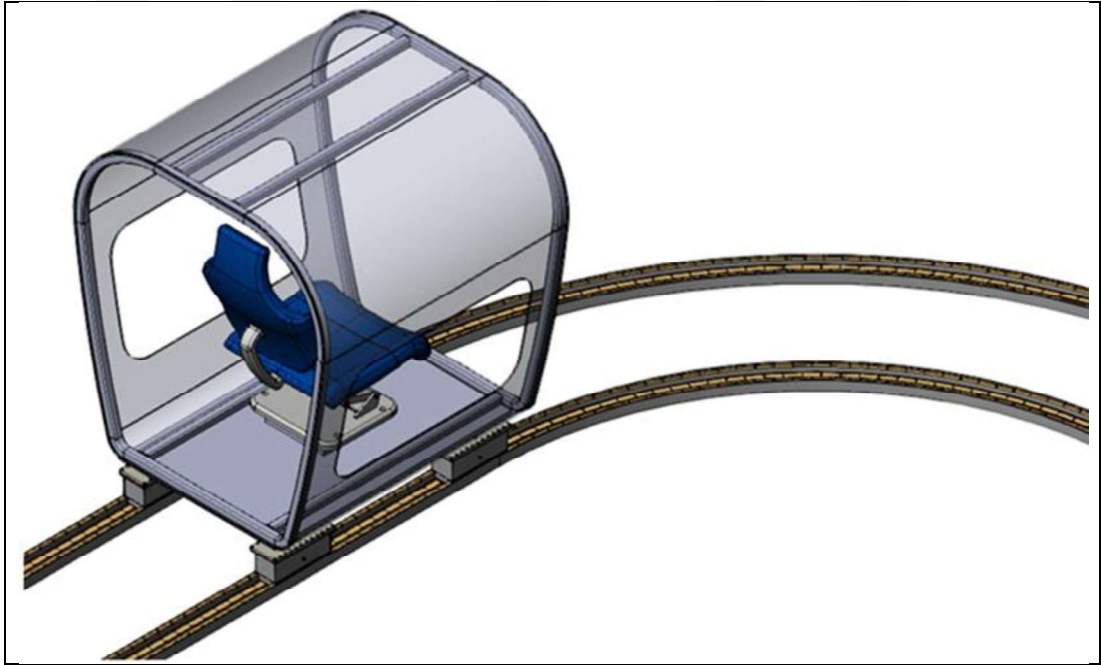
Şu ana kadar YSS ile ilgili yapılan çalışmaların genel amacını levitasyon ve kılavuzlama kuvvetlerini dolayısıyla manyetik katılık sabitlerini artırma ve dolayısıyla maglev sistemlerinin daha kararlı çalışmasını sağlamakla özetleyebiliriz. Bu çalışmanın da amacı süperiletken maglev trenine yeni bir bakış açısı getirerek manyetik kılavuz ray hattındaki tek yüzeyli levitasyonu üç yüzeyli levitasyona yükseltip hem levitasyon hem de kılavuzlama kuvvetinin artışıını gerçekleştirmektir.



Şekil 1.10: Üç yüzeyli levitasyonlu YSS maglev treni.

Bu geliştirme yapılırken süperiletken maglev treninin manyetik kılavuz yoluyla arasında en az 10 mm mesafesinde çalışabildiğini ve kararlı bir şekilde çalışmasına devam ettiğini göstererek bu yeni teknolojinin maglev treni olarak kullanılabilceğini ve uygulanabileceğini kanıtlayarak literatüre katkı sağlamaya çalışıldı. Ayrıca bu çalışmanın gerçekleşmesi için yapılacak simülasyon çalışmalarında levitasyon kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve sönüm sabitinin de bulunması için yeni bir model geliştirilmiştir. Bu yeni geliştirilen model ve COMSOL programı kullanılarak levitasyon kuvvetinin en yükseğe çıkarılması için mıknatıs boyutunun optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu optimizasyonun literatürde çok kullanılan Hallbach diziliminin geliştirilmiş haline uygulanması da çalışmasıyla da literatüre katkısı olacaktır.

Öngörülen geliştirilmiş üç yüzeyli mıknatıs ve YSS'den oluşan kriyostat maglev sisteminin COMSOL programındaki simülasyon sonuçlarından elde edilen katılık ve sönüm sabitleri MATLAB programına tanıtılan maglev treninin sistem parametreleri olarak kullanılacak. Dinamik titreşim simülasyonları gerçekleştirilerek tek kişilik trenin çalışma özellikleri incelenecek ve bu da literatüre katkı sağlayacaktır.



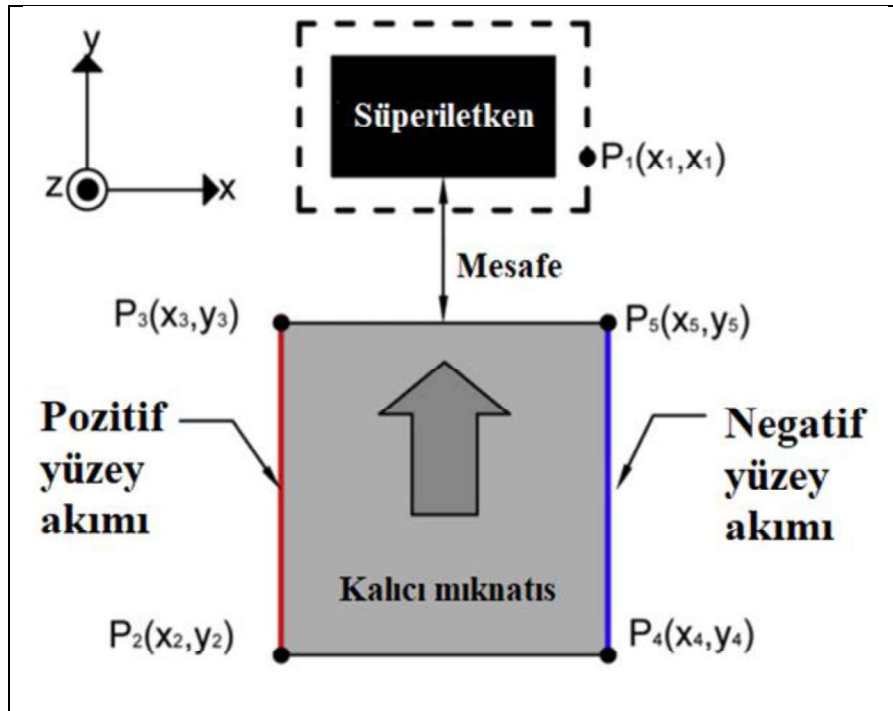
Şekil 1.11: Tek kişilik maglev taşıtının üç boyutlu görünüşü.

## 2. SÜPERİLETKEN MANYETİK LEVİTASYON BENZETİMİ

### 2.1. Modelleme ve Benzetim

Süperiletken maglev tasarımı çalışmalarının gerçekleşmesi için levitasyon özelliklerinin araştırılması gerekmektedir. Kalıcı mıknatıs ve süperiletken külçesinden oluşan maglev sisteminin simülasyonu manyetik alan çalışmalarına olanak sağlayan COMSOL Multiphysics programı kullanılarak yapılmıştır. H formülasyonu sisteme formüllerle tanıtılarak levitasyon özellikleri araştırılabilmektedir.

YSS maglev simülasyonlarını gerçekleştirmek için literatürde birden fazla yöntem sunulmuştur. Bunlardan bir tanesi kalıcı mıknatıstan oluşan manyetik ray hattını analitik formüllerle programa tanıtip çözdürmektir. Bu Biot-Savart kanunundan türetilen bu formülleri programa tanıtmak için COMSOL programının kısmi diferansiyel denklemler modülünü kullanmak gerekmektedir. Aşağıda dikdörtgen şeklindeki bir kalıcı mıknatısın simülasyon görseli ile birlikte x ve y yönündeki iki boyutlu manyetik alan değerlerinin analitik formülleri verilmiştir [Sass et al., 2015].

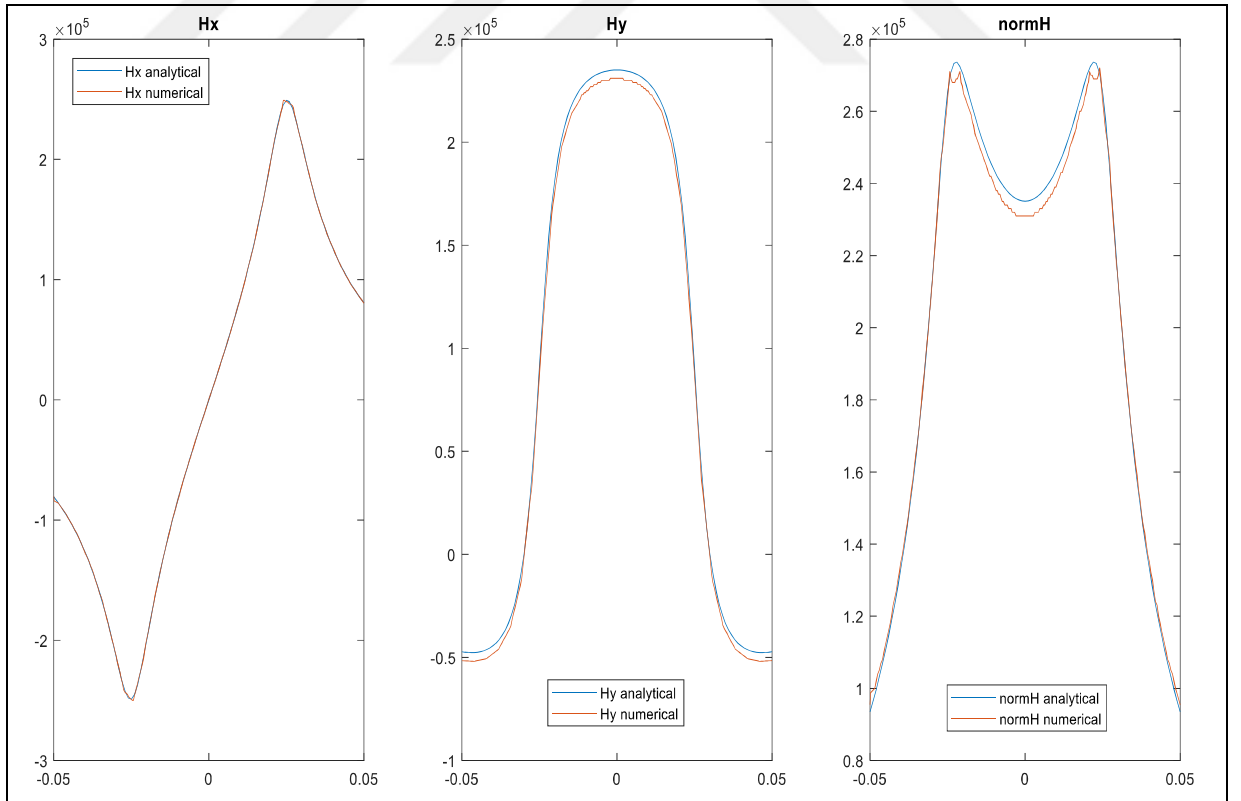


Şekil 2.1: Süperiletken ve kalıcı mıknatıstan oluşan manyetik yatak görseli. Kesikli çizgi simülasyon sınırını göstermektedir. Kalıcı mıknatıs simülasyon alanının içinde değildir.

$$H_{dış,x} = \frac{M_0}{4\pi} \ln \left( \frac{[\Delta y_{13}^2 + \Delta x_{13}^2][\Delta y_{14}^2 + \Delta x_{14}^2]}{[\Delta y_{12}^2 + \Delta x_{12}^2][\Delta y_{15}^2 + \Delta x_{15}^2]} \right) \quad (2.1)$$

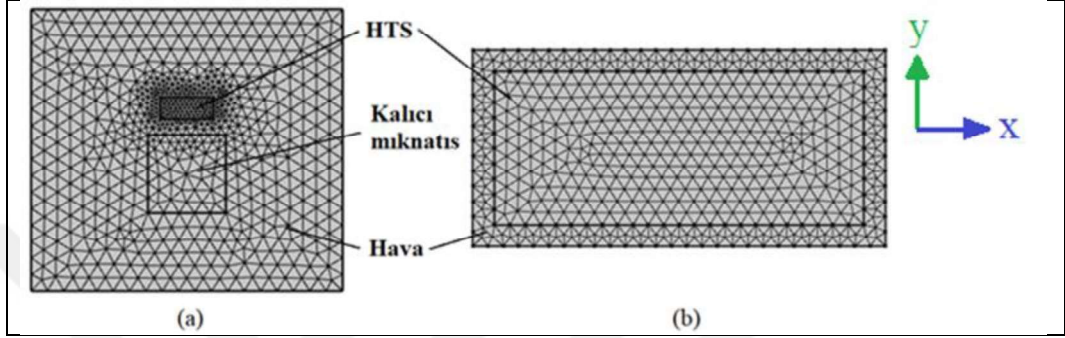
$$H_{dış,y} = \frac{M_0}{2\pi} \left[ \text{atan} \left( \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \right) - \text{atan} \left( \frac{\Delta y_{13}}{\Delta x_{13}} \right) - \text{atan} \left( \frac{\Delta y_{14}}{\Delta x_{14}} \right) + \text{atan} \left( \frac{\Delta y_{15}}{\Delta x_{15}} \right) \right] \quad (2.2)$$

Burada  $M_0$  mıknatısın magnetizasyon değeridir. Ayrıca  $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$  ve  $\Delta y_{ij} = y_i - y_j$  anlamlarına gelmektedir. Süperiletkene kalıcı mıknatıs yaklaştırıldığı zaman içinde oluşan süperakımlar da manyetik alan oluşturduğu için kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alan dış manyetik olarak adlandırılmıştır ve  $H_{dış}$  olarak gösterilmiştir. Makalede sözü geçen kalıcı mıknatısın magnetizasyon değeri 780 kA/m ve boyutları sırasıyla x, y ve z olmak üzere 50mm x 50mm x 100mm olarak verilmiştir. Yukarıdaki formüllerin kullanılmasıyla elde edilen analitik manyetik alan hesaplamalarının ve nümerik hesabının çözümlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Analitik hesap MATLAB programı, nümerik hesap ise COMSOL programı aracılığıyla elde edilmiştir.



Şekil 2.2: Kalıcı mıknatısın 5 mm yukarısından hesaplanan manyetik alan değerlerinin karşılaştırılması.

İkinci yöntemde ise manyetik alan kaynağı simülasyon bölgesinin içinde nümerik olarak hesaplanmaktadır. Bunun için COMSOL programının manyetik alan ve hareketli ağ örgüsü modülü eş zamanlı kullanılmaktadır. Manyetik alan modülü süperiletken ve mıknatıs ile alakalı formülleri çözümlenmede kullanılırken hareketli ağ örgüsü göreceli hareketin oluşturulması için kullanılmaktadır. Aşağıda iki yöntemin karşılaştırmalı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.3: Farklı iki simülasyon yönteminin simülasyon bölgelerinin ağ örgülü hali. (a) Mıknatıslı ve hareketli ağ örgülü yöntem, (b) Mıknatıssız yöntem.

Süperiletken levitasyon simülasyonu için programa H formülasyonunun tanıtılması gerekmektedir. Bunun için formüller kullanılmıştır. Bu formüller Maxwell denklemi ile başlamaktadır (yer değiştirme akım terimi ihmal edilmiştir).

$$\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.3)$$

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\mathbf{H} = [H_x, H_y, H_z]$  manyetik alan ve bileşenlerini ifade ederken  $\mathbf{E} = [E_x, E_y, E_z]$  elektrik alan ve bileşenlerini,  $\mathbf{J} = [J_x, J_y, J_z]$  akım yoğunluğunu ifade ediyor. Malzemenin elektriksel direnci  $\rho$  sembolü ile gösterilmiştir ve bu değer izotropik (yönden bağımsız) olduğu varsayılmıştır. İki boyutlu (2d) olan bir modelde süperiletkenin kesit alanına dik olan akım akışını dikkate alırsak  $H_z, E_x, E_y, J_x, J_y$  değerlerinin hepsi sıfır olmaktadır. Bundan ötürü yukarıdaki denklemler aşağıdaki denklemler haline indirgenebilir.

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial E_z}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

$$E_z = \rho J_z \quad (2.8)$$

$$J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.9)$$

Hava bölgesinin elektriksel direnç değeri ( $\rho$ )  $1\Omega\text{m}$  olarak ayarlandı. Külçe süperiletken bölgesinin elektriksel direnç değeri güç kanunundan elde edilen formül tarafından bulunmaktadır. Aşağıda süperiletkenin direnç formülü ve manyetik alana üstel olarak bağımlı kritik akım formülü görülmektedir.

$$\rho = \frac{E_c}{J_c(B)} \left| \frac{J_z}{J_c(B)} \right|^{n-1} \quad (2.10)$$

$$J_c(B) = J_{c0} \left( \frac{B_0}{B_0 + |B|} \right) \quad (2.11)$$

Yukarıdaki formüllerde bulunan  $E_c$  terimi kritik akım ölçütünü,  $J_{c0}$  başlangıç kritik akım yoğunluğunu ve  $n$  doğrusal olmayan elektriksel direnci oluşturmak için kullanılan güç kanunu üssünü temsil etmektedir.  $E_c$  ve  $J_{c0}$  terimleri deneysel ölçümler sonucu elde edilebilecek değerlerdir. Güç kanunu üssü değerinin yapılan çalışmalar sonucunda 21 olarak seçilmesinin yeterli olduğu bilim insanları tarafından belirtilmiştir. Sanal mıknatıslı simülasyon yönteminin kullanılması için süperiletken içinde oluşan süperakımların oluşturduğu manyetik alanın da hesaba katılması gerekmektedir. Bu formüllerde iki boyutlu simülasyon için aşağıda görüldüğü gibi Biot-Savart kanunundan elde edilebilmektedir. Toplam manyetik alan mıknatısın ve süperiletkenin oluşturdukları manyetik alanların toplamına eşittir.

$$H_{y_{ss},x}(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega_{y_{ss}}} \frac{-J_z(x', y', t)(y - y')}{(x - x')^2 + (y - y')^2} dx' dy' \quad (2.12)$$

$$H_{y_{ss},y}(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega_{y_{ss}}} \frac{J_z(x', y', t)(x - x')}{(x - x')^2 + (y - y')^2} dx' dy' \quad (2.13)$$

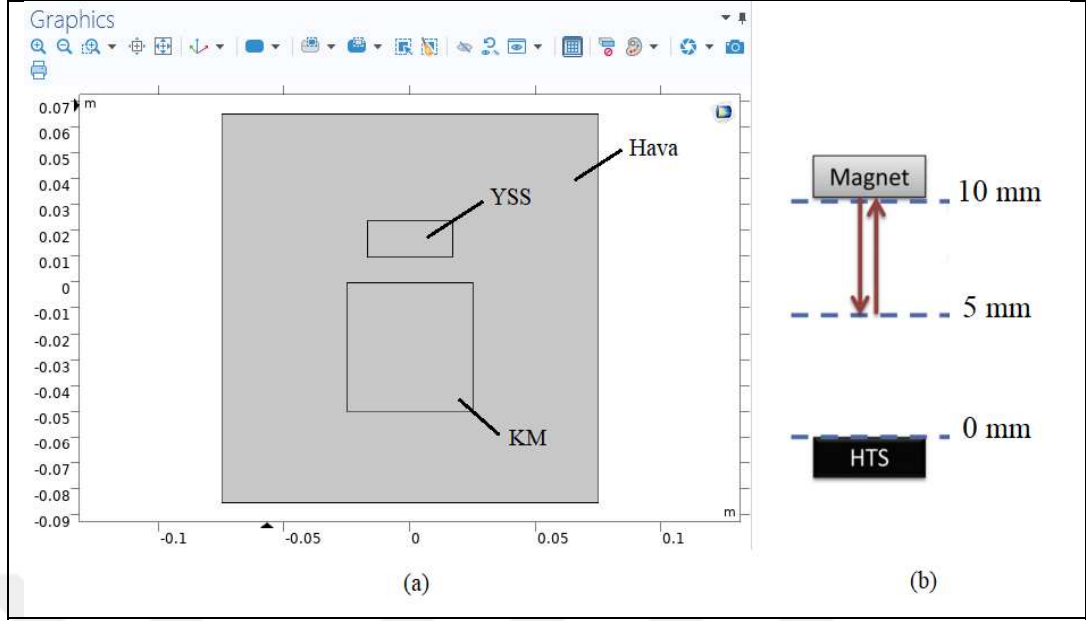
$$H_x = H_{dış,x} + H_{y_{ss},x} \quad (2.14)$$

$$H_y = H_{dış,y} + H_{y_{ss},y} \quad (2.15)$$

Süperiletken levitasyon özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi ve üç yüzeyli levitasyon simülasyonu araştırması için yukarıda anlatılan modeli en az bir kez kullanıp gerçek bir deney sonucu ile doğrulamak gerekmektedir. Bunun için literatürdeki bir süperiletken deney örneğinin (“Superconducting magnetic bearings simulation using an H-formulation finite element model” başlıklı makalenin alansız soğutma deneyi) iki yöntem için de simülasyonu yapılmıştır ve sonuçların deneysel sonuçlarla aynı olduğu gösterilmiştir. COMSOL programında hareketli ağ örgülü ve miknatıslı metodun uygulanması için manyetik alan formülasyonu (magnetic field formulation) adlı modül ve zamana bağlı çalışma yöntemi kullanılmıştır. Bu modül açıldıktan sonra geometri bölümünden YSS, KM ve hava bölgeleri boyutlarına göre programda oluşturuldu.

Tablo 2.1: İki boyutlu simülasyon bölgeleri, boyutları ve merkez konumları.

Simülasyon bölgesi	Boyut (x, y, z) (mm)	Merkez konumu (x, y, z) (mm)
YSS	(34, 14, 67)	(0, 17, 0)
KM	(50, 50, 100)	(0, -25, 0)
Hava	(150, 150, 0)	(0, -10, 0)



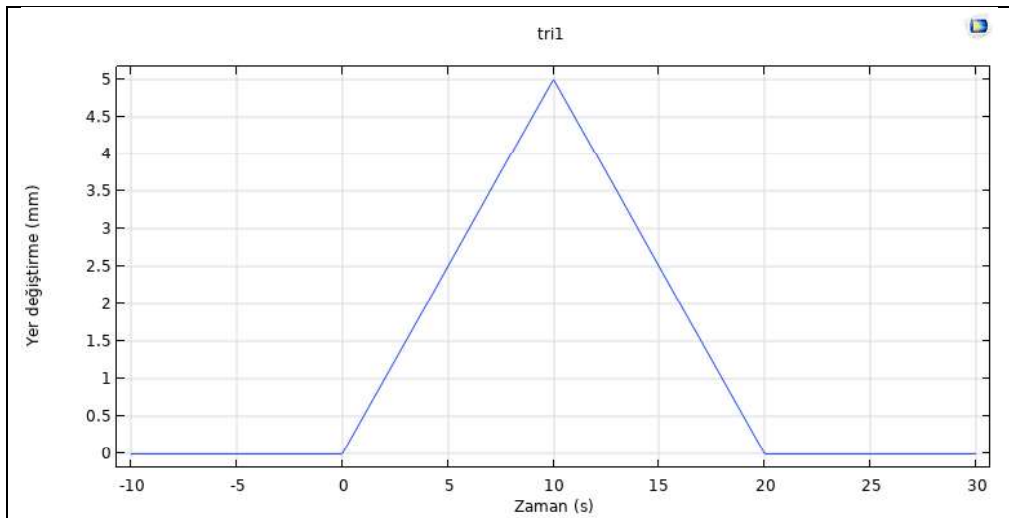
Şekil 2.4: Alansız soğutma için oluşturulmuş simülasyon şeması. (a) COMSOL programı, (b) senaryonun şematik gösterimi.

Simülasyon bölgeleri oluşturulduktan sonra sisteme YSS ve KM ile ilgili parametreler programın parametreler bölümüne girilmiştir.

Tablo 2.2: Süperiletken ve kalıcı mıknatıs ile ilgili parametreler.

Sembol	Tanım	Değer	Birim
$B_0$	Kim model parametresi	0.37	T
$J_{c0}$	Sıfır-akım kritik akım yoğunluğu	$1.5 \times 10^8$	$A/m^2$
$E_c$	Kritik akım ölçütü	$1 \times 10^{-4}$	V/m
$n$	Güç kanunu üssü (1- $\infty$ )	21	
$H_r$	KM gidergenlik kuvveti	$780 \times 10^3$	A/m
$\rho_{hava}$	Hava direnci	1	$\Omega \cdot m$
$\mu_0$	Hava/YSS geçirilgenliği	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m

Süperiletken simülasyon bölgesine süperiletken özelliklerini eklemek için programın bileşen başlığının altındaki tanımlar kısmına formüller programın diline çevrilerek girilmektedir. Manyetik alan formülasyonu sekmesinin altına iki adet Faraday kanunu başlığı açarak kalıcı mıknatıs ve süperiletken bölgeleri sırasıyla seçilerek magnetizasyon ve elektriksel direnç seçenekleri seçilir. Bu aşamadan sonra malzemeler kısmından hava ve kalıcı mıknatıs için sadece elektriksel direnç değeri ve süperiletken için elektriksel direnç değerinin yanı sıra elektrik alan norm  $E_c$  olarak girilir. Ayrıca her malzemenin göreceli geçirgenliği ve göreceli yalıtkanlık sabiti 1 olarak girilmektedir. Fizik bölümünden hareketli ağ örgüsü modülü ekleyip hava bölgesi için serbest deformasyon (free deformation) seçeneği ekliyoruz. Bundan sonra kalıcı mıknatıs bölgesi seçildikten sonra bu bölge için hem önceden belirlenmiş deformasyon (prescribed deformation) hem de önceden belirlenmiş mesh yer değiştirmesi (prescribed mesh displacement) aynı değer için girilmektedir. Alansız soğutma senaryosu için bu değer 20 saniye içinde 5 mm yukarı ve 5 mm aşağı gitmek üzere 0.5 mm/s'dir. Bu yer değiştirme genel tanımlar (global definitions) başlığı altında bulunan değişkenler (variables) kısmından yapılabilir. Senaryoda seçilen hareketi tanımlamak için yine aynı başlık altında bulunan üçgen (triangle) fonksiyonu kullanılmıştır. Üçgen fonksiyonunun alt limiti 0 üst limiti 20 olarak tanımlandıktan sonra değişkenler kısmına hareketi tanımlamak için rastgele bir değişken ismi atıyoruz. Örneğin hareketi "Dy" olarak tanımladıktan sonra ifade (expression) kısmına "5\*tri1(t[1/s])[mm]" formülünü ekleyerek programa hareketi tanımlamış oluyoruz.



Şekil 2.5: Mıknatısın dikey yönde yaptığı hareketin grafiği.

Son olarak ağ örgüsünü ve çalışma zaman aralığını “range(0,0.1,20)” olarak programda ayarladıktan sonra çalışmayı çözdürüyoruz. Sonuçlar (Results) kısmından iki boyutlu grafik bölümünden (2D Plot Group) yüzey (Surface) için grafik çizdirirsek YSS'nin içinde indüklenen süperakımları görebiliriz. Bunun için yüzey grafiği bölümünde ifade kısmına mfh.Jz yazıp zamanı da 10.0 saniyeye getirmemiz gerekir.

Aynı simülasyon senaryosunu bir de diğer yöntem için yani mıknatıssız/sanal mıknatıslı yöntemde deneyip sonuçlar karşılaştırılacaktır. Bunun için yine COMSOL programı kullanılacaktır fakat bu sefer ne hareketli ağ örgüsü modülü ne de manyetik alan formulasyonu modülü kullanılacaktır. Onların yerine sadece genel kısmi diferansiyel denklem (kdd) form (General Form PDE) modülü kullanılacaktır. Modül açıldıktan geometri kısmından bir önceki yöntemde olduğu gibi simülasyon bölgelerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu yöntemde mıknatıs sanal olarak programa tanıtılacağı için sadece hava ve YSS bölgeleri oluşturulacaktır. Bölgeler aşağıda tabloda belirtilen değerlere göre oluşturulmuştur.

Tablo 2.3: İki boyutlu mıknatıssız YSS simülasyon bölge boyutları ve konumları.

Simülasyon bölgesi	Boyut (x, y, z) (mm)	Merkez konumu (x, y, z) (mm)
YSS	(34, 14, 67)	(0, 0, 0)
Hava	(36, 16, 69)	(0, 0, 0)

Bölgeler oluşturulduktan sonra en üstteki başlığa bağımlı değişken niceliği (Dependent variable quantity) olarak manyetik alan birimi yani A/m, kaynak terim niceliği (Source term quantity) olarak V/m<sup>2</sup> değeri girilecektir. Yine aynı kısımdan bağımlı değişken sayısı çalıştığımız model iki boyutlu olduğu için iki adet olarak belirlenecektir. Alan adı kısmına (Field name) “H”, bağımlı değişkenler sayısı (Number of Dependent variables) olarak 2 ve son olarak bağımlı değişkenler (Dependent variables) kısmına sırasıyla manyetik alanın bileşenleri temsil etmesi için “Hx” ve “Hy” değerleri yazılacaktır. (2.6) ve (2.7) denklemleri sisteme tanıtmak için genel kdd 1 (General Form PDE 1) bölümünde konservatif akı (Conservative Flux) kısmında sırasıyla 0, E<sub>z</sub>, -E<sub>z</sub>, 0 yazılacaktır. Kaynak terimler (Source term) ve kütle katsayıları (mass coefficient) kısımları 0 değerlerinde kalacaktır. Çünkü COMSOL

programının varsayılan denklem formatına göre YSS denklemlerini sisteme tanıtırken bu katsayılar sıfır olmak zorundadır.

$$e_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = f \quad (2.16)$$

$$\mathbf{u} = [H_x, H_y]^T \quad (2.17)$$

$$\nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right] \quad (2.18)$$

Bundan sonra yine genel form dirichlet sınır koşulu (Dirichlet Boundary Condition) oluşturup hava bölgesinin en dış sınırlarını seçerek  $H_x$ 'in tanımlanmış değeri (Prescribed value of  $H_x$ ) kısmına “ $H_x_{dış}+H_x_{yss}$ ” ve  $H_y$ 'nin tanımlanmış değeri (Prescribed value of  $H_y$ ) kısmına “ $H_y_{dış}+H_y_{yss}$ ” formüllerini yazarak (2.14) ve (2.15) numaralı denklemleri programa tanıtmış oluruz. Ayrıca başlangıç değerleri (Initial values 1) kısmında manyetik alan bileşenlerinin türevleri sıfır olmak kaydıyla uygun yerlere yine aynı formüllerini yazıyoruz. Sisteme tanıtılan parametreler aşağıdadır.

Tablo 2.4: Simülasyonda kullanılan parametreler.

Sembol	Tanım	Değer	Birim
$H_0$	Model parametresi	1.8e5	A/m
$J_{c0}$	Kritik akım yoğunluğu	$3.7 \times 10^8$	A/m <sup>2</sup>
$E_c$	Kritik akım ölçütü	$1 \times 10^{-4}$	V/m
$n$	Güç kanunu üssü (1-∞)	21	
$H_r$	KM gidergenlik kuvveti	$780 \times 10^3$	A/m
$\mu_0$	Hava/YSS geçirilgenliği	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
$K$	Kısaltma	$M0/4/\pi$	A/m
$R$	Kısaltma	$M0/2/\pi$	A/m

Sanal mıknatısın şekil 2.1'deki görsele göre değişken koordinasyonlarını sisteme tanıtmak için değişkenler kısmına aşağıdaki tablodaki değerler girilmektedir.

Tablo 2.5: Yer değiştirme fonksiyonu ve mıknatısın köşe noktalarının konumu.

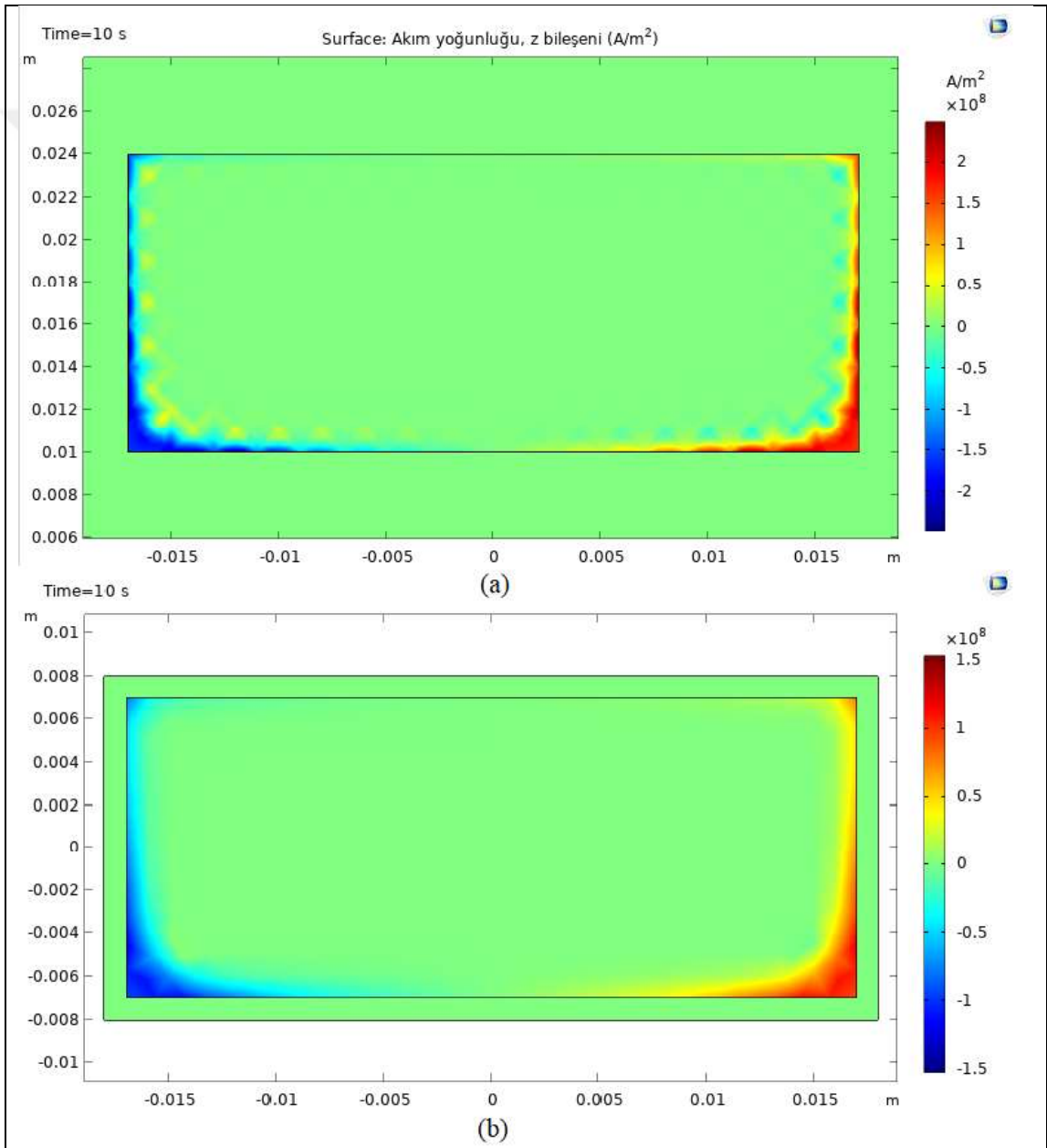
Dy		tri1(t[1/s])*5[mm]	
x <sub>2</sub>	-25[mm]	y <sub>2</sub>	-50[mm] + y <sub>3</sub>
x <sub>3</sub>	-25[mm]	y <sub>3</sub>	-17[mm] + Dy
x <sub>4</sub>	25 [mm]	y <sub>4</sub>	-50[mm] + y <sub>3</sub>
x <sub>5</sub>	25[mm]	y <sub>5</sub>	-17[mm] + Dy

Simülasyon için gerekli formüllerin ((2.11)-(2.15)) çözülmesi için simülasyon bölgelerinde değişkenler tanımlanması gerekmektedir. Aşağıda bölgeler ve o bölgelere tanımlanan değişkenler program dili halinde verilmiştir.

Tablo 2.6: Simülasyon bölgelerine göre değişken tanımlamaları.

Bölge	Değişken adı	İfade	Birim
Hava	Rho	1[ohm*m]	$\Omega \cdot m$
YSS	Rho	$(E_c/J_c) * (abs(J_z)/J_c)^{(n-1)}$	$\Omega \cdot m$
	H	$\sqrt{H_x^2 + H_y^2}$	A/m
	J <sub>c</sub>	$J_{c0} * \exp(-H/H_0)$	A/m <sup>2</sup>
Tüm model	J <sub>z</sub>	$H_y x - H_x y$	A/m <sup>2</sup>
	E <sub>z</sub>	$Rho * J_z$	V/m
	H <sub>x</sub> _dış	$K * \log(\frac{((y[1/m]-y_3[1/m])^2 + (x[1/m]-x_3[1/m])^2) * ((y[1/m]-y_4[1/m])^2 + (x[1/m]-x_4[1/m])^2)}{((y[1/m]-y_2[1/m])^2 + (x[1/m]-x_2[1/m])^2) * ((y[1/m]-y_5[1/m])^2 + (x[1/m]-x_5[1/m])^2)})$	A/m
	H <sub>x</sub> _yss	$-\text{intop1}(J_z * (\text{dest}(y)-y) / ((\text{dest}(x)-x)^2 + (\text{dest}(y)-y)^2)) / 2/\pi$	A/m
	H <sub>y</sub> _dış	$R * (\text{atan}((y[1/m]-y_2[1/m]) / (x[1/m]-x_2[1/m])) - \text{atan}((y[1/m]-y_3[1/m]) / (x[1/m]-x_3[1/m])) + \text{atan}((y[1/m]-y_5[1/m]) / (x[1/m]-x_5[1/m])) - \text{atan}((y[1/m]-y_4[1/m]) / (x[1/m]-x_4[1/m])))$	A/m
	H <sub>y</sub> _yss	$\text{intop1}(J_z * (\text{dest}(x)-x) / ((\text{dest}(x)-x)^2 + (\text{dest}(y)-y)^2)) / 2/\pi$	A/m

Yukarıdaki formüllerde intop1 ile ifade edilen fonksiyon terimi tanımlar kısmından formüllerde kullanılmak üzere sadece YSS bölgesi seçilerek oluşturulan integrasyon fonksiyonudur. Ağ örgüsü de ayarlandıktan sonra zaman aralığı “range(0,0.1,20)” olacak şekilde simülasyonu çözdürüyoruz. Bir önceki yöntemde de olduğu gibi süperiletken içinde indüklenen süperakımları sonuçlar kısmındaki iki boyutlu yüzey grafiği seçeneğinden çizdirebiliriz. Aşağıda iki ayrı yöntemin çözümleri sonucunda elde edilen süperiletken içindeki süperakım dağılımının grafiklerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.6: Süperiletken içindeki akım dağılımlarının yöntemlere göre karşılaştırılması. (a) Mıknatıslı, (b) mıknatıssız.

## 2.2. Manyetik Kaldırma Kuvvetinin Hesaplanması

YSS ve KM arasındaki göreceli hareketten dolayı oluşan levitasyon kuvveti kuvvet sensörleri sayesinde deneysel yöntemlerle ölçülebilmektedir. Ancak levitasyon sistemlerinin özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi için zamandan ve maliyetten tasarruf edilmesi için simülasyon ortamında bu hesabın yapılması gerekmektedir. Bundan ötürü bilim insanları tarafından levitasyon kuvveti için bir formül hesaplanmıştır. Levitasyon kuvveti için kullanılan formül aşağıda gösterilmiştir.

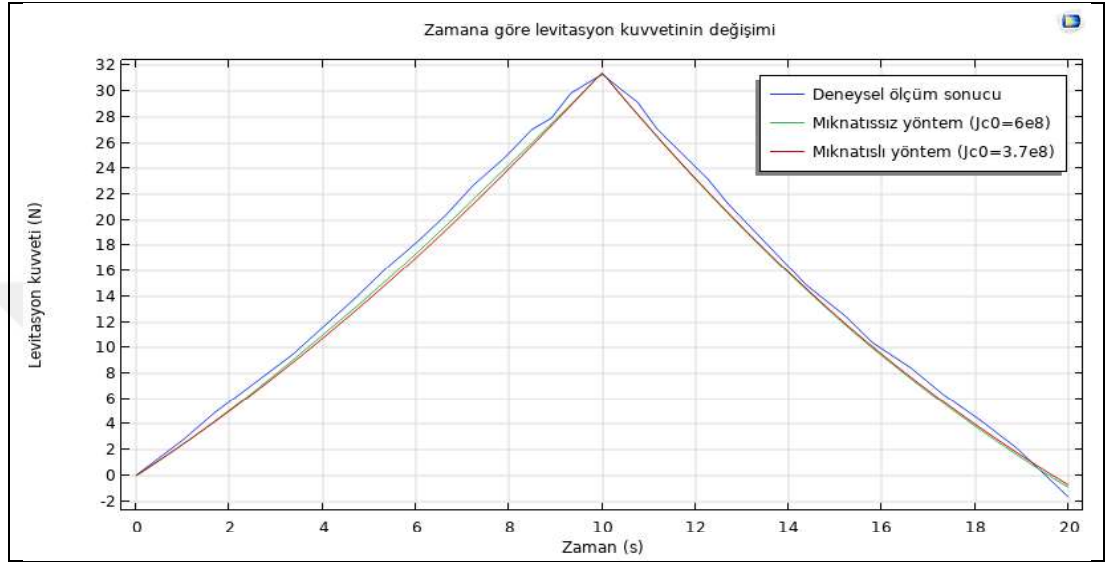
$$F_y(t) = \int_{\Omega_{yss}} [\mu \cdot H_x(x, y, t) \cdot J_z(x, y, t)] ds [N/m] \quad (2.19)$$

Yukarıdaki formülde  $\Omega_{yss}$  süperiletken simülasyon bölgesini,  $ds$  ise diferansiyel kesit alanını ifade etmektedir. Dikey yönde yani  $y$  ekseninde hareket gerçekleştiği için levitasyon kuvveti  $F_y(t)$  olarak ifade edilmiştir. Literatürde levitasyon kuvveti birçok defa hem alanlı hem de alansız soğutma şartlarında ölçülmüştür ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Alansız soğutmada ölçülen levitasyon kuvveti alanlı soğutmaya göre daha yüksek olmuştur. Yani kalıcı mıknatıs ve yüksek sıcaklık süperiletkeni arasındaki hareketin başlangıç mesafesi azaldıkça ölçülen levitasyon kuvvetinin azami değerinin azaldığı yapılan deneylerle kanıtlanmıştır. Yöntemlerin denenmesi ve doğrulanması için kullanılan makalede farklı başlangıç yüksekliklerinde levitasyon kuvveti ölçümü gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Aşağıda tabloda soğutma yüksekliğine göre ölçülen en yüksek levitasyon kuvvet değerleri verilmiştir.

Tablo 2.7: Soğutma yüksekliğine göre levitasyon kuvvet değerleri.

Soğutma yüksekliği	Yaklaştırma mesafesi (kalan mesafe)	Elde edilen en yüksek levitasyon kuvveti
100 mm	95 mm (5 mm)	~110 N
30 mm	25 mm (5 mm)	~90 N
20 mm	15 mm (5 mm)	~68 N
10 mm	5 mm (5 mm)	~32 N

Aşağıda daha önce belirtilen makaledeki alansız soğutma deneyinin iki farklı yöntemle çözülen ve elde edilen levitasyon kuvvetlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların arasındaki fark ihmal edilebilecek seviyede olduğu için kullanılması gayet uygun bulunmaktadır.



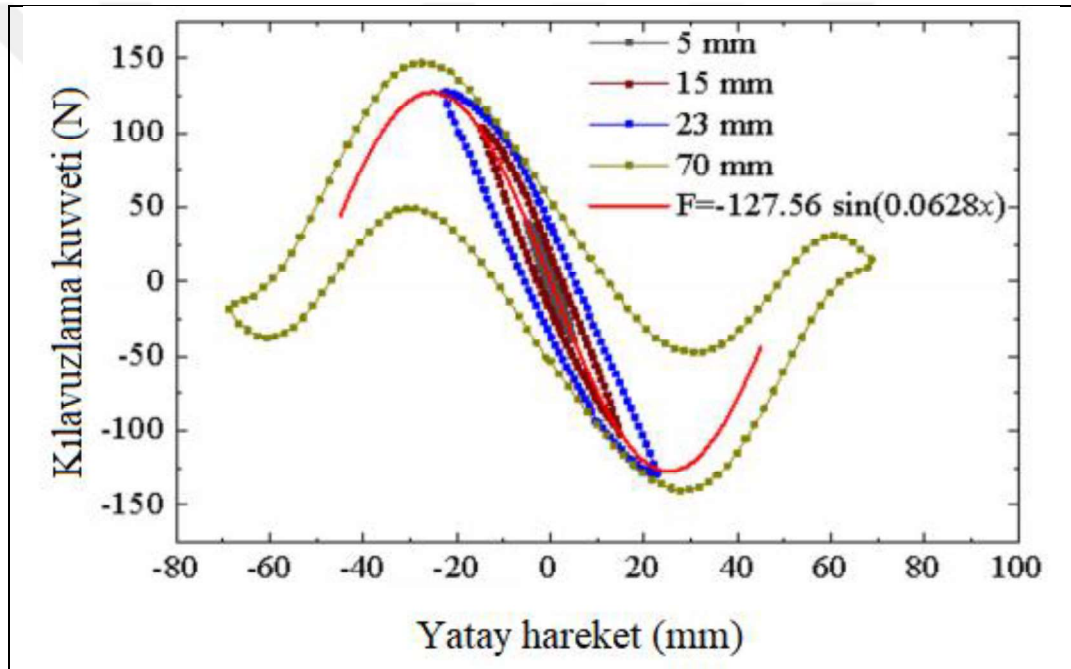
Şekil 2.7: Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

### 2.3. Manyetik Kılavuzlama Kuvvetinin Hesaplanması

Maglev sistemlerinde kararlı çalışma hali düşey yöndeki manyetik kuvveti başka bir deyişle levitasyon kuvveti kadar yatay yöndeki kuvvet yani kılavuzlama kuvveti de çok önem arz etmektedir. Bu yüzden levitasyon kuvveti ile birlikte sistemin kılavuzlama kuvvetinin de hesaplanması gerekmektedir. Düşey yönde olduğu gibi kuvvet sensörleri sayesinde yatay yönde oluşan kuvvetler sensörler yardımıyla deneysel olarak ölçülebilmektedir. Ayrıca bilim insanları maglev sistemlerinin araştırılabilmesi ve geliştirebilmesi için simülasyon ortamında hesaplaması yapılmak üzere manyetik kılavuzlama kuvveti için formül üretmişlerdir. Kalıcı mıknatıslardan oluşan manyetik kılavuz yolu/manyetik ray hattı üzerindeki süperiletkenin yatay yönde hareket ettirilmesi sonucu oluşan kuvvete denir. Maglev tren sisteminin özellikle dönüş yaptığı virajlarda daha da önem kazanan bu özelliğin hesaplanması için kullanılan formül gösterilmektedir.

$$F_x(t) = \int_{\Omega_{yss}} [\mu \cdot H_y(x, y, t) \cdot J_z(x, y, t)] ds [N/m] \quad (2.20)$$

Levitasyon kuvvetinde kullanılan formülde olduğu gibi bu formülde de  $\Omega_{yss}$  süperiletken simülasyon bölgesini, ds ise diferansiyel kesit alanını ifade etmektedir. Literatürde yapılan çalışmalardan edinilen bilgilere göre yatay yöndeki hareket arttıkça belli bir mesafeye kadar kılavuzlama kuvveti artış göstermektedir. Bu mesafeden sonra süperiletken aynı yönde harekete devam ettirilirse kılavuzlama kuvveti azalmaya başlayıp bir süre sonra sıfıra yaklaşmaktadır. Aşağıda yatay manyetik kuvvet ölçümünün görseli verilmiştir [Li et al., 2020].



Şekil 2.8: YSS külçelerinin bazı yatay hareket aralıklarındaki ( $\pm 5$ ,  $\pm 22$ ,  $\pm 70$ ) kılavuzlama kuvveti eğrileri.

Yukarıdaki şekilden de anlaşılabilirdiği gibi yatay hareketin mesafe aralığı arttıkça kılavuzlama kuvvetinin histerisiz eğrisi genişlemektedir. Yani aynı yatay mesafede hareketin yönüne bağlı olarak elde edilen kılavuzlama kuvveti farklı olmaktadır ve hareket aralığı arttıkça elde edilen bu kılavuzlama kuvvetlerinin değerleri birbirinden daha çok uzaklaşmaktadır. Buradan tahmin edileceği gibi süperiletken maglev sistemlerinde sistemin yatay hareketi sistemin kararlılığını önemli şekilde etkilemektedir.

## 2.4. Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması

Hareket eden her dinamik sistemde olduğu gibi YSS maglev sistemlerinde de sistemin katılık sabiti ve sönüm sabitlerinin sistem kararlılığı açısından araştırılması gerekmektedir. Bu sabit değerlerinin ölçümü manyetik kılavuz yolunun üstündeki YSS'nin soğutulması tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmektedir. Literatürde katılık sabiti ölçümü ilgili hareketin çevriminde 2mm'lik küçük çevrimler (minor loop) yapılarak elde edilmektedir. Yapılan küçük çevrimlerden geçirilen doğruların eğimleri ilgili hareket yönünün ve ilgili YSS yüksekliğinin katılık değerini vereceği belirtilmiştir.

### 2.4.1. Dikey Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması

Dikey yöndeki manyetik katılık sabitinin hesaplanması için yukarıda belirtilen küçük çevrim yöntemi, dikey yönün katılığı araştırıldığı için levitasyon kuvvet eğrisine uygulanmalıdır. Aşağıda dikey yöndeki levitasyon katılık sabiti için kullanılan formül gösterilmiştir.

$$k_z = -\frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (2.21)$$

Yukarıdaki formülden de anlaşılacağı gibi kuvvet değişiminin dikey yöndeki hareket değişimine oranı dikey yöndeki katılık sabitine eşittir. Bu değer farklı olarak levitasyon kuvvet eğrisinin hareket mesafesine bölümünden de elde edilebilmektedir. Bu çalışmada hem yatay hem de dikey yöndeki katılık sabitleri bu yöntemle elde edilmiştir.

### 2.4.2. Yatay Manyetik Katılık Sabitinin Hesaplanması

Yatay yöndeki katılık sabiti dikey yöndeki katılık sabitinin elde edildiği gibi kuvvet eğrisinde küçük çevrimler yapılarak elde edilmektedir. Yatay manyetik katılık sabiti için küçük çevrim yöntemi kılavuzlama kuvvet eğrisine uygulanırsa aşağıdaki ifadeye göre elde edilmektedir.

$$k_y = -\frac{\partial F_y}{\partial y} \quad (2.22)$$

Yukarıdaki formülden anlaşılacağı üzere yatay kuvvetin harekete göre değişimi katılık sabiti değerine ulaşmamızı sağlar. Yani kuvvet-hareket eğrisinin eğimi başka bir deyişle harekete göre türevi katılık sabitini vermektedir. Bu çalışmada levitasyon katılık sabitinin elde edildiği gibi kılavuzlama katılık sabiti kuvvet eğrisinin hareket mesafesine bölümünden elde edilmiştir.

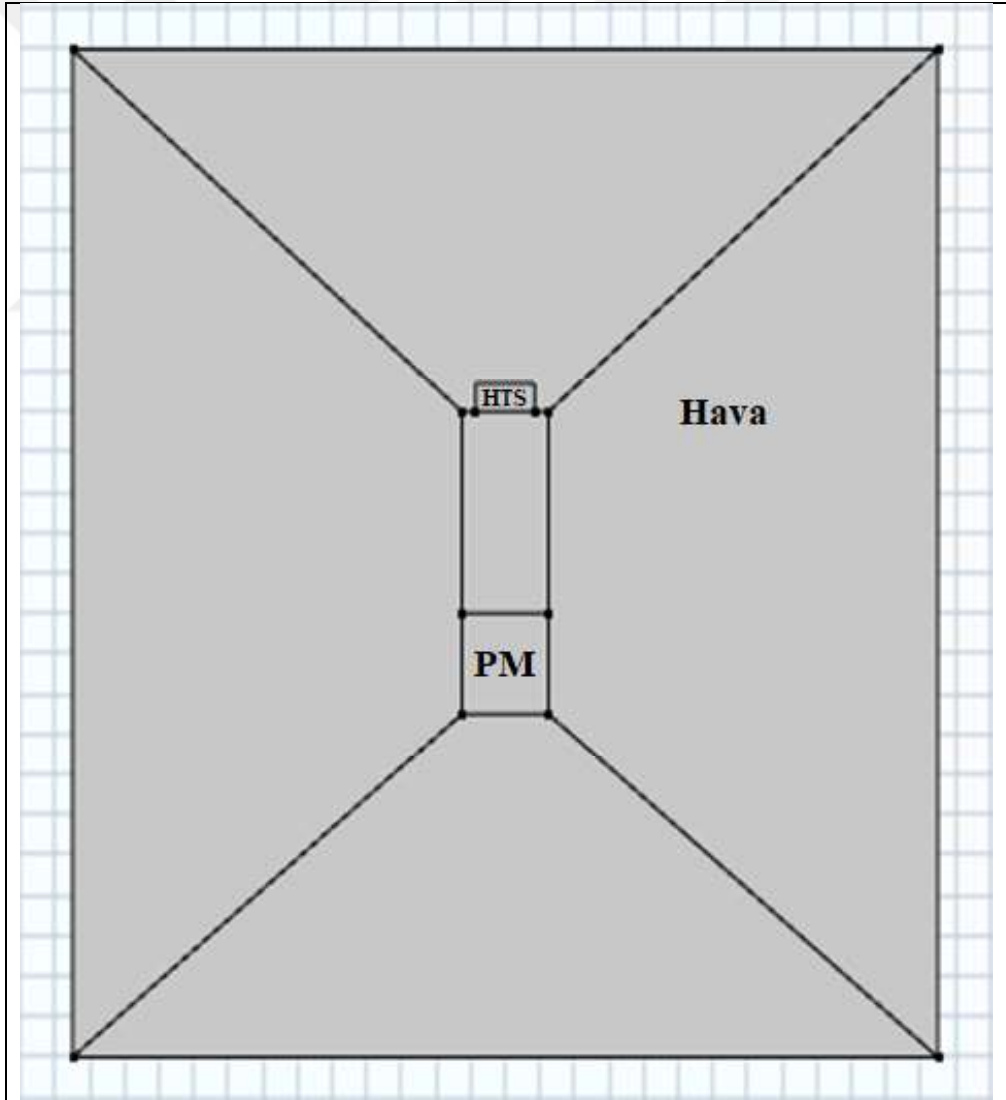
## 2.5. Geliştirilmiş Yöntem

Literatürde şu ana kadar YSS simülasyonu birden fazla yöntem öne sürülmüştür. Bunlardan iki tanesi mıknatıslı ve mıknatıssız (sanal mıknatıslı) simülasyon olmak üzere bu çalışmada anlatılmıştır. Ancak bu iki yöntemin birbirine göre karşılaştırıldığı zaman belli başlı bazı dezavantajları ve avantajları bulunmaktadır. Örneğin; mıknatıslı simülasyonun mıknatıssız simülasyona göre oluşturulma veya hazırlanma süresi daha az ve daha kolay olmaktadır. Öte yandan mıknatıssız simülasyon yönteminde hareketli ağ örgüsü kullanılmadığı için istenilen herhangi soğutma mesafesine göre levitasyon ve kılavuzlama kuvveti hesaplanabilmektedir. Fakat mıknatıssız yöntemde mıknatısın manyetik alan değeri analitik formüllerle oluşturulduğu için çok çaba sarf edilmesi gerekmektedir. Özellikle tasarlanan manyetik kılavuzlama yolu birden çok kalıcı mıknatıs içermekte ise veya simülasyon üç boyutlu olarak yapılıyorsa formülleri oluşturmak çok uzun zaman alabilmektedir.

COMSOL şirketinin kendi forumlarında paylaştığı bir yöntem sayesinde hareketli ağ örgüsünün farklı bir modül yardımıyla yönlendirilmesi sayesinde hareket üzerindeki kısıtlama ortadan kaldırılabilir. Geliştirilen bu yeni yöntemin kullanılmasıyla hem uzun ve zaman alan analitik formüllere gerek kalmıyor hem de istenilen herhangi soğutma yüksekliğine göre levitasyon kuvvet ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemle yatay hareket yani kılavuzlama kuvveti de sorunsuz bir şekilde elde edilebilmektedir. Ancak hem mıknatıssız hem de mıknatıslı simülasyon çalışmasında tahmin edilebileceği gibi üç boyutlu olarak çalışıldığı zaman model oluşturmak da oluşturulan modeli çözmek de iki boyutlu simülasyona göre çok daha fazla zaman almaktadır.

### 2.5.1. İki Boyutlu Simulasyonda Geliştirilmiş Yöntem

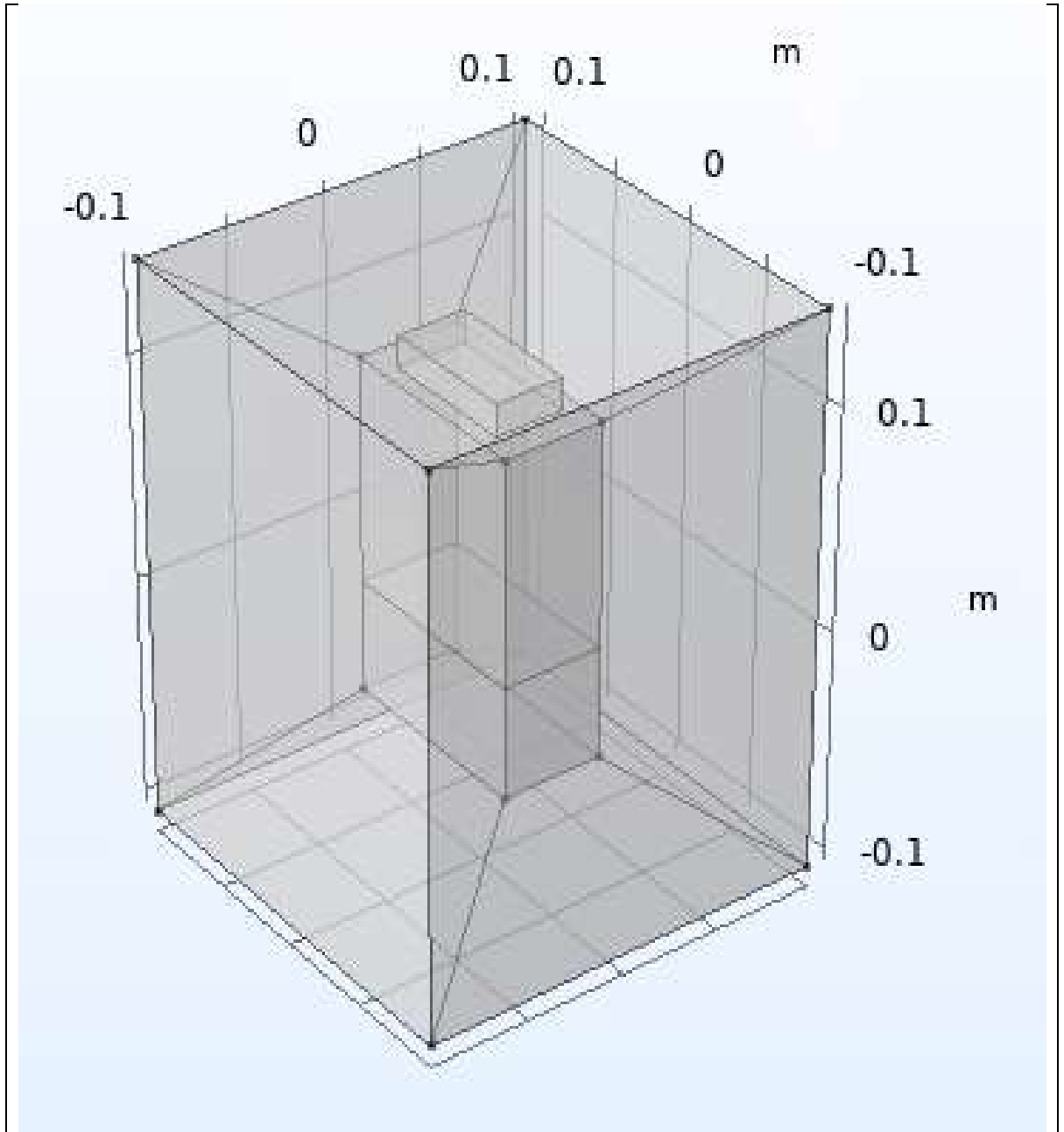
Geliştirilen yeni yöntemin kullanılabilirliğini ve doğruluğunu kanıtlamak amaçlı daha önce yapıldığı gibi deneysel sonucu olan bir çalışmanın değerleri ile karşılaştırma yapılacaktır. Daha önce seçilen makalenin bu sefer alansız soğutma yani YSS ile manyetik ray hattı arasında 100 mm mesafe bulunan deney çalışması doğrulama için seçilmiştir. Tek YSS ve tek kalıcı mıknatıstan oluşan bu deneysel çalışmada YSS ve kalıcı mıknatıs mesafesi başlangıçta 100 mm iken aralarındaki göreceli hareket sonrasında mesafe 5 mm inip sonra tekrar mesafe değeri 100 mm'ye çıkartılarak oluşan levitasyon değeri ölçülmüştür. Aşağıda bu simülasyon senaryosu için oluşturulan geliştirilmiş yöntemin 2 boyutlu simülasyon görseli gösterilmiştir.



Şekil 2.9: İki boyutlu geliştirilmiş yöntem modeli.

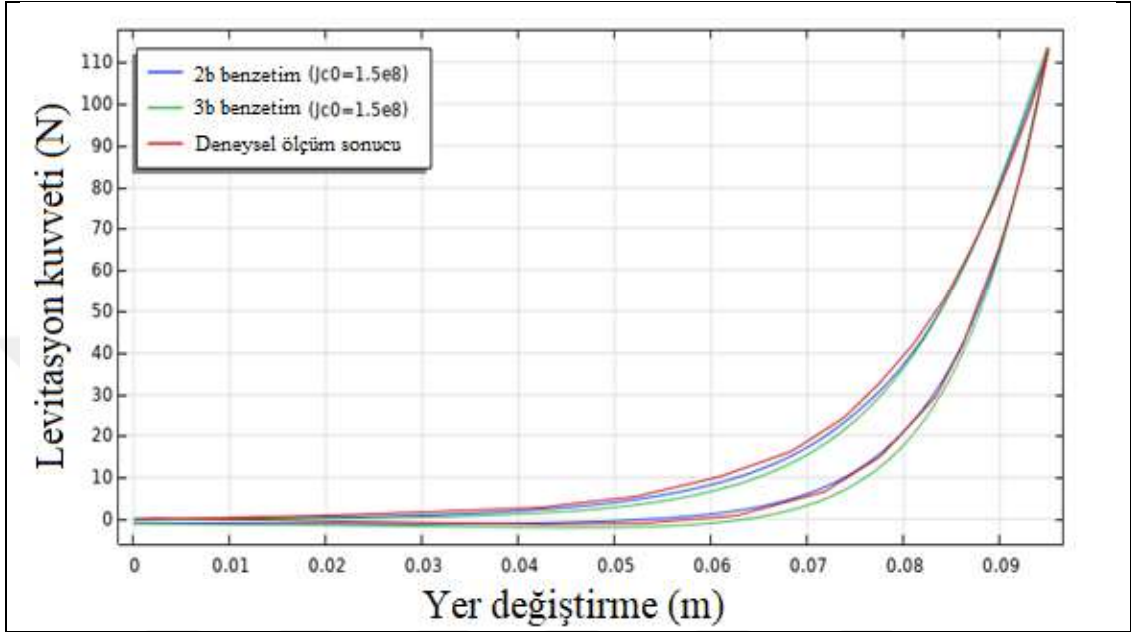
## 2.5.2. Üç Boyutlu Simülasyonda Geliştirilmiş Yöntem

Geliştirilmiş simülasyon yöntemi sayesinde hem iki boyutlu hem de üç boyutlu simülasyon için hesaplama yapılabilmektedir. Üç boyutlu simülasyonda hem formüller hem de simülasyonda kullanılan yöntem biraz daha teferruatlı hale gelmektedir. Hareketli ağ örgüsünü yönlendirmek iki boyutlu yöneme göre daha zor olmakla beraber YSS için örülen ağ çeşidi önem kazanmaktadır. Ayrıca çözüm süresi tahmin edilebileceği gibi iki boyutlu yöneme göre daha fazla zaman almaktadır.



Şekil 2.10: Üç boyutlu geliştirilmiş yöntem modeli.

Aşağıda geliştirilmiş yöntemle hesaplanan levitasyon kuvvetinin hem iki boyutlu hem de üç boyutlu sonuçlarının makaledeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılması görülmektedir. Tüm değerler birbirine çok yakın olması sonucu bu yöntemin doğruluğunu ve kullanılabilirliğini kanıtlanmıştır.

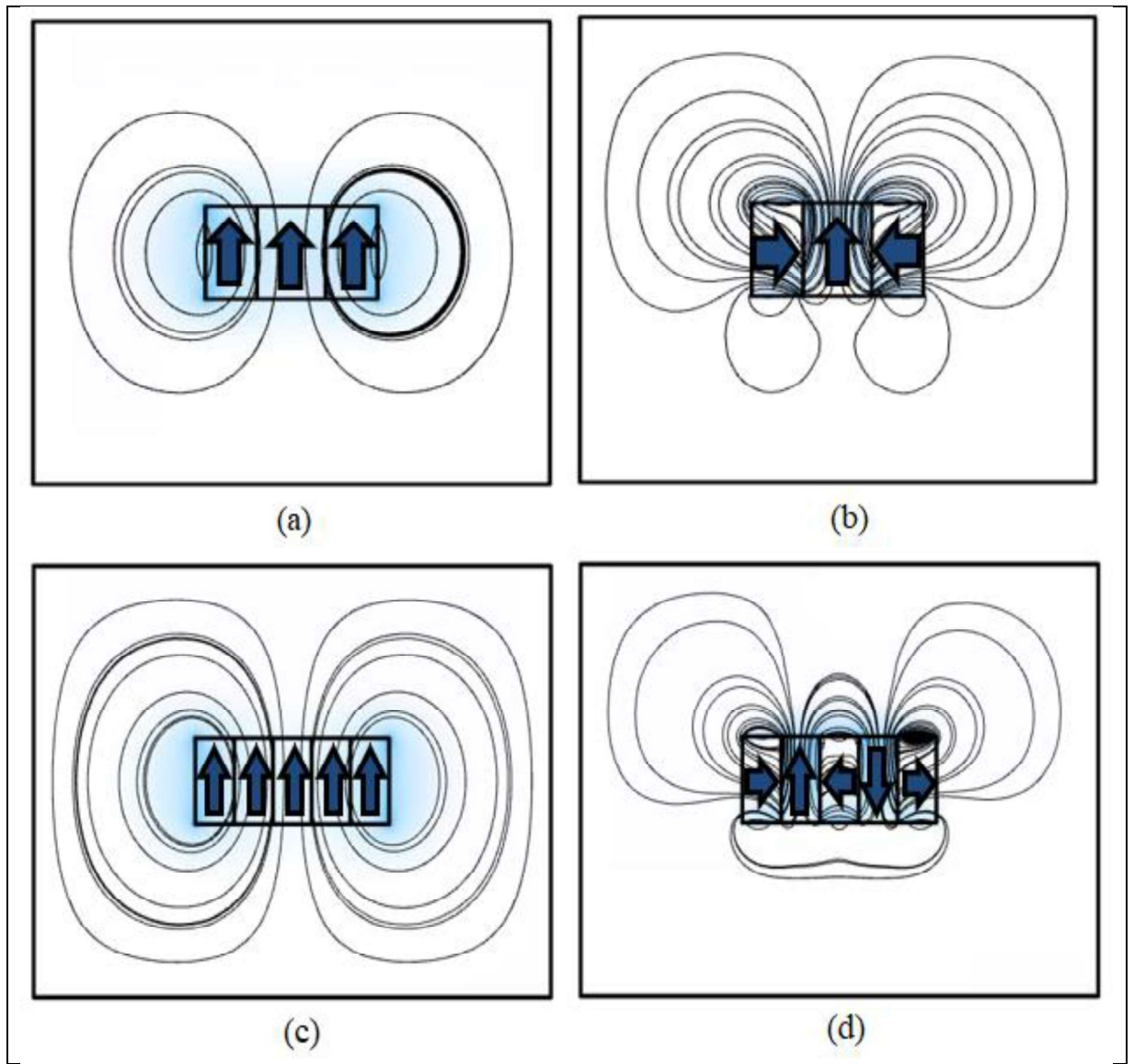


Şekil 2.11: Geliştirilmiş yöntem ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.

## 2.6. Manyetik Ray Hattının Mıknatıs Boyut Optimizasyonu

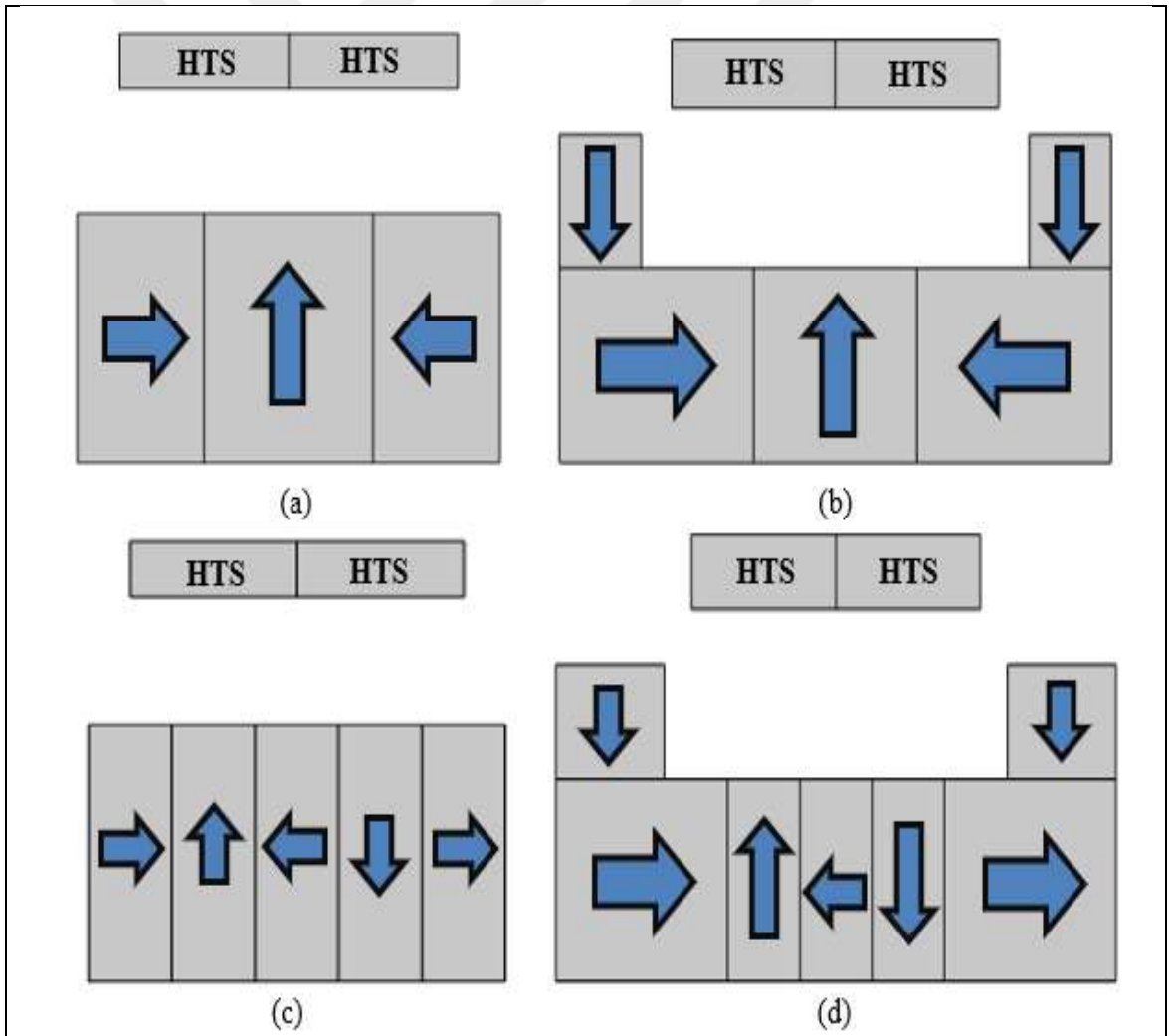
Kalıcı mıknatıslardan meydana gelen HTS Maglev treninin manyetik ray hattının en uygun şekilde oluşturulması için mıknatısların boyut seçiminin uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı COMSOL programında levitasyon kuvveti ölçümü yapılırken yine COMSOL programı içerisinde mevcut olan optimizasyon modülü eş zamanlı kullanılarak uygun mıknatıs boyutu seçimi gerçekleştirilebilir. COMSOL programının optimizasyon modülünü kullanmak için optimizasyon amacı, değişken parametreler ve optimizasyon kısıtlarının belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde bu konu hakkında birçok optimizasyon çalışması bazı otoriteler tarafından yapılmıştır. Bu konu için yapılan optimizasyon çalışması için literatürden farklı olarak mıknatıs maliyeti bir optimizasyon kısıtı olarak seçilmese de tek yüzeyli levitasyon için kullanılan PMG'nin kesit alanıyla üç yüzeyli levitasyon için kullanılan PMG'nin kesit alanı aynı tutulmuştur. Böylelikle sadece levitasyon kuvveti optimizasyon amacı olarak seçilmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla ilgili daha

fazla detay vermeden önce literatürde en çok kullanılan iki adet PMG hakkında bilgi vermek gerekir. Bilim insanları geçtiğimiz yıllarda mıknatıs ray hattı ile ilgili çalışmalarında özel bir mıknatıs diziliminin daha verimli olduğunu keşfettiler. Bu mıknatıs diziliminin özel bir adı mevcuttur ve hallbach'tır. Hallbach dizilimindeki mıknatısların bir tarafında oluşturduğu manyetik alan diğer tarafa göre daha yüksektir ve bilim insanları mıknatısların bu özelliğinden faydalanıp yeni PMG'ler oluşturmuşlardır. Aşağıda arasında hallbach dizilimi de olan farklı dizilimlerle oluşturulmuş mıknatıs ray hattı modelleri mevcuttur. (Oklar mıknatısların magnetizasyon yönünü göstermektedir.)



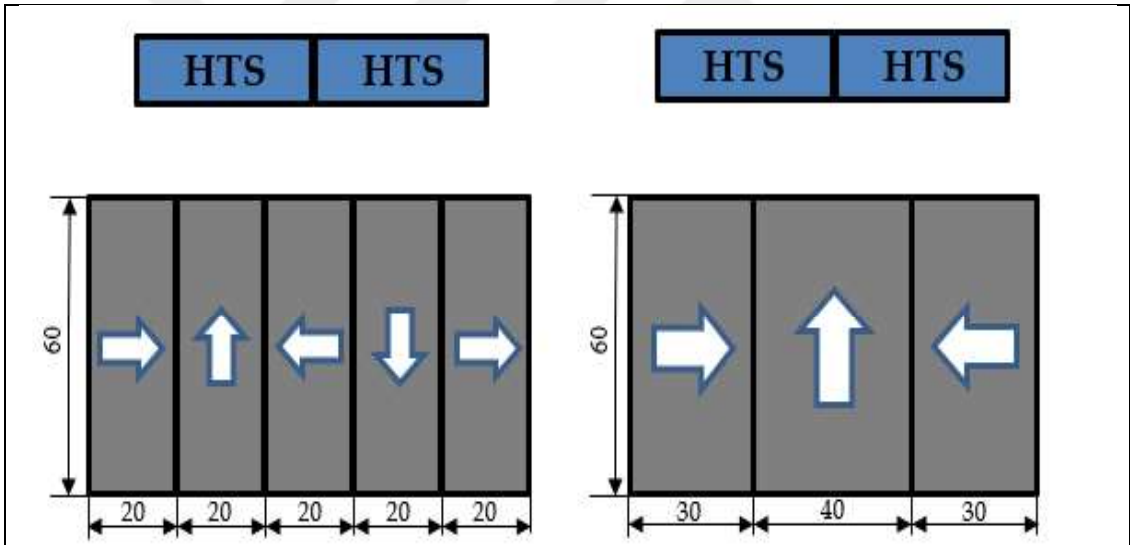
Şekil 2.12: Farklı mıknatıs dizilimleri ve manyetik alan çizgileri. (a) Üç mıknatıslı tek yönlü, (b) üç mıknatıslı hallbach, (c) beş mıknatıslı tek yönlü, (d) beş mıknatıslı hallbach.

Yukarıdaki görsellerden anlaşılacağı gibi mıknatısların üst tarafındaki manyetik alan diğer bölgelerindeki manyetik alan dağılımına göre daha yoğun bir hal almıştır. Manyetik alan kritik manyetik alan değerinin altında kalmak şartıyla ne kadar fazla olursa süperiletkende oluşacak levitasyon kuvveti de o kadar fazla olacaktır. Dolayısıyla manyetik alan değerini yükseltmek maglev sistemine fayda sağlar. Mıknatısların uzunlukları ve magnetizasyon değerleri sadece manyetik alan karşılaştırması yapılacağı için rastgele seçilmiştir. Bu örneklerden anlaşılacağı üzere hallbach dizilimi diğer dizilimlere göre kesinlikle daha avantajlıdır. Bu çalışmada ise hallbach dizilimi bir adım öteye taşıyıp mıknatıs dizilimini daha verimli hale getirmek amaçlanmıştır. Bunun için bazı PMG modelleri ortaya atılmıştır. Önerilen modellerin görselleri aşağıda mevcuttur. (1-S: Tek yüzeyli levitasyon, 3-S: Üç yüzeyli levitasyon.)



Şekil 2.13: Tek ve üç yüzeyli levitasyon durumları. (a) Tek kutup 1-S, (b) tek kutup 3-S, (c) çift kutup 1-S, (d) çift kutup 3-S.

Görsellerde görüldüğü gibi karşılaştırma yapılması için 2 adet farklı PMG tipi kullanılmıştır. Bunlar tek kutuplu ve çift kutuplu mıknatıs ray hattı tipleridir. Dünyanın ilk insan taşıyan HTS Maglev treninin ray hattı tipi tek kutupludur. Çift kutuplu hallbach dizilimi keşfedildikten sonra literatürdeki çalışmalar çift kutuplu hallbach ray hattı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada üç yüzeyli levitasyon tek yüzeyli levitasyon ile karşılaştırma yapılırken hem tek kutuplu ray hattı hem de iki kutuplu ray hattı için levitasyon ve kılavuzlama simülasyonları gerçekleştirilecektir. Yukarıdaki görsellerde okların boyutu önemsizdir sadece magnetizasyon yönünü göstermektedir. Mıknatıs boyutları ve HTS boyutları da ölçeklendirilmemiştir, sadece oluşturulacak modellerin temsili görselleridir. Aşağıda optimizasyon için kullanılacak referans tek ve çift kutuplu PMG'lerin boyutları görülmektedir. Mıknatısların toplam kesit alanı çift kutuplu hallbach diziliminin tasarlanan HTS dizilimine göre en uygun boyutuna göre seçilmiştir ve değeri  $6000 \text{ mm}^2$ 'dir. (Boyutlar mm cinsindedir.)



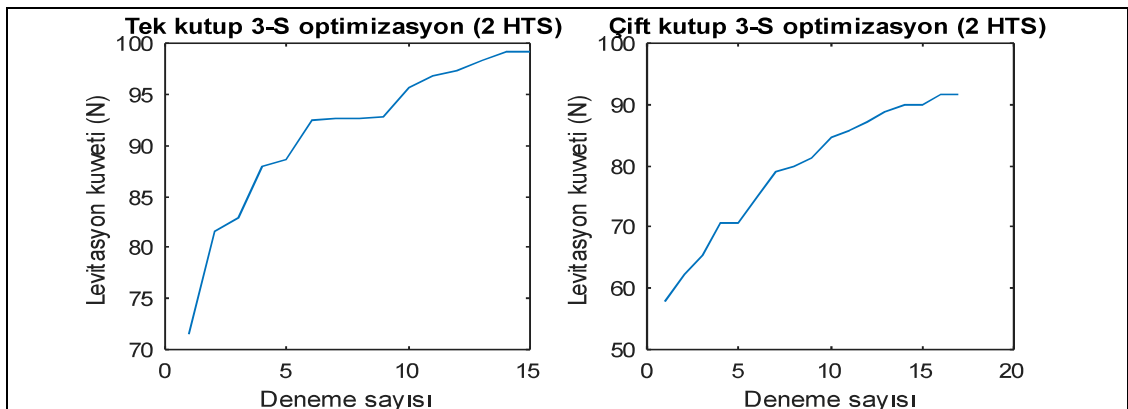
Şekil 2.14: Karşılaştırmada kullanılacak ve mıknatıs kesit alanı için referans seçilen çift kutuplu ve tek kutuplu PMG.

Bu seçilen mıknatıs ray hatlarının boyutları HTS'lerin boyutuna ( $40 \times 40 \times 13 \text{ mm}^3$ ) ve konumuna göre ayarlanmış genişlik ve uzunluk açısından neredeyse en uygundur. Literatürde yapılan çalışmalarda genelde HTS dizilimi hep yan yana ve aralarında boşluk olmadan çalışmalar gerçekleştirilmiştir, dolayısıyla bu çalışmada da HTS'lerin konumu ve dizilimi ona göre ayarlanmıştır. Bundan sonraki aşamada optimizasyonun amacı ve kısıtları detaylı bir şekilde açıklanarak optimizasyonun nasıl gerçekleştirildiği anlatılacaktır.

Literatürdeki yapılan çalışmaların genelinde ölçümler ve simülasyonlarda seçilen soğutma yüksekliği (HTS ve PMG arasındaki ilk mesafe) 30 mm seçilmektedir. Bu çalışmada da soğutma yüksekliği 30 mm seçilmekle beraber optimizasyon çalışması için çalışma yüksekliği (WH) 15 mm seçilmiştir. Çalışma yüksekliğini tren veya kriyostatın ile mıknatıs ray hattı arasındaki mesafenin soğutma gerçekleştirildikten ve kriyostat veya trenin kendi ağırlığını taşıdığı yükseklik olarak tanımlayabiliriz. Tahmin edilebileceği üzere çalışma yüksekliği soğutma yüksekliğinden düşük olacaktır. Üç yüzeyli levitasyon araştırması yapılırken üç yüzeyli levitasyonu sağlayacak alt taraftaki mıknatısların üstüne, sağında ve solunda birer adet olmak üzere toplamda iki tane mıknatıs koymak hedeflenmektedir ve bundan sonra yazının ilerleyen kısımlarında bu iki mıknatıs yan mıknatıs olarak adlandırılacaktır. Yan mıknatısların magnetizasyon yönü optimizasyon çalışmasından önce en verimli olacak şekilde seçilmiştir. Aşağıda optimizasyon ile ilgili bilgilerin yer aldığı tablo ve optimizasyon sonuçları görülmektedir.

Tablo 2.8: Optimizasyon Amaçları ve Kısıtları.

Optimizasyon Amacı	FCH 30 mm seçilerek HTS-PMG arası mesafe 15 mm kalana kadar PMG, HTS'ye yaklaştırıldığında elde edilebilecek en yüksek levitasyon kuvvetini elde etmek.
Optimizasyon kısıtları	- Yan mıknatısların eni ve boyu (en az 5 mm, en fazla 50 mm) - Yan mıknatısların hemen altındaki mıknatısların genişliği - HTS ve yan mıknatıslar arasındaki dikey mesafe 10 mm'dir. (Alt taraftaki mıknatısların yüksekliği kesit alanı toplamı 6000 mm olacak şekilde optimizasyon kısıtlarına göre otomatik olarak ayarlanmaktadır.)

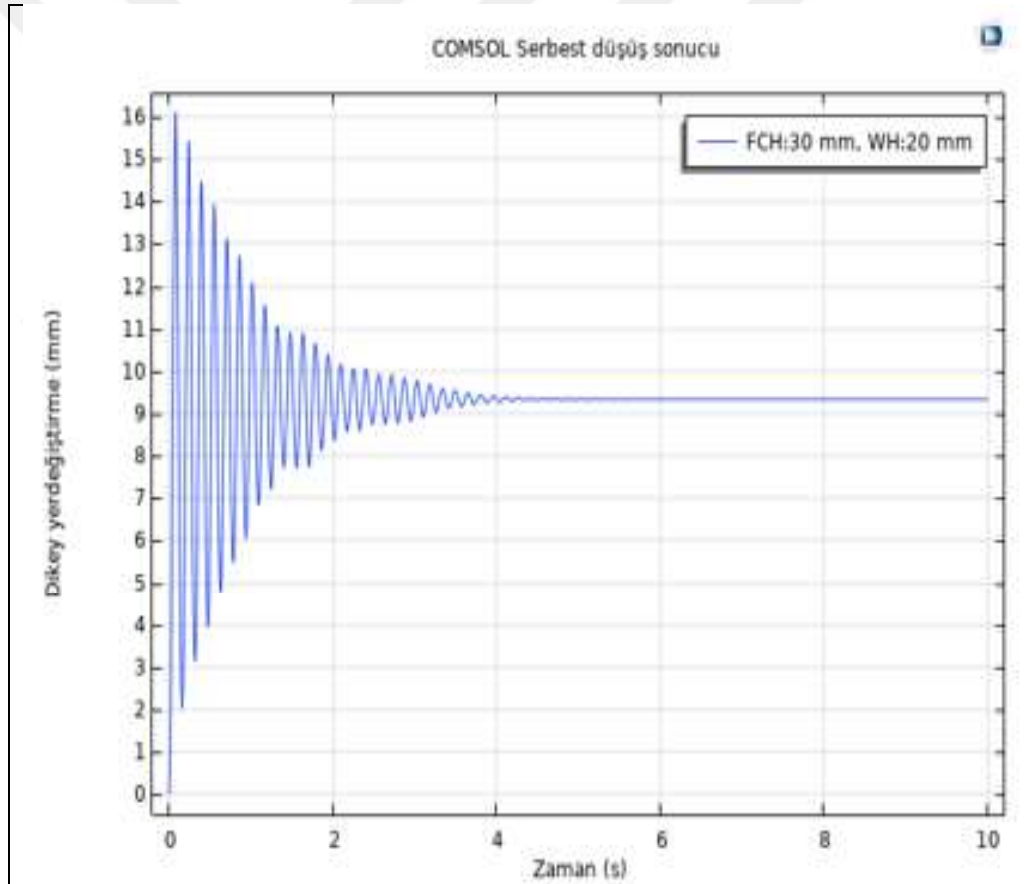


Şekil 2.15: Çift ve tek kutuplu 3-S PMG'lerin optimizasyon sonuçları.



levitasyon manyetik ray hattı kullanılmıştır. HTS maglev treni içerisinde 10'ar adet HTS barındıran 4 adet kriyostat ile manyetik ray hattı üzerinde havada asılı kaldığı düşünülerek her kriyostatın trenin çeyrek ağırlığını taşıdığı düşünülmüştür. Bundan dolayı tek kriyostat için serbest düşme simülasyonları gerçekleştirerek çalışma yüksekliği araştırılmıştır.

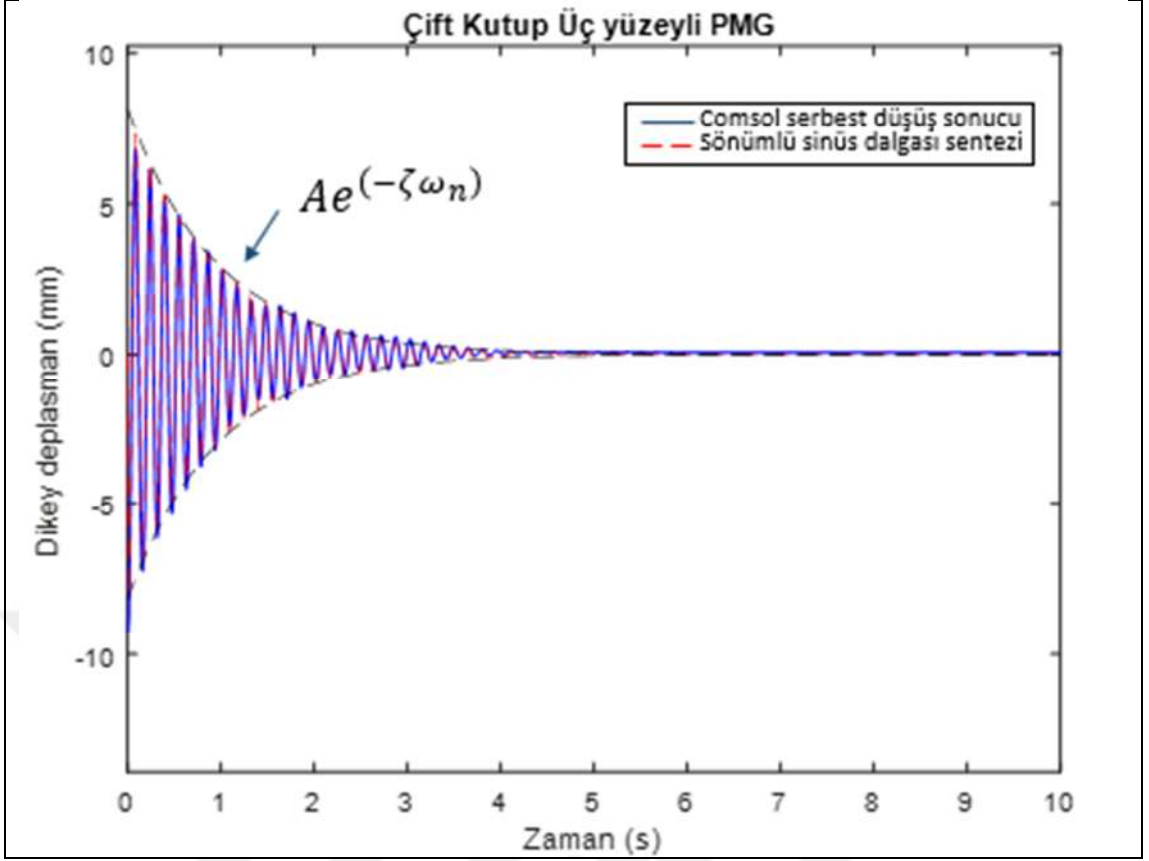
Aynı zamanda kriyostatın serbest düşme esnasındaki dikey deplasmanın davranışı sönümlü bir sinüs dalgasıyla yüksek derecede benzerlik göstermektedir ve bu da kriyostat ve manyetik ray hattı arasında yay ve sönüm elemanı varmış gibi hareket ettiğini kanıtlamaktadır. MATLAB programındaki oluşturulan kodlar sayesinde COMSOL'da elde edilen dikey deplasman eğrisine sönümlü sinüs dalgası uydurularak sönüm değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 2.17: COMSOL'da oluşturulan kriyostatın serbest düşme deplasmanı.

$$z = Ae^{\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (2.23)$$

$$c = 2\zeta\omega_n m \quad (2.24)$$



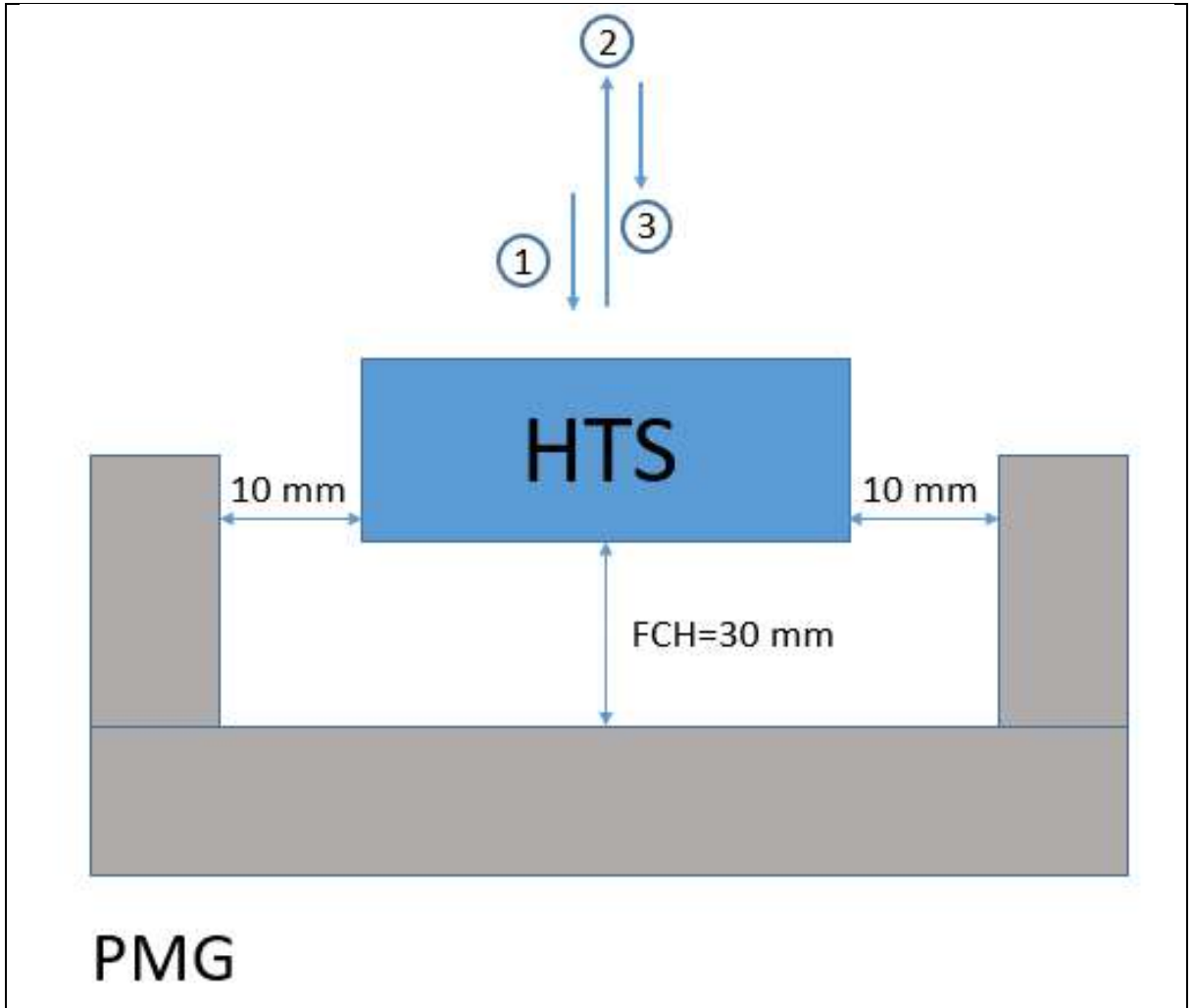
Şekil 2.18: Kriyostat dikey deplasmanına uydurulan sönümlü sinüs dalgasının grafiği.

Sönümlü sinüs dalgası ve sönüm katsayısının formülleri yukarıda verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yapılan hesaplar sonucu trenin her kriyostatının dikey sönüm katsayısı yaklaşık 52 N.s/m olarak bulunmuştur. Trenin çalışma yüksekliği 20 mm olarak seçilmiş ve yatay sönüm katsayısı dikey sönüm katsayısının yarısı olarak 26 N.s/m olarak seçilmiştir. Bütün manyetik ray hatları için yapılacak simülasyon karşılaştırmalarında dikey ve yatay sönüm katsayıları aynı kabul edilmiştir.

### 2.7.2. Manyetik Kaldırma Kuvvetinin Karşılaştırılması

Levitasyon kuvvetinin ölçümü bir kriyostat için hesaplanmıştır ve karşılaştırma ona göre yapılmıştır. Bir kriyostat içinde 10 adet HTS olduğu düşünülerek levitasyon kuvveti ölçümü yapılırken HTS'ler ray hattına 30 mm yükseklikte olacak şekilde ayarlanmıştır. HTS'ler önce PMG ile arasında 5 mm kalacak şekilde 25 mm alçaltılıp ardından 50 mm yukarı doğru yükseltilip son olarak tekrar 25 mm alçaltılıp

başlangıçtaki yüksekliğine getirilmiştir. Aşağıda levitasyon kuvvetinin ölçüm senaryosunun temsili görseli verilmiştir.

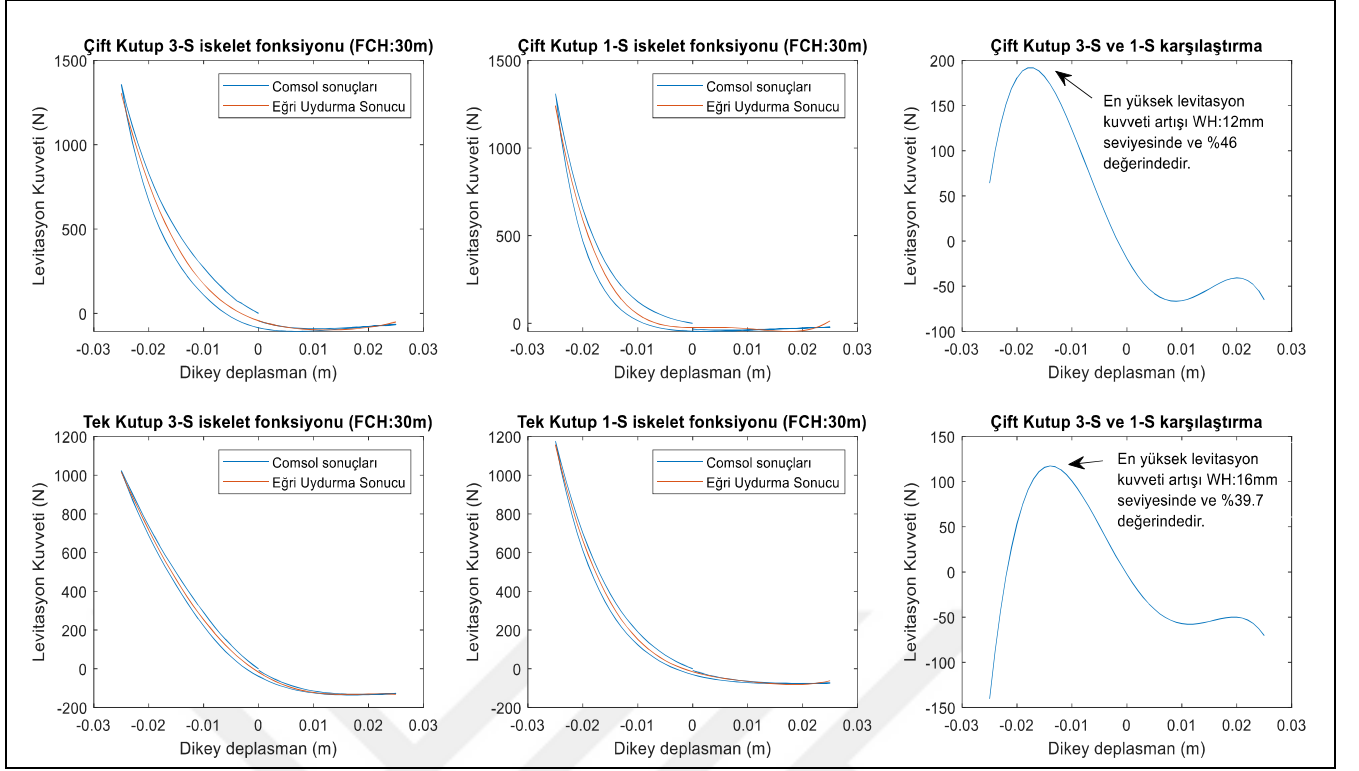


Şekil 2.19: Levitasyon kuvveti ölçüm senaryosunun temsili görseli.

4 adet PMG için levitasyon kuvveti ölçümü için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve histerisiz etkisini ihmal etmek için levitasyon kuvveti eğrisinin orta değerleri kullanılmıştır. Bu değerleri elde etmek için bütün eğrilere MATLAB programı uygulaması kullanılarak iskelet fonksiyonu uydurulmuştur.

Doğrusal olmayan iskelet fonksiyon 4. dereceden bir polinom denklemdir ve terimlerin katsayıları elde edilen levitasyon kuvvetlerinin eğrilerine göre hesaplanmaktadır. Aşağıda levitasyon kuvvetinin fonksiyonu ve terimlerin tablosu verilmiştir.

$$f_{lev} = p_1z^4 + p_2z^3 + p_3z^2 + p_4z + p_5 \quad (2.25)$$



Şekil 2.20: 4 adet PMG'ye ait elde edilen levitasyon kuvvetlerinin grafikleri.

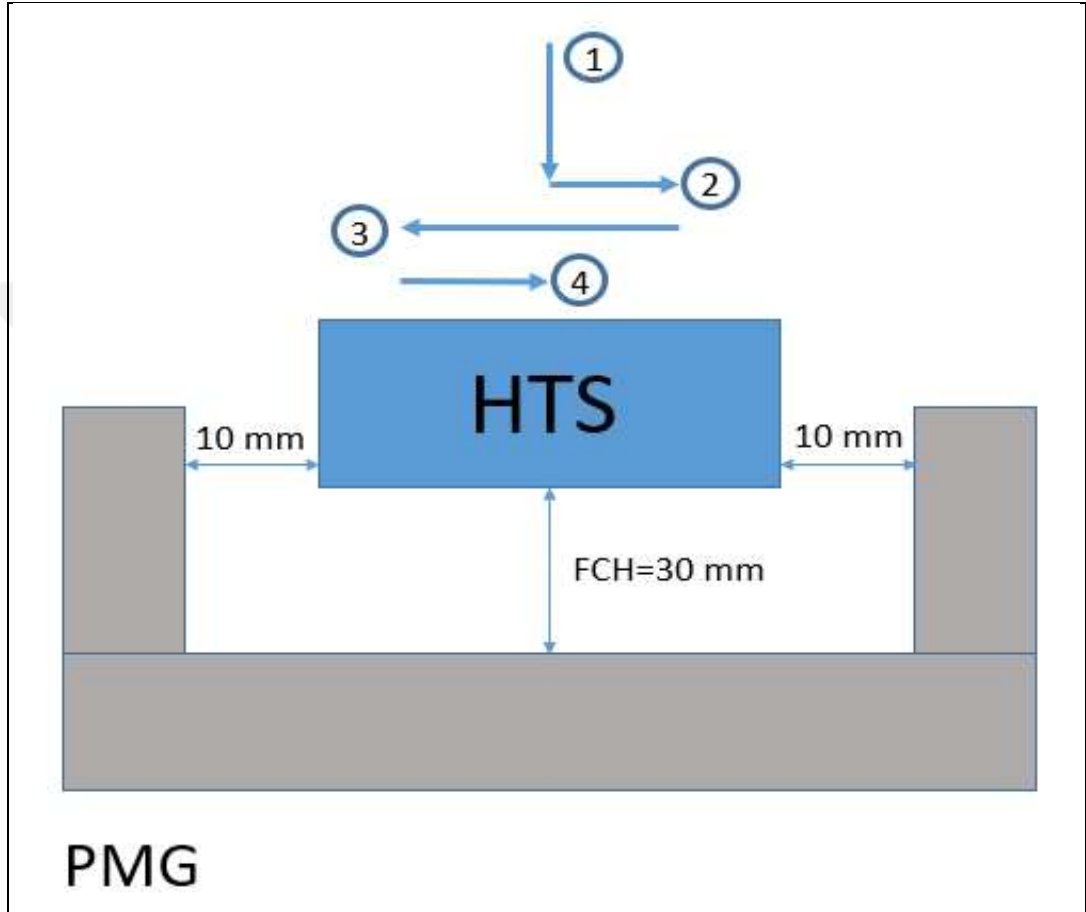
Tablo 2.9: Levitasyon kuvvetlerine ait iskelet fonksiyonlarının katsayıları.

	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
Çift kutup 3-S	4.707e+08	-2.585e+07	7.794e+05	-1.097e+04	-43.45
Çift kutup 1-S	1.329e+09	-3.898e+07	2.126e+05	-181.3	-24.04
Tek kutup 3-S	-1.827e+08	-8.024e+06	8.507e+05	-1.796e+04	-17.91
Tek kutup 1-S	5.965e+08	-2.573e+07	5.282e+05	-8292	-15.3

### 2.7.3. Manyetik Kılavuzlama Kuvvetinin Karşılaştırılması

Kılavuzlama kuvveti levitasyon kuvveti ölçümünde olduğu gibi bir kriyostat için elde edilmiştir ve karşılaştırma ona göre yapılmıştır. Kılavuzlama kuvveti ölçümü gerçekleştirirken HTS'lerin yüksekliği PMG'den 30 mm yüksekte olacak şekilde

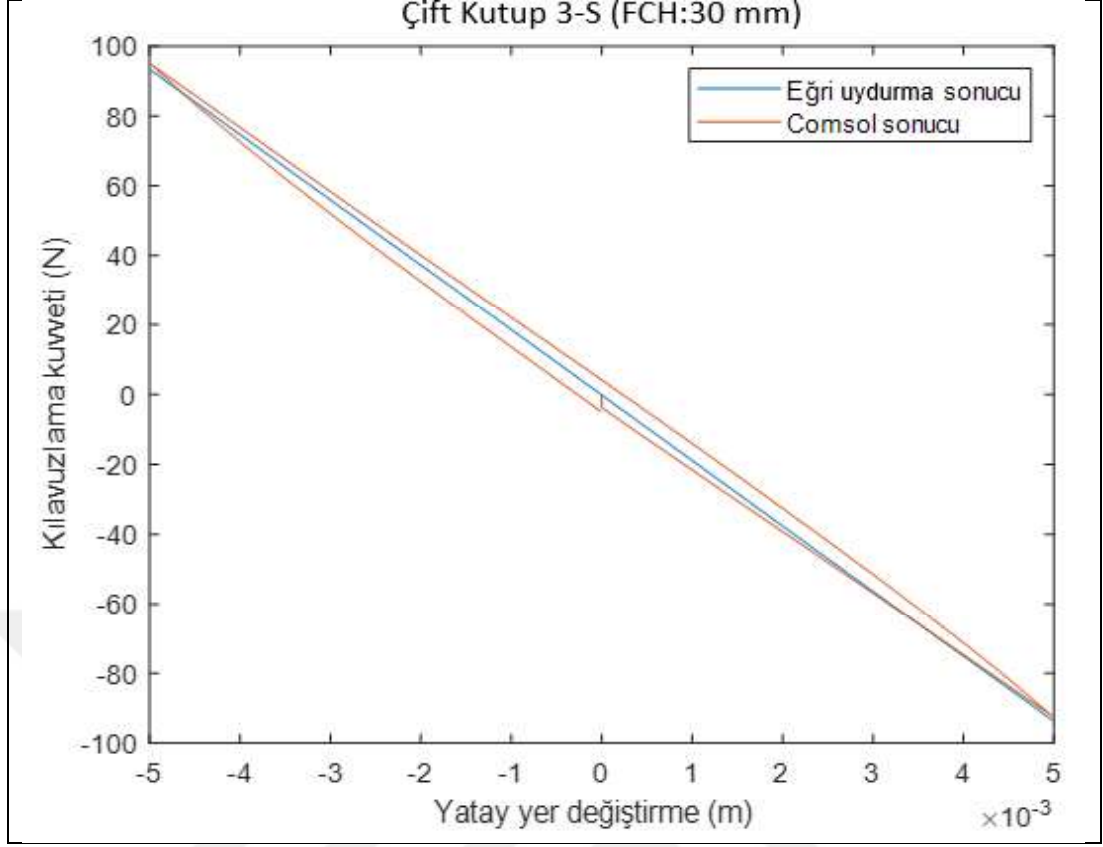
ayarlanmıştır. Yan mıknatıslar ve HTS'ler arasındaki dikey mesafe 10 mm'dir. HTS'ler önce trenin çalışma yüksekliği seviyesine yani 20 mm'ye alçaltılıp sonra sağa 5 mm sonra sola doğru 10 mm, son olarak tekrar 5 mm sağa getirilerek tekrar tam ortaya getirilmiştir. Aşağıda kılavuzlama kuvvetinin ölçüm senaryosunun temsili görseli verilmiştir.



Şekil 2.21: Levitasyon kılavuzlama kuvveti ölçüm senaryosunun temsili görseli.

4 adet PMG için kılavuzlama kuvveti ölçümü için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve histerisiz etkisini ihmal etmek için levitasyon kuvveti eğrisinin orta değerleri kullanılmıştır. Bu orta değerleri elde etmek için bütün eğrilere MATLAB programı uygulaması kullanılarak iskelet fonksiyonu uydurulmuştur. Doğrusal iskelet fonksiyon 1. dereceden bir polinom denklemdir ve terimlerin katsayıları elde edilen kılavuzlama kuvvetlerinin eğrilerine göre hesaplanmaktadır. Aşağıda Çift kutup 3-S PMG'sine ait kılavuzlama kuvvetinin fonksiyonu ve terimleri verilmiştir.

$$f_{gui} = r_1 y + r_2 \quad (2.26)$$



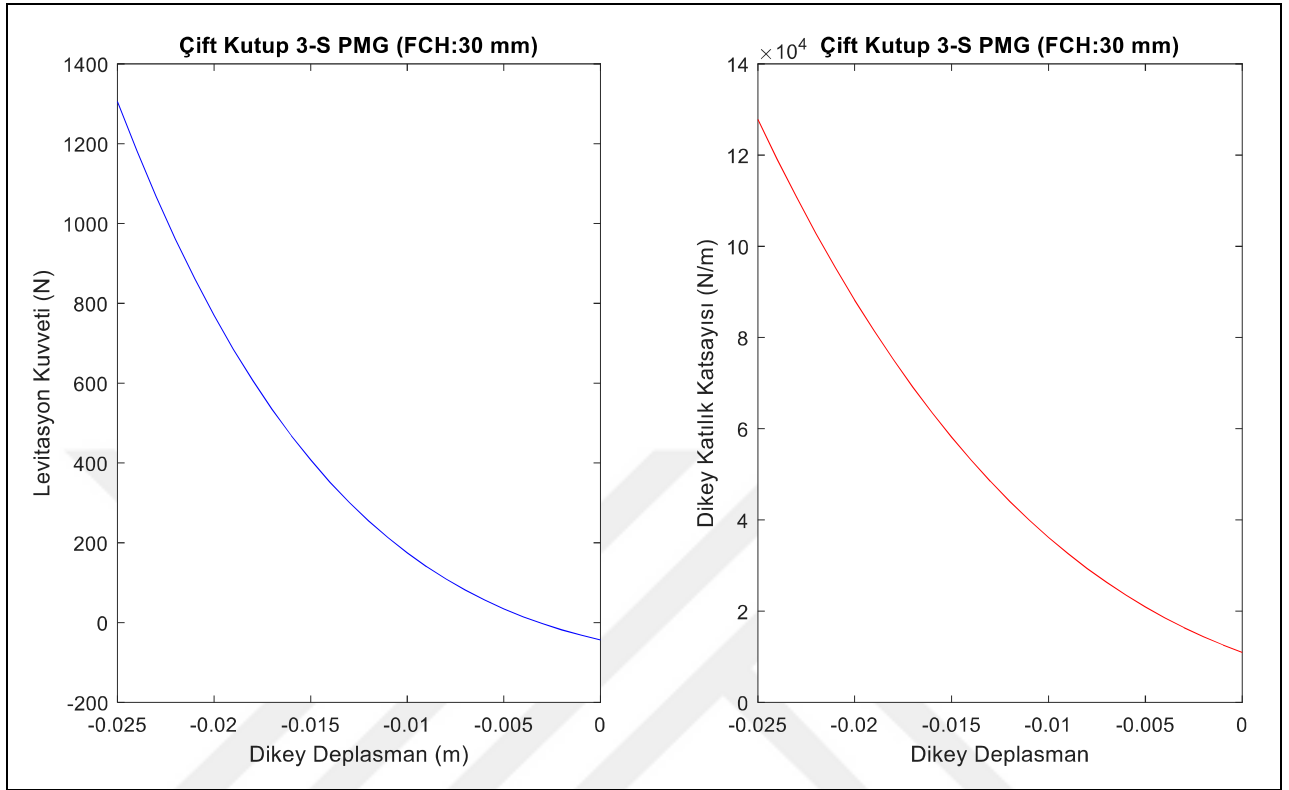
Şekil 2.22: Çift kutup 3-S PMG'ye ait kılavuzlama kuvveti eğrisi.

Kılavuzlama kuvvetini ölçerken kriyostatın yan mıknatıslara temasını engellemek için maksimum hareket mesafesi 5 mm olarak seçilmiştir. Deplasman mesafesi kısa olduğu için elde edilen eğriye lineer bir doğru giydirilebilmektedir.

#### 2.7.4. Kriyostatın Değişken Dikey Katılık Katsayısını Bulma

HTS maglev treninin dinamik simülasyonunu gerçekleştirmek için trenin dikey ve yatay katılık değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. HTS'ler mesafeye göre farklı levitasyon kuvveti oluşturduğu için ve katılık değeri de mesafeye göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca hem dikey katılık hem de yatay katılık değerini hesaplamak için ölçülen iskelet fonksiyonları kullanılmıştır. İskelet fonksiyonları mesafeye göre hesaplanan fonksiyonlar olduğu için ve katılık değerleri de kuvvetlerin mesafeye göre türeviyle hesaplandığı için trenin katılık değerleri elde edilirken daha önce hesaplanmış olan iskelet fonksiyonlarının mesafeye göre türevi elde edilmiştir. Bu yeni elde edilen fonksiyonlar trenin manyetik katılık değerlerini temsil etmektedir.

Aşağıda levitasyon kuvvetinin katılık değerine dönüşümünü gösteren görsel ve katılık değerinin formülü verilmiştir.



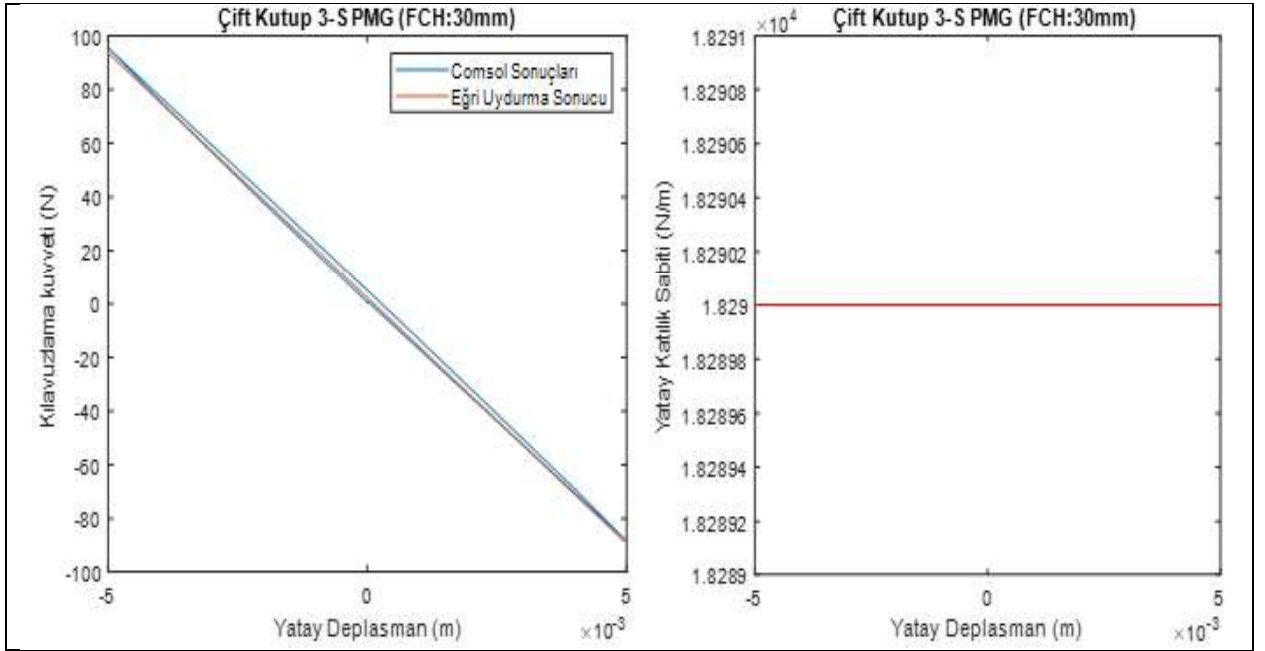
Şekil 2.23: Çift kutup 3-S PMG'ye ait levitasyon kuvveti ve dikey katılık katsayısının mesafeye göre değişimini gösteren grafikler.

$$k_{lev} = \frac{df_{lev}}{dz} = 4p_1z^3 + 3p_2z^2 + 2p_3z + p_4 \quad (2.27)$$

### 2.7.5. Kriyostatın Yatay Katılık Katsayısını Bulma

HTS maglev treninin yatay katılık değerleri dikey katılık değerleri gibi iskelet fonksiyonunun mesafeye göre türevinden elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi yatay ölçüm yapılırken mesafe kısa olduğu için iskelet fonksiyon lineer bir denklem ile temsil edilebilmektedir ve lineer bir denklemin türevi tek terimden oluşacağı için trenin yatay katılık katsayısı bir sabittir dolayısıyla değişmez olarak kabul edilmiştir. Dikey katılık katsayısı hesabında olduğu gibi yatay katılık katsayısı hesabı da 4 adet

PMG için gerçekleştirilmiş olup katılık değerleri negatif olamayacağı için elde edilen sonuçların mutlak değeri alınmıştır.



Şekil 2.24: Çift kutup 3-S PMG'ye ait kılavuzlama kuvveti eğrisi ve yatay katılık sabiti grafikleri.

$$k_{gui} = \frac{df_{gui}}{dy} = r_1 \quad (2.28)$$

Tablo 2.10: Maglev treninin tüm PMG'lere ait yatay katılık katsayıları.

	Çift kutup 3-S	Çift kutup 1-S	Tek kutup 3-S	Tek kutup 1-S
Manyetik yatay katsayısı (N.s/m)	18290	8975	11160	11640

### 3. SÜPERİLETKEN MAGLEV TREN MODELLEMESİ

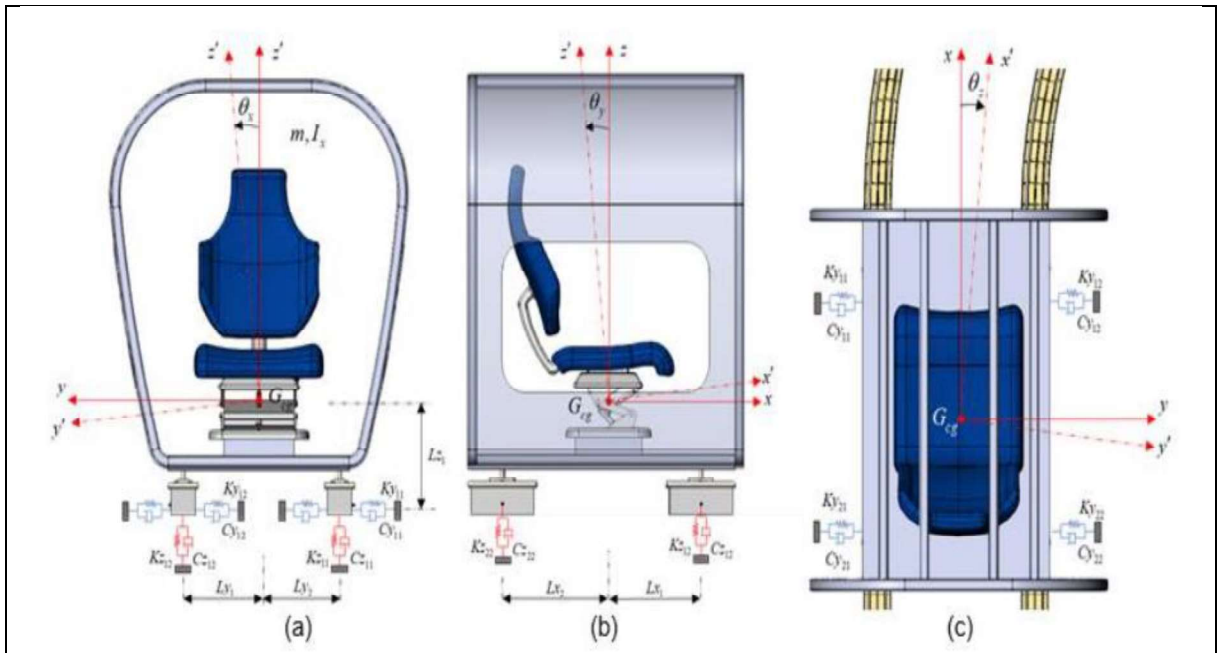
Manyetik kılavuz yolu ve içinde YSS bulunduran kriyostattan oluşan maglev sistemi için hazırlanan ve çözdürülen levitasyon ve kılavuzlama kuvveti simülasyonlarından elde edilen değerler tasarlanan tek kişilik süperiletken maglev treninin dinamik simülasyonunda kullanılmıştır. Ancak COMSOL programında çözdürülen YSS simülasyonları iki YSS olacak şekilde oluşturuldu. Halbuki süperiletken maglev treni 4 adet kriyostat ve her kriyostatın içinde 10 adet YSS olacak şekilde tasarlanmıştır. Bundan dolayı YSS simülasyonlarında elde edilen değerler YSS sayısına göre çarpılarak (5 katı) değeri arttırılmıştır. Elde edilen yeni değerler aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 3.1: Süperiletken maglev trenin dinamik simülasyonlarda kullanılacak olan parametre değerleri.

PMG Tipi	Dikey katılık katsayısı (N/m)	Yatay katılık sabiti (N/m)	Dikey Sönüm sabiti (N.s/m)	Yatay Sönüm sabiti (N.s/m)
Çift kutup (3-S)	Değişken (10970-127800)	18290	52	13
Çift kutup (1-S)	Değişken (181-167000)	8975	52	13
Tek kutup (3-S)	Değişken (17960-64120)	11640	52	13
Tek kutup (1-S)	Değişken (8292-120200)	11160	52	13

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere üç yüzeyli levitasyon sağlayan manyetik ray hatlarının maksimum dikey katılık katsayıları tek yüzeyliye göre daha azdır. Ancak bunlar trenin çalışmasını istemediğimiz en uç noktalarda çalıştığı zaman meydana gelen katılık katsayılarıdır. Yani tren ile ray hattı arasında 5 mm kaldığı zaman bu değerler meydana gelir ki trenin çalışma yüksekliğini 20 mm seçtiğimiz için tren hareket ederken aslında dikey katılık katsayıları bunlardan farklı değerler alır. İlerideki simülasyon çalışmaları bölümünde trenin hareket ederken yatay ve dikey katılık değerleri grafikte verilecektir.

Tren beş adet serbestlik derecesine sahip tek kişilik küçük ölçekli bir maglev treni olarak tasarlanmıştır. Sadece ilerlediği doğrultuda serbestlik derecesine sahip olmayan süperiletken maglev treni 3 adet dönme ve 2 adet öteleme serbestlik derecesine sahiptir. Bu tasarım sayesinde trenin üç boyutlu dinamik simülasyonları çözdürülebilecek ve virajdaki hareketi dahi modellenebilmektedir. Trenin gerçek hayatta kullanılabilmesi için daha karmaşık ve gelişmiş bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Şu anda çalışma için ilk aşama olarak tek kişilik olarak tasarlanan maglev treninde boji bulunmamaktadır ve tek kütlelen oluşmaktadır. SOLIDWORKS programında üç boyutlu katı modelleme kısmının montaj modülü kullanılarak tasarlanan tek kişilik süperiletken maglev treninin dinamik simülasyonlarda kullanılmak üzere kütle ve atalet değerleri elde edilmiştir. Katılık ve sönüm haricindeki diğer değerler tabloda gösterildiği gibidir. Buna benzer olarak Guilherme ve arkadaşları 2010 yılında Brezilya’da yaptıkları çalışma sonucunda gerçek ölçekli maglev taşıt prototipini oluşturmayı başarmışlardır. En iyi levitasyon özelliği için 3 ayrı kalıcı mıknatıs kullanarak manyetik ray hattı oluşturup test etmişlerdir. Farklı soğutma yükseklikleri için levitasyon kuvvetleri hesaplamışlardır. Üretilen tren 4 modülden oluşmaktadır ve 24 kişi taşıma kapasitesine sahiptir. Ayrıca bu tren için 45 metrelik yarıçapa sahip 2 adet viraj barındıran ray hattı da tasarlayıp somutlaştırmışlardır [Sotelo et al., 2010].



Şekil 3.1: Tek kişilik süperiletken maglev treninin üç boyutlu görseli. (a) Önden görünüş, (b) yandan görünüş, (c) üstten görünüş.

Tablo 3.2: YSS maglev treninin parametreleri.

Parametre (birim)	Değer
m (kg)	100
$I_x$ (kg.m <sup>2</sup> )	8.09
$I_y$ (kg.m <sup>2</sup> )	9.695
$I_z$ (kg.m <sup>2</sup> )	10.15
$L_z$ (m)	0.4
$L_{x1}$ (m)	0.335
$L_{x2}$ (m)	0.335
$L_{y1}$ (m)	0.235
$L_{y2}$ (m)	0.235

Süperiletken maglev treninin yukarıda görülen tablodaki parametrelerinden m sisteminin kütlesini,  $I_x$ ,  $I_y$  ve  $I_z$  ilgili yönlere göre kütleli atalet momentlerini ve geri kalanlar kriyostatların dolayısıyla katılık ve sönüm elemanlarının ağırlık merkezine olan uzaklıklarını temsil etmektedir. SOLIDWORKS programı aracılığıyla tasarlanan trenin uzunluk değerleri tek kişinin sığacağı kadar büyüklükte olacak şekilde rastgele seçilmiştir. Tren içinde bir adet koltuk, koltuğu trene bağlayan kısım, saydam gövde, kriyostatlar ve kriyostatları trene bağlayan silindir bağlantılardan meydana gelmektedir. Yine bu çalışmaya benzer olarak Ali Suat ve arkadaşları 3 serbestlik dereceli tek kişilik maglev trenini bilgisayar üzerinde tasarlayıp 3 yüzeyli levitasyon sağlayan manyetik ray hattı üzerindeki davranışı incelemek için simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir [Yıldız vd., 2018].

### 3.1. Sistemin Lagrange Hareket Denklemleri ile modellenmesi

Lagrange metodu genelleştirilmiş koordinatlarda sistemin enerjilerini ifade etmekte ve doğrudan hareket denklemlerinin elde edilmesinde kullanılır. Genelleştirilmiş koordinatlar sistemin konumunu tamamı ile tanımlayan ve bütün sınırlamalardan bağımsız olan bağımsız değişkenlerin oluşturduğu bir settir. Belirli karmaşık fiziksel sistemlerin modellenmesinde Lagrange metodu avantaj sağlar. Lagrange denkleminin  $q_i$  genel koordinatlarında aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde T sistemin toplam kinetik enerjisini, U sistemin toplam potansiyel enerjisi, D sistemdeki sönüm değeri lineer değişken iken ise enerji dağıtma fonksiyonunu,  $Q_i$  sistem üzerine etkiyen genelleştirilmiş dış kuvvet ve  $q_i$  sistemin pozisyonunu tanımlayan genelleştirilmiş koordinatları temsil etmektedir. Sistem beş serbestlik derecesine sahip olduğu için beş adet genelleştirilmiş koordinata sahiptir ve bunlar  $y$ ,  $z$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  ve  $\theta_z$  hareketleridir. Bu hareketler sistemin ağırlık merkezinin ilgili yönlerdeki öteleme deplasmanları ve ilgili eksenlerdeki açısal deplasmanlara tekabül etmektedir. Maglev sistemi YSS ve manyetik kılavuz yol arasında salınım hareketi yapmaktadır. Bu ikisinin arasında doğan etkileşimden dolayı sanki aralarında bir katılık ve sönüm elemanı varmış gibi modelleyebiliriz. Aşağıda sistemin kinetik, potansiyel ve viskoz sönüm enerjisine ait denklemler görülmektedir. Dönmeden kaynaklanan ötelemeler basite indirgenerek formüle eklenmiştir. ( $\sin\theta=\theta$ ,  $\cos\theta=1$ )

$$T = \frac{1}{2} (m\dot{y}^2 + m\dot{z}^2 + I_x\dot{\theta}_x^2 + I_y\dot{\theta}_y^2 + I_z\dot{\theta}_z^2) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} U = & \frac{1}{2} (k_y(y - L_z \times \theta_x + L_{x1} \times \theta_z)^2 + k_y(y - L_z \times \theta_x + L_{x2} \times \theta_z)^2 \\ & + k_z(z + L_{x1} \times \theta_y - L_{y1} \times \theta_x)^2 + k_z(z + L_{x1} \times \theta_y + L_{y2} \times \theta_x)^2 \\ & + k_z(z - L_{x2} \times \theta_y - L_{y1} \times \theta_x)^2 + k_z(z - L_{x2} \times \theta_y + L_{y2} \times \theta_x)^2) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} D = & \frac{1}{2} (c_y(\dot{y} - L_z \times \dot{\theta}_x + L_{x1} \times \dot{\theta}_z)^2 + c_y(\dot{y} - L_z \times \dot{\theta}_x + L_{x1} \times \dot{\theta}_z)^2 \\ & + c_z(\dot{z} + L_{x1} \times \dot{\theta}_y - L_{y1} \times \dot{\theta}_x)^2 + c_z(\dot{z} + L_{x1} \times \dot{\theta}_y + L_{y2} \times \dot{\theta}_x)^2 \\ & + c_z(\dot{z} - L_{x2} \times \dot{\theta}_y - L_{y1} \times \dot{\theta}_x)^2 + c_z(\dot{z} - L_{x2} \times \dot{\theta}_y + L_{y2} \times \dot{\theta}_x)^2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki enerji denklemlerini Lagrange denkleminde yerine koyup gerekli işlemler yapılırsa aşağıdaki gibi hareket denklemleri elde edilmektedir.

Tren gövdesinin yatay hareket denklemi ( $q_1 = y$ ):

$$\begin{aligned}
m\ddot{y} + k_y(y - L_z x \theta_x + L_{x1} x \theta_z) x^4 + k_y(y - L_z x \theta_x - L_{x2} x \theta_z) x^4 \\
+ c_y(\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x + L_{x1} * \dot{\theta}_z) x^4 + c_y(\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x - L_{x2} * \dot{\theta}_z) x^4 = 0
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Tren gövdesinin dikey hareket denklemi ( $q_2 = x$ ):

$$\begin{aligned}
m\ddot{z} + k_z(z + L_{x1} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) + k_z(z + L_{x1} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
k_z(z - L_{x2} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) + k_z(z - L_{x2} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
c_z(\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) + c_z(\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) \\
c_z(\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) + c_z(\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) = 0
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Tren gövdesinin dönme hareket denklemi ( $q_3 = \theta_x$ ):

$$\begin{aligned}
I_x \ddot{\theta}_x - k_y L_z (y - L_z * \theta_x + L_{x1} * \theta_z) x^4 - k_y L_z (y - L_z * \theta_x - L_{x2} * \theta_z) x^4 \\
- L_{y1} k_z (z + L_{x1} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) + L_{y2} k_z (z + L_{x1} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
- L_{y1} k_z (z - L_{x2} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) + L_{y2} k_z (z - L_{x2} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
- L_z c_y (\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x + L_{x1} * \dot{\theta}_z) x^4 - L_z c_y (\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x - L_{x2} * \dot{\theta}_z) x^4 \\
- L_{y1} c_z (\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) + L_{y2} c_z (\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) \\
- L_{y1} c_z (\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) + L_{y2} c_z (\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) = 0
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Tren gövdesinin başvurma hareket denklemi ( $q_4 = \theta_y$ ):

$$\begin{aligned}
I_y \ddot{\theta}_y + L_{x1} k_z (z + L_{x1} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) + L_{x1} k_z (z + L_{x1} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
- L_{x2} k_z (z - L_{x2} * \theta_y - L_{y1} * \theta_x) - L_{x2} k_z (z - L_{x2} * \theta_y + L_{y2} * \theta_x) \\
+ L_{x1} c_z (\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) + L_{x1} c_z (\dot{z} + L_{x1} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) \\
- L_{x2} c_z (\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y - L_{y1} * \dot{\theta}_x) - L_{x2} c_z (\dot{z} - L_{x2} * \dot{\theta}_y + L_{y2} * \dot{\theta}_x) = 0
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Tren gövdesinin yuvarlanma hareket denklemi ( $q_5 = \theta_z$ ):

$$\begin{aligned}
I_z \ddot{\theta}_z + L_{x1} k_y (y - L_z * \theta_x + L_{x1} * \theta_z) x^4 - L_{x2} k_y (y - L_z * \theta_x - L_{x2} * \theta_z) x^4 \\
L_{x1} c_y (\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x + L_{x1} * \dot{\theta}_z) x^4 - L_{x2} c_y (\dot{y} - L_z * \dot{\theta}_x - L_{x2} * \dot{\theta}_z) x^4 = 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

### 3.2. Sistemin Durum Uzay Modelinin elde edilmesi

Süperiletken maglev treninin hareket denklemlerini elde ettikten sonra denklemleri kuvvet denklemi eşitliğine çeviren ve dışardan sisteme etki eden girdileri kompakt bir şekilde göstermeye ve kullanmaya yarayan durum uzay denklemi haline getirilmiştir. Aşağıda durum uzay matrislerinin denklemi görülmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki terimler sırasıyla katılık ve sönüm elemanlarına etkiyen girdilerdir. Bu girdiler kriyostatlara etki eden kuvvetlerdir ve yine sırasıyla aşağıdan, soldan ve sağ taraftan etki etmektedir. Ayrıca girdi kriyostatlarına sırasıyla sol ön, sağ ön, sol arka ve son olarak sağ arka kriyostattan etki ettiği düşünülerek denklemler oluşturulmuştur.

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = K_t Q + C_t \dot{Q} \quad (3.10)$$

$$Z = \begin{bmatrix} y \\ z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$Q = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6 \ f_7 \ f_8 \ f_9 \ f_{10} \ f_{11} \ f_{12}]^T \quad (3.13)$$

$$K = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$C = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$K_t = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5 \ c_6 \ c_7 \ c_8 \ c_9 \ c_{10} \ c_{11} \ c_{12}] \quad (3.16)$$

$$C_t = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5 \ d_6 \ d_7 \ d_8 \ d_9 \ d_{10} \ d_{11} \ d_{12}] \quad (3.17)$$

Yukarıda oluşturulan matrisler çok uzun olduğu için kısaltılmış terimler şeklinde yazılmıştır. Bu matrislerin dinamik simülasyonlarda kullanılmak üzere MATLAB programındaki m-file dosyasına girilmiş hali aşağıda görülmektedir. Q matrisi terimleri sisteme etki eden girdiler olduğu için onlar simulink modülünde sonra ayarlanacaktır.

Tablo 3.3: K ve C matrislerinin elemanlarının değerleri.

a11= 8*ky;	b11= 8*cy;
a12= 0;	b12= 0;
a13= -8*ky*Lz;	b13= -8*cy*Lz;
a14= 0;	b14= 0;
a15= 4*ky*Lx1-4*ky*Lx2;	b15= 4*cy*Lx1-4*cy*Lx2;
a21= 0;	b21= 0;
a22= 4*kz;	b22= 4*cz;
a23= -2*kz*Ly1+2*kz*Ly2;	b23= -2*cz*Ly1+2*cz*Ly2;
a24= 2*kz*Lx1-2*kz*Lx2;	b24= 2*cz*Lx1-2*cz*Lx2;
a25= 0;	b25= 0;
a31= -8*ky*Lz;	b31= -8*cy*Lz;
a32= -2*kz*Ly1+2*kz*Ly2;	b32= -2*cz*Ly1+2*cz*Ly2;
a33=	b33=
8*ky*Lz*Lz+2*kz*Ly1*Ly1+2*kz*Ly2*Ly2;	8*cy*Lz*Lz+2*cz*Ly1*Ly1+2*cz*Ly2*Ly2;
a34= -Lx1*Ly1*kz+Lx1*Ly2*kz+Lx2*Ly1*kz	b34= -Lx1*Ly1*cz+Lx1*Ly2*cz+Lx2*Ly1*cz-
-Lx2*Ly2*kz;	Lx2*Ly2*cz;
a35= 4*Lz*Lx2*ky-4*Lz*Lx1*ky;	b35= 4*Lz*Lx2*cy-4*Lz*Lx1*cy;
a41= 0;	b41= 0;
a42= 2*kz*Lx1-2*kz*Lx2;	b42= 2*cz*Lx1-2*cz*Lx2;
a43= -Lx1*Ly1*kz+Lx1*Ly2*kz+Lx2*Ly1*kz-	b43= -Lx1*Ly1*cz+Lx1*Ly2*cz+Lx2*Ly1*cz-
Lx2*Ly2*kz;	Lx2*Ly2*cz;
a44= 2*kz*Lx1*Lx1+2*kz*Lx2*Lx2;	b44= 2*cz*Lx1*Lx1+2*cz*Lx2*Lx2;
a45= 0;	b45= 0;
a51= 4*ky*Lx1-4*ky*Lx2;	b51= 4*cy*Lx1-4*cy*Lx2;
a52= 0;	b52= 0;
a53= 4*Lz*Lx2*ky-4*Lz*Lx1*ky;	b53= 4*Lz*Lx2*cy-4*Lz*Lx1*cy;
a54= 0;	b54= 0;
a55= 4*ky*Lx1*Lx1+4*ky*Lx2*Lx2;	b55= 4*cy*Lx1*Lx1+4*cy*Lx2*Lx2;

Tablo 3.4:  $K_t$  ve  $C_t$  matrislerinin elemanlarının değerleri.

$c1 = [ 0 \quad kz \quad kz * Ly2 \quad kz * Lx1 \quad 0 ]^T$	$d1 = [ 0 \quad cz \quad cz * Ly2 \quad cz * Lx1 \quad 0 ]^T$
$c2 = [ 0 \quad kz - kz * Ly1 \quad kz * Lx1 \quad 0 ]^T$	$d2 = [ 0 \quad cz - cz * Ly1 \quad cz * Lx1 \quad 0 ]^T$
$c3 = [ 0 \quad kz \quad kz * Ly2 - kz * Lx2 \quad 0 ]^T$	$d3 = [ 0 \quad cz \quad cz * Ly2 - cz * Lx2 \quad 0 ]^T$
$c4 = [ 0 \quad kz - kz * Ly1 - kz * Lx2 \quad 0 ]^T$	$d4 = [ 0 \quad cz - cz * Ly1 - cz * Lx2 \quad 0 ]^T$
$c5 = [ ky \quad 0 - ky * Lz1 \quad 0 \quad ky * Lx1 ]^T$	$d5 = [ cy \quad 0 - cy * Lz1 \quad 0 \quad cy * Lx1 ]^T$
$c6 = [ ky \quad 0 - ky * Lz1 \quad 0 \quad ky * Lx1 ]^T$	$d6 = [ cy \quad 0 - cy * Lz1 \quad 0 \quad cy * Lx1 ]^T$
$c7 = [ ky \quad 0 - ky * Lz1 \quad 0 - ky * Lx2 ]^T$	$d7 = [ cy \quad 0 - cy * Lz1 \quad 0 - cy * Lx2 ]^T$
$c8 = [ ky \quad 0 - ky * Lz1 \quad 0 - ky * Lx2 ]^T$	$d8 = [ cy \quad 0 - cy * Lz1 \quad 0 - cy * Lx2 ]^T$
$c9 = [ -ky \quad 0 \quad ky * Lz1 \quad 0 - ky * Lx1 ]^T$	$d9 = [ -cy \quad 0 \quad cy * Lz1 \quad 0 - cy * Lx1 ]^T$
$c10 = [ -ky \quad 0 \quad ky * Lz1 \quad 0 - ky * Lx1 ]^T$	$d10 = [ -cy \quad 0 \quad cy * Lz1 \quad 0 - cy * Lx1 ]^T$
$c11 = [ -ky \quad 0 \quad ky * Lz1 \quad 0 \quad ky * Lx2 ]^T$	$d11 = [ -cy \quad 0 \quad cy * Lz1 \quad 0 \quad cy * Lx2 ]^T$
$c12 = [ -ky \quad 0 \quad ky * Lz1 \quad 0 \quad ky * Lx2 ]^T$	$d12 = [ -cy \quad 0 \quad cy * Lz1 \quad 0 \quad cy * Lx2 ]^T$

$$\ddot{Z} = -M^{-1}C\dot{Z} - M^{-1}KZ + M^{-1}K_tQ + M^{-1}C_t\dot{Q} \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Z \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ \dot{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}K_t & M^{-1}C_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ \dot{Q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\dot{x} = A_s x + B_s u \quad (3.20)$$

$$y = C_s x + D_s u \quad (3.21)$$

Programaya tanımlanan bu matrisler yukarıdaki şekilde oluşturularak simulinkte simülasyonlarda kullanılmak üzere hazır hale gelmiş oldu. C matrisi 5x5 lik birim matris ile 5x5 lik sıfır matrisinin yanyana getirilmiş hali olup toplamda 5x10 luk bir matristir ve serbestlik derecelerinin çıktığı olmasını sağlamaktadır. Sadece deplasmanlar ölçüldüğü için D matrisi 5x24 lük sıfır matrisinden oluşmaktadır.

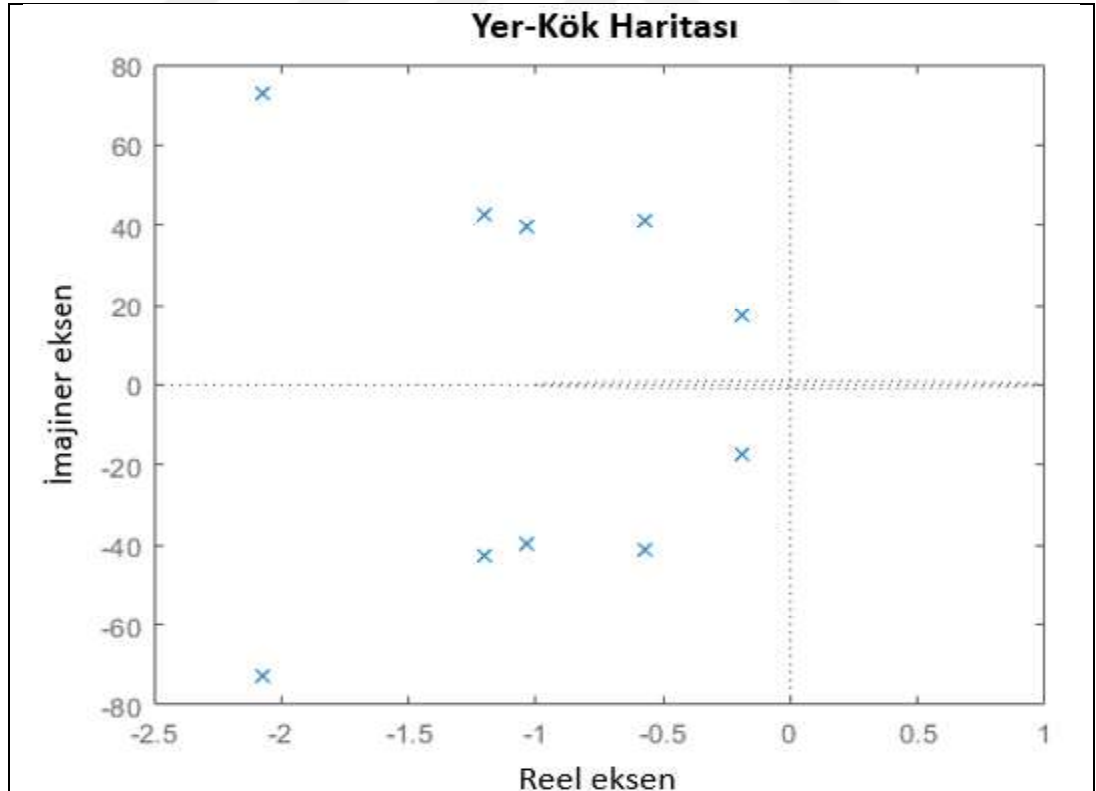
### 3.3. Sistemin Yer-Kök Grafiği

Süperiletken maglev tren sisteminin kararlı olup olmadığını kontrol etmek için kullanılan bir kıstas da sistemin daha doğrusu A matrisinin özdeğerlerini bulmaktır.

Özdeğerler sistemdeki köklerin kök yer grafiğindeki yerini bildirmektedir. Aşağıda bu değerler verilmiştir ve bütün kökler sol yarı düzlemde yani x eksenine göre negatif değer almış olduğu için bütün hareketler referansa gitmeye zorlanacaktır, sonsuza gitmeyecektir. Dolayısıyla sistem kararludur denilebilir. Programda öz değerler bulunurken MATLAB'a has bir komuttan yararlanılmıştır. Ayrıca sistem beş serbestlik derecesine sahip olduğu için durum uzay matrisi serbestlik derecesinin iki katı satıra sahip olur. Bu da on adet kök olduğunu gösterir.

Tablo 3.5: Yer-Kök Grafiğinde Kök Değerleri.

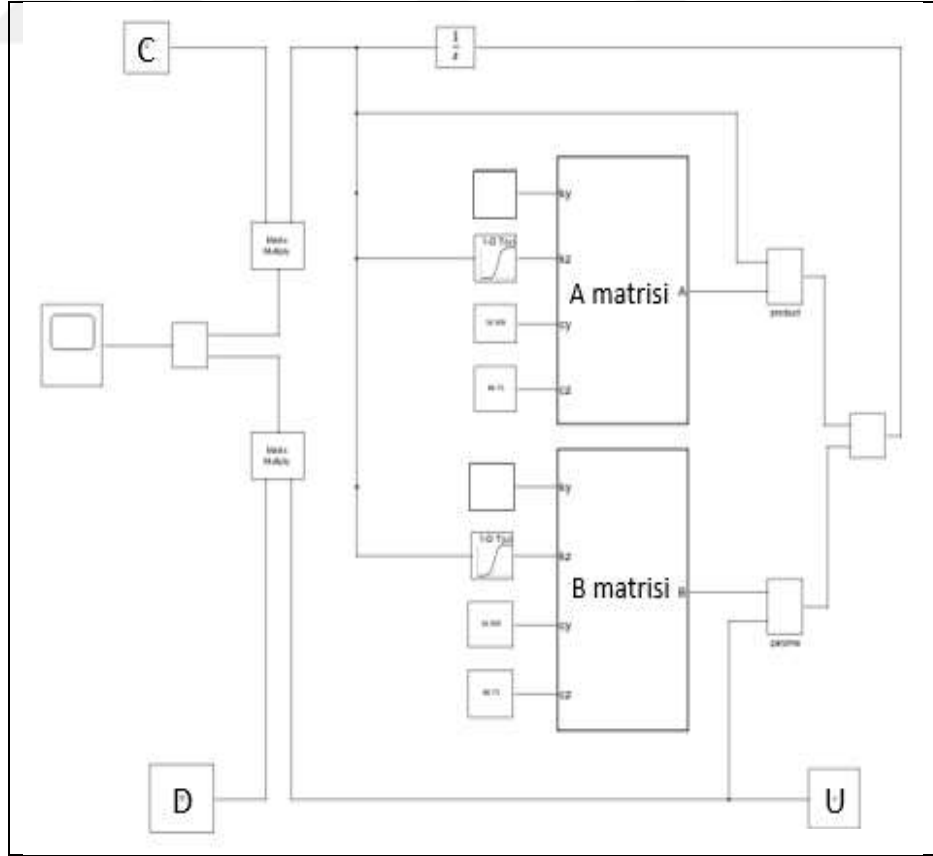
$-0.1890 - 17.4977i$	$-0.1890 + 17.4977i$
$-1.0400 - 39.4831i$	$-1.0400 + 39.4831i$
$-0.5749 - 40.9534i$	$-0.5749 + 40.9534i$
$-1.2039 - 42.4775$	$-1.2039 + 42.4775$
$-2.0694 - 72.6097i$	$-2.0694 + 72.6097i$



Şekil 3.2: Süperiletken maglev trenine ait yer kök haritası.

## 4. DEĞİŞKEN KATILIK KATSAYILARIYLA SÜPERİLETKEN MAGLEV TREN BENZETİMİ

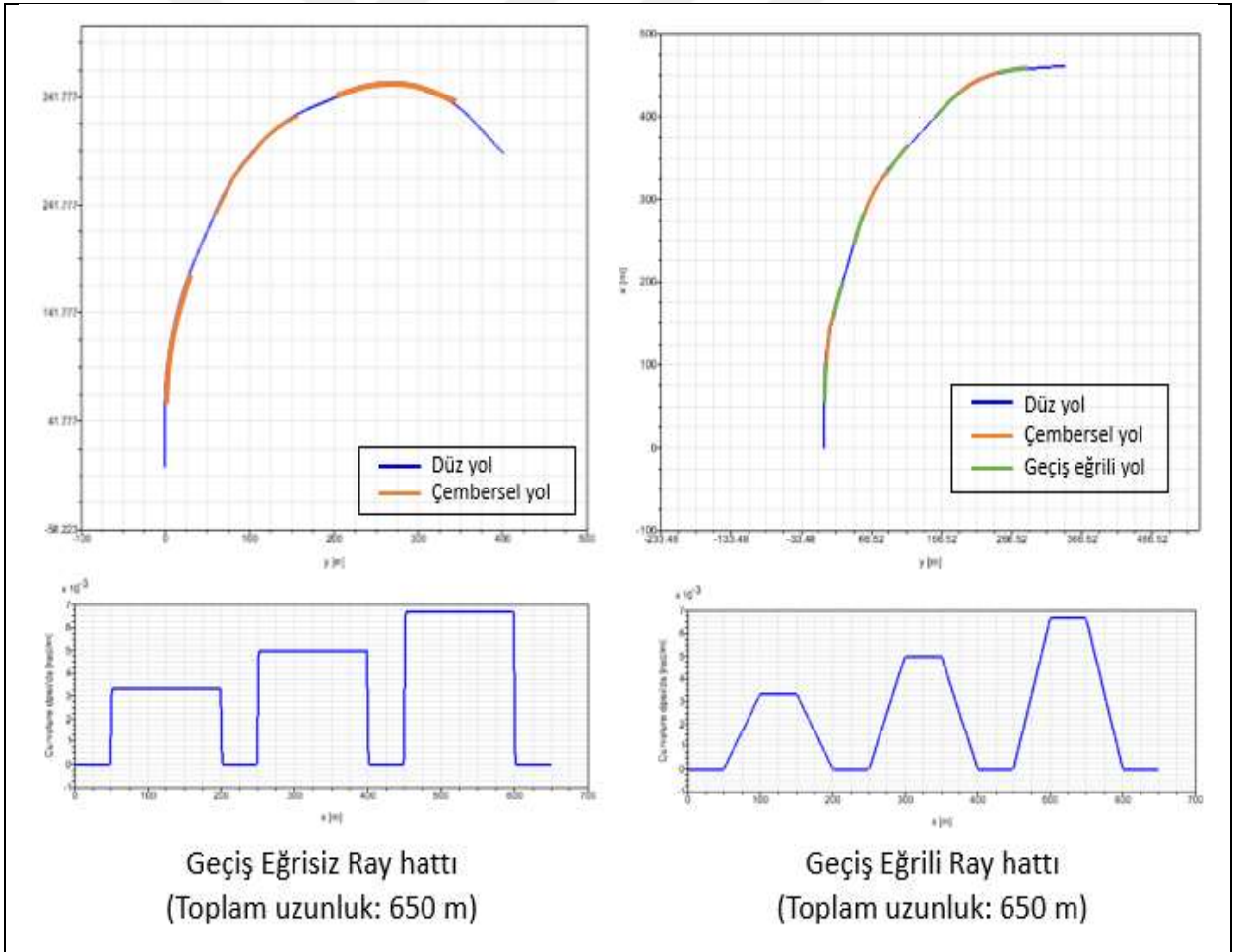
Tasarlanan süperiletken maglev treninin dinamik simülasyonları MATLAB programının simülink modülünde diferansiyel denklemlerin çözülmesiyle gerçekleştirilecektir. Daha önce programa tanıtılan matrisler sayesinde simulinkte bloklar kullanılarak durum uzay şeması oluşturulacaktır. Doğrusal ve basit olan dinamik sistemlerin durum uzayı sabit parametrelerden oluştuğu için A ve B matrisleri değişmemektedir. Fakat doğrusal olmayan parametrelere veya bu çalışmada olduğu gibi değişken katılık sabitlerine sahip bir dinamik sistemin durum uzay modeli ayrıntılı bir şekilde oluşturulması zorunludur. Çünkü trenin katılık parametre değerleri tren ile manyetik ray hattı arasındaki mesafeye göre değişeceğinden A ve B matrisi de değişken olacaktır. Sistemin zamana göre değişen hareketlerini hesaplamak ve grafiğini oluşturmak için çıkış matrisi kullanılacaktır. Katılık sabiti değerleri değişken olduğu için 2. harekete göre yani dikey harekete göre değişmesi için “look up table” bloğu kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Süperiletken maglev treninin simulink modelinin şematik gösterimi.

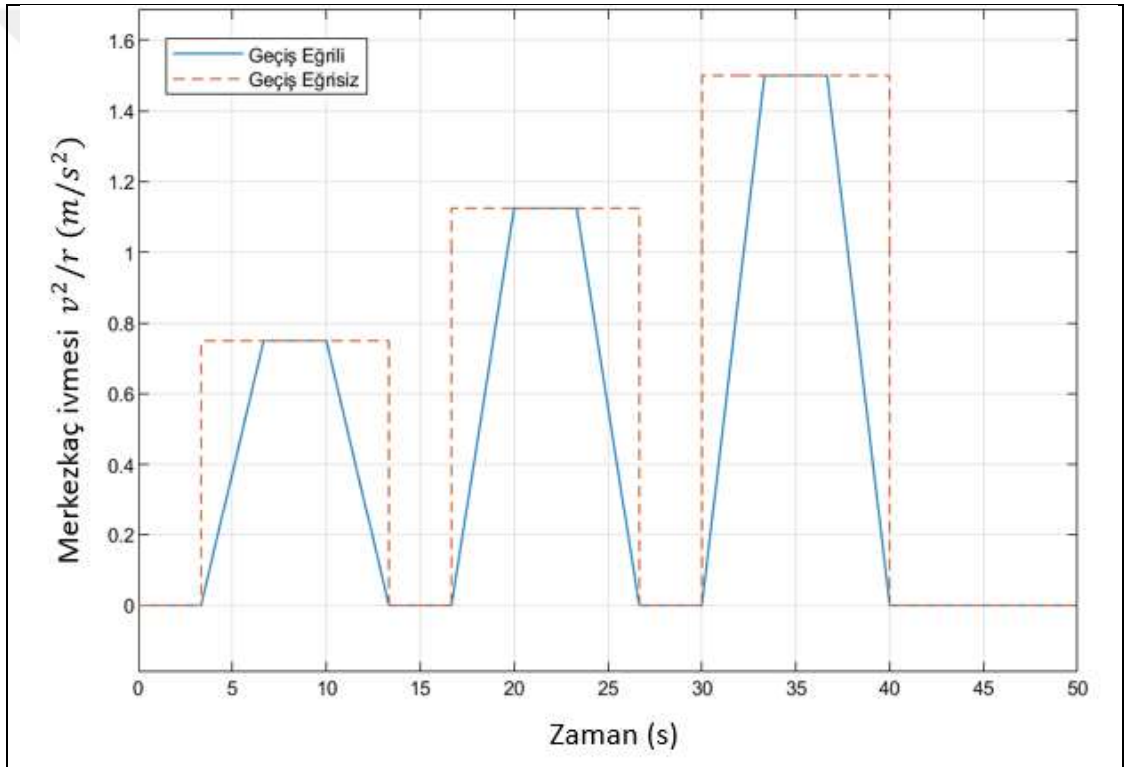
## 4.1. Süperiletken Maglev Treni 1. Simülasyon Çalışması

Dinamik simülasyonların ilki olarak literatürde faydası kanıtlanmış olan geçiş eğrili ray hattının geçiş eğrisiz ray hattı ile karşılaştırması olarak seçilmiştir. Maglev treninin ray hattında çembersel kısım ile düz kısımların birleştiği yerlere eğriliği değişken ve geçiş eğrili olarak adlandırılan bir kısım eklenerek trene etki eden merkezkaç ivmesinin birden etki etmesini engelleyerek trenin daha kararlı bir şekilde hareket etmesini sağlanmaktadır. Bu karşılaştırmayı gerçekleştirmek için iki adet ray hattı profili tasarlanmıştır. Trenin hızının 15 m/s değerinde ve sabit olduğunu kabul ederek trenin viraj simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İki ray hattının uzunluğu da toplam 650 m'dir. İki farklı ray hattının üstten görünüşü ve ray hattı boyunca eğrilik değişimi görülmektedir.



Şekil 4.2: Geçiş eğrili ray hattı, geçiş eğrisiz ray hattı profilleri ve eğriliklerinin değişim grafikleri.

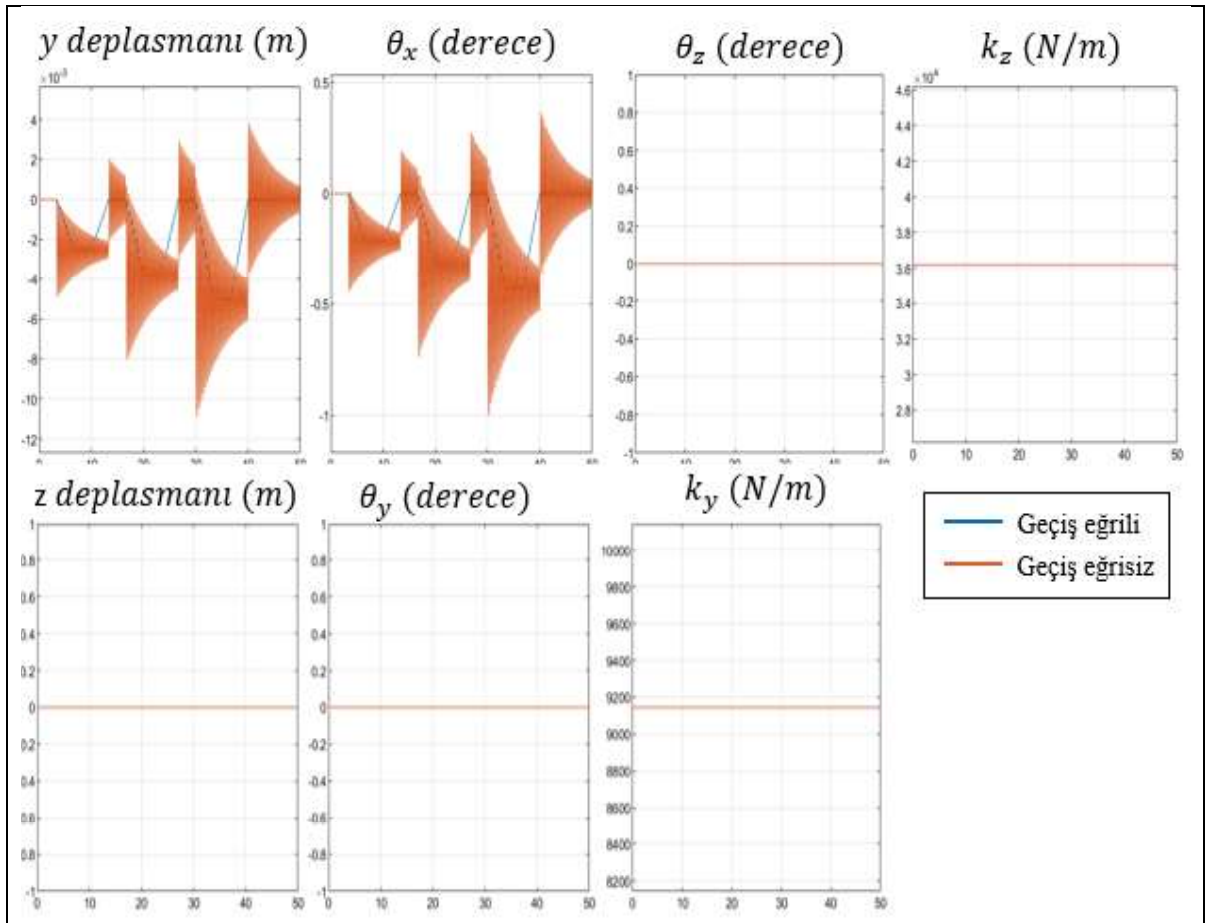
Trenin viraja girdiği an üzerine etkiyen merkezkaç ivmesi MATLAB programının simülink modülünde oluşturulan tren modeline eklenmesi halinde trenin viraj hareketi incelenebilmektedir. Durum uzay modelinde trenin yatay ivmesine aşağıda görülen merkezkaç ivmesi eklenince trendeki serbestlik derecelerinin hepsinin değişimini gözlemlemek mümkün olmaktadır. Bu simülasyonlar sadece üç yüzeyli çift kutup PMG değerleri için gerçekleştirilmiştir. Çünkü modelin doğruluğunu göstermek ve zaten kabul edilmiş bir gerçeğin tekrarı için gerçekleştirilmiştir. Geçiş eğrisiz ray hattındaki çember kısımların uzunluğu 150 m ve yarıçapları sırasıyla 300,200,150 m'dir. Geçiş eğrili ray hattındaki düz, geçiş eğrili kısımlar ve çembersel kısımların hepsinin uzunluğu 50 m'dir ve yarıçaplar sırasıyla 300,200 ve 150 m'dir.



Şekil 4.3: Trenin viraj hareketini modellemek için kullanılan iki farklı merkezkaç ivmesinin zamana göre değişimi.

Tahmin edilebildiği gibi geçiş eğrili ray hattı profilinde hareket eden trenin deplasman ve açı değerleri geçiş eğrisiz ray hattında hareket eden trenin deplasman ve açı değerlerine göre daha iyi değişimler göstermiştir. Aynı katılık ve sönüm değerlerine sahip olan trenin yataydaki deplasmanı ve x eksenine göre yaptığı açı (yuvarlanma hareketi) sadece değişim göstermiştir. Çünkü trene hareket halinde sadece yatay doğrultuda bir ivme etkilemektedir bu da ne düşey doğrultuda ne de

trenin hareketi doğrultusunda bir tepki kuvvetine neden olmamaktadır. Trenin düşey doğrultuda bir harekete uğramaması dikey katılık değerinde de bir değişim olmamasına sebep olmuştur. Dolayısıyla grafiklerden de anlaşılacağı üzere trenin z eksenine göre yaptığı açı (dönme hareketi), trenin y eksenine göre yaptığı açı (kafa vurma hareketi) ve z deplasmanında bir değişim olmamıştır. Ayrıca trenin yataydaki hareketinin ivmesinin değerleri de karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5) ve yine geçiş eğrisiz ray hattındaki değerlerin diğer ray hattındaki değerlere göre daha kötü olduğu görülmüştür. (Aşağıdaki grafiklerin hepsi zamana göre değişimi göstermektedir.)

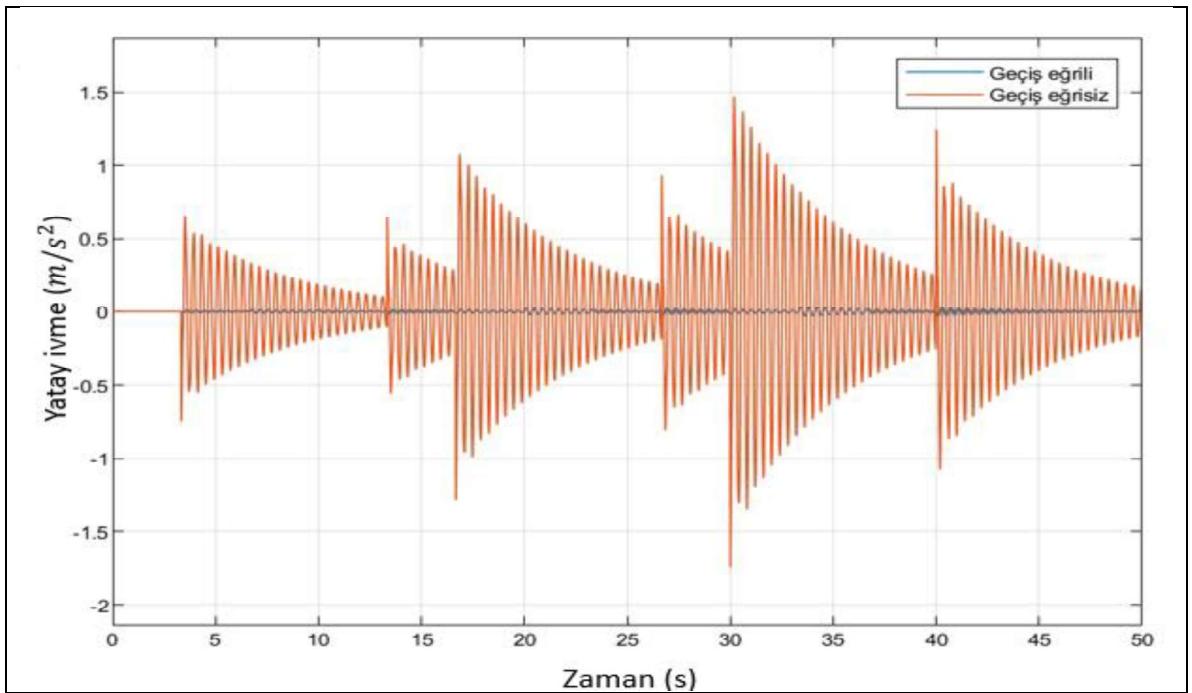


Şekil 4.4: Trenin karşılaştırma yapılan iki ray hattı üzerindeki hareket değişimleri.

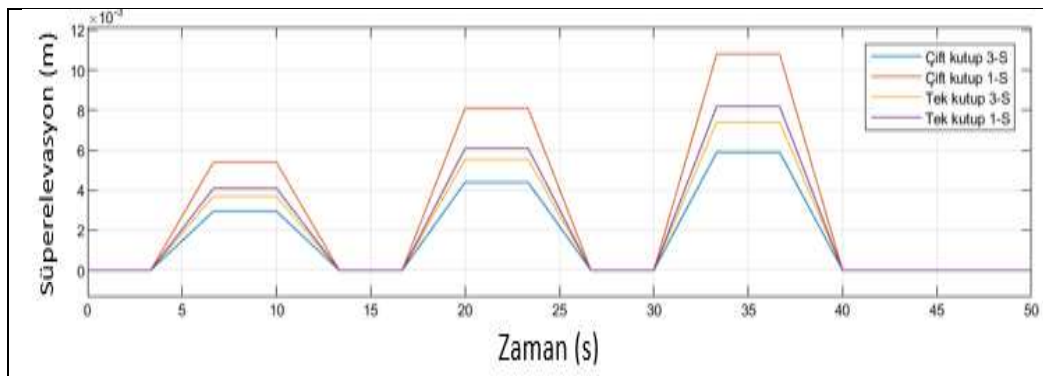
## 4.2. Süperiletken Maglev Treni 2. Simülasyon Çalışması

2. Simülasyon çalışmasında yine HTS maglev treninin viraj performansı incelenmiştir. Bu simülasyon çalışmasında araştırılan tüm PMG'lerin karşılaştırılması geçiş eğrili ray hattı üzerindeki hareketlerinin değişimi gözlemlenmiştir. Ancak 1.

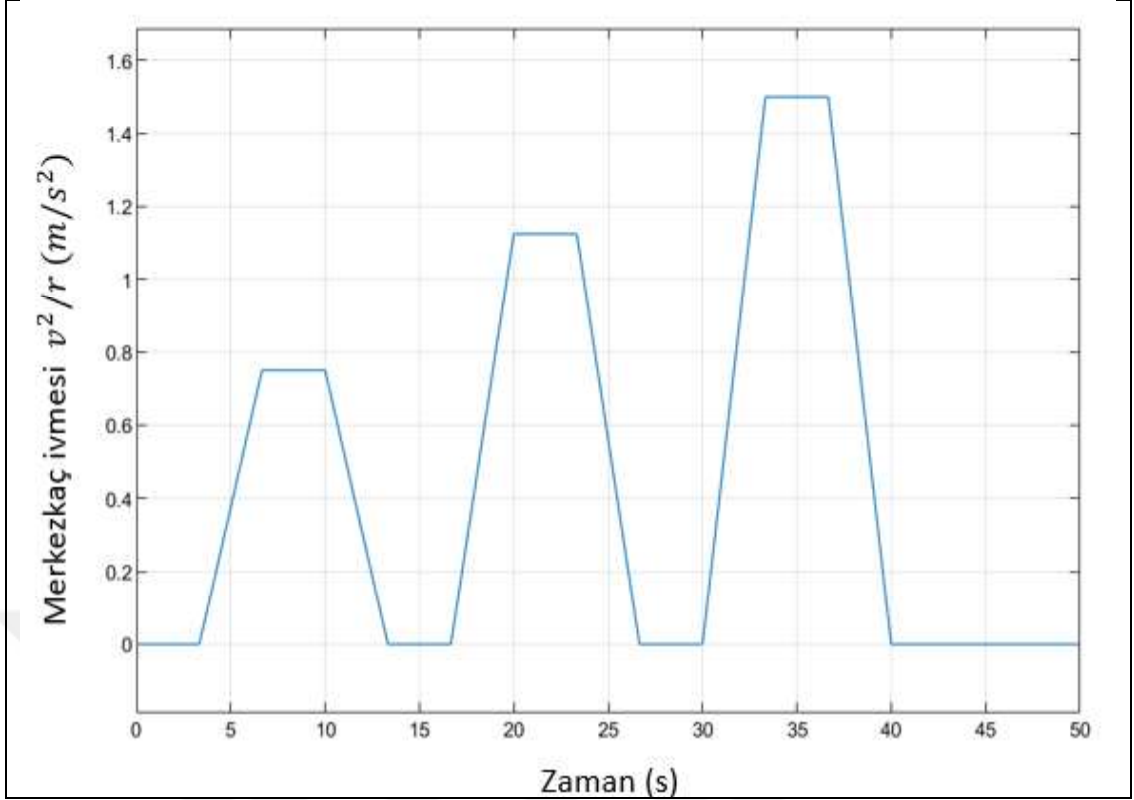
simülasyon çalışmasından farklı olarak bu sefer 2 adet geçiş eğrili ray hattı süperelevasyonlu ve süperelevasyonsuz olacak şekilde karşılaştırılmıştır. Dönme yönüne göre dışarıda kalan ray hattının merkezkaç ivmesini dengelemek amaçlı yükseltme işlemine süperelevasyon denilmektedir. Süperelevasyonlu ve süperelevasyonsuz ray hatlarının ikisi de geçiş eğrilidir ve 1. Simülasyondaki geçiş eğrili ray hattının uzunluklarıyla ve eğrilik değişimiyle aynıdır. Dolayısıyla onların grafikleri tekrar verilmemiştir ancak süperelevasyonlu ray hattının hat üzerindeki süperelevasyon değişimi ve trene etkiyen merkezkaç ivmesinin değişimi şekil 4.7’de görülmektedir.



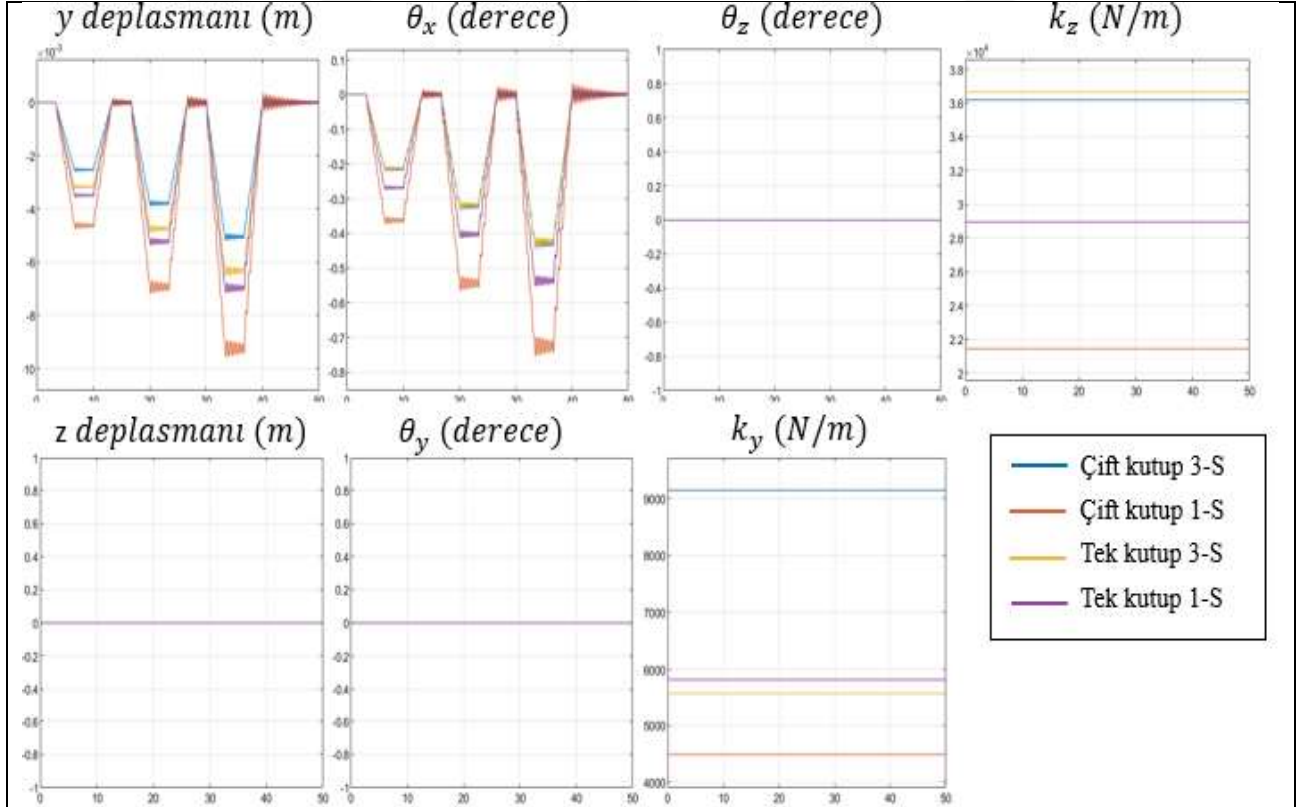
Şekil 4.5: Trenin karşılaştırma yapılan iki ray hattı üzerindeki yatay ivme değişimi.



Şekil 4.6: Geçiş eğrili ve süperelevasyonlu ray hattındaki süperelevasyonun zamana göre değişimi.

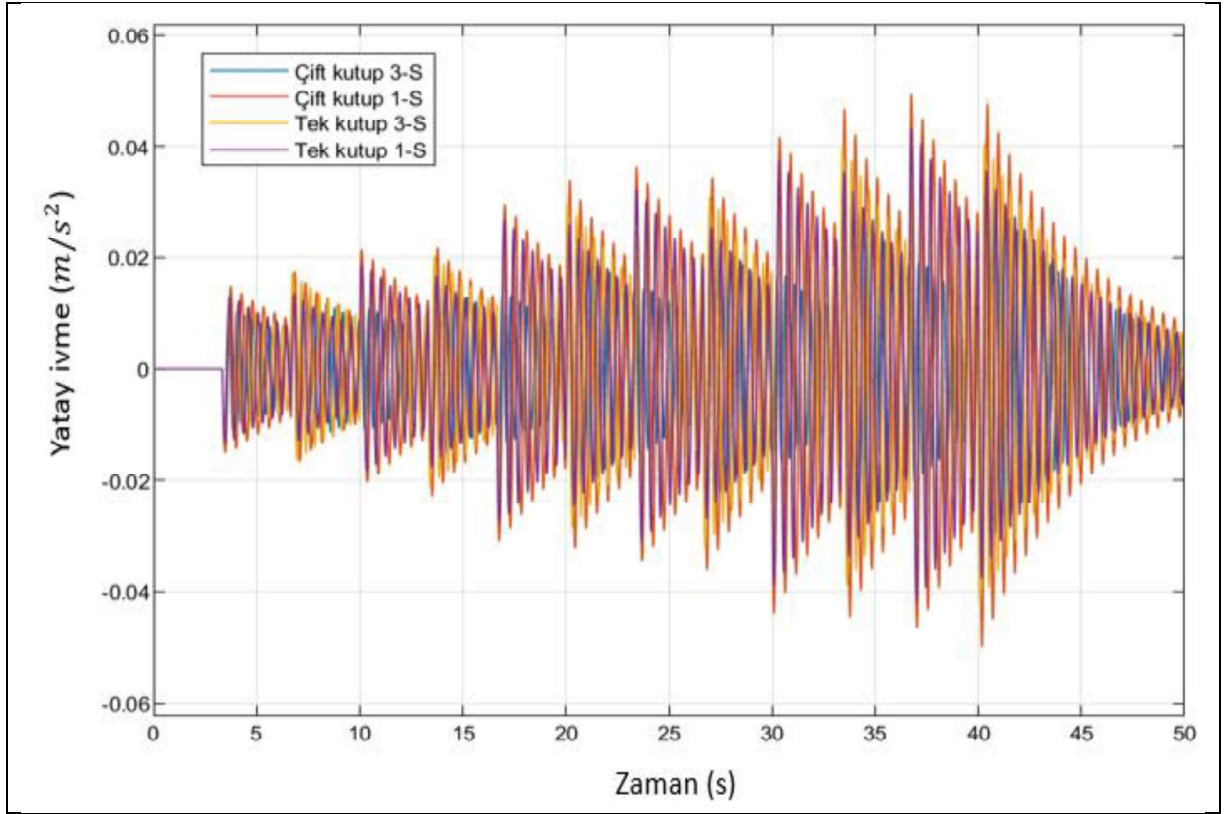


Şekil 4.7: Geçiş eğrili iki ray hattında trene etkileyen merkezkaç ivmesi.



Şekil 4.8: Süperlevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin deplasmanlarındaki, açılarındaki ve katılık değerlerinin değişimi.

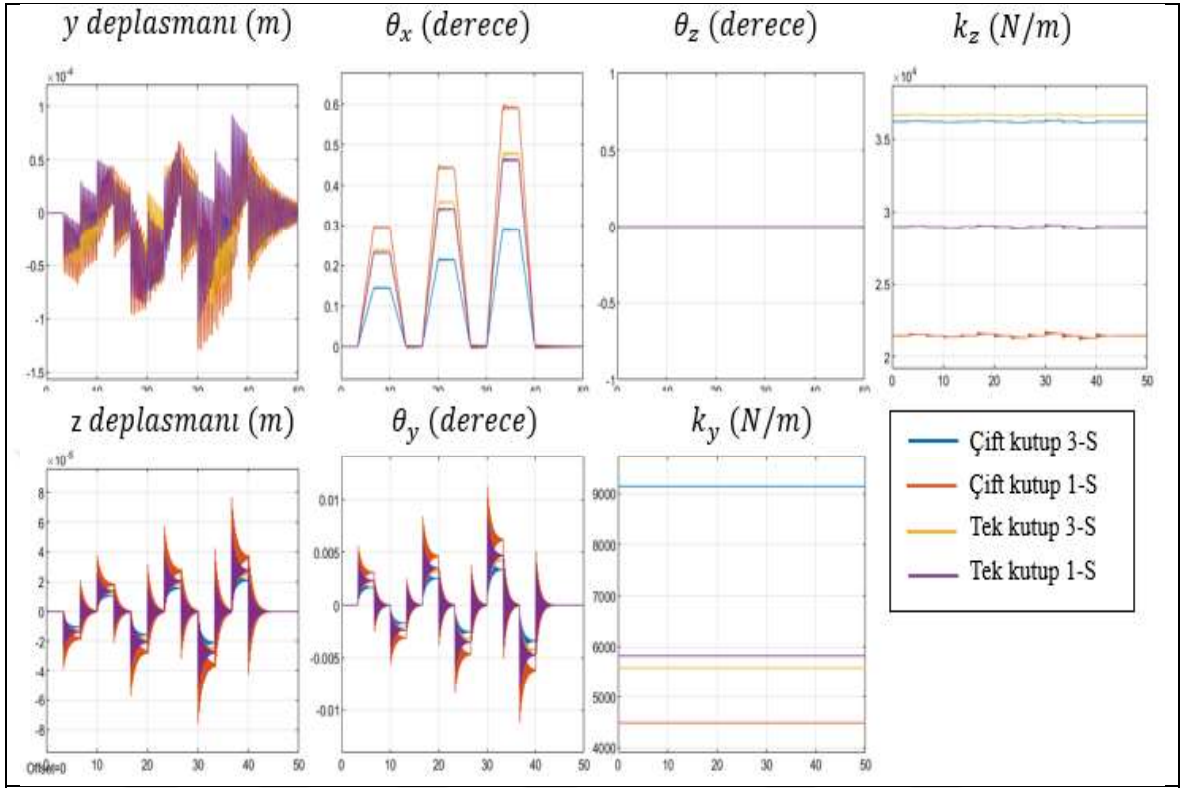
Şekil 4.8'te süperlevasyonsuz ray hattındaki tren hareketinin değişimi görülmektedir. Yataydaki deplasman değerlerinde ve yuvarlanma hareketinde değişim görülmektedir. Tren virajda ilerlerken eğik bir şekilde ilerlemektedir. Çift kutup üç yüzey levitasyona sahip olan manyetik ray hattı üzerinde ilerleyen trenin en düşük deplasman ve eğim değerine sahip olduğu görülmektedir.



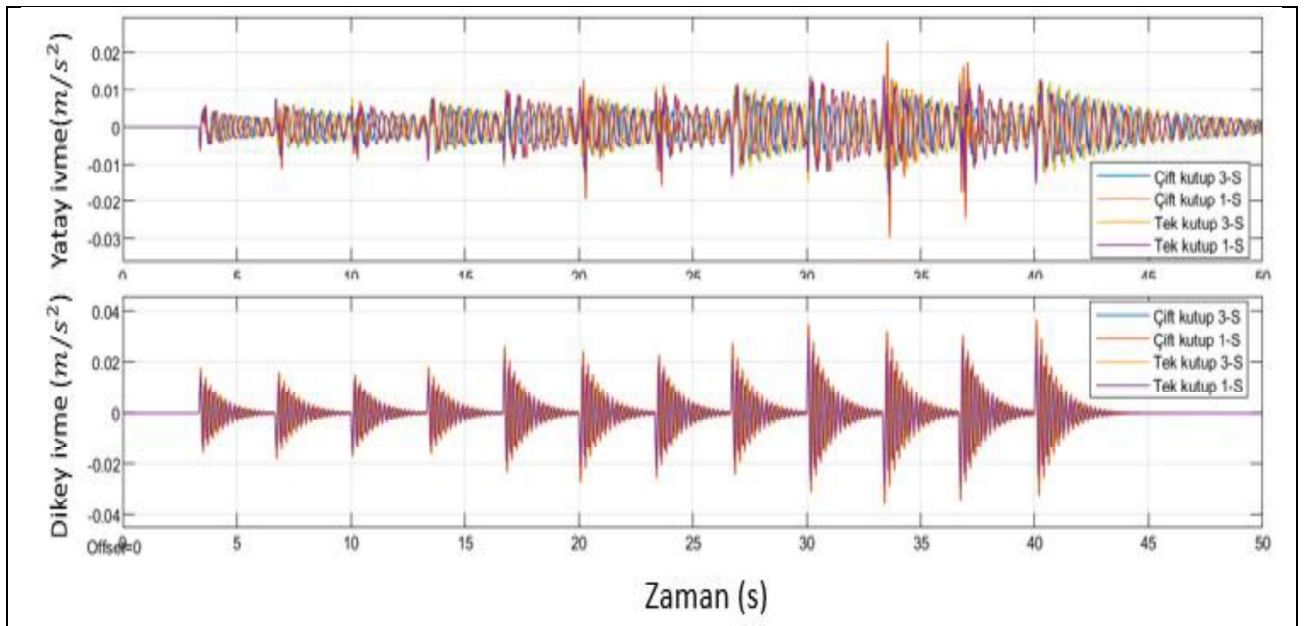
Şekil 4.9: Süperlevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin yatay ivmelerindeki değişimi.

Aşağıda süperlevasyonlu ray hattındaki tren hareketinin değişimi görülmektedir. Dönme hareketinde ve yatay katılık değerinde bir değişim olmadığı görülmektedir. Z eksenine göre yaptığı açıda bir değişim olmaması trenin hep ray hattına paralel bir şekilde ilerlediğini anlatmaktadır. Tren virajda ilerlerken eğik bir şekilde ilerlemektedir. Süperlevasyon ray hattına göre ters yönde eğik bir şekilde hareket etmektedir, bu da süperlevasyonun modelde başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Yine çift kutup üç yüzey levitasyona sahip olan manyetik ray hattı üzerinde ilerleyen trenin en düşük deplasman ve eğim değerine sahip olduğu görülmektedir. Dikey ve yatay ivmelerin konforu bozmayacak derecede

az oldukları görülmektedir ve dikey ivmenin genliğinin yatay ivmenin genliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür.



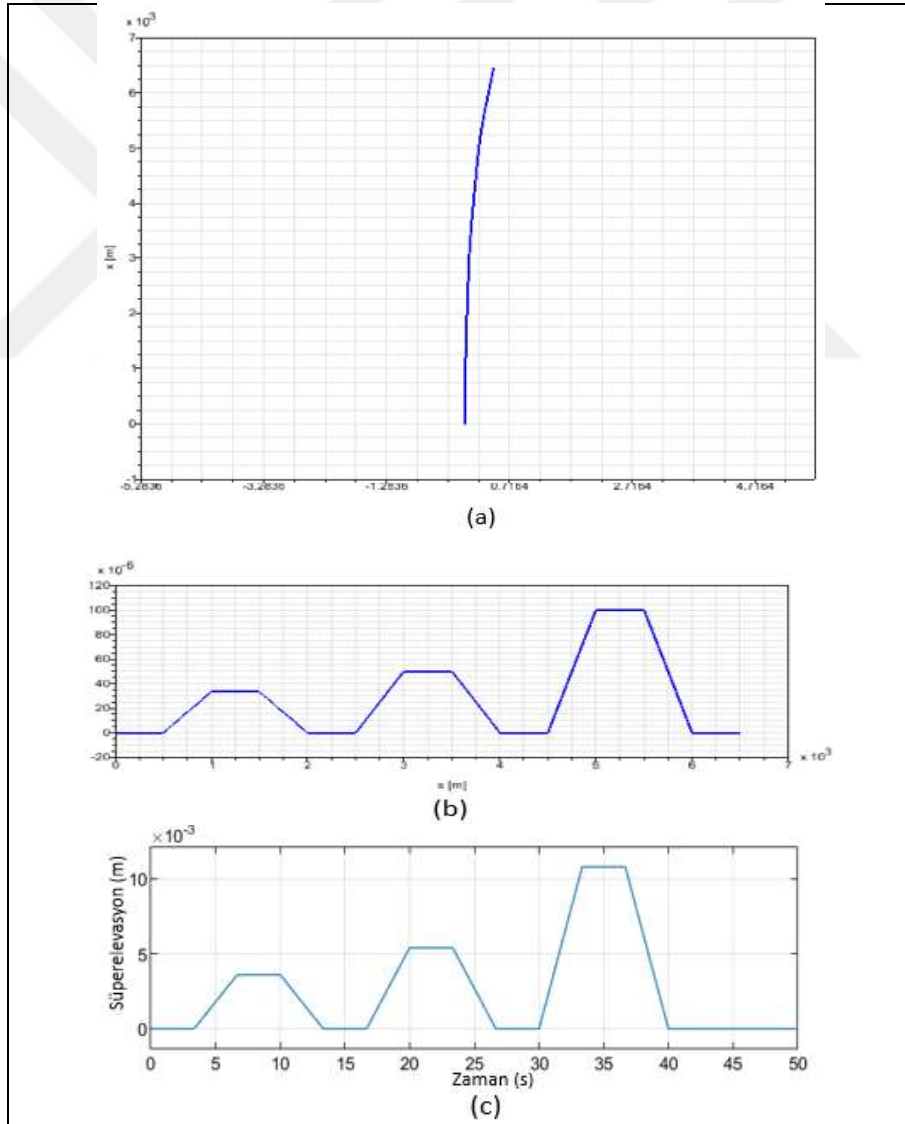
Şekil 4.10: Süperlevasyonlu ray hattında ilerleyen trenin 4 adet PMG'nin üzerindeki trenin deplasman, açı ve katılık değişimleri.



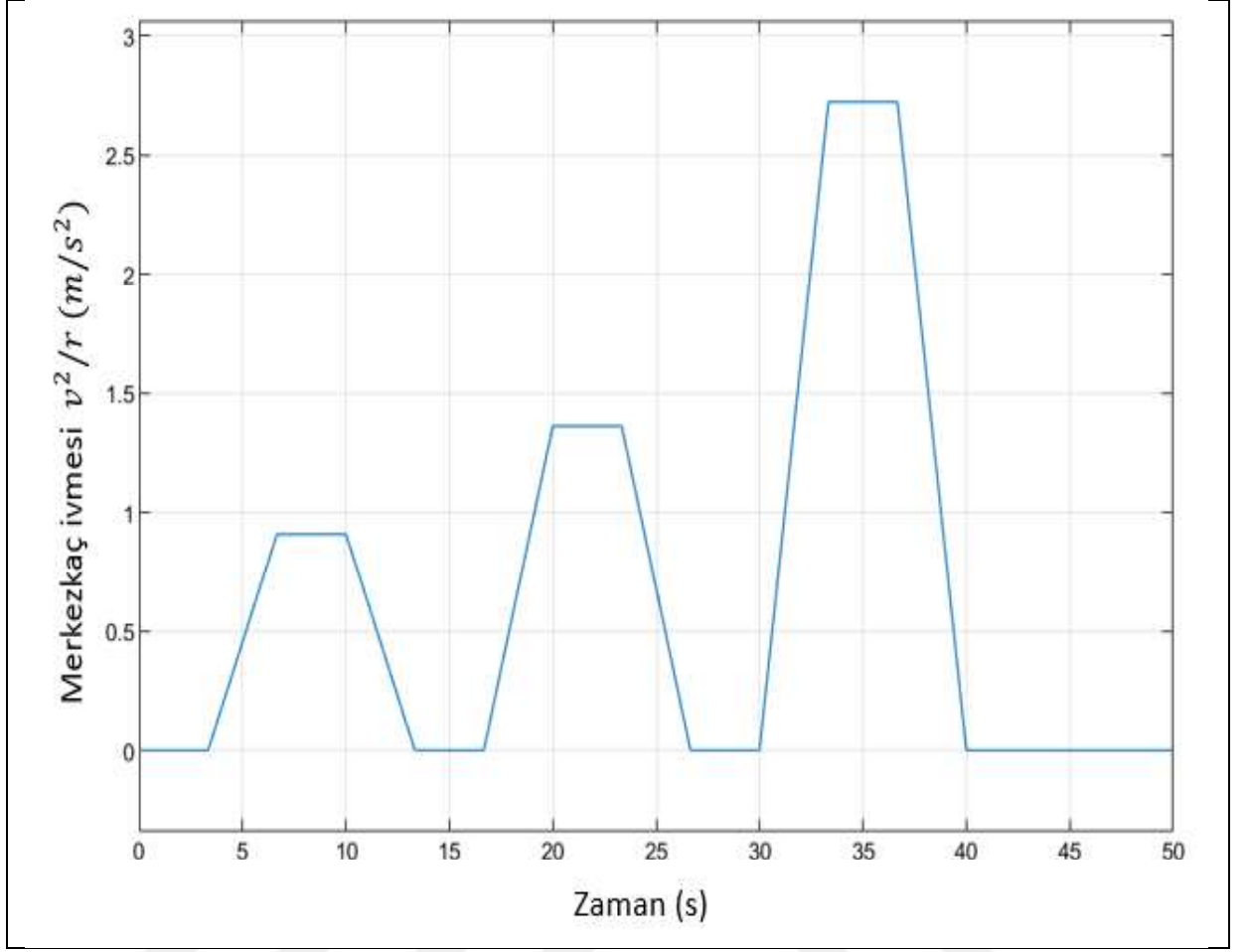
Şekil 4.11: Süperlevasyonsuz ray hattında ilerleyen 4 adet PMG'nin yatay ve dikey ivmelerindeki değişim.

### 4.3. Süperiletken Maglev Treni 3. Simülasyon Çalışması

Son HTS maglev tren simülasyonunda trenin geçiş eğrili ve süperelevasyonlu ray hattındaki yüksek hızlardaki dinamik davranışı gözlemlenmiştir. Yüksek hızda hareket etmesi için oluşturulan ray hattı profilinin uzunluğu 6500 m'dir. Ray hattında bulunan çembersel, geçiş eğrili ve düz kısımların hepsinin uzunluğu 500 m'dir ve çembersel kısımların yarıçapları sırasıyla 30000,20000 ve 10000 m'dir. Trenin ray hattı üzerinde sabit olarak 165 m/s yani 594 km/sa hız değerinde ilerlediği düşünülmektedir. Aşağıda hazırlanan ray hattı profilinin üstten görünüşü, eğrilik değişimi ve süperelevasyon değerinin değişimi gösterilmektedir.

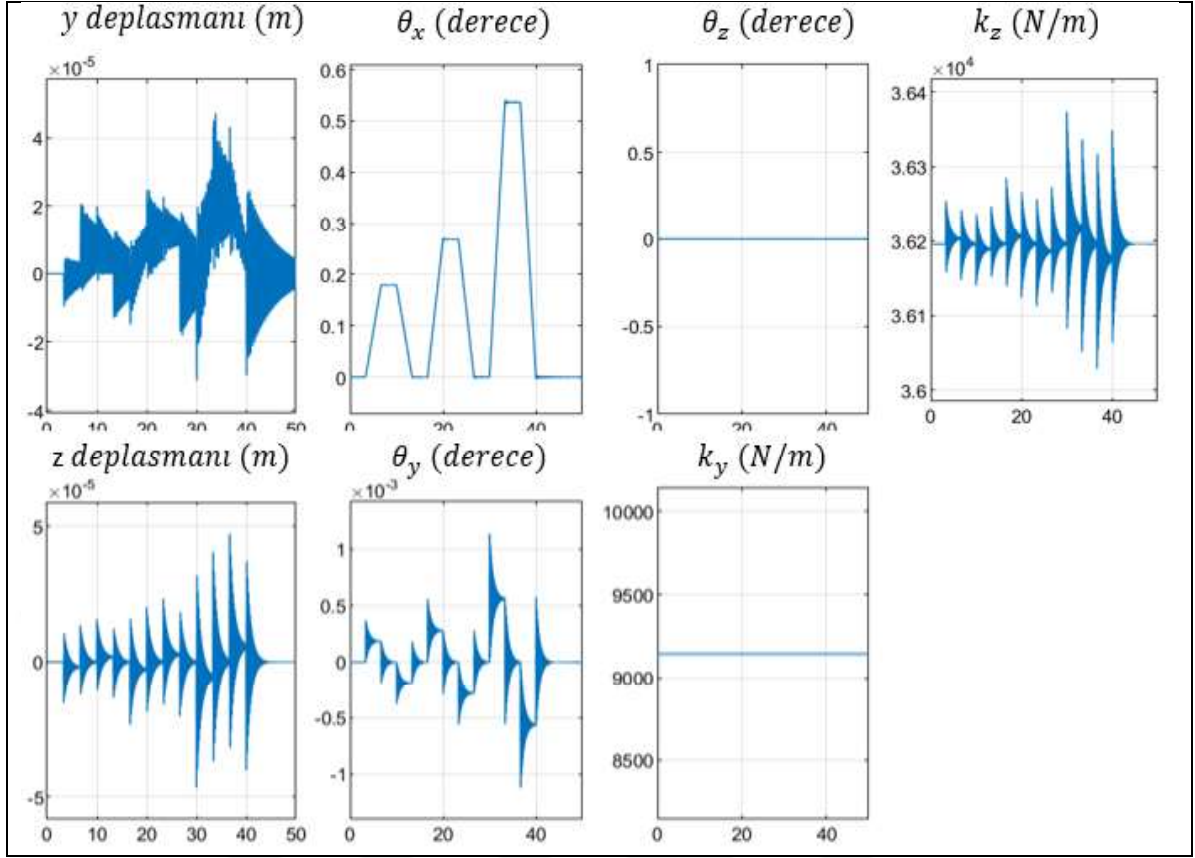


Şekil 4.12: (a) Manyetik ray hattının üstten görünüşü, (b) eğrilik değişimi (rad/m), (c) süperelevasyon değişimi.

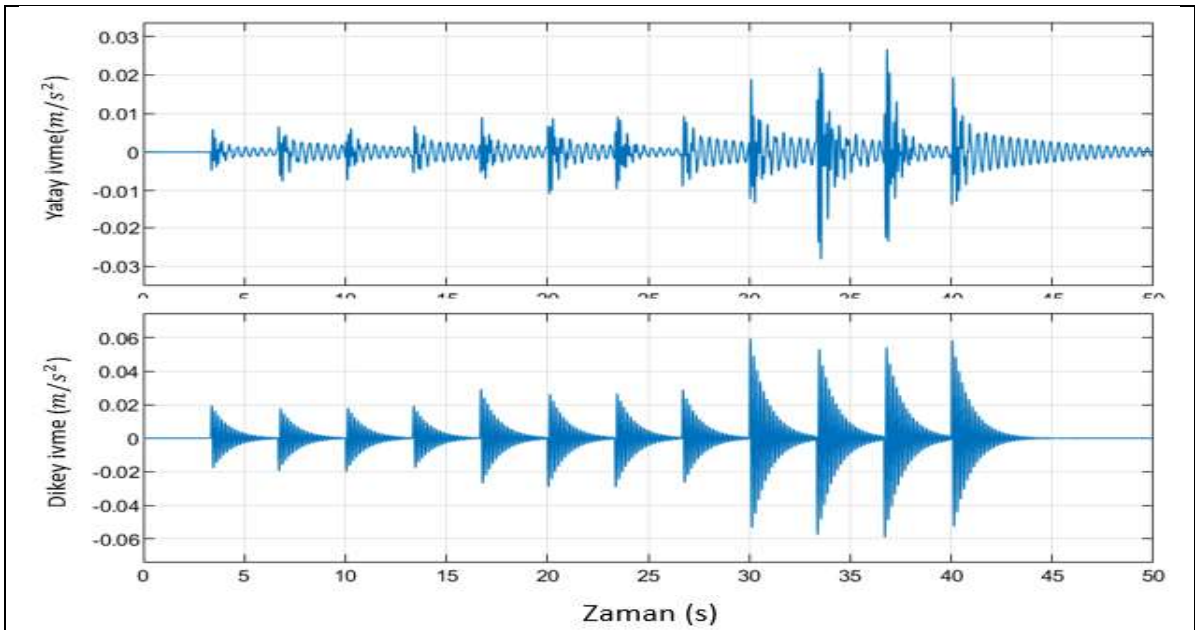


Şekil 4.13: Manyetik ray hattı üzerinde 165 m/s sabit hız değerinde ilerleyen trene etkiyen merkezkaç kuvveti değişimi.

Trenin yatay katılık değeri ve z eksenine göre açısı diğer simülasyonlarda olduğu gibi değişmemiştir. Yataydaki deplasmanı neredeyse sıfırdır. Yatay deplasmanının tamamen 0 olmamasının sebebi trenin süperelevasyon kısmındaki hareketinden dolayıdır. Yuvarlanma hareketinin yani x eksenine göre olan açının eğik olması trenin viraj kısmında eğik bir şekilde gittiğini göstermektedir. Dikeydeki deplasmanı da neredeyse sıfırdır ve kafa vurma hareketinin yani y eksenine göre olan açı önce ön kriyostata sonra arka kriyostata etkiyen süperelevasyondan dolayı değişim göstermektedir. Yatay ivme ve dikey ivmelerinde rahatsız etmeyecek düzeyde seyrettiği görülmektedir, ayrıca yine dikey ivmenin yatay ivmeden daha yüksek olduğu görülmektedir. Hem geçiş eğrisi hem süperelevasyon eklenerek geliştirilen ray hattının trenin yüksek hızlarda bile güvenli ve konforlu bir şekilde hareket edebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.14: Maglev treninin yüksek hızda (165 m/s) hazırlanan ray hattı üzerindeki deplasmanlarının, açılarının ve katılık değerlerinin değişimi.



Şekil 4.15: Maglev treninin yüksek hızda (165 m/s) hazırlanan ray hattı üzerindeki yatay ve dikey ivme değişimi.

## 5. SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bilgilere göre geliştirilen simülasyon metodu ve üç yüzeyli levitasyon yöntemi süperiletken çalışmaları için başarılı olup ilerde yapılacak olan çalışmalar için bir örnek ve destek olmuştur. Geliştirilen tasarımlar ve simülasyonlar sonucu aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Mıknatıslı süperiletken simülasyonu geliştirilerek mesafe kısıtı hareketli ağ örgüsü yöntemi için ortadan kaldırılarak alansız soğutma simülasyonları daha kolay ve gerçekleştirilebilir hale gelmiştir.
- Tasarlanan üç yüzeyli levitasyon sayesinde maglev treninin dikey manyetik katılık sabiti tek yüzeyli levitasyon yöntemine göre çok daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu levitasyon yönteminin kullanılmasının hem sistemin daha çok yük kapasitesine sahip olmasını hem de daha kararlı ve daha titreşimsiz şekilde çalışmasını sağlayacağı görülmüştür.
- Tasarlanan üç yüzeyli levitasyon sayesinde maglev treninin yatay manyetik katılık sabiti tek yüzeyliye göre kısıtlı mesafe içerisinde çok daha iyi olduğu simülasyonlar sonucu görülmüştür. Bu yöntemin sistemin yanal hareketi ve dönme hareketlerinde iyileşme elde ettiği dolayısıyla trenin daha kararlı ve daha titreşimsiz şekilde çalışmasını sağlayacağı kanısına varılmıştır.
- Tasarlanan üç yüzeyli levitasyon sayesinde maglev treninin viraj performansının iyileştiği, diğer manyetik ray hatlarına göre daha iyi değerler elde edilebildiği ve yüksek hızlarda da güvenli bir şekilde hareket edebildiği için kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Tasarlanan manyetik ray dizilimleri arasında en iyi performansı sağlayan çift kutuplu üç yüzey levitasyonlu hallbach dizilimli mıknatıs ray hattı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Trenin geçiş eğrili ve süperelevasyonlu manyetik ray hattında yüksek hızlarda bile güvenli ve konforlu bir şekilde hareket edebildiği sonucuna varılmıştır.

## 6. ÖNERİLER

Bu çalışmada üç yüzeyli levitasyon yöntemi YBCO külçe HTS'ler için levitasyon ve dinamik tren simülasyonları ve kriyostat ve maglev treni tasarımları gerçekleştirildi. Bu çalışma aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurularak geliştirilebilir:

- Simülasyonlar sıcaklığın hep 77 K olduğu düşünülerek yapıldı. Farklı ve daha düşük sıcaklıklar için tekrar simülasyon gerçekleştirilebilir.
- Levitasyon ve dinamik tren simülasyonları farklı soğutma ve çalışma yükseklikleri denenerek geliştirilebilir.
- Simülasyonlar farklı kriyostat tasarımları ve farklı HTS dizilimleri oluşturularak geliştirilebilir.
- Simülasyonlar farklı kütle, atalet değerlerine ve serbestlik derecesine sahip gelişmiş süperiletken maglev treni tasarımları yapılarak geliştirilebilir.
- Simülasyonlar farklı manyetik ray hattı tasarımları geliştirilerek gerçekleştirilebilir.
- Farklı boyutta kalıcı mıknatıslar ve farklı boyutlarda HTS'ler için çalışmalar tekrarlanıp geliştirilebilir.
- Farklı ray hattı profilleri oluşturulup trenin viraj performansı incelenip geliştirilebilir.
- Trenin dinamik simülasyonları gerçekleştirilirken ray hattındaki geometrik düzensizlikler ve ray hattının manyetik alanındaki homojensizlikler dikkate alınarak simülasyona bu etkileri ekleyip daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Chang P.Z., Moon F.C., Hull J.R., Mulcahy T.M., (1990), "Levitation Force and Magnetic Stiffness in Bulk High-Temperature Superconductors", J. Applied Physics, 67, 4358
- [2] Hull J.R., Cansiz A., (1999), "Vertical and Lateral Forces between a Permanent Magnet and a High-Temperature Superconductor", J. Applied Physics, 86, 6396
- [3] H.Woo Lee, K.C. Kim, J. Lee, (2006), "Review of Maglev Train Technologies", IEEE Transactions On Magnetism, 42, 7.
- [4] Jing, H., Wang, J., Wang, S., Wang, L., Liu, L., Zheng, J., Deng, Z., Ma, G., Zhang, Y., & Li, J. (2007). "A two pole Halbach permanent magnet guideway for high temperature superconducting Maglev vehicle", Physica C: Superconductivity and Its Applications, 463-465(SUPPL.), 426-430.
- [5] Ma K.B., Postrekhin Y.V., Chu W.K., (2003), "Superconductor and magnet levitation devices", Rev. Sci. Instrum, 74, 12, 4989-5017
- [6] Moon F.C., (2004), "Superconducting Levitation", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [7] Onnes H.K., (1911), "The resistance of pure mercury at helium temperatures", Superconductivity and Magnetism, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 119- 120.
- [8] Rose-Innes A.C., Rhoderick E.H., (1980), "Introduction to Superconductivity", Second Press, Pergamon Press Ltd., England.
- [9] Sass F., Sotelo G. G., De Andrade R., Sirois F., (2015), "H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors", Superconductor Science and Technology, 28(12).
- [10] Sotelo G. G., Dias D. H. N., Machado O. J., David E. D., Andrade R. de, Stephan R. M., Costa G. C., (2010), "Experiments in a real scale maglev vehicle prototype", Journal of Physics: Conference Series, 234(3), 032054
- [11] Web 1, <https://www.energy.gov/science/doe-explainssuperconductivity>, (Erişim Tarihi: 23/01/2021).
- [12] Werfel F. N., Floegel-Delor U., Rothfeld R., Riedel T., Goebel B., Wippich D., Schirrmeister P., (2012), "Superconductor bearings, flywheels and transportation", Superconductor Science and Technology, 25(1).
- [13] Yang W.M., Chao X.X., Bian X.B., Liu P., Feng Y., Zhang P.X., Zhou L., (2003), "The effect of magnet size on the levitation force and attractive force of single domain YBCO bulk superconductors", Superconductor Science and Technology, 16, 789-792

- [14] Yang W., Liu, Y., Wen Z., Chen X., Duan Y., (2008), “Hysteresis Force Loss and Damping Properties in a Practical Magnet-Superconductor Maglev Test Vehicle”, *Superconductor Science and Technology*, 21, 1
- [15] Yang W.M., Zhou L., Feng Y., Zhang P.X., Nicolsky R., Andrade Jr R., (2003), “The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process”, *Physica C*, 398, 141-146.
- [16] Yang W.M., Zhou L., Feng, Y., Zhang P.X., Wang J.R., Zhang C.P., Yu Z.M., Tang X.D., Wei, W., (2001), “The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors”, *Physica C*, 354, 5-12.
- [17] Sivrioglu S., Yıldız A.S., Basaran S., & Bolat F.C., & Kepenek E., (2018). “Design and Simulation of a Model Maglev Vehicle”, 4th International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE’18), Karabuk, Turkey, October 10-12,
- [18] Zheng J., Huang H., Zhang S., Deng Z., (2018), “A General Method to Simulate the Electromagnetic Characteristics of HTS Maglev Systems by Finite Element Software”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(5), 1–8.
- [19] Zheng X., Yang Y., (2007), “Transition Cooling Height of High- Temperature Superconductor Levitation System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17, 3862

## **EKLER**

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

Yıldız, A. S., Sivrioğlu S., Bedirbeyoğlu M., “A New Guideway Design for the HTS Maglev Vehicles Considering Curve Negotiation” 33rd international symposium on superconductivity (ISS-2020), AIST Tsukuba, Japan.

### **Ek B: Açıklamalar**

