

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLI LİNEER FIRLATICI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUTLU ALTINKILIÇ

DR ÖĞR. ÜYESİ SİNAN BAŞARAN

BİLECİK, 2022

10480890

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLI LİNEER FIRLATICI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUTLU ALTINKILIÇ

DR ÖĞR. ÜYESİ SİNAN BAŞARAN

BİLECİK, 2022

10480890

BEYAN

“Süperiletken Manyetik Yataklı Lineer Fırlatıcı Tasarımı” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)		119M131	
2- TÜBİTAK X			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Mutlu ALTINKILIÇ

.././2022

İmza

ÖNSÖZ

Bu tezde YBCO tipi süperiletkenler kullanılarak manyetik ray ve vagon sistemi tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan kriyostat, ray ve vagon sıfırdan tasarlanmıştır. Tezdeki bu sistem Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarlarında üretilmiştir.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 119M131 numaralı 3501- kariyer geliştirme programı kapsamında yapılmıştır. Tezin yazarı ve danışmanı katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

Bu tez çalışması kapsamında danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Sinan Başaran'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

En son olarak bana gösterdiği sürekli destekten ötürü kardeşime özellikle teşekkür ederim.

Mutlu ALTINKILIÇ

2022

ÖZET

SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLI LİNEER FIRLATICI TASARIMI

Bu çalışmada süperiletken manyetik levitasyon ile yataklaması yapılmış bir fırlatıcı tasarlanmış ve üretilmiştir. Fırlatıcı temel olarak iki parçadan oluşmaktadır bunlar kriyostat ve raydır. Her ne kadar piyasada hazır kriyostatlar üretilip satılıyor olsa da, tez çalışmasındaki kriyostat proje dâhilinde tasarlanıp üretilmiştir. Rayların tasarımında ise kalıcı mıknatıslar kullanılarak Halbach dizilimi esas alınmıştır. Halbach dizilimi tek boyutlu bir dizilimdir ve tek doğrultudaki mıknatısların dizilimini göstermektedir; ne var ki tezdeki raylar süperiletkene iki yüzeyden etkileşime girmektedir ve iki boyutlu bir dizilim mevcuttur. En optimum dizilimin bulunmasında bir dizi simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon çalışmaları yapılırken Femm, Comsol, Matlab gibi programlar kullanılmıştır. En son olarak Matlab ve Simulink kullanılarak tasarlanan sistemin dinamik analizi yapılmıştır. Dinamik analizinde sisteme verilen dış etki sonucu sistemin verdiği tepki gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni (YSS), Süperiletken Manyetik Levitasyon, H-Formülasyon, Manyetik Sonlu Elemanlar Metodu, Lagrange Metodu.

ABSTRACT

SUPERCONDUCTING MAGNETIC BEARING LINEAR LAUNCHER DESIGN

In this study, a catapult that works with magnetic levitation is designed and produced. The catapult consists of two main parts, which are the car and the rail. Although premade cryostats are available in the market, the cryostat in the thesis is designed, and manufactured as a part of the project. Permanent magnets are used in Halbach array in the design of the rails. Halbach array is a one-dimensional array, and it shows how magnets line up in one direction; however, in the thesis rails affect the superconductor on two surfaces and there is a two-dimensional array. In order to find an optimum array, series of simulations are conducted. In these simulations, softwares such as Femm, Comsol and Matlab are used. For last dynamic analysis of the system is studied using Matlab and Simulink. In dynamic analysis, systems' reaction is observed after an external impact.

Keywords: High Temperature Superconductor (HTS), Superconducting Magnetic Levitation, H-Formulation, Magnetic Finite Elements Method, Lagrange Method

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Süperiletkenlerin Kısa Tarihi.....	1
2. SÜPERİLETKENLER VE UYGULAMALARI.....	7
2.1. Süperiletkenlik.....	7
2.2. Süperiletkenler ve Özellikleri.....	7
2.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler.....	8
2.4. Süperiletkenlerin Soğutulması.....	10
2.4.1. Field Cooling (Manyetik Alan İçinde Soğutma).....	10
2.4.2. Zero Field Cooling (Manyetik Alansız Soğutma).....	10
2.5. Manyetik Yataklama.....	11
2.6. Maglev Trenler.....	12
2.7. Kriyostatlar.....	13
2.8. Hysteresis.....	Error! Bookmark not defined.
2.9. Süperiletken Manyetik Levitasyonun Modellenmesi.....	14
2.9.1. Donmuş Görüntü Modeli (Frozen Image Model).....	14
2.9.2. Gelişmiş Donmuş Görüntü Modeli (Improved Frozen Image Model).....	16
2.9.3. Kritik Durum Modeli (Critical State Model).....	17
2.9.4. H-Formulasyon (H-Formulation).....	17

2.10. Halbach Dizilimi (Halbach Array).....	18
3. SÜPERİLETKEN MANYETİK FIRLATICI	20
3.1. Tezin Amacı ve Katkısı	20
3.2. Deney Düzenegi.....	20
3.2.1. Vagon	20
3.2.2. Ray Sistemi.....	24
3.3. Ray Tasarımı.....	24
3.4. Femm Analizi	26
3.5. Matematiksel Model	29
3.6. Comsol Analizi	32
3.6.1. Comsol Durum Çalışması	35
3.7. Dinamik Model	37
3.8. Matlab ve Matlab Simulink Analizi.....	44
4. SÜPERİLETKEN MANYETİK FIRLATICI DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1. Deney Düzenegi.....	47
4.2. Deneysel Çalışmalar	50
5. DURUM ÇALIŞMASI	59
6. SONUÇ	62
KAYNAKÇA	64
EKLER.....	68

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

∇	: Nabla operatörü
A	: Durum uzay sistem matrisi
AC/DC	: Alternating current/ direct current- Alternatif akım/ düz akım
B	: Süperiletken üzerindeki manyetik akı yoğunluğu
B	: Durum uzay girdi matrisi
c	: Sönüm katsayısı
C	: Sönüm katsayı matrisi
C	: Durum uzay çıktı matrisi
CERN	: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
D	: Sönüm ile kaybolan enerji
D	: Durum uzay ileri besleme matrisi
E	: Elektrik alan
F	: Kuvvet
FC	: Field Cooling – Manyetik alan içinde soğutma
Femm	: Finite Element Method Magnetics
H	: Manyetik alan
H_c	: Kritik manyetik alan
HTS	: High temperature superconductor- Yüksek sıcaklık süperiletkeni
J_c	: Kritik akı yoğunluğu
k	: Yay katsayısı
K	: Yay katsayı matrisi
Kuprat	: Bakır oksit
m	: Manyetik dipol momenti
m	: Kütle
M	: Kütle matrisi
M	: Birim hacimdeki manyetik moment
Maglev	: Magnetic levitation – Manyetik levitasyon
M_0	: Kalıcı mıknatısın manyetizasyonu
μ_0	: Vacuum permeability- Boşluğun geçirgenliği
PEEK	: Poly Ether Ether Ketone
PID	: Proportional Integral Derivative (Bir kontrolcü çeşidi)
r	: Dipoller arası mesafe

ρ	: Özdirenç
Sc-Maglev	: Superconducting magnetic levitation – Süperiletken manyetik levitasyon
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
T	: Kinetik enerji
T_c	: Kritik sıcaklık
U	: Potansiyel enerji
YBCO	: Yttrium baryum bakır oksit
YSS	: Yüksek sıcaklık süperletkeni
ZFC	: Zero field cooling – Manyetik alansız soğutma

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Meissner Etkisi	2
Şekil 1.2. Süperiletkenlerin Keşif Yılı	2
Şekil 1.3. Süperiletken MRI.....	4
Şekil 1.4. Süperiletken Volan.....	5
Şekil 1.5. Süperiletken Rüzgâr Türbini.....	6
Şekil 2.1. Süperiletkenliğe Geçiş Eğrileri	8
Şekil 2.2. Kritik Sıcaklık Kritik Manyetik Alan Eğrisi	8
Şekil 2.3. FC ve ZFC Sıcaklık Manyetizasyon Eğrisi.....	11
Şekil 2.4. Süperiletken Trust Yatağı.....	12
Şekil 2.5. Kriyostat Örneği	13
Şekil 2.6. Frozen Image Model (Donmuş Görüntü Modeli).....	15
Şekil 2.7. Improved Frozen Image Model (Gelişmiş Donmuş Görüntü Modeli).....	16
Şekil 2.8. Halbach Array (Halbach Dizilimi).....	18
Şekil 3.1. Deney Düzeneği.....	20
Şekil 3.2. Vagon Tasarımı	21
Şekil 3.3. Bakır Taban.....	22
Şekil 3.4. Ray Tasarımı.....	24
Şekil 3.5. Ray Tasarımı Yan Mıknatıs Yön Çalışması	25
Şekil 3.6. Ray Tasarımı Yan Mıknatıs Yükseklik Çalışması I.....	26
Şekil 3.7. Ray Tasarımı Yan Mıknatıs Yükseklik Çalışması II	27
Şekil 3.8. Ray Tasarımı Üstündeki Manyetik Alan Dağılımı	29
Şekil 3.9. H-formulasyonda Denklemlerin Kurulması	29
Şekil 3.10. Deneyde Kullanılacak Ray Düzeneği.....	31
Şekil 3.11. Dikey Katılığın Hesaplanabilmesi İçin Yapılan Comsol Çalışması.....	32
Şekil 3.12. Yatay Katılığın Hesaplanabilmesi İçin Yapılan Comsol Çalışması.....	34
Şekil 3.13. Gerçek Sistem ve Tasarım Arasındaki Farkı Üzerine Yapılan Comsol Çalışması	36
Şekil 3.14. Hareketli Vagon Sisteminin Üstten Görünüşü	37
Şekil 3.15. Dinamik Analiz İçin Kullanılan Yay ve Dampnerler	38
Şekil 4.1. Deney Düzeneği Mekanik Aksam.....	47
Şekil 4.2. Deney Düzeneği Vagon	48
Şekil 4.3. Deney Düzeneği Elektronik Aksam	48

Şekil 4.4. Scada Arayüzü.....	49
Şekil 4.5. dSpace Arayüzü	50
Şekil 5.1. Hibrit Yataklı Volan Sistemi.....	60

GRAFİKLER LİSTESİ

	Sayfa
Grafik 3.1. Değişik Yükseklikteki Yan Miknatısın Oluşturduğu Manyetik Alanın Yatay Bileşeni.	28
Grafik 3.2. Değişik Yükseklikteki Yan Miknatısın Oluşturduğu Manyetik Alan	28
Grafik 3.3. Değişik Yükseklikteki Yan Miknatısın oluşturduğu Hysteresis.....	33
Grafik 3.4. Değişik Yükseklikteki Yan Miknatısların Kuvvet Zaman Grafiği	33
Grafik 3.5. Yatay Hareket Sonucu Oluşan Kuvvet zaman, Kuvvet Konum Grafiği	35
Grafik 3.6. Tasarım ve Gerçek Sistem Arasındaki Fark	36
Grafik 3.7. Yatay Eksendeki Etkiye Vagonun Tepkisi.....	45
Grafik 3.8. Dikey Eksendeki Etkiye Vagonun Tepkisi.....	45
Grafik 4.1. 200mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	51
Grafik 4.2. 400mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	51
Grafik 4.3. 600mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	52
Grafik 4.4. 800mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	52
Grafik 4.5. 1000mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	53
Grafik 4.6. 1200mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	53
Grafik 4.7. 1400mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	54
Grafik 4.8. 1600mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.	54
Grafik 4.9. 1800mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	55
Grafik 4.10. 2000mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	55
Grafik 4.11. 2200mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	56
Grafik 4.12. 2500mm/s Hızda Gerçekleştirilen Deney.....	56
Grafik 4.13. 2000mm/s Hızda Gerçekleştirilen Git Gel Deneyi 1	57
Grafik 4.14. 2000mm/s hızda Gerçekleştirilen Git Gel Deneyi 2.....	58
Grafik 5.1. Volan Diski ve Elektromiknatıs Arasındaki Mesafe	61
Grafik 5.2. Volan Ekseninin Kayması Sonucu Oluşan Tork	61

1. GİRİŞ

1.1. Süperiletkenlerin Kısa Tarihi

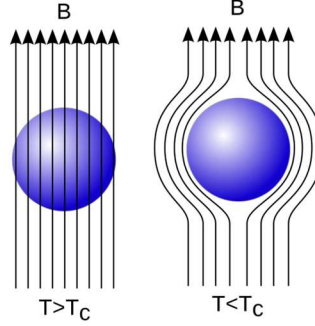
Bir maddenin süperiletken haline geçişi ilk olarak 1911 yılında Hollandalı bilim insanı H. K. Onnes tarafından yapılan deney sonucu gözlemlenmiştir (Dahl, 1984: 20; Onnes H.K., 1911: 15). 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başında aralarında Lord W.T. Kelvin'in de bulunduğu birçok bilim insanı mutlak sıfır sıcaklığa ulaşmayı ve maddenin bu sıcaklıkta göstereceği özellikleri gözlemlemeyi planlamaktaydı. Genel kanı maddenin mutlak sıcaklıkta entalpi ve entropisinin asgari seviyeye ulaşip titreşim gibi tüm hareketlerin (Elektronların hareket de buna dâhil) duracağı yönündeydi. Var olan bu modele göre mutlak sıcaklıkta maddelerin direncinin artıp yalıtkan hale geçeceği öngörülüyordu. Mutlak sıcaklıktaki maddelerle ilgili bir diğer model ise mutlak sıcaklıkta metallerin direncinin sıfıra düşeceği yönündeydi. Bu yüzden Onnes 1911 yılında Cıvayı 4.2K sıcaklığa kadar soğutup direncin artmadığını ve aslında yok sayılabilecek kadar düştüğünü gözlemlediğinde bu ona 1913 Nobel Fizik ödülünü kazandırdı.

Bir maddenin süperiletkenlik göstermeye başladığı ortam koşulları (sıcaklık, basınç), kritik geçiş sıcaklığı, kritik basınç olarak adlandırılır. Onnes 'un çalışmaları sonucu daha birçok metal düşük sıcaklıklara kadar soğutulmuş ve süperiletkenlik durumu başka metallerde de gözlenmiştir. Kritik sıcaklığı en yüksek olan metal Niyobyumdur ve kritik geçiş sıcaklığı 9.25K'dir (Finnemore vd., 1966: 231).

Her ne kadar süperiletken maddelerin kritik geçiş sıcaklığının altında direnci sıfır kabul edilse de bu tam olarak doğru değildir. Bir maddenin öz direnci düştükçe fiziksel olarak onu ölçmek de o kadar zor olur fakat yapılan alışmalarda süperiletken maddelerin öz direncinin $10^{-18}\Omega\text{cm}$ ile $10^{-23}\Omega\text{cm}$ arasında olduğudur (Sarangi ve Chockalingam, 2005: 6). Bir karşılaştırma yapmak gerekirse öz direnci düşük olduğu için elektrik tesisatlarında kullanılan bakır kablonun öz direnci $1.68 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ kadardır. Aradaki 10^{-12} kat fark mühendislik ve daha birçok bilimsel uygulamada çok büyük bir farktır ve kritik geçiş sıcaklığın altındaki süperiletken maddelerin direnci sıfır olarak kabul edilebilir.

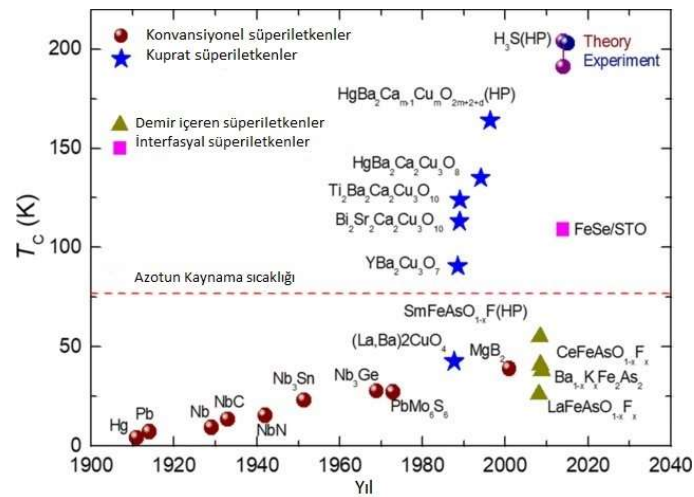
Süperiletken maddeleri diğer maddelerden ayıran bir başka özelliği ise manyetik alanı dışlamalarıdır (Meissner ve Ochsenfeld, 1933: 787). 1933 yılında W. H. Meissner ve R. Ochsenfeld'in yaptıkları araştırmalara göre kritik geçiş sıcaklığın altındaki süperiletken maddeler buldukları ortamdaki manyetik alanı dışlamaktadırlar. Bu etkiye Meissner etkisi denmiştir. Bu çalışmalar farklı manyetik alanlar içinde devam etmiştir ve sonunda manyetik

alan güçlendikçe süperiletken maddenin manyetik alanı tamamen dışlayamadığı gözlemlenmiştir. Süperiletkenlerin manyetik alanı dışlama özelliğini kaybettiği değere ise kritik manyetik alan denilmiştir.



Şekil 1.1. Meissner etkisi: Kritik geçiş sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda süperiletken maddeler maruz kaldıkları manyetik alanı dışlarlar.

Her ne kadar süperiletken maddelerin keşfi 20. yüzyılın başlarında olsa da, bu alandaki çalışmalar 1980' li yıllardan sonra hız kazanmıştır. Önceleri süperiletken malzemeyi kritik sıcaklığın altına soğutmak için sıvı helyum kullanılıyordu. 1986 yılında Bednorz ve Müller La-Ba-Cu-O bazlı bir seramiğin 30K sıcaklığında süperiletken duruma geçtiğini gözlemlemesiyle yüksek sıcaklık süperiletkenler konusunda çalışmalar hız kazandı (Bednorz vd., 1986: 555). Daha sonraları Chu ve ekibi, Bednorz ve Müller ekibinin çalışmalarını daha ileriye taşıdı. Yapılan çalışmalara göre lantanyum yerine itriyum kullanıldığında 92K gibi daha yüksek kritik geçiş sıcaklığına sahip süperiletkenler elde edilebiliyordu ve şu an günümüzde ticari olarak da kullanılan YBCO süperiletkenleri ilk defa bu şekilde ortaya çıktı (M. K. Wu vd., 1987: 908).



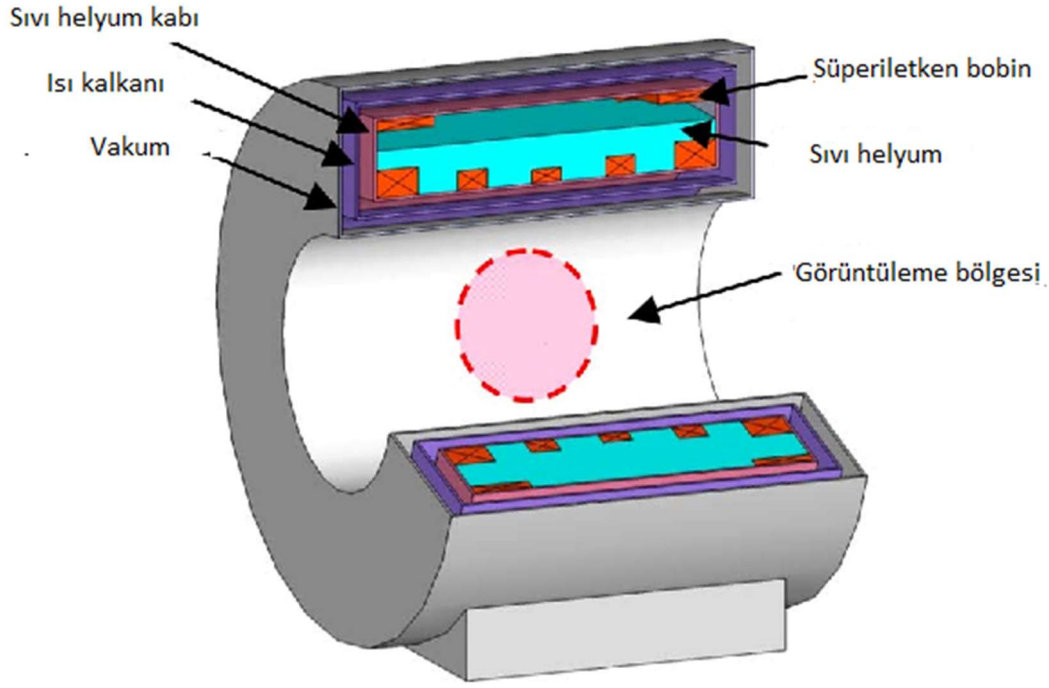
Şekil 1.2. Yıllara göre keşfedilen süperiletkenlerin kritik sıcaklıkları. Konvansiyonel süperiletkenler element veya niyobyum elementinin oluşturduğu bileşikler, Kuprat süperiletkenler bakır oksit içeren süperiletkenlerdir

Kaynak: (Duan vd., 2019: 53).

Bu tarihten sonra süperiletken konusundaki çalışmalar oldukça hız, zira YBCO seramiğinin süperiletkenlik haline geçmesi için sıvı azotla soğutulması kâfiydi. En son yapılan çalışmalarla 250K kritik sıcaklığa sahip süperiletkenler bulunmuş olsa da yüksek basınç altında süperiletkenlik gösterdikleri için günümüzde hala daha YBCO tipi süperiletkenler daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Drozdov vd., 2019: 528). Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfinden itibaren süperiletkenlerle birlikte kriyostatlar üzerine çalışmalar da hız kazandı. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfiyle birlikte yapılan çalışmaların önemli bir bölümü, kritik sıcaklığı daha yüksek olan süperiletkenler bulmak üzerinedir. Her ne kadar günümüz kriyostat teknolojisiyle süperiletkenler 24 saat kritik sıcaklığın altında süperiletken halde tutulabilse de gelecekte basit bir soğutma döngüsüyle kritik sıcaklığa ulaşılabilir ve çok daha uzun süre süperiletken halde kalabilir.

Günümüzde süperiletkenler elektrik aksamı, mekanik aksam veya bunların hibriti olacak şekilde üç değişik şekilde kullanılabilir. İsminden de anlaşılacağı üzere süperiletkenlerde elektrik direnci önemsenemeyecek kadar azdır. 1911 yılında Onnes tarafından ilk defa süperiletken ilk bulunduğu, cıva numunenin direnci süperiletken hale geçince 0.08Ω 'dan $3 \times 10^{-6} \Omega$ civarına düşmüştü. Onnes bu direnci ölçmek için numuneye verilen akımı ve voltaj düşüşünü kullanmıştı. Her ne kadar bu metotla direncin sıfıra yakın bir değere kadar düştüğü kesin olarak ölçülebilse de, çok düşük dirençleri ölçmek için çok kullanışlı bir metot değildir. Yıllar içinde yeni ölçüm teknikleri de gelişmiştir. Bunlarda biri de süperiletken malzeme ile kapalı bir devreye akım vermek ve zaman içinde bu akımın ne kadarının kaybolduğunun ölçülmesidir. Yapılan çalışmalarda değişik bileşenli süperiletkenlerin değişik öz direnci olduğu görülse de genel olarak süperiletkenlerin öz direnci $10^{-18} \Omega \text{ cm}$ 'den daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer mühendislik uygulamaları açısından sıfır olarak kabul edilebilir.

Süperiletkenlerin yok sayılabilecek iç dirençlerinden ötürü elektrik aksamı olarak birçok alanda kullanılır bunlardan bazıları düşük dirençli devre elemanı veya MRI makinelerinde mıknatıs olarak kullanılırlar. Manyetik alanı dışlama özellikleri sayesinde, MRI makinelerinde aynı manyetik alanı oluşturmak için mıknatıs yerine kullanıldıklarında makinenin 20% daha ufak boyutlarda olabileceği yapılan çalışmalar sonuna görülmüştür (Yamamoto vd., 2014: 2). Bu da MRI gibi makinelerin boyutu düşünüldüğünde yer kazancı açısından oldukça önemlidir. Ayrıca Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) ve onun en büyük parçacık çarpıştırıcısı Hadron Çarpıştırıcısı başta olmak üzere birçok parçacık çarpıştırma merkezinde de süperiletken mıknatıslar, atom altı parçacıkların ivmelendirilmesinde kullanılır.

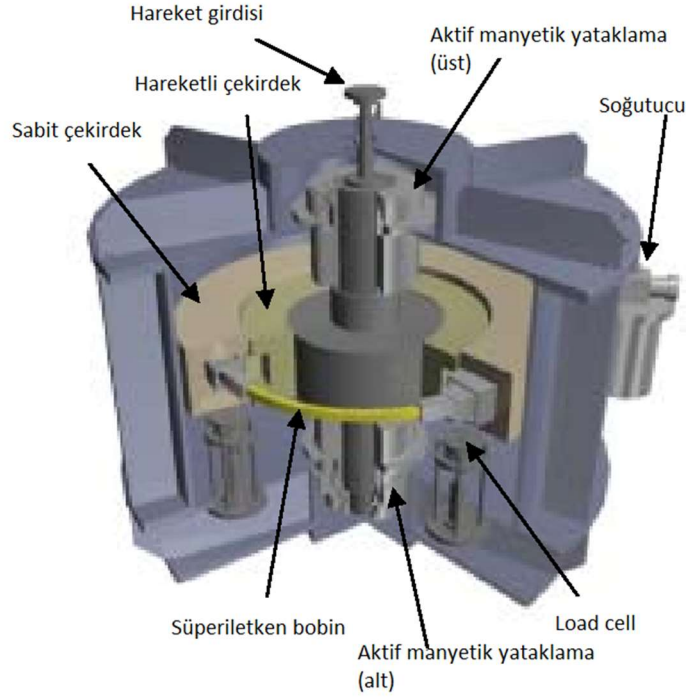


Şekil 1.3. 0.5 T büyüklüğünde manyetik alan oluşturabilecek süperiletken mıknatlara sahip bir MRI makinesinin kesit görüntüsü

Kaynak: (Yamamoto vd., 2014: 2).

Süperiletkenler, kullanıldıkları makinelerin içinde mekanik aksam olarak da kullanılabilirler. Mekanik aksam olarak kullanıldıklarında, genellikle Meissner etkisi ve bu etkiye bağlı olarak ortaya çıkan mükemmel dia manyetiklik, işlevsellik olarak tasarımlarda kullanılır. Süperiletkenlerin mekanik aksam olarak kullanıldığı makineler genel olarak Sc-Maglev trenler, süperiletken manyetik yataklı rulmanlar, manyetik dişliler şeklindedir. Burada süperiletkenler temassız yataklama ya da temassız güç aktarım elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Sc-Maglev trenler fiyat olarak çok uygulanabilir olmasa da dünyanın değişik yerlerinde son zamanlarda rağbet görmektedirler. Bunların en çok bilineni ise Japonya'nın yüksek hızlı trenleridir (Shinkansen). Süperiletkenler ve süperiletkenlerin kullanıldığı manyetik yataklama gün geçtikçe birçok kullanım alanı bulmaktadır. Bunların en başında gelen neden ise konvansiyonel rulman ve yataklama teknolojileri ile ulaşılamayacak hızlara manyetik yataklama ile ulaşılabilmesidir. 1992 yılında yapılan bir çalışmada süperiletken manyetik rulmanda 520 000 devir/dakika hız rekoru kırılmıştır (Ma vd., 2003: 4989; Xu vd., 2016: 3). Bu tip yataklamanın tercih edilmesinin bir başka nedeni ise temas olmamasından dolayı aşınma ve buna bağlı arızaların da olmamasıdır (Y.-C. Wu ve Jian, 2015: 5746). Bu yüzden günlük uygulamalarda olmasa da, bakım onarım işlerinin kolayca yapılamayacağı uzay çalışmaları veya bakım onarım çalışmalarının oldukça maliyetli olduğu rüzgâr tribünü gibi alanlarda kullanılmaktadır. Her ne kadar maliyet olarak pahalı olsa da

süperiletken manyetik dişliler sayesinde güç aktarımı temassız olarak yapılabilir, bu sayede temasa bağlı mekanik aşınmalar, gürültü ve metal yorgunluğu ortadan kaldırılabilirken yağlama gereksinimi olmadığı için viskoz sürtünmeye bağlı kayıplar da azaltılır ve makinenin toplam verimi de artar.

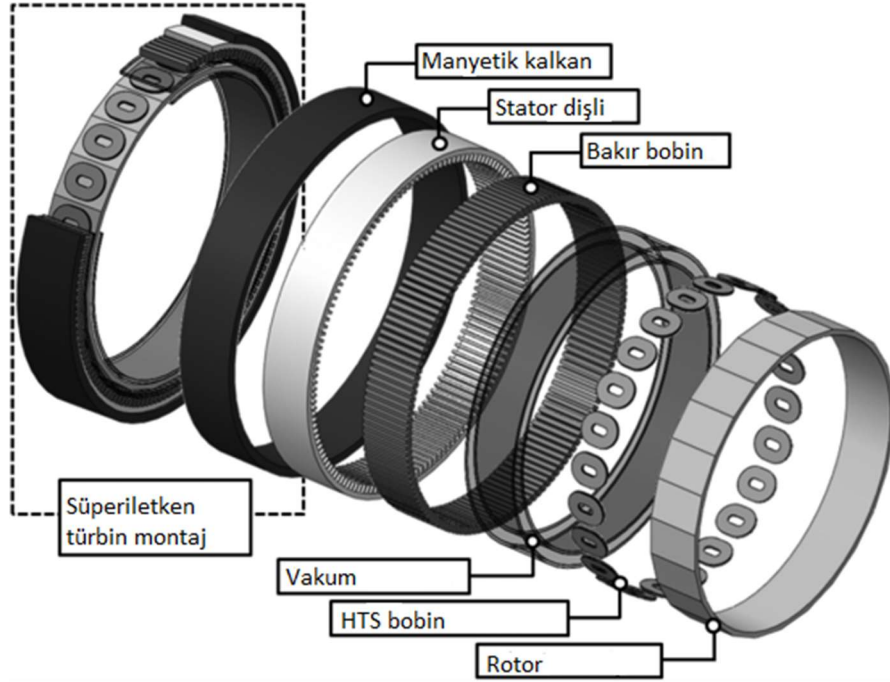


Şekil 1.4. 50 kWh enerji depolama kapasitesine sahip süperiletken volan sisteminin kesit görüntüsü

Kaynak: (Yamauchi vd., 2006: 484).

Süperiletkenlerin hibrit olarak kullanıldığı makineler ise süperiletken motorlar ve volanlar olarak kısaca özetlenebilir. Süperiletken motorlar yapı olarak AC/DC motorlara çok benzer. AC/DC motorlardaki bakır kablo yerine dirençsiz süperiletken kablo kullanılır ayrıca mükemmel diyamanyetiklik sayesinde normal motora göre aynı tork ve hız daha ufak süperiletken motorlarla elde edilebilir (Nam vd., 2019: 3). Normal volanlar, atalet momentleriyle doğru orantılı olarak, kinetik enerjiyi kısa süreli olarak depolamada kullanılır. Günümüzde özellikle hibrit ve elektrikli arabalarda frenleme sistemi, volan sayesinde enerjinin kazanımıyla yapılır. Ancak bu kinetik enerji yeniden elektrik enerjisine dönüştürülmek istenirse kazanım 100% olamayacağı için kayıp olacaktır. Süperiletken volanlar da ise kinetik enerji elektrik enerjisine daha verimli dönüştürülür ve daha az kayıp yaşanır. Tasarım açısından süperiletken rüzgâr türbinleri de süperiletken motorlara benzerler. Süperiletken motorlardan farklı olarak motorlarda elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülürken, türbinlerde tam tersi yaşanır. Önceleri süperiletken rüzgâr türbinleri sadece kâğıt üzerinde tasarım olarak varken

2019 yılında ilk süperiletken rüzgâr türbini Danimarka’da çalışmaya başlamıştır (Bergen vd., 2019: 125006).



Şekil 1.5. 10 MW elektrik enerjisi üretebilecek kapasiteli süperiletken yataklama kullanılmış bir rüzgâr türbini tasarımı

Kaynak: (Sung vd., 2013: 5201805).

Temassız yataklama ve güç aktarımı süperiletken kullanılmadan kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıslar kullanılarak daha ucuza yapılabilir. Ancak bu sistemin daha ucuza kurulabilmesi onun daha kolay veya daha iyi olduğu anlamına gelmez. Öncelikle kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıslarla kurulan sistemler aktif kontrol gerektirmektedir. Süperiletken kullanılan yataklama ve güç aktarımında ise buna gerek yoktur. Ayrıca kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıslarla kurulan sistemler güvenilirlik açısından süperiletkenlerin gerisinde kalırken bu sistemlerin çalışması için harici bir güç kaynağı gereklidir ve süperiletkenler bu sistemlere göre daha çevrecidir. Bütün bunlara ek olarak manyetik güç aktarımında, daha fazla hız oranı elde edilebilir ve değişik hız oranlarına daha hızlı şekilde ulaşılabilir (Lin vd., 2016: 3).

2. SÜPERİLETKENLER VE UYGULAMALARI

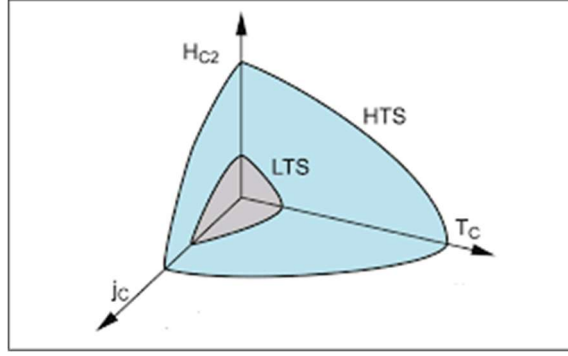
2.1. Süperiletkenlik

Süperiletkenler ve onların elektrodinamik özellikleri ilk olarak Fritz ve Heinz London kardeşler tarafından 1935 yılında öne sürdükleri denklemleri ile açıklamaya çalışmışlardır (London ve London, 1935: 71). Bir madde süperiletken hale geçtiği anda birçok fiziksel değişiklik meydana gelir. Bunların başında maddenin iç direncinin sıfıra yakın bir değere düşmesidir. Ayrıca süperiletken maddeler bir manyetik alana maruz kaldıklarında bu manyetik alanı dışlarlar. İçinde buldukları manyetik alanı dışlayabilmeleri için süperiletken maddelerin yüzeyinde perdeleme akımları oluşur ve bu akımların oluşturduğu manyetik alan, süperiletkenin içinde bulunduğu manyetik alanı dışlar.

Her ne kadar bu akımlar yüzeyde oluşsa da bu akımların süperiletkende ulaştığı bir derinliği vardır ve buna London nüfuz derinliği denir. Bu derinlik, süperiletkenlerin çeşidine göre değişse de yaklaşık olarak 100 nm civarındadır ($10^{-7} m$). Perdeleme akımlarının olduğu derinlikte manyetik alan tam olarak dışlanmaz. Yüzeyden derine doğru gittikçe manyetik alan daha fazla dışlandıği gözlemlenmiştir. Bu fenomen London nüfuz derinliği olan kısımda gerçekleşir, süperiletkenin iç bölgesinde manyetik alan tam olarak dışlanır.

2.2. Süperiletkenler ve Özellikleri

Süperiletken maddeler sadece belli fiziksel şartlar (sıcaklık basınç vb.) altında süperiletken hale dönüşürler, bu şartlara ise kritik şartlar denir. Genel olarak mühendislik uygulamalarında kullanılan YBCO tipi süperiletkenler atmosferik basınç altında süperiletkenlik haline geçebilse de bu bütün süperiletkenler için aynı değildir. Örneğin atmosferik basınç altında süperiletkenlik göstermeyen bakır, demir, gümüş, kobalt, nikel gibi bazı metaller yüksek basınç altında süperiletken olabildikleri gözlemlenmiştir. Maddenin süperiletken hale geçebildiği sıcaklığa, kritik sıcaklık (T_c), Manyetik alana, kritik manyetik alan (H_c) ve akıma yoğunluğuna, kritik akım yoğunluğu (J_c) denir. Bu özellikler, süperiletkenden süperiletkene değişmektedir ve süperiletkene özeldir.



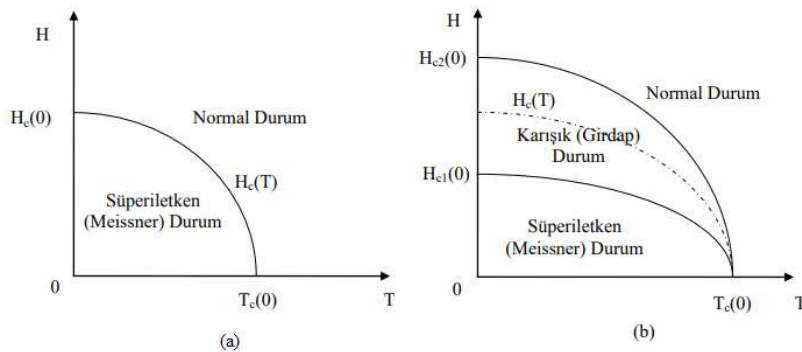
Şekil 2.1. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin süperiletkenliğe geçiş eğrileri. Söz konusu süperiletkenin sıcaklığı, akım yoğunluğu ve manyetik alanı, grafikteki iç bölgede kalıyorsa süperiletken özelliğini gösterir

Kaynak: (Bussmann-holder ve Keller, 2019: 1).

Kritik akım yoğunluğu, süperiletkenin yapısıyla birlikte ebatlarına göre de değişir. Süperiletkenlik özelliği gösteren bir maddeye kritik akım yoğunluğundan daha yüksek bir akım verilirse süperiletkenlik özelliklerini kaybeder. Bunun nedeni süperiletkenin maruz kaldığı manyetik alan nedeniyle süperiletkenin yüzeyinde oluşan perdeleme akımlarının kritik akım yoğunluğunu geçmesidir. Dolayısıyla süperiletken üzerinde akım olup olmaması onun kritik manyetik alan değerini de etkilemektedir. Süperiletkenin sıcaklığı kritik sıcaklık eşiğinden fazla olursa yine aynı şekilde süperiletken özelliğini kaybeder.

2.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletkenler kritik manyetik alan değerinden daha küçük manyetik alana maruz kaldıklarında süperiletkenliklerini korurlar. Kritik manyetik alandan daha büyük manyetik alana maruz kaldıklarında ise süperiletkenliklerini kaybederler. Ancak Niyobyum (Nb) ve Vanadyum (V) temelli süperiletkenler için daha karmaşıktır. Süperiletkenleri I. Tip ve II. Tip olmak üzere iki ayrı tipe ayırabiliriz. Niyobyum ve Vanadyum elementi temelli süperiletkenler II. Tip süperiletkenlerdir, diğer tüm süperiletkenler ise I. Tip süperiletkenlerdir (Ireson, 2012: 79).



Şekil 2.2. (a) Tip I süperiletkenler kritik eşik aşılması durumunda süperiletkenlik özelliklerini kaybeder. (b) Tip II süperiletkenlerde iki adet kritik manyetik alan eşiği vardır. Bunlardan

birincisi aşıldığında süperiletkenlik durumu hemen kaybolmaz ikinci eşiğe kadar kademeli bir şekilde azalır.

I. tip süperiletkenler şu ana kadar bahsetmiş olduğumuz fiziksel özellikleri göstermektedirler. Bir önceki bölümde bahsetmiş olduğumuz kritik manyetik alan kritik akım yoğunluğuna ek olarak kritik manyetik alan ayrıca süperiletkenlerin sıcaklığıyla da bağlantılıdır ve kritik manyetik alan eşiği aşıldığında süperiletkenlik özelliklerini kaybetmektedirler. Süperiletkenlik ve süperiletken olmayan hal arasındaki geçiş I. tip süperiletkenler için anidir. I. tip süperiletkenler, süperiletken durumuna geçtikten sonra maruz kaldıkları manyetik alanı perdeleme akımının olmadığı kısımda dışlanır. Nüfuz derinliğinin (~ 100 nm) ihmal edilirse süperiletkenin içindeki manyetik akı denklem 2.1'deki gibidir.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.1)$$

Burada B süperiletken üzerindeki manyetik akı yoğunluğu, μ_0 boşluğun geçirgenliği, M birim hacimdeki manyetik moment H ise süperiletkenin maruz kaldığı manyetik alanın büyüklüğüdür. $H < H_c$ durumunda süperiletkenin süperiletkenlik durumunu koruduğu göz önüne alınırsa Meissner etkisi nedeniyle $B=0$ olur, bu da bize $H = -M$ olduğunu gösterir. $H > H_c$ durumunda ise $M = 0$ olacağından $B = \mu_0 H$ olacaktır.

I. tip süperiletkenlerde ayrıca kritik manyetik alan aynı zamanda sıcaklığa da bağlıdır. Kritik manyetik alanın sıcaklığa göre olan bağlantısı denklem 2.2'deki gibidir.

$$H_c(T) \cong H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Burada $H_c(0)$, 0 K sıcaklıktaki kritik manyetik alan, T_c kritik sıcaklıktır.

II. tip süperiletkenlerde ise durum I. Tip süperiletkenlere göre farklıdır. II. tip süperiletkenlerde iki değişik kritik alan vardır (H_{c1}, H_{c2}). II. tip süperiletkenler $H < H_{c1}$ durumunda I. Tip süperiletkenler gibi mükemmel diyamanyetik özellik gösterirler ve $B=0$ durumu II. tip süperiletkenler için de geçerlidir. II. tip süperiletkenlerin maruz kaldığı manyetik alan arttırıldığında ($H_{c1} < H < H_{c2}$) süperiletkenlik özelliklerini hemen kaybetmezler. Her ne kadar I. tip süperiletkenler de $M = 0$ olsa da bu II. tip süperiletkenlerde geçerli değildir dolayısıyla $B \neq 0$ fakat $B < \mu_0 H$ olur. Bu bölgede artık meissner etkisi tam olarak gözlenmez (etkisini yitirmeye başlar) ve mükemmel diyamanyetiklik yok olur. Bu yüzden bu bölgedeki II. tip süperiletkenler karışık halde (mixed state) olduğu söylenir.

Normalde saf halleri I. tip süperiletken olmasına rağmen bazı alaşım metallere de II. tip süperiletken olabilmektedir.

Sadece II. tip süperiletkenlerde gözlemlenebilen başka bir durum ise akı saplanması olarak adlandırılan bir fenomendir. Bu durum II. tip süperiletkenlerde karışık durum olarak adlandırılan durumda (mixed state- $H_{c1} < H < H_{c2}$) olur ve bu durumun gerçekleşebilmesi için süperiletkenin kristal yapısının kusurlu olması gerekir (boşluklar, impüriteler vs). Bu durum II. tip süperiletkenler için arzu edilen bir durumdur. Akı saplanması sonu oluşan akımlar da tıpkı süperiletkenlerin yüzeyinde oluşan perdeleme akımları gibi süperiletkenin manyetik alanı dışlamasına yardımcı olur ve süperiletkenin içinde akı saplanması ile hapsolan akımlar sayesinde kritik akım yoğunluğunun (J_c) ve kritik manyetik alan (H_{c2}) düşmesine engel olurlar. Akı saplanması sayesinde II. tip süperiletkenler büyük kütleleri levite edebilirler.

2.4. Süperiletkenlerin Soğutulması

Süperiletkenler soğutulma şekline göre, manyetik alana maruz kaldıklarında gösterdikleri etkiler de farklılık gösterir. Temel olarak süperiletkenler iki farklı şekilde soğutulabilirler. Bunlar manyetik alan içinde soğutma (field cooling) ve manyetik alansız soğutma (zero field cooling'dir) (Joy vd., 1998: 11049).

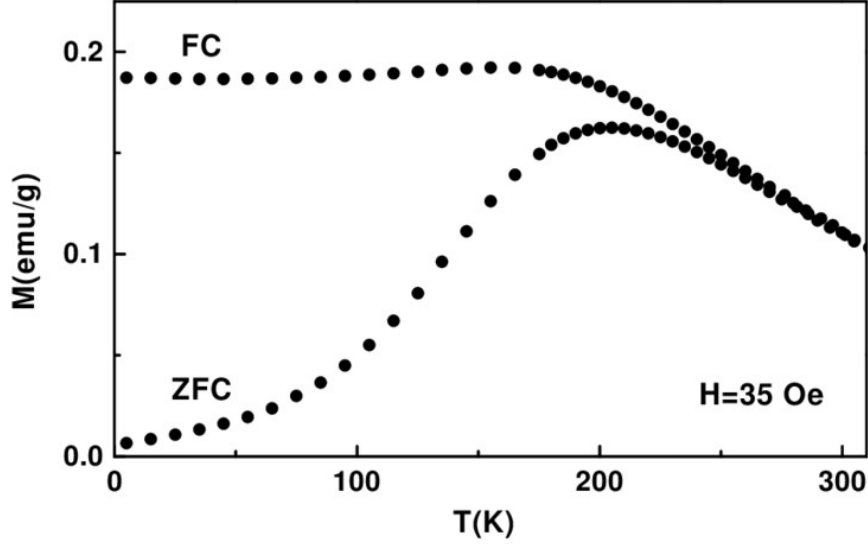
2.4.1. Field Cooling (Manyetik Alan İçinde Soğutma)

Manyetik alan içinde soğutma için $T > T_c$ ve $H=0$ da bulunan süperiletken ilk olarak manyetik alana maruz bırakılır $H < H_c(0), H \neq 0$. Süperiletken bu halde henüz süperiletken duruma geçemediği için maruz kaldığı manyetik alanı dışlayamaz. Manyetik alan süperiletkenin içinde akabilmektedir. Daha sonra süperiletken manyetik alanda bir değişiklik olmaksızın soğutulmaya başlanır ve $T < T_c$ $H < H_c(T)$ ' ye kadar soğutulur. Bu durumda süperiletkenin içinden geçen manyetik alan akımları süperiletkende hapsolür. Daha sonra $T < T_c$ olacak şekilde süperiletken maruz kaldığı manyetik alan azaltıldığında $H=0$ da bulunan süperiletken, hala süperiletkenlik özelliğini göstermektedir ve içine hapsolmuş manyetik alan akımlarını da korumaktadır. Bu haldeki süperiletken üzerinde herhangi bir manyetik alan olmasa da içinde hapsolan manyetik alan akımlarından kaynaklı mıknatıs benzeri özellik gösterir bunun da nedeni denklem 2.1'deki bağlantıda $B=0$ olmasıdır. Her ne kadar süperiletkenin maruz kaldığı alan $H=0$ olsa da $M \neq 0$ olduğundan $M=-H$ olacak şekilde süperiletkenin kendisi manyetik alan oluşturur.

2.4.2. Zero Field Cooling (Manyetik Alansız Soğutma)

Süperiletkenlerin normal halden süperiletken haline geçişinde kullanılan bir başka soğutma şekli de manyetik alansız soğutmadır. Manyetik alansız soğutmada süperiletken öncelikle manyetik alan bulunmayan bir ortamda soğutulmaya başlanır. $H = 0$ $T > T_c$ 'den

$H = 0$ $T < T_c$ 'ye kadar soğutulan süperiletken manyetik alana maruz kaldığında $H < H_c(T)$ süperiletken yüzeyinde perdeleme akımları oluşur ve herhangi bir dış manyetik alan süperiletken tarafından dışlanır.



Şekil 2.3. Manyetik alan içinde (FC) ve manyetik alansız (ZFC) soğutulmuş $BaFe_{10.4}Co_{0.8}Ti_{0.8}O_{19}$ süperiletkeninin sıcaklığa bağlı manyetizasyonu.

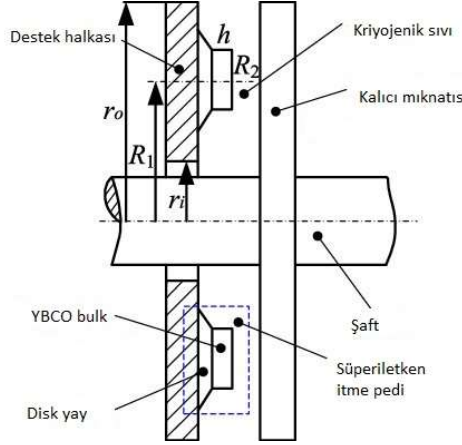
Kaynak: (Labarta vd., 2005)

Manyetik alan içinde ve manyetik alansız soğutma arasında, soğutma biçiminden kaynaklanan bazı farklılıklar bulunur. Öncelikle süperiletkenin süperiletken hale geçtikten sonra maruz kaldığı manyetik alan aynı olsada süperiletkenin gösterdiği tepki, manyetik alan içinde soğutulan süperiletkenin içinde hapsolan manyetik akımlar nedeniyle farklıdır. Manyetik alan içinde soğutulan süperiletken kendiliğinden bir miktar perdeleme akımı oluşturacağı için tamamen aynı ebat ve özellikteki iki süperiletken, manyetik alansız soğutulanın kaldırma (levitasyon) kuvveti, manyetik alan içinde soğutulana göre daha yüksektir. Herhangi bir deney yapılırken, eğer süperiletken üzerinden data (veri) alınacaksa, manyetik alan içinde soğutulan süperiletken soğutulurken, manyetik alansız soğutulan süperiletken ise ısıtılırken data alınır. Manyetik alansız soğutulmuş süperiletken her zaman itme kuvveti oluştururken manyetik alan içinde soğutulmuş süperiletken itme kuvvetinin yanında çekme kuvveti de oluşturabilir.

2.5. Manyetik Yataklama

Herhangi bir makine içinde birbirinden farklı hızlarda hareket eden iki ya da daha fazla aksam bulunuyorsa yataklama yapılır. Konvansiyonel yataklama teknolojilerinde (rulman ve journal yataklar) hareket ister lineer ister de bir eksen etrafında dönme yataklama yapılır. Mekanik yataklarda hareketin yönünden bağımsız olarak her daim temas olmaktadır. Bu temas

neticesinde yük aktarımından kaynaklı yüzey deformasyonları, sürtünmeye bağlı yüzey aşınmaları gürültü vb. gibi birçok etki de beraberinde gelir. Manyetik yataklamamanın konvansiyonel yataklamaya göre en büyük artısı temasın olmamasıdır bu sayede sürtünme olmayacağı için sürtünmeye bağlı aşınmalar gürültü ve parça ömrünün kısılmasının da önüne geçilir.



Şekil 2.4. Süperiletken manyetik yataklama ile oluşturulmuş trust yatağı

Kaynak: (Xu vd., 2016: 3).

Elektromanyetik yataklama mekanik yataklamaya göre daha pahalı olmakla birlikte aktif kontrol sistemini de gerektirir. Bu da hem tasarım hem de bakım onarım maliyetleri göz önüne alındığında mekanik yataklamaya göre sistemin çok daha pahalı olmasına neden olur ve pratik olarak çok da kullanılan bir yataklama tipi değildir.

Süperiletken yataklama ise tasarım maliyeti olarak hem mekanik hem de elektromanyetik yataklarla kıyaslandığında çok daha pahalıdır. Fakat Meissner etkisi ve mükemmel diyamanyetik özelliklerinden ötürü süperiletken manyetik yataklar elektromanyetik yataklar gibi aktif kontrol sistemi gerektirmezler. Bu da süperiletken yatakları elektromanyetik yataklardan daha kullanışlı hale getirir.

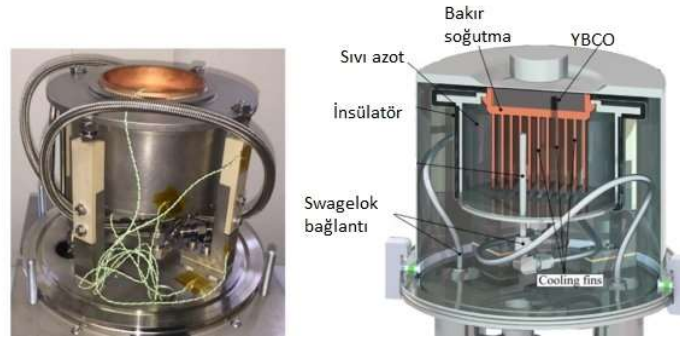
2.6. Maglev Trenler

Maglev trenler prensip olarak manyetik yataklardan çok da farklı değildir. Konvansiyonel trenlerde güç trenlerin tekerine iletilir ve teker ve ray arasındaki sürtünme sayesinde hareket sağlanır. Maglev trenlerde ise ray ve tren arasında mekanik temas bulunmadığından traksiyon kuvveti (tractive force) olamaz. Maglev trenler basitçe lineer manyetik yatak olarak özetlenebilir. Raylarda manyetik alanın oluşmasını sağlayan parçalar bulunur. Trenin gövdesinde ise süperiletken hücreler bulunur. Tren gövdesindeki süperiletkenler raylarda oluşan manyetik alanı dışlarlar ve levitasyon oluşur.

Yine konvansiyonel trenlerden farklı olarak ray ve tren arasında mekanik temas ve dolayısıyla sürtünme olmadığı için hareket farklı şekillerde sağlanır.

2.7. Kriyostatlar

Her ne kadar son yıllarda süperiletkenler üzerine birçok araştırma yapıldı bir çok yeni süperiletken bulunmuş olsa da mühendislik alanında kullanılan süperiletken maddelerin süperiletken hale geçişleri kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleşmektedir (~92K). Bu sıcaklığa ulaşmak için genel olarak kaynama sıcaklığı 77K olan sıvı azot kullanılır. Azot hem atmosferde bol olarak bulunduğu için (78% hacmen) hem de insan vücuduna zarar vermediğinden rahatça kullanılır. Ancak sıvı azot özel olarak muhafaza edilmezse çok kısa süre içinde oda yüksek sıcaklıklara ulaşır bu da süperiletken malzemenin, süperiletken özelliğini kaybetmesi anlamına gelir.



Şekil 2.5. Süperiletken yataklama uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış bir kriyostat

Kaynak: (Neunzig vd., 2019: 7).

Çok düşük sıcaklıktaki malzemelerin ısı yalıtımı kriyostat (cryostat) adı verilen özel kaplarla yapılır. Kriyostat kelimesi Yunanca kryo soğuk ve stat statik, sabit kelimelerinin birleşmesiyle oluşmuştur. Sıvılaştırılmış gazların düşük sıcaklıkta tutulması için kullanılan kriyostatlara Dewar da denir. Dewar ismini kriyostatlar üzerine ilk alışan bilim adamlarından bir olan Sir James Dewar'dan almaktadır. Dewar'ın tasarımı, arasında vakumlanmış boşluk bulunan iç içe geçmiş iki cam kaptan oluşmaktaydı (Soulén, 2019: 32).

Günümüzde kriyostatlar tasarım açısından ilk örnekleriyle ortak özellikleri olsa da birçok alanda değişmiştir. Günümüz kriyostatları içine onulan sıvı azotu 24 saatten daha uzun süre sıvı halde tutabilirken, soğutulması gereken süperiletkeni de aynı zamanda süperiletken halde tutabilmektedir. Soğutulan süperiletken direkt olarak sıvı azot ile temas halinde değildir bu da kriyostatın süperiletkenle temas halinde olan yüzeylerinde ısı direncinin çok düşük diğer yüzeylerde ise çok yüksek olduğunu gösterir. İlk dewarda kullanılan vakum modern kriyostatlarda da olmakla birlikte ışıma ile ısı kazanımını önlemek amacıyla ekstra yalıtım

katmanları da bulunmaktadır. Kriyostatlar, içine konulan sıvı azotun buharlaşma sonucu gaza dönüşmesiyle oluşacak basıncı destekleyecek şekilde tasarlanmıştır.

2.8. Histerezis

Süperiletkenlik haline geçmiş bir süperiletken manyetik alana maruz kaldığında yüzeyinde perdeleme akımları oluşur ve manyetik alan süperiletkene nüfuz etmeden dışlanır. Ancak bu manyetik alan ortadan kaldırıldığında süperiletkenin manyetik alanı dışlama mekanizması hemen yok olmaz. Süperiletkenin yüzeyindeki akımlar yavaşça sönümlenir. Mevcut manyetik alandaki değişim ve bunun süperiletken üzerindeki yansıması arasındaki gecikmeye histerezis denir. Bir süperiletkene sabit olmayan bir akım verildiğinde, değişen akımlar da histerezise neden olur (Edmond ve Firth, 1992: 3813; Schweitzer vd., 1967: 296).

Kısacası histerezis süperiletkenin maruz kaldığı akım ve manyetik alanın değişiminin sonucudur ve değişimin şiddeti histerezisin de ne kadar kuvvetli olduğunu etkiler.

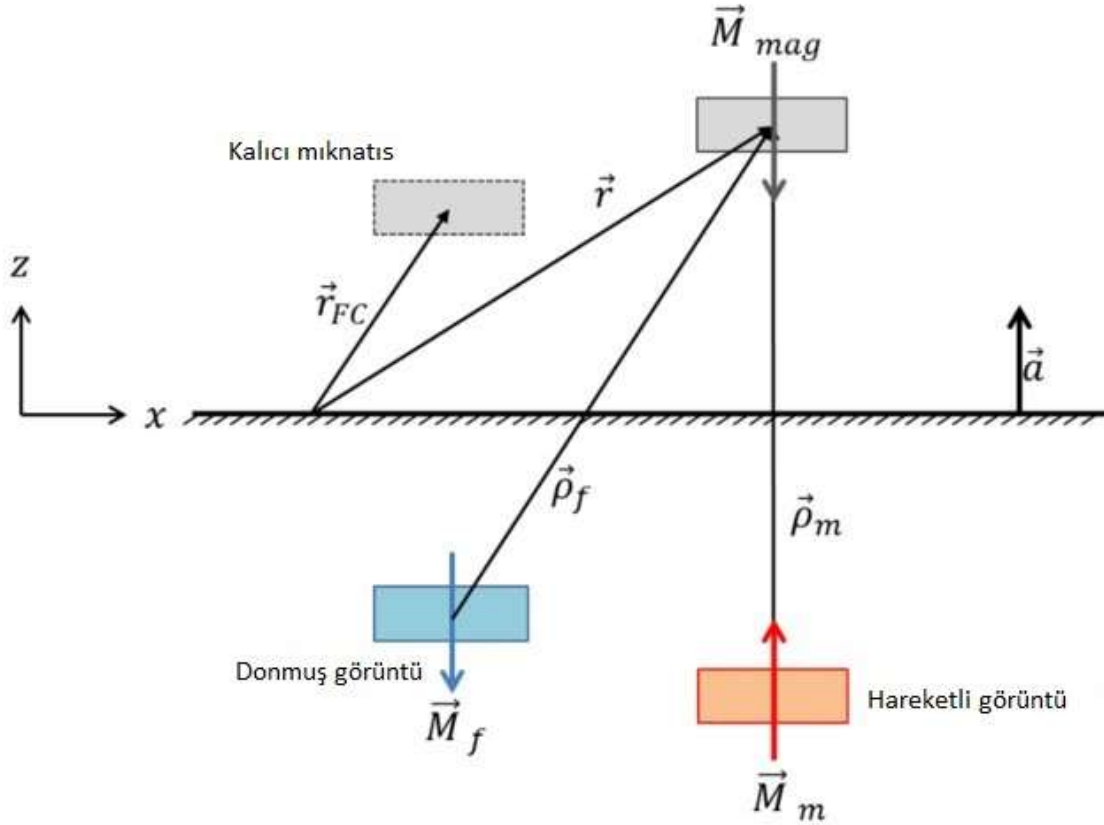
Süperiletken üzerindeki manyetik alanı ve akımı değiştiren bütün etkenler histerezisi tetikler. Örneğin kalıcı mıknatıs ve süperiletken çiftinden oluşan bir levitasyon düzeneğinde kalıcı mıknatısa herhangi bir yönde kuvvet uygulanıp hareket ettirildiğinde süperiletkenin üzerindeki etkisi de değişir. Süperiletken ve mıknatıs arasındaki mesafe korunup mıknatıs yanal yönde hareket ettirilse bile, dipolün süperiletken üzerindeki merkezi değiştiğinden histerezis meydana gelir. Histerezis ne kadar oran olarak küçük görünse de yüksek akım değişikliklerinin veya tekrar eden hareket döngülerinin olduğu uygulamalarda kümülatif olarak birikir ve ihmal edilmemesi gerekir.

2.9. Süperiletken Manyetik Levitasyonun Modellenmesi

Süperiletken manyetik levitasyonun modellenmesinde birçok yöntem mevcuttur. Bunların her birinin birbirlerine göre değişik avantaj ve dezavantajları vardır.

2.9.1. Donmuş Görüntü Modeli (Frozen Image Model)

Süperiletken levitasyonda en çok kullanılan modellerden biri donmuş görüntü modelidir. Bu modelde denklemlerin kurulması basit olduğu için oldukça sık kullanılan bir modeldir. Ne var ki bu modelde histerezis analizi yapılamaz ve histerezis yok varsayılır. Bu modellemede basitçe kalıcı mıknatıs ve süperiletken çiftinin resmi çekilir (o anki donmuş görüntüsü) üzerinden dipollerin yeri belirlenir.



Şekil 2.6. Donmuş görüntü modelinde +z deki bir kalıcı mıknatısın görüntüsü -z Deki süperiletkende oluşur ve modelleme dipollerin etkileşimi üzerinden yapılır

Kaynak: (Liu vd., 2016: 9).

Donmuş görüntü modeli oluşturulurken süperiletkenin yüzeyi referans eksen olarak alınır ve kalıcı mıknatısın dipolününün simetriği süperiletken içinde oluşur. Sistemin yay katığı hesaplanırken dipol dipol etkileşimine göre hesaplar yapılır. Histerezis daha önceden de bahsetmiş olduğumuz üzere sistemdeki değişimin süperiletken üzerindeki etkisinin gecikmesinden kaynaklanır. Donmuş görüntü modelinde ise kalıcı mıknatısın herhangi bir hareketi süperiletken dipolüne de eş zamanlı olarak yansıdığı için histerezis gözlemlenemez -

Dipollerin etkileşiminden oluşan potansiyel enerji denklemi, denklem 2.3'deki gibidir.

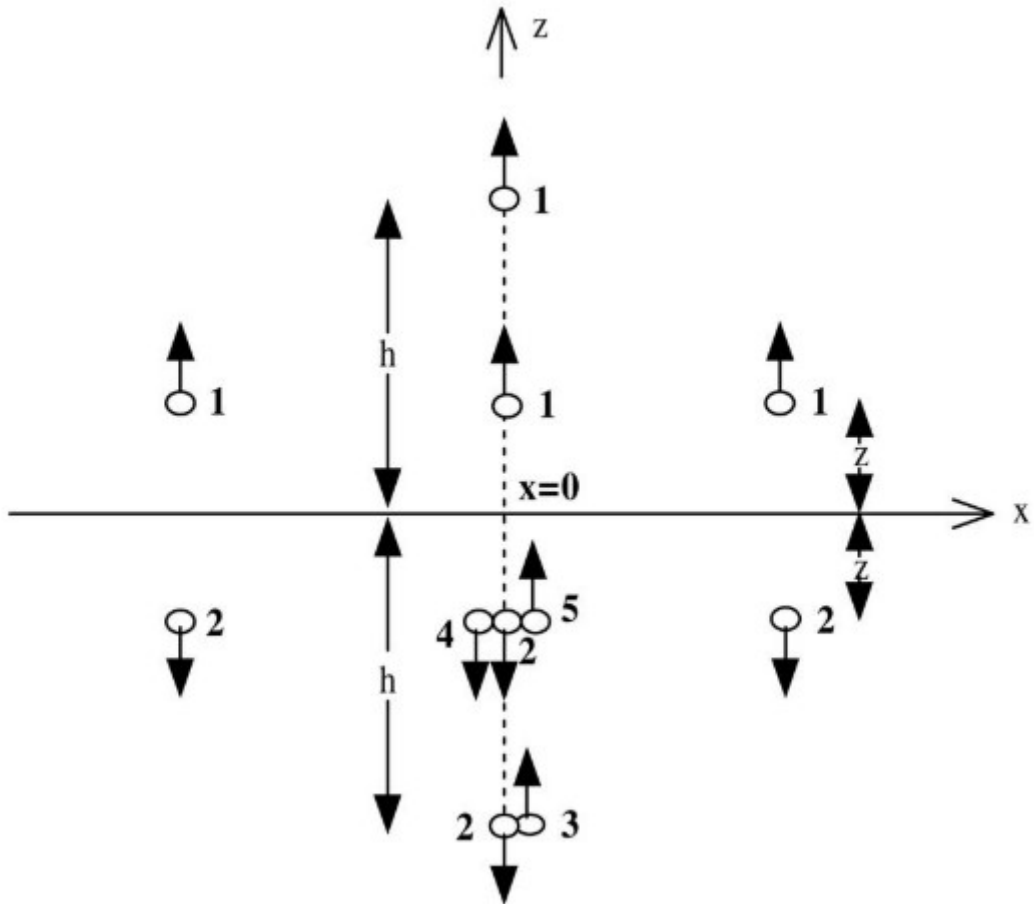
$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{\vec{m}_{mag}\vec{m}_m}{r^3} - \frac{3(\vec{m}_{mag}\vec{r})(\vec{m}_m\vec{r})}{r^5} \right] \quad (2.3)$$

Donmuş görüntü modeli oluşturulurken manyetik alan içinde ve manyetik alansız soğutma farklı modellenir. Manyetik alansız soğutmada kalıcı mıknatısın dipolünün simetriği süperiletken içindedir ve kalıcı mıknatısın hareketine göre süperiletkenin dipolü de hareket eder. Manyetik alan içinde soğutmada ise soğutma esnasında kalıcı mıknatısın pozisyonuna göre süperiletken içinde ayrı bir dipol oluşur. Her ne kadar diğer dipol kalıcı mıknatısın

hareketiyle hareket etse de soğutma esnasında oluşan dipol sabittir ve katılık hesabı yapılırken bu üçüncü dipol de hesaba katılmalıdır.

2.9.2. Gelişmiş Donmuş Görüntü Modeli (Improved Frozen Image Model)

Her ne kadar histerezisi ön göremese de donmuş görüntü modeli levitsayonu başarılı bir şekilde çok karışık işlemlere gerek kalmadan modelleyebildiği için başarılı bir matematiksel model olarak kabul edilebilir. Modelin en büyük eksi yanı ise histerezisi inceleyememesidir. Gelişmiş donmuş görüntü modelinde ise daha önceden tanımlanan dipollere ek olarak bir de hız dipolü modele eklenir (W. M. Yang vd., 2003: 141). Hız zaman bağlı bir büyüklük olduğu için modelin içine artık histerezis de girer. Ancak burada hız ortalama olarak bir dipol değerine atandığından histerezis değerleri bir döngü içinde hata payıyla öngörülebilir.



Şekil 2.7. Gelişmiş donmuş görüntü modeli

Kaynak: (Y. Yang ve Zheng, 2007: 113922).

Bu model ile tam olarak kesin sonuçlar hala elde edilemese de donmuş görüntü modeline göre daha yakın sonuçlar elde edilir.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi} \left(\frac{3z}{r^5} \mathbf{i} + \frac{2z^2 - x^2}{r^5} \mathbf{k} \right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 manyetik alan dağılımının, kalıcı mıknatısın dipolüne bağlı formülüdür. Formül buraya kadar donmuş görüntü modeli ile eşittir. Ancak donmuş görüntü modellerinden farklı olarak hızlar da dipol olarak denkleme dâhil edilir. Dipollerin işaretine göre ve hız vektörünün doğrultusuna göre

$$m_4 = -a_1(h - z) + a_2(z - z_0) \quad (2.5)$$

$$m_5 = (c_1 - c_2)x_m - c_3x \quad (2.6)$$

a ve c katsayıları ve işaretleri değişir. Elde edilen dipoller kuvvet denklemine eklenince her bir dipolün oluşturduğu manyetik kuvvet hesaplanabilir.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (2.7)$$

2.9.3. Kritik Durum Modeli (Critical State Model)

Bu model II. tip süperiletkenlerin akı saplanması üzerine kurulmuş bir modeldir ve düşük sıcaklık süperiletkenleri, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde alternatif akım kayıplarını analiz etme de kullanılır. Bu modelde süperiletkenin herhangi bir noktasında o an maruz kaldığı manyetik akımla bağlantılı kritik akım yoğunluğu olduğu varsayılmaktadır. Donmuş görüntü modelinde dipoller üzerinde modelleme yapılırken kritik durum modelinde akımlar göz önüne alınır. Hysteresis analizinde oldukça başarılı olan bu model daha çok II. tip süperiletkenlerin modellenmesinde kullanılır (Bean, 1964: 31; Prigozhin, 2014: 7).

2.9.4. H-Formülasyon (H-Formulation)

Süperiletkenlerin modellenmesinde çokça kullanılan bir başka yöntem de H-formülasyondur (Shen vd., 2020: 100403). H-formülasyon özünde bir sonlu elemanlar metodudur. Diğer metotlarda kurgulanan denklemler analitik veya sayısal (numerik) olarak çözülebilirken H- formülasyon ise sadece sayısal olarak çözüm sunabilir.

Bu yöntemde Faraday'ın elektromanyetizma denklemleri kullanılır. Faraday'ın elektromanyetizma üzerine denklemi:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.8)$$

Şeklinde yazılabilir

Süperiletkenlerin lineer olmayan iç öz dirençleri ise:

$$\rho = \frac{E_0}{J_c} \left| \frac{\mathbf{J}}{J_c} \right|^{n-1} \quad (2.9)$$

Şeklinde yazılabilir

Manyetik alan H denklemlere bir değişken gibi eklenebilir. Ayrıca Faradayın denkleminde süperiletken göreceli manyetik geçirgenliği olan bir parça olarak tanıtılır ($\mu_r = 1$). Böylece Faraday'ın denklemi:

$$\frac{\partial(\mu_0\mu_r\mathbf{H})}{\partial t} + \nabla \times (\rho\nabla \times \mathbf{H}) = 0 \quad (2.10)$$

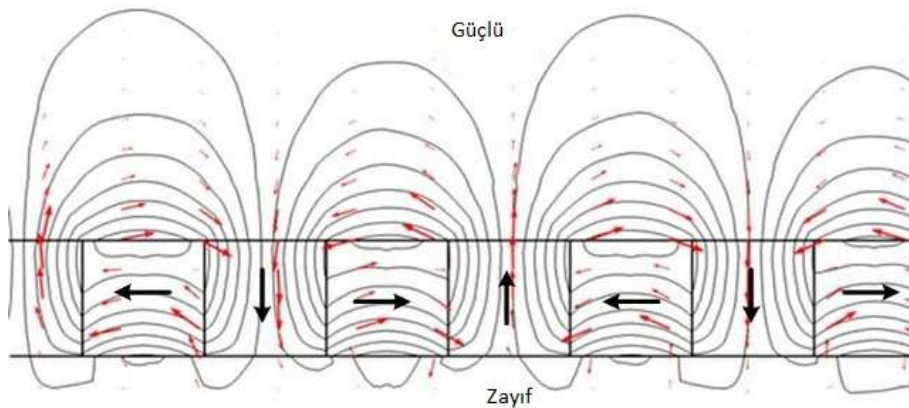
Şekli alır.

Akı yoğunluğu ve manyetik alan arasındaki ilişki de Ampere yasası kullanılarak çözülebilir.

Sonuçta ortaya çıkan denklem sonlu elemanlar metodu ve ile çözülebilir. Bu yöntem diğer yöntemlerden farklı olarak hiçbir zaman analitik olarak çözülemeyeceğinden hata payı her zaman vardır ancak bu hata payı sonlu elemanlar metodunun içindeki dinamiklerle (kurulan ağların, boyu ve sayısı) ayarlanabilir. Burada çözüme ne kadar yakın bir sonuç elde edileceği ve çözümün ne kadar süre içinde elde edileceği optimize edilmelidir.

2.10. Halbach Dizilimi (Halbach Array)

Mıknatısların dizilimi ve bunların sonucunda oluşan manyetik alan üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu alıŐmalar sonucu Halbach diziliminin (Halbach Array) manyetik alan açısından en verimli dizilim olduğu yapılan birçok çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Halbach diziliminde merkez konumunda bulunan mıknatıs polarizasyonu yukarı gösterecek şekilde konulmuŐtur. Bu mıknatısın her iki yanındaki mıknatısların polarizasyonu ortadaki mıknatısı gösterecek şekilde konulur. Bunların yanına konulacak mıknatıslar ise polarizasyonu aşağı gösterecek şekilde konulur. Basitçe özetlemek gerekirse en az 4 mıknatıs halbach dizilimi ile bir araya getirildiğinde kuzey kutbu her yönü gösterir.



Şekil 2.8. Halbach dizilimi. Halbach diziliminin üst yüzeyinde manyetik alan güçlü iken alt yüzeyinde zayıftır

Kaynak: (Wang vd., 2018: 17).

Halbach diziliminin tasarım açısından en önemli tarafı ortalama manyetik alan üst yüzeyde en fazla iken alt yüzeyde en az olmasıdır. Dolayısıyla dizilimin üst yüzeyinde manyetik alana bağlı kuvvet en fazla olacaktır ve manyetik levitasyon için bu yüzey idealdir alt yüzeyde ise manyetik alan en az olacağından sistemin geri kalanına manyetik yük çok fazla binmeyecektir.

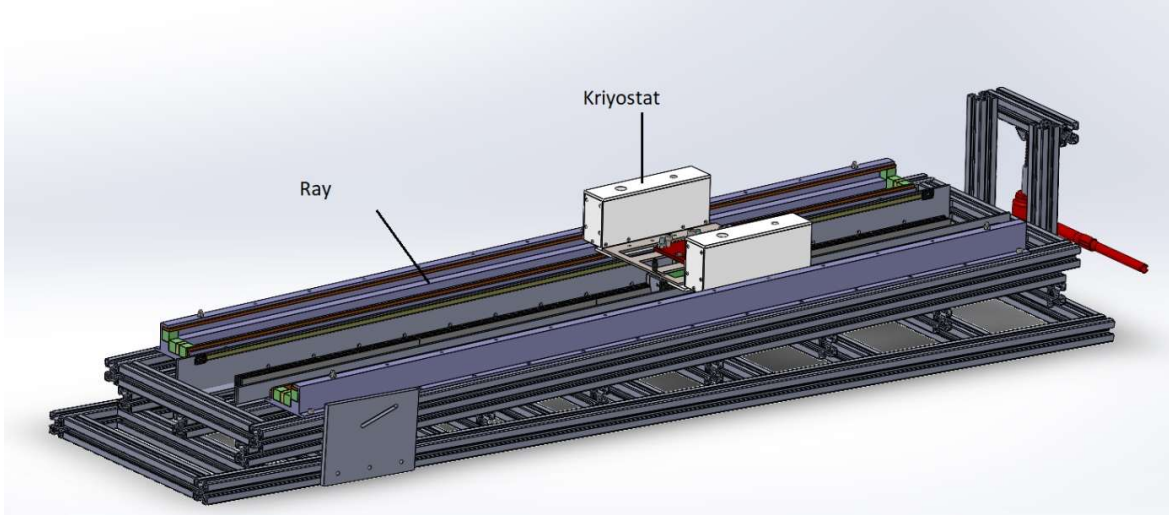
3. SÜPERİLETKEN MANYETİK FIRLATICI

3.1. Tezin Amacı ve Katkısı

Her ne kadar süperiletkenlerin keşfi yüzyıldan daha uzun süre önce yapılmış olsa da süperiletken manyetik yataklama ve yüksek sıcaklık süperiletken üzerine yapılan çalışmalar ve bunların günlük hayattaki karşılıkları oldukça yendir. Süperiletkenler ve onların günlük hayatta pratik kullanımı henüz tam olarak sağlanamamıştır ve bu konuda birçok çalışma yapılması gerekmektedir. Gerek süperiletkenlerin kendilerinin maliyetinin yüksek olması gerekse onların süperiletken hale geçişinin aşırı koşullarda meydana gelmesi ve bu koşulların uzun süre korunamaması (kriyojenik sıcaklıklar vs.) süperiletkenlerin günlük hayatta kolay kolay karşımıza çıkamamasının en önemli nedenlerindedir. Ancak bu onların teknik olarak sağlayabileceği yararların önüne geçemez. Dünyanın en hızlı trenlerinden biri olan Japonya'nın süperiletken manyetik levitasyon ile çalışan yüksek hızlı treni hizmete gireli henüz 20 sene bile olmadı ancak bu kısa sürede süperiletken manyetik yataklama ile çalışan sistemlerin konvansiyonel sistemlere göre ne kadar üstün olduğunu kısa sürede kanıtladı.

3.2. Deney Düzeneği

Deney düzeneği temel olarak 2 ana bölüme ayrılabilir. Bunlar vagon ve raydır.

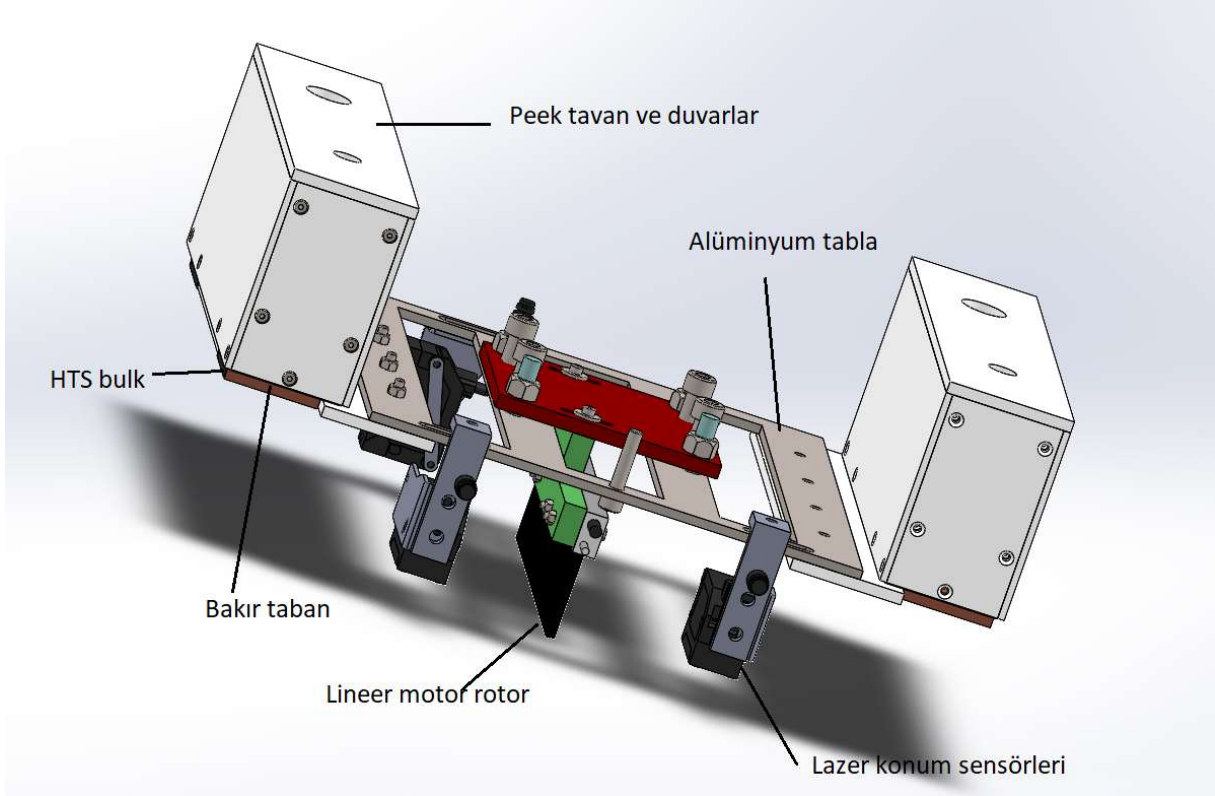


Şekil 3.1. Deney düzeneğinin genel montaj görünümü. Düzenek temel olarak vagon ve ray olmak üzere iki grup altında tanımlanabilir.

3.2.1. Vagon

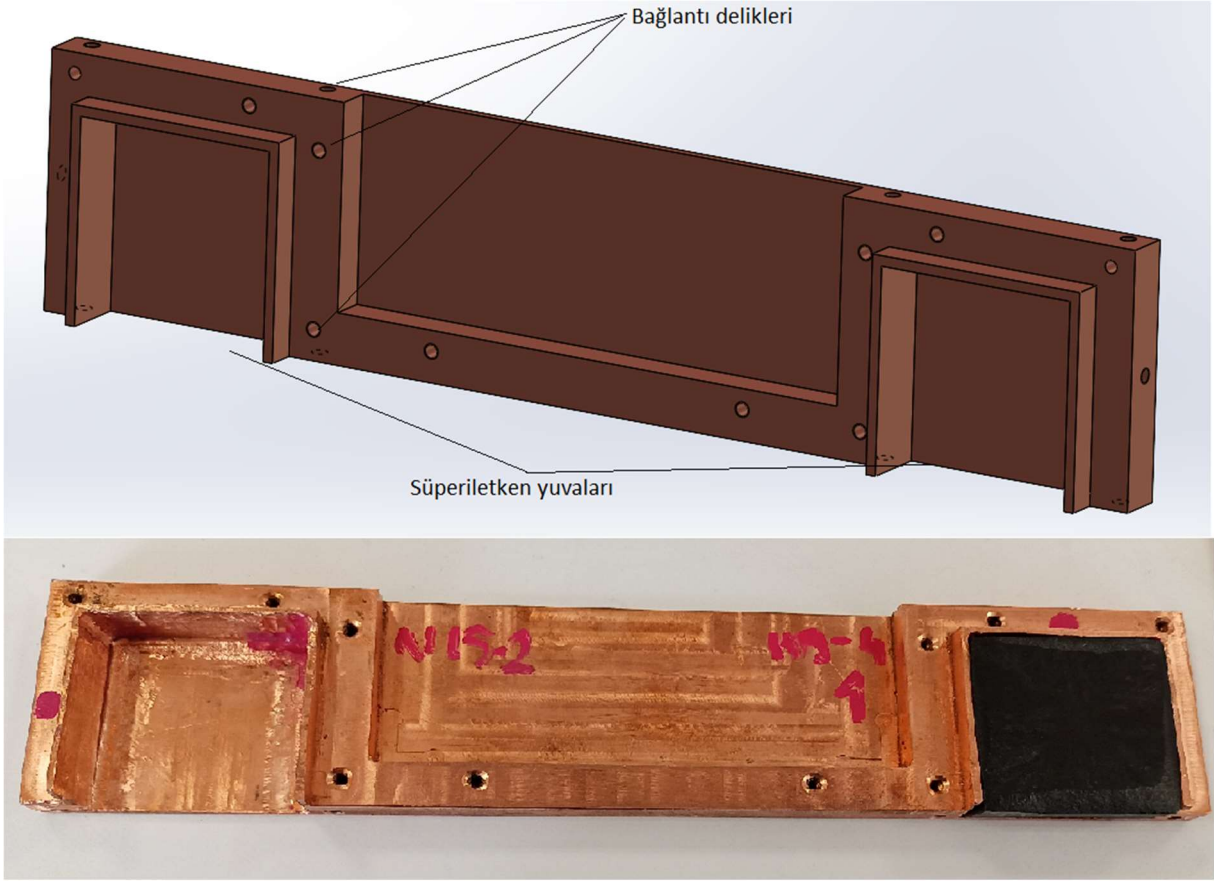
Deneyde kullanılacak vagonun büyük bir kısmını kriyostat oluşturmaktadır. Günümüzde ticari açıdan süperiletkenlerle ilgilenen firmaların birçoğunun hâlihazırda kendi kriyostat tasarımları da mevcuttur ve bunların ticareti de yapılmaktadır. Ancak deneyde hem

daha ekonomik, hem de ebat ve kullanım açısından deney düzeneğiyle doğrudan ilişkili olduğu için özel olarak tasarlanmış bir kriyostat kullanılacaktır.



Şekil 3.2. Deney için tasarlanmış vagon ve kriyostat düzeneği

Tasarlanan kriyostatın en önemli parçalarından biri bakır tabandır. Kriyostatlar içlerine konulan soğuk malzemeyi uzun süre ısı almadan soğuk tutmaları için tasarlanmışlardır. Bunun için ise düşük iletim katsayısına sahip malzemeler kullanılması önemlidir. Bakır ise yüksek iletim katsayısına sahip bir malzemedir. Burada bakır özellikle seçilmiştir. Amaç kriyostatın içine konulacak sıvı azotun, süperiletkenle doğrudan teması olmadan, süperiletkeni kritik sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa soğutulması ve o sıcaklıkta muhafaza edebilmesi içindir. Nitekim şekilde 3.3’de gösterilen tablanın üst kısmında sıvı azot bulunacakken alttaki 2 kare biçimindeki oyuk da süperiletkenlerin yuvasıdır. Şekildeki parça sadece mekanizma da 2 adet bulunacak ve simetrik olarak yerleştirilince dört adet süperiletken deney öncesi soğutulabilecektir. Süperiletken ve bakır taban arasında ısının en verimli şekilde iletilebilmesi için çok düşük sıcaklıklarda da kullanılabilen termal macunlar kullanılacaktır.



Şekil 3.3. Kriyostatın bakır tabanı. Bakırın yüksek ısı iletim katsayısı sayesinde yuvalardaki süperiletkenlerin sıvı azota direkt temas etmeden kritik sıcaklığa kadar soğutulması planlanmıştır. Şekilde parçanın teknik çizimi ve üretilen parça görülmektedir.

Kriyostatın bir başka parçası ise polimer duvarlar ve kapaktır. Tasarım aşamasında ilk olarak bu parçaların PEEK (Poly Ether Ether Ketone) malzemeden üretilmesi tasarlanmıştır. Burada malzemenin metal değil de polimer olmasının bazı avantajları vardır. Öncelikle polimerler metallerle göre daha hafiftir. Sistem manyetizma ile levite edileceğinden olabildiğince hafif olması önemlidir. Polimer malzemeler metallerle göre daha kolay işlenebilir ve metallerle göre daha ucuzdur. Bu da üretim ve malzeme maliyetini düşürür. Polimerlerin ısı genleşme katsayısı metallerden daha azdır. Deney esnasında duvarlar 77.36K sıcaklığa kadar düşecek deney sonrasında ise içinde bulunduğu ortamın sıcaklığına kadar yükselecektir. Bu sıcaklık değişimleri esnasında parçaların boyutlarını ve şekillerini olabildiğince korumaları gerekmektedir. Son olarak polimerlerin ısı iletim katsayısı metallerle göre çok daha azdır bu da azotun soğuk kalabilmesi için önemlidir. Şekilde 3.4’de görülebileceği üzere polimer duvarların kenarları düz değil katman katmandır. Bu içine konulan sıvının dışarı sızmaması için özel olarak tasarlanmıştır. Şekilde 3.2’deki kapakta iki adet delik bulunmaktadır. Bunlardan ilki sisteme sıvı azot eklenebilmesi içindir. Sistem oda sıcaklığına iken ilk olarak sıvı azot eklenmeye başlandığından ani bir şekilde azot buharlaşacaktır. Bu olay kriyostatın iç yüzeyi

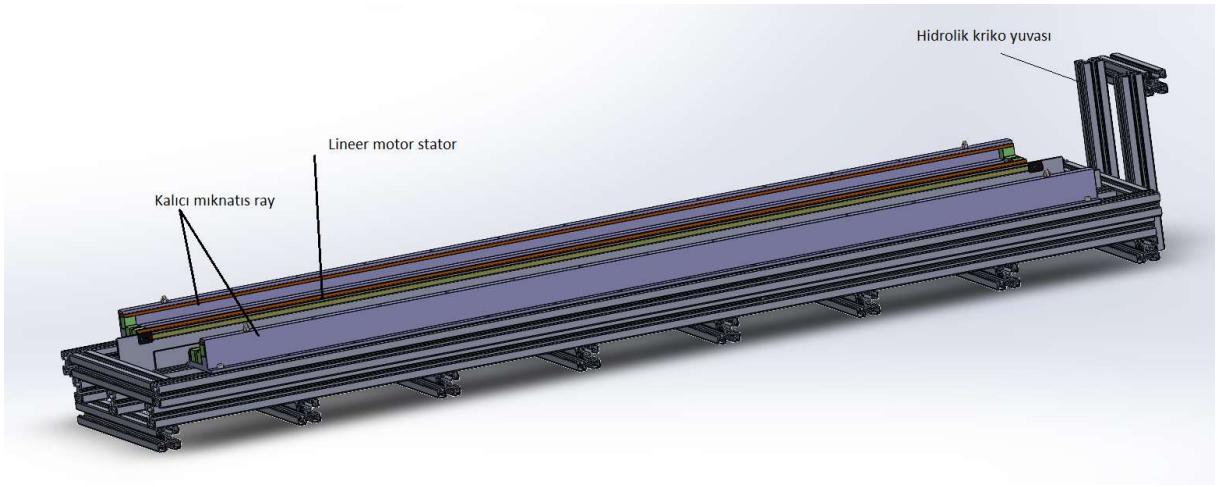
sıvı azotun sıcaklığına ulaşınca kadar devam edecektir ani buharlaşma esnasında ve yine deney esnasında ısı kazanımı nedeniyle buharlaşan azot yine bu iki delik aracılığıyla tahliye edilecektir tek delik yerine iki delik kullanılmasının nedeni ise kriyostatın iç basıncın daha rahat dengelenebilmesidir. Ancak PEEK malzeme maliyet olarak pahalı olduğunda duvarların üretimi için ilk aşamada daha basit plastik polimer malzeme kullanılmıştır. Su ile yapılan ilk denemelerde kriyostatın sızdırmazlık açısından istenilen performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Daha sonra sıvı azot ile yapılan denemelerde plastik kriyostatik sıcaklığa dayanamamıştır ve duvarların malzemesi fotoblok olarak değiştirilmiştir. Fotoblok kompozit bir malzemedir ve plastiğe göre hem daha hafiftir ayrıca kriyojenik sıcaklıklara da dayanabilmiştir. Ayrıca fotoblok malzemenin iletim ısı katsayısı plastiğe göre daha düşüktür. Bütün bu doneler göz önüne alındığında fotoblok kriyostat malzemesi olarak plastikten daha üstündür.

Bakır taban ve fotoblok duvarların birleşimiyle ortaya çıkan parça şekil 3.2’de gösterildiği üzere metal parça ile yine eşleniğiyle birleştirilir. Metal parça düz bir plakadan ibaret değildir ve birçok detayı bulunmaktadır. Parçanın alüminyum tasarlanmasının nedeni hafif olmasıdır. Parçanın üzerinde bulunan boşluklar parçanın hafif olması ve kabloların idaresi içindir. Ayrıca parçanın üzerinde görünen oluklar aracılığıyla lineer motorun forcer parçası monte edilecektir. Bunların dışında tak çıkar parçalar ile konum sensörleri de yine metal üzerine bağlanacaktır. Bu sensörlerle kriyostatın yerden yüksekliği yan duvara olan uzaklıkları eş zamanlı olarak ölçülebilecektir. Şekilde görülen oluklar sayesinde lineer motor forcer aksamının kriyostatın üzerine montajından sonra hem üç öteleme iki rotasyon olmak üzere beş hareket serbesti kullanılarak konumu ince ayarlanabilir. Bu sayede lineer motor herhangi bir yalpalama hareketi yapmadan istenen doğrultuda düz bir hareket yapabilecektir.

Kriyostatı oluşturan bir diğer önemli eleman ise yalıtkan kaplama malzemesidir. Bu malzeme 5mm kalınlığında yapışkan bir bank gibi kriyostatın her tarafını kaplayacaktır yalnızca süperiletkenin alt ve yan yüzeyleri açıkta kalacaktır. Yalıtım bandı düşük ısı iletim katsayılı malzemedir üretilmiş olup parlak bir yüzeye sahiptir. Bu parlak yüzey sayesinde ışımaya ile ısı kazanımının da önüne geçilmesi amaçlanmıştır, ayrıca bu yüzeyde yoğunlaşma ile biriken su yalıtım malzemesine bulaşmayacaktır. Piyasadan hazır alınabilecek kriyostatlar vakum ile üretilmişlerdir vakum sayesinde ısı iletimi çok düşüktür ne var ki deneyde kullanılacak kriyostat teknik yetersizlikler nedeniyle vakumla değil de yalıtım malzemesi ile tasarlanmıştır.

3.2.2. Ray Sistemi

Ray sisteminin iskeleti sigma profil ve bağlantı elemanları ile tasarlanmıştır. Deneysel düzeneğin hafif olması ve kolayca eğim ayarının yapılabilmesi için alüminyum sigma profiller kullanılarak tasarlanmıştır. Ray sisteminin uzunluğu yaklaşık iki metredir ve bu sistem birçok parçanın bir araya gelmesiyle oluşturulmuştur. Bağlantıda manyetik alandan az etkilenen paslanmaz (galvanizli) çelikten üretilmiş bağlantı elemanları (somun civata vb.) kullanılmıştır. Sistemin en ucunda, rayların istenen açıya getirilmesi ve bu açıda kalmasını sağlayacak olan hidrolik kriko vardır. Sistemin ağırlığı kriko ile kaldırılacak ve sabit tutulacaktır. Bu kriko ile ray sistemi 5° derecelik bir açıya kadar ayarlanabilir.



Şekil 3.4. Tasarlanan ray sistemi

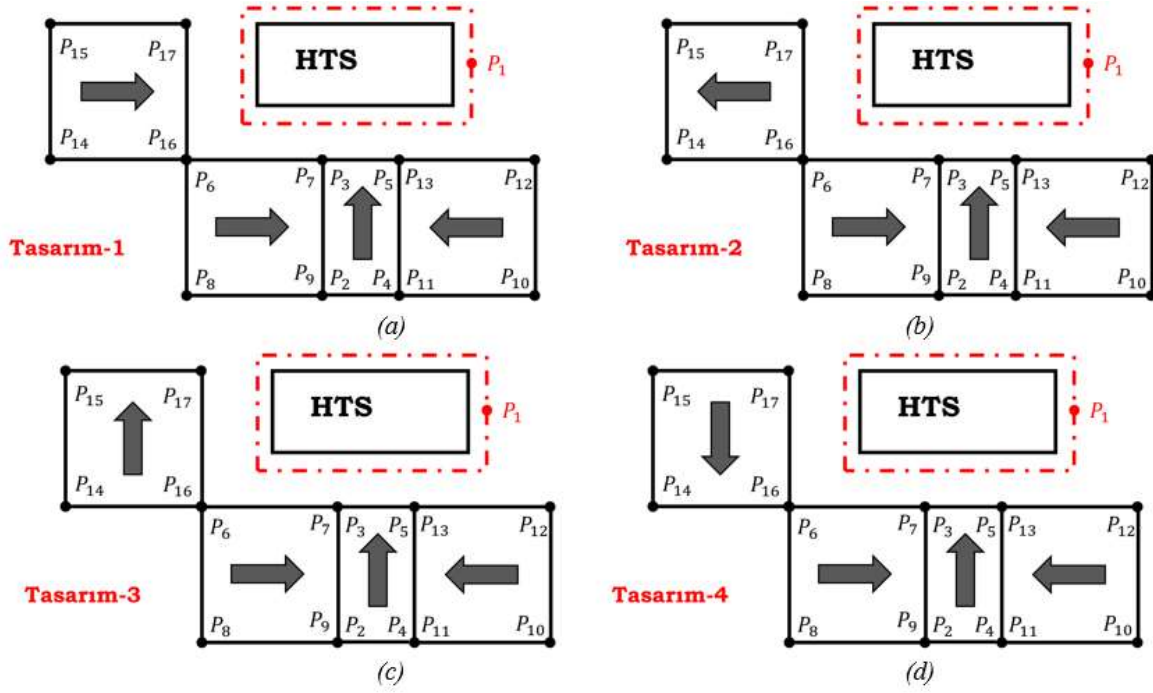
Tasarlanan ray sistemi üzerinde lineer motorun statorları ve encoderları da bulunmaktadır. Lineer motor statorlarının uzunluğu 500mm olduğu için bunlar uç uca eklenecektir. Encoder sayesinde ise lineer motorun ray düzlemi üzerindeki konum kontrolünün yapılması hedeflenmektedir.

Ray sisteminde bulunan bir başka eleman ise rayın kendisidir. Ancak bu ray manyetik levitasyonun sağlanabilmesi için kalıcı mıknatıslardan yapılmıştır.

3.3. Ray Tasarımı

Deneyde kullanılacak mıknatıs dizilimi de halbach diziliminin bir türevidir. Deneyde iki çeşit mıknatıstan ray yapılacaktır bunların boyutları 20mm*20mm*20mm olan küp mıknatıs ve 5mm*10mm*40mm olan çubuk mıknatıslardır. Çubuk mıknatıslar polarizasyon yönü üstte olacak şekilde 4 tanesi bir araya getirilecektir. Bu halbach dizilimindeki merkez mıknatıs rolünü üstlenecektir. Küp mıknatıslar ise her biri ayrı yönü gösterecek şekilde merkez mıknatısın her iki yanına dizilecektir. Bu üç mıknatıstan oluşan dizilim sistemi levite etmeye yeterlidir ancak

yapılacak olan deney kalıcı mıknatıs ve süperiletken arasındaki çoklu yüzey etkileşimi üzerine kuruludur bu da levitasyonu sağlayan kaldırma kuvveti dışında yanal kuvvetlerin de var olduğunu işaret eder.



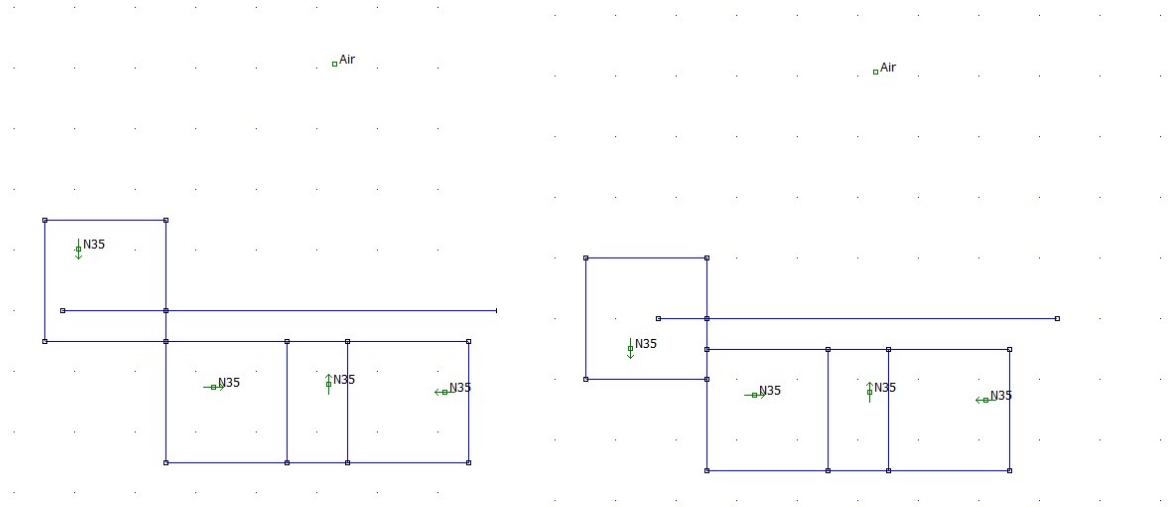
Şekil 3.5. Ray tasarımında yanal mıknatısın yönünü belirlemek için yapılan ön çalışma. Yanal mıknatısın polarizasyon yönü (a) sağa (b) sola (c) yukarı (d) aşağı göstermektedir. Yapılan ön çalışmada yanal mıknatısın dört değişik konfigürasyonunun süperiletken üzerindeki etkisi simüle edilmiştir

Kaynak: (Başaran vd., 2021: 742).

Süperiletken kalıcı mıknatıs çiftinden oluşan mekanizmada süperiletkenin alt yüzeyi ile mıknatıs diziliminin üst yüzeyi arasındaki manyetik etkileşim sayesinde levitasyon sağlanacaktır ancak süperiletkenin yan yüzey ve mıknatıs diziliminin en dışına eklenecek kalıcı mıknatıs sayesinde yan kuvvetler oluşturulacak ve çok yüzeyli (multi-surface) etkileşim elde edilecektir. Bu etkileşim ve sonucu olan yan kuvvet sayesinde mekanizma sağa sola yalpalamadan düz bir doğrultuda gitmesi sağlanacaktır. Eklenecek mıknatısın yönü ile ilgili simülasyon çalışması yapılmış olup polarizasyonun dışarı gösterdiği konfigürasyonun (konfigürasyon b) en etkili olduğu hesaplanmıştır (Başaran vd., 2021: 742). Alt tarafta kalan üç mıknatısın dizilimi ise Halbach dizilimidir.

Yine en son eklenen mıknatısın diğer mıknatıslara göre ne kadar daha yüksekte olması gerektiğiyle ilgili de çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda sonuç olarak diğer mıknatısların üst yüzeyindeki manyetik alanın düzgün (uniform) olması ve yanal manyetik alanın da azami

olmasına dikkat edilmiş ve 5mm'lik bir yükseklik farkıyla eklenen mıknatısın en ideal olduğu matematiksel olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Yanal mıknatısın hangi yükseklik konfigürasyonunda en iyi sonuç verdiği dair yapılan ön çalışmada farklı yüksekliklerde simüle edilmiştir. (a)yanal mıknatıs diğer mıknatısların üst yüzeyinde (b) diğer mıknatısların yüzeyinden 5mm aşağıda.

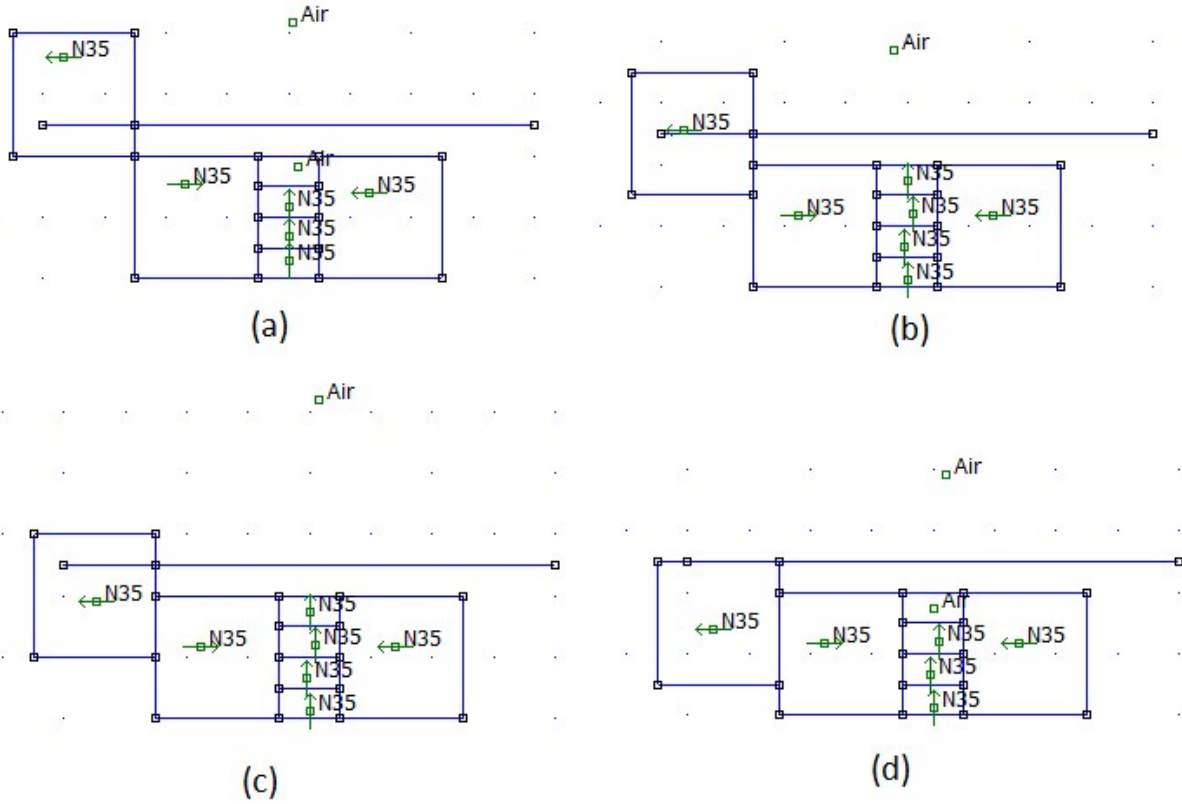
Bu çalışma için yanaral kuvveti sağlayacak olan mıknatıs 5mm aralıklar ile farklı yüksekliklerde simüle edilmiştir. En optimum mıknatıs konumunun bulunması için 5mm aralıklar azaltılarak simüle edilebilir ancak burada temel esas farklı yüksekliklerin etkilerinin gözlemlenmesidir.

Yapılan ön çalışmalarda ortadaki mıknatıs yekpare olarak modellenmiştir ancak burada boyutları 5x10x40 olan mıknatıslardan dört tanesi üst üste konulacaktır. Mıknatıslar birbirine aralarında boşluk olmayacak şekilde yapışmış şekilde modellenmesi ve tek bir mıknatıs le kurulan model aynı sonucu verecektir ancak uygulamada arada boşluk kalacağı düşünülecek olursa az da olsa farklılıklar gözlemlenecektir.

3.4. Femm Analizi

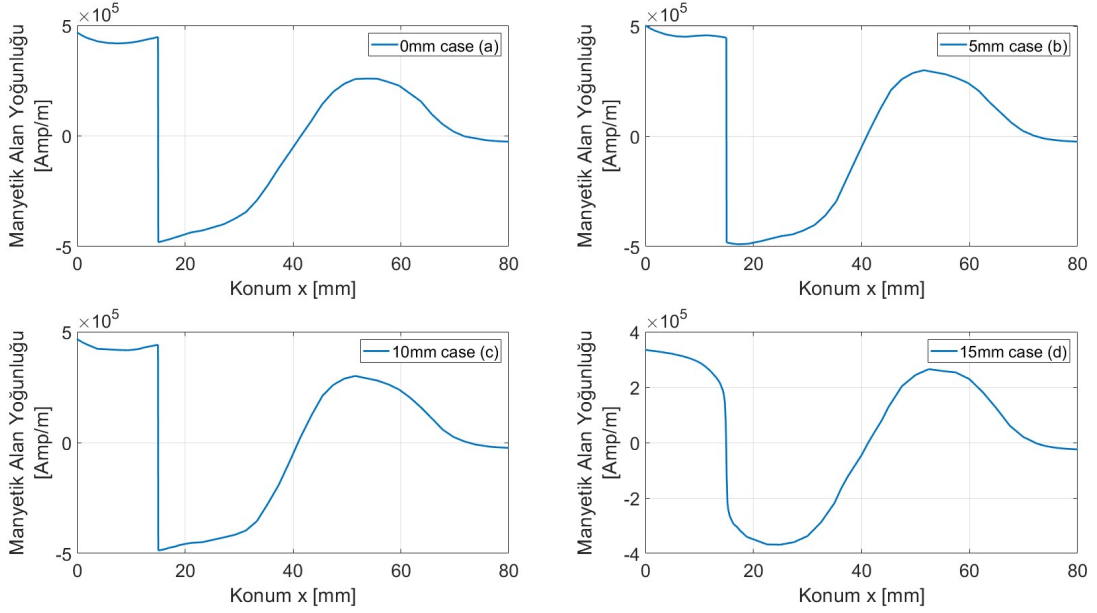
Yapılan çalışmalardan ilki Femm (Finite Element Method Magnetics) adlı program kullanılarak yapılmıştır. Bu program ücretsiz bir program olup manyetik, elektrostatik, ısı akışı ve elektrik akımları üzerinde çalışabilme kabiliyetine sahiptir. Programın en büyük avantajı boyutunun ufak olması ve çözülecek problemin kolayca programa aktarılıp hızlıca çözülebilmesidir. Programın dezavantajları ise çözümlerin zamana bağlı değil, anlık olarak çözümlenmesidir. Bir başka büyük bir dezavantaj ise üç boyutlu geometrilerin çözülememesidir. Program kendi başına bu projedeki analizleri yapmak için yeterli değildir ancak programın

vereceği çözümler diğer programlardan elde edilecek çözümleri tahmin etmede ve bulunan sonuçların doğruluğunu karşılaştırmak için kullanılabilir.



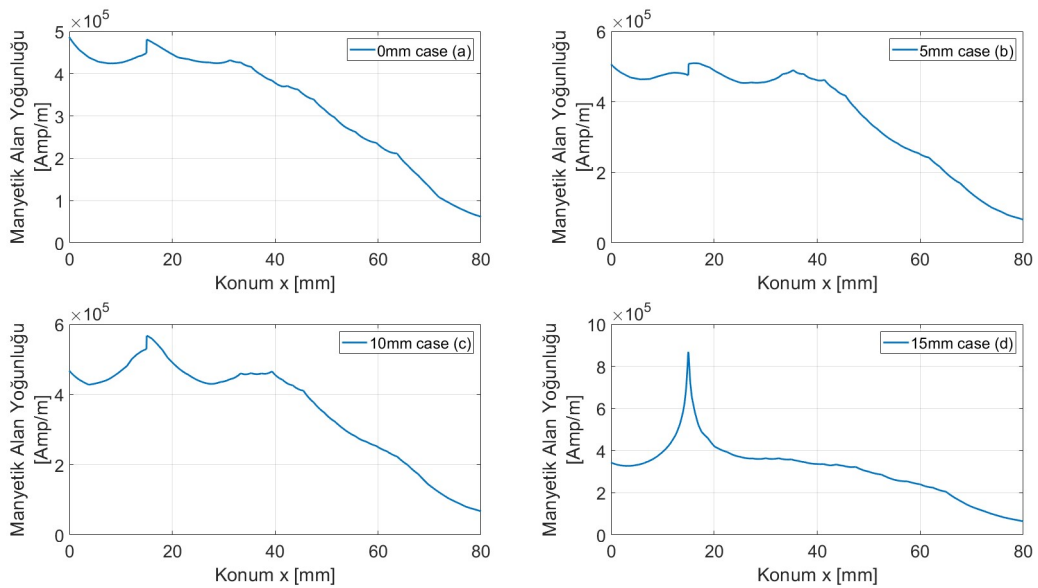
Şekil 3.7. Femm analizi dört değişik model üzerinde yapılmıştır. (a) konumunda yanal mıknatıs, Halbach dizilimi ile dizilmiş mıknatısların üst yüzeyiyle aynı seviyededir. Her bir modelde yanal mıknatıs 5'er mm daha aşağı konumlandırılmıştır.

Süperiletkene etki eden dikey kuvvetin en fazla Halbach dizilimiyle olacağını zaten biliyoruz bu çalışmayı yapmanın birincil amacı hangi konumlandırma şeklinde süperiletken üzerindeki manyetik alanın yatay bileşeninin azami olduğunu bulmaktır. Yatay manyetik alanın en fazla olduğu konfigürasyon yatay kuvvetin de en fazla olacağı konfigürasyondur ve bu şekilde tasarlanacak raylarda, vagonun olası yalpalama sorunu en az olacaktır. Çalışmanın ikincil bir amacı da yanal mıknatısın değişik yükseklikte dikey manyetik alanın dikey bileşene etkisidir. Hâlihazırda Halbach dizilimi sayesinde elde edilebilecek azami manyetik alan elde edilecektir ancak değişik yüksekliklerde konulan yanal mıknatısın az da olsa etkisi gözlemlenebilir.



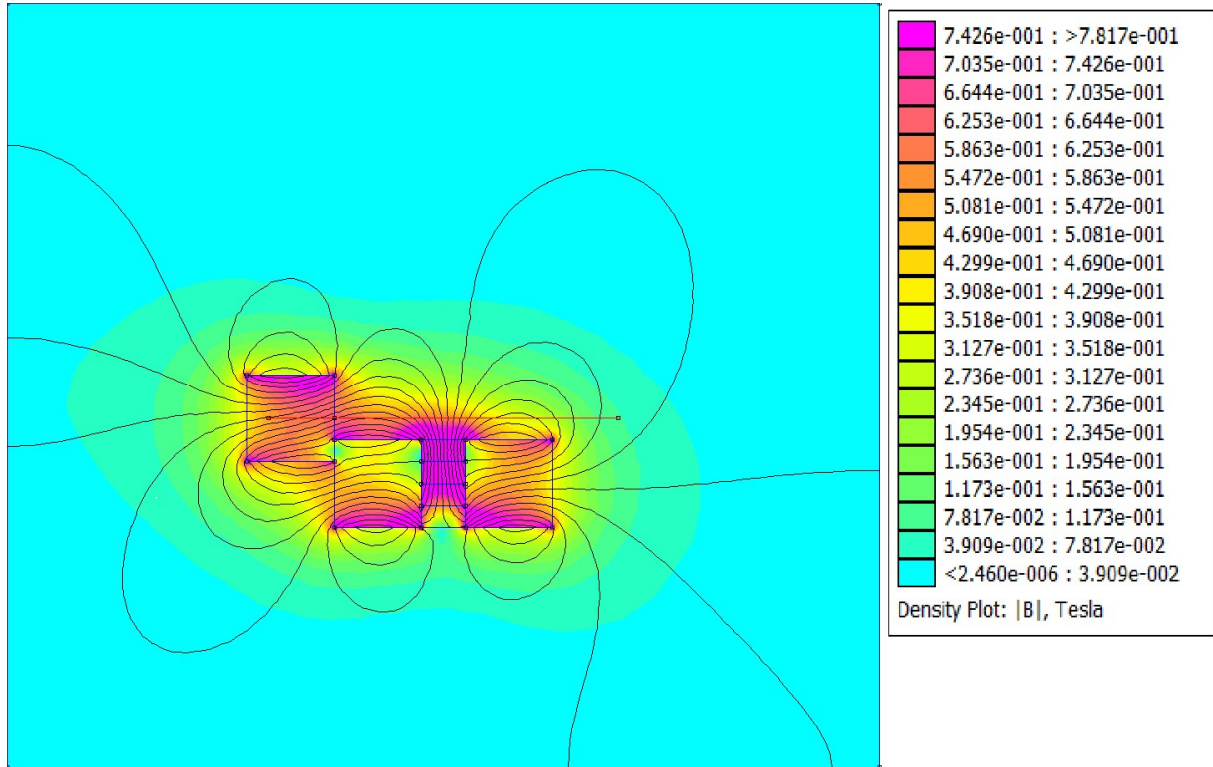
Grafik 3.1. Şekil 3.7’de verilen her bir konfigürasyon için yapılan çalışmanın sonuçları grafikte manyetik alanın yatay bileşeni görülmektedir.

Şekil 3.1’de Femm analiz sonucu her bir yanıl mıknatıs konumu sonucu oluşan manyetik alanın yatay bileşeni görülmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise süperiletken ve kalıcı mıknatıs çiftiyle oluşturulan bir düzenekte her daim itme kuvveti vardır dolayısıyla manyetik alan negatif olsa bile bir itme mevcut olacaktır bu yüzden karşılaştırma yaparken mutlak değerlerin alınması gerekir. Şekilden de görüleceği üzere manyetik alanın yatay bileşeni en çok (b) yani yanıl mıknatısın diğer mıknatısların yüzeyinden 5mm daha aşağı konumlandırıldığında oluşmaktadır.



Grafik 3.2. Şekil 3.7’de verilen konfigürasyonların toplam manyetik alanlarının mutlak değerleri.

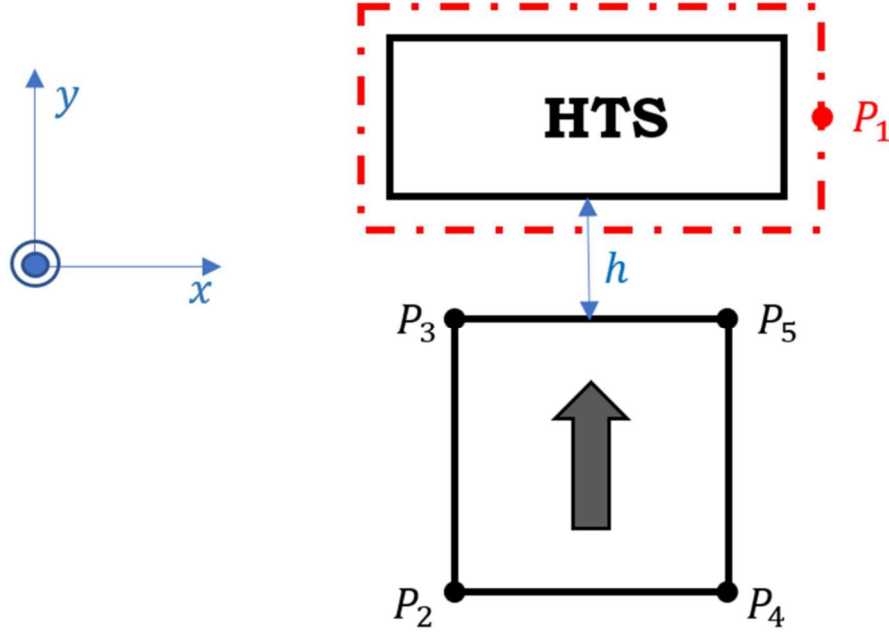
Yapılan çalışma sonucu dört konfigürasyonda oluşan manyetik alanların mutlak değerleri grafik 3.2’de verilmiştir. Süperiletkenin merkez noktası referans alındığında en fazla manyetik alan (b) ve (c) konumlandırmasıyla oluşmuştur dolayısıyla en fazla kuvvet bu iki dizilimde oluşacaktır ancak manyetik alanın yatay konumu dikkate alınırsa (b) dizilimini kullanmak en iyi sonucu verecektir. Şekil 1.23’de (d) diziliminde ani bir yükseliş ve düşüş dikkat çekmektedir. Bunun nedeni ise süperiletkenin mıknatıs yüzeyinden 5mm yüksekte olduğu varsayılp hesapların buna göre yapılmasıdır. (d) diziliminde yanal mıknatısın üst yüzeyi de süperiletkenle aynı yükseklikte olduğundan matematiksel bir hata oluşmuştur. Zaten (d) deki grafiğin devamsız olması da bu ani yükseltinin işlem hatası olduğunu ve ihmal edilebilir olduğunu gösterir.



Şekil 3.8. Femm çalışması sonucu yüzeyden 5mm aşağıdaki mıknatıs dizilimindeki manyetik alanın iki boyutlu dağılımı.

3.5. Matematiksel Model

Vagon sisteminin tasarımında her iki tarafta ikişer olmak üzere 4 adet süperiletken kullanılmıştır. Aynı taraftaki süperiletkenler vagonun ön ve arka tarafında konumlandırılmıştır bu sayede vagonu taşıyan her bir süperiletkene eş miktarda ağırlık düşmesi planlanmıştır. Matematiksel model yapılırken de raylar ile her bir süperiletken arasındaki ilişki tek başına irdelenmiştir. Matematiksel model oluşturulurken daha önce anlatılan modelleme yöntemlerinden H-formülasyon kullanılmıştır.



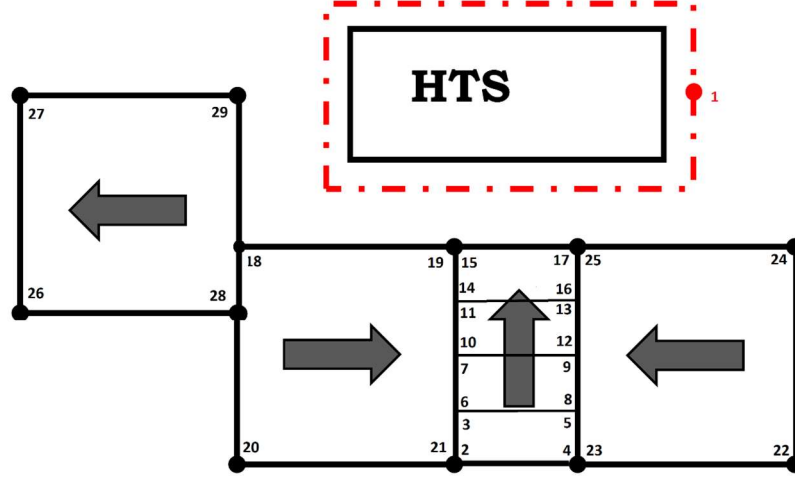
Şekil 3.9. H-formülasyon ile bir süperiletken ve bir kalıcı mıknatıs arasındaki etkileşimi modellenmesi. 1 noktası süperiletken üzerindedir ve kalıcı mıknatıs üzerindeki 2,3,4,5 noktalarının 1 göre etkileri denkleme yazılır.

H-formülasyon ile modelleme yapılırken süperiletken üzerinde bir nokta (1) belirlenir. Kalıcı mıknatısın sınırlarını belirleyen noktaların (2,3,4,5) süperiletkenin üzerindeki noktaya yapmış olduğu etki formüle edilir. Burada her bir noktanın birbirine göre olan ilişkisi (x ekseninde aynı doğrultuda, y ekseninde aynı doğrultuda) ve mıknatısın polarizasyonu da önemlidir. H-formülasyonda denklemler oluşturulurken Biot-Savart yasaları kullanılır. Buna göre 1 noktası ve 2,3,4,5 noktası arasındaki manyetik alan bağlantısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$H_x = \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2}{(x-x_5)^2 + (y-y_5)^2} \right] \quad (3.1)$$

$$H_y = \frac{M_0}{2\pi} \left[\text{atan} \frac{y-y_2}{x-x_2} - \text{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \text{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \text{atan} \frac{y-y_4}{x-x_4} \right] \quad (3.2)$$

Burada polarizasyonun doğrultusu logaritmik veya arctanjant fonksiyonlarından hangisinin kullanılacağını belirlerken polarizasyonun yönü denklemlerdeki negatif pozitifliği belirler. Benzer şekilde kuzey kutbu yukarı veya aşağı değil de sağı veya solu gösteriyorsa H_x ve H_y birbirleri arasında değişir.



Şekil 3.10. Denejde kullanılacak olan ray düzeneği.

Denejde kullanılacak ray konfigürasyonu şekil 3.10’de verilmiştir. Burada ortada tek bir büyük mıknatıs yerine dört adet ufak mıknatıs kullanılmasının nedeni malzeme teminindedir ve tasarımsal başka bir amacı yoktur. Şekil 3.10’deki ray dizilimine göre H-formülasyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 H_{x,ext} = & \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2}{(x-x_5)^2+(y-y_5)^2} + \ln \frac{(x-x_7)^2+(y-y_7)^2}{(x-x_6)^2+(y-y_6)^2} + \right. \\
 & \ln \frac{(x-x_8)^2+(y-y_8)^2}{(x-x_9)^2+(y-y_9)^2} + \ln \frac{(x-x_{11})^2+(y-y_{11})^2}{(x-x_{10})^2+(y-y_{10})^2} + \ln \frac{(x-x_{12})^2+(y-y_{12})^2}{(x-x_{13})^2+(y-y_{13})^2} + \ln \frac{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2}{(x-x_{14})^2+(y-y_{14})^2} + \\
 & \ln \frac{(x-x_{16})^2+(y-y_{16})^2}{(x-x_{17})^2+(y-y_{17})^2} + \ln \frac{(x-x_{26})^2+(y-y_{26})^2}{(x-x_{27})^2+(y-y_{27})^2} + \ln \frac{(x-x_{29})^2+(y-y_{29})^2}{(x-x_{28})^2+(y-y_{28})^2} \left. \right] + \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_{22}}{x-x_{22}} - \right. \\
 & \operatorname{atan} \frac{y-y_{23}}{x-x_{23}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{25}}{x-x_{25}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{24}}{x-x_{24}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{20}}{x-x_{20}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{21}}{x-x_{21}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{19}}{x-x_{19}} - \\
 & \left. \operatorname{atan} \frac{y-y_{18}}{x-x_{18}} \right] \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

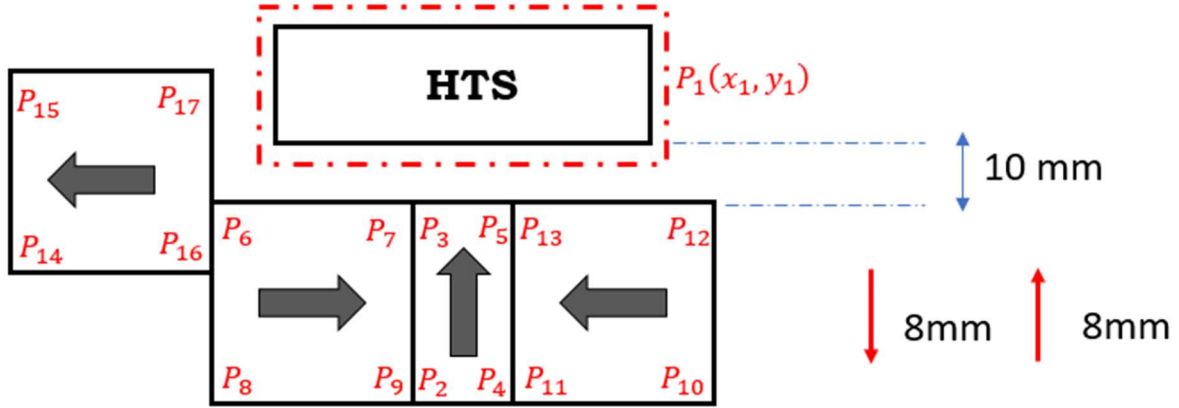
$$\begin{aligned}
 H_{y,ext} = & \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_{18})^2+(y-y_{18})^2}{(x-x_{19})^2+(y-y_{19})^2} + \ln \frac{(x-x_{24})^2+(y-y_{24})^2}{(x-x_{25})^2+(y-y_{25})^2} + \ln \frac{(x-x_{23})^2+(y-y_{23})^2}{(x-x_{22})^2+(y-y_{22})^2} \right] + \\
 & \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_2}{x-x_2} - \operatorname{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \operatorname{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \operatorname{atan} \frac{y-y_4}{x-x_4} + \operatorname{atan} \frac{y-y_6}{x-x_6} - \operatorname{atan} \frac{y-y_7}{x-x_7} + \right. \\
 & \operatorname{atan} \frac{y-y_9}{x-x_9} - \operatorname{atan} \frac{y-y_8}{x-x_8} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{10}}{x-x_{10}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{11}}{x-x_{11}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{13}}{x-x_{13}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{12}}{x-x_{12}} + \\
 & \operatorname{atan} \frac{y-y_{14}}{x-x_{14}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{15}}{x-x_{15}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{17}}{x-x_{17}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{16}}{x-x_{16}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{27}}{x-x_{27}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{26}}{x-x_{26}} + \\
 & \left. \operatorname{atan} \frac{y-y_{28}}{x-x_{28}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{29}}{x-x_{29}} \right] \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

H-formülasyon ile elde edilen denklemler süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasında etkileşimi zamana bağlı olarak vermez, yani elde edilen denklemlerin çözümü süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki o anlık etkileşimi verir bu da denklem 3.3 ve 3.4’ün her bir an için tekrar tekrar çözülmesi gerektiğidir. Bu yöntemin anlamlı bir sonuç verebilmesi için bulunan

denklemlerin kalıcı mıknatıs ve süperiletken arasındaki değişik yükseklikler ve hız vektörleriyle tekrar tekrar çözülmesini gerektirmektedir. Bunların analitik olarak elle yapılması neredeyse imkansızdır ve çok fazla zaman alır. Bu yüzden çözümler yazılımlar aracılığıyla yapılır. Bu çalışmada çözüm yapılabilmesi için COMSOL ve Matlab programları kullanılmıştır.

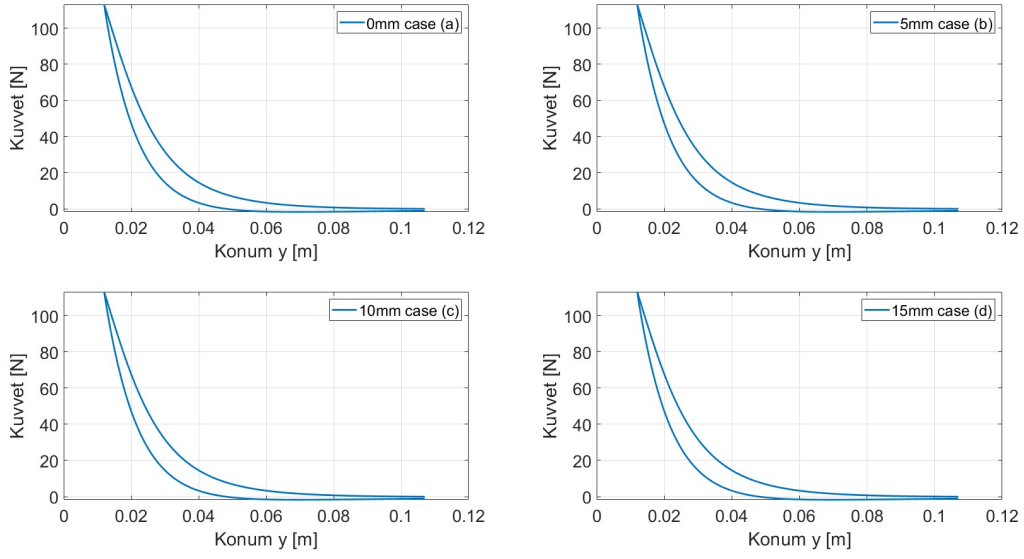
3.6. Comsol Analizi

Tez çalışmasında yapılan bir başka çalışma da Comsol Multiphysics programı üzerinden yapılmıştır. Comsol Multiphysics sadece manyetizma değil, akustikten mukavemete ve elektrik devrelerine kadar birçok fiziksel fenomenin modelinin yapılabileceği oldukça geniş bir programdır. Ayrıca Femm programından farklı olarak zamana bağlı çözümlerde bulabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında hareket denklemlerinde kullanılacak olan eşlenik yay katsayısı ve sönüm katsayısının hesaplanmasında kullanılabilir.



Şekil 3.11. Dikey yay ve sönüm katsayısının hesaplanabilmesi için Comsol programı ile yapılan çalışma

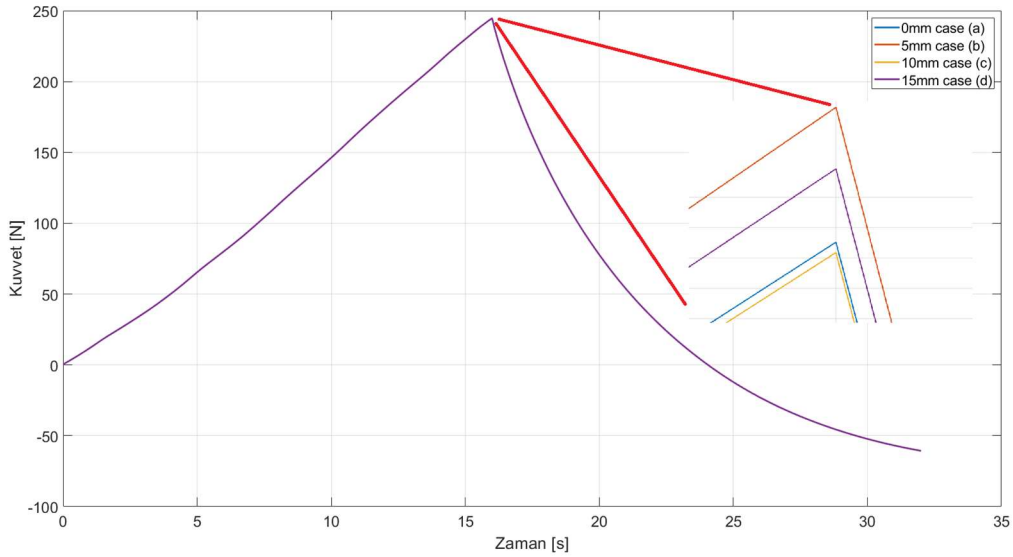
Comsol ile yapılan ilk çalışma şekil 3.7’de verilen konfigürasyonların yukarı aşağı hareket ettirilmesidir. Analizde süperiletken mıknatısların 10mm yukarısında konumlandırılmıştır daha sonra saniyede 0.5mm/s hız ile önce 8mm aşağıya sonra 8mm yukarıya hareket ettirilmiştir. Bu hareket sonrası her dört konfigürasyon için y ekseninde oluşan kuvvetin y eksene göre değişimi grafik3.3’de verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere yanal mıknatısın yüksekliğinin y eksenindeki oluşan kuvvet üzerine etkisi ihmal edilebilir.



Grafik 3.3. Her bir konfigürasyon için y ekseninde oluşan kuvvetin konuma göre değişimleri.

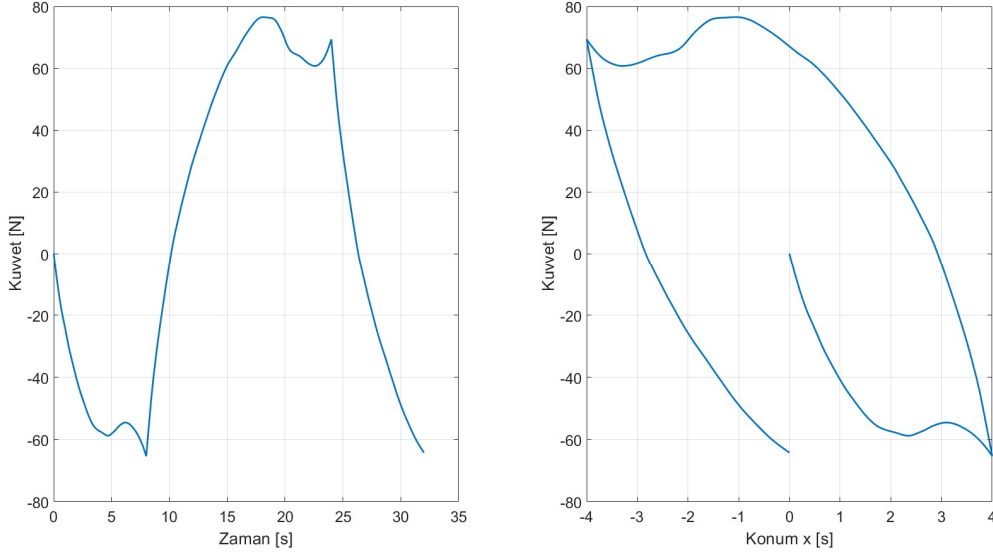
Bu çalışmada bulunan kuvvet zaman grafiği sistemin yay katsayısı ve sönüm katsayısının belirlenmesinde kullanılabilir. Sistemin katsayılarının hesaplanırken genel hareket denklemini kullanılacaktır.

$$F(t, x) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (3.5)$$



Grafik 3.4. Yanal mıknatısın değişik yüksekliklere konumlandırıldığı süperiletken kalıcı mıknatıs sistemin kuvvet zaman grafiği. Grafikten de görülebileceği üzere kuvvetler birbirine oldukça yakındır ve eş kabul edilebilir.

Sistem, Comsol içinde modellenirken kütle ile ilgili herhangi bir bilgi girilmemiştir, ayrıca sistem simülasyon boyunca sabit hızla hareket etmektedir dolayısıyla $m\ddot{x}$ tabiri sıfır alınabilir. Sistemin üzerinde başlangıç anındaki kuvvet sıfır gözükmemektedir dolayısıyla



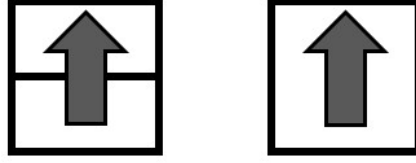
Grafik 3.5. Süperiletkenin yatay ekseninde hareketi ile oluşan (a) kuvvet-zaman (b) kuvvet konum grafikleri

Önceki simülasyondan farklı olarak burada kuvvet lineer olarak artmaz veya azalmaz. Önceki simülasyonda süperiletken dikey eksen üzerinde hareket ederken yeni simülasyonda yatay ekseninde hareket eder ve Şekil 1.24’de de görülebileceği üzere x ve ye eksenindeki manyetik alan değişimi birbirine benzerlik göstermez ancak genel ilkeler açısından bakıldığında yine bir önceki çalışmada olduğu gibi $m\ddot{x}$ sıfır kabul edilebilir ve genel hareket denkleminin diğer elemanları yay ve sönüm katsayıları hesaplanabilir. Simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar üzerinden yapılan hesaplamalar sonucu yatay ve dikey, yay ve sönüm katsayıları $k_y = 30.63kN/m$, $k_x = 17.5kN/m$, $c_y = 2.8 * 10^5 kg/s$, $c_x = 4.9 * 10^5 kg/s$ olarak hesaplanmıştır. Burada önemli bir nokta hesaplanan katsayılar ufak hareketler için geçerlidir. Eğer süperiletken mıknatısa 8mm değil de daha fazla yaklaştırılıp uzaklaştırılıyorsa ortaya çıkacak olan grafik de lineer olmayacaktı ve hesaplanacak olan katsayılar da ortalama bir değer verip hata oranı fazla olacaktı.

3.6.1. Cmsol Durum Çalışması

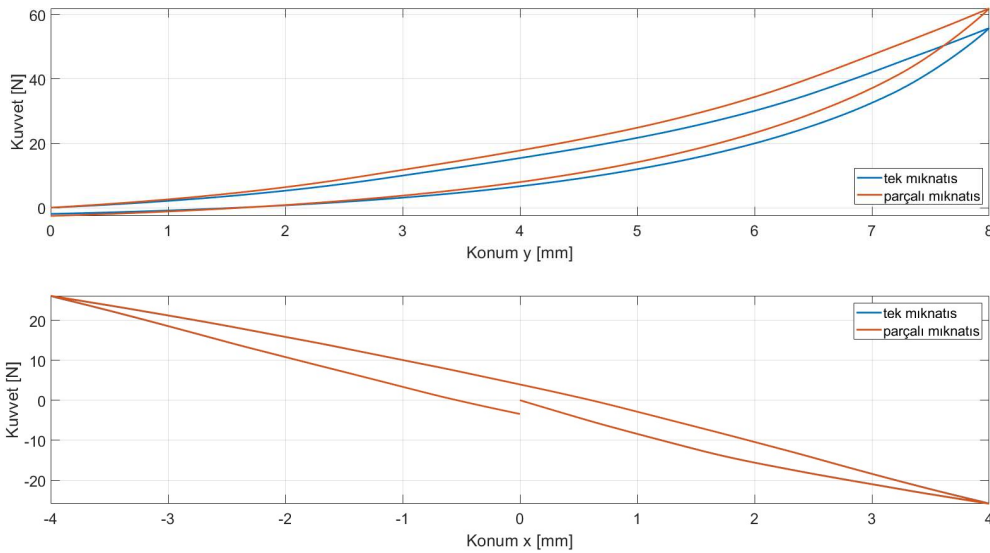
Sistemin matematiksel modellemesinin analizinde Cmsol bize hızlı ve güvenilir bilgiler verir ancak Cmsol da bu analizleri yapmanın belli başlı zorlukları vardır. Bu zorlukların başında matematiksel model başlığı altında bulunan denklemlerin Cmsola aktarılması gelir. Hali hazırda bulunan denklemler oldukça uzundur ve bunların Cmsol’un algılayabileceği formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme esnasında denklemler daha da uzar ve kontrol etmesi oldukça güç hal alır. Denklemlerin Cmsola yanlış yazılması durumunda ise hatayı bulmak daha da zordur. Bu zorluğu azaltmak amacıyla ortada bulunan 4

adet mıknatıs tek bir mıknatıs olarak Comsol'a tanıtılmıştır. Dolayısıyla elde edilen analiz sonuçları tam olarak kurulan sisteme ait değildir.



Şekil 3.13. Cansol durum çalışması için tek mıknatısla ve 2 mıknatısla kurulan sistem

Bu durum çalışmasında parçalı ve tek parça mıknatıslardan aynı sistem kurulmuştur. Çalışmada kullanılan mıknatısların polarizasyonu yönü, manyetik alanlarının kuvveti (N35 mıknatıs) birbiriyle özdeştir ve aradaki tek fark çalışmalarda kullanılan mıknatısların boyutudur. Yapılan çalışma sonucu elde edilen bulgular grafik 3.6'daki gibidir.



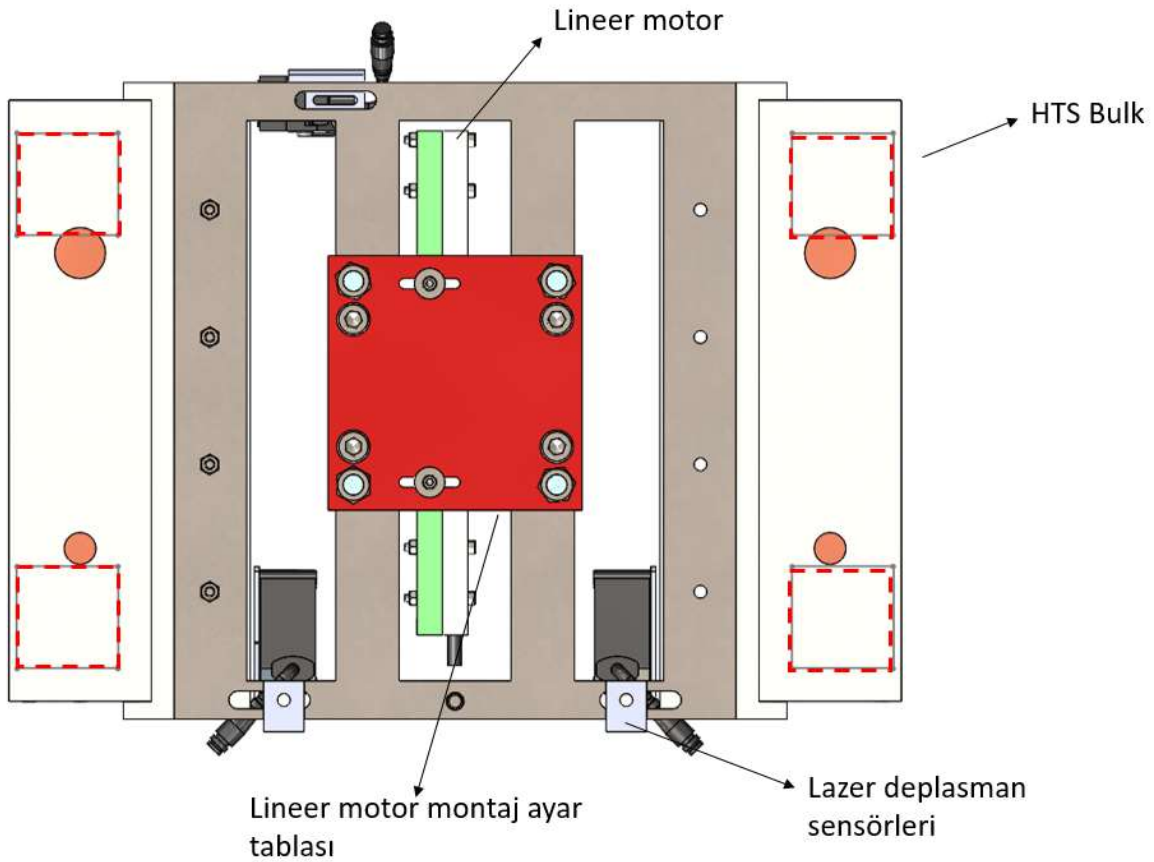
Grafik 3.6. Yapılan çalışmada dikey ve yatay konumda hareket ettirilince ortaya çıkan kuvvet konum grafikleri

Kurulan sistemler Comsol çalışmasında olduğu gibi dikey ve yatay düzlemde 0.5mm hız ile 8mm aralıkta hareket ettirilmiştir ve ortaya çıkan sonuçlar aynı grafikte üst üste çizdirilmiştir. Tek mıknatıs halinde ortada tek bir mıknatıs kullanılmış parçalı mıknatısta ise birden fazla mıknatıs kullanılmıştır. Parçalı mıknatıs analizinde gerçeğe daha yakın olması için 0.1mm kaplama payı da eklenmiştir. Kaplama payının kalınlığı mıknatıslar için kötümser bir tahmin olup gerçekte kaplama miktarı çok daha azdır. Sistem yatay ekseninde hareket ettirildiğinde kaplama miktarının bir fark yaratmadığı görülmektedir. Dikey ekseninde hareket ettirildiğinde ise 7-8% civarında bir fark vardır. Tabii ki bu iki mıknatıs ve maksimum kaplama

payı göz önüne alınarak yapılan çalışmanın sonucudur. Halbach dizilimi içinde ve daha gerçekçi kaplama payı ile fark daha az olacaktır ve analiz mevcut durumu ile kullanılabilir.

3.7. Dinamik Model

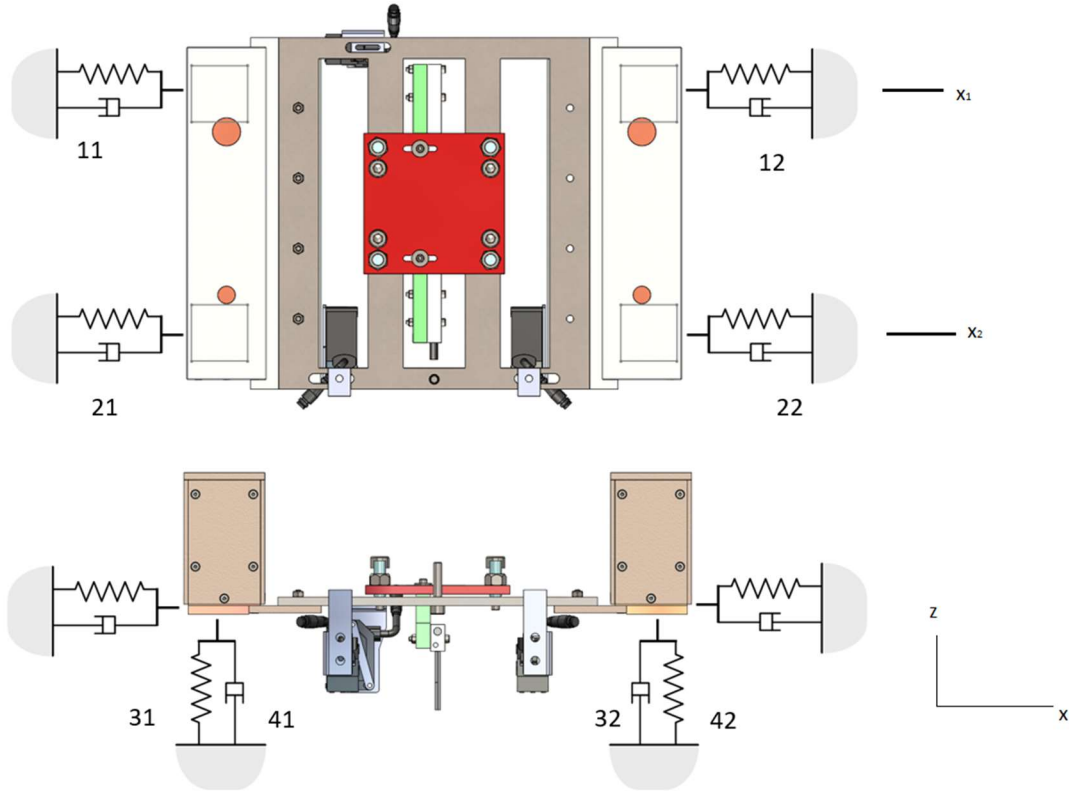
Deney için tasarlanan sistem manyetik levitasyon sağlandıktan sonra tek bir eksen üzerinde ileri ve geri hareket edecektir. Her ne kadar sistemin kritik sıcaklık altına kadar soğutulması sonrası sistem hazır hale getirilirken bir çökme meydana gelse de but tek seferliktir ve sistemin hareket serbestisi bir olarak kabul edilebilir.



Şekil 3.14. Hareketli vagon sisteminin üstten görünüşü

Normalde trenler ve arabalar yolda ilerlerken kabinde oluşan titreşimlerin çoğu yoldaki bozukluklardan, rayların birleşim noktasındaki boşluktan ve içten yanmalı motorun çalışmasından kaynaklanır. Ancak maglev tren sistemlerinde teker dolayısıyla bozuk zemin veya ray sistemi yoktur. Ayrıca içten yanmalı motor kullanılmaması sebebiyle motordan kaynaklanan bir titreşim de söz konusu olamaz. Yine de sisteme herhangi bir dış etki geldiği zaman, hareketin en kısa sürede sönümlenmesi gerekmektedir. Sönümleme işlemi kara taşıtlarında tekerlek ve süspansiyon sistemi ile yapılır ancak maglev trenlerde bunlar bulunmamaktadır. Ancak yine de süspansiyon sistemine benzer bir sistemin maglev yataklamada doğal olarak bulunduğu söylenebilir.

Süspansiyon sistemleri modellenirken kütle, yay, damper sistemi kurulur. Yine benzer olarak manyetik levitasyondaki manyetik kuvvet yay kuvveti, vagonun kütlesi kütle, histerezis de damper olarak kullanılıp benzer bir sistem kurulabilir.



Şekil 3.15. Hareketli vagon sistemindeki yay ve damperler.

Dinamik modelleme için kurulan sistem şekil 3.15’da gösterilmiştir. Sistemde dört adet yanal dört adet de dikey de olmak üzere toplam sekiz adet yay olduğu varsayılmıştır. Yine benzer olarak yanalda dört dikeyde dört adet olmak üzere sekiz adet damper olduğu varsayılmıştır. Sistem y-ekseni üstünde ileri geri hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Her ne kadar y-ekseni üzerinde bir yay katılığı ve sönümlenme olsa da vagonun hareket yolu üstünde olduğundan bunlar yok sayılmıştır. Sistemde toplam sekiz adet yay ve sekiz adet damper kullanılarak modelleme yapılacaksa da şekil 3.15’da toplam altışar damper ve yay görülmektedir. Yayların ve damperlerin numaralandırılmasında özel bir alt indis sistemi kullanıldı. Burada iki haneli bir alt indis numarası görülmektedir. Alt indisin ilk hanesi (birler basamağı) sağ veya solu belirtmektedir. Sol taraftaki yay ve damperler 1, sağ taraftakiler ise 2 olarak numaralandırılmıştır. Alt indisin ikinci hanesi yay/damperin ön arka dikey veya yanalda bulunduğunu belirtir. 1 yanal arka, 2 yanal ön, 3 dikey arka ve 4 dikey ön olduğunu belirtir. Bir örnek vermek gerekirse k_{31} dikey arka soldaki yayın sabitini belirtir. Deney için tasarlanan sistem kendi içinde simetriktir ve her bir süperiletken birbiriyle özdeşdir dolayısıyla yanal yay

ve sönüm katsayıları birbirleriyle eşitir. Yine benzer olarak dikey yay ve sönüm katsayıları birbirlerine eşittir. Ancak modelleme yapılırken bu katsayıların hepsine tek bir isim altında toplamak yerine teker teker ayrı isim verilmiştir dolayısıyla gerçek sistemde bir değişiklik yapılırsa tekrar modelleme yapılmasına gerek kalmadan kolayca matematiksel model üzerinde değişiklik yapılabilir. Bu bilgiler ışığında sistemin enerji denklemleri aşağıdaki gibidir.

Sistemin potansiyel enerji denklemi:

$$U = \frac{1}{2}k_{11}(x_1 - L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{12}(x_1 - L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{21}(x_2 + L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{22}(x_2 + L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{31}(z_{31} + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x)^2 + \frac{1}{2}k_{32}(z_{32} - L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x)^2 + \frac{1}{2}k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x)^2 + \frac{1}{2}k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x)^2 \quad (3.6)$$

Sistemin kinetik enerji denklemi:

$$T = \frac{1}{2} \frac{m}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{2} \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{4} \dot{z}_{31}^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{4} \dot{z}_{32}^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{4} \dot{z}_{41}^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{4} \dot{z}_{42}^2 + \frac{1}{2} I_x \dot{\theta}_x^2 + \frac{1}{2} I_y \dot{\theta}_y^2 + \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}_z^2 \quad (3.7)$$

Sistemdeki sönümün denklemi:

$$D = \frac{1}{2}c_{11}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{12}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{21}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{22}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{31}(\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x)^2 + \frac{1}{2}c_{32}(\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x)^2 + \frac{1}{2}c_{41}(\dot{z}_{41} + L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x)^2 + \frac{1}{2}c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x)^2 \quad (3.8)$$

Şeklindedir.

Üç boyutlu uzayda herhangi bir cisim üçü öteleme, üçü de dönme olmak üzere en fazla altı hareket serbestisi olabilir ancak kurulan hareket denklemlerine bakıldığında tanımlanan eksen sayısı altıdan fazladır. Denklemdeki x_1 ve x_2 x eksenini üzerinde, z_{31} , z_{32} , z_{41} ve z_{42} z eksen, üzerinde yer almaktadır. Aynı eksen üzerinde birden fazla eksen tanımlanmış olması dinamik modelin kurulabilmesi içindir. Benzer sistemler yarım araba süspansiyon sistemlerinin kurulmasında da kullanılır. Her ne kadar vagon tek parça olarak modellenip x_1 'den gelen bir hareket doğrudan x_2 'ye de etki edecek olsa da kurulan denklemlerde bu eksenler birbirinden bağımsız olarak modellenir böylece her bir eksenenden gelen etkinin bir başka eksenindeki etkisi diğer eksenlerden yalıtılarak incelenebilir. Dolayısıyla kurulan sistem sadece beş hareket serbestisine sahiptir ve y ekseninde dış etkiler ihmal edilmiştir.

Kurulan enerji denklemlerinden hareket denklemlerini elde etmek için Lagrange metodu kullanılır. Genel Lagrange denklemi:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (3.9)$$

Her bir hareket eksini için Lagrange denklemi, enerji denklemlerine uygulanır. Birinci hareket ekseni olan x_1 için Lagrange uygulanır.

$q_i = x_1, Q_i = U_1$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{2} \dot{x}_1 \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{m}{2} \ddot{x}_1 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{11}(x_1 - L_y \sin \theta_z) + k_{12}(x_1 - L_y \sin \theta_z) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{11}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z) + c_{12}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z) \quad (3.13)$$

x_1 yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{2} \ddot{x}_1 + k_{11}(x_1 - L_y \sin \theta_z) + k_{12}(x_1 - L_y \sin \theta_z) + c_{11}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z) + c_{12}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z) = U_1 \quad (3.14)$$

İkinci hareket ekseni olan x_2 için Lagrange uygulanır.

$q_i = x_2, Q_i = U_2$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{2} \dot{x}_2 \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{m}{2} \ddot{x}_2 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{21}(x_2 + L_y \sin \theta_z) + k_{22}(x_2 + L_y \sin \theta_z) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{21}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z) + c_{22}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z) \quad (3.18)$$

x_2 yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{2} \ddot{x}_2 + k_{21}(x_2 + L_y \sin \theta_z) + k_{22}(x_2 + L_y \sin \theta_z) + c_{21}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z) + c_{22}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z) = U_2 \quad (3.19)$$

Üçüncü hareket ekseni olan z_{31} için Lagrange uygulanır.

$q_i = z_{31}, Q_i = U_3$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{4} \dot{z}_{31} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{m}{4} \ddot{z}_{31} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{31} (z_{31} + L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{31} (\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) \quad (3.23)$$

z_{31} yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{4} \ddot{z}_{31} + k_{31} (z_{31} + L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) + c_{31} (\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) = U_3 \quad (3.24)$$

Dördüncü hareket eksenini olan z_{32} için Lagrange uygulanır.

$q_i = z_{32}, Q_i = U_4$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{4} \dot{z}_{32} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{m}{4} \ddot{z}_{32} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{32} (z_{32} - L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{32} (\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) \quad (3.28)$$

z_{32} yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{4} \ddot{z}_{32} + k_{32} (z_{32} - L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) + c_{32} (\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) = U_4 \quad (3.29)$$

Beşinci hareket eksenini olan z_{41} için Lagrange uygulanır.

$q_i = z_{41}, Q_i = U_5$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{4} \dot{z}_{41} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{m}{4} \ddot{z}_{41} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{41} (z_{41} + L_x \sin \theta_y + L_y \sin \theta_x) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{41} (\dot{z}_{41} + L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) \quad (3.33)$$

z_{41} yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{4}\ddot{z}_{41} + k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) + c_{41}(\dot{z}_{41} + L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) = U_5 \quad (3.34)$$

Altıncı hareket eksenini olan z_{42} için Lagrange uygulanır.

$q_i = z_{42}, Q_i = U_6$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = \frac{m}{4}\dot{z}_{42} \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) = \frac{m}{4}\ddot{z}_{42} \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} = k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) \quad (3.38)$$

z_{42} yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{m}{4}\ddot{z}_{42} + k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) + c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) = U_6 \quad (3.39)$$

Doğrusal bütün eksenler üzerinde Lagrange metodu uygulanmıştır geriye 3 adet rotasyonel eksenler kalmıştır. θ_x üzerinde Lagrange uygulanır.

$q_i = \theta_x, Q_i = U_7$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = I_x \dot{\theta}_x \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) = I_x \ddot{\theta}_x \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial q_i} = & -k_{31}(z_{31} + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x)L_y \cos\theta_x - k_{32}(z_{32} - L_x \sin\theta_y - \\ & L_y \sin\theta_x)L_y \cos\theta_x + k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x)L_y \cos\theta_x + k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + \\ & L_y \sin\theta_x)L_y \cos\theta_x \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = & -c_{31}(\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x)L_y - c_{32}(\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x)L_y + c_{41}(\dot{z}_{41} + L_x \dot{\theta}_y + \\ & L_y \dot{\theta}_x)L_y + c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x)L_y \end{aligned} \quad (3.43)$$

θ_x yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
& I_x \ddot{\theta}_x - k_{31}(z_{31} + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x) L_y \cos\theta_x - k_{32}(z_{32} - L_x \sin\theta_y - \\
& L_y \sin\theta_x) L_y \cos\theta_x + k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) L_y \cos\theta_x + k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + \\
& L_y \sin\theta_x) L_y \cos\theta_x - c_{31}(\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_y - c_{32}(\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_y + c_{41}(\dot{z}_{41} + \\
& L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) L_y + c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) L_y = U_7
\end{aligned} \tag{3.44}$$

θ_y üzerinde Lagrange uygulanır.

$q_i = \theta_y, Q_i = U_8$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = I_y \dot{\theta}_y \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = I_y \ddot{\theta}_y \tag{3.45}$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial q_i} &= k_{31}(z_{31} + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y - k_{32}(z_{32} - L_x \sin\theta_y - \\
& L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y + k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y - k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + \\
& L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y
\end{aligned} \tag{3.47}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} &= c_{31}(\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_x - c_{32}(\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_x + c_{41}(\dot{z}_{41} + L_x \dot{\theta}_y + \\
& L_y \dot{\theta}_x) L_x - c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) L_x
\end{aligned} \tag{3.48}$$

θ_y yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
& I_y \ddot{\theta}_y + k_{31}(z_{31} + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y - k_{32}(z_{32} - L_x \sin\theta_y - \\
& L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y + k_{41}(z_{41} + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y - k_{42}(z_{42} - L_x \sin\theta_y + \\
& L_y \sin\theta_x) L_x \cos\theta_y + c_{31}(\dot{z}_{31} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_x - c_{32}(\dot{z}_{32} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) L_x + c_{41}(\dot{z}_{41} + \\
& L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) L_x - c_{42}(\dot{z}_{42} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) L_x = U_8
\end{aligned} \tag{3.49}$$

θ_z üzerinde Lagrange uygulanır.

$q_i = \theta_z, Q_i = U_9$ için:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = I_z \dot{\theta}_z \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = I_z \ddot{\theta}_z \tag{3.50}$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial q_i} &= -k_{11}(x_1 - L_y \sin\theta_z) L_y \cos\theta_z - k_{12}(x_1 - L_y \sin\theta_z) L_y \cos\theta_z + k_{21}(x_2 + \\
& L_y \sin\theta_z) L_y \cos\theta_z + k_{22}(x_2 + L_y \sin\theta_z) L_y \cos\theta_z
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = -c_{11}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)L_y - c_{12}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)L_y + c_{21}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)L_y + c_{22}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)L_y \quad (3.53)$$

θ_z yönündeki hareketin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$I_z \ddot{\theta}_z - k_{11}(x_1 - L_y \sin \theta_z)L_y \cos \theta_z - k_{12}(x_1 - L_y \sin \theta_z)L_y \cos \theta_z + k_{21}(x_2 + L_y \sin \theta_z)L_y \cos \theta_z + k_{22}(x_2 + L_y \sin \theta_z)L_y \cos \theta_z - c_{11}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)L_y - c_{12}(\dot{x}_1 - L_y \dot{\theta}_z)L_y + c_{21}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)L_y + c_{22}(\dot{x}_2 + L_y \dot{\theta}_z)L_y = U_9 \quad (3.54)$$

Lagrange metodunun uygulanması sonu ortaya 9 adet hareket denklemi çıkmıştır. Bu dokuz denklem tek bir denklem altında matrislerle gösterilebilir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = U \quad (3.55)$$

Burada M, C ve K matrisleri 9x9 boyutundadır ve sayfa düzeni açısından tez üzerinde gösterilmesi anlaşılma açısından zor olacaktır. Ancak dinamik model için oluşturulan matlab dosyasında her bir matris mevcuttur ve ekler kısmında kodlar verilmiştir. Hareket denklemlerinden matrisler oluşturulurken ufak açı varsayımı kabul edilmiştir buna varsayıma göre $\sin \theta = \theta$, $\tan \theta = \theta$ ve $\cos \theta = 1$ kabul edilir. Bu varsayım sayesinde lineer olmayan hareket denklemleri lineer hale dönüşür. Her ne kadar bu dönüşüm esnasında bir miktar hata ortaya çıksa da genel olarak bu hata sıfır kabul edilebilir. Hareket denklemlerinin lineere dönüşmesiyle birlikte çözümü de kolaylaşmıştır.

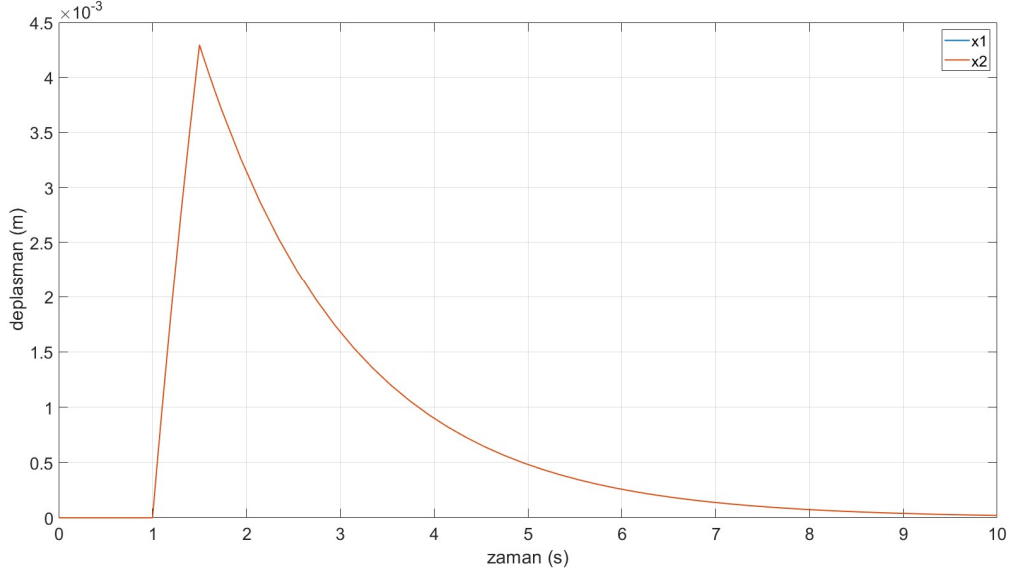
Bulunan hareket denklemleri durum-uzay denklemi biçiminde yazılabilir. Durum-uzay denklemlerinin genel formu:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.56)$$

Şeklinde dir.

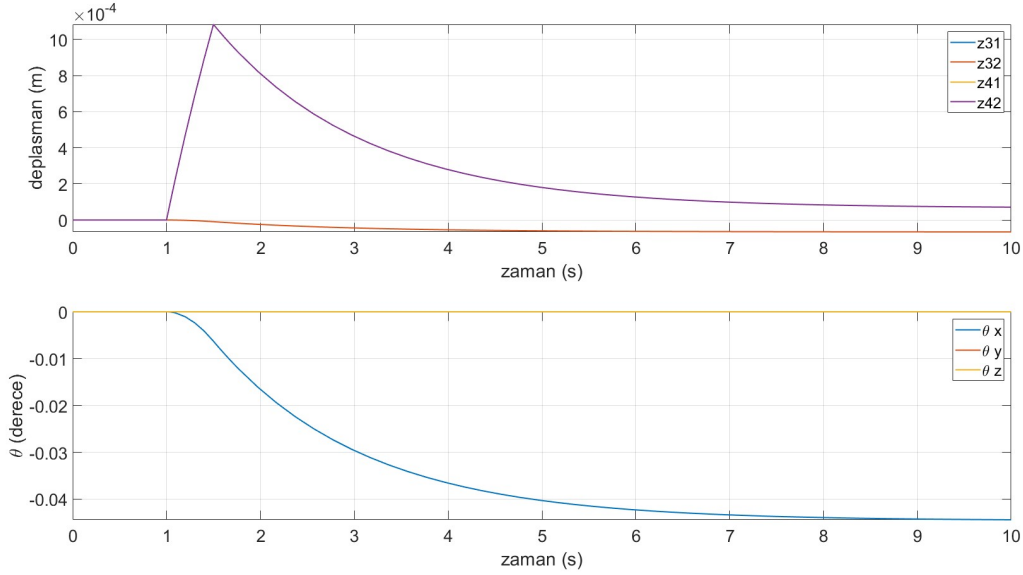
3.8. Matlab ve Matlab Simulink Analizi

Sistemin dinamik modeli Matlab ve Simulink kullanılarak modellenmiştir. Model oluşturulurken dinamik model başlığı altındaki denklemleri kullanılarak durum uzay matrisleri oluşturulmuş ve bu matrisler kullanılarak Simulink ortamında sistem oluşturulmuştur. Oluşturulan sistem üzerine iki ayrı adet etki girilmiştir ve bu etkiler karşısında sistemin verdiği cevap gözlemlenmiştir. Sistemin dinamik modelinin oluşturulmasında kullanılan Matlab kodları ve oluşturulan Simulink'in ekran görüntüsü ekler kısmında verilmiştir.



Grafik 3.7. Yatay ekseninde vagona verilen tepkinin sistem üzerindeki etkisi.

İlk olarak sisteme x_1 eksenini üzerinden bir etki yapılmıştır. Bu etki sonucu sistem en başta 4.3mm kadar bir sapma meydana gelmiştir. Bu sapma zamanla sönümlenip 10 saniye içinde ilk haline geri dönmüştür. Ayrıca grafikten de görüleceği üzere etki sadece x_1 ekseninde verilmiş olsa da x_2 de x_1 ile aynı tepkiyi göstermiştir.



Grafik 3.8. Dikey ekseninde vagona verilen tepkinin sistem üzerindeki etkisi.

Matlab Simulink ile yapılan ikinci çalışmada ilk çalışmadakine benzer olarak bir etki bu sefer z_{31} eksenini üzerinden sisteme etki etmiştir. Her ne kadar sonuçlar bir önceki çalışmadakine benzer olsa da arada farklılıklar vardır. Bu etki sonucu z_{31} eksenini en başta 1.1 mm kadar yukarı kalkmıştır. Daha sonra bu etki sönümlenip sistem yavaş yavaş ilk haline yakın bir duruma geri dönmüştür ama sistemin son hali ilk haline tam olarak dönememiştir. Zaman sonsuza doğru

giderken z_{31} ilk duruma göre 0.09mm daha yüksek bir noktada durmuştur buna karşın z_{32} , z_{41} , z_{42} ilk durumlarına göre daha düşük bir pozisyona kaymıştır. Aslında bu kayma gözle görülemeyecek kadar küçük olup sistemin θ_x açısı 0.044 derece kadar sapmıştır.

Yapılan ilk çalışmanın ilk pozisyona dönüp ikincisinin dönememesinin birkaç şekilde açıklanabilir. Bunlardan ilki x yönünde bir hareket girdisi olduğu zaman vagonun bir tarafında süperiletkenler mıknatıstan uzaklaşırken diğer tarafında mıknatıslara yakınlaşmaktadır dolayısıyla sistem her iki taraftan dengelenmektedir. Z yönünde bir hareket girdisinde ise durum farklıdır. Süperiletken mıknatıs çiftleri sadece vagonun altındadır ve levitasyon sağlamaktadır vagonun üstünde ayrıca süperiletken mıknatıs çiftleri yoktur. Bu da x yönündeki hareketlerden farklı olarak ekstra dengeleme olmadığını gösterir. Bir başka neden ise histerezis olarak görülebilir. Süperiletken ve mıknatıs arasında bir hareketlilik olmuştur ve bu da histerezisin olmasına neden olmuştur ve sonuçta backlash (boşluk) oluşmuştur.

Elde edilen sonuçlardan yapılan bir başka çıkarım ise gerçekleşmesi imkânsız (her bir köşenin yüksekliği) olan sonuçların simülasyon sonucu elde edilmiş olmasıdır. Bunun nedeni sistemim araç süspansiyon sistemi gibi simüle edilmesidir. Araçlarda her bir tekerin süspansiyonu birbirinden bağımsızdır ve yükseklikleri de birbirinden farklı olabilir. Ne var ki deneydeki sistemde her bir köşe birbiriyle bağlantılıdır. Ancak simülasyonun yapılabilmesi için her bir köşenin birbirinden bağımsız olduğu varsayılmıştır. Sonuç olarak bu varsayım simülasyonda bazı hatalar doğurur ancak sistemin verdiği genel tepkinin gözlemlenmesi açısından bu hatalar yok sayılabilir. Ayrıca her bir köşenin yüksekliklerindeki hata ufak olduğundan göz ardı edilebilir seviyededir.

4. SÜPERİLETKEN MANYETİK FIRLATICI DENEYSEL ÇALIŞMALAR

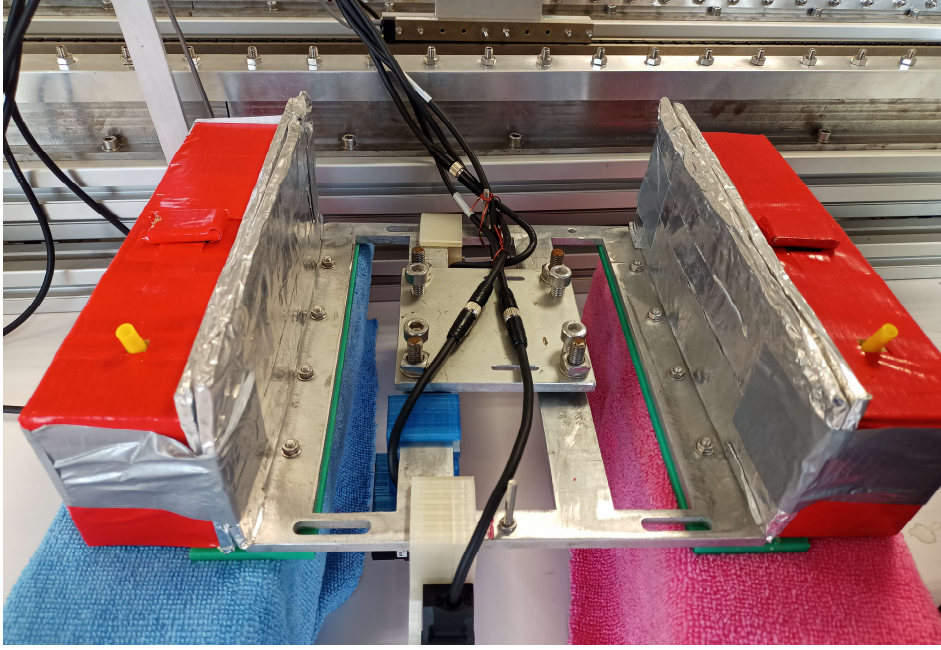
4.1. Deney Düzenegi

Deney düzeneginin mekanik tasarımıyla ilgili bilgiler bölüm 3.1, 3.2 ve 3.3 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde deney düzenegi genel hatları ile tanıtılacak ve nasıl işlediği anlatılacaktır. Deney düzenegi genel olarak 3 ana unsurdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki mekanik aksamlar, ikincisi elektronik aksamlar ve son olarak yazılımlar. Şekil 4.1 'de bir önceki bölümde tasarımı detaylı bir şekilde anlatılan deney düzeneginin kurulu hali görülmektedir ayrıca deneyde kullanılan süperiletkenlerin kritik sıcaklığa soğutulmasında kullanılan sıvı azotun depolandığı tank yine bu şekilde gösterilmiştir.



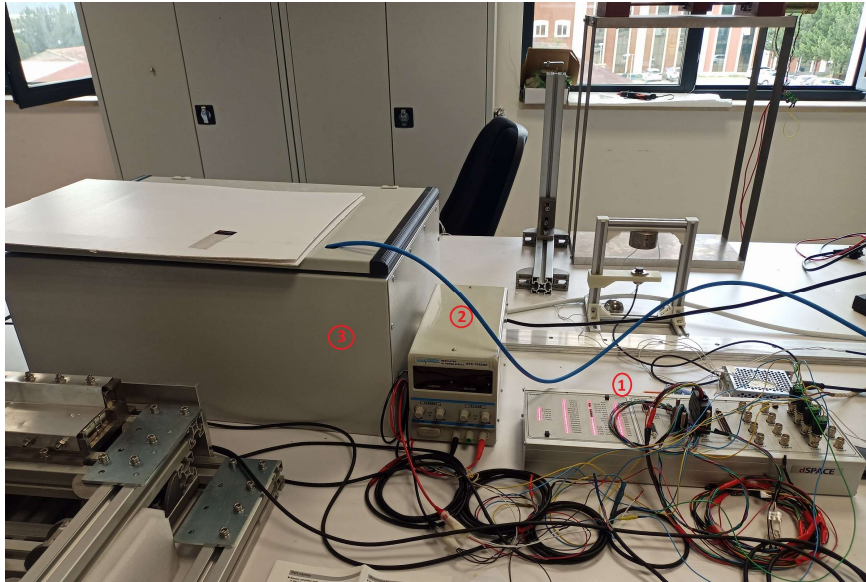
Şekil 4.1. Deney düzenegi. 1 numara ile gösterilen kısımda raylar ve lineer motor bulunmaktadır. 2 ile gösterilen ise sıvı azot tankıdır.

Deneyde kullanılan kriyostat ve vagon düzenegi de şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen kırmızı kutular sıvı azotun konulduğu bölgelerdir. Bu kırmızı kutuların altında bakır taban ve süperiletkenler bulunmaktadır. Ayrıca şekilde alüminyum gövde, bu gövde üzerindeki lineer motorların bağlanacağı delikler görülmektedir. Şekilde ayrıca lazer sensörler de vagona bağlı haldedir.



Şekil 4.2. Kriyostat ve vagon düzeni

Kurulan deney düzeninin boyu yaklaşık 1.8 metredir. Eklemlerin ve krikonun bulunduğu alanlar ve kriyostat vagonun boyu çıkarıldığında hareket alanı olarak 1.3 metrelik bir mesafe kalmaktadır. Deneyler bu 1.3 metrelik ileri geri mesafede gerçekleştirilmektedir. Deneylerin gerçekleştirildiği bu hareket lineer motor sayesinde sağlanmaktadır. Lineer motorun hareketi servo motorlara benzemektedir. Servo motorlarda bulunan geri besleme sistemi lineer motorlarda okuma şeridi ve enkoder aracılığıyla sağlanmaktadır.



Şekil 4.3. Deney düzeninin elektronik aksamı. 1 numara ile gösterilen dSpace kontrolcü kartı, 2 numara ile güç kaynağı, 3 numara ile lineer motorun elektrik kutusudur.

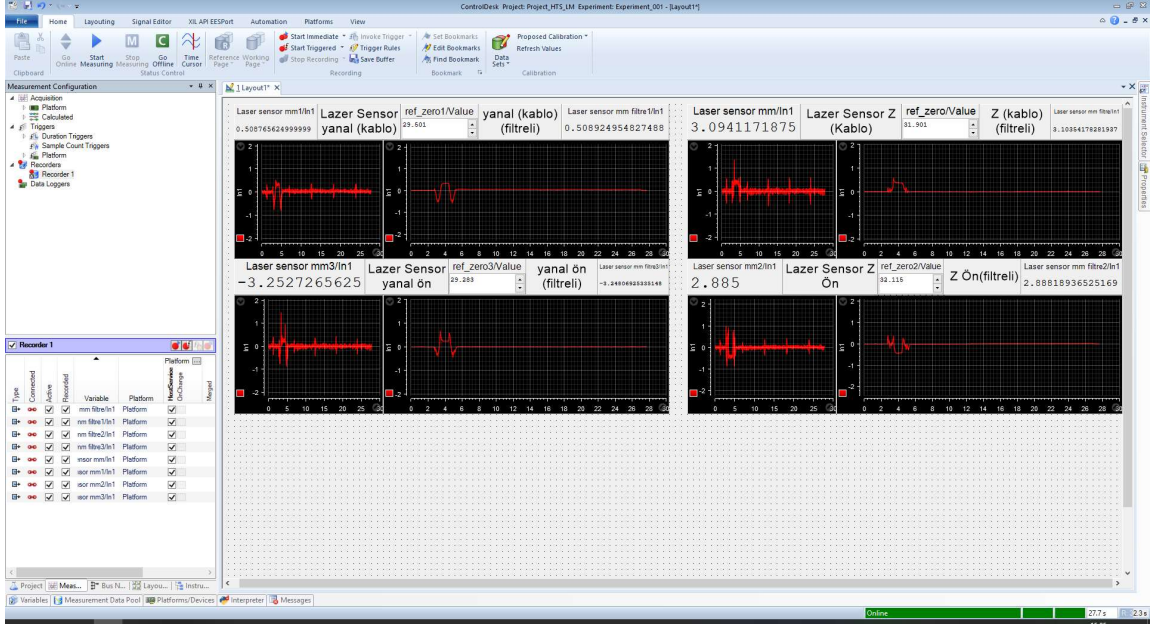
Şekil 4.3’de deney düzeninin elektronik aksamı görülmektedir. 1 numara ile gösterilen parça kontrolcüdür. Kurulan deney düzeninde Meissner etkisi nedeni ile aktif

kontrolcüye ihtiyaç duyulmamaktadır ancak bu parça aracılığıyla sensörlerden gelen veri bilgisayar ortamına aktarılabilir. Şekilde 2 ile gösterilen parça güç kaynağıdır. Güç kaynağı lazer sensörlere enerji sağlamak için kullanılmaktadır. Şekilde 3 ile gösterilen parça lineer motorun sürülmesinde kullanılan elektrik kutusudur. Lineer enkoderden gelen bilgi bu kutuda işlenip lineer motoru hareket ettiren sinyaller bu kutudan gönderilmektedir.



Şekil 4.4. Lineer motorun hızının, ivmesinin, jerkinin ve gideceği mesafenin ayarlanabildiği Scada ara yüzü.

Deney düzeneğinin en son kısmında yazılımlar kullanılmaktadır. Şekil 4.4’de gösterilen ara yüz ile lineer motorun hız, ivme, jerk ve pozisyon kontrolü manuel bir şekilde yapılabilmektedir ayrıca lineer motora binen yük de bu ara yüzde okunabilmektedir. Deney düzeneği bir engele maruz kalırsa veya herhangi bir parça sıkışıp da deney düzeneğini hareketini engellerse bu ara yüz aracılığıyla gözlemlenebilir. Şekil 4.5’de ise dSpace arayüzü görülmektedir. Matlab’ın da yardımıyla dSpace’in kendi programında kurulan bu arayüz ile lazer sensörlerle ölçülen değerler eş zamanlı olarak yüksek çözünürlükle ve yüksek örnekleme frekansı ile izlenebilmektedir.

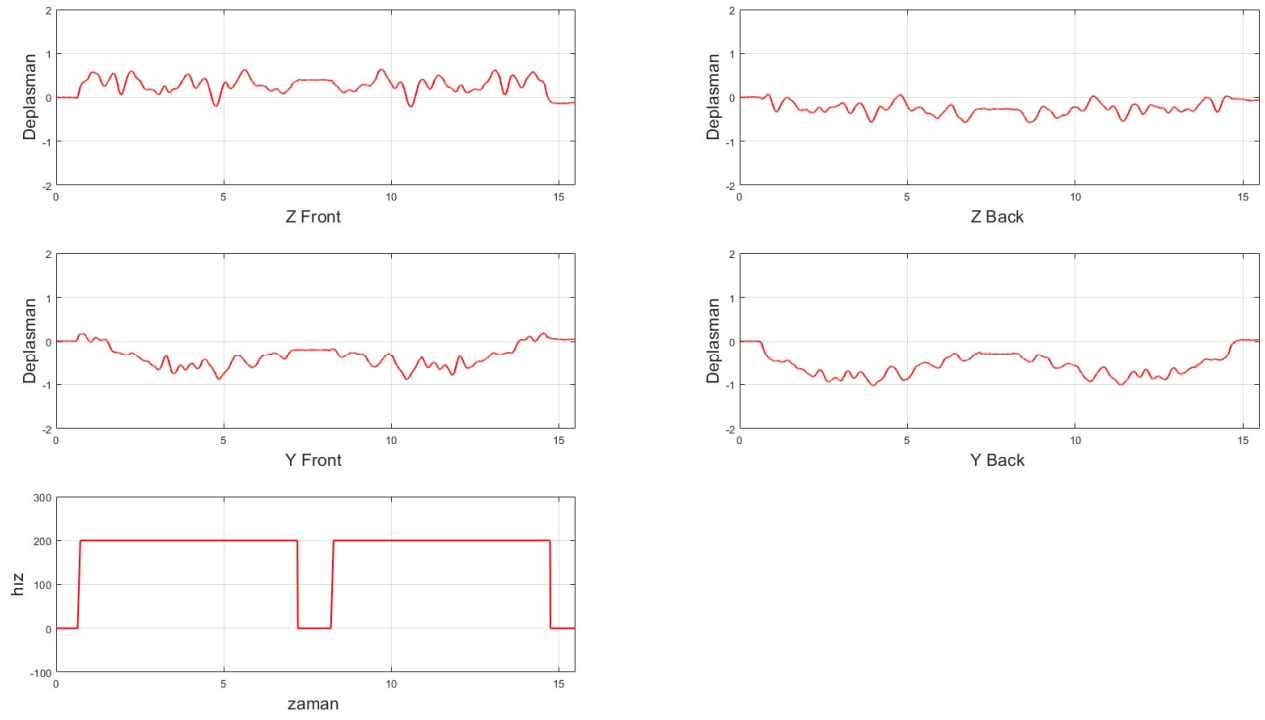


Şekil 4.5. dSpace arayüzü.

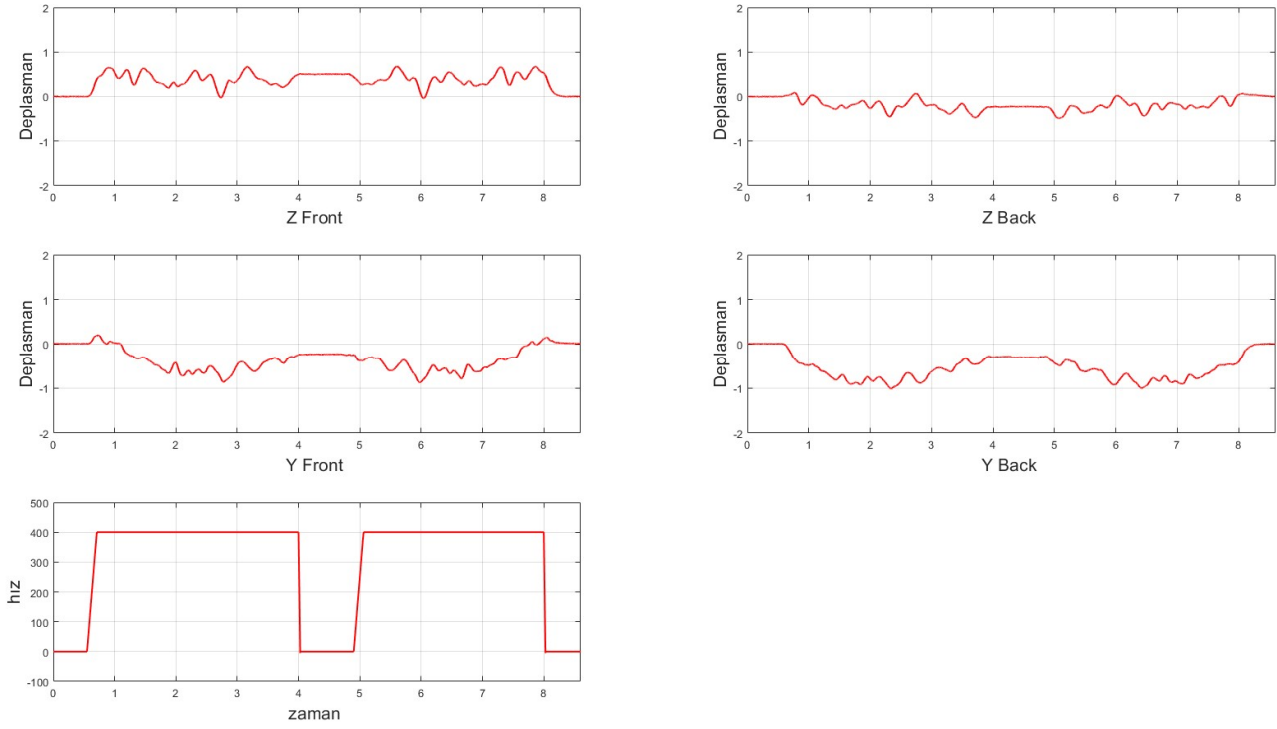
4.2. Deneysel Çalışmalar

Kurulan sistem ile yatay düzlemde değişik hızlarla, değişik açılarla oluşturulmuş eğimli düzeyde değişik hızlarla deneyler yapılacaktır. Bunların dışında sistemin manyetik alan içinde kritik sıcaklığa soğutulması ve soğutulma esnasında takoz olarak kullanılan parçaların sistemden ayrılması sonucu oluşacak statik çökme de gözlenecektir. Son olarak sistemin üstüne miktarı ölçülebilir yük bindirilecek ve sistemin katılığı ölçülecektir. Her bir deney öncesi sistemin ön ayarları yapılmakta ve dışarıdan gelen etkenlerin deney düzeneği üzerine etkisi minimize edilmeye çalışılmaktadır dolayısıyla sistemin deneye hazır hale getirilmesi zaman almıştır ve gelecekteki benzer deneylerde de yine ince ayarlar nedeniyle ön hazırlık çalışmaları gerekebilmektedir.

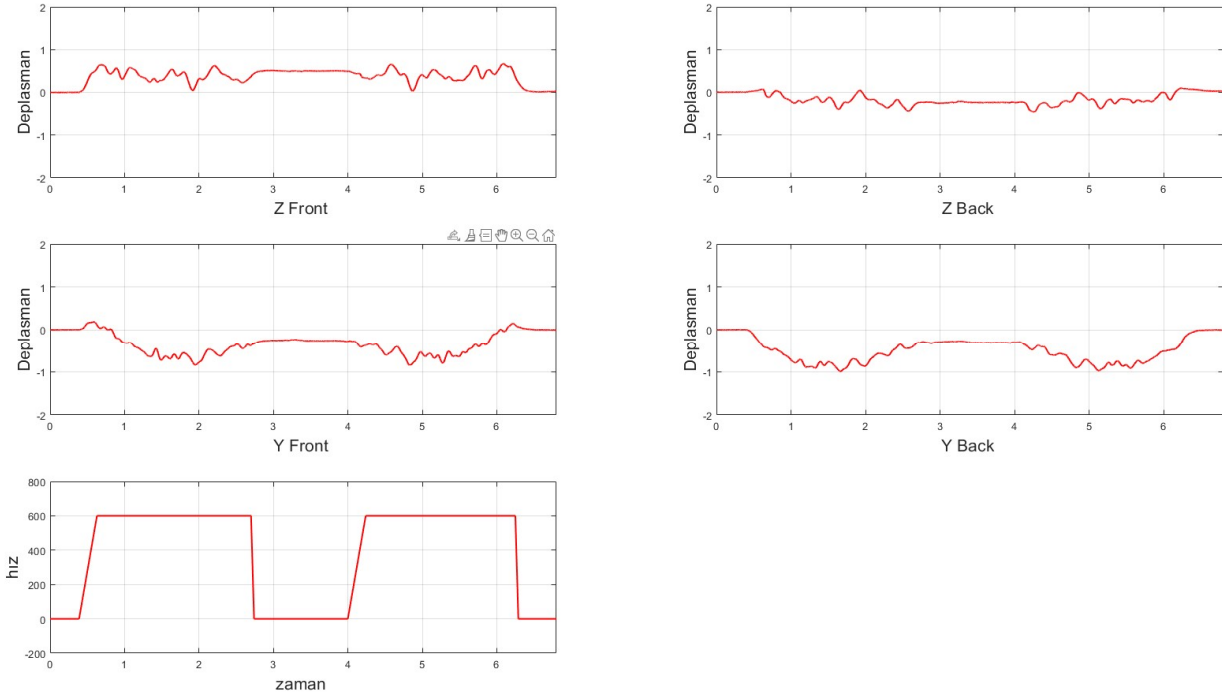
Şu ana kadar yatay düzlemde, farklı hızlarda, vagon üstündeki sensörlerle yatay ve dikeydeki yer değiştirmeler ölçülmüştür. Aşağıdaki grafiklerde bu yer değiştirmeler görülmektedir. Z Front ve Z Back sırasıyla dikey düzlemde vagonun ön ve arka tarafındaki yer değiştirmedir ve üst sırada iki grafikte bunlar gösterilmiştir. Y Front ve Y Back sırasıyla yatay düzlemde vagonun ön ve arka yer değiştirmeleridir. Orta sıradaki iki grafikte yanal yer değiştirme gösterilmiştir. En alttaki tek grafiklerde ise vagonun hız profili zaman grafiğidir.



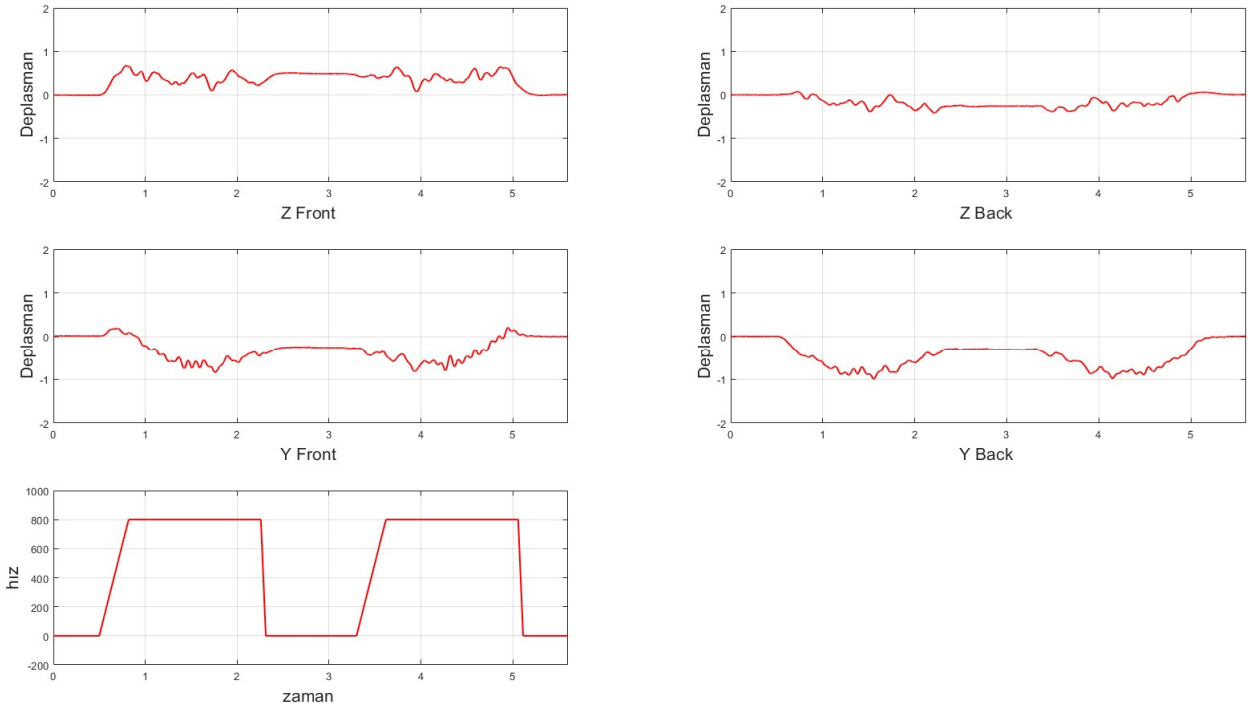
Grafik 4.1. 200 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



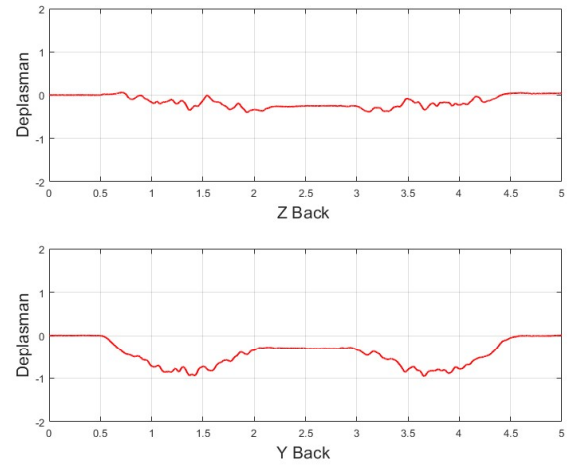
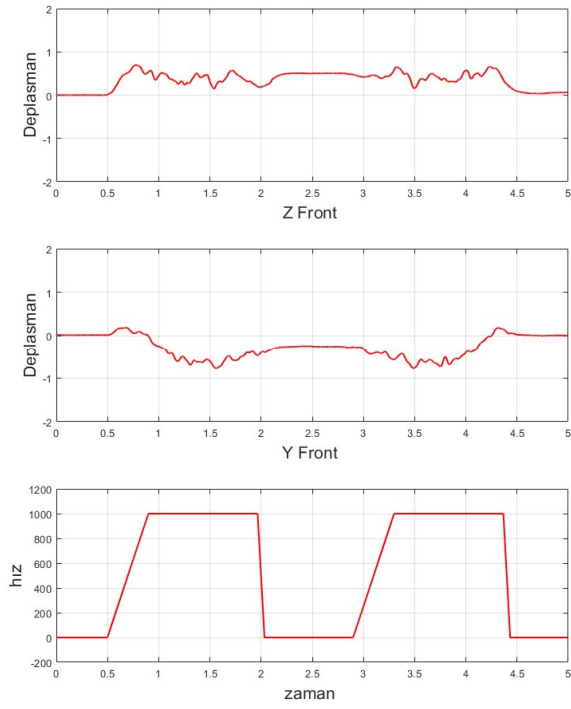
Grafik 4.2. 400 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



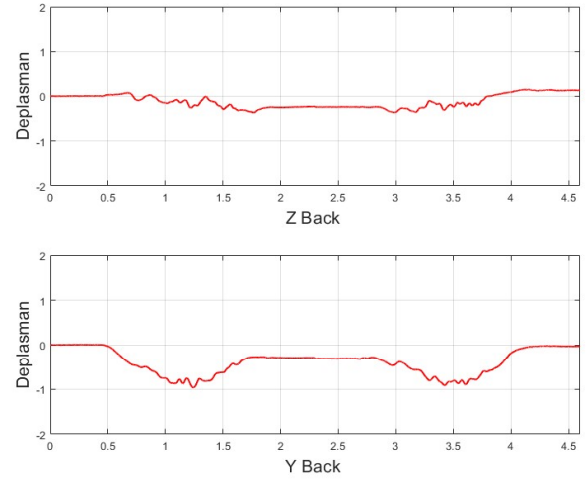
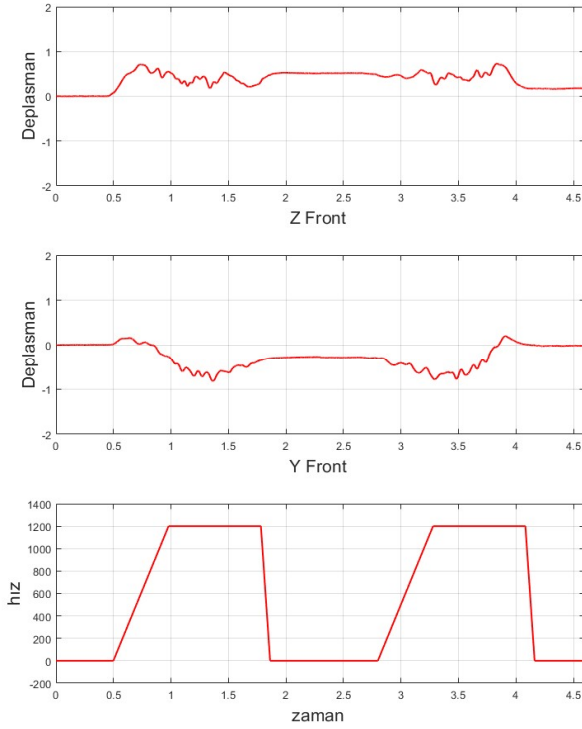
Grafik 4.3. 600 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



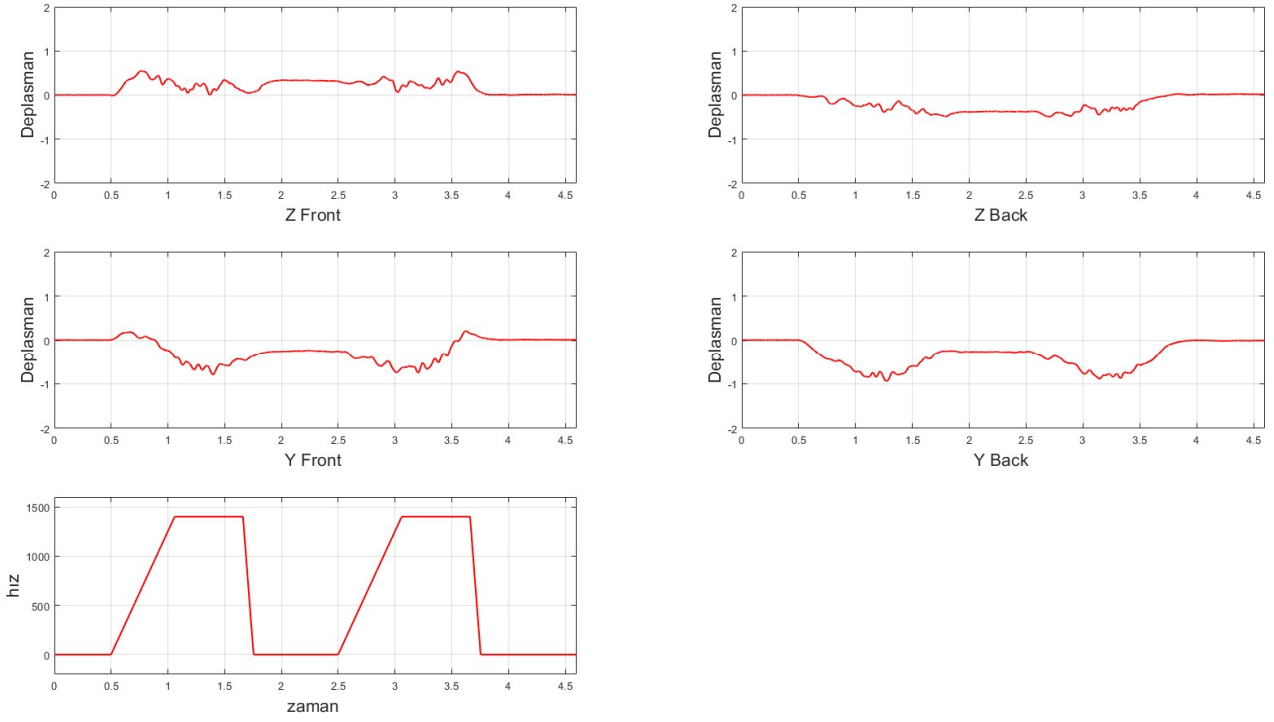
Grafik 4.4. 800 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



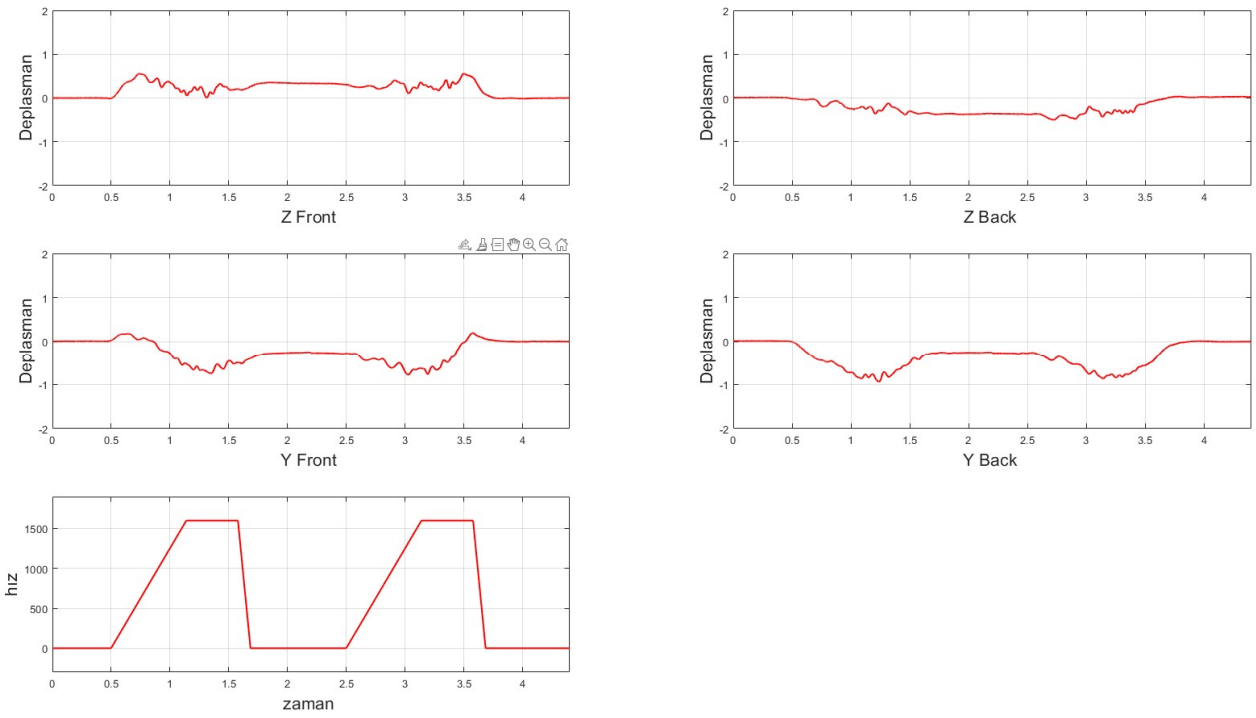
Grafik 4.5. 1000 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



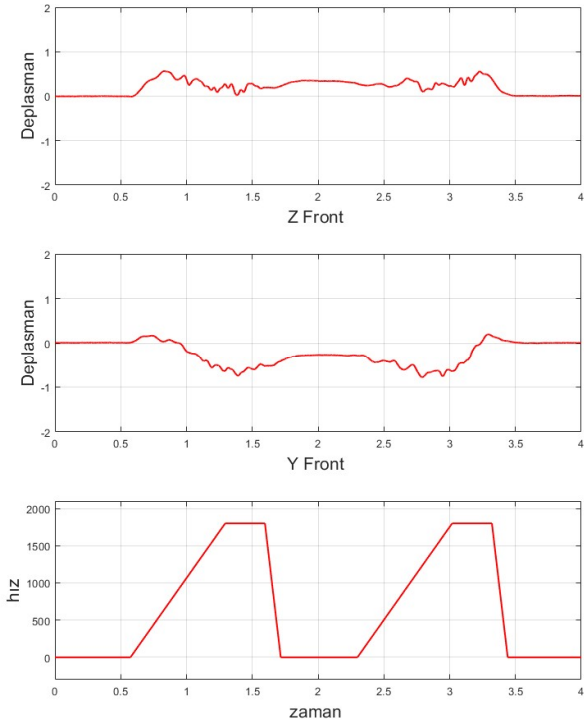
Grafik 4.6. 1200 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



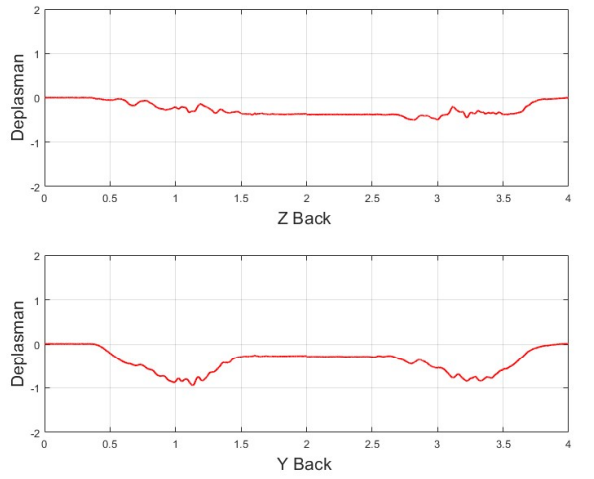
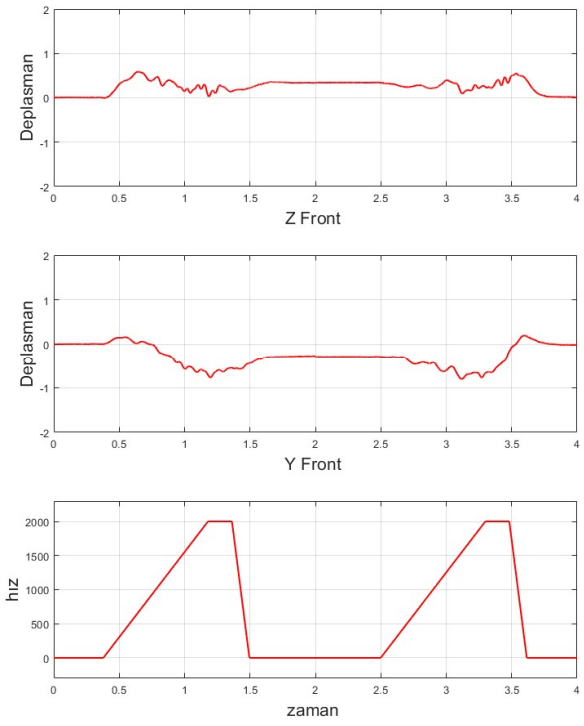
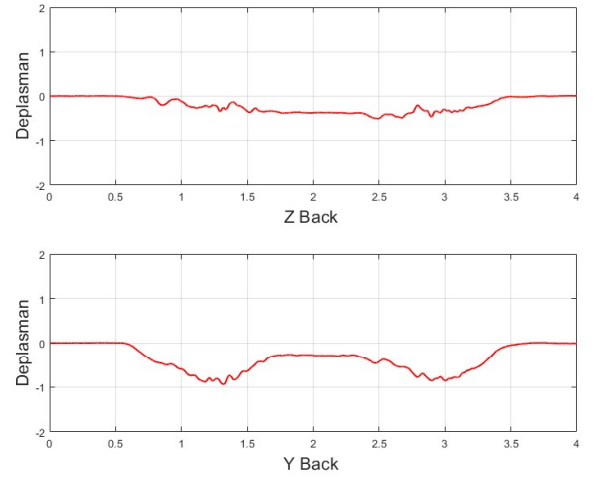
Grafik 4.7. 1400 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



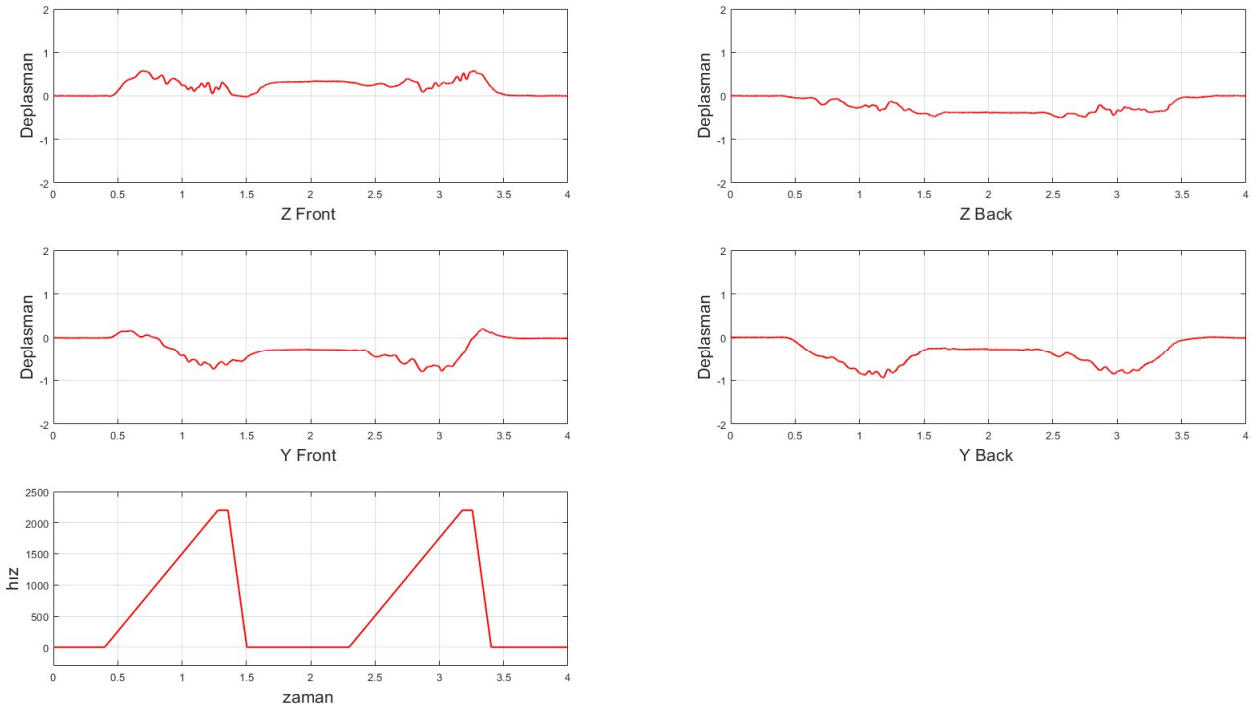
Grafik 4.8. 1600 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



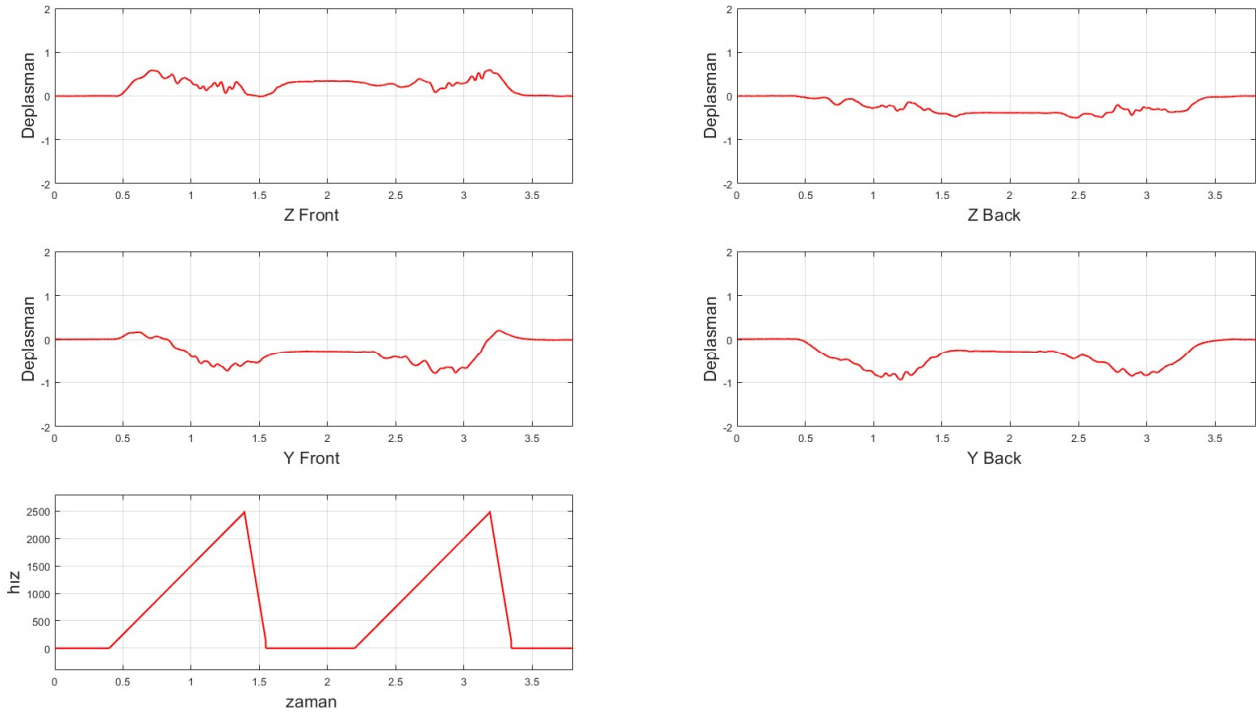
Grafik 4.9. 1800 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.



Grafik 4.10. 2000 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.

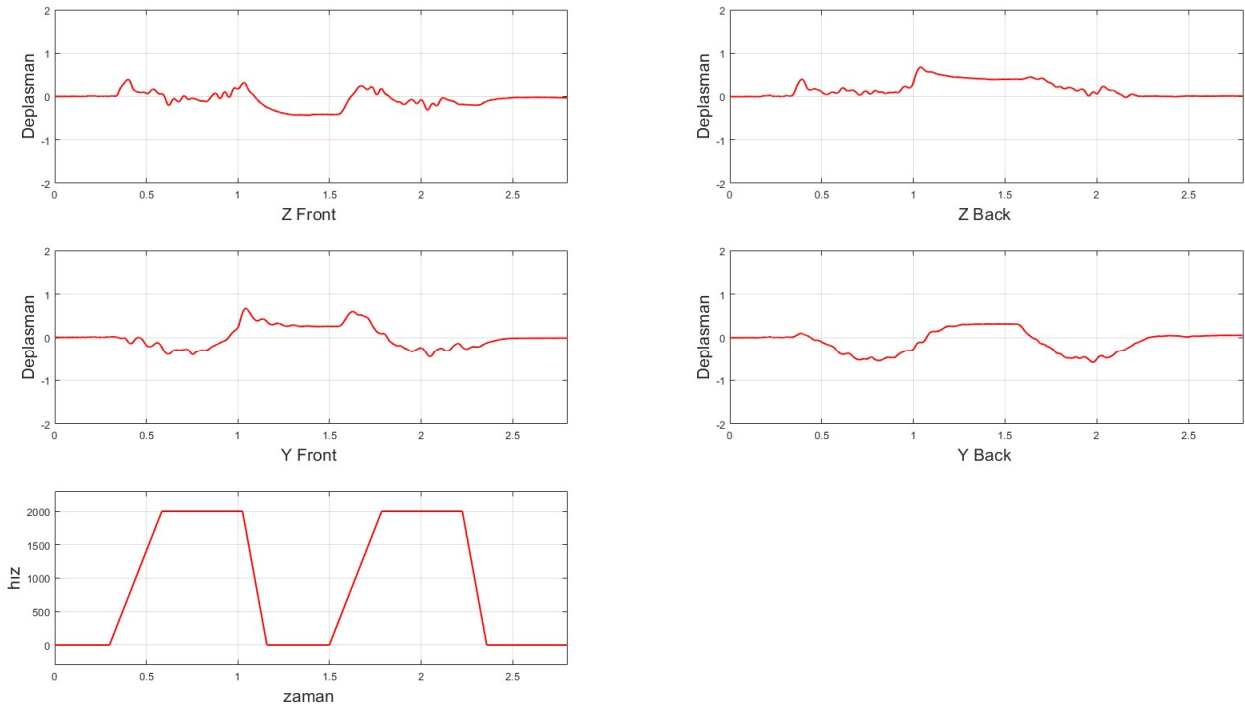


Grafik 4.11. 2200 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü.

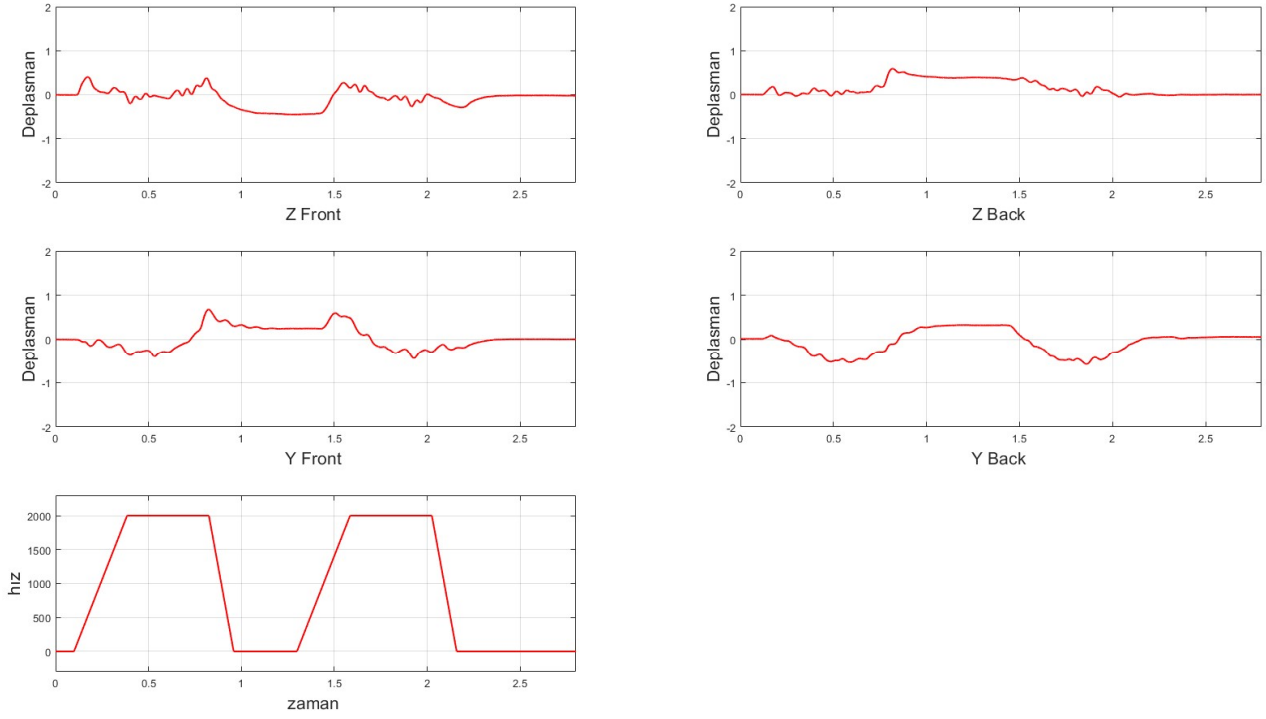


Grafik 4.12. 2500 mm/s hızla deney düzeneğinin 1300mm deki konumundan 0mm konumuna gidişi ve 1300mm konumuna geri dönüşü

Grafik 4.1'den grafik 4.12'ye kadar olan grafiklerde lineer motor encoder'a göre 1300mm olarak okunan konumdan 0mm olarak okunan konuma vagon belirtilen hızlarda hareket ettirilmiş ve kısa bir süre duraksadıktan sonra 1300mm konumuna geri döndürülmüştür. Her bir sensörün değişik hızlarda kaydettiği yer değiştirme profilleri birbirlerine benzerlik gösterse de grafikler arasında bazı farklılıklar gözlenmektedir. Düşük hızlarda elde edilen yer değiştirmeler dikey düzlemde 0.7mm yatay düzlemde 1mm büyüklüğündedir. Hızlar arttıkça dikey düzlemde maksimum yer değiştirme miktarı 0.5mm'ye kadar düşerken yatayda hala 1mm olarak devam etmektedir. Bu da vagonun hızının attığında dikey düzlemindeki maksimum yer değişiminin azaldığını ve vagonun yukarı aşağı yönde daha az sarsıntılı bir yol izlediğini gösterir. Aynı durumu yatay düzlemde söylenemiyor. Bunun en büyük nedeni ise 1.5m uzunluğundaki raylar döşenirken 1mm'lik bir paralellik hatası oluşmuştur mevcut üretim teknolojileri ile bu hata kaçınılmazdır. Hız arttıkça gözlemlenen başka bir olgu ise elde edilen grafik profillerinin daha pürüzsüz olmasıdır. Yani hız arttıkça vagon daha az sarsıntılı bir şekilde yol almaktadır. Grafiklerden okunabilecek bir başka olgu da 0mm'de vagon kısa süreli dururken vagonun önünün arka tarafa göre 0.8mm daha yukarı da olduğudur. Çıplak gözle gözlemlenemeyecek olan bu değişiklik lineer motorun vagonu tam ortasından değil de arkaya doğru bir noktadan ittirmesinden kaynaklanmaktadır.



Grafik 4.13. 2000 mm/s hızla deney düzeneğinin 0mm deki konumundan 1300mm konumuna gidişi ve 0mm konumuna geri dönüşü, Deney 1.



Grafik 4.14. 2000 mm/s hızla deney düzeneğinin 0mm deki konumundan 1300mm konumuna gidişi ve 0mm konumuna geri dönüşü, Deney 2.

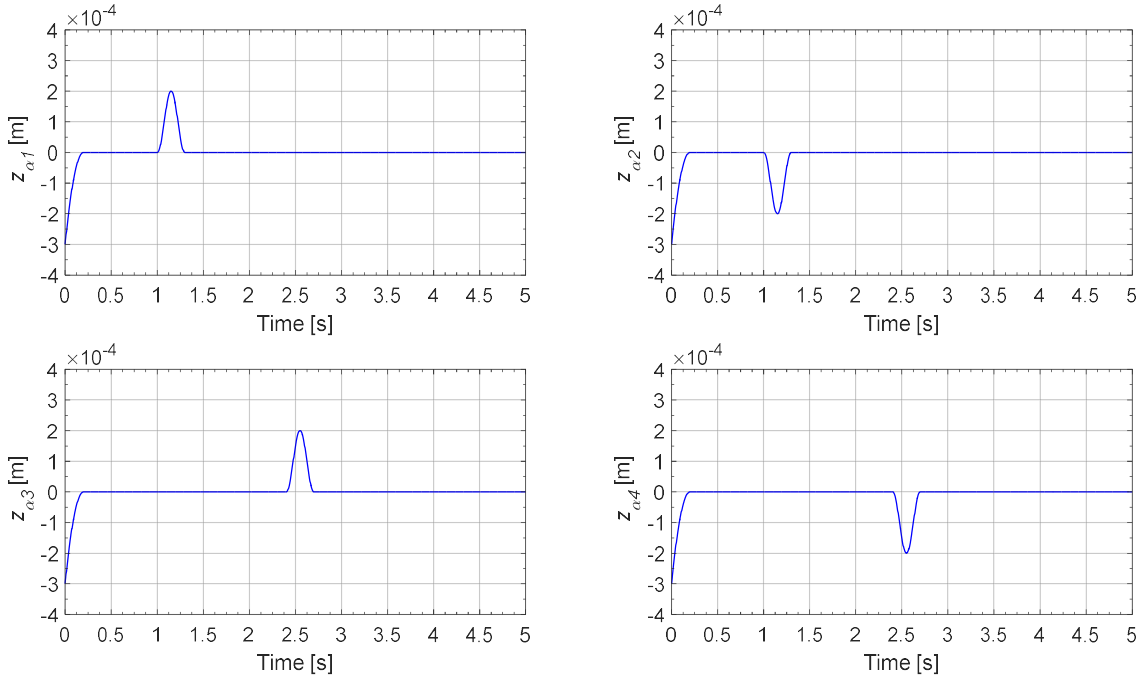
Grafik 4.13 ve grafik 4.14 daha önce Scada ara yüzünde hazırlanmış ve vagonu 0mm'den 1300mm'ye götüren ve sonra 0mm'ye geri döndüren hazır bir fonksiyonun iki defa çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Öncelikle u deneyin parametreleri az önceki deneyin parametrelerinden farklıdır. Önceki deneyde değişik hızlar verilmiştir ve bu hızlara ulaşmak için $2500\text{mm}/\text{s}^2$ 'lik bir ivme ve $100000\text{mm}/\text{s}^3$ 'lük bir jerk kullanılmıştır. Yeni deneyde 2000mm/s 'lik hıza ulaşabilmek için $7000\text{mm}/\text{s}^2$ 'lik bir ivme ve $100000\text{mm}/\text{s}^3$ 'lük bir jerk kullanılmıştır. Her ne kadar ilk deney grubunda son deneyler 2500mm/s'lik hızlarda gerçekleşmiş olsa da ivme daha düşük olduğundan gözle daha yavaş olarak algılanmaktadır. Ayrıca grafik 4.13 ve 4.14 incelendiğinde elde edilen grafikler birbirlerine çok benzemektedir. Bu da kullanılan sensörlerin hassasiyetinin çok yüksek olduğu ve yapılacak deneme sayısından bağımsız olarak aynı sonuçların elde edileceğini gösterir. Bir önceki deney grubuyla sonuçlar karşılaştırıldığında; ivme artırıldığına sistemin daha sarsıntılı bir şekilde çalıştığı söylenebilir.

5. DURUM ÇALIŞMASI

Öğrencinin Yüksek Lisans çalışması süresince proje çalışmasından bağımsız ancak konu kapsamı açısından proje çalışmasına paralel başka bir çalışma daha olmuştur. Bu yapılan çalışma 6-7 Temmuz 2020'de Güney Afrika'nın Johannesburg kentinde yapılan uluslararası konferansta da sunulmuş ve akabinde kongre kitabında da yayınlanmıştır (Altınkılıç ve Başaran, 2020: 59).

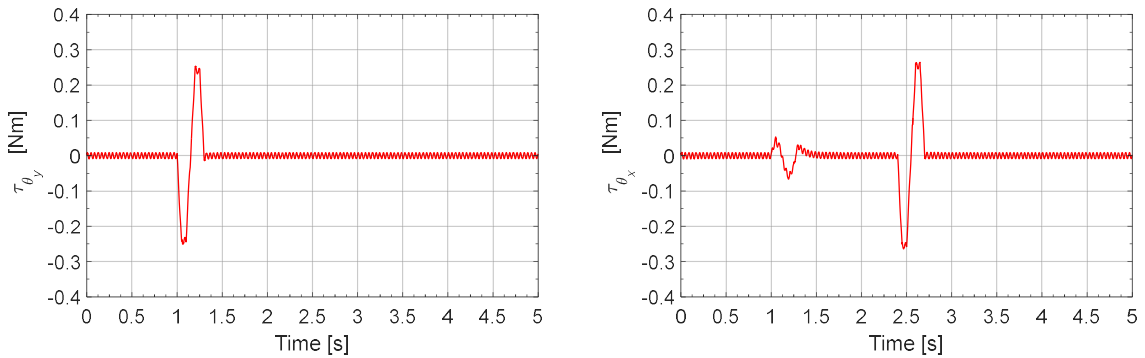
Proje çalışmasında süperiletken manyetik yataklama kullanılarak lineer fırlatıcı üzerinde çalışılmışken konferans çalışmasında süperiletken volan sistemi tasarlanmıştır. Proje çalışmasına benzer olarak her iki sistemde de süperiletken yataklama mevcuttur. Proje çalışmasında süperiletken ve kalıcı mıknatıs çiftleri kullanılarak pasif yataklama yapılmıştır. Konferans çalışmasında ise hibrit yataklama kullanılmıştır. Proje çalışmasından farklı olarak projedeki hareket lineer yöndeysen konferans çalışmasındaki hareket dönme şeklindedir.

Manyetik yataklar genel olarak üçe ayrılabilir. Bunlardan ilki pasif yataklama. Pasif yataklama herhangi bir kontrol gereksinimi olmadan kalıcı mıknatıs ve süperiletkenlerle kurulabilen bir yataklama çeşididir. Diğer manyetik yataklara göre avantajı herhangi bir kontrol gerektirmez ve kendi kendine levite halindedir. Diğer yataklara göre dezavantajı ise süperiletken malzeme kullanılması gerektiğinden diğer yataklama çeşitlerine göre çok daha pahalıdır. Bir diğer manyetik yataklama yöntemi aktif yataklama. Aktif yataklamada elektromıknatıs ve ferromanyetik malzemeler kullanılır. Aktif yataklamada levitasyon elektromıknatısa verilen akım ile kontrol edilir. Ferromanyetik malzemenin elektromıknatısa olan mesafesine göre akım değişir ve mesafe sürekli sabit tutularak levitasyon sağlanır. Aktif yataklama pasif yataklamaya göre her ne kadar daha ucuz olsa da kontrol sistemi gerektirdiğinden kurulumu daha zordur. En son manyetik yataklama yöntemi ise hibrit yataklama. Hibrit yataklamada aktif ve pasif yataklama bir arada kullanılır. Hibrit yataklı sistemlerde pasif yataklar gibi süperiletken kullandığından pahalıdır ancak miktar olarak süperiletken kalıcı mıknatıs çiftlerinin bazıları elektromıknatıslarla değiştirildiğinden pasif yataklar kadar pahalı değildirler. Ayrıca sistemde kullanılan elektromıknatıslar sistemin çalışması için kontrol edilmelidirler.



Grafik 5.1. Volan diski ve elektromıknatısların arasındaki mesafe.

Sistem hibrit olduğu için aktif kontrol de gerekecektir. Sistemin kontrolü için PID kontrolcü düşünülmüştür. Kurulan sistem Matlab ve Matlab Simulink kullanılarak simüle edilmiştir. Grafik 3.9’da elektromıknatısların hemen yanına konuşlanmış sensörler ile volan ve elektromıknatıs arasındaki mesafe görülmektedir bu mesafedeki değişim volan eksenindeki kaymayı gösterir. Sistemde dört adet elektromıknatıs ve her bir elektromıknatısın hemen yanında sensörler bulunmaktadır. Grafikte her bir sensördeki okuma gözükmemektedir.



Grafik 5.2. Volan ekseninin kayması sonucu oluşan tork

Eksendeki kayma sonucu oluşan tork miktarı Grafik 3.10’da gösterilmiştir. Çalışmanın amacı elektromıknatıslar kullanılarak tork üretebilmektir ve simülasyon sonucu istenen etki oluşturulabilmiştir.

6. SONUÇ

Proje ve tezde çalışılan konunun temel olarak lineer manyetik yataklama üzerinedir. Günümüz teknolojisinde manyetik yataklar sıkça kullanım alanı bulsa da, konvansiyonel yataklar günlük hayatta daha çok tercih edilmektedir. Bunların sebebinin başında fiyat ve uygulama kolaylığı gelmektedir. Ancak Manyetik yatakların mekanik yataklara göre bariz avantajları bulunmaktadır. Mekanik yataklar mekanik temastan ötürü kobayca aşınabilirken manyetik yataklarda bu sorun gözlenmemektedir. Ayrıca Mekanik yataklarda ulaşılması imkânsız hızlara manyetik yataklarda kolayca ulaşılabilir. Sonuç olarak Mekanik yataklar ile teknolojinin ulaşamayacağı limitler manyetik yataklar ile kolayca aşılabilir.

Tezde çalışılan konunun birçok uygulama alanı bulunmaktadır bunlardan bir tanesi insansız hava araçlarının pist olmaksızın havalandırılabilmesidir (Sivrioğlu vd., 2018: 262). Bu tabii ki uygulama alanlarından sadece bir tanesidir ve bu örnek kolayca çoğaltılabilir. Bu tezde esas olarak üç ana konu üzerinde çalışılmıştır. Bunlar kalıcı mıknatıs ray tasarımında hangi mıknatısın hangi polarizasyonda ve hangi konumda kullanılması gerektiği. Tasarlanan ray ve süperiletken arasındaki yay ve sönüm katsayısının hesaplanması. Hesaplanan yay ve sönüm katsayısı kullanılarak hareket serbestisi 9 olan dinamik modelin kurulması. Ayrıca proje ile doğrudan bir alakası olmasa da tezin konusu ile bağlantılı olduğu için 2020 yılında yapılan ve uluslararası bir kongrede de sunulan çalışma hakkında bilgi verilmiştir.

Tezde yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışılan konular birbirleriyle doğrudan alakalıdır. İlk çalışılan konu olan kalıcı mıknatıs ray tasarımı yapılmadan ray ve süperiletken arasındaki yay ve sönüm katsayıları hesaplanamaz. Yine aynı şekilde bu katsayılar hesaplanmadan dinamik modelin kurulması da imkânsızdır. Her bir çalışma ile ilgili elde edilen sonuçlar kendi başlıklarının altında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kendi içinde tutarlılık göstermektedir.

Gerek çalışılan alanın nispeten teknolojik olarak yeni bir alan olması gerekse de çalışılan konunun epey kısıtlı bir çerçeve içinde çalışılması açısından gelecekte konu rahatça daha da ileri götürülebilir. Örnek olarak ray tasarımı çalışmasında daha önceden yapılan bir çalışma esas alınarak 4 ray tasarım örneği incelenmiş ve bunların arasından bir seçim yapılmıştır. Ancak ray tasarımı kolayca çeşitlendirilebilir. Rayın tasarımı konusunda kullanılacak mıknatısların türü boyutu ve kolayca temin edilebilir olması en büyük kısıtlayıcı faktördür. Gelecekte daha geniş bir mıknatıs pazarı oluşabilirse ray tasarımı da çok daha gelişebilir. Ayrıca mevcut mıknatıslarla ilgili farklı ray tasarımları üzerine çalışılabilir. Yapılan

çalışmada yanal mıknatısın hangi yükseklikte durması gerektiği üzerine çalışılmıştı ancak yatay eksen olarak hangi konumda olması gerektiği de çalışılabilir.

Bir başka çalışma konusu yay ve sönüm katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar yapılırken manyetik alan içinde soğutma (FC) yapılacağı öngörülmüştür ancak manyetik alansız soğutmanın (ZFC) levitasyon kuvveti açısından daha avantajlı olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla mevcut ray tasarımı ve süperiletken arasındaki katsayılar hesaplanırken farklı durumlar da incelenebilir.

Çalışmada sistemin dinamik analizi de yapılmıştır. Yapılan dinamik analiz deneylerle doğrulanabilir ve daha da geliştirilebilir. Mevcut projenin zaman cetveli, tezin zaman cetveli ile tam olarak uyuşmadığından yapılan çalışmaların birçoğu deneysel olarak bu tez aşamasında doğrulanamasa da gelecek çalışmalarda bu konu çalışılabilir.

Tez çalışmaları kapsamında kurulan sistemde deneylerde yapılmıştır bunların sonuçları kendi başlıkları altında incelenmiştir. Vagonun hızı arttırıldığında sistem daha sarsıntısız bir şekilde hareket ederken ivme arttırıldığında ise sarsıntının şiddeti artmıştır. Ancak sarsıntıların miktarını sadece hızla orantılanmak doğru olmaz deney esnasında sistemin içindeki sıvı azot miktarı da süreyle azalmaktadır ve kriyostatın içindeki sıvı azotun dalgalanması da bozucu bir etkidir. Her ne kadar tasarım ve üretim safhasında kriyostatın içine dalgakıran konulmuş olsa da bu bozucu etkiyi tamamen ortadan kaldırmaz.

KAYNAKÇA

- Altinkılıç, M., ve Başaran, S.** (2020). Tilting Torque Generation With Electromagnetic and Superconducting Magnetic Bearing Flywheel System. *International African Conference on Current Studies of Science, Technology & Social Sciences, July 6-7*, ss. 59–65. Johannesburg.
- Başaran, S., Altinkılıç, M., ve Yıldız, A. S.** (2021). Süperiletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Sistemi için H - Formülü Yöntemi ile Manyetik Ray Konfigürasyonu Tasarımı Magnetic Rail Configuration Design with H - Formulation Method for Superconducting Magnetic Bearing Linear Launcher System, (23), ss. 742–749.
- Bean, C. P.** (1964). Magnetization of high-field superconductors. *Reviews of Modern Physics*, 36(1), ss. 31–39.
- Bednorz, J. G., Takashige, M., ve Müller, K. A.** (1986). Susceptibility measurements support high-T_csuperconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Properties of Perovskites and Other Oxides*, 193, ss. 555–565.
- Bergen, A., Andersen, R., Bauer, M., Boy, H., Brake, M. ter, Brutsaert, P., Bühner, C., vd.** (2019). Design and in-field testing of the world’s first ReBCO rotor for a 3.6 MW wind generator. *Superconductor Science and Technology*, 32(12), s. 125006.
- Bussmann-holder, A., ve Keller, H.** (2019). High-temperature superconductors : underlying physics and applications, ss. 1–13.
- Dahl, P. F.** (1984). Kamerlingh Onnes and the Discovery of Superconductivity : The Leyden Years , 1911-1914 Author (s): Per F . Dahl Source : Historical Studies in the Physical Sciences , Vol . 15 , No . 1 (1984), pp . 1-37 Published by : University of California Press St. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 15(1), ss. 1–37.
- Drozdov, A. P., Kong, P. P., Minkov, V. S., Besedin, S. P., Kuzovnikov, M. A., Mozaffari, S., Balicas, L., vd.** (2019). Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. *Nature*, 569(7757), ss. 528–531.
- Duan, D., Yu, H., Xie, H., ve Cui, T.** (2019). Ab Initio Approach and Its Impact on Superconductivity. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(1), ss. 53–60. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*.
- Edmond, I., ve Firth, L. D.** (1992). Hysteresis in a high-temperature superconductor. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 3813(4), ss. 3813–3818.

- Finnemore, D. K., Stromberg, T. F., ve Swenson, C. A.** (1966). Superconducting properties of high-purity niobium. *Physical Review*, 149(1), ss. 231–243.
- Ireson, G.** (2012). *Discovering Superconductivity: An Investigative Approach*. Wiley.
- Joy, P. A., Kumar, P. S. A., ve Date, S. K.** (1998). The relationship between field-cooled and zero-field-cooled susceptibilities of some ordered magnetic systems. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(48), ss. 11049–11054. IOP Publishing. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/10/48/024> adresinden erişildi.
- Labarta, A., Batlle, X., ve Iglesias, O.** (2005). *From Finite-Size and Surface Effects to Glassy Behaviour in Ferrimagnetic Nanoparticles*.
- Lin, F., Qu, R., ve Li, D.** (2016). A Novel Fully Superconducting Geared Machine. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(7), ss. 1–5.
- Liu, J., Blair, D. G., ve Ju, L.** (2016). Passive Micro Vibration Isolator Utilizing Flux. *Journal of Physics: Conference Series, MOVIC RASD(744)*, ss. 1–12.
- London, H., ve London, F.** (1935). The Electromagnetic Equations of the Supraconductor. *Proceedings of the Royal Society*, 85(1933), ss. 71–88.
- Ma, K. B., Postrekhin, Y. V., ve Chu, W. K.** (2003). Superconductor and magnet levitation devices. *Review of Scientific Instruments*, 74(12), ss. 4989–5017.
- Meissner, W., ve Ochsenfeld, R.** (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Die Naturwissenschaften*, 21(44), ss. 787–788.
- Nam, G., Sung, H., Kim, C., Park, M., ve Yu, I.** (2019). Design and Characteristic Analysis of a 1 MW Superconducting Motor for Ship Propulsions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), ss. 1–5.
- Neunzig, O., Köbbling, M., Weikert, M., ve Tajmar, M.** (2019). Characterization of a Rotational Thrust Balance for Propellantless Propulsion Concepts Utilizing Magnetic Levitation with Superconductors ACTIVE-Aerodynamic Thrustvectoring on Aerospike Nozzles View project Electric Propulsion Innovation and Competitivy , (5 Eylül 2021). tarihinde <https://www.researchgate.net/publication/335995569> adresinden erişildi.
- Onnes H.K.** (1911). The resistance of pure mercury at helium temperatures. Superconductivity and Magnetism, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden 119-120.
- Prigozhin, L.** (2014). On the Bean critical-state model in superconductivity, (May).

- Sarangi, S., ve Chockalingam, S.** (2005). Experimental Evidence for Zero DC Resistance of Superconductors. *arXiv preprint cond-mat/ ...*, ss. 1–10.
- Schweitzer, D. G., Garber, M., ve Bertman, B.** (1967). Hysteresis in Superconductors. I. Flux Trapping in Low- and High-K Materials*. *Physical Review*, 159(1964), ss. 296–300.
- Shen, B., Grilli, F., ve Coombs, T.** (2020). Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications. *IEEE Access*, 8(August), ss. 100403–100414.
- Sivrioğlu, S., Yıldız, A. S., Başaran, S., ve Bolat, F. Ç.** (2018). Design and simulation of a model maglev vehicle, *I(c)*, ss. 262–271.
- Soulen, R. J.** (2019). James Dewar, His Flask and Other Achievements. *Physics Today*, 49(3), ss. 32–37.
- Sung, H., Kim, G., Kim, K., Jung, S., Park, M., Yu, I., Kim, Y., vd.** (2013). Practical Design of a 10 MW Superconducting Wind Power Generator Considering Weight Issue. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), s. 5201805.
- Wang, X., Chen, F., Zhu, R., Yang, G., ve Zhang, C.** (2018). A Review of the Design and Control of Free-Piston Linear Generator, ss. 1–21.
- Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., vd.** (1987). Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Yb-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*, 58(9), ss. 908–910.
- Wu, Y.-C., ve Jian, B.-S.** (2015). Magnetic field analysis of a coaxial magnetic gear mechanism by two-dimensional equivalent magnetic circuit network method and finite-element method. *Applied Mathematical Modelling*, 39(19), ss. 5746–5758. Elsevier.
- Xu, J., Yuan, X., Zhang, C., ve Miao, X.** (2016). Dynamic Characteristics of High- T_c Superconductor and Hydrodynamic Fluid-Film Compound Bearing for Rocket Engine. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(3), ss. 1–5. IEEE.
- Yamamoto, S., Konii, K., Tanabe, H., Yokoyama, S., Matsuda, T., ve Yamada, T.** (2014). Super-Stable Superconducting MRI Magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(3), ss. 1–4. IEEE.
- Yamauchi, Y., Uchiyama, N., Suzuki, E., ve Kubota, M.** (2006). Development of 50kWh-class Superconducting Flywheel Energy Storage System. *International Symposium on*

Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006., ss. 484–486. IEEE.

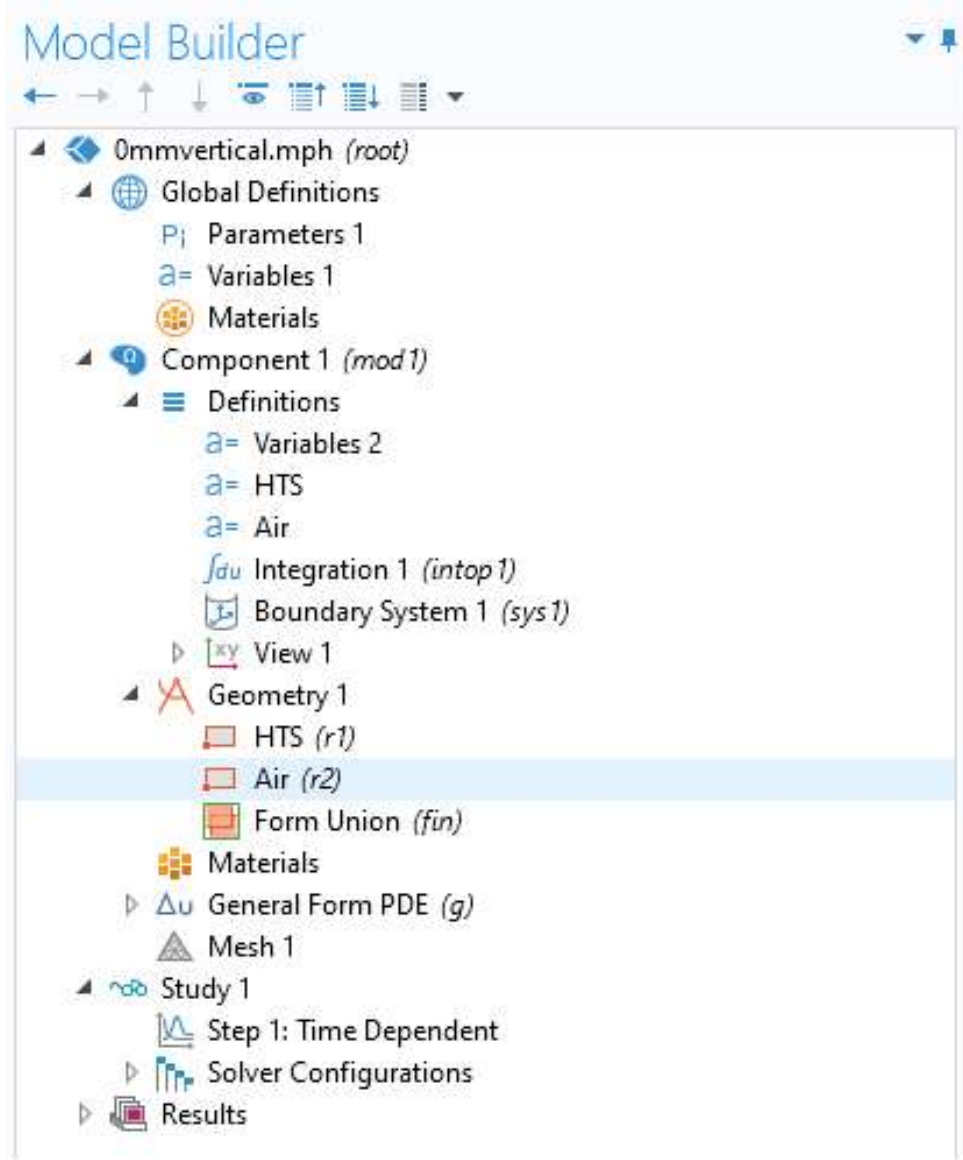
Yang, W. M., Zhou, L., Feng, Y., ve Zhang, P. X. (2003). The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process, *398*, ss. 141–146.

Yang, Y., ve Zheng, X. (2007). Method for solution of the interaction between superconductor and permanent magnet. *Journal of Applied Physics, 101*(11).

EKLER

Ek 1 Cmsol Girdileri

Yatay katılık, dikey katılık ve durum çalışmasında toplam 12 cmsol simülasyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan Cmsol simülasyonunda girdilerin birçoğu birbirleriyle aynıdır. Aynı olan girdiler burada yalnızca tek sefer paylaşılacaktır. Farklı olan simülasyon girdileri ise tek tek gösterilecektir.



Şekil E1.1. Cmsol ürün ağacı.

Cmsol çalışmalarındaki diğer girdiler tablo olarak verilecektir.

Tablo E1.1. Parameters 1 girdileri.

h_bulk	13[mm]	0.013 m	Height of the HTS
w_bulk	40[mm]	0.04 m	Width of the HTS
l_bulk	40[mm]	0.04 m	length of HTS bulk
w_ima1	10[mm]	0.01 m	Width of the permanent magnet1
h_ima1	20[mm]	0.02 m	Height of the permanent magnet1
l_ima1	20[mm]	0.02 m	length of the PM type 1
w_ima2	20[mm]	0.02 m	Width of the permanent magnet2
h_ima2	20[mm]	0.02 m	Height of the permanent magnet2
l_ima2	40[mm]	0.04 m	length of the PM type 2
mu0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]	1.2566E-6 H/m	Magnetic permeability in the vacuum
M0	905659[A/m]	9.0566E5 A/m	Magnetization of the permanent magnet
Ec	1e-4[V/m]	1E-4 V/m	Critical Electric Field
l	40[mm]	0.04 m	Model depth
Jc0	2.4e8[A/m^2]	2.4E8 A/m ²	
n	21	21	
H0	1.8e5[A/m]	1.8E5 A/m	

Tablo E1.2. 0mm Dikey Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-V_y*t)*(t \leq 16)$ $+(-h_bulk/2-2[mm]-V_y*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	$y2$	m
y5	$y3$	m
x6	$x3-w_ima2$	m
x7	$x3$	m
x8	$x6$	m
x9	$x2$	m
y6	$y3$	m
y7	$y3$	m
y8	$y3-h_ima1$	m
y9	$y2$	m
x10	$x4+w_ima2$	m
x11	$x4$	m
x12	$x10$	m
x13	$x5$	m
y10	$y4$	m
y11	$y4$	m
y12	$y3$	m
y13	$y3$	m
x14	$x6-w_ima2$	m
x15	$x14$	m
x16	$x14$	m
x17	$x16$	m
y14	$y3$	m
y15	$y14+h_ima2$	m
y16	$y14$	m
y17	$y15$	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.3. 0mm Yatay Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	-h_bulk/2-4[mm]	m
Vx	-0.5[mm/s]*(t<=8)+0.5[mm/s]*(t<=24)*(t>8)-0.5[mm/s]*(t>24)	m/s
x2	((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t<=8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t<=24)*(t>8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t>24)	m
x3	x2	m
x4	x2+w_ima1	m
x5	x4	m
y2	y3-h_ima1	m
y4	y2	m
y5	y3	m
x6	x3-w_ima2	m
x7	x3	m
x8	x6	m
x9	x2	m
y6	y3	m
y7	y3	m
y8	y2	m
y9	y2	m
x10	x4+w_ima2	m
x11	x4	m
x12	x10	m
x13	x5	m
y10	y4	m
y11	y4	m
y12	y3	m
y13	y3	m
x14	x6-w_ima2	m
x15	x14	m
x16	x14	m
x17	x16	m
y14	y3	m
y15	y14+h_ima2	m
y16	y14	m
y17	y15	m
Fy_ext	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*mu0)	N
Fy	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*mu0)	N
Fx	2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*mu0)	N
CORRENTE	mod1.intop1(Jz)	A

Tablo E1.4. 5mm Dikey Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-V_y*t)*(t \leq 16)$ $+(-h_bulk/2-2[mm]-V_y*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	$y2$	m
y5	$y3$	m
x6	$x3-w_ima2$	m
x7	$x3$	m
x8	$x6$	m
x9	$x2$	m
y6	$y3$	m
y7	$y3$	m
y8	$y3-h_ima1$	m
y9	$y2$	m
x10	$x4+w_ima2$	m
x11	$x4$	m
x12	$x10$	m
x13	$x5$	m
y10	$y4$	m
y11	$y4$	m
y12	$y3$	m
y13	$y3$	m
x14	$x6-w_ima2$	m
x15	$x14$	m
x16	$x14$	m
x17	$x16$	m
y14	$y3-5[mm]$	m
y15	$y14+h_ima2$	m
y16	$y14$	m
y17	$y15$	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.5. 5mm Yatay Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	-h_bulk/2-4[mm]	m
Vx	-0.5[mm/s]*(t<=8)+0.5[mm/s]*(t<=24)*(t>8)-0.5[mm/s]*(t>24)	m/s
x2	((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t<=8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t<=24)*(t>8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t>24)	m
x3	x2	m
x4	x2+w_ima1	m
x5	x4	m
y2	y3-h_ima1	m
y4	y2	m
y5	y3	m
x6	x3-w_ima2	m
x7	x3	m
x8	x6	m
x9	x2	m
y6	y3	m
y7	y3	m
y8	y2	m
y9	y2	m
x10	x4+w_ima2	m
x11	x4	m
x12	x10	m
x13	x5	m
y10	y4	m
y11	y4	m
y12	y3	m
y13	y3	m
x14	x6-w_ima2	m
x15	x14	m
x16	x14	m
x17	x16	m
y14	y3-5[mm]	m
y15	y14+h_ima2	m
y16	y14	m
y17	y15	m
Fy_ext	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*mu0)	N
Fy	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*mu0)	N
Fx	2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*mu0)	N
CORRENTE	mod1.intop1(Jz)	A

Tablo E1.6. 10mm Dikey Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-V_y*t)*(t \leq 16)$ $+(-h_bulk/2-2[mm]-V_y*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	$y2$	m
y5	$y3$	m
x6	$x3-w_ima2$	m
x7	$x3$	m
x8	$x6$	m
x9	$x2$	m
y6	$y3$	m
y7	$y3$	m
y8	$y3-h_ima1$	m
y9	$y2$	m
x10	$x4+w_ima2$	m
x11	$x4$	m
x12	$x10$	m
x13	$x5$	m
y10	$y4$	m
y11	$y4$	m
y12	$y3$	m
y13	$y3$	m
x14	$x6-w_ima2$	m
x15	$x14$	m
x16	$x14$	m
x17	$x16$	m
y14	$y3-10[mm]$	m
y15	$y14+h_ima2$	m
y16	$y14$	m
y17	$y15$	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.7. 10mm Yatay Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	-h_bulk/2-4[mm]	m
Vx	-0.5[mm/s]*(t<=8)+0.5[mm/s]*(t<=24)*(t>8)-0.5[mm/s]*(t>24)	m/s
x2	((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t<=8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t<=24)*(t>8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t>24)	m
x3	x2	m
x4	x2+w_ima1	m
x5	x4	m
y2	y3-h_ima1	m
y4	y2	m
y5	y3	m
x6	x3-w_ima2	m
x7	x3	m
x8	x6	m
x9	x2	m
y6	y3	m
y7	y3	m
y8	y2	m
y9	y2	m
x10	x4+w_ima2	m
x11	x4	m
x12	x10	m
x13	x5	m
y10	y4	m
y11	y4	m
y12	y3	m
y13	y3	m
x14	x6-w_ima2	m
x15	x14	m
x16	x14	m
x17	x16	m
y14	y3-10[mm]	m
y15	y14+h_ima2	m
y16	y14	m
y17	y15	m
Fy_ext	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*mu0)	N
Fy	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*mu0)	N
Fx	2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*mu0)	N
CORRENTE	mod1.intop1(Jz)	A

Tablo E1.8. 15mm Dikey Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-Vy*t)*(t \leq 16)$ $+(-h_bulk/2-2[mm]-Vy*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	$y2$	m
y5	$y3$	m
x6	$x3-w_ima2$	m
x7	$x3$	m
x8	$x6$	m
x9	$x2$	m
y6	$y3$	m
y7	$y3$	m
y8	$y3-h_ima1$	m
y9	$y2$	m
x10	$x4+w_ima2$	m
x11	$x4$	m
x12	$x10$	m
x13	$x5$	m
y10	$y4$	m
y11	$y4$	m
y12	$y3$	m
y13	$y3$	m
x14	$x6-w_ima2$	m
x15	$x14$	m
x16	$x14$	m
x17	$x16$	m
y14	$y3-15[mm]$	m
y15	$y14+h_ima2$	m
y16	$y14$	m
y17	$y15$	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.9. 15mm Yatay Çalışması İçin Variables 1 Girdileri.

y3	-h_bulk/2-4[mm]	m
Vx	-0.5[mm/s]*(t<=8)+0.5[mm/s]*(t<=24)*(t>8)-0.5[mm/s]*(t>24)	m/s
x2	((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t<=8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t<=24)*(t>8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t>24)	m
x3	x2	m
x4	x2+w_ima1	m
x5	x4	m
y2	y3-h_ima1	m
y4	y2	m
y5	y3	m
x6	x3-w_ima2	m
x7	x3	m
x8	x6	m
x9	x2	m
y6	y3	m
y7	y3	m
y8	y2	m
y9	y2	m
x10	x4+w_ima2	m
x11	x4	m
x12	x10	m
x13	x5	m
y10	y4	m
y11	y4	m
y12	y3	m
y13	y3	m
x14	x6-w_ima2	m
x15	x14	m
x16	x14	m
x17	x16	m
y14	y3-15[mm]	m
y15	y14+h_ima2	m
y16	y14	m
y17	y15	m
Fy_ext	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*mu0)	N
Fy	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*mu0)	N
Fx	2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*mu0)	N
CORRENTE	mod1.intop1(Jz)	A

Tablo E1.10. Durum Çalışması Tek Mıknatıs Yatay İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$-h_bulk/2-4[mm]$	m
Vx	$-0.5[mm/s]*(t \leq 8)+0.5[mm/s]*(t \leq 24)*(t > 8)-0.5[mm/s]*(t > 24)$	m/s
x2	$((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t \leq 8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t \leq 24)*(t > 8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t > 24)$	m
x3	x2	m
x4	$x2+w_ima1$	m
x5	x4	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	y2	m
y5	y3	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.11. Durum Çalışması Tek Mıknatıs Dikey İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-Vy*t)*(t \leq 16)+(-h_bulk/2-2[mm]-Vy*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	y2	m
y5	y3	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A

Tablo E1.12. Durum Çalışması Çift Mıknatıs Yatay İçin Variables 1 Girdileri.

y3	-h_bulk/2-4[mm]	m
Vx	-0.5[mm/s]*(t<=8)+0.5[mm/s]*(t<=24)*(t>8)-0.5[mm/s]*(t>24)	m/s
x2	((-w_ima1/2)-Vx*t)*(t<=8)+(-w_ima1/2+4[mm]-Vx*(t-8))*(t<=24)*(t>8)+(-w_ima1/2-4[mm]-Vx*(t-24))*(t>24)	m
x3	x2	m
x4	x2+w_ima1	m
x5	x4	m
y2	y3-h_ima1/2	m
y4	y2	m
y5	y3	m
Fy_ext	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*mu0)	N
Fy	2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*mu0)	N
Fx	2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*mu0)	N
CORRENTE	mod1.intop1(Jz)	A
y6	y2-h_ima1/2-0.1[mm]	m
y7	y2	m
y8	y6	m
y9	y2	m
x6	x2	m
x7	x2	m
x8	x4	m
x9	x4	m

Tablo E1.13. Durum Çalışması Çift Mıknatıs Dikey İçin Variables 1 Girdileri.

y3	$((-h_bulk/2-10[mm])-V_y*t)*(t \leq 16)$ $+(-h_bulk/2-2[mm]-V_y*(t-16))*(t > 16)$	m
Vy	$-0.5[mm/s]*(t \leq 16)+0.5[mm/s]*(t > 16)$	m/s
x2	$=-w_ima1/2$	m
x3	$=-w_ima1/2$	m
x4	$w_ima1/2$	m
x5	$w_ima1/2$	m
y2	$y3-h_ima1$	m
y4	$y2$	m
y5	$y3$	m
Fy_ext	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx_ext*\mu_0)$	N
Fy	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hx*\mu_0)$	N
Fx	$2*I*mod1.intop1(Jz*Hy*\mu_0)$	N
CORRENTE	$mod1.intop1(Jz)$	A
y6	$y2-h_ima1/2-0.1[mm]$	m
y7	$y2$	m
y8	$y6$	m
y9	$y2$	m
x6	$x2$	m
x7	$x2$	m
x8	$x4$	m
x9	$x4$	m

Tablo E1.14. Dikey Çalışmalar İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(H _{yx} -H _{xy})	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
	$\begin{aligned} & (M0 * (\log((x[1/m]-x6[1/m])^2 + (y[1/m]-y7[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x7[1/m])^2 + (y[1/m]-y7[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x8[1/m])^2 + (y[1/m]-y9[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x9[1/m])^2 + (y[1/m]-y9[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x10[1/m])^2 + (y[1/m]-y11[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x11[1/m])^2 + (y[1/m]-y11[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x12[1/m])^2 + (y[1/m]-y13[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x13[1/m])^2 + (y[1/m]-y13[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x14[1/m])^2 + (y[1/m]-y16[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x15[1/m])^2 + (y[1/m]-y17[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x16[1/m])^2 + (y[1/m]-y16[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x17[1/m])^2 + (y[1/m]-y17[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & + (M0*(\operatorname{atan}((y - y2)/(x - x3)) - \operatorname{atan}((y - y3)/(x - x3)) \\ & - \operatorname{atan}((y - y4)/(x - x5)) + \operatorname{atan}((y - y5)/(x - x5))))/(2*pi) \end{aligned}$	A/m
	$\begin{aligned} & (M0*(\operatorname{atan}((x - x10)/(y - y11)) - \operatorname{atan}((x - x11)/(y - y11)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x12)/(y - y13)) + \operatorname{atan}((x - x13)/(y - y13))))/(2*pi) \\ & - (M0*(\operatorname{atan}((x - x6)/(y - y7)) - \operatorname{atan}((x - x7)/(y - y7)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x8)/(y - y9)) + \operatorname{atan}((x - x9)/(y - y9))))/(2*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y2[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y3[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y4[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y5[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & + (M0*(\operatorname{atan}((x - x14)/(y - y16)) - \operatorname{atan}((x - x15)/(y - y17)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x16)/(y - y16)) + \operatorname{atan}((x - x17)/(y - y17))))/(2*pi) \end{aligned}$	A/m
Hx_ext		A/m
Hx_spct	$=-\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(y)-y)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m
Hy_spct	$\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(x)-x)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m

Tablo E1.15. Yatay Çalışmalar İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(Hyx-Hxy)	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
Hy_ext	$\begin{aligned} & (M0 * (\log((x[1/m]-x6[1/m])^2 + (y[1/m]-y7[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x7[1/m])^2 + (y[1/m]-y7[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x8[1/m])^2 + (y[1/m]-y9[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x9[1/m])^2 + (y[1/m]-y9[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x10[1/m])^2 + (y[1/m]-y11[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x11[1/m])^2 + (y[1/m]-y11[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x12[1/m])^2 + (y[1/m]-y13[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x13[1/m])^2 + (y[1/m]-y13[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x14[1/m])^2 + (y[1/m]-y16[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x15[1/m])^2 + (y[1/m]-y17[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x16[1/m])^2 + (y[1/m]-y16[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x17[1/m])^2 + (y[1/m]-y17[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & + (M0*(\operatorname{atan}((y - y2)/(x - x3)) - \operatorname{atan}((y - y3)/(x - x3)) \\ & - \operatorname{atan}((y - y4)/(x - x5)) + \operatorname{atan}((y - y5)/(x - x5))))/(2*pi) \end{aligned}$	A/m
Hx_ext	$\begin{aligned} & (M0*(\operatorname{atan}((x - x10)/(y - y11)) - \operatorname{atan}((x - x11)/(y - y11)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x12)/(y - y13)) + \operatorname{atan}((x - x13)/(y - y13))))/(2*pi) \\ & - (M0*(\operatorname{atan}((x - x6)/(y - y7)) - \operatorname{atan}((x - x7)/(y - y7)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x8)/(y - y9)) + \operatorname{atan}((x - x9)/(y - y9))))/(2*pi) \\ & - (M0*(\log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y2[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y3[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y4[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y5[1/m])^2)))/(4*pi) \\ & + (M0*(\operatorname{atan}((x - x14)/(y - y16)) - \operatorname{atan}((x - x15)/(y - y17)) \\ & - \operatorname{atan}((x - x16)/(y - y16)) + \operatorname{atan}((x - x17)/(y - y17))))/(2*pi) \end{aligned}$	A/m
Hx_spct	$= -\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(y)-y)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m
Hy_spct	$\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(x)-x)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m

Tablo E1.16. Durum Çalışması Tek Mıknatıs Yatay İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(Hyx-Hxy)	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
Hy_ext	$\begin{aligned} & (M0*(\operatorname{atan}((y - y2)/(x - x3)) - \operatorname{atan}((y - y3)/(x - x3)) \\ & - \operatorname{atan}((y - y4)/(x - x5)) + \operatorname{atan}((y - y5)/(x - x5))))/(2*pi) \end{aligned}$	A/m
Hx_ext	$\begin{aligned} & - (M0*(\log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y2[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y3[1/m])^2) \\ & - \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y4[1/m])^2) \\ & + \log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y5[1/m])^2)))/(4*pi) \end{aligned}$	A/m
Hx_spct	$= -\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(y)-y)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m
Hy_spct	$\operatorname{intop1}(Jz*(\operatorname{dest}(x)-x)/((\operatorname{dest}(x)-x)^2+(\operatorname{dest}(y)-y)^2))/2/\pi$	A/m

Tablo E1.17. Durum Çalışması Tek Mıknatıs Dikey İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(Hyx-Hxy)	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
Hy_ext	(M0*(atan((y - y2)/(x - x3)) - atan((y - y3)/(x - x3)) - atan((y - y4)/(x - x5)) + atan((y - y5)/(x - x5))))/(2*pi)	A/m
Hx_ext	- (M0*(log((x[1/m]-x3[1/m]) ² + (y[1/m]-y2[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x3[1/m]) ² + (y[1/m]-y3[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x5[1/m]) ² + (y[1/m]-y4[1/m]) ²) + log((x[1/m]-x5[1/m]) ² + (y[1/m]-y5[1/m]) ²)))/(4*pi)	A/m
Hx_spct	=-intop1(Jz*(dest(y)-y)/((dest(x)-x) ² +(dest(y)-y) ²))/2/pi	A/m
Hy_spct	intop1(Jz*(dest(x)-x)/((dest(x)-x) ² +(dest(y)-y) ²))/2/pi	A/m

Tablo E1.18. Durum Çalışması Çift Mıknatıs Yatay İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(Hyx-Hxy)	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
Hy_ext	(M0*(atan((y - y2)/(x - x3)) - atan((y - y3)/(x - x3)) - atan((y - y4)/(x - x5)) + atan((y - y5)/(x - x5))) + (M0*(atan((y - y6)/(x - x7)) - atan((y - y7)/(x - x7)) - atan((y - y8)/(x - x9)) + atan((y - y9)/(x - x9))))/(2*pi)	A/m
Hx_ext	- (M0*(log((x[1/m]-x3[1/m]) ² + (y[1/m]-y2[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x3[1/m]) ² + (y[1/m]-y3[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x5[1/m]) ² + (y[1/m]-y4[1/m]) ²) + log((x[1/m]-x5[1/m]) ² + (y[1/m]-y5[1/m]) ²)))/(4*pi) - (M0*(log((x[1/m]-x7[1/m]) ² + (y[1/m]-y6[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x7[1/m]) ² + (y[1/m]-y7[1/m]) ²) - log((x[1/m]-x9[1/m]) ² + (y[1/m]-y8[1/m]) ²) + log((x[1/m]-x9[1/m]) ² + (y[1/m]-y9[1/m]) ²)))/(4*pi)	A/m
Hx_spct	=-intop1(Jz*(dest(y)-y)/((dest(x)-x) ² +(dest(y)-y) ²))/2/pi	A/m
Hy_spct	intop1(Jz*(dest(x)-x)/((dest(x)-x) ² +(dest(y)-y) ²))/2/pi	A/m

Tablo E1.19. Durum Çalışması Çift Mıknatıs Dikey İçin Variables 2 girdileri.

Jz	(Hyx-Hxy)	A/m ²
Ez	Rho*Jz	V/m
Hy_ext	(M0*(atan((y - y2)/(x - x3)) - atan((y - y3)/(x - x3)) - atan((y - y4)/(x - x5)) + atan((y - y5)/(x - x5))))/(2*pi) + (M0*(atan((y - y6)/(x - x7)) - atan((y - y7)/(x - x7)) - atan((y - y8)/(x - x9)) + atan((y - y9)/(x - x9))))/(2*pi)	A/m
Hx_ext	-(M0*(log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y2[1/m])^2) - log((x[1/m]-x3[1/m])^2 + (y[1/m]-y3[1/m])^2) - log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y4[1/m])^2) + log((x[1/m]-x5[1/m])^2 + (y[1/m]-y5[1/m])^2)))/(4*pi) - (M0*(log((x[1/m]-x7[1/m])^2 + (y[1/m]-y6[1/m])^2) - log((x[1/m]-x7[1/m])^2 + (y[1/m]-y7[1/m])^2) - log((x[1/m]-x9[1/m])^2 + (y[1/m]-y8[1/m])^2) + log((x[1/m]-x9[1/m])^2 + (y[1/m]-y9[1/m])^2)))/(4*pi)	A/m
Hx_spct	=-intop1(Jz*(dest(y)-y)/((dest(x)-x)^2+(dest(y)-y)^2))/2/pi	A/m
Hy_spct	intop1(Jz*(dest(x)-x)/((dest(x)-x)^2+(dest(y)-y)^2))/2/pi	A/m

Tablo E1.20. HTS girdileri.

Rho	(Ec/Jc)*(abs(Jz)/Jc)^(n-1)	$\Omega \cdot m$
H	sqrt(Hx^2+Hy^2)	A/m
Jc	Jc0*exp(-H/H0)	A/m ²

Tablo E1.21. Air girdileri.

Rho	1[ohm*m]	$\Omega \cdot m$
-----	----------	------------------

Comsolun simülasyonu yapabilmesi için yapılan simülasyonun matematiksel bir zemine oturtulması gereklidir. Bunun için model oluşturulurken ilk aşamada (ya da daha sonra “Add Physics” tuşu ile) modelin nasıl çözüleceği tanıtılmalıdır. Yapılan çalışmada “General Form PDE” yani kısmi diferansiyel denklem, genel form seçilmiştir. Kısmi diferansiyel denklem seçilirken iki değişken olacak şekilde ayarlanmıştır.

Conservative Flux				
Γ	0	x	V/m	
	Ez	y		
	-Ez	x	V/m	
	0	y		
Source Term				
f	0		V/m ²	
	0		V/m ²	
Damping or Mass Coefficient				
d_a	mu0	H/m	0	H/m
	0	H/m	mu0	H/m
Mass Coefficient				
e_a	0	kg·m/(s·A ²)	0	kg·m/(s·A ²)
	0	kg·m/(s·A ²)	0	kg·m/(s·A ²)

Şekil E1.2. General Form PDE girdileri.

Sistem diferansiyel denklem olarak tanıtlıyorsa, denklemlerin çözülebilmesi için başlangıç koşullarının da belirtilmesi gerekir.

Initial Values	
Initial value for Hx:	
H_x	Hx_ext+Hx_spct A/m
Initial time derivative of Hx:	
$\frac{\partial H_x}{\partial t}$	0 A/(m·s)
Initial value for Hy:	
H_y	Hy_ext+Hy_spct A/m
Initial time derivative of Hy:	
$\frac{\partial H_y}{\partial t}$	0 A/(m·s)

Şekil E1.3. Başlangıç koşulları.

Benzer şekilde sınır şartları da belirtilmelidir.

▼ Dirichlet Boundary Condition

Prescribed value of Hx

r₁ Hx_ext+Hx_spct A/m

Prescribed value of Hy

r₂ Hy_ext+Hy_spct A/m

Şekil E1.4. Sınır şartları.

Problemin çözülebilmesi için Comsol'a ilk aşamada geometri ve malzeme bilgisi girildi daha sonra ise kısmi diferansiyel denklemlerle çözmesi gerektiği ve sınır şartları bilgisi verildi. Comsola bundan sonra diferansiyel denklemleri nasıl çözmeye çalışacağı bilgisi girilecektir. Sistem ikinci mertebeden iki bilinmeyenli kısmi diferansiyel denklemdir ve sistemin analitik çözümü çok zordur dolayısıyla program soruyu sayısal (numerik) yöntemler kullanarak çözecektir. Kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için birçok sayısal yöntem ve algoritma mevcuttur. En başta model oluşturulurken (ya da daha sonra "Add Study" tuşu ile) nasıl hangi yöntemi kullanacağı seçilmelidir. Yapılan çalışmada "Time Dependent" yani zamana bağlı bir çözücü kullanılmıştır. Tablo I.2'ye bakıldığında sistemin 16 saniye aşağıya 16 saniye yukarıya hareket ettiği tanımlanmıştır buna göre toplam simülasyon süresi 32 saniyedir. Zaman adım aralığı 0.1 saniye ve tolerans da 10^{-4} olarak tanımlanmıştır.

Ek 2 Matlab Kodları ve Simulink

Dinamik modelin oluşturulmasında kullanılan matlab kodları aşağıdaki gibidir.

```
clc;
clear all;
close all;

% Dinamik modelleme için öncelikle durum uzay matrisinin oluşturulması
% gerekir. Durum uzay matrisi için ise hareket denklemlerinin tanımlanması
% gerekir. Hareket denklemi  $m \cdot \ddot{x} + k \cdot x + c \cdot \dot{x} = \text{force}$  formatındadır. m,
%  $\ddot{x}$ , k, x, c, ve  $\dot{x}$  hepsi matris olarak tanımlanacaktır.

% öncelikle belli katsayıların girişi gerekmektedir.

k11=175000; % N/m
k12=175000; % N/m
k21=175000; % N/m
k22=175000; % N/m

% k11, k12, k21, k22 yanal eksenlerdeki süperiletken- mıknatıs çiftlerini
% katılığıdır.

k31=306250; % N/m
k32=306250; % N/m
k41=306250; % N/m
k42=306250; % N/m

% k31, k32, k41, k42 dikey eksenlerdeki süperiletken- mıknatıs çiftlerinin
% katılığıdır. Not bu eksenlerde aynı zamanda yer çekimi de vardır.

m=3.44; % Kg

% m kryostatın kütesidir.

c11=280000; % kg/s
c12=280000; % kg/s
c21=280000; % kg/s
c22=280000; % kg/s

% c11, c12, c21, c22 yanal eksenlerdeki süperiletken- mıknatıs çiftlerinin
% arasındaki histerisisten kaynaklanan sönümdür.

c31=490000; % kg/s
c32=490000; % kg/s
c41=490000; % kg/s
c42=490000; % kg/s
```

% C31, c32, c41, c42 dikey eksenlerdeki süperiletken mıknatıs çiftinin
% arasındaki histerisisten kaynaklanan sönüm. not bu eksenlerde yer çekimi de
% etki etmektedir.

Ix=0.209894; % kg*m^2
Iy=0.165019; % kg*m^2
Iz=0.07202946; % kg*m^2

% Ix, Iy, Iz kryostatın sırasıyla x, y, ve z eksenindeki atalet
% momentidir.

Lx=0.1525; % Metre
Ly=0.085; % Metre

% Lx, Ly sırasıyla x ve y ekseninde kryostatın boyutlarının
% yarısıdır. Daha açık olmak gerekirse iki süperiletkenin merkezlerinin
% arasındaki mesafe 2*Lx ve 2*Ly'dir.

% Hareket denklemleri oluşturulurken ufak açı varsayımı kabul edilmiştir.
% bu varsayımla denklemler non-linear halden linear hale geçmiş ve çözümü
% de kolaylaşmıştır aynı şekilde sonuçlarda da çok fazla olasa da ufak
% sapmalar meydana gelebilir ancak nihai sonuçta bir değişiklik olmaz.
% Bu varsayımla $\sin(\theta) \approx \theta$, $\cos(\theta) \approx 1$ olur.

% İlk olarak M (kütle) matrisi tanımlanacak

M=[m/2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, m/2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, m/4, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, m/4, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, m/4, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, m/4, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, Ix, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, Iy, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, Iz];

% Sonrasında K (stiffness) matrisi oluşturulur

a11=k11+k12;
a19=-Ly*(k11+k12);
a22=k21+k22;
a29=Ly*(k21+k22);
a33=k31;
a37=-k31*Ly;
a38=k31*Lx;
a44=k32;
a47=-k32*Ly;
a48=k32*Lx;
a55=k41;
a57=k41*Ly;

$a_{58}=k_{41}*L_x$;
 $a_{66}=k_{42}$;
 $a_{67}=k_{42}*L_y$;
 $a_{68}=k_{42}*L_x$;
 $a_{73}=-k_{31}*L_y$;
 $a_{74}=-k_{32}*L_y$;
 $a_{75}=k_{41}*L_y$;
 $a_{76}=k_{42}*L_y$;
 $a_{77}=L_y*L_y*(k_{31}+k_{32}+k_{41}+k_{42})$;
 $a_{78}=L_x*L_y*(-k_{31}+k_{32}+k_{41}-k_{42})$;
 $a_{83}=k_{31}*L_x$;
 $a_{84}=-k_{32}*L_x$;
 $a_{85}=k_{41}*L_x$;
 $a_{86}=-k_{42}*L_x$;
 $a_{87}=L_x*L_y*(-k_{31}+k_{32}+k_{41}-k_{42})$;
 $a_{88}=L_x*L_x*(k_{31}+k_{32}+k_{41}+k_{42})$;
 $a_{91}=L_y*(-k_{11}-k_{12})$;
 $a_{92}=L_y*(k_{21}+k_{22})$;
 $a_{99}=L_y*L_y*(k_{11}+k_{12}+k_{21}+k_{22})$;

$K=[a_{11}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, a_{19}$;
 $0, a_{22}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, a_{29}$;
 $0, 0, a_{33}, 0, 0, 0, a_{37}, a_{38}, 0$;
 $0, 0, 0, a_{44}, 0, 0, a_{47}, a_{48}, 0$;
 $0, 0, 0, 0, a_{55}, 0, a_{57}, a_{58}, 0$;
 $0, 0, 0, 0, 0, a_{66}, a_{67}, a_{68}, 0$;
 $0, 0, a_{73}, a_{74}, a_{75}, a_{76}, a_{77}, a_{78}, 0$;
 $0, 0, a_{83}, a_{84}, a_{85}, a_{86}, a_{87}, a_{88}, 0$;
 $a_{91}, a_{92}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, a_{99}]$;

% C (Sönüm-damping) matrisi oluşturulur

$b_{11}=c_{11}+c_{12}$;
 $b_{19}=-L_y*(c_{11}+c_{12})$;
 $b_{22}=c_{21}+c_{22}$;
 $b_{29}=L_y*(c_{21}+c_{22})$;
 $b_{33}=c_{31}$;
 $b_{37}=-c_{31}*L_y$;
 $b_{38}=c_{31}*L_x$;
 $b_{44}=c_{32}$;
 $b_{47}=-c_{32}*L_y$;
 $b_{48}=c_{32}*L_x$;
 $b_{55}=c_{41}$;
 $b_{57}=c_{41}*L_y$;
 $b_{58}=c_{41}*L_x$;
 $b_{66}=c_{42}$;
 $b_{67}=c_{42}*L_y$;
 $b_{68}=c_{42}*L_x$;
 $b_{73}=-c_{31}*L_y$;

```

b74=-c32*Ly;
b75=c41*Ly;
b76=c42*Ly;
b77=Ly*Ly*(c31+c32+c41+c42);
b78=Lx*Ly*(-c31+c32+c41-c42);
b83=c31*Lx;
b84=-c32*Lx;
b85=c41*Lx;
b86=-c42*Lx;
b87=Lx*Ly*(-c31+c32+c41-c42);
b88=Lx*Lx*(c31+c32+c41+c42);
b91=Ly*(-c11-c12);
b92=Ly*(c21+c22);
b99=Ly*Ly*(c11+c12+c21+c22);

```

```

C=[b11, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, b19;
    0, b22,0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, b29;
    0, 0,b33, 0, 0, 0, b37,b38,0;
    0, 0, 0,b44, 0, 0, b47,b48,0;
    0, 0, 0, 0,b55, 0, b57,b58,0;
    0, 0, 0, 0, 0, b66,b67,b68,0;
    0, 0,b73,b74,b75,b76,b77,b78,0;
    0, 0,b83,b84,b85,b86,b87,b88,0;
    b91,b92,0,0, 0, 0, 0, 0, b99];

```

% Durum uzaydaki A matrisi hesaplanan M, K, ve C matrisleri kullanılarak kolayca oluşturulur

```

A=[zeros(9), eye(9);
    -1*inv(M)*K, -1*inv(M)*C];

```

```

B=[zeros(4,2);
    eye(2);
    zeros(12,2)];

```

```

C=[eye(9),zeros(9)];

```

```

D=[zeros(9,2)];

```

```

sim('dinamikmodelmatris')

```

```

figure (1);
plot(time,x1,time,x2,'LineWidth',1.5);
legend('x1','x2');
xlabel('zaman (s)');
ylabel('deplasman (m)');
grid on;
set(gca,'FontSize',20);
lgd.FontSize = 20;

```

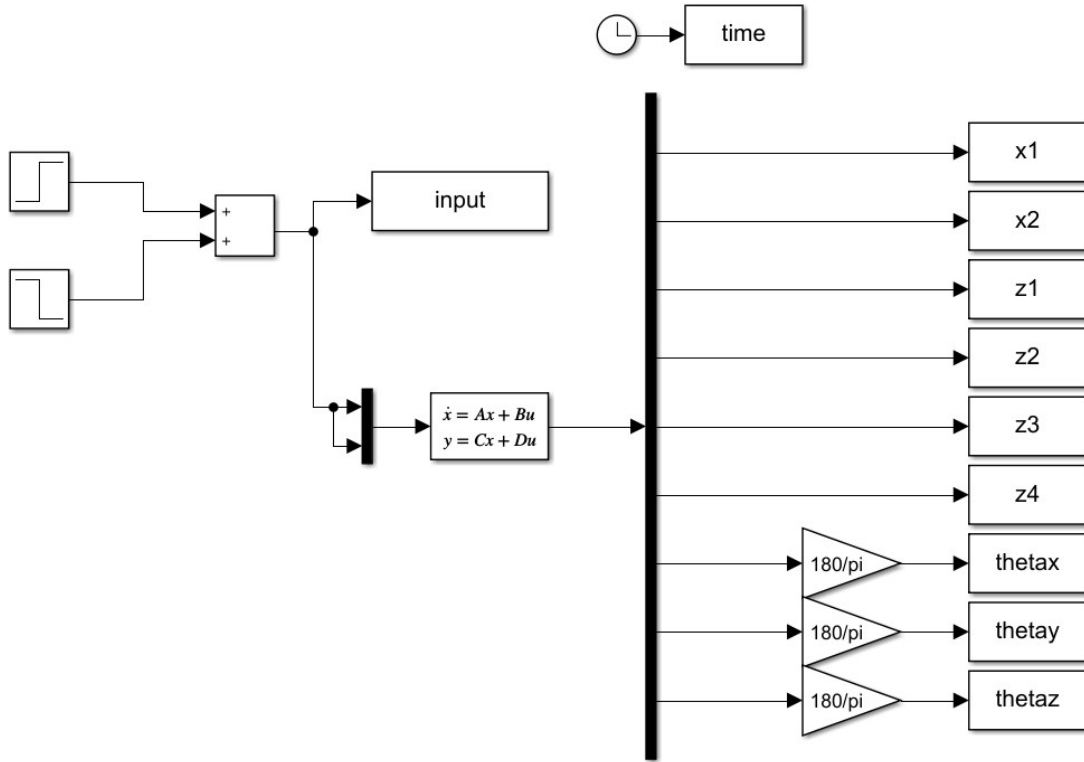
```

figure (2);
subplot(2,1,1);
plot(time,z1,time,z2,time,z3,time,z4,'LineWidth',1.5);
legend('z31','z32','z41','z42');
xlabel('zaman (s)');
ylabel('deplasman (m)');
grid on;
set(gca,'FontSize',20);
lgd.FontSize = 20;

subplot(2,1,2);
plot(time,thetax,time,thetay,time,thetaz,'LineWidth',1.5);
legend('\theta x','\theta y','\theta z');
xlabel('zaman (s)');
ylabel('\theta (derece)');
grid on;
set(gca,'FontSize',20);
lgd.FontSize = 20;

```

Dinamik modeli çözmek için oluşturulan simulink modelinin ekran görüntüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil E2.1. Simulink görüntüsü.