

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK YÜZEYLİ SÜPERİLETKEN VE HALBACH DİZİLİMLİ SÜREKLİ  
MIKNATISLARDAN OLUŞAN SÜPERİLETKEN MANYETİK KALDIRMA  
SİSTEMİNİN DONMUŞ GÖRÜNTÜ MODELİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet Furkan REİSOĞLU**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**ARALIK 2021**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK YÜZEYLİ SÜPERİLETKEN VE HALBACH DİZİLİMLİ SÜREKLİ  
MIKNATISLARDAN OLUŞAN MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN  
DONMUŞ GÖRÜNTÜ MODELİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet Furkan REİSOĞLU  
(504181045)**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet CANSIZ  
Eş Danışman: Prof. Dr. Kemal ÖZTÜRK**

**ARALIK 2021**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504181045 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet Furkan REİSOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOK YÜZEYLİ SÜPERİLETKEN VE HALBACH DİZİLİMLİ SÜREKLİ MIKNATISLARDAN OLUŞAN SÜPERİLETKEN MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN DONMUŞ GÖRÜNTÜ MODELİ İLE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Ahmet CANSIZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman:** **Prof. Dr. Kemal ÖZTÜRK** .....  
Karadeniz Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Murat YILMAZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Deniz YILDIRIM** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Mehmet BAYRAK** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **3 Aralık 2021**  
**Savunma Tarihi** : **24 Aralık 2021**



## ÖNSÖZ

Öncelikli olarak tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet CANSIZ'a bana olan destekleri ve rehberliği için teşekkür etmek isterim. Ayrıca tezimin deneysel çalışmalarının yürütülmesinde imkan tanıyan Sayın Prof. Dr. Kemal ÖZTÜRK'e teşekkür eder, yürütücülüğündeki 118F426 numaralı TÜBİTAK 1001 projesindeki desteği için de TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Tezimde ve yapılan çalışmalarda bana yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Murat ABDİOĞLU ve arkadaşım Sayın Zekeriya KARAAHMET'e teşekkürü borç bilirim.

Akademik anlamdaki desteklerin yanı sıra yüksek lisans öğrenimim süresince bana manevi anlamda destek olan aileme ve tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

Aralık 2021

Ahmet Furkan REİSOĞLU  
(Elektrik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Süperiletkenliğin Gelişimi .....	5
1.3 Meissner Etkisi ve Mükemmel Diyamanyetizma .....	9
1.4 Akı Çivilemesi.....	17
1.5 Süperiletkenlerde Kritik Durum.....	18
1.5.1 Bean kritik durum modeli .....	19
1.5.2 Histeresis ve enerji kayıpları.....	22
1.6 Süperiletkenlerin Endüstriyel Uygulamaları .....	23
<b>2. SÜPERİLETKEN MANYETİK KALDIRMA</b> .....	<b>29</b>
2.1 Manyetik Kaldırma Sistemleri .....	30
2.2 Manyetik Alan ve Manyetik Kuvvet .....	33
2.3 Sürekli Mıknatıslar ve Özellikleri .....	34
2.4 Süperiletkenlerde Manyetik Kuvvet.....	35
2.5 Donmuş Görüntü Modeli (DGM) .....	37
<b>3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYLERİN YAPILMASI</b> .....	<b>41</b>
3.1 Kuvvet Ölçüm Sistemi .....	41
3.2 Deneylerin Yapılması.....	43
3.2.1 Alanlı soğutma (AS) deneyleri .....	43
3.2.2 Sıfır alan soğutma (SAS) deneyleri .....	44
<b>4. DENEYSEL VE TEORİK ÇALIŞMA</b> .....	<b>45</b>
<b>5. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>67</b>



## KISALTMALAR

<b>AC</b>	: Alternatif Akım (Alternative Current)
<b>Alnico</b>	: Alüminyum, Nikel ve Kobalt alaşımları ailesi
<b>AS</b>	: Alan Soğutma (Field Cooling)
<b>SAS</b>	: Sıfır Alan Soğutma (Zero Field Cooling)
<b>BCS</b>	: Bardeen, Cooper ve Scherfer
<b>DC</b>	: Doğru akım (Direct Current)
<b>DGM</b>	: Donmuş Görüntü Modeli (Frozen Image Model)
<b>MgB</b>	: Magnezyum Diborid
<b>MMF</b>	: Manyeto İtici Kuvvet (Magneto Motive Force)
<b>MRI</b>	: Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic rezonance imaging)
<b>NMR</b>	: Nükleer Manyetik Rezonans (Nuclear Magnetic Resonance)
<b>SAAS</b>	: Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcısı
<b>SM</b>	: Sürekli Mıknatıs (Permanent Magnet)
<b>SMED</b>	: Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (Superconducting Magnetic Energy Storage)
<b>SMY</b>	: Süperiletken Manyetik Yatak (Superconducting Magnetic Bearing)
<b>SVED</b>	: Süperiletken Volan Enerji Depolama (Superconducting Flywheel Energy Storage)
<b>YBCO</b>	: Yttrium Barium Copper Oxide
<b>YSS</b>	: Yüksek Sıcaklık Süperiletken (High Temperature Superconductor)



## SEMBOLLER

$B$	: Manyetik akı yoğunluğu
$E$	: Elektrik alan
$F_L$	: Lorentz kuvveti
$F_p$	: Akı çivileme kuvveti (Flux pinning force)
$H$	: Manyetik alan şiddeti
$H_c$	: Kritik manyetik alan
$H_{c1}$	: Birinci kritik manyetik alan
$H_{c2}$	: İkinci kritik manyetik alan
$I$	: Akım
$J$	: Akım yoğunluğu
$J_c$	: Kritik akım yoğunluğu
$J_s$	: Süper akım yoğunluğu
$J_{sh}$	: Perdeleme akım yoğunluğu (Screening Current Density)
$J_{tr}$	: İletimden dolayı oluşan akım yoğunluğu (Transport Current Density)
$M$	: Mıknatıslanma
$\Phi_0$	: Akı kuantumu (Magnetic flux quantum)
$c$	: Işık hızı
$e$	: Elektronun yükü
$h_p$	: Planck sabiti
$h$	: Alan soğutma yüksekliği (Field cooling height)
$m_e$	: Elektronun kütlesi
$n_s$	: Süperiletkenlikten sorumlu yüklerin yoğunluğu
$v_s$	: Süperelektronların hızı
$\lambda$	: Dalma derinliği (Penetration Depth)
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\sigma$	: İletkenlik
$\xi$	: Uyum uzunluğu (Coherence Length)



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1:</b> Süperiletken teknolojisinin bazı uygulamaları ve karakteristik özellikleri.....	<b>28</b>
<b>Çizelge 4.1:</b> Donmuş görüntü modelinde kullanılan sürekli mıknatıs süperiletken etkileşmesi için dipol momentleri ve yer vektörleri... ..	<b>48</b>





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 1.1** : Süperiletken malzemede kritik sıcaklık ( $T_c$ ), kritik manyetik alan ( $H_c$ ) ve kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) arasındaki ilişki.....7
- Şekil 1.2** : Normal iletken ve süperiletkende direncin sıcaklıkla değişimi.....8
- Şekil 1.3** : Cıvanın direncinin sıcaklıkla değişimi.....8
- Şekil 1.4** : Dışardan uygulanan manyetik alanın süperiletken içine girişi.....12
- Şekil 1.5** : Süperiletken malzemede sıcaklık ile manyetik alan arasındaki ilişkiye göre süperiletkenlik durumu: (a) Tip 1 (b) tip 2.....12
- Şekil 1.6** : Tip 1 süperiletken: (a) manyetik akı yoğunluğunun manyetik alan ile değişimi (b) mıknatıslanmanın manyetik alan ile değişimi ..... 14
- Şekil 1.7** : Karma durumda bulunan tip 2 süperiletkende girdapların oluşumu .....15
- Şekil 1.8** : İdeal tip 2 süperiletken: (a) manyetik akı yoğunluğunun manyetik alanla değişimi (b) mıknatıslanmasının manyetik alan ile değişimi.....16
- Şekil 1.9** : Kalınlığı  $2a$  olan bir tabakadan oluşan süperiletken malzemede akım ve manyetik alanların oluşumu: (a) Süperiletkenin ekseni boyunca dışardan uygulanan bir manyetik akı yoğunluğundan ( $B_{uyg}$ ) dolayı indüklenen perdeleme akımları ( $J_{sh}$ ) (b) Süperiletkenin ekseni boyunca elektrik akımı iletiminden dolayı ( $J_{tr}$ ) indüklenen manyetik akı yoğunluğu ( $B_{in}$ ) .....20
- Şekil 1.10** : Kalınlığı  $2a$  olan bir tabakadan oluşan süperiletken malzemede Bean modeline göre dışardan uygulanan manyetik akı yoğunluğuna  $B_0(x)$  göre malzemenin içinde oluşan manyetik akı yoğunluğu  $B_z(x)$  ve akım yoğunluklarının  $J_y(x)$  değişimi: (a)  $B_0(x) = B^*/2$  (b)  $B_0(x) = B^*$  ve (c)  $B_0(x) = 2B^*$  .....22
- Şekil 1.11** : Süperiletken volan enerji depolama sistemi (SVED). .....27
- Şekil 2.1** : Japonya'nın geliştirdiği 500 km/saat üzerinde hıza ulaşan süperiletken Mag-Lev sistemi.....29
- Şekil 2.2** : Hibrit sürekli mıknatıs-elektromıknatıs yatak sistemi.....31
- Şekil 2.3** : (a) Süperiletken-sürekli mıknatıs kaldırma ve (b) süperiletken-girdap akımları kaldırma.....31
- Şekil 2.4** : (a) Kararlı potansiyel çukuru ve (b) kararsız potansiyel tepesi.....32
- Şekil 2.5** : Keyfi olarak konumlanmış iki manyetik dipol .....34
- Şekil 2.6** : Donmuş görüntü konfigürasyonu: AS yüksekliği  $h$  (sabit), ölçüm yüksekliği  $z$  (değişken), SM manyetik momenti  $m^{SM}$ , diyamanyetik görüntü momenti  $m^d$ , donmuş görüntü momenti  $m^f$ . SM bileşenin yeni konumu ile donmuş görüntüsü arasındaki mesafe  $r_f$ , diyamanyetik görüntüsü ile arasındaki mesafe  $r_a$ 'dir.....39
- Şekil 3.1** : Süperiletken manyetik kaldırma sisteminde yer alan kuvvet sensörlerinin kalibrasyon eğrisi.....41
- Şekil 3.2** : Deneylerde kullanılan NdFeB sürekli mıknatıs .....42
- Şekil 3.3** : Deneylerde kullanılan külçe süperiletkenler (YBCO).....42
- Şekil 3.4** : Kuvvet ölçüm sisteminin genel görünümü .....43

<b>Şekil 4.1</b> : Deneyde kullanılan konfigürasyonların gösterimi. Araç gövdesi üç değişik konfigürasyonla kaldırılmıştır. SA: Sıvı azot, YSS: Yüksek sıcaklık süperiletken ve SM: Sürekli mıknatıs .....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Sürekli mıknatıslarla süperiletkenler arasında donmuş görüntü modelinin farklı üç konfigürasyona göre gösterimi: (a) Konfigürasyon 1 (b) Konfigürasyon 2 ve (c) Konfigürasyon 3.....	<b>47</b>
<b>Şekil 4.3</b> : DGM modelinin $h = 5$ mm'de tüm konfigürasyonlar için SM'ler ile YSS arasındaki düşey mesafeye ( $z$ ) karşılık gelen, düşey kuvvet grafiği (İç grafik: tüm konfigürasyonlar için deneysel sonuçlar).....	<b>53</b>
<b>Şekil 4.4</b> : Tüm konfigürasyonlar için $h = 25$ mm'de DGM kullanılarak SM'ler ve araç gövdesinin tabanı (YSS) arasında düşey mesafeye bağlı olarak elde edilen düşey kuvvetin grafiği (İç grafik: tüm konfigürasyonlar için deneysel sonuçlar).....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.5</b> : DGM ile $h = 75$ 'de tüm konfigürasyonlar için SM'ler ile YSS arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak düşey kuvvetin hesaplanması (İç grafik: Deneysel sonuçlar).....	<b>56</b>
<b>Şekil 4.6</b> : $h = 5$ mm'de tüm konfigürasyonlar için yatay yer değiştirmeye karşı kılavuz kuvvetinin DGM'de analizi ve deneysel sonuçları.....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.7</b> : (a) Konfigürasyon 1, (b) Konfigürasyon 2 ve (c) Konfigürasyon 3 için $h = 5$ mm'de $z = 4, 5$ ve $6$ mm konumlarında düşey kuvvetlere karşı yatay yer değiştirmenin DGM analizi.....	<b>58</b>

# **ÇOK YÜZEYLİ SÜPERİLETKEN VE HALBACH DİZİLİMLİ SÜREKLİ MIKNATISLARDAN OLUŞAN MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN DONMUŞ GÖRÜNTÜ MODELİ İLE ANALİZİ**

## **ÖZET**

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri tarafından sağlanan kaldırma kuvveti, araç uygulamaları için sınırlıdır. Süperiletken malzemelerin özellikleri sürekli olarak geliştirilmiş olsa bile, süperiletkenler ile manyetik kaldırma ve kılavuz sistemleri için verimli tasarım mekanizmaları bulmak oldukça zordur. Son on yılda yapılan çalışmalar çok yüzeyli süperiletken ve sürekli mıknatıs bileşenlerini optimum konfigürasyonlarda birleştirmenin kaldırma kuvvetlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu bağlamda, çok yüzeyli süperiletkenlerle etkileşime giren Halbach diziliimli sürekli mıknatıslar en çok kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bu tezde, çoklu süperiletken ve Halbach diziliimli sürekli mıknatıslar kullanılarak farklı konfigürasyonlar için araç gövdesi kaldırma sistemi oluşturulmuştur.

Konfigürasyonlar üç şekilde ele alınmıştır. Konfigürasyon 1'deki kaldırma sistemi bir mıknatıs ve bir süperiletkenden oluşmaktadır. Konfigürasyon 2'deki kaldırma sistemi Halbach diziliimli üç mıknatıs ve bir süperiletkenden oluşmaktadır. Konfigürasyon 3'deki kaldırma sistemi Halbach diziliimli üç mıknatıs ve üç süperiletkenden oluşmaktadır. Bu tezde söz konusu konfigürasyonlar inşa edildikten sonra havaya kaldırma ve kılavuz (yatay) kuvvetleri değişik süperiletken soğutma işlemlerine göre deneysel olarak ölçülmüş ve elde edilen sonuçların analizi donmuş görüntü modeli ile gerçekleştirilmiştir.

Kaldırma kuvvetinin artırılması, kılavuz ve araç gövdesi arasındaki kuvvet etkileşimlerine göre yukarıda anlatılan üç konfigürasyon için incelenmiştir. Mevcut konfigürasyonlar için düşey ve kılavuz kuvvetleri, manyetik dipol yaklaşımı ve donmuş görüntü modeli kullanılarak alanlı soğutma ve sıfır alan soğutma koşullarına göre hesaplanmıştır. Öngörülen kuvvet hesaplamaları, belirli ölçüm mesafeleri için analiz edilmiştir.

Bu çalışma vasıtasıyla manyetik kuvvet ile hareket eden araç sistemlerinde sürekli mıknatıs ve yüksek sıcaklık süperiletkenlerin sayısı ve dizilimlerinin kılavuz ve kaldırma kuvvetleri üzerinde belirli bir miktarda kazanç elde edilebileceği görülmüştür.



# **ANALYSIS OF MAGNETIC LIFT SYSTEM CONSISTING OF MULTI-SURFACE SUPERCONDUCTOR AND HALBACH ARRANGEMENT CONTINUOUS MAGNETS WITH FROZEN IMAGE MODEL**

## **SUMMARY**

Energy is one of the most necessary vital needs for people to live in a certain standard in the world. For this reason, scientific studies on energy are very important for a sustainable life. Traditional methods such as oil and natural gas in energy production cause global warming. Many scientific studies are carried out in order to reduce the negative effects on the environment during the production, transportation and storage of energy. Superconductors, which have the potential to be used in energy production, transport, conversion, storage and many electrical vehicle applications, are an important scientific study in terms of minimizing the aforementioned negative environmental factors.

After the discovery of superconductivity, especially the limitations in cooling technologies did not provide much opportunity for the technological applications of the discovered superconductors. This situation continued until the eighties, although some alloys showing superconductivity at high temperatures were found, the temperature values were not at the desired levels. Thanks to the development of superconductors and the advancement of cooling technologies, advances have occurred in maglev (magnetic levitation) systems. Studies have been on the improvement of the lifting and steering vehicle parts of maglev systems.

Scientific studies conducted after the discovery of superconductivity showed that superconductivity is not only composed of zero resistance, but also revealed that superconductivity has a much more complex working mechanism than expected. Many experiments have been carried out on superconducting materials and it has been understood that these materials have different electrical and magnetic properties compared to normal conductors.

Initially, superconductivity was tried to be explained by starting from the theory of normal conductors, but the studies showed that a special theory of superconductivity should be developed. As a result of the researches, it has been determined that besides the zero resistance of the superconductors, their interactions with the magnetic field also differ from those of normal conductors. For example, it has been observed that superconductors exclude magnetic fields after the zero resistance property, known as the Meissner effect. A theory was developed by the London brothers in order to mathematically prove that superconductors have zero resistance and exclude magnetic fields.

In addition to making superconductors and their applications easier in our daily lives, it is obvious that integrating superconductors into processes that use fossil fuels such as oil, natural gas and coal that harm the environment in energy production, distribution and storage will minimize the damage to nature. The most important

reasons why superconductors are environmentally friendly is that they do not have adverse effects on the environment, such as energy and heat loss.

Making objects immune to the effects of gravity has been the common dream of science and researchers. Research on levitation using magnetic force has paved the way for train applications at speeds over 500 km per hour, and technological developments have accelerated with the emergence of superconducting materials. The modern development of magnetic transport systems known as magnetic levitation (Mag-Lev) began in the late 1960s as a corollary to the development of superconductor, transistor, and chip-based electronic control technology.

With the discovery of high temperature superconductors, YBCO started to be used in mag-lev systems after 1987. In the early days, difficulties were encountered in producing these superconductors in the form of wires due to their low current densities and their brittleness because they are ceramic. However, later on, techniques were developed and large-scale improvements were made in wire applications. On the other hand, it has been determined that superconductors produced in the form of ingots do not have such disadvantages and that they easily lift the magnets into the air, and thus, more focused on their lifting abilities. At this point, superconductor technology clearly shows that existing Mag-Mag-Lev transport systems will be developed with new high-temperature superconducting magnets in the coming years. With their passive, simple and promising properties, superconductors have superior qualities for technology. The development of systems that can move without contact, wear, liquid or gas intervention and without the need for active controls is an indication that they will be used in transportation and many other applications in the future.

The process of gaining superconductivity by cooling the superconducting material in an environment where there is no external magnetic field is known as zero field cooling in the literature. If a magnetic field is applied to the superconductor subjected to such a treatment by an external permanganet magnet, the magnetic flux is excluded by the superconductor. Conversely, when the superconducting material is in an environment where an external magnetic field exists before being cooled, the entire external magnetic field penetrates into the superconducting material. Naturally, the superconducting material is not superconducting before the cooling process takes place. The phenomenon of gaining superconductivity to the superconducting material by starting the cooling process when there is a magnetic field in the environment is also known as field cooling in the literature. After the cooling process is completed, the magnetic field in the superconductor is trapped in its place. The magnetic fluxes trapped in the superconductor are fixed in the non-superconducting centers. The regions where the flux is spiked consist of non-superconducting regions. These areas are called pinning centers. Flux nailing is required for stable superconducting levitation.

The force interaction between superconductors and magnets has been modeled by various methods. Examples of some of these are the magnetization model, the Maxwell stress tensor model, and the critical state model. For force estimates to be valid, the method must also take into account the effect of hysteresis in the superconductor. Using a particular method may not produce accurate results due to assumptions and limitations. In cases where hysteresis is not taken into account, the Ampere currents approximation or dipole moment approximation is one of the methods used together with the Frozen Image Model to determine the forces between the superconductor and

permanganet magnet components. The frozen image model has been successfully applied in various superconducting levitation applications.

The relationship of forces between permanent magnets and high temperature superconductors is related to the flux spike and diamagnetic property of superconductors. Flux nailing ensures that the levitated superconductor or magnet is stabilized (nailing) and guiding (horizontal) forces so that it stays in the same place. The force interaction between the superconductor and the magnet can be modeled according to the dipole-dipole interaction approach because the currents in the superconductor behave like magnetic dipoles created by the magnetic field of the magnets. The interaction that takes place according to the dipole approach can be represented by the forces between the dipoles and their mirror images.

Since the work done in the thesis is experimental and on modeling, let's talk about our experimental setup.

The force measurement system is designed to provide sample control with 3 DC step (step) motors that allow 6-degrees of freedom movement from aluminum material. The measuring system also has a 3-axis load cell to measure the magnetic force at the relevant degree of freedom, a liquid nitrogen-cooled sample cup where superconducting materials are placed and can be changed to suit the multi-surface superconducting. The materials used in the force measurement system are the same, and the experiments were carried out in different configurations.

If we look at the stages of the experiments, we can divide the experiments into two as field cooling and zero field cooling experiments. In field cooling experiments, cooling is done by minimizing the distance between the permanent magnet and superconductors. Thus, when the superconductor is in the cooling phase, the magnetic field acts on it. In zero field cooling experiments, the distance between the permanent magnet and superconductors is brought to the maximum distance and cooling is done. Thus, the magnetic field does not affect the superconductor while it is in the cooling phase.

In this thesis, a vehicle body lifting system is constructed for different configurations by using multiple superconductors and Halbach array permanent magnets.

Three different configurations are taken into account in the thesis. The lifting system in Configuration 1 consists of a magnet and a superconductor. The lifting system in Configuration 2 consists of three Halbach array magnets and a superconductor. The lifting system in Configuration 3 consists of three Halbach array magnets and three superconductors. In this thesis, after the aforementioned configurations were constructed, levitation and guidance (horizontal) forces were experimentally measured according to different superconductor cooling processes and the analysis of the obtained results was carried out with the frozen image model.

The increase in lift is investigated for the three configurations described above, based on the force interactions between the guide and the vehicle body. For the available configurations, the vertical and guide forces were calculated according to the field cooling and zero field cooling conditions using the magnetic dipole approximation and the frozen image model. The predicted force calculations have been analyzed for specific measuring distances.

Through this study, it has been seen that a certain amount of gain can be obtained on the guide and buoyancy forces of the number and arrangement of permanent magnets and high temperature superconductors in vehicle systems moving with magnetic force.



## 1. GİRİŞ

Enerji, insanların dünya üzerinde belirli bir standartta yaşayabilmesi için en gerekli yaşamsal ihtiyaçlardandır. Bu sebeple, sürdürülebilir bir yaşam için enerji üzerine yapılan bilimsel çalışmalar oldukça önemlidir. Enerji üretiminde petrol ve doğal gaz gibi geleneksel yöntemler küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Enerjinin üretilmesi, taşınması ve depolanması esnasında çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır. Enerji üretimi, taşınımı, dönüşümü, depolaması ve birçok elektriksel araç uygulamasında kullanım potansiyeline sahip süperiletkenler sözü geçen olumsuz çevresel faktörlerin en aza indirilmesi açısından önemi olan bir bilimsel çalışma konusudur.

1908 yılında helyumu sıvılaştırmayı başaran Hollanda'daki Leiden Laboratuvarı'ndan fizikçi Heike Kamerling Onnes, 1911 yılında sıvı helyum sıcaklığında (4.2 K) cıvanın direncinin ani bir şekilde düşerek sıfıra yaklaştığını gözlemleyerek süperiletkenliği keşfetmiştir [1]. Sonraki yıllarda birçok metal, bileşik ve alaşımın süperiletkenlik özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. 1933 yılında ise Alman bilim insanları W. Meissner ve R. Ochsenfeld, manyetik alanda 4.2 Kelvine soğutulduğunda manyetik akının süperiletken malzemenin içinden tamamen dışlandığını keşfettiler. Bir malzemenin içindeki manyetik alanın dışlanması mükemmel diyamanyetizma olarak bilinir hale gelmiş olup Meissner etkisi (manyetik akının dışlanması) olarak adlandırılmıştır.

Süperiletkenlik keşfedildikten sonra özellikle soğutma teknolojilerindeki sınırlamalar keşfedilen süperiletkenlerin teknolojik uygulamalarına çok fazla olanak tanımamıştır. Bu durum seksenli yıllara kadar devam etmiş, yüksek sıcaklıklarda süperiletkenlik gösteren bazı alaşımlar bulunmuş olsa da sıcaklık değerleri istenilen seviyelerde olmamıştır. Ancak, 1986 yılından sonra yüksek sıcaklık süperiletkenlerin keşfedilmesiyle süperiletkenlik uygulamaları tekrar hız kazanmıştır. Böylece, 1911 yılında keşfedilen süperiletkenlik 1986 yılında yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfi ile teknolojiye farklı bir boyut kazandırmıştır. 1986 yılında Bednorz ve Müller La-Ba-Cu-O bileşiğinin 30 Kelvin sıcaklığında süperiletkenlik özelliğini keşfetmiştir

[2]. 1986 yılından itibaren La-Ba-Cu-O, Y-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu-O, Tl-Ba-Ca-Cu-O ve Hg-Ba-Ca-Cu-O gibi bileşikler yüksek sıcaklık süperiletkenleri olarak keşfedilmiştir. İlk keşfedilen La-Ba-Cu-O bileşiğinden sonra, 1987'de Wu 92 K'de süperiletken olan Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO) bileşiğini keşfetmiştir [3]. Bu bileşiğin kritik sıcaklığının 77 Kelvin üzerinde olması süperiletkenliğin uygulamaları açısından çok önemlidir. Nitekim bu malzemeleri soğutmak için artık sıvı azot kullanılabilir.

Günümüzde süperiletkenler tek kristal (külçe veya tel şerit), ince film ve kalın film gibi çeşitli şekillerde üretilmektedir. 1986 yılından sonra seramik olan yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) üretilmeye başlamıştır. YSS malzemeleri üretmek için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları katı-hal tepkime, çözelti-jel, eritme-döküm, ince film ve kalın film gibi yöntemlerdir [4-6].

Cıvanın süperiletken olduğu keşfedildikten sonra teknolojik açıdan kullanışlı bir malzeme olmadığı anlaşılmıştır. Takip eden yıllarda başka elementlerin de süperiletkenlik gösterip göstermediği araştırılmıştır.

Nitekim sonraki araştırmaların sonucunda alüminyum (Al), kalay (Sn), kurşun (Pb), indiyum (In), niyobyum (Nb), renyum (Re) ve lantan (La) gibi elementlerin de süperiletken olduğu keşfedilmiştir. Yine yapılan bilimsel çalışmalar elementlerin yanında alaşım ve bileşiklerin de süperiletkenlik sergilediğini göstermiştir.

Süperiletkenlerin gelişimi ve soğutma teknolojilerinin ilerlemesi sayesinde maglev (manyetik kaldırma) sistemlerinde ilerlemeler meydana gelmiştir. Yapılan çalışmalar maglev sistemlerinin kaldırma ve yönlendirme araç kısımlarının iyileştirilmesi üzerine olmuştur.

Yapılan çalışmalar deneysel ve teorik çalışmalar ile desteklenmiştir. Örneğin Hull ve Cansız tarafından yapılan çalışmada süperiletken ve sürekli mıknatıslar arasındaki dikey ve yatay kuvvetler ile ilgili kuvvet hesaplamaları sistemin sıfır alan soğutma ve alanlı soğutma analizleri dikkate alınarak donmuş görüntü modeli ile analiz edilmiştir [7]. Halbach dizilimli sürekli mıknatıs kullanılarak yapılan ilk çalışmalardan biri de Jing ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [8]. Bu çalışmada yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) manyetik kaldırma (Maglev) aracının havaya kaldırma performansını iyileştirmek için Halbach dizilimli sürekli mıknatıslar kullanılarak iki kutuplu bir Halbach dizisinin kalıcı mıknatıs kılavuzu (SM) önerilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi

kullanılarak Halbach SM'lerin, enine kesitinin normal SM konfigürasyonlarına göre daha geniş bir yüksek alan bölgesine sahip olduğunu analiz edilmiştir.

Süperiletken manyetik kaldırma cihazlarında kılavuzu oluşturan kalıcı mıknatısların özellikleri, kaldırma kuvveti ve stabilite açısından performansları için çok önemlidir. Nuria ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada süperiletkendeki manyetik enerjiyi en aza indirmeye yönelik araştırma yapılmıştır [9] Bu çalışmada gerçek maglev cihazlarının gerçekçi parametrelerini dikkate almaya dayalı bir modelden, hem geleneksel düzenlemelerden hem de yakın zamanda önerilen Halbach benzeri düzenlemelerden kaynaklanan kaldırma ve yönlendirme kuvvetlerini ve stabilite hesaplamaları yapılmıştır.

Lei ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) maglev sisteminin histerisiz yeteneğini geliştirmek için, çift kutuplu Halbach sürekli mıknatıs kızıağı (SM) için özel bir manyetik yükselme yapısı tasarlanmıştır [10].

İlerleyen zamanlarda Öztürk ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada süperiletkenlerin çekirdekleri arasındaki mesafeye bağlı olarak sürekli mıknatıslarla etkileşimi ve kaldırma kuvvetinde meydana gelen değişimler donmuş görüntü modeli ile detaylı olarak analiz edilmiştir [11].

Süperiletken teknolojisindeki gelişmeler manyetik yataklardaki gelişmeleride tetikledi ve volan enerji depolama sistemleri için önemli teknolojik ilerlemelere öncülük etti. Bu bağlamda, belirli levitasyon konfigürasyonunun rotorun yatak mekanizmasındaki stabilitesi üzerindeki etkisi üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Rotoru etki eden dikey ve yanal kuvvetler, süperiletkenlerin ve kalıcı mıknatısların çeşitli şekil ve boyutlarına göre belirlenir. Bu kapsamda Cansız ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada sürekli mıknatıslar arasındaki etkileşim kuvvetini modellemek için Amper akımı yaklaşımı kullanılarak analiz yapılmıştır [12]. Bu çalışmada sürekli mıknatıs ve yüksek sıcaklık süperiletken arasındaki etkileşim kuvvetinin belirlenmesi durumunda, süperiletkenin soğutma prosedürüne göre Amper akımı yaklaşımını uygulamak için donmuş görüntü modeli kullanılmıştır.

Son zamanlarda yine Öztürk ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada çok yüzeyli bir YSS (üç çekirdekli yığın YBaCuO ile yüksek sıcaklık süper iletken) Maglev sistemi tasarlanmıştır [13]. Bu çalışma ile çok yüzeyli YSS maglev sisteminin manyetik levitasyon kuvveti, kılavuz kuvveti, manyetik rijitliği ve maliyet analizi

üzerine ilk defa detaylı bir inceleme yapılmıştır. Böylece çok yüzeyli YBaCuO-PMG düzenlemelerinin, yüklenme kapasitesi ve özellikle Maglev sistemlerinin birlikte hareket kararlılığı açısından tek yüzeyli düzenlemelere göre daha üstün olduğu belirlenmiştir [13].

Tezde yapılan çalışma bu çalışmalardan farklı olarak çok yüzeyli YSS'ler ve Halbach dizilimli mıknatısların farklı konfigürasyonları incelenerek deneysel ve teorik incelemeler (donmuş görüntü modeli) yapılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışması, geleceğin teknolojisi olacak olan süperiletken uygulamalarına katkı sağlaması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda süperiletken-mıknatıs etkileşimi için gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışma vasıtasıyla süperiletken kaldırma sistemlerinin cihaz uygulamalarının eniyilemesi (optimizasyonu) konusunda literatüre katkı sağlanmıştır. Manyetik tren uygulamaları için süperiletken kaldırma sistemlerinin deneysel ve kuramsal olarak incelenmesini içeren bu tezde temel olarak süperiletken manyetik kaldırma mekanizmaları ve süperiletken MagLev sistemi deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Her bir mekanizma için tasarım ve sistem eniyilemesine bilgi sağlayacak araştırma gerçekleştirilmiştir. Manyetik kaldırma kuvveti açısından öneme sahip olan süperiletken manyetik yatak tasarımı için prototip geliştirilmiş ve analizi literatürde geçerliliği kabul edilmiş donmuş görüntü modeli (DGM) ile gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslar arası ve mıknatıslarla süperiletkenler arası kuvvetleri içeren etkileşim parametreleri seçilmiş ve tasarım için manyetik dipol yaklaşımlarıyla değişik levitasyon konfigürasyonları incelenmiştir. Raylı sistem uygulamaları açısından öneme sahip süperiletken MagLev sistemi için Halbach dizilimleri deneysel olarak incelenmiş ve bu sistemlerin eniyilemesi için yine dipol momenti yaklaşımı DGM ile uygulanmıştır. Yukarıda verilen başlıkları içeren bu tez çalışması alt bölümlerde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar tezin çıktısı olarak değerlendirilmiştir.

Birinci bölümde süperiletkenliğin gelişimi, sıfır direnç, kritik sıcaklık, alan ve akım yoğunluğu, akı dışlaması, akı kuantumlanması gibi kavramlar tanıtarak süperiletkenliğin gelişimini sağlayan London, Ginzburg-Landau ve BCS teorilerinden bahsedilmiştir. Bu teorilerle açıklığa kavuşturulmuş olan manyetik akı dışlaması, akı kuantumlanması, nüfuz derinliği ve uyum uzunluğu gibi kavramlar tip 1 ve tip 2

süperiletkenleri açısından tanıtılmıştır. Son olarak bu bölümde süperiletkenlerin manyetik alanlarla etkileşimini ve iletkenlik durumlarını incelemek için süperiletkenlerde kritik durum, histerezis ve süperiletken kaldırma (Levitation) açıklanmış ve tez konusuyla ilgili süperiletkenliğin potansiyel uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, süperiletkenler ile manyetik kaldırmanın meydana getirdiği Maglev araçlarına değinilmiştir. Daha sonrasında manyetik kaldırma ve manyetik kuvvet konuları ele alınıp devamında mıknatıslar ve özelliklerine değinilmiş olup deneylerde kullanılan Neodim (NdFeB) mıknatıslar hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında süperiletkenler ve mıknatısların modellenmesi için kullanılan donmuş görüntü modeli ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde deney düzeneğinin tanıtılması ve deneylerin yapılış biçimleri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde süperiletken manyetik kuvvet sisteminde kuvvet ölçümleri yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar donmuş görüntü modeliyle analiz edilmiştir.

Beşinci ve son bölümde tez çalışmasında elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## **1.2 Süperiletkenliğin Gelişimi**

Süperiletkenlik keşfedildikten sonra yapılan bilimsel çalışmalar süperiletkenliğin sadece sıfır dirençten ibaret olmadığını gösterdiği gibi, aslında süperiletkenliğin beklenenden çok daha karmaşık bir çalışma mekanizmasının olduğunu ortaya koymuştur. Süperiletkenlik gösteren malzemeler üzerinde birçok deneyler yapılmış ve bu malzemelerin normal iletkenlere göre farklı elektriksel ve manyetik özelliklerinin olduğu anlaşılmıştır. Başlangıçta normal iletkenlerin teorisinden yola çıkılarak süperiletkenlik açıklanmaya çalışılmış ancak yapılan çalışmalar süperiletkenliğe ait özel bir teorinin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde süperiletkenlerin göstermiş olduğu sıfır direncin yanında manyetik alan ile olan etkileşimleri de normal iletkenlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin, sıfır direnç özelliğinden sonra Meissner etkisi olarak bilinen süperiletkenlerin manyetik alanları dışladığı gözlenmiştir. Süperiletkenlerin sıfır direnç göstermesi ve manyetik alanları dışladığını matematiksel olarak ispatlamak

maksadıyla London kardeşler tarafından bir teori geliştirilmiştir. Ancak bu teori daha ileri seviyede süperiletkenliğin anlaşılabilmesi açısından yetersiz kalmış ve sonrasında Ginzburg Landau teorisi geliştirilmiştir. 1960'lı yıllara gelindiğinde Rus bilim insanı Alexei Abrikosov süperiletkenliğin daha iyi anlaşılması için ileri seviyede çalışmalar yapmış ve son olarak bugün de hala büyük oranda geçerliliğini sürdüren Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından BCS teorisi geliştirilmiştir. Sonraki yıllarda mevcut teorilere eklemeler yapılsa da günümüzde hala birçok konuda geçerliliğini sürdüren BCS teorisi kullanılmaktadır.

Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından 1957'de tesis edilen teoriye (BCS) göre süperiletkenlerde akan süper akımlar, Cooper çiftlerini oluşturan bağlı (bounded) elektronlarla taşınır [14]. Süperiletkenliğin ilk mikroskobik ölçekte tanımlanması bu teori ile gerçekleşmiştir. Örneğin metallerde akım iletkenlik elektronları tarafından taşınır. Bu durum süperiletkenlerde ise Cooper çiftleri tarafından gerçekleştirilir. Cooper çiftleri birbirine eşit fakat zıt moment ve spinlere sahip iki elektronun birlikte hareket etmesiyle oluşur. Metallerde akım dirençle karşılaşır. Direnç, iletkenlik elektronlarının malzeme içindeki saçılmaları sonucu oluşur. Cooper çiftleri metallerdeki gibi bir saçılmaya uğramaz. Cooper çiftlerinin maruz kaldığı saçılmalarda toplam momentum sabit olduğu için süperiletkenlerde direnç sıfırdır. Böylece akımda bir kayıp olmaz.

Süperiletkenliğin sıfır direnç, manyetik alanın dışlanması gibi önemli mekanizmalarının yanında sonraki yıllarda akı kuantumlanması özelliğine de sahip olduğu keşfedilmiştir. Daha sonra açıklanacak olan tip 2 türündeki süperiletken malzemelerin manyetik davranışı Alexei Abrikosov tarafından 1957 yılında açıklanmıştır [15]. Düşük manyetik alanlarda ( $H_{c1}$  ile ifade edilen), süperiletken Meissner halinde olup tip 1 süperiletken gibi davranır.  $H_{c1}$ 'in üzerindeki alan değerlerinde, süperiletken karma-durum denilen durumuna geçer ve böylece manyetik akı süperiletken malzemenin içine kesikli (quantized) değere sahip akı girdapları veya akı-çizgileri (flux-lines) şeklinde girer. Bu durum yalnızca ikinci tip süperiletkenlere mahsus olup akı kuantumlanması olarak bilinir. Süperiletken içine giren kesikli akı-çizgilerinin her biri akı quantumu taşımakta olup değeri,

$$\Phi_0 = \frac{h_p c}{2e} = 2.07 \times 10^{-7} \text{ Gauss-cm}^2 \quad (1.1)$$

ile verilir. Burada  $h_p$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı ve  $e$  ise elektronun yüküdür.

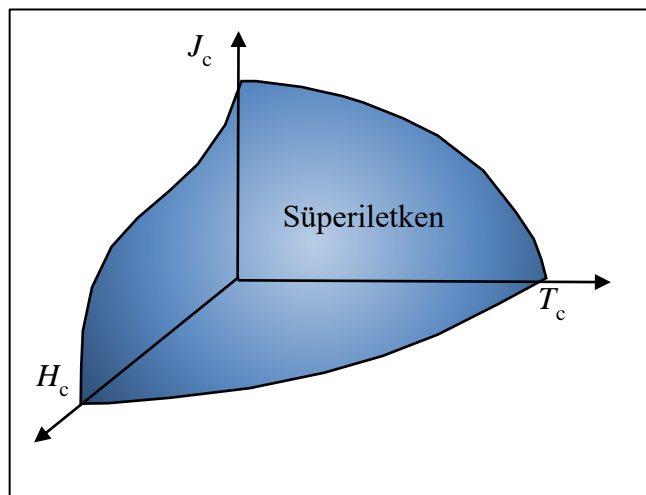
Formal açıdan süperiletkenlik, birçok metal, bileşik ve alaşımın belirli bir sıcaklığın altına soğutulduğunda direncinin aniden sıfıra düşmesi olarak tanımlanır. Süperiletkenlerin süperiletkenlik özelliğini gösterebilmesi için, süperiletken malzemenin bulunduğu sıcaklık, süperiletken malzemeye uygulanan akım yoğunluğu veya manyetik alan parametrelerinin belirli değerlerin altında olması gerekir. Bunlar sırasıyla kritik sıcaklık ( $T_c$ ), kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) ve kritik manyetik alan ( $H_c$ ) olarak adlandırılır.

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi, süperiletkenliğin sürdürülebilmesi için bu parametrelerden herhangi birinin tanımlanan kritik değeri aşmaması gerekir.

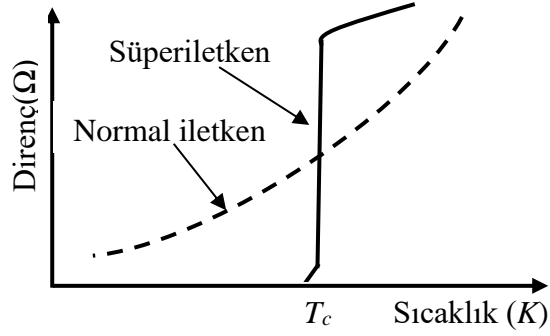
Süperiletkenler kritik sıcaklıklarının altına soğutulduklarında dirençlerinde ani bir düşüş meydana gelir. Kritik sıcaklığın altında soğutulan süperiletkene DC (doğru akım) elektrik akımı uygulandığında, akım hiçbir dirence maruz kalmaksızın sonsuza kadar ilk değerini koruyacak şekilde akmaya devam eder.

Normal iletken malzemelerde direnç sıcaklık ile azalma eğilimindedir ancak hiçbir zaman ani bir azalış göstermediği gibi sıfır değerine de düşmez. Süperiletkende ise sıcaklığın azalmasıyla direnç önce normal iletkendeki gibi azalır, kritik sıcaklığa gelindiğinde ise aniden sıfıra düşer. Normal ve süperiletkenin direncinin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.2’de görülmektedir.

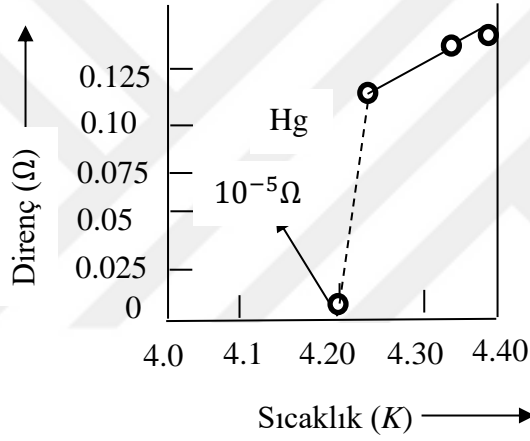
Süperiletkenliğin ilk olarak gözlemlendiği cıvanın direncinin sıcaklıkla değişimi ise Şekil 1.3’te verilmiştir [1].



**Şekil 1.1:** Süperiletken malzemede kritik sıcaklık ( $T_c$ ), kritik manyetik alan ( $H_c$ ) ve kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) arasındaki ilişki [6].



Şekil 1.2: Normal iletken ve süperiletkende direncin sıcaklıkla değişimi [6].



Şekil 1.3: Cıvanın direncinin sıcaklıkla değişimi [1].

Daha önce de belirtildiği gibi süperiletkenin süperiletkenlik gösterebilmesi için kritik sıcaklığın altında soğutulmasının yanında, uygulanan manyetik alanın da belli bir kritik değerin altında tutulması gerekir. Aksi halde malzeme kritik sıcaklığın altında olsa bile süperiletkenlik göstermez ve normal hale geçer. Şekil 1.1'den de görülebileceği gibi süperiletkenliği bozan bu değere kritik manyetik alan ( $H_c$ ) denir. Ginzburg-Landau teorisine göre süperiletkene uygulanan manyetik alanla sıcaklık arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile verilir [4].

$$H_c(T) = H_{c0} \left[ 1 - \frac{T^2}{T_c^2} \right] \quad (1.2)$$

Yukarıdaki bağıntıda,  $T_c$  süperiletkenin kritik sıcaklığı olmak üzere,  $H_c(T)$  herhangi bir  $T$  sıcaklığındaki kritik manyetik alan,  $H_{c0}$  ise sıfır Kelvindeki kritik manyetik alan

değeridir. Süperiletkenin kritik sıcaklığı genellikle herhangi bir manyetik alan uygulamadan sahip olduğu kritik sıcaklık olarak tanımlanır.

### 1.3 Meissner Etkisi Ve Mükemmel Diyamanyetizma

Süperiletkenliğin keşfinden sonra, 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld süperiletkenin kritik sıcaklığının altına soğutulduğunda dışarıdan uygulanan manyetik alanı dışladığını keşfetmişlerdir [16]. Bu özellik süperiletkenlerin mükemmel diyamanyetik malzeme olduğunu göstermektedir. Ayrıca, süperiletken manyetik alan içindeyken dahi kritik sıcaklığın altına soğutulduğunda, manyetik akıyı malzemenin içinden dışarı attığını göstermişlerdir. Bu olay Meissner etkisi olarak adlandırılmıştır. Süperiletken haldeki bir malzeme, soğutma ve manyetik alan uygulama işlemlerinin sıralamasına bağlı olmaksızın içerisinde manyetik alanın bulunmasına asla izin vermez. Meissner olayının teorik açıklaması 1935 yılında Fritz ve Heinz isimli London kardeşler tarafından yapılmıştır [17].

Normal iletkenlerde olduğu gibi süperiletken için de manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve mıknatıslanma arasındaki bağıntı tesis edilebilir. Burada gözetilmesi gereken önemli fark süperiletkenin içinde manyetik alanın daima sıfır olmasıdır.  $B$  manyetik akı yoğunluğu,  $H$  manyetik alan şiddeti,  $M$  mıknatıslanma ve  $\mu_0$  ise manyetik geçirgenlik (permeability) olmak üzere manyetizmanın temel eşitliği aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$B = \mu_0(M + H) \quad (1.3)$$

Bu bağıntıdan faydalanarak  $B = 0$  olması için  $H > 0$  ve  $M < 0$  olması gerektiği sonucuna ulaşılır. Bu durum, pozitif bir manyetik alana maruz bırakılan süperiletkenin negatif bir mıknatıslanma üreteceği anlamına gelir. Manyetik alanın dışlanması, perdeleme akımları (shielding currents) olarak bilinen ve uygulanan manyetik alana eşit ve zıt yönde manyetik alan oluşturacak şekilde süperiletken yüzeyinde akan elektrik akımları vasıtasıyla meydana gelir. Bu mekanizma London teorisiyle kolayca açıklanmıştır. Manyetik alan süperiletkenin yüzey tabakasına nüfuz ettiğinde ise, Lenz kanununa göre oluşan akım dış manyetik alanın tersi yönünde bir manyetik alan oluşturur. Bunun sonucunda süperiletkenin içindeki toplam manyetik alan sıfır olur.

Perdeleme akımlarının süperiletken yüzeyinden ne kadar derine indiği London teorisiyle açıklanan *dalma derinliği* ( $\lambda$ -penetration depth) kavramıyla açıklanır.

Böylece bu kavramların açıklanmasıyla, sıfır direnç ve manyetik alanların süperiletken malzemenin ne kadar derinliğine girebildiği durumları anlaşılır hale gelmiştir. Sıfır direnç ve mükemmel diyamanyetizmanın kurgulandığı bağıntılar London denklemleri olarak bilinir.

London teorisine göre malzeme içindeki iletkenlik elektronlarının bir kısmı süper sıvı veya akışkan (superfluid) haline gelirken diğer kısmının normal kaldığı varsayılmıştır. London denklemleri, iki-akışkan (two-fluid) modelini kullanarak süperiletkenliği açıklamaya çalışır. Newton'un ikinci yasasına göre, uygulanan elektrik alandan ( $E$ ) ötürü kütlesi  $m_e$  olan elektronların üzerine etkiyen kuvvet şu şekilde ifade edilir.

$$E = m_e \frac{d}{dt}(v_s) \quad (1.4)$$

Süper akım yoğunluğu  $J_s$  ise,

$$J_s = n_s e v_s \quad (1.5)$$

ile verilir. Yukarıdaki denklemde  $n_s$  süperiletkenlikten sorumlu yüklerin yoğunluğu,  $v_s$  süperelektronların hızı ve  $e$  de elektronun yüküdür. Buna göre elektrik alan aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$E = \frac{m_e}{n_s e^2} \frac{\partial J_s}{\partial t} \quad (1.6)$$

Elektrik alan ile akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tesis eden Denklem 1.6 birinci London denklemi olarak bilinir. Denklem 1.6 aynı zamanda normal iletkenlerdeki Ohm yasasına karşılık gelir. Burada elektrik alan ( $E$ ) ile elektrik potansiyel ( $V$ ) arasındaki ilişki ( $E = -\nabla V$ ) ve akım yoğunluğu ( $J$ ) ile akım ( $I$ ) arasındaki ilişki ( $A$  kesit alanı olmak üzere  $J = I / A$ ) esas alınarak mikroskobik Ohm yasasından ( $J = E / \rho$ ) makroskopik Ohm yasasına ( $R$  direnç olmak üzere  $V = RI$ ) geçiş yapılır. Karşılaştırma yapıldığında Ohm yasası ile tesis edilen gerilimin akıma oranı dirence tekabül ederken London denklemindeki (Denklem 1.6) ise benzer mekanizma dalma derinliğine ( $\lambda$ ) işaret eder. Şimdi bunu Maxwell denklemlerinden elde edelim,

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.7)$$

Denklem (1.6)'nın her iki tarafının rotasyoneli alınırsa London'un ikinci denklemi elde edilir.

$$\nabla \times J_c = -\frac{n_s e^2}{m} B \quad (1.8)$$

Maxwell denkleminde ve diferansiyel vektör hesabı kullanılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\nabla^2 B = \frac{1}{\lambda^2} B \quad (1.9)$$

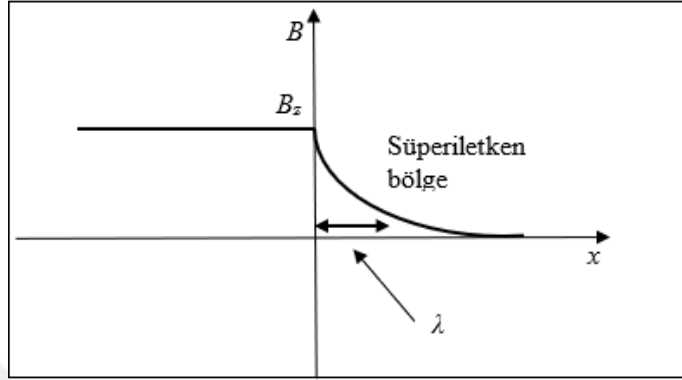
Boşluğun manyetik geçirgenliği  $\mu_0$  olmak üzere yukarıdaki bağıntıda  $\lambda$  *London dalma derinliği* (*London penetration depth*) ile adlandırılır ve  $\lambda^2 = m / \mu_0 n_s e^2$  ile verilir.

Denklem 1.7 ile manyetik alanın süperiletkene ne kadar girdiğini belirlemek mümkündür. London dalma derinliği süperiletkenlerin özelliğini belirlemede kullanılan parametrelerden biridir. Daha önce de ifade edildiği gibi bir süperiletken, manyetik alan içinde kritik sıcaklığının altında soğutulduğunda, yüzeyinde *yüzey akımları* (*surface currents*) indüklenir. Gerçekte bu akımlar malzeme yüzeyinden sonlu kalınlıkta bir tabaka içinde dağılır. İndüklenen bu yüzey akımları malzemenin içindeki net manyetik alanın sıfır olmasını sağlar. Süperiletken malzemenin iç bölgesinde manyetik alanın sıfır olmasına karşın, yüzeye yakın sonlu kalınlıktaki bölgede az da olsa manyetik alanın girdiği gözlenir. Süperiletkene manyetik alan uygulandığında, içindeki manyetik akıyı sıfırlamak için yüzeyinde oluşan bu akımlara *perdeleme akımları* (*screening currents*) denir. Denklem 1.7'nin işaret ettiği gibi perdeleme akımları süperiletken yüzeyinden içeriye girildikçe üstel şekilde azalarak sıfıra düşer. Uygulanan manyetik alanın malzemenin yüzeyine paralel olması halinde,  $B_0$  uygulanan manyetik alanın tam yüzeydeki değeri,  $x$  malzeme yüzeyinden içeriye doğru uzaklık ve  $\lambda$  dalma derinliği olmak üzere manyetik alanın malzeme içindeki derinliğe göre değişimi Denklem 1.9'un çözümü olan aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$B(x) = B_0 e^{(-x/\lambda)} \quad (1.10)$$

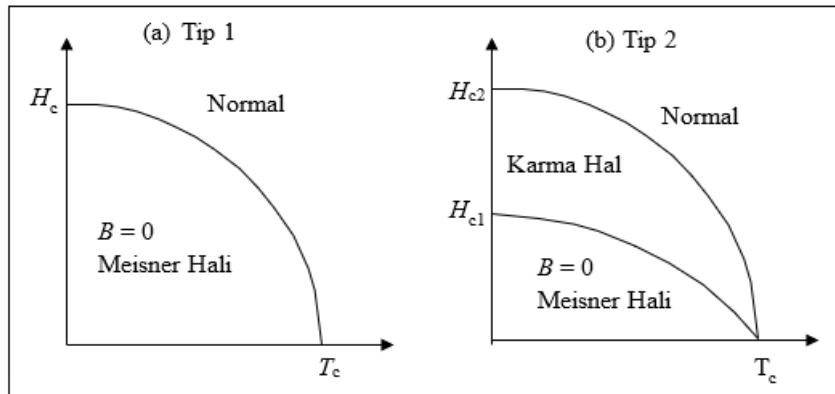
Manyetik alanın yüzeydeki değeri ( $B_0$ ) derinlikle üstel olarak azalmaktadır. Süperiletkenlerde manyetik alanın tamamen sönmüldüğü değer (dalma derinliği) pratikte 100 nanometrenin altında olup malzemenin boyutlarıyla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu sebeptendir ki süperiletken malzemelerde manyetik alanı dışlayan perdeleme akımlarının yüzeyde aktığı kabul edilir.

Süperiletken ile manyetik alan arasındaki ilişki (Denklem 1.10) genel olarak tanımlanmış süperiletken bir bölge için geçerlidir ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Pratikte manyetik alanın süperiletken bölgeye ne şekilde girdiği süperiletken çeşidine ve uygulanan manyetik alanın süperiletkenin soğutulma işlemine bağlıdır.



**Şekil 1.4:** Dışardan uygulanan manyetik alanın süperiletken içine girişi.

Süperiletkenler manyetik alana gösterdikleri cevap şekline göre tip 1 ve tip 2 diye iki farklı kategoride sınıflandırılırlar. Süperiletkene uygulanan manyetik alanın sıcaklık ile değişimi tip 1 ve tip 2 süperiletkenler için Şekil 1.5'te verilmiştir. Meissner durumunun geçerli olduğu veya kritik alan ve kritik sıcaklık aşıldığında süperiletkenliğin yok olduğu süperiletkenler birinci tip olarak bilinir (Şekil 1.5a). Saf metaller genellikle birinci tip süperiletkenlerdir. Niyobyum ve vanadyum hariç cıva, alüminyum, titanyum, kurşun ve kalay gibi tüm metalik süperiletkenler birinci tiptir. Manyetik alanın süperiletken içine girmeye başladığı halde hala süperiletkenliğin muhafaza edildiği süperiletkenler ise ikinci tip olarak adlandırılır (Şekil 1.5b) ve karma (mixed) veya girdap (vortex) fazı olarak bilinir.



**Şekil 1.5:** Süperiletken malzemede sıcaklık ile manyetik alan arasındaki ilişkiye göre süperiletkenlik durumu: (a) Tip 1 (b) tip 2.

İkinci tip süperiletkenlere  $H_{c1}$  ile  $H_{c2}$  değerleri arasında dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında manyetik alan süperiletken malzemeye girebilir.

Birinci ve ikinci tip süperiletkenleri ayırt edici özellik, manyetik alanın süperiletkene Denklem 1.10 ile verilen dalma derinliğinin ( $\lambda$  penetration depth) elektronların birbirine bağlı kaldığı uzaklığı temsil eden *uyum uzunluğuna* ( $\xi$  coherence length) oranı ile verilir. Uyum uzunluğu süperiletkenlikten sorumlu *Cooper çiftlerini* oluşturan elektronların bağlı kalabildikleri karakteristik mesafe ile ilgili bir parametredir.

Başka bir ifade ile bir Cooper çiftindeki iki elektron arasındaki ortalama uzaklık, uyum uzunluğu olarak da düşünülebilir. Süperiletkenin uyum uzunluğu süperiletkenlik özelliği ile yakından ilişkilidir. Bu anlamda dalma derinliğinin uyum uzunluğuna oranı ( $\kappa$ ) Ginzburg–Landau parametresi olarak bilinir [18]. Bu teoriye göre uyum uzunluğu süperelektronların süperiletkenliği koruyabildikleri mesafe olarak da tanımlanır. BCS teorisine göre ise uyum uzunluğu, Cooper çiftini oluşturan süperelektronların bir arada kalabildikleri mesafe olarak tanımlanır.

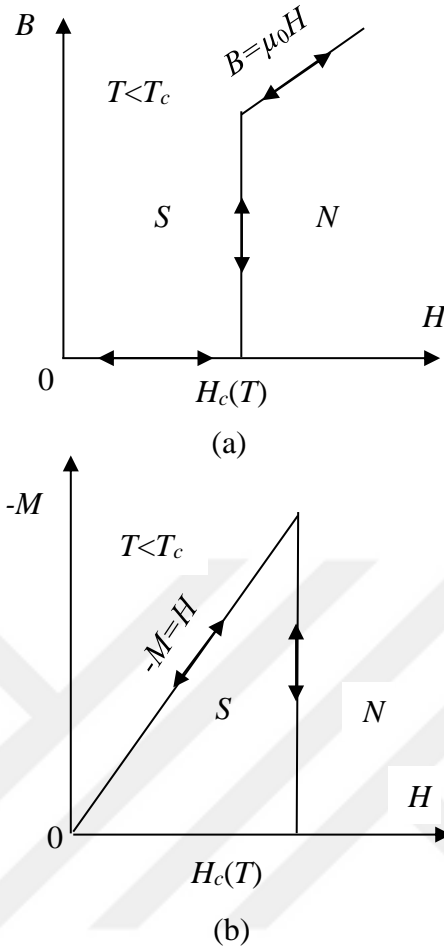
Ginzburg-Landau parametresi süperiletkenleri sınıflandıran bir oran olup  $1/\sqrt{2}$  değerinden küçük ise süperiletken birinci tip, büyük ise ikinci tiptir.

Şekil 1.6a ve şekil 1.6b, sırasıyla normal ve süperiletken durumlarında tip 1 süperiletkenlerin manyetik alanını ve mıknatıslanmasını göstermektedir.

Genel olarak, tip 1 süperiletken, yüksek manyetik bir alanda kullanışlı değildir. Bunun sebebi çok düşük kritik manyetik alana ( $H_c$ ) sahip olmalarıdır. Buna ek olarak, iletkenlik akımı sadece  $\lambda \sim 10^{-6}$  cm dalma derinliği ile tanımlı yüzeyin ince bir tabakasında akabilmekte olup tüm gövdesinde akan akım yoktur.

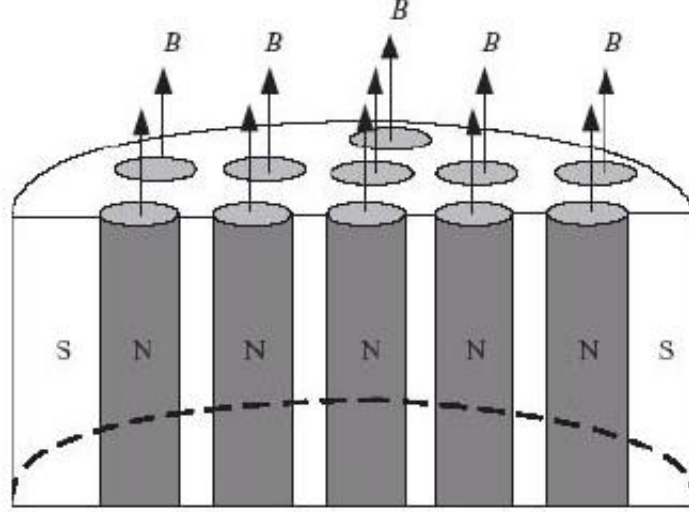
Bu sebeple tip 1 süperiletkenler süperiletken-mıknatıs etkileşimine dayalı ve güç uygulamalarında kullanışlı değildir.

Tip 2 süperiletkenler tip 1 süperiletkenlere göre pek çok açıdan önde olup manyetik kaldırma ve yönlendirme sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Tip 2 süperiletkenler ayrıca bir çok motor, jeneratör, tel ve bunlara benzer birçok alandada tip 1 süperiletkenlere göre oldukça fazla kullanılmaktadır.



**Şekil 1.6:** Tip 1 süperiletken: (a) manyetik akı yoğunluğunun manyetik alan ile değişimi (b) mıknatıslanmanın manyetik alan ile değişimi [6].

İdeal bir tip 2 süperiletken, tip 1 süper iletkenden farklı olarak, kritik sıcaklığın altında soğutulduğunda Şekil 1.5'te görüldüğü gibi iki kritik manyetik alana eşlik eden  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  ile verilen iki manyetik akı yoğunluğu değerine sahiptirler. Dışarıdan uygulanan manyetik alan birinci kritik alanın altında ise, süperiletken Meissner durumunda kalır ve daha sonra sıfır manyetik alanla tam diyamanyetizmaya ulaşır. Dış manyetik alan bu iki kritik manyetik alan değerinde uygulanırsa, karma durum olarak bilinen süperiletken ve normal durum bir arada bulunur. Bu durumda akı çizgileri süperiletken içindeki normal bölgeden geçebilir. Şekil 1.7 karma durumdaki bir tip 2 süper iletkeni göstermektedir. Burada gölgeli olarak gösterilen kısımlar, manyetik alanın geçebileceği normal bölgeyi (N) gösterirken, diğer kısımlar süper iletken bölgelerdir (S). Bir manyetik alan normal alandan geçebilir ve girdap (vorteks) akımı merkezi bölgenin dışında oluşur. Manyetik alan, merkez bölgeden dışarıya doğru sıfıra düşene kadar kademeli olarak azalır ve böylece manyetik alan tamamen perdelenmiş olur.



**Şekil 1.7:** Karma durumda bulunan tip 2 süperiletkende girdapların oluşumu [6].

Dış manyetik alan arttığında, süper iletken bölge ( $S$ ) kademeli olarak azalır ve normal alan ( $N$ ) genişler.

Uygulanan manyetik alan ikinci kritik alanın üzerinde bir değere sahip ise, süperiletkenlik durumu tamamen normal duruma ( $N$ ) döner.

Şekil 1.8’de, ideal bir tip 2 süperiletkenin manyetik alan ile manyetik akı yoğunluğunun ve mıknatıslanmasının değişimi görülmektedir.

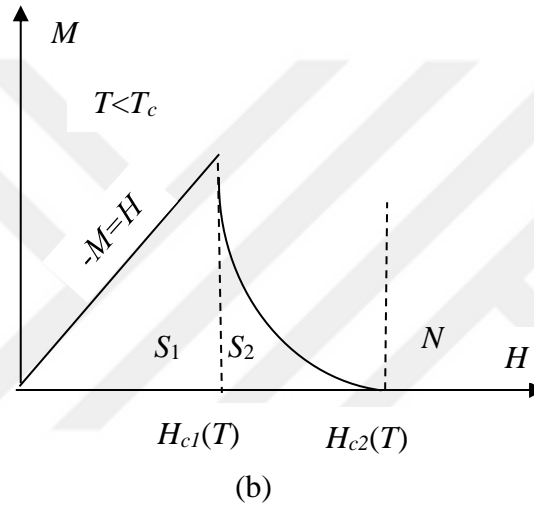
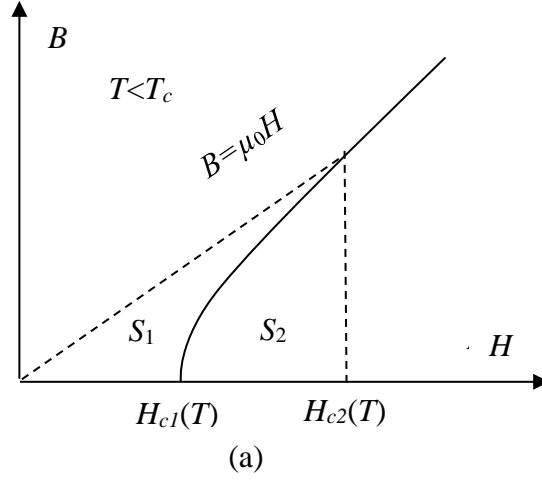
Burada üç durum vardır: süperiletkenlik durumu ( $S_1$  Meissner durumu), karma durum ( $S_2$ ) ve normal durum ( $N$ ).

İdeal tip 2 süperiletkenlerin manyetik akı yoğunluğunun manyetik alanla değişimini daha iyi anlayabilmek için Şekil 1.8’e bakarak mıknatıslanmasının manyetik alan ile nasıl değiştiğini ve kritik akım yoğunluklarının değişimi görebiliriz.

İdeal bir tip 2 süperiletkenin kritik akım yoğunluğu manyetik alana bağlıdır. Kritik akım yoğunluğu, dış manyetik alan ile azalır. Dış manyetik alan, düşük kritik manyetik alanı ( $H_{c1}$ ) geçince kritik akım yoğunluğu ortadan kalkar.

Tip 2 süperiletkenleri tip 1 süperiletkenlerden ayıran en büyük özelliği akıyı çivileme özellikleridir bu özellikleri sayesinde dengede olan bir sistemi sistemin dengesi bozulması halinde tekrardan dengeye sokabilirler.

Tip 2 süperiletkenlerdeki akı çivileme olayı süperiletken içindeki karma durumdan meydana gelmektedir.



**Şekil 1.8:** İdeal tip 2 süperiletken: (a) manyetik akı yoğunluğunun manyetik alanla değişimi (b) mıknatıslanmasının manyetik alan ile değişimi [6].

İdeal tip 2 süperiletkenlerin kristal yapısı nispeten kusursuz olduğundan, akı yolları düzgün bir şekilde düzenlenmiştir, bu nedenle akı yolları etrafındaki girdap akımları birbirini yok eder, dolayısıyla iç kısımdan geçen net akım yoktur. Yani zarf akımı sıfırdır. Bir dereceye kadar ideal tip 2 süperiletken, akım taşıma kabiliyeti açısından tip 1 süperiletkene benzer. Akım, yalnızca dalma derinliği kalınlığına sahip süperiletkenin yüzeyinde bulunur, böylece ideal tip 1 süperiletkenin gövdesi akımı taşıma yeteneğine sahip değildir.

Tip 2 süperiletkenlerde akı süperiletkenin içinde olabilmekte ve bu durum süperiletkenliği yok etmemektedir. Akı çivilenmesinin mümkün olduğu tip 2 süperiletkenlik mekanizması sayesinde tip 1'den manyetik alan ve diğer uygulanmalarında önemli ölçüde ayrılmaktadır. Detaylı olarak akı çivileme olayı sonraki bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

#### 1.4 Akı Çivilemesi

İkinci tip süperiletkenlerde birinci kritik alan olan  $H_{c1}$  değerine kadar uygulanan manyetik alanlarda akı sabit veya sıfır olduğu için akı hareketi olmaz ve böylece herhangi bir enerji kaybı söz konusu değildir (sıfır direnç). Ancak  $H_{c1}$ 'den daha büyük manyetik alanlarda manyetik akı malzemeye manyetik akı tüpleri şeklinde girmeye başlar ve tüpler arasındaki mesafe dalma derinliği  $\lambda$  (penetration depth) mertebesinde olduğunda birbirlerinin varlığını hissetmeye başlarlar. Manyetik alan uygulanan malzemedeki elektrik akımı geçirildiğinde akı tüpleri

$$F_L = J \times B \quad (1.11)$$

ile verilen bir Lorentz kuvveti hissedecekleri için akı tüpleri malzeme içinde hareket etmeye başlar. Bu durum malzeme içinde bir elektrik alan ( $\mathbf{E}$ ) indükleyerek akıma karşı bir direnç oluşturur. Direnç oluşmaması için süperiletken malzeme içerisindeki akının hareket etmemesi gerekir. Bunun için süperiletken malzemelerde “çivileme merkezleri” (pinning centers) oluşturularak akı çizgilerinin bu merkezlerde hareketsiz kalmaları sağlanır. Çivileme merkezleri malzeme içindeki normal bölgeler olup yapısal kusurlar içeren bölgelerdir. Homojen dağılmış akı çivileme merkezleri oluşturmak için genellikle malzemeye süperiletken olmayan madde katkısı yapılarak malzeme içerisinde yapı kusurları oluşturulur.

Girdap (vortex state) durumunda olan ikinci tip süperiletkene girdaplara dik yönde akı uygulanırsa, girdaplara Lorentz kuvveti etki eder ve bu Lorentz kuvveti girdapları harekete geçirir. Lorentz kuvveti, girdapların normal halde (süperiletkenlik özelliği göstermeyen) olan merkezlerinde (core) elektronların hareketine sebep olarak enerji kaybına yol açar. Homojen olmayan ikinci tip süperiletkenlerde örgü kusurları (lattice defects), kaymalar (dislocations), tane sınırları (grain boundaries) veya normal bölgeler akı çivileme (flux pinning) merkezlerini oluşturur.

Akı çivilenmesi ikinci tip süperiletkenler girdap veya karma-durumundayken (mixed state) meydana gelir [19]. Karma-durum durumunda  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  alan değerlerini oluşturan bir bölge mevcuttur. Süperiletken malzeme bu bölgedeyken malzeme içindeki akı çizgileri tek bir kuantum akısı (quantum flux) oluşturacak şekilde malzemeye belirli bölgelerden girer.

## 1.5 Süperiletkenlerde Kritik Durum

Daha önce Cooper çiftleri ile akım yoğunluğunun ilişkili olduğu ifade edilmişti. Uygulamada süperiletken bir malzemenin direnç göstermeksizin taşıyabildiği akım miktarı kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) olarak tanımlanır.  $J_c$  üzerindeki akımlarda Cooper çifti bozulacağından süperiletkenlik de yok olur. Charles Bean 1964 yılında kritik akım yoğunluğunun, uygulanan dış manyetik alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanma eğrileri ve manyetik alınganlıktan (susceptibility) faydalanarak hesaplanabileceğini belirtmiştir [20, 21]. Süperiletken malzeme için kritik akım yoğunluğu deneysel olarak ise farklı manyetik alanlarda ölçülen  $M-H$  eğrilerinden elde edilebilir. Bir süperiletkenin kritik akım yoğunluğu değeri aşılsa malzeme normal hale geçer. Kritik akım yoğunluğu, malzeme geometrisine ve numunenin yapısal özelliklerine bağlıdır.

Süperiletken malzeme içerisinde bulunan süperiletken olmayan bölgeler süperiletken boyunca manyetik akı çizgilerinin hareketini engeller. Akı hareketi (Flux flow) sınırlanınca elektrik direnci de sınırlanmış olur ve böylece daha yüksek miktarda akı tuzaklanması sağlanmış olur. Daha önce de belirtildiği gibi süperiletken olmayan bu bölgele akı çivileme merkezleri gibi davranır. Süperiletkenlerde, histerezis manyetik akı çivilemesinden dolayı oluşur [22]. Böylece süperiletken bir malzemede çivileme merkezleri arttıkça malzemede tuzaklanan akının ve maksimum akım yoğunluğu artırılır. Akı çivileme ikinci tip süperiletkenlerde girdap durumunda (vortex state) meydana gelir.

Karma-durum durumunda akı çizgisine etkiyen iki temel kuvvet vardır. Bunlardan biri akı çivileme kuvveti ( $F_p$ ) ve diğeri ise akım yoğunluğu ile dış manyetik alandan kaynaklanan Lorentz kuvvetidir ( $F_L$ ). Akı çivileme kuvveti numunede tuzaklanan akıyı süperiletken içerisindeki normal bölgelerde tutarak, numunedeki toplam akı yoğunluğunu artırır. Akı çizgilerinin hareketsiz kalması için de çivileme kuvvetinin Lorentz kuvvetinden büyük olması gerekir. Manyetik kuvvetlerin ısıl (Thermal) dalgalanma sonucu akı çivileme merkezinin birinden kurtulup, diğeri bir çivileme merkezine bağlanması olayına ise akı sürüklenmesi (flux creep) denir. Bu durum enerji kayıplarına sebep olur ki bu durum süperiletkenlerde genellikle histerisiz ve Eddy (girdap) akımları olarak gözlenir.

### 1.5.1 Bean kritik durum modeli

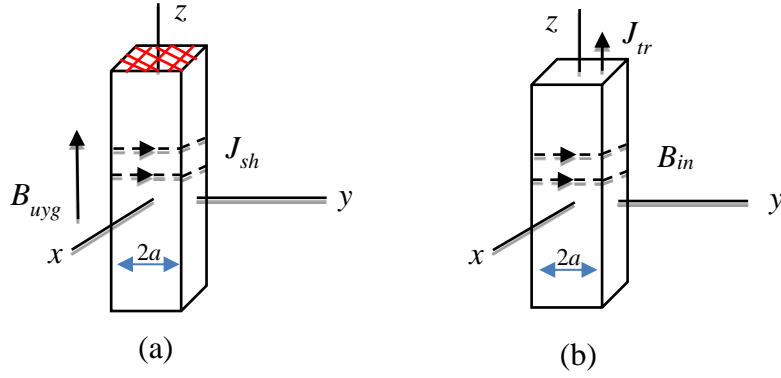
Uygulanan manyetik alan ve elektrik akımına süperiletkenin nasıl cevap verdiği genellikle kritik durum modelleri ile açıklanır. Bu modeller, uygulanan düşük alanlar/akımlar için oldukça kabul görür. Kritik durum modeli, bir süperiletkenin süperiletkenlik özelliği gösteren kısımlarının “kritik akım yoğunluğu” adı verilen bir akım yoğunluğuna ( $J_c$ ) sahip olduğu, diğer bölümlerin ise sıfır iletkenlik gösterdiği kabulüne dayalıdır. Bean modelinde [20, 21], süper akım yoğunluğunun kritik durumda her zaman  $J_c$  büyüklüğüne sahip olduğu varsayılır. Değişik kritik durum modelleri bulunmakta olup en basiti Bean modelidir. Literatürde diğer kritik durum modelleri değişik geometrilere göre uygulanmaktadır [4]. Uygulanan alanlar veya akımlar yükseldikçe süperiletkenin en iç kısımlarına doğru girer ve kritik durum tesis edilmiş olur. Bu modeller süperiletkenin Meissner veya karma-durumları arasındaki farkı gözetmez.

Dış bir akım veya gerilim kaynağının etkisiyle bir süperiletkenden geçen elektrik akımları *iletim akımları* (*transport current*) olarak bilinir. Dışardan uygulanan bir manyetik alanın varlığında ortaya çıkan ve süperiletken içindeki manyetik akıyı yok eden akımlar ise *perdeleme* ( $J_{sh}$ ) akımları (*screening current*) olarak adlandırılır. Öte yandan süperiletkende hem iletim akımı hem de manyetik alanın uygulandığı daha karmaşık durumlar da aynı anda bulunabilir. Kritik durum modeline göre Şekil 1.9’da verilen dikdörtgen prizma (levha) şeklindeki basit geometriler için akım ve manyetik alan arasındaki ilişki Maxwell denklemi ile verilir.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (1.12)$$

Şekil 1.9a’da görülebileceği gibi süperiletken levhaya dışarıdan uygulanan manyetik alanın  $z$ - yönünde ( $\mathbf{B}_{uyg} = B_z \mathbf{a}_z$ ) ve indüklenen akım yoğunluğunun da sadece  $y$ - yönünde bileşeni ( $\mathbf{J} = J_{sh} \mathbf{a}_y$ ) olduğu (levha kalınlığının  $x$ - yönünde daha küçük olması kabulü sebebiyle akım yoğunluğu bileşeni  $J_x$  ihmal edilebilir) kabul edilebilir. Böylece aşağıdaki basit diferansiyel denklem elde edilir.

$$\frac{dB_z(x)}{dx} = \mu_0 J_y(x) \quad (1.13)$$



**Şekil 1.9:** Kalınlığı  $2a$  olan bir tabakadan oluşan süperiletken malzemede akım ve manyetik alanların oluşumu: (a) Süperiletkenin eksenini boyunca dışarıdan uygulanan bir manyetik akı yoğunluğundan ( $B_{uyg}$ ) dolayı indüklenen perdeleme akımları ( $J_{sh}$ ) (b) Süperiletkenin eksenini boyunca elektrik akımı iletiminden dolayı ( $J_{tr}$ ) indüklenen manyetik akı yoğunluğu ( $B_{in}$ ) [4].

Denklem 1.13'nin çözümü manyetik alan ve akımların davranışını açıklamak için belirleyici denklemlerden biridir. Süperiletken geometrisine göre değişik durumlar literatürde incelenmiştir [4].

Bean modelinin en önemli uygulaması, manyetik histerezis döngülerinden kritik akım yoğunluğunun belirlenmesidir. Bean modeli, akım yoğunluğunun yalnızca  $\pm J_c$  veya 0 değerlerini alabileceğini varsayar. Şekil 1.9'da verilen süperiletkenin  $2a$  kalınlığında olduğu düşünülürse  $B^*$  ile temsil edilen karakteristik bir manyetik alan tanımlanabilir.

$$B^* = \mu_0 J_c a \quad (1.14)$$

Dışarıdan uygulanan manyetik alanı  $B_0$  ile gösterirsek bu alanın  $B^*$  ile temsil edilen bir değere ulaştığında, süperiletken malzeme içindeki alanlar ve akımlar süperiletken malzemenin merkezine ulaşacağı anlamına gelir.  $B^*$  alanından düşük ve yüksek değerler için tek boyutlu durumlar analiz edilerek Bean modelinin sağladığı sonuçlar basitçe elde edilebilir. Uygulanan düşük alanlarda, örneğin  $B_0 < B^*$  için, malzeme içindeki manyetik akı yoğunluğunu açıklayabilmek için aşağıda belirtilen Bean modeliyle tanımlı akım yoğunluklarına göre durumları inceleyelim.

$$\begin{aligned} J_y(x) &= J_c, & -a \leq x \leq -a' \\ J_y(x) &= 0, & -a' \leq x \leq a' \\ J_y(x) &= -J_c, & a' \leq x \leq a \end{aligned} \quad (1.15)$$

Yukarıda verilen Denklem 1.15'deki akım yoğunluğunun malzeme yüzeyinden içeriye doğru belli bir kalınlıkta tanımlandığı ( $\pm a$  ve  $\pm a'$  arasında) düşünülürse Denklem

1.13'den de anlaşılacağı gibi  $B_z(x)$ 'in  $J_y = \pm J_c$  olduğu bölgelerde  $x$ 'e doğrusal olarak bağlı olmasını gerektirir. Dolayısıyla içerdeki manyetik alanlar için  $B_0$  yüzeydeki manyetik alan olmak üzere aşağıdaki bağıntılar yazılır.

$$\begin{aligned} B_z(x) &= B_0 \left[ \frac{a'+x}{a'-a} \right], & -a \leq x \leq -a' \\ B_z(x) &= 0, & -a' \leq x \leq a' \\ B_z(x) &= B_0 \left[ \frac{x-a'}{a'-a} \right], & a' \leq x \leq a \end{aligned} \quad (1.16)$$

Bu formüller,  $x = \pm a$  yüzeylerindeki  $B_z(0) = B_0$  sınır koşulu ile elde edilen ifade ile ilişkili  $J_c$  ve  $B_0$  büyüklükleriyle eşleşerek aşağıda denklem haline gelir.

$$J_c = \frac{B_0}{\mu_0(a-a')} \quad (1.17)$$

Uygulanan alanın yüksek olduğu durumlar için, örneğin  $B_0 > B^*$ , akım yoğunluğu aşağıdaki ifadelerle tanımlanır.

$$\begin{aligned} J_y(x) &= J_c, & -a \leq x \leq 0 \\ J_y(x) &= -J_c, & 0 \leq x \leq a \end{aligned} \quad (1.18)$$

Süperiletken malzeme içinde oluşan alanlar ise aşağıdaki ifadelerle gösterilebilirler.

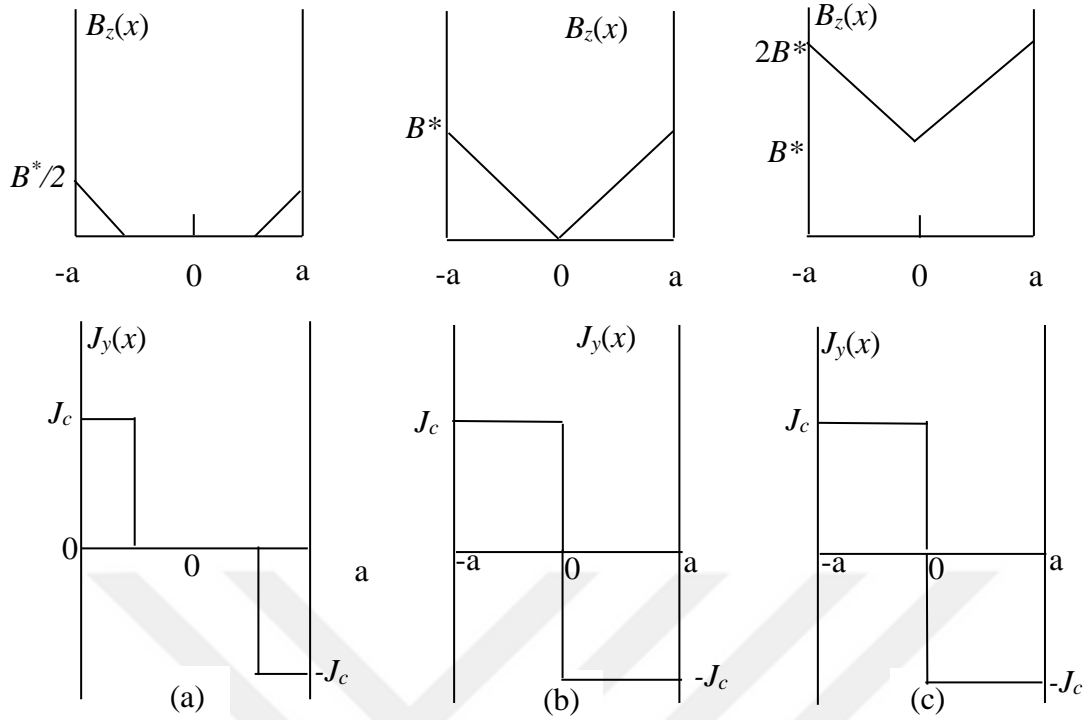
$$\begin{aligned} B_z(x) &= B_0 - B^* \left[ \frac{a+x}{a} \right], & -a \leq x \leq 0 \\ B_z(x) &= B_0 + B^* \left[ \frac{x-a}{a} \right], & 0 \leq x \leq a \end{aligned} \quad (1.19)$$

$B_z(x)$  ve  $J_y(x)$  için bu ifadeler,  $a$ 'nın sonlu bir değeri için Şekil 1.10(a)'da ve  $B_0 = B^*$  ve  $a' = 0$  olduğu durum için Şekil 1.10(b)'de çizilmiştir.

Uygulanan alanın yüksek olduğu durumlar için ise ( $B_0 > B^*$ ), Şekil 1.10(c)'de çizilmiştir.

Uygulanan alan sıfır olduğunda elektrik iletim akımı aşağıdaki denkleme bakılarak hesaplanabilir.

$$I = 2(a-a')LJ_c \quad (1.20)$$



**Şekil 1.10:** Kalınlığı  $2a$  olan bir tabakadan oluşan süperiletken malzemede Bean modeline göre dışarıdan uygulanan manyetik akı yoğunluğuna  $B_0(x)$  göre malzemenin içinde oluşan manyetik akı yoğunluğu  $B_z(x)$  ve akım yoğunluklarının  $J_y(x)$  değişimi: (a)  $B_0(x) = B^*/2$  (b)  $B_0(x) = B^*$  ve (c)  $B_0(x) = 2B^*$  [4].

### 1.5.2 Histerezis ve enerji kayıpları

Birinci tip süperiletkenlerin aksine ikinci tip süperiletkenlerde görülen histerezis, akı çivilenmesinden kaynaklanır. Yapısal kusurlardan oluşan çivileme merkezleri akı çizgilerinin süperiletken malzeme içerisinde serbest bir şekilde hareket etmesini önler. İkinci tip bir süperiletken malzemeye dışarıdan uygulanan manyetik alan, malzeme içine akı çizgileri şeklinde nüfuz eder ve bu durum enerji kaybına sebep olur. Manyetik alan değişimi ( $dB/dt$ ) nüfuz ettiği bölgede Faraday yasasına göre elektrik alan ( $E$ ) oluşturur. Elektrik alan ise malzemedeki perdeleme akımlarını tesis eder. Oluşan perdeleme akımları manyetik alanın malzeme içine nüfuz etmesini engellemiş olur. Bean kritik durum modeline göre süperiletken içindeki elektrik alan, kritik akım yoğunluğuna eşit olacak şekilde bir akım yoğunluğuna sebep olur.

Çivilenen akı çizgileri süperiletken durum için zararlı değildir. Süperiletkenlerde enerji kayıpları iki farklı şekilde meydana gelir. Bunlar elektriksel direncin ve manyetik akıların meydana getirdiği durumlardır. Manyetik akıların arttırılması histerezis kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Süperiletkenlerde elektriksel direnç olmamasına rağmen Faraday kanunları geçerlidir. II. Tip süperiletkenlerde

histerezis durumu enerji kaybına yol açmaktadır ve akımların devam edebilmesi için belirli voltaj uygulanması gerekmektedir. DC uygulamalar için olduğundan akı çivilenmesi meydana gelir ve sonuç olarak kayıplar oluşmaz. AC uygulamalarda ise süperiletkenlerde M-H grafiklerindeki histerezis çevrim, enerji kaybının ne kadar olduğunu gösterebilir.

## 1.6 Süperiletkenlerin Endüstriyel Uygulamaları

Keşfedildiği günden bu yana, süper iletkenin yaygın kullanımı bilim dünyasını ve mühendisleri etkilemiştir. 1960'lardan önce, pratik NbTi ve Nb<sub>3</sub>Sn süperiletken telleri, süperiletkenliğin keşfedilmesinden yaklaşık yarım yüzyıl sonrasına kadar üretilmiyordu. O zamandan buyana, süperiletken teknolojisi ve süperiletken miktatısların uygulaması laboratuvar ve pratik uygulamalar için kullanılmaktadır. Ancak, geleneksel süperiletken güç sistemlerinde, özellikle AC uygulamalarında 4.2 K'de çalışma ihtiyaçları nedeniyle yaygın olarak kullanılmamıştır.

NbTi tellerinin geliştirilmesiyle Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) sistemi, hastanelerde 1980'lerden beri klinik tanı için giderek daha fazla kullanılmaktadır. 1986'da süperiletkenlik alanında gerçek bir atılım A. Müller ve G. Bednorz tarafından yapıldı. Yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) olarak adlandırılan kırılğan bir bakır oksit seramik bileşiği ile 40 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda süperiletkenliği gözlemledirler. O zamandan itibaren, birçok çeşit YSS keşfedildi ve normalden süperiletken duruma geçiş sıcaklığı giderek artırıldı. Nitekim sonraları 77 K sıvı azot sıcaklığından daha yüksek 90 K'nin üzerinde süperiletkenlik özelliği gösteren malzemeler üretilmeye başladı.

77 K sıcaklığında çalışan süperiletken cihazlar, süperiletken teknolojisinin yaygın kullanımını mümkün kılmıştır. 1990'ların sonlarında YSS malzemelerinin geliştirilmesindeki büyük ilerleme ile pratik YSS bantları üretildi ve ticarileştirildi. Süperiletken güç elektroniği teknolojisi uygulaması, hükümetlerin ve çok uluslu şirketlerin desteğiyle büyük ölçekte geliştirildi. Kablo, transformatör, ASS, motor/jeneratör ve SMED gibi süperiletken güç aparatlarının birçok prototipi geliştirildi. Şimdilerde, ticari süperiletken cihazlar, özellikle YSS'ler şirketlerin artan yatırımları ile geliştirilmeye devam etmektedir. Süperiletken teknolojisindeki bu atılımların devam edeceği ön görülmektedir.

Süperiletkenlerin ve uygulamalarının günlük hayatımızı kolaylaştırmasının yanında süperiletkenlerin enerji üretiminde, dağıtımında ve depolanmasında çevreye zarar veren petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlarının kullanıldığı süreçlere entegre edilmesi doğaya verilen zararları en aza indireceği çok açıktır. Süperiletkenlerin çevre dostu olmasının en önemli sebepleri olarak enerji ve ısı kaybı gibi çevreye kötü etki yapacak sonuçlarının olmamasıdır.

Süperiletkenlerin kullanıldığı uygulamalar içinde akla ilk gelen manyetik rezonans görüntüleme (MRI) cihazında kullanılan süperiletken tellerdir. Nükleer manyetik rezonans (NMR) olgusu, süperiletken mıknatısların kullanılmasının ardından klinik uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. MRI tarafından sağlanan tıbbi görüntüleme tekniği, süperiletkenlik olmadan yeterli düzeyde olamazdı. MRI, 1980'lerde süperiletken tel üretim ve soğutma teknolojileri geliştirildikten sonra daha da popüler hale gelmiştir. MRI cihazlarında 1 Tesladan fazla manyetik alan kullanılmasını gerektirdiği için yalnızca süperiletken tel kullanımıyla bu değerlere çıkabileceği bilinmektedir.

Süperiletkenler elektrik akımını neredeyse hiç kayıp olmadan ilettiği için gelecekteki iletim şebekelerinde kullanılacak yeni kablo tasarım potansiyeline sahiptir. Süperiletken tellerin kullanılması, yüksek hızlı maglev trenleri için de önemli olanak sağlamaktadır. Örneğin, bu teller havaya kaldırmak için yüksek manyetik alanlar ve yüksek hızlı maglev trenlerini itmek için yüksek elektrik akımları üretebilirler. Süperiletken tellerin kullanımı süperiletken motor ve jeneratörlerde de benzer faydalar sağlar. Süperiletken telde DC direncinin olmaması, süperiletken motor-jeneratörünün verimliliğine katkıda bulunur. Süperiletken tel, geleneksel bir makinede neredeyse imkânsız olan daha yüksek manyetik alanlar üretebilir. Düşük direnç kayıpları ve yüksek manyetik alan, daha düşük motor hacmi ve uygulamada daha fazla güç yoğunluğu anlamına gelir. Öte yandan, şu anda süperiletken cihazların veya mekanizmaların maliyeti, özel kriyostat ve soğutma gerekliliği nedeniyle nispeten yüksektir. Ancak bu durum yüksek güç seviyeleri söz konusu olduğunda, süperiletkenler bu açıdan daha uygun maliyetli hale gelir.

Motor-jeneratör uygulamalarında olduğu gibi, süperiletken trafoların da çalışma prensibi geleneksel olanlar ile aynıdır. Primerde üretilen değişken manyetik alan (Amper kanununa göre) sekonderde (Faraday yasasına göre) voltaj değişimi yaratır. Süperiletken trafo, süperiletken teller, manyetik nüve, bir kriyostat ve bir soğutucudan

oluşan sargılara sahiptir. Süperiletkenlerin kullanımı daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyet, hafif, daha küçük boyut, yangın güvenliği ve çevre dostu trafolar sağlar. Arıza akımı sınırlama özelliğinin potansiyel kullanımının yanı sıra, süperiletken trafolarında, geleneksel olanlara kıyasla 100 kattan daha fazla akım taşıma kapasitesi elde edilebilir.

Yukarıda belirtilen süperiletkenlik uygulamaları doğrudan veya dolaylı olarak enerji depolaması ile de ilgilidir. Süperiletkenlerin akım taşıma kapasitesi, manyetik alan kaynakları için çok iyi bir aday haline getirirken, diyamanyetik özellikleri (Meissner etkisi) sürekli mıknatısların (SM) dengeli bir şekilde havaya kaldırılmasını da mümkün kılar. Cihaz uygulamaları için, akım taşıma kapasitesi manyetik alan formunda enerji depolamaya olanak sağlarken (SMED), diyamanyetik özelliği ise süperiletken volan enerji depolama (SVED) cihazlarının geliştirilmesini sağlar. Bir başka deyişle sıfır direnç, süperiletken manyetik enerji depolaması için daha fazla akım sağlarken, diyamanyetik olmaları sebebiyle süperiletkenlerin kaldırma özelliği manyetik yatak ve maglev treni uygulamaları için olanak sağlar.

Süperiletkenlerin manyetik görüntüleme cihazında kullanımı yanında, günümüzde süperiletkenliğin tek gerçekçi uygulaması süperiletken manyetik enerji depolamadır. Süperiletken manyetik enerji depolaması konusunda oldukça iyi bir literatür oluşmuştur [23-26]. SMED sistemleri, enerjiyi manyetik alan formunda depolar. Depolanan enerji, süperiletken bobinin endüktansının ( $L$ ) ve akımı ( $I$ ) karesi ile çarpımına eşittir. SMED, enerji iletiminde hızlı tepki gösterir. Bu özellik onların elektrik kesintisi sırasında yük dengelenmesinde kullanılabileceklerini gösterir [23]. Güç izleme sistemi, dağıtım şebekesi ile DC'den AC'ye dönüştürmeyi ve bobini verimli bir şekilde şarj/deşarj etmeyi amaçlayan SMED arasında bir güç elektroniği arabirimi sağlar.

Süperiletkenler volan sistemlerinde de potansiyel kullanıma sahiptirler. Volanlar enerji dönüşüm cihazlarıdır. Volan enerji depolama (VED) uzun süredir var olan bir enerji depolama yöntemidir. Volan enerji depolama sisteminde genellikle dönen bir rotor ve sabit duran bir stator bulunur. Mekanik formda depoladıkları enerjiyi sonradan geri verirler. İlk zamanlarda volanlar mekanik olarak kullanılmaktaydı. Güç elektroniğindeki ve kontrol yöntemlerindeki gelişmeler manyetik yataklı volanları ortaya çıkarmıştır. Manyetik yataklar, özel uygulamalara göre çeşitli ebat ve konfigürasyonlarda üretilir. Manyetik yatak sistemlerinin kararlılığı ve dönüşü

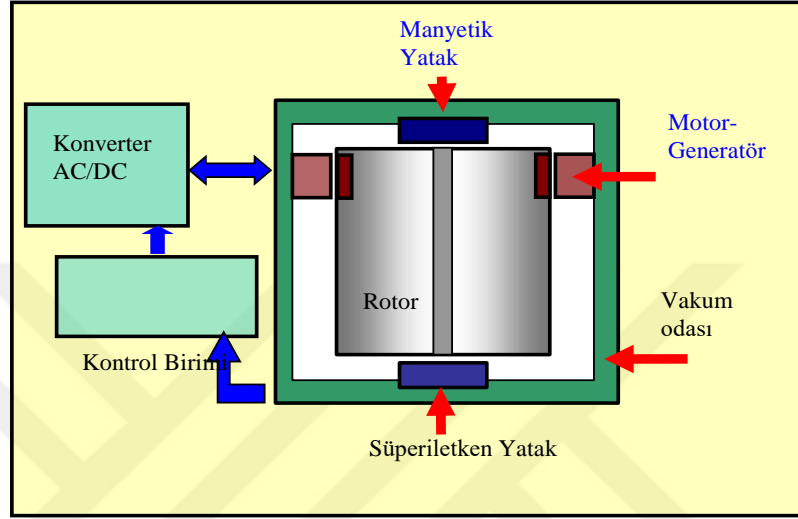
genellikle aktif kontrol ile sağlanır. Aktif kontrol sadece ilave enerji değil aynı zamanda sensörler ve ilgili karmaşık elektronik gerektirir. Bu ilave karmaşıklıklar özellikle cihaz uygulamaları için istenmez. Bu açıdan, yatakların çalışma koşulları, rotorun dengelenmesine ve bunu süren tahrik mekanizmasına odaklanmayı gerektirir. Manyetik yatakların tahrik mekanizmasındaki gelişmeler, klasik olanlara göre daha küçük ve daha hafif bir ağırlıkta yapılabilecek böylece daha etkili yatak sistemleri sağlayacaktır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin (YSS'lerin) keşfedilmesinden bu yana, havaya kaldırma (levitation) ile ilgili birçok mühendislik uygulaması ortaya çıkmıştır [27-31]. Bu uygulamalar genel olarak sürekli mıknatıslar (SM), süperiletkenler ve alüminyum, bakır ve pirinç gibi iletken malzemeler arasındaki etkileşimlere odaklanır. Süperiletken ve SM'lar arasındaki etkileşim oldukça karmaşık olup ileri analiz gerektirir. Donmuş görüntü modeli (DGM) gibi kavramsal yaklaşımlar bu konuda geliştirilen analizlerden biridir [32, 33]. En önemli uygulamalardan biri olarak süperiletken manyetik yatak (SMY) cihazları için etkili bir rotor tasarımı ve sürüş mekanizması geliştirilmesi akla gelir. Bu bakımdan, süperiletken manyetik yatak orta ve büyük ölçekli süperiletken volan enerji depolama (SVED) sistemleri için mekanizma sağlar.

Volanlar enerji dönüşüm sistemlerinin ana bileşenleridir. Volanların enerji depolama güç kalitesi yönetim sistemleri için uygundur [34]. Bu açıdan volan enerji depolama, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin en önemli uygulamalarından biridir. Birçok amaç için volan enerji depolama, depolanan enerji miktarı ve geri verilme hızı bakımından bataryalara göre avantaja sahiptir. YSS pasif yatakların bir volan sisteminde kullanılması, mekanik veya aktif yataklara göre avantajlıdır. Yatağa bağlı parazitik güç kaybı, soğutma gücünü hesaba katan mekanik yataklara göre daha azdır. Ayrıca güvenilirlerdir, bakım gerektirmezler ve çok yüksek hızlarda çalışabilirler.

Volan sisteminde, sürekli dönme hareketini sürdürmek için genellikle bir elektrik motoru kullanılır. Volanın dönmesi sırasında, dönme hızına ve atalet momentine bağlı olarak, sisteminde belirli bir miktarda enerjiye sahip olan mekanik bir batarya olarak düşünülebilir. Volanda depolanan enerji, volanın yavaşlatılması vasıtasıyla (bir jeneratör kullanılarak) elektrik enerjisine dönüştürülür. Bir volan depolama sisteminin ana bileşenleri rotor, manyetik yatak ve güç ara yüzünden oluşur. Süperiletken volan enerji depolama sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.11'de verilmiştir [35].

Süperiletken volan enerji depolama sistemi depolama ve güç dönüştürme elektroniği adı altında iki ana alt bileşenden oluşur. Süperiletken volan enerji depolama sistemlerindeki güç dönüştürme mekanizması, elektrik enerjisini AC'den DC'ye redresör vasıtasıyla dönüştürerek bataryaya veya volanı şarj etmek için invertör vasıtasıyla tersine çevirerek yüke (volana) aktarımı sağlayacak şekilde iki yönlü çalışma mekanizmasına sahiptir.



Şekil 1.11: Süperiletken volan enerji depolama sistemi (SVED) [35].

Teknolojik ilerlemeler birçok avantaj sağlasa da süperiletken volan enerji depolama sistemlerinde iyileştirilmesi gereken bazı dezavantajlar da bulunur. Örneğin bataryalara kıyasla daha yüksek bekleme kayıplarına (standby losses) sahiptirler. Volandaki enerji kayıplarının sebepleri süperiletken bileşenler üzerindeki histerezis, normal iletken kısımlarındaki girdap akımları ve diğer sürtünme gibi sebeplerden oluşur. Bunlara süperiletkenle etkileşimde olan dönen homojen alan dağılımına sahip olmayan mıknatıslar sebep olur. Sürekli mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler çok ileri seviyeye çıkmış olsa da malzemede mikroskobik seviyede olan kusurlar manyetik alan düzensizliği yaratmaktadır. Bu durum mekanik sistemin çalışma koreografisi ile manyetizmanın uyuşmasını engellemektedir. Histerezis kaybı, süperiletkendeki manyetik alan değişiminin büyüklüğüne bağlı olup volandaki titreşimlerin büyüklüğü de enerji kayıplarını artırır. Bu nedenle, volandaki titreşimin genliği frekansa bağlı olduğu kadarıyla histerezis kaybı da frekansa bağlı olacaktır.

Keşfedildiği günden bu yana, volan enerji depolamada kullanıldığı gibi süperiletken ve uygulamaları, sıfır direnç ve mükemmel diyamanyetizma gibi benzersiz fiziksel özellikleri nedeniyle modern bilim ve teknolojiye en aktif araştırma alanlarından biri

olmuştur. Süperiletken teknolojisi temel olarak elektrik mühendisliği ve elektronikte uygulanır. Bu uygulamalardan bazıları ve karakteristik özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.1:** Süperiletken teknolojisinin bazı uygulamaları ve karakteristik özellikleri.

Uygulama Alanları	Karakteristik Özellikleri
Güç iletimi	Düşük kayıplı ve büyük kapasiteli güç iletimi
SMED	Şebeke güç kalitesi ve kararlılığı
Trafo	Enerji tasarrufu ve küçük boyut
Motor	Yüksek verim ve küçük boyut
Jeneratör	Yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve şebeke kararlılığı
Kablo	Yüksek akım yoğunluğu ve düşük ısı kaybı
Mıknatıs	Nükleer manyetik rezonans (NMR)
Manyetik kaldırma	Maglev treni, maglev tahrik sistemi ve volan

Çizelge 1.1’de süperiletken teknolojisinin enerji, ulaşım, tıbbi bakım, savunma ve ileri bilimsel araştırma alanlarında büyük bir değer taşıdığını göstermektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde süperiletkenler veya süperiletkenliğin ilgili olduğu teknoloji ve cihaz uygulamaları güç iletimi, arıza akımı sınırlama, süperiletken manyetik enerji depolama, trafo, motor-jeneratör, kablo, mıknatıs ve manyetik kaldırma gibi birçok alanda mevcut uygulamalar potansiyel alternatif teşkil etmektedir.

Geleneksel bir mıknatısla karşılaştırıldığında, süperiletken bir mıknatısın küçük hacme, daha yüksek verimliliğe, daha yüksek termal kararlılığa ve daha uzun manyetik alan ömrüne sahip olmak gibi birçok benzersiz avantajı vardır.

SMED teknolojisinde süperiletkenlerin kullanımı diğer manyetik enerji depolamalara göre oldukça avantajlıdır şebekenin güç kalitesi ve kararlılığının yanında yüksek ısı kayıpları ve çevreye olan zararları oldukça azdır.

Manyetik kaldırma sisteminde süperiletkenlerin kullanımının önemi diğer elemanlar kullanıldığında sistemde aktif bir enerji akışı olması gerekmektedir ancak süperiletkenlerde pasif enerji meydana geldiği için aktif enerjiden oldukça kar elde edilmektedir.

Süperiletken mıknatıs teknolojisi ayrıca, manyetik kaldırma uygulamaları olan tren teknolojilerinde geleceğin teknolojisi olma yolunda çok büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tezde manyetik kaldırma sistemlerinde süperiletken kullanımı deneysel olarak araştırılmış ve teorik analiz ile desteklenmiştir.

## 2. SÜPERİLETKEN MANYETİK KALDIRMA

Nesneleri yerçekiminin etkilerinden etkilenmeyecek duruma getirmek, bilimin ve araştırmacıların ortak hayali olmuştur. Manyetik kuvvet kullanarak havaya kaldırma ile ilgili araştırmalar saatte 500 km üzerinde hızlarla tren uygulamalarının önünü açmış ve süperiletken malzemelerin de ortaya çıkmasıyla teknolojik gelişmeler daha da hız kazanmıştır. Manyetik kaldırma (Magnetic levitation: Mag-Lev) olarak bilinen manyetik taşıma sistemlerinin modern gelişimi süperiletken, transistör ve yonga tabanlı elektronik kontrol teknolojisinin geliştirilmesinin doğal bir sonucu olarak 1960'ların sonlarında başlamıştır. Özellikle 1980'lerden sonra Japon ve Alman teknolojisi Mag-Lev sistemlerini süperiletken teknolojiyle birleştirerek tren uygulamalarını pazarlamaya hazır noktasına kadar ulaşmıştır. Şekil 2.1'de görülen Japonya'nın geliştirdiği süperiletken Mag-Lev sistemini 500 km/saat üzerinde hıza ulaşabilmektedir.



**Şekil 2.1:** Japonya'nın geliştirdiği 500 km/saat üzerinde hıza ulaşan süperiletken Mag-Lev sistemi [36].

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin keşfedilmesiyle birlikte 1987'den sonra mag-lev sistemlerinde YBCO kullanılmaya başlanmıştır. İlk zamanlarda bu süperiletkenlerin

akım yoğunlukları düşük olduğu ve aynı zamanda seramik oldukları için kırılğan olmaları sebepleriyle tel şeklinde üretilmelerinde güçlükler yaşanmıştır. Ancak daha sonrasında teknikler geliştirilerek tel uygulamalarında büyük çaplı gelişmeler kaydedilmiştir. Külçe şeklinde üretilen süperiletkelerde ise böyle dezavantajların olmadığı ve mıknatısları kolayca havaya kaldırdıkları tespit edilmiş ve bu sayede kaldırma yetenekleri üzerine daha çok yoğunlaşmıştır.

Geçtiğimiz yıllarda, YBCO'nun teknik engelleri aşamalı olarak aşıldı ve bizmut-stronsiyum-kalsiyum-bakır oksit (BSCCO) gibi yeni süper iletken malzemeler keşfedildi. Pratik uygulamalar için daha yüksek akım yoğunlukları elde edildi ve iyi süperiletkenlik özelliğine sahip olan daha kullanışlı ve uzun teller üretilmeye başlanmıştır. Süperiletken teknolojisi bu noktada, önümüzdeki yıllarda mevcut Mag-Mag-Lev taşıma sistemlerinin yeni yüksek sıcaklıklı süperiletken mıknatıslarla geliştirileceğini açıkça göstermektedir. Pasif, basit ve gelecek vaat eden özellikleriyle süperiletkenler teknoloji için üstün niteliklere sahiptir. Temassız, aşınmasız, sıvı veya gaz müdahalesine gerek duymadan ve aktif kontrollere ihtiyaç kalmadan hareket edebilen sistemlerin geliştirilmesi ilerleyen zamanlarda taşıma ve diğer birçok uygulamada kullanılacağına göstergesidir.

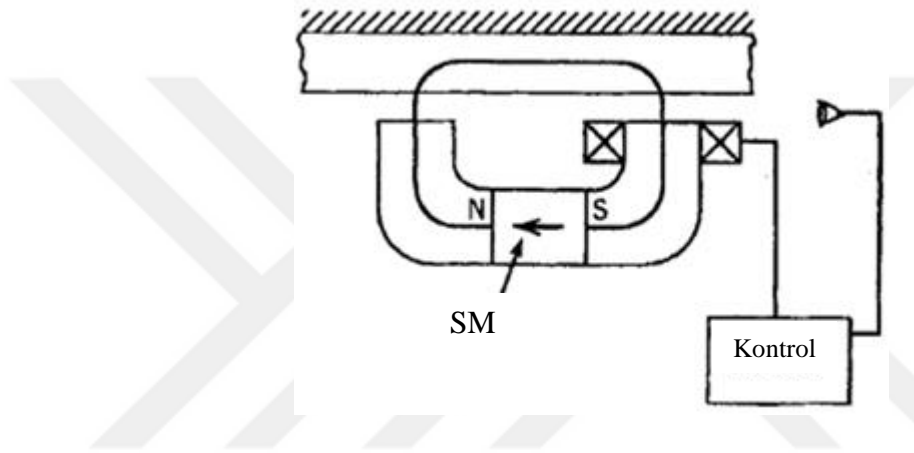
## **2.1 Manyetik Kaldırma Sistemleri**

Havaya kaldırma olayı, zemine teması olmayan bir cismin havada kararlı bir şekilde durması olarak tanımlanır. Dinamik kuvvetlerin etkili olduğu yörünge hareketi, uçma ve havada süzülme hariç, havaya kaldırma kuvvetleri hem elektrik hem de manyetik alanlar tarafından oluşturulabilmektedir. Bu kapsamda bazı manyetik kaldırma sistemlerine aşağıdaki örnekler verilebilir.

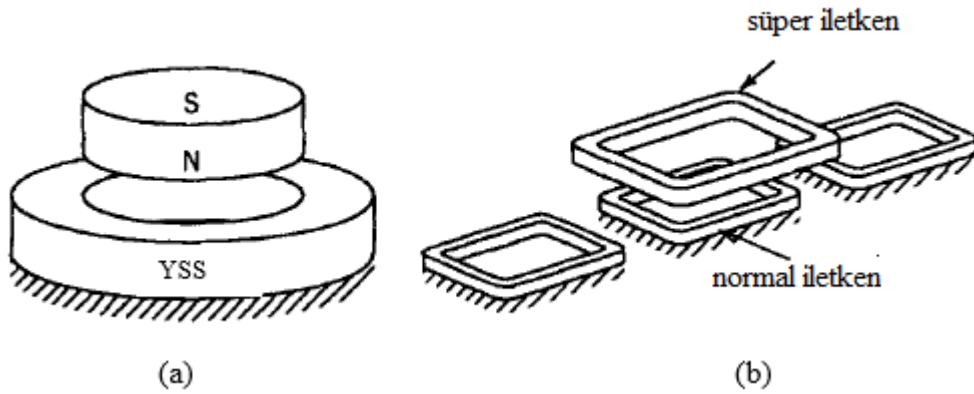
- Sürekli mıknatıslar ile havaya kaldırma
- Manyetik alandaki diyamanyetik malzemeler yardımı ile havaya kaldırma
- Geri besleme kontrollü elektromıknatıslar ile havaya kaldırma
- Girdap (Eddy) akımları ile havaya kaldırma
- Süperiletkenler ve sürekli mıknatıslar ile havaya kaldırma
- Süperiletkenler ve süperiletken mıknatıslar ile havaya kaldırma

Yukarıda örnekleri verilen farklı manyetik kaldırma sistemleri birleştirilerek hibrit denilen kaldırma sistemleri de elde edilebilir. Örneğin Şekil 2.2'de görüldüğü gibi

mıknatıs, elektro mıknatıs ve kaldırmayı kontrol eden üniteden oluşmuş hibrit bir kaldırma sistemi görülmektedir. Külçe şeklinde üretilmiş süperiletken ile mıknatısın kaldırılması pasif kaldırma sistemi için iyi bir örnek teşkil etmektedir. Daha önceleri geleneksel iletken tel ile gerçekleştirilen Eddy akımı yöntemi kaldırma sistemleri yüksek miktarda elektrik akımı taşıma kapasitesine sahip yüksek sıcaklık süperiletken tel kullanılarak uyarlanabilir. Örneğin Şekil 2.3a’da külçe şeklindeki yüksek sıcaklık süperiletkeni üzerinde kaldırılmış mıknatıs uygulaması ve Şekil 2.4b’de süperiletken tel kullanılmış Eddy akımı kaldırma sistemi görülmektedir.



Şekil 2.2: Hibrit sürekli mıknatıs-elektromıknatıs yatak sistemi [36].



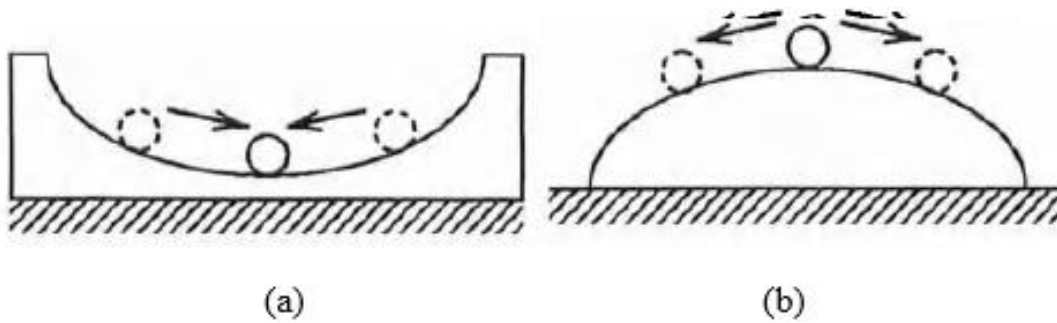
Şekil 2.3: (a) Süperiletken-sürekli mıknatıs kaldırma ve (b) süperiletken-girdap akımları kaldırma [36].

Havaya kaldırma elektrik, manyetik kuvvetler veya hava basıncı kullanılarak elde edilebilir, ancak uçuş ile havada asılı kalmanın arasındaki farkı anlamaya açısından bu iki durum arasındaki farkı ortaya koymak gerekir. Kaldırma işlemi hava basıncı

vasıtasıyla dinamik kuvvetlerin yardımıyla gerçekleştirilmesi halinde kaldırma işlemi uçuş olarak nitelendirilir. Bir taşıtın havaya kaldırılması arasında benzerlik içerse de uçuş ile havaya kaldırma sistemlerini manyetik kaldırmadan ayırmak gerekir. Hava basıncı yardımı olmadığı için manyetik kaldırmada gerekli olan statik veya dinamik kuvvetler manyetik menşeli olduğu için uçuş olayından farklıdır. Örneğin Wright kardeşlerin başlatmış olduğu hava basıncı vasıtasıyla gerçekleştirilen uçuş olayı ile Şekil 2.2 ve 2.3'deki sistem karşılaştırılırsa aradaki fark daha iyi anlaşılabilir olur. Manyetik sistemler vasıtasıyla gerçekleştirilen kaldırma olayında kaldırılan cisim genellikle potansiyel bir çukurda veya potansiyel bir tepenin üzerinde duran top fikrini kullanır. Kararlı ve kararsız denge noktasına sahip bu durumlar potansiyel fikri yaklaşımıyla Şekil 2.4a ve 2.4b'de sırasıyla gösterilmiştir. Potansiyel çukurunda bulunan cisim bulunduğu noktadan yer değiştirildiğinde önceki noktasına geri gelme eğiliminde olup bu nokta kararlı denge noktası ile tanımlanır. Oysa yine kaldırma işleminin gerçekleştiği potansiyel tepesinde ise cismin herhangi bir yer değiştirme yapması halinde önceki noktaya gelmesi imkansız olup bu tür kaldırma olayı dengeden mahrum olup kararsız kaldırma olarak nitelendirilir.

Kararlı denge noktasına sahip kaldırma sistemleri pasif kaldırma sistemleri olarak tanımlanırken kararlı dengeye sahip olmayan kaldırma sistemleri aktif kontrolü gerektirir.

Örneğin Şekil 2.4a'da süperiletken üzerinde kaldırılmış sürekli mıknatıs pasif kaldırmaya örnek teşkil ederken Şekil 2.4b'deki sistem aktif kontrolü gerektirir. Manyetik kaldırma işlemini nitel olarak açıklamaya çalışan potansiyel kavramının matematiksel olarak sonraki kısımda daha detaylı olarak verilecektir.



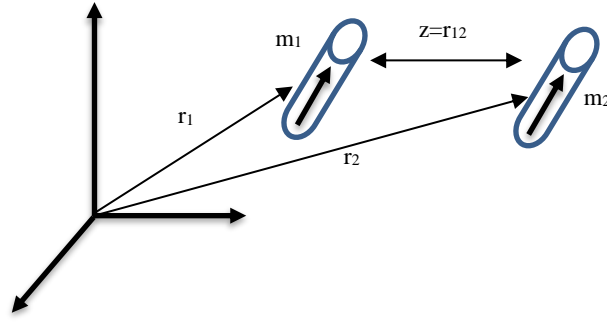
**Şekil 2.4:** (a) Kararlı potansiyel çukuru ve (b) kararsız potansiyel tepesi [36].

## 2.2 Manyetik Alan ve Manyetik Kuvvet

Havaya kaldırma veya bu tezin konusu olan manyetik kaldırma olayını daha iyi anlayabilmek için cisimler üzerindeki manyetik alanlar ve manyetik kuvvetler için matematiksel formülasyonu ortaya koyup fiziksel bir sisteme nasıl uygulanacağını göstermek gerekir. Manyetik alanın içerdiği problemler akışkanlar mekaniği (manyetostatik) ve ısı transferi (manyetik alan difüzyonu) gibi disiplinlerin de içerdiği matematik formülasyon ile benzerliğe sahiptir. Ayrıca, havaya kaldırılmış cisimlerin dinamiği ve kontrolünü açıklayan mekanizmalar mekanik sistemlerdeki titreşimler ile aynı karaktere sahiptir.

Manyetik sistemlerde kuvvetlerin belirlenmesi manyetik alanların davranışına bağlıdır. Elektromanyetik kuvvetler gerçekte maddenin içinde yer alan elektrik yükü ve bu yüklerin hareketinden doğan akımın etkisiyle ortaya çıktığı için iki farklı cisim arasında oluşan manyetik kuvvet kullanılan malzemelerin elektrik ve manyetik özelliklerine bağlıdır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, malzemeler arasında ortaya çıkan manyetik kuvvetler daha önce ifade edildiği gibi değişik formlarda ortaya çıkmaktadır. Bunlar elektrik akımı taşıyan cisimlerle arasında olduğu gibi elektrik akımı taşıyan cisimlerle mıknatıslanma özelliğine sahip ferromanyetik malzemeler veya sürekli mıknatıslığa sahip malzemeler arasında olabilmektedir. Bu özelliklerden yola çıkarak süperiletkenlerle mıknatıslar arasındaki kuvvet etkileşmesi analiz edilmeye çalışılacaktır. Ancak bunu yapmadan önce cisimler arasında ortaya çıkan elektriksel ve manyetik kuvvetlerin matematiksel olarak formülasyonunu ortaya koymamız yerinde olacaktır. Yukarıda verilen bazı örneklerden de anlaşılacağı üzere manyetik sistemleri ortaya çıkaran mekanizmalar malzemelerin elektrik ve manyetik özelliklerine göre çok çeşitlilik içermektedir. Tezin inceleme konusuna sadık kalınma adına biz burada sadece elektrik akımı taşıyan cisimler ile mıknatıslanmış malzeme arasındaki kuvvetleri inceleyeceğiz. Örneğin manyetik dipoller ele alındığında gerçekte bu dipollerin mikroskobik seviyede elektronların spin hareketlerinden dolayı ortaya çıkan akımlar vasıtasıyla oluştuğunu biliriz.

Örneğin Şekil 2.5'te, keyfi şekilde konumlandırılmış  $m_1$  ve  $m_2$  momentlerine sahip manyetik dipoller birbiriyle hizalanmış ve aralarında bir  $z$  mesafesi olan iki noktada bulunması halinde bu dipoller arasındaki kuvvet aşağıdaki formülle ifade edilir.



Şekil 2.5: Keyfi olarak konumlanmış iki manyetik dipol [36].

$$F = -\frac{\mu_0 6m_1 m_2}{4\pi z^4} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki formülde  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Denklem 2.1'deki kuvvet formülüne göre dipoller aynı yönde ise çekici zıt yönde ise itici şekilde etkileşirler. Dipoller arasındaki bu kuvvet gerçekte manyetik potansiyele göre elde edilmektedir. Burada dipollerden biri manyetik potansiyeli temsil ederken diğeri ise bu potansiyel etkisinde bulunan dipolü temsil etmektedir. Bu durumda kuvvet formülü genelleştirilmiş olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$F = m_2 \nabla B_1 \quad (2.2)$$

Burada  $\nabla$  vektör gradyan işlemidir. Manyetik dipoller arasındaki kuvvet daha detaylı olarak bu bölümün sonunda donmuş görüntü modeli işlenirken verilecektir. Manyetik kuvvet incelemesine geçmeden önce her türlü elektrik akımından dolayı ortaya çıkan manyetik kuvvetlerin etki ettiği manyetik malzemeler hakkında bazı bilgileri vermek yerinde olacaktır.

### 2.3 Sürekli Mıknatıslar ve Özellikleri

Sürekli (kalıcı) mıknatıslar\* sensör, motor, alternatör, sabit sürücüler ve hoparlör gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılır. Son otuz yıldır seramik mıknatıslar (sert ferrit) tercih edilen malzeme iken, neodimyum demir bor mıknatıslar, yeni tasarımlar için referans malzeme olarak seramik mıknatısları geride bırakmıştır. Sürekli mıknatıslar (SM), amper yasasına göre elektrik akımına gereksinim olmadan kendi manyetik alanlarını oluşturabilen cisimlerdir. Bu malzemeler genelde demir, nikel ve kobalt

\* Tezde sürekli mıknatis yerine sadece mıknatis ifadesi veya SM kısaltması kullanılmıştır.

alaşımından oluşur. Sürekli mıknatıslar manyetik açıdan sert malzemeler olarak adlandırılırlar. Bu doğal mıknatıslar, bugünün standartlarına göre zayıf olsa bile ilk denizcilere pusula olarak yararlı işlevler sağlamıştır.

Yirminci yüzyılda malzemeler daha hızlı gelişti. Yüzyılın başlarında yüksek karbonlu çelikler tungsten çeliği, kobalt çeliği ve krom kobalt çeliği yoluyla gelişti. Alüminyum nikel kobalt demirleri veya Alnico alaşımlarını üretmek için daha sonra kobalt eklenmiştir. Ferritler 1950'lerde yeniden keşfedildi ve mükemmelleştirildi. 1960'ların sonlarında Sm, Co ve daha sonra alaşımlarının keşfi yapılmıştır. Son zamanlarda Neodimyum Demir Bor malzemelerinin keşfi bize en güçlü mıknatıslarımızı getirdi. Genel olarak manyetik malzemeler sert, kırılğan, seramik benzeri potansiyel enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Neodimyum demir bor malzemeleri 1980'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde General Motors ve Japonya'da Sumitomo Special Metals tarafından keşfedildi. Aynı malzemeyi üretmek için farklı işlemler kullandılar.

Neodimyum demir bor içerikli mıknatıslar yüksek enerjili malzemeler olup neredeyse endüstrinin tüm sektörlerinde kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları otomotiv, havacılık, rüzgar türbini, askeri, beyaz eşya, aydınlatma, gıda hazırlama, ayırma, motor ve jeneratör endüstrileridir. NdFeB mıknatıslar, bloklar, diskler, halkalar, yaylar, küreler, üçgenler, yamuklar ve diğer birçok şekilde stok ve özel ürünler olarak yapılabilir. Bu mıknatıslar düşük Curie sıcaklığı nedeniyle düşük maksimum kullanım sıcaklığına sahiptir. Korozyona karşı özel kaplamalar gerektirebilir.

## **2.4 Süperiletkenlerde Manyetik Kuvvet**

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS), (kendilerine yaklaştırılan manyetik alanları dışlama özelliğinden dolayı) sürekli mıknatısları bir fiziksel kontakta ihtiyaç duymaksızın kararlı bir şekilde yer çekimi kuvvetine karşı havada tutabildikleri gibi, manyetik akıyı içlerinde tuzaklama özelliğinden dolayı da yerçekimine karşı havaya kaldırılmış bir şekilde tutabilirler. Süperiletkenlerin bu özelliği, mıknatıslar veya elektromıknatıslar arasındaki geleneksel manyetik kuvvetlerden farklı bir olaydır. On dokuzuncu yüzyılda Earnshaw'ın manyetik sistemlerin en az bir yönde kararlı dengeden yoksun olduğunu ifade ettiği teoreminde de belirtildiği gibi geleneksel manyetik sistemleri dengede tutmak ancak aktif kontrol ile gerçekleştirilebilir [36].

Ancak süperiletkenlerle mıknatısların manyetik etkileşmesi bu teoremden muaftır. Bu sebeple, süperiletken malzemenin geleneksel manyetik düzeneklere uyarlanması bu sistemlerin pasif olarak dengelenmesin ön ayak oluşturur. Örneğin YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) benzeri süperiletken malzemelerinin manyetik özellikleri manyetik yataklarda pasif kontrole olanak sağlar.

Süperiletken malzemenin herhangi bir dış manyetik alanın olmadığı bir ortamda soğutulmasıyla süperiletkenlik özelliği kazanması işlemi literatürde sıfır alan soğutma (SAS) ya da alanız soğutma (zero field cooling) olarak bilinir [7]. Böyle bir işleme tabi tutulan süperiletkene dışarıdan bir SM vasıtasıyla manyetik alan uygulanması durumunda manyetik akı süperiletken tarafından dışlanır. Buna mukabil, süperiletken malzeme soğutulmaya tabi tutulmadan önce bir dış manyetik alanın var olduğu bir ortamda iken dış manyetik alanın tamamı süperiletken malzemenin içine nüfuz eder. Soğutma işlemi gerçekleştirilmeden önce doğal olarak süperiletken malzeme süperiletken değildir. Ortamda manyetik alan varken soğutma işlemi başlatılarak süperiletken malzemeye süperiletkenlik özelliği kazandırılması olayı da literatürde alanlı soğutma (AS) (field cooling) olarak bilinir. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra ise süperiletken içindeki manyetik alan bulunduğu yerde tuzaklanır. Süperiletken içerisinde tuzaklanan manyetik akılar süperiletken olmayan merkezlerde sabitlenirler. Bu olay daha önce de açıklandığı gibi literatürde akı tuzaklanması veya çivilenmesi (flux pinning) olarak bilinir [19]. Akının çivilendiği bölgeler süperiletken olmayan bölgelerden oluşur. Bu bölgelere çivilenme merkezleri (pinning centers) adı verilir [37]. Akı çivilenmesi, kararlı süperiletken kaldırma (Levitation) için gereklidir [7, 38].

Süperiletkenler ile mıknatıslar arasındaki kuvvet etkileşimi çeşitli yöntemlerle modellenmiştir. Bunlardan bazılarına örnek olarak mıknatıslanma modeli, Maxwell stres tensör modeli ve kritik durum modeli verilebilir [39-42]. Kuvvet tahminlerinin geçerliliğini kabul görmesi için, yöntemin aynı zamanda süperiletkendeki histerezis etkisini de hesaba katması gerekir. Belirli bir yöntemin kullanılması, varsayımlara ve kısıtlamalara bağlı olarak doğru sonuçlar vermeyebilir. Histerisisin hesaba katılmadığı durumlarda, Amper akımları yaklaşımı veya dipol moment yaklaşımı donmuş görüntü modeli (Frozen Image Model) ile birlikte YSS ve SM bileşenleri arasındaki kuvvetleri belirlemek için kullanılan yöntemlerden biridir [32]. Donmuş görüntü modeli (DGM) çeşitli süperiletken kaldırma uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır [32,

43, 44]. Süperiletken ve mıknatıstan oluşan fiziksel sistemin karmaşıklaşması halinde, Amper akımları yaklaşımını hesaba katarak bu metodun kuvvetleri hesaplamak zahmetli hale gelir ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi de oldukça zorlaşır. Bu sebeple her türlü fiziksel özelliğe sahip cihaz uygulamalarında süperiletkenlerle mıknatıslar arasındaki kuvvetleri belirlemede donmuş görüntü modeli dipol yaklaşımıyla birlikte daha basit fakat nicel hesaplamalardan kısmen uzak bir kuvvet analizi sağlamaktadır.

## 2.5 Donmuş Görüntü Modeli (DGM)

Sürekli mıknatıslar ve yüksek sıcaklık süperiletkenler (YSS) arasındaki kuvvetlerin ilişkisi süperiletkenlerin akı çivilenmesi ve diyamanyetik özelliği ile ilgilidir. Akı çivilenmesi, havaya kaldırılmış olan süperiletken ya da mıknatısın aynı yerde sabit durması için sabitlenmesini (çivileme) ve kılavuz (yatay) kuvvetlerinin dengesini sağlar.

Süperiletken ve mıknatıs arasındaki kuvvet etkileşimi dipol-dipol etkileşimi yaklaşımına göre modellenenir, çünkü süperiletkendeki akımlar mıknatısların manyetik alanı tarafından oluşturduğu manyetik dipoller gibi davranır. Dipol yaklaşımına göre gerçekleşen etkileşim dipoller ve ayna görüntüleri arasındaki kuvvetlerle temsil edilebilir.

Yeterince uzak mesafeler için kaynağı tarafından oluşturulan manyetik alan, bir çubuk mıknatıstan mı yoksa bir akım taşıyan bobinden (elektromıknatıs) mi oluşturulduğu birbirinden ayırt edilemez.

Bir çubuk mıknatıs, manyetik dipol momentinin iyi bir görsel betimlemesini sağlar. Bir manyetik akı yoğunluğunun uzayda belli bir konumda bulunan manyetik moment ( $\mathbf{m}_1$ ) tarafından yaratıldığı varsayılmış olsun. Bu durumda, eğer  $\mathbf{m}_1$ 'den belli bir etkileşim mesafesine bir başka dipol moment ( $\mathbf{m}_2$ ) getirilirse, bu dipol sisteminin manyetik potansiyeli şu şekilde yazılabilir [45].

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{m_1 \cdot m_2}{r^3} - \frac{3(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)}{r^5} \right] \quad (2.3)$$

Yukarıdaki formülde vektör büyüklüğü olarak ifade etmek için dipol momentleri kalın harflerle yazılmıştır. Yine, konum vektörünün büyüklüğü olarak  $r$  kullanılmıştır. Kuvvet, manyetik potansiyelin negatif gradyanı olduğundan,

Denklem 2.3'deki potansiyel ifadesine donmuş görüntü modeli uygulanarak manyetik dipoller arasındaki analitik kuvvet ifadeleri elde edilebilir. Bu modele göre, dipollerden biri mıknatısı temsil ederken, diğer dipol YSS içindeki görüntü dipolünü temsil eder. Bu görüntü, elektromanyetikteki geleneksel ayna görüntüsünden farklıdır. Bu fark, bir süperiletken üzerine uygulanan ve sırasıyla alanlı soğutma (AS) ve sıfır alan soğutma (SAS) gibi farklı soğutma işlemlerinden kaynaklanmaktadır.

SAS işleminde, YSS malzeme hiçbir alan uygulanmadan kritik sıcaklığının altında soğutulur. Bununla birlikte, AS işleminde, süperiletken, kritik sıcaklığının altında soğutulurken, YSS malzemenin çevresinde önemli miktarda manyetik alan vardır. SAS işleminde YSS ile SM arasındaki kuvvet, SM-SM etkileşiminin birbirini itmesi durumundaki konfigürasyonla tamamen aynıdır.

Diğer yandan, AS işleminde, süperiletken ile SM arasındaki toplam kuvvet, kütleyle takılan bir mekanik yaya benzer olan AS yüksekliğinde ( $h$ ) sıfırdır. Mıknatısın YSS malzemesine göre denge noktasından herhangi bir hareketine, geri getirici kuvvet (restoring force) karşı çıkar. Bu geri getirici kuvvet nedeniyle havaya kaldırma işlemi her yönde dengeli bir şekilde gerçekleşir. Yani, Earnshaw teoreminden de bilindiği üzere sadece mıknatıslar kullanılarak fiziksel müdahale etmeden bir cisim havada tutulamaz. Tutulsa bile bu dengede sabit ve sürdürülebilir nitelikte olamaz.

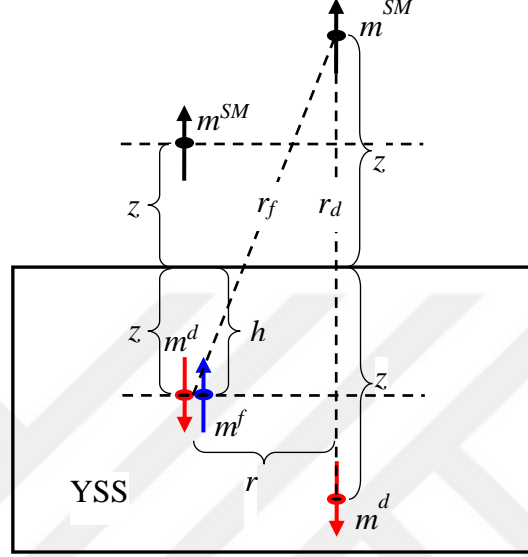
Sıfır alan soğutma işleminde, mıknatısların meydana getirdiği dipol momenti, süperiletken bölgesinde diyamanyetik ayna görüntüsü üretir. Alan soğutma işleminde ise, süperiletkende iki görüntü meydana gelir: Birincisi, SAS işlemindeki ile tamamen aynı olan diyamanyetik ayna görüntüsü, ikincisi ise, süperiletken içinde çivilenmiş olan donmuş görüntüdür.

Mıknatıs hareket ettiğinde diyamanyetik ayna görüntüsü de hareket eder. Süperiletkenin soğutulması tamamlandıktan sonra, süperiletkende meydana gelen donmuş görüntü hareket etmez. Diyamanyetik ve donmuş görüntünün manyetik momentinin büyüklüğü mıknatısın dipol momentine tam olarak eşit olup yönleri birbirinin akı yönüne göre tersidir.

Böylece AS konumundayken süperiletken ile mıknatıs arasında oluşan net kuvvet sıfırdır. Donmuş görüntü yönteminin mıknatıs ile YSS arasındaki etkileşmeyi daha iyi tasvir edebilmek için bir mıknatıs bileşenin YSS yakınında konumlandırıldığını varsayalım. Mıknatıs YSS'nin yakınındayken soğutma işlemi gerçekleştirilmiş olsun.

Bu durumda YSS alan soğutma işlemine tabi tutulmuş demektir. Şekil 2.6'da bu durumu ifade eden fiziksel konfigürasyon verilmiştir [46].

Şekilde siyah renkli kalın ok işaretleri mıknatıs ve moment yönünü göstermektedir. Benzer şekilde kırmızı renkli oklar diyamanyetik görüntü ve mavi renkli oklar ise donmuş görüntüyü göstermektedir.



**Şekil 2.6:** Donmuş görüntü konfigürasyonu: AS yüksekliği  $h$  (sabit), ölçüm yüksekliği  $z$  (değişken), SM manyetik momenti  $m^{SM}$ , diyamanyetik görüntü moment  $m^d$ , donmuş görüntü moment  $m^f$ . SM bileşenin yeni konumu ile donmuş görüntüsü arasındaki mesafe  $r_f$ , diyamanyetik görüntüsü ile arasındaki mesafe  $r_d$ 'dir.

Donmuş görüntü modelinin mıknatıs-YSS konfigürasyonunda nasıl uygulandığını açıklamak için, önce dipollerin düşey yönde hizalandığı Şekil 2.6'da verilen en basit geometriyi ele alalım.

Bu şekilde,  $z$  ölçüm yüksekliği,  $\mathbf{m}^{SM}$  mıknatıs bileşenin manyetik moment vektörü,  $\mathbf{m}^d$  diyamanyetik görüntü moment vektörü ve  $\mathbf{m}^f$  donmuş görüntü moment vektörüdür.  $r^f$  donmuş görüntünün konumu ile mıknatıs bileşenin yeni konumu arasındaki mesafedir. Öte yandan  $r^d$  mıknatıs bileşenin yeni konumu ile diyamanyetik görüntüsü arasındaki mesafedir.

Mıknatıs bileşenin manyetik momenti  $\mathbf{m}^{SM} = m\mathbf{a}_z$  ( $m$  kuvvetinde  $z$  doğrultusunda), donmuş görüntüsünün moment  $\mathbf{m}^f = m\mathbf{a}_z$  ve diyamanyetik görüntüsünün moment  $\mathbf{m}^d = -m\mathbf{a}_z$  (ters yönde  $m$  kuvvetinde ve  $z$  doğrultusunda) ile verilir.

Donmuş ve diyamanyetik durumlar için konum vektörleri sırasıyla  $\mathbf{r}_f = r\mathbf{a}_r + (z+h)\mathbf{a}_z$  ve  $\mathbf{r}_d = 2z\mathbf{a}_z$  dir. Denklem 2.4 kullanılarak, mıknatıs bileşenin temsil ettiği manyetik

moment ile görüntülerinin oluşturduğu manyetik moment sisteminin manyetik potansiyeli elde edilir. Manyetik potansiyelin gradyanı alındığında (-z yönünde türevi) denklem 2.5 ile verilen en genel etkileşim kuvveti ifadesi elde edilmiş olur.

$$\mathbf{F}(r, z) = \frac{\mu_0 m^2}{8\pi} \left[ \frac{r^3 - 4r(z+h)^2}{(r^2 + (z+h)^2)^{7/2}} \mathbf{a}_r + \left[ \frac{2}{(2z)^4} + \frac{3(z+h)r^2 - 2(z+h)^3}{(r^2 + (z+h)^2)^{7/2}} \right] \mathbf{a}_z \right] \quad (2.4)$$

Yatay yönde yer değiştirme olmadığında ( $r = 0$ ) ve süperiletken-kalıcı mıknatıs dipolleri arası mesafe çok büyük iken soğutulması halinde (yani AS yüksekliği  $h = \infty$  ise) Denklem 2.4 kullanılarak SAS işlemine göre YSS ve mıknatıs arasındaki düşey kuvvet düşey yöndeki mesafenin fonksiyonu olarak bulunabilir.

Süperiletkeni soğutma yüksekliği ( $h$ ) sonlu olduğunda (ki bu AS işlemi anlamına gelir) denklem, yatay yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak düşey kuvveti verir. Yanal yer değiştirmenin ( $r$ ) bir fonksiyonu olarak kılavuz kuvveti, belirli bir alanda soğutma ve ölçüm yüksekliklerinde ( $z$ ) elde edilebilir.

Donmuş görüntü modeli tez çalışmamızın teorik kısmını oluşturmaktadır. Deneysel çalışmalarda  $h$  değerinin sonsuz değeri 25-75 mm olarak alınmıştır. Çünkü bu mesafelerde süperiletken ve sürekli mıknatıslar arasında manyetik alan etkileşimi yoktur.

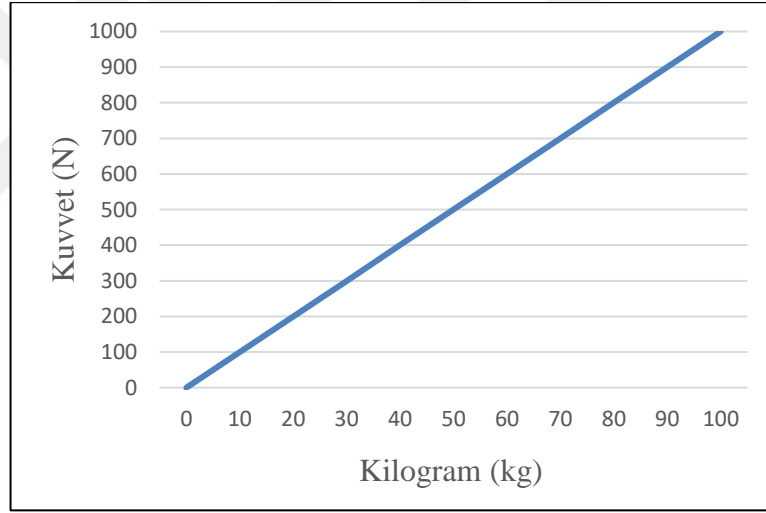
Diğer yandan  $h$  değerinin sonlu alındığı mesafe deneysel düzeneğimize göre 5 mm'dir. Bu mesafe değerinde sürekli mıknatıs ve süperiletken arasında sürekli mıknatısın sebep olduğu manyetik alan oluşur.

Donmuş görüntü modelinde ve deneysel çalışmalarda alanlı soğutmada sürekli mıknatıs ve süperiletken arasında birbirini çekici kuvvet oluşur bu çekme kuvveti donmuş görüntü dipolünün diyamanyetik dipolden daha kuvvetli olduğu kısımdır. Diğer yandan sıfır alanlı soğutma işleminde ise sürekli mıknatıs ve süperiletken arasında birbirlerini itici bir kuvvet meydana gelir bunun sebebi ise diyamanyetik dipolün donmuş görüntü dipolüne göre daha fazla kuvvet uygulayabildiğini göstermektedir. Tez yapılan teorik çalışma kısmı bu kriterler ve modelleme kurallarına göre matematiksel olarak Matlab programı yardımı ile önce potansiyel ifadeler hesaplanmış daha sonrasında düşey ve yatay kuvvet hesaplamaları için potansiyellerin türevi alınmıştır.

### 3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYLERİN YAPILMASI

#### 3.1 Kuvvet Ölçüm Sistemi

Kuvvet ölçüm sistemi temel olarak bir adet kuvvet ölçen cihaz iki adet konumu belirleyen lazer (yatay ve düşey) den oluşmaktadır [13]. Ölçüm sisteminin konum hassasiyeti milimetrik olup belirlenen konumlara 1 mm lik adımlarla yaklaşım uzaklaşmaktadır. Sistem ile ölçüm yapmadan önce kuvvet sensörleri kalibre edilmektedir ve deneyler arasında uzun sürelerin olması halinde bu kalibrasyon işlemi tekrarlanmaktadır. Tipik bir kalibrasyon eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.

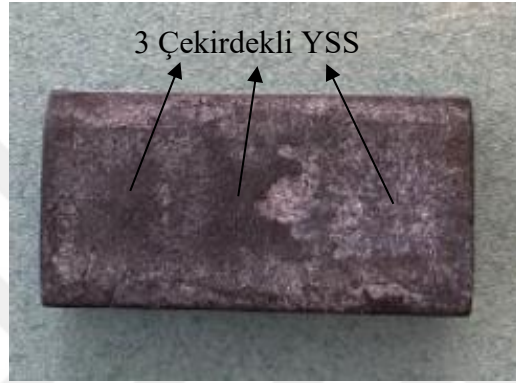


**Şekil 3.1** Süperiletken manyetik kaldırma sisteminde yer alan kuvvet sensörlerinin kalibrasyon eğrisi.

Kuvvet ölçüm sisteminde kullanılan malzemeler aynı olup deneyler farklı konfigürasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan NdFeB mıknatısların boyutları 40×30×30 mm (Şekil 3.2). Deney için gerekli olan süperiletkenlerin (YBCO) boyutları 65×34×14 mm'dir (Şekil 3.3).



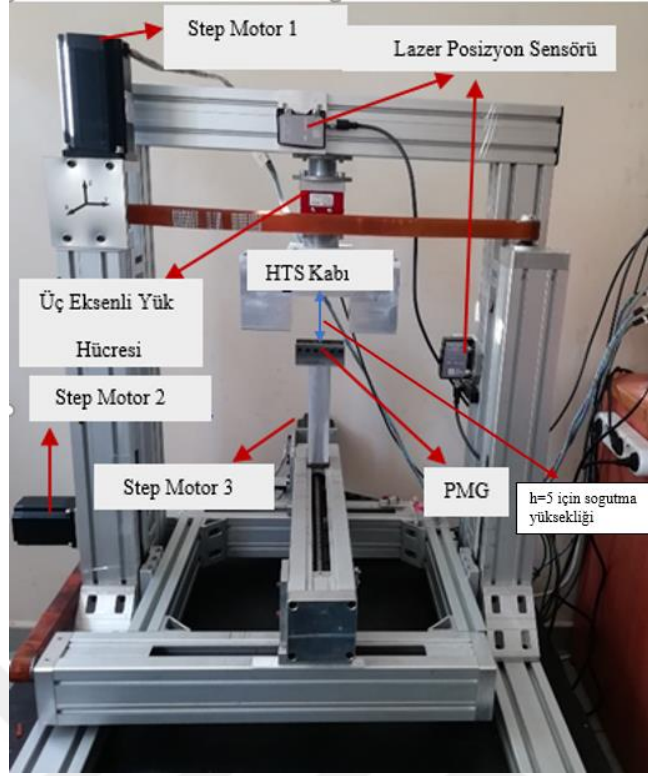
**Şekil 3.2:** Deneylerde kullanılan NdFeB sürekli mıknatıs.



**Şekil 3.3:** Deneylerde kullanılan külçe süperiletkenler (YBCO).

Kuvvet ölçüm sistemi alüminyum malzemeden 6-serbestlik derecesinde hareket etme imkânı sağlayan 3 adet-DC adım (step) motoru ile numune kontrol imkânı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ölçüm sistemi ayrıca ilgili serbestlik derecesindeki manyetik kuvvet ölçümünü gerçekleştirebilmek için Şekil 3.4'te gösterildiği gibi 3-eksenli bir yük hücresine, süperiletken malzemelerin yerleştirildiği ve gerektiğinde çok yüzeyli süperiletken Maglev sistemine uygun olacak şekilde değiştirilebilen, sıvı azotla soğutulan numune kabına ve çeşitli konfigürasyonlara dönüştürülebilen mıknatıs kılavuz yoluna sahip olup, ölçüm esnasındaki verileri almak ve işlemek için Labview yazılımı ile hazırlanıp derlenen bir ara yüzün kullanılabildiği bir bilgisayar bileşenine sahiptir.

Labview yazılımından almış olduğumuz deneysel sonuçlarımızı düzenledikten sonra modellememizin sonuçları ile karşılaştırarak çalışmalarımızı tamamlamış oluyoruz. Deneylerin detaylı anlatımı bir sonraki bölümde mevcuttur.



Şekil 3.4: Kuvvet ölçüm sisteminin genel görünümü.

## 3.2 Deneilerin Yapılması

### 3.2.1 Alanlı soğutma (AS) deneyleri

Manyetik alanlı soğutma işlemlerinde deneye başlamadan önce Şekil 3.4'te görülen kuvvet ölçüm sistemi, alt ve üst (sıvı azot tankı ile kızak arası mesafe) kısımları arasındaki mesafe 5 mm ve yan kısımları arasındaki mesafe 2-3 mm olacak şekilde konumlandırılır. Daha sonra kalıpların içindeki süperiletkenlerin süperiletken durumuna geçmesi için sıvı azot yardımıyla 10-20 dakika arasında huni yardımıyla soğutulur.

Sistemin tamamen soğuduğundan emin olduktan sonra, düşey yöndeki kuvvet ölçümleri için bilgisayar kontrolü ile numune ilk önce 5 mm'den 75 mm'ye daha sonra ise sistemi durdurmadan 75 mm'den tekrar 5 mm'ye ayarlayarak numune eski konumuna gelecek şekilde kuvvet ölçümü tamamlanır. Sistemi eski konumuna getirerek histerisiz meydana gelmiş olur.

Ölçüm sistemi başladıktan sonra tekrar eski konumuna getirilerek histerezis grafiği de elde edilmiş olur. Kılavuz kuvvet ölçümlerinde sistem 5 mm'lik düşey mesafede soğutulduktan sonra yatay mesafe çok sınırlı olduğu için ölçümler genelde 3 mm ve 5

mm'lik mesafeler olacak şekilde yine programda veriler  $x$  ekseninde sağa ve sola ne kadar gidilecekse LabView programına girilerek deney yapılır. Yine bu ölçümde de histerezis grafiği istenilmesi halinde sistem  $x$  ekseninde tekrar ilk konumuna getirilerek kuvvet grafiği elde edilir.

### 3.2.2 Sıfır alan soğutma (SAS) deneyleri

Alan soğutma (AS) işlemlerinde olduğu gibi sıfır alan soğutma (SAS) deneylerinde de benzer işlem takip edilmektedir. Farklı olarak, bu ölçüm sisteminde ölçüm mesafeleri değiştiği için örnek olarak 5 mm'lik deneyin yapılışı şöyledir: Kuvvet ölçüm deneylerine başlamadan önce mıknatıs ve süperiletkenler manyetik etkileşime girmeyeceği bir mesafede (bu durumda 75 mm olarak alınmıştır) tutulur.

Ölçüm sistemi, alt ve üst (sıvı azot kabı ile kızak arası mesafe) kısımları arasındaki mesafe 75 mm'ye kadar ve yan kısımlarında ise 2-3 mm olacak şekilde konumlandırılır.

Daha sonra soğutma işlemleri için alanlı soğutma deneylerinde yapılan aynı işlemler tekrar edilir. Sistemin tamamen soğuduğundan emin olduktan sonra düşey yöndeki kuvvet ölçümleri için bilgisayar vasıtasıyla önce bileşenler arasındaki mesafe 75 mm'den 5 mm'ye daha sonra sistemi durdurmadan 5 mm'den 75 mm'ye adım adım ölçüm yapacak şekilde ayarlayarak ölçüm sistemindeki numune eski konumuna gelince deney tamamlanır.

Kılavuz kuvvet ölçümlerinde sistem 75 mm'lik düşey mesafede soğutulduktan sonra tekrar 5 mm'lik mesafeye ayarlanıp sistemin ne kadar sağa veya sola hareket edeceğini belirleyip gerekli verileri LabView programına girdikten sonra ölçüm işlemleri tamamlanır.

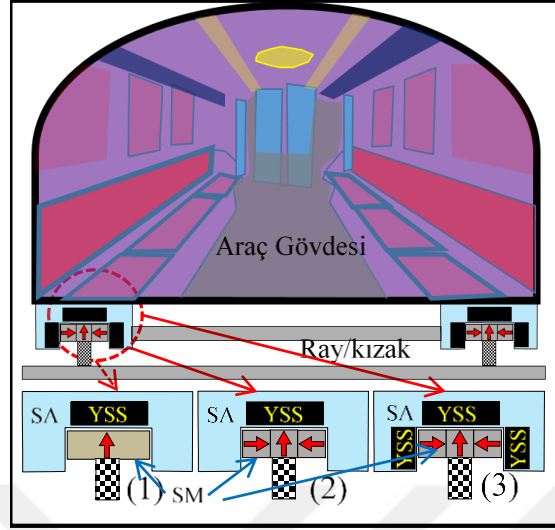
Alanlı ve sıfır alanlı işlemleri bizim tez çalışmamıza göre soğutma yükseklikleri dikey mesafeler için  $h=5, 25$  ve  $75$  mm için yapılmıştır. Yatayda yapılan kuvvet ölçümlerinde ise sistemimizin kısıtlı olması sebebiyle maximum yanal mesafe 2-3 mm olacak şekilde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra buradan elde etmiş olduğumuz verileri ve donmuş görüntü modeli ile elde ettiğimiz verileri kullanarak sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde analiz edip tezimizi tamamlamış olduk.

#### 4. DENEYSEL VE TEORİK ÇALIŞMA

Bu tezde maglev sistemi için gerçekleştirilen deneylerin analizi donmuş görüntü modeli kullanılarak farklı konfigürasyonlar için yapılmıştır. Bu kapsamda, üç farklı konfigürasyon içeren manyetik kaldırma sisteminde kaldırma (levitasyon) ve kılavuz kuvvetleri ile ilgili donmuş görüntü modeli deneysel veriler eşliğinde karşılaştırmalı bir biçimde analiz edilerek incelenmiştir. Araç sistemi için gerçekleştirilen donmuş görüntü model analizi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bir trenin gövdesi ve bir kızaktan oluşan araç sistemi, bileşenler arasındaki etkileşimler daha iyi anlaşılması için Şekil 4.1'de şematik olarak çizilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kızak ve kaldırma sistemi mıknatıs ve süperiletkenlerin yerleştirilme şekline ve sayısına göre üç farklı konfigürasyondan oluşur. Konfigürasyon 1 (Şekil 4.1'de 1 numaralı bölge), aracın kızak kısmında tek bir mıknatıs (düşey doğrultuda) tarafından kaldırılan tek bir külçe YSS'den oluşur. Konfigürasyon 2'de (Şekil 4.1' de 2 numaralı bölge), tek bir YSS ve YSS'nin alt kısmında Halbach dizilimli üç mıknatıs (biri düşey ikisi yatay doğrultulu) tarafından oluşur. Konfigürasyon 3'te ise (Şekil 4.1'de 3 numaralı bölge), kızak kısmında Halbach dizilimli üç mıknatıs (biri düşey ikisi yatay doğrultulu) tarafından kaldırılır, ancak bu kez araç gövdesinde üç YSS vardır (biri üstte ve ikisi yanlarda). Gri renkte boyanmış mıknatıslar üzerindeki oklar mıknatıslanma yönlerini temsil eder. Kaldırma sisteminde yer alan YSS ve mıknatısların ayrıntılı donmuş görüntüsü söz konusu üç konfigürasyona göre Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Mıknatıs-YSS etkileşimlerinin donmuş görüntü temsillerine göre, Şekil 4.2a birinci konfigürasyonu, Şekil 4.2b ikinci konfigürasyonu ve Şekil 4.2c ise üçüncü konfigürasyonu gösterir. Yine Şekil 4.2'de verilen görüntü temsillerinde, gri renkte boyanmış mıknatıslar içindeki siyah oklar mıknatısların manyetik momentini ve yönünü gösterir, mavi oklar süperiletken içinde olduğu kabul edilen donmuş görüntüleri ve yönlerini belirtir ve kırmızı oklar ise yine süperiletkende olduğu kabul edilen manyetik momentlere karşılık gelen diyamanyetik görüntüleri belirtir. Süperiletken bölgenin yarı sonsuz düzlemler olduğu varsayıldığından, Şekil 4.2'deki süperiletken bölgeleri noktalı olarak gölgelendirilmiş şekilde boyanmıştır. Değişik konfigürasyonlara göre deneylerde elde

edilen kuvvet ölçümleri donmuş görüntü modeline göre Denklem 2.3 yardımıyla ileride analiz edilecektir.

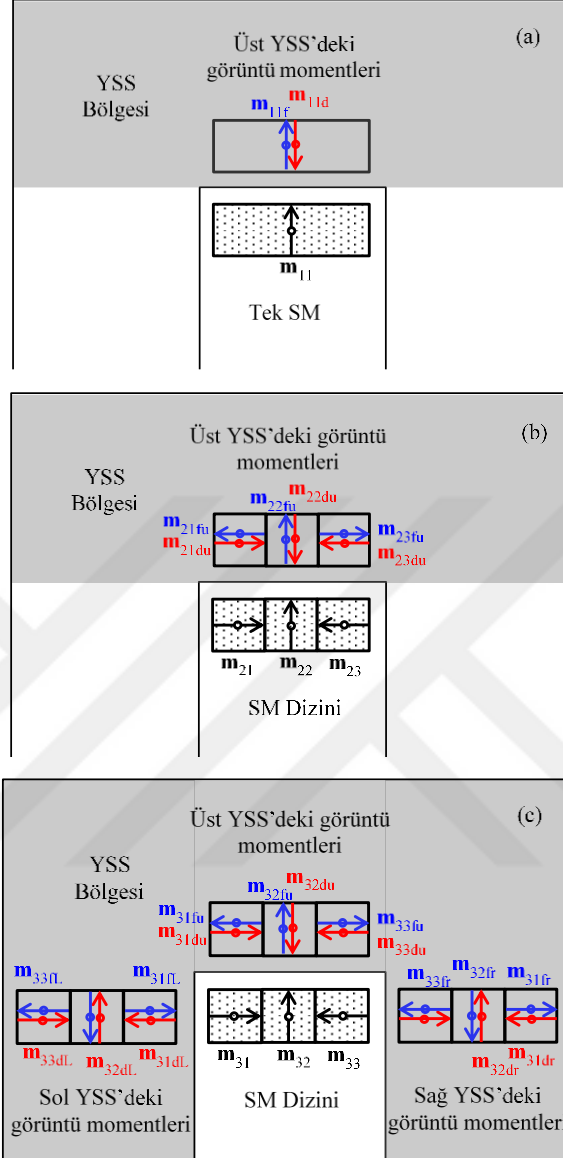


**Şekil 4.1:** Deneyde kullanılan konfigürasyonların gösterimi. Araç gövdesi üç değişik konfigürasyonla kaldırılmıştır. SA: Sıvı azot, YSS: Yüksek sıcaklık süperiletken ve SM: Sürekli mıknatıs.

Bu tez çalışmasında yer alan konfigürasyon 1, 2 ve 3'de verilen düzenlemelere göre donmuş görüntü modeli vasıtasıyla YSS ve mıknatıslar arasındaki düşey (kaldırma) ve kılavuz kuvvetleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Burada, alan soğutma yüksekliği ( $h$ ) düşey doğrultu yönünde seçilmiş ve düşey kuvveti belirlemek için bu yöndeki hareketler  $\pm z$  olarak tanımlanmıştır. Kuvvet değerlerinin ölçüldüğü herhangi bir  $\pm z$  konumu ise ölçüm yüksekliği olarak adlandırılmıştır. Yatay yönde hareket için ise yatay yer değiştirme ( $r$ ) değişkeni kullanılmıştır. Deney aşamasında belli bir alan soğutma yüksekliğinde ( $h$ ) sistem sırasıyla  $\pm z$  ve  $\pm r$  yönlerinde hareket ettirilerek düşeyde ve yatayda oluşan kuvvetler elde edilir. Donmuş görüntü modelinde ise bu üç değişkene bağlı olarak ( $h, r, z$ ) denklemler ve yön vektörleri oluşturulmuştur.

Donmuş görüntü modelinin doğruluğu yalnızca kaldırma sisteminin konfigürasyonuna değil, aynı zamanda hesaplama parametreleriyle ilgili uygun varsayımların seçilmesine de bağlıdır. Bu parametreler bileşenlerin etkileşim mesafesi, boyutları ve manyetik özellikleridir. Örneğin, etkileşim mesafesi bileşenlerin boyutlarından (bu durumda YSS ve mıknatıs) daha büyükse, modelde bileşenlerin boyutu dikkate alınmaz. Bu durumda, model, mıknatısların dipol momentleri gibi nokta oldukları varsayıldığı dipol yaklaşımı kullanılarak uygulanabilir. Öte yandan, bileşenlerin boyutları etkileşim mesafesinden daha büyük olduğunda, model yalnızca boyutların önemli parametreler haline geldiği Amper akımı yaklaşımı ile gerçekçi sonuçlar

sağlayabilir [12]. Ancak özellikle konfigürasyon 2 ve 3'ün karmaşıklığı sebebiyle bu çalışmada dipol yaklaşımı tercih edilmiştir.



**Şekil 4.2:** Sürekli mıknatıslarla süperiletkenler arasında donmuş görüntü modelinin farklı üç konfigürasyona göre gösterimi: (a) Konfigürasyon 1 (b) Konfigürasyon 2 ve (c) Konfigürasyon 3.

Şimdi, tek bir mıknatısın tek bir YSS ile etkileşime girdiği Şekil 4.2a'da gösterilen en basit konfigürasyon 1'i ele alalım ve bunu Denklem 2.3'e uygulayalım. Bu konfigürasyonda mıknatısın dipol momentini  $m_{11}$  olarak verilmiştir. Mıknatısın dipol momentlerinin büyüklüğü ile görüntülerinin büyüklüğü mutlak değerce aynı olduğu varsayılmıştır. Mıknatısın diyamanyetik ve donmuş görüntülerinin dipol momentini ve diyamanyetik ve donmuş durumların mıknatıs-görüntü çifti için konum vektörleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de, ilk sütunda konfigürasyon numarasını

gösterilmiştir. Mıknatısların dipol momentlerindeki ilk alt indisler (ikinci sütunda verilmiştir) konfigürasyon numarasını gösterirken, ikinci alt indisler mıknatıs dizisinde bulunan mıknatısların numarasını belirtir. Örneğin konfigürasyon 1’de sadece bir mıknatıs olduğu için birinci ve ikinci alt indisler aynıdır. Üçüncü ve dördüncü sütunlar herhangi bir konfigürasyonda bulunan mıknatısın veya mıknatıs dizisinde yer alan bir mıknatısın sırasıyla diyamanyetik ve donmuş görüntü dipol momentlerini temsil eder. Beşinci ve altıncı sütunlar sırasıyla mıknatıslar ve bunların diyamanyetik ve donmuş görüntü dipol momentleri arasındaki konum vektörlerini temsil eder.

**Çizelge 4.1:** Donmuş görüntü modelinde kullanılan sürekli mıknatıs süperiletken etkileşmesi için dipol momentleri ve yer vektörleri.

Kon.	SM	Diyamag.	Donmuş	$r_{SM-d}$	$r_{SM-f}$
1	$\mathbf{m}_{11} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{11d} = -m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{11f} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_d = (2h-2z)\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_f = (2h-z)\mathbf{a}_z + r\mathbf{a}_r$
	$\mathbf{m}_{21} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{21d} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{21f} = -m\mathbf{a}_r$		
2	$\mathbf{m}_{22} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{22d} = -m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{22f} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_d = (2h-2z)\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_f = (2h-z)\mathbf{a}_z + r\mathbf{a}_r$
	$\mathbf{m}_{23} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{23d} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{23f} = m\mathbf{a}_r$		
3		$\mathbf{m}_{31dL} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{31fL} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d31L} = (2h-2d+2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f31L} = (2h-2d+r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$
	$\mathbf{m}_{31} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{31dU} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{31fU} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d31U} = (2h-2z)\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{f31U} = (2h-z)\mathbf{a}_z + r\mathbf{a}_r$
		$\mathbf{m}_{31dR} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{31fR} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d31R} = (2h+2d-2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f31R} = (2h+2d-r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$
		$\mathbf{m}_{32dL} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{32fL} = -m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{d32L} = (2h+2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f32L} = (2h+r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$
	$\mathbf{m}_{32} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{32dU} = -m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{32fU} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{d32U} = (2h-2z)\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{f32U} = (2h-z)\mathbf{a}_z + r\mathbf{a}_r$
		$\mathbf{m}_{32dR} = m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{m}_{32fR} = -m\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{d32R} = (2h-2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f32R} = (2h-r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$
		$\mathbf{m}_{33dL} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{33fL} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d33L} = (2h+2d+2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f33L} = (2h+2d+r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$
	$\mathbf{m}_{33} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{33dU} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{33fU} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d33U} = (2h-2z)\mathbf{a}_z$	$\mathbf{r}_{f33U} = (2h-z)\mathbf{a}_z + r\mathbf{a}_r$
		$\mathbf{m}_{33dR} = m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{m}_{33fR} = -m\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{d33R} = (2h-2d-2r)\mathbf{a}_r$	$\mathbf{r}_{f33R} = (2h-2d-r)\mathbf{a}_r + z\mathbf{a}_z$

Konfigürasyon 1 için SM-YSS etkileşimini temsil eden manyetik potansiyel Denklem 2.3'den yararlanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$U_1 = \frac{\mu_0 m^2}{8\pi} \left[ \frac{1}{4(h-z)^3} + \frac{2r^2 - 4(2h-z)^2}{[(2h-z)^2 + r^2]^{5/2}} \right] \quad (4.1)$$

İkinci olarak Şekil 4.2b'de görüldüğü gibi, araç gövdesinin (tek YSS'li) Halbach dizili 3 adet mıknatıs tarafından kaldırıldığı ikinci konfigürasyon ele alınmıştır. Halbach dizili mıknatısların, üst kısımdaki YSS'de diyamanyetik (kırmızı renkli) ve donmuş (mavi) görüntülerle temsil edilmiştir. Bu konfigürasyonda, mıknatısların soldan sağa dipol momentleri  $m_{21}$ ,  $m_{22}$  ve  $m_{23}$  olarak verilmiştir. Halbach dizisindeki mıknatısların diamanyetik ve donmuş görüntülerinin dipol momenti ve ilişkili konum vektörleri

Çizelge 4.1'deki verilere göre oluşturulmuştur. Denklem 2.3'den elde edilen potansiyel ifadesi ise aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$U_2 = \frac{\mu_0 m^2}{8\pi} \left[ \frac{1}{4(h-z)^3} + \frac{10r^2 - 8(2h-z)^2}{[(2h-z)^2 + r^2]^{5/2}} \right] \quad (4.2)$$

Son olarak konfigürasyon 3'de, araç gövdesi, Şekil 4.2c'de gösterildiği gibi, Halbach dizili üç adet mıknatıs tarafından kaldırılan üç adet YSS'den oluşur. Bu konfigürasyonda, mıknatısların dipol momentleri ikinci konfigürasyonla tamamen aynıdır. Soldan sağa dipoller  $m_{31}$ ,  $m_{32}$  ve  $m_{33}$  olarak verilmiştir. Birinci ve ikinci konfigürasyonlara benzer şekilde, Halbach dizisindeki mıknatısların diyamanyetik ve donmuş görüntülerinin dipol momentleri ve ilgili konum vektörleri oluşturulmuştur. Konum vektörleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. Kızağın solunda bulunan mıknatıs ( $m_{31}$ ) için diyamanyetik ve donmuş görüntülerle birlikte konum vektörleri araç gövdesinin sol, üst ve sağ tarafında bulunan YSS'ler içinde gösterilmiştir. Kızağın ortasında bulunan mıknatıs ( $m_{32}$ ) için diyamanyetik ve donmuş görüntülerle birlikte konum vektörleri araç gövdesinin sol, üst ve sağ tarafında bulunan YSS'ler içinde gösterilmiştir. Son olarak kızağın sağında bulunan mıknatıs ( $m_{33}$ ) için diyamanyetik ve donmuş görüntülerle birlikte konum vektörleri araç gövdesinin sol, üst ve sağ tarafında bulunan YSS'ler içinde gösterilmiştir. Kızaktaki  $m_{31}$ ,  $m_{32}$  ve  $m_{33}$  dipolleri ile temsil edilen mıknatıslar ve bunların araç gövdesinin sol, üst ve sağında bulunan YSS'lerdeki görüntüleriyle birlikte elde edilen kümülatif manyetik potansiyel Denklem 2.3'den elde edilir.

$$U_3 = \frac{\mu_0 m^2}{8\pi} [A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6] \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemde  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$  ve  $A_6$  sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$A_1 = \frac{1}{8} \left[ \frac{4}{(h-z)^3} + \frac{1}{(h+r)^3} + \frac{1}{(h-r)^3} \right] \quad (4.4)$$

$$A_2 = \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{(h-d+r)^3} + \frac{1}{(d+2h-r)^3} + \frac{1}{(d+h+r)^3} - \frac{1}{(d-h+r)^3} \right] \quad (4.5)$$

$$A_3 = \frac{2z^2 - 4(2h-2d+r)^2}{[(2h-2d+r)^2 + z^2]^{5/2}} \quad (4.6)$$

$$A_4 = \frac{4z^2 - 4(2d + 2h - r)^2}{[(2d + 2h - r)^2 + z^2]^{5/2}} + \frac{2z^2 - 4(2d + 2h + r)^2}{[(2d + 2h + r)^2 + z^2]^{5/2}} + \frac{2z^2 - 4(2d - 2h + r)^2}{[(2d - 2h + r)^2 + z^2]^{5/2}} \quad (4.7)$$

$$A_5 = \frac{4r^2 - 2(2h - z)^2}{[(2h - z)^2 + r^2]^{5/2}} + \frac{2r^2 - 4(2h - z)^2}{[(2h - z)^2 + r^2]^{5/2}} + \frac{4r^2 - 2(2h - z)^2}{[(2h - z)^2 + r^2]^{5/2}} \quad (4.8)$$

$$A_6 = \frac{4z^2 - 2(2h + r)^2}{[(2h + r)^2 + z^2]^{5/2}} + \frac{4z^2 - 2(2h - r)^2}{[(2h - r)^2 + z^2]^{5/2}} \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen 4.1, 4.2 ve 4.3 numaralı denklemlerde manyetik potansiyellerin türevleri düşey (z) ve yatay (r) yönlere göre sırasıyla alınarak konfigürasyon 1, 2 ve 3 için kuvvet ifadeleri elde edilir. Belirli konfigürasyon için düşey ve kılavuz kuvvetlerin türetilmesi Matlab programı ile sembolik olarak gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ifadelerini içeren denklemler çok fazla yer kapladıkları için metinde yer verilmemiştir. Matlab'dan elde edilen kuvvet ifadeleri, özel konfigürasyon ve soğutma prosedürüne göre doğrudan uygulanır. Denklemlerde,  $d$  teriminin 5 mm olup Halbach dizilimli mıknatısların dipol momentleri arasındaki mesafeyi temsil eder. Bu terim yalnızca konfigürasyon 3 için gerekli olduğu unutulmamalıdır.

Konfigürasyon 3'deki AS yüksekliğinin ( $h$ ) tanımının diğerlerinden farklı olduğunu burada belirtmek de önemlidir. Bir veya çok sayıda mıknatıs, tek bir külçe YSS'nin üzerinde kaldırıldığında, 1. ve 2. konfigürasyonların formülasyonlarındaki  $h$ , doğrudan donmuş görüntü modeline uygulanır. Örneğin AS prosedürü durumunda  $h$  sonlu bir değere sahiptir. Alansız soğutma (SAS) durumunda ise  $h$  sonsuz olarak alınır. Fakat üçüncü konfigürasyonda durum daha farklıdır. Araç gövdesinin üst kısmındaki YSS'nin yanında, mıknatısların sol ve sağ taraflarında ek olarak iki adet daha YSS vardır. Bu durumda, YSS gövdesi mıknatıslara yaklaştığında DGM'in uygulanması farklı bir yaklaşım gerektirir. YSS bölgelerinin DGM'nin uygun bir şekilde uygulanması açısından (YSS bölgeleri yarı sonsuz düzlemler olduğu varsayıldığından), deneysel prosedürde olduğu gibi bir sıfır alan soğutma prosedürünü tam olarak tanımlamak mümkün değildir. Bunun sebebi kızakta bulunan mıknatıslar, çoklu yüzeylerde (biri üstte ve ikisi yanlarda) aynı anda donmuş ve diyamanyetik görüntüler üretmesidir.

İki ve üç numaralı konfigürasyonlarla ilgili yukarıdaki potansiyel formülasyonda, mıknatıs ile kendi görüntüleri arasında bire bir korelasyon olduğunu varsayılmıştır. Bu, belirli bir mıknatısın kızaktaki diğer mıknatısların görüntüleri ile etkileşime

girmeyeceği kabul edilmesi anlamına gelir. Bu nedenle, Çizelge 4.1'de gösterilen ikinci konfigürasyon için, mıknatıs ile diyamanyetik veya donmuş görüntüleri arasındaki konum vektörleri, Halbach dizisindeki herhangi bir mıknatıs için tamamen aynıdır. Gerçekleştirilen hesaplamalardan, bu varsayımın etkileşim kuvvetlerini basitleştirdiği ve dolayısıyla kuvvetlerin büyüklüğünü etkilemeden denklem sayısını azalttığı belirlenmiştir.

Donmuş görüntü modeli yaklaşımı önceki çalışmalarda iyi açıklanmış olsa bile [32], burada bu modelin uygulanmasının belirli bir konfigürasyon ve bununla ilişkili etkileşim bileşenleri açısından çok farklı olduğu kesindir. Örneğin, mıknatıs ve YSS'ler arasındaki kuvvetin belirlenmesi için AS ve SAS koşullarının uygulanması, etkileşim açısından önemli bir husustur. Yalnızca tek mıknatıs ve YSS arasındaki kuvveti hesaba katan en basit (konfigürasyon 1) durumu göz önüne alındığında, SAS mesafesi bileşenlerin boyutlarından çok daha yüksektir. Bu durumda, YSS'de SM'nin iki görüntüsü vardır: biri donmuş görüntü, diğeri ise diyamanyetik görüntüdür. Bu nedenle, düşey ve kılavuz kuvvetler için deneysel ölçüm, AS ve SAS koşulları için konfigürasyon 1'de DGM tarafından tam olarak gerçekleştirilebilir.

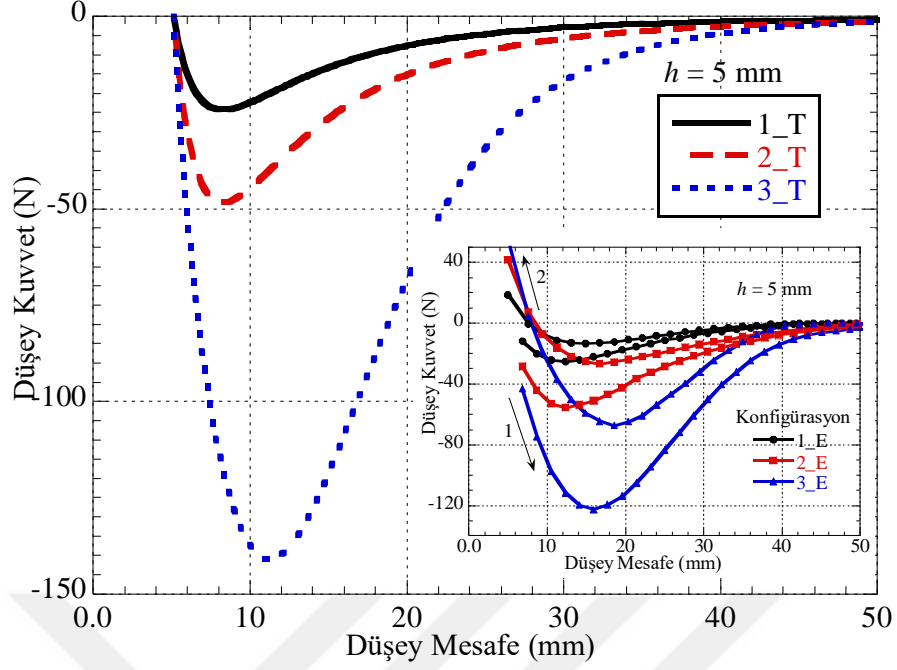
Konfigürasyon 2, modelleme açısından 1'den daha karmaşıktır. Tek bir YSS, Halbach dizili mıknatıslar ile etkileşim halindedir. Dizideki her bir mıknatısın kendi donmuş ve diyamanyetik görüntüleri vardır. Yukarıda ifade edildiği gibi, dizideki her bir mıknatısın yalnızca kendi görüntüleriyle etkileşime girdiği varsayılır. Bu, Halbach dizisindeki dipoller arasındaki merkezden merkeze olan mesafenin ( $d$ ) konfigürasyon 2'de hesaba katılmadığı anlamına gelir. Bu nedenle, konfigürasyon 1 durumunda olduğu gibi, konfigürasyon 2'de de deneysel ölçümler DGM ile uygun şekilde modellenebilir. Konfigürasyon 1 ve 2 için düşey ve kılavuz kuvvet ifadeleri, sırasıyla uzamsal yönlere ( $z$  ve  $r$ ) göre  $U_1$  (Denklem 4.1) ve  $U_2$  (Denklem 4.2) manyetik potansiyellerinin türevlerinden elde edilir.

Kuvvetleri hem AS hem de SAS koşullarında ölçmek mümkün olsa da, DGM açısından SAS durumunda konfigürasyon 3 için sistemin manyetik potansiyelini türetmek pratikte uygun değildir. Bunun nedeni, düşey yön boyunca külçe YSS'nin boyutunun sonlu olduğu konfigürasyon 3'de vurgulanmalıdır. Örneğin, mıknatıs düşey yönde hareket ederken, YSS'nin yanlarda bulunması, DGM'in pratikte sonsuz bir sayı olan SAS mesafesini hesaba katmasını engeller. Konfigürasyon 3 için SAS koşullarında DGM uygulamasının önündeki bu engelin üstesinden gelmek için,  $U_3$ 'ün

türevi (Denklem 4.3) kullanılırken AS yüksekliği ( $h$ ) ayrı olarak dikkate alınır. Bu durumda kuvvetler konfigürasyon 3 için ayrı ayrı hesaplanır. İlk olarak, düşey kuvvet, mıknatısların üzerindeki Halbach dizisi tek YSS arasındaki etkileşim dikkate alınarak hesaplanır. Mıknatısların oluşturduğu Halbach dizisi ile yalnızca araç gövdesinin yanlarında bulunan YSS arasındaki kuvvetler de ayrı hesaplanarak ilk durumda hesaplanan kuvvete eklenir, yani üstte ve yanlardaki kuvvetler ayrı ayrı hesaplandıktan sonra toplanır.

Deney düzeneğinde (Şekil 3.4) YSS'lerin bulunduğu araç gövdesi ile mıknatısların bulunduğu kızak arasındaki düşey mesafenin fonksiyonu olarak düşey kaldırma kuvveti, sıvı nitrojen sıcaklığında  $h = 75, 25$  ve  $5$  mm soğutma yükseklikleri için ölçülmüştür. Burada  $h = 75$  mm gerçekte SAS prosedürü olarak kabul edilir (kızak ve gövde arasındaki mesafe manyetik etkileşmenin olamayacağı kadar büyüktür). Deney düzeneğinin,  $5$  mm'lik AS mesafesinden ( $h$ ) daha az alınmamasının sebebi düzeneğin buna uyumlu olmamasıdır. Yanal yer değiştirme durumunda, mıknatısların üzerindeki YSS'de, konfigürasyon 1 ve 2 için merkez noktasından  $20$  mm'ye kadar hareket edebilirken, konfigürasyon 3 için en fazla  $5$  mm'ye kadar hareket edebilir. Bununla birlikte, tüm konfigürasyonlar için kılavuz kuvvetlerinin tam karşılaştırması için, yatay yer değiştirme  $4$  mm ile sınırlandırılmıştır.

Donmuş görüntü modeli analizini yapabilmek için, ilk adım olarak, sistemdeki düşey kuvvet DGM ile hesaplanmış olup ardından tahmin edilen hesaplama, şekilde (Şekil 4.3) gösterilen önceden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3,  $h = 5$  mm durumunda, mıknatıs üst yüzeyi ve YSS'nin alt yüzeyi arasındaki düşey mesafeye karşı düşey kuvvetin DGM ile analizini göstermektedir. Şekil içindeki iç grafikte (küçük olan) teoriyle kıyaslama analizi yapılan ilgili deneyi göstermektedir. Şekil 4.3'te belirtilen teorik hesaplamalar ele alındığında, siyah düz çizgi ile temsil edilen eğriler konfigürasyon 1'i (1-T), kırmızı uzun kesikli çizgili olanlar konfigürasyon 2'yi (2-T) ve mavi kesikli çizgili olanlar ise konfigürasyon 3'ü (3-T) temsil etmektedir. İç şekilde bulunan deneysel sonuçlar ele alındığında, siyah daire çizgili eğriler konfigürasyon 1'i (1-E), kırmızı kare çizgililer konfigürasyon 2'yi (2-E) ve mavi üçgen çizgililer ise konfigürasyon 3'ü (3-E) temsil etmektedir. Ayrıca, iç grafikte siyah 1 ve 2 numaralı oklar sırasıyla sistemin ilk konumdan uzaklaşımını ve ilk konuma dönüşünü temsil etmektedir.



**Şekil 4.3:** DGM modelinin  $h = 5 \text{ mm}$ 'de tüm konfigürasyonlar için SM'ler ile YSS arasındaki düşey mesafeye ( $z$ ) karşılık gelen, düşey kuvvet grafiği (İç grafik: tüm konfigürasyonlar için deneysel sonuçlar).

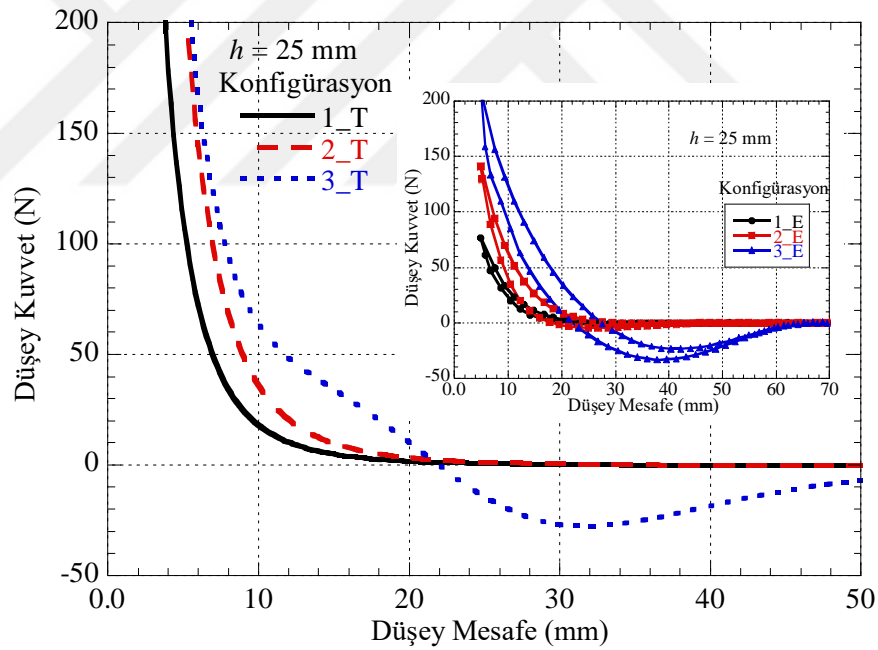
Alan soğutma durumunu gösteren Şekil 4.3'ün içindeki iç grafikte verilen deneysel kuvvet eğrileri incelendiğinde, tüm konfigürasyonlar için soğutma yüksekliğinden ilk yükseliş ve sonrasında tekrar aynı noktaya alçalış esnasında oldukça büyük bir histerezis gözlenmektedir. Örneğin, konfigürasyon 1 ele alındığında, 5 mm mesafede soğutma işlemi gerçekleştikten sonra kızak ile araç gövdesi arasındaki mesafe 12 mm ( $z = 12 \text{ mm}$ ) olacak şekilde birbirinden uzaklaştırıldığında -24 N'luk kuvvet ölçülürken mesafe maksimum noktaya artırıldıktan sonra (75 mm civarında) tekrar aradaki mesafe azaltılarak aynı noktaya getirildiğinde (12 mm) ölçülen kuvvet -13 N olmuştur. Şekil 4.3 içinde verilen iç grafikte soğutma noktasından ilk uzaklaşma 1 ile ve çevrim tamamlanması soğutma noktasına dönüş yolu ise 2 ile gösterilmiştir. Bu histeretik durum konfigürasyon 2 için maksimuma  $z = 16 \text{ mm}$  ölçüm mesafesinde gerçekleşmektedir. Bu durumda ilk uzaklaşma yolunda söz konusu ölçüm noktasında maksimum kuvvet -55 N olurken, çevrim tamamlanıp dönüşte yine aynı ölçüm noktasında maksimum kuvvet -18 N ölçülmüştür. Bu durum konfigürasyon 3 için  $z = 18 \text{ mm}$  ölçüm mesafesinde olup sırasıyla ilk ayrılış yolunda -128 N iken dönüş yolunda ise -66 N olmaktadır. Kuvvetlerin büyüklüğü arttıkça histerezis çevrimi de büyümektedir. Dikkatle incelendiğinde konfigürasyon 2 durumunda gözlenen histerezis diğerlerine göre daha fazladır. Bu durumun incelenmesi ve bir sonuca

varılabilmesi için daha çok deney yapmaya ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Histerezis olayının detaylı incelenmesi sonraki çalışmalara bırakılmıştır. Teorik olarak elde edilen DGM sonuçları iç şekildeki deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında nicel bir uyumdan çok nitel uyum vardır. Örneğin birinci konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 7$  mm'de -25 N, ikinci konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 9$  mm'de -50 N, ve son olarak üçüncü konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 11$  mm'de -140 N olarak elde edilmiştir. Deneysel verilere bakıldığında ise birinci konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 12$  mm'de -24 N, ikinci konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 16$  mm'de -55 N, ve son olarak üçüncü konfigürasyonda maksimum düşey kuvvet  $z = 18$  mm'de -128 N olarak elde edilmiştir. Aynı konfigürasyon için deneysel ve teorik sonuçlar yakın olsa da büyük çaplı histerezis olması sebebiyle bu kuvvet değerleri tam bir nicel uyum sağlamadığını göstermektedir. DGM yaklaşımından beklenen nitel olması sebebiyle mevcut uyumun tez çalışması kapsamında yeterli olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi her konfigürasyon için düşey kuvvetin maksimum değerinin ölçüldüğü yükseklik arasında 5 mm'den daha fazla bir fark vardır. Veriler üzerinde farklılığın varlığı, dipol yaklaşımının nicel yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Literatürde verilen çalışmalardan, aynı durumun Amper akımları yaklaşımı ile ele alınması halinde bu sorunun minimuma indiği hatta deneylerle teorik tahminlerin nicel olarak uyduğu bilinmektedir [32, 44]. Bununla birlikte, bu çalışmada ele alınan varsayımlar çerçevesinde değerlendirildiğinde, Amper akımları yaklaşımı, özellikle konfigürasyon 3'deki tasarım nedeniyle uygulama zorluğunun yanı sıra pratik de değildir.

SAS durumunu ifade eden Şekil 4.4'te, DGM ile elde edilen sonuçların  $h = 25$  mm durumunda düşey mesafeye karşılık gelen düşey kuvveti göstermektedir. Şekil 4.4'ün içinde olan iç grafik, tüm konfigürasyonlar için gerçekleştirilen deneysel kuvvet ölçümlerini göstermektedir. Konfigürasyon 1 ve konfigürasyon 2'de  $h = 25$  mm'den daha yüksek mesafeler için hem DGM ile elde edilen tahminlerde hem de deneysel ölçümlerde gözle görülür bir çekici kuvvet yoktur. Ancak konfigürasyon 3'de 40 mm'ye kadar olan mesafelerde bile mıknatıs ve YSS arasında önemli miktarda çekici kuvvet mevcuttur. Bu, araç gövdesinin yan kısımlarına yerleştirilen YSS'lerin etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu dizilim farklılığından dolayı DGM ile tahmin edilen  $h = 25$  mm'deki verilerin  $h = 5$  mm'deki durumuyla karşılaştırıldığında daha az

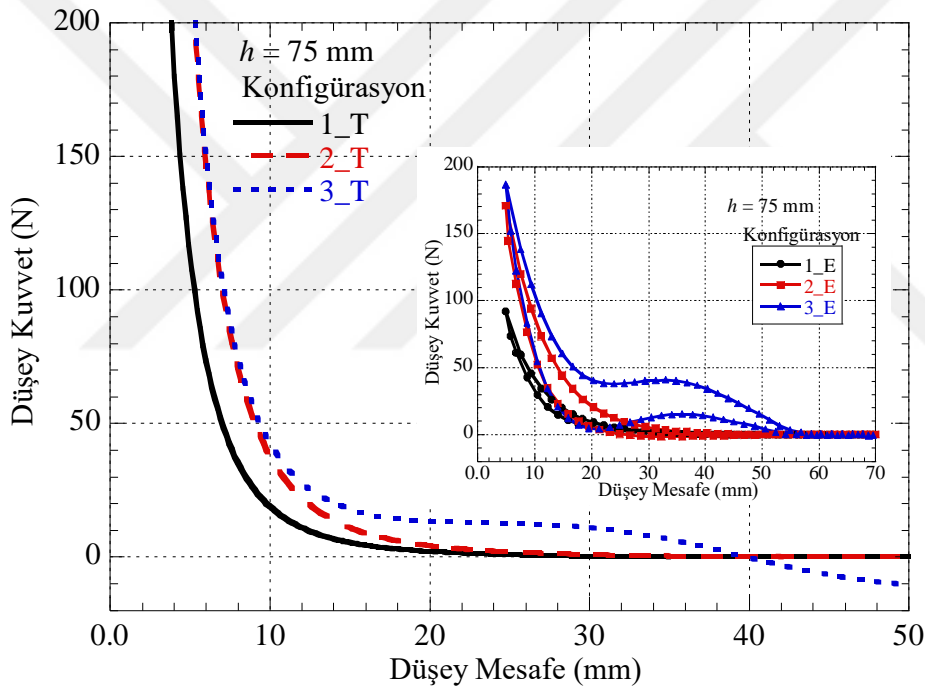
doğrulukla tahmin edildiği görülür. Deneysel ölçümlerde konfigürasyon 3 için ilk konumdan ayrılırken maksimum çekici kuvvet -25 N ve ilk konumuna gelirken maksimum çekici kuvvet -35 N olarak hesaplanmıştır, bu durum DGM ile elde edilen verilerde düşey mesafede  $z = 30$  mm'de -25 N olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4'ün içinde verilen iç grafikte gösterildiği gibi,  $z = 5$  mm'de düşey mesafe için maksimum kuvvetler sırasıyla konfigürasyon 1, 2 ve 3 için 80, 140 ve 206 N olarak elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, düşey kuvvetin büyüklüğü konfigürasyon 3'de en yüksektir. Konfigürasyon 3'deki maksimum kuvvetin konfigürasyon 2'den çok fazla yüksek olmadığı burada görülmektedir. Bunun sebebi araç gövdesinin yan taraflarına yerleştirilen ilave iki (sağda ve solda) YSS'nin kılavuz kuvvetine katkıda buldukları kadar düşey kuvvete de katkıda bulunmamasıdır. Diğer bir deyişle, daha az YSS kullanılarak düşeyde daha fazla kuvvet elde etmek için konfigürasyon 2 daha uygundur. Öte yandan hem düşey hem de kılavuz kuvveti elde etmek istiyorsak konfigürasyon 3 diğer iki konfigürasyona göre tercih edilmelidir.



**Şekil 4.4:** Tüm konfigürasyonlar için  $h = 25$  mm'de DGM kullanılarak SM'ler ve araç gövdesinin tabanı (YSS) arasında düşey mesafeye bağlı olarak elde edilen düşey kuvvetin grafiği (İç grafik: tüm konfigürasyonlar için deneysel sonuçlar).

Şekil 4.5'te SAS durumunda  $h = 75$  mm'de DGM ile tahmin edilen tüm konfigürasyonlar için düşey mesafeye karşılık gelen düşey kuvveti göstermektedir. İç grafik, kuvvetlerin deneysel olarak ölçülen değerlerini göstermektedir. Sıfır alan soğutma durumunda, meydana gelen itici kuvvet mknatis-YSS arasındaki mesafe

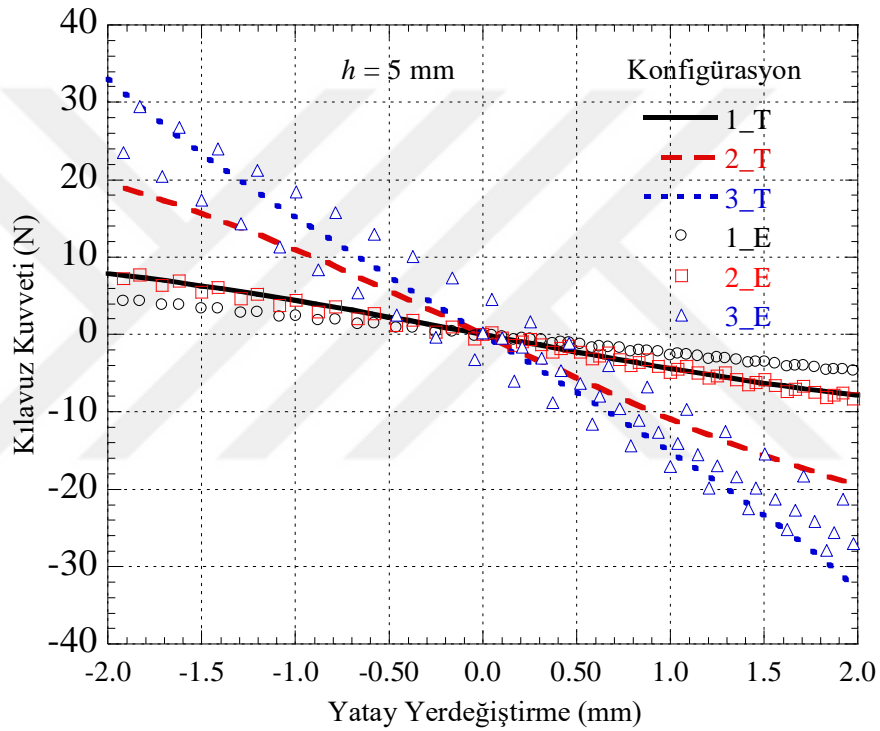
azaldıkça hem deneysel hem de teorik verilerden de anlaşılacağı gibi artma eğilimindedir. Diğer konfigürasyonlardan farklı olarak, konfigürasyon 3'deki düşey kuvvet, araç gövdesinde bulunan mıknatıslardan uzaklaşsa bile yüksek değerleri koruma eğilimindedir. Deneysel verilerden (iç grafikte) de görülebileceği gibi, itme kuvveti 50 mm'lik düşey mesafeye kadar sürdürülürken, bu eğilim teorik tahminde 40 mm'ye kadar çıkmaktadır. Alan soğutma koşullarında olduğu gibi, bu durum yine SAS durumunda daha etkili olan araç gövdesinin yanlarındaki ek YSS'lerden kaynaklanmaktadır. Her yönden konfigürasyon 3, SAS prosedüründeki diğer konfigürasyonlara göre bir avantaja sahiptir. Bunun sebebi, SAS prosedüründe konfigürasyon 3 sadece kılavuz kuvvetine değil, aynı zamanda alan soğutma durumunda olmayan düşey kuvvete de önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.



**Şekil 4.5:** DGM ile  $h = 75$ 'de tüm konfigürasyonlar için SM'ler ile YSS arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak düşey kuvvetin hesaplanması (İç grafik: Deneysel sonuçlar).

Yukarıda da anlatıldığı üzere konfigürasyon 3 daha güçlü kılavuz kuvveti içerir. Tüm konfigürasyonların kılavuz kuvvetlerini karşılaştırmak için, alan soğutma koşullarında ölçümler yapılmıştır. Bekleneceği üzere konfigürasyon 3 her iki soğutma prosedüründe de kılavuz kuvvet elde etmeye uygundur. Fakat konfigürasyon 1 ve 2 yalnızca alan soğutma durumu için kılavuz kuvvet sağlamaktadır. Şekil 4.6'da alan soğutmada yatay konumda sağa ve sola doğru yer değiştirmeye karşılık gelen kılavuz

kuvveti göstermektedir. Kılavuz kuvvet ölçümlerinde DGM tahmini ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum düşey kuvvet durumundan daha iyi olduğu için, DGM'den gelen tahmin ve deneysel sonuçlar aynı grafikte gösterilmiştir. Geri çekme kuvveti, yatay yer değiştirme merkez noktasından (soğutma konumu) uzaklaştıkça artma eğilimindedir. Konfigürasyon 3'de araç gövdesinin yanlarında ilave YSS'ler olduğundan, kılavuz kuvveti diğer konfigürasyonlara göre önemli miktarda maksimize edilmiştir. Örneğin, deneysel verilerden, soğutma konumundan 4 mm'de maksimum kılavuz kuvveti (nihai yatay yer değiştirme) konfigürasyon 1 ve 2 için 20 N'nin oldukça altında iken konfigürasyon 3 için 60 N'den fazladır.

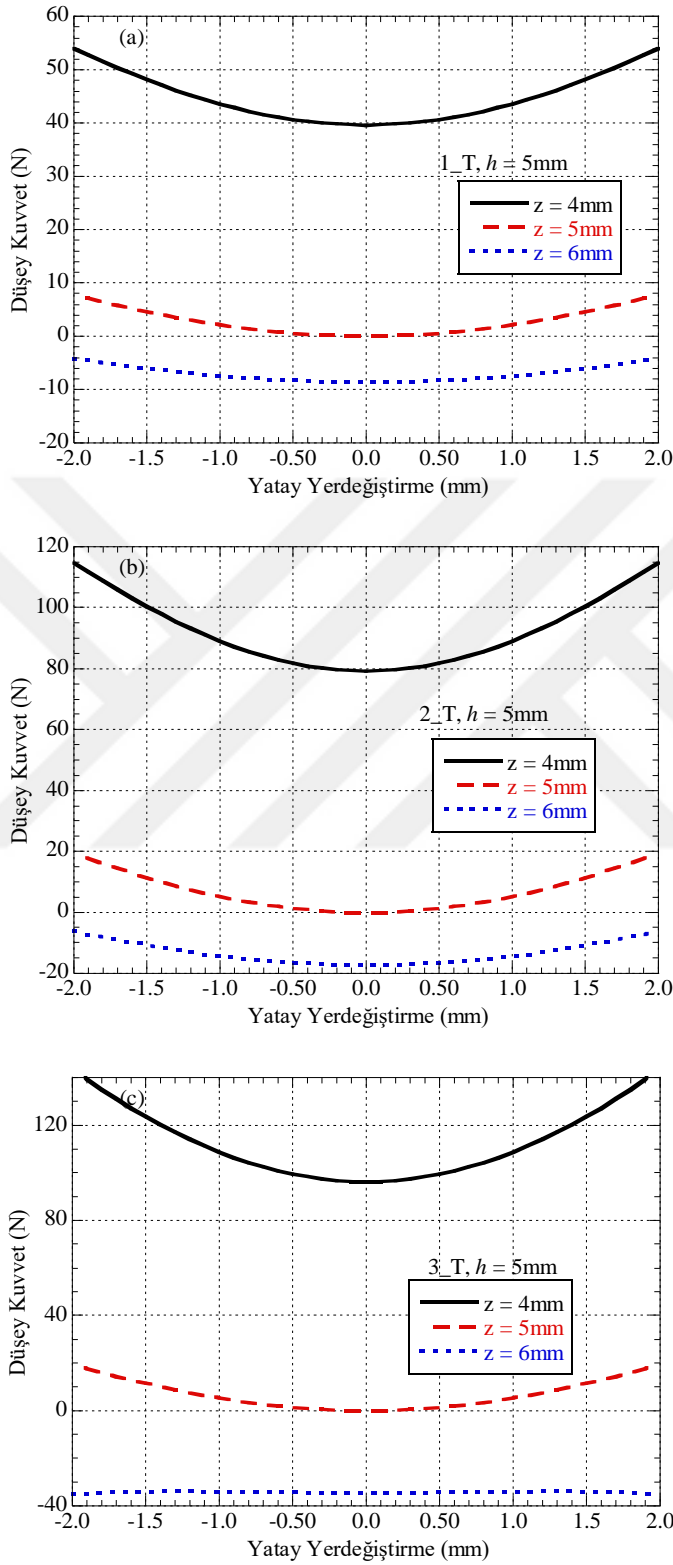


**Şekil 4.6:**  $h = 5$  mm'de tüm konfigürasyonlar için yatay yer değiştirmeye karşı kılavuz kuvvetinin DGM'de analizi ve deneysel sonuçları.

Deneysel verilerden ve DGM analizlerinden anlaşılacağı üzere, YSS'ler ile mıknatıslar arasındaki kuvvetler, bu bileşenlerinin sayısı arttığında artma eğilimindedir. Bununla birlikte, bu çalışmanın ana amacı, deneysel doğrulama ile bu kuvvetlerin belirli koşullar açısından nasıl artırıldığını göstermektir.

Örneğin Şekil 4.3'te gösterildiği gibi,  $h = 5$  mm'lik alan soğutma prosedürü incelendiğinde, konfigürasyon 1'den 3'e kadar düşey kuvvet kendisini ikiye katlayarak artar. Öte yandan, Şekil 4.6'da verilen kılavuz kuvveti durumunda, kuvvet konfigürasyon 1'den 2'ye iki kat, konfigürasyon 1'den 3'e dört katına çıkar.

Bu durum, konfigürasyon 3'ün kılavuz kuvveti kadar düşey kuvvet durumunda da önemli olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.7:** (a) Konfigürasyon 1, (b) Konfigürasyon 2 ve (c) Konfigürasyon 3 için  $h = 5\text{ mm}$ 'de  $z = 4, 5$  ve  $6\text{ mm}$  konumlarında düşey kuvvetlere karşı yatay yer değiştirmenin DGM analizi.

Süperiletken manyetik kaldırma sistemini donmuş görüntü modeli ile daha detaylı incelemek için, yatay yer değiştirmeye karşı düşey kuvvetler hesaplanmıştır. Hesaplamalar, belirli soğutma yüksekliğinde çeşitli düşey mesafelere göre gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, konfigürasyon 1, 2 ve 3 için 5 mm'de alanlı soğutma yüksekliği için düşey kuvvet değeri 4, 5 ve 6 mm ölçüm yüksekliklerinde (z) sırasıyla hesaplanmıştır.

Şekil 4.7'nin sonuçlarına göre konfigürasyon 1'de  $z=4$  mm ve yatay yönde 2 ve -2 konumlarında yani mıknatıs ve süperiletkenin birbirine yaklaştığı durumda yataya bağlı olarak düşeyde meydana gelen kuvvet değeri 52 N'dur.  $z=5$  mm'de 8 N ve  $z=6$  N'da sıfırın altındadır.

Konfigürasyon 2 için bu değerler  $z=4$  mm'de 117 N  $z=5$ 'de 20 N ve  $z=6$  da sıfırın altında değer almaktadır.

Son olarak konfigürasyon 3 e baktığımızda ise bu değerlerin diğer konfigürasyonlara göre yüksek olduğu görülmekte olup bu değerler  $z=4$  mm'de 130 N  $z=5$ 'de 22 N ve  $z=6$  mm'de sıfırın altında değerlere sahiptir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.6'da gösterilen düşey ve kılavuz kuvvetler durumunda olduğu gibi tüm konfigürasyonları karşılaştırdığımızda, araç gövdesi yukarı ve aşağı doğru yer değiştirdiğinde yatay hareket sırasında konfigürasyon 3'de düşey kuvvet yine çok daha yüksektir.

Bu sonuçlar, araç gövdesinin yatay hareketi sırasında düşey yön boyunca daha yüksek geri getirici (restoring force) kuvvetine sahip olduğunu gösterir. Böylece sistemde ani sapmalar meydana geldiğinde sistemi toparlayabilmek ve eski denge konumuna getirmek için konfigürasyon 3 diğer konfigürasyonlara göre oldukça verimlidir.

Bu yapılan hesaplamalar ile donmuş görüntü modeli analizi ile sistemi tasarlanmadan önce sistemin hangi konfigürasyonda nasıl tepki vereceği, hangi değerlerde yaklaşık olarak dengeye ulaşılacağı anlaşılabilir. Böylece deney düzeneği tasarlamadan önce hangi adımlara dikkat edileceği göz önüne alınarak işlem yükü ve zaman kaybından tasarruf elde edilebilir.



## 5. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, belirli bir süperiletken maglev sisteminde, süperiletken ve manyetik bileşenlerin değişik konfigürasyonlarda birlikte kullanımını incelenmiştir. Bu amaçla YSS ve mıknatıs bileşenleri kullanılarak araç sisteminin hareket etmesini ve yerden yükselmesini sağlayan ray ve araç gövdesinden oluşan bir maglev sistemi inşa edilmiştir. Maglev sistemindeki kuvvetler, manyetik dipol yaklaşımına dayalı olarak donmuş görüntü modeli ile analiz edilmiş ve deneysel olarak ölçülen verilerle modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Maglev sistemi için bu çalışmada üç değişik konfigürasyon ele alınmıştır: bir mıknatıs ve bir YSS (konfigürasyon 1), Halbach dizilimli üç mıknatıs ve bir YSS (konfigürasyon 2) ve Halbach dizilimli üç mıknatıs ve üç YSS (konfigürasyon 3).

Bu çalışmanın sonuçlarına göre Maglev sistemlerinde, daha fazla mıknatıs ve YSS kullanıldığı zaman kılavuz ve kaldırma kuvvetinde belirli bir miktarda kazanç elde edilebileceği görülmüştür. Konfigürasyon 3 tarafından sağlanan daha güçlü kaldırma ve kılavuz kuvvetleri, gerçek maglev uygulamaları için bu konfigürasyonun potansiyel avantaj sağlayacağını göstermiştir. Kılavuz kuvvetleri konfigürasyon 1 ve 2’de sadece alan soğutma işleminde etkili olmasına rağmen bu durum konfigürasyon 3’te daha farklı olmuştur. Alanlı soğutma (AS) işleminden farklı olarak konfigürasyon 3’de sıfır alan soğutma işleminde kılavuz kuvveti daha yüksek olduğu gibi, aynı zamanda düşey kuvvete de önemli ölçüde katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında, daha fazla mıknatıs ve YSS bileşeninin kullanılması, daha pasif (enerji gerektirmeyen) kaldırma sistemi sağladığı tespit edilmiştir. Genel analizimizde, donmuş görüntü modelinin ve deneysel sonuçların niteliksel uyum içinde olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca donmuş görüntü modeli analizinin sonucu, deneysel olarak ölçülmeyen/ölçülemeyen kuvvetler hakkında da fikir verebilmektedir. Bu tezden elde edilen sonuçlar vasıtasıyla ileriye dönük yapılacak olan çalışmalarda donmuş görüntü modeli kullanılarak daha gerçekçi analiz yapılması öngörülmektedir.



## KAYNAKLAR

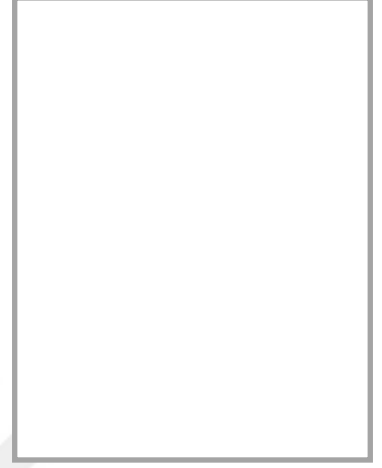
- [1] **Onnes, H.K.** (1911). The Disappearance of The Resistance of Mercury, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 15, 119 – 120.
- [2] **Bednorz, J. G. ve Müller, K. A.** (1986). Possible High Tc Superconductivity in Ba-La-Cu-O System, *Zeitschrift Fur Physik B-Condensed Matter.*, 64, 189-193, doi: 10.1007/BF01303701.
- [3] **Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang Z. J., Wang, Y. Q. ve Chu C. W.** (1987). Superconductivity at 93K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure, *Physical Review Letters*, 60, 1174-1177, doi: 10.1103/PhysRevLett.58.908.
- [4] **Poole, C.P. Jr., Farach, A.F., Creswick, R.J.** (1995). *Superconductivity*, Academic Press, New York.
- [5] **Lee P.J.** (2001). *Engineering Superconductivity*. Wiley-IEEE Press, 672, USA.
- [6] **Wang, Y.** (2013). *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*, Wiley, 400, China.
- [7] **Hull, J.R., ve Cansız A.** (1999). Vertical and lateral forces between a permanent magnet and a high-temperature superconductor, *Journal of Applied Physics*, 86, 11, 6396-6404, doi: 10.1063/1.371703.
- [8] **Jing, H., Wang, J., Wang, S., Wang, L., Liu, L., Zheng, J., Deng, Z., Ma, G., Zhang, Y., ve Li, J.** (2007). A two-pole Halbach permanent magnet guideway for high temperature superconducting Maglev vehicle, *Physica C*, 463, 426-430, doi: 10.1016/j.physc.2007.05.030.
- [9] **Nuria, D.V., Alvaro S., Carles N., ve Du-Xing C.** (2011). Magnet Guideways for Superconducting Mglevs: Comparison Between Hlbach-Type and Conventional Arrangements of Permanent Magnets, *J Low Temp Phys*, 162, 62-71, doi: 10.1007/s10909-010-0225-0.
- [10] **Lei, W., Qian, N., Zheng J., Huang, H., Zhang, Y., ve Deng, Z.** (2017). Magnetic superelevation desing of Halbach permanent magnet guideway for high-temperature superconducting maglev, *Physica C: Superconductivity and its applications*, 538, 1-5, doi: 10.1016/j.physc.2017.04.005.
- [11] **Öztürk, K., Güner S.B., Abdioğlu, M., Demirci, M., Çelik, S., ve Cansız, A.** (2019). An analysis on the relation between the seed distance and vertical levitation force for the multi-seeded YBCO using the modified advanced frozen image (MAFI) and experimental methods, *Journal of Alloys and Compounds*, 805, 1208-1216, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.07.205.

- [12] **Cansiz A, Yildizer I, McGuinness DT.** (2019). Rotor optimization in superconducting magnetic bearing by using frozen image model and Amperian current approximation, *Cryogenics*, 98,60-66, doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.01.002.
- [13] **Öztürk, K., Abdioğlu, M., ve Karahmet, Z.** (2020). Magnetic force and stiffness performances of Maglev system based on multi-surface arrangements with three seeded bulk YBCO superconductors, *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, 578, 1353739, doi: 10.1016/j.physc.2020.1353739.
- [14] **Bardeen, J., Cooper, L. N., ve Schrieffer, J. R.** (1957). Theory of Superconductivity, *Physical Review*, 108, 5, 1175-1204, doi: 10.1103/PhysRev.108.1175.
- [15] **Abrikosov, A.** (1957). On the Magnetic Properties of Superconductors of The Second Group, *Soviet Physics JTEP*, 5, 6, 1174-1182.
- [16] **Meissner, W. ve Ochsenfeld, R.** (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit, *Naturewissenschaften*, 21, 787-788, doi: 10.1007/BF01504252.
- [17] **F. ve H. London.** (1935). 'The Electromagnetic Equation of the Supraconductor', *Proc. Roy. Soc. (London) A149*, 71, doi: 10.1098/rspa.1935.0048.
- [18] **Ginzburg V. L. ve Landau L. D.** (1950). "On the Theory of the Superconductivity", *Zh. Exsperim. i Thor. Fiz.* 20, 1064.
- [19] **Campbell A. M. ve Evetts J. E.** (1972). "Flux Vortices and Transport Currents in Type II Superconductors", *Adv. Phys.* 21, 199, doi: 10.1080/00018737200101288.
- [20] **Bean, C. P.** (1962). Magnetization of Hard Superconductors, *Phy. Rev. Lett.*, 8, 250, doi: 10.1103/PhysRevLett.8.250.
- [21] **Bean, C. P.** (1964). Magnetization of High-Field Superconductors, *Review of Modern Physics*, 36, 31-38, doi: 10.1103/RevModPhys.36.31.
- [22] **Wilson M. N.** (1983). Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford
- [23] **Kustom, R.L., Skiles, J.J., Wang, J., Klontz, K., Ise, T., Ko, K. ve Vong, F.** (1991). Research on power conditioning systems for superconductive magnetic energy-storage (SMES), *IEEE Transactions on Magnetics*, 27, 2, 2320-2323, doi: 10.1109/20.13682.
- [24] **Tixador, P., Deleglise, M., Badel, A., Berger, K., ve Belling B.** (2008). First tests of a 8 kJ HTS SMIES, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18, 2, 774-778.
- [25] **Nielsen, K.E. ve Molinas, M.** (2010). Superconducting Magnetic Energy Storage(SMES) in Power Systems with Renewable Energy Sources, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2487-2492, doi: 10.1109/ISIE.2010.5637892.
- [26] **Ali, MH., Wu, B., ve Dougal, R.A.** (2010). An overview on SMES application in power and energy systems, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1, 1, 38-47, doi: 10.1109/TSE.2010.2044901.

- [27] **Guderjahn, C.A., Wipf, S.L., Fink, H.J., Boom, R.W., Mackenzie, K.E., Williams, D., ve Downey, T.** (1969). Magnetic suspension and guidance for high speed rockets by superconducting magnets, *Journal of Applied Physics*, 40, 5, 8 pp, doi: 10.1063/1.1657938.
- [28] **Atherton, D.L.** (1980). Maglev using permanent magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, 16, 1, 3 pp, doi: 10.1109/TMAG.1980.1060564.
- [29] **Nagaya, K., Suzuki, T., Takahashi, N., ve Kobayashi, H.** (2001). Permanent magnet pulse motor with high-temperature superconducting Levitation, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11, 4, 4109-4115, doi: 10.1109/77.979848.
- [30] **Ma, K.B., Postrekhin, Y.V. ve Chu, W.K.** (2003). Superconductor and magnet Levitation devices, *Review of Scientific Instruments*, 74, 12, 4989-5017, doi: 10.1063/1.1622973.
- [31] **Branco, P.J.C. ve Dente, J.A.** (2012). Design and Experiment of a New Maglev design using zero-field-cooled YBCO Superconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59, 11, 4120-4127, doi: 10.1109/TIE.2011.2174541.
- [32] **Cansız, A.** (2003). Correlation between free oscillation frequency and stiffness in high temperature superconducting bearings, *Physica C*, 390, 356-362, doi: 10.1016/S0921-4534(03)00785-8.
- [33] **Cansız, A.** (2009). Vertical, radial and drag force analysis of superconducting magnetic bearings, *Superconductor Science & Technology*, 22, 7, 8 pp, doi: 10.1088/0953-2048/22/7/075003.
- [34] **Coombs, T.A., Cansız, A., ve Campbell, A.M.** (2002). A superconducting thrust-bearing system for an energy storage flywheel, *Superconductor Science and Technology*, 15, 5, 831-835, doi: 10.1088/0953-2048/15/5/338.
- [35] **Cansız, A., ve McGuinness, D.T.** (2018). Optimization of the Force and Stiffness in a superconducting magnetic bearing based on particular permanent-magnet superconductor configuration, *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 28, 2, 5201208, doi: 10.1109/TASC.2017.2781178.
- [36] **Moon, F.C.** (2004). Superconducting Levitation, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Winheim.
- [37] **Murakami, M., Fujimoto, H., Gotoh, S., ve Yamaguchi, K.** (1991). Flux pinning due to non superconducting particles in melt processed YBCO superconductors, *3 rd International Conferance o Materials and Mechanisms of Superconductivity: High Temperature Superconductors*, 185, 321-326.
- [38] **Cansız, A., Hull, J.R., ve Gündoğdu, O.** (2005). Translational and rotational dynamic analysis of a superconducting Levitation system, *Superconductor Science & Technology*, 18, 7, 990-996, doi: 10.1088/0953-2048/18/7/011.
- [39] **Brandt, E.H.** (1988). Magnetic field density of perfect and imperfect flux line lattices in type II superconductors. I. Application of periodic solutions, *Journal of Low temperature physics*, 73, 5-6, 355-390, doi: 10.1007/BF00683568.

- [40] **Moon, F.C.** (1990). Magnetic forces in high-Tc superconducting bearings, *International Journal of Applied Electronic Material* 1, 29-35.
- [41] **Navau, C., ve Sanchez, A.** (1998). Magnetic Levitation of superconductors in the critical state, *Physical Review B*, 58, 2, 963-970, doi: 10.1103/PhysRevB.58.963.
- [42] **Navau, C., Del-Valle, N., ve Sanchez, A.** (2013). Macroscopic modeling of magnetization and Levitation of hard type-II superconductors: The critical state model, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23, 1, 8201023, doi: 10.1109/TASC.2012.2232916.
- [43] **Sigura, T., Aoyagi, T., Ura, H., ve Yoshizawa, M.** (2003). Parametrically excited horizontal ve and Rolling motion of a levitated body above a high-T-c superconductor, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13, 2, 2247-2250, 2, doi: 10.1109/TASC.2003.813057.
- [44] **Zhang, X.Y., Zhou, Y.H. ve Zhou, J.** (2008). Modelling of symmetrical Levitation force under different field cooling processes, *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, 468, 5, 401-404, doi: 10.1016/j.physc.2007.12.008.
- [45] **Moon, F.C.** (1984). Fractal boundary for chaos in a 2-state mechanical oscillator, *Physical review letters*, 53, 10, 962-964, doi: 10.1103/PhysRevLett.53.962.
- [46] **Yıldız, İ., Cansız, A., ve Öztürk, Kemal.** (2016). Optimization of Levitation and guidance forces in a superconducting maglev system, *Cryogenics*, 78, 57-65, doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.06.007.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Ahmet Furkan REİSOGLU

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2013, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER :

- 2019-2021 Tübitak 1001 “Süperiletken Maglev Araçlarının Dinamik ve Statik Kuvvet Parametrelerinin Çok Yüzeyle(Multisurface) HTS-PGM Etkileşimi Kullanılarak İyileştirilmesi” projesinde bursiyer olarak görev aldı.

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER :

- **Cansız, A. Reisoğlu, A.F. Öztürk, K. Abdioglu, M.** (2021). Frozen image analysis of a superconducting magnetic levitation system consisting of multi-surface superconductor and Halbach array permanent magnet configuration, *Cryogenics*, 117, 103328.