

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YBCO BAZLI MAGLEV SİSTEMLERİ MANYETİK KUVVET SABİTİNİN
FARKLI ALAN ŞARTLARINDA İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erçin ŞAHİN

ARALIK 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YBCO BAZLI MAGLEV SİSTEMLERİ MANYETİK KUVVET SABİTİNİN
FARKLI ALAN ŞARTLARINDA İNCELENMESİ

Erçin ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“YÜKSEK LİSANS (FİZİK)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.12.2014
Tezin Savunma Tarihi : 26.12.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalında

Erçin ŞAHİN tarafından hazırlanan

**YBCO BAZLI MAGLEV SİSTEMLERİ MANYETİK KUVVET SABİTİNİN
FARKLI ALAN ŞARTLARINDA İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 / 12 / 2014 gün ve 1580 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Alev AYDINER

Üye : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada farklı boyutlardaki kalıcı mıknatısların, farklı mıknatıslanma yönelimli dizilimleri ile oluşturulan farklı manyetik kutup sayısına sahip PMG'ler ile HTS YBCO süperiletkenleri arasındaki manyetik kaldırma performansı incelendi. Böylece yapılan bu çalışma ile geliştirilmekte olan HTS/PMG temelli araç tasarımlarının manyetik kararlılığı arttırılmaya çalışıldı.

Tez kapsamındaki çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirildi. TÜBİTAK tarafından desteklenen 1001 kodlu "112T090" nolu proje kapsamında sağlanan imkanlardan dolayı TÜBİTAK'a ve Karadeniz Teknik Üniversitesi tarafından desteklenen BAP "11060" nolu proje kapsamında sağlanan imkanlardan dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmanın gerçekleşmesinde değerli görüş ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deney sistemlerini programlamada kısmi yardımlarından dolayı Arş. Gör. Mehmet EKİCİ'ye, çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Murat ABDİOĞLU ve Arş. Gör. Mehmet KABAER'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu zamana kadar maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Erçin ŞAHİN
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "YBCO BAZLI MAGLEV SİSTEMLERİ MANYETİK KUVVET SABİTİNİN FARKLI ALAN ŞARTLARINDA İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışman hocam Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK 'ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/12/2014

Erçin ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri	4
1.2.1. Sıfır Direnç	4
1.2.2. Meissner Olayı.....	5
1.2.3. Kritik Akım	6
1.3. I ve II. Tip Süperiletkenler	6
1.4. Süperiletkenlerin Soğutulması.....	9
1.4.1. Manyetik Alan Altında Soğutma (FC)	9
1.4.2. Manyetik Alansız Soğutma (ZFC)	10
1.5. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma ve Kararlılık	11
1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma	11
1.5.2. Süperiletkenlerde Manyetik Kararlılık	13
1.6. Manyetik Yatak Sistemleri	18
1.6.1. Aktif Manyetik Yataklar	18
1.6.2. Pasif Manyetik Yataklar	20
1.6.3. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deney Sisteminin Oluşturulması	24
2.1.1. Manyetik Kuvvet Ölçüm Düzenegi	24
2.1.2. Deneyde Kullanılan YBCO Süperiletkenleri ve NdFeB Mıknatıslar.....	26
2.1.3. Maglev Manyetik Kuvvet Ölçüm Sisteminde Kullanılan HTS/PMG Konfigürasyonları	27

2.2.	PMG Manyetik Alan Modellemesi	30
2.3.	DüŖey Manyetik Kuvvet Ölçümlerinin Alınması	31
2.4.	Yatay Manyetik Kuvvet Ölçümlerinin Alınması	32
2.5.	DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümlerinin Alınması.....	32
2.6.	Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümlerinin Alınması	33
3.	BULGULAR VE TARTIŖMA	35
3.1.	PMG Manyetik Alan Modelleme Sonuçları.....	35
3.2.	DüŖey Manyetik Kuvvet Ölçümleri.....	37
3.2.1.	Farklı Soğutma Yüksekliklerinde DüŖey Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları	37
3.2.2.	FC Alanlı Soğutma Rejiminde DüŖey Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları	41
3.3.	Farklı Soğutma Yüksekliklerinde Yatay Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları	45
3.4.	DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümleri	48
3.4.1.	Tek Numuneli DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	48
3.4.2.	İki Numuneli DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	51
3.4.3.	Üç Numuneli ve Hibrit DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	53
3.5.	Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümleri	55
3.5.1.	Tek Numuneli Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	55
3.5.2.	İki Numuneli Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	58
3.5.3.	Üç Numuneli ve Hibrit Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları	61
4.	SONUÇLAR	63
5.	ÖNERİLER	64
6.	KAYNAKLAR	65

ÖZGEÇMİŖ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YBCO BAZLI MAGLEV SİSTEMLERİ MANYETİK KUVVET SABİTİNİN FARKLI
ALAN ŞARTLARINDA İNCELENMESİ

Erçin ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK
2014, 68 Sayfa

Bu çalışmada, farklı boyutlardaki kalıcı mıknatısların (PM), farklı manyetik yönelim dizilimleri ile oluşturulan manyetik kılavuzlama yolları (PMG) ile üstten tohumlama yöntemiyle üretilmiş tek tohumlu silindir YBCO külçe yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) arasındaki manyetik kaldırma performansı incelendi ve böylece geliştirilmekte olan HTS/PMG bazlı Maglev araçlarının manyetik kararlılığının artırılmasına katkı sağlamaya çalışıldı. Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma performansı ve manyetik sertlik değerleri, oluşturulan Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemi ile ölçüldü. Farklı HTS/PMG konfigürasyonları için düşey, yatay manyetik kuvvet ve manyetik kuvvet sabiti ölçümleri alanlı ve alansız soğutma şartlarında ve farklı yüksekliklerde alındı. Laboratuvar çalışmaları öncesinde birkaç PMG dizilimi için COMSOL Multiphysics 3.5a paket program kullanılarak manyetik alan modellemesi yapıldı. Bu sayede deney geometrisinin daha verimli olması sağlandı. Elde edilen veriler ışığında PMG kutup sayısı arttıkça YBCO bazlı Maglev sisteminin manyetik kaldırma performansı arttığı görüldü. Sunulan hibrit model, düşey yönde manyetik kuvvet sabitini iyileştirmesine rağmen yatay manyetik kuvvet sabiti değerini azaltıcı etki göstermiştir. Ayrıca, sistemin düşey ve yatay kararlılığının soğutma yüksekliği (CH) ve çalışma yüksekliği (WH) ile yakından ilişkili olduğu görüldü. Bu verilerin süperiletken Maglev tasarımında yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Maglev, YBCO, Manyetik kılavuzlama yolu, Manyetik kuvvet sabiti

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON MAGNETIC STIFFNESS OF YBCO BASED MAGLEV
SYSTEMS FOR DIFFERENT FIELD CONDITIONS

Erçin ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Kemal ÖZTÜRK
2014, 68 Pages

In this study, magnetic levitation performance was investigated between the top-seeded melt-growth cylindrical bulk high temperature superconductor (HTS) YBCO's and different permanent magnetic guideway (PMG). The goal of this study is to enhance the magnetic stability of superconducting Maglev systems. Firstly, the magnetic field profiles of different PMGs were modelled via COMSOL Multiphysics 3.5a package software and these results provided efficient experimental geometry. After modelling, magnetic levitation performance was measured between HTS YBCO's and several PMG with different pole arrays for different cooling conditions via the Magnetic Force Measurement System. Also, both levitation and guidance stiffness values were compared for several HTS/PMG arrangements and different cooling heights (CHs). It was seen that the more numbers of magnetic poles is effective in increasing the stability of Maglev systems. The presented hybrid model, although it enhances the vertical magnetic stiffness, it shows reducing effect on the lateral magnetic stiffness. Also, these results showed that the levitation and guidance stiffness is closely related to the CHs and working heights (WHs). These data may be helpful to the design of the superconducting Maglev system.

Key Words: Maglev, YBCO, Permanent magnet guideway, Magnetic stiffness

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Süperiletkenlik geçiş sıcaklığı kronolojisi (Malaeb, 2009).....	3
Şekil 1.2.	Meissner olayı: uygulanan zayıf bir manyetik alanın süperiletkenden dışarılanması (Mourachkine, A., 2004).	5
Şekil 1.3.	Kritik yüzey faz diyagramı.....	6
Şekil 1.4.	I. tip ve II. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrileri (Patel, 2013).....	7
Şekil 1.5.	Uygulanan alan arttıkça II. tip süperiletkenlerin akı sızma davranışları (Patel, 2013).	7
Şekil 1.6.	II. tip süperiletkene uygulanan alanın sızması (Patel, 2013).....	8
Şekil 1.7.	Bir yüksek sıcaklık süperiletkeninin manyetik alan altında soğutulması durumunu gösteren H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).	10
Şekil 1.8.	Bir yüksek sıcaklık süperiletken malzemenin manyetik alansız soğutma durumunu gösteren H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).	11
Şekil 1.9.	Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).	19
Şekil 1.10.	YBCO-mıknatıs konfigürasyonlu radyal manyetik yatak (Moon, 2004).....	21
Şekil 1.11.	Eksenel ve radyal pasif manyetik yatak sistemleri (Moon, 2004).	21
Şekil 1.12.	Temel manyetik taşıma sistemleri; a) Elektromanyetik kaldırma veya çekici yöntem; b) Elektrodinamik kaldırma veya itici yöntem (Moon, 2004).	23
Şekil 2.1.	Manyetik kuvvet ölçüm düzeneğinin fotoğrafı	25
Şekil 2.2.	Farklı boyutlarda süperiletken ve mıknatıs bulundurabilen süperiletken numune haznesi, a) dışardan görünümü; b) içerden görünümü.....	26
Şekil 2.3.	$\phi = 45mm$ çap ve $h = 15mm$ yüksekliğe sahip silindir şeklinde külçe YBCO süperiletkenleri	27
Şekil 2.4.	Maglev sistemindeki manyetik kılavuzlama raylarında kullanılan farklı boyutlardaki NdFeB mıknatıs fotoğrafları	27
Şekil 2.5.	Deneyde kullanılan farklı HTS/PMG şemaları (boyutlar mm birimindedir)..	29
Şekil 2.6.	a) Boş PMG kabı ve b) farklı boyutlara ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG	30
Şekil 2.7.	Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin alınması	33
Şekil 2.8.	Yatay manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin alınması	34
Şekil 3.1.	a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b dizilimlerinin manyetik alan ve manyetik akı dağılımı (oklar, manyetik akı yoğunluğunu göstermektedir) ...	36

Şekil 3.2.	PMG1, PMG1a ve PMG1b dizilimlerinin yüzeyinden a) 5 mm ve b) 20 mm yukarıda x konumuna bağlı düşey B_z ve yatay B_x manyetik akı yoğunluğu değişimi	37
Şekil 3.3.	Farklı soğutma yüksekliklerinde a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b konfigürasyonları için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı	39
Şekil 3.4.	PMG1, PMG1a ve PMG1b'nin a) ZFC ve b) CH=20 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 3.5.	FC rejiminde soğutulan PMG1 konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) CH=5 mm, b) CH=10 mm	42
Şekil 3.6.	FC rejiminde soğutulan PMG1a konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) CH=5 mm, b) CH=10 mm	43
Şekil 3.7.	FC rejiminde soğutulan PMG1b konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) CH=5 mm, b) CH=10 mm	44
Şekil 3.8.	CH=5 mm için, PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonlarının FC durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	45
Şekil 3.9.	Farklı soğutma yüksekliklerinde a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b için yatay manyetik kuvvetin yatay yerdeğiştirmeye bağlılığı	47
Şekil 3.10.	PMG1, PMG1a ve PMG1b'nin a) CH=5 mm ve b) CH=15 mm durumundaki kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	48
Şekil 3.11.	Farklı konfigürasyonlar için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı, a) ZFC, b) CH=20 mm, c) CH=5 mm	50
Şekil 3.12.	PMG3 ve PMG4 konfigürasyonları için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı, a) ZFC, b) CH=20 mm, c) CH=5 mm	52
Şekil 3.13.	PMG5, PMG6 ve PMG7 konfigürasyonları için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm	54
Şekil 3.14.	Farklı soğutma yükseklikleri için a) PMG6 ve b) PMG7 konfigürasyonları k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı	55
Şekil 3.15.	Farklı konfigürasyonlar için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm	57
Şekil 3.16.	5 mm soğutma yüksekliğinde PMG1 ve PMG2 konfigürasyonlarının a) düşey ve b) yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	58
Şekil 3.17.	PMG3 ve PMG4 konfigürasyonları için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm	60
Şekil 3.18.	PMG5, PMG6 ve PMG7 için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm	62

SEMBOLLER DİZİNİ

B	: Manyetik akı yoğunluğu
dc	: Doğru akım
F	: Manyetik kuvvet
FC	: Alanlı soğutma
H	: Manyetik alan
H _c	: Kritik manyetik alan
H _{c1}	: Alt kritik manyetik alan
H _{c2}	: Üst kritik manyetik alan
HTS	: Yüksek sıcaklık süperiletkeni
J	: Akım yoğunluğu
J _c	: Kritik akım yoğunluğu
k	: Manyetik kuvvet sabiti
m	: Manyetik moment
M	: Manyetizasyon
PM	: Kalıcı mıknatıs
PMG	: Mıknatıs kılavuzlama yolu
T	: Sıcaklık
T _c	: Kritik sıcaklık
ZFC	: Alansız soğutma
μ _o	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
Φ ₀	: Akı kuantumu
χ	: Manyetik alınganlık

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bazı element, alaşım veya bileşiklerin düşük sıcaklıklarda dc elektriksel direnç göstermemesi olayına süperiletkenlik adı verilir. 1908 yılında H. K. Onnes tarafından helyumun sıvılaştırılmasıyla beraber düşük sıcaklıklar fiziği çalışmalarına ilk adım atılmıştır. Süperiletkenlik ilk olarak 1911 yılında Onnes tarafından civanın sıvı helyum kaynama sıcaklığına (4,2 K) kadar soğutulmasıyla gözlemlendi (Onnes, 1911).

Prof. Onnes'un süperiletkenliğin keşfinden sonra bilim insanları, geçiş sıcaklığını oda sıcaklığı civarına nasıl çıkarabileceklerine odaklandılar. Ayrıca, yeni olguları açıklamak ve yeni süperiletkenler keşfetmek için süperiletkenlik teorileri geliştirilmiştir (Li, 2010). 1933 yılında W. Meissner ve R. Oschensfeld, manyetik alan altında soğutulan süperiletken bir örneğin manyetik akıyı dışarıladığını, yani içerisine girmesini önlediğini gözlemlediler. Ayrıca numunenin H_c denilen kritik bir manyetik alandan daha büyük alanlarda, süperiletkenlik özelliklerini kaybettiğini buldular. Bu olay Meissner olayı olarak bilinir (Meissner ve Oschensfeld, 1933). F. ve H. London kardeşler, süperiletkenliğin teorik bir modellemesini ortaya koyarak, bu olayı, süperiletken akımlar tarafından taşınan elektromanyetik serbest enerji minimizasyonunun bir sonucu olarak başarılı bir şekilde gösterdiler (London ve London, 1935).

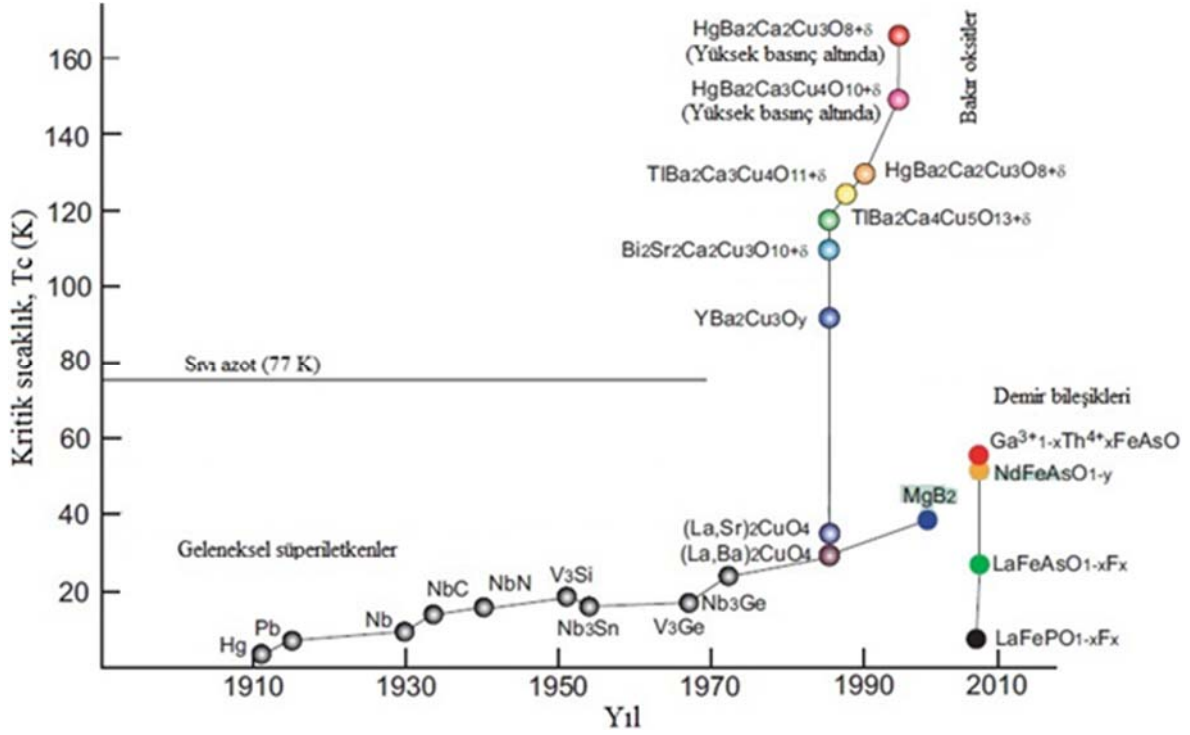
Süperiletkenliği açıklamak için yapılan teorik çalışmalardan bir diğeri de 1950 yılında Ginzburg ve Landau tarafından ortaya konulmuştur. Süperiletkenliğin düzen parametrelerini tanımlayan bu makroskobik teori ile uyuşum uzunluğu tanımlanmıştır (Poole, 2000). Aynı yıllarda, teorik olarak Fröhlich ve deneysel olarak Maxwell tarafından, atomik kütlenin artmasıyla geçiş sıcaklığının düştüğü gösterildi. Bu çalışmalar sonucunda, örgü hareketlerinin süperiletkenlik mekanizmasında önemli bir rol oynadığı anlaşıldı (Fröhlich, 1950; Maxwell, 1950).

1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer, elektron-fonon-elektron etkileşmelerini temel alan, BCS teorisi olarak bilinen mikroskobik bir teori ileri sürdüler (Bardeen vd., 1957). Teoriye göre, örgüdeki bitişik iyonların yakınından geçen bir elektron bu iyonların, her birine momentum kazandıracak bir dizi Coulomb etkileşmesine maruz kalır. Örgünün esnek özelliklerinden dolayı bu artırılmış pozitif yük yoğunluğu bölgesi, örgü içinde

momentum taşıyan bir dalga gibi yayılacaktır. Eğer daha sonra ikinci bir elektron hareket halindeki artmış pozitif yük yoğunluğu bölgesinden geçerse çekici bir Coulomb etkileşmesi görecektir ve dolayısıyla hareket eden bölgenin taşıdığı bütün momentumu soğurabilecektir. Yani ikinci elektron birinci elektron tarafından sağlanan momentumu soğurarak fononla etkileşir. Net etki, iki elektronun birbirleriyle bir miktar momentum değiş tokuşu yapması ve böylece birbirleriyle etkileşmesidir. Bu etkileşme sonucunda birbirleriyle zayıfça bağlı kalan elektronlara Cooper çifti denilmekte ve süperiletkenlerde akan süper akımların Cooper çiftleri tarafından taşındığı düşünülmektedir (Demirdiş, 2008).

Süperiletkenlerin manyetik özellikleri ile ilgili çalışmalar yapan Bean 1962 yılında, süperiletkenleri karakterize eden kritik akım yoğunluğunun, alınganlık ve manyetizasyon eğrilerinden bulunabileceğini gösterdi (Bean, 1962).

1980'li yıllara kadar süperiletkenlikle ilgili önemli çalışmalar yapılmasına ve önemli gelişmeler kaydedilmesine rağmen; elde edilen malzemelerin süperiletken faza geçmeleri için sıvı helyuma ihtiyaç duyuluyordu. 1986 yılında Bednorz ve Müller'in La-Ba-Cu-O bileşiğinde 30 K değerinde bir kritik sıcaklık gözlemleri (Bednorz ve Müller, 1986) ile yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin temelleri atıldı ve daha yüksek sıcaklıklarda da süperiletkenliğin gözlenebilmesi için yapılan çalışmalar hız kazandı. Bednorz ve Müller'in çalışmasından sadece bir yıl sonra Paul Chu ve grubu, Lantanyum yerine itriyum kullanarak YBCO olarak isimlendirilen bakır oksit tabanlı seramikte 92 K geçiş sıcaklığını elde etmeyi başardılar. Bu, süperiletkenlik için sıvı helyuma bağımlılığı ortadan kaldırması açısından son derece önemli bir çalışma oldu. Artık sıvı azot sıcaklığında (77 K) süperiletkenlikle ilgili çalışmalar yapılabilir hale geldi ve süperiletkenlikle ilgili çalışmalar bu sayede büyük bir ivme kazandı. Bu çalışmadan sonra aynı yıllarda $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 110 K, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 125 K ve $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 132 K geçiş sıcaklığına ulaşıldı (Maeda vd., 1988; Chu, 1988; Wu vd., 1987). 2001 yılında ise Jun Akimitsu ve arkadaşları, 1950'den beri biline gelen MgB_2 intermetalik malzemesinin 39 K geçiş sıcaklığı ile süperiletkenliğini gözlediklerini açıkladılar (Nagamatsu vd., 2001). Son olarak Kamihara ve grubu, 26 K geçiş sıcaklığı ile süperiletkenlik gösteren demir tabanlı dörtlü bileşikler ($\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$) buldular (Kamihara vd., 2008). Şekil 1.1, süperiletkenlerin geçiş sıcaklıklarının yıllara göre nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 1.1. Süperiletkenlik geçiş sıcaklığı kronolojisi (Malaeb, 2009).

Manyetik kaldırma sistemlerinin temel ilkesi manyetik alan ve yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) arasındaki etkileşimdir. Bu sistemlerin ana bileşeni süperiletken manyetik yataklardır. Rotor sistemi için dönen, ulaşım sistemi için ise lineer süperiletken manyetik yataklar tasarlanır. Günümüzde büyük şehirlerin en büyük problemi ulaşımıdır. Milyonlarca insan işten-eve, evden-işe giderken gün boyunca birkaç saatlerini yolda harcar. Bu durum metrolardan daha ucuz ulaşım konseptleri üzerine ilgiyi arttırmıştır. Sotelo ve arkadaşları (2010), manyetik alan kaynağı kalıcı mıknatıs yolu (PMG) olan, gerçek ölçekli Maglev (manyetik olarak havalanmış tren) tasarımının inşa maliyetinin, metrolarınının 1/3'ü kadar olduğunu tahmin etmişlerdir. HTS/PMG temelli Maglev sistemlerinin diğer havalanmış araçlardan (elektromıknatıs temelli aktif kontrollü trenler gibi) en önemli avantajı geri beslemeli kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymadan kararlı kaldırma göstermesidir. Böylelikle bu araçlar daha düşük maliyet, daha düşük karmaşıklık ve dolayısı ile yüksek güvenilirliğe sahiptir.

Bu çalışmanın amacı, farklı boyutlardaki kalıcı mıknatısların (PM), farklı mıknatıslanma yönelimli dizimleri ile oluşturulan PMG'ler ile YBCO süperiletkenleri arasındaki manyetik kaldırma performansını incelemek ve geliştirilmekte olan HTS/PMG temelli araç tasarımlarının manyetik kararlılığını arttırmaya katkı sağlamaktır.

1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

1.2.1. Sıfır Direnç

Bütün metaller ve alaşımlar soğutulduklarında elektriksel özdirençleri azalır. Bu düşüşün nedenini anlamak için öncelikle bir iletkenin sahip olduğu direncin nereden kaynaklandığını bilmek gerekir. Bilindiği gibi, bir iletkendeki akım, malzeme içinde serbestçe hareket eden iletkenlik elektronları tarafından sağlanır. Elektronlar dalga yapısına sahip olduklarından, hareket halindeki bir elektrona bir düzlem dalganın eşlik ettiği söylenebilir. Bir düzlem dalganın, saçılmaya uğramadan periyodik bir yapıdan geçme özelliği vardır. Eğer mükemmel bir kristal içinden bir akım geçerse, bu akım herhangi bir dirençle karşılaşmayacaktır. Buna karşılık, kristalin periyodikliğindeki ufak bir hata elektron dalgasının saçılmasına ve dolayısıyla direncin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Mutlak sıfırın üzerinde atomların denge konumlarında titreşim hareketi yapmaları ve kristal yapıda bulunan yabancı atomlar veya kusurlar, bir kristalin periyodikliğini bozan etmenlerdir.

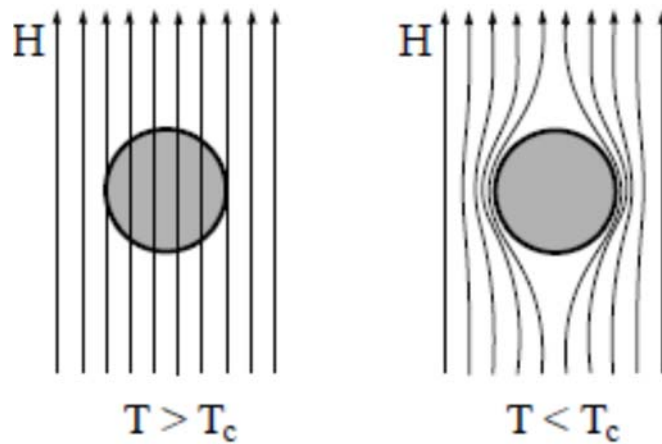
Mükemmel saf bir metalde elektron hareketi sadece termal titreşimler tarafından engellenir ve sıcaklığın sıfıra düşürülmesiyle direnç sıfır olur. Fakat herhangi bir gerçek metal tamamen saf değildir ve bazı safsızlıklar içerir. Böylece elektronlar, örgü atomlarının termal titreşimlerine ek olarak safsızlıklar tarafından da saçılırlar. Bu saçılmalar sıcaklıktan hemen hemen bağımsızdır. Sonuç olarak en düşük sıcaklıkta bile bir artık direnç vardır. Bir metalin safsızlığı ne kadar çok ise artık direnci de o kadar fazla olur. Bununla birlikte sıcaklığın düşürülmesi sırasında süperiletkenlerin gösterdikleri davranış farklıdır. Bu malzemeler soğutulduğunda elektriksel dirençleri bilindiği gibi azalır fakat belirli bir sıcaklıkta ve birkaç Kelvin sıcaklık aralığında elektriksel direnç aniden sıfıra düşer (Rose ve Rhoderick, 1980).

Süperiletken bir numunenin, kritik sıcaklık altında direncinin gerçekten sıfır olup olmadığını sorusu akla gelebilir. Bu problemi çözmek için, bir süperiletken halkadan akım geçirdiğimizi düşünelim. Bu halkada dolanan akım değerinde bir azalmanın olup olmadığını anlamak için akımın meydana getirdiği manyetik alanı ölçebiliriz. Quinn ve Ittner (1962), indüktansı $1,4 \times 10^{-13}$ Henri olan halka süperiletkende benzer bir deneyi gerçekleştirdiler. Deney 7 saat boyunca devam etti ve manyetik alan değeri %2 oranında azaldı. Bu andaki süperiletken direncinin 4×10^{-25} $\Omega \cdot m$ olduğu hesaplandı. Bu değer bakırın oda sıcaklığındaki direncinden yaklaşık 10^{17} defa daha küçüktür. Buradan, numune süperiletken fazda iken, numuneye etkiyen toplam manyetik akı değişmez kalır sonucuna varılabilir.

1.2.2. Meissner Olayı

1933 yılında Meissner ve Oschenfeld, bir metalin süperiletken faza geçtikten sonra ($T < T_c$), iç kısmındaki tüm manyetik akıyı dışarıladığını gözlemlədiler (Meissner ve Oschenfeld, 1933). Şekil 1.2’de görüldüğü üzere, numune normal fazda iken uygulanan manyetik alan süperiletkene tamamen nüfuz eder. Süperiletken kritik sıcaklığı T_c ’nin altına kadar soğutulduğunda, iletken yüzeyine yakın ince bir tabaka haricindeki yerlerde manyetik akı dışarılanacaktır. Manyetik alanın yeterince küçük değerleri için bu dışarılama bütünüyle gerçekleşir ve bu olaya Meissner olayı denir. Bir süperiletken metal, ister alanlı ister alansız soğutulsun, geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda her zaman metal içindeki akıyı dışarı itecek ve dış alanın içerisine girmesini engelleyecektir. Yani bir süperiletkenin manyetizasyonu, uygulanan alanın değerine ve sıcaklığa bağlı iken alanın uygulanma sırasından bağımsızdır. Fakat bir ideal iletkenin manyetizasyonu, alanın soğutmadan önce mi sonra mı uygulandığına bağlıdır. Eğer ideal bir iletken alan altında soğutulursa, sonradan alan kaldırılrsa dahi manyetik akı numune içerisinde durmaya devam eder, dışarılanmaz.

Bir manyetik malzeme için akı yoğunluğu $B = \mu_0(H + M)$ ile verilir. Süperiletken içinde $B = 0$ olduğundan $M = -H$ olur. M süperiletken manyetizasyonunun, alan şiddetine oranı $\chi = \frac{M}{H} = -1$ süperiletken için mükemmel diamanyetik duyunluğu verir.

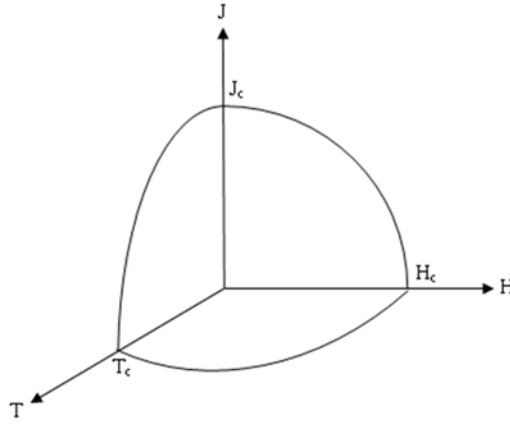


Şekil 1.2. Meissner olayı: uygulanan zayıf bir manyetik alanın süperiletkenden dışarılanması (Mourachkine, A., 2004).

1.2.3. Kritik Akım

Süperiletkenlerin en önemli özelliklerinden biri yüksek akım taşıma kapasiteleridir. Süperiletken malzemenin, süperiletkenliğini kaybetmeden taşıyabileceği maksimum akım miktarına kritik akım denir. Genel olarak, bir süperiletken malzemenin yüzeyinden akan akıma iki katkı olmaktadır. Bu katkılardan biri, süperiletkenden bir dc akım geçirildiğinde yükleri metalin içine ve dışına taşıyan iletim akımı \vec{J}_i , diğeri ise süperiletken bir manyetik alan içine konulduğunda yüzeyinde dolanan perdeleme akımı \vec{J}_p dir. Süperiletkendeki toplam akım yoğunluğu $\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_p$ şeklinde bu iki akım yoğunluğunun toplamı olarak düşünülebilir. Herhangi bir noktadaki toplam akım yoğunluğu \vec{J} , kritik akım yoğunluğu \vec{J}_c değerini aşarsa süperiletkenlik yok olur.

Şekil 1.3, kritik yüzey faz diyagramını göstermektedir. Bu yüzeyin altında bulunan T, H, J değerlerinin her bir kombinasyonu için numune süperiletkendir. Bu değerlerin üstündeki her bir kombinasyon için yani yüzeyin dışında ise numune normal fazdadır. Şekilden görüldüğü gibi, uygulanan manyetik alan ne kadar güçlü ise kritik akım o kadar küçüktür (Rose ve Rhoderick, 1980).

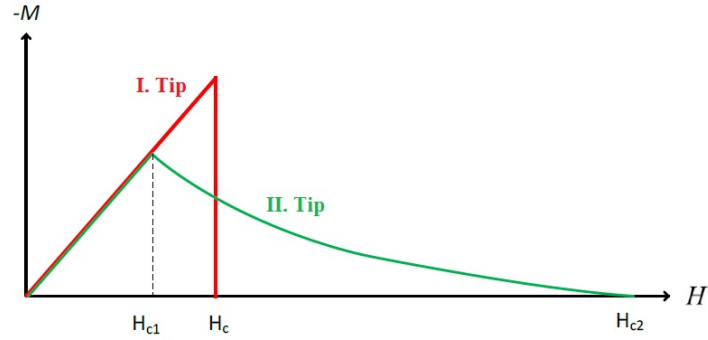


Şekil 1.3. Kritik yüzey faz diyagramı

1.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler

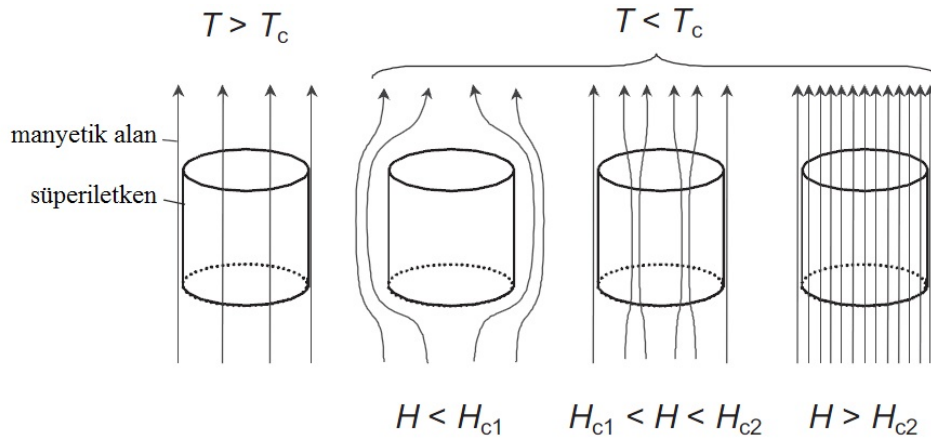
Süperiletkenler, uygulanan manyetik alan arttıkça süperiletken içine manyetik akının sızma davranışına göre iki gruba ayrılırlar. Niyobyum (Nb) dışında süperiletken özellik gösteren tüm metalik elementler I. tip süperiletkenler sınıfında olup, bunların kritik manyetik

alan değerleri (H_c) oldukça düşüktür. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, uygulanan alan H , kritik manyetik alan değerine ulaşana kadar, I. tip süperiletkenler Meissner durumunda olup uygulanan alana eşit büyüklükte ve ters yönde alan oluşturarak manyetik akının içlerine nüfuz etmesine izin vermezler. Uygulanan alan H_c değerine ulaştığında süperiletkenlik özelliklerini kaybederek, normal faza geçerler.



Şekil 1.4. I. tip ve II. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrileri (Patel, 2013).

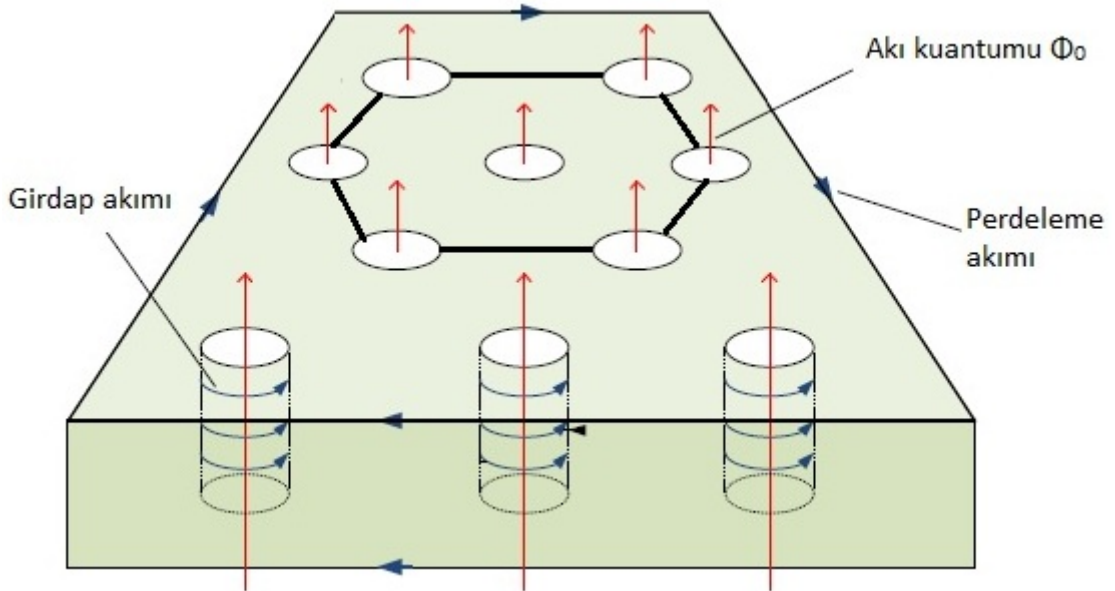
II. tip süperiletkenler ise alt ve üst kritik alan (H_{c1} ve H_{c2}) olmak üzere iki kritik manyetik alana sahiptir. II. tip süperiletkenler H_{c1} değerinin altında Meissner durumunda iken, $H_{c1} < H < H_{c2}$ şartında numune karışık halde olup, manyetik akı numune içine kısmen sızar. Uygulanan alan H_{c2} değerinden daha büyük alan değerlerinde numune normal faza geçer (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Uygulanan alan arttıkça II. tip süperiletkenlerin akı sızma davranışları (Patel, 2013).

Süperiletken malzemenin, minimum serbest enerjili durumu oluşturmak için çok sayıda normal bölgeler oluşturması beklenir. Normal bölgelerin oluşması toplam serbest enerjiyi azaltacak ve daha düşük enerjili duruma getirecektir. Bunun için uygun konfigürasyon, uygulanan manyetik alana paralel uzanan ve süperiletken içinden geçen silindirik normal alan bölgeleridir. Bu silindirlere "normal göbekler" veya "akı merkezi" adı verilir ve düzenli girdap bölgesi oluştururlar (Şekil 1.6). Normal göbekler içinde uygulanan manyetik alanla aynı yönlü manyetik akı mevcuttur. Göbeklerin içindeki akı, diyamanyetik yüzey akımına zıt yönde ve göbeğin etrafında dolanan kalıcı bir akım girdabı (vortex) tarafından oluşturulur. Ayrıca her bir girdap, $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \times 10^{-15}$ Weber büyüklüğünde bir manyetik akı (fluxon) taşır. Süperiletkenlerin bu özelliği, süperiletken manyetik yatak uygulamaları için temel motivasyon kaynağı olmuştur.

Normal bir göbek etrafında dolanan girdap akımı, herhangi bir başka göbek ile çevrelenen girdap akımı tarafından üretilen manyetik alan ile etkileşir. Sonuç olarak iki göbek, yani paralel iki akı çizgisi birbirlerini iterler. Bu karşılıklı etkileşmeden dolayı, girdap halde süperiletken içindeki göbekler rastgele yayılmazlar ve kendilerini Şekil 1.6' da görüldüğü gibi düzenli bir periyodik hegzagonal (altıgen) düzene sokarlar (Rose ve Rhoderick, 1980).



Şekil 1.6. II. tip süperiletkene uygulanan alanın sızması (Patel, 2013).

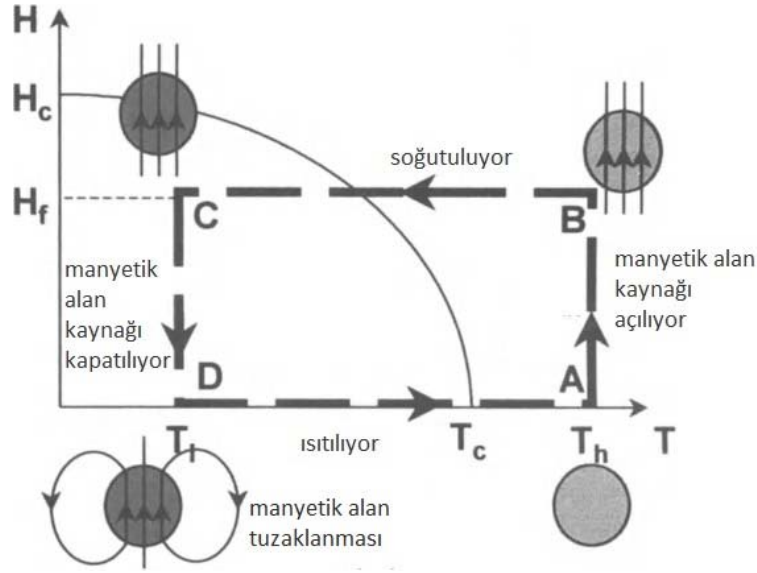
1.4. Süperiletkenlerin Soğutulması

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, H_{c1} değerleri çok küçük olduğundan ($H_{c1} \ll H_c \ll H_{c2}$), pratik uygulamalarda karışık hal durumunda bulunur. Bu nedenle, farklı soğutma şartlarında (manyetik alan altında ya da manyetik alansız) manyetik alana karşı davranışlarını incelemek önem kazanır.

1.4.1. Manyetik Alan Altında Soğutma (FC)

II. tip bir süperiletkenin kritik sıcaklık altına soğutma işlemi, bir dış manyetik alan varlığında yapılırsa süperiletkene manyetik alanlı soğutma rejimi uygulanmış demektir. Şekil 1.7 bu soğutma rejimini detaylı incelemek için, manyetik alan H ve sıcaklık T bağımsız değişkenler olmak üzere, II. tip bir süperiletkenin termodinamik faz diyagramını göstermektedir. H_c-T_c eğrisi, normal ve karışık durum arasındaki faz denge sınırını belirler. Süperiletken A noktasında, T_c kritik sıcaklığın üzerinde ($T=T_h$) ve uygulanan dış manyetik alanın sıfır ($H=0$) olduğu bir pozisyondadır. B noktasında, sıcaklık değişimsiz numune H_f kadar bir dış manyetik alan etkisindedir. C noktası, aynı H_f manyetik alanında süperiletkenin kritik sıcaklığının altına soğutulduğu durumu gösterir ($T_1 < T_c < T_h$). D noktası ise, aynı T_1 sıcaklığında fakat manyetik alanın olmadığı ($H=0$) bir durumu gösterir. Hacimli bir süperiletken, ortamda herhangi bir manyetik alan kaynağı yokken ve T_c kritik sıcaklığının üzerinde yani normal fazda iken (A noktası), manyetik alan altında soğutma rejimine uygun olarak, sırasıyla B, C ve D noktasına kadar taşınacak ve her bir nokta incelenecektir. Başlangıçta A noktasında bulunan süperiletken düzgün bir H_f dış manyetik alan uygulanarak B noktasına taşınır. Bu noktada süperiletken normal durumda olduğundan numune içine manyetik akı çizgileri tamamen nüfuz eder. Daha sonra numune T_1 sıcaklığına kadar soğutulur süperiletken faza geçmesi sağlanır (C noktası). Bu noktada süperiletken karışık faza geçtiğinden ($H_{c1} < H_f < H_{c2}$), manyetik alan çizgileri akı merkezlerinde (normal göbekler) çivilenir. Manyetik alan altında soğutma rejimi sağlanmış olup, süperiletken kritik sıcaklığının altında tutulduğu sürece bir miknatis gibi davranır. Ortamdan manyetik alan kaynağı kaldırılırsa ($H=0$), numune C noktasından D noktasına taşınır. D noktasında numune halen kritik sıcaklığın altındadır ve dış alan kaynağı ortadan kaldırılmasına rağmen süperiletken akı tuzakladığı için miknatis özelliğini kaybetmemiştir. Süperiletkenin miknatis özelliğini kaybetmesi için ısıtılarak normal faza geçilebilir. Bu durumda tekrar başlangıç

konumu olan A noktasına ulaşılır. Bu soğutma rejiminde soğutulan numunenin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri incelendiğinde, tuzaklanan alandan dolayı çekme kuvvetinin baskın olduğu görülür (Weinstock, 2000).

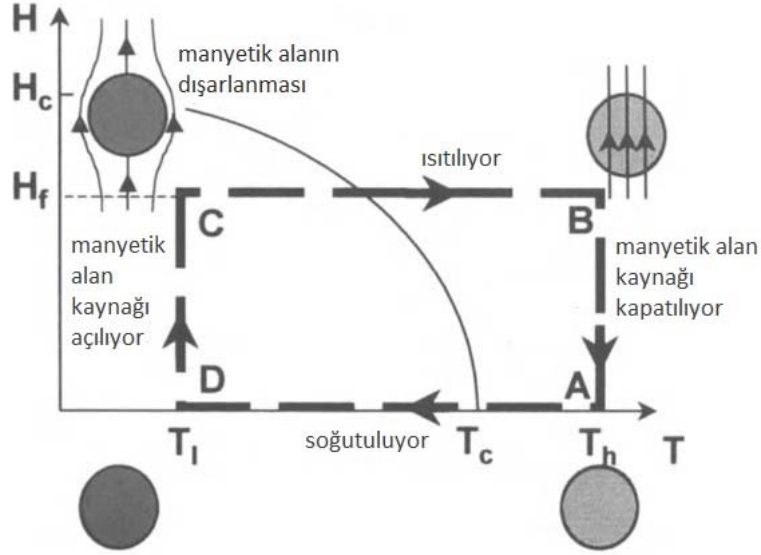


Şekil 1.7. Bir yüksek sıcaklık süperiletkeninin manyetik alan altında soğutulması durumunu gösteren H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).

1.4.2. Manyetik Alansız Soğutma (ZFC)

Süperiletken faza geçişte diğer soğutma yöntemi, ortamda dış manyetik alan olmadan soğutma yapmaktır. Şekil 1.8, manyetik alan H ve sıcaklık T bağımsız değişkenler olmak üzere, II. tip bir süperiletkenin termodinamik faz diyagramını göstermektedir. Şekil 1.7’de olduğu gibi, H_c - T_c eğrisi, normal ve karışık durum arasındaki faz denge sınırını belirler. Hacimli bir süperiletken manyetik alansız soğutma rejimine uygun olarak soğutulacak ve sırasıyla A, D, C ve B noktalarında incelenecektir. Süperiletken A noktasında, T_c kritik sıcaklığın üzerinde ($T=T_h$) ve uygulanan dış manyetik alanın sıfır ($H=0$) olduğu bir pozisyondadır. Sonra süperiletken numune kritik sıcaklığının altındaki bir T_l sıcaklığına kadar soğutularak A noktasından D noktasına taşınmış olur. Bu aşamaya kadar ortamda herhangi bir manyetik alan kaynağı yoktur ($H=0$) ve manyetik alansız soğutma işlemi gerçekleştirilmiş olur. D noktasında süperiletken fazda bulunan numune, düzgün bir H_f dış manyetik alan uygulanarak C noktasına taşınır. C noktasında numune karışık hal fazı baskılanmış olduğundan manyetik alanı büyük ölçüde dışarlayacaktır. Yani manyetik alan

altında soğutma rejiminden farklı olarak diamanyetik özelliği baskın olacak ve manyetik kaldırma kuvveti özelliği incelendiğinde itici kuvvetin fazla, çekici kuvvetin ise çok az olduğu görülecektir. Daha sonra süperiletken numune ısıtılarak C noktasından B noktasına taşındığında $T_h > T_c$ olduğundan normal faza geçer (Weinstock, 2000).



Şekil 1.8. Bir yüksek sıcaklık süperiletken malzemenin manyetik alansız soğutma durumunu gösteren H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).

1.5. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma ve Kararlılık

1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma

Süperiletken manyetik kaldırma, uygulanan alan ve süperiletken içindeki akımlar arasındaki etkileşmeden kaynaklanır. Makroskopik olarak, güçlü çivileme özelliğine sahip olan II. tip bir süperiletken kritik hal modeli kullanılarak incelenir. Bu çerçevede, uygulanan alanın değişimi ile birlikte sabit yoğunluklu akımlar süperiletken içinde indüklenir. Düzgün alan değerindeki değişim ya da düzgün olmayan alan altında süperiletken-kalıcı mıknatıs arasındaki bağıl mesafe değişimi, uygulanan alanı değiştirir. Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki bağıl hareket, kalıcı mıknatısın manyetik alanı ve süperiletken içinde indüklenen akım arasında manyetik kuvvet oluşumuna sebep olur. Eğer bu kuvvet kaldırılan objenin ağırlığını telafi edip kararlı bir şekilde bu şartı sağlıyorsa, obje kararlı ve pasif bir şekilde havada kalabilir.

Earnshaw, sadece diamanyetik malzemelerin pasif ve kararlı bir şekilde kaldırılabilceğini kanıtladı. I. tip süperiletkenler güçlü diamanyetik özelliklerinden dolayı yüksek kaldırma kuvveti üretebilirler, buna rağmen II. tip süperiletkenlerin kullanımı, sistem içinde büyük kararlılık sağladığından dolayı daha önemlidir. Bu kararlılık, akı çizgilerinin çivilenmesinden kaynaklanır ve pasif denge konumlarının sürekli sıralamasına izin verir (Navau ve Sanchez, 2002).

Maglev sisteminin iki anahtar parametresi düşey kaldırma kuvveti ve yanal kılavuzlama kuvvetidir. Bunlar gerçekte, uygulanan alan ve süperiletkende indüklenen akım arasındaki etkileşmeden kaynaklanan toplam Lorentz kuvvetinin bileşenleridir (Song vd., 2005). Bilindiği gibi manyetik kutuplar arasında oluşan manyetik kuvvet, manyetik akının karesi ile orantılı olmasına karşın, II. tip süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kuvvet manyetik akı gradyenti ile orantılıdır. Süperiletken ile mıknatıs arasında oluşan kaldırma kuvveti tek boyutta,

$$F = m \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right), \quad m = MV \quad \text{ve} \quad M = AJ_c r \quad (1.1)$$

ifadesi ile verilir (Murakami vd., 1991). Burada m , süperiletkenin manyetik momentini; dH/dz , manyetik kaynak tarafından oluşturulan alanın düşey eksen z boyunca değişim oranını; M , birim hacimdeki manyetizasyonu; V , numune hacmini; A , numune geometrisine bağlı bir sabiti; J_c , süperiletkenin kritik akım yoğunluğunu ve r , uygulanan dış manyetik alanı dışarlamak için süperiletkende oluşan koruyucu akım halkasının yarıçapını gösterir. Süperiletkenlerin teknolojik uygulanabilirliğini arttırmak için gerekli olan büyük kaldırma kuvveti için büyük r , J_c ve dH/dz değerlerine sahip olunması gerektiğini belirtir. Kaldırma kuvvetinin büyüklüğü birçok değişken tarafından belirlenir. Bu değişkenlerin bazıları, mıknatıs ve süperiletkenin boyutları, birbirlerine göre konumları ve uyumları, farklı soğutma rejimleri, mıknatıs manyetizasyonu ve süperiletkenin kritik akım yoğunluğu olarak sayılabilir (Abdioğlu, 2011).

Optimum PMG tasarımı kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerini arttırmak için etkili bir yöntemdir. Liu ve arkadaşları süperiletken Maglev sistemlerinde önemli bir parametre olan düşey manyetik alan bileşeni B_z 'yi arttırmak için, aynı hacme sahip üç farklı akı yoğunlaştırma formundan oluşan farklı manyetik kılavuzlama yolu tasarladılar. Yaptıkları deneysel çalışmalarda; manyetik kılavuzlama yolunda, akı yoğunlaştırma için kullanılan

kalıcı mıknatısların daha büyük kaldırma kuvvetine, kaldırma kuvveti sertliğine ve süperiletken içerisinde daha büyük akı tuzaklanmasına neden olduğu görüldü (Liu vd., 2009). 2010 yılında Sotelo ve arkadaşlarının gerçek boyutlu Maglev araçları üzerine yaptıkları çalışmada araca monte edilmiş kriyostat içerisinde HTS süperiletkeni ve manyetik ray sisteminde ise NdFeB mıknatıslar ve manyetik akı yoğunlaştırıcı çelik kullanıldı (Sotelo vd., 2010). Yapılan çalışmada en iyi Maglev sistemi geometrisini ve maksimum manyetik kuvveti elde etmek için, manyetik ray üzerinde manyetik akı yoğunluğu haritaları çıkarıldı ve farklı soğutma mesafelerinde manyetik kuvvet ölçümü alındı. Yapılan çalışmada test edilen 1.5m uzunluğunda, toplamda 24 yolcu taşıyabilen dört modül'ün, üzerinde hareket ettiği 45m yarıçaplı % 15 eğimli üç farklı manyetik ray geometrisinin, istenilen manyetik kuvvet ve modülün havada kalma mesafesi değerlerine ulaşılabilmesi için ilave ray konfigürasyonlarının çalışılması gerektiğine karar verildi. Ayrıca aynı araştırmacıların yaptığı ilave çalışmada her bir kriyostat içerisinde bulunan 24 süperiletken numune ile 8 mm'lik düşey süperiletken-manyetik ray mesafesinde, 2500 N lık manyetik kaldırma kuvvetine ulaşıldı (Sotelo vd., 2011).

Maglev ulaşım sistemlerinde manyetik kaldırma kuvveti kadar önemli olan bir diğer kuvvet ise manyetik rayların üzerinde aracın kararlı hareketini sağlayan, yanal manyetik kuvvettir. Yanal kuvvetin Maglev aracının kararlılığı etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Dias vd., 2011), farklı yüksekliklerde manyetik alanlı soğutma yapıldı ve yanal manyetik kuvvet değerleri altı eksenli bir kuvvet ölçü aleti ile alındı. Alınan deneysel ölçüm sonuçlarının ve kritik hal modeli kullanılarak yapılan modellemenin benzer özellikler göstermesi, yapılan bu çalışmanın Maglev sisteminin kararlılığını arttıracak modellemelerde yararlı olacağını gösterir.

1.5.2. Süperiletkenlerde Manyetik Kararlılık

Maglev sistemlerinde manyetik kuvvet kadar önemli bir diğer parametre, sistem kararlılığını sağlayan manyetik kuvvet sabitidir. Manyetik kuvvet sabiti (manyetik sertlik), manyetik olarak havalanmış sistemlerin uygulanan dış kuvvete karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, manyetik kuvvet sabiti, manyetik bir cisim üzerine etkiyen manyetik kuvvetin birim pozisyondaki değişimi olarak tanımlanabilir. En basit olarak manyetik kuvvet sabitinin (k) tanımı, kuvvet yönü ile yerdeğiştirme yönü aynı olduğu durumda, küçük yerdeğiştirmeler için aşağıdaki gibi yapılabilir (Moon, 2004):

$$F_x(x) = F(0) + \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} (x - x_0) \quad (1.2)$$

$$k_x = - \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (1.3)$$

Denklem 1.2’de $F_x(x)$, başlangıç konumunda cismin ağırlığına eşit $F(0)$ manyetik kuvveti ile x yönünde dengeden ayrılma pozisyonlarına göre manyetik alanın değişim oranının toplamıdır. Denklem 1.3, x yönündeki manyetik kuvvet sabiti (manyetik stiffness) değerini göstermektedir. Pozitif manyetik kuvvet sabiti ($k > 0$ veya $\partial F_x / \partial x < 0$) esnek yayda olduğu gibi denge konumundan uzaklaştırılan bir cismin geri çağırıcı kuvvet etkisi ile denge noktasına yöneleceğini gösterir. Manyetik kuvvet sabiti, numunenin çivileme özellikleri ile doğrudan ilişkili bir parametredir. HTS süperiletkenleri, PM sürekli mıknatıslardan ayıran ve bu süperiletkenleri Maglev uygulamalarında vazgeçilmez yapan en temel özellik onların geri çağırıcı kuvvet özelliğine sahip olmalarıdır. Sürekli mıknatıslar arasında olduğu gibi, negatif manyetik kuvvet sabiti ise cismin belli bir yerdeğiştirmeye uğratılması durumunda kararsız bir duruma işaret eder.

Manyetik kuvvet sabiti, Maglev araçlarının tasarımı için önemli parametrelerden biridir. Lu ve arkadaşları, silindirik şeklindeki yedi YBCO kristalinin manyetik kuvvet sabiti performansını tek ve çift kutuplu PMG dizilimleri için incelediler (Lu vd., 2011). Düşey manyetik kuvvet sabiti değerinin, her iki PMG dizilimi için de, kaldırma aralığının azalmasıyla yaklaşık lineer bir şekilde arttığı gözlemlendi. Ayrıca, çift kutuplu PMG’nin tek kutba göre, hem yatay hem de düşey manyetik kuvveti sabiti değerleri için daha kararlı bir sistem ortaya koyduğu gösterdiği gözlemlendi.

Liu ve arkadaşları, çapı 30 mm ve 50 mm olan silindirik şeklindeki YBCO süperiletken numunelerin Maglev performanslarını araştırmak için üç farklı manyetik kılavuzlama yolu üzerinde, farklı soğutma şartlarında çalıştılar (Liu vd., 2008). Deneysel sonuçlar kaldırma kuvvetinin manyetik alanın tepe değerine bağlı olduğunu gösterdi. Ayrıca manyetik alan yapısı ve B_z ’deki değişimin de kaldırma kuvveti üzerinde etkili olduğu görüldü. PMG’de akıyı odaklamak için demir kullanılmaktansa, yüksek zorlayıcı kuvvete sahip PM’ler kullanmak daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, hem manyetik enerjinin yüksek kullanım oranı hem de geniş ve uygun manyetik alan dağılımı sağladığından dolayı Halbach dizilimli PMG ideal kılavuzlama yolu olarak belirlendi.

Brezilyadaki bir üniversitenin uygulamalı süperiletkenlik laboratuvarında Dias ve arkadaşlarının 2012 yılında gerçek boyutlu Maglev araçları için “Lineer süperiletken Manyetik Taşıyıcıların Dinamik Testleri” üzerine yaptıkları çalışmada, yolcu giriş-çıkışlarının ve titreşim hareketinin, HTS süperiletkeni ile manyetik ray arasındaki mesafenin azalmasına etkisi incelendi (Dias vd., 2012). Dinamik testler için HTS süperiletkeninin içinde bulunduğu kriyostat (soğutma sistemi), sabit ve farklı referans kuvvetlerinde titreşime tabi tutularak kuvvet ölçümü alındı ve süperiletken ile manyetik ray arasındaki havada kalma mesafesi analiz edildi. Yapılan bu çalışmada, dış dinamik değişimlerle HTS ile manyetik ray arasındaki düşey mesafe azalmasının Maglev sistemlerinin performansını ciddi ölçüde düşürmeyeceği tespit edildi.

Mıknatıslanmış tek kristal (RE)BCO ve içi oyuk MgB₂ silindir arasındaki kaldırma kuvvetinin ve kuvvet sabitinin araştırıldığı bir çalışmada, 1,7 T manyetik akı tuzaklamış YBCO süperiletkeni ile MgB₂ arasında 500 N’luk bir manyetik kaldırma kuvveti belirlendi (Patel vd., 2013). Araştırmacılar tarafından bu manyetik kaldırma kuvveti değeri, hacimli iki süperiletken numune arasında ölçülebilen maksimum değer olarak rapor edildi. Yapılan bu çalışmada ayrıca, 1 T alan tuzaklanmış GdBCO (38 K) ile MgB₂ süperiletkeni kaldırma kuvveti-konum grafiğindeki ± 1 mm lik 10 çevrimden yararlanılarak 3 mm yanal mesafede -56,8 N/mm lik kayda değer bir manyetik kuvvet sabiti değeri belirlendi.

Aktif elektromanyetik Maglev sistemlerine göre, YBCO süperiletken külçeler, PM mıknatısların üzerinde kararlı olarak havada kalabilir. Bu özellik, kontrol sistemini basitleştiren HTS süperiletkenlerinden oluşan Maglev araçlarının önemli bir avantajıdır. Fakat denge için gerekli olan uygun manyetik akı tuzaklamasını sağlamada YBCO külçelerin uygulanan manyetik alan altında soğutulması gerekmektedir. Ren ve arkadaşları 2002 yılında kalıcı mıknatıslar ve HTS külçelerden oluşan hibrit bir Maglev aracı yaptılar. Sonuçlar hibrit Maglev aracının yüksek manyetik kaldırma, kılavuzlama kuvvetine ve manyetik kuvvet sertliğine sahip olduğunu gösterdi (Ren vd., 2002).

İlk insan taşıyan HTS Maglev test araçlarında kullanılan manyetik kılavuzlama yolunda, manyetik akıyı istenilen noktaya odaklamak için demir kullanıldı ve bu askıda hareket eden ulaşım sistemlerinde çok kullanışlı bir yöntem oldu. Fakat bu kılavuzlama yolunun ürettiği manyetik enerjinin yarısı, demirin azaltıcı etkisinden dolayı kılavuzlanma yolunun üst yüzeyinde toplanır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak ve külçe HTS süperiletkenlerin kaldırma kuvvetini arttırmak için araştırmacılar Maglev araç sistemlerinde Halbach dizilimini geliştirdiler. Manyetik akıyı belli bir yerde toplamak ve manyetik enerjiyi

kılavuzlama yolunun üst yüzeyinde yoğunlaştırmak için oluşturulan manyetik Halbach yolu, özel bir PM dizilimi kullanır (Jing vd., 2007; Deng vd., 2008).

Manyetik taşıyıcı sistemlerin dinamik davranışı büyük oranda sistemin manyetik kuvvet sabitine bağlıdır. Yapılan bir çalışmada halka biçiminde PM ve halka biçiminde HTS süperiletkenlerinden oluşan düşey manyetik taşıyıcı sistemlerin manyetik kuvvet analizinde sistemin manyetik kuvvet sabitini hesaplamak için dondurulmuş görüntü (Frozen image approach) yöntemi kullanıldı (Sivrioglu ve Cinar, 2007). Çalışmayı yapan araştırmacılar, hareketli parçanın dinamik sertlik etkisinden dolayı, halka biçiminde HTS süperiletkeni içerisinde PM in yanal hareketi ile radyal manyetik kuvvet sabitinin % 10 oranında attığını rapor ettiler.

YBCO süperiletkeni bulunduran beş adet yüksek sıcaklık süperiletkeni dizilimi ile PM den oluşan kılavuzlama yolu arasındaki düşey ve yatay manyetik kuvvet sabiti değerini incelemek için yapılan deneysel çalışmada (Lu vd., 2011), manyetik sertlik iki farklı yöntemle belirlendi. Birinci yöntem eklemeli yöntemdir. Bu yöntemde dizilimdeki her bir süperiletkenin manyetik sertlik değeri deneysel olarak ölçülüp bu değerler toplandı. Diğer yöntem olan direk yöntemde süperiletken diziliminin manyetik sertliği doğrudan ölçüldü. Süperiletken dizilimin manyetik sertliğinin her bir süperiletkenin manyetik sertliği ile ilişkili olduğu, fakat komşu HTS ler arasındaki etkileşmeler nedeni ile (değişen akı çivileme özelliğine bağlı olarak) eklemeli yöntemin, dizilimin manyetik sertliğini iyi bir şekilde belirlemediği bulundu. Yapılan çalışmada doğrudan ölçülen HTS diziliminin manyetik sertliğinin eklemeli yöntemle elde edilen her bir HTS nin manyetik sertliğinin toplamından daha küçük olduğu belirlendi. Ayrıca H-metodu kullanılarak sayısal olarak hesaplanan manyetik kuvvet sabiti değerlerinin, deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olması, yapılan sayısal çalışmanın süperiletken manyetik kaldırma (levitasyon) sistemlerinin optimizasyonunda faydalı olacağına işaret eder.

Song ve arkadaşları (Song vd., 2005), alanlı ve alansız soğutma koşullarında, yatay yer değiştirmeler boyunca kaldırma kuvveti ve kuvvet sertliğini deneysel olarak ölçtüler. Simetrik durumda uygulanan manyetik alan ile kaldırma kuvveti arasında lineer bir ilişki varken, simetrik olmayan alan altında lineerliğin kaybolduğu görüldü. Ayrıca hem simetrik hem de simetrik olmayan alan altında, alanlı soğutma koşulunda ölçülen kuvvet sertliğinin, alansız soğutma koşulundaki kaldırma kuvvetine göre daha sert bir biçimde değiştiği gözlemlendi.

Gerçek boyutlu Maglev sistemleri için analitik ve deneysel manyetik kaldırma kuvveti üzerine yapılan bir çalışmada üç farklı set manyetik kılavuzlama yolu ve iki süperiletken kristalin kullanıldığı bir simülasyon yapıldı (Sotelo vd., 2011). Yapılan sayısal hesaplama sonuçları, gerçek manyetik kaldırma sistemi prototipi için yapılan lineer süperiletken manyetik yatakların deneysel verileri ile karşılaştırıldı. Deneysel ve sayısal veriler arasında gözlenen uyum, Maglev sistemlerinin önemli özelliklerinin analizi ve yorumu için kurulan modelin faydalı olduğunu göstermektedir. Ayrıca yapılan çalışmada gözlenen sınırlamalar, manyetik akıyı biçimlendirmek için kullanılan farklı kalınlıktaki demir tabakaların, bazı durumlar için ilave modellemelere ihtiyacı olduğunu gösterir.

Motta ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (Motta vd., 2013) süperiletken Maglev aracının kaldırma kuvveti, manyetik kuvveti sabiti, viskoz sönüm katsayısı ve titreşim frekansı, farklı geometriye sahip PMG için araştırıldı. Alanlı soğutma mesafesinin azalması ile manyetik kuvvet sabitinin arttığı ve ölçülen manyetik kuvvet sabitinin PMG içerisindeki mıknatıs boyutlarına bağlı olduğu gözlemlendi. Bu durum, düşük alanlı soğutma mesafesinde ve mıknatıs boyutlarına bağlı olarak süperiletken numunenin akı çivileme özelliğinin iyileşmesi ile açıklandı. Ayrıca yapılan dinamik ölçüm çalışmasında, viskoz sönüm katsayısı ve titreşim frekansı değerlerinin de süperiletken numunenin alanlı soğutma mesafesinin azalması ile arttığı ve bu değerlerin PMG geometrisine bağlı olduğu gözlemlendi.

Külçe HTS süperiletkenlerin mıknatıslanma özelliği kazanmasında kullanılan alansız soğutma ve alanlı soğutma çok önemli iki yöntemdir (Del-Valle vd., 2007). Alansız soğutma yöntemi büyük manyetik kaldırma kuvvetine ve düşük kararlılığa neden olurken, alanlı soğutma yöntemi yüksek kararlılığa ve süperiletken içerisinde tuzaklanan manyetik akıdan dolayı düşük kaldırma kuvvetine neden olur. Bu durum, HTS süperiletkeni ile uygulanan manyetik alan arasında oluşacak Maglev araçlarında kullanılan kaldırma kuvveti (yük taşıma kapasitesi) ve kılavuzlama kuvvetinin aynı anda artmasının zorluğunu gösterir. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için çeşitli araştırma laboratuvarlarında, HTS süperiletkenin alansız soğutmadan sonra tekrar mıknatıslanma özelliği kazandırılmasıyla aşılmaya çalışılmıştır (Deng vd., 2011; Li vd., 2010). Yapılan deneysel çalışmalar, kılavuzlama yolu üzerinde belli mesafede tekrar mıknatıslanmanın, Maglev araçlarında kaldırma kuvveti ve kılavuzlanma kuvvetini alansız soğutmaya göre eş zamanlı olarak arttırdığını gösterdi.

HTS/PMG sistemlerinin manyetik kuvvet sabiti değerini arttırmak için;

- süperiletken malzeme özelliklerini iyileştirmek,
- farklı konfigürasyonlarda süperiletken ve mıknatıs dizilimleri yapmak,

- manyetik alan kaynağının şiddetini arttırmak

gerekebilir. Bu çalışmada amacımız farklı konfigürasyonlarda süperiletken ve mıknatıs dizilimleri oluşturarak manyetik kuvvet sabiti değerini arttırıp, sistem kararlılığını güçlendirmektir.

1.6. Manyetik Yatak Sistemleri

Bir makine yatağında temel prensip iki parçanın birbirine göre hareket ederken aşınma, sürtünme, ısı üretimi gibi parametrelerin minimuma indirilmesidir. Bilyeli, kaymalı veya sıvı temelli geleneksel yatak sistemlerinde her zaman bir temas vardır. Bu tür yataklardaki sürtünme kuvvetinin neden olduğu enerji kayıplarını önlemek için manyetik yatak sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Manyetik yatak sistemlerinde, bir makine parçasının hareketli diğer bir makine parçasından ayrılması için manyetik alan kaynağına ve manyetik alan biçimlendirici veya alan tuzaklayıcı bir malzemeye ihtiyaç vardır (Çınar, 2007).

Manyetik alan kaynakları olarak normal iletken tel (bakır gibi) veya süperiletken tel (niyobyum-titanyum gibi) bobinler, kalıcı mıknatıslar, süperiletken mıknatıslar veya elektromıknatıslar sayılabilir. Alan biçimlendirici veya tuzaklayıcı malzemeler olarak yumuşak ferromanyetik malzemeler (yumuşak demir, silikon çelik gibi), II. tip süperiletkenler veya normal iletken malzemeler (eddy akımı etkisi) sıralanabilir.

Aktif ve pasif manyetik yataklar olmak üzere iki tür manyetik yatak sistemi vardır. Aktif manyetik yataklar, manyetik alan kaynağı (elektromıknatıs gibi) için sürekli beslemeye ihtiyaç duyar. Buna karşın pasif süperiletken-kalıcı mıknatıs veya süperiletken-süperiletken temelli yataklar karmaşık geri beslemeli kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymazlar.

1.6.1 Aktif Manyetik Yataklar

Aktif manyetik yataklar, sürtünmenin çok az olmasından dolayı çok uzun ömre sahip olmakta ve yüksek devirlerde çalışabilmelerine rağmen aktif kontrol mekanizmaları ve karmaşık geri beslemeli kontrol sistemleri yüzünden yaygın bir kullanım alanı yakalayamamışlardır (Çınar, 2007). Günümüzde kullanılan aktif manyetik yataklar şu şekilde listelenebilir:

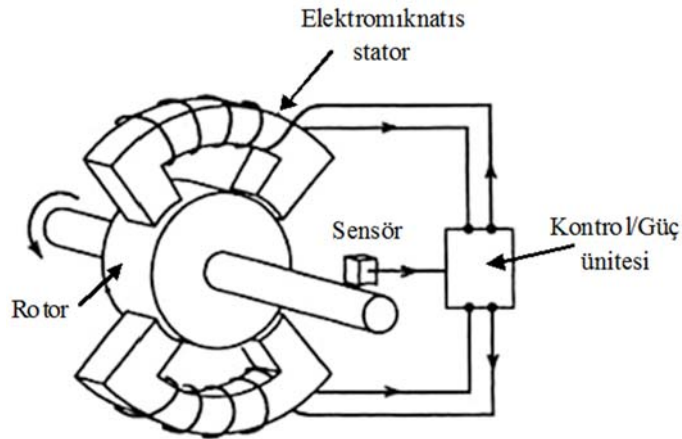
- Yüksek hızlı makine araçları
- Turbomoleküler pompalar

- Doğalgaz iletimi için santrifüj kompresörler
- Yüksek hızlı matbaalar

Gelişme halinde olan uygulamalar arasında, elektrikli otomobil sistemleri için enerji depolama çarkları ve jet uçaklarında kullanılan gelişmiş gaz türbinli motorlar için manyetik yataklar yer almaktadır.

Tipik bir manyetik yatak (Şekil 1.9) aşağıdaki sistemlerden oluşur:

- Ferromanyetik rotor
- İçinde iletken sarmallar olan çok yuvalı stator
- İki kanattaki şaftın konumunu ölçmek için konuma duyarlı mesafe ölçer
- Elektronik analog veya dijital kontrol devresi
- Stator sarmallarındaki akımı beslemek için güç kaynağı
- Manyetik çevrim yollarını sağlamak için silisyum-demir veya kobalt-vanadyum çelik.



Şekil 1.9. Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).

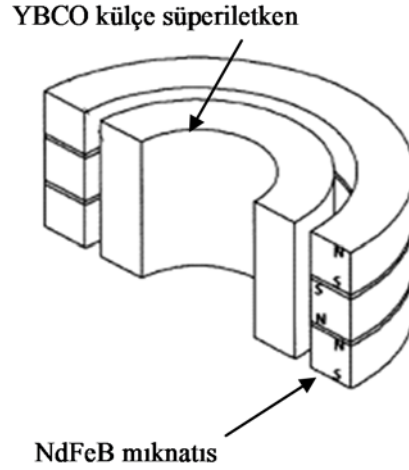
Aktif manyetik yatakların tipik çalışma boşluğu 0.5 mm mertebesindedir. Çalışma sıcaklığı 60 K' den 100°C' ye kadar değişmektedir. Bununla birlikte, gaz türbinli motorlarda kullanılabilir olması için çalışma sıcaklığını 300°C yakınlarına çıkarmaya yönelik gelişmeler devam etmektedir (Moon, 2004).

1.6.2. Pasif Manyetik Yataklar

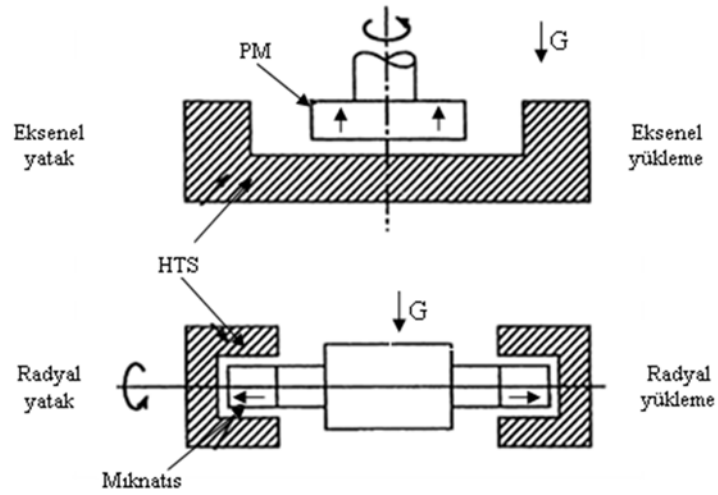
II. tip süperiletkenlerin dış bir manyetik alana yerleştirildiklerinde pasif olarak havalanma ve havada askıda kalma özelliklerinin keşfinden sonra birçok önemli potansiyele sahip uygulamaları düşünülmüştür. Sürtünmesiz yataklar, enerji depolayan dönen çarklar, Maglev araçları gibi uygulamalar bu kapsamda sayılabilir. Bu sistemlerin ana bileşeni süperiletken manyetik yataklardır. Bu tür yataklar, yüksek hızlarda dahi neredeyse sürtünmesizdir. Süperiletken manyetik yatakların diğer bir avantajı ise aktif kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymamalarıdır. Bu özellik, pasif süperiletken yatakları aktif manyetik yataklardan daha güvenli kılar. Dönen bir süperiletken manyetik yatak, yüksek hızlı makineler ve rotorlarda aktif manyetik yatağın yerini alabilir. Lineer bir süperiletken manyetik yatak da dönen bir yatakla aynı avantajları sunar ve Maglev ve diğer lineer sürücülerde kullanılabilir (Sotelo vd., 2011).

Bir süperiletken yatak en basit haliyle, bir süperiletken ve bir mıknatıstan oluşur. Manyetik sertlik ve kayıplar, yatak tasarımında önemli faktörlerdir. Bütün sistemin kararlılığını artırmak ve kaybını azaltmak için karmaşık tipte yataklar tasarlanmıştır.

Eksenel ve radyal kılavuzlamalı manyetik yatak olmak üzere iki temel pasif manyetik yatak tipi vardır. Eksenel yataklarda ana yük kuvveti dönme eksenine doğrultusunda, radyal yataklarda ise yük kuvveti dönme eksenine dik doğrultudadır. Tipik bir HTS/PM radyal yatak düzeni, sonlandırıcı olarak yerleştirilmiş olan PM disklerle birlikte dönen bir shaft ve shaftın her iki ucundaki PM'leri kısmen veya tamamen saran HTS tarafından desteklenen shafttan oluşur. Basit radyal bir yatağın şematik yapısı Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Şekil 1.11'de ise eksenel ve radyal süperiletken manyetik yataklar gösterilmiştir (Moon, 2004).



Şekil 1.10. YBCO-mıknatıs konfigürasyonlu radyal manyetik yatak (Moon, 2004).



Şekil 1.11. Eksenel ve radyal pasif manyetik yatak sistemleri (Moon, 2004).

Hali hazırda teknolojik uygulamaları olan aktif kontrollü elektromanyetik yatak sistemleri avantajları ve birkaç önemli dezavantajları ile aşağıda sunulmuştur (Moon, 2004):

Avantajlar

- Yüksek manyetik sertlik
- Çevresel değişikliklere uyarlanabilir kontrol ünitesi
- Alan kaçaklarının az olması
- Kanıtlanmış endüstriyel uygulamalar

Dezavantajlar

- Yüksek maliyet
- Karmaşık olması ile ilgili güvenilirlik sorunları
- Güç kaynağı, kontrol ünitesi ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar

Pasif süperiletken yataklar ise henüz teknolojik olarak tam anlamıyla kanıtlanmamış olmasına rağmen aşağıda sunulan avantaj ve dezavantajlara sahiptir:

Avantajlar

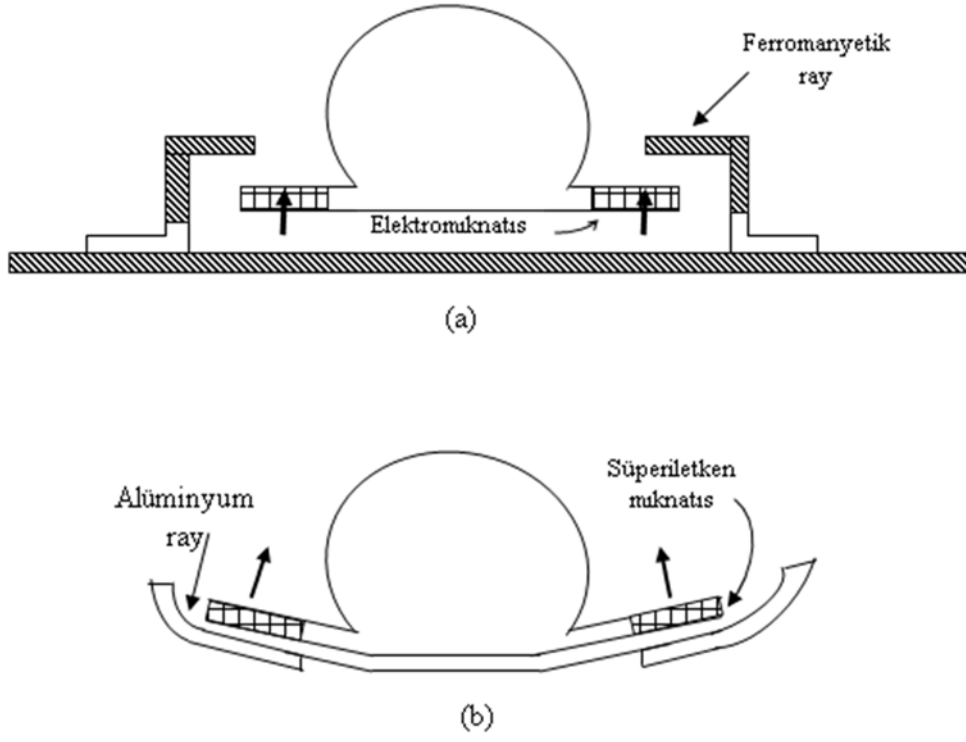
- Herhangi bir elektronik devreye veya güç kaynağına ihtiyaç yoktur, pasiftir
- Potansiyel olarak yüksek güvenilirliğe sahiptir (düşük karmaşıklık)
- Potansiyel olarak daha düşük sistem ağırlığı
- Daha düşük maliyet

Dezavantajlar

- Kriyojenik sıcaklıklara ihtiyaç duyması
- Daha düşük manyetik sertlik
- Manyetik alan kaçakları
- Uygulamada kanıtlanmamış bir teknoloji olması

1.6.3. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar

Manyetik olarak havalanmış araçlarda iki ana yöntem vardır. Birincisi, Şekil 1.12a'da görülen elektromanyetik kaldırma veya çekici kaldırmadır. Bu sistemde aracın ferromanyetik raylarda havada kalmasını sağlayacak süperiletken olmayan elektromıknatıslar kullanılır. İkinci yöntem elektrodinamik kaldırma veya itici kaldırma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.12b). Bu ikinci yöntemde araç üzerinde çok sayıda süperiletken mıknatıs kullanılır. Bu mıknatıslar sayesinde aracın altında yer alan iletken rayda girdap akımları oluşur. Araç hareket ettiğinde oluşan kaldırma, yüksek hızlarda bir asimptotik limite ulaşır (Moon, 2004).



Şekil 1.12. Temel manyetik taşıma sistemleri; a) Elektromanyetik kaldırma veya çekici yöntem; b) Elektrodinamik kaldırma veya itici yöntem (Moon, 2004).

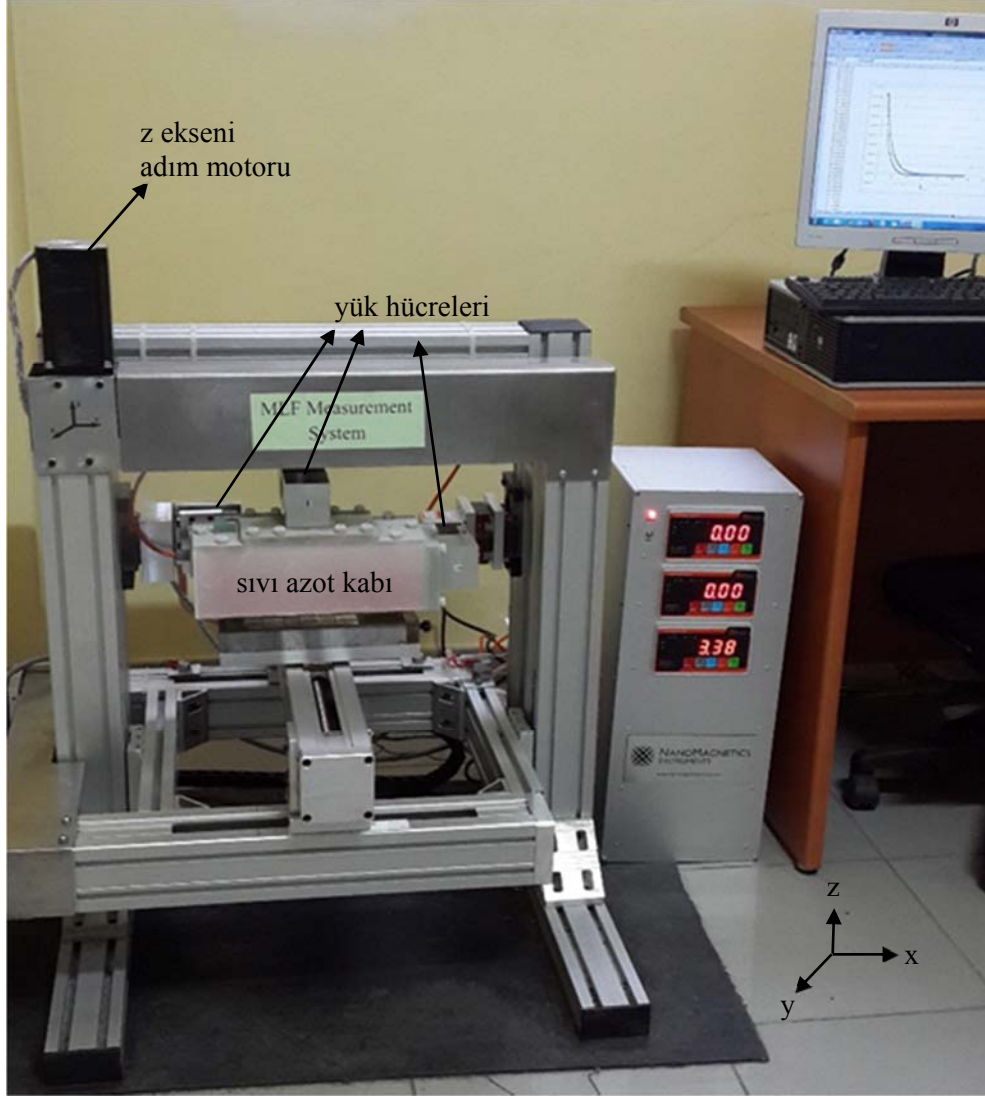
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Hibrit Maglev sisteminde manyetik kaldırma kuvveti değerini arttırmak için kullanılan üstten tohumlama (TSMG) yöntemi ile üretilmiş tek kristal silindir YBCO süperiletkenler ile farklı konfigürasyonlarda NdFeB mıknatısların bulunacağı kılavuzlama yolu arasında oluşan manyetik kaldırma, kılavuzlama kuvveti ve hem düşey hem de yatay eksenler için manyetik kuvvet sabiti ölçümleri bu çalışmanın esasını oluşturmaktadır.

2.1. Deney Sisteminin Oluşturulması

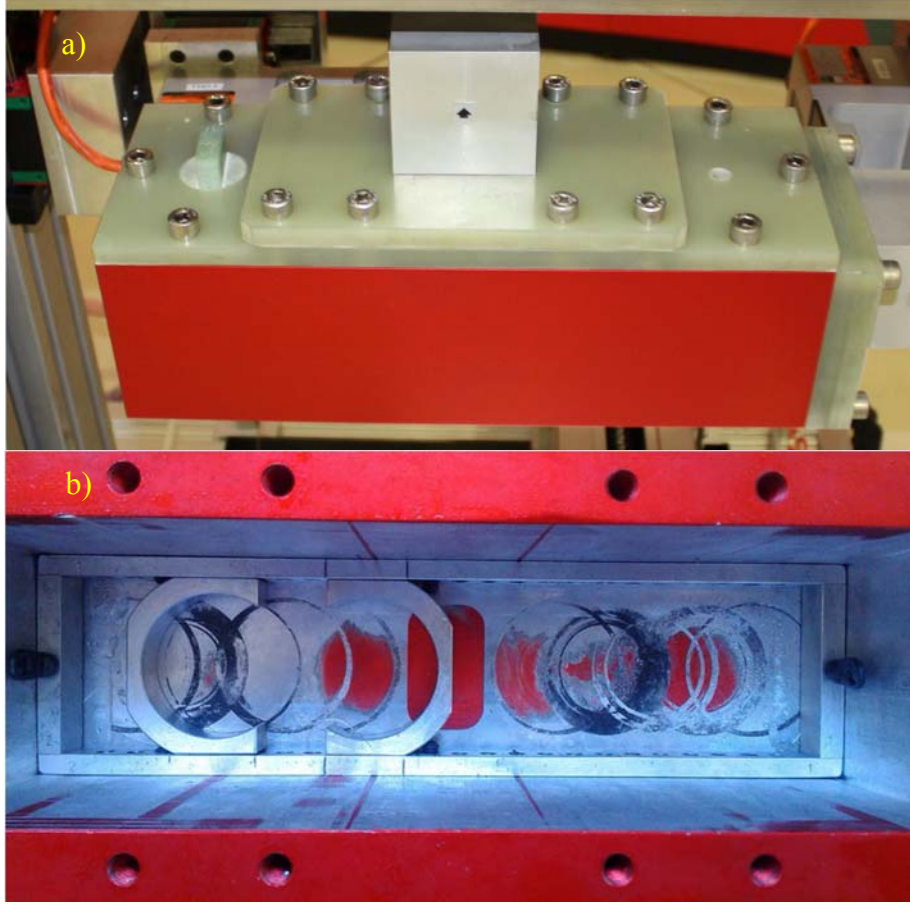
2.1.1. Manyetik Kuvvet Ölçüm Düzeneği

Gerçek Maglev uygulamalarına veri sağlamaya aday, 900N'a kadar manyetik kuvvet ölçebilen Maglev manyetik kuvvet ölçüm sisteminin (Şekil 2.1) hareketi, 16 mm hatveli, $\phi 16$ mm vidalı mil ve buna uygun taşıyıcıya sahip doğrusal hareket sistemi ve triger aktarma sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Sistemin hareket beslemesi ise Nema 34 flanşlı 2 adet 8,5 Nm (x ve y eksenlerinde) ve 1 adet 12,5 Nm tork'lu (z ekseninde) adım motorları ile sağlanmaktadır. 3 adet (x, y ve z eksenlerinde) 900 N'a kadar manyetik kuvveti 1 N hassasiyetle ölçebilen yük hücresine sahip Maglev manyetik kuvvet ölçüm sistemi, Labview programlama dilinde oluşturulan yazılımıyla üç eksende hareket edebilmekte ve üç eksende manyetik kuvvet verilerini konuma bağlı eş zamanlı olarak okuyup hassas olarak bilgisayara aktarabilmektedir.



Şekil 2.1. Manyetik kuvvet ölçüm düzeneğinin fotoğrafı

Şekil 2.2, alüminyumdan imal edilmiş süperiletken numune haznesini göstermektedir. Süperiletken numune haznesi, içindeki numune tutucu çerçeve ve halkalar alüminyum malzemeden imal edilmiş olup, numune haznesindeki süperiletkenleri soğutmak için sıvı azot kullanılmıştır. Halkalar kullanılan süperiletkenleri saracak boyuttadır ve istenilen konumda numuneleri sabitlemeye yarar. Ölçüm sırasında HTS/PMG etkileşmesiyle ortaya çıkan manyetik kuvvet, numune kabına dışardan sabitlenmiş olan kuvvet sensörlerine iletilmektedir.



Şekil 2.2. Farklı boyutlarda süperiletken ve mıknatıs bulundurabilen süperiletken numune haznesi, a) dışardan görünümü; b) içerden görünümü

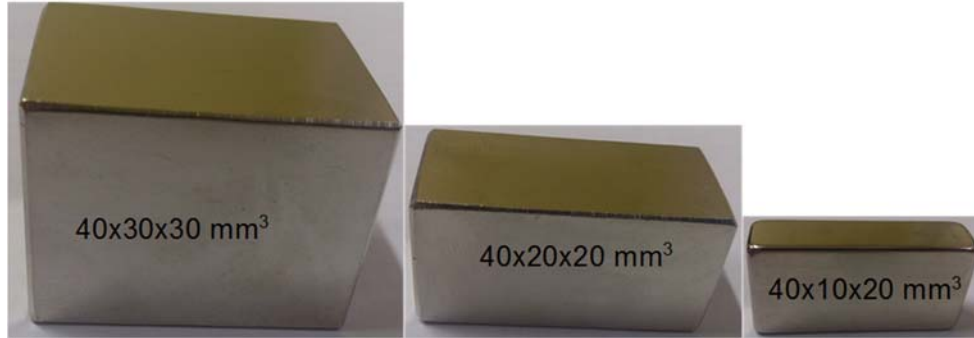
2.1.2. Deneyde Kullanılan YBCO Süperiletkenleri ve NdFeB Mıknatıslar

Bu çalışmada, manyetik alan biçimlendirici ve tuzaklayıcı olarak, Alman ATZ firmasından ticari olarak satın alınan $\phi = 45mm$ çap ve $h = 15mm$ yüksekliğe sahip silindir şeklinde külçe YBCO süperiletkenleri kullanılmıştır (Şekil 2.3). Üstten tohumlama (TSMG) yöntemine göre üretilen bu süperiletkenler, sahip oldukları yüksek kritik akım yoğunluğu değerleriyle Maglev uygulamaları için elverişlidirler. TSMG yönteminde tohum kristali, preslenen YBCO numunelerinin üst kısmına yerleştirilerek ısıtılma tabii tutulmaktadır (Werfel, 2011).



Şekil 2.3. $\phi = 45\text{mm}$ çap ve $h = 15\text{mm}$ yüksekliğe sahip silindir şeklinde külçe YBCO süperiletkenleri

Maglev sisteminde manyetik alan kaynağı olarak farklı boyutlarda NdFeB kalıcı mıknatıslar kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bu mıknatısların farklı manyetizasyon yönelimli dizilimleriyle oluşturulan PMG'lerde, $40 \times 30 \times 30\text{mm}^3$, $40 \times 20 \times 20\text{mm}^3$ ve $40 \times 10 \times 20\text{mm}^3$ boyutlarında ve yüzey manyetik akı yoğunluğu sırasıyla 0,53 T, 0,49 T ve 0,55 T olan mıknatıslar kullanılmıştır.



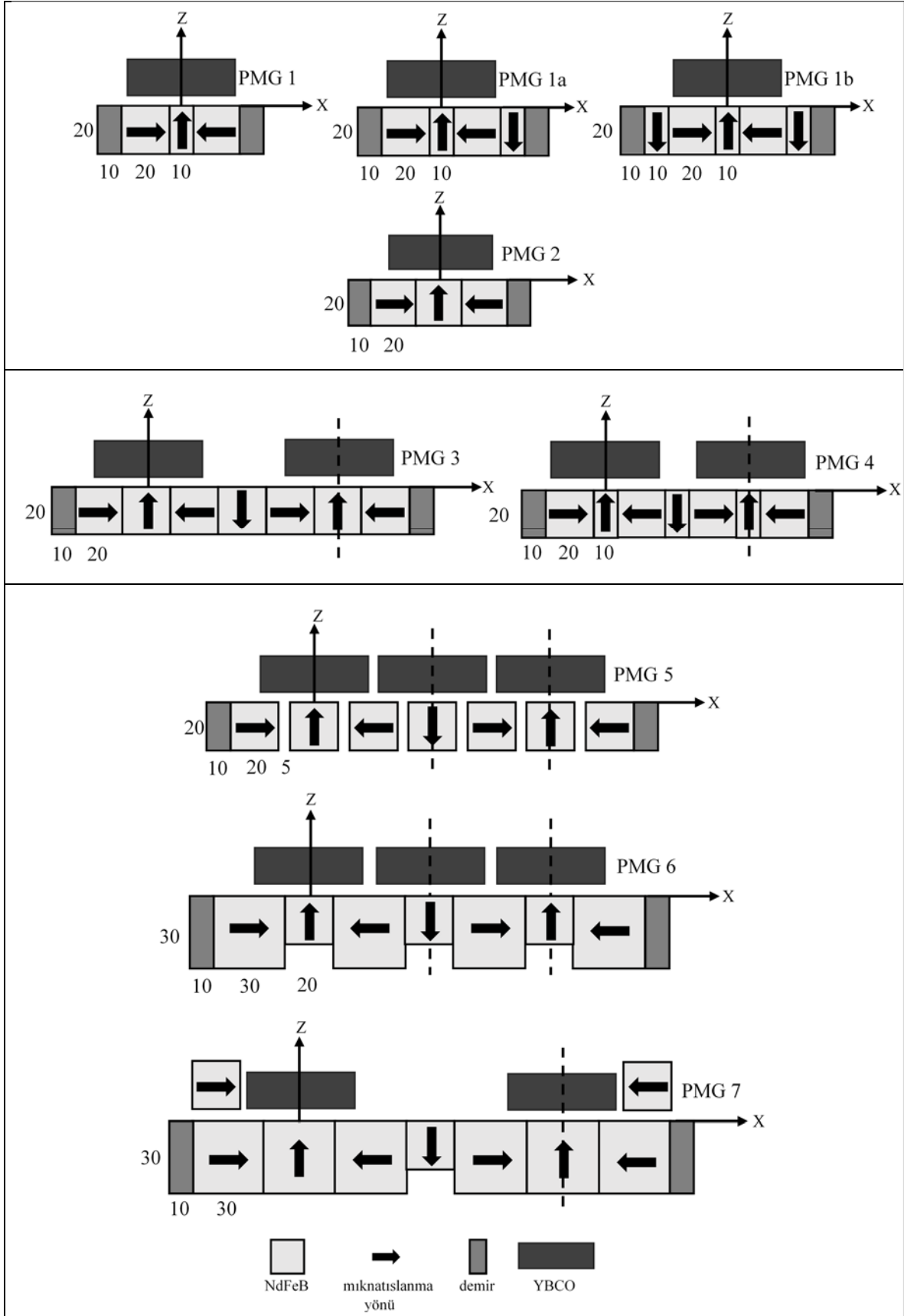
Şekil 2.4. Maglev sistemindeki manyetik kılavuzlama raylarında kullanılan farklı boyutlardaki NdFeB mıknatıs fotoğrafları

2.1.3. Maglev Manyetik Kuvvet Ölçüm Sisteminde Kullanılan HTS/PMG Konfigürasyonları

Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan manyetik kılavuzlama yolunun manyetik alan dağılımı ve şiddeti, Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet ve manyetik kararlılık özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Bu amaçla, süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma,

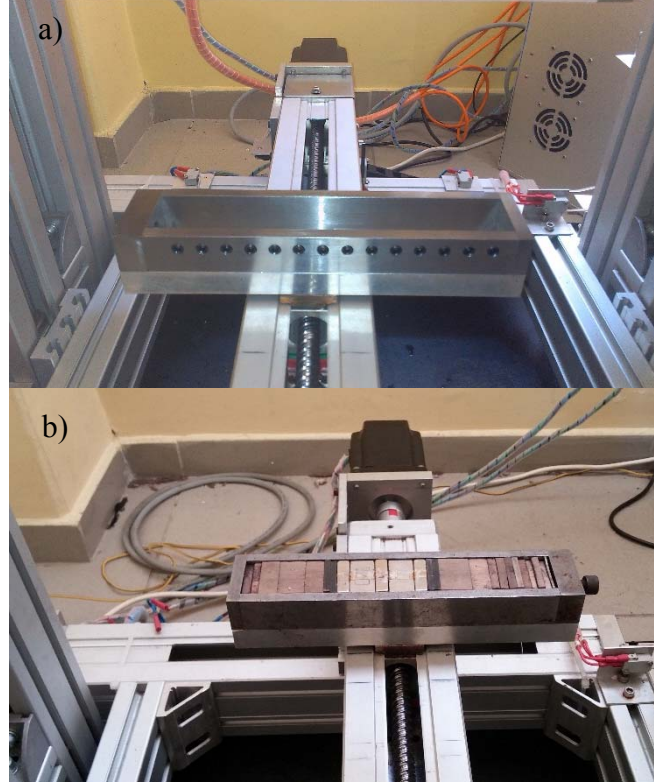
yanal kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı konfigürasyon ve boyutlarda manyetik kılavuzlama yolu tasarlanıp üretilmiştir.

Şekil 2.5'te Maglev manyetik kuvvet ölçüm sisteminde kullanılan farklı HTS/PMG konfigürasyonlarının şematik gösterimi verilmiştir. Şekilde, PMG1 ve PMG2 tek manyetik kutba sahipken, PMG1a dizilimi iki manyetik kutba ve geri kalan PMG'ler üç manyetik kutba sahiptir. Bu manyetik kılavuzlama yolları ile manyetik kutup sayısının manyetik kaldırma ve kararlılık performansına etkisini araştırmak hedeflenmiştir. Ayrıca PMG7 konfigürasyonu ile süperiletken numune kabında iki mıknatıs kullanılarak hibrit bir model sunulmuştur.



Şekil 2.5. Deneyde kullanılan farklı HTS/PMG şemaları (boyutlar mm birimindedir)

Şekil 2.6, boş PMG kabı ve bir adet örnek PMG dizilimini göstermektedir. Bir PMG oluşturmak için, istenilen boyut ve manyetizasyon yönelerindeki mıknatıslar boş PMG kabına sırasıyla yerleştirilir ve mıknatısları uygun konumlarda sabitlemek için PMG kabı üzerindeki vidalar yardımıyla sıkıştırılır. Ayrıca, akıyı homojenleştirmek ve uç etkileri azaltmak için PMG'nin her iki ucuna 10 mm kalınlığında demir bloklar konulmuştur.



Şekil 2.6. a) Boş PMG kabı ve b) farklı boyutlara ve manyetik alan yönelerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG

2.2. PMG Manyetik Alan Modellemesi

Süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar öncesinde optimum HTS/PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemini kullanan COMSOL Multiphysics 3.5a paket programla, sayısal modellemeler (magnetostatic olarak) yapılmıştır. Deney öncesi gerçekleştirilen bu sayısal modellemeler ile deney geometrisinin daha verimli olması hedeflenmiştir. PMG kutup sayısındaki değişimin manyetik akı dağılımına etkisini gözlemlemek için sırasıyla tek, çift ve üç kutuplu PMG'ler incelenmiştir.

Bu amaçla, Şekil 2.5'te görülen PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonlarının manyetik alan modellemesi yapılmıştır.

2.3. Düşey Manyetik Kuvvet Ölçümlerinin Alınması

Farklı HTS/PMG konfigürasyonları (PMG1, PMG1a ve PMG1b) arasındaki etkileşmeden kaynaklanan manyetik kaldırma kuvveti değerleri farklı soğutma yükseklikleri için ZFC ve FC soğutma şartlarında ölçülmüştür.

İlk seri kaldırma kuvveti ölçümleri ZFC rejiminde yapıldı. Soğutma işlemine geçmeden önce süperiletken numune merkezi, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı manyetizasyon yönelimli mıknatıs merkezi hizasına yerleştirildi. Soğutma işlemi manyetik akı yoğunluğunun ihmal edilebileceği numune alt yüzeyi ve PMG üst yüzeyi arası mesafe 75 mm iken, süperiletken numune kabına 15 dk. boyunca sıvı azot dökülerek soğutma yapıldı. Soğutmanın başlarında dökülen sıvı azot çok çabuk buharlaşırken, bir süre sonra numune kabındaki sıvı azot miktarının çok az azaldığı görüldü. Bu durumda numunelerin ve numune kabının sıvı azot ile termal dengeye ulaştığı anlaşıldı. Numunenin süperiletken faza geçtiğinden emin olunduktan sonra, mıknatıs üst yüzeyi ve YBCO alt yüzeyi arasındaki mesafe önce minimum yaklaşma mesafesine (5 mm) getirilip daha sonra başlangıç aralığı 75 mm'ye kadar uzaklaştırıldı. Bilgisayar kontrollü gerçekleştirilen bu işlem süresince adım motorlar 1 mm/s hızla hareket ettirildi ve hareket boyunca konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde düşey kuvvet (F_z) verileri alındı.

İkinci seri düşey manyetik kuvvet ölçümlerinde YBCO numune sırasıyla 20 ve 5 mm soğutma yükseklikleri (CH) için soğutuldu. Soğutma işleminden sonra YBCO ve PMG arası mesafe 75 mm olacak şekilde ayarlandı. ZFC ölçümünde olduğu gibi YBCO/PMG arası önce minimum aralık 5 mm, daha sonra başlangıç aralığı 75 mm'ye getirildi ve bu hareket süresince konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde düşey kuvvet verileri alındı.

FC rejiminde ise 5 ve 10 mm olmak üzere iki farklı soğutma yüksekliği için ölçüm yapıldı. Bütün ölçüm serilerinde olduğu gibi, soğutma işlemine geçmeden önce süperiletken numune merkezi, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı manyetizasyon yönelimli mıknatıs merkezi hizasına yerleştirildi. Düşey soğutma yüksekliği (CH=5mm veya CH=10mm) ayarlanarak, 15 dk. boyunca sıvı azot ile soğutma yapıldı. Numunenin süperiletken faza geçtiğinden emin olunduktan sonra mıknatıs üst yüzeyi ve YBCO alt yüzeyi arasındaki mesafe 75 mm oluncaya kadar uzaklaştırıldı ve tekrar başlangıç

konumundaki aralığa gelinceye kadar yaklaşıldı. Bilgisayar kontrollü gerçekleştirilen bu işlem süresince adım motorlar 1 mm/s hızla hareket ettirildi ve hareket boyunca konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde düşey kuvvet (F_z) verileri alındı.

2.4. Yatay Manyetik Kuvvet Ölçümlerinin Alınması

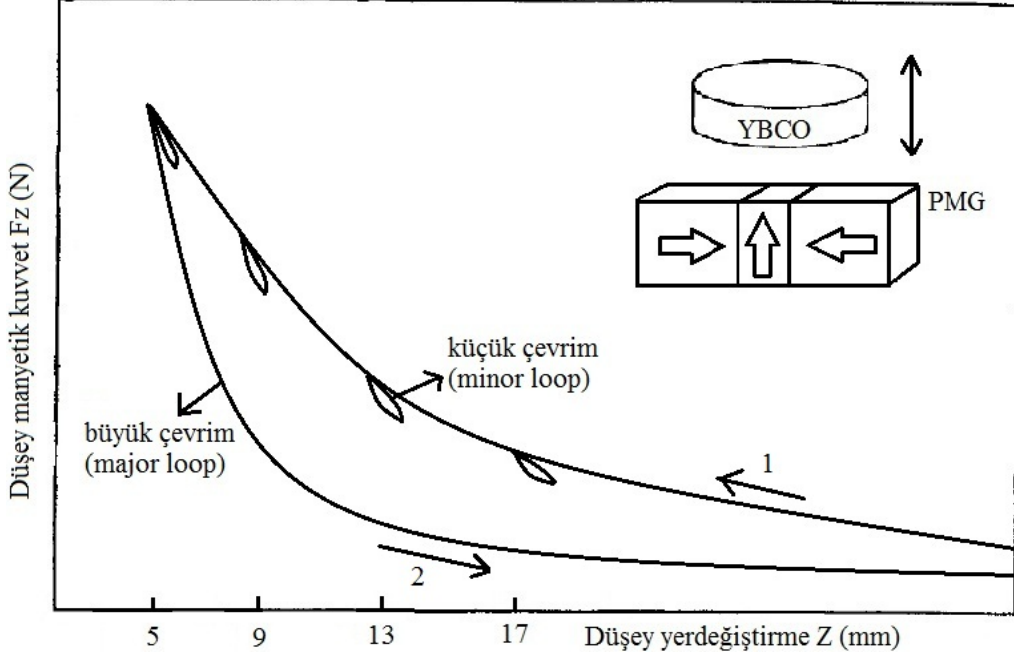
Süperiletkenler manyetik alan altında soğutulduklarında içine çivilenen manyetik akı, alansız soğutma şartına göre daha fazla olmaktadır. Bu nedenle Maglev sistemlerinde pasif yanal kararlılık sağlanabilmesi için alanlı soğutma rejimi daha etkilidir (Hull, 1999). Farklı HTS/PMG konfigürasyonları arasındaki etkileşmeden kaynaklanan manyetik kılavuzlama kuvveti değerleri farklı soğutma yükseklikleri ($CH=5, 10$ ve 15 mm) ve belirli çalışma yüksekliği ($WH=10$ mm) için ölçülmüştür.

Yatay manyetik kuvvet ölçümleri, oluşturulan HTS/PMG konfigürasyonlarının yanal harekete bağlı yatay manyetik kuvvet ölçümleri alınarak yapıldı. Soğutma işleminden önce süperiletken numune merkezi, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı manyetizasyon yönelimli mıknatıs merkezi hizasına yerleştirildi. Bu ölçümlerde, YBCO süperiletkeni farklı soğutma yüksekliklerinde 15 dk. boyunca sıvı azot ile soğutuldu. Soğutma işleminden sonra bütün ölçümlerde HTS/PMG arası düşey çalışma yüksekliği 10 mm olacak şekilde ayarlandı. Daha sonra başlangıç konumu $x=0$ mm olmak üzere, yanal olarak sırasıyla 8 mm $+x$, 16 mm $-x$ ve 8 mm $+x$ doğrultularında hareket için konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde yatay kuvvet (F_x) verileri alındı.

2.5. Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümlerinin Alınması

Farklı HTS/PMG konfigürasyonları arasındaki etkileşmeden kaynaklanan manyetik kaldırma kuvvetine bağlı Maglev sisteminin düşey yönde kararlılığının bir ölçüsü olan düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri farklı soğutma yükseklikleri için küçük çevrimler (minor loop) yöntemiyle ölçülmüştür (Şekil 2.7). Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümleri, süperiletken numune ile PMG yolu arasındaki mesafenin azalması sırasında alındı. Düşey manyetik kaldırma kuvveti ölçüm yöntemiyle benzer aşamalar izlenmiştir. Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümü için, alansız soğutma şartını sağlamak amacıyla numune mıknatıslardan yeterince uzak bir mesafede (75mm) soğutuldu ve daha sonra sırasıyla 17, 13, 9 ve 5mm yaklaşma mesafelerinde 2 mm'lik küçük çevrimler yapıldı. Bu çevrimleri

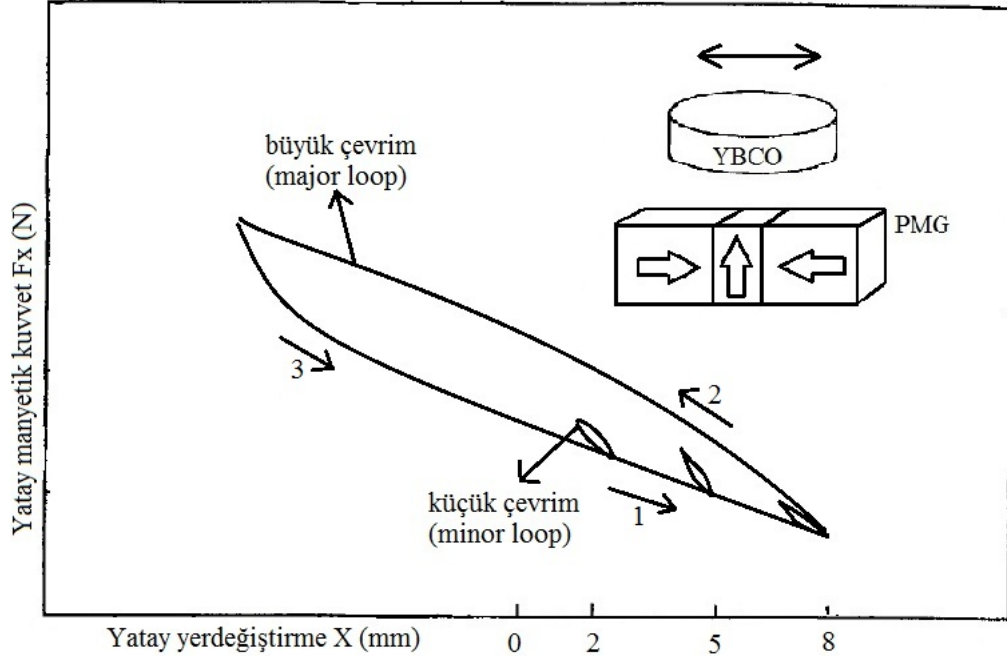
oluşturan noktalardan doğru geçirildi ve bu doğrularının eğimleri alınarak düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) değerlerine ulaşıldı. Daha sonra aynı yöntemle, farklı soğutma yükseklikleri (CH=5 ve 20 mm) için ölçümler yapıldı.



Şekil 2.7. Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin alınması

2.6. Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümlerinin Alınması

Farklı HTS/PMG konfigürasyonları arasındaki etkileşmeden kaynaklanan manyetik kılavuzlama kuvvetine bağlı yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri farklı soğutma yükseklikleri için küçük çevrimler yöntemiyle ölçülmüştür (Şekil 2.8). Bu ölçüm setinde de yatay manyetik kuvvet ölçümlerinde olduğu gibi çalışma yüksekliği 10 mm seçilmiştir. Yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerini elde etmek için hacimli YBCO numuneler farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5, 10 ve 15 mm) soğutuldu ve daha sonra yanal olarak sırasıyla 2, 5 ve 8 mm x eksen mesafelerinde 1 mm'lik küçük çevrimler yapıldı. Yanal manyetik kuvvet-yanal konum grafiğinden elde edilen büyük çevrim üzerindeki küçük çevrimlerden doğru geçirildi ve bu doğrularının eğimleri alınarak yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) değerlerine ulaşıldı.



Şekil 2.8. Yatay manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin alınması

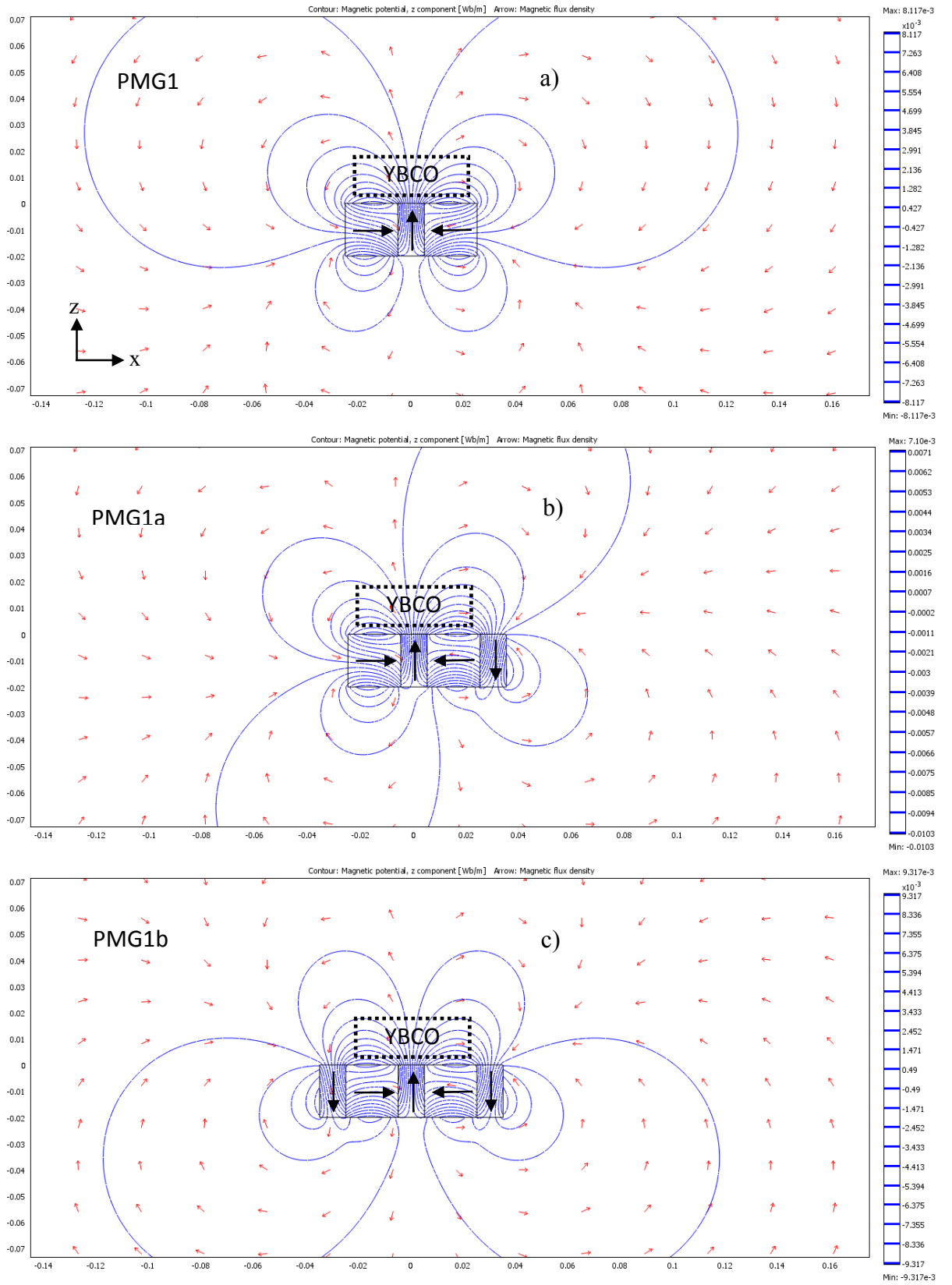
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. PMG Manyetik Alan Modelleme Sonuçları

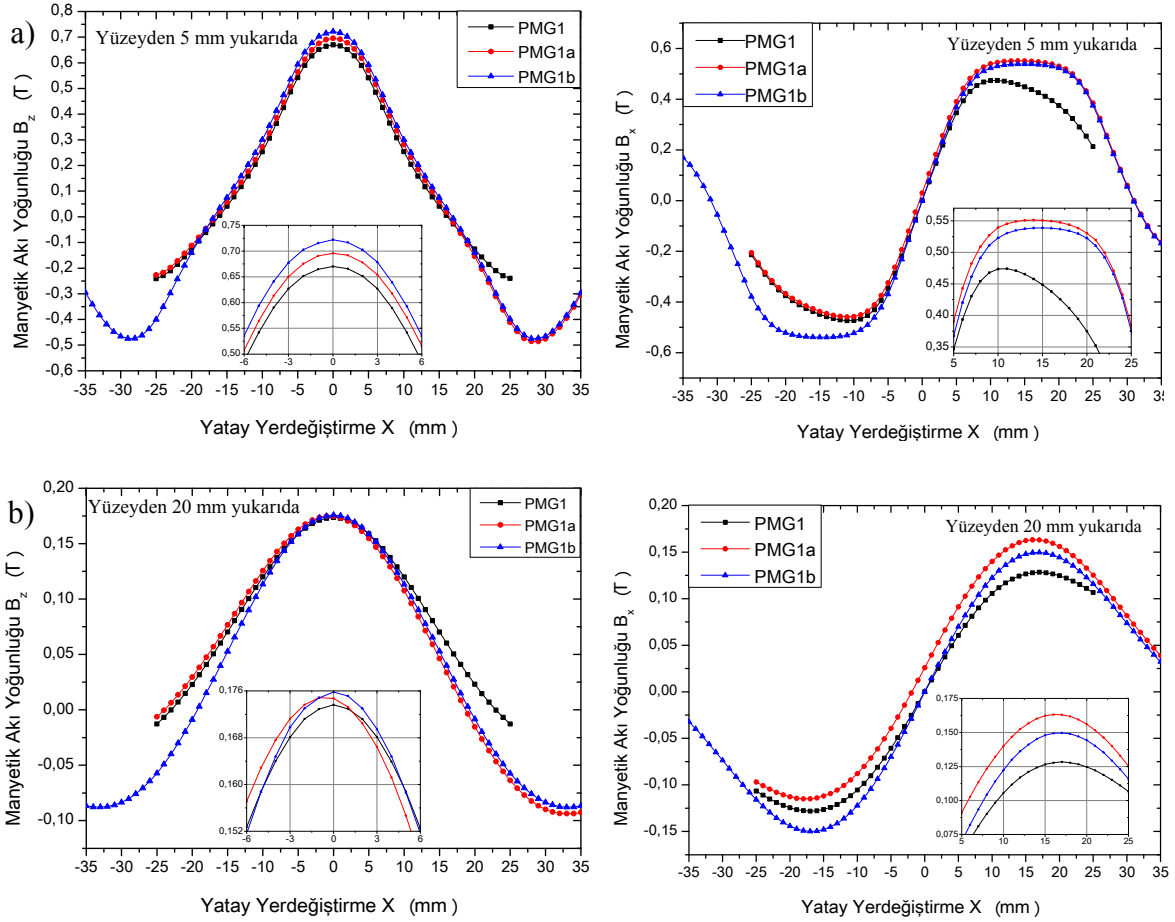
Şekil 3.1, PMG1, PMG1a ve PMG1b dizilimlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan manyetik alan ve manyetik akı dağılımını göstermektedir. Hesaplamalar COMSOL Multiphysics 3.5a paket programıyla yapılmıştır.

Şekilde görüldüğü gibi, PMG1 dizilimi zıt manyetizasyon yönelimli 40mmx20mmx20mm boyutlarına sahip iki mıknatıs ve akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı manyetizasyon yönelimli 40mmx20mmx10mm boyutlarında bir mıknatıs olmak üzere üç mıknatıstan oluşmaktadır. PMG1a dizilimini oluşturmak için PMG1 dizilimine ek olarak aşağı manyetizasyon yönelimli 40mmx20mmx10mm boyutlarında bir mıknatıs ilave edilmiştir. PMG1b dizilimi ise PMG1a'ya ek olarak bir adet aşağı manyetizasyon yönelimli mıknatıs ile birlikte toplamda beş adet mıknatıstan oluşmaktadır. Tüm dizilimlerde YBCO numune merkezi şekilde görüldüğü gibi yukarı manyetizasyon yönelimli mıknatıs merkezi hizasına yerleştirildi. Manyetik alan dağılımının yukarı ve aşağı manyetizasyon yönlü mıknatıs konumlarında yoğunlaştığı ve pik yaptığı görülmektedir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, maksimum manyetik alan şiddeti ve pik sayısı, PMG dizilimine bağlı olarak değişmektedir.

Literatürde geleneksel iki mıknatıslı PMG, düşey z yönünde bir manyetik alan pikine, 5 mıknatıslı Halbach PMG ise iki manyetik alan pikine sahiptir (Liu vd., 2008). Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan PMG1, PMG1a ve PMG1b dizilimleri z yönünde sırasıyla bir, iki ve üç kutba sahiptir. Manyetik alanın düşey bileşeni pik sayısı, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı veya aşağı manyetizasyon yönelimli mıknatıs sayısına bağlıdır. Şekil 3.2a ve Şekil 3.2b karşılaştırıldığında PMG yüzeyinden düşey yönde mesafe arttığında, manyetik akı yoğunluğunun hem düşey hem yatay maksimum değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Yüzeyden hem 5 mm hem de 20 mm düşey mesafeler için B_z maksimum değerleri PMG1b ve B_x maksimum değerleri PMG1a için görülmüştür. Yapılan birçok çalışmada manyetik kaldırma kuvvetinin, ortamdaki manyetik akı dağılımının genişliğine ve ortalama pik şiddetine bağlı olduğu belirtilmiştir (Deng vd., 2008).



Şekil 3.1. a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b dizilimlerinin manyetik alan ve manyetik akı dağılımı (oklar, manyetik akı yoğunluğunu göstermektedir)



Şekil 3.2. PMG1, PMG1a ve PMG1b dizilimlerinin yüzeyinden a) 5 mm ve b) 20 mm yukarıda x konumuna bağlı düşey B_z ve yatay B_x manyetik akı yoğunluğu değişimi

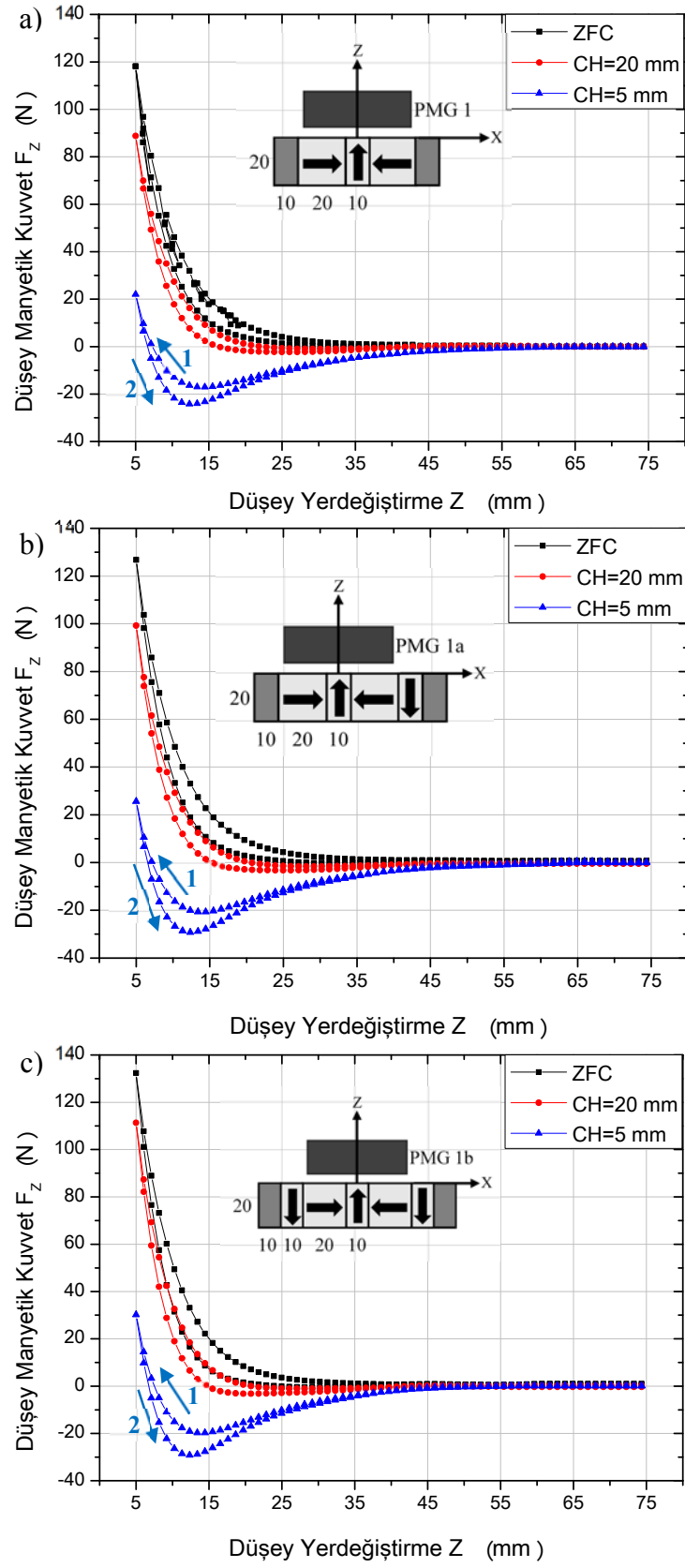
3.2. Düşey Manyetik Kuvvet Ölçümleri

3.2.1. Farklı Soğutma Yüksekliklerinde Düşey Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.3, farklı soğutma yüksekliklerinde PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonları için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Bu ölçümlerin tümünde HTS/PMG arası mesafe önce minimum mesafeye kadar azaltılmış ardından 75 mm olacak şekilde arttırılmıştır. Şekilde görülen numaralı oklar hareket sıralamasını göstermektedir. HTS/PMG arası etkileşme uzak mesafelerde (> 50 mm) çok az olduğundan, bu bölgelerde manyetik kuvvet değerleri ihmal edilecek kadar azdır. HTS/PMG aralığı minimum değere yaklaştıkça alışlagelen kaldırma kuvveti eğrisi gözükmemektedir. Bu eksponansiyel davranış, HTS/PMG birbirine yaklaştıkça PMG'nin

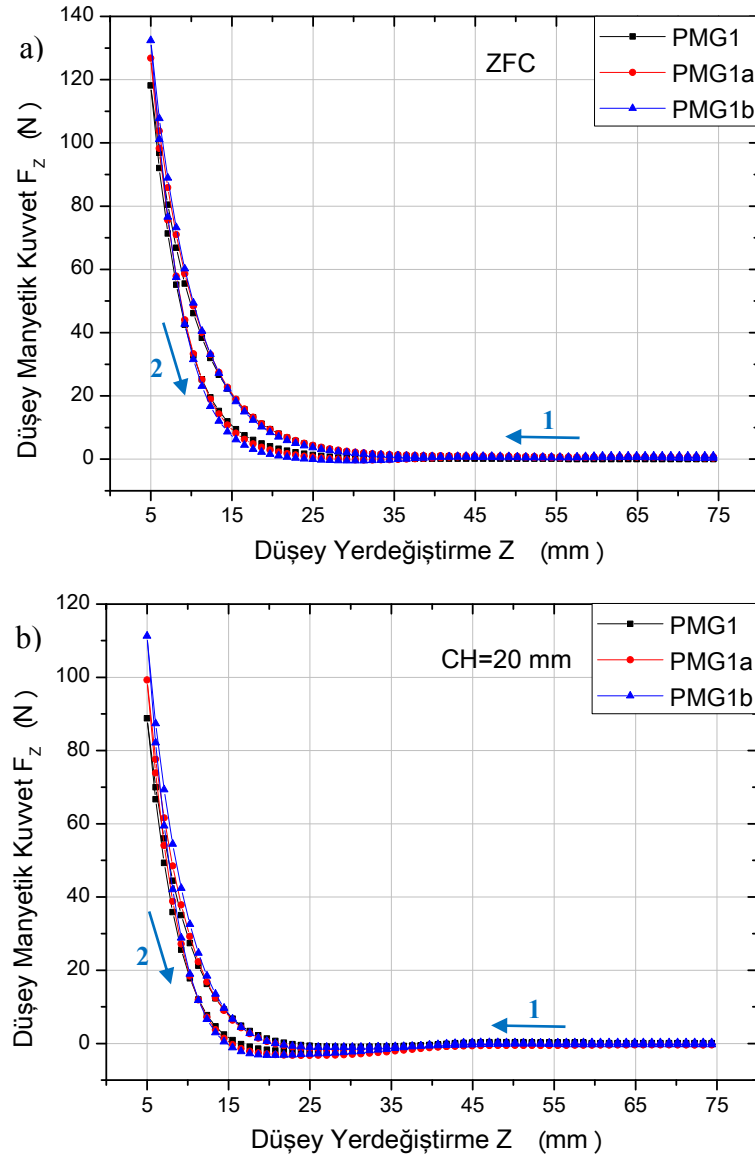
HTS'ye göre yatay ve düşey genişlemesi ile belirginleşir. Her bir konfigürasyon için soğutma yüksekliği azaldıkça maksimum manyetik kuvvetin azaldığı söylenebilir. Bu durum süperiletken malzemelerin soğutma şartlarına bağlı olarak farklı davranışlar göstermesinden kaynaklanmaktadır. Şekilden, soğutma mesafesi 5 mm'den 75 mm (ZFC)'ye çıktığında maksimum kaldırma kuvveti değerinin PMG1 yolu için 22 N'dan 118 N'a, PMG1a yolu için 25,6 N'dan 126,8 N'a ve PMG1b yolu içinse 30,2 N'dan 132,4 N'a çıktığı görülmektedir. Tüm numunelerde 5 mm soğutma mesafesinde numunede tuzaklanan yüksek akı yoğunluğu nedeniyle çekme kuvvetinin baskın olduğu gözükmektedir. PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonları için 5 mm soğutma mesafesinde maksimum çekme kuvveti değerleri sırasıyla -24,1 N, -29,2 N ve -29,2 N'dur. Öte yandan, kaldırma kuvvetindeki artışın ZFC ve 20 mm soğutma yüksekliklerinde daha az olması, bu yüksekliklerde numunelerde tuzaklanan akının az ve bu değerlerin birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

PMG1b ile elde edilen kaldırma kuvveti değerlerinin PMG1 ve PMG1a'dan büyük olduğu görülmektedir. Kaldırma kuvvetindeki artışı, mıknatıs yoluna kademeli olarak eklenen mıknatıslarla birlikte gelişen ve Şekil 3.2'de de görülen manyetik akı dağılımının ve PMG yolu ile üstteki süperiletken numunelerin geometrik uyumu ile açıklamak mümkündür. PMG1b kaldırma kuvveti değerlerinin büyük olması, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi PMG1b'nin B_z pik değerinin diğer iki PMG'den büyük olması nedeniyle hacimli YBCO süperiletkenine daha fazla akım indüklenmesinden kaynaklanmaktadır. Deng ve arkadaşları, tek kutuplu geleneksel PMG ve çift kutuplu Halbach PMG'yi manyetik alan kaynağı olarak karşılaştırdıkları bir çalışma sonucunda, kutup sayısı arttıkça sistemin kararlı kaldırma performansının arttığını gözlemladiler (Deng, 2008). Şekil 3.3'deki veriler literatürdeki bu çalışma ile uyumluluk göstermektedir. Liu ve arkadaşları, Şekil 3.3a'daki PMG1 yoluna benzer bir kılavuzlama yolu ve 7 adet 30 mm çapında ve 17 mm yüksekliğinde YBCO numune arasında 30 mm soğutma yüksekliğinde Maglev kaldırma performansını incelediler (Liu, 2009). Elde ettikleri sonuca göre süperiletken ve PMG arası minimum mesafe 10 mm olmak üzere yaklaşık 150 N maksimum kaldırma kuvveti gözlemladiler. Şekil 3.3a'dan görüldüğü üzere, PMG1 konfigürasyonu için 20 mm soğutma yüksekliği ve minimum yaklaşma mesafesi 5 mm'de yaklaşık 90 N kaldırma kuvveti gözlemlendi. PMG1 konfigürasyonununun 45 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde tek YBCO numunesine sahip olduğu göz önüne alındığında elde edilen kuvvetin önemi algılanabilir.



Şekil 3.3. Farklı soğutma yüksekliklerinde a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b konfigürasyonları için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı

Şekil 3.4'te farklı soğutma mesafeleri için PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonlarının manyetik kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması görülmektedir. İlgili konfigürasyonların ZFC durumunda 20 mm soğutma yüksekliğine göre maksimum kaldırma kuvveti değerlerinin birbirine daha yakın olduğu ve ayrıca 20 mm soğutma yüksekliğinde ZFC'ye göre daha fazla çekme kuvvetine sahip oldukları görülmektedir.

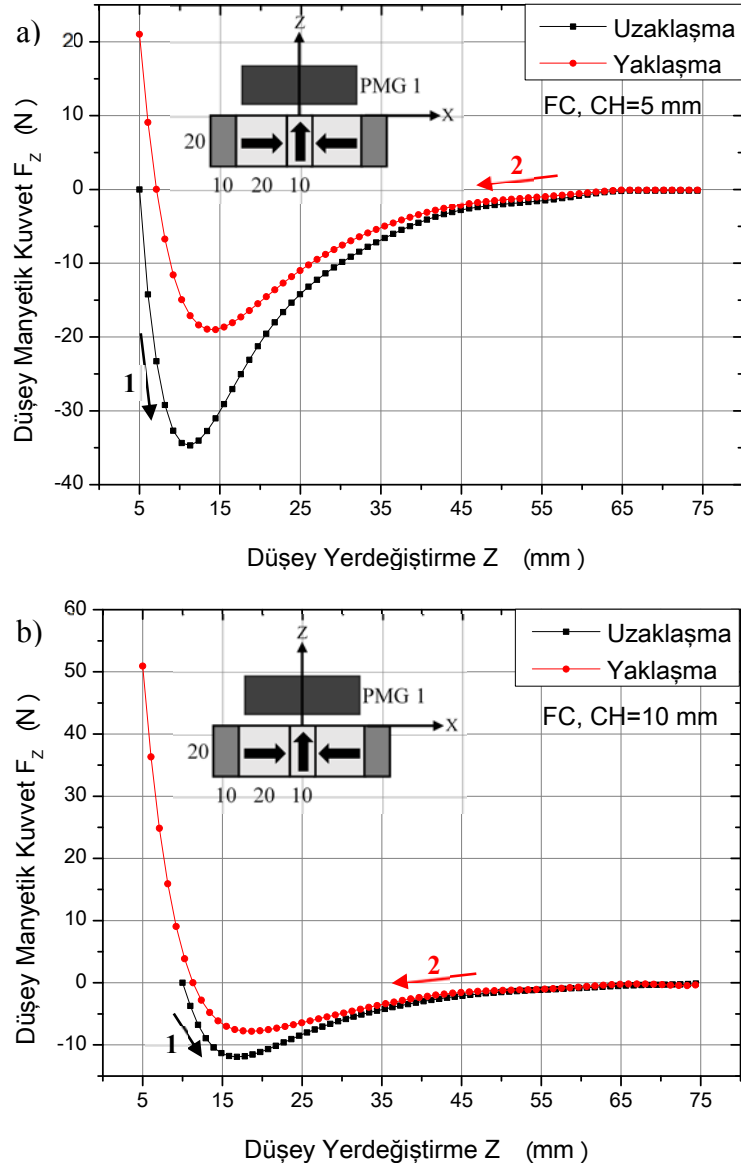


Şekil 3.4. PMG1, PMG1a ve PMG1b'nin a) ZFC ve b) CH= 20 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.2.2. FC Alanlı Soğutma Rejiminde Düşey Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları

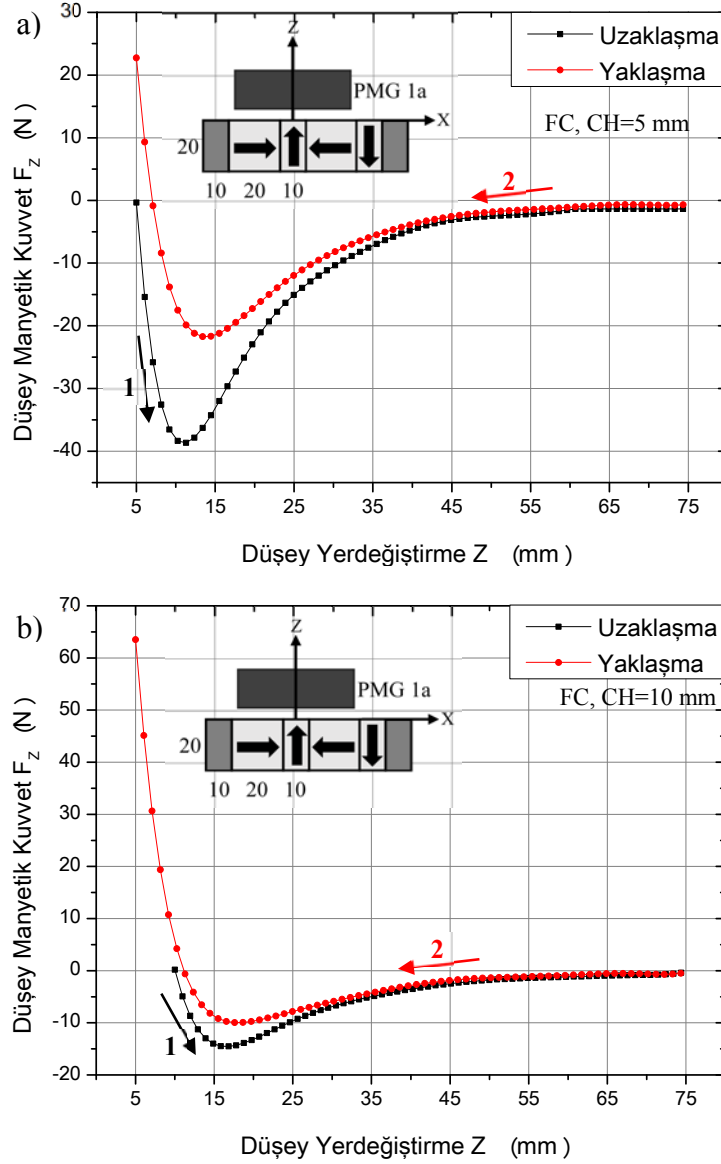
Şekil 3.5, FC rejiminde farklı soğutma yüksekliklerinde soğutulan PMG1 konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığını göstermektedir. FC rejiminde yapılan bütün ölçümlerde, HTS/PMG arası mesafe önce artırılmış sonra ise minimum mesafeye ($z=5$ mm) gelecek şekilde azaltılmıştır. Şekilde görülen numaralı oklar hareket sıralamasını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 5 mm soğutma yüksekliği durumunda çekici kuvvet değeri -34,7 N, itici kuvvet değeri ise 21 N ve 10 mm soğutma yüksekliği için çekici kuvvet değeri -11,9 N, itici kuvvet değeri ise 50,9 N olarak ölçülmüştür. Soğutma yüksekliği arttıkça kaldırma kuvvetinin çekici kısmı azalmakta, itici kısmı ise artmaktadır. Şekil 3.5’de görüldüğü üzere, soğutma yüksekliği arttıkça PMG’nin oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu azalır ve bu nedenle süperiletken numunede daha az akı tuzaklanır. Bu durum, numunede tuzaklanan akı miktarına bağlı olan çekici kuvvetin azalmasına, itici kuvvetin ise artmasına sebebiyet verir.

PMG1 konfigürasyonu için Şekil 3.3a ve Şekil 3.5a karşılaştırıldığında, aynı soğutma yüksekliği ($CH=5$ mm) durumunda HTS/PMG arası düşey mesafe Şekil 3.3a’da önce azaltılmış sonra artırılmışken, Şekil 3.5a’da ise önce artırılmış sonra azaltılmıştır. Yukarıda hareket sırası tanımlanan ölçümler sonucunda, Şekil 3.5a’da görülen FC alanlı soğutma rejimi $CH=5$ mm soğutma yüksekliğine göre 10 N’dan fazla çekici kuvvet değerine sahip olurken itme kuvvetinde hemen hemen bir değişiklik görülmemiştir. Bu durum istenen özellikte manyetik kuvvet elde etmede numunenin maruz kaldığı manyetik alan geçmişinin ne derece önemli olduğunu gösterir.



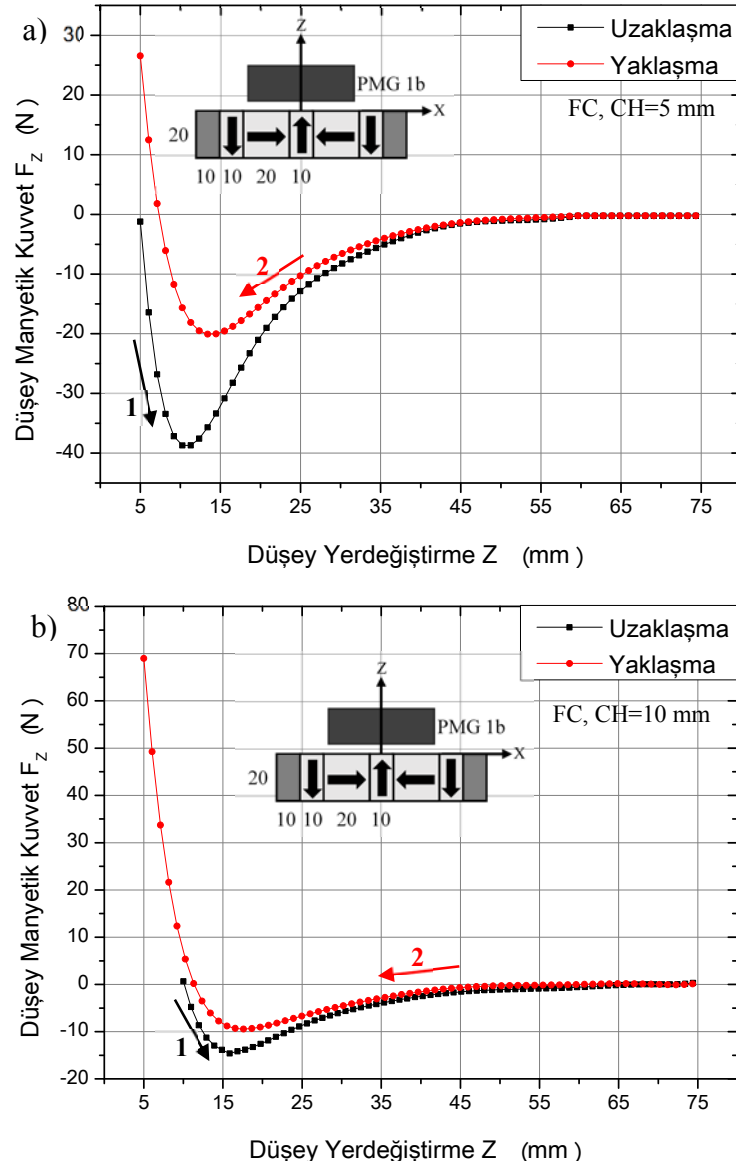
Şekil 3.5. FC rejiminde soğutulan PMG1 konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) $CH=5$ mm, b) $CH=10$ mm

Şekil 3.6, FC rejiminde farklı soğutma yüksekliklerinde soğutulan PMG1a konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 5 mm soğutma yüksekliği durumunda çekici kuvvet değeri -38,6 N, itici kuvvet değeri ise 22,7 N ve 10 mm soğutma yüksekliği için çekici kuvvet değeri -14,4 N, itici kuvvet değeri ise 66,5 N olarak ölçülmüştür. Her iki soğutma yüksekliğinde PMG1a, PMG1 konfigürasyonundan daha büyük çekici ve itici kuvvetlere sahiptir. Bunun nedeni, yapılan modellemede görüldüğü üzere PMG1a'nın daha yüksek düşey ve yatay maksimum akı yoğunluğu büyüklükleridir.



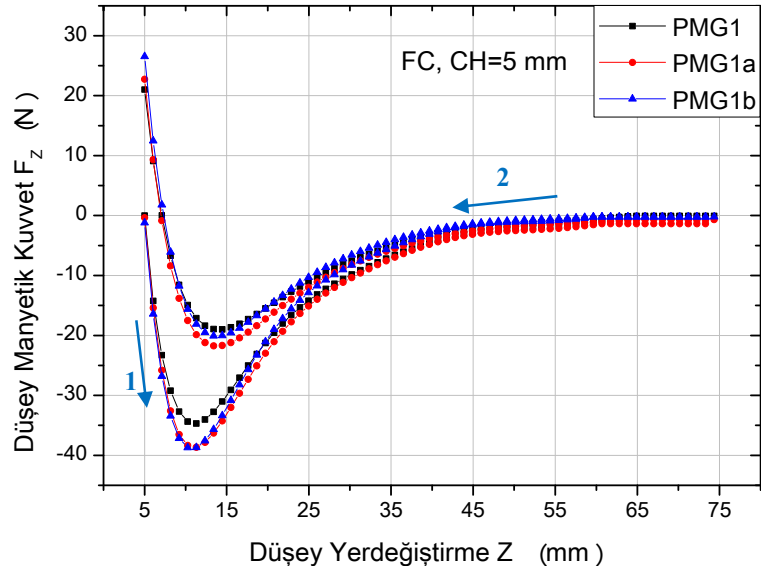
Şekil 3.6. FC rejiminde soğutulan PMG1a konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) $CH=5$ mm, b) $CH=10$ mm

Şekil 3.7, FC rejiminde farklı soğutma yüksekliklerinde soğutulan PMG1b konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 5 mm soğutma yüksekliği durumunda çekici kuvvet değeri -38,7 N, itici kuvvet değeri ise 26,5 N ve 10 mm soğutma yüksekliği için çekici kuvvet değeri -14,6 N, itici kuvvet değeri ise 68,9 N olarak ölçülmüştür. PMG1b konfigürasyonu PMG1a'dan biraz daha büyük çekici ve itici kuvvetlere sahiptir.



Şekil 3.7. FC rejiminde soğutulan PMG1b konfigürasyonu için düşey manyetik kuvvetin düşey yerdeğiştirmeye bağlılığı a) $CH=5$ mm, b) $CH=10$ mm

Şekil 3.8’de FC durumunda, PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonlarının 5 mm soğutma yüksekliği için kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. PMG1 dizilimi aralarında en düşük çekici kuvvet değerine sahipken diğer iki konfigürasyon birbirine yakın maksimum değerlere sahiptirler. Ayrıca PMG1b en büyük histerizeze sahiptir. Manyetik kuvvet-konum grafiklerinde histerize genişliğinin artması, süperiletken numunede tuzaklanan manyetik akının artması ve numunenin manyetik bir hafıza kazanması ile açıklanabilir.



Şekil 3.8. CH=5 mm için, PMG1, PMG1a ve PMG1b konfigürasyonlarının FC durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

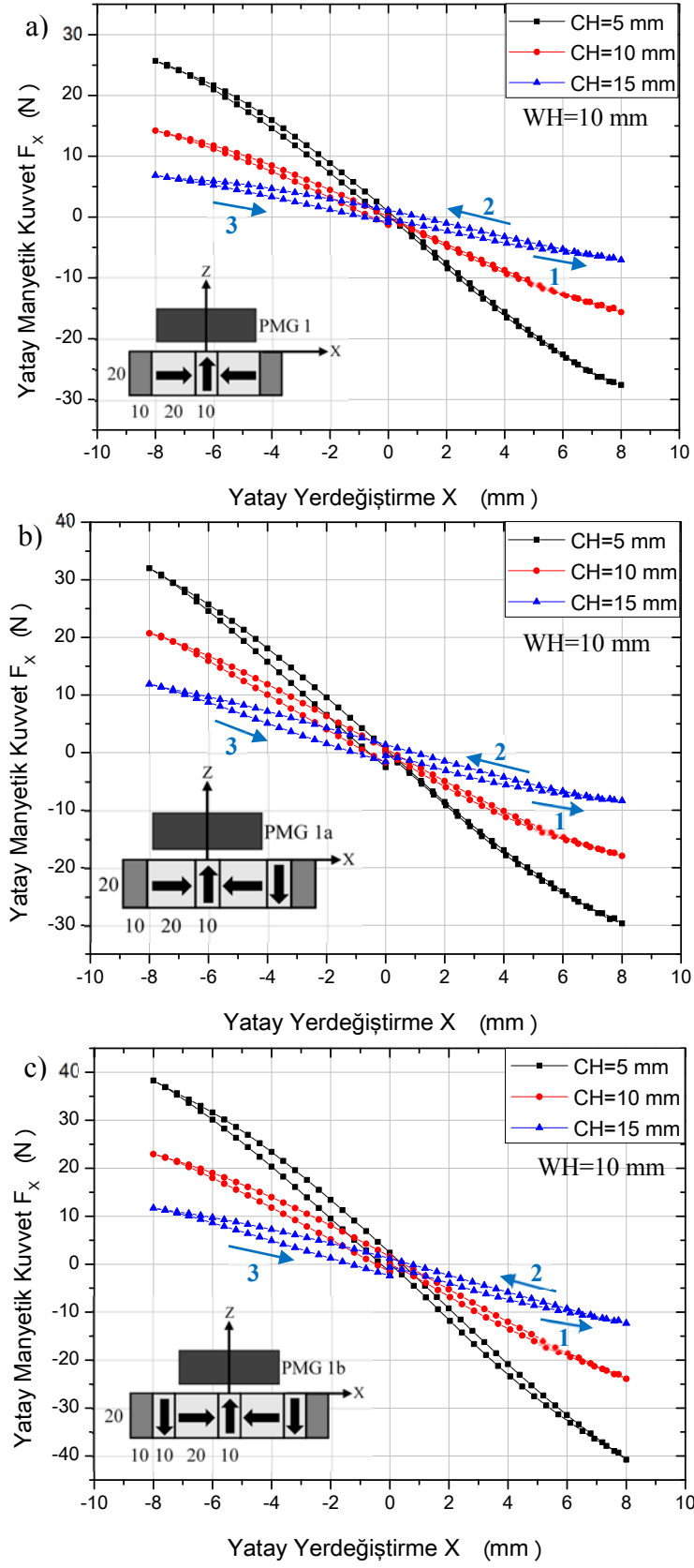
3.3. Farklı Soğutma Yüksekliklerinde Yatay Manyetik Kuvvet Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.9, farklı soğutma yüksekliklerinde PMG1, PMG1a ve PMG1b mıknatıs-süperiletken konfigürasyonları için yatay manyetik kuvvetin yatay yerdeğiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Bu ölçümlerin tümünde, ölçüm öncesi çalışma yüksekliği yani HTS/PMG arası düşey mesafe 10 mm olacak şekilde ayarlandı. Şekilde görülen numaralı oklar hareket sıralamasını göstermektedir. Maglev sistemlerinde kılavuzlama kuvveti, sistemin yatay yöndeki manyetik kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Bu manyetik kuvvet, yatay harekete karşı oluşan geri çağırıcı kuvvetin büyüklüğüne işaret eder. Şekilden görüldüğü gibi soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvveti artmaktadır. Bu durum, düşük soğutma mesafelerinde numune içerisinde daha fazla akı çivileme merkezlerinin olmasından ve dolayısıyla süperiletken malzemede daha fazla manyetik alan tuzaklanmasından kaynaklanmaktadır (Deng, 2011).

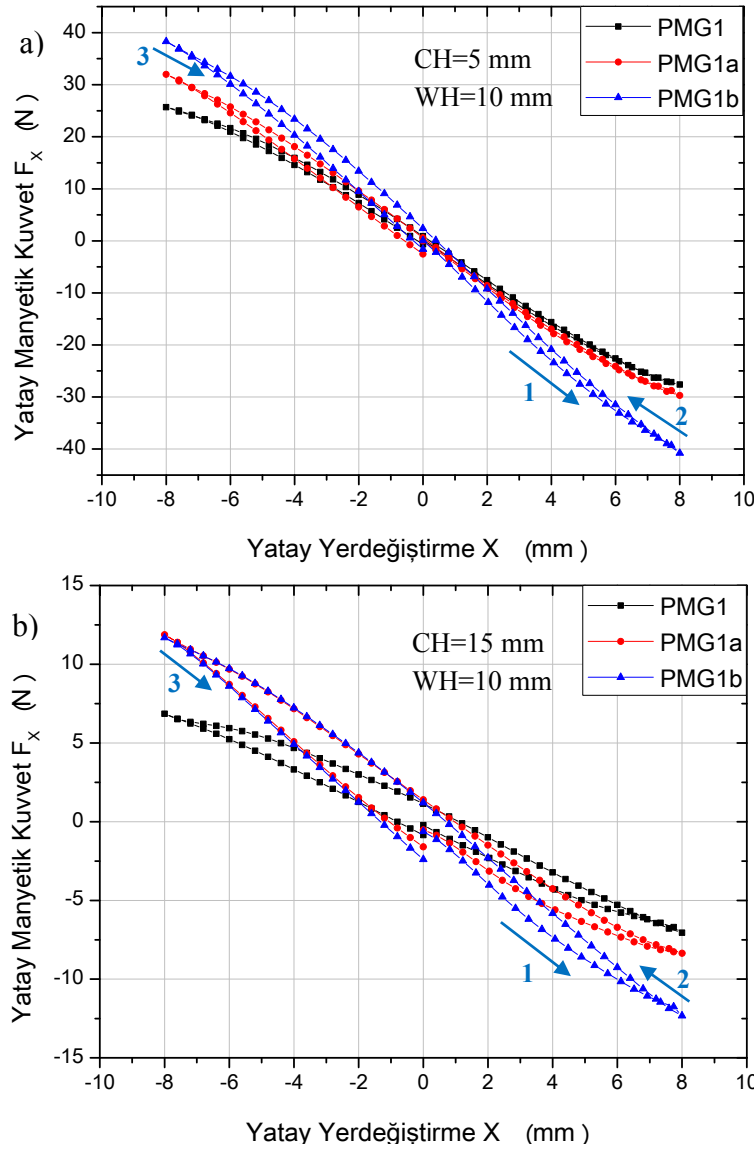
PMG1 konfigürasyonu ile gözlenen maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 27,6 N, 15,6 N ve 7 N'dur. PMG1a yolu ile elde edilen maksimum kılavuzlama kuvvet değeri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 32 N, 20,7 N ve 12 N'dur. Benzer şekilde PMG1b yolu ile maksimum kılavuzlama kuvvet değeri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 40,7 N, 24 N ve 12,3 N olarak ölçülmüştür. PMG1b yolu, düşey manyetik kuvvet verilerinde olduğu gibi yatay manyetik kuvvet verilerinde de maksimum değerlere sahiptir.

Dias ve arkadaşları, 90mmx36mmx15mm boyutlarında üç tohumlu YBCO numunesi ve akıyı homojenleştirmek için aralarında demir blok bulunan toplam altı mıknatıstan oluşan üç sıra iki zıt manyetizasyon yönelimli mıknatısa sahip geleneksel PMG arasında farklı soğutma şartları için yanal manyetik kuvvet üzerine çalıştılar (Dias, 2011). Çalışma yüksekliği 5 mm olmak üzere 10 mm soğutma yüksekliğinde yaklaşık 90 N maksimum yanal manyetik kuvvet ölçtüler. Bizim çalışmamızda, PMG1b konfigürasyonu için 10 mm çalışma yüksekliği ve aynı soğutma yüksekliği için maksimum yanal manyetik kuvvet değeri 24 N ölçülmüştür. İki çalışmada da soğutma yükseklikleri aynı olsa da aradaki yaklaşık 66 N'luk farkın nedeni farklı çalışma yükseklikleri, süperiletken numuneler ve manyetik alan dağılımlarıdır.

Şekil 3.10'da PMG1, PMG1a ve PMG1b'nin 5 mm ve 15 mm soğutma yüksekliklerindeki yatay manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Tüm PMG'ler için soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvvetinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda numunelerin x ekseninde hareketi sırasında meydana gelen çekici kuvvetler, tüm PMG'ler için sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. PMG1b konfigürasyonu dikey manyetik kaldırma kuvveti verilerinde olduğu gibi yatay manyetik kılavuzlama kuvveti verilerinde de hem 5 hem de 15 mm soğutma yükseklikleri için maksimum değerlere sahiptir.



Şekil 3.9. Farklı soğutma yüksekliklerinde a) PMG1, b) PMG1a ve c) PMG1b konfigürasyonları için yatay manyetik kuvvetin yatay yerdeğiştirmeye bağlılığı



Şekil 3.10. PMG1, PMG1a ve PMG1b'nin a) $CH=5$ mm ve b) $CH=15$ mm durumundaki kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.4. Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçümleri

3.4.1. Tek Numuneli Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları

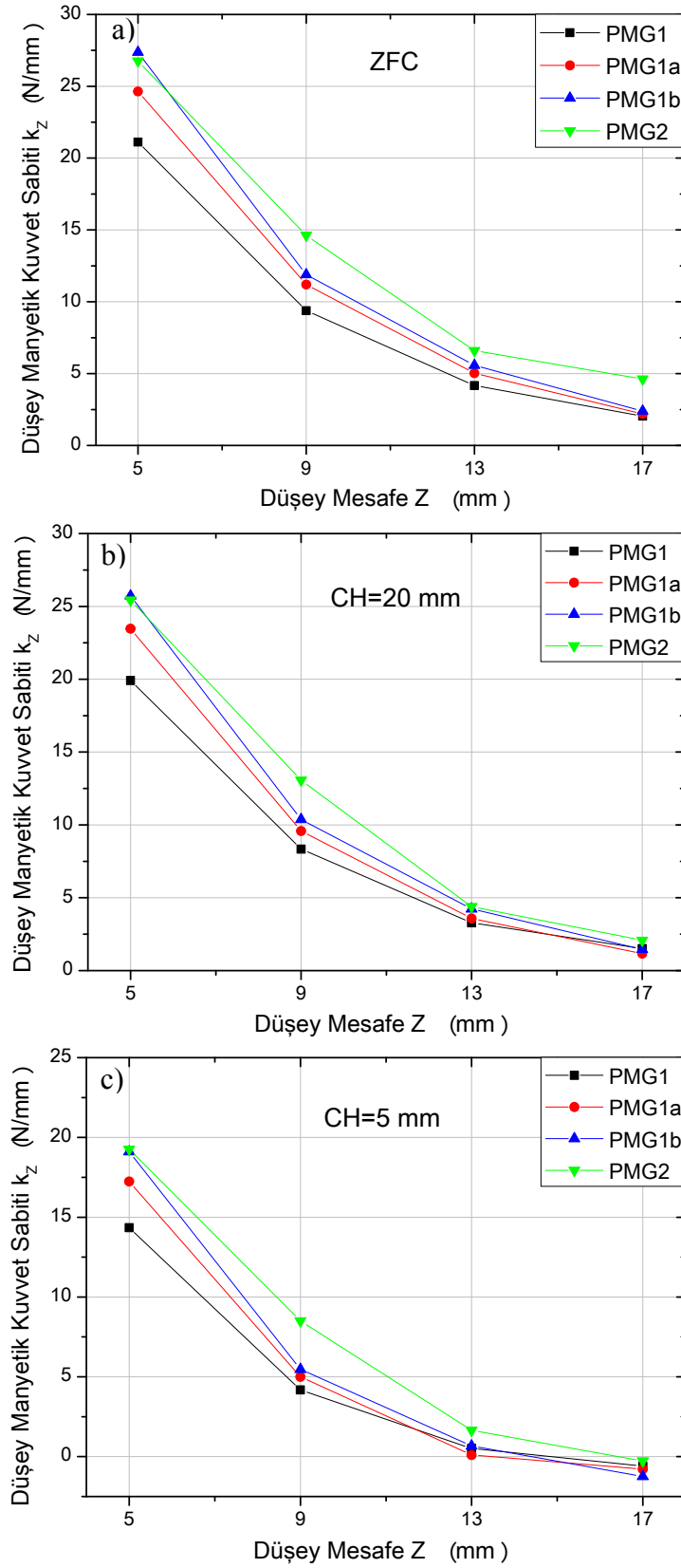
Şekil 3.11, farklı soğutma rejimlerinde (ZFC, $CH=20$ mm, $CH=5$ mm), PMG1, PMG1a, PMG1b ve PMG2 konfigürasyonları arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığını göstermektedir. Burada düşey mesafe, HTS alt yüzeyi ile PMG üst yüzeyi arasındaki düşey aralığı tanımlamaktadır. Düşey manyetik kuvvet sabiti hesaplamaları, Şekil 3.3a'da PMG1 dizilimi ZFC soğutma şartında gösterilen 17, 13, 9 ve 5 mm düşey mesafelerde oluşturulan küçük çevrimlere yardımıyla yapılmıştır. Bu çevrimleri

oluşturan noktalardan doğru geçirildi ve bu doğrularının eğimleri alınarak, $k_z = -\Delta F_z / \Delta z$ denkleminde yerine yazılıp düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) değerlerine ulaşıldı. Bütün düşey ve yatay manyetik sertlik hesaplamaları benzer şekilde gerçekleştirildi.

. Şekil 3.11a'da görüldüğü gibi, ZFC soğutma rejiminde 5 ve 17 mm düşey aralıklarda gözlenen manyetik sertlik değerleri sırasıyla PMG1 için 21,1 N/mm ve 2 N/mm; PMG1a için 24,6 N/mm ve 2,2 N/mm; PMG1b için 27,4 N/mm ve 2,4 N/mm; PMG2 için 26,7 N/mm ve 4,6 N/mm'dir. PMG2'nin büyük düşey aralıklarda diğer konfigürasyonlardan daha fazla manyetik sertliğe sahip olması, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan ortadaki mıknatıs yüzey alanının diğer dizilimlerdekinden iki katı fazla olması ve böylece daha geniş etkin manyetik alan bölgesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Tüm soğutma şartlarında, minimum yaklaşma mesafesi olan 5 mm'de PMG1b konfigürasyonu diğer dizilimlerden daha fazla düşey manyetik sertliğe sahiptir. Bu duruma PMG1b'nin üç kutbu ile daha yüksek düşey manyetik akı yoğunluğu oluşturmasının neden olduğu düşünülebilir. Manyetik kutup sayısı arttıkça manyetik sertliğin artması literatürle de uyumlu bir sonuçtur (Deng, 2008). Bunun yanı sıra soğutma mesafeleri arttıkça düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Düşey manyetik kuvvet sabitindeki artış yüksek soğutma mesafelerinde numunelerde tuzaklanan alanın az olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum manyetik kaldırma kuvvetinin ve dolayısıyla manyetik kuvvet sabitinin artmasına yol açmaktadır.

Literatürde, 10 mm soğutma yüksekliğinde, bir adet çapı 30 mm ve yüksekliği 15 mm olan YBCO süperiletkeni ile aralarında demir bulunan iki zıt manyetizasyon yönelimli PM'ye sahip geleneksel PMG arasında 5 mm düşey mesafede manyetik kuvvet sabiti 12 N/mm bulunmuştur (Lu, 2011a). Bizim çalışmamızda Şekil 3.11c'de görüldüğü üzere, 5 mm soğutma yüksekliğinde, bir adet YBCO ile iki zıt manyetizasyon yönelimli PM ve aralarında bir yukarı manyetizasyon yönelimli toplam 3 adet PM'den oluşan PMG2 konfigürasyonunda, 5 mm düşey mesafede yaklaşık 20 N/mm değerine ulaşılmıştır. Buradan, akı yoğunlaştırıcı olarak yukarı manyetizasyon yönelimli PM'ye sahip PMG diziliminin geleneksel PMG'lere göre daha uygun bir manyetik alan dağılımı sağladığı sonucu çıkarılabilir.

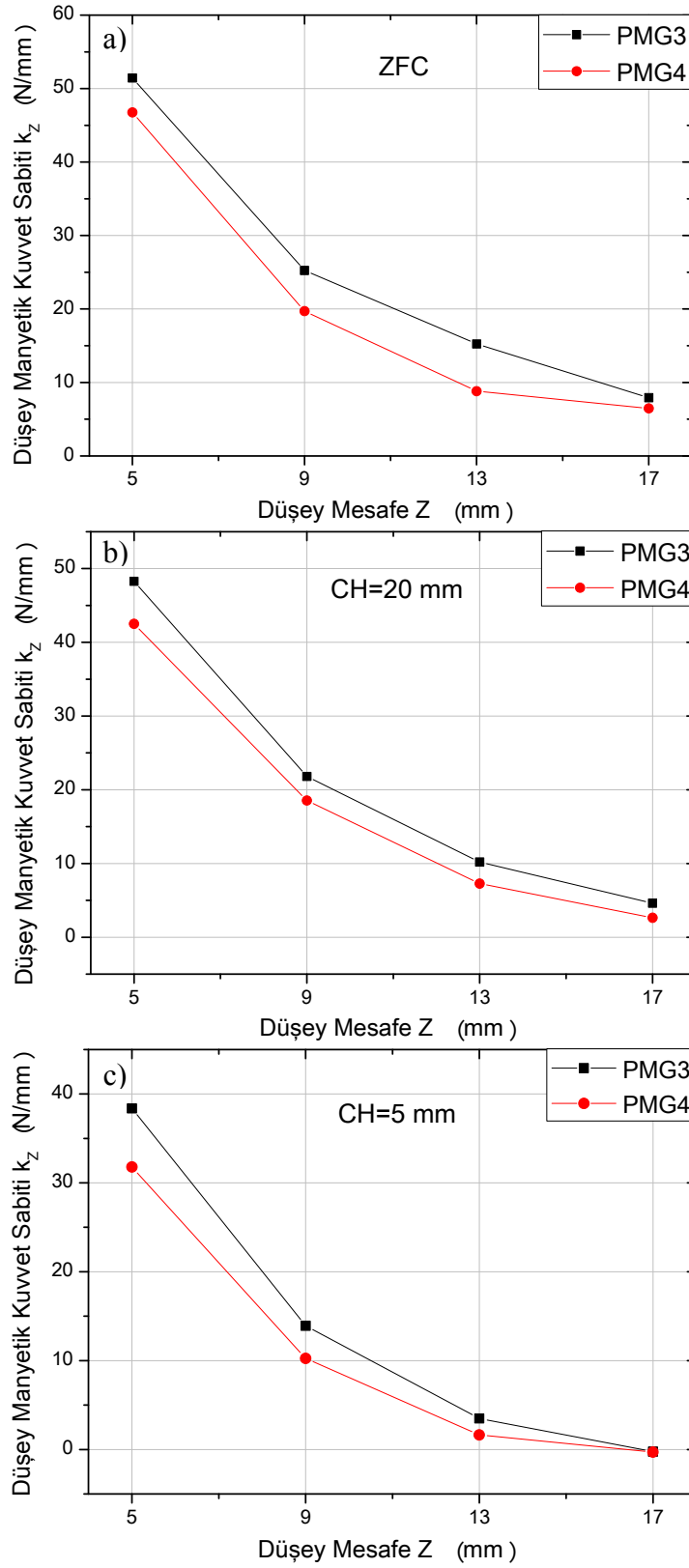


Şekil 3.11. Farklı konfigürasyonlar için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağıllığı, a) ZFC, b) CH=20 mm, c) CH=5 mm

3.4.2. İki Numuneli Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.12, farklı soğutma rejimlerinde (ZFC, CH=20mm, CH=5mm), PMG3 ve PMG4 konfigürasyonları arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağıllığını göstermektedir. Şekil 3.11a'da görüldüğü üzere, ZFC soğutma şartında PMG2 diziliminde tek YBCO süperiletkeni, minimum yaklaşma mesafesi olan 5 mm'de 26,7 N/mm düşey manyetik kuvvet değerine sahiptir. Bu değer, iki YBCO içeren benzer dizilimli 7 mıknatıs sahip PMG3 konfigürasyonundaki aynı yükseklikteki manyetik kuvvet sabiti değerinin (51,4 N/mm) yaklaşık yarısı kadardır. Tüm soğutma şartlarında, PMG3 diziliminin maksimum düşey manyetik kararlılığı PMG4 dizilimine göre daha yüksektir. Elde edilen bu veriler sonucunda, daha öncede bahsedildiği gibi akı yoğunlaştırıcı yukarı manyetizasyon yönelimli mıknatıs yüzey alanının düşey manyetik kuvvet sabitini artmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, PMG1b yoluna iki mıknatıs ilavesiyle üç kutuplu PMG4 yolu elde edilip düşey manyetik kuvvet sabiti değeri PMG1b'ye göre %70 artmıştır.

Şekil 3.12'den görüldüğü üzere, tüm soğutma şartları ve farklı konfigürasyonlar için düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin, süperiletken hazne ve PMG yolu arasındaki mesafe azaldıkça arttığı görülmektedir. Manyetik kaldırma kuvveti ve buna bağımlı kuvvet sabiti değerleri, süperiletken ve manyetik alan dağılımı arasındaki etkileşmeden kaynaklanır. Bilindiği üzere, süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kuvvet, manyetik akı gradyenti ile orantılıdır (dB/dz). Yani süperiletken ve PMG yolu arasındaki mesafe azaldıkça manyetik akı gradyenti artar ve dolayısıyla manyetik kaldırma kuvveti ile bunun gradyenti olan manyetik kuvvet sabiti değeri artar.

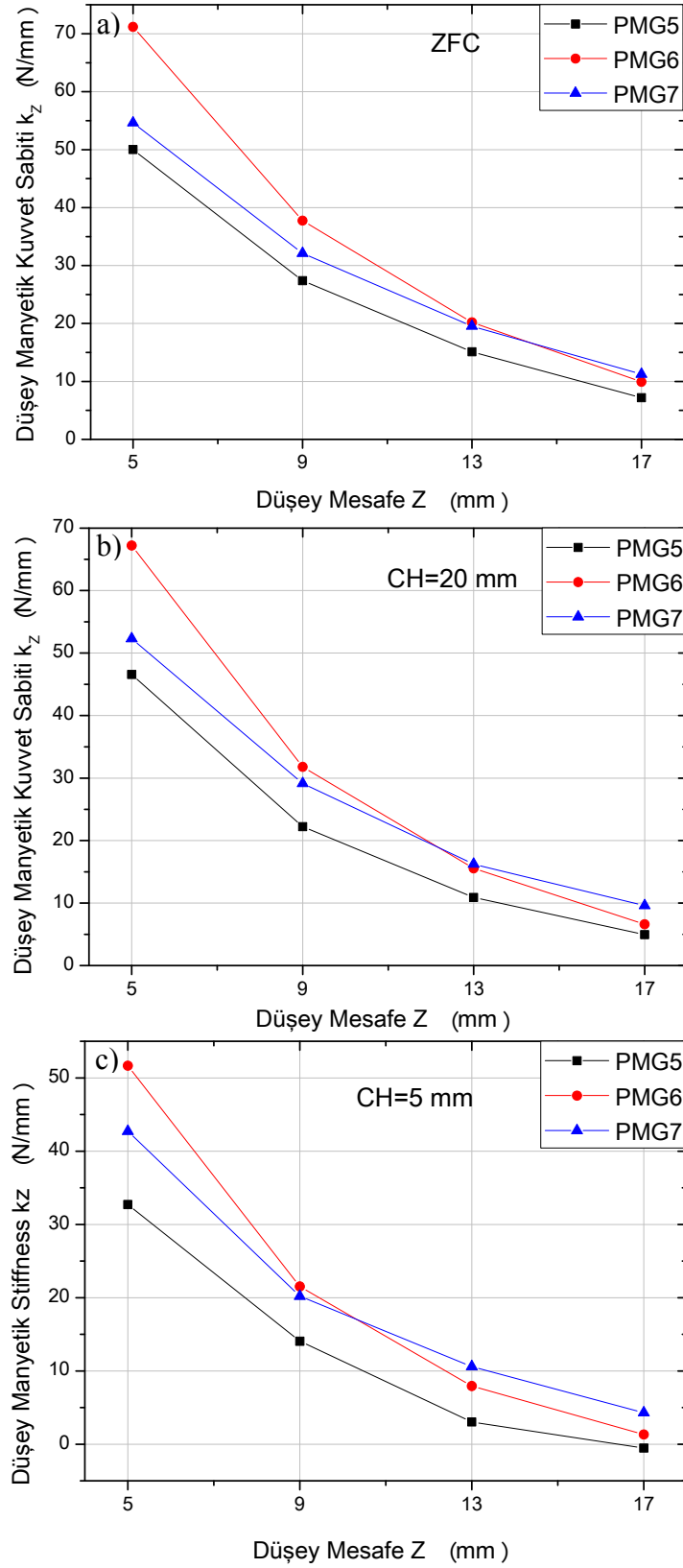


Şekil 3.12. PMG3 ve PMG4 konfigürasyonları için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı, a) ZFC, b) CH=20 mm, c) CH=5 mm

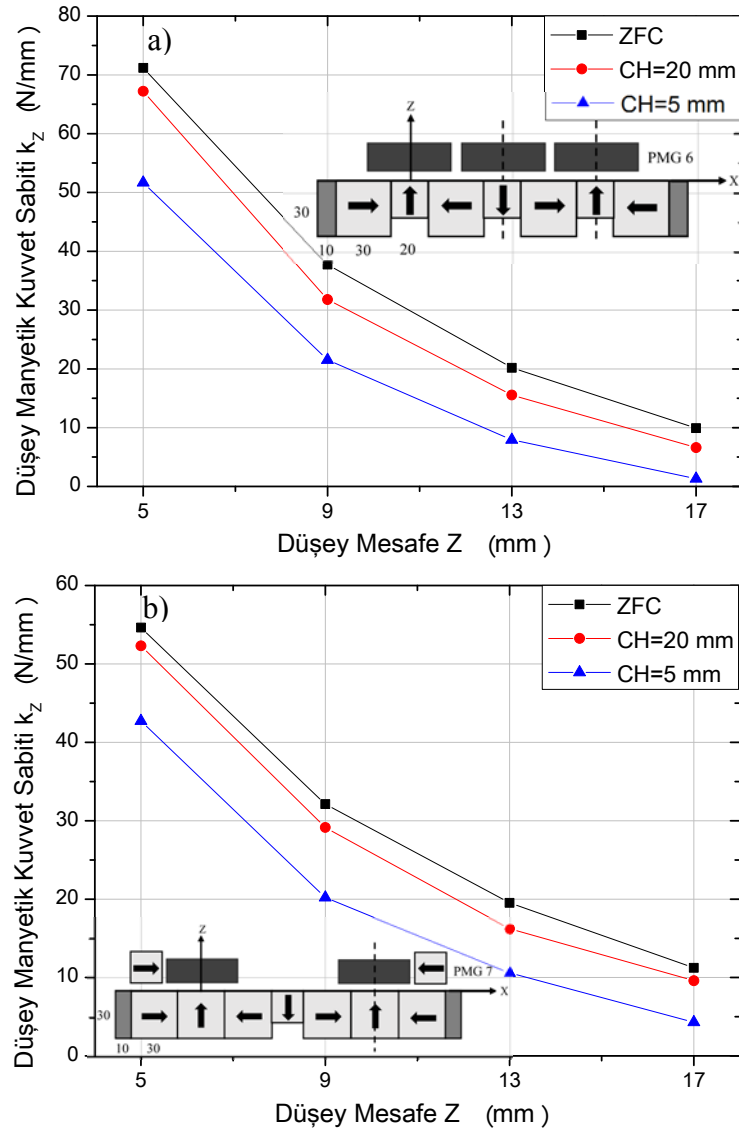
3.4.3. Üç Numuneli ve Hibrit Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.13, farklı soğutma rejimlerinde (ZFC, CH=20mm, CH=5mm), PMG5, PMG6 ve PMG7 konfigürasyonları arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağıllığını göstermektedir. Tüm konfigürasyonlar için soğutma yüksekliği azaldıkça düşey manyetik sertlik değerleri azalmaktadır. PMG5 dizilimi, PMG6 ve PMG7 dizilimlerine göre daha düşük düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerine sahiptir. Çünkü, PMG5 diziliminde mıknatıslar arası boşluklar (5 mm) manyetik alan profilini değiştirmiş ve manyetik akı yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur. Deng ve arkadaşlarının 2008 yılında yaptığı bir çalışmada, soğutma yüksekliği 30 mm olmak üzere, yedi adet çapı 30 mm, yüksekliği 18 mm olan YBCO süperiletkeni ile 5 adet PM'den oluşan Halbach dizilimli PMG arasında 10 mm düşey mesafede manyetik stiffness yaklaşık 20 N/mm olarak ölçülmüştür (Deng, 2008). Şekil 3.13b'de 20 mm soğutma yüksekliğinde PMG5 konfigürasyonu için 9 mm düşey mesafede yaklaşık 22 N/mm manyetik sertliğe sahiptir.

Şekil 3.14, farklı soğutma yükseklikleri için PMG6 ve PMG7 konfigürasyonları k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağıllığını göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere, küçük düşey aralıklarda üç YBCO numunesine sahip PMG 6 dizilimi, büyük düşey aralıklarda ise hibrit model olan PMG7 dizilimi en iyi düşey kararlılık performansına sahiptir. PMG7 dizilimindeki süperiletken haznede bulunan ek kalıcı mıknatıslar, özellikle yüksek düşey mesafelerde ilave itici kuvvet oluşturarak düşey manyetik sertlik performansını iyileştirici özellikte davranırlar.



Şekil 3.13. PMG5, PMG6 ve PMG7 konfigürasyonları için k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafeye bağlılığı, a) ZFC, b) CH=20 mm, c) CH=5 mm



Ŗekil 3.14. Farklı Ŗođutma y¼kseklikleri için a) PMG6 ve b) PMG7 konfig¼rasyonları k_z d¼Ŗey manyetik kuvvet sabitinin d¼Ŗey mesafeye bağlılığı

3.5. Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti ¼l¼mleri

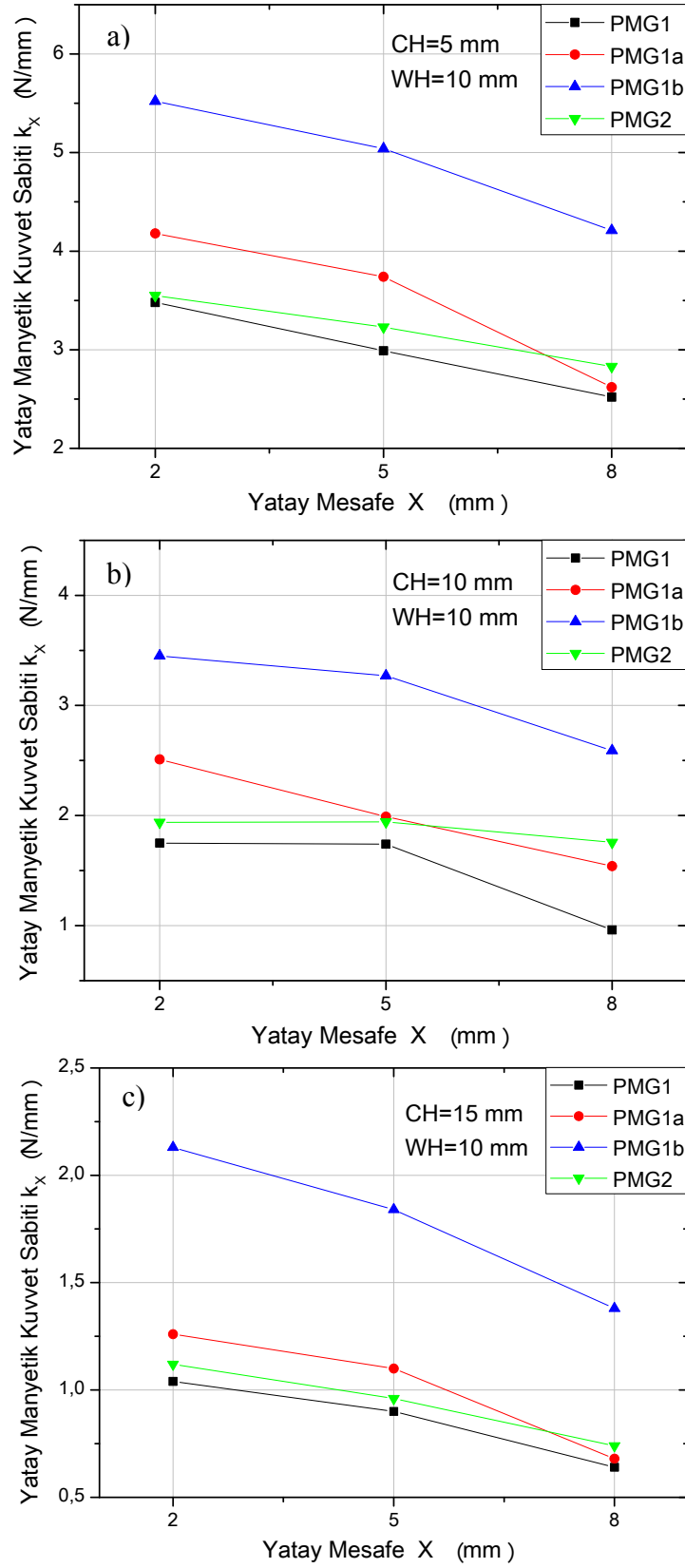
3.5.1. Tek Numuneli Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti ¼l¼m Sonuçları

Ŗekil 3.15, farklı Ŗođutma y¼ksekliklerinde ($CH=5\text{mm}$, $CH=10\text{mm}$, $CH=15\text{mm}$) ve sabit 10 mm d¼Ŗey alıŖma y¼ksekliđinde, farklı HTS/PMG konfig¼rasyonları arasında oluŖan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığını g¼stermektedir. Burada yatay mesafe, HTS merkezi ile akı yođunlaŖtırıcı PM merkezi arasındaki yatay mesafeyi tanımlamaktadır. Ŗekilden g¼r¼ld¼đ¼ gibi Ŗođutma y¼ksekliđi azaldıkça t¼m

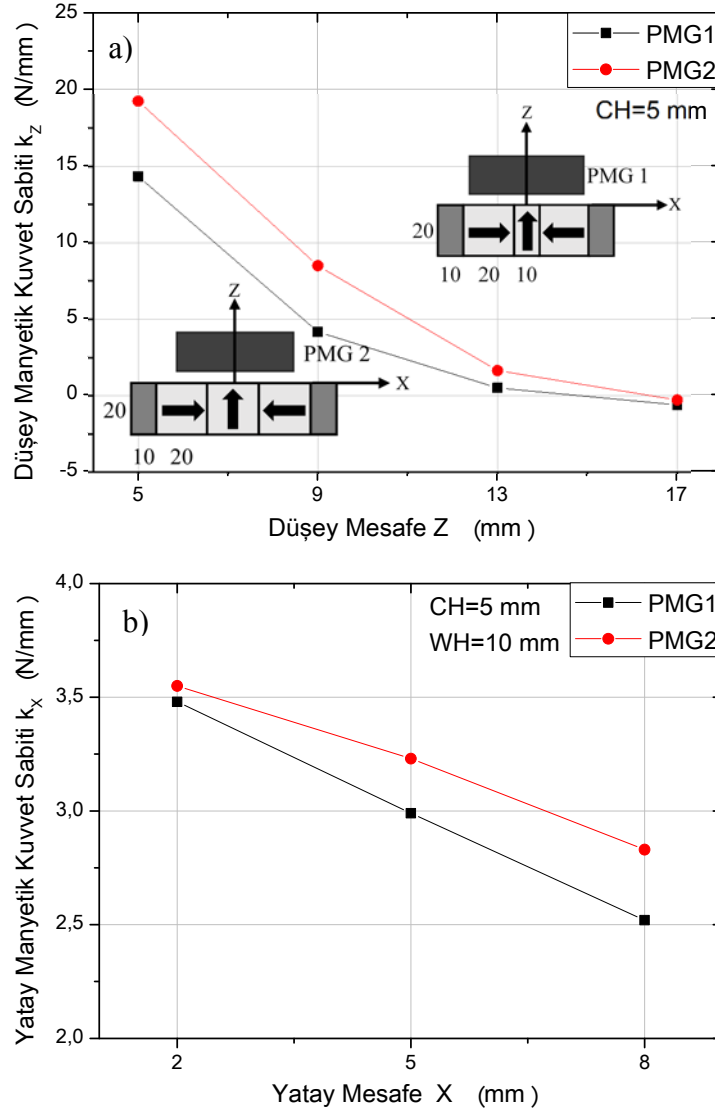
konfigürasyonlar için manyetik sertlik değerleri artmaktadır. PMG1 konfigürasyonu ile gözlenen maksimum yatay manyetik sertlik değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 3,5 N/mm, 1,7 N/mm ve 1 N/mm'dir. PMG1a dizilimi ile elde edilen maksimum yatay manyetik sertlik değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 4,2 N/mm, 2,5 N/mm ve 1,3 N/mm'dir. PMG1b dizilimi maksimum yatay manyetik sertlik değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 5,5 N/mm, 3,5 N/mm ve 2,1 N/mm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde PMG2 dizilimi maksimum yatay manyetik sertlik değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 3,6 N/mm, 1,9 N/mm ve 1,1 N/mm olarak ölçülmüştür. Bilindiği gibi, yanal kılavuzlama kuvvetini etkileyen en önemli parametre, numune içerisinde tuzaklanan manyetik akıdır. PMG1b yolu oluşturduğu daha büyük ortalama manyetik akı yoğunluğu ve üç manyetik kutbu ile yatay manyetik kuvvet verilerinde olduğu gibi yatay manyetik sertlik verilerinde de maksimum değerlere sahiptir. Ayrıca PMG1b kılavuzlama yolunda en kenardaki 10 mm genişliğindeki mıknatısların, yanal manyetik akı gradyentini artırdığı ve böylece bu PMG'nin daha büyük yanal manyetik sertlik değerine sahip olduğu düşünülmektedir.

Her bir soğutma yüksekliğinde, tüm PMG'ler için yatay mesafe arttıkça yatay manyetik kuvvet sabitinde yavaş bir şekilde azalma söz konusudur. Fakat mesafeye bağlı bu değişimlerin düşey manyetik kuvvet sabiti değişimlerine göre çok küçük olduğu fark edilmektedir. Bunun nedeni, düşey manyetik kaldırma kuvvet eğrileri yaklaşık eksponansiyel bir değişim gösterirken yanal manyetik kuvvetin mesafe ile yaklaşık olarak lineer bir değişim göstermesidir. Bilindiği gibi manyetik sertlik, manyetik kuvvetin birim konumdaki değişimidir. Yaklaşık eksponansiyel bir eğrinin birim pozisyon değişimlerinde eğim farkı yüksek, yaklaşık lineer değişim sergileyeninde ise eğimler birbirine yakın olur.

Şekil 3.16, 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG1 ve PMG2 konfigürasyonları için düşey ve yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Hem düşey hem de yatay yön için, PMG2 konfigürasyonu PMG1'e kıyasla daha fazla manyetik sertlik değerlerine sahiptir. Tek manyetik kutba sahip bu konfigürasyonlar için, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan mıknatısın boyutu arttıkça hem düşey hem de yatay manyetik sertlik değerleri artmıştır.



Şekil 3.15. Farklı konfigürasyonlar için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm



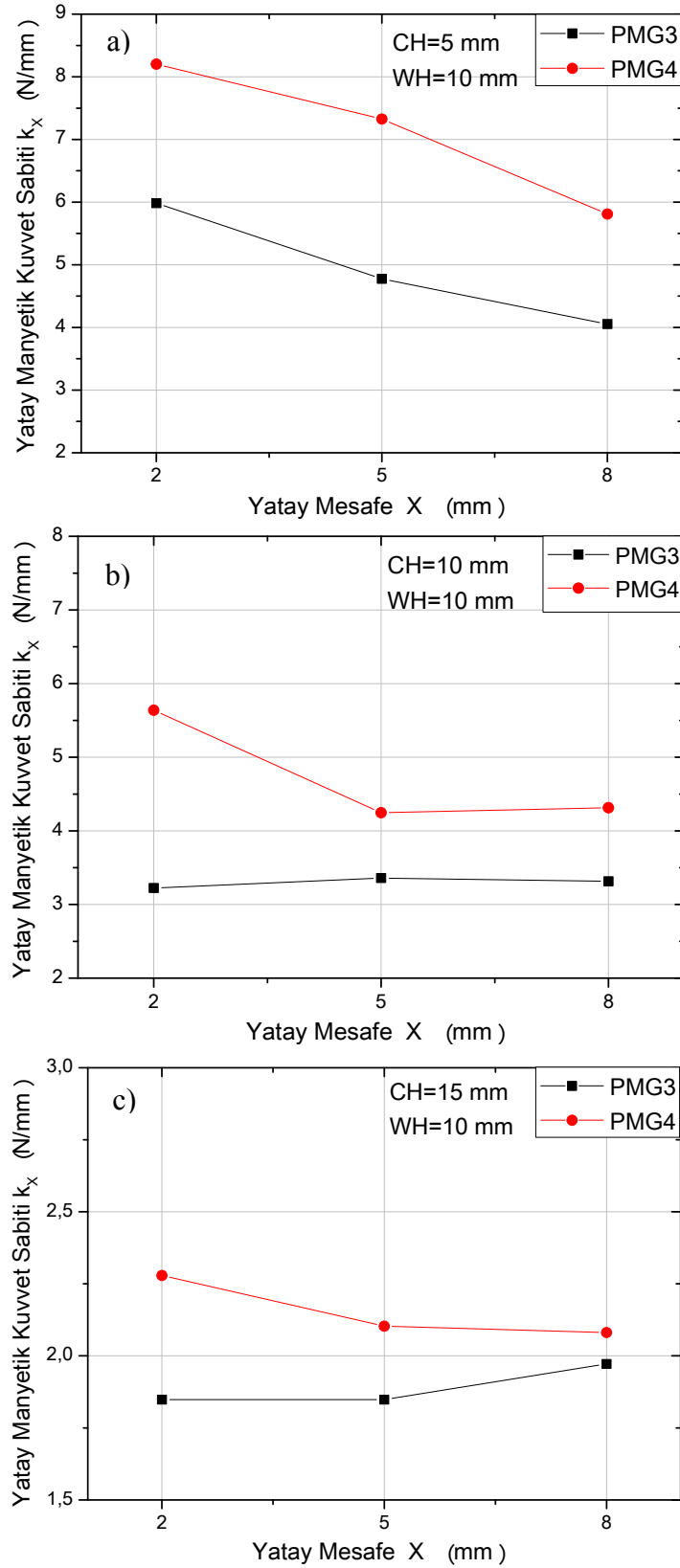
Şekil 3.16. 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG1 ve PMG2 konfigürasyonlarının a) düşey ve b) yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

3.5.2. İki Numuneli Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.17, farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5mm, CH=10mm, CH=15mm), PMG3 ve PMG4 mıknatıs-süperiletken konfigürasyonları arasında oluşan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığını göstermektedir. Şekil 3.15 dikkate alındığında, PMG2 ve PMG3 yolu aynı boyutlu mıknatısların kullanıldığı sırasıyla tek kutuplu ve üç kutuplu manyetik kılavuzlama yollarıdır. Yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri incelendiğinde, üç kutba ve iki YBCO süperiletkenine sahip PMG3 konfigürasyonunun tek kutuplu ve tek YBCO'lu PMG2 konfigürasyonundan tüm soğutma şartları ve tüm yanal

yerdeğiştirme mesafelerinde daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Diğer bir taraftan, PMG3 dizilimi sahip olduğu üç pikle daha yüksek yatay manyetik sertliğe ulaşmasına rağmen mıknatıs yolu kesit alanı PMG2'den daha büyük olduğundan gerçek boyutlu Maglev ray tasarımımda daha fazla maliyete sahip olacaktır. PMG4 yolu ise PMG3'ten daha küçük kesit alanına sahip olmasına rağmen oluşturduğu maksimum yanal manyetik sertlik değerleri ile daha verimli bir yapıdadır.

Şekil 3.16'da incelediğimiz gibi, tek numuneli ve tek kutuplu PMG1 ve PMG2 konfigürasyonları için, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan mıknatısın boyutu arttığında hem düşey hem de yatay manyetik sertlik değerleri artmıştır. İki numuneli ve üç manyetik kutuplu PMG3 ve PMG4 dizilimleri için bu durum biraz farklılık göstermektedir. Şekil 3.12 dikkate alındığında, tüm soğutma yüksekliklerinde PMG3 konfigürasyonunun PMG4'den daha fazla düşey manyetik sertliğe sahip olduğu görülebilir. Şekil 3.17'den ise tüm soğutma yüksekliklerinde PMG4 konfigürasyonunun PMG3'den daha fazla yatay manyetik sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Yani üç kutba sahip PMG'ler için akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan mıknatıs boyutu arttığında düşey manyetik kuvvet sabiti artarken yatay manyetik kuvvet sabiti azalmaktadır. Akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan mıknatıs boyutları süperiletken Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma ve kılavuzlama performansları için önemlidir. Ayrıca, gerçek boyutlu Maglev tasarımlarında en büyük maliyete sahip sistem parçası manyetik alan kaynağı olarak kullanılacak PMG yollarıdır. Böylece gerçek Maglev uygulamalarında optimum PMG yolları tasarımının önemi ortaya çıkmaktadır.

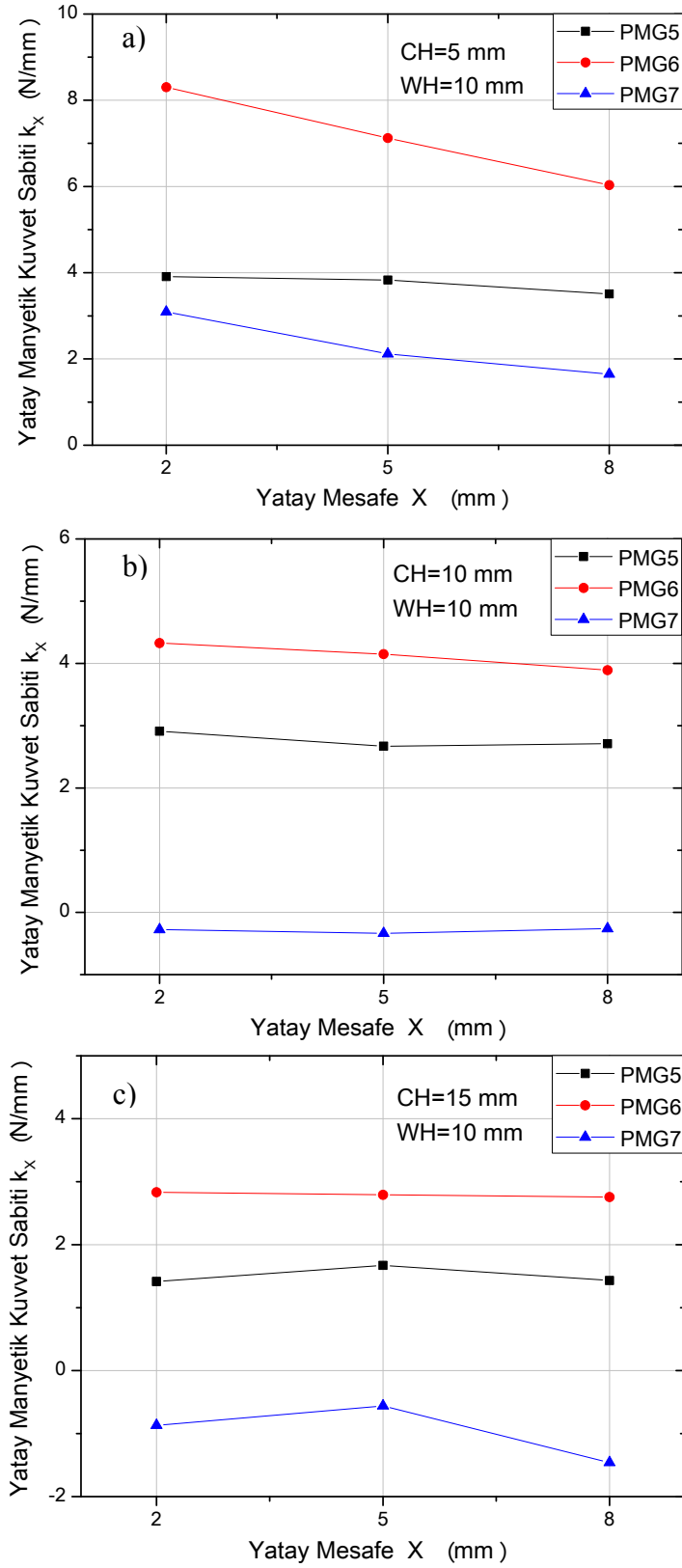


Şekil 3.17. PMG3 ve PMG4 konfigürasyonları için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm

3.5.3. Üç Numuneli ve Hibrit Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.18, farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5mm, CH=10mm, CH=15mm), PMG5, PMG6 ve PMG7 konfigürasyonları arasında oluşan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığını göstermektedir. Bütün soğutma şartlarında, yatay mesafe arttıkça kuvvet sabiti değerleri küçük bir azalma göstermektedir. 10 ve 15 mm soğutma yüksekliklerinde, hibrit PMG7 dizilimi için yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri negatiftir. Negatif manyetik kuvvet sabiti, sistemin ilgili yönde manyetik kararsızlığına işaret eder. PMG7 manyetik kılavuzlama yolundaki bu durum, bu soğutma yüksekliklerinde süperiletken haznedeki ek mıknatısların yanal kararlılığı yok ettiğini göstermektedir. Sunulan hibrit model, düşey yönde manyetik kuvvet sabitini iyileştirmesine rağmen yatay manyetik kuvvet sabiti değerini, yüksek soğutma mesafelerinde azaltıcı yönde etki göstermektedir.

Lu ve arkadaşlarının 2011'de, 15 mm soğutma yüksekliğinde yedi adet çapı 30 mm ve yüksekliği 15 mm olan YBCO süperiletkeni ile aralarında demir bulunan iki zıt manyetizasyon yönelimli PM'ye sahip geleneksel PMG arasında yanal manyetik stiffness ölçümü yaptılar (Lu, 2011b). Çalışma yüksekliği 3 mm olmak üzere, merkezden 2 mm yanal yerdeğiştirme mesafesinde manyetik sertlik yaklaşık 8 N/mm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.18c'de aynı soğutma yüksekliğinde ve çalışma aralığı 10 mm olmak üzere PMG6 konfigürasyonu için 2 mm yanal yerdeğiştirme mesafesinde manyetik sertlik yaklaşık 3 N/mm olarak ölçülmüştür. Yatay manyetik kuvvet ve buna bağlı olarak yatay manyetik sertliğin, çalışma yüksekliği ile ters orantılı olduğu ve bizim yanal ölçümlerimizde kullandığımız 10 mm çalışma yüksekliğinin pratik uygulamalar için optimum değerlere daha yakın olduğu düşünüldüğünde PMG6 konfigürasyonunun ne derece etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.18. PMG5, PMG6 ve PMG7 için k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığı, a) CH=5 mm, b) CH=10 mm, c) CH=15 mm

4. SONUÇLAR

Farklı HTS/PMG konfigürasyonlarının kullanımı ile Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama kuvveti ile bunlara bağlı olarak düşey ve yatay manyetik sertlik değerlerinin iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- PMG modelleme sonuçlarına bakıldığında manyetik alan dağılımının, yukarı ve aşağı manyetizasyon yönlü mıknatıs konumlarında yoğunlaştığı ve pik yaptığı görülmektedir.
- Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama performansı, uygun soğutma yüksekliğine ve PMG dizilimine bağlı olarak artırılabilir. PMG kutup sayısı arttıkça YBCO bazlı Maglev manyetik kaldırma performansı artmaktadır.
- Maglev sisteminde kullanılan süperiletken sayısı arttıkça düşey ve yatay manyetik sertlik değerleri artmaktadır. İki numuneli PMG3 ve üç numuneli PMG6 konfigürasyonları ele alındığında, hem CH=5 mm soğutma yüksekliğinde yanal manyetik kuvvet sabiti hem de ZFC rejimindeki düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri yaklaşık %40 artmıştır.
- Sunulan hibrit modeldeki süperiletken haznede bulunan ek kalıcı mıknatıslar, özellikle yüksek düşey mesafelerde ilave itici kuvvet oluşturarak düşey manyetik sertlik performansını iyileştirici özellikte davranırlar.
- Sunulan hibrit model, düşey yönde manyetik kuvvet sabitini iyileştirmesine rağmen yatay manyetik kuvvet sabiti değerini azaltıcı etki göstermiştir. Bu durum, numuneler ile birlikte kullanılan ilave mıknatısların itici özelliğinin, numunelerin çekici özelliğine baskın gelmesinden kaynaklanmaktadır.
- Tek kutuplu PMG'ler için, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan mıknatısın boyutu arttığında hem düşey hem de yatay manyetik sertlik değerleri artarken, üç kutba sahip PMG'lerde düşey bileşen artar, yatay bileşen azalır. Bu sonuç, mıknatıs boyutlarının Maglev sistemlerinin kaldırma performanslarına önemine işaret eder.
- Tüm soğutma mesafeleri için yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinde küçük değişimler söz konusudur. Ayrıca, mesafeye bağlı bu değişimlerin düşey manyetik kuvvet sabiti değişimlerine göre de çok küçük olduğu fark edilmektedir. Bu farkın nedeni manyetik kaldırma kuvveti eğrilerinin yaklaşık eksponansiyel ve manyetik kılavuzlama eğrilerinin ise yaklaşık lineer değişim göstermeleridir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada üstten tohumlama yöntemiyle üretilmiş tek tohumlu silindir YBCO külçe numuneleri ve farklı PMG'ler arasındaki manyetik kaldırma performansı sıvı azot kaynama sıcaklığında incelenmiştir. Sunulan bu çalışmaya ilave olarak, aşağıdaki önerilen çalışmaların yapılması ile Maglev sistemlerindeki manyetik kuvvet özelliklerinin daha iyi anlaşılması ve kontrol edilmesi sağlanabilir.

- Çalışılan konfigürasyonlar için, farklı kriyostat sistemleriyle daha düşük sıcaklıklarda manyetik kaldırma performansı değişimi incelenebilir.
- Farklı boyutlarda çok tohumlu YBCO külçelerin Maglev performansları araştırılabilir. Ayrıca MgB_2 gibi farklı süperiletken malzemelerin manyetik davranışları araştırılabilir.
- Kalıcı mıknatıslar yerine manyetik alan kaynağı olarak süperiletken tel ile sarılmış bobinler kullanılarak sistemin manyetik kararlılığı araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdioğlu, M., 2012. Numune Boyutu ve Uygulanan Manyetik Akı Dağılımının Nd-Fe-B ve Fe-B Katkılı Sm123 Süperiletkeninin Manyetik Kuvvet Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bardeen, J., Cooper, L. N. ve Schrieffer, J., 1957. Theory of Superconductivity, Phys. Rev., 108, 1175-1204.
- Bean, C. P., 1962. Magnetization of Hard Superconductors, Phys. Rev. Lett., 8, 6, 250-253.
- Bednorz, J. G. ve Müller, K. A., 1986. Possible High Tc Superconductivity in The Ba-La-Cu-O system, Z. Phys. B, Condensed Matter, 64, 189-193.
- Chu, C. W., Bechtold, J., Gao, L., Hor, P. H., Huang, Z. J., Meng, R. L., Sun, Y. Y., Wang, Y. O. ve Hue, Y. Y., 1988. Three Phases in BiSrCaCuO Thin Films Synthesized by the Multilayer Deposition Method. Physical Rev. Lett., 60, 10, 941-946.
- Çınar, Y., 2007. Süperiletken Manyetik Yatakların Analizi Ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Del-Valle, N., Sanchez, A., Pardo, E., Navau, C. ve Chen, D., X., 2007. Enhanced Stability by Cooling in Superconducting Levitation With Translational Symmetry, Applied Physics Letters, 91, 112507, 3.
- Demirdiş, S., 2008. Vorteks Mekanizmasının Süperiletkenliğe Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Jing, H., Lu, Y., Ma, G., Liu, L. ve Liu, W., 2008. High-Efficiency and Low-Cost Permanent Magnet Guideway Consideration for High-Tc Superconducting Maglev Vehicle Practical Application, Supercond. Sci. Technol., 21, 151018, 9.
- Deng, Z., Zheng, J., Lin, Q., Li, J., Zhang, Y., Wang, S. ve Wang, J., 2011. Improved Maglev Performance of Bulk High-Temperature Superconductors With A Re-Magnetization Process After Zero-Field Cooling, Journal of Low Temperature Physics, 162, 72-79.
- Dias, D. H. N., Sotelo, G. G. ve Andrade, Jr. R., 2011. Study of the Lateral Force Behavior in a Field Cooled Superconducting Linear Bearing, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 3, 1533-1537.
- Dias, D. H. N., Sotelo, G. G., Sass, F., Motta, E. S., Andrade Jr, R. ve Stephan, R. M., 2012. Dynamical tests in a linear superconducting magnetic bearing, Physics Procedia 36, 1049-1054.

- Fröhlich, H., 1950. Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature, Physical Review, 79, 5, 845-856.
- Hull, J.R., 2000. Superconducting bearings, Supercond. Sci. Technol, 13, R1-R15.
- 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, 463-465, 426-430.
- Kamihara, Y., Watanabe T., Masahiro H. M. ve Hideo H. H., 2008. Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K, J. Am. Chem. Soc., 130, 11, 3296-3297.
- Li, J., Wang, S., Y., Wang, J., S., Qin, Y., J., Deng, Z., G., Yen, E., Zheng, J., Liu, W. ve Liu, L., 2010. Influence of Re-Magnetized HTS Bulk Samples on The Levitation Performances of a Maglev System, Journal of Superconductivity Novel and Magnetism, 23, 999-1002.
- Li, W., 2010. Explorations of superconductivity mechanism and high critical current performance of MgB_2 , PhD Thesis, Wollongong University, Australia.
- Liu, L., Wang, J., Wang, S., Wang, L. ve Li, J., 2009. Flux Concentrator Optimization of PMG for High-Temperature Superconducting Maglev Vehicle System, J LowTempPhys, 157, 67-72.
- Liu, W., Wang, S.Y., Jing, H., Zheng, J., Jiang, M. ve Wang, J.S., 2008. Levitation Performance of YBCO Bulk in Different Applied Magnetic Fields, Physica C, 468, 974-977.
- London, F. ve London, H., 1935. The Electromagnetic Equations of the Supraconductor, Proc. R. Soc. London A, 149, 71-88.
- Lu, Y., Lu, B. ve Wang, S., 2011a. The Relationship of Magnetic Stiffness Between Single and Multiple YBCO Superconductors over Permanent Magnet Guideway, J Low Temp Phys., 164, 279-286.
- Lu, Y., Ge, Y., Liu, M. ve Wang, J. S., 2011b. High-Performance Permanent Magnet Railway Design Consideration of Magnetic Stiffness Parameters of YBCO Bulk Arrays, Journal of Superconductivity Novel and Magnetism, 24, 1787-1791.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M. ve Asano, T., 1988. A New High- T_c Oxide Superconductor without a Rare Earth Element. J. Appl. Phys., 27, 209-210.
- Malaeb, W., 2009. Iron-Pnictide and Cuprate High-temperature Superconductors Investigated by Photoemission Spectroscopy, PhD Thesis, Department of Complexity Science and Engineering, University of Tokyo, Japan.
- Maxwell, E., 1950. Isotope Effect in the Superconductivity of Mercury, Physical Review, 78, 477.

- Meissner, W. ve Ochsenfeld, R., 1933. Superconductivity, Nature, 132, 931-935.
- Moon, F. C., 2004. Superconducting Levitation, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Motta, E. S., Dias, D. H. N., Sotelo, G. G. ve Stephan, R. M., 2013. Dynamic Tests of an Optimized Linear Superconducting Levitation System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23, 3, 360050, 4.
- Mourachkine, A., 2004. Room-Temperature Superconductivity, Cambridge International Science Publishing, England.
- Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Gotoh, S., Yamaguchi, K., Shiohara, Y., Koshizuoka, N. ve Tanaka, S., 1991. Melt Processing of Bulk High Tc Superconductors and Their Application, IEEE Trans. On Magnet, 27, 1479.
- Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y. ve Akimitsu, J., 2001. Superconductivity at 39K in Magnesium Diboride, Nature, 410, 6824, 63-64.
- Navau, C. ve Sanchez, A., 2002. Stiffness and energy losses in cylindrically symmetric superconductor systems, Supercond. Sci. Technol., 15, 1445-1453.
- Onnes, H. K., 1911. Superconductivity and Magnetism, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 119-120.
- Patel, A., 2013. Pulsed Field Magnetization of Composite Superconducting Bulks for Magnetic Bearing Applications, PhD Thesis, University of Cambridge, England.
- Patel, A., Hopkins, S. C., Giunchi, G., Albisetti, A. F., Shi, Y., Palka, R., Cardwell, D. A., ve Glowacki, B. A., 2013. The Use of an MgB₂ Hollow Cylinder and Pulse Magnetized (RE)BCO Bulk for Magnetic Levitation Applications, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23, 3, 6800604, 4.
- Poole, C. P., 2000. Handbook of Superconductivity, Academic Press, U.S.A.
- Quinn D. J. ve Ittner W. B., 1962. Resistance in a Superconductor, J. Appl. Phys., 33, 748-749.
- Ren, Z., Wang, J., Wang, S., Jiang, H., Zhu, M., Wang, X. ve Shen, X., 2002. A Hybrid Maglev Vehicle Using Permanent Magnets and High Temperature Superconductor Bulks, Physica C, 378-381, 873-876.
- Rose-Innes, A. C. ve Rhoderick, E. H., 1980. Introduction to Superconductivity, Second Press, Pergamon Press Ltd., England.
- Sivrioglu, S. ve Cinar, Y., 2007. Levitation analysis of a ring shaped permanent magnet–high temperature superconductor vertical bearing system, Supercond. Sci. Technol., 20, 559–563.

- Song, H. H., Wang, J. S., Wang, S. Y., De Haas, O., Ren, Z. Y., Wang, X. R., Wang, X. Z., Zheng, J. ve Zhao, Y., 2005. The relationship between levitation force and stiffness in symmetrical and unsymmetrical applied fields, Supercond. Sci. Technol., 18, 95–98.
- Sotelo, G. G., Dias D. H. N., Andrade, Jr. R., Stephan, R. M., Del-Valle, N., Sanchez, A., Navau, C. ve Chen, D., 2011. Experimental and Theoretical Levitation Forces in a Superconducting Bearing for a Real-Scale Maglev System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 5, 3532-3540.
- Sotelo, G. G., Dias D. H. N., Machado, E. D., David, E. D., Andrade, Jr. R. ve Stephan, R. M., 2010. Experiments in a Real Scale Maglev Vehicle Prototype, Journal of Physics: Conference Series, 234, 032054.
- Weinstock, H., 2000. Applications of Superconductivity, NATO ASI Series E: Applied Sciences 365, Springer, Netherlands.
- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Riedel, T., Goebel, B., Rothfeld, R., Schirrmeister, P. ve Wippich, D., 2011. Large-scale HTS bulks for magnetic application, Physica C, 484, 6-11.
- Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. 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 Rev. Lett., 58, 9, 908-910.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Küçükçekmece’de doğdu. Ortaöğrenimini 2003-2007 yılları arasında Büyükşehir Hüseyin Yıldız Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği programında lisans öğrenimine başladı ve 2012 yılında ikincilikle mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.