

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**ÜÇ ÇEKİRDEKLİ YBCO SÜPERİLETKENİ MANYETİK KUVVET
PARAMETRELERİNİN MAGLEV SİSTEMLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRMALI OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet KABAER

**EYLÜL-2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**ÜÇ ÇEKİRDEKLİ YBCO SÜPERİLETKENİ MANYETİK KUVVET
PARAMETRELERİNİN MAGLEV SİSTEMLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRMALI OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet KABAER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
DOKTOR (FİZİK)**

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 / 09 / 2015

Tezin Savunma Tarihi : 30 / 09 / 2015

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Trabzon 2015

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Fizik Anabilim Dalında
Mehmet KABAER Tarafından Hazırlanan**

**ÜÇ ÇEKİRDEKLİ YBCO SÜPERİLETKENİ MANYETİK KUVVET
PARAMETRELERİNİN MAGLEV SİSTEMLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRMALI OLARAK İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 15 /09/2015 gün ve 1619 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

Üye : Prof. Dr. Ahmet CANSIZ

Üye : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Selim Sivrioğlu

Ahmet Cansız

Kemal Öztürk

Tayfur Küçükömeroğlu

Hasan Gedikli

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu doktora tezi çalışmasında üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerleri çeşitli manyetik kılavuzlama yolu (PMG) dizilimleri için deneysel olarak araştırılmış ve Maglev araçları için istenilen manyetik kuvvet performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamındaki çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirildi.

Tez çalışmamın her aşamasında değerli görüşlerini ve ilgisini benden esirgemeyerek bu süreçte olgunlaşmamı sağlayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde bölümümüzde ve laboratuvardaki her türlü olanakları kullanmama izin veren bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'na;

Deney sistemimizin işlevsel hale gelmesinde ve zaman zaman karşılaştığımız çeşitli aksaklıkların giderilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye, Sayın Doç. Dr. Şükrü ÇELİK'e ve Arş. Gör. Dr. Mehmet EKİCİ'ye;

Tez çalışmamın tüm aşamalarında her yardıma ihtiyaç duyduğumda yanımda olan çalışma arkadaşlarım Erçin ŞAHİN ve Arş. Gör. Dr. Murat ABDİOĞLU'na;

Projenin gerçekleşmesine 112T090 proje numarası ile maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a;

Çalışmalarımı gerçekleştirebilmek için KTÜ'ye görevlendirilme aşamamda gösterdiği anlayışlarından dolayı Giresun Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Aygün ATTAR'a ve Giresun Üniversitesi Fizik Bölümünde görev yapan değerli hocalarıma;

Her zaman yanımda olup beni destekleyen ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır için EŞİME ve varlığıyla mutluluğumuza mutluluk katan KIZIMA;

Bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayıp bu günlere gelmemde desteklerini benden esirgemeyen sevgili AİLEME en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet KABAER

Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Manyetik Kuvvet Parametrelerinin Maglev Sistemleri İçin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK‘ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/09/2015



Mehmet KABAER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Süperiletkenlik Parametreleri	4
1.2.1. Sıfır Direnç	4
1.2.2. Meissner Olayı ve Mükemmel Diyamanyetizma	5
1.2.3. Kritik Manyetik Alan ve Kritik Sıcaklık	7
1.2.4. Kritik Akım Yoğunluğu.....	8
1.2.5. Süperiletkenlerde Temel Eşitlikler	9
1.3. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler	11
1.3.1. Akı Çivileme ve Girdap Akımları	14
1.4. Süperiletken Malzemelerin Soğutulması.....	16
1.4.1. Manyetik Alan Altında Soğutma (FC).....	17
1.4.2. Manyetik Alansız Soğutma (ZFC).....	18
1.5. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma ve Kararlılık	19
1.5.1. Manyetik Kaldırma Kuvvetini Etkileyen Faktörler	23
1.6. Çok Çekirdekli YBCO Süperiletkenlerinin Özellikleri	24
1.6.1. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Yapısal Özellikleri	25
1.6.2. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Elektromanyetik Özellikleri.....	27
1.6.3. Çok Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Kullanım Alanları	29
1.7. Literatür Özeti.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
2.1. PMG Manyetik Alan Simülasyonları	45
2.2. Yapılan Deneysel Çalışmalar	46

2.2.1. Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi	46
2.2.2. Süperiletken Numune Kabı.....	47
2.2.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni ve NdFeB Mıknatıslar	49
2.2.4. Manyetik Kılavuzlama Yolu (PMG) Tasarımı ve Özellikleri	50
2.2.5. Farklı Manyetik Alan Şartları Altında Manyetik Kuvvet Ölçüm Yöntemleri.....	53
2.2.6. Farklı Manyetik Alan Şartları Altında Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Yöntemleri	54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
3.1. Giriş	57
3.2. PMG Manyetik Alan Dağılımı Sonuçları ve Değerlendirmesi.....	58
3.3. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi	68
3.4. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi	82
3.5. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Yatay Manyetik Kılavuzlama Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi.....	88
3.6. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi	94
3.7. İncelenen PMG-Üç Çekirdekli YBCO Dizilimlerinin Verimlilik Analizi	99
3.8. Üç Çekirdekli YBCO ile Bütünleşik Mıknatısın Süperiletkenin Manyetik Kuvvet Performansına Etkisi	105
3.8.1. Manyetik Alan Dağılımı ve Bütünleşik Birimin Optimum Yatay Konumunun Belirlenmesi	106
3.8.2. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvete Etkisi	109
3.8.3. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvete Etkisi.....	111
3.8.4. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi	113
3.8.5. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi	115
3.9. Süperakım Çiftlenimin Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Manyetik Kuvvet Özelliklerine Etkisi	117
3.9.1. Süperakım Çiftlenimin Düşey Kaldırma Kuvvetine Etkisi	117
3.9.2. Süperakım Çiftlenimin Yatay Kılavuzlama Kuvvetine Etkisi.....	122
3.9.3. Süperakım Çiftlenimin Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi	125
3.10. Tek Çekirdekli ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenlerin Manyetik Kuvvet Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi	127

3.10.1. Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Verilerinin Tek ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi	130
3.10.2. Yatay Manyetik Kılavuzlama Kuvveti Verilerinin Tek ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi	132
3.10.3. Manyetik Kuvvet Sabiti Verilerinin Tek ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi	135
4. SONUÇLAR.....	139
5. ÖNERİLER.....	143
6. KAYNAKLAR	144
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ÜÇ ÇEKİRDEKLİ YBCO SÜPERİLETKENİ MANYETİK KUVVET PARAMETRELERİNİN MAGLEV SİSTEMLERİ İÇİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet KABAER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK
2015, 151 Sayfa

Yürütülen bu doktora tezi kapsamında üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, hem yüksek kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvveti parametreleri, Maglev araçlarının teknolojik uygulanabilirliği için araştırılmıştır. Manyetik kılavuzlama yollarında kullanılan mıknatısların kutup yönelimleri, dizilimleri ve birbiri ile uyumları ortamın manyetik akı gradyentini geliştirmek açısından önemlidir. Bu amaçla, manyetik kılavuzlama yolu için oluşturulan çeşitli PMG konfigürasyonları ile üç çekirdekli süperiletken YBCO arasında, hem düşey hem de yatay manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti performansı değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, numune kabına yerleştirilen ve düşey konumu değiştirilebilen kalıcı mıknatıslarla birlikte hibrit dizilimler oluşturulmuştur. Tüm bu mevcut PMG-HTS konfigürasyonları için kaldırma kuvveti değerlerinin değişimi alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altında araştırılmıştır. Ayrıca, süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek optimum PMG manyetik alan dağılımının belirlenmesinde yararlanılan sayısal modellemeler, sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programı ile yapılmıştır. Alansız soğutma rejiminde PMG kesit alanı ve birim PMG-YBCO maliyeti hesaba katıldığında maksimum düşey manyetik kuvvet elde etmede, üç mıknatıslı PMG diziliminin beş mıknatıslı dizilimden daha elverişli olduğu görüldü. Ayrıca, alanlı soğutma rejiminde beş mıknatıslı PMG dizilimleri için maksimum kılavuzlama kuvveti elde etmede, kesit alanı küçük PMG'nin (PMG-1c) yüksek maliyetli ve kesit alanı büyük PMG'lerden (PMG-H3c) daha elverişli olduğu tespit edildi. Yapılan çalışmada süperakım çiftleniminden dolayı üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin maksimum düşey ve yatay kuvvet değerlerinin tek çekirdekli YBCO süperiletkenine göre sırasıyla 1,19 ve 1,62 kat daha büyük olduğu ve ayrıca bütünleşik mıknatısın uygun pozisyonda kullanılmasıyla kılavuzlama kuvvetinde azalma olmadan, süperiletkenlerin yükleme kapasitesinin arttırılabileceği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Maglev, Çok Çekirdekli YBCO, Manyetik Kuvvet, Manyetik Kuvvet Sabiti

PhD. Thesis

SUMMARY

COMPARATIVE INVESTIGATION OF MAGNETIC FORCE PARAMETERS OF THREE SEEDED YBCO SUPERCONDUCTOR FOR MAGLEV SYSTEMS

Mehmet KABAER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Kemal ÖZTÜRK
2015, 151 Pages

In this performed PhD thesis, both the magnetic levitation force and guidance force parameters of three seeded YBCO superconductor were investigated for technological applicability of Maglev systems. The pole directions, arrangement and compatibility of the magnets in magnetic guideways are important to improve the magnetic flux gradient of the medium. For this purpose, both the vertical and lateral magnetic force and stiffness performances between three seeded YBCO superconductor and the configurations which are formed for permanent magnet guideways were evaluated. In addition to this, the hybrid arrangements were produced by using additional permanent magnets in sample vessel with different vertical positions. The levitation force values of these all PMG-HTS configurations were investigated under the field cooling (FC) and zero field cooling (ZFC) conditions. Additionally, the numerical modelling was made with package programme using finite elements method, to determine the optimum PMG magnetic field distribution to improve the magnetic levitation and guidance forces of superconductor Maglev systems. It is seen that in zero field cooling regime to obtain maximum vertical magnetic force by considering cross section area of PMG and unit PMG-YBCO cost, PMG arrangement with three magnets is more convenient than arrangement with five magnets. Also, in field cooling regime to obtain maximum guidance force by PMG arrangement with five magnets, it is found that PMG with small cross sectional area (PMG-1c) is more convenient than PMG with high cost and large cross sectional area (PMG-H3c). In performed study it is seen that due to the supercurrent coupling maximum vertical and lateral force values of three seeded YBCO superconductor is 1,19 and 1,62 times bigger than one seeded YBCO superconductor respectively and also by using onboard magnets with suitable position load capacity of superconductors can enhanced without lose in guidance force.

Key Words: Maglev, Multi Seeded YBCO, Magnetic Force, Magnetic Stiffness

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Süperiletkenliğin keşfinden günümüze kadar kritik sıcaklığın yıllara göre değişimi.....	3
Şekil 1.2. Cıvanın süperiletkenlik geçişini gösteren K. Onnes'in asıl verileri (Jiles, 1991).....	5
Şekil 1.3. Meissner Olayı: $T < T_c$ sıcaklığında süperiletken tarafından itilen manyetik alan çizgileri (Mourachkine, 2004).....	6
Şekil 1.4. Nb ₃ Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004)..	9
Şekil 1.5. Manyetik akının süperiletken yüzeyinden numuneye nüfuz edişi.....	10
Şekil 1.6. I. (a) ve II. (b) tip süperiletkenler için uygulanan manyetik alanın sıcaklıkla değişimi.....	12
Şekil 1.7. Uygulanan manyetik alanla (a) I. ve (b) II. tip süperiletkenler için mıknatıslanmanın değişimi.....	13
Şekil 1.8. II. tip süperiletkenlerde akı çivileme mekanizması (Buckel, 2004).	16
Şekil 1.9. Manyetik alan altında soğutulan süperiletken bir malzeme için H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).	18
Şekil 1.10. Manyetik alansız soğutulan süperiletken bir malzeme için H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).	19
Şekil 1.11. Süperiletken YBCO malzemenin manyetik kılavuzlama yolu üzerinde temassız olarak havada durması (Fotoğraf KTÜ araştırma laboratuvarında alınmıştır).....	20
Şekil 1.12. Manyetik kaldırma ve kararlılık modellerinin şematik gösterimi	21
Şekil 1.13. (a) Çok çekirdekli YBCO süperiletkenleri ve (b) çok çekirdekli YBCO numunelerden üretilen içi boş silindirik süperiletken manyetik yataklar (Werfel vd., 2005).....	25
Şekil 1.14. Üç çekirdekli YBCO süperiletkeni (Werfel, 2011).	26
Şekil 1.15. Numunenin başlangıçtaki ve tane sınırlarından kesildikten sonra tuzakladığı manyetik alan dağılımı (77 K) (Werfel 2011).	27
Şekil 1.16. Farklı sıcaklık değerlerinde üç çekirdekli YBCO numunede tuzaklanan alan dağılımı (Werfel 2011).	28
Şekil 1.17. Son on yılda yapılan ve test edilen Süperiletken Manyetik Yatak (SMY) prototiplerine dört örnek (Patel, 2013).	30
Şekil 1.18. Dünyanın farklı bölgelerinde yapılan ve test edilen çeşitli Maglev uygulamaları (a) Rio de Janerio, (b) Dresden, (c) Chengdu ve (d) Çin (Nishijima vd., 2013).....	31
Şekil 2.1. Sayısal hesaplamaların yapıldığı Comsol Multiphysics program arayüzü.....	45
Şekil 2.2. Üç eksenli FUTEK yük hücresine sahip Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi.....	47

Şekil 2.3.	(a) Ölçümlerde kullanılan süperiletken numune kabı ve (b) numuneyi sabitleyerek kuvveti yük hücreğine aktaran destekler	48
Şekil 2.4.	Çalışmada kullanılan üç tohumlu YBCO süperiletkenleri	49
Şekil 2.5.	Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar	50
Şekil 2.6.	Farklı manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG dizilimi	50
Şekil 2.7.	Çalışmalarda kullanılan farklı HTS-PMG dizilimlerinin şematik gösterimleri (tüm boyutlar mm birimindedir).....	52
Şekil 2.8.	Düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ölçümlerinin şematik gösterimi.....	55
Şekil 2.9.	Yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümlerinin şematik gösterimi	56
Şekil 3.1.	(a) PMG-1a diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.1 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir).....	58
Şekil 3.2.	(a) PMG-1b diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.2 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir).....	59
Şekil 3.3.	(a) PMG-1c diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.3 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir).....	60
Şekil 3.4.	(a) PMG-2a, (b) PMG-2b, (c) PMG-2c ve (d) PMG-2d diziliminin manyetik alan profili (Her şeklin içerisinde PMG dizilimlerine ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları, PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede verilmiştir). 61	
Şekil 3.5.	(a) PMG-H3a diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.5 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir).....	62
Şekil 3.6.	(a) PMG-4a, (b) PMG-4b ve (c) PMG-4c diziliminin manyetik alan profili (Her şeklin içerisinde PMG dizilimlerine ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları, PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede verilmiştir).....	63
Şekil 3.7.	PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları	65
Şekil 3.8.	PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları.....	66
Şekil 3.9.	PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları	67
Şekil 3.10.	PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	68

Şekil 3.11. PMG-1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	69
Şekil 3.12. PMG-1b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	70
Şekil 3.13. PMG-1c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	70
Şekil 3.14. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması .	72
Şekil 3.15. PMG-2a dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	73
Şekil 3.16. PMG-2b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	74
Şekil 3.17. PMG-2c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 3.18. PMG-2d dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 3.19. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH= 20 mm, (c) CH=5 mm ve (d) FC durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	77
Şekil 3.20. PMG-H3a dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.21. PMG-H3b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.22. PMG-H3c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi.....	79
Şekil 3.23. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 3.24. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.25. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 3.26. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 3.27. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafeleri için yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	89

Şekil 3.28. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d için (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	91
Şekil 3.29. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafeleri için yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	93
Şekil 3.30. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	95
Şekil 3.31. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	97
Şekil 3.32. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	98
Şekil 3.33. Maksimum normalize manyetik (a) kaldırma, F_z (b) kılavuzlama, F_x (c) düşey k_z ve (d) yatay k_x değerlerinin W_{dym}/W_{yym} oranına bağlılığı (W_{dym} , düşey yönlü mıknatis genişliğini; W_{yym} , yatay yönlü mıknatis genişliğini belirtmektedir)	103
Şekil 3.34. Bütünleşik mıknatislar ile oluşturulan hibrit PMG-HBP dizilimi	106
Şekil 3.35. (a) B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve (b) B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı	107
Şekil 3.36. Farklı YBCO konumları için düşey manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri ...	108
Şekil 3.37. Farklı bütünleşik mıknatis pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	110
Şekil 3.38. Farklı bütünleşik mıknatis pozisyonları için (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	112
Şekil 3.39. Farklı bütünleşik mıknatis pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması	114
Şekil 3.40. Farklı bütünleşik mıknatis pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması	116
Şekil 3.41. FC rejiminde ve CH=5 mm soğutma yüksekliğinde PMG dizilimlerine ait düşey manyetik kuvvetin karşılaştırılması.....	118
Şekil 3.42. (a) CH=75 mm ve (b) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimleri ile ölçülen kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	119
Şekil 3.43. PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin PMG yüzeyinden düşey (a) 5mm ve (b) 10 mm mesafede manyetik enerji yoğunluğu dağılımları	120

Şekil 3.44. Üç çekirdekli YBCO’da (a) düşey ZFC (CH=75 mm) ve (b) yatay alanlı soğutma durumlarında oluşan süperakımların PMG dizilimi ile değişimi.....	121
Şekil 3.45. (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimleri ile ölçülen kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	124
Şekil 3.46. (a) CH=75 mm, (b) 20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimleri için ölçülen düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması.....	126
Şekil 3.47. (a) CH=5 mm ve (b) 10 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimleri için ölçülen yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması .	127
Şekil 3.48. HTS-PMG dizilimlerinin şematik gösterimleri ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları (Ozturk vd., 2015a).	129
Şekil 3.49. (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin düşey kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 3.50. ZFC durumunda (CH=75 mm) PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimlerinin düşey kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	132
Şekil 3.51. (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	134
Şekil 3.52. CH=5 mm soğutma yüksekliğinde PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	135
Şekil 3.53. (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması.....	137
Şekil 3.54. (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	138

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. İncelenen PMG dizilimleri için maliyet ve düşey manyetik kaldırma kuvveti verimlilik analizi.....	100
Tablo 3.2. İncelenen PMG dizilimleri için maliyet ve yatay manyetik kılavuzlama kuvveti verimlilik analizi.....	102
Tablo 3.3. Farklı düşey pozisyonlardaki bütünleşik mıknatısların maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri (Ozturk vd., 2015b)....	113

SEMBOLLER DİZİNİ

- A** : Manyetik vektör potansiyeli
- A** : Yüzey alanı
- B** : Manyetik akı yoğunluğu
- CH** : Soğutma yüksekliği
- e** : Elektron yükü
- E** : Elektrik alan
- F** : Lorentz kuvveti
- F_x** : Manyetik kılavuzlama kuvveti
- F_z** : Manyetik kaldırma kuvveti
- FC** : Alanlı soğutma
- FEM** : Sonlu elemanlar yöntemi
- h** : Planck Sabiti
- H** : Manyetik alan şiddeti
- H_c(0)** : Mutlak sıfır sıcaklığındaki üst kritik manyetik alan
- H_c(T)** : Belirli T sıcaklığındaki üst kritik manyetik alan
- H_c** : Kritik manyetik alan
- H_{c1}** : II. tip süperiletkenlerde alt kritik manyetik alan
- H_{c2}** : II. tip süperiletkenlerde üst kritik manyetik alan
- HTS** : Yüksek sıcaklık süperiletkeni
- J** : Akım yoğunluğu
- J_c** : Kritik akım yoğunluğu
- J_s** : Perdeleme akımı
- k** : Manyetik kuvvet sabiti

- m : Elektron kütlesi
- \mathbf{m} : Manyetik moment
- \mathbf{M} : Mıknatıslanma
- MH : Ölçüm yüksekliği
- MPMG : Eritme toz eritme büyütme yöntemi
- MSMG : Çok tohumlu eritme yöntemi
- MTG : Yönlendirmeli eritme büyütme yöntemi
- N_v : Süperiletkendeki toplam girdap sayısı
- n_s : Süperiletken yük taşıyıcılarının birim hacimdeki yoğunluğu
- OCMG : Oksijen kontrollü eritme büyütme yöntemi
- PM : Kalıcı mıknatıs
- PMG : Manyetik kılavuzlama yolu
- QMG : Hızlı soğutmalı eritme büyütme yöntemi
- r : Perdeleme akım halkasının yarıçapı
- T : Sıcaklık
- T_c : Kritik geçiş sıcaklığı
- TSMG : Üstten tohumlamalı eritme büyütme yöntemi
- V : Süperiletkenin hacmi
- WH : Çalışma yüksekliği
- ZFC : Alansız soğutma
- λ : Nüfuz derinliği
- ρ : Özdirenç
- ϕ_m : Manyetik akı
- ϕ : Manyetik akı kuantumu

- ξ : Kohorens uzunluğunu
- κ : Ginzburg-Landau parametresi
- μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği
- μ_r : Bağlı manyetik geçirgenliği
- χ : Manyetik alınganlık

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1911 yılında Hollandalı fizikçi Heike Kamerling Onnes tarafından keşfedilen süperiletkenlik 20. yüzyılın en büyük bilimsel başarılarından biridir. 1908 yılında helyumu sıvılaştırmayı başaran Onnes, sıvı helyum sıcaklığına (4,2 K) kadar düşüldüğünde cıvanın direncinin ani bir şekilde azalarak ölçülemeyecek kadar düşük değerlere ulaştığını gözlemlediler (Onnes, 1911). Süperiletkenlik, birçok metal, bileşik ve alaşım belirli bir sıcaklığın altına soğutulduğunda direncinin aniden sıfıra düşmesiyle kendini göstermektedir. Onnes'a bu keşfi 1913 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır. Süperiletkenlik özelliği gösteren cıva, kurşun, bizmut gibi metal elementler birkaç K'lık çok düşük sıcaklıklarda bu geçişi göstermektedirler. Süperiletkenliğin keşfini takip eden 75 yıl boyunca daha yüksek sıcaklıklarda süperiletken olan yeni maddeler bulmak için birçok çalışma yapıldı. Daha yüksek sıcaklıklarda süperiletkenlik gösteren çeşitli alaşımlar bulunsa da hiçbirinin geçiş sıcaklığı istenilen seviyelerde değildi.

Süperiletkenliğin diğer önemli özelliği 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld tarafından keşfedildi. Meissner olayı olarak adlandırılan bu özellik, süperiletkenlerin kritik sıcaklık değerlerinin altında manyetik alanı dışlamasıdır. Süperiletken bir maddenin, bir manyetik alan etkisinde kritik sıcaklığının altında soğutulurken, iç kısmındaki tüm manyetik akıyı dışarı attığını gözlemlediler. Eğer alan, numune kritik sıcaklığının altına soğutulduktan sonra uygulanırsa, manyetik akı süperiletkenden dışarı atılır. Bu yüzden bir süperiletken tam bir diyamagnet gibi davranır. Bununla birlikte süperiletken malzemelerin H_c denilen kritik bir manyetik alandan daha büyük alanlarda süperiletkenlik özelliklerini kaybettiklerini ve normal hale geldiğini gözlediler (Meissner ve Ochsenfeld, 1933). Meissner olayının keşfi, süperiletkenlerin kritik sıcaklığın altında sıfır dirence sahip olmalarının keşfinden sonraki en büyük gelişme olup bu keşif ile süperiletkenler için farklı ve çok önemli bir kullanım alanı doğmuştur. Meissner olayının fiziksel açıklaması 1935 yılında London kardeşler tarafından yapılmıştır (Cardwell, 2003).

1935 yılında Frintz ve Heinz London kardeşler tarafından Maxwell denklemlerine dayalı olarak, manyetik akıyı dışarılayan akımın sadece yüzeyde akacağını önererek Meissner olayını açıkladılar. Bu teori ile aynı zamanda süperiletkenliğin temel özelliği olan

diyamanyetizma ve sıfır direnç durumu açıklanır. Ayrıca bu teoride araştırmacılar dışarıdan uygulanan manyetik akının bir süperiletkene nüfuz edebileceğine dair bir fikir ileri sürdüler. Süperiletkenliğin ilk karakteristik uzunluğu olan London nüfuz derinliği (λ) için bir ifade geliştirip durgun manyetik alanın süperiletken içerisine ne kadar nüfuz edebileceğini gösterdiler (London ve London, 1935). London teorisi, süperiletkenliğin elektrodinamik özelliklerini açıklayan ilk makroskobik teori olması nedeniyle önemlidir.

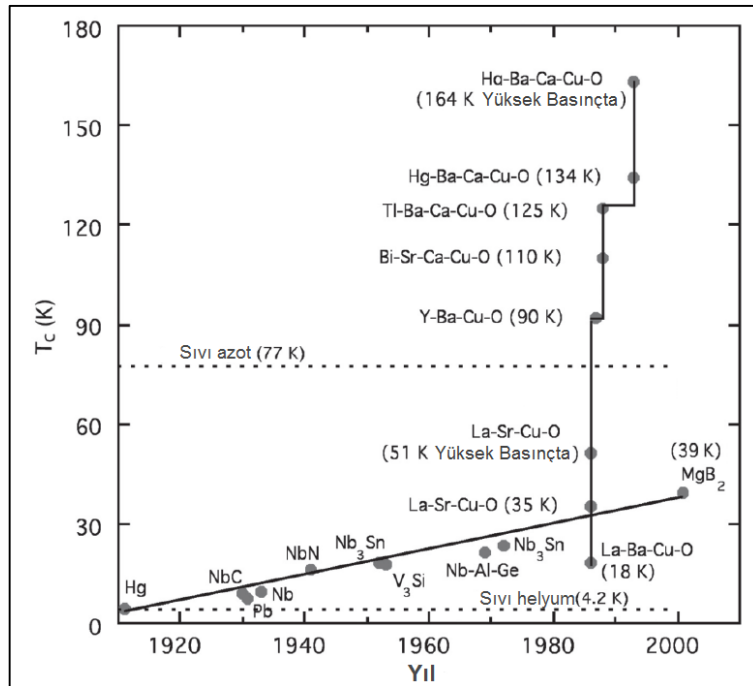
Süperiletkenliğin doğasını anlamak için yapılan teorik çalışmalardan bir diğerini de 1950 yılında Ginzburg ve Landau öne sürdü. Bu çalışma ile süperiletkenliğin düzen parametrelerini tanımlayan makroskobik bir teori geliştirdiler ve London denklemlerini türettiler (Ginzburg ve Kirznits, 1982). Aynı yıllarda, teorik olarak Fröhlich ve deneysel olarak Maxwell tarafından, atomik kütleinin artmasıyla geçiş sıcaklığının düştüğü gösterildi. İzotop olayı olarak adlandırılan bu olay sonucunda, örgü hareketlerinin süperiletkenlik mekanizmasında önemli bir rol oynadığı anlaşıldı (Fröhlich, 1950; Maxwell, 1950).

Süperiletkenliği mikroskobik ölçekte tanımlayan ilk teori 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından geliştirildi. BCS teorisi adı verilen bu teori, süperiletkenliğin doğasının anlaşılması açısından son derece önemlidir. BCS teorisi ile ortaya atılan fikir, elektron-fonon-elektron etkileşmesi sonucu oluşan çekici kuvvet, elektron-elektron arasında oluşan itici kuvvetten daha büyüktür ve bu nedenle iki elektron tek tek değil bir çift olarak düşünülür. O zaman elektronlar birbirlerine zayıfça bağlı kalacak ve ortak hareket eden Cooper çiftleri olarak bilinen zıt momentumlu elektron çiftleri oluşturacaklardır. Bu çift toplam momentumu ve spin değeri sıfır, yükü $2e$ ve kütlesi $2m$ olan bir bozon olarak kabul edilir ve bu nedenle Pauli dışarlama ilkesine uymazlar. Fermi enerjisinde bir yasak enerji aralığı oluştururlar. Cooper çifti serbest durumda bulunan iki elektronun enerjisinden daha düşük enerjiye sahiptir. Süperiletkenlikte Cooper çiftlerinin etkin rol oynadıkları düşünülmektedir (Sheahan, 2002). BCS teorisine göre süperiletkenlerde akan süper akımlar, cooper çiftlerini oluşturan bağlı elektronlarla taşınmaktadır. (Bardeen vd., 1957). Bardeen, Cooper ve Schrieffer, süperiletkenliğe dair geliştirdikleri bu ortak teoriden dolayı 1972 yılında Nobel ödülüne layık görüldü.

Süperiletkenlerin karakterizasyonunda kritik sıcaklık (T_c) ve kritik manyetik alan (H_c) kavramlarından sonra bir diğer önemli kavram da kritik akım yoğunluğudur (J_c). Bean 1964 yılında kritik akım yoğunluğunun, uygulanan harici manyetik alanın bir fonksiyonu olarak manyetizasyon eğrileri ve manyetik alınganlıktan faydalanarak hesaplanabileceğini ileri sürdü (Bean, 1962; Bean, 1964). Mıknatıslanma manyetik alanın nüfuz ettiği yerlerde oluşan

sabit kritik akım yoğunluğu kullanılarak hesaplandığı için bu model, kritik durum modeli olarak adlandırılmıştır.

Süperiletkenliğin keşfinden 1980'li yıllara kadar bu alanda önemli çalışmalar yapılmasına rağmen, bilinen malzemelerin süperiletken faza geçmeleri için halen çok düşük sıcaklıklara 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 birlikte yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin temelleri atıldı ve daha yüksek sıcaklıklarda süperiletkenliğin gözlenebilmesi için yapılan çalışmalar hız kazandı. 1987'de de Wu ve arkadaşları lantanyum yerine itriyum kullanarak 92 K'de süperiletken olan bakır oksit tabanlı seramik olan $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) bileşiğini keşfettiler (Wu vd., 1987). Bu bileşiğin geçiş sıcaklığı, kolayca bulunabilen ve bir soğutucu olan sıvı azotun kaynama sıcaklığı olan 77 K' in üzerindedir. Bu bakımdan bu buluş yüksek sıcaklık süperiletkenliği için bir dönüm noktası olmuştur. Sıvı azot sıcaklığında süperiletken olan bileşiklerin elde edilmesiyle dünya çapında birçok bilim adamı bu alanda çalışmalar yapabilir hale geldi. Böylece birçok yüksek kritik sıcaklığa sahip yeni bileşikler bulundu ve süperiletkenlerin ticari uygulamalara yönelik çalışmaları da hız kazanmış oldu. Şekil 1.1'de süperiletkenliğin keşfinden bu yana bulunan süperiletkenlerin kritik geçiş sıcaklığına bağlı olarak gelişimi gösterilmektedir (Abd-Syukor, 2009; Patel, 2013).



Şekil 1.1. Süperiletkenliğin keşfinden günümüze kadar kritik sıcaklığın yıllara göre değişimi

Bununla birlikte modern toplumlarda hızlı nüfus artışı ve sanayideki önemli gelişmelerle birlikte enerji ihtiyacı da büyük oranda artmaktadır. Bilim adamları yeni enerji kaynakları aramakla kalmamakta, mevcut enerji kaynaklarını da daha etkili kullanma yollarını araştırmaktadır. Dünya çapında en yoğun kullanılan enerji kaynaklarından birisi elektrik enerjisidir. Buradaki en önemli nokta elektrik akımını mümkün olan en düşük kayıpla aktarabilmektir. Dolayısıyla bilim adamları süperiletkenliğin teorisini anlamak, bu malzemelerin birçok farklı ve üstün özelliklerini anlamak adına sayısız deneyler yapmış ve yapmaya da devam etmektedirler. Süperiletkenlerin pek çok sıra dışı elektromanyetik özelliklerinden biri olan sıfır dirence sahip olma özelliği ilgi çekicidir. Yeterince düşük sıcaklıkta tutulan süperiletken bir halkada oluşturulan elektrik akımının herhangi bir dirençle karşılaşmaması kayda değer bir azalma göstermeden akmaya devam etmesine olanak tanır. Yani süperiletken halka doğru akıma karşı bir direnç ortaya koymaz ve bu durum enerji kaybının sıfıra yakın olması anlamına gelmektedir.

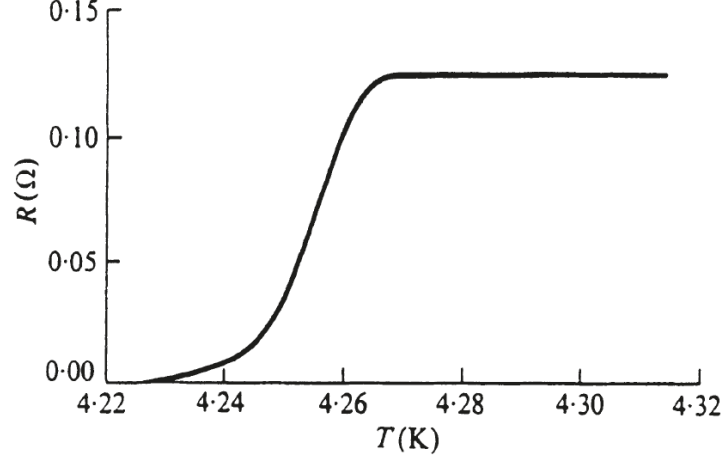
Günümüzde süperiletken temelli olmayan manyetik yataklar, manyetik olarak havalanmış trenler kullanılmakla beraber süperiletken temelli uygulamalar da araştırılıp geliştirilmektedir. Bu sistemlerde asıl amaç, sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını en aza indirmektir. Bununla birlikte bu sistemlerin karmaşık olmaları ile ilgili güvenilirlik sorunları, güç kaynağı, kontrol ünitesi ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar gibi olumsuzlukları vardır. Süperiletken temelli olan sistemlerde ise herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç olmaması, daha düşük maliyet, daha düşük karmaşıklık ve dolayısı ile yüksek güvenilirliğe sahip olma gibi avantajları vardır. Bu nedenle günümüzde süperiletken temelli manyetik yataklar ve manyetik olarak havalanmış trenler (Maglev trenleri) gibi araçlar geliştirilmeye çalışılmaktadır.

1.2. Süperiletkenlik Parametreleri

1.2.1. Sıfır Direnç

Bilindiği gibi metaller ve alaşımlar soğutulduğunda elektriksel dirençleri azalmaktadır. Bazı elementlerin veya alaşımların sıcaklıkla olan direnç değişimi farklıdır. Bu element veya alaşımların sıcaklığı düşürüldüğünde belirli bir kritik sıcaklığın altında elektriksel direnç aniden sıfıra yakın değerlere düşmektedir (Şekil 1.2). Böyle maddelere süperiletken denir ve süperiletken malzemenin bir karakteristiği olan bu sıcaklık kritik

sıcaklık (T_c) olarak adlandırılır. Malzeme, kritik sıcaklığın altında süperiletken halde olup kritik sıcaklığın üstünde ise normal metal gibi davranır (Rose ve Rhoderick, 1980).

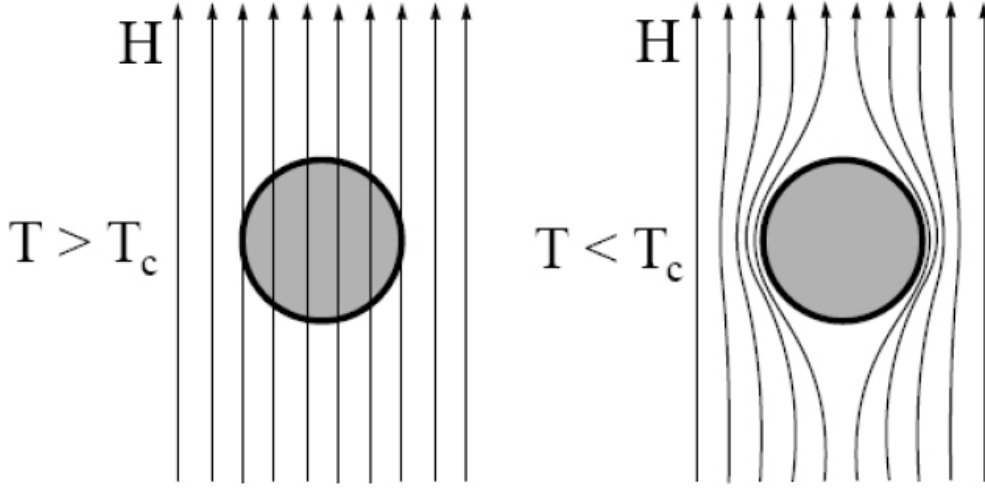


Şekil 1.2. Cıvanın süperiletkenlik geçişini gösteren K. Onnes'in asıl verileri (Jiles, 1991).

1.2.2. Meissner Olayı ve Mükemmel Diyamanyetizma

1933'de iki Alman fizikçi Meissner ve Ochsenfeld, süperiletkenlerin manyetik alan çizgilerini dışarıladıklarını ve içlerine sokmadıklarını gözlediler. Bu olaya Meissner Olayı denir (Şekil 1.3). Silindirik şeklindeki süperiletkenlerle yaptıkları bir seri deneyde, kritik sıcaklığın hemen altında numunenin manyetik alan çizgilerini tam olarak dışarıladıklarını ve süperiletken duruma geçtiklerini göstermişlerdir. Manyetik akının bir malzemedan dışarılanması olayı diyamanyetizma olarak bilinir. Bu malzemeler, negatif manyetik alınganlığa sahiptir (Moon, 2004).

Manyetik alanın dışlanması, perdeleme akımları (shielding currents) olarak bilinen ve uygulanan manyetik alana eşit ve zıt yönde alan oluşturacak yönde süperiletken yüzeyinde akan elektrik akımından dolayı meydana gelir (Hook, 1999). Manyetizmanın temel eşitliğinden $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H})$ faydalanarak $\mathbf{B} = 0$ olması için $\mathbf{H} > 0$ ve $\mathbf{M} < 0$ olması gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Bu durum, pozitif bir manyetik alana maruz bırakılan süperiletkenin negatif bir mıknatıslanma üreteceği anlamına gelir. Negatif mıknatıslanmanın sebebi atomlardaki manyetik momentlerin tekrar dizilimi ya da oluşumu değil, süperiletkenin dış yüzeyinde dolaşan perdeleme akımlarıdır (Cullity, 2009).



Şekil 1.3. Meissner Olayı: $T < T_c$ sıcaklığında süperiletken tarafından itilen manyetik alan çizgileri (Mourachkine, 2004).

Süperiletkenin sıfır DC (doğru akım) direncine sahip olma gibi önemli bir özelliğe sahip olduğu bilinmektedir. Ohm kanununa göre, bir iletken içindeki elektrik alan, o iletkenin direnci ile orantılıdır. Dolayısı ile bir süperiletken için $R=0$ olduğundan, süperiletkenin içinde elektrik alan sıfır olmak zorundadır. Faraday'ın İndüksiyon Kanunu:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Yani, \mathbf{E} 'nin kapalı bir ilmek (halka) boyunca çizgi integrali, kapalı ilmek düzleminden geçen ϕ_m manyetik akısının zamana göre değişiminin eksi işaretlerine eşittir.

Bir süperiletken içindeki her nokta $\mathbf{E}=0$ olduğundan, kapalı yol boyunca alınan integrali

$\oint \frac{d\phi_m}{dt} = 0$ olur. Bu da, süperiletken içindeki manyetik akının değişmeyeceğini ifade eder.

Buradan akının ($\mathbf{B} = \phi_m / A$) süperiletken içinde sabit kalması gerektiği sonucuna varılır.

Manyetik alan süperiletkenin yüzey tabakasına nüfuz ettiğinde ise, Lenz kanununa göre oluşan akım dış manyetik alanın tersi yönünde bir manyetik alan oluşturur. Bunun sonucunda süperiletkenin içindeki toplam manyetik alan sıfır olur (Serway 2005). Manyetik akının dışarlanması olayı tersinir bir durumdur. Süperiletken haldeki bir malzemenin sıcaklığı kritik sıcaklığın (T_c) üzerinde bir sıcaklığa çıkarılırsa, manyetik akı malzemeye nüfuz eder ve numune artık normal bir hale geçmiş olur.

Malzeme içerisindeki manyetik akı,

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} \quad (2)$$

ifadesi ile verilir. Burada \mathbf{H} dış manyetik alan şiddeti, \mathbf{M} mıknatıslanma ve χ manyetik alınganlıktır. Süperiletkenlik durumunda $\mathbf{B} = 0$ olduğundan,

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H} \quad (3)$$

mıknatıslanma manyetik alan şiddetinin eksi işaretlisine eşit olur. Dolayısıyla ortam diyamanyetik olup alınganlık,

$$\chi = \frac{dM}{dH} = -1 \quad (4)$$

olur. Mıknatıslanmanın dış manyetik alanı yok ettiği bu durum mükemmel diyamanyetizma olarak adlandırılır. Bu davranışı yine diyamanyetik olan normal bir metal ile karşılaştırırsak, metalin alınganlığını $\chi \approx -10^{-5}$ olup süperiletkenin alınganlığına kıyasla çok küçük olduğu görülecektir. Dolayısıyla böyle büyük diyamanyetizmayı veren süperiletkenler için farklı mekanizmaların (Meissner olayı) mevcut olduğu sonucu çıkarılmaktadır (Omar, 1993).

1.2.3. Kritik Manyetik Alan ve Kritik Sıcaklık

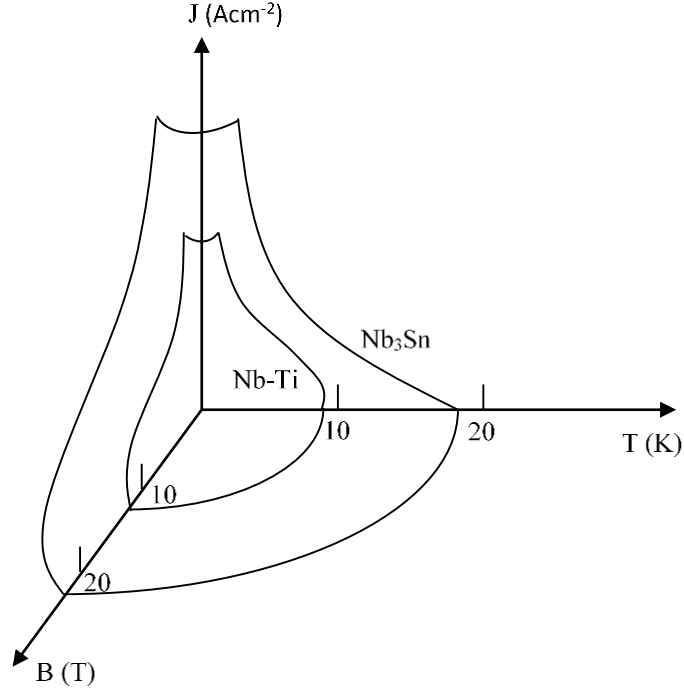
Kritik manyetik alan ve kritik sıcaklık süperiletken malzemenin geçişleri için belirleyici roller üstlenmektedirler. Süperiletken malzemenin süperiletkenlik özelliği gösterebilmesi için kritik sıcaklığın altına kadar soğutulmuş olmasının yanında, o malzemeye uygulanan manyetik alanın belirli bir değerin üstünde olmaması gerekmektedir. Malzeme ancak bu şartlar sağlandığı sürece süperiletken halde bulunabilir. Süperiletken durumda malzemeye uygulanan dış manyetik alan yeteri kadar güçlü ise, bu durum süperiletkenliği yok edebilir ve malzeme tekrar normal hale geçer. Süperiletkenliğin bozulduğu bu manyetik alan değerine kritik manyetik alan denir ve H_c ile gösterilir. Kritik manyetik alanının sıcaklık ile değişimi aşağıdaki ifade ile verilir:

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Eşitlik 5'ten görüldüğü gibi kritik manyetik alan değeri mutlak sıfır sıcaklığında maksimum ve süperiletken sıcaklığı kritik sıcaklığa ulaştığında sıfır olur. Kritik manyetik alan ve kritik sıcaklık üretilen malzemenin cinsine bağlıdır. Süperiletken malzemelerin teknolojinin uygulamaları için kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan değerleri önem teşkil etmekle birlikte, manyetik kuvvet temelli uygulamalar için kritik akım yoğunluğu daha büyük bir öneme sahiptir (Rose ve Rhoderick, 1980).

1.2.4. Kritik Akım Yoğunluğu

Süperiletken bir malzemenin direnç göstermeksizin taşıyabildiği akım miktarının belirli bir sınır değeri vardır. Bu limit değeri kritik akım yoğunluğu (J_c) olarak tanımlanır. Süperiletkenlik durumunun bozulması, kritik manyetik alan ve kritik sıcaklığın yanı sıra yüksek akım yoğunluğuyla da gerçekleşebilir. Bir süperiletkenin kritik akım yoğunluğu (J_c) değeri aşılsa malzeme normal hale geçer. Kritik akım yoğunluğu, numune geometrisine ve numunenin yapısal özelliklerine bağlıdır. Ayrıca bir süperiletkende kritik akım yoğunluğunu belirleyen öğelerden biri de Cooper çiftlerinin bozulmasıdır. Bu durumda numune, bozulan çiftlerin yoğunluklarına bağlı olarak kısmen normal iletken davranış gösterir. II. tip süperiletkenlerde bu çiftlerin bozulmasının yanında, girdapların hareketi de kritik akım yoğunluğuna etki eder. Malzeme içerisindeki safsızlıklar ile akı çizgilerini tuzaklayan girdap bölgelerinin etkileşimi, akı çivileme ile girdapların hareketini engellemektedir. Akı tuzaklandığı sürece maksimum akım yoğunluğu herhangi bir kayba uğramadan akabilir. Aynı zamanda kritik akım yoğunluğu, numuneye uygulanan manyetik alana ve sıcaklığa da bağlıdır. Eğer kritik akım yoğunluğu (J_c) aşılsa, girdaplar (tamamı ya da belirli bir kısmı) uygulanan yüksek manyetik alan ile birlikte akı çivileme kuvvetini yenerek hareket etmeye başlarlar. Bu durum numunede belirli kayıpların artışı manasına gelir. Termal dalgalanmadan (titreşimlerden) dolayı girdapların hareketliliği, uygulanan manyetik alanın ve sıcaklığın artışıyla birlikte önemli ölçüde artar (Krabbes, 2006).



Şekil 1.4. Nb₃Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004).

Uygulanan dış bir manyetik alan altında akım taşıyan tel şeklindeki bir süperiletken, eğer Şekil 1.4 'te gösterilen kritik T, B ve J değerlerini aşarsa yani bu üç değerden herhangi birisi bu eğrilerin dışında kalırsa malzeme direnç göstermeye başlar ve süperiletkenlik bozularak numune normal hale geçer (Moon, 2004).

1.2.5. Süperiletkenlerde Temel Eşitlikler

London kardeşler, süperiletken durumda akım yoğunluğunun o bölgedeki \mathbf{A} vektör potansiyeli ve de manyetik alana bağlı eşitliklerini $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ ve vektör potansiyeli için $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ eşitliklerini kullanarak ortaya koydular. Buna göre,

$$\mathbf{J}_s = -\frac{n_s e^2}{m} \mathbf{A} \quad (6)$$

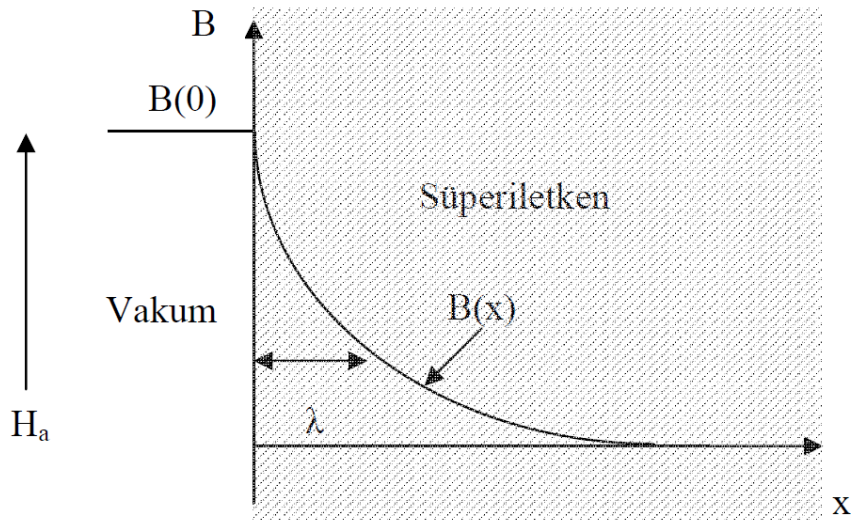
olur ve burada \mathbf{J}_s perdeleme akımı, n_s süperiletken yük taşıyıcılarının birim hacimdeki yoğunluğu, m elektron kütlesi ve e elektron yüküdür. Benzer şekilde,

$$\nabla \times \mathbf{J}_s = -\frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B} \quad (7)$$

$$\mathbf{E} = \frac{m}{n_s e^2} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{J}_s \right) \quad (8)$$

denklemleri de yazılabilir. London denklemleri süperiletkenlerin makroskobik özelliklerinin birkaçını açıklamıştır. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla denklemler uyum içindedir. Bu denklemler manyetik alan bir süperiletken içerisinde belirli mesafelerde nüfuz edebileceği ve manyetik alanın derinliğin artmasıyla eksponansiyel olarak bozulacağını göstermektedir. Manyetik alanın süperiletken içerisinde uzaklığa bağlı olarak üstel bir biçimde azalması London tesir derinliği olarak adlandırılan λ karakteristik uzunluk ölçüğüne bağlıdır (Poole, 2000).

Bunun yanı sıra klasik elektromanyetizma süperiletkenlerin hacimli (bulk) yapılarının özelliklerini, süperiletkende akan yüzey akımları cinsinden belirlemede kullanılabilir. Süperiletken içerisinde akı yoğunluğu değerinin sıfır olması, manyetik alanın uygulanan alana zıt indüklenen yüzey akımlarının oluşturduğu alanla birbirlerini yok etmesinin bir sonucudur. İşte bu yüzey akımları süperiletken yüzeyinde ancak belirli bir kalınlıktaki katmanda akabildiklerinden, bu durum manyetik alanın numuneye ancak belirli bir derinlikte veya mesafede nüfuz edebildiği manası gelmektedir (Rose ve Rhoderick, 1980).



Şekil 1.5. Manyetik akının süperiletken yüzeyinden numuneye nüfuz edişi

Şekil 1.5 süperiletken malzeme yüzeyinden manyetik akının numuneye nüfuz edişini derinliğe bağlı olarak göstermektedir. Alan nüfuz derinliği ve Meissner etkisi sadece Maxwell denklemleri kullanılarak belirlenemez. Eşitlik 7 ve 8 aşağıdaki Maxwell denklemi ile birleştirilmelidir.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (9)$$

Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir. İlgili denklemler birleştirildiğinde,

$$\nabla^2 B = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} B \quad (10)$$

eşitliği elde edilir. Manyetik akı yoğunluğu x derinliğine bağlı olarak şu şekilde değişmektedir:

$$B(x) = B(0) e^{-x/\lambda} \quad (11)$$

Burada λ London tesir derinliği olup aşağıdaki denklemlerle verilir.

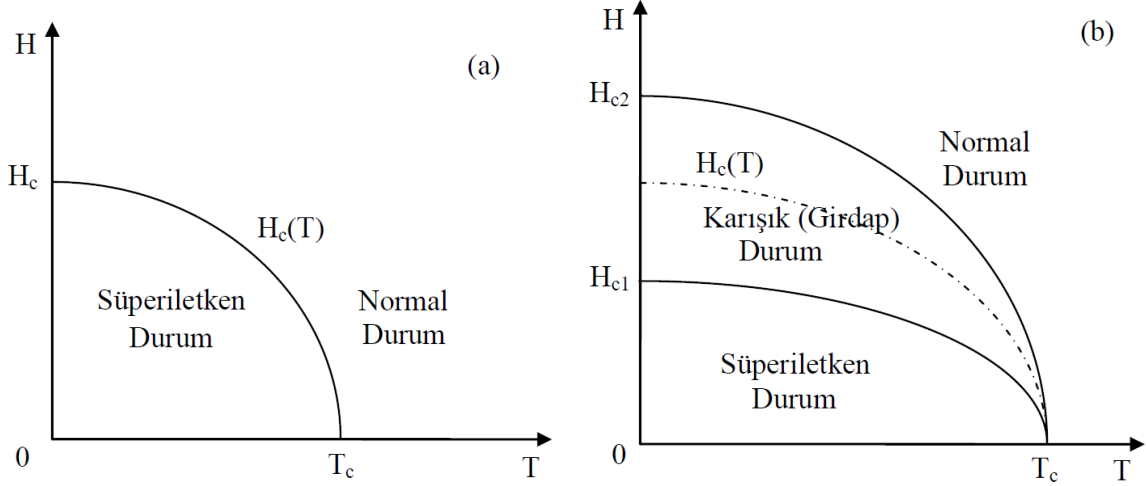
$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}} \quad (12)$$

Kritik sıcaklığa yaklaştıkça süperiletken içerisindeki elektron çiftlerinin sayıları azalmaya başlar ve böylece nüfuz derinliği artar. London denklemleri, deneysel olarak gözlemlenen süperiletken özelliklerin klasik elektromanyetizmanın temel eşitliklerine uyarlanmış halidir (Jiles, 1991).

1.3. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletken malzemeler uygulanan manyetik alan altındaki davranışlarına göre, I. tip süperiletkenler ve II. tip süperiletkenler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. I. tip süperiletkenler genel olarak elementlerin saf halleri olurken, II. tip süperiletkenler ise

genellikle metalik bileşikler, seramik alaşımlar veya farklı oksit bileşenlerdir. Bu iki tip süperiletken arasındaki en önemli fark uygulanan dış manyetik alan altındaki davranışlarıdır.

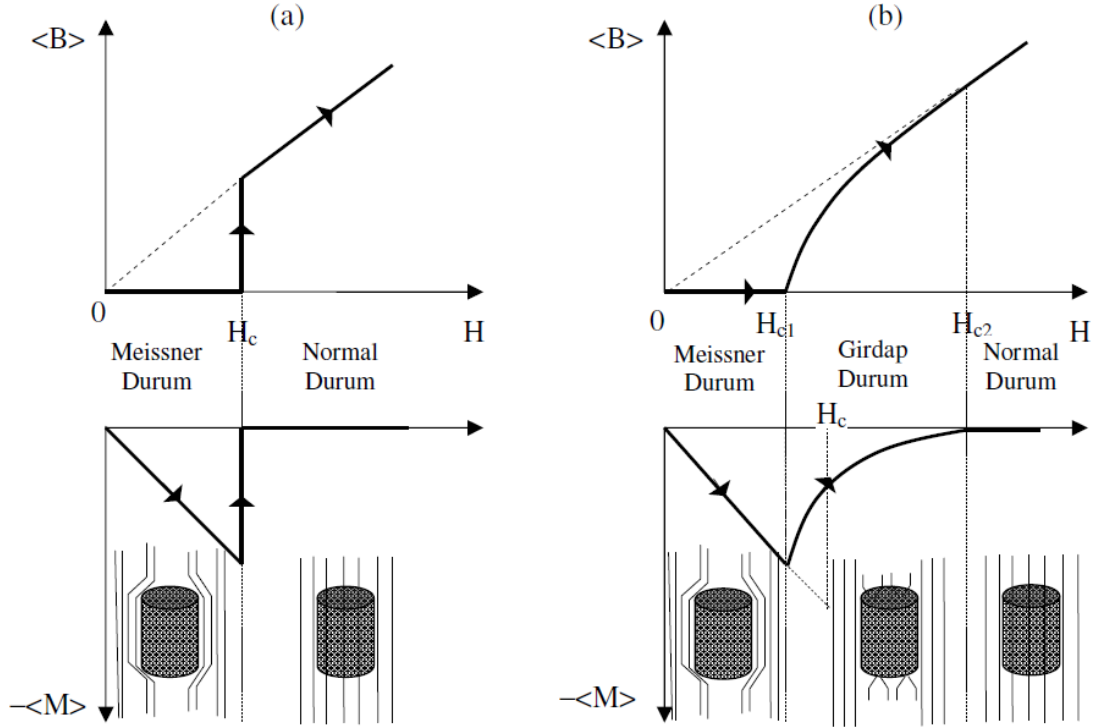


Şekil 1.6. I. (a) ve II. (b) tip süperiletkenler için uygulanan manyetik alanın sıcaklıkla değişimi

Şekil 1.6 I. tip ve II. tip süperiletkenler için manyetik alanın sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir (Rose ve Rhoderick, 1980). I. tip süperiletkenler kritik sıcaklığın (T_c) altında yani süperiletken fazda, bir kritik manyetik alan (H_c) değerine kadar yüzeydeki λ nüfuz derinliği hariç numune içindeki tüm noktalarda manyetik akı dışarlanır. Bu durumda I. tip süperiletkenlerde yüzey akımları mevcut olup, mükemmel bir diyamagnet gibi davranırlar. Ancak, kritik alan değerine geldiklerinde süperiletken durumdan normal duruma keskin bir geçiş yaparlar. Kritik manyetik alan değerinin üzerinde ise manyetik alan tamamen örnek içerisine girer ve süperiletkenlik ortadan kalkar.

Şekil 1.6 (b)'de görüldüğü gibi, II. tip süperiletkenlerde H_{c1} ve H_{c2} olarak adlandırılan iki kritik manyetik alan değerine sahiptirler ve alt kritik alan değeri olan H_{c1} 'e kadar manyetik alanı tamamen dışlarlar. Manyetik alan altında bulunan II. tip bir süperiletken için H_{c1} alt kritik alan değeri, enerji bakımından daha uygun olan karışık duruma geçebilmesi için numuneye uygulanması gereken minimum alandır. Uygulanan manyetik alan değeri H_{c1} ile H_{c2} değerleri arasında ise süperiletken malzeme girdaplı hal (ya da vorteks hali) olarak bilinen karışık halde bulunur. Girdaplı halde madde içindeki ortalama manyetik akı yoğunluğu değişmeye başlar ve akı kısmen malzemeye nüfuz edebilir. Bu şartlar altında malzemedeki normal bölgelerde (dislokasyonlar, örgü kusurları ve safsızlıklar vb.) girdaplar

belirli miktarda akıyı tuzaklayarak süperiletkenin ortalama akı yoğunluğu artırır. II. tip süperiletkenlerde karışık durumdan sonra süperiletkenin normal hale geçtiği yüksek manyetik alan şiddeti, üst kritik alan (H_{c2}) olarak adlandırılır. Uygulanan alanın şiddeti arttığında girdapların sayıları artar ve alan H_{c2} üst kritik alana aştığında, akı numunenin tamamına nüfuz eder. Böylece süperiletken hal ortadan kalkar ve numune normal hale geçer.



Şekil 1.7. Uygulanan manyetik alanla (a) I. ve (b) II. tip süperiletkenler için mıknatıslanmanın değişimi

Şekil 1.7’de I. tip ve II. tip süperiletkenler için uygulanan manyetik alanla, manyetik akı yoğunluğu ve süperiletken malzeme içerisinde oluşan mıknatıslanma arasındaki ilişkisi verilmektedir. Şekil 1.7 (a)’dan görüldüğü gibi I. tip süperiletkenler için, H_c ’nin altındaki manyetik alan değerlerinde numune Meissner bölgesindedir ve manyetik alınganlık ile orantılı olacak şekilde ($\chi = -1$) orijinden çizilen doğrunun eğimi tam olarak 1’dir. Uygulanan manyetik alan, kritik manyetik alan değeri H_c ’ye geldiğinde bilindiği gibi süperiletkenlik bozulmakta ve mıknatıslanma değeri sıfır olmaktadır.

II. tip süperiletkenler ise daha farklı bir davranış göstermektedirler (Şekil 1.7 (b)). Numune H_{c1} alt kritik alan değerine kadar, I. tipe benzer bir davranış göstererek akıyı dışarılar. Alan H_{c1} ile H_{c2} değerleri arasında numune girdaplı durum olan karışık duruma

geçmiş ve akı çizgileri numuneye girmeye başlamışlardır. Son olarak alan değeri H_{c2} 'den büyük ise akı çizgileri numune boyunca tamamen nüfuz etmiş ve artık numune normal hale geçiş yapmıştır. Bu durumda numunedeki mıknatıslanma değeri ise tekrardan sıfır olmuştur. II. tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana bağlı olarak malzemenin içine nüfuz eden manyetik akının numuneye kademeli olarak girişi Şekil 1.7 (b)'de gösterildiği gibidir.

I. ve II. tip süperiletkenler arasındaki bir başka ayırt edici fark, $\kappa = \lambda/\xi$ oranının farklılığıdır. Burada λ süperiletkenin nüfuz derinliği, ξ ise süperiletkenlikten sorumlu Cooper çiftlerini oluşturan elektronların bağlı kalabildikleri kohorens uzunluğunu göstermektedir. Bu iki parametre arasındaki oran Ginzburg-Landau parametresi olarak isimlendirilir ve bu parametre süperiletkenleri karakterize eden bir oran olması nedeniyle önemlidir. I. tip süperiletkenler için $\kappa < 1/\sqrt{2}$, II. Tip süperiletkenler içinse $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 'dir (Li, 1998; Rose ve Rhoderick, 1980).

1.3.1. Akı Çivileme ve Girdap Akımları

Süperiletken malzeme içerisinde bulunan süperiletken olmayan bölgeler (safsızlıklar, tane sınırları, dislokasyon ve boşluk türü kusurlar vb.) süperiletken boyunca manyetik akı çizgilerinin hareketini engeller ve elektrik direnci ortaya çıkmasını geciktirerek daha yüksek miktarda akı tuzaklanmasına olanak sağlar. Bunlara akı çivileme merkezleri (akı merkezleri, girdap yapıları, normal göbekler vb.) adı verilmektedir. Homojen dağılmış akı çivileme merkezleri oluşturmak için, malzemeye süperiletken olmayan maddelerle katkı yapılmakta ya da malzeme içerisinde yapı kusurları oluşturulmaktadır. Böylece süperiletken bir malzemede çivileme merkezleri arttıkça malzemede tuzaklanan akının ve maksimum akım yoğunluğunun J_c artması sağlanabilmektedir.

Akı çivileme II. tip süperiletkenlerde girdap durumunda (karışık durum) meydana gelmektedir. H_{c1} ile H_{c2} alan değerleri arasındaki girdaplı termodinamik fazın fiziksel açıklaması teorik olarak 1957 yılında Abrikosov tarafından yapılmış ve bu çalışması kendisine 2003 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır. Abrikosov'a göre, akı çizgileri süperiletken içerisine tek bir kuantum akısı oluşturacak şekilde ve numuneye belirli bölgelerden girmektedir (Abrikosov, 1957). Bu fikri doğrulamak için şu soruya cevap aranmıştır: "Numune içerisinde belirli bölgelerde tuzaklanan ve yüzeyden çıkan akı çizgileri gerçekten de tek bir akı kuantumundan mı oluşmaktadır?" Bunun için numunedeki akı

çizgilerinin sayısı ve toplam akı belirlenmelidir. Eğer toplam A kesit alanına sahip bir numunede toplam N_v sayıda girdap varsa, ortalama manyetik akı yoğunluğu,

$$B = \frac{N_v}{A} \frac{h}{2e} \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Bu sonucu birim alan başına girdapların sayısı şeklinde yazmak kıyaslama ve yorum yapmak için daha sağlıklı olacaktır.

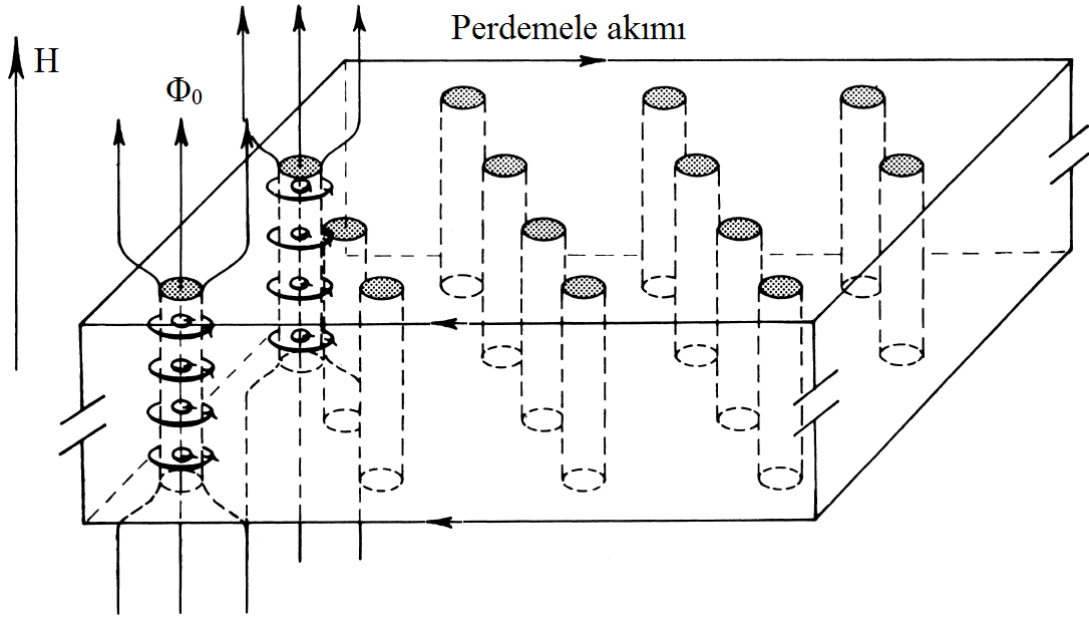
$$\frac{N_v}{A} = \frac{2eB}{h} \quad (14)$$

Bunun gibi değerlendirmeler, homojen II. tip süperiletkenlerde her bir akı çizgisinin,

$$\phi = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15} \text{ (Weber)} \quad (15)$$

büyükliğünde bir akı taşıdığını kesin bir şekilde doğrulamıştır. Çivileme merkezinde tuzaklanan akı, merkezin etrafında dolanan bir girdap (vorteks) akımı tarafından oluşturulur (Annett, 2004).

1967 yılında ise Essmann yaptığı deneysel bir çalışma ile akı çivileme merkezleri örgüsünün altıgen bir yapıda süperiletkene nüfuz edebileceğini kanıtlamıştır. Bir çivileme merkezi etrafında dolanan girdap akımı, bir başka çivileme merkezi ile çevrelenen girdap akımı tarafından üretilen manyetik alan ile etkileşir. Sonuç olarak bu iki merkez, yani iki paralel akı çizgisi birbirlerini iterler. Bu etkileşmeden dolayı, girdap yapıları süperiletken içinde rastgele yayılmazlar ve kendilerini düzenli bir periyodik hegzagonal (altıgen) düzene sokarlar (Essmann, 1967). Şekil 1.8 II. tip süperiletkenlerde girdap yapıları ve akı çivileme merkezlerinde tuzaklanan akıyı göstermektedir. Akı merkezleri süperiletken içinden geçen ve uygulanan manyetik alana paralel uzanan silindirik normal alan bölgeleridir ve düzenli girdap bölgeleri oluştururlar.



Şekil 1.8. II. tip süperiletkenlerde akı çivileme mekanizması (Buckel, 2004).

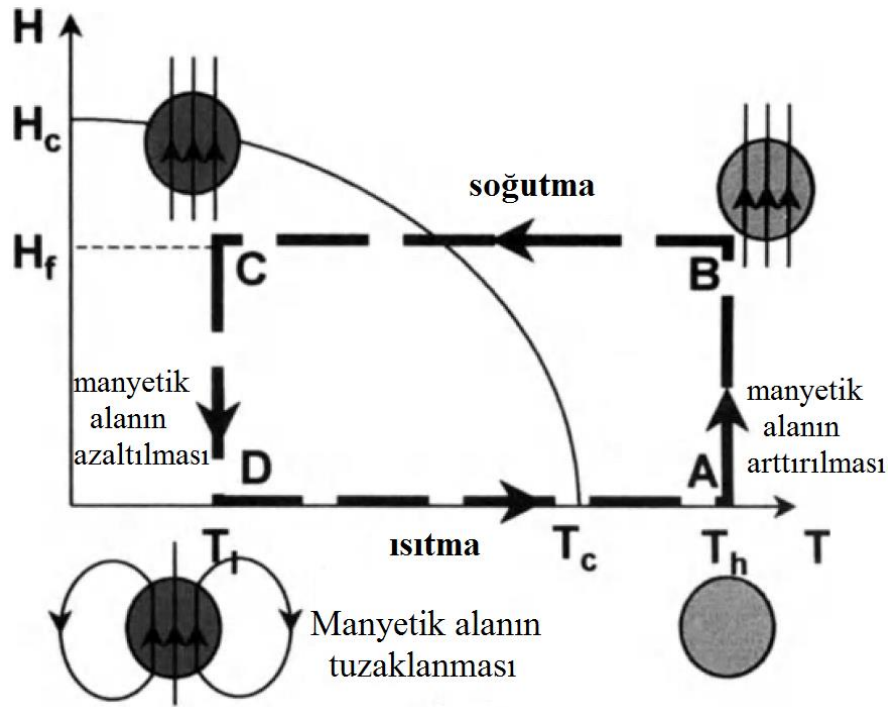
Karışık durumda akı çizgisine etkiyen iki temel kuvvet vardır. Bunlardan biri akı çivileme kuvveti ve diğeri ise akım yoğunluğu ile dış manyetik alandan kaynaklanan Lorentz kuvvetidir. Akı çivileme kuvveti numunede tuzaklanan akıyı süperiletken içerisindeki normal bölgelerde tutarak, numunedeki toplam akı yoğunluğunu artırır. Akı çizgilerinin hareketsiz kalması için de çivileme kuvvetinin Lorentz kuvvetinden büyük olması gerekmektedir. Manyetik kuvvetlerin ısısal dalgalanma sonucu akı çivileme merkezinin birinden kurtulup, diğeri bir çivileme merkezine bağlanması olayına ise akı sürüklenmesi (flux creep) denir.

1.4. Süperiletken Malzemelerin Soğutulması

Süperiletkenlerin manyetik alana karşı olan davranışlarını incelemek için iki şekilde soğutma işlemi uygulanabilir. Bunlar manyetik alan altında soğutma (FC, Field Cooling) ve manyetik alansız soğutmadır (ZFC, Zero Field Cooling). Manyetik kuvvet temelli uygulamalar için önemli olan bu işlemler süresince süperiletken numuneler farklı davranışlar göstermektedir. Örneğin kalıcı mıknatıs ve süperiletken bir madde arasındaki kuvvet değerleri kıyaslanırsa, alansız soğutma durumunda manyetik kaldırma kuvvetinin değeri büyükken, alanlı soğutma durumunda ise manyetik çekici kuvvet değerlerinin büyük olduğu bilinmektedir (Moon, 2004).

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 1.9 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 değişmeksizin 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 çivilenir. Manyetik alan altında soğutma rejimi sağlanmış olup, süperiletken kritik sıcaklığının altında tutulduğu sürece bir mıknatıs 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 mıknatıs özelliğini kaybetmemiştir. Süperiletkenin mıknatıs 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).

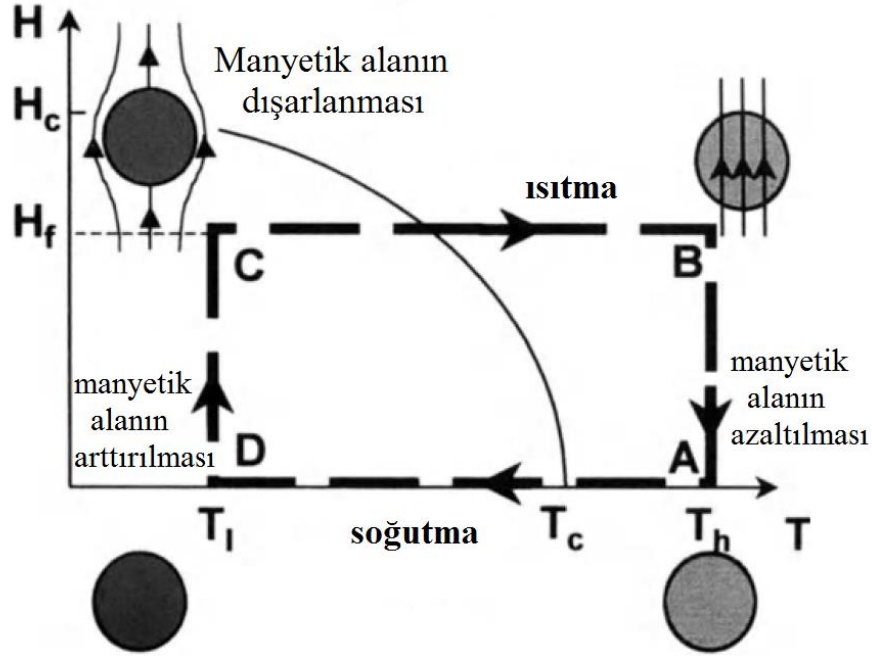


Şekil 1.9. Manyetik alan altında soğutulan süperiletken bir malzeme için H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).

1.4.2. Manyetik Alansız Soğutma (ZFC)

Süperiletken faza geçişte diğer soğutma yöntemi, ortamda dış manyetik alan olmadan soğutma yapmaktır. Şekil 1.10, manyetik alan H ve sıcaklık T bağımsız değişkenler olmak üzere, II. tip bir süperiletkenin termodinamik faz diyagramını göstermektedir. Şekil 1.9'da 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_1 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 diyamanyetik 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 1.10. Manyetik alansız soğutulan süperiletken bir malzeme için H-T faz diyagramı (Weinstock, 2000).

1.5. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma ve Kararlılık

Meissner etkisinin en iyi gösterimi, bir süperiletken ile bir kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kuvvetleri gösteren, havalanmış olarak askıda duran kalıcı mıknatısın durumudur. Burada yatay ve düşey dengeyi sağlayarak manyetik kaldırmayı elde etmek üzere yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) ve kalıcı mıknatıs (PM) kullanılır.

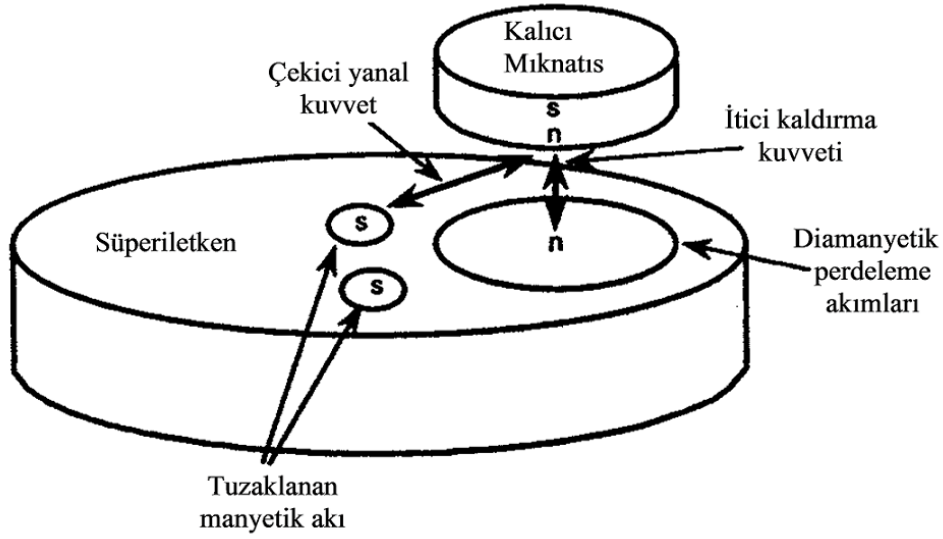
Öncelikle mıknatıs süperiletkenin üzerine yerleştirilerek, süperiletken manyetik alan altında soğutulur. Soğutulma işlemi tamamlandıktan ve malzeme süperiletken durumuna geçtikten sonra, mıknatısın hemen altında indüklenen diyamanyetik perdelene akımları sebebiyle manyetik kaldırma kuvveti oluşur. II. tip süperiletkenlerde diyamanyetizmanın bir sonucu olan manyetik kaldırma olayının kararlılığı akı çivilemesi olayı ile önemli bir şekilde artırılır. Süperiletkenlerde yeteri kadar akı tuzaklandığında mıknatıs ince bir yüzey üzerinde bile havada kalmaya devam eder. Eğer akı çivilemesi yeterince güçlü ise mıknatıs süperiletkenin altında ve hatta yan tarafında bile kararlı bir şekilde askıda kalabilir (Moon,

2004). II. tip süperiletkenlerde görülen ve akı çivileme merkezleri olarak bilinen normal bölgeler (süperiletken olmayan bölgeler) akıyı tuzaklar. Şekil 1.11 manyetik kılavuzlama yolu üzerinde süperiletken YBCO numunesinin temassız olarak havada durmasını göstermektedir.



Şekil 1.11. Süperiletken YBCO malzemenin manyetik kılavuzlama yolu üzerinde temassız olarak havada durması (Fotoğraf KTÜ araştırma laboratuvarında alınmıştır)

Akı çivileme olayı manyetik olarak kaldırılan mıknatısın yatay dengesini oluşturur. Eğer mıknatısın akı çizgileri çivileme merkezlerinde kalacak şekilde yatayda çok küçük bir hareket yaparsa, akı çizgileri bükülür ve yanal geri çağırıcı bir kuvvet uygular. Süperiletkende tuzaklanan akı, eğer mıknatıs yatay veya düşey olarak hareket ederse onu başlangıç pozisyonu olan denge konumuna geri çekecektir. Şekil 1.12’de süperiletken üzerinde manyetik olarak havalanan ve dengede kalan kalıcı mıknatısın üzerine etki eden kuvvetler şematik olarak gösterilmiştir. Mıknatısı denge konumuna geri getiren bu yanal kuvvet, kaldırma kuvvetinin yanında, sistemin kararlılığının bir göstergesidir (Hull 2000).



Şekil 1.12. Manyetik kaldırma ve kararlılık modellerinin şematik gösterimi

Bir mıknatıs ve süperiletken arasındaki manyetik kaldırma kuvveti, ortamın manyetik akı yoğunluğu B ve süperiletken içinden geçen J akım yoğunluğuna bağlıdır ve aşağıdaki gibi verilebilir. Bu kuvvet şu şekilde yazılabilir:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (16)$$

Bu eşitlik çoğu durumda şu şekilde de gösterilebilir:

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} dV \quad (17)$$

Burada M mıknatısın manyetik alanına karşı süperiletkende meydana gelen mıknatıslanma, dV ise süperiletkenin hacmidir. Uygun geometrik düzenlemelerle Lorentz kuvveti etkisindeki manyetik kaldırılan cismin kararlılığı, süperiletkenin manyetik cevabıyla sağlanır. Süperiletkenin manyetik cevabı, cismi negatif geri besleyerek cismin sürekli olarak kararlı kalabilmesini sağlar. Süperiletkenin mıknatıslanmasını sağlayan süperiletken akım yoğunluğu, süperiletkenliğin bozulacağı kritik akım değerine kadar yükselebilir. Bu nedenle yüksek kritik akım yoğunluğuna (J_c) sahip olan süperiletkenlerin, büyük manyetik kaldırma kuvveti ve kuvvet sabiti değerleri (stiffness) göstermeleri beklenir (Qingyong vd., 2009).

Manyetik kuvvet temelli uygulamalardan biri olan Maglev sistemlerinde, sistemin kararlılığını sağlayan bir diğer önemli parametre manyetik kuvvet sabitidir. Manyetik kuvvet sabiti (manyetik sertlik, stiffness vb.), manyetik bir cisim üzerine etkiyen manyetik kuvvetin birim pozisyondaki değişimi olarak tanımlanabilir. Manyetik kuvvet sabiti, manyetik olarak havalanmış sistemlerin uygulanan dış kuvvete karşı gösterdikleri direnç olarak da tanımlanabilir. Manyetik kuvvet sabiti, kuvvet yönü ile yer değiştirme yönü aynı olduğu durumda, küçük yer değiştirmeler için aşağıdaki gibi verilebilir (Moon, 2004):

$$F_x(x) = F(0) + \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} (x - x_0) \quad (18)$$

$$k_x = - \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (19)$$

Eşitlik 18’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. Eşitlik 19, cismin 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 başlangıçtaki denge noktasına yöneleceğini gösterir. Bu durum, cismin bu yöndeki kaldırma olayının kararlı olduğunu belirtmektedir. Negatif manyetik kuvvet sabiti değeri ise, iki sürekli mıknatıs arasındaki kuvvette olduğu gibi, cismin belli bir yer değiştirmeye uğratılması durumunda kararsız bir duruma işaret eder. Manyetik kuvvet sabiti, numunenin akı çivileme özellikleri ile doğrudan ilişkili bir parametre olduğundan, süperiletkenleri sürekli mıknatıslardan ayıran önemli özelliklerden biridir. Süperiletkenlerin, kaldırma kuvvetinin yanı sıra Maglev uygulamaları için en temel ihtiyaçlarından biri olan geri çağırıcı kuvvete sahip olmaları, bu malzemelerin manyetik kuvvet temelli uygulamalarda kullanımına da olanak tanır. Süperiletken malzemeler ile mıknatıs arasında gözlenen manyetik kaldırma olayı, süperiletken malzeme üzerine uygulanan dış bir manyetik alanın malzemede indüklenen perdeleme akımları tarafından dışarılanmasından (Meissner olayı) kaynaklanır. Meissner durumunda malzeme manyetik alanı tamamıyla dışarılar ve itici bir kuvvet oluşur.

1.5.1. Manyetik Kaldırma Kuvvetini Etkileyen Faktörler

Manyetik kaldırma kuvveti, süperiletkenin sahip olduğu manyetik moment ve manyetik alan gradyenti ile orantılı olup aşağıdaki şekilde verilir (Murakami vd., 1991):

$$F_z = m \left(\frac{dH}{dz} \right); \mathbf{m} = \mathbf{M}V; \mathbf{M} = A \mathbf{J}_c r \quad (20)$$

Burada m , süperiletken manyetik moment; dH/dz , manyetik kaynak tarafından oluşturulan alanın düşey z eksenine boyunca değişim oranı; M , birim hacimdeki manyetik moment; V , numune hacmi; A , numune geometrisine bağlı bir sabit; J_c , süperiletkenin kritik akım yoğunluğu ve r , uygulanan dış manyetik alanı dışarılamak için süperiletkende oluşan perdeleme akım halkasının yarıçapıdır. Manyetik kuvvet temelli uygulamalar için istenilen yüksek kaldırma kuvveti değerleri, m , dH/dz ya da r değerlerini büyütürken elde edilebilir. m ve r üzerinde çalışılacak süperiletken malzemenin özelliklerinden olduğu için malzeme kalitesi ve üretim yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Diğer taraftan dH/dz bileşeni dışarıdan uygulanan manyetik alanın kaynağına bağlı olarak değişir. Maglev sistemleri için kullanılan alan kaynakları, farklı boyut ve özelliklerde üretilmiş kalıcı mıknatıslardan oluşan manyetik kılavuzlama yollarıdır (Permanent Magnet Guideway, PMG). Manyetik kılavuzlama yollarında kullanılan mıknatısların kutup yönelimleri, dizilimleri, uyumları manyetik akı gradyentini geliştirmek açısından önemlidir.

Manyetik kaldırma kuvvetinin büyüklüğü, birçok değişken tarafından belirlenir. Bu değişkenler arasında, mıknatıs ve süperiletkenlerin boyutları (numune boyutu, numune kalınlığı, numunenin yüzey alanı vb.), birbirine göre göreceli pozisyonları (Ozturk vd., 2015a; Ozturk vd., 2015b) ve ortam ve tuzaklanan manyetik alan uyumları (Ozturk vd., 2015c), mıknatıs alan şiddeti ve kritik akım yoğunluğu gibi özellikler sayılabilir.

Manyetik kaldırma kuvvetini etkileyen diğer bir etken de soğutma şartlarıdır. Süperiletken ile mıknatıs arasındaki manyetik kuvvetin, süperiletkenin manyetik alan altında (FC) ve alansız (ZFC) soğutma durumlarına da bağlı olarak değiştiğini gösteren birçok çalışma yapılmıştır (Hull vd., 1999). Mıknatıs ve süperiletken arasında daha büyük kaldırma kuvvetinin (itici kuvvet) ZFC durumunda, daha fazla çekici kuvvetin ise FC durumunda sağlanacağı belirtilmiştir (Moon, 2004).

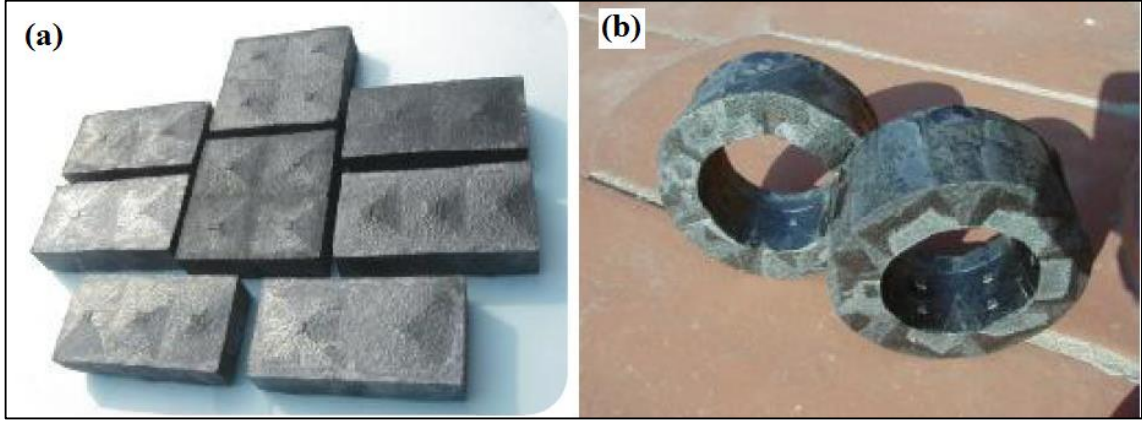
Yapılan bir diğ er ç alışmada, süperiletken ile mıknatıs arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin mıknatıs sayısına, mıknatıs konfigürasyonuna ve mıknatıs boyutuna bağlı olarak değiştiği görölmüştür (Abdioğlu vd., 2012; Abdioğlu vd., 2015).

Ayrıca süperiletken üretim tekniğine bağlı malzeme kalitesi (Kim vd., 2001), süperiletken numuneye yapılan katkılar (Ozturk vd., 2009; Ozturk vd., 2012), süperiletkenin alanlı veya alansız soğutma şartlarına bağlı manyetik geçmişi (Jiang vd., 2012), süperiletken manyetik kaldırma kuvvetini etkileyen faktörlerdendir.

1.6. Çok Çekirdekli YBCO Süperiletkenlerinin Özellikleri

1987 yılında Wu tarafından bulunan YBCO, 77 K sıvı azot sıcaklığını aş an ilk süperiletken malzemedir. Maksimum geçiş sıcaklığı, T_c 90 K civarındadır ve itriyum tabanlı bu sistemde yük taşıyıcıları genelde hollerdir. YBCO hem tetragonal hem de ortorombik yapı halinde bulunabilir fakat süperiletken durum sadece ortorombik yapıda meydana gelmektedir. Tetragonal yapı, 700° C ile 950° C sıcaklık aralığında gözlenir. Sıcaklık azaldıkça ve oksijen miktarı arttıkça 700° C’de yapı tetragonal fazdan ortorombik faza geçer. YBCO’nun ortorombik yapısı tabakalı yapı gibi düşünölebilir. Yapının içinde dört düzlem, bakır ve oksijen atomlarını; iki düzlem, baryum ve oksijen atomunu; tek düzlem ise itriyum atomunu içerir. Süperiletkenliğin anizotropisini azaltan CuO tabakasının varlığı, YBCO’nun süperiletkenlik özellikleri için oldukça önemlidir (Seeber, 1998).

şekil 1.13 (a)’da Alman ATZ firması tarafından üretilen farklı boyut ve sayıda çekirdekler içeren çok çekirdekli YBCO süperiletkenleri görölmektedir. Ayrıca çok çekirdekli YBCO numunelerden üretilen içi boş, yekpare gövdeli ve silindirik süperiletken manyetik yataklar (bearing) şekil 1.13 (b)’de gösterildiği gibidir (Werfel vd., 2005). Manyetik kuvvetlerin kullanılması ile temassız yataklamanın sağlandığı aktif manyetik yataklar ile sürtünmenin en aza indirildiği sistemler, son çeyrek asırdır endüstriyel olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Bu yataklar uzun ömre sahip olmakla birlikte yüksek devirlerde çalışmak mümkün olmaktadır. Ancak manyetik yatakların aktif bir kontrol gerektirmesi, karmaşık bir geri beslemeli kontrol sistemine sahip olması kullanımı zorlaştırırken maliyeti de arttırmaktadır. Süperiletken kaldırma sisteminin aktif manyetik yataklara göre en büyük avantajı pasif bir manyetik kaldırma sağlamasıdır ve süperiletken manyetik yatak uygulamalarında herhangi bir aktif kontrole gerek olmamaktadır (Moon, 2004).



Şekil 1.13. (a) Çok çekirdekli YBCO süperiletkenleri ve (b) çok çekirdekli YBCO numunelerden üretilen içi boş silindirik süperiletken manyetik yataklar (Werfel vd., 2005).

Çok çekirdekli YBCO süperiletkenleri manyetik kuvvet temelli farklı uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple manyetik kuvvetin geliştirilmesi ve daha kararlı yapılar halinde farklı geometrilere üretilmesi için yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin özellikleri ve uygulanabilirliği uzun yıllardır mercek altına alınan bir konu olmuştur. Son yıllarda Maglev uygulamalarının ihtiyaç duyduğu gibi daha büyük ölçekli, daha geniş domain boyutuna ve daha yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip süperiletken numune üretebilmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Üstten tohumlamalı eritme büyütme (Top-seeding melt growth, TSMG), yönlendirmeli eritme büyütme (melt-textured growth, MTG), hızlı soğutmalı eritme büyütme (quench melt growth, QMG), eritme toz eritme büyütme (melt powder melt growth, MPMG) ve oksijen kontrollü eritme büyütme (oxygen-controlled melt growth, OCMG) gibi farklı birçok eritme yöntemi ile bu numuneler üretilmektedirler (Murakami, 1992).

1.6.1. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Yapısal Özellikleri

Şekil 1.14'deki numuneler 400kpa seviyesinde ve top-seeding melt growth (TSMG) yöntemi ile Alman ATZ firması tarafından üretilen üç çekirdekli YBCO numunelerdir. Tohum kristali ya da kristalleri preslenen YBCO numunelerinin üst kısmına yerleştirilerek ısıtılıp işleme tabi tutulmaktadır. Daha sonra farklı uygulamalarda kullanılmak üzere belli işlemlerden geçirilerek istenilen hacimli şekilde elde edilmiş olur. Bu üstten tohumlama tekniğiyle malzemeler daire, kare ya da dikdörtgen şeklinde, farklı boyutlarda ve farklı

çekirdek sayılarına sahip biçimde üretilebilmektedir. Hacimli süperiletken üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanabilirliği hayati bir öneme sahiptir. Çünkü süperiletkenlik ve manyetik özellikleri malzemenin üretim yöntemine, numunenin geometrisine bağlıdır. Numunenin tamamı göz önüne alındığında, malzemedeki mikro çatlaklar, tane sınırları ve zayıf noktalar manyetik özelliklerin bozulmasına ve süperiletkenin akı tuzaklama kapasitesinin zayıflamasına sebebiyet verebilirler (Werfel 2012).



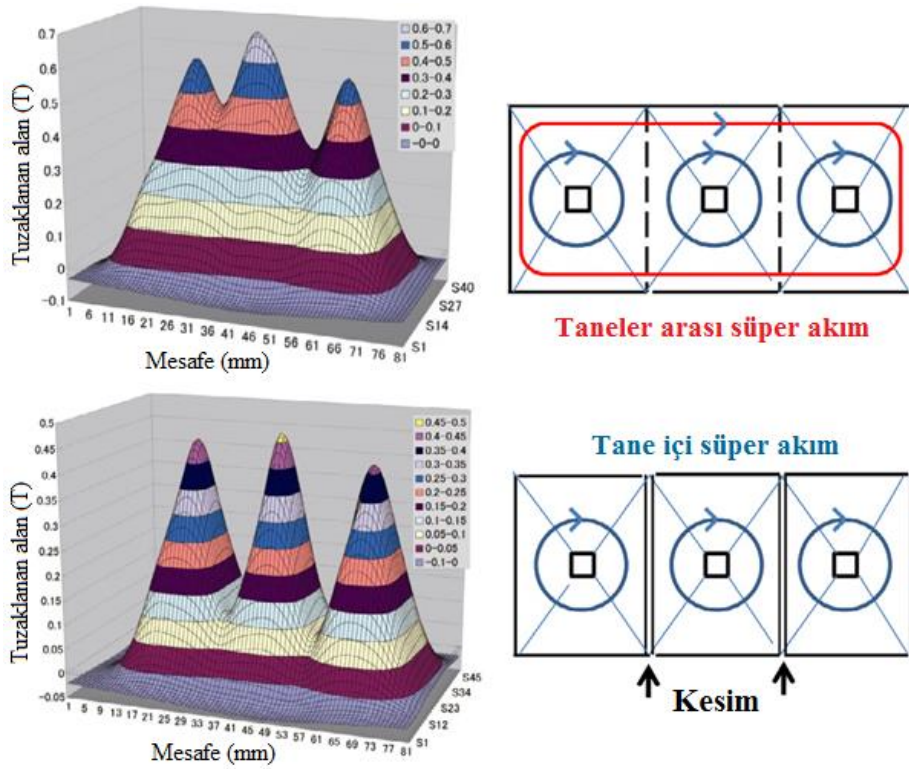
Şekil 1.14. Üç çekirdekli YBCO süperiletkeni (Werfel, 2011).

Çoklu tohumlama işlemi sırasında dikkat edilen hususlar şu şekildedir:

- (i) Top Seeding Melt Growth (TSMG) yöntemi ile çok tohumlu bir numune üretimi, eş zamanlı çekirdeklenmesi ve tek taneli Y123 fazının kontrollü ısıl işlem ile büyümesi temeline dayalıdır. Dolayısıyla tüm tohumlanan bölgeler ve numune benzer termal işlemlere tabi tutulmalıdır.
- (ii) Çekirdeklenme öncesi tohum boyutu, şekli, mesafesi, dizilimi ve düzeni dikkatli seçilmelidir.
- (iii) Çekirdeklenen her bir tanenin kare düzlemsel şekilde büyüme eğilimi (epitaksiyel büyütme), süperiletken özellik gösteren özdeş tane sınırlarına sahip numunenin oluşmasına olanak tanır (Werfel 2011).

1.6.2. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Elektromanyetik Özellikleri

Maglev sistemlerinde kullanılan süperiletkenlerin manyetik kuvvet değerleri, malzemenin akı tuzaklama kapasitesiyle orantılı olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla süperiletken malzemenin manyetik karakteristiğini test etmek için, bir elektromıknatis ya da kalıcı bir mıknatısın yarattığı alanın varlığında alanlı soğutma tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemle harici alanın bir kısmı süperiletken içerisinde tuzaklanır. Daha sonra bu tuzaklanan alan dağılımı numune yüzeyinden bir Hall sensörü yardımı ile belirlenebilir. Şekil 1.15 üç çekirdekli YBCO süperiletkenin 77 K'de, başlangıçta ve tane sınırlarından kesildikten sonra içerisinde tuzaklanan manyetik alan dağılımı verilmektedir.

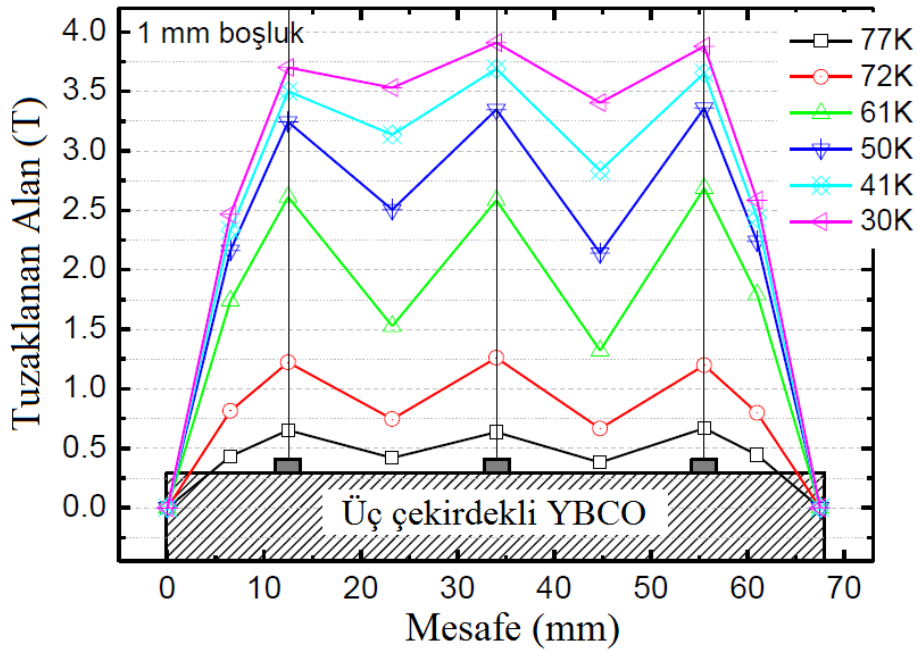


Şekil 1.15. Numunenin başlangıçtaki ve tane sınırlarından kesildikten sonra tuzakladığı manyetik alan dağılımı (77 K) (Werfel 2011).

Ayrı ayrı her üç çekirdekte de tuzaklanan alan değerleri birbirine yakın olmakla birlikte, en yüksek değer 0,7 T'dır. Numune tane sınırlarından kesildikten sonra içerisinde tuzaklanan alanda önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Numune kesildikten sonraki tuzaklanan alan dağılımı numune kesilmeden önceki dağılıma benzer karakterde olmasına

rağmen, maksimum pik değerlerinde önemli bir düşüş yaşanmaktadır. Başlangıçta her bir çekirdek için görülen pikler akı tuzaklanmasında birbirlerini destekler nitelikte iken, kesimden sonraki pik değerleri daha belirgin bir konik yapıda ortaya çıkmaktadır. Uygulanan dış manyetik alanla birlikte numunede tuzaklanan akı, kesimden önce her bir çekirdek etrafında dolanan tane içi süperakımlara neden olurken aynı zamanda çekirdeklerin etrafında dolanan tanelerarası süperakıma da neden olmaktadır. Numune tane sınırlarından kesildikten sonra tanelerarası süperakım ortadan kalkarken sadece her bir çekirdek etrafında ayrı ayrı dolanan tane içi süperakımlar oluşmaktadır (Şekil 1.15). Tanelerarası süperakım numunede tuzaklanan manyetik akıya yaklaşık % 40 oranında katkıda bulunmaktadır. Çekirdeklerin bağlanma bölgelerindeki tuzaklanan akı yoğunluğu ölçümlerine göre, çekirdekler arasındaki tane sınırları numune içerisinde kuvvetli bir şekilde birbirine bağlı ve ya çiftlenmiş halde bulunmaktadır (Werfel 2011).

Tuzaklanan alan ölçümleri iki ilginç özellik göstermektedir. Süperiletkenler için önemli bir özellik olan kritik akım yoğunluğu J_c akı dağılımının eğim gradyenti ile doğru orantılı olacak şekilde, numunenin çekirdeklenme merkezlerinde merkezden uzak bölgelere göre daha yüksektir. Tuzaklanan alan dağılımı simetrik koni şeklinde pikler olarak görülmektedir. Bu durum geometriden dolayı numunenin büyüme bölgelerinde daha büyük bir akı yoğunluğu manasına gelmektedir (Werfel 2012).

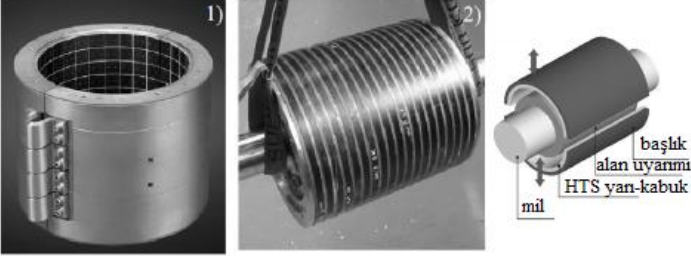
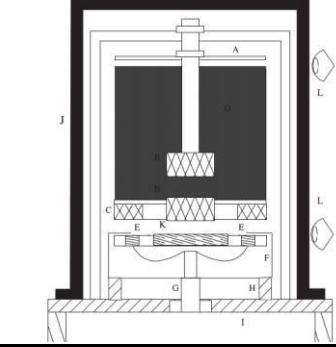
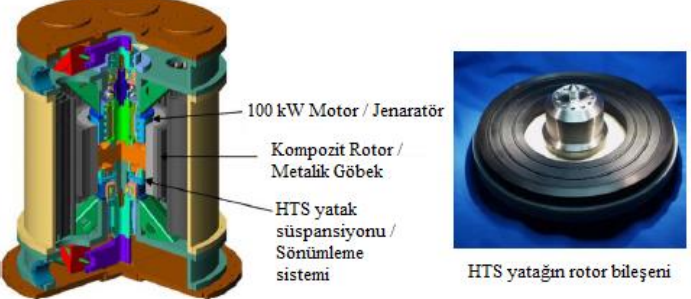
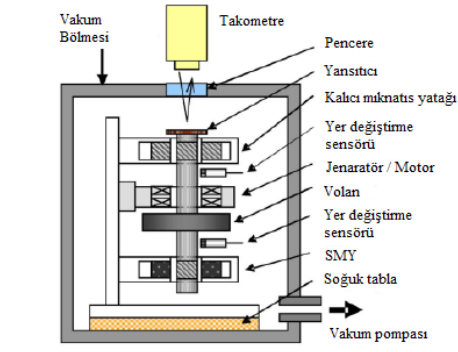


Şekil 1.16. Farklı sıcaklık değerlerinde üç çekirdekli YBCO numunede tuzaklanan alan dağılımı (Werfel 2011).

Yapılan bir çalışmada, süperiletkenin sıcaklığı düşürülerek daha yüksek değerlerde manyetik akı tuzaklanabilmektedir (Werfel 2011). Şekil 1.16'da farklı sıcaklık değerlerinde üç çekirdekli YBCO süperiletken numunede tuzaklanan alan dağılımları gösterilmiştir. Ölçümler numune yüzeyinden 1 mm yukarıda ve numuneye 5 T'lık bir dış manyetik alan uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Örneğin 60 K sıcaklıkta numunenin 2.5 T alan tuzakladığı gözlenmiştir. Sıcaklık 30 K'e kadar düşürüldüğünde bu değer yaklaşık 4 T kadardır. Numunenin çekirdeklenme merkezlerinde diğer ara ve uç bölgelere göre tuzaklanan alan yoğunluğu değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca üstten tohumlama yöntemi ile hazırlanan numunelerin manyetik alansız kritik akım yoğunluğu J_c , 10^9 A/m² ve 2 T alan altında ise 10^8 A/m²'dir (Werfel vd., 2012b).

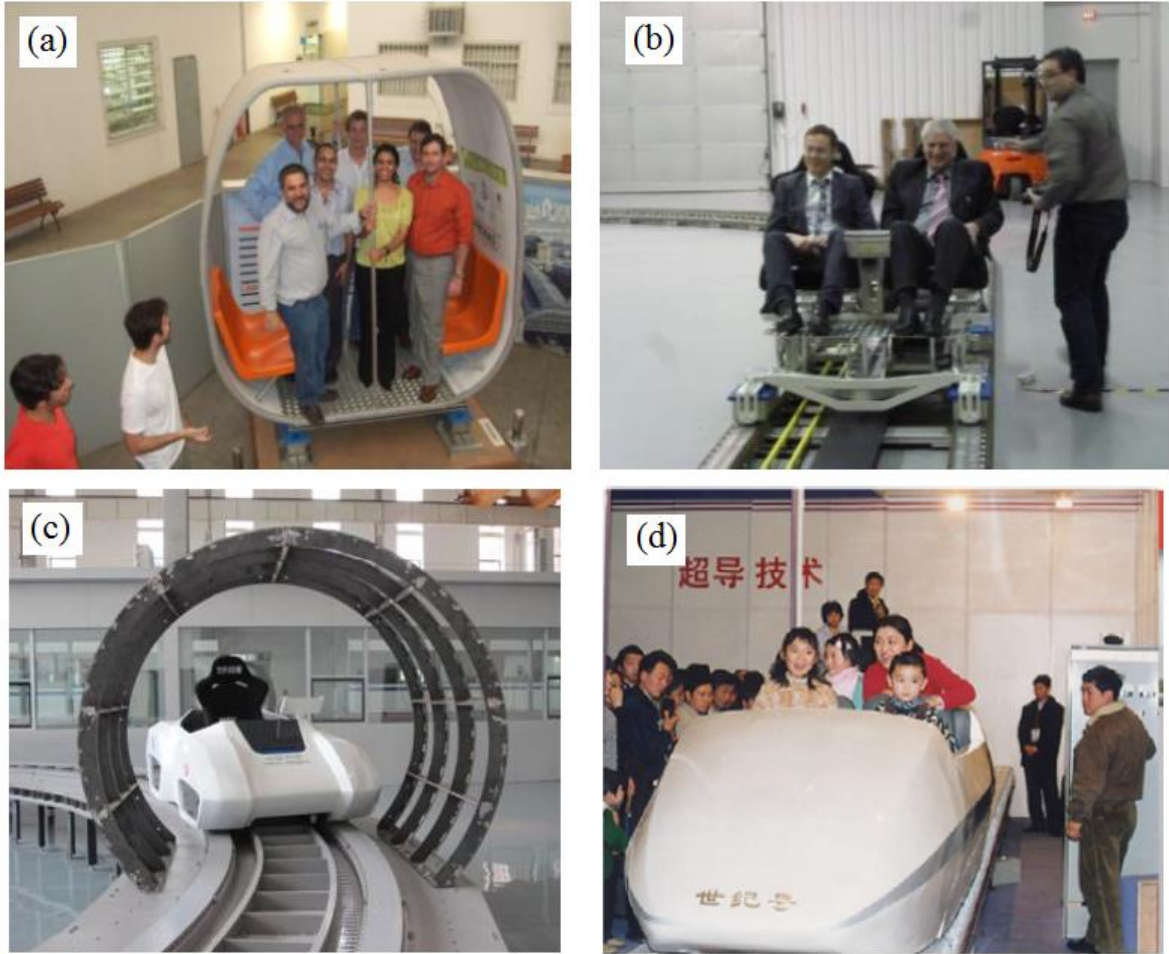
1.6.3. Çok Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Kullanım Alanları

Süperiletken manyetik yataklar (bearing) ve volan (flywheel) enerji depolama sistemleri çok çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin kullanıldığı manyetik kuvvet temelli uygulamalardandır. Bir makine yatağında temel prensip iki parçanın birbirine göre hareket ederken aşınma, sürtünme, ısı üretimi gibi parametrelerin minimuma indirilmesidir. Bu tür yataklardaki sürtünme kuvvetinin neden olduğu enerji kayıplarını önlemek için temassız 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). Aktif ve pasif manyetik yataklar olmak üzere iki tür manyetik yatak sistemi vardır. Aktif manyetik yataklar, manyetik alan kaynağı (elektromıknatis gibi) için sürekli beslemeye ihtiyaç duyar. Buna karşın pasif süperiletken-kalıcı mıknatis veya süperiletken-süperiletken temelli yataklar karmaşık geri beslemeli kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymazlar (Moon, 2004). Külçe süperiletkenin yüzeyinde yüksek manyetik alan gradyenti oluşturmaya dayanan silindirik ve düzlemsel olmak üzere iki temel süperiletken manyetik yatak türü vardır. Bu sistemlerde genel olarak PM dizilimi rotorda (dönen kısım) ve süperiletkenler soğutma kolaylığı için statorda (hareketsiz kısım) yer alır. Şekil 1.17'de son on yılda yapılan ve test edilen süperiletken manyetik yatak (SMY) örnekleri verilmiştir. Bu örnekler boyut ve mevcut performans açısından çeşitlilik göstermektedir. Çoğu örnek sistemde, PM-PM yataklar ilave denge ya da yük desteği sağlamak için kullanılmaktadır. Rotor ise kayıpları en aza indirmek için genellikle bir vakum içinde yer alır (Patel, 2013).

Süperiletken Manyetik Yatak (SMY) Prototipleri	Sistem Detayları
<p>Yüksek yük kapasiteli sanayi tipi yatay eksenli manyetik yatak (Walter vd., 2006)</p> 	<p>Tip: Yatay Eksenli Silindirik SYM. Uygulama: Siemens HTS jeneratör Yük: 10 kN'a kadar Dönme Hızı: 3600 rpm (en fazla 4400 rpm) Süperiletken: Sabit kısım toplam 270 YBCO içeren iki yarım silindirik kabuktan oluşmaktadır. Süperiletken çalışma sıcaklığı yaklaşık 30 K'dır. Çalışma mesafesi 3 mm'dir. Radyal stiffness 5,1 kN/mm'dir.</p>
<p>Volan (flywheel) enerji depolama için süperiletken baskı yatağı (Coombs vd., 2002)</p> 	<p>Tip: Düşey eksen düzlemsel SYM (allta) ve rotor ağırlığını taşıması için çekici PM-PM yatak (üstte). Uygulama: Yüksek döngülü kullanım için volan enerji depolama. Yük: 44 kg Dönme Hızı: 720 rpm (sistem kısıtlı) Süperiletken: Sabit kısımda dış halka numunelerden ve merkez dizilimi altıgen numunelerden yapılmıştır.</p>
<p>5kWh volan (flywheel) için süperiletken manyetik yatak (Boeing) (Strasik vd., 2010)</p> 	<p>Tip: Düşey eksen düzlemsel SYM (allta) ve rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatak (üstte) Uygulama: Kesintisiz enerji kaynağı olarak 5 kWh/100 kW'lık volan enerji depolama sistemi Yük: 164 kg Dönme Hızı: 15000 rpm Süperiletken: Sabit kısım altıgen YBCO numunelerin dizilimi ile oluşturulmuştur. Süperiletken çalışma sıcaklığı 77 K'dir.</p>
<p>Süperiletken ve kalıcı mıknatıs manyetik yataklı volan enerji depolama sistemi (Mitsuda vd., 2009; Murakami vd., 2007)</p> 	<p>Tip: Düşey eksen silindirik SYM (allta) ve rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatak (üstte) Uygulama: Kesintisiz enerji kaynağı olarak kullanılan volan enerji depolama Yük: 0,32 kg Dönme Hızı: 5000 rpm Süperiletken: Sabit kısım YBCO numunelerden oluşan halka dizilimi ile yapılmıştır. Süperiletken çalışma sıcaklığı 70 K'dir.</p>

Şekil 1.17. Son on yılda yapılan ve test edilen Süperiletken Manyetik Yatak (SMY) prototiplerine dört örnek (Patel, 2013).

Süperiletkenlerin kritik sıcaklığın altında uygulanan manyetik alanı dışarılamaları özelliklerinden faydalanılarak yapılan manyetik olarak havalanmış (Maglev) sistemler süperiletkenlerin bir diğer teknolojik uygulamasıdır. Maglev araçlarda iki ana yöntem vardır. Bunlardan ilki 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. Bu ikinci yöntemde araç üzerinde çok sayıda süperiletken mıknatıs kullanılır. Pasif süperiletken kaldırma olarak adlandırılan bu sistemlerde ise bir PM ana alan kaynağı olarak görev yaparken bir ince film veya külçe süperiletken, içerisinde indüklenen süperakımlar sayesinde alan şekillendirme görevi üstlenirler. Bu mıknatıslar sayesinde aracın altında yer alan iletken rayda girdap akımları oluşur. Araç hareket ettiğinde oluşan manyetik kaldırma, Maglev sistemini temassız havada tutmaktadır. (Moon, 2004).



Şekil 1.18. Dünyanın farklı bölgelerinde yapılan ve test edilen çeşitli Maglev uygulamaları (a) Rio de Janeiro, (b) Dresden, (c) Chengdu ve (d) Çin (Nishijima vd., 2013).

Şekil 1.18 şimdiye kadar dünyanın farklı bölgelerinde yapılan ve test edilen daha büyük ölçekte çeşitli Maglev uygulamaları verilmiştir. Bu uygulamadan biri Brezilya Rio de Janerio Üniversitesinde süperiletken vakum kriyostatları kullanılarak tasarlanan ve test edilen Maglev trenidir (Şekil 1.18 (a)). Maglev COBRA isimli tren, 15 kişilik taşıma kapasitesine sahip olup 150 m uzunluğundaki manyetik kılavuzlama yolu üzerinde çalışmaktadır. Maglev COBRA treni, 24 kriyostat tarafından manyetik olarak havalanmış durumda hesaplanan toplam 5 tonluk yük taşıma kapasitesi ile son test aşamalarına ulaşmıştır. Bunun yanı sıra Maglev taşımacılığının olası yüksek hızlardaki potansiyel uygulamalarını araştırmak için Chengdu'daki Southwest Jiaotong Üniversitesi bünyesindeki ASC Lab. tarafından 45 m'lik yeni bir dairesel PMG yolu inşa edilmiştir (Şekil 1.18 (c)). Bu yolla, Maglev taşıma sistemlerinin ticari olarak geliştirilebilmesi adına hava sürtünmesinin ve gerçeğe yakın boyutların Maglev sistemlerine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu sistemin yaklaşık maliyeti ise 400 bin \$'dır. Diğer taraftan yaklaşık 15 sene önce Çin'in Chengdu bölgesindeki ilk Maglev uygulamalarına başlanmasının ardından Almanya Dresden'deki prototip bugünlerde 80 m uzunluğunda oval bir PMG yolu ile 3 yıldan fazla süredir çalışmalara devam etmektedir. Dresden'deki bu Maglev uygulaması (Şekil 1.18 (b)), süperiletken kısımların yanında iki etkin PMG yolu arasında temassız bir akım taşıyıcı ve lineer motor ile 20 km/s hızlara ulaşabilmektedir. SupraTrans II isimli bu Maglev treninin toplam maliyeti yaklaşık olarak 2,2 milyon €'dur. Şekil 1.18 (d)'de gösterilen ilk insan yüklemeli olarak Çin'de çalışmaya başlayan Century isimli Maglev treni 2000 yılından bu yana 40000'den fazla yolcu ile toplam yaklaşık 400 km yol katetmiştir. Bu Maglev sisteminin uzun dönem sağlamlığı ve güvenilirliği, manyetik kaldırma kapasitesindeki değişimin % 5'den daha az olması ve herhangi bir kontrol sistemine ihtiyaç duymadan gerçekleştirilen HTS Maglev sisteminin çalışma garantisi ile onaylanmıştır (Nishijima vd., 2013).

1.7. Literatür Özeti

Süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti özelliklerinden yararlanılarak manyetik olarak havalanmış taşıma sistemleri (Maglev), sürtünmesiz manyetik yatak ve enerji depolayan dönen çark gibi sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının en aza indirilebileceği sistemler, günümüzde çeşitli araştırma laboratuvarlarında geliştirilmeye çalışılmaktadır. Özellikle, ilk insan yüklemeli (first man-loading) yüksek sıcaklık süperiletken Maglev test

aracının 2002 yılındaki başarısı (Wang vd., 2002) ve daha sonraki yıllarda, gerek manyetik kaldırma kuvveti özelliklerindeki iyileşmeler ve gerekse Maglev araçlarının elektromanyetik parametrelerinin saptanmasında kullanılan ölçüm sistemlerindeki gelişmeler süperiletken Maglev sistemlerinin pratik uygulanabilirliğini arttırmıştır (Sotelo vd., 2013; Sotelo vd., 2012; Sotelo vd., 2015; Wang vd., 2009).

Maglev sistemlerinin yük taşıma kapasitesinin ve yanal kararlılığının istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Geleneksel Maglev sistemlerinde, manyetik kılavuzlama yolu (PMG) ile süperiletken malzeme arasındaki manyetik kaldırma kuvveti değerleri artırılırken, sistemin kararlılığını oluşturan kılavuzlama kuvveti değerleri de göz ardı edilmeyip yeterli bir düzeyde olmalıdır. Belirli bir manyetik alan değerine sahip mıknatısların aynı işaretli kutuplarının kullanılmasıyla manyetik kaldırma kuvveti artırılabilmesine rağmen, bu durum Maglev sistemlerinde yanal dengesinde sorunlara ve böylece sistemin hareketinde bir kararsızlığa neden olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, bu tez çalışmasının da araştırma konusu olan, hem manyetik kılavuzlama ve hem de manyetik kaldırma kuvvetini birlikte arttıracak, yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) ve mıknatısların birlikte kullanıldığı yapıların geliştirilmesi üzerinedir (Ren vd., 2002; Chu vd., 2011; Liu vd., 2010).

Yürütülen bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalarda üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, hem yüksek kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvveti parametreleri belirlenmeye çalışılmış ve bu süperiletkenler Maglev araçlarının teknolojik uygulanabilirliği için araştırılmıştır. Maglev sistemleri için kullanılan alan kaynakları, farklı boyut ve özelliklerde üretilmiş kalıcı mıknatıslardan oluşan manyetik kılavuzlama yollarıdır. Manyetik kılavuzlama yollarında kullanılan mıknatısların kutup yönelimleri, dizilimleri, uyumları manyetik akı gradyentini geliştirmek açısından önemlidir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda manyetik kılavuzlama yolunda farklı kutup yönelimli, farklı boyutlarda çeşitli dizilimlere sahip kalıcı mıknatıslar kullanılarak oluşturulan konfigürasyonlarla, üç çekirdekli YBCO numune ve de numuneleri arasındaki hem düşey hem de yatay manyetik kuvvet performansı değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, numune kabına yerleştirilen ve düşey konumu değiştirilebilen kalıcı mıknatıslarla birlikte hibrit dizilimler oluşturulmuştur. Tüm bu mevcut PMG-HTS konfigürasyonları için kaldırma kuvveti değerlerinin alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altındaki değişimi araştırılarak literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma ve kılavuzlama

kuvvetlerinin iyileştirilmesinde kullanılan optimum HTS-PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesinde yararlanılan sayısal modellemeler, sonlu elemanlar yöntemini kullanan COMSOL Multiphysics 4.2a paket programla yapılmıştır. Elde edilecek deneysel ölçüm verilerinden yararlanarak ileriki aşamada daha büyük boyutlu Hibrit Maglev araçlarının manyetik özellikleri araştırılması da planlanmaktadır.

Maglev sistemlerinin kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerleri gibi manyetik kuvvet performansını artırmaya yönelik çalışmalarla ilgili literatür özeti aşağıda verilmiştir.

Maglev sistemlerinde HTS ve PMG arasındaki manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin elektromanyetik kaynaklı etkileşimden ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri, süperiletkenin akı çivileme kapasitesi ve kritik akım yoğunluğu gibi süperiletken malzeme özellikleri ile PMG'nin maksimum manyetik alanı ve manyetik alan gradyenti (Schultz vd., 2005; Sotelo vd., 2011a), ölçüm sıcaklığı (Jing vd., 2012), soğutma mesafesi (Cooling Height, CH) (Zhou vd., 2009), ölçüm yüksekliği (Measurement Height, MH) (Liu vd., 2010) gibi dış manyetik alan ve ortam şartları ile ilişkilidir.

Çok tohumlu eritme yöntemi (multi-seeded melt processed, MSMG) ile üretilmiş külçe süperiletkenlerle PMG arasındaki manyetik etkileşimin araştırıldığı bir çalışmada (Song vd., 2004) iki model kullanıldı: MSMG külçeler ve PMG'ye dik ve paralel olarak yerleştirildi. Çalışmada MSMG külçe bir bütün olarak ve üç parçaya ayrıldıktan sonra birleştirilerek iki farklı şekilde kullanıldı. Bu parçalar yaklaşık olarak aynı boyutlara sahiptir ve parçaların maksimum kaldırma kuvvetleri, paralel durumda çok az farklı olması dışında, neredeyse aynıdır. Çalışmada, MSMG külçelerin tanelerarası kritik akım yoğunluğu nedeniyle, dik durumda daha büyük taneli tek bir külçe gibi kabul edilebileceği ve bu külçe süperiletkenin manyetik kaldırma kuvvetinin kesilip birleştirilmiş dizilimin kaldırma kuvvetinden daha büyük olduğu bulundu. Diğer taraftan, MSMG külçenin kılavuzlama kuvveti hem dik hem paralel durumda birleştirilmiş diziliminkinden daha büyüktür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar MSMG YBCO külçelerin mevcut HTS Maglev sistemlerinin optimizasyonunda tercih edilebileceğini göstermiştir.

Maglev sistemlerinde daha fazla yük taşıma kapasitesi için kaldırma kuvvetinin ve sistemin kararlı olarak hareketini sağlayan çekici kuvvetin artırılması için de süperiletken malzemenin akı tuzaklama kapasitesinin büyük olması istenmektedir. Bu amaçla Choi ve arkadaşları tarafından MSMG yöntemi kullanılarak çok tohumlu (multi-seed) külçe

süperiletken malzemeler üretilmiş ve bu malzemelerin manyetik kaldırma kuvveti, çekici kuvvet ve akı tuzaklama kapasiteleri araştırılmıştır (Choi vd., 2008). MSMG yöntemi ile üretilmiş olan numunelerin kaldırma kuvveti ve tuzaklanan manyetik alan değerleri hem FC hem de ZFC durumlarında çekirdek sayısının artmasıyla azalmıştır. Tuzaklanan manyetik alan analizi, manyetik alanın (100)/(100) eklemlerinin zayıf bağlantılı olması nedeniyle çok çekirdekli numunelerin tane sınırlarından kolaylıkla girdiğini göstermiştir. Zayıf bağlantılı tane sınırlarının, çok çekirdekli numunelerin düşük kaldırma kuvveti ve akı tuzaklama kapasitesine neden olarak gösterilmiştir.

Deng ve arkadaşları üç çekirdekli dikdörtgen prizma şekilli YBCO külçe süperiletkenlerini kullanarak yaptıkları bir çalışmada (Deng vd., 2013) HTS Maglev sistemlerinin performansını artırmak için külçe süperiletkenlerin üzerinde ferromanyetik malzeme kullandılar. Buradaki amaç külçe süperiletkenlerin üzerindeki manyetik akı dağılımını değiştirmek için ferromanyetik malzemelerin yüksek manyetik geçirgenliğinden faydalanmaktır. Çalışmada ferromanyetik plakalar külçe süperiletkenlerin üst yüzeylerine yerleştirildi ve bu plakaların geometrilerinin ve konumlarının Maglev sisteminin performansı üzerindeki etkisi araştırıldı. Ferromanyetik malzemelerin kullanımının kaldırma kuvvetini zayıflattığı fakat kılavuzlama kuvvetinde ciddi bir artış sağladığı gözlemlendi.

Maglev sistemlerinin performansının artırılması için verimli ve ekonomik bir yol arayan araştırmacılar külçe süperiletkenlerin anizotropi özelliklerini iyileştirmek üzerinde yoğunlaştılar (Deng vd., 2013). Araştırmacılar bu çalışmada mevcut HTS Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti performanslarını basit, verimli ve ekonomik bir yolla artırmak için külçe süperiletkenlerin a-b düzlemi ve c-ekseni boyunca kritik akım yoğunluğunun anizotropik özelliklerini araştırdılar. Deneysel sonuçlar, külçe süperiletkenlerin PMG üzerine yerleştirilme modunun, c-ekseninin PMG yüzeyine dik olarak yerleştirildiği geleneksel durumdan c-ekseninin PMG yüzeyine paralel olarak yerleştirildiği yeni duruma değiştirilmesiyle, kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinde sırasıyla PMG'nin maksimum yatay ve düşey manyetik alan pozisyonları için iki kattan daha fazla artış elde edildiğini gösterdi. Bu durum, oluşan kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin fiziksel doğasından ve kritik akım yoğunluğunun a-b düzleminde ve c-ekseni boyunca farklı olduğu gerçeğinden kaynaklanmaktadır.

Uygun bir HTS-PMG dizilimi elde etmek için araştırmacılar dört adet üç çekirdekli YBCO külçe süperiletkeninin iki farklı PMG üzerinde, üç farklı dizilimdeki kaldırma kuvvetini araştırdılar (Deng vd., 2015). Deneysel sonuçlar külçe süperiletkenlerin

diziliminin değiştirilmesiyle kaldırma kuvvetinin artırılabilceğini gösterdi. Uygulanana manyetik alandan faydalanma oranını artırmak için verimli bir yöntem, PMG'nin güçlü manyetik alanına yerleştirilen külçe süperiletkenler arasındaki hava boşluğundan kaçınmaktır. Çalışmada külçe süperiletkenlerin birleşme noktalarındaki boşluklardan kaçınılarak manyetik kaldırma kuvvetinin artırılabilceği rapor edildi.

Manyetik kaldırma kuvvetinin artırılması için ferromanyetik malzemelerin kullanıldığı bir diğer çalışmada (Takao vd., 2015) araştırmacılar yumuşak ferromanyetik çita, külçe HTS ve kalıcı mıknatıstan (PM) oluşan bir temel sistem kurdular ve daha sonra, kaldırma kuvvetini artırmak için iki farklı sistem geliştirdiler. Bu sistemlerden bir tanesi yan yana yerleştirildi ve bu sisteme "2-set modeli" adı verildi. Diğer sistemde ise iki temel sistem basit bir yumuşak ferromanyetik çita ile birleştirildi ve bu sisteme "basit çita modeli" adı verildi. Her iki sistemin de kaldırma kuvvetleri deneysel olarak elde edildi. Deneysel sonuçlara göre "2-set modeli" ve "basit çita modeli"nin kaldırma kuvvetleri sırasıyla temel sistemin % 314 ve % 327'si kadar olduğu görüldü. Araştırmacılar aynı zamanda bu iki sistemin manyetik akı dağılımını nümerik olarak analiz ettiler. Bu analizlerden, yumuşak ferromanyetik plakaların sistemin manyetik çevrimindeki manyetik direnci azaltarak kaldırma kuvvetini artırdığı sonucuna varıldı.

Maglev sistemindeki yanal hareketin kaldırma ve kılavuzlama kuvveti üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı alanlı soğutma mesafeleri (Field Cooling Height, FCH) ve çalışma mesafeleri (Working Height, WH) için kaldırma kuvvetindeki düşüş (relaxation) çalışmasından sonra, HTS külçeler PMG üzerinde yanal doğrultuda hareket ettirilmiştir (Song vd., 2005a). Kaldırma ve kılavuzlama kuvveti verileri sistem tarafından eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Çalışmada kaldırma kuvvetindeki düşüşün hem maksimum yanal yer değiştirmeye hem de çevrim sayısına bağlı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte kılavuzlama kuvveti histerisiz eğrisinin ilk çevrimden sonra değişmediği gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin PMG üzerindeki askıda kalma performansı, iki anahtar parametre olan kaldırma kuvveti kuvvet sabiti ile ilişkilidir. Song ve arkadaşları, alanlı (FC) ve alansız soğutma (ZFC) koşullarında, yatay yer değiştirmeler boyunca kaldırma kuvveti ve kuvvet sabitini ölçtüler (Song vd., 2005b). Uygulanan manyetik alanın simetrik olduğu durumda 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 sabitinin, alansız soğutma koşulundaki kaldırma kuvvetine göre daha sert bir biçimde değiştiği gözlemlendi.

Genellikle literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan PMG'lerin iki tipte olduğu görülmüştür. Bunlardan ilki "Halbach" PMG olarak adlandırılan mıknatıs dizilimidir (Halbach, 1985) ve bu PMG'de beş mıknatıs belirli yönlerde dizilerek manyetik akının PMG'nin üst kısmında yoğunlaştırılması sağlanır. İkinci tip ise geleneksel PMG olarak adlandırılan zıt yönlü iki mıknatıs ve bu mıknatıslar arasında manyetik alanı yoğunlaştırmak için kullanılan çelik veya demirden oluşmuş dizilimdir. Geleneksel PMG'lerin diğer bir çeşidi de zıt kutuplu PM'ler arasında "akı yoğunlaştırıcı" olarak, demir (yada çelik) yerine yukarı veya aşağı yönlü bir PM'nin kullanıldığı PMG türüdür (Liu vd., 2009).

HTS'lerin Maglev performansının artırılması için iki kutuplu Halbach PMG diziliminin tek kutuplu geleneksel PMG ile karşılaştırılmasının hem deneysel hem de sayısal olarak yapıldığı bir çalışmada farklı yaklaşma mesafelerinde Halbach PMG diziliminin geleneksel PMG dizilimine oranla 2,3 kat daha fazla kaldırma kuvveti değerine sahip olduğu gözlenmiştir (Jing vd., 2007). Böylece Halbach dizilimi ile Maglev sistemlerinin kaldırma kuvvetinin artırılacağı ve sistemde kullanılan HTS sayısının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Deng ve arkadaşları geleneksel tek kutuplu PMG ile Halbach PMG'nin verimlilik analizini yaptılar [Deng vd., 2008]. Bu çalışma Halbach PMG'nin geleneksel PMG'ye göre bazı avantajları olduğunu göstermiştir. Maksimum kaldırma kuvveti Halbach PMG için 231,5 N, geleneksel PMG için 133,7 N olarak gözlenmiştir. Bu durum, Halbach PMG nin kaldırma kuvveti değerinin, geleneksel PMG'nin 1,7 katı olduğu anlamına gelmektedir. Aynı şekilde kılavuzlama kuvveti oranı da 2,2 olarak gözlenmiştir. Çalışmadan, Halbach PMG'nin, manyetik alanı PMG'nin üst yüzeyinde yoğunlaştırmada önemli bir etkiye sahip olduğu ve PMG maliyetini azaltarak Maglev sistemlerinin verimliliğini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Diğer bir araştırmadaki deneysel çalışmalar, manyetik akının kapalı bölgesinin kaldırma kuvveti performansını etkileyeceğini ve ekstra kılavuzlama kuvveti sağlayacağını göstermiştir. Bu çalışmada daha büyük kaldırma ve kılavuzlama kuvveti elde etmek için külçe HTS'lerin Halbach PMG diziliminin sırasıyla manyetik alanın düşey (B_z) ve yatay (B_x) piklerinin üzerlerine yerleştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır (Liu vd., 2008b). Manyetik alan kaynağının kaldırma kuvveti performansı üzerindeki etkisinin araştırıldığı benzer bir çalışmada (Liu vd., 2008a) üç farklı tip PMG kullanıldı. Bu PMG'ler arasındaki temel fark manyetik akıyı yoğunlaştırma yöntemidir. Deneysel sonuçlar, manyetik alanın sadece pik değerlerinin, farklı PMG tiplerinin Maglev performansının belirlenmesinde uygun bir

referans olmadığını, B_z ve B_x manyetik alan bileşenlerinin değişiminin de dikkate alınması gereken önemli bir etken olduğunu gösterdi.

2009 yılında yapılan bir çalışmada Deng ve arkadaşları Halbach PMG üzerindeki çift katmanlı $64 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ boyutlu üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin Maglev performansını incelediler (Deng vd., 2009). Araştırmacılar külçe HTS'ye bir üst katman ekleyerek kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılabilirliğini fakat sonuçta oluşan Maglev performansının basit bir toplama ile hesaplanamayacağını buldular. İki bitişik HTS tabakasının etkileşmesi ve perdeleme nedeniyle yalnızca üst tabakanın Maglev performansı uyarılmıştır. HTS'ye bir üst katmanın eklenmesinin ZFC durumunun Maglev performansını FC durumunkinden daha etkili bir şekilde artırdığı gözlenmiştir. Ayrıca HTS'ye bir üst katmanın eklenmesinin kaldırma kuvvetini, kılavuzlama kuvvetinden daha fazla artırdığı da bu çalışmada gözlenmiştir. Bununla birlikte kaldırma kuvvetinde yalnızca % 17'lik ve kılavuzlama kuvvetinde yalnızca % 9'luk bir artış gözleyen araştırmacılar HTS'ye bir üst katmanın eklenmesinin maliyet analizini yaptıklarında bunun ekonomik bir yöntem olmadığı sonucuna varmışlardır.

Del-Valle ve arkadaşları, süperiletken Maglev sistemlerindeki manyetik kılavuzlama yolunun geliştirilmesi için, Halbach tipli mıknatıs dizilimi ile geleneksel mıknatıslardan oluşan dizilimi içeren karşılaştırmalı analitik bir çalışma yaptılar (Del-Valle vd., 2011). Elde edilen sonuçlardan, manyetik kaldırma kuvveti ve kararlılığın hem süperiletkenin genişliğine hem de çalışma mesafesine bağlı olduğu görüldü. Tek kristal süperiletkenin altındaki manyetik kılavuzlama yoluyla aynı genişlikte olması durumunda, aynı toplam hacimdeki üç mıknatıstan oluşan konfigürasyonun mıknatıs genişliğini artırılması ile beş mıknatıs bulunduran Halbach diziliminden oluşan konfigürasyondan, süperiletkenin kararlı manyetik kuvvetini yükseltmede daha etkili görüldü.

Zheng ve arkadaşları Halbach dizilimi (beş mıknatısın farklı yönde dizilimi) ile oluşturulan manyetik kılavuzlama yolu üzerindeki (Halbach PMG) YBCO tek kristal süperiletkeninin anizotropi özelliklerinin, Maglev sisteminin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisini araştırdılar (Zheng vd., 2012). Yapılan çalışmada süperiletken numunede tuzaklanan akı kapasitesi ve kritik akım yoğunluğunun anizotropik özelliklerinin manyetik kaldırma kuvvetine etkisi hem büyütme bölgesi sınırı (Growth Section Boundary-GSB) hem de büyütme bölgesinde (Growth Section-GS) incelendi. Külçe HTS'nin büyütme bölge sınırı (GSB) ile manyetik kılavuzlama yolunun en güçlü manyetik alan pozisyonu arasındaki açı ayarlanarak, manyetik kaldırma kuvveti ve onun manyetik durulma süreçleri farklı alanlı

soğutma şartlarında karşılaştırıldı. Elde edilen deneysel sonuçlarda, kaldırma kuvveti kapasitesi (% 8,1) ve kaldırma kuvvetinin yok olmasının önlenmesinin (% 2,26), manyetik kılavuzlama yolu üzerindeki her külçe HTS'nin içindeki GS ile GSB arasındaki dizilimin optimizasyonu ile iyileştirilebileceği görüldü.

Lu ve Dang 30 mm çaplı, 15 mm yükseklikli silindirik HTS ile geleneksel ve Halbach PMG arasındaki manyetik kuvvetleri matematiksel olarak araştırdılar (Lu ve Dang, 2012). Çalışmada külçe HTS'lerin manyetik kuvvetleri, farklı yanal konumlarda 3D sonlu eleman yöntemi ile araştırılmıştır. Hesaplama sonuçları külçe HTS'nin maksimum kaldırma kuvvetinin uygulanan manyetik alan dağılımına sıkıca bağlı olduğunu göstermiştir. HTS numuneler yanal olarak PMG'lerin merkezine konumlandırılmıştır. Simetrik PMG için numunenin yanal konumunun artmasıyla maksimum kaldırma kuvveti azalmıştır. Halbach PMG için yanal konum sıfırdan 25 mm'ye değiştiğinde kaldırma kuvveti artmıştır. Numunenin konumu Halbach diziliminin merkezini 25 mm'den fazla aştığında maksimum kaldırma kuvveti hızla azalmıştır.

Maglev sistemlerinde tersinir yatay bölgenin geniş olması yatay kararlılığın ve kılavuzlama kuvvetinin büyük olması anlamına gelir. Bu amaçla tek kutuplu simetrik PMG ve Halbach PMG üzerindeki YBCO süperiletkeninin tersinir yatay bölgesi soğutma mesafesi (CH) ve çalışma mesafesine (WH) bağlı olarak araştırıldı (Qin ve Shu, 2013). Çalışmada külçe HTS'nin tersinir yatay bölgesinin yalnızca kılavuzlama kuvveti veya kılavuzlama kuvveti histerisizi ile değil, uygulanan dış manyetik alan, CH, WH ve HTS'nin boyut ve şekline de sıkıca bağlı olduğu bulundu.

Farklı kesit alanlı konfigürasyona sahip Halbach PMG ile HTS arasındaki kaldırma kuvvetinin araştırıldığı nümerik çalışmada (Lu vd., 2014) Halbach PMG üç adet ana (host) mıknatis (HPM) ve iki adet bağımlı (slave) mıknatıstan (SPM) oluşmuştur. Çalışmada 30 mm çaplı ve 15 mm yükseklikli bir silindirik külçe HTS kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, HPM genişliğinin SPM genişliğine oranı 1,6 ve 1,8 arasında ve PMG yüksekliğinin HPM genişliğine oranı 1,2 ile 1,4 arasında sabit tutulduğunda SPM genişliğinin artmasıyla kaldırma kuvvetinin arttığını göstermiştir.

Külçe HTS'lerin mobil uygulamalarını içeren bir çalışmada (Werfel vd., 2012a; Werfel vd., 2012b) çok çekirdekli REBCO (multi-seed REBCO), manyetik kılavuzlama yolu üzerinde kullanıldı. Ticari bir süperiletken üretim firmasının yaptığı bu deneysel çalışmada bu süperiletken numuneler genelde 77 K'de 1 Tesla manyetik alan tuzaklayabilmektedir. Bu çalışma, manyetizasyon, akı sürüklenmesi ve histerisiz gibi

fiziksel özellikler hariç, genelde mobil araçlar ve endüstri için önemli olan; dayanıklılık, güç yoğunluğu ve düşük kütleli olma gibi özellikler üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca bu çalışmada külçe süperiletkenin içinde bulunacağı hareketli vagonun soğutulması için sıvı azot veya vakumlu soğutma sisteminden hangisinin uygun olacağı araştırıldı. Yapılan bu çalışmada çekici kuvvetin ağırlığa oranı 10'dan fazladır ve benzer gruplar 5 ton yüklemeye izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca taşınabilir ve kompakt bir YBCO külçe mıknatis 4 Watt Stirling soğutma sistemi ile 50-80 K arasında soğutularak ölçüm alındı. Dizaynda kullanılan soğutma sisteminin düşük soğutma gücüne sahip olması ve böylece efektif HTS soğuk kütlesi, sistemin kütlelerinin ve ısı kaybının minimum olmasını sağladığı görüldü. Bu soğutma sistemi ile 2,5 litre sıvı azot kullanılarak 5-6 saatte 40 K sıcaklığa inilebilmekte ve 24 saat ölçüm alınabilmektedir. Yapılan bu çalışma, farklı soğutma sistemlerinin tasarımı ile gerçek boyutlu Maglev uygulamaları için az miktarda sıvı azot kullanarak birkaç gün işlem yapılabileceğini göstermektedir.

Süperiletken taşıyıcı uygulamalarında alansız soğutma yöntemi (ZFC) büyük manyetik kaldırma kuvvetine ve düşük kararlılığa neden olurken, alanlı soğutma yöntemi (FC) yüksek kararlılığa ve süperiletken içerisinde tuzaklanan manyetik akıdan dolayı düşük kaldırma kuvvetine neden olur. Bu durum, HTS süperiletkeni ile manyetik ray arasında oluşacak kaldırma kuvveti (yük taşıma kapasitesi) ve kılavuzlama kuvvetinin aynı anda artmasının zorluğuna işaret eder. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için çeşitli araştırma laboratuvarlarında, HTS süperiletkenin alansız soğutmadan sonra tekrar mıknatislanma özelliği kazandırılmasına çalışılmıştır (Deng vd., 2011). Yapılan çalışmada ilk olarak manyetik kılavuzlama yolu (PMG) üzerindeki külçe HTS uzak bir mesafede soğutuldu. Bunu takiben, çalışma yüksekliğinden önce süperiletken, manyetik kılavuzlama yolunun oluşturduğu manyetik alan tarafından tekrar mıknatislandı. Yapılan deneysel çalışmada, kılavuzlama yolu üzerinde belli mesafede süperiletken numunenin tekrar mıknatislanmanın, Maglev araçlarında kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvvetini alansız soğutmaya göre eş zamanlı olarak arttırdığı tespit edildi.

Süperiletken numunelerin mıknatislanması sürecinde oluşan akımlar HTS mıknatisların kaldırma kuvveti performansının geliştirilmesinde etkili olabilir. Bu amaçla Liu ve arkadaşları HTS süperiletken mıknatisların kaldırma kuvveti performansını arttırmak için, farklı alanlarla manyetik tuzaklama çalışmaları yaptılar (Liu vd., 2011). Yapılan çalışmada, manyetik kılavuzlama kuvvetinin geliştirilmesi için önceden mıknatislanmış HTS süperiletkeni kullanıldığında, süperiletken içerisinde oluşan akım konfigürasyonlarının, akı

hareketini bastırmada yararlı olduğu, daha iyi bir kaldırma kuvveti durulma performansına ve daha büyük yanal denge bölgesine neden olduğu görüldü.

Manyetik kılavuzlama yolunun optimizasyonu, kaldırma kuvvetini ve buna bağlı olarak kuvvet sabitini arttırmada etkili bir yoldur. Liu ve arkadaşları, düşey manyetik alan bileşeni B_z 'yi arttırmak için, aynı hacme sahip mıknatıslardan oluşan üç farklı akı yoğunlaştırma formlu manyetik kılavuzlama yolu hazırladılar (Liu vd., 2009). Deneysel sonuçlardan akı yoğunlaştırma için kullanılan kalıcı mıknatıslı manyetik kılavuzlama yolunun HTS süperiletkeni ile etkileştiğinde daha büyük kaldırma kuvveti, kaldırma kuvveti sabiti ve akı tuzaklanması sağladığı görüldü.

Halka şeklinde mıknatıs ve Dy-Ba-Cu-O süperiletkeninin kullanıldığı bir çalışmada mıknatıs kalınlığı değiştirilerek manyetik kaldırma kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerleri araştırıldı (Kurabayashi vd., 2010). Mıknatıs kalınlığının artmasıyla kaldırma kuvveti değerinin arttığı ve doyuma ulaştığı gözlemlendi. Bu çalışmada manyetik kuvvet sabiti değerinin yalnızca 1,6 N/mm olduğu gözlemlendi ve bu değer pratik uygulamalar için yetersiz olduğu açıklandı. Manyetik kuvvet sabiti değerinin artırılması için radyal doğrultudaki alan değişiminin önemli olduğu ve böylece büyük manyetik sertlik değerlerinin istendiği durumlarda NS tipi tabakalı yapının kullanılması gerektiği açıklandı.

Lu ve arkadaşları beş adet yüksek sıcaklık süperiletkeni dizilimi ile kılavuzlama yolu arasındaki düşey ve yatay manyetik kuvvet sabitini araştırmak için bir deney sistemi kurdular (Lu vd., 2011b). Çalışmada kuvvet sabiti iki farklı yöntemle belirlendi. Birinci yöntem eklemeli yöntemdir ki bu yöntemde dizilimdeki her bir süperiletkenin kuvvet sabiti değeri ölçülüp bu değerler toplandı. Diğer yöntem olan direk yöntemde süperiletken diziliminin kuvvet sabiti doğrudan ölçüldü. Süperiletken dizilimin kuvvet sabitinin her bir süperiletkenin kuvvet sabiti ile ilişkili olduğu fakat komşu HTS'ler arasındaki etkileşimler nedeni ile eklemeli yöntemin, dizilimin kuvvet sabitini iyi bir şekilde belirlemediği bulundu. HTS diziliminin kuvvet sabitinin her bir HTS'nin kuvvet sabiti toplamından daha küçük olduğu gözlemlendi.

Maglev sistemlerinde kullanılacak olan HTS süperiletken mıknatısların manyetik alan tuzaklamalarında en büyük problemlerden bir tanesi numune içerisinde hızlı ısı üretimidir. Patel ve Glowacki bu sorunu gidermek için numune içerisinde ab-düzleminde (k_{ab}) ve c ekseninde (k_c) termal iletkenliğin, numune içinde tuzaklanan alan üzerine etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak çalıştılar (Patel ve Glowacki 2012). E-J güç kanunu kullanılarak yapılan modelleme ve yürütülen deneysel çalışmada, külçe numunenin soğuk

bir taban kullanılmasıyla k_c 'nin arttığı ve böylece numune içerisinde hem tuzaklanan alan hem de akının iyileştiği görüldü. Ayrıca yapılan çalışmada, bölgesel olarak numunenin k_{ab} ve k_c termal iletkenlik değerlerini artırmak için sistem içerisine yüksek termal iletkenliği olan bakır yapılar yerleştirildi. Numune boyutunda herhangi bir değişiklik yapmadan sisteme katılan bu bakır yapıların, numune içerisine tuzaklanan manyetik alan ve akı değerini % 30 artırdığı görüldü. Yapılan bu çalışmayla, HTS numunede tuzaklanan manyetik alan ve akı değerini artırmada, uygulamaya bağlı olarak farklı iletken yapıların manyetik tuzaklama sistemlerinde denenmesinin faydalı olacağı anlaşıldı.

HTS süperiletkenlerin Maglev uygulamalarında tuzaklanan alan değerinin büyük olması gerekmektedir. Kare biçimli 12 mm kenar uzunluğuna sahip 55 μ m kalınlığında (RE)BCO şerit yığınları üzerine yapılan ani (pulse) manyetik tuzaklanma deneylerinde, 60 K civarında tuzaklanan manyetik alan değerinin, 14 mm çapında silindirik külçe süperiletkeninkinden daha yüksek olduğu görüldü. Yapılan çalışmada, (RE)BCO şerit yığınlarının düşük sıcaklıkta yüksek manyetik alan tuzaklama performansının ana nedeninin, yığın içerisindeki homojen kritik akım yoğunluğu (J_c) sonucu oluşan termal kararlılığın sağlanmasından geldiği düşünülmüştür. Yürütülen çalışmada (RE)BCO şeritlerin sahip olduğu farklı J_c , termal ve mekanik özelliklerin, onların yüksek manyetik alan tuzaklaması ile ilgili farklı alanlarda kullanım potansiyelini artırabileceği görülmüştür. Aynı araştırmacıların (RE)BCO şeritler üzerine yaptığı ilave çalışmada, 120 tabakalı iki yığın grubu kullanıldı. Yapılan bu çalışmada, 4,2 K ölçüm sıcaklığında alanlı soğutma ile 7,34 T tuzaklanan manyetik alan değerine ulaşıldı (Patel vd., 2013a; Patel vd., 2013b).

Mıknatıslanmış (RE)BCO (RE=rareearth) ve içi oyuk MgB_2 silindir arasındaki kaldırma kuvvetinin araştırıldığı bir çalışmada (Patel vd., 2013c) 1 Tesla'lık alan tuzaklanmış GdBCO ile MgB_2 süperiletkeni kullanıldı. Kaldırma kuvveti-konum grafiğindeki ± 1 mm lik 10 çevrimden yararlanılarak 3 mm mesafede 20 K sıcaklıkta -56,8 N/mm'lik önemli bir manyetik kuvvet sabiti değeri gözlemlendi.

Yang ve arkadaşları, yüksek sıcaklık süperiletkenlerin (HTS) Maglev uygulamalarını araştırmak için, iki doğrusal kılavuzlama yolu içeren Maglev test aracı yaptılar (Yang vd., 2008). Titreşim test tekniğini kullanarak, farklı alanlı soğutma (FC) ve yükleme durumlarında, test aracının dinamik kuvvet özelliklerini ölçtüler. Rezonans frekansları ve manyetik kuvvet sabitinin, alanlı soğutma yükseklikleri (FCH) ve yük ağırlıklarına hem yatay hem de dikey titreşim doğrultularında yüksek bağımlılık gösterdiği, dinamik manyetik kuvvet sabitinin düşük FCH'lerde ve düşük yüklerde arttığı bulundu. Bu veriler

doğrultusunda, HTS Maglev sistemlerinin dinamik kararlılığını arttırmak için, düşük FCH ve ön yükleme yöntemlerinin etkili olduğu görüldü.

Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada küçük bir HTS Maglev itici hareket sistem modeli dizayn ve test edildi (Yang vd.,2010). Oluşturulan elektrik devresindeki kapasitif yüklemenin, güç kaynağı voltajının ve başlangıç hareket hızının model üzerindeki toplam mekanik işe etkisi, tek fazlı güç kaynağı ve lineer motorlar kullanılarak araştırıldı. Maksimum sürücü kuvvet ve Maglev modelinin yaptığı maksimum iş, elektrik devresindeki kondansatör sığası $C=20\mu F$ olduğunda elde edildi ve başlangıç hızı $v_0=9.7\text{cm/s}$ olduğunda voltajın artırılmasıyla Maglev modeli üzerine yapılan işin arttığı gözlemlendi. Bu sonuçların ileride tasarlanacak gerçek boyutlu Maglev itici sistemlerinin optimizasyonunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.

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'dan oluşan 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 1,5 m uzunluğunda, toplamda 24 yolcu taşıyabilen dört modülün üzerinde hareket ettiği 45 m yarıçaplı % 15 eğimli üç farklı manyetik ray geometrisinin, istenilen manyetik kuvvet ve modülün havada kalma mesafesi değerlerine ulaşabilmesi 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 manyetik kaldırma kuvvetine ulaşıldı (Sotelo vd., 2011b).

Maglev ulaşım sistemlerinde manyetik kaldırma kuvveti kadar önemli olan bir diğer kuvvet ise manyetik rayların üzerinde aracın kararlı hareketini sağlayan, yanal (lateral) manyetik kuvvettir. Yanal kuvvetin Maglev aracının kararlılığına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Dias vd., 2011), farklı yüksekliklerde manyetik alanlı soğutma (FC) yapıldı ve yanal manyetik kuvvet değerleri altı eksenli bir kuvvet ölçüm sistemi 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.

Gerçek ölçekli Maglev sistemleri için teorik ve deneysel manyetik kaldırma kuvveti üzerine yapılan bir çalışmada (Sotelo vd., 2011a) üç farklı set manyetik kılavuzlama yolu ve iki süperiletken kristalin kullanıldığı bir simülasyon yapıldı. Yapılan bu simülasyon sonuçları gerçek manyetik kaldırma sistemi prototipi için yapılan lineer süperiletken manyetik yatak verileri ile karşılaştırıldı. Deneysel ve teorik 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 demir tabakaların, bazı durumlar için ilave modellemelere ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

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.

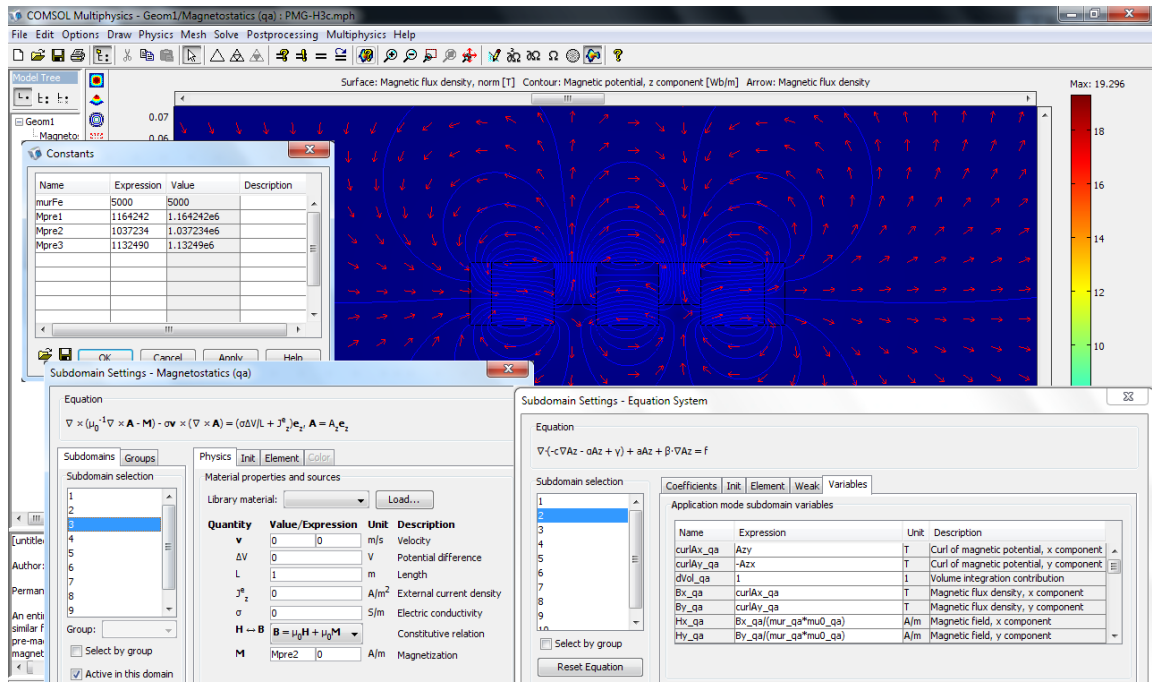
Jiang ve arkadaşları dengeli ve dengesiz HTS Maglev sisteminin dinamik tepkisinin karakteristikleri üzerine bir çalışma yaptı (Jiang vd., 2013). Yapılan çalışmada ilk kez sadeleştirilmiş bir Maglev modeli üretildi ve ivme, yer değiştirme ve rezonans frekansı gibi veriler, titreşimli analizör ve lazer yer değiştirme belirleyici aletleri kullanılarak elde edildi. Dengeli şartlarla karşılaştırıldığında, dengelenmemiş ağırlık durumunun HTS Maglev sisteminin dinamik tepkisini bozduğu görüldü. Bu nedenle HTS Maglev sisteminin dinamik tepkisinin iyileştirilmesi için ön yükleme gibi bir işlemin yapılması gerektiği tespit edildi.

Motta ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (Motta vd., 2013) süperiletken Maglev aracı geliştirildi. Bu araç üzerinde yapılan çalışmalarda aracın ivme, kaldırma kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti (stiffness) özellikleri araştırıldı. Alanlı soğutma mesafesinin (FCH) azalması ile manyetik kuvvet sabitinin arttığı gözlemlendi. Bu durumun akı çivilemesinin artmasından kaynaklandığı açıklandı. Bu çalışmada manyetik kılavuzlama yolu olarak kullanılan mıknatısların diziliminin değiştirilmesi ile manyetik kuvvet sabiti değerinin değiştiği de gözlemlendi.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. PMG Manyetik Alan Simülasyonları

Maglev sistemlerinin yük taşıma kapasitesinin ve yanal kararlılığının geliştirerek, manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla bu tez çalışmasında kullanılan optimum HTS-PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesinde yararlanılan sayısal modeller, Comsol Multiphysics 4.2a paket programının AC/DC modülü ile sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, deneysel çalışmalardan önce, farklı boyut ve manyetik kutup yönelimlerine sahip mıknatıslarla oluşturulan PMG dizilimlerinin konuma bağlı manyetik alan profilleri sayısal yöntemlerle (manyetostatik olarak) hesaplanmıştır.



Şekil 2.1. Sayısal hesaplamaların yapıldığı Comsol Multiphysics program arayüzü

Şekil 2.1’de, Maglev sistemlerinde manyetik alan kaynağı olarak kullanılan PMG yolu manyetik akı dağılımlarının simülasyonlarında faydalanılan ve hesaplanmalarda FEM yöntemini kullanan Comsol Multiphysics 4.2a programının arayüzü görülmektedir. Öncelikle modellenecek olan PMG diziliminin geometrisi, *draw mode* kullanılarak uygun

boyutlarda çizildi. Daha sonra *subdomain* bölümü kullanılarak boşluk ve PMG ortamının manyetik alan formülleri sırasıyla $B = \mu_0 \mu_r H$ ve $B = \mu_0 (H + M)$ olarak girildi. PMG diziliminin kenarlarında, manyetik alan biçimlendirmek amacıyla kullanılan St37 çeliğin görelî manyetik geçirgenliği $\mu_r = 5000 \mu_0$ olarak alındı. PMG dizilimlerini oluştururken kullanılan $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlu mıknatısların manyetizasyon değerleri sırasıyla 1132490 A/m, 1037234 A/m ve 1164242 A/m olarak hesaplandı. Manyetostatik çözüm yaparak PMG yolunun manyetik alan dağılımlarını hesaplamak için Comsol Multiphysics 4.2a programı bağıli değişken olarak manyetik vektör potansiyeli kullanarak aşağıdaki denklem sistemini şu çözer:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = (\sigma \Delta V / L + J_z^e) e_z, \mathbf{A} = A_z e_z \quad (21)$$

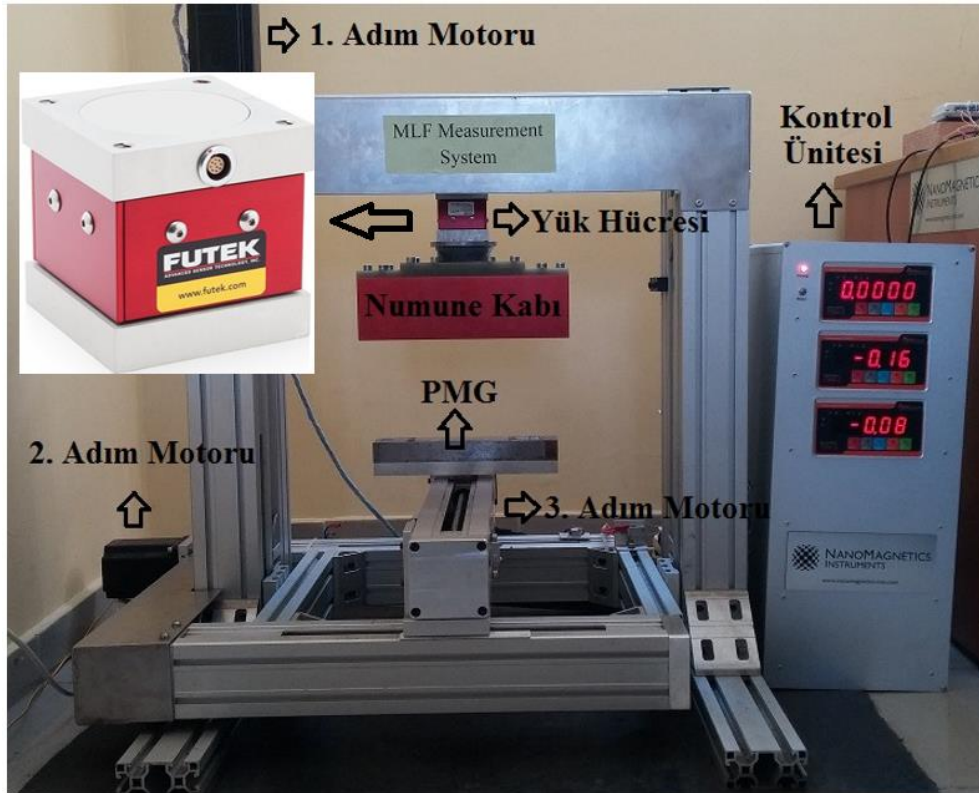
Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, \mathbf{A} manyetik vektör potansiyeli, \mathbf{M} mıknatıslanmayı, σ elektriksel iletkenliği, v hızı, ΔV potansiyel farkını, L uzunluğu, J_z^e dış akım yoğunluğunu ve e_z ise z yönündeki birim vektörü temsil etmektedir. Daha sonra ilgili parametreler ve denklemler programa girildikten sonra çalışma bölgesi yaklaşık olarak 300000 elementten oluşacak şekilde üçgensel ağlar (mesh) oluşturuldu ve istenen manyetik alan profili çıkarılarak yatay konuma bağıli manyetik akı yoğunlukları elde edildi.

2.2. Yapılan Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi

Manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin gerçekleştirildiği manyetik kuvvet ölçüm sistemi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Manyetik kuvvet ölçüm sisteminde hareket, 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 flaşlı 2 adet 8,5 Nm (x ve y-eksenlerinde) ve 1 adet 12,5 Nm (z-ekseninde) torca sahip step motorlar ile sağlanmaktadır.

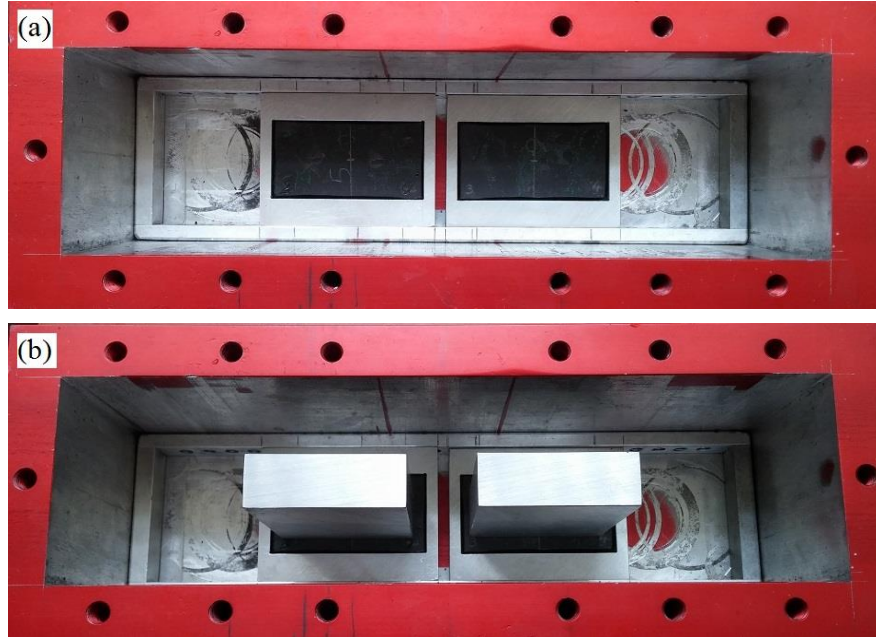
Kuvvet verileri FUTEK MTA400 yük hücresi ile alınmaktadır (Şekil 2.3). Yük hücresi x, y ve z eksenindeki kuvvetleri sırasıyla 1100 N, 1100 N ve 2200 N'a kadar ve 0,5 N, 0,5 N ve 1 N hassasiyetle ölçebilmektedir. Deney sistemi, sisteme entegre edilen uygun bir masaüstü bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Ölçüm sistemi ile bilgisayar NI-PCI-6010 Low-Cost 16-bit, 200 kS/s DAQ Card ile iki yönlü olarak bağlantılıdır (Abdioğlu vd., 2015). Sistemin kontrolü, LabVIEW grafik programlama dilinde oluşturulan yazılımla sistemi üç eksende hareket edebilecek şekilde sağlanabilmektedir. Ayrıca ölçüm sistemi üç eksende manyetik kuvvet verilerini konuma bağlı olarak eş zamanlı okuyup belirli hassasiyet ile bilgisayara aktarabilmektedir.



Şekil 2.2. Üç eksenli FUTEK yük hücresine sahip Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi

2.2.2. Süperiletken Numune Kabı

Manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin artırılması amacı ile bu çalışmada, manyetik kılavuzlama yolunun üstünde numune konumları ayarlanabilen ve birden fazla HTS ve mıknatısın birlikte kullanılabileceği hibrit süperiletken hazne sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Ölçümlerde kullanılan süperiletken numune kabı ve (b) numuneyi sabitleyerek kuvveti yük hücresine aktaran destekler

Şekil 2.3’de hibrit üç çekirdekli HTS-PMG dizilimlerine de olanak sağlayan süperiletken numune haznesi görülmektedir. Süperiletken numune haznesi içindeki dikdörtgen numune tutucular ve dikdörtgen çerçeve manyetik olmayan alüminyum malzemeden imal edilmiştir. Bu numune kabında numuneler arası mesafe istenildiği gibi ayarlanabilmekte ve buna bağlı olarak değişik konfigürasyonlarda PMG’ler kullanılabilir. Kullanılan dikdörtgen numune tutucular süperiletkenleri saracak boyuttadır ve çerçevedeki vidalar ile tutucular istenilen konuma sabitlenebilir. Numune haznesindeki süperiletkenleri soğutmak için kaynama sıcaklığı 77 K olan sıvı azot kullanılır. Ölçüm sırasında PMG ile YBCO arasında oluşan manyetik kuvvet, süperiletkenlerin üzerine yerleştirilmiş destekler (Şekil 2.3 (b)) aracılığı ile numune kabına dışardan sabitlenmiş olan kuvvet sensörlerine iletilmektedir.

Literatürde hibrit sistemlerle ilgili detaylı çalışmalara rastlanmaması ve mevcut çalışmaların da sınırlı sayıda HTS-PMG konfigürasyonunu içermesi, hibrit Maglev sistemlerinin manyetik kuvvetle ilgili çalışmalarının yetersizliğini göstermektedir. Numune kabında süperiletken YBCO ile birlikte kullanılan ve ilave mıknatısların hem düşey hem de yanal konumlarının ayarlanabildiği bir düzenek yardımı ile hibrit yapıları konfigürasyonlar oluşturulabilmektedir. Bu tasarım ile ilave mıknatıslar istenen düşey ve yatay konumda

sabitlenebilmekte ve bu sayede daha büyük manyetik kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvveti için optimum PMG dizilimi araştırılabilmektedir.

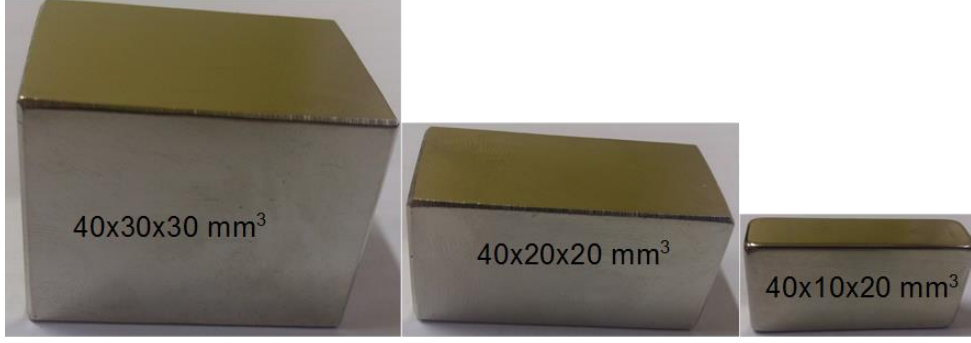
2.2.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni ve NdFeB Mıknatıslar

Yürütülen tez çalışmasında kullanılan üstten tohumlama yöntemi ile üretilmiş dikdörtgen prizma şeklindeki üç çekirdekli YBCO külçe süperiletkenlerin boyutları $65 \times 34 \times 14 \text{ mm}^3$ olup ATZ firmasından satın alındı (Şekil 2.4). Üstten tohumlama (TSMG) yöntemi ile üretilen yüksek manyetik akı tuzaklama kapasitesine sahip üç çekirdekli YBCO süperiletkenler Maglev uygulamaları için kullanıma elverişlidirler.



Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan üç tohumlu YBCO süperiletkenleri

Deneysel ölçümler sırasında manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar (Şekil 2.5) ise Magnet Exper LTD şirketine özel olarak imal ettirildi. Mıknatısların boyutları $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ve yüzeylerindeki manyetik alan şiddetleri sırasıyla 0,53 T, 0,49 T ve 0,55 T'dir.



Şekil 2.5. Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar

2.2.4. Manyetik Kılavuzlama Yolu (PMG) Tasarımı ve Özellikleri

Şekil 2.6'da farklı mıknatıslanma yönlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG dizilimi görülmektedir. İstenilen PMG dizilimini oluşturmak için, uygun boyut ve kutup yönelimindeki mıknatıslar boş PMG kabına sırasıyla yerleştirilir ve mıknatısları uygun konumlarda sabitleyip hareket etmesini engellemek adına PMG kabı üzerindeki vidalar yardımıyla hem x-ekseninde hem de y-ekseninde sıkıştırılır. PMG diziliminde her iki uçtaki mıknatısların kenarına 10 mm kalınlıkta *akı biçimlendirici* olarak görev yapan St37 çelik, manyetik akının homojen olarak dağılımının sağlanabilmesi ve uç etkilerini azaltmak amacıyla yerleştirilir.



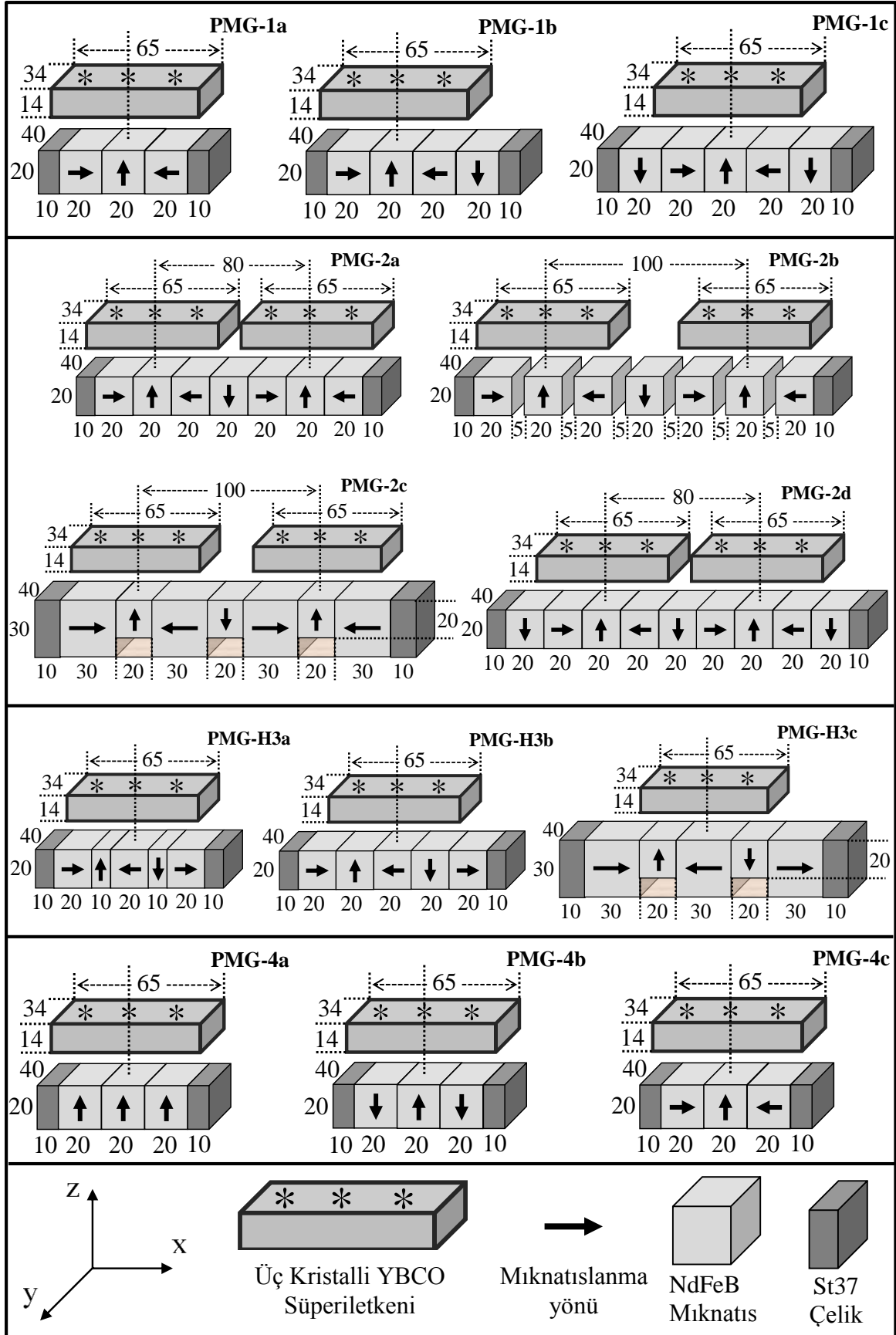
Şekil 2.6. Farklı manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG dizilimi

Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerleri gibi manyetik kuvvet performansı üzerinde, manyetik alan kaynağı olarak kullanılan manyetik kılavuzlama yolu (PMG) önemli rol oynar. Bilindiği gibi manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri süperiletken ile mıknatıs yolu arasında elektromanyetik etkileşimden ileri gelmektedir. Dolayısıyla bu doktora tezi kapsamında süperiletken Maglev araçlarının düşey manyetik kaldırma kuvveti, yanal manyetik kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli konfigürasyon ve boyutlarda manyetik kılavuzlama yolu tasarlanıp üretilmiştir. Bu farklı manyetik kılavuzlama yollarının, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni manyetik kaldırma ve kararlılık performansına etkisini araştırmak hedeflenmiştir. Şekil 2.7’de Maglev manyetik kuvvet ölçüm sisteminde kullanılan farklı HTS-PMG konfigürasyonlarının şematik çizimleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi HTS-PMG konfigürasyonları farklı sayılarda YBCO ile farklı sayı, boyut ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslar ve PMG yolunun her iki ucunda yer alan St37 çelikten oluşmaktadır.

Şekil 2.7’de görülen PMG-1a diziliminin sağ ve sol uçlarına kademeli olarak eklenen ve manyetizasyon yönü aşağı olan ilave mıknatısların manyetik akı dağılımına etkisi gözlenmek istenmiştir. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimleri birer adet YBCO numune ve sırasıyla üç, dört ve beş adet mıknatıstan oluşmaktadır.

Üç çekirdekli YBCO numuneleri ile farklı boyuttaki PMG’ler arasındaki etkileşimi test etmek amacıyla, PMG-2a dizilimi ile aynı kutup yönelimi ve boyutlardaki mıknatıslarla oluşturulan PMG-2b diziliminde, mıknatıslar arasında 5 mm genişlikli boşluklar bırakılarak numuneler arasındaki mesafe 100 mm’ye çıkarılmıştır. PMG-HTS etkileşiminin yanı sıra PMG-2c dizilimi ile değişen mıknatıs boyutunun ve numuneler arası mesafenin artışı ile manyetik kuvvet özelliklerinin değişimi incelenmek istenmiştir. Ayrıca PMG-2d diziliminde manyetik kılavuzlama yolunun her iki tarafında aşağı manyetik yönelimli birer ilave mıknatıs kullanılmıştır. Bu ilave mıknatıslar ile sistemin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin artırılması amaçlanmıştır.

PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c literatürde sıklıkla kullanılan ve PMG yolu üzerinde iyi bir manyetik akı dağılımı oluşturduğu düşünülen Halbach dizilimine (Halbach, 1985) sahiptir. Bu üç dizilim kademeli olarak değişen boyutlardaki mıknatıslar kullanılarak oluşturulmuştur. Buradaki amaç, aynı kutup yönelimine sahip dizilimlerde, değişen mıknatıs boyutlarının dış manyetik alan profiline ve numunede tuzaklanan akıya dolayısıyla da manyetik kuvvet performansına etkisini incelemektir.



Şekil 2.7. Çalışmalarda kullanılan farklı HTS-PMG dizilimlerinin şematik gösterimleri (tüm boyutlar mm birimindedir)

PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri ise üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin tek çekirdekli türevlerine kıyasla daha üstün özellikte olmasının önemli nedenlerinden olan tane içi ve tanelerarası süperakımların, numunenin manyetik kuvvet özelliklerine olan etkisini araştırma için düzenlenmiştir. Burada her bir çekirdek altına merkezlenen mıknatısların kutup yönelimlerinin değişiminin, tane içi süperakımların yönelimlerine ve tanelerarası süperakımlara etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu yolla, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni içerisinde dolaşan bu iki tip süperakım özelliklerinin açıklanması amaçlanmıştır.

2.2.5. Farklı Manyetik Alan Şartları Altında Manyetik Kuvvet Ölçüm Yöntemleri

Yürütülen bu tez çalışması kapsamında yapılan manyetik kuvvet ölçümleri düşey manyetik kuvvet (kaldırma kuvveti), yanal manyetik kuvvet (kılavuzlama kuvveti) ve sistemin düşey ve yatay yönlerdeki kararlılığının belirlenmesi amacı ile manyetik kuvvet sabiti (stiffness) olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan hem düşey hem de yatay tüm ölçümlerde üç çekirdekli YBCO numunelerin soğutulması sırasında kaynama sıcaklığı 77 K olan sıvı azot kullanılmıştır. Ölçüme başlamadan önce süperiletken numune(ler), kullanılan PMG dizilimine göre, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı kutup yönelimli mıknatıs merkezi hizasına ya da PMG yolu ortasına konumlandırılmıştır. Daha sonra istenilen soğutma yüksekliğine alınan numuneler 15 dakika süre ile sıvı azot dökülerek soğutulmuştur. Soğutmanın başlarında dökülen sıvı azot çok çabuk buharlaşırken, bir süre sonra numune kabındaki sıvı azot miktarının çok az azaldığı görülmüştür. Böylece numunelerin ve numune kabının sıvı azot ile termal dengeye geldiği ve numunelerin tamamıyla soğuyup süperiletken faza geçtiği anlaşılmaktadır.

Düşey manyetik kuvvet ölçümleri alansız soğutma (Zero Field Cooling, ZFC) ve alanlı soğutma (Field Cooling, FC) durumlarında gerçekleştirilmiştir. ZFC ölçümleri YBCO numuneler PMG'den, numunelerin içerisine herhangi bir manyetik akı girişine imkân verilmeyecek kadar yeterli uzaklıkta (75 mm) soğutulmuştur. Numunelerin tamamen soğutulup süperiletken faza geçtiklerinden emin olunduktan sonra, mıknatıs üst yüzeyi ve YBCO alt yüzeyi arasındaki mesafe önce minimum yaklaşma mesafesine (5 mm) getirilip daha sonra ilk konumu olan 75 mm'ye kadar uzaklaştırıldı. Bilgisayar kontrollü

gerçekleştirilen bu işlem süresince konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde düşey kuvvet (F_z) verileri kaydedilmiştir.

Diğer bir düşey manyetik kuvvet ölçümünde ise numuneler PMG'nin manyetik alanı altında 20 ve 5 mm soğutma yükseklikleri (Cooling Height, CH) için soğutulmuştur. Soğutma işleminden sonra numuneler PMG ile arasındaki mesafe 75 mm olacak şekilde hareket ettirilmiştir. Sonrasında ZFC ölçümünde olduğu gibi numuneler PMG'ye minimum yaklaşma mesafesi 5 mm'ye kadar yaklaştırılıp tekrar aynı mesafeye uzaklaştırılırken konuma bağlı olarak düşey manyetik kaldırma kuvveti verileri (F_z) kaydedilmiştir.

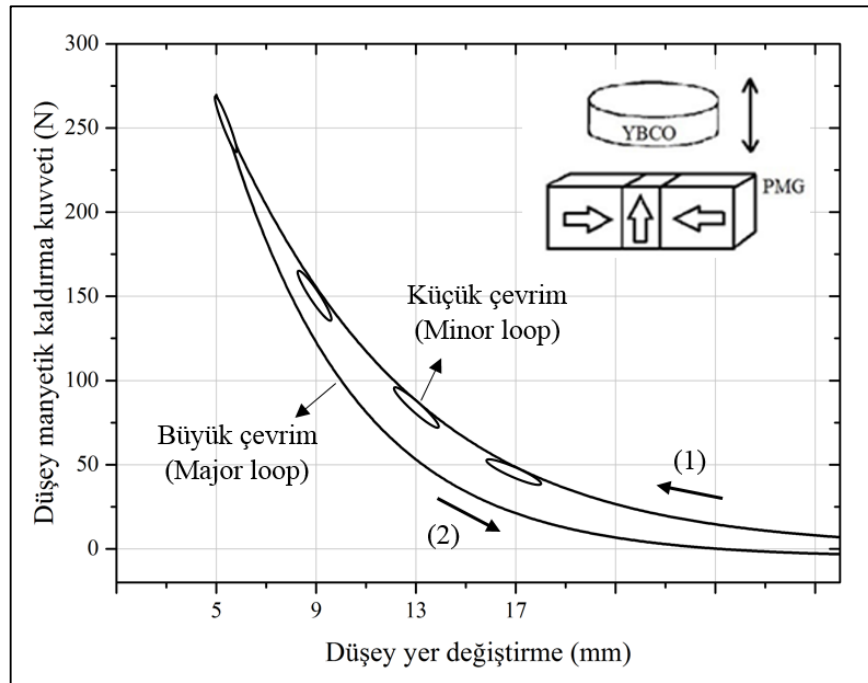
Numunelerin akı tuzaklama kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan FC ölçümlerinde ise numuneler PMG'nin manyetik alanı altında (mıknatıs yüzeyinden 5 mm mesafede) soğutulur. Numune süperiletken faza geçtikten sonra soğutma yüksekliğinden (5 mm) harekete başlayıp 75 mm mesafeye, daha sonra tekrar soğutma mesafesi olan 5 mm'ye hareket ederken konuma bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde düşey manyetik kaldırma kuvveti (F_z) verileri alınmıştır.

Yatay manyetik kuvvet ölçümleri, oluşturulan HTS/PMG konfigürasyonlarının yanal harekete bağlı olarak yapılmıştır. Yanal manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümlerinde numunelerin PMG üzerindeki yatay konumu ayarlandıktan sonra belirli soğutma mesafelerinde (5 mm, 10 mm ve 15 mm) soğutulması sağlanmıştır. Soğutma işleminden sonra düşey çalışma yüksekliği (Working Height, WH) 10 mm olacak şekilde hareket ettirilmiştir. Daha sonra başlangıç konumu $x=0$ mm numuneler yatay olarak x doğrultusunda ± 8 mm hareket ettirilerek ve bu sırada x konumuna bağlı olarak eş zamanlı bir şekilde yatay kuvvet (F_x) verileri kaydedilmiştir.

2.2.6. Farklı Manyetik Alan Şartları Altında Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Yöntemleri

Maglev sisteminin düşey yönde kararlılığının bir ölçüsü olan düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümleri, düşey manyetik kuvvet ölçümleri ile aynı soğutma şartlarında ve aynı soğutma yükseklikleri için gerçekleştirilmiştir. Düşey manyetik kaldırma kuvveti ölçüm yöntemiyle benzer aşamalar izlenmiştir. YBCO numune merkezleri mıknatıs yolu üzerinde önceden belirlenen yatay konumuna hizalandıktan sonra alansız soğutma rejiminde mıknatıslardan yeterince uzak bir mesafede (75 mm) soğutulmuştur. Soğutma tamamlandıktan sonra harekete başlayan numuneler ile PMG arasındaki düşey mesafe

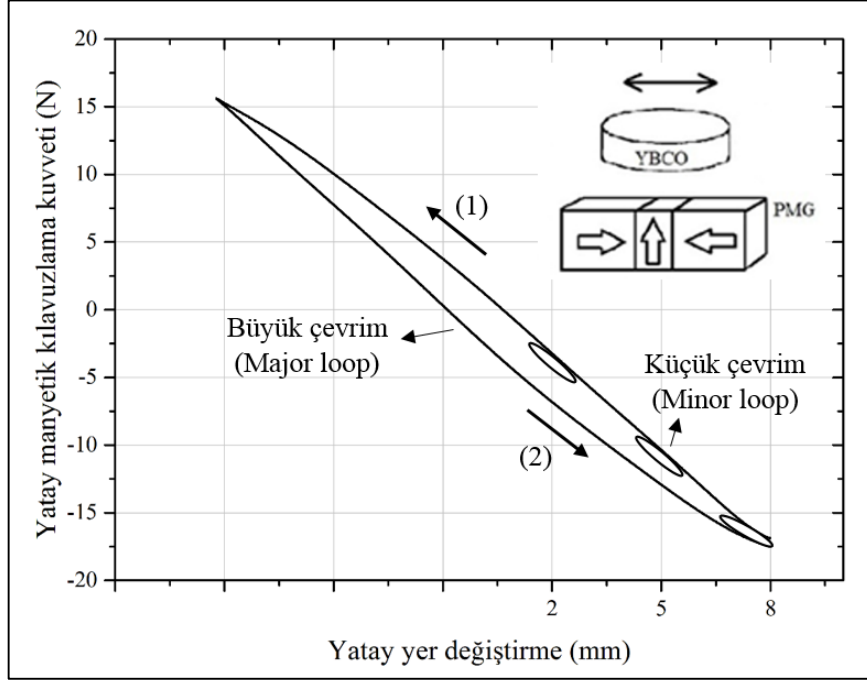
sırasıyla 17 mm, 13 mm, 9 mm ve 5 mm iken 2 mm' lik küçük çevrimler (minor loop) yapılmıştır (Şekil 2.8). Bu küçük çevrimlerden geçirilen doğruların eğimleri $k_z = -\partial F_z / \partial z$ ifadesine göre düşey yöndeki manyetik kuvvet sabitini vereceğinden ilgili konumlardaki doğruların eğimleri hesaplanarak k_z düşey stiffness değerlerine ulaşılmıştır (Hull ve Cansız, 1999). Daha sonra farklı soğutma yükseklikleri (CH=5 ve 20 mm) için benzer düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümleri yapılmış ve aynı işlem adımları takip edilerek düşey manyetik kuvvet sabiti değeri belirlenmiştir. Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçüm verileri, süperiletken numune ile PMG yolu birbirlerine yaklaşırken alınmıştır.



Şekil 2.8. Düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ölçümlerinin şematik gösterimi

Maglev sisteminin yanal kararlılığını belirleyen yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümleri, süperiletken haznesi ile PMG yolları arasındaki farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm) gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler için yatay manyetik kuvvet ölçümlerinde olduğu gibi çalışma yüksekliği WH=10 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler belirlenen soğutma yüksekliklerinde sıvı azot yardımıyla soğutulduktan sonra düşey çalışma yüksekliğine (WH=10 mm) alınmışlardır. Daha sonra x yönünde hareket edilerek sırasıyla 2 mm, 5 mm ve 8 mm mesafelerinde 1 mm'lik küçük çevrimler (minor loop) yapılmıştır (Şekil 2.9). Bu küçük çevrimlerden geçirilen doğruların

eğimleri $k_x = -\partial F_x / \partial x$ ifadesine göre yatay doğrultudaki manyetik kuvvet sabitini vereceğinden ilgili konumlardaki doğruların eğimleri hesaplanarak yatay stiffness değerlerine ulaşılmıştır (Hull ve Cansız, 1999).



Şekil 2.9. Yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümlerinin şematik gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

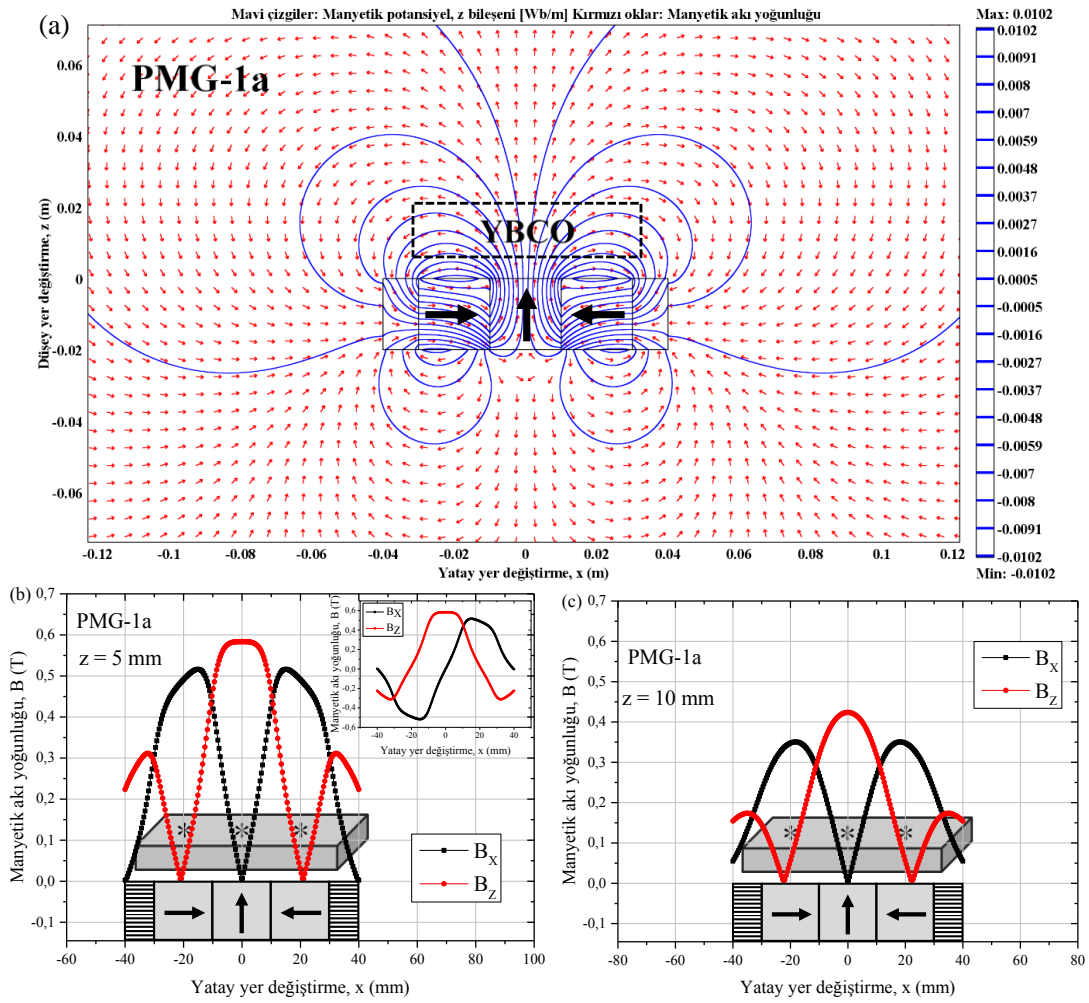
3.1. Giriş

Yürütülen bu tez çalışmasındaki ölçümlerle farklı manyetik kılavuzlama yollarının, üç çekirdekli YBCO süperiletken numunenin düşey manyetik kaldırma kuvveti (F_z), yatay manyetik kılavuzlama kuvveti (F_x) ve hem düşey (k_z) hem de yatay (k_x) manyetik kuvvet sabiti performansına etkisini araştırmak hedeflenmiştir. Bu amaçla çeşitli manyetik kılavuzlama yolu (PMG) dizilimleri önce sayısal olarak araştırılmış ve Maglev araçları için istenilen manyetik kuvvet performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra yapılan deneysel çalışmalarda üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altında hem yüksek kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvveti parametreleri belirlenmeye çalışılmış ve Maglev araçlarının teknolojik uygulanabilirliği için bu parametreler değerlendirilmiştir. HTS olarak kullanılan üstten tohumlama yöntemi ile üretilmiş üç çekirdekli YBCO süperiletkenleri Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ) firmasından ve manyetik alan kaynağı olarak kullanılan NdFeB mıknatıslar Magnet Exper LTD firmasından satın alındı. Bu tez çalışmadaki tüm manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti ölçüm verileri, manyetik kuvvet ölçüm sistemi (Şekil 2.2) kullanılarak alınmıştır.

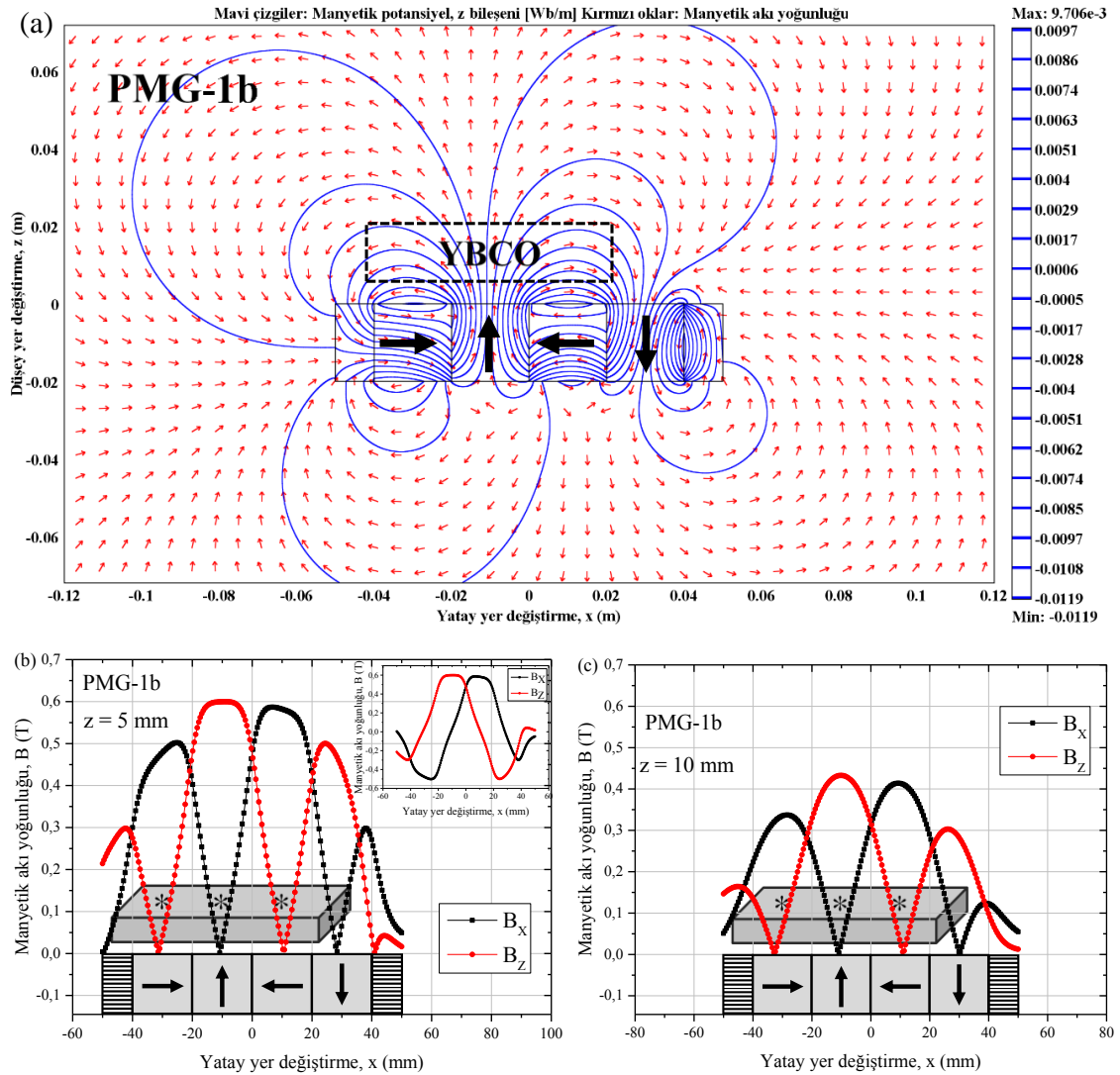
Yapılan deneysel çalışmalar ve modellemeler sonucu elde edilen bulgular, sonuçların değerlendirilmesi ve tartışılması kapsamında şu adımlar izlenmiştir: Öncelikle sayısal modellemeler sonucu elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Daha sonra deneysel çalışmalar kapsamında düşey manyetik kaldırma kuvveti (F_z), düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z), yatay manyetik kılavuzlama kuvveti (F_x) ve yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) verileri ayrı ayrı verilerek belirlenen PMG grupları arasında tüm bu veriler kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Bir sonraki aşamada süperiletken numune kabına yerleştirilen iki ilave mıknatıs yardımı ile oluşturulan hibrit HTS-PMG dizilimi için bütünlük mıkmatısının optimum düşey konumunun, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni manyetik kuvvet performansına etkisi incelenmiştir. Daha sonra üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin her bir çekirdek altına merkezlenen mıknatısların farklı kutup yönelimlerinin, numune içindeki tane içi ve tanelerarası süperakımların oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Son aşamada ise tek ve üç çekirdekli YBCO süperiletkeni manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.2. PMG Manyetik Alan Dağılımı Sonuçları ve Değerlendirmesi

Şekil 3.1’de PMG-1a diziliminin konuma bağlı manyetik akı profili ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. PMG-1a dizilimi $40 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında üç mıknatıstan oluşmaktadır. Yukarı kutup yönelimli mıknatıs manyetik akıyı PMG yüzeyinde yoğunlaştırmak için kullanılmıştır. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi PMG-1a dizilimi bir adet B_x ve iki adet B_z manyetik akı yoğunluğu pikine sahiptir. Tüm şekillerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları, B_x ve B_z değerlerinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir. Şekil 3.1 (b)’nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir.

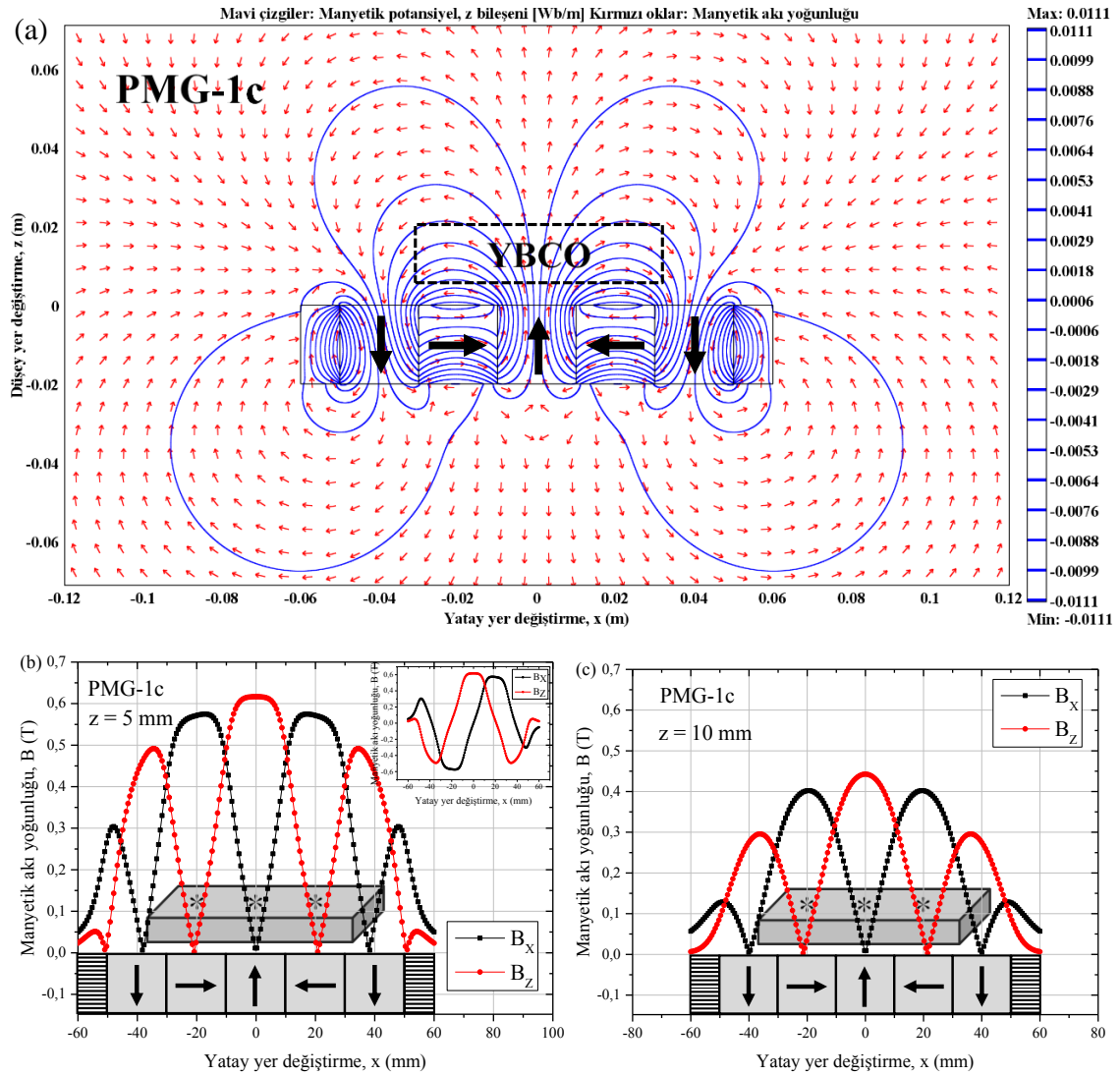


Şekil 3.1. (a) PMG-1a diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.1 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir)



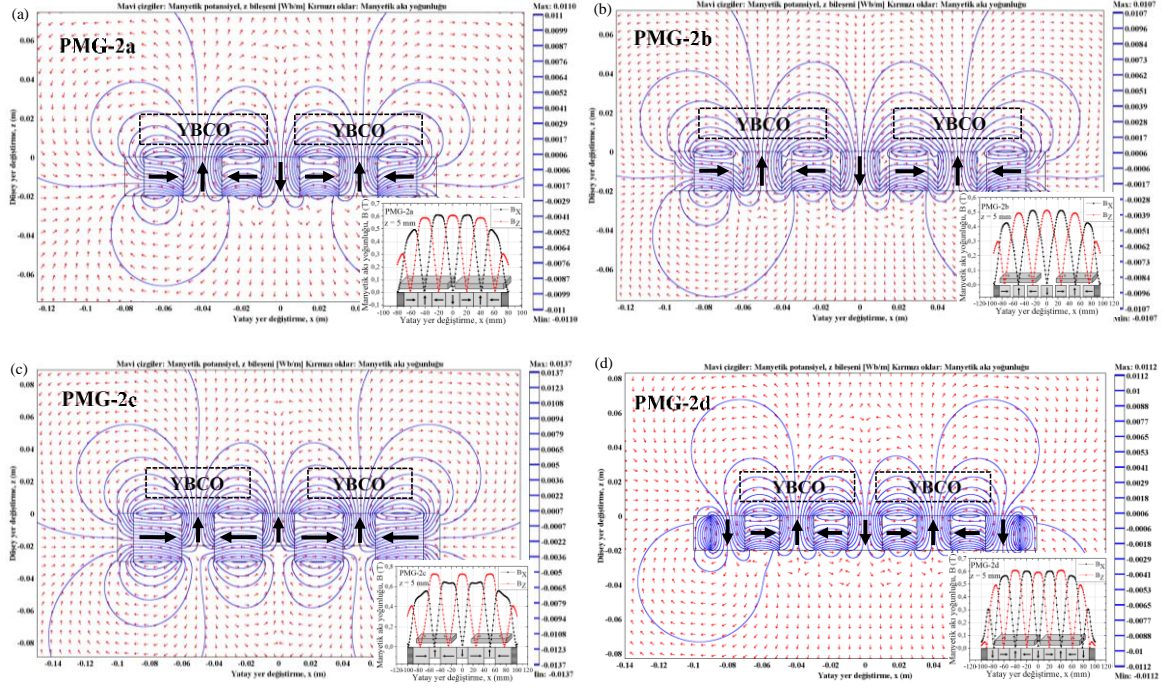
Şekil 3.2. (a) PMG-1b diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.2 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir)

Şekil 3.2'de PMG-1b diziliminin konuma bağlı manyetik akı profili ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. Şekil 3.2 (a)'da görülen mavi çizgiler manyetik potansiyelin z bileşenini ve kırmızı oklar manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. PMG dizilimindeki mıknatısların üzerindeki oklar ise mıknatısların manyetik kutup yönelimlerini göstermektedir. PMG-1a dizilimine ek olarak sağ uç tarafa $40 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında mıknatıslanma yönü aşağı olan bir mıknatıs eklenmiştir. Bununla birlikte PMG-1a dizilimi ek olarak ikinci bir B_z manyetik akı yoğunluğu piki belirginleşerek ortaya çıkmıştır. Düşey ve yatay manyetik akı yoğunluğu değerlerinin PMG yüzeyinden düşey doğrultuda uzaklaştıka azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.3. (a) PMG-1c diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.3 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir)

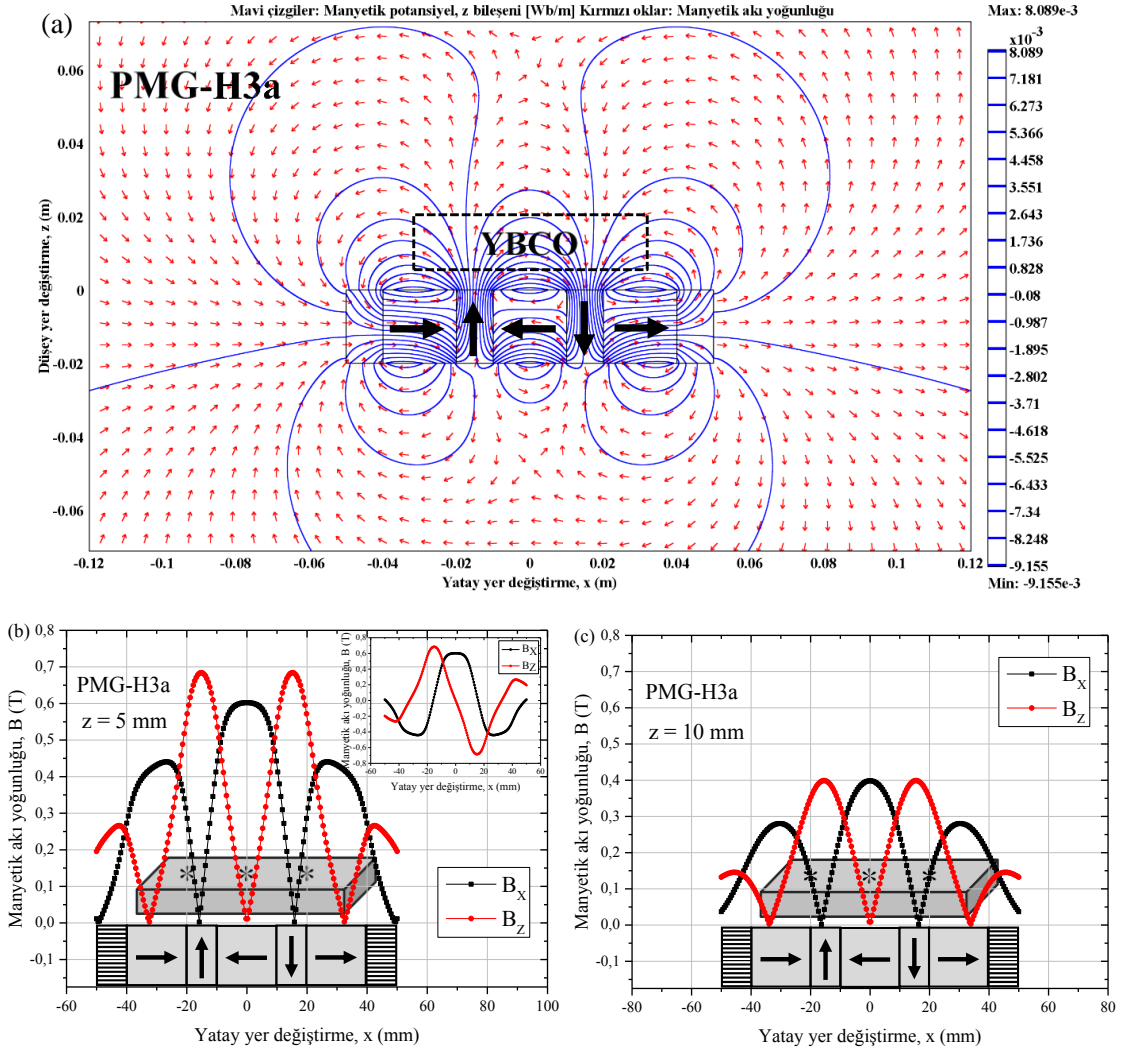
Şekil 3.3'de PMG-1c diziliminin konuma bağlı manyetik akı profili ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. Bu dizilimde PMG-1a dizilimine ek olarak üçlü mıknatıs grubunun sağ ve sol uç taraflarına $40 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında ve kutup yönelimleri aşağı yönlü olan birer mıknatıs eklenmiştir. Bu ekleme PMG-1a dizilimi ek olarak mıknatıs yolunun uç taraflarına doğru ekstra iki B_z manyetik akı yoğunluğu pikinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca düşey yönlü mıknatıs eklemesi ile hem düşey hem de yatay manyetik akı pik şiddetlerinin arttığı gözlenmiştir. Şekil 3.2 (b) ve (c)'den görüldüğü gibi, PMG yüzeyinden düşey mesafe 5 mm'den 10 mm'ye çıkarılınca B_z ve B_x pik değerleri azalmaktadır.



Şekil 3.4. (a) PMG-2a, (b) PMG-2b, (c) PMG-2c ve (d) PMG-2d diziliminin manyetik alan profili (Her şeklin içerisinde PMG dizilimlerine ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları, PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede verilmiştir)

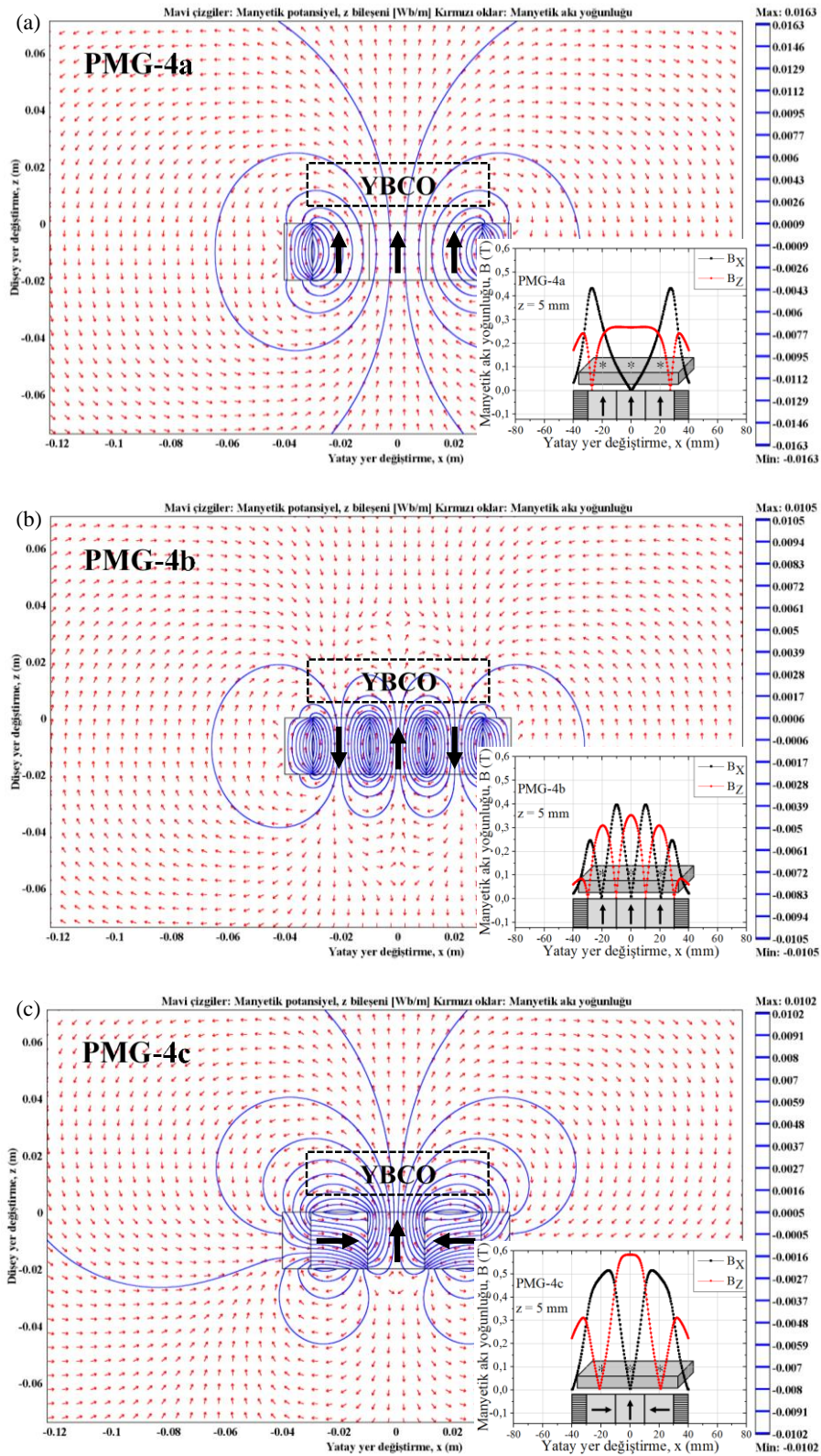
Şekil 3.4, PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin manyetik alan profillerini göstermektedir. Ayrıca her bir şeklin içerisinde ilgili PMG dizilimine ait B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımları, PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede verilmiştir.

PMG-2b diziliminde, numuneler arasındaki mesafeyi 80 mm'den 100 mm'ye çıkarmak için mıknatıslar arasında 5 mm genişlikli boşluklar bırakılmıştır. Buradaki amaç boşluğun PMG'nin oluşturduğu manyetik alan dağılımına etkisini incelemektir. PMG-2a dizilimindeki mıknatıslarla aynı kutup yönelimine fakat farklı boyutlarda mıknatıslara sahip PMG-2c dizilimi ile değişen mıknatıs boyutunun ve numuneler arası mesafenin artışının, üç çekirdekli YBCO numunelerinin manyetik kuvvet özelliklerine etkisi incelenmek istenmiştir. PMG-2d diziliminde ise ilave mıknatısların etkisi ile manyetik akı PMG'nin üst yüzeyinde daha iyi yoğunlaşması sağlanarak sistemin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.5. (a) PMG-H3a diziliminin manyetik alan profili, PMG yüzeyinden (b) 5 mm ve (c) 10 mm düşey mesafede manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Şekil 3.5 (b)'nin içerisinde B_x ve B_z manyetik akı yoğunluklarının yatay yer değiştirmeye bağlı gerçek değerleri verilmiştir)

Şekil 3.5'te PMG-H3a diziliminin konuma bağlı manyetik alan profilleri, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı grafikleri gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi beş adet mıknatıstan oluşan bu dizilim Halbach dizilimi (Halbach, 1985) olarak adlandırılır. PMG-H3a dizilimindeki sağ ve sol manyetik alan yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarında olup aşağı ve yukarı yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ boyutlarındadır. Halbach diziliminden oluşan PMG-H3a diziliminin bir adet büyük ve iki adet küçük olmak üzere üç B_x ile iki adet B_z pikine sahip olduğu görülmektedir. PMG yüzeyinden 5 mm mesafede B_z pik değerleri B_x pik değerlerine göre daha büyüktür ve pik genişliği daha azdır. PMG yüzeyden 10 mm mesafede ise B_z pik genişliği artarak, B_z ve B_x pik değerleri yaklaşık olarak eşit olmuştur.



Şekil 3.6. (a) PMG-4a, (b) PMG-4b ve (c) PMG-4c diziliminin manyetik alan profili (Her şeklin içerisinde PMG dizilimlerine ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları, PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede verilmiştir)

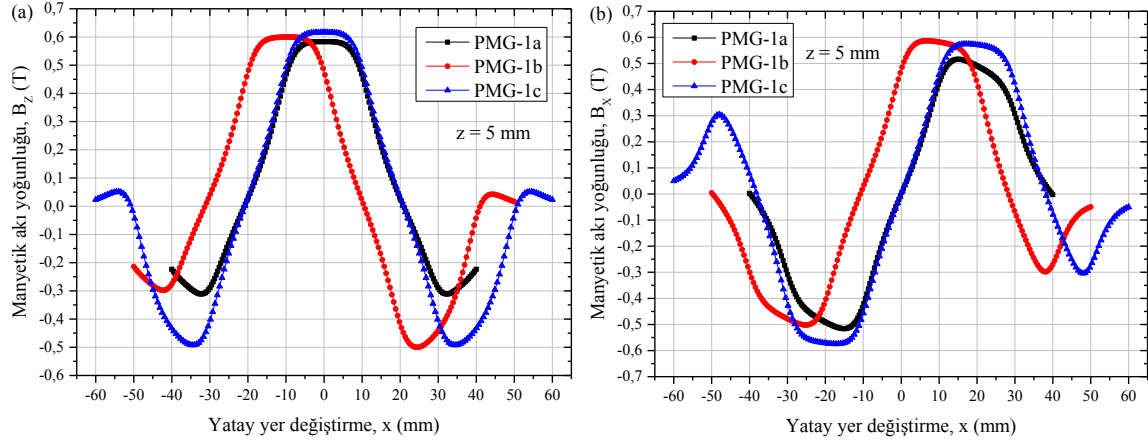
Şekil 3.6'da PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin manyetik alan profillerini gösterilmektedir. Ayrıca her bir şeklin içerisinde PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafe için ilgili PMG dizilimine ait B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilmiştir.

PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri $40 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında ve farklı manyetik kutup yönelimine sahip üçer adet mıknatıstan oluşmuştur. PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri ile üç çekirdekli YBCO numunenin her bir çekirdeği altına mıknatısların kutupları merkezlenmiştir. Manyetik kutup yönelimlerine bağlı olarak her bir çekirdek etrafında dönen taneçi süperakım yönelimlerinin manyetik kuvvete etkisi araştırılmıştır. Bu üç dizilim aynı sayı ve boyutta mıknatıs içerdiğinden, dizilimlere ait B_z ve B_x manyetik akı yoğunlukları daha sağlıklı ve rahat bir gözlem için aynı düşey skalada verilmiştir.

PMG-4a mıknatıs kutupları üzerinde tek bir geniş B_z pikine sahipken, PMG-4b her mıknatıs kutbu üzerinde maksimuma ulaşan üç adet B_z pikine sahiptir. PMG-4a st37 çelik ile mıknatısların bulunduğu uç noktalarda maksimuma ulaşan iki B_x pikine sahipken, PMG-4b iki büyük iki küçük olmak üzere dört B_x pikine sahiptir. PMG-4c ise bir B_z ve iki adette B_x pikine sahiptir. PMG-4c diziliminde sol ve sağ manyetik alan yönelimli mıknatısların arasında PMG yüzeyinde manyetik alanı yoğunlaştırmak amacıyla (Liu vd., 2009) yukarı manyetik kutup yönelimli bir mıknatıs kullanılmıştır. Şekil 3.13 (b) ve (c)'de görülen manyetik akı yoğunluğu dağılımları, B_x ve B_z değerlerinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir.

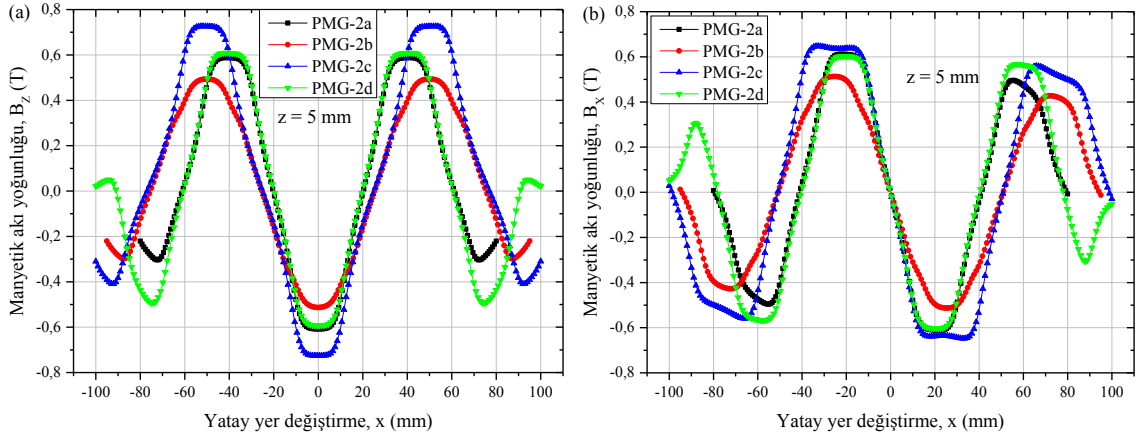
Şekil 3.7'de PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi PMG-1a bir adet B_z pikine sahipken, manyetik kılavuzlama yolunun kenarlarına kademeli olarak eklenen aşağı kutup yönelimli mıknatısların varlığı ile fazladan B_z manyetik akı yoğunluğu piki belirginleşerek sayıları, PMG-1b için ikiye ve PMG-1c içinse üçe çıkmıştır. Bununla birlikte her üç dizilim de ikişer adet B_x pikine sahiptir. PMG-1b ve PMG-1c dizilimindeki ilave aşağı yönlü mıknatıslar B_x yatay manyetik akı bileşenine de katkıda bulunarak pik değerlerini arttırmışlardır. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi dizilimlerin B_z pik değerleri birbirlerine yakın olmakla beraber, PMG-1c diziliminin B_z değerleri diğer PMG'lerden büyüktür. PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin pozitif yönde B_x pik değerleri yaklaşık olarak birbirine eşit ve PMG-1a diziliminden de büyüktürler. Negatif yönde B_x pik değerleri en büyük dizilim PMG-1c olup

diğer iki dizilimin bu yöndeki maksimum pik değerleri birbirlerine eşittir. Manyetik akı yoğunluğu grafiklerinin PMG kesit alanı ile orantılı olarak genişlediği görülmektedir.



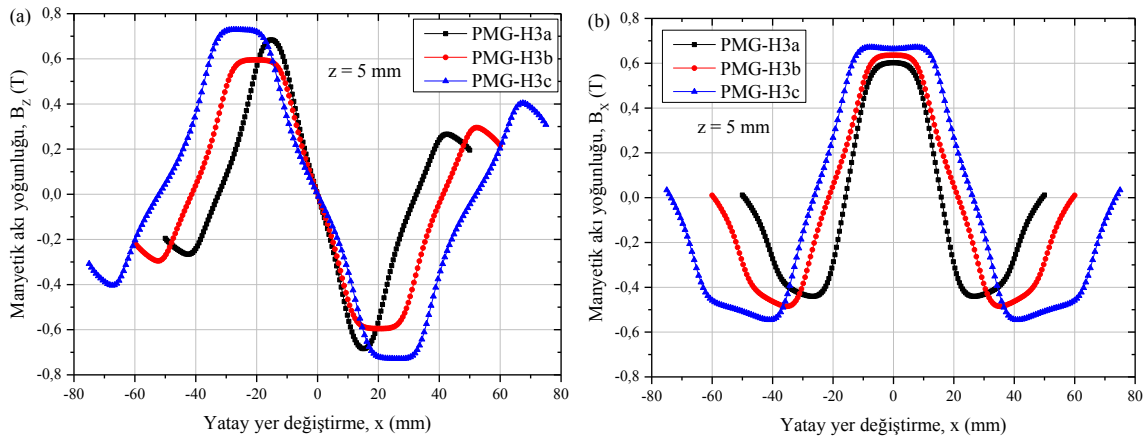
Şekil 3.7. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Şekil 3.8’te PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm PMG’ler üç adet B_z ve dört adet B_x manyetik akı yoğunluğu piklerine sahiptirler. Ayrıca PMG-2d diziliminde kullanılan manyetik kutup yönelimi aşağı olan mıknatısların etkisi ile nispeten daha düşük maksimum değere sahip iki adet B_z piki ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan PMG-2c diziliminin B_x ve B_z değerleri diğer PMG’lerden büyüktür. Bu durum, PMG-2c diziliminde kullanılan $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ boyutlarında ve yatay doğrultuda manyetik kutup yönelimine sahip mıknatısların manyetik akı yoğunluğuna yaptığı pozitif katkıdan ileri gelmektedir. Ayrıca PMG-2a ve PMG-2d diziliminin B_x ve B_z maksimum pik değerlerinin de PMG-2b diziliminden büyük olduğu da şekilden görülmektedir. PMG-2a ve PMG-2d dizilimlerinin PMG-2b diziliminden daha büyük manyetik akı yoğunluğu piklerine sahip olması, PMG-2b diziliminde mıknatıslar arasında bırakılan 5 mm genişlikli boşlukların, PMG-2b diziliminin bileşke manyetik akı yoğunluğunu azaltmasından kaynaklanmaktadır. Dizilimlerde akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı ve aşağı yönlü mıknatısların manyetik kılavuzlama yolundaki konumlarına bağlı olarak, B_z piklerinin yatay doğrultudaki konumlarının değiştiği şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 3.8. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları

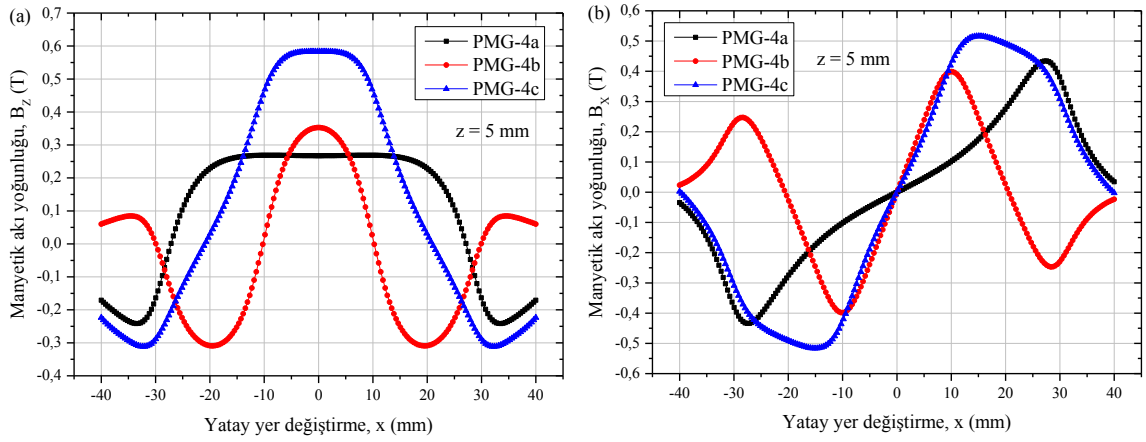
Şekil 3.9’da PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Halbach diziliminden oluşan PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin bir büyük ve iki küçük olmak üzere toplamda üç adet B_x ile iki büyük ve iki de küçük olmak üzere toplamda dört adet B_z pikine sahip olduğu şekilden görülmektedir. Dizilimlere ait manyetik akı yoğunluğu grafikleri PMG kesit alanı ile orantılı olarak genişlemektedir. Bununla birlikte PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin hem düşey B_z hem de yatay B_x manyetik akı yoğunluğu bileşenleri benzer dağılımlar göstermelerine karşın, şekilden görüldüğü gibi, PMG-H3c dizilimi diğer iki PMG dizilimine göre daha büyük B_x ve B_z pik değerlerine sahiptir. Ayrıca PMG-H3a diziliminin B_z düşey manyetik akı yoğunluğu pikleri PMG-H3b’den daha büyük değerlere sahipken, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu bileşeni daha düşük maksimum pik değerlerine sahiptir. Bu durum PMG-H3a dizilimindeki yukarı yönlü mıknatısların genişliğinin az ve bu mıknatısların yüzeyindeki manyetik alan değerinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kullanılan mıknatısların boyutu arttıkça pik değerlerinin arttığı gözlemlendiğinden, PMG-H3c dizilimi diğer PMG’lere kıyasla daha geniş piklere sahipken, PMG-H3a dizilimi daha dar B_z ve B_x piklerine sahiptir.



Şekil 3.9. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Şekil 3.10'da PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede B_z ve B_x manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri üçer adet $40 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında mıknatıstan oluşmaktadır. PMG-4a aynı yukarı yönlü manyetik kutba sahip mıknatıslardan dolayı tek bir geniş B_z pikine sahipken, PMG-4b ayrı ayrı her bir mıknatıs kutbu üzerinde maksimuma ulaşan üç adet B_z pikine ve PMG-4c dizilimi de akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı yönlü mıknatıs kutbu üzerinde bir adet B_z pikine sahiptir. PMG-4a st37 çelik ile kenarlardaki mıknatısların bulunduğu noktalarda maksimuma ulaşan iki B_x pikine sahipken, PMG-4b iki büyük iki küçük olmak üzere dört B_x pikine ve PMG-4c ise iki adette B_x pikine sahiptir. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi dizilimlerin B_z düşey manyetik akı yoğunlukları farklı özellikte dağılımlar göstermesinin yanı sıra, PMG-4c diziliminin B_z değerleri diğer PMG'lerden yaklaşık olarak iki kat daha büyüktür. Bununla birlikte B_x yatay manyetik akı yoğunlukları da farklı karakterde dağılımlar göstermektedir ve PMG-4c dizilimi en büyük B_x pik değerine sahiptir. PMG-4a diziliminin B_x pik değeri PMG-4b'ye göre daha büyük olmasına rağmen, PMG-4a'nın maksimum pik yatayda PMG merkezinden uzakta ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kullanılan mıknatısların manyetik kutup yönelimlerine göre oluşan B_z ve B_x pik genişliklerinin farklılıklar gösterdiği şekilden görülmektedir.

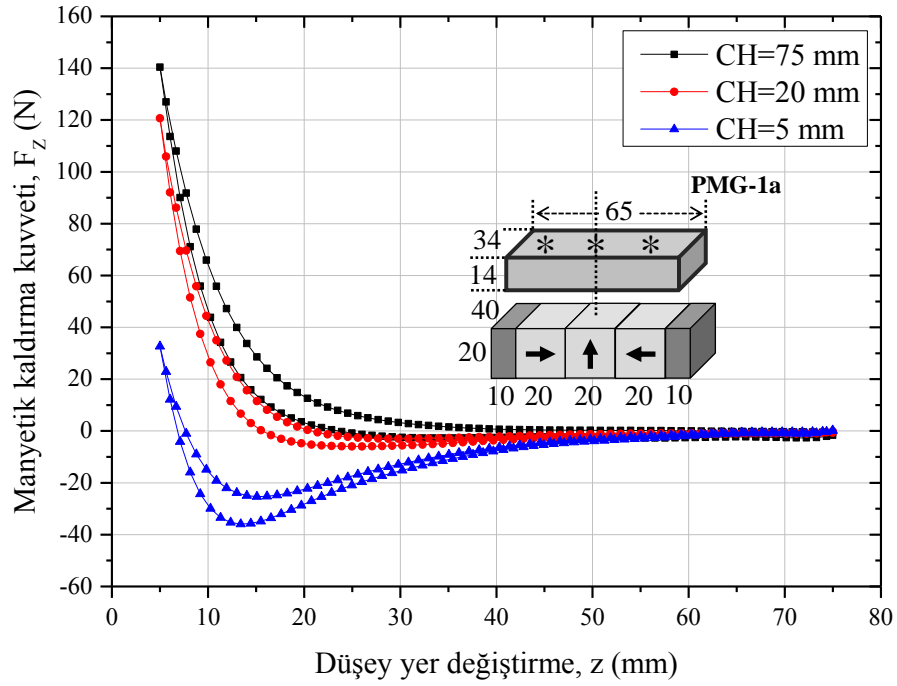
Manyetik alanın düşey bileşeni B_z pik sayısı, genelde akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı veya aşağı manyetik kutup yönlü mıknatıs sayısına ve manyetik alanın yatay bileşeni B_x pik sayısı da sağ veya sol manyetik kutup yönlü mıknatısların sayısına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.10. PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin (a) B_z yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve (b) B_x düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı

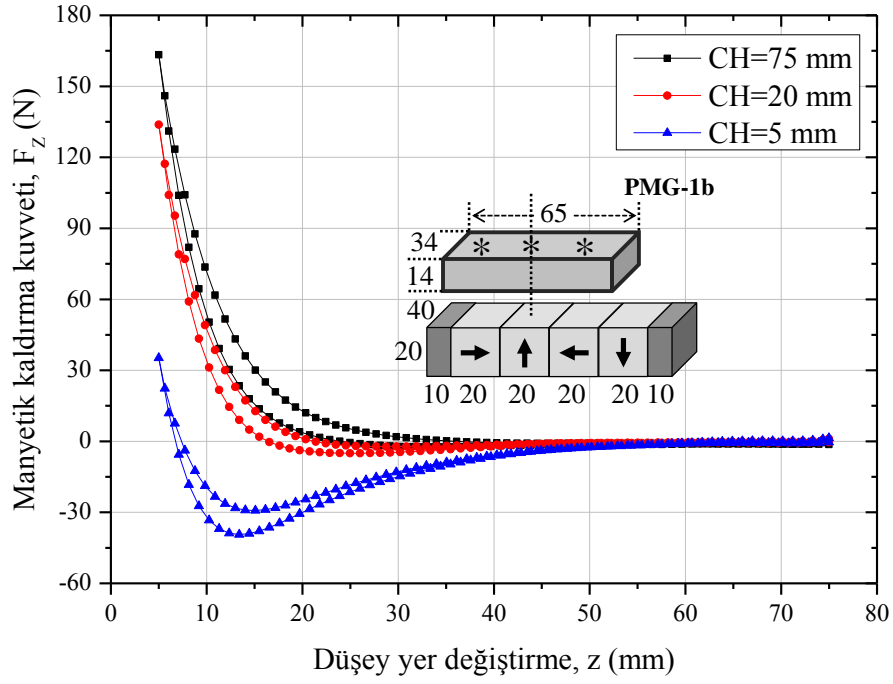
3.3. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Şekil 3.11’de farklı soğutma yüksekliklerinde ($CH=5$ mm, 20 mm ve 75 mm) PMG-1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi alansız soğutma durumunda ($CH=75$ mm) manyetik kuvvet verileri incelendiğinde, alanlı soğutma durumlarına ($CH=5$ mm ve $CH=20$ mm) itici kuvvet değerleri artmakta ve alansız soğutma durumunda numunede alan tuzaklanması olmadığından çekici kuvvet değerleri azalmaktadır. PMG-1a diziliminden elde edilen maksimum itici kuvvet değeri $CH=5$ mm için 33 N’den $CH=20$ mm’de 121 N’a ve $CH=75$ mm (ZFC) durumunda ise 140 N’a artmaktadır.

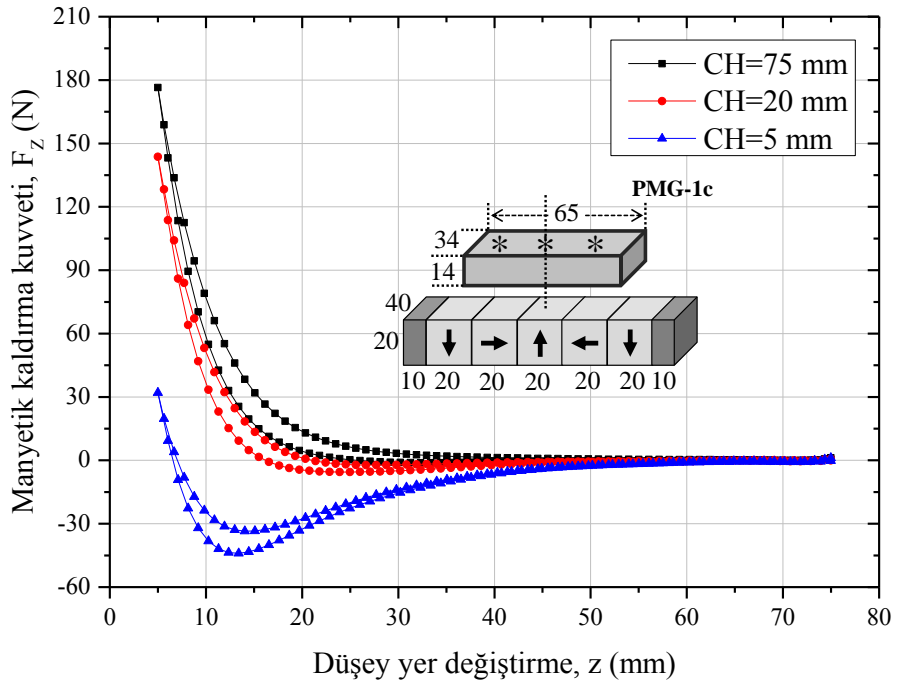


Şekil 3.11. PMG-1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3.12’de PMG-1b ve Şekil 3.13’te PMG-1c dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi alanlı soğutma durumlarında (CH=5 mm ve CH=20 mm) soğutma mesafesi azaldıkça manyetik kaldırma kuvvetinin çekici kısmı artmakta ve itici kısmı azalmaktadır. Alanlı soğutma durumunda (CH=75 mm, ZFC) ise itici kuvvet değerleri, süperiletkenlerde oluşan perdeleme akımlarının ön plana çıkarak diyamanyetik etkinin baskın olmasından dolayı artmaktadır. Şekil 3.12’den görüldüğü gibi soğutma mesafesi arttıkça PMG-1b dizilimin maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm için 35 N’dan CH=20 mm’de 134 N’a ve ZFC durumunda 163 N’a artmaktadır. Benzer şekilde PMG-1c dizilimi için maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm için 32 N’dan CH=20 mm’de 144 N’a ve ZFC durumunda 177 N’a artmaktadır. Manyetik kaldırma kuvveti grafikleri PMG ile üç çekirdekli YBO numunesi arasındaki düşey ölçüm mesafesinin azalmasıyla yaklaşık eksponansiyel bir artış göstererek en düşük yaklaşma mesafesinde (5 mm) maksimum değerine ulaşmaktadır. Manyetik kuvvetin yer değiştirmeye bağlı ölçüm grafiklerinde eğrilerin gösterdiği histerisiz numunede tuzaklanan alanla doğru orantılı olarak değişmektedir.



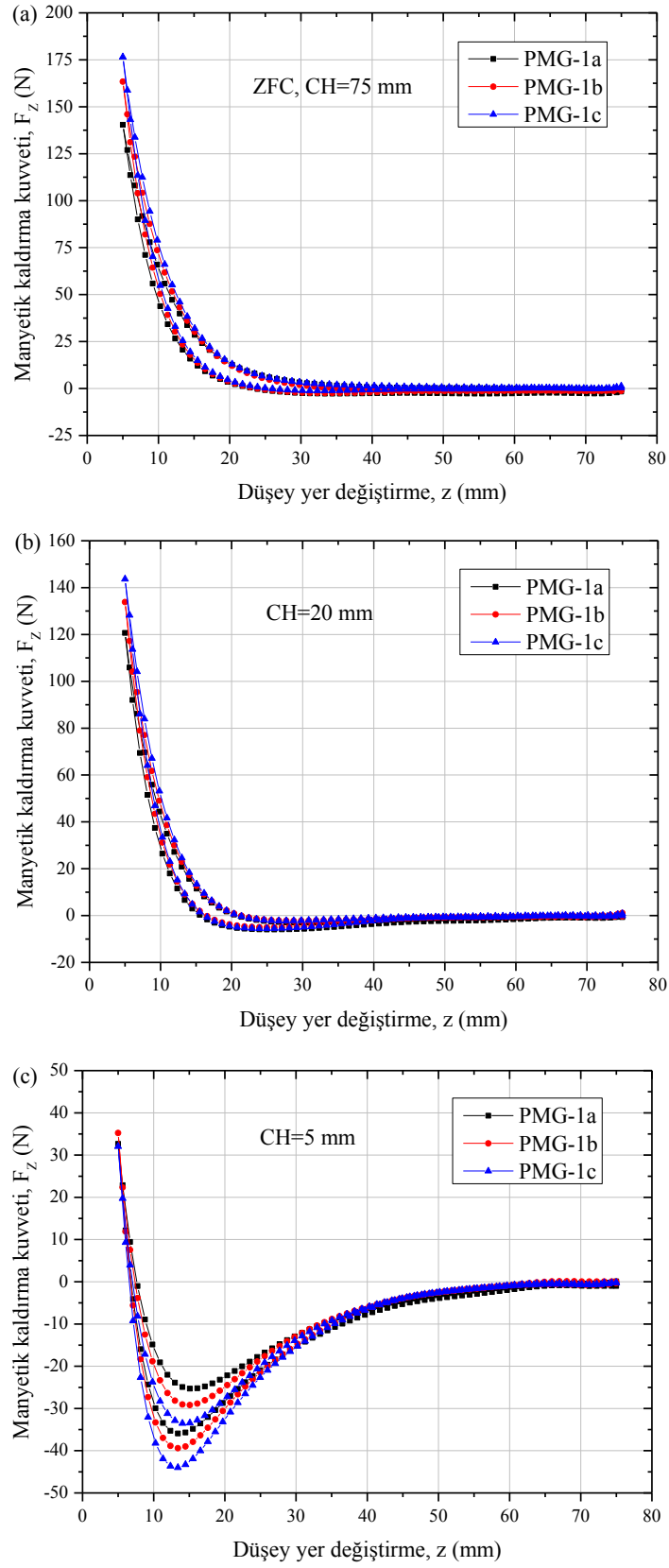
Şekil 3.12. PMG-1b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 3.13. PMG-1c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3.14 farklı soğutma mesafeleri için PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimleri ile numune kabı içerisindeki üç tohumlu YBCO süperiletkeni arasında oluşan F_z düşey manyetik kaldırma kuvvetin, düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden, soğutma mesafesi 75 mm için (ZFC) maksimum kaldırma kuvveti verileri kıyaslandığında PMG-1a yolu için 140 N olan değer, PMG-1b yolu için 163 N'a ve PMG-1c yolu içinse 176 N'a çıktığı görülmektedir. Kaldırma kuvvetindeki maksimum kuvvet değerleri farklılık göstermekle birlikte, CH=5 mm soğutma yüksekliğinde en büyük maksimum çekici kuvvet değerleri PMG-1c diziliminde gözlenmektedir. Bu durum PMG-1c diziliminde diğer PMG'lere kıyasla daha fazla alan tuzaklandığının bir göstergesidir. Tek çekirdekli YBCO süperiletkeni için literatürde rapor edilen (Liu vd., 2008b): "PMG dizilimi ile daha büyük manyetik kaldırma kuvveti elde etmek için süperiletken, B_z pikinin maksimum olduğu yerde konumlandırılmalıdır" ifadesi bu tez çalışmasında PMG-1a dizilimi için doğrulanmıştır. Şekil 3.7'den görülen manyetik akı yoğunluğuna dağılımlarına göre her üç dizilimdeki YBCO süperiletkeni B_z alanının maksimum olduğu yerlerde konumlandırılmış ve literatürdeki bu bilgiden faydalanarak PMG diziliminde kademeli olarak artan mıknatıs sayısına da bağlı olarak manyetik kaldırma kuvveti değerlerinde belirli artışlar gözlenmiştir.

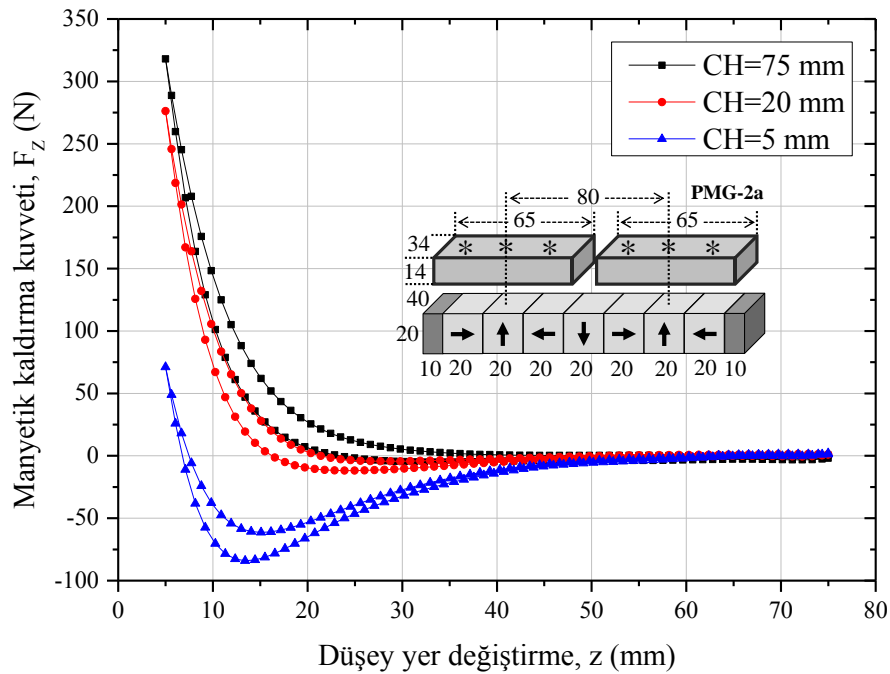
Deng ve arkadaşları iki kutuplu Halbach dizilimindeki PMG (üç adet 40 mm × 30 mm × 30 mm ve iki adet 40 mm × 20 mm × 20 mm boyutlu mıknatıslardan oluşan) dört adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni (64 mm × 32 mm × 13 mm boyutlarında) ile yaptıkları deneysel çalışmada 10 mm'lik minimum düşey yaklaşma mesafesinde ve CH=30 mm soğutma mesafesinde 627 N'luk bir maksimum kuvvet gözlediler (Deng vd., 2011). Bizim çalışmamızda PMG-1c dizilimi ile alansız soğutma şartlarında ve 5 mm düşey yaklaşma mesafesinde benzer boyutlarda (65 mm × 34 mm × 14 mm) sadece bir adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni kullanılarak 176 N'luk bir kuvvet değeri gözlenmiştir. Oluşturulan PMG-1c diziliminin kesit alanı, yapılan çalışmayla kıyaslandığında daha küçüktür. Bu durumda daha küçük mıknatıs boyutları ile oluşturulan PMG-1c diziliminin literatürle uyumlu içinde olduğu anlaşılmaktadır.



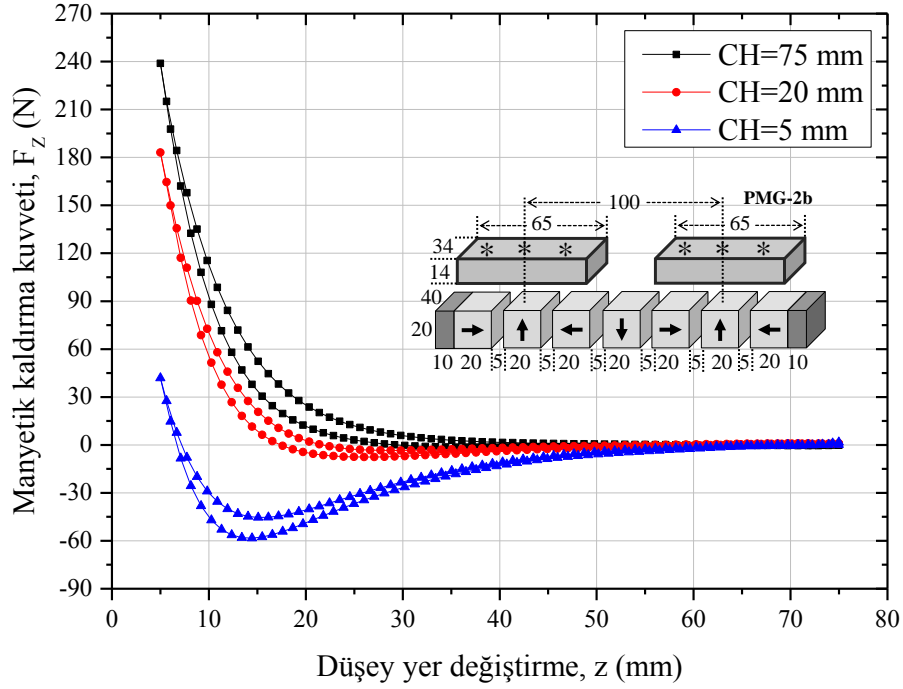
Şekil 3.14. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.15'te PMG-2a ve Şekil 3.16'da PMG-2b dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 3.15'ten görüldüğü gibi PMG-2a diziliminde elde edilen maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm için sırasıyla 71 N, 276 N ve 318 N olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde PMG-2b dizilimi için maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm için sırasıyla 42 N, 183 N ve 239 N olarak elde edilmiştir.

Deng ve arkadaşları 5 mıknatıstan oluşan kesit alanı 3000 mm² olan Halbach PMG kullanılarak ve bu tez çalışmasında incelenen üç çekirdekli YBCO süperiletkeniyle aynı özelliklerde 4 adet numune ile yaptıkları deneysel çalışmada (64 mm × 32 mm × 12 mm) 10 mm'lik minimum yaklaşma mesafesinde ve FCH=30 mm soğutma yüksekliği için 330 N'luk bir maksimum kuvvet gözlediler (Deng vd., 2015). Bizim çalışmamızda benzer bir kesit alanına (2800 mm²) sahip PMG-2a dizilimi ile 20 mm soğutma mesafesinde ve 7 mm düşey mesafede yalnızca 2 adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni kullanılarak yaklaşık olarak 201 N'luk bir kuvvet değeri gözlenmiştir. Bu durumda 7 adet mıknatıstan oluşan PMG-2a diziliminin literatüre kıyasla manyetik kuvvet ve maliyet yönünden daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

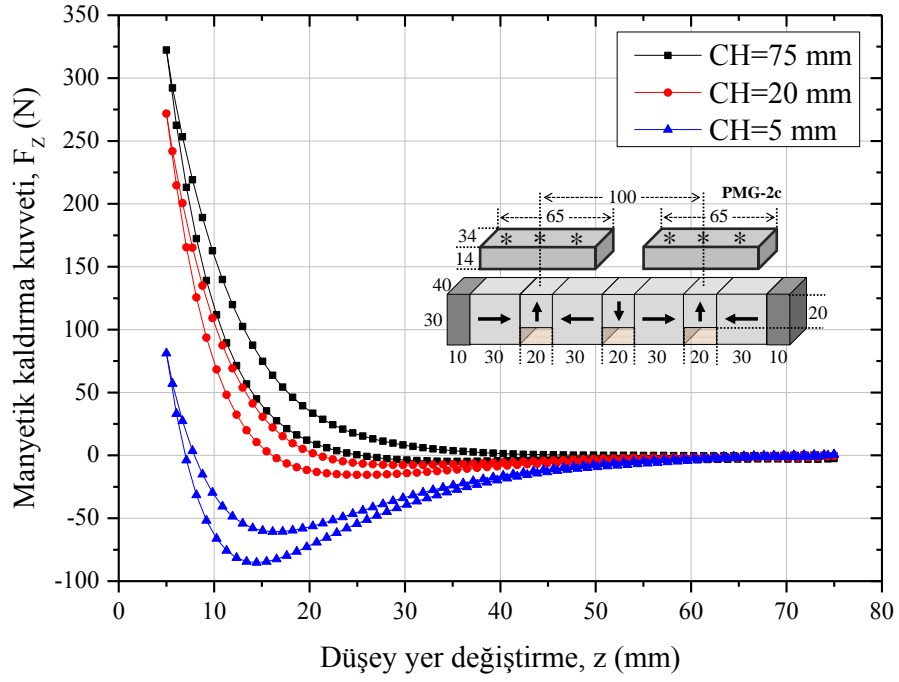


Şekil 3.15. PMG-2a dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

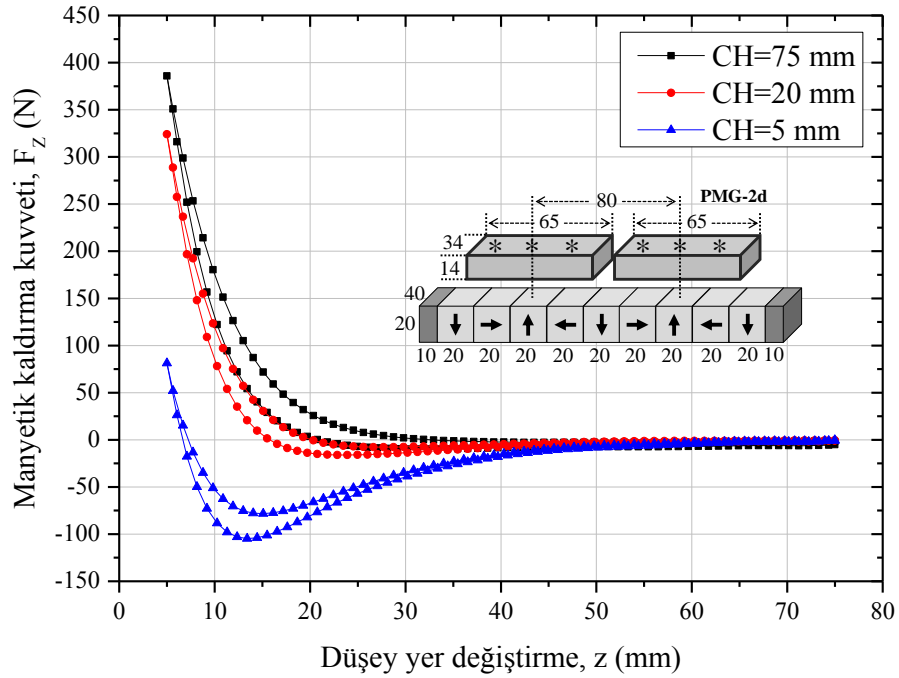


Şekil 3.16. PMG-2b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3.17’de PMG-2c ve Şekil 3.18’de PMG-2d dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 3.17’den görüldüğü gibi PMG-2c diziliminde elde edilen maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm için sırasıyla 81 N, 272 N ve 322 N olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde PMG-2d dizilimi için maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm için sırasıyla 81 N, 324 N ve 386 N olarak elde edilmiştir. Her bir konfigürasyon için soğutma yüksekliği azaldıkça maksimum manyetik kuvvetin azaldığı söylenebilir. Bu durum süperiletken malzemelerin soğutma şartlarına bağlı olarak farklı davranışlar göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.17. PMG-2c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 3.18. PMG-2d dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

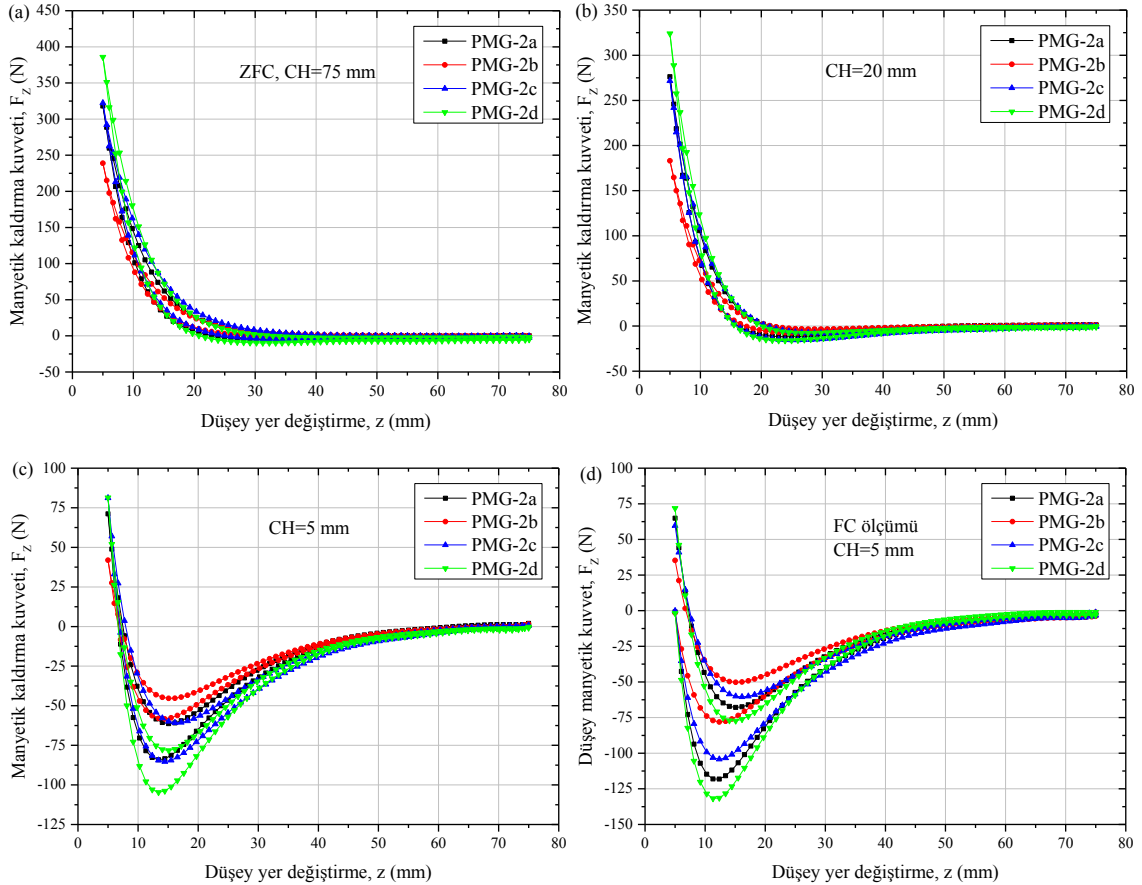
Şekil 3.19 farklı soğutma mesafeleri için PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin manyetik kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Ölçülen tüm soğutma şartlarında PMG-2d diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin en büyük değere sahip olduğu ve bunun yanı sıra CH=5 mm, CH=20 mm ve FC durumunda maksimum çekici kuvvet değerlerinin de en büyük olduğu (-125 N) görülmektedir. Aynı sayıda üç çekirdekli YBCO kullanılan bu dört dizilim arasından PMG-2d'nin kaldırma kuvveti değerlerinin büyük olması, Şekil 3.8'den görüldüğü gibi PMG-2d diziliminin manyetik alan pik pozisyonlarının üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin konumu ile uyumuna ve dış manyetik alan gradyentine bağlanabilir. Bu uyum sonucu üç çekirdekli süperiletkende tuzaklanan manyetik alan ve buna bağlı oluşacak perdeleme akımları artar.

Şekilden, ZFC soğutma durumunda (CH=75 mm) PMG-2b dizilimi için 239 N olan maksimum kaldırma kuvveti değerinin, PMG-2a dizilimi için 318 N'a, PMG-2c dizilimi için 322 N'a ve PMG-2d dizilimi içinse 386 N'a çıktığı görülmektedir. PMG-2b için elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin PMG-2a'ya kıyasla azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi PMG-2b diziliminde mıknatıslar arasındaki boşluğun manyetik olmayan bölgeler oluşturarak (PMG'lerin manyetik akı biçimlendirme özelliğine negatif katkı yaparak) manyetik akı dağılımına olumsuz etkide bulunmasıdır. Bu durum Şekil 3.8'de PMG-2b manyetik alan dağılımı pik şiddetlerinin diğer dizilimlere göre daha düşük olmasından da anlaşılmaktadır.

Diğer taraftan aynı manyetik kutup yönelimli fakat farklı boyutlarda mıknatıslardan oluşan PMG-2a ve PMG-2c dizilimine ait manyetik kuvvet verileri kıyaslandığında, elde edilen grafiklerdeki değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Hatta daha küçük boyutlarda mıknatısların bulunduğu PMG-2a diziliminin alanlı soğutma şartlarında (CH=20 mm ve CH=5 mm) gözlenen maksimum değerlerinin hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. Bu durum manyetik kaldırma kuvvetinin yalnızca yatay doğrultudaki manyetik akı yoğunluğu bileşeni ile değil $(F_z = \int J_y B_x dv)$ ayrıca Eşitlik (20)'de verilen uygulanan manyetik alanın aynı doğrultudaki gradyenti ile orantılı olduğu bilgileriyle açıklanabilir. PMG-2a ve PMG-2c yolları için elde edilen maksimum kaldırma kuvveti değerlerinin birbirine yakın olması, yüksek manyetik kaldırma kuvveti elde etmek büyük boyutlu ve yüksek maliyetli mıknatıs kullanmaya gerek olmadığını göstermektedir.

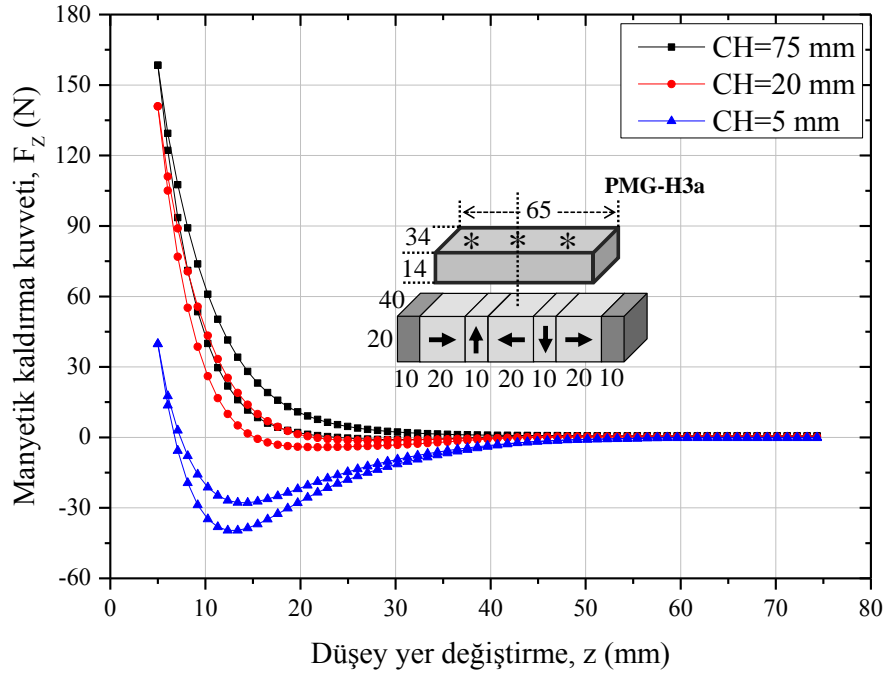
Şekil 3.19 (d)'de görülen süperiletken malzemelerde akı çivileme performansını belirleyen FC ölçümleri incelendiğinde PMG-2d dizilimi en iyi çekici kuvvet değerine

sahtir. Ayrıca PMG-2d'nin gösterdiği histerisiz de diğer dizilimlerden daha büyüktür. Bu durum, PMG-2d'nin üç çekirdekli YBCO süperiletkenleri üzerinde diğer PMG'lerden daha fazla manyetik alan tuzaklama yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

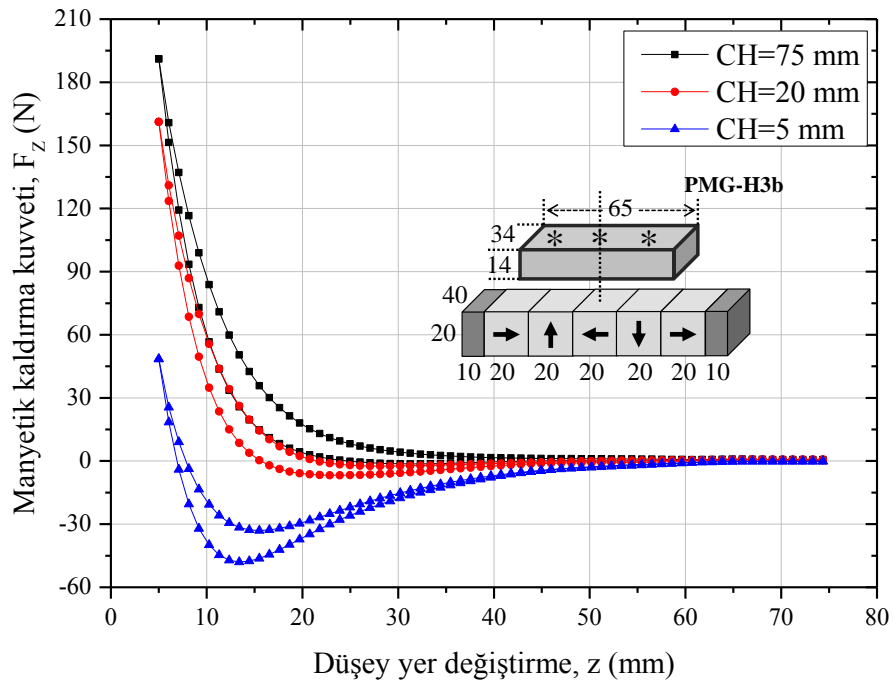


Şekil 3.19. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH= 20 mm, (c) CH=5 mm ve (d) FC durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.20'de farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm) PMG-H3a dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Maksimum itici kuvvet değeri CH=5 mm için 40 N'dan CH=20 mm'de 141 N'a ve CH=75 mm (ZFC) durumunda ise 158 N'a artmaktadır. Ayrıca diğer manyetik kuvvet eğrilerinde olduğu gibi soğutma yüksekliği arttıkça itici kuvvet değerlerinin artarken çekici kuvvet değerlerinin azaldığı şekilden açıkça görülmektedir.

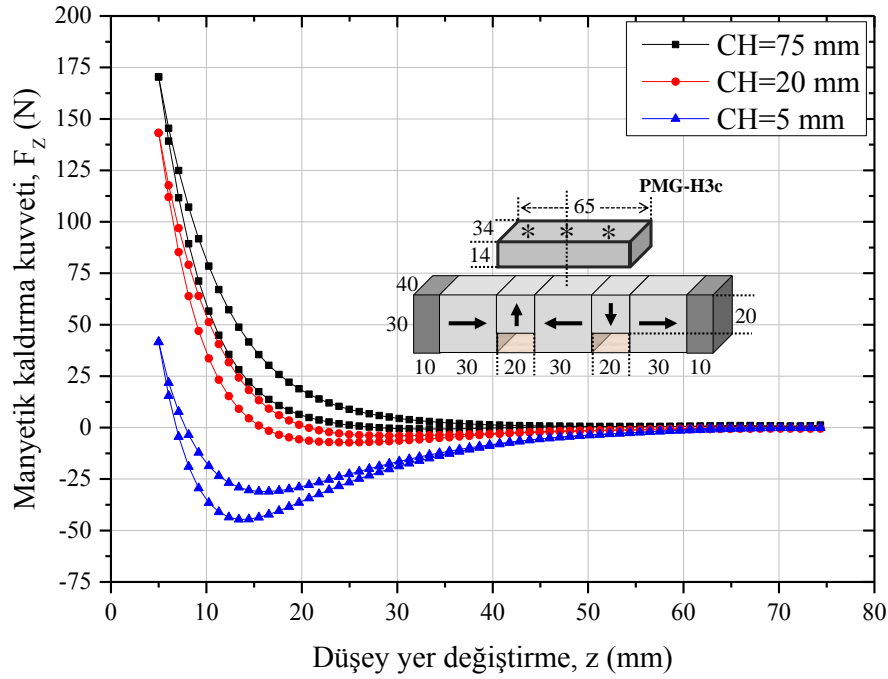


Şekil 3.20. PMG-H3a dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 3.21. PMG-H3b dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3.21’de PMG-H3b ve Şekil 3.22’de PMG-H3c dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 3.21’den görüldüğü gibi soğutma mesafesi arttıkça PMG-H3b dizilimin maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm için 49 N’dan CH=20 mm’de 161 N’a ve ZFC durumunda 191 N’a artmaktadır. Benzer şekilde PMG-H3c dizilimi için maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm için 42 N’dan CH=20 mm’de 143 N’a ve ZFC durumunda 170 N’a artmaktadır.



Şekil 3.22. PMG-H3c dizilime ait manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

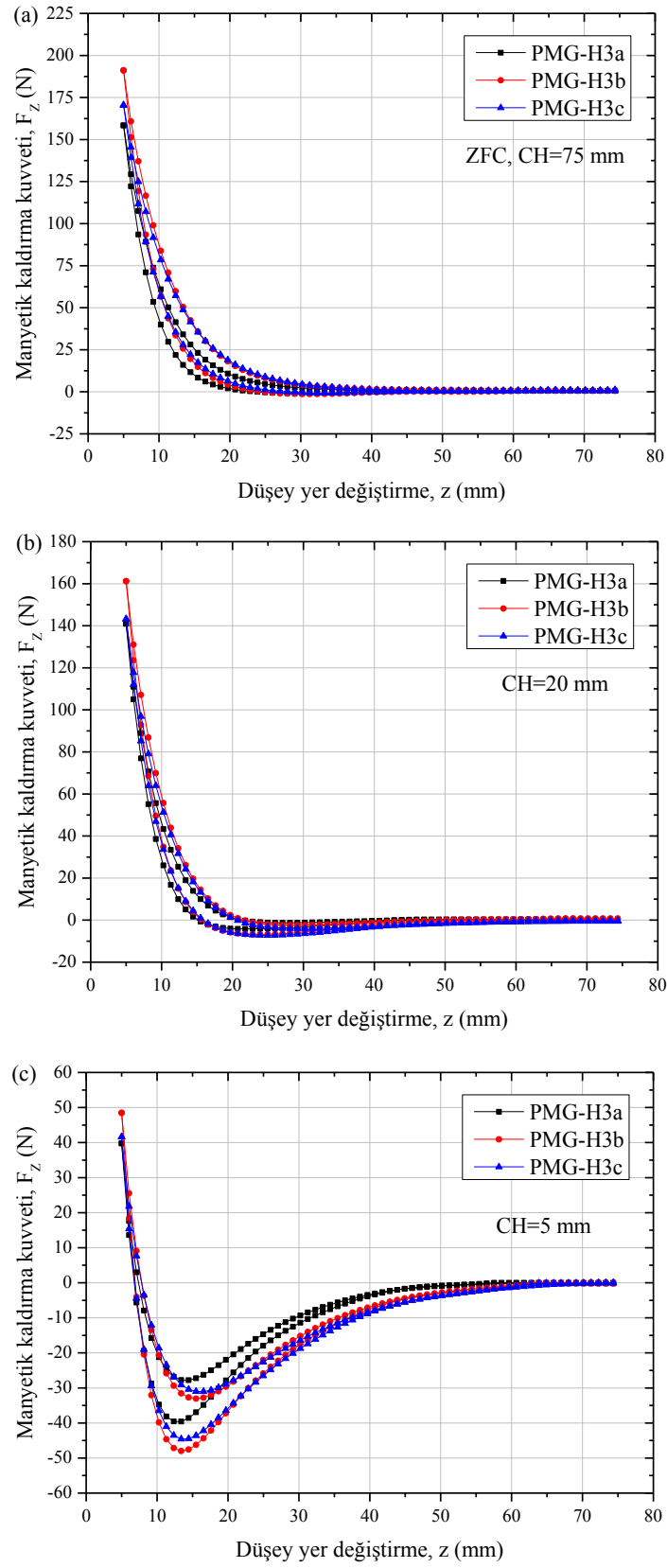
Şekil 3.23 farklı soğutma mesafeleri için PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimleri ile numune kabı içerisindeki üç tohumlu YBCO süperiletkeni arasında oluşan F_z düşey manyetik kaldırma kuvvetin, düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden, soğutma mesafesi 75 mm için (ZFC) maksimum kaldırma kuvveti verileri kıyaslandığında PMG-H3a yolu için 158 N olan değer, PMG-H3b yolu için 191 N’a ve PMG-H3c yolu içinse 170 N’a çıktığı görülmektedir.

Tüm soğutma yüksekliklerinde (CH=75 mm, 20 mm ve 5 mm) yapılan ölçümlerde PMG-H3b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin en büyük değere ve ayrıca CH=5 mm

alanlı soğutma şartında en büyük çekici kuvvet değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi düşey manyetik kuvvet $F_z = \int J_y B_x dv$ eşitliğine göre manyetik kaldırma kuvveti B_x ile orantılıdır (Deng vd., 2013) ve bu eşitlikte F_z düşey yöndeki manyetik kaldırma kuvvetini, J_y numune yüzeyinde oluşan perdeleme akımını ve B_x yatay manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin PMG-H3a'dan daha büyük B_x değerine sahip olması (Şekil 3.9) da bu dizilimlerden elde edilen kaldırma kuvveti değerlerinin büyük olmasını sağlamaktadır.

Diğer yandan aynı Halbach dizilime sahip fakat daha küçük boyutlarda mıknatıslardan oluşan PMG-H3b için elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin PMG-H3c'ye kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi daha önce PMG-2 serisinde anlatıldığı gibi, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin çekirdek pozisyonlarının alttaki PMG yolunun manyetik akı dağılımı ile uyumunun sağlanmış olması gösterilebilir. PMG-H3c diziliminde ortadaki mıknatıs genişliği arttıkça (30 mm) süperiletken ile etkileşimi sağlayacak yukarı ve aşağı yönlü mıknatısların merkezi pozisyonu, üstteki süperiletken numunenin dışına doğru kaymaktadır. Böylece iki kutuplu Halbach benzeri PMG-H3c manyetik yolunun manyetik yönden üstteki üç çekirdekli süperiletkenle PMG-H3b'ye göre daha düşük olan uyumsuzluğu, daha düşük manyetik kaldırma kuvvetine sebep olmuştur.

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada, Deng ve arkadaşları iki katman halinde yerleştirilen toplam 8 adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile 5 mıknatıstan oluşan çift kutuplu Halbach PMG (3 adet 30 mm × 20 mm ve 2 adet 20 mm × 20 mm) arasındaki manyetik kuvvet ölçümlerinde 6 mm'lik minimum yaklaşma mesafesinde ve FCH=30 mm soğutma yüksekliği için 701 N'luk bir maksimum kaldırma kuvveti gözlediler (Deng vd., 2009). Bizim çalışmamızda daha küçük boyutlarda mıknatıslar (5 adet 20 mm × 20 mm) kullanılarak oluşturulan PMG-H3b dizilimi ile ZFC soğutma şartında ve 5 mm düşey yaklaşma mesafesinde yalnızca bir adet aynı özellikte YBCO süperiletkeni kullanılarak yaklaşık 191 N'luk bir kuvvet değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla Maglev sistemlerinde yük kaldırma kapasitesini arttırmak amacıyla kullanılacak PMG-H3b diziliminin literatüre kıyasla daha verimli olduğu söylenebilir.



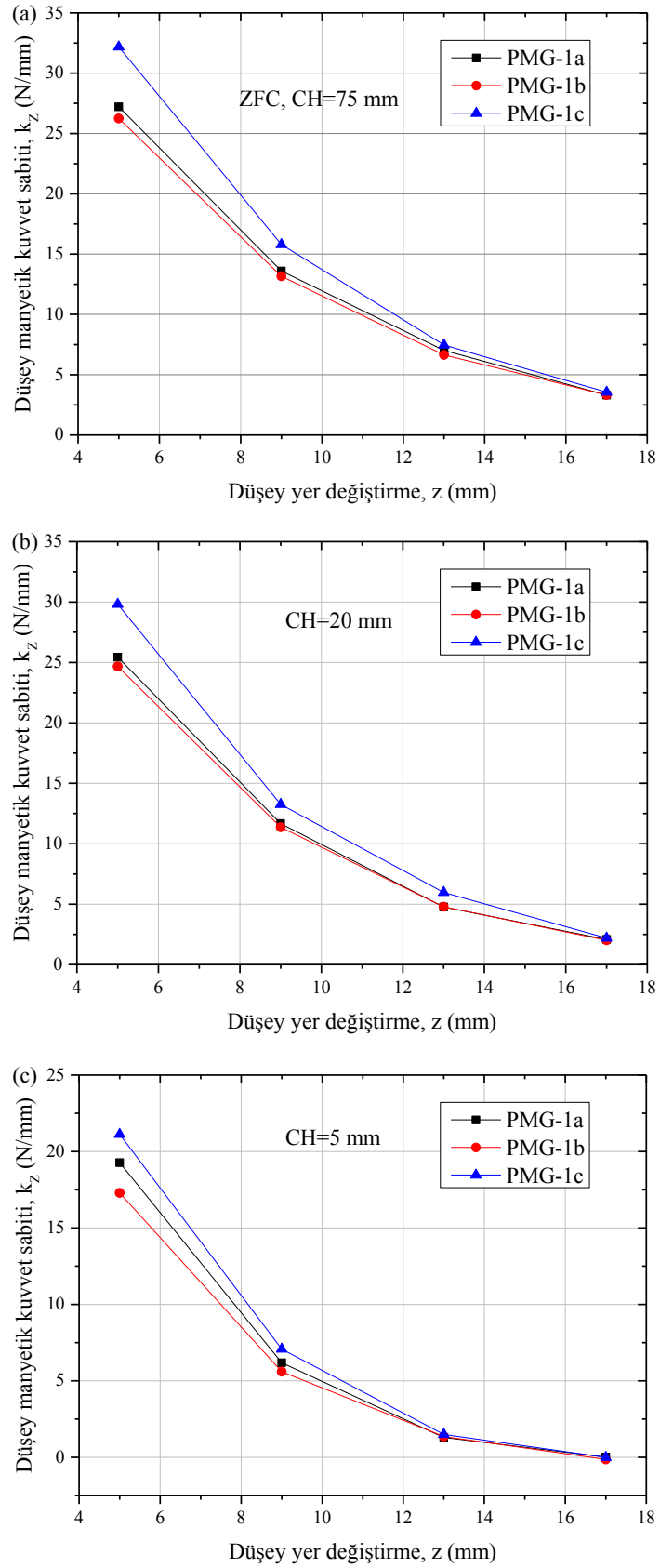
Şekil 3.23. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.4. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Manyetik kuvvet ve manyetik kuvvet sabiti, Maglev sistemleri gibi manyetik kuvvet temelli uygulamaların yük kapasitesini ve kararlılığını değerlendirmede iki önemli parametredir (Deng vd., 2008). Dolayısıyla üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin manyetik kuvvet performansını belirlemek amacıyla düşey manyetik kuvvet verilerinin yanında düşey manyetik kuvvet sabiti verileri de değerlendirilmiştir. Yapılan bu doktora tezi çalışmasında üç çekirdekli YBCO numunelerin bulunduğu süperiletken haznesi ile farklı boyutlarda mıknatıslardan oluşan PMG yolları arasındaki düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ölçümleri, farklı soğutma mesafelerinde ve belirli düşey konumlarda ($z=5$ mm, 9 mm, 13 mm ve 17 mm) incelenmiştir.

Şekil 3.24, farklı soğutma mesafelerinde, YBCO süperiletkenleri ile PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimleri arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, CH=75 mm soğutma mesafesinde (ZFC) 5 mm düşey mesafede maksimum kuvvet sabiti değerleri PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimleri için sırasıyla 27,2 N/mm, 26,2 N/mm ve 32,2 N/mm olarak gözlenmiştir. Burada düşey mesafe, YBCO süperiletkeninin alt yüzeyi ile PMG üst yüzeyi arasındaki düşey aralığı tanımlamaktadır. PMG-1c'nin tüm düşey ölçüm aralıklarında diğer dizilimlerden daha büyük manyetik kuvvet sabiti değerlerine sahip olması, dizilimin her iki yanına ilave edilen aşağı yönlü mıknatısların etkisi ile daha geniş etkin manyetik alan bölgesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

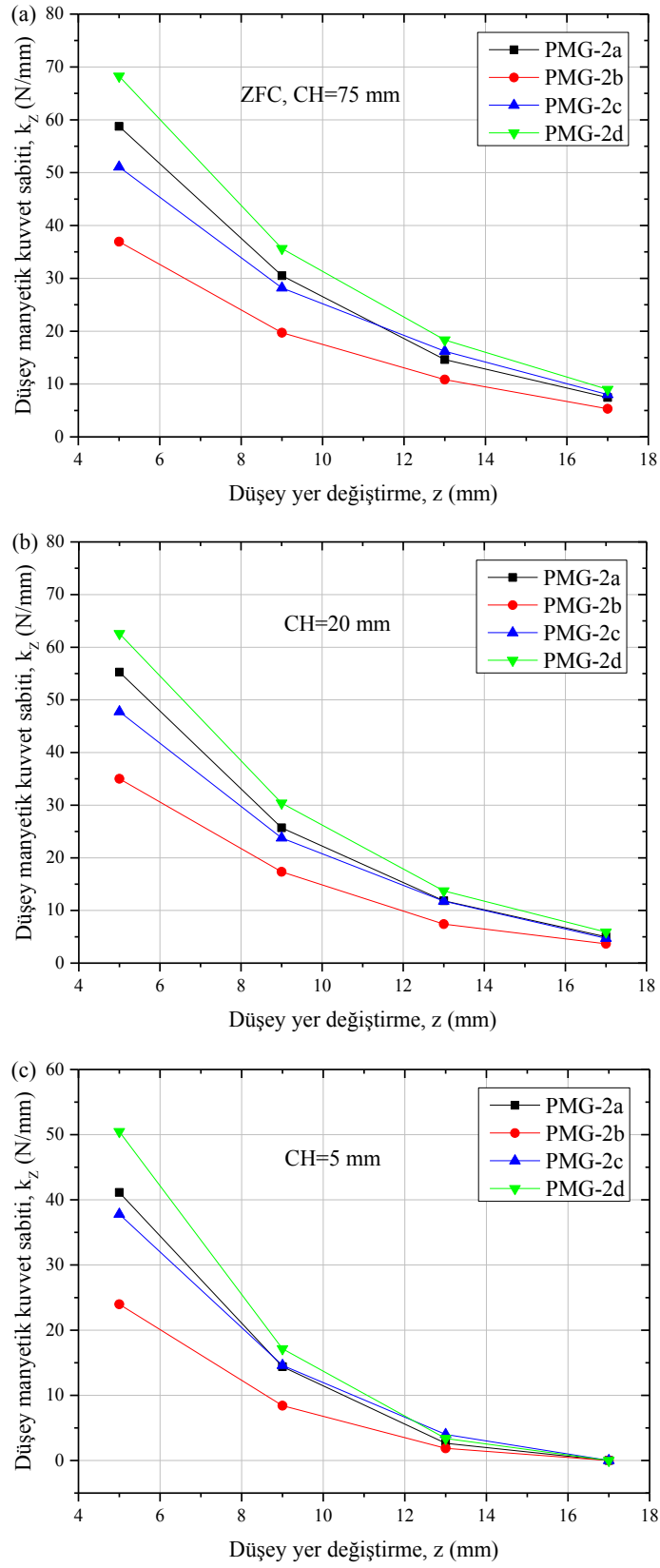
Bilindiği gibi süperiletken ile manyetik alan kaynağı arasındaki düşey manyetik kuvvet, aynı doğrultudaki manyetik akı yoğunluğu bileşeninin gradyenti (dB/dz) ile orantılıdır. Manyetik kuvvet sabiti ise ($k_z = -dF_z/dz$) eşitliği ile verildiğinden düşey ölçüm noktalarındaki ($z=5$ mm, 9 mm, 13 mm ve 17 mm) manyetik kaldırma kuvveti değerleri, ilgili konumdaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerini belirler. Süperiletken ve PMG düşey mesafede birbirlerine yaklaştıkça, manyetik akı gradyenti artar. Düşey manyetik kuvvetin artması ile de bu kuvvetin gradyenti olan manyetik kuvvet sabiti değeri artar. Dolayısıyla farklı dizilimler için tüm soğutma yüksekliklerinde düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri, süperiletken numune ve PMG dizilimi arasındaki düşey mesafe azaldıkça artmaktadır.



şekil 3.24. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.25 YBCO süperiletkenleri ile PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimleri arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını farklı soğutma mesafeleri için göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, $CH=75$ mm soğutma mesafesinde (ZFC) 5 mm düşey mesafede ölçülen maksimum kuvvet sabiti değerleri PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimleri için sırasıyla 58,8 N/mm, 36,9 N/mm, 51,1 N/mm ve 68,3 N/mm olarak gözlenmiştir. Literatürde tek çekirdekli YBCO süperiletkenine ait farklı soğutma şartlarında ölçülen manyetik kuvvet sabiti değerlerine ulaşmak mümkündür. Bu çalışmalar çoğunlukla farklı yükseklik ve çap değerlerinde üretilmiş silindirik tek çekirdekli numunelere aittir. Literatürde 30 mm çaplı ve 15 mm yükseklikli yedi adet YBCO süperiletkeni ile iki kutuplu Halbach PMG arasında 5 mm mesafede 26 N/mm'lik düşey kuvvet sabiti değeri gözlenmiştir (Lu vd., 2011a). Deng ve arkadaşlarının 2008 yılında yaptığı bir çalışmada, soğutma yüksekliği 30 mm olmak üzere çapı 30 mm, yüksekliği 18 mm olan yedi adet YBCO süperiletkeni ile 5 adet mıknatıstan oluşan iki kutuplu Halbach dizilimli PMG arasında ve 10 mm düşey mesafede manyetik kuvvet sabiti yaklaşık 20 N/mm olarak ölçülmüştür (Deng vd., 2008). PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimleri için, iki adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile $CH=20$ mm soğutma mesafesinde 9 mm düşey mesafede ölçülen maksimum kuvvet sabiti değerleri sırasıyla 25,7 N/mm, 17,4 N/mm, 23,8 N/mm ve 30,4 N/mm olarak gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen manyetik kuvvet sabiti değerlerinin literatürde elde edilen değerden genellikle daha büyük olduğu söylenebilir.

PMG-2d'nin ilgili tüm düşey ölçüm aralıklarında diğer dizilimlerden daha büyük manyetik kuvvet sabiti değerlerine sahip olması, daha büyük F_z manyetik kuvvet değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan PMG-2b dizilimi için elde edilen düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri diğer ilgili PMG'ler arasında en düşük olanlarıdır. Bunun sebebi PMG-2b diziliminde mıknatıslar arasındaki boşluğun manyetik akıyı zayıflatarak hem düşey hem de yatay akı yoğunluğu dağılımına olumsuz etkide bulunmasıdır (Şekil 3.8). Aynı dizilimde fakat daha küçük boyutlarda mıknatıslar içeren PMG-2a dizilimi düşey manyetik kuvvet verilerinde olduğu gibi manyetik kuvvet sabiti değerlerinde de PMG-2c diziliminden daha üstündür. Bu iki dizilim için, uzak düşey ölçüm aralıklarında ($z=13$ mm ve 17 mm) kuvvet sabiti değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen $z=5$ mm ve $z=9$ mm'de PMG-2a'nın daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir.



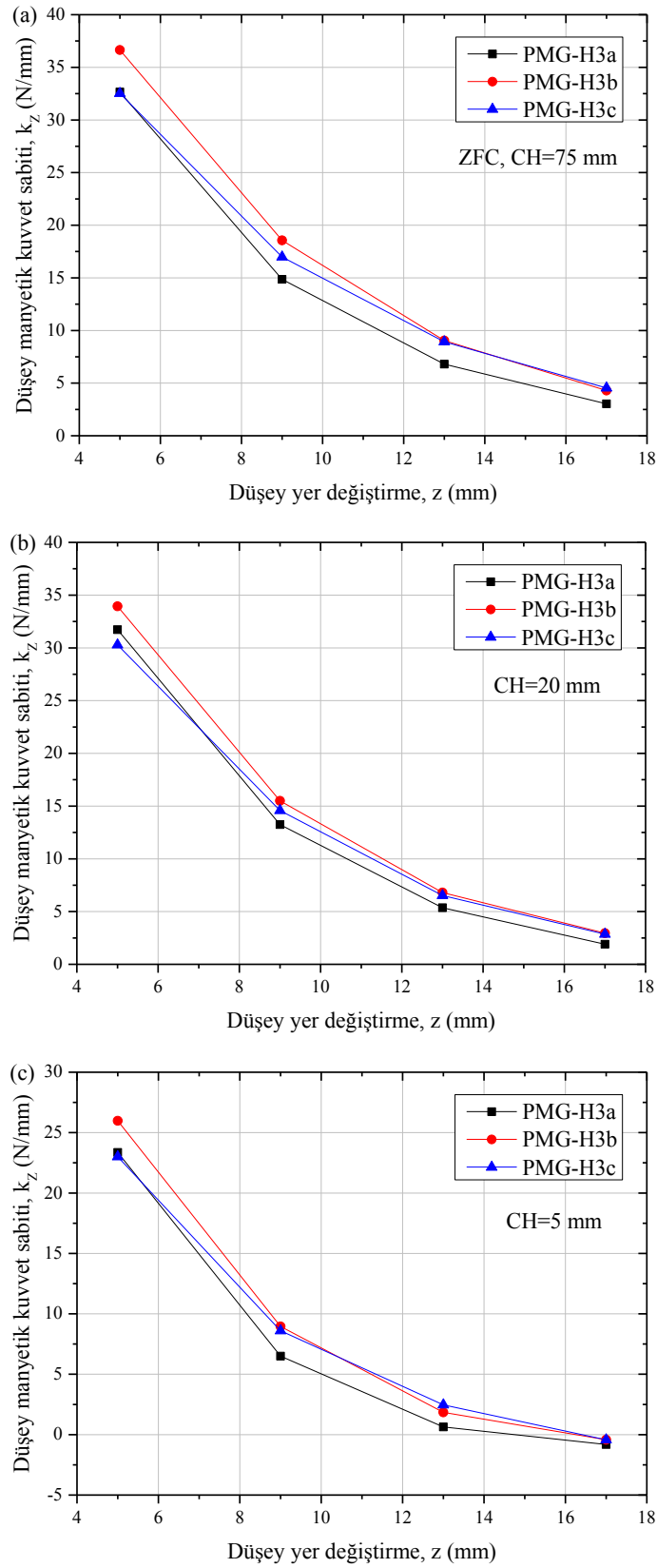
şekil 3.25. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.26'da ise farklı soğutma rejimlerinde (ZFC, CH=20mm, CH=5mm) PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerine ait k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey mesafe ile değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi soğutma mesafeleri arttıkça düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Soğutma mesafelerinin artması ile düşey manyetik kuvvet sabitinde gözlenen artış, numunenin Meissner özelliğinin iyileşmesinden gelmektedir. Numuneye nüfuz eden alanın azalması, süperiletkenlerde daha büyük perdeleme akımlarının oluşup itici manyetik kuvvet değerlerini artmaktadır. Bu durum diyamanyetik etkinin baskın olması ile manyetik kaldırma kuvvetinin ve dolayısıyla manyetik kuvvet sabitinin artmasına yol açmaktadır.

CH=75 mm soğutma mesafesinde (ZFC) ve 5 mm düşey ölçüm mesafesinde elde edilen maksimum kuvvet sabiti değerleri PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimleri için sırasıyla 32,7 N/mm, 36,7 N/mm ve 32,5 N/mm olarak gözlenmiştir. Halbach konfigürasyonundaki bu üç dizilim karşılaştırıldığında tüm mesafelerde en yüksek değerlere sahip PMG-H3b, en iyi düşey kararlılık performansını gösteren dizilimdir.

Minimum yaklaşma mesafesindeki ($z=5$ mm) değerlere bakıldığında PMG-H3a dizilimine ait farklı soğutma mesafelerindeki değerler en düşük olmasına rağmen, bu düşey yükseklikte PMG-H3c dizilimi kadar iyi bir kararlılık göstermektedir. Bu durum PMG-H3a dizilimine ait manyetik kaldırma kuvveti verilerinin diğer dizilimlere kıyasla daha küçük bir aralıktaki ani artışıyla açıklanabilir (Şekil 3.20). Manyetik kuvvet sabiti değerleri manyetik kuvvetin ilgili mesafedeki türevine eşit olduğundan, minimum yaklaşma mesafesine daha yakın bu ani artış kuvvet sabiti değerinin de büyük olmasına neden olmaktadır.

Bunun yanı sıra şuna kadar yapılan çalışmalar arasında, üç çekirdekli YBCO süperiletkenine ait düşey manyetik kaldırma kuvveti (levitation force) ve yatay manyetik kılavuzlama kuvveti (guidance force) ölçümlerine sahip çalışmalara rastlandıysa da, manyetik kuvvet sabiti ölçümlerini içeren herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu tez çalışmasında kullanılan üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin manyetik kuvvet sabiti performansı, farklı soğutma şartları altında ve farklı PMG dizilimleri için incelenerek elde edilen verilerin literatüre kazandırıldığı düşünülmektedir.

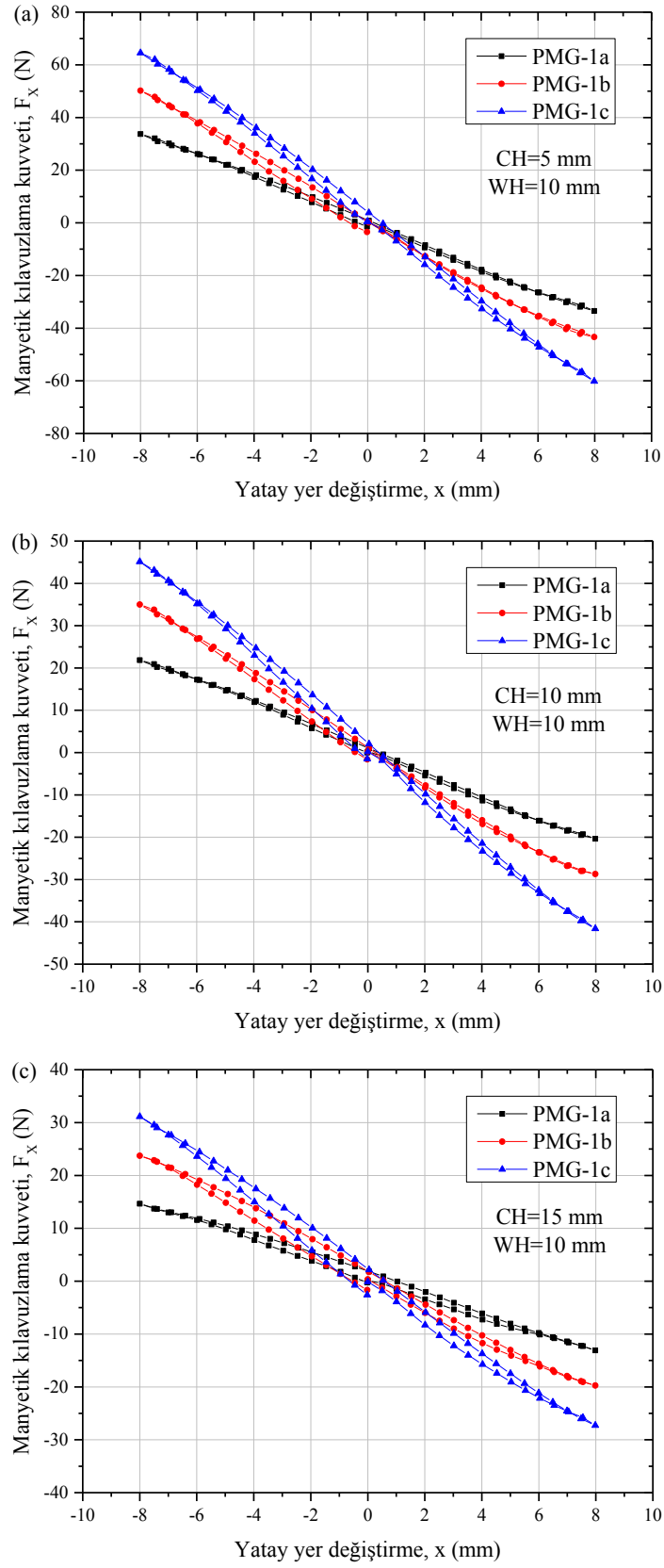


şekil 3.26. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma mesafelerinde k_z manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

3.5. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Yatay Manyetik Kılavuzlama Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Yatay manyetik kuvvet Maglev sistemleri için önemli parametrelerden birisidir. Yatay manyetik kılavuzlama kuvvetinin büyüklüğü, büyük ölçekli uygulamalarda sistemin manyetik olarak kararlı durumda olmasına yardımcı olur. Dolayısıyla farklı mıknatis konfigürasyonlarıyla manyetik alan dağılımı iyileştirilmesi ile ilgili bu tez çalışmasında, PMG dizilimleri ile üç çekirdekli YBCO kristalleri için uygun kılavuzlama kuvveti değerleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle farklı PMG dizilimlerine ait kılavuzlama kuvveti ölçümleri CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde ve WH=10 mm çalışma yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.27’de PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin farklı soğutma mesafelerindeki manyetik kılavuzlama kuvvetleri yatay yer değiştirmeye bağlı olarak verilmiştir. CH=5 mm için gözlenen maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c için sırasıyla 33,7 N, 50,2 N ve 64,5 N’dir. Bilindiği gibi $F_x = \int J_y B_z dv$ eşitliğine göre manyetik kılavuzlama kuvveti B_z ile orantılıdır (Deng vd., 2013) ve bu eşitlikte F_x yatay yöndeki manyetik kılavuzlama kuvvetini, J_y perdeleme akımını ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. PMG-1c’nin PMG-1a ve PMG-1b’den daha büyük B_z pik değerlerine sahip olması (Şekil 3.7), bu dizilimle elde edilen F_x değerlerinin de büyük olmasını sağlamaktadır. Ayrıca Şekil 3.27’den görüldüğü gibi CH azaldıkça F_x artmaktadır. Bu durum CH azaldıkça numuneye nüfuz eden manyetik alan çizgilerinin miktarının artmasından ve dolayısıyla süperiletken malzemede daha fazla manyetik alan tuzaklanmasından kaynaklanmaktadır (Deng vd., 2011).

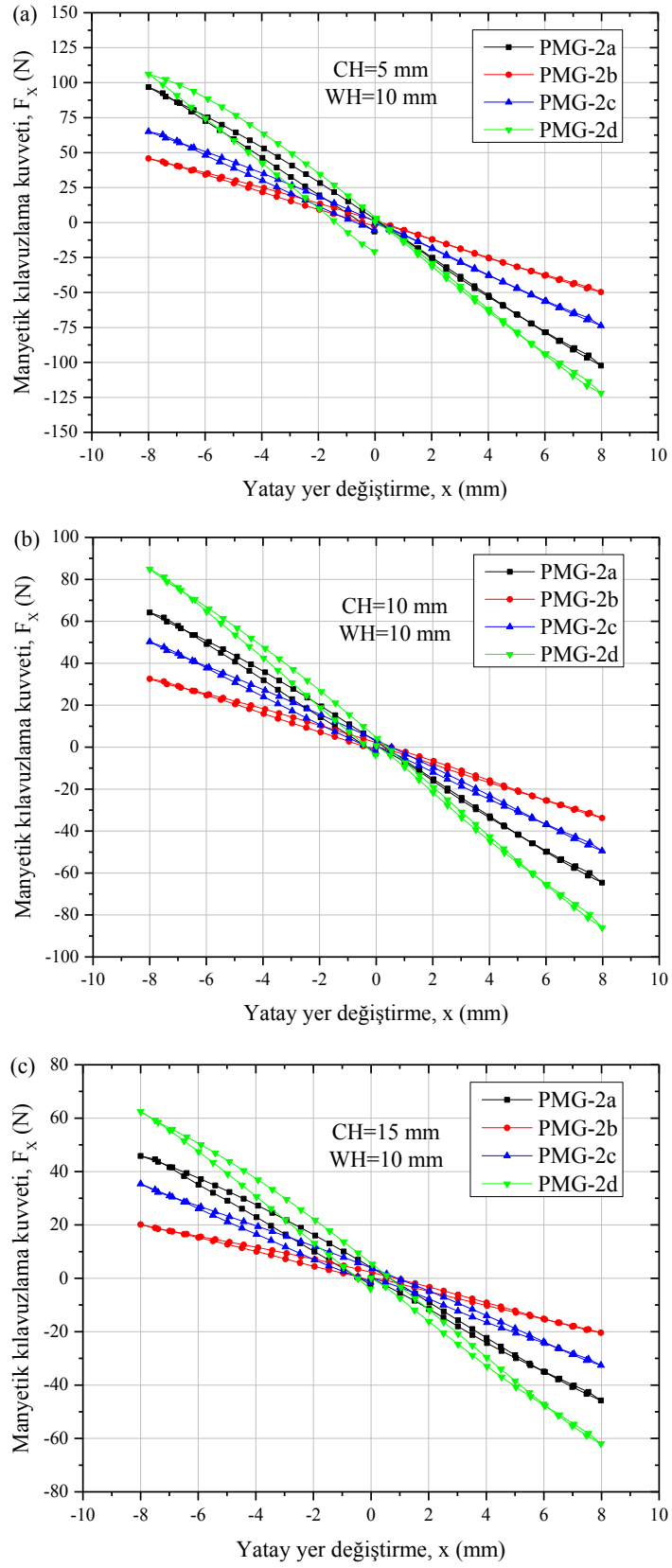
Song ve arkadaşları yaptıkları bir deneysel çalışmada, yatay doğrultuda zıt kutuplu iki mıknatisla oluşturulan 90 mm × 60 mm boyutlarında ve 5400 mm² yüzey alanlı PMG ve 90 mm × 36 mm × 15 mm boyutlu ve üç çekirdekli YBCO süperiletkeni kullanarak manyetik kuvvet ölçümleri yaptılar. Bu çalışmalarında soğutma ve çalışma yüksekliği 20 mm için süperiletkenin ±20 mm yatay hareketine karşı 56 N’luk bir maksimum kılavuzlama kuvveti gözlediler (Song vd., 2004). Bizim çalışmamızda PMG-1c dizilimi ile yakın şartlar altında, soğutma ve çalışma yüksekliği 15 mm için süperiletkenin ±8 mm yatay hareketine karşı 31 N’luk maksimum kılavuzlama kuvveti değeri elde edilmiştir. Çalışmamızda oluşturulan PMG-1c diziliminin yüzey alanı 40 mm × 100 mm (4000 mm²) daha düşük ve daha küçük boyutlarda (65 mm × 34 mm × 14 mm) üç çekirdekli YBCO kullanıldığı düşünülürse, PMG-1c diziliminin literatürle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



şekil 3.27. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) $CH=5$ mm, (b) $CH=10$ mm ve (c) $CH=15$ mm soğutma mesafeleri için yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.28 PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin farklı CH'lardaki manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin yatay yer değiştirmeye bağlı karşılaştırmasını göstermektedir. PMG-2b için CH=5 mm'de gözlenen maksimum kılavuzlama kuvveti 49,7 N olup bu değer PMG-2c, PMG-2a ve PMG-2d dizilimleri için sırasıyla 73,7 N, 102,3 N ve 121,9 N'a arttığı gözlenmiştir. Tüm soğutma yüksekliklerinde yapılan ölçümlerde PMG-2b diziliminin kılavuzlama kuvveti en düşük değerlere sahiptir. Benzer dizilimlere sahip PMG-2a ve PMG-2b dizilimleri karşılaştırıldığında, CH=5 mm için PMG-2b'nin PMG-2a'ya göre kaldırma kuvvetinde % 41 ve kılavuzlama kuvvetinde ise % 51 oranında azalma gösterdiği belirlenmiştir. Kılavuzlama kuvvetindeki daha yüksek azalma oranı, PMG-2b'nin mıknatısları arasındaki boşluğun kılavuzlama kuvvetini, düşey yöndeki kaldırma kuvvetine oranla daha yüksek oranda zayıflattığını gösterir. Bu durum yüksek manyetik kılavuzlama kuvveti elde etmek için küçük mesafelerde akı gradiyentinin büyük olmasının gerekliliğine işaret eder. Ayrıca manyetik kılavuzlama kuvvetinin süperiletken numunede tuzaklanan alana bağlı olduğu bilinmektedir. Kullanılan farklı PMG dizilimleri ile süperiletkende tuzaklanan alan, mıknatısların dizilimdeki konumlarına bağlı olarak önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir (Song vd., 2004). Şekil 3.8'de görülen B_z manyetik akı yoğunluğuna göre daha büyük pik değerlerine sahip PMG-2c'nin daha iyi yatay kılavuzlama kuvveti performansı göstermesi beklenmektedir. Fakat aynı dizilime ve daha küçük boyutlarda mıknatıslara sahip PMG-2a için daha büyük kılavuzlama kuvveti değerleri elde edilmiştir. Bu durum, PMG-2c dizilimine kıyasla PMG-2a ve PMG-2d dizilimleri ile numunelerde tuzaklanan alanın ve birim mesafedeki dış manyetik akı gradiyentinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.8 incelendiğinde PMG-2d'nin, iki adet PMG-1c'nin kombinasyonu ile oluşturulduğu düşünülebilir. PMG-2d'nin PMG-2 serisinde maksimum kaldırma ve kılavuzlama kuvveti göstermesi, PMG-1 serisinde yanlara konulan aşağı yönlü mıknatısların akı biçimlendirmedeki olumlu rolüne işaret eder.

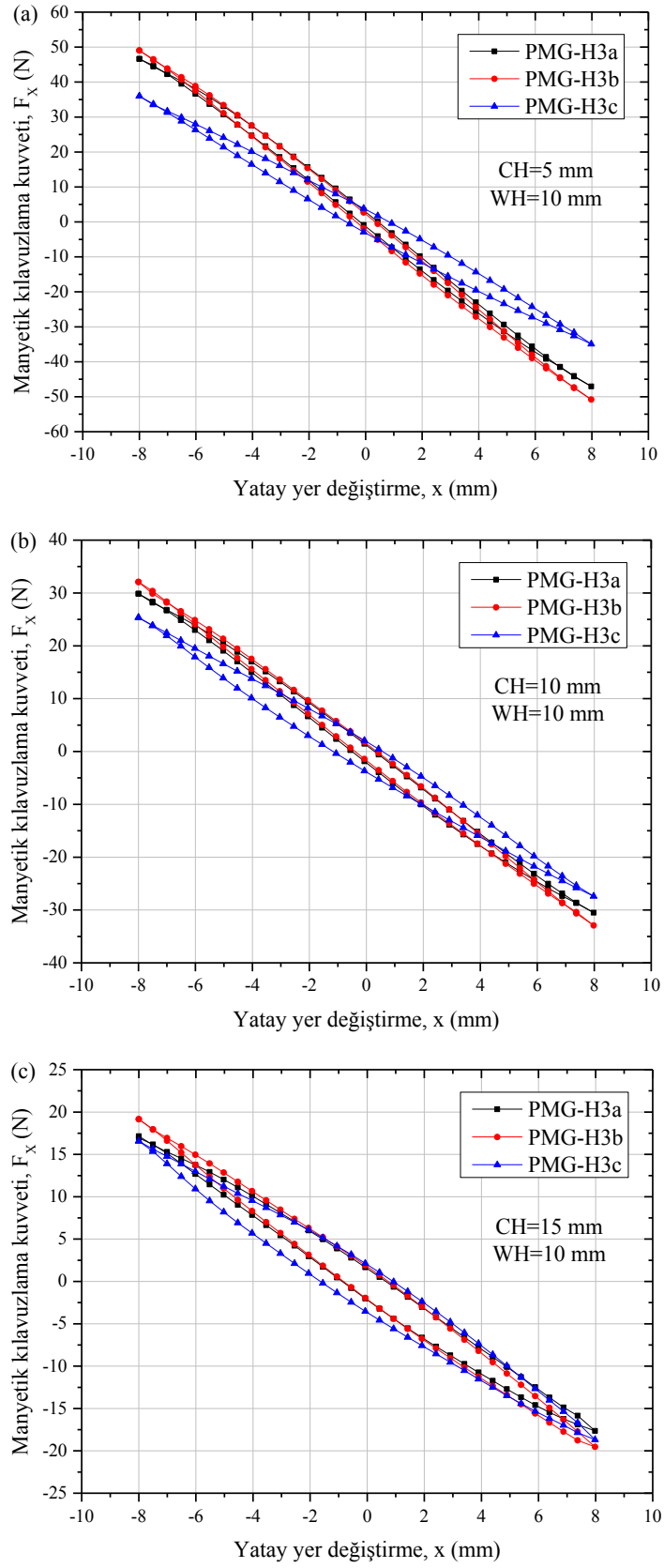
Deng ve arkadaşları, kesit alanı 3000 mm^2 olan 5 mıknatıslı Halbach PMG ve bu tez çalışmasında incelenen üç çekirdekli YBCO süperiletkeniyle aynı özelliklerde 4 adet numune kullanılarak yaptıkları deneysel çalışmada, CH=30 mm ve WH=15 mm için YBCO numunelerin $\pm 5 \text{ mm}$ yatay hareketine karşı 109 N'luk bir maksimum kılavuzlama kuvveti gözlediler (Deng vd., 2013). Aynı şartlar altında fakat tek bir numune ile de 20 N'luk maksimum kılavuzlama kuvveti gözlediler. Bizim çalışmamızda 2800 mm^2 kesit alanına sahip PMG-2a ile CH=15 mm ve WH=10 mm için süperiletkenin $\pm 8 \text{ mm}$ yatay hareketine karşı 46 N'luk maksimum kılavuzlama kuvveti değeri gözlenmiştir.



şekil 3.28. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d için (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.29’da PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin farklı soğutma mesafelerinde manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin yatay yer değiştirmeye bağlı karşılaştırması verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi $CH=5$ mm soğutma yüksekliğinde PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimlerinin ile gözlenen maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri sırasıyla 47,0 N, 50,8 N ve 36,0 N’dur. Benzer şekilde aynı dizilimler ile $CH=10$ mm için sırasıyla 30,5 N, 32,9 N ve 27,4 N ve $CH=15$ mm içinse 17,6 N, 19,5 N ve 18,7 N maksimum kılavuzlama kuvveti gözlenmiştir. Yapılan ölçümlerde tüm soğutma yükseklikleri için ($CH=5$ mm, 10 mm ve 15 mm) PMG-H3b diziliminin manyetik kılavuzlama kuvvetinin en büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi PMG-H3b’nin manyetik alan pik pozisyonlarının üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin konumlarının uyumu ile açıklanabilir. Aynı zamanda şekilden görüldüğü gibi soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvveti artmaktadır. Ayrıca tüm dizilimler için soğutma yüksekliğinin artmasıyla grafiklerde gözlenen histerisizin de arttığı gözlenmiştir. $CH=15$ mm gibi yüksek soğutma mesafesinde histeresizin genişliğinin artması bu mesafede tuzaklanan düşük akı yoğunluğuyla beraber Meissner etkisinin baskın olduğunu gösterir.

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada, Deng ve arkadaşları iki katman halinde yerleştirilen toplam 8 adet üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile 5 mıknatıstan (3 adet 30 mm \times 20 mm ve 2 adet 20 mm \times 20 mm) oluşan çift kutuplu Halbach PMG arasındaki manyetik kuvvet ölçümlerinde 15 mm’lik çalışma yüksekliğinde (WH) ve $FCH=30$ mm soğutma mesafesinde süperiletkenin ± 10 mm yatay hareketi için 102 N’luk bir maksimum kılavuzlama kuvveti gözlediler (Deng vd., 2009). Bizim çalışmamızda daha küçük boyutlarda 5 mıknatıs (20 mm \times 20 mm) ve sadece bir adet üç çekirdekli YBCO kullanılarak benzer şartlar altında, 15 mm’lik soğutma ($CH=15$ mm) ve çalışma yüksekliği ($WH=10$ mm) için süperiletkenin ± 8 mm yatay hareketine karşı 20 N’luk maksimum kılavuzlama kuvveti değeri gözlenmiştir. Dolayısıyla Maglev sistemlerinde yatay kararlılığı belirleyen kılavuzlama kuvvetini arttırmak amacıyla kullanılacak PMG-H3b diziliminin tek numune ile oluşturulduğu düşünüldüğünde literatüre kıyasla özellikle maliyet açısından çok daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.



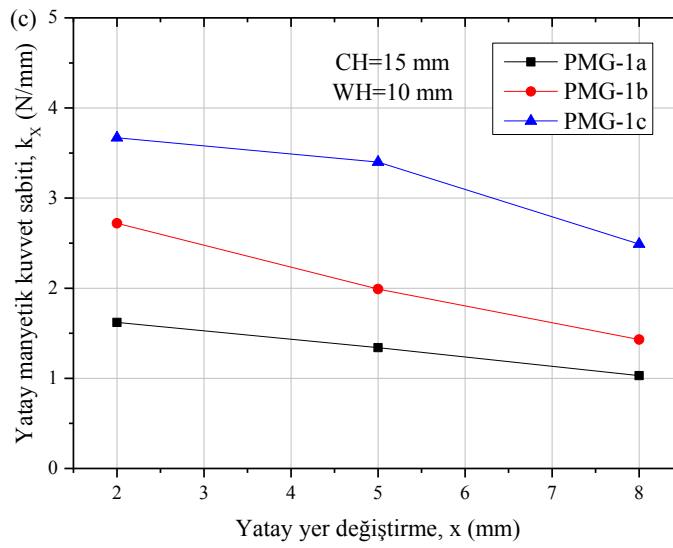
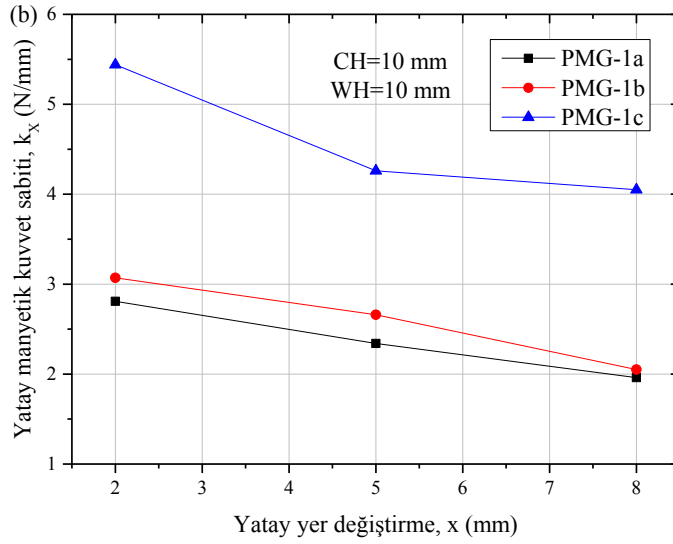
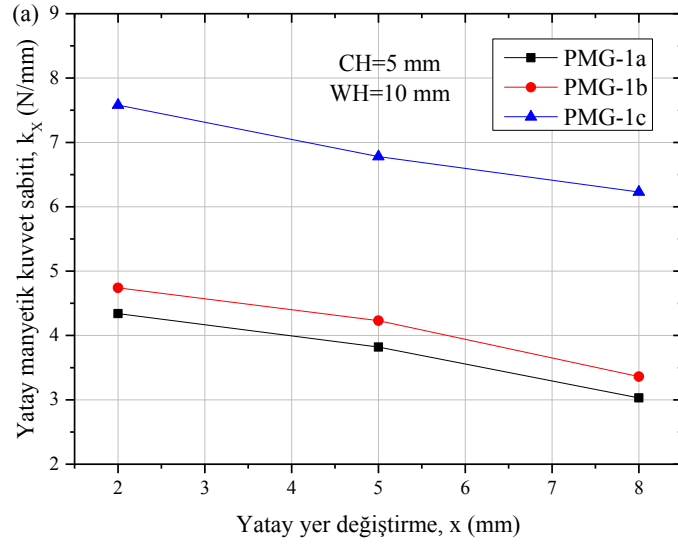
Şekil 3.29. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizimlerinin (a) $CH=5$ mm, b) $CH=10$ mm ve (c) $CH=15$ mm soğutma mesafeleri için yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.6. Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeni Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Şekil 3.30, farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm, CH=10 mm, CH=15 mm) ve sabit 10 mm düşey çalışma yüksekliğinde (WH=10 mm), PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimleri ile üç çekirdekli YBCO süperiletkeni arasında oluşan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığını göstermektedir. Burada yatay mesafe, süperiletken numune merkezi ile akı yoğunlaştırıcı PM merkezi arasındaki yatay mesafeyi tanımlamaktadır. PMG-1a dizilimi ile gözlenen maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 4,3 N/mm, 3,8 N/mm ve 3,0 N/mm'dir. PMG-1b dizilimi ile gözlenen maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 4,7 N/mm, 4,2 N/mm ve 3,4 N/mm'dir. PMG-1c dizilimi ile gözlenen maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri 5, 10 ve 15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 7,6 N/mm, 6,8 N/mm ve 6,2 N/mm olarak ölçülmüştür.

Bilindiği gibi, yanal kılavuzlama kuvvetini etkileyen en önemli parametre, numune içerisinde tuzaklanan manyetik akıdır. PMG-1c dizilimi ilave mıknatıslar ile oluşturduğu daha büyük ortalama manyetik akı yoğunluğundan (Şekil 3.7) dolayı yatay manyetik kuvvet verilerinde olduğu gibi yatay manyetik kuvvet sabiti verilerinde de maksimum değerlere sahiptir. Ayrıca PMG-1c kılavuzlama yolunda her iki kenara yerleştirilen 20 mm genişliğindeki ilave mıknatısların, yanal manyetik akı gradyentini artırdığı ve böylece bu PMG'nin daha büyük yanal manyetik kuvvet sabiti değerine sahip olduğu düşünülmektedir.

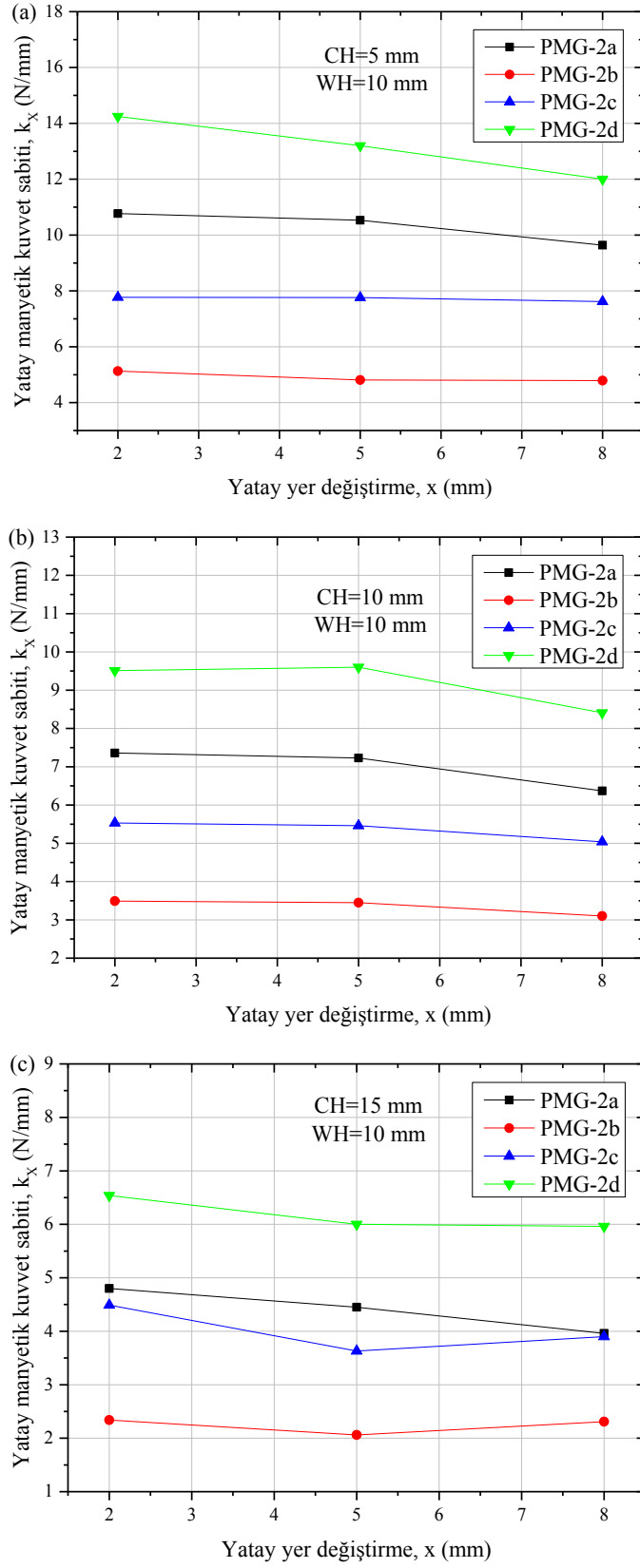
Tüm soğutma yükseklikleri ve her üç PMG dizilimi için yatay mesafe arttıkça yatay manyetik kuvvet sabitinde yavaş bir şekilde azalma söz konusudur. Fakat mesafeye bağlı bu değişimlerin düşey manyetik kuvvet sabiti değişimlerine göre çok küçük olduğu fark edilmektedir. Bu durum, düşey manyetik kaldırma kuvvet eğrileri yaklaşık eksponansiyel bir değişim gösterirken yanal manyetik kuvvetin yatay mesafe ile yaklaşık olarak lineer bir değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi manyetik sertlik, manyetik kuvvetin birim konumdaki değişimi olup ($k_x = -dF_x/dx$) eşitliği ile verilmektedir (Moon, 2004). Yaklaşık eksponansiyel bir eğrinin birim pozisyon değişimlerinde eğim değerleri yüksek iken yaklaşık lineer değişim gösteren durumda ise eğimler birbirine yakın olur.



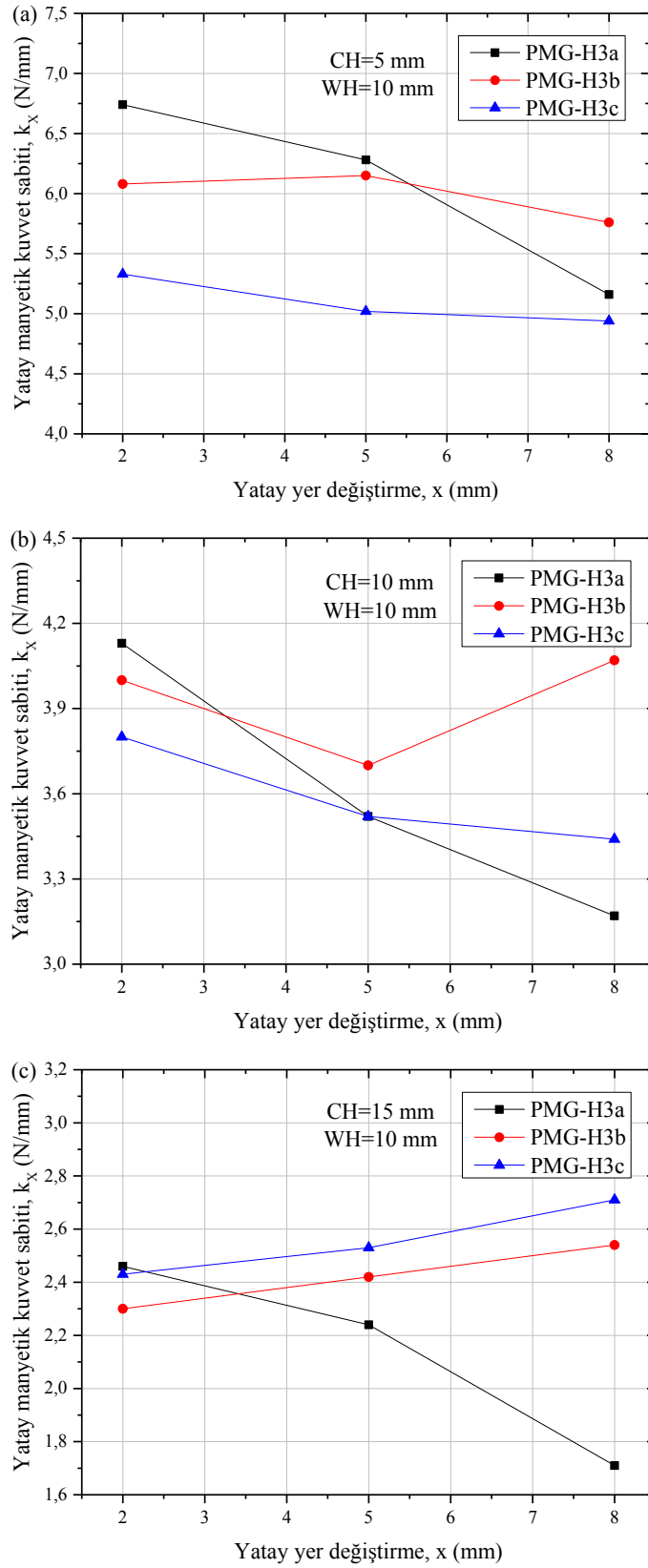
şekil 3.30. PMG-1a, PMG-1b ve PMG-1c dizilimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.31, farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm, CH=10 mm, CH=15 mm) ve sabit 10 mm düşey çalışma yüksekliğinde (WH=10 mm), PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimleri ile ölçülen k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay mesafeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, CH=5 mm soğutma mesafesinde 2 mm yatay yer değiştirmeye karşı maksimum kuvvet sabiti değerleri PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimleri için sırasıyla 10,8 N/mm, 5,1 N/mm, 7,8 N/mm ve 14,3 N/mm olarak ölçülmüştür. Düşük soğutma yüksekliklerinde YBCO numunelerde tuzaklanan manyetik akının daha fazla olması nedeniyle, tüm PMG dizilimleri için soğutma yüksekliği azaldıkça manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Ayrıca genel olarak yanal mesafe arttıkça manyetik kuvvet sabiti değerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 3.32, CH=5 mm, 10 mm ve 15 mm soğutma yüksekliklerinde ve WH=10 mm düşey çalışma yüksekliğinde PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizilimleri ile ölçülen k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Tüm soğutma yüksekliklerinde ve 2 mm yatay ölçüm mesafesinde PMG-H3a diziliminin Şekil 3.9'da verilen dağılımlara göre akı gradyentinin fazla olması ile numunede daha fazla alan tuzaklayarak daha büyük kuvvet sabiti değerlerine sahip olmasına sebep olmaktadır. Daha uzak yatay ölçüm mesafelerinde ise soğutma yüksekliği arttıkça tuzaklanan alan azaldığından diğer dizilimler ile daha yüksek yatay kuvvet sabiti değerleri elde edilmiştir.



şekil 3.31. PMG-2a, PMG-2b, PMG-2c ve PMG-2d dizilimlerinin (a) $CH=5\text{ mm}$, (b) $CH=10\text{ mm}$ ve (c) $CH=15\text{ mm}$ soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması



şekil 3.32. PMG-H3a, PMG-H3b ve PMG-H3c dizimlerinin (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma mesafelerinde k_x manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

3.7. İncelenen PMG-Üç Çekirdekli YBCO Dizilimlerinin Verimlilik Analizi

Maglev sistemlerinin yük taşıma kapasitesinin ve yanal kararlılığının istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin arttırılarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirirken maliyeti ise olabildiğince düşük tutmak büyük bir önem teşkil eder. Yürütülen bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan PMG dizilimlerinin verimlilik analizleri Maglev araçlarının teknolojik uygulanabilirliği için değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1 PMG dizilimlerinin maksimum manyetik kaldırma kuvveti, maliyet ve verimlilik analizini içermektedir. Tabloda A_{PMG} , PMG diziliminin kesit alanını (x - z düzleminde); $(F_z)_{mak}$, maksimum manyetik kaldırma kuvvetini; maliyet ise PMG ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin toplam fiyatını belirtmektedir. PMG kesit alanının artırılmasıyla sistemde elde edilecek olan kuvvetin genelde artacağı açıktır. Bu nedenle PMG dizilimleri arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için maksimum kuvvet değerlerinin PMG kesit alanına bölünmesinin uygun olacağı düşünüldü. İncelenen PMG dizilimlerinin verimliliği, maksimum kuvvetin PMG kesit alanına, maliyete ve kesit alanı kere maliyete bölünmesi ile üç farklı şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 3.1'den görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG-2d dizilimi en büyük, PMG-1a dizilimi ise en küçük düşey manyetik kaldırma kuvveti değerlerine sahiptir. Maglev sistemlerinde ilave mıknatıslarla PMG kesit alanının arttırılması, manyetik kaldırma kuvvetinin de artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle optimum kesit alanı ve daha düşük maliyet ile elde edilecek büyük manyetik kaldırma kuvveti istenen bir durumdur. PMG-1a ve PMG-2a dizilimleri tüm soğutma yüksekliklerinde en büyük $(F_z)_{mak}/A_{PMG}$ değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Maliyet başına maksimum kaldırma kuvveti değerlerine bakıldığında da tüm soğutma yüksekliklerinde PMG-H3b ve PMG-2d dizilimlerinin ön plana çıktıkları görülmektedir. Tablo 3.1'deki verilerden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde maliyet kere kesit alanı başına maksimum manyetik kaldırma kuvveti $((F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet}))$ değerine sahip olan dizilim PMG-1a'dır. Tablo 3.1 genel olarak yorumlandığında üç çekirdekli YBCO süperiletkenlerinden oluşan gerçek boyutlu Maglev uygulamalarında, yüksek maliyet gerektiren manyetik ray olarak PMG-1a'nın, ani frenleme ve yüklemenin gerekli olduğu Maglev duraklarında ise PMG-2d veya PMG-H3b yolları kullanımının uygun olacağı düşünülebilir.

Tablo 3.1. İncelenen PMG dizilimleri için maliyet ve düşey manyetik kaldırma kuvveti verimlilik analizi

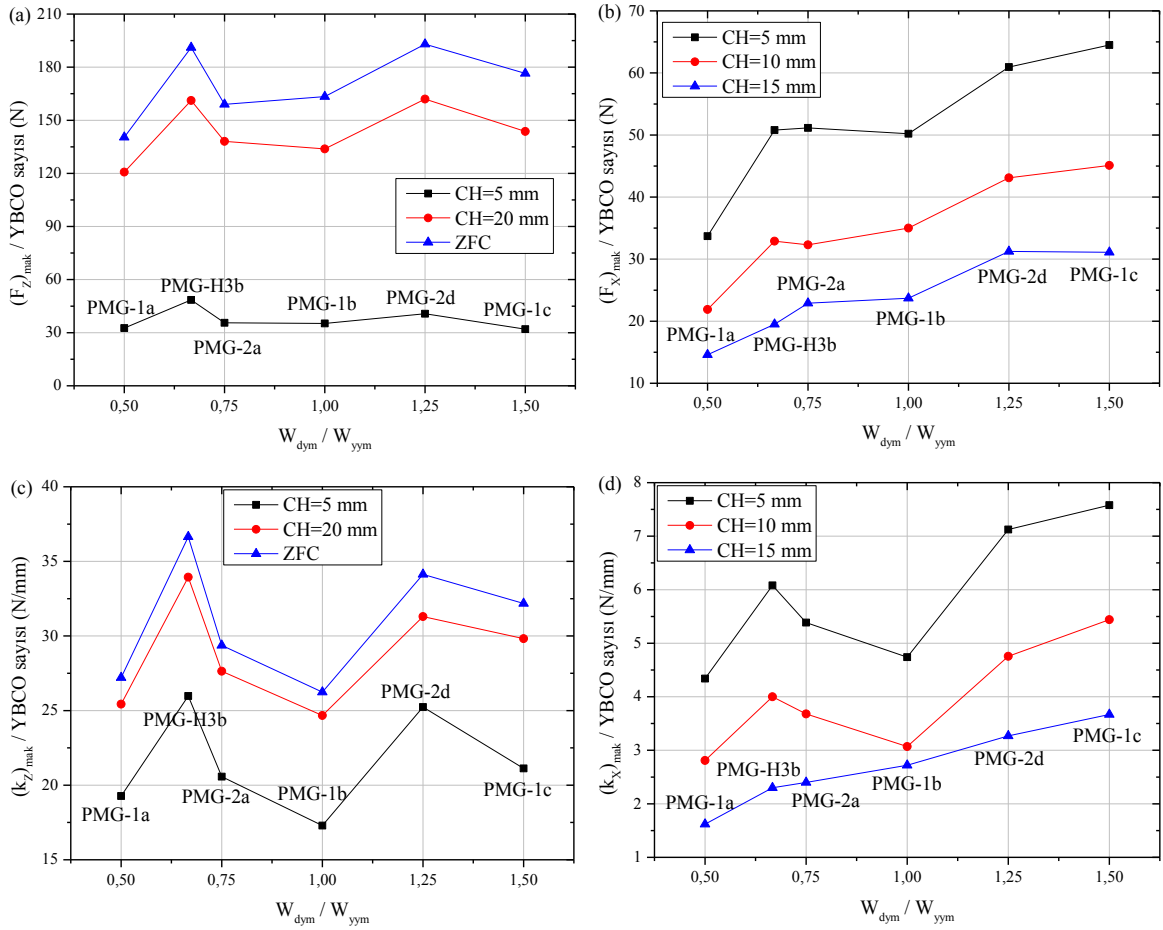
	PMG-1a	PMG-1b	PMG-1c	PMG-2a	PMG-2b	PMG-2c	PMG-2d	PMG-H3a	PMG-H3b	PMG-H3c
A_{PMG} (m ²)	0,0012	0,0016	0,0020	0,0028	0,0028	0,0048	0,0036	0,0016	0,0020	0,0035
Maliyet (PMG+YBCO) (USD)	616,9	639,2	661,5	1256,1	1256,1	1332,5	1300,7	644,5	661,5	718,8
$(F_z)_{mak, CH=5 mm}$ (N)	32,6	35,2	32,0	71,2	41,9	81,2	81,4	39,8	48,5	41,6
$(F_z)_{mak, CH=20 mm}$ (N)	120,7	133,8	143,7	276,2	183,1	271,7	324,0	140,9	161,2	143,2
$(F_z)_{mak, ZFC}$ (N)	140,4	163,4	176,5	318,0	238,9	322,3	386,0	158,4	191,1	170,4
$(F_z)_{mak}/A_{PMG, CH=5 mm}$ (N/m ²)	27167	22000	16000	25429	14964	16917	22611	24875	24250	11886
$(F_z)_{mak}/A_{PMG, CH=20 mm}$ (N/m ²)	100583	83625	71850	98643	65393	56604	90000	88063	80600	40914
$(F_z)_{mak}/A_{PMG, ZFC}$ (N/m ²)	117000	102125	88250	113571	85321	67146	107222	99000	95550	48686
$(F_z)_{mak}/Maliyet, CH=5 mm$ (N/USD)	0,0528	0,0551	0,0484	0,0567	0,0334	0,0609	0,0626	0,0618	0,0733	0,0579
$(F_z)_{mak}/Maliyet, CH=20 mm$ (N/USD)	0,1957	0,2093	0,2172	0,2199	0,1458	0,2039	0,2491	0,2186	0,2437	0,1992
$(F_z)_{mak}/Maliyet, ZFC$ (N/USD)	0,2276	0,2556	0,2668	0,2532	0,1902	0,2419	0,2968	0,2458	0,2889	0,2371
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet), CH=5 mm$ (N/m ² ×USD)	44,0	34,4	24,2	20,2	11,9	12,7	17,4	38,6	36,7	16,5
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet), CH=20 mm$ (N/m ² ×USD)	163,0	130,8	108,6	78,5	52,1	42,5	69,2	136,6	121,8	56,9
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet), ZFC$ (N/m ² ×USD)	189,7	159,8	133,4	90,4	67,9	50,4	82,4	153,6	144,4	67,7

Manyetik kılavuzlama kuvveti pratik Maglev uygulamaları için taşıma kapasitesi kadar önemli bir parametredir. Geleneksel Maglev sistemlerinde PMG ile süperiletken numune arasındaki manyetik kaldırma kuvveti artırılırken, sistemin kararlı bir biçimde hareket edebilmesi için kılavuzlama kuvveti değerleri de yeterli bir düzeyde olması gerekmektedir. Tablo 3.2 bu tez çalışmasında incelenen PMG dizilimlerinin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti, maliyet ve verimlilik analizini içermektedir. A_{PMG} , PMG diziliminin kesit alanını (x - z düzleminde); $(F_x)_{mak}$, maksimum manyetik kılavuzlama kuvvetini; maliyet ise PMG ve YBCO'ların toplam fiyatını belirtmektedir. PMG dizilimlerinin verimliliği, maksimum kuvvetin PMG kesit alanına, maliyete ve kesit alanı kere maliyete bölünmesi ile üç farklı şekilde hesaplanmıştır. Tablo 3,2'den görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG-2d dizilimi en büyük manyetik kılavuzlama kuvveti değerlerine sahiptir. Bununla birlikte PMG-2a tüm soğutma yüksekliklerinde ikinci büyük kılavuzlama kuvveti değerlerine sahip dizilimdir. PMG-2a ve PMG-2d dizilimleri tüm CH'lerde yüksek $(F_x)_{mak}/A_{PMG}$ değerlerine sahiptirler. Maliyet başına maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri için tüm CH'lerde PMG-1c ve PMG-2d dizilimleri en büyük iki $(F_z)_{mak}/(\text{Maliyet})$ değerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Tablo 3,2'den görüldüğü gibi maliyetle birlikte kesit alanı dikkat alındığında PMG-1c ve PMG-1b dizilimleri öne çıkmaktadır. Sonuç olarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 birlikte düşünüldüğünde Maglev sistemlerinin taşıma kapasitesinin daha verimli olması ve aynı zamanda yanal kararlılığın da düşük maliyetle sağlanabilmesi için PMG-1a, PMG-1c ve PMG-2d dizilimlerinin amaca göre uygun yerlerde kullanımının doğru olacağı düşünülmektedir.

Tablo 3.2. İncelenen PMG dizilimleri için maliyet ve yatay manyetik kılavuzlama kuvveti verimlilik analizi

	PMG-1a	PMG-1b	PMG-1c	PMG-2a	PMG-2b	PMG-2c	PMG-2d	PMG-H3a	PMG-H3b	PMG-H3c
A_{PMG} (m ²)	0,0012	0,0016	0,0020	0,0028	0,0028	0,0048	0,0036	0,0016	0,0020	0,0035
Maliyet (PMG+YBCO) (USD)	616,9	639,2	661,5	1256,1	1256,1	1332,5	1300,7	644,5	661,5	718,8
$(F_x)_{mak}$, CH=5 mm (N)	33,7	50,2	64,5	102,3	49,7	73,7	121,9	47,0	50,8	36,0
$(F_x)_{mak}$, CH=10 mm (N)	21,9	35,0	45,1	64,6	33,8	50,2	86,2	30,5	32,9	27,4
$(F_x)_{mak}$, CH=15 mm (N)	14,6	23,7	31,1	45,8	20,4	35,4	62,5	17,6	19,5	18,7
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=5 mm (N/m ²)	28083	31375	32250	36536	17750	15354	33861	29375	25400	10286
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=10 mm (N/m ²)	18250	21875	22550	23071	12071	10458	23944	19063	16450	7829
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=15 mm (N/m ²)	12167	14813	15550	16357	7286	7375	17361	11000	9750	5343
$(F_x)_{mak}/Maliyet$, CH=5 mm (N/USD)	0,0546	0,0785	0,0975	0,0814	0,0396	0,0553	0,0937	0,0729	0,0768	0,0501
$(F_x)_{mak}/Maliyet$, CH=10 mm (N/USD)	0,0355	0,0548	0,0682	0,0514	0,0269	0,0377	0,0663	0,0473	0,0497	0,0381
$(F_x)_{mak}/Maliyet$, CH=15 mm (N/USD)	0,0237	0,0371	0,0470	0,0365	0,0162	0,0266	0,0481	0,0273	0,0295	0,0260
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, CH=5 mm (N/m ² ×USD)	45,5	49,1	48,8	29,1	14,1	11,5	26,0	45,6	38,4	14,3
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, CH=10 mm (N/m ² ×USD)	29,6	34,2	34,1	18,4	9,6	7,8	18,4	29,6	24,9	10,9
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, CH=15 mm (N/m ² ×USD)	19,7	23,2	23,5	13,0	5,8	5,5	13,3	17,1	14,7	7,4

Şekil 3.33 maksimum normalize manyetik kaldırma kuvveti (F_z), manyetik kılavuzlama kuvveti (F_x), düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ve yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) değerlerinin W_{dym}/W_{yym} oranına bağlılığını göstermektedir. Burada W_{dym} , düşey yönlü mıknatıs genişliğini; W_{yym} , yatay yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir. Normalize manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti verileri ilgili dizilimlerin maksimum değerlerinin dizilimde kullanılan üç çekirdekli YBCO sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. PMG-1a, PMG-1b, PMG-1c ve PMG-H3b dizilimleri bir adet üç çekirdekli YBCO içerirken PMG-2a ve PMG-2d dizilimlerinde iki adet üç çekirdekli YBCO kullanılmıştır.



Şekil 3.33. Maksimum normalize manyetik (a) kaldırma, F_z (b) kılavuzlama, F_x (c) düşey k_z ve (d) yatay k_x değerlerinin W_{dym}/W_{yym} oranına bağlılığı (W_{dym} , düşey yönlü mıknatıs genişliğini; W_{yym} , yatay yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir)

Deneysel ölçümlerle elde edilen F_z , F_x , k_z ve k_x verileri üç çekirdekli YBCO sayısına bölünerek, süperiletken sayısının fazla olmasından kaynaklanacak kuvvet ve kuvvet sabiti değerlerindeki artışın doğru yorumlanması amaçlanmıştır. W_{dym}/W_{yym} oranları 0,50; 0,67; 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 olarak elde edilmiştir ve bu oranlar sırasıyla PMG-1a, PMG-H3b, PMG-2a, PMG-1b, PMG-2d ve PMG-1c dizilimlerine karşılık gelmektedir.

Tüm soğutma yüksekliklerinde elde edilen kuvvet ve kuvvet sabiti eğrileri kendi içlerinde genellikle benzer değişimler göstermektedir. Şekil 3.33 (a)'dan görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde W_{dym}/W_{yym} oranı 0,67 olan PMG-H3b dizilimi ve W_{dym}/W_{yym} oranı 1,25 olan PMG-2d dizilimleri ile normalize manyetik kaldırma kuvveti en büyük değerlerine ulaşmıştır. Diğer taraftan tüm soğutma yüksekliklerinde en düşük normalize manyetik kaldırma kuvveti değerlerine sahip olan $W_{dym}/W_{yym}=0,50$ oranı ile PMG-1a dizilimidir.

Şekil 3.33 (b)'den, $CH=5$ mm ve $CH=10$ mm durumlarında W_{dym}/W_{yym} oranı 1,50 olduğunda (PMG-1c dizilimi) normalize manyetik kılavuzlama kuvvetinin en büyük değere ulaştığı, $CH=15$ mm'de ise PMG-1c ve PMG-2d dizilimlerine ait normalize kuvvetin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi W_{dym}/W_{yym} oranının artmasıyla tüm dizilimler için normalize kılavuzlama kuvvet değerleri genellikle artmaktadır. Bilindiği gibi yatay kılavuzlama kuvveti, PMG dizilimlerinin oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunun düşey bileşeni olan B_z ile orantılıdır. Düşey yönlü mıknatıs sayısının artmasıyla W_{dym}/W_{yym} oranının da artacağı açıktır. Böylece düşey yöndeki B_z manyetik akı yoğunluğunun arttığı bu durumun, manyetik kılavuzlama kuvveti üzerine olumlu bir katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 3.33 (c) maksimum normalize düşey manyetik kuvvet sabitinin W_{dym}/W_{yym} oranına bağlı değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde elde edilen eğriler benzer karakter göstermektedir ve bu benzer karakter Şekil 3.40 (a) ile de uyumludur. Normalize manyetik kuvvet sabiti değerleri tüm soğutma yüksekliklerinde W_{dym}/W_{yym} oranı 0,67 olan PMG-H3b dizilimi için maksimum ve W_{dym}/W_{yym} oranı 1,00 olan PMG-1b dizilimi içinse minimum olmaktadır.

Maksimum normalize yatay manyetik kuvvet sabitinin W_{dym}/W_{yym} oranına bağlı değişimi Şekil 3.33 (d) ile verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde W_{dym}/W_{yym} oranı 1,50 (PMG-1c dizilimi) olduğunda normalize yatay manyetik kuvvet sabiti en büyük değerlere ulaşmıştır.

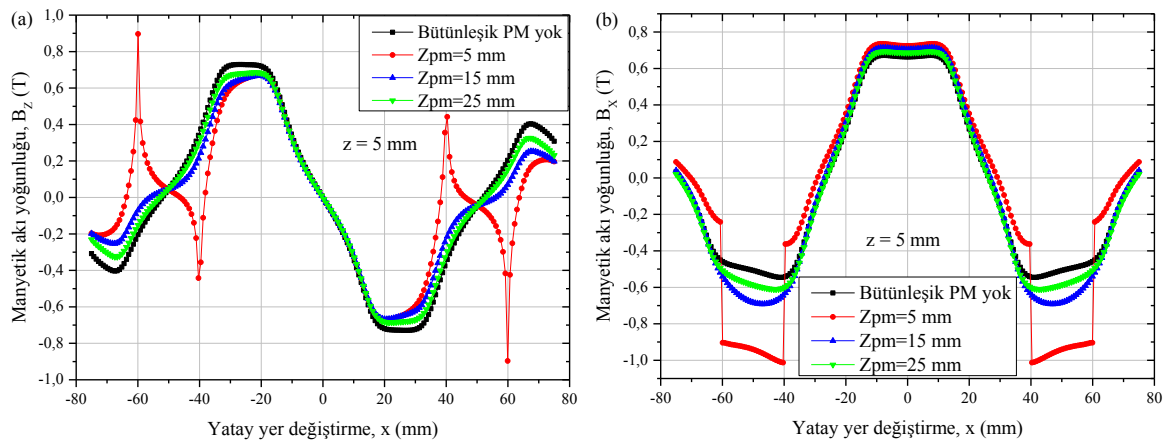
3.8. Üç Çekirdekli YBCO ile Bütünleşik Mıknatısın Süperiletkenin Manyetik Kuvvet Performansına Etkisi

Maglev sistemlerinin yük taşıma kapasitesini iyileştirmek için manyetik kaldırma kuvveti değerleri arttırılırken, aynı zamanda sistemin kararlılığını oluşturan kılavuzlama kuvveti değerleri de yeterli bir düzeyde olmalıdır. Literatürde Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet performansını geliştirmek adına yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda YBCO süperiletkenlerinin manyetik kaldırma veya manyetik kılavuzlama kuvveti verimliliğini ayrı ayrı arttıran bazı gelişmeler kaydedilmiştir. Ancak her iki kuvvette eş zamanlı olarak verimlilik artışı gözlenmemiştir. Dolayısıyla HTS-PMG konfigürasyonu sadece yüksek kaldırma kuvveti değil aynı zamanda büyük kılavuzlama kuvveti de elde edecek şekilde optimize edilmelidir. Bilindiği gibi ZFC rejiminde YBCO süperiletkeni ile daha büyük kaldırma kuvveti elde edilebilirken, kalıcı mıknatısın manyetik alanı ile etkileşen sistem daha zayıf bir kararlılık gösterir. Alanlı soğutma rejiminde sistem numunede tuzaklanan akı nedeniyle daha güçlü bir kararlılık gösterirken, kaldırma kuvvetinde ise bir düşüş yaşanır. Dolayısıyla uygun soğutma yüksekliğinde sistemin kuvvet performansı eş zamanlı olarak optimize edilebilir. Diğer taraftan süperiletken numune kabına yerleştirilen bütünleşik mıknatıslar yardımıyla manyetik kaldırma kuvvetini arttırmak mümkündür. Belirli bir manyetik alan değerine sahip mıknatısların aynı işaretli kutuplarının kullanılmasıyla kaldırma kuvveti arttırırken, Maglev sistemlerinin yanal dengesinde sorunlara ve böylece sistemin hareketinde bir kararsızlığa neden olmaktadır. Bu nedenle kılavuzlama kuvvetinde belirgin bir düşüş olmaksızın kaldırma kuvvetinin artırılabilmesi amacıyla hibrit PMG-HBP dizilimi tasarlandı.

Şekil 3.34'te gösterilen bu PMG tasarımıyla üç çekirdekli YBCO numunesinin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti ile manyetik kuvvet sabiti özellikleri bütünleşik birimdeki kalıcı mıknatısların düşey konumuna bağlı olarak farklı soğutma yüksekliklerinde incelendi. Şekilde görülen *Bütünleşik birim*, üç çekirdekli YBCO ile bütünleşik mıknatısları ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenini içermektedir.

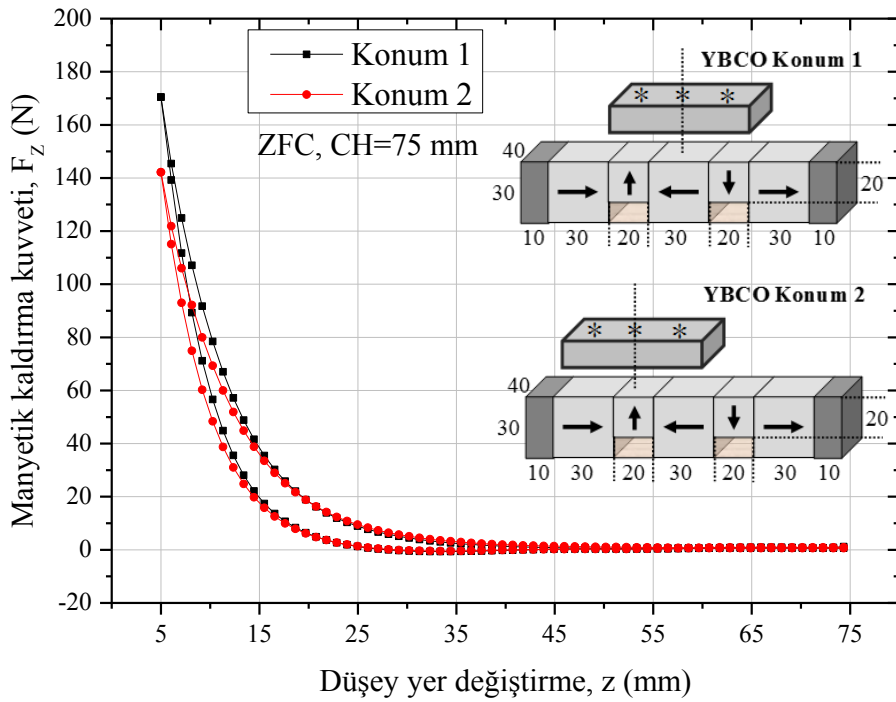
Manyetik kuvvet ölçümleri bütünleşik birim ve Halbach dizilimindeki (PMG-HBP) kılavuzlama yolu ile gerçekleştirildi. Bütünleşik birimdeki mıknatısların kılavuzlama yolu yüzeyi ile arasındaki mesafe 5 mm, 15 mm ve 25 mm olacak şekilde konumlandırılarak manyetik kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Burada Halbach tipi PMG seçilmesinin

Şekil 3.35 PMG yüzeyinden 5 mm düşey mesafede, farklı Z_{PM} konumlarına bağlı olarak PMG dizilimine ait B_z düşey ve B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımlarını göstermektedir. Bilindiği gibi Halbach PMG diziliminde iki adet düşey B_z piki ve bir adet yatay B_x piki bulunmaktadır (Liu vd., 2008b). Halbach PMG kendine özgü manyetik akı özelliklerini korumasının yanı sıra, Şekil 3.35'ten görüldüğü gibi, $Z_{PM}=5$ mm için iki ilave manyetik alan piki ortaya çıkmıştır. Ayrıca Z_{PM} 'nin artışıyla maksimum pik değerlerinin B_z için artarken B_x içinse azaldığı gözlenmiştir. Bütünleşik mıknatısların olmadığı durumda B_z pikleri en büyük değerlere sahipken, B_x pikleri ise en düşük değerlere sahiptir. Bütünleşik mıknatısların varlığıyla B_z pik değerlerinin düşmesi, aynı kutup yönelimine sahip bütünleşik mıknatıslardan ve PMG'nin kenarlarındaki mıknatıslardan çıkan zıt yönlü düşey manyetik akı çizgilerinin (Şekil 3.34'teki düşey kırmızı çizgiler) birbirini yok ederek manyetik akı yoğunluğunu zayıflatması ile açıklanabilir. Diğer taraftan, aynı kutup yönelimine sahip bütünleşik mıknatıslardan ve PMG'nin uçlarındaki mıknatıslardan çıkan aynı yönlü yatay manyetik akı çizgileri (Şekil 3.34'teki yatay kırmızı çizgiler) birbirlerini güçlendirerek manyetik akı yoğunluğunu artırırlar. Kısacası bütünleşik mıknatısların kullanımı B_x manyetik akı yoğunluğu bileşeni üzerinde pozitif katkıda bulunurken B_z manyetik akı yoğunluğu bileşeni üzerinde ise küçük miktarda negatif etkide bulunmaktadır. Manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin sırasıyla B_x ve B_z ile orantılı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bütünleşik mıknatıs kullanımının kaldırma kuvvetini artırması beklenen bir durumdur.



Şekil 3.35. (a) B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve (b) B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet performansı bütünleşik birimdeki YBCO süperiletkenlerin PMG üzerindeki konumuna da bağlıdır. Dolayısıyla manyetik kuvvet ölçümlerinden önce üç çekirdekli YBCO numune geliştirilen PMG-HBP diziliminin hem B_z hem de B_x piklerinin maksimum olduğu yerlerde ayrı ayrı konumlandırılarak deneme ölçümleri yapılmıştır. Bu deneme ölçümleri, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile Halbach dizilimi arasındaki manyetik kaldırma kuvveti için alansız soğutma şartında (ZFC) minimum düşey yaklaşma mesafesi 5 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.36 YBCO süperiletkeninin B_z ve B_x piklerinin maksimum olduğu yerlerde konumlandırılarak yapılan manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi YBCO'nun 1. konumu B_x pikinin, 2. konumu ise B_z pikinin maksimum olduğu yerdedir. Konum 1 için 5 mm minimum düşey yaklaşma mesafesinde 170 N, konum 2 içinse 142 N'luk kaldırma kuvveti değerleri gözlenmiştir. Elde edilen bu verilere göre, Halbach dizilimindeki PMG için konum 1 daha verimli olduğundan dolayı bütünleşik mıknatısın manyetik kuvvet performansına etkisi incelenirken detaylı ölçümler bu konumda gerçekleştirilmiştir.

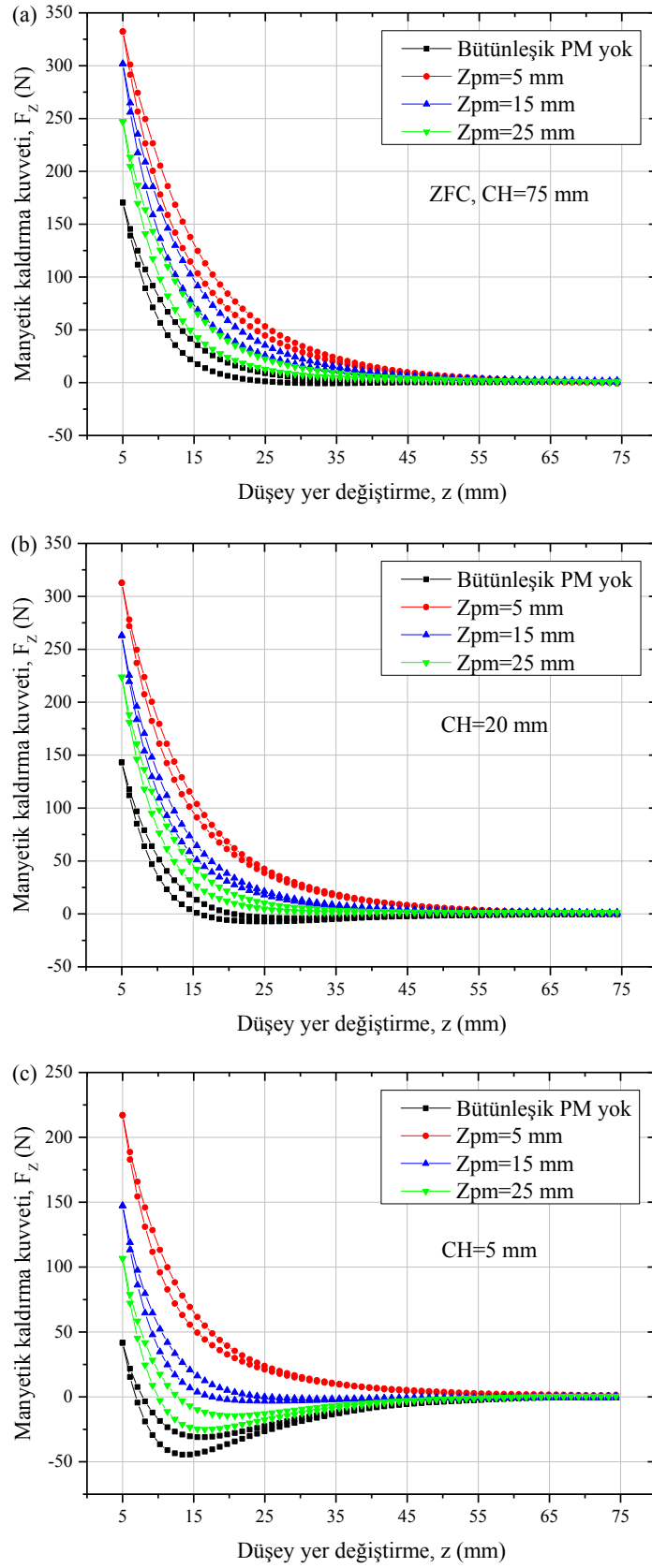


Şekil 3.36. Farklı YBCO konumları için düşey manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri

3.8.2. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvete Etkisi

Şekil 3.37’de bütünleşik mıknatısların farklı konumlarında $CH=75$ mm, 20 mm ve 5 mm soğutma yükseklikleri için manyetik kaldırma kuvvetlerinin (F_z) düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekilden ZFC durumunda ($CH=75$ mm), bütünleşik mıknatıs olmayan durum için 170 N ölçülen maksimum manyetik kaldırma kuvveti değerinin $Z_{PM}=5$ mm, $Z_{PM}=15$ mm ve $Z_{PM}=25$ mm konumlarında sırasıyla 332 N, 302 N ve 247 N’a arttığı görülmektedir. Başka bir deyişle üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin her iki yanına 40 mm \times 20 mm \times 20 mm boyutlarında mıknatıslar konulduğunda manyetik kaldırma kuvveti değerlerindeki artış oranı $Z_{PM}=5$ mm, $Z_{PM}=15$ mm ve $Z_{PM}=25$ mm konumları için sırasıyla % 95, % 77 ve % 45 olmaktadır. Kaldırma kuvvetindeki artışı, bütünleşik mıknatısların kılavuzlama yoluna kademeli olarak yaklaşması ile birlikte daha fazla etkileşmesinin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisiyle açıklamak mümkündür. Ayrıca yüksek CH ’larda baskın Meissner etkisinden dolayı daha büyük kaldırma kuvveti değerleri elde edileceği açıktır.

Tüm soğutma yüksekliklerinde $Z_{PM}=5$ mm pozisyonu en yüksek kaldırma kuvveti değerlerine sahip olmasına rağmen, alanlı soğutma durumlarında bile ($CH=5$ mm ve 20 mm) kaldırma kuvveti eğrilerinde çekici kısım gözlenmemiştir. Maglev uygulamaları için sadece yüksek kaldırma kuvvetinin yeterli olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sistemlerde düşey manyetik kararlılığı sağlamak adına, manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri iyi bir dengede ayarlanmalıdır.

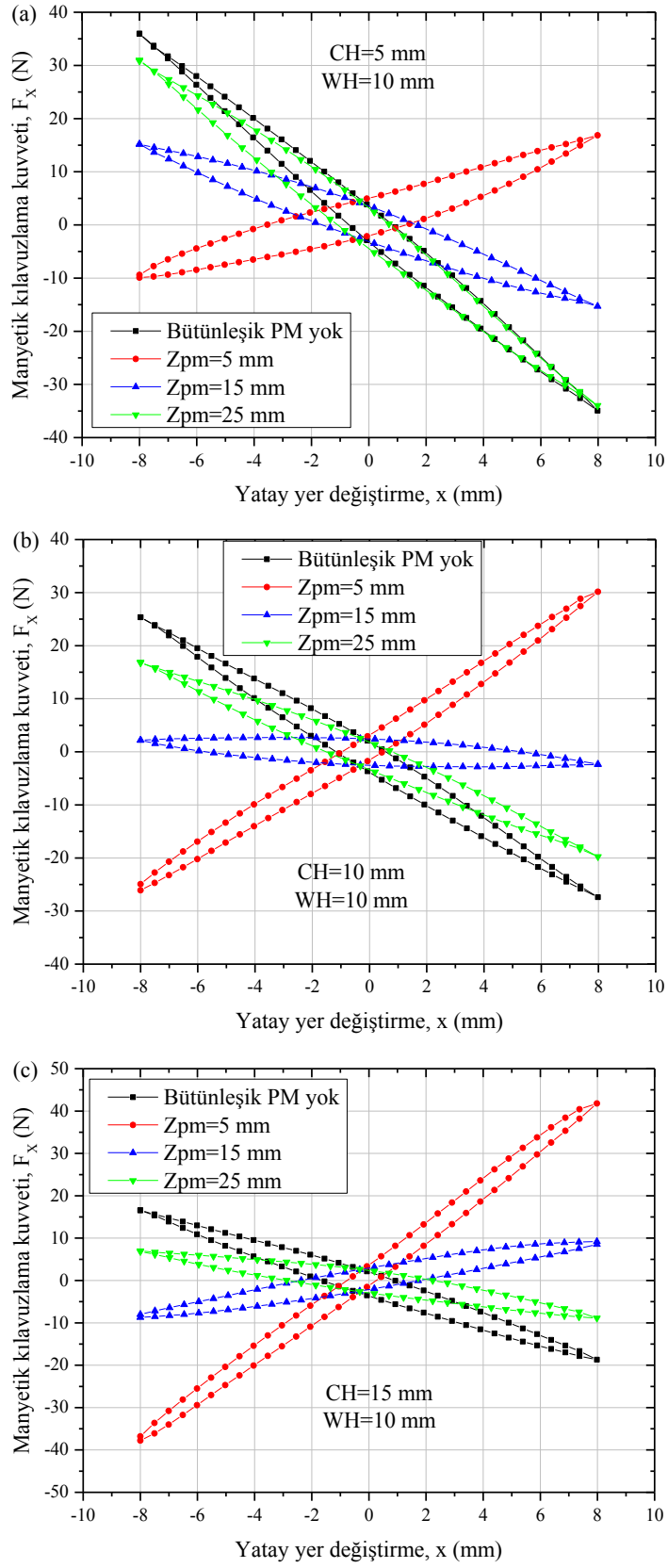


Şekil 3.37. Farklı bütünleşik mıknatıs pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.8.3. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvete Etkisi

Şekil 3.38’de bütünleşik mıknatısların konumuna bağlı olarak üç çekirdekli YBCO süperiletkenine ait yatay kılavuzlama kuvvetinin (F_x) farklı soğutma mesafeleri ($CH=5$ mm, $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm) için karşılaştırılması verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi $CH=5$ mm soğutma yüksekliğinde bütünleşik mıknatıs olmayan durum için ölçülen maksimum yatay kılavuzlama kuvveti değeri $-34,9$ N iken, $Z_{PM}=5$ mm, $Z_{PM}=15$ mm ve $Z_{PM}=25$ mm konumlarında ise sırasıyla $+16,8$ N, $-15,3$ N ve $-34,0$ N olarak ölçülmüştür. Tüm durumlar için manyetik kılavuzlama kuvveti değerlerindeki negatiflik, sistemin pozitif x yönünde yer değiştirmesine karşın yatay olarak dengesini sağlayan çekici kuvveti işaret etmektedir. Bu şartlar altında kılavuzlama kuvvetindeki negatiflik sistemin kararlı olduğunun bir göstergesidir.

PMG-HBP, bütünleşik PM yok ve $Z_{PM}=25$ mm durumlarında tüm soğutma yükseklikleri için kararlı bir yapıdadır. $Z_{PM}=15$ mm durumunda sistem $CH=5$ mm ve $CH=10$ mm soğutma mesafeleri için kararlı bir yapıda iken $CH=15$ mm için bu kararlı davranış bozulmaktadır. Diğer taraftan $Z_{PM}=5$ mm durumunda sistem, bütünleşik PM yok ve $Z_{PM}=25$ mm durumlarının aksine, tüm soğutma yükseklikleri için kararsız bir yapıya sahiptir. Ayrıca bilindiği gibi birbirine paralel manyetik dipoller arasında itici karakterli bir kuvvet oluşur. $Z_{PM}=5$ mm için CH arttıkça maksimum itici kuvvet değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu artış bütünleşik birimdeki mıknatıslar ile PMG arasındaki manyetik itici kuvvetin, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile PMG dizilimi arasındaki kılavuzlama kuvvetine karşı daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Şekil 3.38’den görülebileceği gibi, $Z_{PM}=5$ mm durumu hariç, soğutma yüksekliği arttıkça ortamın diyamanyetik kuvvet karakterinin değiştiği söylenebilir. CH azaldıkça üç çekirdekli YBCO’da daha fazla manyetik akı tuzaklandığından dolayı kılavuzlama kuvveti özellikleri iyileşmektedir. Çünkü tuzaklanan akı arttıkça, bütünleşik PM ile PMG arasındaki itici manyetik kuvvet baskılanır.



Şekil 3.38. Farklı bütünleşik mıknatıs pozisyonları için (a) $CH=5$ mm, (b) $CH=10$ mm ve (c) $CH=15$ mm soğutma yüksekliklerinde kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

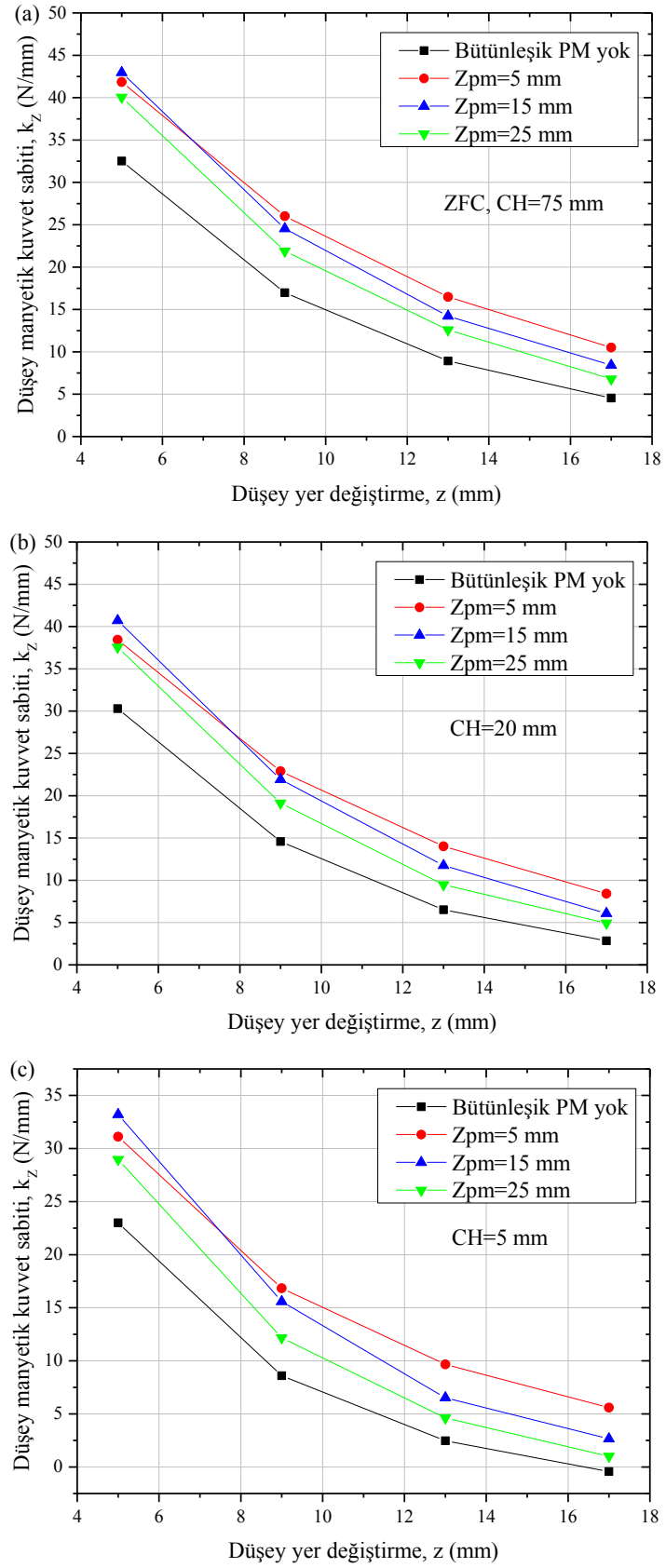
Tablo 3.3. Farklı düşey pozisyonlardaki bütünleşik mıknatısların maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri (Ozturk vd., 2015b)

Bütünleşik mıknatısların düşey pozisyonu	Kaldırma Kuvveti (N)			Kılavuzlama Kuvveti (N)		
	CH=75 mm	CH=20 mm	CH=5 mm	CH=5 mm	CH=10 mm	CH=15 mm
$Z_{pm} = 5$ mm	332,3	312,7	217,1	16,8	30,2	41,8
$Z_{pm} = 15$ mm	301,8	263,0	147,3	-15,3	-2,4	9,2
$Z_{pm} = 25$ mm	247,0	223,7	106,6	-34,0	-19,8	-8,9
Bütünleşik PM yok	170,4	143,2	41,6	-34,9	-27,4	-18,7

Tablo 3.3 farklı soğutma yüksekliklerinde bütünleşik mıknatısların düşey pozisyonları için ölçülen maksimum kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvveti değerlerini göstermektedir. Tablodan görüldüğü gibi, bütünleşik mıknatıslar $Z_{PM}=25$ mm konumunda kullanıldığında ve CH=5 mm'de, manyetik kaldırma kuvveti bütünleşik mıknatıs olmayan duruma göre 41,6 N'dan 106,6 N'a çıkarak % 156 oranında bir artış göstermiştir. Bununla birlikte aynı soğutma yüksekliğinde -34,9 N'dan -34,0 N'a düşen kılavuzlama kuvvetinde ise sadece % 2,6'lık bir azalma gözlenmiştir. $Z_{PM}=25$ mm için kılavuzlama kuvvetindeki bu küçük azalma, pratik Maglev uygulamalarının ihtiyaç duyduğu kaldırma kuvvetindeki muazzam artış yanında kabul edilebilir bir seviyededir (Ozturk vd., 2015b).

3.8.4. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi

Şekil 3.39'da bütünleşik mıknatısların farklı konumlarında CH=75 mm, 20 mm ve 5 mm soğutma yükseklikleri için manyetik kaldırma kuvveti sabitinin (k_z) düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırılması gösterilmektedir. Maksimum düşey kaldırma kuvveti sabiti değerleri tüm soğutma yüksekliklerinde 5 mm mesafede gözlenmiştir. Mıknatıs yolu ile süperiletken arasındaki düşey mesafesi arttıkça ve soğutma yüksekliği azaldıkça düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan Z_{PM} pozisyonunun azalmasıyla düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri genel olarak artmaktadır.



Şekil 3.39. Farklı bütünleşik mıknatıs pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması

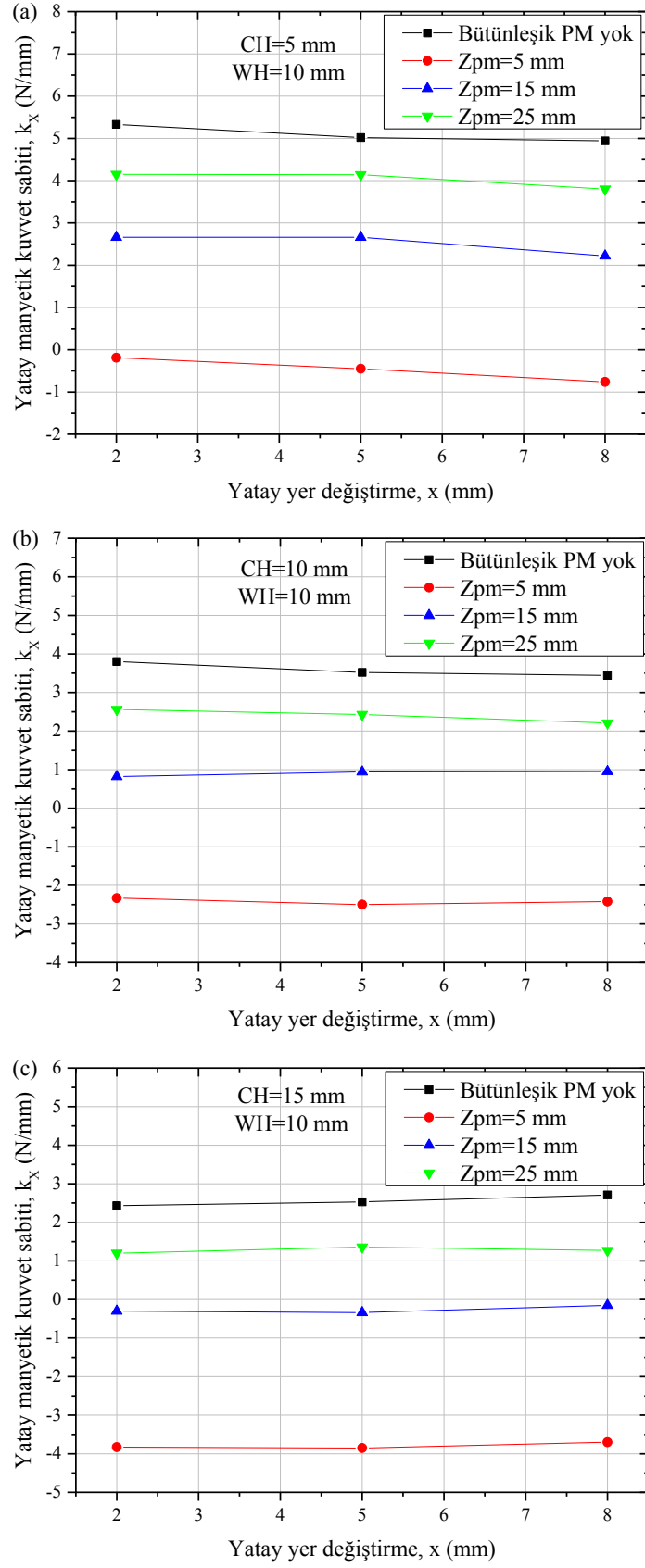
3.8.5. Farklı Bütünleşik Mıknatıs Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi

Şekil 3.40'da bütünleşik mıknatısların konumuna bağlı olarak üç çekirdekli YBCO süperiletkenine ait yatay kılavuzlama kuvvet sabitinin (k_x) farklı soğutma mesafeleri ($CH=5$ mm, $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm) için karşılaştırılması verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, $CH=5$ mm'de ve 2 mm yatay yer değiştirmeye karşı, bütünleşik mıknatıs olmayan durum için ölçülen maksimum yatay kılavuzlama kuvvet sabiti değeri 5,3 N/mm'dir. Benzer şekilde $Z_{PM}=5$ mm, $Z_{PM}=15$ mm ve $Z_{PM}=25$ mm konumlarında ise sırasıyla -0,2 N/mm, 2,7 N/mm ve 4,2 N/mm olarak ölçülmüştür.

Tüm soğutma yüksekliklerinde maksimum yatay kılavuzlama kuvvet sabiti değerleri, bütünleşik mıknatısların olmadığı durumda gözlenmiş olsa da $Z_{PM}=25$ mm konumu için elde edilen kuvvet sabitleri bu maksimum değerlere yakındır. Ayrıca şekilden açıkça görülebileceği gibi, soğutma mesafeleri azaldıkça ve Z_{PM} pozisyonu arttıkça yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Bilindiği gibi manyetik kuvvet sabiti değerinin pozitif olması sistemin kararlı bir yapıda olduğunu gösterirken negatif kuvvet sabiti ise sistemin kararsızlığını işaret etmektedir. Dolayısıyla $Z_{PM}=25$ mm ve bütünleşik mıknatısların olmadığı durumlar, pozitif yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri ile kararlı bir yapı sergilemektedir. Yatay kuvvet sabiti değerleri negatif olan $Z_{PM}=5$ mm pozisyonu tüm soğutma mesafelerinde kararsız bir yapıdadır.

$Z_{PM}=5$ mm pozisyonunun negatif yatay kuvvet sabiti değerleri, bütünleşik birimdeki mıknatısların üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin diyamanyetik kuvvet karakterini baskıladığı manasına gelmektedir. Diğer taraftan $Z_{PM}=15$ mm için $CH=15$ mm soğutma mesafesinde yatay kuvvet sabiti negatif iken diğer soğutma mesafelerinde ($CH=5$ mm ve $CH=10$ mm) bu değerler pozitifdir. Bu durum $Z_{PM}=15$ mm konumunun yatay kılavuzlama kuvvet karakterinin, soğutma yüksekliği arttıkça, çekici kuvvet davranışından itici kuvvet davranışına doğru kaymasıyla açıklanabilir. Kılavuzlama kuvvetinin farklı soğutma mesafeleri için bu kademeli değişimi kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiğinde, Maglev sistemlerinin pasif kontrol uygulamaları ve manyetik yatak (bearing) uygulamaları için çok kullanışlı olabilir.

Optimum bütünleşik mıknatıs pozisyonunu belirlemek için yapılan tüm manyetik kuvvet ölçümleri birlikte değerlendirildiğinde, tüm CH 'larda düşey ve yatay kararlılığa sahip optimum konum $Z_{PM}=25$ mm olarak belirlenmiştir.



şekil 3.40. Farklı bütünleşik mıknatıs pozisyonları için (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde dūřey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması

3.9. Süperakım Çiftlenimin Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkeninin Manyetik Kuvvet Özelliklerine Etkisi

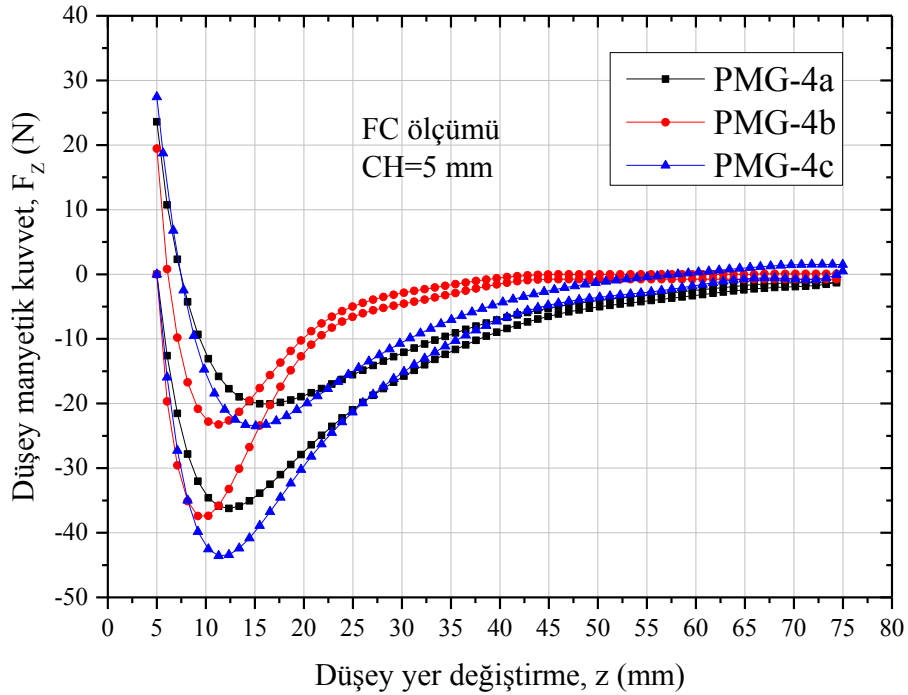
Yürütülen tez çalışmasının bu kısımda, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile PMG arasında oluşan manyetik kuvvetin fiziksel arka planı ile numunede iki komşu çekirdek (domain) arasındaki çiftlenimin manyetik kuvvet performansına etkisi incelenmiştir.

Bilindiği gibi üç çekirdekli YBCO süperiletkeninde, her bir çekirdek (tane) etrafında dolanan tane içi ve aynı zamanda çekirdeklerin etrafında numune boyunca dolanan tanelerarası olmak üzere iki tip süperakım vardır (Deng vd., 2012a). Üç çekirdekli YBCO süperiletkeninde, tek çekirdekli türevlerine kıyasla, tane içi ve tanelerarası süperakımların varlığı daha fazla manyetik akının tuzaklanmasına olanak tanımaktadır (Deng vd., 2012b). Bu nedenle üç çekirdekli YBCO'nun akı tuzaklama özelliklerini test etmek için üç farklı PMG dizilimi kullanılarak manyetik kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Bu dizilimlerde her bir çekirdek altına merkezlenen mıknatısların kutup yönelimlerine bağlı olarak değişen tane içi ve tanelerarası süperakımların tuzaklanan alan ve dolayısıyla manyetik kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3.9.1. Süperakım Çiftlenimin Düşey Kaldırma Kuvvetine Etkisi

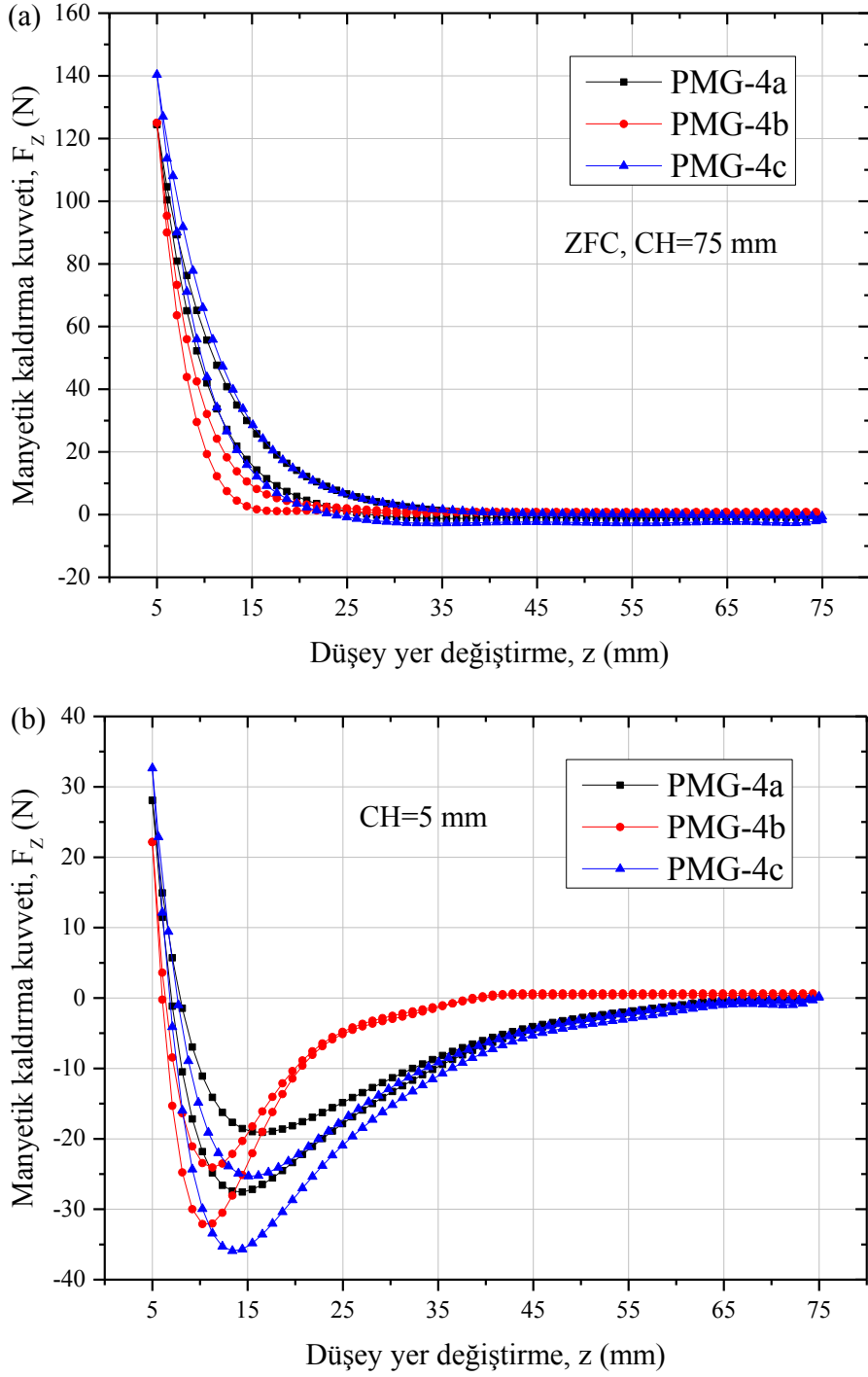
Şekil 3.41'de CH=5 mm soğutma yüksekliğinde ve FC rejiminde, üç çekirdekli YBCO ile PMG dizilimleri arasındaki düşey manyetik kuvvetin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi verilmiştir. FC rejiminde, YBCO CH=5 mm'de tamamen soğutulduktan sonra bu noktadan harekete başlanarak, önce YBCO ile PMG arası mesafe 75 mm'ye çıkarıldıktan sonra tekrar ilk konumu olan 5 mm mesafeye geri getirilir. Şekilden görüldüğü gibi, PMG-4c dizilimi ile üç çekirdekli YBCO arasında ölçülen maksimum itici ve çekici kuvvet değerleri (sırasıyla 27,5 N ve -43,6 N), PMG-4a (sırasıyla 23,6 N ve -36,2 N) ve PMG-4b (sırasıyla 19,5 N ve -37,4 N) dizilimleri ile elde edilen kuvvet değerlerinden daha büyüktür. PMG-4b diziliminin maksimum çekici kuvvet değeri PMG-4a'dan biraz daha büyük olmasına rağmen, düşey mesafe arttıkça PMG-4b diziliminin kuvvet eğrileri PMG-4a ve PMG-4c'ye göre çok daha erken sıfır olmaktadır. PMG-4b dizilime ait düşey manyetik kuvvet verilerindeki bu düşüş ve PMG-4b diziliminin en küçük pozitif kalıcı kuvvet değerine (19,5 N) sahip olmasının nedeni, Şekil 3.10 (a)'da görülen farklı işaretli simetrik B_z

manyetik alan piklerinin birbirlerini zayıflatması ile açıklanabilir. Çünkü bu durum üç çekirdekli YBCO numunede daha az manyetik alan tuzaklanmasına sebep olabilmektedir. Bunun yanı sıra PMG-4c dizilimi, diğer dizilimlere kıyasla daha güçlü B_z manyetik alan dağılımı ile daha yüksek çekici ve pozitif kalıcı manyetik kuvvet (27,5 N) değerlerine sahiptir. Daha büyük manyetik alan dağılımı üç çekirdekli YBCO süperiletkende, tanelerarası çiftlenimden gelen ekstra indüklenmiş akım katkısından dolayı numunede daha fazla süperakımın oluşmasını tetikleyebilir.



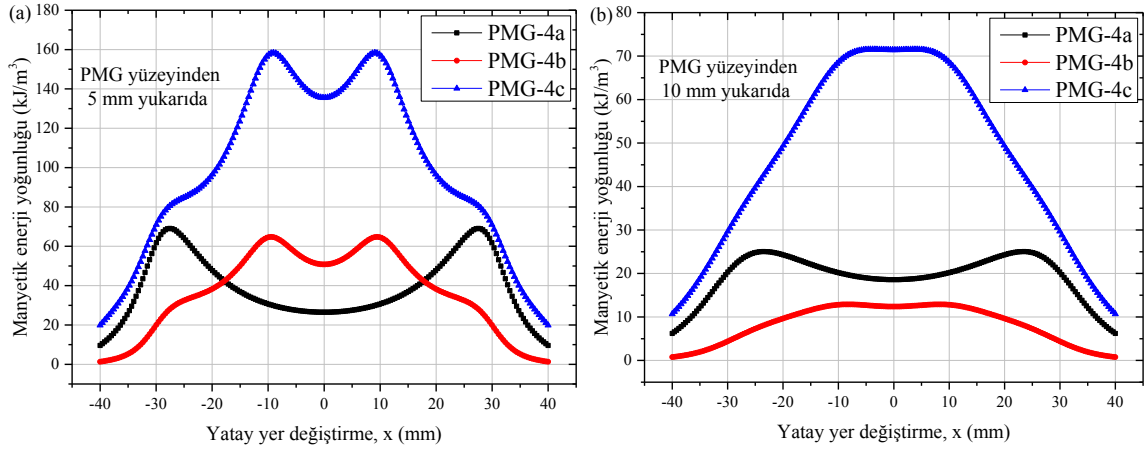
Şekil 3.41. FC rejiminde ve CH=5 mm soğutma yüksekliğinde PMG dizilimlerine ait düşey manyetik kuvvetin karşılaştırılması

Şekil 3.42'de farklı soğutma yüksekliklerinde üç çekirdekli YBCO ile PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri arasında oluşan düşey kaldırma kuvvetinin (F_z) düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.42 (a)'dan görüldüğü gibi PMG-4b diziliminin kaldırma kuvveti değerleri 20 mm düşey mesafede yaklaşık olarak sıfırken, PMG-4a ve PMG-4c dizilimleri 14 N'luk belli bir kuvvet değerine sahiptirler. Bilindiği gibi iki kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kuvvet, manyetik alan kaynaklarının enerji yoğunlukları ($B^2/2\mu_0$) ve yüzey alanları ile kabaca orantılıdır. Burada B toplam manyetik akı yoğunluğunu ve μ_0 ise boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir.



Şekil 3.42. (a) $CH=75$ mm ve (b) $CH=5$ mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizimleri ile ölçülen kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

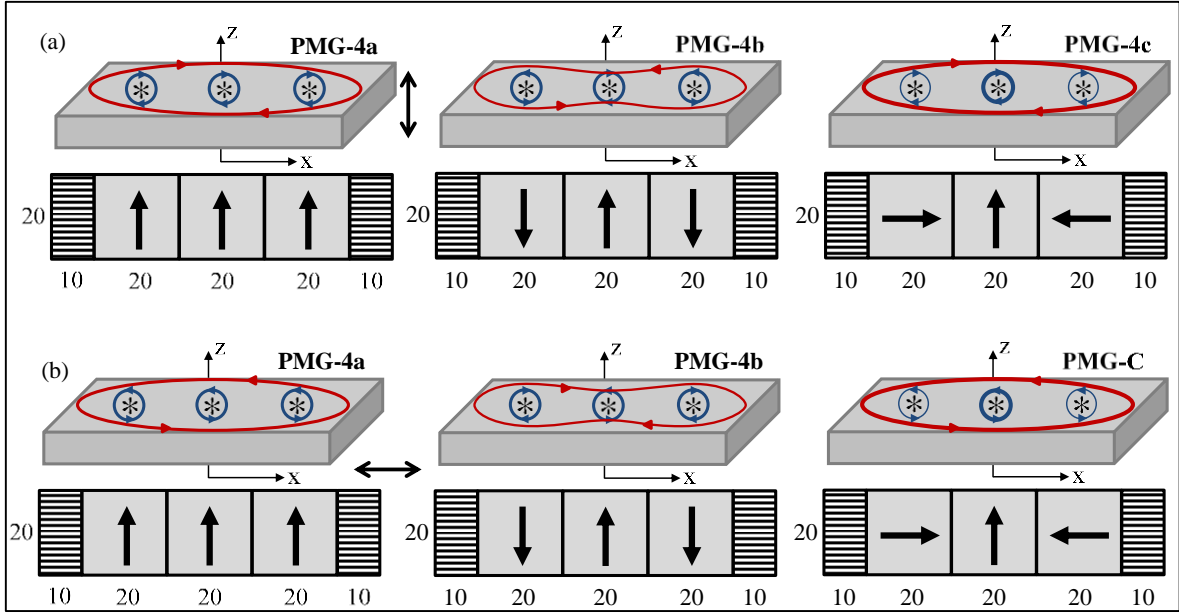
Şekil 3.43 PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizimlerinin PMG yüzeyinden 5mm ve 10 mm yukarıda FEM metodu ile hesaplanan manyetik enerji yoğunluğu dağılımlarını göstermektedir. PMG yüzeyinden düşey mesafe 5 mm'den 10 mm'ye çıktığında farklı PMG dizimleri için manyetik enerji yoğunlukları azalmaktadır.



Şekil 3.43. PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerinin PMG yüzeyinden düşey (a) 5mm ve (b) 10 mm mesafede manyetik enerji yoğunluğu dağılımları

Şekil 3.42’de PMG-4b dizilimine ait kaldırma kuvveti değerlerinde, diğer PMG dizilimlerine kıyasla, düşey yer değiştirmeye bağlı erken zayıflamalar gözlenmiştir. Bu durum Şekil 3.43’de verilen manyetik enerji yoğunluklarının, PMG yüzeyinden düşey mesafe arttıkça PMG-4b dizilimi için PMG-4a ve PMG-4c dizilimlerine kıyasla daha büyük oranda azalmasıyla açıklanabilir. Ayrıca $CH=5$ mm soğutma mesafesinde PMG-4c diziliminin gösterdiği daha büyük alanlı histerisiz, bu dizilimle üç çekirdekli YBCO’da daha fazla alan tuzaklandığının bir göstergesidir.

Şekil 3.44 (a)’da PMG dizilimlerinin düşey hareketi sırasında ve ZFC durumunda, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin her bir çekirdeği etrafında dolaşan taneiçi ve numune boyunca dolaşan tanelerarası süperakımların, PMG’nin manyetik kutup yönelimlerine bağlı olarak değişimi şematik olarak verilmiştir. Alansız soğutma (ZFC) şartında süperiletken, PMG dizilimdeki mıknatıslardan yeterince uzakta soğutulduğundan numuneye herhangi bir manyetik akı girişi söz konusu olmaz. Her bir çekirdek altına merkezlenmiş mıknatıslardan oluşan PMG dizilimine, ZFC durumunda soğutulmuş üç çekirdekli YBCO süperiletkeni yaklaştırıldığında (Şekil 3.44’teki çift taraflı ok süperiletkenin düşey ve yatay hareket doğrultusunu gösterir) uygulanan alanın büyüklüğü ve yönelimine bağlı olarak süperakımlar indüklenir. Lenz yasasına göre, indüklenen taneiçi süperakımları uygulanan diş manyetik alana ters yönlü olacak şekilde her bir çekirdek etrafında akarlar (Deng vd., 2012a; Ozturk vd., 2015a).



Şekil 3.44. Üç çekirdekli YBCO'da (a) düşey ZFC (CH=75 mm) ve (b) yatay alanlı soğutma durumlarında oluşan süperakımların PMG dizilimi ile değişimi

PMG-4a diziliminde manyetik kutup yönelimleri yukarı yönlü olan tüm mıknatıslar tane içi süperakımların saat ibresi yönünde dönmelerine sebep olurlar. Aynı yönde akan bu tane içi süperakımlar (Şekil 3.44'teki iç mavi çizgiler) birbirlerini destekleyerek tanelerarası süperakımın (Şekil 3.44'teki dış kırmızı çizgi) büyümesine yol açarlar. PMG-4b diziliminde ise manyetik kutup yönelimleri aşağı yönlü olan uç taraflardaki mıknatıslar tane içi süperakımların saat ibresinin tersi yönünde dönmelerine sebep olurlar. Farklı kutup yönelimleri ile farklı yönlerde akan tane içi süperakımlar birbirlerinin etkisini yok ederek numune boyunca akan tanelerarası süperakımı zayıflatırlar. PMG-4c diziliminde ise akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı kutup yönlülmü mıknatıs üzerindeki çekirdekte, diğer dizilimlere kıyasla daha büyük boyutta bir tane içi süperakım oluşur. Bu tane içi süperakımlar tanelerarası süperakıma katkıda bulunarak numunedeki perdeleme akımlarının büyümesine yol açarlar.

Uygulanan dış manyetik alanla üç çekirdekli YBCO süperiletkeninde yönelimleri ve boyutları değişen bu süperakımlar manyetik kuvvetleri de doğrudan etkilemektedir. Süperiletken numunedeki manyetik akının yoğunlaştırılması ile PMG-4c diziliminde daha büyük miktarda indüklenen bu süperakımlar, Şekil 3.42 ile verilen düşey manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin daha yüksek çıkmasının nedeni olduğu düşünülmektedir. Aynı veriler incelendiğinde en zayıf kaldırma kuvveti performansını sergileyen PMG-4b diziliminde aşağı ve yukarı yönlü değişen mıknatısların varlığıyla, hem yön değiştirirerek hem de

zayıflayan süperakımlar bu nispeten zayıf kuvvet performansının nedeni olarak gösterilebilir.

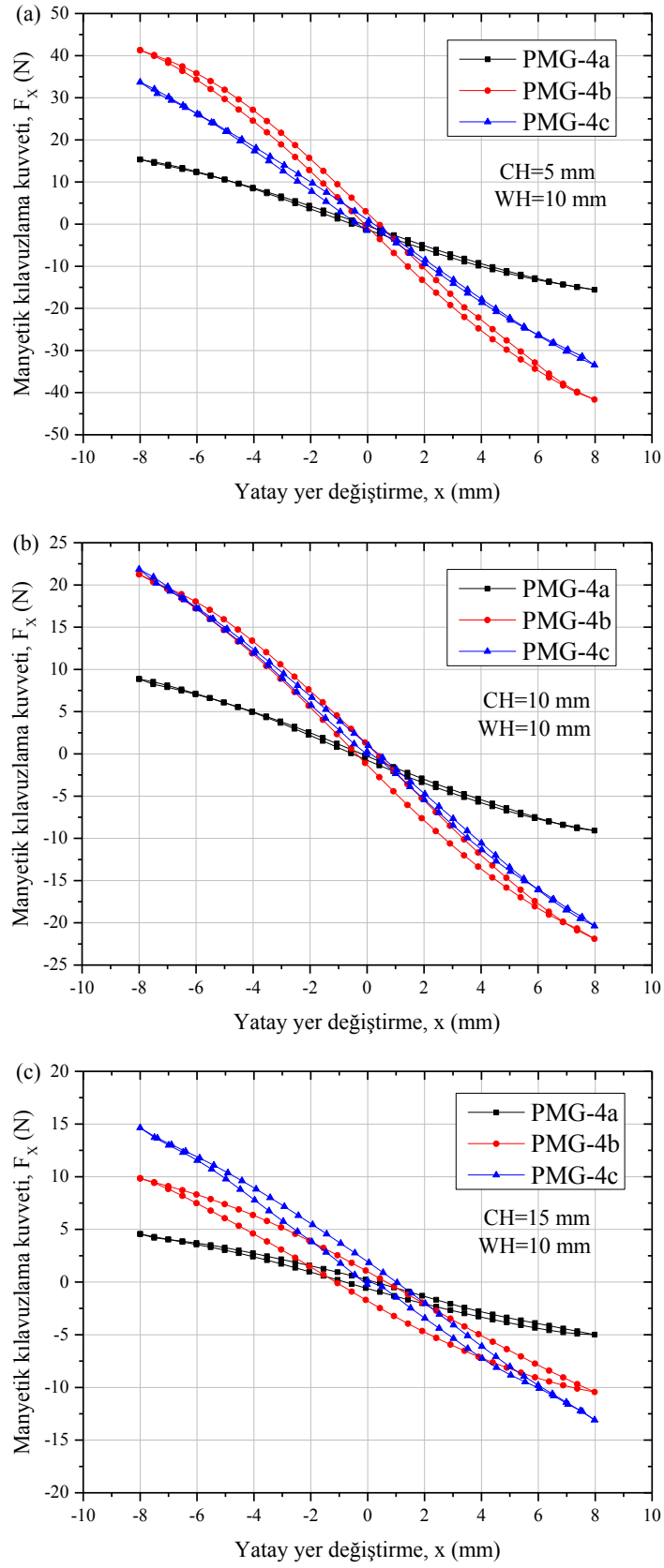
Üç çekirdekli YBCO'da kuvvetlice çiftlenmiş ve birbirine bağlanmış tane sınırları, numune boyunca hatta komşu iki çekirdek sınırında bile tuzaklama yapabilecek daha geniş ve daha kuvvetli akı çivileme merkezleri oluşturmaya olanak verir. Aslında bu durum çok çekirdekli süperiletkenlerin temel akı tuzaklama karakteristiğidir. Dolayısıyla aynı dizilimler kullanılarak üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, akı tuzaklama kapasitesinin fazla olması ve içinde dolaşan süperakımların varlığıyla, tek çekirdekli türevlerine göre daha iyi bir kuvvet performansı sergileyeceği açıktır (Deng vd., 2012b).

3.9.2. Süperakım Çiftlenimin Yatay Kılavuzlama Kuvvetine Etkisi

Şekil 3.44 (b)'de üç çekirdekli YBCO numunesinin alanlı soğutma durumunda her bir çekirdeği etrafında dolaşan tane içi ve numune boyunca dolaşan tanelerarası süperakımların PMG'nin manyetik kutup yönelimlerine bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. ZFC durumunun aksine alanlı soğutmada numunede tuzaklanan akı, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninde her bir çekirdek etrafında dolaşan tane içi süperakımların ve tanelerarası süperakımın yönelimlerinin değişmesine neden olur. Tanelerarası süperakım ZFC durumunda PMG-4a ve PMG-4c dizilimleri için saat ibresi yönünde dolarken, alanlı soğutma durumunda ise yön değiştirerek saat ibresinin tersi yönünde dolmaktadır. Benzer şekilde süperiletken çekirdekleri etrafında dolaşan tane içi süperakımlar da alanlı soğutma şartlarında, ZFC durumundaki dönüş yönlerinin tam aksi yönlerinde dönmektedirler. Ayrıca Şekil 3.44 (b)'de PMG-4b'nin düşey yönde zıt manyetik kutuplara sahip olması, tanelerarası süperakım yoğunluğunun büyüklüğü ve yarıçapının azalmasına neden olur. Bilindiği gibi süperiletkenin akı çivileme merkezlerinde tuzaklanan alan, süperiletkenin bağlı yatay yer değiştirmesine karşı geri çağırıcı bir kuvvet oluşturarak Maglev sistemlerinin kararlı bir manyetik kaldırma karakteri göstermesine imkân verir.

Şekil 3.45'te farklı soğutma yüksekliklerinde PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri ile ölçülen manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Bilindiği kılavuzlama kuvveti F_x , süperakımı oluşturan B_z manyetik akı yoğunluğu ve yanal manyetik akı gradyenti ile orantılıdır. Tüm soğutma yüksekliklerinde PMG-4a dizilimi en düşük kılavuzlama kuvveti değerlerine sahiptir. Bunun nedeni PMG-4a dizilimine ait B_x manyetik akı yoğunluğu gradyentinin, Şekil 3.10 (b)'den de görüldüğü gibi, ± 8 mm yatay

mesafede daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmelidir. CH=5 mm'de PMG-4b PMG-4c'ye kıyasla daha yüksek kılavuzlama kuvvetine sahiptir. Fakat CH=10 mm'de bu iki dizilim birbirlerine yakın değerlere sahipken CH=15 mm'de PMG-4c daha büyük değerlere sahiptir. PMG-4b'de CH'in artmasıyla kuvvetteki bu belirgin düşüş, Şekil 3.43 ile verilen manyetik enerji yoğunluklarının düşey mesafe arttıkça PMG-4b dizilimi için PMG-4a ve PMG-4c dizilimlerine kıyasla daha büyük oranda azalmasıyla açıklanabilir. Ayrıca düşük soğutma mesafesinde PMG-4b'nin yüksek kılavuzlama kuvvetine sahip olması, düşük mesafede taneici yerel tuzaklama etkisinin baskın olduğunu gösterir.

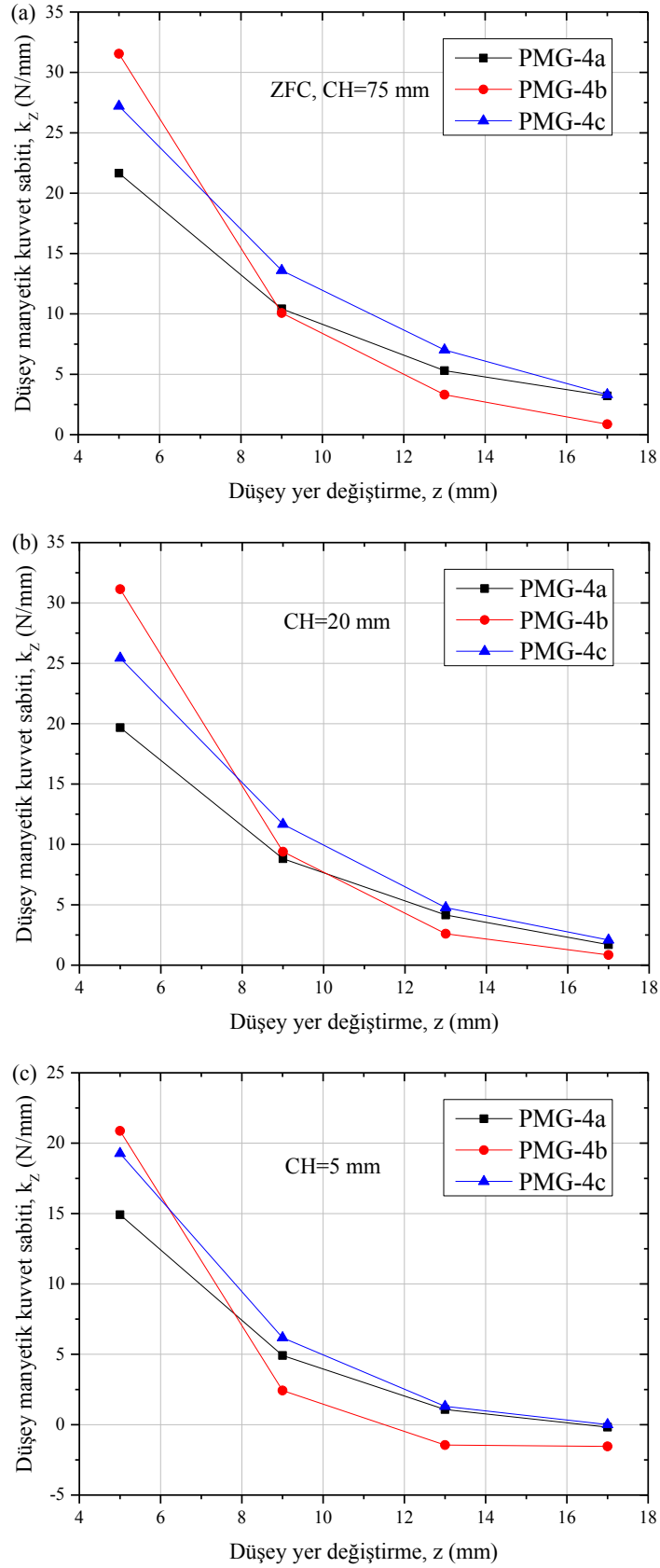


şekil 3.45. (a) $CH=5\text{ mm}$, (b) $CH=10\text{ mm}$ ve (c) $CH=15\text{ mm}$ soğutma ysekliklerinde farklı PMG dizilimleri ile llen kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

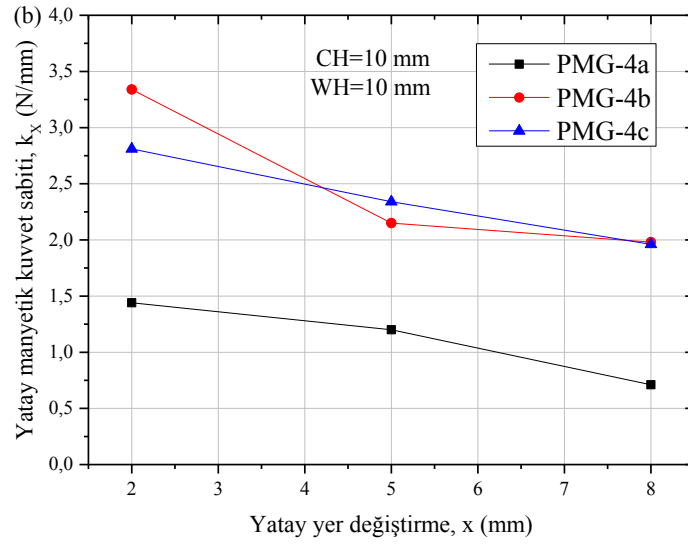
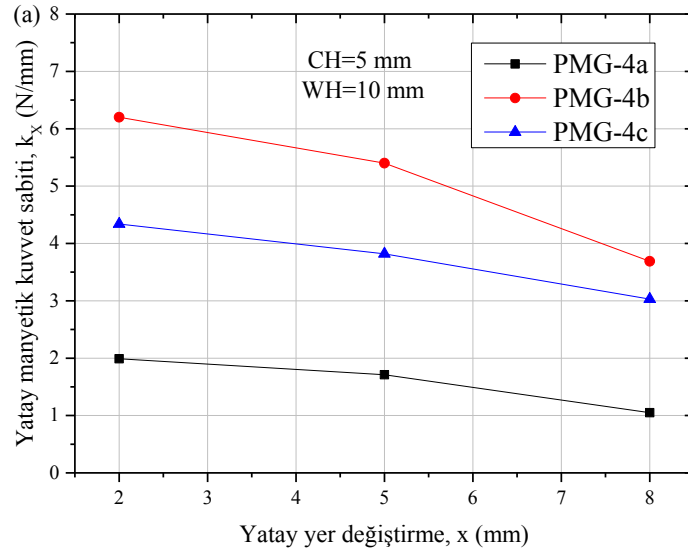
3.9.3. Süperakım Çiftlenimin Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi

Şekil 3.46'da farklı soğutma yüksekliklerinde ($CH=75$ mm, 20 mm ve 5 mm) üç çekirdekli YBCO ile PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri arasında elde edilen düşey manyetik kuvvet sabitinin (k_z) düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, tüm soğutma yüksekliklerinde ve sadece 5 mm minimum düşey yaklaşma mesafesi için PMG-4b dizilimi en büyük k_z değerlerine sahiptir. Bunun nedeni ilgili manyetik kaldırma kuvveti (F_z) grafikleri incelendiğinde, PMG-4b dizilimine ait eğrilerin düşük düşey konumlarda diğer dizilimlere göre daha ani artışlar göstermesidir. Bu ani artışlar ilgili düşey konumdaki eğimin artmasına ve dolayısıyla k_z değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durumun haricinde diğer tüm düşey mesafelerde ve tüm soğutma yükseklikleri için PMG-4c dizilimine ait k_z değerleri en büyüktür.

Şekil 3.47'de ise farklı soğutma yüksekliklerinde ($CH=5$ mm ve 10 mm) üç çekirdekli YBCO ile PMG-4a, PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri arasında elde edilen yatay manyetik kuvvet sabitinin (k_x) yatay yer değiştirmeye bağlı değişimi verilmiştir. Tüm soğutma yüksekliklerinde ve tüm yatay mesafeler için PMG-4a dizilimi ile elde edilen k_x değerlerinin PMG-4b ve PMG-4c dizilimlerine göre daha küçük olduğu şekilden görülmektedir. PMG-4b dizilimine ait k_x değerleri, $CH=5$ mm için PMG-4c'ye göre daha büyüktür. Bu durum ilgili soğutma yüksekliklerindeki manyetik kılavuzlama kuvveti verileri ile de uyum içindedir. $CH=10$ mm soğutma yüksekliğinde ise PMG-4b ve PMG-4c dizilimleri ile elde edilen k_x değerleri birbirlerine yakındır. Şekil 3.47'de, farklı soğutma yüksekliği ile PMG-4a ile PMG-4c'nin yer değiştirmesi, soğutma yüksekliğine bağlı olarak numunedeki tuzaklanan alan ve süperakımların karakterinin değiştiğini gösterir.



şekil 3.46. (a) CH=75 mm, (b) 20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimleri için ölçülen düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması



şekil 3.47. (a) CH=5 mm ve (b) 10 mm soğutma ysekliklerinde farklı PMG dizilimleri için ölçülen yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması

3.10. Tek ekirdekli ve  ekirdekli YBCO Süperiletkenlerin Manyetik Kuvvet zelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi

Yürütülen tez çalışmasının bu kısmında farklı HTS-PMG konfigürasyonları ile tek çekirdekli ve  ekirdekli YBCO süperiletkenlerinin elektromanyetik davranışlarını açıklamak için manyetik kaldırma kuvveti, manyetik kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti ölçümleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tek ve  ekirdekli YBCO numunelerin, çeşitli soğutma ysekliklerinde ve farklı alan şartları altında göstereceği

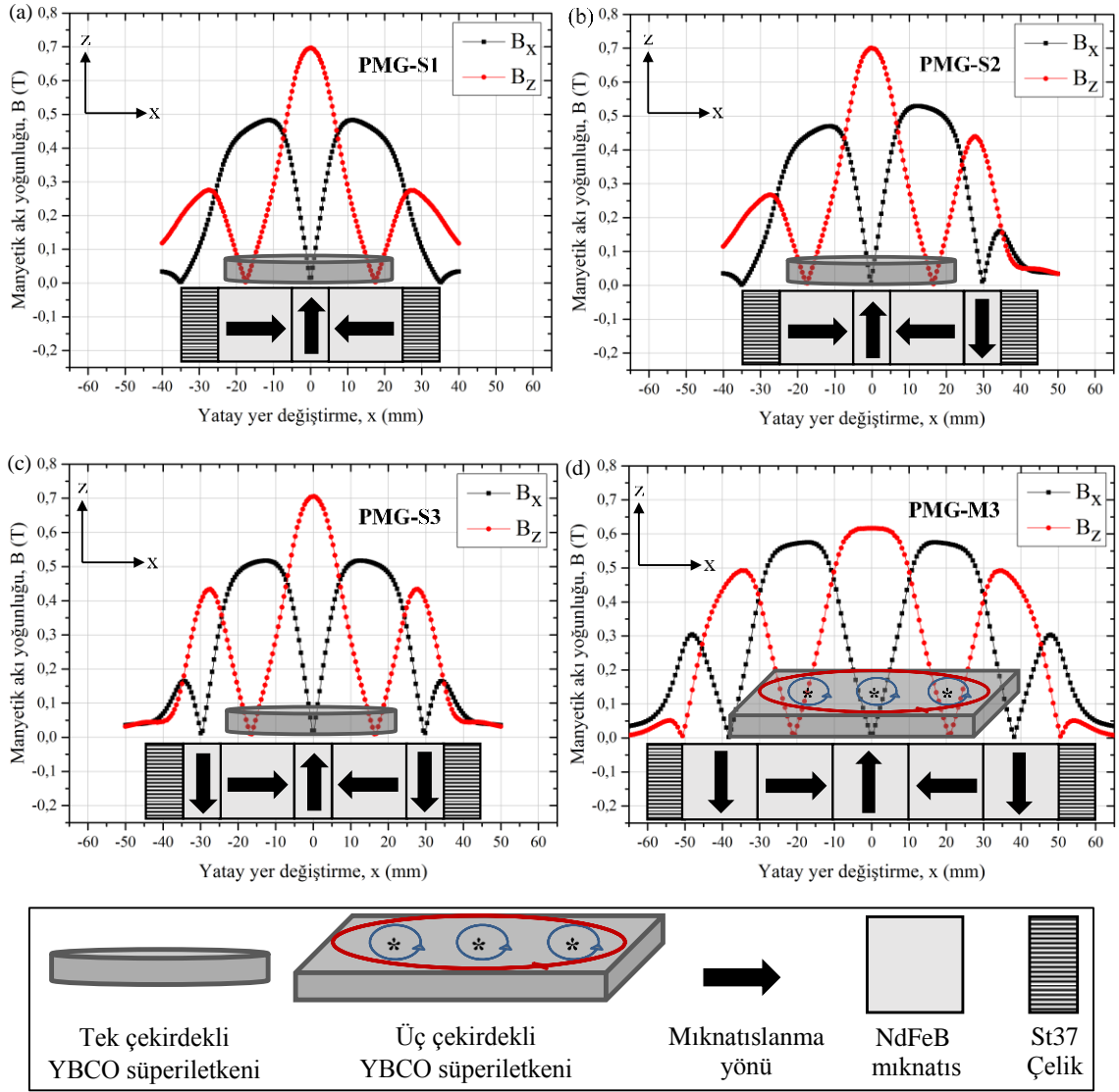
manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, farklı PMG dizilimleri ile deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.48). PMG dizilimlerinin manyetik akı dağılımları hesaplandıktan sonra tek ve üç çekirdekli YBCO'ların kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerleri belirlenmiştir.

Üstten tohumlama (TSMG) yöntemi ile üretilen tek çekirdekli silindirik külçe YBCO süperiletkenleri $\phi=45$ mm çap ve $h=15$ mm yüksekliğinde ve üç çekirdekli dikdörtgen prizma şeklindeki külçe YBCO süperiletkenleri ise $65 \times 34 \times 14$ mm³ boyutlarındadır. Bu başlık altında, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin kuvvet verileri ile karşılaştırma amacı için kullanılan tek çekirdekli YBCO süperiletken manyetik kuvvet verileri, 2014 ve 2015 yıllarında tamamlanan yüksek lisans ve doktora tezlerinden alınmıştır (Şahin, 2014; Abdioğlu, 2015).

Kullanılan PMG dizilimlerinde HTS yarıçapının (ya da genişliğinin) PMG genişliğine oranını sabit bir değer olan 0,64'te tutmak için (PMG-S3 ve PMG-M3 için) PMG-S1, PMG-S2 ve PMG-S3 dizilimlerinde 10 mm genişlikli yukarı yönlü mıknatıs kullanılırken, PMG-M3 diziliminde 20 mm genişlikli yukarı yönlü mıknatıslar kullanılmıştır (Ozturk vd., 2015a). Ayrıca PMG-S3 ve PMG-M3 dizilimlerinde aynı sayıda ve dizilimde fakat farklı genişlikte mıknatıslar kullanıldığından, tek çekirdekli ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenleri arasında daha doğru bir karşılaştırma yapmak için, aynı PMG kesit alanına sahip PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimleri (Şekil 3.50) oluşturulmuştur. Deneysel ölçümlerde incelenen PMG dizilimindeki S ve M terimleri, ilgili dizilimlerde kullanılan sırasıyla tek çekirdekli (single) ve üç çekirdekli (multi) YBCO süperiletkenlerini temsil etmektedir.

Şekil 3.48'de PMG dizilimleri için manyetik alan modellemeleri HTS-PMG şemaları ile birlikte verilmiştir (Ozturk vd., 2015a). Şekilde PMG-M3 dizilimi için üç çekirdekli YBCO üzerindeki mavi ve kırmızı halkalar sırasıyla her bir çekirdek etrafında dönen tane içi süperakımları ve numune boyunca tane sınırlarında dönen tanelerarası süperakımları temsil etmektedir.

Şekilde farklı PMG dizilimleri için gösterilen B_x ve B_z manyetik akı dağılımları PMG yüzeylerinden 5 mm düşey mesafede yatay yer değiştirmeye bağlı olarak hesaplanmıştır. Ayrıca manyetik akı yoğunluğu dağılımları, hesaplanan B_x ve B_z değerlerinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir.



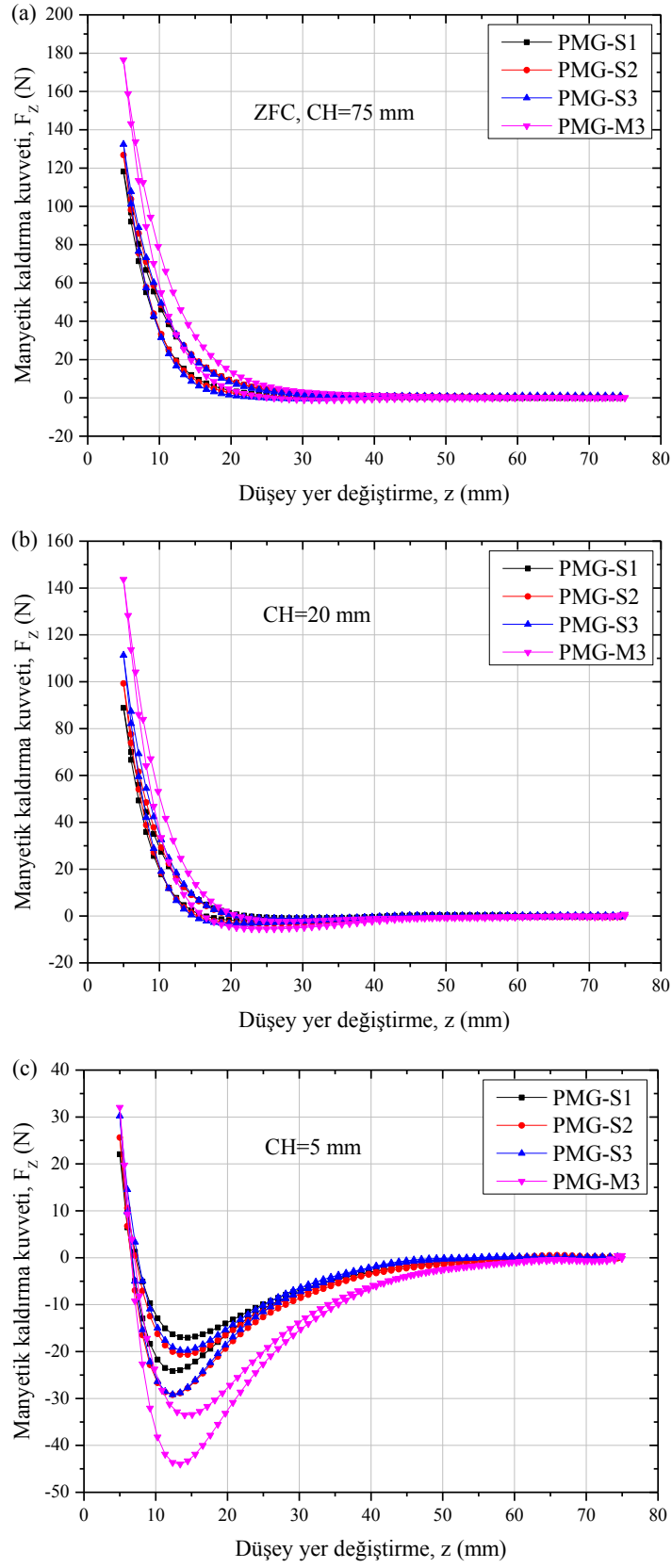
Şekil 3.48. HTS-PMG dizilimlerinin şematik gösterimleri ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları (Ozturk vd., 2015a).

Şekilden görüldüğü gibi PMG-M3 dizilimine ait B_z pikinin maksimum değeri diğer dizilimlere kıyasla daha düşük olmasına rağmen B_x maksimum pik şiddetleri ise daha büyük değere sahiptir. Buna ek olarak, PMG-M3 diziliminde kullanılan aşağı ve yukarı yönlü mıknatısların daha geniş olmasından dolayı B_z piki açıkça diğer dizilimlere kıyasla daha geniştir. Tek çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin kullanıldığı S serisi PMG dizilimleri kıyaslandığında, PMG-S2 ve PMG-S3 dizilimlerinde kullanılan aşağı yönlü ilave mıknatıslardan dolayı, B_x piklerinin maksimum değerleri az miktarda artarken ilave B_z piklerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir.

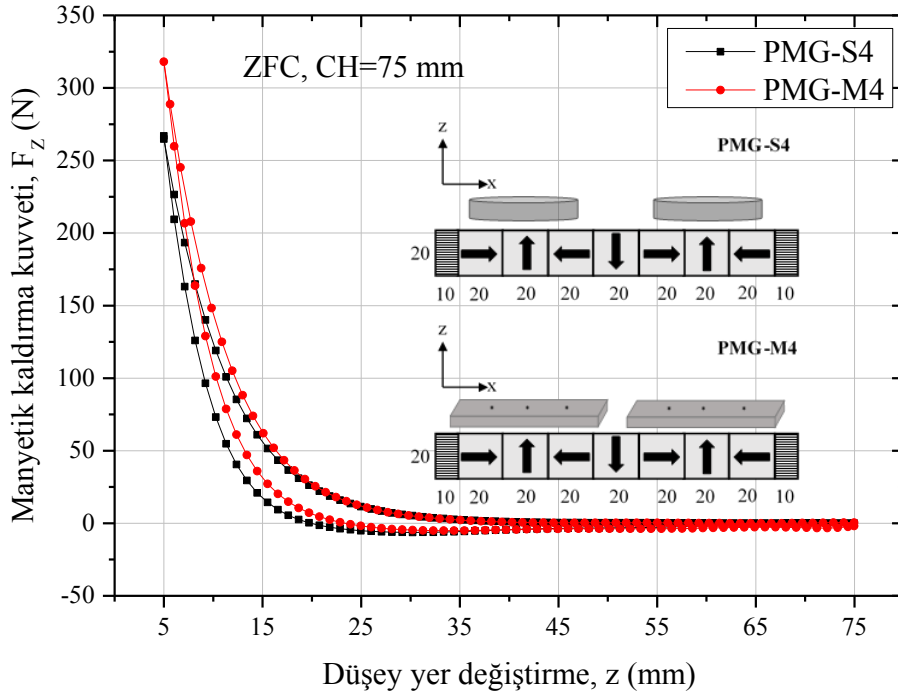
3.10.1. Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Verilerinin Tek ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi

Şekil 3.49 çeşitli soğutma yüksekliklerinde ($CH=75$ mm, $CH=20$ ve $CH=5$ mm) farklı PMG dizilimleri ile elde edilen tek ve üç çekirdekli YBCO süperiletkeni düşey kaldırma kuvvetinin (F_z) düşey yer değiştirmeye bağlı karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 3.49'dan görüldüğü gibi, CH arttıkça maksimum kaldırma kuvveti değerleri artmakta ve maksimum çekici kuvvet değerleri ise CH azaldıkça artmaktadır. Tüm PMG dizilimleri için $CH=5$ mm soğutma yüksekliğinde itici kuvvet değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen PMG-M3 diziliminin çekici kuvvet değerleri diğer dizilimlere kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Bu durum üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin tek çekirdekli YBCO'ya göre daha fazla akı tuzaklama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca $CH=20$ mm ve ZFC durumlarında PMG-M3 diziliminin maksimum kaldırma kuvveti değerleri diğer dizilimlere göre açıkça daha büyüktür. ZFC durumunda PMG-M3 ve PMG-S3 dizilimleri için sırasıyla 176,5 N ve 132,4 N maksimum kaldırma kuvveti değerleri gözlenmiştir. PMG-M3/PMG-S3 dizilimleri ile elde edilen maksimum kuvvet oranları, $CH=5$ mm, $CH=20$ mm ve ZFC durumları için sırasıyla 1,05, 1,29 ve 1,33'tür. Bu sonuç üç çekirdekli YBCO'nun teknolojik kullanım açısından daha üstün özellikte olduğunu göstermektedir. Çünkü üç çekirdekli YBCO, tanelerarası çiftlenimden gelen ekstra indüklenen akım katkısından dolayı daha iyi bir manyetik kaldırma performansı sergilemektedir (Deng vd., 2012a; Deng vd., 2012b). PMG-S1, PMG-S2 ve PMG-S3 dizilimlerinin maksimum itici kuvvet değerlerini kıyaslandığında, PMG-S3 diziliminin aşağı yönlü ilave mıknatısların simetrik B_x piklerine yaptıkları katkıdan dolayı en büyük kaldırma kuvveti değerine sahip olduğu görülmektedir.

Üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin daha üstün kaldırma kuvveti performansına sahip olmasına rağmen, PMG-S3 ve PMG-M3 dizilimlerinde farklı genişlikte mıknatıslar kullanıldığından, tek çekirdekli ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenleri arasında daha yerinde bir karşılaştırma yapmak için PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimleri ile ZFC kaldırma kuvveti ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.50 ile verilen kaldırma kuvveti verileri kıyaslandığında, PMG-M4 dizilimi PMG-S3 dizilimine kıyasla daha büyük maksimum kuvvet değerlerine sahiptir. PMG-M4 ve PMG-S3 ile ölçülen maksimum kaldırma kuvveti değerleri sırasıyla 318,0 N ve 266,9 N olup maksimum kaldırma kuvveti oranı ise 1,19 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.49. (a) $CH=75$ mm, (b) $CH=20$ mm ve (c) $CH=5$ mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin düşey kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması



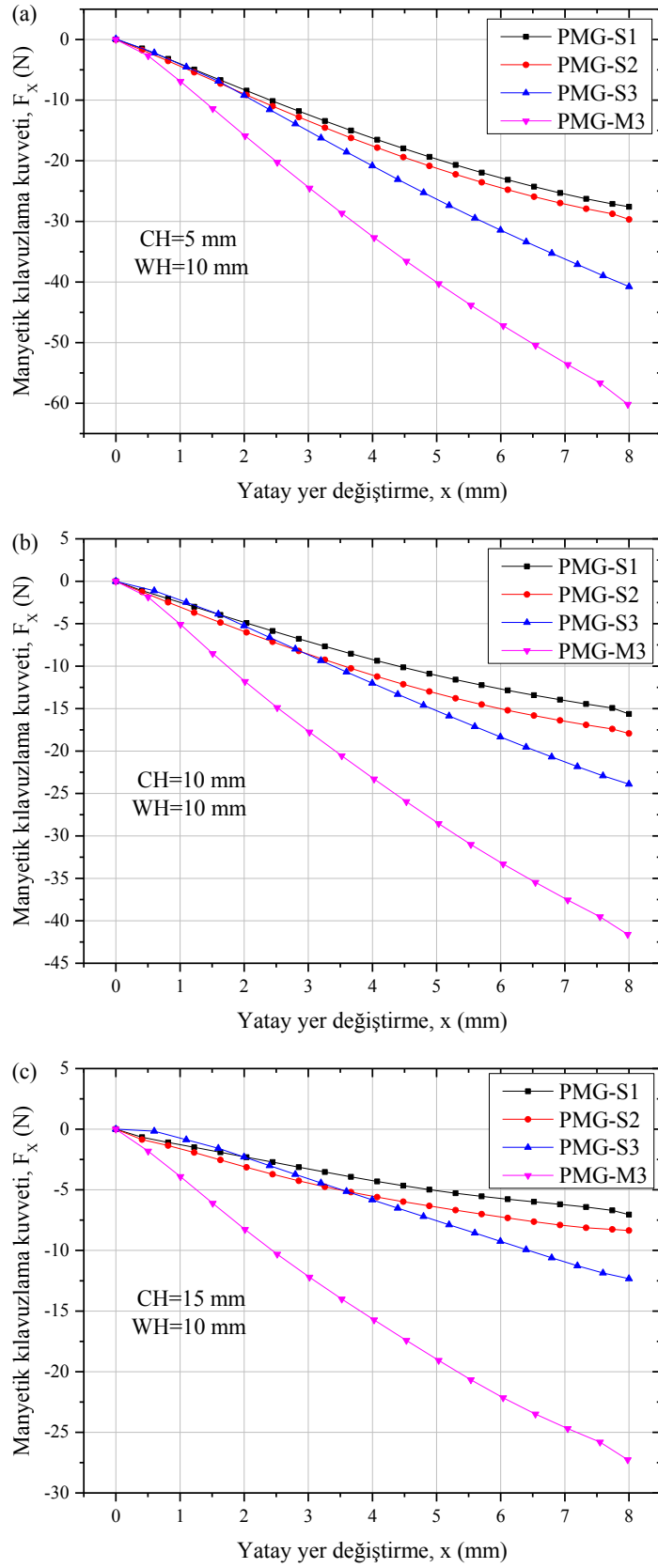
Şekil 3.50. ZFC durumunda (CH=75 mm) PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimlerinin düşey kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.10.2. Yatay Manyetik Kılavuzlama Kuvveti Verilerinin Tek ve Üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi

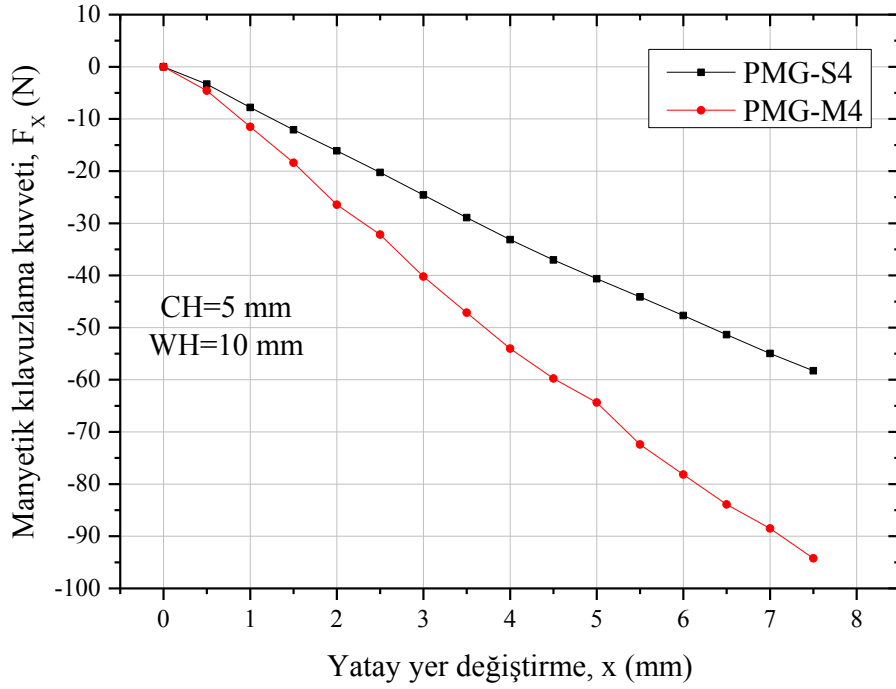
Şekil 3.51 çeşitli soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm, CH=10 ve CH=15 mm) fakat aynı çalışma mesafesinde (WH=10 mm) farklı PMG dizilimleri ile elde edilen yatay kılavuzlama kuvvetinin (F_x) yatay yer değiştirmeye bağlı karşılaştırmasını göstermektedir. Şekildeki manyetik kılavuzlama kuvveti verileri 0-8 mm'lik yatay yer değiştirmede ve tek yönlü alınmıştır. Şekil 3.51'den görüldüğü gibi, S serisi PMG'ler için kılavuzlama kuvveti değerleri ilave B_z piklerinden dolayı (Şekil 3.48) düzenli bir artış göstermektedir. Şekilde görülen negatif kuvvetler YBCO numuneler ilk konumlarından yatay doğrultuda hareket ettiklerinde geri çağırıcı etki göstererek sistemin dengesini işaret eder. Yatay mesafe arttıkça maksimum kaldırma kuvveti değerleri yaklaşık olarak doğrusal bir biçimde artmakta ve maksimum kuvvet değerleri ise CH azaldıkça, manyetik akı tuzaklamasından dolayı artmaktadır (Deng vd., 2011). Ayrıca şekilden görüldüğü gibi, tüm soğutma yükseklikleri için PMG-M3 diziliminin kılavuzlama kuvveti diğer dizilimlere kıyasla belirgin bir biçimde

daha büyüktür. PMG-M3 ve PMG-S3 dizilimleri ile $CH=5$ mm için ölçülen maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri sırasıyla $-60,2$ N ve $-40,8$ N olup maksimum kılavuzlama kuvveti oranı ise $1,47$ 'dir. Bu oranın $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm için sırasıyla $1,74$ 'e ve $2,22$ 'ye artması, üç çekirdekli YBCO'nun pratik uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermektedir. Soğutma yüksekliğinin artmasıyla artan kılavuzlama kuvvet oranı, süperiletken ile PMG-M3 diziliminin, PMG-S3 dizilimine göre daha büyük etkileşim bölgesine (domain) sahip olması ile açıklanabilir. Şekil 3.48 (d)'de görüldüğü ve daha önce de belirtildiği gibi (Şekil 3.44), üç çekirdekli süperiletken içerisindeki taneler etrafında tane içi (Şekil 3.48 (d)'deki mavi halkalar) ve bu tüm süperiletken boyunca tanelerarası çiftlenimden dolayı tanelerarası süperakım (Şekil 3.48 (d)'deki kırmızı halka) oluşur. PMG-M3 diziliminin daha büyük kılavuzlama kuvvetine sahip olması, tanelerarası çiftlenimden gelen ekstra indüklenen akım katkısına atfedilebilir (Deng vd., 2012a; Deng vd., 2012b). Üç çekirdekli YBCO'da dolaşan perdeleme akımlarının yarıçapının artması, ortamdaki manyetik akı yoğunluğu ile perdeleme akımlarının daha büyük bir etkileşim alanına sahip olması anlamına gelir (Ozturk vd., 2015a).

PMG-S3 ve PMG-M3 dizilimlerinde farklı genişlikte mıknatıslar kullanıldığından, tek çekirdekli ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenleri arasında daha yerinde bir karşılaştırma yapmak adına, daha önce gerçekleştirilen manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümlerine ek olarak, PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimleri ile $CH=5$ mm soğutma mesafesi için manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.52'de gösterilen manyetik kılavuzlama kuvveti verileri kıyaslandığında, PMG-M4 dizilimi PMG-S4 dizilimine kıyasla daha büyük maksimum kuvvet değerlerine sahiptir. PMG-M4 ve PMG-S4 ile ölçülen maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti değerleri sırasıyla $-94,3$ N ve $-58,3$ N olup maksimum kaldırma kuvveti oranı ise $1,62$ olarak elde edilmiştir. Manyetik kaldırma kuvveti ve manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni tek çekirdekli YBCO'ya kıyasla, sadece daha farklı PMG dizilimleri ile değil aynı zamanda eşit PMG boyutlarında da daha iyi manyetik kaldırma ve kılavuzlama performansı göstermektedir. Bu sonuçlar, PMG dizilimlerinin aynı kesite sahip olduğu durumlarda, hem kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvvetinin, YBCO numunesinde indüklenen akımın yarıçapına ve tanelerarası çiftlenim etkisine bağlı olduğunu göstermektedir.



şekil 3.51. (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması



şekil 3.52. CH=5 mm soğutma yüksekliğinde PMG-S4 ve PMG-M4 dizilimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

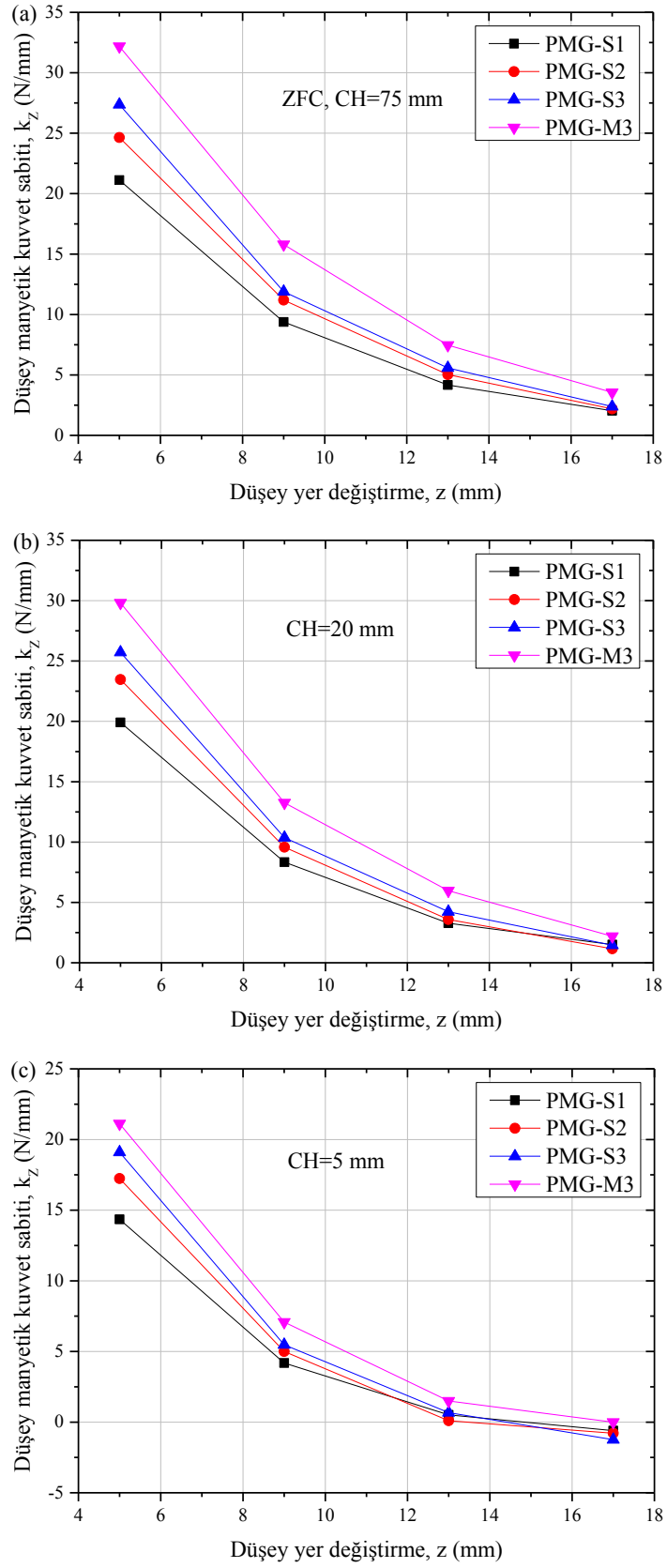
3.10.3. Manyetik Kuvvet Sabiti Verilerinin Tek ve üç Çekirdekli YBCO Süperiletkenleri İçin İncelenmesi

Üç çekirdekli YBCO süperiletkeni ile tek çekirdekli YBCO süperiletkeni karşılaştırmalı olarak incelenirken, manyetik kaldırma kuvveti (F_z) ve manyetik kılavuzlama kuvveti (F_x) ölçümlerine ek olarak, düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ve yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümleri de benzer soğutma şartları ile benzer soğutma yükseklikleri için gerçekleştirilmiştir.

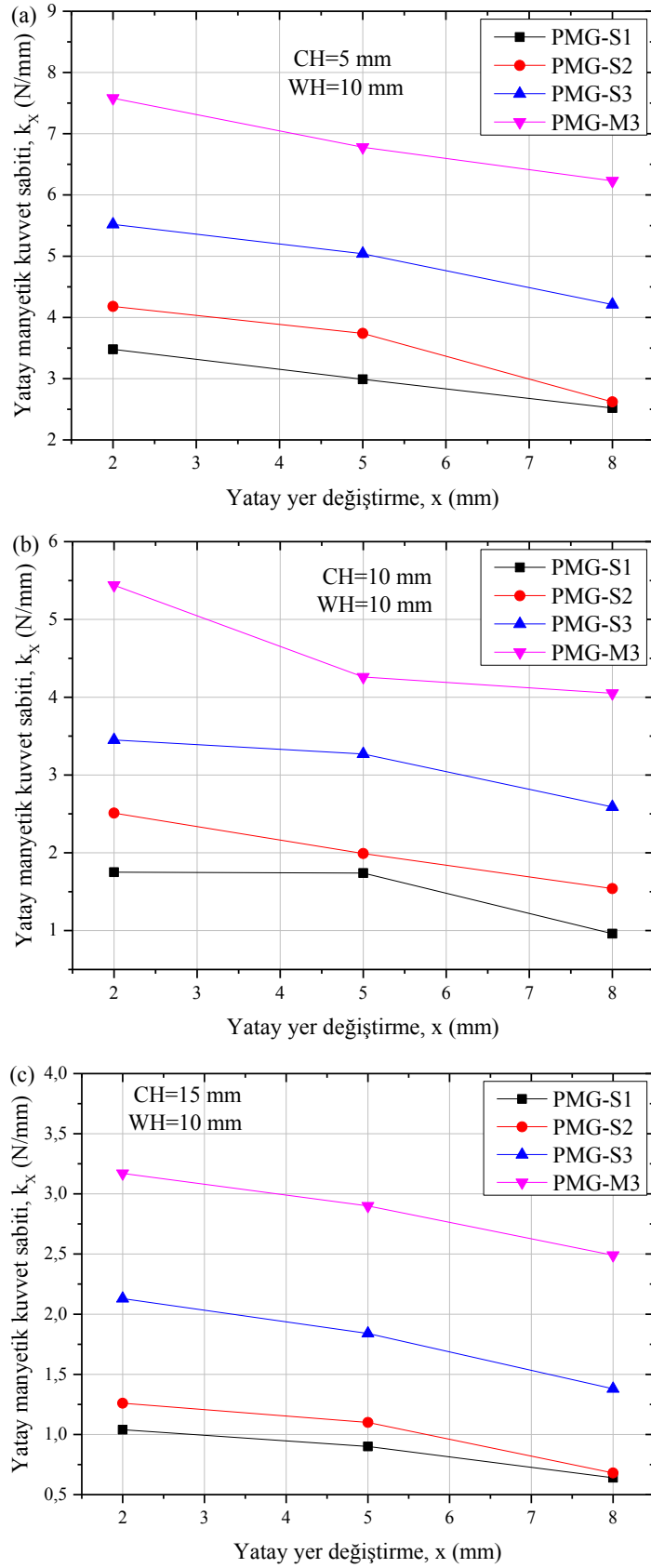
şekil 3.53 farklı HTS-PMG dizilimleri için farklı soğutma mesafelerinde (CH=75 mm, CH=20 mm ve CH=5 mm) tek çekirdekli ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. şekilde düşey kuvvet sabiti değerleri, soğutma yüksekliğinin artmasıyla tüm düşey mesafelerde artmaktadır. Üç çekirdekli YBCO'nun (PMG-M3) düşey kuvvet sabitinin tüm düşey mesafelerde ve tüm soğutma yükseklikleri için en büyük değere sahip olduğu görülmektedir. Tek çekirdekli YBCO süperiletkeninin kullanıldığı S serisi PMG dizilimleri kıyaslandığında, PMG-S2 ve PMG-S3 dizilimlerinde kullanılan aşağı yönlü ilave

mıknatısların etkisiyle, manyetik kaldırma ve manyetik kılavuzlama kuvvetlerinde olduğu gibi düşey kuvvet sabiti değerlerinin de arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca farklı PMG dizilimlerine ait düşey kuvvet sabiti değerleri arasındaki sayısal fark düşey mesafenin artmasıyla daha da azalmaktadır. PMG-M3 ve PMG-S3 dizilimleri ile elde edilen düşey kuvvet sabitlerinin oranı, CH=5 mm, CH=20 mm ve ZFC (CH=75 mm) durumları için sırasıyla 1,10, 1,16 ve 1,17 olarak hesaplanmıştır. Soğutma yüksekliğinin artmasıyla artan bu maksimum kuvvet oranı, Maglev sistemlerinde üç çekirdekli YBCO süperiletkeni kullanımının, yüksek CH'larda düşey dengenin sağlanmasında daha etkin olacağına işaret eder.

Şekil 3.54 farklı soğutma mesafelerinde (CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm) farklı HTS-PMG dizilimleri için tek çekirdekli ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi PMG-M3 diziliminin yatay manyetik kuvvet sabiti tüm soğutma yükseklikleri için tüm yatay mesafelerde en büyük değerlere sahiptir. Bu durum sistemin daha iyi yatay denge gösterdiğinin bir kanıtı olduğu gibi, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin kaldırma kuvvetine ilave, diğer bir üstün yanına işaret eder. Soğutma yüksekliği CH=5 mm için ve 2 mm yatay mesafede gözlenen maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri PMG-S1, PMG-S2, PMG-S3 ve PMG-M3 dizilimleri için sırasıyla 3,5 N/mm, 4,2 N/mm, 5,5 N/mm ve 7,6 N/mm olarak ölçülmüştür. PMG-M3 diziliminin PMG-S3 dizilimine göre ölçülen yatay manyetik kuvvet sabiti oranları CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm soğutma yükseklikleri için sırasıyla 1,38, 1,54 ve 1,49 olarak belirlenmiştir. S serisi PMG dizilimlerine ait yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinde aşağı yönlü ilave mıknatısların kullanılmasıyla sistematik olarak bir artış gözlenmektedir. Bilindiği gibi yatay manyetik kuvvet sabiti hesaplamalarında kullanılan manyetik kılavuzlama kuvveti (F_x), B_z manyetik akı yoğunluğu dağılımına ve YBCO numunede indüklenen akımlara bağlıdır. Dolayısıyla yatay manyetik kuvvet sabitindeki bu sistematik artış, Şekil 3.48'de verilen aşağı yönlü ilave mıknatısların varlığıyla merkezdeki B_z pikinin iki yanında belirginleşen simetrik B_z piklerine atfedilebilir. Buna ek olarak, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin tek çekirdekli YBCO'ya göre daha büyük yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerine sahip olması Şekil 3.48 (d)'de görülen daha büyük değerlere sahip simetrik B_z pikleri ile açıklanabilir.



Şekil 3.53. (a) CH=75 mm, (b) CH=20 mm ve (c) CH=5 mm soğutma yüksekliklerinde farklı PMG dizilimlerinin düşey manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması



şekil 3.54. (a) CH=5 mm, (b) CH=10 mm ve (c) CH=15 mm soğutma yuğsekliklerinde farklı PMG dizimlerinin yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Maglev sistemlerinin yük taşıma kapasitesinin ve yanal kararlılığının istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Maglev sistemlerinde HTS ve PMG arasındaki manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin elektromanyetik kaynaklı etkileşimden ortaya çıktığı bilinmektedir. Yürütülen bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalarda üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, hem yüksek kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvveti parametreleri belirlenmeye çalışılmış ve Maglev araçlarının teknolojik uygulanabilirliği araştırılmıştır. Maglev sistemleri için kullanılan alan kaynakları, farklı boyut ve özelliklerde üretilmiş kalıcı mıknatıslardan oluşan manyetik kılavuzlama yollarıdır. Manyetik kılavuzlama yollarında kullanılan mıknatısların kutup yönelimleri, dizilimleri ve bu mıknatısların süperiletken numunenin çekirdek ve boyutları gibi yapısal özellikleri ile uyumları, Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet ve kuvvet parametrelerini geliştirmek açısından önemlidir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda manyetik kılavuzlama yolunda farklı kutup yönelimli, farklı boyutlarda çeşitli dizilimlere sahip kalıcı mıknatıslar kullanılarak oluşturulan PMG dizilimleri ile üç çekirdekli YBCO arasındaki hem düşey hem de yatay manyetik kuvvet performansı değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin düşey ve yatay kuvvet sabiti ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Tüm bu mevcut PMG-HTS konfigürasyonları için kaldırma kuvveti değerlerinin alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altındaki sonuçlarının literatüre katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Optimum HTS-PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesinde yararlanılan sayısal modellemeler, sonlu elemanlar yöntemini kullanan COMSOL Multiphysics 4.2a paket programıyla yapılmıştır.

Maglev sistemlerinin kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerleri gibi manyetik kuvvet performansını artırmaya yönelik yapılan sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Deneysel çalışmalardan önce, PMG dizilimlerinin manyetik akı yoğunluğu dağılımları için manyetostatik çözüm kullanarak, Comsol Multiphysics 4.2a aracılığıyla yapılan sayısal çözümler, verimli deneysel çalışmalar gerçekleştirmek ve elde edilen veriler için doğru yorumlar yapmak adına faydalı olmuştur.

2. Manyetik alanın düşey bileşeni B_z pik sayısı, akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan yukarı veya aşağı manyetik kutup yönelimli mıknatıs sayısına ve manyetik alanın yatay bileşeni B_x pik sayısı da sağ ve sol manyetik kutup yönelimli mıknatısların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca B_z ve B_x pik genişlikleri PMG dizilimde kullanılan mıknatısların boyutlarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

3. Üç çekirdekli YBCO numunenin manyetik kuvvet performansı, alan kaynağı olarak kullanılan PMG dizilimi ile süperiletken malzeme arasındaki etkileşim ile ilişkilidir. PMG ve süperiletken birbirleri ile uyumlu bir düzende bir araya getirilmelidir. Aksi durumda, çok çekirdekli süperiletken tam performanslı kullanılacak şekilde etkin bir alanla uyarılmazsa iyi bir malzemenin manyetik yükleme potansiyeli boşa harcanmış olur.

4. Aynı dizilimde fakat farklı boyutlarda mıknatıs içeren PMG yolları için elde edilen maksimum kaldırma kuvveti değerlerinin birbirine yakın olması, yüksek manyetik kaldırma kuvveti elde etmek büyük boyutlu ve yüksek maliyetli mıknatıs kullanmaya gerek olmadığını göstermektedir.

5. Manyetik kılavuzlama yolunda akı biçimlendirici olarak mıknatıs yerine hava kullanıldığında, benzer boyuttaki PMG'ler için $CH=5$ mm soğutma yüksekliğinde, kaldırma kuvvetinde % 41 ve kılavuzlama kuvvetinde ise % 51 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. PMG yolunda boşluk kullanımı ile akı gradyentindeki azalmadan dolayı, kılavuzlama kuvvetindeki daha yüksek azalma oranı, yüksek manyetik kılavuzlama kuvveti elde etmek için küçük mesafelerde akı gradyentinin büyük olmasının gerekliliğine işaret eder.

6. Farklı mıknatıs boyutları içeren PMG yolları ile üç çekirdekli YBCO süperiletkeni arasında oluşan yüksek manyetik kılavuzlama kuvvetinin, mıknatıs sayısı ve büyüklüğünden çok, birim mesafede yüksek manyetik akı gradyenti ile orantılı olduğu görüldü.

7. Aynı Halbach dizilimine sahip fakat daha küçük boyutlarda mıknatıslardan oluşan manyetik rayların büyük boyutlu mıknatıslar içeren manyetik raylara kıyasla daha büyük manyetik kuvvet göstermesi, üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin çekirdek pozisyonlarının, alttaki PMG yolunun manyetik akı dağılımı ile uyumunun sağlanmış olmasına işaret eder.

8. Düşey yönlü mıknatıs genişliğinin yatay yönlü mıknatıs genişliğine (W_{dym}/W_{yym}) oranının artmasıyla tüm dizilimler için normalize kılavuzlama kuvvet değerleri genellikle artmaktadır. Bilindiği gibi yatay kılavuzlama kuvveti, PMG dizilimlerinin oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunun düşey bileşeni olan B_z ile orantılıdır. Böylece düşey yöndeki B_z manyetik akı yoğunluğu artışının, üç çekirdekli süperiletkenin manyetik kılavuzlama kuvveti üzerine olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

9. Farklı PMG yollarından oluşan sistem ve üç çekirdekli YBCO süperiletkenlerinden oluşan gerçek boyutlu Maglev uygulamaları düşünüldüğünde, yüksek maliyet gerektiren uzun mesafeli manyetik raylarda üç mıknatıslı PMG manyetik yollarının, ani frenleme, hızlanma ve yüklemenin gerekli olduğu Maglev duraklarında ise beş ve daha yüksek sayıda mıknatıslardan oluşan Halbach benzeri PMG yolları kullanımının uygun olacağı düşünülebilir.

10. Bütünleşik mıknatısların olmadığı durumda B_z pikleri en büyük değerlere sahipken, B_x pikleri ise en düşük değerlere sahiptir. Bütünleşik mıknatısların varlığıyla B_z pik değerlerinin düşmesi, aynı kutup yönelimine sahip bütünleşik mıknatıslardan ve PMG'nin kenarlarındaki mıknatıslardan çıkan zıt yönlü düşey manyetik akı çizgilerinin birbirini yok ederek manyetik akı yoğunluğunu zayıflatması ile açıklanabilir.

11. Aynı kutup yönelimine sahip bütünleşik mıknatıslardan ve PMG'nin uçlarındaki mıknatıslardan çıkan aynı yönlü yatay manyetik akı çizgileri birbirlerini güçlendirerek manyetik akı yoğunluğunu arttırmaları. Kısacası bütünleşik mıknatısların kullanımı B_x manyetik akı yoğunluğu bileşeni üzerinde pozitif katkıda bulunurken B_z manyetik akı yoğunluğu bileşeni üzerinde ise küçük miktarda negatif etkide bulunmaktadır.

12. Bütünleşik mıknatısın $Z_{PM}=15$ mm düşey konumunda, yatay kılavuzlama kuvvet karakterinin, soğutma yüksekliği arttıkça, çekici kuvvet davranışından itici kuvvet davranışına doğru kaymadığı görülmüştür. Kılavuzlama kuvvetinin farklı soğutma mesafeleri için bu kademeli değişimi kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiğinde, Maglev sistemlerinin pasif kontrol uygulamaları ve manyetik yatak (bearing) uygulamaları için çok kullanışlı olabilir.

13. Bütünleşik mıknatısların kullanıldığı $Z_{PM}=25$ mm düşey konumu ve $CH=5$ mm'de, manyetik kaldırma kuvveti bütünleşik mıknatıs olmayan duruma göre 41,6 N'dan 106,6 N'a çıkarak % 156 oranında bir artış göstermiştir. Bununla birlikte aynı soğutma yüksekliğinde -34,9 N'dan -34,0 N'a düşen kılavuzlama kuvvetinde ise sadece % 2,6'lık bir azalma gözlenmiştir. $Z_{PM}=25$ mm için kılavuzlama kuvvetindeki bu küçük azalma, pratik Maglev uygulamalarının ihtiyaç duyduğu kaldırma kuvvetindeki muazzam artış yanında kabul edilebilir bir seviyededir.

14. Üç çekirdekli YBCO süperiletkeninde, birbirine kuvvetlice bağlanarak çiftlenmiş tane sınırları, numune boyunca tuzaklama yapabilecek daha geniş ve kuvvetli akı çivileme merkezleri oluşturmaya olanak verir. Bu durum çok çekirdekli süperiletkenlerin temel akı tuzaklama karakteristiğidir. Üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin, akı tuzaklama

kapasitesinin fazla olmasının yanı sıra numunede dolaşan taneici ve tanelerarası süperakımların varlığıyla, tek çekirdekli türevlerine göre benzer PMG dizilimleri için daha iyi bir manyetik kuvvet performansı sergilediği görülmüştür.

15. Manyetik kaldırma kuvveti ve manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre, üç çekirdekli YBCO süperiletkeni tek çekirdekli YBCO'ya kıyasla, sadece daha farklı PMG dizilimleri ile değil aynı zamanda eşit PMG boyutlarında da daha iyi manyetik kaldırma ve kılavuzlama performansı göstermektedir. Bu sonuçlar, PMG dizilimlerinin aynı kesite sahip olduğu durumlarda, hem kaldırma kuvveti hem de kılavuzlama kuvvetinin, YBCO numunesinde indüklenen akımın yarıçapına ve tanelerarası çiftlenim etkisine bağlı olduğunu göstermektedir.

5. ÖNERİLER

Yürütülen doktora tezi çalışmasında üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin manyetik kuvvet performansı farklı HTS–PMG dizilimi için araştırıldı ve farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvveti, manyetik kılavuzlama kuvveti ve ilgili manyetik kuvvet sabiti ölçümleri deneysel olarak yapıldı. Deneysel çalışmalar öncesinde PMG dizilimlerinin manyetik akı yoğunlukları sayısal olarak belirlendi. Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalara ilave olarak aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

1. Manyetik kaldırma kuvvetinin süperiletken malzemenin kritik akım yoğunluğu ve numune boyutu ile orantılı olduğu bilinmektedir. Bu sebeple kritik akım yoğunluğu ve boyutları farklı süperiletken malzemeler kullanılarak Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet özellikleri araştırılabilir.

2. Maglev sistemlerinde süperiletken malzemelerle etkileşime girecek daha etkin manyetik alan dağılımları oluşturmak adına farklı boyutlarda mıknatıslar kullanılarak çeşitli HTS–PMG dizilimi için manyetik kuvvet özellikleri araştırılabilir.

3. Bu çalışmadaki ölçümler 77 K sıvı azot sıcaklığında gerçekleştirildi. Farklı sıcaklıklarda ölçümler yapılarak çeşitli PMG dizilimleri için YBCO süperiletkeninin manyetik kuvvet özelliklerine sıcaklığın etkisi araştırılabilir.

4. PMG yolunda manyetik alan kaynağı olarak kullanılan kalıcı mıknatıslar yerine daha büyük akım taşıma kapasitesine sahip süperiletken teller ile oluşturulan bobinlerden faydalanılabilir. Bu sayede daha büyük manyetik alan elde edilerek süperiletken malzemelerin akı tuzaklama kapasiteleri test edilebilir.

5. Deneysel çalışmalar öncesinde, PMG dizilimlerinin manyetik alan dağılımlarına ek olarak, manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti özellikleri sayısal olarak hesaplanarak deneysel çalışmaların daha verimli ve ekonomik olarak gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abd-Syukor, R., 2009. High Temperature Superconductors: Materials, Mechanisms and Applications, Academy of Sciences Malaysia, ASM Inaugural Lecture.
- Abdioglu, M., Ozturk, K., Gedikli, H., Ekici, M. ve Cansiz, A., 2015. Levitation and guidance force efficiencies of bulk YBCO for different permanent magnetic guideways, *J. Alloys. Comp.*, 630, 260-265.
- Abdioglu, M., Ozturk, K., Kutuk, S., Bolat, S. ve Yanmaz, E., 2012. Effect of Magnetic Flux Distribution and Magnetic Powder Addition on the Magnetic Levitation Force of Sm123 Superconductors, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 25, 923–929.
- Abdioglu, M., 2015. YBCO Süperiletkeni ile Manyetik Kılavuzlama Yolu Arasındaki Manyetik Kuvvet Özelliklerinin Hibrit Maglev Uygulamaları İçin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Abrikosov, A.A. 1957. On magnetic properties of superconductors of the second Group. *Soviet Physics JETP.*, 9, 1174.
- Annett, J. F., 2004, Superconductivity, Superfluids, Condensates, Oxford University Press Inc., New York.
- Bardeen, J., Cooper, L.N. ve Schrieffer, J., 1957. Theory of Superconductivity, *Phys. Rev.*, 108, 1175-1204.
- Bean, C. P., Doyle, M. V. ve Pincus A. G., 1962. Synthetic High-Field High-Current Superconductor, *Physical Review Letters*, 9, 3.
- Bean, C. P., 1964. Magnetization of high-field superconductors, *Rev. Mod. Phys.*, 31.
- 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.
- Buckel, W. ve Kleiner, R., 2004. Superconductivity: Fundamentals and Applications, 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Cardwell, D. A. ve Ginley, D. S., 2003, Handbook of Superconducting Materials, Institute of Physics Publishing Ltd., London.
- Choi, J. S., Park, S. D., Jun, B. H., Han, Y. H., Jeong, N. H., Kim, B. G., Sohn, J. M. ve Kim, C. J., 2008. Levitation force and trapped magnetic field of multi-grain YBCO bulk superconductors, *Physica C*, 468, 1473-1476.
- Chu, S. Y., Hwang, Y. J., Choi, S., Na, J. B., Kim, Y. J., Chang, K. S., Bae, D. K., Lee, C. Y. ve Ko, T. K., 2011. Design, manufacture and performance evaluation of HTS electromagnets for the hybrid magnetic levitation system, *Physica C*, 471, 1501-1505.
- Coombs, T. A., Cansiz, A. ve Campbell, A. M., 2002. A superconducting thrust-bearing system for an energy storage flywheel, *Supercond. Sci. Technol.*, 15, 831-835.
- Cullity, B. D. ve Graham, C. D., 2009. Introduction to Magnetic Materials, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

- Çınar, Y., 2007. Süperiletken Manyetik Yatakların Analizi Ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Del-Valle, N., Sanchez, A., Navau, C. ve Chen, D. X., 2011. Magnet Guideways for Superconducting Maglevs: Comparison Between Halbach-Type and Conventional Arrangements of Permanent Magnets, J. Low Temp. Phys., 162, 62–71.
- Deng, Z., He, D. ve Zheng, J., 2015. Levitation Performance of Rectangular Bulk Superconductor Arrays Above Applied Permanent-Magnet Guideways, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 1, 3600106, 1-6.
- Deng, Z., Izumi, M., Miki, M., Felder, B., Tsuzuki, K., Hara, S., Uetake, T., Floegel-Delor, U. ve Werfel, F. N., 2012a. Trapped Flux and Levitation Properties of Multiseeded YBCO Bulks for HTS Magnetic Device Applications—Part I: Grain and Current Features, IEEE Trans. Appl. Supercond., 22, 2, 6800110.
- Deng, Z., Izumi, M., Miki, M., Tsuzuki, K., Felder, B., Liu, W., Zheng, J., Wang, S., Wang, J., Floegel-Delor, U. ve Werfel, F. N., 2012b. Trapped Flux and Levitation Properties of Multiseeded YBCO Bulks for HTS Magnetic Device Applications—Part II: Practical and Achievable Performance, IEEE Trans. Appl. Supercond., 22, 2, 6800210.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Jing, H., Lu, Y., Ma, G., Liu, L., Liu, W., Zhang, Y. ve Wang, S., 2008. High-efficiency and low-cost permanent magnet guideway consideration for high- T_c superconducting Maglev vehicle practical application, Supercond. Sci. Technol., 21, 115018, 9.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Lin, Q., Zhang, Y. ve Wang, S. 2009. Maglev performance of a double-layer bulk high temperature superconductor above a permanent magnet guideway, Supercond. Sci. Technol. 22, 055003, 4.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Zhang, Y. ve Wang, S., 2013. An efficient and economical way to enhance the performance of present HTS Maglev systems by utilizing the anisotropy property of bulk superconductors, Supercond. Sci. Technol., 26, 025001, 6.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Zhang, Y. ve Wang, S., 2013. Feasibility of introducing ferromagnetic materials to onboard bulk high- T_c superconductors to enhance the performance of present maglev systems, Physica C, 485, 20-23.
- 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, J. Low Temp. Phys., 162, 72-79.
- Dias, D. H. N., Sotelo, G. G., de 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., de Andrade Jr, R. ve Stephan, R. M., 2012. Dynamical tests in a linear superconducting magnetic bearing, Physics Procedia, 36, 1049–1054.
- Essmann, G.M. ve Trauble, H., 1967. The direct observation of individual flux lines in type II superconductors. Phys.Lett. A, 24, 526-527.

- Fröhlich, H., 1950. Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature, Physical Review, 79, 5, 845-856.
- Ginzburg, V.L. ve Kirzhnits, D.A., 1982. High Temperature Superconductivity, New York ve London, Consultants Bureau.
- Halbach, K., 1985. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings, J. Appl. Phys., 57, 3605-3608.
- Hook, J.R., Hall, H.E., 1999. Çevirenler: Fevzi Köksal, Mustafa Altunbaş, Muharrem Dinçer, Engin Başaran, Katıhal Fiziği, Literatür Yayınları.
- Hull, J. R. ve Cansiz, A., 1999. Vertical and lateral forces between a permanent magnet and a high-temperature superconductor, Journal of Applied Physics, 86, 11, 6396-6404.
- Hull, J. R., 2000. Superconducting bearings, Supercond. Sci. Technol., 13, R1–R15.
- Jiang, D. H., Ma, G. T., Lin, Q. X., Xu, Y. Y., Wang, S. Y. ve Wang, J. S., 2012. Levitation-Force Investigation of High-Temperature Superconducting Maglev System Under Different Variations of the Vertical Displacement, J. Supercond. Nov. Magn., 25, 25-30.
- Jiang, D., Ma, G., Xu, Y., Zheng, J., Deng, Z., Wang, S. ve Wang, J., 2013. Characteristics of Dynamic Response of Balanced and Unbalanced High-T_c Superconducting Maglev System, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3600404, 4.
- Jilles, D., 1991. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Springer-Science + Business Media B.V., Thomson Press (India) Ltd, New Delhi.
- 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.
- Jing, H., Wang, S., Jiang, M. ve Wang, J., 2012. Influence of the Vertical Movement of Bulk on the Levitation Force at Different Temperatures, IEEE Trans. Appl. Supercond., 22, 6, 6800505, 5.
- Kim, C. J., Hong, G. W. ve Oh, H. J., 2001. Multi-seeded melt growth processed YBCO superconductors, Physica C, 357-360, 635-641.
- Krabbes, G., Fuchs, G., Canders, W-R., May, H ve Palka, R., 2004, High Temperature Superconductor Bulk Materials, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Kurabayashi, H., Horikoshi, S., Suzuki, A., Ikeda, M., Wongsatanawarid, A., Seki, H., Akiyama, S., Hiragushi, M. ve Murakami, M., 2010. Interaction between ring permanent magnets and bulk Dy–Ba–Cu–O superconductors, Physica C, 470, 1853–1855.
- Li, S., 1998. Magnetic and Magnetotransport Properties of Polycrystalline YBCO, Doktora tezi, Purdue Univesity.
- 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. Low Temp. Phys., 157, 67–72.

- Liu, W., Wang, J. S., Jing, H., Jiang, M., Zheng, J. ve Wang, S. Y., 2008b. Levitation performance of high- T_c superconductor in sinusoidal guideway magnetic field, Physica C, 468, 2345–2350.
- Liu, W., Wang, J. S., Liao, X. L., Zheng, S. J., Ma, G. T., Zheng, J. ve Wang, S. Y., 2011. Levitation performance of the magnetized bulk high- T_c superconducting magnet with different trapped fields, Physica C, 471, 156–162.
- Liu, W., Wang, J., Wang, S., Lin, Q., Jiang, D., Ma, G. ve Zheng, J., 2010, Influence of Auxiliary Permanent Magnet on the High- T_c Superconductive Hybrid Maglev System, IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 3, 915-919.
- Liu, W., Wang, S. Y., Jing, H., Zheng, J., Jiang, M. ve Wang, J. S., 2008a. 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 Superconductor, Proceeding of the Royal Society of London A, 149, 866, 71-88.
- Lu, Y ve Dang, Q., 2012. Magnetic Forces Investigation of Bulk HTS over Permanent Magnetic Guideway under Different Lateral Offset with 3D-Model Numerical Method, Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 640497, 6.
- Lu, Y., Liu, G. ve Qin, Y., 2014. Levitation Force Investigation of Bulk HTSC Above Halbach PMG with Different Cross-Section Physical Dimensions by 3D-Modeling Numerical Method, J. Low Temp. Phys., 177, 17–27.
- Lu, Y., Ge, Y., Liu, M. ve Wang, J. S., 2011a. High-Performance Permanent Magnet Railway Design Consideration of Magnetic Stiffness Parameters of YBCO Bulk Arrays, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 24, 1787-1791.
- Lu, Y., Lu, B. ve Wang, S., 2011b. The Relationship of Magnetic Stiffness Between Single and Multiple YBCO Superconductors over Permanent Magnet Guideway, J. Low Temp. Phys., 164, 279–286.
- Maxwell, E., 1950. Isotope Effect in the Superconductivity of Mercury, Physical Review, 78, 477.
- Meissner, W. H. ve Ochsenfeld, R., 1933. Upper Critical Field of High T_c Superconducting Y-Ba-Cu-O, Nature, 132, 931-935.
- Mitsuda, H., Inoue, A., Nakaya, B. ve Komori, M., 2009. Improvement of Energy Storage Flywheel System With SMB and PMB and Its Performances, IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 2091-2094.
- Moon, F. C., Weng, K. C. ve Chang, P. Z., 1989. Dynamic magnetic forces in superconducting ceramics, J. Appl. Phys., 66, 5643.
- Moon, F. C., Chang, P. Z., Hojaji, H., Barkatt, A. ve Thorpe, A. N., 1990. Levitation Forces, Relaxation and Magnetic Stiffness of Melt-Quenched $YBa_2Cu_3O_x$, Japanese Journal of Applied Physics, 29, 7, 1257-1258.
- 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 Trans. Appl. Supercond., 23, 3, 3600504.

- Mourachkine, A., 2004. Room-Temperature Superconductivity, Cambridge International Science Publishing, England.
- Murakami, K., Komori, M., Mitsuda, H. ve Inoue, A., 2007. Design of an energy storage flywheel system using permanent magnet bearing (PMB) and superconducting magnetic bearing (SMB), Cryogenics, 47, 272-277.
- 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.
- Murakami, M., 1992. Processing of bulk YBaCuO, Supercond. Sci. Technol., 5, 185-203.
- Nishijima, S., Eckroad, S., Marian, A., Choi, K., Kim, W. S., Terai, M., Deng, Z., Zheng, J., Wang, J., Umemoto, K., Du, J., Febvre, P., Keenan, S., Mukhanov, O., Cooley, L. D., Foley, C. P., Hassenzahl, W. V. ve Izumi, M., 2013. Superconductivity and the environment: a Roadmap, Supercond. Sci. Technol., 26, 113001.
- Omar, M. A., 1993. Elementary Solid State Physics: Principles and Applications, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts.
- Onnes, H. K., 1911. Superconductivity and Magnetizm, 119-120, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.
- Ozturk, K., Celik, S. ve Cansiz, A., 2009. Determination of levitation force and pinning properties of $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{211})_x$ bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio, Phys. Status Solidi A, 11, 2569-2575.
- Ozturk, K., Akbulut, S., Kutuk, S., Bolat, S., Celik, S. ve Basoglu, M., 2012. Comparative study of critical current density, pinning force and levitation force behavior in Yb211 doped-Sm123 bulk superconductors, J. Alloys. Comp., 516, 167-171.
- Ozturk, K., Sahin, E., Abdioglu, M., Kabaer, M., Celik, S., Yanmaz, E. ve Kucukomeroglu, T., 2015a. Comparative study of the magnetic stiffness, levitation and guidance force properties of single and multi seeded YBCOs for different HTS-PMG arrangements, J. Alloys. Comp., 643, 201-206.
- Ozturk, K., Kabaer, M. ve Abdioglu, M., 2015b. Effect of onboard PM position on the magnetic force and stiffness performance of multi-seeded YBCO, J. Alloys. Comp., 644, 267-273.
- Ozturk, K., Abdioglu, M., Sahin, E., Celik, S., Gedikli, H. ve Savaskan, B., 2015c. The Effect of Magnetic Field Distribution and Pole Array on the Vertical Levitation Force Properties of HTS Maglev Systems, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 4, 3601607, 7.
- Patel, A., 2013. Pulsed Field Magnetization of Composite Superconducting Bulks for Magnetic Bearing Applications, PhD Thesis, University of Cambridge, Queens' College, Department of Materials Science and Metallurgy.
- Patel, A., Filar, K., Nizhankovskii, V., I., Hopkins, S., C. ve Glowacki, B., A., 2013b. Trapped fields greater than 7 T in a 12mm square stack of commercial high-temperature superconducting tape, Appl. Phys. Lett., 102, 102601.
- Patel, A., Hopkins, S. C., Giunchi, G., Albisetti, A. F., Shi, Y., Palka, R., Cardwell, D. A., ve Glowacki, B. A., 2013c. The Use of an MgB_2 Hollow Cylinder and Pulse

- Magnetized (RE)BCO Bulk for Magnetic Levitation Applications, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3, 6800604, 4.
- Patel, A., Hopkins, S., C. ve Glowacki, B., A., 2013a. Trapped fields up to 2 T in a 12 mm square stack of commercial superconducting tape using pulsed field magnetization, Supercond. Sci. Technol., 26, 032001, 7.
- Patel, A., ve Glowacki, B., A., 2012. Enhanced trapped field achieved in a superconducting bulk using high thermal conductivity structures following simulated pulsed field magnetization, Supercond. Sci. Technol., 25, 125015, 8.
- Poole, C. P., 2000. Handbook of Superconductivity, Academic Press, U.S.A.
- Qin, Y. ve Shu, Y., 2013. Investigation of the Lateral Reversible Region of YBCO Bulk above a Permanent Magnet Guideway, J. Supercond. Nov. Magn., 26, 2391–2396.
- Qingyong, H., Wang, J. ve Wang, S., 2009. Levitation Force Relaxation of HTS YBCO Bulk under Load, J Supercond Nov Magn., 22, 409–415.
- 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.
- Schultz, L., de Haas, O., Verges, P., Beyer, C., Röhlig, S., Olsen, H., Kühn, L., Berger, D., Noteboom, U. ve Funk, U., 2005. Superconductively Levitated Transport System—The Supra Trans Project, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15, 2, 2301-2305.
- Seeber, B., 1998. Handbook of Applied Superconductivity, Cilt 1, Genova Univ. IOP Publishing, Bristol.
- Serway Raymond A., Moses Clement J. ve Moyer Curt A., 2005, Modern Physics Third Edition, 443-444.
- Sheahen, T. P., 2002. Introduction to High-Temperature Superconductivity, Kluwer Academic Publishers, New York.
- 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., 2005b. The relationship between levitation force and stiffness in symmetrical and unsymmetrical applied fields, Supercond. Sci. Technol., 18, 95–98.
- Song, H., De Haas, O., Beyer, C., Krabbes, G., Verges, P. ve Schultz, L., 2005a. Influence of the lateral movement on the levitation and guidance force in the high-temperature superconductor maglev system, Applied Physics Letters, 86, 192506.
- Song, H., De Haas, O., Ren, Z. Y., Wang, X. W., Zheng, J., Wang, X. Z., Wang, S. Y., Wang, J. S. ve Zhao, Y., 2004. Magnetic interaction between multiple seeded YBCO bulks and the permanent magnet guideway, Physica C, 407, 82-87.
- Sotelo, G. G., de Andrade Jr, R., Dias, D. H. N., Ferreira, A. C., Costa, F., Machado, O. J., de Oliveira, R. A. H., Santos, M. D. A. ve Stephan, R. M., 2013. Tests With One

- Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3, 3601204, 4.
- Sotelo, G. G., de Oliveira, R. A. H., Costa, F. S., Dias, D. H. N., de Andrade Jr, R. ve Stephan, R. M., 2015. A Full Scale Superconducting Magnetic Levitation (MagLev) Vehicle Operational Line, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 3, 3601005, 5.
- Sotelo, G. G., Dias, D. H. N., de Andrade Jr, R. ve Stephan, R. M., 2011b. Tests on a Superconductor Linear Magnetic Bearing of a Full-Scale Maglev Vehicle, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 1464-1468.
- Sotelo, G. G., Dias, D. H. N., Machado, O. J., David, E. D., de Andrade Jr, R., Stephan, R. M. ve Costa, G. C., 2010. Experiments in a Real Scale Maglev Vehicle Prototype, Journal of Physics: Conference Series, 234, 032054, 7.
- Sotelo, G. G., Dias, D. H. N., Motta, E. S., Sass, F., Ferreira, A. C., de Andrade Jr, R. ve Stephan, R. M., 2012. Operational Tests of a Full Scale Superconducting MagLev Vehicle Unit, Physics Procedia, 36, 943-947.
- Sotelo, G. G., N. Dias, D. H., de Andrade, R., Stephan, R. M., Del-Valle, N., Sanchez, A., Navau, C. ve Chen, D. X., 2011a. Experimental and Theoretical Levitation Forces in a Superconducting Bearing for a Real-Scale Maglev System, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 5, 3532-3540.
- Strasik, M., Hull, J. R., Mittleider, J. A., Gonder, J. F., Johnson, P. E., McCrary, K. E. ve McIver, C. R., 2010. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings, Supercond. Sci. Technol., 23, 034021, 5.
- Şahin, E., 2014. YBCO Bazlı Maglev Sistemleri Manyetik Kuvvet Sabitinin Farklı Alan Şartlarında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Takao, T., Usami, T., Yasukawa, S., Horie, T., Takahashi, M. ve Kamijo, H., 2015. Increase of Levitation Force due to Soft Ferromagnetic Plate and Bar in Magnetic Levitation System Using GdBCO Bulk, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 3, 3600805, 1-5.
- Walter, H., Bock, J., Frohne, C., Schippl, K., May, H., Canders, W. R., Kummeth, P., Nick, W. ve Neumueller, H. W., 2006. First heavy load bearing for industrial application with shaft loads up to 10 kN, J. Phys.: Conf. Ser., 43, 995-8.
- Wang, J., Wang, S. ve Zheng, J., 2009. Recent Development of High Temperature Superconducting Maglev System in China, IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 3, 2142-2147
- Wang, J., Wang, S., Zeng, Y., Huang, H., Luo, F., Xu, Z., Tang, Q., Lin, G., Zhang, C., Ren, Z., Zhao, G., Zhu, D., Wang, S., Jiang, H., Zhu, M., Deng, C., Hu, P., Li, C., Liu, F., Lian, J., Wang, X., Wang, L., Shen, X., Dong, X., 2002. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the World, Physica C, 378–381, 809–814.
- Weinstock, H., 2000. Applications of Superconductivity, NATO ASI Series E: Applied Sciences 365, Springer, Netherlands.

- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Goebel, B., Wippich, D., ve Schirrmeister, P., 2012b. Superconductor bearings, flywheels and transportation, Supercond. Sci. Technol., 25, 014007, 16.
- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Wippich, D., Goebel, B. ve Schirrmeister, P., 2012a. Bulk superconductors in mobile application, Physics Procedia, 36, 948–952.
- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Goebel, B., Rothfeld, R., Schirrmeister, P. ve Wippich, D., 2011. Large-scale HTS bulks for magnetic application, Physica C, 484, 6–11.
- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Goebel, B., Wippich, D. ve Schirrmeister, P., 2011. Recent Up-Scaling in HTS Magnetic Device Technology, Ieee Transactions On Applied Superconductivity, 21, 3, 1473-1476.
- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Goebel, B. ve Wippich, D., 2005. Modelling and Construction of a Compact 500 kg HTS Magnetic Bearing, Supercond. Sci. Technol., 18, 19-23.
- Wu, M.K., Ashburn, J.R., Tomg, 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, 908-910.
- Yang, W. M., Li, G. Z., Ma, J., Chao, X. X. ve Li, J. W., 2010. A Small High-Temperature Superconducting Maglev Propeller System Model, IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 2317-2321.
- Yang, W., Liu, Y., Wen, Z., Chen, X. ve Duan, Y., 2008. Dynamic Force Properties of a High Temperature Superconducting Maglev Test Vehicle, IEEE Trans. Appl. Supercond., 18, 2, 799-802.
- Zheng, J., Liao, X., Jing, H., Lin, Q., Ma, G., Yen, F., Wang, S. ve Wang, J., 2012. Anisotropy effect on levitation performance of bulk high- T_c superconductors above a permanent magnet guideway, Physics Procedia, 36, 1043–1048.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KABAER 1985 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul'da tamamladıktan sonra İstanbul Adile Mermerci Anadolu Lisesi'ne gitmeye hak kazandı. Buradaki yedi yıllık öğreniminin ardından 2003 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimini dört yılda tamamladıktan sonra aynı yıl Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans programına başlayarak 2010 yılında buradan mezun oldu. 2010 yılı ekim ayında Giresun Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı. 2011 yılı ocak ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2013 yılında doktora eğitimine devam ettiği Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne görevlendirilen Mehmet KABAER halen burada görev yapmaktadır.