

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**YBCO SÜPERİLETKENİ İLE MANYETİK KILAVUZLAMA YOLU ARASINDAKİ MANYETİK
KUVVET ÖZELLİKLERİNİN HİBRİT MAGLEV UYGULAMALARI İÇİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat ABDİOĞLU

**TEMMUZ - 2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalında
Murat ABDİOĞLU Tarafından Hazırlanan

YBCO SÜPERİLETKENİ İLE MANYETİK KILAVUZLAMA YOLU ARASINDAKİ
MANYETİK KUVVET ÖZELLİKLERİNİN HİBRİT MAGLEV UYGULAMALARI İÇİN
İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14 /07/2015 gün ve 1611 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

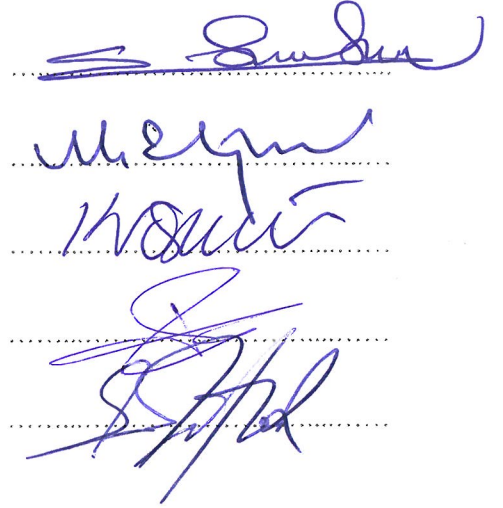
Başkan : Prof. Dr. Erhan COŞKUN

Üye : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Üye : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Doç. Dr. Şükrü ÇELİK



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu doktora tezi çalışmasında süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli manyetik kılavuzlama yolu (PMG) dizilimlerinin manyetik alan dağılımları sayısal olarak belirlendi ve manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerleri deneysel olarak araştırıldı.

Tez kapsamındaki çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirildi.

Tez çalışmamın her aşamasında değerli görüşlerini ve yardımlarını esirgemeyen, bana her konuda yol gösteren 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 aksaklıkların giderilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye ve Sayın Doç. Dr. Şükrü ÇELİK'e;

Deney kontrol sistemimizin yazılımındaki katkılarından dolayı Arş. Gör. Mehmet EKİCİ'ye; deneysel çalışmalarda benimle birlikte göstermiş oldukları üstün sabır ve çalışmaları nedeniyle Erçin ŞAHİN'e ve Arş. Gör. Mehmet KABAER'e;

Çalışmalarım boyunca hiçbir konuda desteğini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Arş. Gör. Dr. Özge ERDEM'e;

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

Çalışmalarımı gerçekleştirebilmem için gösterdikleri anlayıştan dolayı Bayburt Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Selçuk COŞKUN'a;

Bu günlere gelmem için gerek maddi, gerek manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Murat ABDİOĞLU

Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘YBCO S¼periletkeni İle Manyetik Kılavuzlama Yolu Arasındaki Manyetik Kuvvet ˆzelliklerinin Hibrit Maglev Uygulamaları İçin İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Kemal ˆZT¼RK’¼n sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/ˆrnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gˆsterdiđimi, çalışma s¼recinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her t¼rl¼ yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/07/2015

Murat ABDİOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri	3
1.3. Süperiletkenliğin Temel Eşitlikleri.....	6
1.4. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler	8
1.5. Manyetik Kaldırma Olayı.....	10
1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma Olayı.....	10
1.5.2. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar (Maglev)	16
1.6. Literatür Özeti.....	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1. Nümerik Çalışmalar	31
2.2. Deneysel Çalışmalar	32
2.2.1. Çalışmada Kullanılan YBCO Süperiletkenlerin ve NdFeB Mıknatısların Özellikleri	32
2.2.2. Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi Teknik Özellikleri	33
2.2.3. Manyetik Kılavuzlama Yolu (PMG) Tasarımı ve Mıknatıs Dizilimleri	35
2.2.4. Hibrit Süperiletken Numune Kabı ve Özellikleri	38
2.2.5. Manyetik Kuvvet Ölçüm Yöntemleri	39
2.2.6. Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Yöntemleri.....	40
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
3.1. Giriş	43
3.2. Nümerik Bulgular ve Değerlendirme	43
3.3. Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi	55

3.4.	DüŖey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi.....	70
3.5.	Yatay Manyetik Kuvvet (Kılavuzlama) Ölçüm Verilerinin İncelenmesi.....	77
3.6.	Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi.....	86
3.7.	Optimum Yükleme-Kılavuzlama Kuvvet Parametrelili PMG-YBCO Dizilimi İçin Değerlendirmeler	91
3.8.	Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatıs Pozisyonunun Manyetik Kuvvete Etkisi.	95
3.8.1.	Hibrit PMG Diziliminde Optimum DüŖey PM Pozisyonunun Belirlenmesi.....	96
3.8.2.	Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun DüŖey Manyetik Kuvvete Etkisi	101
3.8.3.	Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Kılavuzlama Kuvvetine Etkisi	104
3.8.4.	Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun DüŖey Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi	106
3.8.5.	Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi	109
4.	SONUÇLAR.....	112
5.	ÖNERİLER.....	116
6.	KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŖ		

Doktora Tezi

ÖZET

YBCO SÜPERİLETKENİ İLE MANYETİK KILAVUZLAMA YOLU ARASINDAKİ MANYETİK KUVVET ÖZELLİKLERİNİN HİBRİT MAGLEV UYGULAMALARI İÇİN İNCELENMESİ

Murat ABDİOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK
2015, 123 Sayfa

Manyetik olarak havalanmış taşıma sistemlerinin (Maglev) teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılması gerekmektedir. Geleneksel Maglev sistemlerinde manyetik kılavuzlama yolu (PMG) ile süperiletken numune arasındaki kılavuzlama kuvveti belli bir değerde olmasına rağmen, manyetik kaldırma kuvvetinin istenen düzeyde olmadığı yapılan çalışmalarda görülmüştür.

Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti (stiffness) değerlerinin artırılmasının amaçlandığı bu çalışmada öncelikle Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemi tasarlandı ve imal edildi. Gerçekleştirilen çalışmada son zamanlarda literatürde kullanılan geleneksel PMG ve iki kutuplu Halbach PMG'nin farklı boyutlarının ve ayrıca literatürden farklı olarak üç kutuplu Halbach PMG ve süperiletken haznedeki ilave PM dizilimlerinin, Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet özelliklerine etkisi incelendi. Deneyler öncesinde COMSOL Multiphysics 4.2a paket program ile farklı PMG'lerin manyetik alan modellemesi yapıldı ve böylece optimum manyetik alan dağılımları belirlendi. Bu çalışmada farklı HTS-PMG için farklı soğutma yüksekliklerinde (CH) ve farklı soğutma şartlarında (FC ve ZFC) ölçümler gerçekleştirildi. Yapılan çalışmalarda elde edilen manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti değerlerinin genelde literatürden büyük olduğu gözlemlendi. Ayrıca süperiletkenlerle birlikte uygun konum ve doğrultuda kullanılan ilave mıknatısların, hibrit Maglev sistemlerinin taşıma kapasitelerinin artırılması için yararlı olduğu sonucuna varıldı. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların uluslararası alanda Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin artmasına ve ülkemizde bu alandaki teknik bilgi birikiminin gelişimine büyük oranda katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Maglev, HTS, Kaldırma Kuvveti, Kılavuzlama Kuvveti, Manyetik Kuvvet Sabiti

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MAGNETIC FORCE PROPERTIES BETWEEN YBCO SUPERCONDUCTOR AND MAGNETIC GUIDEWAY FOR HYBRID MAGLEV SYSTEMS

Murat ABDİOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Kemal ÖZTÜRK
2015, 123 Pages

To enhance the technological applicability of the Maglev systems the magnetic levitation and guidance force values must be increased. In conventional Maglev systems, although the guidance force values between the magnetic guideway and superconductors are good, it was observed from the studies that magnetic levitation force is not at desired level.

The goal of this study is to increase the magnetic levitation force, guidance force and magnetic stiffness values. For this purpose, firstly the Magnetic Force Measurement System was designed and fabricated. In the performed study, effect of different dimensions of the conventional PMG and two pole Halbach PMG used in literature frequently and additional onboard PM on the magnetic force properties of Maglev systems were investigated. Before the experiments, the magnetic field profiles of different permanent magnetic guideways (PMG) were modelled via COMSOL Multiphysics 4.2a package and thus optimum magnetic field distributions were determined. The measurements for different HTS-PMG were done in different cooling heights (CH) and different cooling conditions (FC and ZFC). In the performed studies, the magnetic levitation force, guidance force and magnetic stiffness values were determined generally big as compared to the literature. Also, it is concluded that the additional permanent magnets that are used in appropriate positions and directions with superconductors are useful to enhance the load capacity of the hybrid Maglev systems. It is believed that the results of this study will make a contribution to enhancement of technological applicability of the Maglev systems and the scientific knowledge in our country.

Key Words: Maglev, HTS, Levitation Force, Guidance Force, Magnetic Stiffness

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 1. Uygulanan manyetik alanın numuneden dışarılanması.....	4
Şekil 1. 2. Süperiletkende kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı (Müller ve Ustinov, 1997).....	5
Şekil 1. 3. Nb ₃ Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004).	6
Şekil 1. 4. Manyetik akının süperiletken numunenin yüzeyinden içeri nüfuz etmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).....	8
Şekil 1. 5. Uygulanan H alanı altında I. ve II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanması (Patel, 2013).	9
Şekil 1. 6. II. tip süperiletkenlerde T _c 'nin altındaki sıcaklıklarda dış manyetik alan artırılırken malzemeye aşamalı olarak akı girişi (Krabbes vd., 2006).	9
Şekil 1. 7. Bir mıknatısın yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) üzerinde temassız olarak havada durması.....	11
Şekil 1. 8. (a) ZFC ve (b) FC rejimlerinde Sm–Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı (Krabbes vd., 2006).	14
Şekil 1. 9. Manyetik kaldırma modellerinin şematik gösterimi: (a) diyamanyetik tepki ve (b) akı tuzaklama (Hull, 2000).	16
Şekil 1. 10. Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).	17
Şekil 1. 11. Silindirik ve düzlemsel iki temel süperiletken manyetik yatak türü (Patel, 2013).....	18
Şekil 2. 1. Maglev sistemlerinde manyetik alan kaynağı olarak kullanılan PMG yolu manyetik akı dağılımının FEM yöntemi ile hesaplanmasında kullanılan Comsol Multiphysics 4.2a program arayüzü.....	32
Şekil 2. 2. Çalışmada kullanılan silindirik YBCO külçe süperiletkenler	33
Şekil 2. 3. Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar	33
Şekil 2. 4. Üç eksenli FUTEK yük hücreli Maglev Manyetik Kuvvet Ölçüm Düzeneği fotoğrafi.....	34
Şekil 2. 5. FUTEK MTA400 üç eksenli yük hücresi	34
Şekil 2. 6. Boş PMG kabı (a) ve farklı boyutlara ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG (b).....	35
Şekil 2. 7. Çalışmalarda kullanılan farklı HTS–PMG şematik gösterimleri (boyutlar mm birimindedir).....	37

Şekil 2. 8.	İki süperiletken numune bulunduran süperiletken numune haznesi (a) ve ilave mıknatısların düşey ve yanal konumlarının ayarlanabildiği hibrit süperiletken numune haznesi (b)	39
Şekil 2. 9.	Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin şematik gösterimi (Şahin, 2014).	41
Şekil 2. 10.	Yatay manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin şematik gösterimi (Şahin, 2014).	42
Şekil 3. 1.	PMG 1a diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ...	44
Şekil 3. 2.	PMG 1b diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ...	45
Şekil 3. 3.	PMG 1c diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ...	46
Şekil 3. 4.	PMG 2a (a) ve PMG 2b (b) dizilimlerinin manyetik akı profilleri; B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (d)	47
Şekil 3. 5.	PMG 3a diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ...	49
Şekil 3. 6.	PMG 3b diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ...	50
Şekil 3. 7.	PMG 4 diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)	51
Şekil 3. 8.	PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (a) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ...	52
Şekil 3. 9.	PMG 2a, PMG 3b ve PMG 4 dizilimlerinin B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (a) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b)	53
Şekil 3. 10.	Hibrit PMG 4 diziliminin şematik gösterimi (a), ilave mıknatısların düşey pozisyonlarına bağlı olarak B_x yatay (b) ve B_z düşey (c) manyetik akı yoğunluğunun değişimi	54
Şekil 3. 11.	Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatısların yatay konumlarına bağlı olarak B_x yatay (a) ve B_z düşey (b) manyetik akı yoğunluğunun değişimi	55
Şekil 3. 12.	PMG 1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	56
Şekil 3. 13.	PMG 1b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	57
Şekil 3. 14.	PMG 1c diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	57
Şekil 3. 15.	PMG 2a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	58
Şekil 3. 16.	PMG 2b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	59

Şekil 3. 17.	PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH= 20 mm (b) ve ZFC (c) durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 3. 18.	PMG 3a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	62
Şekil 3. 19.	PMG 3b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi	62
Şekil 3. 20.	PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH= 20 mm (b), ZFC (c) ve FC (d) durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 3. 21.	PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH= 20 mm (b) ve ZFC (c) durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması	66
Şekil 3. 22.	Maksimum normalize manyetik kaldırma kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)	70
Şekil 3. 23.	PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	72
Şekil 3. 24.	PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	74
Şekil 3. 25.	PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması	76
Şekil 3. 26.	Maksimum normalize düşey manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)	77
Şekil 3. 27.	PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=10 mm (b) ve CH=15 mm (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	79
Şekil 3. 28.	PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=10 mm (b) ve CH=15 mm (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	81
Şekil 3. 29.	PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=10 mm (b) ve CH=15 mm (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması	83
Şekil 3. 30.	Maksimum normalize manyetik kılavuzlama kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)	86
Şekil 3. 31.	PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin (a) CH=5 mm ve (b) CH=10 mm'deki k_x yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması	88
Şekil 3. 32.	PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin (a) CH=5 mm ve (b) CH=10 mm'deki k_x yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması	90

Şekil 3. 33.	Maksimum normalize yatay manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.).....	91
Şekil 3. 34.	PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvveti (a) ve kesit alanı kere maliyet başına maksimum kaldırma kuvveti (b).....	93
Şekil 3. 35.	PMG'lerin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti (a) ve kesit alanı kere maliyet başına maksimum kılavuzlama kuvveti (b).....	95
Şekil 3. 36.	Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatısların $X_{PM}=0$ mm, $X_{PM}=\pm 2,5$ mm ve $X_{PM}=\pm 5$ mm pozisyonları.....	96
Şekil 3. 37.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı düşey pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a) ve ZFC (b) durumlarında elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı.....	98
Şekil 3. 38.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı düşey pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a) ve $CH=15$ mm (b) soğutma mesafelerinde elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı.....	100
Şekil 3. 39.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=20$ mm (b) ve ZFC (c) durumlarında elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı.....	103
Şekil 3. 40.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=10$ mm (b) ve $CH=15$ mm (c) durumlarında elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı..	105
Şekil 3. 41.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=20$ mm (b) ve ZFC (c) durumlarında elde edilen düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı.....	108
Şekil 3. 42.	Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=10$ mm (b) ve $CH=15$ mm (c) durumlarında elde edilen yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı....	110

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3. 1. PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi	68
Tablo 3. 2. PMG'lerin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi	85
Tablo 3. 3. İlave mıknatısların farklı düşey pozisyonuna karşılık maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri	101
Tablo 3. 4. İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri	106
Tablo 3. 5. İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık maksimum düşey ve yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri.....	111

SEMBOLLER DİZİNİ

- \vec{A} : Manyetik vektör potansiyeli
- B : Manyetik akı yoğunluğu
- CH : Soğutma yüksekliği
- e : Elektron yükü
- E : Elektrik alan
- FC : Alanlı soğutma
- H : Manyetik alan
- h : Planck Sabiti
- H_a : Uygulanan manyetik alan
- $H_c(0)$: Mutlak sıfır 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
- k : Manyetik kuvvet sabiti
- m : Elektron kütlesi
- m : Manyetik moment
- M : Manyetizasyon
- MH : Ölçüm yüksekliği
- n_s : Süperiletken yük taşıyıcılarının yoğunluğu ile ilişkili bir sabit
- PM : Kalıcı mıknatıs

PMG	: Manyetik kılavuzlama yolu
T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik geçiş sıcaklığı
WH	: Çalışma yüksekliği
ZFC	: Alansız soğutma
λ	: Nüfuz derinliği
ρ	: Özdirenç
Φ_0	: Manyetik akı kuantumu
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	: Göreli manyetik geçirgenlik
κ	: Ginzburg-Landau parametresi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilinen metal ve iletkenlerden farklı olarak belirli bir sıcaklığın (kritik geçiş sıcaklığı, T_c) altında dirençleri aniden sıfıra düşen malzemeler süperiletken olarak adlandırılır. Süperiletkenlik, malzemelerin dirençlerinin sıcaklığa karşı davranışları üzerine çalışma yapan Heike Kammerling Onnes tarafından 1911 yılında keşfedilmiştir. 1908 yılında helyumu sıvılaştırmayı başaran Onnes, sıvı helyum sıcaklığına (4,2 K) kadar düşüldüğünde cıvanın direncinin aniden sıfıra düştüğünü gözledi (Onnes, 1911). Bu tarihe kadar yapılmış olan çalışmalardan, metallerin elektriksel dirençlerinin mutlak sıfırda sıfıra gideceği biliniyordu fakat herhangi bir sonlu sıcaklıkta sıfır dirençli bir metalin var olabileceği bilinmiyordu. Cıva elementinin süperiletkenlik özelliği gösterdiğinin keşfinden sonra kurşun ve kalayın da benzer özelliklere sahip olduğu bulundu.

Süperiletkenliğin keşfinden sonra süperiletkenlik mekanizmasının anlaşılmasına yönelik çalışmalara büyük bir önem verildi. 1933 yılında W.H. Meissner ve R. Ochsenfeld, manyetik alan altında soğutulan bir süperiletkenin manyetik akıyı dışarıladığını ve bu malzemelerin H_c denilen kritik bir manyetik alandan daha büyük alanlarda süperiletkenlik özelliklerini kaybettiklerini gözlediler (Meissner ve Ochsenfeld, 1933). Meissner olayı olarak adlandırılan bu özelliğin keşfi, süperiletkenlerin kritik sıcaklığın altında sıfır dirence sahip olmalarının keşfinden sonraki en büyük gelişmedir. Meissner olayının fiziksel açıklaması 1935 yılında London kardeşler tarafından yapılmıştır (Seeber, 1998).

London teorisi, süperiletkenliğin elektrodinamik özelliklerini açıklayan ilk makroskobik teori olması nedeniyle önemlidir. London kardeşler bu teori ile 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. London kardeşler, manyetik akımın süperiletken malzemeye belirli bir girme derinliğine kadar (λ) girebileceğini açıklayarak girme (nüfuz) derinliği kavramını ortaya koydular (London ve London, 1935). London teorisinden sonra süperiletkenliğin ikinci makroskobik teorisi Ginzburg ve Landau tarafından öne sürüldü. Normal hal ile süperiletken hal arasında bir ilişki olduğunu düşünen Ginzburg ve Landau, 1950 yılında süperiletkenliğin düzen parametrelerini tanımlayan makroskobik bir teori geliştirdiler ve

London denklemlerini türettiler (Ginzburg ve Kirznits, 1982). Süperiletkenliğin doğasının anlaşılması için çeşitli çalışmaların yapıldığı bu yıllarda Fröhlich tarafından teorik olarak öne sürülmüş (Fröhlich, 1950) ve Maxwell tarafından yapılan deneysel çalışmalarla (Maxwell, 1950) doğrulanmış olan bir olay da atomik kütle artmasıyla kritik sıcaklığın düşmesidir. İzotop olayı olarak adlandırılan bu durum, örgü hareketlerinin süperiletkenlik mekanizmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Süperiletkenliği mikroskobik ölçekte tanımlayan ilk teori 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından geliştirildi. BCS teorisi adı verilen bu teori, süperiletkenliğin doğasının anlaşılmasına ışık tutması açısından son derece önemlidir. BCS teorisine göre süperiletkenlerde akan süper akımlar, “cooper çifti” denilen bağlı elektronlarla taşınmaktadır (Bardeen vd., 1957). Bardeen, Cooper ve Schrieffer, “süperiletkenliğe dair ortaklaşa geliştirdikleri teoriden dolayı” 1972 yılında Nobel ödülüne layık görüldü.

Kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan kavramlarından sonra süperiletkenleri karakterize eden diğer bir kavram da kritik akım yoğunluğudur (J_c). Bean 1964 yılında kritik akım yoğunluğunun hesaplanabilmesi için alınganlık ve manyetizasyon eğrilerinden faydalanılabileceğini ileri sürdü (Bean, 1964). Süperiletkenlik alanında önemli bir diğer gelişme de Brian David Josephson tarafından 1962 yılında gerçekleştirildi. Josephson’a göre iki süperiletken malzeme arasına çok ince bir yalıtkan tabaka yerleştirildiğinde bu süperiletkenler arasında bir elektron tünellemesi olabilmektedir. Bu çalışma 1973 yılında Nobel ile ödüllendirildi.

Süperiletkenlikle ilgili çalışmalar yapan bilim insanlarının bir kısmı süperiletkenlik mekanizmasının anlaşılmasına yoğunlaşmış iken, bir kısmı da kritik sıcaklığı yükselterek oda sıcaklığına çıkarmaya yoğunlaşmıştır. 1986 yılında Georg Bednorz ve Alex Müller’in 30 K değerinde bir kritik sıcaklığa sahip olan La-Ba-Cu-O süperiletkenini keşfetmeleri (Bednorz ve Müller, 1986) ile yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin (HTS) temelleri atıldı ve daha yüksek sıcaklıklarda da süperiletkenliğin gözlenebilmesi için yapılan çalışmalar hız kazandı.

Süperiletkenliğin 1911 yılındaki keşfinden 1980’li yıllara kadar geçen süre içerisinde süperiletkenlikle ilgili önemli çalışmalar yapılmış ve önemli gelişmeler sağlanmış olsa da; üretilen süperiletken malzemelerin kritik sıcaklığın altına kadar soğutulabilmesi için temin edilmesi çok kolay olmayan sıvı helyuma ihtiyaç duyuluyordu. Bu durum doğal olarak süperiletkenlikle ilgili yapılan çalışmaların istenen düzeyde olmasını engelliyordu.

Bednorz ve Müller'in La-Ba-Cu-O süperiletkenini keşfetmelerinden sadece bir yıl sonra Wu ve grubu, lantanyum yerine itriyum kullanarak, günümüzde YBCO olarak isimlendirilen bileşikle 92 K geçiş sıcaklığına ulaştılar (Wu vd., 1987). Bu çalışma ile süperiletkenlik için sıvı helyuma bağıllık ortadan kalktı ve artık süperiletkenlikle ilgili çalışmalar sıvı azot sıcaklığında (77 K) yapılabilir hale geldi. Süperiletkenlikle ilgili çalışmalar bu sayede büyük bir ivme kazandı. Bu çalışmadan sonra aynı yıllarda $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ bileşiği ile 110 K, $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ bileşiği ile 125 K ve $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$ bileşiği ile 132 K geçiş sıcaklığına ulaşıldı (Maeda vd., 1988; Chu, 1988).

Günümüzde süperiletkenlerin kritik sıcaklık ve kritik akım yoğunluğunu artırmaya yönelik çalışmaların yanında, süperiletkenlerin üzerlerine uygulanan manyetik akıyı dışarılama özelliklerinden yararlanılarak süperiletken esaslı manyetik yataklar, manyetik olarak havalanmış trenler (Maglev trenleri) gibi araçlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti özelliklerinin farklı mıknatıs dizilimleri ve manyetik alan şartları ile artırılması amaçlanmıştır.

1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

Bilinen diğer malzemelerden farklı olarak süperiletkenlere has iki temel özellik vardır:

i. Sıfır elektriksel direnç: Süperiletken malzemeler soğutulduğunda elektriksel dirençleri bilindiği gibi azalır fakat belirli bir sıcaklıkta ve birkaç Kelvin sıcaklık aralığında elektriksel direnç aniden sıfıra düşer. Süperiletken malzemenin bir karakteristiği olan bu sıcaklık kritik sıcaklık (T_c) olarak adlandırılır. Kritik sıcaklığın altında süperiletken olan malzeme kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda normal metal gibi davranır (Rose ve Rhoderick, 1980). Bu özellik, süperiletken bir halkada indüklenen bir akımın, şiddetinde herhangi bir kayıp olmaksızın akmasına imkân verir. Süperiletken bir telde akan akım herhangi bir dirençle karşılaşmayacağı için, bilinen iletkenlerin aksine dirençten kaynaklanan herhangi bir enerji kaybına da neden olmaz.

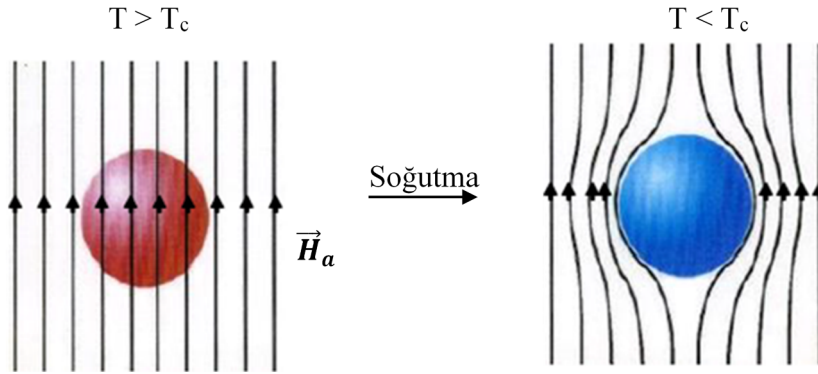
ii. Meissner Olayı: Süperiletkenlerin karakteristik özelliklerinden biri de kendilerine uygulanan manyetik alanı dışarılamalarıdır (Şekil 1. 1). Malzemenin sıcaklığı, kritik sıcaklık T_c 'nin üstünde iken manyetik alan süperiletkenin içine girer. T_c 'nin altında ve küçük manyetik alan değerlerinde, süperiletken yüzeyine yakın ince bir tabaka haricindeki yerlerde manyetik akı dışarılanacaktır. Manyetik alanın yeterince küçük değerleri için bu dışarılama bütünüyle gerçekleşir ve bu olaya Meissner olayı denir. Bu olay, süperiletkenin yüzeyine

yakın yerlerde akan sürekli akım tarafından gerçekleştirilir. Manyetik akının bir malzemeden dışarılanması olayı diyamanyetizma olarak bilinir ve bu malzemeler negatif manyetik alınganlık sabitine sahiptir (Moon, 2004).

Süperiletkenlerin kendilerine uygulanan manyetik alanı dışarıladıkları Maxwell denklemlerinden faydalanılarak kolayca gösterilebilir. Faraday'ın indüksiyon kanununa göre manyetik alanın zamanla değişimi bir elektrik alan indüklenmesine neden olur:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

Elektrik alanı \vec{E} 'nin, özdirenç (ρ) ve akım yoğunluğu (\vec{J}) cinsinden ifade edildiği $\vec{E} = \rho \vec{J}$ eşitliğine göre özdirenç sıfır olduğunda elektrik alan da sıfır olacaktır. Elektrik alanın sıfır olması ise (1.1) eşitliğine göre $-\partial \vec{B} / \partial t = 0$ olacağını gösterir. Bu durumda süperiletken numune içindeki manyetik indüksiyonun zamanda değişmeyeceği anlaşılır.

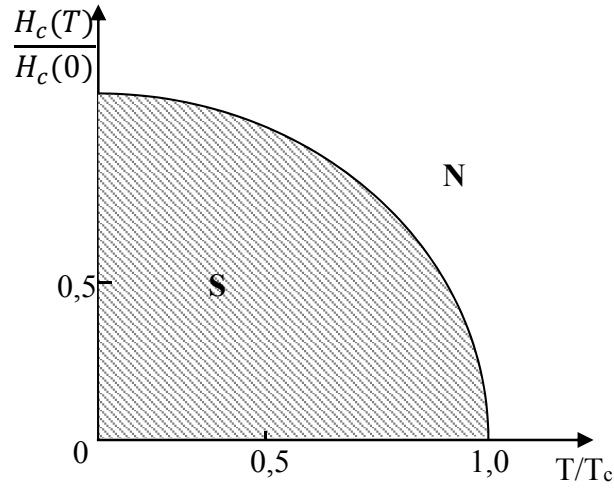


Şekil 1. 1. Uygulanan manyetik alanın numuneden dışarılanması

Süperiletken malzemenin süperiletkenlik özelliği gösterebilmesi için kritik sıcaklığın altına kadar soğutulmuş olmasının yanında, o malzemeye uygulanan manyetik alanın da belirli bir değerin üstünde olmaması gerekmektedir. Süperiletkenliğin bozulduğu bu manyetik alan değerine kritik manyetik alan denir ve H_c ile gösterilir. Kritik manyetik alandan daha büyük alan uygulandığında süperiletken malzeme normal hale döner. Kritik manyetik alan, sıcaklıkla değişir ve bu değişim aşağıdaki ifade ile verilir:

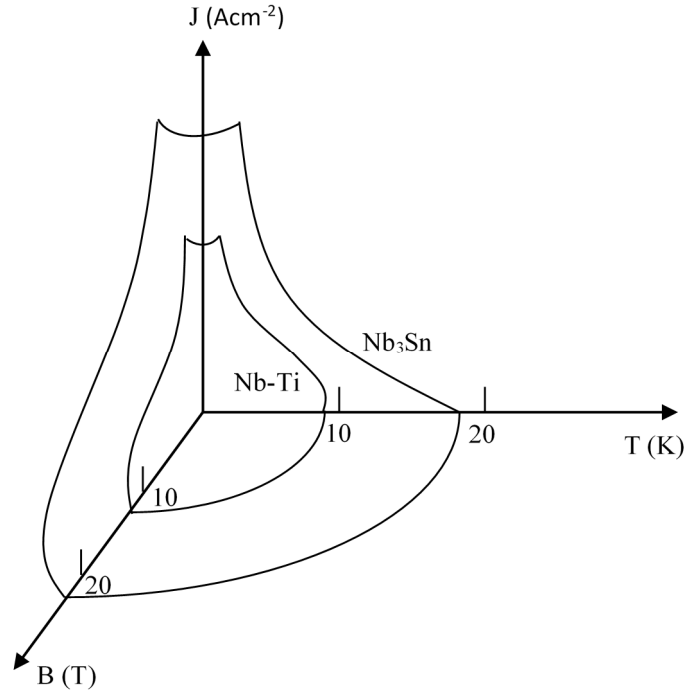
$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right] \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2'den görüldüğü gibi kritik manyetik alan değeri mutlak sıfır sıcaklığında maksimum ve kritik sıcaklıkta sıfır olur. Bir süperiletken malzemenin mutlak sıfırdaki kritik alan değerini belirlemek için belirli sıcaklıklardaki kritik alan değerleri bulunur, bu verilerden bir eğri çizilir ve elde edilen eğri 0 K'e ekstrapole edilir (Şekil 1. 2). Şekilde gösterilen S ve N sembolleri sırasıyla süperiletken durum ve normal durumu ifade eder.



Şekil 1. 2. Süperiletkende kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı (Müller ve Ustinov, 1997).

Kritik sıcaklık ve kritik manyetik alanın yanında süperiletken malzemeden geçirilecek akım yoğunluğu için de bir limit değeri vardır. Bu değere kritik akım yoğunluğu (J_c) denir ve bu değerin üzerinde malzeme normal hale geçer. Kritik akım yoğunluğu, numune geometrisine ve numunenin yapısal özelliklerine bağlıdır. Manyetik alan altında akım taşıyan tel şeklindeki bir süperiletken, eğer Şekil 1. 3'te gösterilen T, B ve J değerleri (T, B, J uzayının çizdiği eğrilerin) içinde bulunmazsa yani eğer bu üç değerden herhangi birisi bu eğrilerin dışında kalırsa malzeme dirençli olur ve normal hale geçer (Moon, 2004).



Şekil 1. 3. Nb₃Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004).

1.3. Süperiletkenliğin Temel Eşitlikleri

Süperiletkenler ideal diamanyetik olarak bilinmelerine ve üzerlerine uygulanan manyetik akıyı dışarılama özelliklerinin olmasına rağmen uygulanan manyetik akının numuneye az da olsa nüfuzu söz konusudur. Süperiletkene uygulanan manyetik akının malzemeye nüfuz ettiği mesafeye nüfuz derinliği (λ) denir. Nüfuz derinliğini tanımlayabilmek için Şekil 1. 4'te gösterilen yarı-sonsuz bir tabakayı düşünelim. Numunenin yüzeyinde $B(0)$ değerinde olan manyetik akı yoğunluğu, numunenin yüzeyinden x kadar içerde $B(x)$ değerine düşerse, nüfuz derinliğini London denklemlerini kullanarak şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\vec{j} = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{A} \quad (1.3)$$

Buradaki \vec{j} perdeleme akımı, n_s süperiletken yük taşıyıcılarının yoğunluğu ile ilişkili bir sabit, m elektron kütlesi, e elektron yükü ve \vec{A} manyetik vektör potansiyelidir. 1.3

eşitliğinde her iki tarafın rotasyonelini alır ve $\vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{B}$ ifadesini kullanırsak 1.4 eşitliğini elde ederiz:

$$\vec{\nabla} \times \vec{j} = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{B} \quad (1.4)$$

Bu eşitliğe Maxwell denklemlerini uygular ve $x \rightarrow \infty$ için $B \rightarrow 0$ olduğunu dikkate alırsak

$$\nabla^2 B = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} B \quad (1.5)$$

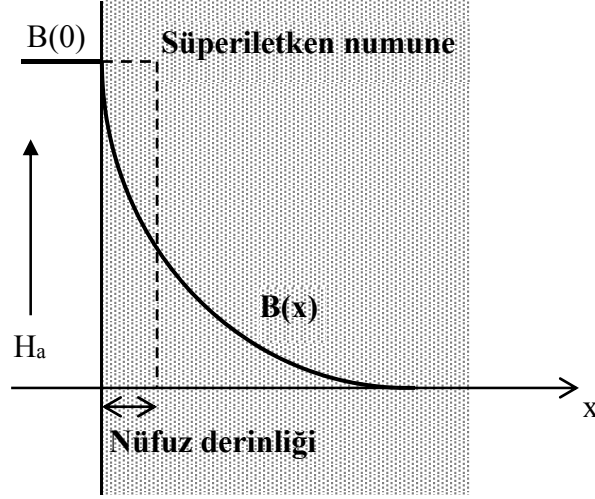
$$\Rightarrow \lambda^2 \frac{d^2 B}{dx^2} = B \quad (1.6)$$

$$\Rightarrow B(x) = B(0)e^{-x/\lambda} \quad (1.7)$$

Eşitliğini elde ederiz. Buradaki λ London girme derinliği olup şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}} \quad (1.8)$$

Eşitlik 1.8'deki μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir. London teoremine göre, nüfuz derinliğinden daha kalın numunelerde akı yoğunluğu numune içerisine girerken üstel olarak azaldığı Eşitlik 1.7' den görülebilir.

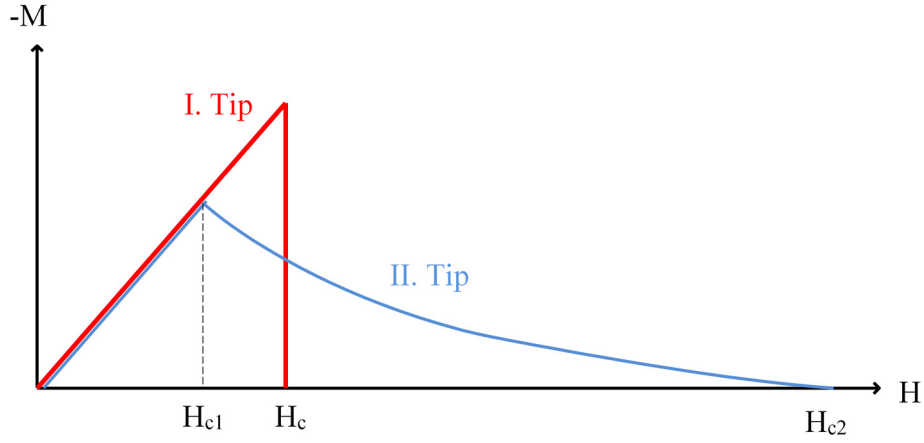


Şekil 1. 4. Manyetik akının süperiletken numunenin yüzeyinden içeri nüfuz etmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).

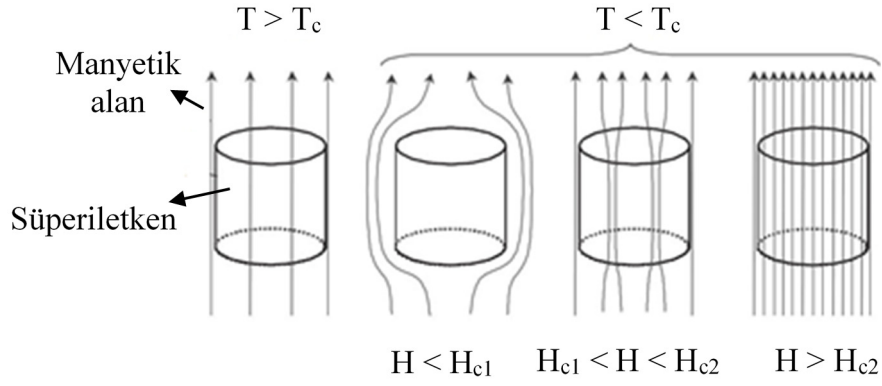
1.4. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletkenler, üzerlerine uygulanan manyetik alan altında gösterdikleri davranışa göre I. tip ve II. tip olmak üzere iki guruba ayrılırlar. Yukarıda da bahsedildiği gibi, süperiletken malzemeler üzerlerine uygulanan manyetik alan belirli bir değeri (H_c) aştığında normal hale geçerler. Bu geçiş I. tip süperiletkenlerde basit bir durum iken II. tip süperiletkenlerde biraz daha karmaşıktır.

Şekil 1. 1'de gösterilmiş olan Meissner olayından anlaşılacağı gibi, süperiletken malzeme bir dış manyetik alana (H) maruz bırakıldığında süperiletkenin içerisindeki manyetik akı yoğunluğunun (B) malzemedan dışarılanması, malzemenin H 'ye eşit büyüklükte fakat zıt yönlü bir makroskobik mıknatıslanmaya sahip olmasına neden olur. Bu durum yalnızca I. tip süperiletkenlerde H_c 'ye ulaşılan ve süperiletkenlik yok olana kadar devam eder (Şekil 1. 5). II. tip süperiletkenlerde uygulanan alan alt kritik alan (H_{c1}) denen bir değeri aşarsa manyetik akı malzemenin içine girdaplar (vortex) halinde kısmen girmeye başlar (Şekil 1. 6). Uygulanan alan H_c ile H_{c1} arasında ise II. tip süperiletkenler karışık durum (mixed state) veya girdap durumu (vortex state) denen bir durumda olur. Uygulanan manyetik alan üst kritik alana (H_{c2}) kadar ulaştığında ise manyetik akı malzemeye bütünüyle girer ve süperiletken malzeme normal hale geçer (Patel, 2013).



Şekil 1. 5. Uygulanan H alanı altında I. ve II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanması (Patel, 2013).



Şekil 1. 6. II. tip süperiletkenlerde T_c 'nin altındaki sıcaklıklarda dış manyetik alan artırılırken malzemeye aşamalı olarak akı girişi (Krabbes vd., 2006).

Manyetik akı süperiletken malzemeye kuantize halde girer, yani her bir akı çizgisi $\Phi_0 = h/2e = 2.1 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ büyüklüğünde akı kuantumu taşır. Uygulanan manyetik alana paralel olarak uzanan akı çizgilerinin sayısı, üst kritik alan H_{c2} 'de normal duruma ulaşana kadar alanla birlikte artar. Bir akı çizgisi ξ yarıçaplı normal iletken bir göbekten ve bunu saran süperakım bölgesinden oluşur. Buradaki manyetik alan ve süperakımlar bir λ mesafesinde yok olur ve ξ , Ginzburg-Landau koherens (eş uyum) uzunluğunu, λ ise girme (nüfuz) derinliğini ifade eder. Koherens uzunluğu, üzerinde süperiletkenliğin oluşturulabileceği en küçük mesafe olarak tanımlanabilir. Diğer bir deyişle koherens uzunluğu, süperiletkenin sınırında normal durumdan süperiletken duruma aşamalı bir

geçişin olduğu mesafenin bir ölçüsüdür. Bu iki parametre arasındaki oran Ginzburg-Landau parametresini verir ve bu oran süperiletkenleri karakterize eden bir oran olması nedeniyle önemlidir (Krabbes vd., 2006):

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (1.9)$$

$$\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{I. Tip süperiletken}$$

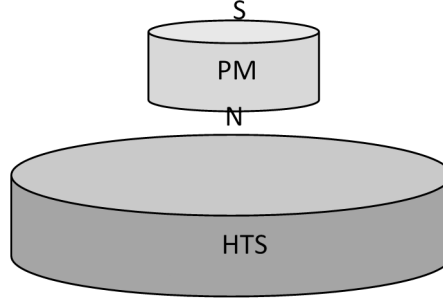
$$\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{II. Tip süperiletken}$$

1.5. Manyetik Kaldırma Olayı

Bir cismin herhangi bir fiziksel desteğe ihtiyaç olmadan havada durması olayına manyetik kaldırma denir. Cisimlerin veya insanların görünür bir destek olmadan havada durması çok eski tarihlerde bile insanların ilgisini çekmiştir. Yerçekimi etkisini ortadan kaldırma düşüncesi Benjamin Franklin'den Robert Goddard'a kadar uzanır. Manyetik kaldırmanın günümüzdeki çekiciliği teknik ve bilimsel iki başarıdan kaynaklanmaktadır: (i) insan taşımacılığında kullanılan 500 km/h hıza kadar ulaşan yüksek hızlı trenlerin icadı ve (ii) yeni süperiletken malzemelerin keşfi (Moon, 2004).

1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma Olayı

Maglev olarak bilinen modern manyetik kaldırmalı ulaşım sistemlerinin gelişimi, düşük sıcaklık süperiletken tellerin, transistorların ve çip tabanlı elektronik kontrol teknolojilerinin gelişiminin doğal bir sonucu olarak 1960'lı yılların sonlarında başladı. 1980'lerde Japon ve Alman mühendisleri bu yüksek hızlı havalanmış araçları piyasaya sürdüler. Wu ve arkadaşları tarafından $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Y123) bileşiğinin 93 K'de süperiletkenlik gösterdiğinin bulunması ve bu bileşiğin manyetik cisimleri havada tutması (Şekil 1. 7), 1987 yılından itibaren bu alandaki çalışmaların hız kazanmasını sağlamıştır (Moon, 2004).



Şekil 1. 7. Bir mıknatısın yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) üzerinde temassız olarak havada durması.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin (HTS) keşfinden sonra süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti özelliklerinden yararlanılarak manyetik olarak havalanmış taşıma sistemleri (Maglev), sürtünmesiz manyetik yatak (Strasik vd., 2010; Cheng vd., 2011; Floegel-Delor vd., 2007) ve enerji depolayan dönen çark gibi sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının en aza indirilebileceği sistemler, çeşitli araştırma grupları tarafından geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Süperiletken malzemeler ile mıknatıs arasında gözlenen manyetik kaldırma, süperiletken malzeme üzerine uygulanan manyetik alanın malzemede indüklenen perdelene akımları tarafından dışarılanmasından (Meissner olayı) kaynaklanır. I. tip süperiletkenler yalnızca Meissner durumunda bulunabilirler, yani kutup yönelimine bakılmaksızın manyetik alan her zaman süperiletkenden dışarılanır. II. tip süperiletkenler ise iki farklı durumda bulunabilir: Manyetik alanın yeterince düşük olduğu birinci durumda bu süperiletkenler I. tip süperiletkenlere benzer şekilde Meissner durumundadır. Bu Meissner durumunda malzeme manyetik alanı tamamıyla dışarılar ve itici bir kuvvet oluşur. Manyetik alanın H_{c1} 'den büyük olduğu ikinci durumda ise manyetik alan süperiletkene girer ve oluşan çekici kuvvete katkı yapacak şekilde bir mıknatıslanma oluşturur. Bu ikinci durum karışık durum (mixed state) olarak bilinmektedir.

Manyetik kaldırma kuvveti süperiletkenin manyetik momenti ve manyetik alan gradyanı ile orantılı olup şu şekilde verilir (Murakami vd., 1991):

$$F_z = m \left(\frac{dH}{dz} \right), \quad m = MV, \quad M = AJ_c r \quad (1.10)$$

Burada m , süperiletkenin manyetik momenti; dH/dz , manyetik kaynak tarafından oluşturulan alanın düşey z eksenini boyunca değişim oranı; M , birim hacimdeki mıknatıslanma; 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.

Maglev sistemlerinde daha fazla yük taşıma kapasitesi için kaldırma kuvvetinin büyük olması istenmektedir. Eşitlik 1.10'dan anlaşılacağı gibi, büyük kaldırma kuvveti için malzemenin kritik akım yoğunluğu (J_c) (Ozturk vd., 2012; Ozturk vd., 2009) ve malzemede indüklenen perdeleme akımlarının yarıçapının (r) büyük olması gerekmektedir. Bu özellikler süperiletkenin yapısal ve elektromanyetik özellikleridir ve daha iyi süperiletken malzeme üretimi ile artırılabilirler (Kim vd., 2001; Choi vd., 2008; Deng vd., 2012a; Deng vd., 2012b; Cardwell vd., 2010). Bununla birlikte daha büyük kaldırma kuvveti elde edebilmek için artırılması gereken diğer bir parametre de dış manyetik alan gradyanıdır (dH/dz). Bu akı gradyanının artırılması alan kaynağı olarak kullanılan kalıcı mıknatıs (permanent magnet, PM) boyut ve diziliminin uygun şekilde ayarlanması ile sağlanabilir (Ozturk vd., 2015; Zhang vd., 2008).

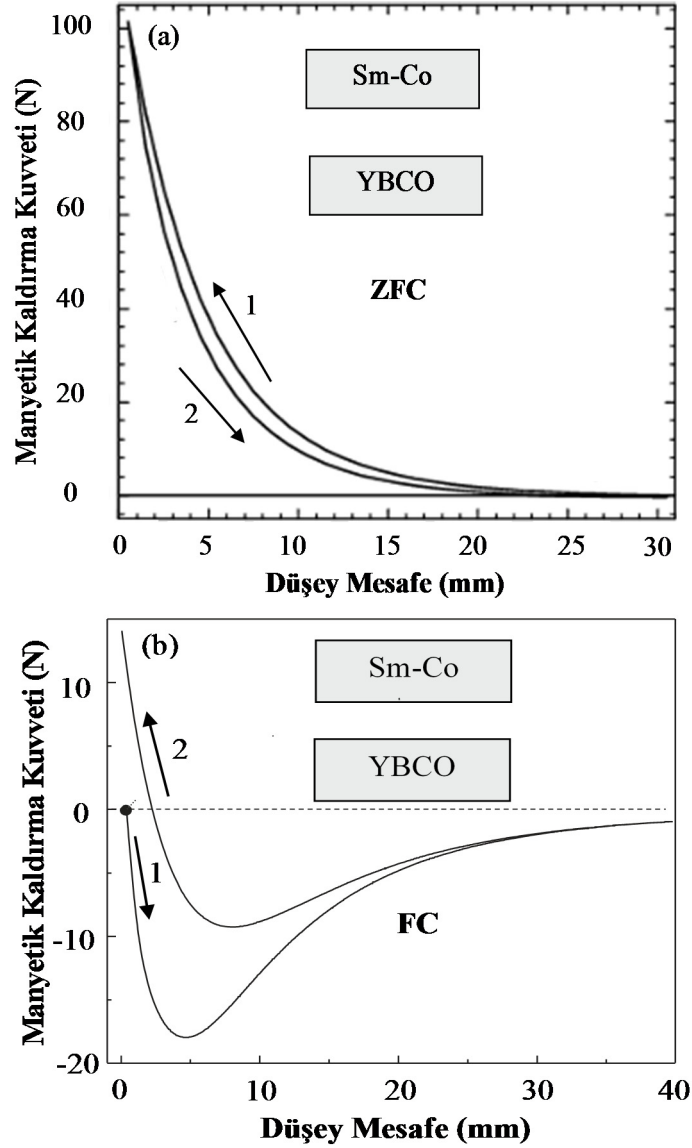
Manyetik kaldırma kuvvetinin büyük olmasının yanında Maglev sistemlerinin kararlı olarak hareket edebilmesi için kılavuzlama kuvvetinin (yanal kuvvet) de büyük olması gerekmektedir (Wang, vd., 2003). Kılavuzlama kuvveti, sistemin yanal hareketine karşı oluşan kuvvet olup süperiletken malzeme ilk konumundan yatay olarak uzaklaştıkça ortaya çıkan negatif kuvvet, sistemin kararlılığına işaret eder.

Maglev sistemlerinin kararlılığı için diğer bir değişken de manyetik kuvvet sabitidir (stiffness) (Ozturk vd., 2015). Manyetik kuvvet sabiti, bir cismin konumundaki birim değişim nedeniyle cisme etkiyen manyetik kuvvetteki değişim olarak tanımlanabilir. Manyetik kuvvet sabiti mekanik sistemlerdeki esneklik sabiti veya yaylardaki yay sabiti düşünülerek daha iyi anlaşılabilir. Aradaki benzerliğin yanında şuna da dikkat etmek gerekir: mekanik yapılarıdaki esneklik sabitinden farklı olarak manyetik kuvvet sabiti mıknatıs-süperiletken arasındaki mesafenin lineer olmayan bir fonksiyonudur. Cisim üzerine etkiyen kuvvet (F_x) ile cismin yer değiştirmesi (x) aynı yönlü olduğunda manyetik kuvvet sabiti (k) en basit hali ile şu şekilde verilir (Moon, 2004):

$$F_x(x) = F(0) + \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} (x - x_0) \quad (1.11)$$

$$k_x = - \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (1.12)$$

Süperiletken malzemeler ile manyetik alan kaynağı arasında gözlenen manyetik kaldırma kuvveti, malzemenin soğutulma şartına göre farklı özellik göstermektedir. Süperiletken malzemenin alan kaynağının manyetik alanı altında soğutulduğu duruma alanlı soğutma (field cooling, FC) ve malzemenin manyetik alan olmaksızın soğutulduğu duruma ise alansız soğutma (zero field cooling, ZFC) denir. Şekil 1. 8'de ZFC ve FC rejimlerinde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ZFC durumunda itici kuvvet baskın iken FC durumunda malzemede tuzaklanan manyetik alan nedeniyle baskın bir çekici kuvvet ortaya çıkmaktadır (Del-Valle vd., 2007).

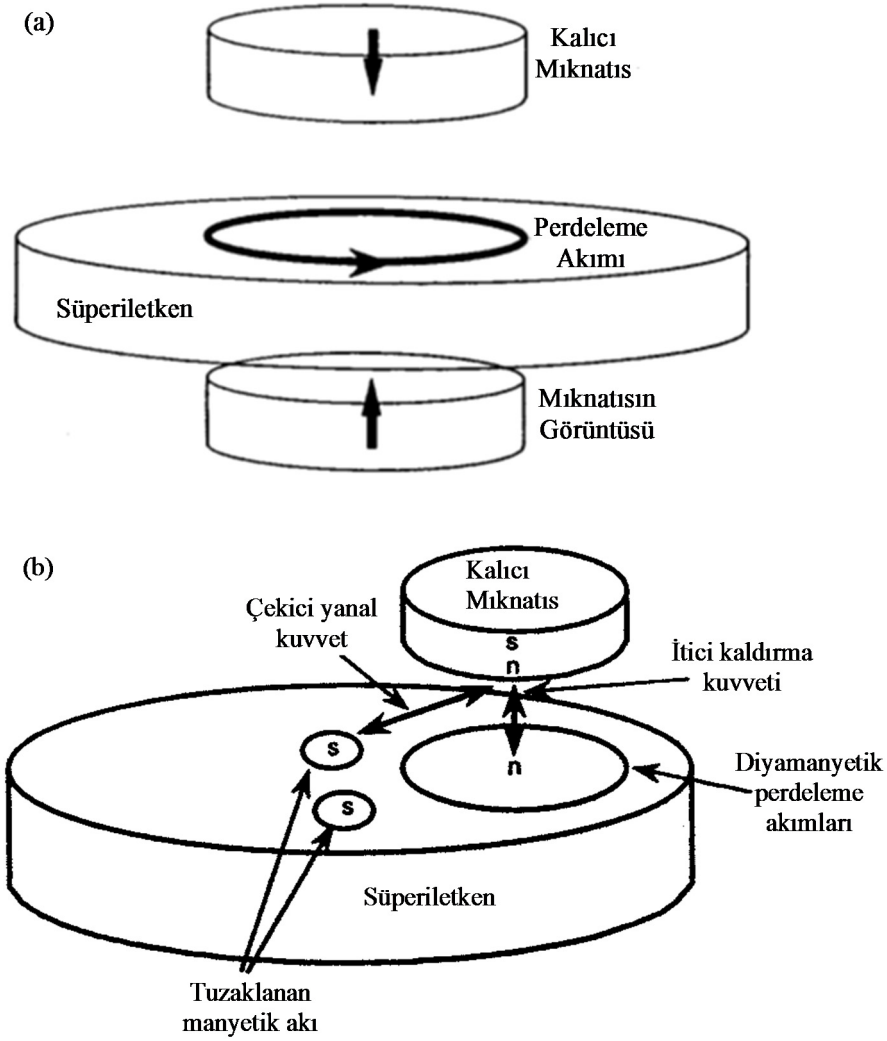


Şekil 1. 8. (a) ZFC ve (b) FC rejimlerinde Sm–Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı (Krabbes vd., 2006).

Daha önce de belirtildiği gibi süperiletkenlerin en temel özelliklerinden biri, üzerlerine uygulanan manyetik akıyı dışarılamalarıdır. Buna göre üzerine yakın bir yerde bir mıknatıs bulunan bir süperiletken, manyetik akıyı dışarılamak için bir perdeleme akımı oluşturur ve ideal durumda mıknatısın bir “ayna görüntüsünün” oluşmasını sağlar (Şekil 1. 9 (a)). Mıknatıs, düz bir süperiletken yüzeyin üzerinde düşey olarak dengededir. Yatay denge, mıknatıs etrafında süperiletken duvarların oluşması için süperiletken malzeme çukur bir yapıda olduğunda sağlanır. Bu olay ilk kez 1. Tip süperiletken olan kurşun kullanılarak gösterilmiştir.

II. Tip süperiletkenlerde diyamanyetizmanın bir sonucu olan manyetik kaldırma olayının kararlılığı akı çivilemesi olayı ile önemli bir şekilde artırılır. Süperiletkenlerde yeteri kadar akı tuzaklandığında PM 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. PM ve HTS arasındaki akı çizgileri kabaca PM ve HTS arasına bağlanmış bir mekanik yay olarak düşünülebilir. Eğer PM akı çizgileri çivileme merkezlerinde kalacak şekilde yatayda çok küçük bir hareket yaparsa, akı çizgileri bükülür ve yanal geri çağırıcı bir kuvvet uygular. Eğer PM yatay veya düşey olarak hareket ederse “yaylar” onu denge konumuna geri çekerler.

PM, akı çizgileri orijinal konumlarından yeni çivileme merkezlerine hareket edecek şekilde yatay olarak yeteri kadar uzağa hareket ettirilirse, ilave tuzaklanan akı içeren ilave bir dengeleyici kuvvet oluşur. Hareket eden akı çizgileri ilave süperakımlar indükler ve bununla ilgili ilave tuzaklanan akı, süperiletken içinde havada duran mıknatısla aynı kutup yönelimine sahip ve bölgesel akıyı azaltan indüklenmiş mıknatıslanma bölgeleri oluşturur. Şekil 1. 9 (b)'de görüldüğü gibi sonuçta süperiletken ile mıknatıs arasında çekici bir etkileşim oluşur ve bu etkileşim yanal bir geri çağırıcı kuvvet oluşturur. Tuzaklanan ilave manyetik akı ilk konumunda kaldığından mıknatısın yatay hareketi düşey kuvvette hafif bir artış oluşturur (Hull, 2000).



Şekil 1.9. Manyetik kaldırma modellerinin şematik gösterimi: (a) diyamanyetik tepki ve (b) akı tuzaklama (Hull, 2000).

1.5.2. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar (Maglev)

Manyetik kaldırma sistemleri iki alt sistemden oluşur:

- i.* Manyetik alanı oluşturan ana sistem
- ii.* Manyetik akıyı şekillendirmek veya tuzaklamak için gerekli olan sistem.

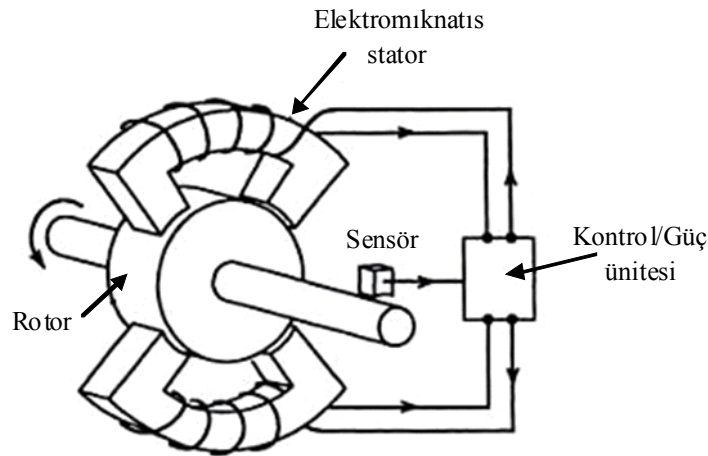
Elektromanyetik kaldırma durumunda bir bobine sarılı telden geçen akımlar esas alanı oluştururken, ferromanyetik bobin tutucu ve ferromanyetik taban bir çeşit manyetik çevrim oluştururlar. Girdap akımlarının oluşturduğu kaldırmada ise bir iletken üzerinde hareket eden süperiletken bobin vardır. Buradaki alan bir kalıcı mıknatıs (PM), süperiletken bobin veya normal iletken bobin tarafından oluşturulur. PM ve iletkenin göreceli hareketleri, iletkenin içindeki girdap akımlarından kaynaklanan bir alan şekillendirme sistemi oluşturur.

Pasif süperiletken kaldırmada sistemlerinde ise bir PM ana alan kaynağı olarak görev yaparken bir ince film veya külçe süperiletken, içerisinde indüklenen süperakımlar sayesinde alan şekillendirme görevi üstlenirler (Moon, 2004).

Süperiletkenlerin kritik sıcaklığın altında üzerlerine uygulanan manyetik alanı dışarılamaları özelliklerinden faydalanılarak yapılan Maglev sistemlerinin yanında diğer önemli bir sistem de sürtünmesiz manyetik yataktır. Normal iletkenlerin kullanıldığı tipik bir aktif manyetik yatak örneği Şekil 1. 10'da görülmektedir. Tipik bir manyetik yatak aşağıdaki sistemlerden oluşur:

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

Aktif manyetik yatakların tipik çalışma boşluğu 0,5 mm mertebesindedir. Bu yatakların çalışma sıcaklığı 60 K' den 100°C' ye kadar değişmektedir. Bununla birlikte, bu yatakların gaz türbinli motorlarda kullanılabilir olması için çalışma sıcaklığını 300°C yakınlarına çıkarmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir (Moon, 2004).



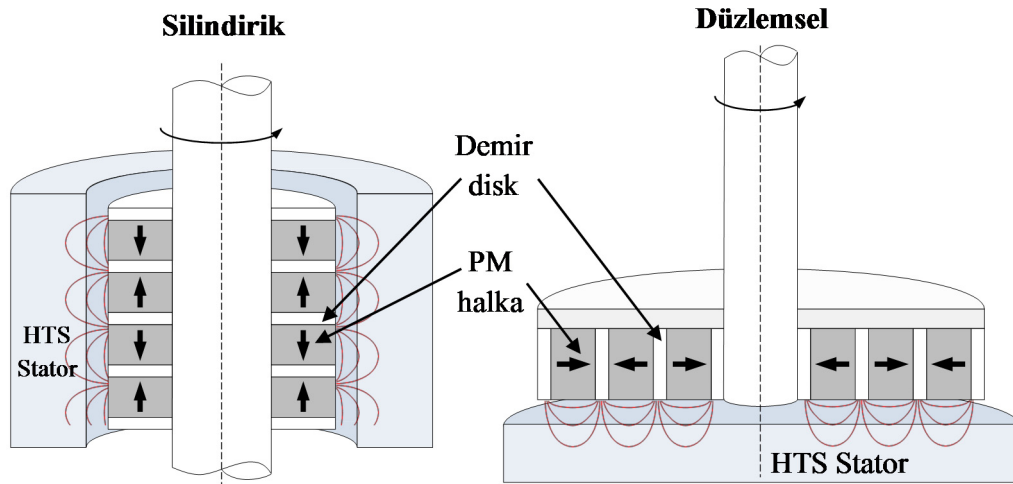
Şekil 1. 10. Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).

Aktif manyetik yatakların yüksek manyetik kuvvet sabiti, çevresel değişikliklere uyarlanabilir kontrol ünitesi, alan kaçaklarının az olması ve kanıtlanmış endüstriyel

uygulamalar gibi avantajlarının yanında yüksek maliyet, karmaşık olması ile ilgili güvenilirlik sorunları, küçük çalışma boşlukları, güç kaynağı, kontrol ünitesi ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır.

Pasif süperiletken yataklar herhangi bir elektronik devreye veya güç kaynağına ihtiyaç duymazlar, potansiyel olarak yüksek güvenilirliğe (düşük karmaşıklık) ve daha düşük sistem ağırlığına sahiptirler, çalışma boşluğu aktif manyetik yataklarından büyük olabilmektedir ve bu sistemler daha düşük maliyetlidir. Bununla birlikte pasif süperiletken yataklar kriyojenik sıcaklıklara ihtiyaç duyması, manyetik kuvvet sabitlerinin düşük olması, sistemde manyetik alan kaçaklarının olması ve uygulamada yeterince kanıtlanmış bir teknoloji olmaması gibi bazı olumsuzluklara sahiptir.

Külçe süperiletken malzemenin (genellikle YBCO veya GdBCO) yüzeyinde yüksek manyetik alan gradyanı oluşturmaya dayanan iki temel süperiletken manyetik yatak türü vardır. Bunlar Şekil 1. 11'de görülen silindirik ve düzlemsel süperiletken manyetik yataklardır. Bu sistemlerde genel olarak PM dizilimi rotorda (dönen kısım) ve soğutma kolaylığı için süperiletkenler statorda (hareketsiz kısım) yer alır (Patel, 2013).



Şekil 1. 11. Silindirik ve düzlemsel iki temel süperiletken manyetik yatak türü (Patel, 2013).

1.6. Literatür Özeti

Günümüzde dünyadaki çeşitli araştırma laboratuvarlarında 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 geliştirilmeye çalışılmaktadır. Özellikle ilk insan yüklemeli (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 teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılması gerekmektedir. Geleneksel Maglev sistemlerinde, manyetik kılavuzlama yolu (Permanent Magnetic Guideway, PMG) ile süperiletken numune arasındaki kılavuzlama kuvveti belli bir değerde olmasına rağmen, manyetik kaldırma kuvvetinin istenen düzeyde olmadığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Manyetik kaldırma kuvveti, sabit manyetik alana sahip mıknatısların aynı işaretli kutuplarının kullanılmasıyla artırılabilmesine rağmen, bu durum Maglev sistemlerinde bir kılavuzlama sorununa ve böylece sistemin hareketinde bir kararsızlığa neden olur. 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 mıknatısın birlikte kullanıldığı hibrit yapıların geliştirilmesi üzerinedir (Ren vd., 2002; Chu, vd., 2011; Liu vd., 2010).

Değişik araştırma laboratuvarlarında hibrit Maglev sistemi ile ilgili yapılan çalışmalarda genelde iki HTS–PMG konfigürasyonu kullanılmıştır. Yürütülen bu doktora tezi kapsamında yüksek manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetine sahip bir hibrit Maglev sistemi geliştirilmiştir. Bu hibrit Maglev sisteminde, HTS ve mıknatısların çeşitli sıra ve sayıda dizilimi ve farklı boyutlarda HTS ve mıknatıs kullanılmasıyla oluşturulan konfigürasyonlarla manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti artırılmış, böylece teknolojik anlamda istenen kuvvet değerlerine yaklaşılmıştır. İlave olarak, hibrit Maglev sisteminin kaldırma kuvveti değerlerinin alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altındaki değişimi araştırılarak literatüre katkı sağlanmıştır. 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.

HTS Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve kuvvet sabiti değerlerini artırmaya yönelik çalışmalarla ilgili literatür özeti aşağıda verilmiştir.

Bilindiği gibi manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti HTS ve PMG arasındaki elektromanyetik etkileşimden kaynaklanmaktadır. Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri; HTS'nin akı çivileme performansı ve kritik akım yoğunluğu gibi süperiletken malzeme özellikleri ile PMG'nin maksimum manyetik alanı ve manyetik alan gradyanı (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.

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle iki tip PMG kullanılmaktadır. Bunlardan biri geleneksel PMG (Liu vd., 2009) olarak adlandırılır ve zıt yönlü iki mıknatıs ve bu mıknatıslar arasında manyetik akıyı yoğunlaştırmak için kullanılan çelik veya demirden oluşur. Geleneksel PMG'lerin diğer bir çeşidi de zıt kutuplu PM'ler arasında akı yoğunlaştırıcı olarak yukarı veya aşağı yönlü bir PM'nin kullanıldığı PMG türüdür. İkinci tür PMG "Halbach" olarak adlandırılır (Halbach, 1985) ve bu PMG'de beş mıknatıs farklı yönlerde dizilerek manyetik alanın PMG'nin üst kısmında yoğunlaştırılması sağlanır.

Lu ve arkadaşları (Lu vd., 2011a) yedi adet silindirik YBCO süperiletkeni kullanarak tek kutuplu PMG ve Halbach PMG'nin düşey ve yanal manyetik kuvvet sabiti performansını araştırdılar. Çalışmada Halbach PMG ile elde edilen düşey ve yanal manyetik kuvvet sabiti değerlerinin tek kutuplu PMG ile elde edilenden daha büyük olduğu, Halbach PMG'nin düşey manyetik kuvvet değerinin tek kutuplu PMG'nin iki katına yakın olduğu gözlemlendi. Çalışmadan, Halbach PMG üzerindeki bir Maglev aracının daha kararlı olarak hareket edeceği sonucuna ulaşıldı.

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 gözlemlenmiştir (Jing vd., 2007). Böylece Halbach dizilimi ile Maglev sistemlerinin kaldırma kuvvetinin artırılacağı ve sistemde kullanılan HTS sayısının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Manyetik alan kaynağının kaldırma kuvveti performansı üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Liu vd., 2008a) üç farklı tip PMG kullanıldı. Bu PMG'ler arasındaki temel fark manyetik akıyı yoğunlaştırma yöntemidir. Deneysel sonuçlar,

manyetik alanın pik değerlerinin, farklı PMG tiplerinin Maglev performansının belirlenmesinde uygun bir referans olmadığını, manyetik alanın düşey (B_z) ve yatay (B_x) bileşenlerinin değişiminin de dikkate alınması gereken önemli bir etken olduğunu gösterdi. Çalışmada ayrıca manyetik alanı yoğunlaştırmak için demir yerine PM kullanılmasının daha iyi bir performans gösterdiği ve Halbach PMG'nin yalnızca daha büyük manyetik enerji kullanım oranına değil aynı zamanda daha geniş ve elverişli manyetik alana sahip olması nedeniyle ideal bir dizilim olduğu sonucuna varıldı.

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 B_z ve B_x piklerinin üzerlerine yerleştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır (Liu vd., 2008b).

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 ve geleneksel PMG için 133,7 N olarak gözlenmiştir. Bu durum, Halbach PMG nin kaldırma kuvveti değerinin, geleneksel PMG'nin 1,73 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. Araştırmacılar tek kutuplu PMG ile Halbach PMG'nin manyetik kuvvet sabiti ölçümlerini de karşılaştırdılar. 7 mm minimum yaklaşma mesafesinde tek kutuplu PMG ile 10,2 N/mm olarak gözlenen düşey manyetik kuvvet sabiti değeri Halbach PMG ile 19,4 N/mm olarak gözlendi. Bununla birlikte 40 mm'den daha büyük düşey mesafelerde manyetik kuvvet sabiti değerlerinde bir fark gözlenmedi. Bu durumda, uzak mesafelerde Halbach PMG'nin tek kutuplu PMG'ye göre bir avantajının olmadığı sonucuna ulaşıldı.

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 histeresiz eğrisinin ilk çevrimden sonra değişmediği gözlenmiştir.

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 işe, elektrik devresindeki kondansatör sığası $C=20\mu F$ olduğunda elde edildi ve başlangıç hızı $v_0=9,7$ cm/s olduğunda voltajın artırılmasıyla Maglev modeli üzerine yapılan için arttığı gözlemlendi. Bu sonuçların ileride tasarlanacak gerçek boyutlu Maglev itici sistemlerinin optimizasyonunda yardımcı olacağı düşünölmektedir.

Zheng ve arkadaşları Halbach dizilimi (beş mıknatısın farklı yönde dizilimi) ile oluşturulan manyetik kılavuzlama yolu üzerindeki 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 göröldü.

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 histeresiz 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 4 Watt Stirling soğutma sistemi ile YBCO külçe mıknatıs 50-80 K arasında soğutularak ölçüm alındı. Dizaynda kullanılan soğutma sisteminin düşük soğutma gücüne sahip olması ve böylece efektif HTS soğuk kütlesi, sistemin kütlesinin 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.

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.

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 duyduğunu göstermiştir.

2010 yılında Sotelo ve arkadaşlarının gerçek boyutlu Maglev araçları üzerine yaptıkları çalışmada araca monte edilmiş kriyostat içerisinde HTS süperiletkeni, 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 ulaşılabilmesi için ilave ray konfigürasyonlarının çalışılması gerektiğine karar verildi. Ayrıca aynı araştırmacıların yaptığı ilave çalışmada her bir kriyostat içerisinde bulunan 24 süperiletken numune ile 8 mm'lik düşey süperiletken-manyetik ray mesafesinde, 2500 N 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.

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 çalışma boşluğu analiz edildi. Yapılan bu çalışmada, dış dinamik değişimlerle HTS ile manyetik ray arasındaki düşey mesafenin azalmasının Maglev sistemlerinin performansını ciddi ölçüde düşürmeyeceği tespit edildi.

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 mıknatıslanma 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 mıknatıslandı. Yapılan deneysel çalışmada, kılavuzlama yolu üzerinde belli mesafede süperiletken numunenin tekrar mıknatıslanmanın, Maglev araçlarında kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvvetini alansız soğutmaya göre eş zamanlı olarak arttırdığı tespit edildi.

Süperiletken numunelerin mıknatıslanması sürecinde oluşan akımlar HTS mıknatısların kaldırma kuvveti performansının geliştirilmesinde etkili olabilir. Bu amaçla Liu ve arkadaşları HTS süperiletken mıknatısların kaldırma kuvveti performansını arttırmak için farklı alanlarla manyetik tuzaklama çalışmaları yaptılar (Liu vd., 2011). Yapılan çalışmada, manyetik kılavuzlama kuvvetinin geliştirilmesi için önceden mıknatıslanmış 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.

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 eksenini boyunca (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 modellemede 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).

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 genişliğinin arttırılması ile beş mıknatıs bulunduran Halbach diziliminden oluşan konfigürasyona göre, süperiletkenin kararlı manyetik kuvvetini yükseltmede daha etkili görüldü.

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.

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 kuvvet sabiti 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.

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.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin PMG üzerindeki askıda kalma performansı, iki anahtar parametre olan kaldırma kuvveti ve 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.

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.

Manyetik kılavuzlama yolunun optimizasyonu, kaldırma kuvvetini ve buna bağlı olarak kuvvet sabitini arttırmada etkili bir yoldur. Liu ve arkadaşları, dikey manyetik alan bileşeni B_z 'yi arttırmak için aynı hacme sahip mıknatıslardan oluşan üç farklı akı yoğunlaştırma formülü 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 kuvvet sabiti ve akı tuzaklanması sağladığı görüldü.

Farklı kesit alanlı konfigürasyona sahip Halbach PMG ile HTS arasındaki kaldırma kuvvetinin araştırıldığı nümerik çalışmada (Lu vd., 2014) Halbach PMG üç adet ana (host) mıknatıs (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.

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 ise maksimum kaldırma kuvveti hızla azalmıştır.

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., 2009b). 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'lük bir artış gözleyen araştırmacılar HTS'ye bir üst katmanın eklenmesinin maliyet analizini yaptıklarında bunun ekonomik bir yöntem olmadığı sonucuna varmışlardır.

Deng ve arkadaşları Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama kuvvetini artırabilmek için verimli, ekonomik ve basit bir yol belirlediler (Deng vd., 2013). Bu çalışmada araştırmacılar külçe süperiletkenin ab–düzlemi ve c–ekseni boyunca olan kritik akım yoğunluğunu araştırdılar. Çalışmada kullanılan dikdörtgen prizma şekilli YBCO süperiletkenini, Halbach PMG üzerinde farklı yerlere ve farklı yönlerde yerleştirildi. c–ekseni PMG yüzeyine paralel tutulduğunda, sırasıyla maksimum yatay manyetik alan ve maksimum düşey manyetik alan konumunda, oluşan kaldırma ve kılavuzlama kuvveti geleneksel olarak c–ekseni PMG yüzeyine dik tutulduğunda elde edilen kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin iki katı kadar olmuştur.

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 histerezisi ile değil, uygulanan dış manyetik alan, CH, WH ve HTS'nin boyut ve şekline de sıkıca bağlı olduğu bulundu.

HTS Maglev araçlarının pratik uygulamalarında yolcuların araca biniş ve inişlerinde araç düşey yönde aşağı ve yukarı hareket eder ve bu düşey hareket manyetik kaldırma kuvvetini değiştirebilir. Jiang ve çalışma grubu bu değişimi iki farklı tip PMG yolu üzerinde ve iki farklı hareket mesafesi için araştırdılar (Jiang vd., 2012). Araştırmacılar kaldırma kuvvetindeki durulmaya (relaxation) benzer şekilde kuvvetin ilk başta hızlı bir şekilde azaldığını, sonra daha yavaş azaldığını gözlediler. Çalışmada aynı zamanda çalışma yüksekliği (WH) azaldıkça ve düşey mesafe arttıkça kaldırma kuvvetindeki düşüşün artma eğiliminde olduğu gözlemlendi.

Liang ve arkadaşları yanal bağlantılı yeni bir HTS Maglev sistemi geliştirdiler ve sistemin kaldırma kuvveti performansını araştırdılar (Liang vd., 2015). Bu Maglev modeli, aracın bir vakum tüpü içerisinde geleneksel sistemlerden çok daha büyük hızlarda hareket etmesini sağlamaktadır. Sonuçlar Maglev sisteminin kararlılığının HTS külçelerin PMG merkezi boyunca dizilimine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu gösterdi. Doğrusal dizilim için kılavuzlama kuvveti askılama mesafesinde azalma ile birlikte HTS külçeleri manyetik tepeden uzaklaştırma eğilimindedir. Bu durum aynı zamanda kaldırma kuvvetinin azalmasına neden olmuştur. Dörtgen, kare ve doğrusal HTS külçe dizilimlerinin karşılaştırılmasında üçgensel dizilim en iyi Maglev performansına sahip olmuştur.

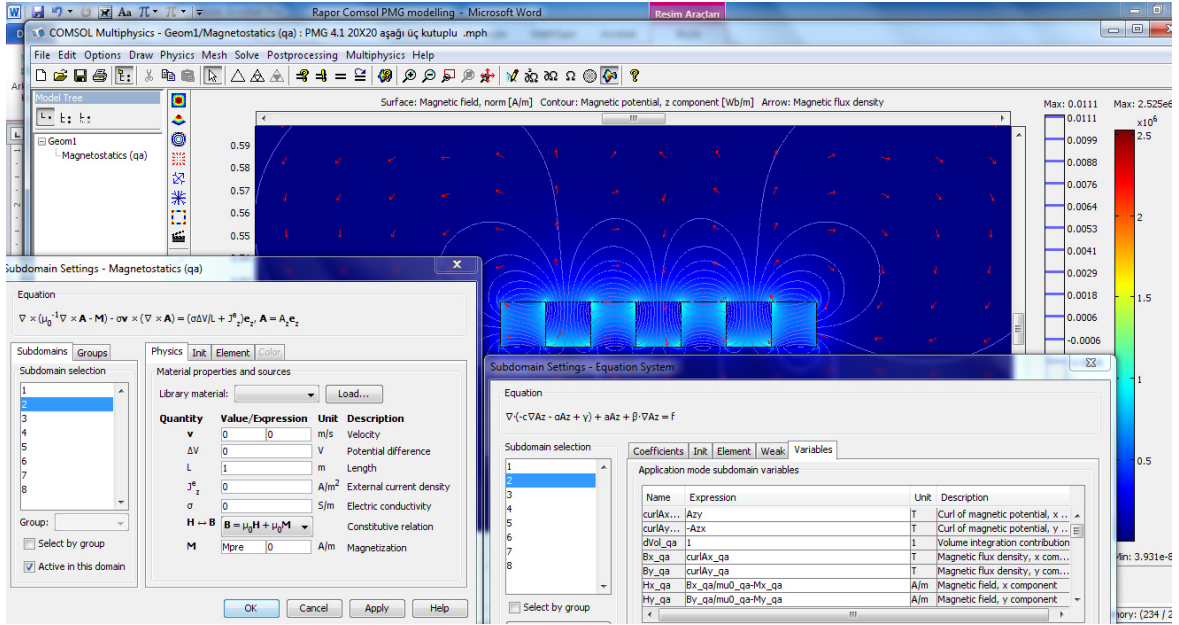
Yumuşak ferromanyetik malzemeler süperiletken Maglev taşıma sistemlerinde kılavuzlama yolu tasarımlarında akı yoğunlaştırıcı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Yumuşak ferromanyetik malzemelerin manyetik kaldırma performansı üzerindeki etkisini tam olarak anlayabilmek için araştırmacılar, aralarında yumuşak ferromanyetik malzeme bulunan sonsuz uzun mıknatıslardan oluşan farklı PMG dizilimlerinin manyetik alanındaki sonsuz uzun süperiletkenin manyetik kaldırma kuvveti özelliklerine fonksiyonel minimizasyon metodu ve Bean kritik durum modeline dayanan bir nümerik model uyguladılar (Huang ve Zhou, 2015). Bu çalışmada manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti, manyetik kuvvet sabiti ve manyetik kutup yoğunluğu süperiletken ve yumuşak ferromanyetik malzeme arasındaki etkileşim dikkate alınarak hesaplandı. Sonuçlar kaldırma performansının PMG dizilimi ve ferromanyetik malzemenin konumu ve boyutu ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Belirli bir genişlikteki yumuşak ferromanyetik malzemenin bazı dizilimlerin içine yerleştirilmesi kaldırma kuvvetini azaltmıştır. Bununla birlikte çoğu dizilimler için yumuşak ferromanyetik malzemeler yalnızca belirli konumlarda ve boyutlarda kullanıldığında kaldırma kuvvetini artırır. Dahası, eğer süperiletken yanal olarak hareket ettirilirse yumuşak ferromanyetik malzemenin varlığı küçük yanal yer değiştirme için yanal kararlılığı önemli oranda artırır ve kaldırma kuvvetindeki düşüşü azaltır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Nümerik Çalışmalar

Süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetlerinin iyileştirilmesi amacıyla bu tez çalışmasında kullanılan optimum HTS-PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesinde yararlanılan sayısal modellemeler, sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanan Comsol Multiphysics 4.2a paket programının AC/DC modülü ile yapılmıştır. Bunun için öncelikle farklı boyut ve manyetik kutup dizilimlerine sahip mıknatısların bulunduğu PMG yolunun konuma bağlı manyetik alan profilleri sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır (magnetostatic modelleme).

Şekil 2. 1’de, Maglev sistemlerinde manyetik alan kaynağı olarak kullanılan PMG yolu manyetik akı dağılımının FEM yöntemi ile hesaplanmasında kullanılan Comsol Multiphysics 4.2a program arayüzü görülmektedir. Bu program aracılığıyla modellenecek olan PMG diziliminin geometrisi, “draw mode” kullanılarak uygun şekilde çizildi. Daha sonra “subdomain” bölümü kullanılarak boşluk ve PMG ortamının manyetik alan formülleri sırasıyla $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ ve $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$ olarak girildi. PMG diziliminin kenarlarında kullanılan St37 çeliğin göreceli manyetik geçirgenliği $\mu_r = 5000 \mu_0$ olarak alındı. 40 mm × 30 mm × 30 mm, 40 mm × 20 mm × 20 mm, 40 mm × 10 mm × 20 mm boyutlu mıknatısların manyetizasyon değerleri sırasıyla 1132490 A/m, 1037234 A/m ve 1164242 A/m olarak hesaplandı. İlgili parametreler programa girildikten sonra çalışma bölgesi yaklaşık olarak 90000 elementten oluşacak şekilde üçgensel ağ (mesh) oluşturuldu. Daha sonra istenen manyetik alan profili ve bu profilden de yatay konuma bağlı manyetik akı yoğunlukları elde edildi.



Şekil 2. 1. Maglev sistemlerinde manyetik alan kaynağı olarak kullanılan PMG yolu manyetik akı dağılımının FEM yöntemi ile hesaplanmasında kullanılan Comsol Multiphysics 4.2a program arayüzü

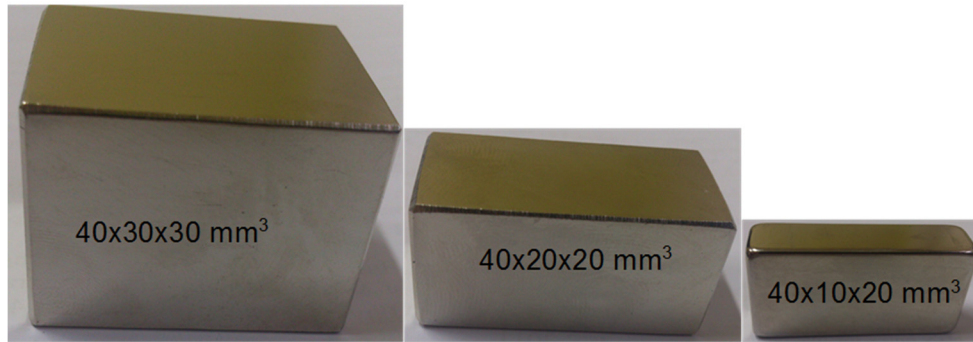
2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Çalışmada Kullanılan YBCO Süperiletkenlerin ve NdFeB Mıknatısların Özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan üstten tohumlama yöntemi ile üretilmiş silindirik külçe YBCO süperiletkenleri, $\varphi=45$ mm çap ve $h=15$ mm yüksekliğinde olup ATZ GmbH firmasından satın alındı (Şekil 2. 2). Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar ise Magnet Exper LTD şirketine özel olarak imal ettirildi. Mıknatısların boyutları $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (Şekil 2. 3) ve yüzeylerindeki manyetik alan şiddetleri sırasıyla 0,53 T, 0,49 T ve 0,55 T'dir.



Şekil 2. 2. Çalışmada kullanılan silindirik YBCO külçe süperiletkenler

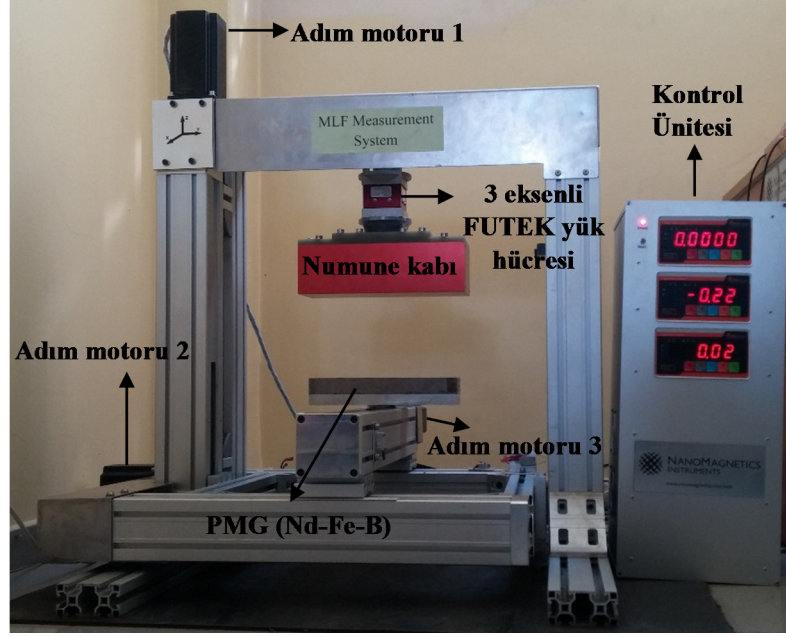


Şekil 2. 3. Manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar

2.2.2. Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi Teknik Özellikleri

Manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin gerçekleştirildiği manyetik kuvvet ölçüm sistemi Şekil 2. 4'te 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) tork'lu step motorlar ile sağlanmaktadır.

Kuvvet verileri FUTEK MTA400 yük hücresi ile alınmaktadır (Şekil 2. 5). 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 Packardbell Imedia 8241 AMD Dual Core 64 bit 3 GB Ram 160 GB masaüstü bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Sistemin yazılımı için LabVIEW grafik programlama dili kullanılmıştır. Ölçüm sistemi ile bilgisayar NI-PCI-6010 Low-Cost 16-bit, 200 kS/s DAQ Card ile iki yönlü olarak bağlantılıdır.



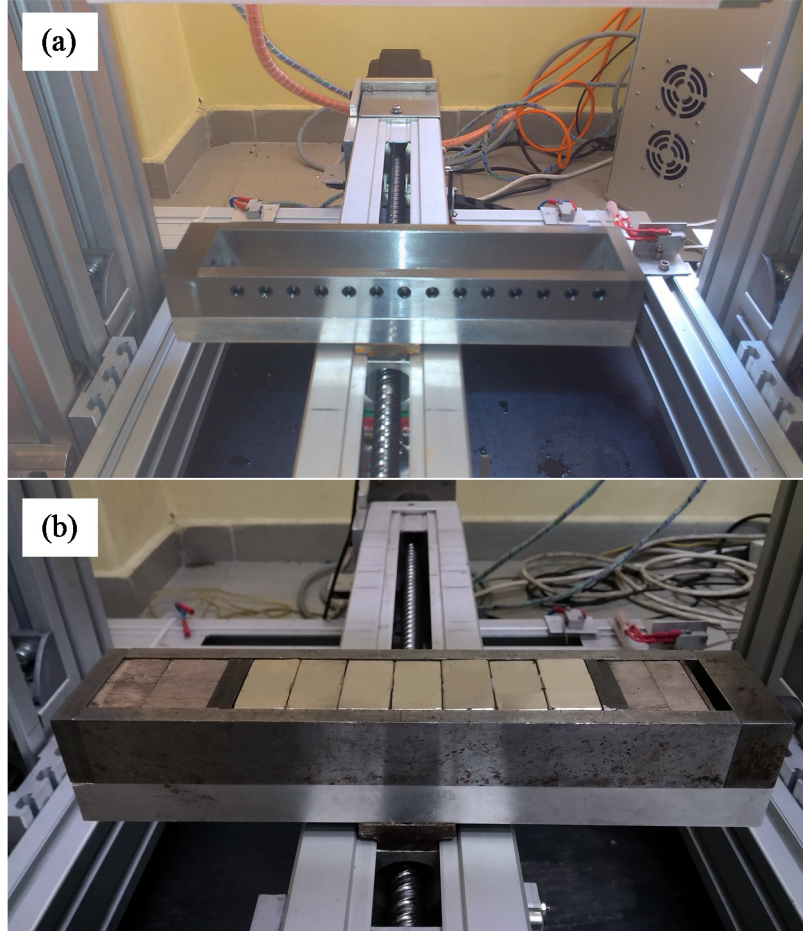
Şekil 2. 4. Üç eksenli FUTEK yük hücreli Maglev Manyetik Kuvvet Ölçüm Düzenegi fotoğrafı



Şekil 2. 5. FUTEK MTA400 üç eksenli yük hücresi

Şekil 2. 6' da boş PMG haznesi ve örnek bir PMG dizilimi görülmektedir. Dizilimdeki mıknatısların sabitlenebilmesi için PMG haznesinin bir yüzünde vidalar bulunmaktadır. İstenilen PMG dizilimi, mıknatısların uygun manyetik alan doğrultularında PMG haznesine yerleştirilerek vidalar yardımı ile sabitlenmesi ile oluşturulur. Manyetik akının homojen

olarak dağılımının sağlanabilmesi amacıyla PMG diziliminde her iki uçtaki mıknatısların kenarına 10 mm kalınlıkta St37 çelik yerleştirilir. PMG dizilimi oluşturulduğunda haznenin bir ucunda bulunan vida yardımıyla mıknatıslar sıkıştırılarak x-ekseni yönünde sabitlenir.

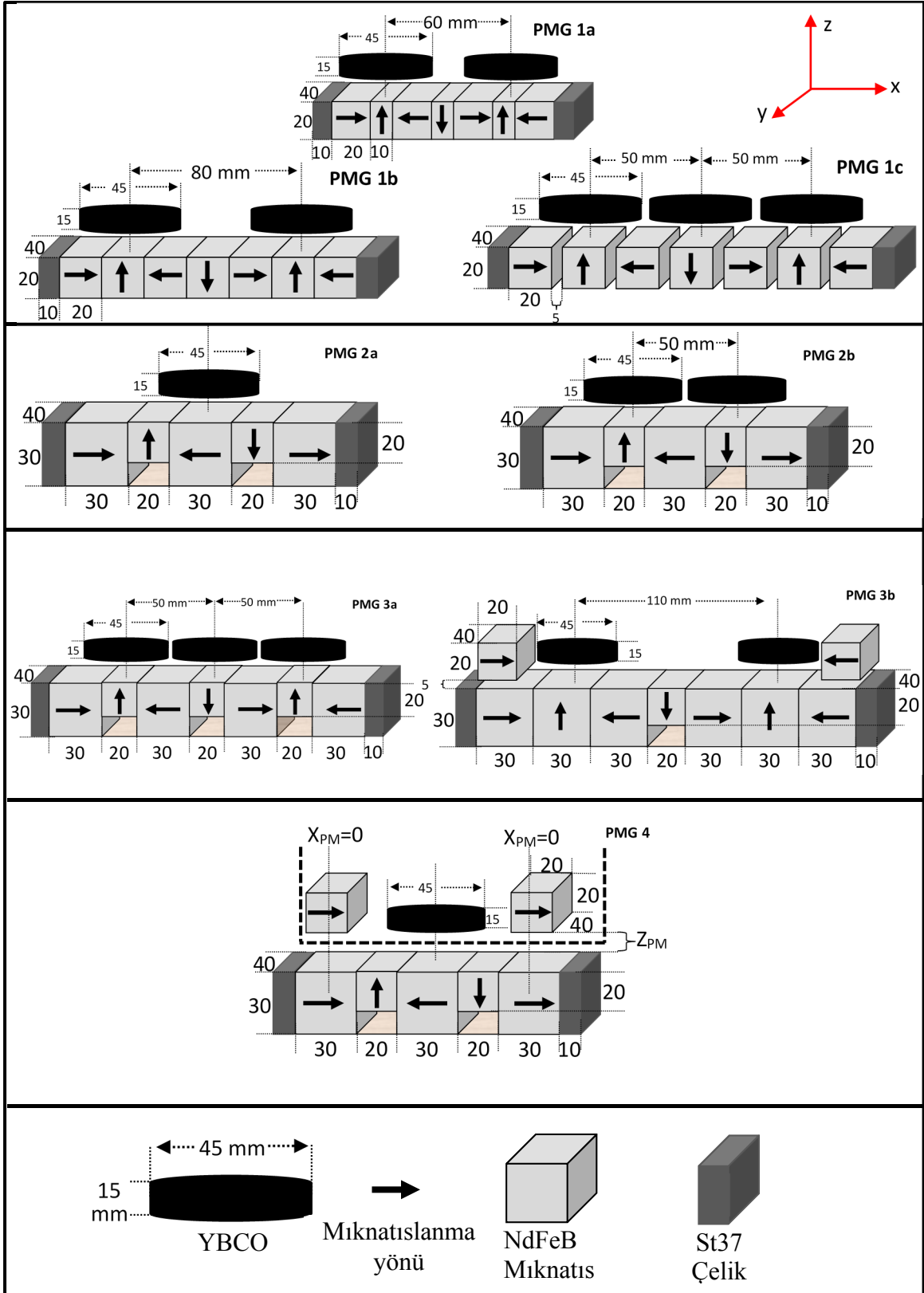


Şekil 2. 6. Boş PMG kabı (a) ve farklı boyutlara ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan örnek bir PMG (b)

2.2.3. Manyetik Kılavuzlama Yolu (PMG) Tasarımı ve Mıknatıs Dizimleri

Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerleri, sistemin üzerinde hareket ettiği manyetik kılavuzlama yolu (PMG) ile ilişkilidir. Bu doktora tezi kapsamında süperiletken Maglev araçlarının manyetik kaldırma kuvveti (düşey kuvvet), yanal kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı konfigürasyon ve boyutlarda manyetik kılavuzlama yolu tasarlanıp üretilmiştir. Şekil 2. 7’de farklı HTS–PMG konfigürasyonlarının şematik çizimleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi HTS–PMG

konfigürasyonları farklı sayılarda YBCO ile farklı sayı, boyut ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslar ve bu dizilimin her iki ucunda yer alan St37 çelikten oluşmaktadır. Ayrıca hibrit Maglev sistemi olarak tasarlanan PMG 3b ve PMG 4 diziliminde numuneler ile birlikte iki adet ilave mıknatıs kullanılmıştır. Bu ilave mıknatıslar, alttaki PMG yolunda kendilerine denk gelen mıknatıslarla paralel manyetik yönetime sahip olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede sistemin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin artırılması amaçlanmıştır. PMG yolu üzerinde üç adet YBCO kullanımına imkân vermesi için PMG 2b diziliminde mıknatıslar arasında 5 mm genişlikli boşluklar bırakılmıştır.

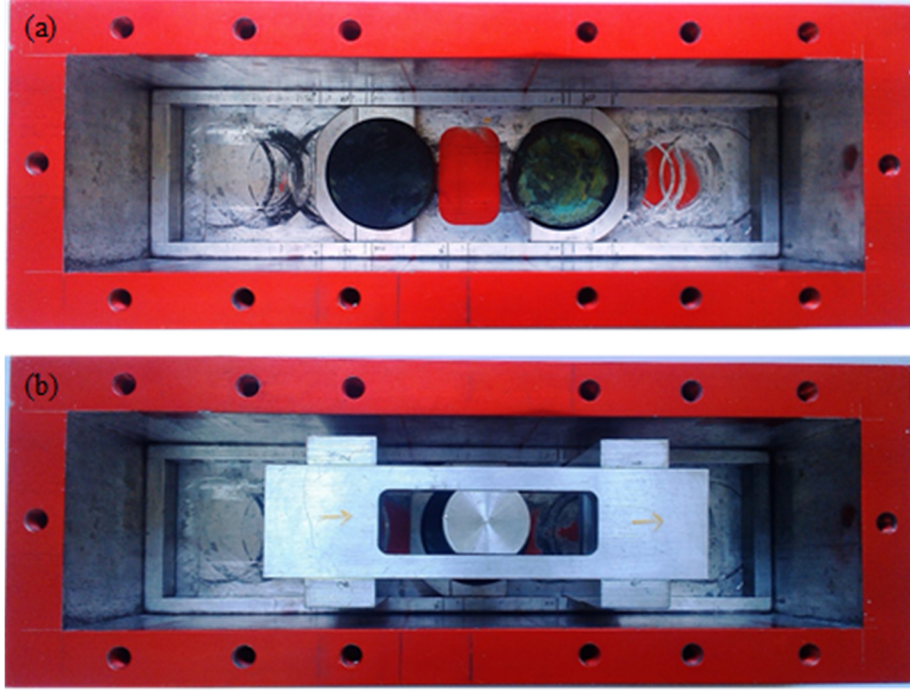


Şekil 2. 7. Çalışmalarda kullanılan farklı HTS-PMG şematik gösterimleri (boyutlar mm birimindedir)

2.2.4. Hibrit Süperiletken Numune Kabı ve Özellikleri

Bu çalışma özellikle Maglev taşıma sistemleri için gerekli olan manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetini artırmaya yöneliktir. Literatürde yapılan çalışmalarda, HTS süperiletkenlerinin kullanılmasıyla elde edilen manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin Maglev sistemlerinin pratik olarak uygulanabilirliği için yeterli olmadığı görülmüştür.

Manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin artırılması amacı ile bu çalışmada, manyetik kılavuzlama yolunun üstünde hareket eden ve birden fazla HTS ve mıknatısın birlikte kullanılabileceği hibrit süperiletken hazne sistemi geliştirilmiştir (Şekil 2. 8). Bu numune kabında numuneler arası mesafe istenildiği gibi ayarlanabilmekte ve buna bağlı olarak değişik konfigürasyonlarda PMG'ler kullanılabilmektedir. Şekilde görülen alüminyum halkalar ile numuneler ve bu halkaların dışında bulunan dikdörtgen çerçevedeki vidalar ile halkalar istenilen konuma sabitlenebilmektedir. Ölçüm sırasında PMG'ler tarafından YBCO'lara uygulanan manyetik kuvvet, numune kabının üstüne sabitlenmiş olan kuvvet sensörüne iletilmektedir. Şekil 2. 8 (b) ilave mıknatısların düşey ve yanal konumlarının ayarlanabildiği hibrit süperiletken numune haznesini göstermektedir. 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.



Şekil 2. 8. İki süperiletken numune bulunduran süperiletken numune haznesi (a) ve ilave mıknatısların düşey ve yanal konumlarının ayarlanabildiği hibrit süperiletken numune haznesi (b)

Literatürde hibrit sistemlerle ilgili bir iki çalışmaya rastlanması ve bu çalışmaların da sınırlı sayıda HTS-PMG konfigürasyonunu içermesi, hibrit Maglev sistemlerinin manyetik kuvvetle ilgili çalışmalarının yetersizliğini gösterir. Şekil 2. 8'deki süperiletken numune haznesi manyetik olmayan alüminyum malzemeden imal edilmiş olup, numune haznesindeki süperiletkenleri soğutmak için kaynama sıcaklığı 77 K olan sıvı azot kullanılır.

2.2.5. Manyetik Kuvvet Ölçüm Yöntemleri

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında yapılan manyetik kuvvet ölçümleri düşey manyetik kuvvet ve yanal manyetik kuvvet (kılavuzlama kuvveti) olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sistemin düşey ve yatay yönlerdeki kararlılığının belirlenmesi amacı ile manyetik kuvvet sabiti (stiffness) ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Bütün ölçümlerde YBCO numunelerin soğutulması için sıvı azot (kaynama sıcaklığı 77 K) kullanılmıştır. Ölçüme başlamadan önce 15 dakika süre ile numune kabına sıvı azot dökülmüştür. 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 soğuduğu anlaşılmaktadır.

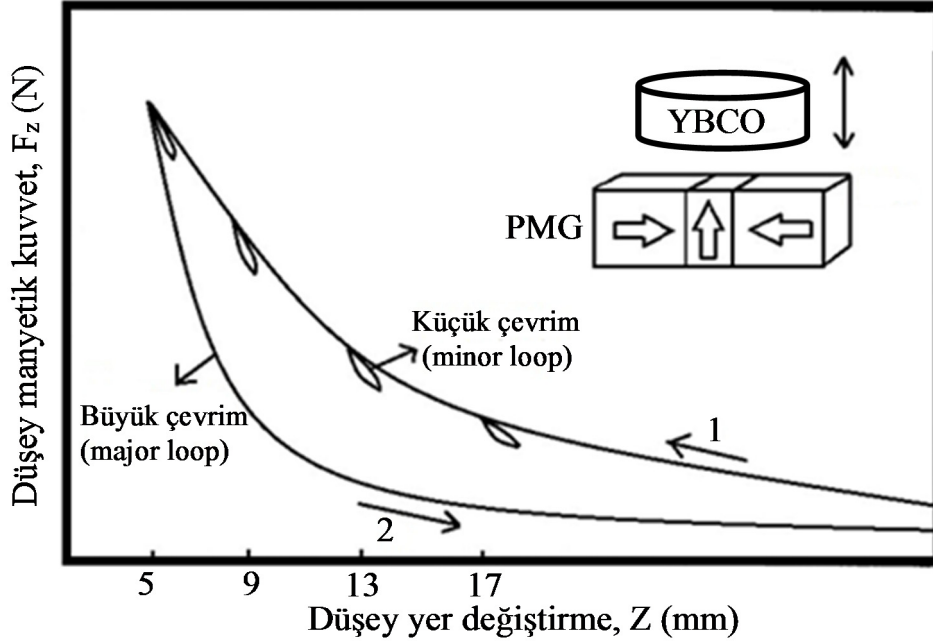
Düşey manyetik kuvvet ölçümleri alanlı soğutma (Field Cooling, FC) ve alansız soğutma (Zero Field Cooling, ZFC) durumlarında gerçekleştirilmiştir. ZFC ölçümleri gerçekleştirilirken YBCO numuneler PMG'den uzak bir mesafede (75 mm) soğutulmuş ve numunelerin içerisine herhangi bir manyetik alan girişine imkân verilmemiştir. Numunelerin bütünüyle soğumasından sonra numuneler PMG'ye yaklaştırılıp (5 mm) uzaklaştırılırken konuma bağlı olarak düşey manyetik kaldırma kuvveti verileri kaydedilmiştir (Şekil 1. 8 (a)). Diğer bir düşey manyetik kuvvet ölçümünde ise numuneler PMG'nin manyetik alanı altında farklı soğutma mesafelerinde (Cooling Height, CH) soğutulmuştur. Daha sonra numuneler PMG'den 75 mm uzaklaştırılmıştır. Sonrasında ZFC durumundaki gibi numuneler PMG'ye yaklaştırılıp uzaklaştırılırken konuma bağlı olarak düşey manyetik kaldırma kuvveti verileri kaydedilmiştir. Numunelerin akı tuzaklama kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan FC ölçümlerinde ise numuneler PMG'nin manyetik alanı altında (5 mm mesafede) soğutulduktan sonra PMG'den uzaklaştırılıp PMG'ye yaklaştırılırken konuma bağlı olarak düşey manyetik kaldırma kuvveti verileri kaydedilmiştir (Şekil 1. 8 (b)).

Yanal manyetik kılavuzlama kuvveti ölçümlerinde numuneler belirli soğutma mesafelerinde (5 mm, 10 mm ve 15 mm) soğutulduktan sonra düşey olarak ölçüm yapılacak olan WH=10 mm'lik çalışma yüksekliğine (Working Height, WH) hareket ettirilmiştir. Daha sonra numuneler yatay olarak x doğrultusunda ± 8 mm hareket ettirilmiş ve bu sırada x konumuna bağlı olarak yatay manyetik kuvvet verileri kaydedilmiştir.

2.2.6. Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Yöntemleri

Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümü (k_z) için, alansız soğutma şartını (ZFC) sağlamak amacıyla, numune miktatıslardan yeterince uzak bir mesafede (75 mm) soğutulmuş ve daha sonra sırasıyla 17 mm, 13 mm, 9 mm ve 5 mm yaklaşma mesafelerinde 2 mm' lik küçük çevrimler yapılmıştır (Şekil 2. 9). 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). Ayrıca, farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kuvvet sabiti değerinin belirlenmesi amacı ile sırasıyla 20 mm ve 5 mm soğutma

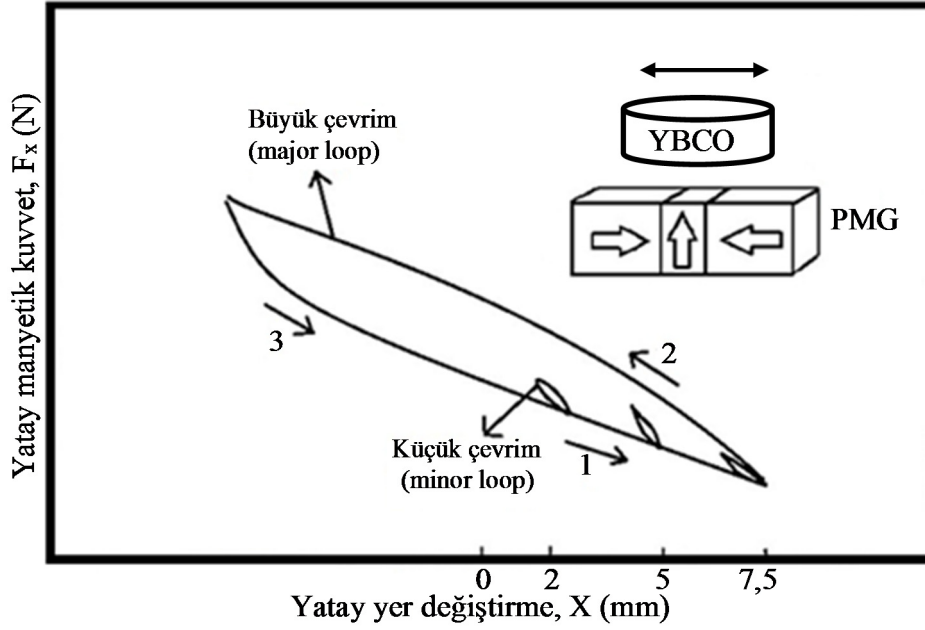
yüksekliklerinde sıvı azot ile soğutma yapılmış ve her bir ölçümdeki soğutma işleminden sonra süperiletken hazne ile PMG yolu arası 75 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir PMG için soğutma işlemi öncesinde YBCO merkezleri ile yukarı veya aşağı manyetizasyon yönelimli ilgili mıknatısların merkezleri aynı hizaya getirilmiştir.



Şekil 2. 9. Düşey manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin şematik gösterimi (Şahin, 2014).

Sistemin yanal kararlılığını incelemek amacıyla, süperiletken haznesi ile mıknatısların bulunduğu PMG yolları arasındaki yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümleri de farklı soğutma yüksekliklerinde ($CH=5$ mm, $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm) incelenmiştir. Tüm ölçümler için süperiletken hazne ile PMG arası çalışma yüksekliği $WH=10$ mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Soğutma işlemine geçmeden önce YBCO merkezleri ile yukarı veya aşağı manyetizasyon yönelimli ilgili mıknatısların merkezleri aynı hizaya getirilmiştir. Numunelerin süperiletken faza geçmesi için farklı soğutma yüksekliklerinde sıvı azot yardımıyla numuneler 15 dakika boyunca soğutulmuştur. Bilgisayar kontrolünde, x yönünde sırasıyla 2 mm, 5 mm ve 7,5 mm noktalarında 1 mm'lik küçük çevrimler yapılmıştır (Şekil 2. 10). Bu küçük çevrimlerden geçirilen doğruların eğimleri $k_x = -\partial F_x / \partial x$ ifadesine göre yatay yöndeki manyetik kuvvet sabitini vereceğinden ilgili konumlardaki doğruların eğimleri hesaplanarak yatay stiffness değerlerine ulaşılmıştır (Hull ve Cansız, 1999).

Şekil 2. 9 ve Şekil 2. 10'da şematik olarak gösterildiği gibi manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti ölçümlerinde histeresiz karakter görülmektedir. Bu histeresiz karakter, süperiletken numune içerisinde bir miktar enerji kaybı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, tüm ölçümlerde kullanılan YBCO süperiletkenler aynı boyutlara sahip olduğundan histeresiz kayıpları bu doktora tez çalışmasının kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 2. 10. Yatay manyetik kuvvet sabiti ölçümlerinin şematik gösterimi (Şahin, 2014).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Giriş

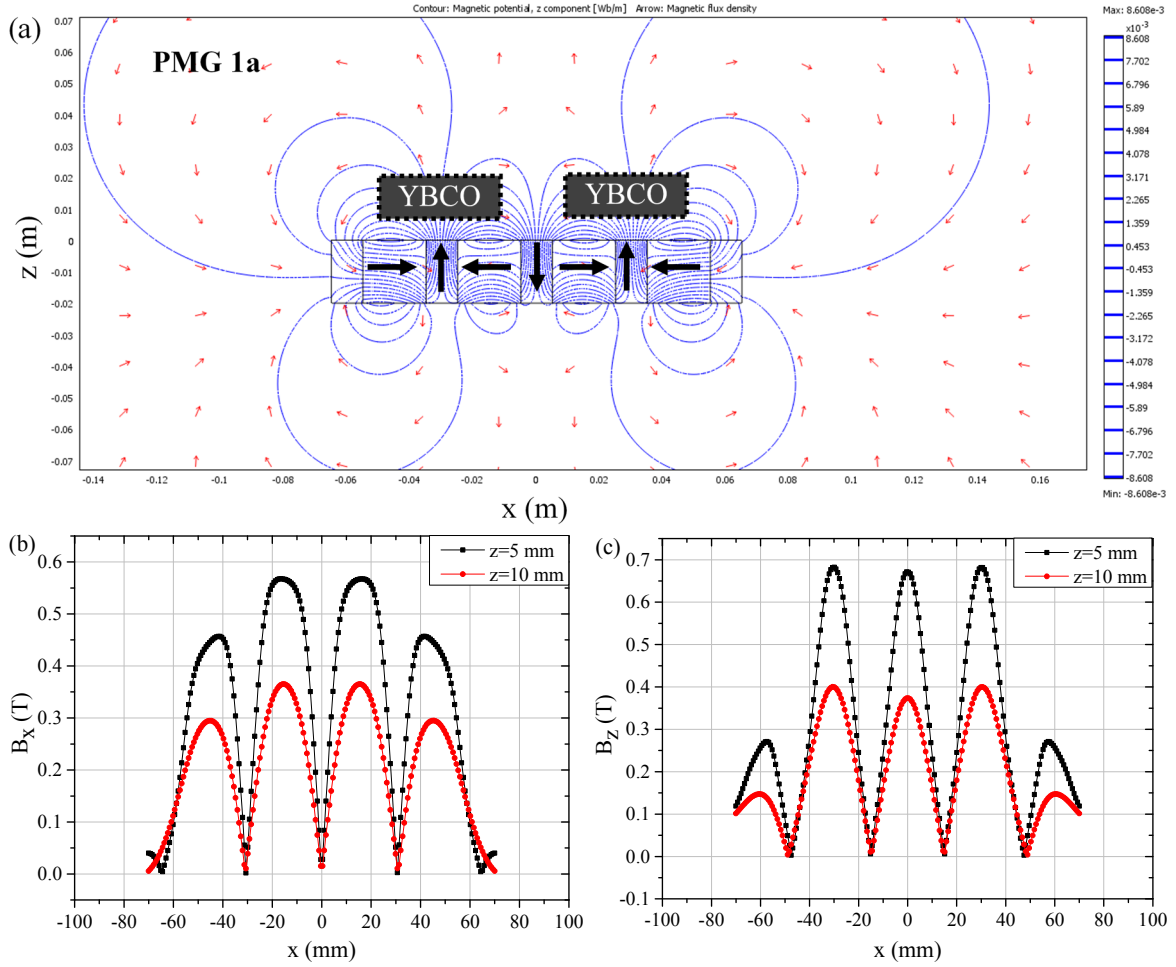
Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılması gerekmektedir. Daha önce hibrit Maglev sistemi ile ilgili yapılan çalışmalarda, sınırlı sayıda HTS–PMG konfigürasyonu kullanıldığından, bu tez çalışması ile yüksek manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti elde etmek için farklı HTS–PMG dizilimleri oluşturuldu ve bu dizilimlerin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti (stiffness) özellikleri farklı soğutma yüksekliklerine (CH) bağlı olarak değişik manyetik alan şartlarında araştırıldı. Çalışmadaki tüm manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti özellikleri, manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi (Şekil 2. 4) kullanılarak belirlendi. HTS olarak kullanılan üstten tohumlama yöntemi ile üretilmiş YBCO süperiletkenler Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ) firmasından ve manyetik alan kaynağı olarak kullanılan NdFeB mıknatıslar Magnet Exper LTD firmasından satın alındı.

3.2. Nümerik Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada kullanılan PMG dizilimlerinin manyetik alan modellemeleri deneysel çalışmalar öncesinde yapılarak hem zaman hem de ekonomi olarak daha verimli bir çalışma gerçekleştirildi. Manyetik alan modellemeleri sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanan Comsol Multiphysics 4.2a paket programındaki AC/DC modülü ile magnetostatik formülasyon kullanılarak gerçekleştirildi.

Şekil 3. 1’de PMG 1a diziliminin konuma bağlı manyetik akı profili ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. Şekil 3. 1 (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 alan yönelimini göstermektedir. PMG 1a dizilimindeki sağ ve sol manyetik alan yönelimli mıknatıslar 40 mm × 20 mm × 20 mm boyutlarında olup manyetik alanı PMG yüzeyinde yoğunlaştırmak amacıyla (Liu vd., 2009) kullanılmış olan aşağı ve yukarı yönelimli mıknatıslar 40 mm × 10 mm × 20 mm boyutlarındadır. Şekil bütünlüğü sağlanabilmesi amacıyla Şekil 3. 1 (b)’de ve

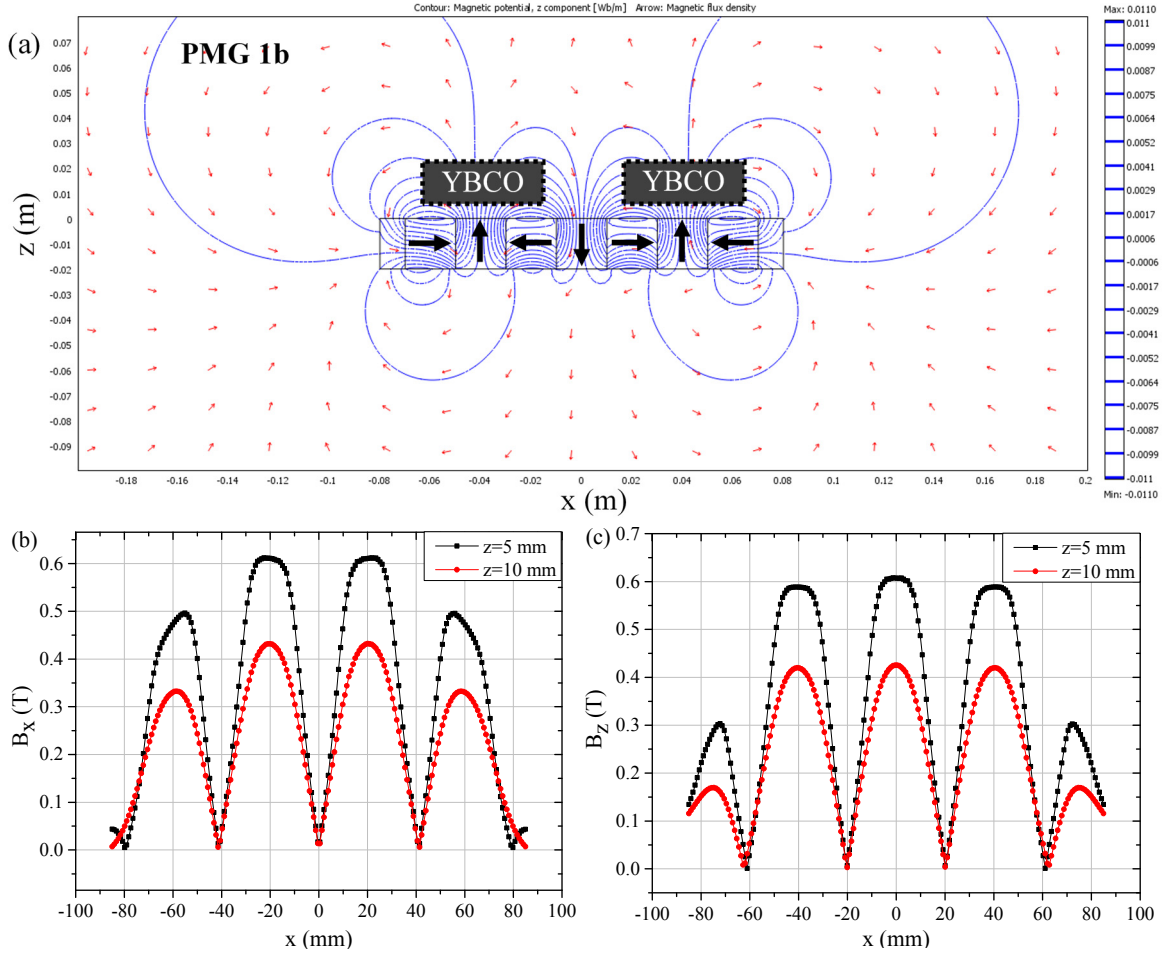
daha sonraki şekillerde görülen manyetik akı yoğunluğu dağılımları, B_x ve B_z değerlerinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir. Şekilden, düşey ve yanal manyetik akı yoğunluğu değerlerinin PMG yüzeyinden düşey olarak uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi PMG 1a dizilimi dört adet B_x ve üç adet B_z manyetik akı yoğunluğu pikine sahiptir.



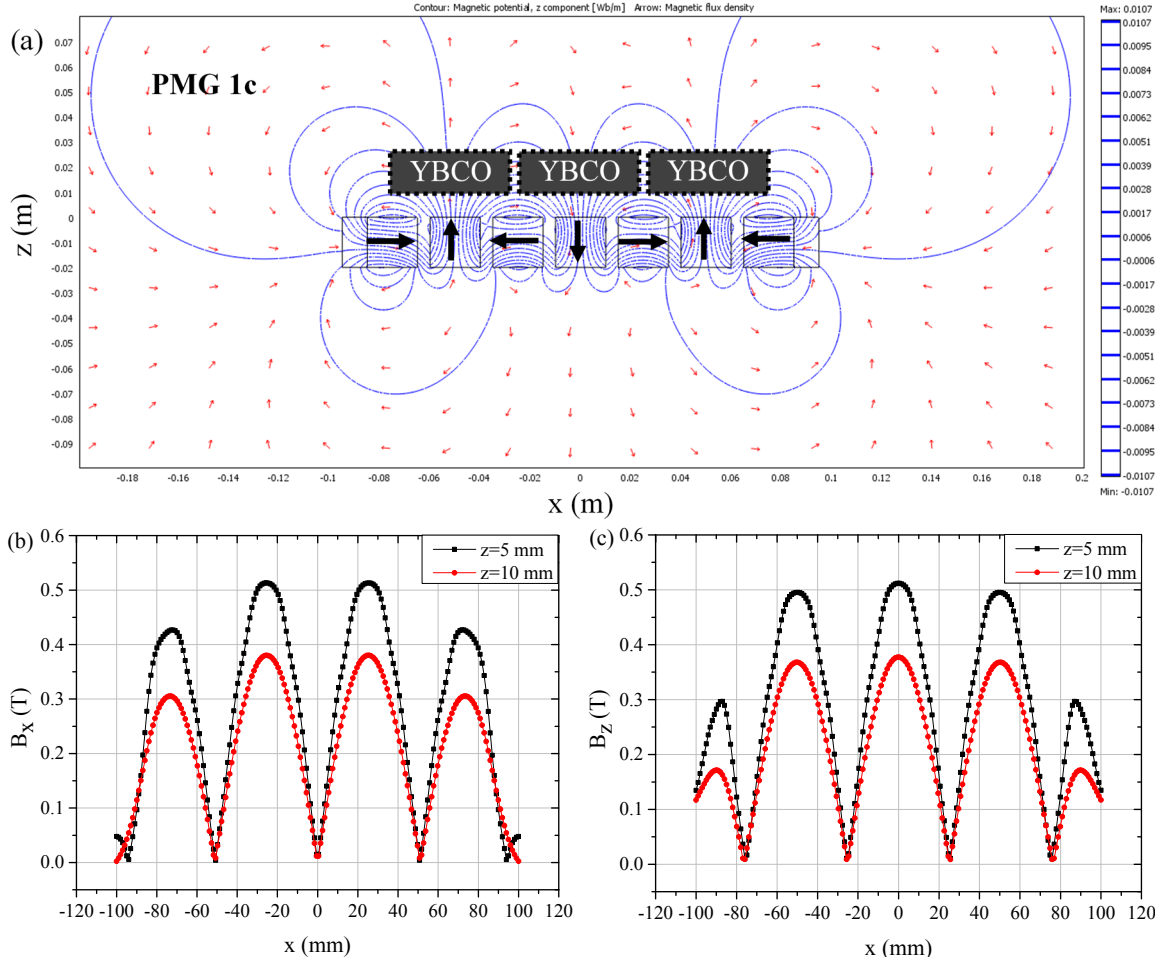
Şekil 3. 1. PMG 1a diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)

Şekil 3. 2' de PMG 1b diziliminin ve Şekil 3. 3'te PMG 1c diziliminin manyetik akı profili ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. PMG 1b ve PMG 1c dizimlerini 40 mm \times 40 mm \times 20 mm boyutlu yedi mıknatıstan oluşmuş olup, üç adet YBCO kullanımına imkân vermesi için PMG 1c diziliminde mıknatıslar arasında 5 mm genişlikli boşluklar bırakılmıştır. Şekillerden görüldüğü gibi manyetik akı yoğunluğu değerleri PMG yüzeyinden düşey olarak uzaklaştıkça azalmaktadır. Ayrıca şekilden PMG 1b ve PMG 1c

diziliminin dört adet B_x ve üç adet B_z manyetik akı yoğunluğu pikine sahip olduğu da görülmektedir. Şekil 3. 2 ve Şekil 3. 3 karşılaştırıldığında PMG 1b diziliminin B_x ve B_z manyetik akı yoğunluğu değerlerinin PMG 1c diziliminden büyük olduğu görülmektedir.

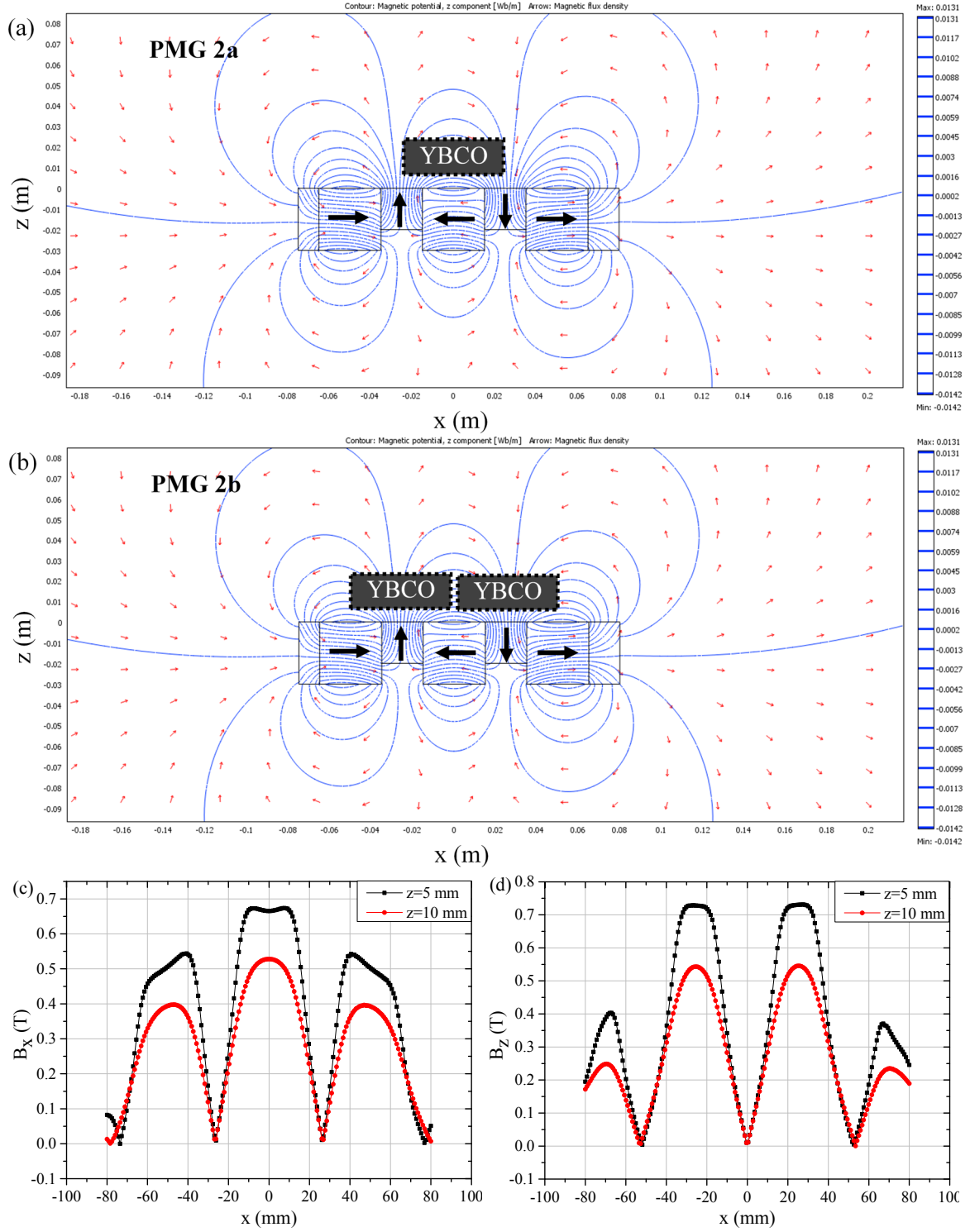


Şekil 3. 2. PMG 1b diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)



Şekil 3. 3. PMG 1c diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)

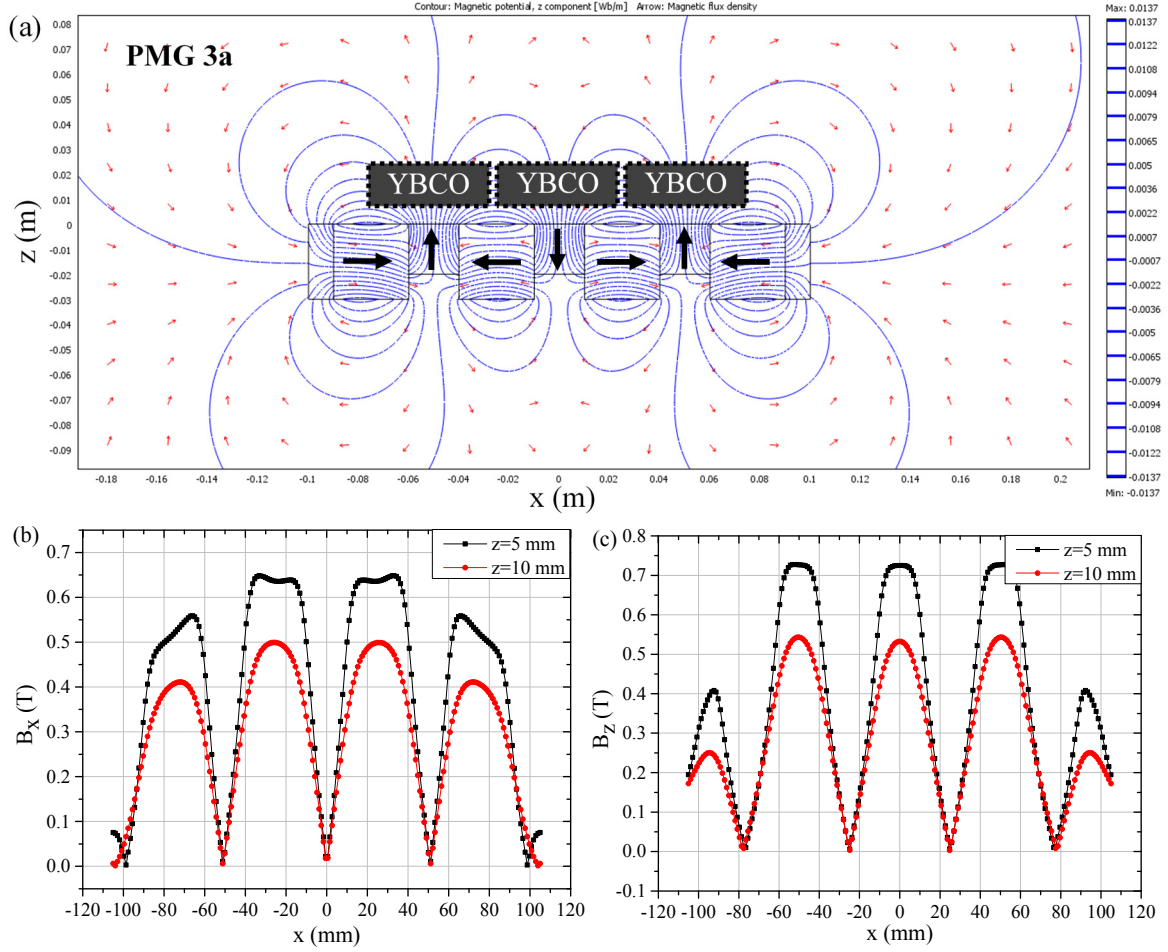
Şekil 3. 4'te PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin konuma bağlı manyetik alan profilleri, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı grafikleri gösterilmiştir. PMG 2a ve PMG 2b dizimleri, kullanılan YBCO süperiletken sayısı dışında aynı mıknatis dizilimlerine sahiptir. Bu nedenle bu dizimlerin manyetik akı yoğunlukları aynı olup Şekil 3. 4 (c) ve (d)'de verilmiştir. Bu dizilim Halbach dizilimi (Halbach, 1985) olarak adlandırılır ve şekilden görüldüğü gibi beş adet mıknatıstan oluşur. PMG 2a ve PMG 2b dizilimindeki sağ ve sol manyetik alan yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ boyutlarında olup aşağı ve yukarı yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarındadır. Halbach diziliminden oluşan PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin bir adet büyük ve iki adet küçük olmak üzere üç B_x ile iki adet B_z pikine sahip olduğu Şekil 3. 4 (c) ve (d)'den görülmektedir.



Şekil 3. 4. PMG 2a (a) ve PMG 2b (b) dizilimlerinin manyetik akı profilleri; B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (d)

Şekil 3. 5, PMG 3a diziliminin manyetik akı profili, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımını göstermektedir. Bu dizilim PMG

2a ve PMG 2b dizilimlerinden farklı olarak yedi mıknatıstan oluşmuş ve dizilimde üç adet YBCO süperiletkeni kullanılmıştır. Dizilimdeki sağ ve sol manyetik alan yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ boyutlarında olup aşağı ve yukarı yönelimli mıknatıslar $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarındadır. Şekil 3. 5 (b) ve (c)'den görüldüğü gibi PMG 3a dizilimi 4 adet B_x ve üç adet B_z pikine sahiptir. Şekil 3. 4 ve Şekil 3. 5, PMG diziliminin merkezindeki pikler ve kenarlardaki pikler açısından iki farklı şekilde karşılaştırılabilir. Merkezdeki en büyük piklere bakıldığında PMG 2a dizilimi daha büyük B_x değeri gösterirken kenarlardaki piklerde PMG 3a dizilimi daha büyük B_x manyetik akı yoğunluğu değerlerine sahiptir. Bununla birlikte her iki dizilimin B_z pik değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

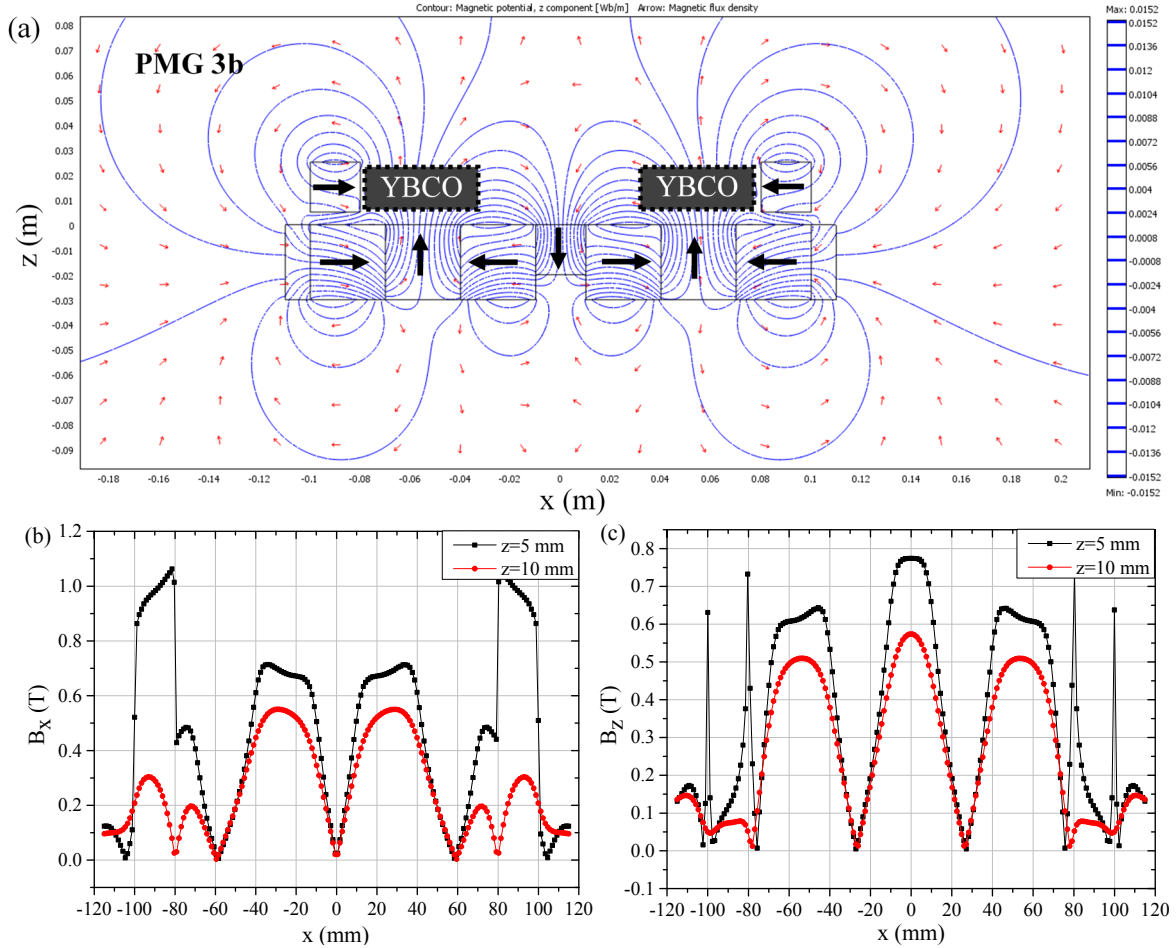


Şekil 3. 5. PMG 3a diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)

Şekil 3. 6, PMG 3b diziliminin manyetik akı profili, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımını göstermektedir. Bu dizilim PMG 3a diziliminden farklı olarak altı adet $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ boyutlarında ve dizilimin ortasında bir adet $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarında mıknatıstan oluşmuştur. Ayrıca dizilimde YBCO süperiletkenlerinin yanında $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarında iki adet ilave mıknatıs yer almaktadır. Bu ilave mıknatıslar alt taraftaki PMG yolunda kendilerine karşılık gelen mıknatıslarla paralel manyetik alan yönelimli olacak şekilde yerleştirilmiştir ve ilave mıknatıslarla süperiletkenlerin birlikte yer aldığı konum, PMG yüzeyinden 5 mm yukarıdadır. Hibrit PMG dizilimi olarak adlandırılan bu dizilimdeki ilave mıknatısların kullanım amacı manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetini artırmaktır. Bilindiği gibi birbirine paralel iki manyetik dipol arasındaki kuvvet itici karakterli olup büyüklük olarak şu şekilde verilir (Moon, 2004):

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3m_1 m_2}{r^4} \quad (3.1)$$

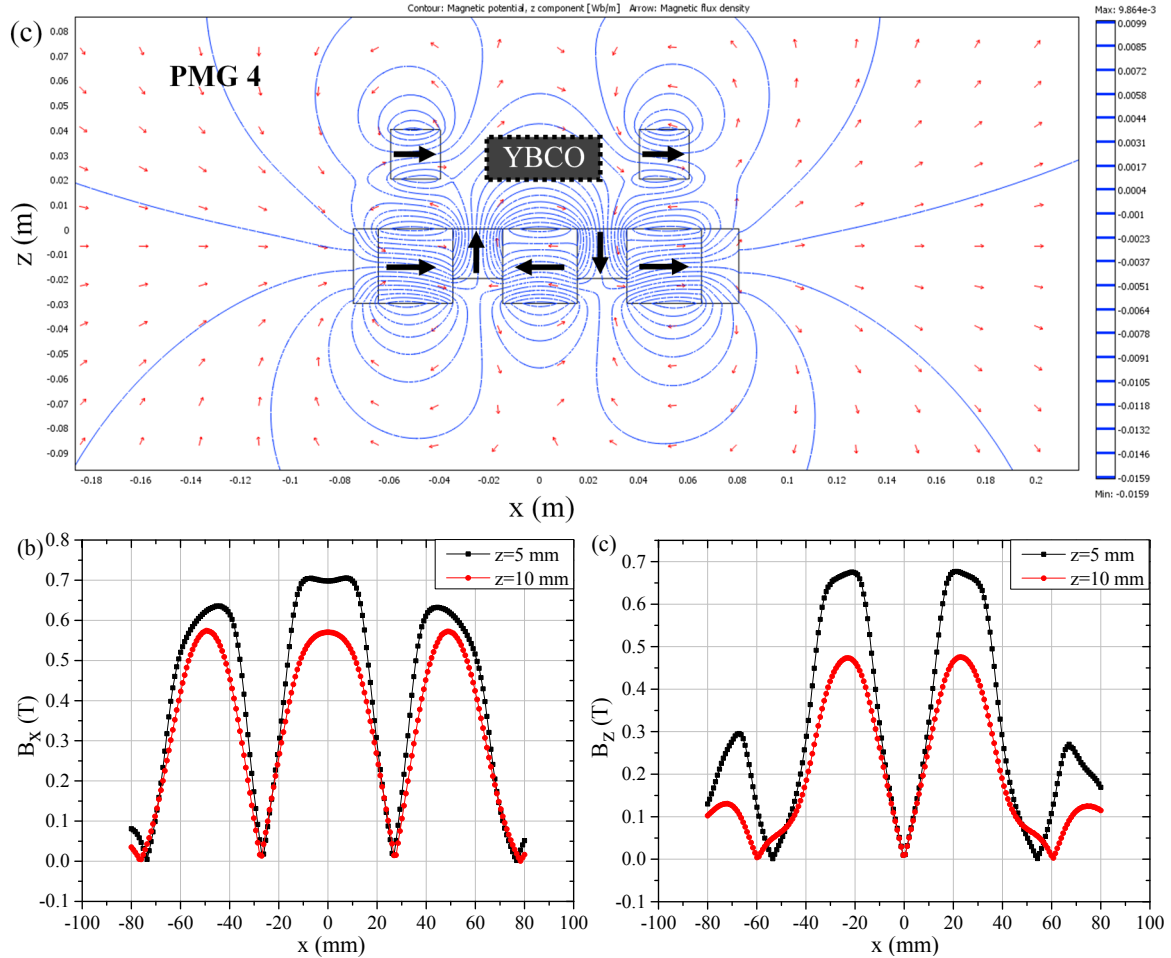
Burada m_1 ve m_2 manyetik dipol momentler ve r bu dipoller arasındaki mesafedir.



Şekil 3. 6. PMG 3b diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)

Şekil 3. 7, PMG 4 diziliminin manyetik akı profili, B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımını göstermektedir. Bu dizilimdeki PMG yolu PMG 2a ve PMG 2b ile aynı olmakla birlikte dizilimde YBCO süperiletkeni ile birlikte iki adet $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarında mıknatıs kullanılmıştır. Şekil 3. 7 (a)'da görüldüğü gibi bu ilave mıknatıslar alt taraftaki PMG yolunda kendilerine karşılık gelen mıknatıslarla paralel manyetik alan yönelimli olacak şekilde ve x doğrultusunda eksenleri çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. İlave mıknatıslarla süperiletkenlerin birlikte yer aldığı konum, PMG yüzeyinden 20 mm yukarıdadır. Bu dizilim de PMG 3b diziliminde

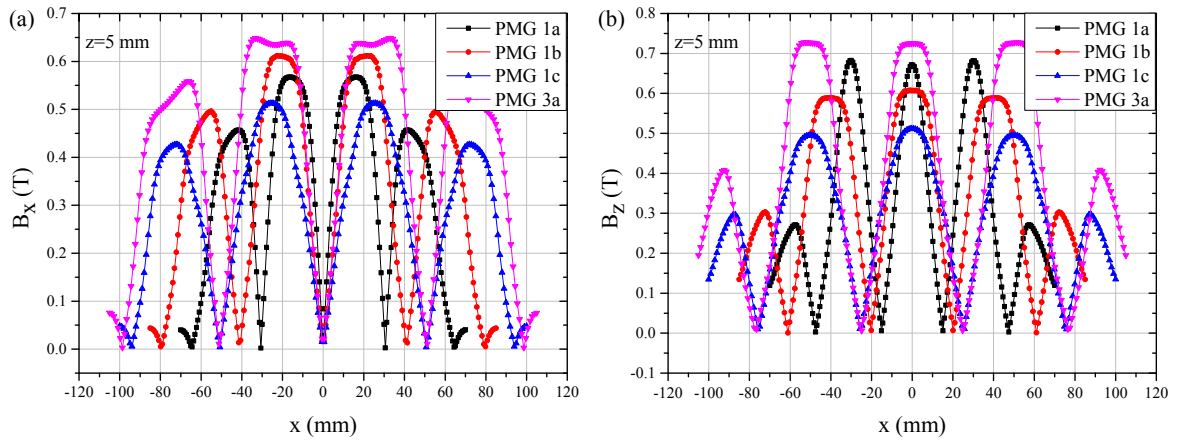
olduğu gibi hibrit PMG dizilimi olarak adlandırılır. Şekil 3. 7 (b) ve (c)'den görüldüğü gibi PMG 4 dizilimi 3 adet B_x ve iki adet B_z manyetik akı yoğunluğu pikine sahiptir.



Şekil 3. 7. PMG 4 diziliminin manyetik akı profili (a), B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c)

Şekil 3. 8'de PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm yukarıdaki B_x ve B_z manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm PMG'ler dört adet B_x ve üç adet B_z manyetik akı yoğunluğu pikilerine sahiptir. Manyetik akı yoğunluğu grafiklerinin PMG kesit alanı ile orantılı olarak genişlediği görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi PMG 3a diziliminin B_x ve B_z değerleri diğer PMG'lerden büyüktür. Ayrıca PMG 1c diziliminin B_x ve B_z pikleri PMG 1a diziliminden geniş olmakla birlikte PMG 1a diziliminin pik değerlerinin PMG 1c'den büyük olduğu da şekilden görülmektedir. PMG 1c diziliminin daha geniş piklere sahip olması, bu dizilimin toplam genişliğinin PMG 1a'dan fazla olmasından

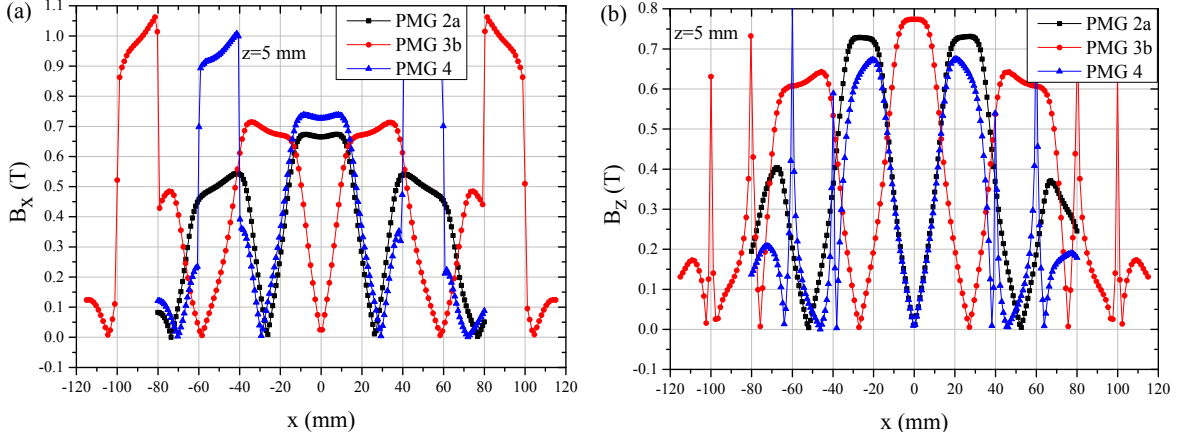
kaynaklanmaktadır. PMG 1a diziliminin PMG 1c diziliminden daha büyük manyetik akı yoğunluğu piklerine sahip olması PMG 1c diziliminde mıknatıslar arasındaki 5 mm genişlikli boşlukların, PMG 1c diziliminin bileşke manyetik akı yoğunluğunu azaltmasından kaynaklanmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi PMG 1b diziliminin B_x değeri PMG 1a diziliminden büyük iken B_z değeri PMG 1a diziliminden küçüktür. Bu durum PMG 1a dizilimindeki yukarı yönlü mıknatısların genişliğinin az ve bu mıknatısların yüzeyindeki manyetik alan değerinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 8. PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (a) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b)

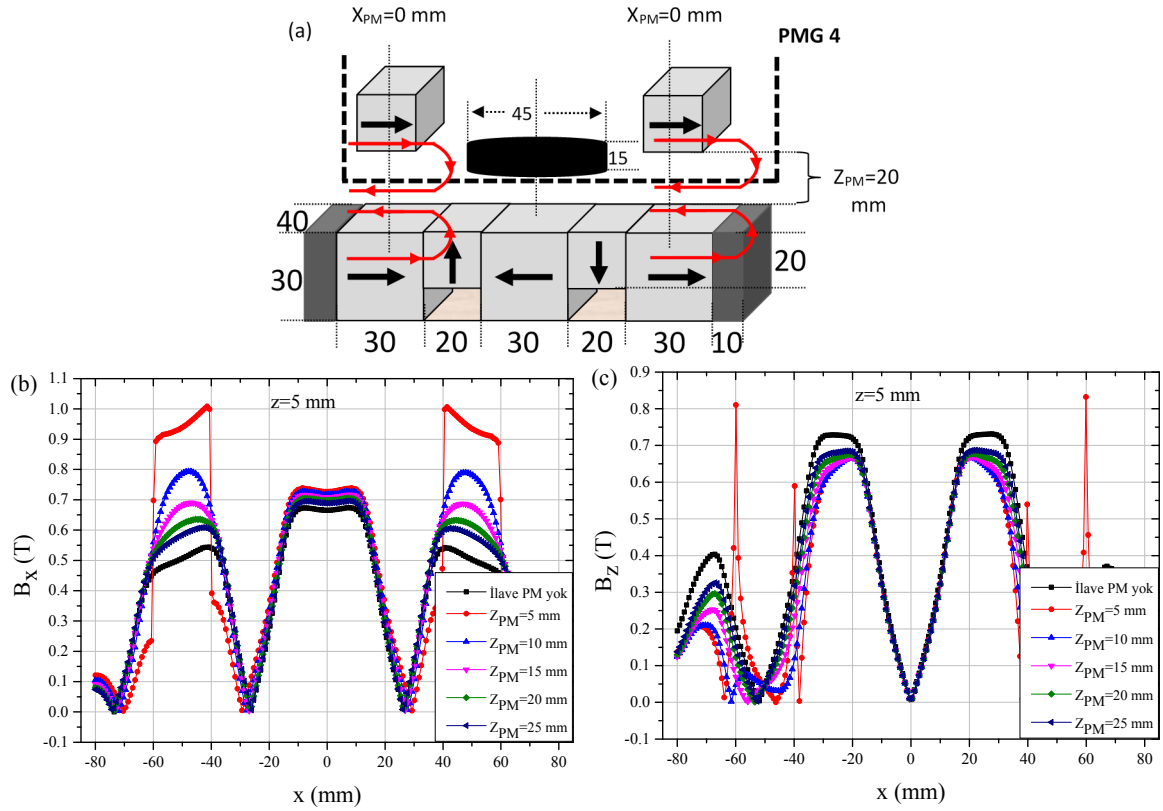
Şekil 3. 9 PMG 2a, PMG 3b ve PMG 4 dizilimlerinin PMG yüzeyinden 5 mm yukarıdaki B_x ve B_z manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. PMG 3b ve PMG 4 dizilimleri hibrit PMG dizilimleri olup ilave mıknatıslar ile PMG arasındaki düşey mesafe 5 mm'dir. PMG 4 dizilimi PMG 2a dizilimine iki adet ilave mıknatıs kullanılarak elde edilmiş bir dizilimdir. Bu nedenle PMG 2a ve PMG 4 dizilimlerinin manyetik akı yoğunlukları karşılaştırılması uygundur. Şekilden görüldüğü gibi PMG 4 diziliminin yatay B_x manyetik akı yoğunluğu PMG 2a diziliminden büyük fakat düşey B_z manyetik akı yoğunluğu PMG 2a diziliminden küçüktür. İlave mıknatıs kullanımıyla hibrit PMG 4 diziliminin B_z değerinin azalması, paralel manyetik alan yönelimine sahip ilave mıknatıslar ile PMG yolunda bu mıknatıslara karşılık gelen mıknatısın manyetik akılarının z-bileşeninin birbirinin etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Hibrit PMG dizilimindeki ilave mıknatısların B_x yatay manyetik akı yoğunluğuna olumlu bir katkı yaptığı ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğunu bir miktar azalttığı görülmektedir. Bilindiği gibi manyetik kaldırma kuvveti B_x , kılavuzlama kuvveti

ise B_z ile orantılıdır. Bu nedenle ilave mıknatısların manyetik kaldırma kuvvetini artırırken kılavuzlama kuvvetini azaltması beklenmektedir. Bu durum ilerleyen kısımlarda ayrıntılı olarak tartışılmıştır.



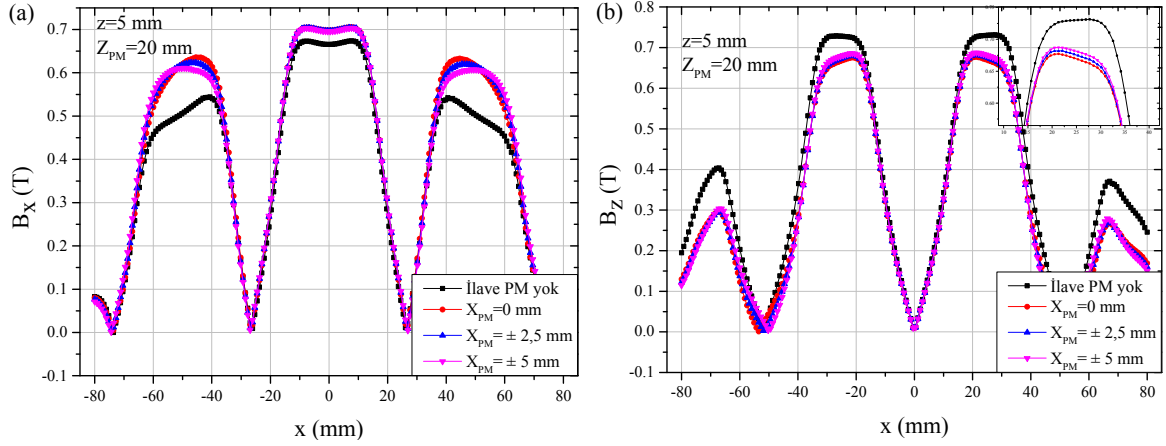
Şekil 3. 9. PMG 2a, PMG 3b ve PMG 4 dizilimlerinin B_x yatay manyetik akı yoğunluğu dağılımı (a) ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b)

Şekil 3. 10, hibrit PMG 4 diziliminin şematik gösterimi ve manyetik akı yoğunluğunun ilave mıknatısların Z_{PM} düşey konumuna göre değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilave mıknatıs kullanımı, ilave mıknatıs olmayan duruma göre manyetik akı yoğunluğunun pik sayısı üzerinde etki yapmamıştır. Bununla birlikte Z_{PM} değerinin artması ile birlikte B_z piklerinin maksimum değerlerinde bir artma gözlenirken B_x değerlerinde azalma gözlenmiş ve ilave mıknatıs olmadığı durumda B_x manyetik akı yoğunluğu minimuma, B_z manyetik akı yoğunluğu ise maksimuma ulaşmıştır. PMG yolunun üstünde ilave PM kullanımının B_z değerini azaltması, Halbach PMG ve ilave PM'lerin aynı x-doğrultulu manyetik akıya sahip olmaları nedeniyle, sağ ve sol taraftaki zıt yönlü manyetik akı çizgilerinin (Şekil 3. 10 (a) düşey kırmızı çizgiler) manyetik akının z-bileşenini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, ilave PM kullanımıyla B_x pik değerinin artması, aynı doğrultulu manyetik akı çizgilerinin (Şekil 3. 10 (a) yatay kırmızı çizgiler) manyetik akının x bileşenini güçlendirmelerinden kaynaklanmaktadır (Ozturk vd., 2015).



Şekil 3. 10. Hibrit PMG 4 diziliminin şematik gösterimi (a), ilave mıknatısların düşey pozisyonlarına bağlı olarak B_x yatay (b) ve B_z düşey (c) manyetik akı yoğunluğunun değişimi

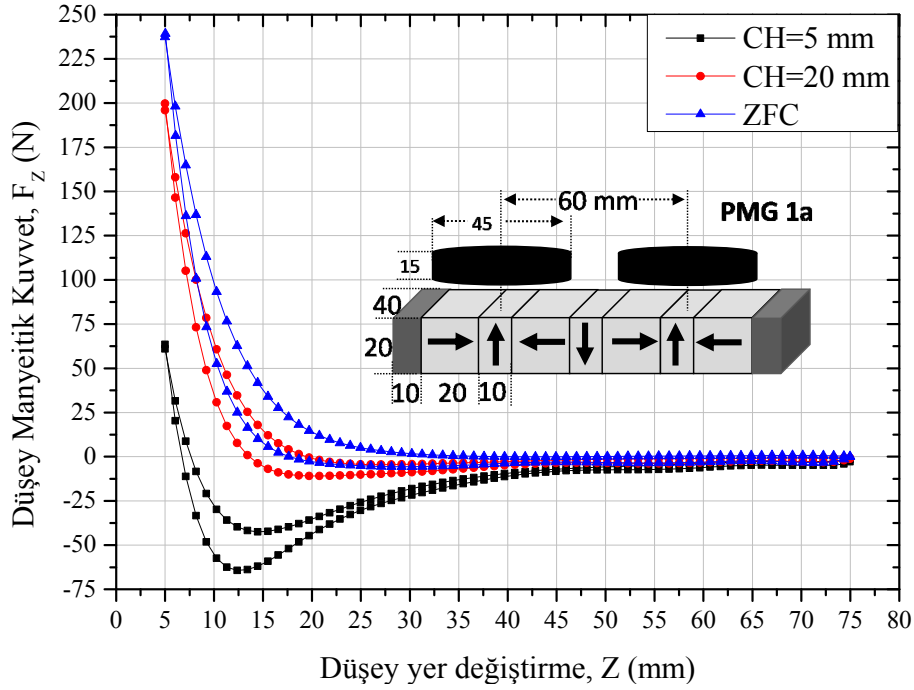
Şekil 3. 11, hibrit PMG 4 diziliminin manyetik akı yoğunluğunun ilave mıknatısların yatay X_{PM} konumuna göre değişimini göstermektedir. Kesim 3. 8’de daha detaylı olarak verildiği üzere hibrit PMG 4 diziliminde öncelikle ilave mıknatısların düşey konumu $Z_{PM}=20$ mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3. 11 (b) de görülen sağ taraftaki pikin daha detaylı görünümü grafiğin içerisine ilave edilerek gösterilmiştir. Şekil 3. 11’de görüldüğü üzere $Z_{PM}=20$ mm düşey mesafe için ilave mıknatısların farklı yatay X_{PM} konumlarının manyetik akı dağılımları belirlenmiştir. Şekil 3. 10 ile uyumlu olarak bu şekilde de ilave mıknatıs kullanımı B_x ’i artırırken B_z ’yi azaltmıştır. Bununla birlikte ilave mıknatısların yatay konumu başlangıç konumundan uzaklaştıkça B_x değeri azalırken B_z değeri artmaktadır.



Şekil 3. 11. Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatısların yatay konumlarına bağlı olarak B_x yatay (a) ve B_z düşey (b) manyetik akı yoğunluğunun değişimi

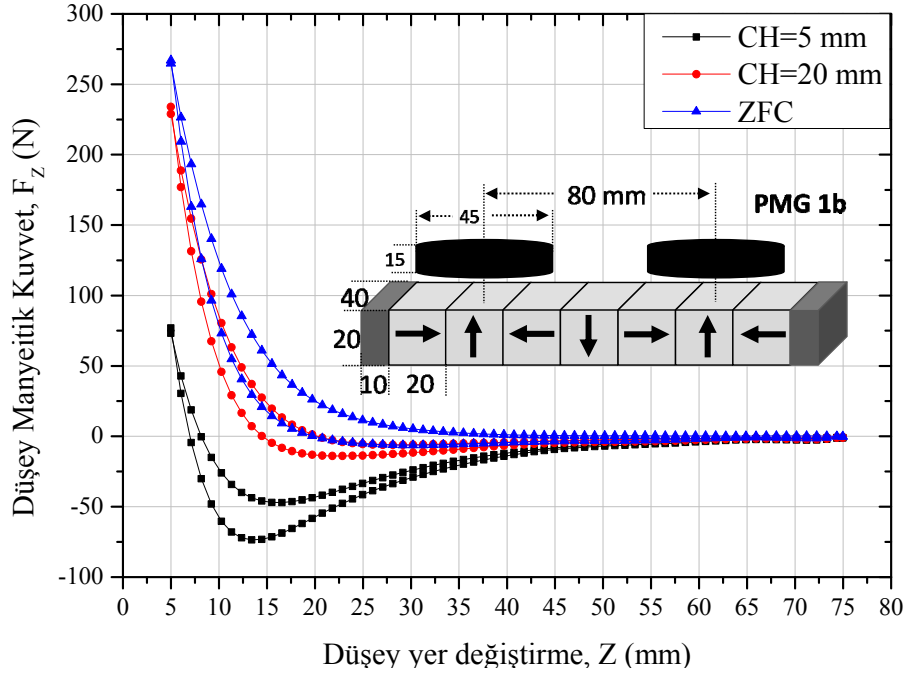
3.3. Düşey Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Şekil 3. 12’de farklı soğutma yüksekliklerinde ($CH=5$ mm, 20 mm ve 75 mm) PMG 1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi soğutma mesafesi arttıkça manyetik kaldırma kuvvetinin itici kısmı artmakta ve çekici kısmı azalmaktadır. Maksimum itici kuvvet değeri $CH=5$ mm için 63 N’den $CH=20$ mm’de 200 N’a ve $CH=75$ mm (ZFC) durumunda 239 N’a artmaktadır. Artan CH değerleri için kaldırma kuvvetindeki artış, süperiletkenlerde oluşan perdeleme akımlarının ön plana çıkarak diyamanyetik etkinin baskın olmasından kaynaklanmaktadır.

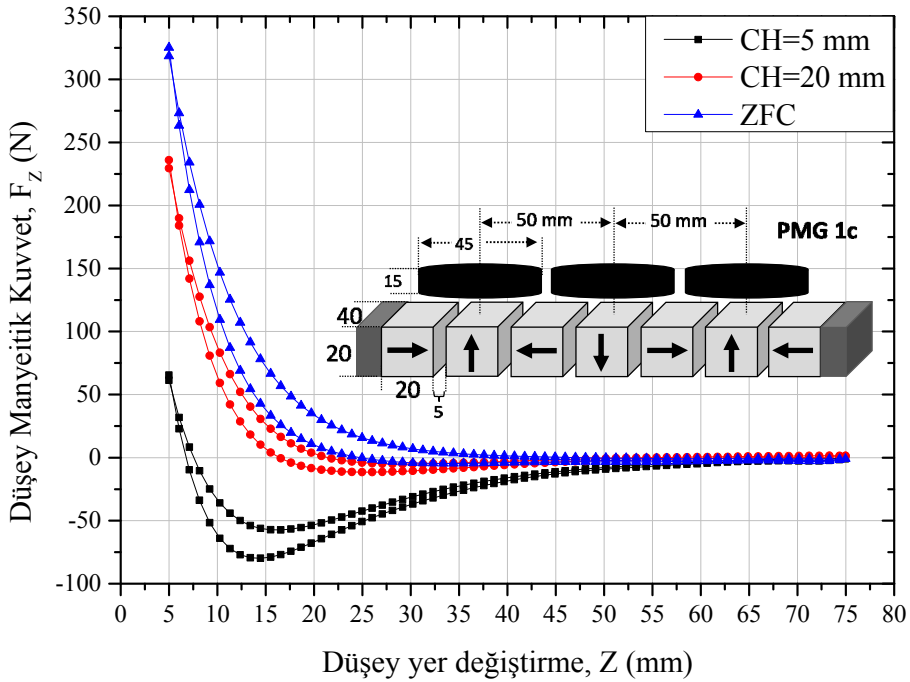


şekil 3. 12. PMG 1a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

şekil 3. 13'te PMG 1b ve şekil 3. 14'te PMG 1c dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetlerinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görölmektedir. şekil 3. 13'ten göröldüğü gibi soğutma mesafesi arttıķa PMG 1b diziliminin maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm'de 77 N'dan CH=20 mm'de 234 N'a ve ZFC durumunda 267 N'a artmaktadır. Benzer şekilde PMG 1c dizilimi için maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm'de 65 N'dan CH=20 mm'de 236 N'a ve ZFC durumunda 325 N'a artmaktadır (şekil 3. 14). Deng ve arkadaşları 5 mıknatıstan oluşan Halbach PMG üzerinde 30 mm çaplı, 18 mm yükseklikli 7 adet YBCO süperiletkeni ile yaptıkları deneysel çalışmada 7 mm'lik minimum yaklaşma mesafesinde ve FCH=30 mm soğutma yükseliği için 231,5 N'luk bir maksimum kuvvet gözlediler (Deng vd., 2008). Bizim çalışmamızda PMG 1b dizilimi ile 20 mm soğutma mesafesinde ve 7 mm düşey mesafede yalnızca 2 YBCO süperiletkeni kullanılarak yaklaşık olarak 180 N'luk bir kuvvet değeri gözlenmiştir. Bu durumda 7 mıknatıstan oluşan PMG 1b diziliminin literatüre kıyasla çok daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.



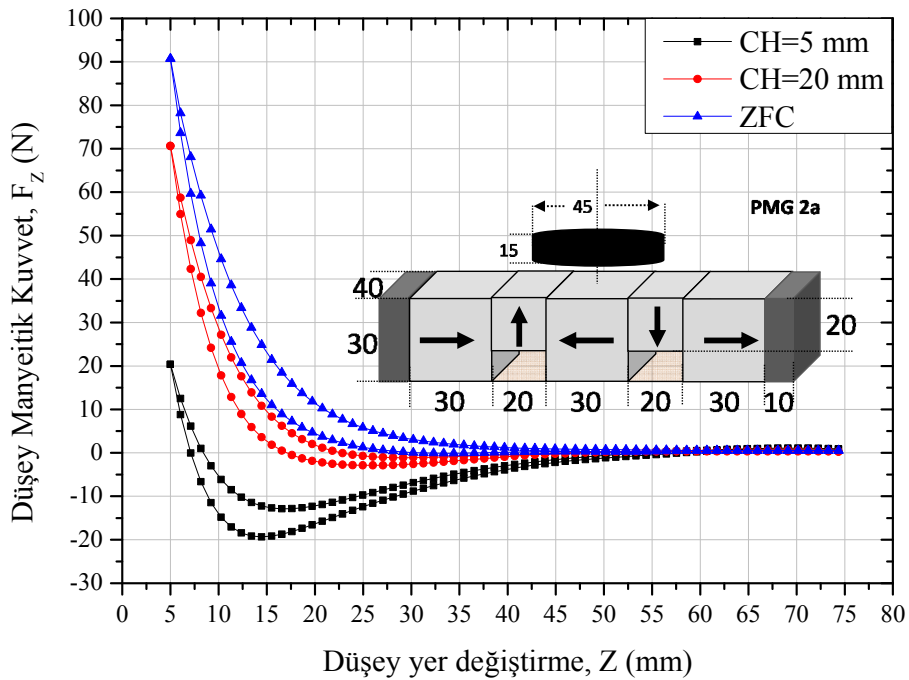
Şekil 3. 13. PMG 1b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



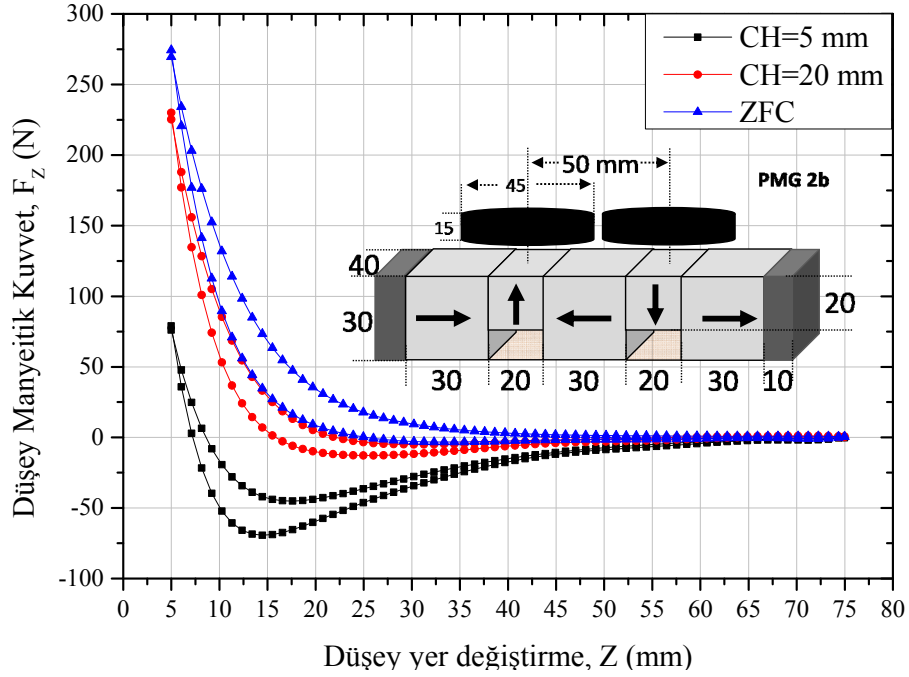
Şekil 3. 14. PMG 1c diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3. 15'te PMG 2a ve Şekil 3. 16'da PMG 2b dizimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

görülmektedir. Şekil 3. 15 ve Şekil 3. 16’da kullanılan PMG yolu aynı olmakla birlikte PMG 2a diziliminde tek YBCO, PMG 2b diziliminde ise iki adet YBCO süperiletkeni kullanılmıştır. PMG 2b diziliminde iki YBCO ile elde edilen maksimum itici kuvvet değerleri CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm için sırasıyla 79 N, 230 N ve 274 N olup bu değerler PMG 2a diziliminde tek YBCO ile elde edilen değerlerin (20 N, 71 N, 91 N) iki katından fazla olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi Halbach PMG’de daha büyük manyetik kaldırma kuvveti elde etmek için süperiletken, B_z pikinin maksimum olduğu yerde konumlandırılmalıdır (Liu vd., 2008b). Şekil 3. 4’ten de görüldüğü gibi PMG 2a dizilimindeki YBCO süperiletkeni B_x alanının maksimum olduğu yerde, PMG 2b dizilimindeki YBCO süperiletkenleri ise B_z alanının maksimum olduğu yerlerde konumlandırılmış ve literatürdeki bu bilgi ilk defa bu çalışmada iki YBCO süperiletkeni ile doğrulanmıştır.

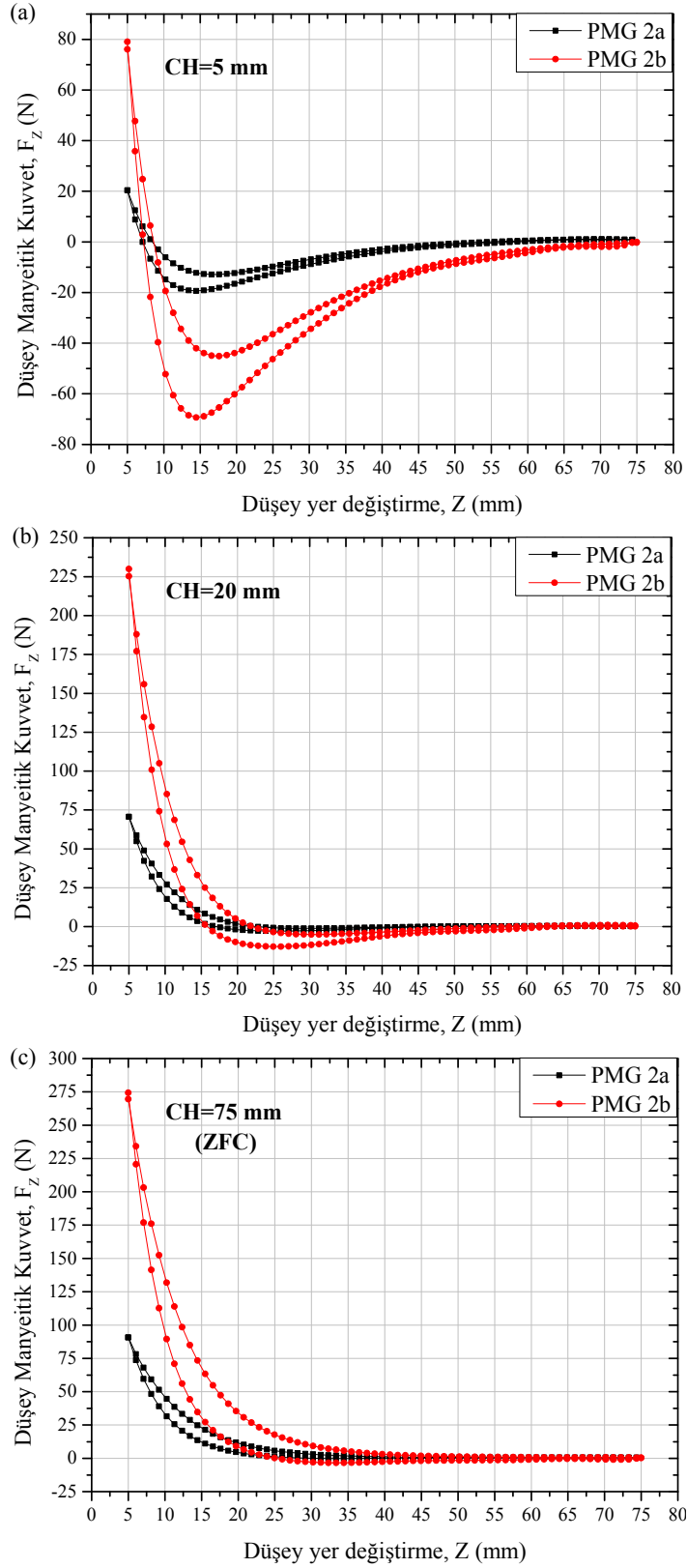


Şekil 3. 15. PMG 2a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



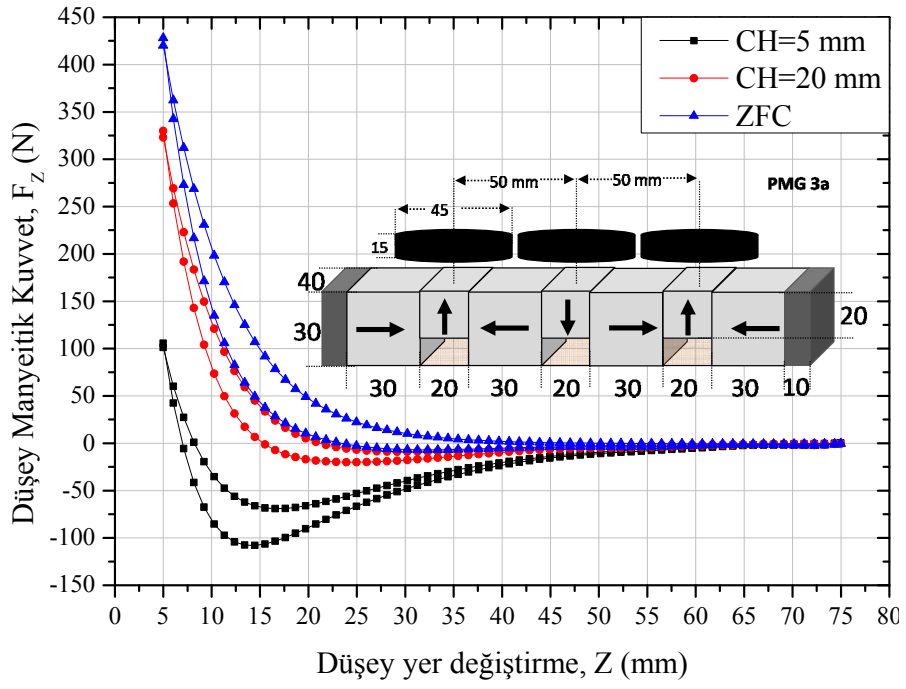
Şekil 3. 16. PMG 2b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3. 17 farklı soğutma mesafeleri için PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin manyetik kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Tüm soğutma yüksekliklerinde iki süperiletken kullanılan PMG 2b diziliminin manyetik kaldırma kuvveti tek süperiletken kullanılan PMG 2a diziliminin iki katına eşit olması beklenirken üç katından fazla olduğu görülmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi PMG 2b dizilimindeki YBCO süperiletkenleri B_z düşey manyetik akı yoğunluğunun maksimum olduğu yerlerde konumlandırıldığı için bu dizilim ile elde edilen kuvvet değerleri PMG 2a ile elde edilen kuvvet değerlerinin iki katından daha büyük olmuştur. Bu durum, Halbach PMG diziliminde iki B_z piki üzerinde iki süperiletken kullanımıyla elde edilecek kuvvet değerlerinin Maglev sistemlerinin taşıma kapasitelerinin artırılması için elverişli olduğunu göstermektedir.

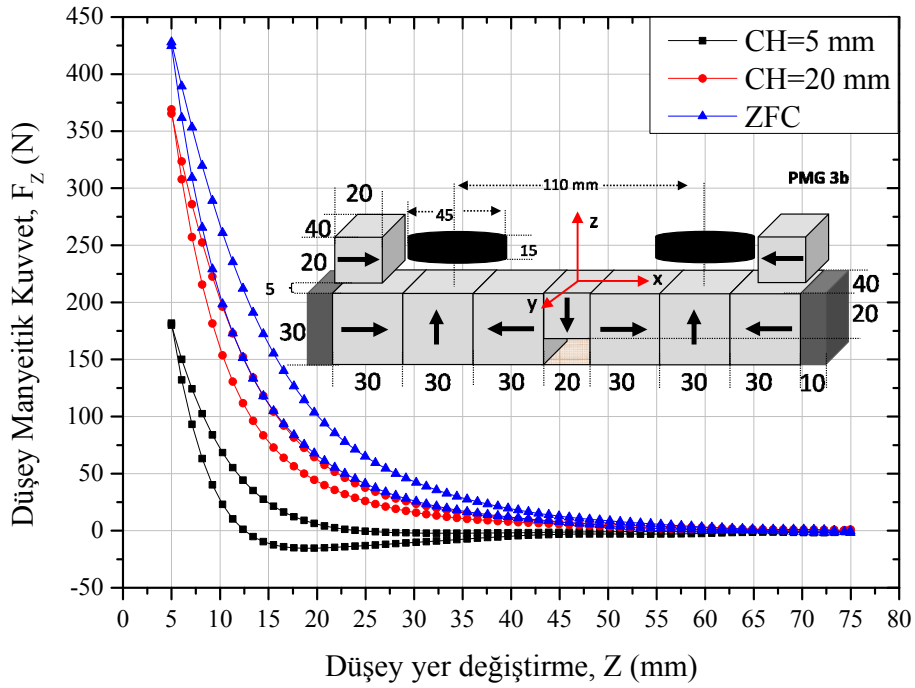


şekil 3. 17. PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH= 20 mm (b) ve ZFC (c) durumdaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 18’de PMG 3a ve Şekil 3. 19’da PMG 3b dizilimlerinin farklı soğutma yüksekliklerinde manyetik kaldırma kuvvetlerinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi görülmektedir. PMG 3a diziliminde üç adet YBCO, PMG 3b diziliminde ise iki YBCO ile birlikte ilave iki mıknatıs kullanılmıştır. CH=5 mm, 20 mm ve 75 mm’de gözlenen maksimum kuvvet değerleri PMG 3a dizilimi için sırasıyla 106 N, 330 N, 428 N ve PMG 3b dizilimi için 182 N, 369 N, 425 N olmuştur. ZFC durumunda elde edilen maksimum kuvvet değerleri birbirine yakın olmakla birlikte CH=5 mm ve CH=20 mm’de PMG 3b dizilimi ile elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin PMG 3a ile elde edilen kuvvet değerlerinden belirgin bir şekilde büyük olduğu görülmektedir. YBCO maliyetinin (yaklaşık 550 €) mıknatıs maliyetine (ortalama 20 €) oranla çok büyük olduğu düşünüldüğünde, YBCO süperiletken sayısının azaltılıp onun yerine ilave iki mıknatısın kullanıldığı PMG 3b hibrit diziliminin PMG 3a diziliminden çok daha avantajlı olacağı söylenebilir. Literatürde, çapı 30 mm, yüksekliği 18 mm olan yedi adet YBCO süperiletkeni ile Halbach dizilimli PMG arasında oluşan maksimum düşey manyetik kaldırma kuvveti CH=30 mm soğutma mesafesinde ve minimum yaklaşma mesafesi olan 7 mm’de 231,5 N olarak belirlenmiştir (Deng vd., 2009a, Jing vd., 2007). Bu çalışmada kullanılan YBCO’ların sayısı ve boyutları düşünüldüğünde PMG 3b diziliminin manyetik kuvvet ve maliyet yönünden verimli olduğu anlaşılmaktadır.



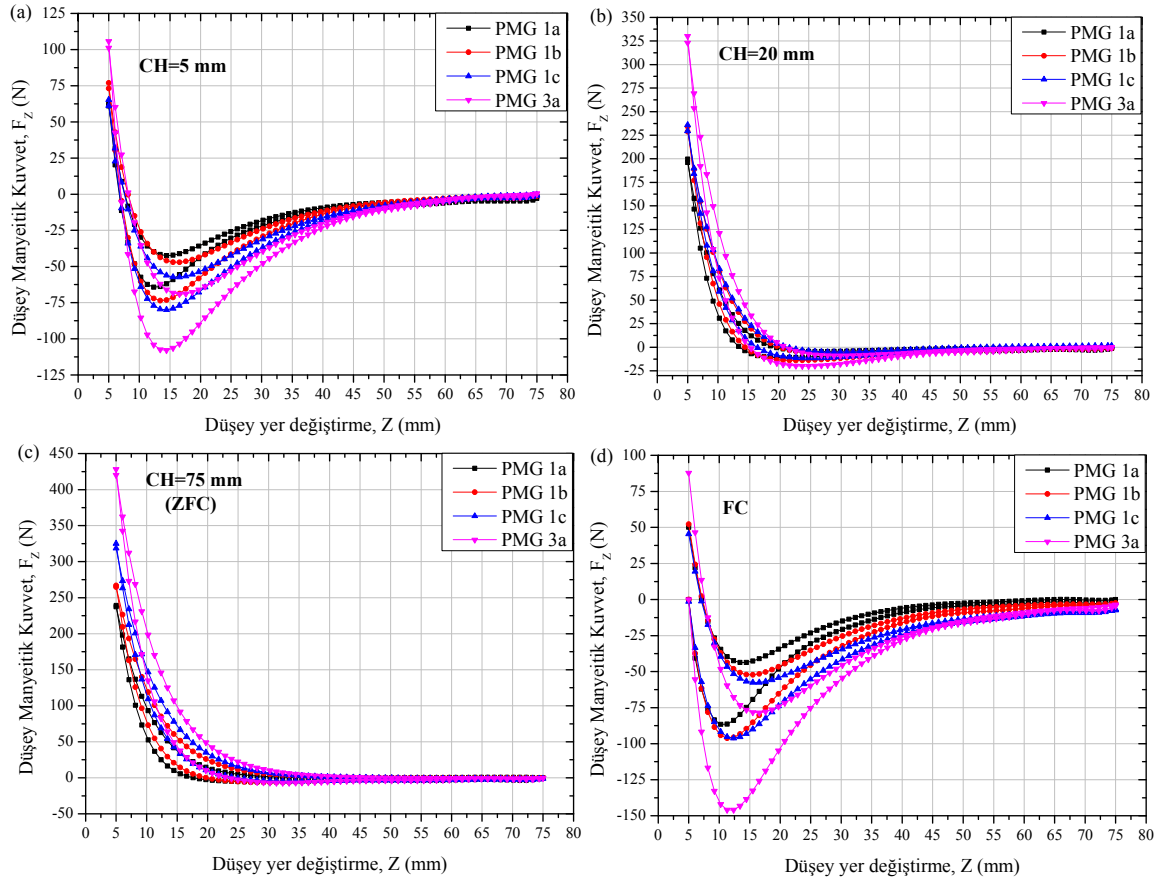
Şekil 3. 18. PMG 3a diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 3. 19. PMG 3b diziliminin manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 3. 20 farklı soğutma mesafeleri için PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin manyetik kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. PMG 3a diziliminin tüm soğutma şartlarında kaldırma kuvvetinin en büyük değere sahip olduğu ve ilave olarak CH=5 mm, CH=20 mm ve FC durumunda da çekici kuvvetinin en büyük olduğu görülmektedir. Aynı sayıda YBCO kullanılan PMG 3a'nın kaldırma kuvveti değerlerinin PMG 1c'den büyük olması, Şekil 3. 8'de görüldüğü gibi PMG 3a diziliminin B_z pik değerinin PMG 1c'den büyük olması nedeniyle, YBCO'larda daha fazla akım indüklemesiyle açıklanabilir.

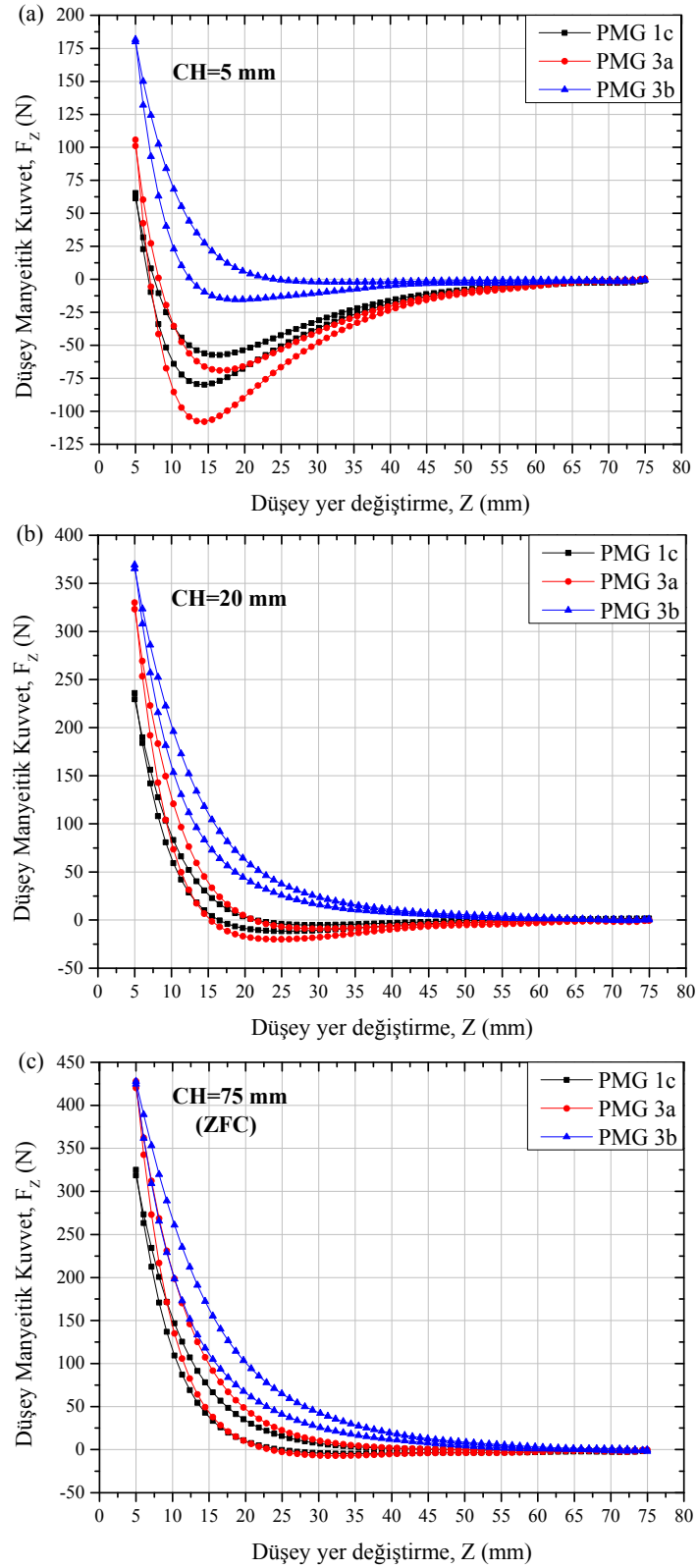
$F_z = \int_V J_y B_x dv$ eşitliğine göre manyetik kaldırma kuvveti B_x ile orantılıdır (Del-Valle vd., 2011) ve bu eşitlikte F_z düşey yöndeki manyetik kaldırma kuvvetini, J_y perdeleme akımını ve B_x yatay manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. PMG 3a diziliminin PMG 1c'den daha büyük B_x değerine sahip olması (Şekil 3. 8) da bu dizilim ile elde edilen kaldırma kuvveti değerinin büyük olmasını sağlamaktadır. Süperiletken malzemelerde akı çivileme performansını belirleyen FC ölçümlerinin yer aldığı Şekil 3. 20 (d)'den görüldüğü gibi PMG 3a en iyi çekici kuvvet değerine sahiptir. PMG 3a'nın gösterdiği histeresiz de diğerlerinden büyüktür. Bu durum, PMG 3a'nın YBCO'lar üzerinde diğer PMG'lerden daha fazla manyetik alan tuzaklama yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 20. PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin $CH=5$ mm (a), $CH=20$ mm (b), ZFC (c) ve FC (d) durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 21’de farklı soğutma mesafeleri için PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin manyetik kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması görülmektedir. PMG 3b diziliminin maksimum kaldırma kuvveti değerlerinin $CH=5$ mm ve $CH=20$ mm için diğer PMG’lerden büyük olduğu, ZFC durumundaki kaldırma kuvveti değerlerinin ise PMG 1c’den büyük, PMG 3a’ya yakın olduğu görülmektedir. PMG 3b diziliminde YBCO’lar ile birlikte kullanılan ilave mıknatıslar soğutma sırasında YBCO’larda manyetik alan tuzaklayarak kaldırma kuvvetinin daha fazla artmasını engellemektedir. Bununla birlikte PMG 1c ve PMG 3a diziliminde üç adet YBCO, PMG 3b diziliminde ise iki adet YBCO ile birlikte ilave iki mıknatıs kullanıldığı düşünüldüğünde ve YBCO maliyetinin mıknatıs maliyetinden çok daha fazla olduğu göz önüne alındığında hibrit PMG 3b diziliminin belirgin bir şekilde verimli olduğu anlaşılmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi PMG 3a diziliminin çekici kuvvet değerleri $CH=5$ mm’de PMG 3b diziliminden büyüktür ve $CH=20$ mm ile ZFC durumlarında PMG 3b diziliminin manyetik kaldırma kuvveti değerlerinde

çekici kuvvet gözlenmemiştir. Bu durum, PMG 3b diziliminde kullanılan ilave mıknatıslar ile PMG yolu arasındaki itici kuvvetin, süperiletkenler ile PMG yolu arasında uzaklaşma sırasında ortaya çıkacak olan çekici kuvvete baskın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 21. PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH= 20 mm (b) ve ZFC (c) durumundaki kaldırma kuvvetlerinin karşılaştırılması

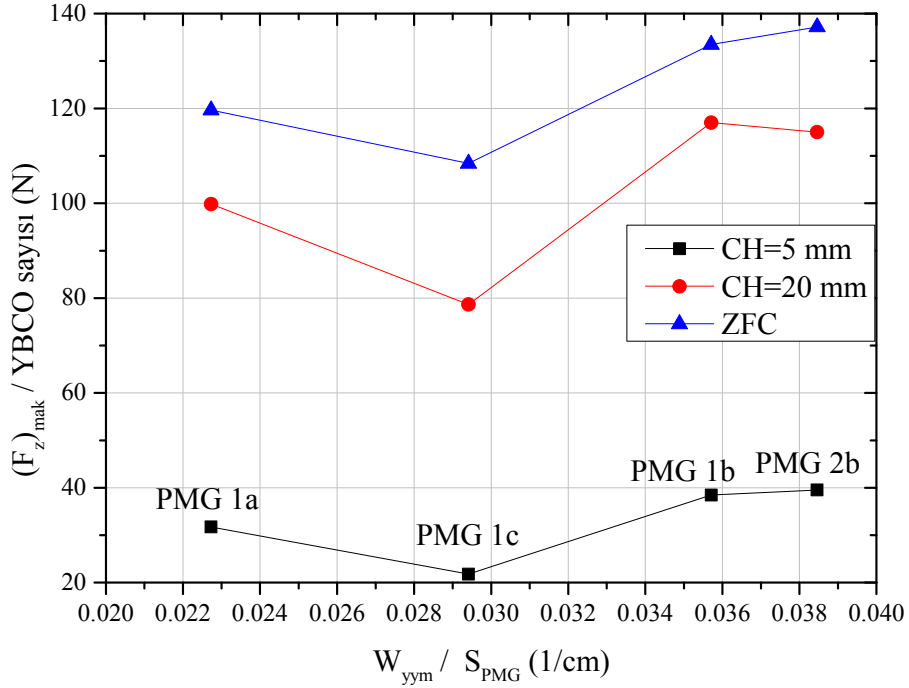
HTS–PMG dizilimlerinin maksimum manyetik kaldırma kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi Tablo 3. 1’de verilmiştir. A_{PMG} , PMG’nin kesit alanını (x - z düzleminde); $(F_z)_{mak}$, maksimum manyetik kaldırma kuvvetini; maliyet ise PMG ve YBCO’ların toplam fiyatını belirtmektedir. Maglev sistemlerinde taşıma kapasitesinin artırılabilmesi için manyetik kaldırma kuvvetinin büyük olması gerekir. Bununla birlikte taşıma kapasitesini artırırken sistemin maliyetinin düşük tutulması da Maglev sistemlerinin pratik uygulamalarda kullanılabilmesi için gereklidir. PMG kesit alanının artırılmasıyla sistemde elde edilecek olan kuvvetin artacağı açıktır. Bu nedenle PMG’ler arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için maksimum kuvvet değerlerinin PMG kesit alanına bölünmesinin uygun olacağı düşünüldü. HTS–PMG dizilimlerinin verimliliği, maksimum kuvvetin PMG kesit alanına, maliyete ve kesit alanı kere maliyete bölünmesi ile üç farklı şekilde hesaplanarak Tablo 3. 1’de verildi. PMG 3b diziliminde altı adet $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ boyutlu mıknatıs ve numune kabında ilave olarak iki adet $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlu mıknatıs kullanıldığından bu dizilimin maliyeti diğerlerinden belirgin şekilde yüksektir. Tablodan görüldüğü gibi $CH=5 \text{ mm}$ ve $CH=20 \text{ mm}$ soğutma yüksekliklerinde PMG 3b dizilimi en büyük kaldırma kuvveti değerlerine sahiptir ve ZFC durumunda PMG 3a dizilimi ile PMG 3b dizilimi yaklaşık olarak aynı kaldırma kuvveti değerlerine sahiptir. PMG 3b dizilimi $CH=5 \text{ mm}$ ’de en büyük $(F_z)_{mak}/A_{PMG}$ değerine sahipken $CH=20 \text{ mm}$ ’de PMG 1a ve ZFC durumunda PMG 1c diziliminin öne çıktığı görülmektedir. Maliyet başına maksimum kaldırma kuvveti değerlerine bakıldığında da tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3b diziliminin en büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. PMG yüzey alanı ve maliyetin birlikte düşünüldüğü durumda bütün soğutma yüksekliklerinde PMG 1a dizilimi en büyük $(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$ değerine sahip olmaktadır.

Tablo 3. 1. PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi

	PMG 1a	PMG 1b	PMG 1c	PMG 2a	PMG 2b	PMG 3a	PMG 3b
A_{PMG} (m ²)	0,0022	0,0028	0,0028	0,0035	0,0035	0,0048	0,0058
Maliyet (PMG+YBCO) (USD)	1230,7	1256,2	1806,2	718,8	1268,8	1882,5	1415,2
$(F_z)_{mak}$, CH=5 mm (N)	63,4	76,9	65,4	20,4	79,0	105,7	181,8
$(F_z)_{mak}$, CH=20 mm (N)	199,7	233,0	235,9	70,6	229,0	329,0	369,1
$(F_z)_{mak}$, ZFC (N)	239,3	266,9	325,2	90,7	274,3	428,1	428,0
$(F_z)_{mak}/A_{PMG}$, CH=5 mm (N/mm ²)	28818,2	27464,3	23357,1	5828,6	22571,4	22020,8	31344,8
$(F_z)_{mak}/A_{PMG}$, CH=20 mm (N/m ²)	90772,7	83214,3	84250,0	20171,4	65428,6	68541,7	63637,9
$(F_z)_{mak}/A_{PMG}$, ZFC (N/m ²)	108772,7	95321,4	116142,9	25914,3	78371,4	89187,5	73793,1
$(F_z)_{mak}/Maliyet$, CH=5 mm (N/USD)	0,0515	0,0612	0,0362	0,0283	0,0623	0,0561	0,1284
$(F_z)_{mak}/Maliyet$, CH=20 mm (N/USD)	0,1622	0,1863	0,1306	0,0982	0,1812	0,1753	0,2608
$(F_z)_{mak}/Maliyet$, ZFC (N/USD)	0,1944	0,2125	0,1801	0,1262	0,2162	0,2274	0,3024
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, CH=5 mm (N/m ² ×USD)	23,4	21,9	12,9	8,1	17,8	11,7	22,1
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, CH=20 mm (N/m ² ×USD)	73,8	66,2	46,6	28,1	51,6	36,4	45,0
$(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times Maliyet)$, ZFC (N/m ² ×USD)	88,4	75,9	64,3	36,0	61,8	47,4	52,1

Şekil 3. 22 maksimum normalize manyetik kaldırma kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığını göstermektedir. Burada S_{PMG} , PMG yüzey alanını ve W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs

genişliğini belirtmektedir. Bu şekildeki normalize kaldırma kuvveti verileri; PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 2b dizilimlerinin maksimum manyetik kaldırma kuvvetlerinin dizilimde kullanılan YBCO sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. PMG 1a, PMG 1b ve PMG 2b dizilimleri iki YBCO içerirken PMG 1c diziliminde üç YBCO kullanılmıştır. Manyetik kaldırma kuvveti verileri YBCO sayısına bölünerek süperiletken sayısının fazla olmasından kaynaklanacak kuvvet artışı ortadan kaldırılmıştır. W_{yym}/S_{PMG} oranları 0,023; 0,029; 0,036 ve 0,038 olarak elde edilmiştir ve bu oranlar sırasıyla PMG 1a, PMG 1c, PMG 1b ve PMG 2b'ye karşılık gelmektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde elde edilen eğriler benzer karakter göstermektedir. CH=5 mm ve ZFC durumunda W_{yym}/S_{PMG} oranını 0,038 olduğunda normalize manyetik kaldırma kuvvetinin en büyük değere ulaştığı, CH=20 mm'de ise W_{yym}/S_{PMG} oranı 0,036 olduğunda normalize kuvvetin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. Tüm soğutma yüksekliklerinde en düşük normalize kaldırma kuvveti değerlerine sahip olan $W_{yym}/S_{PMG} = 0,029$ oranı ile PMG 1c dizilimidir. Şekilden görüldüğü gibi W_{yym}/S_{PMG} oranının artmasıyla PMG 1c dizilimi haricinde normalize kuvvet değeri artmaktadır. Bu durum PMG 1c diziliminde mıknatıslar arasındaki boşluğun, kullanılan Halbach benzeri PMG dizilimlerinde, Halbach PMG'lerin asıl görevi olan manyetik akı yoğunlaştırma kapasitesini azalttığı ve böylece düşey yöndeki manyetik kaldırma kuvveti üzerinde olumsuz bir etki yaptığını göstermektedir.



Şekil 3. 22. Maksimum normalize manyetik kaldırma kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)

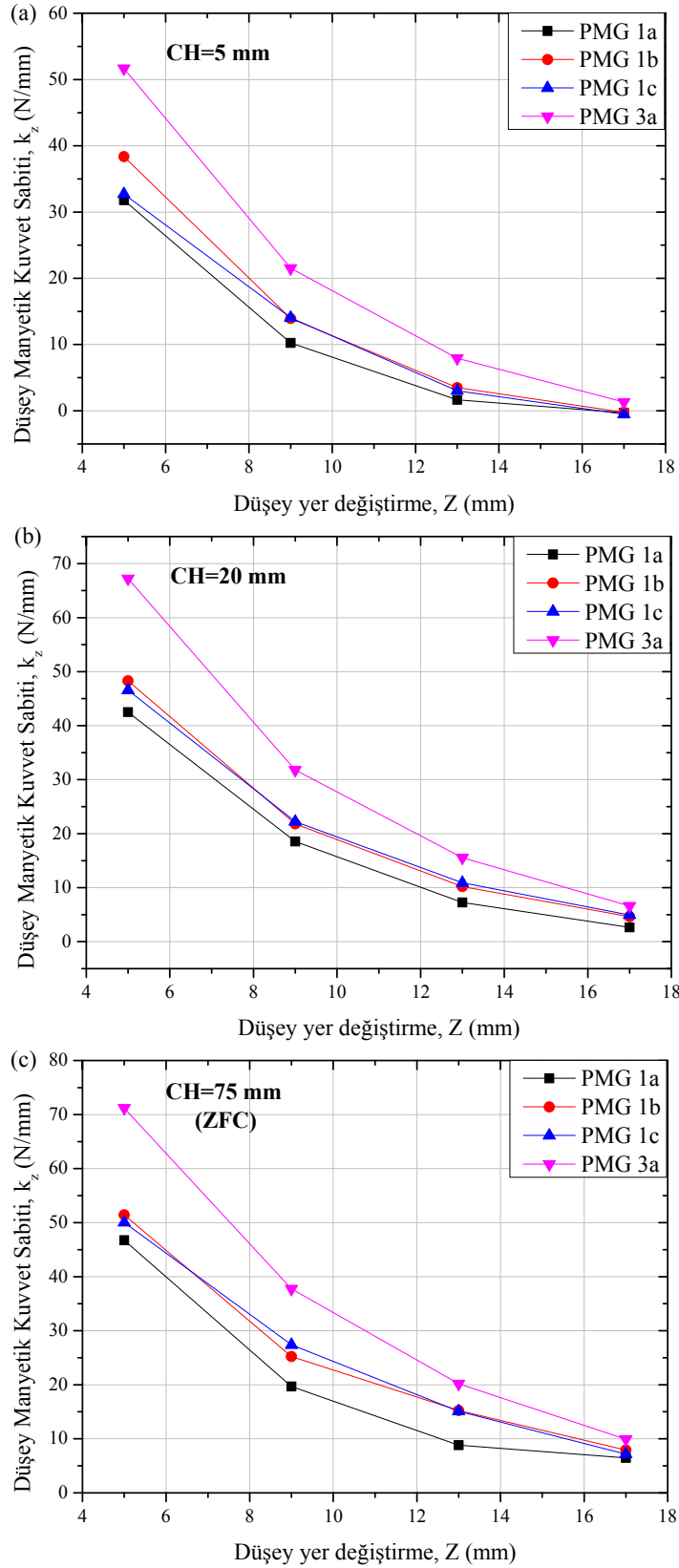
3.4. Düşey Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Bu doktora tezi çalışmasında süperiletken haznesi ile mıknatısların bulunduğu PMG yolları arasındaki düşey manyetik kuvvet sabiti (k_z) ölçümleri farklı soğutma mesafelerinde ve $z=5$ mm, 9 mm, 13 mm ve 17 mm düşey konumlarda incelenmiştir. Şekil 3. 23, farklı soğutma mesafelerinde YBCO süperiletkenleri ile PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimleri arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Grafikten görüldüğü üzere tüm soğutma şartları ve farklı dizilimler için düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri, süperiletken hazne ve PMG yolu arasındaki mesafe azaldıkça artmaktadır.

Manyetik kaldırma kuvveti ve buna bağlı kuvvet sabiti değerleri süperiletken ve manyetik alan dağılımı arasındaki etkileşmeden kaynaklanır (Patitsas, 2011). Bilindiği üzere süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki düşey manyetik kuvvet, manyetik akı gradyenti ile orantılıdır (dB/dz). Yani süperiletken ve PMG yolu arasındaki mesafe azaldıkça, manyetik akı gradyenti artar ve dolayısıyla manyetik kaldırma kuvveti ile bunun gradyenti olan manyetik kuvvet sabiti değeri artar. Ayrıca Şekil 3. 23'ten, tüm dizilimler için soğutma mesafesi artarken kuvvet sabiti değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum soğutma

mesafesinin artmasıyla, güçlü perdeleme akımlarından dolayı manyetik kaldırma kuvvetinin artmasından kaynaklanmaktadır. ZFC durumunda 5 mm mesafede maksimum kuvvet sabiti değerleri PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimleri için sırasıyla 46,8 N/mm, 51,4 N/mm, 50,0 N/mm ve 71,2 N/mm olarak gözlenmiştir.

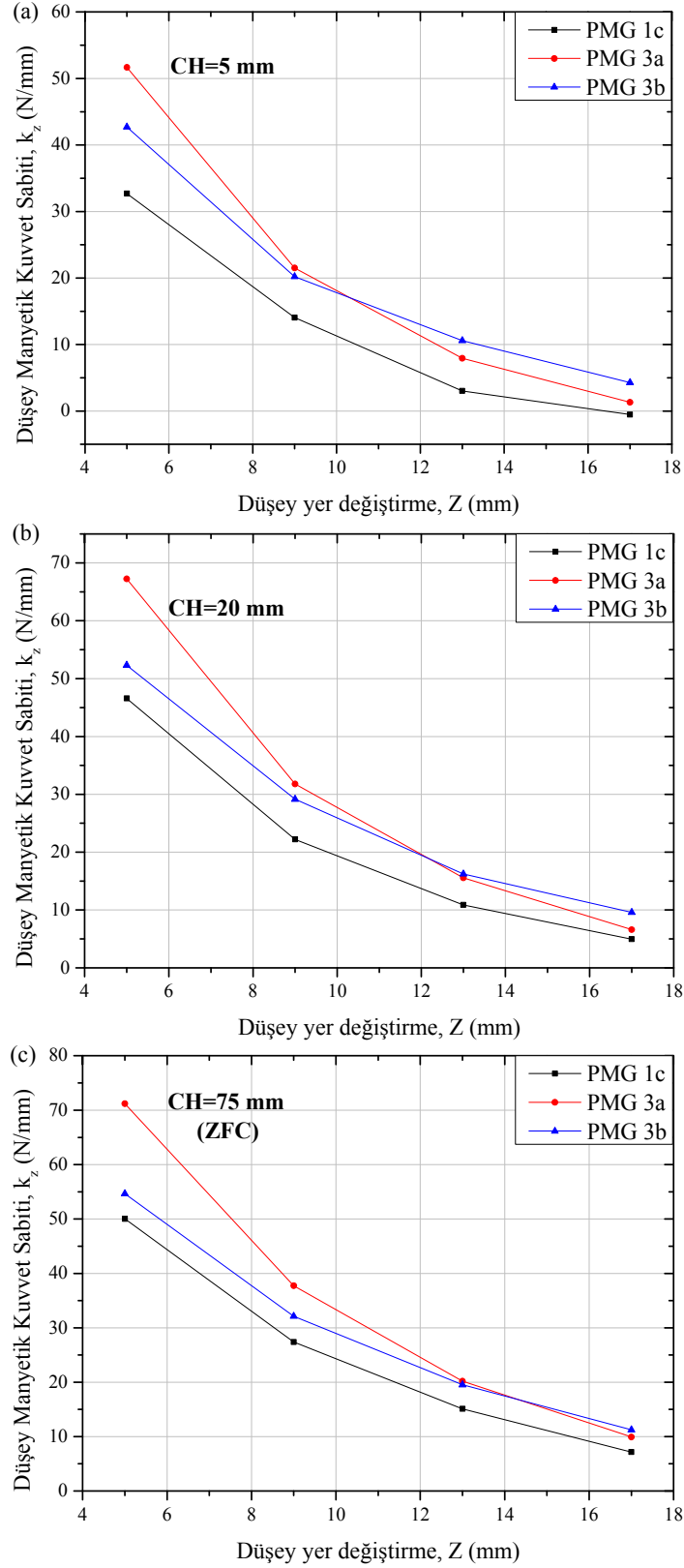
Literatürde 30 mm çaplı ve 15 mm yükseklikli yedi adet YBCO süperiletkeni ile iki kutuplu Halbach PMG arasında ZFC durumunda ve 5 mm mesafede 26 N/mm'lik düşey kuvvet sabiti değeri gözlenmiştir (Lu vd., 2011a). Bu tez çalışmasında elde edilen kuvvet sabiti değerlerinin literatürle karşılaştırıldığında oldukça büyük olduğu söylenebilir. Ayrıca tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3a dizilimi için elde edilen kuvvet sabiti değerlerinin diğer PMG'lerden büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 3. 8'de görüldüğü gibi PMG 3a diziliminin B_z pik değerinin ve manyetik akı gradyentinin diğer PMG'lerden büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



şekil 3. 23. PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düsey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

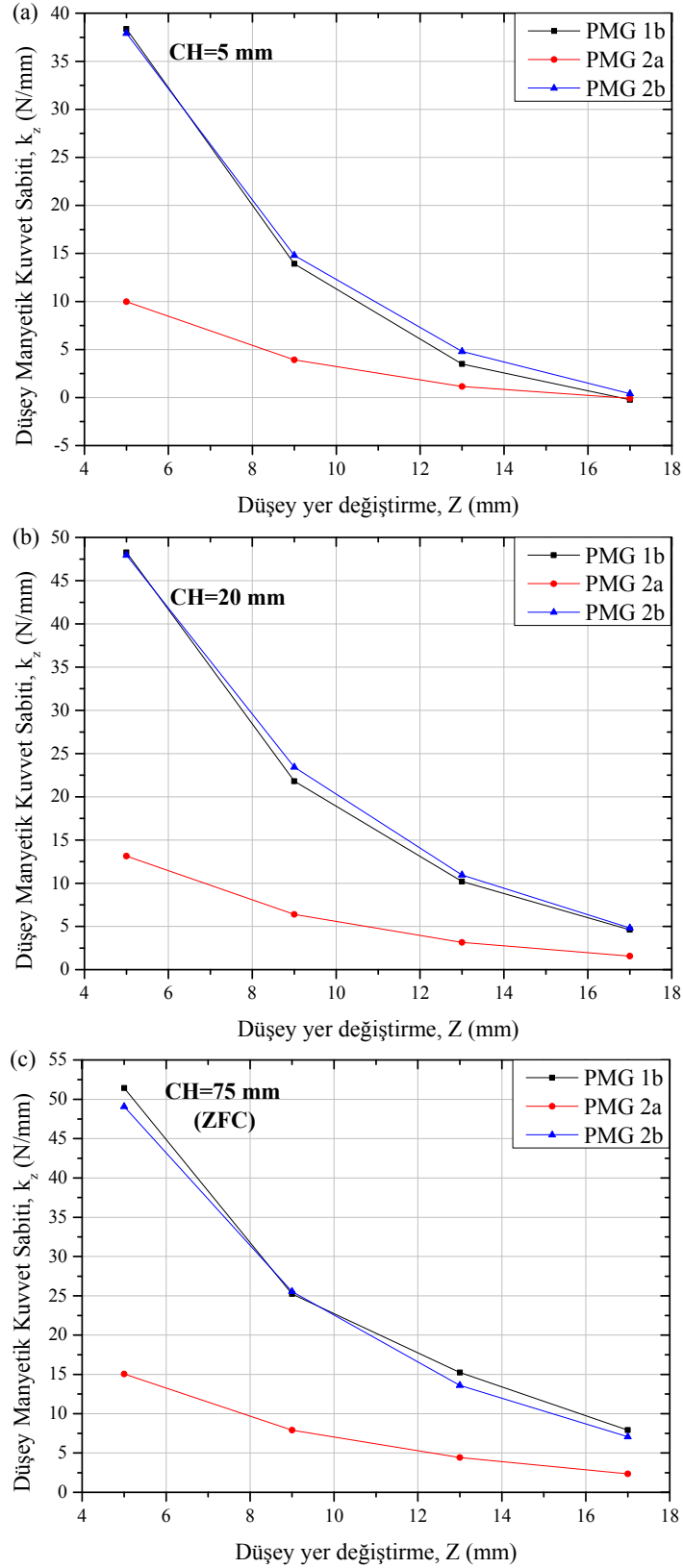
Şekil 3. 24, farklı soğutma mesafelerinde ($CH=5$ mm, $CH=20$ mm, $CH=75$ mm (ZFC)), PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b HTS-PMG dizilimleri arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere süperiletken ile PMG yolu arasındaki küçük mesafelerde üç YBCO numunesine sahip PMG 3a dizilimi, büyük mesafelerde ise hibrit model olan PMG 3b dizilimi en iyi düşey kararlılık performansına sahiptir. PMG 3b dizilimindeki süperiletken haznede bulunan ilave mıknatıslar, büyük mesafede düşey manyetik kuvvet sabiti performansını iyileştirici özelliktedirler. Gerçek boyutlu Maglev uygulamalarında PMG yolu ile süperiletken hazne arasında 10 mm'den daha büyük mesafeye ihtiyaç duyulması hibrit süperiletken haznenin önemine işaret eder. Diğer taraftan PMG 1c dizilimi, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerine göre daha düşük düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerine sahiptir. Bu durum PMG 1c diziliminde mıknatıslar arası boşlukların (5 mm) manyetik alan profilini değiştirmesi ve akı yoğunluğunu azaltmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3. 8).

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). Şekil 3. 24 (b)'de 20 mm soğutma yüksekliğinde ve 9 mm düşey mesafede; PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimleri için sırasıyla yaklaşık 22 N/mm, 32 N/mm ve 29 N/mm düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerine ulaşılmıştır. Manyetik kuvvet sabiti değerlerinin soğutma yüksekliği ile arttığı düşünüldüğünde, bu çalışmada 20 mm'de yalnızca iki YBCO süperiletkeni ile elde edilen stiffness değerlerinin literatürde elde edilen değerden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.



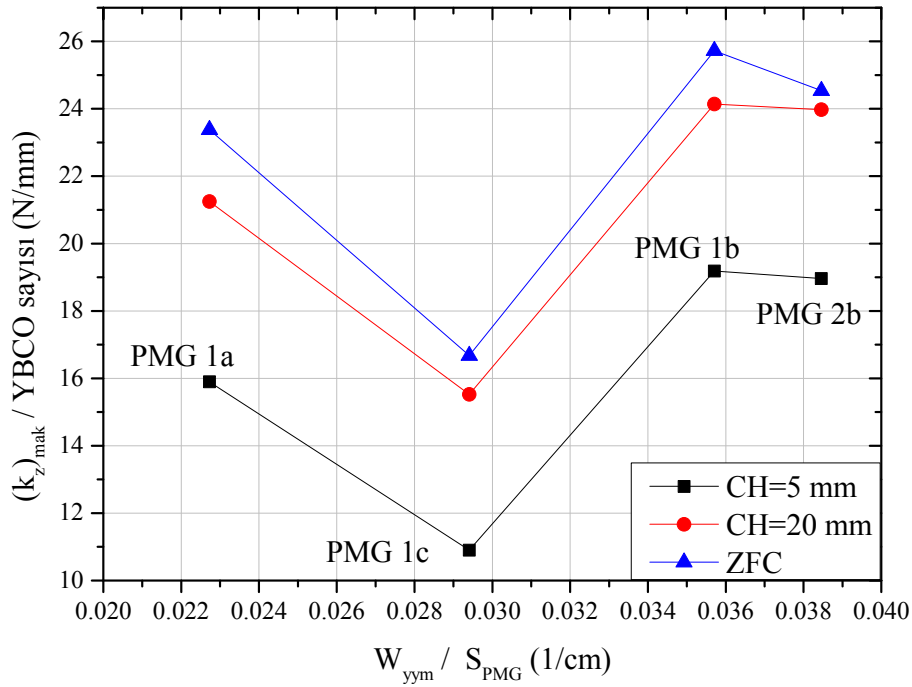
şekil 3. 24. PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 25, farklı soğutma mesafelerinde (ZFC, CH=20 mm, CH=5 mm), PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b HTS–PMG dizilimleri arasında oluşan k_z düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi PMG 1b ve PMG 2b dizilimlerinin manyetik kuvvet sabiti değerleri tüm soğutma mesafelerinde ve tüm düşey konumlarda yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, bu dizilimlerin manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin birbirlerine yakın olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3. 13 ve Şekil 3. 16). İki adet YBCO süperiletkeninin kullanıldığı PMG 1b ve PMG 2b dizilimlerinin maksimum manyetik kuvvet sabiti değerlerinin tek YBCO kullanılan PMG 2a diziliminin iki katından belirgin bir şekilde büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, PMG 2a dizilimindeki YBCO süperiletkeninin B_x alanının maksimum olduğu yerde, PMG 1b ve PMG 2b dizilimindeki YBCO süperiletkenlerinin ise B_z alanının maksimum olduğu yerde konumlandırılmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3. 2 ve Şekil 3. 4).



şekil 3. 25. PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin CH=5 mm (a), CH=20 mm (b) ve ZFC (c) durumlarındaki düşey manyetik kuvvet sabiti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 26 maksimum normalize düşey manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığını göstermektedir. Bu şekildeki normalize kaldırma kuvveti verileri PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 2b dizilimlerinin maksimum manyetik kuvvet sabiti verilerinin dizilimde kullanılan YBCO sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde elde edilen eğriler benzer karakter göstermektedir ve bu benzer karakter Şekil 3. 22 ile uyumludur. Normalize manyetik kuvvet sabiti değerleri tüm soğutma yüksekliklerinde W_{yym}/S_{PMG} oranı 0,036 için maksimum ve W_{yym}/S_{PMG} oranı 0,029 için minimum olmaktadır.



Şekil 3. 26. Maksimum normalize düşey manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)

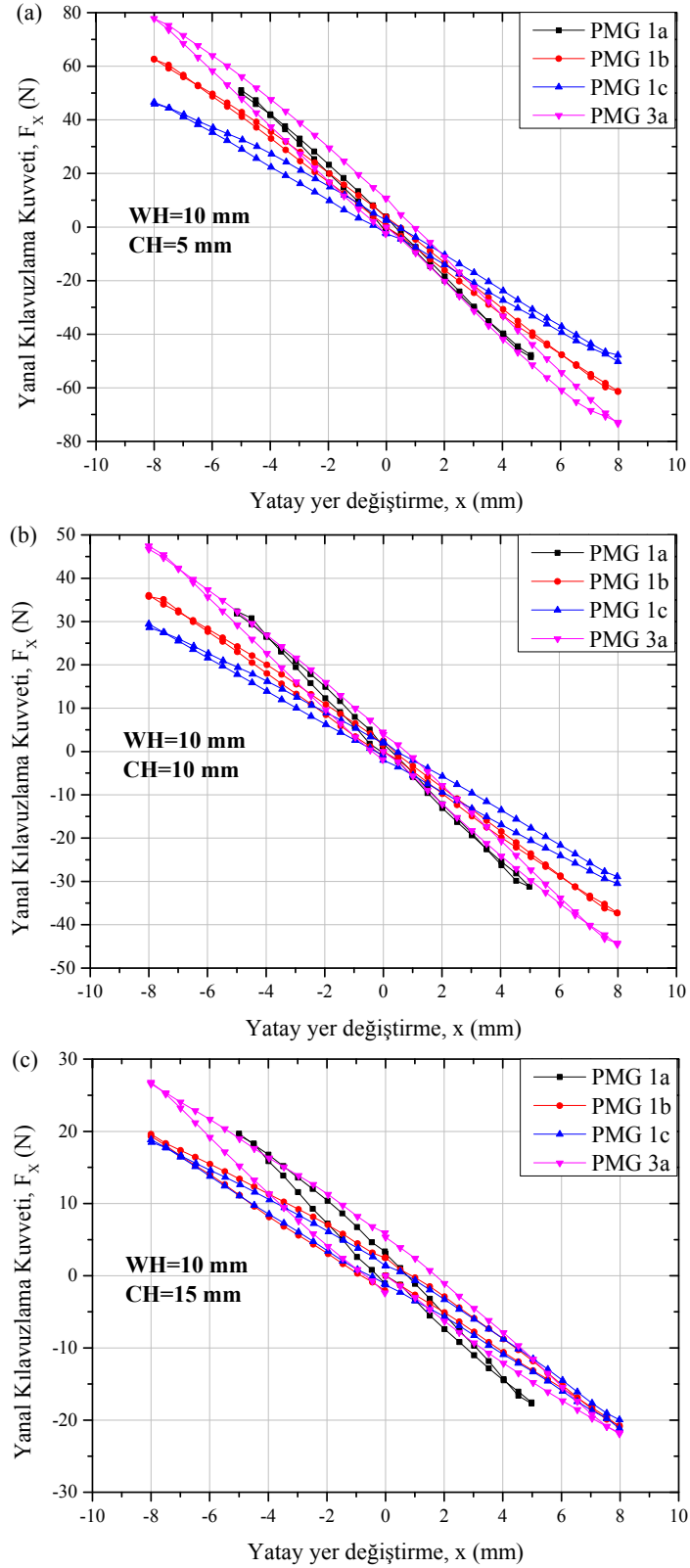
3.5. Yatay Manyetik Kuvvet (Kılavuzlama) Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Maglev sistemlerinde kılavuzlama kuvveti, sistemin yatay yöndeki kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Maglev sistemlerinin pratik uygulamaları için manyetik kaldırma kuvvetinin yanında kılavuzlama kuvvetinin de artırılması gerekmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında farklı PMG dizilimlerinin kılavuzlama kuvvetleri incelenmiştir.

Kılavuzlama kuvveti ölçümleri CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm soğutma yüksekliklerinde ve WH=10 mm çalışma yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir.

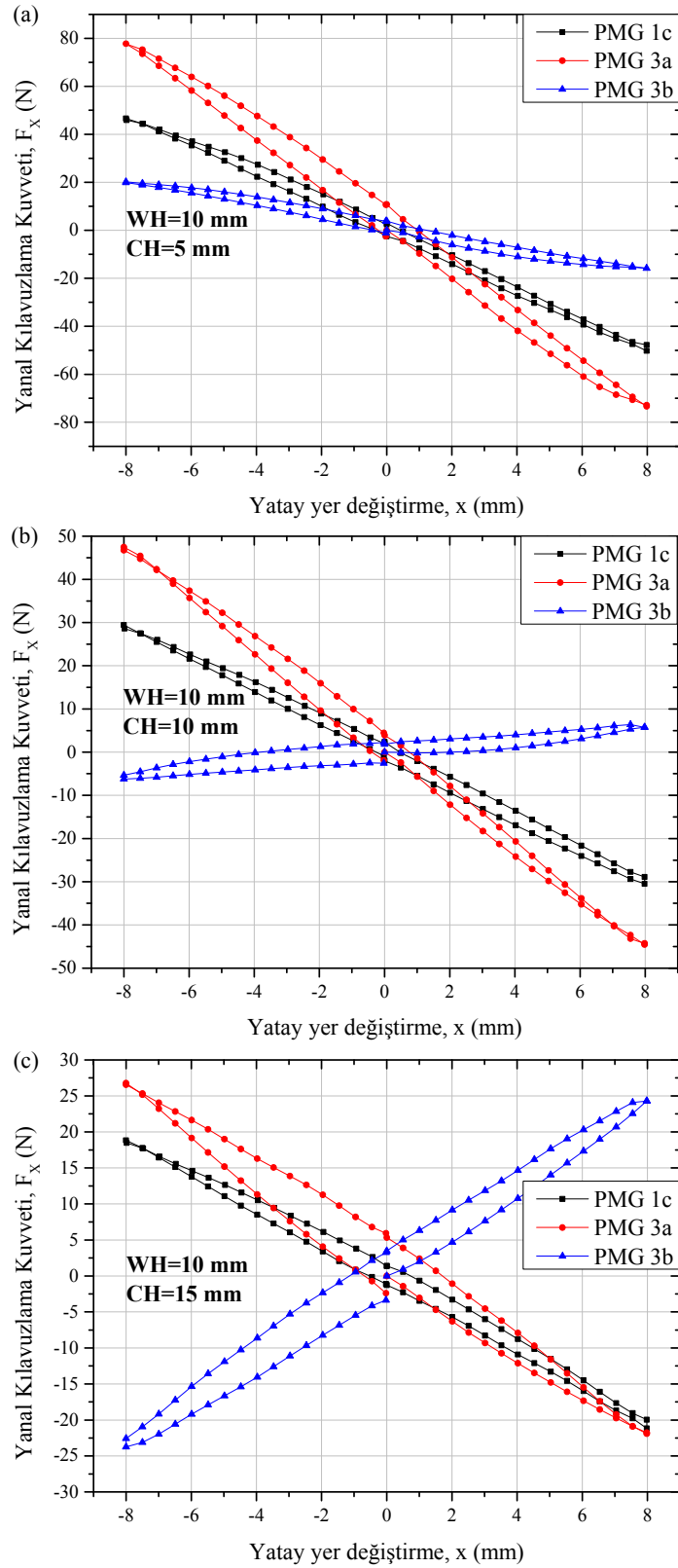
Şekil 3. 27 PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin farklı soğutma mesafelerindeki manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. PMG 1b ve 1c dizilimindeki aşağı ve yukarı yönlü mıknatısların genişliği 20 mm iken PMG 1a diziliminde 10 mm'dir. Bu nedenle PMG 1a diziliminin kılavuzlama kuvveti ölçümleri +x ve -x doğrultularında 5 mm hareket edilerek yapılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi 5 mm yatay konumdaki kılavuzlama kuvvetleri karşılaştırıldığında PMG 1a dizilimi iki adet YBCO süperiletkenine sahip olmasına rağmen üç YBCO'lu PMG 1c diziliminden daha büyük kılavuzlama kuvvetine sahiptir. Aynı zamanda PMG 1b diziliminin kılavuzlama kuvveti CH=5 mm ve CH=10 mm'de PMG 1c diziliminden daha büyük olmakla birlikte CH=15 mm'de PMG 1b ve PMG 1c diziliminin kılavuzlama kuvvetleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Şekilden görüldüğü gibi soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvveti artmaktadır. Bu durum, düşük soğutma mesafelerinde akı tuzaklanmasının daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır (Deng vd., 2011). Süperiletkenlerin başlangıç noktasından yatay doğrultuda hareketi sırasında ortaya çıkan negatif kuvvet, yatay harekete karşı oluşan geri çağırıcı kuvvet anlamına gelmektedir ve sistemin kararlılığına işaret eder. CH= 5 mm soğutma yüksekliğinde gözlenen maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimleri için sırasıyla -48,5 N, -61,3 N, -50,2 N ve -73,4 N'dur.

Şekil 3. 27'den görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3a diziliminin kılavuzlama kuvveti diğerlerinden büyüktür. Bununla birlikte 5 mm yatay mesafedeki kılavuzlama kuvveti değerleri karşılaştırıldığında CH=5 mm ve CH=10 mm'de PMG 1a dizilimi ile PMG 3a dizilimi birbirine yakın değerlere sahipken CH=15 mm'de PMG 1a diziliminin en büyük kılavuzlama kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. PMG 1c diziliminde 3 adet, PMG 1b diziliminde ise 2 adet YBCO kullanılmış olmasına rağmen CH=5 mm ve CH=10 mm'de PMG 1b diziliminin kılavuzlama kuvveti PMG 1c diziliminden daha fazla olmuştur. Bu durum Şekil 3. 8'den de görüleceği gibi PMG 1b diziliminin hem B_x hem de B_z manyetik akı yoğunluğu değerlerinin PMG 1c diziliminden belirgin şekilde yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi yatay manyetik kılavuzlama kuvveti, $F_x = \int_V J_y B_z dv$ eşitliğine göre B_z ile orantılıdır (Del-Valle vd., 2011) ve bu eşitlikte J_y perdeleme akımını ve B_z düşey manyetik akı yoğunluğunu ifade eder.



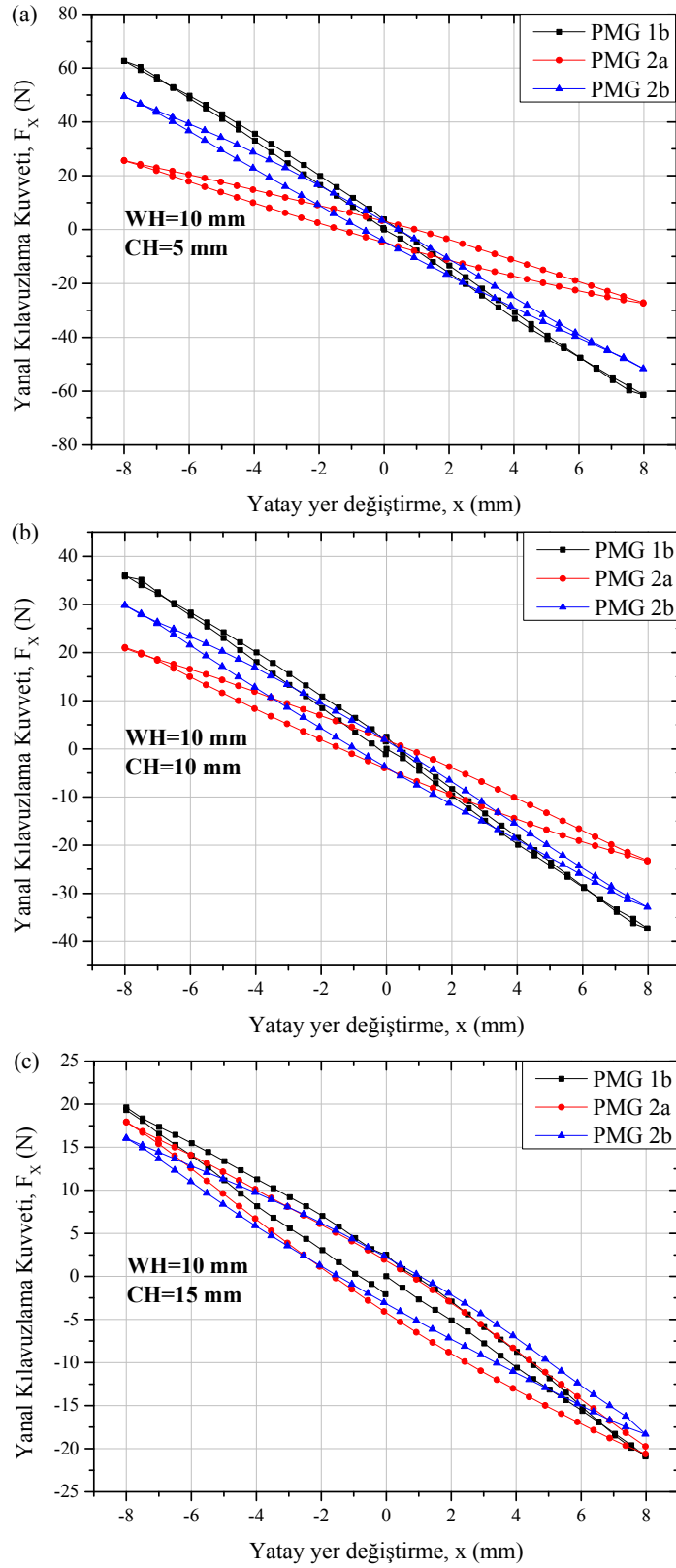
Şekil 3. 27. PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizimlerinin $CH=5$ mm (a), $CH=10$ mm (b) ve $CH=15$ mm (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 28 farklı soğutma mesafeleri (CH) için PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b yolları ile YBCO süperiletkenleri arasında oluşan F_x yatay kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağıllığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm PMG'ler için soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvveti artmaktadır. Şekilde görülen negatif kuvvet değerleri sistemin kararlılığını göstermektedir ve CH=5 mm'de tüm PMG'ler için sistem kararlı iken CH=10 mm ve CH=15 mm'de PMG 3b dizilimi için ilave mıknatısların itici kuvvetlerinin baskın olması nedeniyle sistem kararsız duruma geçmektedir. Ayrıca tüm soğutma mesafelerinde PMG 3a diziliminin en büyük kılavuzlama kuvvetine sahip olduğu ve soğutma mesafesi değıştikçe sistemin diyamanyetik kuvvet karakterinin değıştiği görülmektedir.



şekil 3. 28. PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin $CH=5\text{ mm}$ (a), $CH=10\text{ mm}$ (b) ve $CH=15\text{ mm}$ (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 29, PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin farklı soğutma mesafelerindeki manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi $CH=5$ mm ve $CH=10$ mm'de PMG 1b dizilimi en büyük, PMG 2a dizilimi en küçük kılavuzlama kuvveti değerlerine sahiptir. $CH=15$ mm'de ise kılavuzlama kuvvetlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin $CH=5$ mm'deki maksimum kılavuzlama kuvvetleri sırasıyla -61,3 N, -27,4 N ve -51,7 N olarak elde edilmiştir. PMG 2a ve PMG 2b dizimleri karşılaştırıldığında tek YBCO kullanılan PMG 2a diziliminin kılavuzlama kuvvetinin iki YBCO'lu PMG 2b diziliminin yarısına eşit olması beklenirken, yarısından daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum PMG 2a dizilimindeki süperiletkenin, B_x dış manyetik alan pikinin maksimum olduğu yerde konumlandırılmasından (Şekil 3. 4) kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu sonuç daha büyük kılavuzlama kuvveti elde etmek için külçe HTS'lerin, Halbach PMG diziliminin B_x pikinin üzerlerine yerleştirilmesi gerektiği sonucunu desteklemektedir (Liu vd., 2008b).



şekil 3. 29. PMG 1b, PMG 2a ve PMG 2b dizilimlerinin $CH=5\text{ mm}$ (a), $CH=10\text{ mm}$ (b) ve $CH=15\text{ mm}$ (c)'deki F_x yatay kılavuzlama kuvvetlerinin karşılaştırılması

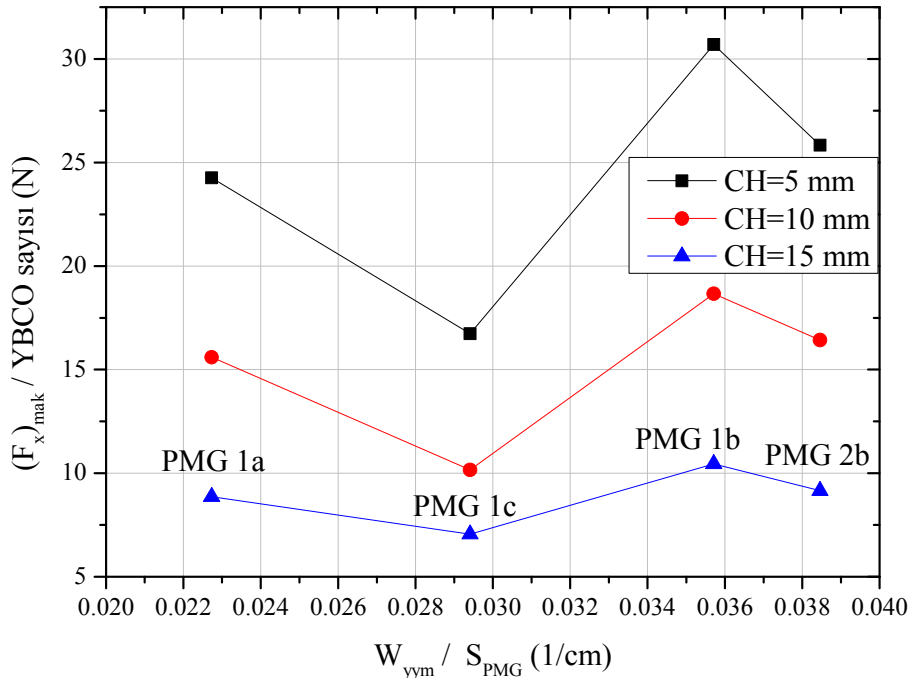
HTS–PMG dizilimlerinin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi Tablo 3. 2’de verilmiştir. A_{PMG} , PMG’nin kesit alanını (x-z düzleminde); $(F_x)_{mak}$, maksimum manyetik kılavuzlama kuvvetini; Maliyet ise PMG ve YBCO’ların toplam fiyatını belirtmektedir. Maglev sistemlerinin kararlı olarak hareket edebilmesi için manyetik kılavuzlama kuvvetinin artırılması gerekir. Bununla birlikte kılavuzlama kuvvetini artırırken sistemin maliyetinin düşük tutulması da Maglev sistemlerinin pratik uygulamalarda kullanılabilmesi için gereklidir. HTS–PMG dizilimlerinin kılavuzlama kuvveti verimliliği, maksimum kılavuzlama kuvvetinin PMG kesit alanına ve kesit alanı kere maliyete bölünmesi ile iki farklı şekilde hesaplanarak Tablo 3. 2’de verildi. PMG 3b diziliminin $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm’de pozitif kılavuzlama kuvvetine sahip olması ve bu dizilim için sistemin kararlı olmaması nedeniyle tabloda PMG 3b dizilimine yer verilmemiştir. Ayrıca $(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, ve $(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$ hesaplamalarında kılavuzlama kuvveti verilerinin mutlak değerleri alınmıştır. Tablodan görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3a dizilimi en büyük kılavuzlama kuvveti değerlerine sahiptir. PMG 1a dizilimi düşük kesit alanı nedeniyle tüm CH’lerde en büyük $(F_x)_{mak}/A_{PMG}$ değerine sahiptir. PMG kesit alanı ve maliyet birlikte düşünüldüğü durumda $CH=5$ mm ve $CH=10$ mm’de PMG 1a dizilimi en büyük $(F_z)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$ değerine sahipken $CH=15$ mm’de PMG 2a dizilimi öne çıkmaktadır.

Tablo 3. 2. PMG'lerin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti, maliyet ve verimlilik analizi

	PMG 1a	PMG 1b	PMG 1c	PMG 2a	PMG 2b	PMG 3a
A_{PMG} (m ²)	0,0022	0,0028	0,0028	0,0035	0,0035	0,0048
Maliyet (PMG+YBCO) (USD)	1230,7	1256,2	1806,2	718,8	1268,8	1882,5
$(F_x)_{mak}$, CH=5 mm (N)	-48,5	-61,3	-50,2	-27,4	-51,7	-73,4
$(F_x)_{mak}$, CH=10 mm (N)	-31,2	-37,3	-30,5	-23,3	-32,9	-44,5
$(F_x)_{mak}$, CH=15 mm (N)	-17,7	-20,9	-21,2	-20,6	-18,3	-21,9
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=5 mm (N/mm ²)	22045,5	21928,6	17928,6	7828,6	14771,4	15291,7
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=10 mm (N/m ²)	14181,8	13321,4	10892,9	6657,1	9400,0	9270,8
$(F_x)_{mak}/A_{PMG}$, CH=15 mm (N/m ²)	8045,5	7464,3	7571,4	5885,7	5228,6	4562,5
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$, CH=5 mm (N/m ² ×USD)	17,9	17,5	9,9	10,9	11,6	8,1
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$, CH=10 mm (N/m ² ×USD)	11,5	10,6	6,0	9,3	7,4	4,9
$(F_x)_{mak}/(A_{PMG} \times \text{Maliyet})$, CH=15 mm (N/m ² ×USD)	6,5	5,9	4,2	8,2	4,1	2,4

Şekil 3. 30 maksimum normalize manyetik kılavuzlama kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığını göstermektedir. Burada S_{PMG} , PMG yüzey alanını ve W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir. Bu şekildeki normalize kılavuzlama kuvveti verileri; PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 2b dizilimlerinin maksimum manyetik kılavuzlama kuvvetlerinin mutlak değerlerinin dizilimde kullanılan YBCO sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. W_{yym}/S_{PMG} oranları 0,023; 0,029; 0,036 ve 0,038 olarak elde edilmiştir ve bu oranlar sırasıyla PMG 1a, PMG 1c, PMG 1b ve PMG 2b'ye karşılık gelmektedir. Şekilden görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde elde edilen eğriler benzer karakter göstermektedir. Tüm

soğutma yüksekliklerinde W_{yym}/S_{PMG} oranı 0,036 (PMG 1b dizilimi) olduğunda normalize manyetik kılavuzlama kuvveti en büyük değere ulaşmıştır. Tüm soğutma yüksekliklerinde en düşük normalize kılavuzlama kuvveti değerlerine sahip olan $W_{yym}/S_{PMG}=0,029$ oranı ile PMG 1c dizilimidir. Bu sonuçların Şekil 3. 22 ile benzer olduğu da görülmektedir.

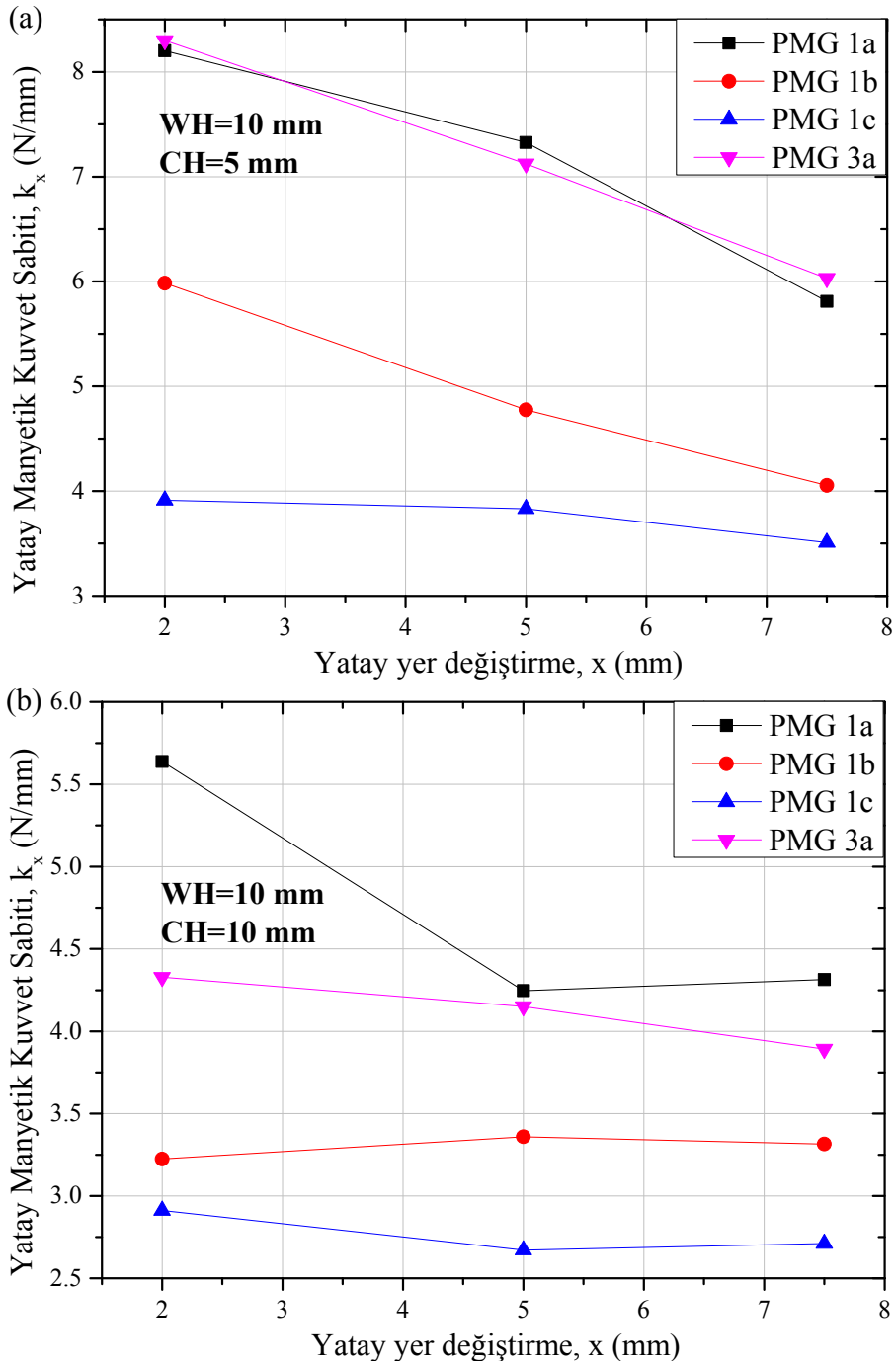


Şekil 3. 30. Maksimum normalize manyetik kılavuzlama kuvvetinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)

3.6. Yatay Manyetik Kuvvet Sabiti Ölçüm Verilerinin İncelenmesi

Silindirik tek çekirdekli HTS YBCO külçe süperiletkenler ile farklı PMG yolları arasındaki etkileşmeden kaynaklanan manyetik kılavuzlama kuvvetine ek olarak, sistemin yanal yöndeki manyetik kılavuzlama kararlılığı bu bölümde araştırılmıştır. Sistemin yanal kararlılığını incelemek amacıyla, süperiletken haznesi ile mıknatısların bulunduğu PMG yolları arasındaki yatay manyetik kuvvet sabiti (k_x) ölçümleri farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm ve CH=10 mm) ve $z=2$ mm, 5 mm, 7,5 mm yatay konumlarda incelenmiştir. Tüm ölçümler için süperiletken hazne ile PMG arasındaki çalışma yüksekliği (WH) 10 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3. 31, farklı soğutma mesafeleri için YBCO süperiletkenleri ile PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimleri arasında oluşan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Düşük

soğutma yüksekliklerinde YBCO'larda tuzaklanan manyetik akının daha fazla olması nedeniyle, şekilden görüldüğü gibi soğutma yüksekliği azaldıkça tüm PMG'ler için manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Ayrıca genel olarak yanal mesafe arttıkça manyetik kuvvet sabiti değerinin azaldığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi CH=5 mm'de PMG 1a dizilimi ile PMG 3a dizilimi yaklaşık olarak aynı kuvvet sabiti değerlerine sahip olup bu değerler diğer PMG'lerden belirgin bir şekilde yüksektir. Bilindiği gibi yatay manyetik kuvvet sabiti kılavuzlama kuvvetiyle, kılavuzlama kuvveti de B_z manyetik akı yoğunluğu ile orantılıdır. Şekil 3. 8'den de görüleceği gibi PMG 1a ve PMG 3a dizilimlerinin B_z manyetik akı yoğunlukları diğer PMG'lerden yüksektir. Bu durum PMG 1a ve PMG 3a'nın daha büyük yanal kuvvet sabiti değerine sahip olmasını sağlamaktadır.

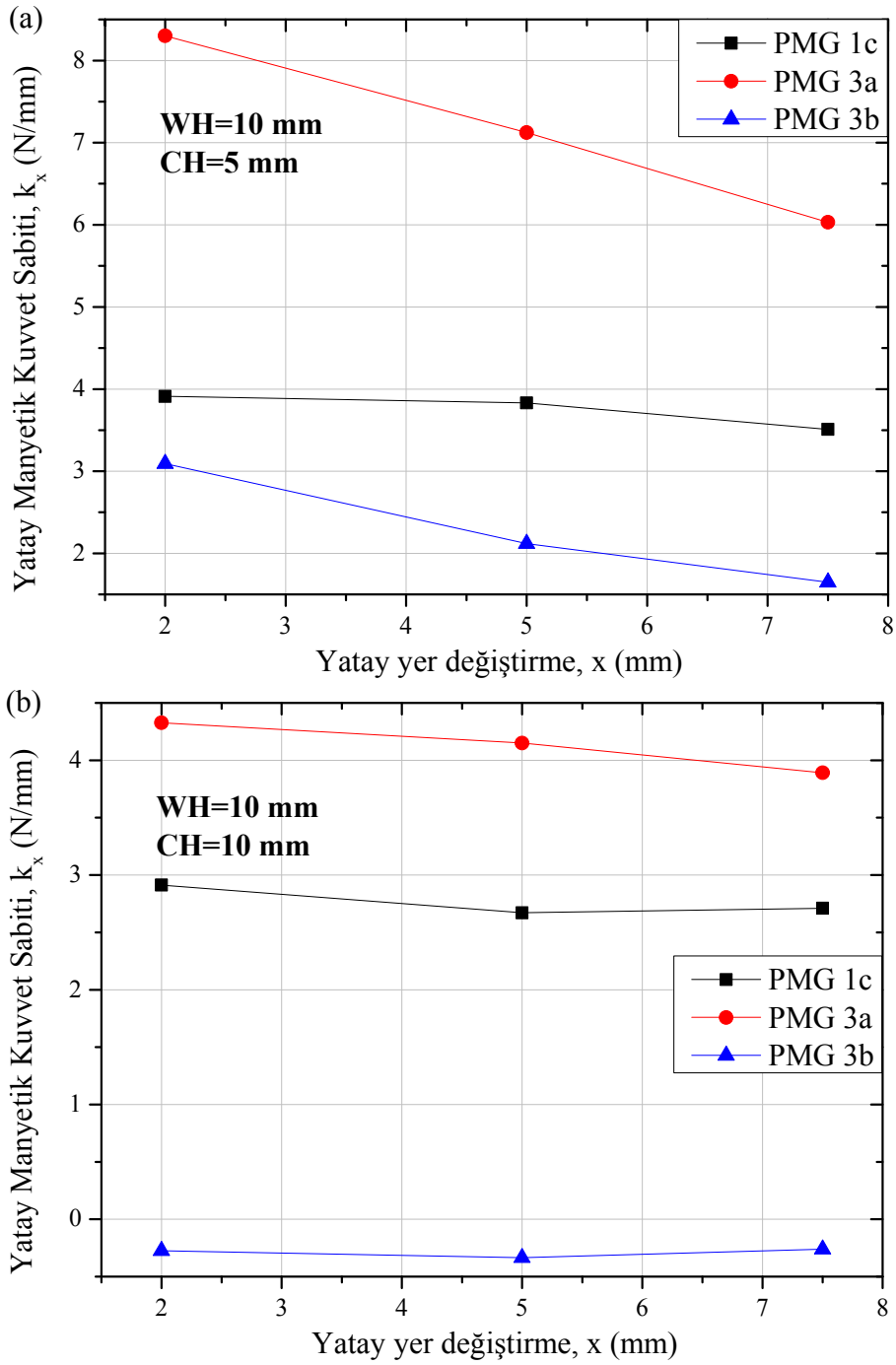


şekil 3. 31. PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 3a dizilimlerinin (a) CH=5 mm ve (b) CH=10 mm'deki k_x yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması

şekil 3. 32, farklı soğutma yüksekliklerinde (CH=5 mm ve CH=10 mm), PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b HTS–PMG dizilimleri arasında oluşan k_x yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Yatay yer değiştirme arttıka kuvvet sabiti değerleri küçük bir azalma göstermektedir. CH=10 mm soğutma

yüksekliğinde, hibrit PMG 3b dizilimi için yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri negatiftir ve negatif manyetik kuvvet sabiti değeri sistemin kararsızlığına işaret eder. Şekildeki negatif kuvvet sabiti değerleri, CH=10 mm soğutma yüksekliğinde süperiletken haznedeki ilave mıknatısların yanal kararlılığı yok ettiğini göstermektedir. Bu durum, Şekil 3. 28’de gösterilen kılavuzlama kuvveti grafiği ile de uyum içerisindedir. Sunulan hibrit model, düşey yönde manyetik kuvvet sabitini iyileştirmesine rağmen yatay manyetik kuvvet sabiti değerini azaltıcı etki göstermiştir. Şekil 3. 32’den ayrıca, PMG 3a diziliminin yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinin tüm soğutma yüksekliklerinde diğer dizilimlerden büyük olduğu görülmektedir.

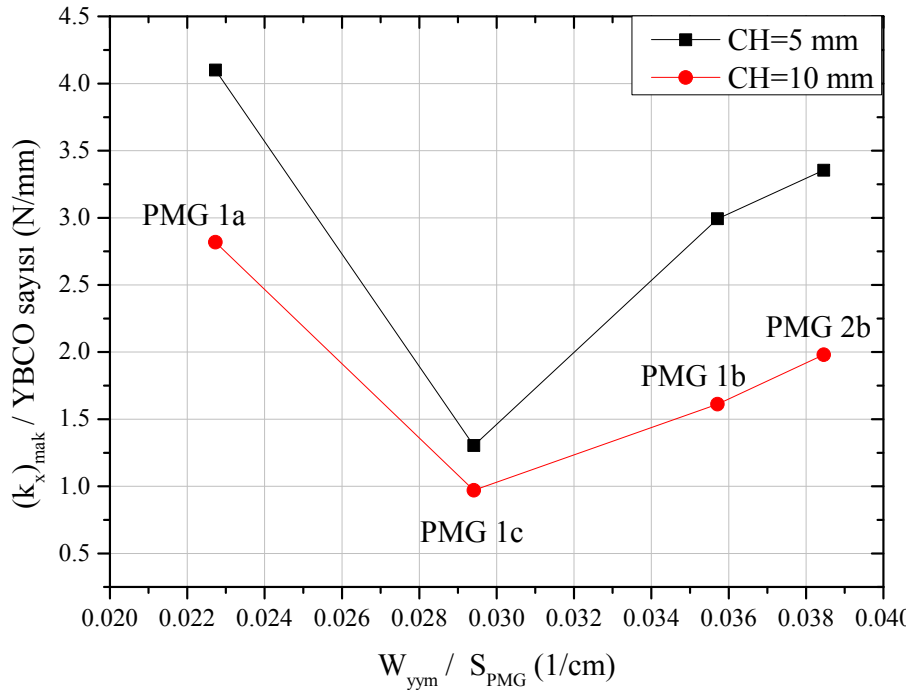
Lu ve arkadaşları 2011 yılında, 15 mm soğutma yüksekliğinde çapı 30 mm ve yüksekliği 15 mm olan yedi adet YBCO süperiletkeni ile aralarında demir bulunan iki zıt manyetizasyon yönelimli PM’ye sahip geleneksel PMG arasında yanal manyetik kuvvet sabiti ölçümü yaptılar (Lu vd., 2011a). Çalışma yüksekliği 3 mm olmak üzere, merkezden 2 mm yanal yer değiştirme mesafesinde manyetik kuvvet sabiti yaklaşık 8 N/mm bulunmuştur. Şekil 3. 32 (b)’de CH=10 mm soğutma yüksekliğinde ve çalışma aralığı 10 mm olmak üzere PMG 3a dizilimi için 2 mm yanal mesafede manyetik kuvvet sabiti yalnızca iki YBCO süperiletkeni için yaklaşık 4,3 N/mm olarak ölçülmüştür. Yatay manyetik kuvvet ve buna bağlı olarak yatay manyetik kuvvet sabitinin çalışma yüksekliği ile ters orantılı olduğu ve bu çalışmada yanal ölçümlerde kullanılan 10 mm çalışma yüksekliğinin pratik uygulamalar için optimum değerlere daha yakın olduğu düşünüldüğünde, PMG 3a diziliminin Maglev uygulamaları için elverişli olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 32. PMG 1c, PMG 3a ve PMG 3b dizilimlerinin (a) $CH=5$ mm ve (b) $CH=10$ mm'deki k_x yatay manyetik kuvvet sabitlerinin karşılaştırılması

Şekil 3. 33 maksimum normalize yatay manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığını gstermektedir. Bu Şekildeki normalize yatay manyetik kuvvet sabiti; PMG 1a, PMG 1b, PMG 1c ve PMG 2b dizilimlerinin maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerinin dizilimde kullanılan YBCO sayısına bđlunmesi ile elde edilmiştir. W_{yym}/S_{PMG}

oranları 0,023; 0,029; 0,036 ve 0,038 olarak elde edilmiştir ve bu oranlar sırasıyla PMG 1a, PMG 1c, PMG 1b ve PMG 2b'ye karşılık gelmektedir. Şekilden görüldüğü gibi CH=5 mm ve CH=10 mm soğutma yüksekliklerinde W_{yym}/S_{PMG} oranı 0,023 (PMG 1a dizilimi) olduğunda normalize yatay manyetik kuvvet sabiti en büyük değere ulaşmıştır ve her iki soğutma yüksekliğinde en düşük normalize yatay kuvvet sabiti değerlerine sahip olan $W_{yym}/S_{PMG} = 0,029$ oranı ile PMG 1c dizilimidir.

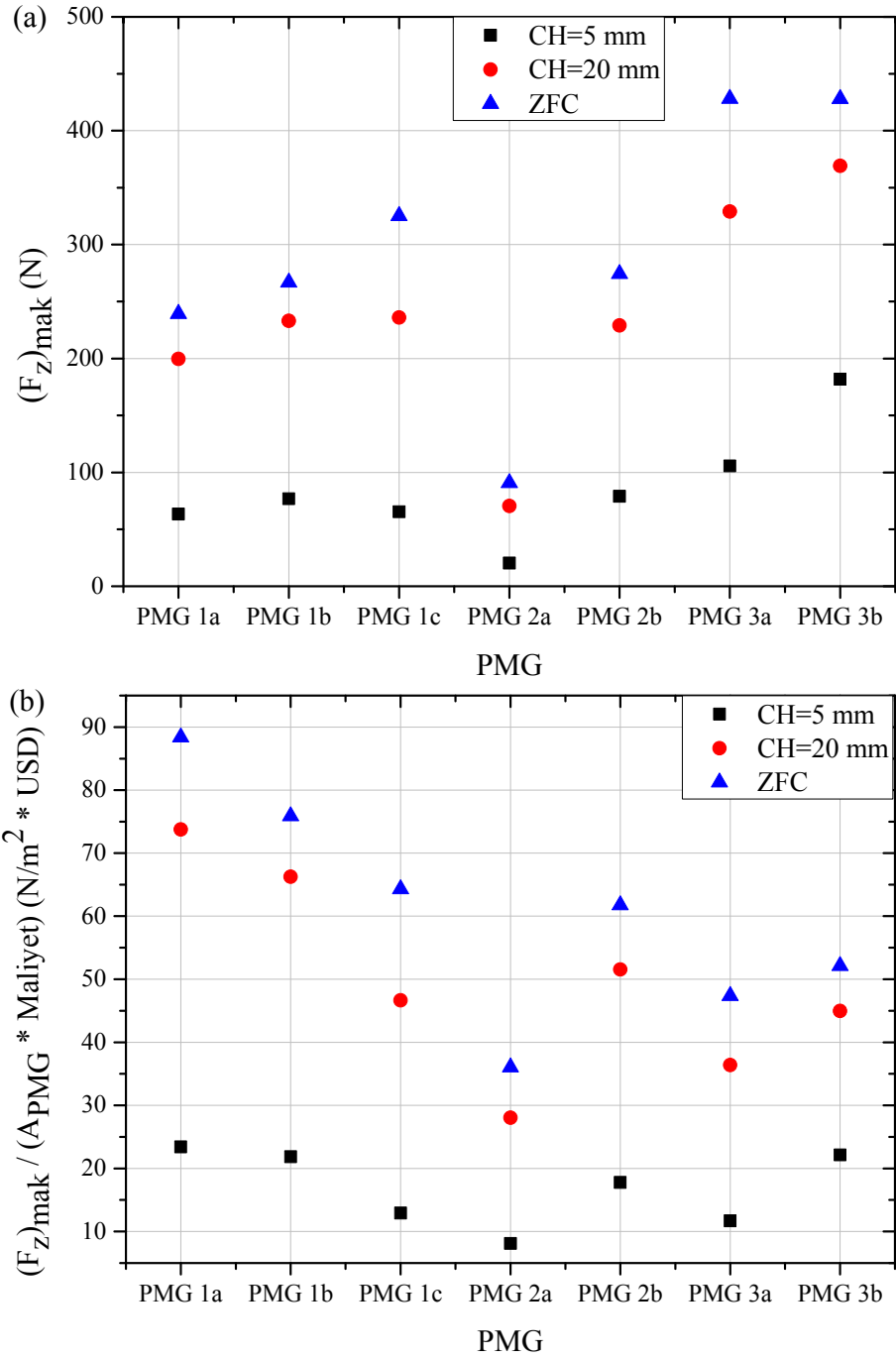


Şekil 3.33. Maksimum normalize yatay manyetik kuvvet sabitinin W_{yym}/S_{PMG} oranına bağlılığı (S_{PMG} , PMG yüzey alanını; W_{yym} , yukarı yönlü mıknatıs genişliğini belirtmektedir.)

3.7. Optimum Yükleme-Kılavuzlama Kuvvet Parametrelili PMG-YBCO Dizilimi İçin Değerlendirmeler

Bilindiği gibi Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin artırılması için sistemin yükleme (taşıma) kapasitesinin büyük, maliyetinin ise düşük olması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında şimdiye kadar kullanılmış olan PMG'lerin verimlilik analizleri bu bölümde yapılmış olup PMG 4 ile ilgili daha detaylı inceleme ilerideki bölümlerde verilmiştir. Şekil 3.34 PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvveti, maliyet ve verimlilik analizini göstermektedir. Şekil 3.34 (a)'da görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3b hibrit dizilimi en büyük, PMG 2a dizilimi ise en küçük düşey

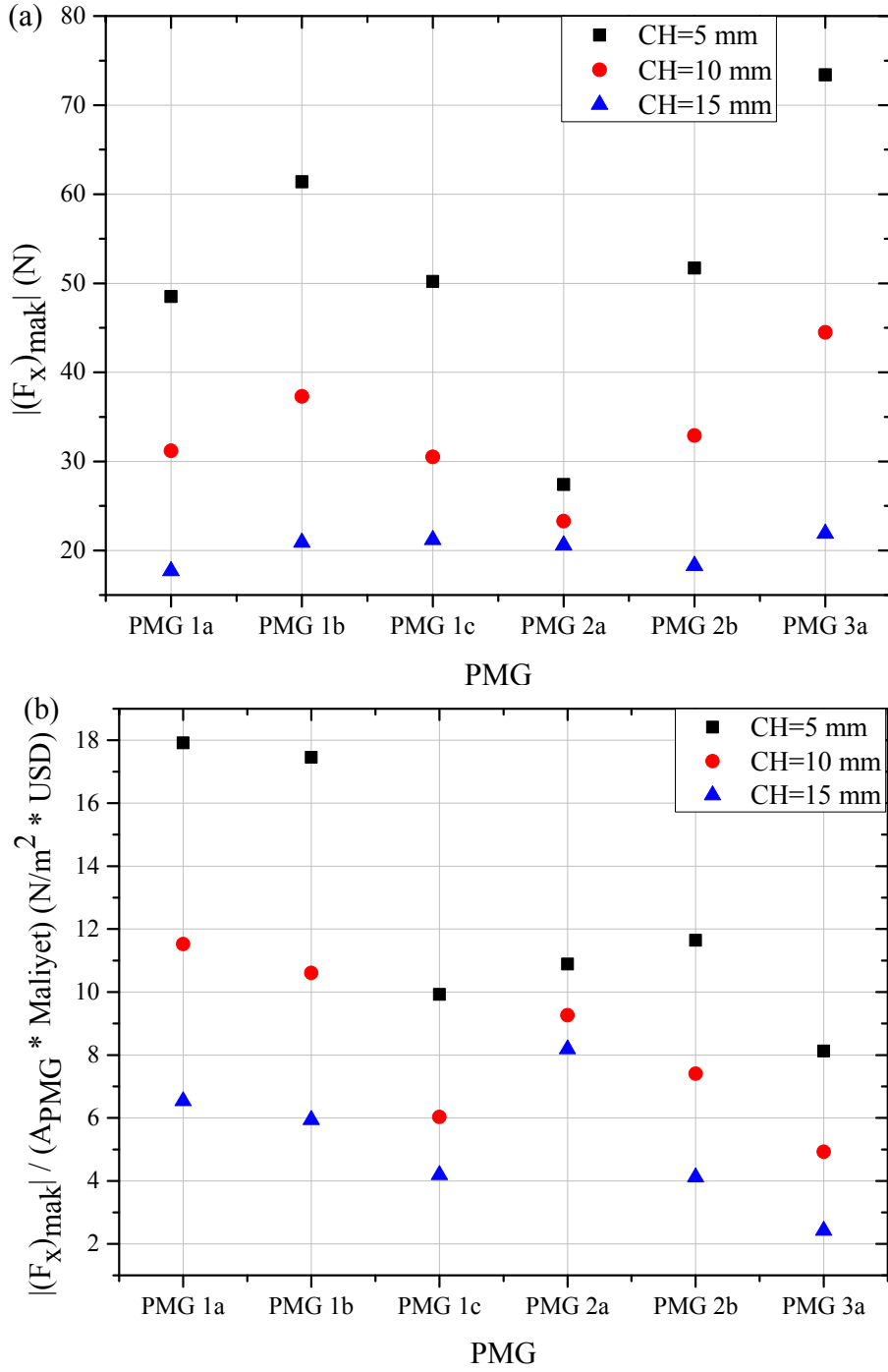
manyetik kaldırma kuvveti değerlerine sahiptir. Maglev sistemlerinde PMG kesit alanının artmasıyla manyetik kaldırma kuvvetinin artacağı açıktır. Bu nedenle daha düşük kesit alanı ve maliyet ile elde edilecek büyük manyetik kaldırma kuvveti istenen bir durumdur. Şekil 3.34 (b)'de görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde maliyet kere kesit alanı başına maksimum manyetik kaldırma kuvveti $((F_z)_{\text{mak}}/(A_{\text{PMG}} \times \text{Maliyet}))$ değerine sahip olan dizilim PMG 1a'dır. Büyük kaldırma kuvvetinin gerekli olduğu Maglev trenlerinin kalkış anında PMG 3b diziliminin, trenin belli bir hıza ulaştığı kilometrelerce uzunluğa sahip duraklar arasında maliyet ön planda olacağından, PMG 1a diziliminin elverişli olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 34. PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvveti (a) ve kesit alanı kere maliyet başına maksimum kaldırma kuvveti (b)

Maglev sistemlerinin pratik uygulamaları için taşıma kapasitesi kadar önemli olan bir diğer değişken de manyetik kılavuzlama kuvvetidir. Sistemin kararlı olarak hareket edebilmesi için kılavuzlama kuvvetinin büyük olması gerekmektedir. Şekil 3. 35 PMG'lerin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti, maliyet ve verimlilik analizini göstermektedir. Daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla maksimum manyetik kılavuzlama

kuvvetlerinin mutlak değerleri alınmıştır. PMG 3b diziliminin CH=10 mm ve CH=15 mm'de pozitif kılavuzlama kuvvetine sahip olması ve bu dizilim için sistemin kararlı olmaması nedeniyle PMG 3b dizilimi bu incelemede gösterilmemiştir. Şekil 3. 35 (a)'dan görüldüğü gibi tüm soğutma yüksekliklerinde PMG 3a dizilimi en büyük kılavuzlama kuvveti değerlerine sahiptir. Bununla birlikte CH=15 mm'de kılavuzlama kuvveti değerleri birbirine yakındır. Şekil 3. 35 (b)'den görüldüğü gibi maliyetle birlikte kesit alanı dikkat alındığında PMG 1a dizilimi ne çıkmaktadır. Sonuç olarak Şekil 3. 34 ve Şekil 3. 35 birlikte düşünüldüğünde Maglev sistemlerinin taşıma kapasitesinin daha verimli olması ve aynı zamanda yanal kararlılığın da düşük maliyetle sağlanabilmesi için PMG 1a ve PMG 3b dizilimlerinin amaca göre uygun yerlerde kullanımının doğru olacağı düşünülebilir.



Şekil 3. 35. PMG'lerin maksimum manyetik kılavuzlama kuvveti (a) ve kesit alanı kere maliyet başına maksimum kılavuzlama kuvveti (b)

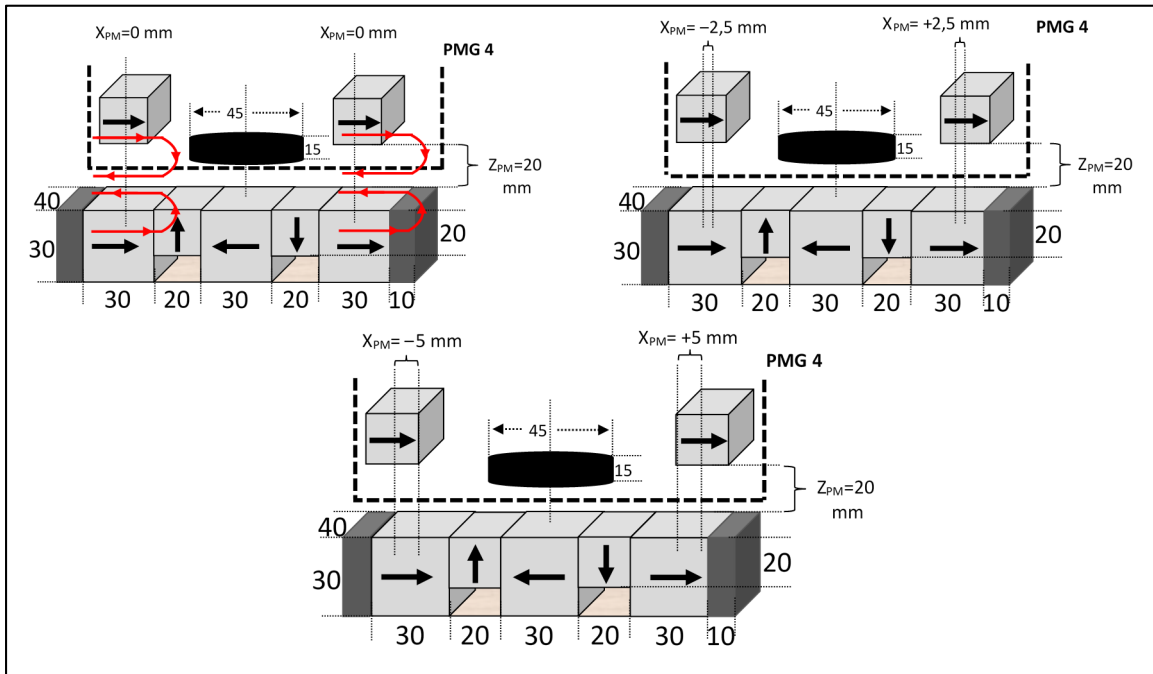
3.8. Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatıs Pozisyonunun Manyetik Kuvvete Etkisi

Literatürde Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama kuvvetinin artırılması ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğu PMG yolunun sayısal

modellenmesi ve dizaynı ile ilgilidir. Maglev sistemlerindeki süperiletkenlerle birlikte kullanılacak ilave mıknatıslar ile kaldırma kuvvetinin artırılacağı açıktır. Fakat bu durumda kılavuzlama kuvvetinde belli bir miktar azalma olmaktadır. Bu çalışmada kılavuzlama kuvvetinde belirgin bir düşüş olmaksızın kaldırma kuvvetinin artırılabilmesi amacıyla hibrit PMG 4 dizilimi tasarlandı (Şekil 2. 7).

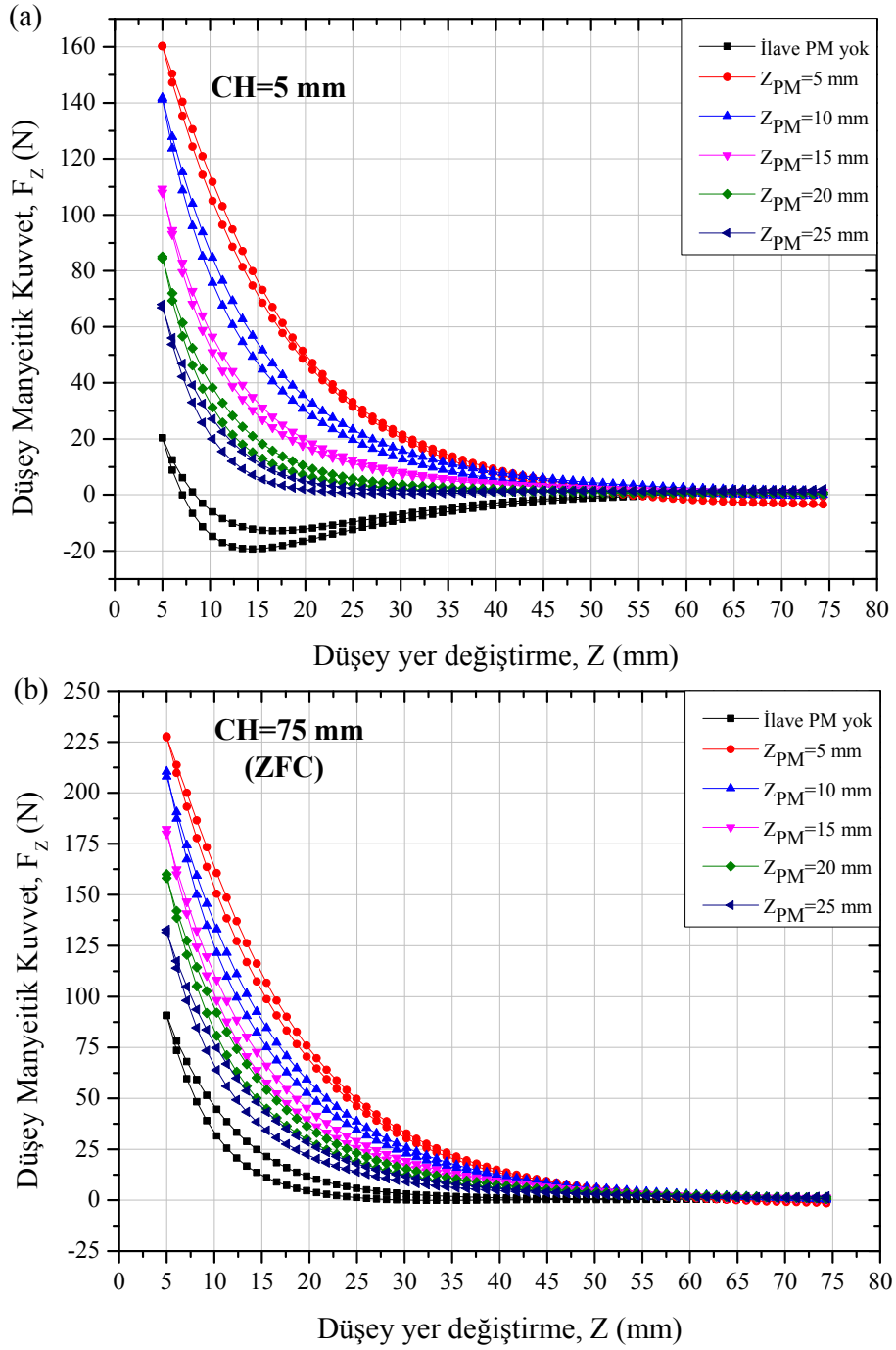
3.8.1. Hibrit PMG 4 Diziliminde Optimum Düşey PM Pozisyonunun Belirlenmesi

Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet ve kuvvet sabiti değerlerinin artırılması amacıyla geliştirilen hibrit PMG 4 diziliminde öncelikle ilave mıknatısların optimum düşey pozisyonunun (Z_{PM}) belirlenmesi amacıyla $Z_{PM} = 5$ mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm olacak şekilde ölçümler yapıldı. Daha sonra belirlenen düşey mesafede ($Z_{PM}=20$ mm) ilave mıknatıslar x-doğrultusunda hareket ettirilerek ($X_{PM}=0$, $X_{PM}=\pm 2,5$ mm, $X_{PM}=\pm 5$ mm) ölçümler gerçekleştirildi. X_{PM} konumlarına göre PMG 4 dizilimine ait şekiller Şekil 3. 36'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 36. Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatısların $X_{PM}=0$ mm, $X_{PM}=\pm 2,5$ mm ve $X_{PM}=\pm 5$ mm pozisyonları

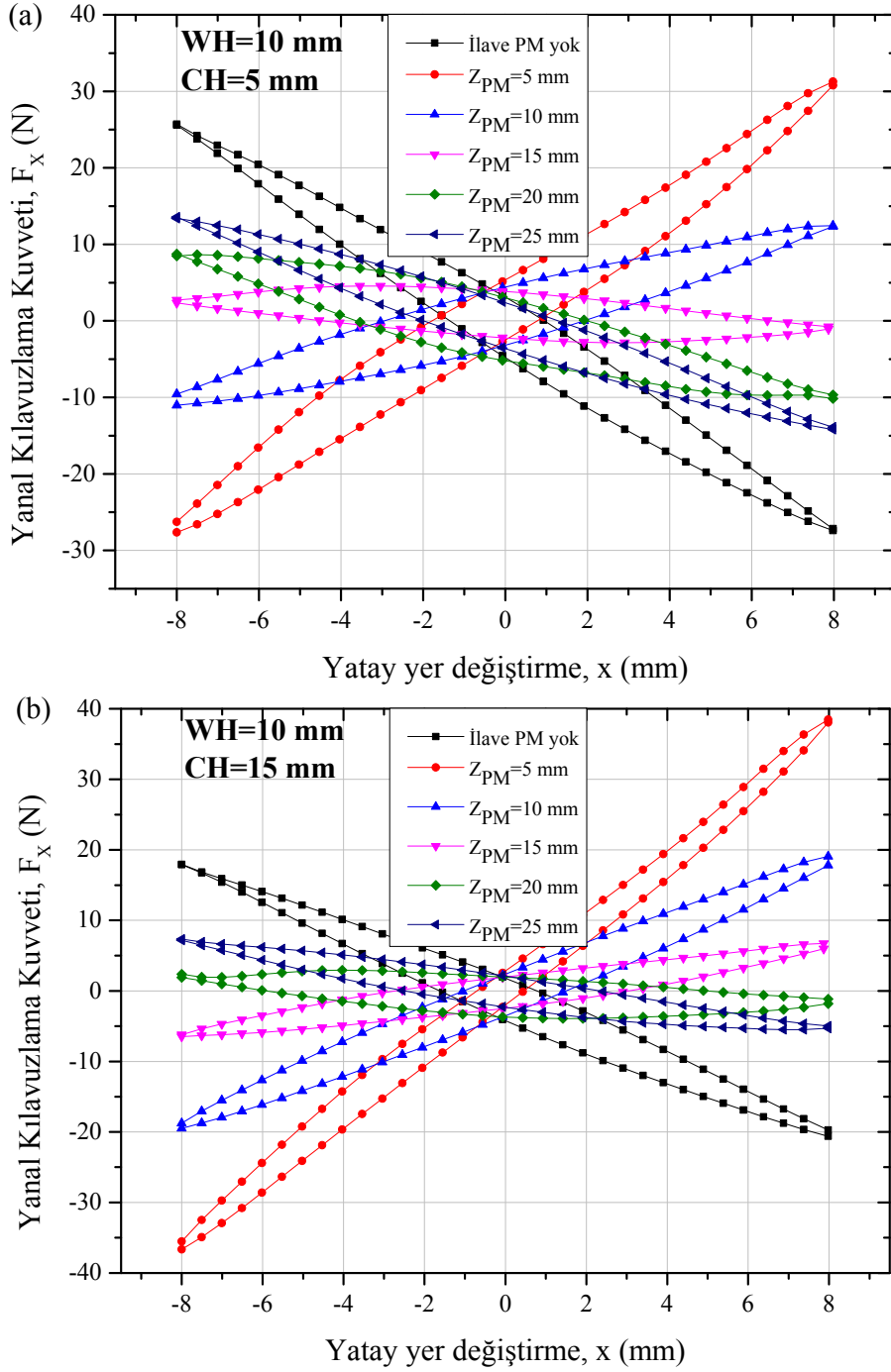
Şekil 3. 37 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı düşey pozisyonlarına karşılık elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi hem $CH=5$ mm hem ZFC durumunda YBCO süperiletkenleri ile birlikte ilave mıknatıs kullanılmasıyla kaldırma kuvvetinde belirgin bir artış olmaktadır. Bu durum, paralel manyetik dipollere sahip mıknatısların itici özellik göstermesi gerçeğinden kaynaklanmaktadır (Moon, 2004). Bununla birlikte ilave mıknatısların düşey konumu (Z_{PM}) arttıkça, PMG yolu ile ilave mıknatıslar arasındaki mesafenin artması nedeniyle, manyetik kaldırma kuvveti azalmaktadır. Ayrıca Şekil 3. 37 (a)'da görüldüğü gibi ilave mıknatıs kullanılması ile manyetik kaldırma kuvveti eğrilerindeki çekici kısım ortadan kalkmıştır. Bu sonuç, ilave mıknatısların itici kuvvetinin süperiletken ile PMG yolu arasında (süperiletken malzemede akı tuzaklanması nedeniyle) oluşan çekici kuvvete baskın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 37. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı düşey pozisyonlarına karşılık CH=5 mm (a) ve ZFC (b) durumlarında elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı

Şekil 3. 38 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı düşey pozisyonlarına karşılık elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi sistem CH=5 mm soğutma mesafesinde ilave PM

yok, $Z_{PM}=25$ mm, $Z_{PM}=20$ mm ve $Z_{PM}=15$ mm durumlarında kararlı iken $CH=15$ mm soğutma mesafesinde ilave PM yok, $Z_{PM}=25$ mm ve $Z_{PM}=20$ mm durumlarında kararlđdır. Eşitlik 3.1'e göre birbirine paralel manyetik dipoller arasında itici karakterli bir kuvvet oluşur. Bununla birlikte Maglev sistemlerinde süperiletkenlerin ilk konumlarından yanal olarak hareket etmeleri sırasında çekici bir kuvvet ortaya çıkar. İlave mıknatısların PMG yoluna yakın olduğu durumlarda ve düşük CH 'lerde sistemde ortaya çıkan kararsızlık, ilave mıknatıslarla PMG yolundaki aynı yönelimli mıknatıslar arasında oluşan itici kuvvetin HTS–PMG arasında oluşan çekici kuvvete baskın olmasından kaynaklanmaktadır.



şekil 3. 38. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı dūřey pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a) ve $CH=15$ mm (b) soğutma mesafelerinde elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı

Tablo 3. 3 ilave mıknatısların dūřey pozisyonlarına karşılık maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerini gōstermektedir. Tablodan gōrōldēęi gibi ilave mıknatıslar $Z_{PM}=25$ mm konumunda kullanıldığında kaldırma kuvvetinde, ilave mıknatıs

olmayan duruma göre CH=5 mm'de % 234'lük ve ZFC durumunda % 45'lik bir artış elde edildi. Bununla birlikte kılavuzlama kuvvetinde CH=5 mm'de % 48'lik ve CH=15 mm'de %73'lük bir azalma oldu. İlave mıknatıslar $Z_{PM}=20$ mm konumunda kullanıldığında, ilave mıknatıs olmayan duruma göre kaldırma kuvvetinde CH=5 mm'de % 317'lik ve ZFC durumunda % 76'lık bir artış elde edildi. Kılavuzlama kuvvetinde ise CH=5 mm'de % 63'lük ve CH=15 mm'de % 91'lik bir azalma oldu. $Z_{PM}=15$ mm ve daha düşük düşey konumlar için kılavuzlama kuvveti değerlerinin çok düşük olması ve sistemin karasız olması nedeniyle $Z_{PM}=20$ mm düşey konum seçildi ve ilave mıknatıslar yatay doğrultuda hareket ettirilerek kılavuzlama kuvvetinde çok fazla bir azalma olmadan kaldırma kuvvetinde önemli bir artışın elde edilmesi amaçlandı.

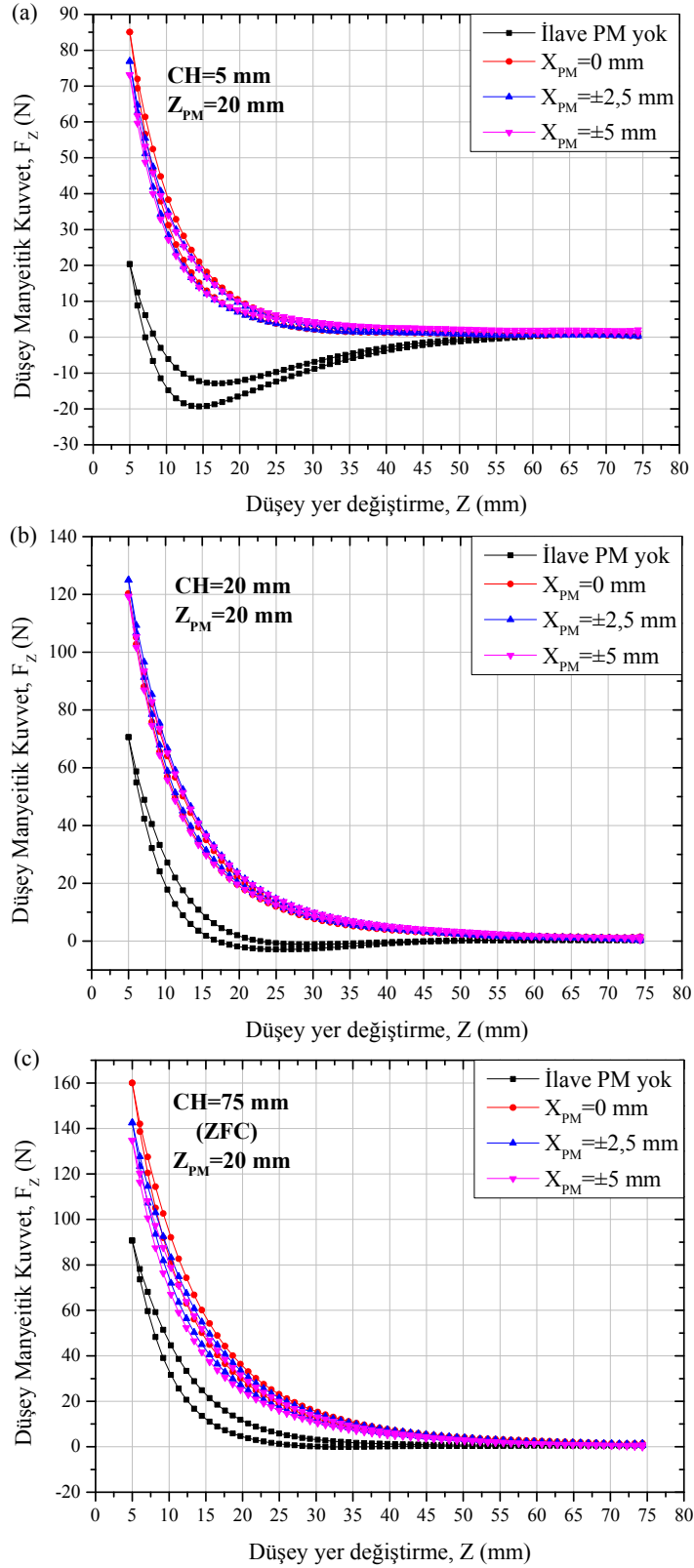
Tablo 3. 3. İlave mıknatısların farklı düşey pozisyonuna karşılık maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri

İlave mıknatısların düşey pozisyonu	Kaldırma Kuvveti (N)		Kılavuzlama Kuvveti (N)	
	CH=5 mm	ZFC	CH=5 mm	CH=15 mm
İlave PM yok	20,38	90,73	-27,40	-20,60
$Z_{PM}=5$ mm	160,36	227,67	31,27	38,48
$Z_{PM}=10$ mm	141,80	210,48	12,46	19,07
$Z_{PM}=15$ mm	109,30	182,18	-1,06	6,72
$Z_{PM}=20$ mm	85,06	160,03	-10,15	-1,81
$Z_{PM}=25$ mm	68,02	131,53	-14,19	-5,50

3.8.2. Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvete Etkisi

Şekil 3. 39 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. $X_{PM}=0$ konumunda ilave mıknatıslar ile PMG yolunda bu mıknatısların altına denk gelen mıknatısların orjinleri düşey doğrultuda çakışacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3. 36). $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda ilave mıknatıslardan sol taraftaki sola doğru, sağ taraftaki de sağa doğru 2,5 mm hareket ettirilmiştir. Benzer şekilde $X_{PM}=\pm 5$ mm konumunda da ilave mıknatıslar sağ ve sol taraflara 5 mm hareket ettirilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ilave mıknatıs kullanılmasıyla tüm soğutma yüksekliklerindeki kaldırma kuvveti değerleri artmaktadır. Bununla birlikte kaldırma kuvvetinin çekici kısmı ve kaldırma kuvveti

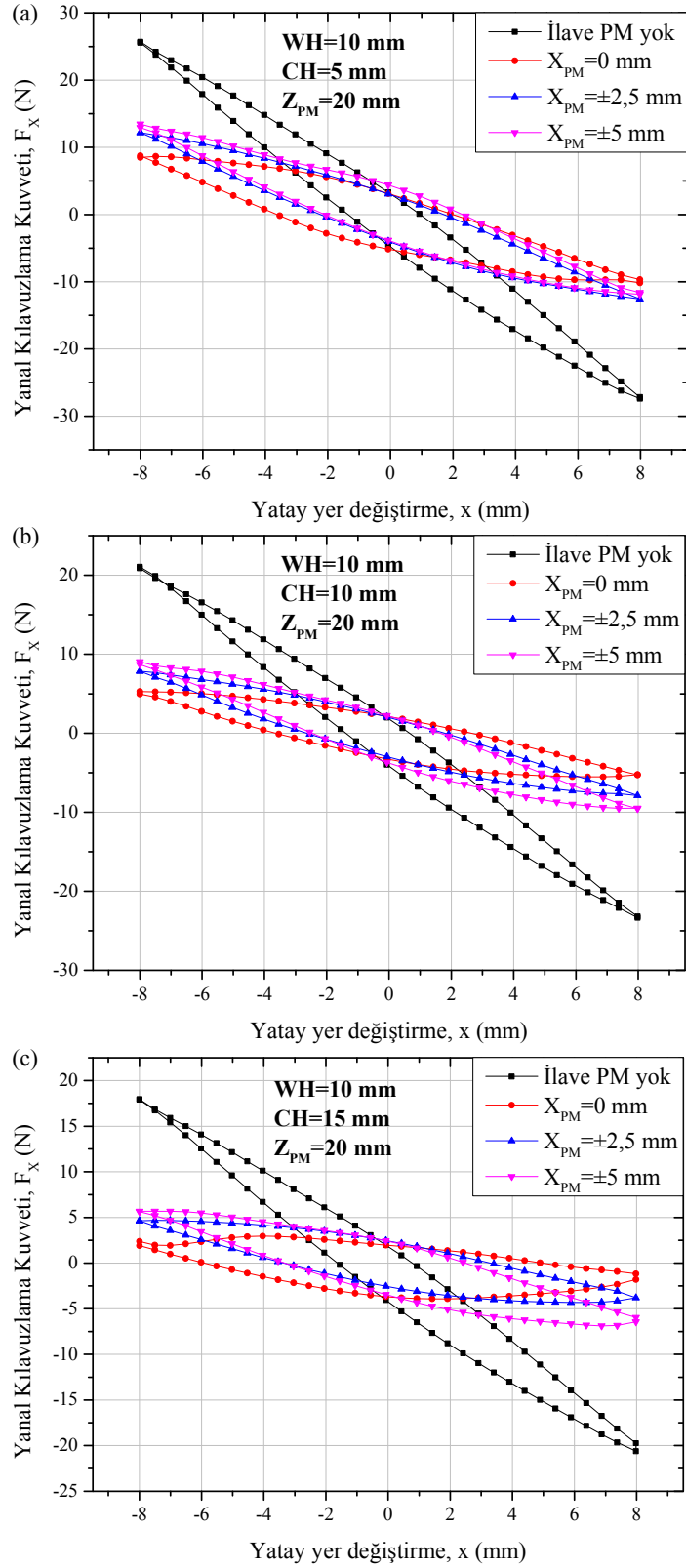
eğrilerindeki histeresiz genişliğinin azaldığı da görülmektedir. İlave mıknatısların kullanıldığı dizimleri karşılaştırdığımızda $CH=5$ mm ve ZFC durumlarında ilave mıknatısların ilk konumundan ($X_{PM}=\pm 0$ mm) uzaklaştırılmasıyla kaldırma kuvvetinde az miktarda düşüş olduğu, $CH=20$ mm'de ise kaldırma kuvvetlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



şekil 3. 39. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatışların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5\text{ mm}$ (a), $CH=20\text{ mm}$ (b) ve ZFC (c) durumlarında elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı

3.8.3. Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Kılavuzlama Kuvvetine Etkisi

Şekil 3. 40 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilave mıknatısların kullanıldığı dizilimlerde kılavuzlama kuvvetinde azalma olmaktadır. Bununla birlikte ilave mıknatısların kullanıldığı dizilimler karşılaştırıldığında, CH=10 mm ve CH=15 mm soğutma yükseklerinde ilave mıknatısların yatay pozisyonu merkezden uzaklaştıkça kılavuzlama kuvvetinde artış olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 3. 39 ve Şekil 3. 40 birlikte ele alınarak daha iyi anlaşılabilir. Şekil 3. 39’da görüldüğü gibi ilave mıknatıslar yatay konumlarından ayrıldıkça itici kuvvetin azalması nedeniye kaldırma kuvvetinde bir miktar azalma olmaktadır. Benzer şekilde bu durumda ilave mıknatıslar ile PMG yolunda aynı manyetik alan yönelimine sahip olan mıknatıslar arasındaki itici kuvvet de bir miktar azalmakta ve dolayısıyla kılavuzlama kuvvetinde artış olmaktadır.



Şekil 3. 40. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=10$ mm (b) ve $CH=15$ mm (c) durumlarında elde edilen manyetik kılavuzlama kuvvetinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı

İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık gelen maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri Tablo 3. 4'te verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi maksimum kaldırma kuvveti değerleri CH=5 mm ve ZFC durumunda ilave mıknatısların $X_{PM}=0$ mm konumunda, CH=20 mm'de ise ilave mıknatısların $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda elde edildi. İlave mıknatısların kullanıldığı durumlarda maksimum kılavuzlama kuvveti değerleri ise CH=5 mm'de $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda, CH=10 mm ve CH=15 mm'de $X_{PM}=\pm 5$ mm konumunda elde edildi. İlave mıknatıslar $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda kullanıldığında ilave mıknatıs olmayan duruma göre kaldırma kuvvetinde CH=5 mm, CH=20 mm ve ZFC durumları için sırasıyla % 277, % 77 ve % 57 artış elde edildi. Bununla birlikte ilave mıknatısların aynı yatay konumunda ilave mıknatıs olmayan duruma göre kılavuzlama kuvvetinde CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm'de sırasıyla % 54, % 66 ve % 82 azalma meydana geldi. CH=5 mm soğutma yüksekliğinde kaldırma kuvvetinde elde edilen artış oranının kılavuzlama kuvvetinin azalma oranının beş katından fazla olduğu görülmektedir. Yüzde olarak F_z artış oranı / F_x azalma oranı $X_{PM}=0$, $X_{PM}=\pm 2,5$ mm ve $X_{PM}=\pm 5$ mm durumlarında sırasıyla 5,04, 5,12 ve 4,57 olarak elde edildi. Bu durumda ilave mıknatısların $Z_{PM}=20$ mm ve $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda kullanılmasının Maglev sistemlerinin taşıma kapasitelerinin artırılmasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

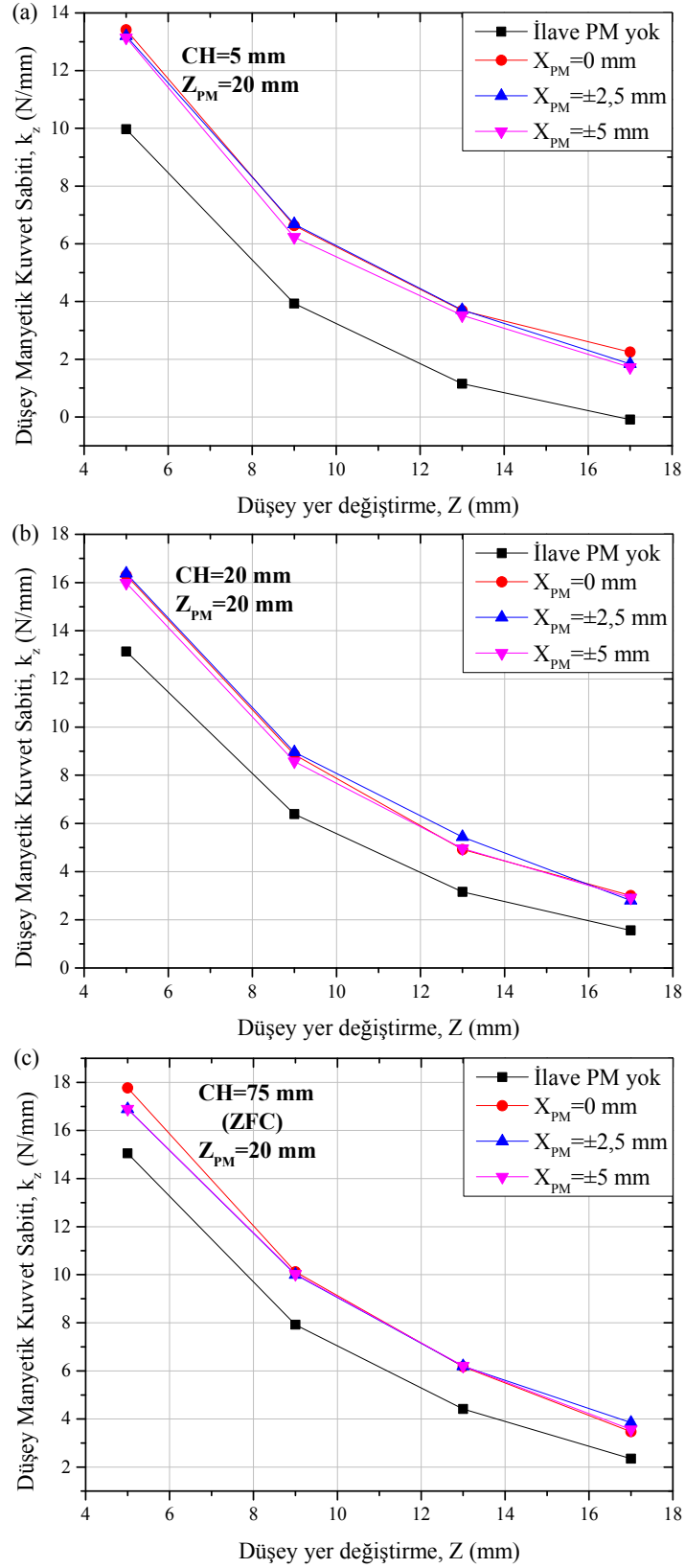
Tablo 3. 4. İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık maksimum manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerleri

İlave mıknatısların yatay pozisyonu	Kaldırma Kuvveti (N)			Kılavuzlama Kuvveti (N)			Yüzde F_z artış oranı / Yüzde F_x azalma oranı
	CH=5 mm	CH=20 mm	ZFC	CH=5 mm	CH=10 mm	CH=15 mm	CH=5 mm
İlave PM yok	20,38	70,62	90,73	-27,40	-23,33	-20,60	
$X_{PM}=0$ mm	85,06	120,28	160,03	-10,15	-5,28	-1,81	5,04
$X_{PM}=\pm 2,5$ mm	76,90	124,97	142,53	-12,56	-7,89	-3,80	5,12
$X_{PM}=\pm 5$ mm	73,16	119,27	134,80	-11,88	-9,55	-6,45	4,57

3.8.4. Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Düşey Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi

Şekil 3. 41 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık elde edilen düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığını

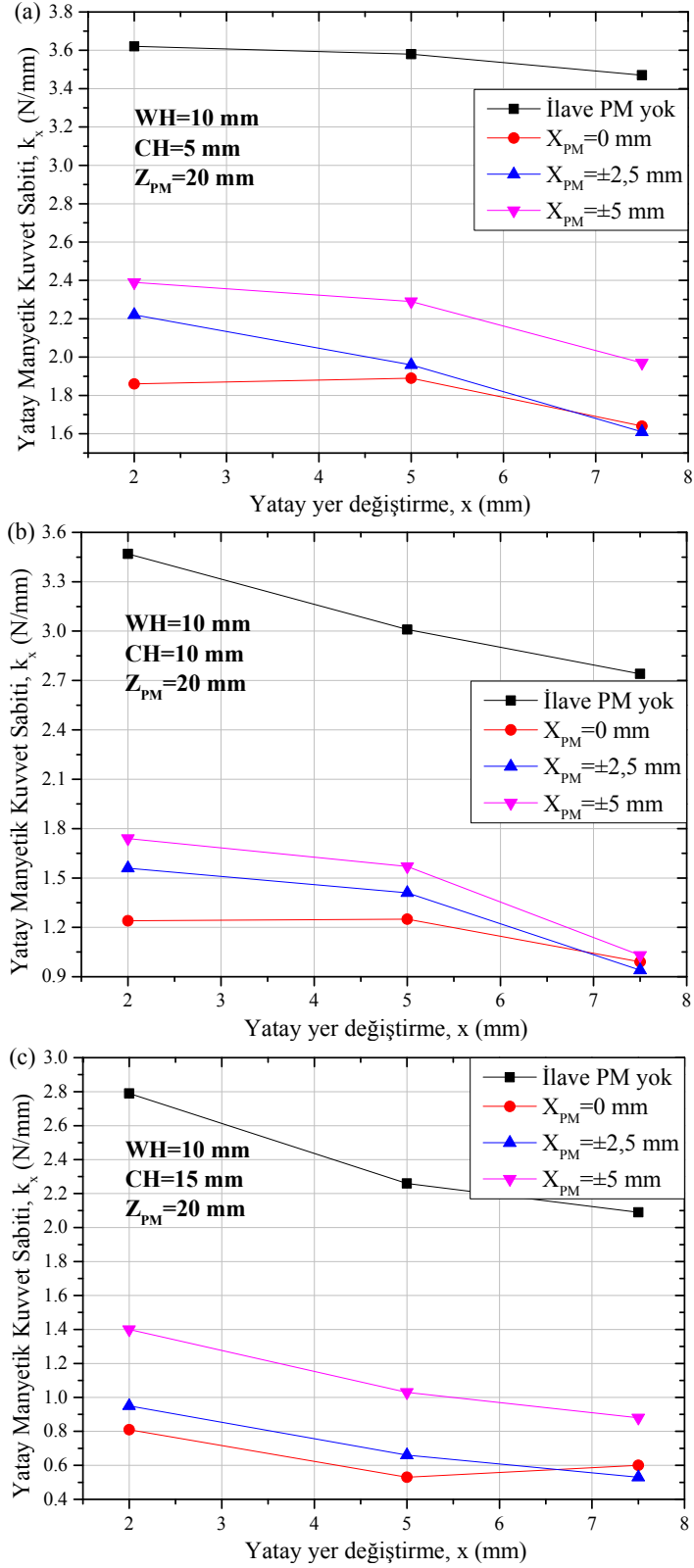
göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilave mıknatısların kullanımıyla tüm soğutma yüksekliklerinde ve tüm düşey mesafelerde düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri artmaktadır. Bununla birlikte manyetik kuvvet sabiti değerlerinin ilave mıknatısların yatay konumuna (X_{PM}) bağlı olarak fazla değişim göstermediği de görülmektedir. Yatay konuma bağlı düşey stiffness değerinde fazla değişimin gözlenmemesinin, ilave mıknatısların yanal pozisyonunun stiffness değerinde değişiklik yapacak kadar büyük olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. 41. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık $CH=5$ mm (a), $CH=20$ mm (b) ve ZFC (c) durumlarında elde edilen düşey manyetik kuvvet sabitinin düşey yer değiştirmeye bağlılığı

3.8.5. Hibrit PMG Diziliminde İlave Mıknatısların Yatay Pozisyonunun Yatay Manyetik Kuvvet Sabitine Etkisi

Şekil 3. 42 hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık elde edilen yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilave mıknatısların kullanımı yatay manyetik kuvvet sabiti değerlerini tüm soğutma yüksekliklerinde azaltmaktadır. İlave mıknatıslı dizilimler kendi arasında karşılaştırıldığında $X_{PM}=\pm 5$ mm konumunun en yüksek, $X_{PM}=0$ mm konumunun ise en düşük manyetik kuvvet sabiti değeri gösterdiği görülmektedir.



şekil 3. 42. Hibrit PMG 4 dizilimindeki ilave mıknatısların farklı yatay pozisyonlarına karşılık CH=5 mm (a), CH=10 mm (b) ve CH=15 mm (c) durumlarında elde edilen yatay manyetik kuvvet sabitinin yatay yer değiştirmeye bağlılığı

İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık maksimum düşey ve yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri Tablo 3. 5'te verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi düşey manyetik kuvvet sabiti değerleri, ilave mıknatısların kullanımı ile artmakla birlikte ilave mıknatıslı dizilimlerin manyetik kuvvet sabiti değerleri birbirine yakındır. $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda kullanılan ilave mıknatıslar düşey manyetik kuvvet sabitini ilave mıknatıs olmayan duruma göre CH=5 mm, CH=20 mm ve ZFC durumunda sırasıyla % 32, %25 ve % 12 oranlarında artırmıştır. Bununla birlikte yatay manyetik kuvvet sabitini CH=5 mm, CH=10 mm ve CH=15 mm'de sırasıyla % 38, % 55 ve % 66 oranlarında azaltmıştır. Yüzde olarak k_z artış oranı / k_x azalma oranına bakıldığında ve Tablo 3. 4 ile Tablo 3. 5 birlikte ele alındığında $X_{PM}=\pm 2,5$ mm yatay pozisyonunda kullanılan ilave mıknatısların Maglev sistemlerinin yükleme kapasitesinin iyileştirilmesinde faydalı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. 5. İlave mıknatısların farklı yatay pozisyonuna karşılık maksimum düşey ve yatay manyetik kuvvet sabiti değerleri

İlave mıknatısların yatay pozisyonu	Maksimum düşey manyetik kuvvet sabiti (N/mm)			Maksimum yatay manyetik kuvvet sabiti (N/mm)			Yüzde k_z artış oranı / Yüzde k_x azalma oranı
	CH=5 mm	CH=20 mm	ZFC	CH=5 mm	CH=10 mm	CH=15 mm	CH=5 mm
İlave PM yok	9,97	13,14	15,05	3,58	3,47	2,79	
$X_{PM}=0$ mm	13,41	16,30	17,77	1,89	1,25	0,81	0,73
$X_{PM}=\pm 2,5$ mm	13,20	16,38	16,89	2,22	1,56	0,95	0,85
$X_{PM}=\pm 5$ mm	13,14	15,98	16,90	2,51	1,74	1,40	1,06

4. SONUÇLAR

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 elektromanyetik sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin artırılması gerekmektedir. Geleneksel Maglev sistemlerinde, manyetik kılavuzlama yolu (PMG) ile süperiletken numune arasındaki kılavuzlama kuvveti belli bir değerde olmasına rağmen, manyetik kaldırma kuvveti değerinin aktif manyetik yataklarda (dış elektrik akımıyla beslenen) üretilenden daha düşük olduğu bilinmektedir. Süperiletken Maglev sistemlerinin kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti (stiffness) değerlerinin iyileştirilmesinin amaçlandığı bu tez çalışmasında çeşitli HTS-PMG dizilimleri kullanılmıştır.

Deneysel çalışma öncesinde en uygun HTS-PMG konfigürasyon ve geometrilerinin belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanan Comsol Multiphysics 4.2a paket programı ile sayısal modellemeler yapıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılan, $\varphi=45$ mm çap ve $h=15$ mm yüksekliğindeki YBCO süperiletkenler ATZ GmbH firmasından, manyetik alan kaynağı olarak kullanılan yüksek kalitede NdFeB (N42) mıknatıslar ise Magnet Exper LTD firmasından satın alındı. Sayısal modellemeler ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Manyetik alan dağılımı modellemesinden elde edilen sonuçlara göre mıknatıs yüzeyinden düşey uzaklaştıkça yatay konuma bağlı hem B_x hem de B_z manyetik akı yoğunluğu değerleri azalmaktadır.

2. PMG'ler için deney öncesinde x ve z yönünde gerçekleştirilen modellemelerin, PMG'lerin maksimum manyetik kaldırma kuvvetinin belirlenmesinde faydalı olduğu görülmüştür.

3. Literatürde sıklıkla kullanılan beş mıknatıslı Halbach dizilimi z yönünde iki manyetik alan pikine sahipken bu tez çalışmasında kullanılan PMG 1a, PMG 1b ve PMG 1c, gibi yedi mıknatıstan oluşan dizilimler üç pike sahiptir. Böylece bu dizilimler ile üç YBCO süperiletken numunesinin kullanılma imkânının olabileceği görüldü. Ayrıca yapılan

deneysel çalışmalarda, üç kutuplu PMG yolu kullanılarak elde edilen manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti değerlerinin iki kutuplu Halbach dizilimi ile elde edilenlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

4. Manyetik kaldırma kuvvetinin artırılması amacıyla numune kabında ilave mıknatısların bulunduğu hibrit PMG dizilimlerinin kullanılması, sistemdeki YBCO sayısının azaltılmasına imkân vermektedir. Böylece azalan YBCO sayısı ile Maglev sistemlerinin maliyeti düşecek ve bu sistemlerin teknolojik uygulamaları artacaktır.

5. İlave mıknatısların itici kuvvetinin, süperiletken ile PMG yolu arasında oluşan çekici kuvvete baskın olması nedeniyle hibrit PMG dizilimlerinde düşey manyetik kaldırma kuvveti eğrilerindeki çekici kısım belli oranda azalmıştır.

6. Kılavuzlama kuvveti ölçümlerinde tüm PMG'ler için soğutma mesafesi azaldıkça kılavuzlama kuvvetinin arttığı görülmüştür. Aynı zamanda numunelerin x ekseninde hareketi sırasında meydana gelen çekici kuvvet değerleri, hibrit PMG haricindeki tüm PMG'ler için tüm soğutma yüksekliklerinde sistemin yanal kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir.

7. Tüm soğutma yüksekliklerinde iki YBCO ile birlikte iki ilave mıknatısın kullanıldığı hibrit PMG 3b dizilimi en büyük düşey manyetik kaldırma kuvveti değerlerine sahipken, maliyet ve PMG kesit alanı dikkate alındığında PMG 1a dizilimi en büyük $(F_z)_{\text{mak}}/(A_{\text{PMG}} \times \text{Maliyet})$ oranına sahiptir. Düşey yöndeki mıknatısların üzerinde üç süperiletkenin kullanıldığı PMG 3a dizilimi tüm soğutma yüksekliklerinde en büyük manyetik kılavuzlama değerlerine sahiptir. Bununla birlikte PMG 1a dizilimi CH=5 mm ve CH=10 mm'de en büyük $(F_x)_{\text{mak}}/(A_{\text{PMG}} \times \text{Maliyet})$ oranına sahiptir.

8. Hibrit PMG 3b dizilimi için CH=5 mm soğutma yüksekliğinde sistem yanal olarak kararlı iken, CH=10 mm ve CH=15 mm için kararsız olmuştur. Bu durum, numunelerle birlikte kullanılan ilave mıknatıslar ile PMG yolu arasında oluşan itici kuvvetin, numunelerle PMG yolu arasında oluşan çekici kuvvete baskın gelmesinden kaynaklanmaktadır. Sunulan hibrit model, düşey yönde manyetik kuvvet sabitini iyileştirmesine rağmen yatay manyetik kuvvet sabiti değerinde belli oranda azaltıcı etki göstermiştir.

9. Süperiletken ile PMG yolu arasındaki küçük düşey mesafelerde düşey manyetik kuvvet sabiti k_z , üç YBCO numunesine sahip PMG 3a diziliminde yüksekken, büyük mesafelerde ise hibrit model olan PMG 3b dizilimi en iyi düşey manyetik kuvvet sabiti değeri göstermiştir. PMG 3b dizilimindeki süperiletken haznede bulunan ilave mıknatıslar, büyük düşey mesafede düşey manyetik kuvvet sabiti performansını iyileştirici

özelliğindedirler. Gerçek boyutlu Maglev uygulamalarında PMG yolu ile süperiletken hazne arasında 10 mm'den daha büyük mesafeye ihtiyaç duyulması, hibrid süperiletken haznenin önemine işaret etmektedir.

10. Süperiletkenler ile birlikte ilave iki mıknatıs kullanılan hibrit PMG 4 diziliminde paralel manyetik yönelime sahip mıknatısların itici özellik göstermesi, kaldırma kuvvetinde belirgin bir artışa neden olmuştur. Bununla birlikte ilave mıknatısların düşey pozisyonu (Z_{PM}) arttıkça, PMG yolu ile ilave mıknatıslar arasındaki mesafenin artması nedeniyle manyetik kaldırma kuvvetinin azaldığı, yatay kılavuzlama kuvvetinin ise belli oranda arttığı gözlemlendi.

11. Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatıslar $Z_{PM}=20$ mm konumunda kullanıldığında ilave mıknatıs olmayan duruma göre kaldırma kuvvetinde $CH=5$ mm'de % 317'lik ve ZFC durumunda % 76'lık bir artış elde edildi. Bununla birlikte kılavuzlama kuvvetinde $CH=5$ mm'de % 63'lük ve $CH=15$ mm'de % 91'lik bir azalma oldu. Bu inceleme sonucunda kılavuzlama kuvvetinde çok fazla bir azalma olmadan kaldırma kuvvetinde önemli bir artışın elde edilebilmesi için ilave mıknatısların optimum düşey konumunun $Z_{PM}=20$ mm olduğuna karar verildi.

12. Hibrit PMG 4 diziliminde ilave mıknatıslar $Z_{PM}=20$ mm düşey ve $X_{PM}=\pm 2,5$ mm yatay pozisyonda kullanıldığında ilave mıknatıs olmayan duruma göre düşey kaldırma kuvvetinde $CH=5$ mm, $CH=20$ mm ve ZFC durumları için sırasıyla % 277, % 77 ve % 57 artış elde edildi. Bununla birlikte ilave mıknatısların aynı yatay konumunda kılavuzlama kuvvetinde $CH=5$ mm, $CH=10$ mm ve $CH=15$ mm'de sırasıyla % 54, % 66 ve % 82 azalma meydana geldi.

13. Hibrit PMG 4 diziliminde $CH=5$ mm soğutma yüksekliğinde kaldırma kuvvetinde elde edilen artış oranının, kılavuzlama kuvvetinin azalma oranının beş katından fazla olduğu ve yüzde olarak F_z artış oranı / F_x azalma oranının $X_{PM}=0$, $X_{PM}=\pm 2,5$ mm ve $X_{PM}=\pm 5$ mm pozisyonlarında sırasıyla 5,04, 5,12 ve 4,57 olduğu görüldü. Bu durum ilave mıknatısların $Z_{PM}=20$ mm ve $X_{PM}=\pm 2,5$ mm konumunda kullanılmasının Maglev sistemlerinin taşıma kapasitelerinin artırılmasında faydalı olacağı gösterir.

14. Maglev sistemlerinin kaldırma ve kılavuzlama kapasitesi, farklı manyetik akı dağılımına sahip PMG dizilimine ve süperiletken numune içerisinde tuzaklanan alan kapasitesini değiştiren soğutma mesafesine bağlı olarak artırılabilir. Bunun yanında, hibrit Maglev sisteminde süperiletkenlerle birlikte uygun konum ve doğrultuda kullanılan ilave mıknatısların düşey ve yatay konumları uygun şekilde ayarlanıp, kılavuzlama

kuvvetindeki kayıp azaltılarak kaldırma kuvvetinde belirgin bir artış elde edilebileceği görölmüştür.

15. Büyük kaldırma kuvvetinin gerekli olduğu Maglev trenlerinin kalkış anında iki YBCO ile birlikte iki ilave mıknatısın birlikte kullanıldığı hibrit PMG 3b diziliminin, trenin belli bir hıza ulaştığı kilometrelerce uzunluğa sahip duraklar arasında ise maliyet ön planda olacağından, PMG 1a diziliminin elverişli olacağı söylenebilir.

5. ÖNERİLER

Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için bu çalışmada sekiz farklı HTS–PMG diziliminin manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti değerleri farklı soğutma yüksekliklerinde deneysel olarak araştırıldı. Deneysel çalışmalar öncesinde PMG dizilimlerinin manyetik akı yoğunlukları nümerik olarak belirlendi. Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalara ilave olarak aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

1. Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet özelliklerinin iyileştirilebilmesi için farklı boyutlarda mıknatıslarla daha fazla sayıda HTS–PMG dizilimi için manyetik kuvvet özellikleri araştırılabilir.

2. Deneysel çalışmaların daha verimli ve ekonomik olarak gerçekleştirilebilmesi için deneysel çalışmalar öncesinde manyetik kaldırma kuvveti, kılavuzlama kuvveti ve manyetik kuvvet sabiti özellikleri nümerik olarak belirlenebilir.

3. Bu çalışmadaki ölçümler sıvı azot sıcaklığında (77K) gerçekleştirildi. Farklı sıcaklıklarda ölçümler yapılarak çeşitli HTS–PMG dizilimlerinin manyetik kuvvet özelliklerinin sıcaklığa göre değişimi araştırılabilir.

4. Farklı boyutlarda süperiletken numune kullanılarak çeşitli HTS–PMG dizilimleri için numune boyutunun manyetik kuvvet özelliklerine etkisi araştırılabilir.

5. Bilindiği gibi manyetik kaldırma kuvveti, süperiletken malzemenin kritik akım yoğunluğu ile orantılıdır. Bu nedenle kritik akım yoğunluğu yüksek olan MgB_2 gibi farklı süperiletken malzemeler kullanılarak Maglev sistemlerinin manyetik kuvvet özellikleri artırılabilir.

6. PMG yolunda kullanılan kalıcı mıknatıslar yerine manyetik alan kaynağı olarak daha büyük manyetik alan sağlayabilecek süperiletken tel ya da şeritlerin kullanıldığı bobinlerden faydalanılabilir. Bu sayede Maglev sistemlerinde amaca uygun manyetik kuvvet özellikleri için manyetik alanın değiştirilmesi sağlanabilir.

7. Bu çalışmada tek sıra PMG dizilimi ile ölçümler gerçekleştirildi. PMG'ler daha fazla sırada dizilerek manyetik kuvvet özellikleri araştırılabilir. Daha fazla süperiletken ve daha uzun PMG yolu ile gerçek boyutlu Maglev taşıma sistemlerine yakın bir sistem oluşturulabilir.

6. KAYNAKLAR

- 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.
- Bardeen, J., Cooper, L.N. ve Schrieffer, J., 1957. Theory of Superconductivity, Phys. Rev., 108, 1175-1204.
- Bean, C.P., 1964. Magnetization of high-field superconductors, Rev. Mod. Phys., 31.
- Bednorz, J.G. ve Müller, K.A., 1986. Possible High T_c Superconductivity in The Ba-La-Cu-O system, Z. Phys. B, Condensed Matter, 64, 189-193.
- Cardwell, D. A., Shi, Y. H., Babu, N. H., Pathak, S. K., Dennis, A. R. ve Iida, K., 2010. Top seeded melt growth of Gd–Ba–Cu–O single grain superconductors, Supercond. Sci. Technol., 23, 034008, 1-9.
- Cheng, S., Olles, M. W., Burger, A. F. ve Day, S. W., 2011. Optimization of a hybrid magnetic bearing for a magnetically levitated blood pump via 3-D FEA, Mechatronics, 21, 1163-1169.
- 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, C.W., Bechtold, J., Gao, L., Hor, P.H., Huang, Z.J., Meng, R.L., Sun, Y.Y., Wang, Y.O. ve Hue, Y.Y., 1988. Three Phases in BiSrCaCuO Thin Films Synthesized by the Multilayer Deposition Method. Physical Rev. Lett., 60, 10, 941-946.
- 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.
- 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.
- Del-Valle, N., Sanchez, A., Pardo, E., Navau, C. ve Chen, D., X., 2007. Enhanced Stability by Cooling in Superconducting Levitation With Translational Symmetry, Applied Physics Letters, 91, 112507, 1-3.
- 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, 1-10.

- 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, 1-10
- 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, 1-9.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Jing, H., Li, J., Liu, W., Zhang, Y. ve Wang, S., 2009a. Performance Advances of HTS Maglev Vehicle System in Three Essential Aspects, IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 2137-2141.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Lin, Q., Zhang, Y. ve Wang, S. 2009b. Maglev performance of a double-layer bulk high temperature superconductor above a permanent magnet guideway, Supercond. Sci. Technol. 22, 055003, 1-4.
- 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, 1-6.
- Deng, Z., Zheng, J., Lin, Q., Li, J., Zhang, Y., Wang, S., 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. ve 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.
- Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Wippich, D., Goebel, B., Riedel, T. ve Werfel, F. N., 2007. Fabrication of HTS Bearings With Ton Load Performance, IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 2, 2142-2145
- 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 (invited), J. Appl. Phys., 57, 3605-3608.
- Huang, C. G. ve Zhou, Y. H., 2015. Levitation properties of maglev systems using soft ferromagnets, Supercond. Sci. Technol., 28, 035005, 1-10.
- 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, 1-4.
- 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, 1-5.
- 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., 2006. 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.
- Liang, G., Zhao, L., Yang, J., Ma, J., Zhang, Y., Wang, X. ve Zhao, Y., 2015. Study of the Maglev Performance of the Side-Mounted High-Temperature Superconductor Maglev Rotating System, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 4, 3601406, 1-6.
- 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., 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, 1-6.
- 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., 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., 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.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M. and Asano, T., 1988. A New High- T_c Oxide Superconductor without a Rare Earth Element. J. Appl. Phys., 27, 209-210.
- 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.
- 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, 1-4.
- Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Gotoh, S., Yamaguchi, K., Shiohara, Y., Koshizuoka, N., and Tanaka, S., 1991. Melt Processing of Bulk High T_c Superconductors and Their Application, IEEE Trans. On Magnet, 27, 1479.
- Müller, P. ve Ustinov, A. V., 1997. The Physics of Superconductors, Springer, Germany.
- Onnes, H. K., 1911. Superconductivity and Magnetizm, 119-120, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.
- Ozturk, K., Abdioglu, M., Sahin, E., Celik, S., Gedikli, H. ve Savaskan, B., 2015. 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, 1-7.
- 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., Celik, S. ve Cansiz, A., 2009. Determination of levitation force and pinning properties of $(\text{Sm123})_{1-x}(\text{Yb211})_x$ bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio, Phys. Status Solidi A, 11, 2569-2575.
- Ozturk, K., Kabaer, M. ve Abdioglu, M., 2015. Effect of onboard PM position on the magnetic force and stiffness performance of multi-seeded YBCO, J. Alloys. Comp., 644, 267-273.

- Ozturk, K., Sahin, E., Abdioglu, M., Kabaer, M., Celik, S., Yanmaz, E. ve Kucukomeroglu, T., 2015. 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.
- 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 MgB₂ Hollow Cylinder and Pulse Magnetized (RE)BCO Bulk for Magnetic Levitation Applications, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23, 3, 6800604, 1-4.
- 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, 1-7.
- Patel, A., 2013. Pulsed Field Magnetization of Composite Superconducting Bulks for Magnetic Bearing Applications, Doktora Tezi, University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Cambridge
- 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, 1-8.
- Patitsas, S. N., 2011. Stability analysis for axially-symmetric magnetic field levitation of a superconducting sphere, *Physica C*, 471, 12-18.
- 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.
- 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.
- 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, S95-S98.
- 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.

- 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, 1-4.
- 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, 1-5.
- 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, 1-7.
- 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., 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, 1-5.
- Şahin, E., 2014. YBCO Bazlı Maglev Sistemleri Manyetik Kuvvet Sabitinin Farklı Alan Şartlarında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- 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., Ren, Z., Wang, X., Zhu, M., Jiang, H., Song, H., Wang, X. ve Zheng, J., 2003. Guidance Forces on High Temperature Superconducting Maglev Test Vehicle, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13, 2, 2154-2156.
- 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. ve Dong, X., 2002. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the World, Physica C, 378–381, 809–814.
- 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, 1-16.

- Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Wippich, D., Goebel, B. ve Schirrmeyer, P., 2012a. Bulk superconductors in mobile application, Physics Procedia, 36, 948–952.
- 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.
- Zhang, J., Zeng, Y., Cheng, J. ve Tang, X., 2008. Optimization of Permanent Magnet Guideway for HTS Maglev Vehicle With Numerical Methods, IEEE Trans. Appl. Supercond., 18, 3, 1681-1686.
- 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.
- Zhou, J., Zhang, X. Y., Zhou, Y. H., 2009. Influences of cooling height and lateral moving speed on the levitation characteristics of YBaCuO bulks, Physica C, 469, 207–210.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Kadıköy’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Gebze’de tamamladı. 2003 yılında öğrenime başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde başladığı yüksek lisans eğitiminden 2011 yılında mezun oldu ve aynı enstitüde aynı yıl doktora eğitimine başladı. Uluslararası alan indeksleri tarafından taranan bilimsel dergilerde yayınlanmış beş adet makalesi ve uluslararası konferanslarda sunulmuş birçok bildirisi bulunmaktadır. 2009 yılı Mart ayında Bayburt Üniversitesi Bayburt Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak başladığı görevine halen devam eden Murat ABDİOĞLU iyi derecede İngilizce bilmektedir.