

**TC
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FERROMANYETİK GRANÜLLERDEN OLUŞTURULMUŞ YÜKSEK
GRADYANTLI MANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

TEOMAN KARADAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

MALATYA - 2009

Onur Sözü

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “FERROMANYETİK GRANÜLLERDEN OLUŞTURULMUŞ YÜKSEK GRADYANTLI MANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakça da yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Teoman KARADAĞ

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FERROMANYETİK GRANÜLLERDEN OLUŞTURULMUŞ YÜKSEK GRADYANTLI
MANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

TEOMAN KARADAĞ
İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Anabilim Dalı
120+xiii sayfa
2009
Danışman: Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

Bu tezde ferromanyetik kürelerden, tel kırıntılarında ve metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların oluşturduğu yüksek gradyantlı manyetik alanlar ve bu yatakların mıknatıslanma özellikleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Son 150 yılı aşan bir süreçte gradyantlı manyetik alanların teorik sonuçları incelenmiş ve bu sonuçların pratik uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir formülleri özetlenmiştir. Kanallarla mıknatıslanma modelinden yararlanarak ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların teorik temelleri belirlenmiştir. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların pratik B-H eğrisinin elde edilmesi için yeni formüller elde edilmiş ve mıknatıslanma parametreleri arasındaki ilişkiler düzeltilmiştir. Mıknatıslanma eğrisine dolgu faktörünün veya yatak parozitesinin etkisi değerlendirilmiştir. Farklı boyutlu dolgu elemanlarından (kürelerden) oluşturulmuş yatakların mıknatıslanma özelliklerine değinilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçların kıyaslanması ve yorumları yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Ferromanyetik küreler, mıknatıslanmış yataklar, manyetik geçirgenlik, gözenekli ortam, mıknatıslanma eğrisi.

ABSTRACT
MASTER THESIS
RESEARCH AND MODELLING OF HIGH GRADIENT MAGNETIC FIELDS
CREATED BY FERROMAGNETIC GRANULES

TEOMAN KARADAĞ
İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric and Electronics Engineering

120+xiii Pages

2009

Supervisor: Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

In this thesis high gradient magnetic fields formed by filled beds, which are made of ferromagnetic spheres, wire crumbs and metal fillings, and magnetization qualifications of these filled beds were examined theoretically and experimentally. Formulas of theoretical results of gradient magnetic fields, which have been obtained over the last 150 years, have been examined and some of these results that can be used easily in practical applications are summarized. Taking advantage of the illustration of magnetization through channels, theoretical basis of the filled bed, which is made of ferromagnetic marbles, have been determined. To obtain practical B-H curves of magnetized filled beds new formulas have been developed and relationships between magnetization parameters have been improved. The effects of filling factor or bed porosity on magnetization curve were evaluated. Magnetization qualifications of the filled beds that are made of filling elements (spheres), which have different dimensions, were investigated. Comparison and comments of theoretical and experimental results have been presented.

KEY WORDS: Ferromagnetic spheres, magnetized beds, magnetic permeability, porous, magnetized curve.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV'a, tez çalışmamda 2008/52 nolu proje ile desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri'ne; Ayrıca hayatım boyunca, hayatımın her alanda desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM'e ve yakınlarıma

TEŞEKKÜR EDERİM.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL VE TEMEL UYGULAMALAR.....	10
2.1. Mıknatıslanmış Tekil Ferromanyetik Kürenin Oluşturduğu Gradyantlı Manyetik Alan.....	12
2.2. Tekil Ferromanyetik Telin Etrafında Oluşan Gradyantlı Manyetik Alan	14
2.3. Tekil Ferromanyetik Çubuğun Etrafında Oluşan Gradyantlı Manyetik Alan	14
2.4. Mıknatıslanmış ve Elipsoid Kesitli Ferromanyetik Çubuğun Oluşturduğu Gradyantlı Manyetik Alan.....	19
2.5. Sonsuz Uzun Solenoidin Gradyantlı Manyetik Alanı.....	22
2.5.1. Spiral (sarmal) şekilli sargı.....	23
2.5.2. Çevresel Periyodik Sarımların Oluşturduğu Manyetik Alan.....	26
2.6. Kutupların Şekillendirilmesi İle Oluşan Gradyantlı Manyetik Ala...	28
2.7. Kapalı Çok Kutuplu Gradyantlı Manyetik Alan	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Mıknatıslanmış Ferromanyetik Tellerden Oluşturulmuş Dolgulu Yatakla	40
3.2. Mıknatıslanmış Ferromanyetik Kürelerden ve Metal Talaşlarından Oluşturulmuş Dolgulu Yataklar.....	44
3.2.1. Ferromanyetik granül dolgulu yatakların manyetik özellikler.....	44
3.3. Ferromanyetik Kürelerden Oluşturulmuş Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Zincirinin Oluşturduğu Manyetik Geçirgenlik.....	47
3.3.1. Mıknatıslanmış dolgulu yatağın ortalama manyetik geçirgenliği.....	52
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1. Materyaller ve Metod.....	58

4.2. Çeşitli Ferromanyetik Granüllerden Oluşturulmuş Dolgulu Yatakların	
Mıknatıslanma Özelliklerinin Deneysel Sonuçlar.....	62
4.2.1 Dolgulu yatak bulunmadığı durumda manyetik sistemin hava aralığının	
mıknatıslanma özelliği.....	62
4.2.2 d=4,75 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler	
ve sonuçları.....	65
4.2.3 d=6,28mm çaplı ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu	
yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin	
sonuçları.....	68
4.2.4 d=9 mm çaplı ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların	
mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	71
4.2.5 d=10,5 mm çaplı ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların	
mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	74
4.2.6 d=11,9 mm çaplı ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların	
mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	77
4.2.7 Ferromanyetik çelik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma	
özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	80
4.2.8 Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma	
özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	83
4.2.9 Farklı çaplara sahip olan ferromanyetik kürelerin karışımından oluşturulmuş	
dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin deneysel incelenmesi.....	86
5 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	110
6 KAYNAKLAR.....	115
7 EKLER.....	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış kürenin oluşturduğu gradyanlı alan.....	12
Şekil 2.2 Paralel ferromanyetik silindirik çubukların dış homojen alandaki durumu.....	15
Şekil 2.3 Silindirik ferromanyetik çubuklar dış manyetik alanda a) iki çubuk, b) üç çubuk, c) dört çubuk.....	16
Şekil 2.4 Ferromanyetik çubukların dışmanyetik alanlarda mıknatıslanmasının teorik ve deneysel sonuçları.....	18
Şekil 2.5 Manyetik alanın maksimum değerinin a/b orantısı ile değişimi.....	19
Şekil 2.6 Mıknatıslanmış elipsoidin koordinat düzlemindeki durumu.....	20
Şekil 2.7 Spiral (sarmal) şekilli (a) ve çevresel periyodik sarımlı (b) selenoidin prensip şeması.....	22
Şekil 2.8 $z=0$ düzleminde yerleştirilmiş tekil sarmal akım taşıyan iletkenin (a) ve simetri eksenine z boyunca seçilmiş silindir (b) durumu.....	23
Şekil 2.9 Kutup şekillendirilmeleriyle oluşturulmuş gradyanlı manyetik alanlar..	29
Şekil 2.10 $\overline{H}(r, \theta)$ manyetik alan şiddetinin polar koordinatlardaki durumu.....	33
Şekil 2.11 Farklı kutup sayılarında parçacığı etkileyen $f(t)$ kuvvet faktörünün silindirik boşluktaki boyutsuz yarıçap üzere göre değişimi.....	39
Şekil 3.1. Asıl etkili kanalın manyetik geçirgenliğinin grafiği olarak adlandırılan granüle(farklı boyutlarda POLYBALLS) edilmiş alanın kanaldan kanala (ya da kanal tarafından) mıknatıslanma örneği.....	48
Şekil 3.2. Ferromanyetik kürelerin değme noktalarının etrafında aynı merkezli halkalar üzerinde ölçülen manyetik zincir için deneysel verilerin kıyaslanması....	52
Şekil 3.3. Yatak elementlerinin büyüklük(çap) oranına karşı dolgu faktörünün çeşitliliği deneysel veri Dk. 3.36'dan hesaplanan metal çizgi.....	54
Şekil 3.4. Kürelerin manyetik geçirgenliği ve dolgulu yataklarının ortalama manyetik geçirgenliği arasındaki ilişkinin; tahmini yüzeyel manyetik alan yoğunluğuyla kıyaslanması.....	56

Şekil 4.1. Manyetik malzeme içermeyen dolgusuz yatağın mıknatıslanma özelliğinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.....	64
Şekil 4.2. Çapı $d=4,75$ mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	67
Şekil 4.3. Çapı $d=6,28$ mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	70
Şekil 4.4. Çapı $d=9$ mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	73
Şekil 4.5. Çapı $d=10,5$ mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	76
Şekil 4.6. Çapı $d=11,9$ mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	79
Şekil 4.7. Ferromanyetik çelik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	82
Şekil 4.8. Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	85
Şekil 4.9. Çapları $d=4,75$ mm ve $d=9$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	88
Şekil 4.10. Çapları $d=4,75$ mm ve $d=10,5$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	89
Şekil 4.11. Çapları $d=4,75$ mm ve $d=10,5$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	90
Şekil 4.12. Çapları $d=6,28$ mm ve $d=9$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	91

Şekil 4.13. Çapları $d=6,28\text{mm}$ ve $d=10,5\text{mm}$ olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	92
Şekil 4.14. Çapları $d=6,28\text{mm}$ ve $d=11,9\text{mm}$ olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	93
Şekil 4.15. $d=4,75\text{ mm}$ çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	95
Şekil 4.16. $d=4,75\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 10 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	96
Şekil 4.17. $d=4,75\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 20 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	97
Şekil 4.18. $d=4,75\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 30 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	98
Şekil 4.19. $d=4,75\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 40 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	99
Şekil 4.20. $d=6,28\text{ mm}$ çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	100
Şekil 4.21. $d=6,28\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 10 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5\text{ cm}$ ve $L=8\text{ cm}$ referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	101
Şekil 4.22. $d=6,28\text{ mm}$ çaplı çelik küreler ve 20 adet $d=2\text{mm}$ çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen	

L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	102
Şekil 4.23. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	103
Şekil 4.24. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	104
Şekil 4.25. L=5 cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.....	105
Şekil 4.26. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.....	106
Şekil 4.27. L=8cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.....	107
Şekil 4.28. L=8cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.....	108
Şekil 4.29. L=5cm de d=4,75 ve d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.....	109
Şekil 4.30. L=5cm de farklı özelliklerdeki dolgulu yatakların B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.....	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 I akımı taşıyan, a yarıçaplı tellerden sarılmış sonsuz çevresel yarım ve spiral şekilli bobinlerin oluşturdukları $B_z(r)$ ve $B_\phi(r)$ manyetik alan yoğunluklarının kıyaslanması.....	29
Çizelge 2.1. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğine ait bazı kararlılık sonuçları.....	50
Çizelge 4.1. Manyetik malzeme içermeyen filtrede, 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğu değerleri.....	68
Çizelge 4.2. Çapı d=4,75mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	66
Çizelge 4.3. Çapı d=6,28mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	69
Çizelge 4.4. Çapı d=9mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	72
Çizelge 4.5. Çapı d=10,5 mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	75
Çizelge 4.6. Çapı d=11,9 mm olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	78
Çizelge 4.7. Ferromanyetik çelik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	81
Çizelge 4.8. Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.....	84
Çizelge 4.9. Çapları d=4,75 mm ve d=9mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	88
Çizelge 4.10. Çapları d=4,75 mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	89

Çizelge 4.11. Çapları $d=4,75$ mm ve $d=11,9$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	90
Çizelge 4.12. Çapları $d=6,28$ mm ve $d=9$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	91
Çizelge 4.13. Çapları $d=6,28$ mm ve $d=10,5$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	92
Çizelge 4.14. Çapları $d=6,28$ mm ve $d=11,9$ mm olan ferromanyetik çelik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.....	93
Çizelge 4.15. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	95
Çizelge 4.16. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve 10 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisi.....	96
Çizelge 4.17. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve 20 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	97
Çizelge 4.18. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve 30 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	98
Çizelge 4.19. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve 40 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	99
Çizelge 4.20. $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	100

Çizelge 4.21. $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve 10 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler....	101
Çizelge 4.22. $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve 20 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler....	102
Çizelge 4.23. $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve 30 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler....	103
Çizelge 4.24. $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve 40 adet $d=2$ mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen $L=5$ cm ve $L=8$ cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler....	104
Çizelge 4.25. $L=5$ cm’de $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	105
Çizelge 4.26. $L=5$ cm’de $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	106
Çizelge 4.27. $L=8$ cm’de $d=4,75$ mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	107
Çizelge 4.28. $L=8$ cm’de $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	108
Çizelge 4.29. $L=5$ cm ve $L=8$ cm de $d=4,75$ ve $d=6,28$ mm çaplı çelik küreler ve 30 adet non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	109
Çizelge 4.30. $L=5$ cm de farklı özelliklerdeki dolgulu yatakların B-H ilişkisini ifade eden değerler.....	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

A-Vektör manyetik potansiyeli

E- Elektrik alan şiddeti vektörü

H- Manyetik alan şiddeti vektörü

B-Manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon vektörü

ρ -Serbest elektrik yük yoğunluğu (bağlı yükleri içermez)

J-İletkenlik akım yoğunluğu (kutuplanma ve manyetizasyon içemez)

dA-Sonsuz küçük A yüzeyinin diferansiyel vektör elemanı

dV-S yüzeyini kapatan diferansiyel V hacmi

∇ -Diverjans operatörü

$\nabla \times$ -Rotasyon operatörü

V_m -Manyetik skaler potansiyel

μ -Manyetik geçirgenlik

μ_r -Bağıl manyetik geçirgenlik

μ_0 -Manyetik sabit ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

r-Radyal koordinat

θ -Polar koordinat

M-Mıknatıslanma vektörü

h-Yerel manyetik alan şiddeti vektörü

F-Manyetik kuvvet

γ -Dolgu faktörü

ϵ -Porozite

μ_{av} -Ortalama manyetik geçirgenlik

$r_\alpha = \frac{r}{\alpha}$ – Boyutsuz radyal koordinat

a,b- Ferromanyetik elemanların boyutları

L- Uzunluk

X,Y,Z-Kartezyen koordinatlar

AC-Değişken akım

DC-Doğru akım

YGMA-Yüksek gradyantlı manyetik alan

H_s - Manyetik alan şiddetinin doyma değeri

M_s - Mıknatıslanma doyma değeri

1 GİRİŞ

Son yıllarda sabit ve değişken manyetik alanların çeşitli bilim alanlarında ve teknolojik yapılarda kullanılması yaygınlaşmaktadır. Bunun esas nedeni elektromanyetik alanın daha tasarruflu olması ve Akım-Gerilim değişimiyle geniş bir aralıkta değerlerinin ayarlanabilir olmasıdır.

Bu amaçla dış manyetik alan kaynağı olarak sabit mıknatıslar, AC ve DC akım bobinleri ve süper iletken manyetikler kullanılmaktadır. Pratik uygulamalarda manyetik alanın etkisini artırmak için bu alanların gradyanlı olması istenmektedir. Gradyanlı alanlar uzayda veya boşlukta manyetik alan şiddetinin değerinin noktadan noktaya değişken olmasıdır.

Bu tür alanlar farklı yöntemlerle elde edilebilir. Gradyanlı alanların en yaygın olarak kullanılan türlerinden biri mıknatıslanmış dolgulu yataklardır [1-5].

Mıknatıslanmış dolgulu yataklar esasen ferromanyetik malzemelerden (küre, çubuk, paslanmaz çelik yün, metal talaşları vb) oluşurlar. Dış manyetik alanın etkisiyle kolaylıkla mıknatıslanan bu yataklardaki elemanların etraflarında yerel (lokal) yüksek gradyanlı manyetik alan bulunan bölgeler meydana getirirler. Bu bölgelerde ince manyetik parçacıklara etkiyen kuvvet, çok büyük değerlere ulaşabilir. Bu olay, mıknatıslanmış granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların birçok tekniksel problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Örneğin, manyetik filtrasyon ve separasyon işlemlerinde [1-5], manyetik flüidizasyonda [6], manyetoforez ve nano teknolojide [7,8] , manyetik ilaç hedefleme işlemlerinde [9-11], farklı kimyasal proseslerde [12] dış manyetik alanda mıknatıslanmış dolgulu yataklar etkin araç olarak kullanılmaktadır.

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların etkinliğini belirleyen esas özellikler bu ortamların mıknatıslanma özellikleri ve dolgu elemanlarının dış etkenlere karşı (paslanma, aşınma vb) dayanıklı olabilmesidir. Ferromanyetik elemanlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri manyetik sistemlerin gelişmesindeki bütün periyotlarda araştırmacıların dikkat merkezinde olmuştur [2,13-22].

Bu çalışmaların çoğunda ferromanyetik çubuklardan ve tellerden ([3,20] veya paslanmaz çelik yünlerden [23,24] oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri öne çıkarılmıştır. Dahası bu çalışmalarda yatakların dolgu faktörünün mıknatıslanma özelliklerine etkisi yetersiz incelenmiş veya hiç değinilmemiştir.Ferro-

manyetik granüllerden (örneğin, kürelerden) oluşturulmuş dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin incelenmesi de yetersiz kalmaktadır. Bu tür yatakların mıknatıslanma özelliklerine ait literatürde sunulan teorik ve deneysel sonuçlar ise esasen 1,2 veya en fazla 4 küreden oluşturulmuş hücrelerin mıknatıslanma özelliklerini içermektedir [25-27]. Gerçekte ise ister manyetik filtrasyon ve separasyon işlemlerinde [4,5], isterse manyetik flüidazasyonda [6] veya diğer aygıtlarda [12] kullanılan dolgulu yataklardaki mıknatıslanan kürelerin sayısı model laboratuvar düzeneklerinde bile 10^3 ve daha fazla olur. Bu durumda hem dolgu faktörünün hem de mıknatıslanmış kürelerin indüklenmiş manyetik alanlarının bir biriyle karşılıklı etkilerinin yatakların mıknatıslanma özelliklerine etkisi de ihmal edilmeyecek düzeyde olur. Bu nedenle, dolgu faktörü büyük olan yatakların mıknatıslanma özelliklerini tekil elemanların (örneğin, kürelerin) mıknatıslanması şeklinde değil, karmaşık mıknatıslanma dallarından oluşmuş manyetik devreler gibi incelemek gerekir.

Çok sayıda ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri de birçok araştırmacılar tarafından incelenmiştir [14-16,28-32]. Bu çalışmalar ise esasen dış manyetik alanın zayıf düzeylerinde ($H < 20-30$ kA/m) incelenmişler ve bazı sonuçlar da [28] pratik hesaplamalarda kullanılması zor olan teorik çalışmadan ibarettirler. Pratikte kullanılan dolgulu yataklarda ise dış manyetik alan şiddeti $H=200$ kA/m ve daha büyük olabilir. Bu durumlarda dolgu elemanlarının indüklediği yerel alanların bir biriyle karşılıklı etkisinin ve demagnetizasyon faktörünün yatağın mıknatıslanma özelliklerine etkisi ihmal olamayacak boyutlara ulaşır.

Dolgu faktörü büyük olan dolgulu yatakların ($\gamma=0.6$) dış manyetik alanın büyük değerlerindeki ($H=150-200$ kA/m) mıknatıslanma özellikleri daha detaylı şekilde [4,17, 22] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda dolgulu yataklarda “kanallarla mıknatıslanma” modeli bazında dolgulu yataklardaki yerel bölgelerin, mıknatıslanma zincirinin ve yatağın tümünün ortalama manyetik geçirgenliği belirlenmiştir. Esasen homojen ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yataklar için elde edilen bu sonuçlar farklı granüllerden oluşturulmuş mıknatıslanmış yataklar için de geçerli olabilmesi için bazı düzeltmelerin yapılması gerekmektedir.

Kısacası 150 yıldan fazla bir dönemi içeren gradyanlı alanların incelenmesinde literatürde sunulan sonuçlara göre bu tür alanların birçok önemli parametrelerinin; özellikle

dolgu faktörünün, matris elemanı geometrisinin ve dolgu malzemesinin manyetik özelliklerinin bu ortamların mıknatıslanma özelliklerine etkisinin yetersiz incelendiği ortaya çıkmaktadır.

Tez çalışmasında literatürde sunulan ve gradyanlı manyetik alanların mıknatıslanma özelliklerinin sonuçları değerlendirilerek farklı boyutlu ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri incelenmiştir. Farklı yöntemlerle (kutup şekillendirilmesi, geometrik değişimler, ferromanyetik granüller vb.) oluşturulmuş gradyanlı alanların alan gradyanı değerlendirilmiştir. Kanallarla mıknatıslanma modeli temel alınarak ferromanyetik kürelerden oluşmuş mıknatıslanma zincirinden gidilerek yatağın yerel bölgelerinin ve tümünün esas mıknatıslanma eğrisinin analitik ifadeleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yatağın porozitesi ve gözeneklerdeki ortamın manyetik özellikleri dikkate alınarak genişletilmiştir. İstatiksel veriler incelenerek farklı granüllerden (ferromanyetik metal talaşlarından) oluşturulmuş yataklar için de mıknatıslanma eğrilerinin düzeltilmiş yeni ifadeleri elde edilmiştir. Bu ifadelerin mühendislik hesaplamalarında kullanışlı olabilmesi için dolgu faktörünün (γ) mıknatıslanma eğrisine etkisi her iki granül ortamlar için de yalnız sabit katsayı ile farklılaşan benzer matematiksel ifadelere dönüştürülmüştür. Dolgu faktörü ile dolgu elemanlarının boyutları arasındaki yeni analitik ilişki elde edilmiştir. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların gözeneklerinde bulunan mikron boyutlu parçacıklara etkiyen kuvvetin özelliklerine değinilmiştir.

Tezin Amacı:

Aynı ve farklı boyutlu, homojen ve non-hojen ferromanyetik elemanlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin teorik ve deneysel incelenmesi, bu ortamların ortalama mıknatıslanma eğrisinin (B-H ilişkisi) elde edilmesi ve dolgu faktörünün mıknatıslanma eğrisine etkisinin belirlenmesidir.

Tezin Kapsamı:

1. Mıknatıslanmış ferromanyetik elemanlardan oluşturulmuş ortamların (efektif ortamların) yaklaşık son 150 yılı kapsayan mıknatıslanma özelliklerinin teorik ve deneysel incelenmesinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.
2. Günümüzde elektromanyetik aygıt ve düzeneklerde kullanılan gradyanlı manyetik alanların türlerinin belirlenmesi ve bu alanların gradyant değişimlerinin kıyaslanması.
3. Gradyanlı manyetik alanların son yıllarda farklı bilim dallarında (kimya, biyoloji, tıp, makine vb.) yeni uygulama alanlarının belirlenmesi.
4. Ferromanyetik elemanlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisinin teorik modelinin elde edilmesi.
5. Ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrilerinin deneysel incelemelerinin yapılması.
6. Hava aralığı, boyutları 3x6x9 cm olan Rapid BOXMAG UK manyetik sisteminin mıknatıslanma özelliklerinin incelenmesi (0-2T).
7. Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin belirlenmesi.
8. Ferromanyetik metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların incelenmesi.
9. Ferromanyetik tel kırıntılarında oluşturulmuş dolgulu yatakların incelenmesi.

Yöntem ve Uygulamalar:

1. Gradyantlı manyetik alanlara ait yapılan bilimsel çalışmaların özeti yaklaşık son 150 yılı kapsayan literatür çalışmalarından alınan atıfların istatistiksel incelenmesiyle değerlendirilerek, esas çalışmaların sonuçları düzenlenip tablo şeklinde verilmiştir.
2. Gradyantlı manyetik alanların manyetik alan şiddeti veya manyetik alan yoğunluğunun ifadeleri elektromanyetik alan teorisinin temellerine uygun olarak manyetik alanın skaler ve vektörel potansiyellerinin ifadelerinden gidilerek Laplace denkleminin diferansiyel şeklindeki biçimindeki çözümlerinden elde edilmiştir.
3. Çok sayılı ferromanyetik elemanlardan oluşturulmuş gradyanlı alanların hesaplanması manyetostatik potansiyel teorisinden farklı olarak çok dallı manyetik devrelerin hesaplanması yöntemine göre yapılmıştır. Yerel bölgelerdeki manyetik alan geçirgenliğinin belirlenmesi için literatürden belli olan A.V. Sandulyak'ın 'kanallarla mıknatıslanma modeli' kullanılmıştır.
4. Deneysel çalışmalarda manyetik olmayan paslanmaz malzemelerden yapılmış 3cm x 3cm x 10cm dikdörtgen kesitli gövdeden oluşturulmuş ortam ferromanyetik granüllerle doldurularak bu ortamların manyetik özellikleri incelenmiştir.
5. Dolgu malzemesi olarak 4-12 mm çap aralığında paslanmaz çelik bilyeler, ince boyutlu ferromanyetik teller, metal talaşları kullanılmıştır.
6. Dış manyetik alan yoğunluğu 0-2 T aralığında ayarlanmıştır.
7. Dış mıknatıslayıcı sistem olarak güçlü manyetik alan oluşturabilen manyetik seperatör sistemi (Rapid BOXMAG UK) kullanılmıştır. Bu aygıt 0-220V DC gerilim ve 0-20 A DC akım ayarlarının yapılmasına imkân vermektedir. Aygıtta çalışma hava aralığı 3x6x9cm dikdörtgen kesittir.
8. Deneylerde ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda enine ve boyuna yönlerde 1 mm hava boşlukları oluşturularak yerel noktaların manyetik alan yoğunlukları ölçülmüştür.
9. Ölçümler GM05 gaussmetresi ile yapılmıştır. Gaussmetrenin Hall propları hava aralığında ölçüm yapılan noktada ahşap askı ile sabitlenerek ölçümler yapılmıştır.

10. Mıknatıslanmış dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğunun ortalama değeri manyetik alanda dolgulu yataklar olmadığı durumdaki değerlerle kıyaslanmıştır.

Tezin Düzeni:

Tez üç esas bölümden giriş ve kaynaklar kısmından oluşmakla kullanılan simgelerin listesini tablo ve grafiklerin listesini içermekle toplam sayfadan oluşmuştur.

Giriş kısmında gradyanlı manyetik alanların teknolojik aygıt ve düzeneklerdeki kullanım amacı ve özellikleri verilmiştir. Yaklaşık olarak son birbuçuk asır sürecinde bu konuda yapılan teorik ve deneysel çalışmaların özetleri kısaca olarak sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre gradyanlı manyetik alanların teorisinde ve deneysel çalışmalarında bulunan yetersiz olarak incelenmiş konular ve literatürde sunulan eksiklikler saptanmıştır.

Bu sonuçlardan gidilerek tezin amacı ve kapsamı belirlenmiştir.

Birinci bölümde çeşitli yöntemlerle oluşturulmuş gradyanlı manyetik alanlar kısaca değerlendirilmiştir. Tekil ferromanyetik küre, silindir, çubuğun oluşturduğu gradyanlı manyetik alanların esas teorik formülleri verilmiştir. Eğrisel geometriye sahip kutupların açık ve kapalı birbirini seri izleyen kutupların oluşturduğu gradyanlı alanların ve selonoidin oluşturduğu gradyanlı alanın özelliklerine ve teorik ifadelerine değinilmiştir.

İkinci bölümde çok sayılı ferromanyetik elemanların mıknatıslanmasından dolayı oluşan Gradyanlı manyetik alanların teorik incelenmesi yapılmıştır. İlk kez olarak farklı boyutlara sahip olan ferromanyetik elemanların (bilyelerin) karışımından oluşturulmuş dolgulu yatakların gözeneklerinde oluşan Gradyanlı manyetik alanın B-H ilişkisinin genelleştirilmiş teorik ifadeleri elde edilmiştir. Bu ortamların mıknatıslanma özelliğinin ferromanyetik elemanların manyetik geçirgenliğine ve ortamın dolgu faktörüne bağımlı olarak değişimlerinin düzeltilmiş yeni ifadeleri elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde yüksek Gradyanlı manyetik alanların çeşitli bilim dallarında pratik uygulamalarda kullanıldığı yerlere değinilmiştir. Kimya, makine, biyoloji, maden ve tıp alanlarında çağdaş teknolojik uygulamalarda Gradyanlı manyetik alanların etkinliği vurgulanmıştır. Manyetik filtrasyon ve seperasyon, manyetik ilaç hedeflendirme, manyetik hipertermia, manyetik hücre ayrımı, nano teknoloji, manyetoforez, manyetik mikro sıvı teknolojisi gibi yeni bilim dallarında Gradyanlı manyetik alanların etkinliği verilmiştir.

Dördüncü bölümde ikinci bölümdeki sonuçlardan yola çıkarak gradyanlı manyetik alanların mıknatıslanma özelliklerinin önemli problemlerinin çözülmesi ve elde edilen

teorik sonuçların geçerliliğinin ispatlanması için yapılan deneysel sonuçlar sunulmuştur. Çeşitli boyutlarda ve çeşitli geometriye sahip olan manyetik malzemelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları uygun tablo ve grafiklerle kıyaslanmıştır ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tez çalışmalarından elde edilen sonuçlar bir uluslar arası SCI indexli dergide (Journal of Dispersion Science and Technology,2009), bir uluslar arası konferansta (TPE 2008,Romanya) ve bir ulusal sempozyumda (ELECO 2008,Bursa,Türkiye) sunulmuştur.

Ayrıca tez çalışmasında yapılan deneyler İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2008/52 nolu proje ile desteklenmiştir.

2 KURAMSAL VE TEMEL UYGULAMALAR

Gradyantlı Manyetik Alanların Oluşturulması ve Özellikleri

Non homojen manyetik alana sahip olan aygıt ve düzeneklerde manyetik alan gradyanlarının yüksek olması bu sistemlerin performanslarının da yüksek olmasını sağlar. Manyetik alanların non homojen özelliği aşağıdaki yöntemlerle elde edilebilir:

- a. Manyetik kutupların şekillendirilmesiyle oluşan non homojen manyetik alanlar,
- b. Bobinlerin geometrisiyle oluşan non homojen manyetik alanlar,
- c. Homojen manyetik alana ferromanyetik malzemeler (tel, çubuk, küre, talaşlar, vb) yerleştirmek suretiyle oluşan non homojen manyetik alanlar.

İlk iki yöntemle oluşturulan manyetik alan gradyanti sınırlı olduğu halde üçüncü yöntemle elde edilen alan gradyanti çok büyük değerlere ulaşabilir ve literatürde bu türlü alanlar yüksek gradyantlı manyetik alan (YGMA) adını alırlar.

Gradyantlı manyetik alanların özelliklerini kısaca olarak aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz. Kolaylık için tezin bu kısmında tekil elemanların dış manyetik alanda oluşturduğu gradyantlı alanlar ele alınacaktır. Mıknatıslanmış çok sayıda ferromanyetik elemanların oluşturduğu YGMA ise tezin bir sonraki kısmında verilecektir.

Genelde manyetik alanların belirlenmesi için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemleri sınıflandırmış olursak aşağıdaki yöntemlerin baskın oldukları görülmektedir.

- a. Analitik veya nümerik yöntem,
- b. Grafiksel veya çizim yöntem,
- c. Deneysel yöntem

Analitik yöntemlerde Poisson denklemlerinin çözümü (akım bulunan bölgelerde) Laplace denkleminin çözümü (akım bulunmayan bölgelerde), ayna yansıması modeli vb. kullanılır. Küresel ve Silindiriksel simetri yer alan manyetik alan problemlerinin çözümünde ise tam akım yasası (Ampere yasası) kullanılır.

Mıknatıslanmış ortamların yer aldığı problemlerin çözümünde manyetik skaler (V_m) ve manyetik vektör ($\vec{A}$) potansiyelleri kullanılır. Eğer serbest akımlar, alanın incelenen bölgesinin dışında ise o halde manyetik alan problemlerinin çözümünde skaler manyetik potansiyel (V_m) teorisi kullanılması daha avantajlıdır. Zira bu durumda sınır koşulları da skaler potansiyel ile ifade edilir.

Sürekli ferromanyetik ortamlardaki manyetik alanları hesaplamak için manyetik alan denklemleri iletken ortamlar için sabit akım denklemlerine benzer olarak (Ohm ve Kirşof yasaları) çözülür. Fakat bu yöntem yalnız eşit sınır koşulları için geçerlidir. Oysa bu koşulların her zaman sağlanması imkânsızdır.

Eğer manyetik alanın incelendiği bölgelerde ferromanyetik malzemeler bulunmuş olursa o halde alanın hesaplanması zorlaşır. Zira bu durumda manyetik geçirgenliğin (μ) alan şiddetine (H) bağımlılığı non lineerdir. Eğer $\mu(H)$ ilişkisi belli ise o halde problemin çözümü seri yaklaşım yöntemiyle çözülebilir.

Manyetik alan problemlerinin matematiksel ifadeleri yeterince zor ve karmaşık olur ve bu nedenle alan problemlerinin analitik yöntemlerle çözümleri bu problemlerin sınırlı bir kesimini kapsamaktadır.

Manyetik alan problemlerinin analitik çözümleri zorlaştığında bu problemler grafiksel olarak çözülürler. Bu yöntem esasen iki boyutlu düzlemsel alanların çözümlerinde geçerli olur. Bilgisayar destekli nümerik çözümler daha geniş imkânlarla sahip olmasına rağmen; bu yöntemlerde parametrelerin arasındaki ilişkiler net olmayabilir ve bu çok sayıda nümerik hesaplamaların gereksinimine neden olur.

Daha zor ve karmaşık manyetik alan problemlerinin çözümlerinde, özellikle uzay koordinatlarındaki çözümlerde manyetik alanın deneysel ölçümlerle çözümleri daha iyi sonuçlar vermektedir.

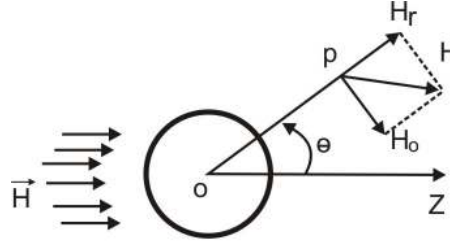
Gradyantlı manyetik alanların çözümlerinde incelenen bölgelerde esasen elektrik akımı ve manyetik alan kaynağı bulunmadığına göre Laplace denkleminin çözümlerinden yararlanacağız.

$$\nabla^2 V_m = 0 \quad (2.1)$$

Öncelikle tekil ferromanyetik elemanların dış manyetik alanda oluşturduğu gradyanlı alanlar belirleyelim. Sonra bu elemanların kümesinin dış manyetik alanın etkisiyle oluşturdukları yüksek gradyanlı alanlar belirlenecektir.

2.1. Mıknatıslanmış Tekil Ferromanyetik Kürenin Oluşturduğu Gradyanlı Manyetik Alan

Yarıçapı a olan manyetik kürenin H manyetik alan şiddetine sahip bir olan homojen manyetik alanda yerleştiğini varsayalım, (Şekil 1.1)



Şekil 1-1

Şekil 2.1 Dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış kürenin oluşturduğu gradyanlı alan.

Mıknatıslanmış bu kürenin dışında oluşturduğu gradyanlı manyetik alanı belirleyelim. Küresel koordinat sistemini kullanalım. Kürenin merkezi orijinde olmakla z eksenine dış manyetik alan şiddeti vektörü $\vec{H}$ yönündedir. $\vec{H}$ yönündeki mıknatıslanma M' dir. Kürenin dışındaki ortamın nonmanyetik ortam (örneğin boşluk) olduğu varsayılmaktadır. Mıknatıslanmış kürenin dışındaki manyetik alan V_m manyetik potansiyele sahiptir. Laplace denkleminin göre

$$\nabla^2 V_m = 0$$

Laplace denkleminin mıknatıslanmış kürenin içinde ($r < a$) ve dışındaki genel çözümleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{a) } r < a \quad \varphi_1 &= c_1 r \cos \theta \\ \text{b) } r > a \quad \varphi_2 &= \frac{c_2}{r^2} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada C_1 ve C_2 integral sabitleri olup, kürenin yüzeyindeki sınır koşullarından belirlenirler. Küre yüzeyindeki sınır koşulları aşağıdaki gibi belirlenir [33].

$$H_{\phi 2} - H_{\phi 1} = M \sin \phi \quad (2.3)$$

veya

$$\left(-\frac{\partial V_2}{r \partial \phi} \right)_{r=3a} - \left(\frac{\partial V_1}{r \partial \phi} \right)_{r=2a} = \frac{C_2}{a^3} \sin \phi - C_1 \sin \phi = M \sin \phi \quad (2.4)$$

Manyetik alanın normal bileşenleri için ise

$$H_{n_2} = H_{n_1} \quad (2.5)$$

olur, zira $(\mu_1 = \mu_2 = \mu_0)$ Başka deyişle

$$-\left(\frac{\partial V_1}{\partial r} \right)_{r=a} = -\left(\frac{\partial V_2}{\partial r} \right)_{r=a} = 2 \frac{C_2}{r^3} \cos \phi = 2 \frac{C_2}{r^3} \cos \phi \quad r=a \quad A_3 = r_3 \quad (2.6)$$

Dk. 4 ve Dk.6'dan integral sabitleri için elde ederiz ki,

$$C_1 = \frac{-2C_2}{a^3} \text{ ve } \frac{C_2}{a^3} - C_1 = M \quad (2.7)$$

Buradan:

$$C_1 = \frac{2}{3}M \text{ ve } C_2 = \frac{1}{3}a^3M \quad (2.8)$$

olur. Sonuç olarak mıknatıslanmış kürenin içinde ve dışındaki manyetik potansiyel aşağıdaki gibi olur.

$$V_1 = -\frac{1}{3}Mr \cos \phi \rightarrow r < a \quad (2.9)$$

$$V_2 = -\frac{1}{3}M \frac{a^3}{r^3} \cos \phi \rightarrow r > a \quad (2.10)$$

Kürenin dışındaki manyetik alan şiddetinin bileşenleri ise

$$H_{2r} = -\frac{\partial V_2}{\partial r} = \frac{2}{3}M \frac{1}{r_a^3} \cos \phi \quad (2.11)$$

$$H_{2\phi} = \frac{1}{3} \frac{M}{r_a^3} \sin \phi \quad (2.12)$$

Burada $r_a = \frac{r}{a}$ normalleştirilmiş koordinattır. Dış manyetik alan şiddetinin bileşenleri ise

$$H_{or} = H \cos \phi \quad (2.13)$$

$$H_{o\phi} = -H \sin \phi \quad (2.14)$$

oluyor.

Böylece mıknatıslanmış kürenin dışındaki manyetik alanın son ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$h_r = \left(H + \frac{2}{3} \frac{M}{r_a^3} \right) \cos \phi \quad (2.15)$$

$$h_\phi = - \left(H - \frac{1}{3} \frac{M}{r_a^3} \right) \sin \phi \quad (2.16)$$

Manyetik alan şiddetinin genliği ise

$$h = \sqrt{h_r^2 + h_\phi^2} \quad (2.17)$$

olarak belirlenir. Bu ifadeden görüldüğü gibi mıknatıslanmış kürenin etrafında oluşan manyetik alan gradyanlı bir alandır, $h(r, \phi)$ ve küre yüzeyinden uzaklaştıkça alan şiddeti hızla azalır.

2.2. Tekil Ferromanyetik Telin Etrafında Oluşan Gradyanlı Manyetik Alan

Mıknatıslanmış tekil ferromanyetik telin etrafında oluşan gradyanlı alanın polar koordinatlardaki bileşikleri (Şekil 1'e benzer olarak) aşağıdaki şekilde belirlenir [3,24],

$$h_r = H \left(1 + k \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \phi \quad (2.18)$$

$$h_\phi = -H \cdot \left(1 - k \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \phi$$

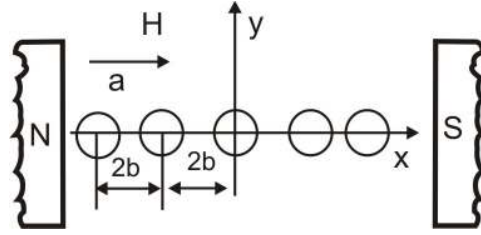
Eğer bu ifadede $H < H_s$ olursa $k=1$, $H > H_s$ olursa $K=M_s/2H$ olur. Burada H_s ve M_s sırasıyla manyetik alan şiddetinin ve tel malzemesinin doyma mıknatıslanmasıdır.

2.3. Tekil Ferromanyetik Çubuğun Etrafında Oluşan Gradyanlı Manyetik Alan

Ferromanyetik tellerden farklı olarak belli bir yarıçapa sahip olan ferromanyetik çubukların etrafında oluşan manyetik alan ölçülebilir ve elde edilen deneysel sonuçlar teorik verilerle kıyaslanabilir. Bu amaçla referans [20]'de sunulan iki ve sonlu sayıda (dört) paralel ferromanyetik çubuk etrafında oluşan gradyanlı alanın belirlenmesi yöntemini

incelemekte yarar vardır.

Birbirine z yönünde paralel yönelmiş sonsuz uzun sonsuz manyetik geçirgenliğe (μ) sahip olan a yarıçaplı ferromanyetik çubukların dış homojen manyetik alanda (H) bulunduğunu varsayalım (Şekil 1.2)



Şekil 2.2 Paralel ferromanyetik silindirik çubukların dış homojen alandaki durumu. Polar koordinatlarda iki paralel ferromanyetik çubuk arasındaki manyetik potansiyel yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazılır.

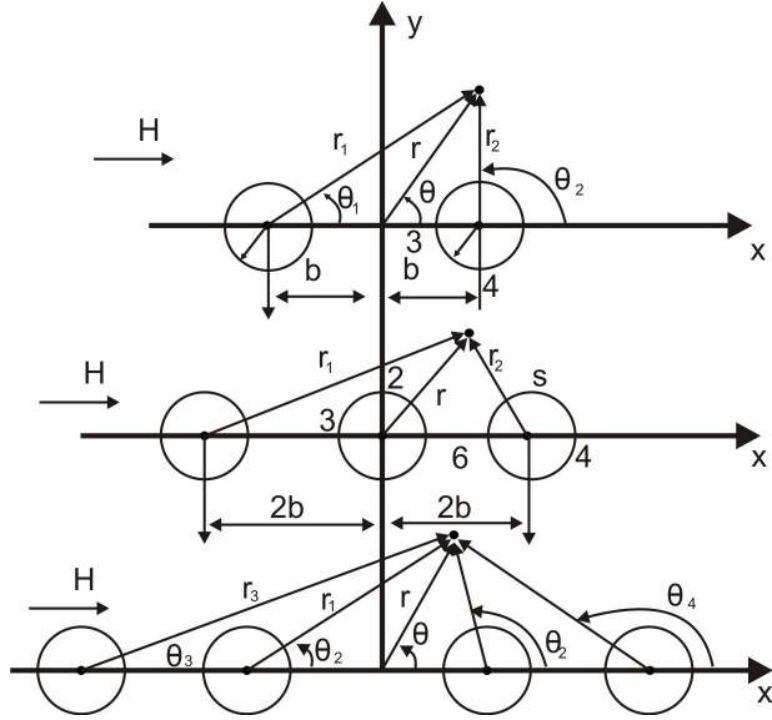
$$\varphi = -Hr \cos \theta + \frac{A_1 \cos \theta}{r_1} + \frac{A_2 \cos \theta}{r_2} \quad (2.19)$$

A_1 ve A_2 integral sabitleridir. İntegral sabitleri aşağıdaki sınır koşullarından belirlenebilir.

i. φ potansiyeli y eksenini boyunca sabittir (sıfırdır).

ii. Ferromanyetik çubukların yüzeyleri eş potansiyeldir, (φ sabittir) $\varphi|_{x=0} = 0$

O halde $\theta = \frac{\pi}{2}$, $r_1 = r_2$ ve $\cos \theta_1 = -\cos \theta_2$ oluyor. Yani $A = A_1 = A_2$



Şekil 2.3 Silindirik ferromanyetik çubuklar dış manyetik alanda a) iki çubuk, b) üç çubuk, c) dört çubuk.

Bu durumda manyetik potansiyelin kartezyen koordinatlarındaki ifadesi şu şekilde olur,

$$\phi = -Hx + A \left[\frac{x+b}{(x+b)^2 + y^2} + \frac{x-b}{(x-b)^2 + y^2} \right] \quad (2.20)$$

İkinci sınır koşuluna göre ($\mu/\mu_0 \rightarrow \infty$) manyetik alan şiddetinin teğet bileşeni çubuğun yüzeyinde sıfıra eşit olacaktır. O halde $x=b$, $y=a$ noktaları için (sağ bölgedeki çubuk) manyetik alanın teğetsel bileşeni

$$-\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=b, y=a} = H_x = H - A \left[\frac{a^2 - 4b^2}{(a^2 + 4b^2)^2} + \frac{1}{a^2} \right] = 0 \quad (2.21)$$

olur.

Buradan

$$A = \frac{a^2 H (a^2 + 4b^2)^2}{2a^4 + 4a^2 b^2 + 16b^4} = a^2 H \lambda \quad (2.22)$$

Bu koşullarda çubuk üzerindeki bütün 4 noktada (1,2,3,4) manyetik alanın teğetsel bileşeni sıfırdır. Görüldüğü gibi manyetik alan boyutsuz λ sabiti ile belirlenir. λ parametresi a/b orantısıyla bağıntılı olup, farklı çubuk sayıları için farklı olur. Yukarıdaki yaklaşıma benzer olarak şekil 1.3b ve 1.3c den üç ve dört çubuk içinde potansiyellerin ifadelerini yazabiliriz.

 ferromanyetik çubuk için

$$\phi = -Hx + \frac{a^2 H \lambda_1 x}{x^2 + y^2} + a^2 H \lambda_2 \left[\frac{x + 2b}{(x + 2b)^2 + y^2} + \frac{x - 2b}{(x - 2b)^2 + y^2} \right] \quad (2.23)$$

Dört ferromanyetik çubuk için

$$\phi = -Hx + a^2 H \lambda_3 \left[\frac{x + b}{(x + b)^2 + y^2} + \frac{x - b}{(x - b)^2 + y^2} \right] + a^2 H \lambda_4 \left[\frac{x + 3b}{(x + 3b)^2 + y^2} + \frac{x - 3b}{(x - 3b)^2 + y^2} \right] \quad (2.24)$$

Burada $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ve λ_4 her biri (a/b) orantısının fonksiyonu olan sabitlerdir. Bu durumda sonlu sayıda ferromanyetik çubukların arasındaki manyetik alan şiddeti;

$$\vec{h} = -\nabla \phi \quad (2.25)$$

olarak belirlenir.

O halde iki çubuk için x=0 düzleminde, yani y eksenı boyunca manyetik alan şiddeti

$$h_x = H \left[1 + \frac{2a^2 \lambda (b^2 - y^2)}{(b^2 + y^2)^2} \right] \quad (2.26)$$

 manyetik çubuk için

$$h_x = H \left\{ 1 + \frac{a^2 \lambda_1 (b^2 - y^2)}{(b^2 + y^2)^2} + a^2 \lambda \left[\frac{9b^2 - y^2}{(9b^2 + y^2)^2} + \frac{b^2 - y^2}{(b^2 + y^2)^2} \right] \right\} \quad (2.27)$$

Dört ferromanyetik çubuk için

$$h_x = H \left[1 + \frac{2a^2 \lambda_3 (b^2 - y^2)}{(b^2 + y^2)^2} + \frac{2a^2 \lambda_4 (9b^2 - y^2)}{(9b^2 + y^2)^2} \right] \quad (2.28)$$

Dk.(26-28)'deki gibi ilişkilere göre manyetik alanın değişimleri şekil 1.4'de gösterilmiştir. şekil 1.5'te ise çubukların indüklediği manyetik alanın dış manyetik alana orantısının çubukların sayısına göre değişiminin orijindeki değeri ($x = 0, y = 0$) gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi ferromanyetik çubuk sayısı 6,7 çubuktan fazla olduğunda

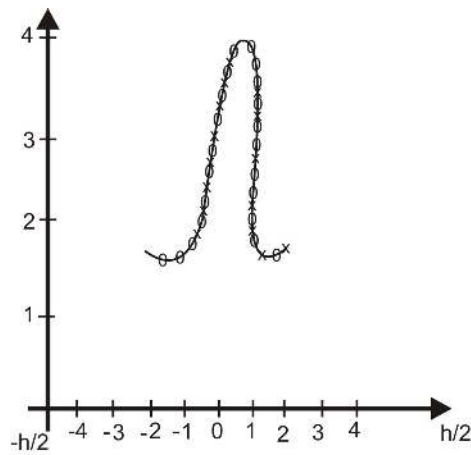
indüklenen manyetik alandaki yaklaşık olarak sabit kalır.

Bu değer referans dış manyetik alan şiddetinin referans değerinden 4-4,5 kez fazla oluyor. Deneylerin yapıldığı düzlemde kullanılan hava aralığı $d=2\text{cm}$ 'lik boşlukta $H=4\text{ kOe}$ manyetik alan şiddeti oluşturmaya imkan sağlamıştır. İki için ölçüm sonuçlarının düzeltilmesi.

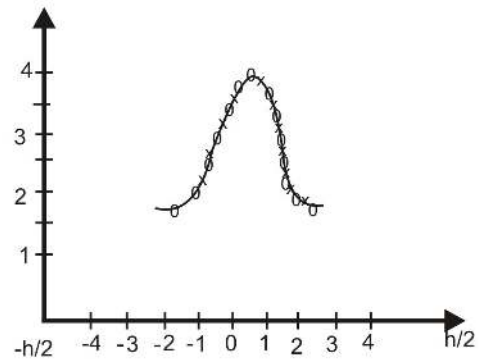
$$h_{x(corr)} = h_{x(ölçüm)} - \frac{HD^2}{24} 12a^2 \lambda \left[\frac{b^4 - 6b^2y^2 + y^4}{(b^2 + y^2)^4} \right]$$

denklemleri ile yapılmıştır.

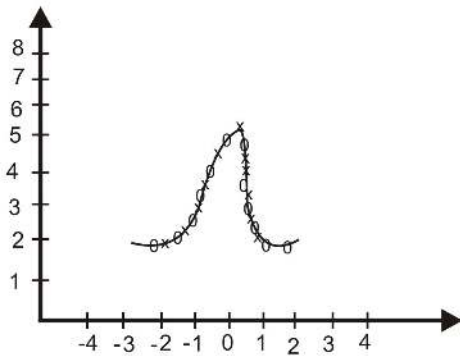
Örneğin iki çubuk için $a=5.6\text{ cm}$, $b=0.8\text{ cm}$, $D^2=3\text{ mm}^2$ ve $h_x=3.75\text{ kOe}$ için $y=0$ düzleminde $h_{x(corr)}=3.75-0.021\text{ kOe}$ olur, yani prob ölçülerine göre oluşan hata %0.5 civarlarındadır.



a)



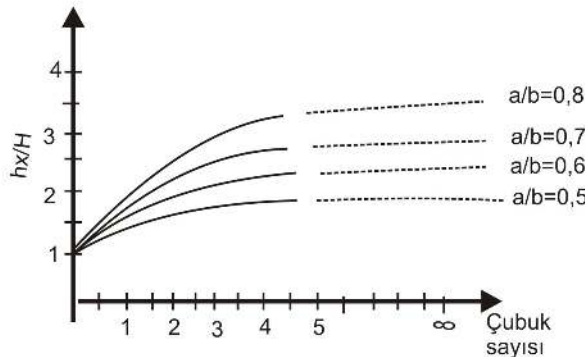
b)



c)

Şekil 2.4 Ferromanyetik çubukların dış manyetik alanlarda mıknatıslanmasının teorik ve deneysel sonuçları:

- a) İki çubuk için ($d=6.5$ cm, $a/b=0.7$, $H=1.72$ kOe)
- b) Üç çubuk için ($d=4.8$ cm, $a/b=0.7$, $H=2.3$ kOe)
- c) Dört çubuk için x-deneysel sonuçlar, o- teorik hesaplamalar.($d=6.5$ cm, $a/b=0.7$, $H=1.72$ kOe)



Şekil 2.5 Manyetik alanın maksimum değerinin a/b oranı ile değişimi

2.4 Mıknatıslanmış ve Elipsoid Kesitli Ferromanyetik Çubuğun Oluşturduğu Gradyanlı Manyetik Alan

Dış manyetik alanda M mıknatıslanmaya sahip olan sonsuz ve elipsoid kesitli ferro-manyetik çubuğun skaler potansiyeli aşağıdaki gibi belirlenir. [34]

$$\phi_m = \frac{Mab}{\sqrt{a^2 - b^2}} \exp(-\xi) \cos(\alpha - \beta) \quad \xi \geq \xi_o \quad (2.29)$$

Burada a ve b ferromanyetik çubuğun büyük ve küçük yarıçapları, η ve η silindiriksel koordinatlardaki r ve ϕ koordinatlarına benzer eliptik koordinatlardır. (Şekil 1.6). β – elipsin büyük yarıçapıyla $\vec{M}$ vektör arasındaki açıdır. ξ veya η koordinatlarının sabit oldukları eğriler sırasıyla konfokal elipsler ve hiperbolayı ifade ederler.

$$\xi_o = \tanh^{-1}(a/b)$$

Şekil 2’de ki mıknatıslanmış elipsin $+x, +y, -x$ ve $-y$ kartezyen koordinatlarındaki eksenlerle

$$x = f \cosh \xi \cos \eta$$

burada $f = \sqrt{a^2 - b^2}$

$$\overline{H} = \frac{Mab}{a^2 - b^2} \exp(-\xi) \left[\frac{\cos(\eta - \beta) \overline{a_\xi} + \sin(\eta - \beta) \overline{a_\xi \xi}}{\sqrt{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta}} \right] \quad (2.31)$$
$$\frac{-}{a_\xi} = \frac{f}{r} \left[\frac{\sinh \xi \cosh \xi \bar{a}_r + \sin \eta \cos \eta \bar{a}_\varphi}{\sqrt{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta}} \right] \quad (2.32)$$

$$\bar{a}_y = \frac{f}{r} \left[\frac{-\sin \eta \cos \eta \bar{a}_r \sinh \xi \cosh \xi \bar{a}_\phi}{\sqrt{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta}} \right] \quad (2.33)$$

Sınır değerlerinde elipsin eksantrisitesi (kaçıklılığı) $e = \frac{f}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ sıfıra yaklaştığında

$\exp(-\xi)/f$ terimi $\bar{a}_\xi \rightarrow \bar{a}_r$ ve $\bar{a}_\eta \rightarrow \bar{a}_\phi$ olmakla sonlu bir sayı olarak kalır. Bu durumda $\beta = 0$ olmakla (1*) ve (3*) tekil dairesel kesitli silindirin dış manyetik alanda mıknatıslanmasını ifade eder.

Bu sonuçlar dikkate alındığında mıknatıslanmış eliptik kesitli çubuğun oluşturduğu gradyantlı alanda küçük manyetik parçacığa etkiyen kuvvet aşağıdaki gibi yazılır: (Doyma mıknatıslanması olmadığı durumunda.)

$$\begin{aligned} \bar{F}_m = & -\frac{\mu_o \beta M^2 a^2 b^2}{(a^2 - b^2)^{5/2}} \frac{\exp(-2\xi)}{[\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta]^{3/2}} \\ & \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\sinh \xi \cosh \xi \cos^2(\eta - \beta)}{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta} + \frac{\sin^2 \eta \sin[2(\eta - \beta)]}{4(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} \right] \bar{a}_\xi \right. \\ & \left. + \left[\frac{\sinh \xi \cosh \xi \sin[2(\eta - \beta)]}{1(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} + \frac{\sin^2(\eta - \beta) \sin 2\eta}{2(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} \right] \bar{a}_\eta \right\} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Doyma mıknatıslanmasında ise bu parçacıklara etkiyen manyetik kuvvet aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{msat} = & -\frac{\mu_o m_s M a b}{(a^2 - b^2)^{3/2}} \frac{\exp(-\xi)}{[\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta]} \\ & \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\sinh \xi \cosh \xi \cos^2(\eta - \beta)}{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta} + \frac{\sin^2 \eta \sin[2(\eta - \beta)]}{4(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} \right] \bar{a}_\xi \right. \\ & \left. + \left[\frac{\sinh \xi \cosh \xi \sin[2(\eta - \beta)]}{2(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} + \frac{\sin(\eta - \beta) \sin 2\eta}{2(\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta)} \right] \bar{a}_\eta \right\} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Bu ifadelerdeki parantezdeki kesir ifadeler uzaklık arttıkça hızla azalırlar ve bütün bu dört terim eksantricity (kaçıklılık) durumunu belirlemekte olup, çok küçük değerlere sahiptirler. Geriye kalan terim ise $\beta=0$ olmakla mıknatıslanmış dairesel kesitli silindirin ifadeleri ile aynı olur.

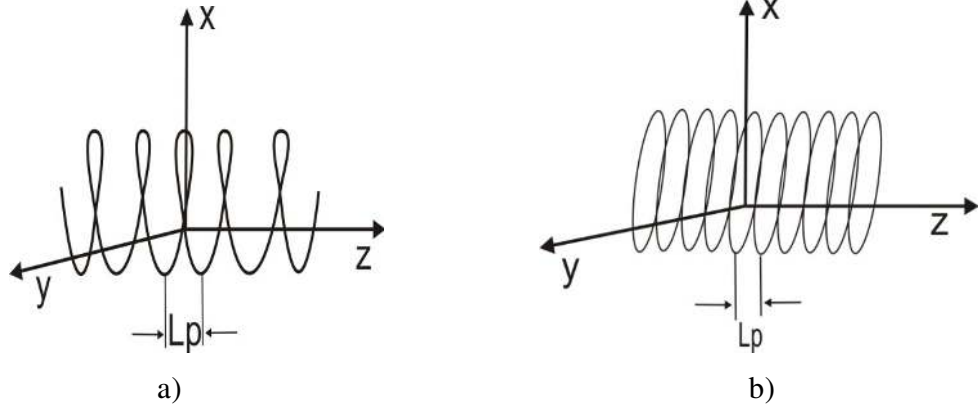
2.5 Sonsuz Uzun Solenoidin Gradyanlı Manyetik Alanı

Genelde I akımı taşıyan n tane sarım içeren sonsuz uzun ideal solenoidin içerisindeki simetri üzerindeki ve simetri eksenindeki manyetik alan yoğunluğu $B_z = \mu_0 n I$ olarak belirlenir. Bu değeri belirlemede solenoidin içerisindeki $\vec{B}$ manyetik alan yoğunluğunun diğer bileşenleri (B_r, B_ϕ) belirlenmemektedir. Fakat birçok durumlarda manyetik alanın her üç bileşeni de etken oluyor. Bu nedenle solenoidin içinde manyetik alan yoğunluğunun bütün bileşenlerini belirlemek gerekir. Simetrik dairesel sargılardan oluşturulmuş solenoidin içerisindeki aşağıdaki şekilde belirleyebiliriz [35].

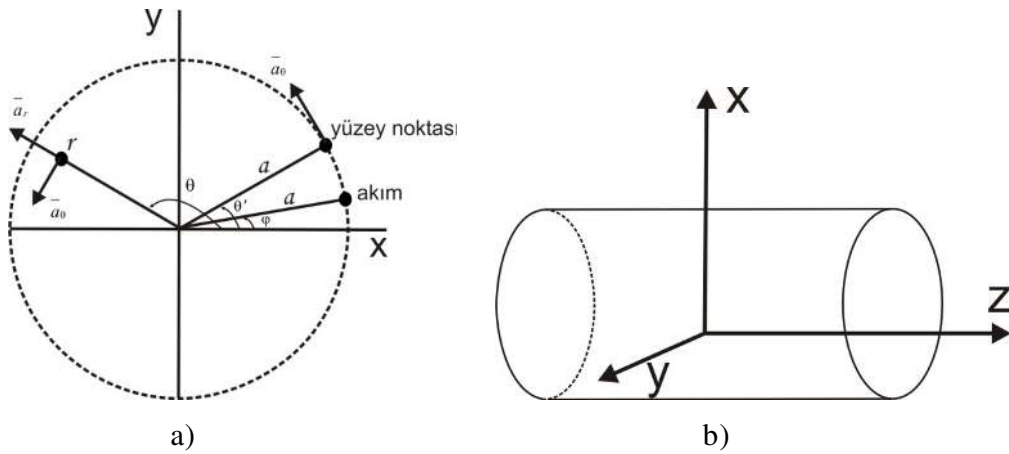
Bu amaçla solenoidi oluşturan sargıların iki şekli ele alınır.

a) Spiral Şekli (Sarmal) Sargılı Solenoid;

b) Periyodik (devri) Yerleştirilmiş Çevresel Sargıların Oluşturduğu Solenoid;



Şekil 2.7 Spiral (sarmal) şekilli (a) ve çevresel periyodik sarımlı (b) solenoidin prensip şeması.



Şekil 2.8 z=0 düzleminde yerleştirilmiş tekil sarmal akım taşıyan iletkenin (a) ve simetri eksenine z boyunca seçilmiş silindirik (b) durumu.

Şekil 2.8 de z=0'a yerleştirilmiş basit(tekil) spiral sarmal akım telinin ve simetri eksenine z ekseninde yerleştirilmiş silindirik gösterilmiştir.

Solenoidin içinde (r, ϕ, z) noktasında manyetik alan vektör potansiyeli a yarıçaplı silindiriksel yüzeyde yayılan yüzey akımına göre (Şekil 2.8a) kolaylıkla belirlenebilir:

$$\bar{A}(r, \phi, z) = \frac{\mu_o}{4\pi} \int \frac{\bar{j} ds}{|\bar{r} - \bar{r}'|} = \frac{\mu_o}{4\pi} \int \frac{j(\phi', z') a d\phi' dz'}{|\bar{r} - \bar{r}'|}$$

Manyetik alanın incelenen noktasında silindirik koordinatların birim vektörleri ile yüzeydeki noktalardaki birim vektörler arasındaki ilişkiler ise aşağıdaki gibidir:

$$\bar{a}_{z'} = \bar{a}_z$$

$$\bar{a}_\phi = \sin(\phi - \phi') \bar{a}_r + \cos(\phi - \phi') \bar{a}_\phi$$

Öte yandan, $\bar{J}(\phi', z')$ a yarıçaplı silindiriksel yüzey üzerindeki yüzey akım yoğunluğudur. (Şekil 1.8a ve 1.8b)

2.5.1. Spiral (sarmal) şekilli sargı

Spiral şekilli sargılarda yüzey akım yoğunluğu aşağıdaki şekilde olur:

$$\bar{J}(\phi - z') = J_{z'}(\phi, z') \bar{a}_{z'} + J_{\phi'}(\phi, z') \bar{a}_{\phi'} \quad (2.36)$$

Yüzeyde $(r = a, \phi = \theta)$ ve z=0 düzleminde yerleşmiş ve $L_p = \frac{2\pi}{k}$ sarım yoğunluğu olan spiral şekilli akımın oluşturduğu yüzeyde akım yoğunluğu formal olarak aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$\begin{aligned} J_{z'}(\phi', z') &= \frac{I}{a} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\phi' - \theta - kz' - mkL_p) = \frac{I}{a} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\phi' - \theta - kz' - 2\pi m) \\ &= \frac{I}{2\pi a} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos[n(\phi' - \theta - kz')] \right\} \\ J_{\phi'}(\phi', z') &= I \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(z' - \frac{\phi' - \theta}{k} mL_p\right) = Ik \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\phi' - \theta - kz' - 2\pi m) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$= \frac{Ik}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos[n(\varphi' - \theta - kz')] \right\} \quad (2.38)$$

Burada k-sarım parametresi olup, takım bölgesi aşağıdaki gibidir:

$$-\infty < z' < \infty \quad \text{ve} \quad 0 \leq \phi' < 2\pi$$

Bu yaklaşım spirial akımı için aşağıdaki koşulların oluşmasını sağlar:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} J_{z'}(\varphi', z') a d\varphi' &= I \\ \int_{-L_p/2}^{L_p/2} J_{\varphi'}(\varphi', z') d\varphi' &= I \end{aligned} \quad -\frac{L_p}{2} \leq z' < \frac{L_p}{2} \quad \text{ve} \quad 0 \leq \phi' < 2\pi \quad (2.39)$$

Bu durumda manyetik alan vektör potansiyelinin (r, ϕ, z) bileşenleri aşağıdaki gibi oluyor:

$r \leq 0$ için

$$A_r(r, \phi, z) = -\frac{\mu_o I}{2\pi} k \alpha \sum_{n=1}^{\infty} \{k_{n+1}(nk\alpha)I_{n+1}(nkr) - K_{n-1}(nk\alpha)I_{n-1}(nkr)\} \sin[n(\phi - \theta - kz)] \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} A_{\phi}(r, \phi, z) &= -\frac{\mu_o I}{4\pi} kr + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} \{K_{n+1}(nk\alpha)I_{n+1}(nkr) + K_{n-1}(nka)I_{n-1}(nkr)\} \\ &\cos[n(\phi - \theta - kz)] \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$A_z(r, \phi, z) = \frac{\mu_o I}{2\pi} \ell u a + \frac{\mu_o I}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} K_n(nka)I_n(nkr) \cos[n(\phi - \theta - kz)] \quad (2.42)$$

Dış $r \geq \alpha$ bölgesi için bu bileşenler şu şekilde yazılır.

$$A_r(r, \phi, z) = -\frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} \{I_{n+1}(nk\alpha)K_{n+1}(nkr) - I_{n-1}(nka)K_{n-1}(nkr)\} \quad (2.43)$$

$$A_{\phi}(r, \phi, z) = \frac{\mu_o I}{4\pi} k \frac{a^2}{r} + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} \{I_{n+1}(nka)K_{n+1}(nkr) + I_{n-1}(nka)K_{n-1}(nkr)\} \quad (2.44)$$

$$A_z(r, \phi, z) = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln r + \frac{\mu_o I}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \{I_n(nka)K_n(nkr) \cos[n(\phi - \theta - kz)]\} \quad (2.45)$$

Burada $I_n(nkr)$ ve $K_n(nkr)$ modifiye edilmiş Bessel fonksiyonlarıdır.

Sınır değerleri koşullarında vektör potansiyellerinin bileşenlerinin ifadeleri aşağıdaki gibi oluyor:

$k \rightarrow 0 (L_p \rightarrow \infty)$ oluşumunda Bessel fonksiyonlarının yaklaşık değerleri dikkate alındığında ($r < a$) ve ($r > a$) bölgeleri için,

$$\begin{aligned} A_r(r, \varphi, z) &\approx 0 \\ A_\varphi(r, \varphi, z) &\approx 0 \\ A_z(r, \varphi, z) &\approx -\frac{\mu_o I}{2\pi} \ln r_{12} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Burada $r_{12} : z = 0$ düzlemindeki yüzey üzerindeki noktasıyla (a, θ) alan içindeki nokta (r, ϕ) arasındaki uzaklıktır. (Şekil 2.) sınır koşullarında $k \rightarrow 0 (L_p \rightarrow \infty)$ bu ifade sonsuz düz telin etrafındaki manyetik alan vektör potansiyeline eşit oluyor.

Benzer şekilde $k \rightarrow \infty (L_p \rightarrow 0)$ koşullarında vektör manyetik potansiyelin bileşenleri aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned} A_r(r, \varphi, z) &\approx 0 \\ A_\varphi(r, \varphi, z) &\approx \frac{\mu_o I}{4\pi} kr \\ A_z(r, \varphi, z) &\approx -\frac{\mu_o I}{2\pi} \ln a \end{aligned} \quad (2.47)$$

Bu durumda selenoidin içindeki manyetik alan yoğunluğu için literatürden belli olan ifade elde edilir:

$$B_z(r, \varphi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi) = \frac{\mu_o I}{2\pi} k = \frac{\mu_o I}{L_p} = \mu_o n I \quad (2.48)$$

Burada $n \left(n = \frac{1}{L_p} \right)$ selenoidin birim uzunluğu başına düşen sarım sayısıdır. Bu şekilde içi

boş selenoidin dış bölgesindeki vektör manyetik potansiyel ($r > a$)

$$\begin{aligned} A_r(r, \varphi, z) &\approx 0 \\ A_\varphi(r, \varphi, z) &\approx \frac{\mu_o I}{4\pi} k \frac{a^2}{r} \\ A_z(r, \varphi, z) &\approx -\frac{\mu_o I}{2\pi} \ln r \end{aligned} \quad (2.49)$$

Bu durumda dış bölgedeki manyetik alan yoğunluğu vektörü bileşenleri de

$$B_{\phi}(r, \phi, z) = -\frac{\partial}{\partial r} A_z = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

$$B_z(r, \phi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\phi}) = 0 \quad (2.50)$$

Buradan çıkan sonuç ise içi boş sonsuz spiral iletken için elde edilen vektör manyetik potansiyel ifadesi selenoidler için $L_p=0$ (ideal selenoid)'den $L_p = \infty$ (düz iletken) için de geçerlidir.

2.5.2. Çevresel Periyodik Sarımların Oluşturduğu Manyetik Alan

Dairesel düz iletkenlerin periyodik ve boyuna yönde simetrik olarak $z_o - 2L_p$, $z_o - L_p$, z_o , $z_o + L_p$, $z_o + 2L_p$ noktalarında yerleşmiş (Şekil 1.7b) sargıların olduğu durumda akım yoğunluğu $dk(1)$ 'e göre aşağıdaki gibi olur,

$$\vec{J}(\phi', z') = J_{\phi'}(z') \bar{a}_{\phi'} \quad (2.51)$$

Burada

$$J_{\phi}(z') = I \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(z' - z_o - mL_p) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} k \delta(k(z' - z_o) - 2\pi m)$$

$$= \frac{Ik}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos[nk(z' - z_o)] \right\} \quad (2.52)$$

Manyetik vektör potansiyelin ϕ bileşeni aşağıdaki integral ifadesi ile belirlenir.

$$A_{\phi}(r, \phi, z) = \frac{\mu_o}{4\pi} \iint \frac{Ik}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos[nk(z' - z_o)] \right\} \frac{\cos(\phi - \phi') ad\phi' dz'}{\sqrt{a^2 + r^2 + (z - z')^2 - 2ar \cos(\phi - \phi')}} \quad (2.53)$$

Aşağıdaki ilişkiler dikkate alınır

$$z - z' = s \quad \phi - \phi' = t \quad (2.54)$$

İntegral altındaki ifade şu şekilde basitleşir:

$$\cos n[nk(z' - z_o)] = \cos[nk(z - z_o - s)] = \cos[nk(z - z_o)] \cos(nks) + \sin[nk(z - z_o)] \sin(nks) \quad (2.55)$$

Sıfıra dönüşen terimleri ihmal ederek manyetik vektör potansiyelin ϕ bileşeni aşağıdaki gibi oluyor.

$$A_{\varphi}(r, \varphi, z) = \frac{\mu_o I}{8\pi^2} ka \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos[nk(z - z_o)] \cos(nks) \right\} \frac{\cos t dt ds}{\sqrt{a^2 + r^2 + s^2 - 2ar \cos t}} \quad (2.56)$$

Gerekli matematiksel işlemlerden sonra manyetik vektör potansiyelin ϕ bileşeni için aşağıdaki ifade elde edilir. [35]

$r \leq a$ için

$$A_{\varphi}(r, \varphi, z) = \frac{\mu_o I}{4\pi} + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} K.(nka) I.(nkr) \cos[nk(z - z_o)] \quad (2.57)$$

$r \geq a$ için

$$A_{\varphi}(r, z) = \frac{\mu_o I}{4\pi} k \frac{a^2}{r} + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} I.(nka) K.(nkr) \cos[nk(z - z_o)] \quad (2.58)$$

Manyetik vektör potansiyelin sınır yaklaşım değerleri ise $k \rightarrow \infty$ veya $L_p \rightarrow 0$ modifiye edilmiş Bessel fonksiyonlarının yaklaşık ifadelerinden elde edilebilir. Böyle ki, iç bölgede $r < a$

$$A_{\varphi}(r, z) \approx \frac{\mu_o I}{4\pi} kr + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{h=1}^{\infty} I.(nka) K.(nkr) \cos[nk(z - z_o)] \quad (2.59)$$

olur. Bu durumda iç bölgede manyetik alanı yoğunluğu literatürde belli olan

$$B_z(r, \varphi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\varphi}) = \frac{\mu_o I}{2\pi} k = \frac{\mu_o I}{L_p} = \mu_o n I \quad (2.60)$$

ifadesine dönüşüyor. Burada $n = \frac{1}{L_p}$ selenoidin birim uzunluğuna düşen sarım (sipir) sayısıdır.

Benzer şekilde dış bölgede $r > a$

$$A_{\varphi}(r, z) \approx \frac{\mu_o I}{4\pi} k \frac{a^2}{r} + \frac{\mu_o I}{2\pi} ka \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{nk(r-a)}}{2nk\sqrt{ar}} \cos[nk(z - z_o)] \approx \frac{\mu_o I}{4\pi} k \frac{a^2}{r} \quad (2.61)$$

Dış bölgedeki manyetik alan yoğunluğu ise, ($r > a$)

$$B_z(r, \phi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\phi}) = 0 \quad (2.62)$$

olur.

İç bölge için elde edilen manyetik vektör potansiyel ifadeleri hem spiral şekilli hem de çevresel sarımlı bobinler için sınır yaklaşımında $k \rightarrow \infty$ veya $L_p \rightarrow 0$ aynıdırlar.

Çizelge 1’de aynı çaplı tellerden yapılmış çevresel sarımlı ve spiral şekilli bobinler için $B_\phi(r)$ ve $B_z(r)$ ifadeleri verilmiştir. Öte yandan her iki bobin için hem manyetik alan hem de vektör potansiyel ifadeleri farklı olurlar. Özellikle sınır değerlerde $k \rightarrow 0$ veya $L_p \rightarrow \infty$ bu fark daha etkindir.

Çizelge 1.1 I akımı taşıyan, a yarıçaplı tellerden sarılmış sonsuz çevresel yarım ve spiral şekilli bobinlerin oluşturdukları $B_z(r)$ ve $B_\phi(r)$ manyetik alan yoğunluklarının

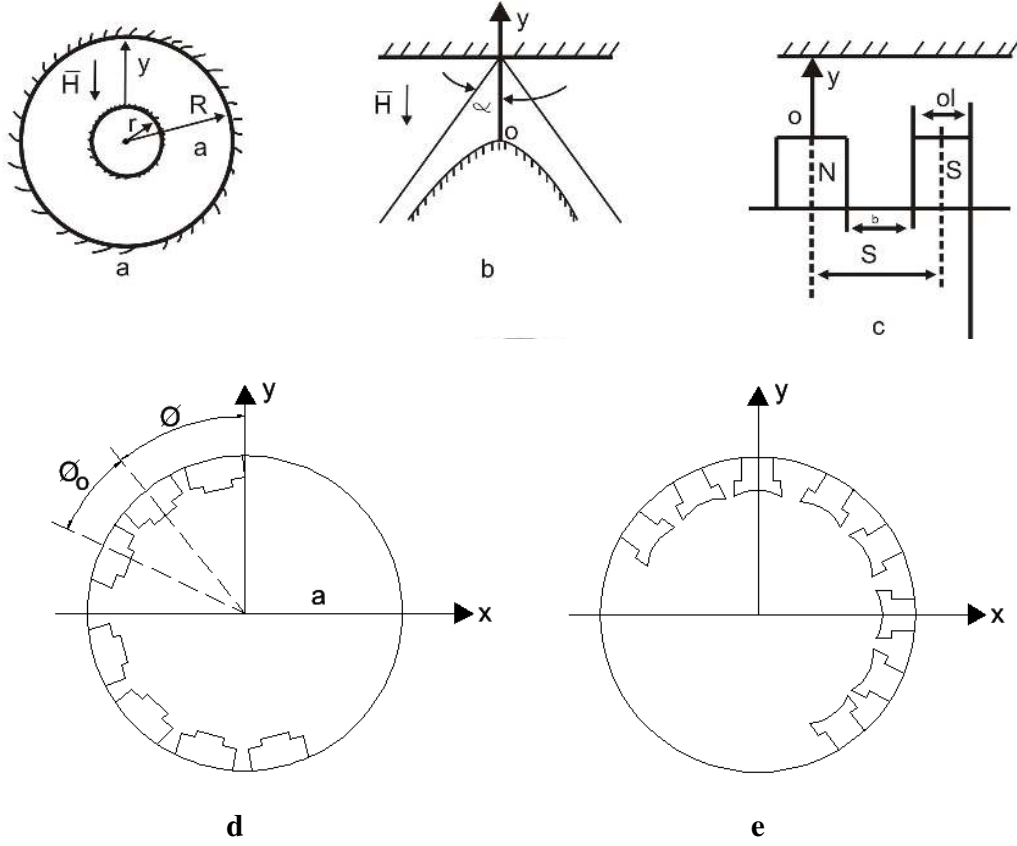
kıyaslanması $n = \frac{1}{L_p}$ sarım sayısı $L_p = \frac{2\pi}{k}$ sıkışma uzunluğudur.

	Spiral bobin	Çevresel sarımlı bobin
$L_p \rightarrow 0$ (veya $k \rightarrow \infty$)	$B_r(r < a) = \mu_o n I$ $B_z(r > a) = 0$ $B_\phi(r \gg a) = \mu_o I / 2\pi r$	$B_z(r < a) = \mu_o n I$ $B_z(r > a) = 0$ $B_\phi(r) = 0$
$0 < L_p < \infty$ (veya $\infty > k > 0$)	$B_z(r = 0) = \mu_o n I$ $B_z(r \neq 0), r < a \neq \mu_o n I$ $B_\phi(r \gg a) = \mu_o I / 2\pi r$	$B_z(r = 0) \neq \mu_o n I$ $B_z(r < a) \neq \mu_o n I$ $B_\phi(r) = 0$
$L_p \rightarrow \infty$ (veya $k \rightarrow 0$)	$B_z(r \neq 0) = 0$ $B_\phi(r) \neq \mu_o I / 2\pi r$ Düz tele dönüşüyor.	$B_z(r = 0) \neq 0 - \mu_o I / 2a$ $B_\phi(r) = 0$ Çevresel sarıma dönüşüyor.

Burada $k \rightarrow \infty$ veya $L_p \rightarrow 0$ koşullarında elde edilen $B_z = \mu_o n I$ ifadesinin hem çevresel hem de spiral şekilli sargılar için geçerli olduğu halde ancak sargısı sıkı sarılmış selenoid için kullanılabilir olduğunu da vurgulamak gerekir. Sonuç olarak $B_z = \mu_o n I$ ifadesi esasen selenoidin boyunu merkez eksenini üzerindeki manyetik alan için geçerlidir.

2.6. Kutupların Şekillendirilmesi İle Oluşan Gradyantlı Manyetik Alan

Kutupların şekillendirilmesi ile oluşan gradyanlı manyetik alan olarak halka şekilli boşluk, hiperbolik kutup-düzlem ikilisi ve bir birini seri izleyen açık kutuplu mıknatıslanma sistemi tambur tipi açık manyetik sistemi ve çok kutuplu kapalı manyetik sistemlerini ele alabiliriz. Bu tür manyetik sistemlerin prensip şemaları Şekil 1-6 da verilmiştir.



Şekil 2.9 Kutup şekillendirilmeleriyle oluşturulmuş gradyanlı manyetik alanlar
a) halka şekilli boşluk b) Hiperbolik kutup-düzlem ikilisi; c) Birbirini seri izleyen açık kutuplu sistem; d) Tambur tipi açık manyetik sistem; e) Çok kutuplu kapalı manyetik sistem.

Halka şekilli boşlukta oluşan manyetik alan şiddeti aşağıdaki gibi değişir.

$$H_y = \frac{H_o r}{r + y} \quad (2.63)$$

Burada; r - iç silindiriksel kutbun yarıçapı, H_o - yarıçapı r olan kutbun yüzeyindeki manyetik alan şiddeti, y - koordinattır.

Manyetik alanı etkileyen kuvvet;

$$F_m = \frac{H_o^2 r^2}{(r+y)^2} \quad (2.64)$$

olur. Bu kuvvetin maksimum değeri;

$$r = \frac{R}{2} = a$$

Olduğunda elde edilir. O halde manyetik alan şiddeti ve manyetik kuvvetin en büyük değerleri aşağıdaki gibi olur.

$$H_y = \frac{H_o a}{a+y} \quad (2.65)$$

$$F_{m\max} = \frac{H_o^2 a^2}{(a+y)^2} \quad (2.66)$$

Hiperbolik kutup-düzlem ikilisi manyetik sistem aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$H_y = \frac{H_o \sin \alpha \cdot a}{\left[a^2 - (a-y)^2 \cos \alpha \right]^{0.5}} \quad (2.67)$$

Bu durumda manyetik kuvvet

$$F_m = \frac{H_o^2 a^2 (a-y) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{\left[a^2 - (a-y)^2 \cos \alpha \right]^{0.5}} \quad (2.68)$$

olur ve bu kuvvet $2\alpha = 60^\circ$ 'de en büyük değere ulaşır. Bu değerde manyetik alan şiddeti ve kuvveti en büyük değeri aşağıdaki gibi olur.

$$H_y = \frac{H_o}{\left[4 - 3 \left(\frac{a-y}{a} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad (2.69)$$

$$F_{m\max} = \frac{3H_o^2 (a-y)}{\left[a^2 + 6ay - 3y^2 \right]^2} \quad (2.70)$$

Seri olarak birbirini izleyen açık kutuplu manyetik sistemin oluşturduğu manyetik alan şiddeti:

$$H_y = H_o e^{-\alpha y} \quad (2.71)$$

şeklinde değişir. Burada $\alpha = \frac{\pi}{s}$ - manyetik alanın not homojen katsayısıdır; s- kutup

adımıdır.

Manyetik alandaki manyetik kuvvetin değişimi ise

$$F_m = \alpha H_o^2 e^{-2\alpha y} \quad (2.72)$$

olur.

Tambur tipi açık kutuplu manyetik sistemin oluşturduğu manyetik alan şiddeti aşağıdaki şekilde belirlenir.

Tambur tipi açık kutuplu manyetik sistemin (Şekil 1.9d) oluşturduğu manyetik alan şiddeti aşağıdaki şekilde belirlenir:[36-38]

$$\begin{aligned} H_r &= H_o \cos\left(\pi \frac{\phi}{\phi_o}\right) \exp\left(-\frac{\pi(r-a)}{\phi_o a}\right) \\ H_\phi &= H_o \sin\left(\pi \frac{\phi}{\phi_o}\right) \exp\left(-\frac{\pi(r-a)}{\phi_o a}\right) \end{aligned} \quad (2.73)$$

Burada r ve ϕ polarkoordinatlarıdır, r - tamburun merkezinden hesaplanmaktadır, H_o - tambur yüzeyindeki manyetik alan şiddetidir, a - tamburun yarıçapı, ϕ_o ve ϕ_0 Şekil 1.9 d' de gösterilmiştir.

Gerçekte Dk.1.73'deki H_r ve H_ϕ bileşenleri Maxwell denklemini ödemiyor. Yani

$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 \nabla \cdot \vec{H} = 0 \text{ veya } \nabla \cdot \vec{H} = 0 \text{ olmuyor.}$$

Zira silindirik koordinatlarda

$$\nabla \cdot \vec{H} = \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{H_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_\phi}{\partial \phi}$$

(2.74)

Olduğuna göre , Dk. 1.73 dikkate alındığında

$$\nabla \cdot \vec{H} = H_o \cos\left(\frac{\pi\phi}{\phi_o}\right) \exp\left(-\frac{\pi(r-a)}{\phi_o a}\right) \left(-\frac{\pi}{\phi_o} + \frac{1}{r} + \frac{\pi}{\phi_o r}\right) \neq 0 \quad (2.75)$$

Bunun yanı sıra literatürde [39,40] diğer yaklaşımlarda yer almaktadır:

$$H = H_o \exp(-dy)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{b + \delta} \quad (2.76)$$

$$H_o = \frac{\pi U_\delta}{2(b + \delta)}$$

Burada U_δ - komşu kutupların uçları arasındaki manyetik potansiyeldir, δ - hava aralığının

uzunluğu, b - kutup genişliğidir, y - kutup yüzeyinden taksimatla olan uzaklıktır.

2.7. Kapalı Çok Kutuplu Gradyantlı Manyetik Alan

Çok kutuplu kapalı manyetik sistemin dik kesiti Şekil 1.9e’de gösterilmiştir [41]. Bu durumda çalışma bölgesi olan silindiriksel bölgedeki manyetik alanı hesaplamak gerekir.

Varsayalım ki, silindiriksel bölgenin uzunluğu sonsuz büyüktür ve saçaklanma olayı ihmal edilebilir. Bu durumda manyetik alanın hesaplanması problemi iki boyutlu probleme dönüşüyor. 1. bölgede manyetik alan yoğunluğu vektörü aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\vec{B} = B_x \vec{a}_x + B_y \vec{a}_y \quad (2.77)$$

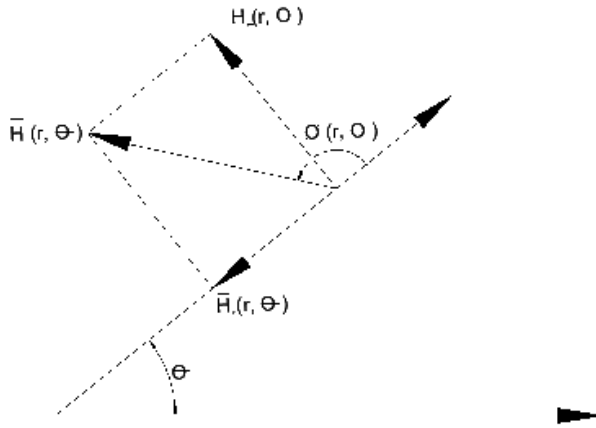
Z eksenini silindirin eksenine boyunca yönlendiğinden

$$B_z = 0 \quad (2.78)$$

Bu sonuca göre B_x ve B_y bileşenlerinin Z eksenine boyunca gradyanları da sıfırdır:

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial z} = 0 \quad (2.79)$$

Eğer mıknatıslayıcı sargılar eşdeğer olursa, çalışma bölgesindeki manyetik alan potansiyeldir ve bu alanın dağılımı silindirik koordinatlarda esasen aşağıdaki şekilde olur



Şekil 2.10 $\vec{H}(r, \theta)$ manyetik alan şiddetinin polar koordinatlardaki durumu

$$|H(r, \theta)| = H(r) . \quad (2.80)$$

Sınır koşulları aşağıdakilerdir

$$r = a, \quad H(a) = H_0 . \quad (2.81)$$

burada a – silindirin dış yarıçapıdır.

Şekil 1.10’a uygun olarak silindirik koordinatlarda Dk. 1.77’den yazarız:

$$\vec{H}(r, \theta) = -H_r(r, \theta)\vec{a}_r + H_\theta(r, \theta)\vec{a}_\theta . \quad (2.82)$$

Şekil 1.10’dan

$$H_r(r, \theta) = |\vec{H}(r, \theta)| \cos \phi(r, \theta) = H(r) \cos \phi(r, \theta); \quad (2.83)$$

$$H_\theta(r, \theta) = |\vec{H}(r, \theta)| \sin \phi(r, \theta) = H(r) \sin \phi(r, \theta); \quad (2.84)$$

Böylece

$$\vec{H}(r, \theta) = H(r) [-\cos \phi(r, \theta)\vec{a}_r + \sin \phi(r, \theta)\vec{a}_\theta] , \quad (2.85)$$

olur. Burada $\vec{a}_r$ ve $\vec{a}_\theta$ uygun yönlerin birim vektörleridir.

Alanın incelenen bölgesinde kaynak bulunmamaktadır ve alan potansiyel ve girdapsızdır [34]. Bu durum için aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$\text{div} \mathbf{H} = 0 \quad (2.86)$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = 0 \quad (2.87)$$

Silindirik koordinatlarda $\text{div} \vec{H}$ ve $\text{rot} \vec{H}$ ifadelerinin tam açılımı dikkate alındığında [34]:

$$\nabla \cdot \vec{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} = \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{H_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} ; \quad (2.88)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (r H_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] = \frac{\partial H_\theta}{\partial r} + \frac{H_\theta}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} ; \quad (2.89)$$

olur. Dk. (2.83) Dk. (2.84) ve Dk. (2.89) dikkate alındığında aşağıdaki denklemler sistemi elde edilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(r)}{\partial r} \cos \phi(r, \theta) + H(r) \frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial r} \sin \phi(r, \theta) - \frac{H(r)}{r} \cos \phi(r, \theta) + \frac{H(r)}{r} \frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial \theta} \cos \phi(r, \theta) &= 0 \\ \frac{\partial H(r)}{\partial r} \sin \phi(r, \theta) + \frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial r} H(r) \cos \phi(r, \theta) + \frac{H(r)}{r} \sin \phi(r, \theta) - \frac{H(r)}{r} \frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial \theta} \sin \phi(r, \theta) &= 0 \end{aligned} \quad (2.90)$$

Birinci denklemi $\sin \phi$ ve ikinci denklemi ise $\cos \phi$ ’e çarparak bu denklemleri toplamış olursak aşağıdaki ifadeleri elde etmiş oluruz:

$$-2H(r) \frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial r} \sin \phi(r, \theta) \cos \phi(r, \theta) = 0 ; \quad (2.91)$$

$$\frac{\partial \phi(r, \theta)}{\partial r} = 0$$

Bu denklemden çıkan sonuç ise şu şekilde olur:

$$\phi(r, \theta) = \phi(\theta) \quad . \quad (2.92)$$

Dk. (2.92) Dk. (2.90)'de göz önüne alınırsa:

$$\frac{\partial H(r)}{\partial r} \frac{r}{H(r)} = \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial \theta} - 1. \quad (2.93)$$

olur. Elde edilen Dk. (2.93) kısmi diferansiyel denklem olup bileşenlere ayırma yöntemiyle kolaylıkla çözülebilir:

$$\frac{r}{H(r)} \frac{dH(r)}{dr} = Q; \quad (2.94)$$

$$\frac{d\phi(\theta)}{d\theta} - 1 = Q; \quad (2.95)$$

Dk. 1.95'in çözümünden

$$\phi(\theta) = (Q + 1)\theta + Q_1 \quad . \quad (2.96)$$

Elde edilir. Q ve Q₁ integral sabitleri kapalı çok kutuplu mıknatıslayıcı sistemlerin özelliklerine uygun olarak sınır koşullarından belirlenir (Şekil 1.10). Eğer τ – silindirin dış yüzeyi üzerimde hesaplanan kutup adımı olursa, bu kutup adımına uygun bir β merkez açısı karşılık gelmektedir. O halde $\theta = m\beta$ olurken alan şiddeti vektörlerinin yönleri ya üst-üste düşer (S kutup) ya da birbirine zıt yönde olur (N kutup) ($\vec{a}_r$ birim vektöre göre). Bu durum $\phi(\theta) = \pi m$ durumuna denk gelmektedir.

$$\theta = \frac{1}{2} \beta + m\beta \text{ yönlerinde alan şiddeti vektörü } e\theta \text{ birim vektörüne göre ya üst üste}$$

düşer ya da zıt yönde olur. Bu duruma denk gelen denklem $\theta = \pi/2 + \pi m$ olur.

Böylece;

$$\phi(\theta) = \pi m \quad (2.97)$$

$$\phi(\theta) = \frac{\pi}{2} + \pi m \quad (2.98)$$

Burada m = 0, 1, 2, 3,

Dk.(2.97) ve Dk.(2.98) dikkate alındığında Dk.(2.96)'dan Q ve Q₁ integral sabitleri

belirlenebilir:

$$Q = \frac{\pi}{2} - 1; \quad Q_1 = 0. \quad (2.99)$$

Dk.(2.99) Dk.(2.94)'da dikkate alındığında

$$\frac{dH(r)}{H(r)} = \frac{dr}{r} Q \quad . \quad (2.100)$$

olur. İntegral işlemi yapıldıktan sonra

$$\ln H(r) = Q \ln r + Q_2 \quad . \quad (2.101)$$

Q_2 – Dk.(2.80) sınır koşulundan belirlenir:

O halde

$$\ln H(r) = \ln H_0 \left(\frac{r}{a} \right)^Q \text{ olur.}$$

Dk.(2.101) ve Dk.(2.99) dikkate alındığında [40]

$$H(r) = H_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{\pi}{\beta} - 1}, \quad r \leq a \quad (2.102)$$

elde edilir.

Dk.(2.102) ve Dk.(2.96) göz önüne alındığında Dk.(2.84)'den elde edebiliriz:

$$\vec{H}(r, \theta) = H_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{\pi}{\beta} - 1} \left[-\cos\left(\frac{\pi\theta}{\beta}\right) \vec{e}_r + \sin\left(\frac{\pi\theta}{\beta}\right) \vec{e}_\theta \right]. \quad (2.103)$$

Örneğin 4 kutuplu sistemlerde $\beta = \pi / 2$

$$\vec{H}(r, \theta) = H_0 \left(\frac{r}{a} \right) \left[-\cos(2\theta) \vec{e}_r + \sin(2\theta) \vec{e}_\theta \right] \quad (2.104)$$

olur. 6 kutuplu sistemlerde ise $\beta = \pi / 3$

$$\vec{H}(r, \theta) = H_0 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \left[-\cos(3\theta) \vec{e}_r + \sin(3\theta) \vec{e}_\theta \right] \quad (2.105)$$

olur. 8 kutuplu sistemlerde ise

$$\vec{H}(r, \theta) = H_0 \left(\frac{r}{a} \right)^3 \left[-\cos(4\theta) \vec{e}_r + \sin(4\theta) \vec{e}_\theta \right] \quad (2.106)$$

olur.

Dk.(2.104)–Dk.(2.106) ifadeleri belirlendikten sonra çok kutuplu sistemlerde oluşan

manyetik alanlar ve bu alanlarda parçacıklara etkiyen kuvveti belirlemek ve çeşitli kutup sayısında bu kuvvet faktörlerinin kıyaslanmasını kolaylıkla yapabiliriz.

Bu amaçla tek parçacığa etkiyen ponderomotor kuvvetin açık ifadesini belirlemek gerekir. Bu kuvvetin yaklaşık ifadesini belirlemeye imkân verir. Manyeto statik enerji teorisini kullanarak çok kutuplu sistemlerde mikron parçacıklara etkiyen kuvvetin daha dakik ifadesini belirleyebiliriz [42,43].

Esas silindirin merkezinde orijini seçmekle, Z ekseninin silindirin simetri eksenı boyunca yerleştğini varsayalım. Simetriklik olayı iki zıt kutup arasında parçacıkların tutulması sürecini incelemeye imkân verir.

Bu durumda manyetostatik enerji aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$E = \frac{1}{2} \int_v (\chi_p - \chi) \vec{M} \vec{H} dv = \frac{1}{2} (\chi_p - \chi) \int_v H^2 dv . \quad (2.107)$$

Çok kutuplu sistemlerde manyetik alan şiddeti Dk. (2.102)'ya göre aşağıdaki gibi olur:

$$\int_v H^2 dv = \int_0^b \int_0^\pi \int_0^{2\pi} H^2 \rho^2 \sin \theta d\rho d\theta d\phi = \frac{H_0^2}{a^{\pi/\beta-1}} \int_0^b \rho^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} [R^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + 2R\rho \cos(\phi - \phi_0)] d\phi \quad (2.108)$$

Mıknatıslayıcı sistemlerde yaygın olan $2p = 4, 6, 8, \dots$ kutup sayılarını dikkate alalım.

a) 4 kutuplu sistemlerde

$$\int_v H^2 dv = \frac{H_0^2}{a^2} \int_0^b \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} [R^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + 2R\rho \cos(\phi - \phi_0)] d\phi \quad (2.109)$$

İntegrasyon işlemi yapıldığında

$$\int_v H^2 dv = \frac{H_0^2}{a^2} \frac{4\pi b^3}{3} \left[R^2 + \frac{4}{3} b^2 \right] . \quad (2.110)$$

olur. Zayıf manyetik parçacığın sistemin kutuplarına çekildiği ponderomotor kuvvet

$$F_R = \frac{\partial E}{\partial R} = \frac{4\pi b^2}{3} H_0^2 \frac{b}{a} \frac{R}{a} (\chi_p - \chi) . \quad (2.111)$$

olur. Bu kuvvetin maksimum değeri parçacığın silindirin duvarında bulunduğu anda oluşuyor.

$$R = a - b \quad (2.112)$$

o halde;

$$F_R = \frac{4\pi H_0^2 b^2}{3} f_4(t) , \quad (2.113)$$

olur. Burada

$$t = a/b; \quad f_4(t) = (t-1)/t^2 \quad (2.114)$$

b) 2p = 6 kutuplu sistemler için Dk. 1.107'dan basit integrasyon işleminden elde ederiz:

$$\int_v H^2 dv = \frac{H_0^2}{a^4} \int_0^b \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} [R^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + 2R\rho \cos(\phi - \phi_0)]^2 d\phi$$

Basit integralleme işleminden sonra aşağıdaki sonucu elde ederiz:

$$\int_v H^2 dv = \frac{H_0^2}{a^4} \frac{4\pi b^3}{3} \left[\frac{8b^4}{35} + 2R^2 b^2 + R^4 \right] \quad (2.115)$$

manyetostatik enerji;

$$E = \frac{1}{2} \frac{4\pi b^3}{3} \frac{H_0^2}{a^4} (\chi_p - \chi) \left[\frac{8b^4}{35} + 2R^2 b^2 + R^4 \right] \quad (2.116)$$

ponderomotor kuvvet;

$$F_R = \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial R} = \frac{4\pi b^2}{3a^4} H_0^2 (\chi_p - \chi) [2Rb^2 + 2R^3] . \quad (2.117)$$

Bu kuvvetin maksimum değeri kutuplar altında silindirin duvarlarında oluşur, yani

$R = a - b$. Bu durumda ponderomotor kuvvet;

$$F_R = \frac{4\pi H_0^2 b^2}{3} f_6(t) , \quad (2.118)$$

Burada;

$$t = a/b, \quad f_6(t) = 2(t-1)[1+(t-1)^2]/t^4 . \quad (2.119)$$

c) 2p = 8 kutuplu sistemler için

Bu durumda Dk. 1.107'dan integralin ifadesi aşağıdaki şekilde olur:

$$\int_v H^2 dv = \frac{H_0^2}{a^6} \int_0^b \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} [R^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + 2R\rho \cos(\phi - \phi_0)]^3 d\phi \quad (2.120)$$

Ponderomotor kuvveti;

$$F_R = \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial R} = \frac{4\pi b^2}{3a^6} H_0^2 (\chi_p - \chi) [R^5 + 0.8Rb^4 + 3.2R^3b^2] \quad (2.121)$$

olur. Bu kuvvetin maksimum değeri

$$R = a - b \quad (2.122)$$

olduğunda oluşur. Bu durumda parçacığa etkiyen kuvvetin ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$F_R = \frac{4\pi H_0^2 b^2}{3} f_s(t) \quad , \quad (2.123)$$

Burada:

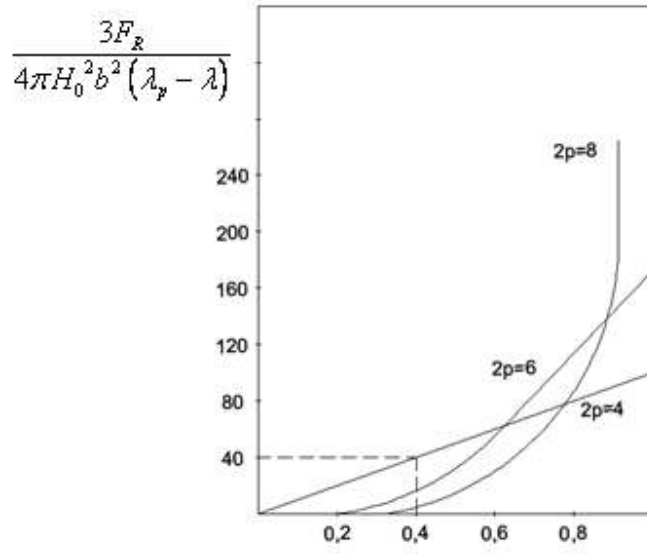
$$f_s(t) = 3(t-1)[(t-1)^4 + 3.2(t-1)^2 + 0.8] / t^6 \quad (2.124)$$

olur.

Elde edilen Dk.(2.110), (2.116), (2.20) çok kutuplu mıknatıslayıcı sistemlerin çalışma bölgelerindeki gradyanlı alanda zayıf manyetik parçacığa etkiyen kuvvetin analitik ifadesini belirlemektedir.

Kutup sayısı arttıkça, $f(t)$ faktörü artar fakat bu durumda kutuptan uzaklaştıkça kuvvetin değeri hızla azalır. Bu değişim Şekil 1.11'te daha açık görülmektedir. Bu şekilde çeşitli kutup sayısında boyutsuz kuvvet faktörünün $\frac{r}{a}$ bağıntısı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, kutup sayısı arttıkça, kutuplara yakın bölgelerde parçacıklara etkiyen kuvvet hızla artar. Fakat bu durumda sistemin merkezi kısmında kuvvet etkisi hızla azalır ve bu bölgelerde manyetik göçtürme olayı hızla zayıflar. Bu durum, benzeri tipteki yapıların tasarımında dikkate alınmalıdır.

Bütün çalışma hacmine göre gradyanlı manyetik alanın en iyi dağılımı 4 kutuplu sistemlerde oluşur. Bu sistemler esasen özel tasarlanmış manyetik sistemler, yüksek gradyanlı manyetik sistemlerin manyetik sistemleri [44,45] veya DC motorların statorları olabilir. Bu tip sistemlerden en avantajlısı çok orijinal ve etkin mıknatıslanma sistemine sahip olan otomobillerin marş motorlarının gövdeleri (veya statorları) olabilir.



Şekil 2.11 Farklı kutup sayılarında parçacığı etkileyen $f(t)$ kuvvet faktörünün silindirik boşluktaki boyutsuz yarıçap üzere göre değişimi.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Mıknatıslanmış Dolgulu Yatakların Özellikleri

Birinci bölümdeki sonuçlara göre yüksek gradyanlı manyetik alanların en etkin olduğu ortam mıknatıslanmış dolgulu yataklardır. Mıknatıslanmış dolgulu yataklar ferromanyetik malzemelerden (tel, çubuk, bilye, plaka, talaşlar) oluşturulurlar. [grob. Wat. Sand. Abb.] Dolgulu yataklarda ferromanyetik malzemelerin sayısı milyonlarca olabilir. Bu durumda her bir tekil elemanın uzay durumunu dikkate alarak manyetik alan gradyanını belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle ferromanyetik malzemelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerini, özellikle B-H ilişkisini daha pratik parametrelerle değerlendirmek gerekir. Dolgulu yataklarda bu parametreler dolgulu yatağın dolgu faktörünü γ veya boşluk (porozite) katsayısıdır(ε):

$$\gamma = \frac{W_m}{W}; \quad \varepsilon = \frac{W_p}{W}, \quad W_m + W_p = W \quad (3.1)$$

Burada W - dolgulu yatağın toplandığı toplam hacim, W_m - toplam hacimdeki ferromanyetik dolgu malzemesinin kapladığı hacim, W_p - toplam hacimdeki boşluğun hacmidir. Bu ifadelerden görüldüğü gibi;

$$\frac{W_m}{W} + \frac{W_p}{W} = 1 \quad \text{veya} \quad \gamma + \varepsilon = 1 \quad (3.2)$$

Hem pratik hem de ekonomik açıdan farklı ferromanyetik elemanlı dolgulu yataklar kullanılabilir. Fakat farklı geometriye sahip olan ferromanyetik elemanlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların her birimini B-H ilişkisini belirlemek çok zordur. Bu nedenle tezdeki teorik ve deneysel çalışmalarda belli basit geometrik şekilli ferromanyetik elemanlardan (tel, bilye) oluşturulmuş dolgulu yataklar incelenmiştir. Kullanılan yöntem olarak bu sonuçlardan gidilerek ve elde edilen teorik ve deneysel sonuçların kıyaslanmasından daha genel değerlendirme yolu seçilmiştir.

3.1. Mıknatıslanmış Ferromanyetik Tellerden Oluşturulmuş Dolgulu Yataklar

Mıknatıslanmış ferromanyetik tellerden oluşturulmuş dolgulu yataklar manyetik filtrasyon ve separasyon işlemlerinde [1-5], biyo manyetik işlemlerde[8-11], micro sıvı

düzeneklerinde [6,7] yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu nedenle bu tür dolgulu yataklar tellerin düzenli geometride (küp hücre, sıralanmış, satranç düzeni vs.) dizilişinde [4,5] ve düzensiz biçimde [24] yapılabilir. Fakat bütün durumlarda esasen manyetik skaler potansiyel tanımından gidilerek elde edilen manyetik alan şiddetinin analitik ifadeleri çok karmaşık veya sonsuz serileri biçiminde olurlar. Örneğin birbirine paralel yerleştirilmiş çok sayıdaki silindiriksel tellerin arasındaki boşluktaki manyetik alan potansiyeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir [46].

$$V_m = -H_0 \left[X_a - \frac{1}{2} k_\mu \beta \frac{\sin \beta x_a}{\cosh \beta x_a - \cos \beta y_a} - \frac{1}{2} k_\mu \beta \frac{\sinh \beta (x_a - X_a)}{\cosh (x_a - X_a) - \cos \beta (y_a - Y_a)} \right] \quad (3.3)$$

Burada $x_a = \frac{x}{a}$, $y_a = \frac{y}{a}$ - boyutsuz koordinatlar, X_a, Y_a - karakteristik boyutsuz başlangıç koordinatlarıdır.

En basit durumlarda bile, örneğin birbiri ile teması olmayan mıknatıslanmış ve paralel iki ferromanyetik tel etrafında oluşan manyetik alan şiddetinin ifadesini yeterince karmaşık olup, kompleks biçimde aşağıdaki şekilde belirlenir [47].

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 + a^2 \left(K_\mu Z_o^* + K_\mu Z_o \frac{a^2}{\alpha^2} + K_\mu^3 Z_o^* \frac{a^4}{\alpha^4} \right) \left\{ \frac{1}{z^2} + \frac{1}{(z-\alpha)^2} + 2a^3 K_\mu^2 Z_o^* \frac{a^3}{\alpha^3} \left[\frac{1}{z^3} + \frac{1}{(z-\alpha)^3} \right] \right. \\ \left. + 3a^4 K_\mu^2 Z_o^* \frac{a_4}{\alpha_4} \left[\frac{1}{z^4} + \frac{1}{(z-\alpha)^4} \right] + 0(\alpha^5) \right\} \quad (3.4)$$

burada a - ferromanyetik telin yarıçapı, α - teller arasındaki uzaklık, $\underline{Z}$ - manyetik alan şiddetinin kompleks ifadesi $\underline{Z}_0$ - dış manyetik alan şiddetinin kompleks ifadesidir.

Dolgulu yatağın dolgu faktörü (γ) dikkate alındığında bu ifadele biraz basitleşir ve pratik hesaplamalar için daha kullanışlı biçime dönüşürler. [48]

Bu yaklaşımda yarıçapı a olan bir telin b yarıçapında bir hücrede yerleştiği varsayılmaktadır. Bu durumda hücrelerde oluşan manyetik alan eş eksenli silindirler için uygulanan sınır koşullarından belirlenebilir. Tellerin merkez ekseninin z - eksenine boyunca

yerleştğini varsayacak olursak hücredeki bölgelerdeki V potansiyeli Laplace denklemlerinden kolaylıkla elde edilebilir.

$$\nabla^2 V_0 = 0 \quad b < r < \infty \quad (3.5)$$

$$\nabla^2 V_1 = 0 \quad a < r < b \quad (3.6)$$

$$\nabla^2 V_2 = 0 \quad 0 < r < a \quad (3.7)$$

Sınır koşulları ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$i) \quad V_0(r, \theta) = -H_0 r \cos \theta \quad r \rightarrow \infty,$$

$$ii) \quad \frac{\partial V_0(b, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial V_1(b, \theta)}{\partial \theta}$$

$$iii) \quad \frac{\partial V_1(a, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial V_2(a, \theta)}{\partial \theta}$$

$$iv) \quad \mu^* \frac{\partial V_0(r, \theta)}{\partial r} \bigg|_{r=b} = \mu_f \frac{\partial V_2(r, \theta)}{\partial r} \bigg|_{r=b}$$

$$v) \quad \mu_f \frac{\partial V_1(r, \theta)}{\partial r} \bigg|_{r=a} = \mu_s \frac{\partial V_2(r, \theta)}{\partial r} \bigg|_{r=a}$$

Yukarıdaki (3.5)-(3.7) Laplace denklemlerinin genel şekildeki çözümleri aşağıdaki gibidir:

$$V_0(r, \theta) = -H_0 r \cos \theta + \sum_{n=1}^{\infty} A_n r^{-n} \cos n\theta \quad (3.8)$$

$$V_1(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n r^n + C_n r^{-n}] \cos n\theta \quad (3.9)$$

$$V_2(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n r^n \cos n\theta \quad (3.10)$$

Yukarıda belirtilen (ii) – (v) sınır koşulları dikkate alındığında integral sabitleri şu şek
belirlenir,

$$A_n = B_n = C_n = D_n = 0$$

$$\text{eğer } n \neq 1 \text{ oluyorsa,} \quad (3.11)$$

$$A_1 = \frac{H_0 a^2}{I \gamma} \left[\gamma (\nu^* + 1)(\nu - 1) - (\nu^* - 1)(\nu + 1) \right] \quad (3.12)$$

$$B_1 = -\frac{2H_0 \nu^*}{I} (\nu + 1) \quad (3.13)$$

$$C_1 = -\frac{2H_0 a^2 \nu^*}{I} (\nu - 1) \quad (3.14)$$

$$D_1 = \frac{4H_0 \nu^*}{I} \quad (3.15)$$

Burada $\nu^* = \frac{\mu^*}{\mu_f}$, $\nu = \frac{\mu}{\mu_f}$, $I = \left[(\nu^* + 1)(\nu + 1) - \gamma (\nu^* - 1)(\nu + 1) \right]$

Bu ifadelerde μ^* - efektif geçirgenlik (permeability) olarak tanımlanan parametre belirsizdir. Bu geçirgenlik tel + hücre ortamının geçirgenliği olarak aşağıdaki ortalama değer olarak da belirlenebilir:

$$\gamma \mu < \overline{H}_z >_i + (1 - \gamma) \mu_f < H_1 >_i = \mu^* < \overline{H}_{eH} >_i \quad \overline{H}_{eff} = -\nabla V_0 \quad (3.16)$$

Burada $i = (x, y, z)$ olarak ifade edilmektedir. Dk. (3.16) yalnız x bileşeni üzere hesaplanmış olursa, o halde bağıl efektif geçirgenlik aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\nu^* = \frac{\nu(1 + \gamma) + (1 - \gamma)}{\nu(1 - \gamma) + (1 + \gamma)} , \quad \nu^* = \frac{\mu^*}{\mu_f} , \quad \nu = \frac{\mu}{\mu_f} \quad (3.17)$$

Bu durumda hücrelerdeki ve efektif ortamdaki manyetik alan şiddetinin ifadesi şu biçimde olur:

$$\overline{H} = AH_0 \left[\left(1 + \frac{K_c}{r_a^2} \right) \cos \theta \overline{a}_r - \left(1 - \frac{K_c}{r_a^2} \right) \sin \theta \overline{a}_\theta \right] \quad 1 < r_a < \frac{b}{a} \quad (3.18)$$

$$\overline{H} = \overline{H}_0 \quad \frac{b}{a} < r_a < \infty$$

Burada $A = \frac{1}{1 - \gamma K_c}$, $K_c = \frac{\nu - 1}{\nu + 1}$, $r_a = \frac{r}{a}$ (3.19)

Sınır yaklaşımında, yani $\gamma = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \rightarrow 0$ olduğunda $\nu^* = 1$ veya $\mu^* = \mu_f$ oluyor. Bu durumda (3.18) denklemi Bölüm 1 de elde edilen tekil ferromanyetik telin etrafında oluşan manyetik alanı ifade etmektedir. Eğer $\mu = \mu_f$ oluyorsa ($K_c = 0$, $A = 1$) o halde ortamdaki homojen manyetik alan şiddetinin ifadesi elde edilmesi $\overline{H} = \overline{H}_0$. Bu durumda bu sonuçların elde edilmesi gerekiyordu.

3.2 Mıknatıslanmış Ferromanyetik Kürelerden ve Metal Talaşlarından Oluşturulmuş Dolgulu Yataklar

3.2.1 Ferromanyetik granül dolgulu yatakların manyetik özellikleri

Çekirdek tipi çelik veya demir örneklerin doyma mıknatıslanması nispeten düşük manyetik alanlarda oluşur. Buna göre bu malzemelerin daha büyük alanlarda ($H > 20-30$ kA/m) mıknatıslanma eğrisinin incelenmesine çoğu zaman gereksinim duyulmamaktadır. Granül tipi ferromanyetik ortamlarda ise mıknatıslanma doyması nispeten daha büyük dış manyetik alanlarda meydana çıkar. Öte yandan, doyma mıknatıslanması büyük olan alanlarda bulunan malzemelerin veya ortamların manyetik özelliklerinin incelenmesi bazı zorluklarla karşı karşıya kala bilir. Örneğin, bir toroitin içinde gereken $H = 100-150$ kA/m manyetik alan şiddetini oluşturmak için mıknatıslayıcı bobinlerin her bir santimindeki m.m.k'ı (1-1.5) kA civarlarında olmalıdır.

Mıknatıslanan herhangi örneğinin esas mıknatıslanma eğrisinin elde edilmesi işlemi silindirik örneklerin kullanılmasıyla kolaylaştırılabilir. Bu durumda demagnetizasyon faktörünü minimuma indirmek için bu örneklerin uzunluklarının bulundukları tankın çapına oranları yeterice büyük olmalıdırlar. Çekirdek tipi örneklerde bu oran $L_0 / D_0 > 50$ civarında olmalıdır. Fakat, dış manyetik alan şiddetinin artmasıyla bu sınır hem çekirdek tipi hem de kuvazi çekirdek tipi örneklerde daha düşük olur. Deneysel incelemeler göstermişler ki [4,17] mıknatıslanmış granül ortamların esas mıknatıslanma eğrilerini elde etmek için $L_0 / D_0 > 9-10$ civarlarında olmalıdır. İleride söz konusu olan bütün mıknatıslanmış dolgu türlerinde bu kriterin sağlandığını varsayacağız.

Dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerini belirlemek için genel yaklaşımlar esasen ya tekil dolgu elemanlarının mıknatıslanmasına göre [24-27] , ya da mıknatıslanmış

dolgu elemanlarının gözeneklerde oluşturduğu yüksek gradyanlı manyetik alan potansiyelinden [28,46] gidilerek veya deney verilerine dayanılarak yaklaşık fonksiyonlarla [2,49] belirlenir. Ancak mıknatıslanmış dolgulu yatakların gözeneklerinde oluşan manyetik alan dış manyetik alan şiddeti, dolgu elemanlarının manyetik geçirgenliği ile yanı sıra gözeneğin geometrisine ve dolgu faktörüne de bağlıdır. Yukarıda adı geçen modellerde bu faktörlerin direk olarak dikkate alınması kolay değildir. Bu faktörleri dikkate almak için bazı çalışmalarda [15,16] mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliği ($\bar{\mu}$) bu ortamların demagnetizasyon faktöründen gidilerek belirlenmiştir. Çok sayıda deney sonuçlarının statiksel verilerine dayanılarak kullanılan bu yöntem de sonuçta bir yaklaşık yöntemdir.

Mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların manyetik geçirgenliğinin ($\bar{\mu}$) yatak elemanlarının manyetik geçirgenliğine (μ) ve dolgu faktörüne (γ) bağımlılığının belirlenmesinin gereksiniminin tarihi çok eskidir. Bu konuda son yüz yirmi yılı aşkın bir sürede yapılan çalışmaların incelenmesi sonucu [13-17,50-56] $\bar{\mu}(\mu, \gamma)$ bağıntısının mühendislik hesaplamalarında daha kullanışlı olan formüller Çizelge 1’de gösterilmiştir:

Bu formüller deneysel verilerle kıyaslandığında pratik hesaplamalarda (1),(3-5) ifadelerinin daha kullanışlı olduğu tespit edilmiştir [4,17]. Fakat bazı durumlarda, özellikle mıknatıslanmış kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanmasında bu formüllerin deney sonuçlarıyla uyumunun hassasiyeti o kadar yüksek değildir [22]. Ayrıca (3) denklemi $\gamma \rightarrow \infty$ ($\varepsilon \rightarrow 0$) sınır koşullarını sağlamamaktadır. Deneysel verilerle iyi uyum sağlayan (5) denklemi ise esasen $\gamma=0.6$ değerleri için düzeltildiğinden dolgulu yatağın porozitesinin değişimini dikkate almamaktadır. Bundan başka bütün bu ifadelerde dolgulu yatağın farklı boyutlardaki elemanlardan (örneğin, farklı çapa sahip olan kürelerden) oluşması durumlarındaki mıknatıslanma özellikleri göz önüne alınmamaktadır. Oysa bu durumda yatağın hem mıknatıslanma karakteri hem de dolayısıyla yatağın dolgu faktörü (γ) değişir. Bu nedenle makalenin bir sonraki kısmında farklı çaplara sahip olan ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma kanalının manyetik geçirgenliğinden gidilerek bu tip yatakların mıknatıslanma eğrisi belirlenecektir.

Çizelge 2.1. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğine ait bazı kararlılık sonuçları

Yazarlar	Formüller	Referanslar
1. Grigoryev-Kirko	$\mu_{av} = 1 + \frac{\gamma(\mu-1)}{1 + \frac{\mu-1}{3(1+39\gamma^4)}}$	[15]
2. Bruggeman	$\frac{\mu - \mu_{av}}{\mu - \mu_c} \sqrt[3]{\frac{1}{\mu_{av}}} = 1 - \gamma$	[14]
3. Lichtenecker	$\mu_{av} = \mu^\gamma \mu_c^{1-\gamma}$	[53]
5. Clausius-Mossotti	$\mu_{av} = \mu_c \left(\frac{2\mu_c + \mu + 2\gamma(\mu - \mu_c)}{2\mu_c + \mu - \gamma(\mu - \mu_c)} \right)$	[50,51]
6. Clausius-Mossotti	$\mu_{av} = \mu \left(\frac{3\mu_c + 2\gamma(\mu - \mu_c)}{3\mu - \gamma(\mu - \mu_c)} \right)$	[50,51]
7. Lorentz	$\mu_{av} = \frac{\mu_c(1+2\gamma)\beta}{1-\gamma\beta}, \quad \beta = \frac{\mu - \mu_c}{\mu + 2\mu_c}, \quad \frac{\mu_c}{\mu} < 10;$	[56]
8. Looyenga	$\mu_{av} = \left[\varepsilon \mu_c^{\frac{1}{3}} + \gamma \mu^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad \frac{\mu_c}{\mu} < 100;$	[51]
9. Shvartsman- Suplin	$\mu_{av} = \frac{(\mu-1)}{2(2+\mu)} \left\{ \ln \left[\frac{\sqrt{2}}{\frac{\gamma(\mu-1)}{2+\mu}} \right]^2 - 1 \right\} \quad \gamma < 0.2$	[29]
10. Sandulyak	$\mu_{av} = \frac{\mu}{1 + \frac{0.15\varepsilon(\mu-1)}{\gamma}}$	[17]
11. Sandulyak	$\mu_{av} = \frac{2.9\mu}{\mu-1} \left(\frac{\mu}{\mu-1} \ln \mu - 1 \right) \quad \gamma = 0.6$	[4]
12. Sandulyak	$\mu_{av} = 2.7 \ln \left(\frac{\mu}{2} + 1 \right) \quad \gamma = 0.6$	[22]

3.4 Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma zincirinin oluşturduğu manyetik geçirgenlik.

Ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş ve dış homojen manyetik alanda mıknatıslanan dolgulu yatakların aşağıdaki özelliklerinin olduğunu varsayalım:

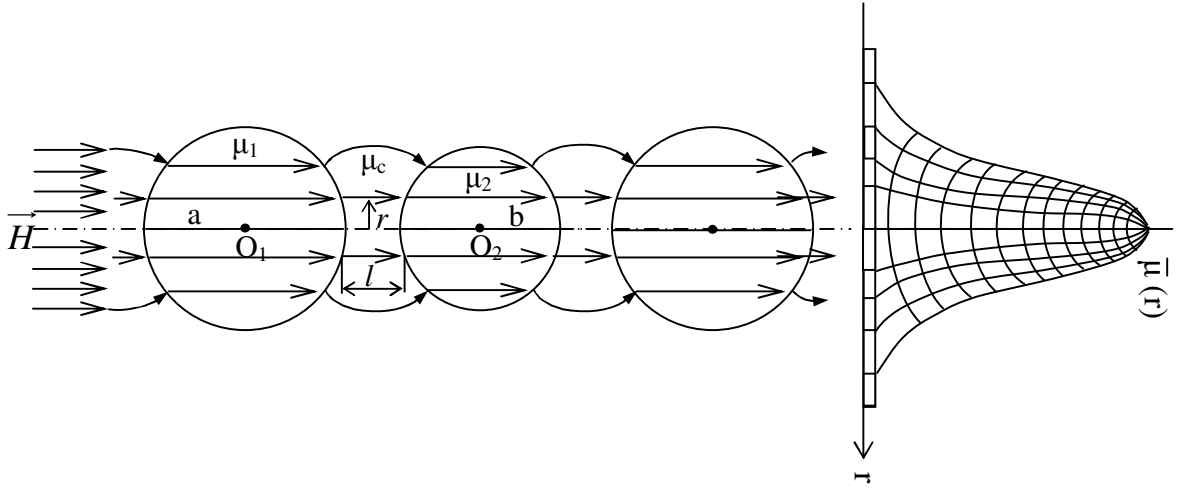
Dolgulu yatak yarıçapları a ve b olan manyetik özellikleri özdeş olmayan ferromanyetik kürelerden oluşmuştur. Genelde $a \neq b$ 'dir;

Bir biriyle teğetleşen kürelerin dış homojen alanda mıknatıslanması simetri eksenleri teğet noktalarından geçen silindiriksel kanallarla oluşmaktadır. Bu kanallar dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış dolgulu yatağın manyetik devresinin dallarını oluşturmaktadırlar. Teğetleşen küreler arasındaki boşlukta mıknatıslanma kanalı kabarcaklar genişler. İlk yaklaşımda bütün mıknatıslanma kanalı yarıçapı kürelerin teğet noktasından taksimatla r uzaklıkta olan düz silindir şeklinde oldukları varsayılmaktadır ve mıknatıslanma kanallarının eğilimlerinin etkisi ihmal edilir.

Yatağın gözeneklerinde oluşan yüksek gradyanlı manyetik alan teğet noktaları etrafında indüklenmektedir. Yataktaki kürelerin sayısı (dolgu faktörü) arttıkça bu yerel alanlar güçlenirler, kürelerin teğet noktalarından uzaklaştıkça ise sürekli olarak azalır;

Mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi bu ortamın boşluk olmasıyla salt manyetik çekirdek olması durumlarındaki sahip oldukları mıknatıslanma eğrilerinin arasında yer almaktadır. Yatağın dolgu faktörü (γ) arttıkça gözeneklerdeki manyetik alan yoğunluğunun ortalama değeri de artar. Öte yandan dolgu faktörü (γ) dolgu elemanlarının (kürelerin) çaplarının orantısı ile (a/b) orantılı olarak değişmektedir.

Bu varsayımlar dikkate alındığında ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özellikleri aşağıdaki gibi belirlenebilir. Yarıçapları a ve b olan ve bir birinden l uzaklıkta olan ferromanyetik kürelerin oluşturduğu zinciri ele alalım. Kürelerin manyetik özelliklerinin farklı olduğunu ($\mu_a \neq \mu_b$) ve küreler arasındaki boşluğun da manyetik geçirgenliği μ_c olan ortam olduğunu varsayalım. Dış homojen H manyetik alanda mıknatıslanmış bu küreler zincirinde belli bir bölgenin, örneğin, iki kürenin merkezleri arasındaki bölgenin (O_1O_2) mıknatıslanma özelliklerini inceleyelim (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Asıl etkili kanalın manyetik geçirgenliğinin grafiği olarak adlandırılan granüle(farklı boyutlarda POLYBALLS) edilmiş alanın kanaldan kanala (ya da kanal tarafından) mıknatıslanma örneği.

O_1O_2 bölgesinin manyetik relüktansının ortalama değeri, kürelerin çekirdeklerinin ve bu küreler arasındaki boşluğun seri bağlanmış relüktanslarından oluşmuş bir manyetik devre kısmı gibi olarak aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\Re = \Re_1 + \Re_2 + \Re_\delta \quad (3.20)$$

veya

$$\frac{l_e}{\mu_0 \bar{\mu} S} = \frac{l_1}{\mu_0 \mu_a S_1} + \frac{l_2}{\mu_0 \mu_b S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 \mu_c S_\delta} \quad (3.21)$$

Burada $l_e = IO_1O_2I$; $l_1(l_2)$ –birinci (ikinci) küre çekirdeğindeki r uzaklıktaki manyetik akı yolu uzunluğu; S_1, S_2, S_3 -sırasıyla manyetik akının birinci, ikinci kürelerde ve hava aralığında çektiği dik kesit alanları; $\bar{\mu}$

r yarıçaplı silindire sınırlanmış bölgenin manyetik geçirgenliğidir. Buradan $\bar{\mu}(r)$ olduğu da açıkça görülmektedir. Mıknatıslanma kanalının r yarıçaplı bir kuvazi silindir olduğunu varsaymış olursak Şekil 2.1'deki geometriye göre aşağıdaki basit ilişkiler kolaylıkla elde edilir:

$$\begin{aligned}
S_1 \approx S_2 \approx S_\delta & \quad l_1 + l_2 = (a+b) - \left(\frac{r^2}{2a} + \frac{r^2}{2b}\right) \\
l_e = a + b + l & \quad l_\delta = l + \frac{r^2}{2a} + \frac{r^2}{2b}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

basit matematiksel işlemlerden sonra ferromanyetik kürelerden oluşmuş zincirin mıknatıslanma kanalının manyetik geçirgenliği

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_1(1+\tau+l_b)}{f_1(\alpha, \tau) + f_2(\alpha, \tau)r_a^2} \tag{3.24}$$

$$f_1(\alpha, \tau) = \tau + \alpha + \beta l_\delta ; \quad f_2(\alpha, \tau) = \beta(1+\tau) - (1+\alpha\tau),$$

$$\text{olur. Burada } l_b = l/b, \tau = a/b > 1 ; r_a = r/a. \quad \beta = \frac{\mu_1}{\mu_c}, \quad \alpha = \frac{\mu_a}{\mu_b}.$$

Özel durumda bir biriyle teğetleşen aynı çapa sahip ($a=b$) özdeş ($\mu_a = \mu_b$) kürelerden oluşturulmuş non manyetik gözenekli dolgulu yataklarda ($l=0, a=b, \tau=1, \mu_c=1$) (3.24) denklemi aşağıdaki şekle dönüşüyor:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu\mu_c \left[1 + \frac{l_b}{1+\tau}\right]}{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau} + \frac{\mu - \mu_c}{2} r_a^2} \tag{3.25}$$

Bu ifade A.V. Sandulyak tarafından elde edilmiş ve çok sayılı deneylerle kanıtlanmış ifadenin aynısıdır [4,17].

(3.24) denklemi mıknatıslanma kanalındaki r_2-r_1 katındaki manyetik geçirgenliğin değişimini de belirlemeğe imkan verir. Böyle ki, $r = r_1$ ve $r = r_2$ arasındaki kanal katı için manyetik akı iki şekilde belirlenebilir:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{1 + \frac{\mu-1}{2} r_a^2}$$

Mıknatıslanmış zincirin ortalama manyetik geçirgenliğini belirlemek için bu zincire ait olan bireysel kanalın sahip olduğu manyetik akıyı belirlemek gerekir.

Tekil mıknatıslanma kanalına ait olan manyetik akı aşağıdaki iki eş değer veya özdeş denklem ile belirlenebilir.

$$\Phi = \mu_0 \bar{\mu}_{av} H \pi (r_2^2 - r_1^2) ; \quad \Phi = \mu_0 H 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \bar{\mu} r dr$$

Bu iki denklemden tekil kanal katındaki ortalama manyetik geçirgenlik ($\bar{\mu}_{av}$) aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\mu_{av} = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \bar{\mu} r dr \quad (3.26)$$

Kürenin teğet noktasından herhangi r uzaklığındaki tüm kanalın ortalama manyetik geçirgenliği ise ($r_l=0$) şu şekilde yazılabilir:

$$\mu_{av} = \frac{2}{r^2} \int_0^r \bar{\mu} r dr \quad (3.27)$$

denklem (3.24) dikkate alındığında (3.27) denkleminde Şekil 2.1’de gösterilen kürelerden oluşturulmuş zincirin mıknatıslanma kanalının ortalama manyetik geçirgenliği aşağıdaki gibi olur:

$$\bar{\mu}_{av} = \frac{2\mu\mu_c \left(1 + \frac{l_b}{1+\tau}\right)}{(\mu - \mu_c)\tau r_a^2} \ln \frac{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau} + \frac{(\mu - \mu_c)\tau}{2} r_a^2}{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau}} \quad (3.28)$$

Teğet noktasından olan uzaklığı (r) küçük kürenin yarıçapına (b) göre boyutsuzlaştırmış olursak Dk.(3.28) aşağıdaki gibi yazılır:

$$\bar{\mu}_{av} = \frac{2\mu\mu_c \tau \left(1 + \frac{l_b}{1+\tau}\right)}{(\mu - \mu_c)r_b^2} \ln \frac{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau} + \frac{(\mu - \mu_c)}{2\tau} r_b^2}{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau}} \quad (3.29)$$

Bu durumda küçük küre çapı hızındaki ($r_b=1$) bir silindiriksel mıknatıslanma kanalının ortalama manyetik geçirgenliği ise şu biçimde olur:

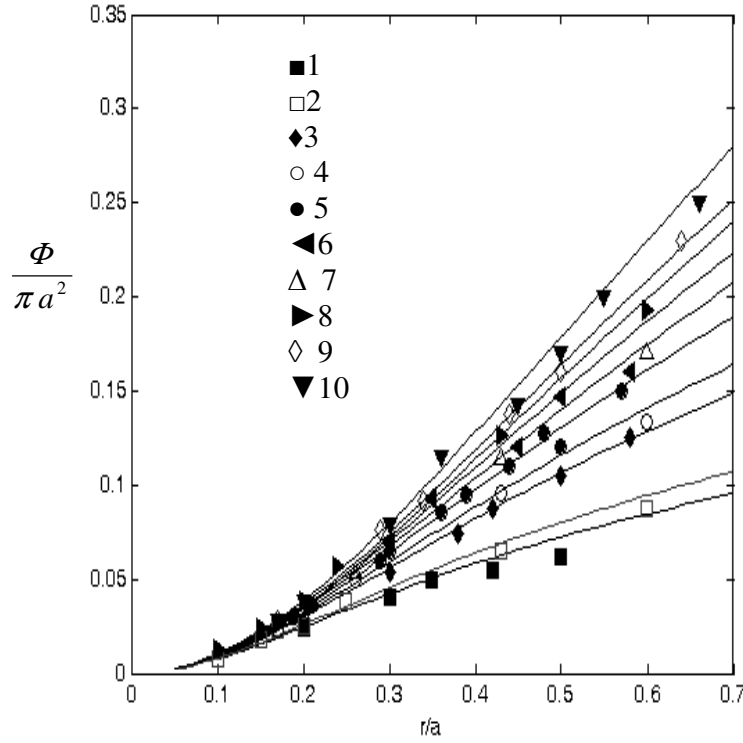
$$\mu_{av} = \frac{2\mu\mu_c \tau \left(1 + \frac{l_b}{1+\tau}\right)}{(\mu - \mu_c)} \ln \frac{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau} + \frac{(\mu - \mu_c)}{2\tau}}{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau}} \quad (3.30)$$

Mıknatıslanmış granüllerden oluşturulmuş dolgulu yataklara sahip olan manyetik filtre ve separatörlerde tutma bölgelerinde (teğet noktalarının etrafında) biriken manyetik parçacıkların dolgulu yatağın manyetik karakteristiklerine etkisinin değerlendirilmesi çok önemlidir. Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda Dk.(3.29) bu değerlendirmeyi yapmağa imkan sağlamaktadır. Böyle ki, teğetleşmiş kürelerin teğet noktaları etrafında (parçacıkları tutma bölgesinde) $r = r_0$ civarındaki bölgenin manyetik mikron parçacıklarla dolduğunu varsayalım. $r_0 < r < b$ bölgesi ise bu parçacıklardan barınmaksındır. Eğer bu parçacıkların manyetik geçirgenlikleri μ_a olursa, o halde $r < r_0$ kanal bölgesinin manyetik geçirgenliği Dk.(3.29)'dan ($l_b=0$) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\bar{\mu}_{av} = \frac{2\mu\mu_c\tau}{(\mu - \mu_a)r_b^2} \ln \frac{\mu_c + \frac{(\mu - \mu_c)}{2\tau}r_b^2}{\mu_a} \quad (3.31)$$

Mıknatıslanmış dolgulu yataklara has olan parametrelerde, örneğin $\mu = 20$, $\mu_a = 1.07$, $\tau = 1.2$ değerlerinde gözeneklerde biriken parçacıkların manyetik özelliklerinin $\bar{\mu}_{av}$ üzerindeki etkisi %1.6 civarlarındadır. Dahası, gözeneklerde biriken manyetik parçacıkların r_b hizasındaki bütün gözeneği doldurduğunu varsaymış olursak bile ($r_b=1$) buna karşın $\bar{\mu}_{av}$ değişimi %(4-5) 'den fazla değildir. Bu nedenle manyetik filtre ve seperatörlerin çalışma karakteristiğini belirlerken, gözeneklerde biriken parçacıkların dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerine etkisi ihmal edilebilir.

Dk.2.31'de elde edilen teorik sonuçların geçerliliğini kanıtlamak için bu sonuçların literatür de [17, 32] yer alan deney sonuçları ile karşılaştırılmasında yarar vardır. Bu deneylerde kürelerin teğet noktaları etrafında eş eksenli halkalar oluşturarak bu bölgelerde indüklenen manyetik akılar ölçülmüştür. Şekil 2.2'de bu veriler Dk.(3.31) den elde edilen teorik sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu sonuçların bir biriyle iyi uyum sağladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.2. Ferromanyetik kürelerin değme noktalarının etrafında aynı merkezli halkalar üzerinde ölçülen manyetik zincir için deneysel verilerin kıyaslanması.

3.4.1 Mıknatıslanmış Dolgulu Yatağın Ortalama Manyetik Geçirgenliği

Dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış granül dolgulu yataklardaki kanallarla mıknatıslanma modeli bu ortamların esas mıknatıslanma eğrisini $B(H)$ belirlemeye imkân verir. Genelde kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisini Dk.(3.31) dikkate alınmakla ($r_b=1$)

$$B = \mu_0 \mu_{av} H \quad (3.32)$$

olarak belirleyebiliriz. Ancak bu durumda mıknatıslanmış dolgulu yataklara has olan bazı faktörlerin de Dk.3.32’de dikkate alınması gerekir. Zira dolgulu yataklarda mıknatıslanma kanalları bir biriyle temasta olurlar veya bir biriyle örtüşerek kanalların manyetik geçirgenliğini de arttırırlar. Kürelerin bir biriyle teğetleşmesi noktalarının sayısına bağımlı olarak her bir küre birkaç mıknatıslanma kanalına sahip olurlar. Dahası, gerçekte mıknatıslanma kanalları doğrusal değil zikzak

şeklinde dirler ve bu kıvrımlar da küreler zincirinin mıknatıslanması düzeyini etkiler. Örneğin, mıknatıslanmış küreler zincirinde merkez ekseninin mıknatıslanma yönüne göre 45^0 - 60^0 eğilmesi durumunda manyetik akı $\%(20-30)$ civarlarında azalır [4]. Öte yandan granül dolgulu yatakların ortalama özellikleri dikkate alındığında ($\gamma=0.6$) mıknatıslanma kanallarının bir birine etkisi yaklaşık olarak bir sabitle değerlendirilebilir [4,17]. Benzer gözlemler diğer elemanlardan (metal çubuklar, talaşlar) oluşturulmuş dolgulu yataklar için de geçerlidir [4,20, 32]. Bu nedenle bu faktörlerin dolgulu yatakların esas mıknatıslanma eğrisine etkisini Dk.3.30 veya Dk.3.32 de sabit veya γ 'ya bağımlı bir katsayı ile düzeltilebilir. Bu amaçla dolgulu yatakların bazı özelliklerini dikkate almakta yarar vardır. Öncelikle, mıknatıslanmış kürelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda dolgu faktörünün ortalama değerinin $\gamma=0.6$ olduğu varsayılmaktadır [4]. Gerçekte ise özdeş kürelerin biriyle karşılıklı dokunma noktasının sayısına (N_k) bağımlı olarak dolgu faktörü $\gamma=0.5-0.74$ civarlarında olabilir. Farklı çaplara sahip olan kürelerin karışımından oluşturulmuş dolgulu yataklarda ise teorik olarak $\gamma=0.2-0.84$ civarlarına kadar değişebilir. Dahası, dolgu faktörü (γ) veya porozite (ε) bu yatağın yerleştiği tankın boyutlarına (örneğin, D çapına) bağımlıdır. Çok sayılı teorik incelemeler, deneyler ve matematiksel modellemeler sonucu bu bağıntılar aşağıdaki gibi belirlenebilir [4,17]:

$$\frac{D}{d} = 3 - 40; \quad (3.33)$$

$$\varepsilon = 0.5 \left(\frac{D}{d} \right)^{-0.1} ; \quad \gamma = 0.52 \left(\frac{D}{d} \right)^{0.06} \quad (3.3)$$

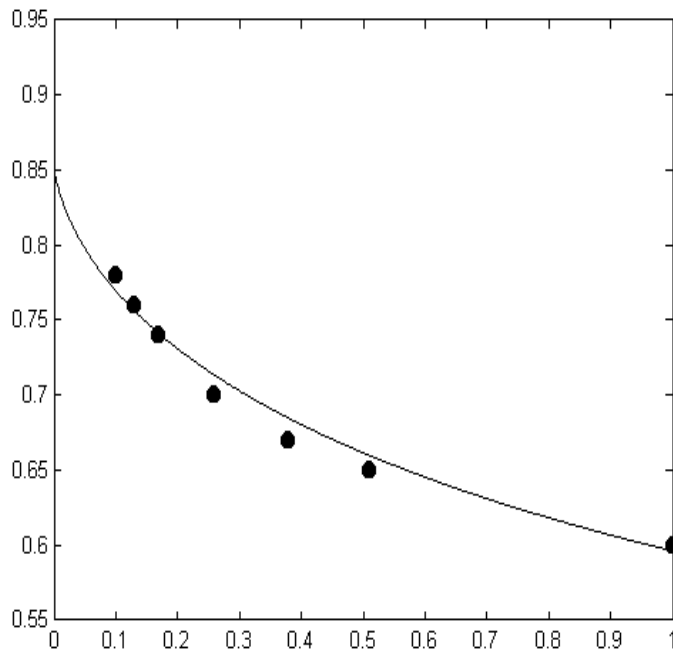
$$N_c = 22\gamma^2 \cong 19 - 28\varepsilon \quad (3.35)$$

Mıknatıslanmış dolgulu yataklarda γ 'nın artmasıyla $\bar{\mu}_{av}$ veya B 'nin artması gözlenmektedir. Bu nedenle dolgu faktörünün (γ) artırılmasının diğer bir yolu farklı çaplara sahip olan kürelerin karışımından oluşturulmuş dolgulu yatakların kullanılmasıdır. Şekil 3.3'de $\gamma(b/a)$ bağıntısı gösterilmiştir. Bu ilişki:

$$\gamma = \frac{0.86}{\left(1 + \frac{1}{\tau^{0.65}} \right)^{0.52}} \quad (3.36)$$

analitik ifadesiyle belirlenebilir.

Şekil 3.3’den görüldüğü gibi γ ’nın etkin artışı $b/a < 0.4$ ($\tau > 3.5$) düzeylerinde oluşur. Bu durumda küçük küreler büyük küreler arasındaki gözeneklerden kolaylıkla geçerler. En iyi sonuçlar ($\gamma = 0.7-0.75$) kürelerin çapları orantısının $b/a < 0.2-0.3$ düzeylerinde elde edilir. Fakat bu türlü dolgulu yataklarda büyük çaplı kürelerin bir biriyle teğet noktalarının sayısı azalır. Dahası bu yataklardan geçen ortamların (sıvı veya gaz)



Şekil 3.3. Yatak elementlerinin büyüklük(çap) oranına karşı dolgu faktörünün çeşitliliği deneysel veri Dk. 3.36’dan hesaplanan metal çizgi.

Debisi azalır, basınç farkı ise hızla artır. Bu olaylar ise mıknatıslanmış dolgulu yataklar kullanılan aygıtların (manyetik filtreler, separatörler, reaktörler) çıkış karakteristiklerinin zayıflamasına neden olur. Böylece, pratik uygulamalarda mıknatıslanmış dolgulu yatakları oluşturan kürelerin çaplarının orantısı $\tau \leq 2.5$ düzeylerinde olmalıdır. Bu durumda $\gamma(\tau)$ ilişkisi ise Dk.2.36’dan belirlenebilir.

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliğini belirleyen ve Dk.2.30 veya

Dk.2.32'nin kullanılmasını zorlaştıran bir husus da metal kürelerin kendilerinin mıknatıslanma özelliklerinin ($\mu(H)$)önceden belirlenmesinin gereksinimidir.

Genel olarak, dolgulu yatakları oluşturan metal kürelerin mıknatıslanma eğrisini aşağıdaki şekilde gösterebiliriz

$$B_n = kH^{\frac{1}{n}} \quad (3.37)$$

$$\mu = \frac{k}{\mu_0 H^{\frac{n-1}{n}}} \quad (3.38)$$

Burada n ve k –düzeltme katsayılarıdır. Örneğin $n=10$ olduğunda kürelerin gerçek mıknatıslanma eğrileri $\mu(H)$ dikkate alındığında $k=0.61$ değerinde bu bağıntı deneysel değerlerle iyi uyum sağlar. Bu durumda

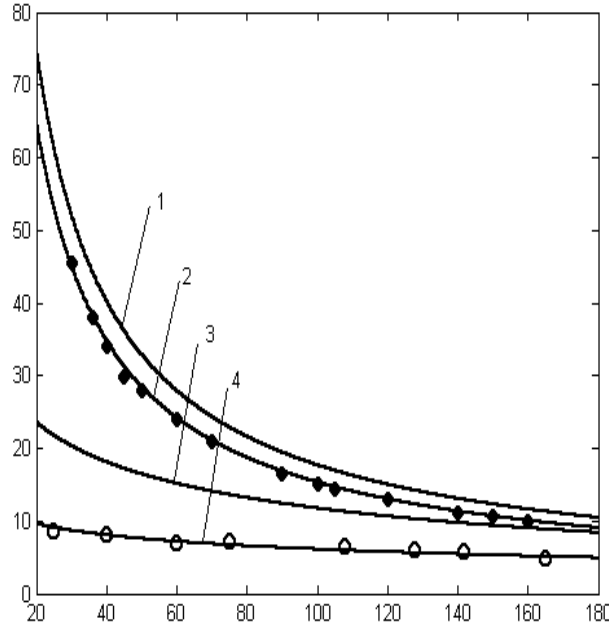
$$\mu = \frac{4.85 \times 10^5}{H^{0.9}} \quad (3.39)$$

olur. Burada $H = H/1$ A/m boyutsuzlaştırılmış dış manyetik alan şiddetidir. Şekil 3.3'de yumuşak çelikten yapılmış metal kürelerin $\mu(H)$ bağıntısının Dk.3.39 ile kıyaslandığı grafik verilmiştir.

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların bu özellikleri dikkate alındığında Dk.2.30-32'den yatağın mıknatıslanma eğrisi kolaylıkla belirlenebilir. Çok sayılı deneylerin ve istatistik verilerin [4,17] incelenmesi sonucu mıknatıslanma kanallarının karşılıklı etkisinin ve dolgu faktörünün (γ) değişiminin mıknatıslanma eğrisine etkisini $K_B=1.4\gamma^{0.65}$ katsayısı ile dikkate alınmasının mümkün olduğu tespit edilmiştir. Böylece,

farklı çaplara sahip olan ve yüzeyleri $l_k=l/2$ kalınlığında non manyetik ($\mu_c=1$) kaplamayla kaplanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların esas mıknatıslanma eğrisi aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$\mu_{av} = \frac{2.75\gamma^{0.65}\mu\tau}{(\mu-1)} \ln \frac{\mu_c + \mu \frac{l_b}{1+\tau} + \frac{(\mu-\mu_c)}{2\tau}}{1 + \mu \frac{l_b}{1+\tau}} \quad (3.40)$$



Şekil 3.4. Topların(1,2) manyetik geçirgenliği ve polyball yataklarının(3,4) ortalama manyetik geçirgenliği arasındaki ilişkinin tahmini yüzeyel manyetik alan yoğunluğuna karşı:1,3-[4,17],2,4, eq.(19) dan hesaplanan ● ve ○ - deneysel tarihler[17]

$$\mu_{av} = \frac{2.75\gamma^{0.65}\mu\tau}{(\mu-1)} \ln\left(1 + \frac{\mu-1}{2\tau}\right) \quad (3.41)$$

Eğer kürelerin yüzeylerindeki koruyucu non manyetik kaplama bulunmuyorsa ($l_b=0$) , o halde mıknatıslanma eğrisinin ifadeleri (Dk.2.40,2.41) daha da basitleşerek aşağıdaki gibi olur:

$$\mu_{av} = 2,8 \ln\left(\frac{\mu-1}{2}\right) \quad (3.42)$$

Dk.2.40-2.43'ün kullanılmasında Dk.2.36 ve Dk.2.39 ilişkileri dikkate alınmalıdır. Hesaplamaları kolaylaştırmak için Dk.2.39 göz önünde tutularak

$$\mu-1 = \frac{8.8 \times 10^5}{\underline{H}^{0.96}} \quad (3.43)$$

yaklaşık ifadesi de kullanılabilir.

Birçok durumlarda, örneğin manyetik filtrasyon ve separasyon işlemlerinde dolgulu yataklarda ferromanyetik kürelerin yerine daha ucuz ve pratik olan metal talaşları kullanılır. Bu durumda, esasen yay şekilli geometriye sahip olan bu dolgu elemanlarının mıknatıslanma özellikleri de farklı olur. Buna rağmen istatistik verilerin incelenmesi sonucu bu, bu tip yatakların mıknatıslanma eğrisinin de kanallarla mıknatıslanma modeline göre belirlenmesinin mümkün olduğu saptanmıştır [4]. Bu durumda mıknatıslanma kanallarının karakterinin değişimi ve dolgu faktörünün (γ) etkisi Dk.11’de $K_c = 1.88\gamma^{0.65}$ katsayısı ile göz önüne alınabilir. O halde metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$\mu_{av} = \frac{3.75\gamma^{0.65}\mu}{(\mu - 1)} \ln\left(\frac{\mu + 1}{2}\right) \quad (3.44)$$

4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Mıknatıslanmış Ferromanyetik Dolguların Mıknatıslanma Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi

Tezin bu bölümünde ikinci bölümde elde edilen teorik sonuçların gerçek ferromanyetik dolgulu yataklarda geçerliliğini saptamak için yapılan deneysel incelemelerin sonuçları verilmiştir. Bu amaçla dış homojen manyetik alanda mıknatıslanan ferromanyetik kürelerden (bilyelerden), tel kırıntılarından ve metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliği dış manyetik alanın geniş bir aralık değerinde $B=0-2$ T incelenmiştir. Deneysel incelemelerde aşağıdaki materyaller ve metot kullanılmıştır.

4.1 Materyaller ve Metot

Deneysel incelemelerde ferromanyetik granül elemanlar olarak çapları 4,75mm, 6,28mm, 9mm, 10,5mm, 11,9mm olan ferromanyetik bilyeler, özel olarak kırıntı hallerine getirilmiş ve uzunlukları 5mm civarında olan ferromanyetik tel kırıntıları ve ferromanyetik metal talaşları kullanılmıştır. Ferromanyetik metal talaşları deneylerden önce özel yöntemlerle yaklaşık olarak 5-7mm uzunluğu olan yay şeklinde hazırlanmıştır. Bazı durumlarda bu yaylar spiral şeklinde de olmuştur.

Dış manyetik sistem olarak hava aralığının boyutları 3cm x 6cm x 9cm olan güçlü manyetik sistem kullanılmıştır. Bu sistem hava aralığında $B=0$ 'dan $B=2$ T civarında güçlü homojen manyetik alan oluşturan BOXMAG RAPID UK tipli manyetik seperatör sistemi olup; sisteme uygulanan DC gerilim DC akımın sırası ile 0-220V, 0-20A aralığında ayarlanmasına imkân vermektedir.

Ferromanyetik granüllerden oluşan dolgulu yataklar not manyetik (Bakır) malzemeden yapılmış 3cm x 3cm x 10cm boyutlarında dikdörtgen kesitli gövdenin içinde oluşturulmuştur.

Ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatağın gözeneklerindeki manyetik alan yoğunluğunu belirlemek için dış manyetik alanın yönüne dik yönde olan ve

dikdörtgen kesitli, kalınlığı 1mm non manyetik levhalardan oluşmuş boyutları 30mm x 3mm x 100mm olan hava aralığı oluşturulmuştur. Bu durumda ölçülebilen hava aralığının eni 1mm olur.

Ferromanyetik dolgulu yataklar, ayrı ayrı 4,75mm, 6,28mm, 9mm, 10,5mm, 11,9mm bilyelerden, bu bilyelerin 4,75mm + 9mm, 4,75mm + 10,5mm, 4,75mm + 11,9mm ve 6,28 + 9mm, 6,28 + 10,5mm, 6,28 + 11,9mm karışımlarından, ferromanyetik tel kırıntılarında ve ferromanyetik metal talaşlarından oluşturulmuştur. Bütün durumlarda dolgulu ve dolgusuz konumlarda manyetik alan yüksekliğine göre 18 farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Herbir noktada 5 ölçüm yapılarak sonuçlar matematiksel istatistik yöntemleriyle ortalama değer olarak alınmıştır. Hem dolgusuz hem de dolgulu yataklar için manyetik alan yoğunluğunun hava aralığının yüksekliğine göre değişimi incelenerek esas ölçümler iki merkeze yakın nokta için referans olarak değerlendirilmiştir. Bütün deney sürecinde 38 farklı koşullarda deney olmakla toplam 22610 ölçüm yapılmıştır.

Hava aralığındaki manyetik alan yoğunluğunun değeri Transversel Hall probu olan G05 Gaussmetre ile yapılmıştır. Hall probunun kalınlığı 1mm'nin altına olup bu prob dolgulu yatağın içinde oluşturulan enine hava aralığında serbestçe hareket ettirmeye imkân vermiştir.

Hall probu ahşap askı üzerinde sabitlenmiştir ve bu askının yardımıyla prob farklı konumlarda sabit tutulmuştur. Probun sabit tutulmasıyla hava aralığının uygun noktasında Gaussmetrenin kararlaşmış göstergesi elde edilmiştir.

Ferromanyetik dolgulu yatakların dolgu faktörünün mıknatıslanma eğrisine etkisini değerlendirmek için yataktaki ferromanyetik malzeme kısmının hacimsel değişimini elde etmek gerekir. Bu amaçla ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda farklı çaplardan olan bilyelerin karışımı ile yanı sıra dolgulu yatakta hacmin bir kısmının çapları 2mm civarında olan plastik (non manyetik) küreler kullanılmıştır. Deneylerde plastik kürelerin yatak hacminde yaklaşık olarak homojen dağılımına özen gösterilmiştir. Böylece deneylerde ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların parozitesinin $\varepsilon=0,26-0,7$ civarında değişimi elde edilmiştir. Ferromanyetik tellerden ve ferromanyetik metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların parozitesinin değişimi ise $\varepsilon=0,85-0,95$ civarında olmuştur.

Ölçümlerin güvenliğini sağlamak için G05 Gaussmetresi sabit pillerden değil sürekli

olarak adaptörden beslenmiştir.

Ölçümlerden alınan sonuçlar hem grafiksel hem de çizelge şeklinde düzenlenerek incelenmiştir ve uygun yorumlar yapılmıştır. Bu incelemeler aşağıda verilmiştir.

(Tez çalışmalarındaki deneysel incelemelerde kullanılan aygıt ve malzemeler aşağıda gösterilmiştir.)



Deneyleerde kullanılan ferromanyetik küreler, non manyetik plastik malzemeler, çelik talaşları, tel kırıntıları.



Deneylerde kullanılan yatak gövdesi



Deney düzeneğinin genel durumu

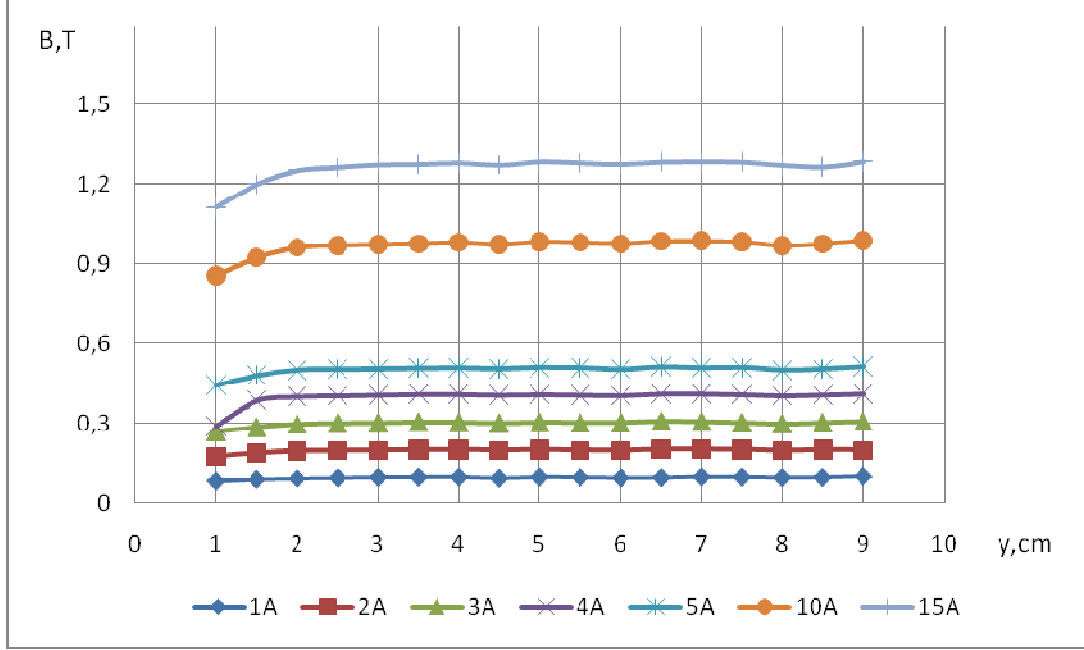
4.2. Çeşitli Ferromanyetik Granüllerden Oluşturulmuş Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Özelliklerinin Deneysel Sonuçları

4.2.1. Dolgulu Yatak bulunmadığı durumda manyetik sistemin hava aralığının mıknatıslanma özelliği

Manyetik sistemin hava aralığında ferromanyetik dolgulu yatak bulunmadığında mıknatıslanma özellikleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi manyetik alan değıştikçe bütün durumlarda hava aralığındaki manyetik alan yoğunluğu hava aralığı boyunca sabit kalmaktadır. Dolayısıyla hava aralığındaki manyetik alan düzgün ve homojen bir manyetik alandır. Şekilden görüldüğü gibi hava aralığının uç bölgelerinde manyetik alanın değeri değışmektedir, bunun nedeni hava aralığının kenarlarında saçaklanmanın oluşmasıdır. Başka bir değışle hava aralığının orta bölgelerinde $L=2\text{cm}-9\text{cm}$ bölgesinde manyetik alan yaklaşık olarak sabit kalır. Bu nedenle deneylerde esasen bu bölgelerde dış manyetik alanın düzgün veya homojen olduğunu varsayabiliriz. Bu nedenle deneysel ölçümlerde dolgulu yatak bulunduğu durumda da esas ölçümler dolgulu yatağın yukarıda adı geçen bölgelerinde yani $L=5\text{cm}$ ve $L=8\text{cm}$ ’de yapılmıştır. Bundan başka Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 de hava aralığının mıknatıslanmasının açıkça doğrusal olduğu görülmektedir. Başka bir değışle dış manyetik alanın yeterince büyük derlerinde bile $B=1,5-2\text{T}$ bu manyetik sistemde doyma olayının bulunmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında hava aralığı ferromanyetik dolgulu yatakla doldurulduğu durumlar için de uygun değlendirmeler yapmak mümkündür. Manyetik sistem ferromanyetik dolgulu yataklara sahip olduğundan aşağıdaki deneysel sonuçlar elde edilir. Mıknatıslanma özelliğinin belirlenmesi için ferromanyetik dolgulu yatakların mıknatıslanmasının Çizelge 4.1 veya Şekil 4.1 ile kıyaslanmasında yarar vardır.

Çizelge 4.1. Manyetik malzeme içermeyen filtrede, 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğu değerleri.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,101	0,199	0,306	0,41	0,513	0,989	1,283
8,5	0,097	0,2	0,302	0,406	0,505	0,977	1,263
8	0,096	0,197	0,298	0,402	0,501	0,97	1,27
7,5	0,098	0,201	0,302	0,407	0,51	0,983	1,281
7	0,099	0,202	0,305	0,41	0,508	0,987	1,282
6,5	0,096	0,202	0,307	0,41	0,512	0,986	1,281
6	0,095	0,197	0,302	0,403	0,503	0,977	1,274
5,5	0,097	0,199	0,302	0,405	0,509	0,981	1,278
5	0,098	0,2	0,303	0,407	0,51	0,984	1,282
4,5	0,094	0,199	0,3	0,405	0,505	0,974	1,271
4	0,098	0,2	0,303	0,408	0,508	0,981	1,278
3,5	0,098	0,2	0,304	0,408	0,507	0,977	1,274
3	0,097	0,198	0,301	0,405	0,505	0,974	1,272
2,5	0,095	0,197	0,3	0,402	0,503	0,971	1,262
2	0,093	0,196	0,297	0,4	0,501	0,963	1,25
1,5	0,09	0,188	0,285	0,385	0,48	0,925	1,199
1	0,0838	0,175	0,2688	0,2872	0,4448	0,8574	1,115



Şekil 4.1. Manyetik malzeme içermeyen dolgusuz yatağın mıknatıslanma özelliğinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.2. Çapı $d=4,75\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları

Şekil 4.2’de $d= 4,75\text{mm}$ çaplı çelik kürelerle (bilyelerden) oluşturulmuş dolgulu yatak boyunca B manyetik alan yoğunluğunun değişimleri gösterilmiştir. $d= 4,75\text{mm}$ ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanması dış manyetik alanın çeşitli değerlerinde incelenmiştir.

Dış manyetik alanın değişimi mıknatıslanma sisteminin bobinlerindeki akımın 1-15 A aralığında değişmesi ile elde edilmiştir.

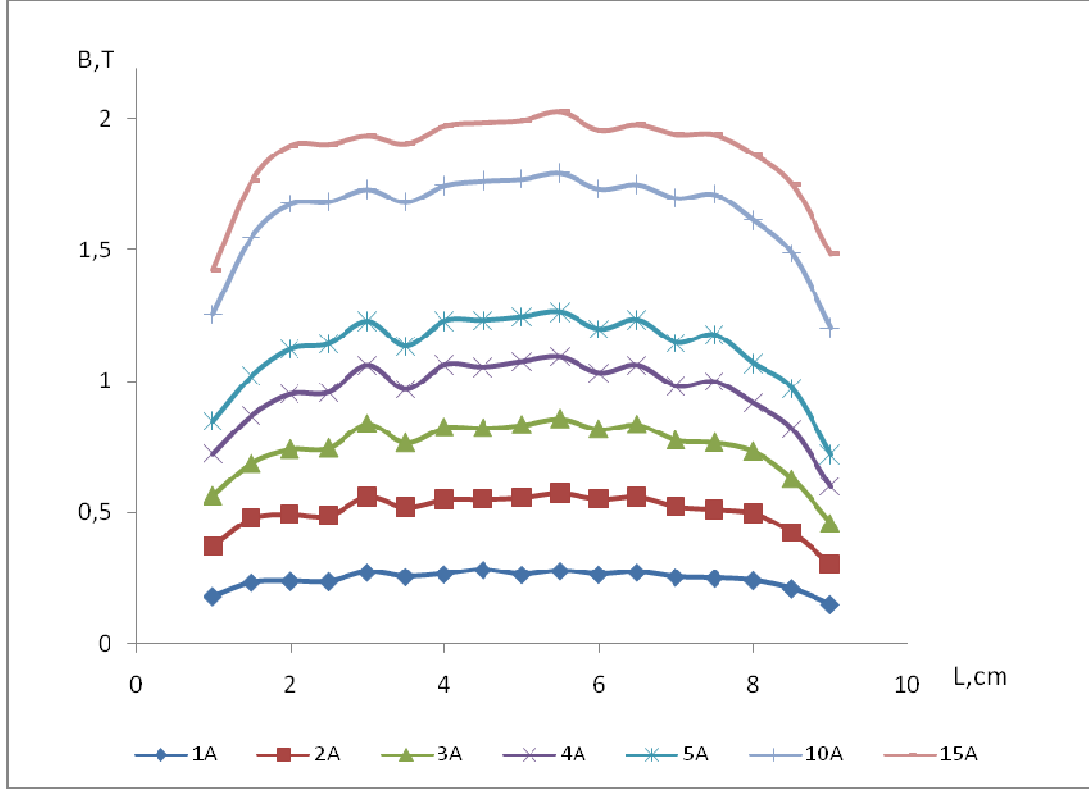
Dolgulu yatak boyunca 17 noktada her bir durum için B değerleri ölçülmüştür ve sonuçlar çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi manyetik sistemin esas hava aralığında B değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Kutupların uç bölgelerinde ise B manyetik alan yoğunluğunun hafif düşüşleri gözlenmiştir. Bu düşüşün nedeni kutbun kenarlarında saçaklanma olayının etkin olmasıdır. Yani bu bölgelerde manyetik alan yoğunluğunun belli bir kısmı boşluktan kapanmaktadır.

Ancak Şekil 4.2’den görüldüğü gibi dolgulu yatağın esas çalışma bölgelerinde manyetik alan yoğunluğunun sabit olarak daraldığını varsayabiliriz. Öte yandan Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi dış manyetik alanın artmasıyla dolgulu yatağın gözeneklerindeki B manyetik alan yoğunluğu da artmaktadır. Sonuç olarak dolgulu yatak bulunması durumunda bu ortamın mıknatıslanma özellikleri Çizelge 4.1 ve ya Şekil 4.1 deki özellikleri sağlamaktadır. Fakat hava aralığında dolgulu yatakların oluşturulmasıyla manyetik alan yoğunluğu boşluktaki duruma nazaran uygun noktalarda 3-3,5 defa fazladır.

Çizelge 4.2. Çapı d=4,75mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,149	0,302	0,457	0,598	0,721	1,204	1,485
8,5	0,208	0,423	0,627	0,818	0,972	1,487	1,752
8	0,239	0,496	0,732	0,917	1,068	1,614	1,865
7,5	0,248	0,512	0,766	0,999	1,176	1,712	1,94
7	0,252	0,523	0,775	0,982	1,146	1,698	1,941
6,5	0,271	0,56	0,834	1,062	1,233	1,75	1,978
6	0,263	0,551	0,817	1,033	1,198	1,734	1,957
5,5	0,276	0,574	0,857	1,094	1,262	1,794	2,026
5	0,262	0,557	0,833	1,076	1,244	1,771	1,993
4,5	0,28	0,551	0,821	1,055	1,231	1,764	1,985
4	0,264	0,55	0,824	1,064	1,229	1,747	1,973
3,5	0,254	0,52	0,765	0,97	1,133	1,683	1,906
3	0,271	0,56	0,837	1,062	1,227	1,732	1,936
2,5	0,235	0,488	0,745	0,959	1,142	1,684	1,904
2	0,236	0,494	0,74	0,952	1,122	1,676	1,9
1,5	0,231	0,477	0,688	0,87	1,019	1,55	1,764
1	0,179	0,372	0,562	0,723	0,848	1,255	1,425



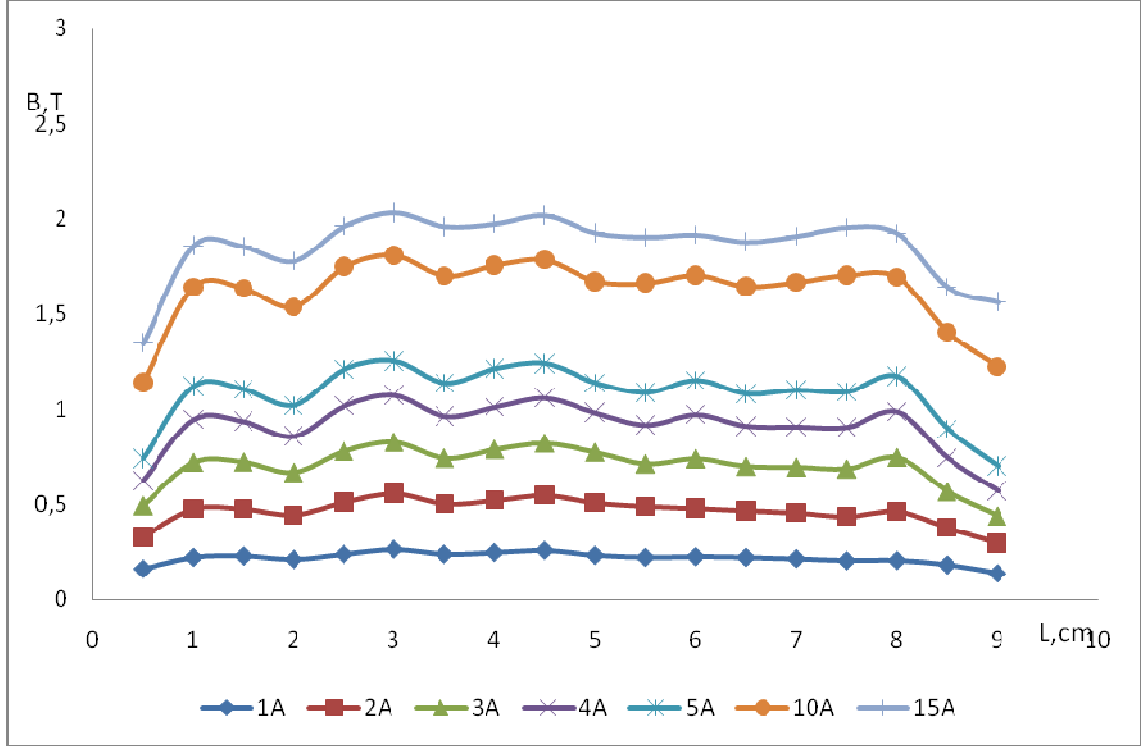
Şekil 4.2. Çapı $d=4,75$ mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.3. apı $d=6,28\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

apı $6,28\text{mm}$ olan homojen elik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özellikleri izelge 4.3 ve şekil 4.3 de verilmiştir. Çizelge ve şekilden görüldüğü gibi bu durumda da dolgulu yatağın mıknatıslanma özellikleri $d=4,75\text{mm}$ ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerine benzerdir. Fakat şekil 4.3 den görüldüğü gibi $d=6,28\text{mm}$ çapındaki ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrileri daha çok dalgalanma göstermektedir. Bunun nedeni bilyelerin çaplarının artmasıyla bilyeler arasındaki boşlukların daha net bir geometriye sahip olmaları ve boşluk-ferromanyetik bilye ara yüzeyinde manyetik kuvvet çizgilerinin daha etkin bir eğime sahip olmasıdır. Buna rağmen $d=6,28\text{mm}$ çapındaki ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların gözeneklerindeki manyetik alan yoğunluğ boşluktaki uygun noktalara göre yaklaşık olarak 2-2,5 defa fazla olmaktadır.

Çizelge 4.3. Çapı $d=6,28\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,139	0,294	0,437	0,572	0,699	1,222	1,564
8,5	0,184	0,376	0,566	0,745	0,895	1,405	1,641
8	0,207	0,463	0,746	0,988	1,171	1,691	1,922
7,5	0,206	0,435	0,686	0,907	1,091	1,702	1,954
7	0,216	0,455	0,695	0,909	1,1	1,666	1,908
6,5	0,223	0,466	0,699	0,913	1,081	1,643	1,878
6	0,227	0,479	0,74	0,973	1,151	1,702	1,915
5,5	0,223	0,489	0,713	0,919	1,087	1,661	1,903
5	0,234	0,508	0,774	0,982	1,137	1,671	1,925
4,5	0,26	0,548	0,822	1,061	1,24	1,782	2,017
4	0,249	0,522	0,789	1,013	1,212	1,755	1,973
3,5	0,24	0,503	0,743	0,965	1,136	1,699	1,958
3	0,266	0,559	0,828	1,076	1,253	1,807	2,031
2,5	0,24	0,512	0,78	1,019	1,209	1,746	1,96
2	0,213	0,444	0,667	0,859	1,019	1,536	1,778
1,5	0,231	0,476	0,722	0,937	1,104	1,634	1,853
1	0,223	0,475	0,72	0,948	1,12	1,64	1,859
0,5	0,162	0,33	0,492	0,626	0,74	1,14	1,347



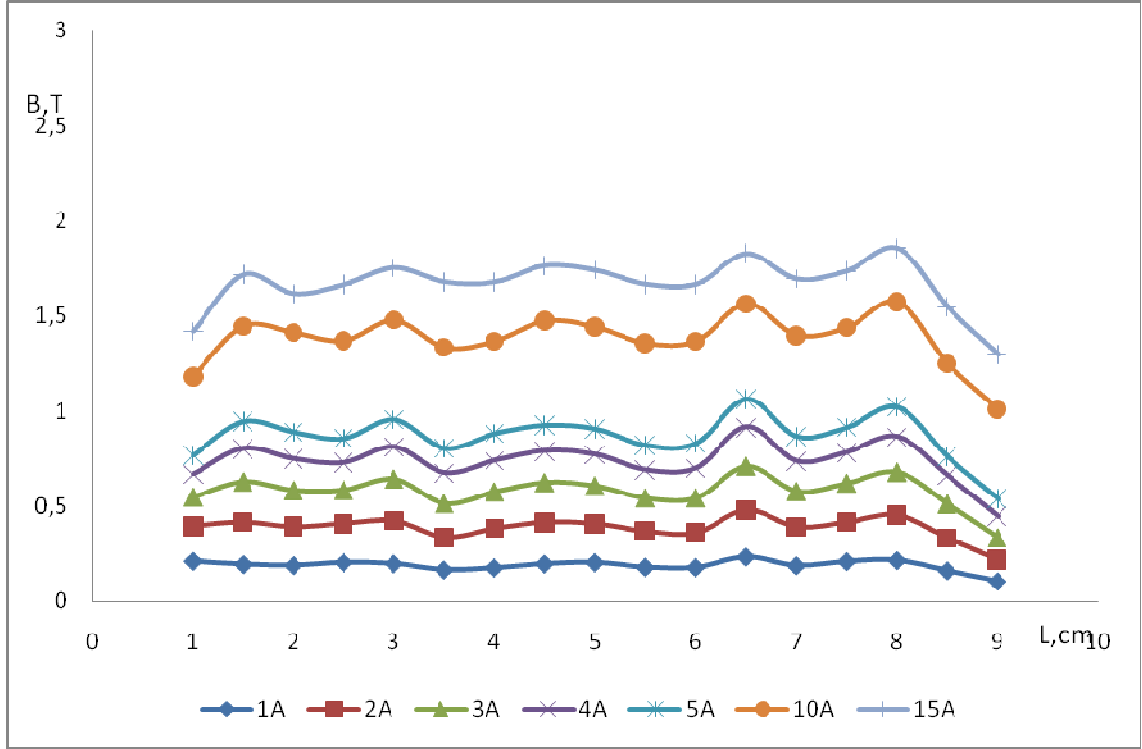
Şekil 4.3. Çapı $d=6,28\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.4. apı d=9 mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

apı d=9mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri izelge 4.4 ve şekil 4.4'de gösterilmiştir. Çizelge ve şekilden görüldüğü gibi ferromanyetik bilyelerin çaplarının artması genel olarak dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliğinin karakterini değişmemektedir. Başka bir değişle dış manyetik alan şiddeti artıkça dolgulu yatağın ortalama manyetik alan yoğunluğu da artmaktadır. Fakat manyetik alan yoğunluğunun artışı yavaşlar, örneğin çapı d=9mm ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların uygun noktasındaki manyetik alan yoğunluğu boşluktaki uygun noktalara göre yaklaşık olarak 2 defa artmaktadır. Bu değer örneğin d=6,28mm çaplı ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş yataklarda 2,5 defa civarlarına çıkabilir.

Çizelge 4.4. Çapı d=9mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,104	0,219	0,333	0,446	0,538	1,011	1,299
8,5	0,16	0,334	0,511	0,66	0,76	1,251	1,548
8	0,215	0,453	0,677	0,864	1,022	1,576	1,857
7,5	0,209	0,417	0,619	0,784	0,915	1,44	1,738
7	0,187	0,392	0,577	0,737	0,867	1,4	1,696
6,5	0,233	0,48	0,708	0,916	1,064	1,566	1,828
6	0,178	0,362	0,542	0,7	0,831	1,369	1,668
5,5	0,179	0,369	0,541	0,691	0,82	1,357	1,668
5	0,204	0,41	0,605	0,772	0,907	1,444	1,742
4,5	0,197	0,416	0,623	0,791	0,926	1,475	1,766
4	0,176	0,385	0,574	0,74	0,882	1,369	1,679
3,5	0,165	0,338	0,513	0,675	0,805	1,335	1,68
3	0,198	0,424	0,641	0,811	0,956	1,479	1,755
2,5	0,204	0,41	0,583	0,729	0,856	1,37	1,666
2	0,188	0,393	0,582	0,749	0,89	1,414	1,618
1,5	0,194	0,417	0,627	0,804	0,946	1,448	1,718
1	0,211	0,397	0,546	0,667	0,768	1,184	1,421



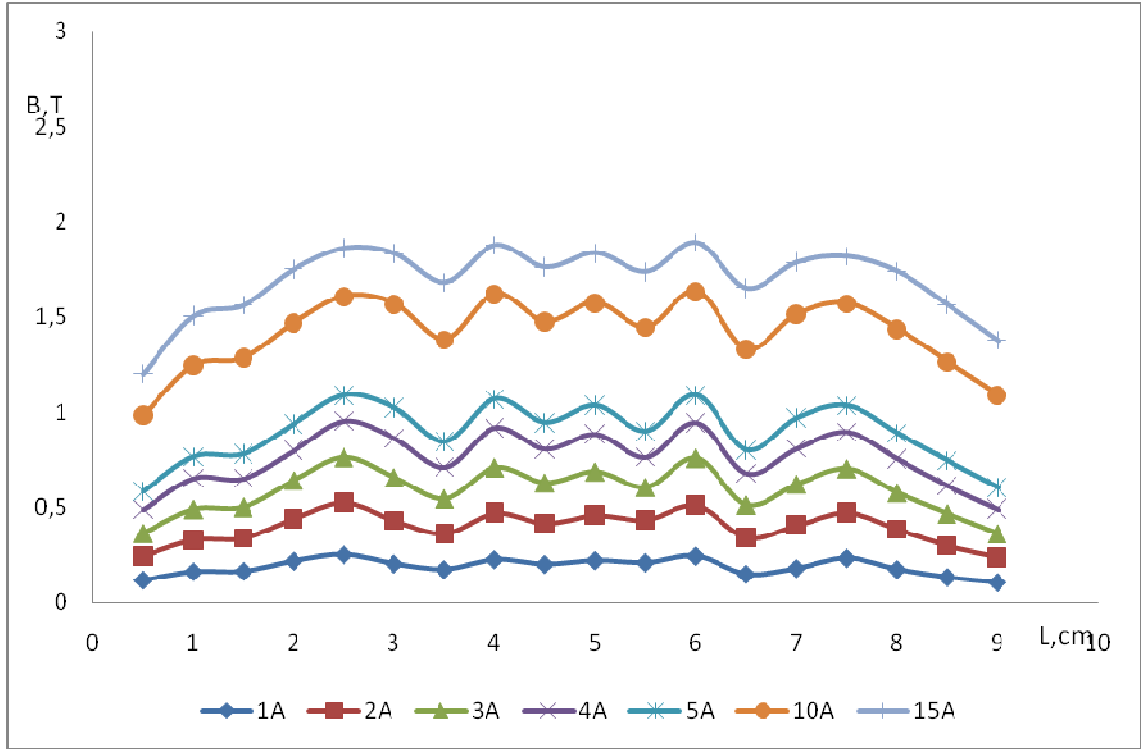
Şekil 4.4. Çapı $d=9\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.5. apı $d=10,5$ mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

apı $d=10,5$ mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri izelge 4.5 ve şekil 4.5’de verilmiştir. Bu izelge ve şekilden görüldüğü gibi $d=10,5$ mm çaplı ferromanyetik bilyelerin mıknatıslanma özellikleri yukarıdaki dolgulu yatakların özelliklerine benzerdir. Yukarıda söz konusu olduğ gibi ferromanyetik bilyelerin çapının artmasıyla gözeneklerdeki manyetik alan yoğunluğunun dalgalanmasındaki artış da devam etmektedir. Bu durumda boşluğa göre dolgulu yatağın uygun noktasındaki manyetik alan yoğunluğunun artışı ise 1,5-1,8 defa civarındadır.

Çizelge 4.5. Çapı d=10,5 mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,105	0,238	0,362	0,489	0,602	1,093	1,377
8,5	0,132	0,3	0,468	0,613	0,744	1,265	1,565
8	0,173	0,386	0,578	0,755	0,89	1,44	1,74
7,5	0,232	0,473	0,705	0,897	1,036	1,572	1,82
7	0,179	0,406	0,623	0,81	0,971	1,516	1,789
6,5	0,148	0,342	0,514	0,679	0,802	1,332	1,652
6	0,243	0,511	0,76	0,945	1,092	1,636	1,891
5,5	0,209	0,436	0,607	0,764	0,901	1,447	1,739
5	0,22	0,459	0,689	0,885	1,037	1,577	1,838
4,5	0,2	0,417	0,63	0,808	0,947	1,477	1,763
4	0,225	0,471	0,711	0,919	1,072	1,623	1,878
3,5	0,173	0,363	0,546	0,711	0,846	1,383	1,683
3	0,203	0,431	0,658	0,864	1,024	1,571	1,835
2,5	0,251	0,526	0,765	0,954	1,092	1,61	1,862
2	0,217	0,442	0,643	0,799	0,94	1,47	1,751
1,5	0,163	0,34	0,503	0,652	0,781	1,286	1,563
1	0,161	0,331	0,491	0,653	0,766	1,247	1,506
0,5	0,117	0,245	0,365	0,488	0,582	0,985	1,202



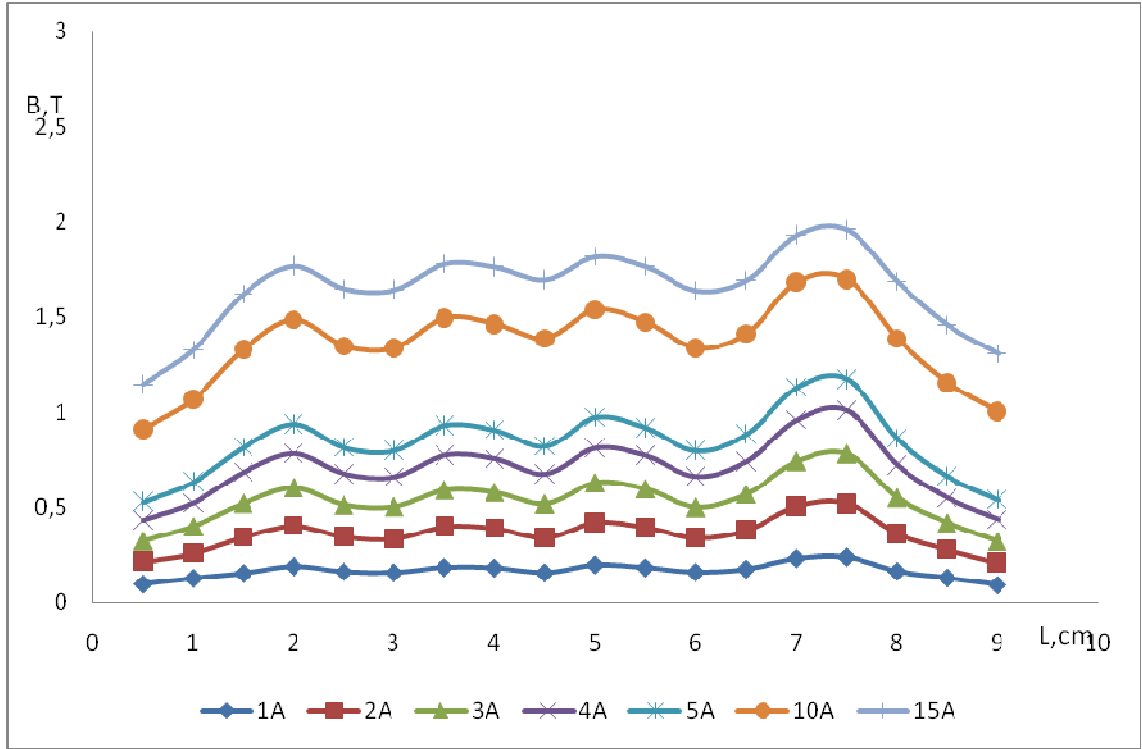
Şekil 4.5. Çapı $d=10,5\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.6. Çapı $d=11,9$ mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

Çapı $d=11,9$ mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.6’de verilmiştir. Bu Çizelge ve şekilden görüldüğü gibi $d=11,9$ mm çaplı ferromanyetik bilyelerin mıknatıslanma özellikleri de ferromanyetik dolgulu yatakların özelliklerinin genel biçimini sağlamaktadır. Bu durumda da manyetik alan yoğunluğunu ferromanyetik bilyelerin çaplarının artmasıyla uygun noktalarda dalgalanmasının artışı görülmektedir. Öte yandan dış manyetik alan şiddetinin farklı değerlerinde bütün durumlarda bu dalgalanmalar yaklaşık olarak birbirine paraleldir, başka bir deyişle bu değişim belli bir kural üzerinde oluşmaktadır. Bu olayın nedeni ise ferromanyetik dolgulu yatakların içi yapısının geometrisinin düzensiz olmasıdır. Yani literatürde dolgulu yatakların genel olarak belli bir geometriye sahip olması varsayımları [4,17] genelde ancak bazı özel durumlarda veya teorik yaklaşımlarda geçerli olup aslında dolgulu yatak düzensiz bir gözenekli ortam olduğu görülmektedir. Bu olay dış manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanan ferromanyetik bilyelerin manyetik alanın kuvvet çizgileri boyunca diziliminde bile yer almaktadır. Bu durumda boşluğa göre dolgulu yatağın uygun noktasındaki manyetik alan yoğunluğunun artışı ise 1,7 defa civarındadır.

Çizelge 4.6. Çapı d=11,9 mm olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,093	0,206	0,323	0,436	0,539	1,006	1,307
8,5	0,131	0,277	0,421	0,548	0,662	1,156	1,457
8	0,165	0,36	0,552	0,722	0,859	1,387	1,686
7,5	0,241	0,518	0,784	1,011	1,173	1,698	1,959
7	0,234	0,503	0,745	0,961	1,129	1,683	1,931
6,5	0,177	0,378	0,572	0,742	0,884	1,412	1,693
6	0,161	0,338	0,503	0,661	0,796	1,338	1,638
5,5	0,185	0,393	0,599	0,772	0,917	1,472	1,764
5	0,2	0,418	0,631	0,813	0,972	1,537	1,817
4,5	0,158	0,34	0,521	0,675	0,82	1,388	1,696
4	0,184	0,387	0,581	0,756	0,905	1,463	1,762
3,5	0,187	0,397	0,594	0,774	0,93	1,495	1,779
3	0,159	0,334	0,505	0,659	0,798	1,337	1,642
2,5	0,163	0,345	0,515	0,676	0,813	1,347	1,648
2	0,192	0,4	0,606	0,783	0,937	1,486	1,767
1,5	0,155	0,343	0,523	0,685	0,815	1,33	1,622
1	0,129	0,257	0,402	0,522	0,633	1,069	1,328
0,5	0,098	0,213	0,326	0,432	0,527	0,913	1,146



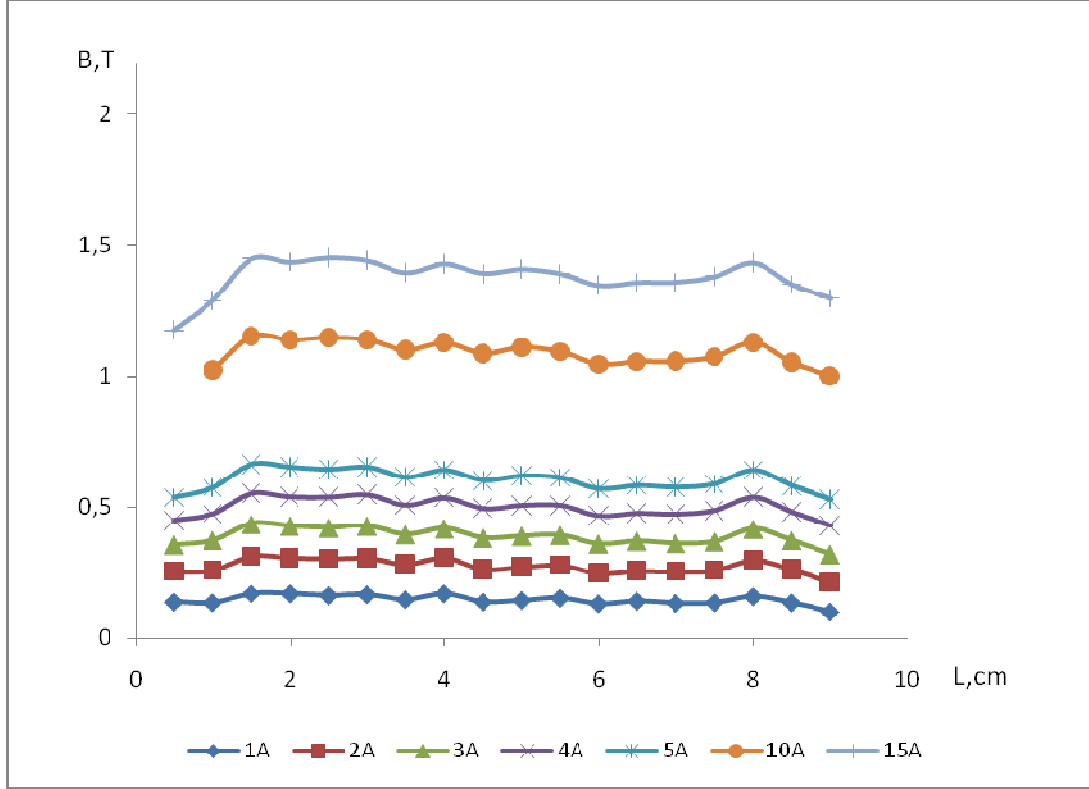
Şekil 4.6. Çapı $d=11,9\text{mm}$ olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.7. Ferromanyetik elik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

Pratik uygulamalarda ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklar ekonomik ve mali açıdan çok pahalıdır. Zira yaklaşık olarak uzunluğu 1m olan ferromanyetik dolgulu yatakta kullanılan bilye sayısı 10^{10} civarlarında olabilir [4,5]. Bu durumda dolgulu yatakların daha ucuz ferromanyetik malzemeden oluşturulması çok önemlidir. Bu malzemelerden biri de çok ucuz ve sanayi atığı olarak tanımlanan ferromanyetik metal talaşları olabilir. Ferromanyetik metal talaşlarını etkin dolgulu yatak olarak kullanabilmek için bu talaşlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların dış manyetik alanın etkisi ile mıknatıslanma özelliklerinin belirlenmesi hem pratik hem de teorik açıdan çok büyük önem arz etmektedir. Tez çalışmalarında yapılan ferromanyetik talaşlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneyseysel inceleme sonuçları izelge 4.7 ve şekil4.7 de sunulmuştur. Çizelge 4.7 ve şekil4.7 den görüldüğü gibi ferromanyetik metal talaşlarında oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin genel karakterini sağlamaktadır. Yani dış manyetik alan şiddetinin artmasıyla gözeneklerdeki manyetik alan yoğunluğu da artar. Bu durumda dolgulu yatak parozitesinin büyük olmasında dolayı manyetik alan yoğunluğunun gözeneklerdeki değişimi manyetik alanın hava aralığındaki değişimine daha yakın benzerlik göstermektedir ve manyetik alanın alan yoğunluğunun dalgalanması çok düşüktür. Öte yandan ferromanyetik metal talaşlardan oluşturulmuş dolgulu yatakların uygun noktalarındaki manyetik alan yoğunluğunun değeri hava aralığındaki değerden yaklaşık olarak 1,3 defa fazladır. Bu ise büyük çaplı ferromanyetik bilyelerden (d=14-15mm) oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerine varsayılabılır. Başka bir değişle uygun koşullarda ferromanyetik metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların kullanılması (zellikle manyetik filtrasyon ve seperasyon işlemlerinde) etkin bir sistem olmakla çok büyük ekonomik kazancın sağlanması imkân sağlayabilir.

Çizelge 4.7. Ferromanyetik çelik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,099	0,212	0,32	0,427	0,527	1	1,298
8,5	0,135	0,261	0,373	0,479	0,581	1,052	1,349
8	0,159	0,296	0,417	0,537	0,641	1,129	1,431
7,5	0,135	0,258	0,369	0,486	0,588	1,074	1,38
7	0,133	0,253	0,362	0,471	0,575	1,057	1,358
6,5	0,141	0,256	0,371	0,475	0,582	1,056	1,357
6	0,131	0,247	0,36	0,465	0,569	1,046	1,346
5,5	0,153	0,277	0,393	0,505	0,611	1,093	1,39
5	0,144	0,271	0,39	0,505	0,619	1,111	1,408
4,5	0,138	0,261	0,383	0,493	0,601	1,086	1,391
4	0,17	0,306	0,419	0,535	0,641	1,128	1,428
3,5	0,147	0,281	0,396	0,506	0,613	1,1	1,394
3	0,166	0,304	0,428	0,547	0,652	1,139	1,44
2,5	0,163	0,302	0,422	0,537	0,643	1,148	1,451
2	0,17	0,305	0,428	0,538	0,652	1,139	1,434
1,5	0,17	0,311	0,437	0,552	0,663	1,153	1,447
1	0,135	0,259	0,373	0,473	0,573	1,024	1,29
0,5	0,138	0,253	0,357	0,447	0,535	0,935	1,177



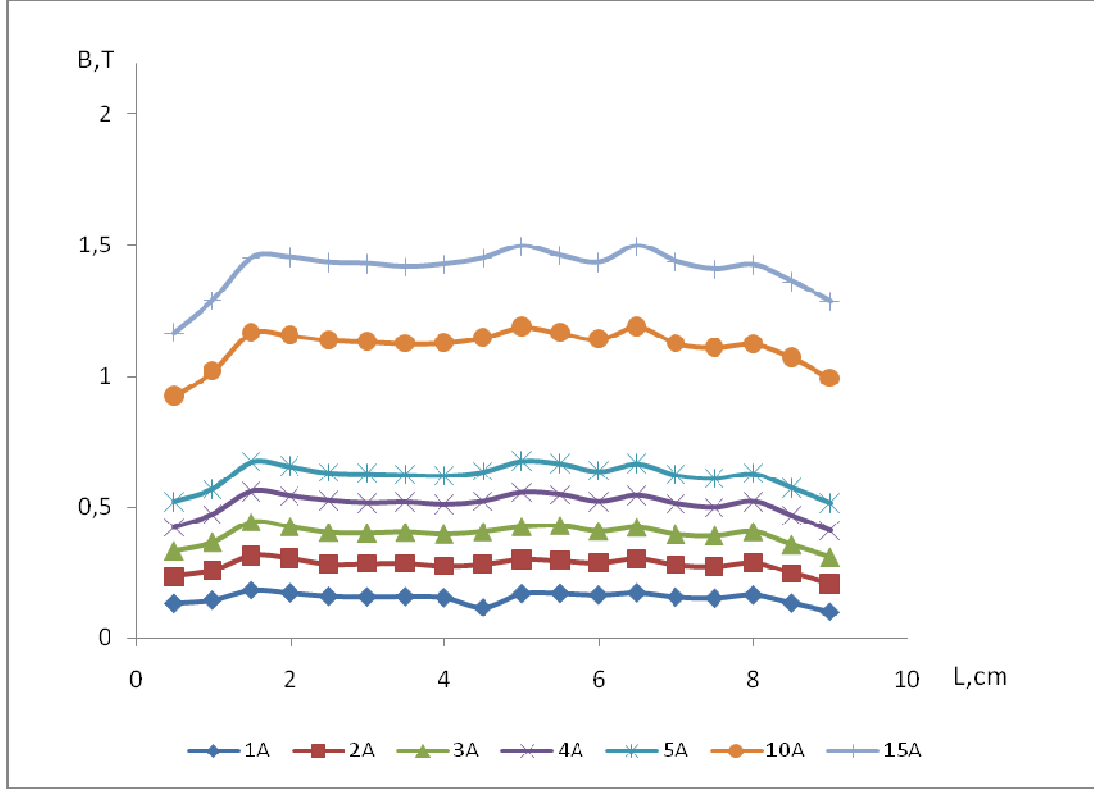
Şekil 4.7. Ferromanyetik çelik talaşlarla oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre, 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.8 Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

Ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların yerine daha ucuz ve pratik açıdan etkin olan mıknatıslanan diğer bir dolgulu yatak türü de ferromanyetik tel kırıntılarından oluşturulmuş dolgulu yataklardır. Bu tür yataklar sanayi atıklarından veya özel teknoloji sonucu olarak elde edilebilir. Bütün durumlarda bu tür mıknatıslanan yatakların maliyeti çok düşüktür fakat bu tür yatakların etkin kullanılabilmesi için onların mıknatıslanma özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Tez çalışmalarında yapılan ferromanyetik tel kırıntılarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları Çizelge 4.8 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu verilerin incelenmesi sonucu ferromanyetik tel kırıntılarından oluşturulmuş dolgulu yatakların da iyi bir mıknatıslanma olduğu açıkça görülmektedir. Dahası bu tür yatakların parozitesinin fazla olması nedeni ile mıknatıslanma özellikleri ferromanyetik metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerine iyi bir benzerlik göstermektedir. Genelde ise ferromanyetik tel kırıntılarından oluşturulmuş dolgulu yatakların manyetik alan yoğunluğu değerleri ve maliyeti ferromanyetik talaşlardan oluşturulmuş dolgulu yataklarinkinden daha düşüktür.

Çizelge 4.8. Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçları.

L,cm	1A	2A	3A	4A	5A	10A	15A
9	0,099	0,204	0,309	0,411	0,515	0,99	1,283
8,5	0,133	0,246	0,356	0,468	0,573	1,07	1,362
8	0,163	0,286	0,406	0,522	0,627	1,121	1,424
7,5	0,151	0,272	0,39	0,5	0,61	1,108	1,408
7	0,155	0,278	0,395	0,514	0,622	1,124	1,437
6,5	0,171	0,303	0,423	0,545	0,665	1,189	1,497
6	0,163	0,286	0,408	0,522	0,637	1,14	1,434
5,5	0,169	0,294	0,429	0,548	0,666	1,164	1,459
5	0,168	0,3	0,425	0,556	0,676	1,187	1,496
4,5	0,115	0,281	0,406	0,523	0,635	1,146	1,45
4	0,153	0,274	0,396	0,511	0,62	1,126	1,427
3,5	0,157	0,284	0,404	0,52	0,623	1,123	1,417
3	0,156	0,283	0,4	0,517	0,627	1,13	1,429
2,5	0,158	0,281	0,403	0,526	0,631	1,137	1,433
2	0,171	0,304	0,425	0,543	0,655	1,155	1,452
1,5	0,181	0,315	0,444	0,56	0,673	1,165	1,45
1	0,144	0,257	0,366	0,474	0,569	1,019	1,288
0,5	0,132	0,234	0,333	0,423	0,521	0,921	1,165



Şekil 4.8. Ferromanyetik tellerle oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin deneysel incelemelerinin sonuçlarına göre, 17 farklı noktada ölçülen B manyetik alan yoğunluğunun filtre boyunca uzunluğa bağlı değişim değerleri.

4.2.9. Farklı çaplara sahip Olan Ferromanyetik Bilyelerin Karışımından Oluşturulmuş Dolgulu Yatakların Manyetik Özelliklerinin Deneyssel İncelenmesi.

İkinci bölümde vurgulandığı gibi ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerini arttırmak için bu ortamın dolgu faktörünü (γ) arttırmak veya parozitesini (ϵ) azaltmak gerekir. Ferromanyetik bilyelerden rastgele oluşturulmuş dolgulu yataklarda bile bu ortamların dolgu faktörü yaklaşık olarak sabit kalır ($\gamma=0,6$) [4,5,17]. Başka bir değişle ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın dolgu faktörünün artırılması kolay bir işlem değildir. ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların dolgu faktörünün artırılmasının en iyi yolu dolgulu yataklarda farklı çaplardan olan bilyelerin kullanılmasıdır [4,5,45]. Bu durumda dolgulu yatağın dolgu faktörü ($\gamma=0,74$) civarına kadar çıkarılabilir. Fakat bu durumda dolgulu yatağın gözeneklerinin daralması veya parozitesinin azalması bu ortamlarda basınç değişiminin hızla artmasına neden olabilir. Bu olay ise bazı teknolojik işlemlerde özellikle de manyetik filtrasyon ve seperasyon, manyetoforez, manyetik ilaç hedeflendirme işlemlerinde istenmeyen bir olaydır. Bu nedenle bu işlem bilyelerin çaplarının belli bir sınırlı orantısında yapılmalıdır. Dahası bu türlü yatakların hangi düzeyde etkin olmaları veya manyetik özelliklerinin hangi orantıda iyileşmesinin bilinmesi ve değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu amaçla tez çalışmalarında farklı çaplardaki ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların da mıknatıslanma özellikleri yukarıdaki yöntemlerle belirlenmiştir.

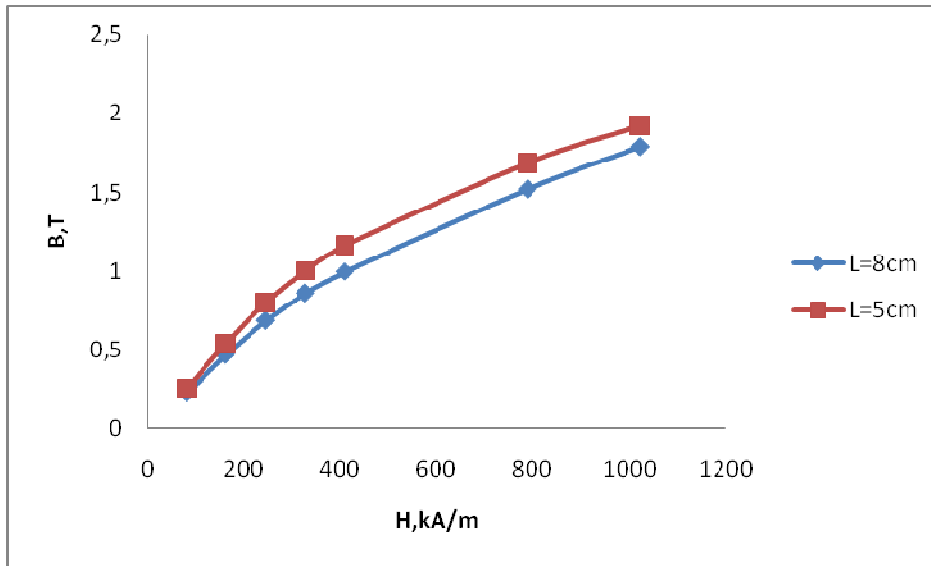
Deneylerde 4,75mm + 9mm, 4,75mm + 10,5mm, 4,75mm + 11,9mm ve 6,28 + 9mm, 6,28 + 10,5mm, 6,28 + 11,9mm karışımlar kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları izelge 4.9’dan izelge 4.14’e kadar, Şekil 4.9’dan Şekil 4.14’e kadar verilmiştir. Bütün bu verilerden görüldüğü gibi ferromanyetik bilyelerin karışımlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların manyetik alan yoğunluğunun dış manyetik alana bağımlılığı veya bu ortamların B-H ilişkisi ciddi bir artış göstermektedir. Özellikle ferromanyetik bilyelerin çaplarının orantısı arttıkça B-H ilişkisi daha hızlı artmaktadır. Zira bu durumda dolgulu yatağın parozitesi azalır. Gözeneklerin manyetik dirençleri de azaldığına göre B-H ilişkisi artar ve bu ilişki sınır koşulunda ($\epsilon=0$) tüm manyetik malzemenin mıknatıslanma özelliğine yaklaşır. Bu durumda ferromanyetik bilyelerin manyetik geçirgenliğinin dış manyetik alan

şiddetine (H) göre değişimi de çok önemlidir. Bu durumda ikinci bölümde elde edilen teorik sonuçların (Dk.2.36 ve Dk.3.39) önemi bir daha açıkça görülmektedir. Genelde ise farklı çaplara sahip olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri ikinci bölümde elde edilen teorik sonuçlarla çok iyi bir uyum sağlamaktadır. Birçok durumlarda ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların dolgu faktörünün artırılması değil azaltılması (parozitesinin artırılması) da istenmektedir. Bu durumda ferromanyetik kürelerin arasındaki hava boşluklarını artırmak gerekir pratik uygulamalarda bu işlem dolgulu yatağın manyetik özelliğinin hızla zayıflamasına neden olduğuna göre çoğu kez kullanılmamaktadır. Ancak dolgulu yatağın parozitesinin artmasıyla manyetik özelliğinin değişmesi genel mıknatıslanma teorisi açısından önemli bir konudur. Bu konu bir sonraki kısımda ele alınmıştır.

d=4,75 mm ve d=9mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.9. Çapları d=4,75 mm ve d=9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,252	0,266
0,202	160,828	0,526	0,551
0,307	244,4268	0,772	0,817
0,41	326,4331	0,988	1,044
0,513	408,4395	1,165	1,212
0,989	787,4204	1,711	1,746
1,283	1021,497	1,947	1,973

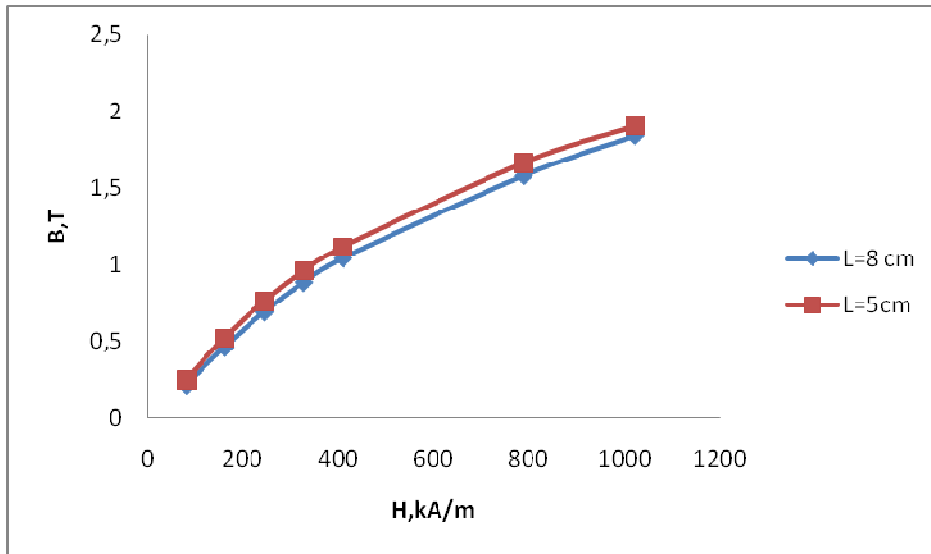


Şekil 4.9. Çapları d=4,75 mm ve d=9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik .

d=4,75 mm ve d=10,5 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.10. Çapları d=4,75 mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,218	0,247
0,202	160,828	0,464	0,52
0,307	244,4268	0,693	0,761
0,41	326,4331	0,887	0,96
0,513	408,4395	1,043	1,115
0,989	787,4204	1,581	1,664
1,283	1021,497	1,843	1,907

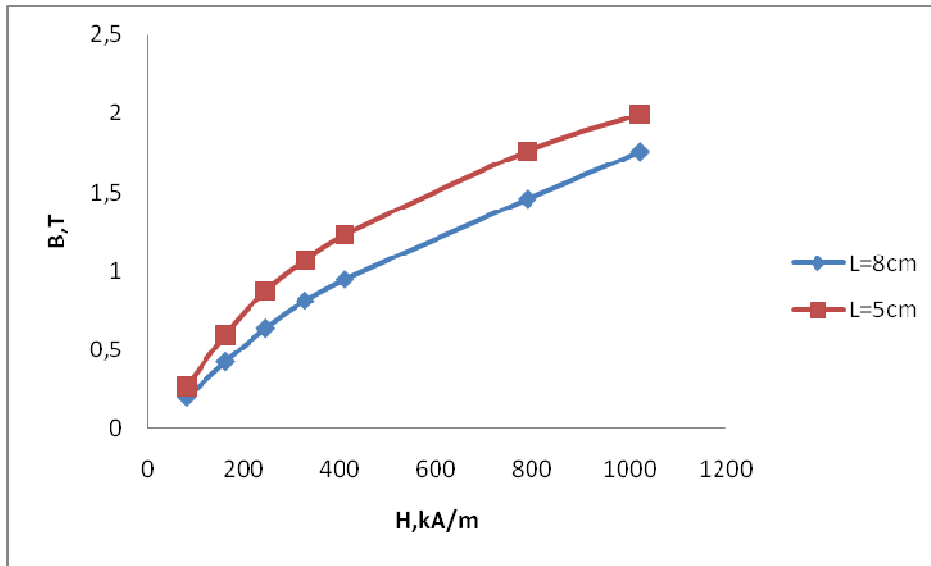


Şekil 4.10. Çapları d=4,75 mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=4,75 mm ve d=11,9 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.11. Çapları d=4,75 mm ve d=11,9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,198	0,269
0,202	160,828	0,425	0,596
0,307	244,4268	0,637	0,875
0,41	326,4331	0,812	1,07
0,513	408,4395	0,947	1,23
0,989	787,4204	1,457	1,76
1,283	1021,497	1,757	1,993

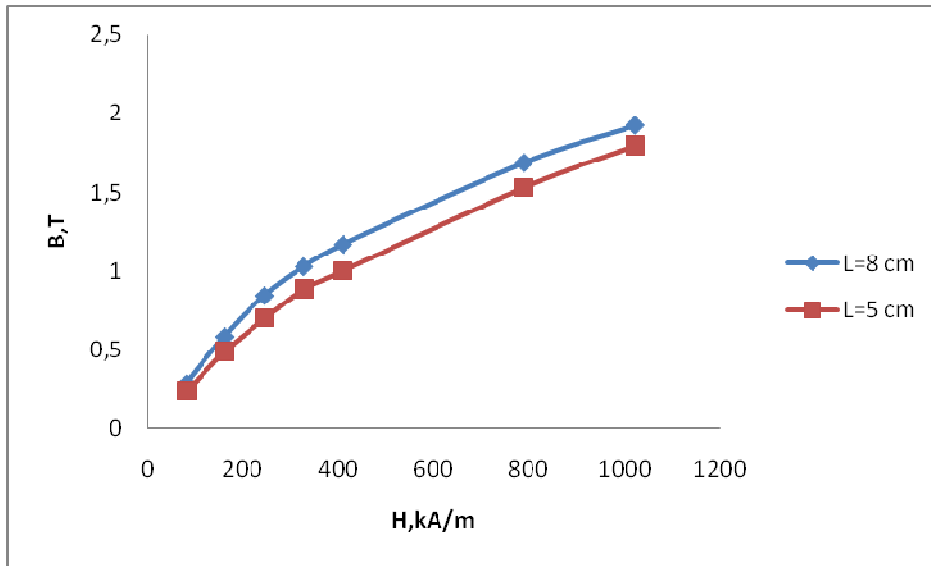


Şekil 4.11. Çapları d=4,75 mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm ve d=9 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.12. Çapları d=6,28 mm ve d=9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8 m	L=5 m
0,101	80,41401	0,279	0,23
0,202	160,828	0,579	0,484
0,307	244,4268	0,84	0,695
0,41	326,4331	1,024	0,884
0,513	408,4395	1,166	1
0,989	787,4204	1,686	1,53
1,283	1021,497	1,924	1,799

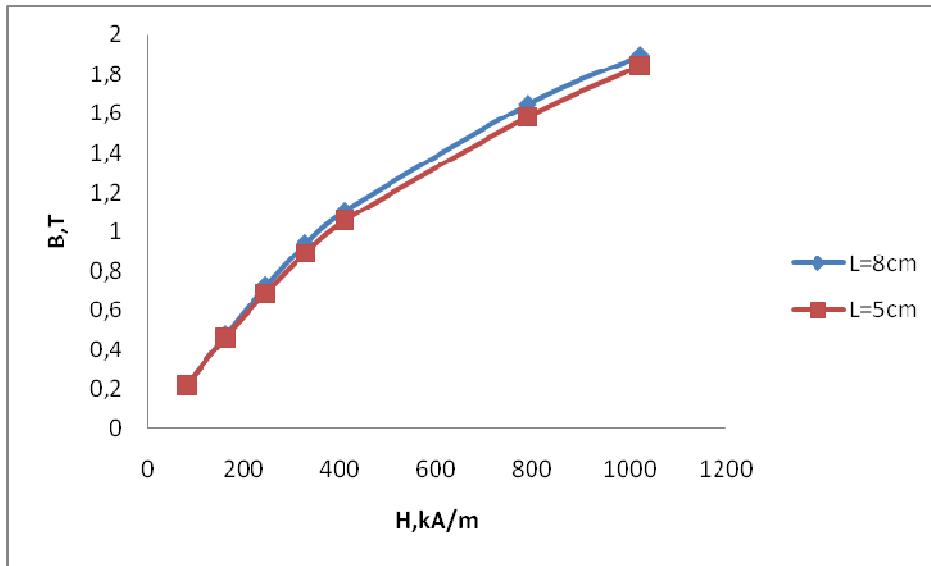


Şekil 4.12. Çapları d=6,28mm ve d=9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm ve d=10,5 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.13. Çapları d=6,28 mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,223	0,217
0,202	160,828	0,474	0,46
0,307	244,4268	0,724	0,685
0,41	326,4331	0,939	0,888
0,513	408,4395	1,107	1,054
0,989	787,4204	1,648	1,58
1,283	1021,497	1,896	1,842

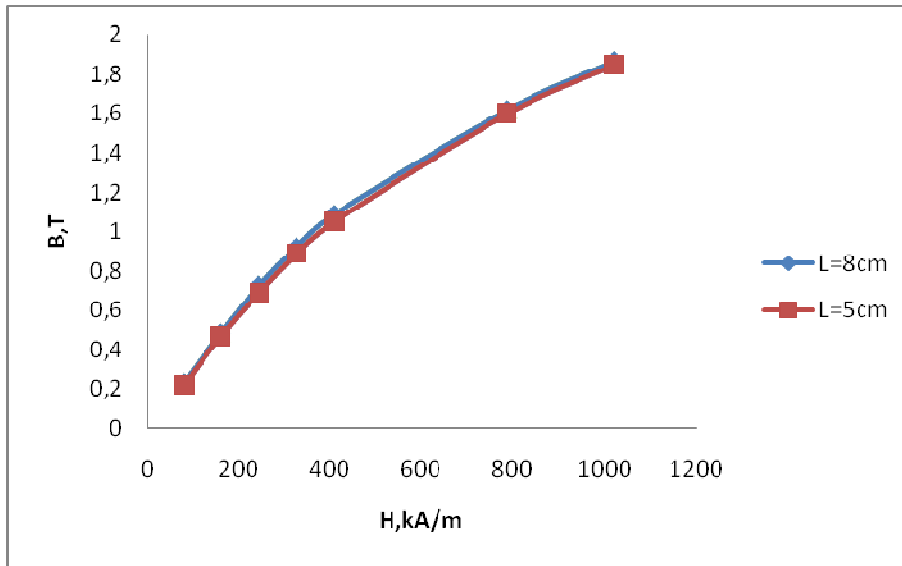


Şekil 4.13. Çapları d=6,28mm ve d=10,5mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm ve d=11,9 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.14. Çapları d=6,28 mm ve d=11,9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçları.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,234	0,221
0,202	160,828	0,487	0,47
0,307	244,4268	0,728	0,691
0,41	326,4331	0,925	0,888
0,513	408,4395	1,089	1,049
0,989	787,4204	1,621	1,598
1,283	1021,497	1,87	1,847



Şekil 4.14. Çapları d=6,28mm ve d=11,9mm olan ferromanyetik çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliklerinin deneysel inceleme sonuçlarına göre, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

4.2.10.Ferromanyetik Bilyelerden oluşturulmuş ve yüksek paroziteli dolgulu yatakların Mıknatıslanma Özelliklerinin Deneysel İncelemelerinin Sonuçları.

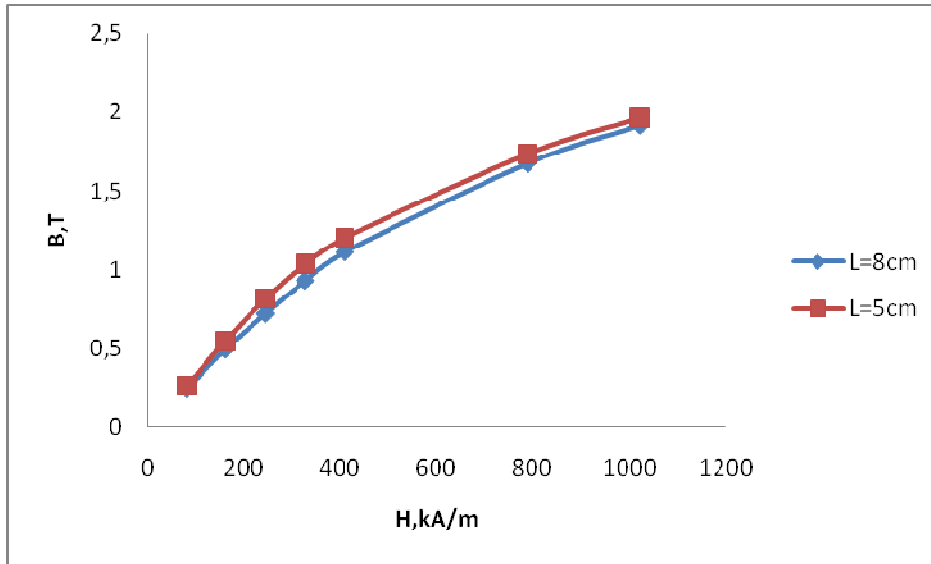
Tez çalışmalarında ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların dolgu faktörünün azaltılması veya parozitesinin artırılması için dolgulu yatak elemanları (bilyeler) belli bir hacimsel orantıda çapı 2mm olan plastik kürelerle karıştırılmıştır. Plastik kürelerin dolgulu yatağın hacminde yaklaşık olarak düzgün olarak dağılmasına özen gösterilmiştir. Böylece ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda hacimsel olarak parozitenin düzgün şekilde artışı sağlanmıştır. Parozite değişiminin mıknatıslanma eğrisine (B-H) etkisini değerlendirmek için plastik kürelerin hacimsel orantısı farklı seçilmiştir. Önce ferromanyetik bilyeler 10 adet plastik kürelerle sonra 20 adet plastik kürelerle daha sonra ise 30 ve son olarak 40 adet plastik kürelerle karıştırılmıştır. Her bir durum için materyaller ve yöntem kısmında sunulan deney yöntemiyle dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrisi elde edilmiştir. Bu deney işlemleri hem çapı 4,75mm olan hem de $d=6,28\text{mm}$ çapa sahip olan ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklar için yapılmıştır. Çapı 4,75mm bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklar için deneysel sonuçlar Çizelge 4.15’den Çizelge 4.19’a kadar Şekil 4.15’ten Şekil 4.19’a kadar. Çapı 6,28mm bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklar için deneysel sonuçlar Çizelge 4.20’den Çizelge 4.24’a kadar Şekil 4.20’ten Şekil 4.24’a kadar.

Verilerden görüldüğü gibi bütün durumlarda ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliğinin genel şekli sağlanmaktadır. Fakat plastik kürelerin sayısının artmasıyla dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliği (B-H eğrisi) zayıflar. Plastik kürelerin fazla artışında bu azalma daha etkin olmaktadır. Plastik kürelerin artmasıyla veya dolgulu yatağın parozitesinin artmasıyla yatağın mıknatıslanma özelliğinin bu şekilde değişimi ayrıca olarak Çizelge ...’ dan Şekil ‘ e kadar verilmiştir. Bu Çizelge ve grafiklerde her bir durumun birbiriyle kıyaslanması sağlanmıştır. Dolgulu yatağın parozitesinin artmasıyla yatağın mıknatıslanma özelliğinin zayıflaması açıkça görülmektedir. Bu sonuç ikinci bölümde elde edilen teorik sonuçlarla da iyi uyum sağlamaktadır.

d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzeme içermeyen filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.15. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,244	0,26
0,202	160,828	0,496	0,548
0,307	244,4268	0,722	0,814
0,41	326,4331	0,931	1,034
0,513	408,4395	1,112	1,2
0,989	787,4204	1,676	1,732
1,283	1021,497	1,918	1,961

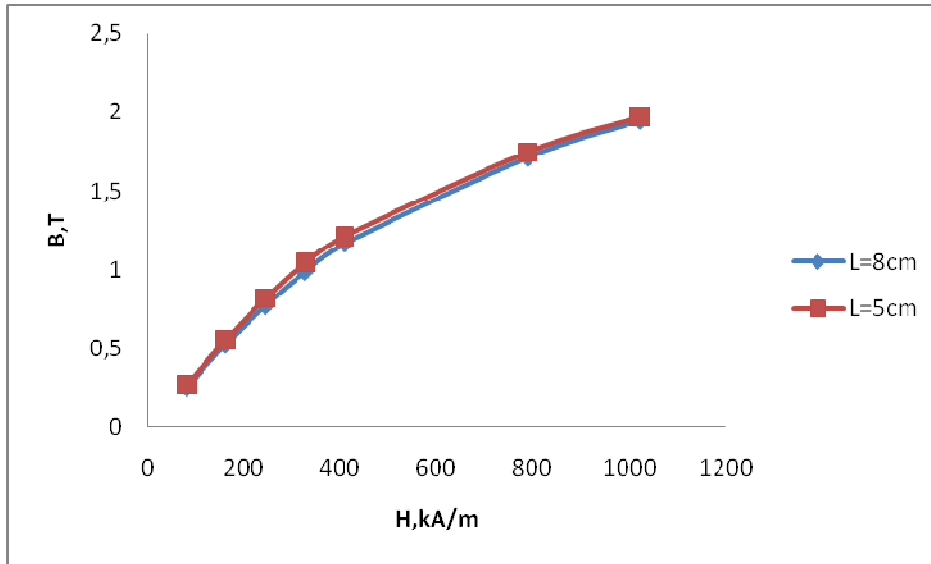


Şekil 4.15. d=4,75 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.16. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,252	0,266
0,202	160,828	0,526	0,551
0,307	244,4268	0,772	0,817
0,41	326,4331	0,988	1,044
0,513	408,4395	1,165	1,212
0,989	787,4204	1,711	1,746
1,283	1021,497	1,947	1,973

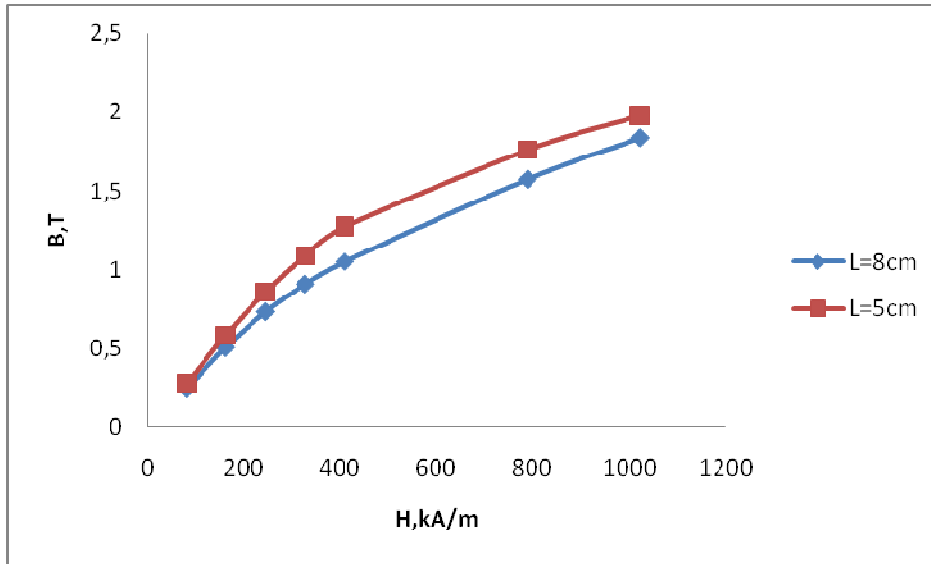


Şekil 4.16. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.17. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,245	0,273
0,202	160,828	0,507	0,579
0,307	244,4268	0,734	0,856
0,41	326,4331	0,909	1,086
0,513	408,4395	1,051	1,269
0,989	787,4204	1,574	1,756
1,283	1021,497	1,838	1,976

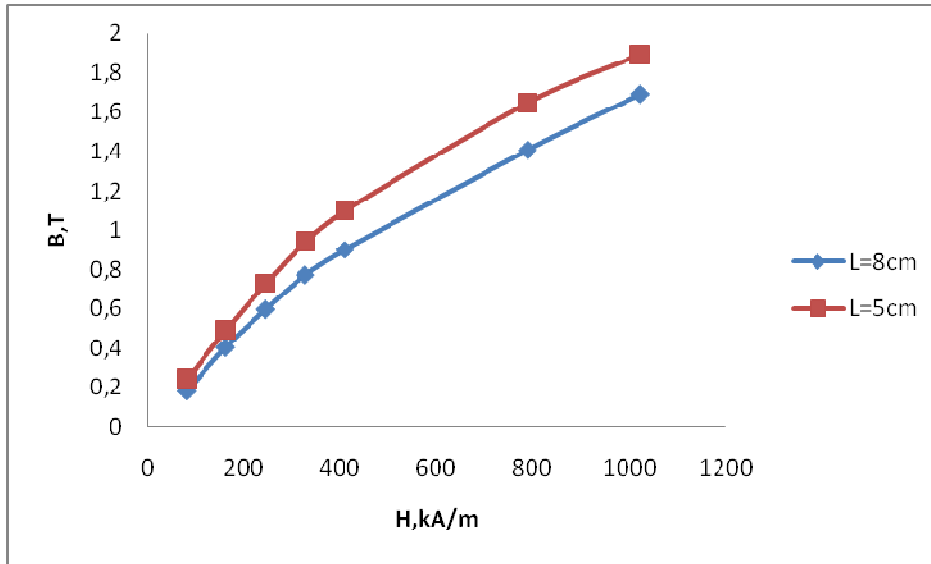


Şekil 4.17. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.18. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,183	0,242
0,202	160,828	0,405	0,491
0,307	244,4268	0,598	0,728
0,41	326,4331	0,773	0,94
0,513	408,4395	0,901	1,099
0,989	787,4204	1,407	1,646
1,283	1021,497	1,691	1,893

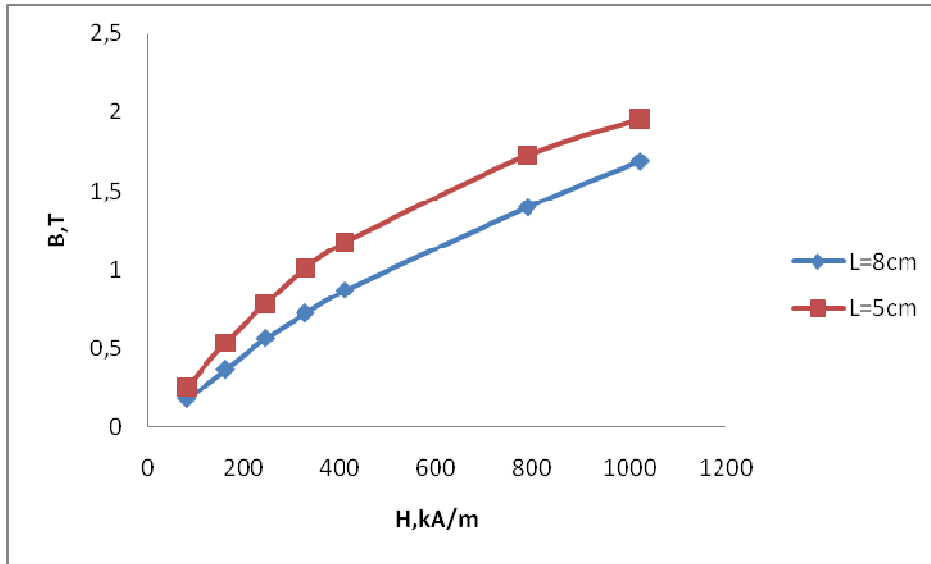


Şekil 4.18. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden grafik.

d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.19. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,175	0,253
0,202	160,828	0,362	0,536
0,307	244,4268	0,561	0,785
0,41	326,4331	0,72	1,01
0,513	408,4395	0,866	1,174
0,989	787,4204	1,394	1,726
1,283	1021,497	1,685	1,956

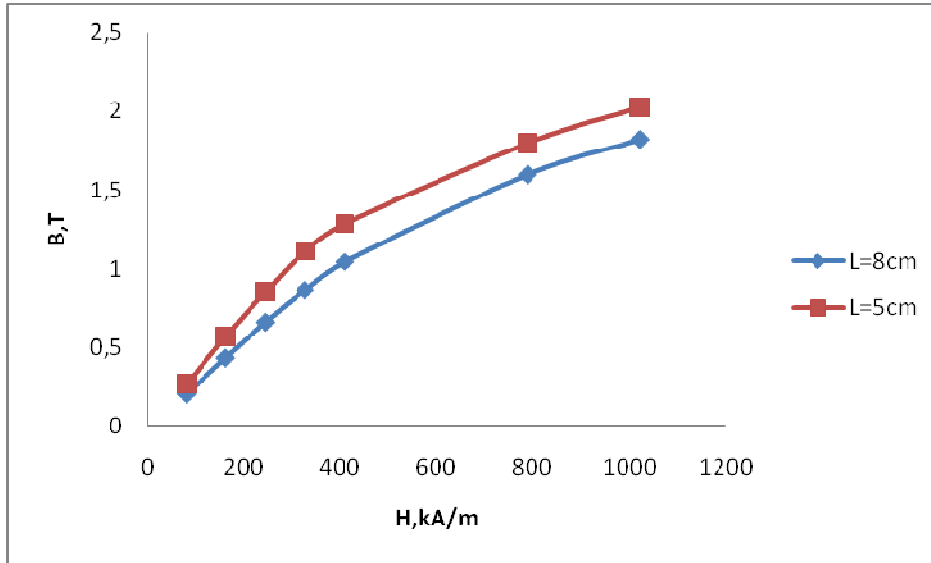


Şekil 4.19. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzeme içermeyen filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.20. d=6,28mm çaplı çelik küreler ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,203	0,265
0,202	160,828	0,433	0,565
0,307	244,4268	0,659	0,851
0,41	326,4331	0,863	1,109
0,513	408,4395	1,042	1,283
0,989	787,4204	1,596	1,794
1,283	1021,497	1,819	2,024

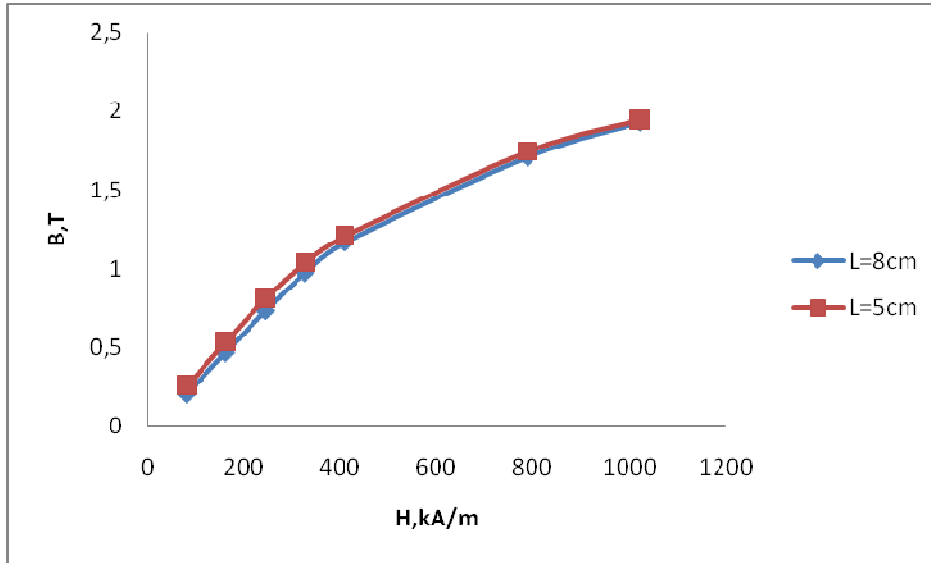


Şekil 4.20. d=6,28 mm çaplı çelik kürelerle oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.21. d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,206	0,255
0,202	160,828	0,468	0,534
0,307	244,4268	0,734	0,812
0,41	326,4331	0,974	1,039
0,513	408,4395	1,165	1,207
0,989	787,4204	1,706	1,742
1,283	1021,497	1,929	1,947

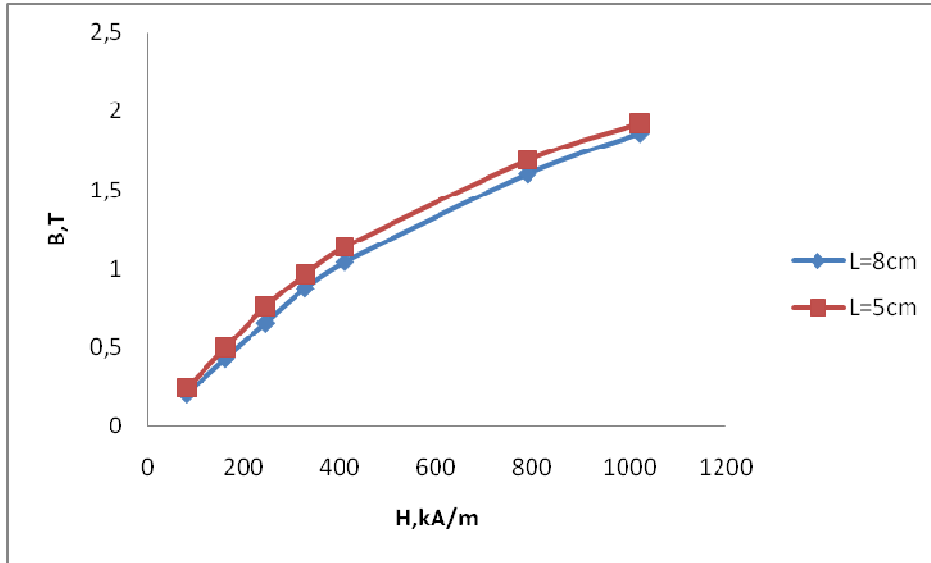


Şekil 4.21. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 10 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.22. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,2	0,243
0,202	160,828	0,427	0,497
0,307	244,4268	0,653	0,76
0,41	326,4331	0,872	0,965
0,513	408,4395	1,039	1,137
0,989	787,4204	1,6	1,688
1,283	1021,497	1,859	1,924

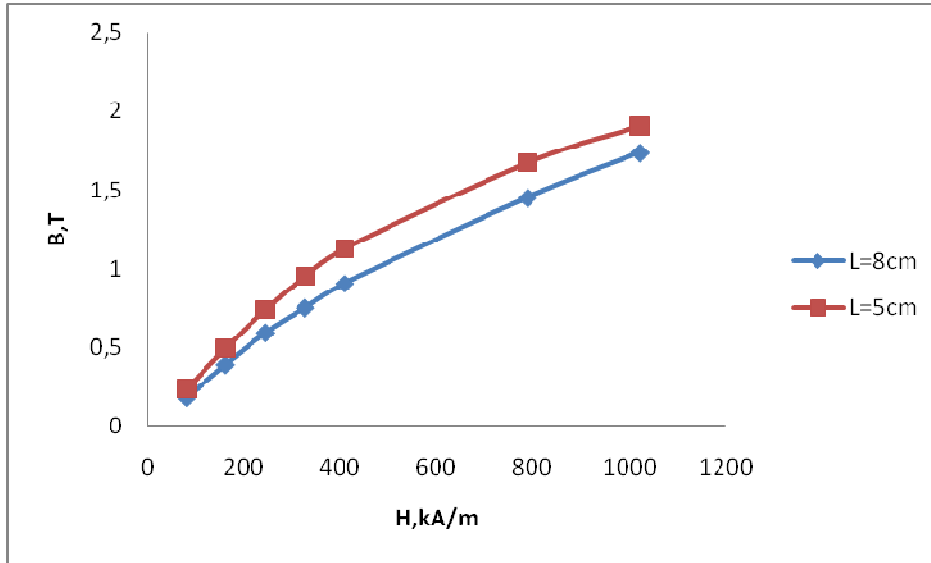


Şekil 4.22. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 20 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.23. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,18	0,234
0,202	160,828	0,39	0,492
0,307	244,4268	0,593	0,74
0,41	326,4331	0,752	0,953
0,513	408,4395	0,907	1,128
0,989	787,4204	1,451	1,672
1,283	1021,497	1,738	1,908

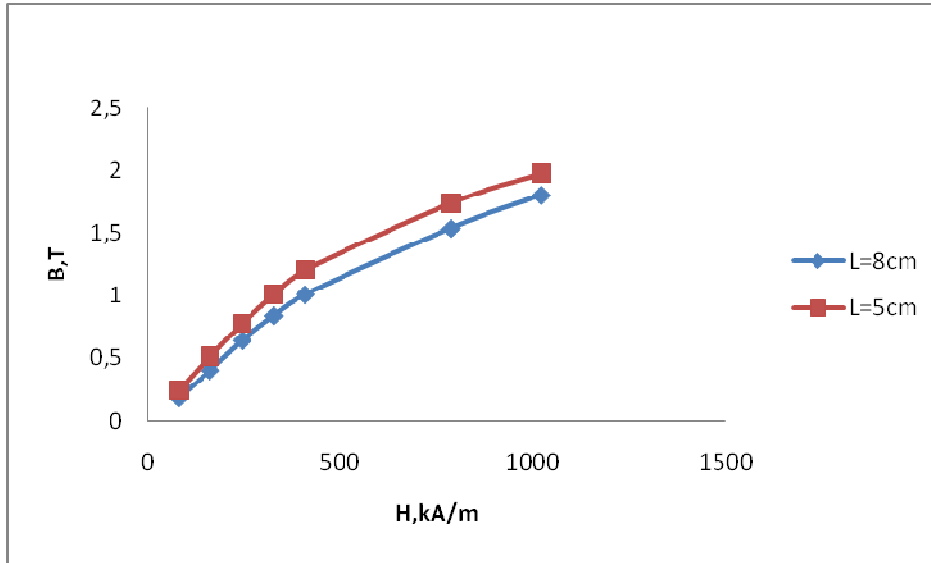


Şekil 4.23. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme içeren filtre ile yapılan ölçümler ve sonuçları.

Çizelge 4.24. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	L=8cm	L=5cm
0,101	80,41401	0,183	0,245
0,202	160,828	0,404	0,516
0,307	244,4268	0,642	0,776
0,41	326,4331	0,84	1,008
0,513	408,4395	1,009	1,204
0,989	787,4204	1,538	1,738
1,283	1021,497	1,804	1,975

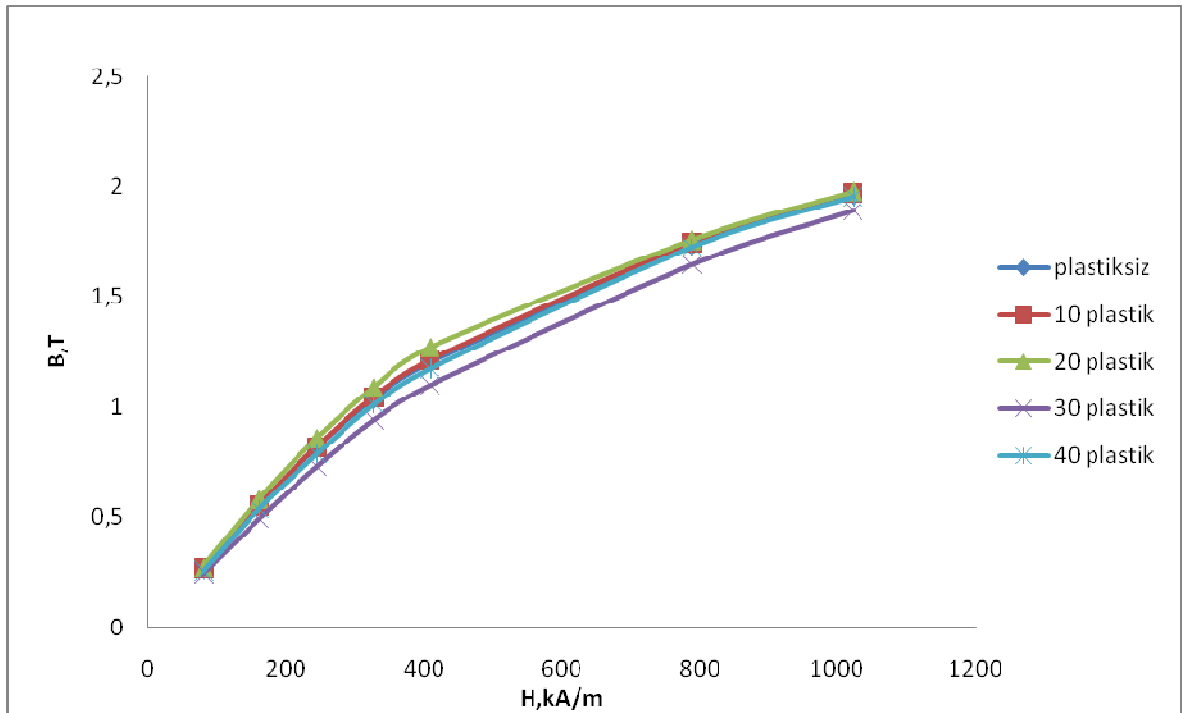


Şekil 4.24. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 40 adet d=2mm çaplı non manyetik malzeme ile oluşturulmuş düzenekte, 17 farklı noktada alınan ölçümlerden seçilen L=5 cm ve L=8 cm referans noktalarındaki B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

L=5cm de Çapı d=4,75 mm olan ferromanyetik bilyelerle farklı sayıda non manyetik kürelerin karışımında oluşturulmuş dolgulu yatakların B-H ilişkisinin karşılaştırılması

Çizelge 4.25. L=5 cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	d=4,75 plastiksiz	d=4,75 10plastik	d=4,75 20 plastik	d=4,75 30 plastik	d=4,75 40 plastik
0,101	80,41401	0,26	0,266	0,273	0,242	0,253
0,202	160,828	0,548	0,551	0,579	0,491	0,536
0,307	244,4268	0,814	0,817	0,856	0,728	0,785
0,41	326,4331	1,034	1,044	1,086	0,94	1,01
0,513	408,4395	1,2	1,212	1,269	1,099	1,174
0,989	787,4204	1,732	1,746	1,756	1,646	1,726
1,283	1021,497	1,961	1,973	1,976	1,893	1,956

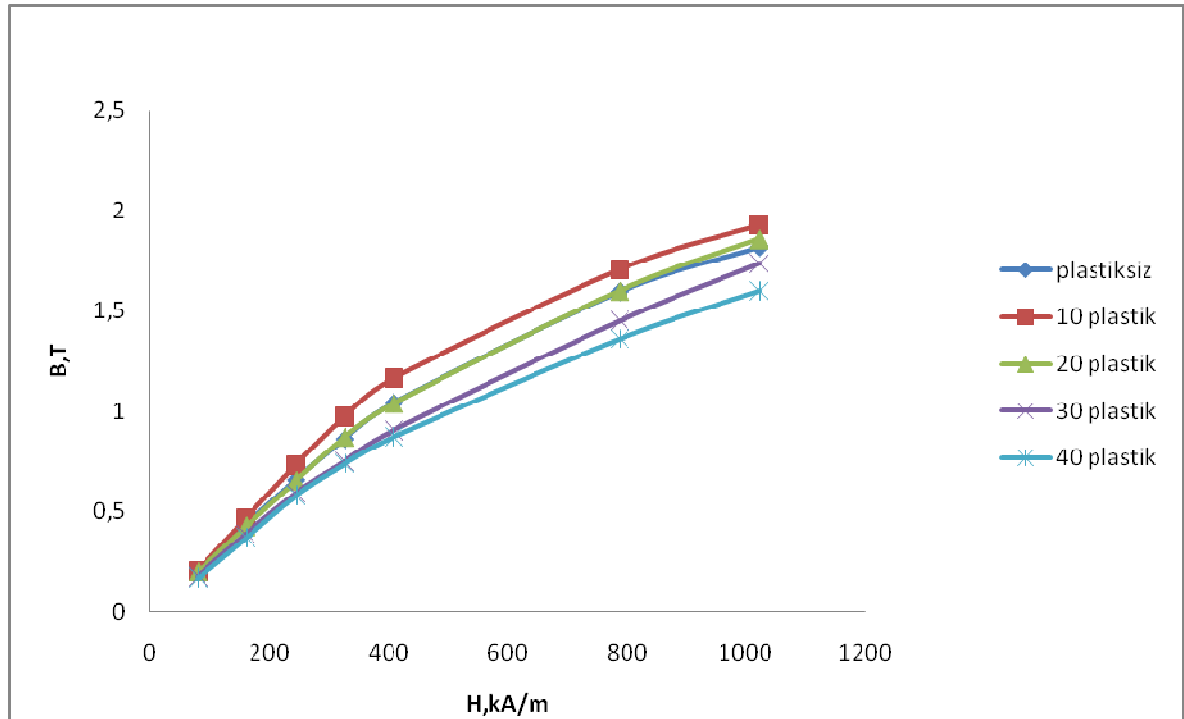


Şekil 4.25. L=5 cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

L=5cm de d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisi.

Çizelge 4.26. L=5 cm'de d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	d=6,28 plastiksiz	d=6,28 10 plastik	d=6,28 20 plastik	d=6,28 30 plastik	d=6,28 40 plastik
0,101	80,414	0,265	0,255	0,243	0,234	0,245
0,202	160,828	0,565	0,534	0,497	0,492	0,516
0,307	244,426	0,851	0,812	0,76	0,74	0,776
0,41	326,433	1,109	1,039	0,965	0,953	1,008
0,513	408,439	1,283	1,207	1,137	1,128	1,204
0,989	787,420	1,794	1,742	1,688	1,672	1,738
1,283	1021,496	2,024	1,947	1,924	1,908	1,975

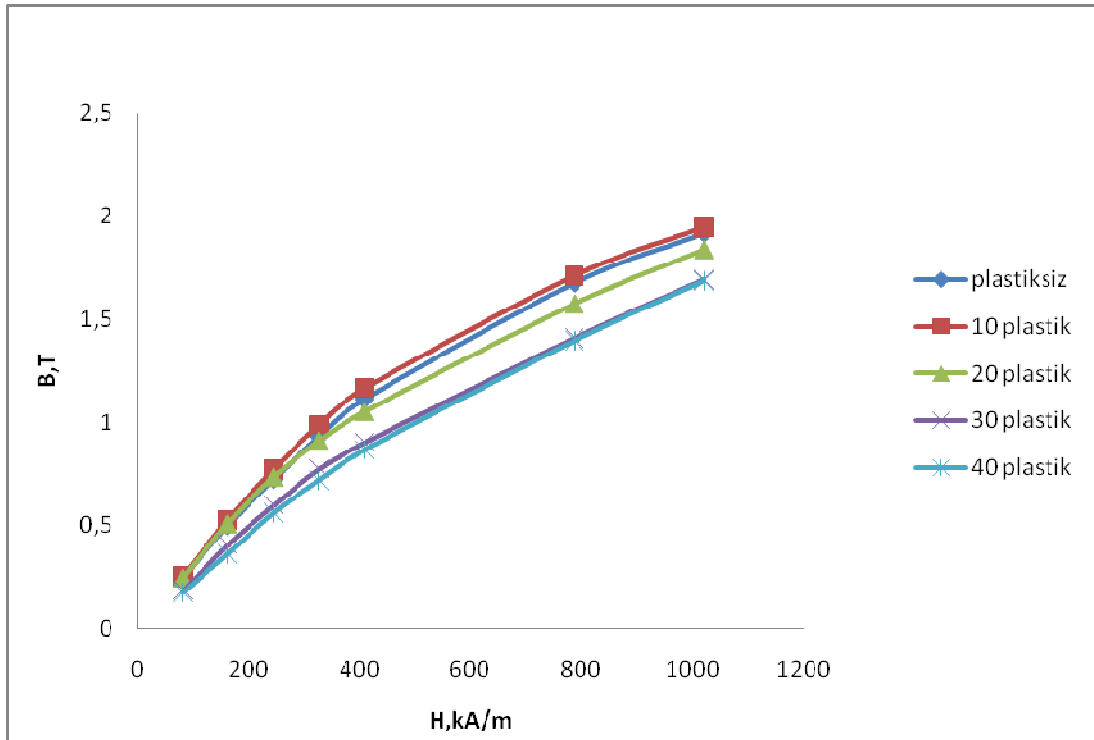


Şekil 4.26. d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

L=8cm de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisi.

Çizelge 4.27. L=8 cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	d=4,75 plastiksiz	d=4,75 10 plastik	d=4,75 20 plastik	d=4,75 30 plastik	d=4,75 40 plastik
0,101	80,414	0,244	0,252	0,245	0,183	0,175
0,202	160,828	0,496	0,526	0,507	0,405	0,362
0,307	244,427	0,722	0,772	0,734	0,598	0,561
0,41	326,433	0,931	0,988	0,909	0,773	0,72
0,513	408,439	1,112	1,165	1,051	0,901	0,866
0,989	787,42	1,676	1,711	1,574	1,407	1,394
1,283	1021,5	1,918	1,947	1,838	1,691	1,685

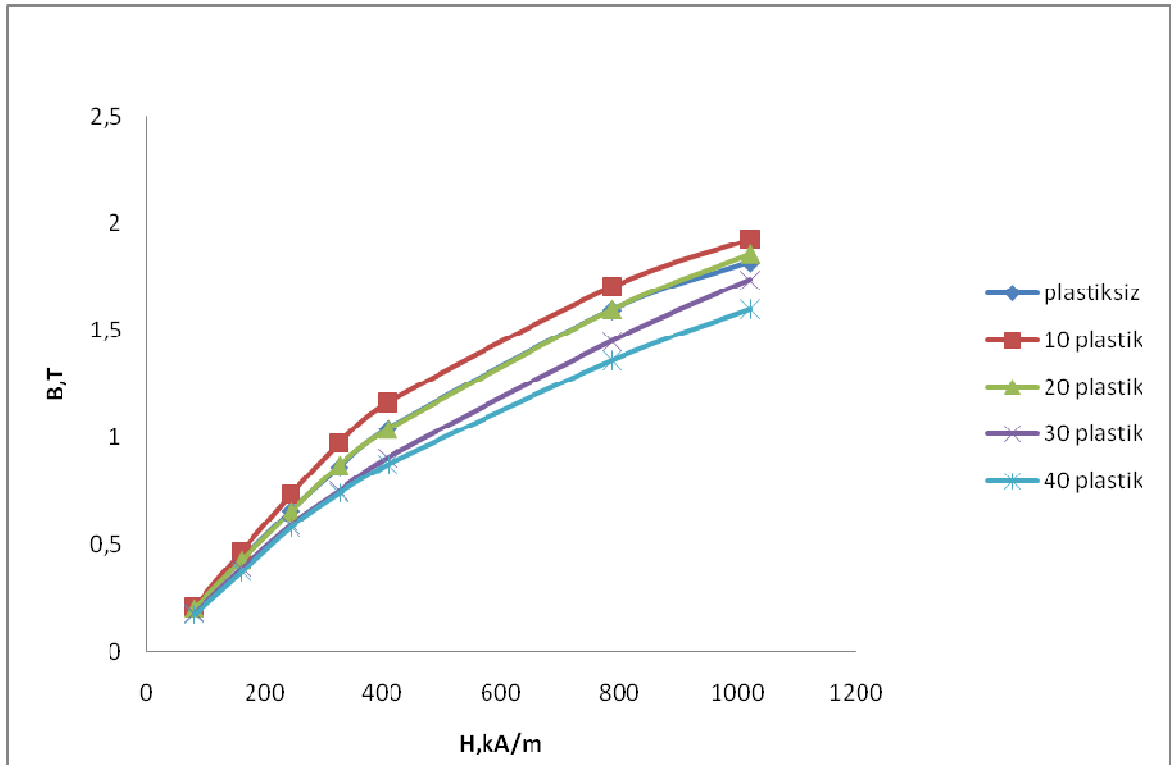


Şekil 4.27. L=8cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

L=8cm de d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerin oluşturduğu filtrede B-H ilişkisi.

Çizelge 4.28. L=8 cm’de d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisini ifade eden değerler.

B	H	d=6,28 plastiksiz	d=6,28 10 lastik	d=6,28 20 plastik	d=6,28 30 plastik	d=6,28 40 plastik
0,101	80,414	0,203	0,206	0,2	0,18	0,17
0,202	160,828	0,433	0,468	0,427	0,39	0,37
0,307	244,426	0,659	0,734	0,653	0,593	0,58
0,41	326,433	0,863	0,974	0,872	0,752	0,74
0,513	408,439	1,042	1,165	1,039	0,907	0,874
0,989	787,420	1,596	1,706	1,6	1,451	1,362
1,283	1021,496	1,819	1,929	1,859	1,738	1,602

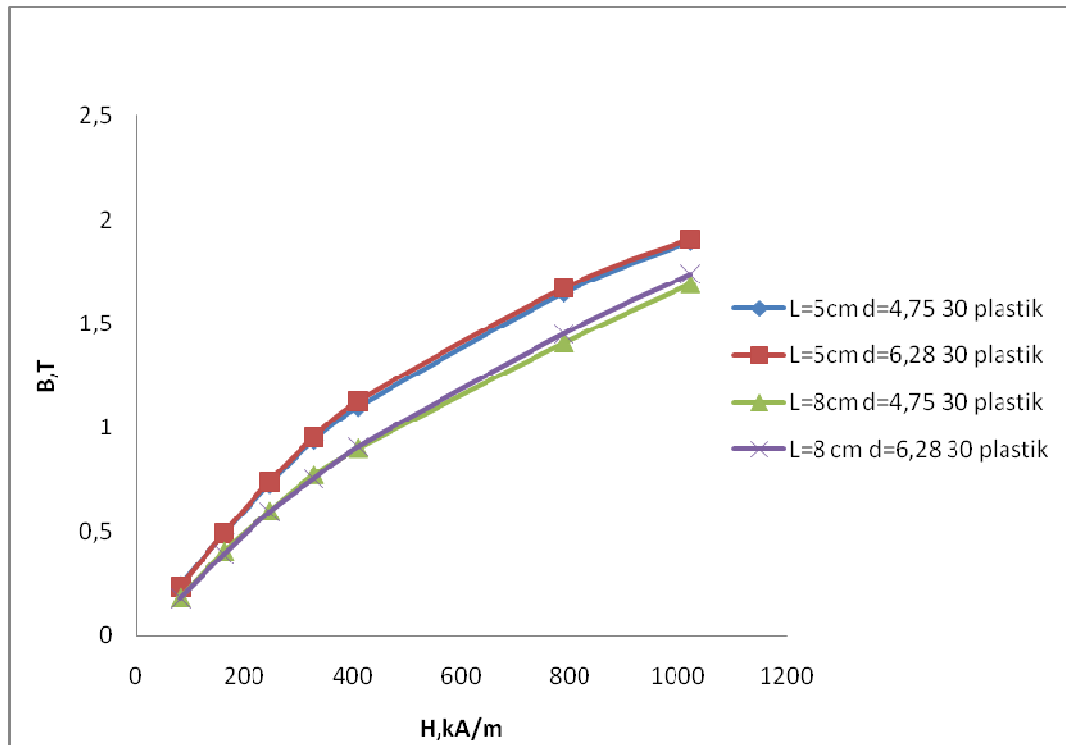


Şekil 4.28. L=8cm’de d=4,75 mm çaplı çelik küreler ve non manyetik malzemelerle oluşturulan düzende B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

L=5cm ve L=8cm de d=4,75 ve d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisi.

Çizelge 4.29. L=5cm ve L=8cm de d=4,75 ve d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade eden değerler.

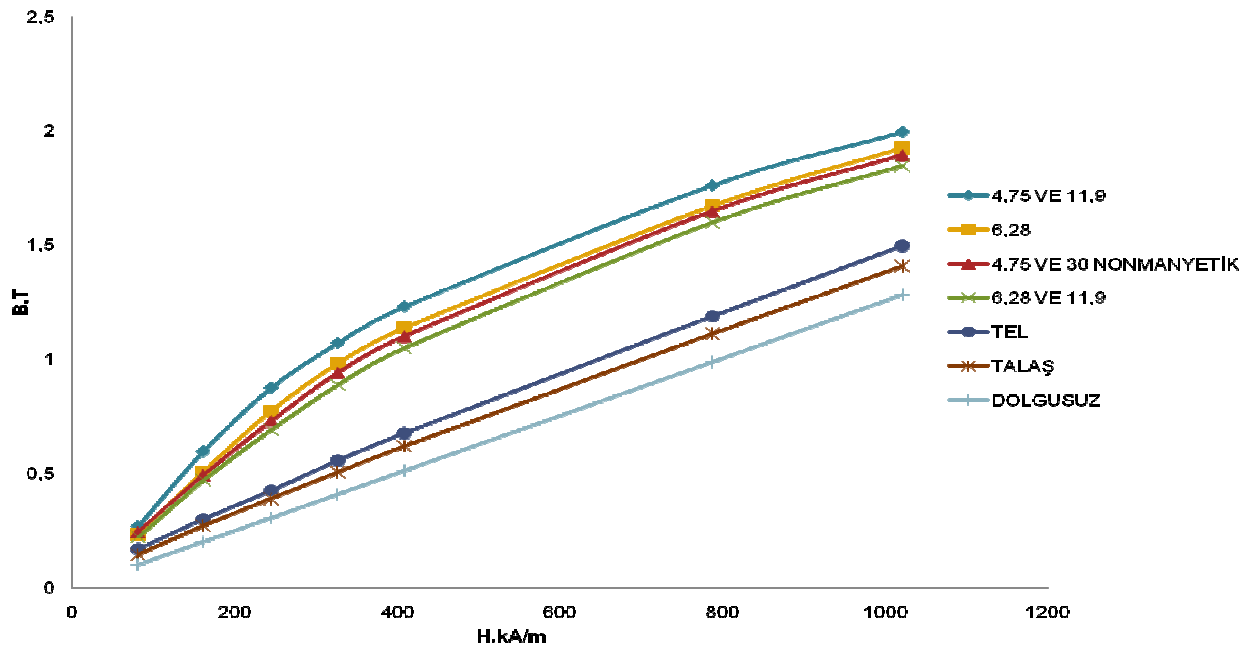
B	H	L=5cm d=4,75 30 lastik	L=5cm d=6,28 30 lastik	L=8cm d=4,75 30 lastik	L=8cm d=6,28 30 lastik
0,101	80,414	0,242	0,234	0,183	0,18
0,202	160,828	0,491	0,492	0,405	0,39
0,307	244,426	0,728	0,74	0,598	0,593
0,41	326,433	0,94	0,953	0,773	0,752
0,513	408,439	1,099	1,128	0,901	0,907
0,989	787,420	1,646	1,672	1,407	1,451
1,283	1021,496	1,893	1,908	1,691	1,738



Şekil 4.29. L=5cm de d=4,75 ve d=6,28 mm çaplı çelik küreler ve 30 adet non manyetik malzemelerle oluşturulan düzenekte B-H ilişkisini ifade edildiği grafik.

Çizelge 4.30. L=5cm de farklı özelliklerdeki dolgulu yatakların B-H ilişkisini ifade eden değerler.

H	TALAŞ	TEL	6,28 ve 30 PLASTİK	4,75 ve 30 PLASTİK	DOLGUSUZ	6,28 ve 11,9	4,75 ve 11,9	6,28	4,75
80,41401	0,144	0,168	0,234	0,242	0,101	0,221	0,269	0,234	0,262
160,828	0,271	0,3	0,492	0,491	0,202	0,47	0,596	0,508	0,557
244,4268	0,39	0,425	0,74	0,728	0,307	0,691	0,875	0,774	0,833
326,4331	0,505	0,556	0,953	0,94	0,41	0,888	1,07	0,982	1,076
408,4395	0,619	0,676	1,128	1,099	0,513	1,049	1,23	1,137	1,244
787,4204	1,111	1,187	1,672	1,646	0,989	1,598	1,76	1,671	1,771
1021,497	1,408	1,496	1,908	1,893	1,283	1,847	1,993	1,925	1,993



Şekil 4.30. L=5cm de farklı özelliklerdeki dolgulu yatakların B-H ilişkisinin ifade edildiği grafik.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Yüksek gradyantlı manyetik alanlar pratik uygulamalarında (manyetik filtrasyon ve seperasyon, nanoteknoloji , biyomedikal) yaygın olarak kullanılmaktadır.
2. Yüksek gradyantlı manyetik alanlar kullanılan düzene ve aygıtlarda alan gradyantını arttırmakla nonhomojen alanın etkisini arttırmak mümkündür. Teorik ve deneysel incelemeler en büyük gradyantların dış manyetik alanlarda mıknatıslanmış ve farklı geometriye sahip olan ferromanyetik granüllerin oluşturduğu saptanmıştır.
3. Tekil ferromanyetik malzemelerin veya şekillendirilmiş kutupların oluşturduğu yerel gradyantların etkin olmalarına rağmen bu malzemelerin yüzeylerinden uzaklaştıkça bu etki hızla azalır ve sistemin performansı azalır.
4. Düzene ve aygıtlarda gradyantlı alanların etkisini arttırmak için manyetik alan şiddeti daha dar olur veya yarıklar oluşturmakta yarar vardır. Bu durumda mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerdeki manyetik enerji bu dar bölgelerde daha hızlı transformasyona uğramakla bu bölgelerde çok yüksek (dış alan genliğinin 10^2 - 10^3 katı) gradyant oluşturabilirler.
5. Yüksek gradyantlı manyetik alan oluşturan ortamların en etkin sistemleri ferromanyetik granüllerden (tel, çubuk, bilye, talaşlar vb.) mıknatıslana bilen dolgu yataklardır.
6. Mıknatıslanmış ferro-granüllerden oluşturulmuş dolgu yatakların mıknatıslanma özellikleri granüllerin geometrisi, manyetik özellikleri ile yanı sıra yatağın dolgu faktörüne bağlıdır. Bu nedenle gözeneklerde indüklenen manyetik alanı manyetik devre teorisine göre belirlenmesi daha doğru sonuçlar verir.
7. Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgu yatakların mıknatıslanma özellikleri bu kürelerin teğetleşme noktaları etrafında oluşan mıknatıslanma kanallarından oluşan zincirler şeklindedir. Mıknatıslanma kanallarının gözeneklerdeki bölgelerindeki mıknatıslanma geçirgenliği kürelerin teğet noktasından uzaklaştıkça hızla azalır.

8. Dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma kanallarının manyetik geçirgenliğinin değişimi mıknatıslanma zincirinin manyetik devresinden belirlenebilir. Mıknatıslanma kanallarının bir birinin üzerine karşılıklı etkisini ve dolgulu yatağın porozitesinin mıknatıslanma özelliklerine etkilerini tekil mıknatıslanma kanalından elde edilen ifadelerle düzeltmeler yaparak belirlemek mümkündür.
9. Farklı çaplı ferromanyetik kürelerin karışımından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrileri de kanallarla mıknatıslanma modelinden kolaylıkla elde edilebilir. Bu durumda yatak porozitesinin veya dolgu faktörünün kürelerin çaplarının orantısıyla değişimini Dk.16'daki ilişkiyle dikkate alınmalıdır.
10. Farklı geometriye sahip olan ferromanyetik granüllerden (metal talaşlarından) oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrilerini elde etmek için tekil mıknatıslanma kanallarından elde edilen sonuçların düzeltilmesine gereksinim vardır. Bu düzeltmeler kanalların bir birinin üzerine etkisini, kanalların eğimlerini de dikkate alan deney verilerini göz önünde tutarak sabit katsayı veya dolgu faktörüne göre nonlineer bir fonksiyonla belirlenebilir.
11. Elde edilen sonuçlar hem özdeş hem de farklı geometri ve mıknatıslanma özelliklere sahip olan (farklı boyutlu, yüzeyleri manyetik veya non manyetik kaplamayla kaplanmış şekilde vb) dolgu elemanlarından oluşturulmuş mıknatıslanmış yataklar için de geçerlidir. Ayrıca bu sonuçlar dolgulu yatağın gözeneklerindeki ortamın hem nonmanyetik hem de manyetik özellikli olması durumunda yatağın mıknatıslanma özelliklerini belirlemeye imkan verir.
12. Elektromanyetik filtrenin performansını iyileştirmek için esas çalışma bölgesini oluşturan mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin bilinmesi gerekir.
13. Dolgusuz duruma göre mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik alan yoğunluğunda önemli derecede artış gözlenmiştir.
14. Bu olay bütün mıknatıslanmış granül dolgulu yataklarda yer almaktadır ve yatağın gözenekliliği ile orantılı olarak değişmektedir.

15. Bu nedenle mıknatıslanmış dolgulu yatakların genel kuramsal modelini oluşturmak için belli düzeltme katsayıları kullanarak bu çalışmada elde edilen sonuçlardan faydalanılabilir.
16. Ölçümler mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğinin değişiminin Lihtenberg yaklaşımına daha uyumlu olduğunu göstermiştir.
17. Yani dolgu elemanlarının hacimsel yoğunluğunun artmasıyla dolgulu yatağın esas mıknatıslanma eğrisi olan $B(H)$ ilişkisi de artacaktır.
18. Sonuçların değerlendirilmesine göre yüksek doluluk oranına sahip mıknatıslanmış dolgulu yatakların elektromanyetik filtrasyonda yüksek verim elde edilmesi için kullanılabileceği sonucu varılmıştır.
19. Yüksek gradyantlı manyetik alanlar pratik uygulamalarında (manyetik filtrasyon ve seperasyon, nanoteknoloji, biyomedikal) yaygın olarak kullanılmaktadır.
20. Yüksek gradyantlı manyetik alanlar; kullanılan düzenek ve aygıtlarda, alan gradyantını arttırmakla non homojen alanın etkisini arttırmak mümkündür. Teorik ve deneysel incelemeler en büyük gradyantların dış manyetik alanlarda mıknatıslanmış ve farklı geometriye sahip olan ferromanyetik granüllerin oluşturduğu saptanmıştır.
21. Tekil ferromanyetik malzemelerin veya şekillendirilmiş kutupların oluşturduğu yerel gradyantların etkin olmalarına rağmen bu malzemelerin yüzeylerinden uzaklaştıkça bu etki hızla azalır ve sistemin performansı azalır.
22. Düzenek ve aygıtlarda gradyantlı alanların etkisini arttırmak için manyetik alan şiddeti daha dar olur veya yarıklar oluşturmakta yarar vardır. Bu durumda mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerdeki manyetik enerji bu dar bölgelerde daha hızlı transformasyona uğramakla bu bölgelerde çok yüksek (dış alan genliğinin 102-103 katı) gradyant oluşturabilir.
23. Yüksek gradyantlı manyetik alan oluşturan ortamların en etkin sistemleri ferromanyetik granüllerden (tel, çubuk, bilye, talaşlar vb.) mıknatıslana bilen dolgulu yataklardır.

24. Mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri granüllerin geometrisi, manyetik özellikleri ile yanı sıra yatağın dolgu faktörüne bağlıdır. Bu nedenle gözeneklerde indüklenen manyetik alanı manyetik devre teorisine göre belirlenmesi daha doğru sonuçlar verir.
25. Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri bu kürelerin teğetleşme noktaları etrafında oluşan mıknatıslanma kanallarından oluşan zincirler şeklindedir. Mıknatıslanma kanallarının gözeneklerdeki bölgelerindeki mıknatıslanma geçirgenliği kürelerin teğet noktasından uzaklaştıkça hızla azalır.
26. Dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma kanallarının manyetik geçirgenliğinin değişimi mıknatıslanma zincirinin manyetik devresinden belirlenebilir. Mıknatıslanma kanallarının bir birinin üzerine karşılıklı etkisini ve dolgulu yatağın porozitesinin mıknatıslanma özelliklerine etkilerini tekil mıknatıslanma kanalından elde edilen ifadelerle düzeltmeler yaparak belirlemek mümkündür.
27. Farklı çaplı ferromanyetik kürelerin karışımından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrileri de kanallarla mıknatıslanma modelinden kolaylıkla elde edilebilir. Bu durumda yatak porozitesinin veya dolgu faktörünün kürelerin çaplarının orantısıyla değişimini Dk.16'daki ilişkiyle dikkate alınmalıdır.
28. Farklı geometriye sahip olan ferromanyetik granüllerden (metal talaşlarından) oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrilerini elde etmek için tekil mıknatıslanma kanallarından elde edilen sonuçların düzeltilmesine gereksinim vardır. Bu düzeltmeler kanalların bir birinin üzerine etkisini, kanalların eğimlerini de dikkate alan deney verilerini göz önünde tutarak sabit katsayı veya dolgu faktörüne göre nonlineer bir fonksiyonla belirlenebilir.
29. Elde edilen sonuçlar hem özdeş hem de farklı geometri ve mıknatıslanma özelliklere sahip olan (farklı boyutlu, yüzeyleri manyetik veya non manyetik kaplamayla kaplanmış şekilde vb) dolgu elemanlarından oluşturulmuş mıknatıslanmış yataklar için de geçerlidir. Ayrıca bu sonuçlar dolgulu yatağın gözeneklerindeki ortamın hem nonmanyetik hem de manyetik özellikli olması durumunda yatağın mıknatıslanma özelliklerini belirlemeye imkan verir.

30. Dolgusuz duruma göre mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik alan yoğunluğunda önemli derecede artış gözlenmiştir.
31. Bu olay bütün mıknatıslanmış granül dolgulu yataklarda yer almaktadır ve yatağın gözenekliliği ile orantılı olarak değişmektedir.
32. Bu nedenle mıknatıslanmış dolgulu yatakların genel kuramsal modelini oluşturmak için belli düzeltme katsayıları kullanarak bu çalışmada elde edilen sonuçlardan faydalanılabilir.
33. Ölçümler mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğinin değişiminin Lihtenberg yaklaşımına daha uyumlu olduğunu göstermiştir.
34. Yani dolgu elemanlarının hacimsel yoğunluğunun artmasıyla dolgulu yatağın esas mıknatıslanma eğrisi olan $B(H)$ ilişkisi de artacaktır.
35. Sonuçların değerlendirilmesine göre yüksek doluluk oranına sahip mıknatıslanmış dolgulu yatakların elektromanyetik filtrasyonda yüksek verim elde edilmesi için kullanılabileceği sonucu varılmıştır.

6 KAYNAKLAR

- [1] Svoboda J 2004 *Magnetic Techniques for the Treatment of materials* (Kluwer academicPublishers: The Netherlands)
- [2] Karmazin V I and Karmazin V V 1984 *Magnetic Method of Beneficiation* (Nedra:Moscow)
- [3] Gerber R and Birss R R 1983 *High Gradient Magnetic Separation* (John Wiley)
- [4] Sandulyak A V 1988 *Magnetic Filtration of Liquids and Gases* (Ximiya: Moscow)
- [5] Abbasov T 2002 *Electromagnetic filtration processes. Theory, Application and Construction, (Seçkin,Ankara)*
- [6] Hristov JY 1996 Fluidization of ferromagnetic particles in a magnetic field Part 1: the effect of field line orientation on bed stability *Powder Technology* **87** 59-66
- [7] Furlani E P and Sahoo Y 2006 Analytical model for the magnetic fieldand force in a magnetophoretic microsystem *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 1724–32
- [8] Sun L, Zborowski M, Moore L R and Chalmers J J. 1998. Continuous, flowthrough immunomagnetic cell sorting in a quadrupole field *Cytometry* **33** 469–75.
- [9] Rotariu O and Strachan N J C 2005 Modelling magnetic carrier particle targeting in the tumor microvasculature for cancer treatment *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **293** 639–46
- [10] Udrea1 L E, Strachan N J C, Badescu V B and Rotariu O 2006 An *in vitro* study of magnetic particle targeting in small blood vessels *Phys. Med. Biol.* **51** 4869–81
- [11] Alexiou Ch, Dieh D, Henninger P, Iro H, Röckelein R, Schmidt W and Weber H 2006 A High Field Gradient Magnet for Magnetic Drug Targeting *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **16** 1527-30
- [12] Iluita I and Larachi F 2003 Theory of tricle –bed magnetohydrodynamics under magnetic field gradients *AIChE J.* **49** 1525-32
- [13] Guivy D 1958 Sur la permittivite et la permeabilite magnetique des mélanges Soc. Franc. Des Electriciens **8** 214-22
- [14] Bruggeman D A G 1935 Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen substanzen *Annalen der Physik* **24** 636-64

- [15] Grigoryev M N and Kirko I M 1956 Estimation of the magnetized properties of magnetodielectric structures *Journal of Technical Physics* **26** 1501-8
- [16] Tolmachev S T and Fainshtein E G 1972 Average permeability of packing balls bed *Theoretical Electrotechnics* **14** 144-151
- [17] Sandulyak A V 1984 *Treating of Liquids in Magnetic fields* (Visha shkola: Lvov)
- [18] Khersones L Krutiy V V Davidenko V P 1970 Estimation of magnetic characteristics of the balls in working zones of the separators *Mining Journal* **3** 56-59
- [19] Lawver J E Wright I L and Kokal H R 1968 The behavior of mesabi iron and silicate minerals in 20 kilogauss magnetic fields *Soc. on Mining Engineering Transaction* **241** 194-203
- [20] Yaniv I, Lin I J and Zimmels Y 1978 On the Magnetic Field of a Finite Array of Cylindrical Ferromagnetic Bars -Part I *IEEE Transactions on Magnetics* **MAG-10** 1175-79
- [21] Moyer C, Natenapit M and Arajs S 1984 Particle capture by an assemblage of spheres in HGMS *J. Appl. Phys.* **55** 2589-92
- [22] Sandulyak A V, Sandulyak A A and Ershova V A 2007 Magnetization curve of a granulated medium in terms of the channel-by-channel magnetization model (New approach) *Doklady Physics* **52** 179-81
- [23] Bean C P 1971 Theory of magnetic filtration *Bull. Am. Phys. Soc.* **16** 350
- [24] Watson JHP 1973 Magnetic filtration *Journal of Applied Physics* **44** 4209-13
- [25] Friedlaender F J, Gerber R , Kurz W and Birrs R.R. 1981 Particle motion near and capture on single spheres in HGMS. *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-17** 2801-4
- [26] Friedlaender F J and Takayasu M 1982 A study of the mechanism of particle build-up on single ferromagnetic wires and spheres. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-18** 817-19.
- [27] Watson JHD and Watson SJP 1983 The ball matrix magnetic separator *IEEE Trans. Magn* **MAG 19**(6) 2698-2704
- [28] Kashevskii B E and Prokhorov I V 2003 Magnetophoretic potential of a chain of ferromagnetic balls in a homogeneous field *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* **76** 775-82
(Seckin: Ankara)
- [29] Shvartsman VL and Suplin V Z 1970 Magnetic field distortion in disperse ferromagnetic Media *Magnetohydrodynamics* **6** 183-9

- [30] Harpavat G 1974 Magnetostatic forces on a chain of spherical beads in on magnetics *IEEE Trans. Magn.* **10** 919-22
- [31] Yarmachuk E J and Janak J F 1982 Chains of permeable spheres in an applied magnetic field *IEEE Trans. Magn.* **MAG-18** 1268-70
- [32] Sultanovich E A and Karmazin V I 1993 Kaolin beneficiation in high-gradient magnetic separator with a ball matrix *Magnetic and Electrical Separation* **5** 1-15
- [33] Edminister J.A 2000 Elektromanyetik. 2. Baskıdan çeviri (T.Aydemir, E.Afacan, C.Nakiboğlu) Nobel yayınları, Ankara
- [34] Stratton J. Electromagnetic Theory, 2007 John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [35] Tomininoka T. mangenetik field calculation of an infinitely long solenoid. Euer J.Phys. 27 (2006) 1399-1408.
- [36] Hopstock D.M.1975, Fundamental aspeets of desing and performance of Low intersity dry magnetic separators, Trans. Soc. Min. Eng. AIME, 258, 222-227.
- [37] Sochnev A. Ya. 1940 Elektromagnetic systems with a magnetic field strength that exerts a constant or decreasing magnetic pondermotive force on a patrikle J. Tech. Phys (JTF) **10**(6) 483-492.
- [38] Smolkin M.R., Smolkin R.D. 2006. Calculation and Analysis of the magnetic force Acting on a particle in the Magnetik Field of separator. Analysis of the Equations Used in the Magnetic Metods of Separation ,IEEE Transactions on Magnetics **42**(11), 3682-3693.
- [39] Karmazin V.V., Karmazin V.I. 1988 Magnetic and Electric Methods of Enrichment, Nedra ,Moscow.
- [40] Sochnev A. Ya. 1984, Calculation of the Field Strength by a Straightforward Method, Energoatomizdat, Leningrad.
- [41] Abbasov T.A. 1991. Taşıyıcı ortamın rhelojik özelliklerini dikkate almakla demir karışımli parçacıkların not homojen manyetik alanda çöktürülmesi Doktora tezi, Azerbaycan Bilimler Akademisi.
- [42] Aharoni A. 1987, Magnetic interaction between spheres. IEEE Trans. Magn., **MAG-23**(5),. 1853-1855
- [43] Eisenstein I. 1981, Magnetic seperators: Traction force between ferromagnetic and paramagnetic spheres. IEEE Trans. Magn., MAG-17, 2801-2804.

- [44] Karadag T, Yıldız Z., Abbasov T, 2008, Ferromanyetik dolgu lu yatakların mıknatıslanma özelliklerinin incelenmesi. Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2008. Bursa, Türkiye. 361-364.
- [45] Karadag T., Yıldız Z., Sarımeşeli A., Abbasov T. 2010 Estimation of Magnetization properties of the ferromagnetic poli-granular beds. Journal of Dispersion Science and Technology
- [46] Eisenstein I, 1978, Magnetik Traction Force in HGMS an ordered array of wires, I, □, IEEE Trans. Magn. , **MAG-14**(6), 1148-1154, 1555-1558.
- [47] Chukhrov A.Y., 1985 Formation of free Convection in magnetidiffusions. Magnetohydrodynamics (2), 61-66.
- [48] Natenapit M., Sauqlek W. 1999. Capture radius of magnetik partcils in radom cylindrical matrices in high gradient magnetik separation. Yournal of applied Physics, **85**(2), 660-664.
- [49] Magnetic method cleaning of gases and waters. 1970 Edit by Izmodenov Y.A., Tavria, Simferopoul.
- [50] Widjajakusma J, Biswal B and Hilfer R 2003 Quantitative comparison of mean field mixing aws for conductivity and dielectric constants of porous media *Physica A* **318** 319-333
- [51] Looyenga H 1965 Dielectric constants of heterogeneous mixtures *Physica* **31** 401-406
- [52] Böttcher C J F 1973 *Theory of Electric Polarization Vol I* (Elsevier Amsterdam)
- [53] Lichtenecker K, Rother K 1931 Die herleitung des logarithmischen mischungsgesetzes aus allgemeinen prinzipien der stationären strömung. *Phys. Zeitschr* **32** 255–260
- [54] Rayleigh Lord 1892 On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium *Philosophical Magazine* **34** 481-502
- [55] Neelakantaswamy P S Turkman R I and Sarkar T K 1985 Complex permittivity of a dielectric mixture: corrected version of Lichtenecker’s logarithmic law of mixing *Electronics Letters* **21** 270-271
- [56] Berthier S 1993 *Optique des milieux composites* (Polytechnica: Paris)

ÖZ GEÇMİŞ

Teoman Karadağ, 1981 yılında Malatya’da doğdu. İlk, orta ve yüksek öğrenimini doğduğu şehirde tamamladı. 2005 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinden mezun oldu. 2007 yılında mezun olduğu üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek Lisans eğitiminin son döneminde Erasmus programı dâhilinde İsveç’in Linköping Üniversitesinde eğitim aldı. 2008 yılından itibaren Türk Telekomünikasyon A.Ş. bünyesinde mühendis olarak görev yapmaktadır.