

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK SIVI ÇEKİRDEKLİ SİSTEMLERİN TASARIMI
İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

KÜBRA KARTACA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

MALATYA

Haziran 2019

Tezin Başlığı: Manyetik Sıvı Çekirdekli Sistemlerin Tasarımı, İncelenmesi ve Modellenmesi

Tezi Hazırlayan: Kübra KARTACA

Sınav Tarihi: 10 Haziran 2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektromanyetik Dalgalar ve Mikrodalga Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Teoman KARADAĞ

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Turan ÖZDEMİR

Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Manyetik Sıvı Çekirdekli Sistemlerin Tasarımı, İncelenmesi ve Modellenmesi ” başlıklı bu çalışmamın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Kübra KARTACA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANYETİK SIVI ÇEKİRDEKLİ SİSTEMLERİN TASARIMI İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

Kübra Kartaca

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

110+ xii sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Tahmuraz Abbasov

Mikro ve nano teknolojik sistemlerin hızlı gelişimi, yeni, daha etkin ve küçük boyutlu aygıt ve malzemelerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu tez çalışmasında nispeten yeni malzemeler sınıfına ait olan manyetik sıvı bazlı düzenek, sensör ve aygıtların tasarımı, teorik ve deneysel incelemeleri yapılmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve mıknatıslanma özellikleri olan sistemlerin bir kısmının veya tümünün manyetik sıvı kullanılarak dönüştürülmesi önerilmiştir. Manyetik sistemlerin mıknatıslanma nüvelerinin yerine manyetik sıvı çekirdeklerin kullanılması durumunda sanayi ve model transformatörlerin çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir. Küçük boyutlu minyatür transformatör yapısı önerilmiş ve bu tür transformatörlerin çıkış karakteristiklerinin sürekli ayarlanabilirliği gösterilmiştir. Manyetik sıvı ile çalışan aygıt ve sensörlerin mıknatıslanma, hidrodinamik ve yapısal özelliklerine dair bazı problemlerinin teorik incelenmesi yapılmış, basit çözüm önerileri verilmiştir. Yüksek akım ölçümlerinde kullanılabilir sensör tasarımı yapılmış, sensörün teorik temelleri geliştirilmiştir. Manyetik sıvı bazlı küçük boyutlu, paramanyetik özellikli örneklerin yoğunluğunun ve manyetik alınganlığının belirlenmesi için basit ölçüm yönteminin teorisi geliştirilmiştir. Sensör yüzeylerinde ince manyetik sıvı tabakalarının manyetik alan altındaki akışı ve kararlılık durumları, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar grafik ve çizelgelerle gösterilerek bu sonuçların kıyaslamaları ve yorumlamaları yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Manyetik Sıvı, Manyetik Sıvı Nüveler, Mikro Transformatör, Sensör, Mıknatıslanma

ABSTRACT

Master Thesis

Design Investigation And Modeling Of Magnetic Liquid Core Systems

Kubra Kartaca

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

110+ xii pages

2019

Supervisor: Prof. Dr. Tahmuraz Abbasov

The rapid development of micro- and nano-technological systems requires the development of more efficient and small-sized devices and materials. In this thesis, theoretical and experimental investigations of magnetic fluid based sensors and devices belonging to the class of relatively new materials have been made. It has been proposed to convert some or all of the systems which are widely used and have magnetizing properties by using magnetic fluid. Magnetic fluid cores are used instead of magnetizing cores of magnetic systems, the output characteristics of industrial and model transformers are evaluated. The structure of the small-sized transformer has been proposed and the sustained adjustability of the output characteristics of such transformers is shown. Some problems related to magnetization, hydrodynamic and structural properties of magnetic fluid-used devices and sensors have been investigated and simple solutions have been given. The sensor design can be used for high current measurements and the theoretical basis of the sensor has been improved. Simple measurement method theory has been developed for the determination of the density and magnetic susceptibility of small sized, paramagnetic samples with magnetic fluid based. The flow and stability conditions of the thin magnetic fluid layers under the magnetic field on the sensor surfaces are examined both theoretically and experimentally. The theoretical and experimental results are shown with graphs and tables and these results are compared and evaluated.

KEYWORDS: Magnetic Fluid, Ferrofluid Core, Micro Transformer, Sensors, Magnetization

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında ve birçok konuda yardım, öneri ve desteklerini esirgmeden beni yönlendiren, ilham veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV'a;

Çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen, motive eden Elektronik Anabilim Dalı öğretim üyesi Dr. Teoman KARADAĞ'a;

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca yardımcı olan, desteklerini esirgemeyen iş arkadaşlarım Y. Emre EKİCİ, Halit AKPINAR'a;

Tezin yazım aşamasında desteğini esirgemeyen Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Ana Bilim Dalı doktora öğrencisi İ. Can DİKMEN'e;

Yüksek lisans çalışmalarına başlamam için beni yüreklendiren, manevi desteklerini esirgemeyen sevgili Enver PARTAL ve ailesine;

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hep hissettiğim değerli AİLEM'e, sevgili Anne ve Baba'ma;

teşekkür ederim.

2016/726 numaralı Yüksek Lisans Projesi kapsamındaki desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
GRAFİKLER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Soğutma	4
1.2. Transformatörler	5
1.3. Sızdırmazlık ve Contalama.....	6
1.4. Pompalama ve Valfleme ile Akışkanların kontrolü	7
1.5. Enerji Hasadı	8
1.6. İlaç Hedefleme ve İlaç Salınımı.....	8
1.7. Tümör Tedavisinde Manyetik Sıvı Kullanımı	9
1.8. MRI’da Kontrast Ajan Olarak kullanımı	10
1.9. Manyetik sıvıların sensörlerde kullanımı	10
1.10 Manyetoreolojik Sıvılar	18
2. KURAMSAL TEMELLER	23
2.1. Ferrohidrodinamik Denklemler	23
2.2. Transformatörler	25
2.3. Lab-On-Chip (LOC) Sistemleri	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. DS-50 Ferromanyetik Sıvı	34
3.1.2. Saf Demir Tozu.....	35
3.1.3. Yeni Transformatör Yapıları ve Tasarımları	37
3.1.4. Yüksek Akım Ölçen Manyetik Sıvılı Sensörün Gövde Tasarımı	39
3.1.5. Manyetik Sıvıya Batırılmış Non-Manyetik Cisimlerin Askıda Kalma Olayının İncelenmesi	41

3.1.6.	Çok Amaçlı Radyal Manyetik Alan Oluşturan Elektromanyetik Alan Sistemi	42
3.1.7.	Helm Holtz Bobinleri Elektromanyetik Sistemi	44
3.1.8.	Lab-on-Chip (LOC) Sistemler	46
3.1.9.	Matlab Programı ve Kullanım Alanları	47
3.2.	Ölçüm Yöntemi ve Kullanılan Cihazlar	47
3.2.1.	GFG 8216A Analog Sinyal Jeneratörü.....	47
3.2.2.	ADS1022B Osiloskop.....	49
3.2.3.	Ayarlı AC Güç Kaynağı (Varyak)	49
3.2.4.	Lakeshore 410 Gaussmetre	50
3.2.5.	Neodyum Mıknatıslar	51
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	52
4.1.	Küçük Boyutlu İnce Çekirdekli Mikro Transformatör Modelinin İncelenmesi	52
4.2.	Nüve Yan Kollarında Hava Boşlukları Oluşturulan Manyetik Sıvı Doldurulan Mantel Tip Tek Fazlı Transformatörün İncelenmesi	68
4.3.	Manyetik Sıvı Bazlı Çalışan Bazı Sensörlerin Teorisinin Geliştirilmesi	76
4.4.	Yüksek Elektrik Akım Şiddeti Değerini Ölçmek İçin Manyetik Sensörlerin İncelenmesi	77
4.4.1.	Manyetik Sıvı Sensörün Temel Prensipleri ve Teorisinin Geliştirilmesi	77
4.4.2.	Manyetik Sıvı Sensörün Pratik Şemasının Geliştirilmesi.....	80
4.4.3.	Manyetik Sıvı Sensörlerde Manyetik Sıvı İçerisinde İndüklenen Manyetik Alanın Değerlendirilmesi	81
4.4.4.	Küçük Boyutlu Dispers Karışımın Manyetik Alınganlığının Ve Özgül Yoğunluğunun Manyetik Sıvı Sensörlerde Belirlenmesi.....	86
4.5.	Manyetik Sıvı Sensörlerinde Kullanılan İnce Manyetik Sıvı Tabakasının Dış Manyetik Alan Etkisinde İncelenmesi.....	88
4.5.1.	Yatay Düzlemde Manyetik Sıvı Tabakasının Enine Manyetik Alandaki Akışının İncelenmesi.....	95
5.	SONUÇLAR	98
6.	KAYNAKLAR	102
	ÖZGEÇMİŞ	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
n	Yüzeyden dışarı doğru birim vektör
I	Akım
V	Gerilim
f	Frekans
T	Tesla
A	Akım
E	Elektrik alan şiddeti
H	Manyetik alan şiddeti
B	Manyetik akı yoğunluğu
K	Boltzman sabiti
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
LOC	Lab-on-chip
$MEMS$	Mikroelektromekanik sistemler
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
W	Watt
N	Sargıdaki sarım sayısı
M	Mıknatıslanma
P	Basınç
V	Hacim
M_{eq}	Süspansiyon kararlılık mıknatıslanması
T	Cauchy gerilme tensörü
Fe_3O_4	Magnetit
μ_0	Manyetik sabit ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
μ	Manyetik geçirgenlik
ω	Dönme hızı (rad/s)
g	Yer çekimi vmesi
ϑ	Devinimsel hız
ξ	Girdap viskozitesi
ρ	Yoğunluk
σ	Elektriksel iletkenlik
ε	Dielektrik geçirgenlik
β	Sürtünme katsayısı
η	Kayma viskozitesi
ϕ	Manyetik akı
λ	Toplam viskozite

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Manyetik Sıvının Nanoyapısı: Nanomanyetik parçacıklar, taşıyıcı sıvı, sürfaktan madde [12].....	1
Şekil 1.2.	S. Papell'in keşfettiği kolloidal manyetik sıvı sentezi akış diyagramı [17]	3
Şekil 1.3.	Deneysel manyetik sıvı soğutmalı transformatörün yapısı [23]	5
Şekil 1.4.	Sıcaklıklar (gri harita, kalın çizgiler) ve doğal termal akış (oklar, akış çizgileri)- Transformatör Yağı UTR40 (solda), süper paramagnetik sıvı (sağda) [26]	6
Şekil 1.5.	Döner mil manyetik sıvı contanın temel bileşenleri [27].....	7
Şekil 1.6.	Manyetik Sıvının Valfleme Uygulaması [29]	7
Şekil 1.7.	Manyetik sıvı bazlı enerji hasadı sisteminin şematik diyagramı [30].....	8
Şekil 1.8.	Dolaşım sistemine enjekte edilen manyetik nano parçacıkların yüksek gradyanlı manyetik alanla belirli bir bölgede konsantre edilmesi [32]....	9
Şekil 1.9.	LVDT konum sensör yapısı [31].....	12
Şekil 1.10.	Eğim-ivme sensörünün temel yapısı [12].....	13
Şekil 1.11.	Açısal konum sensörü. Başlangıç, referans konumu (a), saat yönüne göre çevrilmiş konumu (b) [12].....	14
Şekil 1.12.	Manyetik Sıvılı akış sensörü şematizasyonu [48]	15
Şekil 1.13.	Manyetik sıvı bazlı basınç sensörünün yapısı [53]	16
Şekil 1.14.	Manyetik sıvı bazlı ışın ayırıcının şematik gösterimi [54].....	17
Şekil 1.15.	Manyetik sıvı bazlı optik modülatör şeması [59].....	18
Şekil 1.16.	Kontrol edilebilir MR sıvı cihazları için temel çalışma modları: (a) basınç tahrikli direkt akış modu, (b) doğrudan kesme modu ve (c) iki eksenli uzamsal akış modu [69].....	19
Şekil 1.17.	Uygulama ekipmanlarında kullanılan MR sıvı döner freni [63]	20
Şekil 1.18.	Kamyon koltuğu süspansiyon sisteminde kullanılan MR sıvı damperi [63]	20
Şekil 2.1.	Manyetik akı çizgilerinin manyetik ve non-manyetik malzemeye tepkisi [78]	25
Şekil 2.2.	Bobin şeklinde sarılmış telin üzerinden geçen akım sonucu oluşan manyetik akı çizgileri [78]	26
Şekil 2.3.	Transformatörün manyetik yapısı [79].....	26
Şekil 2.4.	Parçacık domainlerinin manyetik alan yokluğundaki dizilimi (solda), domainlerin manyetik alan altındaki dizilimi (sağda) [80]	28
Şekil 2.5.	Transformatörde açık devre test düzeneği [81].....	29
Şekil 2.6.	Transformatörde kısa devre test düzeneği [81]	30
Şekil 2.7.	Entegre silikon bazlı bileşenlere (mikro pompa, valfler, biyosensör) sahip bir polimer laboratuvar-çipinin şematik çizimi [83]	31
Şekil 2.8.	Birçok örnek sıvı girişi bulunan küçük boyutlu mikro sıvı çip örneği [84]	31
Şekil 3.1.	Sigma Inc. DS-50 manyetik sıvının sabit neodyum mıknatıslarla etkileşimi	34

Şekil 3.2.	Sigma marka diğer manyetik sıvılar ile DS-50 nin mıknatıslanma eğrileri [86]	35
Şekil 3.3.	Öğütülmüş saf demir tozunun elektron mikroskobu görüntüsü	36
Şekil 3.4.	Öğütülmüş saf demir tozunun neodyum mıknatısla etkileşimi	36
Şekil 3.5.	Primer sargının şarjlı matkap yardımıyla şırınga gövdesine sarımı	37
Şekil 3.6.	Tasarlanan alçaltıcı tip mikro transformatör	38
Şekil 3.7.	Kullanıma hazır referans transformatör (solda), karkası ve sargısı ayrı, verniksiz transformatör (sağda).....	39
Şekil 3.8.	Tasarlanan sensör gövdesi.....	40
Şekil 3.9.	Tasarlanan sensör gövdesinin yandan görünüşü	40
Şekil 3.10.	Radyal manyetik alan oluşturan transformatörde ölçüm deney düzeneği	41
Şekil 3.11.	Radyal manyetik alan oluşturan elektromanyetik alan düzeneği	43
Şekil 3.12.	Helmholtz bobin deney seti.....	44
Şekil 3.13.	Çip standı üzerindeki farklı kanallı LOC çipleri	46
Şekil 3.14.	Lab-on-Chip (LOC) aksesuarları	46
Şekil 3.15.	GW Instek, GFG 8216A Sinyal Jeneratörü.....	48
Şekil 3.16.	AA-TECH marka ADS1022B model osiloskop	49
Şekil 3.17.	Ayarlanabilir güç kaynağı	50
Şekil 3.18.	Lakeshore 410 gaussmetre	51
Şekil 3.19.	Kullanılan farklı boyut ve geometriye sahip neodyum mıknatıslar	51
Şekil 4.1.	Gövde kollarının her iki tarafına 0.5 mm yarık açılıp saf demir tozu ile doldurulmuş transformatör. Transformatörün yan görünüşü (a). Yarıkların üstten görünüşü (b)	70
Şekil 4.2.	Gövde kollarına ferromanyetik sıvı eklenen transformatörün üstten görünüşü	71
Şekil 4.3.	Yüksek Akım Ölçer Manyetik Sıvı Sensör Akım Şeması. Üst Görünüş (a), yan görünüş (b).	81
Şekil 4.4.	Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş manyetik sıvı magnetometre (a), kutupların konumu (b).....	82
Şekil 4.5.	Sabit mıknatısların aynı kutupları (sağda) ve farklı kutupları (solda) etkileşimdeyken meydana gelen manyetik alan çizgileri.....	88
Şekil 4.6.	Sabit mıknatıslar ile manyetik sıvının etkileşimi	89
Şekil 4.7.	Sabit neodyum mıknatısların üzerinde 0,3'er ml DS-50 manyetik sıvının mıknatıslanması.....	90
Şekil 4.8.	Sabit mıknatısın alanı altında tutulan 1 ml manyetik sıvı	90
Şekil 4.9.	Sabit mıknatısların kutupları değiştirilerek (birbirini çeker pozisyon) manyetik sıvının tutulması (a), yakından görünüş (b)	91
Şekil 4.10.	Sabit yuvarlak geometrili neodyum mıknatısların etkileşimi altında manyetik sıvının tutulması	92
Şekil 4.11.	Sabit mıknatısların etkisi altında 0,3'er ml manyetik sıvının tutulması..	92
Şekil 4.12.	Miktarı arttırılan manyetik sıvıların birbiriyle etkileşimi	93
Şekil 4.13.	Manyetik sıvıların birleşerek her bir mıknatıs üzerinde aynı miktarda dengelenmesi	94

Şekil 4.14. Manyetik sıvının dik düzlemde yaklaştırılan mıknatısa tepkisi	94
Şekil 4.15. İnce manyetik sıvı tabakasının yatay düzlemde akışı: a) Prensip şeması, b) yüzey kuvvetlerinin sıvı tabakasının uçlarına etkisi	96



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Manyetik Sıvı Seçim Çizelgesi	2
Çizelge 3.1.	Sigma DS-50 manyetik sıvının teknik özellikleri	34
Çizelge 3.2.	Rentech marka Helmholtz deney seti teknik özellikleri	45
Çizelge 3.3.	GW Instek GFG 8516A analog sinyal jeneratörü teknik verileri	48
Çizelge 3.4.	AA-TECH ADS1022B osiloskop teknik verileri	49
Çizelge 4.1.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	53
Çizelge 4.2.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,1 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	54
Çizelge 4.3.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,2 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	55
Çizelge 4.4.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,3 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	56
Çizelge 4.5.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,4 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	57
Çizelge 4.6.	Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,5 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları	58
Çizelge 4.7.	Hava boşluğu nüveli mikro transformatörün farklı frekans değerlerinde primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	61
Çizelge 4.8.	Nüvesinde 0,2 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	62
Çizelge 4.9.	Nüvesinde 0,4 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	63
Çizelge 4.10.	Nüvesinde 0,6 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	65
Çizelge 4.11.	Nüvesinde 0,8 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	66
Çizelge 4.12.	Nüvesinde 1,0 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri	67
Çizelge 4.13.	Farklı eğim konumlarında nüvedeki manyetik sıvı miktarına bağlı olarak indüktans değerleri	68
Çizelge 4.14.	Referans transformatör ve kaynaksız transformatörün reel çalışma gerilim değerleri	69
Çizelge 4.15.	Gövde kollarında 0,5 mm hava boşlukları açılan transformatörün çalışma gerilim değerleri	69
Çizelge 4.16.	Gövdesindeki 0,5 mm hava boşlukları tamamıyla saf demir tozuyla doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri	71

Çizelge 4.17. Transformatör gövdesinde bulunan 0.5 mm yarıkların tamamen ferromanyetik sıvı ile doldurulup elde edilen ölçüm sonuçları.....	72
Çizelge 4.18. Farklı giriş gerilim değerlerinde yük üzerinden geçen akım değerleri.....	74
Çizelge 4.19. Gövdesinde 1.0 mm hava boşlukları açılan transformatörün çalışma gerilim değerleri.....	74
Çizelge 4.20. Gövdesinde 1.0 mm hava boşlukları saf demir tozuyla doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri	75
Çizelge 4.21. Gövdesindeki 1.0 mm hava boşlukları tamamen manyetik sıvı ile doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri.....	75



GRAFİKLER DİZİNİ

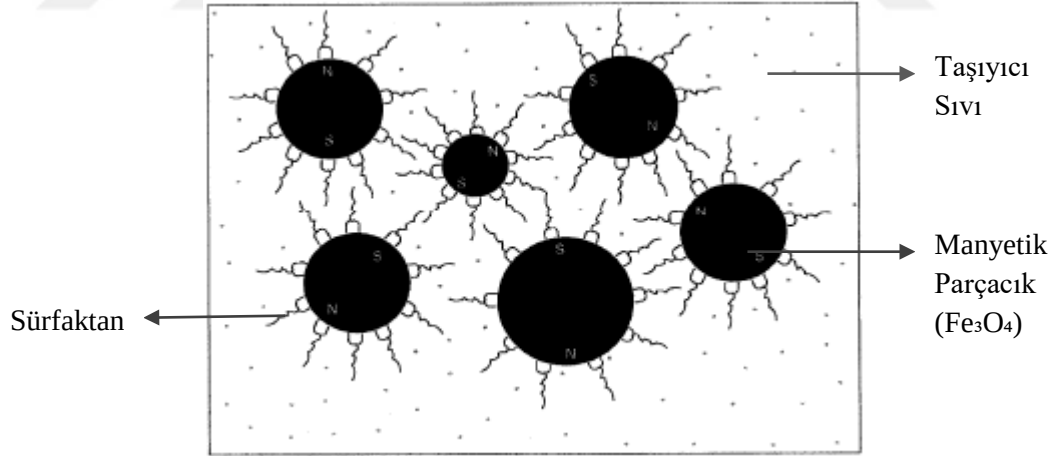
Grafik 1.1. (■) Tümör kenarı, (♦) tümör merkezi, (▲) tümörden 1-2 cm uzaklıktaki normal karaciğer dokusu, (×) alternatif lob ve (◇) vücut sıcaklığı [32]..	10
Grafik 3.1. Akıma göre değişen radyal manyetik alan değerleri	42
Grafik 3.2. Radyal alan oluşturan düzeneğin manyetik alan grafiği	43
Grafik 3.3. Manyetik Alanın Merkez Eksen Üzerinde Mesafeye Göre Değişimi.....	45
Grafik 4.1. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı varken ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	54
Grafik 4.2. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,1 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	55
Grafik 4.3. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,2 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	56
Grafik 4.4. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,3 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	57
Grafik 4.5. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,4 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	58
Grafik 4.6. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,5 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri	59
Grafik 4.7. Mikro transformatör nüvesine ilave edilen saf demir tozu miktarının transformatör çıkış karakteristiği üzerindeki etkisi	60
Grafik 4.8. Hava boşluğu nüveli mikro transformatörün farklı frekans değerlerinde primer ve sekonder gerilim eğrileri	62
Grafik 4.9. Nüvesinde 0,2 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri	63
Grafik 4.10. Nüvesinde 0,4 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri	64
Grafik 4.11. Nüvesinde 0,6 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri	65
Grafik 4.12. Nüvesinde 0,8 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri	66
Grafik 4.13. Nüvesinde 1,0 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri	67
Grafik 4.14. Gövdesinde 0,5 mm boşlukları saf demir tozu ve manyetik sıvı ile doldurularak ölçülen çıkış gerilimleri eğrileri	72
Grafik 4.15. Referans çıkış gerilim değerleri ile 0,5 mm yarıklara demir tozu ve ferromanyetik sıvı doldurularak yapılan ölçümlerin sekonder gerilimlerinin kıyaslanması	73
Grafik 4.16. Referans çıkış gerilim değerleri ile 1,0 mm yarıklara demir tozu ve ferromanyetik sıvı doldurularak yapılan ölçümlerin sekonder gerilimlerinin kıyaslanması	76
Grafik 4.17. H/H ₀ orantısının farklı μ değerlerindeki değişimleri	84
Grafik 4.18. Tanımlanan $f(x)$ fonksiyonun r_a 'nın değişimine ve farklı μ değerlerindeki eğrileri	85

1. GİRİŞ

Günümüzde oluşturulabilen yeni malzemeler sınıfının en önemli örneklerinden biri ferro sıvılar yani manyetik sıvılardır. Temelleri 1960 yıllarında oluşturulan bu sıvılar, ilk zamanlarda NASA tarafından uzay sistemlerinde kullanılmak için geliştirilmiştir [1]. Daha sonra ise birçok sanayi ve bilim alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [2]–[7]. Manyetik sıvılar akışkanlık ve mıknatıslanma olmak üzere iki harika özelliğe sahiptirler.

Manyetik sıvı, bir taşıyıcı sıvı içinde yer alan manyetik parçacıkların kolloidal dağılımıyla meydana gelir. Tipik bir manyetik sıvı Co, Fe-Pt, Gd_2O_3 , Fe_3O_4 gibi ferromanyetik parçacıkların taşıyıcı sıvı içinde koloidal dağılımından oluşur ve bu parçacıklar ortalama olarak 3-15 nm boyutlarındadır [2]–[4]. Bu alanda öncülük eden araştırmacılar Neuringer ve Rosensweig, kolloid bir yapıya sahip olan bu malzemeyi “manyetik sıvılar ” olarak adlandırmıştır. Ferro sıvılar veya manyetik sıvılar tek manyetik alan hareketi ile harekete geçirilebilen akışkanlar oldukları için, belirli bir yeni manyetik madde sınıfını oluşturmaktadırlar.

Manyetik sıvı; alt alan manyetik parçacıkları, taşıyıcı sıvı ve sürfaktan içeren üç bileşenli bir manyetik kolloiddir [7]. Sürfaktan madde parçacıklar arasında yüzey gerilimi oluşturarak, manyetik parçacıkların Brownian hareketi ile çökelme yapmasını önler [7]–[12].



Şekil 1.1. Manyetik Sıvının Nanoyapısı: Nanomanyetik parçacıklar, taşıyıcı sıvı, sürfaktan madde [12]

Manyetik sıvıların sentezinde kullanılan taşıyıcı sıvıların dâhil olduğu kimyasal sınıfların her biri ile farklı özelliklerde birçok çeşit manyetik sıvı özel ekipmanlar ve yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Aşağıda taşıyıcı sıvı olarak kullanılabilen kimyasal madde grupları listelenmiştir.

1. Ethanol
2. Sulu
3. Organik solventler
4. Mineral yağlar
5. Sentetik esterler
6. Sentetik hidrokarbonlar
7. Bitkisel yağlar
8. Silikonlar
9. Glikollar
10. Florokarbonlar
11. Halokarbonlar
12. Silahidrokarbonlar
13. Stiren

Taşıyıcı sıvıların çeşitli oluşu, istenilen kimyasal grup seçilerek, viskozite ve partikül boyutu değiştirilerek birçok farklı manyetik sıvı üretilmesine olanak sağladığından, farklı kullanım alanlarına hitap eder. Kullanılacak alana göre seçilecek kombinasyonla istenilen fiziksel özelliklerde manyetik sıvı üretilmesi mümkündür.

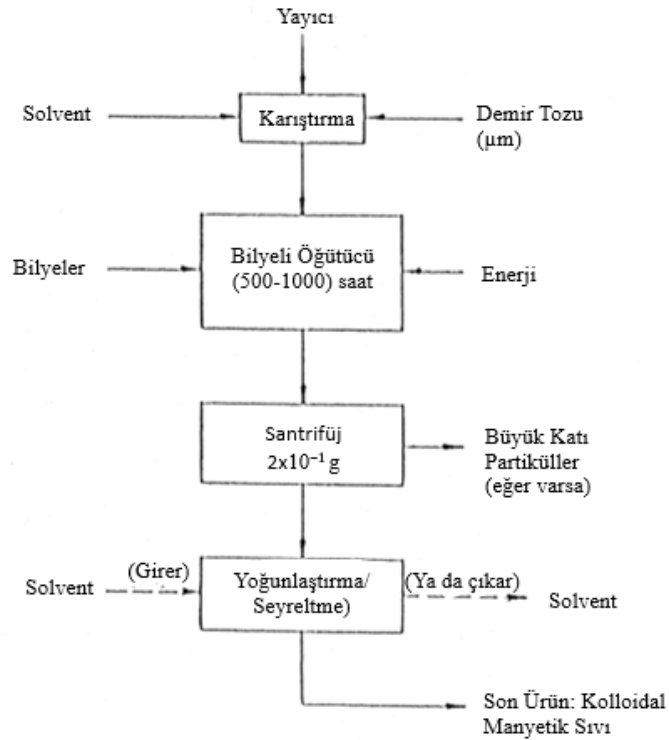
Çizelge 1.1’de manyetik sıvıların seçimi ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Manyetik sıvılar çevresel uyumlulukla ilgili farklılıklar da göstermektedir. Bu sebeple manyetik sıvıların kimyasal sınıfları içinden yalnızca birisi istenilen fiziksel gereksinimleri karşılayabilir.

Çizelge 1.1. Manyetik Sıvı Seçim Çizelgesi [12]

Manyetik Sıvılar	Öne Çıkan Özellikleri	Parametrelerin Pratikteki Sınırları		
		Manyetik Satürasyon (Gauss)	Viskozite @27°C (cP)	Buhar Basıncı @27°C (Torr)
Esterler	Oksitlenme kararlılığı/ Yüksek Viskozite İndeksi	800	20,000	$\sim 10^{-8}$
Hidrokarbonlar	Hidrolitik Kararlılık/ Yapışma Uyumluluğu	500	100,000	$\sim 10^{-9}$
Flurokarbonlar	Kimyasal Kararlılık/ Ekstrem Sıcaklıklar	500	25,000	$\sim 10^{-14}$
Silikonlar	Yüksek Viskozite İndeksi/ Düşük Yüzey Gerilimi	100	500	$\sim 10^{-8}$
Sulular	Yüksek Uçuculuk/ Çevreye zararsız	400	10	24
Organik solventler	Yüksek Mıknatıslanma/ Düşük Viskozite	1000	100	30 @38°C

Çizelgedan görüldüğü üzere her bir tip manyetik sıvının kendine göre farklı avantajları bulunmaktadır. Örneğin, florokarbonlar sert çevresel faktörler altında en iyi performansı sergilemektedir veya esterler yüksek viskozite göstermesi bakımından organik solventlere göre üstünlük sağlamaktadır. Manyetik sıvının performansı açısından manyetizasyon ve viskozite değerleri önem taşımaktadır. Manyetik sıvının üretimi aşamasında tüm gereksinimler ve tolerans değerleri göz önüne alınarak en başarılı performansı gösterecek kimyasal grubunun belirlenip seçilmesi kritik önem taşır. En yaygın manyetik sıvı sentezi metotları ya sulu çözeltide, mikro emülsiyonda ya da ferro hidroksit jellerinin kısmi oksidasyonu sırasında amonyaklı demir ve demir iyonlarının veya sodyum hidroksitin ıslak kimyasal ile çökeltilmesi üzerine dayanır. Diğer yöntemler arasında örneğin, hidro termal sprey pirolizi, iyon değişimi, etanol içindeki nano partiküllerin elektro-çökeltilmesi, sono kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler, sol-jel reaksiyonu, ayrışma organometalik öncüleri ve poliol yöntemi bulunmaktadır [11–17].

Şekil 1.2.'de S. Papell tarafından ilk kez keşfedilen, manyetik alana tepki veren kolloid manyetik sıvının üretim diyagramı yer almaktadır [17]. Mikron büyüklükteki partiküller, uzun bir süre (1000 saat) 10 nm'lik partiküllerin üretilmesi için sürfaktan varlığında tutulmuştur. Bundan sonra bulunan sentez yöntemleri Papell'in keşfi üzerine yapılan modifiyelerden ibarettir. Diyagramdan görüldüğü üzere, manyetik sıvıların sentezinin her bir adımı farklı fiziksel ve kimyasal işlemler içermektedir. Kullanım alanına bağlı olarak bu kademeler değişebilir veya sayıları artabilir. Sentez diyagramından görüldüğü gibi manyetik sıvının temel bileşeni manyetik özellikli Fe_3O_4 (magnetit) parçacıklarıdır.



Şekil 1.2. S. Papell'in keşfettiği kolloidal manyetik sıvı sentezi akış diyagramı [17]

Manyetik parçacıkların ortak problemlerinden biri agremelasyon oluşturma eğilimleri ve havadaki oksidasyona bağlı olarak kimyasal dengesizlikleridir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için manyetik nano partiküllerin yüzeyi sürfaktanla kaplanılır. İyi kolloid manyetik nano partiküller elde edebilmek için, reaksiyon ortamına ya dekstran, polivinilalkol (PVA), oleik asit gibi sürfaktanlar ilave edilebilir ya da parçacıklar daha sonraki bir aşamada kaplanabilir. Sürfaktanlar, partikül büyüklüğünü kontrol etmek ve kolloidal dispersiyonları stabilize etmek için koruyucu ajan görevi görür [18]. Manyetik sıvılarda kullanılan taşıyıcı ortamlar, akışkan sıvı özellikli hemen hemen her malzemeden olabilir. Bunlardan en yaygınları su, mineral yağlar, bitkisel yağlar, kerosin, oleik asit ve türevleri, alkoller ve silikonlardır.

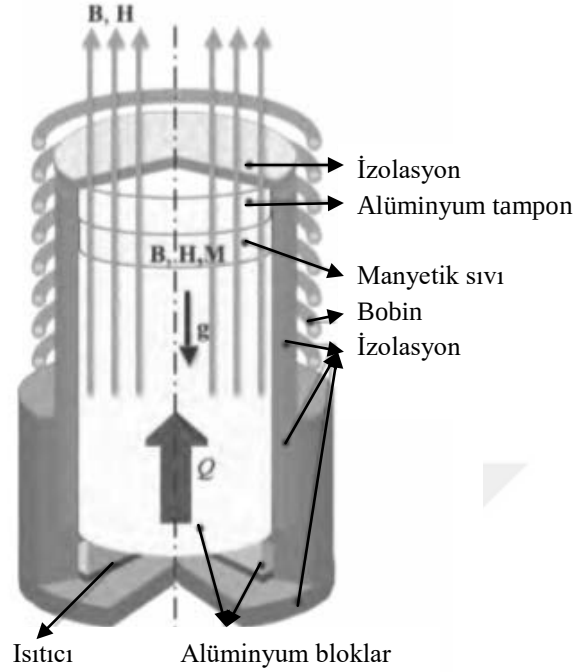
Manyetik alana maruz kaldığında manyetik sıvının tepkisi birçok endüstriyel uygulamayı mümkün kılmıştır [19, 20]. Endüstriyel uygulamada manyetik sıvının stabilite derecesi, kullanışlılığını belirlemede önemli bir faktördür. Sistemin stabilitesi manyetik alanın varlığından sorumlu olan, yani manyetik alan gradyanında kararlılık, yer çekimi alanına karşı gösterdiği kararlılık, belirli bir sıcaklıkta Vander Waals çekimine karşı gösterdiği kararlılık ve manyetik agremelasyona karşı kararlılığı ile ifade edilir.

Günümüzde manyetik sıvıların uygulama alanları, zaman ilerledikçe çeşitlenerek artmaktadır [4], [6], [7], [19], [20]. Manyetik sıvılı uygulamalar genel olarak elektrik, elektronik ve elektro-mekanik sistemlerde uzun süredir kullanılmaktadır. Bu sistemlerin yanı sıra son zamanlarda özellikle biyoloji ve tıp alanında da sağladığı avantajlar nedeniyle kendine önemli bir çalışma alanı yer edinmiştir. Manyetizma, diagnostik, ilaç hedefleme, moleküler biyoloji, hücre izolasyonu, hücre arıtma, hipertermi gibi birçok alanda uygulanmaktadır [4], [21]. İlaç hedefleme; ilacın, verilmesinin gerekli olduğu reseptörlere, organa veya vücudun herhangi bir başka özel bölümüne verilmesidir. İlaç hedeflemesi için nano partiküller, mikro küreler ve mikro partiküller gibi farklı ve non- manyetik mikro karbonlar kullanılır, ancak bunlar normal koşullar altında retiküloendotelyal sistem tarafından hızla temizlenir. Manyetik sıvı yaygın olarak hedeflenen organın özel kısmında ilacı dış manyetik alan yardımı ile serbest bırakmak için kullanılır. Manyetik sıvı bu durumda önemli bir rol oynar çünkü manyetik parçacıklar vücut tarafından iyi tolere edilen manyetitten oluşur ayrıca manyetik alanlar biyolojik sistemlere zarar vermeden vücudun herhangi bir kısmına uyarlanabilir. Manyetik sıvı taşıyıcılar, ilaç hedeflemede karşılaşılan iki temel problemin, yani retiküloendotelyal sistem klirensinin ve hedef alan özgülüğünün üstesinden gelmek için geliştirilmiştir [22]. Mühendislik ve sağlık bilimi alanlarında uzun zamandır kullanılan manyetik sıvı uygulama alanları kısa açıklamalarıyla aşağıda incelenmiştir.

1.1. Soğutma

Isı üreten ekipmanların soğutulması ve kararlı çalışma sıcaklığında tutulması önemli bir mühendislik sorunudur. Transformatörler, yüksek güç kullanan hoparlörler ve güç tüketimi fazla olan daha birçok ekipmanda kullanılan sabit

bobinlerin ısınması sonucu verimlilik düşmektedir. Transformatörlerde manyetik sıvılı nüvenin kullanılması hem soğutma sağlar hem de manyetik ve elektriksel kayıpları minimize edebilir.



Şekil 1.3. Deneysel manyetik sıvı soğutmalı transformatörün yapısı [23]

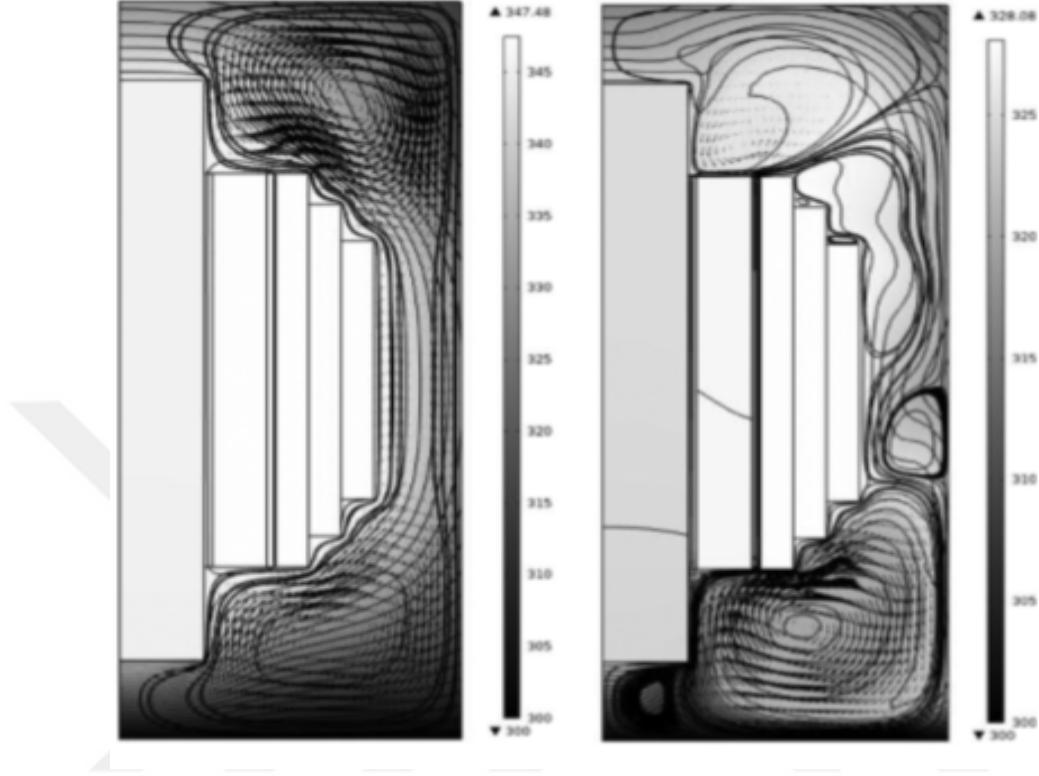
1.2. Transformatörler

Trafo kayıpları yüksek frekanslarda önemli boyutlara çıkabilir ve transformatörlerin performansını sınırlar. Ayrıca katı manyetik nüveden gelen çekirdek kaybı, transformatörlerin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Katı manyetik çekirdek kaybı için çözümlerin önerilip, manyetik sıvı kullanımına dair çalışmalar bulunmaktadır [22], [24].

Manyetik sıvılar, transformatörlere hem termal hem de dielektrik faydalar sağlayabilir. Manyetik sıvı, transformatör sargılarındaki sıvı sirkülasyonunu artırarak soğutmayı iyileştirmek için kullanılabilir. Manyetik sıvı yıldırım impulslarına dayanacak şekilde transformatör kapasitesini artırırken, aynı zamanda tipik yalıtım sıvıları üzerindeki nemin etkisini en aza indirmek için de uygulanabilir. Daha küçük, daha verimli yeni transformatörler tasarlamak veya mevcut ünitelerin ömrünü veya yükleme kapasitesini genişletmek için manyetik sıvının faydaları kullanılmaktadır [25].

Şekil 1.4'te dikey 2–36 kV–40 kVA değerlerine sahip transformatör prototipinde transformatör yağı (UTR40) ile yapılan ve süper paramagnetik sıvı ile soğutma işlemi 2D modelleme ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamada manyetik alan ve termal akış değerlendirilmiştir. Modellemenin sayısal çözümleri Finite Element Method (FEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu iki soğutma tipinin

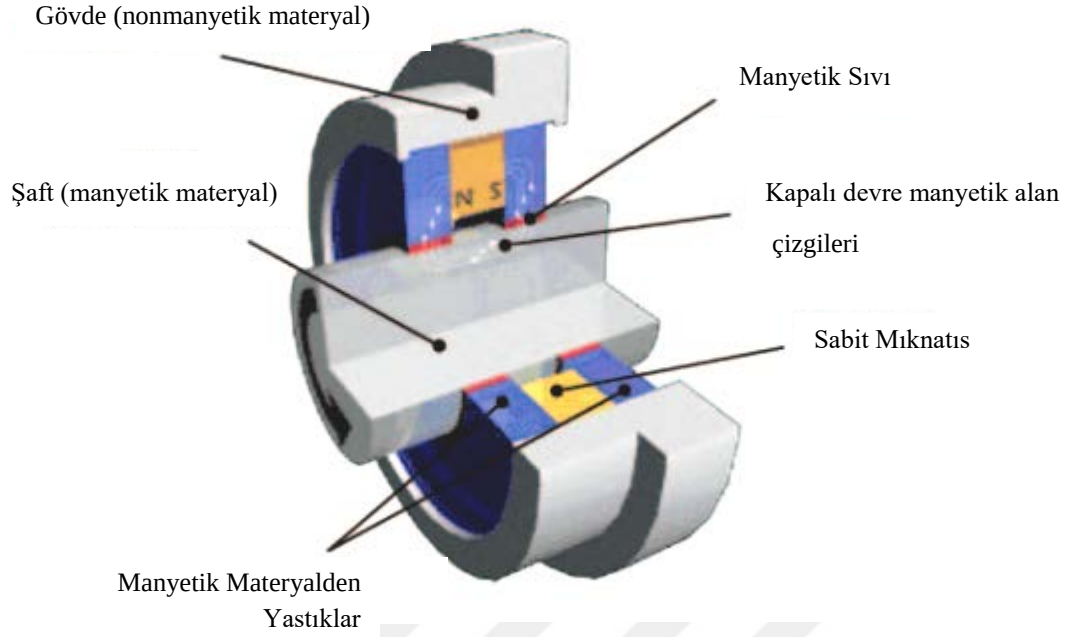
karşılaştırılması sonucunda manyetik sıvının daha iyi soğutma sağladığı görülmüştür. Şekilden görüldüğü üzere sıcak nokta seviyesi manyetik sıvılı seçenekte daha düşüktür (yaklaşık 20°C) ayrıca daha eşit bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir [26].



Şekil 1.4. Sıcaklıklar (gri harita, kalın çizgiler) ve doğal termal akış (oklar, akış çizgileri)- Transformör Yağı UTR40 (solda), süper paramagnetik sıvı (sağda) [26]

1.3. Sızdırmazlık ve Contalama

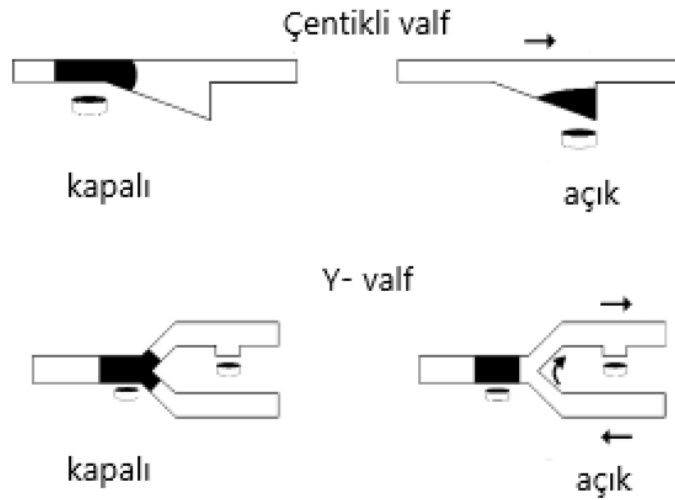
Birçok donanım türünde, birbirlerinden hava geçirmez olarak izole edilmesi gereken iki veya daha fazla farklı hareketli parça vardır. Örneğin şaftlar, bir ortamdan diğerine dönel enerji taşımaktadır ve motor, ortam havası veya başka bir soğutma mekanizması tarafından soğutulması için gereken açık bir yere yerleştirilmelidir. Ayrıca şaftın yükü aktaracağı kısım tamamıyla temiz bir ortam olmak zorundadır. Hermetik olarak kapalı bir kutuda çalışmak zorunda olan bilgisayarların sabit disklerinde, herhangi bir toz ve hatta duman, okuma ve yazma işlemini bozabilir. Bu nedenle, aksın geçtiği deliği hava geçirmez biçimde mühürlemek gereklidir. Bu tip sorunlarda bir miknatısın içi delinip ve şaftı yumuşak manyetik malzemeden yaparak üstesinden gelinebilir. Şaftın oluşu kısım manyetik sıvıyla doldurulur ve manyetik alanla yerinde sabitlenir (Şekil 1.5). Olukta duran manyetik sıvı herhangi bir kirliliğin geçişini engellerken aynı zamanda aksın serbest kalmasını sağladığından sızdırmazlığı ve enerji iletimini aynı anda gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1.5. Döner mil manyetik sıvı contanın temel bileşenleri [27]

1.4. Pompalama ve Valfleme ile Akışkanların kontrolü

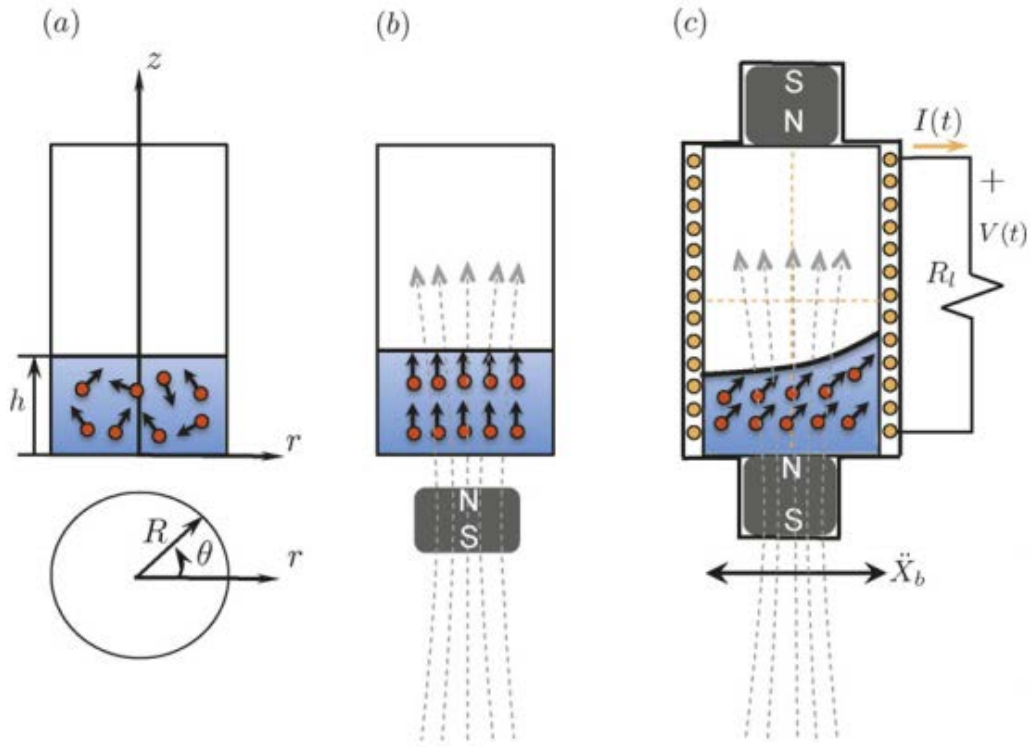
Sıvı kontrolü, yani pompalama ve valfleme, mikroçip bazlı kimyasal işlemlerde kritik öneme sahiptir. Birçok mikroçip uygulaması için elektro kinetik etkiler ile gerekli tüm sıvı kontrolü sağlanabilmektedir [28]. Manyetik sıvılar tıpların standart mikro fabrik cam yapılarında conta, valf ve pompa işlevi görebilme yeteneğini göstermektedir. Manyetik sıvı pompa için potansiyel mikro akışkan uygulamalar, iş yapmak için çipin kendisinde üretilen basınçları kullanmaktadır. Şekil 1.6'da manyetik sıvı harici bir mıknatıs yardımıyla kontrol edilerek yapılan valfleme şematik olarak görülmektedir [29].



Şekil 1.6. Manyetik Sıvının Valfleme Uygulaması [29]

1.5. Enerji Hasadı

Manyetik sıvılar, titreşim enerjisini çevreden hasat etmek için bir fırsat sağlamaktadır. Düşük frekanslı (<100 Hz) titreşimlerin hasat edilmesi için mevcut yöntemler, katı rezonant yapıların kullanılmasını gerektirir. Manyetik sıvılar ile enerji hasadı tasarımları katı yapıya ihtiyaç duymaz. Manyetik sıvı, hazırlanmış bir bobinin içine bir koruyucu kap ile yerleştirilir (Şekil 1.7). Manyetik sıvı daha sonra kalıcı bir mıknatıs kullanılarak harici olarak mıknatıslanır. Harici titreşimler manyetik sıvının kabın içinde kaymasına neden olduğunda, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası aracılığıyla manyetik akıdaki değişime bağlı olarak bobin telinde voltaj indüklenir ve titreşimden elektrik elde edilir [30]. Şekil 1.7'de manyetik sıvı bazlı enerji hasadı sisteminin şematik diyagramı gösterilmiştir. Şekilde herhangi bir manyetik alan etkisi altında bulunmayan, serbest manyetik sıvı dipollerinin dağılımı (a), harici kalıcı mıknatıs uygulandığında manyetik sıvı dipollerinin aksel şekilde sıralanarak mıknatıslanması (b), kalıcı mıknatıs etkisi altında uygulanan titreşim ile birlikte manyetik sıvının bobinde akım indüklenmesi (c) gösterilmektedir.

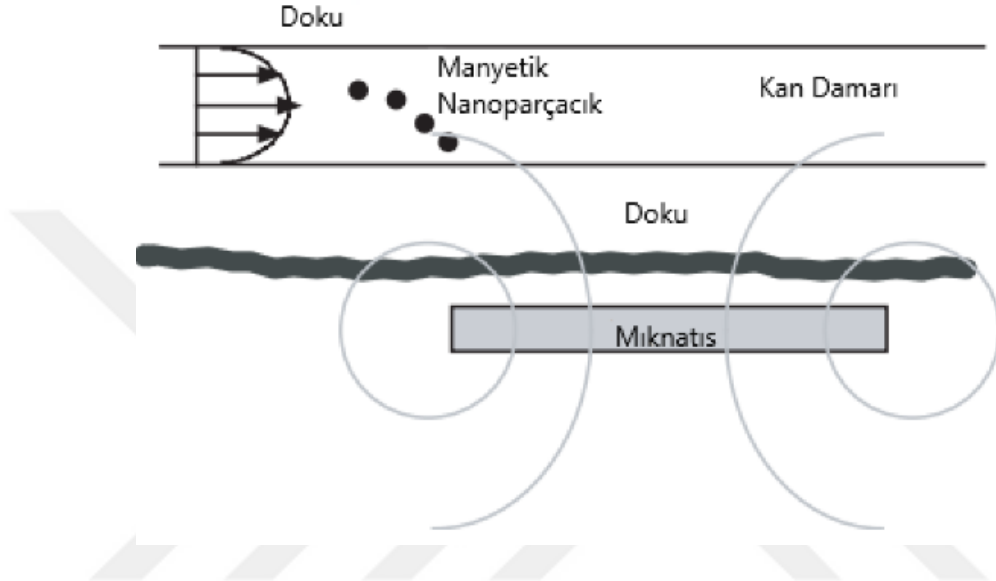


Şekil 1.7. Manyetik sıvı bazlı enerji hasadı sisteminin şematik diyagramı [30]

1.6. İlaç Hedefleme ve İlaç Salınımı

Tümör hücrelerine ilaç dağıtımını hedefleyen manyetik sıvı ile ilaç hedeflemesi, bir manyetik alanın etkisi altında tanımlanmış hedef bölgedeki ilaç konsantrasyonuna izin verir. Bölgeye yönelik ilaç hedefleme, bölgesel anti tümör tedavisinin bir yoludur. Salınım yapılacak ilaç, manyetik sıvı içindeki manyetik nano partiküllere özel kimyasallarla bir dizi proses sonucu bağlanır ve ilaç hedef organ veya tümöre

giden arter yoluyla enjekte edilir. İlaç genellikle bir dış manyetik alanın varlığına bağlı olarak hedeflenen bölgede toplanır. Manyetik sıvı ilaç taşıyıcının hedef alanda uzun süreli tutulması klirensi geciktirir ve ekstra vasküler alımını kolaylaştırır [31]. Şekil 1.8.' de enine kesitte gösterilen hipotetik bir manyetik ilaç verme sisteminde, manyetik alan gradyanının dolaşım sisteminde akan manyetik taşıyıcıları yakalayabilmesi için bir mıknatısın vücut dışına yerleştirilmesi gösterilmektedir [32]. İlaç / taşıyıcı hedefe konsantre edildikten sonra, ilaç ya enzimatik aktivite, pH, ozmolalite ya da sıcaklık gibi fizyolojik koşullardaki değişiklikler ile serbest bırakılabilir ve hücreler tarafından alınabilir [33].

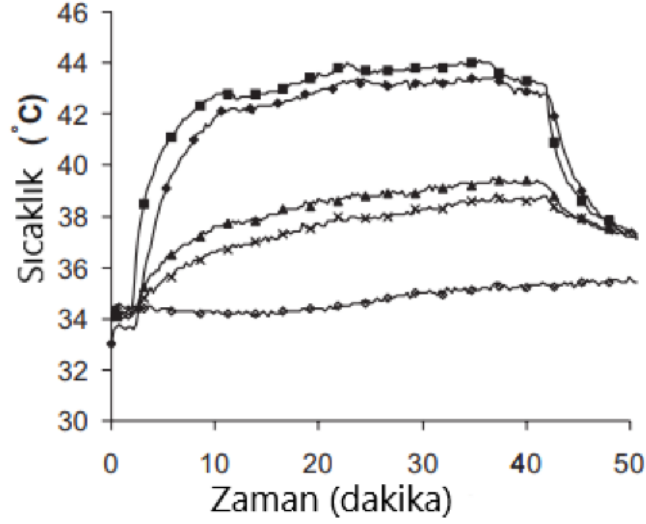


Şekil 1.8. Dolaşım sistemine enjekte edilen manyetik nano parçacıkların yüksek gradyanlı manyetik alanla belirli bir bölgede konsantre edilmesi [32]

1.7. Tümör Tedavisinde Manyetik Sıvı Kullanımı

Hipertermi, organların veya dokuların sıcaklığının 42-46°C' ye çıkarılarak kanserli hücrelerin canlılığının azaltıldığı tedavi biçimidir. Tedavi tümör hücrelerinin, normal hücrelere göre sıcaklığa daha duyarlı olduğu gerçeğine dayanır. Hipertermide, bir ısı iletim sistemi kurmak önemlidir, öyle ki, tümör hücreleri ısıtılırken çevre dokuların bundan en az etkilenmesi istenilir. Isıl işlem lokal olarak hedeflenen hastalıklı dokuya uygulanmaktadır. Mevcut hipertermi tedavilerinde çevre dokular ne kadar izole edilmeye çalışılsa da sağlıklı hücreler de bu işlemde etkilenir ve canlılığını kaybedebilir. Manyetik sıvı ile tümör hedeflenerek AC manyetik alan uygulanarak dokuları seçici olarak ısıtır. Sonuç olarak, tüm tümör homojen olarak ısıtılabilir, buna hücre içi hipertermi denir. Kötü huylu hücrelerin normal hücrelere göre dokuz kat daha fazla manyetik nano partikül içerdiği görülmüştür. Bu nedenle, tümör hücrelerinde üretilen ısı normal hücrelerden daha fazladır. Tümör bölgesinde sıcaklık artışı çevreleyen normal dokulardan daha yüksektir. Bu nedenle bu tedavinin çok daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. [34]. Hipertermi cihazlarının çoğunluğu, sağlıklı dokuların kabul edilemez rastlantısal ısınması nedeniyle kullanımlarında kısıtlı olmasına rağmen, manyetik parçacık hipertermisi daha caziptir çünkü sadece hedeflenen hedef dokunun ısıtıldığından

emin olmak için bir yol sunar. Grafik 1.1’de tavşanlarda hipertermi tedavileri ile ilgili hayvan deney verileri gösterilmiştir. İntra-vasküler olarak infüze edilen ferromanyetik mikro küreler kullanılarak bir tümörün tercihli ısıtılmasını göstermektedir.



Grafik 1.1. (■) Tümör kenarı, (◆) tümör merkezi, (▲) tümörden 1-2 cm uzaklıktaki normal karaciğer dokusu, (×) alternatif lob ve (◇) vücut sıcaklığı [32]

Grafik 1.1’den görüldüğü gibi ferromanyetik mikro küreler kullanılarak tümöre uygulanan hipertermide, tümörlü bölgenin sıcaklığı, tümörün yakınındaki sağlıklı hücrelere zarar vermeden noktasal olarak arttığı görülmektedir.

1.8. MRI’da Kontrast Ajan Olarak kullanımı

Manyetik rezonans görüntüleme (MRI), insan yumuşak dokularındaki birçok hastalığın tanısında kullanılan en önemli tıbbi tekniklerden biridir [35]. Manyetik sıvıların en önemli uygulamalarından biri de manyetik rezonans görüntülemenin kontrast maddesi oluşudur [36]. Biyolojik yapı ile uyumlu taşıyıcı madde ile hazırlanan manyetik sıvı görüntülemeyi kolaylaştırmak için ajan olarak vücuda enjekte edilir ve belli bir bölgeye ulaşması için yönlendirilir. Süper paramanyetik kontrast ajanları, MRI’da paramanyetik olanlara kıyasla daha iyi bir proton gevşetme üretme avantajına sahiptirler [37].

1.9. Manyetik sıvıların sensörlerde kullanımı

Manyetik sensörleri genel olarak iki tip altında toplayabiliriz: birincisi yer kürenin manyetik alanını kullanarak ölçüm yapan sensörlerdir diğerleri ise ölçümü manyetik malzemeler kullanarak yapan sensörlerden oluşur ve bu grup en yaygın kullanıma sahip sensörleri kapsamaktadır. Manyetik sensörlerde yarıiletkenler, yumuşak malzemeler ve sert malzemeler kullanılabilir. Yarı iletkenler, Hall sensörlerinde ve yarı iletken manyetorezistörlerde kullanılır. Silikon, tipik olarak CMOS teknolojisi ile üretilen entegre Hall sensörleri için yaygın olarak kullanılır [22]. Ferromanyetik manyetoresistörler (AMR, GMR ve SDT), manyetik alan dedektörleri ve GMI için

kristalin, amorf ve nanokristalin malzemelerinin manyetik olarak yumuşak alaşımları kullanılır [24]. Sensörlerde kullanılan yumuşak manyetik materyallerin çoğu kristal haldedir ve amorf alaşımlar daha az kullanılır. Nanokristal yumuşak manyetik alaşımlar kırılgenliklarından dolayı nadiren kullanılmaktadırlar. Bahsedilen tüm malzemeler toplu halde ve püskürtme, elektro kaplama veya lazerle ile yapılan ince filmler olarak kullanılmaktadır. Dökme malzemeler ince şerit veya tel şeklinde üretilmektedir [25]. Yumuşak manyetik alaşımlara dayanan en yaygın sensörler, aynı boyut ve güç tüketimine sahip Hall sensörlerine göre 100 kat daha yüksek alan çözünürlüğüne ulaşan AMR sensörleridir. Manyetik alan sensörlerinde sert mıknatıslar nadiren kullanılmaktadır. Eğer polarlama mıknatısları olarak görev yaparlarsa, alanın zaman ve sıcaklık dengesiyle ilgili sorunlar ortaya çıkar. Ölçülen alan ile kalıcı mıknatıs arasındaki kuvvete dayanan manyetik alan sensörleri eski teknoloji olsa da MEMS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte tekrar ortaya çıkmıştır [38]. Birçok endüstri dalında, tıp ve biyoloji teknolojinde yaygın olarak kullanılan manyetik alan sensörleri kısa açıklamalarıyla aşağıda izah edilmiştir.

Günümüzde kullanılan manyetik alan sensörlerinin 90%'nından daha fazlasını oluşturan Hall sensörleri, otomotiv uygulamalarında (ateşleme kontrolü, Anti Block Sistemi (ABS), konum sensörlerinde (doğrusal veya açısal) ve rotor üzerinde daimi mıknatıslı temassız DC motorlarda (bilgisayar sürücüler ve fanlarında) stator akımının kontrolü için kullanılmaktadırlar. Entegre Hall sensörleri, çoğunlukla CMOS teknolojisi kullanılarak silikondan yapılmıştır. Bu çip; uyarma, yükseltme ve sinyal işleme için elektronik devreler içermektedir [31].

Akı yoğunlaştırıcılar, Hall Etkisi algılayıcı sisteminin performansını önemli ölçüde arttırmak için kullanılan yumuşak manyetik malzemelerden yapılmaktadır. Bir akı konsantratörü bir mıknatısın kutup yüzünün karşısında yerleştirildiğinde, manyetik alan konsantratörün içinden geçer ve böylece konsantratör ile kutup yüzeyi arasındaki akış yoğunluğu artar [34].

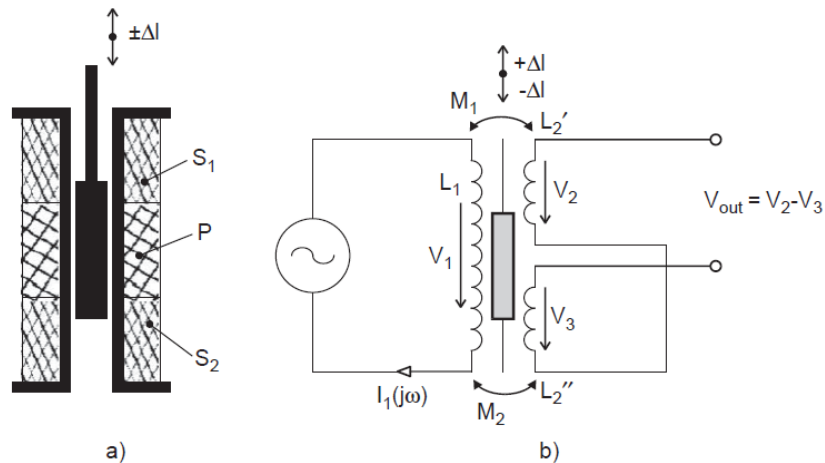
GMR'ler ve SGT'ler ise çok katmanlı yapılardan oluşmaktadır. En yaygın GMR yapısı olan spin valfinin yapısı iki ince, yumuşak ferromanyetik katmanın, manyetik olmayan bir metalik katmanla ayrılmasından oluşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bir spin valfinde, bir tabakanın mıknatıslanması sabitlenirken, diğer tabakanın mıknatıslanması dış alanla döner. Bu yapının direnci iki mıknatıslanma arasındaki açıya bağlıdır [36]. GMR sensörlerinin ölçüm akımı çok tabakalı yapının düzleminde akar. SGT sensörlerinde akım, tabaka düzlemine dik olarak akar ve iletken olmayan ayırma tabakası boyunca tünelleme yapar. SGT sensörlerinin avantajı, büyük direnci ve dolayısıyla düşük güç tüketiminin olmasıdır, ancak yalıtım katmanı elektrostatik boşalma ile kolaylıkla hasar alabilir. Ayrıca SGT sensörleri, GMR sensörlerinden daha küçük yapılabilirler [39].

Ferromanyetik Magnetoresistorler (AMR), nikel ve demir gibi manyetik ince filmlerin kullanıldığı sensörlerdendir. Perm alaşımından oluşan Ni-Fe'den yapılmış MR elemanı, yarı iletken IC'nin kablolama katmanı üzerinde biçimlendirilir. MR

elemanına harici manyetik alan uygulandığında, MR elemanının direnç oranı değişir ve bir voltaj farkı oluşur [40].

AMR sensörleri Hall sensörlerinden çok daha duyarlıdır ve mekanik strese karşı çok daha dirençlidirler. Yarıiletken cihazlar için bir problem olan piezo etkisini göstermezler. AMR sensörleri, araç tespiti, elektrik akımlarının temassız ölçümü, makinelerde konum ve dönme hızı ölçümleri ve gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Günümüzde AMR'lerin önemi, pedal konumunun belirlenmesi, ABS için tekerlek hız sensörleri ve motor yönetim sistemleri gibi uygulamalarla otomotiv endüstrisinde kullanılmasından dolayı hızla artmaktadır. [41]. Hall sensörlerinden daha hassastırlar ve 10nT çözünürlükte ölçmeye izin verirler, ancak genellikle aynı çipe entegre edilemeyen daha karmaşık elektroniklere ihtiyaç duyarlar [42].

Endüstride yaygın olarak kullanılan geleneksel endüktans ve transformatör sensörlerinden LVDT (linear variable differential transformer) karşılıklı indüksiyon prensibine göre çalışır ve elektriksiz bir enerji olan hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT), hareketli gövdeli diferansiyel transformatördür. Şekil 1.9' da bir LVDT sensörünün çalışma şeması gösterilmiştir. Birincil sargı (L_1) gerilim kaynağından beslenir ve iki simetrik ikincil sargı (L_2' , L_2'') üzerindeki gerilimlerden çıkış gerilimi (V_{out}) alınır. Çekirdek merkezi konumdan yer değiştirdiğinde (Δl), sekonder voltaj değişecektir. LVDT en popüler konum sensörlerinden biridir ve milimetrelerden santimetrelere kadar ölçüm aralıklarına sahiptir. Düşük güç tüketimi, düşük histerizis, yüksek çıkış ve hassaslık gibi avantajlar sağlarken; sıcaklık değişimlerinden önemli ölçüde etkilenmesi, manyetik ekranlamaya ihtiyaç duyması, büyük çıkış değerleri alınmak istendiğinde çok büyük yer değiştirme yapılmasına ihtiyaç duyulması gibi dezavantajları da mevcuttur [43].



Şekil 1.9. LVDT konum sensör yapısı [31]

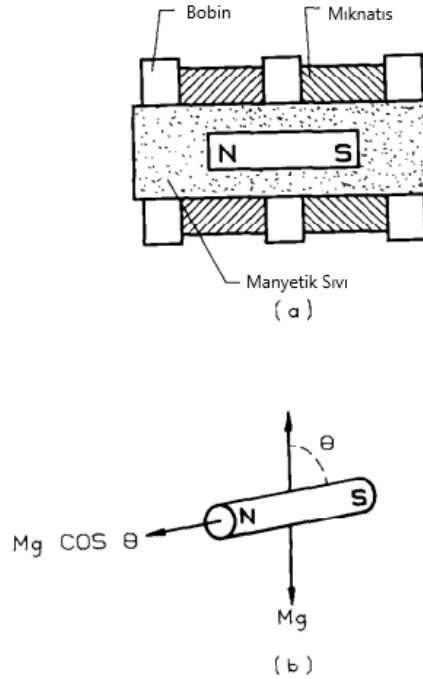
Hız sensörleri de genellikle endüksiyon yasasını kullanmaktadır. Alan kaynağı genellikle daimi bir mıknatıstır ve ibrenin dönme oranını ölçmek için kullanılan

sensörler, Dünya'nın alanını bir kaynak olarak ve küçük bir bobini de algılayıcı olarak kullanmaktadır [31].

Manyetik debimetreler, sıvı akış hızını ölçer ve hacmi hesaplar. Çalışma prensipleri manyetik alanda akan iletken bir sıvıda oluşturulan bir elektrik alanına dayanmaktadır. Alan genellikle boru etrafındaki bobinler tarafından oluşturulan kare dalga şeklindedir. Elektrik alanı genellikle sıvıya batırılmış iki iletken elektrot arasındaki voltaj çıkışı olarak algılanır, ancak iletken olmayan borunun dış yüzeyindeki iki elektrot ile temassız olarak da ölçüm yapılabilmektedir.

Kısaca izah edilen bu sensörlerin yanı sıra rezonans sensörleri ve manyetometreler, kuvvet ve tork sensörleri, elektrik akım sensörleri de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Konum belirleme, araç takip, güvenlik sistemleri, detektör sistemleri, medikal uygulama alanları, uzay araştırmaları ve jeoloji, tahribatsız test gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar [31].

Manyetik sıvı sensörler çok önemli bir uygulama alanıdır [2], [44]. Birçok bilim adamı manyetik sıvı ile çalışmalar yapmıştır. Manyetik sıvı ile tamamen doldurulmuş olan ilk ivme sensörü, 1969 yılında Rosensweig tarafından sunulmuştur [45]. Eğim veya ivme sensörlerinde, manyetik sıvıya daldırılmış kalıcı bir mıknatıs serbest halde sıvı içinde hareket etmektedir [46]. Mıknatısın manyetik alanı ile manyetik sıvının manyetizasyonu arasındaki etkileşim, yerçekiminden daha kuvvetli bir manyetik kuvvet oluşturur. Bu kuvvet daha az yoğun olan manyetik sıvıda ($\rho = 1 \text{ g / ml}$) ağır olan kalıcı atalet mıknatısının ($\rho = 7 \text{ g / ml}$) sıvıda batmamasını sağlar [12]. Şekil 1.10'da manyetik sıvı bazlı bir eğim sensörünün yapısı gösterilmektedir.

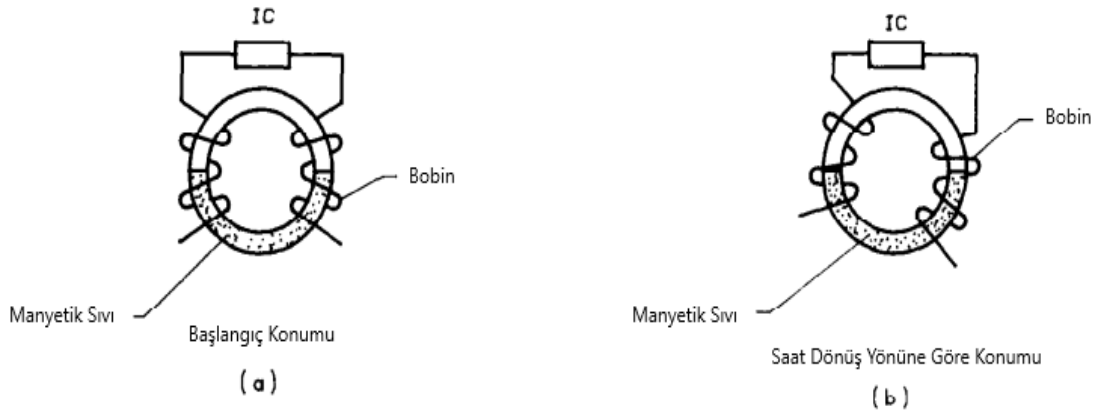


Şekil 1.10. Eğim-ivme sensörünün temel yapısı [12]

Aviyonik, robotik, otomotiv ve tıp gibi endüstriler büyük ölçüde sensör teknolojisine dayanmaktadır. Açısal konumu ya da ivmelenmeyi ölçmek için kullanılan sensörler

çoğunlukla çevresel faktörlere duyarlı olma eğilimindedir. Örneğin, elektromekanik jiroskoplar kontrollü bir atmosfer ve sık kalibrasyon gerektirirken eğimölçerler, yay benzeri esnekliklerin mevcudiyetinden dolayı çok hassastırlar. Öte yandan, manyetik sıvı bazlı bir sensör sağlamdır ve hareketli parça bulundurmamaktadır.

Şekil 1.11 .a manyetik sıvı bazlı ivme-eğim sensörün temel yapısını göstermektedir. Manyetik olmayan silindirik bir tüp, kararlı bir manyetik sıvı ile tamamen doldurulur. Manyetik sıvı içinde bir delme kütlesi gibi davranan eksenel olarak polarize edilmiş kalıcı bir atalet mıknatısı askıda durmaktadır. Tüpün etrafında atalet mıknatısının konumunu kontrol etmek için kullanılan elektronik servo sistemin parçası olan iki karşıt bobin bulunmaktadır. Şekil 1.10 (b), mıknatıs dikey bir açı (Θ) ile eğimlendiğinde, kuvvet $mg\cos\Theta$ ' nın bir bileşeni mıknatısın eksenini boyunca hareket eder ve mıknatısı referans konumundan değiştirir. Bobinler bu değişikliği algılar ve geri besleme akımını ayarlayarak mıknatısı orijinal konumuna geri döndürür. Mıknatıs üzerinde etkili olan kuvvet akımla doğru orantılıdır [47].

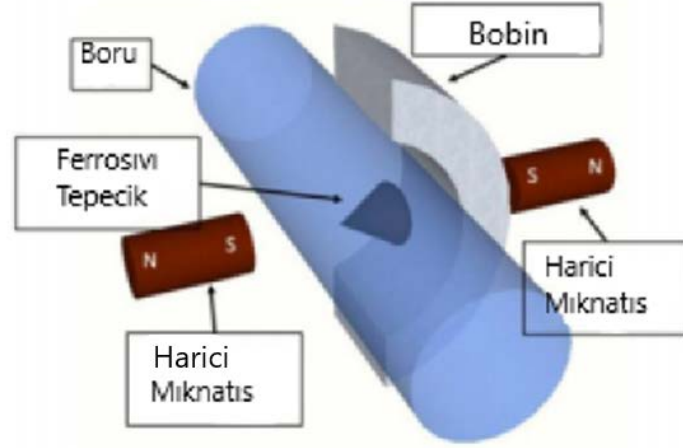


Şekil 1.11. Açısal konum sensörü. Başlangıç, referans konumu (a), saat yönüne göre çevrilmiş konumu (b) [12]

Şekil 1.11’de manyetik sıvı kullanarak oluşturulan konum sensörü, toroid biçimli bir kaptan oluşmaktadır. Kanal düşük viskoziteli manyetik sıvı ile yarı doldurulmuştur ve herhangi bir sızıntıyı önlemek için tamamen kapatılmıştır. Toroidin etrafına iki eşit aralıklı bobinler sarılmıştır. Manyetik sıvı toroidde manyetik bir sıvı çekirdek gibi davranır ve her bir bobinin endüktansının artmasını sağlamaktadır. Başlangıçta her iki bobin aynı seviyeye kadar doldurulur ve böylece endüktans değerleri aynıdır [47]. Sensör döndürülürken, bir bobinde diğerinden daha fazla manyetik sıvı bulunur ve bu da gerilim indüklenmesine neden olur. İndüklenen bu gerilim sensörün açısal yer değiştirmesiyle orantılıdır.

Akış sensörleri birçok uygulama alanında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Akış ölçümleri belirli türler altında birçok sensör ile gerçekleştirilebilir. Bunlardan biri de manyetik akış sensörleridir [48]. Faraday indüksiyon yasasını kullanan manyetik akış ölçerlerde, manyetik alan hacri bobinler tarafından üretilir ve sıvı iletken görevi görür. Sıvı hareketi tarafından üretilen voltaj, akış oranı ile doğru orantılıdır. Bu yöntem sadece iletken sıvılar ile kullanılabilir [48]. Şekil 1.12’de gösterilen manyetik

sıvı akış sensörü, cam boru, harici mıknatıslar, bobin ve manyetik sıvıdan oluşmaktadır. Manyetik sıvı kütlesi üzerinde etkili olan manyetik kuvvet, uygun bir konumda manyetik sıvı damlasını koruyan eşdeğer bir elastik kuvveti (veya eşdeğer yay) tanımlamaktadır [44]. Ayrıca, üst mıknatıs ve manyetik sıvı arasındaki mesafe, manyetik sıvı üzerinde etkili olan manyetik basıncı ve dolayısıyla viskozite ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerini de tanımlamaktadır.

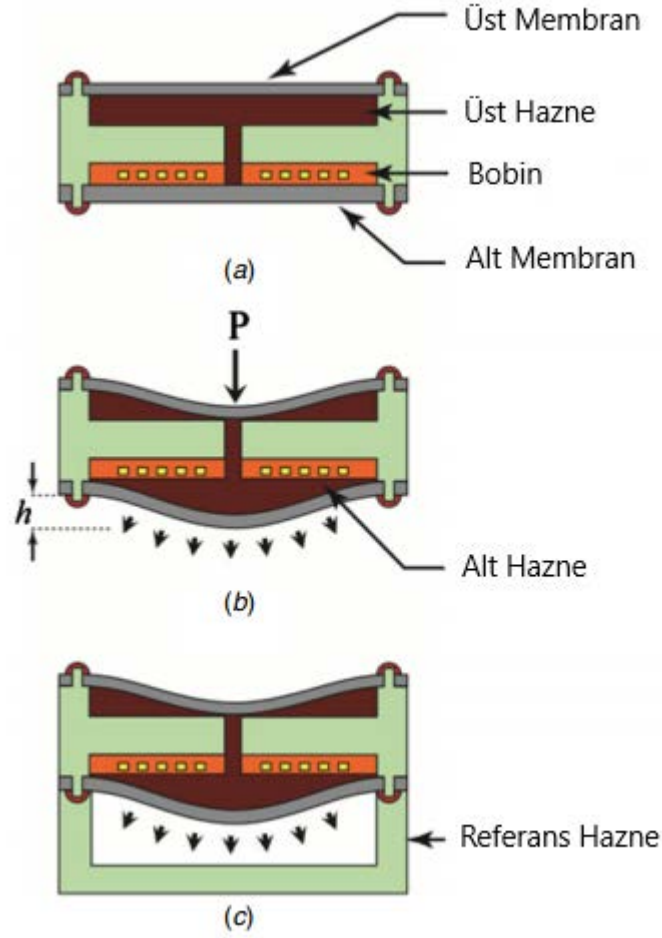


Şekil 1.12. Manyetik Sıvı akış sensörü şematizasyonu [48]

Sistemde manyetik sıvı tepecik sabittir ve değişen statik (yavaş değişen) akış hızı ferro tepecik etrafında bozunmalara sebep olur. Manyetik sıvı tepecığının yer değiştirmesinin bir elektrik sinyaline dönüştürülmesi için sisteme entegre edilen bir indüktif okuma stratejisi, algılama bobinleri vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir [48].

Basınç sensörleri endüstrinin çeşitli dallarında sıklıkla kullanılmaktadır. Fizyolojik basınçların kablosuz olarak algılanması, 1957'deki çalışmanın ardından, frekansı dış basınçla modüle edilen tek bir transistor osilatörünü içeren sindirilebilir bir kapsül kullanarak gastrointestinal basıncı ölçmek için kullanımı yarım yüzyıldan uzun bir süredir ilgi alanı olmuştur [49]. 1960'larda göz içi basıncını kaydetmek için pasif LC transponderler kullanılmıştır [50]. Bu öncü çabaların ardından MEMS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte çeşitli anatomik bölgelerdeki basınçları izlemek için tasarlanmış minyatür cihazlar ortaya çıkmıştır [51]–[53].

Şekil 1.13'te bir basınç sensörünün şematik diyagramını gösterilmektedir. Cihaz, küçük bir delikten bağlanan ve ince polimerik membranlarla kaplı üst ve alt haznelerden oluşmaktadır. Manyeto-akışkan basınç sensörünün çalışma mekanizması, koloidal manyetik sıvının manyetik geçirgenliğine ve dispersiyon ortamının akışkanlığına dayanmaktadır.

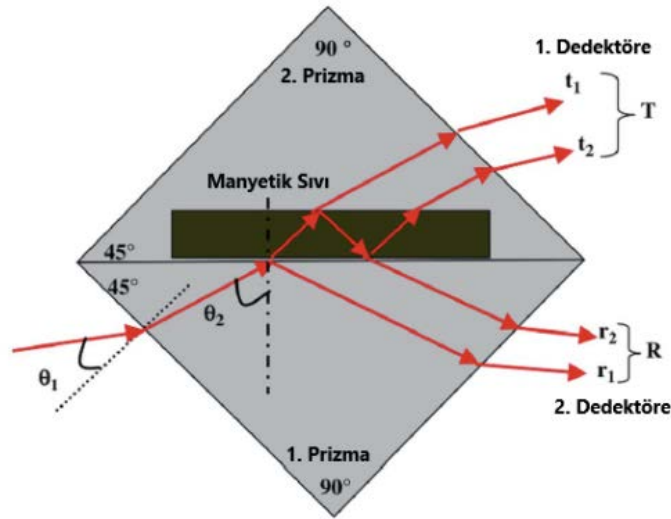


Şekil 1.13. Manyetik sıvı bazlı basınç sensörünün yapısı [53]

Alt bölme ayrıca bir düzlemsel indüktör içermektedir. Küçük geçiş deliği, alt ve üst hazne arasında manyetik sıvının transferini sağlamaktadır. Şekil 1.13.a, cihazı, basınçsız konumda gösterir, burada tüm manyetik sıvı üst bölmede bulunmaktadır. Üst membrana basınç uygulandığında, Şekil 1.13.b 'de gösterildiği gibi, taban membranının bükülmesi nedeniyle oluşan boşlukta, manyetik sıvının bir kısmını bobine yakın olan alt hazneye doğru akar. Manyetik sıvının manyetik geçirgenliği polimer membrandan ve onu çevreleyen havadan daha yüksek olduğundan bobinin indüktans değeri artar. Şekil 1.13.c 'de mutlak basıncı ölçmek için bir referans bölmesi eklenmiştir. Kaçak kapasitansın basınç değişimlerinden etkilenmediği göz önüne alındığında, dış basınç arttıkça bobinin self-rezonans frekansında bir düşüş meydana gelmektedir. Belirli bir basınç için, bobinin rezonans frekansındaki değişim, membranın bükülmesine ve aynı zamanda manyetik sıvının manyetik geçirgenliğine bağlıdır. Ölçümler bir faz analizörü kullanılarak gerçekleştirilir [53].

Manyetik sıvılarda bulunan çok sayıdaki manyetik partiküller onları genellikle opak yapar, bununla birlikte uygulanan manyetik alanın yoğunluğuna ve yönüne göre manyetik olarak kontrol edilebilir optik özellikler kazanırlar. Manyetik sıvıların kullanıldığı yaygın manyetik olarak ayarlanabilen optik özellikler, dikroizm, çift kırılma ve manyeto-optik etkidir. Manyetik sıvıların bu ayarlanabilir optik özellikleri, uygulanan manyetik alana ve manyetik dipol-dipol etkileşimlerine bağlı

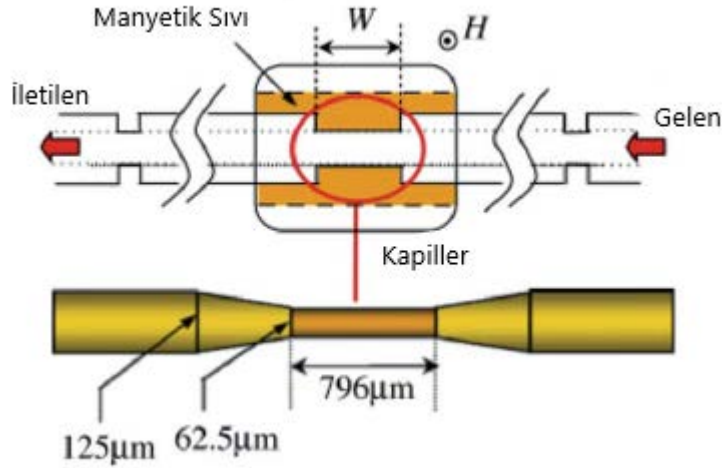
olarak partiküllerin anizotropisi veya zincir yapılarının oluşumu esasına dayanmaktadır [54]. Manyetik sıvının ayarlanabilen manyeto-optik özelliği uygulanan manyetik alan altında gelen ışığın polarizasyon yönü ile uygulanan manyetik alan arasındaki açı değiştirilerek sağlanabilir [55]. Manyetik alan yokluğunda manyetik sıvıların kırılma indisi sabit bir sıcaklıkta partikül konsantrasyonu ile lineer olarak artar ve sabit bir partikül konsantrasyonu için sıcaklık ile birlikte azalır [56]. Bununla birlikte, bir manyetik sıvı filme dik bir manyetik alan uygulandığında, manyetik alan genliği ile kırılma indisindeki bir artış, partiküllerin düzenine bağlıdır [57]. Manyetik sıvı filmlerde manyetik alan yoğunluğu ile kırılma indisinin değişimi, manyetik sıvının iki prizma arasına yerleştirildiği ve manyetik alanın dik bir yönde uygulandığı manyetik sıvı bazlı ayarlanabilir ışın ayırıcı gibi ayarlanabilir optik sistemler oluşturmak için kullanılmaktadır. Şekil 1.14'te manyetik sıvı bazlı bir ışın ayırıcı prizma gösterilmektedir. Manyetik sıvılı ışın bölücüler klasik ışın bölücülere göre sabit oranlı bölünmüş çıkış enerjileri olduğundan daha avantajlıdır.



Şekil 1.14. Manyetik sıvı bazlı ışın ayırıcının şematik gösterimi [54]

Başka bir optik uygulama alanı olan manyetik sıvı çekirdekli optik fiberler, diğer sıvı optik fiberlere kıyasla, uygulanan manyetik alanda optik kayıp ve çok modlu çalışma gibi ayarlanabilir özelliklere sahip olmalarından dolayı avantajlıdır [58].

Manyetik alanın kırılma indeksini değiştirdiği ve bu şekilde yayılan ışığın yoğunluğunun Şekil 1.15' te gösterildiği gibi uygulanan manyetik alan şiddeti boyunca azaltılabildiği uygulamalar bulunmaktadır.



Şekil 1.15. Manyetik sıvı bazlı optik modülatör şeması [59]

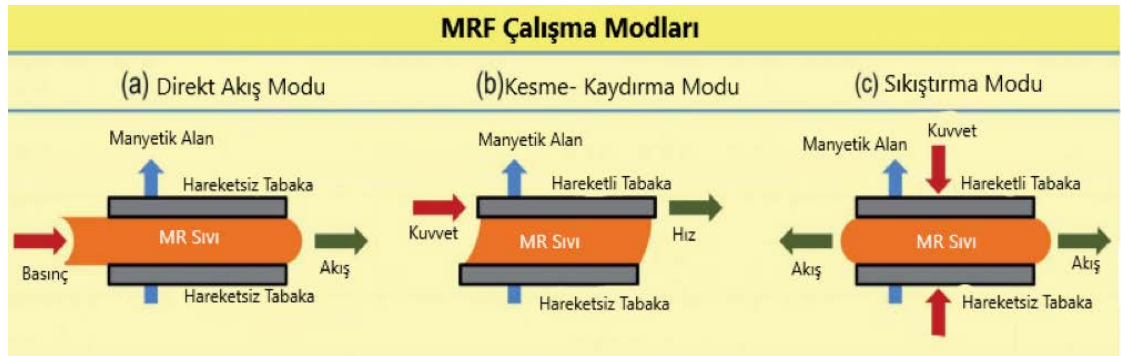
Manyetik sıvılı optik modülatörler manyetik sıvı bazlı optik-mantık cihazlarında kullanılırlar. Ayarlanabilir modülatörler, paralel iletişimde ve seri konfigürasyonlarda kullanılarak, optik iletişimde faydalı mantıksal aygıtlar oluşturmaktadırlar. Ancak yavaş tepki süreleri (> 20 ms) olduğundan, sadece düşük hızlı uygulamalar için uygun aygıtlardır [60].

1.10. Manyetoreolojik Sıvılar

Manyetik sıvılardan biraz daha farklı bir yapı sergileyen bir diğer sıvı türü manyetoreolojik (MR) sıvılardır. Rabinow ve Winslow'un 1940' lardaki keşiflerinden beri, magneto ve elektoreoloji, son yıllardaki önemi büyük ölçüde artan multidisipliner bir alan olarak ortaya çıkmıştır [61], [62]. MR sıvılarının bileşimi, manyetik olmayan bir ortamda yüksek bir mıknatıslanabilir parçacık konsantrasyonu gibi özellikleriyle temelde manyetik sıvıların yapısına benzemektedir. Fakat parçacık büyüklüğü ve bileşimindeki farklılıkları dolayısıyla farklı davranışlar sergilemektedirler. Özellikle, MR akışkan parçacık büyüklükleri tipik olarak 10^{-7} ile 10^{-5} arasındadır yani kolloidal manyetik sıvı parçacıklarından bir ila üç büyüklük daha büyüklerdir. Daha büyük MR sıvı partikülleri, kararlı, yüksek mıknatıslanabilir materyaller ve geri dönüşümlü parçacık agremelasyonunu sağlarlar [63]. MR malzemeler, mekanik özellikleri kontrollü bir şekilde harici bir manyetik alanla değiştirilebilen bir çeşit akıllı malzemelerdir. Genellikle taşıyıcı olarak sıvıları, yağları, elastomerleri ve köpükleri içerebilirler [64]. Yaygın olarak kullanılan MR sıvıları silikon yağındaki karbonil demir partiküllerinden yapılır. MR akışkanlar, manyetik alanın uygulanmasıyla kontrol edilebilen bir viskoziteye sahiptir. Genellikle bir taşıyıcı sıvı içinde bulunan mikron boyutlu manyetik parçacıkların dispersiyonlarıdır. MR sıvılarının stabilitesini arttırmak için küçük miktarlarda partikül katkı maddeleri kullanılabilirken, reolojik özelliklerin geliştirilmesi için daha yüksek konsantrasyonlarda çeşitli parçacıkların karışımları da kullanılabilir. MR davranışını arttırmak için aynı malzemeden (örneğin, demir), fakat

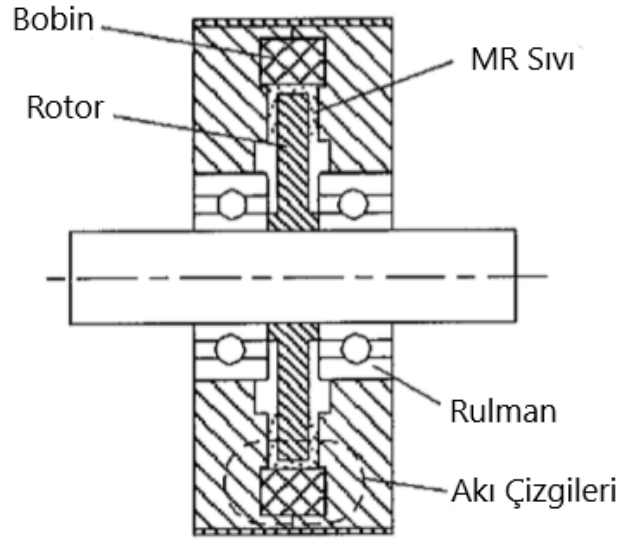
iki farklı çaptan (birkaç mikron aralığında) spesifik parçacıkların karışımları kullanılabilir. Bu tür dispersiyon karışımları, büyük kürelerin veya küçük kürelerin tekil dağılımlı süspansiyonlarından daha büyük alan indüklü akma gerilmeleri ve daha düşük viskoziteleri gösterir [64]. Bu sıvıların geleneksel mekanik arayüzlere göre en önemli avantajı büyüklüğü 1 T seviyesinde uygulanan manyetik akış yoğunlukları için görünür viskozitesinde birkaç büyüklük derecesi kadar değişiklik sergileyebilirler. Bu olağanüstü özellik onları titreşimlerin aktif kontrolünü veya tork iletimini gerektiren mekanik sistem uygulamaları için çok iyi adaylar haline getirmektedir. Tipik örnekler arasında amortisörler, frenler, kavramalar, sismik titreşim damperleri, kontrol vanaları ve yapay eklemler bulunmaktadır. Ayrıca harekete geçirme, sönümleme ve robotik ile ilgili uygulamalarda kullanılabilirler [65]. Diğer örnekler, termal enerji aktarımı [66], biyomedikal uygulamalar [67], izotermal manyetik adveksiyonu [68] için manyetik alanların kullanımını içerir. Bir MR sıvısının verimi ilk olarak, alanın uygulanmasıyla oluşan yapının kuvvetini ölçen verim stresi ile değerlendirilir. Akma gerilmesi, gerilime karşı gösterilen maksimum gerilimi temsil eder, başka bir deyişle gerilmenin sabit kalmasına rağmen bir yapıda meydana gelen deformasyondaki artıştır çünkü jel-benzeri yapı stresi bu maksimum seviyeye ulaştığında kırılır.

MR sıvılarını kullanan çoğu cihaz, sabit kutuplara (basınçla çalışan direkt akış modu - PDF) veya nispeten hareket edebilen kutuplara (doğrudan kesme modu - DS ve sıkıştırma film modu - S) sahip olarak sınıflandırılabilir. Şekil 1.14'te MR sıvılarının çalışma modları şematize edilerek gösterilmiştir.



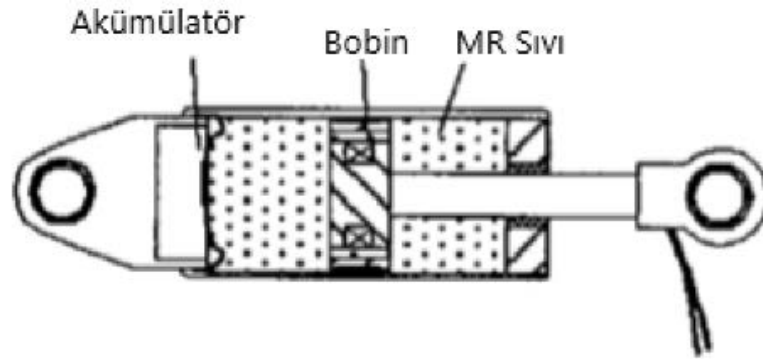
Şekil 1.16. Kontrol edilebilir MR sıvısı cihazları için temel çalışma modları: (a) basınç tahrikli direkt akış modu, (b) doğrudan kesme modu ve (c) iki eksenli uzamsal akış modu [69]

Bu malzemelerin artan teorisinin daha iyi anlaşılmasıyla birlikte, kontrol edilebilir malzemelerin pratikliğini geliştirmek için son on yılda önemli çalışmalar olmuştur. MR sıvıları için ana uygulama alanı, frenler ve debriyajlar dahil olmak üzere tork aktarımı için kullanılan cihazlardır [61], [62], [65], [70]. Şekil 1.15'de MR akışkan tabanlı disk tipi bir frenin şemasını gösterilmektedir. MR sıvı bazlı frenler günümüzde ticari olarak temin edilebilen uygulamalardır. Kontrol edilebilir akışkan tabanlı frenler ve debriyajlar, çeşitli otomotiv uygulamalarında ve gerdirme uygulamalarında ticari başarıya olanak tanımaktadırlar [70].



Şekil 1.17. Uygulama ekipmanlarında kullanılan MR sıvı döner freni [63]

MR sıvılar için bir başka ana uygulama alanı, yarı aktif veya uyarlamalı titreşim kontrolü için amortisörlerde kullanılmalarıdır. Bu teknolojinin, birincil süspansiyon, sekonder süspansiyonlar ve motor yuvaları gibi otomotiv sanayi uygulamalarında kullanılmaktadırlar [71]–[73]. Şekil 1.16’da bir MR sıvı amortisörünün bir şemasını gösterilmektedir. Bu aygıtın çalışmasının temel olarak frenler ve kavramalardan farklı olduğu görülebilir, çünkü MR sıvısı doğrudan kesilmekten ziyade dairesel deliklerden geçirilir. Bu MR damperi uygulaması şu anda araç koltuğu titreşim kontrolünde kullanılmak üzere bir sistem içinde satılan ticari bir üründür [74].



Şekil 1.18. Kamyon koltuğu süspansiyon sisteminde kullanılan MR sıvı damperi [63]

MR sıvı dolu otomotiv amortisörlerinin kullanılması, yarış arabası sürücülerinin süspansiyon sistemini çeşitli yol ve lastik koşullarına göre ayarlayabilme kabiliyeti büyük avantaj sağlamaktadır. Kontrol edilebilir akışkan sönümleyicileri kullanılarak diğer titreşim kontrol uygulamaları, sismik sönümlleme ve helikopter rotoru sönümlleme gibi uygulama alanları MR sıvıların diğer önemli uygulama alanlarındandır [63].

1960'lı yıllardan itibaren gelişmekte olan manyetik sıvı teorisi ve pratiğinin sonuçlarından birçok yorum çıkartmak mümkündür. Farklı taşıyıcı baza sahip olabilen manyetik sıvılar, birçok farklı sanayi dallarında uygulama alanı bulmaktadır. Fakat yapılan yayın taramaları sonucunda şu ana kadar yapılan çalışmalardan genel bir teori veya uygulama yöntemi elde edilememiştir. Dolayısıyla yeni tür manyetik sıvıların oluşturulması, incelenmesi ve uygulanması açısından literatürde ciddi bir boşluk olduğu görülmektedir. Özellikle tıp ve biyoloji alanlarında manyetik sıvı uygulamaları geniş bir yer kaplasa da, manyetik sıvı ile yapılabilecek farklı birçok uygulama alanı hala bulunmaktadır. Manyetik sıvılar genelde elektroteknik (elektrik ve manyetizma) alanları bazlı geliştirilmesine rağmen, manyetik sıvıların en az uygulama alanının bulunduğu dallar da yine elektroteknik sistemlerdir. Hem miknatıslanma hem de akışkanlık özelliği gösteren bu sıvıların elektroteknik alanlarda (devreler, röleler, ayırıcılar, kesiciler, anahtarlar, güç elektroniği, elektrik makinaları, röleler, antenler, kontrol sistemleri vb.) uygulanmasının birçok avantajı olacaktır. Bu nedenle mevcut manyetik sıvıların ve sentezlenebilir yeni manyetik sıvı türlerinin elektrik, elektronik ve haberleşme sistemlerinde kullanılması güncel çalışma konularını teşkil etmektedir.

Bu tez çalışmasında manyetik sıvıların elektrik, elektronik ve haberleşme sistemlerinde mümkün olabilecek uygulama alanlarında kullanılması esas hedef olarak seçilmiştir. Tez konusu multidisipliner bir konu olup; elektrik, elektronik, elektromanyetik, hidrodinamik, ısı ve kütle transferi, tıp, biyoloji gibi geniş kavramlar içeren tanım, kuram, denklem ve farklı matematik yöntemleri içermektedir.

Bu tezin amacı yayın taraması yapılarak elektrik ve elektronik sistemlerinde özellikle manyetik sensörlerde ve güç sistemlerinde manyetik sıvıların günümüzdeki kullanım alanlarını incelemek, yeni tip manyetik sıvılı sensörlerin hem tasarımını hem de teorik ve deneysel incelemelerini yapmaktır. Ayrıca manyetik sıvı bazlı küçük boyutlu ve düşük güce sahip transformatörlerin tasarımı ve incelenmesi, manyetik sıvıların sensörler ve benzer düzenekler üzerinde bazı teorik problemlerinin geliştirilmesi de amaçlanmıştır. Tezin bu amaçlara ulaşması için aşağıdaki çalışmaların yapılması hedeflenmiştir.

1. Manyetik sıvıların 1960 yıllarında başlayarak yapılan çalışmalarının özetleri ve bu çalışmalardan oluşturulmuş sınırlı sayıda olan kitapların (Berkovsky, Rosensweigh, Blum, Odenbach) incelenmesi sonucu, manyetik sıvıların teknik ve deneysel çalışmalarında bulunan boşlukların değerlendirilmesi.
2. Bazı elektroteknik yapılarda kullanılan manyetik nüvelerin yerine manyetik sıvıların farklı manyetik parçacık derişimine sahip numunelerinin kullanım açısından değerlendirilmesi, küçük boyutlu, nüvesinin manyetik geçirgenliği ayarlanabilir mikro transformatörün deneysel olarak incelenmesi ve çalışma frekansları karakteristiklerinin değerlendirilmesi.

3. Elektroteknik sistemlerde kullanılacak manyetik sıvıların manyetik parçacık derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen manyetik özelliklerinin transformatör karakteristiklerine etkisinin incelenmesi.
4. Manyetik sıvılı sensörlerin bazı özelliklerinin teorik incelenmesi ve teorisinin geliştirilmesi.
5. Manyetik sıvılarda küçük boyutlu parçacıkların manyetik karakteristiklerinin belirlenmesi için sensör teorisinin geliştirilmesi.

Bu problemlerin gerçekleştirilmesi için İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümünde bulunan elektromanyetik düzeneklerin ve ölçüm cihazlarının kullanılması öngörülmüştür. Farklı geometriye sahip olan yüksek grandyanlı manyetik alan sistemleri kullanılmıştır. Ayrıca Helm Holtz bobin düzeneği alınarak deneysel ölçümlere tabii tutulmuştur. Pratik deneylerin yapılabilmesi için İnönü Üniversitesi BAP Projesi (2016/ 726) kapsamında yurtdışı menşei (SIGMA CO. INC.) manyetik sıvı (DS-50) temin edilmiş, farklı yapısal özelliklere sahip transformatörler tasarlanmış, küçük boyutlu sensörlere has olan boşluk ve kanallardaki manyetik sıvı akışını değerlendirmek için Lab-on-Chip (LOC) düzenekleri satın alınmıştır.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar Gaziantep UEMK (2018), Sivas CIEA (2018) ve Malatya IDAP (2018) konferans ve kongrelerinde sunulmuş, bildiri metinleri 3 uluslar arası bildiriler kitaplarında basılmıştır. Tezden türetilmiş 1 makale YÖK DergiPark'ta yer alan, ulusal hakemli The International Journal of Energy & Engineering Sciences dergisinde yayımlanmıştır (2018). Sunulan makale ve bildirilerle yurtiçi ve yurtdışı bilim insanlarından ilgi ve takdir alınmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Ferrohidrodinamik Denklemler

Klasik akışkanlar mekaniğinde en çok kullanılan Bernoulli denklemi; basınç, hız, yerçekimi alanı altında bir sıvının yükselmesi gibi problemleri matematiksel olarak açıklamaktadır. Ferro hidrodinamik denklemlerin özel bir durumu sabit sıcaklık ve akış altında sıkıştırılamayan manyetik sıvılar için elde edilebilir. Bu durumda kararlı durum koşulları için Bernoulli denklemi aşağıdaki gibidir [2],

$$p - \mu_0 M H + \frac{1}{2} \rho \vartheta^2 + \rho g h = \text{sabit} \quad (2,1)$$

Burada, M süspansiyonun mıknatıslanması, H manyetik alan, g yer çekimi ivmesi ve h bir yükseklik üzerindeki referans yüzeyi ifade etmektedir. Dk. 2,1 askıda durma, manyetik sıvı sızdırmazlıklar, manyetik nozul gibi bazı önemli manyetik sıvı davranışlarını açıklamaktadır [3], [4].

Manyetik sıvının süreklilik ya da makroskobik tanımındaki madde bağı, iç açısal momentum yoğunluğu, simetrik olmama durumu ve madde gerilmesi gerekliliği manyetik sıvının pratikte sürekli polarizasyonlu olduğu durumları ifade etmektedir. Ferro hidrodinamik denklemler oluşturulurken manyetik sıvılar; değişmez, tek dağılımlı parçacıklar ve küresel eşit dağılımlı uzay şeklinde kabul edilmiştir. Bu koşullar altında manyetik sıvının kütle yoğunluk dağılımı sabit olacaktır. Bu nedenle süreklilik denklemi,

$$\nabla \cdot \mathcal{V} = 0 \quad (2,2)$$

şeklinde verilir.

Momentum denklemi, manyetik kuvvet teriminin, normal kuvvet terimleri üzerine basitçe birleştirilmesi varsayımı üzerine yazılırken, enerji denklemi için, manyetokalorik ısı kaynağı terimi, basit bir şekilde, ısı taşınım denklemindeki karşılık gelen enerji terimleri ile birleştirilmiştir. Bu durumda momentum denklemi,

$$\rho \frac{d\mathbf{q}}{dt} + \rho(\mathbf{q} \cdot \nabla)\mathbf{q} = -\nabla p + \mu_0 M \nabla H - \nabla \psi + \mu \nabla^2 \mathbf{q} \quad (2,3)$$

Genel dengeden lineer momentum yoğunluğu $\mathbf{p}(\mathbf{x},t) = \rho(\mathbf{x},t) \mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ durumunda, sıkıştırılamayan manyetik sıvılar için lineer bir momentum denklemi elde edilir,

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu_0 \mathbf{M} \nabla H + 2\zeta(\nabla \times \boldsymbol{\omega}) + (\lambda + \eta - \zeta)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{V}) + (\mu + \xi)\nabla^2 \mathbf{V} \quad (2,4)$$

Burada ρ yoğunluk, $\mathbf{V}$ devinimsel hız, $\boldsymbol{\omega}$ kısaca dönme hızı olarak da ifade edilebilen alt süreklilik birimlerinin ortalama dönme hızı, p basınç, $\mathbf{g}$ yer çekimi alan vektörü, $\mathbf{M}$ süspansiyonun mıknatıslanması, H manyetik alan, λ toplam viskozite, η kayma viskozitesi ve ζ girdap viskozitesidir. Braner ve arkadaşları tarafından birbirini etkilemeyen alanların seyreltilmiş süspansiyonları için girdap viskozitesini tanımlamada yaygın olarak kullanılan $\zeta = 1,5\phi_h\eta_0$ elde edilmiştir. Bu ifadede ϕ_h asılı duran parçacıkların hidrodinamik özellik göstermeyen sonsuz seyreltmenin sınırında

bu denklem değişir. Einstein tarafından ifade edilen manyetik sıvı etkin viskozite ile viskozite arasındaki farkın bir ölçüsü olan girdap viskozitesi Shliomis tarafından tartışılan sözde dönme viskozitesi ile karıştırılmamalıdır [5].

Mıknatıslanmış materyale son derece küçük bir ısı ilavesi için o ısının korunumu esastır. Aşağıdaki eşitlik bu korunumu ifade etmektedir.

$$dQ = dU + dW_R + dW_{1R} \quad (2,5)$$

Dk. (2,5) geliştirilirse enerji korunumu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$dQ = c(T, H)dT + \mu_0 T \left(\frac{dM}{dT} \right)_H dH - \Phi dt \quad (2,6)$$

İç açısal moment yoğunluğu değişim oranı $\mathbf{s}(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{I}(\mathbf{x}, t) \boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}, t)$, toplam açısal moment yoğunluğundan lineer momentum yoğunluğunun momentini çıkartılarak elde edilebilir [2], [5].

$$\rho \mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H} + 2\xi (\nabla \times \mathbf{V} - 2\boldsymbol{\omega}) + (\lambda' + \eta') \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{\omega}) + \eta' \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (2,7)$$

$\mathbf{I}(\mathbf{x}, t)$ manyetik sıvıda alt süreklilik birimleri için durağan yoğunluğun momentidir ve parçacıkların konsantrasyonu ve şekline bağlıdır. λ' toplam dönme viskozitesi ve η' ise kayma dönme viskozitesidir. Gerilme tensörünün simetrik olmayan kısmı, iç açısal moment $\mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$ ve dış açısal moment $\mathbf{x} \times \mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ arasındaki dönüşüm için bir mekanizma sağlar. Bu çalışma alanın başlangıcından beri manyetik sıvının tanımlanması ya da önerilmesinde kayma viskozitesinin rolü aktif tartışma konusu olmuştur. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalar manyetik sıvıların belli sınıflarında kayma viskozitesinin önemini destekler niteliktedir [75], [76]. Çünkü düşük frekanslı manyetik alanlarda yapılan manyetik sıvı uygulamalarının neredeyse tamamını etkilemektedir yani manyetik alan magnetostatik sınırlarda Maxwell denklemlerine uymaktadır [75].

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad \nabla \cdot (\mathbf{M} + \mathbf{H}) = 0 \quad (2,8)$$

Akışkanın mıknatıslanma yoğunluğu, uygulanan manyetik alan, akışkan ve parçacık rotasyonundan dolayı değişir ve genellikle mıknatıslanma gevşeme denklemi olarak adlandırılır.

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{M} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} + \frac{1}{\tau} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_{eq}) \quad (2,9)$$

Dk. 2,9'da $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_B}$ alt süreklilik birimlerinin etkin gevşeme zamanı, $\mathbf{M}_{eq}$ ise süspansiyon kararlılık mıknatıslanmasıdır. Dk. (2,9) düşük manyetik alan için mıknatıslanmayı doğru bir şekilde ifade eder.

Manyetik sıvılarda etkileşmeyen parçacıkları, tek dağılımlı biriktirmenin kararlı mıknatıslanması aşağıda belirtildiği gibidir.

$$\frac{\mathbf{M}_{eq}}{\varphi M_d} = L(\xi) = \frac{\mathbf{H}}{H}, \quad L(\xi) = \cos \xi - \xi^{-1} \quad (2,10)$$

Burada $\xi = \frac{mH}{k_B T}$ Langevin parametresi, $L(\xi)$ Langevin fonksiyonu, φ manyetik parçacık konsantrasyonu, k_B Boltzman sabiti, M_d nanoparçacık materyallerin alan mıknatıslanması ve T mutlak sıcaklıktır. Düşük manyetik alan sınırında ($\xi \ll 1$) süspansiyonun manyetik duyarlılığı χ_0 olan kararlı mıknatıslanma, manyetik alan $\mathbf{M}_{eq} = \chi_0 \mathbf{H}$ ile doğru orantılıdır.

Ferrohidrodinamik denklemler olarak bilinen Dk.(2,1)- (2,10) manyetik alan etkisi altında manyetik sıvının akışını tanımlamak için gereken denklem kümesidir. Bu magnetostatik problem için gereken sınır koşulları,

$$\mathbf{n} \cdot \|\mathbf{B}\| = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (2,11)$$

$$\mathbf{n} \cdot \|\mathbf{H}\| = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K} \quad (2,12)$$

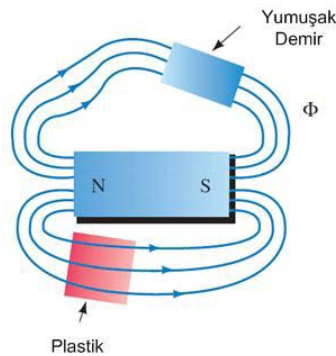
Burada $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ manyetik indüksiyon, $\mathbf{K}$ yüzey akı yoğunluğu ve $\mathbf{n}$ faz 1'den faz 2'ye işaretli ara yüzeye dik bir birim vektördür. $(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)$ eşitliğinde 1-2 arayüzü boyunca $\mathbf{x}$ değişkeninin farkını temsil eden $\|\mathbf{x}\|$ notasyonu verilmiştir. Hidrodinamik problem için sınır koşullarının çeşitli tipleri kabul edilmiştir [75], [76]. Öteleme hızı için Lamb tarafından aşağıdaki denklem önerilmiştir [77].

$$\mathbf{V} - \mathbf{V}_s = \frac{1}{\beta} [\mathbf{n} \times (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \times \mathbf{n})] \quad (2,13)$$

Burada β sürtünme katsayısı, $\mathbf{V}_s$ yüzey hızı, $\mathbf{n}$ yüzeyden dışarıya doğru birim vektör ve $\mathbf{T}$ Cauchy gerilme tensörüdür ve β 'den itibaren parçacık çapı ile ters orantılıdır [77].

2.2. Transformatörler

Bir mıknatısta manyetik alan yönünü gösteren kuvvet çizgileri manyetik akı olarak tanımlanır ve Φ sembolü ile gösterilir. Manyetik akı yönü N kutbundan S kutbuna doğru olup kapalı bir devre oluşturmaktadır. Manyetik akı yolunda demir gibi bir manyetik malzeme varsa akı yolunu değiştirir. Plastik gibi manyetik olmayan bir malzeme varsa, akı yolunu değiştirmez.

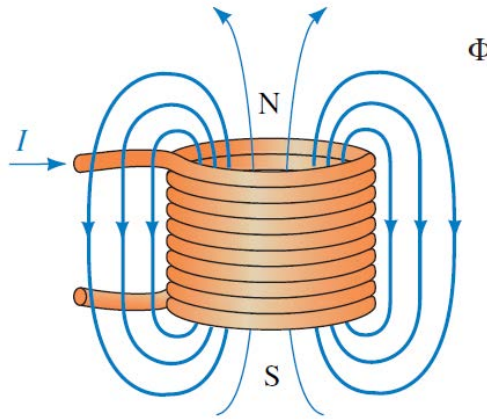


Şekil 2.1. Manyetik akı çizgilerinin manyetik ve non-manyetik malzemeye tepkisi [78]

İçinden akım geçen bir iletkenin etrafında manyetik alan meydana gelir. İletken, bir manyetik nüve (çekirdek) üzerine sarılır ise, manyetik akı nüve üzerinden devresini tamamlar. Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesi Ampere Kanunu ile aşağıdaki gibi ifade edilir,

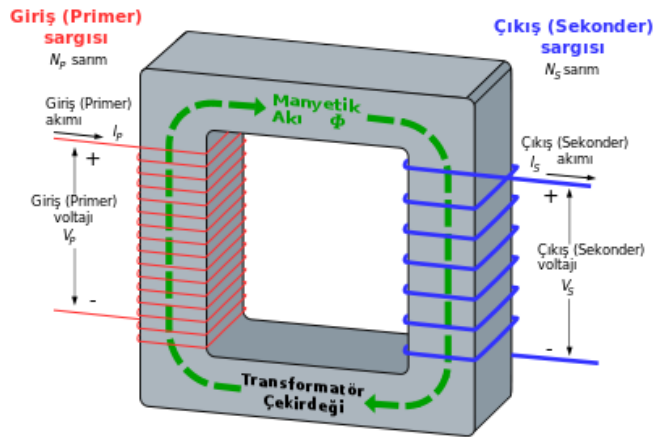
$$\oint_A \mathbf{H} \times d\mathbf{l} = I_{net} \quad (2,14)$$

Burada $\mathbf{H}$ manyetik alan şiddeti olup I_{net} akımı tarafından üretilir. l manyetik akı yolunun uzunluğudur. Şekil 2.2' de akım geçen bobin biçiminde sarılmış iletken tel üzerinde oluşan manyetik akı şematize edilmiştir.



Şekil 2.2. Bobin şeklinde sarılmış telin üzerinden geçen akım sonucu oluşan manyetik akı çizgileri [78]

Çekirdek (nüve); demir veya ferromanyetik malzemeler olarak bilinen belirli diğer metallerin alaşımından yapılmış ise, akım tarafından üretilen bütün manyetik alanın nüve içerisinde kaldığı varsayılacaktır. Böylelikle, Ampere Kanunu'ndaki integralin yolu, nüvenin ortalama yol uzunluğu lc olacaktır. Şekil 2.3'te, dikdörtgen nüvenin bir kolu üzerine sarılı N_p ve N_s sarımlı bir sargı bulunan manyetik yapı gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Transformatörün manyetik yapısı [79]

Manyetik alan şiddeti **H**, bir anlamda akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın bir ölçüsüdür. Manyetik alan şiddeti **H** ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu **B** arasındaki ilişki,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2,15)$$

Burada, μ malzemenin manyetik geçirgenliği, **B** manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Manyetik geçirgenlik (μ), malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini tanımlayan bir parametredir. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde daha kolay manyetik alan oluşur.

Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri sabittir ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanması bağıl geçirgenliği verir. Bağıl geçirgenlik aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2,16)$$

Bağıl geçirgenliğin yüksek olması malzemenin manyetik özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelir.

Şekil 2.3'deki nüvenin kesit alanı A olarak kabul edilirse sargıdan geçen i akımından dolayı nüvede oluşacak toplam akı,

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = \frac{\mu N i A}{l_c} \quad (2,17)$$

olarak ifade edilir.

Zamanla değişen manyetik alanın indüklediği gerilim, Faraday kanunu ile ifade edilir. Faraday, değişken bir manyetik akı tarafından kesilen sargı uçlarında bir gerilim indüklendiğini ve bu gerilim değerinin manyetik akının zamanla değişimine bağlı olduğunu ifade etmiştir. Değişken manyetik akı N sarımlı sargıyı keserse, sargı uçlarındaki toplam gerilim her bir sargıda indüklenen gerilimler toplamına eşit olacaktır.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2,18)$$

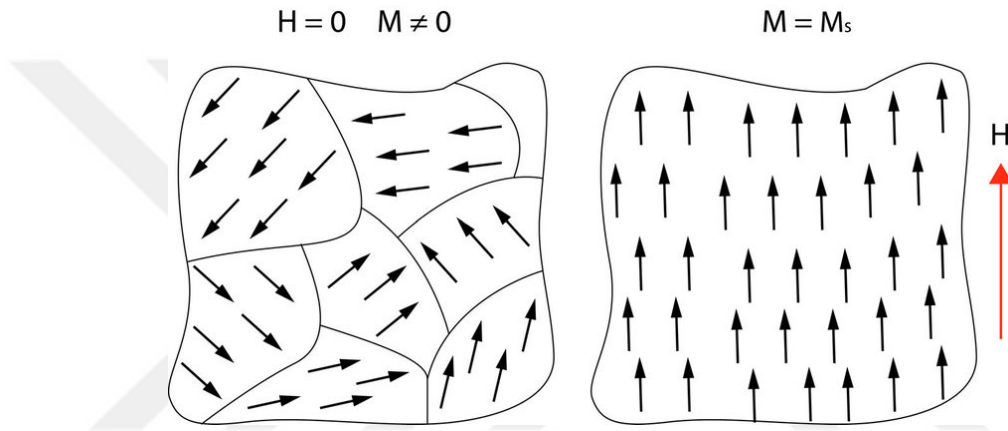
Dk. (2,18)'deki (-) negatif işaret Lenz kanununun bir ifadesidir. İndüklenen gerilim kendisini meydana getiren değişikliğe karşı koyduğu için denklemden negatif işareti kullanılır. Lenz kanununa göre; bir sargıda indüklenen gerilim, eğer sargı uçları kısa devre edilirse, sargıdan bir akım dolaştıracak ve bu akımın üreteceği akı orijinal akının değişimine karşı koyacaktır.

Eğer uygun konumdaki bir iletken manyetik alan içinde hareket ederse, üzerinde bir gerilim indüklenecektir. İndüklenen bu gerilim aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$e = (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{I} \quad (2,19)$$

Burada, $\mathbf{V}$ iletkenin hızı, $\mathbf{B}$ manyetik akı yoğunluğu vektörü ve $\mathbf{I}$ manyetik alan içindeki iletkenin uzunluk vektörünü ifade etmektedir.

Ferromanyetik nüvedeki kayıplar temel olarak iki başlık altında toplanabilir, bunlar histerezis kayıpları ve eddy (girdap) akımı kayıplarıdır. Bir demir malzemenin mıknatıslık özelliği göstermemesinin nedeni başlangıçta atomların gelişigüzel dağılmış olmasıdır. Bu durumda toplam akı değeri sıfır olmaktadır. Fakat demir malzeme harici bir manyetik alan etkisinde kaldığında domainlerdeki atomlar harici manyetik alanı destekleyecek yönde akı oluştururlar. Harici manyetik alanın değeri artırılırsa, bütün domainler aynı yönü gösterirler. Şekil 2.4'te manyetik alan etkisi altındaki domainlerin yönlenmesini ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Parçacık domainlerinin manyetik alan yokluğundaki dizilimi (solda), domainlerin manyetik alan altındaki dizilimi (sağda) [80]

Mıknatıslanmanın bu temel prensibinde demir içinde domainlerin yönünü değiştirmek için gerçekte bir enerjiye gerek duyulması, transformatörlerde ortak olan bir enerji kaybına neden olur. Bu kayıplar histerezis kayıpları olarak adlandırılır. Histeresis kayıpları aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$P_h = K_h f B_m^n V \quad (2,20)$$

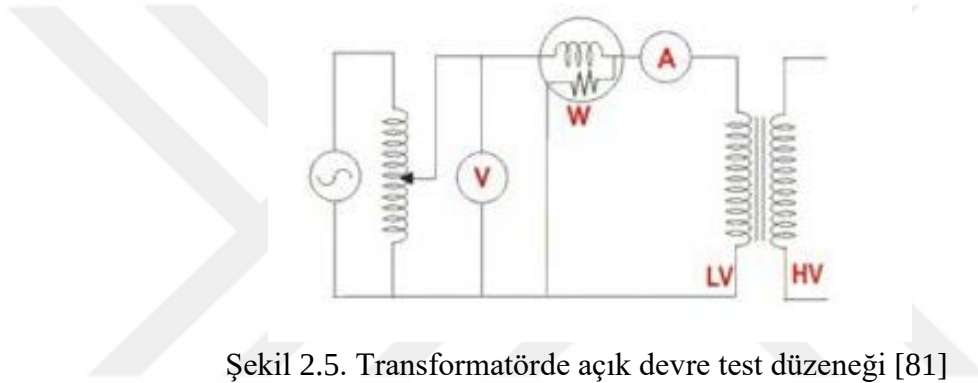
Burada P_h histeresis kayıpları (W), K_h manyetik malzemeye bağlı olan sabit, n değeri 1.5-2.5 arasında alınır ve deneysel olarak bulunur, V nüvenin hacmini ifade eder.

Eddy (girdap) akımları nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilir. Faraday kanununa göre; zamanla değişen akı, nüve etrafına sarılı sargılarda bir gerilim indüklediği gibi manyetik bir nüve içersinde de bir gerilim indüklenmesine sebep olur. Bu gerilimler nüve içersinde akımın bir halka şeklinde dolaşmasına neden olurlar. Girdap akımları demir nüve gibi rezistif (omik) özelliği olan malzemeler içinden akarlar ve enerji nüve içinde ısı şeklinde harcanır. Birim hacim başına eddy akımı güç kayıpları aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$P_e = K_e (f B_m t_1)^2 \quad (2,21)$$

Burada t_1 sac levha kalınlığı, K_e manyetik malzemenin iletkenliğine bağılı sabit, V manyetik nüvenin hacmini ifade eder. Ferromanyetik nüvenin bir çok ince levhalardan yapılması ve levhaların bir yüzünün silikon ile yalıtılması, silisli saclardan yapılan nüvede girdap akımları için akım yollarını çok kısaltılarak yol direnci artırılır ve böylece eddy akımı ile beraber eddy kayıplarının da azaltılması hedeflenir.

Transformatörlerin verimini ve bakır kayıplarının belirlenmesi için bir takım testler yapılmaktadır. Bunlar yüksüz (boşta) çalışma deneyi ve kısa devre deneyleridir. Transformatörlerde açık devre (yüksüz) testi transformatörün gerilim düzenlemesi ve trafonun verimliliğini belirlemek için yapılır. Bu test, transformatörün primer sargısında yapılır. Test trafoya yük bağlanmadan yapıldığı için ekonomik ve kolaydır. Şekil 2.5'te açık devre testi düzeneği şematize edilmiştir.

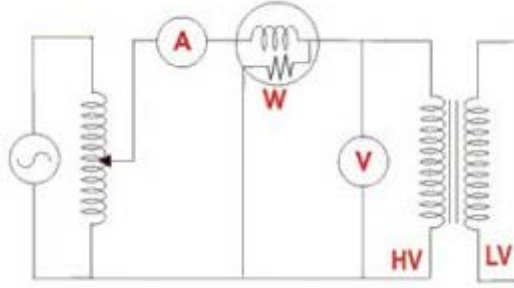


Şekil 2.5. Transformatörde açık devre test düzeneği [81]

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi Transformatörün voltajını (V), akımını (A) ve gücünü (W) ölçmek için AG gerilimine bir wattmetre (W), ampermetre (A) ve voltmetre (V) bağlanır. Transformatörün sekonder sargısı açık tutulur ve voltmetre terminallerine bağlanır. Voltmetre, transformatöre uygulanan voltajı okur, ampermetre yükü olmayan akımı okur, wattmetre ise giriş gücünü verir. Nominal anma gerilimi, birinci sargısına AC güç kaynağı sıfırdan nominal frekansta değişken oranlı bir Varyak (oto transformatörü) yardımıyla voltmetre LV tarafının anma gerilimine eşit oluncaya kadar, uygulanan voltaj yavaşça yavaş yükseltilir. Bu voltmetre sekonder sargıda indüklenen gerilimi ölçer. Transformatörün ikinci kısmı açık olduğundan, çıkış gücü sıfırdır. Yüksüz akım birinci sargı üzerinden akar ve uygulanan voltaj, AG sargısının nominal değerine ulaştığında, üzerine bağlı olan ölçü aletlerin değerleri okunur. Transformatörün bakır kaybı, birinci sargıda meydana gelir, çünkü sekonder sargısı açıktır. Wattmetre'nin okuması transformatörün temel kayıplarını verir. Trafo çekirdeği kaybı tüm yük türleri için aynıdır.

Transformatörlerde kısa devre deneyi trafonun tam yükte demir ve bakır kayıplarını bulmak için gerçekleştirilen bir verimlilik testidir. Kısa devre deneyinde trafonun ikinci sargısı olan sekonder sargıları kısa devre edilir ve primer sargısına varyak

yardımı ile düşük voltaj uygulanır. Kısa devre deneyinde Şekil 2.6’da gösterildiği gibi voltmetre , ampermetre, varyak ve wattmetre trafoya bağlanır.

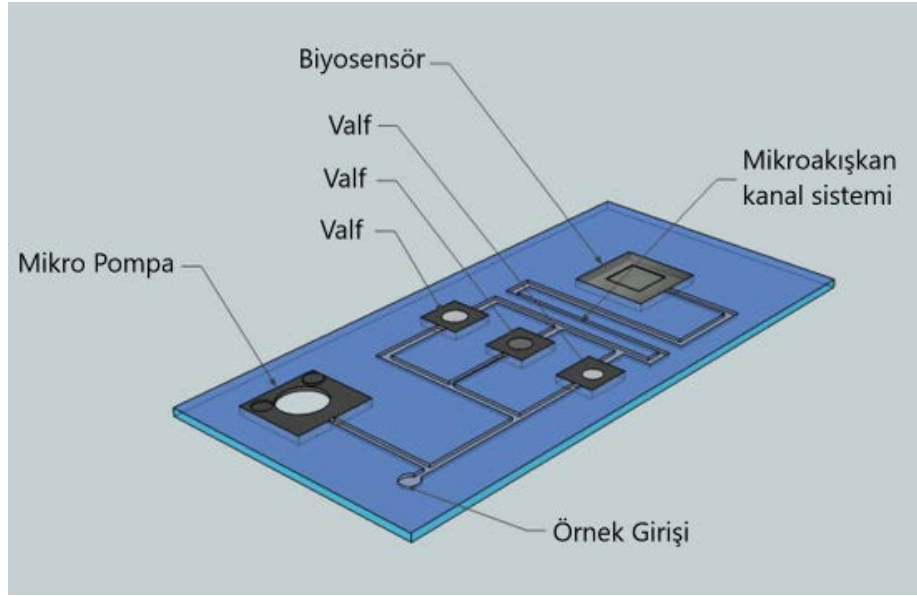


Şekil 2.6. Transformatörde kısa devre test düzeneği [81]

Kısa devre deneyinde trafonun sekonder sargıları kısa devre edilerek primer sargısına varyak yardımı ile değişen değerlerde düşük voltaj uygulanır ve trafonun sargılarına nominal akıma eşit oluncaya kadar varyak yardımı ile voltaj uygulanır. Trafo sargıları nominal akıma ulaştığı zaman bağlanan ölçü aletlerinin değerleri okunur. Ampermetre değeri tam yükte primer akımının eş değerini verir. Voltmetre değeri, uygulanan kısa devre gerilimini verir. Wattmetre değeri ise tam yükteki bakır kayıplarını verir.

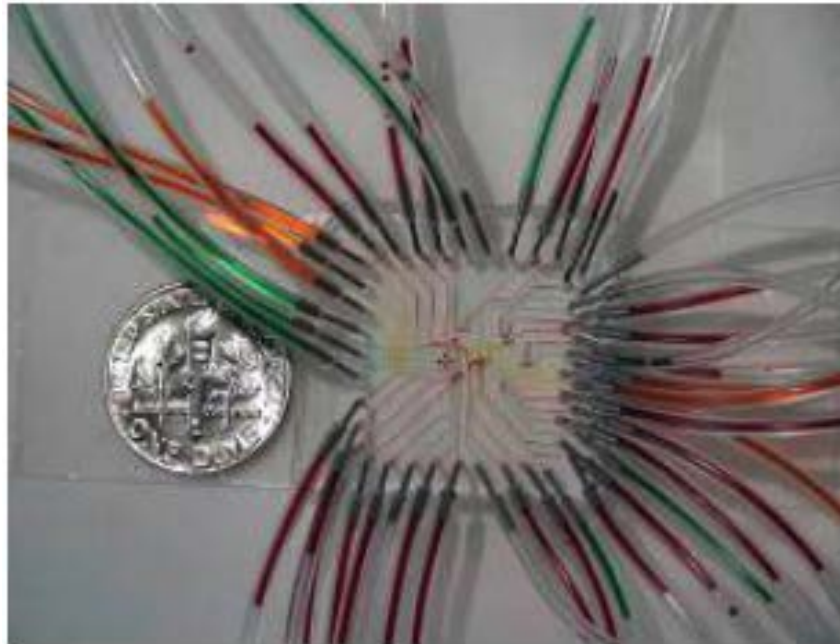
2.3. Lab-On-Chip (LOC) Sistemleri

Lab-onChip farklı işlevlere sahip birçok laboratuvar ve test cihazının özelliklerinin birkaç santimetrekarelik çiplerde toplanmasından meydana gelir. Bu çipler piko litre düzeyindeki çok küçük hacimli sıvılar üzerinde bile kullanılabilirler. LOC cihazları için MEMS sistemlerin alt kümesidir de denebilir. Mikroakışkan cihazlar yüksek verimli tarama imkânı sunmaktadır ayrıca düşük hacimli sarf malzemeleri ile çalışır. Mikro akışkanlar özellikle tıbbi, veterinerlik ve çevre bilimlerinde, analitik cihazların geri dönüş sürelerini ve maliyetlerini azaltma potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu etkin teknoloji tüketici ürünlerine sınırlı bir yayılma gözlemlenmiştir [82]. Bunun temel sebebi, mikro sıvı sistemlerindeki ilerlemeyi, standart ticari bileşenlerin az oluşunun engellenmesidir. Araştırmacılar genellikle valfler, pompalar, akış sensörleri, detektörler vb. sistemleri kısa vadede proje bazlı olarak geliştirmektedir. Ancak, bu bileşenler, iyi karakterize edilmiş, seri üretilmiş mantık kapıları gibi tasarımlar için yaygın olarak mevcut değildir. Sonuç olarak, bugüne kadar geliştirilen mikro akışkan (LOC) sistemlerin çoğu özel uygulamalar içindir ve yaygın olarak bulunmayan özel teknolojilerle üretilmektedir. Yine de sonuç olarak mikro-akışkan tasarımların, çip üzerinde laboratuvar konseptinin temelini oluşturan çoklu uygulamalara dönüştürülmesi hedeflenmektedir.



Şekil 2.7. Entegre silikon bazlı bileşenlere (mikro pompa, valfler, biyosensör) sahip bir polimer laboratuvar-çipinin şematik çizimi [83]

Şekil 2.7’de bir LOC bileşeninin şematik yapısı gösterilmektedir. Bu tür çip uygulamaları küçük hacimlerde sıvıların karıştırılması, kimyasal reaksiyonların yapılması, belirli moleküllerin saptanması vb. uygulamalar için sıvının çeşitli istasyonlar arasında taşındığı minyatür bir sistemi oluşturmaktadır. LOC sistemleriyle elde edilen bağlamalar, kompakt ve otonom bir ünite sadece bir çiple bile işlevselliğinin önemli ölçüde genişletilmesini sağlar [83].



Şekil 2.8. Birçok örnek sıvı girişi bulunan küçük boyutlu mikro sıvı çip örneği [84]

1990'lı yılların ortalarından beri, kapiller elektroforez, genetik uygulamalar, tıp, araştırma-geliştirme gibi birçok alandaki uygulamalar için LOC sistemleri kullanılmaktadır. Kapiler elektroforez (CE), milimetre çapındaki kılcal damarlarda, mikro ve nano sıvı kanallarda yapılan bir elektro kinetik ayırma yöntemidir. CE yöntemlerinde analitler, bir elektrik alanın etkisi altında elektrolit çözeltileri yoluyla hareket ederler. Analitler, iyonik hareketliliğe ve/veya kovalent olmayan etkileşimler vasıtasıyla ayrılabilir. Ek olarak, analitler, iletkenlik, pH' veya gradyanlar vasıtasıyla konsantre edilmiş olabilirler [85].

Uygulama alanlarına bağlı olarak LOC sistemleri birçok avantaj sağlamaktadırlar. Düşük hacimde sıvı tüketimi olması kaynaklı, pahalı ajanların ve tanı amaçlı kullanılan sıvıların kullanımı azalır, hızlı tepki süresi sebebiyle daha iyi proses kontrolü sağlanması, aynı anda birçok paralel uygulama yapabilme olanağı sağlanması, maliyeti ucuz, kompakt sistemler olmaları LOC sistemlerin sağladığı başlıca avantajlardandır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

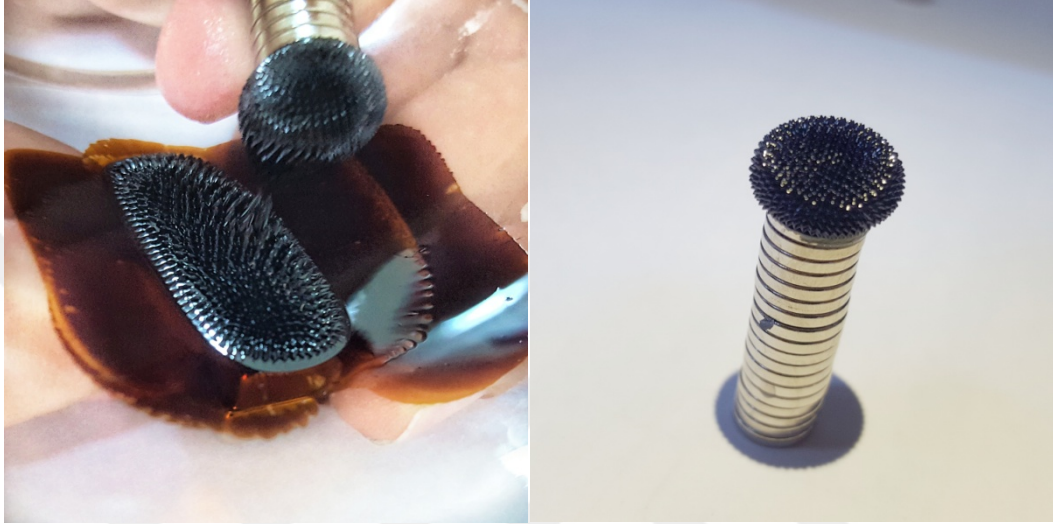
3.1. Materyal

Tez çalışmasında kullanılan cihazların ve materyallerin özellikleri, kullanım şekilleri bu başlık altında verilmiştir. Tasarlanan düzenekler, devreler ve sistemler açıklanmıştır. Öncelikle deneylerde ve tasarlanan düzeneklerde kullanılan manyetik sıvı (ferromanyetik sıvı, manyetik sıvı) ve bu sıvının özellikleri ile mıknatıslanma eğrileri sunulacaktır. Manyetik sıvıların mıknatıslanma özelliğinin yükseltilmesi için bu sıvının içerdiği magnetit (Fe_3O_4) parçacıklara ek olarak sanayi yöntemiyle hazırlanmış mikron boyutlu yapay magnetit parçacıklarıyla zenginleştirilmiştir. Manyetik sıvıların kullanıldığı mikro transformatörler ve sanayi transformatörleri ile hazırlanan deney modelleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında bu transformatörlerin giriş ve çıkış empedans karakteristikleri incelenmiştir. Laboratuvar deneylerinde laboratuvar koşullarında mevcut olan kaynak, ölçüm devreleri ve düzenekleri kullanılmıştır. Manyetik sıvıların farklı manyetik alanlarda (düzgün, düzgün olmayan, yüksek gradyanlı) davranışlarını incelemek için laboratuvarda bulunan ve özel olarak tasarlanmış çok amaçlı elektromanyetik sistem, Helmholtz bobinleri deney seti, özel olarak hazırlanmış farklı bobinler, AC/DC kaynaklar, bağlantı kabloları, ölçüm cihazları kullanılmıştır. Bu bölümde bu cihazların önemli karakteristik özellikleri verilmiştir. Farklı koşullarda manyetik sıvıların davranışlarını incelemek için çeşitli nüve yapısına sahip olan transformatörler hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için bu transformatörler onlar için baz oluşturan sanayi üretimi transformatörle kıyaslanmıştır. Manyetik sıvıların farklı sensör sistemlerinde ve bu sistemlerin ayrı kısımlarındaki davranışlarını modellemek için bu sıvıların mikro ve makro akışkanlar seviyesinde teorik ve deneysel incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla İnönü Üniversitesi BAP projesi desteğiyle mikro sıvı sistemler için Lab-on-Chip (LOC) sistemleri temin edilmiştir. Bu tür sistemlerden manyetik sıvıların davranışını incelemek için neodyum türü farklı boyutlara sahip sabit mıknatıslar kullanılmıştır. Manyetik sıvıların küçük boyutlu sensörlerin mikro kanallarındaki akışlarının özelliklerinden yararlanarak küçük boyutlu sensörlerin yapılmasına örnek olarak yüksek akım ölçüm sensörü tasarlanmıştır. Deneylerde küçük boyutlu elektromanyetik mıknatıslanma sistemi kullanılarak manyetik sıvıda non manyetik nesnelerin davranışı incelenmiştir. Bu basit deney setinde manyetik sıvı, non manyetik kürecikler ve sanayide kullanılan küçük boyutlu elektromanyetik nüveli elemanlar kullanılmıştır. Teorik yöntem olarak manyetik özellikleri göz önüne alınan hidrodinamik sistemlerin, diferansiyel durum denklemleri, parçacık fiziği, elektromanyetik alan teorisi model ve kavramları kullanılmıştır. Teorik formüllerin hesaplanmasında ve yapılan deneylerin sonuçlarının değerlendirilmesinde MATLAB Simulink programı kullanılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan bu düzenek, eleman ve sistemlerin kısa tanımları aşağıda verilmiştir.

3.1.1. DS-50 Ferromanyetik Sıvı

Kollodial bir karışım olan ve non-manyetik bir madde olan iso-parafin bazlı, içinde nanometre ölçülerinde magnetit parçalar bulunduran (Fe_3O_4) ferromanyetik sıvı olarak, Çin menşeli Sigma Inc. markasının DS-50 tip genel amaçlı ferromanyetik sıvısı tezin pratik çalışmalarında kullanılmıştır. Genel amaçlı kullanımlar için uygun olan DS-50 ferromanyetik sıvısı bir bütün olarak hareket eder. Şekil 3.1’de Sigma DS-50 ferromanyetik sıvı ve bu sıvının neodyum mıknatısla etkileşiminin görseli yer almaktadır.



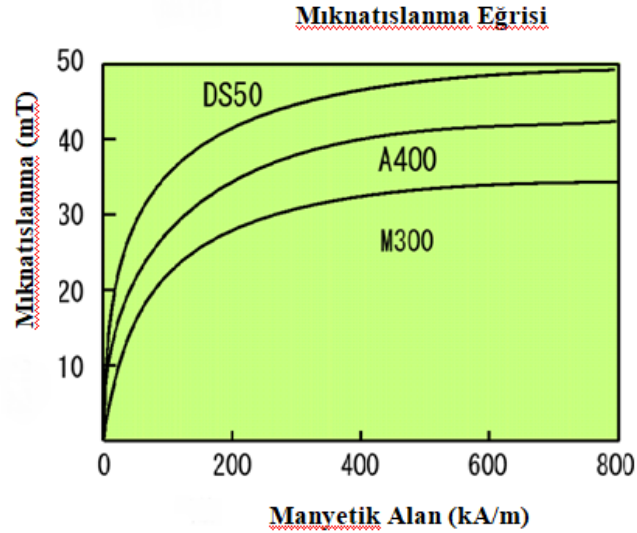
Şekil 3.1. Sigma Inc. DS-50 manyetik sıvının sabit neodyum mıknatıslarla etkileşimi

Şekilden görüldüğü gibi DS-50 manyetik sıvısı yeterince yüksek manyetik özelliklerine sahip olup, sabit mıknatıs etkisi altında kararlı bir mıknatıslanma göstermektedir. Kullanılan DS-50 manyetik sıvının teknik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Sigma DS-50 manyetik sıvının teknik özellikleri.

Sıvı Tipi	DS-50
LOT numarası	161005
Özgül Ağırlık (20C)	1.4
Viskosite (20C)	120 mPa.sec
Mıknatıslanma	1.2 mT

Şekil 3.2’de Sigma firması tarafından üretilen DS-50 manyetik sıvısının ve diğer genel amaçlı kullanılan manyetik sıvıların mıknatıslanma eğrileri gösterilmiştir.

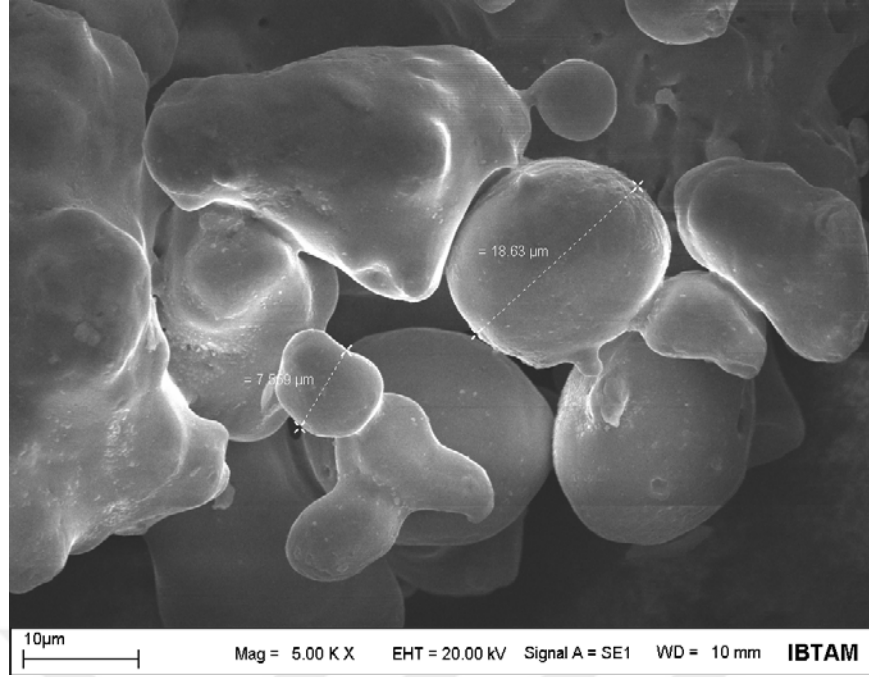


Şekil 3.2. Sigma marka diğer manyetik sıvılar ile DS-50 nin mıknatıslanma eğrileri [86]

Grafikten görüldüğü gibi, Sigma firması tarafından üretilen farklı manyetik sıvı türlerinden en iyi mıknatıslanma özelliğine sahip olan türü DS-50 tip manyetik sıvılardır. Tez çalışmasında yapılan deneylerde tasarlanan sensör, transformatör ve diğer düzeneklerde DS-50 tip manyetik sıvı kullanılmıştır. DS-50 tip ferromanyetik sıvının taşıyıcı bazının iso-parafin olmasından dolayı buharlaşma özelliğinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple uygulamalar yapılırken sıvının hava ile temasının minimumda tutulmasına ve deneylerin kapalı ortam koşullarında yapılmasına özen gösterilmiştir. Uygulamalar sırasında bazın cilde zarar vermemesi için koruyucu lateks eldivenler kullanılmış ve ortamın hijyenik tutulmasına dikkat edilmiştir. Manyetik sıvının sensör kanallarında veya transformatör nüvelerine yerleştirilmesi için 1 ml hazneli plastik şırıngalar kullanılmıştır.

3.1.2. Saf Demir Tozu

Sigma firması tarafından üretilmiş DS-50 manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğini arttırmak için bu sıvının içerisine belirli derişimlerde yapay olarak saf demir tozu ilave edilerek ya da tek başına kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Yapay saf demir tozu (magnetit) parçacıklarının boyutlarının standart DS-50 manyetik sıvının içerisindeki magnetit parçacıklarıyla kıyaslanabilir konumda olabilmesi için bu demir tozları endüstriyel ortamda öğütülerek mikron boyutlu parçacıklar haline getirilmiştir. Öğütülerek hazırlanmış demir tozlarının İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'ndeki (İBTAM) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Öğütülmüş saf demir tozunun elektron mikroskobu görüntüsü

Bu görüntülerden kullanılan demir tozlarının mikron boyutlu olup belirgin bir geometriye sahip oldukları açıkça görülmektedir. Tez çalışmalarındaki deneylerde saf demir tozu belirlenen farklı derişimlerle manyetik sıvı içerisine ilave edilerek homojen şekilde karışması sağlanmıştır. Elde edilen manyetik sıvı, daha fazla magnetit (Fe_3O_4) safhaya sahip olan bir sıvıya dönüştürülmüştür. Oluşturulan bu yeni manyetik sıvıların mıknatıslanma özelliklerinin artışı değerlendirilmek için aynı düzeneklerde saf demir tozları tek başına kullanılarak incelemeler yapılmıştır.

Şekil 3.4' te kullanılan saf demir tozunun neodyum mıknatısla etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Öğütülmüş saf demir tozunun neodyum mıknatısla etkileşimi

3.1.3. Yeni Transformatör Yapıları ve Tasarımları

Manyetik sıvıların elektromekanik sistemlerde esas manyetik eleman olan ferromanyetik nüvelerin yerine kullanılabilirliğini araştırmak için birkaç transformatör modeli tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu modellerden bazı transformatörlerin çekirdekleri (nüveleri) tümüyle manyetik sıvıdan oluşturulmuş, bu yapılarda farklı manyetik safha derişimine sahip olan ferromanyetik sıvılar kullanılmış ve sanayi üretimi transformatörlerde oluşan arızalar, nüvelerdeki mikro çatlaklar oluşması durumunda bu bölgelerde manyetik sıvıların ve demir tozlarının kullanılmasının transformatörlerin çıkış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda manyetik sıvı ile çalışan transformatörlerin çıkış karakteristiklerini incelemek için nüvede kullanılan malzeme türüne göre farklı yapılarda örnekler üretilmiştir. Pratik çalışmalar için örnek model olarak hazırlanan aşağıdaki transformatör yapıları hazırlanmış ve incelenmiştir.

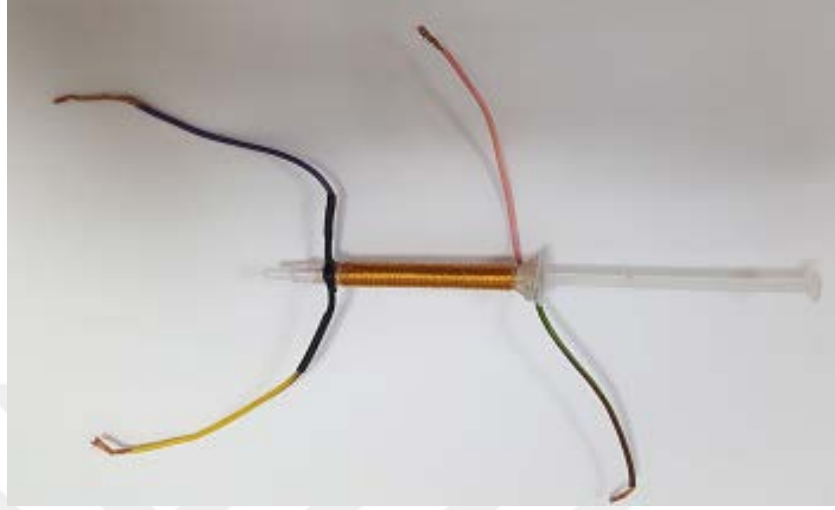
- Küçük boyutlu ince çekirdekli mikro transformatörün modeli.
- Nüve yan kollarında hava boşlukları oluşturulan manyetik sıvı doldurulan mantel tip tek fazlı transformatörün tasarımı.

Günümüzde mikro sistemlerde ve özellikle MEMS sistemlerinde yaygın olarak kullanılan mikro transformatörlerin nüvesinin manyetik sıvı çekirdekle değiştirilmesi durumunda bu tür mikro transformatörlerin karakteristiklerini incelemek için alçaltıcı tip mikro transformatör tasarımı yapılmıştır. Transformatörün gövdesi medikal amaçlı kullanılan 1 ml hazneli plastik şırıngadan oluşmaktadır. Transformatörün nüvesi, şırınganın iç hazne kısmıdır . Gövde olarak plastik şırınganın seçilmesinde, iç haznede manyetik sıvı miktarını ölçekli olarak ayarlayabilmek ve hava ile temasını engellemek gibi avantajlar sağlaması etkili olmuştur. Primer ve sekonder sargıların sarımı hem el ile hem de devri düşürülen şarjlı matkap yardımı ile tamamlanmıştır. Şekil 3.5’ te primer sarımın yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Primer sargının şarjlı matkap yardımıyla şırınga gövdesine sarımı

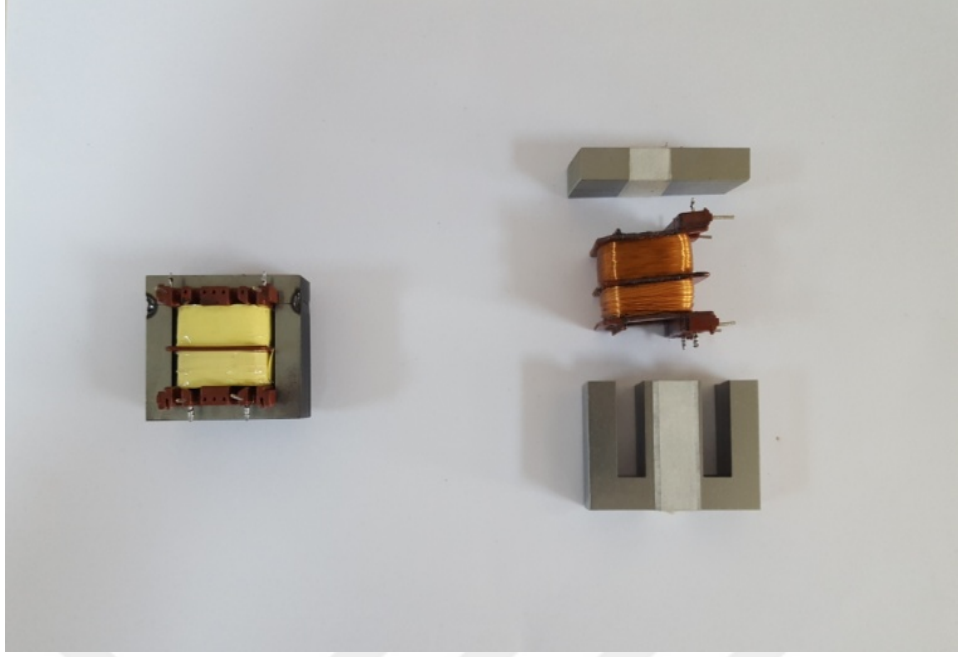
Primer sargı 0,3 mm kalınlığındaki bakır tel ile çoklu sarım yapılarak gerçekleştirilmiştir. Primer sargının toplam direnci 77,8 ohm 'dur. Sekonder sargı yalıtılan primer sargı üzerine uygulanmıştır. Sargı 0.7 mm çaplı bakır tel ile elde sarılmıştır. Sekonder sarımın toplam direnç değeri 0.6 ohm'dur. Tasarlanan mikro transformatörün görseli Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Tasarlanan alçaltıcı tip mikro transformatör

Sarımların giriş ve çıkış uçlarına çok damarlı yumuşak kablolar lehimlenerek transformatörün yapısı tamamlanmıştır. Mikro transformatör ile manyetik sıvı ve saf demir tozunun etkileşimine bağlı olarak gerçekleştirilen deney ölçümleri tamamlanmıştır. Bu mikro transformatörün hazne kısmının hacmi ayarlanıp, farklı magnetit parçacık derişimlerine sahip olan manyetik sıvıyla veya saf demir tozuyla doldurularak deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, 100 Hz- 1MHz arasında değışen farklı frekans değerlerinde tekrarlanmıştır. Şırınganın haznesi manyetik sıvı veya saf demir tozunun miktarının ayarlanmasında avantaj sağlamıştır.

Tasarlanan diğerk mantel tip tek fazlı transformatörde, gövdenin yan kollarında 0.50 mm ve 1.0 mm'lik hava boşlukları oluşturulmuştur. İki farklı deney modeli hazırlanmıştır. Bu boşluklara DS-50 tip ferromanyetik sıvı ve saf demir tozu doldurularak transformatörün açık devre deneyleri yapılmıştır. Referans transformatör olarak VDE 0570 / EN 61558 normuna göre üretilmiş (tedarikçi: Aslan Elektronik, Malatya, Türkiye) tek fazlı, 220/12 V, 5W elektriksel değerlerine sahip PCB tip standart endüstriyel transformatör kullanılmıştır. Aynı üretim partisine ait olan iki transformatörden birisi referans olarak diğeri ise üzerinde farklı yapısal değışimler yapılarak kullanılmıştır. Yapısal değışimleri yapılan transformatöre gövde kaynağı ve vernikleme işlemleri uygulanmayıp, parçalarına ayrılabilir formda tutulmuştur. Kullanılan transformatörler Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Kullanılan transformatörlerin gövdesini oluşturan silisyumlu saç plakaların kalınlığı 0.50 mm'dir.

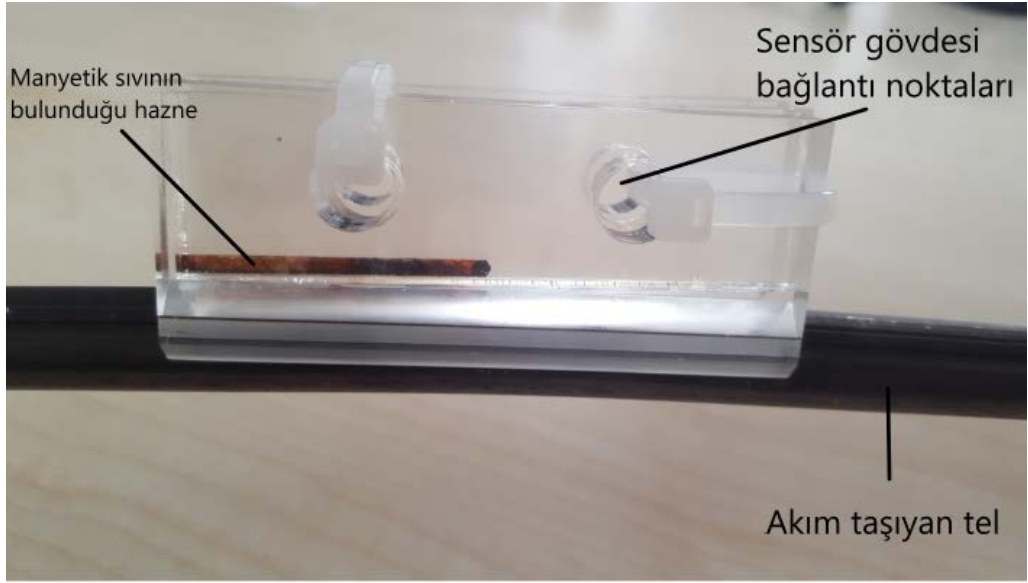


Şekil 3.7. Kullanıma hazır referans transformatör (solda), karkası ve sargısı ayrı, verniksiz transformatör (sağda)

Transformatörlerle deneyleri gerçekleştirirken uzun çalışma süreleri sonucu ısınan sargılar soğuk jel torbalarla soğutulup, referans değerlere indirilerek deneylere devam edilmiştir. Demonte transformatörün gövde kollarında açılan yarıklarda demir tozunu ve manyetik sıvının homojen yerleştirilmesi ve olabildiğince kayıpsız tutabilmesi için özen gösterilmiştir.

3.1.4. Yüksek Akım Ölçen Manyetik Sıvılı Sensörün Gövde Tasarımı

Manyetik sıvıların en yaygın olarak kullanıldığı alan sensör teknolojileridir. Günümüzde çeşitli amaçlar için kullanılan manyetik sıvılı farklı sensörler bulunmaktadır. Tez çalışmada yüksek akım düzeylerini ölçmek için manyetik sıvı sensör tasarımı amaçlanmıştır. Yüksek akımların oluşturduğu manyetik alanların seviyelerinin sınırlı düzeyde olması, bu seviyelerin temas bulunmadan manyetik sıvılar tarafından algılanması mümkündür. Tasarlanan manyetik sıvılı yüksek akım ölçen sensör içerisinden akım taşıyan tel geçen, non-manyetik malzemeden (şeffaf sert plastik) yapılmış ve içerisinde belli hacimde manyetik sıvı olan basit bir yapıya sahiptir. İletkenin geometrisine uygun olarak manyetik sıvı sensör dikdörtgen veya silindirik şekilde yapılabilir. Tasarlanan sensör gövdesinin akım taşıyan tel (katener hattı) üzerindeki duruşu Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Tasarlanan sensör gövdesi

Manyetik sıvılı sensör gövdesi tasarımı yapılırken akım taşıyıcı yüzeyin geometrisi göz önüne alınarak yapılmıştır. Montaj kolaylığı açısından sensör gövdesi üç adet parçadan meydana gelmektedir. Sensör gövdesinin yan görünüşü ve parçaların duruşu Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Tasarlanan sensör gövdesinin yandan görünüşü

Sensör kanalının farklı geometrilerde tasarlanması, çeşitli elektromekanik sistemlerdeki yüksek akım değerlerini kolaylıkla ölçmeye olanak sağlayacaktır. Tez çalışmasında özel olarak tasarlanan sensörün özellikle trambüs-trolleybüs gibi yüksek akımlı hava hatlarıyla çalışan toplu taşıma araçlarının havai hatlarında kullanılması hedeflenmiştir.

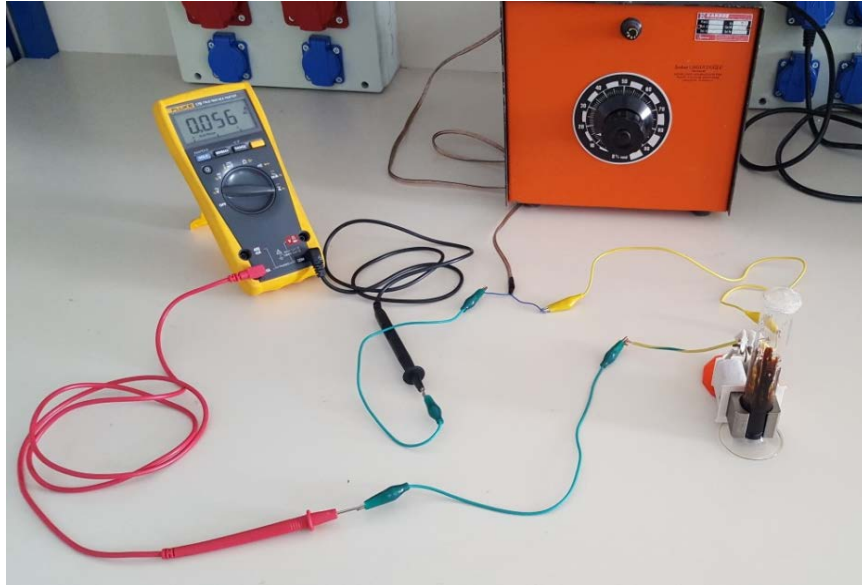
3.1.5. Manyetik Sıvıya Batırılmış Non-Manyetik Cisimlerin Askıda Kalma Olayının incelenmesi

Manyetik sıvının pratik uygulamalarında özellikle çeşitli sensörlerde bu sensörün farklı parçalarının birbirine göre temassız konumları oluşturulmalıdır. Bu kısımların uzunluk ve açısal yer değişimleri sensörün esas çalışma kısmını oluşturur. Buna göre, bu farklı kısımlar çoğu kez manyetik ve elektriksel özellikleri farklı malzemelerden yapılırlar. Buna göre belli bir geometriye sahip olan bu tür parçaların manyetik sıvının içerisindeki davranışlarını incelenmesi sensör uygulamaları bakımından çok önemlidir. Tez çalışmasında bu incelemeler teorik ve deneysel olarak yapılmıştır. Farklı sensör türlerinde kullanılabilen düzgün olmayan (non-homojen) manyetik alanlarda manyetik sıvılar ve onların içerisine batırılmış non-manyetik malzemelerin askıda kalma koşulları değerlendirilmiştir. Bunun için laboratuarda bulunan farklı düzgün olmayan alan çeşitleri uygulanmıştır. Bu alan çeşitleri aşağıda açıklanmıştır.

1. Zayıf güçlü küçük boyutlu radyal manyetik alan sistemi
2. Özel tasarımı çok amaçlı güçlü radyal manyetik alan sistemi
3. Helmholtz bobinleri manyetik alan sistemi

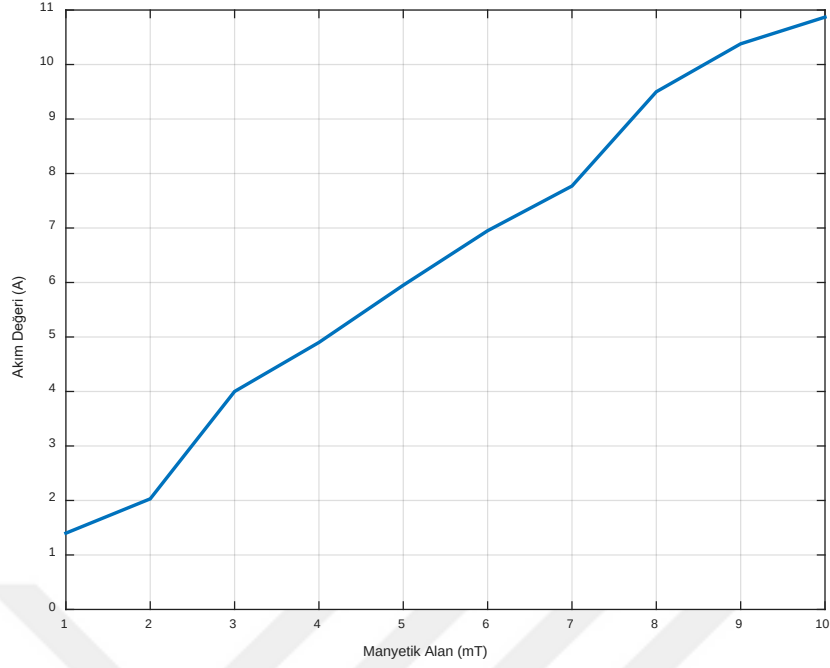
Şekil 3.10'da zayıf güçlü küçük boyutlu radyal manyetik alan sistemi ölçüm düzeneği gösterilmiştir.

Alan içine cam tüp içinde manyetik sıvı konularak sıvının hareketi gözlemlenmiştir. Ayrıca manyetik sıvı içine non-manyetik cam küre atılarak kürenin manyetik alan altında bulunan manyetik sıvı içindeki hareketi ve askıda kalma koşulları incelenmiştir.



Şekil 3.10. Radyal manyetik alan oluşturan transformatörde ölçüm deney düzeneği

Radyal manyetik alan üreten sistem sargı uçlarına ayarlı AC gerilim verilerek elde edilen manyetik alan eğrisi Grafik 3.1.' de gösterilmiştir.



Grafik 3.1. Akıma göre değişen radyal manyetik alan değerleri

Grafik 3.1.' de belirtilen bu değerler transformatörün manyetik alan kutuplarının orta noktasında, hava boşluğunda gaussmetre ile farklı düzeydeki manyetik alanlar ölçülmüş ve bu manyetik alanın sargıdaki akıma göre değişimi verilmiştir. Ölçümler radyal manyetik alan sisteminin merkezinde farklı yükseklik noktalarında yapılmış, ölçümlerde Lakeshore 410 gaussmetresi HT4511 ölçüm probu kullanılmıştır.

3.1.6. Çok Amaçlı Radyal Manyetik Alan Oluşturan elektromanyetik Alan Sistemi

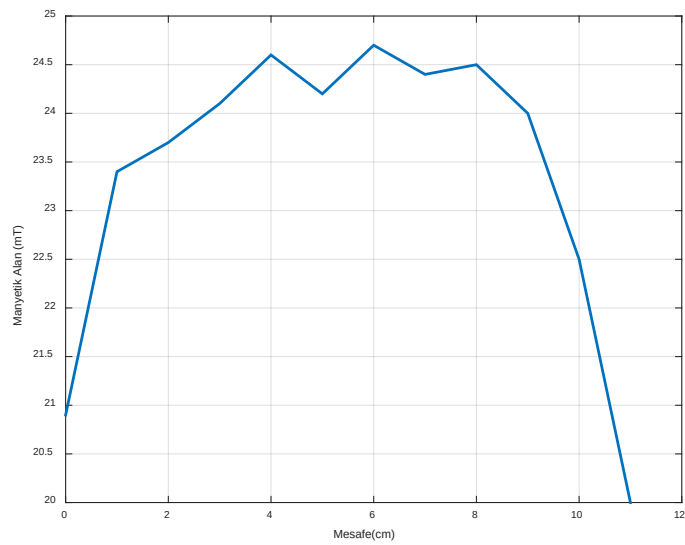
Pratik çalışmalarda hem AC hem DC olarak çalışabilen, radyal bir manyetik alan elde edilmesini sağlayan, voltaj ve akım kontrollü elektromanyetik alan sistemi kullanılmıştır.

Bu tür çalışmalarda kullanılması için özel olarak tasarlanan elektromanyetik alan sisteminde ölçümler manyetik alanın olduğu kutupların arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11' de kullanılan elektromanyetik alan sistemi düzeneğinde gaussmetre ile kutuplar arasında oluşan manyetik alan ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Radyal manyetik alan oluşturan elektromanyetik alan düzeneği

Radyal manyetik alan üreten sistem sargı uçlarına ayarlı AC gerilim verilerek elde edilen manyetik alan eğrisi Grafik 3.2' de gösterilmiştir.



Grafik 3.2. Radyal alan oluşturan düzeneğin manyetik alan grafiği

Düzenegin ölçüm aralığında y eksenine göre manyetik alan dağılımı grafikte gösterilmiştir.

3.1.7. Helm Holtz Bobinleri Elektromanyetik Sistemi

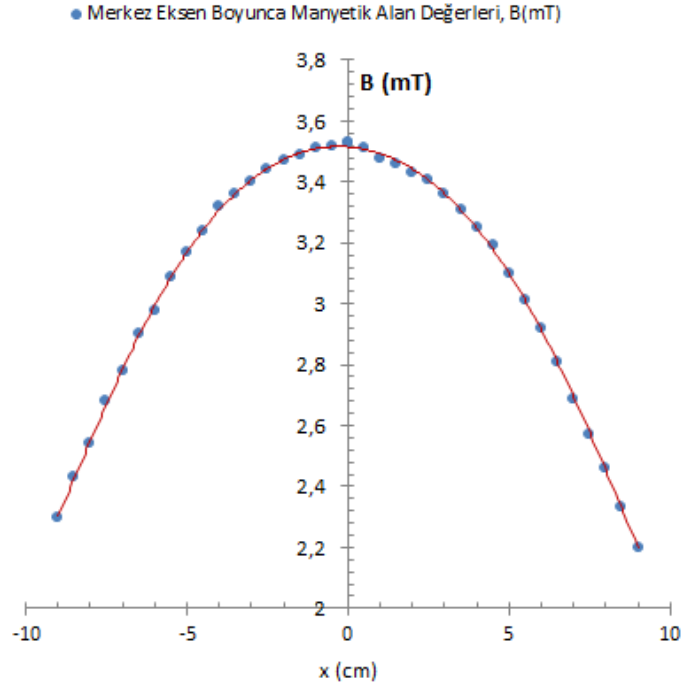
Yapılan deneysel çalışmalarda Rentech marka Helmholtz bobin elektromanyetik sistem seti kullanılmıştır. Düzenekte aksenal hareketler step motorlar aracılığıyla kontrol edilebilir yapıdadır. Deney seti akım kaynağı, Hall probu, prob tutucu, teslametre, kontrol ünitesi ve Helmholtz bobinlerini içermektedir. Şekil 3.12' de deney setinin görseli verilmiştir.



Şekil 3.12. Helmholtz bobin deney seti

Helmholtz bobin deneyi için elektriksel olarak seri bağlantılı iki özdeş bobin aynı merkez eksen (simetri eksen) üzerinde birbirlerine paralel konumlandırılarak bir ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzenekte, bobin düzlemleri birbirine paralel olup, bobin düzlemleri arasındaki mesafe bobin yarıçapına (R) eşittir. İki bobin, simetri eksen üzerinde aralarında bir bobin yarıçapı (R) mesafesi kadar bir uzaklıkta konumlandırılarak, bobin düzlemleri arasında kalan büyük bir hacim içinde düzgün (uniform) manyetik alan oluşturulmuştur. Helmholtz bobinlere uygulanan sabit $I=2A$ (DC) akımı altında, Gaussmetre tarafından merkez eksen üzerinde iki bobinin orta noktasından ($x=x_0$) başlanarak $-9cm < x < +9cm$ boyunca “-x” ve “+x” yönlerinde manyetik alan değerleri alınmıştır. Alınan bu manyetik alan değerlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda Grafik 3.3’ te verilmiştir.

Merkez Eksen (x) Boyunca Ölçülen Manyetik Alan Değerleri



Grafik 3.3. Manyetik Alanın Merkez Eksen Üzerinde Mesafeye Göre Değişimi

Grafik 3.3' ten görüldüğü gibi manyetik alan yoğunluğunu değişimi kapalı şekilde simetrik parabol vermektedir. Helmholtz bobin deney seti farklı özellikler göstermektedir. Deneylerde kullanılan Rentech markalı Helmholtz deney setinin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Rentech marka Helmholtz deney seti teknik özellikleri [87]

TEKNİK ÖZELLİKLER	
Helmholtz Bobinleri İç çapı 190mm, dış çapı 230mm 190 sarımlı Tel kalınlığı 1,2 mm	Step motor kontrol ünitesi, LCD göstergeli LCD üzerinde z veya eksenindeki prop pozisyonunu gösterir.
Akım Kaynağı 0-5A, DC Ayarlanabilir Hassasiyet: 10mA 4 dijital led göstergeli Kısa Devre korumalı	Multimetre 3,5 dijital gösterge, 0-200V kademeli 0-10A kademeli 0-20MW Kademeli
Teslametre 0-2 T ölçüm aralığı 4,5 LCD Gösterge Statik dinamik (10-200Hz) manyetik alan ölçebilme	
Step Motor Sürücüsü X eksen motorlu, Y-Z eksen - manuel	

3.1.8. Lab-on-Chip (LOC) Sistemler

Tez çalışmasında MEMS ve mikro sistemlerde manyetik sıvıların LOC düzeneklerindeki davranışları incelenmiştir. Bu deneylerin yapılması için tipte birçok kanala sahip LOC çipleri kullanılmıştır. Manyetik sıvıların MEMS ve mikro sistemlerdeki davranışlarını inceleyebilmek için lab-on chip düzenekleri satın alınmıştır. LOC çipleri farklı tipte birçok kanal içermektedir. Tüm LOC ürünleri Almanya menşeli Microfluidic Chip-Shop firmasından temin edilmiştir. Alınan malzemeler bir polimer türevi olan PPMA materyalinden imal edilmiştir. Şekil 3.13’ te çip standı üzerinde konumlandırılmış farklı yapıda kanallara sahip dört tip LOC çipi gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Çip standı üzerindeki farklı kanallı LOC çipleri

LOC çipleri bağlantı noktaları aparatları, hazneler, ince kapiller borular, tutucu makaslar, şırıngalar, eldivenler ile birlikte kullanılmaktadır. Şekil 3.14’ te çiplerle birlikte kullanılan aksesuarlar gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Lab-on-Chip (LOC) aksesuarları

Her ne kadar manyetik sıvılar yeterince incelenmiş olsalar da, bu tür problemlerin çözümü için tam teşekkül bir teori bulunmamaktadır. Matematiksel yöntem olarak tez çalışmasında manyetik sıvı hidro mekaniği kavramları dikkate alınarak bu sıvıların mikro kanallardaki hareketleri değerlendirilmiştir. Kullanılan sistemlerin bulunduğu düzgün olmayan manyetik alanların özellikleri dikkate alınarak manyetik sıvıya etkiyen kuvvetler için yeni formüller türetilmiş ve bu alanlarda manyetik sıvının davranışları değerlendirilmiştir.

3.1.9. Matlab Programı ve Kullanım Alanları

MATLAB teknik bir programlama dilidir, arka planında çok ciddi bir akademik çalışma bulunmaktadır [88]. MATLAB, Matrix Laboratory kelimelerinin ilk üç harfi alınarak oluşturulmuş bir kelimedir. MATLAB; özellikle mühendislik bilimlerinde çokça kullanılan bir dildir. Kullanım alanlarından bazıları: kontrol sistemleri, güç sistemleri, filtre tasarımı, genetik algoritma, grafik, veritabanı, finans, bulanık kontrol, sinir ağları, optimizasyon, görüntü işleme, istatistik olup; birçok alanda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. MATLAB içerisindeki mevcut veritabanı sayesinde kısa yazılımlarla matris tabanlı matematiksel işlemleri hızla işleyebilen grafik özelliği yüksek, kullanıcı etkileşimli bir yazılımdır. MATLAB, geleneksel programlama dillerinin aksine programı derleyip (compile); çalıştırabilir bir dosya (exe) haline getirmeden, yorumlayarak (interpret) çalıştırır. Böylece programın hatalardan arındırılması sürecinde ciddi bir zaman tasarrufu da sağlanmış olur [88] .

3.2. Ölçüm Yöntemi ve Kullanılan Cihazlar

Bu tezin pratik çalışmalarında tasarlanan transformatörlerin giriş ve çıkış karakteristiklerini belirleyebilmek için laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçme yöntemi kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerin doğruluğu için kullanılan cihazların standardizasyon ve kalibrasyonlarına dikkat edilmiştir.

3.2.1. GFG 8216A Analog Sinyal Jeneratörü

AC sinyal üretmek için kullanılan cihaz GW Instek firmasına ait GFG 8216A model cihazıdır. Cihazın frekans sahası 0.5Hz ~ 5MHz aralığındadır. Cihaz Sinüs, Üçgen, Kare, Rampa, TTL ve CMOS dalga çıkışlarını sağlayabilmektedir. İstenilen dalga şekli seçilerek ayarlanabilir frekans aralığından ayarlı DC ofset kontrolü ile sinyal çıkışı sağlanabilmektedir. Tasarlanan mikro transformatörün sargılarına sinüs dalga uygulanmıştır. Şekil 3.15' te GFG 8216A analog sinyal jeneratörü cihazının görünümü verilmiştir.



Şekil 3.15. GW Instek, GFG 8216A Sinyal Jeneratörü

Deneylerde aktif olarak kullanılan sinyal jeneratörüne ait teknik veriler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. GW Instek GFG 8516A analog sinyal jeneratörü teknik verileri.

TEMEL FONKSİYON	Frekans Sahası	0.3Hz ~ 3MHz (7 kademe)
	Genlik	>10Vpp (@ 50Ω)
	Empedans	50Ω ±10%
	Zayıflatıcı	-20dB ±1dBx2
	DC Offset	<-5V ~ >5V (@ 50Ω)
	Duty Kontrol	1MHz'e ayarlı 80% : 20% : 80%
	Ekran	6 haneli LED ekran (GFG-8015A modelinde ekran yoktur)
SİNÜSDALGA	Distorsiyon	≤ 1%, 0.5Hz ~ 100kHz; THD ≤ -30dB
	Düzensizlik	≤ 0.3dB, ≤ 500kHz ; ≤ 1dB, < 5mHz
ÜÇGEN DALGA	Dogrusallık	≥98%, 0.5Hz ~ 100kHz; 95%, 100kHz ~ 5MHz
KARE DALGA	Simetri	±2%, 0.5Hz ~ 100kHz
	Yükselme/Düşme Zamani	≤50nS (en fazla çıkışta & @ 50Ω)
CMOS ÇIKIS	Seviye	4Vpp±1Vpp ~ 14.5Vpp±0.5pp ayarlanabilir
	Yükselme/Düşme Zamani	≤120n

3.2.2. ADS1022B Osiloskop

Pratik çalışmalarda gerilim ve frekans ölçümlerinde kullanılan osiloskop AA-TECH markasının ADS1022B modelidir. Şekil 3.16’ da ADS1022B model osiloskobun görseli yer almaktadır.



Şekil 3.16. AA-TECH marka ADS1022B model osiloskop

Çizelge 3.4’ te AA-Tech marka osiloskobun teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. AA-TECH ADS1022B osiloskop teknik verileri

· 225 MHz Bant Genişliği
· K Kanal Başına 32 K Kayıt Uzunluğu
· 5500MSa/s Gerçek Zamanlı Örnekleme Hızı
· 110GSa/s Periyodik Sinyaller için Örnekleme Hızı
· 5 5 adet Tetikleme Seçeneği (Edge,Pulse,Video,Slope,Alternative)
· DDijital Filtre ve Data Kaydedici Özelliği
· SSCPI Programlama Komut Kontrol Desteği
· RRenkli 7” TFT LCD Ekran
112 Dil Seçeneği, Online Yardım, Tek Tuş Hafıza, Tek Tuş Yazdırma
UUSB Host,USB Device, RS-232, Pass/Fail Out Bağlantısı

3.2.3. Ayarlı AC Güç Kaynağı (Varyak)

Transformatörlerin primer ve sekonder sargıları tarafından çekilen akımın ve çıkış ucunda indüklenen gerilimin net bir şekilde ölçülüp kontrol edilebilmesi için sargılara uygulanacak gerilimin kademeli ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için pratik çalışmalarda 50 Hz şebeke frekansında 0-280 V çıkış gerilim skalasına sahip varyak kullanılmıştır. Kullanılan varyağın görseli Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Ayarlanabilir güç kaynağı

Laboratuar ortamında günlerce süren deneylerde transformatörlerin esas parametreleri (gerilim, akım) sürekli olarak ölçülmüştür. Ölçümler sırasında transformatörlerin ısınma durumları da sürekli kontrol edilmiştir. Sargılardaki sıcaklıkta ciddi artışlar yaşandığında deneyler durdurulmuş ve sonraki ölçümlerde giriş gerilimi bu gerilim değeriyle sınırlandırılmıştır.

Transformatör nüvesi boşken veya mantel tip transformatörde manyetik sıvılı deneyler yapılırken hafif ısınmalar oluşmuştur. Nüvenin manyetik direncinin düşük olduğu durumlarda ya da manyetik sıvıya ekstra saf demir tozu (Fe_3O_4) eklendiği durumlarda sıcaklığın artmasının temel sebebi, Fe_3O_4 parçacıklarının AC elektrik alanı altında titreşiminin daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Meydana gelen ısınmaların deney sonuçlarına etki etmemesi için deneyler durdurulmuş ve ısınan sargılar soğuk jel torbalarla soğutulduktan sonra ölçümlere devam edilmiştir.

3.2.4. Lakeshore 410 Gaussmetre

Lakeshore markasının 410 model nolu gaussmetresi HT4511 model Hall probuyla birlikte tezin pratik çalışmalarında manyetik alan ölçümlerini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Kullanılan cihazın görseli Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Lakeshore 410 gaussmetre

Kullanılan gaussmetre değeri 0.01 mT ‘den 2 T’ye kadar olan manyetik alan ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir. Manyetik alan değerleri Gauss ya da Tesla birimli olarak, AC ve DC seçilerek gerçekleştirilebilmektedir.

3.2.5. Neodyum Mıknatıslar

Tezin çalışmalarında manyetik sıvıyı hareket ettirmek, sabitlemek veya mıknatıslamak için sabit neodyum mıknatıslar kullanılmıştır. Çeşitli boyutlarda kullanılan farklı geometrilere sahip mıknatısların görseli Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Kullanılan farklı boyut ve geometriye sahip neodyum mıknatıslar

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında manyetik sıvı çekirdeklerinden oluşan bazı transformatör tasarım modellerinin ve manyetik sıvılı çalışan sensörlerin tasarım ve teorisinin geliştirilmesi yapılmıştır. Esas çalışma organı olarak manyetik sıvıların fiziksel, elektrik, manyetik ve hidrodinamik özellikleri dikkate alınarak, tasarlanan modellerin çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda esasen aşağıdaki problemlerin çözümü ele alınmıştır.

1. Küçük boyutlu ince çekirdekli mikro transformatör modelinin tasarımı ve incelenmesi.
2. Nüve yan kollarında açılan hava boşluklarına manyetik sıvı doldurulan mantel tip tek fazlı transformatörün incelenmesi.
3. Manyetik sıvı bazlı çalışan bazı sensörlerin teorisinin geliştirilmesi.

4.1. Küçük Boyutlu İnce Çekirdekli Mikro Transformatör Modelinin İncelenmesi

Tasarlanan mikro transformatöre (Şekil 3.6) sinyal jeneratörü bağlanarak primer sargısına farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanmıştır. Uygulanan farklı frekansların çıkış gerilimi üzerindeki etkisi açık devre ölçümleriyle gözlemlenmiştir. Önce mikro transformatör nüvesine 1 ml'lik manyetik sıvı konularak ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları Çizelge 4.1' de ve Grafik 4.1'de verilmiştir. Deneylerde transformatörün primer sargısına uygulanan gerilimin frekansı geniş bir aralıkta (0,1-...-1kHz) değiştirilmiştir. Çizelge 4.1 ve Grafik 4.1' den görüldüğü gibi manyetik sıvının eklenmesiyle transformatörün çıkış karakteristikleri yükselmeye başlamıştır. Başka bir deyişle non-manyetik bir çekirdeğe manyetik özellikli sıvıların eklenmesiyle çekirdeğin manyetik karakteristikleri ve sonuç olarak da transformatörün çalışma karakteristikleri iyi yönde değişmektedir. Fakat çizelgeden görüldüğü gibi bu değerler silisyum alaşımlı saçlardan oluşturulmuş veya ferrit çekirdekli transformatörlerdeki karakteristiklerden daha zayıftır. Buna göre manyetik sıvı çekirdeklerin mıknatıslanma veya manyetik özelliklerini iyileştirmek gerekmektedir. Genelde bu iki yöntemle elde edilebilir:

- a) Yüksek doyma mıknatıslanmasına sahip olan yeni manyetik sıvı türlerini kullanılması.
- b) Var olan mevcut manyetik sıvının manyetik özelliklerinin iyileştirilmesi.

Birinci yöntemin kullanılması günümüzde sınırlı bir düzeye sahiptir ve en iyi manyetik sıvıların doyma mıknatıslanması ancak 100-140 kA/m civarlarına ulaşabilmektedir [6], [7]. Bu değerlerin yükseltilmesi hem fiziksel, kimyasal hem de teknolojik bakımdan şuanda zor görünmektedir. Dahası yapılabilecek iyileştirmeler mali bakımdan da manyetik sıvının fiyatının artmasına neden olmaktadır. Buna göre bu yöntem yalnız ileride daha düşük maliyetli yüksek kaliteli yüksek manyetik özellikli manyetik sıvıların oluşturulmasıyla giderilecektir. Pratik bakımdan daha uygulanabilir olan yöntem ise ikincisidir. Çünkü sanayi ortamında veya teknoloji üretiminde ince boyutlu magnetit (Fe_3O_4) parçacıkların oluşturulması kolay, maliyeti

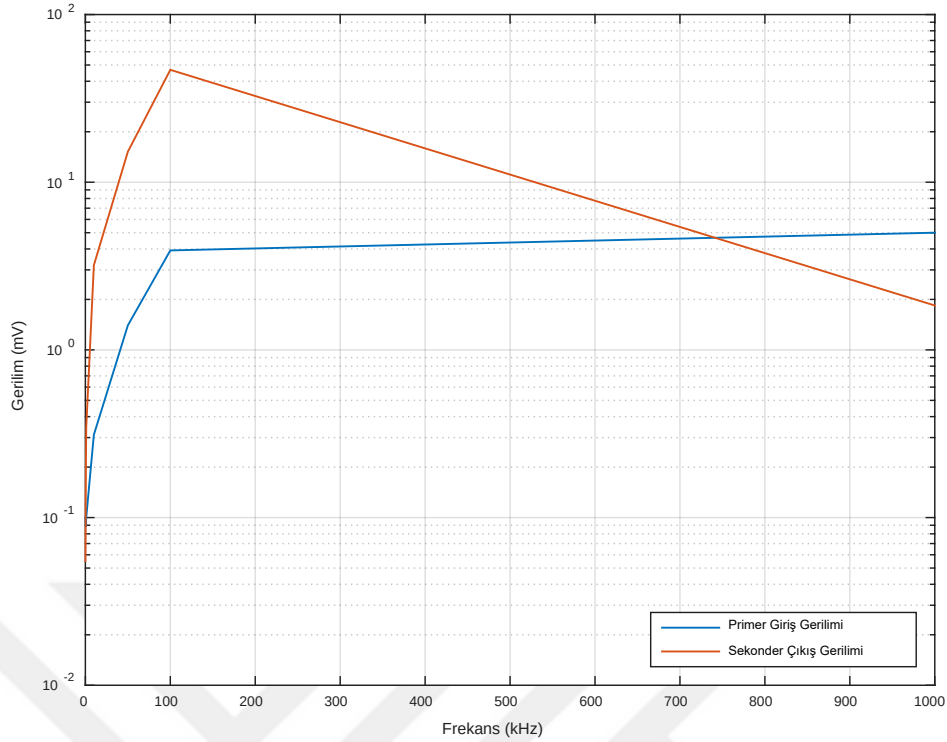
ise düşüktür. Buna göre bu tozların belli bir konsantrasyonda manyetik sıvıya eklenmesi sıvının doyma mıknatıslanmasının belli bir düzeyde artışına neden olur. Bu yaklaşımın en büyük avantajı ise manyetik sıvıların histerezisinde kalıcı mıknatıslanmanın olmamasıdır. Dezavantajıysa manyetik safha konsantrasyonunun artması ile yüksek frekanslarda manyetik sıvıdaki enerji kayıplarının artmasıdır. Yüksek güçlü, düşük frekanslı güç transformatörlerinde bu etki önemsiz düzeyde olabilir. Fakat zayıf güçlü transformatörlerde bu artışın transformatörün çıkış karakteristiklerine etkisi ayrıca incelenmeli ve değerlendirilmelidir. Zira zayıf güçlü, yüksek frekanslı transformatörlerde bu kayıplar ciddi boyutlara ulaşabilir. Dolayısıyla tasarlanan mikro transformatörün manyetik nüvesini oluşturan manyetik sıvıya belli orantılarla magnetit (Fe_3O_4) tozlarının eklenmesiyle karakteristiklerinin değişiminin incelenmesi hem pratik hem de teorik bakımdan önemlidir. Bu amaçla mikro transformatörün nüvesine kademeli şekilde saf demir tozu eklenerek transformatör karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca farklı miktarda manyetik sıvı miktarı bulunan eğimli pozisyonlar için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 4.1-12’de gösterilmiştir.

Yükseltici olarak çalıştırılan mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı eklenerek primer sargısına farklı frekanslarda sinyal bağlanarak elde edilen primer ve sekonder sargı gerilim değerleri Çizelge 4.1 ’de derlenmiştir.

Çizelge 4.1. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.100	0.055
0.500	0.088	0.168
1	0.100	0.344
10	0.312	3.20
50	1.40	15.20
100	3.92	46.80
1000	5	1.84

Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi uygulanan frekans değerleri arttıkça indüklenen çıkış gerilimi 50-100 kHz frekans değerlerinde maksimuma ulaşarak daha kararlı bir değişim göstermektedir. 1 MHz frekans değerinde çıkış gerilimin aşırı düşmesinin esas nedeni, manyetik sıvı içindeki demir tozu parçacıklarının (Fe_3O_4) yüksek frekanslarda artan titreşimi sonucu manyetik kayıpların artmasıdır [89]. Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.1’ de verilmiştir.



Grafik 4.1. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı varken ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

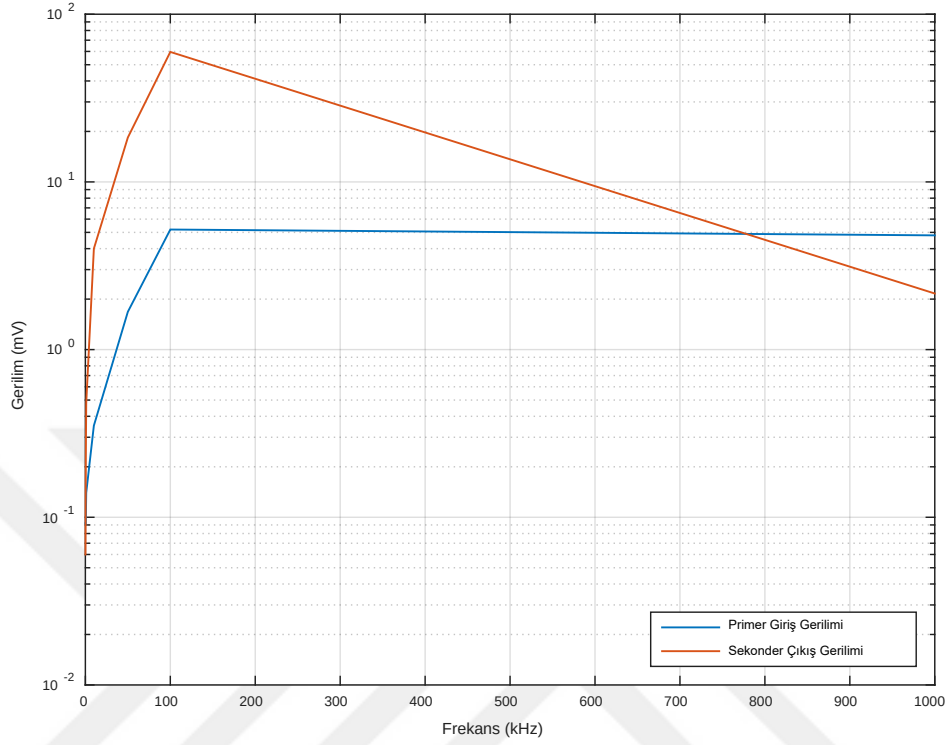
Transformatörün çekirdeğinde bulunan manyetik sıvıya demir tozlarının eklenmesi aşağıdaki kademelerle oluşturulmuştur. Mikro transformatörün nüvesindeki 1 ml ferromanyetik sıvıya 0.1 ml hacimli demir tozu katkısı yapıp homojen olarak karıştırılarak tekrarlanmıştır. Uygulanan sinyalin frekans değişimine göre elde edilen giriş ve çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.2’de derlenmiştir.

Çizelge 4.2. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,1 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.092	0.060
0.500	0.092	0.216
1	0.140	0.480
10	0.352	4
50	1.68	18.40
100	5.20	59.60
1000	4.80	2.16

Ölçüm sonuçlarından görüldüğü üzere çıkış gerilim değerleri nüvedeki demir tozu parçacıklarının (Fe_3O_4) artmasıyla birlikte yükselmeye başlamıştır.

Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.2’ de verilmiştir. Grafik 4.1 ve 4.2’den görüldüğü gibi, manyetik sıvının mıknatıslanma özelliği arttıkça gerilimlerin pik değerleri gözle görülür şekilde artmıştır.



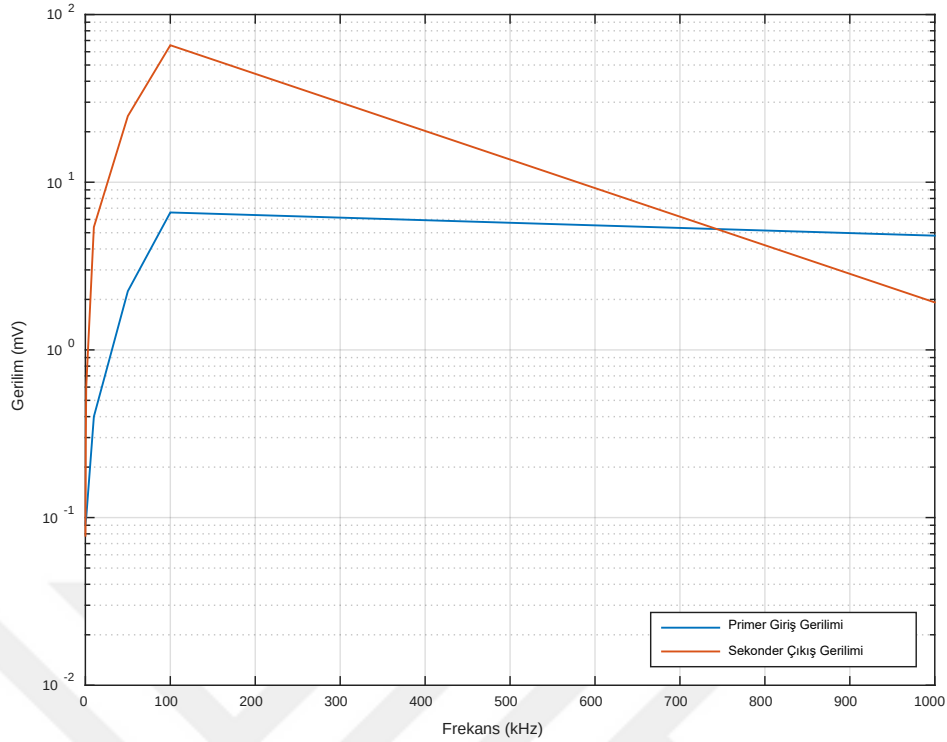
Grafik 4.2. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,1 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

Daha sonra ölçümler nüvedeki 1 ml ferromanyetik sıvıya 0.2 ml hacimli demir tozu katkısı yapılarak homojen olarak karıştırılarak tekrarlanmıştır. Frekans değişimine göre elde edilen giriş ve çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.3’te derlenmiştir.

Çizelge 4.3. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,2 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.092	0.078
0.500	0.096	0.280
1	0.100	0.600
10	0.400	5.40
50	2.24	24.80
100	6.60	65.60
1000	4.80	1.92

Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.3’ te verilmiştir.



Grafik 4.3. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,2 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

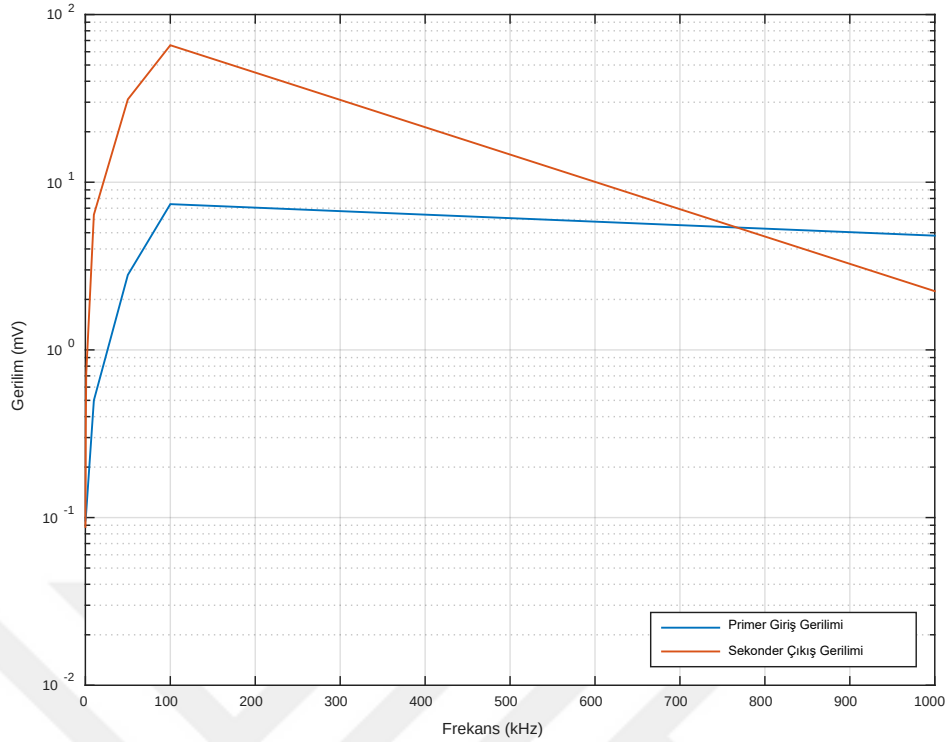
0,1ml hacimli saf demir tozunun eklenerek gerçekleştirilen ölçüm eğrileri (Grafik 4.2.) ile yukarıdaki grafik kıyaslandığında, nüvedeki mıknatıslanan magnetit parçacık konsantrasyonunun artışı ile birlikte çıkış gerilim karakteristiğinde de gözle görülür bir artış gerçekleşmiştir.

Ölçüm nüvedeki 1 ml ferromanyetik sıvıya 0.3 ml hacimli demir tozu katkısı yapıp homojen olarak karıştırılarak tekrarlanmıştır. Frekans değişimine göre elde edilen giriş ve çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.4'te derlenmiştir.

Çizelge 4.4. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,3 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.096	0.088
0.500	0.100	0.344
1	0.108	0.720
10	0.500	6.40
50	2.80	31.20
100	7.40	65.60
1000	4.80	2.24

Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.4' te verilmiştir.



Grafik 4.4. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,3 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

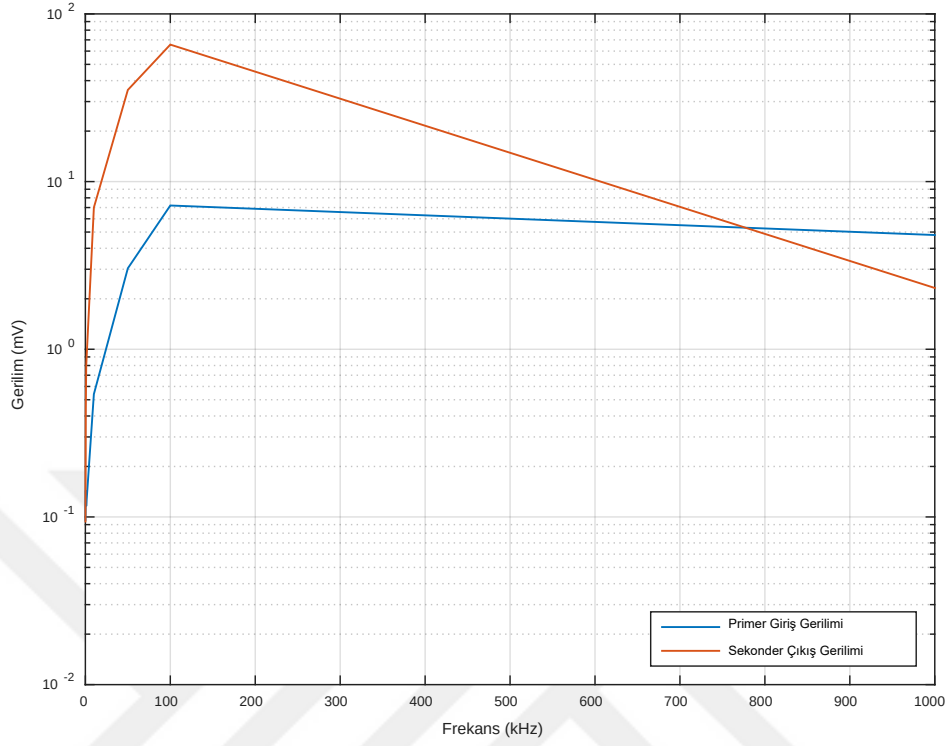
Grafik 4.4' te görüldüğü gibi çıkış gerilim eğrisi bir Grafik4.3 ile yakın benzerlik göstermekte olup, ilk durumun gösterildiği Grafik 4.2'ye göre artış göstermektedir. Bunun sebebi, nüvedeki manyetik sıvının magnetit (Fe_3O_4) parçacıklarına doymaya başlaması sonucu çıkış karakteristiğinde de bir doyuma ulaşılmasıdır.

Ölçüm nüvedeki 1 ml ferromanyetik sıvıya 0.4 ml hacimli demir tozu katkısı yapıp homojen olarak karıştırılarak tekrarlanmıştır. Frekans değişimine göre elde edilen giriş ve çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.5' te derlenmiştir.

Çizelge 4.5. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,4 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.096	0.094
0.500	0.144	0.440
1	0.116	0.800
10	0.540	7.00
50	3.04	35.20
100	7.20	65.60
1000	4.80	2.32

Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.5’ te verilmiştir.



Grafik 4.5. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,4 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

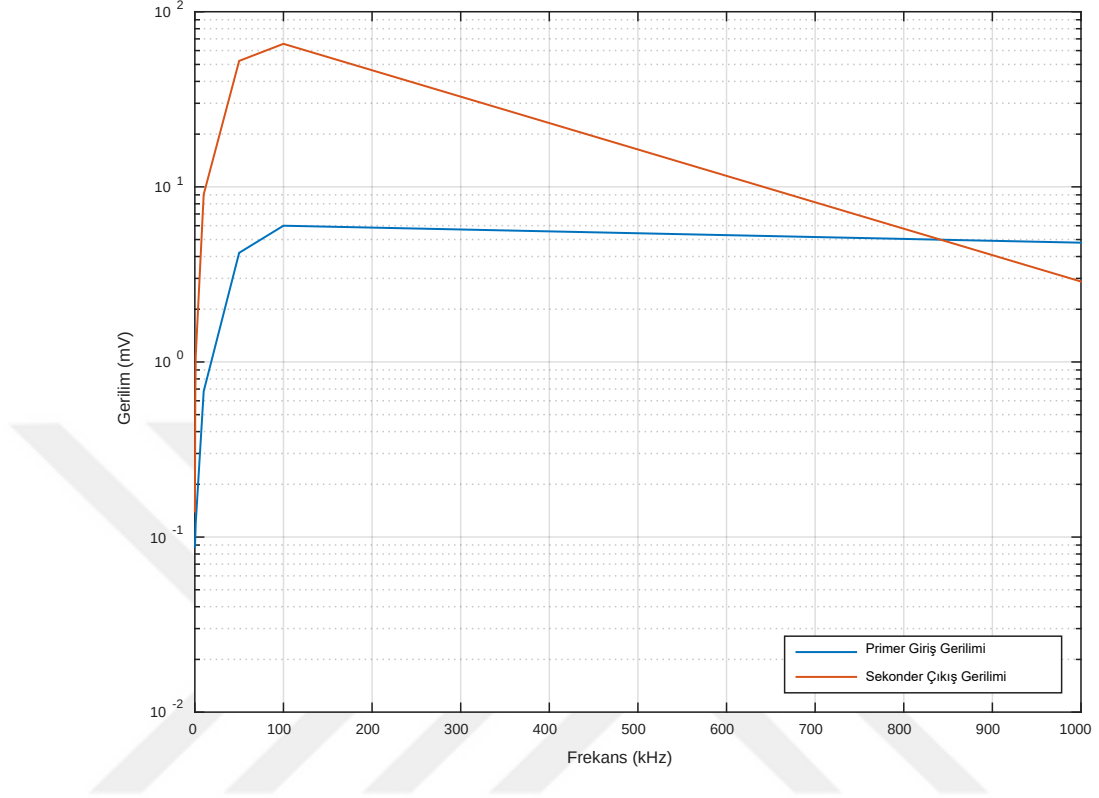
Grafik 4.5'ten anlaşıldığı üzere nüvenin magnetit parçacıklarına bir önceki ölçümden görüldüğü üzere (Grafik4.1.4) doyuma ulaşmasından dolayı gözle görülür bir artış gözlemlenmemektedir.

Ölçüm nüvedeki 1 ml ferromanyetik sıvıya 0.5 ml hacimli demir tozu katkısı yapıp homojen olarak karıştırılarak tekrarlanmıştır. Frekans değişimine göre elde edilen giriş ve çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.6'da derlenmiştir.

Çizelge 4.6. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvı içerisine 0,5 ml hacimli demir tozu eklenerek gerçekleştirilen deney sonuçları

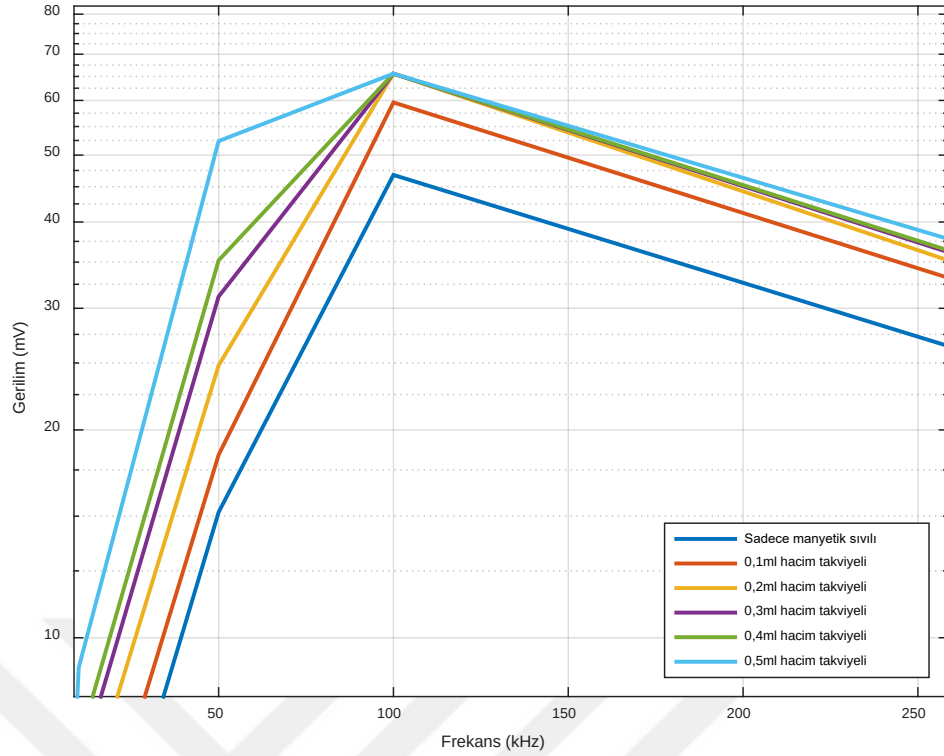
Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
0.100	0.088	0.140
0.500	0.100	0.600
1	0.120	1.08
10	0.680	9.06
50	4.20	52.40
100	6.00	65.60
1000	4.80	2.88

Gerçekleştirilen deney sonuçlarının frekans-gerilim karakteristiği Grafik 4.6’ da verilmiştir. Mikro transformatör nüvesine ilave edilen magnetitlerin belirli bir miktardan sonra çıkış karakteristiği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı Grafik 4.6’dan açıkça görülmektedir.



Grafik 4.6. Mikro transformatör nüvesine 1 ml manyetik sıvıya 0,5 ml hacimli saf demir tozu karıştırılarak ölçülen primer-sekonder gerilim eğrileri

Fakat bütün bu deneylerde manyetik sıvının ferromanyetik safhasının artırılmasıyla transformatörün çıkış karakteristiğinin iyileşmesine karşın, bu değişimin azalmasına karşılık gelen frekans ($\sim f = 100\text{kHz}$) değişmemektedir. Manyetik safhanın türünün değişimi ile (Fe^{2+} , Ni, Co) bu kritik frekans değerlerinin de değişeceği muhtemeldir. Mikro transformatör manyetik sıvı nüvesine kademeli olarak ilave edilen saf demir tozu, nüve hacminin yaklaşık olarak yarısına ulaştıktan sonra nüvedeki manyetik sıvının doyuma ulaşmaya başladığı ve transformatör çıkış karakteristiklerini stabilize etmeye başladığı görülmektedir. uygulanan her ilavenin mikro transformatörün çıkış karakteristiği üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için Grafik 4.7 aşağıda verilmiştir.



Grafik 4.7. Mikro transformatör nüvesine ilave edilen saf demir tozu miktarının transformatör çıkış karakteristiği üzerindeki etkisi

Grafik 4.7'de görüldüğü gibi mikro transformatör nüvesindeki manyetik sıvının magnetit parçacık konsantrasyonu artırıldığında çıkış karakteristiğinde beklenildiği gibi bir iyileşme görülmektedir [90]. Fakat belirli bir miktardan sonra çıkış karakteristiği bir noktadan öteye geçememektedir. Bunun sebebi manyetik sıvının magnetit (Fe_3O_4) parçacık doyumuna ulaşması ve manyetik özelliğinin değişmemesidir. Çıkış karakteristikleri ile frekans aralığı değerlendirmesi yapıldığında da, belirli bir frekans aralığında (50-100 kHz) maksimum çıkış karakteristiği gözlemlendiği ve çok daha yüksek frekanslar uygulandığında ise çıkış karakteristiğinin hızla gözle görülür şekilde bozulduğu görülmektedir. Nüvedeki parçacık konsantrasyonu artırıldığında ise aynı şekilde yüksek frekanslarda elektriksel kayıplar yaşanacağından çıkış karakteristiğinde aşırı gürültüler gözlemlenerek bozulmaktadır.

Tasarlanan mikro transformatörün nüvesine 1 ml manyetik sıvı eklenip daha sonra kademeli olarak toplamda 0.5 ml hacimli demir tozu homojen olarak karıştırılarak elde edilen deney sonuçlarından (Çizelge 4.1-7) görüldüğü üzere, uygulanan frekans değerlerinin değişimine göre demir tozu katkılı manyetik sıvı nüveli mikro transformatörün çalıştığı en kararlı frekans aralığı 50-100 kHz değerleridir. Uygulanan frekans 1 MHz 'e yaklaştıkça hem manyetik sıvının içerisinde bulunan kendi nano boyutlu demir parçacıkları hem de deney esnasında ilave edilen nano boyutlu demir tozu parçacıklarının yüksek frekans altında oluşturdukları aşırı titreşimden dolayı elektriksel ve manyetik kayıplarının da artması sonucu indüklenen çıkış gerilimi hızla azalmaktadır. Bozulan çıkış gerilim karakteristiği yüksek

frekansta çalışmaya uygun başka tip bir manyetik sıvının tercih edilmesiyle aşılabılır. Yüksek frekansta aşırı elektriksel kayıplara sebep veren demir tozu parçacıkları (Fe_3O_4) yerine başka manyetik parçacıklar içeren (örneğin ferrit) manyetik sıvılar seçilerek yüksek frekansta çalışmalarda manyetik kayıplar minimize edilebilir.

Mikro transformatörlerin ve zayıf güçlü transformatörlerin devre ve düzeneklerde farklı konularda kullanıldığı göz önüne alınarak, tasarlanan mikro transformatörün de nüvesinin farklı konumlarda olduğu durumlar için çıkış karakteristiklerinin incelenmesi yapılmıştır.

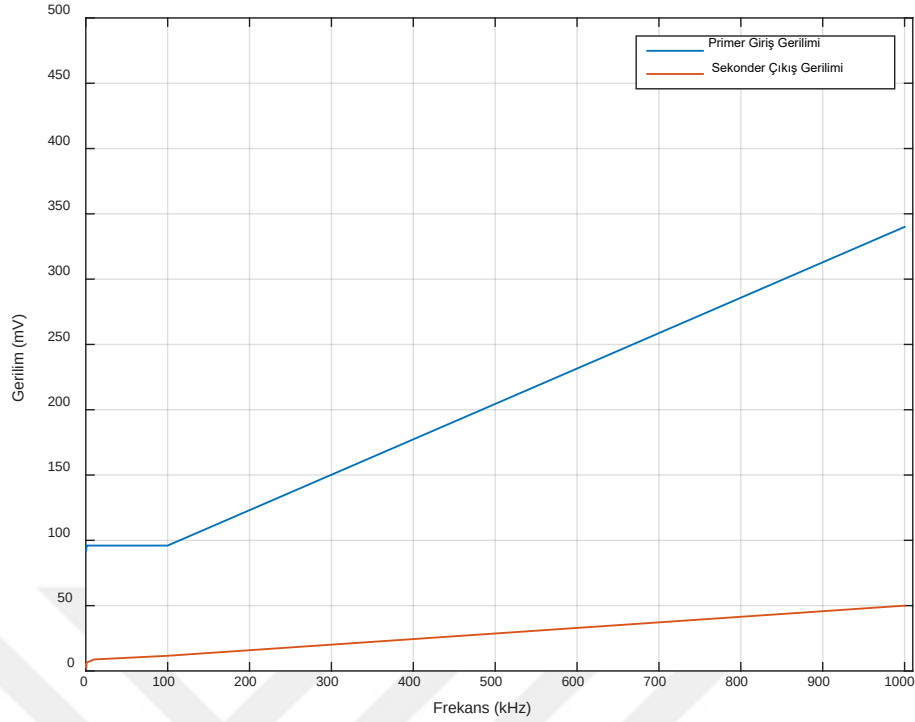
Tasarlanan mikro transformatör modeli ile gerçekleştirilen diğer ölçümlerde boş şırınga içerisine belirli miktarda manyetik sıvı eklenerek şırınga yatay düzleme paralel, yatay düzleme 45 derece açılı ve yatay düzleme 90 derece dik pozisyonlarda konumlandırılarak hem çıkış gerilim karakteristiği hem de her eğim pozisyonu için ayrı ayrı empedans karakteristikleri gözlemlenmiştir.

Alçaltıcı olarak çalıştırılan transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanan hava boşluğu nüveli transformatörde ölçülen frekansa bağlı primer- sekonder gerilim değerleri Çizelge 4.7’de derlenmiştir.

Çizelge 4.7. Hava boşluğu nüveli mikro transformatörün farklı frekans değerlerinde primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri.

Uygulanan Frekans (kHz)	Primer Sargı Giriş Gerilimi (mV)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (mV)
0,1	92	5
0,5	92	2
1	96	6,4
10	96	8,8
100	96	11,6
1000	340	50

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde ölçülen primer ve sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.8’de gösterilmiştir.



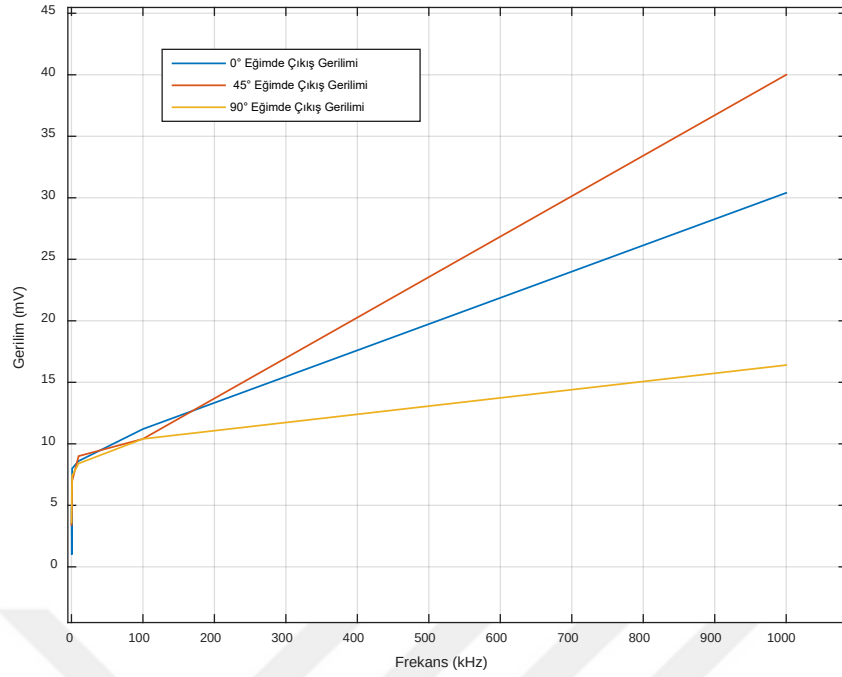
Grafik 4.8. Hava boşluğu nüveli mikro transformatörün farklı frekans değerlerinde primer ve sekonder gerilim eğrileri

Transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanıp farklı eğim pozisyonlarında konumlandırılıp, nüvesine (şırınanın iç haznesi) 0,2 ml ferromanyetik sıvı eklenerek ölçülen frekansa bağlı giriş- çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.8’de derlenmiştir.

Çizelge 4.8. Nüvesinde 0,2 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri

Eğim Frekans (KHz)	0°		45°		90°	
	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)
0,1	88	4,8	88	3,4	88	3,6
0,5	84	1,0	86	4,4	88	5,6
1	98	8,0	88	7,0	96	7,4
10	92	8,6	98	9,0	96	8,4
100	92	11,2	96	10,4	96	10,4
1000	300	30,4	320	40,0	296	16,4

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde farklı eğim pozisyonlarında ölçülen sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.9’da gösterilmiştir.



Grafik 4.9. Nüvesinde 0,2 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri

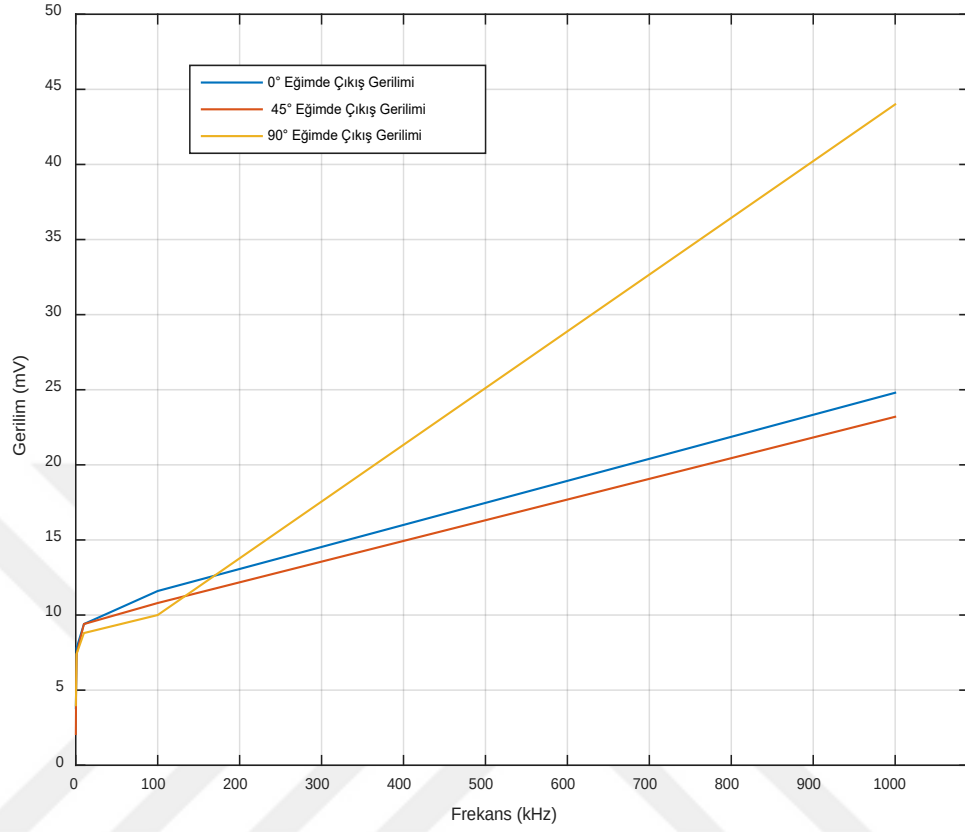
Nüveye manyetik sıvının eklenmesi her eğim durumunda da boş nüvede yapılan ölçümlere göre (Grafik 4.8) beklendiği gibi daha iyi sonuç göstermeye başlamıştır. Grafik 4.9'da diğer durumlara kıyasla çıkış karakteristiği en iyi olan 90° eğimli pozisyonda alınmıştır. Çıkış eğrilerinin yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken nokta, transformatörün alçaltıcı tip olarak çalıştırıldığı göz ardı etmemektir. Bu durumda indüklenen çıkış gerilimi düşüşü miktarı göz önüne alınmalıdır.

Transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanıp farklı eğim pozisyonlarında konumlandırılıp, nüvesine 0,4 ml ferromanyetik sıvı eklenerek osiloskop ile ölçülen frekansa bağlı giriş- çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.9'da derlenmiştir.

Çizelge 4.9. Nüvesinde 0,4 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri

Eğim Frekans (KHz)	0°		45°		90°	
	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)
0,1	88	3,8	86	2,08	88	4,0
0,5	88	5,2	86	5,2	88	5,2
1	88	7,8	94	7,4	94	7,4
10	92	9,4	98	9,4	98	8,8
100	96	11,6	92	10,8	96	10,0
1000	312	24,8	304	23,2	312	44,0

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde farklı eğim pozisyonlarında ölçülen sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.10’da gösterilmiştir.



Grafik 4.10. Nüvesinde 0,4 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri

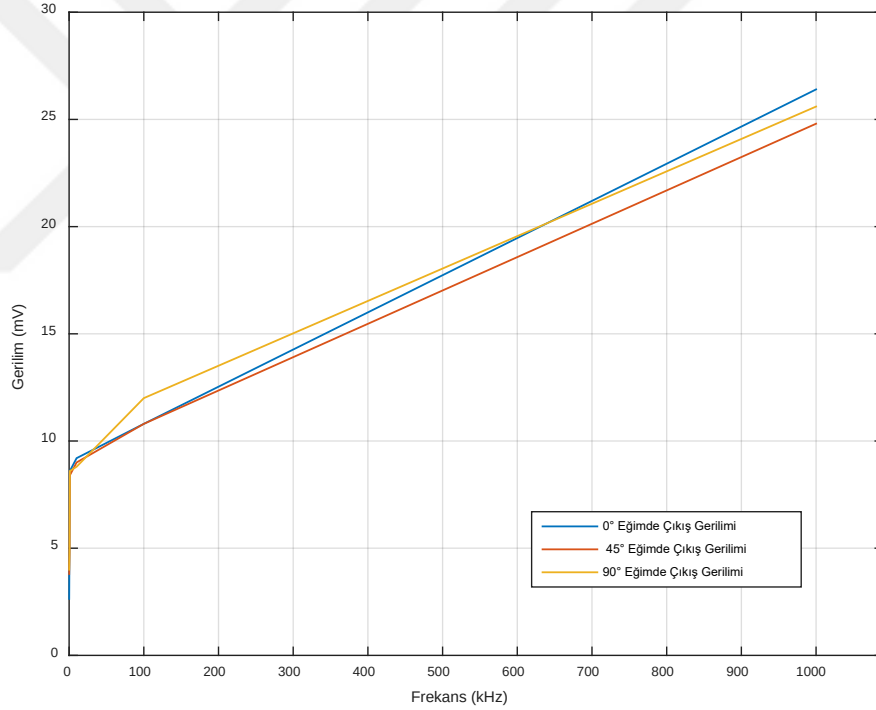
Grafik 4.10’ dan görüldüğü üzere en iyi çıkış karakteristiği nispeten 90° eğimli durumda elde edilmiştir. Bir önceki ölçüm eğrileriyle (Grafik 4.9) kıyaslanacak olunursa özellikle 90° eğimli konum sonuçlarında yüksek frekans değerlerinde gözle görülür bir artış görülmektedir.

Transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanıp farklı eğim pozisyonlarında konumlandırılıp, nüvesine 0,6 ml ferromanyetik sıvı eklenerek osiloskop ile ölçülen frekansa bağlı giriş- çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.10 ’da derlenmiştir.

Çizelge 4.10. Nüvesinde 0,6 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri

Eğim Frekans (KHz)	0°		45°		90°	
	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)
0,1	86	2,64	86	3,8	86	4,0
0,5	88	5,4	94	4,8	88	4,8
1	98	8,6	96	8,4	94	8,6
10	96	9,2	96	9,0	96	8,8
100	96	10,8	94	10,8	94	12,0
1000	320	26,4	304	24,8	288	25,6

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde farklı eğim pozisyonlarında ölçülen sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.11’de gösterilmiştir.



Grafik 4.11. Nüvesinde 0,6 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri

Mikro transformatörün nüvesine eklenen manyetik sıvı miktarı arttıkça çıkış gerilim karakteristikleri de birbirine yaklaşılmaya başlamıştır. Grafik 4.11’den görüldüğü üzere nüvenin yarısından fazlası manyetik sıvı ile doldurulduğunda eğim konumları çıkış karakteristikleri üzerinde benzer etkiler göstermektedir.

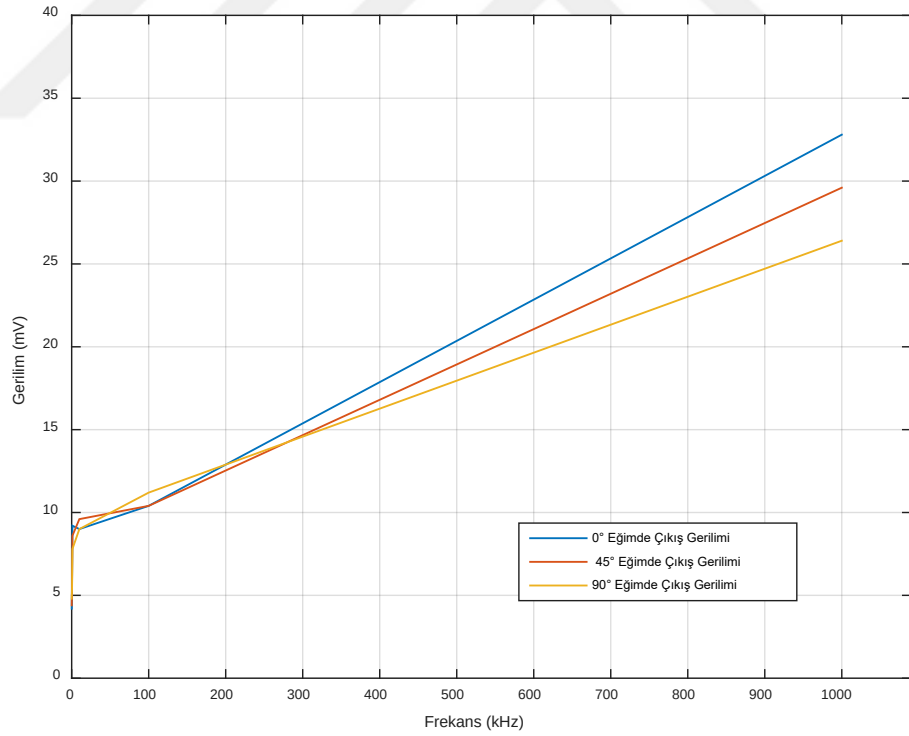
Transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanıp farklı eğim pozisyonlarında konumlandırılıp,

nüvesine 0,8 ml ferromanyetik sıvı eklenerek osiloskop ile ölçülen frekansa bağlı giriş- çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.11’de derlenmiştir.

Çizelge 4.11. Nüvesinde 0,8 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri

Eğim Frekans (KHz)	0°		45°		90°	
	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)
0,1	86	4,2	86	4,4	86	4,8
0,5	86	5,6	86	5,8	88	5,4
1	96	9,2	94	8,6	94	7,8
10	96	9,0	96	9,6	96	9,0
100	94	10,4	94	10,4	92	11,2
1000	312	32,8	304	29,6	288	26,4

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde farklı eğim pozisyonlarında ölçülen sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.12’de gösterilmiştir.



Grafik 4.12. Nüvesinde 0,8 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri

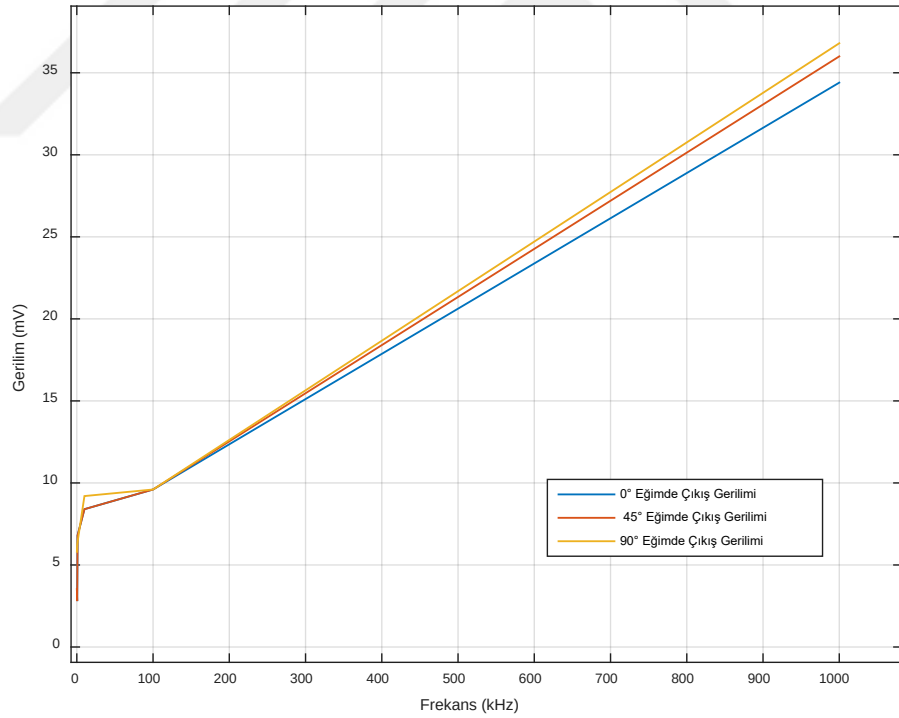
Transformatörün primer sargısına sinyal jeneratörü bağlanarak farklı frekans değerlerinde giriş sinyali uygulanıp farklı eğim pozisyonlarında konumlandırılıp,

nüvesine 1 ml ferromanyetik sıvı eklenerek nüve tamamen manyetik sıvı dolu halde ölçülen frekansa bağlı giriş- çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.12’de derlenmiştir.

Çizelge 4.12. Nüvesinde 1,0 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki primer giriş ve sekonder çıkış gerilim değerleri

Eğim Frekans (KHz)	0°		45°		90°	
	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)	Primer Giriş (mV)	Sekonder Çıkış (mV)
0,1	84	3,52	84	3,52	84	5,8
0,5	84	2,8	84	2,8	84	6,2
1	94	6,8	94	6,8	94	6,4
10	96	8,4	96	8,4	94	9,2
100	94	9,6	94	9,6	92	9,6
1000	328	34,4	294	36,0	296	36,8

Yukarıdaki çizelgede farklı frekans değerlerinde farklı eğim pozisyonlarında ölçülen sekonder gerilim değerlerinin eğrileri Grafik 4.13’te gösterilmiştir.



Grafik 4.13. Nüvesinde 1,0 ml manyetik sıvı bulunan mikro-transformatörün farklı eğim pozisyonlarındaki sekonder çıkış gerilim eğrileri

Grafik 4.13’ten görüldüğü üzere, mikro transformatörün nüvesi tamamıyla homojen manyetik sıvı ile doldurulduğunda çıkış karakteristikleri eğrileri arasındaki açılar azalarak, üst üste binmeye başlamıştır. Nüvede hava boşluğu bırakılmadan manyetik sıvı doldurulduğu için, hangi eğim pozisyonunda olursa olsun nüvedeki manyetik

sıvı derişimi aynı kalacağından eğim durumunun çıkış karakteristikleri üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Mikro transformatör nüvesine kademeli olarak 0,2'şer ml manyetik sıvı eklenerek farklı eğim pozisyonlarında giriş frekansına bağlı giriş-çıkış gerilim karakteristikleri ve indüktans değerleri deney gözlem sonuçları Çizelge 4.13' te derlenmiştir.

Çizelge 4.13. Farklı eğim konumlarında nüvedeki manyetik sıvı miktarına bağlı olarak indüktans değerleri

Eğim Nüve	0°	45°	90°
Boş	0,016 mH (120 Hz)		
0,2 ml manyetik sıvı eklendi	0,016 mH (120 Hz)	0,015 mH (120 Hz)	0,013 mH (120 Hz)
0,4 ml manyetik sıvı eklendi	0,019 mH (120 Hz)	0,018 mH (120 Hz)	0,018 mH (120 Hz)
0,6 ml manyetik sıvı eklendi	0,023 mH (120 Hz)	0,020 mH (120 Hz)	0,022 mH (120 Hz)
0,8 ml manyetik sıvı eklendi	0,025 mH (120 Hz)	0,025 mH (120 Hz)	0,025 mH (120 Hz)
1 ml (nüve full dolu) manyetik sıvı eklendi	0,027 mH (120 Hz)	0,027 mH (120 Hz)	0,027 mH (120 Hz)

Çizelge 4.13'ten görüldüğü üzere mikro transformatör nüvesindeki manyetik sıvı miktarının artmasıyla birlikte indüktansı dolayısıyla empedans değeri de değişmektedir ($Z= R+j\omega L$). Eğim açısı arttıkça indüktans değeri de azalır. Bu değişim nüvedeki manyetik sıvı miktarının az olduğu durumlarda daha etkindir. Nüvedeki manyetik sıvı miktarı arttıkça bu değişim ihmal edilecek kadar azalır. Öte yandan mikro transformatör sargısının empedansının azalması iyi bir sonuç olsa da, nüvenin büyük kısmının boş olması zaten transformatörün performansını negatif etkilemektedir. Bu nedenle manyetik sıvı nüvelerinde eğim açılarına göre empedansın değiştirilmesi yöntemi transformatörlerden ziyade eğim ve hız sensörlerinde [6] kullanması daha avantajlıdır.

4.2. Nüve Yan Kollarında Hava Boşlukları Oluşturulan Manyetik Sıvı Doldurulan Mantel Tip Tek Fazlı Transformatörün İncelenmesi

Bu çalışmada endüstriyel tip (Şekil 3.7) 220/12 V gerilim ve 5W güç değerine sahip, tek fazlı, gövde saç kalınlığı 0,50 mm olan transformatörler

kullanılmıştır(üretici firma: Aslan Elektronik/Malatya).Aynı üretim serisinden 2 adet trafo alınmıştır. Kullanıma hazır olan birinci transformatör deneylerde referans olarak baz alınmıştır. İkinci transformatörün gövdesini oluşturan E ve I kısımlarına kaynak işlemi yaptırılmamış ve I kısmı serbest şekilde bırakılmıştır. Transformatörlere ayarlanabilir AC kaynak (varyak) bağlanarak elde edilen referans ölçüm sonuçları Çizelge. 4.14’ te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Referans transformatör ve kaynaksız transformatörün reel çalışma gerilim değerleri

Primer Sargılara Uygulanan Giriş Gerilimi (V)	Referans Trafo Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)	Kaynaksız Trafo Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.975	1.975
50	3.285	3.284
100	6.60	6.61
120	7.93	7.92
150	9.899	9.899
170	11.23	11.22
190	12.55	12.54
200	13.20	13.21

Çizelge 4.14’te iki transformatörün reel çalışma değerleri gösterilmiştir. Gövdesi ayrılmış trafonun ve referans trafonun neredeyse aynı çıkış karakteristiği sergilediği görülmektedir.

Deneyde ilk olarak gövdesi ayrılabilen, kaynaksız trafonun her iki gövde yan kollarında 0,5mm’ lik hava boşlukları açılmıştır. Gövdesi fiziksel olarak tekrar birleştirip herhangi bir kaynak ya da reçine işlemi yapılmamıştır. İki kolunda 0,5 mm hava aralığı bulunan transformatöre AC varyak bağlanarak elde edilen çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.15’te verilmiştir.

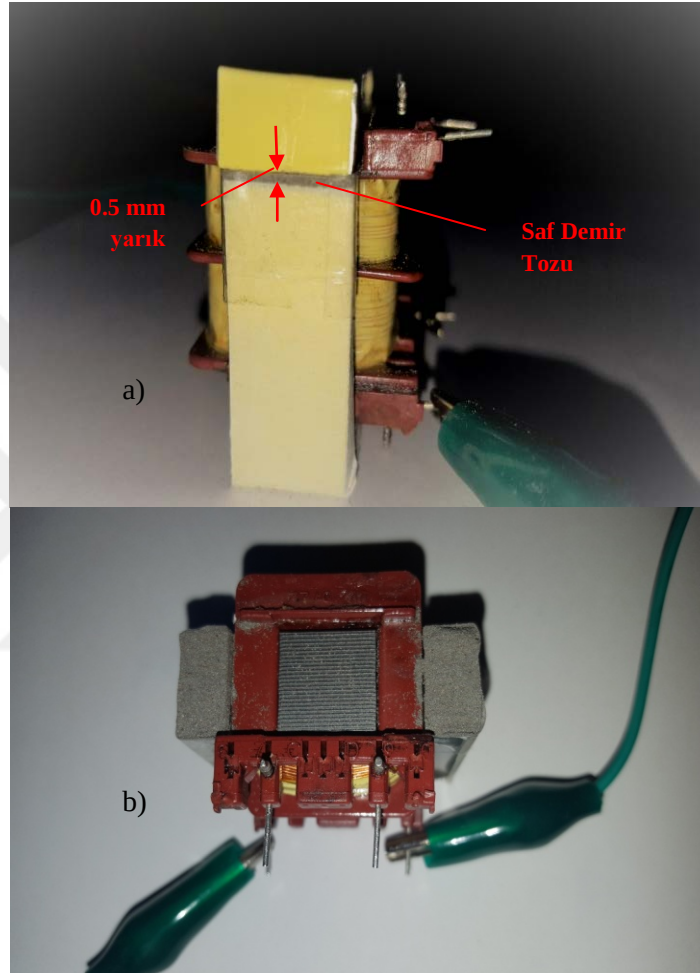
Çizelge 4.15. Gövde kollarında 0,5 mm hava boşlukları açılan transformatörün çalışma gerilim değerleri

Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.677
50	2.839
100	5.744
120	6.97
150	8.70
170	9.87

Yukarıdaki çizelgeden görüldüğü üzere transformatör gövde kollarına hava boşlukları açıldıktan sonra çıkış geriliminde ortalama %13’lük bir azalma gerçekleşmiştir. Ölçüm esnasında primer giriş 170 V AC uygulandığı zaman ısınma

sorunu yaşanmıştır. Sargıların zarar görmemesi için primere daha fazla gerilim değeri uygulanmamıştır.

Transformatörün iki kolunda bulunan 0.50 mm'lik hava boşlukları tamamıyla saf demir tozuyla (Fe_3O_4) doldurulup gövde herhangi bir kaynak işlemi olmaksızın sadece fiziksel olarak tekrar birleştirilmiştir. Transformatörün hava boşluklarının demir tozuyla doldurulmuş ve ölçüme hazır hali Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Gövde kollarının her iki tarafına 0.5 mm yarık açılıp saf demir tozu ile doldurulmuş transformatör. Transformatörün yan görünüşü (a). Yarıkların üstten görünüşü (b)

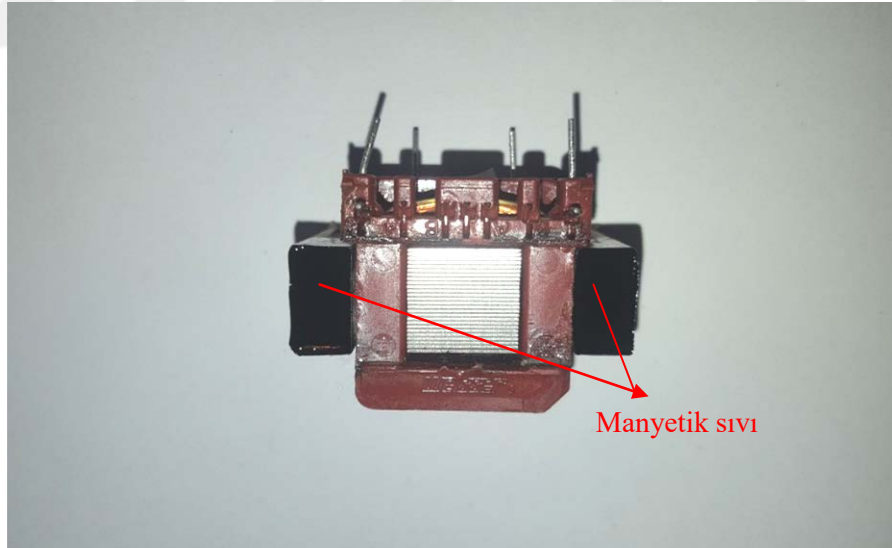
İki kolunda bulunan 0,5 mm hava aralığının saf demir tozuyla doldurulup hazırlanan transformatöre varyak bağlanarak ölçülen çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Gövdesindeki 0,5 mm hava boşlukları tamamıyla saf demir tozuyla doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri

Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.885
50	3.160
100	6.312
120	7.59
150	9.49
170	10.50
200	13.20

Çizelgedan görüldüğü üzere çıkış gerilimleri değerleri beklendiği gibi Çizelge 4.15'e göre artış göstermektedir. Açılan yarıklara saf demir tozu doldurulmasının sonucunda çıkış gerilim değerleri referans değerlere (Çizelge 4.14) oldukça yaklaşmıştır.

Deney demir tozunun boşaltılıp yerine manyetik sıvı ile tamamen doldurularak tekrarlanmıştır. İki kolunda hava boşluğu bulunan transformatörde hava boşlukları manyetik sıvı ile doldurulup sabitlenerek, transformatör gövdesi herhangi bir kaynak işlemi olmaksızın sadece fiziksel olarak tekrar birleştirilmiştir. Transformatörün gövdesinde açılan yarıklara manyetik sıvı doldurulmuş hali Şekil 4.2' de verilmiştir.



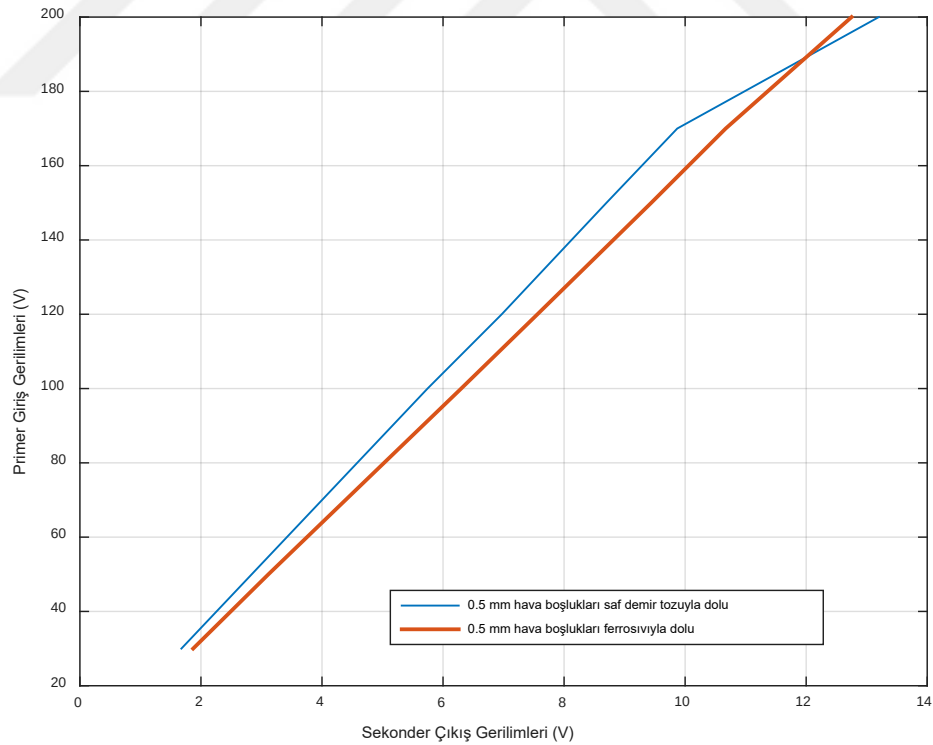
Şekil 4.2. Gövde kollarına ferromanyetik sıvı eklenen transformatörün üstten görünüşü

İki kolunda bulunan 0,5 mm hava aralığının tamamen manyetik sıvıyla doldurulup transformatörün üst kısmı yerleştirilerek hazırlanan transformatöre varyak bağlanarak elde edilen giriş/çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Transformatör gövdesinde bulunan 0.5 mm yarıkların tamamen ferromanyetik sıvı ile doldurulup elde edilen ölçüm sonuçları

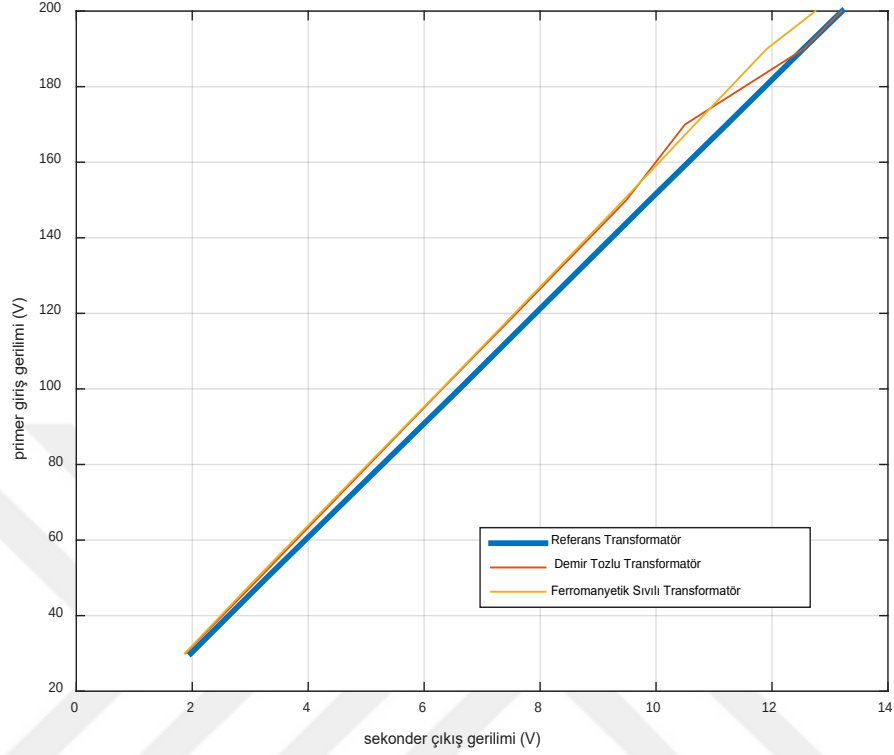
Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.871
50	3.115
100	6.30
120	7.56
150	9.44
170	10.67
200	12.75

Çizelgedan görüldüğü üzere deneyin manyetik sıvı ile gerçekleştirilen ölçümleri saf demir tozuyla gerçekleştirilen değerlerin yer aldığı Çizelge 4.16 ile kıyaslandığında ortalama %0,72 daha düşük çıkış gerilimi değerleri vermiştir. Deney sırasında giriş geriliminin arttırılmasıyla birlikte kullanılan transformatörün E ve I kısımlarının kaynaksız ve gövdenin verniksiz olmasından dolayı oluşan titreşimler, sonradan açılan gövde yarıklarındaki manyetik sıvının gövdeyi oluşturan silisyumlu saçlar arasında minimal oranda yürümesine yol açmıştır.



Grafik 4.14. Gövdesinde 0,5 mm boşlukları saf demir tozu ve manyetik sıvı ile doldurularak ölçülen çıkış gerilimleri eğrileri

Grafik 4.14' te 0,5 mm hava boşluklu yapıya sırasıyla saf demir tozu ve daha sonra manyetik sıvı eklenerek yapılan ölçümlerden elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Grafik 4.15. Referans çıkış gerilim değerleri ile 0,5 mm yarıklara demir tozu ve ferromanyetik sıvı doldurularak yapılan ölçümlerin sekonder gerilimlerinin kıyaslanması

Grafik 4.15'te trafonun herhangi bir işlem yapılmadan önce alınan çıkış gerilim değerleri ile saf demir tozlu ve manyetik sıvı kullanılarak yapılan ölçümler kıyaslanmıştır. Grafikten görüldüğü üzere primer sargıya 185 V AC'nin üstünde uygulanan primer gerilim değerlerinde sekonder çıkış değerleri saf demir tozu ile yapılan deneyde referans trafo değerleriyle neredeyse aynı karakteristiği gösterirken, ferromanyetik sıvı ile yapılan deneyde ise düşüş göstermiştir [91]. Ayrıca gövde yarıkları herhangi bir maddeyle doldurulmadan yapılan ölçümlerde hava boşluğunda direncin artmasından dolayı ciddi ısınma sorunları gözlemlenmiştir.

Devrede herhangi bir yük elemanı eklenmeden yapılan ölçümlerden sonra sisteme transformatörün sekonder çıkış tarafına 500 ohm değerinde ayarlanabilir aktif direnç potu bağlanarak dört farklı direnç değeri belirlenmiş ve primere farklı AC giriş gerilim değeri uygulanarak sekonder taraftan akım değeri değişimi incelenmiştir. Ölçümler yapılırken trafonun yan gövde kollarındaki 0.50 mm'lik hava boşlukları demir tozu ve manyetik sıvıdan arındırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.18'de derlenmiştir.

Çizelge 4.18. Farklı giriş gerilim değerlerinde yük üzerinden geçen akım değerleri

Bağlı Direnç (ohm) \ Primer gerilim değerleri (V)	30	120	170
	Sekonder çıkış akım değerleri (mA)		
1,65	147,4	571,4	-
3,16	121,5	517,0	5,83
7,20	16,64	74,24	75,5
7,52	3,51	14,77	20,55

Çizelge 4.18’den görüldüğü gibi genel olarak transformatörün çıkış karakteristiklerinin değişimleri tutarlıdır. Ancak primer gerilimin artırılmasıyla sekonder akımın düşüşü de hızlanmaktadır. Fakat nüvedeki boşluğun çok küçük olması (0,50 mm) bile nominal çalışma gerilimine yakın gerilimlerde transformatörün aşırı ısınmasına ve performansının ciddi boyutlarda düşmesine neden olur. Oysa bu boyutlardaki yarıklar ve çatlaklar transformatörlerde hem üretim hem de kullanım sürecinde oluşabilir. Böyle durumlarda bu bölgelerin yüksek konsantrasyonlu manyetik sıvılarla onarımı transformatörün performansının yükseltilmesine imkan sağlayabildiği aşıkardır.

Transformatörün gövdesinde açılan yarıkların çıkış gerilimi üzerindeki etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için gövdeyi oluşturan her bir saç kalınlığının (0,5 mm) iki katı boyutunda trafo yan kollarında yatay 1,0 mm hava boşlukları açılarak ölçümler aynı şekilde tekrarlanmıştır. Transformatör kollarında açılan 1,0 mm hava boşlukları ile yapılan ölçümler Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Gövdesinde 1.0 mm hava boşlukları açılan transformatörün çalışma gerilim değerleri

Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.639
50	2,735
100	5,513
120	6.53
150	8.06
170	8.90
190	10.07

Çizelge 4.19’ da gösterilen sonuçlara göre, gövde kollarında 1,0 mm’ lik yarıkların açılması sonucu elektriksel kayıpların artması üzerine referans trafo çıkış gerilim değerinde ortalama %18’ lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Ölçüm esnasında primer

giriş 170 V AC uygulandığı zaman ısınma sorunu yaşanmıştır. Sargıların zarar görmemesi için primer sargıya uygulanan gerilim sınırlandırılmıştır.

Transformatör gövdesindeki 1.0 mm'lik hava boşlukları ilk olarak saf demir tozu ile tamamen doldurulmuştur. Elde edilen çıkış gerilim değerleri Çizelge 4.20' de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Gövdesinde 1.0 mm hava boşlukları saf demir tozuyla doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri

Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.826
50	3.040
100	6.02
120	7.19
150	8.87
170	9.94
190	11.07

Çizelgedan görüldüğü üzere, beklenildiği gibi Çizelge 4.19'a göre daha iyi çıkış gerilim değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca bir önceki deneyde gövdede 0,5 mm yarıklar varken demir tozu doldurularak elde edilen gerilim değerleri (Çizelge 4.16) ile karşılaştırılırsa, çıkış gerilim değerlerinden ortalama %1 daha düşük değerlerin elde edildiği görülmektedir.

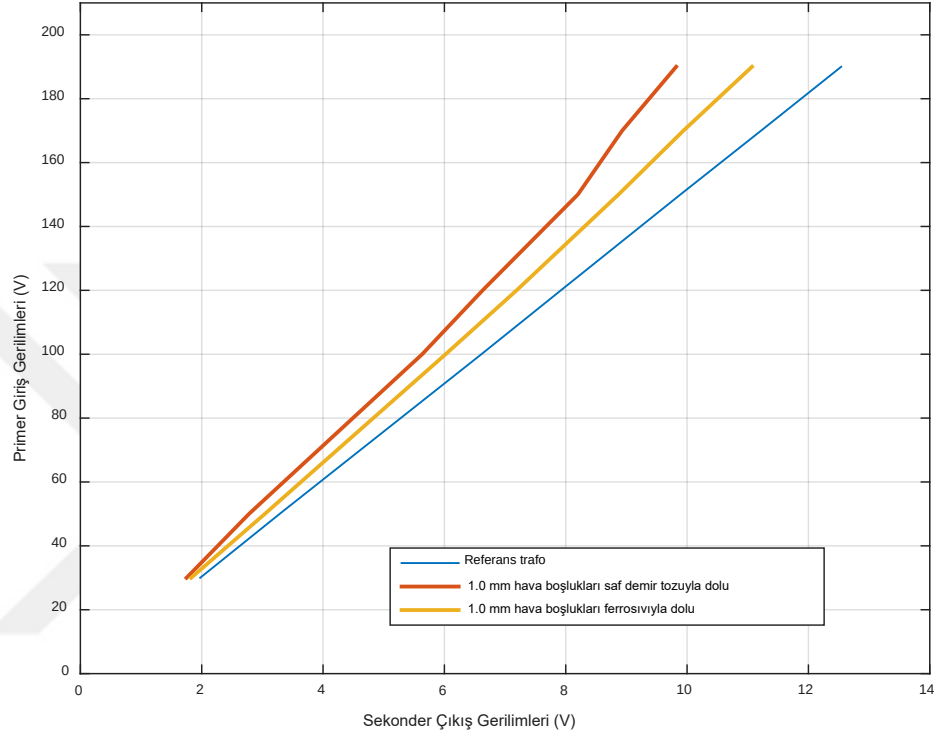
Transformatör kollarındaki yarıkların tümünün manyetik sıvı ile doldurulması durumunda, trafonun çıkış karakteristiğinin değişiminin de incelenmesi ve kıyaslanması önemlidir. Bu amaçla transformatörün kollarındaki 1.0 mm'lik hava boşlukları demir tozundan arındırılarak yerine manyetik sıvı eklenmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.21'de sunulmuştur.

Çizelge 4.21. Gövdesindeki 1.0 mm hava boşlukları tamamen manyetik sıvı ile doldurulan transformatörün çalışma gerilim değerleri

Primer Sargı Giriş Gerilimi (V)	Sekonder Sargı Çıkış Gerilimi (V)
30	1.750
50	2.779
100	5.634
120	6.63
150	8.20
170	8.93
190	9.82

Çizelge 4.21’den elde edilen sonuçlara göre, hem referans değerlere göre hem de 0,50 mm gövde yarıklı deney sonuçlarına göre (Çizelge 4.17) çıkış gerilimlerinde ortalama %14’e yakın bir azalma söz konusudur.

1.0 mm hava boşluklu trafo yapısına sırasıyla saf demir tozu ve daha sonra manyetik sıvı eklenerek yapılan ölçümlerden elde edilen pratik sonuçlar karşılaştırmalı olarak Grafik 4.16’da verilmiştir.



Grafik 4.16. Referans çıkış gerilim değerleri ile 1,0 mm yarıklara demir tozu ve ferromanyetik sıvı doldurularak yapılan ölçümlerin sekonder gerilimlerinin kıyaslanması

Grafik 4.16’den görüldüğü gibi trafo gövdesinde açılan yarıkların boyutu büyüyünce elde edilen sekonder gerilim değerleri referans değerlerden gözle görülür farkla ayrılmaya başlamıştır. Ayrıca Grafik 4.15 ile kıyasladığında gövde boşluklarının manyetik sıvı ya da saf demir tozu ile doldurulması ile referans trafo değerlerine hiçbir primer giriş değerinde ulaşamamaktadır. Bunun esas nedeni, gövdede açılan yarıkların boyutunun büyümesi ile oluşan titreşimin sonuçları olumsuz etkilemesi ve elektriksel ve manyetik kayıpların minimize edilmesini zorlaştırmasıdır [92].

4.3. Manyetik Sıvı Bazlı Çalışan Bazı Sensörlerin Teorisinin Geliştirilmesi

Manyetik sıvıların son yıllarda yoğunlukla kullanıldığı alanlardan biri de çeşitli sensör teknolojileridir [6], [7], [83], [93]–[98]. Fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikler taşıyan manyetik sıvıların teorisi ve pratiği çok yönlü ve disiplinler arası niteliklerdir. Buna göre manyetik sıvı kullanılan sistemlerin, düzeneklerin ve

sensörlerin durum denklemlerinin içerdikleri parametreler arasındaki ilişkiler non-lineer olup, esasen deneyselliğe dayanmaktadır. Bu nedenle manyetik sıvı ile çalışan sistem ve düzeneklerin, özellikle de sensörlerin genel ve tamamlanmış bir teorisinin olduğu söylenemez. Manyetik sıvı sistemlerinin teori ve pratiğinde bulunan bu boşlukların doldurulması için manyetik sıvı hidrodinamiği, reolojisi, mıknatıslanması ve diğer davranışlarını belirleyen teorik ve uygulamalarının geliştirilmesine gereksinim vardır. Tez çalışmasında manyetik sıvı sensörlerin aşağıdaki teori ve uygulamalarının geliştirilmesi hedeflenmiş ve yapılmıştır:

1. Yüksek elektrik akım şiddeti değerlerini ölçmek için manyetik sıvı sensörlerin incelenmesi.
2. Dış manyetik alanda bulunan manyetik sıvı içerisinde indüklenen manyetik alanın belirlenmesi.
3. Manyetik sıvı içerisinde parçacığın asılı kalması durumunun incelenmesi ve manyetik alınganlığının belirlenmesi.
4. Yatay düzlemde manyetik sıvı tabakasının dış manyetik alan etkisinde incelenmesi.

Aşağıdaki bölümlerde de bu olayların literatürden belli olan teorik incelemeleri geliştirilerek bu olayların çözümüne yeni yaklaşımlar ele alınmıştır.

4.4. Yüksek Elektrik Akım Şiddeti Değerini Ölçmek İçin Manyetik Sensörlerin İncelenmesi

Elektroteknik sistemlerde en temel işlem bu sistemlerin farklı bölgelerindeki akım veya gerilim değerlerinin sürekli ya da periyodik olarak ölçümüdür. Sanayi ortamında akım ve gerilim ölçümü için çok sayıda kontrol ve ölçüm sistemleri vardır [99]. Fakat birçok durumda, özellikle elektrik akımının çok düşük ve çok yüksek değerlerinde, ölçüm ve kontrol işlemlerinin yapılması kolay değildir. Buna göre, elektrik akımının yüksek değerlerde ölçüm ve kontrolünün yapılması için basit ve güvenli aygıtların geliştirilmesi günümüzün önemli problemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemlerin çözümü için kullanılabilecek teknolojilerden biri de manyetik sıvı sensörlerdir. Manyetik sıvı, ferrit veya ferro manyetik nano parçacıklardan oluşturulmuş, kararlı bir yapıya sahip olan koloit süspansiyonlardır. Dış manyetik alanın etkisiyle kolaylıkla mıknatıslanan bu sıvılar, manyetik sensörlerin esas elemanı olarak kullanılabilirler [6], [7]. Yeterince hassasiyetli mıknatıslanma özelliklerine sahip olan bu sıvılar, elektroteknik alanlarda yeterince yaygın kullanılmamaktadır. Hâlbuki elektrik makinaları, elektrik aparatları ve yüksek gerilim tekniğinde manyetik sıvı sensörlerin kullanılabileceği çok sayıda önemli alan bulunmaktadır.

4.4.1. Manyetik Sıvı Sensörün Temel Prensipleri ve Teorisinin Geliştirilmesi

Literatürde Buica ve arkadaşları tarafından yüksek akım sensörünün teori ve pratiği verilmiştir [99]–[101]. Genel olarak yüksek akım sensör yapılarında akım taşıyan telin etrafına manyetik sıvı içeren bir hacim monte edilir. Telden geçen akım arttıkça

manyetik alanın serbest yüzeyi akım yönünde gerilerek belli yüksekliğe ulaşır. Teldeki akım şiddeti ile manyetik sıvının yüzey geometrisi arasındaki ilişki belli bir ölçütte teldeki akımın değerini belirlemeye imkân verir [100], [101]. Mekaniksel olarak hareketli kısımları bulunmayan bu sensörler yüksek akım değerlerini geniş aralıkta ölçmeye imkân verir. Esasen dikey akım taşıyan tellerdeki akımların ölçümünde avantajlı olan bu sensörler eğimli ve yatay tellerdeki akımların ölçümünde etkin değildirler. Bu nedenle farklı geometrik yapıda olan akım taşıyan tellerin çeşitli konumları için manyetik sıvı sensörlerin tasarımı ve modellenmesi çok önemlidir. Örneğin trambüs hatlarındaki farklı konumlarda olan yüksek akım katener tellerinde akımın ölçümü için bu tür sensörlerin kullanılması birçok avantaj sağlayabilir. Fakat bütün bu avantajlara rağmen bu tür manyetik sıvı sensörlerin teorisi de yeterince oluşturulmamıştır. Zira bu tür sistemlerde oluşan olayları tamamlayan manyetik, hidrodinamik, reolojik, ısı ve kütle değişimi denklemleri çok değişkenli ve non-lineer yapıya sahiptirler. Bu da hem manyetik sıvı denklemlerinin analitik çözümlerinin elde edilmesini zorlaştırır hem de sensör çıkış parametrelerinin arasındaki doğru ilişkileri belirlemede zorluk oluşturur. Bu nedenle manyetik sıvı sensörlerde kullanılması için manyeto hidrodinamik denklemlerin çözümlerinde birçok deneyle kanıtlanmış ve parametreler arasındaki ilişkileri basit formüllerle belirleyen ifadeler kullanmak daha avantajlıdır. Zira bu yaklaşımda sensörün çıkış parametreleri arasındaki ilişkiler de basit ifadelerle elde edilmiş olur. Bazı durumlarda gerekli düzeltme katsayıları kullanılarak ölçümlerden elde edilen verileri de kolaylıkla bir ölçüt dizisine dönüştürmek mümkün olabilir. Manyetik sıvı teknolojilerinde sensörler de dâhil olmakla bütün durum denklemlerinde istisnasız olarak manyetik sıvının mıknatıslanma denklemi kullanılır. Koloidal bir ortam olan manyetik sıvıların mıknatıslanması esasen Langevin formülüne göre belirlenir [4]–[7]. Fakat bu ilişkinin sensörlerdeki manyetik sıvı durum denkleminde direkt olarak kullanılması denklemin analitik çözümünü imkânsız kılmaktadır. Bu nedenle manyetik sıvıların mıknatıslanma özelliklerini daha basit formüller ifade etme gereksinimi vardır. Bazı durumlarda uygulama bakımından da manyetik sıvı sensörlerin daha avantajlı yapılarının oluşturulması gerekmektedir. Özellikle manyetik sıvı sensörün yatay, eğimli veya yüksek dikey konumlarda yapılandırılması büyük önem arz etmektedir. Manyetik sıvının rengi kontrol amaçlı kullanılan sensörlerinde çok önemli olmasa da, akım sensörlerinde çok önemlidir. İçerdiği manyetik parçacığın (Fe_3O_4) renginden dolayı esasen koyu renkte olan manyetik sıvıların başka renklerde üretilmesi de istenebilir. Bu ise manyetik sıvıların çeşitli renkte sentezlerinin yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca akım taşıyan telin geometrisine göre de sensörün yapısı şekillenmelidir. Örneğin trambüs veya tramvay hava (katener sistemi) hatlarında yüksek akımların sürekli ölçümünü sağlayabilmek için bu hatların farklı konumlarını ve geometrilerini dikkate almak gerekmektedir. Bu sistemler için tasarlanmış manyetik sıvı sensörler yarım daire, tam daire, dikdörtgen prizma veya başka şekillerde olabilir.

Manyetik sıvıların mıknatıslanma eğrilerinin çok sayıda incelemeleri göstermiştir ki, bu eğriler genel olarak bütün manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrisi karakterinde olup, birbirine benzemektedirler. Bu eğriler taşıyıcı ortamın manyetik

ve yüzey aktif malzeme safhaların fiziksel özelliklerine, dispers fazın konsantrasyonuna bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedirler [4]–[6]. Bu nedenle manyetik sıvıların mıknatıslanma eğrilerinin eksponent biçiminde olduğunu varsaymak mümkündür. Langevin yaklaşık formülünden farklı olarak eksponent şeklinde olan mıknatıslanma eğrisi denklemi manyetik sıvıların hidrodinamik ve sensör akış denklemlerinin analitik incelenmesinde kolaylık sağlamaktadır. Tezin bu kısmında manyetik sıvı bazında oluşturulmuş yüksek akım ölçüm sensör yapısı geliştirilmiş, bu tür sensörlerin teorik ve pratik uygulamalarının temel prensiplerine değinilmiş ve bu yaklaşım geliştirilmiştir.

Manyetik alan şiddetinin akım elemanı ile doğru orantılı olduğu bellidir. Bu nedenle akım şiddetinin arttırılmasıyla manyetik alanın bulunduğu manyetik ortamın mıknatıslanması da artar. Dış manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanan manyetik sıvının yüzey profili Bernoulli denklemi ile ifade edilir [2,3],

$$P + \rho g z - \mu_0 \int_0^H M dH = \text{sabit} \quad (4,1)$$

Burada P hidrostatik basınç, ρ manyetik sıvı yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi, z manyetik sıvı serbest yüzey yüksekliği, H manyetik alan şiddeti, M manyetik sıvı mıknatıslanmasıdır ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$).

Öte yandan akım taşıyan bir telin etrafında oluşan manyetik alan şiddeti de bellidir.

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi \cdot r} \vec{a}_\phi \quad (4,2)$$

Burada; I akım şiddeti, r radyal uzaklık, $\vec{a}_\phi$ birim vektördür.

Genelde manyetik sıvının mıknatıslanması Langevin formülüne göre hesaplanmaktadır.

$$M = M_s \left(\coth \xi - \frac{1}{\xi} \right) \quad (4,3)$$

$$\xi = \frac{\mu_0 M H}{K T} \quad (4,4)$$

Burada, M mıknatıslanma, M_s manyetik sıvının doyma mıknatıslanması, H manyetik alan şiddeti, m parçacıkların manyetik moment, K Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklıktır.

Nispeten büyük doyma mıknatıslanmasına ($M_s \geq (40-50) \text{ KA/m}$) sahip olan manyetik sıvılar için ise;

$$M = M_s \exp(-\alpha H) \quad (4,5)$$

olarak varsayabiliriz. Burada α amipik sayı olup, mıknatıslanma deneylerine göre belirlenir. Bu durumda manyetik sıvının serbest yüzeyinde r ve r_0 arasındaki profil aşağıdaki gibi olur.

$$P(r, z) + \rho g z(r) - \mu_0 \int_0^{H(r)} M dH = P(r_0, z) + \rho g z(r_0) - \mu_0 \int_0^{H(r_0)} M dH \quad (4,6)$$

Manyetik sıvının serbest yüzeyinin bütün noktalarında $P=\text{sabit}$ olduğuna göre, sıvının akım boyunca değişimi aşağıdaki gibi olur;

$$\Delta Z(r, r_0) = Z(r) - Z(r_0) = \frac{\mu_0}{g} \int_{H(r_0)}^{H(r)} M dH \quad (4,7)$$

Denklem (4,3) ve Denklem (4,5) dikkate alındığında serbest yüzey değişimi şu şekilde olur;

$$\Delta Z(r, r_0) = \frac{\mu_0}{g} \frac{Ms}{\alpha} e^{-Q_0(\frac{r_0}{r})} [e^{-L(1-\frac{r_0}{r})} - 1] \quad (4,8)$$

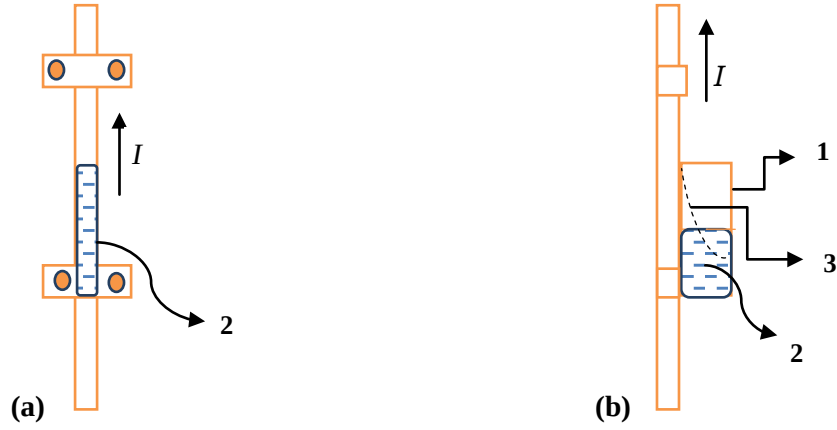
Burada;

$$Q_0 = \frac{\alpha I}{2 \pi r_0} \quad (4,9)$$

Denklem (4,8) akım taşıyan tel etrafında manyetik sıvı yüzey profilini belirlemeye olanak sağlar. Fakat akım taşıyan tel etrafındaki manyetik alanı yeterince güçlü bir alan değildir. Bu nedenle sensörün göstergesi de çok belirgin olmayabilir. Sensöre göre akım değerlerini belirleyebilmek için bu akımın değerleri kiloamper (kA) ve daha yüksek değerlerde olmalıdır. Bu ise ancak çok yüksek akım tekniklerinde mümkündür. Daha düşük akımları ölçmek için ise manyetik sıvı sensörlerde ek güçlendirici düzenekler kullanılabilir.

4.4.2. Manyetik Sıvı Sensörün Pratik Şemasının Geliştirilmesi

Yüksek akım ölçer manyetik sıvı sensör, içerisinde akım taşıyan tel geçen, non-manyetik malzemeden (PPMA) yapılmış ve içerisinde belli hacimde manyetik sıvı olan basit bir yapıya sahiptir (Şekil 4.3). İletkenin geometrisine uygun olarak manyetik sıvı sensör dikdörtgen veya silindirik şekilde yapılabilir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, akımölçer manyetik sıvı sensör, non-manyetik gövde (1), manyetik sıvı (2) kısımlarından oluşturulmuştur. I akımını taşıyan teldeki akım arttıkça manyetik sıvının serbest yüzeyi de tel boyunca uzamış olur (3). Sensör üzerindeki ölçüte göre akımın değeri belirlenir. Akım ve manyetik sıvı serbest yüzey profili arasındaki ilişki ise Denklem (4,7)'ye göre belirlenir. Böylece manyetik sıvı serbest yüzeyinin akım değerlerine göre $\Delta Z(I)$ değişimi teldeki akım değerini belirlemeye imkân verir. Sensör kanalının farklı geometride tasarlanması çeşitli elektromekanik sistemlerdeki yüksek akım değerlerini kolaylıkla ölçmeye imkân sağlayabilir.



Şekil 4.3. Yüksek Akım Ölçer Manyetik Sıvı Sensör Şeması. Üst Görünüş (a), yan görünüş (b).

Söz konusu yapılar her ne kadar teorik görünse de, yeni tür elektromanyetik malzeme sınıfına dâhil edilen manyetik sıvılar kullanılarak yüksek akım ölçüm sensörleri pratikte yapılabilir. Basit yapıya sahip olan bu sensörler daha tasarruflu olup, yüksek akımları hem sürekli hem de periyodik ölçmeye imkân verir. Bu nedenle bu sensörler yüksek akım sistemlerinin otomasyon devrelerinde etkin olarak kullanılabilir. Manyetik sıvı sensörlerin uygulama alanlarını genişletmek için bu sıvıların manyetik, hidrodinamik ve reolojik özelliklerinin sistemin davranış denklemlerine etkilerini teorik ve deneysel sonuçlarını geliştirmek gerekmektedir. Bu amaçla manyetik sıvı sistemlerinin farklı bileşenleri arasındaki analitik veya yaklaşık ilişkileri geliştirmek ve yeniden düzenlemek gerekmektedir.

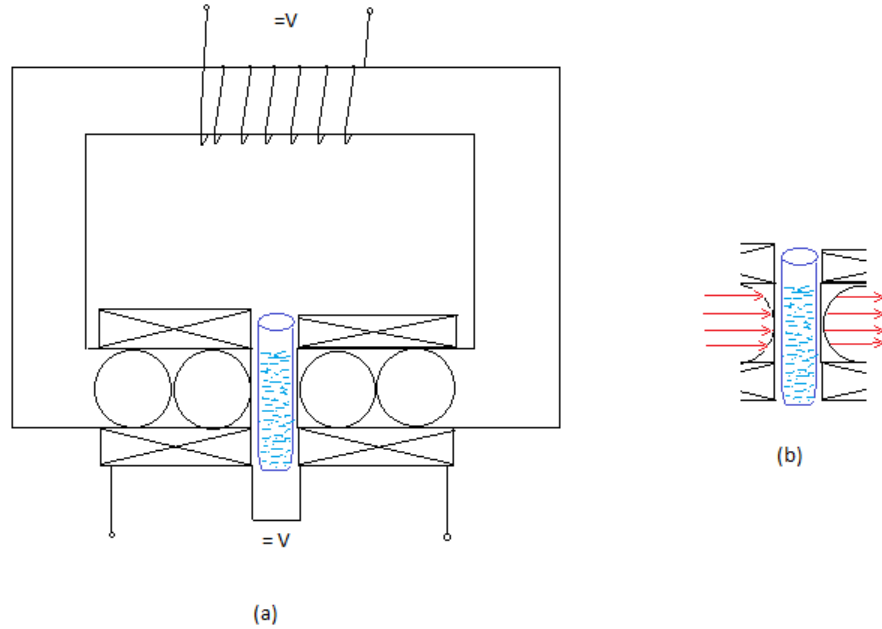
4.4.3. Manyetik Sıvı Sensörlerde Manyetik Sıvı İçerisinde İndüklenen Manyetik Alanın Değerlendirilmesi

Manyetik sıvı bazında çalışan sensörlerin ölçüm hassasiyeti öncelikle manyetik sıvının dış manyetik alanda indüklenmesi özellikleri ile belirlenir. Birçok manyetik sensörlerden farklı olarak manyetik sıvı sensörlerde esas çalışma elemanı olan manyetik sıvılar, dış manyetik alanda kolaylıkla mıknatıslanır ve sensörün hassasiyetini belirleyen toplam etkin manyetik alanı ciddi boyutlarda etkiler. Bu etkiyi doğru değerlendirebilmek için manyetik sıvıda indüklenen ek manyetik alanın değerini yaklaşık da olsa dikkate olmak gerekir. Manyetik sıvıda indüklenen ek alanın, direkt veya dolayısıyla belirleme yönteminin geliştirilmesi gerekmektedir. Çünkü sensörlerin çalışması durumunda mıknatıslanmış manyetik sıvının içerisinde indüklenen alanı direkt olarak ölçmek mümkün değildir.

Literatürde mıknatıslanmış manyetik sıvıların içinde indüklenen manyetik alanın değerlendirilmesi için manyetik kaldırma (levitation) yöntemi geliştirilmiştir [102], [103]. Manyetik sıvı ortamına yerleştirilmiş non-manyetik küreye etkileyen ponderomotif kuvvetin değerleri kıyaslanarak kürenin denge konumuna karşı gelen uzaklıkların değerlendirilmesi sonucu manyetik sıvının içerisinde indüklenen

manyetik alan belirlenmiştir. Benzer çalışmalar daha önce manyeto gravometrik ve manyeto hidrostatik seperatörlerin manyetik alanında da yapılmıştır [103]. Bütün bu çalışmalarda eğrisel kutuplu veya darboğaz (a wedge-shaped air gap) şekilli manyetik sistemler kullanılmıştır. Bu sistemlerde oluşturulan ponderomotif kuvvet yaklaşık olarak belirlenmiştir [102]–[104]. Oysa non manyetik küreye etkiyen kuvvetin hesaplanmasında oluşan hatalar ölçüm sonuçlarının da hata bakımından büyük olmasına neden olur. Bu sonuçların düzeltilmesi için çok sayıda deneylerin yapılması gerekmektedir. Fakat bu manyetik sistemlerin birinde geçerli olan deney sonuçları diğer manyetik sistemi için geçerli olmayabilir. Bu dezavantajları gidermek için dış manyetik sistem olarak mıknatıslanmamış ferromanyetik küreler zincirini kullanabiliriz. Zayıf ve küçük boyutlu manyetik parçacıkların veya onların karışımının manyetik alınganlığını belirlemek için mıknatıslanmış küre zincirinin kullanılması fikri ilk defa Rus bilim adamı A.V. Sandulyak tarafından söylenmiş ve bu yöntemin teorik yaklaşımı da incelenmiştir [105]. Benzer yaklaşım kullanılarak manyetik sıvı içerisinde indüklenen manyetik alanın değeri değerlendirilebilir. Mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş mıknatıslanma sistemi en azından iki önemli avantaja sahiptir. Bu özellikler:

1. Ölçülen numunenin küre yüzeylerinden eş çekim veya eş itim koşullarında konumlarının oluşturulabilmesi.
2. Mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerin arasındaki hava aralığında parçacığa etkiyen kuvvetin maksimum değere sahip olması, dolayısıyla manyetik kutuplar arasında itilen veya çekilen küreciklerin maksimum manyetik kuvvet etkisinde tespit edilmesi mümkündür.



Şekil 4.4. Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş manyetik sıvı magnetometre (a), kutupların konumu (b)

Manyetik sıvı içerisinde indüklenen manyetik alanı değerlendirebilmek için Şekil 4.4'te gösterilen düzenek kullanılabilir. Yarıçapı a olan ferromanyetik kürelerden

oluşturulmuş zincir düzeneğinin olduğunu göz önüne alalım. Bu ferromanyetik küreler zincirinin mıknatıslanma düzeyinin kararlı bir değere ulaşması için zincirde 8-10 adet kürenin olması yeterlidir. Küreler arasında büyük gradyanta sahip olan non-homojen manyetik alan oluşturmak için mıknatıslanan kürelerin sayısı 2 veya 4 adet olabilir. Mıknatıslanmış iki küre arasındaki uzaklığın L olduğu kabul edilerek ve bu boşluğa çapı $d_1=L$ olan bir tüp yerleştirilmiştir. Manyetik sıvı ile doldurulmuş tüp içerisine çapı d olan non-manyetik bir küre yerleştirilmiştir. Dış H_o alanının etkisiyle mıknatıslanan manyetik sıvı bu sıvıya batırılmış d çapında olan non-manyetik küreye F_m kaldırıcı ponderomotif kuvveti etkilemektedir. Bu kuvvet d küresini alanın maksimum bölgesine iterek dengede tutar. Kaldırıcı ponderomotif kuvvetinin değeri dış manyetik alan şiddeti H_o veya bobin akımı I değişimi ile ayarlanabilir. Bütün durumlarda her bir I değerine küreler arasındaki boşlukta d küresinin belli bir konumu karşılık gelir. Literatürde dar geçit türlü kutup sisteminde parçacığın farklı konumlarından gidilerek manyetik sıvı içindeki indüklenen manyetik alan şiddeti belirlenmiştir [102]–[104], [106]. Bu tür kutup sistemlerinde oluşan manyetik alan hiperbolik değişime sahip olur. Bu nedenle numunenin kutuplara eşdeğer olarak çekilebilmesi için kutup sisteminin diğer iki boyutu teorik olarak sonsuz boyutta olmalıdır. Bu durum manyetik sistemin pratik bakımından gerçekleştirilmesi için ciddi bir engel teşkil etmektedir. Bu tür kutuplardan farklı olarak mıknatıslanmış küreler arasındaki oluşan manyetik alan kesinlikle seçici olarak silindirik simetriye sahip olup, yalnız radyal yönde (enine) değişime sahiptir. Bu özellikte numunelerin kutuplarına eşdeğer olarak çekimini sağlar. Öte yandan küreler arasındaki boşlukta ponderomotif kuvvetin maksimum değere ulaştığı konum vardır. Buna göre numune (non-manyetik küre) en son bu bölgeye itilerek manyetik sıvı içerisinde dengede bulunacaktır. Eğer ponderomotif kuvveti belli olursa, bu konum teorik olarak da belirlenebilir. Dahası non manyetik küreyi bu konumunda tutan manyetik alan şiddeti bu noktadaki manyetik sıvı içerisindeki toplam manyetik alanı temsil eder. Bu alanın belirlenmesiyle manyetik sıvı içerisinde indüklenen manyetik alan şiddeti (H_{ms}) kolaylıkla belirlenebilir:

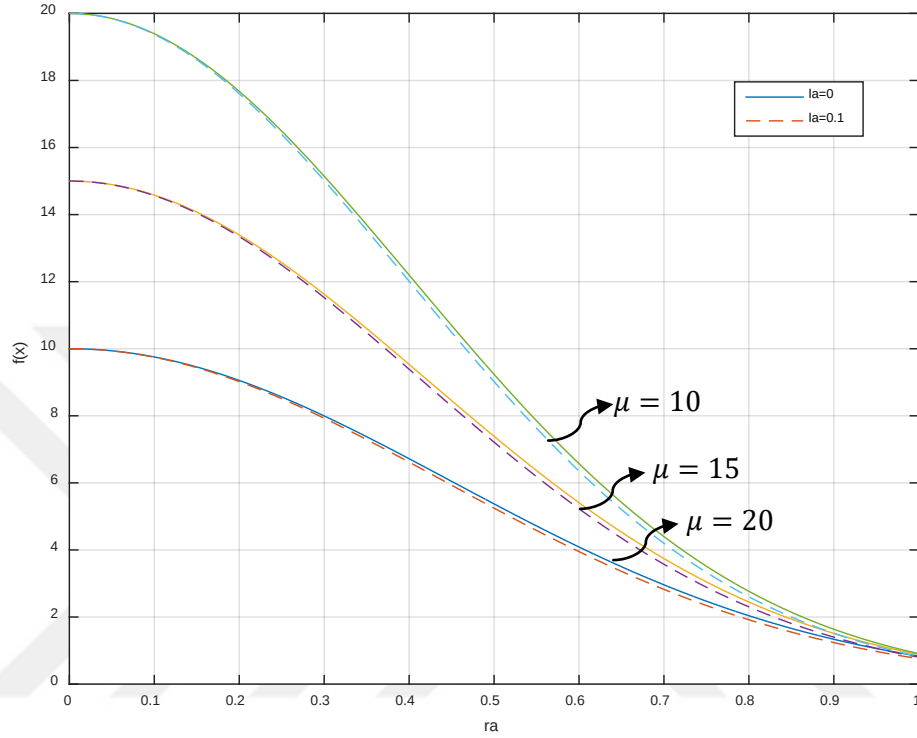
$$H_{ms}=H_t \quad -h \quad (4,10)$$

Burada H_t toplam manyetik alan şiddeti, h non manyetik numunenin dengede tutulduğu noktadaki manyetik alan şiddetidir.

Böylece mıknatıslanmış ferromanyetik küreler arasındaki boşluktaki manyetik alanı belirlemek için Şekil 4.4'deki düzeneğe bulunan en az iki küre arasındaki manyetik alanı ve ponderomotif kuvvetini belirlemek gerekmektedir. Teorik olarak bu işlem aşağıdaki fenomenal yaklaşımla elde edilebilir [105]. Aralarındaki uzaklıkları ℓ olan mıknatıslanmış iki küre arasındaki boşlukta kürelerin merkezlerini geçen eksen r uzaklığındaki noktada manyetik alan şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir [107].

$$H= H_0\mu \exp(-kr_a^2) \quad (4,11)$$

Burada H_o dış manyetik alan şiddeti, μ kürelerin manyetik geçirgenliği, r merkezden olan uzaklık, $r_a=r/a$, a kürelerin yarıçapı, k düzeltme katsayısıdır. Genellikle k mıknatıslanma sisteminin birçok parametresine bağlıdır. Kolaylık için burada k 'nın yalnız μ ve küreler arası uzaklık olan ℓ 'den bağımlı olduğu düşünülmektedir. Oluşan manyetik alan şiddetinin (H) dış manyetik alan şiddetine (H_o) oranının, $\mu=10, 15, 20$ değerlerinde uzaklık r_a 'ya göre değişimi Grafik 4.17'de gösterilmiştir.



Grafik 4.17. $\frac{H}{H_0}$ oranısının farklı μ değerlerindeki değişimleri

Grafik 4.17 de $f(x) = \frac{H}{H_0} = \mu \exp(-kr_a^2)$ olarak tanımlanmıştır.

Mıknatıslanma sisteminin özellikleri, başlangıç ve sınır koşulları dikkate alınarak,

$$k = \ln \frac{2(1+\ell_a)}{1+\mu+\mu\ell_a} \quad (4,12)$$

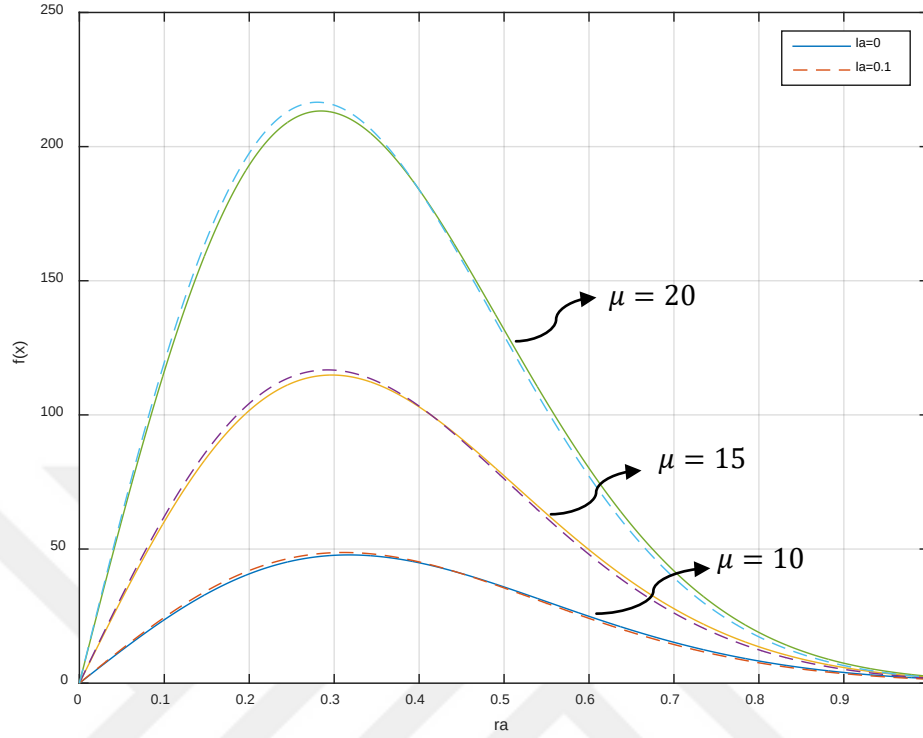
olduğu varsayılabilir. Burada $\ell_a = \ell/a$ küreler arasındaki boyutsuz uzaklıktır. Bu durumda non manyetik küreye etkiyen kaldırıcı kuvvet aşağıdaki gibi olur.

$$F_m = \mu_0 k_f w_p h \nabla h \quad (4,13)$$

Bu kuvvetin genliği ise,

$$|F_m| = \frac{2k\mu^2 H_0^2 \mu_0}{a} k_f w_p r_a \exp(-2kr_a^2) \quad (4,14)$$

Grafik 4.18’de $f(x) = \frac{|F_m|a}{2k_f\mu_0w_p} = k r_a \mu^2 \exp(-2kr_a^2)$ grafiği r_a ’nın değişimine göre farklı μ değerlerindeki değerleri gösterilmiştir.



Grafik 4.18.Tanımlanan $f(x)$ fonksiyonun r_a ’nın değişimine ve farklı μ değerlerindeki eğrileri

Burada k_f manyetik sıvının alınganlığıdır. $w_p = \frac{\pi d_1^3}{6}$ non manyetik kürenin hacmidir. Mıknatıslanmış küreler arasındaki boşlukta F_m ponderomotif kuvvetin en büyük (maksimum) olduğu nokta var olur. Denklem(4,5)’ten F_m ’yi maksimum yapan boyutsuz uzaklık r_a aşağıdaki gibi belirlenir,

$$r_a = \frac{1}{2\sqrt{k}} \quad (4,15)$$

Denklem (4,14- 15)’e göre manyetik alan ve alan kuvvet faktörünün değişimleri Grafik 4.17’de gösterilmiştir. Farklı manyetik geçirgenlik değişimlerinde küreler arasındaki uzaklığa göre bu parametrelerin değişimleri kuvvet faktörünün maksimum değere sahip olduğu bölgenin olduğunu açıkça göstermektedir.

Örneğin $d=20$ mm olan iki kürenin arasında $d_2=4$ mm olan bir tüp yerleştirilmiş olsaydı, $\mu=15$ olan küreler için F_m ’nin maksimum olduğu konumun Denklem(4,12)’de $k = 9,17$ olmakta ve Denklem (4,15)’e göre,

$$r_a = 0,151 \quad (4,16)$$

olarak elde edilir. Tüpün içerisinde manyetik sıvı bulunduğunda, mıknatıslanan manyetik sıvının kaldırdığı non manyetik küre bizzat bu bölgede dengede olacaktır ve küre tüpün duvarında aşağıdaki denge denkleminde göre uyum sağlayacaktır.

$$(\rho_p + \rho_f)g = \left(\frac{F_m}{W_p}\right)_{max} \quad (4,17)$$

Burada $\rho_p(\rho_f)$ kürenin (manyetik sıvının) yoğunluğu, g yer çekimi ivmesidir. Denklem (4,14) dikkate alındığında F_m 'nin maksimum değeri Denklem (4,17) olacaktır.

$$(\rho_p - \rho_t)g = \frac{\sqrt{2k}}{a} \mu_0 \mu^2 k_f \exp\left(-\frac{1}{2}\right) H^2 \quad (4,18)$$

Dış manyetik alan şiddeti olan H_0 yerine, manyetik sıvının indüklenmesi sonucu oluşan toplam manyetik alan şiddeti H götürülmüştür. Çünkü gerçekte non manyetik kürenin dengede tutulmasını sağlayan alan şiddeti H toplam alanıdır. Böylece manyetik sıvının ve mıknatıslama sisteminin fiziksel ve geometrik parametreleri belli olduğunda Denklem (4,11) ve Denklem (4,18)'den belirlenen h ve H değerlerine göre Denklem (4,10)'dan manyetik sıvının içerisinde indüklenen manyetik alan şiddeti belirlenebilir. Dolayısıyla, manyetik sıvı sensörlerin doğru çalışabilmesi için önemli olan indüklenen manyetik alan şiddeti belirlenmiş ve değerlendirilmiş olur. Dahası, pratik bakımdan çok önemli olan bu sonuç, literatürde yeterince incelenmemiş olan bu konu boşluğunun doldurulması için önemli katkı sağlamış olmaktadır. Örneğin, yukarıdaki koşullarda $a=10,5$ mm, $\rho_p=2700$ kg/m³, $\rho_f=885$ kg/m³, $k_f=0,015$ olduğunda Denklem (4,18)'den $H=7,17 \cdot 10^3$ A/m elde edilir. Bu sonuç literatürde sunulan deneysel değerlere iyi uyum sağlamaktadır [101]. Bu deneylerde C şekilli gradyanlı manyetik alan kullanılmıştır.

4.4.4. Küçük Boyutlu Dispers Karışımın Manyetik Alınganlığının Ve Özgül Yoğunluğunun Manyetik Sıvı Sensörlerde Belirlenmesi

Manyetik malzemenin alınganlığının belirlenmesi için birçok standart yöntemler (Faraday, VSM, SQUID, Gouy methodu vb.) kullanılmaktadır. Manyetik alanın çeşitli bilim dallarında (tıp, biyoloji, savunma sanayi, gıda teknolojileri vb.) yaygın olarak uygulanması nedeniyle, bu alanlardaki manyetik özellikli malzemelerin alınganlığının belirlenmesi için yeni ve standart olmayan yöntemler de geliştirilmiştir [107]. Fakat manyetik alınganlığı belirlenen malzemelerin boyutları ve morfolojisi küçüldükçe onların alınganlığının standart yöntemlerle belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle küçük boyutlu, dispersif özellikli manyetik malzeme veya karışımların manyetik alınganlıklarının belirlenmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gündemin önemli problemlerindendir. Manyetik sıvıların farklı bazlarda yapılması sonucu oluşan bu sıvıları kullanmakla manyetik alınganlıkların ve özgül yoğunluklarının belirlenmesi için yeni yöntemler geliştirilebilir. Bu yöntemler Zimmels yönteminin [104] geliştirilmesi ile yapılabilir. Zimmels yöntemine göre

[102], [104] küçük hacimli manyetik malzemeler zayıf manyetik (paramanyetik) süspansiyon içerisine batırılır. Dış manyetik alanın değişimi ile (dolayısıyla dış elektrik devresinde bobinleri besleyen akım şiddetinin) manyetik parçacıkların konumları belirlenir. En az iki konuma veya belli bir örnek numune ile kıyaslanarak küçük hacimli manyetik malzemenin veya karışımın manyetik alınganlığı veya özgül yoğunluğu hesaplanır. Kama türlü kutuplarda alan gradyantını belirlemek için en az iki deney yapmak gerekir. Bu yöntemde dış manyetik alan- akım şiddeti ilişkisi aşağıdaki gibi belirlenir [104].

$$H = k_1 I, \quad \nabla H = k_2 I, \quad H \frac{dH}{dy} = kI^2 \quad (4,19)$$

Burada k_1 , k_2 ve k_3 düzeltme katsayılarıdır ve deneysel olarak belirlenirler. İki farklı parçacık için yapılan deneylerden,

$$\frac{k_f - k_{p1}}{k_f - k_{p2}} \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = \frac{\rho_{p2} - \rho_f}{\rho_{p1} - \rho_f} \quad (4,20)$$

Burada k_f para manyetik süspansiyonun manyetik alınganlığı, k_{p1} ve k_{p2} sırasıyla 1. ve 2. Parçacıkların manyetik alınganlıkları, ρ_f paramanyetik süspansiyonun yoğunluğu, ρ_{p1} ve ρ_{p2} sırasıyla 1. ve 2. parçacıkların yoğunluklarıdır. Parçacıklardan bir tanesi örnek numune olarak seçilirse, diğer parçacığın manyetik alınganlığı veya yoğunluğu kolaylıkla hesaplanabilir. Deneylerde [102], [104] para manyetik sıvı olarak $\rho_f = 1,45 \text{ g/cm}^3$ olan MnCl_2 çözeltisi kullanılmıştır. Deneysel olarak bu çözeltinin manyetik alınganlığı ise,

$$k_f = [137(\rho_f - 1)\rho_f \pm 2] 10^6 \quad (4,21)$$

olarak hesaplanmıştır. Küçük boyutlu manyetik parçacığın veya karışımların manyetik alınganlığı veya yoğunluğu manyetik sıvı kullanılarak mıknatıslanmış ferromanyetik küresel kutupların oluşturduğu alanda da belirlenebilir. Bu yöntemde küreler arasındaki boşlukta manyetik alanın değeri maksimum olduğuna göre bu noktada parçacığın konumu belli olduğuna göre az sayıda deney kullanılacağı aşıkardır. Manyetik alınganlığı belirlenen parçacığın alınganlığının k_p olduğu varsayılırsa, Denklem (4,18) aşağıdaki gibi yazılır,

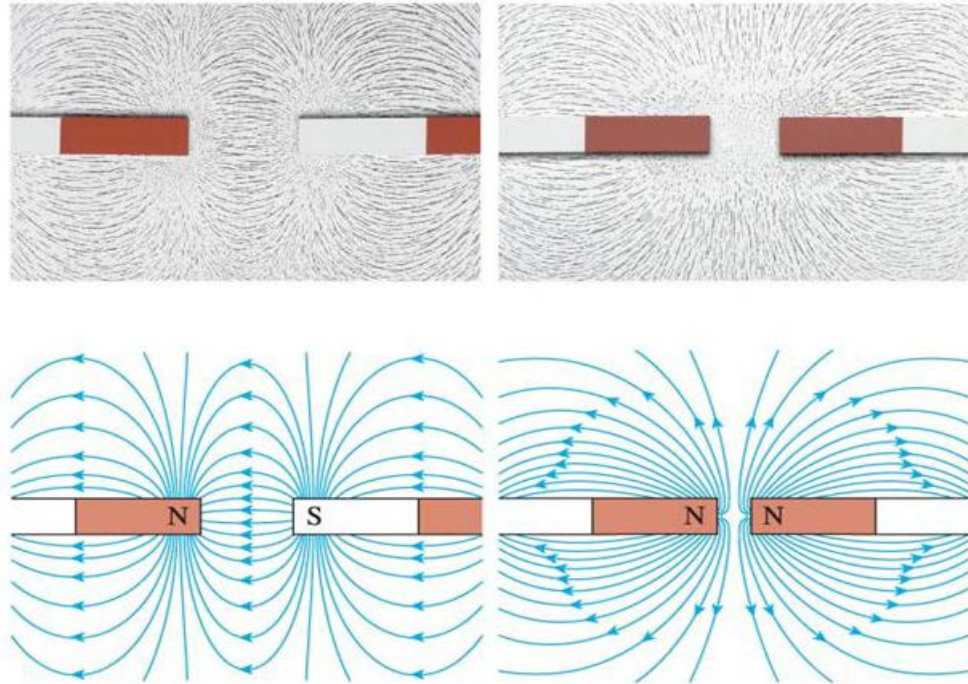
$$(\rho_p - \rho_t)g = \frac{\sqrt{k}}{a} (k_p - k_f) \exp \left(-\frac{1}{2} \right) H^2 \mu^2 \mu_0 \quad (4,22)$$

Örneğin, manyetik özellikli bir karışım veya parçacıklar için $H=10 \text{ kA/m}$, $\rho_f = 885 \text{ kg/m}^3$, $\rho_p=2700 \text{ kg/m}^3$, $k_f=0,015$, $a=10 \text{ mm}$, $g=9,81 \text{ m/s}^2$ hesaplanan manyetik alınganlık $k_p=0,475$ elde edilir. Bu değer maden mühendisliğinde ve sanayi sıvılarının içerdikleri karışımların manyetik alınganlığı değerleri düzeyindedir [102], [104]. Bu parçacıklar veya karışımlar ise esasen magnetit (Fe_3O_4) veya Fe_2^+ bileşenli oksitlerde oluşmuşlardır.

Görüldüğü gibi, manyetik sıvı sensörlerde manyetik kutupların mıknatıslanmış kürelerden seçilmesi ve sensörün veya benzeri düzeneklerin parametreleri arasında daha güvenli ve doğru ilişkiler oluşturmak mümkündür.

4.5. Manyetik Sıvı Sensörlerinde Kullanılan İnce Manyetik Sıvı Tabakasının Dış Manyetik Alan Etkisinde İncelenmesi

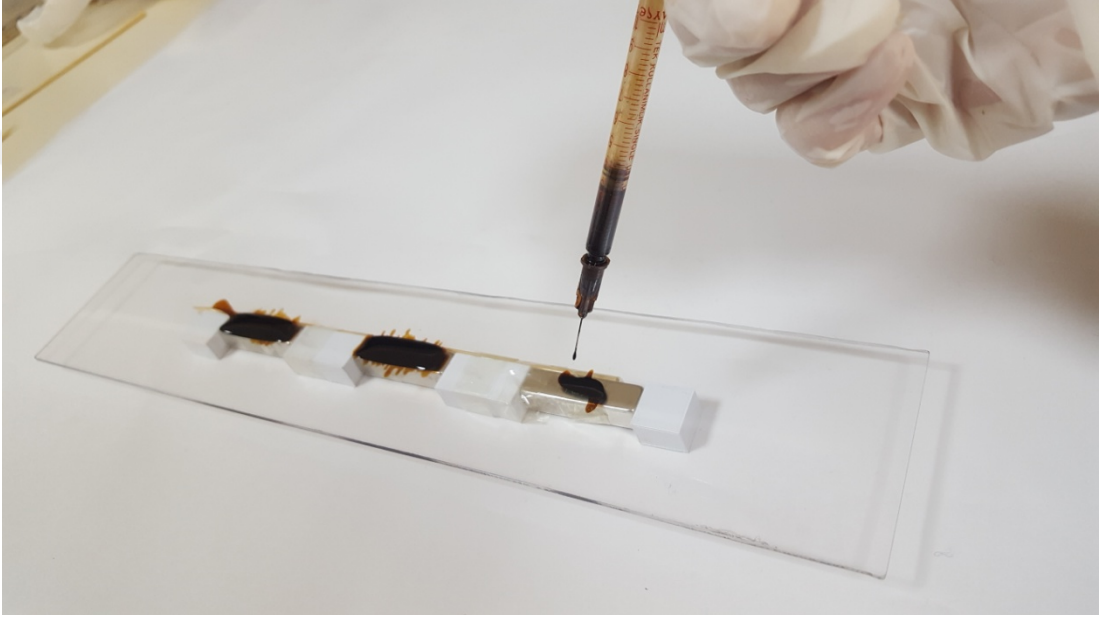
Manyetik sıvı duyarlı sistemlerde değişik yapısal özelliklere sahip farklı manyetik sıvılar kullanılmaktadır. Tezin pratik çalışmalarında kullanılan iso-parafin bazlı Sigma DS-50 tipi manyetik sıvıların da bu bakımdan dış manyetik alanın etkisinde davranışlarının incelenmesinde yarar vardır. Çünkü dış manyetik alan yönlendirmesiyle manyetik sıvıların yüzeylerinde farklı geometriler oluştuğu bellidir [6], [7]. Bu kararsız yüzeyler, Rosensweig Kararsızlığı adını da alır [3]. Tezin bu kısmında, sabit neodyum mıknatıslarıyla oluşturulan manyetik sıvı yüzeyindeki ince sıvı tabakasının kararlılık değişimleri incelenmiştir. Ayrıca sıvı tabakasındaki sıvı miktarının artmasıyla yüzeydeki oluşan kararsız veya kararlı konumlar da değerlendirilmiştir. Belli olduğu üzere manyetik sıvı yüzeyleri dış manyetik alan kuvvet çizgileri yönünde çok sayıda iğnelenmeler oluşturur (Rosensweig Kararsız Yüzeyleri). Buna göre, deneylerde kullanılan sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik alan kuvvet çizgilerinin değerlendirilmesi önemlidir. Şekil 4.5'te iki sabit mıknatısın etkileşimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sabit mıknatısların aynı kutupları (sağda) ve farklı kutupları (solda) etkileşimdeyken meydana gelen manyetik alan çizgileri

Şekilden görüldüğü üzere sabit mıknatısların kutup başlarının etkileşimine bağlı olarak manyetik alan çizgileri dağılarak ya da sıkışarak kapalı bir döngü oluştururlar.

Çalışmalarda ilk olarak 40x10x10 mm boyutlu neodyum mıknatıslar kullanılarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenekte sabit mıknatısların oluşturdukları manyetik alanların birbiri üzerindeki etkisini zayıflatmak için non-manyetik malzemeden takozlar kullanılmıştır. Takozların boyutları 30x15x10 mm boyutlarına sahiptir. Mıknatıs kutupları birbirini itecek şekilde (N-S/ S-N/ N-S) eksenel olarak sıralanıp, etkileşim sonucu hareket etmemeleri için ahşap çubuklarla da sabitlenmişlerdir. Ayrıca manyetik kutuplarından gereken yüzeyi sağlayabilmek için mıknatısların üzerine 2,0 mm kalınlıkta non-manyetik malzeme PPMA'den üretilmiş plaka, mıknatısların yüzeyine direkt temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. İlk olarak her bir mıknatıs üzerine 0,3 ml manyetik sıvı bırakılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Sabit mıknatıslar ile manyetik sıvının etkileşimi

Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere neodyum mıknatısların kutuplarının birbirini itmesi durumunda oluşan manyetik alanın etkisi ile manyetik sıvı yüzeyinde içnelenmeler oluşmamıştır. Bunun sebebi mıknatısların oluşturduğu alan çizgilerinin yukarıdan aşağı doğru kapanarak devam etmesidir. Bu sebeple manyetik sıvı mıknatısın kendisine doğru alan etkisiyle iyice bastırılarak yüzeyinde içnelenmeler oluşmadan mıknatıslanmıştır. Her bir sabit mıknatısın üzerinde 0,3 ml manyetik sıvının bıkardığı düzenek Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sabit neodyum mıknatısların üzerinde 0,3'er ml DS-50 manyetik sıvının mıknatıslanması

Şekilden görüldüğü üzere manyetik sıvı, yüzeyinde iğnelenmeler (sparkles) oluşmadan ve komşu bölgedeki manyetik sıvıyla etkileşime girmeden ince manyetik sıvı tabakası sabit bir şekilde tutulmaktadır.

Daha sonra her bir manyetik sıvı tabakasının üzerine 1 ml manyetik sıvı eklenmiştir. Böylece manyetik sıvı tabakasının kalınlığı artırılmıştır. Bu durumda manyetik sıvı miktarının artırılmasıyla birlikte sıvının yüzey geometrisinde önemli bir geometrik değişim olmamıştır. Ayrıca komşu manyetik sıvı tabakaları arasında etkileşim de olmamıştır. Bu yüzeyler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

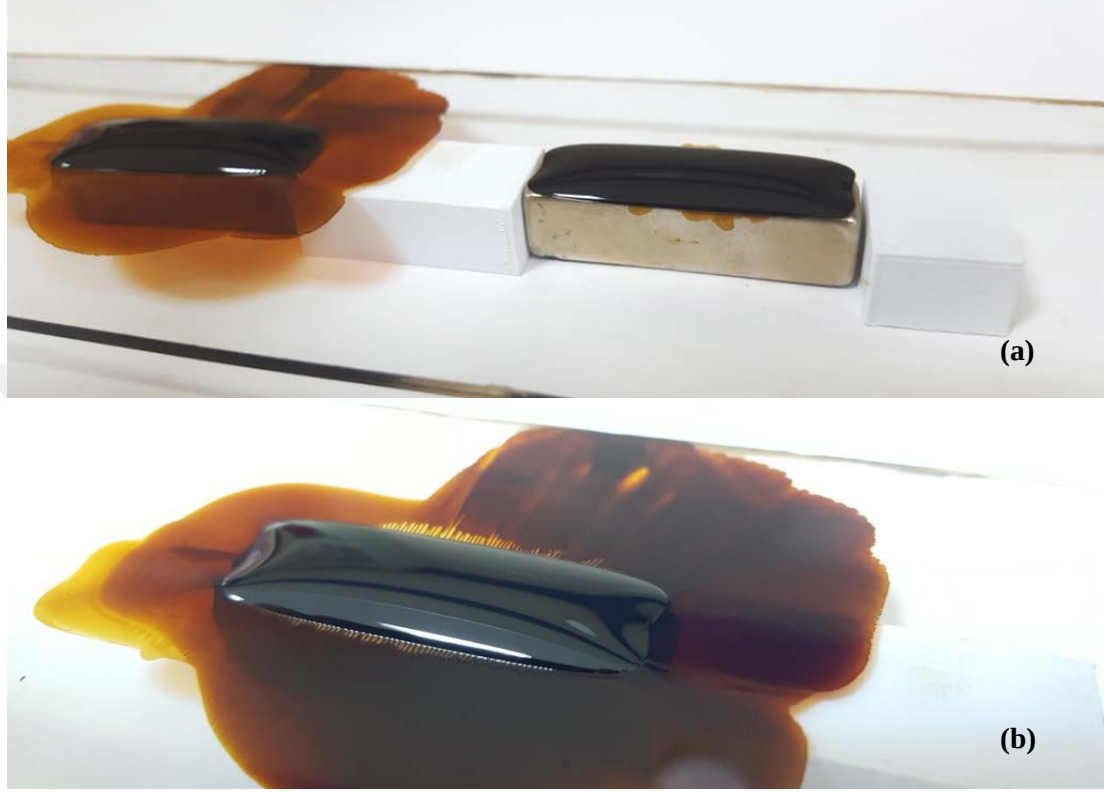


Şekil 4.8. Sabit mıknatısın alanı altında tutulan 1 ml manyetik sıvı

Ancak Şekil 4.8'den görüldüğü üzere, mıknatıs üzerinde tutulan manyetik sıvı miktarı tabakasındaki sıvı miktarı arttıkça, mıknatısın kenar sınırlarında manyetik alan çizgilerinin açılması ile sıvı yüzeyinde hafif iğnelenmeler oluşmaya başlamıştır. Fakat bu durum manyetik sıvı yüzeyindeki Rosensweig kararsızlık yüzeylerinden ziyade, mıknatısların kenarlarındaki saçaklanmadan kaynaklanmaktadır. Bu olayları

daha doğru açıklayabilmek için, manyetik sıvının etkilendiği sabit mıknatısların birbiriyle zıt kutuplarla etkileşmesi durumunda da incelemeler yapılmıştır.

Zıt kutuplu (N-S/ N-S) sabit neodyum mıknatıslar kullanarak manyetik sıvının dış manyetik alan altındaki yüzey geometrisi değişimlerinin incelendiği deney düzeneği Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Sabit mıknatısların kutupları değiştirilerek (birbirini çeker pozisyon) manyetik sıvının tutulması (a), yakından görünüş (b)

Şekil 4.9’a mıknatıslar üzerine 1,0 ml manyetik sıvı bırakılmıştır. Sıvıya yakından bakıldığı zaman (Şekil 4.9.b) mıknatıs kenar sınırlarında Şekil 4.8’in tam tersi şekilde yüzeyden mıknatısa doğru manyetik sıvının çekildiği görülmektedir. Bunun esas sebebi kutup yönleri değiştirilen mıknatısların oluşturduğu alanın Şekil 4.8’de oluşan alanın tam tersi yönünde oluşmasıdır. İnce manyetik sıvı tabakasının manyetik kutuplara çekildiğini gösterebilmek için sıvı yüzey üzerinde ince tabaka şeklinde dağıtılmıştır (Şekil 4.9.a-b). Mıknatısın etkisiyle yüzeye yayılmış sıvı hızla mıknatıs bulunan yüzeye çekilmiştir. Bu durumda sıvının yayıldığı bölgedeki izler de açıkça görülmektedir.

İnce manyetik sıvı tabakalarının yüzeyinde oluşan iğnelenmelerin daha net görünebilmesi için, 1 cm çapında yuvarlak şekilli neodyum mıknatıslar da kullanılmıştır (Şekil 4.10). Bu neodyum mıknatıslar birbirini çeken pozisyonda konumlandırılarak aralarına 30x15x10 mm boyutlu non-manyetik takoz yerleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Sabit yuvarlak geometrili neodyum mıknatısların etkileşimi altında manyetik sıvının tutulması

Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere mıknatıs ile yüzey direkt olarak temas halindedir. Manyetik sıvının mıknatıs üzerine bırakılmasıyla birlikte oluşan manyetik alan yönelimine göre, manyetik sıvı yüzeyinde iğnelenmeler (sparkles) yani dışarı doğru açılmalar net olarak gözlenmiştir. Her iki mıknatıs yüzeyine 0,3 ml manyetik sıvı bırakılarak ince sıvı yüzeyinde oluşan değişimler Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Sabit mıknatısların etkisi altında 0,3'er ml manyetik sıvının tutulması

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere manyetik sıvı yüzeyinde oluşan dış alanın yönüne göre dışarı doğru açılmalar (iğnelenmeler) gözlenmiştir. Manyetik sıvı miktarını arttırdıkça, sıvı tabakasındaki iğnelenmeler de net bir görüntü oluşturarak birbirine

doğru çekimleri başlamıştır. Bu iğnelenmelerin birbirine doğru yaklaşması ve sonucunda yüzey tabakasında oluşan iğnelenmelerin birbiriyle köprü oluşturması Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu deneyde şekilde soldaki mıknatıs üzerinde tutulan manyetik sıvı miktarı arttırılarak gözlemler devam ettirilmiştir. Mıknatıs üzerinde tutulan sıvı miktarı 0,5 ml’ye ulaştığında, manyetik sıvı yüzeylerin birbiriyle etkileşimi hızla artarak bu yüzeyler köprücük oluşturmuştur. Şekil 4.12’de manyetik sıvıların birleşme anı gösterilmektedir.



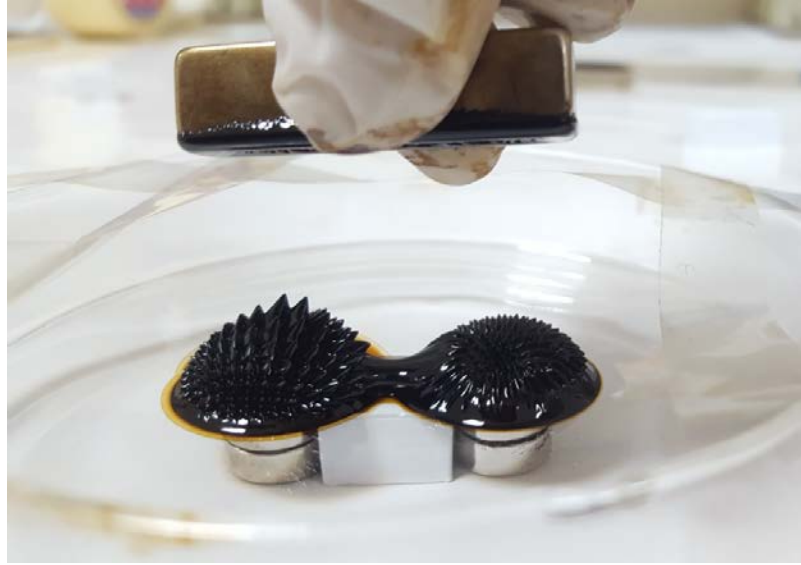
Şekil 4.12. Miktarı arttırılan manyetik sıvıların birbiriyle etkileşimi

Manyetik sıvı miktarı arttırıldığında manyetik sıvının bu köprücükler vasıtasıyla kütle transferi yaptığı gözlenmiştir. Yani manyetik sıvı, miktarı fazla olan bölgeden az olan bölgeye taşınarak her iki sıvı tabakası arasında bir dengelenme oluşmuştur. Şırınga kullanılarak manyetik sıvı miktarının arttırılması devam ettirilmiş ve bu miktar 1 ml’ye ulaştırılmıştır. Sıvının eklenmesi tek bir manyetik sıvı bölgesine yapıldığı halde, bu manyetik sıvı tabakası iğnelenmeler vasıtası ile dış manyetik alanın kuvvet çizgileri boyunca komşu tabakaya aktarılarak her iki mıknatıs üzerinde eşit miktarda (0,5’er ml) dengelenmiştir. Dengelenme tamamlandıktan sonraki durum Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere mıknatısların enerjileri farklı olsaydı, bu durumda her bir mıknatıs üzerindeki dengelenmiş sıvı miktarı da farklı olurdu. Dolayısıyla dış manyetik alan şiddetinin farklı seçimiyle manyetik sıvıların hatasız bir şekilde denge orantısını oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu olay, çok bölgeli manyetik sıvı sensörlerde pratik bakımdan etkin olarak kullanılabilir.



Şekil 4.13. Manyetik sıvıların birleşerek her bir mıknatıs üzerinde aynı miktarda dengelenmesi

Ayrıca neodyum mıknatısların üzerinde biriken manyetik sıvının yüzey geometrileri oluşan manyetik alanın çizgileri yönünde eksiksiz şekiller oluşturduğu da gözlenmiştir. Manyetik alan etkisinde biriken sıvıya taban mıknatısların konumları değiştirilmeden dik düzlemde 40x10x10 mm boyutlu başka bir neodyum mıknatıs yaklaştırılmıştır. Manyetik sıvı, etkisinde olduğu alanın haricinde üçüncü bir mıknatısın da sisteme dâhil edilmesiyle yüzey geometrisini yaklaştırılan üçüncü mıknatısın kutuplarına göre değiştirmeye başlamıştır. Şekil 4.14'te yaklaştırılan mıknatısın manyetik sıvının yüzey geometrisine etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 4.14. Manyetik sıvının dik düzlemde yaklaştırılan mıknatısa tepkisi

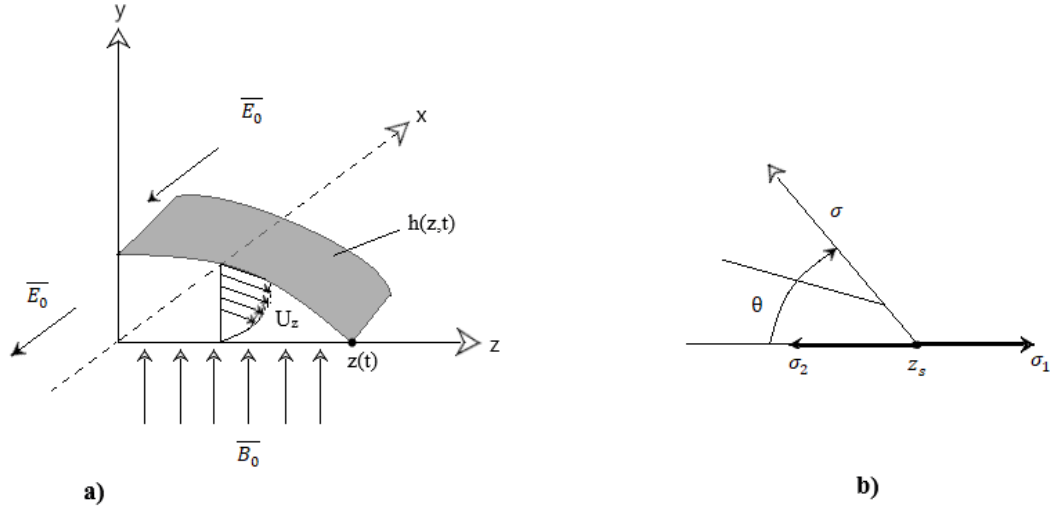
Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi yaklaştırılan mıknatısın diğer sabit mıknatıslarla etkileşimi sonucu manyetik alanın yönlenmesini etkileyerek bir tarafın yüzey iğnelenmesini arttırırken diğer tarafı alttaki mıknatısa doğru bastırarak yüzeyde önceden oluşan iğnelenmeleri sönmölemektedir. Böylece manyetik sıvı kutuplarını ve alan şiddetini değiştirerek manyetik sıvı yüzeyindeki iğnelenme oluşumlarını iyi bir şekilde kontrol etmek mümkündür. Buna göre, manyetik sıvı duyarlı sistemlerde dış manyetik alanın (sabit mıknatıslar) kutup seçimi, enerjisi, itme/çekme kuvvetleri iyice değerlendirilerek seçilmelidir. Çünkü manyetik sıvı duyarlı sistemlerin performansı bu olaylarla değerlendirilir.

Yukarıdaki gözlemlenen bütün olaylarda, manyetik sıvı türünün farklı şekilde seçilmesiyle de farklı şekillerde meydana çıkabilir. Ancak bütün durumlarda manyetik sıvı tabakasının dış manyetik alan sistemiyle etkileşmesi, manyetizmanın temel kavramlarının sonuçlarına uygun olarak gerçekleşir. Bu çalışmalar yapılırken dış ortam sıcaklığı, manyetik sıvı bileşenler arasındaki difüzyon işlemleri, konveksiyon (taşıma) olayları da incelenmelidir. Bu konular tez çalışması kapsamı dışında olduğu için burada incelenmemiştir.

4.5.1. Yatay Düzlemde Manyetik Sıvı Tabakasının Enine Manyetik Alandaki Akışının İncelenmesi

Manyetik sıvıların dik, eğimli ve yatay düzlemlerde davranışının incelenmesi, manyetik sıvı teorisinin ve pratiğinin en eski ve önemli problemlerinden biridir [6], [7]. Bu yönde yapılan çalışmalar manyetik sıvı sensörlerin esas çalışma organlarının teori ve pratiğinin düzenlenmesi için göz ardı edilmeyen bir öneme sahiptir. Buna rağmen manyetik sıvıların yüzeylerden akış dinamiğinin teori ve pratiğinin birçok problemleri hala yeterince açıklanamamaktadır. Bu problemlerin başında ise manyetik sıvıların sensör yüzeyleri hareketinde sınırlarda “donma” koşulunun sağlanmamasıdır [108]. Akışkanlar mekaniğinin temel sınır koşulu olarak sıvı-katı sınırında sıvının akış fazının sıfıra eşit olması yerine manyetik sıvılarda sınır yüzeyinde kayma (slip) akışı olduğu gözlemlenmektedir [6], [7]. Bu nedenle manyetik sıvıların düzlemdeki akışı, sınır koşullarının kayması dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu durumda yavaş akışa sahip olan ince manyetik sıvı tabakasının kalınlığının değişimleri aşağıdaki teorik yaklaşımla da değerlendirilebilir.

Varsayalım ki ince manyetik sıvı tabakası sensör yüzeyinde kalınlığı $h(z,t)$ olmakta ve yavaş hızla yüzeyde yayılmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15.İnce manyetik sıvı tabakasının yatay düzlemde akışı: a) Prensip şeması, b) yüzey kuvvetlerinin sıvı tabakasının uçlarına etkisi

Şekil 4.15'ten görüldüğü gibi, yüzey gerilim kuvveti katsayılarının etkisi ile $(\sigma, \sigma_1, \sigma_2)$ manyetik sıvı tabakasının z_s sabit konumundan, $z(t)$ kayma durumuna geçiş yapabilir. Bu yapıda manyetik sıvının yayılma hızının $(0, U_y, U_z)$ yoğunluğu ρ , dinamik viskozitesi η ve elektriksel geçirgenliğinin σ_E olduğunu kabul edelim. Manyetik sıvı tabakasına $\vec{B}(0, B_0, 0)$ ve $\vec{E}(-E_0, 0, 0)$ elektrik ve manyetik alanların etkiğini kabul edelim. Bu durumda manyetik sıvıdaki basıncın P olduğunu varsaymış olursak, manyetik sıvının z eksenini düzlemsel yüzeydeki akış denklemi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\eta \frac{d^2 U_z}{dy^2} - \frac{dP}{dz} + \eta(E_0 - U_z B_0) = 0 \quad (4,23)$$

$$\frac{dP}{dy} + \rho g = 0 \quad (4,24)$$

$$\frac{dU_y}{dy} + \frac{dU_z}{dz} = 0 \quad (4,25)$$

Burada $\vec{g}(0, -g, 0)$ yerçekimi ivmesidir. Manyetik sıvı tabakasının kalınlığının $y=0$ ve $y= h(z,t)$ ile sınırlandırıldığını kabul ederek, sıvı tabakasının kalınlığının manyetik alanda değişimi denklemini yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz [109].

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dz} \frac{h^3}{3\eta} \left[\frac{d}{dz} \left(\rho g h - \sigma \frac{d^2 h}{dx^2} \right) \right] - \sigma_E E_0 B_0 - U(z, t) h \quad (4,26)$$

Burada $U_z(y=0, t) = V(z, t)$ 'dir.

Manyetik sıvı tabakasının uç kısmının sabit konumdan kayma hızı olarak $U(z, t)$ aşağıdaki gibi belirlenebilir,

$$V(z, t) = \mathcal{V}_f \exp(-\alpha(z_f - z)^2) \quad (4,27)$$

Burada $\mathcal{V}_f = \frac{dz}{dt}$, α –deneylerden belirlenen düzeltme katsayısıdır. Manyetik sıvı tabakasının uç kısmının eğim açısı ise aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma} \quad (4,28)$$

Bu formül ideal pürüzsüz yüzeyler için olsa da, yavaş yayılan sıvı tabakalarında da bir düzeltme katsayısı ile hesaplamalarda kullanılabilir. Denklem (4,26)’nın analitik çözülmesi yeterince karmaşık bir biçime elde edilir [109]. Fakat pratik hesaplamalardan ziyade, teorik amaçla $\sigma = 0$ durumu için manyetik sıvı tabakasının yüzey kalınlığının değişimi hesaplanabilir. Aslında ideal sıvı tabakası için varsayılan bu koşul, güçlü NeFeB mıknatıslarının etkisinde buluna manyetik sıvı tabakası için kabul edilebilir bir kriterdir. Bu durumda Denklem (4,26) aşağıdaki gibi dönüştürülür,

$$\frac{dh}{dz} - \frac{\sigma_E}{\rho g} E_0 B_0 = 0 \quad h(0) = h_0, \quad h(z_f) = 0,$$

Buradan kararlı durumda manyetik sıvının akış tabaka kalınlığı aşağıdaki basit formülle hesaplanabilir,

$$h(z) = h_0 \left(1 - \frac{z}{z_s} \right), \quad z_s = \frac{\rho g h_0}{\sigma_E E_0 B_0} \quad (4,29)$$

Buradan görüldüğü gibi, manyetik sıvı tabakası yayıldıkça dış enine manyetik alanın etkisiyle daha da incelmeye meyilli olur. Manyetik sıvı tabakasının kenarları yüzeye bu yüzeye dik arasında belli bir açı ile sınırlanmış olur. Burada manyetik sıvının düzlem üzerindeki uç noktasının konumu da önemli olur. Genelde manyetik alanda bu konumun durağan olduğu varsayıldığı halde zamanla bu konum da hafif kaymaya maruz kalabilir. Manyetik sıvı tabakasının uç noktalarının bu konumu Denklem (4,29)’dan görüldüğü gibi tabakanın başlangıç kalınlığına (h_0), fiziksel parametrelerine ($\sigma_E \rho, g$) bağlı olduğu kadar, bu sisteme uygulanan elektrik (E_0) ve manyetik (B_0) alanlarına da bağlıdır. Elektrik ve manyetik alanlar arttıkça manyetik sıvı kenarlarının eğimleri de daha net ve durağan olacaktır. Bu tez çalışmasındaki yapılan deneylerde Şekil (4,6- 4,9)’ da açıkça görülmektedir. Ayrıca tez çalışmasında yapılan deneylerde, tabakadaki manyetik sıvı miktarının artmasıyla sıvı kenarlarının hafif genişlemesi ve seri manyetik sıvı tabakaları durumunda bu sınırların birbiriyle birleşmesi olayları da gözlenmiştir (Şekil 4,12-14). Bu olay manyetik sıvı miktarının belli bir kritik hacimden sonra yayılma özelliğinin artmasının yanı sıra, dış manyetik alan granyantının azalması ile de izah edilebilir. Bu nedenle manyetik sıvı sensörlerin tasarımında sıvı tabakası, kullanılan çalışma bölgelerinin tasarımında bu özelliklerin dikkate alınması önemlidir. Sensörlerin çalışma bölgelerindeki manyetik sıvı yüzey kaymalarının dikkate alınmaması, sensörün çıkış karakteristikleri hatalarının artmasına ve sensör ölçüm hassasiyetinin zayıflamasına neden olur. Bu sonuç birçok deneysel alanlarda benzer problemlerin çözümünde de kullanılabilir [110].

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yeni teknolojik sistemlere ait olan manyetik sıvı sistemlerin uygulanmasının teorik ve deneysel incelemeleri yapılmıştır. Tezin amaç ve kapsamına uygun olarak yapılan incelemelerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Günümüzde nano ve mikro teknolojik sistemlerin kullanılması gittikçe yaygınlaşmaktadır. Buna göre, bu tür sistemlerin etkinliğini arttırmak için uygun mikro ve nano malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Manyetik sıvılar yapı ve fizikokimyasal özelliklerine göre yeni malzeme sınıfına ait olup, bu bakımdan nano ve mikro teknolojik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaya aday olan bir malzemedir.
2. Manyetik sıvılar, nano sistem olarak hem akışkanlık hem de mıknatıslanma özelliğine sahip olan malzemelerdir. Bu malzemeler manyetik alan duyarlılığı olan hemen hemen bütün sistem ve aygıtlarda kullanılabilir. Farklı bazlarda yapılabilen manyetik sıvılar, geniş bir uygulama alanına (ağır sanayi, kimya sanayisi, inşaat, tıp, biyoloji, nano teknoloji vb.) sahip olduğuna göre manyetik sıvı teori ve pratiği geniş anlamda disiplinler arası bir bilim dalı olarak resmileşmektedir. Buna göre manyetik sıvı teori ve pratiğinin tüm bu anabilim dallarında bulunan teori ve kavramlarını kullanarak geliştirmek gerekmektedir.
3. Tez çalışmasında manyetik sıvı kullanılarak manyetik sıvı duyarlı sistemlerde farklı kullanım yerlerinde manyetik sıvı teori ve pratiğinin bazı problemlerinin geliştirilmesi ve incelenmesi yapılmıştır.
4. Manyetik sıvı duyarlı sistemlerde elektroteknik aygıt ve yapılar için en önemli eleman olan transformatörlerin ve sensörlerin manyetik sıvı kullanılarak çalışabilmesi ve pratiği geliştirilmiştir.
5. Manyetik sıvı kullanılan sistemler için mikro transformatör ve endüstriyel PCB tip transformatör kullanılmıştır. Bu transformatörlerin manyetik nüve kısımları yerine manyetik sıvılar kullanılarak incelemeler yapılmış, çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir.
6. İnce boyutlara sahip olan bir şırınga niteliğinde çekirdek üzerine yapılan primer ve sekonder sargılarından oluşturulmuş mikro transformatörün nüve mıknatıslanması değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Şırınganın hacmindeki manyetik sıvı miktarı ayarlanarak mikro transformatörün giriş ve çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucu küçük boyutlu elektroteknik sistemlerde bu tür transformatörlerin kullanılabilir olacağı kanaatine varılmıştır.
7. Mikro transformatörün nüve kısmı farklı manyetik sıvı miktarlarıyla doldurularak, transformatörün çıkış karakteristiklerinin de bu durumda değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca mikro transformatörün konumunu, eğimini değiştirerek primer ve sekonder sargılarındaki endüktansların değişimleri de gözlenmiştir. Böylece mikro transformatörün konumunu değiştirerek primer ve sekonder sargılarındaki empedansların da ayarlanabilir olduğu görülmüştür.

8. Şırınga pistonunu hareket ettirerek manyetik sıvı miktarının değişimine göre mikro transformatörün çıkış gerilimini kademeli değil sürekli olarak ayarlayabilmenin mümkün olduğu vurgulanmıştır.
9. Tasarlanmış mikro transformatörün yüksek frekanslardaki çalışma performansı da incelenmiştir. Bu transformatörlerin nispeten yüksek frekanslarda da iyi bir performans sergilediği gözlenmiştir. Bu frekansların seviyesi 50-100 kHz aralığında daha etkin olduğu gözlenmiştir. Ancak frekans arttıkça bu transformatörlerin verimi de hızla düşmüştür. Bunun nedeni sıvı içerisindeki manyetik parçacıkları üzerindeki elektriksel ve manyetik kayıpların artmasıdır.
10. Deneylerde manyetik sıvı miktarının ve bu sıvının mıknatıslanma özelliğinin artmasıyla transformatörün veriminin de arttığı gözlenmiştir. Buna göre, deneylerde kullanılan DS-50 tip manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğinin artırılması için girişimlerde bulunulmuştur. Bu amaçla standart DS-50 manyetik sıvısının içerisine farklı oranlarda sanayi üretimi saf demir tozu eklenmiştir. Dispers boyutları 100 mikronu geçmeyen bu parçacıklar, farklı deney kademelerinde manyetik sıvıya eklenerek ölçümleri yapılmıştır.
11. Manyetik sıvı nüveli mikro transformatörün nüvesindeki manyetik tozun derişiminin artmasıyla transformatörün çıkış karakteristiklerinin de iyileştiği gözlenmiştir. Yapı bakımından en elverişli düzenin 1 ml manyetik sıvıya %50 hacimli saf demir tozunun eklendiği durumda elde edilmiştir.
12. Mikro transformatör nüvesinin tümünün saf magnetit tozla doldurulması durumunda, mikro transformatörün çıkış karakteristiklerinde hafif artışların olduğu da görülmüştür. Ancak frekansın artmasıyla nüvedeki kayıplar da (manyetik, girdap, histerezis) arttığı gözlenmiştir.
13. Manyetik sıvıların daha güçlü transformatörler için kullanılabilir olduğunu göstermek amacıyla PCB tip endüstriyel transformatör üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu amaçla aynı teknoloji ile yapılmış eş değer iki PCB tip transformatörün nüvesi üzerinde manyetik sıvıların etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla transformatörün nüve yan kollarında fiziksel hava boşlukları oluşturulmuştur. Bu hava boşlukları 0,5 mm ve 1,0 mm olarak açılmışlardır. Değiştirilmiş bu transformatörün çıkış karakteristikleri, eş değer sanayi transformatörün çıkış karakteristikleriyle kıyaslanmıştır. Oluşturulan değişimlerin transformatörün verimini ciddi şekilde etkilediği ölçüm ve grafiklerle sunulmuştur.
14. Oluşturulan hava boşluklarının manyetik sıvılarla onarılması durumunda transformatörün çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir. Manyetik sıvıların kullanımıyla değiştirilmiş transformatörün karakteristiklerinde iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir. Manyetik sıvının içerdiği manyetik parçacıkların derişiminin artırılmasıyla bu karakteristiklerin daha da iyileştiği görülmüştür.

15. Manyetik sıvı yerine saf magnetit demir tozu kullanıldığında da endüstriyel tip transformatörün çıkış karakteristiklerinde iyileşmelerin olduğu görülmüştür.
16. Manyetik sıvıların veya demir tozlarının kullanılması durumunda yüksek frekanslarda ve çalışma gerilimlerinde kayıpların da arttığı gözlenmiştir. Bu değişimler transformatörlerin hem çıkış karakteristiklerinden hem de transformatörlerin ısınmasından açıkça görülmüştür.
17. Oluşturulan mikro transformatörün ve endüstriyel transformatörün nüvelerinde manyetik sıvı kullanılmasında oluşan manyetik ve ısı kayıplarına rağmen manyetik sıvı nüveli transformatörlerin çıkış karakteristiklerinin sürekli olarak ayarlanabilmesi bakımından daha avantajlı oldukları kanaatine varılmıştır. Bu özellikler göz önünde tutularak manyetik sıvıların daha güçlü transformatörlerde ve çok fazlı transformatörlerde nüve elemanı olarak kullanılmasının avantajlı olduğu gözlenmiştir. Bu yöndeki çalışmaların devam ettirilmesi uygun görülmüştür.
18. Manyetik sıvı duyarlı diğer sistemlerin sensörler ve seperasyon sistemleri olduğu bilinmektedir. Tez çalışmalarında manyetik sıvıların manyetik sıvı duyarlı sensörlerde kullanılmasının bazı teorik kavramları da incelenmiştir. Manyetik sıvıların hidrodinamiği ve mıknatıslanma özelliklerinin bazı teorileri geliştirilmiştir.
19. Manyetik duyarlı sistemlerin performansını yükseltmek için manyetik sıvıların kullanıldığı bölgelerin manyetik alan gradyanlarının yükseltilmesi gerekir. Bu amaçla manyetik sıvıların mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerin oluşturduğu alandaki davranışları teorik olarak incelenmiştir. Manyetik sıvı sensörler için önemli olan manyetik sıvı içerisinde indüklenen manyetik alanın belirlenmesi için basit matematiksel yöntem sunulmuştur.
20. Manyetik sıvı kullanılarak non-manyetik malzemelerin manyetik alınganlığının ve yoğunluğunun değerlendirilmesi için teorik model sunulmuştur. Bu modele göre, küçük boyutlu manyetik parçacıkların da manyetik alınganlıklarının değerlendirilebilir olduğu gösterilmiştir.
21. Manyetik sıvı sensörlerine örnek olarak yüksek elektrik akımı ölçüm sistemlerinde kullanılabilir manyetik sıvı akımölçer tasarlanmıştır. Bu sensörün çıkış karakteristiklerinin belirlenmesi için matematiksel teori geliştirilmiştir.
22. Manyetik sıvı sensörlerin farklı konumlarda çalışma performansını değerlendirmek için manyetik sıvıların dış manyetik alan etkisiyle ince tabaka akışı deneysel olarak incelenmiştir. Dış manyetik alan mıknatıslarının konum ve kutuplarının uygun seçimiyle, manyetik sıvıların yüzey şekillendirilmesinin farklı şekilde yapıldığı gösterilmiştir.
23. Manyetik sıvı tabakasındaki sıvı miktarını ayarlayarak, sensörlerde kullanılan manyetik sıvıların yüzey şekillendirilmesi ve farklı hacimlerin kütle transferinin yapılabilirliği deneylerde görülmüştür.

24. Yapılan teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda manyetik sıvıların manyetik duyarlı sistemlerde mikro ve nano teknoloji boyutlarında kullanılmasının etki olduğu kanaatine varılmıştır. Manyetik sıvıların manyetik duyarlı sistemlerde yaygın olarak kullanılabilmesi için, disiplinler arası anabilim dallarında çok sayıda deneysel incelemelerin yapılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.



6. KAYNAKLAR

- [1] Papell Solomon Stephen, *Low Viscosity Magnetic Fluid Obtained By The Colloidal Suspension Of Magnetic Particles*, US Patent 3,215,572 1965.
- [2] J. L. Neuringer, R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, **Phys. Fluids**, 7:12, (1964) 1927.
- [3] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics - R. E. Rosensweig*, Dover, 2014.
- [4] S. Odenbach, *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, development and ferrofluids*, vol. 763. Springer Verlag, 2009.
- [5] M. I. Shliomis, *Magnetic fluids*, **Sov. Phys. Uspekhi**, 17:2 , (1974) 153–169.
- [6] B. M. Berkovskiĭ, V. G. Bashtovoiĭ, and Unesco., *Magnetic fluids and applications handbook*, Begell House, Inc, 1996.
- [7] B. M. Berkovskiĭ, V. F. Medvedev, M.S. Krakov, *Magnetic fluids; engineering applications*, **Mater. Res. Bull.**, 29:12 (2003) 1352–1353.
- [8] V. Ervithayasuporn and Y. Kawakami, *Synthesis and characterization of core-shell type Fe_3O_4 nanoparticles in poly(organosilsesquioxane)*, **J. Colloid Interface Sci.**, 332: 2, (2009) 389–393.
- [9] L. Vékás, D. Bica, and O. Marinica, *Magnetic Nanofluids Stabilized With Various Chain Length Surfactants*, 2006.
- [10] K. Hayashi, W. Sakamoto, and T. Yogo, *Magnetic and rheological properties of monodisperse Fe_3O_4 nanoparticle/organic hybrid*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 321:5, (2009) 450–457.
- [11] T. Ozkaya, M. S. Toprak, A. Baykal, H. Kavas, Y. Köseoğlu, and B. Aktaş, *Synthesis of Fe_3O_4 nanoparticles at 100 °C and its magnetic characterization*, **J. Alloys Compd.**, 47: 1–2 (2009) 18–23.
- [12] T. S. Raj K., Moskowitz B., *New commercial trends of nanostructured ferrofluids*, **Indian J. Eng. Mater. Sci.**, 11:4 (2004) 241–252.
- [13] M. Chastellain, A. Petri, and H. Hofmann, *Particle size investigations of a multistep synthesis of PVA coated superparamagnetic nanoparticles*, **J. Colloid Interface Sci.**, 278:2, (2004) 353–360.
- [14] R. F. C. Marques *et al.*, *Electro-precipitation of Fe_3O_4 nanoparticles in ethanol*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 320:19, (2008) 2311–2315.
- [15] R. Abu Mukh-Qasem and A. Gedanken, *Sonochemical synthesis of stable hydrosol of Fe_3O_4 nanoparticles*, **J. Colloid Interface Sci.**, 284:2 (2005) 489–494.
- [16] Y. Cai, Y. Shen, A. Xie, S. Li, and X. Wang, *Green synthesis of soya bean sprouts-mediated superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 322:19, (2010) 2938–2943.
- [17] B. Jeyadevan And T. Fujita, *Preparation methods and properties of magnetic*

- fluid. A review.*, **J. Soc. Mater. Eng. Resour. Japan**, 3: 2, (1990) 100–127.
- [18] L. Cabrera, S. Gutierrez, N. Menendez, M. P. Morales, and P. Herrasti, *Magnetite nanoparticles: Electrochemical synthesis and characterization*, **Electrochim. Acta**, 53:8, (2008) 3436–3441.
 - [19] S. Odenbach and S. Thurm, *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.
 - [20] A. . Fallis, *Ferrofluids Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*, **Springer**, 53:9.
 - [21] X. Biao, L. Yiping, R. Hongjuan, and H. Ren, *Review on Magneto-Rheological Fluid and its Application*, **Am. J. Nanosci. Nanotechnol.**, 2: 4 (2014) 70–74.
 - [22] T. Yamamura, D. Nakamura, M. Higashiwaki, T. Matsui, and A. Sandhu, *High sensitivity and quantitative magnetic field measurements at 600°C*, **J. Appl. Phys.**, 99:8 (2006) 302.
 - [23] L. Pislaru-Danescu *et al.*, *Prototyping a Ferrofluid-Cooled Transformer*, **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 49: 3 (2013) 1289–1298.
 - [24] D. C. Jiles and C. C. H. Lo, *The role of new materials in the development of magnetic sensors and actuators*, **Sensors and Actuators, A: Physical** , 106:1–3 (2003) 3–7.
 - [25] J. B. Yi, X. P. Li, J. Ding, and H. L. Seet, *Study of the grain size, particle size and roughness of substrate in relation to the magnetic properties of electroplated permalloy*, **J. Alloys Compd.**, 428:1–2, (2007) 230–236.
 - [26] L. Pislaru-Danescu, A. M. Morega, G. Telipan, M. Morega, J. B. Dumitru, and V. Marinescu, *Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering*, **IEEE Trans. Magn.**, 49:11 (2013) 5489–5497.
 - [27] L. Matuszewski and Z. Szydło, *The application of magnetic fluids in sealing nodes designed for operation in difficult conditions and in machines used in sea environment*, **Polish Marit. Res.**, 15: 3 (2008) 49–58.
 - [28] A. Joseph and S. Mathew, *Ferrofluids: Synthetic Strategies, Stabilization, Physicochemical Features, Characterization, and Applications*, **Chempluschem**, 79: 10, (2014) 1382–1420.
 - [29] H. Hartshorne, C. J. Backhouse, and W. E. Lee, *Ferrofluid-based microchip pump and valve*, **Sensors Actuators, B Chem.**, 99: 2–3 (2004) 592–600.
 - [30] A. Bibo, R. Masana, A. King, G. Li, and M. F. Daqaq, *Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester*, **Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.**, 376:32 (2012) 2163–2166.
 - [31] P. Ripka and K. Závěta, *Chapter Three Magnetic Sensors: Principles and Applications*, **Handb. Magn. Mater.**, vol. 18 (2009) 347–420.
 - [32] Q. A. Pankhurst, J. Connolly, S. K. Jones, and J. Dobson, *Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine*, **J. Phys. D. Appl. Phys.**, 36:13(2003)

R167–R181.

- [33] D. S. Alberts *et al.*, *Locoregional Cancer Treatment with Magnetic Drug Targeting*, **Cancer Res.**, 48:20 (1988) 5874–7.
- [34] R. S. Popovic, P. M. Drljaca, and P. Kejik, *CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts*, **Sensors Actuators, A Phys.**, 129:1-2 (2006) 94–99.
- [35] C. L. Dumoulin, S. P. Souza, and R. D. Darrow, *Real-time position monitoring of invasive devices using magnetic resonance*, **Magn. Reson. Med.**, 29:3, (1993) 411–415.
- [36] A. Barthélémy, A. Fert, and F. Petroff, *Chapter 1 Giant magnetoresistance in magnetic multilayers*, **Handb. Magn. Mater.**, vol. 12, (1999) 1–96.
- [37] E. Hee Kim, H. Sook Lee, B. Kook Kwak, and B.-K. Kim, *Synthesis of ferrofluid with magnetic nanoparticles by sonochemical method for MRI contrast agent*, **J. Magn. Magn. Mater.**, vol. 289 (2005) 328–330.
- [38] D. K. Wickenden *et al.*, *Micromachined polysilicon resonating xylophone bar magnetometer*, **Acta Astronaut.**, 52: 2–6 (2003) 421–425.
- [39] L. Y., *Magnetic recording technologies: overview*. In: Buschow, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 2007.
- [40] MXT Inc. (2018). <http://www.mxt.ca/index.html>, (Online Accessed: 22-Oct-2018).
- [41] S. Tumanski, *Thin Film Magnetoresistive Sensors*,. Francis, 2001.
- [42] E. Zimmermann, A. Verweerd, W. Glaas, A. Tillmann, and A. Kemna, *An AMR sensor-based measurement system for magnetoelectrical resistivity tomography*, **IEEE Sens. J.**, 5:2 (2005) 233–240.
- [43] S. Fericean and R. Droxler, *New Noncontacting Inductive Analog Proximity and Inductive Linear Displacement Sensors for Industrial Automation*, **IEEE Sens. J.**, 7:11 (2007) 1538–1545.
- [44] B. Ando, A. Ascia, S. Baglio, and N. Savalli, *A Novel Ferrofluidic Inclinometer*, **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, 56:4, (2007) 1114–1123.
- [45] R. E. Rosensweig, *Fluid Dynamics and Science of Magnetic Liquids*, **Adv. Electron. Electron Phys.**, vol.48 (1979) 103–199.
- [46] R. E. Rosensweig, *Buoyancy And Stable Levitation Of A Magnetic Body Immersed In A Magnetizable Fluid*, **Nature**, 210:5036 (1966) 613–614.
- [47] K. Raj and R. Moskowitz, *Commercial applications of ferrofluids*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 85:1–3 (1990) 233–245.
- [48] B. Andò, S. Baglio, and A. Beninato, *A flow sensor exploiting magnetic fluids*, in **Procedia Engineering**, vol. 25 (2011) 559–562.
- [49] B. Jacobson, *Endoradiosonde techniques-A survey*, **Med. Electron. Biol.**

Eng.,1:2 (1963) 165–180.

- [50] C. C. Collins, *Miniature Passive Pressure Transensor for Implanting in the Eye*, **IEEE Trans. Biomed. Eng.**, 14:2 (1967) 74–83.
- [51] J. A. Potkay, *Long term, implantable blood pressure monitoring systems*, **Biomed. Microdevices**,10:3 (2008) 379–392.
- [52] T. Kakaday, A. W. Hewitt, N. H. Voelcker, J. S. J. Li, and J. E. Craig, *Advances in telemetric continuous intraocular pressure assessment*, **Br. J. Ophthalmol.**, 93:8 (2009) 992–996.
- [53] G. Chitnis and B. Ziaie, *A ferrofluid-based wireless pressure sensor*, **J. Micromechanics Microengineering**, 23:12 (2013) 125-131.
- [54] I. Torres-Díaz and C. Rinaldi, *Recent progress in ferrofluids research: Novel applications of magnetically controllable and tunable fluids*, **Soft Matter**, 10:43 (2014) 8584–8602.
- [55] X.-K. Bai, S.-L. Pu, L.-W. Wang, X. Wang, G.-J. Yu, and H.-Z. Ji, *Tunable magneto—optic modulation based on magnetically responsive nanostructured magnetic fluid*, **Chinese Phys. B**, 20:10 (2011) 107-501.
- [56] S. Pu, X. Chen, Y. Chen, W. Liao, L. Chen, and Y. Xia, *Measurement of the refractive index of a magnetic fluid by the retroreflection on the fiber-optic end face*, **Appl. Phys. Lett.**, 86:17 (2005) 171-904.
- [57] S. Y. Yang, J. J. Chieh, H. E. Horng, C.-Y. Hong, and H. C. Yang, *Origin and applications of magnetically tunable refractive index of magnetic fluid films*, **Appl. Phys. Lett.**, 84: 25 (2004) 5204–5206.
- [58] Y. Zou, K. Liu, Z. Shen, and X. Chen, *Magnetic-fluid core optical fiber*, **Microfluid. Nanofluidics**, 10:2 (2011) 447–451.
- [59] Y. Zhao, R. Lv, Y. Zhang, and Q. Wang, *Novel optical devices based on the transmission properties of magnetic fluid and their characteristics*, **Opt. Lasers Eng.**,50:9 (2012) 1177–1184.
- [60] J. J. Chieh, C. Y. Hong, S. Y. Yang, H. E. Horng, and H. C. Yang, *Study on magnetic fluid optical fiber devices for optical logic operations by characteristics of superparamagnetic nanoparticles and magnetic fluids*, **J. Nanoparticle Res.**, 12:1 (2010) 293–300.
- [61] J. Rabinow, *The magnetic fluid clutch*, **Electr. Eng.**, 67:12 (1948) 1167–1167.
- [62] W. M. Winslow, *Induced Fibration of Suspensions*, **J. Appl. Phys.**, 20:12 (1949) 1137–1140.
- [63] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson, *Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids*, **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 10:1 (1969) 5–13.
- [64] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, and R. Hidalgo-Alvarez, *Magnetorheological fluids: a review*, **Soft Matter**, 7:8 (2011) 3701.

- [65] J. Wang and G. Meng, *Magnetorheological fluid devices: Principles, characteristics and applications in mechanical engineering*, **Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.**, 215:3 (2001) 165–174.
- [66] M. C. Heine, J. de Vicente, and D. J. Klingenberg, *Thermal transport in sheared electro- and magnetorheological fluids*, **Phys. Fluids**, 18: 2 (2006) 301.
- [67] J. Liu, G. A. Flores, and R. Sheng, *In-vitro investigation of blood embolization in cancer treatment using magnetorheological fluids*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 225: 1–2 (2001) 209–217.
- [68] K. J. Solis and J. E. Martin, *Isothermal Magnetic Advection: Creating functional fluid flows for heat and mass transfer*, **Appl. Phys. Lett.**, 97:3 (2010) 034-101.
- [69] A. G. Olabi and A. Grunwald, *Design and application of magneto-rheological fluid*, **Mater. Des.**, 28:10 (2007) 2658–2664.
- [70] J. D. Carlson and M. R. Jolly, *MR fluid, foam and elastomer devices*, **Mechatronics**, 10: 4–5 (2000) 555–569.
- [71] E. M. Shtarkman, *Rotary shock absorber with a controlled damping rate*, US Patent US 4942947A, April 1989.
- [72] B. F. Spencer, J. D. Carlson, M. K. Sain, and G. Yang, *On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures*, in *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, (1997), pp. 458–462.
- [73] J. M. Ginder, *Behavior of Magnetorheological Fluids*, **MRS Bull.**, 23:08 (1998).
- [74] Lord Corporation.(1999). www.motion-master.com, www.mrfluid.com. (on-line access on 20 Feb 2019).
- [75] I. Torres-Diaz and C. Rinaldi, *Ferrofluid flow in a spherical cavity under an imposed uniform rotating magnetic field: Spherical spin-up flow*, **Phys. Fluids**, 24: 8 (2012).
- [76] A. Chaves, M. Zahn, and C. Rinaldi, *Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements*, **Phys. Fluids**, 20:5 (2008) 053-102.
- [77] H. Lamb, *Hydrodynamics*. Cambridge university press, 1993.
- [78] G. Bal, *Transformatorlar*. Seçkin Yayıncılık, 2012.
- [79] Transformator.(2018). www.Wikizeroo.Net/Index.Php?Q=Ahr0chm6ly90ci53awtpcgvkaweub3jnl3dpa2kvvhjhbnmb3jtyxtdtn1 (on-line accessed: 19-Nov-2018).
- [80] A. Arora, *Optical and electric field control of magnetism ”* MSc Thesis, Institutional Repository of the University of Potsdam, 2018.
- [81] Elektrikde. (2018). <http://www.elektrikde.com/transformatorlerde-bostayuksuz-calisma-ve-kisa-devre-testi/>, (On-line accessed: 21-Nov-2018).

- [82] L. R. Volpatti and A. K. Yetisen, *Commercialization of microfluidic devices*, **Trends Biotechnol.**, 32:7 (2014) 347–350.
- [83] SINTEF.(2016).www.Sintef.No/En/Projects/Polsi-A-New-Industrial-Production-Method-For-Next-/ (On-line Accessed: 21-Nov-2018).
- [84] P. Abgrall and A.-M. Gué, *Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review*, **J. Micromechanics Microengineering**, 17:5 (2007) R15–R49.
- [85] G. Kemp, *Capillary Electrophoresis*, **Biotechnol. Appl. Biochem.**, 27:1 (1998) 9–17.
- [86] SIGMA CO INC.(2018). http://www.sigma-hc.co.jp/english/magnetic_fluid.html (Online access on 20 March 2019).
- [87] RENTECH.(2018).<https://www.rentech.com.tr/urun/helmholtz-bobinleri-deney-seti-manuel-step-motorlu-urun-kodu-reee09-reee09-sm/> (On-line Accessed: 14-Oct-2018).
- [88] C. K. U. Arifoğlu, *MATLAB ve Mühendislik Uygulamaları*. Alfa, 2003.
- [89] K. Kartaca and T. Abbasov, Küçük Boyutlu Manyetik Sıvı Nüveli Transformatörün Tasarımı ve İncelenmesi, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 2018.
- [90] K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, Y. E. Ekici, and İ. C. Dikmen, Designing and Analysing of Ferrofluid Core Transformer, 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP) (2018) 1–4.
- [91] K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, And İ. C. Dikmen, “Investigation Of The Characteristics Of Output By Using Magnetic Fluids İn Air Gaps Formed İn The Core Of A Single Phase Transformer,” Uemk 2018 Bildiri Özetleri Kitabı, (2018) 964-972.
- [92] K. Kartaca And T. Abbasov, Modeling And Investigation Of Ferrofluid Micro Transformer And Industrial Type Transformer, **Int. J. Energy Eng. Sci.**, 3:3 (2019) 86–100.
- [93] M. M. M. Elmars Blums, Andrejs Cebers, *Magnetic Fluids - Elmars Blums, Andrejs Cebers, M. M. Maiorov - Google Kitaplar*. 1997.
- [94] P. Kopčanský Et Al., “Magnetic Fluids And Their Technical And Biomedical Applications,” 2008.
- [95] L. Vékás, *Magnetic Nanofluids Properties And Some Applications*, **Rom. J. Phys.**, 49 (2004) 707–721.
- [96] L. Qian And D. Li, *Use Of Magnetic Fluid İn Accelerometers*, **J. Sensors**, Vol. (2014) 1–9.
- [97] D. C. Li, *Theory And Application Of Magnetic Fluids*. China Science Press, 2003.
- [98] D. C. Li, *Theory and Applications of Magnetic Fluid Seals*. Cambridge, 1985.

- [99] P. Monolescu, *Industrial Electrical Measurements*. Bucharest: Technical Publishing House, 1966.
- [100] C. D. Buioca, V. Iusan, A. Stanci, and C. Zoller, *A new type magnetofluidic actuator*, **J. Magn. Magn. Mater.**, 252 (2002) 318–320.
- [101] C. D. Buioca, V. Iusan, and A. Stanci, *Computer aided design of a high electric current magnetofluidic sensor*, **Sensors Actuators, A Phys.**, 94: 3 (2001) 161–164.
- [102] Y. Zimmels and I. Lin, *Principles of three-dimensional magnetohydrostatic axial separation system*, **IEEE Trans. Magn.**, 18:3 (1982) 921–928.
- [103] Y. Zimmels and I. Lin, *Characterization of magnetohydrostatic axial separation system*, **IEEE Trans. Magn.**, 19:1 (1983) 27–32.
- [104] Y. Zimmels, *Measurement of specific gravity and magnetic susceptibility of particulate materials by levitation in paramagnetic solutions*, **IEEE Trans. Magn.**, 13:2 (1977) 959–962.
- [105] T. Abbasov, *Elektromanyetik Filtreleme İşlemleri*. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2002.
- [106] Y. Zimmels and I. J. Lin, *Advances in magnetic separation techniques for mineralogical studies*, **International Congress On Applied Mineralogy**, (1981) vol. 1 491–498.
- [107] K. E. McCloskey, J. J. Chalmers, and M. Zborowski, *Magnetic Cell Separation: Characterization of Magnetophoretic Mobility*, **Anal. Chem.**, 75: 24 (2003) 6868–6874.
- [108] D. V. D. SH, *On the motion fluid-fluid interface along a slip flow*, **J. Fluid Mech.**, 19:2 (1977) 209–229.
- [109] Pavlov and K.B., *Spread of a conductive liquid film in a transverse magnetic field*, **Magnetohydrodyn. (Engl. Transl.)**, 21:1 1985.
- [110] V. Zablotskii, O. Lunov, S. Kubinova, T. Polyakova, E. Sykova, and A. Dejneka, *Effects of high-gradient magnetic fields on living cell machinery*, **J. Phys. D. Appl. Phys.**, 49:49 (2016) 493–503.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Kübra KARTACA

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya/ 10.12.1990

Adres: İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, D Blok Kat.2 Battalgazi/Malatya

E-Posta: kubra.kartaca@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Mesleki Deneyim: Bozankaya Otomotiv A.Ş.

- Trambüs Saha Elektrik Bakım Sorumlusu (2017-devam ediyor)

Yayın Listesi:

1. K. Kartaca, T. Abbasov, Modeling And Investigation Of Ferrofluid Micro Transformer And Industrial Type Transformer, International Journal of Natural and Engineering Sciences, vol.3, pp. 86-100 , 2018.
2. T. Abbasov, T. Karadağ, İ. C. Dikmen, K. Kartaca, The role and status of the universities in global energy policy Case study: Inonu University, Malatya, Turkey, International Conference on Energy of the Future (ICEF2018), Baku/Azerbaijan, 2018.
3. U. Keskinçinç, T. Abbasov, T. Karadağ, K. Kartaca et. al., Electromagnetic Field Pollution Measurements And Mappings In A University Settlement, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), Malatya/Turkey, 2018.
4. K. Kartaca, T. Abbasov, Design and Analysis of Small Dimensional Magnetics Nuanced Transformer, International Conference on Innovative Engineering Applications, Sivas/Turkey, 2018.
5. K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, Manyetik sıvı nüveli Transformatörün Tasarımı ve İncelenmesi, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing(IDAP), Malatya/Turkey, 2018.
6. K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, , İ. C. Dikmen, An Overview of Battery Technologies, International Energy and Engineering Congress and Exhibition, pp. 974-987, Gaziantep/Turkey, 2018.

7. K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, İ. C. Dikmen, Investigation of the Characteristics of Output by Using Magnetic Fluids in Air Gaps Formed in the Core of a Single Phase Transformer, pp. 964-973, Gaziantep/Turkey, 2018.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. K. Kartaca, T. Abbasov, Modeling And Investigation Of Ferrofluid Micro Transformer And Industrial Type Transformer, International Journal of Natural and Engineering Sciences, vol.3, pp. 86-100, Gaziantep/Turkey, 2018.
2. K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, Manyetik sıvı Nüveli Transformatörün Tasarımı ve İncelenmesi, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing(IDAP), Malatya/Turkey, 2018.
3. K. Kartaca, T. Abbasov, Design and Analysis of Small Dimensional Magnetics Nuanced Transformer, International Conference on Innovative Engineering Applications, Sivas/Turkey, 2018.
4. K. Kartaca, T. Abbasov, T. Karadağ, İ. C. Dikmen, Investigation of the Characteristics of Output by Using Magnetic Fluids in Air Gaps Formed in the Core of a Single Phase Transformer, pp. 964-973, Gaziantep/Turkey, 2018.