T.C.

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK SIVI ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRLERİN TASARIMI VE İNCELENMESİ

VEYSEL GÖGEBAKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2016

Tez Başlığı **:** Manyetik Sıvı Çekirdekli Transformatörlerin Tasarımı ve İncelenmesi

Tezi Hazırlayan : Veysel GÖGEBAKAN

Sınav Tarihi **:** 23.06.2016

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değerlendirilerek Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı	Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV İnönü Üniversitesi	……
Üye	Yrd. Doç. Dr. Yavuz EROL Fırat Üniversitesi	……
Üye	Yrd. Doç. Dr. Teoman KARADAĞ İnönü Üniversitesi	……

Prof. Dr. Alaattin ESEN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Manyetik Sıvı Çekirdekli Transformatörlerin Tasarımı ve İncelenmesi’ başlıklı bu çalışmanın 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.

Veysel GÖGEBAKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANYETİK SIVI ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRLERİN
TASARIMI VE İNCELENMESİ

Veysel GÖGEBAKAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

80+ix sayfa

2016

Danışman: Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

Hızla gelişmekte olan elektrik-elektronik sanayisinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek yeni, etkin ve daha küçük boyutlu sistemlerin tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Son yıllarda bu problemlerin çözümlerinin yeni ve en etkin yöntemlerinden biri akışkanlık ve mıknatıslanma özelliklerine sahip olan manyetik sıvıların kullanılmasıdır.

Tez çalışmasında manyetik sıvı kullanılarak orta ve zayıf güçlü transformatörlerin karakteristikleri incelenmiştir. Mıknatıslanma sistemi manyetik sıvı olan çeşitli transformatör tasarımları yapılmış ve bu transformatörlerin çıkış karakteristikleri seri üretim transformatörün karakteristikleri ile karşılaştırılmıştır. Manyetik sıvı bazında yapılan transformatörlerin veriminin arttırılması için hibrit transformatör yapıları ve çekirdek kısmının manyetik özelliklerinin yükseltilmesi yöntemi önerilmiştir. Küçük boyutlu devre ve sistemlerde kullanılabilecek basit mikrotransformatör modeli yapılmış ve karakteristikleri incelenmiştir. Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin teorisinin geliştirilmesine değinilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre manyetik sıvı transformatörlerin pratik uygulamalarına ait öneriler sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Manyetik Sıvı, Transformatör, Mıknatıslanma, Manyetik Parçacıklar, Mikrotransformatör

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN AND INVESTIGATION OF MAGNETIC FLUID CORE TRANSFORMERS

Veysel GÖGEBAKAN

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

80+ix pages

2016

Supervisor: Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

Modern, more effective and least dimension systems are required to meet electrical and electronics industry that has a rapid improvement. One of the newest and most effective method of solving these problems is the use of magnetic fluids with a magnetization and flow properties in recent years.

In this thesis, the characteristics of low and middle power transformers are investigated. The variety of transformers whose magnetization system is magnetic fluid are designed, and output characteristics of these transformers are compared with the characteristics of mass production transformers. Hybrid transformers structures and the raising method of the magnetic properties of the core are suggested to increase the effectiveness of transformers which are in the base of magnetic fluid. Microtransformer models that can be used in least dimension circuit and systems are formed, and the characteristics of these transformers are observed. The developments of the theory of magnetic fluid core transformers have been mentioned. According to the results of studies, suggestions about practical application of magnetic fluid transformers are offered.

KEYWORDS: Magnetic fluid, Transformer, Magnetization, Magnetic Particles, Microtransformer

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında ve birçok konuda yardım, öneri ve desteklerini esirgemeden beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV'a,

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hep hissettiğim Ailem'e, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim Anne ve Babam'a,

Birlikte bir ömür kurduğumuz değerli Eşim'e,

Bu tez çalışmasını 'Manyetik Duyarlı Sistemlerin İncelenmesi ve Modellenmesi' başlıklı ve 2015/72 numaralı proje ile destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET	i
	ABSTRACT	ii
	TEŞEKKÜR	iii
	İÇİNDEKİLER	iv
	ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
	ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
	SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1.	**GİRİŞ**	1
2.	**KURAMSAL TEMELLER**	12
2.1.	Manyetik Sıvıların Sentez Yöntemleri	12
2.1.1.	Bilyeli Öğütme (Ball Milling) Metodu	13
2.1.2.	Kimyasal Çöktürme	13
2.1.3.	Hidrotermal/Solvotermal Sentez	14
2.1.4.	Mikrodalga Sentezler	16
2.1.5.	Mikroemülsiyon ve Poliol Metot	16
2.1.6.	Stabilizasyon	16
2.2.	Ferrohidrodinamik Denklemler	17
2.2.1.	Gevşeme Mekanizması	20
2.2.2.	Parçacık-Parçacık Etkileşimi	22
2.3.	Transformatörler	25
2.3.1.	Manyetik Alanın Üretilmesi	25
2.3.2.	Zamanla Değişen Bir Manyetik Alanın Endüklediği Gerilim	27
2.3.3.	Transformatör Nüvelerindeki Enerji Kayıpları	27
2.3.3.1.	Histerizis Kayıpları	27
2.3.3.2.	Eddy Akımı Kayıpları	28
2.3.4.	Transformatör Çeşitleri	29
3.	**MATERYAL VE YÖNTEM**	30
3.1.	Materyal	30
3.1.1.	Manyetik Sıvı	30
3.1.2.	Yeni Transformatör Yapılarının Tasarımı	31
3.1.3.	Matlab Programının Kullanım Alanları	34
3.2.	Yöntem	35
3.2.1.	Ölçme Yöntemi	35
3.2.1.1.	Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar	35
4.	**ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA**	38
4.1.	Seri Üretim Mantel Tip Transformatörün İncelenmesi	38
4.2.	Plastik Malzemeden (Derlin) Yapılmış Mantel Tip Ayarlı Transformatörün Tasarımı ve İncelenmesi	40
4.3.	Yüksek Verimli Manyetik Sıvı Transformatörlerin Tasarımı ve İncelenmesi	47
4.3.1.	Manyetik Sıvı Hibrit Transformatör Yapıları	48
4.3.1.1.	Üst Boyunduruk Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatörün Karakteristiklerinin İncelenmesi	48
4.3.1.2.	Orta Bacak Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatörün Karakteristiklerinin İncelenmesi	51
4.3.2.	Manyetik Sıvının Mıknatıslanma Özelliklerini Yükselterek Transformatör Veriminin İyileştirilmesi	54
4.3.2.1.	Plastik Malzemeden Yapılmış Ayarlı Transformatörün Yüksek Konsantrasyonlu Manyetik Sıvı ile Karakteristiğinin İncelenmesi	55

4.3.2.2. Hibrit Transformatörlerin Yüksek Konsantrasyonlu Manyetik Sıvı ile Karakteristiklerinin İncelenmesi..... 56
4.4. Manyetik Sıvı Mikrotransformatör Tasarımı ve İncelenmesi..... 59
4.5. Manyetik Sıvı Hibrit Transformatör Teorisinin Geliştirilmesi..... 60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 68
6. KAYNAKLAR..... 71
7. EKLER..... 77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı manyetik sıvılardaki manyetik parçacıkların boyut aralığı.....3
Şekil 1.2. Manyetik sıvı şaft yataklama uygulaması.....4
Şekil 1.3. Manyetik sıvı hoparlör uygulaması.....5
Şekil 1.4. Manyetik sıvı eğim sensörü uygulaması.....7
Şekil 1.5. Manyetik akı yoğunluğu ölçme sensörü..... 8
Şekil 2.1. Çift katmanlı elektriksel manyetik akışkanın sentez diyagramı.....15
Şekil 2.2. Manyetik kristal izotropik olmayan örnekler ile farklı manyetik malzemelerin boyutları için hesaplanmış Neel (τ_N) ve Brownian (τ_B) gevşeme zamanlar.....21
Şekil 2.3. Bir manyetik sıvıda her bir santimetreküpte bulunan parçacık sayısı (N_{part}) ve hidrodinamik hacim kesrinin ($\emptyset_h$) bir fonksiyonu olarak parçacık yüzeyleri arasındaki göreceli uzaklık (δ_{ip}).....23
Şekil 2.4. Küçük (a) ve büyük (b) seperasyonlarında suda askıda duran a=10 nm ($Md = 425\ kAm - 1$) yarıçaplı iki küresel manyetik parçacık arasındaki manyetik etkileşimler için hidrodinamik kuvvet, tork ve bunların göreceli değerleri.....24
Şekil 2.5. Bir mıknatıs ve manyetik akıları.....25
Şekil 2.6. Basit bir manyetik yapı.....26
Şekil 2.7. (a) Manyetik domainlerin doğal yönlenmiş hali (b) Manyetik domainlerin dışardan bir manyetik alan uygulanarak yönlenmiş hali.....28
Şekil 2.8. Blok demir ve paketli saclardan yapılmış nüvelerdeki Eddy akımları.....28
Şekil 3.1. Manyetik Sıvı (DS-50)..... 30
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan DS-50 manyetik sıvının mıknatıslanma eğrisi.....31
Şekil 3.3. Seri üretim mantel tip transformatör.....32
Şekil 3.4. Plastik malzemeden (Derlin) yapılmış mantel tip ayarlı transformatör.....32
Şekil 3.5. Orta bacak kısmı manyetik sıvı hibrit transformatör..... 33
Şekil 3.6. Üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı transformatör.....33
Şekil 3.7. Mikrotransformatör.....34
Şekil 3.8. Ayarlı AC güç kaynağı (Varyak).....35
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları..... 36
Şekil 3.10. Bir ölçüm örneği..... 36
Şekil 4.1. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün boyunduruk kısmındaki manyetik sıvı miktarı değişiminin çıkış gerilimleri üzerine etkisi.....43
Şekil 4.2. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde manyetik sıvı miktarındaki değişimin çıkış gerilimleri üzerine etkisi.....45
Şekil 4.3. Üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı çekirdek olan hibrit transformatörün giriş gerilimlerine bağlı olarak $U_{ad,21}$ ucundaki gerilimlerin değişimi.....50
Şekil 4.4. Orta bacak kısmı manyetik sıvı çekirdek olan hibrit transformatörün giriş gerilimlerine bağlı olarak $U_{ad,21}$ ucundaki gerilimlerin değişimi.....52
Şekil 4.5. Manyetik sıvı çekirdekli transformatör tasarımında manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğinin çıkış gerilimleri üzerine etkisi.....56
Şekil 4.6. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün seri üretim transformatör ile karşılaştırılması.....57
Şekil 4.7. Mikrotransformatörün çıkış geriliminin çekirdeğin manyetik özelliklerine bağlı değişimi.....60
Şekil 4.8. Sıvının seviyesine göre çekirdekteki (202 mm) sargının indüktans değerinin değişimi.....65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Seri üretim bir transformatörün açık devre deney sonuçları..... 38
Çizelge 4.2. Seri üretim bir transformatörün U_{21} ve U_{22} uçları için kısa devre deney sonuçları..... 38
Çizelge 4.3. Seri üretim bir transformatörün U_{23} ucu için kısa devre deney sonuçları..... 39
Çizelge 4.4. Seri üretim bir transformatörün U_{21} ve U_{22} uçları için yükte çalışma deney sonuçları..... 39
Çizelge 4.5. Seri üretim bir transformatörün U_{23} ucu için yükte çalışma deney sonuçları. 39
Çizelge 4.6. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatör çekirdeğinin boş olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları..... 40
Çizelge 4.7. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 5 ml, 10 ml ve 15 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları..... 41
Çizelge 4.8. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 20 ml ve 25 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları..... 41
Çizelge 4.9. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 30 ml, 35 ml ve 40 ml manyetik sıvı durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları.. 42
Çizelge 4.10. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 45 ml ve 50 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları.....43
Çizelge 4.11. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 55 ml ve 60 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları..... 44
Çizelge 4.12. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde manyetik sıvı olmadığı durumda U_{21}, U_{22} ve U_{23} uçları için kısa devre deney sonuçları..... 46
Çizelge 4.13. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu durumunda U_{21}, U_{22} ve U_{23} uçları için kısa devre deney sonuçları..... 47
Çizelge 4.14. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu (60 ml) durumunda U_{21} ve U_{22} uçları için yükte çalışma deney sonuçları..... 47
Çizelge 4.15. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu (60 ml) durumunda U_{23} ucu için yükte çalışma deney sonuçları..... 47
Çizelge 4.16. Üst boyunduruk kısmı boş (hava) olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları..... 49
Çizelge 4.17. Üst boyunduruk kısmı yarı dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları..... 49
Çizelge 4.18. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları.....49
Çizelge 4.19. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün kısa devre deney sonuçları..... 50
Çizelge 4.20. Üst boyunduruk kısmı boş (hava) olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları..... 51
Çizelge 4.21. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları..... 51
Çizelge 4.22. Orta bacak kısmı boş (hava) ve tam dolu olan hibrit transformatörde açık devre deney sonuçları..... 52

Çizelge 4.23. Orta bacak kısmı boş ve tam dolu olan hibrit transformatörde U_{21} ve U_{22} için kısa devre deney sonuçları..... 53
Çizelge 4.24. Orta bacak kısmı boş ve tam dolu olan hibrit transformatörde U_{23} için kısa devre deney sonuçları 53
Çizelge 4.25. Orta bacak kısmı boş olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları..... 53
Çizelge 4.26. Orta bacak kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları.....54
Çizelge 4.27. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 40 ml manyetik sıvı + 20 mg Fe_3O_4 parçacığı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları 55
Çizelge 4.28. Üst boyunduruk kısmı Fe_3O_4 parçacığı ile tam dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları.....57
Çizelge 4.29. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları.....57
Çizelge 4.30. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları (21 gün sonra).....58
Çizelge 4.31. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün kısa süreli aralıklı çalışma açık devre deney sonuçları..... 58
Çizelge 4.32. Manyetik sıvı tam dolu (5 ml) durumda mikrotransformatör.....59
Çizelge 4.33. %50 manyetik sıvı + %50 Fe_3O_4 durumda mikrotransformatör..... 59
Çizelge 4.34. Fe_3O_4 parçacıkları ile tam dolu (5 mg) durumda mikrotransformatör..... 59

SİMGELER VE KISALTMALAR

ρ	Elektriksel Yük Yoğunluğu
$\boldsymbol{v}$	Devinimsel Hız
$\boldsymbol{\omega}$	Dönme Hızı
P	Basınç
g	Yer Çekim İvmesi
M	Mıknatıslanma
M_s	Doyma Mıknatıslanması
λ	Toplam viskozite
η	Kayma Viskozitesi
ζ	Girdap Viskozitesi
ϕ	Manyetik Akı
σ	Elektrik Geçirgenliği
μ	Manyetik Geçirgenlik
μ_0	Manyetik Sabit
μ_r	Bağıl Manyetik Geçirgenlik Katsayısıdır
k_B	Boltzmann Sabiti
T	Mutlak Sıcaklık
β	Sürtünme Katsayısı
n	Yüzeyden Dışarıya Doğru Birim Vektör
H	Manyetik Alan
B	Manyetik Akı yoğunluğu
V	Hacim
δ_{ip}	Göreceli Uzaklık
N	Sargıdaki Sarım Sayısı
W	Watt
V	Volt
I	Akım
A	Amper
T	Tesla
U_n	Transformatörün nominal çalışma gerilimi
U_1	Primer Gerilimi
$U_{ad,1}$	Primer açık devre gerilimi
$I_{ad,1}$	Primer açık devre (yüksüz) akımı
$P_{ad,1}$	Primer açık devre (yüksüz) gücü
U_{21}	1 nolu Sekonder Ucu Gerilimi
$U_{ad,21}$	1 nolu Sekonder Ucu Açık Devre Gerilimi
U_{kd}	Kısa Devre Gerilimi
I_{kd}	Kısa Devre Akımı
P_{kd}	Kısa Devre Gücü
$I_{y,1}$	Yüklü Durumda Primer Akımı
$U_{y,21}$	Yüklü Durumda 1 nolu Sekonder Ucunun Gerilimi
$I_{y,21}$	Yüklü Durumda 1 nolu Sekonder Ucunun Akımı
Fe_3O_4	Magnetite
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
MEMS	Mikroelektromekanik Sistemler

1. GİRİŞ

Manyetik sıvılar bir sıvı taşıyıcıda dağılmış, yer çekimi ve manyetik alan gibi bir kuvvet alanına uzun sure maruz kalsa bilse çökmeyen, ferromanyetik materyallerin (~5-20 nm) manyetik nano parçacıklarının koloidal süspansiyonlarıdır. Brownian hareket 10 nm boyutundaki parçacıkların yerçekimi altında çökelmesini engellemektedir. Her parçacığın çevresine parçacık yığışmasını engellemek için düzensiz manyetik alanların varlığında parçacıklar arasında kısa menzilli yapısal itme sağlamak amacıyla bir yüzey etkin madde yerleştirilmiştir [1,2]. Bu anlamda doğada şimdiye kadar ferromanyetik özellik gösteren homojen akışkan bir sistemin bulunamadığı düşünüldüğünde insan yapımı tek malzemedir. Manyetik sıvı ya da manyetik nano akışkanlar, çok küçük manyetik nano parçacıkların sıvı taşıyıcı ortamda çökmeden durabilmeleri, akışkan olmaları ve manyetik kontrol edilebilirlik gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı oldukça şaşırtıcı malzemelerdir.

Manyetik sıvıların sentez ve uygulamaları tahmin edilenin aksine nano bilim ya da nano teknolojiden çok daha öncesine dayanır. 19. yüzyılın başlarında Michael Faraday ve Thomas J. Seebeck gibi fizikçiler ince manyetik metal tozların yardımıyla bir sıvıda askıda durabilen ilk manyetik sıvılar denebilecek malzemeyi tanımlamışlardır. Ancak çok hızlı bir şekilde metal tozlarının çökmesi [3] istenilen performanstan çok uzak olmasından dolayı manyetik sıvıların önemi o günlerde pek anlaşılamamıştır. Yıllar sonra bu sorun çok küçük manyetik parçacıklar kullanılarak kısa sürede çökmeyen kararlı manyetik akışkanların üretilmesiyle çözüldü. Manyetik sıvıların akışkanlık ve manyetik kontrol edilebilirlik özelliği bilim insanları arasında ilgi çekici ve araştırmaya açık bir alan olma değerini hala korumaktadır [4].

S. S. Papell tarafından oleik asit sürfaktif ve gaz/parafin seyreltici ortam (kerosene dispersant medium) kullanılarak konsantre edilmiş kararlı bir manyetik akış süspansiyonu hazırlanmıştır [5]. 20. yüzyılın başlarında manyetik kolloidal nano parçacık sistemler sunulmuş olmasına rağmen manyetik sıvıların üretim ve kullanımı, 1960 yılında NASA'nın uzay araştırma programları kapsamında uzayda akışkanların kontrolü için yapılan çalışmalarla olmuştur. Bununla birlikte çok sayıda teknolojik ve biyomedikal alanların ilgisini çekmiştir [1]. 1960'lardan beri bu konuyla ilgili kompleks teorilerin önerilmesi, yapı ve dinamiğinin anlaşılması, izotropik olmayan ve dinamik durumlarda nonlineer manyetik sıvıların faz davranışı ile ilgili sayısız uygulamalar gerçekleşmiştir [7,8]. Geleneksel ferromanyetik sıvı uygulamaları; sıvı

O-halkası (O-ring) olarak sabit mıknatısların DC manyetik alanlarını rötatif ve ayırma contalarında, hoparlörlerde ısı transferinde, step motorlarda ise damper/şok absorbe edici olarak kullanılmaktadır [8,9].

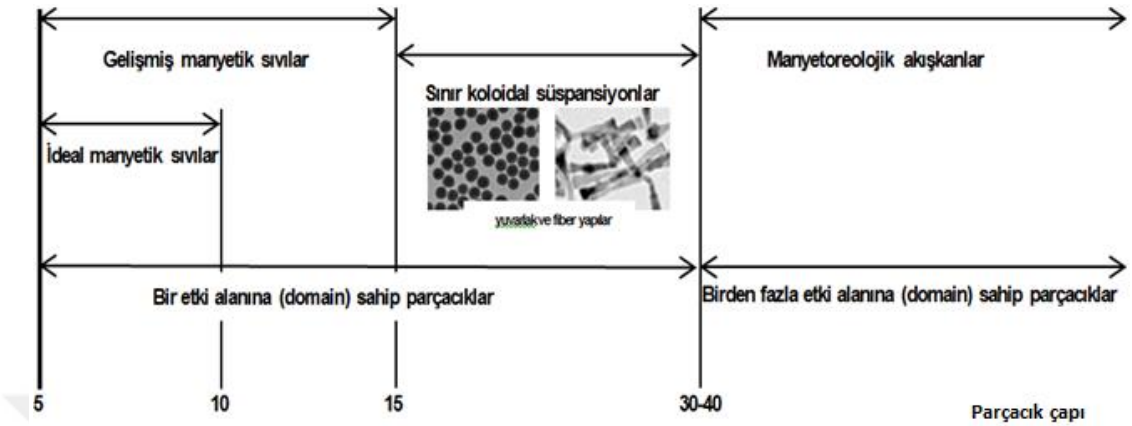
Manyetik nano akışkanların fiziko kimyasal ve dinamik özelliklerini içeren çalışmalar bilim ve teknolojinin farklı alanlarından birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Neredeyse tüm bilgisayar disk sürücülerinde yüzeyi kirletici maddelerden korumak amacıyla manyetik bir akışkan döner conta kullanılır. Yarı iletken sanayisinde ise ferromanyetik akışkan döner şaft keçesi içeren silikon kristal geliştirme fırınları mevcuttur.

Rosensweig ve grubu tarafından yarı-homojen mıknatıslabilir sıvı ortam için temel hidrodinamik denklemlerine manyetik kuvvetler tanıtılarak 'ferrohidrodinamik' ve 'manyetohidrodinamik' olarak bilinen çalışma alanları ortaya çıkarılmıştır [1,3]. Çeşitli manyetik sıvılar için çok dağılımlılık, manyetik davranış, dipolar etkileşim, zincirimsi kümelenme (chainlike aggregates) formu, uzun dönemli sıralama (long-range ordering) gibi fiziko-kimyasal özelliklerin yanında sentez ve stabilizasyon, reolojik ve termal özellikler, dinamik dengesizlikler, faz davranışı ve parçacık birleştirme gibi çalışmalar bu araştırma alanlarına örnek verilebilir.

Günümüzde ise birçok bilim dalında manyetik akışkanlar alanındaki araştırmaların sayısı oldukça fazladır. Son yıllarda nano manyetik akışkanlar ile ilgili teorik ve deneysel çalışmalar artış göstermiştir. Bilim insanları bu akışkanların faz geçişleri, dinamikleri ve yapılarındaki dipolar etkileşimin ve manyetik alanın etkisini öğrenmek için oldukça meraklı davranmaktadırlar. Manyetik sıvılarda dipolar zincirlerin oluşumu ve manyetik veya manyetik olmayan nano parçacıkların öz toplanması (self-assembly) da yapılan çalışmalarda geniş yer ayrılan konulardandır [10]. Manyetik sıvılar belli durumlarda manyeto reolojik akışkanların denge yapısını öğrenmek için model koloidler olarak kullanılır [11]. Manyeto reolojik akışkanların doğal fiziksel özelliklerini (reolojik, optik ve termal) değiştirmek için birçok pratik uygulama yapılmış ve bu alanda çok sayıda patent ve yayınlarla yeni tanımlanmış potansiyel uygulamalar kanıtlanmıştır [4,12,14].

Manyetik sıvıların çift yönlü normal akış özellikleri ve manyetik kontrol edilebilirliklerinin geliştirilmesi ve farklı manyetik alanlardaki gereksinimleri karşılamak için manyetik sıvıların hazırlanmasında kullanılan sentetik işlemler de oldukça önemlidir [16]. Manyetik nano parçacıkların özellikleri ve sentezlerini, kolloidal manyetik malzemeler ve manyeto reolojik akışkanlar (1-20 mm) gibi manyetik akışkanları detaylı bir şekilde inceleyen etkileyici kitaplar ve makaleler vardır [11, 17-21].

İdeal bir manyetik sıvıda parçacık genişliği 5-10 nm arasında olsa da bilim insanları tarafından üzerinde anlaşılan ve parçacık genişliğinin 15 nm'ye kadar artabildiği manyetik sıvı türleri Şekil 1.1'de sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.1. Farklı manyetik sıvılardaki manyetik parçacıkların boyut aralığı [22]

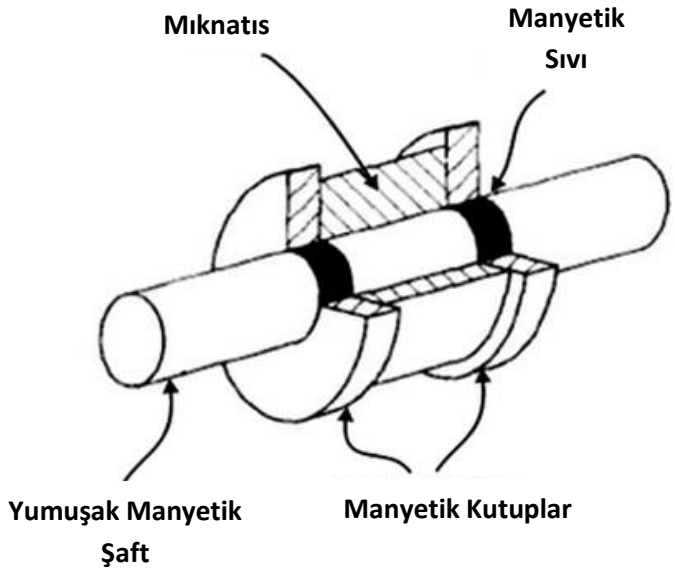
Manyetik sıvıların faz davranışı, yavaş yıpranma dinamiği ve bellek etkisi gibi temel özellikleri belirsizliklerini hala korumaktadır [23]. Manyetik sıvı parçacıkları, optik bir mikroskopta genellikle görünmez ve manyetik özellikli yumuşak materyaller gibi davranırlarlar. Bu yüzden bir manyetik alana maruz kaldıklarında manyetize olabilir ve manyetik olarak kontrol edilebilirler [24].

Manyetik sıvılar önemli ve geniş uygulama alanlarına sahiptir. Manyetik akışkanların mekanik (contalar, rulmanlar ve amortisörler) sektörlerden elektromekaniğe (hoparlörler, sensörler, elektrik motorları, anahtarlama elemanları), biyomedikalden (manyetik hipertermi, manyetik rezonans kontrast maddeler, hedeflenen ilaç taşınımı, yüksek gradyanlı manyetik ayırıcılar) biyoteknik sektörlere [25-27] kadar olan geniş kullanım alanı kapsamlı bir biçimde incelenmiştir.

Manyetik nano sıvılar yıllar boyunca sayısız teknoloji ve mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. Bu uygulamaların birçoğunda akış ve biçim oluşumunu manyetik olarak kontrol edilebilme yeteneğine sahip olmalarından dolayı manyetik sıvılardan yararlanılmıştır. Bunlardan bazıları hala geliştirilme aşamasındadır.

1960'larda bulunmasının ardından piyasaya sunulan ilk manyetik sıvı tabanlı ticari ürün, basınç/vakum altında çalışan döner bir şaft keçesi yani bir manyetik sıvı contasıydı [28]. Manyetik sıvılar sabit mıknatıs kutup parçaları ve dönen bir şaft

arasındaki radyal aralığa yerleştirildiğinde 'sıvı O-halka' biçimini yani hava geçirmez bir conta halini alır [8]. Pompalar, ark deşarjörleri, X-ışını jeneratörleri, iyon katkılayıcıları, robotlar, kimyasal buhar biriktirme ekipmanları, mikropompalar, üstbırakımlı büyüme sistemleri, kademeli motorlar, vakumlu fırınlar, gaz indüksiyon mekanizmaları, püskürtme sistemleri, tekil kristal büyüme ve bir vakum külçe (chunk) mekanizması gibi uygulamalar için uzun süreli kararlılığa sahip sızdırmaz manyetik sıvı contaların geliştirildiği bildirilmiştir. Manyetik sıvı kullanan araçlarda sızdırmazlık, ısı transferi ve sönümlendirme gibi manyetik sıvıların önemli teknik uygulamaları kısaca Raj vd. [29] tarafından özetlenmiştir. Şekil 1.2'de verilen manyetik conta sistemi bunlardan biridir.



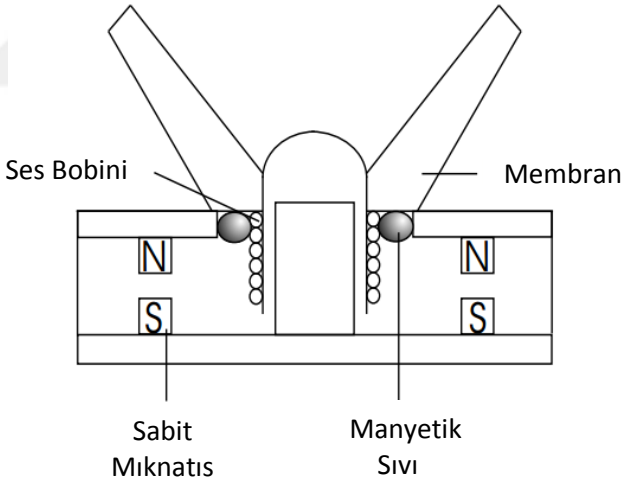
Şekil 1.2. Manyetik sıvı şaft yataklama uygulaması [30]

Şekil 1.2'de görüldüğü gibi şaftın içerisindeki oluk manyetik alan tarafından yerinde tutulabilen, herhangi bir kirlilik geçişini engelleyen manyetik sıvı ile doldurulmuştur.

Manyetik sıvılar geri dönüşüm ve madencilik sektöründe ayırma sürecinde de kullanılıyor olmakla birlikte burada fazla bir ekonomik yarar sağlamamaktadır. Bu alanlarda, bir manyetik alan ile manyetik sıvılar içine salınmış manyetik olmayan materyallerin (altın, gümüş veya kurşun) manyetostatik itme özelliği kullanılmaktadır [2]. Farklı yoğunluğa sahip materyalleri ayırmak veya manyetik olmayan materyali yüzme ya da batma durumunda tutma işlemleri, manyetik sıvının görünürdeki yoğunluğunu değiştirebilme yetisine sahip uygulama alanı olarak gözlemlenebilir. Bu

yöntem mevcut performansı geliştirmek amacıyla hala araştırılmaktadır. Mekanik uygulamaları açısından, dört zamanlı dizel motorun performansı ve emisyon kalıpları üzerinde manyetik sıvının etkisi, dizel yakıta su tabanlı manyetik sıvı katılarak araştırılmıştır [31]. Fren termal veriminin göreceli olarak %12'ye kadar arttığı ve frene özel yakıt tüketiminin, dizele oranla %11'e kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte motor egzozundaki gaz türlerinin analizinde dizel yakıtına göre daha düşük NO_x emisyonları sergilediği fakat buna karşın CO emisyonunun arttığı görülmüştür. Buradaki nano parçacıklar egzoz akışında manyetik bir çubuk kullanılarak toplanmıştır.

Bir başka uygulama alanı da yüksek kalitede hoparlör üretimidir. Manyetik sıvı ses bobini aralığında soğutma amacıyla tutularak hoparlörlerin yüksek güçte çalışmasına yardımcı olmaktadır [32]. Hoparlörlerde ısı transferi amacıyla kullanılan manyetik sıvının sisteme bir kaç katkısı vardır. Manyetik sıvı yerine bir katı malzeme olması durumunda istenmeyen sönümleme etkisi oluşacağı Şekil 1.3'teki sistemden anlaşılmaktadır.



Şekil 1.3. Manyetik sıvı hoparlör uygulaması [32]

Manyetik sıvının ısı iletkenliği havadan beş kat daha fazladır ve bobini soğutma işlemi hoparlörlerde oldukça önemli olduğundan burada ciddi bir etkiye sahiptir.

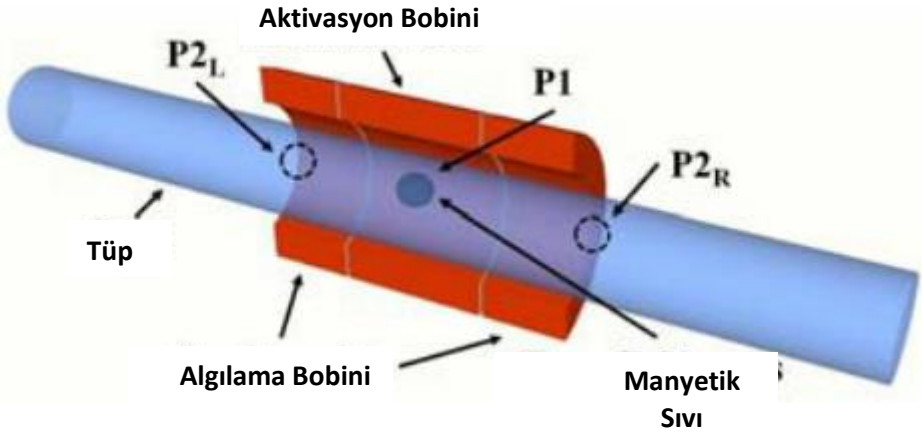
Elektromanyetik parazitten kaynaklanan kirliliği azaltmak için manyetik sıvının mikrodalga emici olarak davranabilme yeteneği kullanılmaktadır [33]. Yakın zamanda, Mishra vd. iletken manyetik sıvıları üstün elektromanyetik parazit kalkanı özelliği ile birleştiren indirgenmiş grafen oksit sentezini raporlamıştır [34].

Manyetik sıvılar Pickering köpüklerinin tahliye özelliklerini çalışmak için bir model sistem olarak da hizmet verebilecek yeni bir sınıf duyarlı 'manyeto Pickering' köpüğü geliştirmek için kullanılmışlardır [35]. Manyetik ve manyetik olmayan parçacıkların karışımından oluşan bu köpüklerin tutarlılığı konusunda benzer birçok çalışma, temassız köpük giderici süreçlerdeki potansiyel uygulamaları yüzünden harici bir uygulama alanında sürdürülmektedir.

Manyetik sıvılar yüksek manyetik duyarlılıkları sayesinde, güçlü harici manyetik alanlar kullanılarak geçirgen kayalar ve bunların toprak boyunca taşınımları gibi bazı yeraltı çevre mühendisliği uygulamalarında önemli bir kullanım alanına sahiptir [36]. Manyeto basınç kullanmayı içeren bu tür yöntemler yeraltı engelleri oluşturmak, kayaları derzlendirmek ve mikropları veya kimyasal etmenleri hedeflenmiş bir alana haricen yönlendirmek için kullanılabilir.

Gözenekli ortamda manyetik sıvı akışının karışabilir (su tabanlı) ve karışmaz (yağ tabanlı) kavramlaştırmaları için sayısal benzetim yetenekleri manyetik kuvvetlere karşı incelenmiştir. Mıknatısın yönünden bağımsız olarak, parçacıkların güçlü mıknatıslanması ve ardından bir mıknatısa doğru çekilmeleri manyetik sıvı akışına neden olur. Yakın zamanda Wu vd. amonyak/su köpük soğurmasını geliştirmede Fe_3O_4 nano manyetik sıvı ile harici bir manyetik alanın birlikte etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, sabit manyetik sıvı konsantrasyonu altında manyetik alan yoğunluğu artışı ile soğurmanın da gelişim gösterdiğini bulguladılar [37]. Rotasyonel manyetik alanda ıslak duvar soğurma kolonu kullanılarak CO_2/metil dietanolamin çözeltisine manyetik sıvı eklenmesiyle yapılan deneyler, gaz-sıvı-kütle transfer oranında anlamlı bir artış ortaya çıkardı [38]. Her ne kadar manyetik sıvılar kullanılarak gelişmiş kütle transfer oranları üzerinde birçok çalışma yapılmış olsa da gelişim etkisinin mekanizması açık bir biçimde ortaya konulamamıştır. Ayrıca daha önce de belirtildiği gibi bu manyetik sıvılar harici bir manyetik alan ile birleşerek ısı transfer sürecini kontrol etmek ve geliştirmek için yeni bir tür ısı transfer ortamı olarak kullanılmaktadır [39].

Harekete duyarlı olmalarından dolayı manyetik sıvı algılayıcı uygulamaları ivme ölçerler, debimetreler, eğim ölçerler, basınç sensörleri ve anahtarlar üzerinde araştırmalara konu olmuştur [40]. Bunlardan Andò vd. tarafından Şekil 1.4'te verilen 10 mm çapında ve 0.25 ml manyetik sıvı içeren eğim ölçme sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 1.4. Manyetik sıvı eğim sensörü uygulaması [40]

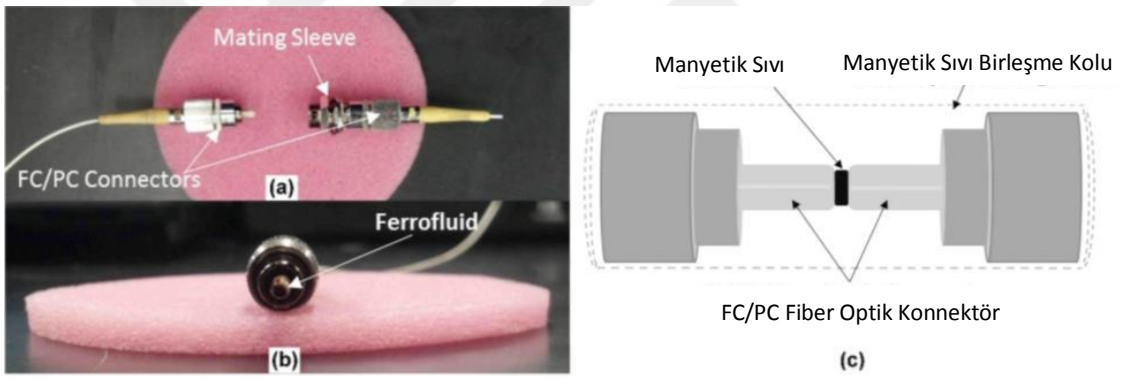
Bu sistem kütle hareketini kontrol etmek için aktivasyon bobinine, kütle pozisyon aktivasyonu için iki adet algılama bobinine ve manyetik sıvıya sahiptir. Algılama bobinleri boru etrafına sarılmıştır ve algılama sisteminin uzunluğu 78 mm'dir. Bu yaklaşım, manyetik sıvı kütlesinin cam boru içerisinde ileri-geri hareket etmesi prensibine dayanır. Uygulanan eğimin etkisiyle iki sabit nokta arasında manyetik sıvı kütlesinin geçiş zamanını kullanarak bir çeşit algılama yöntemi oluşturulur.

Bunların yanında manyetik bantlar, çelikler, alaşımlar, manyeto-optik fotorezist ve disklerde manyetik alan belirlenmesi ve alan yapısı çalışmalarında kullanımları da önemlidir [41]. Sarmal bobinlerde manyetik sıvıların kullanımı gürültü düzeyini ciddi biçimde azaltarak daha sessiz bir çalışma ortamı ve kolay taşınabilirliği sağlar. Kazandırdığı termal ve dielektrik yararlar trafolarda da kullanımını uygun kılar [42]. Yakın zamanlarda, mikro yapılı fiber-optik Bragg yansıtıcılarla birleşik manyetik sıvılar; rehabilitasyon, robot yazılımları ve biyonik dış iskelet çalışmalarında kayma gerilimi yer değişiminin hassas ölçümlerini yapmakta kullanılan akıllı pad geliştirmede kullanılmıştır [43]. Bu sensör pad üst yüzey boyunca uygulanan dikey basınç yüklerine karşı düşük bir hassasiyet göstermiştir. Bu tür kesme sensör pad sondaları aynı zamanda sağlık sektöründe de önemli uygulamalara sahiptir.

Manyetik sıvı çözeltileri sanayide sıklıkla ferromanyetik malzemelerin hatalarını bulmak için kullanılır. Bu yöntem, test örneği üzerine monte edilmiş iki şeffaf ince tabaka arasına sıkıştırılmış manyetik sıvıda manyetik akının hareket yeteneğini değerlendirmeye dayanır [2]. Beyaz ışıklı bir aydınlatma kaynağı kullanıldığında hatalı noktalara yakın olan manyetik sıvılardaki renk değişikliği, bu alanlarda oluşan

manyetik akı sızıntısı (leakage) tarafından damlacık zincirleri (droplet chains) şeklinde oluşur. Damlacık zincirleri sayesinde Bragg dağılımı gözle görülebilir.

Manyetik sıvılar aynı zamanda manyetik mürekkep yapımında ve sanat alanında da kullanılmaktadır [2]. Manyeto optik dalga boyu filtrelerde, optik modülatörlerde, doğrusal olmayan optik materyallerde, ayarlanabilir fiber optik filtrelerde, optik kafeslerde ve optik anahtarlarda da kendilerine kullanım alanı bulmaktadır [2,44]. Manyetik sıvı ayarlanabilir optik gereçler geliştirmek için kullanılabilir [45]. Örneğin hava boşluğu fiber optik iletim bağlantıları boyunca artan bir zayıflama meydana getirir ve bu da iletimin azalmasına sebep olur. Homa vd. [46] tarafından fiber optik kabloların birleşme noktalarındaki hava boşluğundan faydalanılarak manyetik akı yoğunluğunu ölçmek için manyetik sıvıdan bir sensör üretilmiştir. Şekil 1.5'te görülen sistem fiber uç yüzeyleri arasına bir kovan içinde manyetik sıvı konularak oluşturulmuştur.



Şekil 1.5. Manyetik akı yoğunluğu ölçme sensörü [46]

Manyetik sıvıların optik özellikleri de pratik uygulanabilirlikleri açısından birçok araştırmaya konu olmuştur. Manyeto optik özelliklerin değerlendirilmesi, manyetik alan altında manyetik sıvıların davranışını incelemek için önemli bir yoldur. Bir diğer önemli ve ilginç kullanım alanı da manyetik olarak şekli değiştirilebilen sıvı ayna üretimidir. Düşük buhar basıncı ve etilen glikolün yüksek yüzey gerilimi sayesinde etilen glikol tabanlı manyetik sıvıların bu amaca uygun oldukları bildirilmiştir [47,48].

Manyetik olarak kontrol edilebilen fonksiyonel araçlar geliştirme potansiyeli daha fazla olan manyetik alanla kontrol edilen optik anahtarlar, Fe_3O_4 bazlı manyetik sıvılarda Ag nanolevhaları kapsüle edilerek (encapsulating) üretilmiştir. Saf manyetik

sıvılara göre daha fazla hassasiyet ve ışık iletme değişimi sağlayan manyetik alan sayesinde Ag nanolevhalar döndürüldüğünde geçirgenliğin ayarlanması gerçekleşir [49]. Burada parçacık kümelenmesine karşı etkin itici bir engel yaratabilen ve aynı zamanda manyetik sıvıların nano parçacıkları ve manyetik sıvı yüzeyine yayılmış nano parçacıklar arasındaki yıkıcı etkileşimleri perdeleyen 2-[2-(2-methoxyethoxy)ethoxy)] asetik asit (MOEEAA) ligandı kullanılmıştır.

$Zn_xFe1_{}_xFe_2O_4$ ve $Ni_xFe1_{}_xFe_2O_4$ kompozisyonuna sahip çinko ferrit ve nikel ferrit nano parçacıklardan oluşan manyetik sıvılar sentezlenmiştir. Bunların optik ve manyetik özellikleri, optik özellikli yumuşak cam levhalar arasına sıkıştırılmış ince manyetik sıvı filmler içinden, manyetik alan tarafından oluşturulmuş lazer iletiminin araştırıldığı sistematik bir çalışma ile ilişkilendirilmiştir [50]. Bu ince filmler ile bir ışığa bağımlı direnç (LDR) ve manyetik alan ile manyetik moment sensör uygulamaları için lazer yardımıyla bir optik gaussmetre formüle etmek mümkündür.

Manyetik sıvı ince filmler, manyeto optik ve manyetik sıvı litografisi gibi bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Giersig ve Hilgendorff, nano-litografik teknikler kullanarak manyetik sıvıdan manyetik nano parçacık üstyapıları hazırlanması üzerine bir değerlendirme yapmışlardır [51]. Chang vd. yakın alan litografisi için bir mikro-akışkan kanal içinde, alan tarafından indüklenmiş koloidal manyetik nano parçacık düzeneği üretmek için çok amaçlı ve uygun maliyetli bir süreç bildirmişlerdir [52].

Lee vd. tarafından açıklanan bir başka yöntemde, manyetik disk sıraları yardımıyla manyetik sıvı mikro damlacıklarında yüksek benzerlik elde edilmiş ve bu benzerlik sayesinde örgü (lattice) yapılarını modelleme yolu bulunmuştur [53]. Bu süreçte süper paramanyetik rejimden süper spin cam durumuna geçiş, aynı zamanda da metalik veya manyetik olmayan/ yalıtkan alt katmanlarda (subsrates) birikmiş manyetik nano noktalar için süper ferromanyetik sıraya geçiş bildirilmiştir [54].

Chip üstü laboratuvar sistemleri gibi mikro akışkan cihazları elde etmede manyetik sıvının uygulanabilirliği oldukça ilgi çekmektedir [55]. Uygun akış özellikleri ve yüksek manyetik denetlenebilirliği bu mikro akışkan cihazların performansını arttırabilir. Yakın bir örnekte, Xia vd. fotopolimerize edilebilen manyetik sıvılar ve lazer işlem kullanılarak geliştirilmiş manyetik güçle çalışan teknoloji ile akıllı nano-mikro makineleri birleştirmiştir [56]. Mikromakinelerin uzaktan kontrolü için uygulanan bu teknik bir fotoreziste homojen olarak katkılanan MPS-Fe_3O_4 manyetik sıvı (MPS=3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate) kullanır ve bu manyetik sıvı da monomer olarak metil akrilat (%37.14 wt), çapraz bağlayıcı olarak pentaeritritol

triakrilat (%60.00 wt), fotobaşlatıcı olarak benzil (%1.66 wt), ve ışık duyarlılığı olarak da 2-benzil-2-(dimetilamino)-1-(4-morfolinofenil)bütan-1-onedan (%1.20 wt)'dan oluşmaktadır. Liu vd. hızlı Pb^{2+} tepkisi için boş bir çukurdan oluşan poli (N-izopropilakrilamit-kobenzo-18-crown-6-akrilamit) mikrojel temelli yeni bir Pb^{2+}- tepkili mikro aktüator düzeneği geliştirmiştir [57]. Manyetik çekirdeğin etkisi altında bulunan manyetik sıvı mikro kanallardan Pb^{2+} ile kontamine olmuş çözeltinin sızmasını engellemek amacıyla mikro aktüatörlerin dönüş hareketlerini mümkün kılmaktadır. Manyetik sıvı pompaları harici bir manyetik alanın etkisi altında kanallardan akışkanları geçirmek için kullanılabilir [58]. Bu sıvılar süper paramanyetik doğaları sayesinde kanallarda hareket edebilmek için herhangi bir geometrik şekli alabilir ve akışkanlıklarını yoğun manyetik alanlarda dahi koruyabilirler [59]. Bir mıknatısın hareketiyle sıvıların mikro kanallarda akışını kontrol eden manyetik sıvı tıpalar kullanılarak nano mekanik vanalar üretilmiştir [60]. Yakın zamanda yapılan bir başka uygulamada ise su sevmez (hydrophobic) manyetik sıvılar manyetik itmenin gücünü ve etki alanını basitçe ayarlama yoluyla su damlacıklarının nano litreden piko litreye hareketini hassas olarak kontrol etmek için kullanılmıştır. Bu kontrolün manyetik etiket serbest damlacık işlemi ve manyetik materyallerden etkilenmeden şeffaf bir çözelti bulma gibi uygulamaları vardır [55]. Manyetik sıvı vasıtasıyla boyutlarına bağlı olarak mikro parçacıklara odaklanan, sürekli olarak ayırma ve sınıflandırma işi yapan bir nanositometre içinden akışın geliştirildiği de bildirilmiştir [60].

Literatürde sunulmuş ve devam eden çok sayıda çalışmanın incelenmesinden aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir:

1. Manyetik sıvılar fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Son yıllarda ise manyetik sıvıların en yaygın kullanım alanları tıp ve biyomühendisliktir.
2. Manyetik sıvılar başlangıçta teknik alanlarda (kimya sanayi, elektrik enerji sanayi, makine sanayi, sensör teknolojisi vd.) kullanılmasına rağmen son yıllarda yüksek güç ve yüksek frekanslı elektrik sistemlerinde kullanılması yönünde sunulan çalışmaların sayısı azalmıştır.
3. Yeni tür manyetik sıvıların sentezi veya farklı taşıyıcı bazlara sahip olan manyetik sıvıların modifiye edilmesi bu sıvıların pratik kullanım alanlarını genişletebilir.

4. Özellikle MEMS (mikroelektromekanik sistemler) gibi mikrosistemlerde manyetik sıvı kullanımında farklı uygulama alanları vardır. Bu amaçla manyetik sıvıların bazı özelliklerinin (mıknatıslanma, akışkanlık vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmasının amacı manyetik sıvı kullanarak elektrik ve elektronik sistemlerin bazı elemanlarının veriminin arttırılması olmuştur. Kısacası düşük ve orta güç transformatörlerin mıknatıslanma sistemini (manyetik çekirdek) manyetik sıvı bazında yaparak bu transformatörlerin malzeme tasarrufu ve kullanımları bakımından avantajlarının yükseltilmesidir.

Bu amacı gerçekleştirmek için tez çalışmasında aşağıdaki problemlerin çözümü öngörülmüştür.

1. Düşük güçlü seri üretim transformatör bazında yeni transformatör türlerinin tasarım ve analizi.
2. Manyetik sıvı transformatörün çıkış karakteristiklerinin incelenmesi ve bu karakteristiklerin seri üretim transformatörün karakteristikleri ile karşılaştırılması.
3. Manyetik sıvı ve seri üretim transformatörlerin hibrit modellerinin manyetik sıvının fiziksel özelliklerindeki değişimlere bağlı olarak deneysel incelenmesi.
4. Manyetik sıvının mikro sistemlere uyumluluk ve etkisinin araştırılması.
5. Elde edilen sonuçlara göre zayıf, orta güç ve yüksek frekanslı transformatörlerde manyetik sıvı kullanımı ile ilgili önerilerin yapılması.

Tez çalışması süresince bu problemleri çözebilmek için İnönü Üniversitesi BAP Projesi (2015/72) bazında seri üretim transformatör ve sanayi üretimi (Sigma Corporation) manyetik/ferromanyetik sıvı temin edilmiş, farklı yapısal özelliklere sahip olan transformatörler tasarlanmış ve deneylerle incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ile 2 uluslararası, 1 ulusal bildiri sunulmuş, Türk Patent Enstitüsü'ne 1 patent başvurusu yapılmış ve ayrıca manyetik duyarlı sistemlerin özelliklerine ait 1 makale SCI kapsamındaki uluslararası bir dergide yayımlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Manyetik Sıvıların Sentez Yöntemleri

Manyetik sıvıların üretimi için yüksek doyum mıknatıslanmalı farklı malzemeler kullanılmaktadır [61]. Bu materyallerin seçimi kullanım amacına bağlıdır. Genel olarak ferro veya ferri manyetik metaller ve metal oksitler kullanılır. Ters ferromanyetik sıvı sentezinde diyamanyetik materyaller de kullanılır. Sentezleri için farklı metaller (Fe, Co, Ni, Gd), demir nitrür (Fe_xN) gibi metal nitrürler, metal oksitler (Fe_3O_4 ve g-Fe_2O_3), bimetalik parçacıklar (Ni-Fe, Fe-Pt, Fe-Co, Sm-Co), ve ferrit ($MnFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $Li_2Fe_2O_4$) kullanılmıştır [7, 62-67]. Süspansiyon haline getirilmiş F-B, Fe-Co-B, Fe-Ni-B ve Co-B alaşım parçacıklarıyla hazırlanmış cıva tabanlı metalik manyetik sıvılar, cıvada $NaBH_4$ kullanılan sulu çözeltilerdeki geçiş metal iyonlarının indirgenmesiyle sentezlenmiştir [2]. Manyetik materyalin seçim aralığı ne kadar geniş olsa da süspansiyonun kararlılığını sağlayabilmek için sürfaktant ve taşıyıcı ortam ile uyumlu olması esastır.

Son yıllarda endüstriyel alanda kullanılmak üzere iyi optimize edilmiş manyetik sıvı elde edebilmek amacıyla genellikle bir veya iki aşamadan oluşan sentez yöntemleri geliştirilmiştir.

Bir aşamalı metot manyetik nano parçacıkların taşıyıcı sıvıda eşzamanlı sentezini içerir. Bu metot parçacıkların taşıyıcı sıvı içerisinde topaklanmasını ve dengesiz dağılımını en aza indirir [68]. Fakat ortamda reaksiyona girmemiş kalıntı denebilecek yabancı maddelerin bulunması gibi bazı dezavantajları da vardır. Bu sorun manyetik sıvı hazırlanması için daha ekonomik olduğu kabul edilen iki aşamalı yöntem kullanılarak belli bir dereceye kadar önlenebilir [69]. Birinci adımda manyetik nano parçacıklar, bilyeli öğütme (ball milling), kimyasal çöktürme, hidrotermal/solvotermal sentez, mikrodalga sentezler, termal çöktürme veya mikroemülsiyon ve poliol gibi farklı sentetik yollarla hazırlanır. İkinci adımda ise kararlı bir manyetik sıvı elde etmek için manyetik nano parçacıklar stabilize edilmiş bir katman veya kabuk ile kaplanır [2]. Tıp veya biyomedikal alan uygulamaları dışında endüstriyel ihtiyaçlar için maliyet düşünüldüğünde sentetik üretimler tercih edilir.

2.1.1. Bilyeli Öğütme (Ball Milling) Metodu

Öğütme veya bilyeli öğütme denilen yöntem, katı parçacıkların boyutlarının küçültülmesi için tarih öncesi devirlerden beri kullanılan bir tekniktir. Manyetik sıvı hazırlamak için de sürekli gelişim göstererek uzun zamandır kullanılmaktadır [68]. Mekanik aktivasyon, mekanik alaşımlama ve mekanik kimya gibi disiplinlerde alternatif bir metot olarak kullanılır [70]. Parçacıkların nano boyutlara kadar küçültülmesine imkan verir.

Bilyeli öğütme süreci, kapalı bir kap içerisinde bulunan ve yüksek hızla dönen bilyenin altındaki manyetik malzemenin parçacık çapının nanometrik boyutlara kadar küçültülmesi işlemine dayanır [69]. Düzgün dağılımlı ince parçacıklar bu metot ile elde edilebilir. Altı aydan daha uzun bir süre kararlılığını koruyabilen ilk manyetik sıvı, 1964 yılında S.Papell tarafından bilyalı öğütücüde oleik asit ve kerosen kullanılarak magnetit (Fe_3O_4)'in öğütülmesiyle hazırlanmıştır [4]. S.S. Papell bu metot ile parçacık çapı 60 nm'den daha küçük olan manyetik tozlar elde etmeyi başarmıştır.

Parçacığın istenilen boyutlara getirilebilmesi açısından oldukça kolay uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen öğütme sürecinin çok uzun olması ve çelikten yapılmış olan öğütücü bilyenin zamanla aşınarak malzemenin manyetik özelliğini etkilemesi bu yöntemin ana dezavantajlarından bir kaçı olarak yöntemin bulunduğu ilk zamandan bu yana araştırmacılar için üzerinde yoğunlaşılan problemlerden olmuştur. Öğütme sürecinde oluşan kimyasal reaksiyonların koşulları mekanik aktivasyon tarafından reaksiyon oranlarının artması ya da süreç boyunca kimyasal tepkimelerin azaltılması ile düzeltilebilir. Bu durum malzemelerin manyetik özelliklerini etkileyebilecek polimorfik faz dönüşümlerine ya da amorfizasyona sebep olabilir. Öğütme işlemi boyunca malzemenin manyetik özelliğindeki değişimler ve bunların kontrolü ile ilgili metodun geliştirilmesi için yapılan çalışmalar rapor edilmiştir [70].

2.1.2. Kimyasal Çöktürme

Kimyasal çöktürme metodu manyetik oksit üretmede nispeten daha hızlı ve kolay bir yöntemdir. Literatür incelendiğinde manyetik sıvı sentezleri için basit ve en çok kullanılan metot olduğu görülecektir. Bu metot, etkisiz koşullar ve düşük sıcaklıklarda güçlü bir baz olan NaOH veya KOH kullanılarak Fe^{3+} ve Fe^{2+} tuzlarının

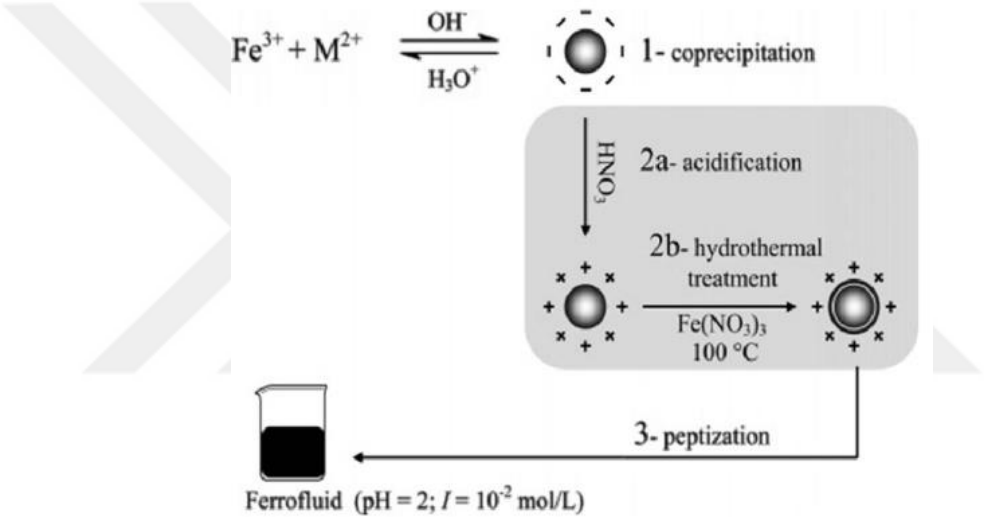
sulu ortamda 2:1 oranında çökelmesine dayanır. Reaksiyonun seyri boyunca Fe^{2+} iyonlarının bazıları Fe^{3+} iyonlarına oksitlendiğinden dolayı Fe^{3+} ve Fe^{2+} hidroksitlerinin Fe_3O_4 'e dönüşümünü içeren reaksiyon kompleks bir stokiyometredir. Bu yüzden havanın varlığında bu oksidasyonun oranı, demir içeren iyon konsantrasyonundan bağımsız olduğu varsayılır [71]. Fe_3O_4 genellikle uygun sürfaktansın varlığında 80-82 C'de sentezlenir [72,73]. Alternatif olarak ise, tek değerlikli Li^+ ve Zn^{2+} veya çift değerlikli Co^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+} gibi metal iyonları ile Fe^{2+} iyon tuzları yer değiştirilerek nano ferrit içeren manyetik sıvılar kolayca sentezlenebilir. Bu yöntemin çok fazla kullanılmasının en önemli sebebi, malzemenin manyetik özelliklerini kolaylıkla ayarlayabilme fırsatı vermesidir. Bu durum farklı boyut ve yapıda ferritler kullanılarak yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [68]. Termomanyetik konveksiyon ve ısı transferinde kullanılan görece düşük Neel sıcaklıklı diğer ferritler genel olarak incelenirken kobalt ferritler çoğunlukla yüksek manyeto-kristal anizotroplu parçacık gerektiren uygulamalarda kullanılır. Birlikte çöktürme ve sol-gel metotları çok ince ($\approx$1nm) bir magnezyum oksit (MgO) tabaka ile kaplanmış süperparamanyetiğin Fe_3O_4 nano parçacıklarının sentezi için ayrıca sunulmuştur [74].

Kimyasal çöktürme metodunda kusursuz bir şekilde tek dağılımlı parçacıkları elde etmek için parçacık boyutunun kontrolü kolay değildir. Bu metot 3 ile 20 nm arasında değişen farklı parçacık boyutları verebilir. Tek dağılımlı parçacıklar elde etmek için kısa patlamalı çekirdeklenmenin süreç başlangıcı parçacık artışının geri kontrolü tarafından takip edilmelidir [75]. Dahası çöktürme bazının farklı tipleri tarafından kullanılan parçacık boyutu kısmen kontrol edilebilir [76]. Parçacık boyutu, kristallenme derecesi ve stokiyometri üzerindeki sıcaklık ve pH da önemli bir etkiye sahiptir. Amorphous yapıya sahip düşük sıcaklıkta oluşan ürünler ele alındığında yüksek sıcaklıklar (50-100 ℃) üretilebilir. Düzgün bir şekilde kontrol edilebilen ortamın pH'ı sitokiyometrik manyetik tozları verecektir. Stabilize edilmiş manyetik sıvılar hazırlanırken elektrostatik veya iyonik pH'ın dikkatlice gözlenmesi ayrıca önemlidir. Fe_2O_3'ün oksidasyonu boyunca Fe_3O_4 sitokiyometrisi üzerinde pH'ın etkisi Correa vd. tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir [73].

2.1.3. Hidrotermal/Solvotermal Sentez

Manyetik sıvı sentezlerinde kullanılan metotlardan biri de hidrotermal sentez metodudur. Hidrotermal reaksiyonlar genellikle parçacık çapı ve morfolojik kontrolü

iyi olan sulu ortamda yüksek sıcaklık altında basınçlı kap veya yüksek basınç reaktörü kullanılarak yapılmaktadır [18]. Hidrolizin kinetiği iyonik türlerin büyük kısmında kritik koşullarda artan çözünürlük ve akışkanlık ile ivmelenir ve suyun viskozitesi yavaşlar. Parçacıkların Oswalt olgunlaşmasının daha da hızlanmasına katkı sağlar [77]. Ferrik tuzlar ile demir içeren tuzlar kullanarak hidroliz-oksidasyon işlemi veya birleşik metal hidroksitlerin nötrolizasyonu ile nano ferritlerin hidrotermal sentezleri mümkündür. Bu durumda ferrik tuzlar/demir içeren tuzlar (ferric salts/ferrous salts)'ın metal hidroksitinin elektrostatik potansiyeli ile katkı sağlayan seyirci iyonlarının (spectator ions) doğrudan etkisinden dolayı parçacık kristalliliğini tanımlamak için çöktürme kimyasalının rolü önemlidir [77].



Şekil 2.1. Çift katmanlı elektriksel manyetik akışkanın sentez diyagramı [77].

Şekil 2.1'de manyetik sıvının sentez diyagramında, birinci adımda alkalik ortamda metallerin (Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, ve Zn^{2+}'yi M^{2+}) birlikte çöktürülmesi işlemi yapılmıştır. İkinci adımda ise nano parçacıkların adım 3'teki asidik ortamda peptinleştirmeden önceki yüzey iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir.

5.5 nm ile 9 nm arasında yüksek kalitede manyetik sıvı elde etmek için oleik asit ile kaplanmış ve kerosende dağılmış Co-Zn ferrit $Co_{03}Zn_{07}Fe_2O_4$ nanoparçacıkların hidrotermal yöntem ile sentezlenebildiği gösterilmiştir [78]. Gomes vd. tarafından MFe_2O_4 nano parçacıkları içeren çift katmanlı elektriksel manyetik akışkanın hazırlanması için Şekil 2.1'de verilen birlikte çöktürme/hidrotermal tekniği kullanılmıştır [79].

2.1.4. Mikrodalga Sentezler

Mikrodalga yöntemi homojen ısınma, yüksek verim, enerji ve zaman tasarrufu, saflık ve yüksek kalitede ürünler üretmede önemli avantajlar sunan hızlı ve kolay bir metottur [80]. Bu teknik uzun zamandan beri manyetik nanoparçacık üretiminde kullanılmaktadır. Polivinal alkolde demir tuzlarının çöktürülmesi ile yüksek kararlıklı, doğaya zarar vermeyen manyetik sıvıların sentezlendiği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [81]. Deneyler sonucunda mikrodalga ışınlama ile manyetik sıvının kararlılığı etkilenmeksizin çok dağılımlılığı, ortalama parçacık büyüklüğü, kristalleşme ve manyetik doyumunun arttığı belirtilmiştir. Ürün kalitesi ve sentezin verimliliği için günümüzde otomatikleştirilmiş basınç ile mikrodalga reaktörlerin kullanımı ve sıcaklık kontrol fonksiyonları artış göstermektedir. İyonik sulu ortam kullanılarak manyetik nanoparçacık sentezi için birçok mikrodalga destekli tepkimeler literatüre her geçen gün eklenmektedir [74].

2.1.5. Mikroemülsiyon ve Poliol Metot

Manyetik sıvı üretiminde spinel-ferrit nano parçacıkların sentezlenmesi için kullanılan bir yöntemdir [82]. Bu metot ile emülsiyonların iç ve dış fazı olarak bilinen lipofilik ve hidrofilik fazlardan oluşan, karışmayan en az iki sıvının sürfaktantlar ile damlacık olarak dağılan homojen yapılar elde edilir. Geleneksel veya basit emülsiyon yapılarında birden çok faz bulunur. Sulu faz yağ fazı içerisinde dağıldığında buna yağ içerisinde su emülsiyonu, yağlı faz su içerisinde dağıldığında ise buna su içerisinde yağ emülsiyonu adı verilir [83]. Yüzey etkin maddenin yapısı ve üretim işlemleri emülsiyon tipini belirler. Elde edilen yapının emülsiyon olabilmesini sağlayan başka bir bileşene ihtiyaç duyulur. Bu bileşen sistemi kararlı kılmaktadır. Yüzey aktif madde olan bu bileşen emülsiyonlaştırıcıdır. Literatürde yer alan çalışmalarda bu yöntemin manyetik sıvı hazırlarken parçacık dağılımını kontrol etmede oldukça etkili olduğu görülmüştür [84-86].

2.1.6. Stabilizasyon

Nanomanyetik parçacıkların yanında manyetik sıvılarda nanoparçacıklar arasındaki çeşitli aktif potansiyellerin dengelenmesi ve kontrolü gerekmektedir. Manyetik sıvıların kararlılığı yani manyetik nanoparçacıkların çökmeden sıvı içerisinde asılı kalabilmesi yer çekimi kuvveti, çekici dipol-dipol etkileşimleri ve itici

sterik/elektrostatik/elektrosterik etkileşimler gibi parçacıklar arasındaki kuvvetlerin dengelenmesiyle başarıldı [16]. Bu dengeyi sağlayan taşıyıcı sıvılar ve yüzey dengeleyicinin rolü oldukça önemlidir. Manyetik sıvı süspansiyonlarının kararsız olmasındaki asıl sebep manyetik nanoparçacıkların yüksek yüzey enerjisi, hızlı Brownian hareketi sonucu parçacıklar arası çarpışma, büyük parçacıklar arasında daha fazla dipol-dipol etkileşimleri, nispeten zayıf parçacık dengeleyici ve taşıyıcı sıvının kimyasal uyumluluğu gibi çeşitli faktörlerin kolektif bir etkisidir [87]. Manyetik sıvıların kararlılığında manyetik nanoparçacıkların elde edilebilmesi ile aynı öneme sahip olan stabilizasyon işlemi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bu dengeleme işlemleri organik veya sulu ortamda sterik stabilizasyon, sulu ortamda elektrostatik stabilizasyon ve iyonik sıvı çözeltilerinde stabilizasyon başlıkları altında incelenmektedir.

2.2. Ferrohidrodinamik Denklemler

Manyetik sıvılar pratikte sürekli polarizasyonlu uygun durumları ifade eder. Bu durumda akışkanın süreklilik ya da makroskobik tanımındaki madde bağı (body couple), iç açısal momentum yoğunluğu, simetrik olmama durumu ve madde gerilmesi gereklidir. Ferrohidrodinamik denklemler oluşturulurken izotermal sıkıştırılamayan manyetik sıvılar; değişmez, tek dağılımlı parçacıklar ve küresel eşit dağılımlı uzay şeklinde düşünülmüştür. Bu koşullar altında manyetik sıvının kütle yoğunluk dağılımı sabittir. Bu nedenle süreklilik denklemi,

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{2,1}$$

şeklinde verilir.

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,

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

Burada ρ yoğunluk, $\mathbf{v}$ devinimsel hız, $\boldsymbol{\omega}$ kısaca dönme hızı olarak da söylenebilecek altsüreklilik (subcontinuum) birimlerinin ortalama dönme hızı, p basınç, $\mathbf{g}$ yer çekimi alan vektörü, $\mathbf{M}$ süspansiyonun mıknatıslanması, $\mathbf{H}$ manyetik alan, λ toplam (bulk) viskozite, η kayma viskozitesi ve ζ girdap viskozitesini temsil etmektedir. Brenner ve arkadaşları

tarafından birbirini etkilemeyen alanların seyreltilmiş süspansiyonları için girdap viskozitesini tanımlamada yaygın olarak kullanılan $\zeta = 1.5\phi_{\mathrm{h}}\eta_0$ elde edilmiştir. Bu ifadede ϕ_{h} asılı duran parçacıkların hidrodinamik hacim kesri ve η_0 kayma viskozitesidir. Manyetik etkileşim ve 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 [88].

İç açısal moment yoğunluğu değişim oranı **s**(**x**, *t)* = *ρ*(**x**, *t) I*(**x**, *t)ω*(**x**, *t)*, toplam açısal moment yoğunluğundan lineer momentum yoğunluğunun momenti çıkarılarak elde edilebilir [1,88].

$$\rho \boldsymbol{I} \frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H} + 2\zeta(\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{v} - 2\boldsymbol{\omega}) + (\lambda' + \eta')\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{\omega}) + \eta' \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{\omega} \qquad (2,3)$$

***I*(x**, *t)* manyetik sıvıda altsüreklilik birimleri için durağan yoğunluğun momentidir ve parçacıkların konsantrasyonu ve şekline bağlıdır. λ' toplam dönme viskozitesi, η' ise kayma dönme viskozitesidir. Gerilme tensörünün simetrik olmayan kısmı, iç açısal moment **s**(**x**, *t)* ve dış açısal moment **x** × **p**(**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 [89-90]. Çünkü düşük frekanslı manyetik alanlarda yapılan manyetik sıvı uygulamalarının neredeyse tamamını etkilemektedir yani manyetik alan magnetostatik sınırlarda Maxwell denklemlerine uymaktadır [90].

$$\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{H} = 0, \ \boldsymbol{\nabla} \cdot (\mathbf{M} + \mathbf{H}) = 0 \qquad (2,4)$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\nabla}\mathbf{M} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} - \frac{1}{\tau}(\mathbf{M} - \mathbf{M}_{\mathrm{eq}}) \qquad (2,5)$$

Dk. 2,5'te $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_N} + \frac{1}{\tau_B}$ altsüreklilik birimlerinin etkin gevşeme zamanı, $\mathbf{M}_{eq}$ ise süspansiyonun kararlılık mıknatıslanmasıdır. Farklı mıknatıslanma gevşeme denklemleri önerilmiştir [90]. Bu yüzden Dk. 2,5 düşük manyetik alan için mıknatıslanmayı doğru bir şekilde önerir. Yüksek manyetik alan, genlik ve frekanslarda mıknatıslanma gevşemesi daha iyi bir şekilde tanımlanmıştır [89].

Manyetik sıvılarda etkileşmeyen parçacıkları, tek dağılımlı biriktirmenin kararlılık mıknatıslanması elde edilmiştir.

$$\frac{\mathbf{M}_{eq}}{\phi M_d} = L(\alpha) = \frac{\mathbf{H}}{H}, \;\; L(\alpha) = \cos\alpha - \alpha^{-1} \tag{2,6}$$

Burada $\alpha = \frac{mH}{k_B T}$ Langevin parametresi, $L(\alpha)$ Langevin fonksiyonu, ϕ manyetik parçacık konsantrasyonu, k_B Boltzmann sabiti, M_d nanoparçacık materyallerin alan (domain) mıknatıslanması ve T mutlak sıcaklıktır. Düşük manyetik alan sınırında ($\alpha \ll 1$) 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. 2,1-2,6 manyetik alanın etkisi altında manyetik sıvının akışını tanımlamak için gereken denklem kümesidir. Bu magnetostatik problem için gereken sınır koşulları,

$$\mathbf{n} \cdot \|\mathbf{B}\| = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \tag{2,7}$$

$$\mathbf{n} \times \|\mathbf{H}\| = \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K} \tag{2,8}$$

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 verildi. Hidrodinamik problem için sınır koşullarının çeşitli tipleri kabul edilmiştir [89,90]. Öteleme hızı için Lamb tarafından aşağıdaki denklem önerilmiştir [91],

$$\mathbf{v} - \mathbf{v}_s = \frac{1}{\beta}[\mathbf{n} \times (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \times \mathbf{n})] \tag{2,9}$$

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 çapına ters orantılıdır

[91]. Kayma etkisi makroskobik manyetik sıvı akışkanlarda ihmal edilebilir. Dolayısıyla öteleme hızında sınır koşulları aşağıdaki gibi olur,

$$\mathbf{n} \cdot \|\mathbf{v}\| = 0 \tag{2,10}$$

$$\mathbf{n} \times \|\mathbf{v}\| = 0 \tag{2,11}$$

Dönme hızı için en çok kullanılan *ad hoc* sınır koşulları [90],

$$\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}} = \frac{\Upsilon_{\omega}}{2}(\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{v})_{\mathrm{b}} \tag{2,12}$$

Burada Υ_{ω} ayarlanabilen katsayı ve $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}$ zarın/duvarın açısal hızını temsil etmektedir. Dk. 2,12'de iki olgu göz önüne alındığında, zar/duvar yüzeyi ile alt süreklilik birimleri arasında güçlü etkileşim durumu, kayma ve dönmenin olmadığı durumlar ($\Upsilon_{\omega} = 0$) tarafından temsil edildi. Duvar yüzeyi ile akışkan arasındaki zayıf etkileşim durumunda ise zar/duvar yüzeyinde ($\Upsilon_{\omega} = 1$) sıfırlama simetrik olmayan gerilme (the vanishing antisymmetric stress) tarafından ifade edildi. O halde dönme hızı için sınır koşullarının doğru seçilmesi hala tartışmaya açıktır [89,90].

Ferrohidrodinamik denklemlerin özel bir durumu sabit sıcaklık ve akış altında sıkıştırılamayan manyetik sıvılar için elde edilebilir. Bu durumda kararlı durum koşulları için bilinen adıyla ferrohidrodinamik Bernoulli denklemi karşımıza çıkmaktadır [1],

$$p - \mu_0 MH + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{sabit} \tag{2,13}$$

Burada M süspansiyonun mıknatıslanması, H manyetik alan, g yer çekim ivmesi ve h ise bir yükseklik üzerindeki referans yüzeyini ifade etmektedir. Dk. 2,13 kendiliğinden askıda durma (self-levitation), manyetik sıvı sızdırmazlıklar (ferrofluid seals), manyetik nozul (magnetic nozzles) vb. gibi bazı basit ama önemli manyetik sıvı davranışlarını açıklamak için çok yararlıdır [1,2].

2.2.1. Gevşeme Mekanizması

Yapılan birçok çalışmada manyetik sıvılara büyüklüğü ve yönü değişen manyetik alan uygulanır. Uygulanan manyetik alan (**H**) değiştiğinde manyetik sıvı mıknatıslanması (**M**) yeni bir denge genliği ve yön için gevşer. Bu gevşeme süreci

için iki mekanizma vardır. İlk mekanizma taşıyıcı sıvının hidrodinamik direncine karşı parçacık dönmesi (particle rotation) tarafından gerçekleşir ve Brownian gevşeme mekanizması olarak bilinir. Brownian gevşeme zamanı aşağıdaki gibi karakterize edilir [1],

$$\tau_{\mathrm{B}} = \frac{3V_{\mathrm{h}}\eta_0}{k_{\mathrm{B}}T} \tag{2,14}$$

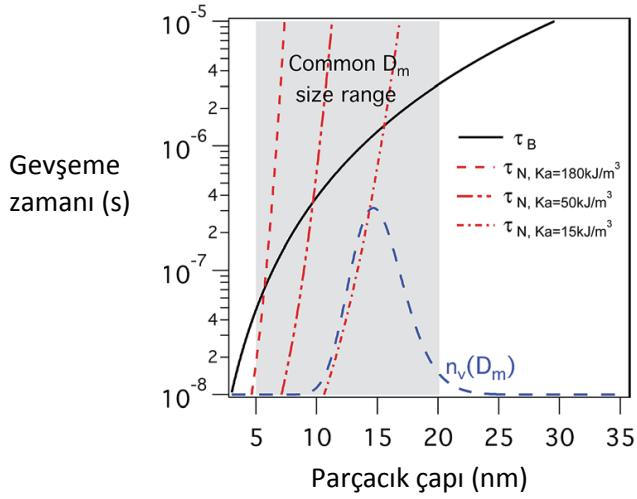
Burada η_0 taşıyıcı sıvının vizkositesi ve V_{h} ise hidrodinamik parçacık hacmidir. Parçacık içindeki manyetik dipol döndüğünde ikinci gevşeme mekanizması oluşur. Bu durum Neel gevşeme mekanizması olarak da bilinir. Neel gevşeme zamanı aşağıda karakterize edilmiştir [1],

$$\tau_{\mathrm{N}} = \frac{1}{f_0}\exp\left(\frac{K_{\mathrm{a}}V}{k_BT}\right) \tag{2,15}$$

Yukarıdaki ifadede $f_0 \approx 10^9$ Hz, K_{a} malzemenin izotropik olmayan sabiti ve V ise parçacığın manyetik çekirdek hacmidir. Etkin gevşeme zamanı,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\mathrm{N}}} + \frac{1}{\tau_{\mathrm{B}}} \tag{2,16}$$

Manyetik özellikli ($FeO \cdot Fe_2O_3$, K_{a}~15 kJ m^{-3}) ve kobalt ferrit ($CoO \cdot Fe_2O_3$, K_{a}~180 kJ m^{-3}) nanoparçacıkları için Neel ve Brownian gevşeme zamanlarının beklenilen ilişkisi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Manyetik kristal izotropik olmayan örnekler ile farklı manyetik malzemelerin boyutları için hesaplanmış Neel (τ_{N}) ve Brownian (τ_{B}) gevşeme zamanları [92]

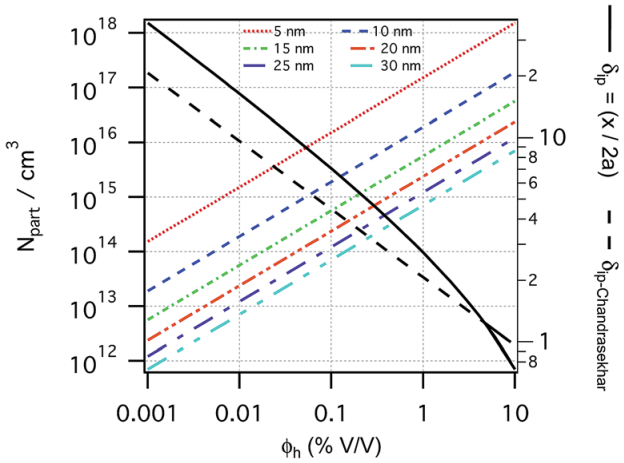
Yukarıdaki grafikte kobalt ferrit ($CoO\text{-}Fe_2O_3$) için verilen değer 180 kJm^{-3} ve 15 kJm^{-3}, manyetit için ($FeO\text{-}Fe_2O_3$)'tür. Ortalama çap ortak boyut aralığı D_m (gri alan) ve tipik lognormal boyut dağılımı ($D_m = 15$ nm, $\ln\sigma = 0.15$ (mavi) gösterilmiştir. $\ln\sigma$ ise standart sapmadır.

Biyomedikal olmayan uygulamalarda kullanılan frekanslar için $\Omega_{f\tau} \ll 1$ olduğunda alanla uyum içinde; $\Omega_{f\tau} = 1$ olduğunda alanla anlamlı biçimde uyumsuz; $\Omega_{f\tau} \gg 1$ olduğunda ise ihmal edilebilir bir mıknatıslanmaya sahip biçimde davranacaklardır.

2.2.2. Parçacık-Parçacık Etkileşimi

Parçacık boyutlarının 5 – 20 nm arasında olmasından dolayı ferromanyetik sıvıda düşük hacim kesirlerinde bile birim hacim başına çok sayıda parçacık düşmektedir. Parçacıkların sayısal yoğunluğu (n) normal bir yapıda düzenlenmiş tekil dağılımlı nanoparçacıklar hesaba katılarak ve Brownian hareket, harici kayma gerilmesi ile manyetik alanlar ihmal edilerek hesaplanabilir. Sonuçta elde edilen parçacık yoğunluğu Şekil 2.3'te farklı parçacık boyutları ve parçacık yüzeyleri arasındaki tahmin edilen göreceli uzaklık (δ_{ip}) için manyetik sıvılarda hidrodinamik hacim kısmının bir fonksiyonu ($\emptyset_h$) olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak Şekil 2.3'te, parçacıkların tahmini yoğunluğu kullanılarak (n) rastgele dağılımları için Chandrasekhar tarafından parçacıklar arasındaki tahmini ortalama uzaklık ($\delta_{ip} = \frac{1}{d_h} 0.55396 n^{-\frac{1}{3}}$) da çizilmiştir [92].

Manyetik sıvıların statik veya zamanla değişen manyetik alanlar kullanılarak oluşturulan manyetik kuvvetler sayesinde kontrol edilebildikleri zaten bilinen bir konudur. Çalışma sadece süspansiyondaki parçacık yoğunluğu için çok kaba bir tahmin olsa da manyetik sıvıların birim hacim başına çok sayıda parçacığa sahip olduğu ve bunların arasında çok az uzaklık bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2.3'te manyetik parçacıklar arasındaki manyetik ve hidrodinamik etkileşimlerin hacim kesirleri $\emptyset_h > \%0.1$ v/v için bu sıvılarda anlamlı olduğu görülmektedir. Bu da yaygın olarak kullanılan manyetik sıvılarda herhangi bir manyetik alan olmadığında bile topaklanma oluşum ihtimalini göstermektedir [93].



Şekil 2.3. Bir manyetik sıvıda her bir santimetreküpte bulunan parçacık sayısı (N_{part}) ve hidrodinamik hacim kesrinin ($\emptyset_h$) bir fonksiyonu olarak parçacık yüzeyleri arasındaki göreceli uzaklık (δ_{ip}) [93]

Tekil dağılımlı parçacık boyutu dağılımı göz önüne alınarak hesaplanmış ve Brownian hareket, harici kesme gerilimi ile manyetik alanın etkileri ihmal edilmiştir. Burada *x*, parçacık yüzeyleri arasındaki uzaklık, a ise hidrodinamik parçacık çapıdır.

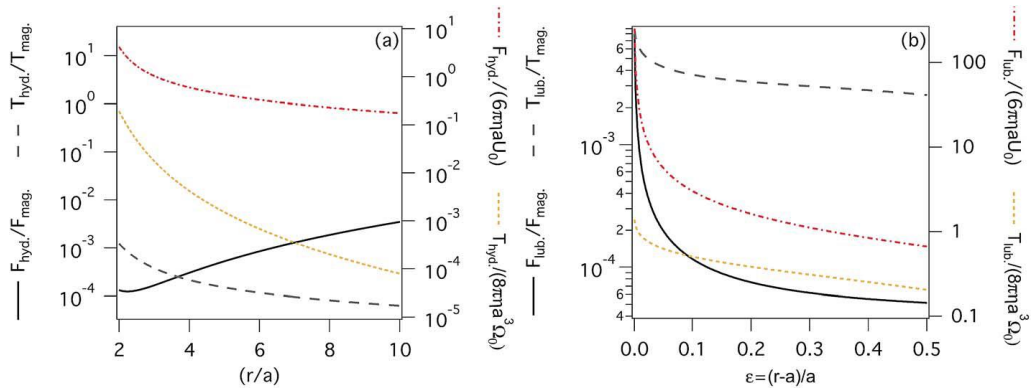
İki katı parçacık arasındaki etkileşimler mesafeye bağlı olarak, birbirinden uzak parçacıklar arasında uzak alan etkileşimleri biçiminde ve yakın temas içinde olan parçacıklar arasında ise yağlama etkileşimleri olarak sınıflandırılabilir [94]. Düşük Reynolds sayısı için etkileşim halinde olan iki küresel parçacığın kuvvet, tork ve itme (stresslet) ile ilgili büyük direnç matrisi için ifadeler Jeffrey ve Onishi tarafından çok kutuplu genleşme kullanılarak elde edilmiştir [95]. Yakın temastaki parçacıklar için ε^{-1} ve $\ln \varepsilon^{-1}$'e bağımlı olan göreceli kesme (shearing) hareketi (rotasyonel) ve göreceli sıkma (squeezing) akışı gibi farklı durumlarda kuvvetler ve torkların miktarı belirlenmiştir. Burada ε parçacık yüzeyleri arasındaki göreceli uzaklığı ifade etmektedir.

İki parçacık arasındaki dipol-dipol etkileşim enerjisi Dk. 2,17'de verilmiştir [1],

$$E_{\mathrm{dd}} = \frac{1}{4\pi\mu_0}\left[\frac{\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2}{r^3} - \frac{3(\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r})}{r^5}\right] \qquad (2,17)$$

Burada $\mathbf{m}_1$ ve $\mathbf{m}_2$ iki parçacığın dipol momentleri, $\mathbf{r}$ ise $\mathbf{m}_1$'den $\mathbf{m}_2$'ye vektör ve *r* de bu vektörün büyüklüğüdür. Dipol-dipol etkileşim enerjisi daha büyük parçacık seperasyonu için bir Keesom etkileşimine benzer. İki sabit dipol arasında etkileşen kuvvet ve tork için ifadeler Dk. 2,17'den elde edilebilir.

Dönmeyen küresel parçacıkların göreceli dönüşümü ve iki ötelenmeyen (non-translating) dönel parçacığın normalleştirilmiş torku için normalleştirilmiş kuvvet Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Bunun yanında iki manyetik parçacık arasındaki manyetik etkileşime göre hidrodinamiğin göreceli büyüklüğü de görülmektedir. Bu etkileşim kuvveti $U_0 = 10^{-6}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ hızlı ötelenen dönmeyen parçacıklar düşünülerek, etkileşim torku ise $\Omega_0 = 10^{3}\ \mathrm{s^{-1}}$ dönme oranlı döner ve ötelenmeyen parçacıklar düşünülerek hesaplanmıştır [93].



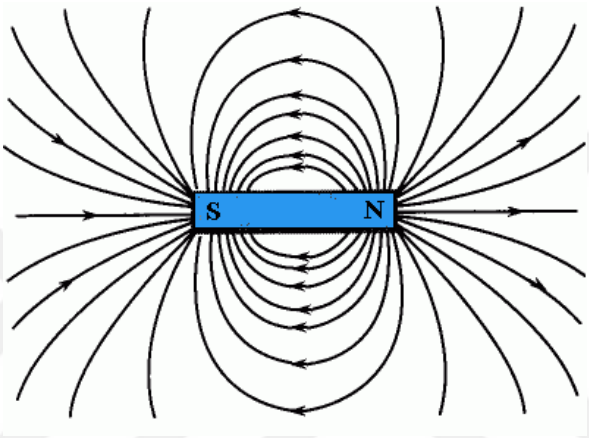
Şekil 2.4. Küçük (a) ve büyük (b) seperasyonlarında suda askıda duran a=10 nm ($M_{\mathrm{d}} = 425\ \mathrm{kAm^{-1}}$) yarıçaplı iki küresel manyetik parçacık arasındaki manyetik etkileşimler için hidrodinamik kuvvet, tork ve bunların göreceli değerleri [93]

Büyük ve küçük parçacık ayrışmaları için manyetik etkileşimlerin hidrodinamik etkileşimlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum hidrodinamik etkileşim etkisinin seyreltik manyetik sıvılarda birinci dereceden ihmal edilebileceğini göstermektedir. Manyetik sıvılarda manyetik dipol-dipol etkileşimlerin önemi Butter vd. [93]'nin çalışmasında gösterilmiş ve bu çalışmada dipol etkileşimlere bağlı olarak parçacık çapının bir fonksiyonu şeklinde parçacık kümelerinin ve zincirlerinin oluşumu bildirilmiştir. Daha büyük parçacıkların manyetik alanın yokluğunda bile birdenbire kümeleşme eğilimi göstermesine rağmen küçük parçacıklarda bu durum oluşmamıştır. Küçük parçacık ayrışmalarında, parçacıklar arasındaki etkileşim onları doğrusal dipol yapılar haline yöneltir. Bu yapılar genellikle manyetik alan ortamdan kaldırıldıktan sonra termal kaynaşmadan dolayı birbirinden ayrılır. Birçok uygulamada avantaj oluşturmak için kullanılabilecek olan parçacık topaklanması manyetik sıvıların özelliklerini ve performansını etkiler.

2.3. Transformatörler

2.3.1. Manyetik Alanın Üretilmesi

Manyetik alanın üretilmesi manyetik alanın bir karakteristiği olan manyetik akıya dayanır. Manyetik akıyı kuzey (N) ve güney (S) kutupları arasındaki kuvvet çizgilerinin temsil ettiği düşünülebilir ve Ø sembolü ile gösterilir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi manyetik akı kuzey kutbundan çıkarak güney kutbuna gider ve buradan da tekrar kuzey kutbuna döner.



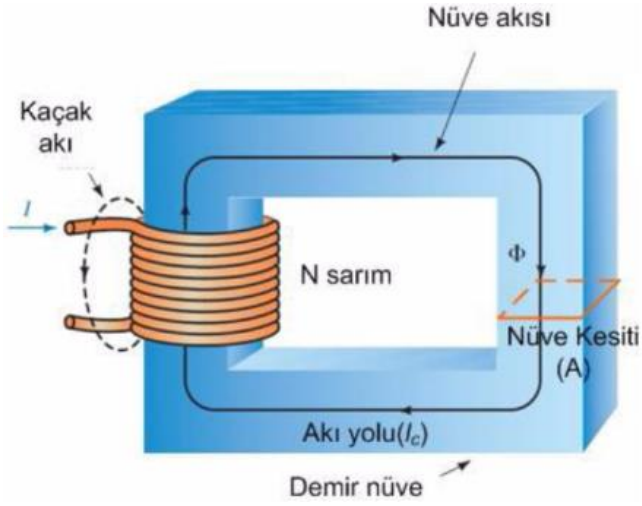
Şekil 2.5. Bir mıknatıs ve manyetik akıları [96]

Bu anlamda manyetik akı veya manyetik kuvvet çizgileri kapalı bir döngü oluşturur ve süreklidirler. Bir sargıdan geçen akım sayesinde manyetik alanın oluşmasını ifade eden yasa Ampere yasası'dır.

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{I} = I_{net} \tag{2,18}$$

I_{net} akımı tarafından üretilen **H**, manyetik alan şiddetidir ve **I** amper (A), **H** ise (At/m) cinsinden ölçülmektedir.

Bu durum Şekil 2.6'da verilen ferromanyetik malzemeden yapılmış bir nüvenin kolu üzerine yerleştirilen N sarımlı sargı için düşünüldüğünde sargı uçlarına uygulanan akım sayesinde oluşan manyetik alan çekirdeğin içinde kalacaktır. Bu sayede çekirdeğin ortalama uzunluğu *lc*, Amper kanununda yer alan integralin yolu olmaktadır.



Şekil 2.6. Basit bir manyetik yapı [96]

Manyetik alan oluşturmak için akımın gösterdiği çabaya manyetik alan şiddeti **H** adı verilir. Malzemenin manyetik geçirgenliği μ (H/m) olduğundan manyetik akı yoğunluğu,

$$\mathbf{B} = \mu\,\mathbf{H}\ (\mathrm{Wb/m^2}) \tag{2,19}$$

denklemi ile verilir. Şekil 2.6'da verilen bir kesit alanındaki toplam akı,

$$\emptyset = \oint_{\mathrm{A}} \mathbf{B}\, d\mathbf{A} \tag{2,20}$$

Burada $d\mathbf{A}$ birim alandaki artıştır. Eğer akı vektörü **A** alanının düzlemine dik ve akı yoğunluğu alan içinde sabit ise akı denklemi,

$$\emptyset = \mathbf{B}\,\mathbf{A} \tag{2,21}$$

olarak yazılır.

Sonuç olarak A nüve kesit alanı olarak düşünüldüğünde sargıdan geçen *i* akımından dolayı nüvede meydana gelen toplam akı,

$$\emptyset = \mathbf{B}\,\mathbf{A} = \frac{\mu \mathrm{N} i \mathrm{A}}{lc} \tag{2,22}$$

olarak yazılır.

2.3.2. Zamanla Değişen Bir Manyetik Alanın Endüklediği Gerilim

Manyetik akı bir sargıyı kestiğinde bu sarım üzerinde gerilim endüklenir. Endüklenenen bu gerilim akının zamanla değişimiyle doğru orantılıdır. Zamanla değişen bir manyetik alanın endüklediği gerilim Faraday yasası ile açıklanır ve transformatörün çalışma esasıdır.

$$e = -\mathrm{N}\frac{d\emptyset}{dt} \tag{2,23}$$

Burada e bir sargının N sarımında endüklenen gerilimdir. $\emptyset$ sargıyı kesen akı, N ise sargıdaki sarım sayısıdır. Denklemdeki (-) yön Lenz yasasının bir değeridir.

Lenz yasasına göre; eğer sargı uçları kısa devre edilirse, sargıda endüklenen gerilimden dolayı sargıda bir akım oluşur ve bu akımdan kaynaklanan akı ise esas akıya zıt yönde olacaktır. Fakat üretilen gerilimin polaritesi fiziksel olarak tanımlanabildiği için negatif işaret genellikle yazılmaz.

2.3.3. Transformatör Nüvelerindeki Enerji Kayıpları

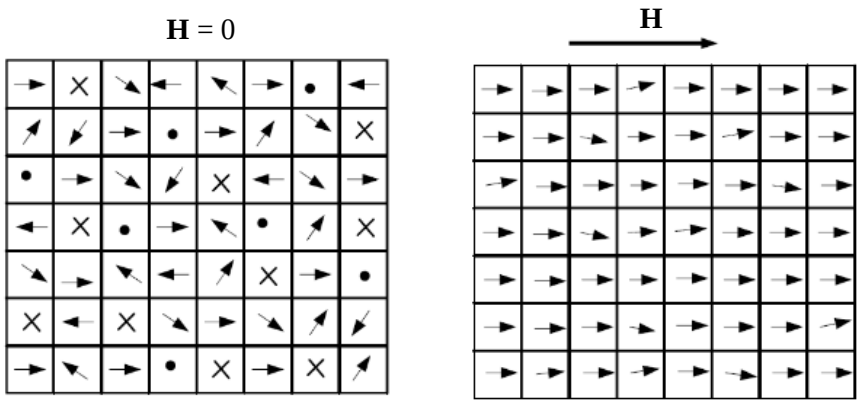
Ferromanyetik nüvelerde histerizis ve girdap (eddy) kayıpları olmak üzere iki tür kayıp vardır.

2.3.3.1. Histerizis Kayıpları

Manyetik nüvenin yapısındaki domainlerin yönünü değiştirmek için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum bütün elektrik makinalarında ve transformatörlerde bir güç kaybına sebep olmaktadır. Bir demir çekirdeğe AC akım uygulandığında bu akımdan dolayı domainlerin yönü akım yönüne göre değişecektir. Bu anlamda domainlerin yön değiştirmesi için harcanan/kaybolan enerjiye histerizis kaybı denir. Manyetik alana bağlı olarak bu değişim Şekil 2.7'de görülmektedir.

Histerizis kayıpları aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\mathrm{P_h} = \mathrm{K_h f B_m^n V} \tag{2,24}$$

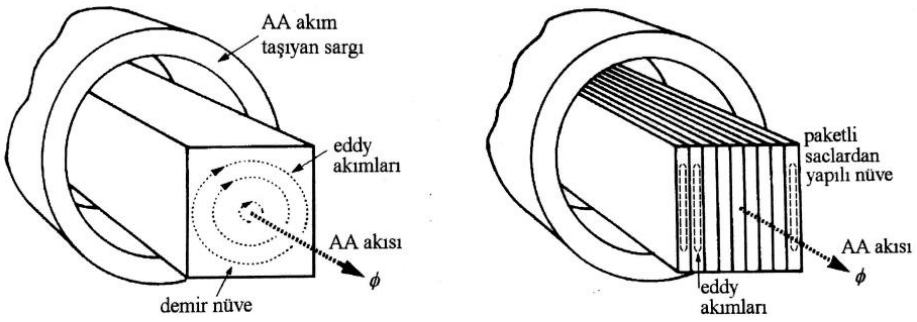


Şekil 2.7. (a) Manyetik domainlerin doğal yönlenmiş hali (b) Manyetik domainlerin dışardan bir manyetik alan uygulanarak yönlenmiş hali [96]

Burada P_h histerizis kayıplar (W), K_h manyetik malzemeye bağlı bir sabit, n değeri deneysel olarak bulunur, nüve hacmi ise V (m^3)'dir.

2.3.3.2. Eddy Akımı Kayıpları

Manyetik çekirdek içindeki kayıpların bir diğer kaynağı da nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilir ve Eddy akımı kayıpları olarak adlandırılır. Faraday kanununa göre AC akım altında bir nüve üzerine sarılmış sargılarda ve manyetik nüve üzerinde gerilim oluşur. Burada nüvenin iletken bir yapısının olması bu durumun başlıca sebebidir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi girdap akımı olarak da nitelenen Eddy akımları rezistif özelliği olan demir nüve gibi malzemelerin boyunca akarlar. Bu kayıp Eddy akımının yolu üzerinde bulunan nüvenin ısınmasından dolayı gerçekleşir.



Şekil 2.8. Blok demir ve paketli saclardan yapılmış nüvelerdeki Eddy akımları [96]

Bu anlamda Eddy akımından dolayı kaybolan enerji Eddy akımlarının nüve içerisinde izlediği yolun boyutlarıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle akının dolaştığı yüzeyi azaltmak için ferromanyetik nüveler ince levhalardan (0.35 - 0.6 mm) yapılır. Levhalar arasındaki yalıtımı sağlamak için silis kullanılır.

2.3.4. Transformatör Çeşitleri

Transformatörler kullanım amacına göre farklı tiplerde üretilmektedir. Bir transformatörün çıkış gerilimi giriş gerilimden yüksek ise yükseltici, düşük ise alçaltıcı transformatör olarak adlandırılır.

Güç transformatörleri elektronik devrelerde kullanılır ve birçok farklı tip ve uygulamaları vardır.

Ototransformatörler genellikle düşük güç gerektiren yerlerde ayarlı gerilim sağlamak için kullanılırlar.

Yalıtım transformatörleri giriş ve çıkış gerilimleri eşit olan transformatörlerdir. Doğru akımın yalıtımı amacıyla kullanılırlar.

Ses frekansı (20 KHz'e kadar) transformatörleri, ses frekansı yükseltici devresi giriş, çıkış veya yükselticiler arasında empedans eşlemesi için kullanılır.

Kontrol transformatörleri elektrik sisteminde değişik noktalarda gerilimin genliği ve fazında istenen düzenlemeleri sağlamak amacıyla düşük güç, sabit akım veya sabit gerilim gerektiren devrelerde kullanılır.

Ölçü tipi transformatörler sistemin yüksek enerjili kısmı ile ölçü aletleri ve ölçü elemanları arasında emniyetli bir bağlantının sağlanması ve yüksek gerilim ve akımların izlenmesi için kullanılır.

Tez çalışmasında bir fazlı küçük güçlü (35 W) seri üretim bir transformatörün karakteristikleri, geometrik ve elektriksel parametreleri (sargılar, yalıtkanlar) değiştirilmeden sadece çekirdek kısmının malzemesi değiştirilmek suretiyle incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

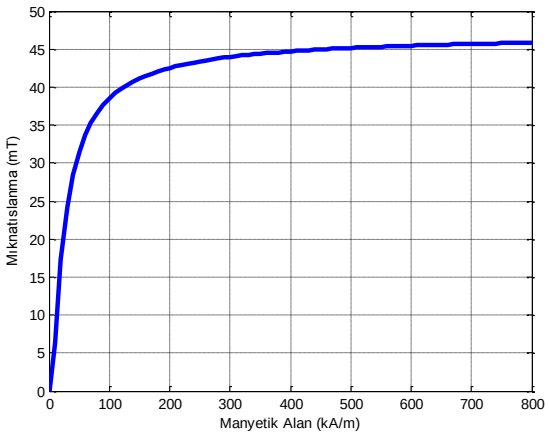
3.1.1. Manyetik Sıvı

Bu tez çalışmasında tasarlanan transformatörlerin çekirdeğinde, yağ bazında manyetik olmayan taşıyıcı sıvının koloidal karışımları olan manyetik sıvılar kullanılmıştır. Bu karışım genellikle %10'unu oluşturan 5-20 nm boyutlarında magnetite (Fe_3O_4) gibi kalıcı olarak mıknatıslanmış parçacıkları içerir [1]. Brownian hareket kısa mesafeli sterik bir engelleme ve elektrostatik itme sağlamak amacıyla oleik asit ya da polimer kaplama sayesinde yerçekimi altında nanoboyutlardaki parçacıkların çökmesini engeller [97]. Şekil 3.1a tez çalışmasında kullanılan manyetik sıvı ve Şekil 3.1b'de ise manyetik sıvının belirli bir manyetik alanın etkisi altında şekillenmiş hali görülmektedir.

(a) (b)

Şekil 3.1. Manyetik Sıvı (DS-50)

Bu manyetik sıvının mıknatıslanma eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Manyetik sıvılar akışkanlıklarını yüksek gradyan manyetik alan altında bile korumaktadırlar [3]. Manyetik sıvıların sahip oldukları bu özellikler düşünüldüğünde uzun süreli çalışma ve verim gerektiren sistemlerde kullanılması uygundur.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan DS-50 manyetik sıvının mıknatıslanma eğrisi [97]

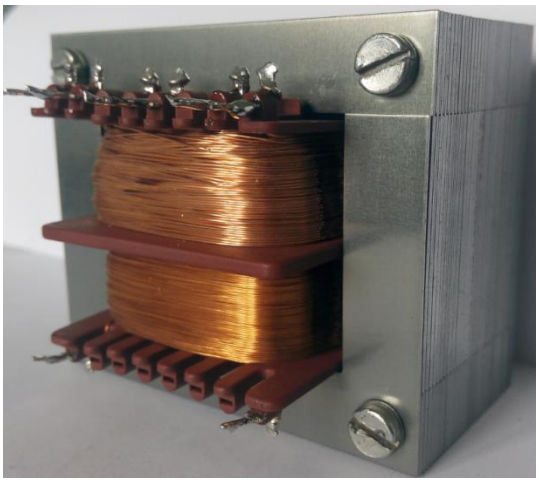
Bu anlamda tez çalışmasında yukarıdaki grafikte mıknatıslanma eğrisi verilen 47 mT mıknatıslanma ve 88 mPa viskozite özelliklerine sahip Sigma Corporation/ Japonya firmasından temin edilen DS-50 model manyetik sıvı kullanılmıştır.

3.1.2. Yeni Transformatör Yapılarının Tasarımı

Tez çalışmasında manyetik sıvı bazında çalışan transformatörlerin verimliliğini değerlendirmek için hem manyetik çekirdek hem de kullanılan malzeme türüne göre farklı yapılarda örnekler üretilmiştir. Piyasada seri üretimi mevcut olan transformatörlerden faklı olarak bu yapılarda hem manyetik (metal) hem de non-manyetik (plastik) malzemelerin bileşkesi ve kombinasyonu kullanılmıştır. Tez çalışmasında örnek model olarak aşağıdaki transformatör yapıları tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir.

- Plastik malzemeden (Derlin) yapılmış mantel tip ayarlı transformatör
- Orta bacak kısmı manyetik sıvı hibrit transformatör
- Üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı transformatör
- Mikrotransformatör

Açık devre, kısa devre ve yük durumları için deneyleri yapılan üretilmiş bütün transformatörler, Şekil 3.3'te verilen seri üretim mantel tip bir transformatörün gerçek ölçülerine sahiptir.



Şekil 3.3. Seri üretim mantel tip transformatör

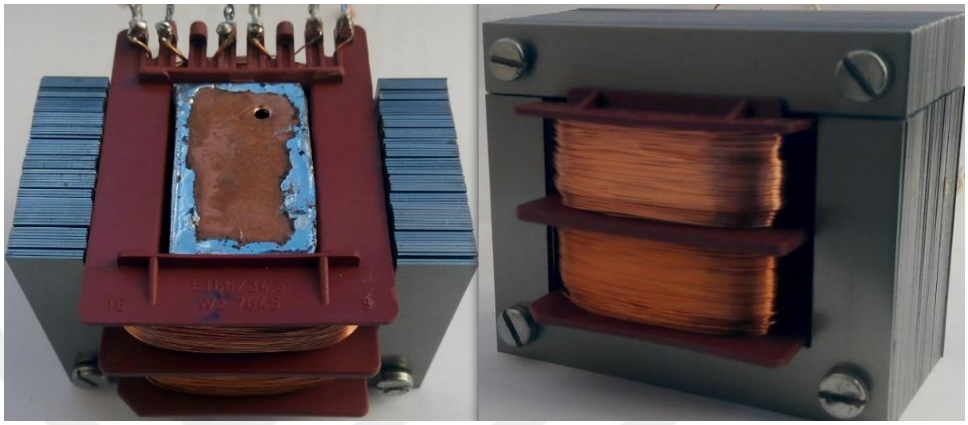
Manyetik veya non-manyetik çekirdeğe sahip olan bu transformatör yapıları içerisinde, esas manyetik çekirdek olarak manyetik sıvı kullanılan ve sıvı miktarının ayarlanabilir olarak tasarlandığı mantel tip transformatör örneği Şekil 3.4'te verilmiştir. Diğer transformatör türlerinden farlı olarak manyetik sıvı ayarlı transformatörde piston yukarı-aşağı hareket ederek manyetik sıvı hacminin değişim ayarı yapılabilmektedir. Bacak kanalındaki manyetik sıvı hacminin değişimi çekirdeğin manyetik geçirgenliğini de değiştirir. Bunun sonucu olarak endüklenen manyetik akı dolayısıyla da transformatörün çıkış gerilimi değişmiş olur.

Şekil 3.4. Plastik malzemeden (Derlin) yapılmış mantel tip ayarlı transformatör

Bu transformatörde sıvı miktarına bağlı olarak sekonder sargılarında endüklenen gerilim değişimlerini görebilmek için bir piston vasıtasıyla manyetik sıvının farklı

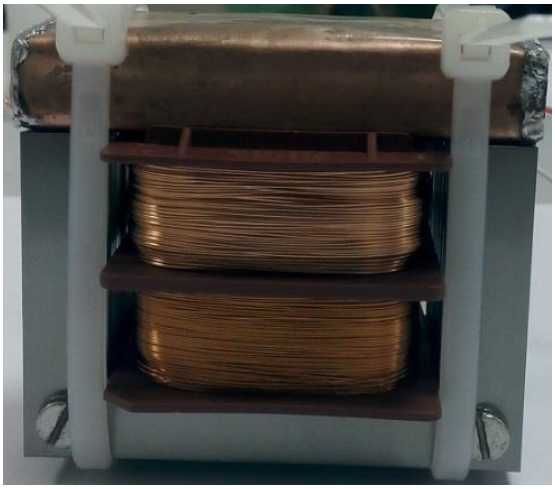
miktarlarda doldurulmasına imkân sağlanmıştır. Böylece sıvı miktarına bağlı olarak sekonder sargılarında endüklenen gerilim değişimleri ayarlanabilmektedir.

Mantel tip transformatörün üst boyunduruk ve orta bacak kısmı manyetik sıvı doldurulabilecek bir hazne olarak hibrit yapıda tasarlanan transformatörler Şekil 3.5-6'da görülmektedir.



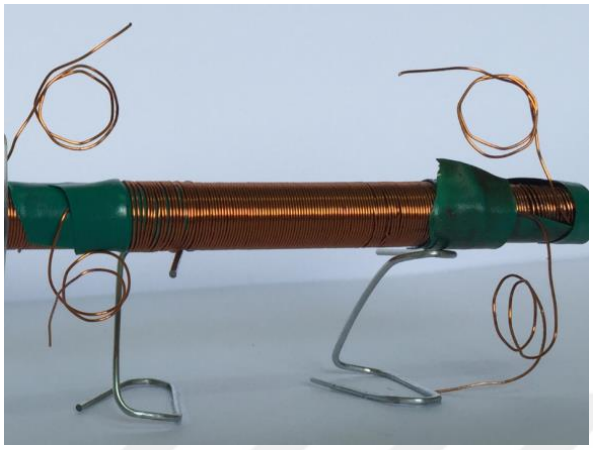
Şekil 3.5. Orta bacak kısmı manyetik sıvı hibrit transformatör

Transformatörün diğer bölgeleri elektromanyetik saclardan oluştuğu halde Şekil 3.5'te görülen orta bacak ve Şekil 3.6'da görülen üst boyundurukta manyetik geçirgenlik manyetik sıvı tarafından sağlanmaktadır. Böylece manyetik çekirdekte indüklenen manyetik akı sıvı miktarına bağlı olarak ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.6. Üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı transformatör

Şekil 3.7'de transformatörün üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı doldurulabilecek kanal olarak tasarlanmış ve sıvı miktarındaki değişimlere göre elde edilen çıkış gerilimleri yapılan deneylerde ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Mikrotransformatör

Manyetik sıvının mikro sistemlere olan etkisini araştırmak amacıyla toplam 5 ml hacimde alçaltıcı bir mikrotransformatör tasarlanmıştır. Şekil 3.7'de görülen mikrotransformatör ile manyetik sıvının mıknatıslanma değişimine bağlı olarak açık devre ölçümleri yapılmıştır.

3.1.3. Matlab Programının Kullanım Alanları

Matrix Laboratory kelimelerinden türetilerek Matlab ismini alan program, içerisindeki mevcut veritabanı sayesinde kısa yazılımlarla matris tabanlı matematiksel işlemleri hızlı bir şekilde gerçekleştirebilen grafik özelliği yüksek ve kullanıcı etkileşimli bir programdır.

Günümüzde bilgisayar tabanlı işlemsel yeteneği yüksek sistemlere ihtiyaç duyan özellikle mühendislik ve doğa bilimlerinde yapılan çalışmalarda karmaşık ve matris şeklinde olmayan sayılar ile etkili bir analiz düzeyine sahiptir. Lineer cebir, giriş-çıkış fonksiyonları, grafik işlemleri ve programlama komutları gibi hazır fonksiyonların yanında farklı alanlara özgü toolbox'ların da olması istenilen program yapısının kullanıcılar tarafından oluşturulmasına imkân vermektedir. Bu anlamda tez çalışmasında, Matlab programının matrislerle işlem yapabilme yeteneğinden faydalanılarak transformatör deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Ölçme Yöntemi

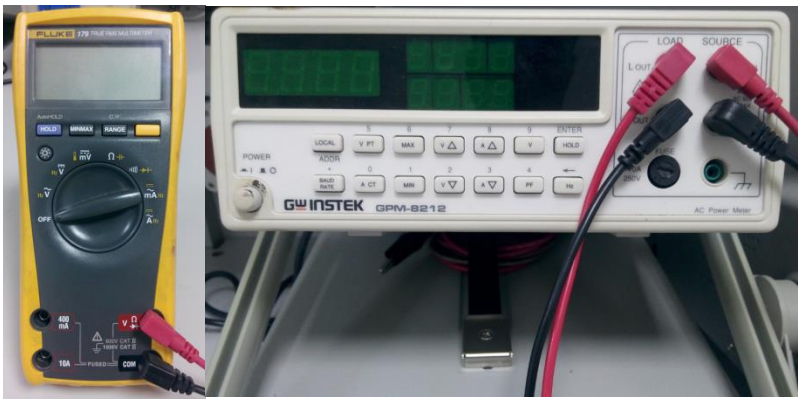
Bu tez çalışmasında üretilen transformatörlerin çıkış ve giriş parametrelerini belirleyebilmek amacıyla laboratuvar ortamında yapılan ölçme yöntemi kullanılmıştır. Hassas ve doğru ölçümler alabilmek için ölçüm yapılan cihazların standardizasyon ve kalibrasyonuna azami derecede dikkat gösterilmiştir.

3.2.1.1. Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar

Primer ve sekonder sargıları tarafından çekilen akım ve sekonder ucunda endüklenen gerilimin net bir şekilde ölçülüp değerlendirilebilmesi için transformatörlerin primer sargılarına uygulanan gerilimlerin kademeli ve kontrollü bir şekilde verilebilmesi önemlidir. Bu anlamda deney aşamalarında Şekil 3.8'de görülen 0-280 V aralığında ve şebeke frekansında (50 Hz) gerilim sağlayan ayarlı gerilim kaynağı/varyak kullanılmıştır.

Şekil 3.8. Ayarlı AC güç kaynağı (Varyak)

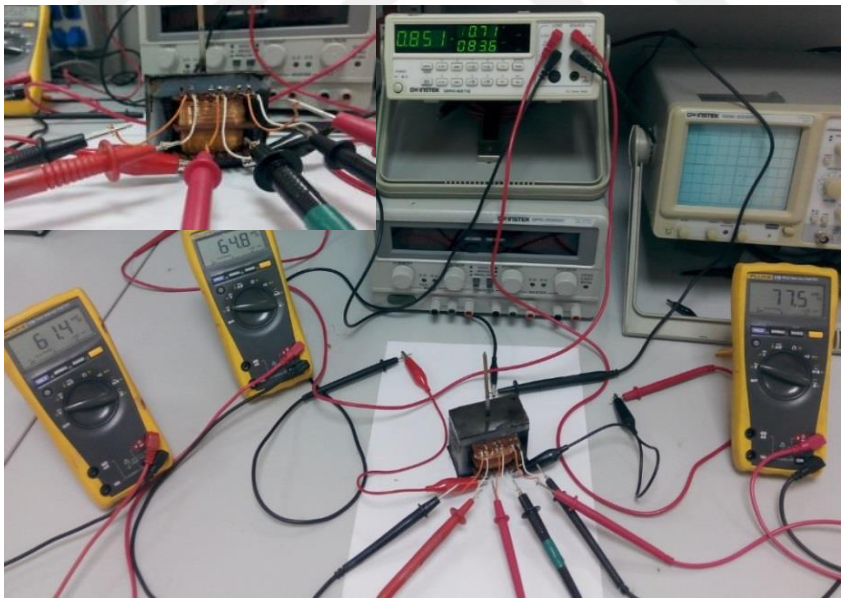
Transformatörlerin primer sargılarına uygulanan gerilimden dolayı sekonder sargılarında oluşan gerilim ve akımların ölçümünde Şekil 3.9a'da verilen FLUKE 179 model multimetreden faydalanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Transformatörlerin primer sargılarına uygulanan gerilim ve akımı ölçmek ve özelikle sargılar tarafından yüksek akım çekilmesi durumunda sargıların zarar görmesini engellemek başka bir deyişle bir çeşit kontrol mekanizması oluşturmak amacıyla Şekil 3.9b'de verilen 0-640 V/0-20 A ölçüm aralığına sahip GW INSTEK GPM-8212 model Wattmetre kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Bir ölçüm örneği

Laboratuvar ortamında günler süren deneyler ile ilgili bir ölçüm örneği Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi transformatörün primer ve sekonder sargılarındaki esas parametrelerin (akım, gerilim, güç) sürekli ölçümü

yapılabilmektedir. Her bir ölçümde transformatör sargılarının ısınma durumu da kontrol edilmiştir. Transformatör sargılarındaki ısı arttığında (özellikle çekirdeğin boş olduğu tasarımlarda) ölçümler durdurulmuş ve sonraki ölçümlerde primer sargı gerilimi bu gerilim ile sınırlandırılmıştır.

Transformatörün çekirdek kanalı manyetik sıvı ile tam dolu olduğu durumda da transformatörde az miktarda ısınma oluşmaktadır. Çekirdeğin manyetik direncinin düşük olduğu bu durumda transformatör sargılarındaki ısısının çok az yükselmesinin nedeni, çekirdekteki (manyetik sıvı) Fe_3O_4 parçacıklarının AC alan altında daha büyük titreşimli olmasından kaynaklanmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Seri Üretim Mantel Tip Transformatörün İncelenmesi

Sanayi ortamında seri üretimi yapılan mantel tip bir transformatörün (Şekil 3.2) açık devre, kısa devre ve yük durumları için deney sonuçları Çizelge 4.1-5'te gösterilmiştir. Transformatörün açık devre durumunda çıkış uçlarındaki gerilimler sırasıyla $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$, $U_{ad,23}$ olarak adlandırılmıştır. Giriş devresinin gerilim, akım ve gücü ise $U_{ad,1}$, $I_{ad,1}$, $P_{ad,1}$ olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1. Seri üretim bir transformatörün açık devre deney sonuçları

$U_{ad,1}$(V)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$I_{ad,1}$(mA)	3	4.2	5	5.6	6.2	6.9	7.6	8.4	9.4	10.5	11.9
$P_{ad,1}$(W)	0.017	0.076	0.17	0.28	0.41	0.57	0.74	0.93	1.14	1.36	1.61
$U_{ad,21}$(V)	1.14	2.28	3.43	4.58	5.68	6.92	8.06	9.2	10.37	11.48	12.64
$U_{ad,22}$(V)	1.14	2.28	3.43	4.58	5.68	6.92	8.05	9.2	10.37	11.48	12.63
$U_{ad,23}$(V)	0.87	1.76	2.64	3.52	4.37	5.29	6.16	7.07	7.96	8.81	9.71

Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi $U_{ad,1}$'in artmasıyla transformatörün sekonder uçlarında endüklenen gerilimler sürekli olarak artış göstermektedir. Nominal U_{ad} geriliminde ($U_n = 220$ V) transformatörün sekonder uçlarındaki gerilimler sırasıyla $U_{ad,21} = 12.04$ V, $U_{ad,22} = 12.63$ V, $U_{ad,23} = 9.71$ V olmuştur. Bu nominal veya anma durumunda transformatörün şebekeden çektiği primer devresinin akımı 11.9 mA, primer sargısındaki güç ise 1.61 W olmuştur. Kısa devre deneyinde ise sekonder devresi kısa devre yapılmış ve transformatörün primer nominal akımına uygun olarak (P = 35 W) kısa devre geriliminin U_{kd}=60 V olduğu görülmüştür (Çizelge 4.2). Bu durumda devredeki akım $I_{kd} = 156.8$ mA, ölçülen güç $P_{kd} = 8.22$ W olmuştur.

Çizelge 4.2. Seri üretim bir transformatörün U_{21} ve U_{22} uçları için kısa devre deney sonuçları

U_{kd}(V)	10	20	30	40	50	60
P_{kd}(W)	0.25	1.01	2.28	4.07	6.13	8.22
I_{kd}(mA)	26.9	54	80	100.7	130.5	156.8

Çizelge 4.3. Seri üretim bir transformatörün U_{23} ucu için kısa devre deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	0.06	0.26	0.58	1.04	1.63	2.22
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	6.6	13.5	19.8	26.5	32.9	40.1

U_{21} ve U_{22} uçlarında yapılan bu kısa devre deney sonuçları Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi U_{23} ucu için tekrarlandığında $P_{kd} = 2.22$ W, $I_{kd} = 40.1$ mA olarak elde edilmiştir.

Transformatörün sekonder uçları yükte çalışma durumunda ise her biri bağımsız olarak 1.5 kΩ'luk dirence bağlanmıştır. Farklı giriş gerilimlerinde primer ve sekonder sargılarında endüklenen gerilim, akım ve primer devresindeki aktif güç değerleri ölçülmüştür. Nominal çalışma durumunda $(U_n = 220\,V)$, U_{21} ve U_{22} gerilimleri, akım ve güçlerin değişimleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Primer devresinin nominal veya anma durumunda $U_{y,21} = 12.7$ V, $I_{y,1} = 12.3$ mA, $I_{y,21} = 16.9$ mA, $P_{y,1} = 1.73$ W.

Çizelge 4.4. Seri üretim bir transformatörün U_{21} ve U_{22} uçları için yükte çalışma deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**	**160**	**180**	**200**	**220**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	3.4	4.5	5.3	6	6.8	7.4	8.2	9.1	10.1	11.2	12.3
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.018	0.078	0.17	0.29	0.44	0.6	0.76	0.97	1.19	1.43	1.73
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	1.13	2.27	3.41	4.54	5.73	6.9	8	9.16	10.33	11.46	12.7
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	1.57	3.12	4.71	6.23	7.86	9.4	10.9	12.5	14	15.61	16.9

Çizelge 4.5. Seri üretim bir transformatörün U_{23} ucu için yükte çalışma deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**	**160**	**180**	**200**	**220**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	3.2	4.4	5.2	5.9	6.7	7.4	8.2	9	10.1	11.2	12.69
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.017	0.076	0.17	0.29	0.43	0.6	0.77	0.97	1.19	1.41	1.67
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.86	1.74	2.64	3.53	4.37	5.24	6.14	7	7.96	8.77	9.7
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	1.2	2.4	3.63	4.84	6	7.19	8.42	9.62	10.84	11.94	13.2

U_{23} uçlarındaki çıkış parametrelerinin ise $U_{y,1} = 220\,\text{V}$, $U_{y,23} = 9.7\,\text{V}$, $I_{y,1} = 12.69\,\text{mA}$, $I_{y,23} = 13.2\,\text{mA}$, $P_{y,1} = 1.67\,\text{W}$ olduğu Çizelge 4.5'te görülmektedir.

4.2. Plastik Malzemeden (Derlin) Yapılmış Mantel Tip Ayarlı Transformatörün Tasarımı ve İncelenmesi

Şekil 3.4'te verilen transformatör üzerinde oluşturulan özel oluklar kullanılarak çekirdek kanalı manyetik sıvı ile doldurulmuş ve manyetik sıvı miktarındaki artışın endüklenen gerilime etkisi değerlendirilmiştir. Bunun için çekirdeğe kademeli bir şekilde (her kademede 5 ml) manyetik sıvı eklenmiştir. Sıvı miktarına uygun olarak transformatörün açık devre deneyleri yapılmıştır. Ayrıca transformatörün çıkış karakteristiklerini iyi değerlendirebilmek için üretilen transformatör çekirdeğinin boş ve manyetik sıvı ile tam dolu durumları için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde çekirdeğin boş ve tam dolu durumları için transformatörün açık devre, kısa devre ve yük rejimlerinde elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatör çekirdeğinin boş olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	75.5	158	228.4	293.7
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.69	3	6.6	10.91
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.05	0.11	0.17	0.22
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.06	0.12	0.18	0.23
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.071	0.15	0.22	0.28

Plastik çekirdekten oluşan transformatörde çekirdeğin manyetik geçirgenliği zayıf ($\mu = \mu_0$) olmasından dolayı çıkış karakteristikleri de düşük olmuştur. Çizelge 4.6'dan da görülen $U_{ad,1}$ giriş geriliminde, 40 V civarlarında bile çıkışta endüklenen gerilimler $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$, $U_{ad,23}$ sırasıyla 0.28 V, 0.23 V, 0.22 V olarak ölçülmüş ve bu durumda primer sargısındaki akım 293.7 mA, şebekeden çekilen güç ise 10.91 W olmuştur. Çekirdeği boş (hava) olan transformatörde giriş gücü esasen primer sargısında bakır kayıplarına harcanan güçten başka bir şey değildir. Açık devre deneylerinde plastik çekirdekli transformatörün çekirdek kanalındaki sıvı kademeli

olarak 5 ml arttırılarak çekirdeğin manyetik sıvı ile doldurulması durumunda deneyler tekrarlanmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 4.7-8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 5ml, 10 ml ve 15ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	Manyetik sıvı miktarı 5 ml				Manyetik sıvı miktarı 10 ml				Manyetik sıvı miktarı 15 ml			
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	82	154	225.2	282.4	80	154.5	230	297	80.4	152	220	293
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.82	2.98	6.56	10.72	0.8	2.98	6.67	11.5	0.82	2.93	6.31	11.33
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.06	0.14	0.22	0.28	0.08	0.15	0.23	0.29	0.08	0.15	0.22	0.29
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.07	0.12	0.18	0.23	0.07	0.13	0.19	0.24	0.07	0.13	0.19	0.24
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.06	0.11	0.17	0.22	0.06	0.12	0.18	0.23	0.06	0.12	0.17	0.22

Kullanılan manyetik sıvının mıknatıslanma özellikleri göz önünde tutularak transformatör sargılarının aşırı ısınmaması için primer devresinin gerilimi çekirdek kanalının boş olduğu durumdaki ile aynı yani $U_{ad,1} = 40$ V seçilmiştir. Genel olarak çekirdekteki manyetik sıvı miktarının artmasıyla çekirdeğin manyetik geçirgenliği artmış ve sekonder devresinde endüklenen gerilimde de artış gözlenmiştir.

Çizelge 4.8. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 20 ml ve 25 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	Manyetik sıvı miktarı 20 ml				Manyetik sıvı miktarı 25 ml			
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	78.2	151.5	226	294	77.6	150.3	224.7	292.5
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.77	2.9	6.58	11.3	0.77	2.88	6.51	11.2
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.08	0.15	0.23	0.29	0.08	0.15	0.23	0.29
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.07	0.13	0.19	0.24	0.07	0.13	0.19	0.24
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.06	0.12	0.17	0.23	0.06	0.12	0.18	0.23

Fakat Çizelge 4.8'den görüldüğü gibi ilk kademede (5 ml) sekonderde endüklenen gerilimler küçük bir azalma eğiliminde olmuştur. Bu olayın nedeni muhtemelen sıvı miktarının az olması ve endüklenen manyetik alanın esasen bu az miktardaki sıvı üzerinden kapanması olmuştur. Başka bir deyişle zaten sekonder devresini kesen

manyetik akı yoğunluğu düşük olduğu halde bu akı yoğunluğunun bir kısmı da çekirdeğin yerel bölgelerinde manyetik sıvı üzerinden kapanarak daha da zayıflamıştır. Diğer durumlarda ise sekonder devresinde endüklenen gerilimlerin artışları az da olsa gözlenmiştir. Transformatörün çekirdek kanallarının üst kısmı hariç tümüyle dolması durumunda (25 ml) transformatörün çıkış geriliminde az bir değişim olmaktadır.

Çizelge 4.9. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 30 ml, 35 ml ve 40 ml manyetik sıvı durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	Manyetik sıvı miktarı 30 ml				Manyetik sıvı miktarı 35 ml				Manyetik sıvı miktarı 40 ml			
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	79	160.7	231	298.1	77.8	152.4	220.5	303.2	77.6	141.4	208.6	283.2
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.75	3.1	6.6	11.3	0.75	2.87	6.43	11.62	0.72	2.43	5.26	10.82
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.08	0.17	0.24	0.3	0.09	0.16	0.24	0.31	0.09	0.18	0.26	0.32
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.07	0.14	0.2	0.25	0.07	0.14	0.2	0.26	0.08	0.17	0.22	0.27
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.06	0.13	0.18	0.24	0.06	0.13	0.18	0.24	0.07	0.14	0.2	0.25

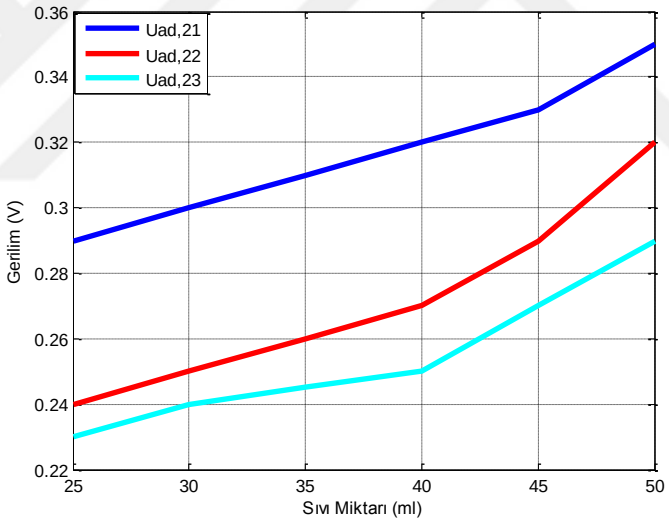
Deneyin sonraki aşamalarında Çizelge 4.9'dan görüldüğü gibi transformatörün boyunduruk kısmı her kademede 5 ml artacak şekilde manyetik sıvı ile doldurulmuştur. Transformatördeki sıvı miktarı 30 ml olduğunda kısmen de olsa boyunduruk kısmının manyetik geçirgenliğinin artmasıyla çıkış gerilimlerinde $U_{ad,21} = 0.3\text{V}$, $U_{ad,22} = 0.25\ \text{V}$, $U_{ad,23} = 0.24\ \text{V}$ gibi görülür düzeyde artışlar meydana gelmiştir. Bu sonuç transformatör çekirdeğinin tamamının manyetik sıvı ile doldurulması durumunda manyetik geçirgenliğin değişerek transformatörün çıkış gerilimlerini iyi yönde etkileyeceğini açıkça göstermektedir. Boyunduruk kısmındaki manyetik sıvı miktarı 5 ml daha arttırıldığında (35 ml) çıkış gerilimlerinde pozitif bir etki oluşmuştur.

Transformatörün boyunduruk kısmının tümüyle manyetik sıvı ile dolması durumunda (50 ml) çıkış gerilimleri $U_{ad,21} = 0.35\ \text{V}$, $U_{ad,22} = 0.33\ \text{V}$, $U_{ad,23} = 0.29\ \text{V}$ olmuştur. Çizelge 4.8'de boyunduruğun boş olduğu durum (25 ml) ile Çizelge 4.10'da boyunduruğun tam dolu olduğu durum (50 ml) kıyaslandığında transformatörün çıkış geriliminin ortalama %26 artış gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.10. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 45 ml ve 50 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	Manyetik sıvı miktarı 45 ml				Manyetik sıvı miktarı 50 ml			
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	70.1	132.2	201	260	64.2	126.4	196.7	247.5
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.68	2.33	5.13	10.3	0.64	2.18	5.16	9.72
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.1	0.2	0.28	0.33	0.1	0.24	0.3	0.35
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.09	0.19	0.25	0.3	0.09	0.22	0.28	0.33
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.07	0.16	0.21	0.27	0.08	0.19	0.23	0.29

Bu durumlar için 40 V sekonder gerilimi esas alınarak manyetik sıvı miktarının artışı ile transformatörün çıkış gerilimindeki artış eyleminin de değiştiği Şekil 4.1'de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.1. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün boyunduruk kısmındaki manyetik sıvı miktarı değişiminin çıkış gerilimleri üzerine etkisi

Bütün bu deneylerde transformatörün ayar sistemi (piston) aşağı durumdadır. Diğer bir deyişle transformatörün orta bacak haznesi (bobinlerin bulunduğu kısım) boştur ve bu bölgede manyetik alan geçirgenliği boşluğun geçirgenliğine eşittir ($\mu_r = 1,\ \mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m). Dolayısıyla bütün bu deneylerde transformatörün çekirdeğinin manyetik kısmı yalnızca dış cephe boyunca kapanmıştır. Aslında transformatör sargılarının endüklediği esas manyetik akı orta bacak üzerinden

(mantel tip transformatör için) dağılım dalları oluşturmaktadır. Buna göre transformatörün yapısı ve manyetik sıvının mıknatıslanma özelliklerine bağlı olarak yukarıdaki deneylerde elde edilen çıkış gerilimleri nispeten düşük değerlerdedir.

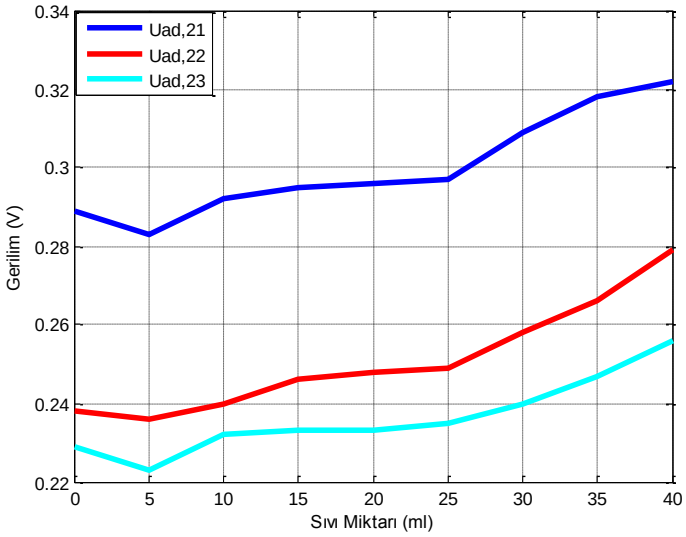
Transformatörün orta bacak kanalının manyetik sıvı ile doldurulması durumunda ise ölçülen çıkış gerilimlerinin değişimleri Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 55 ml ve 60 ml manyetik sıvı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	Manyetik sıvı miktarı 55 ml				Manyetik sıvı miktarı 60 ml			
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{ad,1}}$(mA)	56.6	98.3	166.4	206	24.3	76.3	96.7	154.2
$\boldsymbol{P_{ad,1}}$(W)	0.32	1.67	4.82	9.43	0.17	1.42	4.14	9.17
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.12	0.27	0.35	0.43	0.13	0.31	0.39	0.49
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.1	0.25	0.33	0.37	0.12	0.29	0.37	0.41
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.09	0.2	0.29	0.34	0.1	0.24	0.33	0.38

Toplam hacmi 10 ml olan orta bacak kanalı her seferde 5 ml dolacak şekilde 2 kademede doldurulmuştur. İlk kademede 5 ml sıvı eklendiğinde çıkış gerilimlerinin değişimleri yukarıdaki çizelgede görüldüğü gibi $U_{ad,21} = 0.43$ V, $U_{ad,22} = 0.37$ V, $U_{ad,23} = 0.34$ V olmuştur. Orta bacak haznesi tümüyle manyetik sıvı ile doldurulduğunda (toplam sıvı miktarı 60 ml - piston tam yukarıda) ise transformatörün sekonder sargılarında endüklenen gerilimler $U_{ad,21} = 0.49$ V , $U_{ad,22} = 0.41$ V , $U_{ad,23} = 0.38$ V olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi transformatörün sadece yan bacakları ve boyunduruk kısımlarının manyetik sıvı ile doldurulduğu durum ile tam dolu olduğu durum kıyaslandığında sekonder sargılarındaki gerilimler ortalama %69.5 artış göstermiştir.

Genel olarak çekirdek kısmı plastik malzemeden yapılmış gerilimi ayarlanabilir bir transformatörde çekirdeklerin manyetik geçirgenliğini arttırmak için manyetik sıvı kullanılması halinde bu transformatörün çıkış uçlarındaki gerilimlerin değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde manyetik sıvı miktarındaki değişimin çıkış gerilimleri üzerine etkisi

Görüldüğü gibi transformatör çekirdeğinin manyetik sıvı ile doldurulması durumunda manyetik sıvı miktarı ile orantılı olarak sekonder sargılarında endüklenen gerilimler de artmaktadır. Çıkış gerilimlerinin artış hızı manyetik sıvının miktarı ve fiziksel özelliklerine bağımlıdır.

Deneylerde kullanılan manyetik sıvının doyma mıknatıslanması M_s=47 mT (Şekil 3.2) olmasına rağmen bu manyetik sıvının mıknatıslanma özelliği zayıftır. Bu olay deneylerde kullanılan sıvının belirli bir primer gerilimi değerinde hızla ısınması ve kayıplarının artması ile görülmüştür. Buna göre manyetik kayıpları düşük olarak üretilen yeni sıvıları kullanmakla transformatörde endüklenen gerilimleri daha geniş bir aralıkta üretmek mümkündür.

Deneylerde elde edilen çıkış gerilimleri seri üretimi yapılan transformatörün nominal değerlerinin %20'si civarındadır. Fakat sıvının manyetik özellikleri yeterince iyi olursa endüklenen gerilimlerin artış hızlarının da daha etkin olacağı Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de açıkça görülmektedir.

Günümüzde nano ve mikro fluid bazlarında oluşturulan yeni tür manyetik sıvıların gelişimini göz önüne aldığımızda, çekirdekleri tamamen manyetik sıvı olan etkin ve yüksek verimli transformatör üretiminin mümkün olabileceği söylenebilir.

Transformatörlerin çalışma verimini değerlendirmek için kısa devre ve yük rejimlerindeki çalışmalarını incelemekte fayda vardır. Çekirdeği plastik malzemeden oluşan transformatörün çekirdek kanallarının boş ve tam dolu (60 ml) olduğu durumlarda kısa devre ve yük rejimleri için yapılan deney sonuçları Çizelge 4.12-15'te verilmiştir.

Çizelge 4.12. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde manyetik sıvı olmadığı durumda U_{21}, U_{22} ve U_{23} uçları için kısa devre deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için				U_{23} ucu için			
$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	83.2	161	240	324.2	78	162.5	235	304.7
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	0.82	3	6.92	10.12	0.73	2.97	6.66	9.78

Çizelge 4.13. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu durumunda U_{21}, U_{22} ve U_{23} uçları için kısa devre deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için				U_{23} ucu için			
$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	66.4	138	222	310.4	56.4	126.3	198.3	287.2
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	0.59	2.4	6.3	8.75	0.46	2.27	5.4	8.24

Çizelge 4.12-13'ten görüldüğü gibi $U_{kd} = 40$ V ve transformatör çekirdeğinin manyetik sıvı ile tam dolu durumunda primer kısa devre akımı 287.2 mA dir. Çekirdeğin boş olduğu durumda ise bu akım 304.7 mA olmuştur. Sekonder devresindeki güç (devredeki bakır kayıpları) ise sırasıyla 304,7 W ve 287,2 W olmaktadır. Başka bir ifadeyle manyetik sıvının kullanılmasıyla devrede harcanan güç de (kayıplar) azalmıştır.

Benzer denemeler transformatörün sekonder sargılarına belirli bir yük (1.5 kΩ) bağlandığında da yapılmıştır. Transformatör çekirdeğinin manyetik sıvı ile tam dolu olduğu durumda (60 ml) sekonder gerilimleri U_{21}, U_{22} ve U_{23} Çizelge 4.14-15'te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu (60 ml) durumunda U_{21} ve U_{22} uçları için yükte çalışma deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	70	147.3	222.2	268.5
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	1	3.1	6.96	11.9
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.1	0.22	0.3	0.4
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.08	0.15	0.27	0.38

Çizelge 4.15. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörün manyetik sıvı ile tam dolu (60 ml) durumunda U_{23} ucu için yükte çalışma deney sonuçları

$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	55	117	180.2	224.3
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.9	2.8	6.56	11.3
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.12	0.2	0.3	0.35
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.05	0.08	0.15	0.25

Örneğin sekonderde $U_{y,1} = 40$ V iken $U_{y,23} = 0.35$ V olmuştur. Aynı koşullarda çekirdeği boş olan transformatörde ise bu değer $U_{y,23} = 0.21$ V olmuştur. Çekirdek manyetik sıvı ile doldurulduğunda sekonder yük geriliminin yaklaşık olarak 1.5 kat arttığı ve sekonder akımının da daha düşük bir seviyede olduğu gözlenmiştir. Ayrıca transformatör 60 V'a kadar ısınmadan dengeli bir şekilde çalışmıştır. Manyetik sıvı kullanılmasıyla transformatörün çıkış parametrelerinin etkin olarak iyileştiği bu deneylerden anlaşılmaktadır. Fakat yukarıdaki çizelgelerden de görüldüğü gibi manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin çıkış karakteristikleri yani verimi yeterince yüksek değildir. Bu nedenle farklı yapısal veya fiziksel yöntemlerle bu transformatörlerin verimini yükseltmek gerekmektedir. Tezin sonraki bölümlerinde bu yöntemler detaylıca incelenmiştir.

4.3. Yüksek Verimli Manyetik Sıvı Transformatörlerin Tasarımı ve İncelenmesi

Mıknatıslanan çekirdek kısmının boş (hava) veya manyetik sıvı ile doldurulması durumlarında transformatörün veriminin düşük olduğu ve bu verimin esasen manyetik sıvının fiziksel özellikleri ile sınırlandığı açıkça görülmektedir.

Günümüzde üretilen manyetik sıvıların mıknatıslanma özellikleri ise zaten sınırlıdır [8]. Buna göre tez çalışmasında manyetik sıvı transformatörlerin verimini arttırmak için aşağıdaki yöntemler önerilmiştir.

a) Manyetik Sıvı Hibrit Transformatörler Kullanılması
b) Manyetik Sıvının Mıknatıslanma Özelliklerinin İyileştirilmesi

4.3.1. Manyetik Sıvı Hibrit Transformatör Yapıları

Manyetik sıvı hibrit transformatörlerde manyetik çekirdeğin bir kısmı silisyum alaşımlı saclardan diğer kısmı ise manyetik sıvıdan oluşturulur. Tez çalışmasının bu bölümünde manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerde çıkış parametrelerini yükseltmek için hibrit transformatörlerin oluşturulması ve incelenmesi ele alınmıştır. Bu kapsamda aşağıda belirtilen iki tür manyetik sıvı hibrit transformatör hazırlanmış ve ölçümleri yapılmıştır.

- Üst Boyunduruk Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatör
- Orta Bacak Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatör

4.3.1.1. Üst Boyunduruk Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatörün Karakteristiklerinin İncelenmesi

Bu transformatörde çekirdeğin E şekilli bölgesi standart silisyum alaşımlı saclardan oluşturulmuş ve sargılar manyetik malzeme olan orta bacak üzerine yerleştirilmiştir. Transformatörün çekirdeğinin manyetik devresinin üst boyunduruk kısmı, seri üretim transformatörün boyutlarına bağlı kalınarak, bakır plaka ile bir kanal şeklinde oluşturulmuş ve bu kanalın üst kısmında manyetik sıvının rahatça doldurulabilmesi için bir oluk açılmıştır (Şekil 3.6). Bu oluktan transformatörün üst boyunduruk kanalı yarı dolu ve tam dolu şeklinde manyetik sıvı ile doldurularak bu hibrit transformatörün boş (hava), yarı dolu ve tam dolu (22 ml) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde yukarıdaki protokol üzere açık devre, kısa devre ve yük durumlarında ölçümler alınmıştır. Açık devre deneylerinde üst boyunduruk kanalının boş, yarı dolu ve tam dolu deneylerinin sonuçları Çizelge 4.16-18'de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Üst boyunduruk kısmı boş (hava) olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları

$U_{ad,1}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**
$I_{ad,1}$(mA)	61.2	118.8	176.8	231	289	301	348.2
$P_{ad,1}$(W)	0.42	1.79	4	7.17	11.23	13	16.7
$U_{ad,21}$(V)	0.61	1.2	1.78	2.36	2.96	3.2	3.54
$U_{ad,22}$(V)	0.57	1.1	1.6	2.2	2.7	3.1	3.44
$U_{ad,23}$(V)	0.45	0.9	1.33	1.74	2.17	2.3	2.62

Çizelge 4.17. Üst boyunduruk kısmı yarı dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları

$U_{ad,1}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**
$I_{ad,1}$(mA)	50.8	104.7	159	214.3	268.9	325.5	351.3
$P_{ad,1}$(W)	0.37	1.52	3.46	6.26	10.12	15.18	18
$U_{ad,21}$(V)	0.67	1.32	1.93	2.53	3.11	3.71	3.98
$U_{ad,22}$(V)	0.67	1.31	1.93	2.53	3.11	3.71	3.98
$U_{ad,23}$(V)	0.5	0.98	1.44	1.89	2.31	2.75	2.96

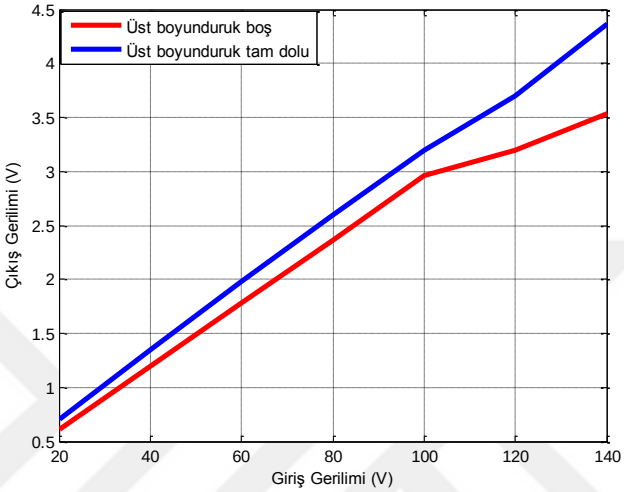
Transformatörün üst boyunduruk kısmı yarı dolu durumunda ise $U_{ad,21} = U_{ad,22} = 3.98$ V, $U_{ad,23} = 2.96$ V olduğu Çizelge 4.16'dan görülmektedir. Bu veriler boyunduruğun boş olduğu durumdaki Çizelge 4.17'de $U_{ad,21} = U_{ad,22} = 3.54$ V, $U_{ad,23} = 2.96$ V olarak ölçülen değerlerle karşılaştırıldığında manyetik sıvı miktarının artmasıyla sekonder çıkış geriliminin arttığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.18. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları

$U_{ad,1}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**
$I_{ad,1}$(mA)	48.7	99.4	152.5	207.5	263.2	317	371.5
$P_{ad,1}$(W)	0.36	1.43	3.31	6.1	9.87	14.62	20.8
$U_{ad,21}$(V)	0.71	1.35	1.98	2.6	3.2	3.7	4.36
$U_{ad,22}$(V)	0.71	1.34	1.97	2.6	3.1	3.7	4.36
$U_{ad,23}$(V)	0.52	1.01	1.47	1.94	2.38	2.81	3.24

Çizelge 4.18'den görüldüğü gibi boyunduruğun manyetik sıvı ile tam dolu durumunda sekonder devresinde gerilimler $U_{ad,21} = U_{ad,22} = 4.36$ V , $U_{ad,23} = 3.24$ V olmuştur.

Örneğin burada sekonder sargılarının $U_{ad,21}$ ucu için üst boyunduruğun boş ve tam dolu olduğu durumlarda giriş gerilmine göre çıkış ucundan alınan gerilimlerin değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı çekirdek olan hibrit transformatörün giriş gerilimlerine bağlı olarak $U_{ad,21}$ ucundaki gerilimlerin değişimi

Boyunduruğun manyetik sıvı ile tam dolu durumunda (22 ml) daha etkin bir gerilim artışı şekilden görülmektedir.

Çizelge 4.19. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün kısa devre deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için						U_{23} ucu için					
$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	0.12	0.84	1.77	3.13	4.93	7.11	0.11	0.43	0.97	1.73	2.8	3.84
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	28.8	57.4	84	112	141	171	23.8	47.8	72.9	98.6	126.4	154.2

Bu hibrit transformatörün kısa devre deneyi ise boyunduruk kısmı tam dolu durumu için yapılmıştır. Çizelge 4.19'dan görüldüğü gibi giriş geriliminin 60'V a kadar arttırılması durumunda transformatördeki kısa devre akımı U_{21} ve U_{22} için 171 mA, U_{23} için 154.2 mA olarak ölçülmüştür.

Yük durumunda (1.5 kΩ) hibrit transformatörün boyunduruk kısmının boş ve tam dolu ölçümleri yapılmış ve yapılan ölçümler Çizelge 4.20-21'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Üst boyunduruk kısmı boş (hava) olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için						U_{23} ucu için					
$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	57.4	114.5	172	231.2	287.4	349	59.5	114.7	169.4	230.9	284.8	334.5
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.42	1.69	3.82	7	11.5	16.7	0.45	1.68	3.7	7	10.96	14.9
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.6	1.19	1.78	2.39	2.97	3.52	0.46	0.88	1.3	1.77	2.18	2.6
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.8	1.57	2.35	3.16	3.96	5.8	0.61	1.16	1.71	2.33	2.86	3.37

Çizelge 4.21. Üst boyunduruk kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için						U_{23} ucu için					
$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	50	100.3	152.3	205.5	250.4	298.4	48.5	100.2	151.6	207.2	259.2	291.2
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.55	2.98	4.6	8.2	12.13	15.76	0.4	1.64	3.74	6.8	10.76	13.02
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.44	0.87	1.3	1.72	2.18	2.64	0.19	0.37	0.55	0.73	0.9	1.17
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.11	0.2	0.27	0.35	0.41	0.5	0.05	0.08	0.12	0.15	0.18	0.2

Görüldüğü gibi $U_1 = 120\,\text{V}$ iken sekonder sargılarında endüklenen gerilimler $U_{21} = U_{22} = 2.64\,\text{V}$, $U_{23} = 1.17\,\text{V}$ olmuştur. İlk bakışta bu değerler boyunduruğun boş olduğu durumda endüklenen gerilimlerden düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni muhtemelen yük durumundaki çalışma geriliminin $U_1 = 120\,\text{V}$ civarlarında olmasıdır. Diğer deneylerdeki bu değer maksimum $U_1 = 60\,\text{V}$ 'a karşılık gelmekteydi. Başka bir deyişle çalışma geriliminin yaklaşık olarak 2 kat arttırılmasıyla boyunduruk kısmındaki manyetik ve demir kayıpları da artmıştır.

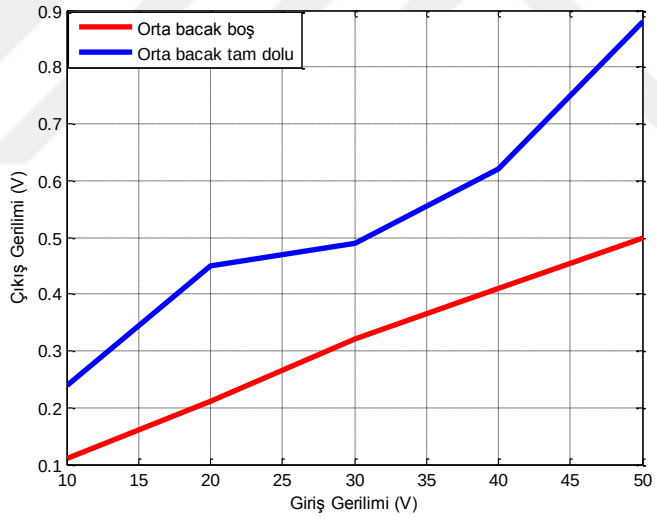
4.3.1.2. Orta Bacak Kısmı Manyetik Sıvı Çekirdek Olan Hibrit Transformatörün Karakteristiklerinin İncelenmesi

Dış çekirdek kısmı (U ve üst boyunduruk I) standart transformatörlerde olduğu gibi silisyum alaşımlı saclardan, orta bacak kısmı ise manyetik sıvı ile doldurulabilecek kanala sahip hazneden oluşan hibrit bir transformatör

oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Bu hibrit transformatörde açık devre, kısa devre ve yükte çalışma deneyleri haznenin boş ve tam dolu (22 ml) durumları için yapılmıştır. Açık devre deneyinin sonuçları Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. Orta bacak kısmı boş (hava) ve tam dolu olan hibrit transformatörde açık devre deney sonuçları

	Orta Bacak Boş					Orta Bacak Tam Dolu				
$U_{ad,1}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$I_{ad,1}$(mA)	78	149	224.2	283.5	342.5	52.3	117	185.3	249.5	312
$P_{ad,1}$(W)	0.75	2.75	6.19	10.4	13.6	0.41	1.92	4.64	8.39	13.15
$U_{ad,21}$(V)	0.11	0.21	0.32	0.41	0.5	0.24	0.45	0.49	0.62	0.88
$U_{ad,22}$(V)	0.11	0.21	0.32	0.41	0.5	0.24	0.45	0.62	0.46	0.88
$U_{ad,23}$(V)	0.091	0.17	0.25	0.33	0.4	0.2	0.35	0.48	0.59	0.69



Şekil 4.4. Orta bacak kısmı manyetik sıvı çekirdek olan hibrit transformatörün giriş gerilimlerine bağlı olarak $U_{ad,21}$ ucundaki gerilimlerin değişimi

Çalışma geriliminin 50 V'a kadar ayarlanması durumunda orta bacağın manyetik sıvı ile tam dolu olması halinde sekonderde endüklenen gerilimler $U_{21} = U_{22} = 0.88\,\text{V}$, $U_{23} = 0.69\,\text{V}$ olmuştur. Buna karşılık haznenin boş durumunda bu gerilimler $U_{21} = U_{22} = 0.5\,\text{V}$, $U_{23} = 0.4\,\text{V}$ olmuştur. Bu durumda gerilim artışının daha etkin olduğu görülmektedir. Bunun esas nedeni sargıların bu bacak üzerinde yerleşmesidir. Çünkü bu durumda çekirdeğin manyetik özelliğinin yüksek olması dış

bacaklardaki manyetik akıyı da pozitif yönde etkilemektedir. Bu değişimin grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir.

Bu hibrit transformatörün kısa devre deneylerinde $U_{kd} = 50$ V civarına ayarlanan giriş geriliminde, akım ve güç değerlerinin yaklaşık olarak aynı artış trendi gösterdiği Çizelge 4.23-24'de görülmektedir.

Çizelge 4.23. Orta bacak kısmı boş ve tam dolu olan hibrit transformatörde U_{21} ve U_{22} için kısa devre deney sonuçları

	Orta Bacak Boş					Orta Bacak Tam Dolu				
$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	0.64	2.76	6	9.9	12.4	0.43	1.86	4.49	8.4	11.2
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	71.5	148.2	219.4	280.6	350.3	51.8	111.8	178.6	248.3	310.4

Çizelge 4.24. Orta bacak kısmı boş ve tam dolu olan hibrit transformatörde U_{23} için kısa devre deney sonuçları

	Orta Bacak Boş					Orta Bacak Tam Dolu				
$\boldsymbol{U_{kd}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$\boldsymbol{P_{kd}}$(W)	0.64	2.75	6	9.8	12.5	0.4	1.85	4.67	8.05	10.98
$\boldsymbol{I_{kd}}$(mA)	71.5	148.2	219.2	278.7	356.7	51.2	113.9	184.6	245.4	308.3

Transformatörün yük durumunda (1.5 kΩ) haznenin boş ve tam dolu (22ml) durumları için yapılan deneyler Çizelge 4.25-26'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Orta bacak kısmı boş olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için					U_{23} ucu için				
$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	71.5	145.8	215	284	344.4	71	146	213.3	282	342.6
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.65	2.68	5.87	10.35	12.6	0.63	2.72	5.82	10.32	12.58
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.1	0.21	0.31	0.41	0.52	0.08	0.17	0.25	0.33	0.46
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.21	0.4	0.6	0.77	0.89	0.17	0.32	0.47	0.62	0.85

Çizelge 4.26. Orta bacak kısmı tam dolu olan hibrit transformatörün yükte çalışma deney sonuçları

	U_{21} ve U_{22} uçları için					U_{23} ucu için				
$\boldsymbol{U_{y,1}}$(V)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$\boldsymbol{I_{y,1}}$(mA)	52.2	115.8	181.2	246	324	0.18	0.35	0.47	0.6	0.7
$\boldsymbol{P_{y,1}}$(W)	0.41	1.88	4.46	8	10.28	0.35	0.64	0.87	1	1.3
$\boldsymbol{U_{y,2}}$(V)	0.25	0.45	0.6	0.75	0.9	52.2	115.8	181.6	246	324.1
$\boldsymbol{I_{y,2}}$(mA)	0.47	0.87	1.11	1.38	1.56	0.41	1.88	4.46	8	10.3

Sonuçlardan da görüldüğü gibi yük durumunda sekonderde endüklenen gerilim, örneğin U_{21} için 0.9 V olmuştur. Buna karşılık haznenin boş olması durumunda endüklenen gerilim ise $U_{21} = 0.52$ V dur. Dolayısıyla gerilim artışı %73 civarında olmuştur. Bu transformatörde kısa devre yük durumu incelendiğinde transformatör çekirdeğinin hacmi küçük olan bacaklarında manyetik sıvı kullanılması durumunda endüklenen gerilimin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç manyetik sıvı transformatörlerin tasarımında dikkate alınmalıdır.

4.3.2. Manyetik Sıvının Mıknatıslanma Özelliklerini Yükselterek Transformatör Veriminin İyileştirilmesi

Deneysel incelemelerde ve üretici firmanın (Sigma Corporation) verilerine göre deneylerde kullanılan DS-50 model manyetik sıvının mıknatıslanma özelliklerinin yüksek olmadığı görülmektedir. Öte yandan nanometre boyutlu manyetik parçacıklar içeren bütün manyetik sıvılar sınırlı doyma mıknatıslanmasına sahiptirler [8]. Genellikle manyetik parçacıklar/magnetite (Fe_3O_4) manyetik sıvı hacminin %10 - %20 kısmını oluşturmaktadır. Buna göre manyetik sıvıların doyma mıknatıslanmasını yükseltmek için ideal yöntem bu sıvılara manyetik karışım (Fe_3O_4) ekleyerek sıvının konsantrasyonunu yapay olarak arttırmaktır. Ancak manyetik sıvılarda bu işlem kolay değildir. Çünkü manyetik karşımın konsantrasyonunun artmasıyla sıvıdaki parçacıkların kümeleşmesi de artar, manyetik karışım çökme eğilimi gösterir ve manyetik sıvının fiziksel özellikleri değişerek manyetik özelliği zayıflar. Buna göre genel olarak manyetik sıvı sistemlerde bu yöntemin kullanılması istenmeyen bir durumdur. Fakat transformatörlerin çekirdeklerinde kümeleşme olayı o kadar da etkin olmayabilir. Çünkü dış manyetik

alanın etkisiyle bu parçacıklar zaten manyetik kuvvet çizgileri üzere yönlenmiş olup AC alan altında salınım hareketinde bulunurlar. Ancak başlangıç ya da transformatörün geçici çalışmama durumunda bu parçacıkların kısmen veya tümünün çökmesi olaylarının transformatörün verimine etkisini ayrıca incelemek gerekir.

Tez çalışmasında transformatörlerin çalışma aralıklarının farklı duraklamalarında (3 saat, 21 gün) çalışma performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre manyetik parçacıkların bir kısmının çökmesinden sonra transformatör yeniden çalıştırıldığında çıkış parametrelerinde ihmal edilebilecek kadar az bir değişim olduğu gözlenmiştir. Buna göre deneylerde firma üretimi olan DS-50 model manyetik sıvıya farklı miktarlarda, tezin eklerinde parçacık analiz raporu verilen, <100 μm civarında parçacık çapına sahip olan magnetite parçacıkları eklenerek sıvının mıknatıslanma özellikleri iyileştirilmiştir. Üretilen yüksek konsantrasyonlu manyetik sıvı ile tez çalışmasında tasarlanmış olan plastik malzemeden yapılmış transformatör, üst boyunduruk kısmı manyetik sıvı çekirdek olan transformatör ve mikrotransformatör yapıları üzerinde deneysel incelemeler yapılmıştır.

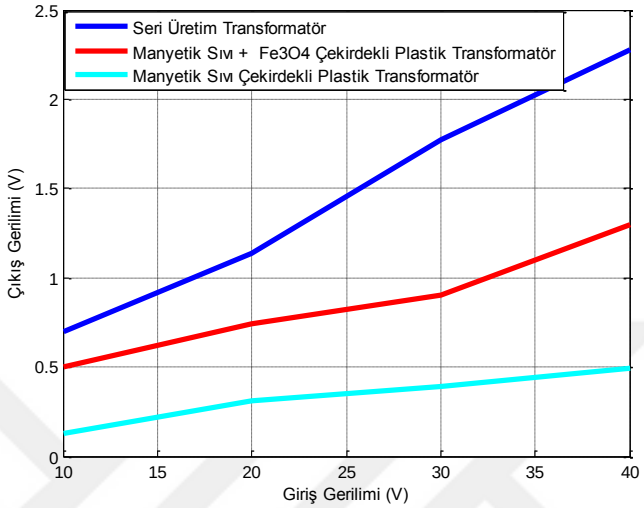
4.3.2.1. Plastik Malzemeden Yapılmış Ayarlı Transformatörün Yüksek Konsantrasyonlu Manyetik Sıvı ile Karakteristiğinin İncelenmesi

Manyetik sıvının fiziksel özelliğinin ve kayıplarının transformatörün verimini ciddi bir biçimde etkilediği görülmektedir. Bu etkiyi daha iyi açıklayabilmek için ilk deneylerde ölçümleri detaylı bir şekilde yapılan plastik malzemeden (derlin) imal edilmiş transformatörün çekirdeğine doldurulan manyetik sıvının içerisine mikrometre boyutlarında magnetite parçacıkları kontrollü bir şekilde eklenmiştir. Elde edilen yeni manyetik sıvı (20 mg Fe_3O_4+40 mg manyetik sıvı) ile çekirdeğin tam dolu durumu incelenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Plastik malzemeden yapılmış ayarlı transformatörde 40 ml manyetik sıvı + 20 mg Fe_3O_4 parçacığı olduğu durumda $U_{ad,21}$, $U_{ad,22}$ ve $U_{ad,23}$ uçları için deney sonuçları

	40 mg manyetik sıvı + 20 mg Fe_3O_4 parçacığı						
$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**
$\boldsymbol{U_{ad,21}}$(V)	0.5	0.74	0.9	1.3	1.76	2.17	2.5
$\boldsymbol{U_{ad,22}}$(V)	0.35	0.55	0.77	1.07	1.29	1.64	1.9
$\boldsymbol{U_{ad,23}}$(V)	0.35	0.6	0.76	1.08	1.27	1.61	1.92

Yukarıdaki çizelgede görüldüğü gibi manyetik sıvı içerisine ekstra magnetite parçacıkları eklendiğinde transformatörün çıkış uçlarından alınan gerilim %500 artmıştır. Şekil 4.5'te 40 V'a kadar uygulanan giriş gerilimi için bu sonuçlar detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 4.5. Manyetik sıvı çekirdekli transformatör tasarımında manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğinin çıkış gerilimleri üzerine etkisi

Grafikten de anlaşılacağı üzere manyetik sıvının mıknatıslanması 50 mT'nin üzerine çıkarıldığında çıkış geriliminde ciddi bir artış meydana gelmiştir. Bu durumdan manyetik sıvı çekirdekli transformatör tasarımında manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğinin çok önemli olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

4.3.2.2. Hibrit Transformatörlerin Yüksek Konsantrasyonlu Manyetik Sıvı ile Karakteristiklerinin İncelenmesi

Hibrit transformatörlerde manyetik sıvının sargılarda indüklenen gerilime etkisini daha iyi anlayabilmek amacıyla üst boyunduruğun tamamına Fe_3O_4 parçacığı doldurulmuştur. Çizelge 4.28'den anlaşılacağı üzere elde edilen veriler seri üretim transformatörün çıkış değerlerine %18 farkla yaklaşmıştır. Bunun anlamı kullanılan manyetik sıvının direnci arttıkça mıknatıslanmanın daha yüksek gerilim seviyelerinde olacağıdır. Dolayısıyla sistem daha yüksek akım ve gerilimlere dayanabilmektedir.

Çizelge 4.28. Üst boyunduruk kısmı Fe_3O_4 parçacığı ile tam dolu olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları

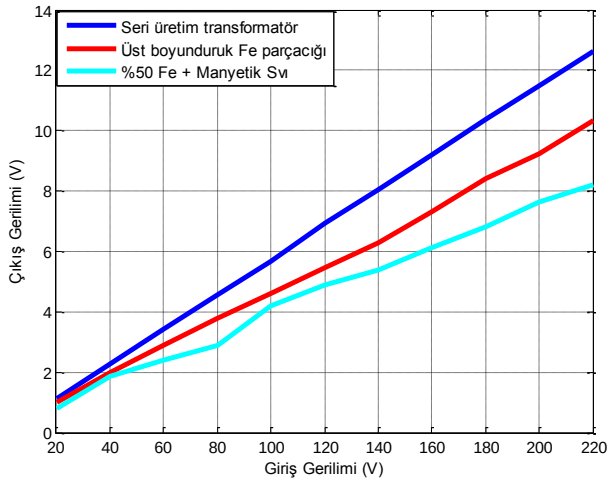
U_{ad}(V)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$U_{ad,21}$(V)	1	2	2.9	3.78	4.62	5.45	6.3	7.3	8.4	9.24	10.35
$U_{ad,23}$(V)	0.8	1.77	2.6	3.57	4.51	5.14	5.76	6.34	7	7.58	8.15
$I_{ad,1}$(mA)	10.1	33.3	63	78.8	127.8	160	193	227.4	258	290.3	327
$P_{ad,1}$(W)	0.054	0.27	0.75	1.1	2.65	4	5.7	7	8.61	10.1	11.68

Bu sonucu kademeli olarak anlayabilmek amacıyla transformatörün üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olacak şekilde doldurulmuştur. Çizelge 4.29'da elde edilen veriler seri üretim transformatör ile karşılaştırıldığında çıkış gerilimlerinde %34 fark oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 4.29. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları

U_{ad}(V)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$U_{ad,21}$(V)	0.81	1.85	2.4	2.9	4.2	4.9	5.36	6	6.8	7.64	8.3
$U_{ad,23}$(V)	0.72	1.4	1.87	2.4	3.62	4.21	4.83	5.3	6.05	6.51	7.11

Hibrit transformatörde kullanılan manyetik sıvının mıknatıslanma özelliği arttırıldığında sekonder sargılarında elde edilen gerilimlerin seri üretim transformatöre göre değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün seri üretim transformatör ile karşılaştırılması

Şekil 4.6'dan görüleceği üzere manyetik sıvıya dışarıdan eklenen Fe_3O_4 parçacıkları sıvının mıknatıslanmasını pozitif yönde etkilediğinden dolayı primer sargısına 220 V'a kadar gerilim uygulanabilmiştir. Sekonder sargılarında oluşan gerilim ise seri üretim transformatör değerlerine oldukça yaklaşmıştır.

Fe_3O_4 parçacıkları eklenerek oluşturulan nispeten yeni karışımın zamana bağlı olarak manyetik özelliklerindeki değişimi anlayabilmek amacıyla uzun bir süre kullanılmadan bekletilerek aynı sistemde tekrar uygulanmıştır. Önceki deneylerde kullanılmış olan manyetik sıvı ve bu sıvıya sonradan eklenen ortalama 100 μm boyutundaki Fe_3O_4 parçacıklarından oluşan yeni karışım ile 21 gün sonra yine aynı deneyler yapıldığında çıkış verilerinde değişiklik olmadığı yani manyetik sıvının mıknatıslanma kalitesinin değişmediği Çizelge 4.30'da görülmektedir. Bunun yanında aynı yapı 1 saat boyunca çalıştırıldığında çıkış gerilimlerinde herhangi bir değişiklik olmadığı da gözlenmiştir.

Çizelge 4.30. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün açık devre deney sonuçları (21 gün sonra)

U_{ad}(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**	**160**	**180**	**200**	**220**
$U_{ad,21}$(V)	0.80	1.85	2.4	2.9	4.2	4.9	5.37	6.1	6.8	7.64	8.22
$U_{ad,23}$(V)	0.73	1.4	1.82	2.4	3.6	4.2	4.83	5.3	6	6.49	7.14

Çizelge 4.31. Üst boyunduruk kısmı %50 Fe_3O_4 parçacığı + %50 manyetik sıvı olan hibrit transformatörün kısa süreli aralıklı çalışma açık devre deney sonuçları

U_{ad}(V)	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**	**160**	**180**	**200**	**220**
$U_{ad,21}$(V)	0.8	1.71	2.2	2.41	4.2	4.9	5.36	6	6.8	7.6	8.3
$U_{ad,23}$(V)	0.7	1.2	1.5	1.84	3.62	4.2	4.8	5.3	6	6.55	7.05

Hibrit transformatör belirli bir süre (3 saat) çalıştırılıp bekletildikten sonra (3 saat) tekrar çalıştırıldığında sekonder sargılarındaki gerilim seviyesinde bir değişim gözlenmiştir. Bu değişim Çizelge 4.31'de görüldüğü gibi primer sargılara uygulanan yaklaşık 90 V kademesinde gerçekleşmiştir. 80 V kademesindeyken manyetik sıvıya sonradan eklenen demir parçacıkları çökmüş durumda olduğundan bu parçacıkların çıkış gerilimine bir etkisi olmamıştır. Bir başka deyişle çekirdekteki manyetik alan bütün parçacıkların çekirdek boyunca homojen dağılabilmesi için yeterli olmamıştır.

Fakat 100 V'a yaklaşıldığında zeminde bulunan parçacıklar daha büyük değerde bir manyetik alana maruz kaldıklarından dolayı hareketlenmeye başlamış ve manyetik sıvının direncini arttırmıştır. Bu durum 100 V kademesindeyken gerçekleşen ani gerilim değişimini açıklamaktadır.

4.4. Manyetik Sıvı Mikrotransformatör Tasarımı ve İncelenmesi

Son yıllarda elektrik, elektronik ve iletişim endüstrisindeki gelişmeler bu sistemlerde kullanılan elemanların daha etkin ve küçük boyutlarda yapılması gereksinimini ortaya koymuştur. MEMS sistemlerinde ve birçok mikro sistemlerde kullanılabilecek mikrotransformatörlerin tasarımı büyük önem arz etmektedir [98]. Bu amaçla transformatörlerin en önemli manyetik kısmı olan çekirdeğinin manyetik sıvı ile yapılması bu problemin çözümlerinden biri olabilir. Manyetik sıvı çekirdeklerde kullanılan ferro-nanofluidler düşük elektrik geçirgenliğine sahip olduğundan çekirdekteki manyetik kayıpların (girdap/eddy ve histerizis) da azaltılmasına imkân sağlamaktadır.

Bu kapsamda bir mikrotransformatör tasarlanmıştır (Şekil 3.7). Çekirdeğin mıknatıslanma özelliklerini arttırmak için manyetik sıvıya belirli oranlarda çapı 100 μm'den küçük olan Fe_3O_4 (magnetite) parçacıkları eklenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.32-34'de gösterilmiştir. Transformatörün giriş geriliminin geniş aralıkta değişimine ($U_{ad,1} = 0.5\ \text{V} - 2\ \text{V}$) karşılık çıkış gerilimi ($U_{ad,2}$) ölçülmüştür.

Çizelge 4.32. Manyetik sıvı tam dolu (5 ml) durumda mikrotransformatör

$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	0.5	1	1.5	2
$\boldsymbol{U_{ad,2}}$(V)	0.022	0.064	0.082	0.1

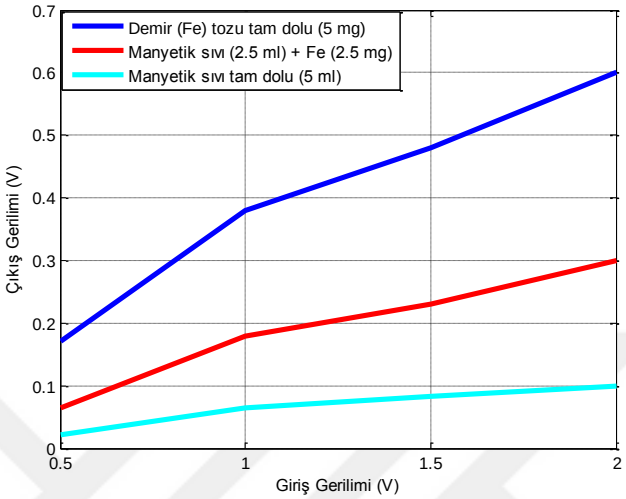
Çizelge 4.33. %50 manyetik sıvı + %50 Fe_3O_4 durumda mikrotransformatör

$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	0.5	1	1.5	2
$\boldsymbol{U_{ad,2}}$(V)	0.065	0.18	0.23	0.3

Çizelge 4.34. Fe_3O_4 parçacıkları ile tam dolu (5 mg) durumda mikrotransformatör

$\boldsymbol{U_{ad,1}}$(V)	0.5	1	1.5	2
$\boldsymbol{U_{ad,2}}$(V)	0.17	0.38	0.48	0.6

Yukarıdaki çizelgelerden görüldüğü gibi transformatörün giriş geriliminin artmasıyla çıkış gerilimi de artmaktadır. Fakat manyetik sıvının mıknatıslanma özellikleri arttırıldığında bu artış yaklaşık olarak 6 kat olmaktadır. Bu ilişkinin grafiksel görünümü Şekil 4.7'de daha açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.7. Mikrotransformatörün çıkış geriliminin çekirdeğin manyetik özelliklerine bağlı değişimi

Transformatörün sekonder sargısında endüklenen gerilim manyetik sıvının elektrik, manyetik ve fiziksel özelliklerine (viskozite, sıcaklık, yoğunluk) ve çekirdeğin boyutlarına bağlıdır. Özellikle çekirdekte bulunan manyetik sıvı miktarı çekirdeğin mıknatıslanma özelliğini dolayısıyla da transformatörün verimini önemli derecede etkilemektedir.

4.5. Manyetik Sıvı Hibrit Transformatör Teorisinin Geliştirilmesi

Manyetik sıvı teorisi ve pratik uygulamaları ile ilgili artarak devam eden çalışmalar genel olarak Bölüm 2'de yeterince incelenmiştir [1,8,99]. Manyetik sıvıların kullanım alanları hızla gelişmekte olmasına rağmen bu alanlarda yapılan teorik çalışmaların yetersiz kaldığı literatür araştırmalarında gözlenmiştir. Özellikle tıp ve biyolojide (ilaç hedefleme, hyperthermia vd.) etkin kullanımında ve çeşitli amaçlar için üretilen sensörlerin tasarımında bu teorik bilgilerin yetersizliği ciddi uygulama sorunları oluşturmaktadır. Dolayısıyla manyetik sıvıların uygulama alanlarının genişletilmesini engelleyen bu sorunlar, manyetik sıvıların özel uygulama alanlarına göre teorisinin geliştirilmesinde önemli bir problem olarak durmaktadır.

Manyetik sıvıların en ileri kullanım alanlarından biri de bu sıvıların transformatörlerin çekirdek kısmında mıknatıslanma elemanı olarak kullanılabilme olanağının incelenmesidir.

Transformatörlerin teorisi ve pratiği genelde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Manyetik sıvı sert manyetik malzemelerden (silisyum alaşımlı saç) farklı olarak birçok hassas parametrelere (akışkanlık, yoğunluk, ısı transferi, viskozite) sahip olduğundan transformatörlerin çekirdek kısmının manyetik sıvı ile yapılması durumunda transformatörlerin teorisi önemli bir şekilde değişecektir. Dahası bütün bu parametrelerin değişimi manyetik sıvının mıknatıslanma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Neticede bu parametrelerin değişimleri manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin verimini de belirlemektedir. Buna göre manyetik çekirdeği mıknatıslanma özelliği olan sıvıdan oluşturulmuş transformatörlerin teori ve pratiğinin oluşturulmasında onların klasik transformatörlerden farklı olan bu özellikleri göz önüne alınmalıdır.

Son yıllarda manyetik sıvıların çeşitli alanlarda uygulamalarına ait literatürde yüzlerce makale ve patentler yayımlanmasına rağmen manyetik sıvıların transformatörlerde kullanılmasına ait yayımlanan çalışmaların sayısı çok azdır [100-105]. Bu çalışmalardan güç transformatörleri [103] ve yüksek frekanslı transformatörlere ait birkaç çalışmanın dışında büyük kısmı mikro [104,105] ve laboratuvar türü [101] transformatörlere aittir. Mıknatıslanma çekirdeği olarak kullanılması öngörülen manyetik sıvıların transformatörlerde etkin olarak kullanılmasının nedenleri aşağıdakiler gibidir.

a) Teknik amaçlar için kullanılan manyetik sıvıların (trafo yağı, kerosen, petrol temelli sıvılar) doyma mıknatıslanmasının (M_s) düşük olması,

b) Manyetik sıvıların mıknatıslanma özelliklerinin zamanla zayıflaması,

c) Manyetik sıvının içerdiği esasen magnetite (Fe_3O_4) parçacıklarının AC alan altında özellikle güç ve yüksek frekans transformatörlerinde manyetik kayıplarının (girdap/eddy ve histerizis) artması,

d) Manyetik sıvıların silisyumlu saclardan farklı olarak akışkan özelliğe sahip olmasıdır. Bu tür ortamlarda ek olarak dissipasyon, viskozite, magnus efekti ve diğer türlü kayıplar da yer almaktadır.

e) Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerde elektromanyetik, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle transferi ve termodinamik temelleri içeren genel bir teorinin olmamasıdır. Dahası literatürde sunulan sınırlı sayıdaki çalışmalarda transformatörlerde

kullanılması öngörülen manyetik sıvıların içerdikleri dispers manyetik parçacıkların (Fe_3O_4) konsantrasyonunun değişmediği kabul edilmektedir. Oysa kullanım yerine bağlı olarak çekirdeğin mıknatıslanma özelliğini arttırması için dispers karışımın konsantrasyonunu da belli oranda değiştirmek mümkündür.

Doğal olarak manyetik sıvıya eklenen dispers karışım bu sıvının içerdiği karışımda koagülasyon ve çökme olayı oluşturabilir. Fakat koşullara bağlı olarak ek dispers karışımın konsantrasyonu ayarlanabilir ve mıknatıslanma değişimi manyetik sıvı kinetiğinin teorisinde de göz önüne alınabilir.

Tez çalışmasında kullanılan ve Sigma şirketinden (Japonya) temin edilen DS-50 model manyetik sıvının mıknatıslanma özelliğini arttırmak için bu sıvıya belirli konsantrasyonda dispers karışım (Fe_3O_4) eklenerek deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde hem manyetik özelliklerinin korunumu süresinin hem de mıknatıslanma özelliklerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle bu faktörlerin de manyetik sıvı teorisinde dikkate alınmasında fayda vardır. Öncelikle transformatörün manyetik sıvı çekirdeğindeki olayların kararlı durumda olduğu varsayılmaktadır. Manyetik sıvının fiziksel parametrelerinin değişimine bağlı olarak transformatör parametreleri de değişecektir. Buna göre manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerde manyetik alan kaynağı, manyetik alan ve mıknatıslanma olayları ayrıca incelenmeli ve modellenmelidir. Bunların yanında transformatör sargılarındaki kapasitans ve indüktans değişimi de dikkate alınmalıdır.

Sargılardaki kapasitans olayları elektrostatik alandaki süreklilik yasasına göre değerlendirilebilir.

$$\nabla . \mathbf{j} = \nabla(\sigma \nabla V_e) \tag{4,1}$$

Burada V_e elektrokinetik potansiyel, $\sigma(S/m)$ elektrik geçirgenliktir.

Manyetik alan için ise aşağıdaki denklemler geçerli olur.

a) Bakır sargılarda ve hava boşluğunda,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_s} \nabla \times \mathbf{A}\right) = \mathbf{y} \tag{4,2}$$

b) Manyetik sıvı çekirdekte,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}\right) = 0 \tag{4,3}$$

Burada $\mathbf{A}$ (T. m) manyetik vektör potansiyel, $\mu = \mu_0 \mu_r$ (H/m) manyetik geçirgenlik, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$(H/m) manyetik sabit, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik katsayısıdır (ferrit için μ_r=1000, boşluk için ise μ_r=1), $\mathbf{M}$ (A/m) manyetik sıvının mıknatıslanma vektörüdür. Manyetik sıvı ve nano sıvılarda bu parametre Langevin formülüne dayanarak [8] aşağıdaki gibi analitik olarak hesaplanabilir [104],

$$\mathbf{M} = \gamma \tan^{-1}(\lambda \mathbf{H}) \tag{4,4}$$

Burada $\mathbf{M}$ manyetik alan şiddetidir, γ ve λ ampirik katsayılardır. Bu katsayılar manyetik sıvıların mıknatıslanması deneylerinde hassas ölçümlerle belirlenebilir. Manyetik nano sıvılar için bu parametrelerin karakteristik değerleri $\gamma = 3.05\ \mathrm{A/m}$, $\lambda = 1.5 \times 10^{-1}\ \mathrm{m/A}$ şeklindedir [104].

Denklem 4,2 ve 4,3 manyetik alan $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$ sınır koşulu ile tamamlanmaktadır.

Transformatörün çekirdeğindeki manyetik sıvının hareketi veya sıvıda oluşan olaylar akışkanlar mekaniğinin türbülans rejimine göre değerlendirilebilir. Reynolds sayısının düşük değerlerinde (Re<1) manyetik sıvıda yer alan olaylar aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir,

a) Moment değişimi,

$$\rho(\mathbf{u} \times \boldsymbol{\nabla})\mathbf{u} = \boldsymbol{\nabla}[\mathrm{p}\mathbf{I} + \eta(\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u} + (\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u})^{\mathrm{T}})] + \mathbf{f} - \rho\mathbf{g} \tag{4,5}$$

b) Kütle değişimi,

$$\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u} = 0 \tag{4,6}$$

c) Türbülans kinetik enerji taşınımı,

$$\rho\mathbf{u} \times \boldsymbol{\nabla}\mathrm{k} = \boldsymbol{\nabla}[(\eta + \sigma_{\mathrm{k}}\eta_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\nabla}\mathrm{k}] + \eta_{\mathrm{T}}\rho(\mathbf{u}) - \beta_{\mathrm{k}}\rho\mathrm{k}\boldsymbol{\omega} \tag{4,7}$$

d) Türbülans frekans taşınımı,

$$\rho\mathbf{u} \times \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\nabla}[(\eta + \sigma_{\omega}\eta_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\omega}] + \alpha\boldsymbol{\omega}\eta_{\mathrm{T}}\mathrm{P}(\mathbf{u})/\mathrm{k} - \beta_{\mathrm{k}}\rho\boldsymbol{\omega}^2 \tag{4,8}$$

Burada $\mathbf{u}$ (m/s) hız, P ($\mathrm{N/m^2}$) basınç, ρ ($\mathrm{kg/m^2}$) yoğunluk, g ($\mathrm{m^2/s}$) gravitasyon sabiti, η ($\mathrm{s^{-1}}$) dinamik viskozite, $\mathrm{f_m} = \mu_0(\mathbf{M} \times \boldsymbol{\nabla})\mathbf{H}$ ($\mathrm{N/m^3}$) birim hücredeki manyetik kuvvet, $\mathbf{I}$ birim matris, k ($j/\mathrm{m^3}$) türbülans kinetik enerjisi, $\boldsymbol{\omega}$ ($\mathrm{m^2/s^3}$) birim türbülans enerjiye düşen dissipasyon, α ve β ampirik sabitler,

$\mathrm{P}(\mathbf{u}) = \boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u}(\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u} + (\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{u})^{\mathrm{T}})$ ve $\eta_{\mathrm{T}} = \rho_k/\boldsymbol{\omega}(\mathrm{s}^{-1})$ türbülans viskozitedir. Bu teorik uygulamalarda manyetik nano sıvının Newtonian özellikli, homojen ve izotropik olduğu varsayılmaktadır.

Transformatörün primer ve sekonder sargılarındaki elektrik parametreleri aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

Primer (L_{11}) ve sekonder (L_{22}) sargılarının özindüktifliği,

$$L_{11} = \frac{2}{{I_1}^2}\int_V W_{m1}dv\ ,\quad L_{22} = \frac{2}{{I_2}^2}\int_V W_{m2}dv \tag{4,9}$$

Burada I_1 ve I_2 primer ve sekonder sargılarındaki akımlar, V (m^3) transformatör çekirdeklerinin hacimleri, W_{m1} (j/m^3) primer devresinin I_1 akımına sahip olmakla sekonder devresinin akımı açık devre $(I_2 = 0)$ olduğu durum için manyetik enerji yoğunluğu ve W_{m2} (j/m^3) sekonder devresi I_2 akımına sahip olmakla primer devresinin akımı $(I_1 = 0)$ olduğu durum için manyetik enerji yoğunluğudur.
Karşılıklı indüktiflik L_{12},

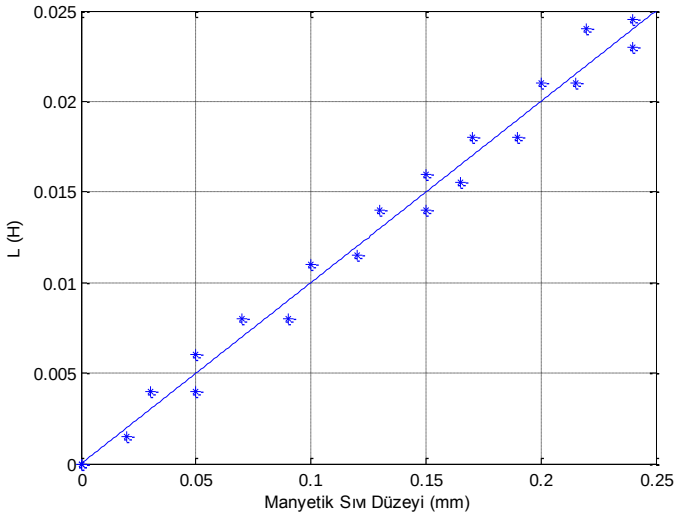
$$L_{12} = \frac{1}{I_1 I_2}\int_V W_{m1,2}dv - \left(\frac{L_{11}{I_1}^2}{2} + \frac{L_{22}{I_2}^2}{2}\right) \tag{4,10}$$

Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerde özellikle MHz ve daha yüksek frekanslarda kapasite etkisi önemli olmaktadır. Kapasitans parametrelerinin statik bakımdan analizi elektrostatik alanın aşağıdaki denklemi ile değerlendirilebilir.

$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{D} = 0 \ \text{ veya } \ \boldsymbol{\nabla}.(\varepsilon \boldsymbol{\nabla} \mathrm{V}) = 0 \tag{4,11}$$

Burada V (V) elektrostatik potansiyel, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ çekirdeğin dielektrik geçirgenliği (F/m), ε_r bağıl dielektrik geçirgenliği, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ dielektrik sabitidir.
Referans değerler olarak, örneğin mikrotransformatörlerde bu değerler $L_{11} = L_{22} =$ 3,695 nH, $L_{12} = 0{,}192$ nH, C=33,06 pF olarak gözlenmiştir [104].

Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin deneysel incelemelerinden elde edilen diğer sonuçlara göre ise [102] çekirdekteki manyetik sıvı miktarına göre sargıların indüktansının değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Sıvının seviyesine göre çekirdekteki (202 mm) sargının indüktans değerinin değişimi [102]

Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin çıkış parametrelerinin incelenmesi deneylerinde, bu parametrelerin manyetik sıvı miktarının değişimine etkin olarak bağımlılığı ortaya çıkmıştır [106-108].

Eğer transformatörün primer sargılarına $i = I_0 \sin \omega t$ (A) akım uygulandığında transformatörün manyetik sıvı çekirdekte dik kesit yüzey alanının dolu (S_2) ve boş (S_1) kısımlarında endüklenen toplam manyetik akı (ϕ) aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\phi = \phi_1 \phi_2 = \mu_0 \frac{N_1 i}{l} N_2 S_1 + \mu_0 \mu_r \frac{N_1 i}{l} N_2 S_2 = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} I_0 \sin \omega t \ [1 + m(\mu_r - 1)] \qquad (4,12)$$

Burada l çekirdeğin ortalama uzunluğu, N_1 ve N_2 çekirdekteki sargıların sarım sayıları, μ_r manyetik sıvının bağıl manyetik geçirgenliği, $m = \frac{S_2}{S_1}$ olup çekirdek dik kesitinin manyetik sıvı ile kaplanmış kısmını göz önüne alan orantı katsayısıdır. Bu durumda sargılarda endüklenen emk aşağıdaki gibi olur,

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} I_0 S_1 \omega [1 + m(\mu_r - 1)] \cos \omega t \qquad (4,13)$$

Manyetik sıvı miktarının değişimi ile sekonder sargısında endüklenen emk ise şu şekilde yazılır,

$$E = K\omega [1 + (m + \Delta m)(\mu_r - 1)] \cos \omega t \qquad (4,14)$$

Burada $K = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} I_0 S_1$ 'dir.

Deneysel incelemeler $m \leq 0{,}1$ civarında olduğunda transformatörün sekonder sargılarında endüklenen gerilimin nominal gerilimden çok düşük olduğunu göstermiştir ($\leq \%50$). Bu nedenle pratik uygulamalarda manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerde $m \geq 0{,}75$ olarak seçilmesinde fayda vardır. Tez çalışmasında yapılan deneylerde bu faktör $0 \leq m \leq 1$ aralığında değiştirilmiştir. m=1 ve manyetik karışımın (Fe_3O_4) artmasıyla çıkış gerilimleri seri üretim transformatörün çıkış parametrelerinin nominal değerlerine yaklaşmıştır.

Sonuç olarak manyetik sıvı çekirdekli transformatörün çıkış gerilimlerinin transformatör genel teorisinin temelinde bir yaklaşımla da elde etmenin mümkün olduğu gösterilebilir.

Bacak yarıçapı R olan çekirdeğin endüktansı/geçirgenliği manyetik sıvı eklendikçe değişir. Eğer sargı endüktansı $\Delta_{l(1)}$ ise buna karşılık gelen çıkış gerilimi V_{out} şu şekilde belirlenir [102],

$$V_{out} = P\Delta l_{(1)} V_{in} f_{in} (\frac{h}{D}) \qquad (4{,}15)$$

Burada P sabit, h manyetik sıvının seviyesi/yüksekliği, D borunun/çekirdeğin çapı, V_{in} ve f_{in} çıkış geriliminin genliği ve frekansıdır. İndüktans değişimi $l_{(1)} - l_{(1-t)}$ olarak (borunun farklı bölgelerinde) varsayılırsa bu boru kısmında birim uzunluk başına sarım sayısı N^* olursa, o halde çıkış gerilimi aşağıdaki gibi olur [102],

$$V_{out} = [4(t^2 + a^2)^{\frac{1}{2}} - 4((1-t)^2 + a^2)^{\frac{1}{2}} - (4t^2 + a^2)^2] V_{in} f_{in} (\frac{h}{D}) \qquad (4{,}16)$$

Burada $K = (\frac{1}{2\pi\mu_0}) \frac{R^3}{N^{*2}}$, $a = \frac{R}{l}$ ve $\beta = \left(\frac{\mu_1}{\mu} - 1\right)(1 + a^2)^{\frac{1}{2}} - (\frac{a}{\mu_r} - 1)[3(1 + {\mu_r}^2) - 2\mu_r]$ 'dır.

Bütün değerlendirmelerden elde edilen sonuçlara göre manyetik sıvı sistemlerin çeşitli elektrik-elektronik ve diğer pratik uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılabilmesine ışık tutabilen genel teorik temellerin bulunmadığı açıkça görülmektedir. Yapılan teorik çalışmalar manyetik sıvıların belirli bir uygulaması için geçerli olup başka bir uygulama sistemi için geçerli değildir. Manyetik sıvı

uygulamalarının teorik temellerindeki yetersizlik, onların çeşitli alanlardaki uygulama imkânlarını sınırlayarak bu tür sistemlerin tasarım ve kontrolünün oluşturulmasını engellemektedir. Buna göre manyetik sıvı sistemlerin teorik bazının geliştirilmesi ve daha geniş alanlara dâhil edilmesi problemleri güncel olarak kalmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pratik olarak manyetik karakteristiği iyi ve birçok pozitif özelliğe sahip olan (mıknatıslanma, akışkanlık, ısı transferi, düşük hacim, ağırlık vs.) manyetik sıvıların manyetik duyarlı sistemlerde kullanılması önemli ve güncel bir problem olarak belirlenmiştir. Bu nedenle manyetik sıvı bazında, manyetik çekirdek kısmı bu sıvılardan oluşan birçok sistemde (motor, hareketli kısımların arasında conta, audio sistemler vb.) çeşitli manyetik sıvıların kullanımının önemli ve etkin bilimsel araştırma yönü hesap edilmektedir. Bu sistemler içerisinde pratik açıdan en önemli olanlarından biri de transformatörlerdir. Ağır ve maliyetli manyetik malzemeden oluşturulmuş çekirdek sistemine sahip olan transformatörlerin çekirdek kısmında manyetik sıvıların kullanılması yapı, kullanım, montaj ve servis bakımından çok büyük avantajlar sağlar. Bu bakımdan tez çalışmasında çekirdeklerinde manyetik sıvı kullanımına imkân verecek farklı transformatör türleri tasarlanarak bütün giriş ve çıkış parametreleri incelenmiştir. Transformatör yapıları tümüyle manyetik sıvı bazında ve hibrit yapıda (manyetik sıvı-sac) yapılmıştır. Elde edilen sonuçların pratik bakımdan önemini değerlendirebilmek için aynı boyutlarda sanayi ortamında (Aslan Elektronik / Malatya / Türkiye) seri üretimi yapılan standart transformatör yapısı kullanılmıştır. Manyetik sıvı olarak 47 mT mıknatıslanma özellikli, izoparafin bazlı ve genel test amaçlı olan sıvı kullanılmıştır (Sigma Corporation / Japonya). Bütün yapılarda manyetik sıvının kullanımı ayarlı olarak yapılmıştır. Transformatörün çıkış karakteristiklerinin kullanılan manyetik sıvı miktarına bağımlılığı ölçülmüştür. Standart ve yeni tasarlanan transformatör yapılarında açık devre, kısa devre ve yük durumları incelenmiştir. Böylece transformatörlerin hem yüklü hem de yüksüz karakteristikleri değerlendirilmiştir. Bazı yerel özellikler dikkate alınmaksızın tasarlanan transformatörlerde yapılan deneylerden aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Bütün durumlarda (açık devre, kısa devre, yük durumu) transformatörlerin çıkış gerilimleri beklendiği gibi manyetik sıvı miktarının artmasıyla daha etkin bir şekilde yükselmiştir.

Transformatörün çekirdek kısmının manyetik sıvı ile tam dolu olması durumunda manyetik sıvı bazında olan transformatörlerin çıkış parametreleri en yüksek değere ulaşır. Fakat transformatörün çalışma gerilimi arttıkça bu artış zayıflar ve hatta azalabilir. Bunun esas nedeni manyetik sıvının yüksek gerilimlerde (muhtemelen

yüksek frekanslarda da) manyetik ve demir kayıplarının artmasıdır. Çünkü manyetik sıvının Fe_3O_4 parçacıkları daha hızlı ısınır ve esas malzemeden (sıvı) hızlı ısı transferi oluşturur. Bu nedenle yüksek gerilim transformatörlerinde manyetik sıvı sistemlerin kullanılmasında titiz ön çalışmaların yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde oluşan kayıplar bu tür sistemlerin verimini düşürebilir.

2. Standart transformatör ve tasarlanan transformatör çekirdeklerinin boş olduğu durumlar ile çekirdeklerdeki manyetik sıvının tam dolu olduğu durum kıyaslandığında endüklenen gerilimler %50-100 fark göstermektedir. Bunlar transformatörlerin yapısından ve deney koşullarından kaynaklanabilir. Fakat transformatörün dış karakteristiklerinin bu kadar düşük olması kullanılan manyetik sıvının fiziksel ve manyetik özelliklerine bağlıdır. Yapılan deneylerde kullanılan manyetik sıvı ideal manyetik özelliklere sahip değildir. Günümüzde kullanılan birçok manyetik sıvı (örneğin Ferrotec Şirketi / ABD $\mathbf{M_s} = 100\,\mathrm{mT}$) daha yüksek mıknatıslanma özelliğine sahip olarak üretildiğinden dolayı daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Başa bir deyişle yeni tür manyetik sıvıların sentezlenmesi manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin daha verimli olmasına imkân sağlar.

3. Transformatörlerde ve diğer elektroteknik sistemlerde (Röle, elektrik makinaları vs.) yüksek verimli manyetik sıvılar kullanmak gerekir. Bu amaçla manyetik sıvıların manyetik bileşenlerinin (Fe_3O_4) konsantrasyonunu arttırmak mümkündür. Bu işlem daha küçük boyutlu (5-15 nm) manyetik parçacıklar ile yapıldığında sıvının mıknatıslanma özelliği daha etkin olur.

4. Manyetik sıvı çekirdekli transformatörlerin verimini arttırmak için bu transformatörler hibrit biçimde (Şekil 3.4-6) yapılabilir. Bu transformatörlerde manyetik geçirgenliği sağlayan çekirdeğin bir kısmı standart transformatörlerde kullanılan silisyum alaşımlı saclardan diğer kısmı ise manyetik sıvıdan oluşturulabilir. Bu durumda transformatörlerde montaj, taşınım ve ağırlık bakımından önemli avantajlar sağlanabilir.

5. Hibrit tip manyetik sıvı transformatörlerin deney sonuçlarının genel olarak bütün durumlarında, tümüyle manyetik sıvıdan oluşturulmuş çekirdekli yapılara nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle pratik bakımdan hibrit transformatörlerin kullanımı daha avantajlı görülmektedir.

6. Deneylerde manyetik sıvı miktarının artışına bağlı olarak çıkış gerilimlerindeki değişim gözlenmiştir. Böylece çekirdek kanallarına uygulanan manyetik sıvı miktarının ayarlanmasıyla transformatörlerin çıkış gerilimlerinin de

ayarlanabileceğinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum transformatörün çıkış uçlarının sayısını her zaman 2 uç biçiminde yapmaya imkân sağlar. Yani transformatördeki manyetik sıvı miktarı değiştikçe sekonder uçlarındaki gerilim sürekli ayarlanabilir.

7. Manyetik sıvı transformatörlerde sıvı miktarının değişimine bağlı olarak çıkış gerilimini sürekli ayarlı yapabilmek için transformatörün bacaklarındaki manyetik sıvı miktarı pistonlar vasıtasıyla değiştirilebilir. Bu amaçla tasarlanan transformatör yapısında (Şekil 3.4) orta bacaktaki manyetik sıvı miktarını değiştirebilmek için bir piston tasarlanmıştır. Bu manyetik sıvı transformatörünün deneysel incelemelerinden elde edilen sonuçlara göre (Çizelge 4.6-16) sekonder geriliminin ayarlanabilir olduğu görülmüştür. Fakat bu sonuçlar pratik bakımdan çok da yüksek değildir. Kullanılan manyetik sıvının özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha etkin yapıların tasarlanmasıyla transformatörlerde daha yüksek verim sağlanabilir.

8. Manyetik sıvının fiziksel özeliklerini (mıknatıslanma, ısı transferi, dayanıklılık vb.) iyileştirerek bu çıkış parametrelerini daha da yükseltmek mümkündür. Çünkü yapılan deneylerde transformatörlerin verimini belirleyen esas faktörün manyetik sıvının fiziksel özellikleri olduğu açıkça görülmüştür. Daha ucuz ve manyetik bakımdan daha iyi fiziko-kimyasal özelliklere sahip sıvıların sentezlenmesiyle bu problem çözülebilir.

9. Yüksek gerilim ve frekanslar için tasarlanmış transformatörlerde manyetik ve elektrik kayıplarının artmasıyla manyetik sıvı transformatörlerin verimleri azalabilir. Buna göre manyetik sıvı transformatörlerin yeni çalışma alanlarından biri olan mikroelektromanyetik (MEMS) sistemlerde ve alçak gerilim transformatörlerinde mikrotransformatör olarak kullanılması daha avantajlı olabilir.

6. KAYNAKLAR

[1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Dover Publications, New York, 1997.

[2] S. Odenbach, *Colloidal MFs: Basics, Development and Application of FFs,* Springer, Heidelberg, 2009, 1 -378.

[3] D. Mayer. *Future of electrotechnics: ferrofluids*, **Advances in Electrical and Electronic Engineering**, 7:2 (2008) 9-14.

[4] S. Papell, *Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles,* US Patent 3215572, 1964.

[5] L. Vékás, *Magnetic nanofluids properties and some applications,* **Rom. J. Phys.,** 49:10 (2004) 707-721.

[6] L. Vekas, M. V. Adveev, ve D. Bica, "Magnetic Nanofluids: Synthesis and Structure", D. Shi (Ed.) Springer, New York, 2009, p. 650-728.

[7] R. E. Rosensweig, *Magnetic fluids*, **Sci. Am.,** 247 (1982) 136-145.

[8] B. M. Berkovski, V. Bashtovoy, *MFs and Applications Handbook,* B. House Inc., New York, 1996.

[9] E. Blums, A. Cebers, M. M. Maiorov, *MFs.*, de Gruyter, Berlin, 1997.

[10] P. Ilg, S. Odenbach, *Ferrofluid structure and rheology*, **Lect. Notes Phys.,** 763 (2009) 249-325.

[11] J. de Vicente, D. J. Klingenbergb, R. Hidalgo-Alvarez, *Magnetorheological fluids: a review,* **Soft Matter, 7 (**2011) 3701-3710.

[12] B. B. Yellen, G. Friedman, *Magnetic fluid manipulators and methods for their use,* US Patent 8678640 B2, 2014.

[13] L-C. Hsu, *Device and method for ferrofluid power generator and cooling system,* US Patent 20040182099 A1, 2004.

[14] C. Passow, B. Fischer, M. Sprung, M. Köckerling, J. Wagner, *Direction-dependent freezing of diamagnetic colloidal tracers suspended in paramagnetic ionic liquids,* **Langmuir**, 30:25 (2014), 7283-7288.

[15] D. Serantes, K. Simeonidis, M. Angelakeris, O. C. Fesenko, M. Marciello, M. P. Morales, D. Baldomir, C. M. Boubeta, *Multiplying magnetic hyperthermia response by nanoparticle assembling*, **J. Phys. Chem.,** 118:11 (2014) 5927-5934.

[16] S. Odenbach, *Recent progress in magnetic fluid research* **J. Phys. Condens. Matter,** 16:8 **(**2004) 1135-1150.

[17] C. Scherer, A. F. M. Figueiredo Neto, *Ferrofluids: properties and applications,* **Braz. J. Phys., 35:3** (2005) 718-725.

[18] L. H. Reddy, J. L. Arias, J. Nicolas, P. Couvreur, *Magnetic nanoparticles: design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications,* **Chem. Rev.,** 112:11 (2012) 5818-5878.

[19] L. Vekâs, *Ferrofluids and magnetorheological fluids,* **Advances in Science and Technology,** 54 (2008) 127-136.

[20] S. Odenbach, *Ferrofluids: magnetically controllable liquids*, **Proc. Appl. Math. Mech.,** 1 (2002) 28-32.

[21] S. W. Charles, "FFs." in S. Odenbach (Ed.), *Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*, Lecture Notes in Physics, Vol. 594, Springer, Heidelberg, 2002, p. 3-12.

[22] M. T. Löpez-Löpez, A. Gömez-Ramîrez, L. Rodrîguez-Arco, J. D. G. Duran, L. Iskakova, A. Zubarev, *Colloids on the frontier of ferrofluids. rheological properties*, **Langmuir,** 28:15 (2012) 6232-6245.

[23] T. Wen, K. M. Krishnan, *Cobalt-based magnetic nanocomposites: fabrication, fundamentals and applications,* **J. Phys.,** 44 (2011) 1-24.
[24] C. Yamahata, *Magnetically actuated micropumps*, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland, 2005.
[25] M. F. Casula, P. Floris, C. Innocenti, A. Lascialfari, M. Marinone, M. Corti, R. A. Sperling, W. J. Parak, C. Sangregorio, *Magnetic resonance imaging contrast agents based on iron oxide superparamagnetic ferrofluids*, **Chem. Mater.**, 22 (2010) 1739-1748.
[26] L. Tavano, M. Vivacqua, V. Carito, R. Muzzalupo, M. C. Caroleo, F. Nicoletta, *Doxorubicin loaded magneto-niosomes for targeted drug delivery,* **Colloids Surf.** 102 (2013) 803-807.
[27] K. Büscher, C. A. Helm, C. Gross, G. Glöckl, E. Romanus, W. Weitschies, *Nanoparticle composition of a ferrofluid and its effects on the magnetic properties*, **Langmuir**, 20 (2004) 2435-2444.
[28] R. E. Rosensweig, *Magnetic fluid seals,* US Patent 3260584, 1971.
[29] K. Raj, B. Moskowitz, R. Casciari, *Advances in ferrofluid technology,* **J. Magn. Magn. Mater.** 149 (1995) 174-180.
[30] K. Raj ve R. Moskowitz, *Commercial applications of ferrofluids,* **J. of Mag. and Magnetic Materials,** 85 (1990) 233.
[31] M. B. Shafii, F. Daneshvar, N. Jahani, K. Mobini, *Effect of ferrofluid on the performance and emission patterns of a four-stroke diesel engine,* **Adv. Mech. Eng.,** 3 (2011) 1-5.
[32] A. Engel, H. W. Muller, P. Reimann, A. Jung, *Ferrofluids as thermal ratchets,* **Phys. Rev. Letters,** 91 (2003) 6.
[33] S. S. Nair. "*Investigations on the effect of excitonic confinement on nanomagnetic materials and studies on the optical properties of ferrofluids"* PhD Thesis, Cochin University of Science and Technology India, 2006.7-8.
[34] M. Mishra, A. P. Singh, B. P. Singh, V. N. Singh, S. K. Dhawan, *Conducting ferrofluid: a high-performance microwave shielding material,* **J. Mater. Chem. A,** 2 (2014) 13159-13168.
[35] S. Lam, E. Blanco, S. K. Smoukov, K. P. Velikov, O. D. Velev, *Magnetically responsive pickering foams,* **J. Am. Chem. Soc.**,133 (2011) 13856-13859.
[36] G. J. Moridis, S. E. Borglin, C. M. Oldenburg, A. Becker, *Theoretical and experimental investigations of FFs for guiding and detecting liquids in the subsurface,* **Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-41069**, Berkeley, California, 1998.
[37] W. D. Wu, G. Liu, S. X. Chen, H. Zhang, *Nanoferrofluid addition enhances ammonia/water bubble absorption in an external magnetic field,* **Energy and Buildings**, 57 (2013) 268-277.
[38] S. Komati, A. K. Suresh, *CO2 absorption into amine solutions: a novel strategy for intensification based on the addition of ferrofluids,* **J. Chem. Technol. Biotechnol**., 83:8 (2008) 1094-1100.
[39] Q. Li, Y. Xuan, *Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field,* **Exp. Therm. Fluid Sci.,** 33 (2009) 591-596.
[40] B. Andö, S. Baglio, A. Beninato, *A ferrofluid inclinometer with a time domain readout strategy*, **Sens. Actuators**, 202 (2013) 57-63.
[41] V. Nikitin, *Magneto-optical photoresist,* US Patent 7989152 B2, 2006.
[42] K. Raj, *Quiet ferrofluid solenoid,* US Patent 5969589, 1999.

[43] B. Andö, S. Baglio, A. Beninato, *A ferrofluid inclinometer with a time domain readout strategy*, **Procedia Engineering**, 47 (2012) 586-589.
[44] J. J. Chieh, S. Y. Yang, H. E. Horng, C. Y. Hong, H. C. Yang, *Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation*, **Appl. Phys. Lett.** 90 (2007) 133505.
[45] H. E. Horng, C. S. Chen, K. L. Fang, S. Y. Yang, J.J. Chieh, C.-Y Hong, H. C. Yang, *Tunable optical switch using magnetic fluid*, **Appl. Phys. Lett.**, 85:23 (2004) 5592-5593.
[46] D. Homa, G. Pickrell, *Magnetic sensing with ferrofluid and fiber optic connectors*, **Sensors,** 14:3 (2014) 3891-3896.
[47] Z. Wu, A. Iqbal, F. B. Amara, *Magnetic Fluid Deformable Mirrors, Modeling and Control of Magnetic Fluid Deformable Mirrors for Adaptive Optics Systems*, Springer, Berlin, 2013, 81-97.
[48] J. P. Dery, E. F. Borra, A. M. Ritcey, *Ethylene glycol based ferrofluid for the fabrication of magnetically deformable liquid mirrors*, **Chem. Mater.,** 20 (2008) 6420-6426.
[49] Y. Mao, J. Liu, J. Ge, *Tuning the transmittance of colloidal solution by changing the orientation of Ag nanoplates in ferrofluid*, **Langmuir**, 28:36 (2012) 13112-13117.
[50] S. S. Nair, S. Rajesh, V. S. Abraham, M. R. Anantharaman, *Ferrofluid thin films as optical gaussmeters proposed for field and magnetic moment sensing*, **Bull. Mater. Sci.**, 34:2 (2011) 245-249.
[51] M. Giersig, M. Hilgendorff, *Magnetic nanoparticle superstructure*, Eur. **J. Inorg. Chem.,** (2005) 3571-3583.
[52] C. H. Chang, C. W. Tan, J. Miao, G. Barbastathis, *Self-assembled ferrofluid lithography: patterning micro and nanostructures by controlling magnetic nanoparticles*, **Nanotechnology**, 20:49 (2009) 495301.
[53] C. P. Lee, H. Y. Tsai, M. F. Lai, *Field evolution of self-assembled lattice structures of ferrofluid microdroplets on magnetic disc arrays*, **Soft Matter**, 8:45 (2012) 11537-11543.
[54] S. Sahoo, O. Sichelschmidt, O. Petracic, C. Binek, W. Kleemann, G. N. Kakazei, Y. G. Pogorelov, J. B. Sousa, S. Cardoso, P. P. Freitas, *Magnetic states of discontinuous Co80Fe20–Al2O3 multilayers*, **J. Magn. Magn. Mater.,** 240:1-3 (2002) 433-435.
[55] G. P. Zhu, N.T. Nguyen, *Rapid magnetofluidic mixing in a uniform magnetic field*, **Lab Chip,** 12:22 (2012) 4772-4780.
[56] H. Xia, J. Wang, Y. Tian, Q. D. Chen, X. B. Du, Y. L. Zhang, Y. He, H. B. Sun, *Ferrofluids for fabrication of remotely controllable micro-nanomachines by two-photon polymerization*, **Adv. Mater.**, 22:29 (2010) 3204-3207.
[57] Y. M. Liu, W. Wang, W.-C. Zheng, X.-J. Ju, R. Xie, D. Zerrouki, N. N. Deng, L.-Y. Chu, *Hydrogel-based microactuators with remote-controlled locomotion and fast Pb^{2+}-response for micromanipulation*, ACS **Appl. Mater. Interfaces,** 2 (2013) 7219-7226.
[58] A. Hatch, A. E. Kamholz, G. Holman, P. Yager, K. F. Bohringer, *A ferrofluidic magnetic micropump*, **J. Microelectromech**. **Syst.,** 10:2 (2001) 215-21.
[59] N. Pamme, *Magnetism and microfluidics*, **Lab Chip**, 6:1 (2006) 24-38.
[60] H. Hartshorne, C. J. Backhouse, W. E. Lee, *Ferrofluid-based microchip pump and valve*, **Sens. Actuators**, 99:2-3 (2004) 592-600

[61] D. Bica, L. Vekâs, M. Rasa, *Preparation and magnetic properties of concentrated magnetic fluids on alcohol and water carrier liquids,* **J. Magn. Magn. Mater.**, 252 (2002) 10-12.
[62] D. Andelman, R. E. Rosensweig, *Modulated phases: review and recent results,* **J. Phys. Chem.**, 113:12 (2009) 3785-3798.
[63] C. Liu, B. Zou, A. J. Rondinone, Z.J. Zhang, *Chemical control of superparamagnetic properties of magnesium and cobalt spinel ferrite nanoparticles through atomic level magnetic couplings,* **J. Am. Chem. Soc.**, 122:26 (2000) 6263-6267.
[64] P. Kinnari, R. V. Upadhyay, R. V. Mehta, *Magnetic properties of Fe–Zn ferrite substituted ferrofluids,* **J. Magn. Magn. Mater.**, 252 (2002) 35-38.
[65] N. Aziizi, Z. Manochehri, A. Nahayi, S. Torkashvand, *A facile one-pot synthesis of tetrasubstituted imidazoles catalyzed by eutectic mixture stabilized ferrofluid,* **J. Mol. Liq.,** 196 (2014) 153-158.
[66] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, Z. Pan, *Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids,* **Renewable Sustainable Energy Rev.**, 21 (2013) 548-561.
[67] M. Chand, S. Kumar, A. Shankar, R. Porwal, R. P. Pant, *The size induced effect on rheological properties of Co-ferrite based ferrofluid,* **J. Non-Cryst. Solids**, 361 (2013) 38-42.
[68] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, *A review on development of nanofluid preparation and characterization,* **Powder Techn.,** 196:2 (2009) 89-101.
[69] W. Yu, H. Xie, *A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications,* **J. Nanomater.,** (2012) 435873
[70] G. Mulas, F. Delogu, S. Enzo, L. Schiffini, G. Cocco, "Experimental and Theoretical Studies in Modern Mechanochemistry", in F. Delogu, G. Mulas (Eds.), Transworld Research Network, Kerala, 2010, p. 107-118.
[71] D. Maity, D. C. Agrawal, *Synthesis of iron oxide nanoparticles under oxidizing environment and their stabilization in aqueous and non-aqueous media,* **J. Magn. Magn. Mater.,** 308 (2007) 46-55.
[72] G. D. Moeser, K. A. Roach, W. H. Green, P. E. Laibinis, T. A. Hatton, *Water-based magnetic fluids as extractants for synthetic organic compound,* **Ind. Eng. Chem. Res.,** 41 (2002) 4739-4749.
[73] J. R. Correa, D. Canetti, R. Castillo, J. C. Lopez, J. Dufour, *Influence of the precipitation pH of magnetite in the oxidation process to maghemite,* **Mater. Res. Bull.,** 41 (2006) 703-713.
[74] A. Joseph ve S. Mathew, *Ferrofluids: synthetic strategies, stabilization, physicochemical features, characterization and applications,* **ChemPlusChem,** 79 (2014) 1382-1420.
[75] M. A. M. Gijs, F. Lacharme, U. Lehmann, *Microfluidic applications of magnetic particles for biological analysis and catalysis,* **Chem. Rev.,** 110 (2010) 1518-1563.
[76] C. Xu, S. Sun, *Superparamagnetic nanoparticles as targeted probes for diagnostic and therapeutic applications,* **Dalton Trans.,** 2009, 5583-5591.
[77] M. A. Willard, L. K. Kurihara, E. E. Carpenter, S. Calvin, V G. Harris, *Chemically prepared magnetic nanoparticles,* **Int. Mater. Rev.,** 49:3 (2004) 125-170.
[78] B. Y. Yu, S.-Y. Kwak, *Self-assembled mesoporous Co and Ni-ferrite spherical clusters consisting of spinel nanocrystals prepared using a template-free approach,* **Dalton Trans.** 2011, 40, 9989-9998.

[79] P. Acharya, R. Desai, V. K. Aswal, R. V. Upadhyay, *Structure of Co-Zn ferrite ferrofluid: A small angle neutron scattering analysis,* **Pramana,** 71:5 (2008) 1069-1074.
[80] V. Polshettiwar, M. N. Nadagouda, R. S. Varma, *Microwave-assisted chemistry: a rapid and sustainable route to synthesis of organics and nanomaterials,* **Aust. J. Chem.,** 62 (2009) 16-26.
[81] S. Bhattacharya, D. Mallik, S. Nayar, *Comparative study of biomimetic iron oxides synthesized using microwave induced and conventional method,* **Magn. IEEE Trans.,** 47 (2011) 1647-1652.
[82] D. Makovec, A. Kosaka, A. Znidarsic, M. Drofenik, *The synthesis of spinel-ferrite nanoparticles using precipitation in microemulsions for ferrofluid applications,* **J. Magn. Magn. Mater.,** 289 (2005) 32-35.
[83] M. Sanchez-Dominguez, M. Boutonnet, C. Solans, *A novel approach to metal and metal oxide nanoparticle synthesis: The oil-in-water microemulsion reaction method,* **J. Nanopart. Res.,** 11**:7 (**2009) 1823-1829.
[84] S. Rana, J. Philip, B. Raj, *Micelle based synthesis of cobalt ferrite nanoparticles and its characterization using fourier transform infrared transmission spectrometry and thermogravimetry,* **Mater. Chem. Phys.**, 124:1 (2010) 264-269.
[85] C. Okoli, M. Sanchez-Dominguez, M. Boutonnet, S. Jaras, C. Civera, C. Solans, G. R. Kuttuva, *Comparison and functionalization study of microemulsion-prepared magnetic iron oxide nanoparticles,* **Langmuir,** 28 (2012) 8479-8485.
[86] A. Arizaga, A. Milln, U. Schubert, F. Palacio, *Synthesis of silica-coated aqueous ferrofluids through ligand exchange with a new organosilica precursor,* **J. Mater. Sci.,** 48 (2013) 2550-2556.
[87] L. Vekas, D. Bica, O. Marinica, *Magnetic nanofluids stabilized with various chain length surfactants,* **Rom. Rep. Phys.** 58 (2006) 257-267.
[88] M. I. Shliomis, *Magnetic fluids,* **Phys.-Usp.,** 17 (1974) 153-169.
[89] A. Chaves, M. Zahn ve C. Rinaldi, *Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements,* **Phys. Fluids,** 20 (2008) 053102.
[90] I. Torres-Diaz ve C. Rinaldi, *Ferrofluid flow in a spherical cavity under an imposed uniform rotating magnetic field: Spherical spin-up flow,* **Phys. Fluids,** 24 (2012) 082002.
[91] H. Lamb, *Hydrodynamics,* Dover Publications, New York, 1945.
[92] S. Chandrasekhar, *Stochastic problems in physics and astronomy,* **Rev. Mod. Phys.,** 15 (1943) 1-89.
[93] K. Butter, P. H. H. Bomans, P. M. Frederik, G. J. Vroege ve A. P. Philipse, *Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy,* **Nat. Mater.,** 2 (2003) 88-91.
[94] J. Happel ve H. Brenner, *Low Reynolds Number Hydrodynamics, with Special Applications to Particulate Media*, Kluwer Boston, Hingham, 1983.
[95] D. J. Jeffrey ve Y. Onishi, *Calculation of the resistance and mobility functions for two unequal rigid spheres in low-Reynolds-number flow,* **J. Fluid Mech.,** 139 (1984) 261-290.
[96] G. Bal, *Transformatorlar*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2008.
[97] Anonymous. (2016) http://www.sigma-hc.co.jp/english/magnetic_fluid.html (online access on 23 May, 2016).
[98] T. Abbasov, V. Gögebakan, T. Karadağ, *Particle capture modeling for an axial magnetic filter with a bounded non-Newtonian flow field,* **Powder Technology,** 291 (2016) 223–228.

[99] L. P. Danescu, A. M. Morega, G. Telipan, M. Morega, J. B. Dumitru, V. Marinescu, *Magnetic nanofluid applications in electrical engineering,* **IEEE Trans. Magn.,** 49:11 (2013) 5487-5497

[100] L. P. Danescu, A. M. Morega, M. Morega, V. Stoica, O. M. Marinica, F. Nouras, N. Paduraru, I. Borbáth, T. Borbáth, *Prototyping a ferrofluid-cooled transformer,* **IEEE Transactions on Industry Applications,** 49:3 (2013) 1289-1298.

[101] N. C. Popa, A. Siblini, J. J. Rousseau, M. F Blanc-Mignon, B. Payet-Gervy, B. Bayard, and C. Nader, *Numerical model for ultrathin electrical coils with magnetic fluid core,* **Int. J. of App. Elect. and Mech.** 28:3 (2008) 371-378.

[102] V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj, A. Nunes, E*xperimental study of magnetic colloidal fluids behavior in power transformers,* **J. Magn. Magn. Mater.**, 513 (2000) 215-216.

[103] A. M. Morega, Mihaela Morega, J. B. Dumitru, *Magnetic field – flow interactions in a miniatureelectric power transformer with magnetic nanofluid core and solenoid type coils,* **Rev. Roum.Sci. Techn. - Électrotechn. et Énerg.,** 58:1 (2013) 25–344.

[104] T. H. Tsai, P. H. Chen, D.S. Lee ve C.T. Yang, *Investigation of electrical and magnetic properties of ferro-nanofluid on transformers,* **Nanoscale Res Lett.**, 6:1 (2011) 264.

[105] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, Manyetik sıvı çekirdekli mikrotransformatör tasarımı, URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi, Ankara/Türkiye, 2016 (accepted paper).

[106] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The design and analysis of hybrid transformers with magnetic fluid core, IV. International Scientific Conference of Young Researchers, p. 18-19, Baku/Azerbaijan, 2016.

[107] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The design of hybrid transformer with magnetic fluid core, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences, Konya/Türkiye, 2016 (accepted paper).

[108] I. Anton, I. de Sabata, L. Vékás, *Application orientated researches on magnetic fluids,* **Journal of Magnetism and Magnetic Materials,** 85:1-3 (1990) 219-226.

7. EKLER

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Veysel Gögebakan

Doğum Yeri ve Tarihi: Nizip/1986

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

E-Posta: veysel.gogebakan@inonu.edu.tr

Lisans: Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya

YAYIN LİSTESİ

[1] H. Kayan, S.E. Hamamcı, V. Gögebakan, Durum Gecikmeli Sistemler için Basit Kontrolör Tasarımı, TOK 2014 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, s. 791-795, Kocaeli/Türkiye, 2014.

[2] S.E. Hamamcı, M. Köksal, V. Gögebakan, İ. Işık, Bozucu Model Yöntemi ile Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemlerin Kontrolü, TOK 2014 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, s. 811-816, Kocaeli/Türkiye, 2014.

[3] S.E. Hamamcı, V. Gögebakan, İ. Işık, Kaos Türetim Yöntemi ile Yeni Bir Kaotik Sistem, IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, pp. 2492-2495, Malatya/Türkiye, 2015.

[4] T. Karadağ, V. Gögebakan, T. Abbasov, Instant and Continuous Measurements of High Frequency Electromagnetic Fields, The 11th International Conference on Technical And Physical Problems of Electrical Engineering, pp. 368-370, Bucharest/Romania, 2015.

[5] T. Karadağ, V. Gögebakan, T. Abbasov, Discussion and Evaluation on the Environmental Effects of Periodically Measured High-Frequency Electromagnetic Field and Climatic Changes in 3 Year-Period, 1th International Conference on Enviromental Science and Technology, pp. 170-174, Sarajevo/Bosnia-Herzegovina, 2015.

[6] T. Abbasov, V. Gögebakan, T. Karadağ, *Particle capture modeling for an axial magnetic filter with a bounded non-Newtonian flow field*, **Powder Technology**, 291 (2016) 223–228.

[7] R. Güntürkün, H. Apaydın, Ş. Kitiş, V. Gögebakan, *The design and implementation of a vest made for visually handicapped which recognizes the obstacles and determines the direction*, **Int. Journal of Engineering Research and Applications**, 6/2 (2016) 59-62.

[8] T. Karadağ, V. Gögebakan, T. Abbasov, The Comparative Evaluation of Long Period and Continuous Electromagnetic Field Measurement Results of a University Hospital, IV. International Scientific Conference of Young Researchers, pp. 16-18, Baku/Azerbaijan, 2016.

[9] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The Design and Analysis of Hybrid Transformers with Magnetic Fluid Core, IV. International Scientific Conference of Young Researchers, pp. 18-19, Baku/Azerbaijan, 2016.

[10] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, Manyetik sıvı çekirdekli mikrotransformatör tasarımı, URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi, Ankara/Türkiye, 2016 (accepted paper).

[11] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The design and investigation of transformer with magnetic fluid core, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences, Konya/Türkiye, 2016 (accepted paper).

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

[1] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The design and analysis of hybrid transformers with magnetic fluid core, IV. International Scientific Conference of Young Researchers, pp. 18-19, Baku/Azerbaijan, 2016.
[2] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, Manyetik sıvı çekirdekli mikrotransformatör tasarımı, URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi, Ankara/Türkiye, 2016 (accepted paper).
[3] V. Gögebakan, T. Abbasov, T. Karadağ, The design and investigation of transformer with magnetic fluid core, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences, Konya/Türkiye, 2016 (accepted paper).
[4] V. Gögebakan, T. Abbasov, Patent Başvurusu**,** Başvuru No: 1464789159895, Belge No: 2016-TP101-1077.

TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN Fe_3O_4'ÜN (MAGNETITE) PARÇACIK ANALİZ SONUÇLARI

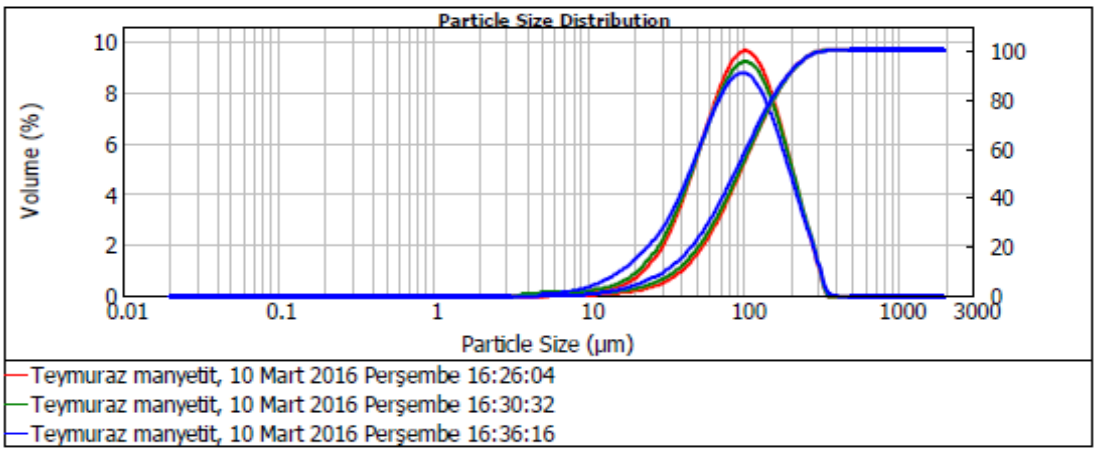
MALVERN INSTRUMENTS

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name: Teymuraz manyetit	**SOP Name:**	**Measured:** 10 Mart 2016 Perşembe 16:36:16	
Sample Source & type:	**Measured by:** madeni	**Analysed:** 10 Mart 2016 Perşembe 16:36:17	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Measurement		
Particle Name: Manyetit	**Accessory Name:** Hydro 2000MU (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Normal
Particle RI: 1.500	**Absorption:** 0	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 5.11 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 1.557 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0436 %Vol	**Span :** 1.874	**Uniformity:** 0.572	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 0.0192 m^2/g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 60.030 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 101.808 um	

d(0.1): 30.663 um **d(0.5):** 87.705 um **d(0.9):** 194.995 um



Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00
0.011	0.00
0.013	0.00
0.015	0.00
0.017	0.00
0.020	0.00
0.023	0.00
0.026	0.00
0.030	0.00
0.035	0.00
0.040	0.00
0.046	0.00
0.052	0.00
0.060	0.00
0.069	0.00
0.079	0.00
0.091	0.00
0.105	0.00

Size (µm)	Volume In %
0.105	0.00
0.120	0.00
0.138	0.00
0.158	0.00
0.182	0.00
0.209	0.00
0.240	0.00
0.275	0.00
0.316	0.00
0.363	0.00
0.417	0.00
0.479	0.00
0.550	0.00
0.631	0.00
0.724	0.00
0.832	0.00
0.955	0.00
1.096	0.00

Size (µm)	Volume In %
1.096	0.00
1.259	0.00
1.445	0.00
1.660	0.00
1.905	0.00
2.188	0.00
2.512	0.00
2.884	0.00
3.311	0.00
3.802	0.00
4.365	0.00
5.012	0.02
5.754	0.07
6.607	0.09
7.586	0.13
8.710	0.19
10.000	0.27
11.482	0.38

Size (µm)	Volume In %
11.482	0.52
13.183	0.68
15.136	0.88
17.378	1.12
19.953	1.41
22.909	1.76
26.303	2.19
30.200	2.73
34.674	3.36
39.811	4.11
45.709	4.93
52.481	5.78
60.256	6.59
69.183	7.27
79.433	7.73
91.201	7.91
104.713	7.78
120.226	

Size (µm)	Volume In %
120.226	7.34
138.038	6.61
158.489	5.69
181.970	4.64
208.930	3.58
239.883	2.50
275.423	1.50
316.228	0.22
363.078	0.01
416.869	0.00
478.630	0.00
549.541	0.00
630.957	0.00
724.436	0.00
831.764	0.00
954.993	0.00
1096.478	0.00
1258.925	0.00

Size (µm)	Volume In %
1258.925	0.00
1445.440	0.00
1659.587	0.00
1905.461	0.00
2187.762	0.00
2511.886	0.00
2884.032	0.00
3311.311	0.00
3801.894	0.00
4365.158	0.00
5011.872	0.00
5754.399	0.00
6606.934	0.00
7585.776	0.00
8709.636	0.00
10000.000	

Operator notes: