



**ÖZEL ÇEKİRDEKLİ BİR TRANSFORMATÖR TASARIMI VE
UYGULAMASI**

Sude HATEM

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sude HATEM

12.09.2022

ÖZEL ÇEKİRDEKLİ BİR TRANSFORMATÖR TASARIMI VE UYGULAMASI
(Doktora Tezi)

Sude HATEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek frekans uygulamalarında yeni bir yaklaşım olan manyetik akışkan nüveli transformatörün (ANT) tasarımı ve optimize edilmesi üzerinde durulmuştur. Akışkan nüveli transformatörler düşük iletkenlikleri, yağ-bazlı manyetik akışkanlıkları ve süper paramanyetizma özellikleriyle, geleneksel transformatörlerde karşılaştığımız girdap akımları ve nüve kayıplarına bir çözüm olabilmekteler. Bu çalışmada kullanılan manyetik sıvı, 70µm çapında ferromanyetik tanelerden ve yalıtkan baz olarak motor yağından oluşmaktadır. Sistem esas olarak doğrusal bir akışkan nüveden ve birincil ve ikincil sargılardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda ferromanyetik tanelerin yağın içinde karmaşık bir model sergiledikleri ve ikincil sargıda tanımlanmış bir yüksek frekans çıkışı ürettiği kanıtlanmıştır. Sistemin çalışma durumu akışkan çekirdeğin manyetizasyonuna bağlıdır. Testlerden elde edilen sonuçlar, uygulamada üretilen güç miktarı, sisteme uygulanan gerilimin frekasına, manyetik tanelerin kütesine ve çıkış yüküne bağlı olduğunu kanıtlamıştır. Manyetik tanelerin kütle değeri $m=3.5$ g'dan başlatılıp bu değeri arttırarak, sistemin çıkış gerilimi ve çıkış gücü açık devre durumunun yanısıra farkı değişken yükler için elde edilmiştir. Akışkan çekirdeğin farklı koşullar için manyetizasyon durumunu detaylıca gözlemleyebilmek adına benzetim çalışması COMSOL Multi-Physics 5.6 paket programı kullanılmıştır. Uygulamalı çalışmalarda en etkin çalışma frekans aralığı 9-13 (MHz) ve elde edilen en yüksek güç miktarı 423,36 mW olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 90517
Anahtar Kelimeler : Nüve, yüksek frekans, manyetik akışkan, MHz, güç, trafo
Sayfa Adedi : 142
Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SPECIAL CORED TRANSFORMER

(Ph. D. Thesis)

Sude HATEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2022

ABSTRACT

In this thesis, the design and optimization of magnetic fluid core transformer (ANT), which is a new approach in high frequency applications, is emphasized. Fluid core transformers, with their low conductivity, oil-based magnetic fluidity and super paramagnetism, can be a solution to the eddy currents and core losses we encounter in conventional transformers. The magnetic fluid used in this study consists of ferromagnetic particles with a diameter of $70\mu\text{m}$ and motor oil as an insulating base. The system essentially consists of a linear fluid core and primary and secondary windings. It has been proven in experimental studies that ferromagnetic particles exhibit a complex pattern in the oil and produce a defined high frequency output in the secondary winding. The operating state of the system depends on the magnetization of the fluid core. The results obtained from the tests proved that the amount of power produced in practice depends on the frequency of the voltage applied to the system, the mass of the magnetic particles and the output load. Starting from $m=3.5\text{ g}$ and up to high mass values, the output voltage and output power of the system have been obtained for the open circuit condition as well as for differential loads. In order to observe the magnetization state of the fluid core for different conditions in detail, the simulation study COMSOL Multi-physics 5.6 package program was used. In applied studies, the most effective operating frequency range was determined as 9-13 (MHz) and the highest amount of power obtained was determined as 423.36 mW.

Science Code : 90517

Key Words : Core, high frequency, magnetic fluid, MHz, power, transformer

Page Number : 142

Supervisor : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Öncelikle, Doktora eğitimim boyunca ve gerek benzetim çalışmaları, gerek ise deneysel çalışmalar sırasında bana verdiği değerli destek ve yönlendirmelerinden dolayı sevgili hocam Prof. Dr. Erol KURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu güne kadar beni destekleyen ve her türlü maddi-manevi desteklerini benden esirgemeyen ve bu yolda beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Muhammed'e ve aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Bu çalışmayı canım oğlum Aren'e armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	xv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xxi
RESİMLERİN LİSTESİ	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. MANYETİK ÇEKİRDEK MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANSLI TRANSFORMATÖR TASARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	11
2.1. Manyetik Özelliklere Giriş.....	11
2.2. Manyetik Malzemelerin Özellikleri	11
2.3. Manyetik Dipoller	14
2.5. Manyetik Etki Alanları.....	21
2.5. Manyetik Duyarlılık ve Geçirgenlik	23
2.6. Doğrusal, İzotropik ve Homojen Manyetik Malzemeler	25
2.7. Manyetik Malzemeler	25
2.7.1. Ferromanyetik malzemeler.....	25
2.7.2. Antiferromanyetik malzemeler	27
2.7.3. Ferrimanyetik malzemeler	28
2.7.4. Diyamanyetik malzemeler	28
2.7.5. Paramanyetik malzemeler	29
2.8. Histerezis.....	29

	Sayfa
2.9. Nüve Geometrileri.....	32
2.10. Ferromanyetik Nüve Malzemeler	32
2.10.1. Demir nüveler.....	33
2.10.2. Ferrosilikon nüveler	33
2.10.3. Amorf alaşım nüveler.....	34
2.10.4. Nikel-demir ve kobalt-demir nüveler	34
2.10.5. Ferrit nüveler.....	35
2.10.6. Toz nüveler.....	37
2.10.7. Nanokristal nüveler	38
2.11. Histerezis Kaybı	39
2.12. Girdap Akımı Nüve Kaybı	41
2.13. Nüve Doygunluğu	43
2.13.1. Sinüzoidal gerilim için nüve doygunluğu	45
2.14. Deri Etkisi	46
2.15. Deri Kalınlığı	47
3. FERROMANYETİK AKIŞKANLAR VE MANYETİZASYON	51
3.1. Ferromanyetik Akışkanlar.....	51
3.1.1. Yapısal kompozisyon ve düzenlenim.....	51
3.1.2. Ferroakışkanlar ve nanobilim.....	53
3.2. Zamanla Değişen Manyetik Alanda Ferroakışkan	53
3.3. Ferroakışkanda Moment Üretimi	53
3.4. Manyetoviskoz Etki - Manyetorotasyonel Viskozite	54
3.5. Yığılma, Tane Etkileşimi ve Viskoelastik Etkiler.....	56
3.6. Manyetik Tane Çapının Belirlenmesi	56
3.7. Ferromanyetik Akışkanların Mıknatıslanması	57
3.7.1. Manyetizasyon teorisi	57

Sayfa

3.7.2. Manyetik gevşeme teorisi	60
3.7.3. Kolloidal manyetik Fe_3O_4 nanotaneli nanoakışkanın sentezi ve karakterizasyonu	63
3.7.4. Yağ bazlı Fe_3O_4 nanoakışkanların imalatı	65
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE AKIŞKAN ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRÜN BENZETİM ÇALIŞMASI.....	69
4.1. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi	69
4.2. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemiyle Yüksek Frekanslı Transformatörün Tasarlanması	71
4.3. Sayısal Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar	72
4.3.1. AC/DC modülü	72
4.4. Manyetik Alanlar Arayüzünün Ayarlaması	73
4.5. Elektrik Devresi Arayüzü Ayarlaması	75
4.6. Süspansiyonun İki Fazlı Akış Modellemesi.....	77
4.6.1. Model tanımı	77
4.6.2. Matematiksel model	78
4.7. Manyetik Akışkan Nüveli Transformatörün Sonlu Eleman Modellenmesi.....	82
4.7.1. ANT geometrisi ve parametrelerin ayarlanması	83
4.7.2. ANT için ağ oluşturulması	85
4.7.3. ANT birinci aşama çalışması	87
4.7.4. ANT ikinci aşama çalışması.....	95
5. FERROMANYETİK AKIŞKAN ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRÜN DENEYSEL ÇALIŞMALARI.....	103
5.1. Sistemin Genel Kurulumu.....	103
5.2. Deneysel Çalışma Sonuçları	104
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	133
KAYNAKLAR	135

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ	141
----------------	-----

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Günümüzde yaygın olarak kullanılan manyetik malzemelerin frekans aralıkları.....	3
Çizelge 2.1. $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ferromanyetik malzemelerin öz dirençleri	12
Çizelge 2.2. Ferromanyetik malzemelerin bağıl geçirgenliği	26
Çizelge 2.3. Ferromanyetik malzemelerin doyma akı yoğunluğu	27
Çizelge 2.4. Ferromanyetik malzemelerin frekans aralığı	34
Çizelge 2.5. Bakır için $T = 20^{\circ}\text{C}$ 'de deri kalınlığı.....	49
Çizelge 4.1. Bakır sargıların manyetik ve elektrik özellikleri	84
Çizelge 4.2. Benzetim modelinde kullanılan motor yağı bazlı manyetik akışkanın fiziksel parametreleri	84
Çizelge 4.3. Çeşitli tanelerin kütle oranları için manyetik taneler ve motor yağı karışımı yoğunluğu.....	87
Çizelge 4.4. ANT parametreleri ve açıklamaları	95
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	103
Çizelge 5.2. $R = 0,15\ \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü	109
Çizelge 5.3. $R = 0,18\ \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü	109
Çizelge 5.4. $R = 0,2\ \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü	110
Çizelge 5.5. $R = 0,22\ \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü	110
Çizelge 5.6. $R = 0,3\ \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü	110
Çizelge 5.7. Farklı frekanslarda $R = 0,4\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	115
Çizelge 5.8. Farklı frekanslarda $R = 1\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	116
Çizelge 5.9. Farklı frekanslarda $R = 1.87\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	117
Çizelge 5.10. Farklı frekanslarda $R = 3.2\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	118
Çizelge 5.11. Farklı frekanslarda $R = 4\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	119
Çizelge 5.12. Farklı frekanslarda $R = 5\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	120
Çizelge 5.13. Farklı frekanslarda $R = 6,4\ \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü	121

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.14. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri	124
Çizelge 5.15. $R = 3,2 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri	125
Çizelge 5.16. $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri	126
Çizelge 5.17. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	128
Çizelge 5.18. $R = 3,2 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	129
Çizelge 5.19. $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	130

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Literatürde bulunan yumuşak nüve malzemelerinin frekans-güç karakteristikleri.....	3
Şekil 1.2. Yaygın kullanılan nüve geometrileri	5
Şekil 2.1. Çekirdeğin etrafında dönen ve kendi eksen etrafında dönen elektron: a) Çekirdeğin yörüngesinde dönen ve yörüngedeki m_0 manyetik momenti sergileyen elektron, b) Kendi eksen etrafında dönen ve spin manyetik momenti m_s sergileyen elektron, c) manyetik dipol.....	16
Şekil 2.2. Uzun bir silindirik manyetik alana sahip bir çubukta oluşan manyetik alan..	21
Şekil 2.3. Ferromanyetik malzemenin aşamalı manyetizasyonu: a) $H=0$ ve ferromanyetik alanlar rastgele yönlendirilmiş, b) $H > 0$ ve manyetik alana paralel alanlar genişlerken, c) $B = B_s$ 'de, tüm alanlar harici alanla hizalı	22
Şekil 2.4. Uygulanan bir manyetik alan altında spin manyetik momentlerinin yapıları: a) Ferromanyetikte, b) Antiferromanyetikte, c) Ferrimanyetikte.....	28
Şekil 2.5. Nüvenin $B - H$ histerezi	30
Şekil 2.6. Sert ve yumuşak ferromanyetik malzemeler için histerezis döngüleri: a) Sert manyetik malzeme için histerezis döngüsü, b) Yumuşak manyetik malzeme için histerezis döngüsü.	31
Şekil 2.7. Artan salınımlar için ferromanyetik malzemenin ardışık histerezis döngülerinden geçirilerek manyetizasyonu.....	32
Şekil 2.8. Histerezis güç kaybı: a) H sıfırdan maksimum değerine yükseldiğinde nüve manyetizasyonu sırasında nüve tarafından emilen enerji, b) Nüve demanyetizasyonu sırasında, H maksimum değerinden sıfıra düştüğünde nüveden geri dönen enerji	39
Şekil 2.9. Manyetik çekirdeğin kesit görünümü	42
Şekil 2.10. Manyetik alan yoğunluğu ve sargı akımının fonksiyonları olarak manyetik akı yoğunluğu: (a) Manyetik alan yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak manyetik akı yoğunluğu, (b) sabit sayıda dönüşte sargı akımının bir fonksiyonu olarak manyetik akı yoğunluğu.	44
Şekil 2.11. Kare dalga formları ve sinüzoidal sargı gerilimi için karşılık gelen akı bağlantısı. a) Sargı geriliminin dalga formu v_L . b) akı bağlantısının dalga formu λ	45
Şekil 2.12. Bakır için T sıcaklığının bir fonksiyonu olarak deri kalınlığı.....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 2.13. $T = 20^{\circ}\text{C}$ 'de bakır için f frekansının bir fonksiyonu olarak deri kalınlığı δw	49
Şekil 3.1. Ferroakışkanın 10 nm mertebesinde çaplara sahip manyetik nüvelerin (büyük küreler, manyetik olarak geçirgen taneler) süspansiyonu	55
Şekil 3.2. Dönme viskozitesinin etkisi: a) Akışın alan yönü ve girdaplılığının eşdoğrusaldır, b) girdap ve alan yönü diktir.....	56
Şekil 3.3. Bir kürenin hacmi içindeki tüm dipoller, bir cismin net manyetizasyonuna katkıda bulunur.....	58
Şekil 3.4. Teorik Langevin denkleminden düşük ve yüksek alan asimptotları (kesik çizgiler).....	60
Şekil 3.5. Manyetik dipol momenti m olan bir manyetik tane için Neel gevşemesine kıyasla Brownian gevşemesi, a) manyetik alan uygulanmamış, b) θ ile m açısında uygulanan manyetik alanın etkisi altında gevşeme ve (c) gevşeme tamamlandıktan sonra	62
Şekil 3.6. Nano boyutta Fe_3O_4	63
Şekil 3.7. Fe_3O_4 'ün kristal yapısı.....	64
Şekil 3.8. Fe_3O_4 nanotanelerinin XRD modeli	65
Şekil 3.9. Çöktürme işleminin akış diyagramı.....	66
Şekil 3.10. Yüzey aktif madde ve tane arasındaki ilişkiyi gösteren adsorpsiyon modeli: a) Su bazlı Fe_3O_4 nanoakışkan modeli, b) Yağ bazlı Fe_3O_4 nanoakışkan modeli.....	66
Şekil 4.1. u (düz mavi çizgi) işlevine, doğrusal temel işlevlerin doğrusal bir birleşimi olan u_h (kesikli kırmızı çizgi) ile yaklaşılr (ψ düz siyah çizgilerle temsil edilir). Katsayılar u_0 ile u_7 arasında gösterilir.....	70
Şekil 4.2. Benzetim programlarının akış algoritması.....	82
Şekil 4.3. ANT'nin geometri görüntüsü	83
Şekil 4.4. ANT için oluşturulan ağ	85
Şekil 4.5. ANT yapısı için oluşturulan ağ modelinin farklı yönlerden alınan görüntüleri: a) x - y - z açısından, b) x - y , c) x - z , d) yakınlaştırılmış sargı ve nüve, e) yakınlaştırılmış ağ görüntüsü.....	86
Şekil 4.6. Manyetik akı yoğunluk spektrumu ve manyetik çizgileri: a) Birincil sargı uyartılmış b) İkincil sargı uyartılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyartılmış ..	88

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. İkincil sargı uyartılmışken manyetik akı yoğunluk spektrumu ve manyetik akı çizgileri: a) x - y - z düzlem koordinatları b) x - z düzlem koordinatları, c) x - y düzlem koordinatları.....	89
Şekil 4.8. Tasarlanan ANT'de birincil sargı uyartılmışken, oluşan manyetik alan şiddeti: a) x - y - z düzlem koordinatları, b) y - z düzlem koordinatları, c) x - z düzlem koordinatları, d) x - y düzlem koordinatları	90
Şekil 4.9. Tasarlanan ANT'de birincil sargı uyartılmışken, oluşan manyetizasyon normu (A/m): a) x - y - z düzlem koordinatları, b) x - z düzlem koordinatları, c) x - y düzlem koordinatları.....	91
Şekil 4.10. Modelin hız alanı modellerini gösteren akım tüpleri: a) Birincil sargı uyartılmış, b) İkincil sargı uyartılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyartılmış	92
Şekil 4.11. Modelin farklı güç şemaları için basınç kalıpları, a) Birincil sargı uyartılmış b) İkincil sargı uyartılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyartılmış	93
Şekil 4.12. Manyetik akı yoğunluğu spektrumu ve manyetik akı: a) $t=0,14$ ms, b) $t=0,15$ ms, c) $t=0,16$ ms	94
Şekil 4.13. ANT geometrisine ait x , y ve z yönlerinde manyetik akı yoğunluğu bileşeni	95
Şekil 4.14. Farklı tane oranlarda manyetik akı yoğunluk spektrumu	96
Şekil 4.15. Taşıyıcı içinde dağılmış fazın çeşitli konsantrasyon oranları için değerlendirilen manyetizasyon eğrisi.....	99
Şekil 4.16. Dağınık faz kütle oranına göre ikincil sargı gerilimi dalga formları bir arada.....	99
Şekil 4.17. Manyetik tanelerin kütle oranı artışıyla birlikte çıkış gerilimi ve çıkış gücü	100
Şekil 4.18. Farklı yükler için frekansa göre ANT çıkış gerilimi	101
Şekil 4.19. Farklı yükler için frekansa göre ANT çıkış gücü	101
Şekil 5.1. $R = 0,15 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri	111
Şekil 5.2. $R = 0,18 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri	111
Şekil 5.3. $R = 0,2 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri	112

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. $R = 0,22 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri	112
Şekil 5.5. $R = 0,3 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri	113
Şekil 5.6. Farklı yüklerde frekans değişimiyle ANT çıkış gerilimi	122
Şekil 5.7. Farklı yüklerde frekans değişimiyle ANT çıkış gücü	122
Şekil 5.8. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri.....	125
Şekil 5.9. $R = 3,2 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri.....	126
Şekil 5.10. $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri	127
Şekil 5.11. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	129
Şekil 5.12. $R = 3,2 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	130
Şekil 5.13. $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü	131

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Farklı manyetik tane kütle farkasiyonuna sahip akışkan nüveli transformatör örnekleri	104
Resim 5.2. Örnek nüvelerde kullanılan manyetik tanelerin yapısı	104
Resim 5.3. Ferromanyetik tanelerden ve motor yağından yapılmış farklı kütle oranlarına sahip örnekler için açık devre testleri a) $\varphi d = 0,2 - 0,3$, b) $\varphi d = 0,3 - 0,4$, c) $\varphi d = 0,4 - 0,6$, d) $\varphi d = 0,6 - 0,8$, e) $\varphi d \geq 0,8$...	105
Resim 5.4. Manyetik tanelerin kütle yoğunluklarını ayarlama işleminde kullanılan WF hassas tartı terazi	106
Resim 5.5. Dağınık faz kütle oranına göre ikincil sargı geriliminin dalga formları: a) Şeffat pembe örnek $\varphi d = 0,2 - 0,3$, b) Kırmızı örnek $\varphi d = 0,3 - 0,4$, c) Mat pembe örnek $\varphi d = 0,4 - 0,6$, d) Sarı örnek $\varphi d = 0,6 - 0,7$, e) Sarı örnek $\varphi d \geq 0,8$	107
Resim 5.6. Farklı dirençlerin çıkışını görselleştirmek için direnç tablosuna bağlı ANT örneği	114
Resim 5.7. ANT için çıkış gerilimleri dalga formları a) $R = 0,2 \Omega$, b) $R = 1,87 \Omega$, c) $R = 1 \Omega$, d) $R = 0,4 \Omega$	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_s	Doygunluk Manyetik akı yoğunluğu
f	Frekans
H	Manyetik alan
H_{ext}	Harici Manyetik alan
I_{surf}	Yüzey akım yoğunluğu
J	Akım yoğunluğu
L_l	Kaçak endüktans
M	Manyetizasyon
M_s	Doygunluk manyetizasyon
m_o	Yörünge momenti
m_s	Spin manyetik momenti
N_A	Atomdaki manyetik momentlerin sayısı
n_D	Manyetik dipol sayısı
P	Basınç
T_c	Curie sıcaklık
V	Manyetik alan hızı
V_m	Skaler manyetik potansiyel
χ_m	Manyetik duyarlılık
ρ_s	Katı tane yoğunluğu
$\mathcal{R}$	Relüktansın
Φ	Manyetik akı
ρ_f	Sıvı yoğunluğu
ρ_c	Elektrik direnci
μ_0	Vakum geçirgenliği
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik

Simgeler**Açıklamalar**

T_q	Dönme kuvveti
φ_d	Dağınık faz kütle oranı
δ_w	Deri kalınlığı
μ	Manyetik geçirgenlik
ε	Elektrik geçirgenlik
ε_r	Bağıl elektrik geçirgenlik

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ANT	Akışkan nüveli transformatör
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
EMG	Elektromanyetik girişim
EMK	Elektromanyetik kuvvet
KDD	Kısmi diferansiyel denklemler
MA	Manyetik alan
MEMS	Mikroelektromekanik sistemler
MPT	Moly-permalloy tozlar
NEMS	Nanoelektromekanik sistemler
PDMS	Polidimetilsiloksan
SEA	Sonlu elemanlar analiz yöntemi
XRD	X Işını kristalografisi (X-Ray Diffraction)

1. GİRİŞ

Tesislerde üretilen elektrik enerjisinin tüketicilere iletimi sırasında iletim ve dağıtım gerilim seviyeleri, üretim tesisleri ve tüketiciler tarafından dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Hem yüksek hem de düşük gerilimlerde daha düşük maliyetli uzun mesafeli iletim hattı gerekebilir, bu nedenle iletim sisteminden dağıtım sistemine geçiş sağlanırken gerilim geliklerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, elektrik iletim sistemlerinde daha güçlü transformatörler kullanılırken, elektrik dağıtım sistemlerinde çok sayıda az güçlü transformatör kullanmak yaygın bir davranıştır [1].

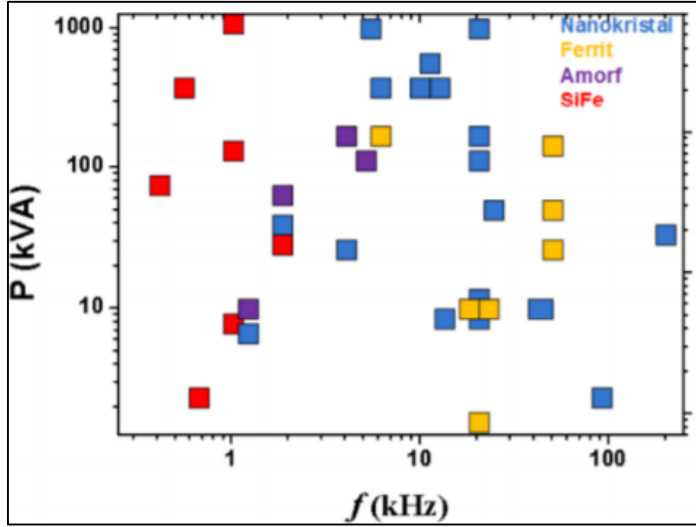
Bakım ve arıza sırasında yaşanan kesintileri dışında sürekli hizmet veren en verimli dağıtım transformatörleri, ilettikleri elektriğin yaklaşık %3'ü kadar bir kayıpla çalışmaktadır. Bu sebeple, tesisler ve ilgili endüstriyel iştirakler, işletme maliyetlerini ve enerji kayıplarını azaltmak için devamlı olarak yeni yöntemler ve teknolojiler araştırmaktadır. Örneğin; transformatörlerin icadından bu güne değin, nüve yapımında uygun malzemelerin seçimi, transformatörlerin performanslarını ciddi derecede etkilediği için dikkate alınagelmıştır. Doğru nüve malzemenin seçimi yüksek akı yoğunluğunda (B) kayıpları azaltırken, transformatörün istenen frekanslarda çalışmasını sağlayabilmektedir. Yüksek güç yoğunluğu, hafifliği ve yüksek verimli eviricilere yönelik artan eğilimle beraber manyetik bileşenler, yukarıda belirtilen bütün özelliklere ulaşmada önemli bir röle sahiptir. Bilhassa; yüksek frekanslı anahtarlama bileşenlerinin ortaya çıkmasıyla, transformatörler ve bobinler gibi elektriksel elemanlar daha küçük boyutlarla yüksek çalışma frekanslarında etkin çalışabilmektedir. Ancak bu küçük boyutlar, ek olarak kayıpları beraberinde getirmiştir [2]. Bu nedenle yüksek çalışma frekanslı cihazlarda asgari parazitik çıktı ve azami verimlilik elde etmek için, manyetik elemanların seçimi, son derece büyük önemdedir. Doğru nüve seçimi, öncelikle transformatörü nüve kaybı nedenli aşırı ısınmadan da koruyacaktır.

Hızla gelişen elektrik-elektronik teknolojileri incelendiğinde, verimliliği yüksek, kompakt sistemlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu açıdan transformatörler endüstride kullanılan kritik sistem elemanları arasında yer almaktadır. Buna göre yeni tip transformatörlerin geliştirilmesi ve bunların işletme ve ekonomik açıdan optimum tasarımı günümüzün en önemli sorunlarından biri olmaya devam etmektedir.

Yüksek kaliteli ve yüksek verime sahip sistemlerin tasarımlarının geliştirilmesi konusunda çok disiplinli birçok çalışma bulunmaktadır [3]. Özellikle manyetik çekirdeğin malzemesinin yüksek kaliteye ve yüksek manyetizasyon değerlerine sahip olması arzu edilir. Bu kapsamda metal nüveden kaynaklanan elektrik kayıplarının azaltılmasının yanı sıra malzeme tasarımında iyileştirmeler yapmak da mümkündür. Transformatörlerin manyetik nüvelerin daha yüksek manyetizasyona sahip olması bu sistemler için çok önemli bir avantajdır. Bu açıdan manyetik akışkanların elektromanyetik sistemlerde kullanımı ve uygulaması son yıllarda önem kazanmış ve yaygınlaşmıştır [4]. Manyetik akışkanlar savunma sanayi, tıp, biyoloji, güç sistemleri gibi birçok endüstriyel alanda önemli bir yere sahiptir [5 - 9]. Manyetik sıvılar, manyetik olmayan çeşitli taşıyıcı bazlar (izo-parafin, yağ vb.) içeren nano veya mikron boyutlu ferromanyetik tanelerden oluşan kolloid bir yapıya sahiptir. Katı manyetik malzemeler gibi manyetizasyon özelliğinin yanı sıra, sıvı formundan dolayı akışkan özelliği sergilemesi de bu yapıların büyük bir avantajdır. Ferromanyetik sıvıların transformatörlerde nüve olarak veya gövdenin belirli bir bölümünde kullanılması elektriksel kayıpların daha az olması, transformatör gövdesinin daha hafif olması, verimde atırış ve uygulama kolaylığı sağlanması önemli avantajlardan bazılarıdır.

Transförmörlerin optimal tasarımı sırasında özdirenç, manyetik doygunluk ve elektriksel geçirgenlik gibi farklı materyal özelliklerinin dengede tutulması mühimdir [10]. Şekil 1.1’de halihazırda literatürde ve endüstride kullanılan farklı nüve materyallerinden yapılmış olan transformatörler için frekans-güç grafiği gösterilmektedir. Bu grafiğe göre nanokristal malzemelerden üretilen nüveler frekans ve güç karakteristiği açısından düzgün bir dağılım sergilerken, SiFe malzemeli nüveler düşük frekanslarda, amorf nüveler ise orta frekanslarda ve düşük güçlerde tercih edilmektedir. Ferrit yapıları ise güç bakımından amorf larla aynı statüdeyken, daha yüksek frekanslara çıkabilmektedir. Nanokristal uygulamaları ile 100 kHz frekanslarda çalışan transformatörlere rastlanılabilmektedir.

Çizelge 1.1., günümüzde yaygın olarak kullanılan manyetik malzemelerin frekans aralıklarını göstermektedir.



Şekil 1.1. Literatürde bulunan yumuşak nüve malzemelerinin frekans-güç karakteristikleri [11].

Çizelge 1.1. Günümüzde yaygın olarak kullanılan manyetik malzemelerin frekans aralıkları

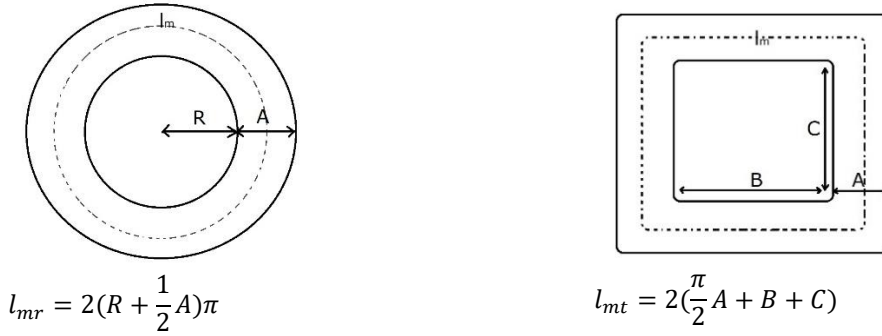
Malzeme	Çalışma frekansı
Demir	50-1000 Hz
Silikon Çelik	50-1000 Hz
Nikel Demir Alaşımı	50-1000 Hz
Amorf Alaşım	1-250 kHz
Demir tozu	100 kHz-100 MHz
Ferrit-MnZn	10 kHz-2 MHz
Ferrit-NiZn	200 kHz-100 MHz

Manyetik nüve yapılarından hangisinin kullanılacağı, uygulamaya ve sistemin topolojisine bağlı olarak değişim gösterir. Çelik malzemeler için %4-5 silikon ilavesi ile girdap akımlarını ve histerezis kayıplarını etkili bir şekilde azaltmak ve böylece transformatörün performansı ile verimliliğini artırmak bir dereceye kadar mümkün olmaktadır [12,13]. Demir alaşımları, amorf malzemeler, yumuşak manyetik ferritler ve demir tozları, piyasada mevcut olan transformatörlerin nüve malzemelerinin ana gruplarıdır.

Bu sınıflar kısaca incelenirse, demir alaşımları kategorisinde en popüler örneğin silikon çelikli malzeme (SiFe) olduğu görülür. Bu malzeme düşük frekanslarda yüksek akı yoğunluğuna sahiptir. Ancak; bu malzeme için yüksek frekanslarda (kHz ve MHz) girdap akımı kayıpları yüksektir. Yüksek frekanslı transformatörde (Örn. Düzlemsel transformatör), yapının düşük iletkenlik ile yüksek geçirgenliğe sahip olması istenir. İlaveten, yapı yüksek frekanslarda girdap akım kayıplarını azaltmak için yüksek dirençli

elektriksel özelliklere sahip olmalıdır. Bu durum, silikon çelik malzemelerin, yüksek frekanslı cihazların çekirdeğinde kullanımının uygun olmadığını gösterir ve Şekil 1.1'den anlaşıldığı üzere düşük frekanslı (Hz) uygulamalar için yaygınlık arz eder [14]. Amorf yapılar 25 yılı aşkındır transformatörlerde kullanılmaktadır (Şekil 1.1'de mor renkte gösterilmiştir). Bu malzemeler yüksek elektriksel direnç, iyi manyetik geçirgenlik ve düşük nüve kayıplarına sahiptir, dolayısıyla da orta yüksek frekans (kHz) uygulamalarda tercih edilmektedir. 2714A ise amorf sınıfında en çok kullanılan malzemedir. Bu malzeme düşük kütlesi sebebiyle bilhassa havacılık uygulamalarında vazgeçilmezdir [10]. Amorf malzemeler SiFe'ye kıyasla daha düşük manyetik doyum noktasına sahiptir. Bu durum, büyük boyutlu transformatörlerin maliyetinin artmasına neden olur. Ancak bu sorun, bakım maliyetleri düşük olduğu takdirde enerji tasarrufu sağlayacağından, geçerli bir çözüm olarak düşünülebilir. Nüve malzemelerinin çalışılmasında küresel enerji tasarrufu ve çevresel kaygılar önemli etkiye sahiptir [15-16]. Amorf nüvede, transformatörün yüksüz durum kayıpları, standart tane-yönelimli (grain-oriented) silikon çelik transformatörlere kıyasla % 60-70 daha azdır [17]. Sertleştirilmiş $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ amorf alaşım nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu (B), nüve kaybı ve farklı çalışma sıcaklığı altında manyetik geçirgenlik ve dinamik manyetik özellikler sistematik olarak [18]'de ve benzer manyetik nüve malzemelerinin özellikleri [19]'da verilmiştir. Nano ölçekli demir tozu yapılar toz nüve malzemelerinin bir örneği olup yüksek frekanslarda kullanılmaktadır [10].

Transformatörlerin çalışmasını etkileyen bir diğer önemli özellik geometridir. Genel olarak; manyetik bileşenler güç elektroniği cihazlarının verimliliği ve güç yoğunluğu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Manyetik elemanlarda nüve kayıpları ve bakır kayıpları olarak iki çeşit kayıp oluşabilmektedir. DC filtre bobinleri gibi bazı elemanlar için nüve kayıpları ihmal edilebilir düzeydeyken, transformatörler ve AC sargılar için nüve kayıpları, toplam kayıpların önemli bir bölümünü temsil eder ve dolayısıyla bu kayıplar dikkate alınmalıdır [20]. Nüve kayıplarının uzaysal dağılımı akı yoğunluğu alanının doğrusal fonksiyonu olarak çekirdeğin şekil ve boyutuna bakılmaksızın homojen haldedir ve bu nedenle toplam nüve kaybı üzerindeki geometrik etkiler ihmal edilebilir. Sözelimi; Şekil 1.2'de gösterildiği gibi toroidal ve dikdörtgen nüvelerin aynı uyarıtıma, aynı kesit alanına ($A_t = A_r = A$) ve aynı akı yoluna sahip oldukları için (I_m) toplam kayıplarının aynı olacağı varsayılmaktadır. Ancak, bu varsayım çekirdeğin şekline ve yapısına bakıldığında yanlıştır.



Şekil 1.2. Yaygın kullanılan nüve geometrileri [21]

Literatürde nüve geometrisinin çeşitli nüveler üzerindeki etkisini analizleyen farklı çalışmalar bulunmaktadır [21-24]. Sözelimi; [22]'de yapılan ölçümler nüve geometrisinin yüksüz kayıplar üzerindeki etkisini (16 - 20 MVA) güç aralığında endüstriyel dağıtım transformatörleri için sayısal olarak incelemiştir. Yine [23], farklı geometri yapılarının, toroidal nüvelerde oluşturduğu toplam kayıpları üzerindeki etkisini deneysel olarak rapor etmiştir. [24]'te ise dikdörtgen ve toroidal nüveler içindeki alanları ve kayıp dağılımlarını tahmin etmek üzere kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlemeli formülasyonu ve yaklaşımları tartışılmıştır. Bir diğer çalışmada; yüksek uyartım genliklerinde harmoniklerin etkisi sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir [25]. Farklı bir çalışmada ise elektromanyetik benzetimle çeşitli geometriler üzerine analizler gerçekleştirilmiş ve doğrulukları üzerine araştırma yapılmıştır [26]. Nüve yapılarının manyetik alan dağılımı ve oluşturdukları nüve kayıpları üzerine modelleme yapılarak; ayrıntılı analizler gerçekleştirilmiştir [21]. İlaveten; sözkonusu çalışmada türetilen modellerde, herhangi bir geometriye sahip örnek nüve kaybı ölçümleri yapılarak, aynı malzemeden aynı yöntemle imal edilmiş farklı geometrideki transformatör nüveleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırmada; yüksek frekansta manyetik nüve hacminin azaltılabileceği görülmüştür. Bununla birlikte, yüksek geçirgenliğe sahip olan amorf ve demir alaşımları gibi düşük nüve kayıplı yumuşak manyetik malzemelerin kullanımı diğer malzemelere kıyasla daha uygun görülmüştür ve yüksek frekanslı transformatörlerin tasarımı için bu alaşımlarının kullanımı önerilmiştir [27-29], ancak bu çalışmalarda elektromanyetik performans karşılaştırmalarına, detaylı bir şekilde odaklanılmamıştır.

Transformatör tasarımcılarının dikkate alması gereken önemli bir diğer husus ise ekonomik faktördür. Ancak yalnızca ekonomi düşünülerek, transformatörlerdeki kayıplar azaltılamaz. Frekans uyumlu kaliteli nüve malzemesinin kullanılması oluşan akı seviyesini

önemli ölçüde etkiler. [30], üç yöntem ele alınarak; transformatörün verimliliği ve güvenli çalışma seviyesinin yükseltilmesi için metoloji ortaya konmuştur.

Girdap akımı ve histerezis kayıpları, nüve kayıplarının büyük kısmını oluşturur. Kalıcı kayıp ise bu kayıpların küçük bir oranının oluşturur [31-34]. Bu kayıpları hesaplamak için iki ana yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden biri Steinmetz formülü kullanılarak nüve kayıplarını hesaplamaktır [35,36]. Sözgelimi; [35]'te, geliştirilmiş Steinmetz formülü kullanılarak yüksek frekanslı transformatör nüveleri üzerinde analizler yapıp, farklı malzemelerin nüve kayıp özellikleri üç boyutlu bir şekilde elde edilmiştir. [37]'de, farklı uyarma koşulları altındaki kayıpların özellikleri analiz edilmiştir. Bir diğer öneri ise, nüve kayıplarının, girdap akımı kaybı ve histerezis kaybına ayrışması olan nüve kaybını tanımlayan kayıp ayırma yöntemidir [38]. Bu yöntemle yapılan bir çalışmada, DC gerilim altında çekirdeğin histerezis kayıplarının özellikleri incelenmiştir [39]. Geleneksel demir nüve kaybı hesaplama yöntemi, demir nüvede manyetik alan dağılımının homojen olduğunu varsayar, böylece transformatörlerin gerçek kayıplarını hesaplama sırasında genellikle büyük hatalar oluşur. Bilgisayar benzetimi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle nüve kayıpları hesaplanması bütün dünyada geçerli bir yöntem haline gelmiştir [40-41]. Manyetik akı yoğunluğu, demir nüvenin kayıp eğrisine göre çıkarılıp hesaplanır, ardından nüve kayıplarının elde edilmesi için bütün birim kayıpları birbirine eklenir. Bu doğrultuda, DC bayas altında nüve kaybı hesaplamada sonlu elemanlarla iyi sonuçlar elde edilmiştir [42].

Bilgisayar sektöründeki gelişmelerle beraber, çip ve anakart üstü transformatör tasarımlarında artış gözlenmiştir. Bilhassa düzlemsel transformatörler son zamanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tarz sistemlerde; maksimum verimliliğini elde etmek için bütün muhtemel ek kayıpların tasarım optimizasyonu yapılmalıdır. Yüksek güç yoğunluklu cihazlarda, bileşenlerin anahtarlama kayıplarını dikkate alarak anahtarlama frekansının seçimi yapılmalıdır [43]. Yüksek çalışma frekansı ile ortaya çıkan ek kayıplar, geleneksel tel sargılı manyetik bileşenler için çeşitli sınırlamalar oluşturur. Çalışma frekansı KHz'den MHz'e çıkarıldığında ise bu kayıplar daha da yükselir. Bu durumda, yüksek frekans kayıplar ve parazitik sınırlamaları azaltabilmek adına, düzlemsel transformatörler bir çözüm olarak görülür ve geleneksel tel sargı sistemlerinden ziyade, düzlemsel sistemler kullanılır. İlaveten, yüksek ısıl kararlılık, düşük kaçak alan, yüksek güvenilirlik ve yüksek frekans aralıkları (MHz), bu tip transformatörlerin tasarımcılar arasında popülerlik kazanma sebeplerinden birkaçıdır. Bu konuda yapılmış olan bir çalışmada yüksek frekanslı düzlemsel

transformatör uygulaması üzerine sargıların akım taşıma kapasitesini arttırmak için çalışmalar yapılmış, paralel sarımdan kaynaklanan özel problemler, tek boyutlu bir alan modeline göre ele alınarak modellenmiştir [44]. Benzer bir şekilde (10 - 500W) gücüne sahip uygulamalarda kullanılan düzlemsel manyetik yapıların özellikleri gözden geçirilmiş ve düzlemsel sistemlerin özellikleri araştırılmıştır [45]. Araştırılmış farklı manyetik nüveli birçok çip üstü transformatörlerin parazitik sığa, dirençsel kayıp ve benzer kayıplar gibi olumsuz faktörlerin ayrıntıları detaylı olarak tartışılmıştır [46-53]. Yukarıdaki faktörlerin yanı sıra, bazı araştırmalar “katı” manyetik nüveden kaynaklanan nüve kaybının, transformatörlerin performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir [54-56].

Transformatörlerin kayıplarını düşürmek için bir çözüm son yıllarda dünya çapında büyük önem kazanan; ancak literatürde henüz bu konuyla ilgili çok fazla kaynağa rastlanamayan elektromanyetik sistemlerin ve transformatörlerin çekirdeğinde manyetik sıvı maddelerin kullanımıdır. Prototipleri oluşturulmuş ferromanyetik akışkan nüveli transformatörlerin literatürde sunulmuş bazı çalışmalarda, ferroakışkan nüveli mikro transformatörlerin yapısı ve deneysel sonuçları ortaya konulmuştur [57, 58]. Bu çalışmalarda, önemli ölçüde daha az sargı sayısı ve daha az miktarda manyetik sıvı kullanılmıştır. Ayrıca uygulanan frekans yüksek bantta olup, kullanılan manyetik akışkan yağ bazlıdır [59].

Bu doğrultuda yapılmış olan bir çalışmada düzlemsel sistemlerin çekirdeğinde kullanılan, Fe_3O_4 yağ bazlı nanoakışkanlar, Fe_3O_4 nanotaneler, yüzey aktif madde, dizel yağı ve polidimetilsiloksan (PDMS) karışımından oluşturulmuştur [46]. Küçük boyutlu bir manyetik sıvı nüveli prototip transformatör tasarımı [60]’da yapılmış ve bu transformatörün farklı frekans değerlerinde çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Bahsi geçen çalışmada nüve olarak kullanılan manyetik sıvı sanayi ortamında (SIGMA HI-CHEMICAL INC) hazırlanmış iso-parafin bazlı bir sıvıdır. Nüvedeki manyetik sıvı miktarı 1 ml olan prototip transformatörün sarım sayıları elektriksel direncine göre sarım yapılarak ayarlanmıştır.

Tasarlanan transformatörün deney sonuçları incelendiğinde 1MHz gibi yüksek frekanslarda transformatörün çıkış geriliminin hızla düşüş gösterdiği görülmüştür. Yüksek frekanslarda transformatör veriminin düşüşünün esas nedeni manyetik sıvının içerdiği magnetit (Fe_3O_4) tanelerde kayıpların frekansla artmasıdır. Fakat bu artışlara rağmen transformatördeki ısı kayıplar aynı oranda artmamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre manyetik sıvı nüveli transformatörlerin metal nüveli muadillerine göre daha yüksek frekanslarda daha verimli

çalışabildikleri gözlemlenmiştir. Bu da manyetik sıvı nüveli transformatörlerin çalışma frekansının daha yüksek seviyelere çıkabileceğini göstermektedir. Hat gerilim transformatörü 50 veya 60 Hz'te çalışırken, yüksek frekans transformatörleri 20 KHz'den 1MHz'in üzerinde frekanslarda kullanılır. Yüksek frekansta çalışmanın faydalarından özetle bahsedilirse:

- Çalışma frekansı arttıkça, transformatörün boyutu azalır.
- Transformatör boyutu daha küçük olduğundan, daha az bakır tel gereklidir, böylece kayıplar azalır ve transformatörün daha verimli çalışmasına yardımcı olur.

Demir nüvelerde kayıp hesaplama yöntemi, bu nüvelerdeki manyetik alan dağılımının muntazam olduğunu varsaymaktadır ve çekirdeğin manyetik alan dağılımını tam olarak dikkate alamamaktadır. Bu sebepten transformatörlerin gerçek kayıplarını hesaplama sırasında genellikle büyük hatalar oluşabilmektedir. Manyetik histerezis, elektrik transformatörlerindeki enerji kaybının ana sebeplerinden biridir. Ancak, bir yağ süspansiyonundaki küçük mıknatıslanmış metal tanelerden yapılmış kolloidal nano akışkanlar yada bu tez çalışmasında düşünülen gelişigüzel dağılmış demir taneleri sıfıra yakın histerezis kaybına sebep olur ve bu karışım, yüksek verimli güç dönüşümü için elektrik güç transformatörlerinde nüve olarak kullanılabilir. İlaveten; demir alaşımları, amorf malzemeler, yumuşak manyetik ferritler ve toz demir malzemeler nüvede meydana gelen girdap akım kayıpları ve histerizis kayıpları manyetik sistemlerde özellikle de yüksek frekans çalışmalarda, ısı kaybına yol açar ve dolayısıyla da sistem veriminde büyük düşüşe sebep olur. Bu konular gözönüne alındığında; transformatörlerin geliştirilmesi, kullanılması ve ekonomik açıdan optimum tasarımları günümüzün en önemli sorunlarından biri olmaya devam etmektedir. Özellikle manyetik nüve malzemesinin yüksek kalite ve yüksek mıknatıslanma değerlerine sahip olması istenir. Bu durumda, metal nüveden kaynaklanan elektrik kayıplarını azaltmanın yanı sıra malzemelerin tasarımında iyileştirmeler yapmak mümkündür. Endüstride, montajda ve nakliye esnasında kullanılan büyük ölçekli transformatörlerde, zaman zaman meydana gelebilecek mekanik gövde hasarı durumunda, hasarlı alan mümkün olduğunca sert hale getirilebilir ve ferromanyetik sıvı veya demir tozu ile doldurulabilir. Bu tip bir doldurma işleminin çıkış gerilimi karakteristikleri üzerinde olumlu etkisi olabilir.

Bu tez çalışmasının temel aldığı araştırma hipotezleri; “yüksek frekanslarda çalışabilen yeni bir manyetik taneli akışkan çekirdeğe sahip, verimli transformatörler geliştirilebilir mi?, ve “bu yeni tasarım, manyetik sistemlerde oluşan ve yukarıda belirtilen enerji ve verim kaybı sorunlarına az da olsa pratik bir çözüm getirebilir mi?” olarak ortaya konmaktadır.

Bu vesileyle; öngörülen tezin temel amacı; üretim tesisleri, savunma sanayi, tıp, biyoloji, güç sistemleri, ağır sanayi gibi birçok endüstriyel alanda uzun ömürlü kullanılabilecek yüksek manyetik doyum noktalı, yüksek direnç ve yüksek geçirgenliğe sahip yeni nesil manyetik sıvı nüveli transformatörler tasarlamaktır. Bu amaçla; nüve olarak kullanılacak, manyetik-olmayan taşıyıcı baz ve nano/mikron büyüklüğünde ferromanyetik tanelerden oluşan kolloid yapıya sahip bir ferromanyetik akışkan üretilecektir. Manyetik sıvı nüve sayesinde, transformatörde hafiflik, yüksek verimlilik ve pratiklik elde etmek hedeflenmiştir. Geliştirilmesi planlanan manyetik sıvı nüve, yüksek frekans bandında çalışma kabiliyetine sahip olacaktır. Manyetik sıvı malzemeler ile yapılan çekirdeğin diğer transformatör nüvelerden farklı olarak diğer malzemelerle aynı geometride ve aynı boyutta bir nüve tasarlanırken bu nüvede kullanılan malzemelerin çok daha düşük fiyatla ve yerli imkanlarla elde edilmesinin mümkün olmasıdır. Dolayısıyla, bahsi geçen nüve tasarımıyla yüksek frekanslı transformatörlerde büyük ölçüde ekonomik tasarruf sağlamak olasıdır. Böylece literatüre ve ülkemize kazandırılacak yerli kaynaklarla geliştirilmiş ürün, daha fazla maliyet, dışa bağımlılık ve kısa servis ömrüne sahip malzemelerin kullanımı yerine yerli imknlarla uygun bir şekilde geliştirilecektir. Yukarıda genel olarak çerçevesi açıklanan ana amaca uygun olarak; açık, ölçülebilir ve gerçekçi bir takım alt hedeflere ulaşmak amaçlanmıştır:

1. Tercih edilen karışım ile optimum oranda çeşitli kütle oranda demir tozu ve manyetik olmayan sıvılar kullanılarak geliştirilem farklı örnekler geliştirmek; birlikte kullanımlarındaki manyetik iletkenlik performansları belirlenerek bu performanslara göre manyetik iletkenliklerin karakterizasyonları yapılmak.

2. Belirlenecek olan kriterlere göre; optimum kullanım oranlarında ve uygun tekniklerle üretilecek nüvelerin maliyetini mümkün olan en düşük seviyelere indirebilmek amacıyla, elektromanyetik özellikler göz önüne alınarak; katkı oranları test edilip en makul parametrelerde transformatör tasarlanıp imal etmek.

Yukarıda listelenen hedeflerin sonunda elde edilen bilgi birikimi ile geliştirilecek yüksek frekanslı yeni transformatörün testlerinin tamamlanması planlanmıştır.

Yüksek gerilim ve frekanslarda çalışma, transformatör tasarımında bazı zorluklar yaratabilir:

Yüksek frekanslı çalışma, daha yüksek nüve kaybına ve sıcaklığa yol açar, dolayısıyla yüksek doygunluk akı yoğunluğuna sahip bir manyetik malzeme seçimi, düşük özgül kayıp ve yüksek çalışma sıcaklığı, yüksek verim ve güç yoğunluğu elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Azaltılmış hacim ve ağırlık istenen bir özellik olduğundan, izolasyon gereksinimleri ve termal yönetim dikkatlice düşünülmelidir. Sargılardaki deri ve yakınlık etkileri, 50/60 Hz'de çalışmaya kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir; bu nedenle tel seçimine özellikle dikkat gösterilmelidir. Nüve ve sargı düzenlemeleri, maksimum güç aktarımı için termal hususlara ve kaçak endüktans gereksinimine göre seçilmelidir.

Tez çalışmasının 2. Bölümünde farklı manyetik malzemelerin yüksek frekanslı transformatör tasarımı üzerindeki etkileri gözden geçirilip, transformatörlerde kullanılan çeşitli manyetik nüveler incelenmiştir. Bununla birlikte, manyetik dipol ve manyetik alan kavramları sunulup, manyetizasyon, bağıl geçirgenlik ve manyetik histerezis konuları tartışılmıştır. Ayrıca nüve doygunluğu açıklanmış ve ardından çeşitli manyetik nüvelerin temel özellikleri ele alınmıştır. Manyetik akışkanların özellikleri, sentez aşamaları ve manyetizasyon durumu Bölüm 3'te ele alınmaktadır. Bölüm 4'te önerilen akışkan nüveli transformatörün metodolojisi ve matematiksel modeli aracılığıyla, optimum verilere sahip bir örnek tasarımı benzetim ortamında geliştirilmiş, akı yoğunluğu optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasına ait sonuçlar detaylıca sunulmaktadır. Benzetim çalışmalarının ardından Bölüm 5 ANT uygulamasını ele almaktadır. Bu bölümde prototip üzerinde hazırlama prosedürü yapısal, manyetik ve elektriksel özelliklerin karakterizasyonu ve tasarım yaklaşımının geçerliliğini her aşama için sunulmaktadır. Son olarak, toplam uygulamalardan elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için öneriler Bölüm 6'da verilmiştir.

2. MANYETİK ÇEKİRDEK MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANSLI TRANSFORMATÖR TASARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

2.1. Manyetik Özelliklere Giriş

Bu bölümde, malzemelerin manyetik özellikleri gözden geçirilip, transformatörlerde kullanılan manyetik nüveler incelenmektedir. Manyetik dipol ve manyetik alan kavramları, manyetizasyon, bağlı geçirgenlik ve manyetik histerezis bu bölümde tartışılmaktadır. Nüve doygunluğu açıklanıp, çeşitli manyetik nüvelerin temel özellikleri ele alınıp, manyetik nüvelerdeki histerezis kaybı ve girdap akımı kaybı analiz edilmektedir.

2.2. Manyetik Malzemelerin Özellikleri

Ferromanyetik kimyasal malzemeler:

- Demir (Fe)
- Kobalt (Co)
- Nikel (Ni)
- Gadolinyum (Gd)

Yumuşak manyetik malzemeler genel olarak dört kategoriye ayrılabilir:

- Çelikler (SiFe)
- FeNi ve FeCo alaşımları
- MnZn ve NiZn ferritleri
- Amorf metalik alaşımlar (metalik camlar)

Manyetik nüve kullanımının amacı, $\mathcal{R}$ relüktansını azaltmak, L indüktansını arttırmak, φ manyetik akısını arttırmak, tanımlanmış bir manyetik yol elde etmek ve hava boşluğunda depolanan enerjiyi sargıya bağlamaktır. Ayrıca, manyetik nüve düşük relüktans yolu ile manyetik akıyı nüvede tutarak kaçak endüktans L_l ve elektromanyetik girişim (EMG) seviyesini azaltmaktadır. Manyetik nüveler, manyetik cihazların alan yoğunluğu ve manyetik enerji yoğunluğunu arttırarak güç elektroniği devrelerinin boyutunu ve ağırlığını azaltır. İki tür manyetik malzeme vardır: yumuşak ve sert manyetik malzemeler. Yumuşak

manyetik malzemeler, AC dalga şekillere sahip devrelerdir (sinüs dalgaları, kare dalgalar, dikdörtgen dalgalar vb.). Bu nedenle, indüktörler ve transformatörler için manyetik nüvelerde yumuşak manyetik malzemeler kullanılabilir. Sert manyetik malzemelerin mıknatıslanması ve demanyetize edilmesi zordur ve bu nedenle fırçasız ve senkron elektrik motorları gibi uygulamalarda kalıcı mıknatıslar olarak kullanılır. Manyetik malzemelerin ana parametreleri aşağıdaki gibidir:

- yüksek bağıl geçirgenlik μ_{rc} ,
- yüksek doygunluk manyetik akı yoğunluğu B_s ,
- düşük kritik manyetik şiddet H_c ,
- yüksek elektrik direnci ρ_c ,
- yüksek Curie sıcaklığı T_c ,
- birim hacim P_v başına düşük histerezis ve girdap akımı kayıpları,
- yüksek üst çalışma frekansı f_H (veya geniş bant aralığı).

Manyetik bir malzemenin değeri Eş. 2.1'ile tanımlanır.

$$K = \frac{\mu_{rc}\rho_c B_s f_H}{P_v} \quad (2.1)$$

Başlıca manyetik malzemeler silikon çelik, nikel demir (permalloy), kobalt demir (permendur), ferritler, amorf metalik alaşımlar (metalik camlar olarak da adlandırılır), demir tozları, moly-permalloy tozları (MPT'ler) ve sendust tozlarıdır. Manyetik nüveler elektrik akımının iletkenleridir ve elektrik özdirenc aralıkları 10^{-7} ila $10^7 \Omega.m$ arasındadır. Çizelge 2.1., çeşitli manyetik malzemelerin elektrik direnc değerlerini listemektedir.

Çizelge 2.1. T = 20 °C'de ferromanyetik malzemelerin özdirençleri [61]

Malzeme	Elektrik direnci ρ_c ($\Omega.m$)
Kobalt Ferrit	10^7
Mg Ferrit	10^7
NiZn Ferrit	$10^3 - 10^7$
Bakır Ferrit	10^5
Mn Ferrit	10^4
MnZn Ferrit	0.5 – 1000
Zn Ferrite	10^2

Çizelge 2.1. (devam) $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ferromanyetik malzemelerin öz dirençleri [61]

Fe Ferrit	4×10^{-3}
Gd	131×10^{-6}
Metalik cam	125×10^{-6}
NiFe (Nickel Demir)	45×10^{-6}
SiFe (Silikon demir, 2.5% Si)	45×10^{-6}
50% Kobalt alaşımı	35×10^{-6}
SiFe (Silikon demir, 1% Si)	25×10^{-6}
SiFe (Silikon demir, 0,25% Si)	10×10^{-6}
Demir	$9,61 \times 10^{-6}$
Nikel	$6,93 \times 10^{-6}$
Kobalt	$6,24 \times 10^{-6}$
Nanokristal	$1,2 \times 10^{-6}$

Manyetik çekirdeğin temel amacı manyetik akı iletmek, yani manyetik akı için kolay bir yol sağlamak ve manyetik alanı nüvede yoğunlaştırmaktır. Manyetik nüveler, iletkenlerin elektrik devrelerinde elektrik akımlarını iletmesine benzer şekilde manyetik devrelerde manyetik akıyı iletir. Bağlı geçirgenlik, manyetik akıyı iletmek için belirli bir malzemenin havadan ne kadar fazla iletkenliğe sahip olduğunun bir ölçüsüdür. Ferromanyetik malzemelerin bağlı geçirgenliği, boş alandan 10^5 kat daha fazladır. Bakırın elektrik direnci ise ρ_{cu} , boş alandan 10^{20} kat daha düşüktür. Bir manyetik devrede nüve kullanımının amacı, endüktans artıştır. Böylece, manyetik alanın radyasyonunu azaltırken manyetik enerjiyi depolamak için daha iyi bir kapasite elde etmek mümkündür. Bu amaçın elde edilmesi için kullanılan malzemeler "yumuşak" manyetik özelliklere sahiptir. Bu malzemeler "sert" manyetik malzemeler gibi kalıcı olarak manyetize olmazlar. Manyetik alandan çıkarılan yumuşak manyetik malzemeler, manyetizasyonlarını kaybetme eğilimindedir. Çekirdeğin mevcudiyeti nedeniyle manyetik alan konsantrasyonunun artma derecesi, nüve malzemesinin bağlı geçirgenliğinin bir fonksiyonudur. Manyetik nüveler, bağlı geçirgenliği 5 ila 10^5 arasında olan yumuşak ferromanyetik malzemelerden yapılmıştır. Çekirdeğin varlığından dolayı manyetik alan konsantrasyonunun artma derecesi, nüve malzemedeki geçirgenliğin bir fonksiyonudur. Demir (Fe), kobalt (Co), nikel (Ni) ve gadolinyum (Gd) gibi çeşitli metalik malzemeler, yumuşak ferromanyetik malzemeler olarak işlev görür. Yaygın alaşım malzemeler silikon, alüminyum, manganez, çinko ve kromdur.

2.3. Manyetik Dipoller

Bir atomda, elektronların nüve etrafındaki hareketi, güney ve kuzey kutupları olan manyetik dipoller adı verilen küçük, dirençsiz bir döngüdeki elektrik akımının akışına eşdeğerdir. Mikroskobik akım döngüleri, güney kutuplarından kuzey kutuplarına doğru yönlendirilmiş bir manyetik alan üretir. Birçok elektron küçük mıknatıslar gibi davranırlar. Yörüngeler rasgele yönlendirilir ve manyetik alanların yok olmasına neden olur. Harici bir manyetik alan H_{ex} uygulandığında, yörüngelerin yönü, manyetik alanların yönlerini değiştirerek yeniden şekillenir. Lenz yasasına göre, yörüngedeki elektron manyetik alanları, harici manyetik alana karşı çıkma eğilimindedir. Bir manyetik alan, manyetik malzeme içinde, tek tek manyetik momentlerin bir yönde paralel şekilde, tipik olarak 10^{12} 'den 10^{18} 'e kadar sıralandığı, tek biçimli manyetizasyona sahip bir bölgedir. Hiçbir harici manyetik alan uygulanmadığında, çeşitli alanların hizalanma yönleri rastgeledir. Bir manyetik alanın boyutu tipik olarak 10^{-6} ila 10^{-4} m arasındadır. Manyetik alanlar, ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini ve davranışını belirler.

Harici bir manyetik alan, mikroskobik akım döngülerini manyetik alana normal yönde kademeli olarak hizalar. Manyetik momentler, alanların dönmesi veya alanların büyümesi ve daralması ile yeniden yönlendirilir. Mevcut döngüler orijinal konumlarından kaydırılır. Bu eylem enerjinin depolanmasıyla sonuçlanır. Manyetik malzemeler, uygulanan bir manyetik alana maruz kaldıklarında manyetik kutuplama sergilerler. Bir malzemenin manyetizasyonu, manyetik dipoller uygulanan manyetik alanla hizalandığında meydana gelir. Manyetizasyon, bir atomun yapısına, elektronların farklı enerji yörüngelerine yerleştirilmesine, kristal ortama ve elektron spinlerinin birbirine paralel olarak sıralanmasına bağlıdır. Bir atomda, çeşitli dairesel yörüngelerde elektronlarla çevrili merkezi bir pozitif nüve vardır. Atomların temel özelliği, hem elektronların hem de protonların kendi eksenleri üzerinde dönmesidir. Dönen bir elektron, ağırlık merkezinden başka bir noktada asılı duran dönen bir jirokopa benzer ve uygulanan bir manyetik alanla çakışan bir manyetik kuvvet nedeniyle hareket eder. Spin, bir elektron veya protonun kuzey ve güney kutbuna sahip küçük bir mıknatıs gibi davranmasına neden olan manyetik bir moment vektörüdür. Manyetik bir malzemenin manyetizasyonu, üç mekanizma tarafından üretilen atomik akım döngülerinden kaynaklanır:

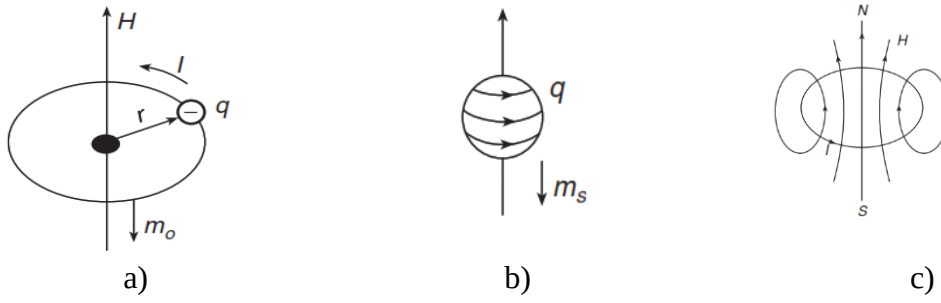
1. Elektronun kendi eksenini etrafında dönmesi,
2. Elektronların nüve etrafındaki yörüngesel hareketi,
3. Nüvedeki protonların birbirini etrafındaki hareketi.

Nüve etrafında dairesel şekilde hareket eden bir elektron, Şekil 2.1.a'da gösterildiği gibi hareketli bir yük olduğu için küçük bir akım döngüsüne benzer. Bir elektron Şekil 2.1.b'de gösterildiği gibi kendi eksenini etrafında döner. Döngü akımının yönü elektron hareketinin yönünün tersidir. Her akım döngüsü bir manyetik alan H üretir. Bir döngü akımı tarafından üretilen manyetik alanın modeli, kalıcı bir mıknatıs tarafından sergilenen manyetik alan modeline benzer. Bu nedenle, küçük akım döngüsü, Şekil 2'de gösterildiği gibi, kuzey kutbu ve güney kutbu olan bir manyetik dipol olarak kabul edilebilir. Manyetik alan çizgileri dairesel döngünün içinden geçer ve kapalı yollarda dışarıya geri döner. Manyetik dipoller manyetizasyona (manyetik kutuplama) neden olur. Küçük akım döngüsü, döngü akımı I ve döngü alanı $A=\pi r^2$ 'nin çarpımına eşit bir yörüngesel manyetik momente sahiptir. Ortalama yörünge yarıçapı $r \approx 10^{-10}$ m'dir. Bir elektron için manyetik dipol yörünge momenti Eş. 2.2'ile verilir.

$$m_0 = AI = \pi r^2 I \quad (2.2)$$

Yörünge momentinin m_0 vektörü ve yönü, mevcut döngünün yüzeyine diktir ve sağ el kuralı ile belirlenir. Atoma manyetik akı yoğunluğu uygulandığında, atomun dipolü Eş. 2.3'te verilen ifadeyle bir moment yaşar (dönme kuvveti).

$$T_q = m_0 \times B = AI \times B = \pi r^2 I \times B \quad (2.3)$$



Şekil 2.1. Çekirdeğin etrafında dönen ve kendi eksenini etrafında dönen elektron: a) Çekirdeğin yörüngesinde dönen ve yörüngedeki m_o manyetik momenti sergileyen elektron, b) Kendi eksenini etrafında dönen ve spin manyetik momenti m_s sergileyen elektron, c) manyetik dipol

Bu moment, yörünge manyetik momentinin yönünü ve büyüklüğü, uygulanan manyetik alan $\mathbf{B}$ 'nin yönü ile hizalama eğilimindedir. Bu durumda moment ifadesi Eş. 2.4' ile verilir.

$$|T_q| = |m_o| |B| \sin \varnothing = AI |B| \sin \varnothing = \pi r^2 I |B| \sin \varnothing \quad (2.4)$$

burada $\varnothing$, m_o ve $\mathbf{B}$ vektörleri arasındaki açıdır. Tam hizalaşma için $\varnothing = 0$ olmalıdır. Bu hizalanma sonucunda, toplam manyetik alan daha güçlü hale gelir.

Dönen bir elektron sonsuz bir akım döngüsü gibi davranır. Atomlar da, elektronların hem yörünge hem de dönüş hareketleri tarafından üretilen manyetik alanlar birbirini götürür ve böylece atom düşük bir manyetik etki gösterir. Diğer atomlarda yörünge ve spin alanları birbirini iptal etmez ve bu nedenle malzeme manyetik etkiler gösterir. Her bir atomik akım döngüsünün etkisi çok küçük olmasına rağmen, milyarlarca atomun birleşik etkisi güçlü bir manyetik alan ile sonuçlanır.

Bir elektron için üretilen manyetik momentler:

1. Çekirdeğin etrafında döndüğünden dolayı yörüngesinin manyetik momenti m_o ,
2. Çekirdeğin yörüngesinde dönerken kendi eksenini etrafında döndüğünden dolayı manyetik moment m_s .

r yarıçaplı dairesel bir yörüngede sabit v hızıyla hareket eden $-q$ yüküne sahip bir elektron, Eş. 2.5 ile verilen bir tam dönüşü (yörüngenin çevresi) tamamlar.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.5)$$

burada v elektron yörünge hızıdır ve $\omega = v/r$. Küçük döngü akımı I elektron yörüngesindeki hareketin tersi yönde akar ve

$$I = -\frac{q}{T} = -\frac{qv}{2\pi r} = -\frac{qw}{2\pi} \quad (2.6)$$

şeklinde verilir. Uygulanan manyetik alan sıfır ise, proton yükü q nedeniyle elektrona etki eden Coulomb kuvveti

$$F = -a_r \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.7)$$

şeklindedir. a_r , protondan elektrona doğru işaret eden bir birim vektördür. Dolaşım hareketinden dolayı elektrona etki eden merkezkaç kuvveti,

$$F = m_e \omega^2 r = \frac{m_e v^2}{r} \quad (2.8)$$

olarak verilir. Elektron yörüngeye yerleştirildiğinde, iki kuvvet birbirini dengeleyecektir. Burada m_e elektron kütlesidir ve $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg'dır.

$$v = \frac{q}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m_e r}} \quad (2.9)$$

ifadesi yörünge elektron hızını verir. Bir elektronun bir döngü süresi,

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{q} \sqrt{4\pi\epsilon_0 m_e r} \quad (2.10)$$

Eş 2.10'ile hesaplanır. Böylece, yörüngedeki bir elektron tarafından indüklenen akım,

$$I = \frac{q}{T} = \frac{q^2}{4\pi r \sqrt{4\pi\epsilon_0 m_e r}} \quad (2.11)$$

şeklinde verilir. Bir elektron dipolünün yörüngesel manyetik momenti,

$$m_0 = AI = \frac{q^2}{4} = \sqrt{\frac{r}{\pi\epsilon_0 m_e}} \quad (2.12)$$

ifadesiyle bulunur. Elektron yörünge düzlemine dik olan $\mathbf{H}$ manyetik alanı uygulanırsa, Coulomb kuvveti ve q proton yüküne bağlı olarak elektrona etki eden Lorentz kuvveti ve uygulanan H manyetik alanı

$$F = -a_r \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} + qv\mu_0 H \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Coulomb kuvveti ve merkezkaç kuvveti birbirini dengeleyecektir.

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} + qvr\mu_0 H = \frac{m_e v^2}{r} \quad (2.14)$$

Böylece elektron yörünge hızı v artar, T azalır, yörüngedeki elektron tarafından üretilen akım artar, elektron döngüsü tarafından indüklenen manyetik alan artar ve yörüngenin manyetik momenti artar. Ancak, yukarıdaki değişkenlerin değerleri neredeyse H 'den bağımsızdır. Akım döngüsünün yörüngesel manyetik momenti, elektronun açısal momentumu $\mathbf{m}_a$ ile ilgilidir. Elektronun açısal momentumu

$$m_a = m_e v r \quad (2.15)$$

ile verilir. Yörünge açısal momentumu m_a ile verilir ve minimum adım değışikliğı,

$$\Delta m_{a(\min)} = \frac{h}{2\pi} = 1,06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, \quad (2.16)$$

ifadesiyle elde edilir. $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, Planck sabitidir. Yörüngesel açısal momentum m_a her zaman $h/(2\pi)$ 'nin bir tamsayıdır.

Manyetik dipoller bir yönde hizalanırsa, birçok paralel solenoide benzer bir yapı oluştururlar ve bu nedenle bir manyetik alan indüklerler. Aynı yönde hizalanmış bir dizi manyetik dipol, bir manyetik alan olarak adlandırılır. Bir elektron içsel bir açısal momentuma (spin) ve içsel bir manyetik momente sahiptir. Spin elektron momentleri harici alanla hizalanma eğilimindedir. Bu nedenle, toplam manyetik alan daha güçlü hale gelir. Kuantum teorisinden, bir elektronun spin manyetik momenti,

$$m_s = \frac{qh}{4\pi m_e} = m_{o(\min)} \quad (2.17)$$

şeklinde verilir. Bir demir elektronun spin manyetik momenti $m_s = 9,3 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}$ 'dir. Bir atomun elektron sayısı tek ise, atom sıfır olmayan bir spin manyetik momentine sahiptir ve harici manyetik alanlar elektron spinleri üzerinde moment uygular. Bir atomun elektron sayısı çift ise, her elektron çiftindeki spinler zıt yönlere sahiptir, bu nedenle birbirlerinin spin manyetik momentini iptal eder. Bir atomun toplam manyetik momenti, atom yörüngesi ve spin manyetik momentlerinin vektör toplamına eşittir:

$$m_A = \sum_{i=1}^{N_A} m_i \quad (2.18)$$

Burada m_A manyetik momentlerinin vektör toplamını ifade eder ve N_A , atomdaki manyetik momentlerin sayısıdır. Yörüngesel manyetik moment, spin manyetik momenti ile aynı büyüklük mertebesinde. Bir elektronun manyetik momenti, çekirdeğin manyetik

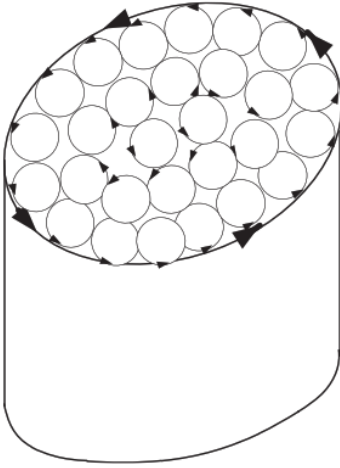
momentinden 1000 kat daha güçlüdür. Bir malzemenin manyetik özellikleri, atomlarının manyetik dipollerin harici bir manyetik alanla etkileşimi ile belirlenir. Bu özellikler, bir malzemenin kristal yapısına bağlıdır. Ferritler, çok ince sınırları ile ayrılmış küçük kristallerden oluşur. Çoğu malzemede, atomdaki bir elektronun manyetik momenti, zıt yönde dönen başka bir elektronun manyetik momenti tarafından iptal edilir. Bu nedenle, elektronların yörünge hareketi tarafından üretilen net manyetik moment, çoğu malzemede sıfırdır veya çok küçüktür. Elektron sayısı çift olan atomlarda, elektron çiftleri zıt spinlere sahiptir ve dolayısıyla spin manyetik momentleri birbirini götürür. Buna karşılık, tek sayıda elektron içeren atomlar, spin manyetik momentini üreten eşleşmemiş bir elektrona sahiptir. Manyetik malzemeler: Ferromanyetikler, diyamanyetikler, paramanyetikler, antiferromanyetikler, ferrimanyetikler ve süperparamanyetikler şekilde sınıflandırılabilir. Demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik malzemelerde, yörüngedeki moment ve dönen manyetik momentler birbirini iptal etmez.

Manyetik dipoller bir manyetizasyon kaynağıdır. Yörüngedeki bir elektron, uygulanan alanla aynı yönde bir manyetik moment sergiler. Harici bir manyetik alanın varlığında, bir manyetik dipol bir moment yaşayacaktır. Momentin etkisi, manyetik dipölü (yörüngedeki elektron tarafından üretilen manyetik alan) uygulanan manyetik alan yönünde hizalama eğiliminde olacaktır. Manyetizasyon, birim hacim başına manyetik dipol momentidir. Bir manyetik malzemenin metreküpü başına n_D manyetik dipol mevcuttur. Bir malzemenin manyetizasyon vektörü M , birim hacimde bulunan tüm atomların manyetik dipol momentlerinin vektör toplamıdır.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n_D} m_i}{V_c} = \frac{N_D m_i}{V_c} = N_D m_i = n_D A I \quad (2.19)$$

Mıknatıslanma vektörünün birimi A/m'dir. Örneğin, bir demir $n = 8,5 \times 10^{28}$ atom/m³ içerir. Demir için maksimum M büyüklüğü $7,9 \times 10^5$ A/m'dir.

Şekil 2.2'de, uzunluğu l ve kesit alanı A_D olan uzun bir silindirik manyetik alana sahip bir çubuk verilmiştir.



Şekil 2.2. Uzun bir silindirik manyetik alana sahip bir çubukta oluşan manyetik alan

Dipollerin yoğunluğu $n_D = N_D / lA = N_D / V_D$ 'dir. Burada $V_D = lA$ alan hacmidir. Tüm dipol momentleri silindir eksenini boyunca hizalanır. Manyetik alanda, dipoller birçok paralel solenoid oluşturur. Alanın iç kısmında, bir solenoidin akımları, bitişik solenoidlerden akan akımları iptal eder. Bu nedenle, iç kısımdaki akım sıfırdır. Sadece etki alanı duvarındaki akımlar birbirini iptal etmez ve net yüzey akımı I_{surf} üretir, bu da büyük bir manyetik dipol oluşumuna yol açar. Bu dipolün manyetik momenti, A_D kesit alanına sahip büyük solenoid formundaki bireysel atom dipollerinden oluşan alanın manyetik momentine eşittir.

$$A_D I_{surf} = N_A m_i \quad (2.20)$$

manyetizasyon ile sonuçlanan

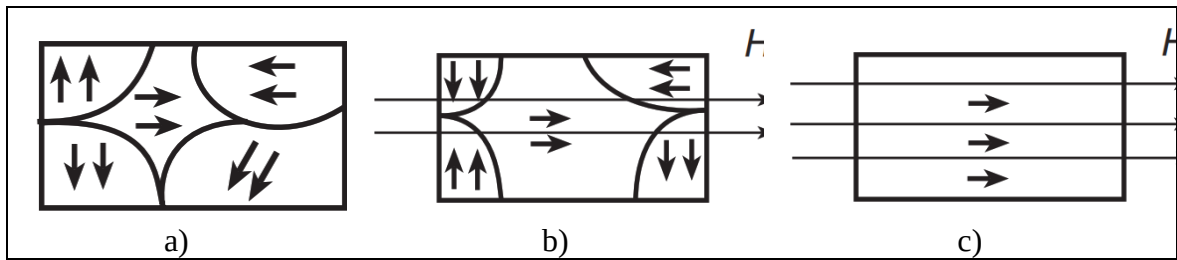
$$M = \frac{N_A m_i}{V_D} = \frac{I_{surf}}{L} = J_{surf} \quad (2.21)$$

ile ifade edilir.

2.5. Manyetik Etki Alanları

Ferromanyetik malzemelerde, yörüngedeki manyetik moment neredeyse sıfır olduğu için, elektron dönme momenti nedeniyle her atom büyük bir dipol momentine sahiptir. Mıknatıslanma, komşu atomlar arasındaki spin hizalaması nedeniyle atomlar arasındaki ve bir bütün olarak kristal içindeki spin etkileşimlerinin sonucudur. Ferromanyetik malzemeler,

içinde tüm manyetik momentlerin hizalandığı, ferromanyetik alanlar adı verilen paralel dönüşlere sahip büyük atom gruplarından oluşan mikroskobik bölgelerden oluşur. Büyük dipol momentler, atomik momentlerin vektör toplamı olarak alanlar tarafından üretilir. Bununla birlikte, alan momentleri alandan alana doğru değişir. Ferromanyetiklerin doğal manyetizasyonu, komşu atomlar arasındaki spin hizalaması nedeniyle, alan adı verilen küçük bölgeler üzerinde birbirine paralel olarak meydana gelir. Etki alanları, herhangi bir yönde net manyetik akı sıfır olacak şekilde rastgele bir şekilde düzenlenmiş, ayrı ayrı manyetize edilmiş bölgelerdir. Etki alanları, yörünge hareketi ve elektronların dönmesiyle oluşturulur.



Şekil 2.3. Ferromanyetik malzemenin aşamalı manyetizasyonu: a) $H=0$ ve ferromanyetik alanlar rastgele yönlendirilmiş, b) $H > 0$ ve manyetik alana paralel alanlar genişlerken, c) $B = B_s$ 'de, tüm alanlar harici alanla hizalı

Bu alanlar enerji yörüngelerinde özel bir elektron düzenine sahiptirler. Bu düzenleme, elektron spinlerinin paralel hizalanmasıyla sonuçlanır. Mıknatıslanma, elektron spinleri ve ferromanyetik alanlarda atomik düzeyde ve atomlar arası düzeyde karşılıklı etkileşimlerinden kaynaklanır. Etki alanları, doğrusal boyutta (çapta) yaklaşık $1-10 \mu\text{m}$ 'dir. Alanların hacmi $0,001\text{mm}^3$ ile 1mm^3 arasındadır. Her alan, komşu dipoller arasında güçlü bir kuvvetle paralel olarak hizalanan, dönen elektronlar tarafından üretilen birçok manyetik dipol içerir. Böylece, güçlü bir yerel manyetik alan üretilir. Tipik olarak, manyetik alan 10^{16} ile 10^{21} atom içerir. Alanlar, 100 ile 150 atom kalınlığında olan, alan duvarları olarak adlandırılan ince geçiş bölgeleriyle birbirinden ayrılır. Bu alan sınırlarında, kademeli bir dönüş yönelimi geçişi vardır. Bu süreç, zaman alanında ve uzay alanında farklı değerlerdedir.

Harici manyetik alan sıfır olduğunda, iç yapı, Şekil 2.3.a'da gösterildiği gibi, dışarıda ölçülen net manyetik akı sıfır olacak şekilde rastgele yönlendirilmiş, tamamen manyetize edilmiş küçük alanlardan oluşur. Bir ferromanyetik malzemeye harici bir manyetik alan uygulandığında, bu alan manyetik alanlarıyla etkileşime girer ve alanlar, uygulanan alanla

kısmen yeniden hizalanma eğilimindedir. Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi, dipollerin uygulanan H alanına paralel olduğu durumda etki büyür ve diğer alanların boyutları azalır. Dönen elektronlar tarafından üretilen manyetik alan ve orijinal harici alan, daha güçlü bir toplam manyetik akı yoğunluğu ile sonuçlanmak üzere birleşir. Büyük atom gruplarının bu şekilde yeniden hizalanması, ferromanyetik malzemede yüksek bir bağıl geçirgenliği üretir. Manyetik alan yoğunluğu, sargı akımının artırılmasıyla yavaşça yükseltildiğinden, alanlar yeniden yönlenmeye başlar. Manyetizasyon derecesi, manyetik dipollerin hizalanma derecesine bağlıdır. Yüksek manyetik alan yoğunluğunda, alanlar harici alan ile hizalanır. Harici alan daha fazla arttırıldığında, manyetik malzemenin tüm gövdesi tek bir alan haline gelecek şekilde manyetize edilir ve Şekil 2.3'te gösterildiği gibi tüm dönen elektronlar hizalanır. Manyetik akı yoğunluğu, doyma düzeyine B_s ulaşır ve daha fazla artamaz. Bu noktanın ötesinde, H 'deki artış, manyetik olmayan bir malzemede (hava, $\mu_r = 1$) olduğu gibi B 'de aynı artışa neden olur. Doyma akı yoğunluğu aralığı 0,3 T ile 2,3 T arasındadır. Bir sargıda nüve doygunluğa girdiğinde, bağıl geçirgenlik bire düşeceğinden dolayı indüktans değeri azalır. Ayrıca nüve kayıpları artar. Ferrit nüvelerin düzgün olmayan bir manyetik akı dağılımı, nüve malzemesinde lokalize manyetik doygunluk ve sıcak noktalar oluşturur. Sıcaklık arttıkça doyma akı yoğunluğu azalır.

2.5. Manyetik Duyarlılık ve Geçirgenlik

Geçirgenliğin değeri, bir malzemedeki elektronların yörünge ve dönüş açısal momentleri tarafından belirlenir. Atomik dipol mıknatısların etkisi, birim hacim başına dipol moment olarak tanımlanan manyetizasyon ile tanımlanabilir. Bir manyetik çekirdeğe bir manyetik alan B_{air} uygulandığında nüvedeki manyetik akı yoğunluğunun serbest uzay bileşeni,

$$B_{air} = \mu_0 H \quad (2.22)$$

şeklinde verilir. Mıknatıslanma vektörü tarafından indüklenen, içsel dahili manyetik akı yoğunluğu,

$$B_i = \mu_0 M \quad (2.23)$$

şeklinde verilir. Doğrusal, homojen ve izotropik bir ortam için manyetizasyon, manyetik alan yoğunluğu ile orantılıdır.

$$M = \chi_m H \quad (2.24)$$

burada χ_m manyetik duyarlılıktır. İndüklenen (içsel) manyetik akı yoğunluğu

$$B_i = \mu_0 M = \mu_0 \chi_m H \quad (2.25)$$

ifadesiyle verilir. Uygulanan harici bir manyetik akı varlığında, toplam manyetik akı yoğunluğu,

$$B = B_{air} + B_i = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2.26)$$

ile elde edilir. Bir manyetik malzemenin nispi geçirgenliği

$$\mu_r = 1 + \chi_m = 1 + \frac{M}{H} \quad (2.27)$$

ile verilir.

$\chi_m = \mu_r^{-1}$ ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ A/m. Mıknatıslanmanın manyetik akı yoğunluğunu önemli ölçüde artırabileceği görülebilir. Boş alan için, $\chi_m = 0$ ve $\mu_r = 1$ 'dir. Kaplanmamış ferrit nüvelerin bağlı geçirgenliğinin sargının toleransı genellikle $\pm \%20$ veya $\pm \%25$ 'tir.

Manyetik nüveli bir sargının indüktansı ise,

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 A_c N^2}{l_c} = L_0 + L_{\chi m} \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilebilir. Nüvesiz indüktörün endüktansı

$$L_0 = \frac{\mu_0 A_c N^2}{l_c} \quad (2.29)$$

ifadesiyle verilir. Nüve malzemenin manyetik duyarlılığından kaynaklanan indüktans,

$$L_{\chi m} = \frac{\chi_m \mu_0 A_c N^2}{l_c} = \frac{(\mu_r - 1) \mu_0 A_c N^2}{l_c} \quad (2.30)$$

ifadesiyle verilir.

2.6. Doğrusal, İzotropik ve Homojen Manyetik Malzemeler

Bir manyetik malzemede, χ_m manyetik alan yoğunluğundan bağımsız ise, ($\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$ ile doğrusal olarak değişiyorsa) doğrusaldır. Aksi takdirde, doğrusal değildir ($\chi_m = f(H)$). Manyetik malzemelerde, χ_m uzay koordinatlarından bağımsız ise homojendir, yani noktadan noktaya değişmiyor ve $\mu \neq f(x,y,z)$. Aksi halde homojen değildir. Bir manyetik malzeme, eğer χ_m manyetik alan vektörü $\mathbf{H}$ 'nin yönünden bağımsız ise izotropiktir. Aksi takdirde, anizotropiktir. Bir manyetik ortam anizotropik ise, manyetik duyarlılığı ve manyetik geçirgenliği tanımlamak için tensörler kullanılır. Bu durumda, $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ ve $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$. Aksi takdirde, χ_m ve μ_r skalerdir.

Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik $\mu(H)$ sabit bir değere sahip olmadığından dolayı doğrusal değildir ve manyetik alan yoğunluğuna bağlıdır, ($\mu=f(H)$). Sonuç olarak, $\mathbf{B}=\mu(H)\mathbf{H}$, $\mathbf{H}$ 'nin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Hemen hemen tüm ferromanyetik malzemeler anizotropiktir. Manyetik anizotropi, manyetik özelliklerin tercih edilen bir yöne bağımlılığıdır ve manyetik malzemelerdeki manyetizasyon vektörünün belirli bir yönde hizalanma eğilimidir. Anizotropik malzemeler için, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$. Manyetik duyarlılık frekansın bir fonksiyonudur ve yüksek frekanslarda karmaşıktır.

2.7. Manyetik Malzemeler

2.7.1. Ferromanyetik malzemeler

Ferromanyetizma esas olarak elektron spinlerinin varlığından kaynaklanır. Demanyetize edilmiş durumdaki bir ferromanyetik, rastgele yönlendirilmiş birçok manyetik alana bölünmektedir. Manyetik momentler her alanda bir yönde hizalanır. Ferromanyetik malzemeler, dönme momentlerinden dolayı büyük manyetik momentlere sahiptir ve yörüngesel manyetik momentler neredeyse sıfırdır. Bu nedenle, $m_s \gg m_o$ 'dır. Kristal kafes içindeki bir etki alanındaki bitişik manyetik dipol momentleri arasında, dipol momentlerini

paralel tutan güçlü bağlantı kuvvetleri olarak bilinen özel bir kuantum olgusu mevcuttur. Bu kuvvet, atomik dipol hizalama sürecini büyük ölçüde kolaylaştırır ve manyetik momentleri manyetik alanlar adı verilen katı paralel düzenlenime kilitler. Manyetik dipol grupları kendiliğinden aynı yönde hizalanır ve manyetik alanlar oluşturur. Alanlar, akım ileten ve manyetik alan üreten bir grup paralel solenoidlere benzer. Harici manyetik alan sıfır olduğunda, manyetik alanlar rastgele yönlerde yönlendirilir ve rastgele yönlerde iç manyetik alan üretir. Çeşitli etki alanları rastgele yönlerde sahip olduğundan, net manyetik alan sıfırdır. Harici manyetik alanın varlığında, alanlar bu alan yönünde hizalanma eğilimindedir ve harici alana eklenen çok güçlü bir dahili manyetik alan üretir. Harici alanın büyüklüğü artıp sıcaklık düştüğünde hizalama derecesi artar. Sonuç olarak, ferromanyetikler, 1 ile 1000 000 aralığında $\mu_r \gg 1$ ile sonuçlanan büyük ve pozitif manyetik duyarlılığa sahiptir $\chi_m = M/H$. Çeşitli ferromanyetik malzemeler için bağıl geçirgenlik değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Tüm alanlar harici alan yönünde hizalandığında, nüve doyurulur ve ek bir iç alan indüklenmez. Manyetik akı yoğunluğu doyma değerine ulaştığında, nüve bağıl geçirgenliği azalır ve sonunda boş alan değerine ulaşır $\mu_r=1$. Ferromanyetik malzemeler için doyma akı yoğunluğu değerleri Çizelge 2.3'te verilmiştir. Ferromanyetik malzemelerin bağıl geçirgenliği, hem uygulanan alanın hem de önceki manyetik geçmişin bir fonksiyonudur.

Çizelge 2.2. Ferromanyetik malzemelerin bağıl geçirgenliği [61]

Malzeme	Bağıl geçirgenlik (μ_r)
Demir tozu	10 – 60
NiZn ferrit	150
Kobalt	250
Nikel	600
50% Ni, 50% Fe, Ortonol	1000 – 4000
MnZn-ferrit	2700
0.25% Silikon-demir	2700
48% Nikel alaşımları	4000
2.5% FeSi-çelik	5000
4% FeSi-çelik	7000
50% Kobalt alaşımları	10 000
Metalik cam	10 000
Nanokristal	15 000 – 150 000
80% Ni, 4% Mo alaşımları	50 000
99.8% Saf demir	5000
99.96% Saf demir	280 000

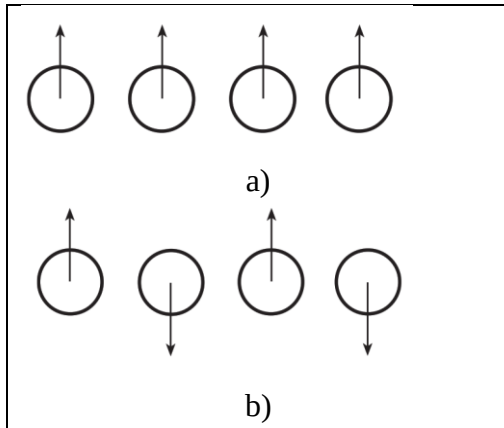
Çizelge 2.3. Ferromanyetik malzemelerin doyma akı yoğunluğu [61]

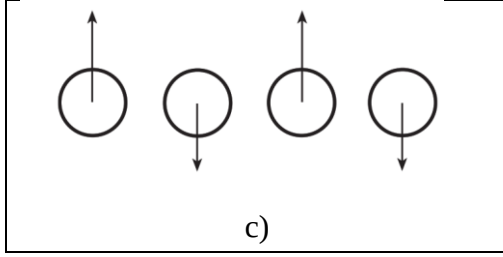
Malzeme	Doyma akı yoğunluğu B_s (T) ($T=20^\circ\text{C}$)
50% Kobalt alaşımları	2,3
0.25% Silikon demir	2,2
2.5% Si-çelik	2
Magnesil tane odaklı Si demir	1,5
Metalik cam	1,6
78% Ni-Fe alaşımları “kalıcı”	1,5
80% Ni, 20%Fe alaşımları “superkalıcı”	0,6
48% Ni-Fe alaşımları	1,5
50% Ni, 50% Fe “Ortonol”	1,4 – 1,6
Nanokristal	1,2 – 1,5
80% Ni, 4% Mo alaşımları	0,8
50% Ni-50% Fe alaşımları “superkalıcı”	0,75
MnZn ferrit	0,4 – 0,8
NiZn ferrit	0,3

Alanlardaki tüm spin manyetik momentleri, sargı tarafından üretilen manyetik akı yönünde hizalanır ve Şekil 2.4.a'da gösterildiği gibi bu momentler büyüklük olarak eşittir.

2.7.2. Antiferromanyetik malzemeler

Antiferromanyetik malzemelerde, bitişik atomların manyetik momentleri zıt yönlerde hizalanır ve harici bir manyetik alanın yokluğunda büyüklükleri yaklaşık olarak eşittir. Uygulanan bir manyetik alan varlığında net manyetik moment sıfırdır. Uygulanan bu manyetik alanın mevcudiyeti, malzemenin manyetik özellikleri üzerinde küçük bir etkiye sahiptir, bu da nispi manyetik geçirgenliğin μ_r 'den biraz daha fazla olmasına neden olur. Şekil 2.4.b., antiferromanyetik malzemelerdeki spin manyetik momentlerinin yapısını göstermektedir.





Şekil 2.4. Uygulanan bir manyetik alan altında spin manyetik momentlerinin yapıları: a) Ferromanyetikte, b) Antiferromanyetikte, c) Ferrimanyetikte.

2.7.3. Ferrimanyetik malzemeler

Krom ve manganez gibi ferrimanyetik elementler, atom numarası olarak demirle yakındırlar ve atomik dipol momentleri arasında güçlü eşleşme kuvvetlerine sahiptirler. Ancak eşleşme kuvvetleri elektron spinlerinin antiparalel hizalamalarını meydana getirir. Spin manyetik momentleri çok büyüktür ve uygulanan bir manyetik alanın yokluğunda atomdan atoma doğru değişir ve net manyetik moment oluşmaz. Bir manyetik alan uygulandığında, manyetik momentlerin büyüklükleri eşit değildir ve yönler değişir, bu da Şekil 2.4.c'de gösterildiği gibi net sıfır olmayan bir manyetik moment ile sonuçlanır. Kısmi iptal nedeniyle, ferrimanyetik malzemelerdeki manyetik akı yoğunluğu, ferromanyetik malzemelerden daha düşüktür ve bağlı geçirgenlik birden çok daha yüksektir ($\mu_r \gg 1$). Bir ferrimanyetik malzeme Curie sıcaklığının üzerinde ısıtıldığında, spin yönleri aniden rastgele olur ve ferrimanyetik paramanyetik hale gelir. Ferritler ferrimanyetik malzemelerdir. Yüksek direnç ρ_c ve küçük girdap akımlarına sahiptirler ve yüksek frekanslarda düşük girdap akımı (dirençsel) kayıpları verirler.

2.7.4. Diamanyetik malzemeler

Diamanyetik malzemeler için bizmut (Bi), bakır (Cu), elmas (C), altın (Au), kurşun (Pb), cıva (Hg), gümüş (Ag) ve silikon (Si) birkaç örnektir. Diamanyetik malzemelerde manyetik etkiler zayıftır. Harici bir manyetik alanın yokluğunda, yörünge ve dönüş manyetik momentleri birbirini iptal eder ve net manyetik moment sıfırdır. Uygulanan bir manyetik alan, dönme momentinin yörünge momentini biraz aşmasına neden olarak küçük bir net manyetik moment ile sonuçlanır ($m_s > m_o$). Küçük manyetik moment, küçük bir manyetik alan oluşturan küçük dipol hizalamasına neden olur. Bu alan, uygulanan manyetik alana zıttır, itici bir etkiye neden olur ve toplam manyetik alanı hafifçe azaltır. Diamanyetizma

sadece harici bir manyetik alanın varlığında meydana gelir. Harici alan sıfıra düşürüldüğünde, dipollerin hizalanması ortadan kalkar. Diamanyetik malzemelerin manyetik duyarlılığı,

$$\chi_m = -\frac{\pi\mu_0 q^2 n N_A r_{av}^2}{6m_e} \quad (2.31)$$

burada r_{av} ortalama elektron yörüngesidir. Örneğin, $n=5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $N_A=8$ ve $r_{av}=10^{-20}$ için, $\chi_m \approx -10^{-5}$ elde edilir. Diamanyetik malzemeler küçük ve negatif bir manyetik duyarlılığına sahipler $\chi_m = M/H \approx -10^{-5} < 0$, bu da $\mu_r < 1$ ile sonuçlanır. Burada $\mu_r \approx 1-10^{-5}$. Örneğin, bakır (Cu) için $\mu_r = 0,99999$, gümüş (Ag) için $\mu_r = 0,99998$ ve altın (Au) için $\mu_r = 0,99996$. Diamanyetik malzemelerin bağıl geçirgenliği sabittir ve uygulanan manyetik alan ve sıcaklıktan bağımsızdır.

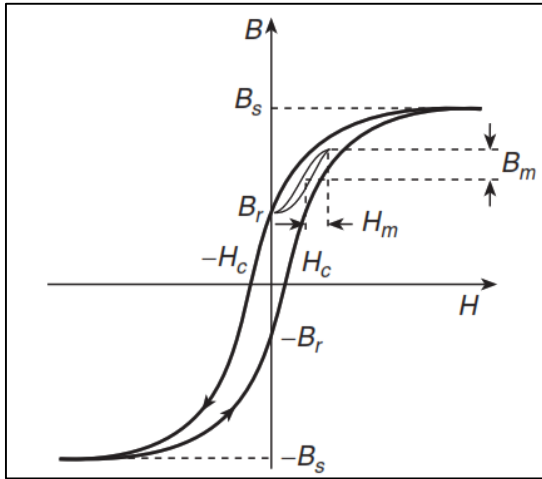
2.7.5. Paramanyetik malzemeler

Alüminyum (Al), kalsiyum (Ca), krom (Cr), magnezyum (Mg), niyobyum (Nb), platin (Pt), titanyum (Ti) paramanyetik malzemeler için birkaç örnektir. Paramanyetikte, manyetik duyarlılık öncelikle manyetik dönme momentlerinden kaynaklanır ($m_s > m_o$). Enerji yörüngeleri sadece kısmen elektronlar tarafından işgal edilir. Elektron dönüşleri, küçük manyetik alan nedeniyle tamamen hizalı değildir. Harici alan sıfır olduğunda, bireysel dipoller rastgele yönlendirilir ve net iç manyetik alan sıfırdır. Bir harici alan uygulandığında, manyetik dipoller harici alan yönünde hizalanır. Bu alanın büyüklüğü artıp, sıcaklık azaldıkça dipollerin hizalanma derecesi artar. Paramanyetikte spin momentleri yüksek sıcaklıkta kaybolur. Paramanyetizma sadece harici bir manyetik alanın varlığında meydana gelir. Bu alan sıfıra düşürüldüğünde, dipollerin hizalanması kaybolur ve dipoller rastgele yönlendirilir.

Paramanyetik malzemeler küçük ve pozitif manyetik duyarlılığa sahipler $\chi_m = M/H \approx 10^{-5} > 0$, $\mu_r > 1$ ile sonuçlanır. Örneğin, Alüminyum (Al) için $\mu_r = 1,00002$, titanyum (Ti) için $\mu_r = 1,0002$ ve platin (Pt) için $\mu_r = 1,0003$. Paramanyetik malzemeler doğrusaldır ve bağıl geçirgenlikleri, uygulanan manyetik alandan bağımsızdır.

2.8. Histerezis

Manyetizasyon eğrisine histerezis ismi verilmektedir ve nüvedeki manyetik sürtünmeden kaynaklanır. "Histerezis" kelimesi "geride kalmak" anlamına gelir ve manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan yoğunluğu arasındaki ilişkidir. Bu değer nüve malzeme özelliklerine göre belirlenir. Ferromanyetik bir malzemenin "hafızası" vardır ve harici alan çıkarıldıktan sonra mıknatıslanmış halde kalır. İndüklenen manyetizasyon, manyetik alanın çıkarılmasından sonra bile kaybolmaz. $B-H$ eğrisi, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi doygunluk sergileyen, doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Manyetik alan yoğunluğu arttığında, manyetik akı yoğunluğu artar. Yüksek H değerlerinde, nüve manyetizasyonu, manyetik momentlerin tam hizalanmasına karşılık gelen doyma değerine yaklaşır ve manyetik akı yoğunluğu B , doyma değerine ulaşır (B_s). Manyetik alan yoğunluğu azaldığında, alan hareketine direnen sürtünme kuvvetleri nedeniyle birçok alan hizalı kalma eğilimindedir. Bu nedenle, alanlar başlangıçtaki hizalanmamış düzenlemelerine dönmeye başlamadan önce manyetik alan önemli ölçüde azaltılmalıdır.

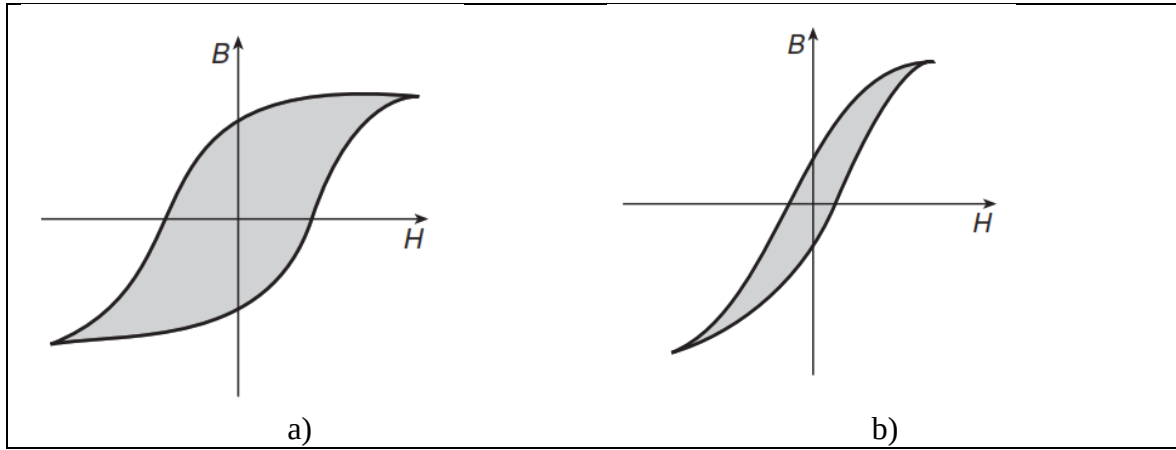


Şekil 2.5. Nüvenin $B-H$ histerezi [61]

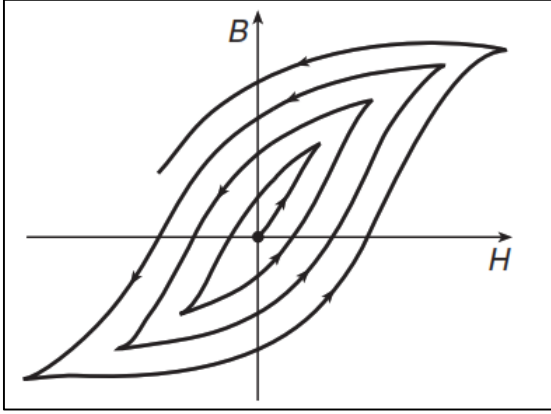
Manyetik alan yoğunluğu sıfıra düşürüldüğünde, manyetik akı yoğunluğu sıfır olmaz çünkü alanlar kısmen hizalı kalır ve nüve artık akı yoğunluğu, artıklık veya kalan mıknatıslanma B_r olarak adlandırılan bazı artık manyetik akı yoğunluğunu korur. B 'yi sıfıra indirmek için, negatif zorlayıcı kuvvet veya ters bir manyetik alan yoğunluğu uygulanmalıdır $H = H_c$. Manyetik alan şiddeti daha da azaltıldığında, manyetik akı yoğunluğu da azalır ve doyma değerine ulaşır. Manyetik alan şiddeti arttığında, manyetizasyon eğrisi farklı bir yol izler. $H=0$ 'da, $B=\pm B_r$ ve $B=0$ 'da, $H=\pm H_c$ olur. Bu nedenle, manyetizasyon eğrisi tamamen tersine çevrilemez. H 'nin düşük değerlerinde isteksizlik düşük ve doyma bölgesinde yüksektir. Bu nedenle ferromanyetik nüveli manyetik devreler doğrusal değildir. Toroidal

çekirdeğe sahip bir indüktördeki manyetik akı, çekirdeğin iç tarafından artmaya başlar. Şekil 2.5., kararlı durum işlemi için $H(t)$ ve $B(t)$ 'nin AC bileşenlerinin salınımı tarafından belirlenen küçük bir histerezis döngüsünü gösterir.

Histerezis döngüsünün şekli ve boyutu, ferromanyetik malzemenin özelliklerine ve uygulanan H alanının büyüklüğüne bağlıdır. Sert ve yumuşak manyetik malzemeler için histerezis döngüleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Manyetik nüvelerde, dar histerezis döngülerine sahip olan yumuşak ferromanyetik malzemeler kullanılır. Histerezis döngüsünün çevrelediği alan, ısı üreten alanların yeniden hizalanması nedeniyle malzemeyi histerezis döngüsünden geçirmek için gereken enerjiyi temsil eder. Bu nedenle, $B - H$ döngüsünün alanı, bir döngü için hacim başına histerezis enerji kaybına eşittir. B_m büyüklüğü arttığında, $B - H$ döngüsünün alanı da artar. Bu nedenle histerezis enerji kaybı artar. Girdap akımları nedeniyle frekans arttıkça $B - H$ döngüsü genişler. Sargılar ve transformatörler için mükemmel bir nüve, çok dar ve çok yüksek $B - H$ histerezise sahip olmalıdır. Büyüyen salınımlar için ardışık histerezis döngülerinde taşıyarak bir ferromanyetik malzemenin manyetizasyon süreci Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Sert ve yumuşak ferromanyetik malzemeler için histerezis döngüleri: a) Sert manyetik malzeme için histerezis döngüsü, b) Yumuşak manyetik malzeme için histerezis döngüsü [61].



Şekil 2.7. Artan salınımlar için ferromanyetik malzemenin ardışık histerezis döngülerinden geçirilerek manyetizasyonu [61].

2.9. Nüve Geometrileri

Bir manyetik çekirdeğin seçimi için aşağıdaki hususların göz önünde bulundurulması gerekir:

- Nüve malzemesi
- Nüve geometrisi
- Nüve boyutu
- Hava boşluğunun uzunluğu

Nüveler, hava boşluklu ve hava boşluksuz kap nüveleri, güç kalitesi nüveleri, dikdörtgen modüler nüveler, ekonomik transformatör tasarım nüveleri gibi çok çeşitli boyut ve şekillerde üretilir.

2.10. Ferromanyetik Nüve Malzemeler

Yumuşak manyetik malzemelerden oluşan beş nüve tipi vardır:

1. Demir alaşımlı nüveler,
2. Nikel – demir ve kobalt – demir nüveler,
3. Ferrit nüveler,
4. Toz nüveler,
5. Nanokristal nüveler.

2.10.1. Demir nüveler

Malzemelerin manyetik özellikleri, hassas alaşım bileşiminin yanı sıra tanelerin boyutuna ve şekline bağlıdır. Demir nüveler, demir (Fe) ve az miktarda silikon (Si), nikel (Ni), kobalt (Co) ve krom (Cr) alaşımlarından oluşur. Bu alaşımlar ferromanyetik ailesine aittir. Demir nüveler düşük öz dirençli, yüksek bağıl geçirgenlikli ve yüksek doyma akı yoğunluğuna sahiptir. Demir nüvelerin direnci, alüminyum (Al) ve bakır (Cu) gibi iyi iletkenlerinkiyle karşılaştırılabilir.

2.10.2. Ferrosilikon nüveler

Silikon manyetik çelik, bir demir-silikon (FeSi) alaşımıdır ve düşük frekanslarda en yaygın olarak kullanılan yumuşak manyetik malzemedir. İlk olarak, silikon öz direncini artırır ve böylece girdap akımlarını ve girdap akımı kayıplarını azaltır. %3 silikon ilavesi, direnci yaklaşık dört kat artırır. İkincisi, silikon, demirin manyeto-anizotropi enerjisini azaltır ve bağıl geçirgenliği artırır ve böylece histerezis nüve kayıplarını azaltır. Üçüncüsü, silikon manyetostriksiyonu düşürür ve böylece transformatör gürültüsünü azaltır. Ancak silikon, doyma akı yoğunluğunu ve Curie sıcaklığını T_c azaltır. $Si \leq \%1$ olan demir nüvelere düşük silikonlu çelikler ismi verilir. Demir nüvelerin tipik bağıl geçirgenliği, 2500 ila 5 000 arasındadır. FeSi nüve öz direncinin tipik değerleri, 10^{-7} ila $7 \times 10^{-7} \cdot m$ arasında değişir. Demir laminasyon nüvelerinin doyma akış yoğunluğunun tipik değerleri, silikon çelikler için 1,5 ila 2,2 T ve 0,5 ila 2 T arasında yüksektir. Demir nüvelerin Curie sıcaklığı yüksektir ve 760 °C ile 810 °C arasında değişir. Demir nüvelerde hem histerezis hem de girdap akımı kayıpları mevcuttur. Ancak girdap akımı kaybı, histerezis kaybından çok daha yüksektir. Spesifik güç kaybı, $f = 50$ Hz ve $B = 1,5$ T'de 0,3 ila 3 W/kg arasındadır. Demir nüveler, düşük öz direnç nedeniyle yüksek girdap akımı kaybı nedeniyle 500 Hz'ye kadar düşük frekanslarda kullanılır. Girdap akımlarını azaltmak için, demir nüveler, birbirinden ince bir yalıtım kaplamasıyla izole edilmiş birçok ince laminasyon yığınının yapıldır. Demir nüvelerin uygulamaları, 50 veya 60 Hz şebeke hattı frekansları için düşük silikonlu çeliklerden yapılmış güç transformatörleri, 400 Hz'de çalıştırılan uçak güç transformatörleri, elektrik motorları, jeneratörler, röleler ve 5 kHz'in altında çalıştırılan filtre sargılarıdır. Çizelge 2.4., çeşitli ferromanyetik malzemeler için frekans aralıklarını göstermektedir.

2.10.3. Amorf alaşım nüveler

Amorf yapılarıdaki atomlar kristal (periyodik) bir yapı oluşturmazlar ve bir düzensizlik içindedirler. Amorf manyetik malzemeler, demir ve kobalt ve nikel gibi diğerk manyetik malzemelerin veya bor, silikon, niyobyum ve manganez gibi geçiş metallerinin alaşımlarıdır. Amorf metaller, camla benzer kristal olmayan bir yapıya sahip oldukları için metalik camlar olarak adlandırılırlar. Sıcak erimiş metaller 1300 °C'de bir soğutma silindiri üzerinde sıkıştırılır. Amorf nüveler ince şeritler halinde üretilir. Bağıl geçirgenlik 150 000 ila 1 000 000 arasında ve çok yüksektir. Doyma akı yoğunluğu 0,7 ila 1,8 T aralığındadır. Özdirenç ise $1,2 \times 10^{-6}$ ila $2 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ aralığındadır. Maksimum alışma frekansı 250 kHz'e çıkabilir.

Çizelge 2.4. Ferromanyetik malzemelerin frekans aralığı [61]

Malzeme	Frekans Aralığı
Demir alaşımları	50 – 3000 Hz
Nikel–demir alaşımlar	50 – 20 000
kobalt– demir alaşımlar	1 – 100 kHz
Nanokristal	0,4 – 150 kHz
Amorf alaşımları	0,4 – 250 kHz
MnZn ferritler	10 – 2000 kHz
Demir tozları	0,1 – 100 MHz
NiZn ferritler	0,2 – 100 MHz

2.10.4. Nikel-demir ve kobalt-demir nüveler

Demir, daha yüksek bir geçirgenlik elde etmek için genellikle nikel ile veya daha yüksek bir doygunluk manyetik akı yoğunluğu elde etmek için kobalt ile alaşımlanır. Nikel yüzdesine göre farklılık gösteren iki nikel - demir alaşımı kategorisi düşük nikel alaşımları (% 40 – 50 Ni) ve yüksek nikel alaşımları (% 78 – 82 Ni)'dir. Nikel – demir (NiFe) alaşımları (%40 Ni veya %80 Ni ve %4 Mo), 40 000 ila 50 000 ile herhangi bir yumuşak manyetik malzemenin en yüksek geçirgenliğine sahiptir. Doyma akı yoğunluğu $B_s = 0,8 - 1,5$ T'dir ve zdireni $4,8 \times 10^7$ ila $5,8 \times 10^7 \Omega \cdot m$ aralığındadır ve curie sıcaklığı $T_c = 450$ °C'dir. Daha yüksek dirençler, bu çekirdeğı ses frekansı uygulamaları için uygun hale getirir. NiFe alaşımlarından yapılan nüveler mekanik streslere karşı hassastır. Bu nedenle bu nüveler koruyucu plastik veya alüminyum kasalara yerleştirilerek nveyle kasa arasındaki boşluk sönümleme ortamı ile

doldurulur. Nikel – demir alaşımlı nüveler, yüksek bağıl geçirgenlikleri nedeniyle akım transformatörlerinde kullanılır.

Nikel-demir çekirdeğin uygulamaları, akım transformatörlerini, geniş bantlı transformatörleri, doğrusal transformatörleri, darbe transformatörlerini, doyurulabilir reaktörleri, güç inverterlerini, DC-DC dönüştürücüleri ve manyetik yükselticileri içerir.

Kobalt-demir (CoFe) metal alaşımları (%50 Co), en yüksek doyma akış yoğunluğuna sahiptir ($B_s = 2,4$ T). Bu alaşımın bağıl geçirgenli $\mu_r = 10\,000$ ve öz direnci $\rho_c = 3,5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 'dir. Spesifik güç çekirdeği kaybı, $f = 5$ kHz ve $B = 0,25$ T'de $20 - 24$ W/kg'dır. Bu malzemenin kalınlık değerleri $0,05$ ve $0,1$ mm'dir. Kobalt-demir nüveler, çok yüksek akı yoğunluklarında düşük güç kayıplı özel transformatörlerde, manyetik yükselticilerde ve 20 kHz'de uzay uygulamalarında kullanılır.

2.10.5. Ferrit nüveler

Ferritler ferrimanyetik malzemelerdir ve manganez (Mn) ve çinko (Zn) veya nikel (Ni) oksitleri veya karbonatlarıyla karıştırılmış demir oksitlerden (Fe_2O_4) yapılmış yoğun, sert, kırılgan, kimyasal olarak homojen polikristal seramiklerdir. Bu malzemeler preslenir ve daha sonra $1000^\circ C$ ile $1500^\circ C$ arasındaki sıcaklıklarda fırınlanır. Metal oksitlerine seramik denir. Çoğu seramik, girdap akımlarını azaltan yüksek dirençli yalıtkanlardır. Bir ferrit, $10 - 20 \mu m$ mertebesinde küçük kristallerden oluşur. Bu kristallerde manyetik alanlar oluşabilir. Yumuşak ferritlerde kristal yapı kübiktir. Ferritler için genel bir kimyasal bileşim formülü $MMFe_2O_4$ 'tür. Burada MM, manganez (Mn), çinko (Zn), nikel (Ni), kobalt (Co), bakır (Cu), demir (Fe) gibi geçiş metallerini temsil eder. Ferritlerin en yaygın kimyasal bileşimleri $NiZnFe_2O_4$ ve $MnZnFe_2O_4$ 'tür.

Ferritler, bitişik atomik momentlerin antiparalel hizalanmasını gösterir, ancak momentler eşit değildir. Ferritler çok yüksek nispi geçirgenliğe μ_r , yüksek öz dirence ve düşük doyma akı yoğunluğuna sahiptirler.

Tipik μ_r aralığı 40 ile $10\,000$ arasındadır. Ferrit nüvelerin tipik öz direnci 10 mm'dir. Ferritlerin öz direnci, genellikle en az 10 faktörü ile demir nüvelerinkinden çok daha yüksektir, ancak bu değer 1 ile 10 arasında değişebilir. Ferritler yalıtkandır ve bu sebepten

dolayı düşük girdap akımı kayıpları nedeniyle yüksek frekanslı uygulamalar için kullanılabilir. Tipik doygunluk manyetik akı yoğunluğu 0,3T'dir. MnZn ve NiZn ferritlerinin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 10 – 18 aralığındadır. Bu nüveler, 10 kHz ile 50 MHz arasındaki yüksek frekans aralığında kullanılır. Yüksek öz direnç nedeniyle ferrit nüvelerde girdap akımı güç kaybı çok düşüktür. Ferrit nüveler sadece histerezis kaybına sahiptir.

Güç kaybı yoğunluğunun değerleri, $B_m = 100$ mT ve $f = 100$ kHz'de $P_v = 100$ mW/cm³'tür. $f = 500$ kHz ve $B_m = 50$ mT'de $P_v = 300$ mW/cm³'tür. Ferrit nüveli indüktörlerin kalite faktörü Q yüksektir. Ferritlerin benzersiz bir sınırlayıcı özelliği, düşük Curie sıcaklıkları $T_c = 150 - 300$ °C'dir.

Curie sıcaklığı T_c aşıldığında ferritler ferromanyetik özelliklerini kaybederler. Spesifik ferrit güç kaybı $f = 20$ kHz'de 50 mW/cm³'tür. Ferrit nüveler, 500 kHz'in üzerindeki frekanslarda en düşük güç kayıplarına sahiptir. Ferritlerin termal iletkenliği 35–43 mW/(cm · °C)'dir.

En yaygın ferrit alaşımları manganez-çinko (MnZn) ve nikel-çinkodur (NiZn). Manganez-çinko (MnZn) gibi yumuşak ferritlerin içeriği: $Mn + Zn + Fe_2O_3$ 'tür. Düşük frekanslarda $\mu_r = 1000-4000$, orta doygunluk akı yoğunluğu $B_s = 0,4 - 0,8$ T ve nispeten düşük öz direnç $\rho_c = 0,5 - 2$ Ω.m'de yüksek bir bağıl geçirgenliğe sahiptirler ve Curie sıcaklığı düşüktür (150 °C'den 225 °C'ye kadar).

Nikel-çinko (NiZn) yumuşak ferritler kimyasal formülü: $Ni+Zn + Fe_2O_3$ 'tür. Düşük frekanslarda düşük bağıl geçirgenliğe ($\mu_r = 40 - 300$), geniş bir frekans aralığında sabit bağıl geçirgenliğe, yüksek frekanslarda yüksek öz direnç $\rho_c = 10^3$ ila 10^7 Ω · m'ye ve düşük kayıplara sahiptirler. Ayrıca, doyma akı yoğunluğu düşüktür, $B_s = 0,8$ T ve Curie sıcaklığı $T_c = 300$ °C'dir. Bu yumuşak ferritlerin çalışma frekansları 100 kHz'den 100 MHz'e kadardır. NiZn ferritlerinin manyetik özellikleri, yüksek manyetik alanlarda değişebilir.

Ferritlerin önemi büyük ölçüde yarı iletken sıcaklık aralığındaki yüksek dirençlerinden kaynaklanmaktadır. Boşluklu ferrit nüveler, önemli miktarda enerji depolayabilir. Güç elektroniği uygulamalarında ferrit nüve popülerliğinin nedenleri düşük maliyet ve düşük kayıplardır. Ancak bu seramikler yüksek mekanik gerilmeler altında kırılabilirler.

Bir ferritin bağıl geçirgenliği sıcaklıkla birlikte maksimum değere yükselir ve ardından 1'e düşer. Ferritlerin özdirenci frekansla azalır. Sıcaklık arttıkça, ferrit nüve için doyma manyetik akı yoğunluğu azalır. Oda sıcaklığında B_s değerinin %40 veya %50'ye kadar düşebilir. Ferrit nüveler, diğer seramik malzemeler gibi kırılgandır ve mekanik şoklara ve titreşim koşullarına karşı hassastır. Hızlı değişen mekanik yükler ve yüksek hızlı soğutma, ferrit nüvelerin çatlamasına veya bozulmasına neden olabilir. Mekanik nüve stresi arttıkça, çekirdeğin bağıl geçirgenliği azalır.

Bir ferritin bağıl geçirgenliği sıcaklıkla maksimum değere yükselir ve ardından 1'e düşer. Sıcaklık arttıkça, ferrit nüve için doyma manyetik akı yoğunluğu azalır ve oda sıcaklığında B_s değerinin %40 veya %50'sine kadar düşebilir.

Ferrit nüveler, diğer seramik malzemeler gibi kırılgandır ve mekanik şoklara ve titreşim koşullarına karşı hassastır. Hızlı değişen mekanik yükler ve yüksek hızlı soğutma, ferrit nüvelerin çatlamasına veya bozulmasına neden olabilir. Mekanik nüve stresi arttıkça, çekirdeğin bağıl geçirgenliği azalır.

2.10.6. Toz nüveler

Toz metal nüveler, toz haline getirilmiş demir veya toz haline getirilmiş demir alaşımlarından (demir bileşikleri esas olarak oksitler) temel malzemenin öğütülerek ince toz tanelerde dönüştürülmesi ve ardından bu tanelerin birbirinden ayırmak için etkisiz bir yalıtkan malzeme kaplanmasıyla üretilir. Bu işlem, doyma akısını ve özdirenci artırır, girdap akımı kaybını azaltır ve yapıdaki dağıtılmış hava boşluğunun boyutunu kontrol eder. Tozlar daha sonra basınç altında çeşitli nüve şekillerine preslenir. Hava boşluğu, manyetik taneleri bir arada tutan manyetik olmayan bağlayıcıdır. Hava boşluklarını oluşturmak, mevcut kapasiteyi ve frekans tepkisini dengelemek için yüksek derecede hassasiyet gerektirir. Genel kompozit çekirdeğin eşdeğer geçirgenliği belirlenir. Toz nüveli sargılar yüksek tepe akımları iletebilir.

Toz nüveler için malzeme maliyeti düşüktür. tanelerin boyutu 5 ila 200 μm arasındadır ve yüksek frekanslarda deri kalınlığından daha azdır. Yalıtım malzemesinin kalınlığı 0,1 ila 3 μm arasındadır. Bu malzeme, bağıl geçirgenliği azaltan ve çekirdeğin önemli miktarda enerji depolamasına izin veren dağıtılmış bir hava boşluğu eşdeğeri sağlar. Nüvelerde eşit olarak

dağıtılan küçük hava boşlukları, etkili geçirgenliği azaltır, ancak nüve doygunluğu oluşmadan önce sargıdan geçebilecek DC akımı miktarını artırır. μ_r değerleri, tane boyutuna ve karışımdaki manyetik malzeme miktarına bağlı olarak 3 - 550 aralığındadır. Öz direnç ise $\rho_c = 1 \Omega \cdot m$ 'dir. Bu nüveler, lamine demir nüvelerden daha yüksek manyetik akı yoğunluğu (0,5 – 1,3 T) ve çok daha yüksek öz direnç değerlerine sahiptir. Bu nedenle, lamine nüvelere göre çok daha düşük girdap akımı kayıplarına sahiptirler ve yüksek frekanslarda kullanılabilirler. Toz nüvelerin bağlı geçirgenliği, demir ferrit nüvelerden daha düşüktür ve genelde, 10 ila 550 arasındadır. μ_r 'nin standart değerleri 10, 14, 26, 35, 55, 60, 75, 90, 100, 125, 147, 160, 173, 200, 300 ve 550'dir. Bu malzemelerin Curie sıcaklığı $T_c = 450^\circ C$ 'dir. Enerji manyetik olmayan boşluklarda depolanır. Akı yoğunluğunun genliği arttıkça, bağlı geçirgenlik başlangıç değerinin %40'ı kadar azalır. Hava boşluklarının boyutu, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalıştırıldığında, nüve yaşlandıkça değişme eğilimindedir. $100^\circ C$ 'ye yaklaşan yüksek sıcaklıkta, tanelerin bir kısmı birbiriyle temas eder. Sonuç olarak girdap akımları ve nüve kayıpları artarak daha fazla ısı üretir ve yaşlanma sürecini daha da hızlandırır. Yeni tip demir tozlarında, dağıtılmış hava boşlukları oluşturmak için silikon veya alüminyum kullanılır. Bu yeni tozlar, bozulma olmadan $200^\circ C$ 'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Toz nüveler, ferrit nüvelerden çok daha yüksek nüve kaybı sergiler. Sargıdaki hava boşluğu nedeniyle girdap akımı kaybı, tek bir hava boşluğunu bölümlere ayırarak, dağıtılmış bir hava boşluğu kullanarak, düşük ve yüksek geçirgenliğe sahip nüvelerin bir kombinasyonunu kullanarak ve düşük geçirgenliğe sahip bir malzeme ekleyerek azaltılabilir. boşluklu nüve gecikmesi ve sargı arasında iki manyetik yol oluşturmak (daha düzgün bir manyetik alan dağılımı ile sonuçlanır) ve bir sarma şekli oluşturur. Düşük geçirgenliğe sahip toz malzemelerin nüve kayıpları, aynı manyetik akı yoğunluğu genliğinde ve aynı frekansda yüksek geçirgenlikli ferrit malzemelere kıyasla çok daha yüksektir.

Toz nüvelerin en yaygın uygulamaları toroidal indüktörler ve ayarlanabilir sargılardır.

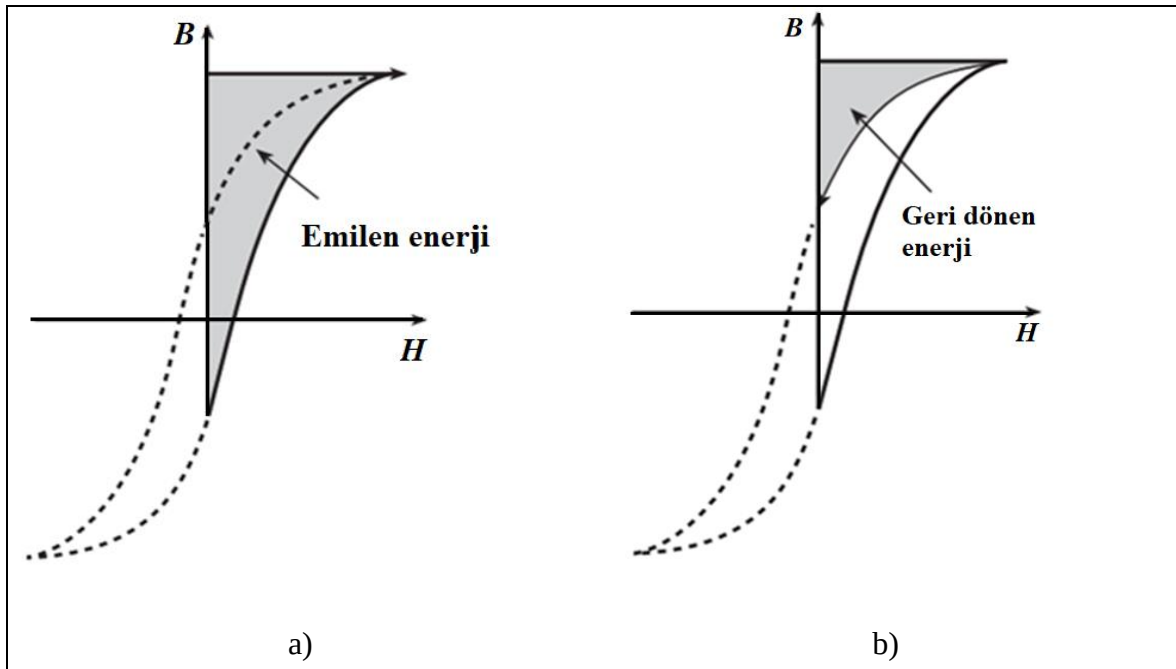
2.10.7. Nanokristal nüveler

Nanokristal nüveler, boyutu 7 - 20 nm olan ultra ince kristaller içerir ve bu nedenle nanokristaller olarak adlandırılır. Bu nüveler, silikon çeliklerin yüksek doygunluk manyetik akı yoğunluğunu ve yüksek frekanslı ferrit kayıplarını birleştirir. Bağlı geçirgenlik 15 000–150 000 aralığındadır. Doyma manyetik akısı 1,2–1,5 T aralığındadır. Öz direnç $\rho_c = 1,2 \times 10^{-6} m$ 'dir. Curie sıcaklığı $T_c = 600^\circ C$ 'dir. Spesifik güç kaybı $f = 20$ kHz ve $B = 0,2$ T'de 5

W/kg'dır. Nanokristal nüveler 150 kHz'e kadar kullanılır. Bu malzemeler doğrusal bir histerezis döngüsüne sahiptirler. Çok yüksek bir bağıl geçirgenlik, onları akım trafolarındaki ve ortak mod EMG filtrelerindeki uygulamalar için uygun hale getirir.

2.11. Histerezis Kaybı

Nüve kaybı ve artan nüve sıcaklığı, yüksek frekanslı uygulamalarda genellikle en önemli sınırlamalardır. Nüve kayıpları, histerezis kaybı ve girdap akımı kaybından oluşur. Histerezis kaybı, nüve malzemenin manyetik momentlerini hizalamak ve döndürmek için kullanılan enerjidir. Nüve kayıplarının fiziki çok karmaşıktır. Henüz, kimyasal içerik ve malzeme yapısı gibi nüve malzeme özelliklerinden nüve kayıplarını tahmin etmemize izin veren bir teori geliştirilmemiştir. Histerezis alanı ne kadar büyükse, çevrim başına kayıp o kadar fazla ve histerezis kaybı da o kadar büyük olur. Sargı akımı döngü boyunca değiştiğinde, belirli bir zaman aralığında, kaynaktan bobine enerji akar ve diğer bazı zaman aralıklarında, enerji kaynağa geri döner.



Şekil 2.8. Histerezis güç kaybı: a) H sıfırdan maksimum değerine yükseldiğinde nüve manyetizasyonu sırasında nüve tarafından emilen enerji, b) Nüve demanyetizasyonu sırasında, H maksimum değerinden sıfıra düştüğünde nüveden geri dönen enerji

Şekil 2.8. histerezis kaybını göstermektedir. Manyetik alan şiddeti sıfırdan maksimum bir değere yükseltildiğinde, enerji, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, bobine harici bir devre

tarafından sağlanır. Manyetik alan şiddeti maksimum değerden sıfıra düşürüldüğünde, enerji, Şekil 2.8.b'de gösterildiği gibi harici devreye geri döner. Sağlanan ve geri dönen enerji arasındaki fark, nüvede kaybolan enerjidir. Histerezis kaybı, bir nüvedeki manyetik alanları hizalamak ve döndürmek için kullanılan enerjidir. Manyetik alanların hizalamasını değiştirmekle ilgili sürtünme kuvvetlerinin üstesinden gelmek için bir miktar enerji manyetik bir çekirdeğe emilir. Bir AC akım devresinde bir sargı veya bir transformatör kullanıldığından, nüve malzeme, uygulanan akımın frekansı ile aynı sayıda histerezis döngüsünden bir saniyede geçer. Alanları hareket ettirmek için kullanılan enerji, nüve malzemede ısı olarak dağılır. Histerezis kaybı, histerezis alanıyla orantılı olduğundan, nüveler, dar histerezis döngülerine ve buna bağlı olarak döngü başına çok az enerji kaybına sahip olan yumuşak ferromanyetiklerden yapılır. Gerilimi v_L , akımı i_L , manyetik akı φ , manyetik akı yoğunluğu B , manyetik alan yoğunluğu H , kesit alanı A_c ve nüve hacmi V_c olan bir indüktörde, indüktörün akı, gerilimi ve akımı

$$\varphi = A_c B \quad (2.32)$$

$$V_L(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} = N \frac{d\varphi(t)}{dt} = N A_c \frac{dB(t)}{dt} \quad (2.33)$$

$$i_L(t) = \frac{l_c H(t)}{N} \quad (2.34)$$

burada $V_c = l_c A_c$ nüve hacmidir ve $d\lambda = v_L dt = N d\varphi$. Sargıya iletilen ve ısı olarak kaybedilen güç,

$$P_H = \frac{W_H}{T} = f W_H = V_c f \oint H dB(W) \quad (2.35)$$

ve birim hacim başına histerezis güç

$$P_h = \frac{P_H}{V_v} = f \oint H dB = f A_{BH} (W/m^3) \quad (2.36)$$

ile verilir. Bu nedenle, birim hacim başına histerezis güç kaybı, $B-H$ histerezis döngüsü tarafından çevrelenen A_{BH} alanı ve f frekansı ile orantılıdır. f frekansı ne kadar yüksek olursa, $B-H$ döngüsü o kadar çok kez dışarı süpürülür ve bu da daha yüksek bir histerezis kaybına

neden olur. Her döngüde akı yoğunluğu genliği B_m ne kadar büyük olursa, A_{BH} alanı o kadar büyük olur ve daha fazla nüve kaybı meydana gelir. Başka bir deyişle, histerezis döngüsünün alanı, döngü başına birim hacim başına histerezis enerji kaybına karşılık gelir. V_c hacminin bir çekirdeğindeki histerezis güç kaybı,

$$P_H = P_h V_c(W) \quad (2.37)$$

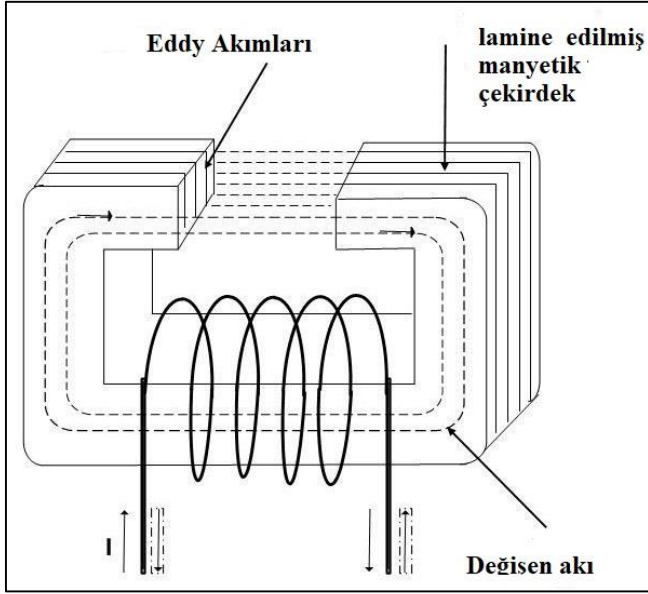
İfadesinden elde edilir. Bağlı geçirgenlik değeri sıcaklıkla azaldığından dolayı, histerezis güç kaybı yoğunluğu da sıcaklık ile azalır. Genel olarak, histerezis güç kaybı yoğunluğu,

$$P_h = k_h f B_m^2 \quad (2.38)$$

ile verilir. Bu denklemde k_h histerezis kayıp katsayısıdır. Yumuşak demir nüveler bu koşulu karşılar ve manyetik alanın hızla tersine çevrildiği uygulamalar için uygundur. Tersine, sert çeliğin geniş bir histerezisi vardır ve bu da büyük histerezis kayıplarına neden olur. Ferritler ayrıca nispeten büyük bir histerezis alanına sahiptir. Çalışma frekansı arttıkça, B - H döngüsünün alanı da artar ve histerezis nüve kaybını artırır.

2.12. Girdap Akımı Nüve Kaybı

Manyetik bir malzemeye alternatif bir manyetik alan uygulandığında, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre malzemenin kendisinde bir emk indüklenir. Manyetik malzeme iletken bir malzeme olduğundan, bu emk'lar malzemenin gövdesi içinde akımı dolaştırır. Bu akımlar herhangi bir işlevden sorumlu olmadığından girdap akımı kaybı olarak bilinen manyetik malzemedeki bir kayıp (I^2R kaybı) üretir. Histerezis kaybına benzer şekilde, girdap akımı kaybı da manyetik malzemenin sıcaklığını artırır. Bir manyetik malzemedeki histerezis ve girdap akımı kayıpları, demir kayıpları veya nüve kayıpları veya manyetik kayıplar adıyla bilinir.



Şekil 2.9. Manyetik çekirdeğin kesit görünümü

Manyetik çekirdeğin bir kesit görünümü Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Değişen akı çekirdeğin kendisiyle bağlantı kurduğunda, nüvede emk'yi indükler ve bu da kenar akım kayıpları adı verilen dolaşım akımını oluşturur ve karşılığında bu akım, girdap akımı kaybı veya (I^2R) kaybı olarak adlandırılan bir kayıp üretir; burada I akımın değeri ve R , girdap akımı yolunun direncidir. Nüve, daha büyük kesit alanına sahip katı demirden yapılmışsa, I ’in büyüklüğü çok büyük olacak ve dolayısıyla kayıplar yüksek olacaktır.

Akımın büyüklüğü, katı çekirdeği manyetik alana paralel düzlemde laminasyon adı verilen ince tabakalara bölerek azaltılabilir. Her laminasyon, ince bir vernik veya oksit film kaplama tabakası ile diğerinden yalıtılır. Çekirdeğin lamine edilmesiyle, her bölümün alanı azaltılır ve dolayısıyla indüklenen emk de azalır. Akımın geçtiği alan küçüldükçe girdap akımı yolunun direnci artar.

Girdap akımı kaybı, silikon çelik gibi daha yüksek öz direnç değerine sahip bir manyetik malzeme kullanılarak da azaltılır. Girdap akımı kaybı için matematiksel ifade,

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (2.39)$$

şeklindedir. Bu denklemde,

K_e - girdap akımının katsayısı (büyüklüğü manyetik malzemenin doğasına bağlı),

$B_m - wb/m^2$ cinsinden maksimum akı yoğunluğu değeri,

T – metre cinsinden laminasyon kalınlığı,

$f - Hz$ cinsinden manyetik alanın tersine çevrilme frekansı,

$V - m^3$ cinsinden manyetik malzemenin hacmi Girdap Akımı kaybı.

2.13. Nüve Doygunluğu

Birçok sargı, manyetik nüveler kullanılarak yapılır. Manyetik nüve, manyetik alanının bir iletkenidir. Kesit alanı A_c ve doygunluk manyetik akı yoğunluğu B_s olan bir sargı için, manyetik çekirdeğin doymaya başladığı manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri ile sonuçlanır. Doymuş manyetik akı yoğunluğu $B_s = \mu_0 H_s$ sabittir. Nüve doygunluğunu önlemek için, nüvedeki manyetik akının maksimum değeri düşürülmeli veya nüve kesit alanı A_c artırılmalıdır. Ferrit nüvelerdeki düzgün olmayan bir manyetik akı dağılımı, lokalize manyetik doygunluk ve sıcak noktalar yaratır.

Manyetik çekirdeğin doymaya başladığı manyetik akı bağlantısı:

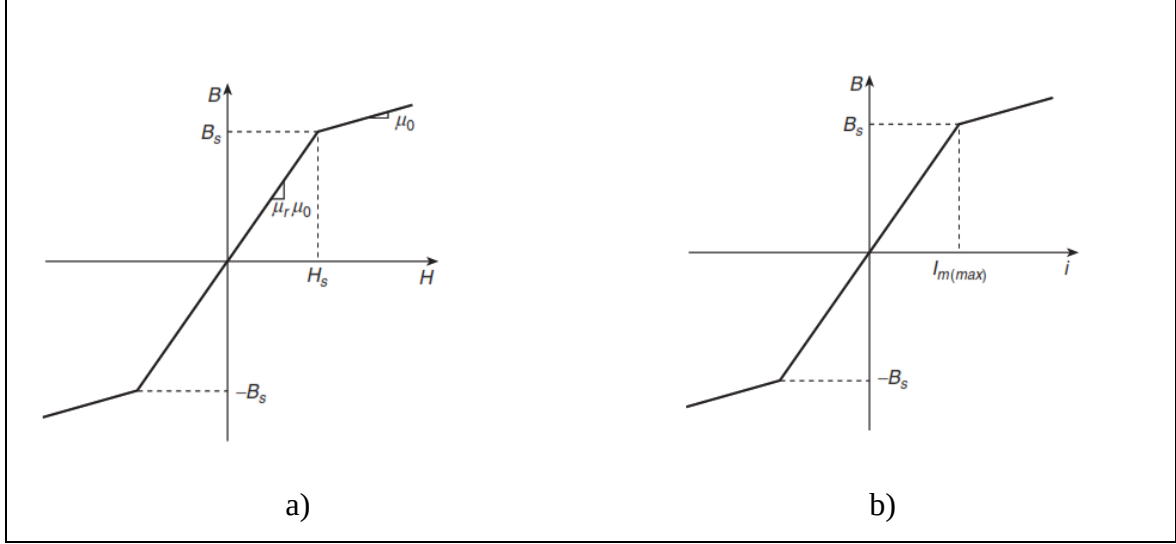
$$\lambda_s = N\varphi_s = NA_c B_s = LI_{max} \quad (2.40)$$

şeklinde verilir. Manyetik alan yoğunluğu, $F = Ni$ ile orantılıdır. Şekil 2.10., H ve i 'nin fonksiyonları olarak B 'yi göstermektedir. Doyma akı yoğunluğu

$$B_s = \mu H_s = \frac{\mu_{rc} \mu_0 N I_{max}}{l_c} \quad (2.41)$$

ifadesiyle verilir. Nüve doygunluğunu önlemek için, tepe sargı akımı $I_{m(max)}$ 'ı veya N dönüş sayısını azaltmak gerekir.

$$\frac{\mu_{rc}\mu_0 N I_{max}}{l_c} < B_s \quad (2.42)$$



Şekil 2.10. Manyetik alan yoğunluğu ve sargı akımının fonksiyonları olarak manyetik akı yoğunluğu: (a) Manyetik alan yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak manyetik akı yoğunluğu, (b) sabit sayıda dönüşte sargı akımının bir fonksiyonu olarak manyetik akı yoğunluğu.

Faraday yasasından, $d\lambda = v_L(t) dt$. Bu nedenle, indüktör gerilimi ile akı bağlantısı arasındaki genel ilişki:

$$\lambda(t) = \int_0^t v_L(t) dt + \lambda(0) \quad (2.43)$$

şeklinde verilir. Transformator için,

$$(N_1 i_1 + N_2 i_2 + \dots)_{max} \leq B_s A_c R = \frac{B_s l_c}{\mu_{rc} \mu_0} \quad (2.44)$$

2.13.1. Sinüzoidal gerilim için nüve doygunluğu

Doyma akı yoğunluğu B_s olan bir manyetik çekirdeğe sahip bir indüktör için Şekil 2.11., indüktör gerilimi v_L 'nin ve manyetik akı bağlantısının λ sinüzoidal dalga formlarını göstermektedir. Bu dalga formlarının DC bileşenlerinin sıfır olduğu varsayılır. Sargı gerilimi

$$v_L = V_{Lm} \sin \omega t \quad (2.45)$$

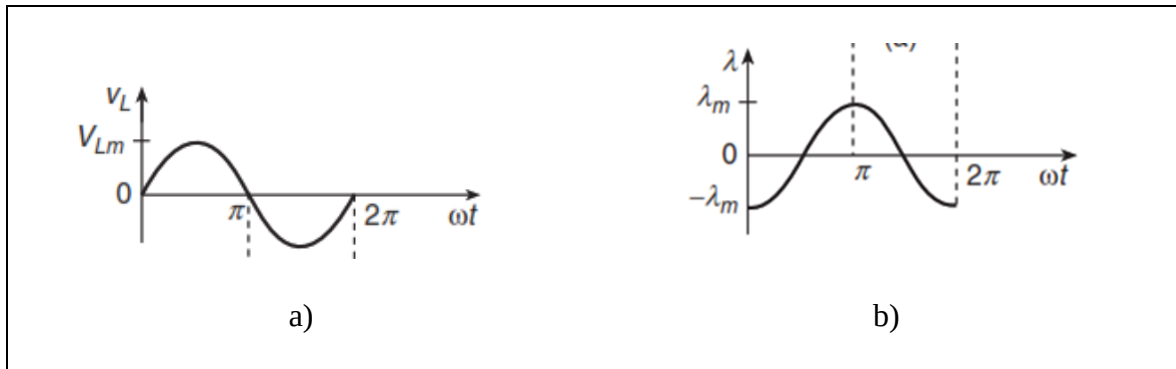
ile verilir. Manyetik akı bağlantısının tepe-tepe değeri,

$$\Delta \lambda = NA_c B_m < NA_c B_s \quad (2.46)$$

olur. Manyetik akı bağlantısının kararlı durum dalga formu,

$$\lambda(t) = -\frac{V_{Lm}}{\omega} \cos \omega t = -\lambda_m \cos \omega t \quad (2.47)$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.11. Kare dalga formları ve sinüzoidal sargı gerilimi için karşılık gelen akı bağlantısı.

a) Sargı geriliminin dalga formu v_L . b) akı bağlantısının dalga formu λ

Böylece, f frekansı azaldıkça manyetik akı bağlantısının genliği artar. Minimum frekans f_{min} , manyetik akı bağlantısının genliği doyma değerine ulaştığında meydana gelir.

$$\lambda_m = \lambda_s = \frac{V_{Lm(max)}}{\omega_{min}} \quad (2.48)$$

Sargının çekirdeği doyurmadan çalışabileceği en düşük frekans,

$$\begin{aligned} f_{min} &= \frac{V_{Lm(max)}}{2\pi\lambda_s} = \frac{V_{Lm(max)}}{k_f N A_c B_s} \\ &= \frac{V_{L(rms)}}{4,44 N A_c B_s} \end{aligned} \quad (2.49)$$

şekilde verilir. Bu denklemde sinüzoidal sargı gerilimi için dalga formu faktörü, etkin değerinin sinüzoidal gerilimin genliğine oranı olarak tanımlanır.

2.14. Deri Etkisi

Zamanla değişen akım taşıyan bir iletken sargı, kendi akımlarından dolayı manyetik alanlara maruz kalır. Faraday yasasına göre, bu manyetik alanlar iletkenlerde girdap akımlarını oluşturan elektromotor kuvvetleri indükler. İki tür girdap akımı etkisi vardır: Deri etkisi ve yakınlık etkisi. Bir iletkendeki deri etkisi, kendi akımının neden olduğu manyetik alandan kaynaklanır. Yakınlık etkisi, bitişik iletkenlerde akan akımların neden olduğu manyetik alanlardan kaynaklanır. Bu etkilerin her ikisi de yüksek frekanslarda iletkenlerde düzgün olmayan akım yoğunluğuna neden olur. Bu yüksek frekanslı olaylar iletkenlerin yüksek frekanslı akımları iletme yeteneğini sınırlar. Deri etkisi ve yakınlık etkisi birbirine diktir ve ayrı ayrı düşünülebilir. Yakınlık etkisi, yüksek frekanslarda çok katmanlı sargılarda baskındır.

Zamanla değişen akım $i(t)$ taşıyan izole edilmiş yuvarlak ve düz bir iletken, iletkenin hem içinde hem de dışında zamanla değişen dairesel bir manyetik alan $H(t)$ indükler. Manyetik alanın büyüklüğü, $i(t)$ akımının değişim hızına ve iletken merkezinden radyal uzaklığa (r) bağlıdır. Düşük frekanslarda, iletkendeki akım yoğunluğu tekdüzedir ve manyetik alanın büyüklüğü iletken içindeki r mesafesi ile doğrusal olarak artar. İletkenin dışında, manyetik alanın büyüklüğü r ile ters orantılı olarak azalır. İletkenin içinde bulunan manyetik alan $H(t)$ iletkende girdap akımları $i_E(t)$ indükler. Harici akımın $i(t)$ frekansı arttıkça akım yoğunluğu

dağılımı daha düzensiz hale gelir. İletkenin dışındaki manyetik alan değişmeden kalır ve sadece net akıma $i(t)$ bağlıdır.

Deri etkisi, zamanla değişen akım taşıyan bir iletkenin kendi manyetik alanına (kendi kendine alan) girmesinden kaynaklanır, bu da iletkenin kendisinde girdap akımlarına neden olur. Lenz yasasına göre girdap akımları, birincil manyetik alana karşı çıkan ikincil bir manyetik alan üretir. Bir iletkende AC bir akım aktığında, iletken kendi akımı tarafından bir manyetik alan indüklenir, bu da iletkende fazladan dolaşım akımına neden olur. Sonuç olarak, akım yüzeye yakın akma eğilimindedir ve akım yoğunluğu yüzeyden iletkenin merkezine doğru azalma eğilimindedir. Çok yüksek frekanslarda, akımın tamamı iletken üzerinde çok dar bir yüzeyde akar. Bir telin içi akımın iletilmesine katkıda bulunmaz. Frekans arttıkça iletkenin etkin direnci artar ve güç kaybı da artar. Düşük frekanslarda akımın direnç üzerinde, yüksek frekanslarda ise sargı üzerinde etkisi baskındır.

Bakır kaybı olarak da adlandırılan sargı gücü kaybı, sargı direncinden geçen akım akışından kaynaklanır. DC ve düşük frekanslarda, J akım yoğunluğu iletkenin kesit alanı boyunca düzgün bir şekilde dağıtılır. İletken bir malzeme alternatif bir manyetik alana maruz kaldığında, içinde girdap akımları indüklenir. Yüksek frekanslarda, akım yoğunluğu, deri etkisi ve yakınlık etkisi iki mekanizmaların neden olduğu girdap akımları nedeniyle düzensiz hale gelir.

2.15. Deri Kalınlığı

Deri kalınlığı, bir iletkenin manyetik akı ve girdap akımı tarafından nüfuz etme derecesini tanımlar. δ_w , bir iletkenin deri kalınlığı veya nüfuz derinliğidir ve aşağıda verilmiştir:

$$\delta_w = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma_w}} = \sqrt{\frac{\rho_w}{\pi \mu_r \mu_0 f}} \quad (2.50)$$

Kaplama etkisi, yalnızca deri kalınlığı δ_w iletken kalınlığından çok daha büyükse ihmal edilebilir. Deri kalınlığı aynı zamanda sıcaklığa bağlıdır.

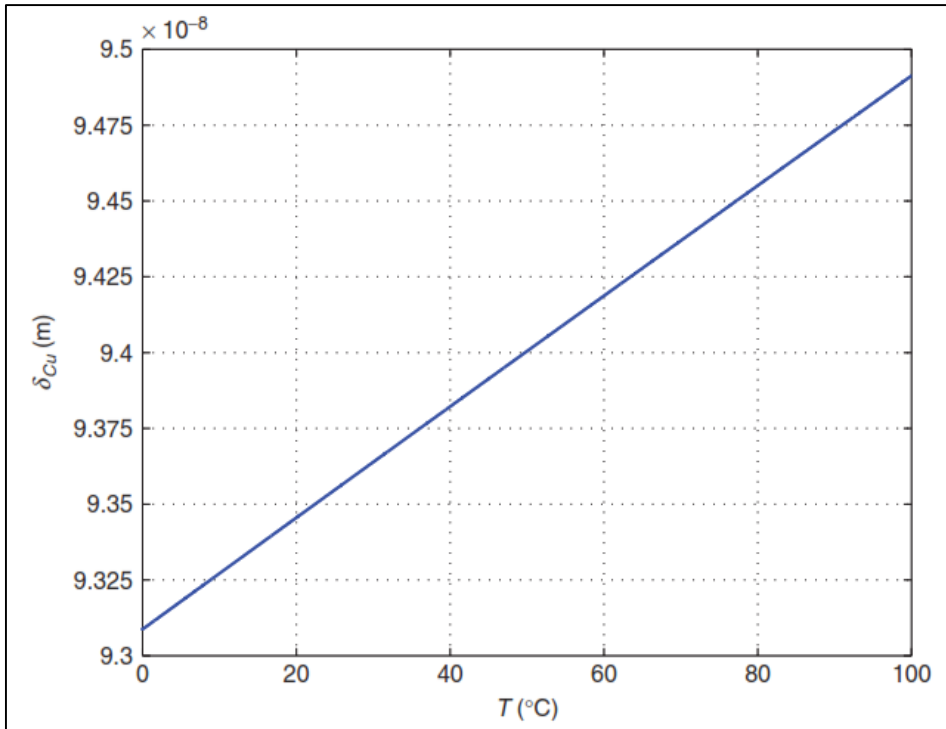
$$\delta_{\omega(T)} = \sqrt{\frac{\rho_{\omega(T_0)}[1+\alpha(T-T_0)]}{\pi\mu_r(T)\mu_0 f}} \quad (2.51)$$

Özdirenç sıcaklıkla artıp, bağıl geçirgenlik ise sıcaklık ile azalır. Bu nedenle deri kalınlığı sıcaklıkla artar. Bakır için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak yüzey kalınlığı Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

$T = 20^\circ\text{C}$ ’de bir bakır iletkenin yüzey kalınlığı,

$$\begin{aligned} \delta_{Cu(20^\circ\text{C})} &= \sqrt{\frac{\rho_{(Cu\ 20^\circ\text{C})}}{\pi\mu_0 f}} \\ &= \sqrt{\frac{1,724 \times 10^{-8}}{\pi \times 4 \times \pi \times 10^{-7} f}} = \frac{66,083}{\sqrt{f}} \text{ (mm)} \end{aligned} \quad (2.52)$$

ifadesiyle verilir.

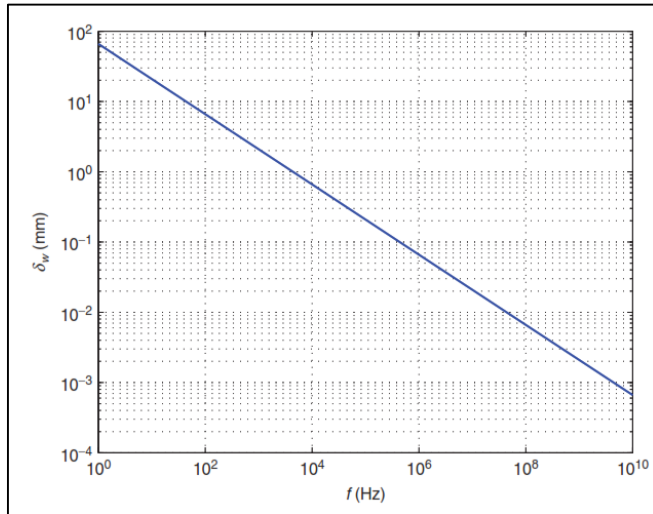


Şekil 2.12. Bakır için T sıcaklığının bir fonksiyonu olarak deri kalınlığı [61]

Çizelge 2.5. Bakır için $T = 20^\circ\text{C}$ 'de deri kalınlığı [61]

Frekans	Deri kalınlığı (δ_{Cu})
60 Hz	8,53 mm
400 Hz	3,3 mm
1 kHz	2,53 mm
10 kHz	0,66 mm
20 kHz	0.467 mm
100 kHz	0.209 mm
1 MHz	0.066 mm
10 MHz	20.9 μm
100 MHz	66 μm
1 GHz	2.09 μm
2 GHz	1.478 μm
10 GHz	0.66 μm

Şekil 2.13., $T = 20^\circ\text{C}$ 'de bakır için frekansın bir fonksiyonu olarak kabuk kalınlığını δ_w göstermektedir. Çizelge 2.5., ise seçilen frekanslarda ve $T = 20^\circ\text{C}$ sıcaklığında bakır için yüzey kalınlığını vermektedir.

Şekil 2.13. $T = 20^\circ\text{C}$ 'de bakır için f frekansının bir fonksiyonu olarak deri kalınlığı δ_w [61]

Bahsi geçen katı nüve malzemeleri kullanımı durumunda transformatör kayıpları yüksek frekanslarda dramatik hale gelir ve trafoların performansını sınırlar. Önceki çalışmalar, parazitik sığa ve dirençsel kayıp gibi transformatör kayıplarının nedenlerini ayrıntılı olarak tartışmıştır [62-65]. Katı manyetik nüveden kaynaklanan nüve kaybı, transformatörlerin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Giriş bölümünde literatürde katı manyetik nüve kaybı için önerilen çeşitli çözümler detaylıca incelenmiştir. Sonuç olarak, sadece birkaç çalışma sıvı manyetik nüveli transformatörleri ele almaktadır. Düşük elektrik iletkenliği ve

süper paramanyetizma gibi ayırt edici özellikleri ile sıvı manyetik nüve, girdap akımı ve histerezisin nüve kayıplarına bir çözüm olarak kabul edilir. Bölüm 3’te, bir transformatörde manyetik nüve olarak uygulanabilen sıvı ferro-nanoakışkan malzemelerin yapısı ve karakteristikleri ayrıntılı olarak incelenmektedir.

3. FERROMANYETİK AKIŞKANLAR VE MANYETİZASYON

3.1. Ferromanyetik Akışkanlar

Ferromanyetik akışkan (ferro-akışkan) araştırma alanı, çeşitli manyetik akışkanların sentezini ve özelliklerini, ferrohidrodinamik teorisinin temellerini, ferroakışkanların hidrodinamiğini, problemlerini ve uygulamalarını kapsamaktadır. Ferrohidrodinamik terimi manyetik alanların varlığında manyetik akışkanların akış davranışının tanımını içerir. Manyetoviskoz terimi ise etkinin teorik tartışmasını ve kayma hızının rotasyonel viskozite varyasyonunu içerir. Literatürde mekanik konumlandırmadan tıbbi uygulamalara farklı alanlarda ferroakışkanların çeşitli olası kullanımlarına geniş bir genel bakış sağlanmıştır. Günümüzde, ferroakışkanlar, bilgisayar sürücülerinde ve döner sistemlerde sıvı contalar olarak kullanımlarından, jeofizik akışları ve mikroakışkan cihazların geliştirilmesine yönelik laboratuvar deneylerinde kullanımlarına kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Harici bir manyetik alan tarafından kontrol edilebilen her türlü sıvı hem temel akışkanlar mekaniği/dinamiği ile ilgilenen bilim insanları, hem de uygulama mühendisleri için ilgi çekici bir konuyu temsil etmektedir.

Manyetik alanların hem yönlendirme hem de alan gücü açısından doğru bir şekilde değiştirilebilmesi, bu tür harici kuvvetlerin eklenmesi için manyetik akışkanları oldukça ilginç kılmaktadır.

Genel olarak, manyetik alan değişimi, karakteristik olarak farklı hidrodinamik davranış türlerine yol açabilir ve sistemin etkin bir şekilde kontrolü için kullanılabilir. Bu bağlamda, Manyetohidrodinamikte (MHD akışları) türbülansa geçiş, gök cisimlerinde, gezegenlerde ve büyük ölçekli endüstriyel tesislerde manyetik alanların oluşumu gibi birçok astrofiziksel ve jeofiziksel problemlerde önemli bir rol oynamaktadır [66, 67].

3.1.1. Yapısal kompozisyon ve düzenlenim

Ferroakışkan veya manyetik sıvı olarak da bilinen manyetik akışkanlar, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ gibi süperparamanyetik nanotanelerin bir taşıyıcı sıvı içinde bulunmaları sonucunda ortaya çıkan kararlı kolloidal süspansiyonlardır. Ticari olarak temin edilebilen ferroakışkanların çoğu, ortalama çapı yaklaşık 10 nm olan manyetik nanotaneler

içeren süspansiyonlardır. Bu tür süspansiyonların koloidal kararlılık durumları çok önemlidir. Bu kararlılık herhangi bir termal hareket halindeyken, hem yerçekimi alanındaki hem de manyetik alan gradyanlarındaki sedimantasyonun yanı sıra, manyetik etkileşim nedeniyle yığılmanın önlenmesine yol açar. Genel olarak, nano ölçek çapındaki tanelerin termal enerjisi kT (k , Boltzmann sabitini ve T mutlak sıcaklığı), garanti edilemese de kararlılık gereksinimlerini karşılar. Bunun bir nedeni, taneler temas eder etmez ortaya çıkan ve bu nedenle kümeleşmeye çalışan ‘Van der Waals’ çekimidir. Tanelerin bu tür geri döndürülemez yığılmayı önlemek için, taneler arasında doğrudan teması önlemek için genellikle bir yüzey aktif madde tabakası kullanılır. Bu yüzey aktif madde katmanları, taşıyıcı sıvının dielektrik özelliklerine uygun olmalıdır. Ferroakışkanlar, bilinen doğal olarak oluşan manyetik sıvılar olmadığından ve manyetohidrodinamikten farklı olarak, akış özelliğinin elektrik akımına ihtiyaç duymadan ve dolayısıyla karşılık gelen Lorentz kuvvetlerinin yokluğunda meydana geldiğinden dolayı özellikle ilgi çekicidir. Bu süspansiyonlar, güçlü bir mıknatıslanma alanının etkisi altında sıvı özelliklerini korurken güçlü manyetik davranış sergiler.

Modern ferroakışkanların çoğu, manyetik bileşen olarak manyetit (Fe_3O_4) veya kobalt ferrit (CoFe_2O_4) kullanır. Ferroakışkanın manyetik alan altındaki etkisi büyük ölçüde kullanılan manyetik bileşene bağlıdır. Örneğin, kobalt bazlı ferroakışkanlar, manyetit bazlı olanlardan önemli ölçüde daha güçlü etkiler gösterir. Ferroakışkanların üretimi için yaygın bir yöntem, mikron boyutundaki manyetit tanelerin, bir bilyalı değirmende yüzey aktif madde ve taşıyıcı sıvı varlığında 500-1000 saat boyunca taneler istenen nanometre aralığı boyutuna ulaşana kadar öğütülmesidir. Daha verimli bir üretim yöntemi, gerekli kimyasal reaksiyonla taneleri kimyasal olarak çöktürmektir [68]. Taşıyıcı sıvılar çok yönlü bir spektruma sahiptir ve farklı yağlardan, heptandan, kerosenden oluşabilir. Yüzey aktif maddenin genel olarak spesifikasyonu, taşıyıcı sıvının dielektrik özelliklerine uyması gerektiğinden daha karmaşık ve çok yönlüdür. Asetik asit, suda manyetit olarak kullanılacak bir yüzey aktif madde için bir örnek olabilir.

Akışkanlar genellikle opaktır ve temas edebilecekleri yüzeylerden temizlenmesi genellikle çok zordur, ancak son çalışmalar optik olarak şeffaf ve renkli ferroakışkanların sentezini bildirmektedir. Mevcut uygulamaların çoğu statik manyetik alanlar kullanırken alternatif ve dönen alanların etkileri gelecekteki uygulamaları araştırmak için kullanılmaktadır. Ferroakışkanlar içindeki manyetik taneler, etkileşmeyen manyetik dipollerin bir koleksiyonu

olarak modellenmiştir. Ferroakışkanlar kararlı kolloidlerdir, çünkü tanelerin Brownian hareketi, tam tane boyutuna ve taşıyıcı sıvının fiziksel özelliklerine bağlı olarak günler veya yıllar boyunca yerçekimi oturmasına direnmelerini sağlar. Teorik olarak, yüzey aktif madde tarafından sağlanan elektrostatik engel nedeniyle tanelerin topaklanması önlenir, ancak pratikte daha düşük kaliteli sıvılar, bir elektron mikroskobu ile tanımlanabileceği gibi bir manyetik alana maruz kaldıklarında daha uzun zincirlerin oluşumuna eğilimlidir.

3.1.2. Ferroakışkanlar ve nanobilim

Harici alternatif ve dönen manyetik alanlara maruz kaldıkları durumlarda ferroakışkanların kapsamlı araştırma ve uygulama eksikliği devam etmektedir. Birçok araştırmacı, kolloid özelliklerini belirli uygulamalara uyarlamak amacıyla nanotaneerin ve sıvıların üretimini incelemeye devam ediyor. Bununla birlikte, araştırmacılar, kalıcı olarak mıknatıslanmış tanelerin 10 nm çapından dolayı, hızla gelişen mikroeletromekanik sistemler (MEMS) ve nanoeletromekanik sistemler (NEMS) alanlarında ferroakışkan uygulamalarının potansiyelini değerlendirmeye başlamıştır. Bu boyut ölçeği doğal olarak ferroakışkanları MEMS ve NEMS cihazlarına uyum için uygun bir seçenek haline getirir.

3.2. Zamanla Değişen Manyetik Alanda Ferroakışkan

Mikroakışkan kullanan cihazlarda ferroakışkanların zamanla değişen manyetik alanlardaki davranışı, bu konuyla ilgili farklı uygulama alanları ortaya çıkarır. Akış yönünü ve hızını kontrol etme yeteneği, mekanik parçalara ihtiyaç duymadan çalışan mikroakışkan pompalarda ve mikroakışkan karıştırıcılarda bulunabilir. MEMS cihazlarında tel üretimi yaygın olduğu için, sıvı hareketini kontrol etmek için manyetik alanların uygulanması, mekanik valf ve kanalların imalatının karmaşıklığına göre avantajlı olabilir. MEMS manyetik indüksiyon motorlarının son zamanlardaki gelişimi ile, bir MEMS ölçeğinde zamanla değişen alanlar yaratma olasılığı, ferroakışkan manipülasyonunda yararlı olabilecek bir gerçeklik haline gelmiştir.

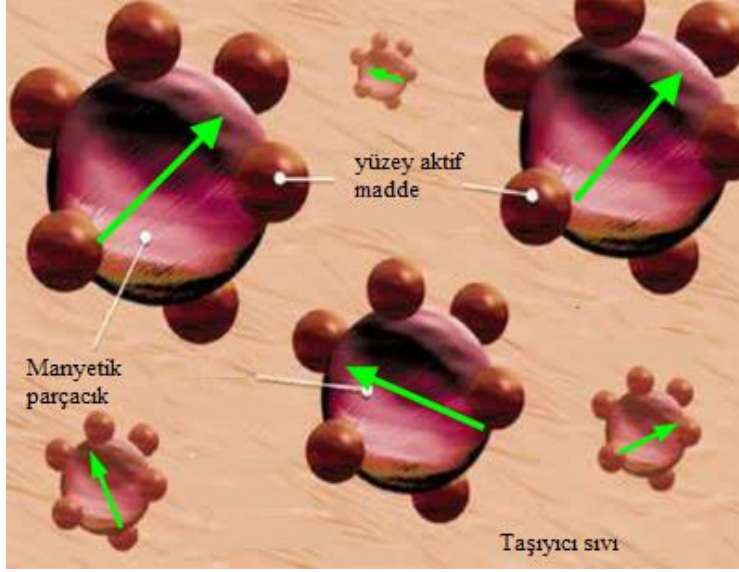
3.3. Ferroakışkanda Moment Üretimi

Ferroakışkanların alternatif ve dönen manyetik alanlardaki davranışı ferroakışkan tanelerinin manyetizasyonu ile uygulanan manyetik alan arasında bir faz gecikmesi mevcut

olduğundan dolayı, dc alanlardan çok farklı olabilir, böylece manyetizasyon dc durumundan farklı olarak, uygulanan manyetik alanla aynı doğrultuda değildir. Manyetik alanın ve manyetik momentin bu uyumsuzluğu, ferroakışkan üzerinde bir moment ile sonuçlanır. Bu moment, simetrik olmayan bir parçaya sahip olan manyetik stres tensörünün oluşmasına neden olur. Fiziksel olarak, ferroakışkan taneler, tanenin kalıcı manyetizasyonunun ve zamanla değişen manyetik alanın vektörel çarpımı tarafından verilen manyetik momentle karşılaşır. Bunu takip eden dinamikler, tanelerin manyetik gevşeme özelliği olarak bilinen alanla hizaya gelecek şekilde dönme hızına ve uygulanan manyetik alanın frekansına bağlıdır. Bireysel taneler üzerindeki moment nedeniyle ferroakışkan içinde üretilen net moment, uygun bir kesme hızı viskozimetresi kullanılarak ölçülebilir. Uygun koşullar altında sıvı, uygulanan bir döner alan ile birlikte veya ters yönde dönebilir. Ek olarak, katı bir sınırda dönen manyetik taneler üzerindeki sınır koşullarına dikkat edilmelidir. Bu nedenle, teorik ferrohidrodynamicin büyük bir kısmı ferroakışkan gevşeme denklemlerini, sınır koşullarını ve yüzey ve hacim momentlerinin rolünü geliştirmeye ve anlamaya yöneliktir.

3.4. Manyetoviskoz Etki - Manyetorotasyonel Viskozite

Rotasyonel viskozite uygulanan bir manyetik alanın etkisi altında ferroakışkanda değişebilen anahtar bir parametredir. Bu değişiklik, akışkan harici manyetik alanların etkisi altında bir kesme akışına maruz kaldığında serbest tane rotasyonunun engellenmesinden kaynaklanır. Hareket halindeki bir manyetik akışkan için çevreleyen taşıyıcı sıvının viskoz bir moment ürettiği bilinmektedir. Böylece, ek olarak uygulanan bir harici manyetik alan ile, herhangi bir alanın yokluğunda istatistiksel olarak yönlenmiş tanelerin manyetik momentleri bu alan yönünde hizalanır (Şekil 3.1). Bu nedenle, manyetik sert tanelerde manyetik bir moment uygulanır. Akışkanın vortisitesi ve manyetik alanın yönü eşdoğrusal değilse, manyetik moment, viskoz momenti etkisiz hale getirir ve viskozitenin artışına neden olur.



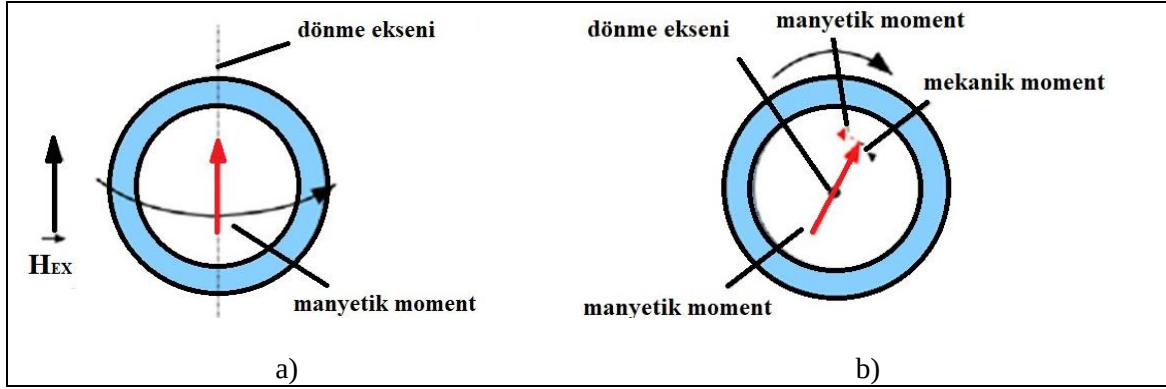
Şekil 3.1. Ferroakışkanın 10 nm mertebesinde çaplara sahip manyetik nüvelerin (büyük küreler, manyetik olarak geçirgen taneler) süspansiyonu [69]

Bir taşıyıcı sıvı (arka plan, taşıyıcı sıvı) içinde yaklaşık 2 nm kalınlığında polimer kabuklarla (küçük küreler, yüzey aktif madde) çevrilidir. Nüveler, hacimleriyle orantılı olarak kalıcı bir manyetik momente (yeşil oklar) sahiptir.

Şekil 3.2., kesme akışının etkisi altındaki (sert) bir ferroakışkan parçacığının durumunu göstermektedir. Genel olarak, taneler akışkandaki viskoz sürtünme tarafından üretilen

mekanik moment nedeniyle dönecektir. Akışkana bir manyetik alan H_{ext}

uygulanırsa, tanelerin manyetik momenti alan yönü ile aynı hizada olacaktır. Akışın alan yönü ve girdaplılığının eşdoğrusal olduğu senaryoda (Şekil 3.2.a), manyetik hizalama yalnızca tanelerin manyetik momentinin girdap yönü ile aynı doğrultuda olmasına yol açacaktır. Parçacığın hareketiyle ilgili başka bir değişiklik görülmez ve bu nedenle sıvının akışı bir bütün olarak etkilenmeden kalır. Ancak girdap ve alan yönü dik ise (Şekil 3.2.b) durum farklıdır. Mekanik moment, parçacığın manyetik momentinin ve alan yönünün yanlış hizalanmasını zorlayacaktır. Manyetik momentin parçacıktaki yönünün sabit olduğu düşünülürse, bu manyetik moment ve alanın karşılıklı yönleri arasındaki açının neden olduğu manyetik momenti ve H_{ext} bir manyetik moment ile sonuçlanır. Bu manyetik moment, mekanik momentin tam tersi olarak hareket ettiğinden, tanenin akışta serbest dönüşünü engeller ve dolayısıyla akış direncini artırır ve böylece sıvı, artan bir viskozite sergiler.



Şekil 3.2. Dönme viskozitesinin etkisi: a) Akışın alan yönü ve girdaplılığının eşdoğrusaldır, b) girdap ve alan yönü diktir [69].

Akış alanındaki yerel farklılıklar, manyetik tanenin (mavi) dönmesine neden olur. Bu dönüş (siyah ok), dönüş eksenine paralel (sol: dikey noktalı çizgi) harici olarak uygulanan bir manyetik alan olan H_{ext} 'ten etkilenmeden kalır. Ancak, dönme eksenini alana dik ise (sağda: kalın siyah nokta), manyetik moment (kırmızı ok) alan yönünün dışına doğru çevrilir. Ortaya çıkan manyetik moment, parçacığın dönüşünü ve dolayısıyla taşıyıcı sıvının akışını da engeller. Bu etki, makroskopik olarak artan bir viskozite ile kendini gösterir.

3.5. Yığılma, Tane Etkileşimi ve Viskoelastik Etkiler

Ferroakışkanlar bir yüzey aktif madde tarafından birbirine yapışmasını önleyecek şekilde üretilse de, gerçek dünyada çeşitli dış etkiler tipik olarak ideal senaryoyu bozabilir. Bu konu, hem deneysel gözlemlerde hem de ferroakışkanların teorik modellenmesinde zorluklarla sonuçlanır. Ferroakışkanların hidrodinamiğini tanımlarken, olası bir gerçek, tanelerin zincir şeklinde kümeler oluşturmak üzere toplandığı ve dolayısıyla sıvının serbest akışını engellediği ve viskoziteyi arttırdığıdır. Karmaşık manyetik sıvıların akışı için matematiksel bir model oluşturmak amacıyla, küçük hacimli veya eşit nokta boyutuna sahip etkileşimsiz manyetik taneler varsayılır. Bununla birlikte, gerçek ferroakışkanlar, elipsoidal şeklinde sonlu bir boyuta sahip tanelerin bir süspansiyonunun yanı sıra çeşitli uzunluklarda zincirler oluşturma eğiliminde olan tane-tane etkileşimlerinden oluşur.

3.6. Manyetik Tane Çapının Belirlenmesi

Ferroakışkanlar, çeşitli boyutları kapsayan taneler içerir. Ferroakışkan manyetizasyonu ve tane gevşemesi tartışmalarında bahsedildiği gibi, manyetik akışkanın davranışı tanelerin

boyutuna bağlıdır. Bu nedenle, akışkan içindeki tane boyutları aralığının belirlenmesi yararlıdır. Bir Titreşimli örnek manyetometre (VSM, Vibrating sample magnetometer) cihazı kullanılarak ferroakışkanların manyetizasyon eğrileri, manyetik geçirgenlik, minimum, ortalama ve maksimum manyetik tane çapları, manyetik hacim oranı ve doyma manyetizasyonu gibi örnek özelliklerin elde edilmesi mümkündür. Sonuçlar ayrıca manyetik tane çapı aralığının hesaplanmasına yol açabilir. Ferroakışkanları tartışırken, iki farklı tane boyutunun değeri dikkate alınması gerekir. Birincisi, katı bir parçacığın manyetik olarak aktif bölümünün boyutunu tanımlayan manyetik tane boyutudur. İkincisi ise, manyetik tanenin yanı sıra bir yüzey aktif madde tabakasından oluşan fiziksel katı tane boyutudur. Yüzey aktif madde genellikle tek başına manyetik parçacığın yarıçapına 2 nm ekler.

3.7. Ferromanyetik Akışkanların Mıknatıslanması

Mıknatıslanma eğrileri, bir ferroakışkan örneğinin doygunluk manyetizasyonu, manyetik tane hacim oranı, manyetik geçirgenlik ve manyetik tane çapı aralığını belirlemek için doğru bir yöntem sağlar. Teorik ve hesaplanmış manyetik giderme faktörlerinin karşılaştırılması, akışkan parametrelerinin, özellikle tane boyutunun son derece hassas ölçümlerine olan ihtiyacını gösterir. Uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak bir malzemenin manyetizasyon ölçüsü, manyetizasyon eğrisinde gösterilebilir.

3.7.1. Manyetizasyon teorisi

Manyetik alanın bir fonksiyonu olarak manyetizasyon, τ momenti ve $H = H_0 \hat{z}$ ile θ açısında bulunan $\mathbf{m}$ momentli bir manyetik dipolün enerjisi (W) yardımıyla bulunur. Bu fonksiyon, Paramanyetik davranış için Langevin ilişkisi olarak bilinmektedir.

$$\tau = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H} = \mu_0 m H \sin \theta \quad (3.1)$$

bu denklemde θ manyetik dipol moment ile dış manyetik alan arasındaki açıdır . Parçacığın enerjisi, parçacığı θ açısıyla döndürmek için gereken mekanik ise eşittir:

$$W = \int_0^\theta \tau d\theta = -m\mu_0 H [\cos \theta - 1] \quad (3.2)$$

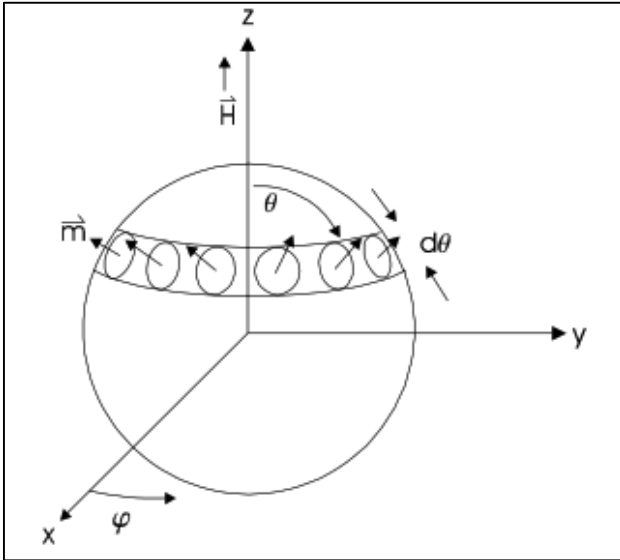
Dipol moment alan ile aynı hizaya gelme eğiliminde olsa da, bu davranışı engelleyen ve rastgele bir uzaysal yönelim sağlayan ek bir termal enerji vardır.

Termodinamik açısından, bu durum Boltzmann istatistikleri kullanılarak tanımlanabilir.

$$n = \hat{n} e^{-W/kT} \quad (3.3)$$

Bu denklemde n , dipollerin sayı yoğunluğu, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K, Boltzmann sabiti ve T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Eş. 3.2'nin Eş. 3.3'te yer değiştirmesi, Eş. 3.4'te verilen enerji ile dipollerin sayı yoğunluğunu verir.

$$n = n_o e^{m\mu_0 H \cos \theta / kT} \quad (3.4)$$



Şekil 3.3. Bir kürenin hacmi içindeki tüm dipoller, bir cismin net manyetizasyonuna katkıda bulunur.

Bu denklemde n_o , manyetik alan sıfır olduğunda manyetik dipollerin sayı yoğunluğunun genliğini temsil eder.

Birçok manyetik dipolü çevreleyen R yarıçaplı bir küre üzerinde integral alma ve kürenin hacmine bölme, dipollerin ortalama sayı yoğunluğunu :

$$N = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R^3} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^R n_o e^{m\mu_o H \cos \theta / kT} \sin \theta dr d\varphi d\theta = \frac{n_o}{\alpha} \quad (3.5)$$

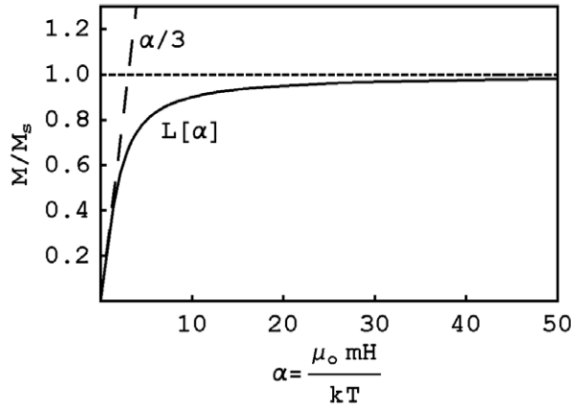
ifadesiyle verilir. Bu denklemde φ , x - y düzleminde x ekseninden olan açıdır ve $\alpha = (m\mu_o H)/kT$ dir. Net manyetizasyon, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi uygulanan manyetik alanın yönüne paralel olacaktır. z -yönelimli manyetizasyon için diferansiyel ifade M_z ,

$$dM_z = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cos \theta r^2 \sin \theta dr d\varphi d\theta \quad (3.6)$$

ifadesinde tanımlandığı gibi kürenin hacmi üzerinden integral alınması

$$\frac{M}{\varphi M_d} = \frac{M}{M_s} = L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha} \quad (3.7)$$

ile sonuçlanır, burada M ve H her ikisi de $\vec{z}$ yönündeler. φ manyetik katının taşıyıcı sıvıya ve yüzey aktif maddeye hacim oranıdır. M mıknatıslanma, $M_d = m/V$, hacmi V ve manyetik dipol momenti m olan manyetik parçacığın etki alanı manyetizasyonu ve $M_s = \varphi M_d$, alanla hizalanmış tüm dipollere karşılık gelen ferroakışkanın doygunluk manyetizasyonudur. Eş. 3.7 paramanyetik davranış için Langevin denklemi olarak bilinir. Şekil 3.4'te Eş. 3.7'nin teorik Langevin denklemi, düşük ve yüksek alan asimptotları (kesik çizgiler) ile çizilmiştir.



Şekil 3.4. Teorik Langevin denkleminin düşük ve yüksek alan asimptotları (kesik çizgiler)

Langevin denkleminin yüksek alan limiti, küçük tanelerin çapını tahmin etmek için kullanılabilir. Alternatif olarak, aynı rejimde çalışmak için düşük bir sıcaklık da kullanılabilir. Yüksek alan bölgesi doyma bölgesi olarak bilinir çünkü dipollerin çoğunun manyetik alanla hizalandığı noktada manyetizasyonun doygunluk değerine yaklaşımını tanımlar. Manyetik hacim oranı

$$\varphi = \frac{M_s}{M_d} \quad (3.8)$$

olarak hesaplanır. Böylece, tek bir mıknatıslanma eğrisi, düşük alanlı Langevin rejiminde manyetik geçirgenlik, hakkında bilgi sağlayabilir; M_s doygunluk manyetizasyonu, φ manyetik hacim oranı, ve d ferroakışkanın tane çapı aralığını ifade etmektedir. Langevin denkleminin düşük ve yüksek alan asimptotları, sıvı içindeki tane çapı aralığının üst ve alt sınırlarının tahminini sağlar. Düşük alan rejiminin manyetizasyon davranışına en büyük taneler hakim olurken, yüksek alan rejiminin davranışa en küçük taneler tarafından yönetilir.

3.7.2. Manyetik gevşeme teorisi

Ferroakışkanlar içindeki tanelerin boyut aralığı, manyetik gevşeme mekanizmalarının tane boyutuna güçlü bir şekilde bağlı olması nedeniyle önemlidir. Ferroakışkanda tane momentinin uygulanan manyetik alanla hizalanabileceği iki baskın mekanizma, Brownian hareketi ve Neel gevşemesidir. Brownian hareketi, parçacığın alanla hizaya gelecek şekilde

fiziksel dönüşüdür ve Neel gevşemesi, parçacığın kristal eksenine göre manyetik momentinin hareketi ile karakterize edilir.

Bu iki işlem Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Her bir mekanizma için karakteristik gevşeme süreleri mevcuttur.

Brownian gevşeme süresi,

$$\tau_B = \frac{3V_B\eta_o}{kT} \quad (3.9)$$

ile verilir. Neel gevşeme süresi,

$$\tau_N = \frac{1}{f_o} e^{\frac{KV_N}{kT}} \quad (3.10)$$

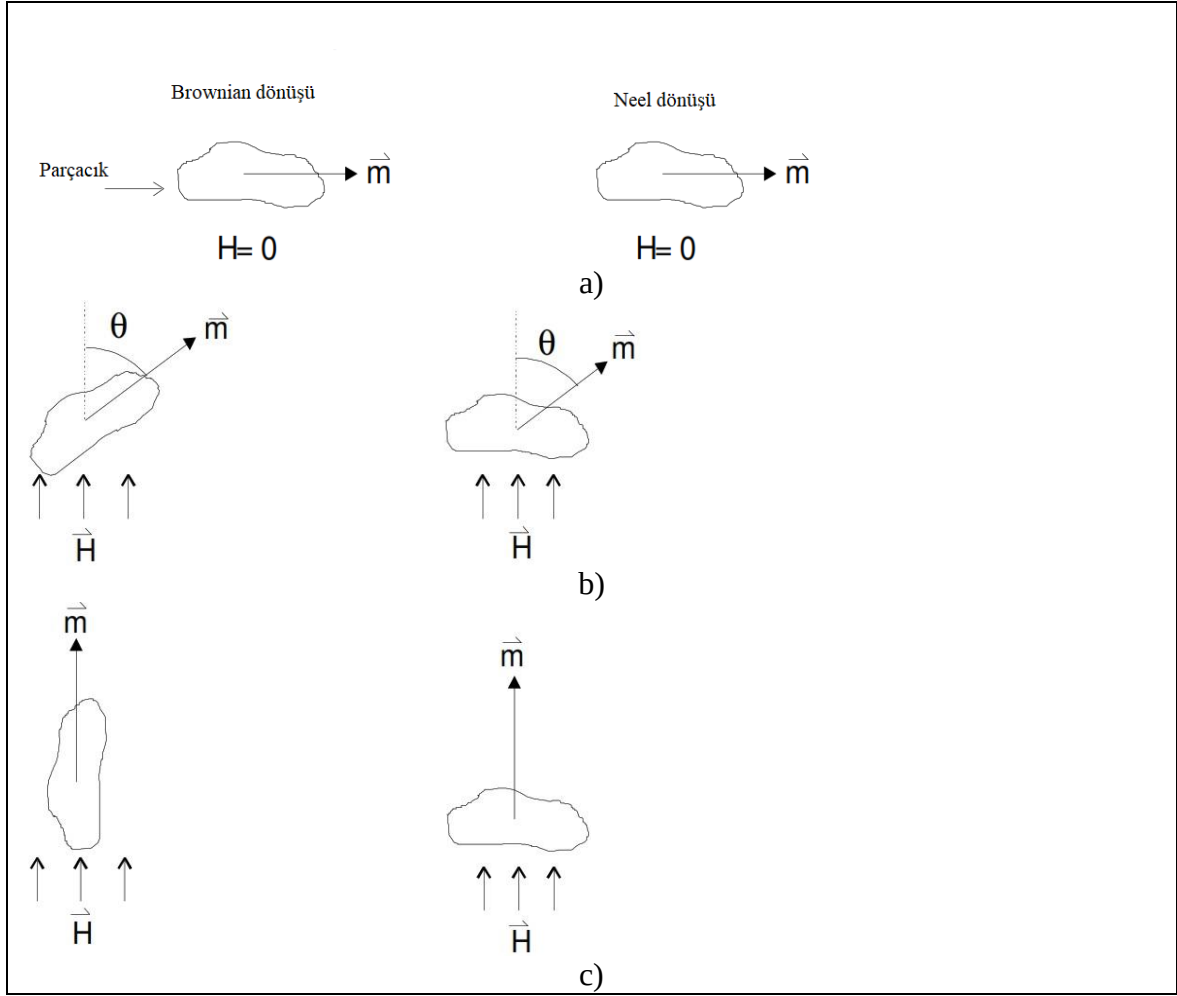
olup, bu denklemlerde η_o , f_o ve K sırasıyla taşıyıcı akışkan dinamik viskozitesi, Neel gevşemesinin frekans sabiti ve parçacığın anizotropi sabiti'dir. Tane hacimleri V_B ve V_N , Brownian tane boyutu,

$$V_B = \frac{4}{3}\pi(R + \delta)^3 \quad (3.11)$$

İle, Neel tane boyutu ise,

$$V_N = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (3.12)$$

ile verilir. Eş. 3.11'de δ yüzey aktif madde tabakasının kalınlığını temsil eder ve $R = d/2$ manyetik tane yarıçapıdır. Eş. 3.9 ve Eşç 3.10'da tanımlanan gevşeme süreleri tipik olarak $10^{-5} - 10^{-9}$ saniye civarındadır.



Şekil 3.5. Manyetik dipol momenti $\vec{m}$ olan bir manyetik tane için Neel gevşemesine kıyasla Brownian gevşemesi, a) manyetik alan uygulanmamış, b) θ ile $\vec{m}$ açısında uygulanan manyetik alanın etkisi altında gevşeme ve (c) gevşeme tamamlandıktan sonra

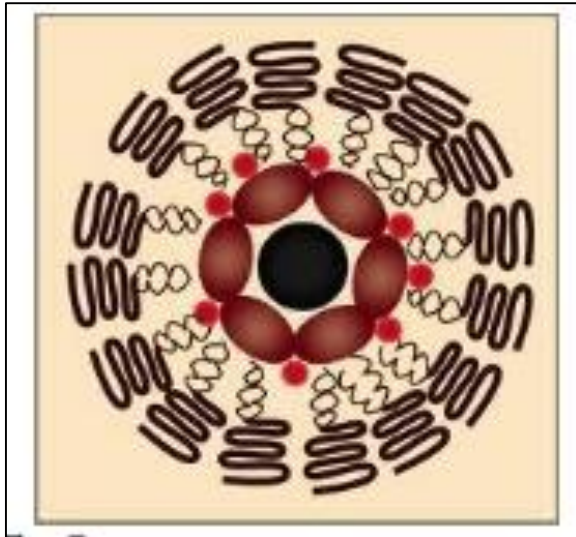
Ferroakışkan taneleri için etkin gevşeme süresi, hem Brownian hem de Neel süreçlerinin aynı anda hareket ettiği dikkate alınarak türetilir.

Manyetik nanotaneler farklı kompozisyonlarda oluşturulabilir. Bu yapıların bazı örnekleri Demir oksitler; Fe_3O_4 (magnetit) ve $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemit), Metal tozlar, Fe ve Co, Spinel yapıda ferrimagnetler, MgFe_2O_4 , MnFe_2O_4 ve CoFe_2O_4 , CoPt_3 , ve FePt alaşımları'dır. Son yıllarda nanoteknoloji alanında meydana gelen gelişmeler, nanotanelerin sentezlenmesine, karakterizasyonuna, fonksiyonel hale getirilmesine ve farklı alanlardaki uygulamalarda kullanılmasına olanak vermektedir. Demiroksit nanotaneler uygulamalarda en çok tercih edilen manyetik taneler arasında yer almaktadır. Başta maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ve manyetit (Fe_3O_4) olmak üzere birçok demir oksit taneü yapılan farklı çalışmalarda yer almaktadır.

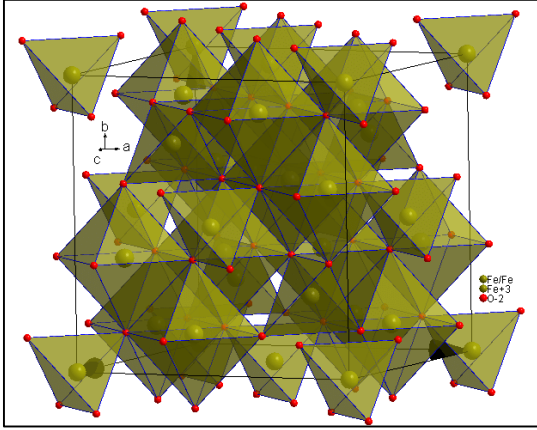
Nano boyuttaki manyetik tanelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Kuantum etkileri ve büyük yüzey alanından dolayı manyetik tanelerin nano boyutta, manyetik özellikleri değişmekte ve süperparamanyetik karakter kazanmaktadır. Bunun nedeni her bir manyetik taneün kendi başına bir manyetik birim oluşturmasıdır [70].

3.7.3. Kolloidal manyetik Fe₃O₄ nanotaneli nanoakışkanın sentezi ve karakterizasyonu

Milattan önce 1500’lü yıllarda keşfedilen ilk manyetik yapı Manyetit (Fe₃O₄)’tür. O zamandan günümüze kadar birçok manyetik malzeme bulunmasına rağmen hala üzerinde en çok çalışılan yapı olma özelliğini korumaktadır. Manyetit, ters bir omurga üzerinde oluşmuş kübik bir yapıya sahiptir. Bu yapıyı oluşturan oksijen atomları merkeze bakacak şekilde sıralanırken, Fe katyonları bazı bölgelerde 4, bazı bölgelerde 6 oksijen atomuyla çevrelenmiştir. Oda sıcaklığında elektronlar Fe⁺² ve Fe⁺³ iyonları arasında geçiş özelliği göstermektedir. Bu özelliğinden dolayı manyetit yarı metalik malzemeler sınıfında yer almaktadır [70]. Şekil 3.6’da Nano boyutta Fe₃O₄ yapısı, Şekil 3.7’de ise Fe₃O₄’ün kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Nano boyutta Fe₃O₄ [70].



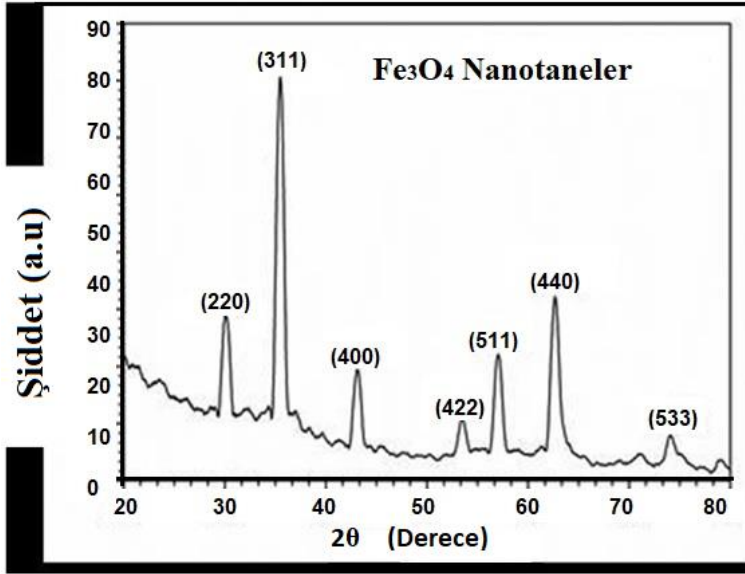
Şekil 3.7. Fe_3O_4 'ün kristal yapısı [71].

Manyetitler, poliyol yöntemi, çöktürme yöntemi, sonokimyasal sentez ve mikroemülsiyon teknikleri olmak üzere birçok farklı yolla sentezlenebilir. Fe^{+2} ve Fe^{+3} tuzlarının ikili çöktürmesiyle manyetit sentezlenmesi en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bunun nedeni kolay uygulanabilir ve verimli bir yöntem olmasıdır [70]. Sentezlenen nanotaneinin boyutu, şekli ve içeriği kullanılan tuzun çeşidi (örn; klorür, sülfat, nitrat, perklorür), $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$ oranı, ortamın pH'ı ve iyonik gücüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Fe_3O_4 tozu yapısal olarak X-ışını kırınımı ile karakterize edilmektedir. Numüne bir tozun XRD modeli Şekil 3.8'de sunulmaktadır. Endeksler (220), (311), (400), (422), (511) ve (440) ile vurgulanan Fe_3O_4 'e karşılık gelen tepe noktalarını göstermektedir. (311) zirvesine göre, Scherrer formülü ile belirlenen bu nümünün kristalitlerin orta boyutu 14 nm'dir.

Scherrer formülü:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta} \quad (3.13)$$

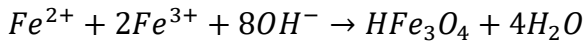
Bu denklemlde D kristalitlerin orta boyutu, λ X-ışınının dalga boyu ($\lambda = 0,154059$ nm), B genişlik ve θ kristal oryantasyon zirvesinin açısıdır.



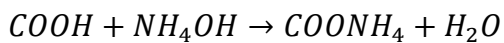
Şekil 3.8. Fe₃O₄ nanotanelerinin XRD modeli [71].

3.7.4. Yağ bazlı Fe₃O₄ nanoakışkanların imalatı

Yağ bazlı Fe₃O₄ nanoakışkanlar, Fe₃O₄ nanotaneleri, yüzey aktif madde ve dizel yağı ile polidimetilsiloksan (PDMS) karışımından oluşmaktadır. Fe₃O₄ nanotanelerini, verimli bir reaksiyon süresi için birlikte çöktürme yöntemiyle üretmek mümkündür. Karşılık gelen kimyasal reaksiyon

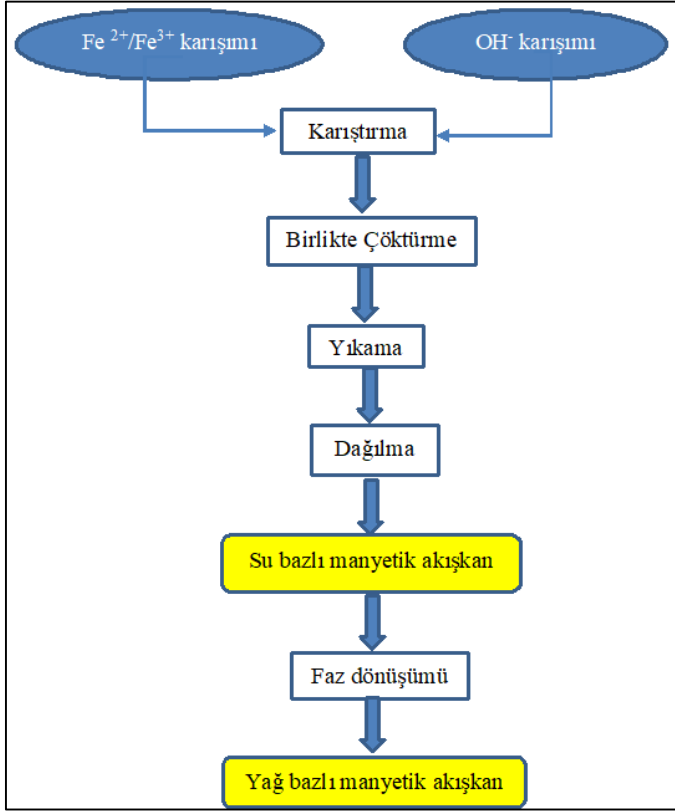


şeklinde ifade edilebilir. Çöktürme işleminin akış şeması Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Fe₃O₄ nanotanelerinin yığılmasını önlemek ve aynı zamanda Fe₃O₄ nanotanelerinin yüzeyini değiştirmek için, yüzey aktif madde olarak oleik asit eklenebilir. Oleik asit suda çözünmez ve bu nedenle oleik asidin fonksiyonel grubunu modifiye etmek için amonyak kullanılabilir. Modifikasyon işleminin kimyasal reaksiyonu,

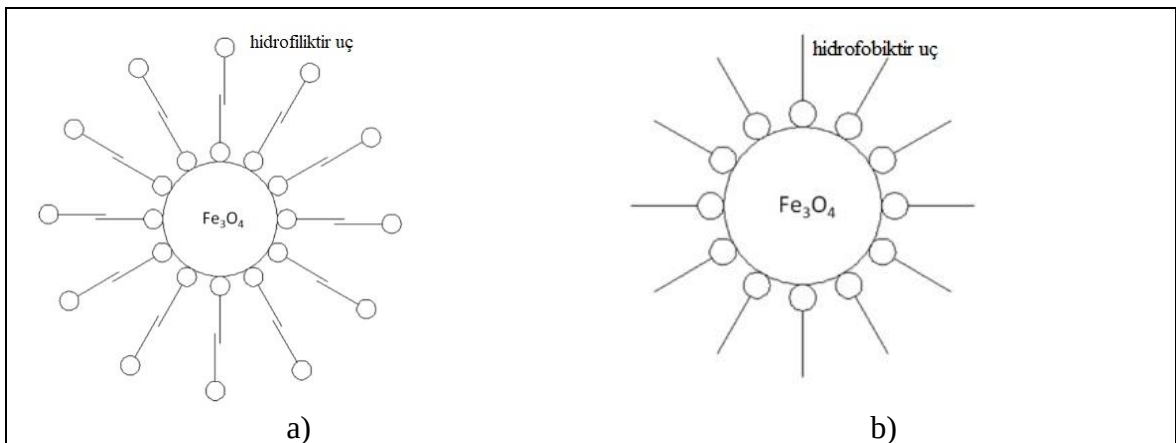


şeklinde ifade edilir. Bir oleik asit molekülünde her biri farklı özelliklere sahip iki uç vardır. COONH₄ ucu hidrofilik ve hidrokarbon ucu hidrofobiktir. Oleik asidin hidrofilik ucu, Şekil 3.10.a)’da gösterildiği gibi ilk yüzey aktif madde tabakasını oluşturan Fe₃O₄ nanotanelerinin yüzeyine bağlanır. Şekil 3.10.b), sabitlenmiş oleik asit tanelerinin hidrofobik ucu ikinci bir

yüzey aktif madde tabakası oluşturmak için çözeltideki diğer oleik asit moleküllerine ayrıca bağlanır. İki katmanlı yapı, Fe_3O_4 nanotanelerine kararlılık sağlar ve nanotanelerin sudaki dağılımını tek tip hale getirir.



Şekil 3.9. Çöktürme işleminin akış diyagramı



Şekil 3.10. Yüzey aktif madde ve tane arasındaki ilişkiyi gösteren adsorpsiyon modeli: a) Su bazlı Fe_3O_4 nanoakışkan modeli, b) Yağ bazlı Fe_3O_4 nanoakışkan modeli [72]

Ferroakışkan alanı, manyetik akışkanların sentezini ve özellikleri, ferrohidrokinamik teorisinin temelleri ve ferroakışkanların dinamiğini bu bölümde incelenmiştir. Literatür

bilgiler incelendiğinde farklı uygulamalarda kullanılma amacıyla herhangi bir ferromanyetik akışkanın üretimi uzun zaman ve maliyet gerektiren bir süreçtir. Bölüm 4'te benzetim ortamında ferrmanyetik akışkan yapısı oluşturulup, düşük güçlü bir transformatörün çekirdeği olarak kullanılması gerçekleştirilmiştir.

4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE AKIŞKAN ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRÜN BENZETİM ÇALIŞMASI

Ferroakışkan konu alanı, manyetik akışkanların sentezi ve özellikleri, ferrohidrokinamik teorisinin temelleri ve ferroakışkanların dinamiği bölüm 3'te incelenmiştir. Literatür bilgileri incelendiğinde farklı uygulamalarda kullanılma amacıyla herhangi bir ferromanyetik akışkanın üretimi uzun zaman ve maliyet gerektiren bir süreçtir. Bu Bölümde benzetim ortamında bir ferromanyetik akışkan yapısı oluşturulup, manyetik bir yol oluşturma amacıyla düşük güçlü bir transformatörün çekirdeğinde kullanılmıştır.

4.1. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) veya Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) sayısal tekniğin kullanıldığı herhangi bir fiziksel olgunun benzetim çalışmasından ibarettir. Genel olarak tasarımcılar, araştırmacılar ve mühendisler, daha iyi ürünler geliştirmek amacıyla fiziksel prototip ve deneylerin sayısını azaltmak ve bileşenleri tasarım aşamasında optimize etmek için bu yöntemi kullanırlar.

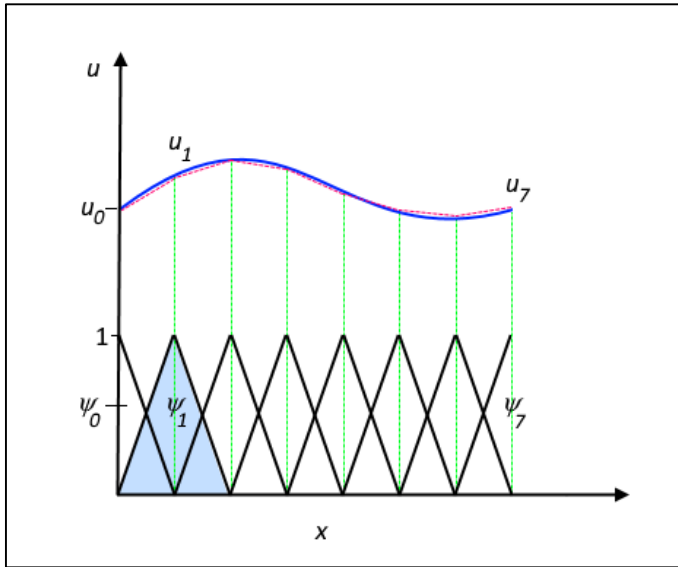
Yapı veya akışkan davranışı, termal taşınım, dalga yayılımı, biyolojik hücrelerin büyümesi, vb. gibi herhangi bir fiziksel olguyu kapsamlı olarak anlamak ve nicelleştirmek için matematiğin kullanılması gereklidir. Bu işlemlerin çoğu Kısmi Diferansiyel Denklemler (KDD) (veya Partial Differential Equations, PDE) kullanılarak açıklanır. Ancak, bu denklemleri bir bilgisayarın çözebilmesi için, son birkaç on yıl içinde sayısal teknikler geliştirilmiştir ve günümüzde bunların önde gelenlerinden biri, Sonlu Elemanlar Analizi'dir.

Diferansiyel denklemler sadece doğal süreçleri değil, aynı zamanda mühendislik mekaniğinde karşılaşılan fiziksel olayları da tanımlayabilir. Bu kısmi diferansiyel denklemler, bir yapıdaki alakalı nicelikleri (gerilme türü, ısı transferi vb.) hesaplamak ve belirli bir yük altında incelenen bileşenin belirli bir davranışını tahmin etmek için çözülmesi gereken karmaşık denklemlerdir. SEA sadece problemin yaklaşık bir çözümünü verdiğini ve bu kısmi diferansiyel denklemlerin gerçek sonucunu elde etmek için sayısal bir yaklaşım olduğunu bilmek önemlidir. Basitleştirilmiş haliyle, SEA, belirli koşullar altında bir parçanın veya montajın nasıl davrandığını tahmin etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. SEA modern benzetim yazılımları için temel olarak kullanılır ve mühendislerin tasarımlarında zayıf noktaları bulmalarına yardımcı olur. SEA yöntemine dayanan bir

benzetim çalışması sonuçları Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, genellikle bir renk ölçeği ile tasvir edilir. Uzay ve zamana bağlı problemler için fizik yasalarının tanımı genellikle kısmi diferansiyel denklemler (KDD) cinsinden ifade edilir. Geometrilerin ve problemlerin büyük çoğunluğu için bu KDD’ler analitik yöntemlerle çözülemez. Bunun yerine, tipik olarak farklı türde ayrıklaştırmalara dayalı olarak denklemlerin bir yaklaşımı oluşturulabilir. Sayısal model denklemlerinin çözümü, sırayla, KDD'lere gerçek çözümün bir yaklaşımıdır. Bu tür yaklaşımları hesaplamak için sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılır. Örneğin, bir KDD’de bağımlı değişken olabilen bir u fonksiyonunu ele alalım (yani, sıcaklık, elektrik potansiyeli, basınç, vb.) ifadesi:

$$u \approx u_h \quad (4.1)$$

$$u_h = \sum_i u_i \psi_i \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. u (düz mavi çizgi) işlevine, doğrusal temel işlevlerin doğrusal bir birleşimi olan u_h (kesikli kırmızı çizgi) ile yaklaşılır (ψ_i düz siyah çizgilerle temsil edilir). Katsayılar u_0 ile u_7 arasında gösterilir [73].

Eldeki probleme bağlı olarak, doğrusal fonksiyonlar yerine başka fonksiyonlar seçilebilir. Sonlu elemanlar yönteminin bir diğer avantajı da teoremin geliştirilmiş olmasıdır. Bunun nedeni, sayısal formülasyon ile KDD probleminin zayıf formülasyonu arasındaki yakın ilişkidir. Örneğin, teori, sayısal model denklemleri bir bilgisayarda çözüldüğünde, hata tahminleri veya hata için sınırlar sağlar.

4.2. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemiyle Yüksek Frekanslı Transformatörün Tasarlanması

Elektrik ve manyetik alanların çözümünde kullanılan yöntemlerden en çok kullanılanı sonlu elemanlar yöntemidir. Bu tez çalışmasına konu olan akışkan nüveli transformatörün bütün tasarımları üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanan COMSOL Multiphysics paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Modellemeye bakış açısından, bir transformatör temelde 3 boyutlu bir geometriye sahiptir. 3 boyutlu sonlu eleman metodunun elektrik makinelerinin tasarımında uygulanması, manyetik akı, akım yoğunluğu, sargı indüktansları ve üretilen elektromanyetik alan gibi önemli tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesine imkan verir. Özellikle karmaşık geometri içeren modellerde; bilhassa manyetik doymanın, uç sargı alanları ve saçaklanmanın etkili olduğu tasarımlarda 3 boyutlu bilgisayar benzetimli çözümler çok doğru tahminler vermektedir. Tercih edilen programda; analiz yapılırken, malzemelerin özellikleri ve sınır şartları doğru olarak girildiğinde sistemin çeşitli durumlardaki tepkileri önceden belirlenebilir. COMSOL Multi-Physics alan benzetim programı etkileşimli bir yazılım paketidir ve 3 boyutlu elektrostatik, statik manyetik ve kenar akımları problemlerini, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözmektedir. Bu program statik elektrik alanları, kuvvet, moment, akım yoğunluğu ve gerilim dağılımları ile yüklerin sebep olduğu kapasitelerin; statik manyetik alanların, statik harici manyetik alanların ve sabit mıknatısların oluşturduğu kuvvet, moment ve indüktansların hesaplanmasında; doğrusal ve doğrusal olmayan malzemelerin kullanıldığı yapılardaki alanların benzetiminde ve ayrıca sıcaklık ile ısı akışı gibi termal büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Bu program vasıtasıyla transformatörün gerçeğe yakın 3 boyutlu yapısı irdelenmiştir. Bu yöntemin kullanılması çözümlerde zamandan tasarruf ve düşük maliyetle üretimi sağlamaktadır.

SEA metodu düzgün olmayan geometrik bölgelerde elektrik veya manyetik alanları belirlemek için, bölgeyi piramide benzeyen çok sayıda dörtyüzlü eleman (tetrahedra) olarak adlandırılan alt bölgelere ayırır. Her dörtyüzlü elemandaki alan ayrı bir polinomla belirlenir. Bu elemanların toplamı sonlu eleman ağ (mesh) olarak ifade edilir. Bir ağ otomatik olarak üretilir ve her model için bir alan çözümü hesaplanır. Bu çözümde nüve ve sargılardaki dörtyüzlü elemanlar kolaylıkla görülebilir. Çözümün doğruluğu, dörtyüzlü elemanların her birinin ne kadar küçük olduğuna bağlıdır. Çözüm binlerce sonlu eleman kullanılmasıyla oluşturulan ağlarla gerçekleşir. Büyük sayıda elemanlı ağlar için güçlü bir hesaplama ve

belleğe gerek vardır. Bunun için kullanılacak bilgisayarın işlem gücü ve bellek miktarı yeterli olmalıdır.

Akışkan ferromanyetik nüve yapısında meydana gelen manyetizasyon kuvvetleri bilinmesi gereken karmaşık akışlarla sonuçlanabilir. Bu yüzden, bu bölümde ferromanyetik akışkan nüveli transformatör için matematiksel modeller ve sayısal benzetim sonuçları sunmaktadır. Çeşitli elektrik devre şemaları öngörülmekte ve beklenen akışlar ve sonuçlar araştırılmaktadır. Yüksek frekans uygulamalarında; elektromanyetik alanlar tüm elektromanyetik ortamlarda enerji taşıma işlevine sahiptirler. Dolayısıyla elektromanyetik alanların hassas biçimde analitik ve sayısal analizleri; bu cihazlar ve sistemlerin özelliğini inceleyebilmek için önemli bir temeldir.

4.3. Sayısal Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar

Manyetik alanlar (Magnetic fields, MF), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) ve elektrik devreleri (electric circuits, EC) modülleri, manyetik kuvvetlerini tasarlamak, değerlendirmek ve nüvedeki alan hızının akış modellerini gözlemlemek için benzetim programında (Comsol Multi-Physics 5.6) kullanılan fiziklerdir.

4.3.1. AC/DC modülü

AC/DC Modülü, AC/DC elektromanyetiklerin 2B ve 3B benzetimi için benzersiz bir ortam sağlar. Bu modül, kapasitörler ve elektrikli makinelerin ayrıntılı analizi için güçlü bir araçtır ve bir grafik arayüzünde statik, yarı statik, geçici ve zamana bağlı benzetim çalışmaları bu modül yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Mevcut fizik arayüzleri, aşağıdaki elektromanyetik alan benzetimi türlerini kapsar:

- Elektrostatik,
- İletken ortamdaki elektrik akımları,
- Manyetostatik,
- Düşük frekanslı elektromanyetikler,

Bu modül, standart sonuçlara ve görselleştirme işlevselliğine ek olarak, sığa ve indüktans ile elektromanyetik kuvvetler gibi toplu parametrelerin doğrudan hesaplanmasını destekler.

AC/DC Modülündeki arayüzler, elektromanyetik alan benzetim çalışmaları için bir benzetim araçları seti oluşturur. Gerçek fiziği tanımlamak ve doğru fizik arayüzünü seçmek için alanların geometrik özellikleri ve zaman değişimleri dikkate alınmalıdır. Arayüzlerin çözeceği fiziksel nicelikler elektrik skaler potansiyeli V , manyetik vektör potansiyeli $\vec{A}$ ve manyetik skaler potansiyel V_m olabilir.

4.4. Manyetik Alanlar Arayüzünün Ayarlaması

Manyetik alanlar arayüzü, bobinler, iletkenler ve mıknatısların içinde ve çevresinde oluşan manyetik alan ve indüklenen akım dağılımlarını hesaplamak için kullanılır. Bu arayüzü yardımıyla uygulamaya bağlı olarak, sabit, frekans alanı, küçük sinyal analizi ve zaman alanı modellemesi 2B ve 3B olarak desteklenir. Düşük bir iletkenlik eklenerek faydalı frekans aralığı aşağı doğru genişletilebilir. Fizik arayüzü, manyetik vektör potansiyeli ve isteğe bağlı olarak bobinler için bağımlı değişkenler olarak skaler elektrik potansiyeli kullanılarak formüle edilen Maxwell denklemlerini çözer.

Her fizik arayüzü eklendiğinde, varsayılan düğümler - Manyetik Alanlar, Ampère Yasası, Manyetik Yalıtım (varsayılan sınır koşulu) ve Başlangıç Değerleri model oluşturucuya da eklenir. Ardından, Fizik, sınır koşullarını ve harici akımları uygulayan diğer düğümler ve fizik özelliklerini seçmek için Manyetik Alanlar arayüzü eklenir.

Elektrik alan

Ortam için varsayılan bağıl elektrik geçirgenlik (ϵ_r), malzeme türüne bağlıdır ve yüzey alanında tanımlanır. Elektrik alanın değeri geçirgenliğin özelliklerine göre izotropik, çapraz, simetrik veya anizotropik'i seçilip, ardından değerleri ve ifadeleri bir matrise girilmektedir.

Manyetik alan

Ortamın makroskopik özelliklerini (manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan bilgilerini) ve bağıl geçirgenlik gibi uygulanabilir malzeme özelliklerini tanımlayan ilişki belirtilir.

Bağıl geçirgenlik

$B = \mu_0 \mu_r H$ ilişkisini kullanmak için bağıl geçirgenlik ögesi seçilir. İzotropik, çapraz, simetrik veya anizotropik alan değerleri ve ifadeleri girilir.

Manyetik kayıplar

Bu seçenek karmaşık bir bağıl geçirgenlik sunar ve zaman uyumlu (frekans alanı) çalışmaları için tasarlanmıştır.

Bağıl geçirgenliği karmaşık olarak tanımlamak için manyetik kayıplar μ' ve μ'' ögesi olarak seçilir: $\mu_r = \mu' + i\mu''$, burada μ' ve μ'' sırasıyla gerçek ve sanal kısımlardır.

Kalan akı yoğunluğu

$B = \mu_0 \mu_r H + B_r$ ilişkisini kullanmak için kalan akı yoğunluğu $B_r(T)$ seçilir. Varsayılan bağıl geçirgenlik μ_r , malzemeden gelen değerleri kullanır. Tanım için, bağıl geçirgenliğin özelliklerine göre izotropik, çapraz, simetrik veya anizotropik'i seçilip ve ilgili alana girilir.

Manyetizasyon

$B = \mu_0 H + \mu_0 M$ ilişkisini kullanmak için mıknatıslanma (A/m) seçilip ardından 3B bileşenler için x, y ve z bileşenlerini girilir.

Etkili B-H eğrisi

Harmonik problemlerinde manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan arasındaki doğrusallaştırılmış ilişkiyi sağlayan etkin bir eğri kullanmak için etkin B-H eğrisi $|H|_{eff}$ (A/m) ögesi seçilir.

B-H doğrusal olmayan daimi mıknatıs

Zorlayıcı alan (H_c) tarafından kaydırılan H uzayında bir nokta etrafında doğrusal olmayan izotropik bir BH ilişkisini kullanmak için 'BH kalıcı mıknatıs' seçilir. Bu ilişki, yumuşak

kalıcı mıknatısların kendi kendine manyetikliğinin giderilmesinin kolay modellenmesi için tasarlanmıştır. Mıknatıslanma yönü, normalde fizikte girilmesi gereken tek girdidir.

Harici akım yoğunluğu

‘Harici Akım Yoğunluğu’ düğümü, ‘Manyetik Alanlar’ arayüzünün tanımladığı denkleme, harici olarak oluşturulmuş bir akım yoğunluğu (J_e) ekler.

Harici akım yoğunluğunun her bir bileşeni için bir değer veya ifade girilir (A/m). Harici akım yoğunluğu kayıplara katkıda bulunmaz (Joule ısıtma nedeniyle). Varsayılan durumda ilişkili bir elektrik alanı olmadığından dolayı $J_e=0$ (A/m)'dir.

Hız (Lorentz Terimi)

Hız (Lorentz terimi) düğümü modele hız (v (m/s)) eklemektedir. Harici akım (J_e), $\sigma v \times B$ 'ye eşittir ve yalnızca ‘Manyetik’ ve ‘Elektrik Alanlar’ arayüzü kullanılarak hem elektrik potansiyeli hem de manyetik vektör potansiyeli çözümlerinde geçerlidir. Ne zaman kullanılabileceğinin operasyonel bir tanımı, hareketli alanın yalnızca harekete göre sabit olması gereken indüklenmiş bir manyetik kaynak (manyetizasyon ve girdap akımları) içermesi gerektiğidir.

4.5. Elektrik Devresi Arayüzü Ayarlaması

Bir fizik arayüzü eklerken AC/DC modülünde bulunan ‘Elektrik Devresi’ arayüzü, gerilim ve akım kaynakları, dirençler, kapasitörler, sargılar ve yarı iletken cihazlar dahil devrelerdeki akımları ve gerilimleri modellemek için kullanılır. ‘Elektrik Devresi’ arayüzü ile oluşturulan modeller, dağıtılmış saha modellerine bağlantılar içerebilir. Fizik arayüzü durağan, frekans etki alanında ve zaman etki alanında modellemeyi destekler ve devre elemanlarıyla ilişkili gerilimler, akımlar ve yükler için Kirchhoff'un koruma yasalarını çözer. Bu fizik arayüzü eklendiğinde, varsayılan bir ‘Yer Düğümü’ (ground node) özelliği ekler ve bunu elektrik devresindeki sıfır düğümü ile ilişkilendirir.

Transformatör

Transformatör özelliği, iki sargı ve karşılıklı indüktans özelliklerinin bir kombinasyonunu veya ideal bir transformatörü temsil eder. Birincil ve ikincil düğüm bağlantıları için düğüm adları girilip ve düzenlenir.

Cihaz parametreleri

Sargılar ve transformatör modeli seçilir ve ideal transformatör olup olmadığı belirlenir.

İndüktörlerin karakteristiğini belirleyen değerler ve ifadeler:

- Kuplaj faktörü (k). (Varsayılan değeri 0,98'dir).
- Birincil sargı indüktansı $L_1(H)$. (Varsayılan değeri 1 mH'dir).
- İkincil sargı indüktans $L_2(H)$. (Varsayılan değeri 1 mH'dir).
- İdeal transformatör için sargı oranı (N_1/N_2) değerleri girilir.

Karşılıklı indüktans

Karşılıklı Endüktans, devredeki mevcut iki indüktör özelliği arasında bir bağlantının belirlenmesine izin verir. Bağlantının karşılıklı indüktansı,

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (4.3)$$

Bu denklemde k , bağlantı faktörü, L_1 ve L_2 indüktörlerin endüktanslarıdır.

Harici cihaz

Elektrik devresinde akım uyarmalı terminaller, devre portları ve sınırlar alanlarda veya diğer fizik arayüzlerinde tanımlanmışsa, bu değerler gerilim listesinde seçenekler olarak görüntülenir. Aynı şekilde, uygun bir bağlantı operatörü kullanarak gerilim değişkeni girilir.

İndüktif veya elektromanyetik dalga yayılım modelleri için, elektrik potansiyeli indüklenen EMG'yi yakalamadığından, gerilim ölçümü elektrik alanının bir integrali olarak gerçekleştirilmelidir.

4.6. Süspansiyonun İki Fazlı Akış Modellemesi

Sıvı-katı karışımlar (süspansiyonlar), petrol ve gaz arıtma, kağıt üretimi, gıda işleme, bulamaç taşıma ve atık su arıtma gibi çeşitli endüstriyel alanlarda önemlidir. Ayırık, tane tabanlı yöntemlerden, makroskopik iki fazlı açıklamalara kadar çeşitli farklı modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Tane tabanlı yöntemler, sınırlı sayıda katı tane olduğunda uygundur. Öte yandan, çok sayıda tane olduğunda, fazların hacim oranlarını izleyen makroskopik veya ortalomalı bir model kullanmak daha uygundur.

Bu aşamada, ‘Faz Aktarım Karışım’ modeli, ‘Laminar Akış’ multifizik arabirimini kullanarak makroskopik iki fazlı bir akış modelinin kurulacağını gösterir. Model, farklı oranlarda katı tane içeren sıvı-katı karışımlar için uygundur.

4.6.1. Model tanımı

Bir süspansiyonun dinamiği, o karışım için momentum taşıma denklemi, süreklilik denklemi ve katı faz hacim oranında bir taşıma denklemi ile modellenir. ‘Faz Taşıma Karışım Modeli’ (Phase Transport Mixture) , ‘Laminar Akış’ multifizik arayüzüyle bu denklemleri otomatik olarak kurar. Momentum aktarımını modellemek için,

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla) = -\nabla p - \nabla \cdot \mu[\nabla u + \nabla u^T] + \rho g - \nabla \cdot [\rho_s \varphi_s (1 - c_s) u_{slip} u_{slip}^T] \quad (4.4)$$

denklemi kullanır. Bu denklemde u kütle ortalomalı karışım hızını (m/s), p basıncı (Pa), g yerçekimi ivmesini (m/s²) ve u_{slip} katı ve sıvı fazlar arasındaki bağıl hızı verir. Ayrıca

$\rho = (1 - \varphi_s)\rho_f + \varphi_s\rho_s$ karışım yoğunluğudur. Burada ρ_f ve ρ_s sırasıyla sıvı ve katıların faz yoğunlukları (kg/m³) ve φ_s katı-faz hacim oranıdır. $c_s = \varphi_s\rho_s/\rho$ boyutsuz tane kütle oranıdır. Son olarak μ , Krieger ifadesine göre karışım viskozitesini (Ns/m²) temsil eder.

$$\mu = \mu_f \left(1 - \frac{\varphi_s}{\varphi_{max}}\right)^{-2.5\varphi} \quad (4.5)$$

Bu denklemde μ_f sıvının dinamik viskozitesi ve φ_{max} maksimum paketleme konsantrasyonudur. Karışım modeli, süreklilik denkleminin aşağıdaki formunu kullanır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4.6)$$

Katı faz hacim oranı için taşıma denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \varphi_s) + \nabla \cdot (\rho_s \varphi_s u_s) = 0 \quad (4.7)$$

Katı faz hızı ise u_s , $u_s = u + (1 - c_s) u_{slip}$ ile verilir.

ρ_s 'nin sabit olduğunu varsayarsak, Eş 4.6'nın, Eş 4.7'ye eşdeğer olduğu anlamına gelir:

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_s u + \varphi_s (1 - c_s) u_{slip}) = 0 \quad (4.8)$$

Süreklilik denklemini ve tane taşınımını farklı bir şekilde formüle edilebilmektedir. Bu yaklaşımda, bir tane akışı 'Kayma hızı, (u_{slip}) yerine, J_s (kg / (m²·s))' ile tanımlanmış ve katı faz taşınımını aşağıdakine göre yazılabilir.

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_s u) = - \frac{\nabla J_s}{\rho_s} \quad (4.9)$$

4.6.2. Matematiksel model

Yüksek frekanslı uygulamalarda; elektromanyetik alanlar tüm elektromanyetik ortamlarda enerji taşıma işlevine sahiptir. Bu nedenle, elektromanyetik alanların hassas analitik ve

sayısal analizi, bu cihazların ve sistemlerin özelliklerinin incelenmesi için önemli bir temeldir. Sistem statik manyetik alanları iki adımda çözer:

1. Modelin akım akış benzetimini ve akım yoğunluğunu (J) hesaplar,
2. Akım yoğunluğuna göre manyetik alan şiddeti (H)'yi hesaplar.

Harici alanlar sınır koşullarında belirtilir. Harici bir manyetik alan kullanıldığında, manyetik sıvıdaki manyetik dipoller aynı yönde yönlendirilir. Aksi takdirde, net bir manyetizasyon elde etmeden rastgele yönlendirilirler. Akışkanda çalkalama meydana geldiğinde, büyük genlikli yüzey dalgalarını içeren karmaşık bir akışkan hareketi meydana gelir. Bu türbülanslı hareket, çalkalama sırasında manyetik dipollerin yönünü değiştirerek manyetik akıda ani değişikliklere neden olur. Bu etki, nüve etrafında sarılmış olan sargıda bir EMG'ya neden olur. Katı bir nüve ile bir ferromanyetik akışkan arasındaki temel fark, ferromanyetik akışkanın türbülanslı hareketi nedeniyle sonsuz sayıda mod içermesidir. Matematiksel modelin tasarımı için öncelikle manyetik alan kaynağının modellenmesi gerekir. Daha sonra manyetik alan hesaplanır ve manyetizasyon kuvvetleri değerlendirilir. Son olarak, nüvedeki akış analiz edilir.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V_e) = 0, \quad (4.10)$$

Burada, V_e [V] elektrokinetik potansiyeldir. Her sargının terminaleri, güç şemasına bağlı olarak Dirichlet sınır koşullarını (bir uçta gerilim, diğer uçta toprak) belirtir. Akım yoğunluğunu hesapladıktan sonra, statik manyetik alan çözücü, 'Ampere' yasasını ve 'Maxwell' denklemlerini kullanarak aşağıdaki ifadeleri çözer:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_e + \vec{J}_o \quad (4.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.13)$$

$\vec{H}(x,y,z)$ manyetik alan kuvveti (A/m), $\vec{B}(x,y,z)$ manyetik akı yoğunluğu (T), $\vec{J}_e$ girdap akımı yoğunluğu (A/m²) ve $\vec{J}_o$ harici akım yoğunluğunu ifade eder (A/m²).

$\vec{D}$ (C/m²) elektrik akı yoğunluğu olarak tanımlanır ve ρ elektriksel yük yoğunluğudur (C/m³).

Sistem, Lorentz kuvvetini kullanarak x, y, z eksenlerine ait momenti hesaplar:

$$T = \int \vec{r} \times (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad (4.14)$$

Burada r , dönme eksenindeki yer değiştirme vektörüdür. Elektrik yalıtımının sınır durumu:

$$n \cdot J = 0 \quad (4.15)$$

n harici normaldir. Burada her bir sargı üzerindeki gerilim düşüşü, sargılardaki elektrik akımı yoğunluğu 1 A/mm² olacak şekilde ayarlanır. Ortaya çıkan akım yoğunluğu, manyetik alan problemine harici bir alan kaynağı olarak tanımlanır. İndüktansların analizi, manyetik alan için matematiksel modele dayanmaktadır:

-Bakır sargılarda ve boş alanda manyetik alan:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = \vec{J}_e \quad (4.16)$$

-Ferro-akışkan nüvede manyetik alan:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A - M) = 0 \quad (4.17)$$

Bu denklemde, A [Tm] manyetik vektör potansiyelidir ve M [A/m] manyetik akışkandaki manyetizasyondur. Bu değer analitik formül ile yaklaşık olarak:

$$M = \gamma \arctan(\lambda H) \quad (4.18)$$

ifadesine eşittir. Bu denklemde, γ ve λ manyetik sıvının deneysel manyetizasyon özelliğine tam olarak uyması için seçilen deneysel sabitlerdir. Teorik denklemler olarak,

• Momentumun korunumu:

$$\rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pI + \eta (\nabla u + \nabla u)^T] + f_{mg} - \rho g \quad (4.19)$$

Kütle korunması:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4.20)$$

Türbülanslı kinetik enerji iletimi:

$$\rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot [\eta + \sigma_k \eta_T) \nabla k] + \eta_T P(u) - \beta_k \rho k \omega \quad (4.21)$$

Türbülanslı frekans iletimi:

$$\rho u \cdot \nabla \omega = \nabla \cdot [\eta + \sigma_\omega \eta_T) \nabla \omega] + \alpha \omega \eta_T P(u)/k - \beta_k \rho \omega^2 \quad (4.22)$$

Manyetik akışkan davranışı, bu formüllerin birlikte çözülmesiyle açıklanır. Bu denklemde $\rho[\text{kg/m}^3]$ kütle yoğunluğu, $g[\text{m/s}^2]$ yerçekimi ivmesi ve $\eta[\text{s}^{-1}]$ dinamik viskozitedir.

$$f_{mg} = \mu_0 (M \cdot \nabla) H \quad (4.23)$$

f_{mg} [N/m³], manyetizasyon harici kuvveti, I birim matrisi, k [J/m³] kinetik enerji yoğunluğu, ω [m²/s³] (türbülans frekansı) birim türbülans enerjisi başına dağılımı olarak tanımlanır. α ve β deneysel sabitlerdir.

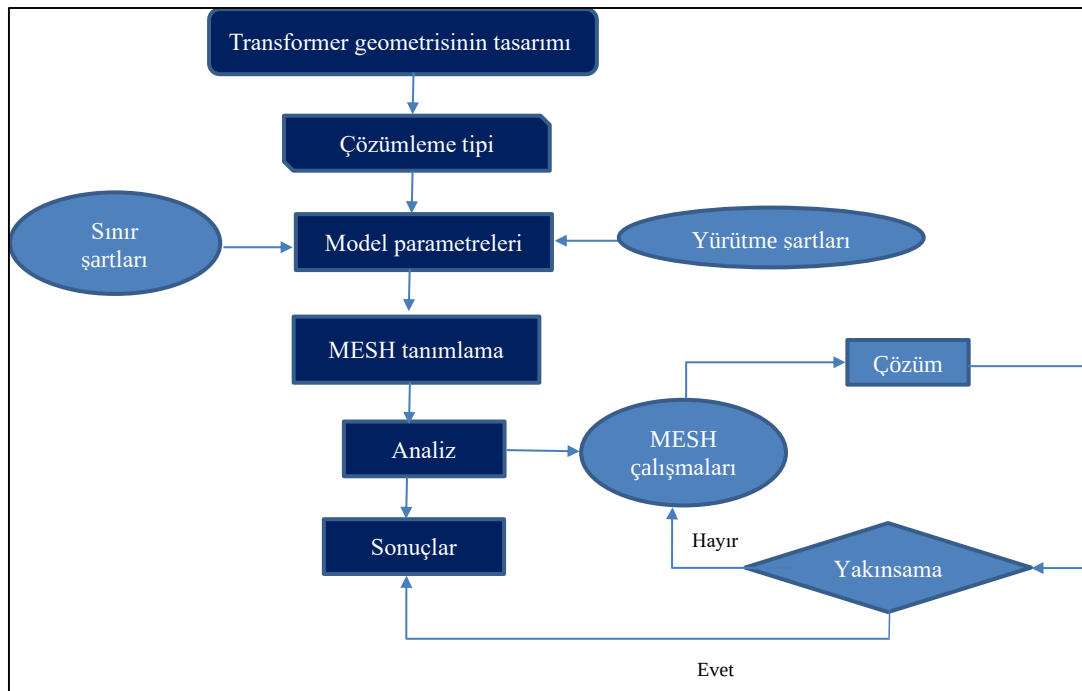
$$(u) = \nabla \cdot u [(\nabla u + \nabla \cdot u)^T] \quad (4.24)$$

$$\eta_T = \rho k / \omega \quad (4.25)$$

Burada, η_T [s⁻¹] türbülans viskozitesidir. Modellenen ferromanyetik akışkan, Newton tipi, homojen ve izotropik olarak kabul edilir.

4.7. Manyetik Akışkan Nüveli Transformatörün Sonlu Eleman Modellenmesi

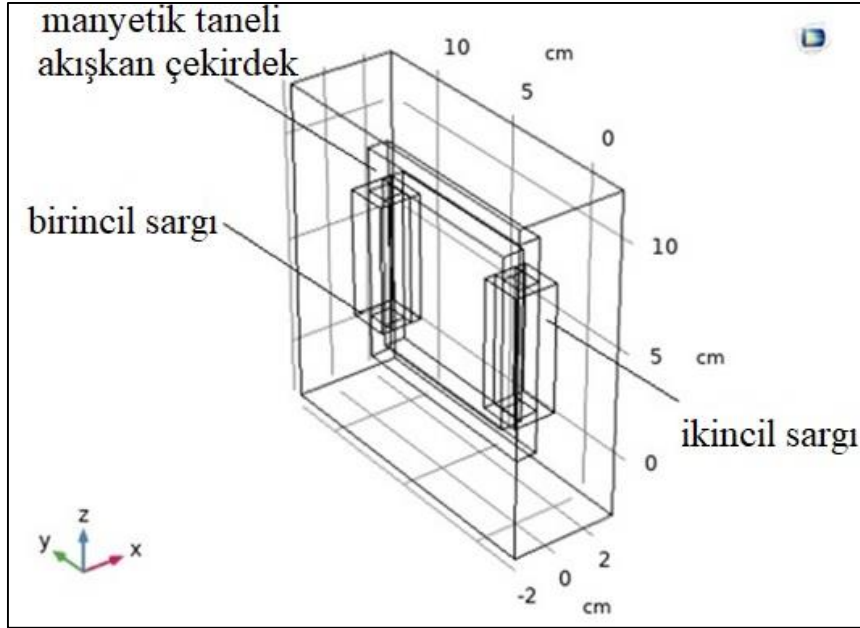
Bu tez çalışmasına konu olan manyetik akışkan nüveli transformatörün bütün tasarımları üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanan COMSOL Multiphysics paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de benzetim programlarının akış algoritması verilmiştir.



Şekil 4.2. Benzetim programlarının akış algoritması

4.7.1. ANT geometrisi ve parametrelerin ayarlanması

Şekil 4.3'te, benzetim ortamında modellenen ve ardınan üzerinde analizler başlatılan yapı gösterilmektedir. Bu cihazın ferromanyetik nüvesi kare bir çerçeve yapısına sahiptir. Birincil ve ikincil sargıları temsileden sargılar bloklar halinde modellenmiştir. Manyetik akışkan nüve, makroskopik olarak süper paramanyetik bir malzeme gibi davranan, sıvı bir taşıyıcı içinde dağılmış, yaklaşık $70\mu\text{m}$ çapında manyetik tanelerin kararlı, koloidal bir süspansiyonudur. Elektriksel özellikler açısından, manyetik sıvının elektriksel empedansı ve kayıp tanjantı nispeten sabittir. Manyetik alan kapalı olduğunda, tanelerin manyetik momentleri, sıvının net (makroskopik) manyetizasyonuna neden olmayacak kadar hızlı bir şekilde rastgele dağılır.



Şekil 4.3. ANT'nin geometri görüntüsü

Tasarım için kullanılan birincil ve ikincil sargılar bakır (Cu) malzemeden oluşturmaktalar ve dairesel sargı yapısına sahipler. Bu sargıların detaylı parametre bilgileri Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1. Bakır sargıların manyetik ve elektrik özellikleri

Özellikler	Değişken	Birim	Boyut
Bağıl manyetik geçirgenlik	μ_{r_iso} ; $\mu_{rii} = \mu_{r_iso}$, $\mu_{rij} = 0$	1	3×3
Elektiriksel iletkenlik	σ_{iso} ; $\sigma_{mai} = \sigma_{iso}$, $\sigma_{maj} = 0$	S/m	3×3
Termal Genleşme katsayısı	α_{iso} ; $\alpha_{iai} = \alpha_{iso}$, $\alpha_{aij} = 0$	1/K	3×3
Sabit basınçta ısı kapasitesi	C_p	J/(kg·K)	1×1
Bağıl elektrik geçirgenlik	ϵ_{nr_iso} ; $\epsilon_{nr_{ii}} = \epsilon_{nr_iso}$, $\epsilon_{nr_{ij}} = 0$	1	3×3
Yoğunluk	ρ	kg/m ³	1×1
Termal iletkenlik	k_{iso} ; $k_{ii} = k_{iso}$, $k_{ij} = 0$	W/(m·K)	3×3
Young modülü	E	Pa	1×1
Poisson oranı	ν	1	1×1
Referans direnci	ρ_0	$\Omega \cdot m$	1×1
Direnç sıcaklık katsayısı	α	1/K	1×1
Referans sıcaklığı	T_{ref}	K	1×1

Akışkan çekirdeğin tasarımı için akışkan akışı fiziğinin tanımlanması gerekmektedir. ANT çekirdeğinin dikkate alınan ferroakışkan malzeme özelliklerini tanımlamak için, Çizelge 4.2’de verilen özellikler ve fiziksel parametreler uygulanıp, ferromanyetik tanelerin $B-H$ eğrisi, yapısal bir $B-H$ ilişkisi eklenerek tanımlanan malzemeye tanıtılmıştır. Sonuç olarak, manyetik alan normunun $B-H$ eğrisine bağlı bir tanımlamaya ihtiyacı olacaktır. Böylece, hem akışkanlığın hem de ferromanyetizmanın özelliklerine ulaşmak mümkün olmuştur. Manyetik kuvvetlerini tasarlamak, değerlendirmek ve ANT çekirdeğinde hız alanının akış modellerinin manyetik akı yoğunluğunu gözlemlemek için, benzetim programında manyetik alanlar (MF) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD(Computational Fluid Dynamics, CFD) modülleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Benzetim modelinde kullanılan motor yağı bazlı manyetik akışkanın fiziksel parametreleri

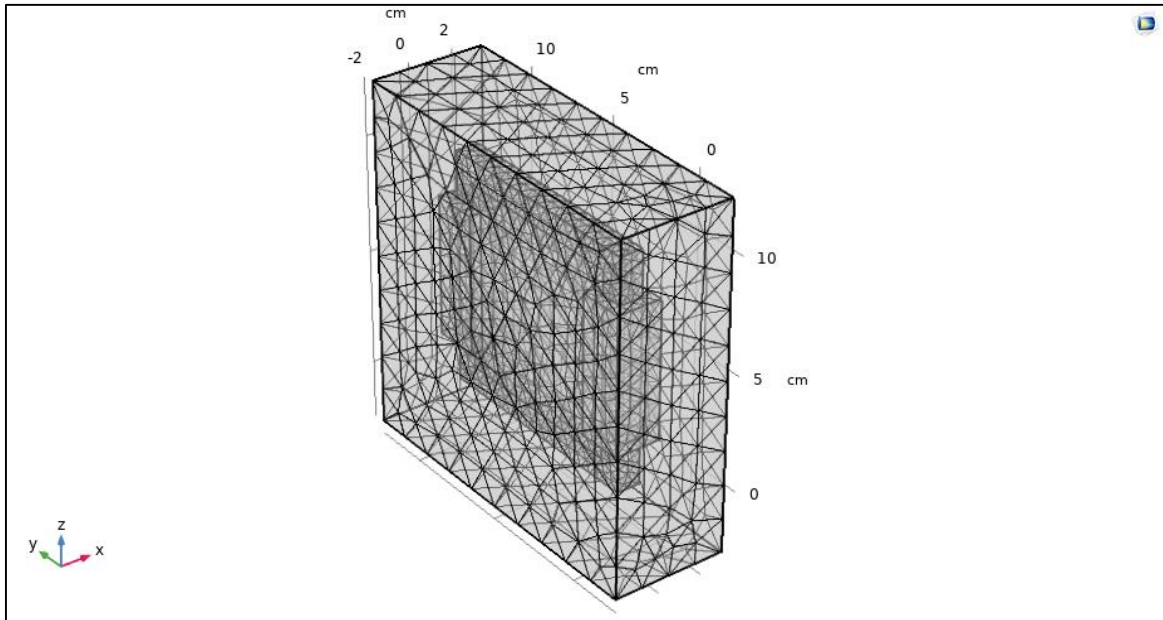
Parametre	Özellik
Dinamik vizkosite (Pa.s)	0,15
Yoğunluk (g/cm ³)	1,21 – 7,104
Sabit basınçta ısı kapasitesi J/(kg·K)	1,67
Termal iletkenlik (W/mK)	0,176
Elektiriksel iletkenlik [MS/m]	10^{-12}
Manyetik parçacığın kimyasal bileşeni	Demir tozu (Fe)
Manyetik tane ortalama yarıçapı [μm]	70
Manyetik tanelerin ağırlık konsantrasyonu	0,1 - 0,9
Çalışma frekansı [MHz]	1 - 20

Çizelge 4.2'den anlaşıldığı üzere ANT çalışmasını analiz edebilmek için aynı tasarım modelini kullanarak, farklı yapılar üzerinden parametere ayarlaması yapıp farklı değişik aralıkları, çeşitli yük durumları ve değişen kütle oranlarda çıkış gerilim ve güç durumlarını incelemek mümkündür.

4.7.2. ANT için ağ oluşturulması

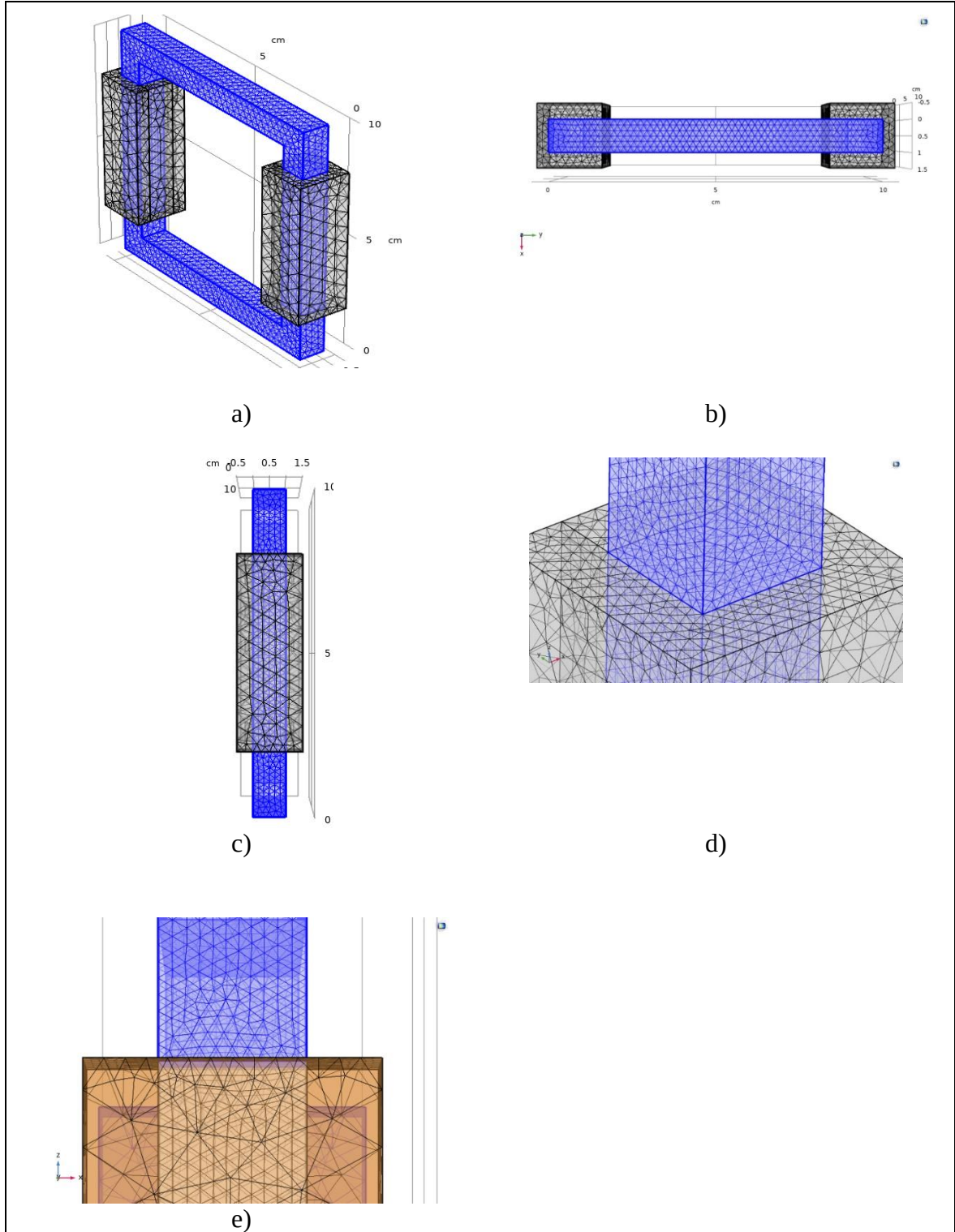
Modele eklenen ağ oluşturma dizisinde, manyetik akışkan nüve alanı 'akışkanlar dinamiği' (Fluid Dynamics) ve ANT'nin geriye kalan geometrisi 'genel fizik' (General Physics) olarak kalibre edilmiştir. Ağ oluştururken her iki farklı alan için ayarlamalar yapılmıştır. Bakır sargılar için serbest üçgen ve normal eleman boyutlu ağ yapısı ayarlanırken, akışkan nüve için ağ oluşumu akışkan dinamiğine uygun,

olacak şekilde ve daha hassas ve küçük eleman boyutlarda kalibre edilmiştir. Çözümleme süresini indirebilmek amacıyla ANT geometrisinin geriye kalan bölgeleri serbest üçgen elemanların gevşek bağlantısıyla kalibre edilmiştir. Oluşturulan ağ, Şekil 4.4'te sunulmaktadır.



Şekil 4.4. ANT için oluşturulan ağ

Şekil 4.5'te yapı için oluşturulan ağ modeli farklı yönlerden görüntülenmiştir.



Şekil 4.5. ANT yapısı için oluşturulan ağ modelinin farklı yönlerden alınan görüntüleri: a) x-y-z açısından, b) x-y , c) x-z, d) yakınlaştırılmış sargı ve nüve, e) yakınlaştırılmış ağ görüntüsü

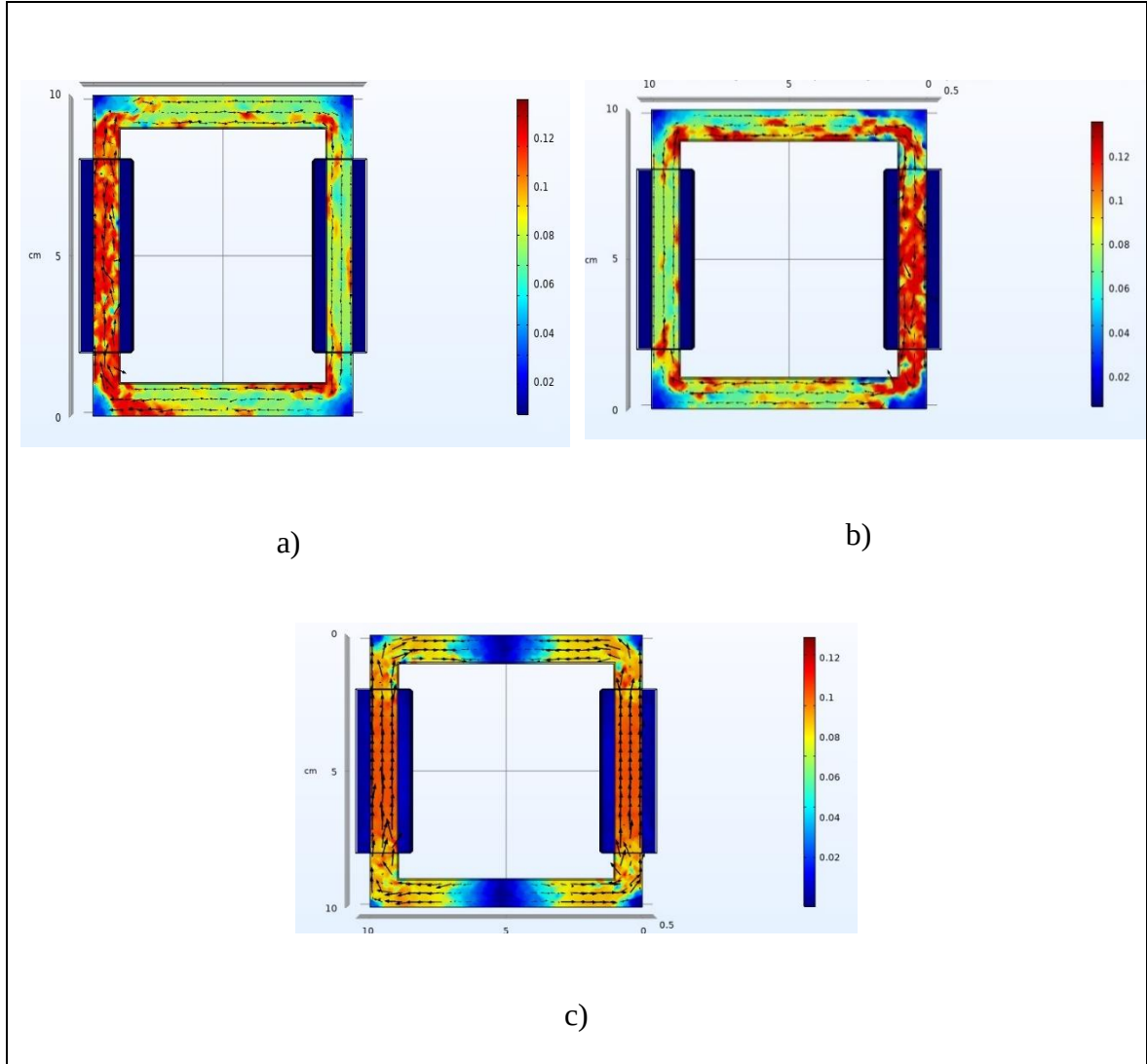
4.7.3. ANT birinci aşama çalışması

Sayısal benzetim çalışmasında, dört yüzlü, ikinci dereceden vektör elemanları kullanılarak alan modellenmiştir. Ferromanyetik akışkan çekirdeğin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle, SEA analiziyle ilgili cebirsel problem doğrusal değildir. Sonuç olarak, sıralı ve paralel sayısal çarpanlara ayırma performansını iyileştirmek için, sola ve sağa bakan süper düğüm tekniklerinin bir kombinasyonu ile MUMPS çözücü algoritması tercih edilmiştir. Dağılmış tanelerin çeşitli ortalama kütle farksiyonlarına göre, demir tozu taneleri ve motor yağından oluşan karışımın yoğunluğu hesaplanmış ve Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

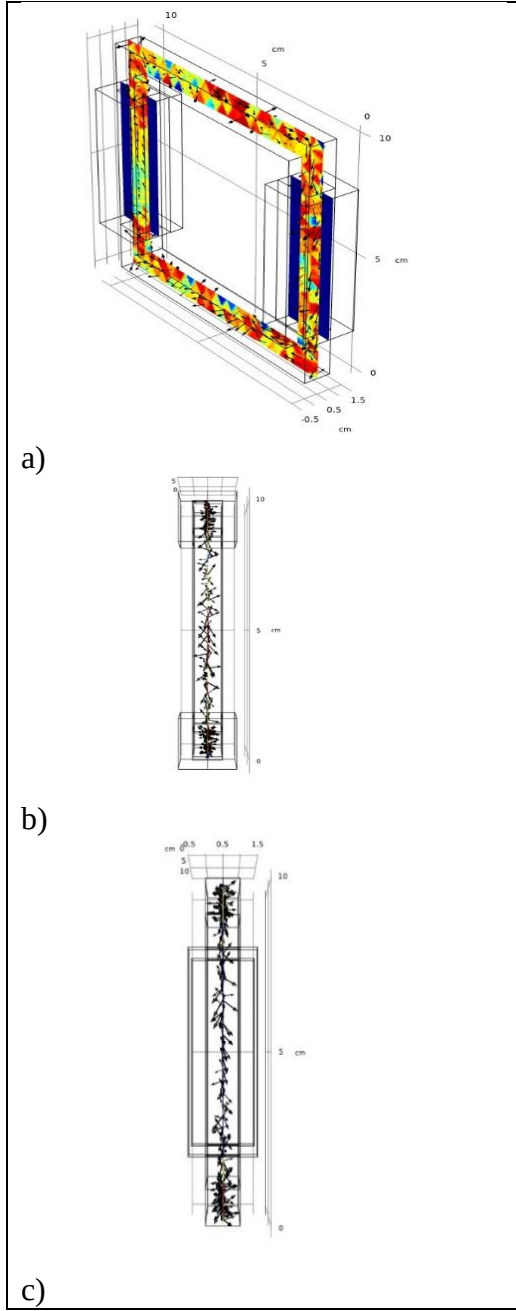
Çalışmanın ilk aşamasında, üretilen manyetik akı yoğunluğunu görselleştirmek için, yaklaşık %50 nanotane kütle oranına karşılık gelen $\rho = 4336.25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ karışım yoğunluğuna sahip bir ANT çekirdeğinin benzetim işlemi gerçekleştirilmiştir. Üç güç şemasıyla simüle edilmiş ANT'nin manyetik akı yoğunluğu spektrumu ve akan akı, akı çizgileri aracılığıyla Şekil 4.6'da gösterilmektedir. İlk senaryoda sadece birincil sargıya ve ikinci senaryoda sadece ikincil sargıya güç sağlanırken, üçüncü senaryoda her iki sargıya da ek uyarımı ile güç veriyor. Benzetim çalışması yardımıyla elde edilen sonuçlar Çizelge ve Grafikler halinde tezin ilerleyen bölümlerinde sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Çeşitli tanelerin kütle oranları için manyetik taneler ve motor yağı karışımı yoğunluğu

Manyetik tane konsantrasyonu φ_d (%)	Karışım yoğunluğu (ρ) [kg/m ³]
5	1218,87
10	1565,25
20	2258
30	2950,75
40	3643,5
50	4336,25
60	5029
70	5721,75
80	6414,5
90	7104,8



Şekil 4.6. Manyetik akı yoğunluk spektrumu ve manyetik çizgileri: a) Birincil sargı uyarılmış b) İkincil sargı uyarılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyarılmış

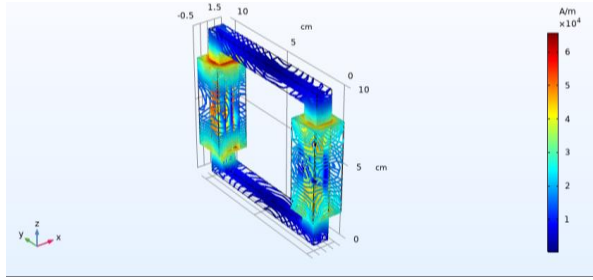


Şekil 4.7. İkincil sargı uyartılmışken manyetik akı yoğunluk spektrumu ve manyetik akı çizgileri: a) x - y - z düzlem koordinatları b) x - z düzlem koordinatları, c) x - y düzlem koordinatları

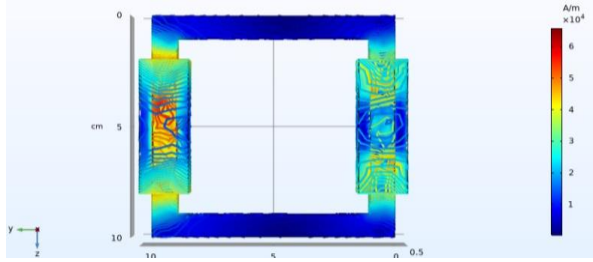
İkincil sargıya güç verildiği duruma ilişkin sonuçlar x - y - z , x - z ve x - y düzlem koordinatları için Şekil 4.7'de sunulmuştur. Çizgilerin rengi ve boyutu, modelin manyetik akı yoğunluğunun değeri ile orantılıdır. Manyetik alan uygulanmadığında, ferroakışkandaki manyetik dipoller rastgele yönelme yerine aynı yöne yönlendirilir. Bu nedenle, manyetizasyon yoktur. Harici bir manyetik alan uygulandığında ve sıvıda çok küçük bir çalkalama meydana geldiğinde, büyük genlikli yüzey dalgalarını içeren karmaşık bir akışkan hareketi meydana gelir. Bu

türbülanslı hareket, manyetik akıda ani değişikliklere neden olan manyetik dipollerin yönünü değiştirir. Harici manyetik gövde kuvvetlerinin ferroakışkan çekirdeğin manyetizasyonu üzerindeki etkisi sayısal benzetim ile gözlemlenmiştir.

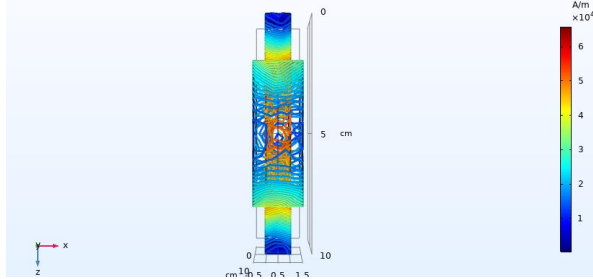
Tasarlanan ANT'de oluşan manyetik alan şiddeti (H) ve manyetizasyon normu (M) sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulmuştur.



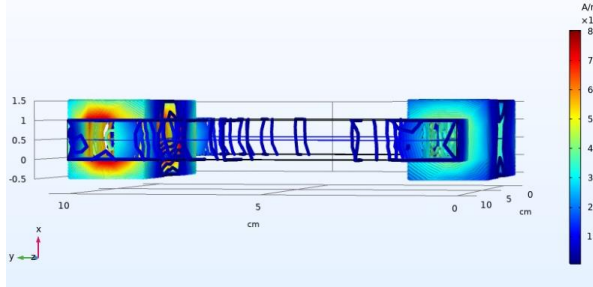
a)



b)

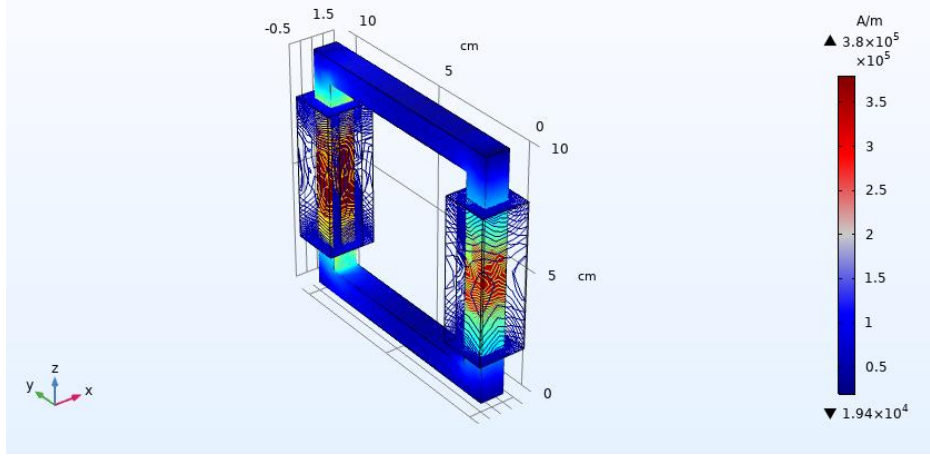


c)

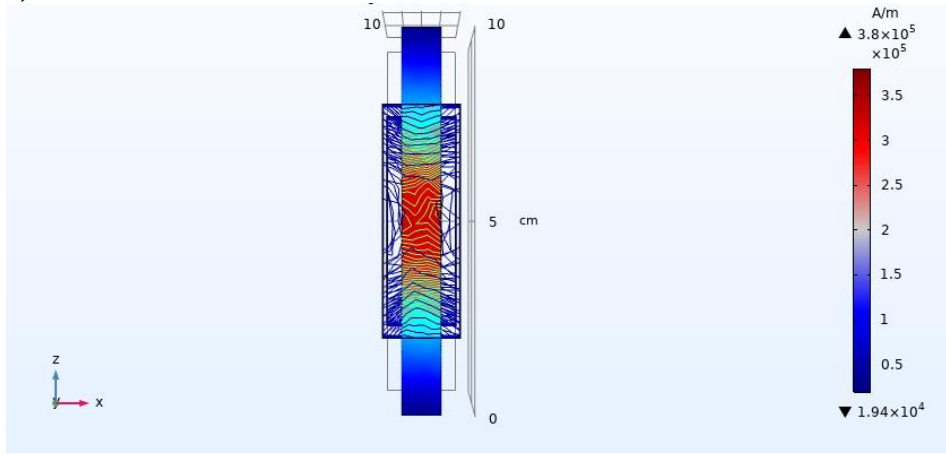


d)

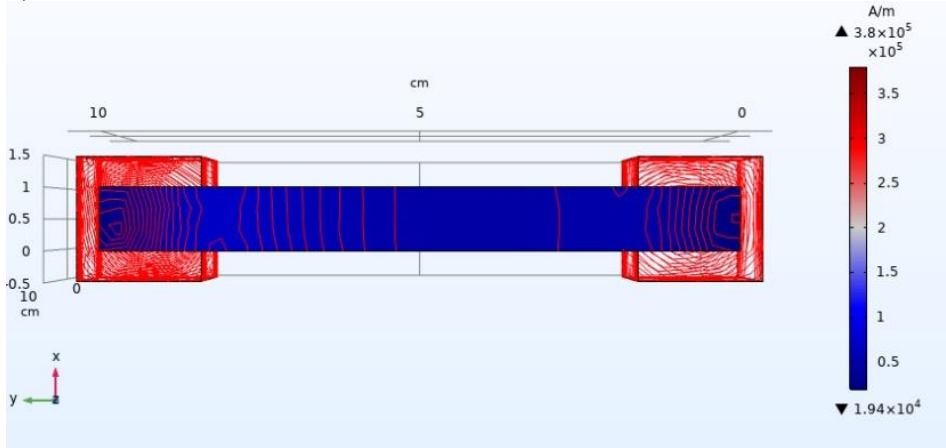
Şekil 4.8. Tasarlanan ANT'de birincil sargı uyartılmışken, oluşan manyetik alan şiddeti: a) x-y-z düzlem koordinatları, b) y-z düzlem koordinatları, c) x-z düzlem koordinatları, d) x-y düzlem koordinatları



a)



b)

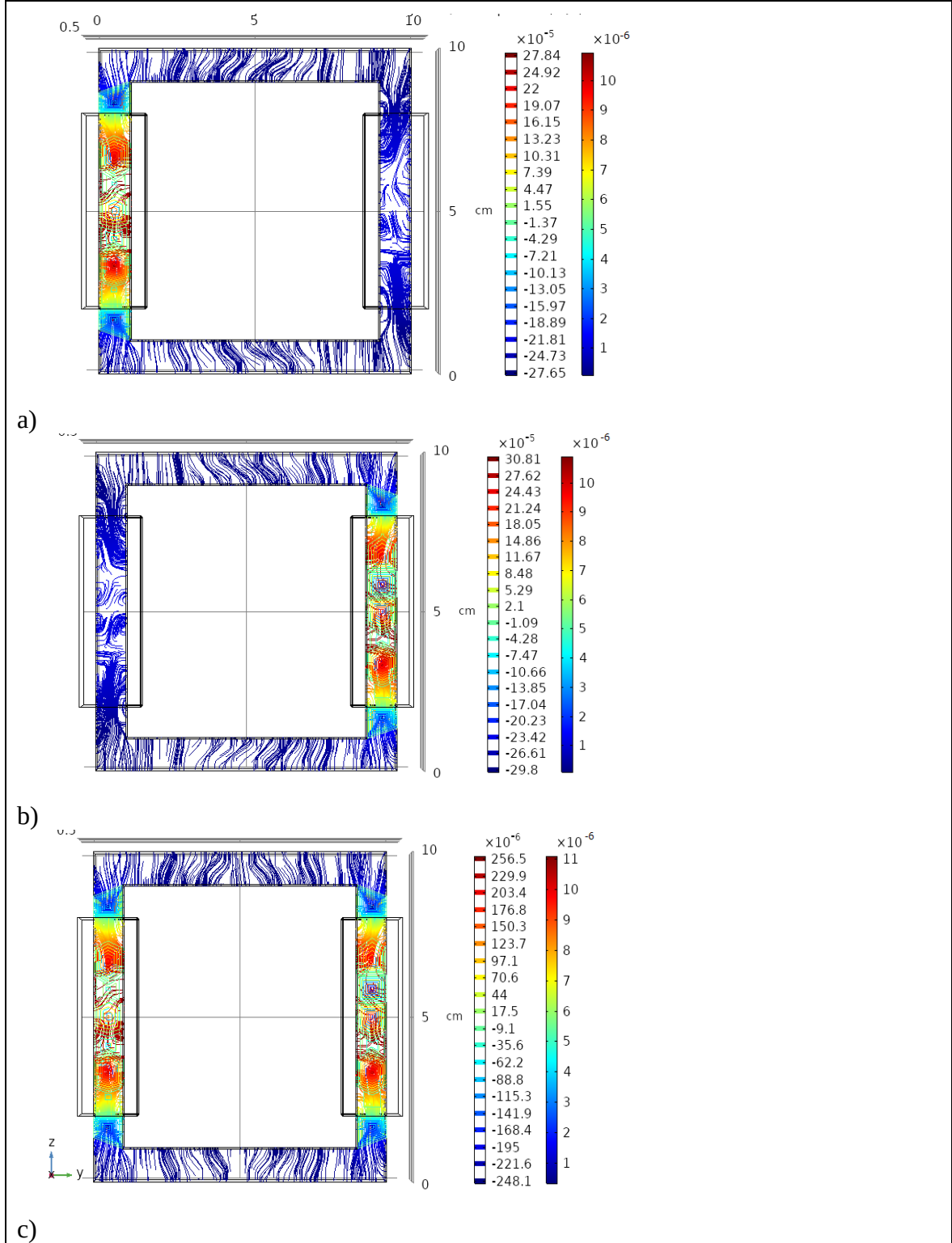


c)

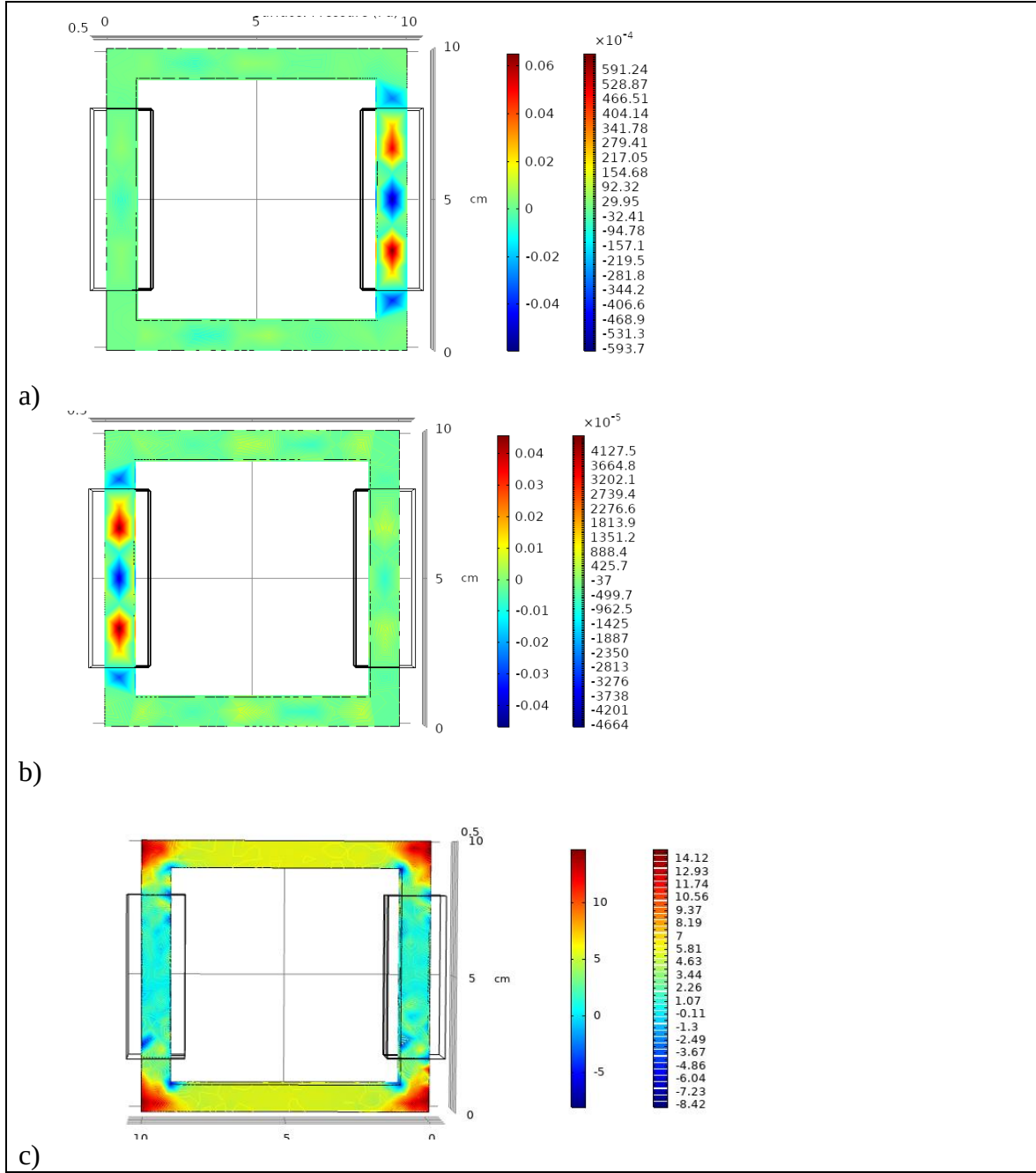
Şekil 4.9. Tasarlanan ANT'de birincil sargı uyarılmışken, oluşan manyetizasyon normu (A/m): a) x - y - z düzlem koordinatları, b) x - z düzlem koordinatları, c) x - y düzlem koordinatları

Manyetik alan ve türbülanslı akış modüllerinin sonuçlarını aynı anda elde edebilmek için benzetim modelinde her iki fizik aynı çalışmaya uygulanmıştır. Sonuç olarak, manyetik kuvvetler uygulanarak ANT'nin çekirdeğinde oluşturulan akış modellerini gözlemlemek

mümkündür. Akış tüpleri akış alanını gösterir ve bu alanine rengi ve boyutu hız modülüyle orantılıdır. Şekil 4.10., hız alanının (v) 3 boyutlu görünümünü sunmaktadır ve Şekil 4.11., her iki fizik uygulandığında nüveden geçen basıncı gösterir.



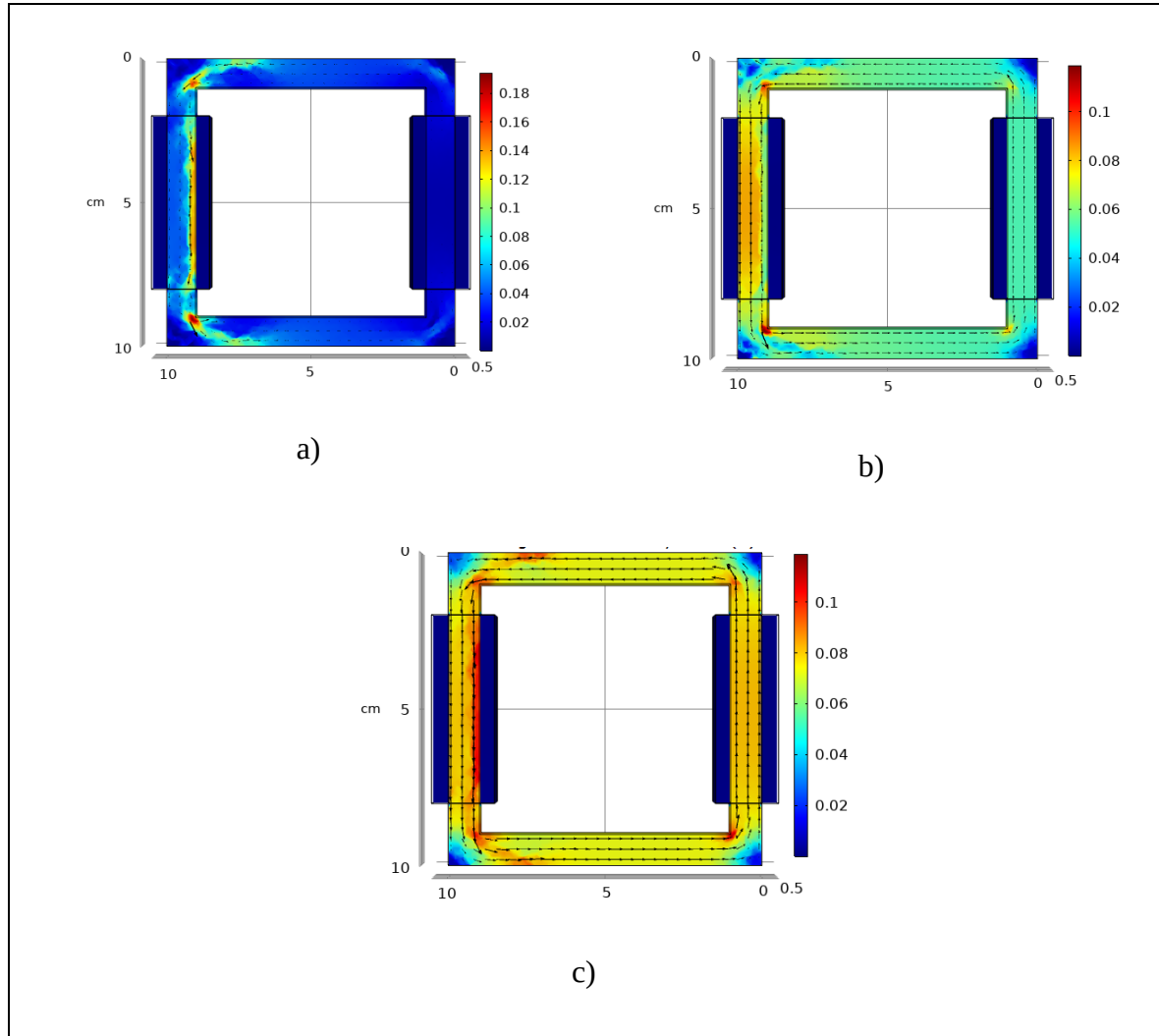
Şekil 4.10. Modelin hız alanı modellerini gösteren akım tüpleri: a) Birincil sargı uyarılmış, b) İkincil sargı uyarılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyarılmış



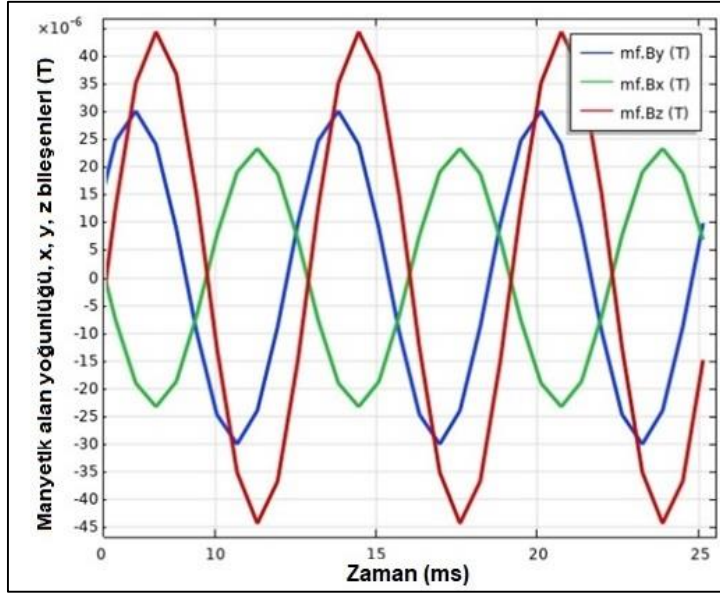
Şekil 4.11. Modelin farklı güç şemaları için basınç kalıpları, a) Birincil sargı uyarılmış b) İkincil sargı uyarılmış, c) Her iki sargı aynı anda uyarılmış

Aynı AC akımı ile birincil sargı uyarımı için benzetimi yapılmış ANT'nin manyetik akı yoğunluğu spektrumu ve manyetik akı, akı çizgileri ile gösterilir. Çalışma zamana bağlı olduğundan, üretilen manyetik akı yoğunluğu zamana göre değişmektedir. Bu durumda, ANT, manyetik tanelerin %50 kütle oranına ($\rho=4336.25$ [kg/m³] karışım yoğunluğu) sahip bir nüve içermektedir.

Şekil 4.12’de göre, $t = 0,14$ ms, $t = 0,15$ ms ve $t = 0,16$ ms için birincil sargıya uygulanan akım uyarısının farklı akı yoğunluğu değerlerine yol açtığı açıktır. ANT bir yükseltici transformatör olarak kabul edildiğinden, ikincil sargı tarafının akı hatlarında bir artış gözlenir. x , y ve z yönleri için manyetik akı yoğunluğu bileşeni Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Akı yoğunluğu, y ve z ile karşılaştırıldığında x yönünde daha fazla miktara sahiptir. Bu sorun doğrudan transformatör için tanımlanan geometriye bağlıdır.



Şekil 4.12. Manyetik akı yoğunluğu spektrumu ve manyetik akı: a) $t = 0,14$ ms, b) $t = 0,15$ ms, c) $t = 0,16$ ms



Şekil 4.13. ANT geometrisine ait x, y ve z yönlerinde manyetik akı yoğunluğu bileşeni

Tasarlanan transformatör için tanımlanan parametreler ve açıklamalar Çizelge 4.4'te verilmiştir.

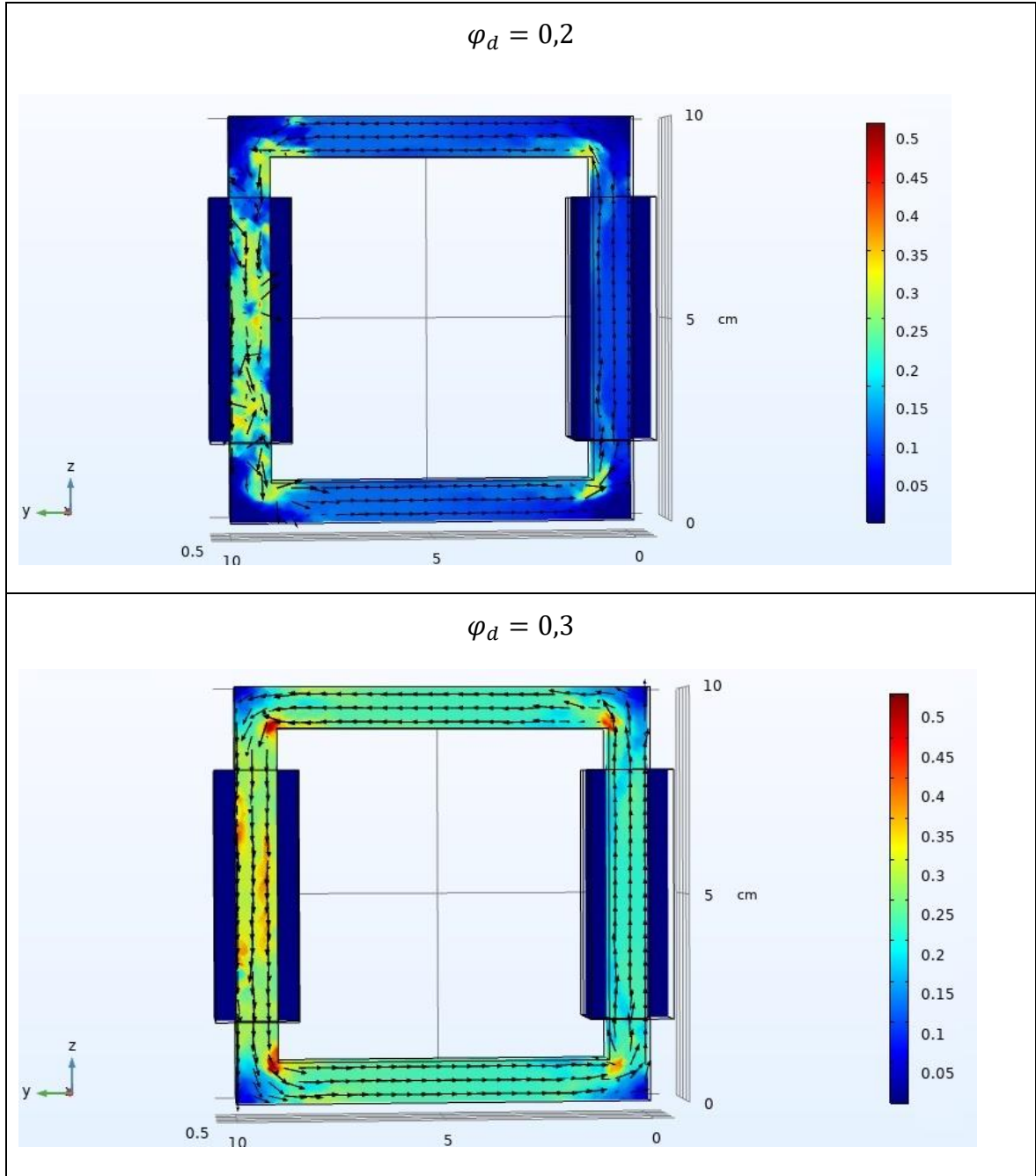
Çizelge 4.4. ANT parametreleri ve açıklamaları

Malzeme	Özellik
Nüve geometrisi (X) (cm)	10
Nüve geometrisi (Y) (cm)	10
Nüve geometrisi (Z) (cm)	1
Birincil sarım sayısı	10
İkincil sarım sayısı	80
Sargı yapısı	Sayısal
Sargı iletkenliği [S/m]	60×10^7
Sargı modeli	Homojen çoklu sargı
Sargı telinin kesit alanı (m ²)	10^{-6}
Sargı uyarıtımı	$5V_{p-p}$

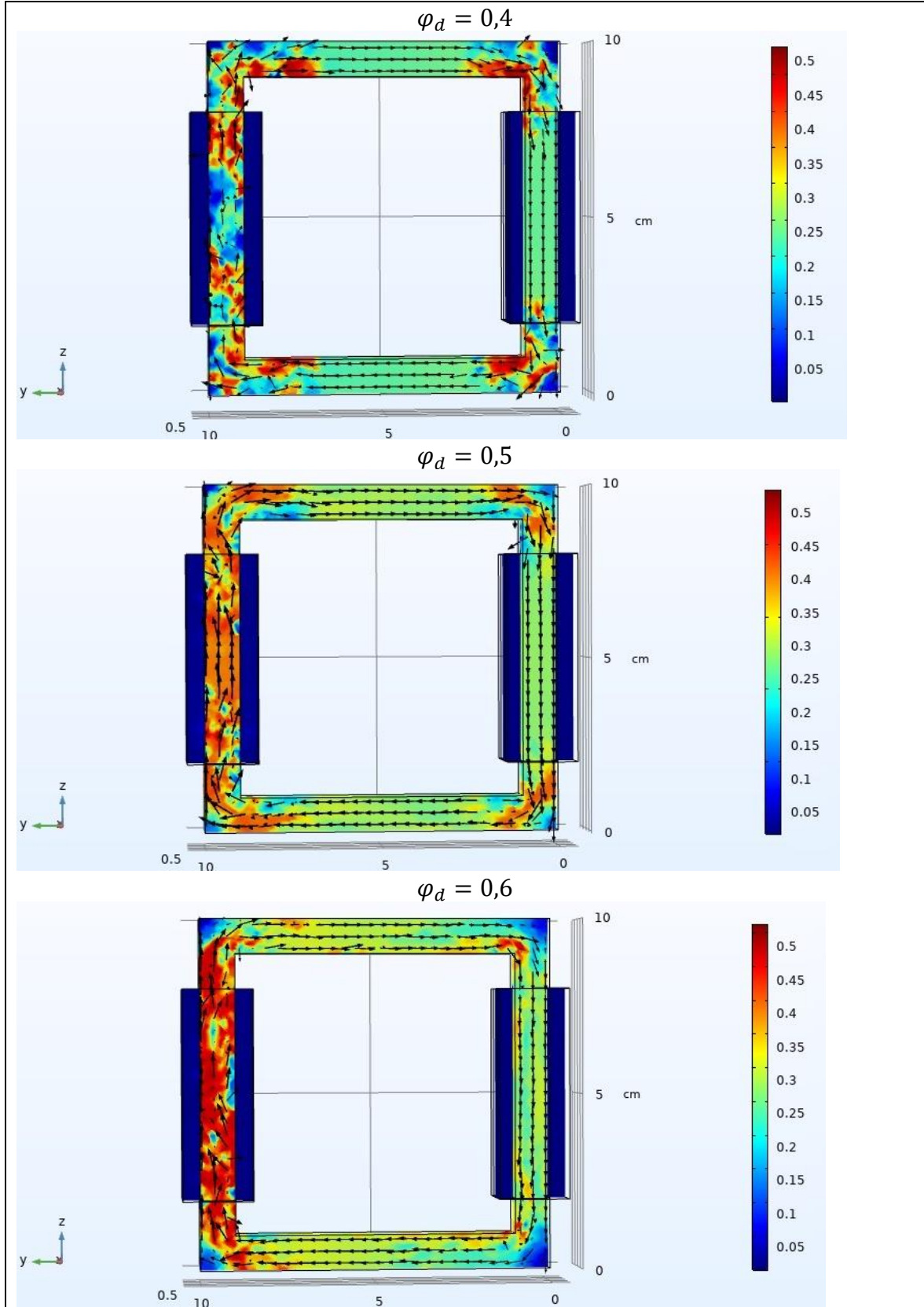
4.7.4. ANT ikinci aşama çalışması

Benzetim parametreleri ile modelin çıkış özellikleri arasındaki ilişkiyi elde etmek için benzetim çalışmasının ikinci aşaması işlenmiştir. Bu aşamada, dağılmış faz konsantrasyonu ϕ_d dışındaki tüm parametreler önceki çalışma ile aynıdır. Benzetim adımlarını takiben, aynı taşıyıcı içinde dağılmış faz ϕ_d 'nin çeşitli konsantrasyonları için $B-H$ eğrileri değerlendirilir. Konsantrasyon oranı, %10 ile %90 arasında bir yüzde miktarına sahiptir. Yüzde arttıkça, uygulanan aynı miktarda manyetik akı yoğunluğu için doyma manyetizasyonu artar.

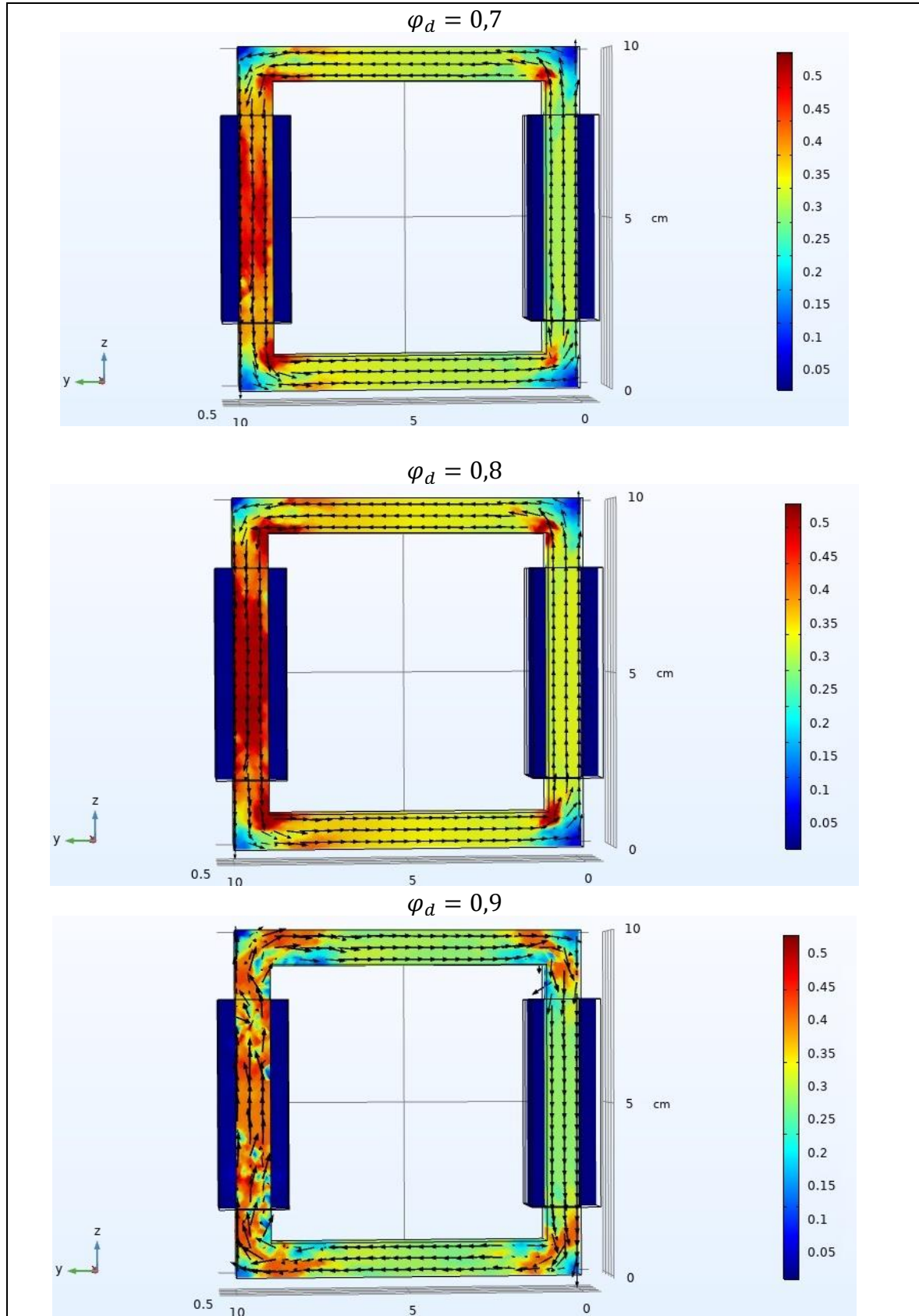
Değişen manyetik tane kütle yoğunluğuna bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu değişiklik göstermektedir. Bu durumu daha ayrıntılı inceleyebilmek için farklı tane oranlarda manyetik akı yoğunluk spektrumu ve manyetik akı değişimleri şekil 4.14'te sunulmuştur. Şekil 4.15'de taşıyıcı içinde dağılmış fazın çeşitli konsantrasyon oranları için manyetizasyon eğrileri verilmiştir.



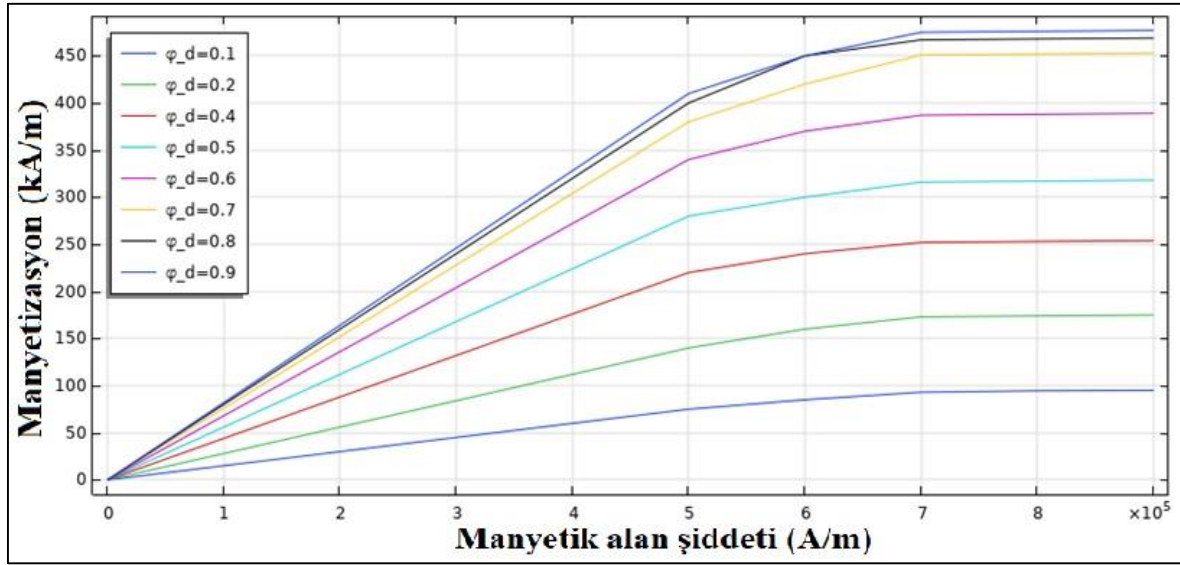
Şekil 4.14. Farklı tane oranlarda manyetik akı yoğunluk spektrumu



Şekil 4.14. (devam) Farklı tane oranlarda manyetik akı yoğunluk spektrumu

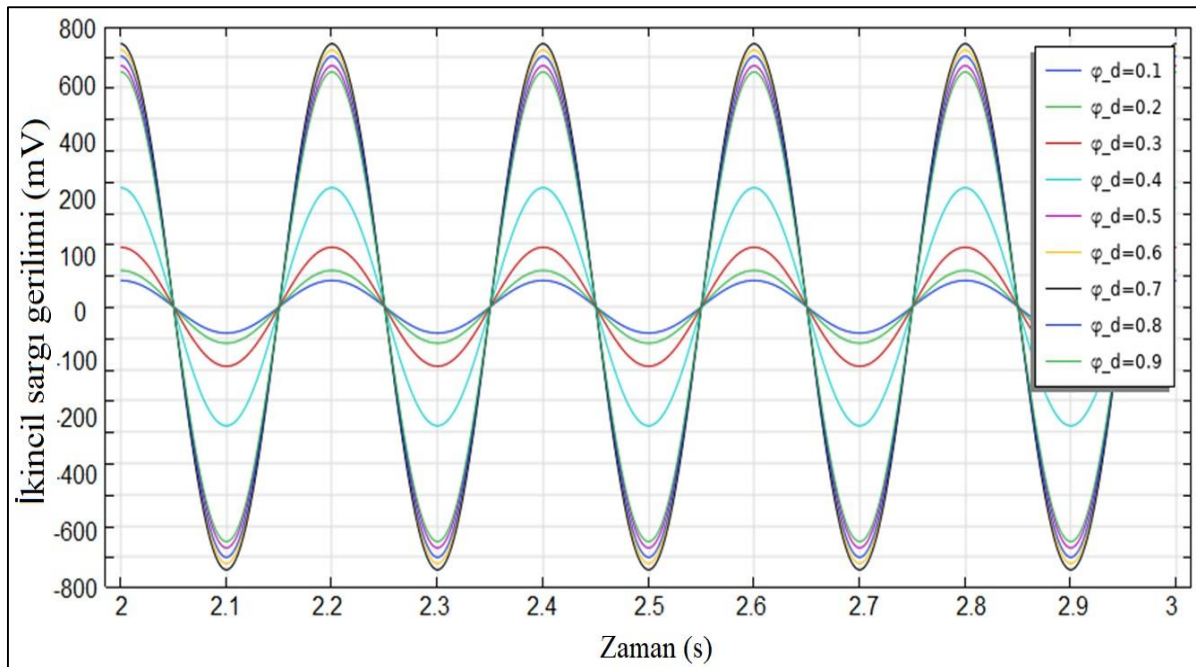


Şekil 4.14. (devam) Farklı tane oranlarda manyetik akı yoğunluk spektrumu

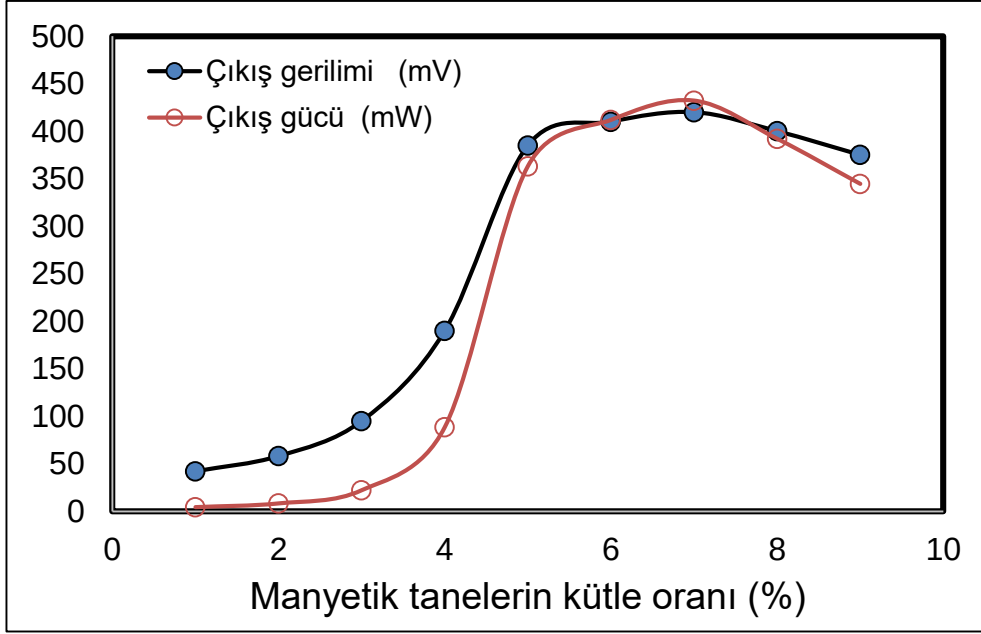


Şekil 4.15. Taşıyıcı içinde dağılmış fazın çeşitli konsantrasyon oranları için değerlendirilen manyetizasyon eğrisi

İkincil sargı gerilimleri çalışma frekansına ve uyarım gerilim miktarına göre farklı davranışlar sergileyecektir. Dağınık faz kütle oranına göre ikincil sargı gerilim dalga formlarını bir arada Şekil 4.16'da sunulmaktadır.

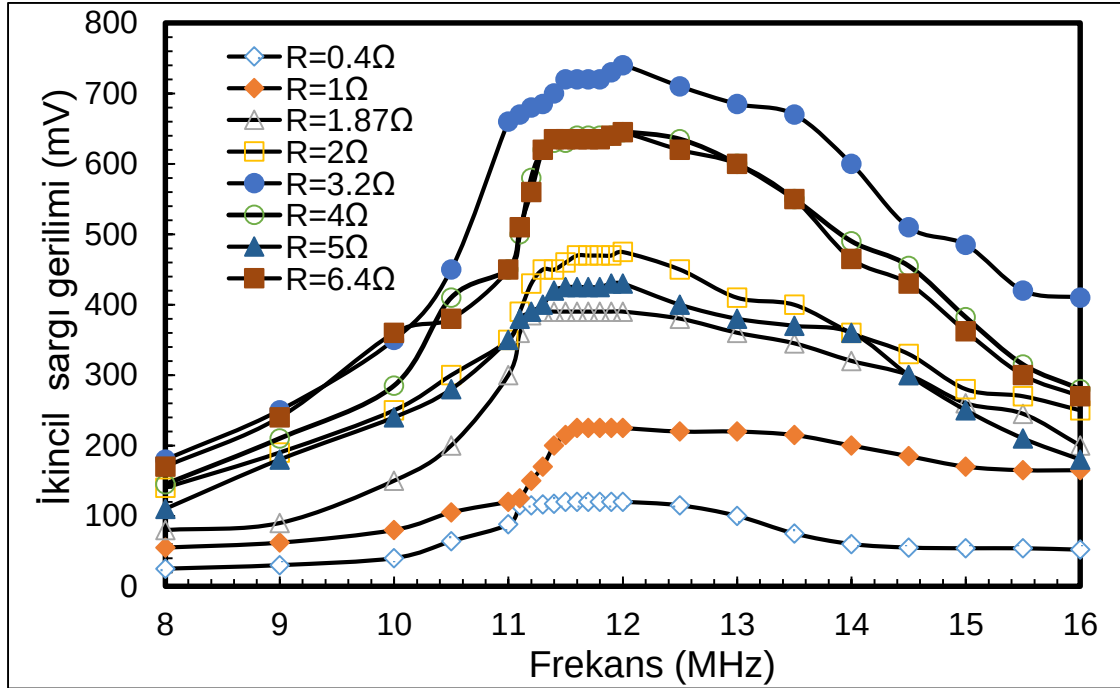


Şekil 4.16. Dağınık faz kütle oranına göre ikincil sargı gerilimi dalga formları bir arada

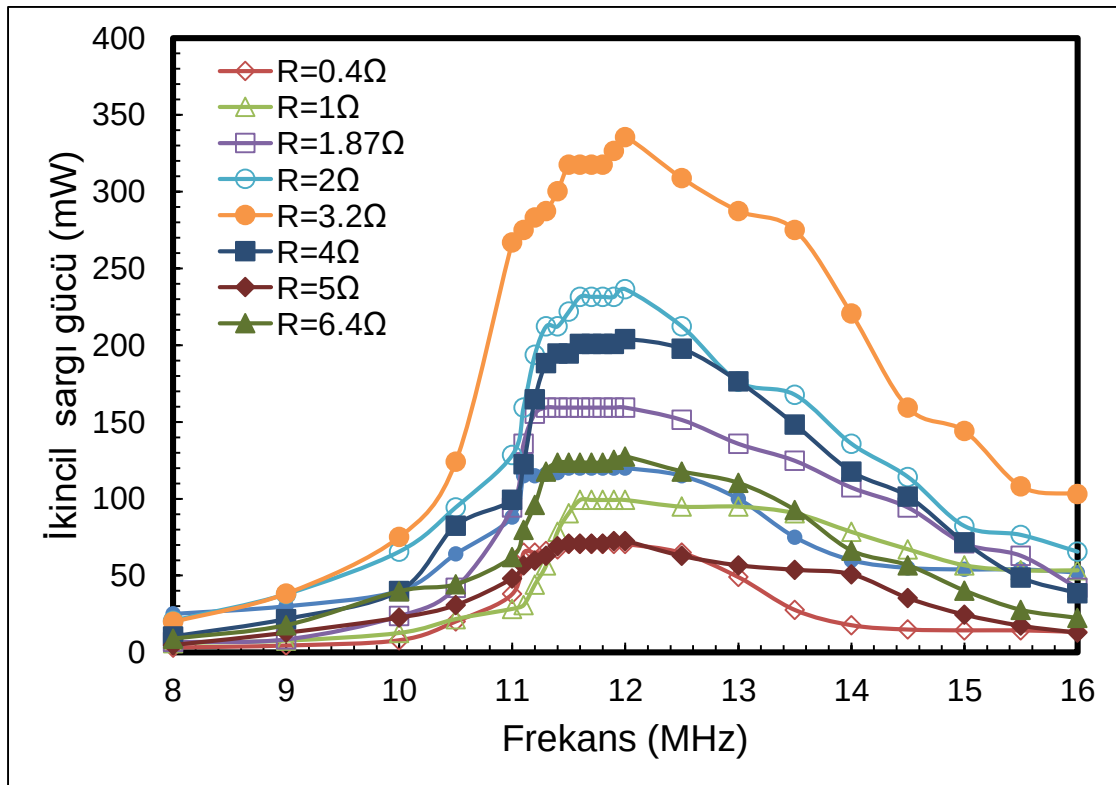


Şekil 4.17. Manyetik tanelerin kütle oranı artışıyla birlikte çıkış gerilimi ve çıkış gücü

Benzetim sonuçlarına göre, birincil sargıya uygulanan giriş gerilimi için artan manyetik tanelerin kütle oranına göre çıkış gerilimi ve çıkış gücünde artış gözükmemektedir. Fakat, Şekil 4.17’de gösterildiği gibi manyetik tane kütlesi daha da arttırıldığında gerilim genliği belirli bir kütle oranı üzerine çıktığında azalmaya başlamıştır. Bu gerçek, nüve için zamana göre maksimum akı değişimini sağlayan optimum miktarda manyetik tane kütle oranının var olduğunu kanıtlamaktadır ve bu olay kesinlikle demir tozu kütlesine bağlıdır. Başka bir deyişle, çekirdeğin manyetik özellikleri, sıvının manyetik özelliğini artırarak gelişme yaşamaktadır.



Şekil 4.18. Farklı yükler için frekansa göre ANT çıkış gerilimi



Şekil 4.19. Farklı yükler için frekansa göre ANT çıkış gücü

Maksimum frekans aralığına (yaklaşık 12 MHz) ulaştıktan sonra çıkış gerilimi ve dolayısıyla çıkış gücü düşmeye başlasa da, artan yüke göre çıkış gerilimi ve gücünün arttığı açıktır.

Burada, $3,2 \Omega$ için maksimum çıkış gücü elde edilmiştir. Son olarak, ANT'nin çalışma özellikleri (çıkış gerilimi ve çıkış gücü), sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterildiği gibi ikincil sargıya farklı yükler bağlanarak 9-13 MHz frekans aralığında ayrı ayrı elde edilmiştir. Akışkan içindeki manyetik konsantrasyonunu yükselterek manyetik özelliği değiştirmenin en büyük avantajı, manyetik akışkanların histerezisinde kalıcı bir manyetizasyon olmamasıdır. Dezavantajı ise manyetik tane konsantrasyonunun artması ve yüksek frekanslarda nüvedeki enerji kayıplarının artmasıdır. Bu kayıp artışının, zayıf güç transformatörlerinde transformatörün çıkış özelliklerine etkisi ayrı ayrı incelenmeli ve değerlendirilmelidir. Ayrıca taşıyıcı akışkan içerisindeki manyetik nanotanelerin farklı dozları da bu akışkanların klasik anlamını değiştirmektedir.

Benzetim Çalışmaların Sonucu

Burada, sayısal sargılı transformatörün matematiksel modellemesi ve sayısal benzetim sonuçları sistematik olarak analiz edilmiştir. Benzetim çalışması, operasyonel koşulları sağlayan farklı elektrik güç şemaları ile bağlantılıdır ve ANT'nin manyetik alanını ve manyetik parametrelerini hesaplamak için 3D modeller kullanılır. Manyetik nüve, bir sıvı taşıyıcı (motor yağı, izo-parafin) içinde dağılmış, manyetik nanotanelerin kararlı, kolloidal bir süspansiyonudur. ANT'nin çekirdeğinde meydana gelen manyetizasyon gövde kuvvetleri, türbülanslı bir akışla sonuçlanır ve akışın yapısı, güç kaynağı şeması tarafından üretilen ve yönetilen manyetik alana bağlıdır. Akış desenleri için, manyetik akışkanın manyetizasyonu ile farklı hücreler oluşturulur. Akış fiziği türbülans yapısına sahiptir ve bu fizik değerlerini çözebilmek için 'Wilcox $k-\omega$ ' modeli kullanılır. Benzetim sonuçlarına göre, değişen uygulanan frekans değerleri ile ANT'nin çalıştığı en kararlı frekans aralığı 9 - 13 MHz'dir. Gelecekteki çalışmalar, manyetik akı yoğunluğu üretimi açısından en iyi çalışma sonuçlarını geliştirmek, optimal çıkış değerleri elde etmek için baz sıvıda farklı manyetik nanotane konsantrasyonuna sahip farklı manyetik nanotane-yağ süspansiyonunu inceleyerek ANT için deneysel analizin belirlenmesini içerir.

5. FERROMANYETİK AKIŞKAN ÇEKİRDEKLİ TRANSFORMATÖRÜN DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Bu bölüm, akışkan çekirdeğe sahip transformatör uygulamasını ele almaktadır. Hazırlama işlemi, yapısal, manyetik ve elektriksel özelliklerin karakterizasyonu her aşama için bu bölümde sunulmaktadır.

5.1. Sistemin Genel Kurulumu

Bu bölüme kadar manyetik akışkan nüveli transformatörle ilgili teorik açıklama, sayısal hesaplamalar ve benzetim çalışmaları üzerinde durulmuştur. Bu bölümde, ANT tasarımı için gereken malzemeler hazırlanarak sistemin uygulamalı biçimde yapısal çalışmaları sunulmuştur. Deneysel çalışması için kullanılan malzemeler ve özellikleri Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Özellik
Ferromanyetik tane	Demir tozu ($d = 70 \mu\text{m}$)
Yalıtkan baz	Motor yağı ($\rho = 874 \text{ kg/m}^3$)
Sargılar	İnce telli bakır ($d = 0,2 \text{ mm}$)
Birincil sargı sayısı	10
İkincil sargı sayısı	80
Nüve boyutu	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$

Bir sinyal generatorü tarafından üretilen farklı frekanslara sahip gerilim dalgaları, akışkan nüveli transformatörün birincil sargılarına uygulanarak ikincil sargılarda üretilen gerilim dalga formları gözlemlenmektedir. Sinyal generatorü Instek AFG-2125 modelinde olup ve 1 kHz'den 25 MHz'e kadar geniş bir frekans aralığına sahiptir. Ayrıca, uygulamalı çalışmalarda frekanslara bağlı olarak optimize edilmiş güç üretiminin tespiti için değişken elektrik yük tablosu kullanılmaktadır. Resim 5.1’de, deney düzeneği, akışkan nüveli transformatör örnekleri ve bu örneklerle sarılan sargılar gösterilmektedir. İlk başta, 4 örnek hazırlanıp deneylerin gerçekleştirilmesinin ardından 5. Örnek, en yoğun kütle orana sahip olan örneğe (sarı renkli nüve) demir tozu ekleyerek elde edilip, aynı deneyler bu örnek için tekrarlanmıştır. Bu sebepten dolayı örnek sayısı 4 adet gözükürken, aslında deney aşamalarında son örnekte değişiklik yaparak yeni bir yapı elde edilmiştir. Böylece, manyetik tane kütle oranınınun değişimiyle çıkış parametrelerin değişimi her durum için ayrı ayrı

gözlemlenmiştir. Resim 5.2’de örnek nüvelerinde kullanılan manyetik tanelerin yapısı ve görüntüsü verilmiştir. Bu taneler halis saf demir tozundan oluşup 70 μ m çapına sahiptir.



Resim 5.1. Farklı manyetik tane kütle farkasiyonuna sahip akışkan nüveli transformatör örnekleri

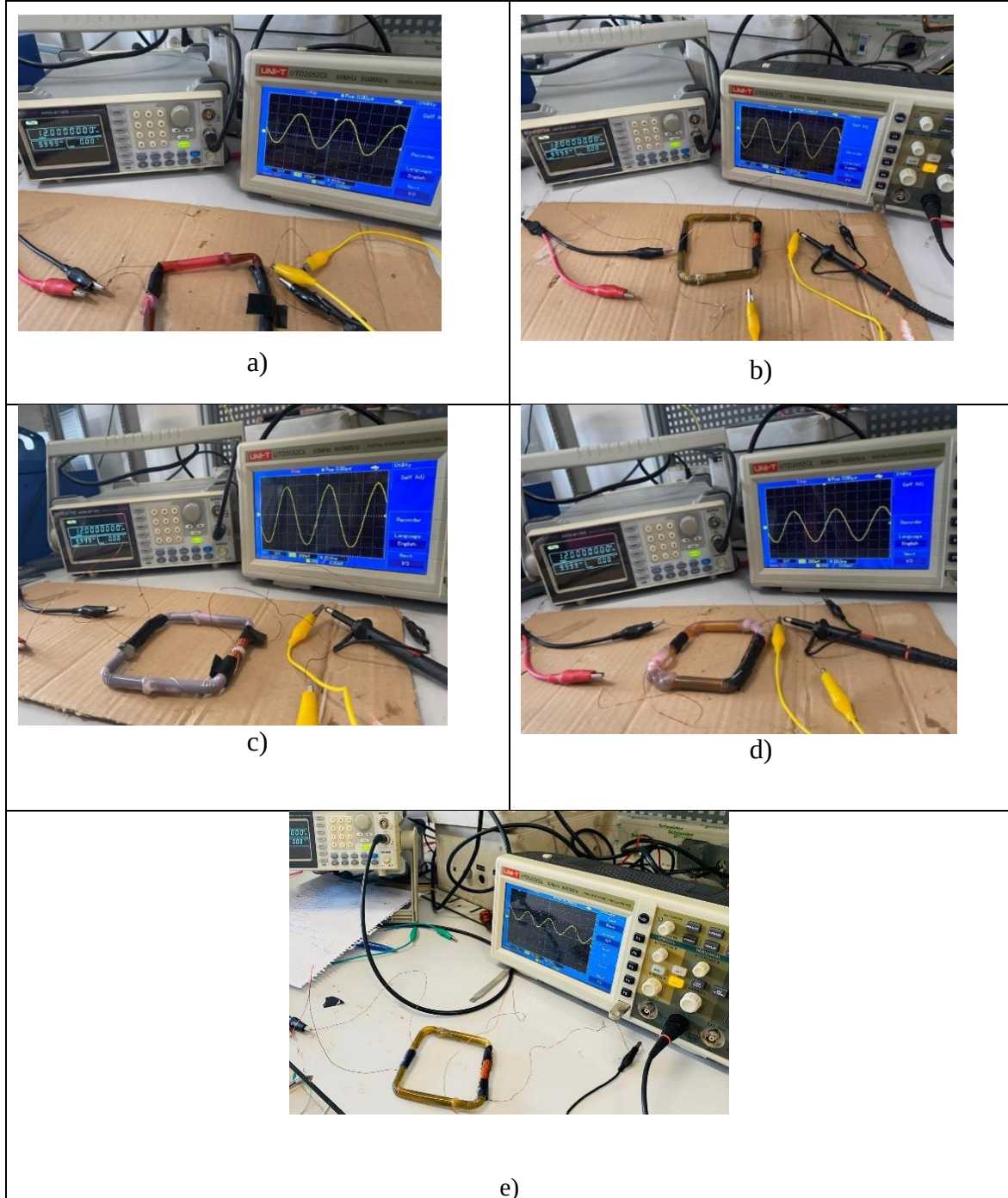


Resim 5.2. Örnek nüvelerde kullanılan manyetik tanelerin yapısı

5.2. Deneysel Çalışma Sonuçları

Deneysel çalışmalar iki aşama halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada sıvı çekirdeğin içindeki demir tozu kütlesi ana parametre olarak değiştirilmiştir. Empedanslar dengelendiği zaman maksimum çıkış gücü elde etmek mümkün olduğundan dolayı, ikinci aşamada parametre olarak, çıkış gücünü etkileyen elektrik yükü dikkate alınmıştır.

Çalışmaların ilk aşamasında her bir örneği önce yüksüz durumda, ardından aynı yük miktarına bağlayarak testler gerçekleştirilmiştir. Prototip üzerindeki bağlantılar farklı örnekler ile açık devre durumu için Resim 5.3'te verilmiştir.

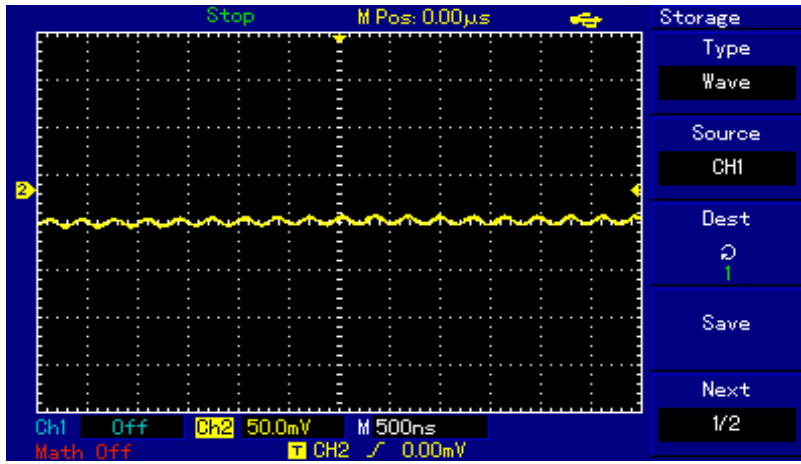


Resim 5.3. Ferromanyetik tanelerden ve motor yağından yapılmış farklı kütle oranlarına sahip örnekler için açık devre testleri a) $\varphi_d = 0,2 - 0,3$, b) $\varphi_d = 0,3 - 0,4$, c) $\varphi_d = 0,4 - 0,6$, d) $\varphi_d = 0,6 - 0,8$, e) $\varphi_d \geq 0,8$

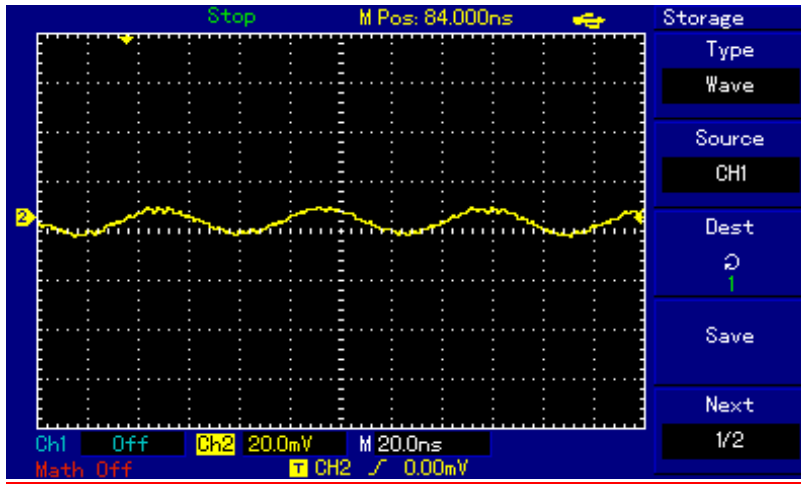
Manyetik tanelerin kütle yoğunluklarının ayarlanması, Resim 5.4'te verilmiş olan WF profesyonel sayısal hassas tartı kullanılarak yapılmıştır. Bu işlemlerden farklı frekans aralıkları için osiloskop üzerinde elde edilen sonuçlar Resim 5.5'te gösterilmiştir.



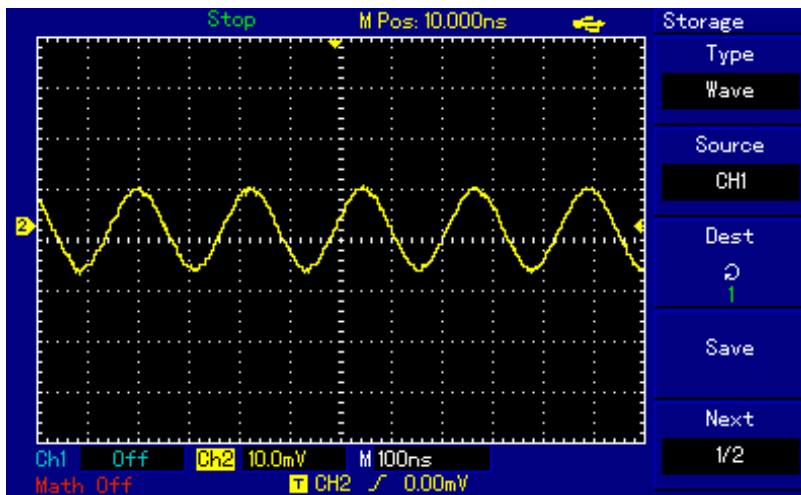
Resim 5.4. Manyetik tanelerin kütle yoğunluklarını ayarlama işleminde kullanılan WF hassas tartı terazi



a)

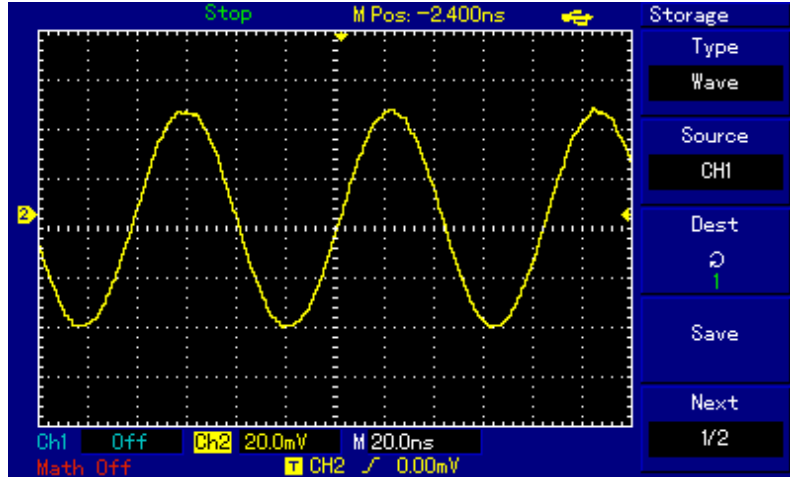


b)

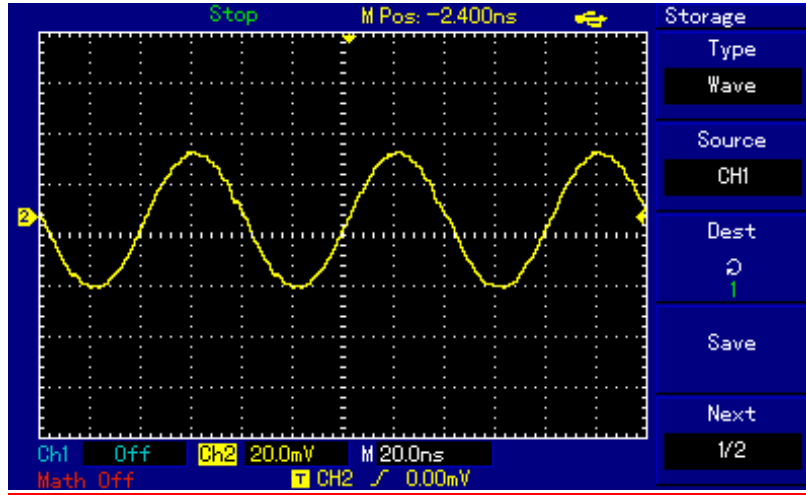


c)

Resim 5.5. Dağınık faz kütle oranına göre ikincil sargı geriliminin dalga formları: a) Şeffat pembe örnek $\varphi_d = 0,2 - 0,3$, b) Kırmızı örnek $\varphi_d = 0,3 - 0,4$, c) Mat pembe örnek $\varphi_d = 0,4 - 0,6$, d) Sarı örnek $\varphi_d = 0,6 - 0,7$, e) Sarı örnek $\varphi_d \geq 0,8$



d)



e)

Resim 5.5. (devam) Dağılık faz kütle oranına göre ikincil sargı geriliminin dalga formları:

- a) Şeffat pembe örnek $\varphi_d = 0,2 - 0,3$, b) Kırmızı örnek $\varphi_d = 0,3 - 0,4$, c) Mat pembe örnek $\varphi_d = 0,4 - 0,6$, d) Sarı örnek $\varphi_d = 0,6 - 0,7$, e) Sarı örnek $\varphi_d \geq 0,8$

Osiloskop görüntülerinden de anlaşıldığı üzere farklı manyetik tane kütle oranlarında transformatörün çıkış karakteristiği değişiklik göstermektedir. Benzetim çalışmasında olduğu gibi burada da yine kütle oranı arttıkça genel yapının manyetik özellikleri ve dolayısıyla çıkış gerilimi artış sergilerken, belli bir kütle oranından sonra bu değerler düşmektedir. Benzetim çalışmalarda $\varphi_d = 0,8$ 'den sonra düşüş meydana gelirken, deneysel çalışmada $\varphi_d = 0,6 - 0,7$ civarında çıkış değerleri düşmektedir. Benzetim çalışma ve deneysel çalışmalar arasındaki bu fark deneysel ortamda ortaya çıkan ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.

Manyetik kütle yoğunluğunun değişimiyle birlikte homojen olmayan dağılımdan kaynaklanan farklı gerilimler osiloskop üzerinde görülebilir.

Bu durumu daha anlaşılır şekilde sunabilmek için farklı akışkan nüveli örneklerin ikincil sargılarına farklı değerlerde yükler bağlanarak çıkış gerilim ve güç seviyeleri elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge ve grafikler halinde sunulmuştur. Çizelge 5.2., $R = 0,15 \Omega$, Çizelge 5.3., $R = 0,18 \Omega$, Çizelge 5.4., $R = 0,2 \Omega$, Çizelge 5.5., $R = 0,22 \Omega$ ve Çizelge 5.6., $R = 0,3 \Omega$ için farklı kütle oranlarda elde elden çıkış gerilim ve güç değerlerini sırasıyla Şekil 5.1., Şekil 5.2., Şekil 5.3., Şekil 5.4., ve Şekil 5.5'te sunmaktadır.

Çizelge 5.2. $R = 0,15 \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış güç

Manyetik tanelerin kütle oranı	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
10	3	0,0294
20	6	0,1176
30	25	2,041666667
40	100	32,66666667
50	160	83,62666667
60	300	294
70	360	423,36
80	340	377,6266667
90	330	355,74

Çizelge 5.3. $R = 0,18 \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü

Manyetik tanelerin kütle oranı	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
10	5	0,068055556
20	11	0,329388889
30	38	3,930888889
40	130	46,00555556
50	320	278,7555556
60	360	352,8
70	385	403,5013889
80	350	333,4722222
90	345	324,0125

Çizelge 5.4. $R = 0,2 \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü

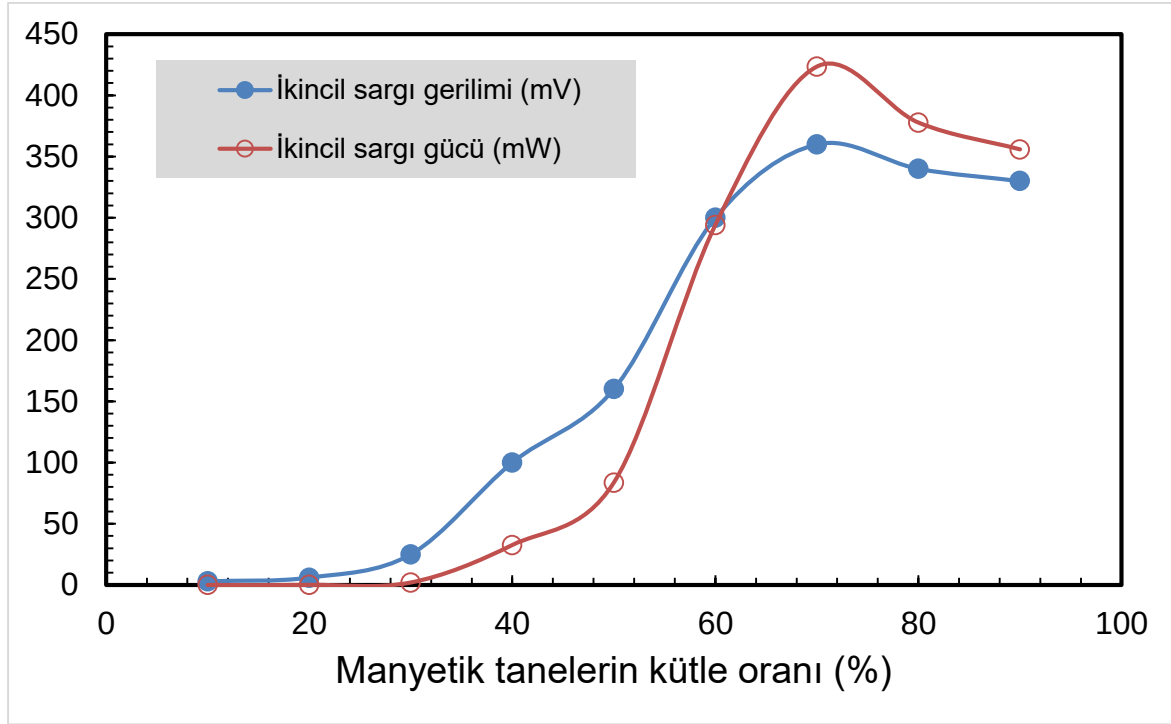
Manyetik tanelerin kütle oranı	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
10	8	0,1568
20	17	0,70805
30	42	4,3218
40	190	88,445
50	355	308,76125
60	400	392
70	410	411,845
80	380	353,78
90	365	326,40125

Çizelge 5.5. $R = 0,22 \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü

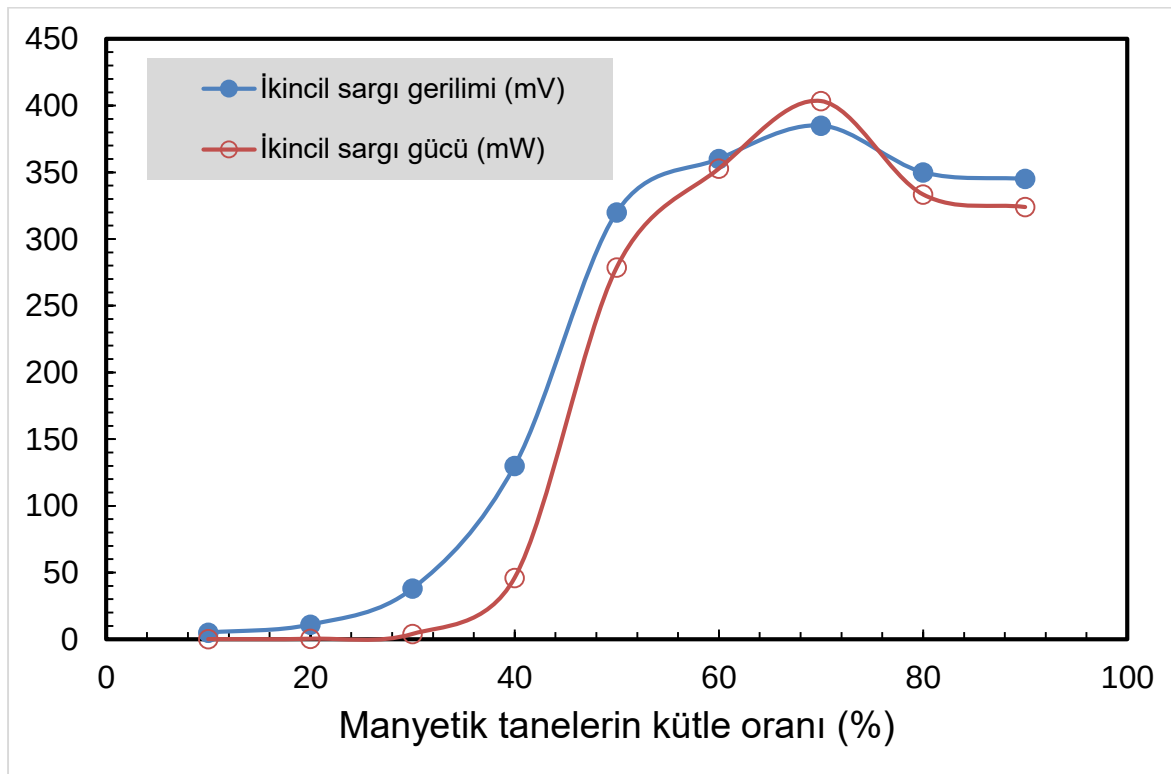
Manyetik tanelerin kütle oranı	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
10	10	0,222727273
20	22	1,078
30	64	9,122909091
40	220	107,8
50	375	313,2102273
60	410	374,4045455
70	425	402,3011364
80	395	347,5102273
90	370	304,9136364

Çizelge 5.6. $R = 0,3 \Omega$ 'da çıkış gerilim ve çıkış gücü

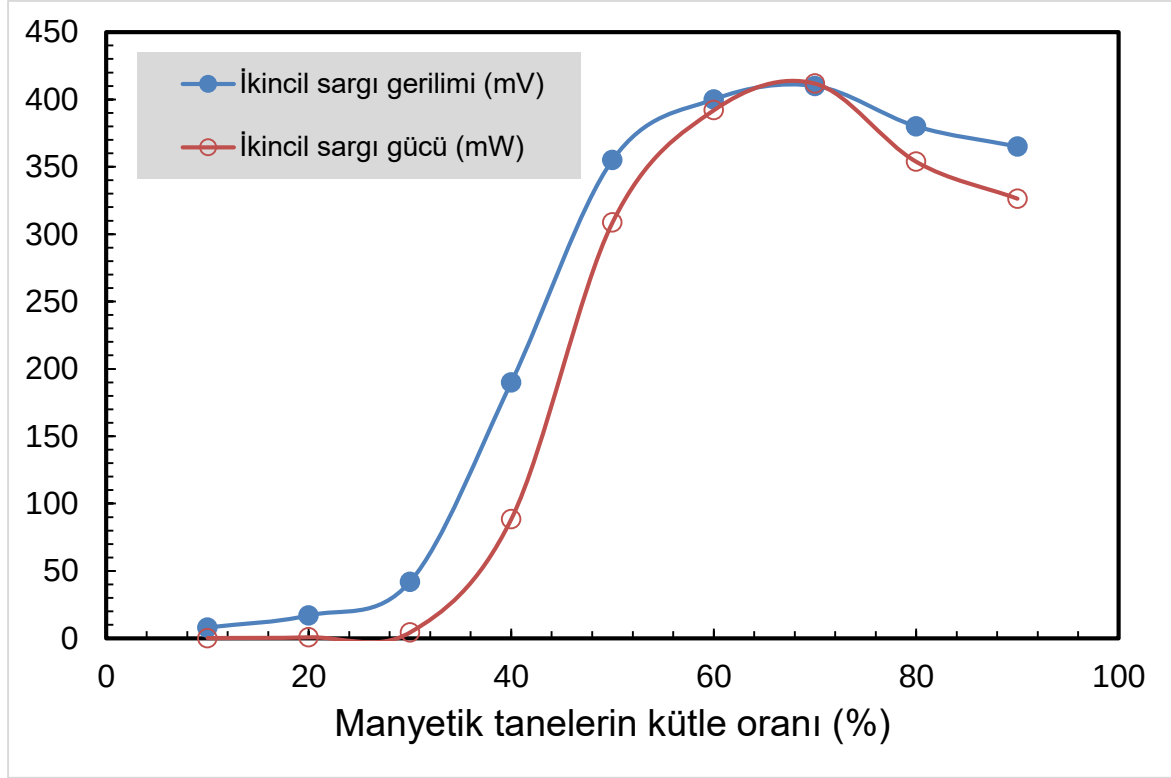
Manyetik tanelerin kütle oranı	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
10	10	0,163333333
20	25	1,020833333
30	72	8,4672
40	245	98,04083333
50	395	254,8408333
60	430	302,0033333
70	460	345,6133333
80	380	235,8533333
90	370	223,6033333



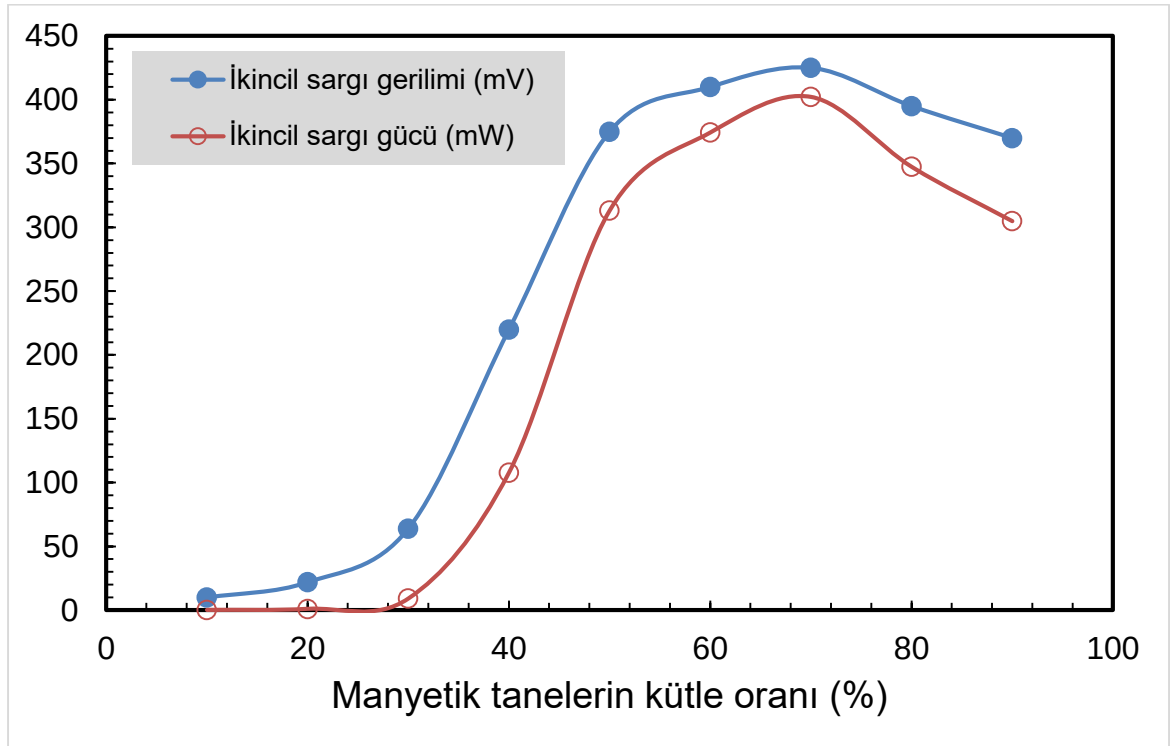
Şekil 5.1. $R = 0,15 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri



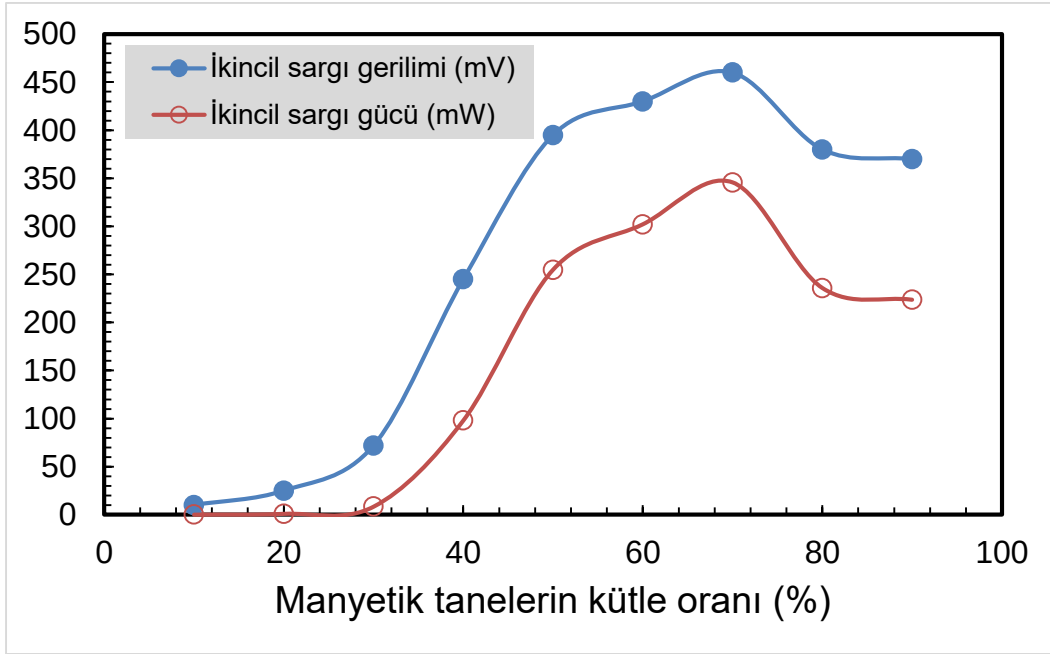
Şekil 5.2. $R = 0,18 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri



Şekil 5.3. $R = 0,2 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri



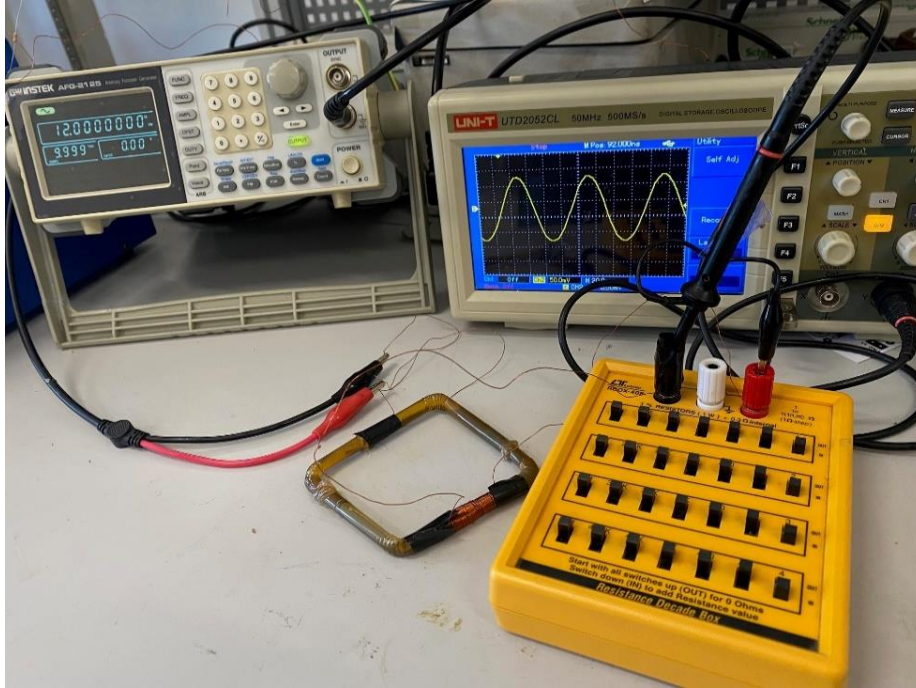
Şekil 5.4. $R = 0,22 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri



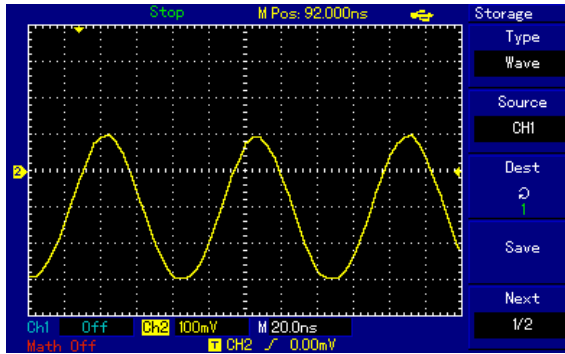
Şekil 5.5. $R = 0,3 \Omega$ 'da farklı manyetik tane kütle oranıyla elde edilen gerilim ve güç grafikleri

Grafiklerden de anlaşıldığı üzere manyetik kütle oranı $\varphi_d = 0,6$ 'ya varana kadar artış göstermektedir. Bu durum mevcut yüklerin hepsi için geçerlidir. $R = 0,2$ 'nin altındaki yükler için güç grafiğiyle gerilim grafiğinde çakışma oluşmaktadır ve belli bir aralıkta güç seviyesi gerilim seviyesinin üzerine çıkmaktadır. Fakat bu durum $0,2 \Omega$ 'dan daha büyük yükler için geçerli değildir ve çıkış gerilimi her zaman çıkış gücünün üzerinde seyretmektedir.

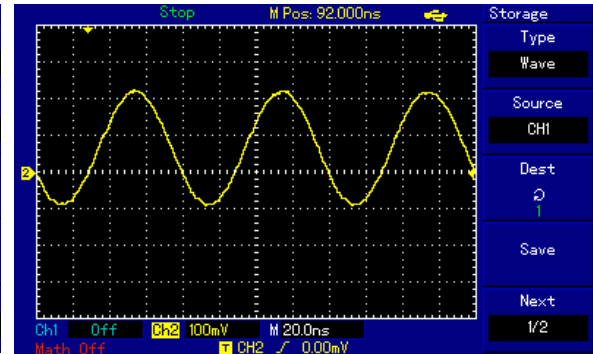
Deneysel çalışmaların ikinci fazında parametre olarak, farklı frekanslarda çıkış gücünü etkileyen elektrik yükü dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, tek bir örneğin ikincil sargılarına farklı yük değerlerine erişim sağlamayı mümkün kılan Resim 5.6'da gösterilen bir direnç tablosu bağlanarak frekans değişimiyle akışkan nüveli transformatörün çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Farklı yükler için çıkış geriliminin dalga formları Resim 5.7'de verilmiştir.



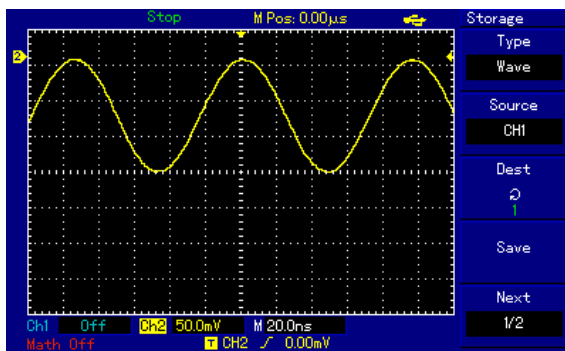
Resim 5.6. Farklı dirençlerin çıkışını görselleştirmek için direnç tablosuna bağlı ANT örneği



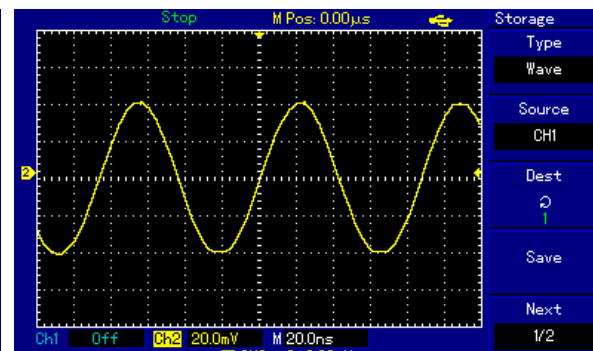
a)



b)



c)



d)

Resim 5.7. ANT için çıkış gerilimleri dalga formları a) $R = 0,2 \Omega$, b) $R = 1,87 \Omega$, c) $R = 1 \Omega$, d) $R = 0,4 \Omega$

Çizelge 5.7., Çizelge 5.8., Çizelge 5.9., Çizelge 5.10., Çizelge 5.11., Çizelge 5.12. ve Çizelge 5.13., sırasıyla, $R = 0,4 \Omega$, $R = 1 \Omega$, $R = 1,87 \Omega$, $R = 3,2 \Omega$, $R = 4 \Omega$, $R = 5 \Omega$ ve $R = 6,4 \Omega$ için çıkış gerilim ve güç değerlerini vermektedir. Son olarak farklı yüklerde deneysel çalışmadan elde edilen verileri grafikler haline getirerek Şekil 5.6'da frekans değişimiyle ANT çıkış gerilimi ve Şekil 5.7'de frekans değişimiyle ANT çıkış gücü verilmiştir.

Çizelge 5.7. Farklı frekanslarda $R = 0,4 \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

$R = 0,4 \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	17,2	1,449616
9	24,4	2,917264
10	35,2	6,071296
10,5	39	7,4529
11	50	12,25
11,1	58	16,4836
11,2	58	16,4836
11,3	65	20,7025
11,4	67	21,9961
11,5	69	23,3289
11,6	73	26,1121
11,7	73	26,1121
11,8	73	26,1121
11,9	73	26,1121
12	73	26,1121
12,5	72	25,4016
13	69	23,3289
13,5	62	18,8356
14	54	14,2884
14,5	47	10,8241
15	36	6,3504
15,5	31	4,7089
16	29	4,1209

Çizelge 5.8. Farklı frekanslarda $R = 1 \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

$R = 1 \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	24	1,12896
9	32	2,00704
10	48	4,51584
10,5	56	6,14656
11	78	11,92464
11,1	96	18,06336
11,2	120	28,224
11,3	125	30,625
11,4	130	33,124
11,5	132	34,15104
11,6	132	34,15104
11,7	135	35,721
11,8	140	38,416
11,9	148	42,93184
12	150	44,1
12,5	150	44,1
13	146	41,77936
13,5	140	38,416
14	134	35,19376
14,5	124	30,13696
15	110	23,716
15,5	92	16,58944
16	66	8,53776

Çizelge 5.9. Farklı frekanslarda $R = 1.87 \, \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

$R = 1,87 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	80	6,70802139
9	90	8,489839572
10	150	23,5828877
10,5	230	55,4459893
11	300	94,3315508
11,1	370	143,4887701
11,2	380	151,3497326
11,3	390	159,4203209
11,4	410	176,1903743
11,5	410	176,1903743
11,6	412	177,9134973
11,7	410	176,1903743
11,8	410	176,1903743
11,9	420	184,8898396
12	420	184,8898396
12,5	418	183,1331765
13	415	180,5139037
13,5	370	143,4887701
14	350	128,3957219
14,5	310	100,7251337
15	270	76,40855615
15,5	210	46,22245989
16	180	33,95935829

Çizelge 5.10. Farklı frekanslarda $R = 3.2 \, \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

$R = 3,2 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	180	19,845
9	250	38,28125
10	300	55,125
10,5	350	75,03125
11	420	108,045
11,1	480	141,12
11,2	500	153,125
11,3	510	159,31125
11,4	515	162,4503125
11,5	520	165,62
11,6	520	165,62
11,7	520	165,62
11,8	520	165,62
11,9	520	165,62
12	524	168,1778
12,5	526	169,46405
13	526	169,46405
13,5	526	169,46405
14	500	153,125
14,5	450	124,03125
15	370	83,85125
15,5	310	58,86125
16	275	46,3203125

Çizelge 5.11. Farklı frekanslarda $R = 4 \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

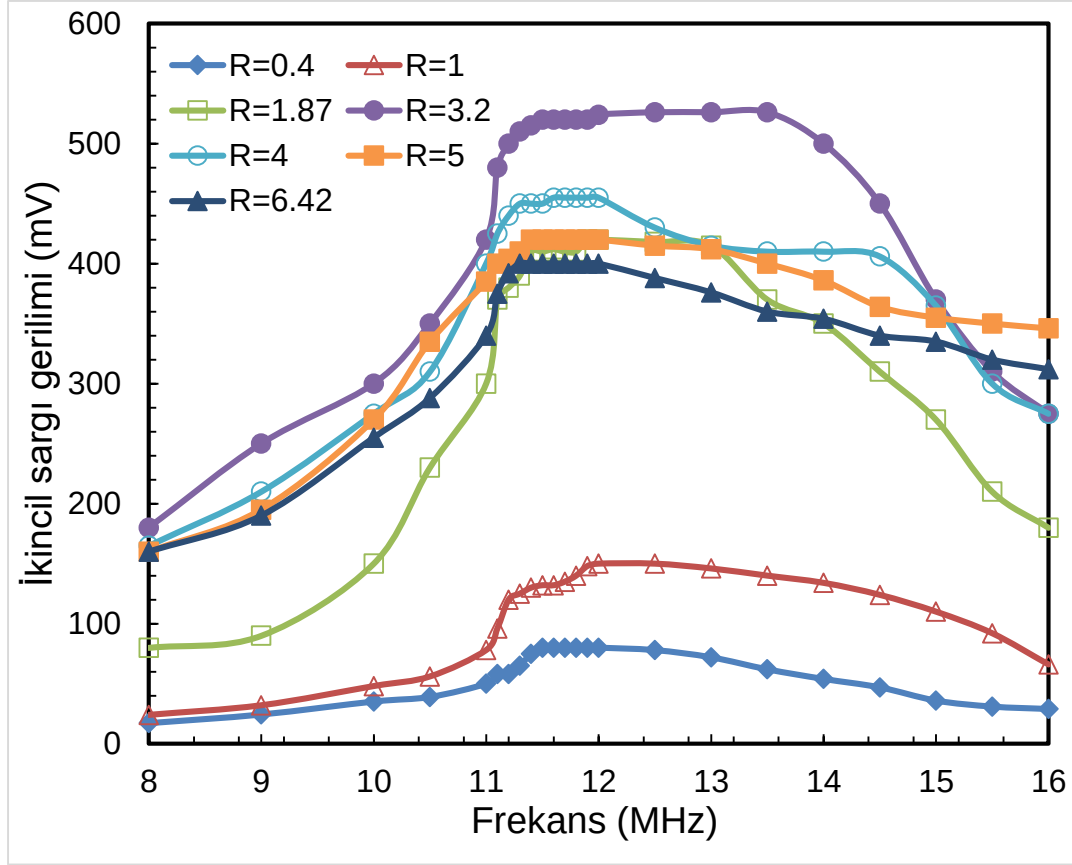
$R = 4 \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	165	13,34025
9	210	21,609
10	275	37,05625
10,5	310	47,089
11	400	78,4
11,1	425	88,50625
11,2	440	94,864
11,3	450	99,225
11,4	450	99,225
11,5	450	99,225
11,6	455	101,44225
11,7	455	101,44225
11,8	455	101,44225
11,9	455	101,44225
12	455	101,44225
12,5	430	90,601
13	415	84,39025
13,5	410	82,369
14	410	82,369
14,5	406	80,76964
15	365	65,28025
15,5	300	44,1
16	275	37,05625

Çizelge 5.12. Farklı frekanslarda $R = 5 \, \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

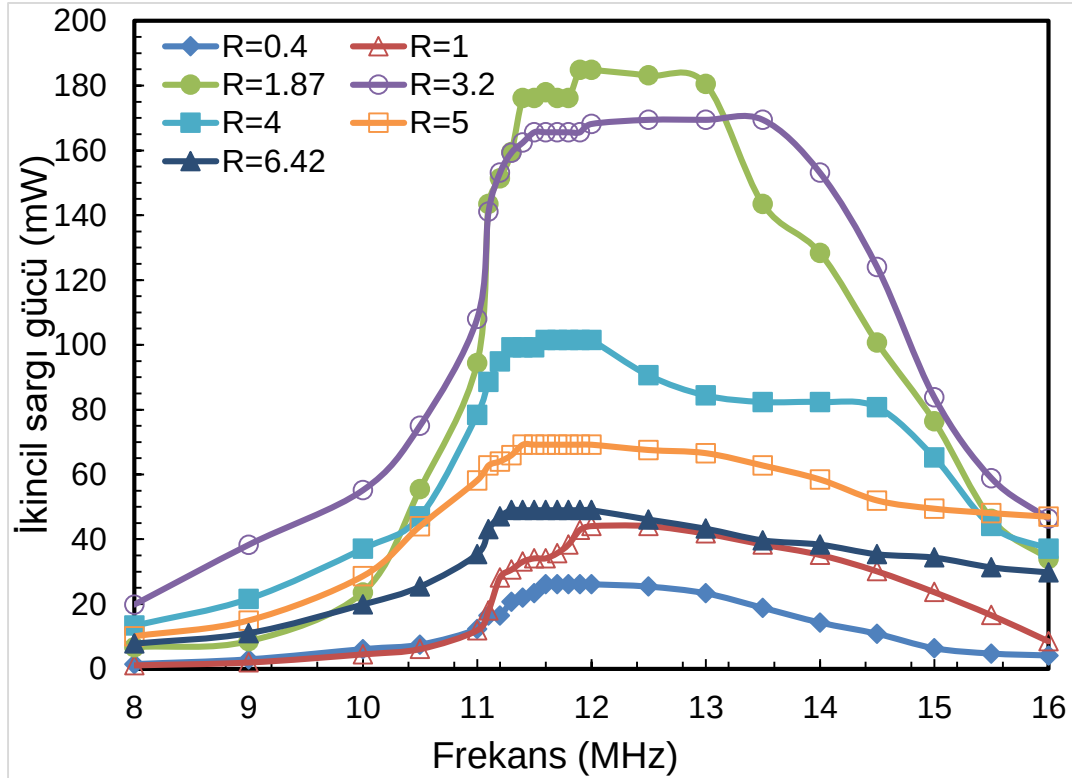
$R = 5 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	160	10,0352
9	195	14,9058
10	270	28,5768
10,5	335	43,9922
11	385	58,1042
11,1	400	62,72
11,2	404	63,980672
11,3	410	65,8952
11,4	420	69,1488
11,5	420	69,1488
11,6	420	69,1488
11,7	420	69,1488
11,8	420	69,1488
11,9	420	69,1488
12	420	69,1488
12,5	415	67,5122
13	412	66,539648
13,5	400	62,72
14	386	58,406432
14,5	364	51,938432
15	355	49,4018
15,5	350	48,02
16	346	46,928672

Çizelge 5.13. Farklı frekanslarda $R = 6,4 \, \Omega$ için çıkış gerilim ve çıkış gücü

$R = 6,4 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV)	İkincil sargı gücü (mW)
8	160	7,84
9	190	11,055625
10	255	19,91390625
10,5	288	25,4016
11	340	35,4025
11,1	375	43,06640625
11,2	392	47,0596
11,3	400	49
11,4	400	49
11,5	400	49
11,6	400	49
11,7	400	49
11,8	400	49
11,9	400	49
12	400	49
12,5	388	46,1041
13	376	43,2964
13,5	360	39,69
14	354	38,378025
14,5	340	35,4025
15	335	34,36890625
15,5	320	31,36
16	312	29,8116



Şekil 5.6. Farklı yüklerde frekans değişimiyle ANT çıkış gerilimi



Şekil 5.7. Farklı yüklerde frekans değişimiyle ANT çıkış gücü

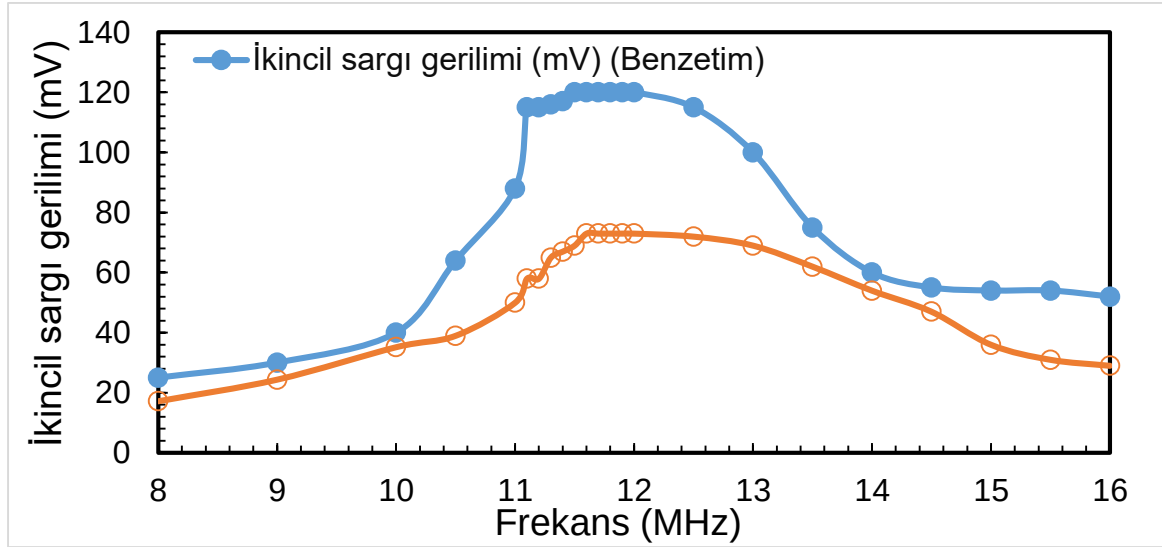
Akışkan nüveli transformatörün farklı yüklerde çıkış gerilimi grafiği dikkate alındığında, en yüksek gerilim değerinin $R = 3,2 \Omega$ 'iken elde edildiği gözlemlenmiştir. Bütün yükler için gerilim seviyesi $f = 11 \text{ MHz}$ ile $f = 13,5 \text{ MHz}$ aralıklarında en yüksek değeri sunmaktadır ($V = 526 \text{ mV}$).

Aynı şekilde tasarlanan transformatörün farklı yüklerde çıkış gücü grafiği dikkate alındığında, $f = 11,2 \text{ MHz}$ ile $f = 13 \text{ MHz}$ frekans aralıklarında, sistem çıkış gücü bakımından en verimli davranışı sergilemektedir Burada da yine $R = 3,2 \Omega$ ve $R = 1,87 \Omega$ 'da ikincil sargıda en yüksek güç değeri elde edilmiştir ($P = 184,889 \text{ mW}$)

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te yapılmış olan benzetim çalışmalarıyla kıyaslandığında, değerler belli bir oranda birbirleriyle farklılık gösterse de, aynı frekans aralıklarında yine her iki durumda da tasarlanan transformatörler yakın davranışlar sergilemektedirler. Bu durumun isbatı iki çalışmadan elde edilen sonuçları karşılaştırıp, şekiller üzerinde göstererek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da aynı frekans aralıklarında sırasıyla $R = 0,4 \Omega$, $R = 3,2 \Omega$ ve $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri sunulmuştur. Çizelge 5.14., Çizelge 4.15., ve Çizelge 5.16., bu şekillere ait değerleri detaylıca sunmaktadır.

Çizelge 5.14. $R = 0,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

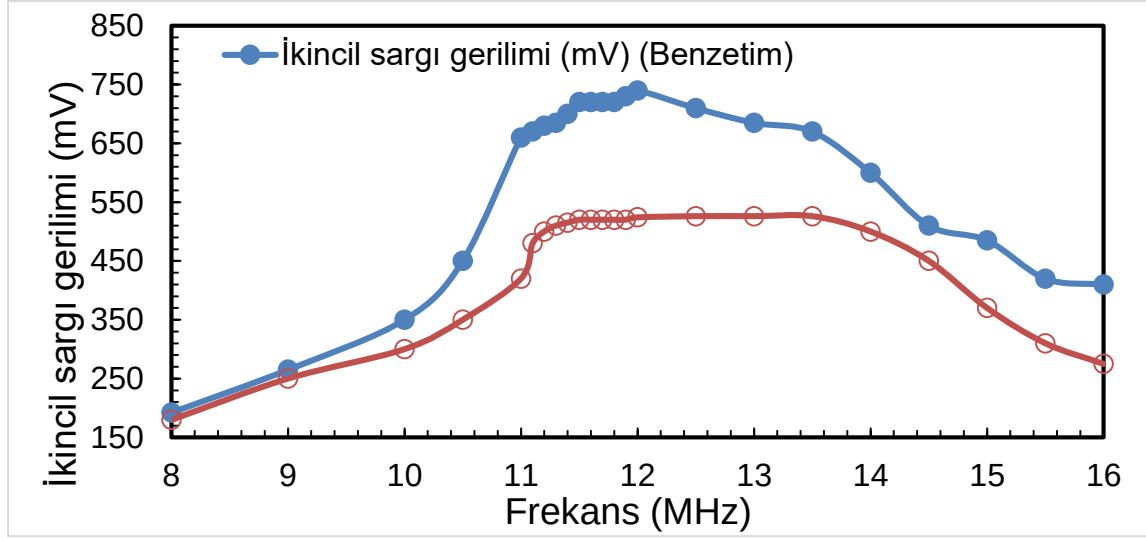
$R = 0,4 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Benzetim)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Deneysel)
8	25	17,2
9	30	24,4
10	40	35,2
10,5	64	39
11	88	50
11,1	115	58
11,2	115	58
11,3	116	65
11,4	117	67
11,5	120	69
11,6	120	73
11,7	120	73
11,8	120	73
11,9	120	73
12	120	73
12,5	115	72
13	100	69
13,5	75	62
14	60	54
14,5	55	47
15	54	36
15,5	54	31
16	52	29



Şekil 5.8. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

Çizelge 5.15. $R = 3,2 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

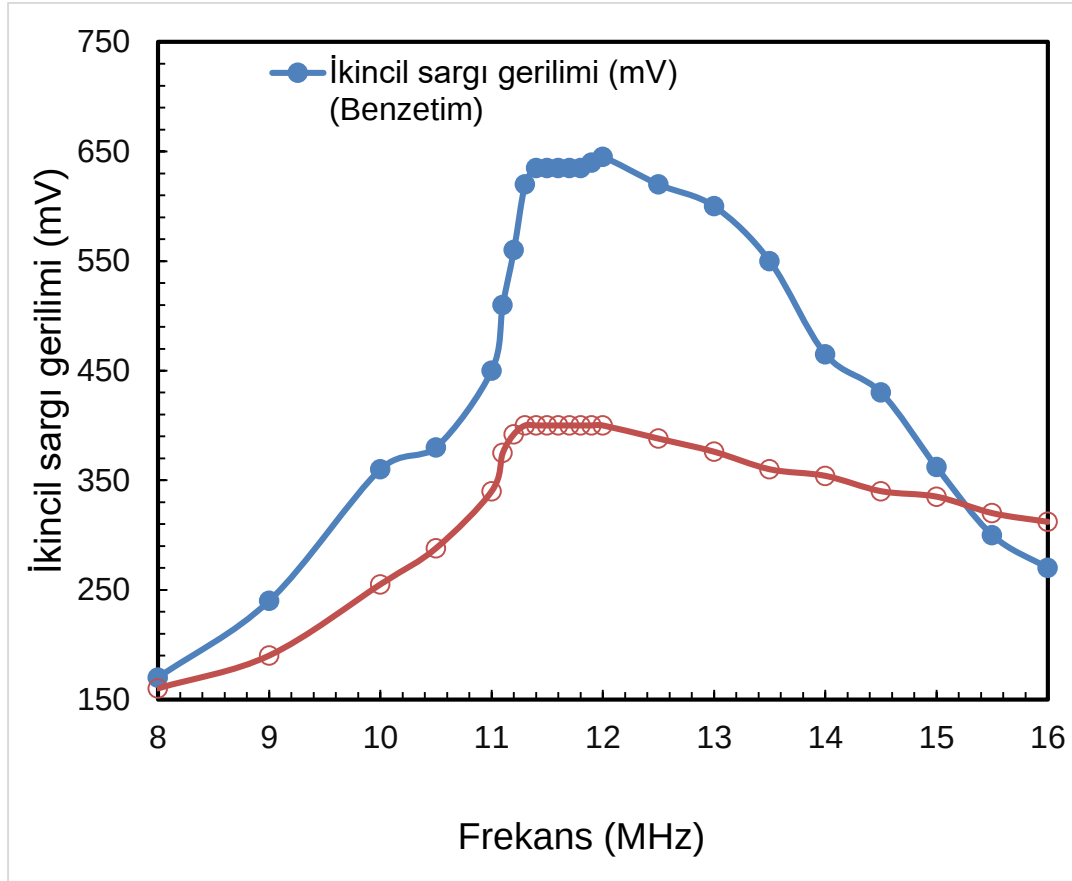
$R = 3,2 \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Benzetim)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Deney)
8	192	180
9	265	250
10	350	300
10,5	450	350
11	660	420
11,1	670	480
11,2	680	500
11,3	685	510
11,4	700	515
11,5	720	520
11,6	720	520
11,7	720	520
11,8	720	520
11,9	730	520
12	740	524
12,5	710	526
13	685	526
13,5	670	526
14	600	500
14,5	510	450
15	485	370
15,5	420	310
16	410	275



Şekil 5.9. $R = 3,2 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

Çizelge 5.16. $R = 6,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

$R = 6,4 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Benzetim)	İkincil sargı gerilimi (mV) (Deney)
8	170	160
9	240	190
10	360	255
10,5	380	288
11	450	340
11,1	510	375
11,2	560	392
11,3	620	400
11,4	635	400
11,5	635	400
11,6	635	400
11,7	635	400
11,8	635	400
11,9	640	400
12	645	400
12,5	620	388
13	600	376
13,5	550	360
14	465	354
14,5	430	340
15	362	335
15,5	300	320
16	270	312



Şekil 5.10. $R = 6,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gerilimleri

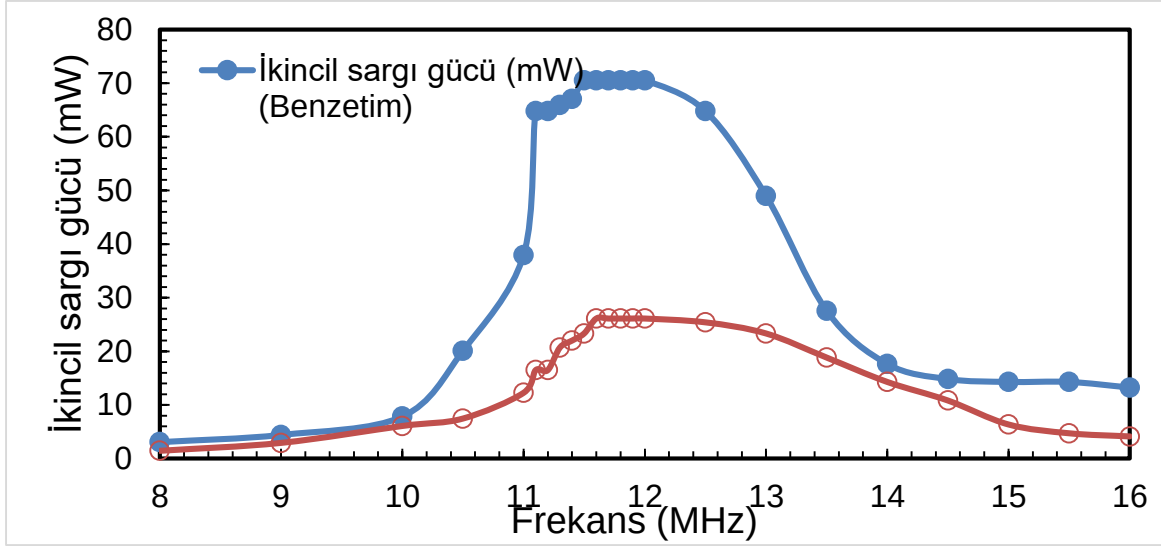
Şekil 5.8., Şekil 5.9. ve Şekil 5.10'da bulunan grafikler yardımıyla benzetim çalışması ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması mümkündür. Bu grafiklerde her üç yük durumu için de neredeyse eşit seviyede bir farklılık gözlemlenmiştir ($\Delta V \approx 200 \, mV$). Çıkış gerilim seviyesinde ortaya çıkan bu değer farklı sebeplerden kaynaklanabilir. Bu sebeplerden en bariz olanı manyetik tanelerin kütlelerini ayarlama ve ölçme sırasında gerçekleşebilen ölçüm hataları olabilir. Bir diğer neden ise manyetik tanelerin kütlelerinden dolayı taşıyıcı baz içerisinde sergilerdikleri yığılma eylemidir. Transformator çekirdeğinin belli bir bölgesine toplanan taneler, diğer bölgelerde oluşan manyetik akıyı zayıflatarak çıkış karakteristikleri etkilemekte. Ancak, benzetim programında manyetik tanelerin dağılma yöntemi homojen seçildiği için, bu sorun tamamen ortadan kalkmıştır ve manyetik akı tüm oranlar için oranlı ve düzgün bir şekilde oluşmaktadır.

Aynı şekilde benzetim çalışmaları ve deneysel bulgulardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp, iki durumda da ikincil sargılara aktarılan güç miktarı şekiller üzerinde gösterilerek kıyaslama yapılmıştır. Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te aynı frekans

aralıklarında sırasıyla $R = 0,4 \Omega$, $R = 3,2 \Omega$ ve $R = 6,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü sunulmuştur. Çizelge 5.17., Çizelge 5.18. ve Çizelge 5.19., bu şekillere ait değerleri detaylıca sunmaktadır.

Çizelge 5.17. $R = 0,4 \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

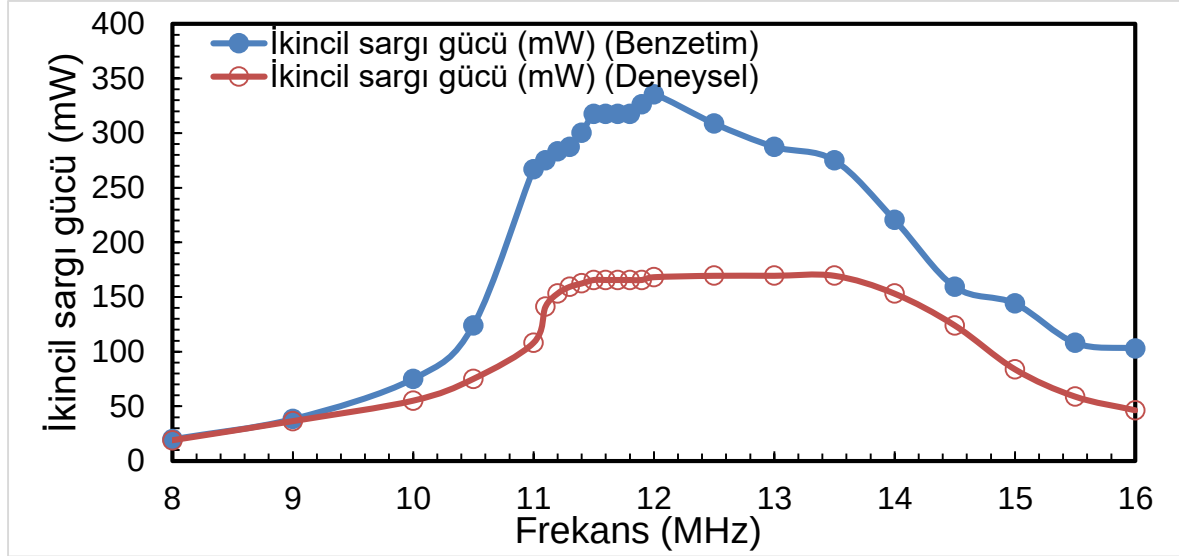
$R = 0,4 \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gücü (mW) (Benzetim)	İkincil sargı gücü (mW) (Deneysel)
8	3,0625	1,449616
9	4,41	2,917264
10	7,84	6,071296
10,5	20,0704	7,4529
11	37,9456	12,25
11,1	64,8025	16,4836
11,2	64,8025	16,4836
11,3	65,9344	20,7025
11,4	67,0761	21,9961
11,5	70,56	23,3289
11,6	70,56	26,1121
11,7	70,56	26,1121
11,8	70,56	26,1121
11,9	70,56	26,1121
12	70,56	26,1121
12,5	64,8025	25,4016
13	49	23,3289
13,5	27,5625	18,8356
14	17,64	14,2884
14,5	14,8225	10,8241
15	14,2884	6,3504
15,5	14,2884	4,7089
16	13,2496	4,1209



Şekil 5.11. $R = 0,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

Çizelge 5.18. $R = 3,2 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

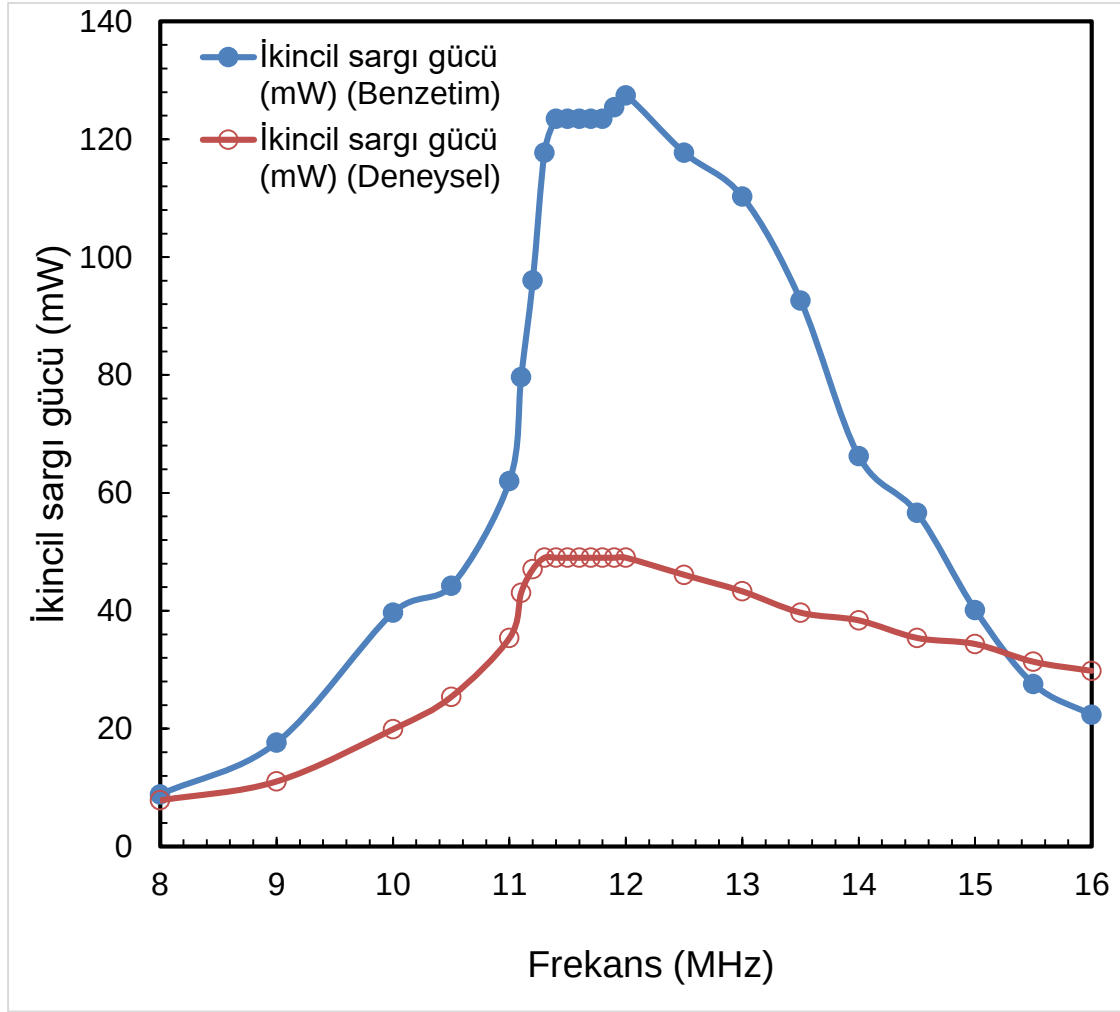
$R = 3,2 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gücü (mW) (Benzetim)	İkincil sargı gücü (mW) (Deneysel)
8	19,845	18,9
9	38,28125	36,4
10	75,03125	55,125
10,5	124,03125	75,03125
11	266,805	108,045
11,1	274,95125	141,12
11,2	283,22	153,125
11,3	287,4003125	159,31125
11,4	300,125	162,4503125
11,5	317,52	165,62
11,6	317,52	165,62
11,7	317,52	165,62
11,8	317,52	165,62
11,9	326,40125	165,62
12	335,405	168,1778
12,5	308,76125	169,46405
13	287,4003125	169,46405
13,5	274,95125	169,46405
14	220,5	153,125
14,5	159,31125	124,03125
15	144,0753125	83,85125
15,5	108,045	58,86125
16	102,96125	46,3203125



Şekil 5.12. $R = 3,2 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

Çizelge 5.19. $R = 6,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

$R = 6.4 \, \Omega$		
Frekans (MHz)	İkincil sargı gücü (mW) (Benzetim)	İkincil sargı gücü (mW) (Deneysel)
8	8,850625	7,84
9	17,64	11,055625
10	39,69	19,91390625
10,5	44,2225	25,4016
11	62,015625	35,4025
11,1	79,655625	43,06640625
11,2	96,04	47,0596
11,3	117,7225	49
11,4	123,4876563	49
11,5	123,4876563	49
11,6	123,4876563	49
11,7	123,4876563	49
11,8	123,4876563	49
11,9	125,44	49
12	127,4076563	49
12,5	117,7225	46,1041
13	110,25	43,2964
13,5	92,640625	39,69
14	66,21890625	38,378025
14,5	56,625625	35,4025
15	40,132225	34,36890625
15,5	27,5625	31,36
16	22,325625	29,8116



Şekil 5.13. $R = 6,4 \, \Omega$ için benzetim programı ve deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış gücü

Şekil 5.11., Şekil 5.12. ve Şekil 5.13'te bulunan grafikler yardımıyla benzetim çalışması ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması mümkündür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yeni bir yaklaşım olan manyetik sıvı nüveli transformatörün tasarımı ve farklı frekans değerlerinde çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Gövdesi manyetik olmayan materyalden yapılan transformatörün içine manyetik sıvı eklenerek farklı frekans değerlerindeki çıkış gerilim ve güç karakteristikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik şeklinde sunulmuştur.

Cebirsel analiz, sayısal benzetim ve deneysel metotlar uygulanırken, sayısal benzetimde COMSOL Multi-physics 5.6 sonlu elemanlar paketi kullanılmıştır. Farklı tane yoğunluklarında oluşan manyetik akı yoğunluğu araştırılıp, uygun değerler elde edilene kadar benzetim çalışması üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Çalışmalar iki aşamada sunulmuştur. Birinci aşama, yüksek frekansta çeşitli ferromanyetik tane yoğunluklarında açık devre deneyi ve tek bir yük bağlanarak çıkış güç ve gerilim karakteristikleri elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşama, yüksek frekansta tek bir yoğunluğa sahip bir örneğin ikincil sargılarına farklı yükler bağlanarak çıkış güç ve gerilim karakteristikleri elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmalarında elde edilen raporlara göre 9-13 (MHz) frekansları arasında ANT cihazı kabul edilebilir ölçüde çıktı sunmaktadır. Bu değerleri ferromanyetik tanelerin yoğunluk derecesi ayrıca etkilemektedir. En yüksek çıkış gerilim ve güç değerleri %60 ile %70 ferromanyetik tanelerin yoğunluğunda elde edilmiştir.

Tasarlanan transformatörün prototip ortamda da elektriksel özellikleri ve çıkış gücü ve gerilim karakteristikleri yüksek frekans değerlerinde endüstriyel olarak kullanılan transformatörlerle benzerlik gösterdiği görülmüştür. En yüksek gerilim $R = 3.2 \Omega$ ikincil sargı uçlarına bağlıyken elde edilmiştir.

ANT tasarımının benzetim ve uygulamalı çalışmalardan elde edilen sonuçlar kıyaslanırken, çıkış gerilimi ve çıkış gücü seviyesinde ortaya çıkan farklılıklar çeşitli sebeplerden kaynaklanabilir. Bu sebeplerden en bariz olanı manyetik tanelerin kütlesini ayarlama ve

ölçme sırasında gerçekleşebilen ölçüm hataları olabilir. Bir diğer neden ise manyetik tanelerin kütlelerinden dolayı taşıyıcı baz içerisinde sergilerdikleri yığılmadan kaynaklı olabilir. Transformator çekirdeğinin belli bir bölgesine toplanan taneler, diğer bölgelerde oluşan manyetik akıyı zayıflatarak çıkış karakteristikleri etkilemekteler. Ancak, benzetim programında manyetik tanelerin dağılma yöntemi homojen olduğu için, bu sorun görülmemektedir ve manyetik akı tüm oranlar için daha düzgün bir şekilde artmıştır.

Bu tez çalışmasında ANT çekirdeğinin katı fazı manyetik taneler (demir tozu) olarak seçilmiştir. İlerleyen zamanlarda konuyla ilgili çalışmaları daha kapsamlı hale getirebilmek adına, farklı özelliklere sahip manyetik tanelerin kullanımı üzerinde incelemeler yapılması planlanmaktadır. Bu özellikler kimyasal yapının değişimi, tane çapının değişimi, yığılmayı önleyici faktörlerin eklenmesi, nüve geometrisinde değişim, sargı tellerinin çapında yapılan değişim ve benzer özellikler olabilir.

Yapılan çalışmaların sonunda en verimli ve en etkin çıkış karakteristiklerinin elde edilmesini sağlayan yapı prototip örnekler üzerinden uygulama alanlarına aktararak endüstriyel sahalara arz edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Ilbedev, V. (2007). *Transformer basics*, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Nashville, TN, 356-359.
2. Erickson, R.W. (2001). *Fundamentals of power electronics*. (2. Baskı). Norwell, Massachusetts USA: Kluwer Academic Yayınevi, 431.
3. Odenbach, S. (Editor). (2009). *Basics, development and application of ferrofluids*. Heidelberg: Springer Berlin Yayınevi, 359-420.
4. Blums, E., Maiorov, M. M., and Cebers, A. (1997). *Magnetic fluids*. (1. Baskı). Berlin: Walter de Gruyter Co Yayınevi, 129-141.
5. González-Martín R, Gutiérrez-Serpa, A., and Pino, V. (2021). The use of ferrofluids in analytical sample preparation. *Separations*, 8(4), 47.
6. Berkovskii, M., Vitalii, F. M., and Krakov, M. S. (1993). (1. Baskı). *Magnetic fluids engineering applications*. New York: Oxford University Press. 124.
7. Ivanov, A. O., Zubarev, A. (2020). Chain formation and phase separation in ferrofluids influence on viscous properties. *Materials*, 13(18), 3956.
8. Berkovskii, B. M., Bashtovoi, V. G. (1996). *Magnetic fluids and applications handbook*. New York Wallingford: Begell House, 88.
9. Pislariu Danescu, L., Morega, A. M., Telipan, G., Morega, M., Dumitru, J. B., and Marinescu, V. (2013). Magnetic nanofluid applications in electrical engineering. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(11), 5489-5497.
10. Colonel, W., and McLyman, T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. (4. Baskı). New York U.S.A: Marcel Dekker, Inc, 245-280.
11. Balci, S. (2016). *Nanokristal nüve malzemesi ile orta frekans güç transformatörünün analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6.
12. Kul, S., Iskender, I. ve Balci, S. (2018). *FEA simulation of the electromagnetic effects on the flux distribution of the joints in the transformer core structure*. 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, 1-5.
13. Isa, M. Z., Kadir, A., Gomes, C., Azis, N., Izadi, M. and Alyozbak, O. S. H. (2016). *Analysis on magnetic flux density and core loss for hexagonal and butt-lap core joint transformers*. IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), Auckland, 1-4.
14. Cockrell, W. (1958). *Industrial electronics handbook*. (2. Baskı). New York: McGraw-Hill Book Co, 285.

15. Hasegawa, R., and Azuma, D. (2008). Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(20), 2451-2456.
16. Tomczuk, B., and Koteras, D. (2011). Magnetic flux distribution in the amorphous modular transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(12), 1611-1615.
17. Hasegawa, H. W. Ng., Lee, R. A. C., and Lowdermilk, L. A. (1991). Amorphous alloy core distribution transformers. *Proceedings of the IEEE*, 79(11), 1608-1623.
18. Aina, H., Anding, W., and Shiqiang, Y. (2016). Dynamic magnetic characteristics of Fe78Si13B9 amorphous alloy subjected to operating temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 408(1), 159-163.
19. Ahmad, M. K., Ali, M. S., Majid, A., Saleem, J., and Kazmi, S. M. R. (2018). *Comparison and analysis of core materials for high frequency (1MHz) planar transformers*. International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, 1-5.
20. Goo, J., Kim, Y., Lee, S., Kim, W., Lee, J., and Choi, K. (2020). Magnetization loss estimation of hts solenoid coils wound with corc. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-7.
21. Mogorovic, M., and Dujic, D. (2019). *Modeling and experimental verification of geometry effects on core losses*. 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan Korea (South), 3040-3046.
22. Wojtkun, J., Bródka, B., and Stachowiak, D. (2018). *The influence of core geometry on no-load losses of medium power transformers*. International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW), Poznań, 123-127.
23. Kahveci, A., Szary, P., Herget, F., Putri, A. K., and Hameyer, K. (2016). *Methods for hysteresis losses determinations at non-standard ring core geometries equivalent to Epstein measurements*. 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, 135-142.
24. Wang, L., Huang, I., and Prokhorov, A. V. (2017). Different shapes and dimensions of laminated core on characteristics of a practical single-phase distribution transformer using finite-element analysis. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, 1-9.
25. Puskarczyk, M., Jamieson, B., and Jurczak, W. (2013). *The influence of core shape and material nonlinearities to corner losses of inductive element*. Excerpt from the Proceedings of the 2013 COMSOL Conference, Rotherdam, 1-5.
26. Luo, M., and Dujić, D. (2015). *Permeance based modelling of the core corners considering magnetic material nonlinearity*. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, 950-955.

27. Islam, M. R., Guo, Y. G., and Zhu, J. G. (2014). An amorphous alloy core medium frequency magnetic-link for medium voltage photovoltaic inverters. *Journal of Applied Physics*, 115(17), 17E710-1-17E710-4.
28. Islam, M. R., Guo, Y. G., and Zhu, J. G. (2013). A medium-frequency transformer with multiple secondary windings for medium-voltage converter based wind turbine generating systems. *Journal of Applied Physics*, 113(17), 17A324.
29. Wei, S., Fei, W., Boroyevich, D., and Tipton, C. W. (2008). High-density nanocrystalline core transformer for high power high-frequency resonant converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(1), 213-222.
30. Alyozbaky, O. (2018). The losses and temperature comparison in three-phase distribution transformer with various assembly core designs. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 15(1), 1-10.
31. Yehui, H., and Grace, Ch. (2012). Evaluation of magnetic materials for very high frequency power applications. *IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993)*, 27(1), 425-435.
32. Salvador, K., Harmel, D., Oliveira, L., Cabral, S., and Almaguer, H. (2020). Study of the effectiveness of magnetic shielding for compact power transformers used on mobile applications. *IEEE Latin America Transactions*, 18(6), 1034-1040.
33. Filchev, T. (2010). *High voltage high frequency power transformer for pulsed power application*. The 14th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE/PEMC), Ohrid, USA, 165-170.
34. Heinemann, L. (2002). *An actively cooled high power, high frequency transformer with high in solution capability*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (ECCE), Atlanta, USA, 352-357.
35. Chen, J., Ma, J., and Fang, Y. (2019). *An improved steinmetz premagnetization graph (spg) applied in high magnetic field*. 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 1-5.
36. Ionita, V., Petrescu, L., and Cazacu, E. (2018). *Impact of steinmetz coefficients variance for fesi laminate magnetic cores*. International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, Romania, 1-4.
37. Du, Y., Cheng, Zh., Xie, D., and Yan, W. (2009). Multi-directional magnetic performance simulation of anisotropically oriented silicon steel sheets. *High Voltage Engineering*, 35(12), 3022-3026.
38. He, R., Zhang, Y., Zhang, D., and Xie, D. (2018). *An improvement of core losses estimation model in power electronic transformer*. IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, HuZhou, China, 1-5.
39. Cao, L., He, J., and Zhang, B. (2008). Model and verification of dynamic hysteresis loss of power transformer core under DC bias magnetic state. *Journal of Power & Energy Systems*, 28(24), 141-146.

40. Li, Y., Zhu, L., and Zhu, J. (2018). Core loss calculation based on finite-element method with jiles–atherton dynamic hysteresis model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1-5.
41. Zhang, C., Gao, S., Zhou, L., Jiang, J., and Cai, J. (2019). Novel analytical formulas for eddy-current losses in semicircle-section wound core of transformer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(11), 1-12.
42. Guihua, M., Yancun, L., and Mansheng, G. (2008). *Study of transformer's harmonic characteristic in DC magnetic bias*. China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, 1-4.
43. Ouyang, Z., Thomsen, O. C., and Andersen, M. A. E. (2012.) Optimal design and tradeoff analysis of planar transformer in high-power dc–dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), 2800-2810.
44. Wei, Ch., Yipen, Y., and Yuequn, H. (2003). Model and design of PCB parallel winding for planar transformer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(5), 3202-3204.
45. Quinn, C., Rinne, K., O'Donnell, T., Duffy, M., and Mathuna, C.O. (2001). *A review of planar magnetic techniques and technologies*. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, USA, 1175-1183.
46. Tsung-Han, T., Long-Sheng, K., Ping-Hei, Ch., Da-Sheng, L., and Chin-Ting, Y. (2010). Applications of ferro-nanofluid on a micro-transformer. *Sensors*, 10(9), 8161-8172.
47. Yoon, J. B., Kim, B. I., Choi, Y. S., and Yoon, E. (2003). 3-D construction of monolithic passive components for RF and microwave ICs using thick-metal surface micromachining technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 51(1), 279-288.
48. Choi, Y. S., Yoon, J. B., Kim, B. I., and Yoon, E. (2002). *A high-performance MEMS transformer for silicon RF ICS*. 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS, Las Vegas, NV, United States, 653-656.
49. Park, E. C., Choi, Y. S., Yoon, J. B., and Yoon, E. (2002). Monolithically integrable RF MEMS passives. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 2(1), 49-55.
50. Yoon, J. B., Kim, B. I., Choi, Y. S., and Yoon, E. (2002). *3-D lithography and metal surface micromachining for RF and microwave MEMS*. Proceedings of IEEE International MEMS Conference, Las Vegas, NV, USA, 673-676.
51. Chong, K., and Xie, Y. H. (2005). High-performance on-chip transformers. *IEEE Electron Device Letters*, 26(1), 557-559.
52. Yunas, J., Hamzah, A. A., and Majlis, B. Y. (2009). Fabrication and characterization of surface micromachined stacked transformer on glass substrate. *Microelectronic Engineering*, 86(10), 2020-2025.

53. Mannam, R., Gorantla, S. R., and Vangala, N. A. (2019). Practical technique to measure transformer losses in high frequency SMPS. *Springer Nature Applied Sciences*, 1(3), 227-235.
54. Yunas, J., Hamzah, A., and Majlis, B. (2009). Surface micromachined on-chip transformer fabricated on glass substrate. *Microsystem Technologies*, 15(4), 547-552.
55. Park, J. W., and Allen, M. G. (2003). Ultralow-profile micro machined power inductors with highly laminated Ni/Fe cores: Application to low-megahertz DC-DC converters. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(5), 3184-3186.
56. Zhao, J. H., Zhu, J., Chen, Z. M., and Liu, Z. W. (2005). Radio-frequency planar integrated inductor with permalloy-SiO₂ granular films. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(8), 2334-2338.
57. Tsai, T. H., Chen, P. H., Lee, D. S., and Yang, C. T. (2011). Investigation of electrical and magnetic properties of ferro-nanofluid on transformers. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 264-269.
58. Tsai, T. H. (2010). Applications of ferro-nanofluid on a micro-transformer. *Sensors*, 10(9), 8161-8172.
59. Pislariu Danescu, L., Morega, A.M., Morega, M., Stoica, V., and Marinica, O. M. (2013). Prototyping a ferrofluid-cooled transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1289-1298.
60. Kartaca, K., Abbasov, T., Karadag, T., Ekici, Y., and Dikmen, I. (2018). *Manyetik sıvı nüveli transformatörün tasarımı ve incelenmesi*. International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), Malatya, 8620721.
61. Kazimierczuk, M. (2013). *High-frequency magnetic components*. (2. Baskı). New Jersey: Wiley & Sons, Limited, John Yayınevi, 96.
62. Bartoli, M., Reatti, A., and Kazimierczuk, M. K. (1994, 5-9 September). *High-frequency models of ferrite inductors*. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics, Controls, Instrumentation, and Automation (IECON'94), Bologna, Italy, 1670-1675.
63. Bartoli, M., Reatti, A., and Kazimierczuk, M. K. (1994, 27-29 September). *Predicting the high-frequency ferrite-core inductor performance*. Proceedings of the Conference of Electrical Manufacturing and Coil Winding, Chicago, Rosemont, 409-413.
64. Bartoli, M., Reatti, A., and Kazimierczuk, M. K. (1994, 2-7 October). *Modeling iron-powder inductors at high-frequencies*. Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, CO, 1125-1232.
65. Ferreira, J. A. (1994). Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 9(1), 127-131.
66. Kurt, E., Busse, F. H., Pesch, W. (2004). Hydromagnetic convection in a rotating annulus with an azimuthal magnetic field. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 18(2), 251-263.

67. Kurt, E., Busse, F. H., and Pesch, W. (2007). Pattern formation in the rotating cylindrical annulus with an azimuthal magnetic field at low prandtl numbers. *Journal of Vibration and Control*, 13(9), 1321-1330.
68. Oehlsen, O., Cervantes-Ramírez, S., Cervantes-Avilés, P., and Medina Velo, I. (2022). Approaches on ferrofluid synthesis and applications: current status and future perspectives. *ACS Omega*, 7(4), 3134–3150.
69. İnternet: Altmeyer, S. A. (September, 2020). Ferrofluids. Scholarpedia, Web: <http://scholarpedia.org/article/Ferrofluids>, 15(11), Erişim tarihi: 26.09.2020.
70. Sakallıoğlu, H. (2013). *Manyetik nanotaneler üzerine desteklenmiş Schiff bazı türevi metal komplekslerinin sentezleri ve katalitik etkinliklerinin incelenmesi*. Yüksek lisans tezi. Çukurova üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 16.
71. Indrayana, I. P., and Suharyadi, E. (2018). Synthesis and characterization of the microstructure and functional group bond of Fe_3O_4 nanoparticles from natural iron sand in Tobelo North Halmahera. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 7(9), 13-22.
72. Chen, J., Hu, H., Jiang, S., Deng, L., and Peng, T. (2021). *Calculation of the core loss of high-frequency high-voltage transformer considering the influence of temperature*. IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS), Huzhou, China, 1-5.
73. İnternet: COMSOL Multiphysics (March, 2016). The finite element method (FEM), Web: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>, Erişim tarihi: 21.02.2017.



GAZİ GELECEKTİR..