

**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEKLERİNDE KULLANILAN
ELEKTRİK ÇELİKLERİ VE AMORF ŞERİTLERİN UÇ UCA GELEN
BİRLEŞİM YERLERİNDEKİ MANYETİK AKI DAĞILIMININ
DENEYSEL VE KURAMSAL İNCELENMESİ**

SEZER ERDEM

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

BURSA 2006

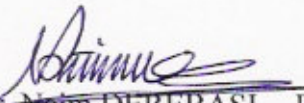
T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

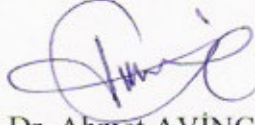
TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEKLERİNDE KULLANILAN
ELEKTRİK ÇELİKLERİ VE AMORF ŞERİTLERİN UÇ UCA GELEN
BİRLEŞİM YERLERİNDEKİ MANYETİK AKI DAĞILIMININ
DENEYSEL VE KURAMSAL İNCELENMESİ

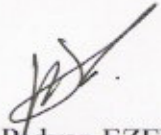
SEZER ERDEM

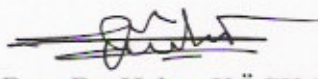
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

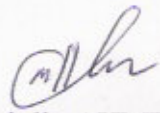
Bu Tez 30/06/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Naim DEREBAŞI (Danışman)


Prof. Dr. Ahmet AVINÇ


Prof. Dr. Ridvan EZENTAŞ


Doç. Dr. Hakan KÖÇKAR


Yrd. Doç. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

ÖZET

Transformatör çekirdekleri oluşturulurken kullanılan manyetik maddeler (elektrik çelikleri, amorf şeritler vb.) dışında çekirdeklerin geometrisi de çok önemlidir. Bir transformatör çekirdeği yapılırken geometriye bağlı olarak levhaların köşe ve orta yerlerinde hava aralıkları oluşmaktadır. Bu hava aralıkları akı dağılımında değişmelere yol açmaktadır.

Bu çalışmada, hava aralıklarının manyetik akı yoğunluğu dağılımları üzerindeki etkisi üç katlı elektrik çeliklerinden (M4) ve amorf şeritlerden (Metglas-2605SC) yapılmış örneklerde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Levhalar arasındaki akı geçişleri aynı örnekte (M4) farklı yerlere yerleştirilen algılama bobinlerinin yardımıyla ayrıntılı olarak incelenmiş ve manyetik akı yoğunluğu değişimi yüzde olarak hesaplanmıştır. z- tipi (Unicore) transformatör çekirdeğinde oluşan hava aralıklarının da akı dağılımına etkisi incelenmiştir. Akının, Unicore' daki hava aralıklarının oluşumu nedeniyle levhalar arasından kolayca geçtiği teorik ve deneysel olarak saptanmıştır.

Bazı örneklerdeki manyetik akı yoğunluğu değişimlerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak benzeşimleri yapılmıştır. Ayrıca, deneysel sonuçlar 2-boyutlu statik manyetik analiz (manyetik vektör potansiyel formülasyonu) kullanılarak da teyid edilmiştir.

ABSTRACT

The geometry of transformer cores is very important apart from the magnetic materials (electrical steels, amorphous ribbons etc.) used when they are formed. Some air gaps exist at the corners and in the yoke of the transformer laminations depending on the geometry while a transformer core is made. These air gaps cause some variations on the flux distribution.

In this research, the effect of air gaps on magnetic flux density distributions has been investigated in the samples which are made of three stacked laminations of electrical steels (M4) and amorphous ribbons (Metglas-2605SC) and then, they have compared. The flux transitions between the laminations have been investigated in detail with the aim of search coils located in different areas on the same sample (M4) and the percent of magnetic flux density variation has been calculated. The effect of air gaps formed in the z-type (Unicore) transformer core for the flux distribution has been also investigated. It is theoretically and experimentally determined that the flux is easily transferred between the laminations due to the formations of air gaps in the Unicore.

The variations of magnetic flux density in some samples have been simulated using the finite element method. The experimental results have also confirmed by using 2D static magnetic analysis (magnetic vector potential formulation).

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	3
2. 1. MANYETİZMA	3
2. 1. 1. Manyetik Atomların Vektör Modeli	3
2. 1. 1. 1. Temel Kuantum Sayısı (n)	3
2. 1. 1. 2. Yörüngesel Açısız Momentum Kuantum Sayısı (ℓ)	4
2. 1. 1. 3. Yörüngesel Manyetik Kuantum Sayısı (m_ℓ)	4
2. 1. 1. 4. Spin Manyetik Kuantum Sayısı (m_s)	5
2. 1. 2. Elektronların Manyetik Momentleri	8
2. 1. 3. Manyetik Alan.....	10
2. 1. 4. Manyetik Alan Şiddeti	10
2. 1. 5. Manyetik Akı Yoğunluğu	10
2. 1. 6. Manyetik Akı	11
2. 1. 7. Faraday ve Lenz Yasaları.....	11
2. 1. 8. Mıknatıslanma.....	12
2. 1. 9. Geçirgenlik ve Alınganlık	13
2. 1. 10. Ferromanyetizma	14
2. 2. ELEKTRİK ÇELİKLERİ	15
2. 2. 1. Yönlendirilmiş ve Yönlendirilmemiş Elektrik Çelikleri.....	15
2. 2. 2. Yönlendirilmiş Elektrik Çeliklerinin Gelişimi.....	16
2. 3. AMORF FERROMANYETİK MADDELER	19
2. 3. 1. Amorf Şeritlerin Bazı Manyetik Özellikleri	19
2. 3. 1. 1. Manyetik Moment ve Doyum Mıknatıslanması	22

2. 3. 1. 2. Geçirgenlik.....	23
2. 3. 2. Amorf Maddenin Üretim Yöntemleri	23
2. 4. ÇEKİRDEK MADDELERİNDE GÜÇ KAYIPLARI.....	26
2. 4. 1. Histeresis Kayıpları.....	26
2. 4. 2. Klasik Girdap Akımları Kayıpları.....	26
2. 4. 3. Anormal Kayıplar	27
2. 5. ELEKTRİK ÇELİKLERİ VE AMORF MADDELERDE AKI DAĞILIMI.....	30
2. 5. 1. Farklı Geometriye Sahip Transformatör Çekirdeklerinde Akı Dağılımı.....	30
2. 5. 2. Manyetik Devreler ve Zıt Miknatıslanma Alanı	34
2. 5. 3. Şekil Anizotropisi	37
2. 6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FİNİTE ELEMENT METHOD, FEM)	40
2. 6. 1. Maxwell Denklemleri	40
2. 6. 1. 1. Genel Diferansiyel Şekli	40
2. 6. 1. 2. Elektro ve Manyetostatik Alanlar	41
2. 6. 1. 3. Yapısal Bağlıntılar.....	41
2. 6. 2. Vektör Potansiyel	42
2. 6. 2. 1. Manyetostatik Alan için Vektör Potansiyel	42
2. 6. 3. Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş	43
2. 6. 4. İki-Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi	44
2. 6. 4. 1. Sınır-Değer Problemi	44
2. 6. 4. 2. Sonlu Eleman Analizi	46
2. 6. 4. 2. 1. Bölge Ayrımı.....	46
2. 6. 4. 2. 2. Temel Interpolasyon.....	48
2. 6. 5. İki-Boyutlu Statik Manyetik Analiz.....	50
2. 6. 5. 1. İki-Boyutlu Statik Manyetik Analizde Kullanılan Elemanlar	51
2. 6. 5. 2. Statik Manyetik Analizin Adımları	51
2. 6. 5. 2. 1. Fiziksel Çevreyi Oluşturmak	51

2. 6. 5. 2. 2. Modeli Yapmak, Ağ Oluşturmak ve Modeldeki Her Bir Bölgenin Fiziksel Niteliklerini Atamak	51
2. 6. 5. 2. 3. Sınır Şartlarını ve Yüklemeleri Uygulamak	52
2. 6. 5. 2. 4. Çözümleri Oluşturmak	52
2. 6. 5. 2. 5. Sonuçların Yeniden İncelenmesi.....	52
3. MATERYAL VE YÖNTEM	53
3. 1. ÇEKİRDEKTE MANYETİK BÜYÜKLÜKLERİN HESAPLANMASI ..	53
3. 2. ÖLÇME DEVRESİ.....	56
3. 2. 1. Ölçme Devresinin Çalışma Özellikleri	58
3. 2. 2. Ölçme Devre Şemasında Çekirdek Üzerinde Kullanılan Örnekler.....	58
3. 2. 2. 1. Örnek-1'in Özellikleri	58
3. 2. 2. 2. Örnek-2'nin Özellikleri	59
3. 2. 2. 3. Örnek-3'ün Özellikleri	60
3. 2. 2. 4. Örnek-4'ün Özellikleri	61
3. 2. 3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Deneysel Sistemin Modellenmesi ...	62
3. 2. 3. 1. Örnek-1'in Modellenmesi	62
3. 2. 3. 2. Örnek-2'nin Modellenmesi	65
3. 2. 3. 3. Örnek-4'ün Modellenmesi	66
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	68
4. 1. ÖRNEK-1'İN ÖLÇME SONUÇLARI	68
4. 1. 1. Örnek-1'in Ölçme Sonuçlarının Tartışılması.....	73
4. 2. ÖRNEK-2'NİN ÖLÇME SONUÇLARI	79
4. 2. 1. Örnek-2'nin Ölçme Sonuçlarının Tartışılması.....	84
4. 3. ÖRNEK-3'ÜN ÖLÇME SONUÇLARI.....	89
4. 3. 1. Örnek-3'ün Ölçme Sonuçlarının Tartışılması.....	102
4. 4. ÖRNEK-4'ÜN ÖLÇME SONUÇLARI.....	105
4. 4. 1. Örnek-4'ün Ölçme Sonuçlarının Tartışılması.....	112
4. 5. ELDE EDİLEN TÜM SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	117
KAYNAKLAR	124

EKLER.....	128
EK-1 BİR KÜRENİN ZİT MIKNATISLANMA ALANININ VE ZİT MIKNATISLANMA SABİTİNİN BULUNMASI	128
EK-2 ANSYS ÇÖZÜMLEMESİ İÇİN KULLANILAN TEORİ.....	131
E2. 1. ELEKTROMANYETİK ALAN TEMELLERİ	131
E2. 2. MANYETİK VEKTÖR POTANSİYEL.....	134
EK-3 ANSYS BENZEŞİM PROGRAMININ KULLANIMI.....	136
EK-4 MANYETİK AKI YOĞUNLUĞU VE MANYETİK ALAN ŞİDDETİ İÇİN HATA HESABI.....	145
TEŞEKKÜR.....	148
ÖZGEÇMİŞ	149

SİMGELER DİZİNİ

n	: Temel kuantum sayısı
E	: Elektronun enerjisi
Z	: Atom numarası
m	: Elektronun kütlesi
e	: Elektronun yükü
ϵ_0	: Boşluktaki elektriksel geçirgenlik
h	: Planck sabiti
ℓ	: Yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı
P_ℓ	: Yörüngesel açısal momentum
m_ℓ	: Yörüngesel manyetik kuantum sayısı
m_s	: Spin manyetik kuantum sayısı
P_s	: Spin açısal momentum
s	: Elektron spini
\vec{S}	: Toplam spin vektörü
\vec{L}	: Toplam yörüngesel vektörü
\vec{J}	: Toplam açısal momentum vektörü
P_j	: Toplam açısal momentum
v	: Elektronun hızı
μ'_ℓ	: Yörüngesel manyetik moment
μ'_s	: Spin manyetik moment
μ'_B	: Bohr magnetonu
μ'_j	: Toplam manyetik moment
g	: Lande veya spektroskopik yarıma faktörü
H	: Manyetik alan şiddeti
B	: Manyetik akı yoğunluğu (manyetik indüksiyon)
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
N	: Sarım sayısı

Φ	: Manyetik akı
V	: İndüklenen gerilim
t	: Zaman
Y_A	: Yüzey alanı
μ'	: Manyetik moment
M	: Mıknatıslanma
ℓ_d	: Dipol uzunluğu
M_s	: Doyum mıknatıslanması
χ	: Manyetik alınganlık
μ_r	: Bağlı manyetik geçirgenlik
T_c	: Curie sıcaklığı
H_c	: Sıfırlayıcı alan
T_g	: Camsı-erime sıcaklığı
P_h	: Histeresis kayıpları
f	: Frekans
P_g	: Klasik girdap akımı kayıpları
ρ_d	: Elektriksel direnç
d	: Yoğunluk
t_ℓ	: Levhanın kalınlığı
g	: Hava aralığı uzunluğu
w	: Levha genişliği
a	: Üst üste binme uzunluğu
H_z	: Zıt mıknatıslanma alanı
N_z	: Zıt mıknatıslanma sabiti
ℓ_{Fe}	: Akının demir üzerinde aldığı yol
ℓ_h	: Akının hava üzerinde aldığı yol
$Y_{A_{Fe}}$: Demirin yüzey alanı
Y_{A_h}	: Havanın yüzey alanı
μ_{Fe}	: Demirin manyetik geçirgenliği
μ_h	: Havanın manyetik geçirgenliği

E_{md}	: Manyetik durgun enerji
K_s	: Şekil-anizotropi sabiti
E_p	: Potansiyel enerji
\vec{E}	: Elektrik alan şiddeti
\vec{D}	: Elektrik akı yoğunluğu
\vec{J}_a	: Elektrik akım yoğunluğu
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu
ϵ	: Ortamın dielektrik geçirgenliği
σ	: Ortamın İletkenliği
\vec{A}	: Vektör potansiyel
ϕ	: Bilinmeyen fonksiyon
f	: Kaynak veya uyarma fonksiyonu
ω	: Açısal frekans
V_{ort}	: İndüklenen gerilimin ortalama değeri
V_p	: İndüklenen gerilimin tepe değeri
V_{rms}	: İndüklenen gerilimin rms değeri
N_2	: Algılayıcı bobinin sarım sayısı
ℓ_{ort}	: Çekirdek üzerinde akımın aldığı ortalama yol
N_1	: Mıknatıslanma bobininin sarım sayısı
i_m	: Akımın en büyük değeri
B_m	: Manyetik akı yoğunluğunun en büyük değeri
H_m	: Manyetik alan şiddetinin en büyük değeri
ρ_k	: Yüzey kutup yoğunluğu
\vec{J}_s	: Uygulanan kaynak akım yoğunluğu vektörü
\vec{J}_e	: İndüklenen girdap akım yoğunluğu vektörü
\vec{J}_v	: Hız akım yoğunluğu vektörü
M_0	: Kalıcı mıknatıslanma
v	: Manyetik direnç
V	: Elektrik skaler potansiyel

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. 3d elektronunun yörüngesel ve spin açısai momentumlarının alabileceği değerler	5
Şekil 2. 2. Bir demir atomundaki elektron kabukları	6
Şekil 2. 3. Russell-Saunders çiftlenimi	7
Şekil 2. 4. Ferromanyetizma	14
Şekil 2. 5. (a) Yönlendirilmemiş ve (b) yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin iç yapısı	15
Şekil 2. 6. Demirin yönlere bağlı mıknatıslanma eğrileri	16
Şekil 2. 7. Fiziksel yöntemlerle elektrik çeliklerinin yüzeyinin çizilmesinin etkisi.....	18
Şekil 2. 8. Dönen kasnağın dış yüzeyi üzerine döküm yaparak hızlı soğutma tekniği	24
Şekil 2. 9. Kristal ve amorf yapıda atomların düzeni.....	25
Şekil 2. 10. Transformator çekirdeklerinde kayıpların klasik ayrılması.....	29
Şekil 2. 11. Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Çok-katlı model (N = 4).....	30
Şekil 2. 12. Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Tek-katlı model (N = 1)	31
Şekil 2. 13. (a) Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerleri (b) kısmen üst üste binen dizilimin şematik gösterimi.....	33
Şekil 2. 14. (a) Kapalı bir yol içeren Demir toroiddeki manyetik akı yolu, (b) hava boşluğu olan Demir toroid	36
Şekil 2. 15. Manyetik alan olmadığında mıknatıslandırılmış bir cismin Manyetik durgun enerjisi	37
Şekil 2. 16. Uzun ekseni c, kısa ekseni a olan elipsoid.....	39
Şekil 2. 17. Temel sonlu elemanlar. (a) Bir-boyutlu. (b) İki-boyutlu. (c) Üç-boyutlu	44
Şekil 2. 18. Süreksiz bir ara yüzeye sahip bölge Γ_d kullanılarak gösterilir.....	46
Şekil 2. 19. İki-boyutlu bir bölgenin alt bölmesi	47

Şekil 2. 20. Doğrusal üçgen (üç açılı) eleman	48
Şekil 2. 21. Bir üçgenin doğrusal interpolasyon fonksiyonları (a) N_1^e (b) N_2^e (c) N_3^e . Fonksiyonların düzlemsel yüzeyleri karartılıdır	50
Şekil 3. 1. Ölçme devre şeması	56
Şekil 3. 2. Geri besleme devre şeması.....	57
Şekil 3. 3. Çekirdeğin şekli ve boyutları	57
Şekil 3. 4. Hazırlanan deneysel örnek-1	59
Şekil 3. 5. Hazırlanan deneysel örnek-2	60
Şekil 3. 6. Hazırlanan deneysel örnek-3	61
Şekil 3. 7. Hazırlanan deneysel örnek-4	61
Şekil 3. 8. Örnek-1'in sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi ve sınır koşulları.....	62
Şekil 3. 9. Örnek-1 için ANSYS benzeşim programında oluşturulan model (a) ve Şekil 3. 8.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ (b)	64
Şekil 3. 10. Örnek-2'nin sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi ve sınır koşulları	65
Şekil 3. 11. Örnek-4'ün sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi ve sınır koşulları	66
Şekil 3. 12. Örnek-4 için ANSYS benzeşim programında oluşturulan model (a) ve Şekil 3. 11.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ (b)	67
Şekil 4. 1. 50 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).....	71
Şekil 4. 2. 100 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).....	71
Şekil 4. 3. 200 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).....	72
Şekil 4. 4. 400 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).....	72
Şekil 4. 5. Örnek-1 için manyetik alan şiddetinin frekansla değişimi	74
Şekil 4. 6. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (50 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	76
Şekil 4. 7. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (100 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	76
Şekil 4. 8. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (200 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	77

Şekil 4. 9. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (400 Hz) akı yoğunluğu dağılımı ...	77
Şekil 4. 10. 50 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2)	82
Şekil 4. 11. 100 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2)	82
Şekil 4. 12. 200 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2)	83
Şekil 4. 13. 400 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2)	83
Şekil 4. 14. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (50 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı	86
Şekil 4. 15. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (100 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı	86
Şekil 4. 16. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (200 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı	87
Şekil 4. 17. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (400 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı	87
Şekil 4. 18. 50 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	96
Şekil 4. 19. 100 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	96
Şekil 4. 20. 200 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	97
Şekil 4. 21. 400 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	97
Şekil 4. 22. 50 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	98
Şekil 4. 23. 100 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	98
Şekil 4. 24. 200 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	99

Şekil 4. 25. 400 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	99
Şekil 4. 26. 50 Hz için $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	100
Şekil 4. 27. 100 Hz için $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	100
Şekil 4. 28. 200 Hz için $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	101
Şekil 4. 29. 400 Hz için $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3)	101
Şekil 4. 30. Örnek-3 için $N_{O(2-1)}$ 'deki akı yoğunluğundaki azalma ile $N_{A(2-1)}$ ve $N_{Ü(2-1)}$ 'deki akı yoğunluğundaki artmanın toplamının, manyetik alan şiddetiyle değişimi	104
Şekil 4. 31. 50 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).....	110
Şekil 4. 32. 100 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).....	110
Şekil 4. 33. 200 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).....	111
Şekil 4. 34. 400 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).....	111
Şekil 4. 35. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (50 Hz) akı yoğunluğu dağılımı ..	114
Şekil 4. 36. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (100 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	114
Şekil 4. 37. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (200 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	115
Şekil 4. 38. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (400 Hz) akı yoğunluğu dağılımı	115
Şekil 4. 39. 1 cm'lik üst üste binme için (a) 1.8, (b) 1.5 (c) 1.1 T'lık çekirdek akı yoğunluklarında ölçülen 45° açılı kısmen üst üste binen köşelerde komşu iki levhadaki birbirine geçen akı yoğunluğu dağılımı.....	117
Şekil 4. 40a. C ve E-tipi transformatör çekirdeği b. z-tipi (Unicore) çekirdek	120
Şekil 4. 41. Örnek-4'ün (200Hz, $B_{2C} = 1.0$ T) ANSYS benzeşim programıyla elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı	122

Şekil 4. 42. Şekil 4. 41.'de örnek-4'ün daire içinde kalan kısmında akı çizgilerinin tipik değişimi	123
Şekil E1. 1. Mıknatıslandırılmış küre yüzeyinde oluşan kutuplar. Kuzey ve güney kutupları sırasıyla artı ve eksi işaretleri ile gösterilmiştir	129
Şekil E1. 2. Kürenin merkezindeki zıt mıknatıslanma alanı	129
Şekil E2. 1. Elektromanyetik alan bölgeleri.....	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2. 1. Bazı amorf manyetik alaşımların ticari adları ve kimyasal bileşimleri	20
Çizelge 2. 2. Elektrik çeliklerinde çekirdek kayıplarını azaltma yöntemleri	28
Çizelge 2. 3. Değişik basit geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri.....	35
Çizelge 4. 1. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-1)	69
Çizelge 4. 2. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-1) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 4 - \% 5$ olarak hesaplanmıştır)	70
Çizelge 4. 3. Örnek-1 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması	78
Çizelge 4. 4. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-2)	80
Çizelge 4. 5. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-2) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 3 - \% 4$ olarak hesaplanmıştır)	81
Çizelge 4. 6. Örnek-2 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması	88
Çizelge 4. 7. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 3 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3) ...	90
Çizelge 4. 8. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 4 - \% 5$ olarak hesaplanmıştır)	91
Çizelge 4. 9. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 1 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3) ...	92

- Çizelge 4. 10. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 4 - \% 5$ olarak hesaplanmıştır)93
- Çizelge 4. 11. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 4 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3)..94
- Çizelge 4. 12. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 4 - \% 5$ olarak hesaplanmıştır)95
- Çizelge 4. 13. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-4) 106-107
- Çizelge 4. 14. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-4) (H'nin hatası $\pm \% 2$, B'nin hatası da $\pm \% 4 - \% 5$ olarak hesaplanmıştır) 108-109
- Çizelge 4. 15. Örnek-4 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması116

1. GİRİŞ

Transformatör çekirdeklerinde ve dönen elektrik makinelerinde ucuz ve az kayıplı elektrik çeliklerinin kullanımına dünya genelinde talep artmaktadır. Geleneksel Si-Fe alaşımları çekirdek maddesi olarak kullanılmaktadır, fakat son yıllarda bazı alternatif maddelerin gelişmesi söz konusu olmuştur. Bölgesel kristalleri (Grain) yönlendirilmiş % 3 Si-Fe transformatör çekirdeklerinde kullanılmaktadır ve yönlendirilmemiş Si-Fe ya da demir, motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılır. Amorf maddeler ticari olarak mevcuttur fakat oldukça iyi manyetik özelliklerine rağmen kullanımı sınırlıdır. (Moses 1992).

Bir transformatör çekirdeğinin verimliliği, birleşme yerlerindeki eklemlerin şekline oldukça bağlıdır. Bu bölgelerde akı, çeliğin dönme yönünden sapabilir. Böylece yüksek kayıplı bölgeler meydana gelir (Jones ve Moses 1974). Akının dönme yönünden saptığı temel bölgeler akının eklemler arasından geçtiği köşelerdir. Burada dönme yönünden sapan akı nedeniyle çok sayıda zararlı etki meydana gelebilir. Geçirgenlikteki azalma, aynı çekirdekte akı yoğunluğunu oluşturmak için mıknatıslanma akımının artması anlamına gelmektedir (Jones ve ark. 1973). İdeal koşullar altında bir transformatör çekirdeğinin eklemlerindeki toplam akının dalga şekli sinüs eğrisine sahiptir. Fakat çekirdeğin köşelerindeki akının dalga şekli sinüs eğrisinden oldukça uzaktır. Akı değişiminin neden olduğu ilave bir kayıp eklemler çevresinde bölgesel bir ısınmaya yol açabilir (Moses ve ark. 1972). Eklem bölgelerinde hava boşluklarını birbirine bağlamak için üst üste binme düzenlemelerine ihtiyaç duyulur. Buna aynı zamanda çekirdeğin mekanik kararlılığı açısından da ihtiyaç duyulur. Levhaların en iyi düzenlemesinde bile boşluk etkilerinden kaçınılmaz. Çünkü kesme işlemi maddenin bölgesel manyetik özelliklerini bozacaktır. Sonuç olarak akı hava boşluğu bölgesi etrafından geçecek ve böylece hava boşluğunu köprüleyen levha doyumuna daha çabuk ulaşacaktır. Kayıptaki artışlar; farklı bir ortam (hava) nedeniyle akının yön değiştirmesi ve harmonikler nedeniyle yüksek girdap akımı kayıplarına bağlıdır (Pfützner ve ark. 1994).

C-sarımlı şerit çekirdekler iyi bir manyetik başarımlı ve yüksek geçirgenlik özelliği vermesine rağmen, ham maddenin manyetik özelliklerini azaltan birçok üretim zorlukları gösterir. Unicore teknolojisi ham maddenin manyetik özelliğine yakın bir çekirdeğin üretimini gerçekleştirir. Unicore teknolojisi, bilinen C ve E çekirdeklerine seçenek olarak, transformatör çekirdeklerini üretmekte yenilik yaratan bir yöntemdir (Anonim 1999).

Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar diye adlandırılan küçük alanlar (üç-boyutlu durumlarda hacimler) olarak ilgilenilen bölgelerin alt bölümlerini içerir. Bölge boyunca manyetik potansiyelin uzaysal değişimi Maxwell denklemlerinden türetilen doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlanır. Bu denklemler genellikle akı yoğunluğu gibi alan büyüklüklerinin belirlenmesini kolaylaştıran A vektör potansiyeli cinsinden yazılırlar. Bundan dolayı denklemler A cinsinden elemanlara ayrıldıktan sonra çözülür ve son işlemde akı yoğunluğu gibi diğer büyüklükler A'nın düğüm noktası değerinden hesaplanır (Moses ve ark. 2003).

Bu çalışmada, hem elektrik çeliği hem de amorf şeritlerin birleşim yerlerinde oluşan hava aralığının manyetik akı dağılımına etkisi incelenmiştir. C ve E-tipi transformatör çekirdeklerine seçenek olan z-tipi çekirdeklerde (Unicore) manyetik akı dağılımı incelenmiştir. Deneysel verilere ek olarak ANSYS benzeşim programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle levhalar arasındaki akı dağılımı hesaplanmıştır ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2. 1. MANYETİZMA

Manyetizma, temel olarak elektrik yüklerinin hareketinden kaynaklanmaktadır. Maddenin atomunu oluşturan elektron ve çekirdek, hareketleri nedeniyle bir manyetik momente sahiptirler. Çekirdeğin manyetik momenti elektron kabuklarının manyetik momentinden daha zayıftır. Bundan dolayı bir maddenin manyetik özelliklerini elektronların oluşturduğu manyetik momentler belirler (Arabi 1987).

Atomik manyetik momentlerin oluşumu için iki temel hareket vardır. Bunlardan biri çekirdeğin etrafındaki elektronun yörüngesel hareketidir. Diğeri ise elektronun kendi eksenini etrafında dönmesinden oluşan spin hareketidir ve bu spin hareketi bir halkadan geçen elektrik akımının oluşturduğu dipol moment ile eşdeğerdir.

2. 1. 1. Manyetik Atomların Vektör Modeli

Ferromanyetizmada, atomlardaki elektronlar bölgesel olmadıklarından elektron spininin önemi çok büyüktür. Bir atomdaki elektronun durumu dört kuantum sayısı ile tanımlanır. Bunlar, temel kuantum sayısı n , yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı ℓ , yörüngesel manyetik kuantum sayısı m_ℓ ve spin manyetik kuantum sayısı m_s 'dir.

2. 1. 1. 1. Temel Kuantum Sayısı (n)

1, 2, 3, gibi tam sayı değerlerini alan baş kuantum sayısı yörüngenin genişliğini tanımlar ve buradan yörüngenin enerjisi belirlenir. $n = 1, 2, 3, \dots$ ile değişen yörünge grupları (elektron kabukları) sırasıyla aşağıdaki gibi isimlendirilir.

n	1	2	3	4	5	6	7
Yörünge Grubu	K	L	M	N	O	P	Q

Baş kuantum sayısıyla (n) bir elektronun enerjisi,

$$E = -\frac{Z^2 m e^4}{8 n^2 h^2 \epsilon_0^2} \quad (2.1)$$

olarak verilir. Burada Z atom numarası, m elektronun kütlesi, e elektronun yükü, ϵ_0 boşluktaki elektriksel geçirgenlik ve h Planck sabitidir. n. kabuktaki izin verilmiş elektronların en büyük sayısı $2n^2$ 'dir.

2. 1. 1. 2. Yörüngesel Açısal Momentum Kuantum Sayısı (ℓ)

Elektronun yörüngesel hareketinin açısal momentum cinsinden bir ölçüsüdür. Her elektron P_ℓ ile verilen ve değeri,

$$P_\ell = \sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar \quad (2.2)$$

olan yörüngesel açısal momentuma sahiptir. Burada $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 'dir. ℓ 'nin aldığı değerler

0, 1, 2,, (n-1) ile sınırlıdır. ℓ 'ye bağlı olarak yörüngelerin aldığı isimler aşağıdaki gibidir.

ℓ	0	1	2	3	4
Yörünge	s	p	d	f	g

2. 1. 1. 3. Yörüngesel Manyetik Kuantum Sayısı (m_ℓ)

Yörüngesel manyetik kuantum sayısı dış bir manyetik alan içinde kendiliğinden oluşmaktadır. Elektron yörüngelerinin içinde bulunduğu düzlem sadece belirli yönelimlerde bulunabilir. m_ℓ , sadece

$$\ell, (\ell-1), (\ell-2), \dots, 0, \dots, -(\ell-2), -(\ell-1), -\ell$$

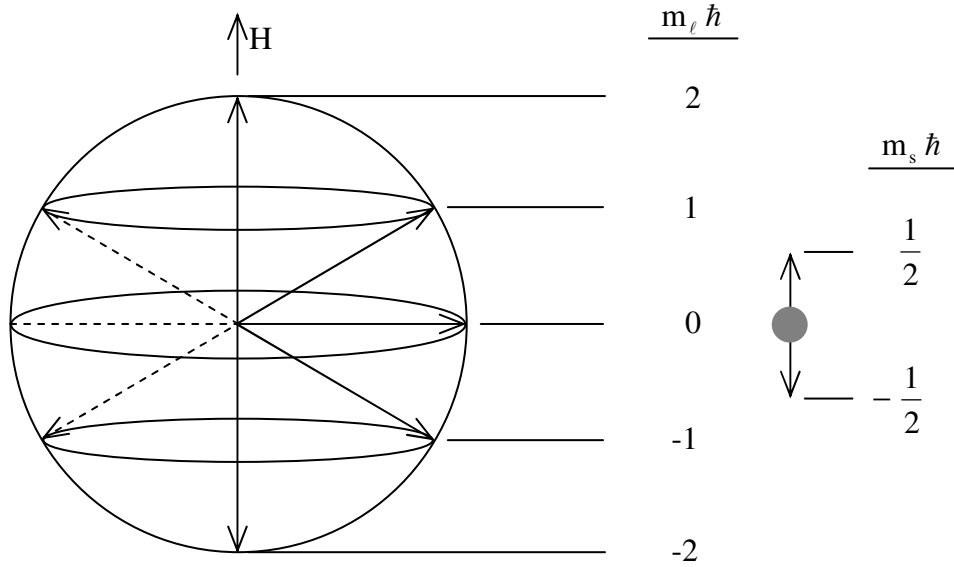
değerleri arasındadır ve dış alan yönündeki açısal momentumun yörüngesel bileşeni $m_\ell \hbar$ ile verilir.

2. 1. 1. 4. Spin Manyetik Kuantum Sayısı (m_s)

Elektron kendi eksenini etrafında dönmesiyle doğal bir açısal momentuma sahiptir. Bu momentum,

$$P_s = \sqrt{s(s+1)} \hbar \quad (2.3)$$

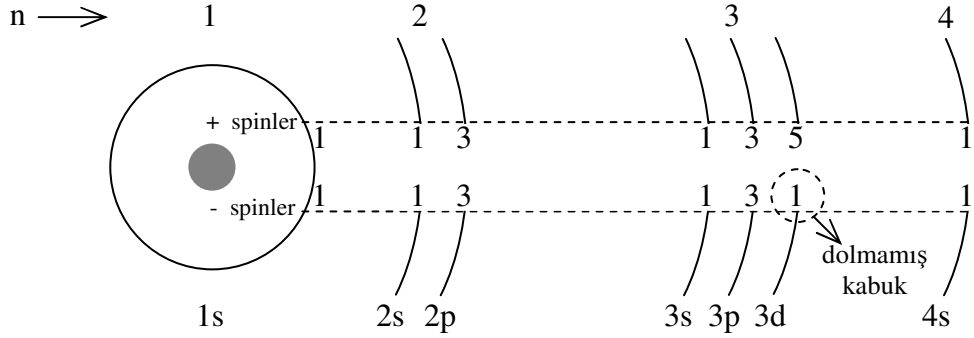
olarak verilir. Burada s , elektron spinidir ve değeri $\frac{1}{2}$ 'dir. Uygulanan manyetik alan yönündeki spin açısal momentumun bileşeni sürekli değerlere sahip değildir, yani kesikli değerler almaktadır. Spin yönelimine bağlı olarak $m_s = \pm \frac{1}{2}$ değerlerini alırken, m_s 'nin alan yönündeki bileşeni $m_s \hbar$ değerleriyle verilmektedir. Yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı ℓ olan bir yörüngenin, manyetik alan yönündeki bileşeni $2\ell+1$ kadardır. Örneğin, d elektronları ($\ell = 2$) Şekil 2. 1.'de görüldüğü gibi $m_\ell = 2, 1, 0, -1, -2$ değerleri için beş yönelime sahip olabilir. Spin, sadece manyetik alana paralel veya zıt yönde paralel olan iki farklı yönelime sahip olabilir. Her elektron, dört kuantum sayısıyla belirlenmiş farklı yörüngelerde bulunabilir. Diğer bir deyişle, dört kuantum sayısıyla belirlenmiş her yörünge sadece bir elektron kabul edebilir. Bu kural Pauli Dışarlama ilkesi olarak bilinir.



Şekil 2. 1. 3d elektronunun yörüngesel ve spin açısal momentumlarının alabileceği değerler (Chikazumi, 1986).

Atom numarası (Z) arttıkça elektron sayısı da artar. Elektronlar, en düşük enerji seviyesinden en yüksek enerji seviyesine doğru kabukları doldururlar ve sırasıyla 1s, 2s, 2p, 3s ve 3p olarak yörüngelere yerleşirler. Ancak 3p'den sonra, 3d yerine 4s kabuğu doldurulur. Bunun nedeni, 4s yörüngesinin şekli eliptiktir ve elektronun çekirdeğe olan yakınlığı değişmektedir. $Z = 19$ (K)'dan $Z = 29$ (Cu)'a kadar olan element serisinde 3d seviyesi artan atom numarasıyla (Z) yavaşça dolmaktadır. Bu elementler yakından manyetizma ile ilgilidir ve geçiş elementleri olarak bilinirler (Chikazumi 1986).

Bir demir atomundaki 26 elektronun kabuklarının nasıl doldukları Şekil 2. 2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 2. Bir demir atomundaki elektron kabukları (Bozorth, 1968).

En içteki ilk kabuk 2, sonraki 8, daha sonraki 14 ve en son kabuk 2 elektrona sahiptir. Şekil 2. 2.'de yörünge kabuklarında gösterilen sayılar demir atomunda her kabuk için kaç tane + ve - spin olduğunu anlatmaktadır. Üçüncü kabukta beş elektron pozitif spine sahipken bir elektronun negatif spini vardır. Böylece dört elektronun spini dengelenmemiştir. Atomdaki bu kalıcı manyetik moment mıknatıslanmanın koşullarından biridir (Bozorth 1968).

3d kabuğundaki elektron sayısı düşünüldüğünde çeşitli açısal momentum vektörleri arasında kuvvetli etkileşmeler olmaktadır. Bu açısal momentum vektörleri i . elektronun m_{s_i} spin vektörü ve m_{ℓ_i} yörüngesel vektörü ile j . elektronun m_{s_j} spin

vektörü ve $m_{\ell j}$ yörüngesel vektörüdür. Her bir elektronun toplam spin vektörüne katkısı spin-spin etkileşmeleriyle meydana gelmektedir. Toplam spin vektörü,

$$\vec{S} = \sum_{i=1}^n m_{s_i} \quad (2.4)$$

olarak verilir. Benzer şekilde toplam yörüngesel vektörü,

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n m_{\ell_i} \quad (2.5)$$

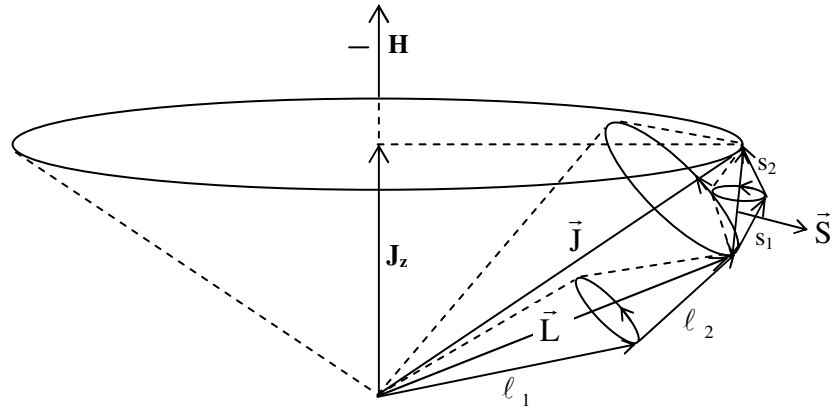
ile verilir. Böylece spin-yörünge etkileşimini veren toplam açısal momentum vektörü,

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (2.6)$$

şeklinde verilir. Şekil 2. 3.'de gösterilen bu etkileşme Russell-Saunders çiftlenimi olarak bilinir (Chikazumi 1986). Bir elektron yörüngesel ve spin açısal momentuma sahip olduğundan, \vec{P}_j ,

$$\vec{P}_j = \vec{P}_\ell + \vec{P}_s \quad (2.7)$$

ile verilir.



Şekil 2. 3. Russell-Saunders çiftlenimi (Chikazumi, 1986).

2. 1. 2. Elektronların Manyetik Momentleri

Klasik olarak bir çekirdeğin etrafındaki dairesel yörüngede hareket eden elektronun hareketi için, açısal momentumu P_ℓ ve manyetik momenti μ'_ℓ arasında belirli bir oran vardır. Eğer elektron, r yarıçaplı bir yörüngede v hızıyla hareket ediyorsa relativistik olmayan formülle açısal momentumu,

$$P_\ell = m v r \quad (2. 8)$$

ile verilir. Burada m elektronun kütlesidir.

Bir elektrik devresinde aynı yörüngenin manyetik momenti akım ve alanın çarpımıdır. Akım, yörüngedeki herhangi bir noktadan birim zamanda geçen yük olup, dönme frekansı ile $-e$ elektronun yükünün çarpımı olarak adlandırılır. Böylece,

$$\mu'_\ell = \pi r^2 (-e) \frac{v}{2\pi r} = - \frac{e v r}{2} \quad (2. 9)$$

Eşitlik (2. 8) ve (2. 9)'un birleştirilmesiyle,

$$\mu'_\ell = - \frac{e}{2m} P_\ell \quad (2. 10)$$

olur. Eşitlik (2. 10) yörüngesel elektron hareketi için aynı zamanda kuantum mekaniksel formüldür. Ayrıca elektronun kendi eksenini etrafında spin hareketi için bir spin manyetik momenti de vardır. Elektron spinini için μ'_s 'nin P_s 'ye oranı, yörüngesel hareket oranından iki kat daha büyüktür.

$$\mu'_s = - \frac{e}{m} P_s \quad (2. 11)$$

Eşitlik (2. 2) ve (2. 3)'ü kullanarak, Eşitlik (2. 10) ve (2. 11)'deki μ'_ℓ ve μ'_s manyetik momentlerini yalnızca kuantum mekaniksel terimlerle,

$$\mu'_\ell = -\frac{e}{2m}\sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar = -\sqrt{\ell(\ell+1)}\frac{e\hbar}{2m} \quad (2. 12)$$

$$\mu'_s = -\frac{e}{m}\sqrt{s(s+1)}\hbar = -\sqrt{s(s+1)}\frac{e\hbar}{m} \quad (2. 13)$$

elde etmek mümkündür. Burada $\frac{e\hbar}{2m}$ büyüklüğü Bohr magnetonu olarak adlandırılır ve bu büyüklük mümkün olabilecek en küçük teorik manyetik momenttir.

$$\mu'_B = \frac{e\hbar}{2m} \quad (2. 14)$$

Yörüngesel ve spin manyetik momentleri μ'_B cinsinden yeniden yazılırsa,

$$\mu'_\ell = -\sqrt{\ell(\ell+1)}\mu'_B \quad (2. 15)$$

$$\mu'_s = -\sqrt{s(s+1)}2\mu'_B \quad (2. 16)$$

olur. Tek bir elektronun sahip olduğu yörüngesel ve spin hareketlerinin toplam manyetik momenti (μ'_j),

$$\mu'_j = -g\sqrt{J(J+1)}\mu'_B \quad (2. 17)$$

olarak verilmektedir. Burada g tek bir elektron için Lande veya spektroskopik yarıлма faktörüdür ve

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + s(s+1) - \ell(\ell+1)}{2J(J+1)} \quad (2. 18)$$

eşitliği ile verilir. Yörüngesel hareket olmadığı durumda ($\ell = 0, J = s$) sadece spin hareketi için $g = 2$ olur. Diğer durumda ($s=0, J=\ell$) $g = 1$ olur. Böylece spin manyetik moment, yörüngesel manyetik momente göre iki kat daha büyüktür (Arabi 1987).

2. 1. 3. Manyetik Alan

Manyetik alan uzayda birim hacimdeki enerji değişimidir. Bu enerji değişimi, elektrik yüklerinin ivmelenmesi, akım taşıyan bir iletkendeki kuvvet, çubuk mıknatısın bir manyetik momentte oluşturduğu döndürme moment veya belirli tipteki atomlarda elektron spinlerinin yön değiştirmesi gibi etkilere sebep olur.

Elektrik yükleri hareketli olduğu zaman bir manyetik alan oluşturur. Bir iletken üzerindeki elektrik akımı manyetik alan kaynağıdır. Ayrıca manyetik alan sabit bir mıknatısla da oluşturulabilir.

2. 1. 4. Manyetik Alan Şiddeti

Manyetik alan şiddeti (\vec{H}), sadece onu üreten akımın dağılımı ve büyüklüğüyle belirlenmektedir. Ortamdan bağımsız olduğu için manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu (\vec{B} , manyetik indüksiyon) arasındaki ayrımı belirler.

2. 1. 5. Manyetik Akı Yoğunluğu

Amper yasasına göre (Eşitlik (3. 13)), bir ortamda akımla manyetik alan oluşturulduğunda ortamın tepkisi manyetik akı yoğunluğudur (manyetik indüksiyon, \vec{B}). 1 m^2 'deki 1 Weber'lik manyetik akımın oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu 1 Tesla'dır.

Manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan arasındaki ilişki, ortamın manyetik geçirgenliği (μ) olarak isimlendirilir. Birçok ortamda \vec{B} , \vec{H} 'nin doğrusal bir fonksiyonudur. Boşlukta manyetik alanla manyetik akı yoğunluğu arasındaki bağıntı,

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2. 19)$$

şeklindedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olup değeri $4\pi 10^{-7}$ H/m'dir.

Bununla birlikte diğer ortamlarda (örneğin ferromanyetik maddelerde) \vec{B} , \vec{H} 'ya doğrusal olarak bağlı değildir. Bir ferromanyetik maddenin B-H eğrisi, o madde hakkında gerekli birçok bilgiyi vermektedir. Ferromanyetik maddelerde \vec{B} ve \vec{H} arasındaki bağıntı,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2. 20)$$

ile verilir. Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği olup, sabit değildir.

2. 1. 6. Manyetik Akı

Manyetik alan uzayda nerede varsa orada manyetik akı (Φ) var demektir. Bu manyetik akı Weber birimiyle ölçülmektedir. Akının geçtiği iletkenin kapalı devresinde bir e.m.k. üretildiği için manyetik akının değişim oranı ölçülebilir. 1 Weber, içinden akı geçen bir sarımlı bobinde bir saniyede üretilen bir voltluk e.m.k.'nın düzenli olarak sıfıra düşürülmesiyle oluşan manyetik akı miktarıdır.

2. 1. 7. Faraday ve Lenz Yasaları

Faraday yasasına göre bir elektrik devresinde indüklenen gerilim (V), devreyle bağlantılı manyetik akının değişme oranıyla orantılıdır.

$$V = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2. 21)$$

Burada Φ , N sarımlı bobinden geçen manyetik akı ve $\frac{d\Phi}{dt}$ ise akının değişim oranıdır.

Eşitlik (2. 21)'deki eksi işareti Lenz yasası ile açıklanır ve bu yasaya göre, indüklenen gerilim kendisini üreten akıya zıt yöndedir.

Manyetik akı yoğunluğu ile manyetik akı arasındaki değişim, akının dik bir Y_A yüzeyinden geçmesi durumunda,

$$B = \frac{\Phi}{Y_A} \quad (\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{Y}_A) \quad (2.22)$$

şeklindedir.

2. 1. 8. Mıknatıslanma

Bir katıda birim hacimdeki manyetik moment, mıknatıslanma (\vec{M}) olarak tanımlanır.

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}'}{\text{Hacim}} \quad (2.23)$$

Manyetik moment ve manyetik akı arasındaki ilişkiden \vec{M} ve \vec{B} arasında basit bir ilişki kurulur. Dipol uzunluğu ℓ_d , yüzey alanı Y_A ve merkezdeki manyetik akısı Φ olan bir çubuk mıknatıs için manyetik moment ve mıknatıslanma sırasıyla,

$$\vec{\mu}' = \frac{\vec{\Phi} \ell_d}{\mu_0} \quad (2.24)$$

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}'}{Y_A \ell_d} = \frac{\vec{\Phi}}{\mu_0 Y_A} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (2.25)$$

şeklindedir. Bu durumda bir manyetik alan üretmek için elektrik akımına gerek yoktur. Böylece \vec{B} Eşitlik (2. 19) şeklinde yazılır. Bu nedenle mıknatıslanma (\vec{M}) ve manyetik alan (\vec{H}) aynı yoldan \vec{B} manyetik indüksiyonu meydana getirir. Eğer ortamda hem mıknatıslanma hem de manyetik alan varsa onların katkıları toplanır.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.26)$$

Eğer bir maddenin birim hacimdeki her manyetik momenti n tane temel atomik manyetik dipole sahipse, tüm momentleri paralel olarak yönelmiş bu maddenin birim hacimdeki manyetik momentlerine doyum mıknatıslanması denir. Doyum mıknatıslanması (\vec{M}_s), n ve $\vec{\mu}'$ çarpımına eşittir.

$$\vec{M}_s = n \vec{\mu}' \quad (2.27)$$

2.1.9. Geçirgenlik ve Alınganlık

Geçirgenlik (μ) ve Alınganlık (χ),

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (2.28)$$

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (2.29)$$

ile verilir. Ortamın veya maddenin çeşidine bağlı olarak \vec{B} ve \vec{M} , \vec{H} 'nın doğrusal fonksiyonu olabilir veya olmayabilir. Bu yüzden \vec{M} ve \vec{H} 'ya bağlı olan geçirgenlik ve alınganlık ta değişir. μ_r ile gösterilen bir ortamın bağıl geçirgenliği,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.30)$$

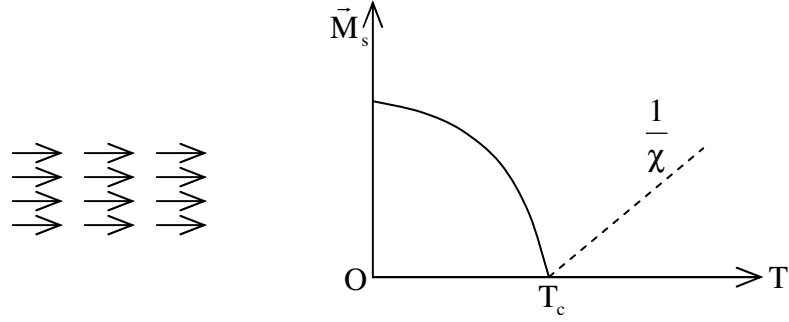
olarak verilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Boşluğun bağıl geçirgenliği 1'dir. Bağıl geçirgenlik ile alınganlık arasındaki bağıntı,

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (2.31)$$

ile verilir (Jiles 1991).

2. 1. 10. Ferromanyetizma

Ferromanyetizma durumunda spinler birbirine paralel olarak yönelmişlerdir. Böylece komşu spinler arasında kuvvetli bir pozitif etkileşme söz konusudur. Sıcaklık artarken, spin düzeni sıcaklıkla uyarılmaktadır. Böylece kendiliğinden olan mıknatıslanmanın sıcaklık bağımlılığı Şekil 2. 4.'teki gibi olmaktadır. Şekil 2. 4.'te mıknatıslanma sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır ve belli bir sıcaklıkta değeri sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) denir. Ferromanyetizmada alınganlık çok yüksek değerdedir (Chikazumi 1986).

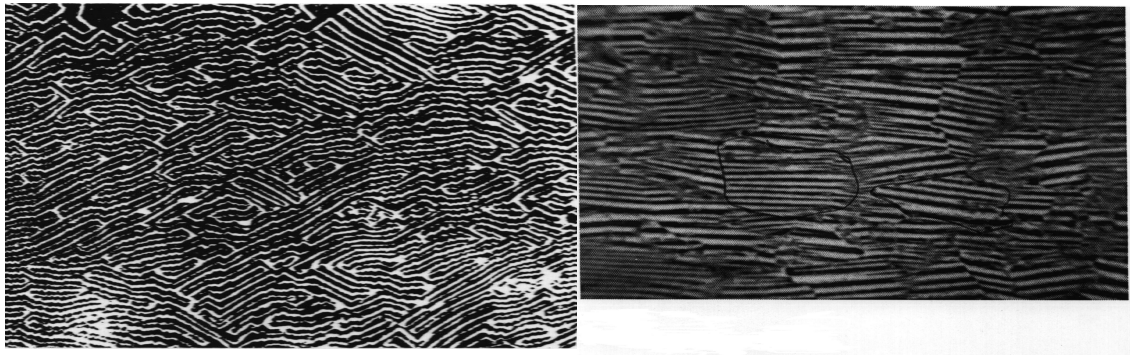


Şekil 2. 4. Ferromanyetizma (Chikazumi, 1986).

2. 2. ELEKTRİK ÇELİKLERİ

2. 2. 1. Yönlendirilmiş ve Yönlendirilmemiş Elektrik Çelikleri

Transformatör çekirdeği olarak kullanılan elektrik çelikleri kristalleri yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş olarak iki çeşit üretilir (Şekil 2. 5.). Yönlendirilmemiş elektrik çelikleri izotropik manyetik özellikler gösterir ve her yöndeki manyetik özellikleri hemen hemen aynıdır.



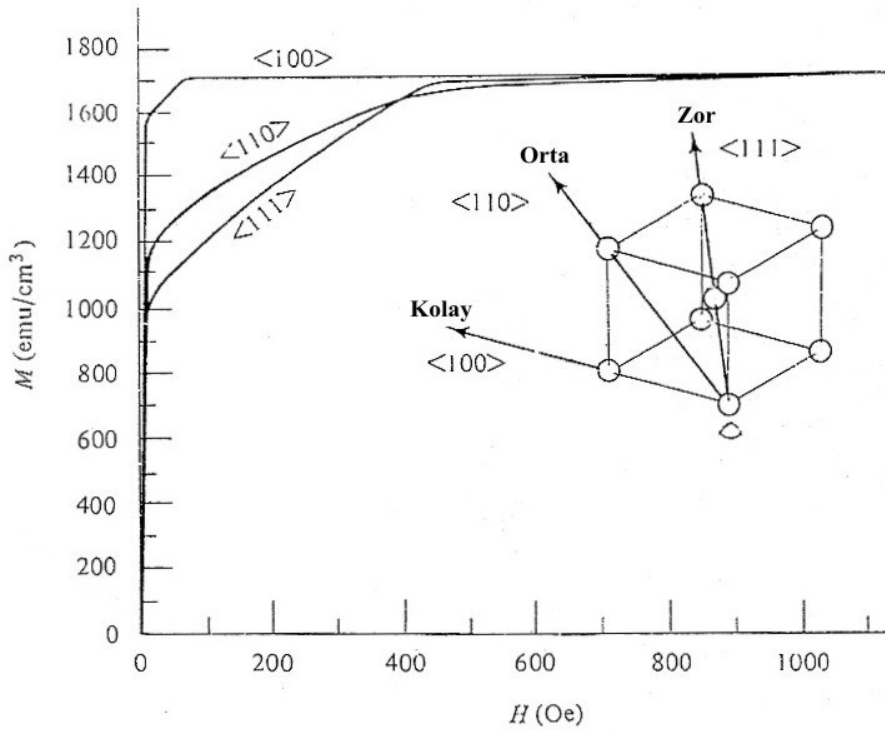
(a)

(b)

Şekil 2. 5. (a) Yönlendirilmemiş ve (b) yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin iç yapısı (Derebaşı, 2002) .

Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin, yönlendirilmiş elektrik çeliklerine göre güç kayıpları (manyetik veya çekirdek kayıpları) fazladır, manyetik geçirgenlikleri düşüktür ve daha ekonomiktirler.

Demir kübik kristal yapısı olan bir elementtir ve küp eksenleri boyunca en az enerji ile mıknatıslanmaktadır ve kolay mıknatıslama eksenini olarak bilinir. Yüzey köşegeni yönünde orta ve küp köşegeni yönünde ise en zor mıknatıslanabilir. Şekil 2. 6. Demirin yönlere bağlı olarak mıknatıslanma eğrilerini göstermektedir (Cullity 1972). Yönlendirilmiş elektrik çelikleri üretim sırasında kübün kenarları mıknatıslanma yönü olacak şekilde yönlendirilmiştir. Bölgesel kristaller (grain) her biri aynı yönde yönelmiş momentler topluluğu içermektedir ve bunlar domain olarak adlandırılır.



Şekil 2. 6. Demirin yönlere bağlı mıknatıslanma eğrileri (Cullity, 1972).

Her domain manyetik olarak doymuştur. Komşu domainlerdeki manyetik momentler zıt yönde yönelmişlerdir. Bu sebepten tüm maddenin net mıknatıslanma vektörü sıfırdır. Yönlendirme, haddeleme, tavlama ve soğutma işlemlerini içeren ve ileri teknoloji gerektiren bir işlemdir. Yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin manyetik kayıpları düşük, geçirgenliği yüksektir. Yönlendirilmemiş çeliklere göre biraz daha pahalıdır (Derebaşı 2002).

2. 2. 2. Yönlendirilmiş Elektrik Çeliklerinin Gelişimi

Transformatör çekirdekleri önceleri yumuşak çelikten yapılmaktaydı. 18. yüzyılın sonlarında yüksek geçirgenlik ve düşük kayıpları olan çekirdek malzemeleri için araştırmalara başlandı. 1900'lerde düşük Karbon çeliklerine Silisyum (Si) ilavesiyle daha iyi manyetik özelliklerde olan malzeme keşfedildi. 1903 yılında Silisyum katılan Demir alaşımında geçirgenliğin arttığı, histeresis kayıplarının azaldığı ve manyetik yaşlanmanın etkilerinin yok olduğu saptandı.

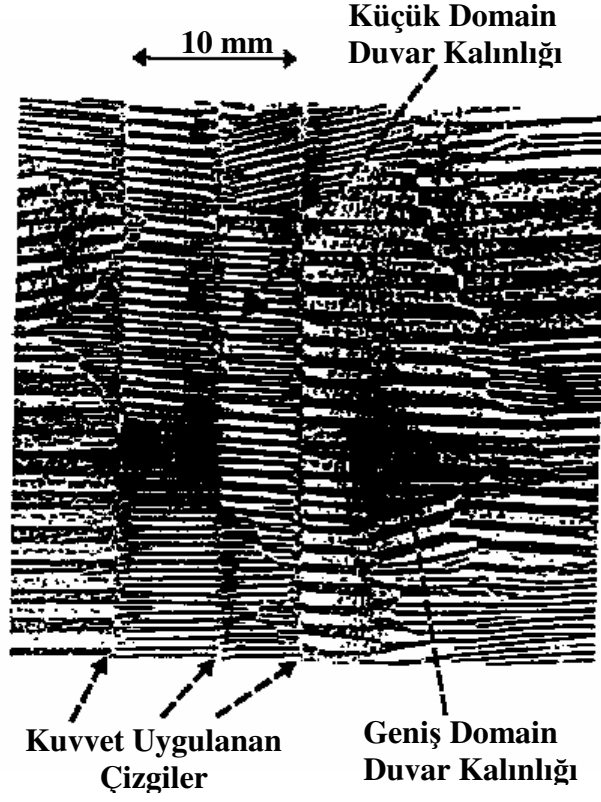
Ticari olarak SiFe üretimine 1905’de Amerika’da ve 1906’da İngiltere’de başlandı. Demire Silisyum katılması alaşımın elektriksel direncini arttırmakta, doyum mıknatıslanmasını azaltmakta ve mekanik özelliklerinde bazı zorluklar meydana getirmektedir. Kısa bir zaman sonra SiFe alaşımının uygun özelliklerinden dolayı sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmesine başlandı ve transformatör çekirdeklerinde düşük karbon oranlı çeliğin yerini aldı.

1918 ve 1925’de araştırmacılar SiFe alaşımının yüksek manyetik anizotropik özelliğini gösterdiler (manyetik özelliklerin yöne bağlı olarak değişmesi özelliği). “Goss” ismindeki araştırmacı SiFe alaşımında grain (kristal) bölgesel yapısını geliştirerek haddeleme yönündeki manyetik özelliklerinin daha iyi olduğunu gösterdi. Bu işlem 1936’da ticari olarak bir Amerikan firması olan ARMCO tarafından geliştirildi. İlk üretilen SiFe alaşımı 0.32 mm kalınlığında ve 1.5 Tesla 50 Hz’de yaklaşık 1.5 W/kg’lık güç kayıplarına sahipti.

1964’te yeni bir gelişmiş elektrik çeliği elde edildi. Bu malzeme yüksek geçirgenliğe sahipti ve grainleri yönlendirilmişti. Bu malzemeye kısaca Hi-B ismi verildi. Hi-B elektrik çelikleri ticari olarak 1968’de Japon Nippon Çelik İşletmeleri tarafından üretilmeye başlandı. Hi-B malzemesiyle güç kayıplarında % 15’lik bir azalma sağlanmıştır.

Güç kayıplarında daha ileri gelişmeler yönlendirilmiş SiFe alaşımında domain inceltme yöntemiyle elde edildi. Domainlerin inceltmesi işlemi elektrik çeliklerinin enine çizilmesiyle yapılmaktaydı ve güç kayıplarında % 44’e kadar azalma sağlanmıştı. İlk zamanlarda bu yöntemin uygulanmasında malzeme yüzeyindeki izolasyon tabakasını bozduğu için bazı problemler meydana geldi. Fakat daha sonra yüzey teması olmayan yöntemlerin gelişmesiyle ticari üretimine başlandı. 1982’de Japon Nippon Çelik İşletmeleri yönlendirilmiş SiFe elektrik çeliklerinde yüksek güçte laser kullanarak domainlerin inceltmesi yöntemini geliştirdi. Bu yöntemle çizilmiş 0.23 mm kalınlığında Hi-B malzemesinde 1983’te 1.7 Tesla 50 Hz’de 0.85 W/kg’lık güç kaybı ölçüldü ve üretimine başlandı. Nippon Çelik İşletmeleri laser kullanılarak çizilen elektrik çeliklerini ZDKH koduyla tanımlamaktadır. Daha sonra işlem daha da

geliştirilerek mekanik olarak çizilen malzeme üretimine başlandı. Bu tip malzemeye ise ZDMH kodu verildi (Derebaşı 1996). Şekil 2. 7.'de yüzeyin çizilmesinin domainlere olan etkisini açıkça göstermektedir (Beckley 2000).



Şekil 2. 7. Fiziksel yöntemlerle elektrik çeliklerinin yüzeyinin çizilmesinin etkisi (Beckley, 2000).

2. 3. AMORF FERROMANYETİK MADDELER

Elektromanyetik aletler, ya kullanılan maddelerin özelliklerini geliştirmekle ya da yeni bir manyetik madde geliştirerek daha verimli hale getirilir. Bu nedenle ferromanyetik amorf alaşımların gelişimi oldukça dikkat çekicidir. Amorf maddelerin temel kimyasal bileşimi T_xM_{100-x} şeklindedir. Burada T bir veya daha fazla geçiş metallerini (Demir (Fe), Nikel (Ni) ve Kobalt (Co)), M ise bir veya daha fazla metal yapıcı veya camsı elementleri (Silisyum (Si), Bor (B), Karbon (C), Fosfor (P) veya Molibdeniyum (Mo)) temsil etmektedir. x ise karışımdaki elementin atomik yüzdesidir.

Amorf şeritler için değişik üretim teknikleri vardır. Bunlar buhar, elektroliz ve kimyasal biriktirme yöntemleri olarak bilinmektedir. Fakat tercih edilen üretim yöntemi, erimiş haldeki alaşımı basınçla, hızlı dönen bir kasnak üzerine püskürtmektir (Meydan 1984).

2. 3. 1. Amorf Şeritlerin Bazı Manyetik Özellikleri

Amorf alaşımların manyetik özellikleri atomik bileşimlerine bağlıdır. Bu yüzden belirli uygulamalara uygun özellikteki amorf şeritleri üretmek için doğru bileşimi seçmek gerekmektedir.

Genel olarak amorf alaşımların manyetik özellikleri;

- normal elektrik çeliklerine göre daha yüksek elektriksel direnç,
- kuvvetinden bir şey kaybetmeden esneklik,
- benzer kristalli alaşımlara göre daha yüksek aşınma direnci,
- çok yüksek hızlarda stratejik olmayan metallerden üretilmesidir.

Amorf şeritler başlıca üç önemli grupta üretilmektedir. Amorf alaşımların sınıflandırılması farklı şirketler tarafından Çizelge 2. 1.'de görüldüğü gibi farklı ticari isimler altında yapılmaktadır.

Çizelge 2. 1. Bazı amorf manyetik alaşımların ticari adları ve kimyasal bileşimleri.

TİCARİ ADI	NUMARA	KİMYASAL BİLEŞİM	FİRMA VE/VEYA ÜLKE
Metglas [®]	2605	Fe ₈₀ B ₂₀	Honey Well Inc., ABD
	2605A	Fe ₇₈ Mo ₂ B ₂₀	
	2605S-3	Fe ₇₉ Si ₅ B ₁₆	
	2605S-2	Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	
	2605S	Fe ₈₂ Si ₆ B ₁₂	
	2605CO	Fe ₆₇ Co ₁₈ B ₁₄ Si ₁	
	2605SC	Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂	
	2615	Fe ₈₀ P ₁₆ C ₃ B ₁	
	2705X	Fe _{5.85} Co _{70.15} Mo ₂ B ₁₅ Si ₅	
	2826	Fe ₄₀ Ni ₄₀ P ₁₄ B ₆	
	2826A	Fe ₃₂ Ni ₃₆ Cr ₁₄ P ₁₂ B ₆	
	2826B	Fe ₂₉ Ni ₄₉ P ₁₄ B ₆ Si ₂	
	2826MB	Fe ₄₀ Ni ₃₈ Mo ₄ B ₁₈	
	Vitrovac [®]	E 0040	
E 4040		Fe ₃₉ Ni ₃₉ Mo ₄ Si ₆ B ₁₂	
6010		Co ₅₅ Ni ₂₀ Fe ₅ (SiB) ₂₀	
E 6010		Co ₅₈ Ni ₄₀ Fe ₅ Si ₁₁ B ₁₆	
6025		Co ₆₆ Fe ₄ Mo ₂ Si ₁₆ B ₁₂	
7505		Fe ₈₁ B ₁₃ Si ₄ C ₂	
Amoment [®]	26	Fe ₇₈ Si ₁₀ B ₁₂	Japonya
	27	Co ₇₅ Si ₁₅ B ₁₀	
	45 NPR-A	Fe ₄₀ Ni ₄₀ P ₁₆ B ₄	Rusya
	85 KSR-A	(Co _{0.93} Fe _{0.07}) ₇₅ Si ₁₅ B ₁₀	

KAYNAK: Derebaşı, Ph. D. Thesis, 1994.

a) Demir Esaslı Olan Amorf Şeritler: Örnek olarak Amerikan Honey Well Inc. firmasının ürettiği Metglas 2605SC verilebilir. Bu şeritler yüksek doyum mıknatıslanmasına ve düşük kayıplara sahiptir. Demir esaslı olan alaşımlar üretilmiş haliyle yüksek manyetik gerilmeye sahiptir. Tavlama işlemi, Histeresis eğrisini geliştirmek için kullanılabilir. Bu çeşit amorf şeritler diğer alaşımlar içinde sıcaktan en az etkilenen şeritlerdir. Başlıca güç ve dağıtım transformatörlerinde, motorlarda, yüksek manyetik gerilme aranan yerlerde, manyetik anahtarlarda, transduserlerde (dönüştürücülerde), yüksek frekans ve akım transformatörlerinde kullanılmaktadır.

b) Nikel Esaslı Olan Amorf Şeritler: Bu gruba Metglas 2826MB örnek verilebilir. Nikelli amorf şeritler yüksek geçirgenliğe (μ), düşük sıfırlayıcı alan (H_c) ve manyetik gerilmeye sahiptir. Aynı zamanda Demirli amorf şeritlerle karşılaştırıldığında daha fazla aşınma direnci ve daha az doyum mıknatıslanmasına sahiptir. Nikelli amorf şeritlerin manyetik koruma (ekranlama), manyetik alan sensörleri ve kayıt kafaları gibi uygulamaları vardır.

c) Kobalt Esaslı Olan Amorf Şeritler: Metglas 2705X ve Vitrovac 6025 bu gruptandır. Kobaltlı amorf şeritler en yüksek geçirgenlik ve en düşük kayıplara sahiptir. Bu şeritleri üretmek pahalıdır ve düşük doyum mıknatıslanmasına sahiptirler. Fakat Kobaltlı amorf şeritler mükemmel yüksek frekans özelliklerine ve hemen hemen sıfır manyetik gerilmeye sahiptirler. Bu özellikler Kobaltlı amorf şeritlerin daha çok özel uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Örneğin yüksek frekanslı dönüşüm transformatörleri, kayıt kafaları, sensörler ve esnek koruma gibi uygulamalarda kullanılırlar (Derebaşı 1994).

2. 3. 1. 1. Manyetik Moment ve Doyum Mıknatıslanması

Manyetik maddelerde yüksek doyum mıknatıslanması transformatör üreticileri tarafından istenmektedir. Çünkü çalışma koşullarına bağlı olarak yüksek doyum mıknatıslanması transformatörün çekirdeğinden birim hacimde daha çok manyetik akı geçmesini sağlar. Böylece aynı büyüklükteki bir transformatörden daha büyük güç alınması sağlanır. Bu nedenle daha küçük bobinler daha az manyetik madde gerektireceğinden önemli bir tasarruf sağlanmış olur.

Yüksek doyum mıknatıslanması hem üretim kayıplarını hem de çalışma kayıplarını azaltır. Şu anda kullanılmakta olan elektrik çeliklerinin doyum mıknatıslanması 2 Tesla'ya yakın olduğu için çeliğin yerini alabilecek bir maddenin doyum mıknatıslanması bu değerle karşılaştırılmalıdır.

Amorf maddelerin mıknatıslanması genellikle atomdaki manyetik moment birimi veya Bohr magnetonu (μ'_B) ile açıklanır. Birim kütledeki mıknatıslanmayı belirlemek için yoğunluğun bilinmesi gerekmektedir. Manyetik akı yoğunluğunu belirlemek için örneğin kesit alanı kesin olarak bilinmelidir. Fakat amorf şeritlerde yüzeyin çok düzgün olmaması sebebiyle kesit alanını kesin olarak ölçmek çok zordur.

Amorf zayıf iletken olmasına rağmen 3d elektronları kristalli geçiş metal alaşımlarında hareketlidirler. Böylece 3d elektronlarının manyetik momenti, manyetizmanın bant teorisi olarak tartışılmalıdır. Atomlarda, yüksek enerjili spin durumları daha çok elektron-elektron Coulomb itme enerjilerine sahiptir ve Hund kuralına göre atomlar genellikle büyük manyetik momentlere sahip olacaktır. Atom etkileşmelerinde yüksek enerjili spinler için Coulomb enerjisindeki azalmayla, toplam spini sıfır olan elektron çiftleriyle en düşük enerji seviyelerinin doldurulmasındaki enerji azalması arasında bir denge elde edilmektedir. Bağ etkileşmeleriyle karşılaştırıldığında Coulomb enerjisinin büyük olduğu yerlerde, yüksek enerjili spin atoma benzer durum oluşturmaktadır. Bağ enerjisi, Coulomb enerjisiyle karşılaştırılabilir olduğu zaman geçiş metallere 3d yörüngeleri arasında olduğu gibi, bir uzlaşmaya varılır ve momentler azalır. Bağların hala kuvvetli olduğu durumlarda,

metal yapıcı s ve p durumlarıyla geçiş elementlerinin 3d durumları arasında olduğu gibi moment daha da küçülür veya ihmal bile edilebilir.

Fe, Ni ve Co gibi amorf geçiş elementlerinin manyetik momentleri en anlaşılabilir olanlarıdır. Bununla birlikte bu metalleri saf haliyle elde etmek oldukça zordur. Bant modeline göre basitleştirilmiş kurallar gösterir ki, geçiş elementlerinin manyetik momentleri, metal yapıcı eklenmesiyle çizgisel olarak azalır. Bu azalma metal yapıcılardan elde edilebilen elektron sayısına bağlı olarak değişir. Yani yaklaşık olarak her Fosfor (P) atomu $3\mu'_B$, her Silisyum (Si) veya Karbon (C) atomu $2\mu'_B$ ve her Bor (B) atomu $1\mu'_B$ bileşiği toplam manyetik momentinden azaltır (Meydan 1984).

2. 3. 1. 2. Geçirgenlik

Genel olarak amorf alaşımların geçirgenliği üretimden sonraki durumunda oldukça düşüktür. Fakat yeniden kristalleşme sıcaklığının altında tavlama ile geliştirilebilir. Ayrıca manyetik gerilme azaltılarak da geçirgenlik geliştirilebilir.

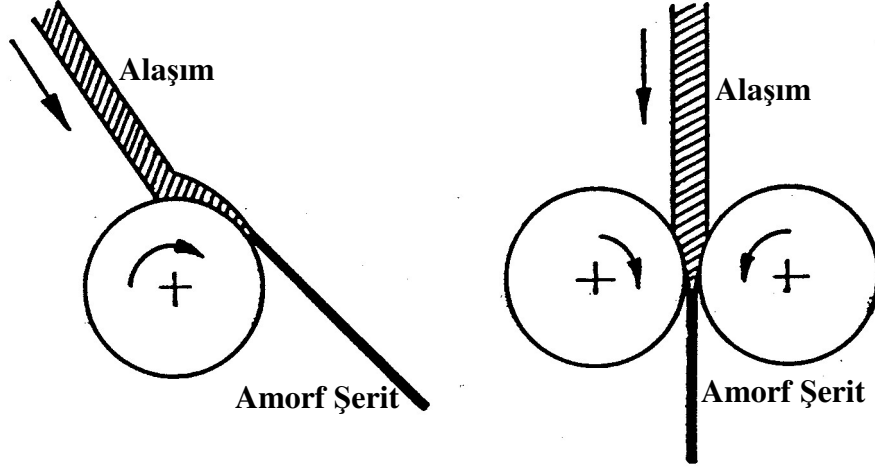
Geçirgenliğin frekansla değişimi birçok uygulamada çok önemlidir. Frekans değişimi amorf alaşımların yüzey bozuklukları nedeniyle büyüktür. Yüksek frekanslarda yüzey bozukluklarının etkileri, amorf alaşımların yüksek elektriksel direnci kullanılarak ihmal edilebilir.

2. 3. 2. Amorf Maddenin Üretim Yöntemleri

Amorf şeritler yaygın bilimsel araştırmanın merkezinde yer alan yeni bir manyetik madde grubunu oluşturmaktadır. Bu maddeler herhangi bir düzenli kristal yapıya sahip değildirler. Soğutma işlemiyle alaşımlar kristalleşmeye uğramaksızın sıvı halden katı hale geçerler. Sıvı alaşımlar erime sıcaklığında iç denge gösterirler. Böylece uygulanan soğutma hızına bağlı olarak sıvılar ya kristalleşir, ya da amorf veya mikro kristal yapıyı benimserler.

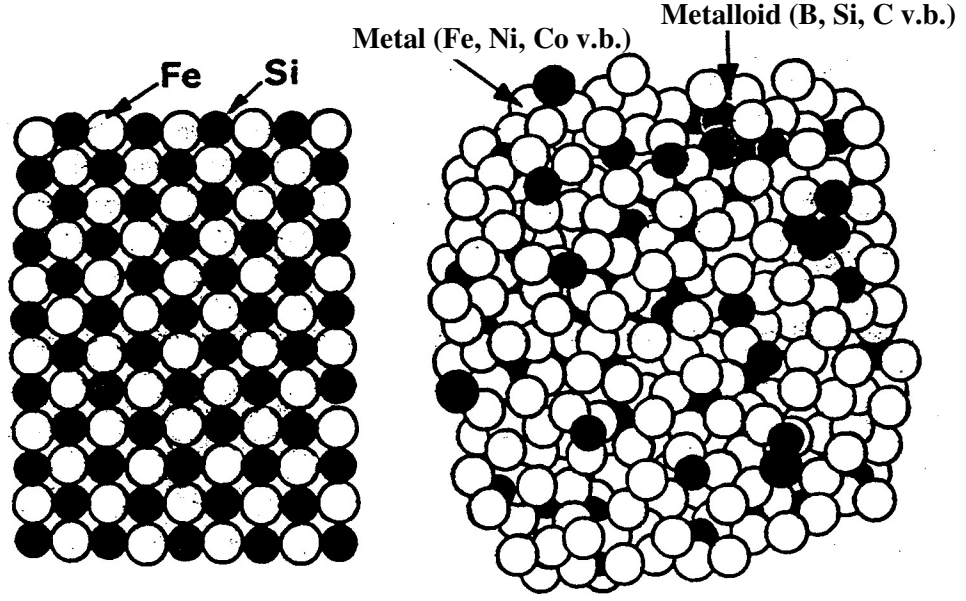
Bir sıvı alaşım çekirdeklenmenin (ve kristal büyümesinin) olası olduğu soğutma sıcaklığının altında kalmalıdır. Camsı-erime sıcaklığı T_g olarak adlandırılan belirli bir sıcaklığın altında sıvının viskozitesi o kadar çok yükselir ki madde atomik yapısında herhangi bir önemli değişme olmaksızın katıya dönüşür. Daha yüksek soğutma hızında sıvı daha yüksek bir sıcaklıkta cama dönüşebilir. Böylece T_g sıcaklığı camsı-erimenin kinetik değişkeni olarak da tanımlanabilir.

Birçok üretim yöntemi olmasına rağmen bunların en önemlisi sürekli döküm yöntemidir. Bu yöntem Şekil 2. 8.'de gösterilen döner kasnağın dış veya iç yüzeyine yatay ya da dikey olarak sıvı metalinin sabit hızla püskürtülmesiyle uygulanır.



Şekil 2. 8. Döner kasnağın dış ve iç yüzeyi üzerine döküm yaparak hızlı soğutma tekniği (Derebaşı, 1994).

Amorf yapılarda topolojik ve kimyasal olmak üzere iki türlü düzensizlik vardır. Topolojik düzensizlik atomlar arası uzaklığın büyük olmasından kaynaklanır. Kimyasal düzensizlik ise atomların çevresiyle ilişkilidir ve alaşım bileşenlerinin gelişigüzel dağılımı ile belirlenir (Şekil 2. 9.). Atomlar arası uzaklığa göre ise iki çeşit düzensizlik vardır: Küçük ve büyük hacimsel düzensizlikler.



Şekil 2. 9. Kristal ve amorf yapıda atomların düzeni (Derebaşı, 1994).

Elektrik endüstrisinde kullanılmalarına rağmen elektrik çelikleri ile karşılaştırıldığında amorf şeritlerin en önemli olumsuz yönleri manyetik doyum mıknatıslanmasının düşük olması, ısıtıldıklarında kırılğan hale gelmesi, mekanik işleme zorlukları (kesme, delme) ve ekonomik olarak daha pahalı olmalarıdır. Bu etkiler manyetik çekirdek üretiminde sarım teknolojisinin kullanımını gerektirir ancak sarım teknolojisi elektrik makinelerinin gücünü sınırlamaktadır (Derebaşı 1994).

2. 4. ÇEKİRDEK MADDELERİNDE GÜÇ KAYIPLARI

Güç kaybı, makinenin stator (duran bölümü) çekirdeklerinde ve güç transformatörlerinde kullanılan çekirdek maddesinin seçiminde en önemli değişkenlerden biridir. Güç kaybı bileşenleri histeresis, klasik girdap akımı ve anormal kayıplardır.

2. 4. 1. Histeresis Kayıpları

Histeresis kayıpları (P_h),

$$P_h = a f B_{\max}^n \quad (\text{W / kg}) \quad (2. 32)$$

bağıntısıyla verilir. a ve n maddeye bağlı sabitlerdir. n “Steinmetz sabiti” olarak bilinir ve Demir için değeri 1.6’dır. f (Hz) mıknatıslanma frekansı ve B_{\max} (T) manyetik indüksiyonun tepe değeridir (Derebaşı 2002).

2. 4. 2. Klasik Girdap Akımları Kayıpları

Girdap akımı kaybı zamana göre değişken bir alanla mıknatıslanmalarında iletken ferromanyetik maddede kaçınılmazdır ve mıknatıslanma ile dış manyetik alan arasındaki faz farkının temel sebeplerinden biridir. Akı yoğunluğuna ilişkin Faraday kanununa göre iletken bir ortamdaki manyetik akıdaki zamana göre herhangi bir değişme madde içinde elektriksel girdap akımlarını oluşturur, bunun sonucunda bir e.m.k. indüklenir. Böylece madde içinde indüklenmiş girdap akımları I^2R (joule) enerji kaybını arttırır. Lenz kanunu, manyetik alanın bu akımlara neden olan dış alana karşı koyduğunu ifade eder.

Klasik girdap akımları kayıpları (P_g) levha şeklindeki malzemelerde,

$$P_g = \frac{\pi^2 t_\ell^2 f^2 B_{\max}^2}{6 \rho_d d} \quad (\text{W / kg}) \quad (2. 33)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada t_ℓ (m) levhanın kalınlığı, ρ_d (Ω -m) elektriksel direnç ve d (kg/m^3) yoğunluktur.

Klasik girdap akımı kaybı madde boyunca sabit ve tek olan geçirgenlikle doğrusal bir B-H ilişkisi olduğunu varsayar. Böylece, dalga şekli sinüs eğrisi olarak uygulanan bir alan için tüm diğer niceliklerin dalga şekli de sinüs eğrisidir ve ince bir levha içindeki girdap akımı kayıpları Maxwell eşitlikleri yardımıyla hesaplanır.

Eşitlik (2. 33)'e göre, girdap akımları nedeniyle devir başına düşen enerji kaybı frekansın doğrusal bir fonksiyonudur. Histeresis nedeniyle olan devir başına enerji kaybı frekanstan bağımsızdır. Geleneksel olarak, histeresis ve girdap akımı kayıpları farklı frekanslarda verilen bir akı yoğunluğu için güç kaybı ölçümlerini alarak ve devir başına düşen toplam güç kaybının frekansa karşı eğimi grafiğe geçirilerek deneysel olarak ayrılabilir. Bu eğriyi sıfır frekansa genişletmek histeresis kaybını verir.

Girdap akımı kayıp bileşeni, ince levhalarda frekanstan bağımsız olan devir başına histeresis kaybının toplamdan çıkarılmasıyla tanımlanır. Bununla birlikte bu yapıldığında, görünür girdap akımı kaybının Eşitlik (2. 33)'de hesaplanmış olan değerden daima daha büyük olduğu bulunur. Bu, anormal bir kayıp olarak adlandırılan ileri bir kayıp bileşenini verir (Derebaşı 1994).

2. 4. 3. Anormal Kayıplar

(2. 32) ve (2. 33) bağıntıları ile açıklanamayan kayıplar anormal kayıplardır. Toplam güç kayıpları ve bileşenleri Şekil 2. 10.'da görülmektedir (Cullity 1972). Anormal kayıplar kristal büyüklüğü, madde içindeki gerilmeler, domain duvarı hareketleri, madde içindeki kusurlar, yanlış yerleşimler gibi birçok maddeye ait özelliklere bağlıdır.

Yukarıda anlatılan güç kayıplarının bileşenlerini azaltmak için yapılan yöntemler Çizelge 2. 2.'de verilmektedir. Çizelge 2. 2.'de histeresis kayıplarının azaltılması için, kristal yönelimlerinin geliştirilmesi Demir içindeki manyetik olmayan maddelerin mümkün olduğunca azaltılması ve iç gerilmelerin giderilmesi gereklidir.

Çizelge 2. 2. Elektrik çeliklerinde çekirdek kayıplarını azaltma yöntemleri.

Çekirdek kaybı çeşidi	Çekirdek kaybı azaltma yöntemi
Histeresis	1) Yönelmeyi geliştirmek
	2) Manyetik olmayan maddeleri azaltmak
	3) İç gerilmeleri gidermek
Klasik girdap akımı	1) Maddeyi inceltmek
	2) Si katkısını çoğaltıp, maddenin direncini arttırmak
Anormal	1) Kristalleri küçültmek
	2) Yüzeyi ince bir filmle kaplamak
	3) Fiziksel yöntemlerle domainleri inceltmek

KAYNAK: Derebaşı, Aydınlatma Cihazlarının Transformatör Çekirdeklerinde Kullanılan Maddelerin Özellikleri, 2002, s. 102.

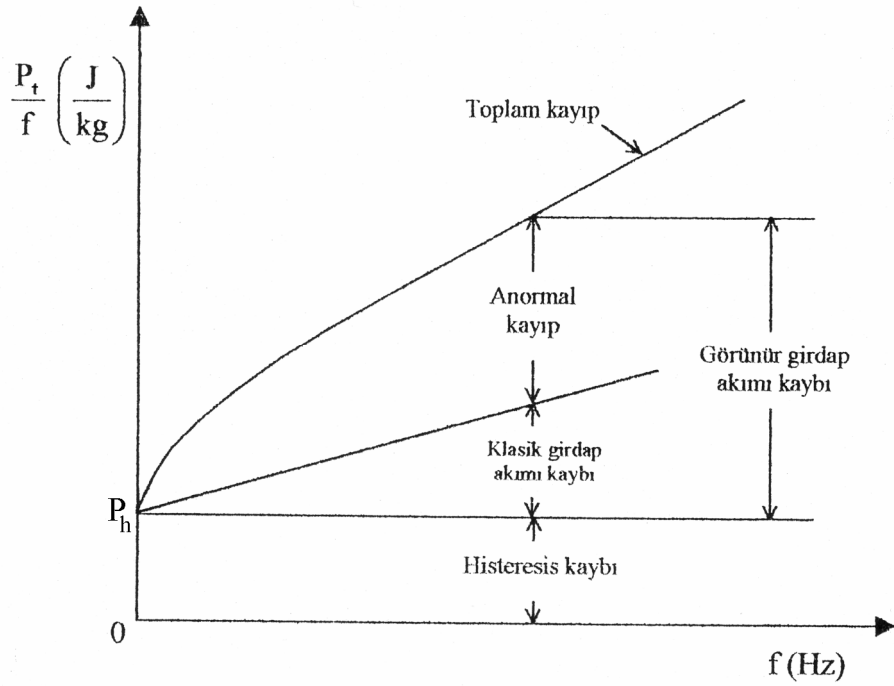
Elektrik çeliklerinin üretiminde farklı işlemler kullanılıp kristal boyutları küçültülmelidir. Çeşitli kimyasal yöntemlerle çelik içindeki manyetik olmayan maddeler örneğin Karbon (C) azaltılmaktadır. Üretim ve maddenin mekanik işlenmesi sırasında oluşan iç gerilmeler elde edilen ürünün tavllanmasıyla giderilmekte ve manyetik özellikler yeniden kazandırılmaktadır. Klasik girdap akımları levha haline getirilmiş elektrik çeliklerinin inceltmesi ve maddeye Silisyum (Si) katkısıyla azaltılmaktadır. Anormal kayıplar ise kristal boyutlarının küçültülmesi, levha yüzeyinin ince bir filmle (MgO) kaplanması ve fiziksel olarak domainlerin inceltmesi yöntemleriyle azaltılmaktadır (Derebaşı 2002).

Anormal kayıp, güç frekanslarında amorf maddelerinin toplam güç kaybının % 90-99'undan sorumludur. Bu, grainleri yönlendirilmiş Fe-3.2%Si için olan oranın % 30-90'ını ile karşılaştırılmalıdır. Bu anormal kaybın temeli çeşitli domain etkilerine katkıda bulunmaktadır. Bunlar;

- Domain duvarının oluşumu ve duvar açıları,
- Dalga şekli sinüs eğrisi olmayan, tek olmayan ve tekrarlamalı olmayan duvar hareketi,
- Akının tam nüfuz edememesi ve domain duvarının eğilmesi,

- d) Dalga şekli sinüs eğrisi olmayan akı yoğunluğu ve akı yoğunluğunun bölgesel değişimi,
- e) Örnek kalınlığı etkileri,
- f) Domain duvarının yeniden oluşması ve yok olması,

şeklinde ifade edilmektedir (Luborsky 1983).

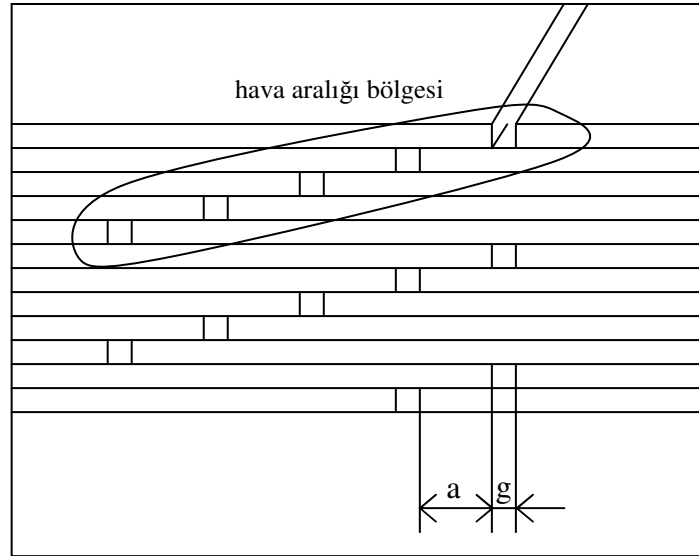


Şekil 2. 10. Transformator çekirdeklerinde kayıpların klasik ayrılması (Cullity, 1972).

2. 5. ELEKTRİK ÇELİKLERİ VE AMORF MADDELERDE AKI DAĞILIMI

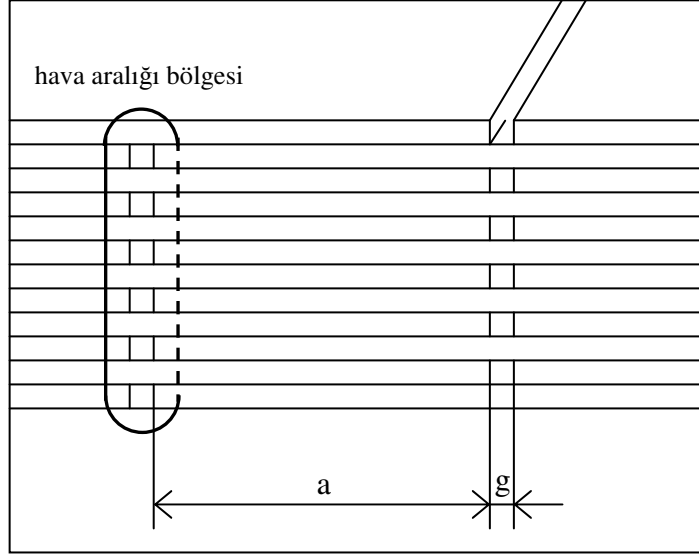
2. 5. 1. Farklı Geometriye Sahip Transformatör Çekirdeklerinde Akı Dağılımı

Farklı transformatör üreticileri, güç kaybı ve gürültüsü olmayan en iyi çekirdek özelliğini elde etmek için son derece değişik yöntemler uygulamaktadırlar. Son zamanlarda hem akademik hem de endüstri araştırma laboratuvarları, önemli bir ölçüde geliştirilen çekirdek eklem (birleşme yeri) yöntemlerini önermektedirler. Bununla birlikte yığılma faktörünü arttıran temel problem bölgelerinin hala bu birleşme yerleri olduğu varsayılır. İkinci bir azalma için birçok çekirdek üreticisi üst üste binen bölgeler için çok-katlı yöntemleri tanıtmışlardır (Şekil 2. 11.).



Şekil 2. 11. Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Çok-katlı model (N = 4) (Löffler ve ark., 1995).

Bu yöntemde bitişik iki eklem arasında oluşan hava boşluğu tek-katlı yöntem (Şekil 2. 12.) durumunda olduğu gibi tek bir levha ile köprülenmez.



Şekil 2. 12. Üst üste binme düzenlemesinin incelenen tipi: Tek-katlı model ($N = 1$) (Löffler ve ark., 1995).

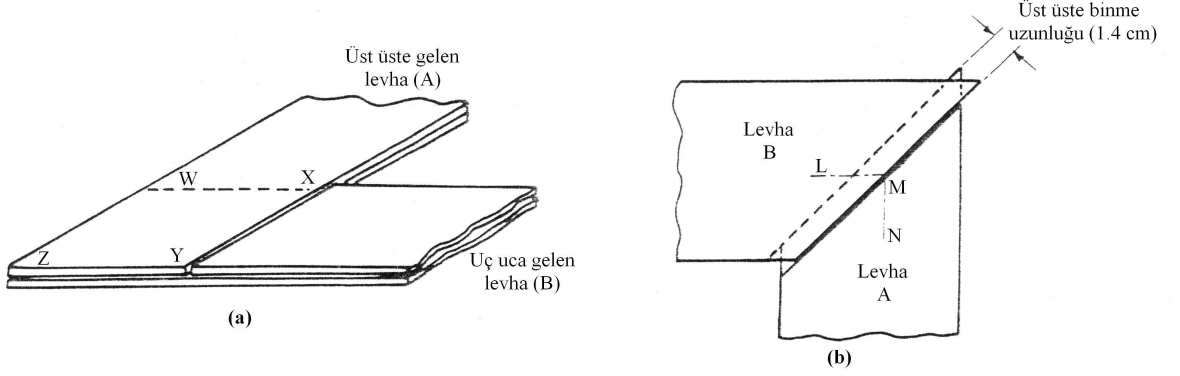
Çok-katlı yöntemde N kat için N tane levha ile köprülenir. Bununla birlikte çok-katlı çekirdek yönteminin oluşumu için artan fiyat gibi bir olumsuzluğa sahiptir. Löffler ve arkadaşlarının (1995) yaptığı çalışmada model çekirdeğin özellikleri üzerinde çok-katlı yapılandırma etkisi araştırılmıştır. g (hava aralığı uzunluğu), levha genişliği w , üst üste binme uzunluğu a gibi geometrik değişkenlerin etkisi vurgulanmaktadır. Buna ilaveten tek-katlı yapılandırma için kayıplar üzerinde olumsuz etkiye sahip çok sayıda geometrik değişkenlerin var olduğu ve N basamak sayısındaki artışın, böyle değişkenlerin çekirdeğin manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini azalttığı gösterilmektedir (Löffler ve ark. 1995).

Transformatör çekirdekleri birleştirilirken hava aralıkları levha uçlarında doğal olarak 0–3 mm genişliğinde oluşmaktadır. Çekirdekler değişen genişlikteki paketleri içerdiğinden bu paketlerin değiştirilmiş hava aralığı bölgeleri levha düzlemine dik Φ_z akı bileşenlerine ve böylece aşırı girdap akımı kaybına neden olmaktadır. Löffler ve arkadaşlarının (1994) araştırmasındaki genel sonuçlar:

- 1) Kaydırılmış elektrik çeliklerinin birleşimindeki hava boşlukları, düzlemsel girdap akımları ve akı düzensizliklerine uygun iç levhalardaki akı bileşenlerine sebep olur,
- 2) Kayıp artışları bağıl bir en küçük değerden geçen değişim uzunluğuna bağlıdır,
- 3) En yüksek kayıp artışları 1 mm'ye ulaşan boşluk uzunluklarından meydana gelir,
- 4) Kayıp artışları, boşlukların hem ortalama uzunluğuna hem de bölgesel dağılımına bağlıdır,

şeklinde verilmiştir. (Löffler ve ark. 1994).

Transformatördeki güç kayıpları çeliğin kalitesini arttırarak veya daha iyi yapım teknikleri kullanılarak azaltılabilir. Grainleri yönlendirilmiş Si-Fe kullanımı transformatör verimliliğini arttırmada temel bir etkiye sahiptir, fakat tek olumsuz yönü gerilme duyarlılığına sahip olmasıdır. Bir transformatör çekirdeğinin verimliliği birleşme yerlerinin yapılandırılmasına bağlıdır. Bu bölgelerde akı, çeliğin dönme yönünden sapabilir ya da biçim değiştirebilir. Böylece yüksek kayıplı bölgeler oluşur. Önceleri, sadece toplam kayıplar incelendiğinden birleşme yerlerindeki akı dağılımı ve bölgesel kayıplar hakkında fazla bir bilgi elde edilememiştir. Jones ve Moses'ın (1974) çalışmasında, Gupta'nın 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimli bir transformatörün verimliliğinin uç uca ve üst üste gelen birleşimle yapılan benzer bir transformatörden % 7 daha fazla olduğunu ve Brechna'nın da farklı birleşme noktalarını karşılaştırdığı ve 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimin uç uca ve üst üste gelen birleşiminkiyle olandan % 8 - % 10 daha verimli olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte 90°'den farklı uç uca birleşimleri kullanan bir transformatörün ekonomik olup olmadığı konusunda şüphe olduğunu açıklamıştır. En basit köşe birleşme türü Şekil 2. 13a.'da ki uç uca ve üst üste gelen birleşimlerdir. Bu türde tabakalar çekirdek boyunca A ve B pozisyonları arasında birbirini izleyecek şekilde dizilirler. Şekil 2. 13b.'de gösterilen 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimle yapılan transformatörlerin verimliliğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.



Şekil 2. 13. (a) Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerleri (b) kısmen üst üste binen dizilimin şematik gösterimi (Jones ve Moses, 1974).

Büyük çekirdeklerde 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimin uç uca ve üst üste gelen birleşimle yapılandan daha verimli olduğu bilinmesine rağmen iki birleşme türünde akı dağılımının ve kaybının karşılaştırılması önceden yapılmamıştır. Jones ve Moses'ın (1974) araştırmasındaki deneysel sonuçlar kaybın ve akı dağılımının genel şeklini göstermekten başka aşağıdakileri de ortaya çıkarmaktadır;

1) Kısmen üst üste binen dizilimin, uç uca ve üst üste gelen birleşiminden 1.5 T ve 50 Hz'de mıknatıslandırılmış 15 cm'lik tabakalarda % 18 daha verimlidir.

2) En büyük bölgesel kayıp, uç uca ve üst üste gelen birleşim yerlerinde bulunan koldaki ortalama kayıptan % 26 ve 45° açılı kısmen üst üste binen dizilimde bulunan koldaki ortalama kayıptan da % 7 daha büyüktür.

3) Uç uca ve üst üste gelen birleşim yerlerinde daha yüksek olan bu kaybın nedeni doymuş maddenin ve dönen akının daha büyük değerde olmasıdır (Jones ve Moses 1974).

2. 5. 2. Manyetik Devreler ve Zıt Mıknatıslanma Alanı

Verilen bir \vec{H} manyetik alanında, manyetik bir maddenin varlığı, μ geçirgenliği nedeniyle \vec{B} manyetik indüksiyonunu etkiler. Manyetik devrelerdeki manyetik akıyı belirlemek için uygun bir kavram, elektriksel direncin manyetik benzeri olan R manyetik direncidir. Ayrıca manyetik madde sonlu bir uzunluğa sahipse, bu maddenin uç kısımları da manyetik kutupların oluşması uygulanan alanın zıttı bir manyetik alan doğurur. Bu zıt alan zıt mıknatıslanma alanı olarak adlandırılır ve şiddeti maddenin \vec{M} mıknatıslanmasına ve geometrisine bağlıdır.

\vec{M} mıknatıslanmasının \vec{H} manyetik alanının manyetik dipolmomentin varlığı nedeniyle sonlu boyutlarda mıknatıslanmış bir madde içinde zıt yönleri göstermekte olduğu için, madde içinde her ne zaman manyetik kutuplar oluşursa var olan \vec{H}_z zıt mıknatıslanma alanını tanımlamak mümkündür. Bu zıt mıknatıslanma alanı, uygulanan alan sıfıra düşürüldüğünde sonlu uzunluktaki örnekler üzerindeki histeresis ölçümlerinden bulunabilir. Fakat ölçülen alan artık (kalan) mıknatıslanma nedeniyle negatiftir. Zıt mıknatıslanma alanı sadece iki faktöre bağlıdır. Bunlar maddedeki mıknatıslanma ve örneğin şeklidir. Zıt mıknatıslanma alanı, mıknatıslanma ile orantılıdır,

$$\vec{H}_z = N_z \vec{M} \quad (2. 34)$$

şeklinde verilir. Burada N_z , örneğin geometrisinden hesaplanan zıt mıknatıslanma sabitidir. N_z için tam analitik çözümler sadece küre ve elipsoid gibi şekiller için elde edilebilir. Çizelge 2. 3.' te çeşitli geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri verilmiştir.

Çizelge 2. 3. Değişik basit geometriler için zıt mıknatıslanma sabitleri.

Geometri	N_z
Toroid	0
Uzun Silindir	0
Silindir $l/d = 20$	0.00617
Silindir $l/d = 10$	0.0172
Silindir $l/d = 8$	0.02
Silindir $l/d = 5$	0.040
Silindir $l/d = 1$	0.27
Küre	0.333

KAYNAK: Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, 1991, s.40.

Manyetik akı yolunun bir hava boşluğuyla kesildiği durumlar uygulamada önemlidir. Çünkü sabit mıknatıs, elektrik motorları, jeneratörler ve madde analizi gibi mühendislik uygulamalarında bu olayla karşılaşılır. Burada karşılaşılan problem tek bir maddede hesaplanan akıdan daha karmaşıktır. Bununla birlikte manyetik alan için manyetik akıyla ilgili denklemlerin genelleştirilmesiyle zıt mıknatıslanma fikri, çözümü sağlamak için uygulanabilir.

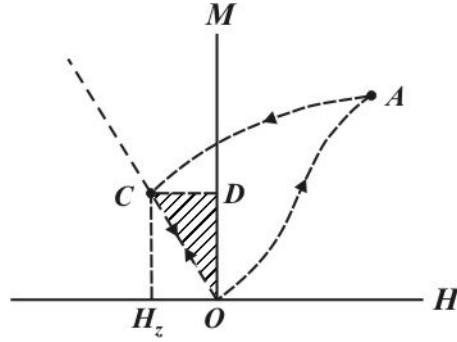
i akımı taşıyan N sarımlı demir bir halka ele alındığında (Şekil 2. 14a.), manyetik alan Ni/ℓ olacaktır. Burada ℓ , halkanın ortalama uzunluğudur. Akının, manyetik indüksiyon ve manyetik alan arasındaki ilişkiyi,

$$\Phi = B A = \mu H A = \mu \left(\frac{Ni}{\ell} \right) A = \frac{Ni}{(\ell/\mu A)} \quad (2.35)$$

şeklinde yazılır. Burada $\ell/\mu A$ terimi yolun manyetik direncidir. Bu, bir elektrik devresinde elektriksel direncin benzeridir yani; manyetik bir devrede seriler halinde manyetik dirençler toplanabilir. Şekil 2. 14b.'de gösterildiği gibi halkada hava aralığı sağlamak için bir yarı oluşturulur. Eğer hava aralığı küçükse aralıkta akı kaybı az

2. 5. 3. Şekil Anizotropisi

Tercihli kristal yönelimi olmayan polikristal yapıya sahip bir örnek, kristal anizotropiye sahip olmayacaktır. Eğer örnek küresel bir şekle sahipse, uygulanan alan onu herhangi bir yönde mıknatıslayacaktır. Bunun nedeni zıt mıknatıslanma alanının kısa eksen boyunca uzun eksen boyunca olanından daha güçlüdür. Kısa eksen boyunca uygulanan alan örneğin içinde aynı alanı üretmek için daha güçlü olmak zorundadır. Bu nedenle sadece şekil, manyetik anizotropinin kaynağı olabilir.



Şekil 2. 15. Manyetik alan olmadığında mıknatıslanmış bir cismin Manyetik durgun enerjisi (Cullity, 1972).

Şekil anizotropisini ele almak için sıfır manyetik alanda sürekli olarak mıknatıslanmış bir cismin E_{md} manyetik durgun enerjisine ihtiyaç vardır. Eğer bir cisim Şekil 2. 15.'te olduğu gibi A düzeyine kadar uygulanan bir alan tarafından mıknatıslanılırsa ve sonra uygulanan alan kaldırılırsa mıknatıslanma zıt mıknatıslanmanın etkisiyle C seviyesine düşecektir. Burada OC , $-1/N_z$ (N_z , zıt mıknatıslanma sabitidir) eğimli zıt mıknatıslanma alan çizgisidir. Örnek,

$W = \int_0^M H dM$ eşitliğine göre OCD taralı üçgeninin alanına eşit E_{md} enerjisini içerir.

Bu enerji örneğin zıt mıknatıslanma alanı ile ilgilidir ve manyetik durgun enerji, öz

enerji veya mıknatısın kendi alan enerjisidir. $W = \frac{H^2}{8\pi}$ eşitliğinden bu enerji,

$$E_{md} = \frac{1}{8\pi} \int H_z^2 dv \quad (2. 37)$$

şeklinde yazılabilir. Burada dv hacim elemanıdır ve tüm uzay üzerinden integral alınabilir. Uzayda H_z 'nin dağılımı nadiren tam olarak bilinebilir. Tam olarak bilinse bile integralin hesabı zordur. Şekil 2. 15.'te OCD üçgeninin alanını hesaplamak daha kolaydır.

$$E_{\text{md}} = \frac{1}{2} H_z M \quad (2.38)$$

Burada M , C noktasındaki mıknatıslanma seviyesidir. Bu enerji vektör formunda yazılabilir.

$$E_{\text{md}} = -\frac{1}{2} \vec{H}_z \cdot \vec{M} \quad (2.39)$$

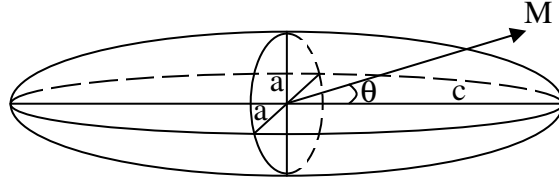
Çünkü \vec{H}_z , \vec{M} 'ye paralel değildir.

Diğer taraftan uygulanan H_u alanında bir mıknatısın birim hacimdeki potansiyel enerjisi,

$$E_p = -\vec{H}_u \cdot \vec{M} \quad (2.40)$$

şeklindedir. Bir mıknatısın kendi alanındaki ve uygulanan alandaki enerji ifadeleri $1/2$ çarpanı dışında benzerdir. $H_z = N_z M$ bağıntısını kullanarak Eşitlik (2.38) N_z cinsinden yazılabilir.

$$E_{\text{md}} = \frac{1}{2} N_z M^2 \quad (2.41)$$



Şekil 2. 16. Uzun eksenini c , kısa eksenini a olan elipsoid (Cullity, 1972).

Şekil anizotropisine tekrar dönek için, uzun eksenini c , kısa eksenini a olan elipsoid şeklindeki bir cismi ele alalım (Şekil 2. 16.). Bu cisim c eksenini ile θ açısı yapan M mıknatıslanmasına sahip olsun. M bileşenlerine ayrılırsa,

$$E_{\text{md}} = \frac{1}{2} \left[(M \cos \theta)^2 N_c + (M \sin \theta)^2 N_a \right] \quad (2. 42)$$

yazılabilir. Burada N_c ve N_a , c ve a eksenleri boyunca olan zıt mıknatıslanma sabitleridir. $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ yazılırsa,

$$E_{\text{md}} = \frac{1}{2} M^2 N_c + \frac{1}{2} (N_a - N_c) M^2 \sin^2 \theta \quad (2. 43)$$

olur. Örneğin uzun eksenini kristalin kolay mıknatıslanma eksenini ile aynıdır ve şekil-anizotropi sabiti K_s ,

$$K_s = \frac{1}{2} (N_a - N_c) M^2 \quad (2. 44)$$

ile verilir. Mıknatıslanma c eksenini boyunca kolaydır ve c eksenine dik bir eksen boyunca zordur. Eğer c , a 'ya eşit olacak şekilde büzülürse cisim küresel olur. Bu durumda $N_c = N_a$ olacağından $K_s = 0$ olur ve şekil anizotropisi kaybolur. Bir diskin mıknatıslanması kısa a eksenini boyunca zor ve a 'ya dik uzun eksen boyunca kolay olur. Şekil anizotropisinin şiddeti $(N_a - N_c)$ ile belirlenen örneğin c/a eksen oranına ve mıknatıslanma değerine bağlıdır. Bir kürenin zıt mıknatıslanma alanının ve zıt mıknatıslanma sabitinin bulunması EK-1'de verilmektedir (Cullity 1972).

2. 6. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ (FİNİTE ELEMENT METHOD, FEM)

2. 6. 1. Maxwell Denklemleri

2. 6. 1. 1. Genel Diferansiyel Şekli

Elektromanyetik analiz problemi, verilen sınır şartlarına bağlı Maxwell denklemlerinin bir çözümüdür. Genel olarak zaman değişkenli alanlar için diferansiyel formda Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{Faraday Yasası}) \quad (2. 45)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_a \quad (\text{Maxwell-Amper Yasası}) \quad (2. 46)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Gauss Yasası}) \quad (2. 47)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Gauss Yasası – Manyetik}) \quad (2. 48)$$

Burada \vec{E} elektrik alan şiddeti (V/m), \vec{D} elektrik akı yoğunluğu (C/m²), \vec{H} manyetik alan şiddeti (A/m), \vec{B} manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²), \vec{J}_a elektrik akım yoğunluğu (A/m²) ve ρ elektrik yük yoğunluğu (C/m³) olarak verilir. Diğer temel denklem, süreklilik denklemi olarak bilinir ve aşağıdaki gibidir;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_a = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2. 49)$$

2. 6. 1. 2. Elektro ve Manyetostatik Alanlar

Bir statik alan için alan büyüklükleri zamana bağlı değildir. Bu durumda Eşitlik (2. 45), (2. 46) ve (2. 49) aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (2. 50)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_a \quad (2. 51)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_a = 0 \quad (2. 52)$$

Oysaki Eşitlik (2. 47) ve (2. 48) aynı kalır.

2. 6. 1. 3. Yapısal Bağlıntılar

Maxwell denklemleri, alan büyüklükleri arasında yapısal bağlıntılar belirli olduğunda tanımlı olur. Yapısal bağlıntılar ele alınan ortamın makroskobik özelliklerini tanımlar. Herhangi bir ortam için;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2. 53)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2. 54)$$

$$\vec{J}_a = \sigma \vec{E} \quad (2. 55)$$

şeklindedir. Buradaki yapısal değişkenler ϵ , μ ve σ sırasıyla ortamın dielektrik geçirgenliğini (F/m), manyetik geçirgenliğini (H/m) ve iletkenliğini ($1/(\Omega \cdot m)$) gösterir. Bu değişkenler anizotropik ortam için tensör, izotropik ortam için skalerdir.

2. 6. 2. Vektör Potansiyel

Maxwell denklemlerini çözmek için, ilk olarak iki alan içeren birinci dereceden diferansiyel denklemler sadece bir alan içeren ikinci dereceden diferansiyel denklemlere çevrilmelidir.

2. 6. 2. 1. Manyetostatik Alan için Vektör Potansiyel

Manyetostatik alan (2. 48) ve (2. 51) denklemleriyle bilinir. Eşitlik (2. 48)'deki manyetik akı yoğunluğu (\vec{B}) aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (2. 56)$$

Burada \vec{A} vektör potansiyelidir. Eşitlik (2. 54)'ün yardımıyla Eşitlik (2. 56)'yı (2. 51)'de yerine koyarak, ikinci dereceden diferansiyel denkleme ulaşılır.

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_a \quad (2. 57)$$

Bununla birlikte \vec{A} tek başına tayin edilemez. Çünkü \vec{A} Eşitlik (2. 57)'nin çözümü ise f biçimine bakılmaksızın $\vec{A}' = \vec{A} + \nabla f$ şeklinde yazılabilen herhangi bir fonksiyonunun da bir çözümüdür. Böylece \vec{A} 'yı tek başına tayin etmek için \vec{A} 'nın diverjansına bir şart konulmalıdır. Böyle bir şart ayar şartı olarak bilinir. Bu şart için doğal bir seçim,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (2. 58)$$

şeklinindedir. Yukarıdaki tartışmalar statik duruma çok uygundur (Jin 1993).

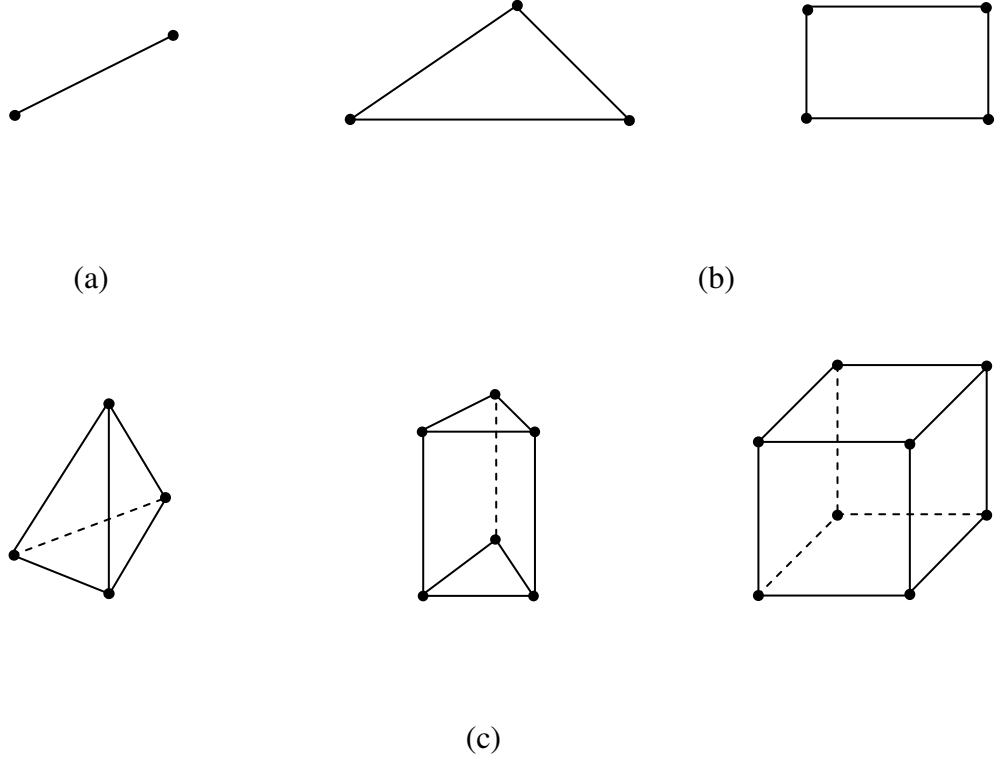
2. 6. 3. Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar diye adlandırılan küçük alanlar (üç-boyutlu durumlarda hacimler) içerisinde ilgilenilen bölgelerin alt bölümlerini içerir. Bölge boyunca manyetik potansiyelin uzaysal değişimi Maxwell denklemlerinden türetilen doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlanır. Bu denklemler genellikle akı yoğunluğu gibi alan büyüklüklerinin belirlenmesini kolaylaştıran A vektör potansiyeli cinsinden yazılırlar. Bundan dolayı denklemler A cinsinden elemanlara ayrıldıktan sonra çözülür ve son işlemde akı yoğunluğu gibi diğer büyüklükler A'nın düğüm noktası değerinden hesaplanır.

Sonlu elemanlar yöntemi çözümleri, analitik yöntemlerin ötesinde problemlerin geniş bir alanı için elde edilebilir. Düzgünlük, doğrusallık ve durağan koşulların kısıtlanması gibi analitik yöntemlerin zorlaştığı sınırlamaların üstesinden gelebilir (Moses ve ark. 2003).

Matematiksel fiziğin sınır-değer problemleri pratik olarak her mühendislik uygulamasında ortaya çıkar. Farklı yaklaşımlar da mevcuttur. Örnek olarak yapısal analiz, ısı transferi, akışkan akı, elektromanyetik alanlar verilebilir. Bunlar tüm pratik model problemlerinde oldukça büyük ilgi çekmektedir. (Chari ve Silvester 1984).

Bölgenin ayrımı, sonlu eleman çözümlenmesinde ilk ve belki de en önemli basamaktır. Çünkü bölgeyi ayırma yolu bilgisayarın bellek gereksinimini, hesaplama zamanını ve sayısal sonuçların doğruluğunu etkileyecektir. Tüm bölge, alt bölgeler olarak belirtilen çok sayıda küçük bölgelere bölünür. Bu alt bölgeler genellikle elemanlar olarak belirtilir. Gerçekte düz veya eğri bir çizgi olan bir- boyutlu bir bölge için elemanlar orijinal çizgiyi oluşturmak için iç içe bağlanmış kısa çizgiler halindeki parçalardır (Şekil 2. 17a.). İki-boyutlu bir bölge için, elemanlar genellikle küçük üçgen ve dikdörtgendirler (Şekil 2. 17b.). Tabi ki dikdörtgen elemanlar, dikdörtgen bölgeleri ayırmak için en uygundur. Üçgen olanlar da düzensiz bölgeler için kullanılabilirler. Üç-boyutlu bir çözümde ise; bölge tetrahedral, üçgen prizma veya dikdörtgenler prizmasına bölünebilir (Şekil 2. 17c.). Bunlar arasında tetrahedral olanlar en basit olanlarıdır ve keyfi hacim bölgelerine en iyi şekilde uyarlar (Jin 1993).



Şekil 2. 17. Temel sonlu elemanlar. (a) Bir-boyutlu. (b) İki-boyutlu. (c) Üç-boyutlu (Jin, 1993).

2. 6. 4. İki-Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu Elemanlar yöntemi iki-boyutlu problemler için çok iyi geliştirilmekte ve birçok bilim dalında ve mühendislik alanlarında, elektromanyetikte önemli bir rol oynamaktadır.

2. 6. 4. 1. Sınır-Değer Problemi

Ele alınan sınır-değer problemi, ikinci-mertebeden diferansiyel denklem kullanılarak tanımlanır.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \beta \phi = f \quad (x, y) \in \Omega \quad (2.59)$$

Burada ϕ bilinmeyen fonksiyondur, α_x, α_y ve β bölgenin fiziksel özellikleriyle ilgili değişkenler olarak bilinir ve f kaynak veya uyarma fonksiyonudur. Bilinen iki-boyutlu Laplace denklemi, Poisson denklemi ve Helmholtz denklemi, Eşitlik (2. 59)'un özel şeklidir.

Ele alınan sınır şartları aşağıdaki gibi verilir,

$$\phi = p \quad (\Gamma_1 \text{ üzerine}) \quad (2. 60)$$

$$\left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{x} + \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{y} \right) \cdot \hat{n} + \gamma \phi = q \quad (\Gamma_2 \text{ üzerine}) \quad (2. 61)$$

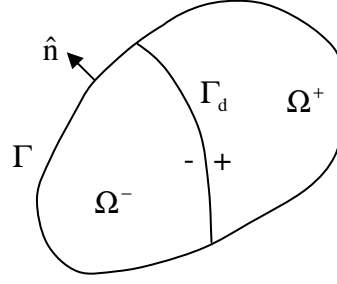
Burada $\Gamma (= \Gamma_1 + \Gamma_2)$, Ω kapalı alan sınırı veya çevrelemesini gösterir, \hat{n} onun dış normal birim vektörüdür ve γ , p ve q sınırın fiziksel özellikleriyle ilgili değişkenleri olarak bilinir. Özellikle p ve q sınır kaynağı veya sınır uyarması olarak da düşünülebilir. Açıkça, Neumann sınır şartı $\gamma=0$ alınan Eşitlik (2. 61)'in özel bir durumudur.

α_x ve α_y ile tanımlanan bölgenin özellikleri süreksiz veya kesikli değişmelere sahipse ve ayrıca süreksiz ara yüzeyinde herhangi bir türde yüzey kaynağı mevcut değilse süreklilik koşullarını ϕ sağlar.

$$\phi^+ = \phi^- \quad (\Gamma_d \text{ üzerine}) \quad (2. 62)$$

$$\left(\alpha_x^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial x} \hat{x} + \alpha_y^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial y} \hat{y} \right) \cdot \hat{n} = \left(\alpha_x^- \frac{\partial \phi^-}{\partial x} \hat{x} + \alpha_y^- \frac{\partial \phi^-}{\partial y} \hat{y} \right) \cdot \hat{n} \quad (\Gamma_d \text{ üzerine}) \quad (2. 63)$$

Burada Γ_d süreksiz ara yüzeyleri gösterir (Şekil 2. 18.). “+” ya da “-” üste yazılanlar onun (Γ_d) ilgili büyüklüklerinin “+” ya da “-” tarafında olduğunu gösterir ve \hat{n} , Γ_d 'ye normal birim vektörü gösterir.



Şekil 2. 18. Süreksiz bir ara yüzeye sahip bölge Γ_d kullanılarak gösterilir (Jin, 1993).

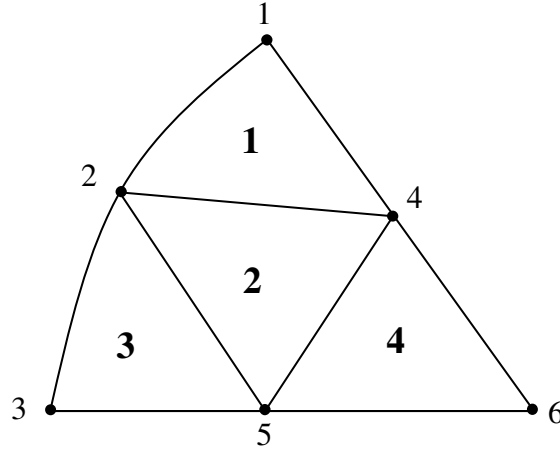
2. 6. 4. 2. Sonlu Eleman Analizi

Bu kısımda, Eşitlik (2. 59)'da tanımlanan sınır-değer probleminin çözümünü matematiksel bir bağıntıyla verebilmek için sonlu eleman yönteminin temel adımları ele alınmaktadır. Burada basitlik için doğrusal üç açılı elemanlar kullanılmıştır.

2. 6. 4. 2. 1. Bölge Ayrımı

Sonlu elemanlar analizinin ilk adımı, Ω alan bölgesini, burada üçgen elemanlar olarak sözü edilen birçok iki-boyutlu elemanlara bölmektir. Alt bölge oluşturulurken elemanlar arasında boşluğun olmaması ve elemanların üst üste gelmemesi gerekir. Ayrıca elemanlar kendilerine dik konumdaki elemanlarla bağlantılı olmalıdırlar veya başka bir deyişle bir elemanın tepesi sadece onun komşu elemanlarına dik olmalıdır. Bu temel zorunluluklara ilaveten iyi bir alt bölgelere ayırma aynı zamanda birbirini takip eden iki noktayı adreslemelidir. İlk önce dar elemanların ya da küçük bir iç açığa sahip elemanların oluşturulmasından kaçınılmalıdır. Bu elemanlar kabul edilmesine rağmen çözüm hatalarını arttırabilir. Sonlu elemanlar çözümünün hatası en küçük iç açının sinüsüyle ters orantılıdır. Bu yüzden tüm elemanlar eş kenarlı olmalıdır. İkinci olarak, daha küçük elemanların daha iyi sayısal çözüm anlamına geldiğine dikkat edilmelidir. Daha küçük elemanlar daha fazla bilinmeyenle ve buda artan hafıza isteği ve hesaplama zamanı ile sonuçlanacağından, arzu edilen doğruluk için eleman sayısını en azda tutmak gereklidir. İyi bir uygulamada küçük elemanlar kullanılmalıdır.

Her bir elemanı tanımlamak için elemanlar tamsayılarla etiketlenebilir ve benzer şekilde elemanlara dik olan düğüm noktalarını tanımlamak için de başka tamsayılarla etiketleme yapılabilir. Bu üç düğüm noktası durumunda, her bir eleman birkaç düğüm noktasıyla birleştirildiğinden, bir nokta bütün sistemdeki konumuna ilaveten ilgili elemandaki kendi konumuna sahiptir. Bu konum tam sayılarla etiketlenebilir. Tüm sistemdeki konumunu gösteren genel sayıların aksine bölgesel sayılardan oluşan bir tam sayıyla da etiketlenebilir. Genel düğüm sayısı, bölgesel düğüm sayısı ve eleman sayısı olmak üzere bu üç sayıyı ilişkilendirmek için, toplam eleman sayısını gösteren M ile $i = 1, 2, 3$ ve $e = 1, 2, 3, \dots, M$ olduğu $n(i,e)$ ile temsil edilen bir $3 \times M$ tamsayı dizini tanımlarız. Bağlantı düzeni olarak ta adlandırılan $n(i,e)$ de, i bir düğüm noktasının bölge numarası, e eleman sayısı ve $n(i,e)$ değeri bir düğüm noktasının genel sayısıdır. Açık bir şekilde bu tamsayı düzeni, elemanlar ve düğüm noktalarının numaralandırılmasıyla ilgili tüm bilgiyi içerir.



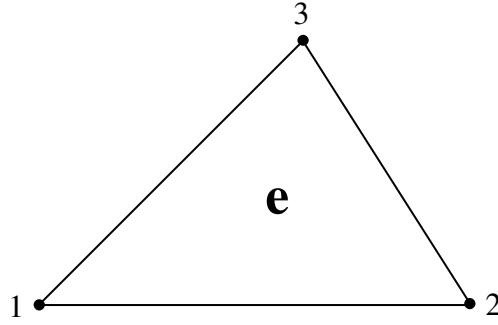
Şekil 2. 19. İki-boyutlu bir bölgenin alt bölmesi (Jin, 1993).

Bunu daha açık göstermek için Şekil 2. 19.'da verilen örneği ele alalım. Bu örnekte 4 eleman ve 6 düğüm noktası vardır. $n(i,e)$ düzeni aşağıdaki gibi numaralandırılabilir,

e	n(1,e)	n(2,e)	n(3,e)
1	2	4	1
2	5	4	2
3	3	5	2
4	5	6	4

(2. 64)

Açıkça, bu numaralandırma işlemi tek değildir. Örneğin ilk eleman için aynı zamanda Şekil 2. 20'de gösterilen bölgesel numaralandırma ile uyum içinde olması için saat yönünün tersine numaralandırılarak 4, 1, 2 veya 1, 2, 4 gibi üç düğüm noktası numarasını alabilir. Daha önce tanımlanan bağlantı düzenine ilaveten, Eşitlik (2. 61) sınır koşulunun kapsamını kolaylaştırmak için kullanılacak ortak düğüm noktaları ile Γ_2 'ye uygun olan parçaları bağlayan benzer bir düzenlemeyi tanımlamalıyız. Ayrıca Eşitlik (2. 60) Dirichlet sınır şartı kullanmak için Γ_1 'e karşılık gelen genel düğüm noktası sayısını içeren bir vektöre ihtiyaç duyulacaktır.



Şekil 2. 20. Doğrusal üçgen (üç açılı) eleman (Jin, 1993).

Sonlu elemanlar formülasyonunda gerekli olan bazı diğer veriler:

1. x_i ve y_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), düğüm noktaları koordinatlarını sağlar. Burada N düğüm noktalarının toplam sayısını gösterir.
2. Her bir eleman için $\alpha_x, \alpha_y, \beta$ ve f' 'nin değerleri.
3. Γ_1 ' de düğüm noktaları için p değeri.
4. Γ_2 ' ye rast gelen her bir bölge için γ ve q değerleri.

2. 6. 4. 2. 2. Temel Interpolasyon

Bölge alt bölümlere ayrıldığında her bir eleman için bilinmeyen ϕ fonksiyonun tahmin edilmesi gerekir ve bu analizin ikinci adımıdır. Doğrusal üçgen (üç açılı)

elemanlar kullanılırsa her bir eleman için bilinmeyen ϕ fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\phi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (2.65)$$

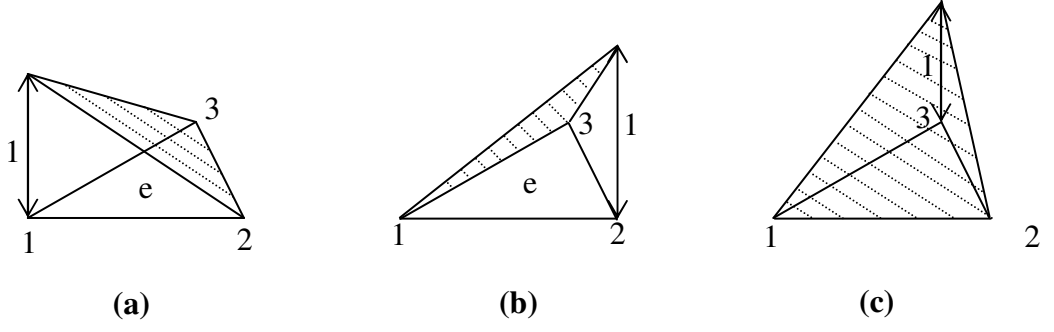
Burada a^e , b^e ve c^e belirlenecek olan sabit katsayılarıdır ve e eleman sayısıdır. Doğrusal bir üçgen eleman Şekil 2. 20.'deki üçgenin köşelerine yerleştirilmiş üç düğüm noktası vardır. Düğüm noktalarının sırasıyla ϕ_1^e , ϕ_2^e ve ϕ_3^e ile gösterilen ϕ 'ye karşılık gelen değerlerle 1, 2, 3 sayıları kullanılarak düğüm sayılarının saat yönünün tersiyle numaralandırılır. a^e , b^e ve c^e sabit katsayılarını ϕ_j^e cinsinden elde ederek ve Eşitlik (2.65)'de yerine koyarak,

$$\phi^e(x, y) = \sum_{j=1}^3 N_j^e(x, y) \phi_j^e \quad (2.66)$$

bulunur. Burada $N_j^e(x, y)$ interpolasyondur veya Eşitlik (2.67) ile verilen genişleme fonksiyonudur.

$$N_j^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta^e} (a_j^e + b_j^e x + c_j^e y) \quad j=1,2,3 \quad (2.67)$$

$N_j^e(x, y)$ 'nin başka önemli özelliği, gözlenen (x, y) noktası j . düğüm noktasının karşı kenarındaki eleman üzerinde olduğunda, sıfır olmasıdır. Bu yüzden bir elemanın kenarında ϕ^e 'nin değeri karşı düğüm noktasında ϕ 'nin değeriyle ilişkili değildir ama ortak kenarın iki uç noktadaki değerler tarafından belirlenir. Bu önemli özellik elemanın kenarları boyunca çözümün sürekliliğini garanti eder. Şekil 2. 21.'de bir üçgen eleman için N_j^e interpolasyon fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 2. 21. Bir üçgenin doğrusal interpolasyon fonksiyonları (a) N_1^e (b) N_2^e (c) N_3^e .
Fonksiyonların düzlemsel yüzeyleri karartılıdır (Jin, 1993).

Eşitlik (2. 66)'da verilen ϕ , Ritz ya da Galerkin yöntemi kullanılarak denklem sisteminin formülasyonu ilerletilebilir (Jin 1993).

2. 6. 5. İki-Boyutlu Statik Manyetik Analiz

Bir statik manyetik analiz, aşağıdaki yollardan biriyle üretilen manyetik alanları hesaplar:

- Kalıcı mıknatıslanma
- DC elektrik akımının sabit akışı
- Uygulanan bir gerilim
- Hareketli bir iletken
- Uygulanan bir dış alan

Statik manyetik analiz girdap akımları gibi zamana bağlı etkileri dikkate almaz. Bir statik manyetik analizde kalıcı mıknatıslanmada olduğu kadar hem doyuma gidebilen hem de doyuma gidemeyen manyetik maddeleri benzeştirebiliriz. Bir statik manyetik analizde iki-boyutlu model için vektör potansiyel formülü kullanılır.

2. 6. 5. 1. İki-Boyutlu Statik Manyetik Analizde Kullanılan Elemanlar

İki-boyutlu bir modelde geometri yapısını oluşturabilmek için iki-boyutlu elemanlar kullanılır. Tüm cisimler ve yapılar üç-boyutlu olmasına rağmen geometri düzlemsel veya eksen-simetrik modele karşılık geldiğinde, analiz için iki-boyutlu model düşünülmelidir. Çünkü iki-boyutlu modelin oluşturulması daha kolaydır ve çözüm için daha az zaman gerekir.

2. 6. 5. 2. Statik Manyetik Analizin Adımları

Beş ana adımdan oluşan bir statik manyetik analiz yapmak için süreç aşağıdaki gibidir:

- Fiziksel çevreyi oluşturmak
- Modeli yapmak, ağ oluşturmak ve modeldeki her bir bölgenin fiziksel niteliklerini atamak
- Sınır şartlarını ve yüklemeleri uygulamak
- Çözümleri oluşturmak
- Sonuçları yeniden incelenmek

2. 6. 5. 2. 1. Fiziksel Çevreyi Oluşturmak

Bir çözümleme için fiziksel çevreyi tanımlamada fiziksel problemin matematiksel benzetişim modeli kurulur. Bu aşamada analiz başlığı, eleman tipleri ve seçenekleri, eleman koordinat sistemi, gerçek sabitler, birim sistemi ve madde özellikleri (elektrik çeliği, bobin ve hava gibi) tanımlanır.

2. 6. 5. 2. 2. Modeli Yapmak, Ağ Oluşturmak ve Modeldeki Her Bir Bölgenin Fiziksel Niteliklerini Atamak

Model yapıldıktan sonra daha önce tanımlanan eleman tipleri ve seçenekleri, eleman koordinat sistemi, gerçek sabitler ve madde özellikleri her bir bölge için ayrı ayrı atanır. Daha sonra tüm model için ağ oluşturulur.

2. 6. 5. 2. 3. Sınır Şartlarını ve Yüklemeleri Uygulamak

İki-boyutlu statik manyetik analizle hem katı model (anahtar noktalar, çizgiler ve alanlar) hem de sonlu elemanlar modelinde (düğüm noktaları ve elemanlar) sınır şartları ve yüklemeler uygulanır. Kullanılan ticari ANSYS programı çözüm boyunca ağ oluşturulan katı modelde uygulanan yüklemeleri otomatik olarak aktarır. İki-boyutlu statik analiz için aşağıdaki sınır şartları ve yüklemeler seçilmektedir:

- Sınır şartları: Vektör potansiyel, paralel akı ve dik akı
- Uyarılma Yüklemeleri: Akım yoğunluğu ve gerilim düşmesi
- İşaret (Flag): Kuvvet ve sonsuz yüzeyler
- Diğerleri: Akım dilimleri, Maxwell yüzeyleri ve gerçek yer değiştirmelerdir.

2. 6. 5. 2. 4. Çözümleri Oluşturmak

Bu kısımda iki-boyutlu statik manyetik analiz, problemi çözmek için yapmanız gereken işlemleri tanımlar. Program çalıştırılarak fiziksel nitelikleri atanmış bölgelerdeki çözümü yapar.

2. 6. 5. 2. 5. Sonuçların Yeniden İncelenmesi

Elde edilen sonuçlar incelenerek deneysel değerlere uygunluğu karşılaştırılır ve gerekiyorsa yeniden hesaplama yapılır (Anonim 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3. 1. ÇEKİRDEKTE MANYETİK BÜYÜKLÜKLERİN HESAPLANMASI

Basit bir mıknatıslanma devresinde, direnç üzerindeki gerilim yardımıyla çekirdeğe verilen akım (i) ve buradan manyetik alan şiddeti (H), Faraday yasasına göre algılayıcı bobininde indüklenen gerilim yardımıyla da manyetik akı yoğunluğu (B) hesaplanmaktadır.

Çekirdek içinde dolaşan manyetik akı yoğunluğu zamana bağlı bir sinüs fonksiyonu ise,

$$B(t) = \sum_{n=1} a_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Herhangi bir $t = t'$ anında B'nin tepe değeri,

$$B(t') = B_m = \sum_{n=1} a_n \sin(n\omega t' + \varphi_n) \quad (3.2)$$

şeklini alır. Yarım periyot sonra ($t = \frac{\pi}{\omega} = \frac{1}{2f}$)

$$B(t' + \frac{\pi}{\omega}) = \sum_{n=1} a_n \sin(n\pi + n\omega t' + \varphi_n) \quad (3.3)$$

olur. n' nin tek sayı olması durumunda,

$$B(t' + \frac{\pi}{\omega}) = -B(t') \quad (3.4)$$

olmaktadır. Böylece Eşitlik (3. 1) ana frekansın yarım periyotlarında negatif ve pozitif en büyük değerleri almaktadır. Ayrıca Faraday yasasına göre,

$$V(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -Y_A \frac{dB}{dt} \quad (\Phi = B \cdot Y_A) \quad (3.5)$$

olduğundan, Eşitlik (3. 1)'in zamana göre türevi,

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1} a_n n \omega \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.6)$$

olmaktadır ve $t = t' + \frac{n\pi}{\omega}$ 'da Eşitlik (3. 6)'nın değeri sıfır olur. Böylece $\frac{dB}{dt}$ 'nin ana frekansın yarım periyodu üzerinden ortalama değeri alınırsa,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{ort}} = \frac{\omega}{\pi} \int_{t'}^{t'+\frac{\pi}{\omega}} \sum_{n=1} a_n n \omega \cos(n\omega t + \varphi_n) dt \quad (3.7)$$

elde edilir ve bu integralin sonucu,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{ort}} = \frac{\omega}{\pi} \sum_{n=1} a_n [\sin(n\omega t' + \varphi_n) - \sin(n\pi + n\omega t' + \varphi_n)] \quad (3.8)$$

olmaktadır. Buradan,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{ort}} = \frac{2\omega}{\pi} \sum_{n=1} a_n \sin(n\omega t' + \varphi_n) \quad (3.9)$$

şeklini alır. Eşitlik (3. 1), Eşitlik (3. 9)'da yerine konduğunda,

$$B_m = \frac{\pi}{2\omega} \left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{ort}} \quad (3.10)$$

elde edilir. Algılayıcı bobininde indüklenen gerilim $\left[V = -N Y_A \left(\frac{dB}{dt} \right) \right]$ ve açısal frekans ($\omega = 2\pi f$) ifadeleri Eşitlik (3. 10)'da yerine konulursa,

$$B_m = \frac{V_{ort}}{4 N_2 Y_A f} \quad (3. 11)$$

şeklini alır. $V_{ort} = \frac{2}{\pi} V_p$ ve $V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$ (V_p , tepe değer olmak üzere) ifadeleri

Eşitlik (3. 11)'de yerine konursa,

$$B_m = \frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A f} \quad (3. 12)$$

olur. Burada V_{rms} , algılayıcı bobininden indüklenen gerilimin rms değeri ve N_2 ise algılayıcı bobininin sarım sayısıdır (Beckley 2000). Eşitlik (3. 11) ve (3. 12), çıkış sinyalinin dalga şekli sinüs olduğunda geçerlidir. Eğer sinyalde bir bozulma meydana gelirse, sinyalin harmonikleri oluşmaya başlar. Bu durumda Eşitlik (3. 11) ve (3. 12) kullanıldığında ölçüm hatası artar.

Amper yasasına göre kapalı bir yol boyunca N sarımdan geçen akım,

$$Ni = \oint \vec{H} d\vec{\ell} \quad (3. 13)$$

şeklinde verilmektedir. Akım sinüs eğrisi şeklinde ise,

$$i(t) = i_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3. 14)$$

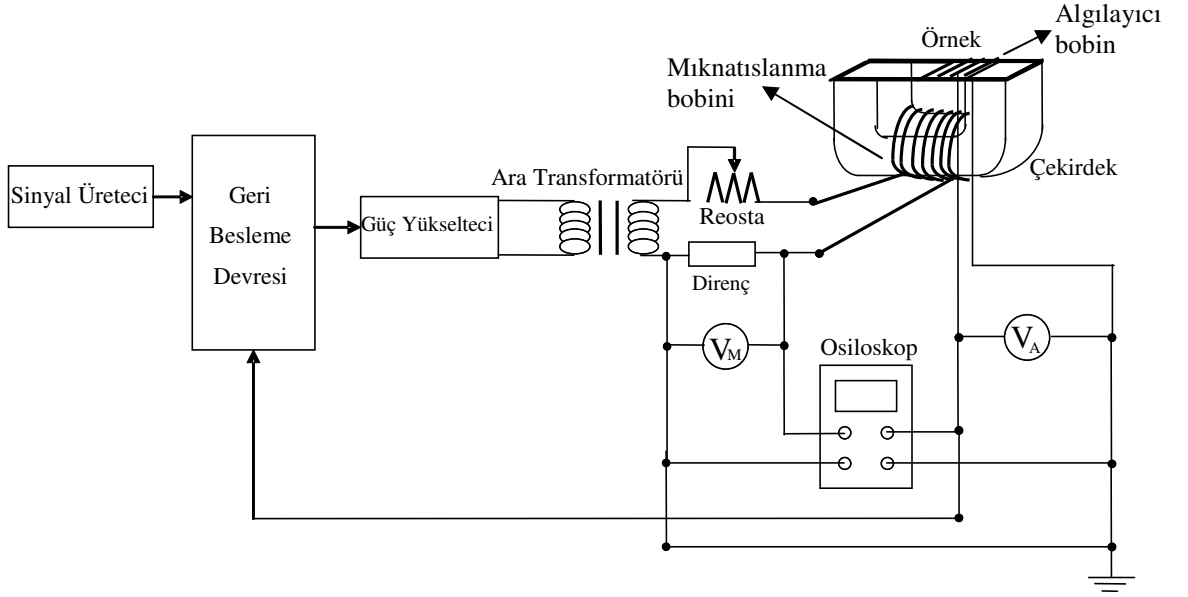
şeklinindedir. Manyetik alan kapalı yol boyunca düzgün ise H integral dışına alınabilir.

$$N i_m = H_m \ell_{ort} \quad (3. 15)$$

$$H_m = \frac{N_1 i_m}{\ell_{ort}} \quad (3. 16)$$

Burada H_m çekirdeğin oluşturduğu manyetik alan şiddetinin en büyük değeri (A/m), N_1 mıknatıslanma bobininin sarım sayısı, i_m akımının en büyük değeri (A) ve ℓ_{ort} çekirdek üzerinde akımın aldığı ortalama yoldur (m) (Küçük 2003).

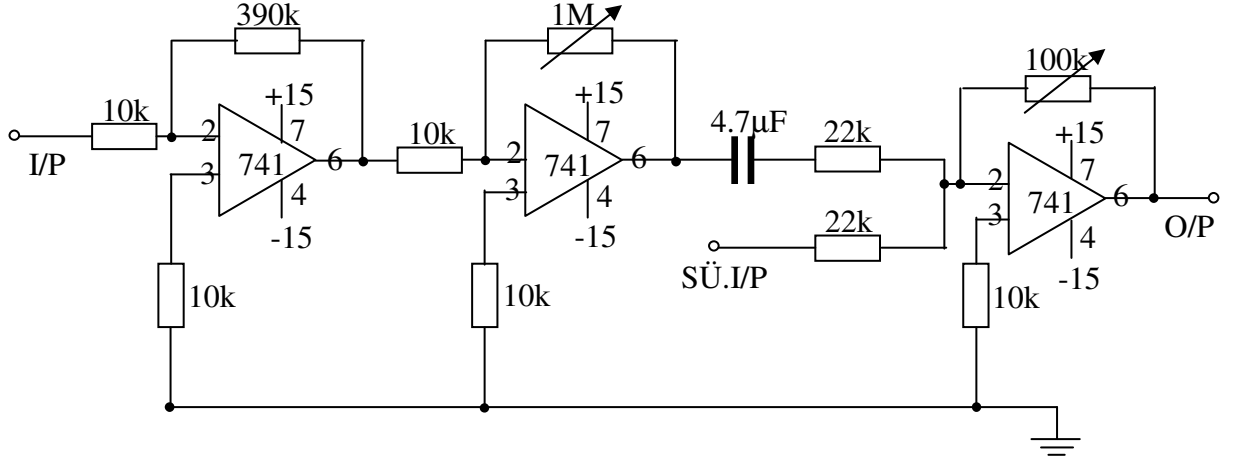
3. 2. ÖLÇME DEVRESİ



Şekil 3. 1. Ölçme devre şeması.

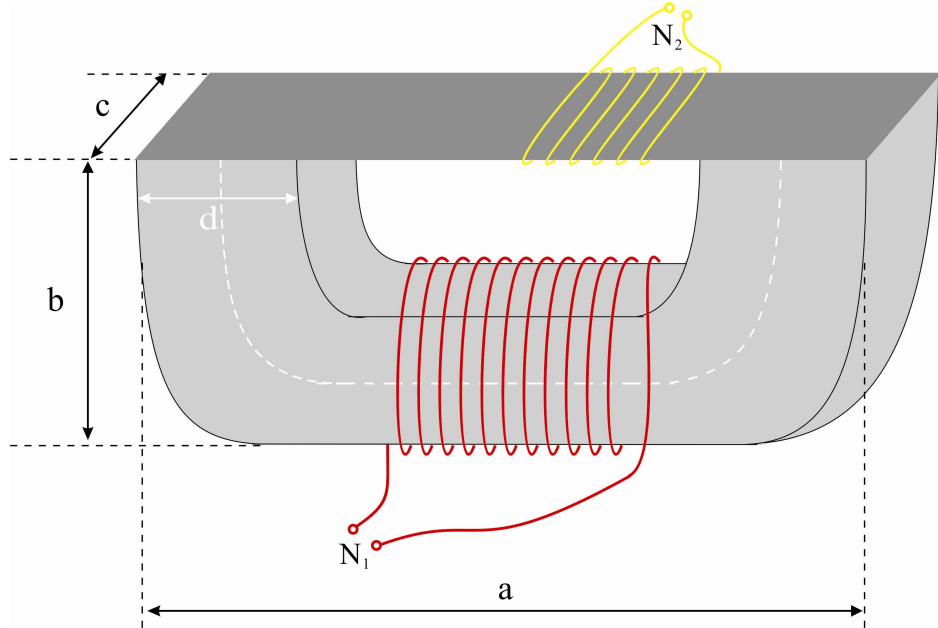
Şekil 3. 1.'deki ölçme devre şemasında mıknatıslanma bobininde akımı oluşturmak için Agilent 33250A marka sinyal üretici kullanılmıştır. Mıknatıslanma gerilimi (V_M , $(0.51 \pm 0.01)\Omega$ ve 50 W değerindeki direnç üzerinden) ve algılayıcı bobinde indüklenen gerilim (V_A), Thurlby 1503 ve Keithley 2400 marka voltmetreler ile ölçülmüştür. Direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ve algılayıcı bobinden indüklenen gerilim (V_A) aynı zamanda Tektronix TAS 475 marka osiloskopta görüntülenerek, dalga şekilleri gözlenmiştir. Yüksek indüksiyon değerlerinde harmonikler oluşup dalga şekillerini bozduğu için ölçüler alınırken dalga şekillerinin sinüs olmasına dikkat edilmiştir. Bu harmonik bileşenler ölçme hatasına sebep olduğu için, sinyal üreticiden gönderilen sinyal ile algılayıcı bobinden alınan çıkış sinyali ölçme devresine ilave edilen geri besleme devresine (Şekil 3. 2.) gönderilir. Geri besleme devresi, bu iki

sinyali toplar ve sonuçta bozulmaları en aza indirir. Ölçme devresinde bulunan ara transformatör (200 W değerinde), güç yükseltici ile mıknatıslanma devresi arasındaki empedansı dengeler ve güç yükselticiden gelebilecek DC gerilimini engeller (Derebaşı 1994).



Şekil 3. 2. Geri besleme devre şeması (Derebaşı, 1994).

Ölçme devresindeki U-şekilli çekirdek, yönlendirilmiş elektrik çeliği (M4) levhalarının sıkıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Çekirdeğin şekli Şekil 3. 3.'te verilmiştir. Burada $a = 254$ mm, $b = 89$ mm ve $c = d = 49$ mm'dir. N_1 mıknatıslanma bobininin (178 sarım) N_2 ise algılayıcı bobinlerin sarım sayısıdır. Çekirdeğin üzerindeki kesikli beyaz çizgilerin uzunluğu ortalama akı yolunun uzunluğunu verir ($\ell_{ort} = 312$ mm).



Şekil 3. 3. Çekirdeğin şekli ve boyutları.

Tüm cihazlar, gürültü ve okuma hatalarını engellemek üzere birbirlerine yakın olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca kayıpları engellemek için kısa ve bükülmüş bağlantı kabloları kullanılmıştır (Derebaşı ve ark. 2000).

3. 2. 1. Ölçme Devresinin Çalışma Özellikleri

Şekil 3. 1.'deki ölçme devresinde, sinyal üreticiden gönderilen sinyal ile algılayıcı bobinden alınan çıkış sinyali Şekil 3. 2.'deki geri besleme devresine gönderilir. Geri besleme devresi bu iki sinyali toplar ve bozulmaları giderir. Bu sinyal, güç yükseltecinde yükseltilerek ara transformatörün 1. sargısını besler. Ara transformatörün 2. sargısından Faraday yasası ile indüklenen gerilim, çekirdeğin mıknatıslanma bobinini enerjilemektedir.

Çekirdeğin mıknatıslanma bobininin oluşturduğu manyetik alan Eşitlik (3. 16) ile hesaplanır. Direnç üzerinde düşen gerilimden (V_M) yararlanılarak mıknatıslanma devresinin akım şiddeti bulunur. Örneklerin üzerine sarılmış algılayıcı bobinden ayrı ayrı indüklenen gerilimler (V_A) ölçülür. Eşitlik (3. 12) kullanılarak algılayıcı bobinlerin oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu değerleri tek tek hesaplanır. Ölçülen gerilimler aynı zamanda osiloskopta görüntülenerek, indüklenen gerilimlerin dalga şekilleri gözlemlenir. Ölçüler alınırken bu dalga şekillerinin sinüs olmasına dikkat edilmiştir.

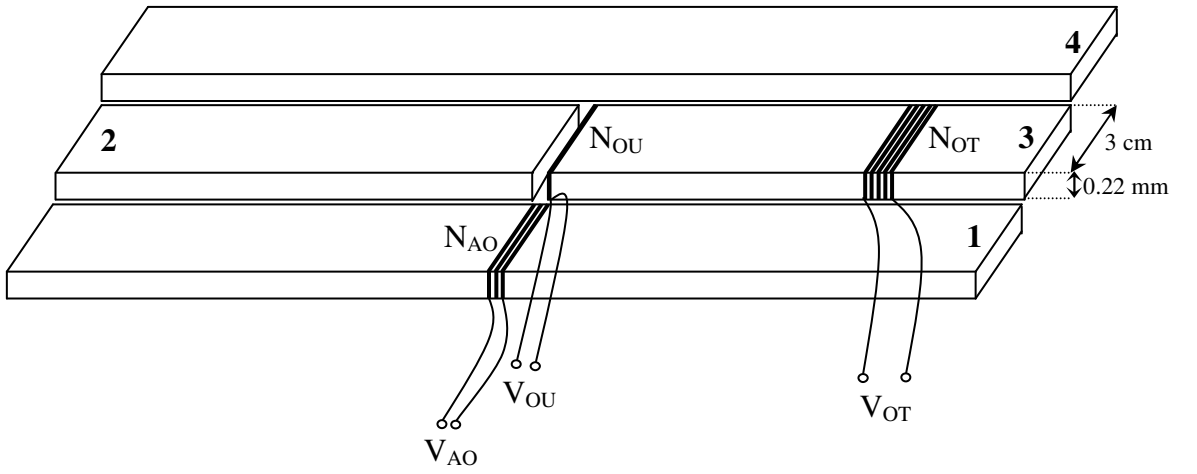
3. 2. 2. Ölçme Devre Şemasında Çekirdek Üzerinde Kullanılan Örnekler

Tezdeki amaç, transformatör çekirdeklerinde kullanılan üst üste dizilmiş elektrik çelikleri ve amorf şeritlerde birleşim yerlerindeki hava aralığının düzenlenişine bağlı olarak levhalar arasındaki manyetik akı geçişlerinin incelenmesidir. Bu nedenle aşağıda belirtilen dört adet örnek üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

3. 2. 2. 1. Örnek-1'in Özellikleri

Örnek-1 için kullanılan levhalar % 3 SiFe yönlendirilmiş elektrik çeliklerinden (M4) oluşturulmuştur. Şekil 3. 1.'deki ölçme devre şemasında, U-şekilli çekirdeğin

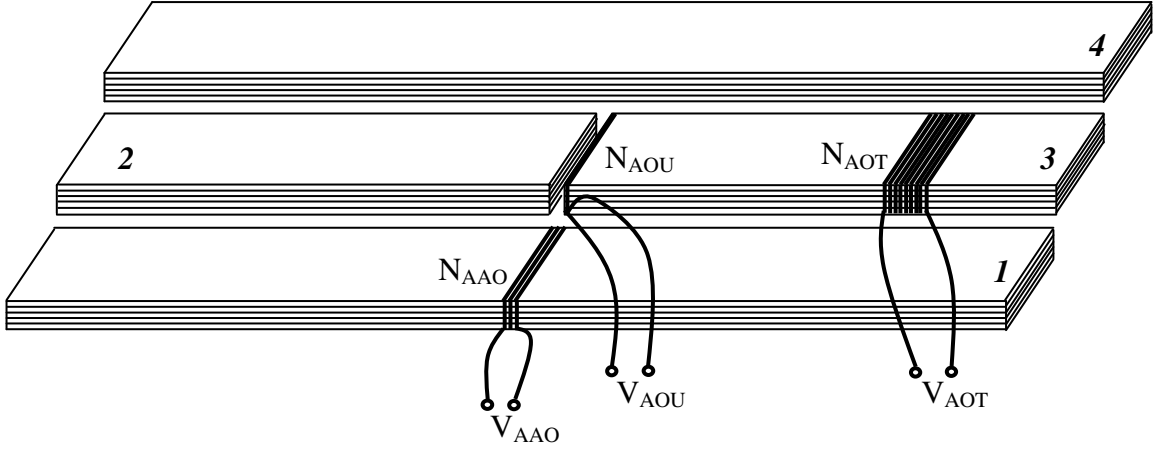
üstündeki örnek-1, dört adet (üç kat) elektrik çeliğinden (M4) oluşur. 3 nolu elektrik çeliğinin sol uç kısmında tek bir sarım vardır ve bu sarım 2 nolu elektrik çeliğine bakan yan yüzeyi çevreler ($N_{OU} = 1$). N_{OT} bobini 100 sarımlı olarak 3 nolu elektrik çeliğini sarar ($N_{OT} = 100$). Ayrıca 1 nolu elektrik çeliğinin tam ortasında (2 ve 3 nolu elektrik çeliklerinin karşılaştıkları bölgeye denk gelen yerde) 10 sarımlı bobin bulunur ($N_{AO} = 10$). Bu sarımlar için 0.11 mm kalınlığında emaye kaplı bakır teller kullanılmıştır. Bu dört elektrik çeliği Şekil 3. 4.'te olduğu gibi düzenlenir ve birbirine sabitlenerek kaymaları önlenir.



Şekil 3. 4. Hazırlanan deneysel örnek-1.

3. 2. 2. 2. Örnek-2'nin Özellikleri

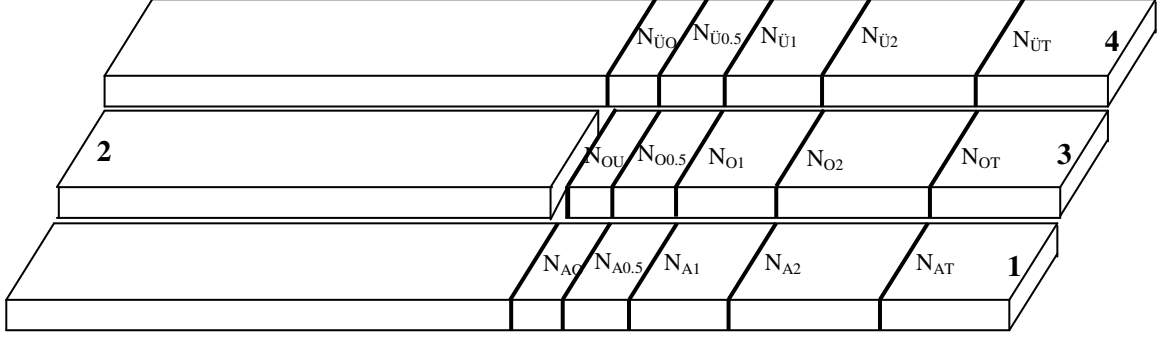
Örnek-2 için kullanılan levhalar Metglas-2605SC ($Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$) amorf şeritlerden oluşturulmuştur. Örnek-2 için kullanılan amorf şeritlerin boyutları 25.130 mm genişliğinde ve 0.028 mm kalınlığındadır. Amorf şeritlerin kalınlığı mikrometre büyüklüğünde olduğundan beş kat birleştirilerek standartlara uygun olarak kalınlık 0.140 mm yapılmıştır. Şekil 3. 1.'deki ölçme devre şemasında, U-şekilli çekirdeğin üstündeki örnek-2 dört adet (beşer katlı) amorf şeritten oluşur. Örnek-2'de, sarım yerleri ve sayıları örnek-1'de olduğu gibi aynen uygulanmıştır. Buna göre; $N_{AOU} = 1$, $N_{AOT} = 100$ ve $N_{AAO} = 10$ sarımlıdır (Şekil 3. 5.).



Şekil 3. 5. Hazırlanan deneysel örnek-2.

3. 2. 2. 3. Örnek-3'ün Özellikleri

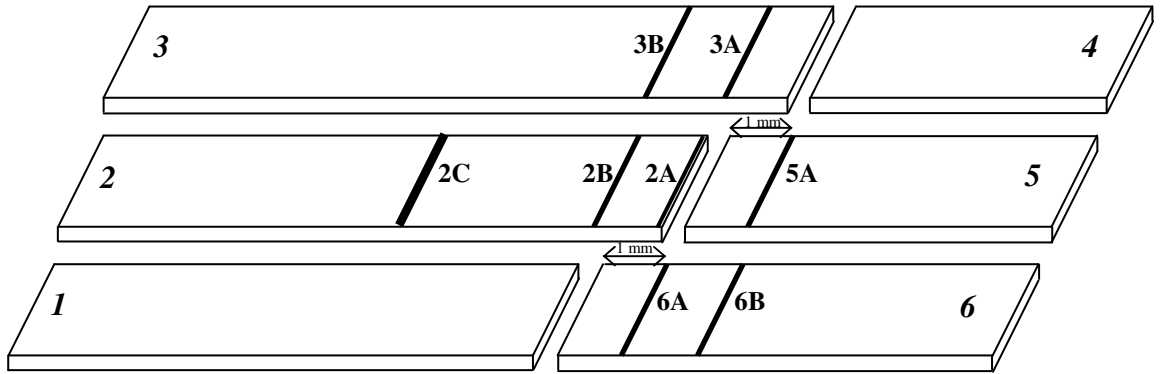
Örnek-3'ü oluşturmak için kullanılan levhalar % 3 SiFe yönlendirilmiş elektrik çeliklerinden (M4) oluşturulmuştur. Şekil 3. 1.'de bulunan U-şekilli çekirdeğin üstündeki örnek-3 yine dört adet (üç kat) elektrik çeliğinden (M4) oluşmaktadır. 3 nolu elektrik çeliğinin hava aralığına bakan ucunda beş sarım vardır ($N_{OU} = 5$). N_{OU} sarımlarından 0.5 cm ileride $N_{O0.5}$, $N_{O0.5}$ sarımlarından 1 cm ileride N_{O1} ve N_{O1} sarımlarından 2 cm ileride N_{O2} sarımları da 5 sarımlı olarak 3 nolu elektrik çeliğine sarılmıştır. N_{OT} bobini de 100 sarımlı olarak 3 nolu elektrik çeliğinde bulunur. 1 ve 4 nolu elektrik çeliğinin tam ortasında 10 sarımlı N_{AO} ve $N_{ÜO}$ bobinleri bulunur. 3 nolu elektrik çeliğindeki $N_{O0.5}$, N_{O1} , N_{O2} ve N_{OT} bobinlerinin alt hizasındaki 1 nolu elektrik çeliğinde $N_{A0.5}$, N_{A1} , N_{A2} ve N_{AT} bobinleri, üst hizasındaki 4 nolu elektrik çeliğinde ise $N_{Ü0.5}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü2}$ ve $N_{ÜT}$ bobinleri vardır ve bu bobinlerin hepsi 10 sarımlı olacak şekilde test örneklerine sarılmıştır. Bu dört elektrik çeliği Şekil 3. 6.'daki gibi düzenlenmiştir ve birbiriyle sabitlenerek titreşimleri ve kaymaları önlenmiştir.



Şekil 3. 6. Hazırlanan deneysel örnek-3.

3. 2. 2. 4. Örnek-4'ün Özellikleri

Örnek-4 için kullanılan levhalar da % 3 SiFe yönlendirilmiş elektrik çeliklerinden (M4) oluşturulmuştur. Her bir elektrik çeliği arasında 1 mm aralıklarla 3 hava boşluğu bırakılmıştır. En alttaki hava aralığının manyetik akı üzerindeki etkisini gözlemlemek için 2B ($N_{2B} = 5$) ve 3B ($N_{3B} = 10$) bobinleri, ortadaki hava aralığının etkisini gözlemlemek için 3A ($N_{3A} = 5$) ve 6A ($N_{6A} = 5$) bobinleri ve en üstteki hava aralığının etkisini incelemek için de 5A ($N_{5A} = 5$) ve 6B ($N_{6B} = 10$) bobinleri elektrik çeliklerine sarılmıştır. Ayrıca 2 nolu elektrik çeliğinin sağ uç kısmından geçen manyetik akıyı gözlemlemek için 2A ($N_{2A} = 5$) bobini sarılmıştır. Son olarak başlangıç manyetik akı yoğunluğunu ayarlamak için 2C bobini 20 sarımlı olarak 2 nolu elektrik çeliğine sarılmıştır. Bu elektrik çelikleri Şekil 3. 7.'de olduğu gibi düzenlenip fiziksel olarak kaymaları önlenmiştir.

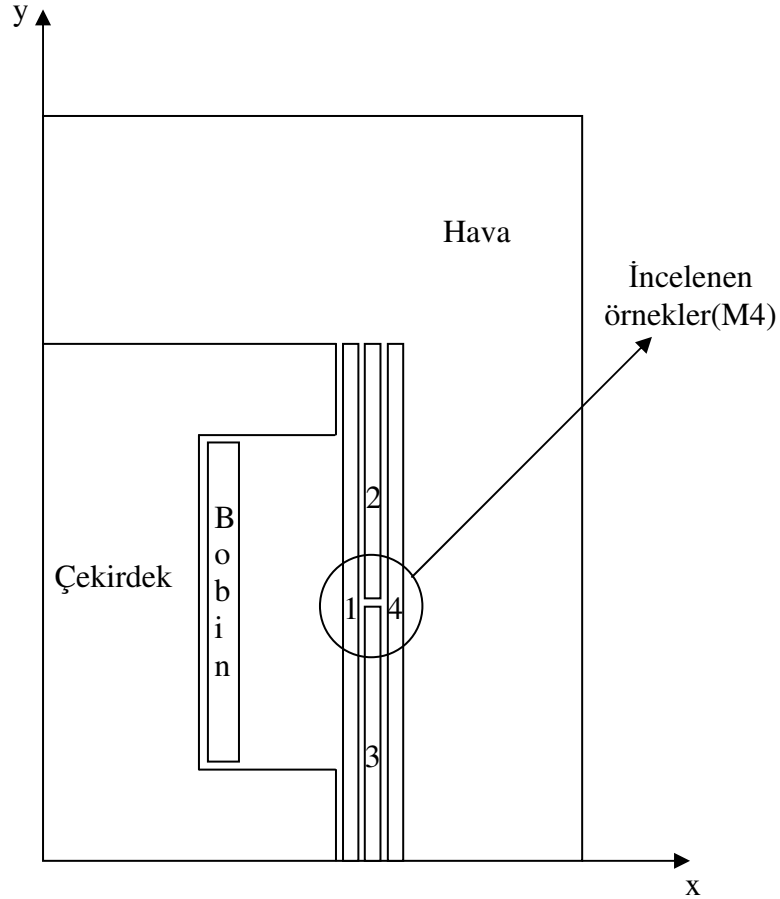


Şekil 3. 7. Hazırlanan deneysel örnek-4.

3. 2. 3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Deneysel Sistemin Modellenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method, FEM) kullanılarak örnek-1, 2 ve 4 için toplam manyetik akı yoğunluğunun değişimi, ticari ANSYS benzeşim programı (Bakınız Ek-3) kullanılarak yapılmıştır. ANSYS benzeşim programında deneysel sistemin modellenmesi elektrik çeliğinin haddeleme yönündeki izotropisinden oluşan simetri nedeniyle ve hesaplama zamanını azaltmak amacıyla 2-boyutlu yapılmıştır. Modeldeki uzunluklar, deneysel modele uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Modelde eksen simetrisi kullanılmıştır.

3. 2. 3. 1. Örnek-1'in Modellenmesi



Şekil 3. 8. Örnek-1'in sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellenmesi ve sınır koşulları.

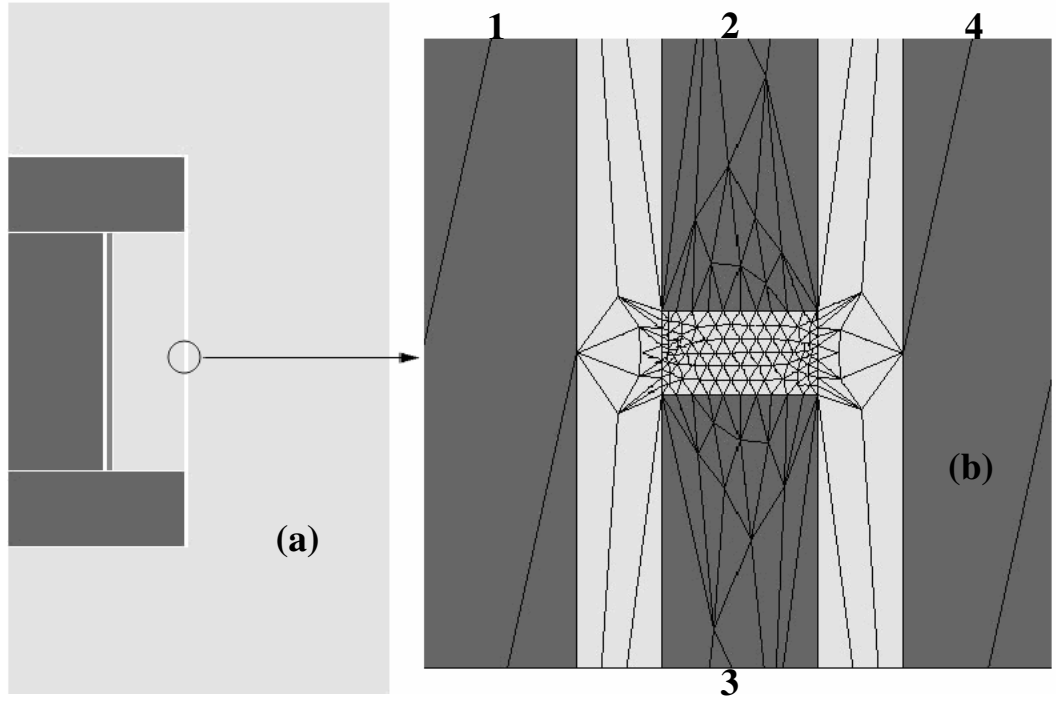
Şekil 3. 1.'deki ölçme devre şemasında yer alan U-şekilli çekirdek ile üzerinde bulunan örnek-1'in modellenmesi Şekil 3. 8.'de verilmiştir (Çekirdeğin boyutlarına Şekil 3. 3.'den bakınız). ANSYS benzeşim programı kullanılarak 2-boyutlu statik manyetik çözümleme (Bakınız Ek-2) için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1) Şekil 3. 8.'deki modelde her bir bölgenin uzunlukları girilerek modelin çizimi yapılmıştır.

2) Modelde bulunan her bir maddenin (elektrik çeliği, bobin ve hava gibi) manyetik özellikleri atanmıştır. Hava ve bobin için manyetik geçirgenlik doğrusal olduğundan sabit değer girilirken, elektrik çeliği doğrusal olmadığı için 50, 100, 200 ve 400 Hz frekans değerleri için uygun B-H değerleri (Derebasi ve ark. 2000) girilmiştir. Daha sonra modelde her bir bölgenin ataması yapılmıştır.

3) Modele uygun eleman tipi belirlenerek, (Her bir elemanın özellikleri "ANSYS HELP" kısmında (Bakınız Ek-3) incelenebilir) seçenekler işaretlenir. Manyetik vektör seçimi ve elemanın eksen simetrik olması bu aşamada belirtilmiştir.

4) Çözümleme için modelde ağ oluşturulmuştur. Modele en uygun ağ oluşumu için çok sayıda tekrar yapılmıştır. İlk olarak 2 ve 3 nolu elektrik çelikleri arasında farklı bir ortam vardır. Bu ortamın (hava) manyetik geçirgenliği düşük ve manyetik direnci büyük olduğu için 3 nolu elektrik çeliğinden gelen akı 2 nolu elektrik çeliğine tümüyle geçemeyip yüzey alanının daha geniş olması nedeniyle aşağı ve yukarıya doğru olan 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerine geçmektedir. Bu değişimi daha iyi gözlemleyebilmek için hava aralığı etrafında çok küçük ağ oluşturma tercih edilmiştir. Fakat elektrik çeliğinin hava aralığına uzak olan kısımlarında, bobinde, çekirdekte ve dış havada oluşturulan ağ sırasıyla küçükten büyüğe doğru artırılmıştır. Böylece hesaplama zamanı kısaltılmaktadır. Ayrıca çok sayıda ağ oluşturmakla bulunan doğruluğa, daha az sayıda ağ oluşturmakla da elde edilebilir. Modelde, serbest üçgen ağ çok küçük bölgelere ayırdığı için tercih edilmiştir. Bu modelin, en çok eleman sayısı 6592 ve düğüm noktası sayısı 13233 olarak elde edilmiştir (Marmin ve ark. 1998). ANSYS benzeşim programında oluşturulan model ve Şekil 3. 8.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ Şekil 3. 9.'da gösterilmektedir.

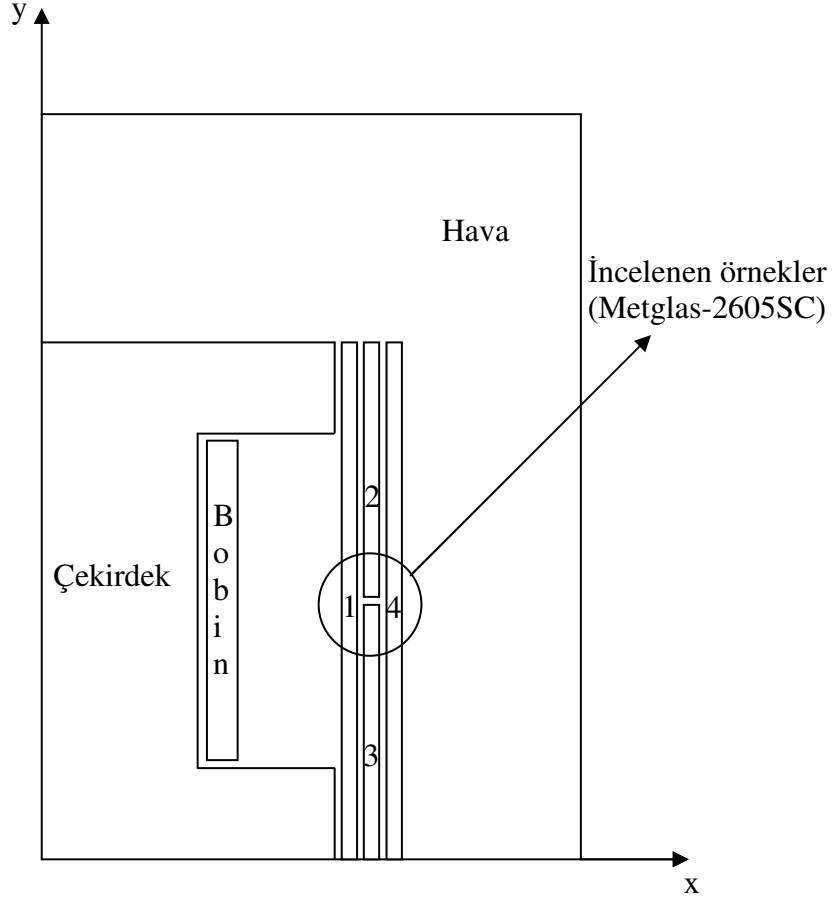


Şekil 3. 9. Örnek-1 için ANSYS benzeşim programında oluşturulan model (a) ve Şekil 3. 8.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ (b).

5) Modeldeki sınır şartı, paralel akının geçtiği alan çözümlerini oluşturmak için dış çerçeveye uygulandı. Bu sınır şartı, çerçevenin dışında akı kaybı olmadığını varsaymaktadır. Yükleme içinde 178 sarımlı bobine deneysel değere uygun akım yoğunluğu değerleri girilmiştir.

6) ANSYS benzeşim programı çalıştırılarak fiziksel nitelikleri atanmış bölgelerdeki çözüm yapılmıştır.

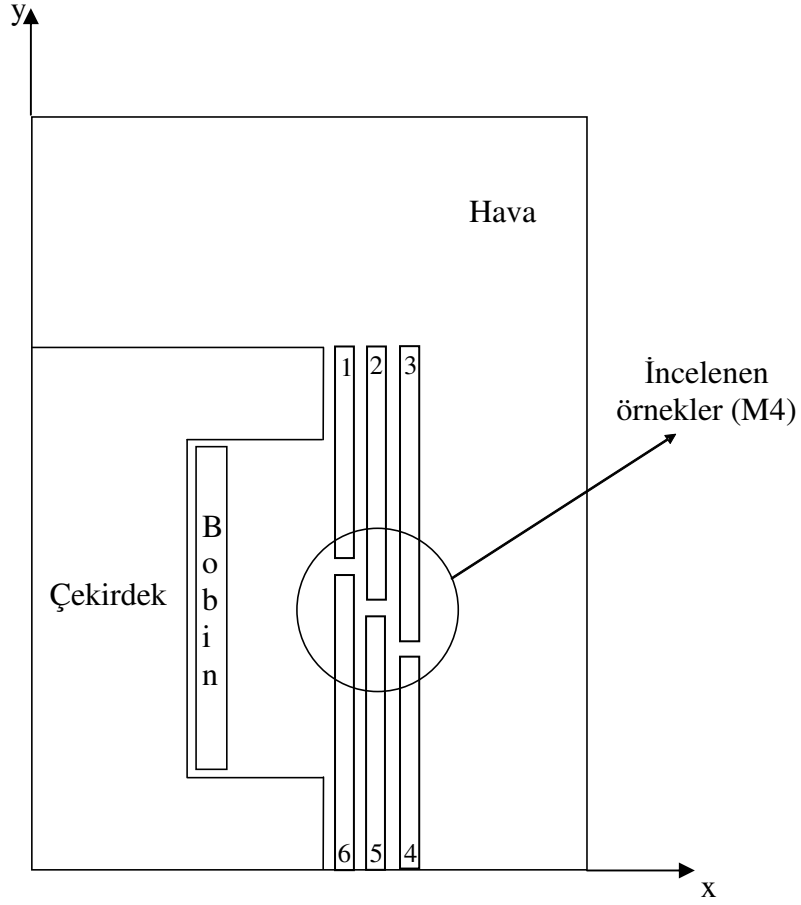
3. 2. 3. 2. Örnek-2'nin Modellenmesi



Şekil 3. 10. Örnek-2'nin sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi ve sınır koşulları.

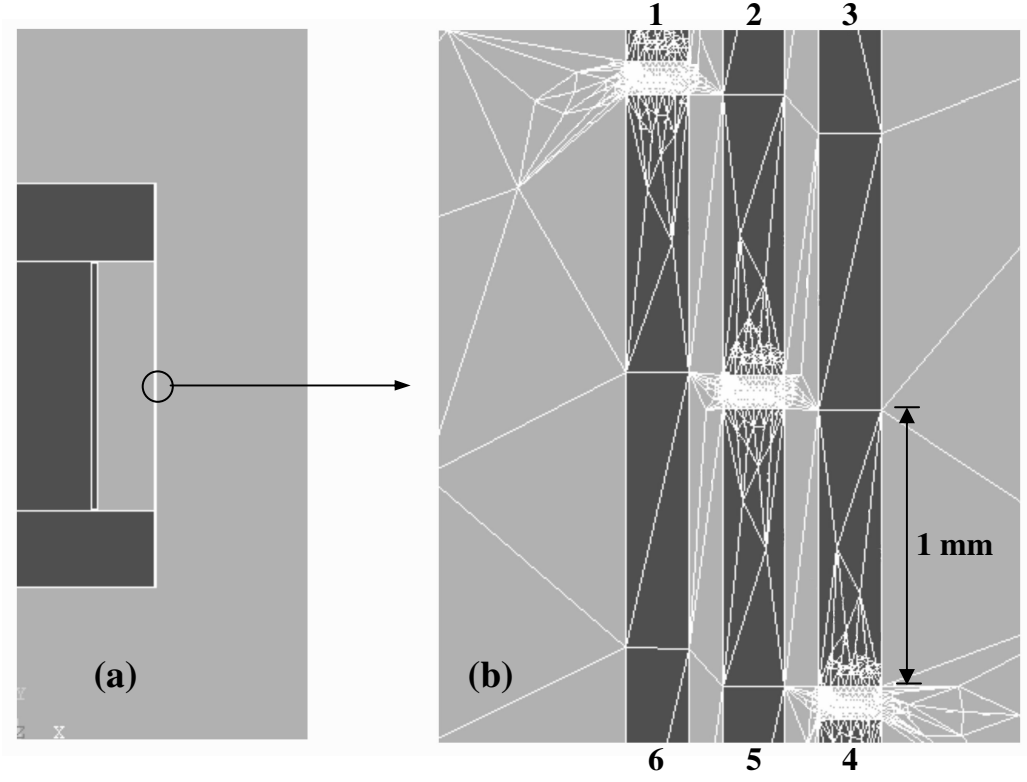
Örnek-1'e benzer şekilde örnek-2'nin modellenmesi de Şekil 3. 10.'da gösterilmektedir. ANSYS benzeşim programı kullanılarak 2-boyutlu statik manyetik çözümleme için örnek-1'deki benzer adımlar izlenmiştir. Farklı olarak U-şekilli çekirdek üzerine elektrik çeliği yerine amorf şeritler yerleştirildiğinden, modelde örnek-2 için amorf şeritlerde manyetik özellik olarak 50, 100, 200 ve 400 Hz frekans değerleri için Çizelge 4. 5.'de verilen B-H değerleri girilmiştir. Modelin, en çok eleman sayısı 6644 ve düğüm noktası sayısı 13337 olarak elde edilmiştir. ANSYS benzeşim programı başlatılarak fiziksel nitelikleri önceden belirtilmiş bölgelerdeki çözüm sağlanmıştır.

3. 2. 3. 3. Örnek-4'ün Modellenmesi



Şekil 3. 11. Örnek-4'ün sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi ve sınır koşulları.

U-şekilli çekirdek ve üzerindeki örnek-4'ün modellemesi Şekil 3. 11.'de gösterilmektedir. ANSYS benzeşim programı kullanılarak 2-boyutlu statik manyetik çözümleme için örnek-1'deki benzer adımlar uygulanmıştır. Farklı olarak U-şekilli çekirdek üzerine 4 yerine 6 adet elektrik çeliği yerleştirilmiştir. Modelde 6 adet elektrik çeliği arasında kalan 3 hava boşluğu için çok küçük ağ oluşturulmuştur. ANSYS benzeşim programında oluşturulan model ve Şekil 3. 11.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ Şekil 3. 12.'de verilmiştir. Modelin en çok eleman sayısı 7186 ve düğüm noktası sayısı 14421 olarak elde edilmiştir ve ANSYS programı kullanılarak çözüm yapılmıştır.



Şekil 3. 12. Örnek-4 için ANSYS benzeşim programında oluşturulan model (a) ve Şekil 3. 11.'de daire içinde kalan kısımda oluşturulan ağ (b).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Elektrik çelikleri ve amorf şeritlerden oluşturulan transformatör çekirdeklerindeki levhaların birleşim yerlerinde hava aralıkları meydana gelir. Hava aralıklarının düzenlenişine bağlı olarak levhalar arasında manyetik akı geçişleri olur ve hava aralıkları manyetik devrenin direncini arttırdığı için manyetik kayıplara yol açar. Bu manyetik kayıplar, hava aralıklarının bölgesel dağılımıyla değişmektedir.

Üst üste dizilmiş levhalar arasında bir hava boşluğu bırakılarak elektrik çeliği ve amorf şeritten iki ayrı örnek hazırlanmıştır. Bu örneklerde oluşturulan manyetik akı dağılımı incelenmiştir. Ayrıca elektrik çelikleri ile z-şekilli hava aralıklarına sahip bir çekirdek oluşturularak, hava aralıklarındaki bölgesel akı dağılımı incelenmiştir.

4. 1. ÖRNEK-1'İN ÖLÇME SONUÇLARI

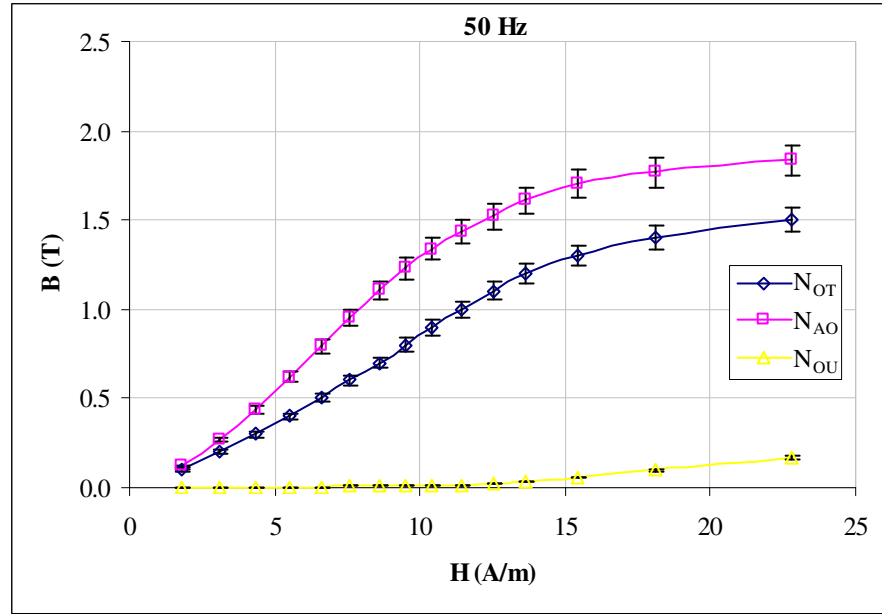
Şekil 3. 4.'teki örnek-1, Şekil 3. 1.'deki ölçme devresinde bulunan U-şeklindeki çekirdek (178 sarımlı bobinden oluşur) üzerine yerleştirilmiştir. Böylece çekirdek içerisinden geçen manyetik akı, örnek-1'den geçerek manyetik devreyi tamamlamaktadır. N_{OT} üzerinde indüklenen V_{OT} gerilimi ölçülerek B_{OT} (Manyetik akı yoğunluğu) değeri hesaplanmıştır. Aynı şekilde sırasıyla N_{AO} ve N_{OU} üzerinde indüklenen V_{AO} ve V_{OU} gerilimleri ölçülerek B_{AO} ve B_{OU} değerleri hesaplanmıştır. Miknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile algılayıcı bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler Çizelge 4. 1.'de verilmektedir. Çizelge 4. 1.'de verilen değerler kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri Çizelge 4. 2.'de verilmektedir. Ayrıca N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri 50, 100, 200 ve 400 Hz için sırasıyla Şekil 4. 1., Şekil 4. 2., Şekil 4. 3. ve Şekil 4. 4.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4. 1. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-1).

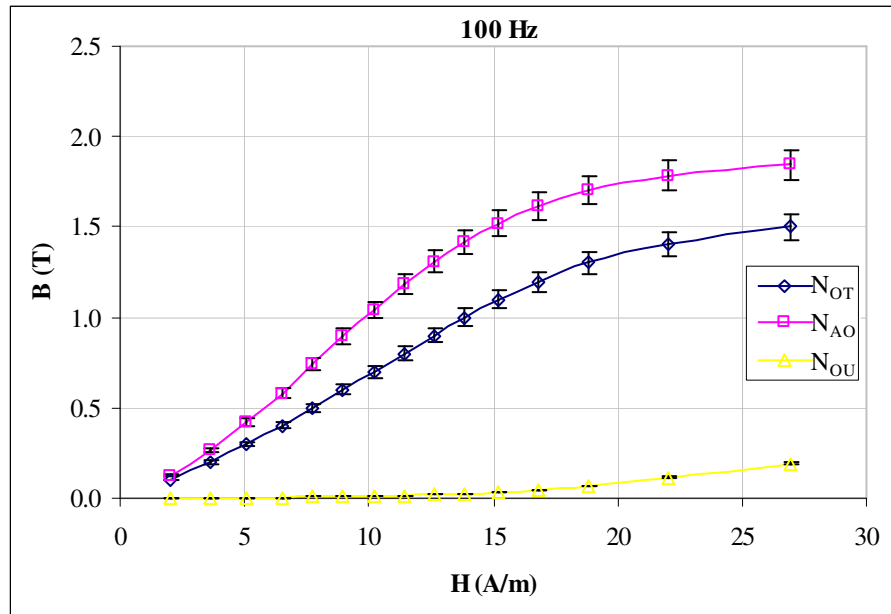
V_M (mV)	V_{OT} (mV)	V_{AO} (mV)	V_{OU} (mV)	V_M (mV)	V_{OT} (mV)	V_{AO} (mV)	V_{OU} (mV)
50 Hz				200 Hz			
1.6	14.5	1.8	0.002	2.3	58.6	7.5	0.007
2.8	29.5	4.0	0.003	4.2	117.4	15.7	0.019
3.9	43.9	6.4	0.004	6.0	175.5	24.2	0.036
4.9	58.7	9.1	0.005	7.7	234.4	33.0	0.057
5.9	73.3	11.6	0.007	9.3	293.3	41.9	0.079
6.8	87.9	14.0	0.009	10.9	351.6	50.7	0.101
7.7	102.6	16.2	0.010	12.4	410.3	59.4	0.125
8.5	117.2	18.0	0.015	13.9	468.6	67.8	0.151
9.3	131.6	19.6	0.017	15.4	527.6	75.4	0.179
10.2	146.3	21.0	0.022	16.9	585.7	82.4	0.210
11.2	161.3	22.3	0.033	18.3	644.1	88.7	0.248
12.2	175.8	23.6	0.045	20.0	703.4	94.7	0.310
13.8	190.5	24.9	0.080	22.1	762.6	100.0	0.433
16.2	205.0	25.9	0.141	25.2	820.8	104.5	0.691
20.4	219.8	26.9	0.248	30.1	880.5	108.2	1.126
100 Hz				400 Hz			
1.8	29.3	3.6	0.002	3.2	117.0	15.5	0.030
3.2	58.8	7.8	0.004	6.1	234.3	31.7	0.086
4.5	88.1	12.3	0.008	8.6	351.0	48.1	0.144
5.8	117.3	16.9	0.013	11.0	469.3	65.0	0.203
6.9	146.5	21.6	0.019	13.2	586.4	81.7	0.261
8.0	175.7	26.2	0.027	15.3	702.6	98.3	0.316
9.1	204.9	30.5	0.036	17.4	820.3	115.0	0.374
10.2	234.3	34.6	0.046	19.4	937.0	130.9	0.430
11.3	263.8	38.3	0.058	21.3	1054.7	146.0	0.491
12.4	292.8	41.5	0.073	23.3	1172.5	160.3	0.553
13.6	322.4	44.5	0.095	25.2	1289.8	173.7	0.625
15.0	351.4	47.3	0.128	27.2	1407.6	186.7	0.719
16.8	380.9	49.9	0.200	29.6	1523.0	199.0	0.912
19.7	410.6	52.2	0.340	33.1	1642	209.1	1.401
24.1	439.8	54.0	0.561	37.9	1758	216.5	2.279

Çizelge 4. 2. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-1)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 4 - % 5 olarak hesaplanmıştır).

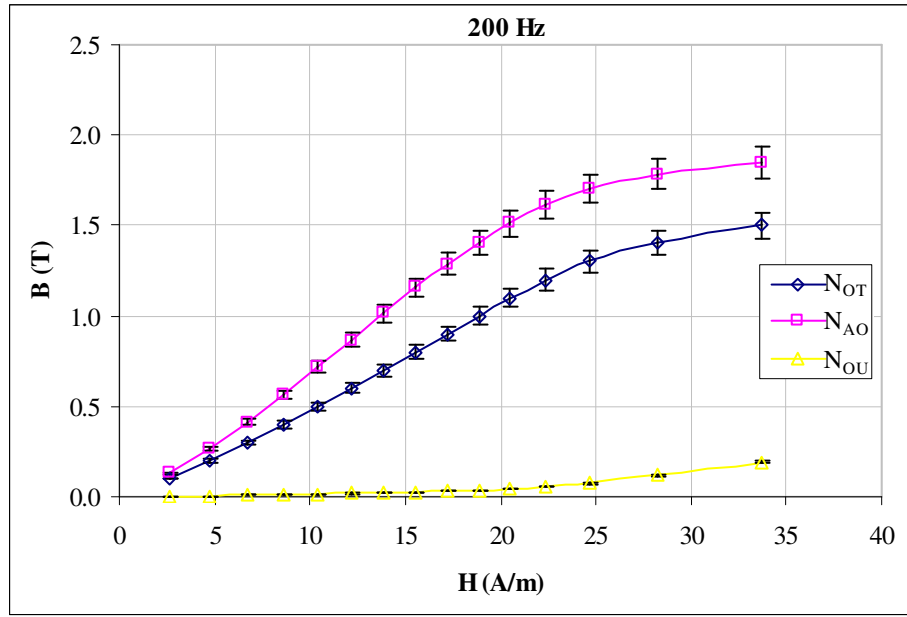
H (A/m)	B _{OT} (T)	B _{AO} (T)	B _{OU} (T)	H (A/m)	B _{OT} (T)	B _{AO} (T)	B _{OU} (T)
50 Hz				200 Hz			
1.809	0.100	0.124	0.0014	2.573	0.100	0.128	0.0012
3.111	0.200	0.271	0.0020	4.691	0.200	0.267	0.0032
4.368	0.300	0.437	0.0027	6.724	0.300	0.414	0.0062
5.473	0.400	0.620	0.0034	8.615	0.400	0.563	0.0097
6.596	0.500	0.791	0.0048	10.394	0.500	0.714	0.0135
7.608	0.600	0.956	0.0061	12.195	0.600	0.865	0.0172
8.611	0.700	1.105	0.0068	13.870	0.700	1.013	0.0213
9.510	0.800	1.229	0.0102	15.558	0.800	1.157	0.0258
10.425	0.900	1.340	0.0116	17.223	0.900	1.286	0.0305
11.427	1.000	1.435	0.0150	18.917	1.000	1.407	0.0359
12.519	1.100	1.521	0.0225	20.490	1.100	1.515	0.0424
13.649	1.200	1.611	0.0307	22.370	1.200	1.616	0.0529
15.435	1.300	1.699	0.0546	24.700	1.300	1.705	0.0738
18.133	1.400	1.769	0.0963	28.180	1.400	1.782	0.1179
22.818	1.500	1.836	0.1692	33.619	1.500	1.843	0.1918
100 Hz				400 Hz			
2.014	0.100	0.123	0.0007	3.586	0.100	0.132	0.0026
3.568	0.200	0.265	0.0014	6.828	0.200	0.271	0.0073
5.023	0.300	0.419	0.0027	9.638	0.300	0.411	0.0123
6.484	0.400	0.576	0.0044	12.294	0.400	0.554	0.0173
7.720	0.500	0.737	0.0065	14.758	0.500	0.697	0.0223
8.956	0.600	0.895	0.0092	17.132	0.600	0.839	0.0270
10.191	0.700	1.042	0.0123	19.470	0.700	0.981	0.0319
11.417	0.800	1.181	0.0157	21.719	0.800	1.118	0.0367
12.638	0.900	1.307	0.0198	23.833	0.900	1.246	0.0419
13.883	1.000	1.417	0.0249	26.057	1.000	1.367	0.0472
15.211	1.100	1.518	0.0324	28.181	1.100	1.481	0.0533
16.792	1.200	1.615	0.0437	30.406	1.200	1.592	0.0613
18.796	1.300	1.703	0.0683	33.130	1.300	1.699	0.0778
22.019	1.400	1.780	0.1159	37.005	1.400	1.783	0.1195
26.945	1.500	1.842	0.1913	42.403	1.500	1.847	0.1945



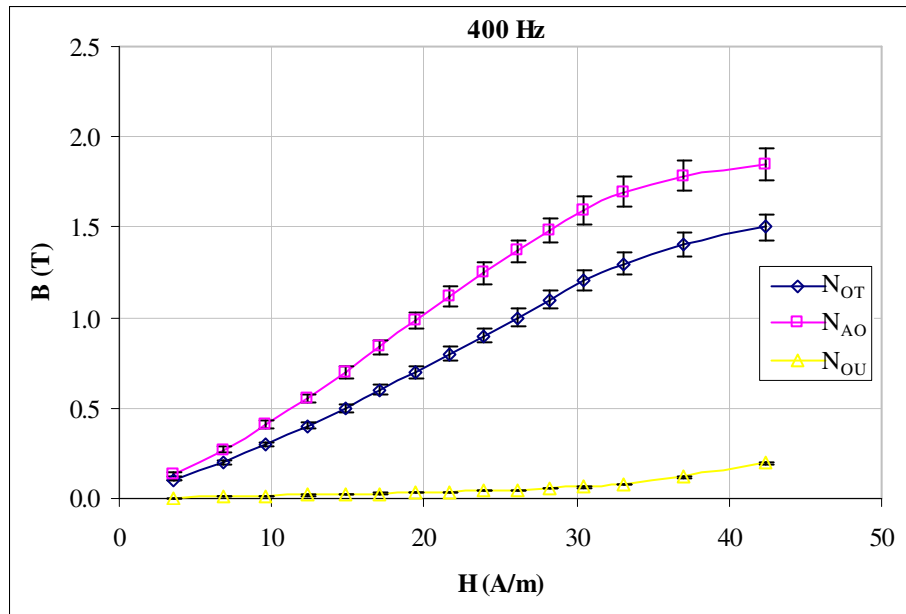
Şekil 4. 1. 50 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).



Şekil 4. 2. 100 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).



Şekil 4. 3. 200 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).



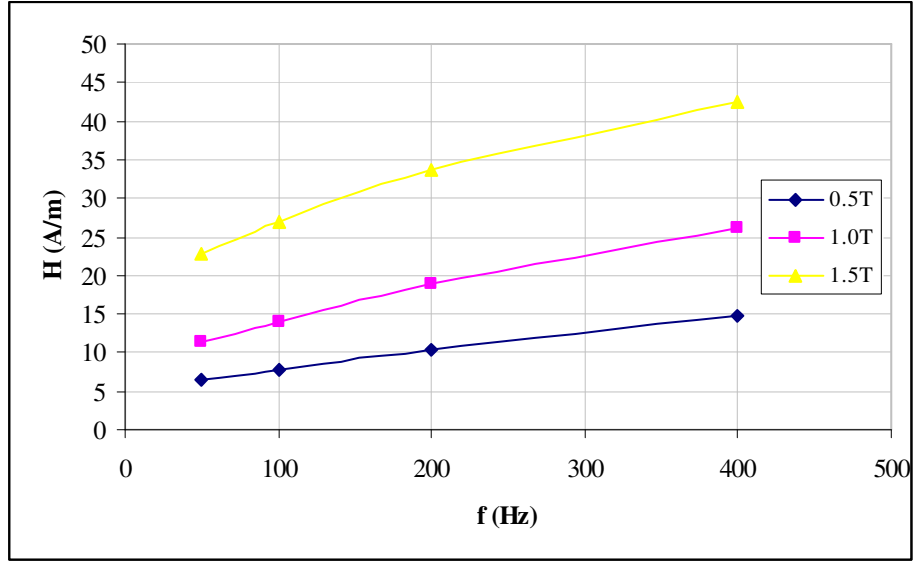
Şekil 4. 4. 400 Hz için N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimden elde edilen B-H eğrileri (örnek-1).

4. 1. 1. Örnek-1'in Ölçme Sonuçlarının Tartışılması

İncelediğimiz örneklerden Şekil 3. 4.'e bakıldığında 3 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akı geçirgenliği farklı bir ortamla karşılaştığında yönelimini değiştirmektedir. Bu ortam elektrik çeliğine göre manyetik geçirgenliği çok küçük olan havadır. Buna göre manyetik akı, manyetik direnci daha fazla olan hava aralığında aynı yönde tümüyle geçemeyip yüzey alanının daha geniş olması nedeniyle aşağı ve yukarıya doğru olan 1 ve 4 nolu elektrik çeliğine geçişler gerçekleştirmektedir. 1 nolu elektrik çeliğinden geçen manyetik akı hava aralığına yaklaştıkça artmaktadır. Deneysel olarak manyetik akı değerleri N_{OT} , N_{AO} , N_{OU} bobinleri ile algılanmaktadır. N_{OT} bobini yardımıyla 3 nolu elektrik çeliğinde belirli B değerleri ayarlanarak manyetik akı yoğunluğundaki değişim N_{OU} ve N_{AO} bobinleriyle gözlenmiştir. Manyetik akı geçişlerindeki değişime frekansın etkisini incelemek amacıyla farklı frekans değerleri kullanılmıştır. Seçilen frekans değerleri uygulamada transformatör çekirdeklerinde kullanılan güç frekanslarına karşılık gelmektedir. Şekil 4. 1., Şekil 4. 2., Şekil 4. 3. ve Şekil 4. 4. manyetik akıdaki değişimleri göstermektedir. Şekil 4. 1.'de N_{OT} bobini ile ayarlanan başlangıç manyetik akı yoğunluğu değerleri hava aralığının manyetik direnç etkisinden dolayı 1 nolu elektrik çeliğine geçiş yaptığı algılanan büyük değerlerle (N_{AO} bobininde) anlaşılmaktadır. Aynı şekilde 3 nolu elektrik çeliğinden hava aralığını kullanarak 2 nolu elektrik çeliğine geçen akı N_{OT} ile ayarlanmış değerden küçüktür. Bu akı değişimi manyetik alanın yaklaşık 15 A/m değerine kadar hızlı arttığı halde 15 A/m'den sonra değerler de değişim çok az olmaktadır. Bunun sebebi maddenin bu değerden sonra doyuma yaklaşmasıdır. Diğer bir ifadeyle manyetik momentlerin aynı yöne yönelimi artmaktadır. 50 Hz'de gözlenen bu durum benzer olarak 100, 200 ve 400 Hz frekans değerlerinde de aynen gözlenmektedir. Ölçümler sonucunda 3 nolu elektrik çeliğinin uç kısmındaki manyetik akı yoğunluğu (B_{OU}), başlangıçtaki manyetik akı yoğunluğunun (B_{OT}) ortalama olarak 50 Hz'de % 2.5'na, 100 Hz'de % 3.2'ne, 200 Hz'de % 4.1'ne ve 400 Hz'de % 5.3'ne kadar azaldığı hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplanan hata oranları da ölçü alınan 4 frekans değeri için aynı düzeyde (% 4 - % 5) elde edilmiştir. Bununla beraber 3 nolu elektrik çeliğinden geçen akı hava aralığına yaklaştıkça 1 nolu elektrik çeliğine geçişler deneysel olarak teyit edildiğinden buna

benzer olarak 4 nolu elektrik çeliğine de aynı şekilde geçişlerin olduğu beklenmektedir. Bununla ilgili ayrıntılı ölçmeler sonraki örneklerde yapılmıştır.

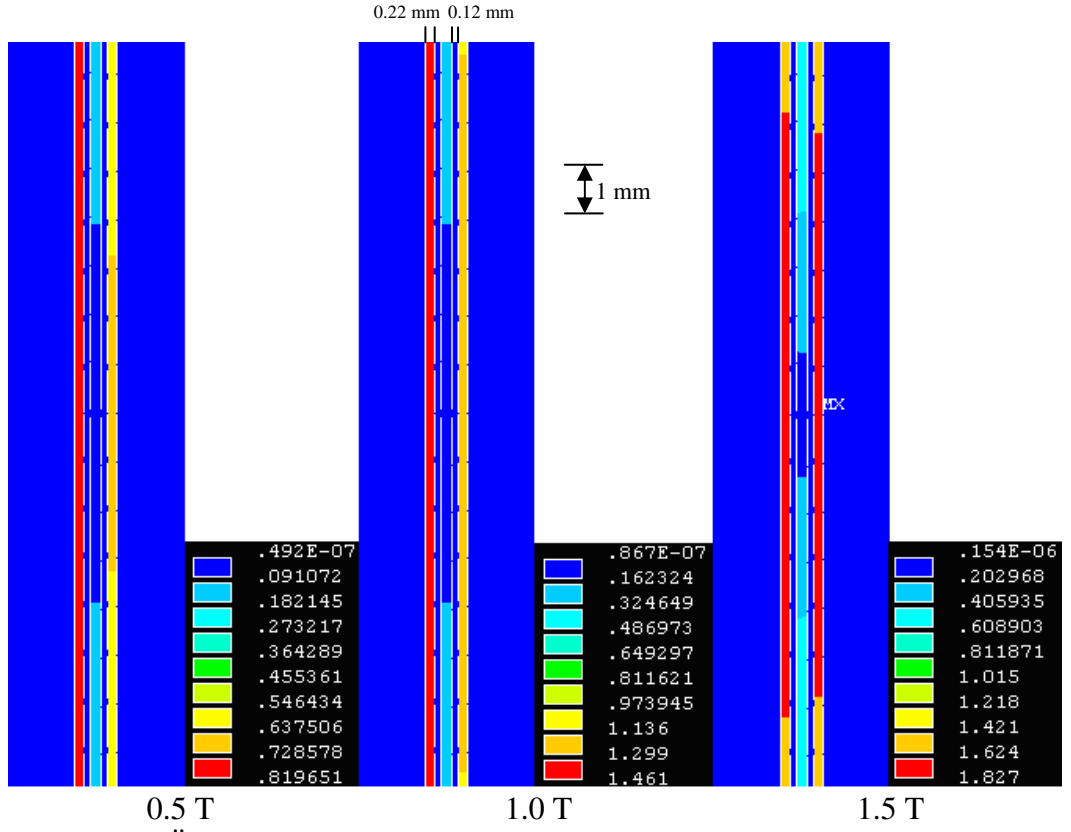
Örnek-1'de manyetik alan şiddetinin frekansla değişimi, 0.5, 1.0 ve 1.5T başlangıç manyetik akı yoğunluğu değerleri için Şekil 4. 5.'de gösterilmektedir. Frekans arttıkça çekirdeğin mıknatıslanma bobinini enerjilemek için uygulanan akımın da arttığı gözlenmektedir.



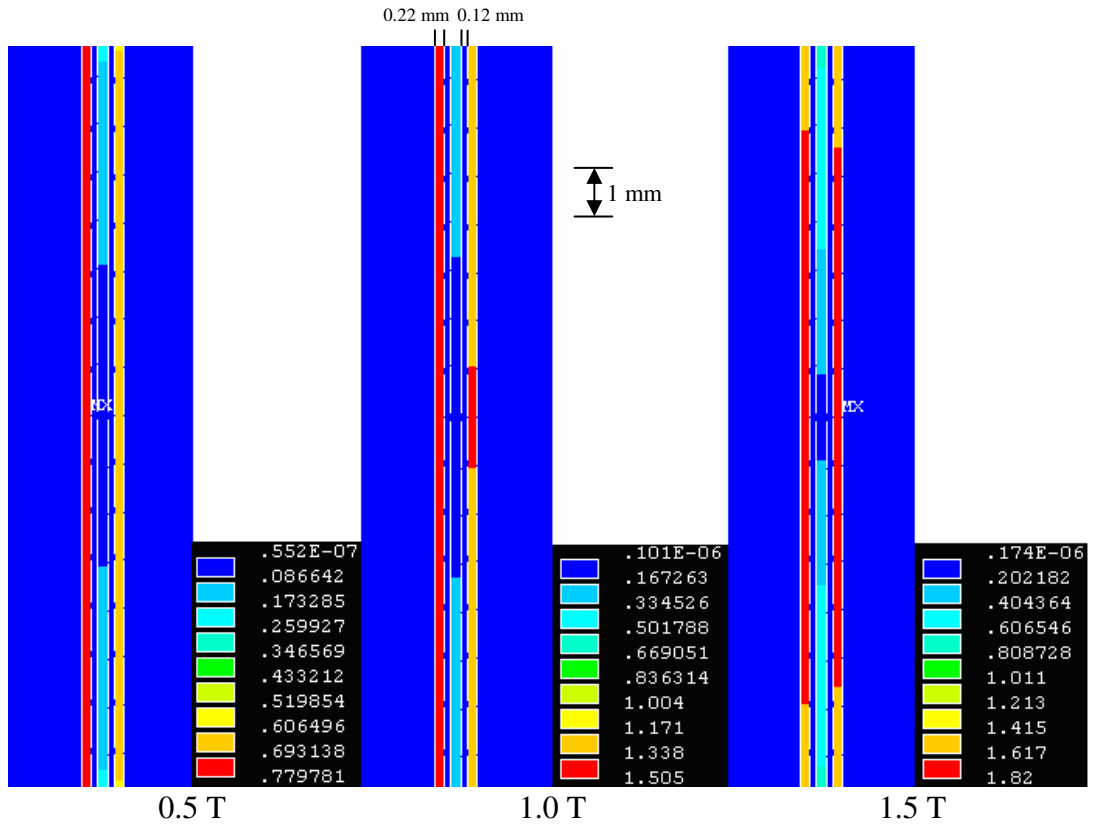
Şekil 4. 5. Örnek-1 için manyetik alan şiddetinin frekansla değişimi.

Deneysel verilerin sayısal yöntemlerle desteklenmesi ve karşılaştırılması yapılan araştırmanın bilimsel doğruluğunu desteklemektedir. Bu nedenle deneysel verilere ek olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deney sisteminin benzeşimi bilgisayar yardımıyla yapılmış ve akı dağılımındaki değişim bu yöntemle de incelenmiştir. Şekil 4. 6., Şekil 4. 7., Şekil 4. 8. ve Şekil 4. 9.'da örnek-1 için farklı frekanslardaki sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4. 6. incelendiğinde deneysel ölçmelerde elde ettiğimiz veriler gibi bu çözümlemede de ilk olarak manyetik akı 1 nolu elektrik çeliğinde çekirdeğe en yakın olduğundan en fazla manyetik akı geçişleri görülmektedir. Bu akı geçişleri azalarak 3 ve 4 nolu elektrik çeliklerine doğru devam etmektedir ancak 3 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı hava boşluğuna yaklaştıkça azalmaktadır. Böylece manyetik akı yoğunluğu 0.5 T (50 Hz) başlangıç değerinden 0.09 T en büyük değerine kadar düşmüştür. Buna karşılık hava boşluğuna denk gelen bölgedeki 1 nolu

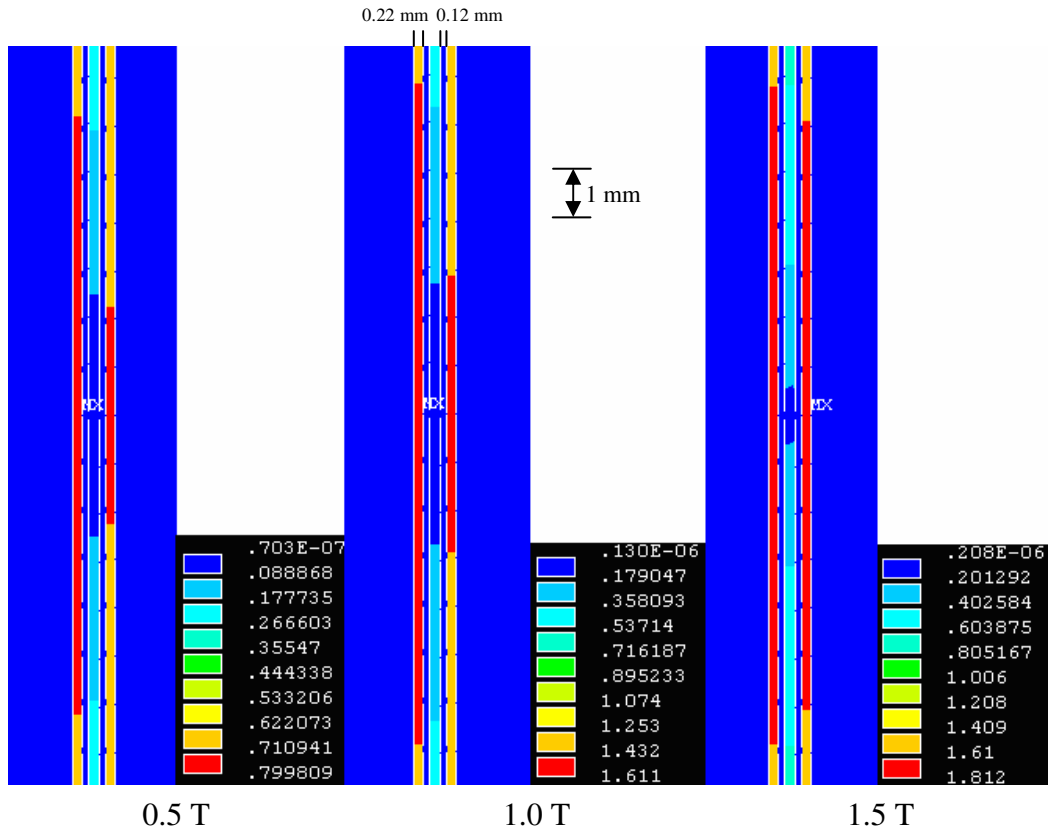
elektrik çeliğinde akı artmaktadır. Bu akı yoğunluğu 0.82 T en büyük değerine kadar yükselmektedir. Bu değerler 3 nolu elektrik çeliğindeki akı yoğunluğu 1.5 T (50 Hz) değerine çıkarıldığında sırasıyla hava boşluğuna en yakın yerde 0.20 T değerine kadar azalırken, hava boşluğuna karşılık gelen 1 nolu elektrik çeliğindeki bölgede 1.83 T değerine kadar yükselmektedir. 4 nolu elektrik çeliğinde ise çok daha farklı bir durum gözlenmektedir. 3 nolu elektrik çeliğinde başlangıçta 0.5 T değerine ayarlanan manyetik akı yoğunluğu hava boşluğuna karşılık gelen bölgede 0.73 T değerine kadar yükseldiği halde (1 nolu elektrik çeliğinde aynı yerdeki akı yoğunluğundan düşük) 1.5 T değerine ayarlandığında 4 nolu elektrik çeliğinde hava boşluğuna karşılık gelen bölgede B'nin 1.83 T (1 nolu elektrik çeliğinde aynı yerdeki akı yoğunluğuna eşit) değerine kadar çıktığı görülmektedir (Şekil 4. 6.). Böylece manyetik akının çekirdeğe daha yakın olduğu için 1 nolu elektrik çeliğine doğru daha fazla geçişlerin olduğunu ancak 3 nolu elektrik çeliğindeki akı yoğunluğu arttırıldıkça 1 nolu elektrik çeliği manyetik olarak doyuma gittiği için manyetik akı geçişlerinin 4 nolu elektrik çeliğine yöneldiği teyit edilmektedir. Aynı durum frekans arttırıldığında da gözlenmektedir. Frekansın değişimi, sonlu elemanlar yöntemine Bölüm 3. 2. 3.'te belirtildiği gibi farklı B-H verilerinin girilmesiyle ele alınmıştır.



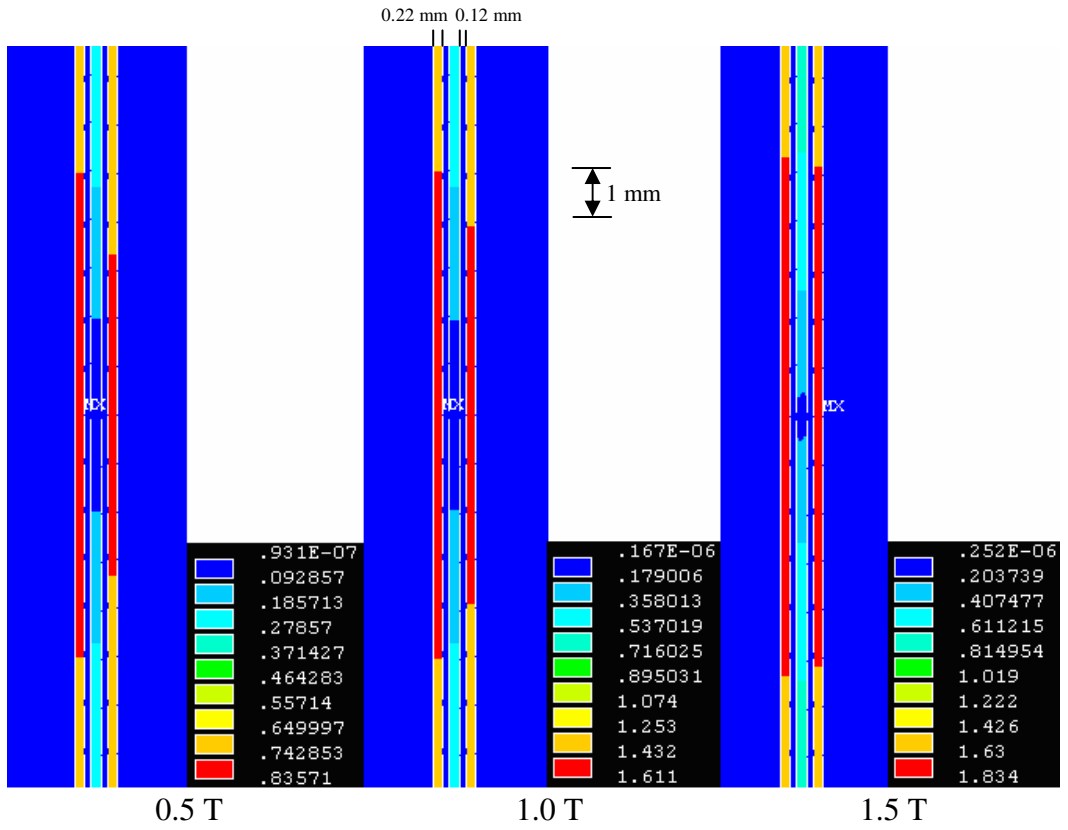
Şekil 4. 6. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (50 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 7. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (100 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 8. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (200 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 9. Örnek-1'deki elektrik çeliklerinde (400 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.

Sonlu elemanlardan elde edilen grafikler Çizelge 4. 3.'te sayısal olarak ayrıca verilmektedir. Deneysel verilerin hata oranları da dikkate alınarak sonlu elemanlar yönteminde elde edilen kuramsal değerlerle % 85 - % 90 arasında uyumlu olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 3. Örnek-1 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması.

Örnek-1	B_{OT} (T)	B_{AO} (T)	B_{OU} (T)
50 Hz			
Deneysel	0.500	0.791	0.005
<i>Kuramsal</i>	<i>0.364 - 0.455</i>	<i>0.729 - 0.820</i>	<i>0.492e-7 - 0.091</i>
Deneysel	1.000	1.435	0.015
<i>Kuramsal</i>	<i>0.649 - 0.812</i>	<i>1.299 - 1.461</i>	<i>0.867e-7 - 0.162</i>
Deneysel	1.500	1.836	0.169
<i>Kuramsal</i>	<i>1.218 - 1.421</i>	<i>1.624 - 1.827</i>	<i>0.154e-6 - 0.203</i>
100 Hz			
Deneysel	0.500	0.737	0.007
<i>Kuramsal</i>	<i>0.433 - 0.520</i>	<i>0.693 - 0.780</i>	<i>0.552e-7 - 0.087</i>
Deneysel	1.000	1.417	0.025
<i>Kuramsal</i>	<i>0.836 - 1.004</i>	<i>1.338 - 1.505</i>	<i>0.101e-6 - 0.167</i>
Deneysel	1.500	1.842	0.191
<i>Kuramsal</i>	<i>1.213 - 1.415</i>	<i>1.617 - 1.82</i>	<i>0.174e-6 - 0.202</i>
200 Hz			
Deneysel	0.500	0.714	0.014
<i>Kuramsal</i>	<i>0.444 - 0.533</i>	<i>0.711 - 0.800</i>	<i>0.703e-7 - 0.089</i>
Deneysel	1.000	1.407	0.036
<i>Kuramsal</i>	<i>0.895 - 1.074</i>	<i>1.432 - 1.611</i>	<i>0.130e-6 - 0.179</i>
Deneysel	1.500	1.843	0.192
<i>Kuramsal</i>	<i>1.208 - 1.409</i>	<i>1.61 - 1.812</i>	<i>0.208e-6 - 0.201</i>
400 Hz			
Deneysel	0.500	0.697	0.022
<i>Kuramsal</i>	<i>0.464 - 0.557</i>	<i>0.743 - 0.836</i>	<i>0.931e-7 - 0.093</i>
Deneysel	1.000	1.367	0.047
<i>Kuramsal</i>	<i>0.895 - 1.074</i>	<i>1.432 - 1.611</i>	<i>0.167e-6 - 0.179</i>
Deneysel	1.500	1.847	0.195
<i>Kuramsal</i>	<i>1.222 - 1.426</i>	<i>1.63 - 1.834</i>	<i>0.252e-6 - 0.204</i>

4. 2. ÖRNEK-2'NİN ÖLÇME SONUÇLARI

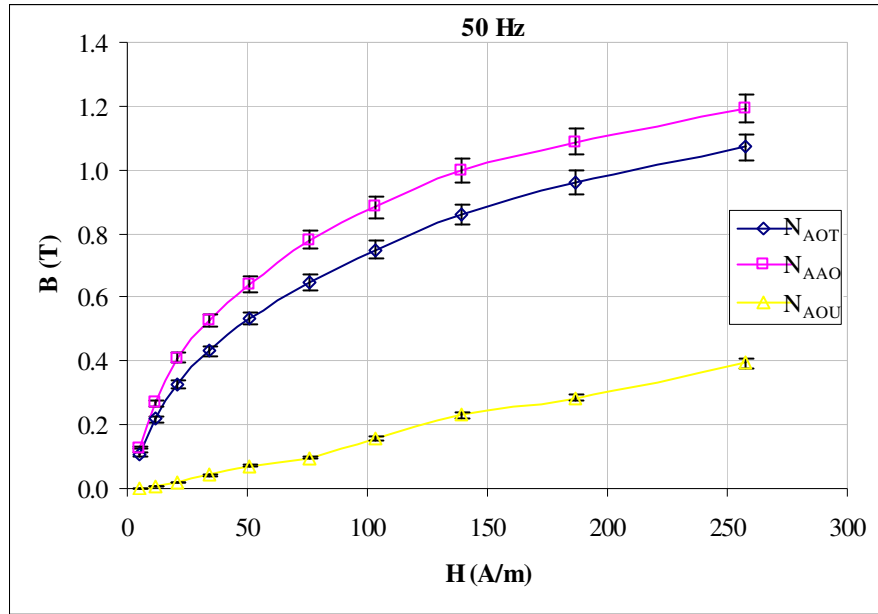
Şekil 3. 5.'teki örnek-2, Şekil 3. 1.'deki ölçme devresinde bulunan U-şeklindeki çekirdek (178 sarımlı bobinden oluşur) üzerine yerleştirilmiştir. Bobine akım verildiğinde çekirdek içerisinde geçen manyetik akı, örnek-2'den geçerek manyetik devreyi tamamlar. N_{AOT} üzerinde indüklenen V_{AOT} gerilimi, N_{AAO} ve N_{AOU} üzerlerinden indüklenen V_{AAO} ve V_{AOU} gerilimleri ölçülerek sırasıyla B_{AOT} , B_{AAO} ve B_{AOU} manyetik akı yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler Çizelge 4. 4.'te verilmektedir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri Çizelge 4. 5.'te, ayrıca N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri de 50, 100, 200 ve 400 Hz için Şekil 4. 10., Şekil 4. 11., Şekil 4. 12. ve Şekil 4. 13.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4. 4. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-2).

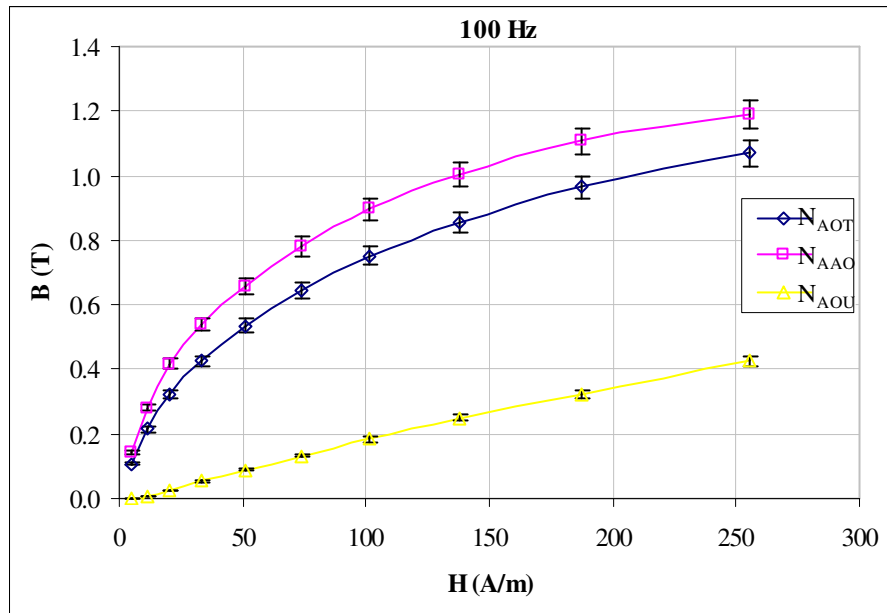
V_M (mV)	V_{AOT} (mV)	V_{AAO} (mV)	V_{AOU} (mV)	V_M (mV)	V_{AOT} (mV)	V_{AAO} (mV)	V_{AOU} (mV)
50 Hz				200 Hz			
4.5	8.4	1.0	0.001	4.7	33.4	4.5	0.006
10.3	17.0	2.1	0.003	10.3	67.1	8.9	0.042
18.7	25.3	3.2	0.014	18.6	100.5	13.1	0.112
30.4	33.6	4.1	0.032	30.2	133.7	17.0	0.211
45.2	41.8	5.0	0.056	45.7	167.2	20.8	0.321
67.6	50.6	6.1	0.075	65.7	200.8	24.5	0.460
92.4	58.5	6.9	0.122	90.9	234.1	28.1	0.625
124.7	67.0	7.8	0.179	122.9	267.2	31.5	0.822
166.8	75.0	8.5	0.223	167.0	301.1	34.8	1.061
230.0	83.7	9.3	0.308	228.8	334.6	37.6	1.375
100 Hz				400 Hz			
4.6	16.8	2.2	0.003	4.8	66.2	9.0	0.032
10.2	33.6	4.4	0.012	10.5	133.6	17.9	0.126
18.3	50.0	6.5	0.039	18.7	200.4	26.2	0.278
29.9	66.7	8.4	0.083	30.5	267.7	34.1	0.478
45.6	83.6	10.3	0.140	45.9	334.3	41.7	0.711
66.1	100.6	12.2	0.208	65.9	401.6	49.1	0.982
90.8	117.1	14.0	0.286	91.3	468.6	56.3	1.301
123.3	133.8	15.7	0.388	123.6	535.4	63.2	1.688
167.2	150.6	17.3	0.505				
228.1	167.1	18.6	0.663				

Çizelge 4. 5. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-2)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 3 - % 4 olarak hesaplanmıştır).

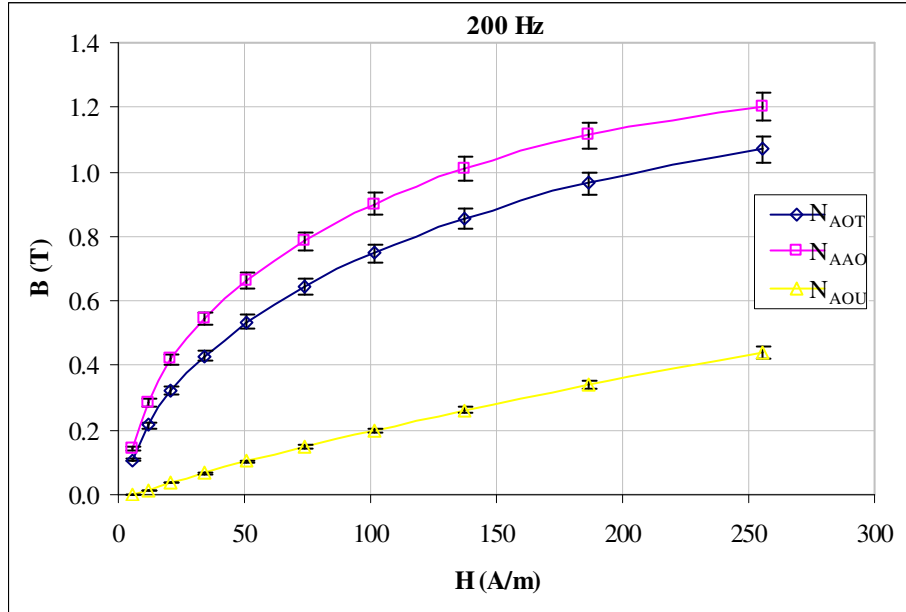
H (A/m)	B _{AOT} (T)	B _{AAO} (T)	B _{AOU} (T)	H (A/m)	B _{AOT} (T)	B _{AAO} (T)	B _{AOU} (T)
50 Hz				200 Hz			
4.681	0.100	0.119	0.0012	4.918	0.100	0.135	0.0018
10.587	0.200	0.247	0.0035	10.729	0.200	0.265	0.0125
19.374	0.300	0.379	0.0166	19.404	0.300	0.391	0.0334
31.620	0.400	0.488	0.0381	31.577	0.400	0.509	0.0631
47.239	0.500	0.598	0.0670	47.762	0.500	0.622	0.0960
70.035	0.600	0.723	0.0889	68.609	0.600	0.732	0.1375
96.601	0.700	0.826	0.1460	94.992	0.700	0.840	0.1869
130.092	0.800	0.931	0.2137	128.598	0.800	0.943	0.2461
174.882	0.900	1.020	0.2676	174.452	0.900	1.040	0.3171
240.088	1.000	1.111	0.3680	238.978	1.000	1.124	0.4109
100 Hz				400 Hz			
4.785	0.100	0.131	0.0018	5.068	0.100	0.136	0.0048
10.609	0.200	0.262	0.0071	10.987	0.200	0.268	0.0189
19.187	0.300	0.390	0.0234	19.567	0.300	0.392	0.0416
31.333	0.400	0.504	0.0498	31.854	0.400	0.510	0.0714
47.657	0.500	0.616	0.0837	47.985	0.500	0.624	0.1063
68.890	0.600	0.728	0.1241	68.818	0.600	0.734	0.1467
94.847	0.700	0.837	0.1710	95.329	0.700	0.841	0.1943
128.824	0.800	0.939	0.2320	129.089	0.800	0.944	0.2522
174.603	0.900	1.034	0.3018				
238.533	1.000	1.113	0.3968				



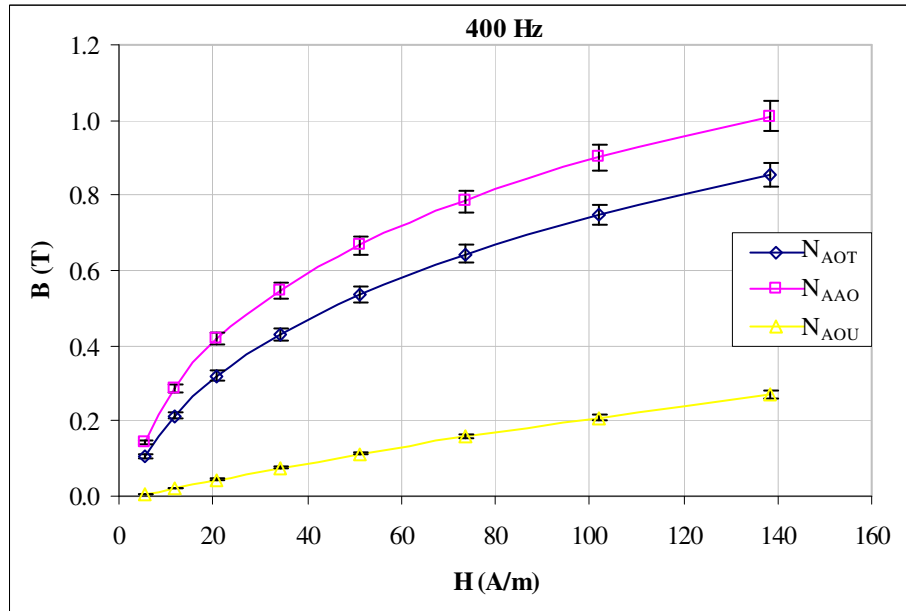
Şekil 4. 10. 50 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2).



Şekil 4. 11. 100 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2).



Şekil 4. 12. 200 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2).

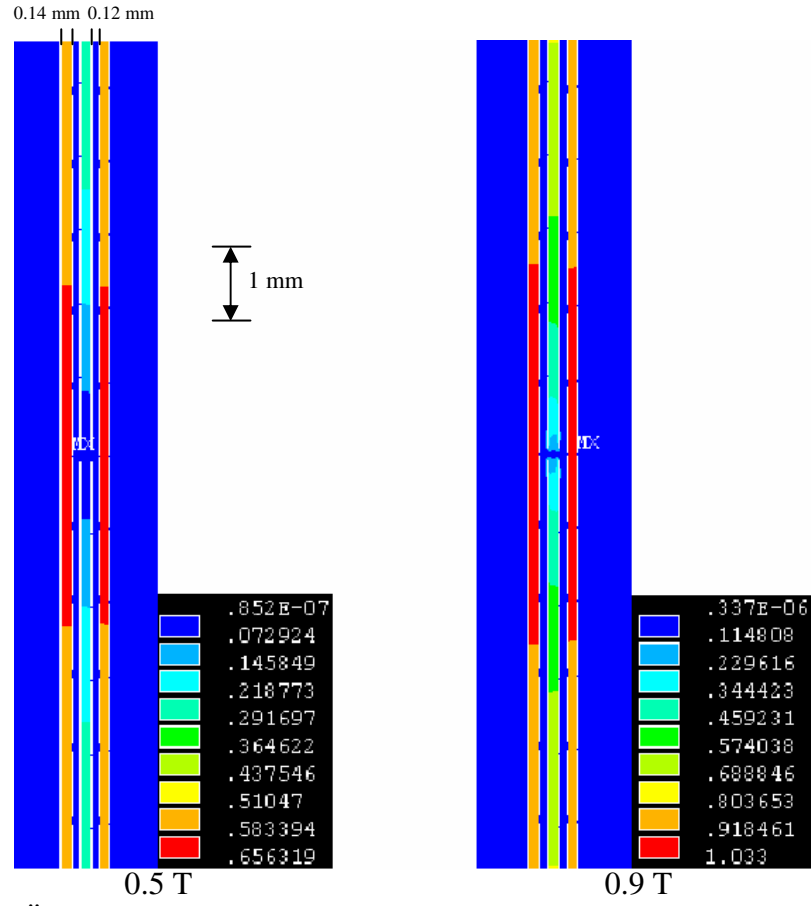


Şekil 4. 13. 400 Hz için N_{AOT} , N_{AAO} , N_{AOU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-2).

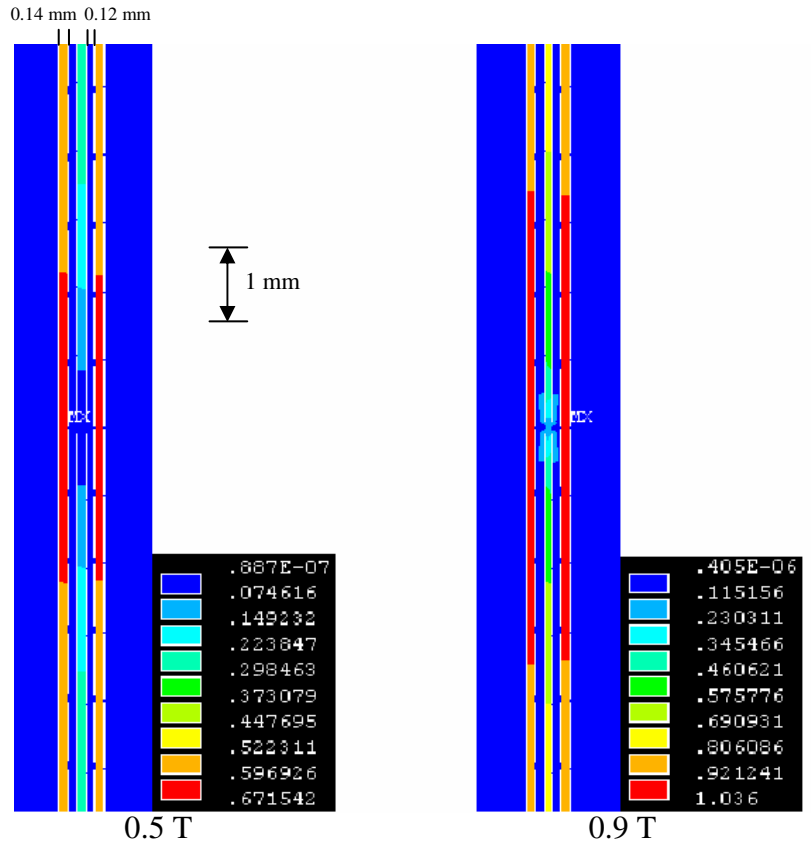
4. 2. 1. Örnek-2'nin Ölçme Sonuçlarının Tartışılması

Çalışmanın bu aşamasında örnek-1'e benzer olarak hazırlanan örnek-2'de de (Şekil 3. 5.) ölçümler yapılmıştır. Örnek-1'de elektrik çelikleri (M4) yerine örnek-2'de amorf şeritler (Metglas-2605SC) kullanılmıştır. Amorf şeritler, elektrik çeliklerine göre farklı manyetik ve mekanik özelliklere sahip olduğundan, bu farklılığın akı dağılımına etkisini gözlemlemek için N_{AOT} , N_{AAO} ve N_{AOU} bobinleriyle 50, 100, 200 ve 400 Hz frekanslarında indüklenen gerilimler ölçülerek manyetik akı yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4. 10., Şekil 4. 11., Şekil 4. 12. ve Şekil 4. 13. manyetik alan şiddetine karşı manyetik akı yoğunluğu değişimlerini göstermektedir. Şekil 4. 10. incelendiğinde 50 Hz için N_{AOT} bobininden indüklenen manyetik akı yoğunluğunun başlangıçta manyetik alan arttıkça hızlı bir şekilde arttığı daha sonrada artış hızı azalsa da artmaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Manyetik alan şiddetinin 250 A/m değerinden sonra çıkış sinyali sinüs şeklinden uzaklaştığı için ölçüme devam edilmemiştir. Bu nedenle amorf şeritlerde doyum mıknatıslanması düşük olmasına rağmen eğrilerin tam olarak doyuma gittiği gözlenememiştir. Fakat grafikteki eğrilerin gidişinden özellikle N_{AAO} ve N_{AOT} bobinlerinden manyetik akı yoğunluğunun yüksek manyetik alan değerlerinde doyuma doğru gideceği beklenmektedir. 3 nolu amorf şeritten gelen manyetik akı hava aralığı ile karşılaşmaktadır. Hava aralığı zıt mıknatıslanma alanı oluşturduğu için uç kısımdan (N_{AOU}) geçen akının azalmasına neden olacaktır (Bakınız Bölüm 2. 5. 2.). Böylece uç kısımdan geçemeyen akıda alt ve üst kısımlardan geçerek manyetik devreyi tamamlar. Bu yüzden manyetik akı yoğunluğu değeri büyükten küçüğe doğru N_{AAO} , N_{AOT} , N_{AOU} bobinlerinde görülmüştür. Bu değişim Şekil 4. 10.'da açıkça gözlemlenmektedir. Benzer durum Şekil 4.11., Şekil 4. 12. ve Şekil 4. 13. için de geçerlidir. Ölçmeler sonucunda 3 nolu amorf şeridin uç kısmındaki manyetik akı yoğunluğu (B_{AOU}), başlangıçtaki manyetik akı yoğunluğunun (B_{AOT}) ortalama olarak 50 Hz'de % 16'ı, 100 Hz'de % 19'u, 200 Hz'de % 21'i ve 400 Hz'de % 22'ne kadar azaldığı hesaplanmıştır. Örnek-1'de olduğu gibi 3 nolu amorf şeritten geçen akının hava aralığına yaklaştıkça 1 nolu amorf şeride geçtiği deneysel olarak gösterilmektedir. Buna benzer olarak 4 nolu amorf şeride de aynı şekilde geçişlerin olduğu beklenmektedir.

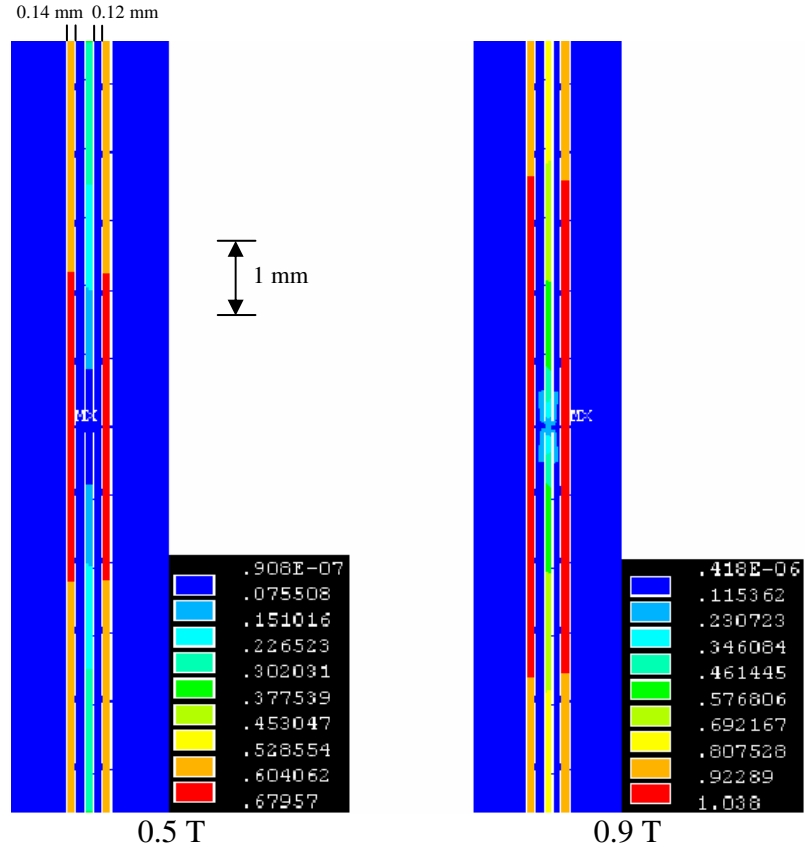
Örnek-2 için yapılan deneysel hesaplamalar ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar yardımıyla da akı dağılımındaki değişimler incelenmiştir. Şekil 4. 14., Şekil 4. 15., Şekil 4. 16. ve Şekil 4. 17.'de örnek-2 için farklı frekanslardaki sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Başlangıçta manyetik akı 1 nolu amorf şerit çekirdeğe en yakın olduğundan en fazla manyetik akı geçişleri burada görülmektedir. Daha sonra akı geçişleri 3 ve 4 nolu amorf şeritlere doğru kaymaktadır. Ancak 3 nolu amorf şeritteki manyetik akı yoğunluğu hava boşluğuna yaklaştıkça azalmaktadır. Örneğin, 0.5 T (100 Hz) başlangıç manyetik akı yoğunluğu (B_{AOT}) değerinden 0.07 T (B_{AOU}) en büyük değerine kadar düşmüştür. Bununla birlikte 1 nolu amorf şeridin ortasındaki bölgede manyetik akı yoğunluğu 0.67 T (B_{AAO}) en büyük değerine kadar yükselmektedir. 3 nolu amorf şeritteki başlangıç manyetik akı yoğunluğu (B_{AOT}) 0.9 T (100 Hz) değerine çıkarıldığında hava boşluğuna en yakın yerde akı yoğunluğu 0.12 T (B_{AOU}) en büyük değerine düşmektedir ve 1 nolu amorf şeridin ortasındaki bölgede ise 1.04 T (B_{AAO}) en büyük değerine ulaşmaktadır. 4 nolu amorf şeridin ortasındaki manyetik akı yoğunluğu değeri de 1 nolu amorf şeridin ortasındaki akı yoğunluğu gibi aynı değeri almaktadır. Bunun nedeni amorf şeridin manyetik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Bakınız Bölüm 2. 3.). Yani amorf şeritlerde doyum mıknatıslanmasının düşük olması nedeniyle 3 nolu amorf şeritten gelen akının hava aralığına yaklaştıkça 1 nolu amorf şeride geçiş yaparak onu manyetik olarak hızlı bir şekilde en büyük değere ulaştırdıktan sonra manyetik akı geçişlerinin 4 nolu amorf şeride yönelerek onu da 1 nolu şeritteki gibi en büyük değerlere ulaştırdığı görülmektedir. Aynı durum diğer frekanslarda da gözlenmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde frekans değişimi incelenirken, ANSYS benzeşim programına Bölüm 3. 2. 3.'te belirtildiği gibi farklı B-H verileri girilmiştir.



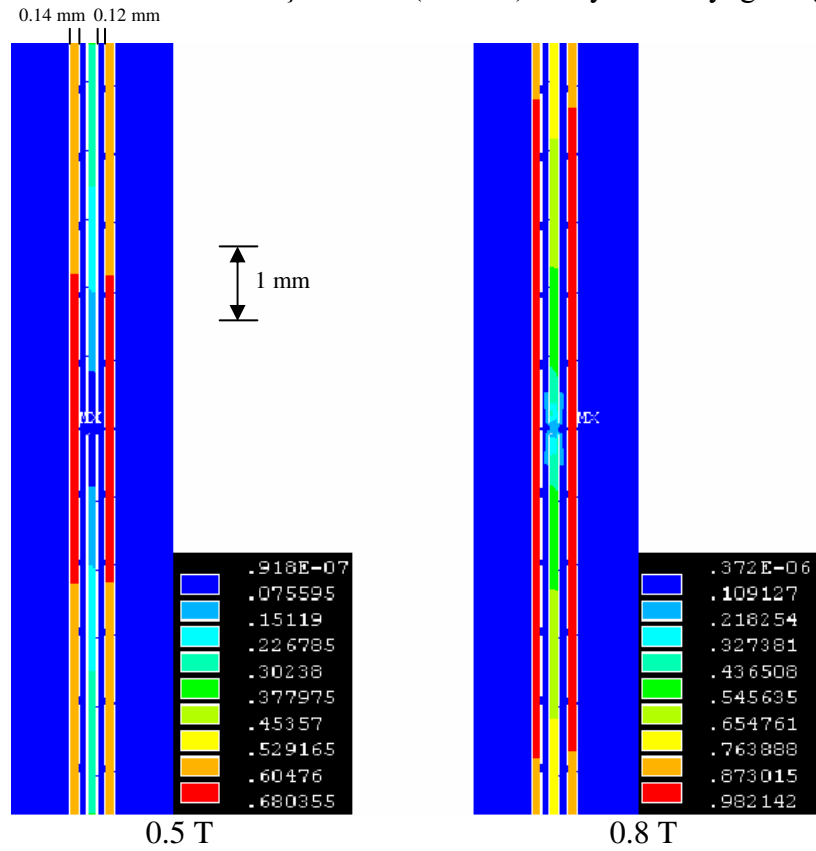
Şekil 4. 14. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (50 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 15. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (100 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 16. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (200 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 17. Örnek-2'deki amorf şeritlerde (400 Hz) manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen grafiklerdeki renk anahtarlarına ait değerlerle deneysel yöntemle elde edilen sonuçlar Çizelge 4. 6.'da verilmektedir. Deneysel verilerin hata oranları da dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemindeki kuramsal değerlerle % 85 - % 90 arası uyum içinde olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 6. Örnek-2 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması.

Örnek-2	B_{AOT}(T)	B_{AAO}(T)	B_{AOU}(T)
50 Hz			
Deneysel	0.500	0.598	0.067
<i>Kuramsal</i>	0.438 - 0.510	0.583 - 0.656	0.852e-7 - 0.073
Deneysel	0.900	1.020	0.268
<i>Kuramsal</i>	0.804 - 0.918	0.918 - 1.033	0.115 - 0.344
100 Hz			
Deneysel	0.500	0.616	0.084
<i>Kuramsal</i>	0.448 - 0.522	0.597 - 0.672	0.887e-7 - 0.075
Deneysel	0.900	1.034	0.302
<i>Kuramsal</i>	0.806 - 0.921	0.921 - 1.036	0.115 - 0.345
200 Hz			
Deneysel	0.500	0.622	0.096
<i>Kuramsal</i>	0.453 - 0.529	0.604 - 0.680	0.908e-7 - 0.076
Deneysel	0.900	1.040	0.317
<i>Kuramsal</i>	0.808 - 0.923	0.923 - 1.038	0.115 - 0.346
400 Hz			
Deneysel	0.500	0.624	0.106
<i>Kuramsal</i>	0.454 - 0.529	0.605 - 0.680	0.918e-7 - 0.076
Deneysel	0.800	0.944	0.252
<i>Kuramsal</i>	0.764 - 0.873	0.873 - 0.982	0.109 - 0.327

4. 3. ÖRNEK-3'ÜN ÖLÇME SONUÇLARI

Bu kısımda ölçme devre şemasında bulunan U-şekilli çekirdek üzerine örnek-3 yerleştirilerek manyetik akının söz konusu örnekten geçerek devreyi tamamlaması sağlanmıştır. 3 nolu elektrik çeliğindeki N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} üzerlerinden indüklenen V_{OT} , V_{O2} , V_{O1} , $V_{O0.5}$, V_{OU} gerilimleri ölçülerek B_{OT} , B_{O2} , B_{O1} , $B_{O0.5}$, B_{OU} değerleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde, 4 nolu elektrik çeliği üzerindeki $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ üzerlerinden indüklenen $V_{ÜT}$, $V_{Ü2}$, $V_{Ü1}$, $V_{Ü0.5}$, $V_{ÜO}$ gerilimleri ölçülerek $B_{ÜT}$, $B_{Ü2}$, $B_{Ü1}$, $B_{Ü0.5}$, $B_{ÜO}$ değerleri ve 1 nolu elektrik çeliği üzerindeki N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} üzerlerinden indüklenen V_{AT} , V_{A2} , V_{A1} , $V_{A0.5}$, V_{AO} gerilimleri ölçülerek B_{AT} , B_{A2} , B_{A1} , $B_{A0.5}$, B_{AO} değerleri de hesaplanmıştır. Miknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 3 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler Çizelge 4. 7.'de, 1 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler Çizelge 4. 9.'da, 4 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler ise Çizelge 4. 11.'de verilmektedir. Çizelge 4. 7., Çizelge 4. 9. ve Çizelge 4. 11.'de verilen değerler kullanılarak hesaplanan manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri de Çizelge 4. 8., Çizelge 4. 10. ve Çizelge 4. 12.'de verilmektedir. Çizelge 4. 7.'de verilen değerler kullanılarak N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri 50, 100, 200 ve 400 Hz için Şekil 4. 18., Şekil 4. 19., Şekil 4. 20. ve Şekil 4. 21.'de verilmektedir. Çizelge 4. 9.'da verilen değerler kullanılarak N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri 50, 100, 200 ve 400 Hz için Şekil 4. 22., Şekil 4. 23., Şekil 4. 24. ve Şekil 4. 25.'te verilmektedir. Çizelge 4. 11.'de verilen değerler kullanılarak $N_{ÜT}$, $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri 50, 100, 200 ve 400 Hz için Şekil 4. 26., Şekil 4. 27., Şekil 4. 28. ve Şekil 4. 29.'da gösterilmektedir.

Çizelge 4. 7. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 3 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3).

V_M (mV)	V_{OT} (mV)	V_{O2} (mV)	V_{O1} (mV)	$V_{O0.5}$ (mV)	V_{OU} (mV)
50 Hz					
1.8	14.8	0.4	0.2	0.1	0.015
3.2	29.3	0.9	0.4	0.2	0.039
4.5	43.9	1.4	0.8	0.3	0.067
5.7	58.6	2.0	1.0	0.4	0.097
6.9	73.2	2.5	1.3	0.6	0.123
8.2	87.8	3.0	1.6	0.7	0.158
9.3	102.4	3.5	1.7	0.8	0.194
10.5	117.2	4.0	2.1	0.9	0.256
11.5	132.2	4.5	2.5	1.1	0.305
12.7	146.4	5.1	3.0	1.4	0.382
100 Hz					
2.1	29.3	1.0	0.5	0.2	0.052
3.7	58.5	2.1	1.1	0.5	0.118
5.2	87.8	3.2	1.8	0.8	0.191
6.5	117.0	4.2	2.4	1.1	0.261
7.8	146.3	5.3	2.9	1.4	0.331
9.1	175.9	6.3	3.5	1.7	0.400
10.4	205.1	7.4	4.1	1.9	0.485
11.7	234.3	8.4	4.7	2.2	0.560
13.1	263.7	9.5	5.4	2.6	0.657
14.6	293.2	10.6	6.1	3.0	0.799
200 Hz					
2.5	58.6	2.1	1.2	0.6	0.2
4.5	117.1	4.4	2.5	1.3	0.3
6.4	175.6	6.6	3.8	1.9	0.4
8.1	234.8	8.8	5.1	2.5	0.5
9.8	293.2	11.0	6.3	3.1	0.7
11.4	352.3	13.2	7.6	3.7	0.8
12.9	410.4	15.4	8.8	4.3	1.0
14.5	468.9	17.6	10.1	5.0	1.1
16.1	527.6	19.8	11.4	5.7	1.3
17.8	586.7	22.1	12.8	6.3	1.5
400 Hz					
3.4	117.3	4.7	2.9	1.5	0.3
6.3	234.3	9.4	5.9	3.1	0.7
8.8	351.7	14.0	8.7	4.5	1.1
11.2	468.3	18.6	11.4	5.9	1.4
13.4	585.6	23.2	14.0	7.2	1.8
15.6	699.6	27.6	16.6	8.5	2.1
17.7	820.7	32.2	19.3	9.9	2.5
19.8	938.2	36.9	22.0	11.3	2.8
21.8	1055.3	41.5	24.8	12.7	3.2
23.8	1171.9	46.2	27.6	14.1	3.5

Çizelge 4. 8. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 4 - % 5 olarak hesaplanmıştır).

H (A/m)	B_{OT} (T)	B_{O2} (T)	B_{O1} (T)	B_{O0.5} (T)	B_{OU} (T)
50 Hz					
2.014	0.101	0.055	0.027	0.014	0.002
3.580	0.200	0.123	0.055	0.027	0.005
5.034	0.300	0.191	0.109	0.041	0.009
6.376	0.400	0.273	0.137	0.055	0.013
7.719	0.500	0.341	0.177	0.082	0.017
9.173	0.599	0.410	0.218	0.096	0.022
10.403	0.699	0.478	0.232	0.109	0.026
11.746	0.800	0.546	0.287	0.123	0.035
12.865	0.902	0.614	0.341	0.150	0.042
14.207	0.999	0.696	0.410	0.191	0.052
100 Hz					
2.349	0.100	0.068	0.034	0.014	0.004
4.139	0.200	0.143	0.075	0.034	0.008
5.817	0.300	0.218	0.123	0.055	0.013
7.271	0.399	0.287	0.164	0.075	0.018
8.725	0.499	0.362	0.198	0.096	0.023
10.180	0.600	0.430	0.239	0.116	0.027
11.634	0.700	0.505	0.280	0.130	0.033
13.088	0.800	0.573	0.321	0.150	0.038
14.654	0.900	0.648	0.369	0.177	0.045
16.332	1.001	0.723	0.416	0.205	0.055
200 Hz					
2.797	0.100	0.072	0.041	0.020	0.007
5.034	0.200	0.150	0.085	0.044	0.010
7.159	0.300	0.225	0.130	0.065	0.014
9.061	0.401	0.300	0.174	0.085	0.017
10.963	0.500	0.375	0.215	0.106	0.024
12.753	0.601	0.450	0.259	0.126	0.027
14.431	0.700	0.526	0.300	0.147	0.034
16.220	0.800	0.601	0.345	0.171	0.038
18.010	0.900	0.676	0.389	0.195	0.044
19.912	1.001	0.754	0.437	0.215	0.051
400 Hz					
3.803	0.100	0.080	0.049	0.026	0.005
7.048	0.200	0.160	0.101	0.053	0.012
9.844	0.300	0.239	0.148	0.077	0.019
12.529	0.400	0.317	0.195	0.101	0.024
14.990	0.500	0.396	0.239	0.123	0.031
17.451	0.597	0.471	0.283	0.145	0.036
19.800	0.700	0.549	0.329	0.169	0.043
22.149	0.800	0.630	0.375	0.193	0.048
24.387	0.900	0.708	0.423	0.217	0.055
26.624	1.000	0.788	0.471	0.241	0.060

Çizelge 4. 9. Mıknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 1 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3).

V_M (mV)	V_{AT} (mV)	V_{A2} (mV)	V_{A1} (mV)	$V_{A0.5}$ (mV)	V_{AO} (mV)
50 Hz					
1.8	2.4	2.5	2.7	2.9	3.0
3.2	5.2	5.3	5.7	6.0	6.2
4.5	8.4	8.7	9.2	9.6	9.9
5.7	11.9	12.3	12.9	13.5	13.8
6.9	15.3	15.9	16.6	17.3	17.7
8.2	18.5	19.3	20.3	21.1	21.6
9.3	21.0	22.1	23.3	24.3	24.8
10.5	22.7	24.2	25.6	26.7	27.5
11.5	23.9	25.6	27.2	28.5	29.4
12.7	24.8	26.5	28.2	29.9	30.9
100 Hz					
2.1	4.2	4.4	4.8	5.1	5.4
3.7	8.6	9.0	9.7	10.4	10.8
5.2	13.3	13.9	14.9	15.9	16.4
6.5	18.1	19.0	20.3	21.5	22.2
7.8	23.0	24.2	25.8	27.2	28.1
9.1	28.0	29.5	31.4	33.1	34.1
10.4	32.9	34.8	37.0	39.0	40.1
11.7	37.5	39.8	42.4	44.7	46.0
13.1	41.7	44.6	47.7	50.4	52.0
14.6	45.3	48.8	52.4	55.4	57.3
200 Hz					
2.5	7.1	7.4	8.1	8.8	9.2
4.5	14.1	14.8	16.2	17.5	18.3
6.4	21.3	22.5	24.5	26.4	27.6
8.1	28.9	30.6	33.3	35.8	37.3
9.8	36.8	39.0	42.3	45.3	47.2
11.4	45.0	47.8	51.8	55.4	57.5
12.9	53.0	56.4	61.0	65.2	67.7
14.5	61.1	65.1	70.5	75.2	78.1
16.1	68.5	73.3	79.4	85.0	88.2
17.8	75.8	81.4	88.6	94.8	98.4
400 Hz					
3.4	12.8	13.2	14.4	15.8	16.7
6.3	25.2	26.2	28.8	31.6	33.3
8.8	37.9	39.7	43.6	47.7	50.3
11.2	50.6	53.3	58.6	64.0	67.3
13.4	63.7	67.3	74.0	80.8	84.9
15.6	78.6	83.2	91.3	99.2	104.1
17.7	93.2	98.7	108.3	117.6	123.3
19.8	107.7	114.1	125.1	135.7	142.1
21.8	121.1	128.4	141.0	152.9	160.1
23.8	134.1	142.8	156.7	169.9	177.8

Çizelge 4. 10. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 4 - % 5 olarak hesaplanmıştır).

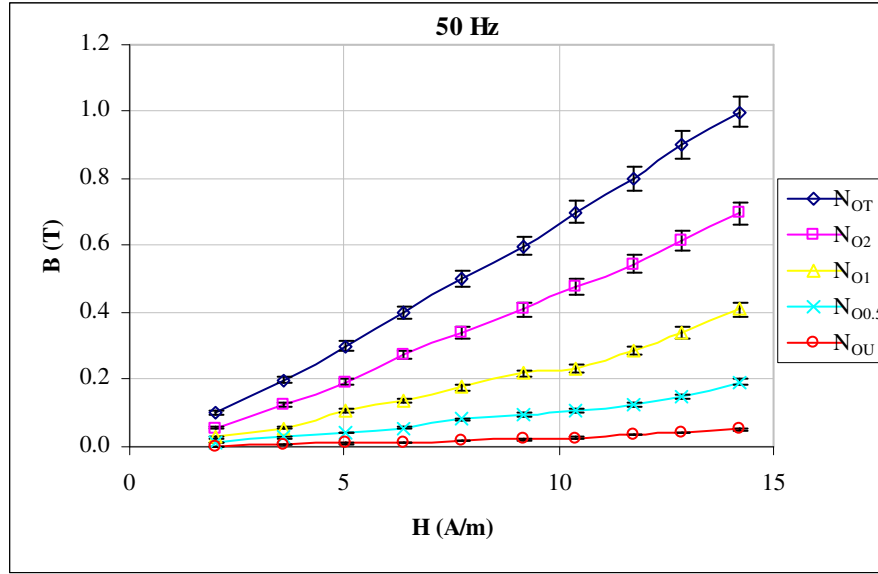
H(A/m)	B_{AT}(T)	B_{A2}(T)	B_{A1}(T)	B_{A0.5}(T)	B_{AO}(T)
50 Hz					
2.014	0.164	0.171	0.184	0.198	0.205
3.580	0.355	0.362	0.389	0.410	0.423
5.034	0.573	0.594	0.628	0.655	0.676
6.376	0.812	0.839	0.880	0.921	0.942
7.719	1.044	1.085	1.133	1.181	1.208
9.173	1.263	1.317	1.385	1.440	1.474
10.403	1.433	1.508	1.590	1.658	1.693
11.746	1.549	1.652	1.747	1.822	1.877
12.865	1.631	1.747	1.856	1.945	2.007
14.207	1.693	1.809	1.925	2.041	2.109
100 Hz					
2.349	0.143	0.150	0.164	0.174	0.184
4.139	0.293	0.307	0.331	0.355	0.369
5.817	0.454	0.474	0.508	0.543	0.560
7.271	0.618	0.648	0.693	0.734	0.758
8.725	0.785	0.826	0.880	0.928	0.959
10.180	0.956	1.007	1.072	1.130	1.164
11.634	1.123	1.188	1.263	1.331	1.368
13.088	1.280	1.358	1.447	1.525	1.570
14.654	1.423	1.522	1.628	1.720	1.775
16.332	1.546	1.665	1.788	1.891	1.955
200 Hz					
2.797	0.121	0.126	0.138	0.150	0.157
5.034	0.241	0.253	0.276	0.299	0.312
7.159	0.363	0.384	0.418	0.450	0.471
9.061	0.493	0.522	0.568	0.611	0.636
10.963	0.628	0.665	0.722	0.773	0.805
12.753	0.768	0.816	0.884	0.945	0.981
14.431	0.904	0.962	1.041	1.112	1.155
16.220	1.043	1.111	1.203	1.283	1.333
18.010	1.169	1.251	1.355	1.450	1.505
19.912	1.293	1.389	1.512	1.618	1.679
400 Hz					
3.803	0.109	0.113	0.123	0.135	0.142
7.048	0.215	0.224	0.246	0.270	0.284
9.844	0.323	0.339	0.372	0.407	0.429
12.529	0.432	0.455	0.500	0.546	0.574
14.990	0.543	0.574	0.631	0.689	0.724
17.451	0.671	0.710	0.779	0.846	0.888
19.800	0.795	0.842	0.924	1.003	1.052
22.149	0.919	0.973	1.067	1.158	1.212
24.387	1.033	1.095	1.203	1.304	1.366
26.624	1.144	1.218	1.337	1.449	1.517

Çizelge 4. 11. Miknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile 4 nolu elektrik çeliğinden indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-3).

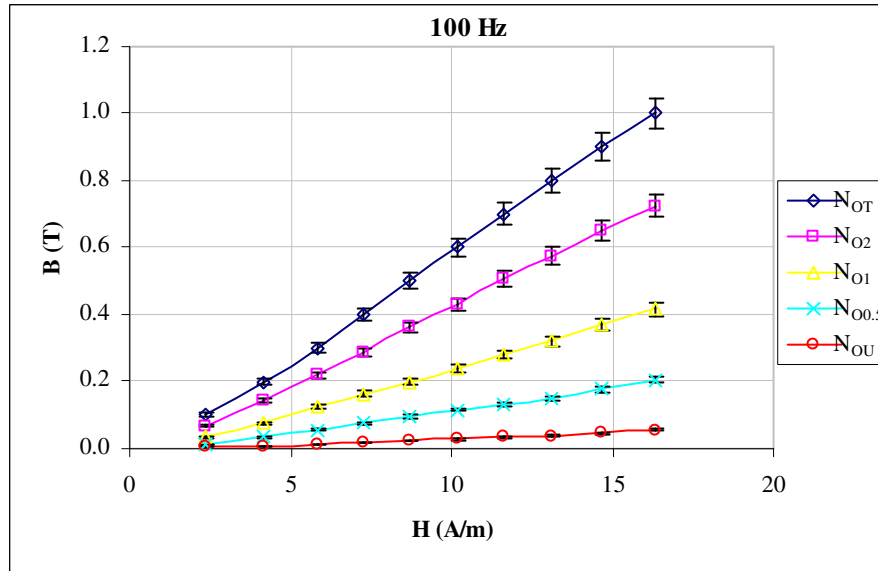
V_M (mV)	$V_{\dot{U}T}$ (mV)	$V_{\dot{U}2}$ (mV)	$V_{\dot{U}1}$ (mV)	$V_{\dot{U}0.5}$ (mV)	$V_{\dot{U}0}$ (mV)
50 Hz					
1.8	1.2	1.5	1.8	2.0	2.1
3.2	2.9	3.5	4.1	4.5	4.6
4.5	5.0	5.8	6.7	7.3	7.6
5.7	7.2	8.4	9.6	10.3	10.7
6.9	9.5	11.0	12.4	13.3	13.8
8.2	11.6	13.3	15.1	16.2	16.8
9.3	13.2	15.3	17.3	18.5	19.2
10.5	14.5	16.8	19.0	20.3	21.1
11.5	15.4	17.7	20.1	21.6	22.5
12.7	16.1	18.5	21.0	22.6	23.7
100 Hz					
2.1	2.2	2.7	3.3	3.7	3.9
3.7	5.1	6.2	7.4	8.1	8.6
5.2	8.4	10.0	11.8	12.9	13.6
6.5	11.8	14.0	16.4	17.9	18.7
7.8	15.3	18.1	21.1	22.9	23.9
9.1	18.9	22.4	25.9	28.0	29.3
10.4	22.5	26.5	30.6	33.1	34.5
11.7	25.8	30.4	34.9	37.7	39.3
13.1	28.5	33.4	38.4	41.5	43.3
14.6	30.7	35.8	40.9	44.2	46.3
200 Hz					
2.5	4.8	5.7	6.9	7.7	8.2
4.5	9.9	12.0	14.4	16.0	16.9
6.4	15.2	18.4	22.1	24.4	25.7
8.1	20.8	25.1	30.0	33.1	34.8
9.8	26.3	31.7	37.9	41.7	43.8
11.4	32.4	38.9	46.2	50.7	53.3
12.9	37.9	45.4	53.9	59.1	62.0
14.5	43.4	52.1	61.8	67.6	70.8
16.1	49.1	58.7	69.4	75.9	79.6
17.8	54.7	65.0	76.4	83.5	87.6
400 Hz					
3.4	9.5	11.3	13.7	15.5	16.6
6.3	19.0	22.7	27.6	31.1	33.1
8.8	28.6	34.2	41.6	46.7	49.6
11.2	38.1	45.7	55.6	62.2	66.0
13.4	47.6	57.4	69.7	77.8	82.4
15.6	57.1	68.8	83.4	93.0	98.4
17.7	66.8	80.7	97.9	108.9	115.1
19.8	76.2	92.1	111.8	124.4	131.4
21.8	85.3	103.3	125.3	139.3	147.2
23.8	94.3	114.1	138.3	153.8	162.5

Çizelge 4. 12. Dört ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-3)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 4 - % 5 olarak hesaplanmıştır).

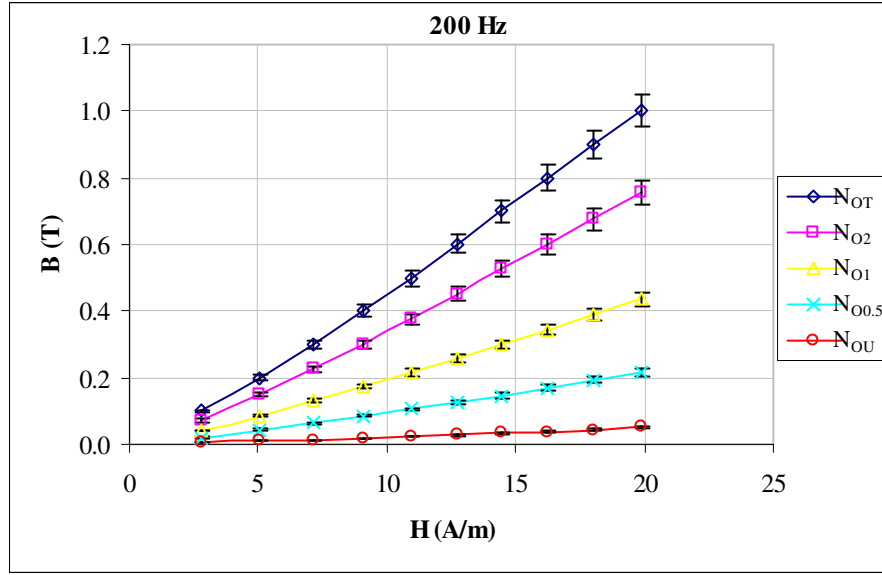
H (A/m)	B_{ÜT} (T)	B_{Ü2} (T)	B_{Ü1} (T)	B_{Ü0.5} (T)	B_{Ü0} (T)
50 Hz					
2.014	0.082	0.102	0.123	0.137	0.143
3.580	0.198	0.239	0.280	0.307	0.314
5.034	0.341	0.396	0.457	0.498	0.519
6.376	0.491	0.573	0.655	0.703	0.730
7.719	0.648	0.751	0.846	0.908	0.942
9.173	0.792	0.908	1.031	1.106	1.147
10.403	0.901	1.044	1.181	1.263	1.310
11.746	0.990	1.147	1.297	1.385	1.440
12.865	1.051	1.208	1.372	1.474	1.536
14.207	1.099	1.263	1.435	1.542	1.618
100 Hz					
2.349	0.075	0.092	0.113	0.126	0.133
4.139	0.174	0.212	0.253	0.276	0.293
5.817	0.287	0.341	0.403	0.440	0.464
7.271	0.403	0.478	0.560	0.611	0.638
8.725	0.522	0.618	0.720	0.781	0.816
10.180	0.645	0.764	0.884	0.956	1.000
11.634	0.768	0.904	1.044	1.130	1.177
13.088	0.880	1.037	1.191	1.287	1.341
14.654	0.973	1.140	1.310	1.416	1.478
16.332	1.048	1.222	1.396	1.508	1.580
200 Hz					
2.797	0.082	0.097	0.118	0.131	0.140
5.034	0.169	0.205	0.246	0.273	0.288
7.159	0.259	0.314	0.377	0.416	0.439
9.061	0.355	0.428	0.512	0.565	0.594
10.963	0.449	0.541	0.647	0.712	0.747
12.753	0.553	0.664	0.788	0.865	0.909
14.431	0.647	0.775	0.920	1.008	1.058
16.220	0.741	0.889	1.054	1.153	1.208
18.010	0.838	1.002	1.184	1.295	1.358
19.912	0.933	1.109	1.304	1.425	1.495
400 Hz					
3.803	0.081	0.096	0.117	0.132	0.142
7.048	0.162	0.194	0.235	0.265	0.282
9.844	0.244	0.292	0.355	0.398	0.423
12.529	0.325	0.390	0.474	0.531	0.563
14.990	0.406	0.490	0.595	0.664	0.703
17.451	0.487	0.587	0.712	0.793	0.839
19.800	0.570	0.688	0.835	0.929	0.982
22.149	0.650	0.786	0.954	1.061	1.121
24.387	0.728	0.881	1.069	1.188	1.256
26.624	0.804	0.973	1.180	1.312	1.386



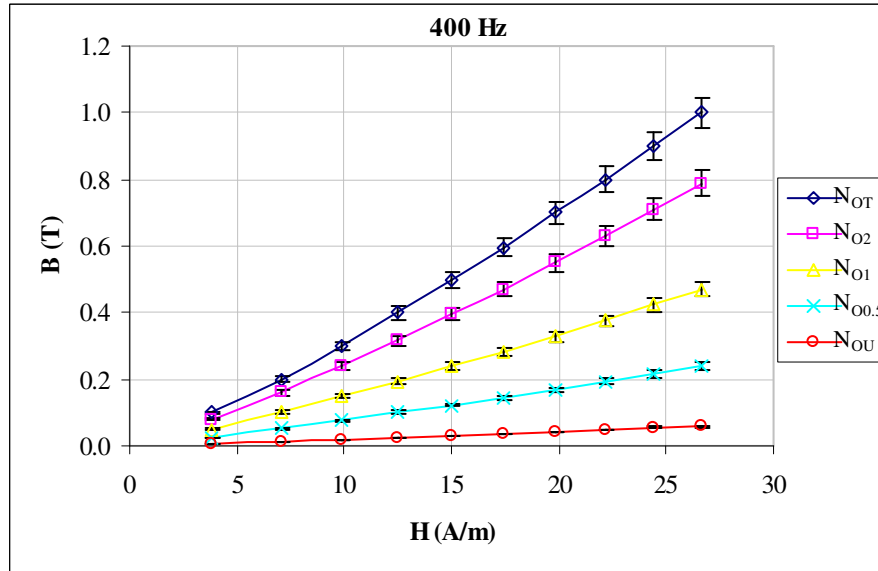
Şekil 4. 18. 50 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



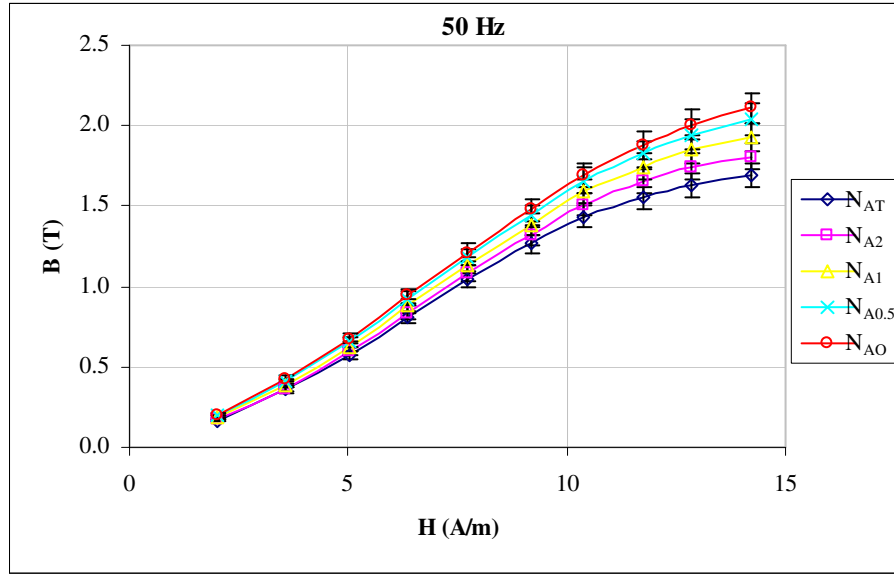
Şekil 4. 19. 100 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



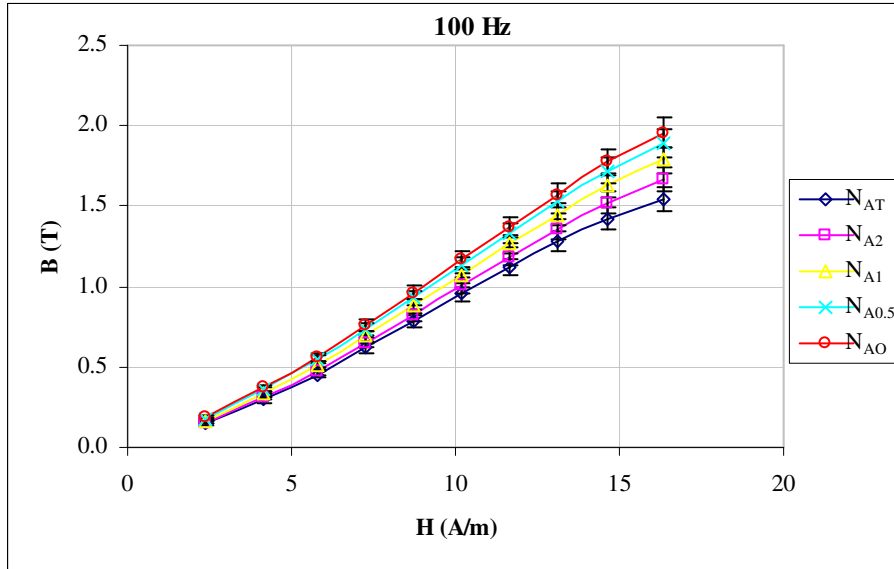
Şekil 4. 20. 200 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



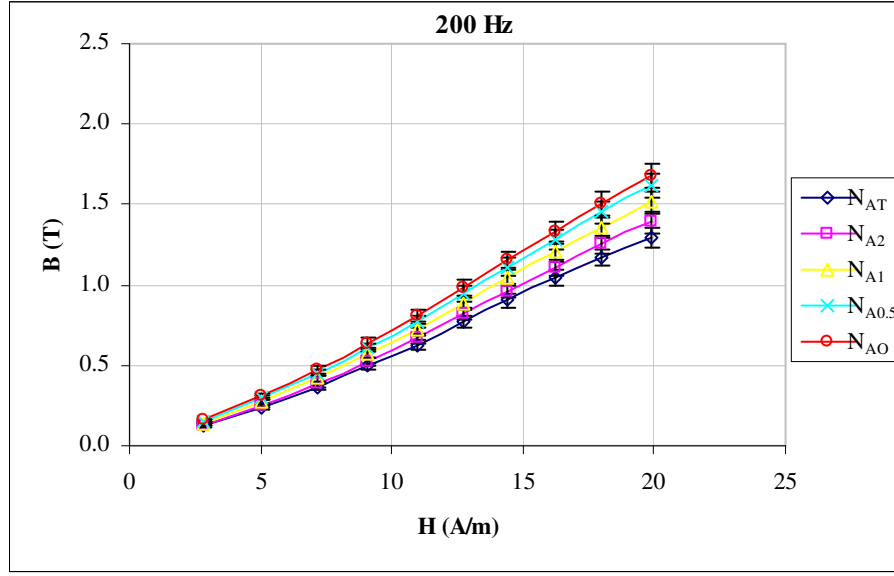
Şekil 4. 21. 400 Hz için N_{OT} , N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$, N_{OU} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



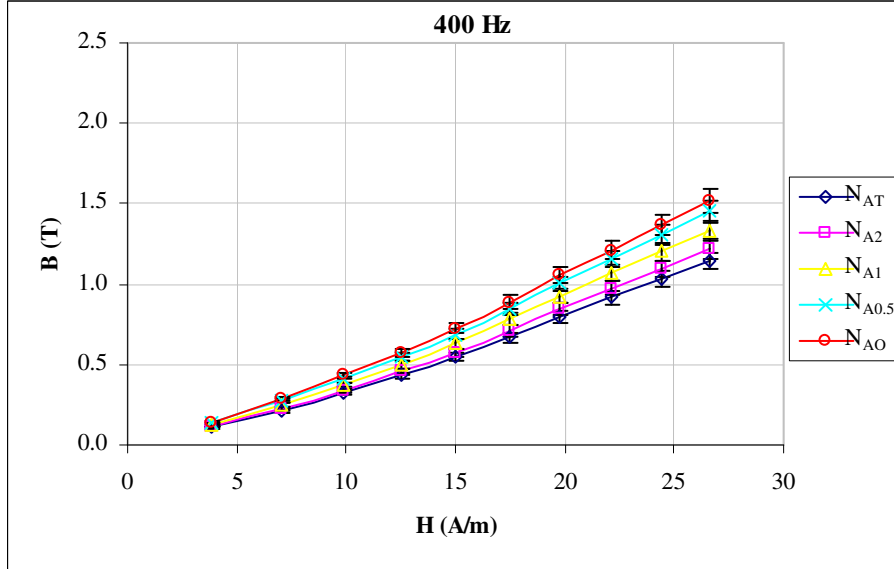
Şekil 4. 22. 50 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



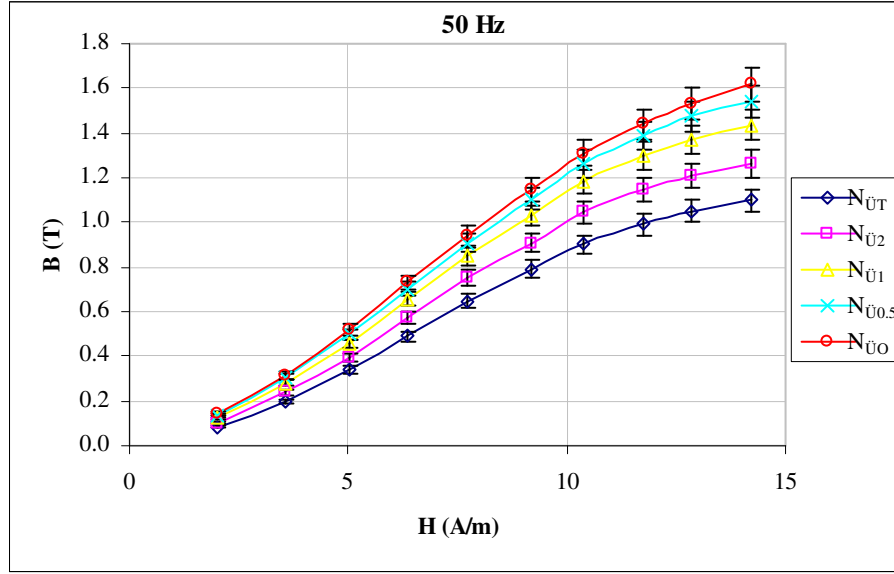
Şekil 4. 23. 100 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



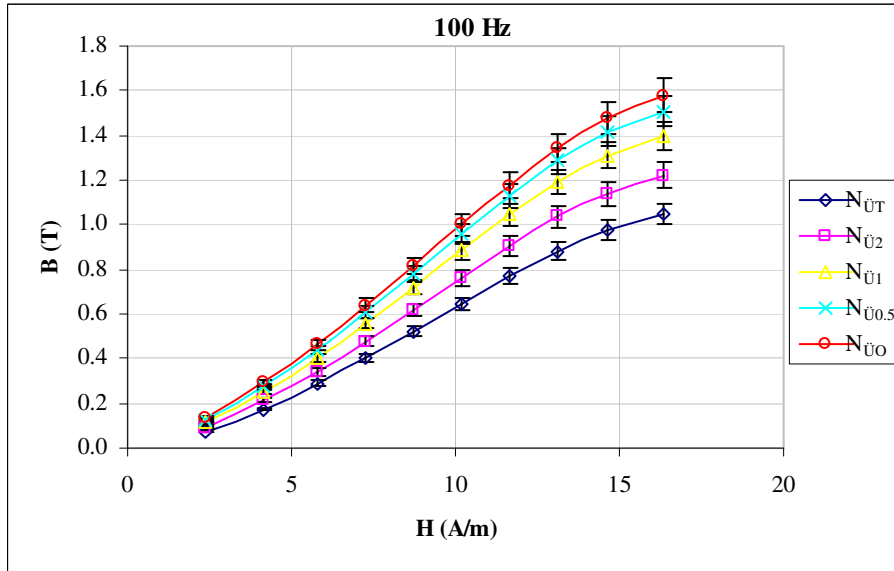
Şekil 4. 24. 200 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



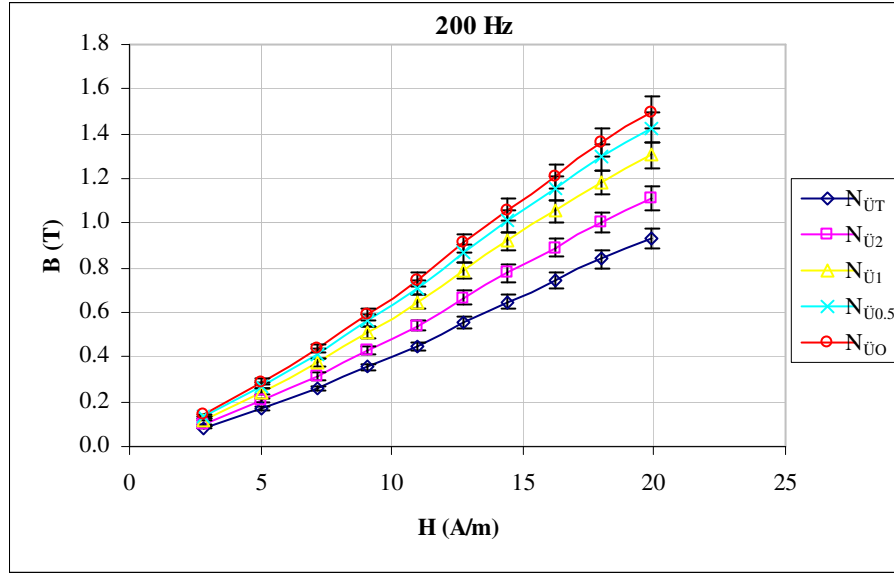
Şekil 4. 25. 400 Hz için N_{AT} , N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



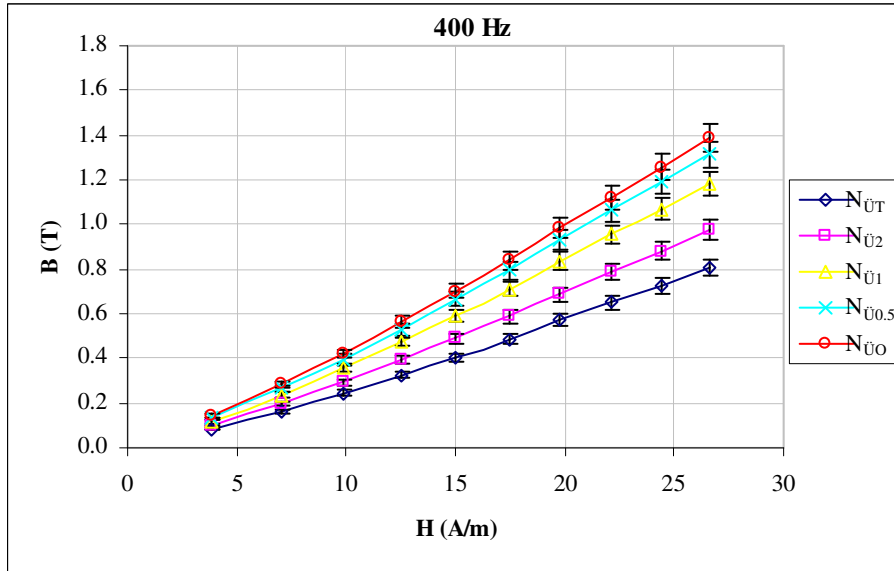
Şekil 4. 26. 50 Hz için $N_{\text{ÜT}}$, $N_{\text{Ü2}}$, $N_{\text{Ü1}}$, $N_{\text{Ü0.5}}$, $N_{\text{Ü0}}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



Şekil 4. 27. 100 Hz için $N_{\text{ÜT}}$, $N_{\text{Ü2}}$, $N_{\text{Ü1}}$, $N_{\text{Ü0.5}}$, $N_{\text{Ü0}}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



Şekil 4. 28. 200 Hz için $N_{\text{ÜT}}$, $N_{\text{Ü2}}$, $N_{\text{Ü1}}$, $N_{\text{Ü0.5}}$, $N_{\text{Ü0}}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).



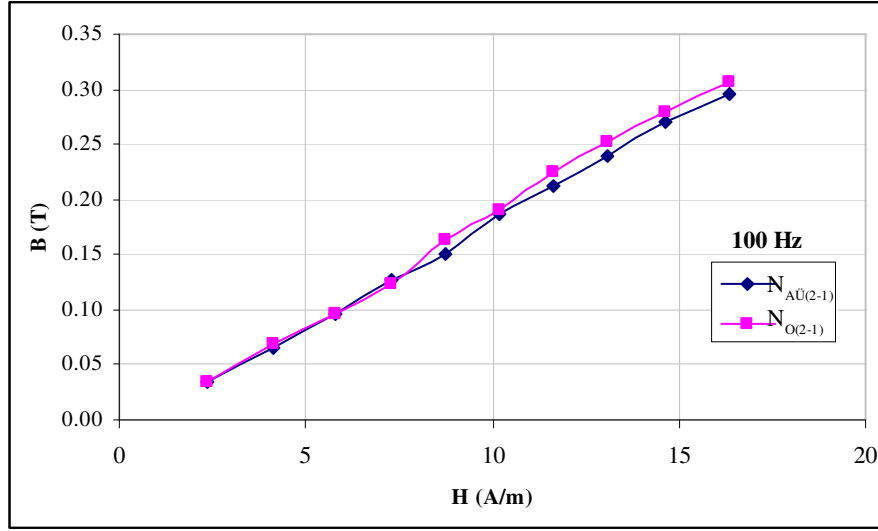
Şekil 4. 29. 400 Hz için $N_{\text{ÜT}}$, $N_{\text{Ü2}}$, $N_{\text{Ü1}}$, $N_{\text{Ü0.5}}$, $N_{\text{Ü0}}$ bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-3).

4. 3. 1. Örnek-3'ün Ölçme Sonuçlarının Tartışılması

Bu kısımda örnek-1'deki akı geçişlerinin dağılımını daha ayrıntılı incelemek amacıyla örnek-3 hazırlanmıştır. 3 nolu elektrik çeliğinden geçen akı manyetik direnci daha büyük olan farklı bir ortama (hava) yaklaştıkça 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerine geçişler yapmaktadır. Böylece 3 nolu elektrik çeliğinden geçen akıdaki azalma ile 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerindeki akının artmasını karşılaştırmak için 15 farklı yerde sarımlar yapılmıştır (Simetri nedeniyle sarımların örnek-3'ün sağ tarafına yapılması yeterlidir). B_{OT} değeri 0.1 T ile 1.0 T aralığında alınmıştır. Şekil 4. 18., Şekil 4. 19., Şekil 4. 20. ve Şekil 4. 21. 3 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı değişimlerini göstermektedir. Şekil 4. 18.'de farklı yerlere sarılmış bobinlerden geçen indüksiyon değerleri artan manyetik alanla artmaktadır. Ayrıca manyetik akı değerinin, N_{OT} sarımlarından N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$ ve N_{OU} sarımlarına gidildikçe azaldığı gözlenmektedir. Buna 3 nolu elektrik çeliğinin sonundaki hava aralığı sebep olmaktadır. Manyetik akı, direnci yüksek olan hava ortamına yaklaştıkça yönelimini değiştirerek üst ve alttaki elektrik çeliklerine geçmektedir. 50 Hz'de gözlenen bu durum benzer olarak 100, 200 ve 400 Hz frekans değerlerinde de aynen tekrarlanmaktadır. Şekil 4. 22., Şekil 4. 23., Şekil 4. 24. ve Şekil 4. 25., 1 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı değişimlerini göstermektedir. Şekil 4. 22.'de tüm algılama bobinleri için manyetik akı yoğunluğu değeri manyetik alanın yaklaşık 12 A/m değerine kadar hızlı bir şekilde arttığı halde 12 A/m'den sonra daha yavaş değişim göstermektedir. Bunun sebebi maddenin bu değerden sonra doyuma yaklaşmasıdır. Benzer olarak Şekil 4. 23.'te de tüm bobinler için manyetik akı yoğunluğu değeri manyetik alanın yaklaşık 15 A/m değerine kadar hızlı bir şekilde arttığı halde 15 A/m'den sonra değerlerdeki değişim azalmaktadır. Fakat Şekil 4. 24. ve Şekil 4. 25.'te manyetik akı yoğunluğu tüm eğriler için hızlı bir şekilde artmaktadır. Manyetik akı, 50 Hz gibi nüfuz edemediği için 200 ve 400 Hz değerlerinde doyuma ulaştığı gözlenmemiştir. Bunu gözleyebilmek için deney düzeneği yeterli olmamıştır. Şekil 4. 26., Şekil 4. 27., Şekil 4. 28. ve Şekil 4. 29., 4 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı değişimlerini göstermektedir. Bu şekillerdeki eğrilerin değişimi 1 nolu elektrik çeliğindeki eğrilere benzer olduğu gözlemlenmektedir. Farklı olarak 1 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı yoğunluğu değerlerinin 4 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı yoğunluğu değerlerinden büyük olmasının sebebi 1 nolu

elektrik çeliğinin çekirdeğe daha yakın olmasıdır (Şekil 3. 6.). Manyetik akı yoğunluğu değerlerinin N_{OT} sarımlarından N_{O2} , N_{O1} , $N_{O0.5}$ ve N_{OU} sarımlarına gidildikçe azalırken, N_{AT} sarımlarından N_{A2} , N_{A1} , $N_{A0.5}$, N_{AO} sarımlarına ve $N_{ÜT}$ sarımlarından $N_{Ü2}$, $N_{Ü1}$, $N_{Ü0.5}$, $N_{ÜO}$ sarımlarına doğru gidildikçe arttığı gözlenmektedir. Manyetik akı yoğunluğu ortalama olarak N_{OT} ile N_{O2} sarımları arasında % 27, N_{O2} ile N_{O1} sarımları arasında % 44, N_{O1} ile $N_{O0.5}$ sarımları arasında % 52 ve $N_{O0.5}$ ile N_{OU} sarımları arasında da % 76 oranında azalmıştır. 4 nolu elektrik çeliğinde ise 3 nolu elektrik çeliğinden geçişler nedeniyle $B_{ÜT}$ değeri $B_{ÜO}$ değerine kadar artmaktadır. Manyetik akı yoğunluğunda ortalama olarak $N_{ÜT}$ ile $N_{Ü2}$ sarımları arasında % 19, $N_{Ü2}$ ile $N_{Ü1}$ sarımları arasında % 18, $N_{Ü1}$ ile $N_{Ü0.5}$ sarımları arasında % 10 ve $N_{Ü0.5}$ ile $N_{ÜO}$ sarımları arasında % 5 oranında artma olmuştur. 1 nolu elektrik çeliğinde de 3 nolu elektrik çeliğinden geçişler nedeniyle B_{AT} değeri B_{AO} değerine kadar artmaktadır. Manyetik akı yoğunluğunda ortalama olarak N_{AT} ile N_{A2} sarımları arasında % 5, N_{A2} ile N_{A1} sarımları arasında % 8, N_{A1} ile $N_{A0.5}$ sarımları arasında % 7 ve $N_{A0.5}$ ile N_{AO} sarımları arasında % 4 oranında artma olmuştur. 1 nolu elektrik çeliği çekirdeğe yakın olduğu için 4 nolu elektrik çeliğine göre daha çabuk doyuma ulaşmaktadır. Bu nedenle 4 nolu elektrik çeliğindeki artma oranları 1 nolu elektrik çeliğindeki artma oranlarından daha büyüktür.

3 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akının 1 ve 4 nolu elektrik çeliğine geçtiğini göstermek amacıyla Şekil 4. 30.'da 100 Hz için B-H eğrisi verilmektedir. Söz konusu şekilde N_{O2} 'den N_{O1} 'e gidişte manyetik akı yoğunluğundaki azalmanın, N_{A2} 'den N_{A1} 'e ve $N_{Ü2}$ 'den $N_{Ü1}$ 'e gidişteki artmaların toplamına hemen hemen eşit olduğu görülmektedir. Böylece 3 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akının hava ile karşılaştığında 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerine geçiş yaptığı sonucu çıkarılabilmektedir.



Şekil 4. 30. Örnek-3 için $N_{O(2-1)}$ 'deki akı yoğunluğundaki azalma ile $N_{A\ddot{U}(2-1)}$ ve $N_{\ddot{U}(2-1)}$ 'deki akı yoğunluğundaki artmanın toplamının, manyetik alan şiddetiyle değişimi.

4. 4. ÖRNEK-4'ÜN ÖLÇME SONUÇLARI

Şekil 3. 7.'deki örnek-4'ün çekirdek üzerine yerleştirilmesiyle, akının söz konusu örnekten geçmesi sağlanır. Bunun sonucunda N_{2C} (2C bobininin sarım sayısı) üzerinde indüklenen V_{2C} gerilimi ölçülerek B_{2C} (Manyetik akı yoğunluğu) değeri hesaplanmıştır. Aynı şekilde sırasıyla N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} üzerinde indüklenen V_{2B} , V_{2A} , V_{3B} , V_{3A} , V_{5A} , V_{6B} , V_{6A} gerilimleri ölçülerek B_{2B} , B_{2A} , B_{3B} , B_{3A} , B_{5A} , B_{6B} , B_{6A} değerleri de hesaplanmıştır. V_M gerilimi ile algılayıcı bobinlerden 4 ayrı frekansta ölçülen gerilimler Çizelge 4. 13.'te verilmektedir. Çizelge 4. 13.'te verilen değerler kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri Çizelge 4. 14.'te yer almaktadır. N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri 50, 100, 200 ve 400 Hz için Şekil 4. 31., Şekil 4. 32., Şekil 4. 33. ve Şekil 4. 34.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4. 13. Miknatıslanma devresindeki seri direnç üzerinde düşen gerilim (V_M) ile indüklenen gerilimi algılayan bobinlerden 4 ayrı frekans değerinde ölçülen gerilimler (örnek-4).

V_M (mV)	V_{2C} (mV)	V_{2B} (mV)	V_{2A} (mV)	V_{3B} (mV)	V_{3A} (mV)	V_{5A} (mV)	V_{6B} (mV)	V_{6A} (mV)
50 Hz								
6.4	3.2	0.6	0.4	1.5	0.7	0.6	1.8	0.8
12.1	6.4	1.4	0.8	3.0	1.4	1.2	3.7	1.7
17.6	9.6	2.2	1.2	4.6	2.1	1.8	5.6	2.6
23.0	12.7	3.0	1.7	6.2	2.9	2.5	7.5	3.5
28.2	15.8	3.8	2.2	7.8	3.7	3.2	9.5	4.4
33.5	19.1	4.6	2.6	9.4	4.4	3.8	11.4	5.3
38.7	22.4	5.4	3.1	11.0	5.2	4.5	13.3	6.2
43.9	25.8	6.2	3.5	12.6	6.0	5.2	15.2	7.2
49.0	29.3	7.0	4.0	14.2	6.8	6.0	17.0	8.1
54.2	32.9	7.8	4.4	15.9	7.6	6.7	18.9	9.0
59.5	36.4	8.6	4.9	17.5	8.4	7.4	20.7	9.9
65.0	39.6	9.4	5.3	19.2	9.2	8.2	22.4	10.8
70.9	42.4	10.2	5.8	20.8	10.0	9.0	24.0	11.7
78.0	44.7	11.0	6.3	22.5	10.9	9.9	25.3	12.4
88.4	46.7	11.7	6.7	24.1	11.8	10.9	26.1	13.0
100 Hz								
6.5	6.3	1.5	0.8	3.0	1.4	1.2	3.7	1.7
12.4	12.6	3.0	1.7	6.2	2.9	2.5	7.5	3.5
18.0	18.8	4.6	2.6	9.4	4.4	3.9	11.3	5.3
23.5	25.0	6.1	3.5	12.5	6.0	5.2	15.2	7.1
28.9	31.3	7.7	4.4	15.7	7.5	6.5	19.0	9.0
34.2	37.6	9.3	5.3	18.9	9.0	7.9	22.8	10.8
39.5	44.1	10.9	6.3	22.1	10.6	9.2	26.6	12.6
44.7	50.7	12.5	7.2	25.3	12.1	10.6	30.4	14.4
49.9	57.6	14.1	8.1	28.5	13.7	12.1	34.1	16.3
55.2	64.6	15.7	9.0	31.7	15.3	13.5	37.8	18.1
60.5	71.7	17.4	10.0	34.9	16.8	14.9	41.4	19.9
66.0	78.6	19.0	10.9	38.3	18.5	16.5	45.0	21.8
71.8	84.6	20.6	11.8	41.6	20.2	18.0	48.2	23.5
78.6	89.6	22.2	12.7	45.0	21.9	19.9	50.7	25.0
88.2	93.6	23.6	13.6	48.3	23.7	21.9	52.3	26.2

Çizelge 4. 13.'ün devamı.

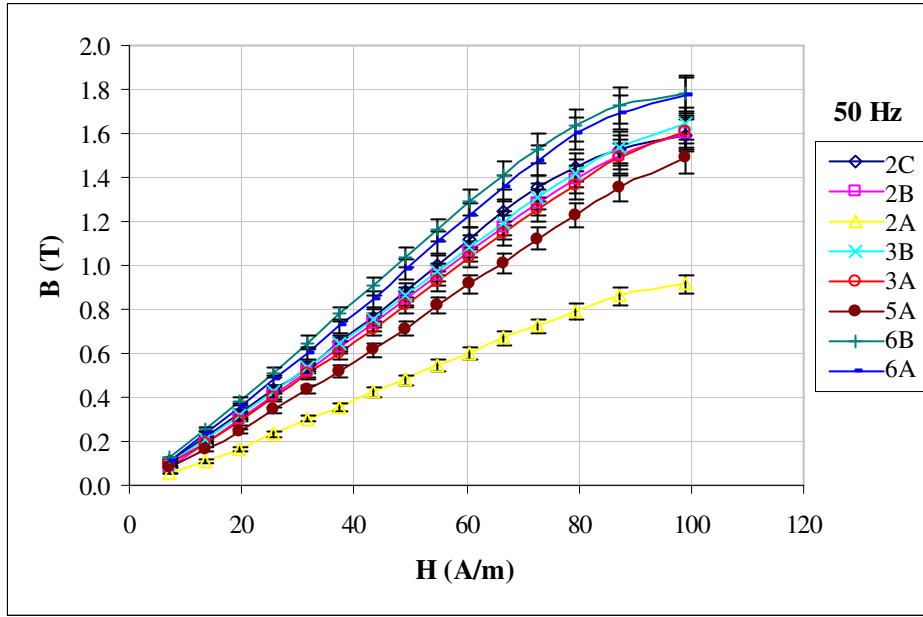
V _M (mV)	V _{2C} (mV)	V _{2B} (mV)	V _{2A} (mV)	V _{3B} (mV)	V _{3A} (mV)	V _{5A} (mV)	V _{6B} (mV)	V _{6A} (mV)
200 Hz								
6.6	12.5	3.0	1.7	6.2	2.9	2.5	7.4	3.5
12.7	24.9	6.2	3.5	12.5	5.9	5.2	15.1	7.1
18.6	37.2	9.3	5.4	18.9	9.0	7.9	22.8	10.8
24.2	49.4	12.4	7.2	25.1	12.1	10.6	30.4	14.4
29.8	61.7	15.6	9.0	31.5	15.1	13.2	38.1	18.1
35.3	74.1	18.7	10.9	37.9	18.2	15.9	45.8	21.8
40.7	86.6	21.9	12.7	44.3	21.3	18.6	53.4	25.4
46.0	99.6	25.1	14.6	50.7	24.4	21.4	61.0	29.1
51.3	112.9	28.3	16.4	57.1	27.5	24.1	68.4	32.7
56.6	126.8	31.6	18.2	63.6	30.7	27.1	75.8	36.4
61.9	141.3	34.9	20.1	70.2	33.9	30.0	83.1	40.1
67.4	155.5	38.2	21.9	76.7	37.1	33.0	90.3	43.7
73.3	168.4	41.4	23.7	83.3	40.5	36.2	96.7	47.2
80.0	179.4	44.5	25.5	90.2	44.0	39.9	101.6	50.2
89.3	188.0	47.4	27.3	96.7	47.6	44.0	104.7	52.5
400 Hz								
7.2	24.4	6.1	3.5	12.5	6.0	5.3	15.0	7.1
13.7	48.6	12.3	7.2	25.1	12.1	10.6	30.0	14.3
20.0	73.1	18.7	10.9	37.8	18.2	16.0	45.3	21.7
26.1	97.6	25.0	14.5	50.5	24.3	21.4	60.6	29.0
31.9	121.8	31.2	18.2	63.0	30.4	26.7	75.8	36.2
37.7	146.4	37.6	21.9	75.8	36.5	32.1	91.3	43.6
43.3	171.2	44.0	25.5	88.5	42.7	37.5	106.7	51.0
48.9	196.7	50.5	29.3	101.4	48.9	43.0	122.1	58.5
54.4	222.6	56.9	33.0	114.3	55.2	48.6	137.2	65.8
59.9	249.7	63.5	36.7	127.2	61.5	54.3	152.1	73.2
65.5	277.6	70.0	40.4	140.1	67.9	60.0	166.9	80.6
71.1	305.8	76.7	44.1	153.2	74.3	65.9	181.5	87.9
76.9	333.3	83.2	47.8	166.8	81.1	72.4	194.5	95.0
82.4	356.9	89.4	51.4	180.6	88.2	79.9	204.2	100.9
89.4	375.9	95.2	54.9	193.2	95.2	87.8	209.9	105.4

Çizelge 4. 14. Normalize edilmiş 4 ayrı frekanstaki H ve B değerleri (örnek-4)
(H'nin hatası \pm % 2, B'nin hatası da \pm % 4 - % 5 olarak hesaplanmıştır).

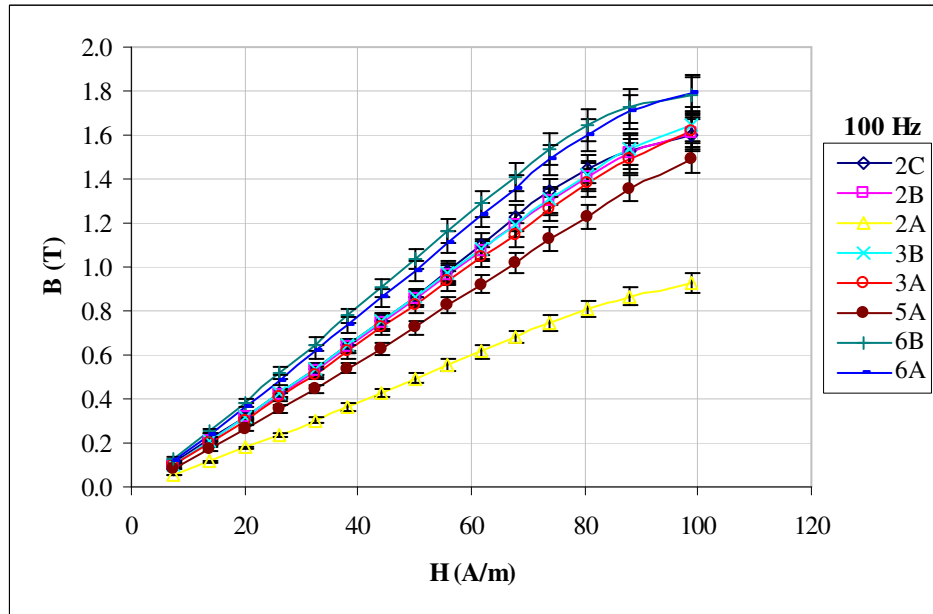
H (A/m)	B _{2C} (T)	B _{2B} (T)	B _{2A} (T)	B _{3B} (T)	B _{3A} (T)	B _{5A} (T)	B _{6B} (T)	B _{6A} (T)
50 Hz								
6.556	0.100	0.075	0.050	0.094	0.088	0.075	0.113	0.100
12.395	0.200	0.175	0.100	0.188	0.175	0.150	0.231	0.213
18.030	0.300	0.275	0.150	0.288	0.263	0.225	0.350	0.325
23.747	0.400	0.378	0.214	0.391	0.365	0.315	0.472	0.441
29.254	0.500	0.481	0.278	0.494	0.468	0.405	0.601	0.557
34.497	0.600	0.578	0.327	0.591	0.553	0.477	0.716	0.666
39.645	0.700	0.675	0.388	0.688	0.650	0.563	0.831	0.775
44.623	0.800	0.769	0.434	0.781	0.744	0.645	0.943	0.893
49.339	0.900	0.860	0.491	0.872	0.835	0.737	1.044	0.995
54.004	1.000	0.948	0.535	0.967	0.924	0.815	1.149	1.094
58.943	1.100	1.040	0.592	1.058	1.015	0.895	1.251	1.197
64.569	1.200	1.139	0.642	1.164	1.115	0.994	1.358	1.309
71.260	1.300	1.251	0.711	1.275	1.226	1.104	1.472	1.435
80.082	1.400	1.378	0.789	1.409	1.366	1.240	1.585	1.553
93.078	1.500	1.503	0.861	1.548	1.516	1.400	1.677	1.670
100 Hz								
6.764	0.100	0.095	0.051	0.095	0.089	0.076	0.117	0.108
12.904	0.200	0.190	0.108	0.197	0.184	0.159	0.238	0.222
18.832	0.300	0.294	0.166	0.300	0.281	0.249	0.361	0.338
24.651	0.400	0.390	0.224	0.400	0.384	0.333	0.486	0.454
30.267	0.500	0.492	0.281	0.502	0.479	0.415	0.607	0.575
35.780	0.600	0.594	0.338	0.603	0.574	0.504	0.728	0.689
41.106	0.700	0.692	0.400	0.702	0.673	0.584	0.844	0.800
46.243	0.800	0.789	0.454	0.798	0.764	0.669	0.959	0.909
51.118	0.900	0.881	0.506	0.891	0.856	0.756	1.066	1.019
56.022	1.000	0.972	0.557	0.981	0.947	0.836	1.170	1.121
60.853	1.100	1.068	0.614	1.071	1.031	0.914	1.270	1.221
66.062	1.200	1.160	0.666	1.169	1.130	1.008	1.374	1.331
72.335	1.300	1.266	0.725	1.278	1.242	1.106	1.481	1.444
80.518	1.400	1.388	0.794	1.406	1.369	1.244	1.584	1.563
92.669	1.500	1.513	0.872	1.548	1.519	1.404	1.676	1.679

Çizelge 4. 14.'ün devamı.

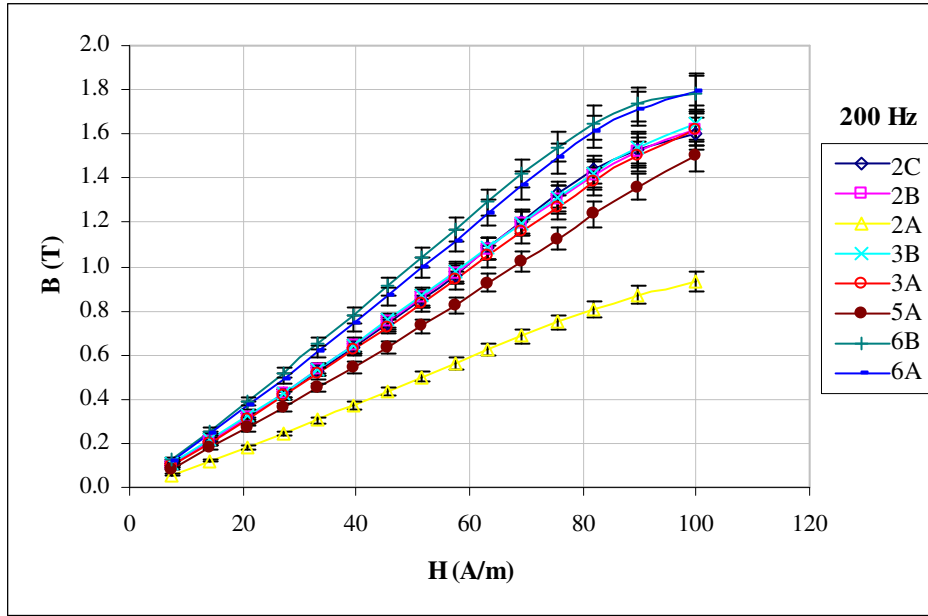
H (A/m)	B _{2C} (T)	B _{2B} (T)	B _{2A} (T)	B _{3B} (T)	B _{3A} (T)	B _{5A} (T)	B _{6B} (T)	B _{6A} (T)
200 Hz								
6.923	0.100	0.096	0.054	0.099	0.093	0.080	0.118	0.112
13.376	0.200	0.199	0.112	0.201	0.190	0.167	0.243	0.228
19.669	0.300	0.300	0.174	0.305	0.290	0.255	0.368	0.348
25.694	0.400	0.402	0.233	0.406	0.392	0.343	0.492	0.466
31.665	0.500	0.506	0.292	0.511	0.489	0.428	0.618	0.587
37.479	0.600	0.606	0.353	0.614	0.589	0.515	0.742	0.706
43.138	0.700	0.708	0.411	0.716	0.689	0.601	0.863	0.821
48.447	0.800	0.806	0.469	0.814	0.784	0.688	0.980	0.935
53.623	0.900	0.902	0.523	0.910	0.877	0.768	1.091	1.043
58.530	1.000	0.997	0.574	1.003	0.968	0.855	1.196	1.148
63.186	1.100	1.087	0.626	1.093	1.056	0.934	1.294	1.249
68.201	1.200	1.179	0.676	1.184	1.145	1.019	1.394	1.349
74.197	1.300	1.278	0.732	1.286	1.251	1.118	1.493	1.457
81.861	1.400	1.389	0.796	1.408	1.373	1.245	1.586	1.567
93.426	1.500	1.513	0.871	1.543	1.519	1.404	1.671	1.676
400 Hz								
7.738	0.100	0.100	0.057	0.102	0.098	0.087	0.123	0.116
14.785	0.200	0.202	0.119	0.207	0.199	0.174	0.247	0.235
21.525	0.300	0.307	0.179	0.310	0.299	0.263	0.372	0.356
28.052	0.400	0.410	0.238	0.414	0.398	0.351	0.497	0.475
34.342	0.500	0.512	0.299	0.517	0.499	0.438	0.622	0.594
40.519	0.600	0.616	0.359	0.621	0.598	0.526	0.748	0.715
46.430	0.700	0.720	0.417	0.724	0.698	0.613	0.873	0.834
52.156	0.800	0.822	0.477	0.825	0.796	0.700	0.993	0.952
57.680	0.900	0.920	0.534	0.924	0.893	0.786	1.109	1.064
62.910	1.000	1.017	0.588	1.019	0.985	0.870	1.218	1.173
68.065	1.100	1.110	0.640	1.110	1.076	0.951	1.323	1.278
73.169	1.200	1.204	0.692	1.202	1.166	1.034	1.424	1.380
78.659	1.300	1.298	0.746	1.301	1.265	1.130	1.517	1.482
84.766	1.400	1.403	0.807	1.417	1.384	1.254	1.602	1.583
93.555	1.500	1.520	0.876	1.542	1.520	1.401	1.675	1.682



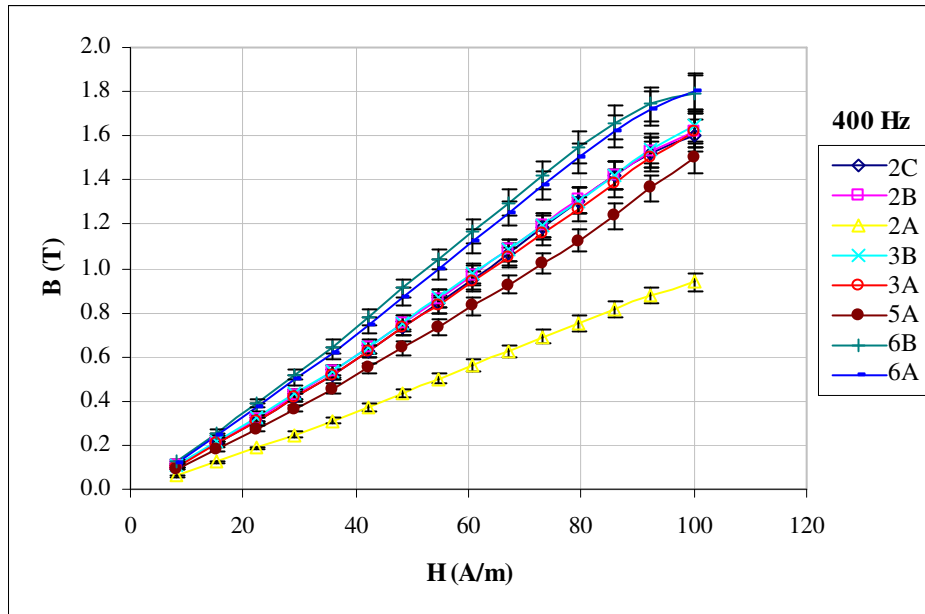
Şekil 4. 31. 50 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).



Şekil 4. 32. 100 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).



Şekil 4. 33. 200 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).



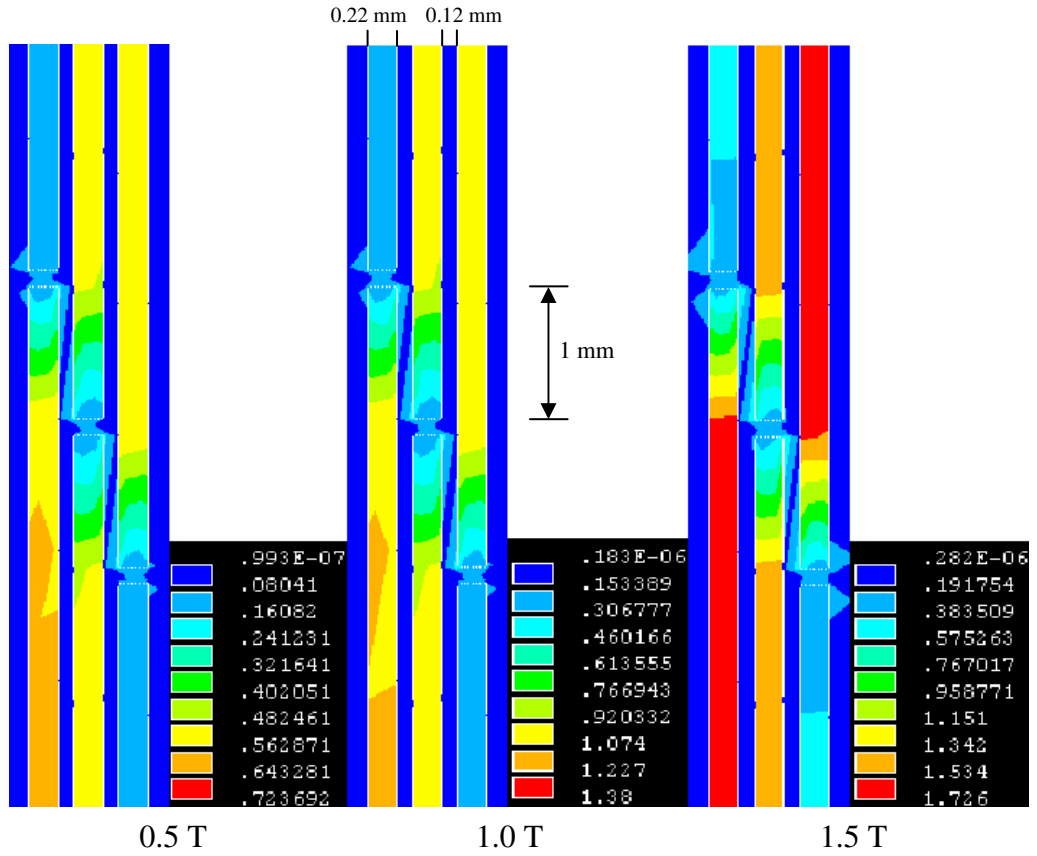
Şekil 4. 34. 400 Hz için N_{2C} , N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} , N_{6A} bobinlerinde indüklenen gerilimlerden elde edilen B-H eğrileri (örnek-4).

4. 4. 1. Örnek-4'ün Ölçme Sonuçlarının Tartışılması

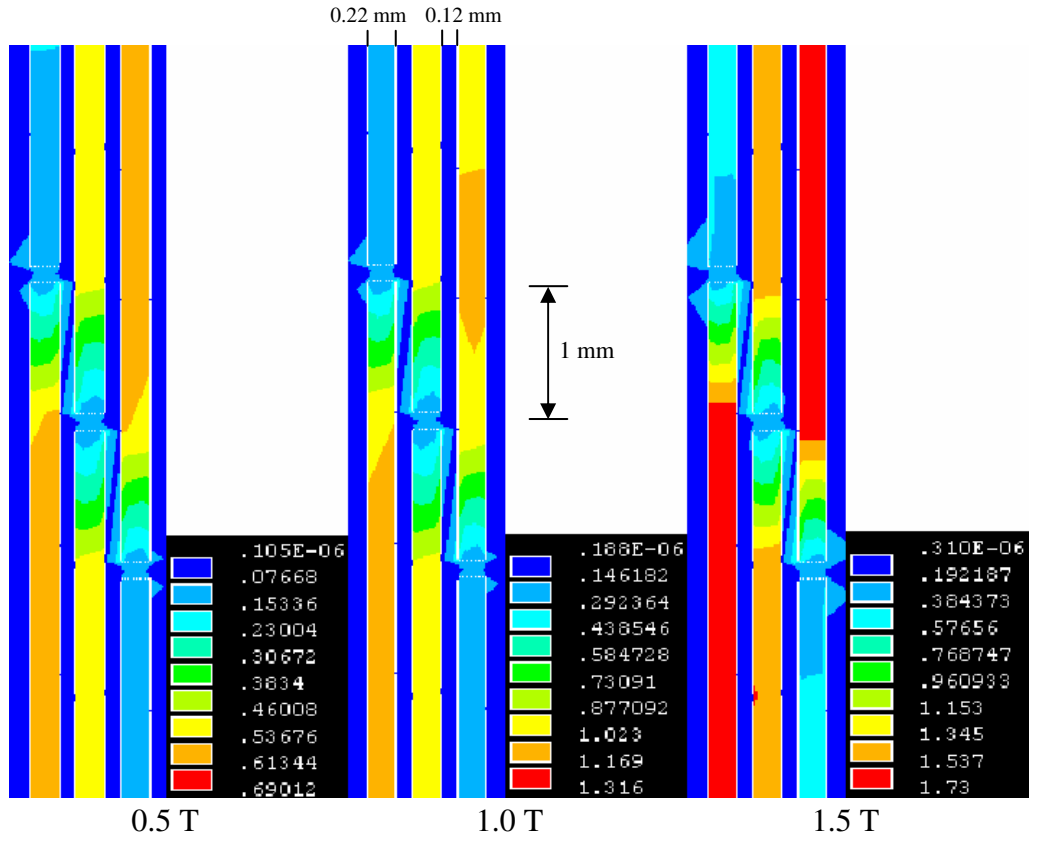
Örnek-4'te altı adet elektrik çeliği arasında tek bir hava aralığı yerine z-şeklinde üç tane hava aralığı vardır (Şekil 3. 7.). 1 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akı manyetik direnci elektrik çeliğine göre daha fazla olan hava aralığına yaklaştığında tümüyle aynı yönde geçemeyip yüzey alanının daha büyük olması nedeniyle yukarı doğru yönelerek 2 nolu elektrik çeliğine geçmektedir. 2 nolu elektrik çeliğinden gelen akı hava aralığına yaklaştığında karşısındaki 5 nolu elektrik çeliğine tamamen geçemeyip, yukarı ve aşağı doğru yönelerek 3 ve 6 nolu elektrik çeliklerine geçişler yapmaktadır. Aynı şekilde 3 nolu elektrik çeliğinden gelen akı da hava aralığına yaklaştıkça 5 nolu elektrik çeliğine yönelmektedir. Deneysel olarak 50, 100, 200 ve 400 Hz değerine karşılık N_{2C} bobininden 0.1 T ile 1.5 T arasında başlangıç manyetik akı yoğunluğu verilerek N_{2B} , N_{2A} , N_{3B} , N_{3A} , N_{5A} , N_{6B} ve N_{6A} sarımlarındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi incelenmiştir. Seçilen frekans değerleri uygulamada transformatör çekirdeklerinde kullanılan güç frekanslarına karşılık gelmektedir. Şekil 4. 31., Şekil 4. 32., Şekil 4. 33. ve Şekil 4. 34. manyetik akıdaki değişimleri göstermektedir. Şekil 4. 31.'de B_{2C} ile ayarlanan manyetik akı yoğunluğu değerleri z-şekilli hava aralığının manyetik direnç etkisinden dolayı 6 nolu elektrik çeliğinde (B_{6B} , B_{6A}) en büyüktür. Ayrıca 6 nolu elektrik çeliğinin çekirdeğe yakın olması da bu değerlerin büyük olmasını sağlamaktadır. Daha sonra sırasıyla N_{2C} , N_{3B} , N_{2B} , N_{3A} ve N_{5A} sarımlarına karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu değerleri gözlenmektedir. 2 nolu elektrik çeliğinin uç kısmında yani hava aralığına en yakın olan yerde havanın manyetik direncinin çok büyük olması nedeniyle manyetik akı yoğunluğu (B_{2A}) en küçüktür. Grafikteki akı değişimleri manyetik alanın yaklaşık 80 A/m değerine kadar hızlı bir şekilde artarken 80 A/m değerinden sonra değişim az olmaktadır. Bunun nedeni maddenin doyuma yaklaşmasıdır. 50 Hz'de gözlenen bu durum benzer olarak 100, 200 ve 400 Hz frekans değerlerinde de gözlenmiştir.

Deneysel verilerle sayısal sonuçları karşılaştırmak amacıyla, deneysel verilere ek olarak sonlu elemanlar yöntemiyle örnek-4'ün benzeşimi bilgisayar yardımıyla yapılarak akı dağılımlarındaki değişimler karşılaştırılmıştır. Şekil 4. 35., Şekil 4. 36., Şekil 4. 37. ve Şekil 4. 38., örnek-4'te farklı frekanslardaki sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiş manyetik akı yoğunluğu dağılımlarını göstermektedir.

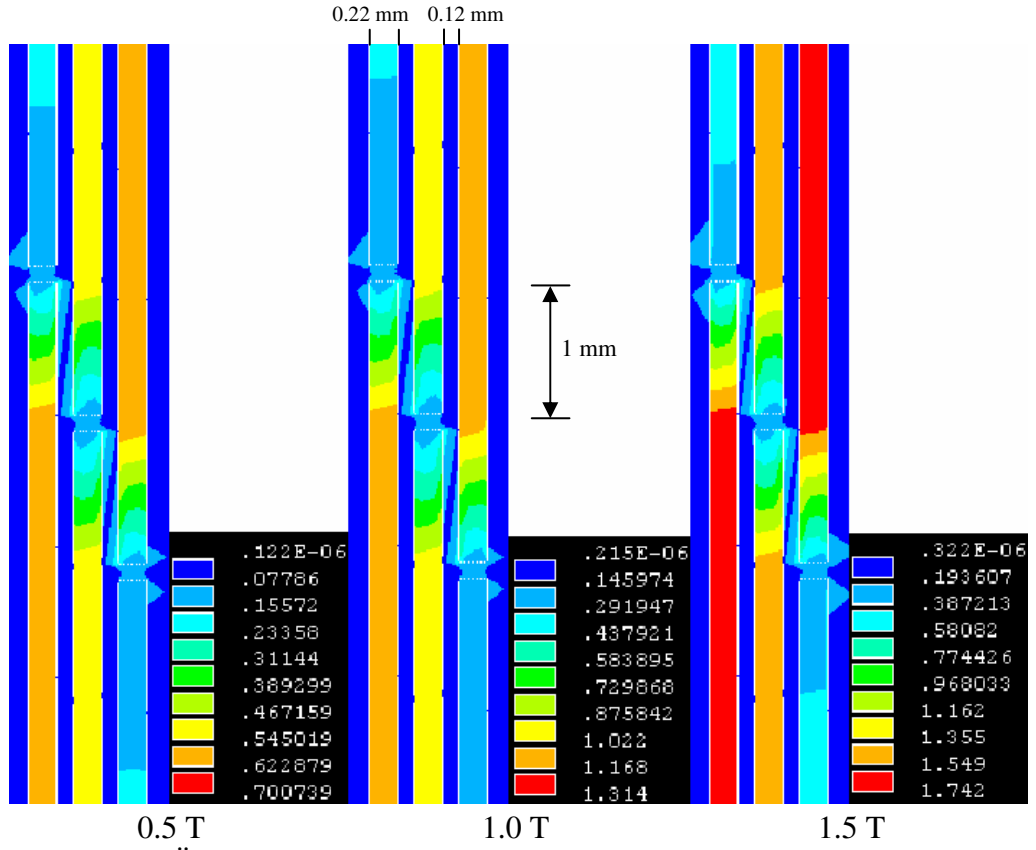
Başlangıçta manyetik akı 1 nolu elektrik çeliğinde çekirdeğe en yakın olduğundan dolayı en fazla manyetik akı geçişleri görülmektedir. Bu akı geçişleri 2 ve 3 nolu elektrik çeliklerine doğru azalarak devam etmektedir, fakat ilk olarak 1 nolu elektrik çeliğindeki manyetik akı hava boşluğuna yaklaştıkça azalmaktadır. Örneğin 0.5 T (B_{2C}), 50 Hz manyetik akı yoğunluğu başlangıç değerinden 0.08-0.32 T (B_{2A}) aralığında bir değere kadar düşmüştür. Bununla birlikte alt hava boşluğuna karşılık gelen bölgenin üstündeki 2 nolu elektrik çeliğindeki akı yoğunluğu 0.40-0.56 T (B_{2B}) aralığında bir değere ve 3 nolu elektrik çeliğinde ise akı yoğunluğu 0.56 T (B_{3B}) en büyük değerine kadar yükselmektedir. Orta hava aralığının üstündeki ve altındaki 3 ve 6 nolu elektrik çeliklerindeki manyetik akı yoğunlukları da 0.56 T (B_{3A} , B_{6A}) en büyük değerine kadar yükselmektedir. En üstteki hava aralığının altındaki 5 nolu elektrik çeliğinde manyetik akı yoğunluğu 0.40-0.56 T (B_{5A}) ve onun altındaki 6 nolu elektrik çeliğinde ise 0.48-0.64 T (B_{6B}) aralığındaki değere karşılık gelmektedir. Bu değerler 2 nolu elektrik çeliğindeki başlangıç manyetik akı yoğunluğu 1.5 T (B_{2C}) değerine çıkarıldığında, hava aralığına en yakın olan yerde 0.19-0.96 T (B_{2A}) aralığındaki bir değere kadar düşmüştür. Ayrıca alt hava boşluğuna karşılık gelen bölgenin üstündeki 2 nolu elektrik çeliğindeki akı yoğunluğu 1.15-1.53 T (B_{2B}) aralığında ve 3 nolu elektrik çeliğinde akı yoğunluğu ise 1.73 T (B_{3B}) en büyük değerine kadar yükselmektedir. Orta hava aralığının üstündeki ve altındaki 3 ve 6 nolu elektrik çeliklerindeki manyetik akı yoğunluğu 1.34-1.73 T (B_{3A} , B_{6A}) aralığındaki değerdedir. En üstteki hava aralığının altındaki 5 nolu elektrik çeliğinde manyetik akı yoğunluğu 1.15-1.53 T (B_{5A}) aralığında ve onun altındaki 6 nolu elektrik çeliğinde ise 1.73 T (B_{6B}) en büyük değere kadar yükselmektedir. Böylece manyetik akının hava gibi manyetik direnci elektrik çeliğine göre daha yüksek bir ortamla karşılaştığında hava aralığından tümüyle geçemeyip yüzey alanı daha büyük olan diğer elektrik çeliklerine geçtiği doğrulanmaktadır. Aynı durum frekans arttırıldığında da gözlenmektedir.



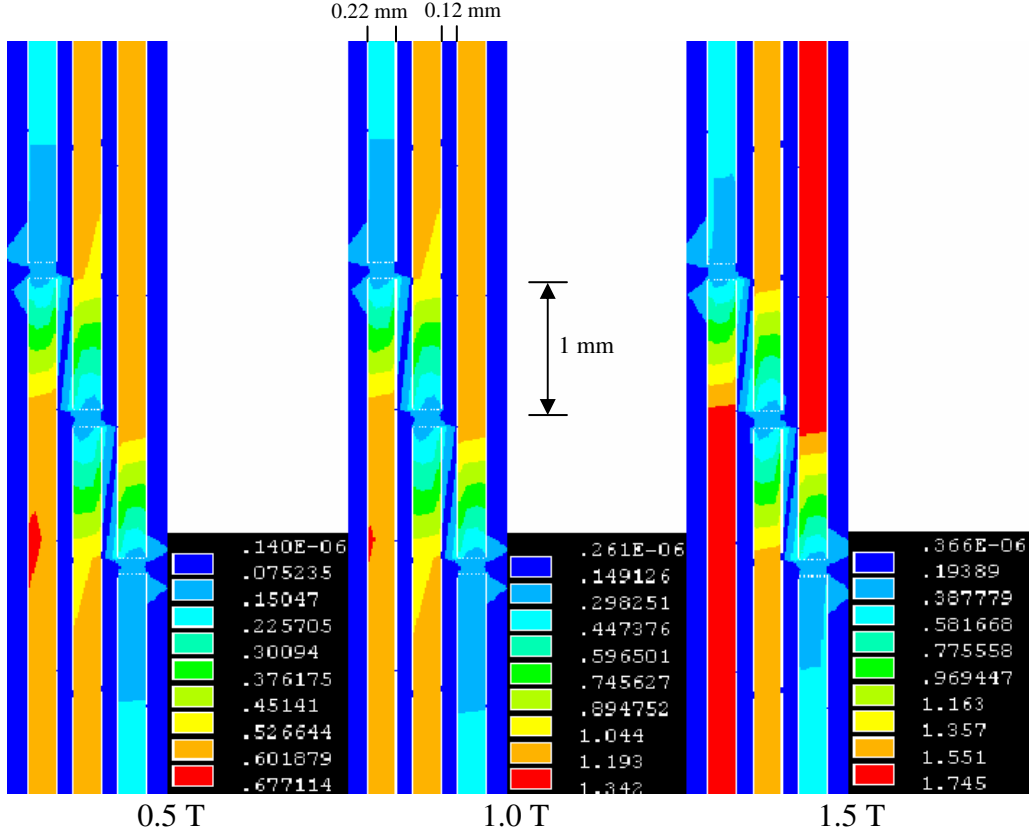
Şekil 4. 35. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (50 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 36. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (100 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 37. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (200 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 38. Örnek-4'teki elektrik çeliklerinde (400 Hz) akı yoğunluğu dağılımı.

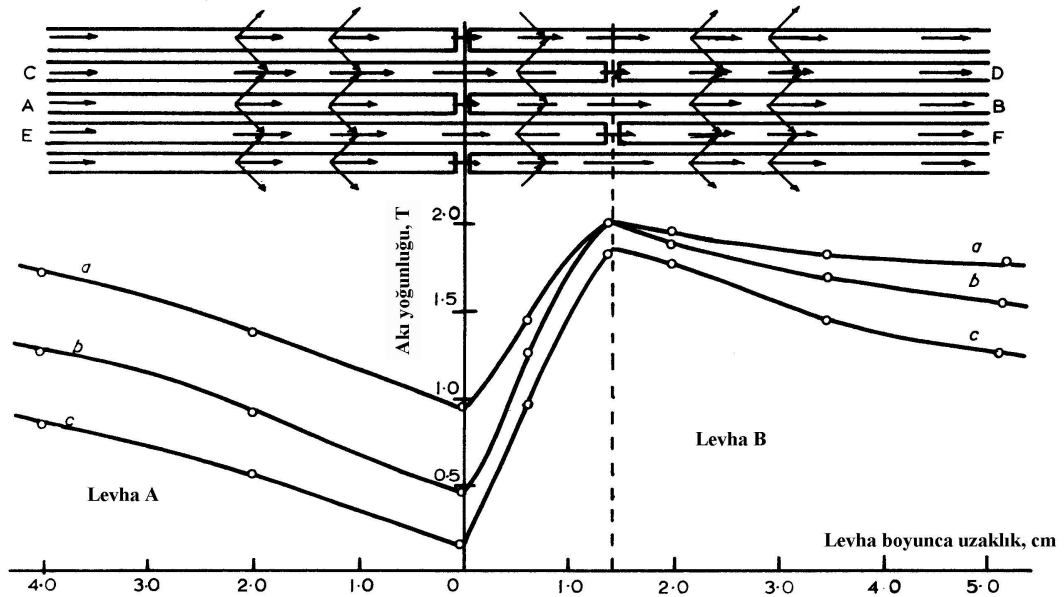
Sonlu elemanlardan elde edilen grafikler Çizelge 4. 15.'de sayısal olarak ayrıca verilmektedir. Deneysel verilerin hata oranları da dikkate alınarak sonlu elemanlar yönteminde kuramsal değerlerle % 95 - % 100 arası uyum içinde olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 15. Örnek-4 için deneysel ve kuramsal (FEM) sonuçların karşılaştırılması.

Örnek-4	B _{2C} (T)	B _{2B} (T)	B _{2A} (T)	B _{3B} (T)	B _{3A} (T)	B _{5A} (T)	B _{6B} (T)	B _{6A} (T)
50 Hz								
Deneysel	0.500	0.481	0.278	0.494	0.468	0.405	0.601	0.557
<i>Kuramsal</i>	<i>0.402-0.482</i>	<i>0.402-0.563</i>	<i>0.080-0.322</i>	<i>0.482-0.563</i>	<i>0.402-0.563</i>	<i>0.402-0.563</i>	<i>0.482-0.643</i>	<i>0.482-0.563</i>
Deneysel	1.000	0.948	0.535	0.967	0.924	0.815	1.149	1.094
<i>Kuramsal</i>	<i>0.767-1.074</i>	<i>0.767-1.074</i>	<i>0.153-0.614</i>	<i>0.920-1.074</i>	<i>0.767-1.074</i>	<i>0.767-1.074</i>	<i>0.920-1.227</i>	<i>0.920-1.074</i>
Deneysel	1.500	1.503	0.861	1.548	1.516	1.400	1.677	1.670
<i>Kuramsal</i>	<i>1.151-1.534</i>	<i>1.151-1.534</i>	<i>0.192-0.959</i>	<i>1.534-1.726</i>	<i>1.342-1.726</i>	<i>1.151-1.534</i>	<i>1.534-1.726</i>	<i>1.342-1.726</i>
100 Hz								
Deneysel	0.500	0.492	0.281	0.502	0.479	0.415	0.607	0.575
<i>Kuramsal</i>	<i>0.383-0.537</i>	<i>0.383-0.537</i>	<i>0.077-0.307</i>	<i>0.537-0.613</i>	<i>0.460-0.613</i>	<i>0.383-0.537</i>	<i>0.537-0.613</i>	<i>0.460-0.613</i>
Deneysel	1.000	0.972	0.557	0.981	0.947	0.836	1.170	1.121
<i>Kuramsal</i>	<i>0.731-1.023</i>	<i>0.731-1.023</i>	<i>0.146-0.585</i>	<i>1.023-1.169</i>	<i>0.731-1.023</i>	<i>0.731-1.023</i>	<i>1.023-1.169</i>	<i>0.877-1.169</i>
Deneysel	1.500	1.513	0.872	1.548	1.519	1.404	1.676	1.679
<i>Kuramsal</i>	<i>1.345-1.537</i>	<i>1.153-1.537</i>	<i>0.192-0.961</i>	<i>1.537-1.73</i>	<i>1.345-1.73</i>	<i>1.153-1.537</i>	<i>1.537-1.73</i>	<i>1.345-1.73</i>
200 Hz								
Deneysel	0.500	0.506	0.292	0.511	0.489	0.428	0.618	0.587
<i>Kuramsal</i>	<i>0.467-0.545</i>	<i>0.389-0.545</i>	<i>0.078-0.311</i>	<i>0.545-0.623</i>	<i>0.467-0.623</i>	<i>0.389-0.545</i>	<i>0.545-0.623</i>	<i>0.467-0.623</i>
Deneysel	1.000	0.997	0.574	1.003	0.968	0.855	1.196	1.148
<i>Kuramsal</i>	<i>0.730-1.022</i>	<i>0.730-1.022</i>	<i>0.146-0.584</i>	<i>1.022-1.168</i>	<i>0.876-1.168</i>	<i>0.730-1.022</i>	<i>1.022-1.168</i>	<i>0.876-1.168</i>
Deneysel	1.500	1.513	0.871	1.543	1.519	1.404	1.671	1.676
<i>Kuramsal</i>	<i>1.162-1.549</i>	<i>1.162-1.549</i>	<i>0.194-0.968</i>	<i>1.549-1.742</i>	<i>1.355-1.742</i>	<i>1.162-1.549</i>	<i>1.549-1.742</i>	<i>1.355-1.742</i>
400 Hz								
Deneysel	0.500	0.512	0.299	0.517	0.499	0.438	0.622	0.594
<i>Kuramsal</i>	<i>0.451-0.527</i>	<i>0.451-0.602</i>	<i>0.075-0.376</i>	<i>0.527-0.602</i>	<i>0.451-0.602</i>	<i>0.451-0.602</i>	<i>0.527-0.677</i>	<i>0.451-0.602</i>
Deneysel	1.000	1.017	0.588	1.019	0.985	0.870	1.218	1.173
<i>Kuramsal</i>	<i>0.895-1.044</i>	<i>0.895-1.193</i>	<i>0.149-0.746</i>	<i>1.044-1.193</i>	<i>0.895-1.193</i>	<i>0.895-1.193</i>	<i>1.044-1.342</i>	<i>0.895-1.193</i>
Deneysel	1.500	1.520	0.876	1.542	1.520	1.401	1.675	1.682
<i>Kuramsal</i>	<i>1.163-1.551</i>	<i>1.163-1.551</i>	<i>0.194-0.969</i>	<i>1.551-1.745</i>	<i>1.357-1.745</i>	<i>1.163-1.551</i>	<i>1.551-1.745</i>	<i>1.357-1.745</i>

4. 5. ELDE EDİLEN TÜM SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Jones ve arkadaşları (1973, 1974) araştırmalarında, Şekil 2. 13b.'de gösterildiği gibi transformatörlerin köşelerindeki levha uçlarında oluşan hava aralıklarının etkisini incelemişlerdir. Şekil 4. 39. çekirdekteki iki bitişik tabakanın dönme yönü boyunca (Şekil 2. 13b.'deki NL) ölçülen en yüksek akı yoğunluğunun boylamasına değişimlerini göstermektedir. Akı A'nın üstündeki ve altındaki C ve E levhalarına geçtikçe A levhasındaki akı yoğunluğu azalmaktadır. B levhasındaki akı yoğunluğu üst üste binme noktasında (Şekil 4. 39.'da noktalı kısım) doyuma ulaşıncaya kadar artmaktadır. Çünkü üst ve alt levhalardan B levhasına akı geçişi olmaktadır. Üst üste binme bölgesinden sonra B levhasındaki akı D ve F levhalarına geçmesi nedeniyle azalmaktadır (Jones ve ark. 1973, 1974).



Şekil 4. 39. 1 cm'lik üst üste binme için (a) 1.8, (b) 1.5 (c) 1.1 T'lık çekirdek akı yoğunluklarında ölçülen 45° açılı hafifçe üst üste binen köşelerde komşu iki levhadaki birbirine geçen akı yoğunluğu dağılımı (Jones ve ark. 1973, 1974).

Löffler ve arkadaşlarının (1994, 1995) araştırmalarında, kaydırılmış elektrik çeliklerinin birleşimindeki hava boşluklarının düzlemsel girdap akımları ve akı düzensizliklerine uygun iç levhalardaki akı bileşenlerine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kayıp artışlarının, hava aralığının hem ortalama uzunluğuna hem de bölgesel

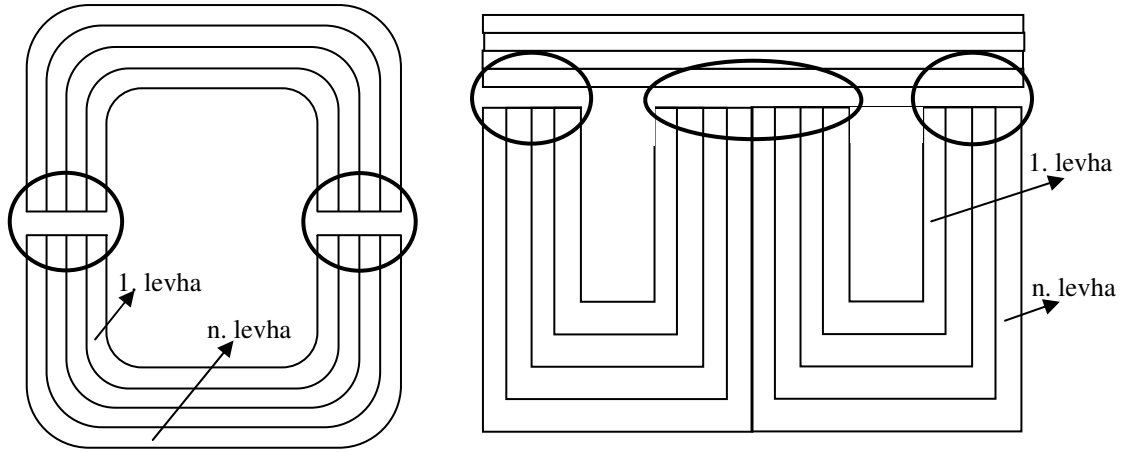
dağılımına bağlı olduğunu göstermişlerdir (Löffler ve ark. 1994, 1995). Transformator çekirdeklerinde levhalar arasında oluşan farklı uzunluklardaki hava boşluklarını ise Girgis (1998) ve Löffler (1994, 1995) yaptıkları çalışmalarda incelemişlerdir. Bu hava boşluklarının uzunluğundaki artışın hem güç kaybının hem de uyarma akımının artmasına neden olduğunu, ayrıca levhaların birleşme yerlerinde oluşturulan hava aralıkları arasındaki güç kaybına etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Girgis ve ark. 1998, Löffler ve ark. 1994, 1995).

Bizim çalışmamızda ilk olarak elektrik çeliğinden (M4) yapılmış örnek-1 (Şekil 3. 4.) ile amorf şeritten (Metglas-2605SC) yapılmış örnek-2'deki (Şekil 3. 5.) akı dağılımı araştırılmıştır. İki örnek içinde 3 nolu levhadan gelen akının hava aralığına yaklaştığında akıdaki değişim incelenmiştir. Örnek-1'de 3 nolu levhanın ucundaki (Hava boşluğuna en yakın olan yer) akı yoğunluğu başlangıca göre ortalama % 96, örnek-2'de ise ortalama % 81 azalmıştır. Ayrıca 1 nolu levhanın tam ortasında akı yoğunluğunu 3 nolu levhanın başlangıcındaki akı yoğunluğu ile kıyaslarsak, örnek-1'de ortalama % 38 ve örnek-2'de de ortalama % 22 artmıştır (Hesaplamalar 50, 100, 200 ve 400 Hz frekans değerlerinin ortalaması olarak yapılmıştır). Amorf şeritlerin manyetik geçirgenliği elektrik çeliklerine göre daha fazladır (Amorf şeritler için en büyük geçirgenlik 300000 H/m (Anonim 1992), elektrik çeliği için 40000 (Jiles 1991) değerindedir). Ayrıca amorf şeritlerin yüksek elektriksel direnci vardır ve kristal yapıya sahip değildirler (Şekil 2. 9.), izotropik özellik gösterirler, yüksek frekans özellikleri daha iyidir ve elektrik çeliklerine göre daha fazla silisyum içermektedirler. Bu nedenlerle amorf şeritlerde hava boşluğuna en yakın olan yerlerde manyetik akı yoğunluğu değeri elektrik çeliğine göre daha fazladır. Böylece hava boşluğunun karşısındaki levhaya geçişler amorf şeritlerde elektrik çeliklerindeki kadar değildir. Amorf şeritlerin doyum mıknatıslanması elektrik çeliklerine göre daha düşük olduğu için 1 nolu levhanın tam ortasında manyetik akı yoğunluğu daha küçük olmaktadır (Amorf şeritler için $B_s = 1.61$ T (Anonim 1992) ve elektrik çeliği için $B_s = 2.0$ T'dır (Jiles 1991)). Örnek-1, 30.00 mm genişliğinde ve 0.22 mm kalınlığında dört adet elektrik çeliğinden oluşturulurken örnek-2, 25.130 mm genişliğinde ve 0.140 mm kalınlığında (beş kat) dört adet amorf şeritten oluşturulmuştur. Amorf şeritleri, elektrik çelikleriyle kıyaslamak amacıyla aynı kalınlığa yaklaştırmaya çalışsak da standart

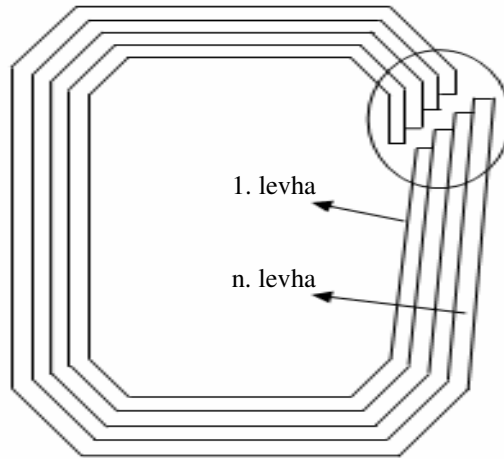
5 şeritten oluşan paketler kullanılmıştır. Manyetik akı değişiminde alan büyüklüğünün de etkisi olduğundan amorf şeridin alanının elektrik çeliğine göre küçük olması dikkate alınmaktadır. Bu nedenle sonuçlar birbirleriyle bağıl olarak karşılaştırılmıştır.

Örnek-3, dört adet elektrik çeliğinden (M4) oluşmaktadır ve manyetik akının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için üzerinde farklı uzaklıklarda on beş adet sarım vardır (Şekil 3. 6.). 3 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akı manyetik geçirgenliği çok küçük olan farklı bir ortamla (Hava boşluğu) karşılaştığında yönelimini değiştirmektedir. Böylece manyetik akı direnci daha fazla olan hava boşluğundan tümüyle aynı yönde geçemeyip yüzey alanı daha büyük olan 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerine geçmektedir. Bu nedenle 3 nolu elektrik çeliğinde ortalama $B_{OT}-B_{O2}$ arasında % 27, $B_{OT}-B_{O1}$ arasında % 59, $B_{OT}-B_{O0.5}$ arasında % 80 ve $B_{OT}-B_{OU}$ arasında da % 95 oranında azalmaktadır. 1 ve 4 nolu elektrik çeliklerine geçişler nedeniyle 1 nolu elektrik çeliğinde ortalama $B_{AT}-B_{A2}$ arasında % 5, $B_{AT}-B_{A1}$ arasında % 14, $B_{AT}-B_{A0.5}$ arasında % 22 ve $B_{AT}-B_{AO}$ arasında da % 26 oranında, 4 nolu elektrik çeliğinde ise ortalama $B_{ÜT}-B_{Ü2}$ arasında % 19, $B_{ÜT}-B_{Ü1}$ arasında % 41, $B_{ÜT}-B_{Ü0.5}$ arasında % 54 ve $B_{ÜT}-B_{ÜO}$ arasında da % 62 oranında artmaktadır. Bu oranlar 50, 100, 200 ve 400 Hz frekansları değerlerinden ortalama olarak hesaplanmıştır.

Unicore teknolojisi, üretim aşamalarındaki kayıpları en aza indiren bir çekirdek üretmek için geliştirilmiştir. Bu yöntem bilinen C ve E çekirdeklerine (Şekil 4. 40a.) seçenek olarak transformatör çekirdeklerini üretmekte yenilik yaratan bir yöntemdir. Şekil 4. 40b.'de Unicore teknolojisiyle üretilen z-tipi çekirdek modeli gösterilmektedir (Anonim 1999). Bu çekirdekte, her tabakadaki elektrik çeliklerinin hepsi aynı yerden direk kesilmeyip kademeli bir şekilde kesilmiştir.



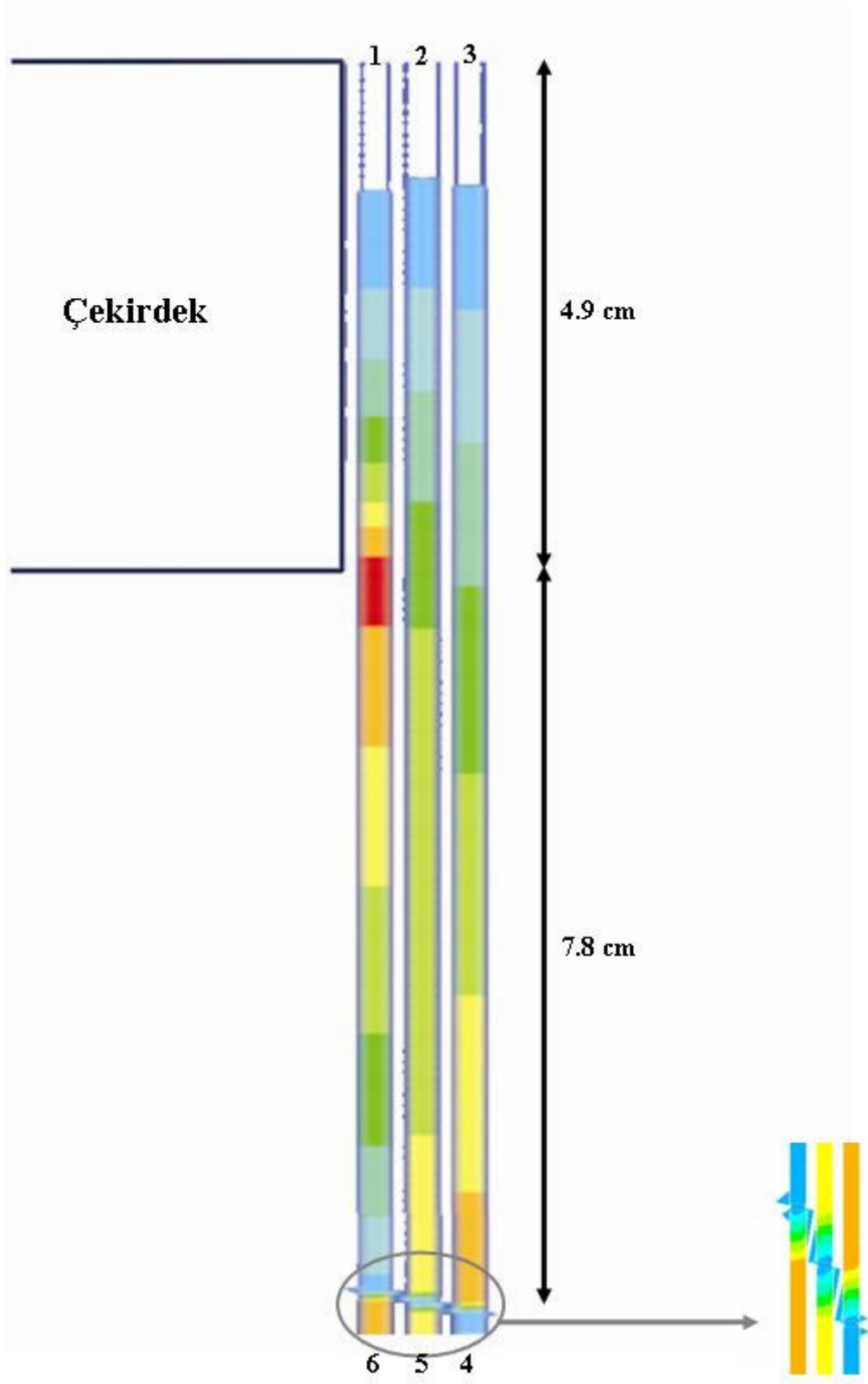
Şekil 4. 40a. C ve E-tipi transformatör çekirdeği.



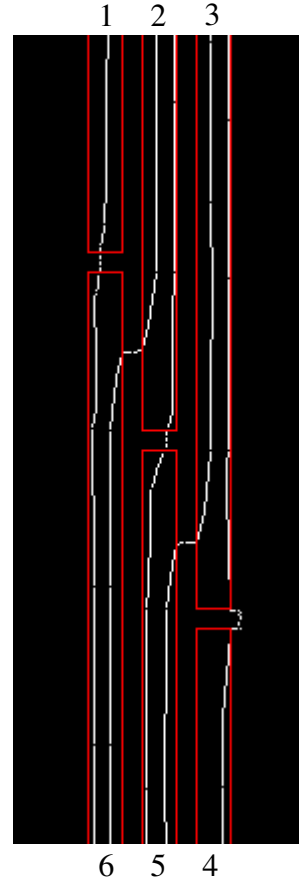
Şekil 4. 40b. z-tipi (Unicore) çekirdek.

Örnek-4, Şekil 4. 40b.'deki z-tipi çekirdeğe benzetmek amacıyla hazırlanmıştır. Örnek-4'te ANSYS benzeşim programıyla elde edilen manyetik akı yoğunluğu değişimi Şekil 4. 41.'de verilmektedir. Başlangıçta çekirdekten gelen manyetik akı 1 nolu elektrik çeliğine geçerek onun en fazla değere ulaşmasını sağlamaktadır. Bu nedenle 1 nolu elektrik çeliğinden 2 ve 3 nolu elektrik çeliklerine akı geçişleri olmaktadır. Daha sonra üç elektrik çeliğinde de akı dağılımı eşit olmaktadır. 1 nolu elektrik çeliğinden gelen manyetik akı manyetik geçirgenliği elektrik çeliğine göre çok küçük olan hava aralığı ile karşılaştığında aynı yönde tümüyle geçemeyip yüzey alanının daha geniş

olması nedeniyle yukarı doğru yönelerek 2 nolu elektrik çeliğine geçmektedir. 2 nolu elektrik çeliğinden gelen akı ise 1 nolu levhaya benzer olarak yukarı ve aşağı doğru yönelip 3 ve 6 nolu elektrik çeliklerine geçişler gerçekleştirmektedir. Aynı şekilde 3 nolu elektrik çeliğinden gelen akı ise 5 nolu elektrik çeliğine geçişler gerçekleştirmektedir. Şekil 4. 42.'de, Şekil 4. 41.'de gösterilen örnek-4'ün daire içinde kalan bölgedeki akı çizgilerinin tipik değişimi verilmektedir. Şekil 4. 7.'de örnek-1 için 100 Hz, 0.5 T'da (başlangıç manyetik akı yoğunluğu) hava boşluğuna en yakın olan yerde manyetik akı yoğunluğu 0.09 T iken 1.5 T'da bu değer 0.20 T en büyük değeri almaktadır. Şekil 4. 36.'da ise örnek-4 için 100 Hz, 0.5 T'da bu değer 0.31 T iken 1.5 T'da 0.96 T olarak en büyük değerini almaktadır. Bizim çalışmalarımızda incelediğimiz üç katlı çekirdek geliştirilerek Şekil 4. 40b.'deki z-tipi (Unicore) çekirdeğinde olduğu gibi n katlı levhaya genelleştirilebilir. Böylece merdiven şeklinde oluşturulan hava aralıkları akının tabakalar arası daha kolay geçişini sağlamaktadır. Şekil 4. 40a.'daki C ve E-tipi transformatör çekirdeklerinde hava aralıkları her bir levhada aynı yerden tümüyle kesildiğinden tüm akının hava boşluğundan geçmesi sonucunda akı kaybının artmasına yol açmaktadır.



Şekil 4. 41. Örnek-4'ün (200Hz, $B_{2C} = 1.0$ T) ANSYS benzeşim programıyla elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4. 42. Şekil 4. 41.'de örnek-4'ün daire içinde kalan kısmında akı çizgilerinin tipik değişimi.

KAYNAKLAR

ANONİM. 1992. Metglas Kataloğu. Honey Well Inc., USA. p. 10-11.

ANONİM. 1999. Katalog Ürünü. Wiltan Ltd. İngiltere. p. 1-3.

ANONİM. 2002. ANSYS (Lisanslı program). İngilizce. Fıgıs A. Ş. Celal Bayar Caddesi, Petek Bozkaya İş Merkezi, C Blok, 301-311 No:6, 16220, BURSA-TÜRKİYE

ARABI, M. M. 1987. Novel Methods for Measuring Power Loss in Electrical Steels. Ph. D. Thesis, Wolfson Centre for Magnetics Tecnology, Department of Electrical and Electronic Engineering, University College, Cardiff. p. 5, 18-21.

BECKLEY, P. 2000. Electrical Steels. European Electrical Steels, Orb Works, Newport, South Wales. p. 83, 138.

BOZORTH, R. M. 1968. Ferromagnetism. D. Van Nostrand Company Inc., p. 434-435.

CULLITY, B. D. 1972. Introduction to Magnetic Materials. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts. p. 54-55, 209, 240-244, 503.

CHARI, M. V. K. and P. P. SILVESTER. 1984. Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems. John Wiley and Sons, Chichester. p. 1.

CHIKAZUMI, S. 1986. Physics of Magnetism. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. p. 10, 52-56.

DEREBAŞI, N. 1994. Effect of Tension and Surface Properties on Magnetic Domains and Power Loss in Amorphous Ribbons. Ph. D. Thesis, Wolfson Centre for Magnetic Technology, School of Electrical, Electronic and Systems Engineering, University of Wales College of Cardiff. p. 18-24, 27, 36-38, 96-97.

DEREBAŞI, N. 1996. Transformator Çekirdeklerinde Üretim Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Kullanılan İleri Malzemeye Bağlı Olarak Verimin Arttırılması. Tübitak TİDEB0305. s. 81-83.

DEREBASI, N. , R. RYGAL, A. J. MOSES, D. FOX. 2000. A novel system for rapid measurement of high-frequency magnetic properties of toroidal cores of different sizes. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215-216, p. 684-686.

DEREBAŞI, N. 2002. Aydınlatma Cihazlarının Transformator Çekirdeklerinde Kullanılan Maddelerin Özellikleri. 4. Ulusal Aydınlatma Kongresi. İstanbul. 5 Ekim 2002, s. 100-107. Özdil Basımevi. İstanbul.

GIRGIS, R. S. , K. GRAMM, E. G. TENIJENHUIS, J. E. WRETHAG. 1998. Experimental Investigations on Effect of Core Production Attributes on Transformer Core Loss Performance. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, p. 526-531.

JILES, D. 1991. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Chapman and Hall, London. p. 1-2, 6-10, 29-33, 36-43, 294.

JIN, J. 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics. John Wiley and Sons, Inc. , New York. p. 1-4, 23-24, 72-73, 77-81.

JONES, M. A., A. J. MOSES and J. E. THOMPSON. 1973. Flux Distribution and Power Loss in the Mitered Overlap Joint in Power Transformer Cores. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-9, No. 2, p. 114-122.

JONES, M. A. and A. J. MOSES. 1974. Comparison of the Localized Power Loss and Flux Distribution in the Butt and Lap and Mitred Overlap Corner Configurations. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-10, No. 2, p. 321-326.

KÜÇÜK, İ. 2003. Çalışma Frekansına ve Geometrik Yapıya Bağlı Olarak Toroid Çekirdeklerin Manyetik Özelliklerinin Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi. Doktora Tezi. Uludağ Üniversitesi. Bursa. s. 68-71.

LÖFFLER, F., H. PFÜTZNER, T. BOOTH, C. BENGTSSON, K. GRAMM. 1994. Influence of Air Gaps in Stacked Transformer Cores Consisting of Several Packages. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 2, p. 913-915.

LÖFFLER, F., T. BOOTH, H. PFÜTZNER, C. BENGTSSON, K. GRAMM. 1995. Relevance of Step-Lap Joints for Magnetic Characteristics of Transformer Cores. IEE Proc.-Electr. Power Appl. , Vol. 142, No. 6, p. 371-378.

LUBORSKY, F. E. 1983. Amorphous Metallic Alloys. Butterworths, London. p. 367.

MARMIN, F., S. CLENET, F. PIRIOU, P. BUSSY. 1998. Error Estimation of Finite Element Solution in Non-Linear Magnetostatic 2D Problems. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, p. 3268-3271.

MEYDAN, T. 1984. Transducers Using Amorphous Ribbon Materials. Thesis Submitted to the University of Wales in Candidature for the Degree of Doctor of Philosophy, Wolfson Centre for Magnetics Tecnology, Department of Electrical and Electronic Engineering, University College, Cardiff. p. 1, 12-15.

MOSES, A. J., B. THOMAS and J. E. THOMPSON. 1972. Power Loss and Flux Density Distributions in the T-Joint of a Three Phase Transformer Core. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-8, No. 4, p. 785-790.

MOSES, A. J. 1992. Development of Alternative Magnetic Core Materials and Incentives for Their Use. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 112, p. 150-155.

MOSES, A. J., F. AL-NAEMI, J. HALL. 2003. Designing and Prototyping for Production. Practical Applications of Electromagnetic Modelling. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254-255, p. 228-233.

PFÜTZNER, H., C. BENGTTSSON, T. BOOTH, F. LÖFFLER and K. GRAMM. 1994. Three-dimensional Flux Distributions in Transformer Cores as a Function of Package Design. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 5, p. 2713-2727.

EKLER

EK-1 BİR KÜRENİN ZIT MIKNATISLANMA ALANININ VE ZIT MIKNATISLANMA SABİTİNİN BULUNMASI

Bir kürenin uygulanan bir H_u alanı tarafından mıknatıslanması yüzey üzerinde kuzey ve güney kutupların ortaya çıkmasına neden olacaktır (Şekil E1. 1.). Ayrıca bu serbest kutuplar zıt mıknatıslanma alanını (H_z) oluşturacaktır. ρ_k , kürenin yüzeyi üzerindeki kutup yoğunluğu ve a da onun yarıçapı olsun. ρ_k 'yı bulmak için, ekvatorial kesit üzerindeki birim alan başına düşen kutup şiddeti M olarak alınır (M , kürenin mıknatıslanmasıdır). r yarıçaplı ve dr genişliğindeki halka şeklindeki şerit üzerindeki kutupların sayısı $2\pi r M dr$ 'dir (Şekil E1. 2.). M küre boyunca olduğu için yüzey üzerindeki halka şeklindeki şeritte kutupların sayısı aynı olacaktır. Bu yüzey şeridinin alanı $(2\pi a \sin \theta) (a d\theta)$ 'dir. Böylece yüzey kutup yoğunluğu,

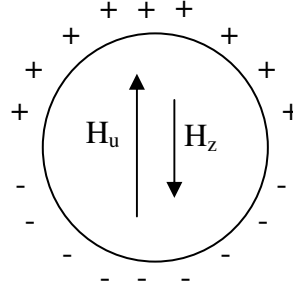
$$\rho_k = \frac{2\pi r M dr}{2\pi a^2 \sin \theta d\theta} \quad (\text{E1. 1})$$

şeklindedir. Fakat, $r = a \sin \theta$ ve $dr = a \cos \theta d\theta$. Böylece,

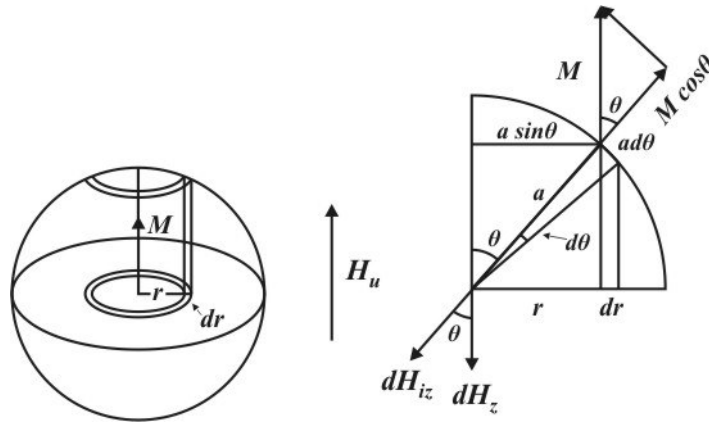
$$\rho_k = \frac{M (a \sin \theta) (a \cos \theta) d\theta}{a^2 \sin \theta d\theta} \quad (\text{E1. 2})$$

$$\rho_k = M \cos \theta \quad (\text{E1. 3})$$

ile verilir.



Şekil E1. 1. Mıknatıslandırılmış küre yüzeyinde oluşan kutuplar. Kuzey ve güney kutupları sırasıyla artı ve eksi işaretleri ile gösterilmiştir (Cullity, 1972).



Şekil E1. 2. Kürenin merkezindeki zıt mıknatıslanma alanı (Cullity, 1972).

Kürenin üst ve altında halka şeklindeki şeritler üzerindeki kutuplar nedeniyle kürenin merkezinde zıt mıknatıslanma alanı (dH_{iz}), kürenin merkezinde yerleşmiş birim kutup üzerindeki kuvvetle verilir:

$$dH_{iz} = \frac{[(2\rho_k)(2\pi a^2 \sin\theta d\theta)] [1]}{a^2} = 4\pi\rho_k \sin\theta d\theta \quad (\text{E1. 4})$$

$$dH_z = dH_{iz} \cos\theta \quad (\text{E1. 5})$$

Küre için zıt mıknatıslanma alanı,

$$H_z = \int dH_z = 4\pi M \int_0^{90^\circ} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \quad (\text{E1. 6})$$

$$H_z = \frac{4\pi M}{3} \quad (\text{E1. 7})$$

şeklinde bulunur. Zıt mıknatıslanma sabiti,

$$N_z = \frac{4\pi}{3} \quad (\text{E1. 8})$$

ile verilir (Cullity 1972).

EK-2 ANSYS ÇÖZÜMLEMESİ İÇİN KULLANILAN TEORİ

E2. 1. ELEKTROMANYETİK ALAN TEMELLERİ

Elektromanyetik alanlar, aşağıda gösterilen Maxwell denklemleriyle yürütülür.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_a + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_s + \vec{J}_e + \vec{J}_v + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{E2. 1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{E2. 2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{E2. 3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{E2. 4})$$

Burada \vec{H} manyetik alan şiddeti vektörü, \vec{J}_a toplam akım yoğunluğu vektörü, \vec{J}_s uygulanan kaynak akım yoğunluğu vektörü, \vec{J}_e indüklenen girdap akım yoğunluğu vektörü, \vec{J}_v hız akım yoğunluğu vektörü, \vec{D} elektrik akı yoğunluğu vektörü (Maxwell, bunu yer değiştirme vektörü olarak gösterir ama mekanik yer değiştirme ile karıştırmaktan sakınmak için burada elektrik akı yoğunluğu ismi kullanılır.) \vec{E} elektrik alan şiddeti vektörü, \vec{B} manyetik akı yoğunluğu vektörü ve ρ elektrik yük yoğunluğudur.

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\vec{J}_a + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right] = 0 \quad (\text{E2. 5})$$

Süreklilik denklemi, Maxwell denklemlerini sağlamalıdır. Kullanıcılar J_s 'yi de bu hesaba katmalıdır. Yukarıdaki alan denklemlerine elektromanyetik maddelerin davranışını tarifleyen yapısal bağıntı ilave edilmelidir. Kalıcı mıknatıs özelliğine sahip olmayan doyurulabilir maddeyi ele alan problemlerde manyetik alanlar için yapısal bağıntı,

$$\vec{B} = [\mu] \cdot \vec{H} \quad (\text{E2. 6})$$

şeklindedir. Burada $[\mu]$, \vec{H} 'nın genel bir fonksiyonu olarak manyetik geçirgenlik matrisini verir. Manyetik geçirgenlik matrisi $[\mu]$ ya sıcaklığın ya da alanın bir fonksiyonu olarak girilebilir. $[\mu]$ sadece sıcaklığın bir fonksiyonu olursa,

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad (\text{E2. 7})$$

Burada μ_0 boşluğun geçirgenliği, μ_{rx} ise x yönündeki bağıl geçirgenliktir. Eğer $[\mu]$ sadece alanın bir fonksiyonu ise,

$$[\mu] = \mu_h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{E2. 8})$$

Burada μ_h , B-H eğrisinden türetilen geçirgenliktir. Her ikisinin de olduğu durum da mümkündür.

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_h & 0 & 0 \\ 0 & \mu_0 \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_h \end{bmatrix} \quad (\text{E2. 9})$$

Kalıcı mıknatıslık ele alındığında yapısal bağıntı,

$$\vec{B} = [\mu] \cdot \vec{H} + \mu_0 \vec{M}_0 \quad (\text{E2. 10})$$

şeklindedir. Burada M_0 kalıcı mıknatıslanma vektörüdür. Genel yapısal bağıntıyı manyetik direnç cinsinden tekrar yazarsak,

$$\vec{H} = [\nu] \cdot \vec{B} - \frac{1}{\nu_0} [\nu] \cdot \vec{M}_0 \quad (\text{E2. 11})$$

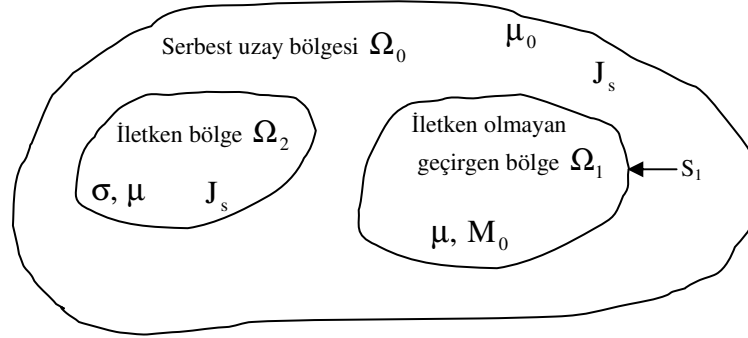
haline gelir. Burada $[\nu]$ manyetik direnç matrisini $\left([\nu] = \frac{1}{[\mu]}\right)$ ve ν_0 boşluğun manyetik direncini verir $\left(\nu_0 = \frac{1}{\mu_0}\right)$. İlgili elektrik alanlar için yapısal bağıntılar,

$$\vec{J}_a = [\sigma] \cdot \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{E2. 12})$$

$$\vec{D} = [\epsilon] \cdot \vec{E} \quad (\text{E2. 13})$$

şeklindedir. Burada $[\sigma]$ elektriksel iletkenlik matrisini, $[\epsilon]$ elektriksel geçirgenlik matrisini ve \vec{v} hız vektörünü verir.

Manyetik alan problemlerinin çözümü genelde potansiyel fonksiyonları kullanarak elde edilebilir. Manyetik vektör potansiyeli ve manyetik skaler potansiyel olmak üzere iki tip potansiyel fonksiyonu çözülecek problemlere bağlı olarak kullanılır. Potansiyel seçimini etkileyen faktörler alan dinamiği, alan boyutu, kaynak akım konfigürasyonu, bölge büyüklüğü ve ayırma gibi değişkenleri içerir. Uygulanabilir bölgeler Şekil E2. 1.'de gösterilmiştir.



Şekil E2. 1. Elektromanyetik alan bölgeleri.

Burada Ω_0 serbest uzay bölgesini, Ω_1 iletken olmayan geçirgen bölgeyi, Ω_2 iletken bölgeyi, μ demirin geçirgenliğini, μ_0 havanın geçirgenliğini, M_0 kalıcı mıknatıslığı, S_1 sınırı ve σ iletkenliği göstermektedir ($\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_0$).

E2. 2. MANYETİK VEKTÖR POTANSİYEL

Statik ve dinamik alanları ele alarak ve yer değiştirme akımlarını ihmal ederek aşağıdaki Maxwell denklemleri uygulanır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_a \quad (\text{E2. 14})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{E2. 15})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{E2. 16})$$

Manyetik ve elektrik alan için alışılmış yapısal denklem (E2. 11) ve (E2. 12) eşitliklerinde tarif edildiği gibi uygulanır. Anizotropi ve doğrusal olmama ile ilgili bazı sınırlamalar getirmesine rağmen aşağıda belirtilen formülasyonlar da meydana gelir. Bir elektromanyetik alan probleminin Ω giriş bölgesinde (E2. 14) – (E2. 15) ilgili Maxwell denklemlerini sağlayan bir çözüm aranır. Eşitlik (E2. 17) ve (E2. 18) ile ifade edilen \vec{B} manyetik alan ve \vec{E} elektrik alana izin veren potansiyeller tanımlanarak bir çözüm elde edilebilir.

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{E2. 17})$$

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \quad (\text{E2. 18})$$

Burada \vec{A} manyetik vektör potansiyel ve V ise elektrik skaler potansiyeldir. Bu özelleştirmeler Eşitlik (E2. 15) ve (E2. 16) iki Maxwell denkleminin sağlanmasını temin eder. Çözülmesi gereken şey akım yoğunluğunun diverjans özelliği ve (E2. 11) yapısal bağıntısıyla birlikte (E2. 14) Amper devre yasası olarak verilir. İlave olarak vektör potansiyel eşitliğinden emin olmak için Coulomb ayar koşulu devreye sokulur.

Sonuçlanan diferansiyel denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\vec{\nabla} \times [\mathbf{v}] \vec{\nabla} \times \vec{A} - \vec{\nabla} v_e \vec{\nabla} \cdot \vec{A} + [\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + [\sigma] \vec{\nabla} V - \vec{v} \times [\sigma] \vec{\nabla} \times \vec{A} = 0 \quad (\Omega_2) \quad (\text{E2. 19})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left([\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - [\sigma] \vec{\nabla} V + \vec{v} \times [\sigma] \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = 0 \quad (\Omega_2) \quad (\text{E2. 20})$$

$$\vec{\nabla} \times [\mathbf{v}] \vec{\nabla} \times \vec{A} - \vec{\nabla} v_e \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \vec{J}_s + \vec{\nabla} \times \frac{1}{v_0} [\mathbf{v}] \cdot \vec{M}_0 \quad (\Omega_0 + \Omega_1) \quad (\text{E2. 21})$$

$$v_e = \frac{1}{3} \text{tr}[\mathbf{v}] = \frac{1}{3} (v(1,1) + v(2,2) + v(3,3)) \quad (\text{E2. 22})$$

Bu denklemler uygun sınır koşullarına bağlıdır. Potansiyel fonksiyonların tanımlanmasıyla elde edilen bu basitleştirilmiş Maxwell denklem sistemi iki-boyutlu ve üç-boyutlu statik ve dinamik alanların çözümleri için kullanılmaktadır.

Farklı geçirgenliklere sahip maddelerin kullanıldığı modeller için üç-boyutlu vektör potansiyel formülasyonu tavsiye edilmez (Anonim 2002).

EK-3 ANSYS BENZEŞİM PROGRAMININ KULLANIMI

ANSYS benzeşim programında iki-boyutlu manyetik statik analiz için izlenen adımlar: (ANSYS benzeşim programı İngilizce olduğundan adımlardaki komutlar İngilizce olarak verilmiştir. Ayrıca aynı birim sisteminde değerler girilmelidir.)

Adım 1 (İlk dikdörtgenin oluşturulması):

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions

(Bu aşama, şeklin dikdörtgenlerden oluşması durumunda kullanılır.)

2. Dikdörtgenin X1, X2, Y1 ve Y2 değerleri girilir.

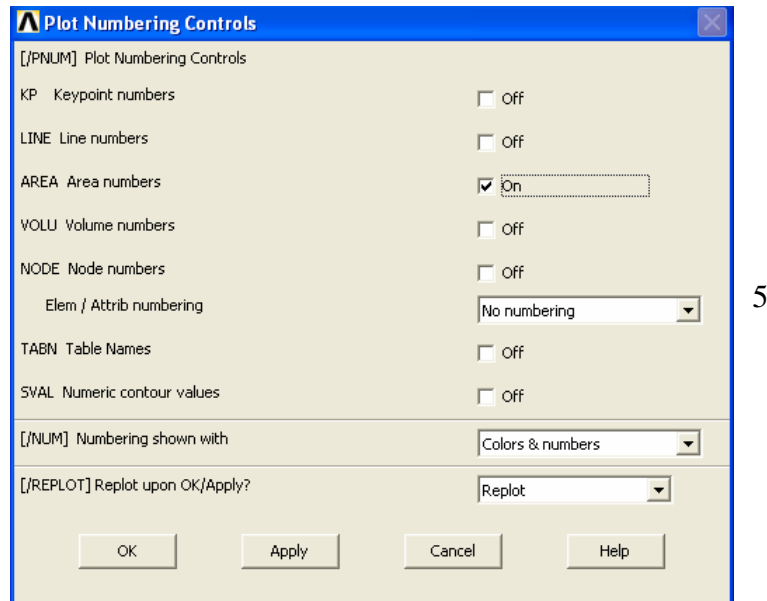
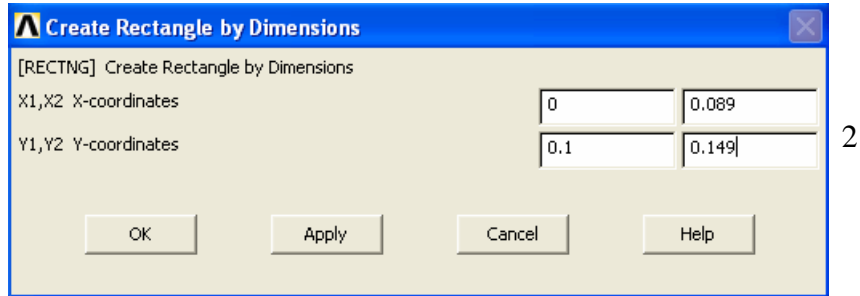
3. OK.

4. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering

5. Area numbers seçilir.

(Bu kısımda oluşturulan dikdörtgen numaralandırılır.)

6. OK.



Adım 2 (Kalan dikdörtgenlerin oluşturulması):

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions
2. Dikdörtgenin X1, X2, Y1 ve Y2 değerleri girilir.
3. Apply.
(2. ve 3. aşamalar kalan diğer dikdörtgenlerin sayısına bağlı olarak tekrarlanır.)
4. OK.

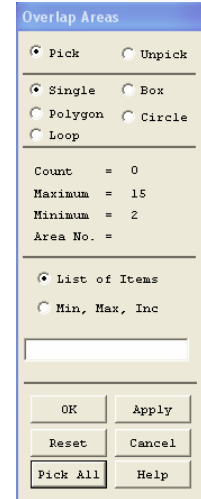
Adım 3 (Tüm alanların üst üste bindirilmesi):

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Overlap > Areas
2. Pick All.

(Bu aşamada tüm dikdörtgenlerin üst üste bindirilmesi sonucunda, oluşan sınırlar yeni alanların oluşmasına yol açar.)

3. Toolbar: SAVE_DB

(Programda bu aşamaya kadar yapılan işlemleri kaydeder.)



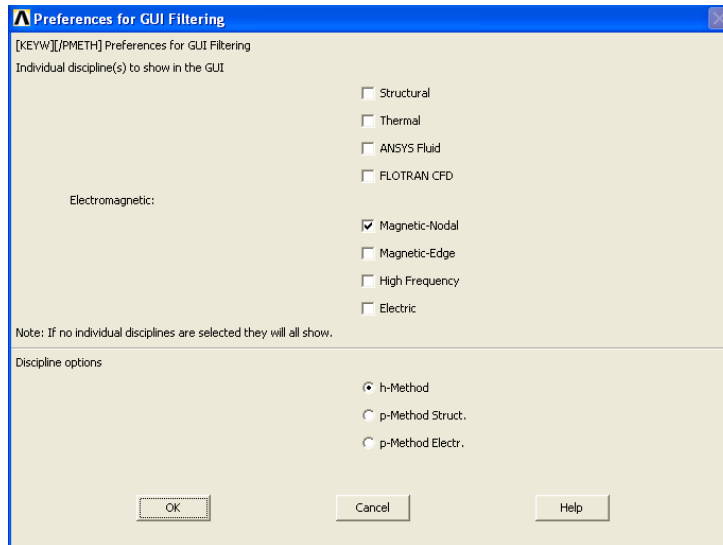
2

Adım 4 (Tercihlerin seçilmesi):

1. Main Menu > Preferences
2. Magnetic-Nodal

(Manyetik çalışmada bu kısım seçilerek sadece manyetikle ilgili niceliklerin ele alınması sağlanır.)

3. OK.



2

Adım 5 (Madde özelliklerinin tanımlanması):

1. Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

2. Electromagnetics, Relative Permeability, Constant

3. MURX=1

(Modelde kullanılan maddenin sabit bağıl manyetik geçirgenliğe sahip olması durumunda kullanılır. Örneğin hava için MURX = 1 alınır. Fakat madde sabit bağıl manyetik geçirgenliğe sahip değilse Electromagnetics' den sonra B-H Curve seçilerek çıkan tabloda B ve H değerleri girilir.)

4. OK.

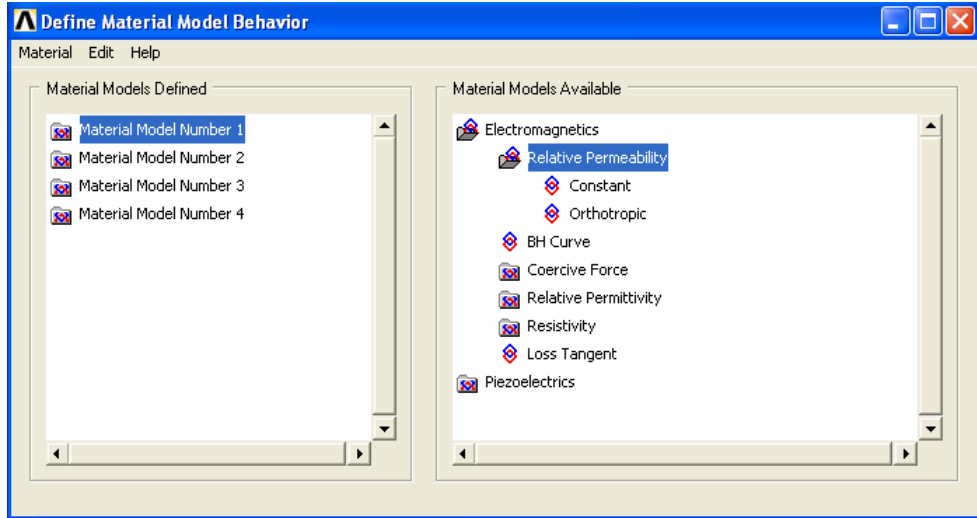
(Modelde kaç farklı madde varsa aynı işlem tekrarlanır.)

5. Material > Exit.

6. Utility Menu > List > Properties > All Materials

(Bu kısım girilen tüm maddelerin özelliklerini görüntüler.)

7. File > Close (Windows)



2

Adım 6 (Eleman tipi ve özelliklerinin tanımlanması)

1. Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete

2. Add.

3. Magnetic Vector' ü seç.

4. Vect Quad 8nod53' ü seç.

5. OK.

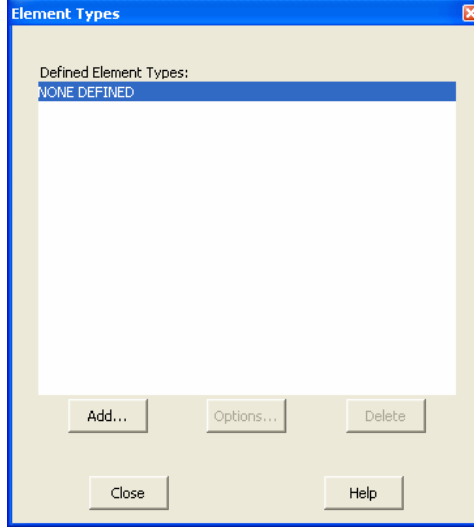
6. Options.

7. Element Behavior kısmında Axisymmetric kısmı seçilir.

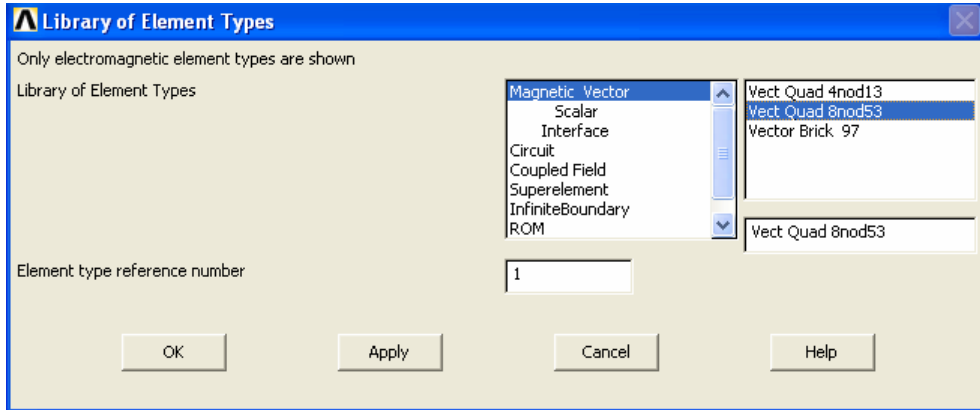
8. OK.

9. Close.

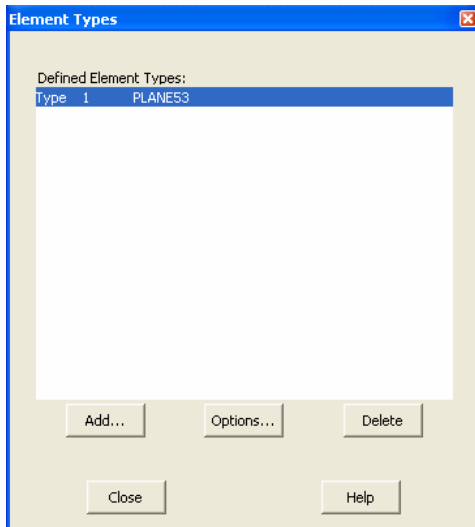
(Bu aşamalarda çalışılan sisteme en uygun elemanlar seçilir ve her elemanın özelliği ANSYS help kısmından öğrenilebilir.)



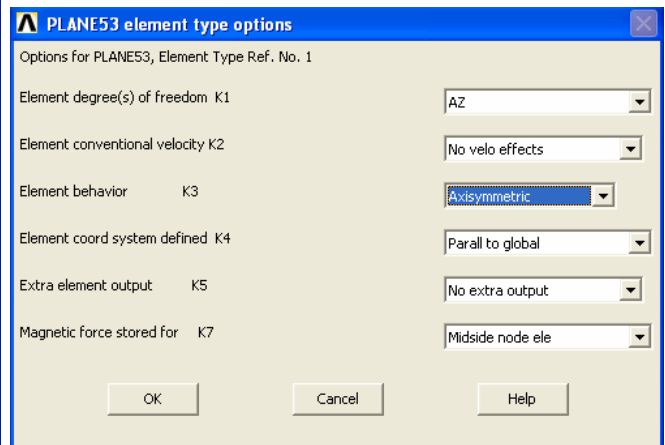
2



3-4



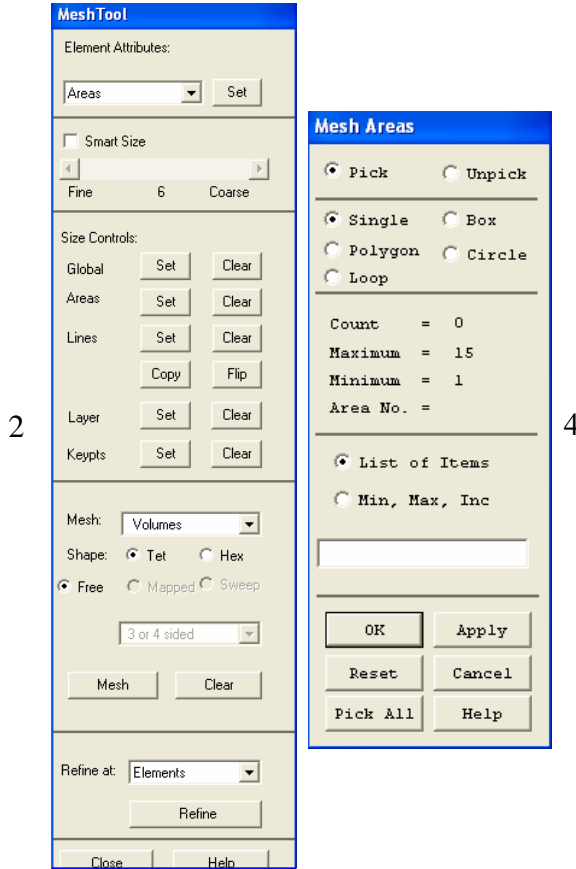
6



7

Adım 7 (Madde Özelliklerinin atanması):

1. Main Menu > Preprocessor > MeshTool
2. Element Attributes kısmında Areas seçilerek set düğmesine basılır.
3. Burada tek bir maddeye ait alanlar seçilir (Örneğin hava olan alanlar).
4. Apply.
5. Başka maddelere ait alanlar da tek tek seçilir (Örneğin elektrik çeliği, bobin gibi).
6. OK.
7. Toolbar: SAVE_DB

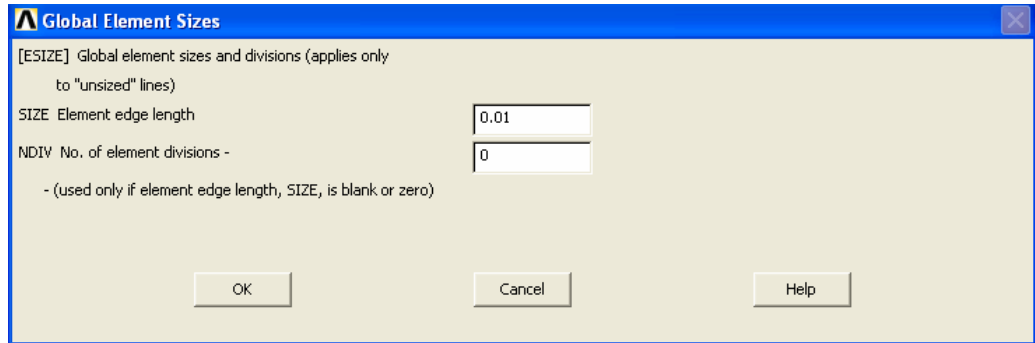


Adım 8 (Hava boşluğunda oluşturulan ağın büyüklüğünün belirlenmesi):

1. Size Controls' de Lines seçilir.
2. Sık ağı oluşturmak istenen hava boşluklarına karşılıklı çizgiler konur.
3. OK.
4. No. of element divisions kısmına karşılıklı konan çizgileri kaç parçaya bölmek istiyorsak onun rakamı yazılır.
5. OK.

Adım 9 (MeshTool kullanılarak modelde ağ oluşturma):

1. Meshtool'da Size Control'de set düğmesine basılır.
2. Elemanın kenar uzunluğunu girilir.
3. OK.
4. Meshtool'da areas kısmı seçilir.
(Areas seçilmesinin sebebi alanlarda ağ oluşturmak içindir.)
5. Ağ oluşturmak için Meshtool'da mesh düğmesine basılır.
6. Pick All seçilerek ağ oluşturmak için tüm alanlar seçilir. Fakat tüm alanlar değil de belirli alanlarda ağ oluşturmak isteniyorsa sadece o kısımlar seçilerek OK düğmesine basılır.
7. MeshTool kapatılır.
8. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering
9. Plot Numbering Controls penceresinden Material Numbers seçilir.
(Material numbers seçildiğinde modelde oluşturulan ağ farklı maddeler için farklı renklerde gösterir.)
10. OK.

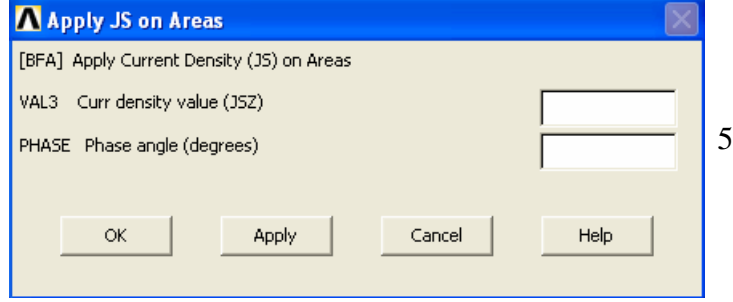


Adım 10 (Akım yoğunluğunun uygulanması):

Akım yoğunluğu, bobinin sarım sayısı ile bobinden geçen akım çarpılıp elde edilen sonuç bobinin alanına bölünmesiyle bulunur.

1. Utility Menu > Plot > Areas
2. Main Menu > Preprocessor > Loads > -Loads- Apply > -Magnetic- Excitation > -Curr Density- On Areas
3. Bobin alanı seçilir.

4. OK.
5. Akım yoğunluğu değeri girilir.
6. OK.



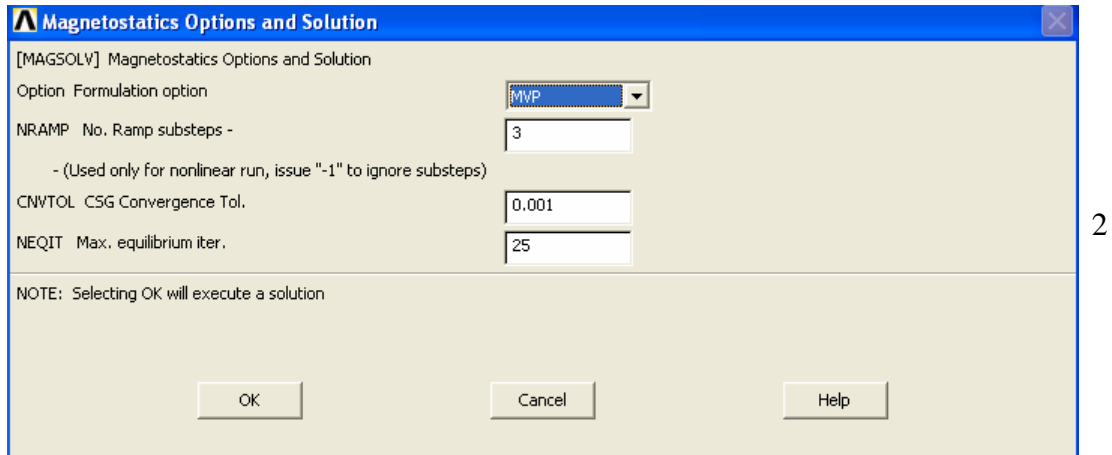
Adım 11 (Alan çözümü için paralel bir akı oluşturulur):

(Paralel akı alan çözümünü elde etmek için çevreye bir sınır koşulu uygulanır. Böylece bu sınır dışında akı kaybının olmadığı varsayılır.)

1. Utility Menu > Plot > Lines
2. Main Menu > Preprocessor > Loads > -Loads- Apply > -Magnetic- Boundary > -Vector Poten- Flux Par'l- On lines
3. Modelin çevresindeki tüm çizgiler seçilir.
4. OK.
5. Toolbar: SAVE_DB.

Adım 12 (Çözüm):

1. Main Menu > Solution > -Solve- Electromagnet > -Static Analysis- Opt & Solve
2. OK.
3. Çözüm tamamlandığında Solution Done penceresi görünür.
4. Close.



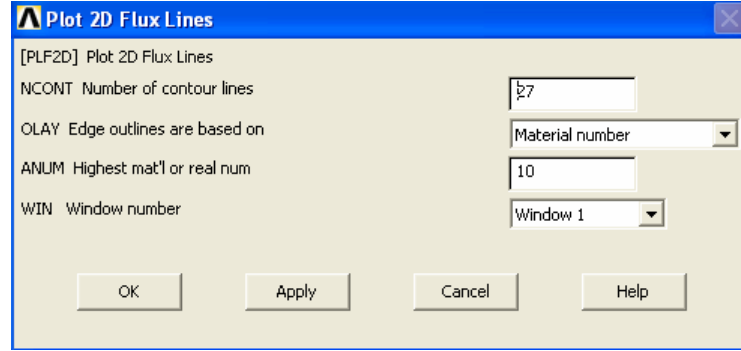


3-4

Adım 13 (Modelde akı çizgilerinin çizilmesi):

1. Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot- 2D Flux Lines

2. OK.



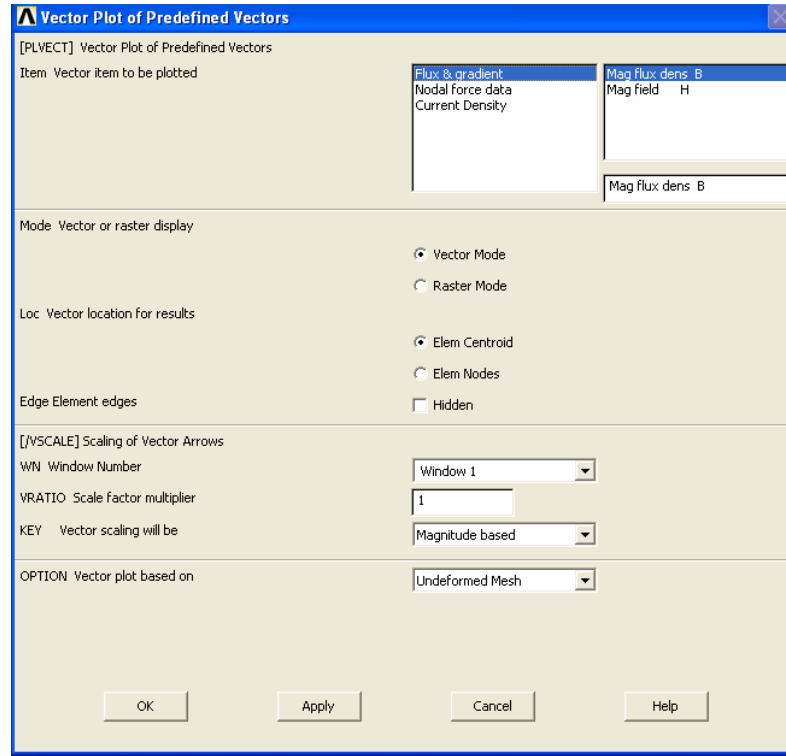
2

Adım 14 (Vektör olarak akı yoğunluğu çizimi):

1. Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Vector Plot- Predefined

2. Açılan pencereden Flux & gradient ve Mag flux dens B seçilir.

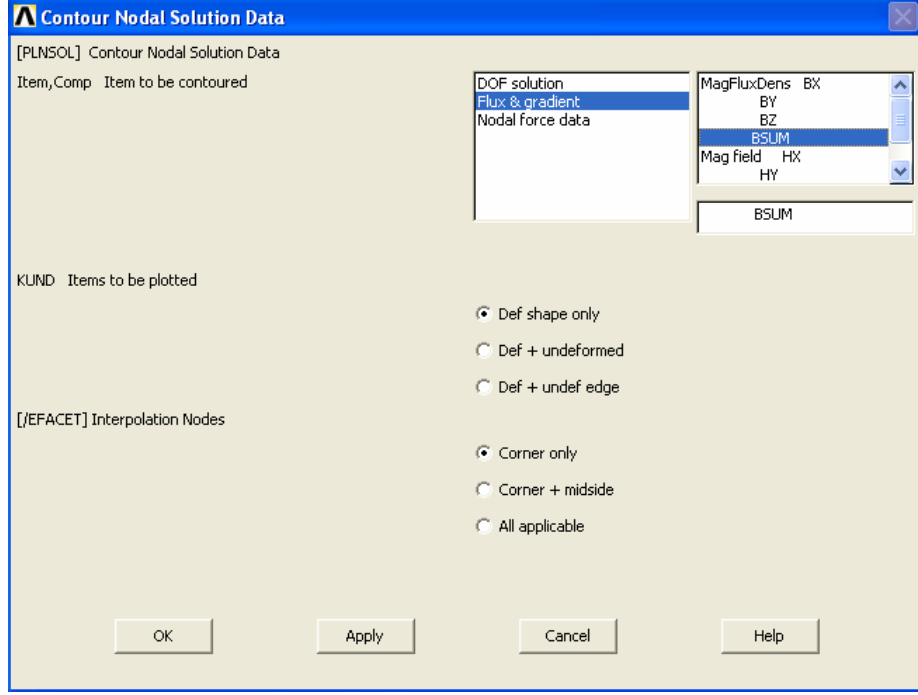
3. OK.



2

Adım 15 (Toplam akı yoğunluğu büyüklüğünün çizimi):

1. Main Menu > General Postproc > Plot Results >-Contour Plot- Nodal Solu
2. Açılan pencereden Flux & gradient ve BSUM seçilir.
3. OK.



2

Adım 16 (ANSYS programından çıkış):

1. Toolbar: QUIT
2. Açılan pencereden istenen seçenek seçilir. Örneğin kayıt yapmadan çıkmak için Quit – No Save! Seçilir.
3. OK.

(Anonim 2002).

EK-4 MANYETİK AKI YOĞUNLUĞU VE MANYETİK ALAN ŞİDDETİ İÇİN HATA HESABI

Manyetik akı yoğunluğu Eşitlik (3. 12) ile verilmektedir. Bu eşitlik,

$$B_m = \frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A f} \quad (E4. 1)$$

şeklindedir. Bu eşitliğin hatası,

$$\Delta B_m = \sqrt{\left(\frac{\partial B_m}{\partial V_{rms}} \Delta V_{rms}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_m}{\partial N_2} \Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{\partial B_m}{\partial Y_A} \Delta Y_A\right)^2 + \left(\frac{\partial B_m}{\partial f} \Delta f\right)^2} \quad (E4. 2)$$

olarak yazılır. Burada,

$$\frac{\partial B_m}{\partial V_{rms}} = \frac{1}{4.44 N_2 Y_A f} \quad (E4. 3)$$

$$\frac{\partial B_m}{\partial N_2} = - \frac{V_{rms}}{4.44 N_2^2 Y_A f} \quad (E4. 4)$$

$$\frac{\partial B_m}{\partial Y_A} = - \frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A^2 f} \quad (E4. 5)$$

$$\frac{\partial B_m}{\partial f} = - \frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A f^2} \quad (E4. 6)$$

şeklindedir. Manyetik alan şiddeti Eşitlik (3. 16) ile verilmektedir. Bu eşitlik,

$$H_m = \frac{N_1 i_m}{\ell_{ort}} \quad (E4. 7)$$

şeklindedir. Burada $\left(i_m = \frac{V_{rms}}{R}\right)$ olduğundan

$$H_m = \frac{N_1 V_{rms}}{\ell_{ort} R} \quad (E4. 8)$$

şeklini alır. Bu eşitliğin hatası,

$$\Delta H_m = \sqrt{\left(\frac{\partial H_m}{\partial N_1} \Delta N_1\right)^2 + \left(\frac{\partial H_m}{\partial V_{rms}} \Delta V_{rms}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_m}{\partial \ell_{ort}} \Delta \ell_{ort}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_m}{\partial R} \Delta R\right)^2} \quad (E4. 9)$$

olarak yazılır. Burada,

$$\frac{\partial H_m}{\partial N_1} = \frac{V_{rms}}{\ell_{ort} R} \quad (E4. 10)$$

$$\frac{\partial H_m}{\partial V_{rms}} = \frac{N_1}{\ell_{ort} R} \quad (E4. 11)$$

$$\frac{\partial H_m}{\partial \ell_{ort}} = - \frac{N_1 V_{rms}}{\ell_{ort}^2 R} \quad (E4. 12)$$

$$\frac{\partial H_m}{\partial R} = - \frac{N_1 V_{rms}}{\ell_{ort} R^2} \quad (E4. 13)$$

şeklindedir. ΔB_m ve ΔH_m bağıntılarında kullanılan mutlak hatalar tüm hesaplamalarda aynı değildir. Çünkü bazı ölçümlerde farklı hassaslıkta deney aletleri kullanılmıştır. Örnek-1 ölçümlerinden birini ele alalım. 50 Hz için $V_M = 20.4$ mV ve $V_{OT} = 219.8$ mV ($N_{OT} = 100$) olarak ölçülmüş, $H = 22.821$ A/m ve $B_{OT} = 1.500$ T olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta B_{OT} = \sqrt{\left(\frac{1}{4.44 N_2 Y_A f} \Delta V_{rms}\right)^2 + \left(-\frac{V_{rms}}{4.44 N_2^2 Y_A f} \Delta N_2\right)^2 + \left(-\frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A^2 f} \Delta Y_A\right)^2 + \left(-\frac{V_{rms}}{4.44 N_2 Y_A f^2} \Delta f\right)^2}$$

Burada $\Delta V_{rms} = V_{rms} \times 2.10^{-3}$ mV, $\Delta N_2 = 1$ (100 sarım için), $\Delta f = 1 \cdot 10^{-6}$ Hz olarak alınmıştır. ΔY_A için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\Delta Y_A = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_A}{\partial \ell_1} \Delta \ell_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial \ell_2} \Delta \ell_2\right)^2} \quad (Y_A = \ell_1 \cdot \ell_2)$$

$$\Delta Y_A = \sqrt{(\ell_2 \Delta \ell_1)^2 + (\ell_1 \Delta \ell_2)^2}$$

$\ell_1 = 30.00$ mm, $\ell_2 = 0.22$ mm olarak ölçülmüştür. $\Delta \ell_1 = \Delta \ell_2 = 0.01$ mm şeklindedir. Bu değerlerle hesaplamalar yapıldığında $\Delta B_{OT} = 0.070$ T olarak hesaplanmıştır. Bu durumda B_{OT} değerindeki hata $\pm \% 4.7$ olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta H = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{\ell_{ort} R} \Delta N_1\right)^2 + \left(\frac{N_1}{\ell_{ort} R} \Delta V_{rms}\right)^2 + \left(-\frac{N_1 V_{rms}}{\ell_{ort}^2 R} \Delta \ell_{ort}\right)^2 + \left(-\frac{N_1 V_{rms}}{\ell_{ort} R^2} \Delta R\right)^2}$$

$N_1 = 178$ ($\Delta N_1 = 1$ sarım), $\ell_{ort} = 0.312$ m ($\Delta \ell_{ort} = 1 \cdot 10^{-3}$ m) ve $R = 0.51 \Omega$ ($\Delta R = 0.01 \Omega$) olarak ölçülmüştür. Bu değerlerle hesap yapıldığında $\Delta H = 0.473$ A/m olarak hesaplanmıştır. Bu durumda H değerindeki hata $\pm \% 2.1$ olarak hesaplanmıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanmasında benden yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Naim DEREBAŞI'na, tezin gelişimindeki katkılarından dolayı Tez İzleme Komitesinin değerli üyeleri Sayın Prof. Dr. Ahmet AVİNÇ, Sayın Prof. Dr. Rıdvan EZENTAŞ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na, ANSYS ticari benzeşim programının sağlanmasında Figes A. Ş.'nin sahibi Dr. Tarık ÖĞÜT'e, çalışmalarımda bana yardımda bulunan Fizik bölümündeki Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma ve bana her konuda destek olan eşim Araş. Gör. Beyhan ERDEM'e ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

Sezer ERDEM, 11 Ocak 1973 tarihinde Bursa'da doğdu. İlkokulu Bitlis Gazi Paşa, orta ve lise öğrenimini ise Bursa Atatürk Lisesi'nde tamamladı. 1990 yılında Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Lisans eğitime başladı. 1994 yılında Fizik Bölümünden üçüncülükle mezun oldu. Aynı yılın Eylül ayında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı ve Nisan 1995'de Araştırma Görevlisi olarak atandı. 1997 yılında Yüksek Lisans çalışmasını bitirerek aynı yıl Doktora çalışmalarına başladı ve halen Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.