

TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEKLERİNDE
GEOMETRİK YAPIYA BAĞLI MANYETİK
AKI DAĞILIMI VE ENERJİ VERİMİNE ETKİSİ

Taylan GÜNEŞ



T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEKLERİNDE GEOMETRİK YAPIYA BAĞLI
MANYETİK AKI DAĞILIMI VE ENERJİ VERİMİNE ETKİSİ**

Taylan GÜNEŞ

Prof. Dr.Dr. Naim DEREBAŞI
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2016

TEZ ONAYI

Taylan Güneş tarafından hazırlanan “Transformatör çekirdeklerinde geometrik yapıya bağlı manyetik akı dağılımı ve enerji verimine etkisi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Anabilim Dalı`nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr.Dr. Naim DEREBAŞI

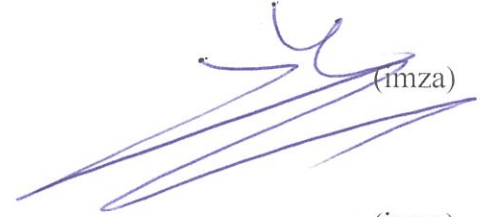
Başkan : Prof. Dr.Dr. Naim DEREBAŞI
Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

 (imza)

Üye: Prof. Dr. Muhittin AHMETOĞLU
Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

 (imza)

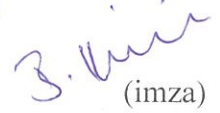
Üye: Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Müh. Anabilim Dalı

 (imza)

Üye: Prof. Dr. Yüksel ERGÜN
Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

 (imza)

Üye: Doç. Dr. Bayram KILIÇ
Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

 (imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum


Prof.Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü
01.11.2016 (Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.././....

imza

Taylan GÜNEŞ

ÖZET

Doktora Tezi

TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEKLERİNDE GEOMETRİK YAPIYA BAĞLI MANYETİK AKI DAĞILIMI VE ENERJİ VERİMİNE ETKİSİ

Taylan GÜNEŞ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr.Dr. Naim DEREBAŞI

Transformatör, motor ve jeneratör gibi elektrik makinelerinde çekirdek ve blok kısımlarında sıklıkla kullanılan yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinde, kullanım amaçlarına uygun olarak delik açma sonucu oluşan manyetik bozulma, hem manyetik özellikler hem de domain yapısı açısından incelenmiştir. Manyetik domainler, Manyeto-optik Kerr etkisini (MOKE) esas alarak gözlem yapma olanağı veren Kerr mikroskoplarının düşük ve yüksek çözünürlüklü modülleriyle gözlemlenmiştir. Domainler, elektrik çeliklerinin makro ve mikro yapıları arasında bir bağlantı sağlamak açısından incelenmiş ve 10 mm çapındaki dairesel bir delik etrafındaki manyetik akı dağılımı, nicel olarak modellenenmiştir. Malzemelerde lokalize olarak meydana gelen manyetik bozulmaların açıklaması için *relüktans* ve *geçirgenlik* arasındaki bağ kullanılmış ve mikro yapı görüntüleri üzerinden araştırılmıştır. Özellikle %3-SiFe graini yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde, yerel ve genel manyetik akı dağılımının incelenmesi için domain teorsinden faydalanılmıştır. Bununla birlikte, söz konusu yönlendirilmiş çelikleri, farklı manyetik anizotropi içeriklerinde incelenmiş ve histerezis eğrileri üzerinden lokal ve genel manyetik özellik karşılaştırmaları yapılmıştır. Bağlı geçirgenlik (μ_r) ve maksimum geçirgenlik (μ_{max}) gibi spesifik manyetik özelliklerin karşılaştırılması sonucunda, (1 1 0)[0 0 1] kristalografik yönelime sahip graini yönlendirilmiş %3-SiFe elektrik çeliğinin, yönlendirilmemiş çeliklere oldukça benzer olduğu deneysel olarak bulunmuştur. Haddeme doğrultusuna dik kesilen malzemenin, böylelikle, mikro yapısal olarak oldukça karmaşık bir doğası olan yönlendirilmemiş çeliklere alternatif olabileceği önerilmiştir. Bu önerme doğrultusunda, delik etrafındaki manyetik alan dağılımları navigasyonel olarak iki farklı modelde çok başarılı bir şekilde tanımlanmıştır. Dahası her iki modelin sistem değişkenleri ve sonuçları birbiriyle paralel olmasına rağmen, farklı metot ve tanımlamalar ile bir manyetik alan çizgisinin doğrultusu nicel olarak gösterilebilmiştir. Elde edilen bulgular, elektrik çeliklerinde anormal kayıplar olarak adlandırılan mikroyapısal deformasyonların etkilerini, yeniden organize olan dallanmış ve bağcık benzeri domainler üzerinden açıklamıştır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik domainler, histerezis eğrileri, manyetik geçirgenlik ve relüktans, %3-SiFe graini yönlendirilmiş elektrik çelikleri, Manyeto-optik Kerr etkisi

2016, xiv + 128 sayfa

ABSTRACT
PhD Thesis

**EFFECT TO THE ENERGY EFFICIENCY AND MAGNETIC FLUX DENSITY
DISTRIBUTION DEPENDENT ON GEOMETRICAL STRUCTURE IN
TRANSFORMER CORES**

Taylan GÜNES

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr.Dr. Naim DEREBASI

The detrimental effect of drilling electrical steel sheets was deeply investigated in terms both of magnetic properties and of domain structures in grain oriented and non-oriented electrical steel which is commonly used as a core and cylinder block in electrical machines such as transformers, motors and generators. Magnetic domains were observed by Kerr microscopy at low and high resolution modules where Magneto-optical Kerr effect (MOKE) enables to get visible domain patterns. Since domains were examined to provide a link between macro- and microstructures of electrical steel in this study, magnetic flux density distribution was able to modelling in a quantitative way. In order to explain localized magnetic deterioration in the sample, the connection between reluctance and relative permeability (μ_r) were empirically investigated by comparing local and global hysteresis loops of certain regions. In grain-oriented Fe-3%Si transformer sheets, such local and global magnetic flux density distribution was able to study with helping of domain theory. Moreover, certain grain oriented electrical steels were analyzed with regard to their anisotropy content. In this sense, generalized magnetic properties could be compared on hysteresis loops. As a result of comparing some of specific magnetic properties such as relative and maximum permeability, it was experimentally found that grain-oriented Fe-3%Si transformer sheets with a [001](110) Goss texture has relatively similar properties with respect to non-oriented sheets. Therefore, it was proposed that the sample which are horizontally cut to rolling direction could be described as a proper alternative to non-oriented sheets. In the way of this proposal, magnetic field distribution in the vicinity of the hole was successfully defined at two different models. Whereas the system parameters and empirical results of either model are parallel each other, direction of the magnetic field lines could be quantitatively indicated with distinctive methods and description. Obtained evidences are to put forward the effects of microstructural deformations which are defined as “anomalous losses” in electrical steels by domain branching and cord patterns as a result of domain re-organization mechanism.

Keywords: Magnetic domains, Hysteresis loops, magnetic permeability and reluctance, grain-oriented Fe-3%Si transformer sheets, Magneto-optical Kerr Effect.

2016, xiv + 128 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, *Yurtdışı Doktora Sırası Araştırma Bursu* kapsamında Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK) tarafından 6 Ay süreyle ve 1059B141400777 numaralı projeyle 2214 A *Doktora Araştırma Burs programı* kapsamında TÜBİTAK tarafından 12 Ay süreyle finansal olarak; “Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW) Dresden” tarafından 18 Ay süreyle teknik altyapı açısından desteklenmiştir. Bundan dolayı üç kuruma da teşekkür ederim.

Yurtdışı çalışmalarım kapsamında bana her türlü misafirperverliği gösteren ve hem teknik hem teorik birçok konuda engin bilgilerinden yararlandığım eş danışmanım sayın Prof. Rudolf SCHÄFER ve Mikroyapı Araştırma laboratuvarı çalışanları Dr. Ivan SOLDATOV, Christian BECKER ve Stefan POHAFL’a teşekkür ederim.

Tüm doktora eğitimim süresince engin bilgi ve tecrübesiyle farklı bakış açıları ve vizyon kazanmamı sağlayan çok değerli danışman hocam sayın Prof.Dr.Dr. Naim DEREBAŞI’na, tez izleme komitemde bulunan ve yapıcı eleştirileriyle tezimi geliştirmemi sağlayan sayın Prof. Dr. Güneş YILMAZ ve Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU’na teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar hiç bir zaman desteğini esirgemeyen sevgili annem Ferhan BUÇUK’a, hem yurt içinde hem de yurt dışında, benimle oldukça zahmetli, yorucu ve çok zor bir süreci birlikte yaşayan sevgili eşim ve hayat arkadaşım Ayşe Gül GÜNEŞ’e gösterdiği sabır ve verdiği cesareten ötürü teşekkür ederim.

Taylan GÜNEŞ

..../.../...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGE VE KISALTMALAR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Elektrik Çelikleri	3
2.1.1. Graini Yönlendirilmemiş Elektrik Çelikleri	3
2.1.2. Graini Yönlendirilmiş Elektrik Çelikleri (GYEÇ)	4
2.1.2.1. GYEÇ'nin Manyetik Özellikleri	7
2.2. Mıknatıslanma Değişkenleri	8
2.2.1. Manyetik Anizotropi	12
2.3. Güç Kayıpları	16
2.3.1. Histerezis Kayıpları	16
2.3.2. Girdap Akımı Kayıpları	16
2.4. Manyetik Domainler	18
2.4.1. Domain Fikri	19
2.4.2. Domainlerin Anlaşılması	20
2.4.3. Manyetik Domain Terimi	22
2.5. Domainlerin Enerji Terimleri	22
2.5.1. Dönme (Exchange) Enerjisi	23
2.5.2. Anizotropi Enerjisi	24
2.5.3. Dış Manyetik Alan (Zeeman) Enerjisi	25
2.5.4. Kaçak (Zıt) Alan Enerjisi	25
2.5.5. Manyeto-Elastik Etkileşim ve Manyetik Gerilme Enerjisi	25
2.5.6. Mikromanyetik Denklemler	26
2.6. Domain Duvar Hareketinin Fiziksel Yorumu	26
2.7. Domain Çeşitleri ve Yorumlanması	27

2.7.1. Tamamlayıcı Domainler (TD)	28
2.7.2. Kristal Yapılar	30
2.8. Domain Evrilmesi	31
2.8.1. Domain Desenlerinde Dallanma (Branching) Oluşumu	33
2.8.1.1. Dört – Fazlı Domain Dallanması (Basamak benzeri Motifler)	34
2.8.2. Manyetik Alan doğrultusuna Bağımlı Domain Evrilmesi	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
3.1. Malzeme Hazırlama	39
3.1.1. Boyut ve Birimler	40
3.1.2. Delme/Kesme İşlemi (Delik Açma)	40
3.1.3. Elektriksel Deşarj Makinesi (EDM) ile Kesme/Delme işlemi	41
3.1.4. Tavlama (Annealing)	43
3.1.5. Malzeme Temizliği	43
3.1.5.1. Kazıma (Etching)	44
3.1.5.2. Taşlama (Grinding)	45
3.1.5.3. Parlatma (Polishing)	45
3.2. Manyeto-Optik Gözlem Yöntemleri	46
3.2.1. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)	47
3.2.2. Kerr Mikroskopları	51
3.2.3. Aydınlatma Yolu	53
3.3. Manyetik Özelliklerin Analizi	54
3.3.1. Elektrik Çeliğinin Manyetik Özelliklerinin Ölçümü	54
3.3.1.1. Mıknatıslama Bobini – 1 (Solenoid)	54
3.3.1.2. Mıknatıslama Bobini – 2 (Yüksek Alan Bobinleri)	56
3.3.1.3. Algılayıcı (Arama) Bobinler	57
3.3.1.4. Diğer Devre Elemanları	57
3.3.2. Yönlendirilmemiş çelik için manyetik özelliklerin ölçümü	59
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	62
4.1. Örnek – 1 ((110)[100] yönelime sahip %3 – SiFe GYEÇ) deneysel sonuçları.....	62
4.1.1. Manyetik Özelliklerin Karakterizasyonu ve Yorumlanması	62
4.1.2. Manyetik Mikro Yapıların Karakterizasyonu ve Yorumlanması	68

4.2. Örnek – 2 ((1 1 0)[0 0 1] yönelime sahip %3 – SiFe GYEÇ) deneysel sonuçları	77
4.2.1. Manyetik Özelliklerin Karakterizasyonu ve Yorumlanması.....	77
4.2.2. Manyetik Mikro Yapıların Karakterizasyonu ve Yorumlanması	82
4.2.3. Dönme Sistemi – Dallanmış Domainlerin Yönelim Karakterizasyonu	92
4.2.3.1. Ayar numunesi	92
4.2.3.2. Ayar değişkenlerinin belirlenmesi	93
4.2.3.3. 3 Değişkenin (α - β - Φ) Kullanıldığı Model [Model – 1]	93
4.2.3.4. 2-Değişkenin (α - β) kullanıldığı sistem [Model – 2]	101
4.3. Örnek – 3 (Yönlendirilmemiş Elektrik Çeliği) Deneysel Sonuçları	110
4.3.1. Mıknatıslanma eğrileri ve yorumlanması	110
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	117
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	128

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Dönme (exchange) sabiti
α (Model-1)	Dallanmış Domain ile manyetik alan doğrultusu arasında oluşan açı değeri
α (Model-2)	Manyetik alan yönelimi
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Kolay eksen ile kristal doğrultuları arasındaki açı değerleri
B_1, B_2	Manyetik çift kırınım sabitleri
β (Model-1)	Duvarın başlangıç konumu ile dallanmış domain arasındaki açı değeri
β (Model-2)	Manyetik domain yönelimi
B_r	Artık ya da kalıcı mıknatıslanma
B_s	Doyum indüksiyonu
B_m	Maksimum indüksiyon
C	Domain duvar mobilitesi
C_m	Mukavemet modülü
c	Elastik tensör sabiti
D	Domain duvar kalınlığı
e_d	Kaçak (Zıt) alan enerji yoğunluğu
E_{an}	Anizotropi enerjisi
ε_m^0	Serbest manyeto-elastik deformasyon
F_{an}	Anizotropi kuvvetleri
Fe	Demir atomu
ϕ	Manyetik Akı
Φ	Kolay eksen ile domain duvarının sıfır alandaki konumu arasındaki açı değeri
ρ	Elektriksel direnç
H_d	Zıt alan
H_c	Sıfırlayıcı alan
H_2O_2	Hidrojen peroksit
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidroflorik asit
J_s	Doyum mıknatıslanma yoğunluğu
K_0, K_1, K_2	Anizotropi sabitleri
K_{\perp}	Dik anizotropi katsayısı
K_c	Kübik anizotropi sabiti
K_d	Zıt mıknatıslama alan sabiti
K_u	Tek eksenli anizotropi sabiti
l	Manyetik akı yolunun uzunluğu
λ	Manyetik gerilme sabiti
L_s	Ortalama domain uzunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
μ_d	Diferansiyel manyetik geçirgenlik
μ_{max}	Maksimum manyetik geçirgenlik
m_i	Mıknatıslanma vektör bileşeni

$m_{Pol}, m_{lon}, m_{Tra}$	Kutupsal, boyuna ve enine mıknatıslanma bileşenleri
M_s	Doyum mıknatıslanması
MgO	Magnezyum oksit
n	Bobin sarım sayısı
σ_{ex}	Simetrik tensör
P_{ec}	Girdap Akımı kayıpları
P_h	Histerezis kayıpları
P_t	Toplam güç kayıpları
R	Relüktans (manyetik direnç)
R_F	Manyeto-optik Faraday genliği
R_K	Manyeto-optik Kerr genliği
R_N	Normal düzlemde kutuplanan ışık genliği
$R_K^{Pol}, R_K^{Lon}, R_K^{Tra}$	Kutupsal, boyuna ve enine Kerr genlikleri
R_p, R_s	Manyeto-optik yansıma katsayıları
SO ₄	Sülfirik asit
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum oksit
χ	Manyetik alınganlık
γ	Domain duvar hareketi için gerekli olan asgari hareket katsayısı
γ_w	Spesifik duvar enerjisi
W	Domain kalınlığı
W_b	Temel (basit) domain kalınlığı
W_s	Yüzey domain kalınlığı
Q_v	Voigt malzeme sabiti
ω	Duvar hareketine karşı mikroyapısal direnç

Kısaltmalar Açıklama

AGM	Alternatif (Dalgalı akım) gradyent manyetometresi
DVM	Dijital voltmetre
EDM	Elektriksel deşarj kesme makinesi
EBS	Elektron geri saçılım kırınımı
GYEÇ	Graini yönlendirilmiş elektrik çeliği
IFW	Leibniz institut für Festkörper und Werkstofforschung
MOKE	Manyeto optik Kerr etkisi
ND	Yüzey normalı doğrultusu
TD	Enine doğrultu
RD	Haddeleme doğrultusu
VSM	Titreşimli örnek manyetometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 2.1.** Kolay mıknatıslanma ekseninin çok iyi yönlendirilmiş bir grain içerisindeki levha benzeri domainler ile gösterilmesi. Şematik kristalografik doğrultular soldaki çizimde verilmiştir5
- Şekil 2.2.** Yönlendirilmemiş ve yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin mikro yapısal karşılaştırması6
- Şekil 2.3.** Kristal kenar eksenlerinden belirli açılarla r_1 ve r_2 doğrultusunda sapmalar ...8
- Şekil 2.4.** Manyetik olarak yumuşak (a – b) ve sert (c) maddelerin karakteristik mıknatıslanma eğrileri9
- Şekil 2.5.** Mıknatıslanma ve Histerezis Eğrileri. Mıknatıslanma eğrisi, 1. bölgede, kesikli çizgiyle gösterilmiştir11
- Şekil 2.6.** B(H) eğrisinin eğiminden geçirgenlik bileşenlerinin hesaplanması (a) ve geçirgenliğin, manyetik alanın bir fonksiyonu olarak değişimi (b)12
- Şekil 2.7.** Disk şeklinde dört farklı domaine sahip bir numunenin dik ve eğimli alan etkisi altında domain duvarlarının hareketi13
- Şekil 2.8.** M(H) (a – c) ve histerezis (d) eğrilerinde, mıknatıslanmada yapılan iş14
- Şekil 2.9.** Aynı koşullardaki Fe78B13Si9 alaşımlı iki numunenin, enine ve boyuna kesilmesi sonucu ortaya çıkan anizotropi enerjisinin, histerezis eğrisinden elde edilmesi15
- Şekil 2.10.** Özel olarak hazırlanan %3.2-SiFe transformatör çeliği için f frekansının bir fonksiyonu olarak $B_m = 1.7$ T için birim ağırlık ve dönme başına P/f güç kaybı18
- Şekil 2.11.** Kristalografik yapısına göre değişen yüzey domainlerinin, farklı modüllerdeki Kerr mikroskobuyla elde edilen görüntüleri22
- Şekil 2.12.** Varsayımsal sıfır kalınlıklı 180° duvarın iki yanında antiparalel yönelime sahip mıknatıslanan spinler24
- Şekil 2.13.** Yönelim dışı kristallerden oluşan bir grain içerisinde, açı oranına göre tamamlayıcı domain yoğunluğunun artışı30
- Şekil 2.14.** Yüzey merkezli kübik kristalin doğrultu eksenleri (a) ve yüzeylerinin (b, c) miller indisleriyle, birim hücre üzerinde tanımlanması ve olası birçok düzlemin indislerle ifadesi (d)31
- Şekil 2.15.** Yönlendirilmiş elektrik çeliğinin eksenleri ve kübik kristalde miller indisleriyle eksenin gösterimi32
- Şekil 2.16.** Bazı TD çeşitleri; çam ağacı- (a), hançer- (b), vida- (c), gerilme kanallarına hapsolmuş ikincil tamamlayıcı domainler (d)33
- Şekil 2.17.** Kübik kristal düzleminde, istenmeyen dallanmış domain dizilimine sahip bir örneğin yüzey ve bulk yapısında, basamak benzeri oluşan, kapak domainler ve mıknatıslanma doğrultularının şematik gösterimi35
- Şekil 2.18.** Enine alan etkisi altında, 0.3 mm kalınlıklı, %3-SiFe çeliğinin (1 1 0) düzleminde oluşan üç farklı domain deseni. Doyumun 0,3 katındaki alan geriliminde elde edilen testere-dişi benzeri (a, e) domain desenini, 0,7 katında sürün benzeri domainler (b, f) takip ediyor. Yüksek alanlarda (c, d) ise, dallanmış domainlerin gelişimi gözlemlenmektedir. Model (g), yaklaşık olarak (c) de verilen en basit domain dallanmasını şematize etmektedir37

Şekil 2.19. Tüm kapak domainlerin aynı doğrultu boyunca mıknatıslandığı, eğimli alanda oluşan bir diğer domain deseni çeşidi; Bağcık-benzeri (Cord) domainler. (d) de ki diyagram, (a) da beyaz işaretlenmiş bölgenin kesit alanını gösterir. Eğer uygulanan alan, enine doğrultuya döndürülmeye başlarsa, kapak domainlerin hacmi, iç duvarların katlanarak yayılmasıyla, büzüşmeye başlar. Böylelikle, (e)' de üstten görünümü açıklanan, (b)' deki bağcık desenli karakteristikler oluşur. (f) deki kesit alanı, bağcık desenin yüzeyinin hemen altındaki ortamı gösterir. Alanın şiddetlenmesiyle, dallanmış domainlerin oluşumu (c) de gösterilmiştir	38
Şekil 3.1. Yönlendirilmiş çeliğe açılan deliğin boyutları	41
Şekil 3.2. Yönlendirilmemiş elektrik çeliği üzerindeki deliklerin ve etrafına sarılan bobinlerin boyutları ve konumları	43
Şekil 3.3. İşlem görmemiş elektrik çeliği (a), delik açılmış (b) ve temizleme prosedürlerine maruz bırakılmış Kerr gözlemine uygun hale getirilmiş (c) numunenin görüntüleri	47
Şekil 3.4. Kutupsal (a) ve boyuna (b) manyeto-optik Kerr ve Faraday etkileri	50
Şekil 3.5. Dikey kutuplanma için boyuna (a) ve enine (b) etkiler	51
Şekil 3.6. Bir Kerr sistemindeki ilgili açıların Kutuplayıcı ve Analizör üzerinden gösterimi	52
Şekil 3.7. İki tip Kerr mikroskobu. Düşük çözünürlük ve yüksek hassasiyetli versiyon (a ve c). Yüksek çözünürlüklü Kerr mikroskobu (b ve d)	53
Şekil 3.8. Aydınlatma açıklığı, Kutuplayıcı ve Analizörün şematikleri (a). Mikroskobun arka odak düzleminde (b) gözlemlenebilen, tam açıklıktaki sönüm bölgesi, bu durum için içe doğru gösterilmiştir (a)	54
Şekil. 3.9. Mıknatıslama bobininin taslak çizimi. Tüm ölçeklendirmeler milimetre boyutunda verilmiştir	56
Şekil 3.10. Mıknatıslama devresi. Boyunluk, şematik olarak gösterilen kaçak akının sistem içerisinde tutunması için sistemle kompakt olarak kullanılır	56
Şekil 3.11. Yüksek alan gerilimleri sağlayan, kapalı devre büyük bobin	58
Şekil 3.12. Ortalama akı doğrultusuna dik bağlanan Ana Bobin (AB), Sağ ve Sol bobinler, hem fotoğraf (a) ile hem de ölçeklendirilen şemasıyla (b) gösterilmiştir	58
Şekil 3.13. Ölçme devre elemanları	59
Şekil 3.14. İlgili ölçüm devresiyle histerezis eğrisinin elde edilmesi	60
Şekil 3.15. Yönlendirilmemiş elektrik çelikleri için kullanılan ölçme devresi	61
Şekil 3.16. Malzemenin mıknatıslanması için kullanılan çekirdeğin boyutları	62
Şekil 4.1. Delinen malzemedeki, bobin konumları (a) ve ilgili bobinlerden 0,1 Hz gibi düşük bir frekansta algılanan histerezis eğrilerinin karşılaştırılması (b)	64
Şekil 4.2. Delik öncesi ve sonrası histerezis eğrilerinin karşılaştırması	65
Şekil 4.3. Tüm bobinlerden elde edilen manyetik bağıl geçirgenlik değerlerinin karşılaştırması (a). $\mu = B/\mu_0 H$ formülü esas alınarak elde edilen maksimum geçirgenlik pikleri, yakınlştırılmış gösterimde ayrı ayrı verilmiştir (b)	66
Şekil 4.4. Frekansın bir fonksiyonu olarak, malzemedeki sıfırlayıcı alan (H_c) ve kalıcı mıknatıslanma (B_r) gibi manyetik özelliklerin, delik öncesi ve sonrası Ana bobin (AB) ile sağ ve sol bobinlerden elde edilen histerezis eğrilerinden türetilerek karşılaştırılması	67
Şekil 4.5. Tavlamanın yüzey gerilimlerine etkisi	70

Şekil 4.6. Kademeli olarak yüksek alana maruz kalan delik civarı mikro yapıların homojen olmayan doyum mıknatıslanması, 0 (a), 5 kA/m (b) ve 15 kA/m (c) alan geriliminde alınan yarı-kararlı Kerr görüntüleriyle verilmiştir	71
Şekil 4.7. 0,1 Hz frekansta elde edilen yarı-kararlı histerezis eğrisinde numaralarla belirlenmiş alan gerilimlerinde, deliğin sol ve sağında gözlemlenen, Kerr görüntüleriyle domain duvar hareketlerinin tespiti. Kırmızı ile belirlenmiş alanlar, algılayıcı bobinlerin sarıldığı bölgelerdir	72
Şekil 4.8. Yarı-kararlı Kerr görüntülerinden, domain kalınlığının şiddet grafiği ile tespit edilmesi	73
Şekil 4.9. Deliğin sağından seçilmiş, iyi yönelime sahip grain içindeki domain diziliminin ± 70 A/m dış alan etkisi altında duvar hareketiyle yarı-kararlı görüntüleri	74
Şekil 4.10. 1 mm' lik alanda gözlemlenen levha- benzeri domainler (a) içine tutunmuş tamamlayıcı domainlerin, alan etkisiyle dinamik evrilme aşamaları (b)	75
Şekil 4.11. Deliğin önünde elde edilen domain motiflerinden, iç dinamiklerdeki mıknatıslanma ve manyetik akı dağılım doğrultusu, uygulanan dış manyetik alana ve referans modele göre tahmin edilmiştir	76
Şekil 4.12. Deliğin önünde bulunan levha benzeri domainlerin, manyetik alan bileşenlerinin etkisi altında kademeli olarak evrilmesi (a). Sıfır alan etkisinde ilgili bölgedeki domain dizilimiyle (b), enine alan etkisi altında oluşan düzensiz testere dişi motiflerinin (c), mıknatıslanma doğrultularıyla şematik olarak gösterimi	77
Şekil 4.13. [1 0 0] ve [0 0 1] kristal eksenlerini doğrultusundaki GYEÇ ile yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin genel akı yoğunluğu dağılımdaki (a) ve buna bağlı olarak bağlı geçirgenliklerindeki (b) karşılaştırmalar	79
Şekil 4.14. Akı dağılımındaki bozulmanın delik öncesi ve sonrası genel (b) ve yerel (c) karşılaştırmaları yarı-statik B(H) eğrisinde verilmiştir. (a)'da ki şematik gösterimde verildiği gibi tercih edilen eksen dışında tüm değişkenler örnek-1 deki gibidir	81
Şekil 4.15. Her bir bobinden, hesaplanan ve alana bağlı olarak değişen bağlı geçirgenlik eğrileri	82
Şekil 4.16. Malzemedeki deliğin etrafında oluşan tipik domain desenleri. Soldaki fotoğrafta, görüntülerin alındığı lokasyonlar harflerle gösterilmiştir	84
Şekil 4.17. Deliğin sağ, sol, ön ve arkasında, belirli alan gerilimlerinde oluşan yarı-kararlı testere dişi benzeri domain yapıları	85
Şekil 4.18. Genel bakış açısıyla, delik ve etrafında, uygun alan uygulamalarında oluşan kutuplanmanın boyutu verilmiştir (a). (b)' deki I(H) grafiği, (a)'daki dağılımın nicel analizini başarılı bir şekilde yapmaktadır	86
Şekil 4.19. Deliğin hemen sonrasındaki grainlerin ve domainlerin sıfır alandaki (solda) ve 12 kA/m civarındaki (sağda) yarı-statik Kerr görüntüleri	87
Şekil. 4.20. Deliğin önünde, seçili bir graindeki vida benzeri TD	87
Şekil 4.21. Deliğin hemen öncesinde, farklı büyütme özelliğine sahip lenslerle yapılan ayrıntılı bağcık benzeri domain yapı analizi (a). 40 kA/m alan geriliminde elde edilen Kerr görüntüsünde (b) bir grain içerisinde, düzensiz dizilim gösteren bağcık domainlerden birinin fiziksel özellikleri incelenmiştir. (a) ve (b)' de verilen tüm Kerr fotoğrafları, (c)' de kırmızı nokta ile gösterilen bölgeden alınmıştır	89

Şekil 4.22. Yarı-kararlı histerezis eğrisiyle elde edilen, mıknatıslanma eğrisinin numaralandırılmış alan gerilimlerindeki Kerr görüntüleriyle karşılaştırılması	90
Şekil 4.23. Seçilen levha benzeri desenlerin, uygulanan alanla tamamlayıcı domainlere evrilmesi. Son görüntü, 60 kA/m' de ki doyum durumunu göstermektedir	91
Şekil 4.24. Genel perspektiften, deliğin sağ tarafındaki domain evrimi süreci. Levha benzeri domainler (a), dik alan etkisi altında testere dişi benzeri (b) ve sonra sütun benzeri (c) domainlere dönüşürler. Yüksek çözünürlük Kerr mikroskobuyla alınan görüntülerde ise sütun benzeri domainler (d), alanın daha da artışıyla çekirdeklenmeye başlamış ve basit dallanmış domain (e) halini aldıktan sonra, yüksek ve eğimli alanla, bağcık benzeri domain yapısı (f) elde edilmiştir	92
Şekil 4.25. Sıfır alanda iyi yönlendirilmiş domain desenlerinin, eşit alan gerilimlerinin $\pm 30^\circ$ aralığında, yönelim doğrultusundaki değişimler	94
Şekil 4.26. Dönme sisteminin, Model – 1 ile tanımlanması. Ayar numunesinden alınan statik Kerr görüntülerindeki (a) desenlerin yönelim değişkenleri, bir görüntü analiz programıyla ölçülmüştür. (b)' deki şematik çizimler, tamamen (a)'daki görüntülerden ölçülen değişkenlerin kullanılmasıyla üretilmiştir. Sistem karakteristiklerini veren α , β ve Φ değişkenleri, hem negatif (P4' ve P5' için) hem de pozitif (P1' ve P2' için) ayrı ayrı (c)' deki şematik çizimle açıklanmıştır	95
Şekil 4.27. Sıfır alanda, rastgele seçilen bir domain duvarı (P1) ve yüksek alan ile dallanmış bir numuneye dönüşen bu yapının duvarı (P1') ve referans noktaları (Kolay eksen ve H- doğrultusu) arasında tanımlanan sistem değişkenlerinin en açık illüstrasyonu	97
Şekil 4.28. $\Phi = 0^\circ$ (a), $\Phi = \pm 10^\circ$ (b) ve $\Phi = \pm 20^\circ$ (c) için oluşan her bir duvar yönelimi durumunda α ve β sistem değişkenlerinin gösterdikleri hem manyeto-optik hem de nicel sapma değerleri	98
Şekil 4.29. Domain yöneliminin kararlı olduğu kritik alan yoğunluğunda $0,7 \times J_s$ (doyum indüksiyonunun % 70' i), tüm fraksiyonlardaki yönelimin, sabit bir doğrultu üzerinde kaldığı nicel olarak gösterilmektedir	99
Şekil 4.30. Kerr görüntüleriyle (a)' da verilen desenlerdeki dönme, mıknatıslanma ve alan doğrultularından elde edilen açısal değerler, (b)' de şematik olarak gösterilmiştir. (c)' de ise α ve β açısal değerlerinin alan gerilimlerinde nasıl oluştuğu gösterilmiştir	100
Şekil 4.31. Deliğin sağında oluşan dönme değişkenlerinin model – 1' deki değişkenlere uygulanmasıyla ortaya çıkan β (α) eğrisi	101
Şekil 4.32. Dönme sisteminin, Model – 2 ile tanımlanması. Domain dönmesi (b)' de, (c)' de tanımlanan mekanizmaya göre şematize edilmiştir. Değişkenlerin değerleri, (a)' da Kerr görüntüleri altında verilmiştir	103
Şekil 4.33. Ayar numunesinden elde edilen verilerle üretilmiş olan $\beta(\alpha)$ grafiği	104
Şekil 4.34. Delik ve malzeme kenarları civarında gözlenen dallanmış ve bağcık benzeri domain yönelimlerinin (β) ve alan doğrultularının (α) ikinci modele göre nümerik tanımlaması (a) ile gerçek malzeme fotoğrafına çizilen şematik illüstrasyon (b)	105

- Şekil 4.35.** Domain yönelimindeki sapmanın manyeto-optik analizi (a). Delik kenarından uzaklaştıkça, sistem değişkenlerinin değerleri sıfıra doğru yaklaşır. (b)'de ki şematik illüstrasyon, tamamen (a)'da ölçülen $\alpha - \beta$ değerlerinden esinlenilerek çizilmiştir106
- Şekil 4.36.** Deliğin, manyetik alanı doğrultusundan saptıran bozucu etkisi, merkezinden itibaren 12 mm'lik bir yarıçapta çembersel bir alanı kapsamaktadır 108
- Şekil 4.37.** Genelleştirilmiş $\beta(\alpha)$ grafiği üzerinden delik etrafında oluşan domain yönelimi ve alan doğrultularının belirlenmesi (a). Delik etrafında oluşan alan ve domain dağılımı, (b)'de şematik olarak gösterilmiştir109
- Şekil 4.38.** Büyük delik etrafında “L” kodu ile sarılan bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrileri (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz ve (d) 400 Hz'te karşılaştırılmıştır112
- Şekil 4.39.** Küçük delik etrafında “S” kodu ile sarılan bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrileri (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz ve (d) 400 Hz'te karşılaştırılmıştır114

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ticari olarak kullanılan bazı yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin fiziksel ve manyetik özellikleri	7
Çizelge 2.2. Tipik ferromanyetik malzemelerin domain yapısının analiz edilmesiyle tanımlanabilecek enerji terimleri	23
Çizelge 4.1. Manyetik özelliklerin, malzemenin belirli yerlerindeki bobinler vasıtasıyla elde edilen nümerik değerleri	68
Çizelge 4.2. Dönme değişkenlerinin genelleştirilmiş tanımları	97
Çizelge 4.3. Ayar ve delikli malzemelerden elde edilen Model – 2 değişkenlerinin karşılaştırılması	110
Çizelge 4.4. Büyük delik etrafındaki “L” kodlu bobinlerden ve AB’den herbir frekans değerinde ayrı ayrı elde edilen akı yoğunluğu değerleri	113
Çizelge 4.5. Küçük delik etrafındaki “S” kodlu bobinlerden ve AB’den her bir frekans değerinde ayrı ayrı elde edilen akı yoğunluğu değerleri	115

1. GİRİŞ

Transformatör, motor, jeneratör gibi elektrik makinelerinin, durağan ya da hareketli parçalarında, verimli bir indüksiyon sağlamak için kullanılacak elektrik çeliği ve bu çeliğin fiziksel özellikleri oldukça büyük önem arz eder. Özellikle transformatör çekirdeklerinde, kolayca mıknatıslanıp sonra zıt mıknatıslanan, oldukça yüksek manyetik geçirgenlik ve elektriksel direnç gibi özelliklere sahip kolay mıknatıslanabilir manyetik malzemelerin kullanımına ihtiyaç duyulur. Bu ve benzeri özellikler de malzemenin kristal yapısından haddelene doğrultusuna birçok değişkene bağlıdır. Bunun yanı sıra malzeme seçimi için de, kullanılacak transformatörün çeşidi, levha oranı, kesilme boyutu ve tipi gibi birçok bilgi de gereklidir.

Transformatör çekirdekleri kullanım alanı ve müşteri taleplerine göre farklı boyut ve şekillerde üretilebilmektedir. Ancak böyle yapılarda, ısınma, ses ve dolayısıyla güç kaybı gibi sorunlar çok önemli olduğundan, tasarımlar bu sorunları giderecek ya da en küçük duruma getirecek şekilde yapılmalıdır. Levhalar üst üste bindirilerek ve birbirlerine sıkıca tutturularak, bir transformatör çekirdeği oluşturulur. Burada önemli olan kısım, belirli bölgelerde delinen levhaların bir vida yardımıyla bir arada tutulmasının sağlanmasıdır. Bu işlem sonrasında, E-I, C-I, T-U vb. alfabetik dizilimde transformatör çekirdekleri üretilir.

Her biri elektriksel olarak yalıtılmış levhaların üst üste konulup, vida ile sabitlenmesi sonucu, girdap akımları ve nihayetinde oluşan ısınma problemleri da en küçük duruma getirilmiş olur. Ancak, levha üzerinde açılan delik ya da delikler, ferromanyetik bir malzeme olan çeliğin üzerinde manyetik olmayan (hava boşluğu) konumların olduğu anlamına gelmektedir. Bunun birçok dezavantajı olabilir. Her ne kadar, delikler uygun boyut ve ebattaki vida yoluyla kapatılıyor olsa da, söz konusu deliğin kesme kenarlarında, mıknatıslanmayı bozucu (zıt mıknatıslama) bölgesel alanlar oluşacağından, manyetik akı dağılımında bozulmalar ya da dalgalanmalar oluşur.

Daha önce levhalar arasındaki hava boşluğunun bozucu etkisi (Erdem 2006), Güç transformatörlerdeki köşe eklemlerde oluşan hava boşluklarının etkileri (Tang ve ark. 2015) ve elektromanyetik devrelerde zıt mıknatıslama alanların ideal olmayan davranışları (Faghihi ve Heydari 2009) çalışılmıştır. Ancak, iki veya daha fazla eklemli çekirdeğinde, her bir levha üzerindeki böyle deliklerin bozucu etkisi ne manyetik özellikler açısından ne de manyetik mikro yapıları yani manyetik domainleri açısından

araştırılmamıştır. Oysaki yapılan çalışmalarda, böyle deliklerin, delinmemiş çeliklere oranla yaklaşık % 65'lik bir güç kaybına sebep olduğu bulunmuştur (Gunes ve ark. 2016). Bu kayıpların yanı sıra delik boyutuna bağlı olarak malzeme içerisinde bazı manyetik özelliklerin bölgesel olarak ciddi anlamda bozulduğu ve bu durumun, tüm malzemenin manyetik özelliklerine etki etmesi de olasıdır.

Malzemenin, sıfırlayıcı alan (H_c), artık mıknatıslanma (B_r), manyetik (bağlı) geçirgenlik (μ_r) ve alınganlık (χ) gibi manyetik özelliklerindeki bozulmalar, histeresis eğrisindeki farklılıklarla tespit edilebilir. Bölgesel ve genel bozulmalar ve de birbirlerine etkisi, histeresis ya da girdap akımı kayıplarıyla gösterilebilse de, domain yapılarındaki bozulmalar ya da anormalliklerin tespiti ancak ayrıntılı manyeto-optik gözlemler sonucunda mümkün olabilir. Öyle ki, bir malzemenin mıknatıslanma eğrisini doğru bir biçimde analiz etmek için domain yapılarının altında yatan sistemi anlamak gerekir (Hubert ve Schäfer 1998). Manyetik domainler, mikroskobik özellikler ile temel fiziksel özellikler arasında bir köprü olan malzemenin mikro yapılarının bir elemanıdır. Bir histeresis eğrisinde akının, manyetik alanın bir fonksiyonu olarak birim zamanda değişmesiyle, geri döndürülemez mıknatıslanmanın bir sonucu olarak elde edilmesi, manyetik domain yapısının izlenmesiyle de gözlemlenebilir.

Bu tez çalışmasında, transformatör vb. elektrik makinelerinin çekirdeklerinde kullanılan levhaların elektriksel boşalma yöntemiyle delinmesi ya da kesilmesi sonucunda manyetik özelliklerdeki bozulmalar incelenmiştir. Makroskobik ölçümler sonucunda elde edilen bölgesel ve genel verilerle, malzemede deliğin oluşturduğu bozucu etki tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra, deliğin etrafında, bağlı geçirgenliğin çok yüksek seviyelere çıktığı tespit edilmiş ve bu bölgeler, Manyeto-optik Kerr etkisinin (MOKE) kullanılmasıyla gözlemlenmiştir. Nicel olarak elde edilen manyetik özellikler, böylece manyetik alana bağlı olarak domain motifleri ve domain duvar hareketiyle ispatlanmıştır. Bununla birlikte, mikro yapıların ayrıntılı olarak incelenmesi yoluyla delik etkisiyle, manyetik alanın doğrultusundaki sapmaların sayısal analizi yapılmıştır. Bu analiz neticesinde, alan doğrultusundaki yönelim dışı sapmalar üzerine uygun bir model önerilmiştir. Önerilen model üzerinden tanımlanan sistem değişkenleri, delik benzeri yapılardan kaynaklanan doğrultu sapmalarının tanımlanması için oldukça başarılı sonuçlar vermiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Elektrik elikleri

Transformatör, motor ve jeneratör gibi elektrik makinelerinin, çekirdeklerinde genellikle levhalar halinde kullanılan ve kullanım amacına göre boyutları, kompozisyonları ve şekilleri farklılaşan malzemeler genel itibariyle elektrik çelikleri olarak isimlendirilirler. Bu tarz malzemelerin birbirinden ayırt edilmesini sağlayan ve sınıflandırın en belirleyici etken, grainlerinin yönlendirilip yönlendirilmemesidir. Bu bağlamda, elektrik çelikleri, grainleri yönlendirilmiş (Goss yapısında) ve yönlendirilmemiş elektrik çelikleri olarak ikiye ayrılır. Goss yapısına sahip, yönlendirilmiş elektrik çelikleri, haddeleme doğrultusunda, ortalama olarak aynı eksende yönlendirilmiş domainlerden oluşur. Öte yandan, herhangi bir yönlendirme yapılmayan ya da rastgele kristalografik eksen dizilime sahip elektrik çelikleri ise graini yönlendirilmemiş olarak isimlendirilir.

2.1.1. Graini yönlendirilmemiş elektrik çelikleri

Genellikle dönen elektrik makinelerinde sıklıkla kullanılan bir malzeme olan yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin mıknaatıslanma işlemleri hakkında çok az şey bilinir (Williams ve ark. 1949, Martin 1957). Bu tarz yapılarda, kristal yapı tamamen rastgele dizilimden oluşur. Bunun bir sonucu olarak, karmaşık domain dağılımı ve oldukça küçük grainler ile sık grain sınırları, manyeto-optik analiz konusunda ciddi birer sorun olmaktadır. Makro ölçekte incelenebilen manyetik özelliklerine ise histeresis eğrisi gibi statik ya da yarı-statik ölçümler vasıtasıyla karar verilebilmektedir. Bunun dışında, deneysel analiz kısmında da bahsedilecek olan örnek hazırlama aşamalarına uygun olarak işlem görmüş örneklerde, ancak grain sınırlarının belirginleştirilmesi sağlanabilir. Öte yandan, izotropik bir yapıya sahip olan bu çeliklerin, haddeleme sırasında (soğuk ve sıcak) çeşitli değişimler kullanarak ve alaşımdaki silisyum (Si) ilavesindeki oranları değiştirerek, söz konusu grain boyutlarını arttırmak mümkündür (Youliang ve ark. 2016). Çelik alaışımındaki silisyum oranı, bilindiği üzere malzemenin fiziksel ve manyetik değişkenlerini doğrudan etkiler. Öyle ki, % 2,5'tan fazla Si içeren alaşımlar erime noktası üzerindeki tüm sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik (fcc) olurlar (Cullity ve Graham 2009). Bunun anlamı, böyle alaşımlar, faz değişiminden bağımsız tüm sıcaklıklarda, tekrar kristallenebilirler. Öte yandan, kompozisyondaki Si artışının manyetik açıdan olumlu etkileri; (i) elektriksel direnci artırır ve girdap akımına karşı bir direnç üretilir,

(ii) manyetik kristal anizotropi azalır ve manyetik geçirgenlik artar, (iii) manyetik gerilme azalır ve hassasiyeti düşürülür, gibidir. Bununla birlikte, doyum indüksiyonunda bir azalma ve malzemenin gittikçe kırılğan hale gelmesi, dolayısıyla haddelemenin zorlaşması ise istenmeyen etkileridir.

2.1.2. Graini yönlendirilmiş elektrik çelikleri (GYEÇ)

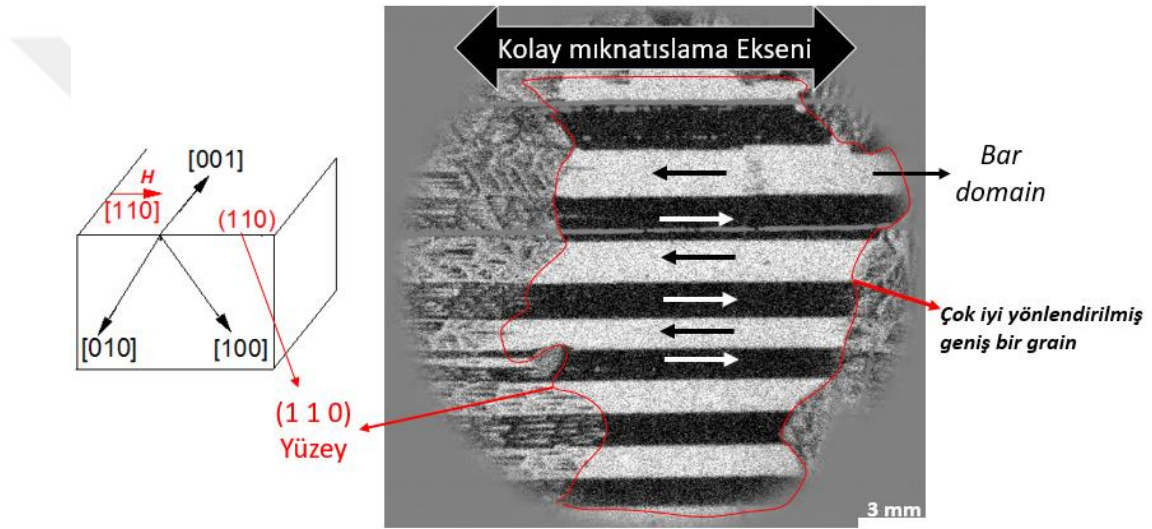
Graini yönlendirilmiş demir silikon levhaları olarak ta bilinirler. N.P. Goss tarafından 1935 yılında bulunmuştur (Goss 1935). Grain yönelimleri tamamen kristal yapısının üç-boyutlu eksenleri ile (miller indisleriyle) kontrol edilebilmektedir. Basit kübik bir kristal yapısını ele aldığımızda, küpün yüzey eksenini doğrultusunda, haddeleme yapılabileceğinden, bu yönlendirme sonucunda grainler, en temel haliyle, ortalama $[1\ 0\ 0]$ ya da $[0\ 0\ 1]$ doğrultusunda domain dizilimindedir, denebilir.

Bu tarz ferromanyetik malzemelerin en iyi örneklerinden biri grainleri haddeleme doğrultusunda yönlendirilmiş, 3%-SiFe kompozisyonuna sahip elektrik çeliğidir. Genellikle, transformatör çeliği ya da levhası olarak da isimlendirilebilir. GYEÇ, çoğunlukla geniş grain sınırlarına ve çok iyi dizilimde domain yapılarına sahiptir. Bazı grainlerde, kolay mıknatıslama ekseninden $1^\circ - 8^\circ$ arasında hafif sapmalar gözlemlenebilir. Böyle sapma açıları domain yapısının, şekli, duvar özellikleri ve kalınlığı gibi fiziksel değişkenlerle anlaşılabilir. Atomik boyuttaki dizilim hakkında, daha ayrıntılı bilgi edinmek için, kristal yapının incelenmesine imkân verecek aletsel analiz yöntemleri de denenebilir.

GYEÇ, karakterize edilirken yönlendirmenin gerçekleştirildiği kristal eksenine, o örneğin kolay mıknatıslama eksenini denir. Kolay mıknatıslama etkisi, malzemenin manyetik mikro yapısının analiz edilmesi için çok önemli bir değişkendir. Tahmin edileceği gibi yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinde böyle bir eksen yoktur, yerine rastgele dağılıma sahip mıknatıslama eksenleri kullanılır. Kolay mıknatıslama eksenini, üzerinde çalışılan elektrik çeliğinin, manyetik doyuma ulaşıncaya kadar bir AC dış manyetik alan tarafından mıknatıslanmasından sonra, kademeli olarak manyetik alanın sıfıra indirilmesi sonucu elde edilen bar domainlerin uzandığı doğrultudur (Şekil 2.1).

Böylelikle Kerr görüntülerinden, manyeto-optik olarak kolay mıknatıslama eksenini tespit edilebilmektedir. Kolay mıknatıslama eksenini, graini yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde yapılan kapsamlı nicel analizlerde, önemli bir kaynak noktasıdır. Sıfır mıknatıslanmada

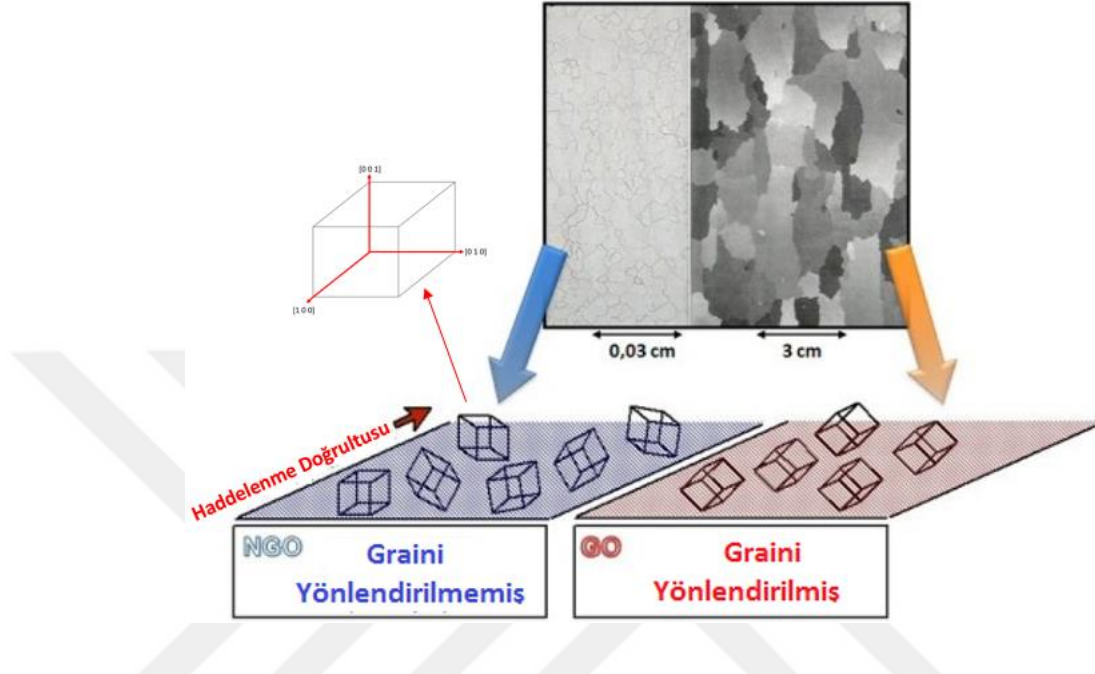
ya da bir dış manyetik alan uygulaması altında, domain kalınlığı, tamamlayıcı domainler, dönme doğrultusu ya da domain evrimi gibi birçok mikro yapı analizlerinde, grainlerin kolay eksenini bilinmelidir. Böyle graini yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde % 3 ile % 6,5 oranında değişen silisyum ilavesi kullanılır. Kullanım alanına ve istenen verime göre kompozisyonda çeşitlendirme yapılabilir. Graini yönlendirilmiş transformatör çeliği, malzemenin çalışma eksenini boyunca, $[0\ 0\ 1]$ kolay mıknatıslama doğrultusundan bir kaç derecelik sapmalarla uzanan geniş grainlere sahip %3-SiFe kristallerinden oluşurlar. Levha malzemesinin üretim sürecindeki haddeleme doğrultusu, ortalama kolay mıknatıslama eksenine aynıdır.



Şekil 2.1. Kolay mıknatıslama ekseninin çok iyi yönlendirilmiş bir grain içerisindeki bar domainler ile gösterilmesi. Şematik kristalografik doğrultular soldaki çizimde verilmiştir.

Tüm grainlerin yüzeyleri, (110) düzleminde (tamamen (110) $[0\ 0\ 1]$ kristal yapısında oluşan) aynı doğrultuda gözlenirler. Böyle bir dizilim Şekil 2.1'de tüm eksenleriyle verilmiştir. Levhalar arasında oluşabilecek girdap akımlarını önlemek için her biri ince bir filmle yalıtılır. Kaplamanın kalitesi ya da içeriği, genellikle girdap akımları sonucu oluşacak ısı akışının önlenmesi veya da en küçük duruma getirilmesine karar vermektedir. Şekil 2.2'den de anlaşılacağı gibi, grain boyutları, yönlendirme koşullarına göre ciddi manada farklılıklar gösterir. Kristalografik yapılar, Goss yapısında oldukça düzgün bir dizilime sahipken, yönlendirilmemiş çelikteki rastgele dağılım, basitçe sistemlerin birbirinden nasıl farklılaştığını göstermektedir. Öte yandan, yukarıda da bahsedildiği gibi yönlendirilmemiş çeliklerde, karmaşık domain dağılımı ve oldukça küçük grainler ile sık

grain sınırları gözlenir. Şematik gösterimde verilen kübik yapılardaki kristal dizilimi, yönlendirilmemiş çeliklerin, izotropik yapısından kaynaklanmakta iken, yönlendirilmiş çeliklerde anizotropik bir dağılım söz konusudur.



Şekil 2.2. Yönlendirilmemiş ve yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin mikro yapısal karşılaştırması. Anonim, 2016).

Anizotropi değeri, yönlendirilmiş çeliklerde çalışma doğrultusu yani, malzemeye dışarıdan yapılan bir etkini (manyetik alan, gerilme, sıkıştırma, vs.) doğrultusu ile malzemenin tercih edilen yönelimi arasındaki açısal değere, çok kuvvetli bir şekilde bağlıdır (Küppers 1968).

Öte yandan GYEÇ, manyetik özellikleri açısından da düşük güç kaybı, yüksek geçirgenlik ve ekonomik transformatör malzemesi sağlamak amacıyla geliştirilmiş demir (Fe) silisyum (Si) alaşımlarıdır. Ticari olarak, ilk kez AK Steel (Anonim 2013a) tarafından üretilen bu manyetik malzemeler, kalınlıklarına göre (0.18 – 0.35 mm) sırasıyla, M2, M3, M4, M5 ve M6 olarak standart boyutlara sahiptirler. AK Steel tarafından yayınlanan, bazı manyetik ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de ki gibidir.

Söz konusu çeliklerin kullanıldığı transformatör çekirdekleri, levhaların üst üste bindirilmesi suretiyle üretilirken, levhalara, kesme, delme, presleme ve makaslama gibi işlemler uygulanmaktadır. Bu ve benzeri işlemler genellikle elektromanyetik cihazlarda kullanılan elektrik çeliğinin manyetik özelliklerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Öyle

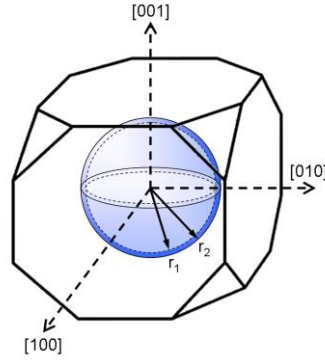
ki, üst üste bindirilmiş ve aralarında da yalıtıcı malzeme bulunan levhalar ideal koşullarda manyetik akı dağılımının katmanlarda belirli bir doğrultuda akmasına izin verir. Ancak, katmanlarda, geometrik yapıdan kaynaklı, manyetik olmayan bölgelerle (hava gibi) karşılaşıldığında manyetik akı dağılımında bozulmalar meydana gelecek ve ilişkili olarak güç kayıpları oluşacaktır. Transformator çekirdekleri, bu tarz, kesme, delme, presleme ve makaslama gibi işlemler yoluyla üretilen elektrik çeliklerinden meydana gelirse, enerji verimliliğini sağlamak için temel öğelerin başında akı yoğunluğu dağılımını bozacak etkileri saptamak veya en küçük duruma getirmek gelmektedir.

Çizelge 2.1. Ticari olarak kullanılan bazı yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin fiziksel ve manyetik özellikleri (Anonim 2013a)

	<i>Fiziksel Özellikleri</i>				<i>Maks. Güç Kaybı</i> (W/kg)	
					<i>50 Hz</i>	
	Kodu	Kalınlık	Sınıf	Yoğunluk (g/cm ³)	Direnç ($\Omega \cdot m \times 10^{-6}$)	1.5 T
M2	0.18	18G041	7.65	51	0,676	1,07
M3	0.23	23G045			0,695	1,1
M4	0.27	27G051			0,858	1,23
M5	0.30	30G058			0,968	1,38
M6	0.35	35G066			1,1	1,56

2.1.3. GYEÇ'nin manyetik özellikleri

GYEÇ, haddeleme doğrultusunda çok dikkatli bir üretim sürecinden geçirilerek üretildiğinden en uygun manyetik karakteristiklere sahiptir. Kolay mıknatıslama eksenine paralel akı yolu düzenlemesiyle çekirdek malzemesi olarak kullanıldıklarında, yüksek indüksiyonda bile düşük güç kayıpları gösterebilirler. En önemli özelliklerinden biri ise yüksek hatta bazı durumlarda çok yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmalıdır. Bu özellikleri sayesinde, kolay mıknatıslama eksenine ve çalışma doğrultusunun aynı olduğu örneklerde, doyum mikro saniyeler içinde ve çok düşük manyetik alan etkisiyle gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.3. Kristal kenar eksenlerinden belirli açılarla r_1 ve r_2 doğrultusunda sapmalar. Çalışma doğrultusu, haddeleme doğrultusu, enine doğrultu ve normal eksenleri keyfi olarak alınmıştır (Frommert ve ark. 2008).

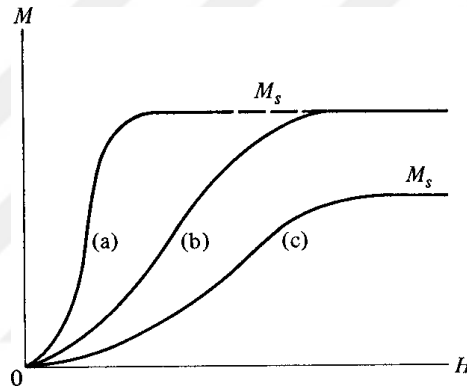
Tabii ki bu durum, domain yapısındaki yönelim dışı sapmalarla yakından alakalıdır. Çünkü çalışma eksenini ile domain yönelimi arasında yüzey içi (in-plane) veya yüzey dışı (out-of-plane) sapmalardan dolayı oluşacak açı değerleri hem mıknatıslanma eğrisinin eğimini artırır hem de kalıcı mıknatıslanma (B_r) gibi manyetik karakteristikleri değiştirebilir. Bu bağlamda, mikro manyetik özelliklerin makro manyetik özelliklere etkisi gözlemlenmiş olur. Şekil 2.3'te r_1 ve r_2 vektörleriyle gösterilen yönelim dışına sapma doğrultuları, mikro yapılarda, tamamlayıcı domainler olarak gözlemlenir. Bu yapılar, ileride ayrıntılı olarak verilecektir.

Kristal eksenden küçük sapmalar her ne kadar akı dağılımının doğrusallığını bozsa da, ikincil kristallenmeyi sağlayacak ısı tavlama ile bunun üstesinden gelinir ve nispeten iyi dizilime sahip domain yapısı elde edilebilir. Ancak daha büyük sapmalar, daha büyük anizotropi enerjisinin de kaynağı olacağından, tamamlayıcı domainlerden bağımsız bir yaklaşım gerektirebilir. Şekil 2.4'te verilen $M(H)$ grafiğinde karşılaştırılan malzemelerin mıknatıslanma eğrilerinden de, yönelim farklılıkları anlaşılabilir.

2.2. Mıknatıslanma Değişkenleri

Bir ferromanyetik malzemeyi doyurmak ya da başka bir deyişle, tamamen mıknatıslamak için düşük bir alan gerilimi yeterli ise bu malzeme genellikle “kolay mıknatıslanabilir manyetik malzeme” olarak tanımlanabilir. Ayrıca, mıknatıslanma eğrisinden de malzemenin zor ya da kolay mıknatıslanabilir manyetik malzeme olduğu anlaşılabilir. Öyle ki, Şekil 2.4'te verilen mıknatıslanma eğrilerine sahip üç malzemenin makro seviyedeki manyetik yapısı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Burada, (a) ve (b) kolay

mıknatıslanabilir; (c) ise sert manyetik malzeme olarak tanımlanabilir. Görüldüğü gibi zor mıknatıslanabilir manyetik malzemede doyum mıknatıslanması düşer ancak histeresis alanı artar. (b)'de ise farklı bir durum söz konusudur. Bazen bazı maddeler manyetik olarak ya kolay ya da zor mıknatıslanabilir olabilirler ve bu tamamen fiziksel ve mikro yapısal koşullara bağlıdır. Çünkü çalışma eksenini kolay eksenle belirli açılar yaparsa, malzemenin domain yapısı kolay ekseninde bulunsa da, mıknatıslanma eğrisinin doyuma giderken eğimi artar. Bu durum, histeresis eğrisinde kendisini çok daha net bir biçimde ortaya çıkarır. Kalıcı mıknatıslanma (B_r) ve sıfırlayıcı alan (H_c) gibi manyetik karakteristikler, böyle koşullar altında değişkenlik gösterir ve ayırt edici özellik olarak tanımlanabilirler.



Şekil. 2.4. Kolay (a – b) ve zor mıknatıslanabilir (c) maddelerin karakteristik mıknatıslanma eğrileri

Şekil 2.5'te, hem indüksiyon (düz çizgi) hem de mıknatıslanma (kesikli çizgi) eğrileri verilmiştir. Doyum mıknatıslanmasından sonra, M sabit olmasına rağmen, manyetik alan H, indüksiyonun bir kısmını oluşturduğundan, B, H ile artmaya devam eder. Bu durum, aşağıdaki eşitlikten de anlaşılabilir;

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (2.1)$$

burada B, manyetik indüksiyonu, M ve H ise sırasıyla mıknatıslanma ve manyetik alanı temsil etmektedir. (2.1) eşitliği en temel manyetizma denklemlerindedir.

Böylelikle, B(H) eğrisiyle, mıknatıslanmanın temel dinamikleri, doyum indüksiyonuna ulaşıldıktan yani geri döndürülemez mıknatıslanma oluşturulduktan sonra, malzemeye uygulanan alanın kademeli olarak sıfırlanmasıyla, B_r ve H_c karakteristikleri elde edilir.

Bu manyetik değişkenler histeresis eğrisinin şekline karar verir. Bilindiği gibi, bu eğrinin döngüsünü tamamlaması sonucu oluşan alan histeresis kaybını verir ve yapılan iş, örnekte ısı olarak açığa çıkar. H_c , belirli ve doyum indüksiyonundakinin zıttı bir alan geriliminde ve sıfır indüksiyonda elde edilir. B_r ise, dış alan etkisi hiç yokken yani uygulanan manyetik alan tamamen kaldırıldığında, örnekte kalan mıknatıslanmadır. Bu iki değişken, düşük ve yüksek frekans uygulamalarında, tüm elektrik çeliklerinde karakteristik analiz yapılmasına olanak sağlayan önemli ölçütlerdir.

Faraday yasasına göre, n sarımlı bir bobin içerisinde geçen manyetik akının (Φ) değiştirilmesiyle bobin içerisinde oluşan gerilim, akının değişim oranına eşit olur. Akı bobinin kesit alanı (A) üzerinden kararlı biçimde ölçülebiliyorsa, bobinde akı yoğunluğu ($B = \Phi/A$) oluşmuştur. Şekil 2.5'te ki histeresis eğrisinin elde edildiği elektronik integral alıcıda veya manyetik devrede, akı metre de bir devre elemanı olarak bulunursa, akı yoğunluğundaki değişim de hesaplanabilir. Bunun için öncelikle bilinmesi gereken;

$$H = \frac{nV}{lR} = \frac{ni}{l} \quad (2.2)$$

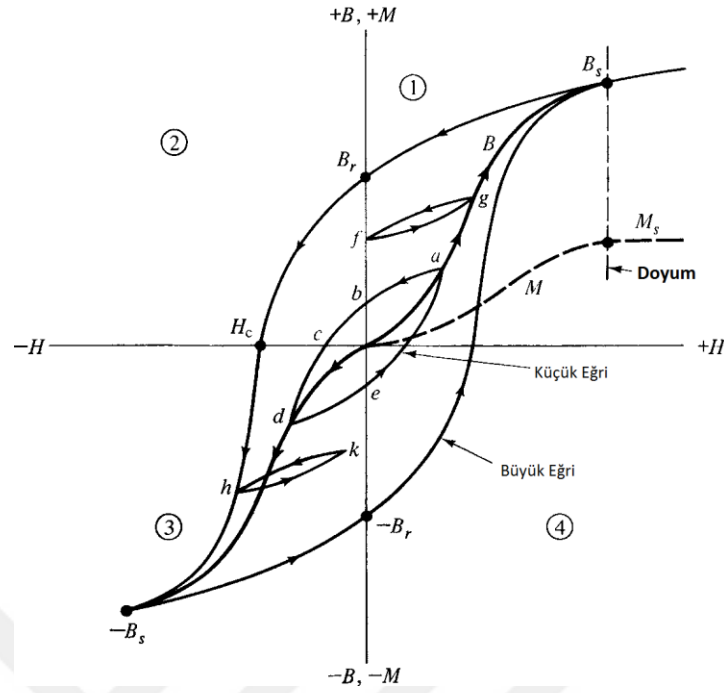
ile verilen manyetik alan bileşenleridir. Burada i , bobine uygulanan akımı ve l ise akı yolunun ortalama uzunluğunu temsil eder. n/l manyetik alan sabiti olarak ta bilinir. Ölçülen bobin hiçbir manyetik malzeme içermiyorsa, $B = \mu_0 H$ olur ve akımetre doğrudan manyetik alanı (H) ölçer. Çünkü boşluğun geçirgenliği μ_0 , birdir. Ancak ferromanyetik gibi bir manyetik malzemedan geçen akı değeri ölçülürken, hava boşluğunun geçirgenliğiyle birlikte bağlı geçirgenlikte (μ_r) hesaplanır.

$$\Phi = BA = \mu HA = \mu_0 \mu_r HA \quad (2.3)$$

(2.2) ve (2.3) eşitliklerindeki benzer terimlerin birleştirelmesiyle;

$$\Phi = \mu_0 \mu_r \frac{ni}{l} A = \mu_0 \frac{ni}{l/\mu_r A} \quad (2.4)$$

elde edilir. (2.4)'de paydada elde edilen $l/\mu_r A$, manyetik dirençtir ve R ile gösterilir. Bu bağlamda, manyetik direnç (relüktans), alanın bir fonksiyonu olarak değişen bağlı geçirgenliğe doğrudan bağlıdır, yani dolaylı olarak uygulanan bir dış alanın etkisiyle değişkenlik gösterebilir.



Şekil 2.5. Mıknatıslanma ve Histeresis Eğrileri. Mıknatıslanma eğrisi, 1. bölgede, kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

Bu koşul malzemenin tüm yüzey kesit alanının aynı olduğu durumlar için geçerlidir. Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik (μ) ile alınganlık (χ) arasında;

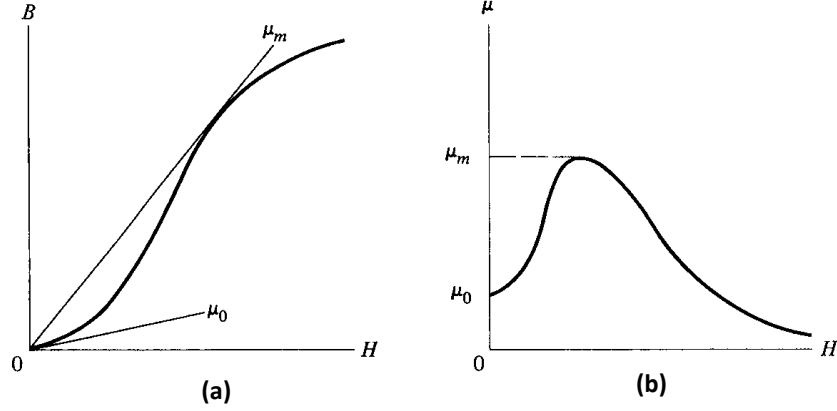
$$\mu = \chi + 1 \quad (2.5)$$

gibi bir ilişki olduğundan, çok yüksek geçirgenlikli malzemelerde (GYEÇ gibi), aynı koşullar alınganlık için de geçerli olur yani alanın bir fonksiyonu olarak değişir. Şekil 2.5'te geri döndürülemez mıknatıslanmanın oluştuğu doyum indüksiyonu (B_s) noktasından sonra malzeme zıt mıknatıslandığında, B_r ve H_c karakteristikleri büyük eğride elde edilmiştir.

Manyetik geçirgenlik, mıknatıslanma eğrisinin eğiminden hesaplanabildiği gibi (Şekil 2.6 a), histeresis eğrisinden de, $\mu_r = B/\mu_0 H$ bağıntısının kullanılmasıyla elde edilebilir. Ancak, başlangıç geçirgenliği (μ_0), eğrinin doğasının bir sonucu olarak bulunamayabilir. Bundan dolayı, söz konusu eğriden, diferansiyel geçirgenlik (μ_d) değerleri;

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (2.6)$$

ile elde edilebilir.



Şekil 2.6. B(H) eğrisinin eğiminden geçirgenlik bileşenlerinin hesaplanması (a). Geçirgenliğin, manyetik alanın bir fonksiyonu olarak değişimi (b).

2.2.1. Manyetik anizotropi

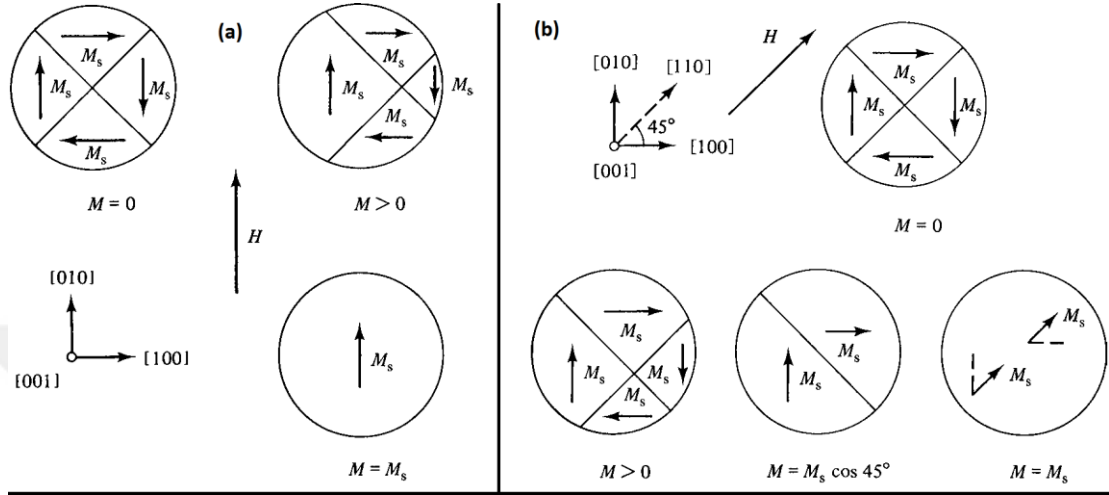
Mıknatıslanma eğrilerinden malzemelerin anizotropileri hakkında bilgi sahibi olunabilir (Cullity ve Graham 2009). Manyetik anizotropi, manyetik özelliklerin domain dizilimi, haddeleme doğrultusu, kolay eksen ve manyetik alan doğrultusu gibi birçok değişkenye bağlı olarak değişir. Ticari öneme sahip manyetik malzemelerin tasarımı için de son derece önemli bir değişkendir. Aşağıdaki şekilde disk şeklinde bir örneğin, dış bir alan etkisi altında mıknatıslanma süresince domain duvarlarının nasıl hareket ettirildiği gösterilmektedir.

Şekil 2.7 a'da domain duvar hareketi için gerekli olan küçük alan gerilimleri kullanılmıştır. 2 farklı doğrultuda, 90° duvarlarla birbirinden ayrılmış dört farklı domainin, uygulanan dik alan ile [0 1 0] doğrultusunda doyuma ulaşmasıyla, anizotropi kuvvetine karşı iş yapılmış olur. Uygulanan alan, mıknatıslanma vektörünü kolay eksenden döndürmek için anizotropi kuvvetine karşı iş yaptığından, kolay eksen dışındaki bir doğrultuda, doyurulan bir kristalde enerji depolanmalıdır (b). Bu enerji kristal anizotropi enerjisi (E_{an}) olarak bilinir. Bunu açıklamak için, α_1 , α_2 ve α_3 gibi doyum mıknatıslanmasıyla (M_s), kolay eksenler arasındaki kristal doğrultularının yaptığı açılar tanımlayalım. Bu durumda söz konusu enerji;

$$E_{an} = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \dots \quad (2.7)$$

ile ifade olunur. Burada, K_0 , K_1 ve K_2 , anizotropi sabitlerini temsil eder. K_2 terimi bazen çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. İlk terim, K_0 , ise açıdan bağımsız olduğu için

ihmal edilebilir. Kübik kristallerde elde edilen bu açısal bağımlılık, M_s vektörünün eksenlerle yaptığı açı değerlerini esas alır. Kristal anizotropi, kristal içerisindeki, kristalografik doğrultuya eş bir mıknatıslanma kuvveti olarak kabul edilebilir (Cullity ve Graham 2009).



Şekil 2.7. Disk şeklinde dört farklı domaine sahip bir örneğin dik ve eğimli alan etkisi altında domain duvarlarının hareketi. (Cullity ve Graham 2009).

Öte yandan, hekzagonal kristallerde, M_s vektörü ile c eksenini arasındaki açı değeri θ ise tek eksenli anizotropiyi tanımlar. Burada anizotropi enerjisi;

$$E_{an}^{tek} = K'_0 + K'_1 \cos^2 \theta + K'_2 \cos^4 \theta + \dots \quad (2.8)$$

$\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ olduğundan,

$$E_{an}^{tek} = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots \quad (2.9)$$

şeklinde ifade olunur. Hekzagonal kristallerde, K_2 'de hesaba katıldığından, enerjinin da en küçük durumda olduğu noktalar K_1 ve K_2 anizotropi sabitlerine bağlı olarak değişir. Bu bağlamda, K_1 ve $K_2 > 0$ ise E_{min} , $\theta = 0^\circ$ de sağlanırken; K_1 ve $K_2 < 0$ ise E_{min} , $\theta = 90^\circ$ de elde edilebilir. Bunun anlamı, kolay eksenler, anizotropi sabitlerine bağlı olarak bulunur ve çalışma eksenleri bu alanlarda seçilmelidir.

Mıknatıslanma eğrisinden anizotropi ölçümünün doğrudan bir bağlantısı yoktur (Cullity ve Graham 2009). Ancak, histeresis eğrisiyle sınırlanan ya da mıknatıslanma eğrisiyle, M-ekseni arasında kalan alan, basitçe mıknatıslanmada yapılan işi verir. Birim zamanda,

V hacimli bir örnekte birim hacim başına yapılan iş te etkin olarak hesap edilebiliyorsa, yapılan bu iş, madde de depolanan enerjiye eşit olacaktır. Bu durumda;

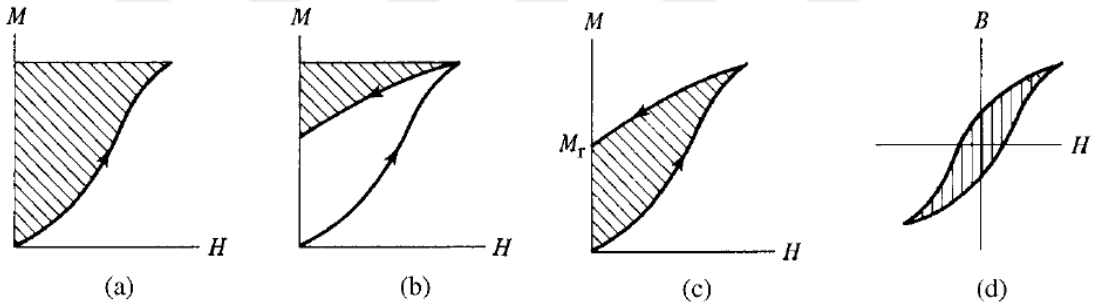
$$W = \int_0^{B_{max}} H dB \quad (2.10)$$

$$B = \mu H \quad \text{ve} \quad dB = \mu dH \quad (2.11)$$

(2.10) ve (2.11)'in ortak çarpanları benzetilir ve ölçüm hava boşluğundan tamamen bağımsız olursa,

$$W = \frac{\mu}{2} H^2 \quad (2.12)$$

elde edilir. Böylece malzemenin manyetik geçirgenliğinin yarısı ve uygulanan dış alanın karesi, malzemede depolanan enerjiye karar vermekte kullanılabilir. Tam bu noktada, elde edilen değerlerin analizi, histeresis eğrisiyle ilişkilendirilebilir. Öyle ki, B(H) ya da M(H) eğrilerindeki söz konusu alanların anizotropi kuvvetlerine karşı yapılan işe eşit olduğu, (2.12) ve Şekil 2.8 ile gösterilebilir.

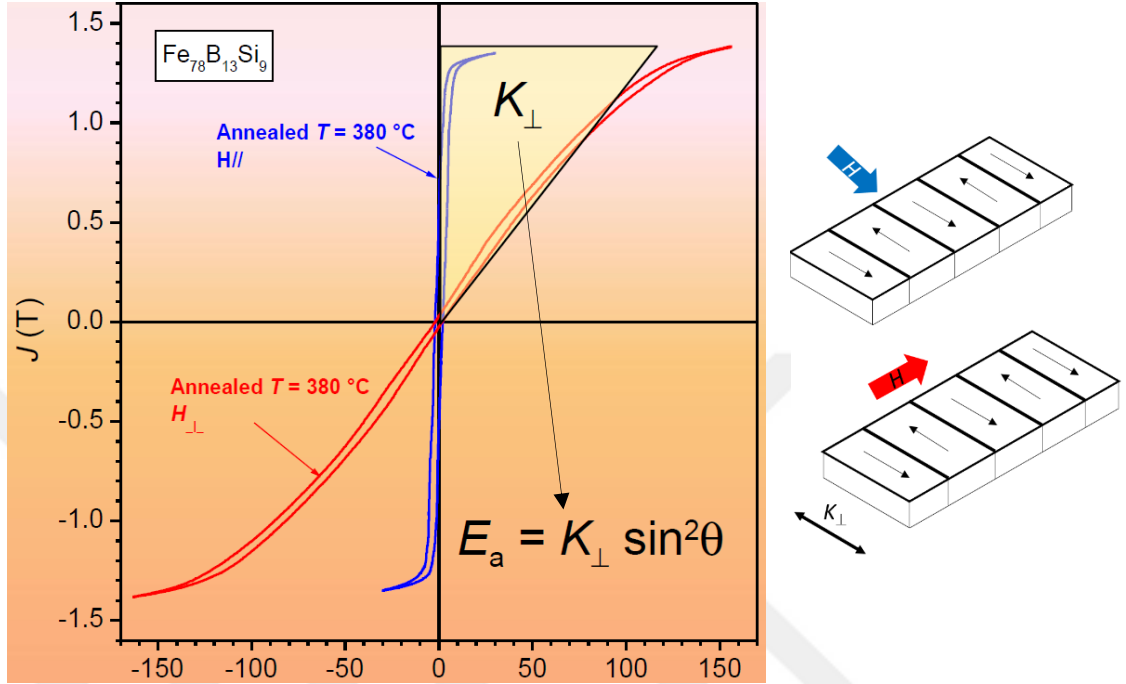


Şekil 2.8. M(H) (a – c) ve histeresis (d) eğrilerinde, mıknatıslanmada yapılan iş (Cullity ve Graham 2009).

Öyle ki, kolay eksen doğrultusunda grainleri yönlendirilmiş ve 380° lik bir ısıl tavlamaya maruz kalmış alaşımın, aynı koşullarda fakat çalışma doğrultusuna, dik kolay eksene sahip (haddeleme doğrultusuna dik kesilmiş) halinin histeresis eğrileri, Şekil 2.9’da ki gibi karşılaştırılmıştır. Her iki eğrinin kaynak noktaları baz alınarak şekilde görülen sarı renkli dik üçgen ortalama olarak anizotropi enerjisine eşit olmaktadır (Anonim 2013b).

Ayrıca, malzemenin grain doğrultusuna dik ve paralel uygulanan DC alan gerilimlerinden, eğrilerin “Diz” bölgesinde şiddetli değişimler de tespit edilebilir. Aslında, hemen tüm manyetik özelliklerinde bu farklılığı gözlemlemek mümkündür.

Mıknatıslanma eğrisindeki diz bölgesi, çok keskin olmamakla birlikte, domain dönmesi ve duvar hareketinin arasındaki ince bir çizgi olarak kabul edilebilir (Cullity ve Graham 2009). Bu işlem uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonudur.



Şekil 2.9. Aynı koşullardaki $Fe_{78}B_{13}Si_9$ alaşımlı iki örneğin, enine ve boyuna kesilmesi sonucu ortaya çıkan anizotropi enerjisinin, histeresis eğrisinden elde edilmesi.

GYEÇ’de, mikro yapıya bağlı olarak domain dönmesi çok düşük alanlarda ve hızla gerçekleşmesi beklenir. Ancak malzeme, izotropik olduğunda ya da silisyum oranının %3’ ün altına indiği durumlarda, dönme işlemi için gerekli olan alan miktarı, ters orantılı bir biçimde artar. Böyle durumlar, malzemede depolanan anizotropi enerjisinde artış olduğunun habercisidir. Şekil 2.9’da şematik olarak verilen kırmızı ve mavi histeresis eğrileri arasında elde edilen dik üçgen ise söz konusu durumun en büyük olduğu koşulu vurgulamaktadır. Dikkat edilirse, kırmızı eğride gözle görülür bir diz bölgesi, 150 A/m civarında bile gözlenemezken, mavi eğrideki diz bölgesi yaklaşık olarak 10 A/m de elde edilebilmiştir. Bu şekilde birbirinden farklılaşan eğrilerden, yapı içerisindeki kolay eksenin, çalışma doğrultusuna (H – doğrultusu) belirli açılarda ($> 0^\circ$) bulunduğu anlaşılabilir.

2.3. Güç Kayıpları

Transformatörlerde kullanılan elektrik çeliklerindeki çekirdek kayıplarının birden fazla bileşeni bulunmaktadır. Histeresis ve klasik girdap akımı kayıpları bunların en bilinenleridir. Öte yandan, makroskobik boyutta, nicel olarak elde edilemeyen ancak hesaplamalar sonrası ortaya çıkan “anormal kayıplar” da gözlemlenir. Frekansa bağlı ölçümler yoluyla birbirinden ayrılan iki ana kayıp sınıfı bulunur. Bunlar, Histeresis ve Girdap akımı kayıplarıdır.

2.3.1. Histeresis kayıpları

Bu tarz kayıplar akı metre yoluyla dolaylı olarak tespit edilebildiği gibi, statik ve yarı-statik histeresis eğrisinin alanından da tespit edilebilir. Bu alan vasıtasıyla, malzemenin anizotropik doğası hakkında da bilgi sahibi olunabilir. Öyle ki, içerisinde yüksek anizotropi enerjisi barındıran bir malzemenin, birim alandaki mıknatıslanmasında azalma olacaktır ve bu bağlamda, klasik girdap akımı kayıpları da indükleneyecek ve denklem (2.13) ve (2.14)'e göre, güç kaybı artacaktır. Histeresis kayıpları, SI birim sisteminde W/kg biriminde bulunabilir. Basitçe toplam kaybı göstermek için;

$$P_t = P_h + P_{ec} = W_h f + k f^2 \quad (2.13)$$

$$P_t = W_h + k f \quad (2.14)$$

eşitlikleri kullanılır. Burada P_t , bir periyotta toplam enerji kaybını verirken, k , kolaylık açısından girdap akımı kaybıyla ilgili bir sabit olarak kabul edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında beklenen, P_t/f 'in frekansla doğrusal olarak değişmesi ve sıfır frekansta yani DC akımda W_h 'ya eşit olmasıdır. Malzemenin manyetik mikro yapısı açısından, histeresis kayıpları, kristal safsızlıklarının duvar hareketini engellemesi ve yüzey kusurlarıyla ilişkilendirilir. Ayrıca, tamamlayıcı domainler, temel domainlere tutunduğundan, burada oluşan duvar hareketine engel olduklarından, bu tarz kayıplara açık bir şekilde katkı sağlarlar.

2.3.2. Girdap akımı kayıpları

İletken, ferromanyetik elektrik çelikleri (yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş) doğasının bir sonucu olarak girdap akımlarının az veya çok oluşumu kaçınılmazdır (Toshito ve ark.

2006, Petrovic 2010). Bu durum, bir dış AC-manyetik alanın, faz kaymasına sebep olan ana etkenlerdendir. Böylelikle uygulanan sinüzoidal bir alan için, diğer tüm nicelikler de sinüzoidal olur. Girdap akımı kayıplarını ifade etmek için;

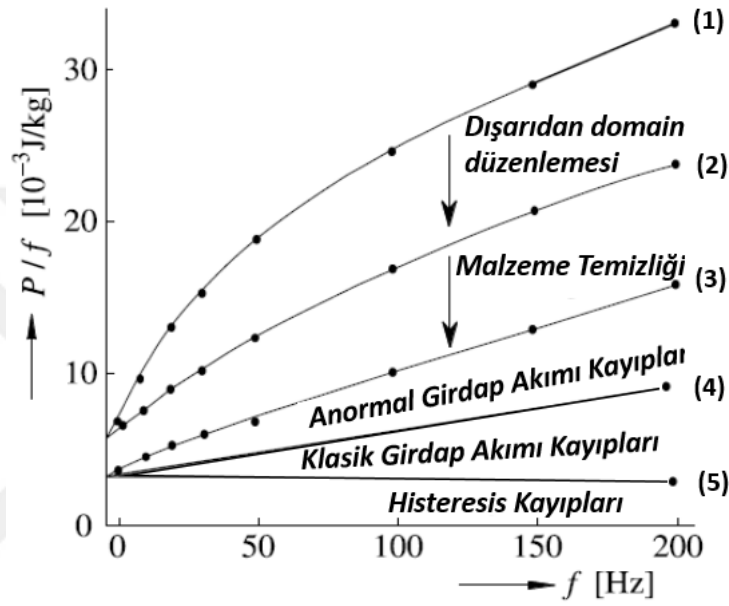
$$\frac{P}{f} = \frac{\pi^2 D^2 B_m^2 f}{6 \rho} \quad (2.15)$$

eşitliği kullanılır. Burada P/f , bir periyottaki kayıp, D , levha kalınlığı, B_m , indüksiyon genliği, ρ ise elektriksel direnci temsil eder. Bu bağlamda, histeresis kaybı f ile; klasik girdap akımı kaybı ise f^2 ile orantılı olur. Malzeme kompozisyonuna ve fiziksel özelliklerine göre değişen değişkenler ve sabitler (π , D , B_m ve ρ), kayıpların kendi başlıkları altında toplanırsa, (2.13) ve (2.15)'te verildiği gibi histeresis kayıpları frekanstan bağımsız olur iken, girdap akımı kayıpları, frekans ile orantılı olarak artar ya da azalır. Frekansa bağımlı güç kaybı grafiklerinin bir üstünlüğü, parabolik (karesinden dolayı) eğriler yerine, doğrusal eğriler ile güç kaybının değişimi tespit edilebilir.

Öte yandan, hesaplanan klasik kayıpla, gözlemlenen kayıp arasındaki fark olan anormal kayıplar, ancak malzemenin domain yapısı hesaba katıldığında hesaplanan girdap akımı kaybına ulaşılabilir. Oluşan kayıplar domain duvarıyla ilişkili girdap akımları etkisinden kaynaklanır. Şekil 2.10'da frekansa bağımlı kayıplar ve kayıpların hangi oranlarda ve hangi değişimlerle düşürüldüğü ayrıntılı bir biçimde verilmiştir. (1) eğrisi hiçbir değişimin yapılmadığı 0.18 mm kalınlıklı örneğin güç kaybını göstermekteyken, (2) dış müdahale sonucu domain düzenlenmesi ve (3) mekanik ve kimyasal (Polishing) müdahalelerle, anormal kayıplar seviyesine getirilmiş hali gösterir. (4) ve (5) makro ölçekteki ölçümler sonucunda elde edilebilen kayıp miktarlarını temsil eder.

Genelde, domainlerin, yüksek alan etkisi altında ya da akının eğrilerek yön değiştirdiği durumlarda, yeniden dizilimi ya da organize olmasından kaynaklanan ekstra bir kayıp mekanizması daha vardır (Hubert ve Schäfer 1998). Ancak bu güç kaybı mekanizması, çok iyi yönlendirilmiş domain yapısının olduğu transformatör çeliklerinin büyük çoğunluğunda görülmez. Fakat E-I, C-I ya da L-T tarzında eklemeli ve üst üste bindirmeli levhalardan üretilmiş transformatör çekirdeklerinin köşelerinde akı keskin bir şekilde (90° civarında) yön değiştirdiğinden, bu tarz yapılar, mükemmel yönlendirilmiş domain yapısına sahip elektrik çelikleriyle yapılmış olsa da yeniden domain dizilim mekanizmasından kaynaklı bir kayıp mekanizması yine oluşabilir (Hubert ve Schäfer

1998). Yeniden dizilen domain yapısının başlıca örnekleri, bağcık-benzeri (cord-) ve dallanmış (branching) domainlerdir (Hubert ve Schäfer 1998). Bu karmaşık yapıların iç dinamiklerinde süreksiz ya da kesikli mıknatıslanma doğrultuları, akının toplama ve dağıtma şemasında düzensizliklere sebep olabilir. Böylelikle kayıpların bazı bileşenleri, böyle atomik boyutta oluştuğundan “Anormallik” olarak isimlendirilir ve makro yapılarda elde edilenden her zaman fazla gözlemlenebilir.



Şekil 2.10. Özel olarak hazırlanan %3.2-SiFe transformatör çeliği için f frekansının bir fonksiyonu olarak $B_m = 1.7$ T için birim ağırlık ve bir periyotta P/f güç kaybı. (Hubert ve Schäfer 1998).

2.4. Manyetik Domainler

Manyetik malzemelerin, manyetik mikro yapılarını gözlemlemek, anlık ya da dinamik ölçümler almak günümüz koşullarındaki teknolojik gelişmeler göz önüne alındığında, bir kaç on yıl öncesine göre oldukça kolaylaşmıştır. Ancak yapılacak gözlemin amacı, gözlemi yapılacak malzemenin yapısı ve beklenen çıktılar, farklı gözlem tekniklerinin var olduğu ortamda, bir karmaşaya ve anlamsız çalışmalara sebep olabilmektedir. Manyetik domainlerin gözlemlenmesi, yapıyla ilgili kapsamlı bilgi sahibi olmak anlamına gelmediğinden, elde edilen sonuçların doğru bir biçimde yorumlanması, tüm domain yapılarının hem nicel hem de nitel olarak önceden tanımlanması ve beklenen sonuçlarla karşılaştırılması sonucunda mümkün olabilir. Öyle ki, elde edilen domain motiflerinin, malzemenin fiziki koşullarına göre farklı anlamlar içereceği bilinmelidir (Hubert ve

Schäfer 1998). Örneğin, ince film amorf yapısında ya da bir amorf telde elde edilecek domain yapısı ile nispeten kalın bir örnek olan GYEÇ den elde edilen yüzey domain motifleri birbirinden farklı mikro yapılardan oluşmaktadır. Kaldı ki, manyeto-optik görüntüleme sistemlerinde, ince film ya da şeritlerde, Faraday yöntemi kullanılırken, kalın örneklerde Kerr yöntemi (Kerr etkisi) tercih edilir. Özetle, domain yapıları ve sayısal mikro manyetik yaklaşımlar bir arda değerlendirilmelidir.

Domain araştırmalarında, dış etkenlerin oldukça önemli değişimler olduğu bilindiğinden, dış manyetik alanın gerilimi ve doğrultularının, domain evrilmesine ne tür etkiler ve katkılar yaptığı birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Kaya 1934, Kirenskii ve ark. 1959, Hubert 1965, Shilling ve Houze 1974, Shin ve ark. 2010, Perevertov ve Schäfer 2012, 2014). Domainler, domain duvarları, grainler ve sınırları, mikro yapıların birer elemanlarıdır. Bu çerçevede, birbirleriyle olan ilişkileri kristal yapılarının tanıtılmasıyla açıklanmaya çalışılmış ve genelde çalışma doğrultularını veren kristal düzlemler mümkün olduğunca tüm değişimleriyle görsel olarak sunulmuştur.

2.4.1. Domain fikri

19. yüzyılın başlarında, bilim adamları manyetik maddelerin basit manyetik yapılardan oluştuğunun farkına varmıştır. Amper'in temel moleküler akımlar hipotezi, bunun bilinen en iyi örneğidir. Bu hipotez, temel manyetik konsepti çok iyi bilinen iki deneysel gerçekliği açıklar; (i) manyetik kuzey ve güney kutuplar izole edilemez olması ve (ii) tüm manyetik momentlerin aynı doğrultuda yönlendirildiği manyetik doyum durumudur. Bu hipotezlerin geçerliliğinden başka, manyetik davranışın anlaşılmasına ilişkin hiçbir gelişme, Langevin'in (Langevin 1905) geliştirdiği paramanyetizma kuramına kadar elde edilememiştir. Mıknatıslanmanın temeli birim hacim başına manyetik moment olarak tanımlanır. Langevin, İstatistik termodinamik yöntemleri kullanıldığı çalışmalarda, oda sıcaklığında bağımsız moleküler magnetlerin zayıf bir manyetizmaya sebep olduğunu göstermiş ve kuvvetli manyetizmaya bu momentler arasındaki etkileşimlerin sebep olduğu sonucuna varmıştır. İki yıl sonra Weiss (1907), van der Waals düzenlemesini (1873) kullanarak bu fikri geliştirmiştir. Ayrıca, Weiss, meşhur kuramında sıcaklığa bağlı manyetik doyumun genel şeklini başarıyla ortaya koymuş ve çok büyük bir moleküler alan gözlemlemiştir. Çalışmalardan kısa bir süre sonra, Heisenberg (1928), kuantum mekaniksel değişim (exchange) etkisinde, bu alanın doğasını tanımlamıştır.

Weiss kuramı ayrıca manyetik doyum durumunun Curie noktasının yeteri kadar altında tüm sıcaklıklarda termodinamik denge durumu olduğunu da öngörmüştür. Moleküler alan değeri, pratikte meydana gelen iç ya da dış manyetik alandan çok daha büyük olduğundan, bu doğrudur. Fakat Weiss moleküler alanı, sürekli ortalama mıknatıslanma doğrultusunu izlediğinden, mıknatıslanma vektörü sadece onun değerinde sabitlenir, oysa doğrultusu keyfi kalır. Weiss kuramının bu özelliği, aslında oda sıcaklığında (Curie sıcaklığının çok altında yani örneğin farklı kısımlarındaki mıknatıslanma vektörlerinin bir değerini yok ettiği koşullar altında) bir parça demirin “manyetik-olmayan” olarak görünebileceğini açıklar. Orijinal çalışmasında, Weiss, bir kristal parçasının bir doğrultuda, diğer parçanın zıt yönde mıknatıslandığından bahsetmiştir. Fakat bu makalesinde, manyetik alt yapılar olarak bir isimlendirme yapılmamıştır. Günümüzde, evrensel olarak, kristal yapıya sahip, kararlı olarak mıknatıslanan bölgelerin alt bölümleri için “DOMAIN YAPI” tanımlaması kabul edilmiştir. Kuramların günümüzde uygulanabilirliği, teknolojik gelişim süreçleri de göz önüne alınarak bir çok manyetik, manyeto-optik ve mekanik cihazlarla yapılmaktadır. Temel olarak bilinmesi gereken en önemli nokta, domain kuramının oluşturulmasında manyetik vektörlerin sıcaklık, manyetik alan vs. gibi birçok dış ve yerine göre iç dinamiklerin kontrolüyle oluşturulmuş olmasıdır. Buradan, domain yapılarının anlaşılması ve yorumlanması ileriki kısımlarda uygulamalı örneklerle açıklanacaktır.

2.4.2. Domainlerin anlaşılması

Domain fikrinden manyetik histeresis kuramına doğrudan geçiş oldukça uzun ve kapsamlı çalışmalar sonucu sağlanabilir. Bununla ilgili olarak, ilk domain konseptinin doğrulaması, Barkhausen (1919) tarafından yapılmıştır. Barkhausen, mıknatıslanmanın genellikle süresiz olduğunu, verilen bir karakteristik gürültünün, yükselticiyle dinlenmesi vasıtasıyla keşfetmiştir. Aslında, Barkhausen atlamaları domain anahtarlaması olarak yorumlanmıştır. Bu yorum, bugün geçerliliğini yitirmiş olsa da, Barkhausen olayının sonraki araştırmaları kapsamlı bir keşfi doğurmuştur. Araştırmacılar, karmaşık Barkhausen gürültüsü yerine, mıknatıslanmanın geri döndürüldüğü süreçteki bazı basit işlemleri bulmaya gayret etmişlerdir. Bu süreçte elde edilen bulgular, mıknatıslanma işlemlerinin makro ve mikro yapıları hakkında ayrıntılı

yorum yapabilme imkânı sağlamıştır. Domain yapısını anlama açısından da, bu ve benzeri yaklaşımlar oldukça yararlı bilgiler sunmuştur.

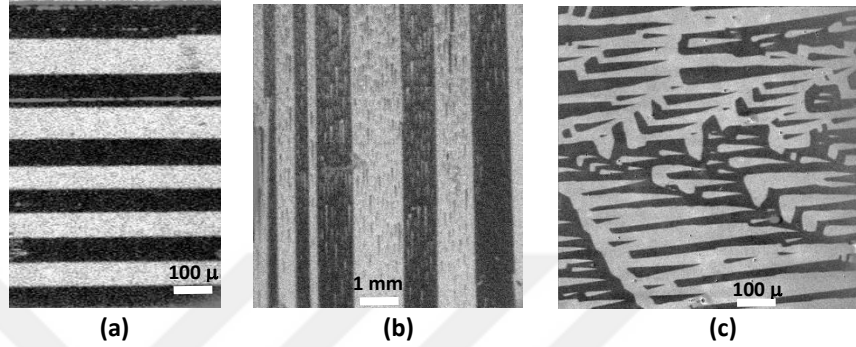
Zıplama dinamiklerinin analizi, zıt mıknatıslanmış domainlerin arasındaki bir sınırın uzaysal olarak homojen olmayan süreçlerle oluşabilmesi olarak değerlendirilmiştir. Bu hipotez, yakın bir süre sonra Sixtus ve Tonks (1931) tarafından doğrulanmıştır. Bu durum, domainler arasındaki kuramsal geçişleri analiz etmesi açısından Bloch'a (1932) ilham vermiştir ve aradaki duvarların birkaç yüz kafes sabiti kalınlığına sahip olması gerektiği bulunmuştur. Geniş domain duvarlarının, safsızlıklarla olan ilişkisini aydınlatan bu sonuç, Sixtus-Tonks deneyinde gösterilen, domain duvarlarının neden kolayca hareket edebildiğini de açıklar.

Bu gelişmelere paralel olarak, birçok araştırmacı (Akulov 1931, Becker 1930, Honda ve Kaya 1926) anizotropilerin etkisi, manyetik gerilme ve iç gerilmelerin manyetik mikro yapılar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Becker ve Döring (1939) tarafından yayınlanan kitapta, bu çalışmalarını özetlemiştir. Çalışma sonuçlarından bazıları şöyledir.

- Kristal anizotropi ve manyetik gerilme, ferromanyetizmanın Weiss kuramında ya da Heisenberg'in "exchange etkileşmesinden" elde edilemeyen bağımsız materyal özellikleridir. Bunlar spin-yörünge etkileşmesiyle bağlantılıdır ve tek kristallerde deneysel veriler yoluyla tespit edilebilirler.
- Kristal anizotropinin bir sonucu olarak, manyetik mikro-yapı, işlevsel olarak anizotropinin kolay mıknatıslama eksenindeki domainlerden oluşur. Yani ferromanyetik malzemeler için son derece önemli olan kolay mıknatıslama eksenini, kristal anizotropi yoluyla domainler üzerinden bulunabilir. Bir mıknatıslanma işlemi, ya domain duvarlarının yer değiştirmesi esasına ya da domain içerisindeki mıknatıslanma vektörlerinin dönmesi esasına dayanır. Zaten, her iki işlem de dolaylı olarak birbirine bağlıdır.
- Demirin kübik anizotropisi, $[1\ 0\ 0]$ doğrultusunda ise, demir parçası içindeki homojen olmayan gerilmeler, birden fazla kolay mıknatıslama eksenini boyunca manyetize olmuş domain üretecektir. Böylelikle 90° duvarları üretilir. 90° duvarı, mıknatıslanma doğrultuları arasında 90° olan iki domain arasındaki domain duvarına denir.

Araştırma sonuçları, domain yapısı içerisinde birbiriyle bağıntılı birçok enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. İlgili enerji terimleri, bölüm 2.5'de tanımlanmıştır. Ancak, mıknatıslanma işleminde kuramının tamamlanması için gerekli bir element kayıptır. Bu

element, bazı bilim adamlarına göre (Frenkel ve Dorfman 1930, Bloch 1932, Heisenberg 1931), “Manyetik Statik Enerji” olarak bilinen manyetik dipol etkileşimidir. Bu manyetik enerji terimi, birim hacimde domain duvarlarıyla ayrılan domain örneklerinin sayısı ve genişliği ile ilgilidir. Mikro manyetik enerji teriminden ziyade manyetik mikro yapı analizlerinde esas alınır.



Şekil 2.11. Kristalografik yapısına göre değişen yüzey domainlerinin, farklı modüllerdeki Kerr mikroskobuyla elde edilen görüntüleri

2.4.3. Manyetik domain terimi

Manyetik domainler, bir manyetik malzemenin temel fiziksel özellikleriyle makroskobik davranışları arasında bir bağlantı oluşturur. Ferromanyetik malzemeler, manyetik domainlerin doğasını, davranışlarını ve dış etkilere tepkilerini en iyi şekilde tespit etme imkânı verdiği için, sıklıkla manyetik mikro yapı analizlerinde kullanılmaktadır. Sağladığı bilgi sadece mikro yapıların, enerji verimliliğine etkisini değil, aynı zamanda makro yapılarla olan ilişkisini de gözlemlene imkânı tanır. Domainlerde mıknatıslanma doğrultusu genellikle anti-paralel (180°) olmakla birlikte, farklı özelliklerdeki malzeme tipleri için farklı doğrultular ve açılarda da mıknatıslanma doğrultuları oluşmaktadır. Kısacası domain, aynı doğrultularda mıknatıslanan spinlerin bir arada bulunduğu ve farklı doğrultularda (180° , 90° , vs.) mıknatıslanan spinlerin “Domain Duvarı” olarak isimlendirilen yapılarla birbirinden ayrıldığı özel alanlara verilen isimdir.

2.5. Domainlerin Enerji Terimleri

Malzeme içerisinde oluşan mikro yapı enerji dönüşümleri domain yapısı ve dış etmenlerle evrilmesi göz önüne alınarak yorumlanabilir. Bazı kaynaklara göre 5, bazılarına göre ise 6 adet terimi mikro manyetik domain yapılarının oluşumuna karar

verir. Bu farklılık kimi kaynaklarda, dış gerilmenin bir enerji kaynağı olarak görülmemesi ya da hesaba katılmamasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji terimleri ve tanımladıkları değişkenler Çizelge 2.2’de ki gibidir. Buradaki terimlerin katsayı ve özel tanımlamalarıyla, etki boyutları enerji biriminde verilmiştir.

Çizelge 2.2. Tipik ferromanyetik malzemelerin domain yapısının analiz edilmesiyle tanımlanabilecek enerji terimleri.

Enerji Terimi	Katsayı	Tanımlama	Etki Boyutu
Dönme	A [J/m]	Malzeme sabiti	$10^{-12} - 2 \cdot 10^{-11}$ J/m
Anizotropi	K_u, K_c [J/m ³]	Malzeme sabiti	$\pm(10^2 - 2 \cdot 10^7)$ J/m ³
Dış Alan	$H_{ex}J_s$ [J/m ³]	H_{ex} = Dış alan J_s = Doyum mik. yoğ.	Alan geriliminin büyüklüğüne bağlıdır
Zıt Miknatislama Alanı	K_d [J/m ³]	$K_d = J_s^2 / 2\mu_0$	$0 - 3 \cdot 10^6$ J/m ³
Dış Gerilme	$\sigma_{ex}\lambda$ [J/m ³]	σ_{ex} = Dış gerilim λ = Many. Gerilme sabiti	Gerilimin büyüklüğüne bağlıdır
Manyetik Gerilme (Etkileşim)	$C\lambda^2$ [J/m ³]	C = mukavemet modülü	$0 - 10^3$ J/m ³

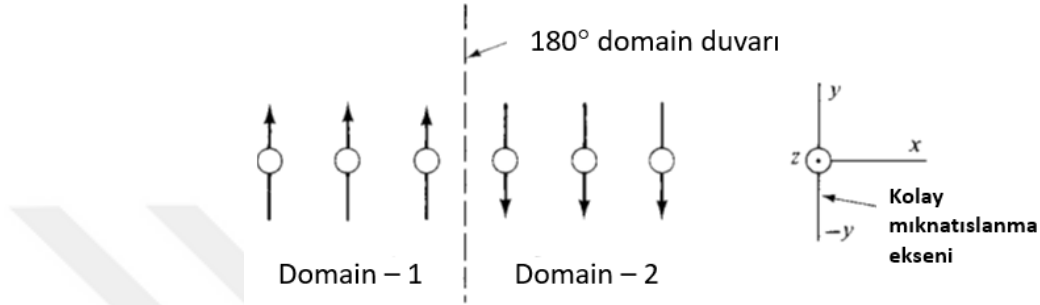
Burada, bazı nicelikler her malzeme için farklı enerji değerlerini tanımlasa da, o malzeme için ayırt edici sabitler olarak adlandırılırlar. Yani malzemenin kristal yapısıyla yakından ilgili enerji değişkenleridir. Ancak malzemenin kristal yapısında herhangi bir değişim yapılırsa, kompozisyonda farklılık olmasa da bu enerji değerlerinde farklılıklar gözlemlenebilir.

2.5.1. Dönme (Exchange) enerjisi

Dönme enerjisi, birçok katıdaki kovalent bağın ve birçok molekülün toplam enerjisinin önemli bir kısmını oluşturur. Ferromanyetizmada ne kadar önemli bir rol oynadığını Heisenberg (1928) göstermiştir. Bir ferromanyetiğin temel özelliği, sabit bir denge durumunda tercih edilen miknatislanma doğrultusu ile belirlenebilir. İdeal koşullardan sapmalar suretiyle oluşan farklı miknatislanma doğrultularının uzaysal değişimi ile spinlerde oluşan dönmenin ortalama enerji değeri;

$$E_x = A \int (\nabla m)^2 dV \quad (2.16)$$

ile verilir. Burada, A , dönme sabitidir ve birimi J/m ile ifade edilir. Genelde sıcaklığa bağlı bir değişkendir. Aynı spinlerin farklı ya da aynı doğrultuda mıknatıslanmasını ifade eden “ m ”, tüm bileşenleriyle birim hacimde entegre edildikten sonra, dönme enerjisini verir. Spinlerin mıknatıslanması Şekil 2.12’de, 180° domain duvarıyla ayrılan iki antiparalel mıknatıslanmaya sahip komşu domainlerin spinlerinin yönelimini ifade eden taslak ile verilmiştir.



Şekil 2.12. Varsayımsal sıfır kalınlıklı 180° duvarın iki yanında antiparalel yönelime sahip mıknatıslanan spinler (Cullity ve Graham 2009)

2.5.2. Anizotropi enerjisi

Bir ferromanyetiğin enerjisi, malzemenin yapısal eksenlerine göre mıknatıslanma doğrultusuna bağlıdır. Temelde, spin-orbit etkileşmesinin bir sonucu olan bu bağımlılık, anizotropi enerjisi olarak isimlendirilir. Kübik, tek-eksenli, ortorombik, yüzey ve ara yüzey anizotropi enerjileri olarak birçok katman, boyut ve kristal yapısında tanımlanabilirler. Kübik kristal yapısındaki enerji terimi ana hatlarıyla 2.2.1’ de anlatılmıştır. Anizotropi enerjisi terimi, genel olarak dönme enerjisiyle sıkı bir ilişki içerisindedir. Farkları, dönme enerjisinin atomik boyutta spin dönmesini esas almasına karşın, anizotropi enerjisi, mikro boyutta bile elde edilebilen daha genel bir enerji terimi olmasından kaynaklanır. En genel haliyle tüm yapılar için anizotropi enerjisi, anizotropi kuvvetlerinin, mıknatıslanma doğrultusunun bir fonksiyonu olarak işlem görmesi olarak belirtilebilir. Bu tanımlama;

$$E_{an} = F_{an}(m) \quad (2.17)$$

ile verilebilir. Burada, F_{an} , kristal ve yapısal tüm anizotropilerden gelen katkıların toplandığı anizotropi kuvvetlerini ifade eder.

2.5.3. Dış manyetik alan (Zeeman) enerjisi

Manyetik alan temel olarak dış manyetik alan ve zıt mıknatıslama alanı olarak iki bileşende ele alınır. İlk bileşen, dış alan (H_{ex}) ile mıknatıslanma vektör alanının etkileşme enerjisi olarak basitçe;

$$E_H = -J_s \int H_{ex} \cdot m dV \quad (2.18)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, J_s , doyum mıknatıslanması için uygulanan doyum alanını verir. Üiform bir dış alan için bu enerji, domain yapısına ya da örnek şekline değil sadece ortalama mıknatıslanmaya bağlıdır.

2.5.4. Kaçak alan enerjisi

Kaçak (zıt mıknatıslama) alan enerjisi, malzemenin kendi içinde indüklenen alan tarafından oluşturulan ve dış alanın zıttı olarak çalışan bir enerji terimidir. Ayrıca, manyetik alan tarafından genel olarak üretilen enerjini ikinci terimini oluşturur. Fakat terimler, birbirine karşı iş yaptığından zıt işaretlidir. Zıt mıknatıslama alanı, H_d ile gösterilir ve mıknatıslanma yoğunluğunun (J) diverjansı tarafından üretilen alandır. Farklı kutup yoğunluğuna sahip iki manyetik ortamda (örneğin grain sınırlarında), mıknatıslanmanın farklı doğrultularda oluşması, malzeme içerisinde bir zıt mıknatıslama oluşturacağından, burada mıknatıslanmaya ve Zıt mıknatıslama alan sabiti K_d ' ye bağlı bir Zıt mıknatıslama alan enerjisi oluşacaktır. Zıt mıknatıslama enerji yoğunluğu, e_d ;

$$e_d = -\frac{1}{2} H_d J = \frac{J_s^2}{2 \mu_0} \quad (2.19)$$

ile verilir. $K_d = \frac{J_s^2}{2 \mu_0}$ olduğundan, $e_d = K_d$ denebilir. Yani, malzemenin mıknatıslanma değişkenlerine ve doyum alanına bağlı olarak değişen kaçak alan sabiti aynı zamanda malzemenin zıt mıknatıslama alan enerjisine eşit olur.

2.5.5. Manyeto-Elastik etkileşim ve manyetik gerilme enerjisi

Manyetik cisimde oluşan ya da oluşturulan elastik etkiler, mıknatıslanma vektörlerinin doğasından çok daha farklı bir yapıdır. Bir manyetik etkileşme altında bozulan cisim, asimetric tensör ya da bozulma vektörleriyle ifade olunur. Bunun anlamı, sistemde mekanik bozunumunda oluşacağıdır. Ancak gerilme, büzülme ya da benzeri etkileşimler

oldukça küçük boyutlarda oluşacağından, mikro manyetik ölçüm yöntemleriyle tespit edilebilir. Manyetik gerilme sonucu oluşacak uzanımın, bozulma öncesiyle oranlanmasıyla, mikron boyutundaki gerilme veya uzanımlar, manyetik veya manyeto-optik olarak gözlemlenebilir. Böyle bir çalışma Küppers ve ark. (1968) tarafından gerçekleştirilmiş ve manyetik gerilme değişkenlerini, çivi benzeri domain yoğunluğunun değişimine göre incelemiştir.

2.5.6. Mikro manyetik Denklemler

Mikro manyetik denklemler, varyasyonel hesabın kullanıldığı birim vektör alanına $m(r)$ göre toplam serbest enerjinin da en küçük duruma getirilmesiyle üretilirler (Brown 1940). Böylelikle, domain kuramıyla (Williams ve ark. 1949, Landau ve Lifshitz 1935, Kittel, 1949, Kittel ve Galt 1956) ile aynı prensibin temellerine dayanır. Bu temele göre, toplam serbest enerji, 2.5.1. – 2.5.5. bölümlerinde verilen mıknatıslanmaya bağımlı tüm enerji terimlerinin katkısıyla, malzemenin hacmi üzerinden alınan integral yoluyla,

$$E_{tot} = \int \left[\overbrace{A(\text{grad } m)^2}^{\text{Dönme}} + \overbrace{F_{an}(m)}^{\text{Anizotropi}} - \overbrace{H_{ex} \cdot J}^{\text{Dış Alan}} + \overbrace{\frac{1}{2} H_d \cdot J}^{\text{Zıt Mik. Alanı}} - \overbrace{\sigma_{ex} \cdot \epsilon^0}^{\text{Dış Gerilme}} + \underbrace{\frac{1}{2} (p_e - \epsilon^0) \cdot c \cdot (p_e - \epsilon^0)}_{\text{Manyetik Gerilme}} \right] dV. \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir. Burada, σ_{ex} , simetrik tensör; $\epsilon^0(m)$, verilen herhangi bir noktadaki serbest manyeto-elastik bozulmayı ifade eder. Son çarpandaki c ise elastik sabit tensörüdür. Eşitliğin her bir bileşenindeki enerji terimleri ve bağımlı olduğu değişkenler, denklem üzerinde tanımlandığı gibidir.

2.6. Domain Duvar Hareketinin Fiziksel Yorumu

Klasik mekanikte, Newton hareket yasasının 3 boyutta basit periyodik kuvvet etkisindeki sönümlü salıncının hareket denklemi, keyfi alan değişkenleriyle zamana bağımlı hareket eden domain yapısına uygulanırsa,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \omega \frac{dx}{dt} + \gamma x = 2M_s H \quad (2.21)$$

eşitliği, duvarın hareket denklemi olarak tanımlanabilir. Burada, x duvar konumu olarak kabul edilir. (2.21)'in ilk bileşeni olan $m \frac{d^2x}{dt^2}$ çok yüksek frekanslar haricinde, genellikle göz ardı edilebilir. İkinci bileşendeki katsayı ω , harekete karşı, yüzey safsızlıkları ve kristal kusurları gibi yapısal bozulmalardan kaynaklanabilecek direnci temsil eder ve viskoz sönümlenme değişkeni denir. Mikro gerilme ve safsızlıklardan dolayı oluşacak kuvvet ise son değişken γx ile ifade edilir. Burada γ -değeri en düşük enerjili duvar hareketi için gerekli olan alana karar verir. Dahası, tüm malzemenin γ -değerlerinin toplamı, kapsamlı duvar hareketi için gerekli olan sıfırlayıcı alanı (H_c) da belirler.

Bu bağlamda, dış manyetik alanı bir sabit ve sabit bir hızda, kapsamlı duvar hareketini sağlayacak kadar büyük kabul edelim. Bu durumda, H 'a doğrudan bağlı olan 3. terim de ihmal olacaktır ve $\frac{dx}{dt} = v$ olacağından,

$$\omega v + \text{sabit} = 2M_s (H - H_0) \quad (2.22)$$

$$v = 2 \frac{M_s}{\omega} (H - H_0) \quad (2.23)$$

elde edilir. $C = 2 \frac{M_s}{\omega}$ gibi bir kabul yapılırsa,

$$v = C (H - H_0) \quad (2.24)$$

elde edilir ve duvar hareketinin hızı belirlenmiş olur. Ayrıca C ile tanımladığımız sabit ise *domain duvar hareketliliğini* verir. Genel duvar hareketinden önce, sabit alan H_0 , arttırılıp H alanı uygulanırsa, (2.22) – (2.24) eşitlikleri geçerli olur. Burada *hareketlilik* (C) basitçe uygulanan birim alan başına hız olarak tanımlanır.

2.7. Domain Çeşitleri ve Yorumlanması

Her ne kadar Kerr mikroskobu vasıtasıyla doğru ve güvenilir domain gözlemleri yapmak büyük önem teşkil etse de, elde edilen dinamik, statik ya da yarı-statik domain görüntülerini doğru bir biçimde yorumlamak ta bir o kadar ciddi öneme sahiptir. Elde edilen domain deseni ve duvarıyla grain boyutu, grain sınırları vb. mikro yapıların yorumlanması, birçok harici ve dâhili etmenin bilinmesiyle mümkün olur. Bölüm 2.1 – 2.3'de de ayrıntılı olarak verildiği gibi kolay mıknatıslama ekseni, haddeleme doğrultusu,

yönelim dışı sapma açıları, uygulanan dış manyetik alan gibi etkenlerin yanı sıra iç ve dış gerilmeler, kesme, delme, kaplama ve kompozisyon gibi birçok uygulanan ya da kendiliğinden oluşabilecek etkenlerin bir çoğunun, gözlemlenen domain deseninin yapısını ve dahası mıknatıslanma doğrultularını doğru yorumlayabilmek için bilinmesi gerekmektedir.

Sıfır mıknatıslanmada iyi yönlendirilmiş domainler, Şekil 2.11 a'da verildiği gibi kolay ekseninde uzanan bar domainlerden oluşur. Domainlerin kalınlığı için bir standart yoktur ve birçok etmene bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu şekilde verilen domainlerin kalınlığı ortalama 200 – 250 mikron civarında yani oldukça geniştir. Öte yandan, manyetik alanın uygulanma doğrultusu, domain dönmesi ve duvar hareketinin tespiti için oldukça büyük önem arz eder. Şüphesiz ki, alanın doğrultusu ile domain dizilim doğrultusu arasındaki θ açısı arttıkça, anizotropi enerjisi de, $E_{an} = K_{\theta} \sin^2\theta$ ile orantılı olarak artacaktır.

2.7.1. Tamamlayıcı Domainler (TD)

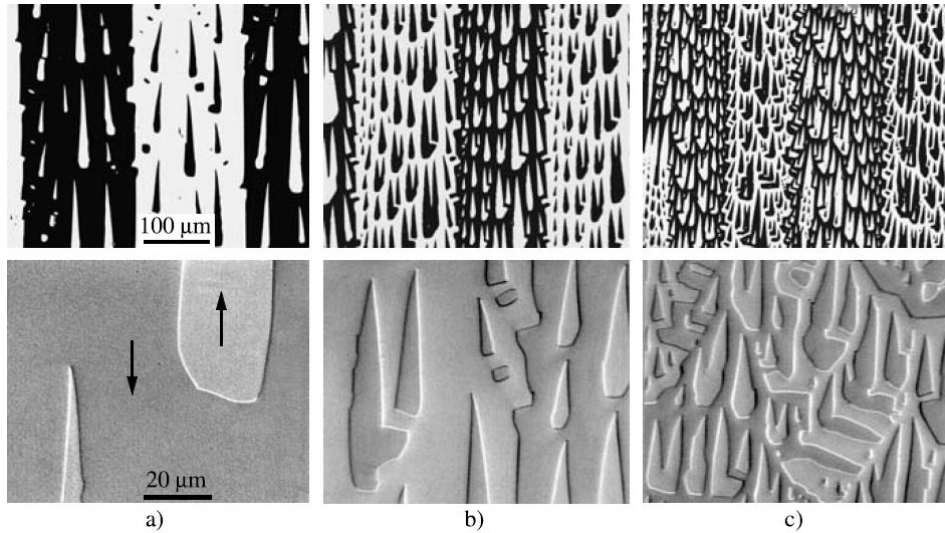
Örnek yüzeylerinde, iyi dizilime sahip domain şeritlerinin yanı sıra, çivi, tarak, testere dişi veya çam ağacı benzeri daha küçük yapılar da gözlemlenebilir. Bu yapılar, toplanan akının daha rahat bir şekilde dağıtılması için, örnek yüzeyindeki, sıg domainlerin aldığı şekillerdir. Böyle konumlarda, etkin domain kalınlıklarında azalmalar görülür. Akı, manyetik akış şemasını, zıt kutba sahip manyetik yüklü uygun yüzeye geçecek şekilde oluşturur ve uygun koşullarda bunu sürekli tekrarlar. Bu dengeleyici domain sistemi, doğrultusunda herhangi bir sapma göstermeyen, mükemmel dizilime sahip temel domainlerin üzerine tutunduğundan, bu tarz yapıya sahip domainlere Tamamlayıcı Domainler (TD) denir. Şekil 2.11 b-c'de, sırasıyla, bar domainlere tutunmuş halde ve yüksek çözünürlükte elde edilen, çivi- benzeri TD, örnek olarak verilebilir.

TD, akı dağılımındaki bozulmaları, ikincil domain (küçük hacimli) yapılarıyla telafi eden mikro yapılar olduğundan, birçok nesneye ya da objeye benzetilebilen geometrik yapılarla sahiptirler. Örneklerde görülen hemen tüm desenler, tek boyutta gözlemlenebildiğinden, doğadaki benzeri cisimlerin ismiyle anılmıştır. Balıksırtı, testere dişi, çivi, kama, çam ağacı, bıyık, sütun, dal ve bağcık en bilinen TD benzetmelerindedir.

TD yoğunluğuna göre kabaca, kristal yapıdaki yönelim dışı sapma açıları belirlenebilir. Düşük yoğunluklu sapma açıları en fazla 8° civarındadır. Şekil 2.13'te, kristal ekseninden

yönelim dışı sapmalar sonucu oluşan domain motiflerinin, yüksek çözünürlükteki görüntüleri verilmiştir. Yönelim dışı sapmalar kristal içerisindeki yörüngesel sapmalardır. Bu sebeple, Şekil 2.11 a'da ki gibi çok iyi yönlendirilmiş kristal yapısına sahip grainlerde yönelim dışı sapmalar ya yoktur ya da gözlemlenemeyecek kadar küçüktür. Düzlem içi ya da dışı olarak sapma gösteren kristaller, genellikle en yakın kolay ekseninden 2° ile 8° arasında dönme yapar. Bu açı değerlerinin tamamlayıcı domainlerle ilişkisi, Hubert (1989) tarafından araştırılmış ve tamamlayıcı domain yoğunluğunun sapma açısına doğrudan bağlı olduğu bulunmuştur.

Şekil 2.13'te elde edilen çivi benzeri tamamlayıcı domainler, açı değerini ve yüzey özelliklerini karakterize etmede de kullanılabilir. (a) dan (c)'ye kristal yönelim dışı sapma açısı, sırasıyla, 2° , 4° ve 8° dir. Kerr mikroskobunun büyütme oranı değiştirilince alt ve üst spotlar arasındaki farklılık daha net görülmektedir (Hubert ve Schäfer 1998). Kristal eksenlerinden sapmalar sonucu, çivi benzeri domainlerin, temel domainlere tutunmasının esas sebebi, çivi benzeri domainlerin doğasında gizlidir. Böyle yapılar, malzemenin iç domainlerindeki dinamiklerin, akı toplama ve dağıtma şemalarıyla ayarlanması temeline dayanır. Böyle mikro yapıların dağılımı ve çeşitleri, malzemenin manyetik doğasıyla ilgili bazı ipuçları verebilir.



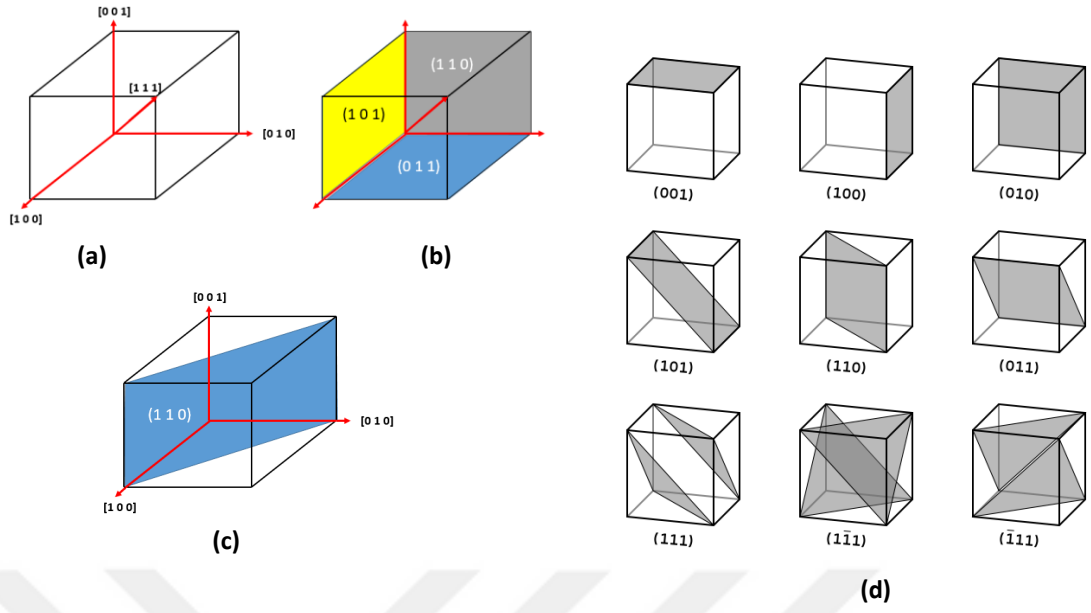
Şekil 2.13. Yönelim dışı kristallerden oluşan bir grain içerisinde, açı oranına göre tamamlayıcı domain yoğunluğunun artışı. (Hubert ve Schäfer 1998).

2.7.2. Kristal yapılar

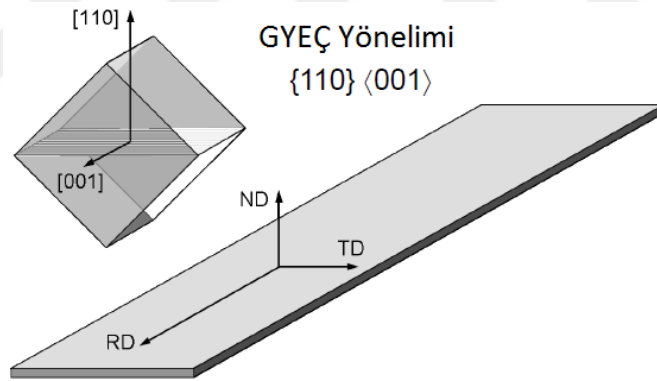
Kristalografik doğrultular ve düzlemlerin tanımlanması, çalışılan bölgedeki domain yapılarını anlamak için oldukça önemlidir. Kristal düzlemler, sıcak ya da soğuk haddeleme (Dorner ve ark. 2007, Saleh ve ark. 2011) ve ısıl işlem (Stoyka ve ark. 2010) uygulamaları ile düzenlenebilmektedir. Haddeleme ve tavlama işlemleri belirli sistematikler dâhilinde gerçekleştirilirse, tekrar kristallenmeye, yani kristal doğrultusunun veya yapısının değişimine sebep olabilir. Bu değişimler, özellikle demire eklenen silisyum, nikel veya kobalt gibi ferromanyetik alaşımlarda, grain boyutunun artmasına ve bu yapıların haritalandırılabilmesine imkan tanır. Elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) cihazıyla böyle grain haritalandırma işlemlerinin analizi birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır (Chen ve ark. 2003, Dorner ve ark. 2007, Saleh ve ark. 2011, Stoyka ve ark. 2010, Frommert ve ark. 2008).

Yüzey merkezli bir kübik kristal yapısını ve eksenlerini ele alırsak, doğrultu eksen ve yüzeylerini iyi tanımlamak gerekir. Bu bağlamda, küp eksenleri ve yüzeylerinin hücre sınırları, basit miller indisleriyle tanımlanır. Şekil 2.14 a ve b, sırasıyla, yüzey merkezli kübik bir kristal *eksenlerini* ve *yüzeylerini* miller indisleriyle göstermektedir. Belirli bir çalışma eksenini ya da yüzeyi olan kristalin, doğrultusunu bulabilmek için domain yapısının sıfır mıknatıslanmadaki yönelimi kullanılabilir. Bu yönelim vasıtasıyla bulunan kristalin çalışma yüzeyi, malzemenin hem yüzey hem de içyapısındaki kristalografik doğrultularının bulunması için kullanılabilir. Şekil 2.14 d'de, mümkün kristal çalışma yüzeylerinin bazıları gösterilmiştir. Bu yolla ve (Anonim 2010) kristalde yapıya bağlı olarak oluşabilecek tüm çalışma yüzeyleri görsel olarak elde edilebilir.

Bir grainin kristalografik doğrultusu, kolay mıknatıslama eksenini de ifade ettiğinden, elektrik çelikleri genelde eksen ve yüzey doğrultusunu tanımlayan indisler ve malzemenin kompozisyonu ile anılırlar. Böyle malzemeler, haddelenme ya da ikincil kristallenme ile kristal doğrultusu ortalama olarak aynı tarafa yönlendirilmiş olanlardır. Kristal yapılar, Şekil 2.14 a-c'de verildiği gibi düz bir zemin üzerinde kararlı şekilde yayılmış kristal dağılımından ziyade yüzeyde ve içyapıda, Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilen, belirli açılarla döndürülmüş bir yerleşime sahiptir. Malzemeye bağlı olarak, kristal eksenini bilinen yapılarda, haddeleme doğrultusu (RD), enine doğrultu (ED) ve yüzey normali (ND) belirlenebilir.



Şekil 2.14. Yüzey merkezli kübik kristalin doğru eksenleri (a) ve yüzeylerinin (b, c) miller indisleriyle, birim hücre üzerinde tanımlanması ve olası birçok düzlemin indislerle ifadesi (d).



Şekil 2.15. Yönlendirilmiş elektrik çeliğinin eksenleri ve kübik kristalde miller indisleriyle eksenin gösterimi.

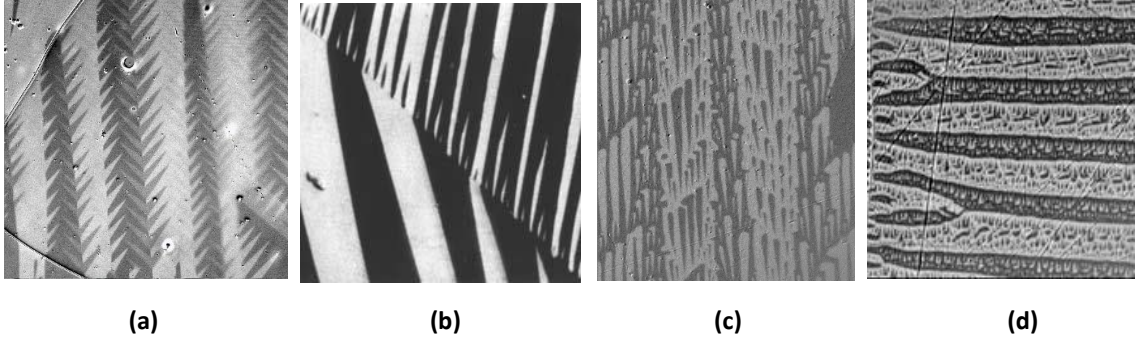
2.8. Domain Evrilmesi

Tamamlayıcı domainler, her ne kadar, doğadaki benzerlerine göre farklı farklı isimlendirilse de, bir dış manyetik ve/veya mekanik etki altında, karakteristiklerini değiştirip, bir başka TD'ye evrilebilir. Böyle dönüşüm ya da evrilme süreçleri, malzemenin manyetik mikro yapısı ve iç dinamikleri konusunda bazı ipuçları verir. Bu

ipuçlarını kullanarak malzemenin maruz kaldığı manyetik alan, akı diyagramları, iç ve dış gerilmeler yahut yapısal ve yüzeysel bozulmalar hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Tamamlayıcı domainlerin kristallerinde, en yakın kolay eksen ile yüzey arasındaki yönelim dışı sapma açısı ortalama 5° ya da daha azdır. Ayrıca, temel bar domainler üzerine tutunurlar. Zıt mıknatıslama alan enerjisini azaltan, akı toplayıcı domainler sistemin tamamlayıcısıdır. Burada, Şekil 2.16 a'da verilen düzensiz çam-ağacı benzeri TD önemli rol oynar ve 90° lik duvarların oluşmasıyla manyetik statik enerji ile domain duvar enerjisi arasında bir denge oluşturur. Şekilde görülen yapıların hemen her biri, malzemenin farklı bir karakteristiğini ortaya çıkaran yapılardır. Çam ağacı- benzeri yapılar zıt mıknatıslama alan enerjisi azaltmak için oluşurken, hançer şeklindeki (b) domainler, dallanmanın faz geçişlerini ifade eder (Hubert ve Schäfer 1998). Öte yandan; vida-benzeri (c) desenler akı toplama ve dağıtma şemasının çok önemli bir üyesidir. Gerilme kanallarına hapsolmuş ikincil Tamamlayıcı Domainlerin gösterildiği (d) fotoğraf, iç veya dış kaynaklı gerilmelerin akı taşıyıcı desenlere nasıl büyük bir etki yaptığını gösteren çok özel bir görüntüdür (*Bu görüntü, EMSA 2016 isimli konferansta sunulmuş ve ödül almıştır*).

Tamamlayıcı domainlerin en önemli desenlerinden biri, Şekil 2.16 c'de verilen, sivri vida-benzeri (Lancets) domainlerdir. Bu yapılar, sıfır alan durumundaki yapılardan, düzenli yönelime sahip yapılara dönüşünceye kadar ki, domain evrilmesi sürecinin büyük çoğunluğunda farklı şekillerde karşımıza çıkabilir. Tabii ki şu iyi bilinmelidir ki, böyle desenler kristalde, yönelim dışı sapmalar olduğunda gözlemlenir ve iyi yönlendirilmiş temel domainler üzerine parçalı olarak düzenli – düzensiz, kararlı – kararsız veya seyrek ya da yoğun şekilde tutunurlar. Buna benzer olarak, TD, malzemenin yüzey gerilmelerinden kaynaklanan desenlere de tutunabilirler. Ancak bu durumda, yüzeydeki serbest yük yoğunluğundan, diğer vida benzeri domainlerden hacim olarak daha küçük yapılarda gözlemlenir ve ikincil TD olarak isimlendirilirler. Böyle bir yapı, şekil 2.16 d'de verilmiştir. Hubert ve Schäfer (1998), bu ve benzeri tüm yapıları, yüzey ve iç dinamikleri açısından çalışmış ve matematiksel hesaplamalarını ünlü kitaplarında vermişlerdir.



Şekil 2.16. Bazı TD çeşitleri; çam ağacı- (a), hançer- (b), vida- (c), gerilme kanallarına hapsolmuş ikincil tamamlayıcı domainler (d).

2.8.1. Domain Desenlerinde Dallanma (Branching) Oluşumu

Domain desenlerinde dallanma, yüzeye doğru domainlerin kendini tekrar ederek kademeli olarak artan yoğunlukta dizilimi prensibine dayanır. Düzlem boyunca oluşan yatay akı sıfır ve pratikte hiçbir akı bölünmüş yüzeyde (grainlerde) bulunmuyorsa, bu durumda iç dinamiklerde kaçak alan ya da zıt mıknatıslayıcı alan var demektir. Dallanmanın doğası 3 enerji terimiyle açıklanabilir. Bunlar, duvar enerjisi, kapalı domain (closure) enerjisi ve zıt mıknatıslama alan enerjisidir.

- I. *Duvar Enerjisi*; İnce bir kesit alanındaki birim hacim başına toplam duvar enerjisi γ_w/W gibi bir eşitlikle açıklanır. Burada γ_w , spesifik duvar enerjisi, W ise domain kalınlığını verir. Duvar yoğunluğu, yüzeye yakın arttığında, malzeme kalınlığına bağlı olarak çeşitli fazlarda dallanmalar oluşur.
- II. *Kapalı Domain Enerjisi*; Yüzey domain kalınlığı W_s ile orantılıdır. Yüzey domainleri belirli yoğunlukta faz sayısını belirlemede önemli bir yere sahiptir. Elektrik çeliklerinde, domain desenlerinin incelenmesiyle, daralmasıyla kapalı domainler dallanma seviyesinin karakteristiğini belli eder.
- III. *Zıt mıknatıslama Alan Enerjisi*; Aslında bu enerji terimi, domain kalınlığındaki değişme oranına bağlı olarak artar ya da azalır. Bu bağlamda, domain kalınlığının çok çok küçüldüğü 2 ve hatta 4 fazlı dallanma durumlarında enerji oldukça artar. Ayrıca, zıt mıknatıslama alan enerjisi yüklerin karesiyle orantılı olduğundan, iç yüklerdeki artışla, enerjide de parabolik bir ivme gözlemlenir.

Aslında, bu üç enerji eşitliğine Zeeman enerjisi (dış manyetik alan ve zıt mıknatıslama alanların ortalama enerjisi) de eklenebilir. Bu durumda toplam enerji, ortalama mıknatıslanmanın hesaba katılmasıyla daha üniform bir hal alır.

2.8.1.1. Dört – Fazlı domain dallanması (basamak benzeri desenler)

Çok (multi-) eksenli dallanma iç zıt mıknatıslama alanlarla mümkün olduğundan, gerekli olan kritik kalınlık tek-eksenli malzemelerinkinden çok daha düşüktür. Dört fazlı dallanmalarda, Şekil 2.17’de gösterilen, basamak benzeri domain desenleri neredeyse karakteristiktir. Adını yüzeye yaklaştıkça hacimleri küçülen kapalı domainlerin basamak şeklinde dizilimden alırlar (Dedie ve ark. 1971). Mıknatıslanma doğrultuları, pratikte akının yüzeyden içe ve içyapıdan yüzeye aktarılmasına uygun olarak sistematik bir biçimde kendiliğinden oluşur. İşte bu güzergâhın oluşması, yukarıda açıklanan enerji terimlerinin uyumu sayesinde gerçekleşir.

Toplam kapalı domain enerji yoğunluğu hesaplamasında, her iki uçtaki kapalı domainler ve temel duvarların enerjisi hesaba katılır. Bu bağlamda, toplam enerji;

$$e_{tot} = \frac{W_b K}{8\sqrt{2} L} + \frac{\left(L - \frac{W_b}{\sqrt{2}}\right) \gamma W}{W_b L} \quad (2.24)$$

ile ifade edilir. Burada, W_b , temel domain kalınlığını, L domain uzunluğunu ve K ise anizotropi sabitini verir.

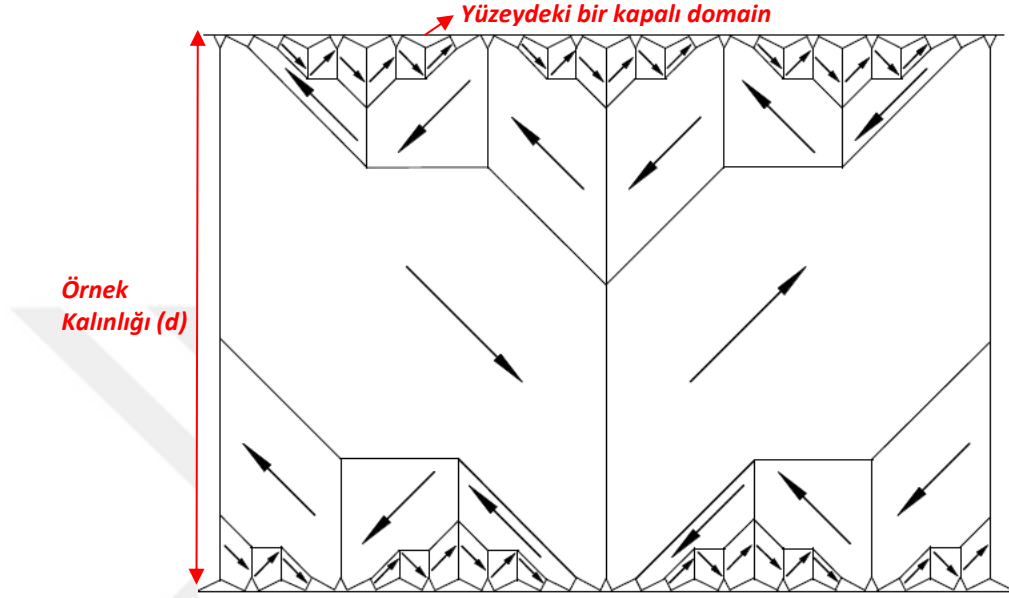
$$\varepsilon = \frac{e}{K}, \quad \Lambda = \frac{L}{\sqrt{A/K}}, \quad \omega_b = \frac{W_b}{L}, \quad \eta = \frac{\gamma W}{\sqrt{A/K}} \quad (2.25)$$

şeklinde indirgenmiş birimlerin tanımlandığı eşitlik setinde verilen değerler, (2.24)’te verilen değerlere göre tekrar düzenlenirse;

$$\varepsilon_{tot} = \frac{W_b}{8\sqrt{2}} + \frac{\eta}{\omega_b \Lambda} - \frac{\eta}{\sqrt{2} \Lambda} \quad (2.26)$$

elde edilir ve W_b ’ye göre en iyi uyum sağlanmış olur. Böylelikle, prensipte malzemenin içyapısından, yüzeye doğru artan kapalı domain ve duvar sayısına bağlı olarak oluşan 2, 3 ya da 4 fazlı domain dallanma seviyelerindeki enerji yoğunluğu kuramsal olarak hesaplanabilir. Ancak (2.26) ile verilen en genel eşitliğin altında, basamak motiflerinin

nesil ve dallanma oranı gibi bir kaç değişkenin daha ölçülmesi gerekir ki, bu durumda, deneysel sonuçların da, hesaba katılması sağlanabilmiş olur. Kapalı domain yoğunluğunun indirgenme hesabı ve toplam domain hesaplama etkenleri de, bu sayısal değerlerin alt başlıklarında ölçülmesi gereken değerlerdir.



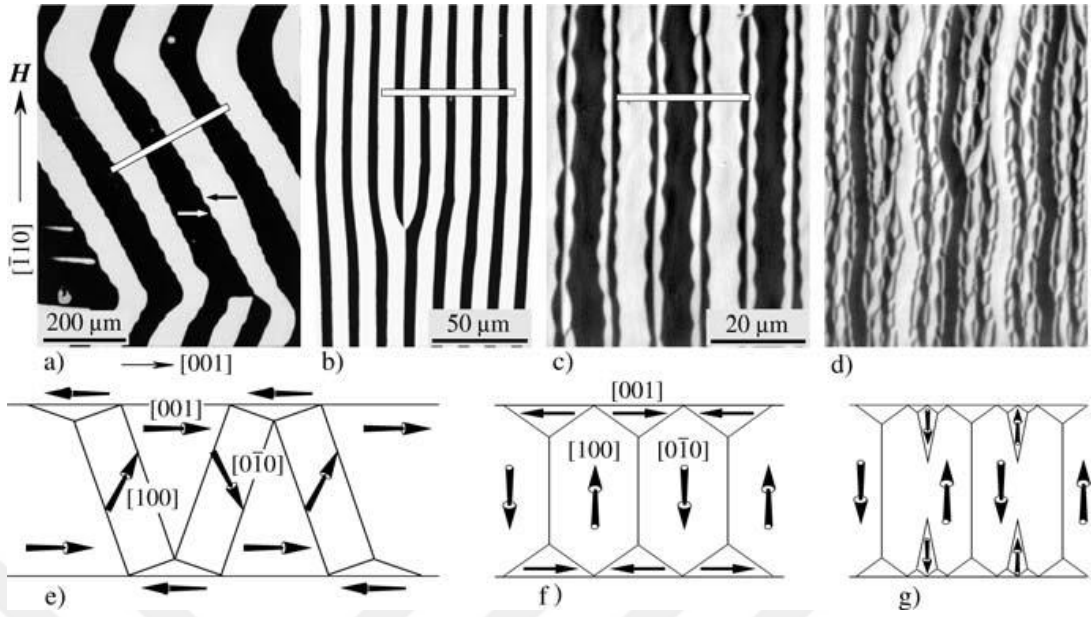
Şekil 2.17. Kübik kristal düzleminde, istenmeyen dallanmış domain dizilimine sahip bir örneğin yüzey ve bulk yapısında, basamak benzeri oluşan, kapalı domainler ve mıknatıslanma doğrultularının şematik gösterimi.

2.8.2. Manyetik alan doğrultusuna bağımlı domain evrilmesi

Malzemede, zıt mıknatıslama sonrası elde edilen domain yapısı herhangi bir yönelim dışı sapma açısına sahip olmayan temel domainlerden oluşsa bile, eğer dış alan eğimli ya da dik bileşenler halinde uygulanırsa, yine tamamlayıcı domainler elde edilir. Ancak diğer yapıların aksine bu durumda zıt mıknatıslama alan etkisinin yanı sıra malzemenin iç domainlerinin birbirleriyle olan etkileşmesinden kaynaklanan mikro yapılar ortaya çıkar. Levha benzeri bar domainlerin enine alan etkisi altındaki karakteristiklerini ele alırsak, sırasıyla, testere-dişi- (Kirenskii ve ark. 1959, Hubert 1965, Imamura ve ark. 1984), sütun- (Hubert ve Schäfer 1998, Kaya 1934, Kirenskii 1959, Hubert 1965, Imamura ve ark. 1984), dallanmış- (Hubert 1965, Hubert ve Schäfer 1998) ve bağcık benzeri (Hubert ve Schäfer 1998) domain desenleri, manyetik alanın kademeli ve yeteri kadar artırılmasıyla elde edilebilir. Ayrıca, desen kalınlığı da kademeli olarak en düşüğe azaltılır. Bu işlemin son basamağı ise malzemenin doymasıdır ki, bu seviyede domainler

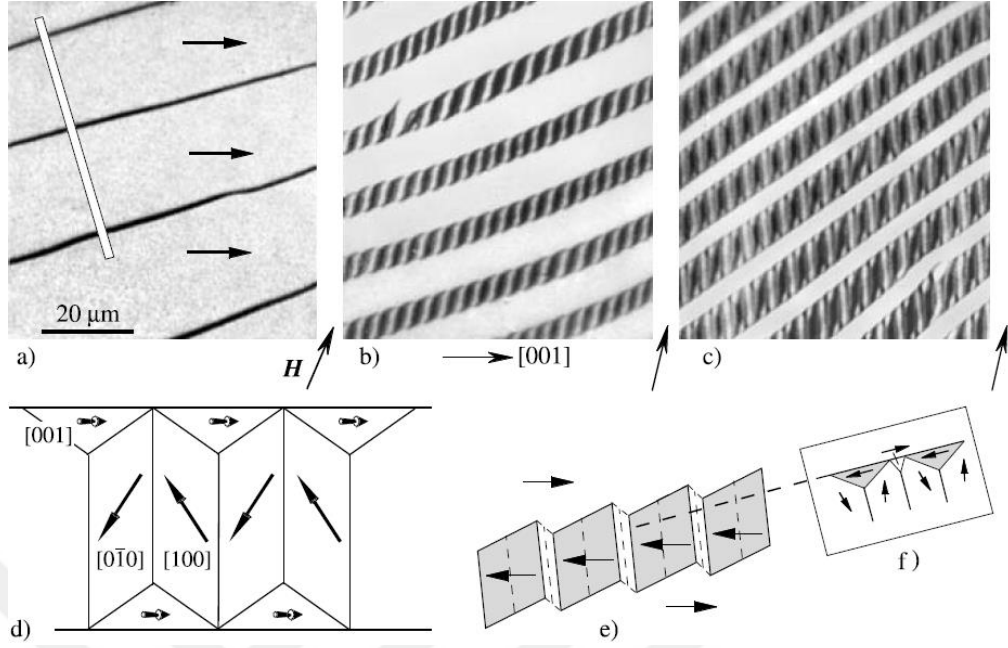
tamamen kaybolur (Hubert ve Schäfer 1998). Böyle bir evrim sürecinin yüzey ve iç domainlerde oluşturduğu etki, Şekil 2.18'de, Kerr görüntüleriyle yüzeyde (a – d) ve uygun model çizimleriyle hem yüzey hem de örnek içinde (e – f) ayrı ayrı verilmiştir. Testere-dişi benzeri domainler (a) genellikle enine ya da belirli eğimlerle etki eden alan ile gözlemlenen karakteristik domain yapısıdır. Yapının üstünlüklerinden biri, düşük çözünürlüklü Kerr mikroskop modülünde bile ayrıntılı olarak tespit edilebilmesidir. Ayrıca testere-dişi domain desenleri, özellikle iç domainlerin ve duvarların yerleşimi ve dağılımı konusunda sağladığı bilgilerle, uygun modelin (e) mıknatıslanma dağılımı ile çizilebilmesine imkân vermiştir.

Domain evrilmesi, domainlerin yeniden organize olması anlamına da geldiğinden, aslında çok da istenen bir durum değildir. Enerji kaybının da bir diğer bileşeni olarak görülebilmektedir. Pratik uygulamalarda hiç tercih edilmese de, alanın her elektrik makinesinde sürekli kolay eksene paralel gelmesi de yapısal imkânsızlıklardan dolayı beklenmeyeceği için böyle dönüşüm süreçleriyle birçok makinede karşılaşılabılır. Domain dallanması böyle yeniden organize olan ya da dizilen domainlerin en karakteristik yapısıdır. Önce sütun benzeri (b) yapılar, modelinde de (f) verildiği gibi alan doğrultusunda dizilir ve ardından desenlerin kenarlarından içe doğru çekirdeklenmeler başlar. (c)'de verilen Kerr görüntüsü ve içyapıyı gösteren model çizimi (g), böyle yapılanmaların en temel hali olarak bilinir. Bu aşamadan itibaren, manyetik gerilme etkileşimi, domain duvar ve kapalı domain enerji terimlerinin arasında, kararlı denge konumu sağlanana kadar enine alan etkisi altında bir dönüşüm süreci gerçekleşir. Sarmal halinde kuvvetli bir dallanma şeklini alan domain yapısı (d), bu üç enerji teriminin en uygun koşullarda denge halinin bir sonucu olarak yorumlanır (Hubert 1965). Ancak şu unutulmamalıdır ki, alan etkisi altında yeniden dizilen domain desenleri, mıknatıslanma momentlerinin döndüğü anlamı taşımamaktadır. Sadece bir mıknatıslanma momentini temsil eden, bir domain kontrastının daralmasını yani, momentlerin dönmeye zorlanmasını sağlar. Böyle zorlayıcı kuvvetler vasıtasıyla, yüksek alan gerilimlerinde doyum sağlanır. Doyum sağlandığında ise tüm mıknatıslanma momentlerinin, alan doğrultusuna döndüğü varsayılır.



Şekil 2.18. Enine alan etkisi altında, 0.3 mm kalınlıklı, %3-SiFe çeliğinin (1 1 0) düzleminde oluşan üç farklı domain deseni. Doyumun 0,3 katındaki alan geriliminde elde edilen testere-dişi benzeri (a, e) domain desenini, 0,7 katında sürun benzeri domainler (b, f) takip ediyor. Yüksek alanlarda (c, d) ise, dallanmış domainlerin gelişimi gözlemlenmektedir. Model (g), yaklaşık olarak (c) de verilen en basit domain dallanmasını şematize etmektedir (Hubert ve Schäfer 1998).

Malzeme içerisinde bazen manyetik alan, bölgesel olarak domainlere eğimli bir Φ açısıyla ($0^\circ < \Phi < 90^\circ$) gelebilir. Bunun, yüzeydeki hava boşlukları, malzemenin yapısı ya da transformatör köşelerindeki 90° lik yerleşimler gibi birçok sebebi olabilir. Ancak böyle durumlarda domainler, dallanmış desenlerdekinden daha farklı bir yapıyla, bağcık-benzeri desenler ile gözlemlenebilirler. Hubert ve Schäfer (1998) yayınladıkları, “Manyetik Domainler” isimli kitabında böyle mikro yapıları, iç dinamikleriyle birlikte göstermişlerdir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, bir dış alan, domain desenine $55^\circ - 60^\circ$ civarında bir açıyla geldiğinde, oluşan bağcık-benzeri desenler, ne manyetik alan doğrultusunda ne de $[0 0 1]$ kolay eksenine doğrultusunda yönelirler. Ancak, çok karmaşık bir yapıya ulaşıncaya (c), alan doğrultusuyla arasındaki açı değeri yaklaşık yarı yarıya azalır. Fakat yine de alan doğrultusunda uzanmaz. Şekil 2.19 d -f’de ise yüzeyde ve malzemenin içinde, söz konusu desenlerin ve buna bağlı olarak mıknatıslanma işlemlerinin nasıl oluştuğu, oklar vasıtasıyla gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Tüm kapalı domainlerin aynı doğrultu boyunca mıknatıslandığı, eğimli alanda oluşan bir diğer domain deseni çeşidi; Bağcık-benzeri (Cord) domainler. (d) deki çizim, (a) da beyaz işaretlenmiş bölgenin kesit alanını gösterir. Eğer uygulanan alan, enine doğrultuya döndürülmeye başlarsa, kapalı domainlerin hacmi, iç duvarların katlanarak yayılmasıyla, büzüşmeye başlar. Böylelikle, (e)' de üstten görünümü açıklanan, (b)' deki bağcık desenli karakteristikler oluşur. (f) deki kesit alanı, bağcık desenin yüzeyinin hemen altındaki ortamı gösterir. Alanın şiddetlenmesiyle, dallanmış domainlerin oluşumu (c) de gösterilmiştir (Hubert ve Schäfer 1998).

Görüldüğü gibi, yüksek ve eğimli alan uygulamalarında, yüzey domainleri kapalı domainlere dönüşmekte ve iç domainlerle bir korelasyon içerisinde manyetik momentlerin dağılımına izin vermektedir. Böyle mikro yapısal oluşumlar, akı kapısı ya da akı yolu olarak isimlendirilir. Tamamlayıcı domainlerin de zaten esas amacı, akının kolaylıkla malzeme içerisinde dağılımına sağlayacak yollar üretmesidir. Manyetik alanın daha da artışıyla (c), bu kapalı domainler daha da küçülecek (f) ve gözle ayırt edilemez domain boyutları oluşacaktır. Burada önemli olan husus, bağcık- ya da dallanmış domainlerin oluşumunda, manyetik alan doğrultusu ve şiddetinin etkin rol oynamasıdır. Böyle karakteristik yapılar, manyetik alanın ve akı dağılımının, hem yüzeyde hem de iç domainlerde nasıl oluştuğunun yorumlanmasına imkân sağlayan önemli değişkenlerdir. Kaldı ki, manyetik alan dağılımının, malzemenin fiziki koşullarına bağlı olarak akıyı yönlendirmesi çok bilinen bir işlemdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, malzemelerin deneysel ölçümlere hazır hale getirilmesi sürecindeki teknik işlemler hakkında bilgi verilecektir. Araştırmalar kapsamında iki farklı analiz yöntemi kullanıldığından, hazırlık safhasında da, Kerr mikroskobuyla ölçüm alınan bazı gerekliliklerinden ötürü bir takım temizleme işlemleri yapılmıştır. Özel bir süreç olan malzeme temizliği, mümkün olduğunca tasvir edilmeye çalışılmış ve konuyla ilgili bazı teknikler aktarılmıştır.

Bu tez kapsamında kullanılan üç farklı örnekten ikisi, %97 demir (Fe) ve %3 silisyum (Si) içeriğine sahip alaşımlı levhalardan kesilmiştir. Malzemelerin büyük bir kısmı Leibniz IFW, bir kısmı ise Fraunhofer enstitülerinden temin edilmiştir. Bunun yanı sıra deneyler kapsamında ihtiyaç duyulan tüm teknik alt yapı ihtiyaçları ve teknik destek IFW enstitüsünden sağlanmıştır. Delik açmak için yapılan kesme işlemi de IFW enstitüsünde Elektriksel Deşarj Makinesinde (EDM) gerçekleştirilmiştir. Bir diğer örnek ise yönlendirilmemiş elektrik çeliğinden üretilmiş %2,4 silisyum (Si) içeriğine sahiptir. Bu örnekte delme işlemi farklı bir aşamaya göre gerçekleştirilmiş ve lazer kesme işlemi uygulanmıştır. Tüm kesme ve ölçme işlemleri Uludağ üniversitesinde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Malzeme Hazırlama

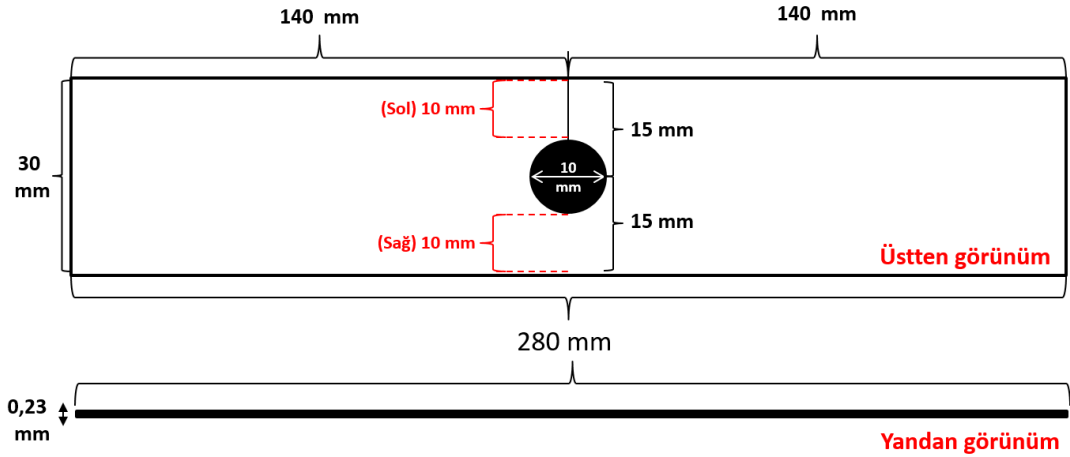
%3-SiFe alaşımlı, graini yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin, haddeleme doğrultusuna dik ve paralel kesimleriyle elde edilmiştir. Bunun anlamı, üzerinde çalıştığımız örneklerin, kompozisyonları aynı olmasına rağmen, farklı anizotropi değerlerine sahip ya da farklı doğrultularda kolay eksenleri bulunan örnekler kullanılmıştır. Bir diğer örnek, yönlendirilmemiş çelik olduğundan, daha farklı bir yapıya ve anizotropi değerine sahiptir. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi sadece kompozisyon olarak değil, manyetik özellik açısından da daha farklı bir doğası vardır. Her iki GYEÇ, kolay eksenlerine bakılmaksızın, aynı koşullarda ve önceden belirlenen ölçütlerde delinmiş, temizlenmiş ve bobinlenmiştir. Bobinlenmeyle verilmek istenen, arama bobinlerinin, malzeme ölçüm devresine sokulmadan önce belirlenen bölgelere sarılmasıdır.

3.1.1. Boyut ve birimler

Büyük levhalardan, standart boyutlara sahip transformatör çeliklerinin kesme işlemi, mekanik olarak (CNC) yapılmıştır. Kesilen standart GYEÇ örnekleri, sanayide M3 olarak bilinen ve 23G045 ASTM koduna sahip, 280 mm uzunluk, 30 mm genişlik ve 0,23 mm kalınlığındadır. Kesilen örneklerin her birinin yoğunluğu 7.65 g/cm^3 , elektriksel direnci $51 \times 10^{-6} \Omega\text{-m}$ olarak ölçülmüştür. Doyum indüksiyonu 1,9 ile 2,05 T civarındadır. 50 Hz ve 1,9 T en büyük indüksiyonda, özel güç kaybı ise yaklaşık 1,75 W/kg'dır. Yönlendirilmemiş çelikler ise N530 kodlu ve 300 mm uzunluk, 30 mm genişlik ve 0,5 mm kalınlığa sahiptir.

3.1.2. Delme/Kesme işlemi (Delik Açma)

GYEÇ üzerindeki delik etkisinin araştırılması için önceki çalışmalarımızın kaynağıyla (Gunes ve ark. 2015), tüm örneklerin tam ortasında 10 mm çapında dairesel bir delik açılmıştır. Deliğin açıldığı yerin koordinatları, Şekil 3.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Buna göre, 280 mm uzunluğundaki örneğin, boyuna olarak her iki ucuna, deliğin kesme kenarlarının mesafesi 135 mm, enine mesafesi ise (sağ ve sol taraflarından) 10 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Yönlendirilmiş çeliğe açılan deliğin boyutları.

Kesme işlemi, IFW atölyelerinde bulunan Elektriksel Deşarj Makinesine (EDM), üstte verilen koordinatların girilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kesmenin, manyetik mikro yapılarda oluşturması muhtemel bozucu etkilerini en düşüğe indirmek için doğrudan mekanik uygulamadan (delgeç veya matkap gibi) kaçınılır (Emura ve ark. 2003, Siebert

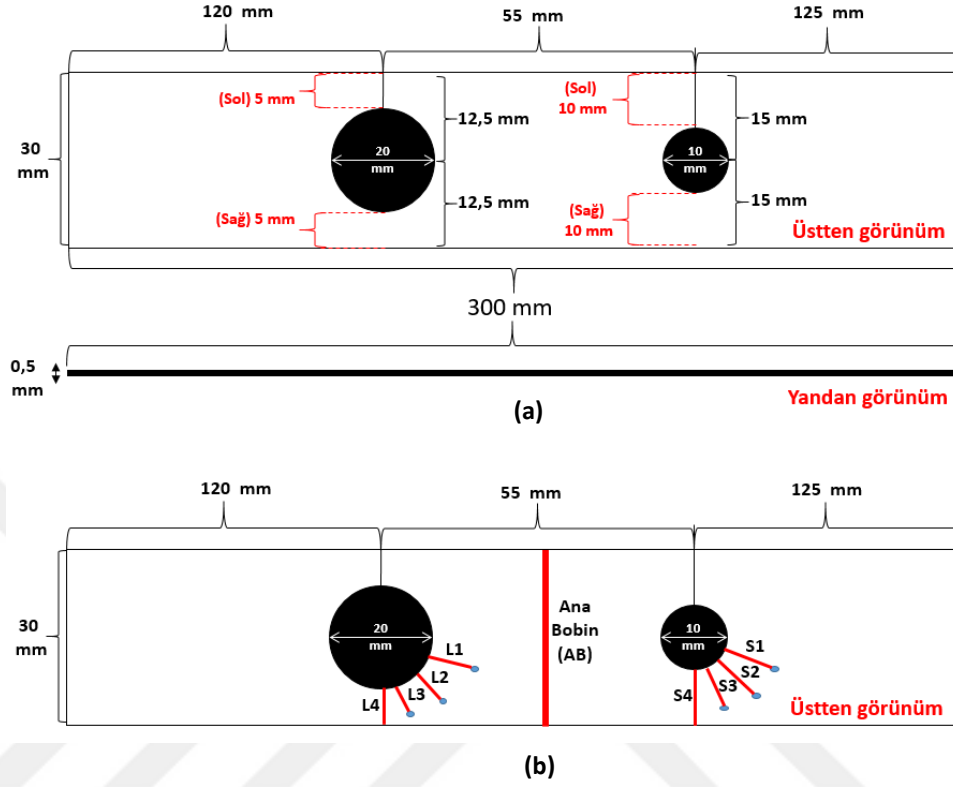
ve ark. 2014). Yerine, elektrotlar ile malzeme yüzeyinin belirli bölgelerine elektriksel boşalma uygulanmıştır.

Öte yandan, yönlendirilmemiş elektrik çeliğinde ise daha farklı bir malzeme delme ve bobinleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 3.2, elektrik çeliğinin delme sonrası değişkenlerini tanımlamaktadır. Buna göre, 3. Örnek olarak verilen malzeme üzerinde, 10 mm ve 20 mm çaplarında iki delik birden lazer yoluyla kesilmiştir (Şekil 3.2 a). Ayrıca delik etrafında, 0° ile 65° arasında, uygun açısal farklılıklarla dizilen, 1 mm çapında, bobin delikleri açılmıştır (Şekil 3.2 b). Her bir delik boyutu için (10 mm ve 20 mm), küçük deliklerin, büyük deliklere olan mesafesi eşit tutulmuştur. Buna göre, küçük delik çevresinde, S1 – S4 olarak isimlendirilen bobinlerin uzunluğu 5 mm iken büyük delik çevresindekiler (L1 – L4) 10 mm uzunluğa sahip arama bobinlerini gösterir. Delik açma işlemi, Nd-YAG lazer ile gerçekleştirilmiştir. Delik değişkenleri önceden belirlenmiş olup, aralarında 55 mm civarında boşluk bırakılmış ve bu bölgeye Ana Bobin (AB) sarılmıştır. Delinen bölgelerin keskin kenarlarının, bobinleri etkilememeleri için izole edilmiş ve bobinler bu izolasyonların üzerine sarılmıştır. Böylelikle daha güvenilir bir ölçüm alınması sağlanmıştır. Ayrıca bobinler, 0,1 mm kalınlıklı emaye bakır tel vasıtasıyla Şekil 3.2 b’de gösterilen alanlara sarılmış ve bu bölgelerdeki en büyük akı yoğunluğu pikleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bakır teller, gürültünün önlenmesi ve güvenlik açısından, izolasyonlu kullanılmış olup, sadece kontak bölgelerde izolasyonu sökülmüştür.

3.1.2.1. Elektriksel Deşarj Makinesi (EDM) ile kesme/delme işlemi

Malzemenin herhangi bir sebepten ötürü kesme, delme, presleme ya da manyetik ortam bütünlüğünü bozacak bir etkiye maruz kalması sonucunda, manyetik özellikler kısmen ya da tamamen bozulur (Emura 2003). Manyetik özelliklerdeki istem dışı sapmalar kendini kayıplardaki artış ve geçirgenlikteki azalma olarak gösterir. Kesmenin bozucu etkisi, birim hacim başına kesilen bölgenin miktarı ve haddeme doğrultusuna olan açısına bağlı olarak değişebilir (Hribernik 1982.). Kesmenin elektrik çeliklerinde oluşturduğu istenmeyen etkiler, birçok araştırmacı tarafından (Rygal ve ark. 2000, Schmidt 1976, Moses ve ark. 2000) çalışılmış ve sonucunda oluşan etkileri nicel olarak tanımlamıştır. Öte yandan, temelde mekanik ve lazer kesme olarak iki yolla gerçekleştirilen işlemin

olumlu ve olumsuz tarafları yine birçok araştırmacı tarafından (Belhadj ve ark. 2002, 2003, Siebert ve ark. 2014, Saleem 2016) elektrik çelikleri üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 3.2. Yönlendirilmemiş elektrik çeliği üzerindeki deliklerin ve etrafına sarılan bobinlerin boyutları ve konumları.

Kesme işlemleri, elektrik çeliklerinde mekanik gerilmeleri indükler (Emura 2003, Belhadj 2003, Siebert 2014). Ancak mekanik kesme işlemleri genellikle giyotin ile yapılmaktadır (Baudouin 2003, Belhadj 2002, Saleem, 2016, Siebert, 2014). Verilen kaynaklarda giyotin ile gerçekleştirilen mekanik kesme işlemlerinin, lazer kesmeye göre manyetik özellikler açısından çok daha düşük özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Ancak çalışılan materyal yönlendirilmemiş elektrik çelikleridir ve mekanik olarak ucuz ve basit bir kesme olan giyotin kesmesi kullanılmıştır. Oysa ki, bu çalışmada delme işlemi olarak kullanılan EDM tekniği, kesme/delme sonrası malzemede oluşması muhtemel iç ve yüzey gerilmeleri mümkün olduğunca en düşüğe tutacak şekilde tasarım edilmiştir. Bununla birlikte, geometrisi oldukça zor kesimlerin ya da sert cisimlerin bile etkili kesimine imkân veren ve işlem sonrası örnek yüzeyinde dalgalanma (tepe ve çukurlar) ve çapak etkisi gibi istenmeyen etkilerin oluşmasına ise izin vermeyen bir tekniktir (Jameson 2001). Spark erozyonu olarak ta bilinen method, uzun süren hazırlık işlemi, sabit ortam sıcaklığı,

yüksek üretim maliyeti ve sınırlı malzemelere uygulanabilirlik gibi teknik konular açısından bazı dezavantajlara da sahiptir.

İletken malzemeler için termal üretim, işleme yöntemlerinden olan EDM iletken malzemenin ilgili parçası (delinecek alan) ile EDM elektrodu arasında oluşturulan elektriksel boşalma temeline dayanır. Bir kalıp uç ya da tel elektrot olarak kullanılabilir. Bu durum işlenecek malzemenin fiziksel özelliklerine de bağlı olabilir. Kesme işlemi, de iyonize su ile doldurulmuş tank içerisinde iletken olmayan bir ortamda tel uçlu elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10 mm çapında dairesel delik açmak için uygun elektriksel boşalma, bu ortamda örneğimize nüfuz etmiş ve çapak oluşmaksızın, makul seviyelerde iç ve yüzey gerilimlerinin olduğu kesme işlemi yapılmıştır. Oluşan bu makul seviyedeki gerilmeler de mümkün tavlama sıcaklığında giderilmeye çalışılmıştır.

3.1.3. Tavlama (Isıl işlem)

GYEÇ için tekrar kristallenmeyi, mikro yapı yönelimlerinin çok daha iyileştirilmesi ve olası iç gerilmelerinin en küçük duruma getirilmesi için yüksek sıcaklıklarda ısıl müdahale uygulanması, birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Sha ve ark. 2004, Gottstein 2002). Bu bağlamda, Park ve ark. (2002), farklı silisyum içeriklere sahip Goss yapısındaki elektrik çeliklerine 700° C – 1050° C aralığında, tavlama sıcaklıklarını belirli sürelerle uygulamış ve birincil ve ikincil tekrar-kristallenme koşullarını ve manyetik özelliklerdeki mükemmelleşmeyi ispatlamışlardır.

Tez çalışmaları kapsamında araştırılan örnekler üzerinde yapılan denemeler ile 900° C'lik ısıl müdahalenin Kerr gözlemleri için uygun olacağı belirlenmiştir. Bu kapsamda, söz konusu manyetik özelliklerin sağlanması açısından, tavlama fırınlarında her bir örneğin 900° C de 1 saat boyunca ısıl müdahaleye maruz kalması sağlanmıştır. Gerekli tavlama işleminin ardından, örneğin soğutulması 100° C/saat periyodunda gerçekleştirildi. Böylece, kesme ve/veya temizlik işlemlerinin ardından oluşacak iç gerilmeler de en küçük duruma getirilmiştir.

3.1.4. Malzeme temizliği

Kerr mikroskoplarında, yüzey hakkında ayrıntılı bilgiye ulaşılması, belirli işlemlere bağlı olarak hazırlanan örnek yüzeyinin kalitesine bağlıdır. Işık uygun koşullarda, metal yüzeyinin 20 nm kadar altına nüfuz edebilir (Hubert ve Schäfer 1998). Kolay

mıknatıslanabilir metallerde, mekanik parlatma işlemi, hasarlı yüzey çok kalınsa genellikle yetersiz kalır. Temizlik sonrası, hafif bir ısıl müdahale (800° C kadar) yüzeyin yeniden yapılandırılmasına ve istenen gözlem koşullarının sağlanmasına imkân verir. Ancak bu koşulun bir bağlayıcılığı yoktur ve malzeme yapısına göre değişebilir. Malzeme temizliği kimyasal ve mekanik olmak üzere 2 farklı yolla gerçekleştirilebilir. Kimyasal temizlik, yüksek çözünürlüklü görüntü alınması istenen ve çok küçük yapıların inceleneceği sistemlerde tercih edilir. Yani, yüksek çözünürlükte Kerr gözlemi yapılmak istenen örneğe mümkün koşullarda elektrolitik temizlik (Hubert ve Schäfer 1998) uygulanmalıdır. Elektrolitik temizlik, transparent mikroskop gözlemlerinde (Faraday), en az Kerr gözlemleri kadar gereklidir ve çok iyi sonuçlar verir (Bühler ve ark. 1966, Evans ve Garret 1973).

Mekanik temizlik aşamaları ise biraz daha karmaşık ve uzun bir işlemdir. En temel haliyle, Kazıma, Taşlama ve Parlatma olarak 3 aşamalı olan bir işlemler bütünüdür. Tez çalışması kapsamında kullanılan örnekler hem fiziksel hem de kimyasal süreçlerden oluşan işlemler vasıtasıyla Kerr gözlemlerine hazır hale getirilmiştir.

3.1.4.1. Kazıma (Etching)

IFW ve Fraunhofer enstitülerinden örnekler inorganik bir yalıtkan ile kaplı halde tedarik edilmiştir. Bu kaplamalar, magnezyum oksit (MgO) ve silikanın bir reaksiyon halinde yüksek sıcaklıktaki hidrojen ortamında, çelik yüzeyine kaplanan ince cam benzeri bir filminden oluşurlar. Böyle yapıları çelik yüzeyinden sökmek için kazıma işlemi uygulanmalıdır. Nitekim aksi koşullarda yüzeyin Kerr etkisi ile görüntülenmesi imkânsızdır.

Kazıma işleminde örnekler grup grup geniş ve ağzı açık, enine uzun bir kaba koyulmuş ve Hidroklorik asit (HCl) içerisine batırılıp bir saat kadar beklendikten sonra uygun bir bez yardımıyla üzerlerindeki kaplamalar sökülüştür. Ardından sırasıyla damıtılmış (destile) su ve etanol içerisine batırılıp temizlenmiş ve kurutucudan geçirilmiştir. Bazı malzemelerin kaplamaları dayanıklı olduğundan bu işlem iki kez tekrarlanmıştır. Kazıma işlemi kimyasal bir işlemdir.

3.1.4.2. Taşlama (Grinding)

Kazıma sonrasında ise aynı örnekler taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Taşlama işlemi, kazıma ve parlatma işleminden farklı olarak örneğe fiziksel, katı bir malzemeyle etki etme işlemidir. Öncelikle, IFW enstitüsündeki dönen mil üzerinde taşlama işleminin yapıldığı cihazlarda 280 mm uzunluklu bir çelik levhanın zımparalanmasına uygun tutucular kullanılmıştır. Bu işlemin temelinde çeşitli sürtünme kuvvetlerine sahip, özel olarak imal edilmiş zımpara kâğıtları üzerinde daireler çizerek malzemenin kaplamasının tamamen çıkarılması ve parlatılması vardır. Zımparalama esnasında etanol ile ara sıra zeminin ıslatılması, işlem esnasında meydana gelebilecek gerilmeleri önlemek için kullanılır. Zımparalama – taşlama işleminde kullanılan bu özel zımpara kâğıtları, sürtünme katsayılarıyla ters orantılı olarak 600 – 4000 arasında kodlanmıştır.

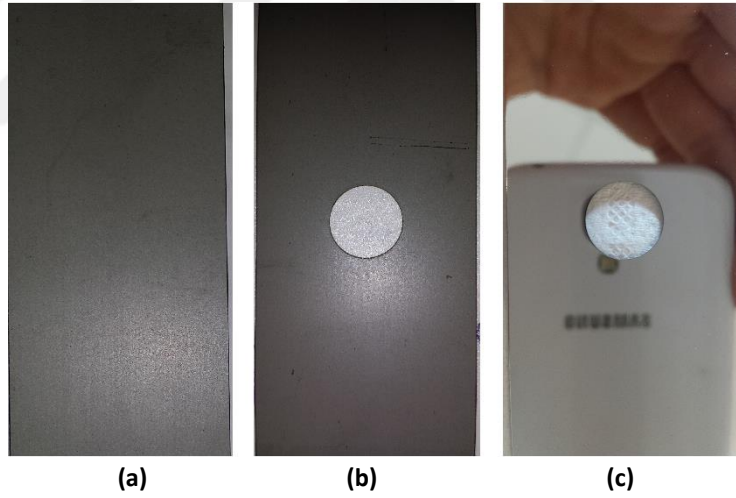
Kaplamanın kazıma esnasında çok fazla çıkarılamaması durumunda 600 ile 800 kodlu kâğıtlar daha çok kullanılır. Fakat bu kâğıtların kullanılması malzemedeki iç gerilmeleri, çok ciddi boyutlarda indükleyebilir. Bu yüzden, genellikle 2500 kodlu zımpara kâğıtları kullanılmıştır. İşlemlerin sonunda, tüm örnekler ayrı ayrı 4000 kodlu zımpara kâğıdı ile yaklaşık 15 – 20 dakika taşlanmış ve parlatma işlemine hazır hale getirilmiştir.

3.1.4.3. Parlatma (Polishing)

Parlatma işlemi, genişçe ve derin iki kap ve üç adet tüp içerisine kimyasalların konulmasıyla başlamıştır. Geniş iki kaptan birinin tabanı buz ile kaplanmıştır. Bunun sebebi, bu kabın içine ince uzun (örneklerin boyutlarından biraz büyük) bir kap daha konulacak ve içine belirli ölçeklerde hidrojen sülfat (SO_4) ve Hidroklorik asit (HF) konulacak olmasıdır. Bilindiği üzere bu asit, yoğun aktivitesinden dolayı, konulduğu özel kabı oldukça ısıtacaktır. Diğer geniş kaba, yine belirli ölçülerde SO_4 ve Hidrojen Peroksit (H_2O_2) konulmuştur. İnce uzun tüplere ise (batırılma sırasına göre) H_2O_2 , damıtılmış su ve etanol konulmuştur. Bu hazırlıklar sonrasında, örnekler önce HF asidine tek tek sırayla batırılmış 40 ile 60 saniye arasında değişen periyotlarda bekletilmiş – yıkanmıştır. Ardından diğer geniş kapta bir süre daha yıkanmıştır. Sonrasında sırasıyla, H_2O_2 – damıtılmış su – etanol tüplerinde belirli aralıklara (yaklaşık 5 -15 saniye kadar) yıkanmıştır. Etanol tüpünden sonra hızlıca kurutmaya alınmıştır. Bu temizlik aşamasında tüm geçişler çok hızlı yapılmıştır. Bunun amacı oksitlenmeyi önlemektir. İşlem sonunda, kapların temizlenmesinden önce tüm temizlik malzemeleri, turnusol kâğıdı kullanılarak

asit oranı açısından kontrol edilmiştir. Ardından HF ve SO₄ ile H₂O₂ ve SO₄'ün bulunduğu kaplar genişçe ve derin bir kaba, sadece H₂O₂ nin olduğu tüp ise başka bir kaba toplanmıştır. Damıtılmış su ve etanol tüpleri ise hemen yıkanmıştır. Kaplara konulan kimyasallar en az bir saat boyunca, aktiflikleri devam ettiğinden dolayı, çeker ocaktan çıkarılmadı.

Bu uzun ve karmaşık kimyasal işlemlerin ardından, parlatılan malzemeler, diğer temizlik aşamalarında oluşabilecek yüzey dalgalanmalarını giderip, düzgün hale getirecek bir aşamadan daha geçer. Bu aşamada malzeme, amorf silisyum oksit (SiO₂) solüsyonu ile özel bir kumaş üzerinde daireler çizerek 20 şer dakikalık periyotlarla en az üç kez döndürülür. Bu işlemler bütünü, tüm örnekler için ayrı ayrı uygulanmıştır. Sonuçta elde edilen örnekler Kerr mikroskobuyla gözleme hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.3'de, söz konusu örneğin, delinmeden önce (a), sonra (b) ve temizleme aşamaları sonrasındaki (c) halleri karşılaştırılmıştır. (c)'de verilen görüntü, malzemenin temizlik işlemi sonrasında, ayna gibi parlak bir yüzeye sahip olduğunun kanıtıdır.



Şekil 3.3. İşlem görmemiş elektrik çeliği (a), delik açılmış (b) ve temizleme aşamalarına maruz bırakılmış Kerr gözlemine uygun hale getirilmiş (c) örneğin görüntüleri.

3.2. Manyeto-Optik Gözlem Yöntemleri

Malzeme temizliği ve gerekli değişimler yapıldıktan sonra örneğin manyetik mikro yapılarını incelemek için manyeto-optik Kerr etkisinin kullanılmasıyla yarı-statik domain görüntüleri elde edilmiştir. Kerr mikroskopları, kutuplanmış ışığın malzeme üzerinden yansıtılarak belirli optik yöntemlerin kullanılmasıyla domain görüntülerinin elde edilmesi

esasına dayanır. Elde edilen domain motifleri ve duvarları, kontrast farklılıklarına göre birbirinden ayırt edilerek tanımlanır. Kerr etkisiyle gözlemlenen domainlerin mıknatıslanma doğrultuları ve duvar yönelimleri kartezyen ve kutupsal koordinatlarla tanımlanabilir. Bu bağlamda, Kerr etkisiyle elde edilecek domain motiflerinin, manyetik doğası hakkında ayrıntılı bilgiye sahip olunabilir.

3.2.1. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)

Kerr mikroskobu ve manyetik ölçüm sistemi, Manyeto-Optik Kerr Etkisini (MOKE) esas alan tüm manyetik malzeme çeşitlerinde, manyeto-optik yüzey histeresis eğrilerinin ölçüldüğü ve mıknatıslama işlemleriyle manyetik domainlerin görsel olarak elde edildiği bir arada bir sistemdir. Görüntü işleme yeteneği sayesinde kontrast ayarı ile domain yapıları ve mıknatıslama doğrultuları belirginleşir. Manyetik alanlar, düzlem içi ve çeşitli elektromagnetler yardımıyla düzlem dışı olmak üzere uygulanabilir. Özel bir ölçüm sistemi sayesinde, 30x300 mm boyutlarındaki standart levha çeliğinin, domain yapısı tüm ayrıntılarıyla incelenebilir. Buna ek, eşzamanlı endüktif histeresis ölçümü de yapılabilir. Özel bir donanım kullanılarak, graini-yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde, grain yönelimleri, yarı-otomatik olan domain resimlerinden elde edilebilir.

Manyeto-optik Kerr gözlemleri yansıtma modülü (Williams ve ark. 1951, Fowler ve Fryer 1952) ve geçirim modülü (Fowler ve Fryer 1956, Dillon 1958) olmak üzere iki yolla kullanılır. Yansıtma modülünde MOKE (Kerr 1877) esas alınırken, geçirim modülünde, Faraday etkisi (Faraday 1846) esas alınır. Her iki sistem de kutuplanmış ışık düzleminin küçük orandaki sapmaları temeline dayanır. Bu ışık ışını kutuplanan mikroskop alıcısında görünür olur. Faraday etkisi, prensipte, geçirgen olan az sayıdaki manyetik malzemede nadiren uygulanan bir yöntemdir. Geçirgen olmayan manyetik malzemelerde ise sadece Kerr etkisi kullanılabilir. Uzun yıllardır, her ne kadar düşük kontrastlı ve zayıf kaliteye sahip görüntüler üzerinden, örneklerin analizi yapılmaya çalışılmış olsa da, son yıllarda eklenen teknolojik alt yapıyla, oldukça ayırt edici görüntüler elde edilmeye başlanmıştır. Manyeto-optik temelli domain gözlemleri, $m = J/J_s$ (J_s = doyum mıknatıslanma yoğunluğu) mıknatıslama doğrultusundaki optik sabitlere bağımlılığın zayıf olması temeline dayanır. Söz konusu, Kerr ve Faraday etkilerine ek olarak, mıknatıslanma değişkenlerinde ikinci dereceden olan, *Voigt Etkisi* (Voigt 1898) de, manyeto-optik görüntülere katkıda bulunur. Voigt etkisi aynı zamanda, doğrusal çift kırınım olarak

bilinir ve Cotton-Mouton Etkisi ismiyle anılır (Cotton ve Mouton 1907). Tüm bu etkiler, genelleştirilmiş dielektrik sabiti tensörüyle gösterilebilir. Kübik kristaller için tensör aşağıdaki formda verilmiştir;

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon \begin{bmatrix} 1 & -iQ_v m_3 & iQ_v m_2 \\ iQ_v m_3 & 1 & -iQ_v m_1 \\ -iQ_v m_2 & iQ_v m_1 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 m_1^2 & B_2 m_1 m_2 & B_2 m_1 m_3 \\ B_2 m_1 m_2 & B_1 m_2^2 & B_2 m_2 m_3 \\ B_2 m_1 m_3 & B_2 m_2 m_3 & B_1 m_3^2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada Q_v , polarize ışık düzleminin manyeto-optik sapmasını tanımlayan (Voigt) malzeme sabitidir. Etki, aynı zamanda dairesel manyetik çift kırınım olarak ta isimlendirilir. B_1 ve B_2 sabitleri de bu etkiyi tanımlayan değerlerdir. İzotropik ve amorf ortamında, bu iki sabit eşittir, fakat kübik kristallerde genellikle farklıdırlar. m_i , kübik eksenler boyunca mıknatıslanmanın birim vektör bileşenleridir. Tüm sabitler frekans bağımlı ve genelde karmaşıktır. Ancak Q_v , B_1 ve B_2 sabitlerinin, reel kısımları genellikle baskındır.

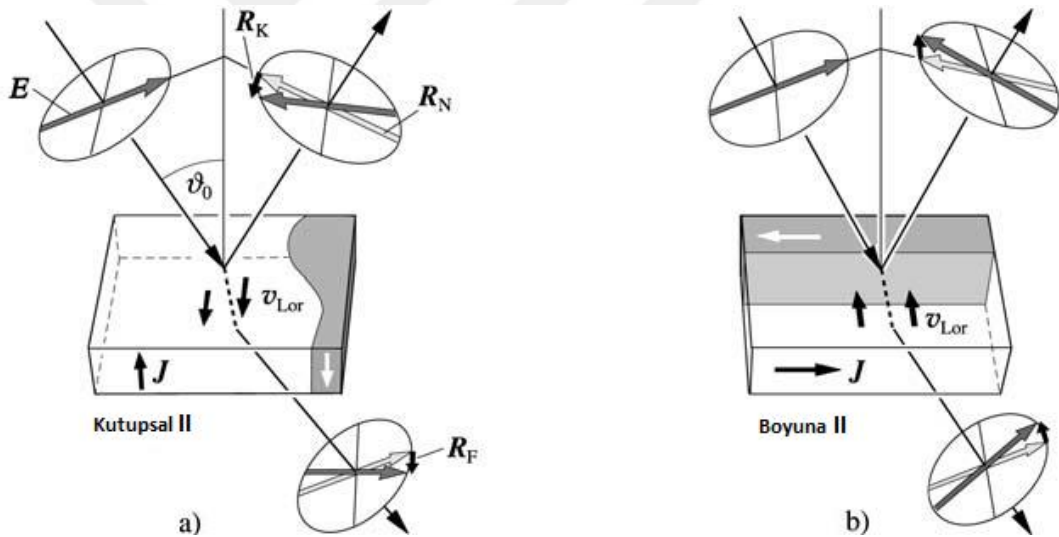
Domain gözlemek için, sapma etkileri, doğrusal çift kırınım etkilerinden çok daha önemlidir. Öyle ki, geçirgen ince filmlerde (garnet), manyetik mikro yapıların gözlemlenmesi için genellikle sapma etkileri kullanılır. Kerr etkisi, herhangi bir metalik malzemeye ya da ışık ışınına soğurabilen bir manyetik malzemeye uygulanabilirken, Faraday etkisi, saydam ortamlarla sınırlandırılmıştır. Bu iki etkinin, mıknatıslanma doğrultusuna olan bağımlılığı, kesin bir şekilde, (4.1) eşitliğinden, Maxwell denklemlerinden ya da uygun sınır koşullarından türetilir. Bu yolla, manyeto-optik sapma etkilerinin geometrisi açıklanabilir.

Geometriyi açıklamak için yüzeye dik yönetime sahip mıknatıslanma olduğu varsayılır (Şekil 3.4 a). Doğrusal olarak kutuplanmış bir ışık ışını, kutuplanmış düzleme paralel osile etmek için elektronlar uyarılır. Düzenli olarak yansıtılan ışık, gelen ışık olarak aynı düzlemde kutuplanır. Ortaya çıkan ışığın, bu bileşenine \mathbf{R}_N denir. Aynı zamanda, Lorentz kuvvetleri, birincil harekete ve mıknatıslanma doğrultusuna dik, küçük bir titreşimsel hareket bileşenini indükler. $\mathbf{v}_{lor} = -\mathbf{m} \times \mathbf{E}$, ile orantılı bu ikincil hareket, Huygens prensibinden dolayı ikincil genlikler üretir. Bunlar, geçirme için \mathbf{R}_F , Faraday genliği; yansıma için \mathbf{R}_K , Kerr genliğidir. \mathbf{R}_F veya \mathbf{R}_K ile \mathbf{R}_N 'nin süperpozisyonu, mıknatıslanmaya bağımlı kutuplanma sapmalarına yol açar.

Şekil 3.4, yüzey normali boyunca mıknatıslanma noktaları için kutupsal Faraday ve Kerr etkilerini gösterir. Bu etki, gelen ışık dik olduğunda ($\theta_0 = 0^\circ$), en kuvvetli halini alır.

Boyuna etki için mıknatıslanma, yüzeye paralel ve gelen ışık düzlemi boyunca olur. Işık ışını yüzeye eğimli olmalıdır. Bu, gelen ışığın yüzeye hem dik hem de paralel kutuplanması için manyeto-optik bir sapma üretir. Böylece, gelen ışık ışınının genliği, Lorentz hareketi ve yansıyan ya da geçen ışın doğrultusu arasındaki açısal ilişkinin incelenmesiyle görülebilir.

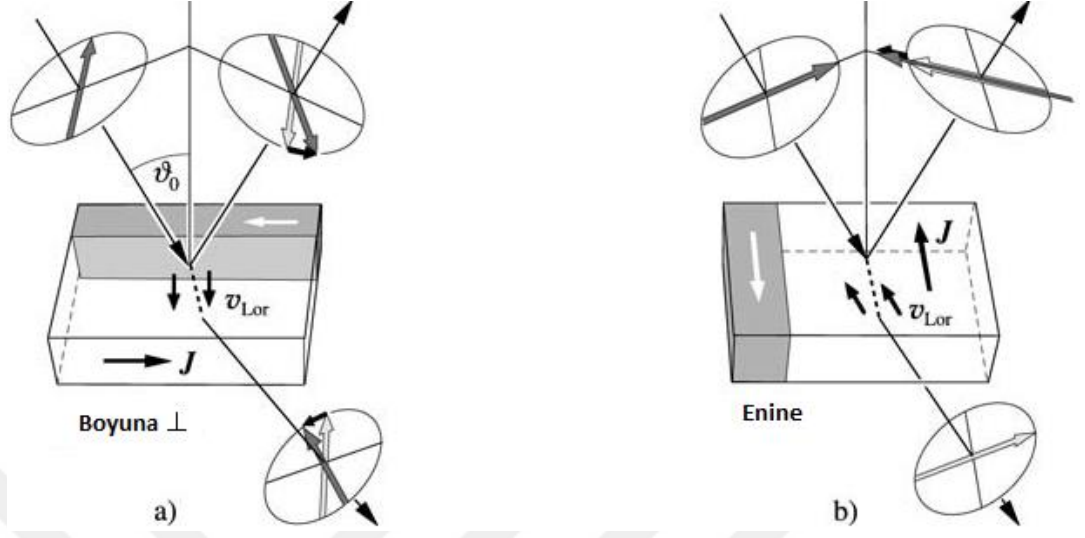
Mıknatıslanmanın, gelen ışığın düzlemine dik olduğu enine yönelim için (Şekil 3.5 b), geçirimde, herhangi bir manyeto-optik etki söz konusu değildir. Ancak, yansıtımda paralel kutuplanan ışık, yansıyan ışın farklı bir doğrultuya sahip olacağından bir Kerr genliği üretir. Kutupsal, boyuna ve enine durumlar için Kerr genlikleri sırasıyla, R_K^{Pol} , R_K^{lon} ve R_K^{tra} ; m_{pol} , m_{lon} ve m_{tra} , mıknatıslanma bileşenlerine bağlı olarak üretilir. Sonuçta, bir analizör içinden geçirilen ışık (gelen ışık düzlemine dik ekseninde ölçülen α_s düzenlemesiyle), gelen ışığın genliğine göre toplam sinyal genliğine götürür.



Şekil 3.4. Kutupsal (a) ve boyuna (b) manyeto-optik Kerr ve Faraday etkileri.

Şekil 3.4'te R_N düzenli yansıyan elektrik alan genliğidir. Manyeto-optik genlikler R_K ve R_N , Lorentz hareketi, v_{lor} tarafından üretilmiş olarak düşünülebilir. Kutup etkileri, ϑ_0 açısının yok edilmesi için oluşur ve büyük oranda, E kutuplanma doğrultusundan bağımsızdırlar. Burada, paralel kutuplanma durumu içinde gösterilen, boyuna etkiler $\sin\vartheta_0$ ile orantılı olarak artar. Şekil 3.5'te ise boyuna etkilerin büyüklüğü (b)'de ki durumla aynı, fakat zıt işaretlisidir. Enine durumda, sadece paralel kutuplanma bir etki

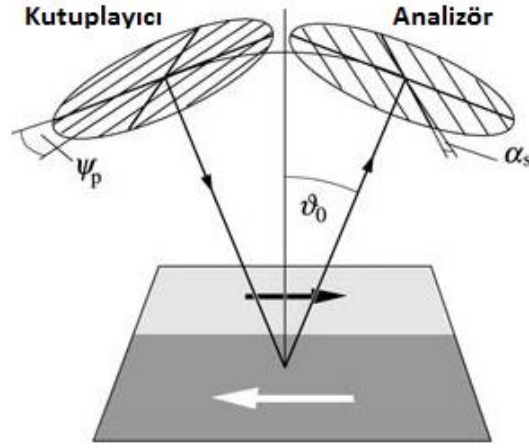
üretir ve sadece yansıtma da gerçekleşir. Geçirimde, kutuplanma için herhangi bir enine etki yoktur. Her iki etkide de, gelen ışın açısının bilinmesi gerekir.



Şekil 3.5. Dikey kutuplanma için boyuna (a) ve enine (b) etkiler.

$$A_{\text{tot}} = -R_p \cos \Psi_p \sin \alpha_s + R_s \sin \Psi_p \cos \alpha_s + R_K^{\text{Pol}} \cos (\alpha_s - \Psi_p) m_{\text{Pol}} + R_K^{\text{lon}} \cos (\alpha_s + \Psi_p) m_{\text{lon}} - R_K^{\text{tra}} \cos \Psi_p \sin \alpha_s m_{\text{tra}} \quad (4.2)$$

Yansıma katsayıları R_p ve R_s , Fresnel bağıntısının kullanımıyla, gelen ışık açısı ve optik sabitlerden üretilebilir. Benzer bir tanımlama, Kerr katsayıları için de mümkündür. Buradaki α ve Ψ açı değerleri, kutupsal ve boyuna etkilerin tanımlanması ve en uygun kontrast ayarının sağlanması için önemlidir.

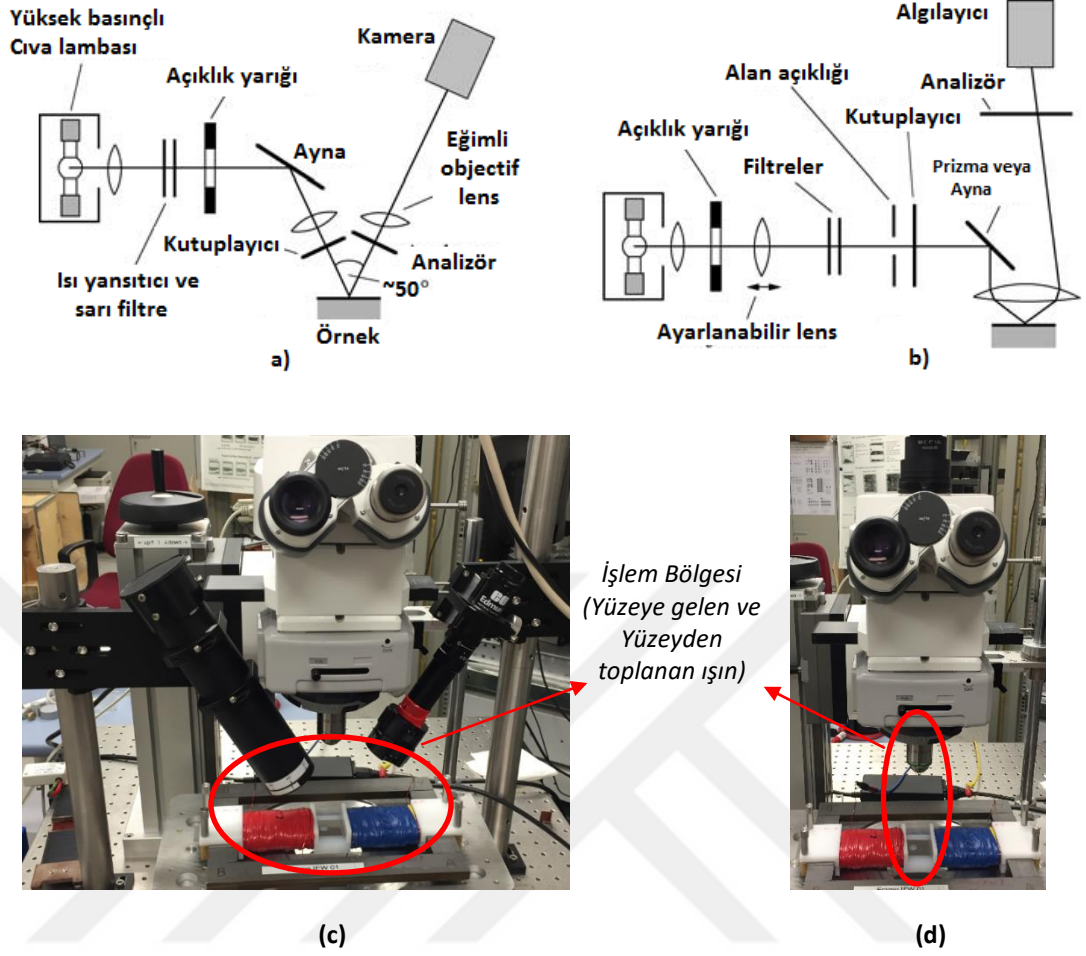


Şekil 3.6. Bir Kerr sistemindeki ilgili açıların Kutuplayıcı ve Analizör üzerinden gösterimi.

3.2.2. Kerr mikroskopları

En bilinen Kerr mikroskopları, şekil 3.7’de, şematik (a-b) ve fotoğraflarıyla (c-d) gösterilenlerdir. İlk sistem (a ve c), büyük örneklerin domain desenlerini, geniş boyutlarda elde etmek için boyuna ve enine etkilerde düşük çözünürlüklü uygulamalar için tavsiye edilir. Bu sistemin üstünlüğü, kutuplayıcı ve analizör arasındaki örnekten başka hiçbir optik element olmamasıdır. Yani kontrast koşulları en uygun seviyededir. Objektif lensler, odaklanma seviyesini arttırmak için ve görüntü bozulmasını azaltmak için eğimli olurlar. Bu dizilimdeki çözünürlük, elde edilebilir sayısal açıklık ve objektifte iki mikron civarındaki sapmayla sınırlanır. Ayrıca, bu tarz düşük çözünürlüklü versiyonlarda, değişken nokta boyutlarında, gözlem yapılabilmektedir. Bu boyutlar, 30x30 mm’den 8x8 mm’ye kadar değişmektedir.

Optik mikroskobun limitleri dâhilinde yüksek çözünürlükteki gözlemler, geleneksel kutuplanma mikroskobu temeline dayanan, ikinci mikroskop sistemiyle (b-d) mümkün olur (Green ve Prutton 1962). Böyle yüksek çözünürlüklü optik mikroskoplar, birkaç 10 mikrondan birkaç yüz mikrona kadar manyetik mikro yapıların yüzey haritasını çıkarma imkânı verir. Sistem içerisinde, ışın, ayna elementi ve kutuplayıcı ile analizör arasındaki objektif içerisinden iki kez geçtiğinden, kontrast seviyesi azalır.



Şekil 3.7. İki tip Kerr mikroskobu. Düşük çözünürlük ve yüksek hassasiyetli versiyon (a ve c). Yüksek çözünürlüklü Kerr mikroskobu (b ve d).

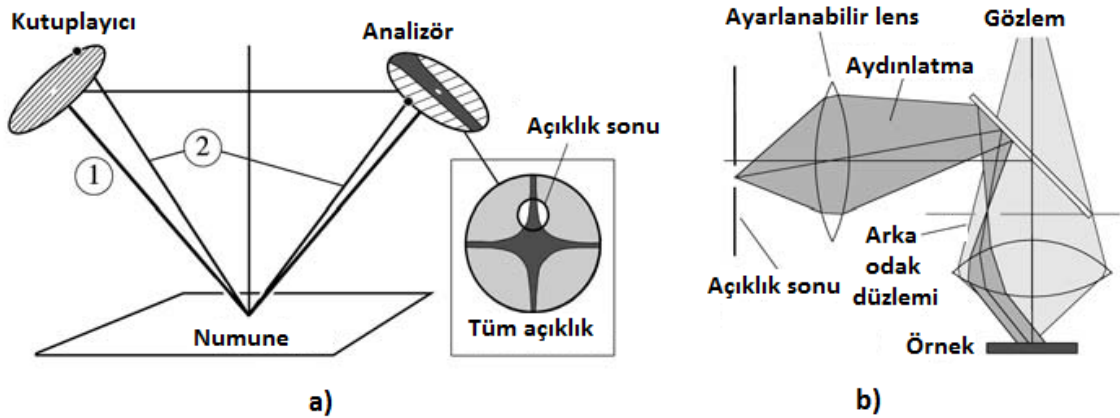
Burada, gerilimsiz ve kaliteli kutuplayıcı optikleri zorunludur. Kutuplanmadaki bozulmadan kaçınmak için objektif lensler, ayna elementi gerilimsiz olmalıdır. Berek prizmaları, ışık kaybını önlediği ve kutuplanma bozulmasını düşük tuttuğundan, boyuna etki için ayna elementleri tercih edilir. Öte yandan, görüntüleme aralığını sınırlandırır ve böylece bir doğrultuda çözünürlük olur. Işık şiddeti herhangi bir sorun teşkil etmezse, örnek yansıtıcısı en uygun çözünürlükte kullanılır ve gözlem modunda yüksek esneklik tercih edilir. En iyi çözüm, arka odak düzleminde dar bir yansıtıcı bulunmasıdır. Böyle bir yansıtıcı aparatı, daha önce Prutton mikroskobunda (Carey ve Isaac 1966) kullanılmıştır. Geçirmede ise böyle bir aydınlanma problemi meydana gelmez (Boersch ve Lambeck 1960).

Yeşil ve sarı cıva çizgilerini seçmek için uygun spektral filtreler ile yüksek basınçlı bir cıva lambası birçok durumda en iyi ışık kaynağı olarak tavsiye edilir. Bu, sadece yeşil-

sarı değil, mavi boyutunda da kullanılabilir bir renk spektrumu ve yeterli parlaklık için tercih edilir. Ark lambalarının dezavantajı, ömürleri ve kararlılıklarındaki eksikliklerdir. Katı hal, mavi ve yeşil lazerler, uygun ve yeteri kadar güvenilir olduklarında ancak kullanılabilirler. Lazer aydınlatmanın üstünlüğü, (i) neredeyse sınırsız şiddet opsiyonları, (ii) ark kaynakları için imkansız olan lazer çıkış güçlerini dengeleme olanakları, (iii) stroboskopik ve yüksek hızlı mikroskoplar için kısa lazer darbelerinin kullanımınıdır. Öte yandan, yüksek şiddette ışın yayan diyotlarda, son yıllardaki gelişmeler, umut vaat edici seçenekler arasına girmelerini sağlamıştır (Bardou ve ark. 1996).

3.2.3. Aydınlatma (Işık yolu)

Kerr mikroskobundaki aydınlatma açıklığı, ne çok büyük ne de çok küçüktür. Aşırı küçük bir açıklık (paralel ışık), örnek yüzeyinin keskin kusurları civarında kırınım saçığını bozucu olur. Büyük açıklık ise, kutuplanma bozulumu etkisinden dolayı oluşan bir arka plan şiddetiyle kontrastı azaltır. Bu sebepler, Şekil 3.8 a’da şematik olarak gösterilmiştir. Kutuplayıcı, gelen ışığın merkezi düzlemine paralel olursa, merkezi ışın (1), herhangi bir metalik yüzeyden, faz kayması olmaksızın yansıtılır. Bu durum, gelen ışığın farklı bir düzlemindeki ışın (2) için doğru değildir. Örneğin bir noktaya gelen tüm ışık ışınları hesaba katılırsa, burada düzlem, aydınlanma demetinin merkezi ışını ile ve gelen ışık düzleminin merkezindeki normal yüzeyi ile tanımlanır.



Şekil 3.8. Aydınlatma açıklığı, Kutuplayıcı ve Analizörün şematikleri (a). Mikroskobun arka odak düzleminde (b) gözlemlenebilen, tam açıklıktaki sönüm bölgesi, bu durum için içe doğru gösterilmiştir (a).

Kutuplayıcı ve analizörün konumları, bu merkezî düzleme göre değerlendirilir. Bu düzlemde bulunmayan tüm ışınlar için etkin kutuplayıcı açısı farklıdır. Kutuplayıcı ayarları, merkezi aydınlatma düzlemi için optimize edilirse, diğer ışınlar için başka bir en iyi uyuma gerek duyulmaz. Bu, en büyük sönüm için analizör ve kutuplayıcının ayarlanmasıyla ve mikroskobun kırınım düzlemine bakılmasıyla gösterilebilir.

3.3. Manyetik Özelliklerin Analizi

Elektrik çeliklerinin manyetik özellikleri, birçok mıknatıslanma değişkenlerinin kullanılmasıyla ölçülebilir. Açık devrede manyetik ölçümler titreşimli örnek manyetometresi (VSM), dalgalı gradiyent manyetometresi (AGM), SQUID manyetometresi gibi birçok yolla ölçülebilir. Bunun yanı sıra, malzemenin mıknatıslanması da birçok yol ve yöntemle sağlanabilir. En çok kullanılan yöntemler, genelde bir iskelet yapıya bakır telle sarılan selenoid sarmalının içerisine malzemenin yerleştirilmesiyle elde edilir. Sistemin bir kesit alanı ele alınacak olursa, halka şeklindeki sarmaldan geçirilen akım ile halka içerisinde bir manyetik alan indüklenmiş olur. Akım geçirilen selenoidin indüklediği manyetik alan, (2.2)'de verilmiştir. Oluşturulan alanın, malzemede oluşturduğu indüksiyon denklem (2.3)'te verildiği gibidir. Malzemeyle selenoid arasındaki hava boşluğunun da hesaba katılması için denkleme boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı da eklenmiştir.

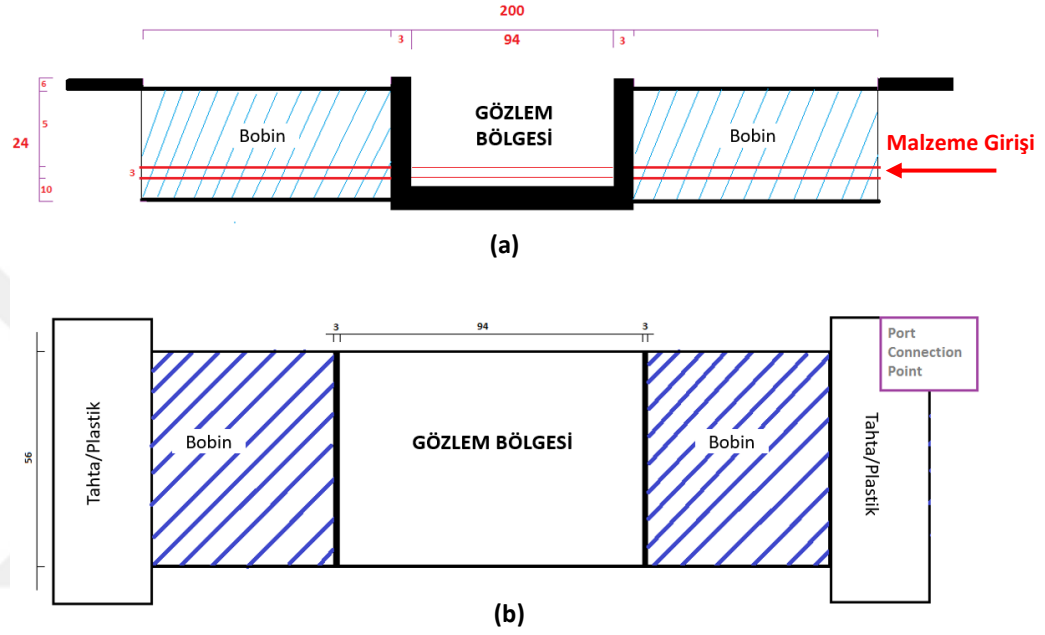
3.3.1. GYEÇ için manyetik özelliklerin ölçümü

Selenoid içindeki malzemede, manyetik alan doğrultusunda oluşan akımın, malzemenin yapısal özelliklerine de bağlı olarak, kaçak akı olarak düzensiz dağılmasını engellemek için bir ölçüm devresinin kurulması gereklidir. Böylelikle elde edilecek mıknatıslanma eğrilerinin hem kararlı olması hem de gürültünün azaltılması sağlanabilir. Bu çalışmada, elde edilen histeresis grafikleri de, böyle manyetik devrelerin kurulmasıyla elde edilmiştir.

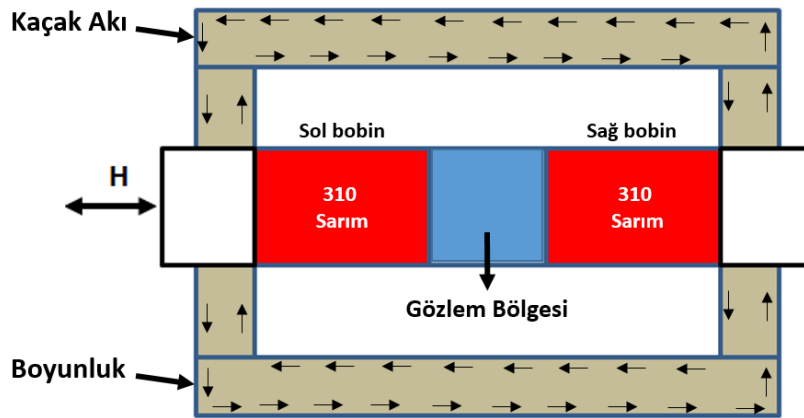
3.3.1.1. Mıknatıslama bobini – 1 (Selenoid)

Mıknatıslanma devresi olarak kullanılan selenoidi üretmek için öncelikle IFW atölyelerinde, iskelet yapının tasarımı ve taslağı belirlenmiştir. Bu taslak sarım sayısına ve kullanılacak bakır telin fiziki özelliklerine bağlı olarak Şekil 3.9'da gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Taslak, manyetik alanın malzemede düzgün dağılmasını sağlamak için

gözlem bölgesinin her iki tarafına da eşit sarım sayısında bobin kurulmasına imkân verecek ölçütlerde tasarlanmıştır. Tüm değişkenler keyfidir ve hiçbir standarda göre belirlenmemiştir. Bu mıknatıslama devresinin önemli bir özelliği, domainlerin mıknatıslanması ve domain duvarlarının hareket etmesinin canlı olarak izlenmesine, gözlem bölgesi vasıtasıyla imkân verecek olmasıdır. Bu devreyle stroboskopik yani dinamik domain gözlemi almak da mümkündür.



Şekil. 3.9. Mıknatıslama bobininin taslak çizimi. Tüm ölçeklendirmeler milimetre boyutunda verilmiştir.

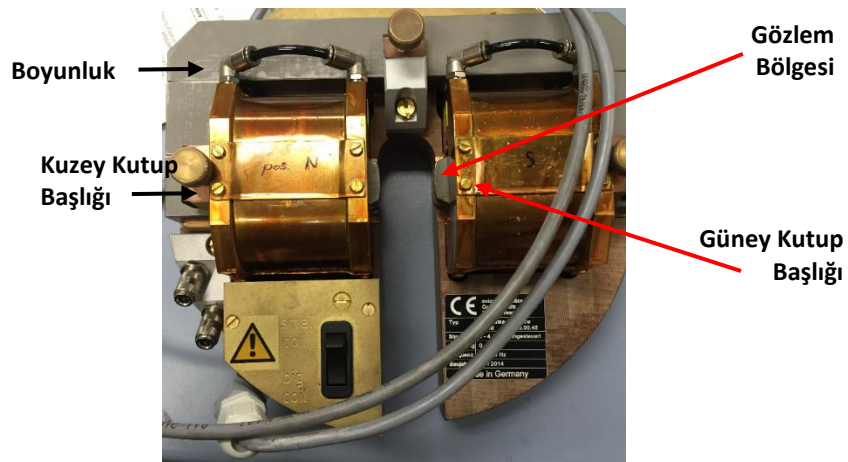


Şekil 3.10. Mıknatıslama devresi. Boyunluk, şematik olarak gösterilen kaçak akının sistem içerisinde tutunması için sistemle bir arada olarak kullanılır.

Çekirdek yapısı hazırlandıktan sonra, 0,5 mm kalınlığında bakır tel kullanarak, 310 sarım sağ ve 310 sarım sol tarafa olmak üzere toplam 620 sarımlı bir selenoid mıknatıslama devresi oluşturulmuştur. Devre, LabView programıyla kalibre edilmiş ve manyetik alan sabiti (n/l) 2900 m⁻¹ olarak bulunmuştur. Akının malzeme uçlarından kaçmasını önlemek için selenoid bir boyunluk içine yerleştirilmiştir. Böylece, tüm sistemdeki akı dağılımı, en düşük kaçak akı oranıyla kararlı bir biçimde oluşturulmuştur. Tüm mıknatıslama devresi, Şekil 3.10'a verilmiştir.

3.3.1.2. Mıknatıslama bobini – 2 (yüksek alan bobinleri)

Yüksek alan bobinleri sadece Kerr gözlemleri sırasında malzemenin tamamen doyum mıknatıslanmasına ulaşmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Devre, bobin – 1 de verilen sistemle aynı özelliklere sahip olsa da, tamamen tümleşik ve kapalı bir sistem olmasından dolayı daha düzgün ve yüksek bir alan sağlamıştır. Şekil 3.11'de, bobinin görüntüsü verilmiştir. Bobin, normal çalışma koşulları ve güç kaynağının potansiyeline bağlı olarak 200 kA/m lik çok büyük bir manyetik alanı malzemedeki oluşturabilmektedir. Genelde küçük ebatlarda (gözlem bölgesine sığabilecek kadar) örnekler, tutucu bir araç aracılığı ile sabitlenip mıknatıslanmaktadır. Fakat Kutup başlıklarının içerisinden geçirilecek uzun örneklerde de, yüksek alan gereksinimi duyulduğunda kullanılabilir. Böyle büyük bir alanın oluşmasıyla doğal olarak ortaya çıkması muhtemel ciddi ısınma problemleri ise devreye dışarıdan uygulanan azot ile giderilir. Bu çalışmada, anlık ya da yarı-anlık ölçümler alındığından, soğutucu cihazların kullanımına gerek duyulmamıştır.



Şekil 3.11. Yüksek alan gerilimleri sağlayan, kapalı devre büyük bobin.

3.3.1.3. Algılayıcı (arama) bobinler

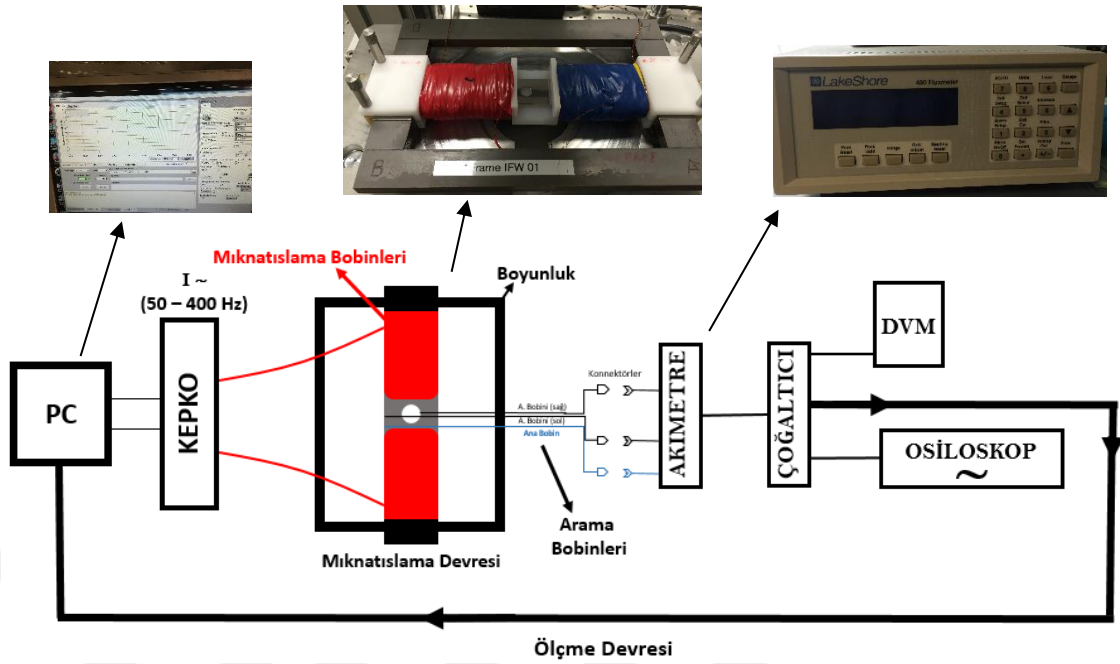
Algılayıcı ya da diğeri bir adıyla arama bobinleri, bölüm 3.1’de verilen aşamalara göre hazırlanmış malzemelerin, önceden belirlenen bölgelerine belirli oranlarda sarılmıştır. Ana Bobin (AB), Sağ bobin ve Sol bobin olmak üzere üç algılayıcı bobin kullanılmıştır. Ana bobin, tüm malzemede indüklenen akının, alanın bir fonksiyonu olarak elde edilmesi için 50 sarım ile kullanılırken, Sağ ve Sol bobinler, delik civarındaki yerel akı dağılımının ve mıknatıslanma işlemlerinin tespiti için onar sarımlı kullanılmıştır. Şekil 3.12’de bobinleri sarılmış elektrik çeliğinin resmi, şematik gösterimiyle birlikte verilmiştir.



Şekil 3.12. Ortalama akı doğrultusuna dik bağlanan Ana Bobin (AB), Sağ ve Sol bobinler, hem fotoğraf (a) ile hem de ölçeklendirilen şemasıyla (b) gösterilmiştir.

3.3.1.4. Diğer devre elemanları

Bu çalışmada, manyetik özellikler, histeresis eğrileri üzerinden tespit edilmiştir. Ölçüm devresine bağlanan mıknatıslanma devresi, Labview programıyla kontrol edilmiştir. İndüklenen manyetik akının birim zamanda uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak, bölgesel ya da genel olarak elde edilmesini sağlamak için malzemenin belirli bölgelerine bağlanan arama bobinleri, çoğaltıcı yoluyla, akı metreye bağlanmıştır. Akı metre de bir devre elemanı olarak ölçme devresinde bilgisayara bağlanmıştır. Tüm kontrol bilgisayardan, manyetik alan ve frekansta yapılan değişimlerle sağlanmıştır.

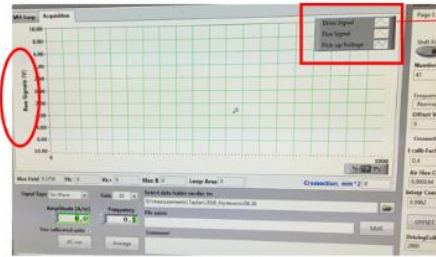
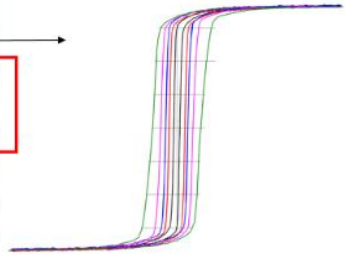
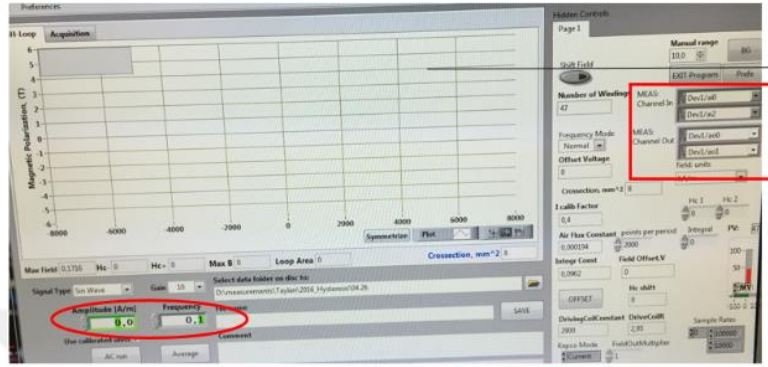


Şekil 3.13. Ölçme devre elemanları.

Miknatıslanma devresinden sonra kullanılan devre elemanları malzemenin birim zamandaki akı değerini (dB/dt) ölçeceğinden, akı metreye bağlanan anahtarlama devresi ve çoğaltıcı vasıtasıyla, dijital voltmetre (DVM) ve osiloskop ile devre tamamlanır. Bilgisayara aktarılan tüm sinyaller burada işlenir. Anahtarlama sistemiyle, her bir arama bobini ayrı ayrı kontrol edilebilmiştir. Öte yandan, uygulanan yüksek alan ve frekanslarda, oluşması muhtemel harmonikler, hem osiloskop hem de programın kendi sinüs dalga fonksiyonlarıyla kontrol edilebilmiştir. Güç kaynağı (Kepko), 2, 4 ve 6 amperlik 3 farklı akım değeri sağlayabilen fonksiyonlarda kullanılmıştır. Manyetik ölçüm devresinde 4 amperlik, mikroyapı analizlerinde 6 amperlik versiyonları kullanılmıştır. Lakeshore marka akımetre miknatıslanma devresine seri bağlanmıştır. Ayrıca, harici bağlanan Hamag HM 450 MHz Analog Osiloskop, anahtarlama devresiyle ölçme sistemine dahil edilmiştir.

Tüm sistemin girdi ve çıktıları bilgisayarda bulunan yazılım vasıtasıyla eşzamanlı olarak, Şekil 3.13'te gösterildiği gibi kontrol edilebilmiştir. Kontrol ünitesindeki işlemler, Şekil 3.14'te verildiği gibi bilgisayar ekranından yapılır. Sistemin bir arada olarak işletilmesinde, aynı sistem bileşenlerinin kullanılması daha güvenilirdir. Örneğin, çok karmaşık ölçme devrelerinde, harmonik kontrolü, programın içerisinde var olan kontrol paneliyle sağlanması devreye dışardan eklenmiş bir osiloskoptan çok daha güvenilirdir.

sonuçlar verebilir. Elde edilen histeresis eğrileri, frekans ve en büyük alan gerilimine göre birbirinden bağımsız elde edilir. Farklı frekanslarda ve manyetik alanlarda, şekildeki gibi karmaşık bir görüntüyü, aynı anda elde etmek söz konusu değildir. Bundan dolayı, verilen karşılaştırmalı histeresis ilmekleri şematiktir.



Mıknatıslama bobini, Akı ve Arama bobini sinyallerinin dalga fonksiyonları

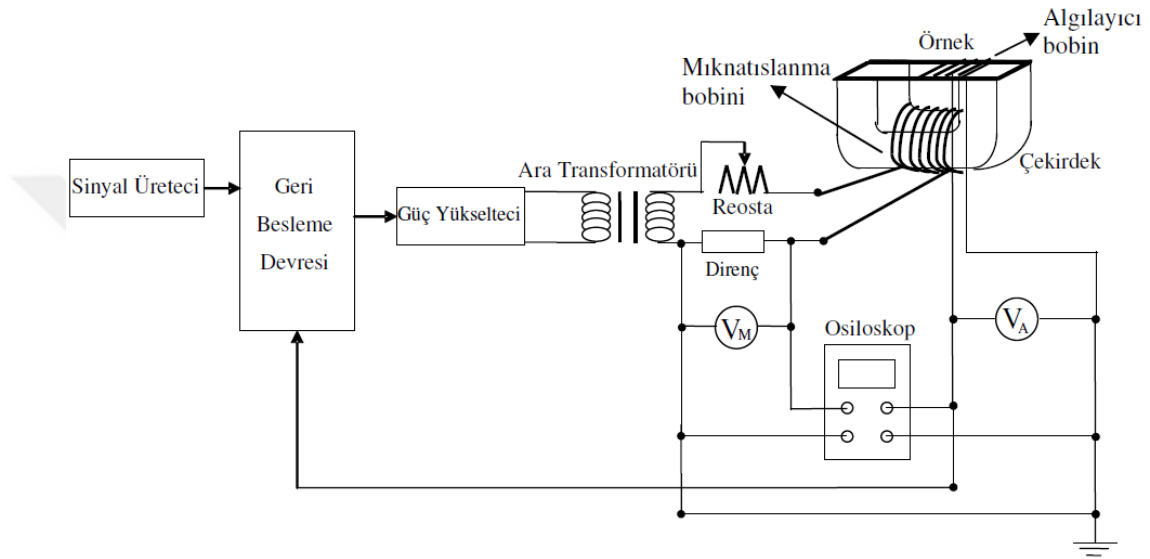
Şekil 3.14. İlgili ölçüm devresiyle histeresis eğrisinin elde edilmesi.

Üstteki şekil LabView programının kullanımıyla, farklı alan gerilimi ve frekans uygulamasının sonucunda mıknatıslanma işlemlerinin gözlemlendiği sistemin anlık görüntüsünü verir. Alttaki şekil ise yüksek alan ve/veya frekans uygulandığında oluşması muhtemel harmonikleri tüm dalga fonksiyonları açısından gösteren program bileşeninin anlık görüntüsüdür.

3.3.2. Yönlendirilmemiş çelik için manyetik özelliklerin ölçümü

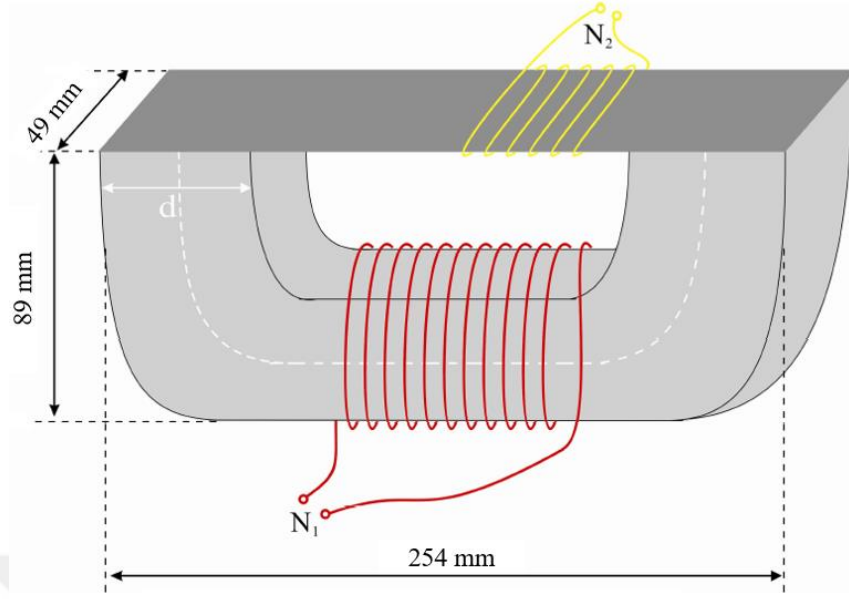
Yönlendirilmemiş elektrik çeliğinde ilgili bölgelerdeki mıknatıslanma işlemleri, daha farklı bir ölçme devresiyle elde edilmiştir. Şekil 3.15'te verilen ölçme devresinde mıknatıslanma bobininde akım üretmek için Agilent 33250A marka sinyal üretici kullanılmıştır. Thurlby 1503 ve Keithley 2400 marka voltmetreler, bobinde indüklenen gerilimin ölçülmesinde kullanılan devre elemanlarıdır. Tektronix TAS 475 marka osiloskop ise ilgili bölgelerde oluşması muhtemel harmoniklerin tespiti için devreye eklenmiştir. Dahası, ölçme devresinde, malzemenin mıknatıslanması için U-şekilli

çekirdek kullanılmıştır. Bu, transformatör boyunluğu benzeri çekirdek, levha halindeki GYEÇ'nin üst üste bindirilmesiyle oluşturulmuştur. Çekirdek, tüm değişkenleriyle, şekil 3.16'da şematize edilmiştir. U-şekilli çekirdek, N_1 sarımlı (178) bir bobin yardımıyla mıknatıslanmaktadır. Öte yandan, malzemedeki algılayıcı bobin sargı sayısı N_2 , 100 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.16'da kesikli çizgiler ile gösterilen ortalama akı yolu, 312 mm olarak hesaplanmıştır. Tüm devre elemanlarında gürültüyü azaltacak önlemler alınmıştır.



Şekil 3.15. Yönlendirilmemiş elektrik çelikleri için kullanılan ölçme devresi.

Küçük ve büyük delikler etrafında oluşan yerelleşmiş akı yoğunluğundaki değişimin gözlemlendiği ölçme devresinde, V_M , mıknatıslanma gerilimini, V_A ise algılayıcı bobinde indüklenen gerilimi ifade eder.



Şekil 3.16. Malzemenin mıknatıslanması için kullanılan çekirdeğin boyutları.

Malzemelerde, kesme ve delmeden kaynaklı çapak etkisi oluşabileceğinden, bobinlerin sarımları dikkatle gerçekleştirilmiş ve mümkün olduğunca bobin – malzeme arasında bir kontak kurulmamasına dikkat edilmiştir. U-şekilli mıknatıslama çekirdeğinin bağlı olduğu ölçüm devresinde de, sinyallerin toplanıp bozulmaların da en küçük duruma getirildiği geri besleme devresi eklenmiştir (Derebasi 1994). Böylelikle, hem mıknatıslama hem de algılayıcı bobinlerden elde edilen değerlerin güvenilirliği mümkün olduğunca sağlanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, bir önceki bölümde açıklanan delme, temizleme ve bobinleme işlemlerinden geçirilen malzemelerin, deneysel sonuçları verilecektir. Bu çalışma kapsamında, çalışma doğrultusuna paralel $(1\ 1\ 0)[1\ 0\ 0]$ ve dik $(1\ 1\ 0)[0\ 0\ 1]$ olmak üzere iki farklı kristalografik doğrultuya sahip fakat aynı kompozisyondaki %3-SiFe elektrik çeliği ve grainleri yönlendirilmemiş elektrik çeliği kullanılmıştır. Çalışma doğrultusuna dik kolay eksene sahip (haddeleme doğrultusuna dik kesilen) malzeme önceki bölümlerde de açıklandığı gibi transformatör çekirdeklerinde tercih edilmeyen bir örnek olmasına karşın, domain davranışlarını çok iyi analiz etme imkânı verdiği için tercih edilmiştir. Zira bu malzemedan elde edilen sonuçlar, manyetik alanın, manyetik olmayan bölgesel hava boşluklarıyla karşılaştığında nasıl bir yol izlediğini bölgesel olarak tespit etme imkânı vermiştir. Bunun yanı sıra, ilgili sistemin incelenmesinde, sınır koşulları iyi bir şekilde tanımlanmış ve graini yönlendirilmemiş çeliklere olan yapısal benzerliklerinden dolayı genel olarak karşılaştırılması muhtemel problemlerin çözümüne ışık tutulmuştur.

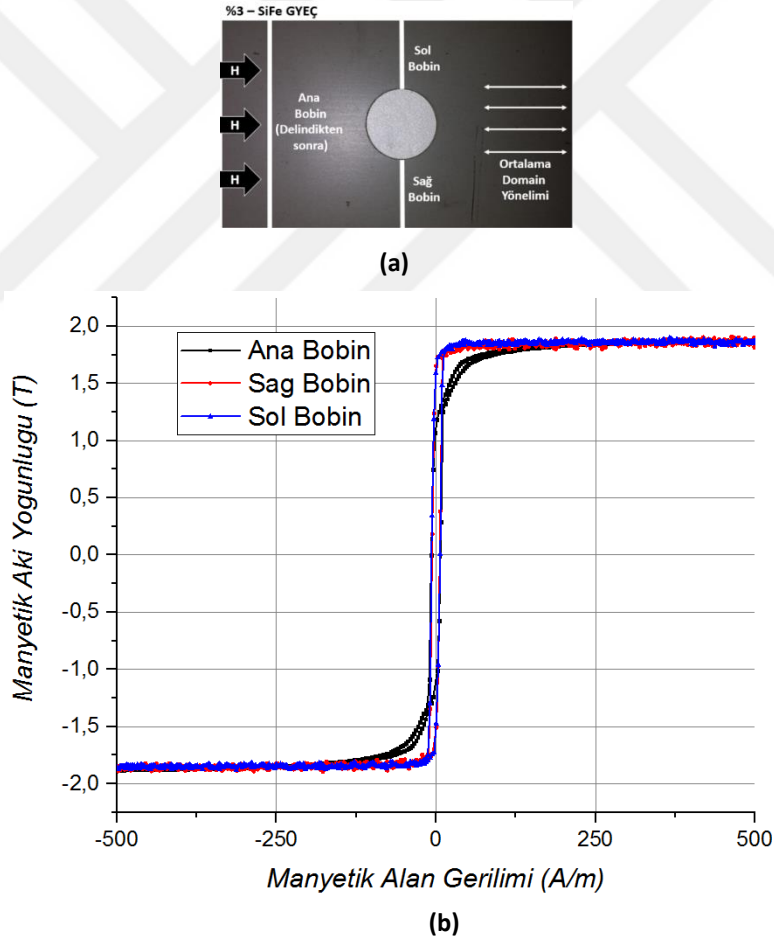
Çalışmalar kapsamında incelenen diğer bir malzeme türü olan çalışma eksenine paralel domain dizilimine sahip GYEÇ, makro ve mikro manyetik ölçüm değişkenleriyle araştırılmıştır. Bir transformatör çekirdeğinin levhalarına manyetik alan etki ettiği sürece, indüklenen akının, domain yapısında oluşturduğu değişiklikler, deliğin tüm yörüngesi boyunca incelenmiş ve elde edilen domain görüntüleri akının akış şematığının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Her iki yapı için de manyetik özellikler ve Kerr gözlemleri bir arada verilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

4.1. Örnek – 1 ($(110)[100]$ Yönelime Sahip %3 – SiFe GYEÇ) Deneysel Sonuçları

4.1.1. Manyetik özelliklerin karakterizasyonu ve yorumlanması

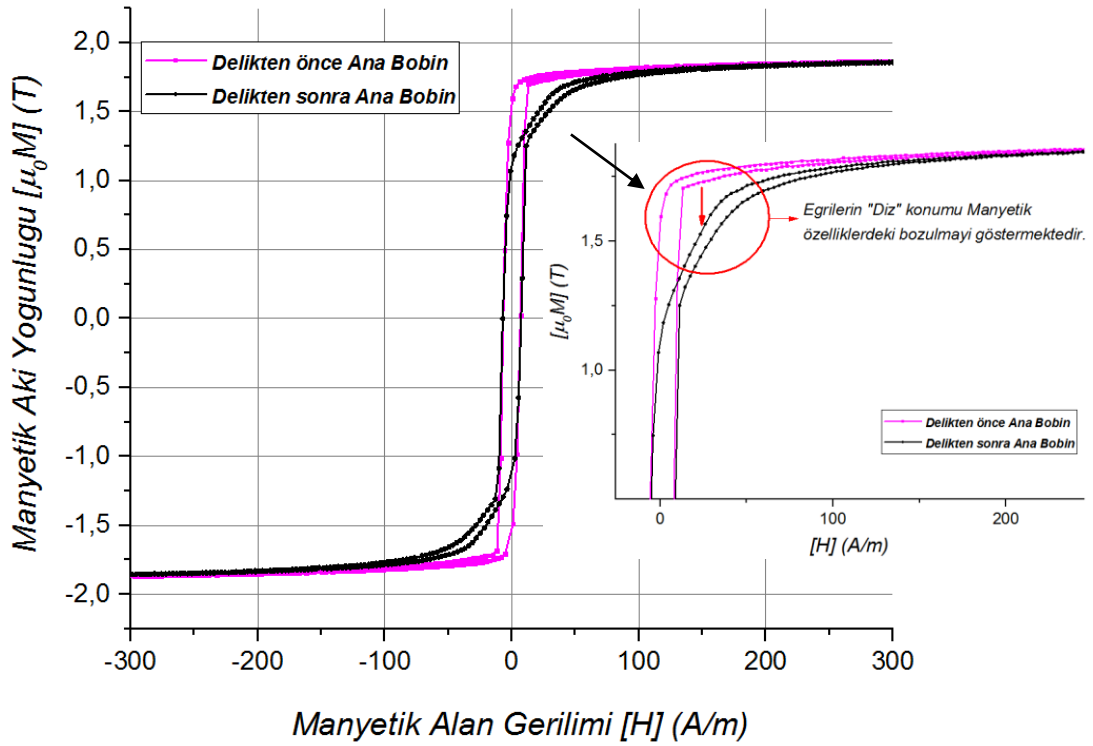
İlk deneysel çalışmalarda, yerel ve genel akı yoğunluğunun dağılımı, belirli noktalarda incelenmiştir. Şekil 4.1 a’da verilen malzemenin şematik gösterimi, histeresis eğrilerinin hangi konumlardan elde edildiğini anlatmaktadır. Sarılan bobinler vasıtasıyla ölçülen her bir histeresis grafiği ise (b)’de verilmiştir. Çalışma eksenine yani dış manyetik alanın uygulandığı doğrultuya paralel domain dizilimine sahip elektrik çeliğinde, beklendiği gibi hızlı bir doyum mıknatıslanması elde edilmiştir. Malzemenin domain dizilimi (kolay ekseni), haddeleme doğrultusundadır ve aynı zamanda bu doğrultu çalışma doğrultusu olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, çalışmanın temel amaçlarından olan deliğin

manyetik özellikleri bozucu etkisi de elde edilen mıknatıslanma grafiklerinden (Şekil 4.1 – 4.4) ispatlanmıştır. Öncelikle Şekil 4.1, delinen standart çeliğin genel mıknatıslanma karakteristiğinde ciddi bir bozulma olduğunu gösterir. Şekil 4.2’de delinme öncesi ve sonrası ana bobinlerin sağladığı akı yoğunluğu, manyetik alanın bir fonksiyonu olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1 ile aynı koşullarda alınan ölçümler, aynı sarım sayısına sahip Ana Bobinlerden elde edilmiştir. Yakınlaştırılmış gösterim eğrilerin ortalama diz konularındaki farklılığı ortaya koymak için verilmiştir. Öyle ki, histeresis eğrisinin ortalama diz bölgesinde, buna bağlı olarak kalıcı mıknatıslanma seviyesinde (B_r) düşüş gözlemlenmiştir. Hiç bir işlem görmemiş (delinmemiş), aynı özellik ve koşullarda ölçülen elektrik çeliği ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.2), bu durum kendini net bir biçimde belli eder.



Şekil 4.1. Delinen malzemedeki, bobin konumları (a) ve ilgili bobinlerden 0,1 Hz gibi düşük bir frekansta algılanan histeresis eğrilerinin karşılaştırılması (b).

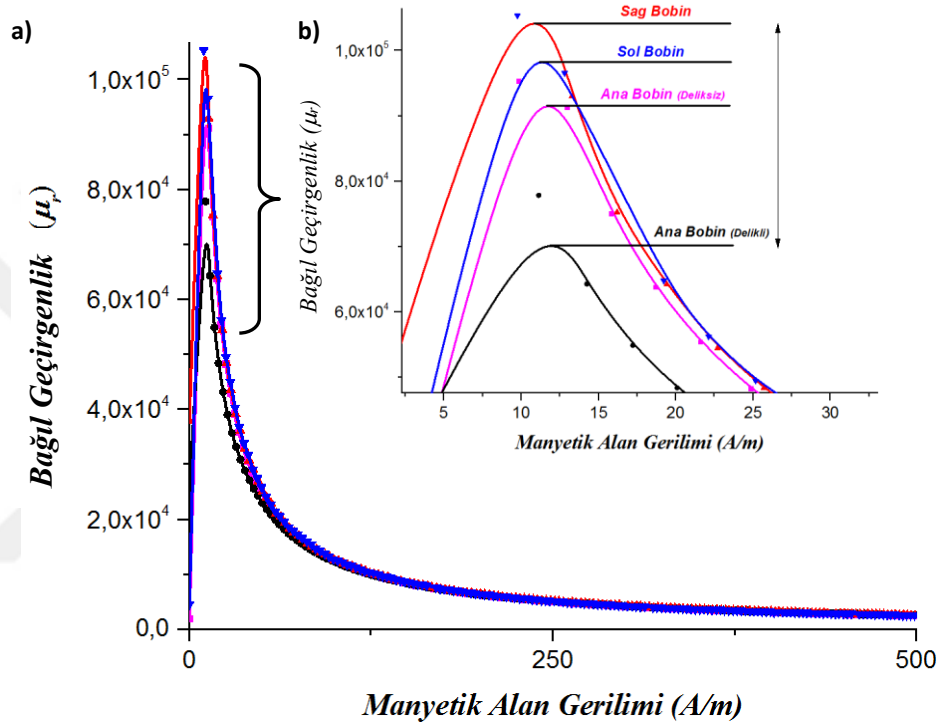
Bu veriler ışığında, daha kesin yerel veriler elde etmek için Şekil 4.3 a’da, bağlı manyetik geçirgenlik sonuçları her bir bobin için ayrı ayrı elde edilmiş ve yakınlaştırılmış gösterimi ile (b), en büyük geçirgenlik değerlerinin nasıl farklılaştığı ortaya konmuştur. Söz konusu şekilde, böyle zirve değerlerindeki farklılıklar gösterilmiş ve manyetik direncin, histeresis eğrisinin şekline nasıl etki ettiği kanıtlanmıştır. Öte yandan, deliğin sağ ve sol tarafında konumlandırılan algılayıcı bobinlerde ise, bu durumun tam aksine, çok hızlı bir doyum indüksiyonu elde edilmiştir. Bunun iki açıklaması olabilir ki, bu iki koşul da birbiriyle bağıntılıdır.



Şekil 4.2. Delik öncesi ve sonrası histeresis eğrilerinin karşılaştırması.

Temel manyetizma denklemlerinden de hatırlanacağı gibi (2.4), manyetik direnç ya da relüktans, doğrudan örneğin kesit alanıyla ilişkili bir manyetik özelliktir. Bu bağlamda, bobinleri sardığımız bölgeler, ana bobinin kesit alanıyla karşılaştırıldığında, üçte biri oranda bir azalma gözlemlenir. Manyetik direnç ($R = l / \mu_r A$), kesit alanı (A) ile ters orantılı olduğundan, deliğin sağ ve sol kenarlarında yükselmesi oldukça doğaldır. Ayrıca, l , tüm devre için bir sabit kabul edildiği ve A ise nicel olarak bilindiğinden, bağlı geçirgenlik, manyetik direnci tanımlamak için oldukça ideal bir manyetik özellik haline gelir. Zira Şekil 4.3’te her bir bobin için elde edilen en büyük geçirgenlik değerleri bir bir

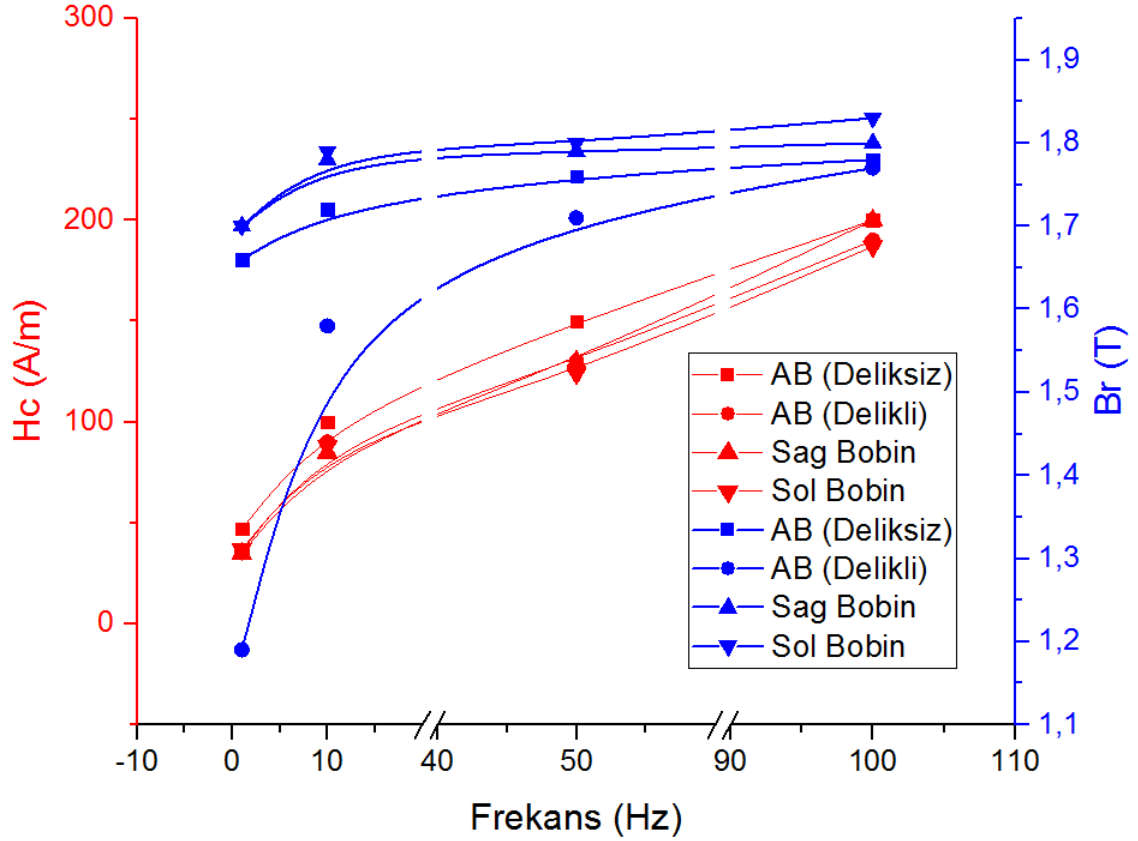
gösterilmiştir. Malzemede bir sabit olmayan bağıl geçirgenlik, yarı-kararlı histeresis eğrisinden, $\mu_r = B/\mu_0 H$ bağıntısı esas alınarak üretilmiştir. Manyetik alan ile mıknatıslanma doyumuna ulaşana kadar bu değer sürekli değişkenlik gösterdiğinden, en büyük pikleri kaynak noktası olarak belirlenmiştir. Buna göre, normal koşullarda zaten çok yüksek bir geçirgenliğe sahip olan GYEÇ, delik civarında manyetik dirençten gelen katkıyla oldukça yüksek bir bağıl geçirgenlik piki göstermiştir.



Şekil 4.3. Tüm bobinlerden elde edilen manyetik bağıl geçirgenlik değerlerinin karşılaştırması (a). $\mu = B/\mu_0 H$ bağıntısı esas alınarak elde edilen en büyük geçirgenlik değerleri, yakınlaştırılmış gösterimde ayrı ayrı verilmiştir (b).

Şekil 4.3'te sağlanan bilgi temel manyetizma ilkelerinin yanı sıra, malzemenin özel koşulları ve manyetik özelliklerindeki bozulmaları, konumsal ve yapısal olarak açıklamak için oldukça değerlidir. Öyle ki, Şekil 4.1'de ayırt edilemeyecek kadar üst üste olmuş sağ ve sol bobinlerden elde edilen histeresis dalları, geçirgenlik grafiğinde % 10 -13 civarında birbirinden farklı sonuçlar vermektedir. Muhtemelen buna sebep olan unsur, kesme sırasında mükemmel bir oranlama yapılamaması ve bir tarafın diğer taraftan biraz daha fazla bir kesit alanına sahip olmasıdır. Bununla beraber, delik kenarlarındaki yerel geçirgenlik değeri ile kesme sonrası ana bobinden elde edilen genel değerler karşılaştırıldığında, akının delik civarında birim zamandaki akı hızının % 50 oranında

arttığı tespit edilmiştir. Aslında bu durum, akının üç birimlik yolda giderken bir anda bir birimlik yoldan gitmesi sağlandığında oluşacak hızlanma olarak önceden tahmin edilir olsa da, bu sonuç sayısal olarak bölgedeki akı hareketliliğinin tespiti olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 4.4. Frekansın bir fonksiyonu olarak, malzemedeki sıfırlayıcı alan (H_c) ve kalıcı mıknatıslanma (B_r) gibi manyetik özelliklerin, delik öncesi ve sonrası Ana bobin (AB) ile sağ ve sol bobinlerden elde edilen histeresis eğrilerinden türetilerek karşılaştırılması.

Ayrıca, delme öncesinde ana bobinden elde edilen geçirgenlik pikinin sonrasına göre % 18 civarında fazla olduğu da yine kaynak noktalarından tespit edilmiştir. Bu durum ise yukarıda da bahsedilen iki koşuldan ikincisiyle açıklanabilir. Bu koşul, delik içerisindeki hava boşluğundan kaynaklanan “Zıt mıknatıslama alanı”dır. Şekil 4.1 a’da verilen taslak çizimden de anlaşılacağı gibi manyetik alan deliğin kenarlarına ulaştığı zaman, deliğin kesme kenarlarında bir karşıt mıknatıslanma olacaktır. Çünkü bu alan, manyetik olan ve olmayan iki ortamın karşılaştığı bölgedir. Tahmin edileceği gibi hemen zıt kutuplar, her iki ortamda da oluşacaktır.

Zıt mıknatıslama sonucu oluşan bu kutuplanma, delik etrafında bir kalkan gibi ters mıknatıslanma alanı oluşturacak ve söz konusu alan zıt mıknatıslama kuvvetleriyle dengede tutulmaya çalışacaktır. Doğal olarak bu işlemler oluşurken, akı da kendine daha kolay bir geçiş kapısı arayacaktır. Bu durum, manyetik özelliklerin bozulmasına ve bölgede, deyim yerindeyse, bir manyetik karışıklığa sebep olur. Nitekim Şekil 4.4'te verilen frekansa bağlı artık mıknatıslanma değerlerindeki dalgalanmalar da, bu tepkiye bağlı olabilir.

Çizelge 4.1. Manyetik özelliklerin, malzemenin belirli yerlerindeki bobinler vasıtasıyla elde edilen sayısal değerleri

Manyetik Karakteristik	Frekans [Hz]	Ana Bobin (Delikten önce)	Ana Bobin (Delikten sonra)	Sağ bobin	Sol bobin
H_c [A/m]	0,1	6,71	7,22	6,14	6,7
	1	37	43,3	34,6	37
B_r [A/m]	0,1	1,55	1,1	1,59	1,59
	1	1,66	1,19	1,7	1,73
Başlangıç Geçirgenliği	0,1	2020	2020	3817	4572
En Büyük Geçirgenlik	0,1	96 x 10 ³	79 x 10 ³	120 x 10 ³	107 x 10 ³

0,1 Hz ile 100 Hz arasında değişen frekans değerlerinde, sıfırlayıcı alan (H_c) ve kalıcı mıknatıslanma (B_r) değerleri, Şekil 4.4'te karşılaştırılmıştır. Frekansın bir fonksiyonu olarak, malzemenin konumuna göre yerel ve genel manyetik özellikler, söz konusu grafikte birlikte verilmiştir. Ayrıca, oldukça düşük frekanslarda da (0,1 ve 1 Hz) elde edilen bu manyetik özellikler, Çizelge 4.1'de sayısal olarak, ayrıntılarıyla gösterilmektedir. Çizelgede verilen değerler, manyetik özelliklerin sayısal olarak delikli ve deliksiz örneklerdeki sonuçlarını göstermektedir.

Zıt mıknatıslamayı malzemenin boyunca uygulanan manyetik alan doğrultusunda düşünürsek, bu durumda da deliğin ön tarafında çok daha büyük bir etki oluşacak ve bu etki manyetik mikro yapıları da geri döndürülemez şekilde etkileyecektir. Bu doğrultuda, nispeten yüksek frekanslarda bir alan uygulandığında, akı kapılarının normalize olması beklenir. Bu durum şekil 4.4'te, delikli örneğin ana bobininden ölçülen B_r eğrisiyle

kanıtlanmıştır. Görüldüğü gibi, 50 Hz frekans uygulamasına kadar oldukça düşük değerlerde seyreden B_r eğrisi, 50 Hz ve üstü uygulamalarda kademeli olarak delinme öncesi seviyelere yaklaşır. Ancak 100 Hz'e yaklaşırken sağ ve sol bobinlerde gözlemlenen dalgalanmalar, bu yorumun dışında tutulmalıdır. Çünkü bölgenin yüzey alanından dolayı yüksek frekanslarda, anormal hareketlilikler (gürültü ve zıt mıknatıslama alan yoğunluğundaki artış gibi) göstermesi normaldir.

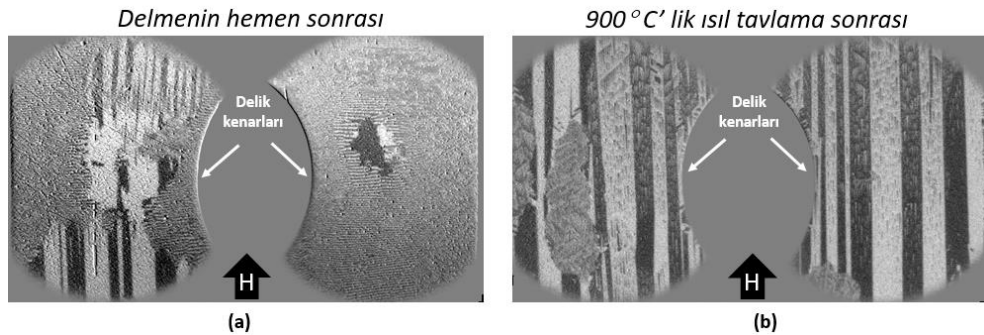
Sıfırlayıcı alan değerleri doğrusala yakın bir artış ivmesi göstermektedir. Oysa ki, bu değerlerin, malzemenin domain yapısındaki bozulmalar konusunda, daha özel bilgiler içermesi beklenirdi. Öyle ki, kalıcı mıknatıslanma da, geçirgenlik piklerine yakın sonuçlar elde edilmesine karşın, H_c değerlerinde, herhangi bir ayırt edici ipucu elde edilememiştir. Bu bağlamda, manyetik mikro yapıların incelenmesi ve 0,1 Hz'te elde edilen eğrilerin özellikle delik kenarlarında gözlemlenmesi gerekmektedir. Mümkün olan en düşük frekansın kullanılmasındaki amaç, DC- alan uygulanarak gözlemlenen domain yapılarının, histeresis eğrilerine en uygun şekilde elde edilmek istenmesindedir.

4.1.2. Manyetik mikro yapıların karakterizasyonu ve yorumlanması

Manyetik domain yapısı, bir önceki bölümde ayrıntılarıyla anlatıldığı gibi Kerr mikroskobunun düşük çözünürlüklü genel görünüm modülü (Şekil 3.7 c) ve yüksek çözünürlüklü Kerr modülünün (Şekil 3.7 d) kullanılmasıyla incelenmiştir. Öncelikle malzemenin gözlem aşamaları, manyetik özellik analizlerinden elde edilen veriler ışığında yeniden tasarlanmıştır. Bunun yanı sıra, bölüm 3.1.2 ve 3.1.3'te verilen kesme ve tavlama işlemleri sonrasında, domain yapılarının görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Her ne kadar delik açma işlemi, malzemede oluşacak gerilimleri en düşük seviyede tutacak bir yöntem olan EDM (bölüm 3.1.2.1) ile yapılmış olsa da, bu kadar büyük bir deliğin açılması ve malzeme temizliği aşamalarının (bölüm 3.1.4) uygulanması delik civarında nispeten büyük gerilimlerin oluşmasına sebep olmuştur. Kerr metoduyla malzeme üzerinde gözlem yapabilmek için mikro yapıların iç ve yüzey gerilimlerinden arındırılmış bir ortama gereksinim duyulduğundan, malzeme uygun şartlarda bir ısıl işleme tabi tutulmuştur. Domain yapısının dış etmenlerden dolayı bozulmuş hali böylelikle yeniden kristallenme doğasına sahip olmuş ve net olarak gözlemlenmiştir. Şekil 4.5'te ki tavlama öncesi ve sonrası düşük çözünürlüklü Kerr görüntüleri, gerilim etkisiyle bozulan yapının boyutlarını ortaya koyar. Delme ve temizlik işlemleri sonrası

yüzeyde oluşan gerilme desenleri, domain dizilimine 90° uzanmakta iken (a), 900°C ' lik tavlama sıcaklığına 1 saat süresince maruz kalan örneğin yüzeyinde gerilimden eser kalmamıştır (b). Deliğin özellikle sol kısmındaki bölgesel farklılıklar (b), küçük açı değerlerinde yönelim dışı sapma yapan tamamlayıcı domainlerden ve dolayısıyla, kristal yapısından kaynaklanır. Görüntüler düşük çözünürlükte alındığından, böyle mikro yapıların mahiyeti tam olarak ayırt edilemeyebilir.

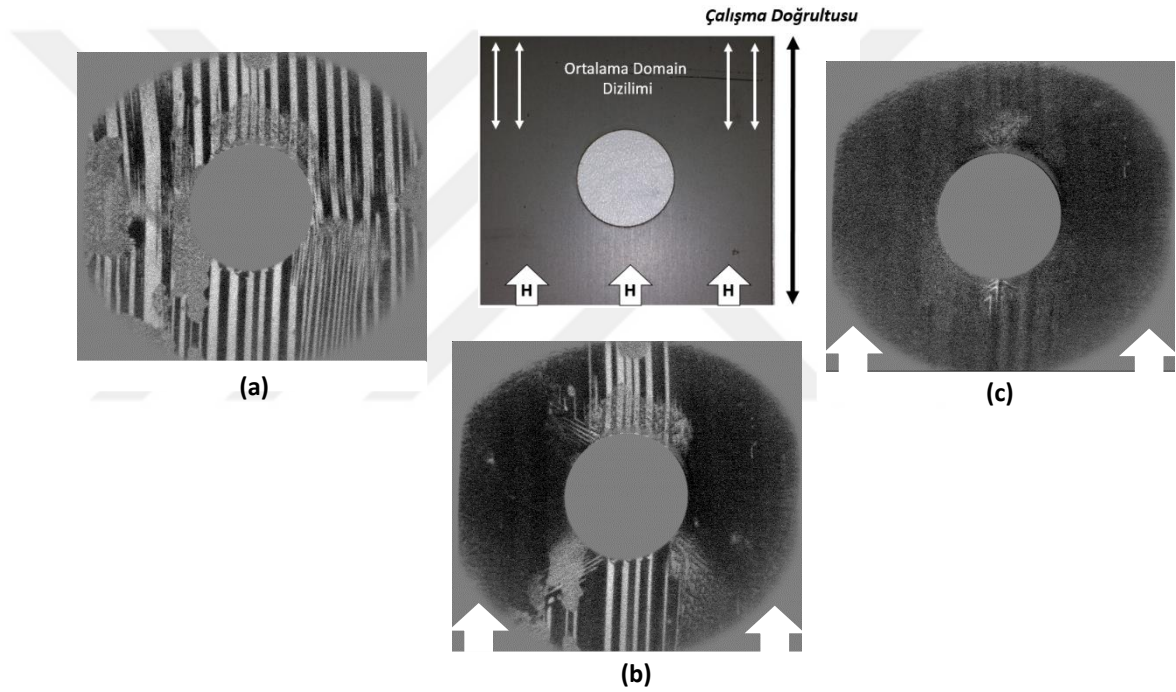
Öte yandan, şu çok iyi anlaşılmıştır ki, deliğin her iki yanında, önünde ve arkasında, manyetik doyum birbirinden bağımsız alan gerilimlerinde oluşmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 4.6'da, deliğin küresel görünümü, sıfırlayıcı mıknatıslanma sonrasında ve yüksek alan uygulamaları altında olmak üzere 3 ayrı düşük çözünürlüklü Kerr fotoğrafıyla verilmiştir. Kerr mikroskobunun genel görünüm modülünden, tüm delik etrafındaki küresel domain dizilimi aynı anda, 0 A/m 'de (a), en kararlı haliyle gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, söz konusu şekilde, 5 kA/m (b) ve 15 kA/m (c) alan gerilimlerindeki Kerr görüntüleri ise, delik etrafında homojen olmayan doyum mıknatıslanmasının var olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum, yerleşmiş manyetik akı dağılımının bozulduğuna işaret eder (Gunes ve ark. 2015). Aslında, delik kenarlarında, çok hızlı bir doyumun oluştuğu, manyetik özelliklerin analizi kısmında tespit edilen relaktanstan dolayı bilinmekteydi. Ancak, manyetik alanın uygulanma doğrultusuna göre, delik öncesinde ve sonrasındaki bu kararsız yapı, ana bobinden (delikli) elde edilen histeresis eğrisindeki ivmenin (bkz. Şekil 4.1 – 4.2) ve geçirgenlik ile diğer manyetik özelliklerdeki bozulmanın (bkz. Şekil 4.3 – 4.4) nedenini açıklar.



Şekil 4.5. Tavlamanın yüzey gerilimlerine etkisi.

Deliğin her iki yanında oluşan domain dizilimi ve dış alan uygulamasıyla meydana gelen duvar hareketleri, yarı-kararlı histeresis eğrileriyle karşılaştırılmış ve Şekil 4.7'de, dinamik bir gözlem seti oluşturulmuştur. Yarı-kararlı histeresis eğrilerinden elde edilen

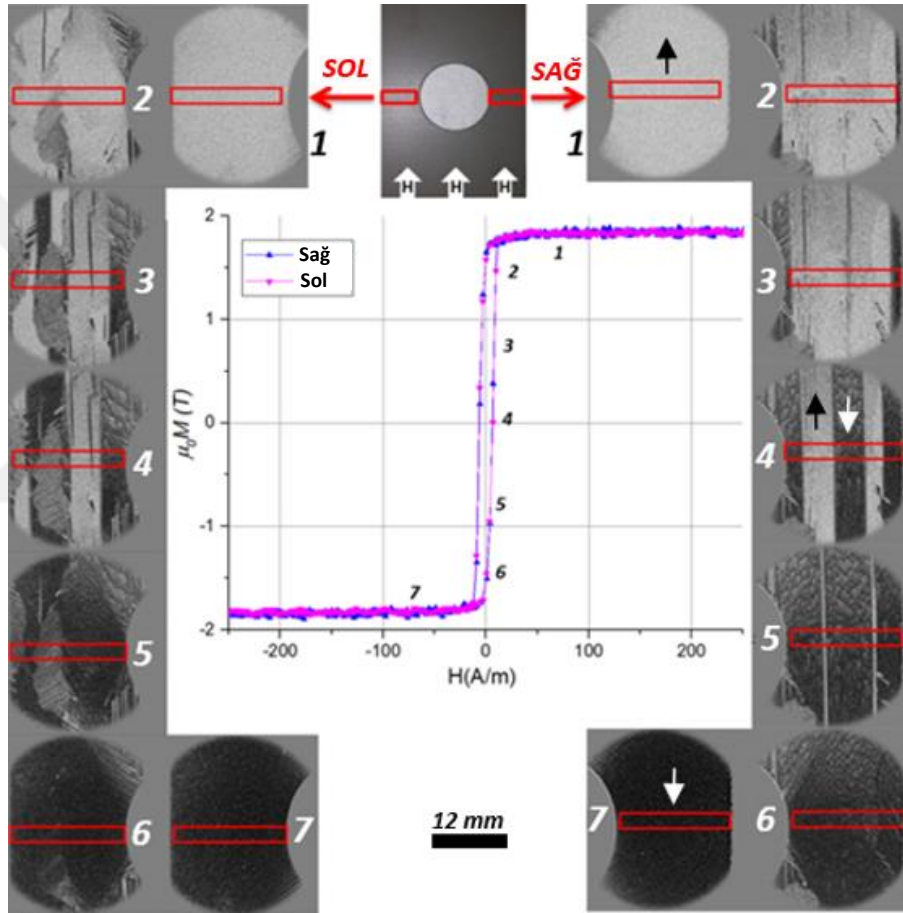
yüksek geçirgenlik değerleri, Şekil 4.7’de ki sağ ve sol bölgelerde gözlemlenen domain hareketlilikleriyle doğrulanmıştır. Şekilde numaralandırılmış Kerr fotoğrafları, uygulanan alanın bir fonksiyon olan akı yoğunluğunun eğrisinde ilgili bölgelere iliştilmiştir. Böylece geri döndürülemez domain duvar hareketi çok az bir zaman diliminde ve oldukça düşük bir frekansta (0,1 Hz) gözlemlenmiş olur. Bu yapının ± 30 A/m aralığında, genliğinin artırılmasıyla yani frekansın yükseltilmesiyle kararlı domain ve domain duvarları elde edilir. Nitekim Şekil 4.4’te ana bobin için elde edilen B_r değerleri bu kanıyı doğrulamaktadır. Netice itibariyle, makro- ve mikro manyetizma arasındaki bağlantı, tıpkı domainlerin genel tanımında olduğu gibi sağlanmıştır.



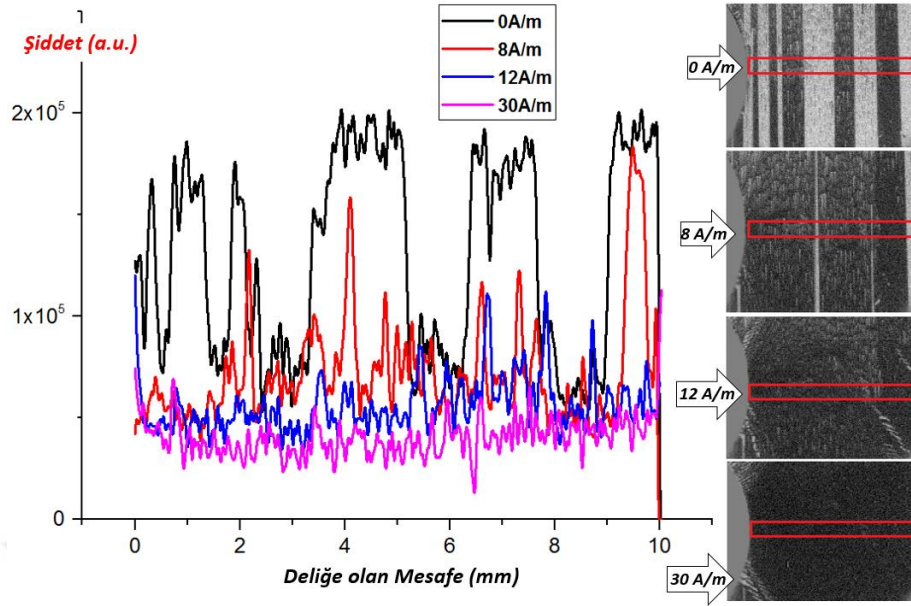
Şekil 4.6. Kademeli olarak yüksek alana maruz kalan delik civarı mikro yapıların düzgün olmayan doyum mıknatıslanması, 0 (a), 5 kA/m (b) ve 15 kA/m (c) alan geriliminde alınan yarı-kararlı Kerr görüntüleriyle verilmiştir.

Şekil 4.8 ve 4.9’da, hem git gide yükselen çözünürlük değerleri kullanılmış hem de, buna paralel olarak, söz konusu bölgelerde gözlemlenen çivi-benzeri TD tartışılmıştır. Domain duvar hareketinin, görüntü kontrastında oluşturduğu dalgalanmalar, Şekil 4.8’de konumun bir fonksiyonu olarak verilen şiddet grafiğinde gösterilmiştir. Burada, seçili alan (kırmızı dikdörtgen) içindeki duvar hareketiyle domain kalınlıklarının, uygulanan dış alana bağlı olarak azalması incelenmiştir. Statik görüntüleri verilen yapıların, dış alanla şiddetlerindeki azalma konumsal olarak ve boyut olarak ayrı ayrı

gözlemlenebilmiştir. Sayısal olarak bölgede gözlemlenen ortalama domain kalınlığı 1,5 milimetre büyüklüğündedir. Elde edilen grafik uygun koşullarda normalize edildikten sonra, kare ya da yarı-kararlı sinüs dalgaları elde edilebilir. Bu da nicel olarak bölgedeki domain kalınlıklarının ve delik çeperine olan mesafelerin tespit edilebilmesine imkân tanır. Ayrıca hatırlatma olarak, söz konusu şekilde gösterilen oklar alan doğrultusunu göstermek için verilmemiştir. Burada manyetik alan, domain dizilimine paralel uygulanmıştır.

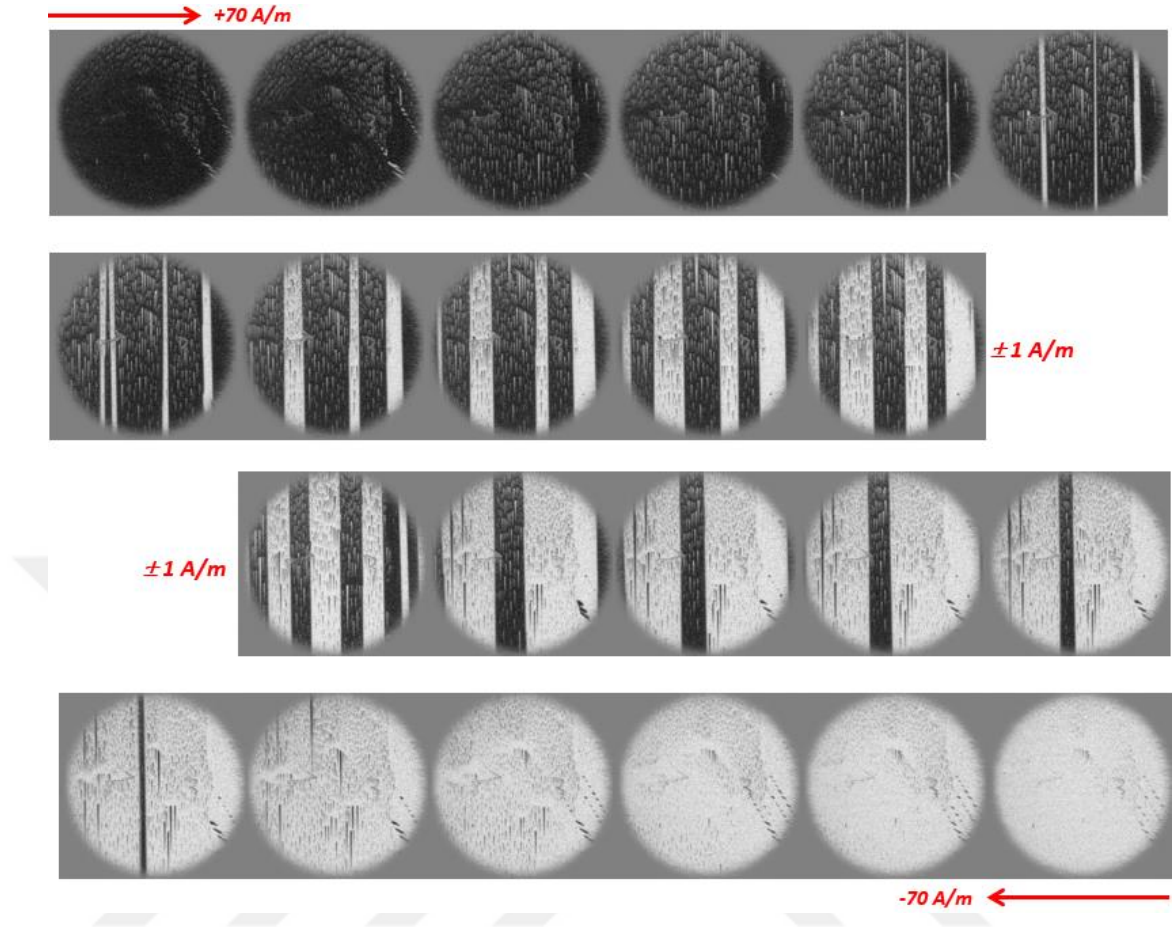


Şekil 4.7. 0,1 Hz frekansta elde edilen yarı-kararlı histeresis eğrisinde numaralarla belirlenmiş alan gerilimlerinde, deliğin sol ve sağında gözlemlenen, Kerr görüntüleriyle domain duvar hareketlerinin tespiti. Kırmızı ile belirlenmiş alanlar, algılayıcı bobinlerin sarıldığı bölgelerdir.



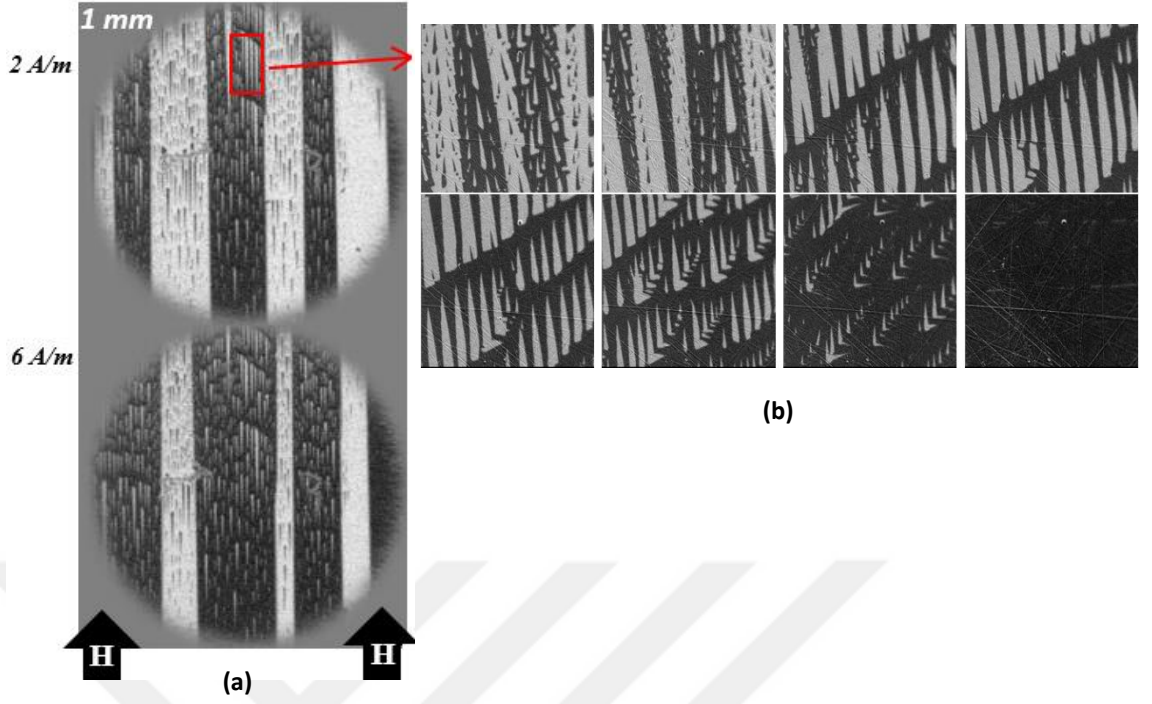
Şekil 4.8. Yarı-kararlı Kerr görüntülerinden, domain kalınlığının şiddet grafiği ile tespit edilmesi.

Şekil 4.9’da, deliğin sağ alanından, iyi yönlendirilmiş ve küçük kristalografik yönelim dışı sapmalar gösteren ($\sim 2^\circ$) (Hubert ve Schäfer 1998) bir grainden alınan görüntüler, çok yüksek bağıl geçirgenliğe sahip alandaki duvar hareketinin ve akabinde TD yoğunluğunun ± 70 A/m aralığında gözlemlenmesine imkan vermiştir. Burada ayrıca, Kerr kontrastının kullanılmasıyla yüzey domainlerin mıknatıslanma doğrultuları da net bir şekilde, uygulanan alan doğrultusuna bağlı olarak tespit edilebilir. Koyu ve açık renkli kontrast değişimleri malzemenin yerel olarak doyum indüksiyonuna sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle geri döndürülemez bir mıknatıslanma oluşmuş ve sıfır alana giderken, mikro yapılar belirli bir artık (kalıcı) mıknatıslanmaya sahip olmuş olur. Böylelikle pozitif ve negatif alan gerilimlerinde, alanlar mutlak değerde eşit olsalar bile aynı domain yapısının gözlemlenmesi beklenemez.



Şekil 4.9. deliğin sağından seçilmiş, iyi yönelime sahip grain içindeki domain diziliminin ± 70 A/m dış alan etkisi altında duvar hareketiyle yarı-kararlı görüntüleri.

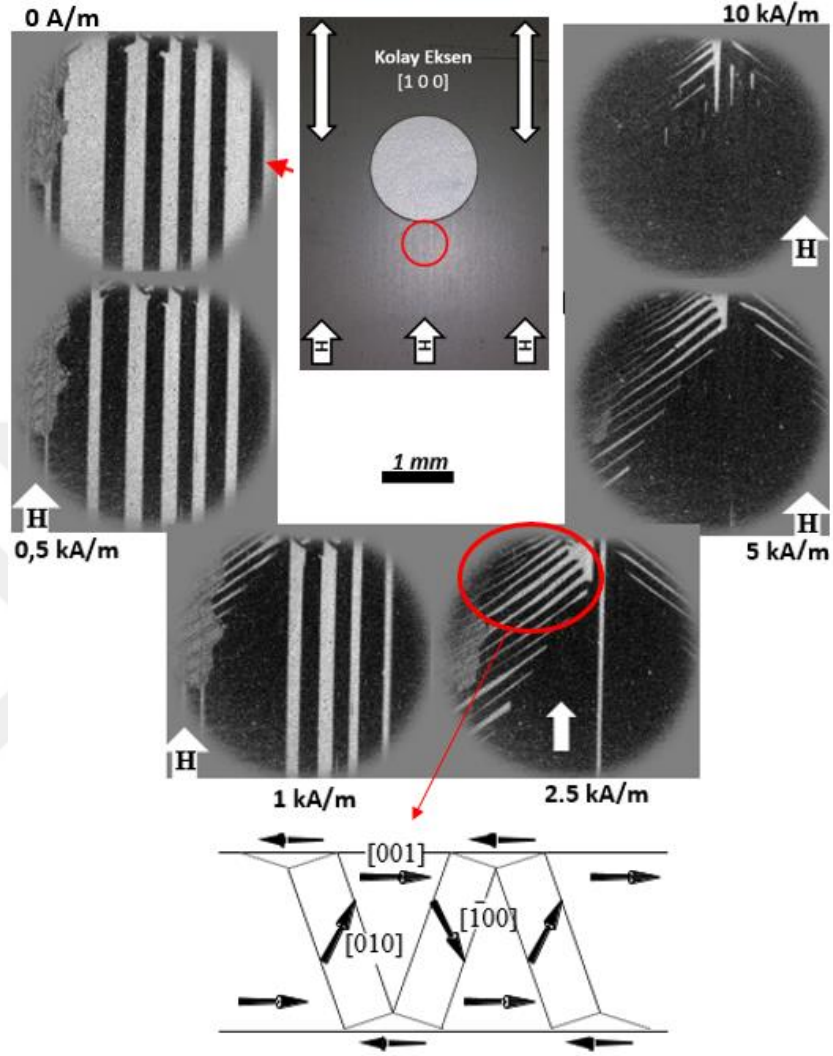
TD, bilindiği gibi bar domainlere tutunabilirler (düşük yönelim dışı sapma açılarında). Mikroskobun genel görünüm modunda düşük çözünürlükte belli belirsiz seçilen bu yapılar (Şekil 4.10 a), yüksek çözünürlüklü modda, Şekil 4.10 b’de ki gibi net bir biçimde gözlemlenirler. Burada aynı zamanda, 2 A/m gibi oldukça düşük bir alanda gözlemlenen çivi benzeri domainlerin, yüksek alan uygulamasında nasıl yoğunluğunu yitirdiği ve evirildiği de gözlemlenmiştir. Mutlak doyum, tamamen koyu kontrasta sahip fotoğrafta, 100 A/m’ de elde edilmiştir. Evrim süresince, çivi-, tarak- ve balıksırtı- benzeri TD (b) gözlemlenmiştir. Kuvvetle muhtemel, burada gözlemlenen TD, delikten kaynaklanan ve alan gerilimiyle şiddetini daha da arttıran zıt mıknatıslamanın, akı yollarını kesmesinden dolayı oluşmuştur. Zira, TD’nin iç domainlerle olan ilişkisi ve onlara olan bağılılığı, süresiz mıknatıslanma oluşması ihtimali ya da tehlikesi durumunda akının, enine yol kat etmesini sağlayan kapılar ya da akı yolları oluşturmasıyla açıklanabilir (Hubert ve Schäfer 1998).



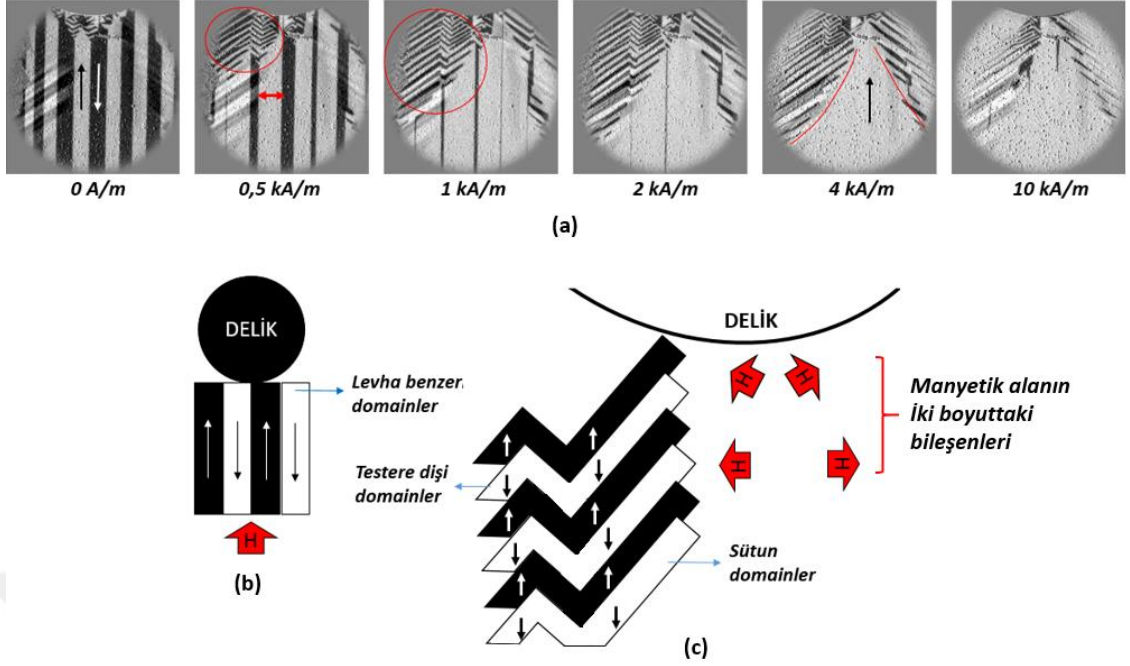
Şekil 4.10. 1 mm' lik alanda gözlemlenen bar domainler (a) içine tutunmuş tamamlayıcı domainlerin, alan etkisiyle dinamik evrilme aşamaları (b).

Şekil 4.6 b ve c'de ki genel görünüm modunda verilen Kerr fotoğraflarından, delik önünde ve arkasındaki yapıların, çok yüksek manyetik alanlarda bile, bölgelerin doyum mıknatıslanmasına sahip olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple, Şekil 4.11'de deliğin önündeki domain yapıları, daha yüksek çözünürlükte incelenmiştir. Çalışma doğrultusunda uzanan domainler alan uygulamasıyla, normal koşullarda, genişleme ve daralma hareketleriyle kararlı bir konuma gelir. Ancak burada, alan geriliminin artmasıyla kademeli olarak delik kenarına doğru sıkışan, büyük boyutta testere dişi benzeri TD oluşmaktadır. Bu durum beklenenin dışında, sıra dışı bir yapı olarak yorumlanabilir. Çünkü testere dişi yapılar, uygulanan dış manyetik alanın, domain dizilimine dik nüfuz ettiği durumlarda gözlemlenir [Hubert 1965, Kaya 1934]. Buradan da anlaşılacağı üzere, manyetik alan, muhtemelen zıt mıknatıslayıcı alan ile karşılaştığında 90° lik bir sapmayla bileşenlerine ayrılıp haddelme doğrultusunda uzanan domainlere etki etmektedir. Ancak nitel ya da nicel olarak zıt alan ya da dış manyetik alanın etki derecesini veya sınırının belirlenmesi bu koşullarda imkânsındır. Bunun yerine, yeniden organize olan yapının mikro manyetik doğası, Şekil 4.11'in sonunda verilen model çiziminin yardımıyla incelenebilir. Böylelikle, oluşan yarı-kararlı

domain yapısı, akının delik kenarından saptırılarak, komşu grainlere ya da arka yüzeye geçirilmesini iç domainler ile sağlamaktadır.



Şekil 4.11. Deliğin önünde elde edilen domain motiflerinden, iç dinamiklerdeki mıknatıslanma ve manyetik akı dağılım doğrultusu, uygulanan dış manyetik alana ve kaynak modele göre (Hubert ve Schäfer 1998) tahmin edilmiştir.



Şekil 4.12. Deliğin önünde bulunan bar domainlerin, manyetik alan bileşenlerinin etkisi altında kademeli olarak evrilmesi (a). Sıfır alan etkisinde ilgili bölgedeki domain dizilimiyle (b), enine alan etkisi altında oluşan düzensiz testere dişi motiflerinin (c), mıknatıslanma doğrultularıyla şematik olarak gösterimi.

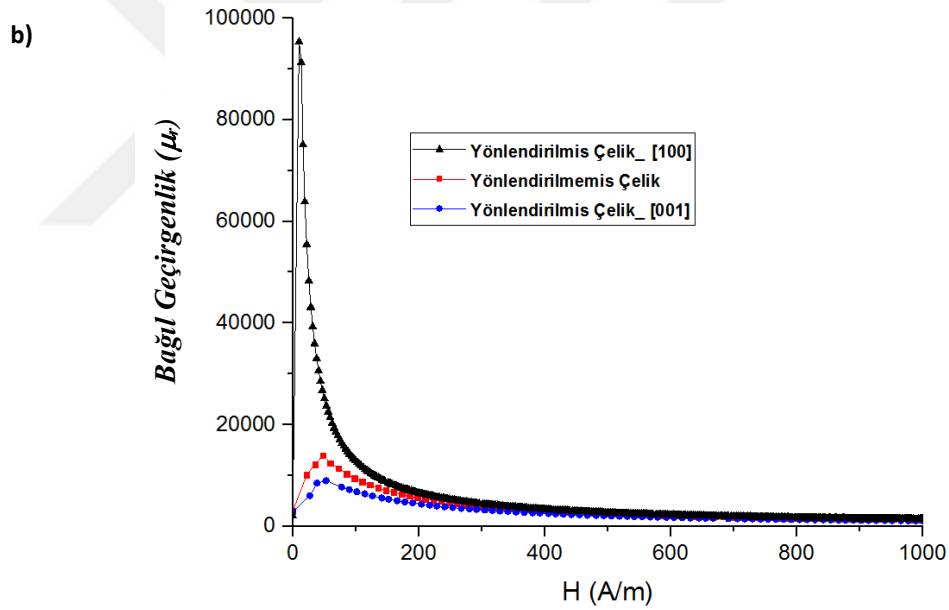
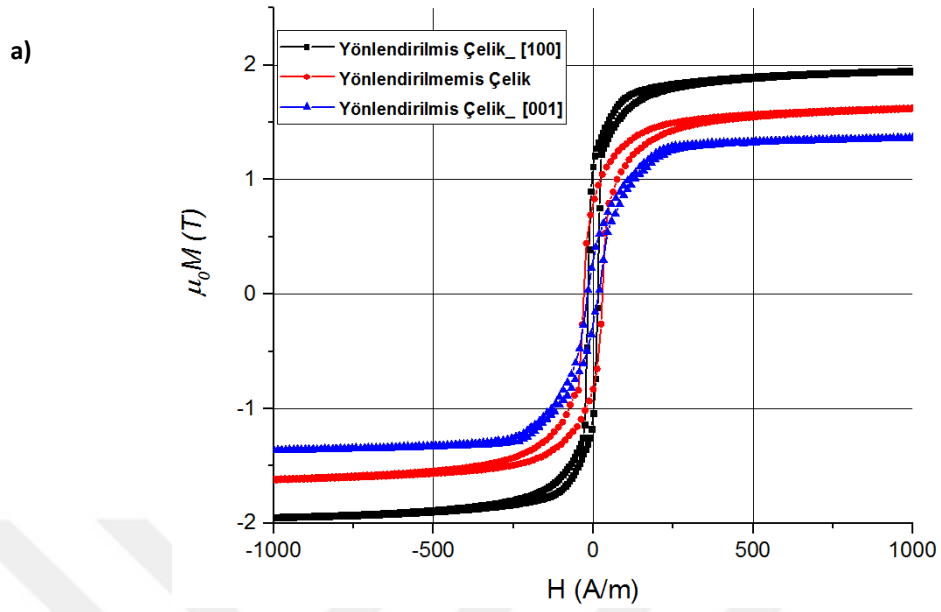
Şekil 4.12’de söz konusu durum gerek Kerr görüntüleriyle (a) gerekse sıfır alandaki (b) ve belirli bir alan etkisi altındaki (c) taslak çizimleriyle açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu bölgede oluşan yapılara bağlı kalınarak malzemede indüklenen akının doğrultuları, zıt mıknatıslayıcı alan etkisi ve dış alanın $\pm 90^\circ$ yörüngesinde ekseninden saptırılmasıyla bölgesel olarak bozulmuştur. Bu durum, domainlerin yeniden dizilimine sebep olmuş ve ekstra bir güç kaynağı oluşturmuştur. Kaldı ki, domainlerin yeniden organize olup dizilmesi, manyetik mikro yapı analizlerinde istenmeyen bir durum olarak bilinmektedir. Bu durumun esas sebebi olarak da hava boşluğu, gerilim ve çekirdek köşeleri gibi herhangi bir dış güç ile akının normal koşullardan saptırılması olarak gösterilir (Hubert ve Schäfer 1998). Nitekim Şekil 4.11 – 4.12’de üzerinde çalıştığımız bölgenin hemen sağ ve solunda (Şekil 4.7 – 4.10), doyum indüksiyonu 30 A/m – 70 A/m alan gerilimi civarında elde edilirken, burada 15 kA/m’ lik gerilimlerde bile küresel, üniform bir doyum gözlenememiştir. Hem histeresis eğrisindeki ciddi sapmalar (delik sonrası Ana Bobin için) hem de delik önü ve arkasında gözlemlenen, yeniden domain dizilimleri, böyle GYEÇ’de ne denli bir manyetik bozulmanın olduğunu ortaya koymaktadır.

4.2. Örnek – 2 ((1 1 0)[0 0 1] Yönelime Sahip %3 – SiFe GYEÇ) Deneysel Sonuçları

4.2.1. Manyetik özelliklerin karakterizasyonu ve yorumlanması

Standart Epstein boyutlarında, haddelenme doğrultusuna dik kesilen, bu model materyalin seçilmesindeki amaçlardan biri malzemedeki manyetik momentlerin diziliminin, graini yönlendirilmemiş elektrik çeliklerine oldukça benzer olmasındandır. Bilindiği gibi, yönlendirilmemiş çeliğin karmaşık domain yapısından dolayı, geniş alanlar için düşük çözünürlüklü genel perspektif Kerr gözlemlerinin yapılması çok zordur. Bundan dolayı, elde edilen manyetik özelliklerin böyle malzemeler için yorumlanması da güçleşir. Bu koşullardan dolayı, öncelikle manyetik özellikleri açısından, yönlendirilmemiş ile [1 0 0] ve [0 0 1] eksenlerinde yönelime sahip yönlendirilmiş elektrik çelikleri, yarı-kararlı histeresis eğrileriyle Şekil 4.13 a'da karşılaştırılmıştır. Bununla beraber, her bir malzeme türünün geçirgenliği, elde edilen histeresis eğrilerinin verileri üzerinden hesap edilmiş ve Şekil 4.13 b'de verilmiştir.

Şekil 4.13'te elde edilen eğriler, araştırma konusunun ikinci kısmına bir giriş niteliğindedir. Öyle ki, normal koşullarda, bir transformator çekirdeğinde ya da aynı sınıftan bir elektrik makinesinde, bu kadar büyük bir anizotropiye sahip bir elektrik çeliği kullanılamaz. Ancak, bölgesel olarak, akının yön değiştirmesi gerektiği ve çalışma eksenine göre anizotropinin arttığı durumlar da olabilir. Makinenin kullanım alanına ve tasarımına bağlı olarak böyle sapmaların oluşması da, Şekil 4.13 a'da kırmızı ve mavi ile gösterilen histeresis eğrilerinin arasındaki fark kadar bir boşluk oluşmasına sebep olabilir. Şekil 2.9'da verilen örnekle açıklandığı gibi bu boşluk, anizotropi enerjisinin bir kaynağıdır. Öte yandan, Şekil 4.13 a'da karşılaştırmaya dâhil edilen bir diğer değişken de siyah eğri ile verilen yönlendirilmemiş elektrik çeliğinin akı dağılım grafiğidir. Görüldüğü gibi, dik kolay eksene sahip elektrik çeliğinden daha iyi özelliklere sahiptir. Fakat aynı zamanda birbirine yakın manyetik özellikler gösterdiği de söylenebilir. Çünkü, yönlendirilmişteki tüm domainler, çalışma eksenine ortalama 90° de bulunurken, yönlendirilmemişteki domain dağılımı rastgeledir ve bazen bölgesel olarak, çalışma eksenine paralel dizilime de sahip olabilirler. Tüm veriler delik sonrası Ana Bobinden elde edilmiştir. (a)' da gösterilen B(H) ve (b)' de verilen $\mu(H)$ grafikleri her bir malzemenin delik sonrasındaki manyetik karakteristiklerinin karşılaştırılmasına imkan vermiştir.



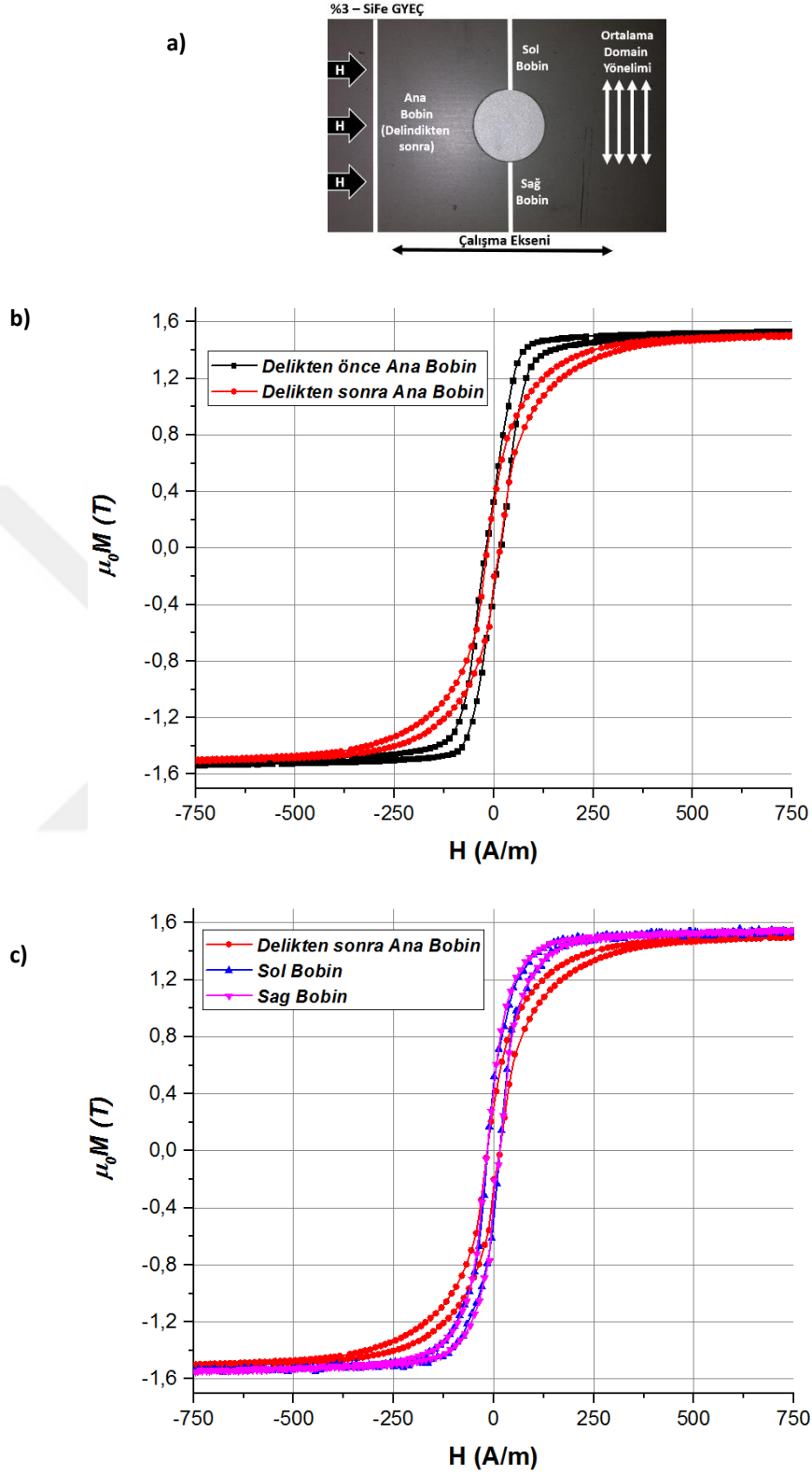
Şekil 4.13. [1 0 0] ve [0 0 1] kristal eksenlerini doğrultusundaki GYEÇ ile yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin genel akı yoğunluğu dağılımındaki (a) ve buna bağlı olarak bağıl geçirgenliklerindeki (b) karşılaştırmalar.

Gözlemlenen tüm ideal grain yönelimine sahip elektrik çelikleri arasında, (1 1 0)[0 0 1] kristal yönelimine sahip GYEÇ, yönlendirilmemiş çeliğe en uygun seçenek olarak göze çarpmaktadır. Bu durum, Şekil 4.13 a'daki alana bağımlı bağıl geçirgenlik grafiklerinde net bir biçimde doğrulanmıştır. Öyle ki, çalışma ekseninde ideal yönelime sahip elektrik çeliğinde bağıl geçirgenlik yaklaşık olarak 95×10^3 ölçülmesine rağmen,

yönlendirilmemiş ve dik yönelimdeki elektrik çeliklerinde bu değer sırasıyla, 14×10^3 ve 9×10^3 olarak elde edilmiştir. Oysa B(H) eğrisinden gözlemlenen kalıcı mıknatıslanma B_r değerleri, ideal yönelimdeki, yönlendirilmemiş ve dik yönelimli elektrik çelikleri için sırasıyla, 1,12 T, 0,78 T ve 0,29 T'dır. Bu koşullarda, bu değerler üzerinden aynı karşılaştırmayı yapmak mantıksızdır. Sıfırlayıcı alan H_c ise daha çok kompozisyon üzerinden değerlendirme yaptığından, yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde 14 – 16 A/m bandında değişmekte iken yönlendirilmemiş çelikte 28 A/m olarak ölçülmüştür.

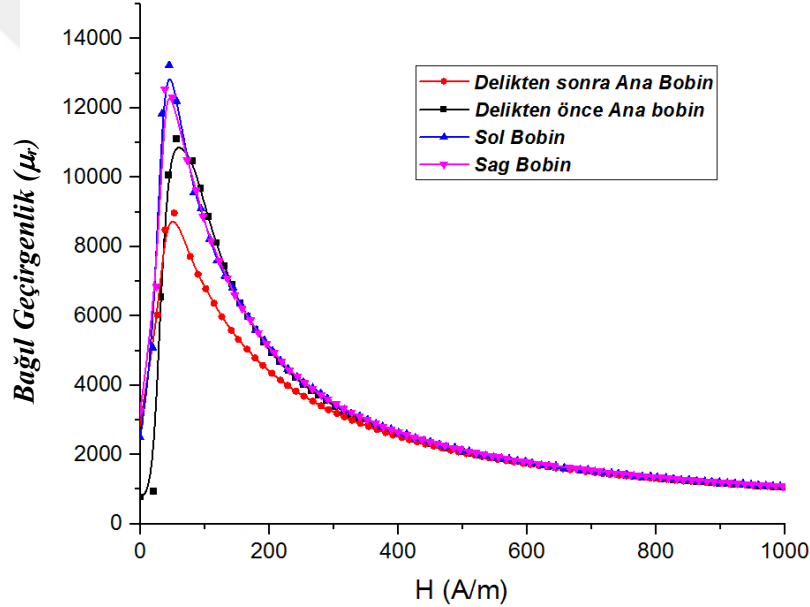
Örnek – 1 ile aynı fiziki koşullar altında ölçümleri gerçekleştirilen örnek – 2' nin, çalışma eksenine dik domain yapısına sahip elektrik çeliğinin delik civarındaki bobin sarım düzeni, alan (çalışma) doğrultusu ve ortalama domain dizilim doğrultusu şematik olarak Şekil 4.14 a'da verilmiştir. Aynı şeklin (b) ve (c) şıklarında ise manyetik alanın bir fonksiyonu olarak sırasıyla genel ve yerel akı yoğunluğu karşılaştırmaları yarı-statik histeresis eğrilerden gözlemlenmiştir. Aslında eğriler sayısal olarak farklı sonuçlar verse de, yapısal olarak (Ana – Sağ – Sol Bobin kıyaslamaları), örnek – 1 ile aynı sonuçları göstermesi beklenirdi. Fakat anizotropi kuvvetleri, doyum indüksiyonuna bağlı olarak, H_c ve B_r gibi karakteristik değerleri de karşılaştırılmayacak ölçülerde değiştirmiştir. Örneğin, Örnek – 1'de H_c değeri delik öncesi ve sonrası hemen hemen aynı değerlerde seyrederken (delik kenarları dâhil toplam karşılaştırma), örnek – 2' de delik sonrası % 23 civarında bir azalma gözlemlendi.

Öte yandan, B_r değeri için ise bunun tam aksi elde edilmiştir. Örnek – 1 için B_r değeri kesme/delme sonrasında % 30 civarında bir düşüş göstermişken, Örnek – 2'de, öncesinde ve sonrasında neredeyse aynı kalıcı mıknatıslanma değerleri elde edilmiştir. Bu karmaşık durumun açıklaması muhtemelen Örnek – 2'nin mikro yapılarında gizlidir. Çünkü burada, sadece domain duvar hareketi değil, buna ek olarak domain evrimi, yüzey ve iç domainlerdeki hareketlilikten kaynaklanan enerji dönüşümlerinde oluşacaktır.



Şekil 4.14. Akı dağılımındaki bozulmanın delik öncesi ve sonrası genel (b) ve yerel (c) karşılaştırmaları yarı-statik B(H) eğrisinde verilmiştir. (a)'da ki şematik gösterimde verildiği gibi tercih edilen eksen dışında tüm değişkenler örnek-1 deki gibidir.

Tıpkı Şekil 4.3'te Örnek – 1 için elde edildiği gibi Örnek – 2'de de her bir bobin için $\mu = B/\mu_0 H$ bağıntısı esas alınarak ilgili bağıl geçirgenlik değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan geçirgenlik değerleri, Şekil 4.15'te gösterildiği gibi yine bir dış alanın fonksiyonu olarak $\mu(H)$ grafiğinde karşılaştırılmıştır. Tüm bobinler için kaynak noktası ve karakteristik olarak kabul edilen en büyük noktaları, karşılaştırılmıştır. İdeal olarak, sağ ve sol bobinlerden algılanan akı yoğunluğu, tüm kesit alanın üçte biri kadar daralan alanda üç kat artması beklenir. Bu durum bölgesel geçirgenlik eğrileri ile Şekil 4.15'te gözlemlenmiştir. Tabii ki, ideal koşullarla karşılaştırıldığında, zıt mıknatıslama alanının etkisiyle çok düşük değerlerde kalmış olmasına karşın, yine de en büyük geçirgenlik, bu alanlarda en yüksek değerleri sağlamıştır. Bu bağlamda, her bir bobin için geçirgenlik pikleri, manyetik direncin bir göstergesi olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Her bir bobinden, hesaplanan ve alana bağlı olarak değişen bağıl geçirgenlik eğrileri.

Delik öncesi ve sonrası bu pikler sırasıyla, 10.8×10^3 ve 8.7×10^3 olarak ölçülmüşken, yaklaşık olarak 12×10^3 , deliğin sağ ve sol tarafından elde edilen μ_{max} değerleridir. Deliğin önünde ve arkasında oluşan kutulanmanın da etkisiyle kesme öncesine göre kesme sonrasında elde edilen μ_{max} , % 20 daha azdır. Hatırlanacağı gibi μ_{max} için hesaplanan bu fark Örnek – 1'de yaklaşık % 18 olarak belirtilmiştir. Bu sonuç, delik önce ve sonrası kıyaslaması için anizotropinin, en büyük geçirgenlik hesabında çok fazla etkin olmadığını gösterdiği için oldukça önemlidir. Öte yandan, delinen örneğin genel ve bölgesel

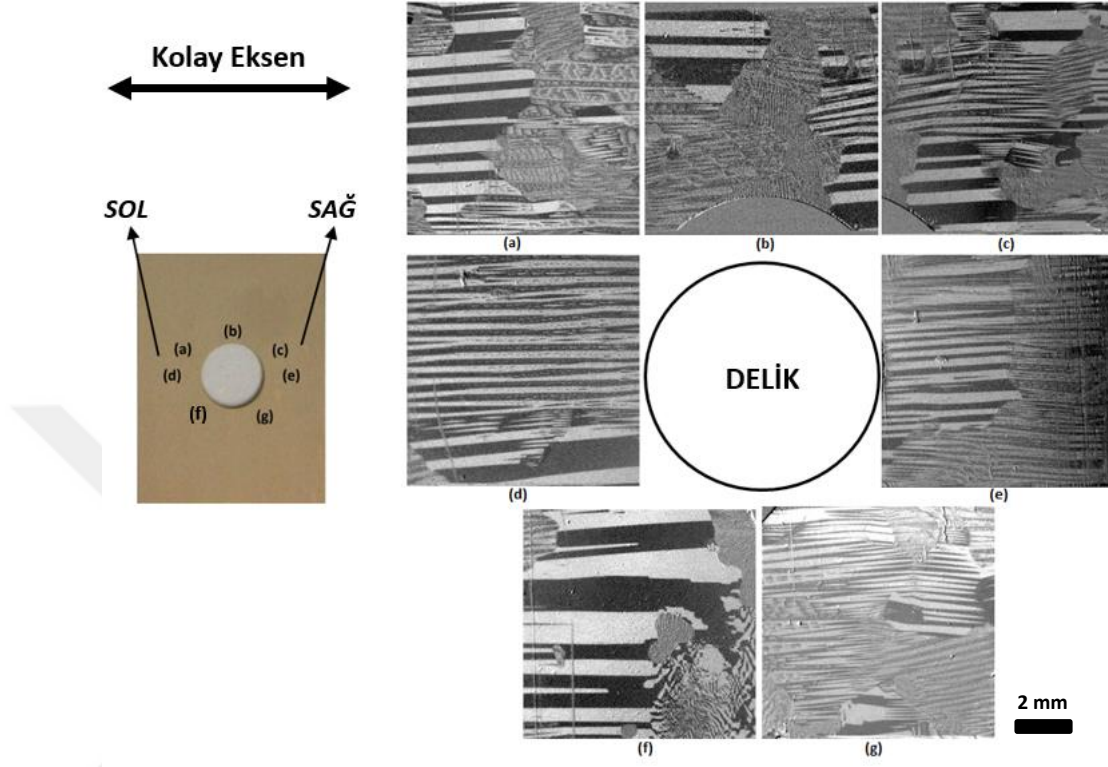
geçirgenlik pikleri karşılaştırıldığında, % 28 lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, Örnek – 1’de, % 35 olarak elde edilmişti. Bu sonuç göz önüne alındığında, genel ve bölgesel akı dağılımının incelendiği durumlarda, anizotropinin etkisinin arttığı söylenebilir. Sonuç olarak, manyetik anizotropinin sadece malzemenin tümündeki geçirgenlik değerlerini göz önüne aldığımızda, etkisi göz ardı edilebilecek olmasının yanı sıra, genel ve bölgesel geçirgenliklerdeki (ölçülen bölgeye de bağlı olarak) etkisinin daha baskın olduğu söylenebilir.

4.2.2. Manyetik Mikro Yapıların Karakterizasyonu ve Yorumlanması

İncelenen bu model materyal, sadece akı dağılımındaki bozulmanın değil, aynı zamanda manyetik alanın, deliğin varlığından dolayı izlediği yolun da nicel olarak tespit edilebilmesine imkân vermiştir. Bu doğrultuda, Kerr mikroskobunun her iki modülünün de kullanılmasıyla, domain yapılarındaki evrilme, dönüşme ve değişimler izlenmiştir. Domain kuramından da teorik olarak faydalanılarak yorumlanan mikro yapılar, çalışma eksenini, kolay eksen ve ortalama domain eksenini gibi kaynak eksenlerinin kullanılmasıyla, alan doğrultusu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan malzemenin dezavantajlarından biri büyük bir anizotropi enerjisine sahip olmasıdır. Bundan dolayı, doyum mıknatıslanmasına ulaşması yani domain yapısının tamamen kaybolması ve yerini tamamen tek kontrasta (açık veya koyu) bırakması, uygulanan alan geriliminin çok yüksek olmasıyla mümkün olmuştur. Bu alan gerilimi, malzemenin yüzey alanına bağlı olmakla birlikte, kullandığımız örnek de yerine göre 100 kA/m’ ye kadar çıkmıştır.

Malzeme hazırlama aşamaları ve ısıl müdahalenin ardından, delik etrafındaki domainlerin dizilimi Şekil 4.16’da verildiği gibi gözlenmiştir. Kerr görüntülerinin, malzemenin fotoğrafı üzerinde harflendirilen bölgelere göre sırasıyla verilmiş halinden de anlaşılacağı gibi delik ile örnek kenarları arasında kalan alanlarda ve deliğin ön ve arkasındaki bölgelerde, iyi yönlendirilmiş domainler ile TD bulunmaktadır. Geniş perspektiften alınan bu görüntüler, küresel olarak dağılım şeklini de açıklar. Görüntüler, önce 25 Hz frekansta, malzemenin tamamını doyurmak için yeterli olan yüksek alan uygulamasından sonra 10 sn’ lik süre içinde sıfır alana kademeli ve sistematik bir biçimde azaltılmasıyla elde edilmiştir. Yani, şekilde verilen domain görüntüleri, içerisinde kalıcı mıknatıslanma (B_r) barındıran, mikro yapılarıdır. Bu koşullardan dolayı, sıfır manyetik alandaki domain

dizilimi malzemenin doğası hakkında önemli bilgiler içermektedir. Grain boyutları, domain yönelimi ve kalınlığı, bunlardan bazılarıdır.

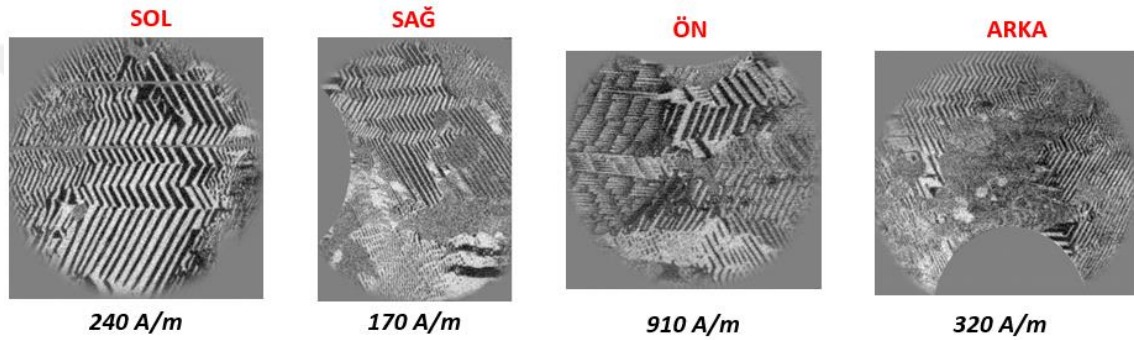


Şekil 4.16. Malzemedeki deliğin etrafında oluşan tipik domain desenleri. Soldaki fotoğrafta, görüntülerin alındığı konumlar harflerle gösterilmiştir.

Şekil 4.17’de, delik etrafında üniform bir mıknatıslanmanın olmadığı, ön, arka, sağ ve sol kısmındaki 10 mm’lik bölgelerde, kaynak TD’nin seçilmesiyle kanıtlanmıştır. Karakteristik testere dişi benzeri domain yapılarının her bir bölgede, yaklaşık olarak oluşması için gerekli alan gerilimleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, malzemenin sağ ve sol kısmında ortalama 200 A/m’lik enine uygulanan alan gerilimi yeterli olmaktadır, delik öncesindeki bölgede, 900 A/m’lik alanın bile bu yapıya benzer bir dizilim göstermesi için yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, deliğin ön ve arkasında bile bir senkronize alan dağılımının olmadığı da fark edilmiştir. Delik sonrasında, söz konusu TD oluşumu için gerekli alan gerilimi, öncesine göre yaklaşık olarak 1/3 oranında daha azdır. Ayrıntılı analizin yapılabilmesi için, delik ve etrafının düşük çözünürlüklü, bir arada görüntüsü Şekil 4.18’de verilmiştir.

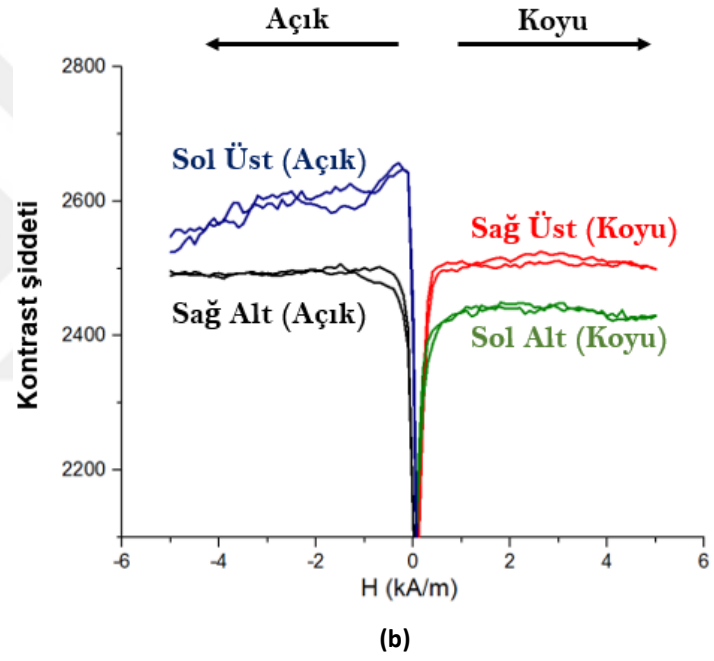
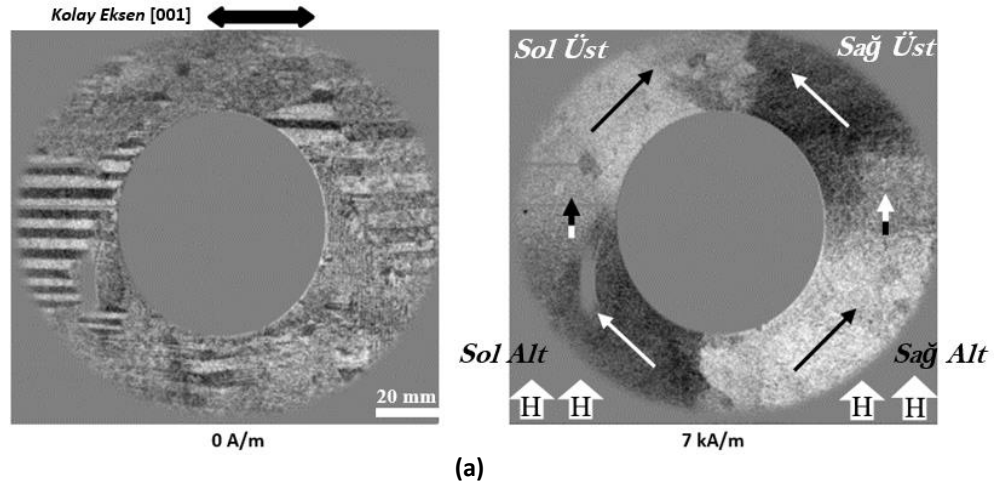
Şekil 4.18 a’da, sıfır ve 7 kA/m’lik alan geriliminde delik etrafında oluşturulan, kontrast değişimi ile bölgede çok ciddi bir kutuplanmanın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum,

yüzeyde oluşan mıknatıslanma doğrultularını tahmin edebilmemize olanak sağlamıştır. Buna ek olarak, dört bölgeye ayrılarak isimlendirilen delik civarındaki mıknatıslanma, Kerr mikroskobunun bir ekipmanı olan kontrast şiddet ölçümü ile de nicel olarak başarılı bir şekilde tanımlanmıştır. 7 kA/m alan geriliminde elde edilen genel görüntüsündeki bölgesel ölçümlerden türetilen I(H) grafiği (b), kontrast değişiminin mıknatıslanma doğrultularındaki sapmaları iyi bir şekilde tanımladığını göstermektedir. Bu bağlamda, delik etrafında, doğrusal olmayan bir alan ve dolayısıyla akı dağılımından bahsetmek oldukça gerçekçi olacaktır. Ancak yine de böyle bir tanımlama için daha yüksek çözünürlüklü Kerr analizi gerekmektedir.

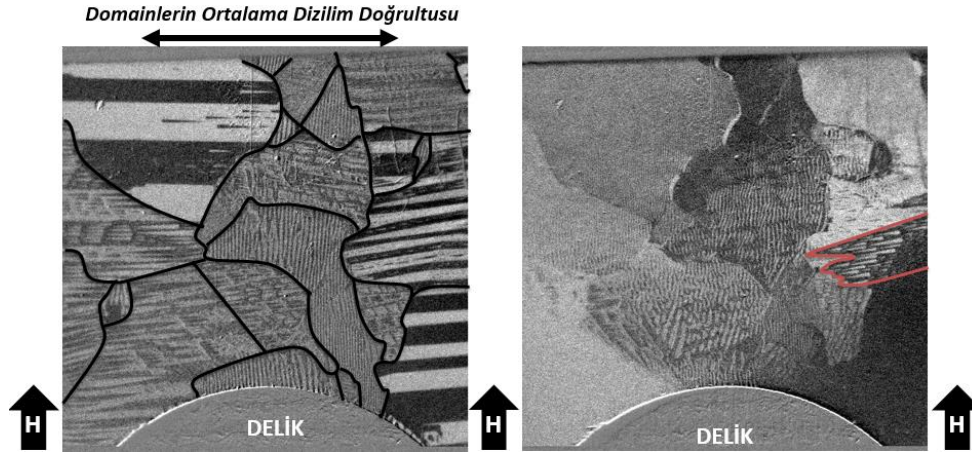


Şekil 4.17. Deliğin sağ, sol, ön ve arkasında, belirli alan gerilimlerinde oluşan yarı-kararlı testere dişi benzeri domain yapıları.

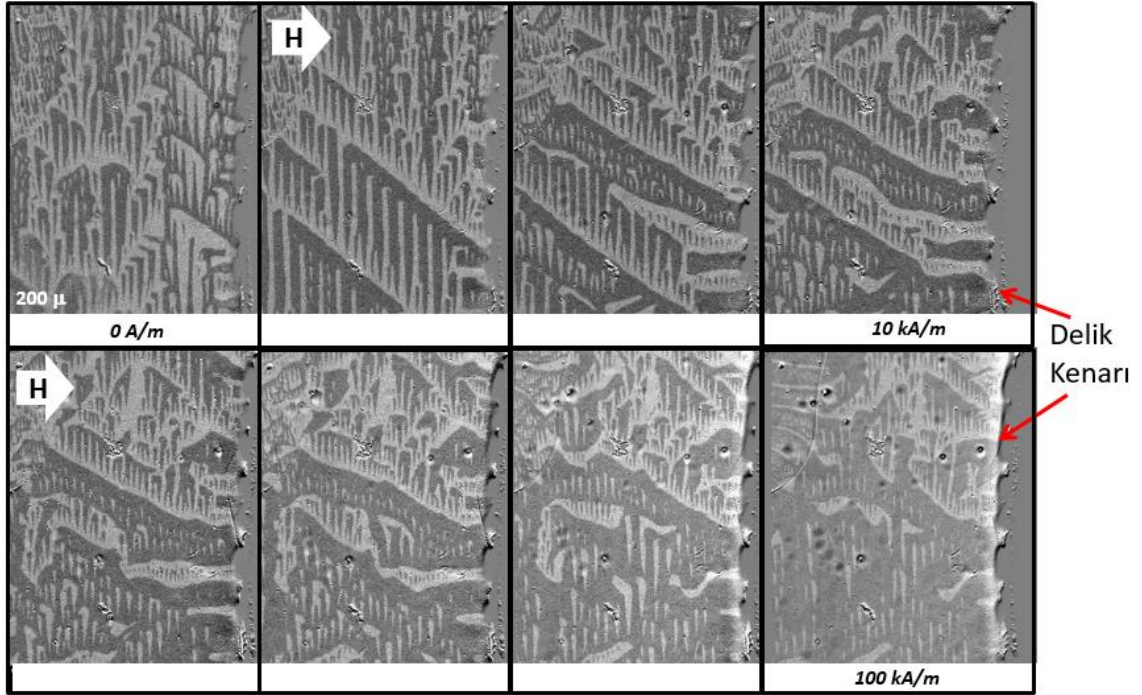
Uygulanan manyetik alanın doğrultusuna göre deliğin arkasında kalan bölgedeki grain sınırları ve domain yapıları, Şekil 4.19'da incelenmiştir. Bir önceki şekilde açık bir şekilde küresel olarak tespit edilen kutuplanma, delik sonrasında enine uygulanan, yaklaşık 12 kA/m alan gerilimindeki, yarı kararlı Kerr görüntüsünde de gözlemlenmiştir. Ayrıca, bazı bölgelerde, çivi benzeri TD yapıları da, yüksek alana rağmen hala gözlemlenmektedir. Bunun dışında bir diğer dikkat çekici nokta ise sıfır alanda, deliğin hemen ardında uzanan, çok küçük yerel gerilim desenlerinin oluşmuş olmasıdır. Bu bölgelerin delik hizasında, malzeme boyunca oluşması ve alan uygulandıktan sonra tek kontrastta birleşmesi, deliğin bozucu etkisinden kaynaklanmış olabilir. Bu bölgenin sağ ve solunda ise farklı tonlarda kontrastlar oluşması birkaç grainin bir araya gelip yeni bir kutup oluşturmasını sağlamış olabilir. Bu durum, muhtemelen, zıt mıknatıslamanın etkisini düşürmek için kendiliğinden gerçekleşen mikro yapısal bir mekanizmanın bileşenidir. Ayrıca, şekil 4.18 a'da ki, sağ üst ve sol üst bölgelerinde elde edilen kutuplanmayı da destekler.



Şekil 4.18. Genel bakış açısıyla, delik ve etrafında, uygun alan uygulamalarında oluşan kutuplanmanın boyutu verilmiştir (a). (b)'deki $I(H)$ grafiği, (a)'daki dağılımın nicel analizini başarılı bir şekilde yapmaktadır.



Şekil 4.19. Deliğin hemen sonrasındaki grainlerin ve domainlerin sıfır alandaki (solda) ve 12 kA/m civarındaki (sağda) yarı-statik Kerr görüntüleri.

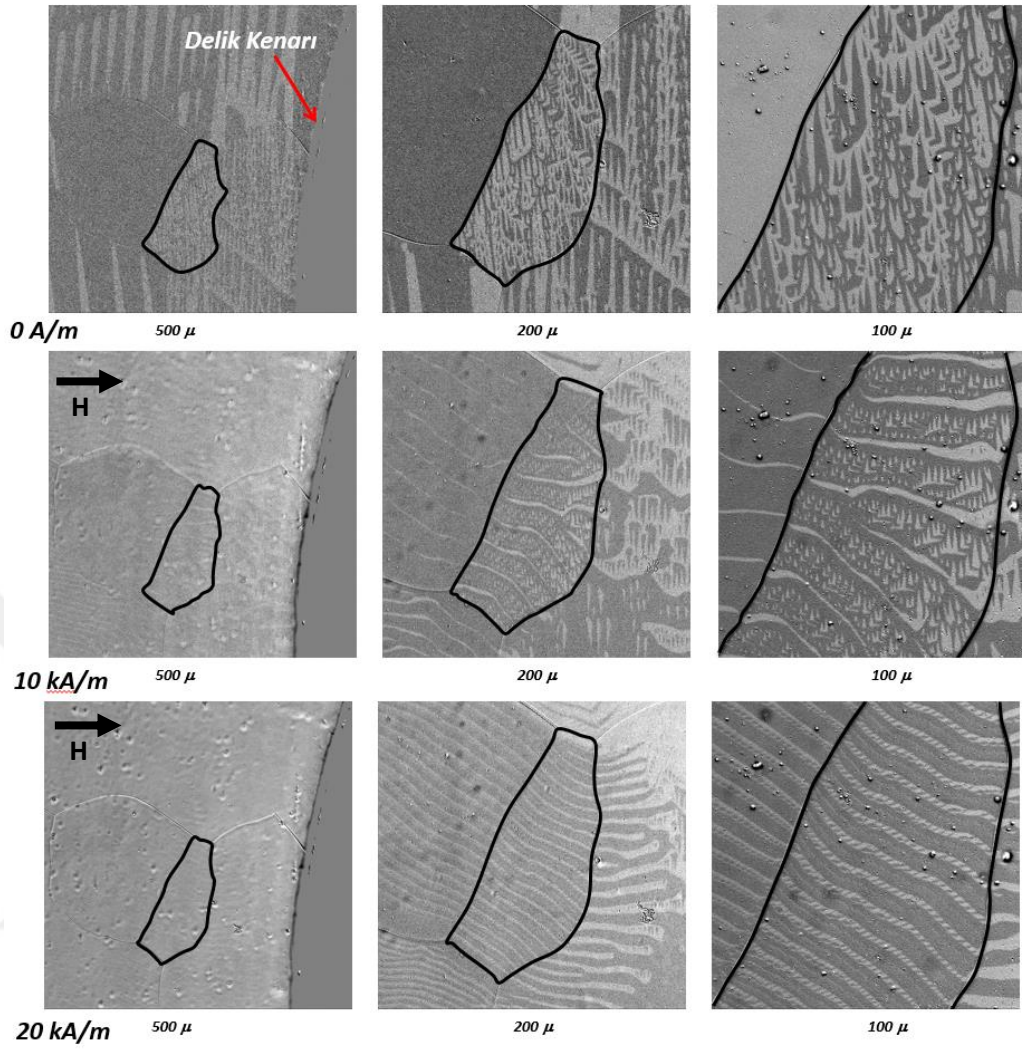


Şekil. 4.20. Deliğin önünde, seçili bir graindeki vida benzeri TD.

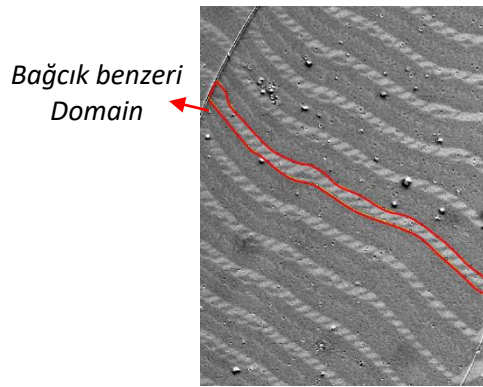
Delik öncesindeki grainleri doyurmak için uygulanan manyetik alanın gerilimi, yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin karakteristiğinden çok farklı bir yapı ortaya koyar. Böyle yapıların evrim periyotları Şekil 4.20'de, uygulanan alana karşılık yapıdaki değişimleri gösteren Kerr fotoğraflarıyla verilmiştir. Seçilen grain, yaklaşık 4° lik bir yönelim dışı sapma açısına sahiptir (bkz. Şekil 2.13). Uygulanan enine alan ile çivi benzeri TD, tarak benzeri domain dizilimine evrilmişlerdir. Daha sonra ise 10 kA/m'lik

alan geriliminde ikincil TD gözlemlenmeye başlamıştır. Burada en dikkat çekici nokta, 10 kA/m'lik bir alan geriliminde, tarak benzeri yapıların gözlemlenmiş olmasıdır. Bu durum, akı yoğunluğunun, delik öncesinde çok çok düştüğünü gösterir. Başka bir deyişle, etkin manyetik alan, bu bölgede bileşenlerine ayrılmak suretiyle etkinliğini kaybetmiştir. Hatırlanacağı gibi böyle bir analiz, delik öncesi bölgeler için de Şekil 4.12'de de yapılmıştı. Bu iki yapı arasındaki tek fark, alan geriliminin miktarıdır ve bu da anizotropi farklılığından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.20'de verilen Kerr görüntü dizisinin son fotoğrafında gösterilen, 100 kA/m'lik manyetik alanda halen gözlemlenen domain yapıları, delik öncesi bölgenin, elektrik çeliklerinde akı yoğunluğunun en düşük olduğu ve doyum mıknatıslanmasına ulaşmanın en zor olduğu bölge olarak yorumlanmasına sebep olur. Öyle ki, doyum indüksiyonunun olduğu alan geriliminde, Kerr gözlemi yapmak mümkün olmamıştır.

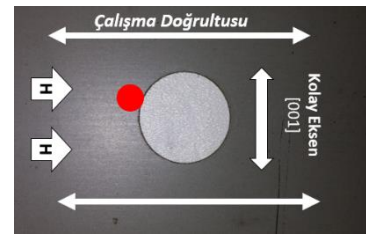
Şekil 4.21'de yapılan çalışma ise domain gözlemlerinde yüksek çözünürlüklü görüntü almanın, malzemenin manyetik karakteristiğini anlamakta ne kadar büyük bir öneme sahip olduğunu gözler önüne sermektedir. 500, 200 ve 100 mikronluk büyütme sağlayan, optik odaklanma özelliğine sahip farklı lensler ile (c)'de kırmızı noktayla işaretlenen bölgedeki bir grainin, her bir gözlem periyodunda artan alan gerilimiyle nasıl görüntüler verdiği, (a)'da verilen fotoğraf dizileriyle gösterilmiştir. Burada amaç, odaklanılan bölgeye yapılan her bir yaklaşma hareketiyle, malzemede daha çok ayrıntının fark edilmesidir. Ancak, yüksek çözünürlüklü görüntü boyutunun arttırılması yani gözlem alanına yaklaşılmasıyla, alan gerilimi arttırıldığında, yüzeydeki tüm kusur, hasar ve tepe/çukurlar, görüntü almayı zorlaştırır. Bu bağlamda malzeme, kusursuz bir temizleme işlemine tabi olmalıdır.



(a)



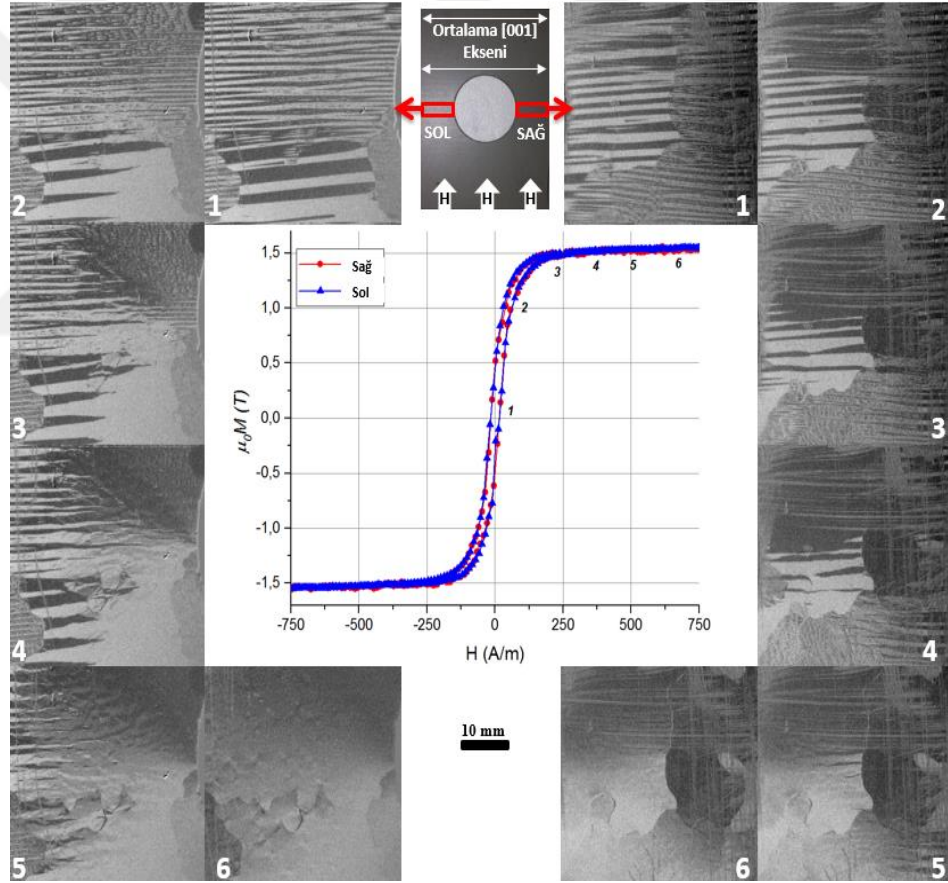
(b)



(c)

Şekil 4.21. Deliğin hemen öncesinde, farklı büyütme özelliğine sahip lenslerle yapılan ayrıntılı bağcık benzeri domain yapı analizi (a). 40 kA/m alan geriliminde elde edilen Kerr görüntüsünde (b) bir grain içerisinde, düzensiz dizilim gösteren bağcık domainlerden birinin fiziksel özellikleri incelenmiştir. (a) ve (b)' de verilen tüm Kerr fotoğrafları, (c)' de kırmızı nokta ile gösterilen bölgeden alınmıştır.

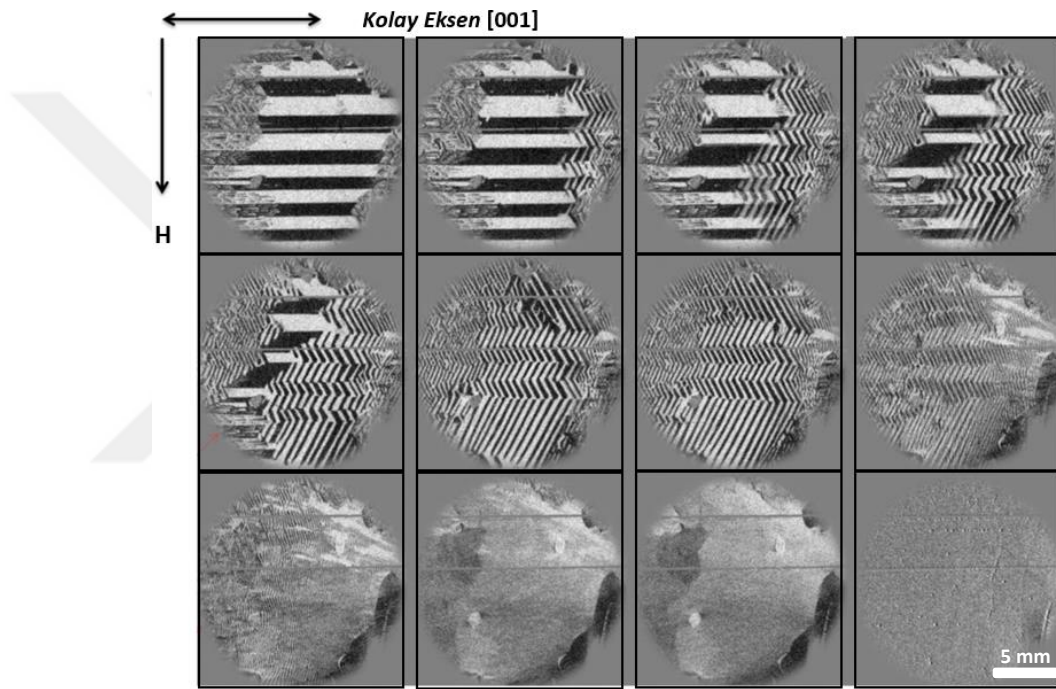
Öte yandan, elde edilen Kerr görüntüleri içerisinde en makul ve en güvenilir bilgiler, 40 kA/m alan uygulamasında ve 100 mikronluk odaklanma boyutunda, (b)'de ki gibi gözlemlenmiştir. Burada incelenen grain içerisinde seçilen bir bağcık domain yapısının fiziksel özellikleri de yüzey domainlerinden ölçülmüştür. Bir örgü sarmalı gibi birbirine dolanmış gibi duran yüzey domainlerin ortalama kalınlığı (W_s) ve uzunluğu (L_s) sırasıyla, 2,51 μm ve 0,82 μm olarak ölçülmüştür. Ayrıca 54 adet oldukları belirlenen yüzey (kapalı) domainlerin belirli koşullar altında, bir arada oluşturdukları bağcık benzeri domainin uzunluğu ise 69,56 μm olarak ölçülmüştür. Bu değerler, domain kuramında ilgili eşitliklerin kullanılmasıyla mikro ölçekteki bölgelerin enerji değerlerini bulmakta kullanılabilir.



Şekil 4.22. Yarı-kararlı histeresis eğrisiyle elde edilen, mıknatıslanma eğrisinin numaralandırılmış alan gerilimlerindeki Kerr görüntüleriyle karşılaştırılması.

Delğin sağ ve sol kısımlarında elde edilen yarı-kararlı histeresis eğrilerinde, belirli alan gerilimlerinde gözlemlenen geniş perspektif domain görüntü dizisi, numaralandırılmış

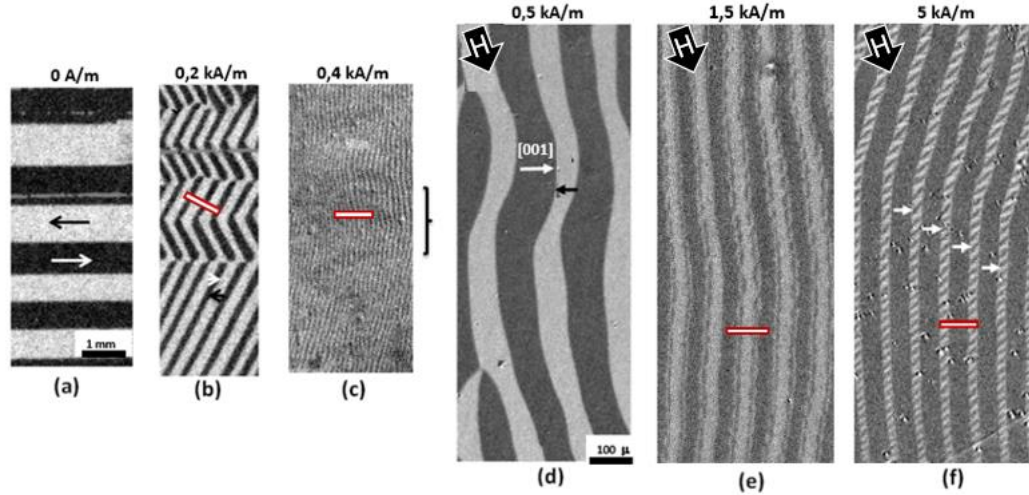
olarak Şekil 4.22’de verilmiştir. Tüm fotoğraflarda en dikkat çekici özellik, alan gerilimindeki artış ile her bir görüntünün üst ve altı arasında bir kutuplanma olmasıdır. Bu durum Şekil 4.18’in yorumlarını desteklemektedir. Görünen odur ki, kutuplanma bölgesel gözlemleri zor kılmanın dışında, grainlerin doyum mıknatıslanmalarını da engellemektedir. Öte yandan, özellikle sağ taraftaki 2 – 5 ile numaralandırılmış görüntülerden delik kenarında gözlemlenen, belli belirsiz, gri bir bölgenin, manyetik alanın artışıyla, etkisini arttırıp yayıldığı fark edilmiştir. Bu durum, zıt mıknatıslayıcı alanın, bölgedeki etkisinin bir sonucu olarak yorumlanabilir.



Şekil 4.23. Seçilen levha benzeri desenlerin, uygulanan alanla tamamlayıcı domainlere evrilmesi. Son görüntü, 60 kA/m’ de ki doyum durumunu göstermektedir.

Delğin sağ tarafında, çok iyi yönlendirilmiş bir grain içerisinde seçilen temel domainlerin, enine alan etkisi altında verdiği reaksiyon, Şekil 4.23’te adım adım, tüm dönüşümleriyle doyum mıknatıslanmasına kadar izlenmiştir. Bölgenin sağ ve solundan başlamak üzere ortasına doğru, testere dişi yapıları oluşmuştur. İkinci sıranın, ikinci görüntüsünde (soldan sağa), TD, tamamen dönüşümünü tamamlamış olsa da, enine alan gerilimi kademeli olarak arttırılmaya devam ettiğinden, testere dişi TD yeniden organize olup üçüncü sıranın ilk görüntüsüne kadar, sütun benzeri domainlere evrilirler. Bu aşamaya gelinceye kadar uygulanan alan gerilimi, doyum indüksiyonunun (J_s) sadece %

2' si kadardır. Ayrıca, son sıranın 2 ve 3. görüntüsünden sadece grain sınırları arasındaki yük farklılıklarından kaynaklanan kontrast değişimi gözlemlenebilmiştir. Doyum induksiyonu, son görüntüde verildiği gibi alanın tamamen tek tonda olduğu durumdur.



Şekil 4.24. Genel perspektiften, deliğin sağ tarafındaki domain evrimi süreci. bar domainler (a), dik alan etkisi altında testere dişi benzeri (b) ve sonra sütun benzeri (c) domainlere dönüşürler. Yüksek çözünürlük Kerr mikroskopuyla alınan görüntülerde ise sütun benzeri domainler (d), alanın daha da artışıyla çekirdeklenmeye başlamış ve basit dallanmış domain (e) halini aldıktan sonra, yüksek ve eğimli alanla, bağcık benzeri domain yapısı (f) elde edilmiştir.

Daha Yüksek çözünürlükte bu aşamaların takibi, Şekil 4.24'te yapılmıştır. Buna göre, (a – c) arasında elde edilen dönüşüme ek olarak, 100 mikronluk bir alanda, sütun benzeri domainler (d), çekirdeklenmelerin başladığı en temel dallanmış domain (e) ve sadece eğimli alana maruz kalan domain desenlerinin oluşturacağı bağcık benzeri domainler (f) gözlemlenebilmiştir. İlgili desenlerin gözlemlendiği alan gerilimlerinde her bir fotoğrafın üstüne iliştilmiştir. Bağcık benzeri domainlerin gözlemlenmesi, yukarıda açıklamaya çalıştığımız, manyetik alan dağılımının delik kenarlarında parabolik bir doğrultu izlediği fikrini çok kuvvetli bir biçimde desteklemektedir. Bölüm 2.8.2'de manyetik alan doğrultusuna bağlı domain evriminin nasıl oluştuğu açıklanmıştır. Bu durumu kaynak olarak aldığımızda, deliğin sağ tarafında, sıfır manyetik alanda, bar yapısında gözlemlenen domainlerin, doyum öncesine kadar enine alan etkisi altında (tam 90°) çekirdeklenip Şekil 4.20 e'de ki gibi dallanmış domainler halinde alan doğrultusuna dönmesi beklenir. Ancak burada gerçekleşen durum, alanın domain desenine ne paralel ne de dik geldiğini, bunun yerine belirli bir eğimde etki ettiğini gösterir. Yani söz konusu

bölgedeki iyi yönlendirilmiş domain desenleri, eğimli bir alan etkisi altında, tıpkı Şekil 4.21 b’de ki gibi bağcık benzeri domainlere dönüşmüşlerdir. Elde edilen domain desenlerinin, yüzey ve iç mıknatıslanma doğrultuları, Şekil 2.18 e-g’de sırasıyla verilen, testere dişi, sütun ve temel dallanmış domain model çizimlerinden tahmin edilebilir. Bağcık benzeri domain yapıları için bu doğrultuların tahmin edilmesi ise Şekil 2.19 d-f’de verilen model çizimleriyle mümkündür.

Delik etrafında, yönelimlerini belirli açılarda yapan bağcık benzeri ve dallanmış domainler, Şekil 2.18 ve 2.19’da ki kaynak yapılarla karşılaştırıldığında, manyetik alan doğrultusunun nicel olarak bulunabilmesine imkân verebilir. Ancak bunu sağlayabilmek, birçok ayar biriminin tanımlanmasıyla mümkün olabilir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların bundan sonraki kısmında, Şekil 4.24’te gözlemlenen yapıların, deliğin sağ ve sol kısmındaki tüm iyi yönlendirilmiş grainlerinde araştırılması ve buna bağlı olarak uygun domain dönme sisteminin bulunması üzerine odaklanılmıştır.

4.2.3. Dönme Sistemi – dallanmış ve bağcık benzeri domainlerin yönelim karakterizasyonu

Dönme sistemi, domain desenlerinin enine ya da belirli açılarla eğimli yüksek manyetik alana maruz kaldıklarında verdikleri tepkinin, manyeto-optik Kerr etkisinin kullanılarak gözlemlendiği bir çalışmadır. Elde edilen veriler, kartezyen koordinatlarda (x- ve y-değişkenleriyle) yani yüzey domainler ve duvarların hareketiyle incelenmiştir. Söz konusu verilerin belirli bir sistem üzerinde gösterilmesi, ayar çalışmaları sonucunda elde edilen değişkenlerin yorumlanmasına göre yapılmıştır. Ayar çalışmalarının yapıldığı örneğin değişkenleri özel olarak belirlenmiştir. Tüm ölçümler, Örnek -1 ve Örnek – 2’de kullanılan sistemlerle uyumlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada sadece örnek – 2 ve mikro yapısal olarak aynı özellikleri içeren ayar örneği kullanılmıştır.

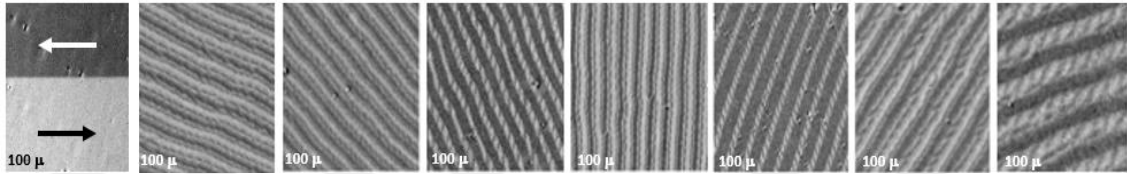
4.2.3.1. Ayar örneği

Domain yapılarına, kolay mıknatıslama eksenlerine bağlı olarak uygulanan alanın doğrultusu, yapıdaki hareketliliğin baş aktörlerindedir. Bu nedenle, domain yapılarına uygulanan alanın doğrultusu ve yapının sıfır alandaki yönelim eksenini bilirse, domainlerin dönüşecekleri TD çeşidi, uygulanan alan gerilimine ve yönelecekleri doğrultu ise uygulanan alan doğrultusuna bağlı olur. Bu bağlamda, ayar örneği, 10 mm çapında, iyi yönlendirilmiş bir grainden meydana gelen dairesel bir yönlendirilmiş

elektrik çeliğinden kesilmiştir. Kesme, temizlik ve ısıl müdahale işlemleri bölüm 3'te, delinmiş malzemeye uygulanan koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yüzey alanı oldukça küçük olduğundan dolayı doyum mıknatıslanması hayli güç olacağından, bölüm 3.3.1.2'de gösterilen yüksek alan bobini ile mıknatıslanmıştır.

4.2.3.2. Ayar değişkenlerinin belirlenmesi

Ayar örneğinin domain yapısına göre manyetik alan doğrultuları $\pm 20^\circ$ ve $\pm 30^\circ$ kadar, 10° 'lik açılarla değiştirilmiştir. Uygulanan alanın doğrultusuna göre nihai domain yönelimleri, tüm alan uygulamalarında, doyum mıknatıslanmasının % 70'inde elde edilmiştir. Tüm alan doğrultuları eşit koşullarda uygulanmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi sıfır alanda kaynak alınan domainler, levha benzeri, yönelim dışı sapma açısı olmayan domain desenlerinden seçilmiştir. Böylelikle, Kerr görüntülerinde yüksek manyetik alan ile gözlemlenen yönelimlerin karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır.

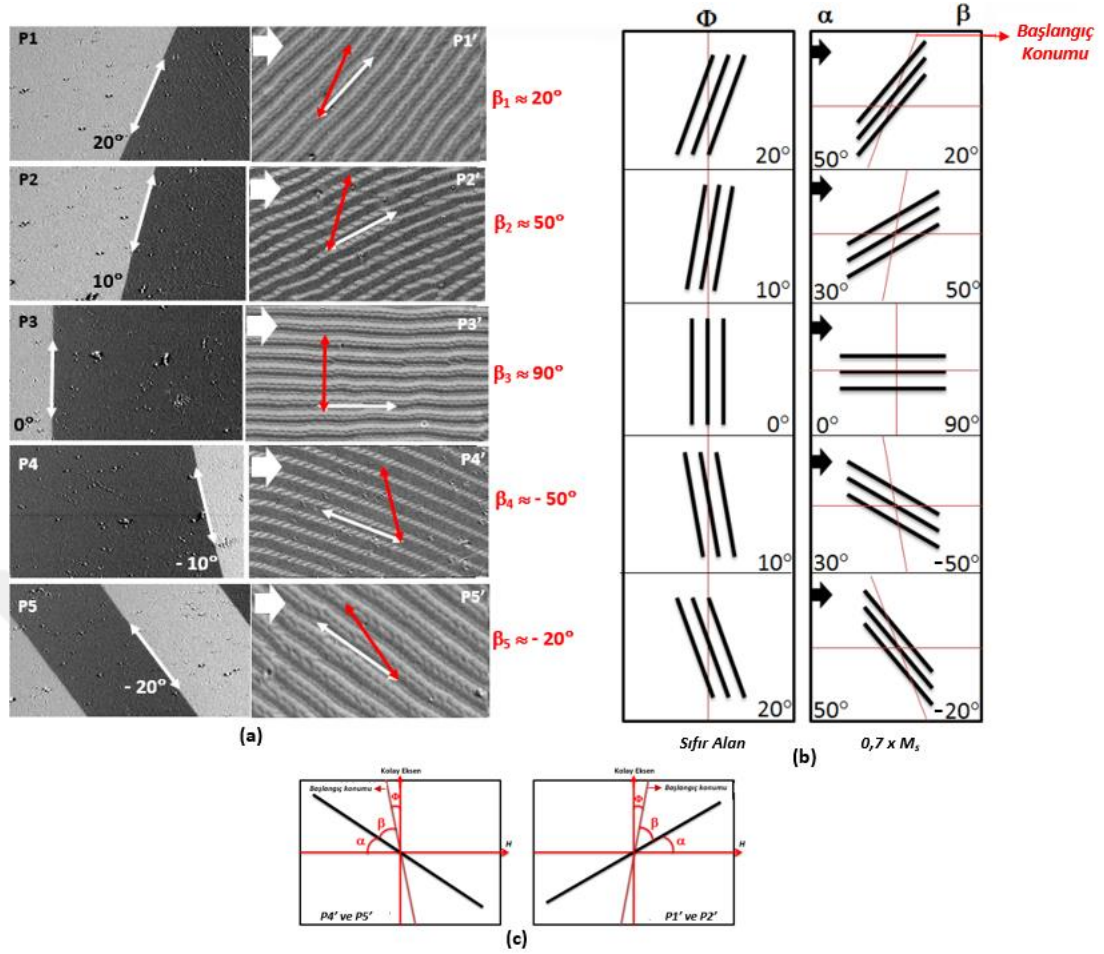


Şekil 4.25. Sıfır alanda iyi yönlendirilmiş domain desenlerinin, eşit alan gerilimlerinin $\pm 30^\circ$ aralığında, yönelim doğrultusundaki değişimler.

Yukarıdaki şekilde, ayar örneğinden elde edilen görüntüler, gerekli değişkenlerin tanımlanmasıyla, uygun sisteme uygulanması açısından kaynak gözlemlerdir. Manyetik alan ve domain yöneliminin bağımsız olarak Şekil 4.25'te ki yönelimler için uygun sistem bulunması adına 2 farklı model geliştirilmiştir.

4.2.3.3. 3-Değişkenin ($\alpha - \beta - \Phi$) kullanıldığı sistem [Model – 1]

Ayar örneğinden alınan Kerr görüntülerinden, yönelim değişkenlerinin tayini için belirlenen ilk model, kısmî-sabit olmayanlar sistemi olarak tanımlanmıştır. Bu sistemde, sıfır alandaki domain desenlerinin, 10° 'lik açısal farklılıklarla dizildiği, ancak uygulanan alanın sabit olduğu varsayılmıştır. Buna bağlı olarak, şekil 4.26' da verilen değişkenler, her bir senaryo için (sıfır alandaki domain dizilimi) özel karakteristikler olarak kabul edilmiştir.



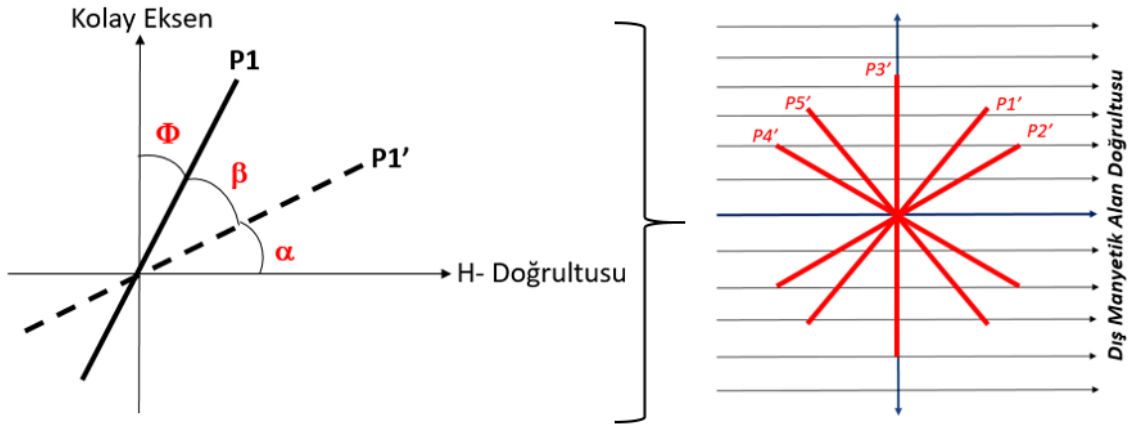
Şekil 4.26. Dönme sisteminin, Model – 1 ile tanımlanması. Ayar örneğinden alınan statik Kerr görüntülerindeki (a) desenlerin yönelim değişkenleri, bir görüntü analiz programıyla ölçülmüştür. (b)' deki şematik çizimler, tamamen (a)'daki görüntülerden ölçülen değişkenlerin kullanılmasıyla üretilmiştir. Sistem karakteristiklerini veren α , β ve Φ değişkenleri, hem negatif (P4' ve P5' için) hem de pozitif (P1' ve P2' için) ayrı ayrı (c)' deki şematik çizimle açıklanmıştır.

Domain kuramında temelini oluşturan enerji terimlerinden kaynaklanan dinamikler göz ardı edildiğinde, domain deseninin, uygulanan alan doğrultusunda uzanması beklenir. Ancak, hem yüzey ve iç mikro yapıların yük farklılıkları hem de alan geriliminin etkisiyle bu yapılarda oluşacak zıt mıknatıslama kuvvetleri, domain evrilmesine ve oluşturulacak en uygun enerji koşullarına uygun doğrultuda domain yönelimine sebep olur. Özetle, yüzeyde gözlemlediğimiz kapalı domainler, iç domainler ve duvarıyla koordineli bir kararlı yönelim doğrultusu meydana getirir. Şekil 4.26'da ölçülen dönme değişkenleri, bu bağlamda, yönelim doğrultularının ve açısal değişkenliklerinin iyi anlaşılabilmesine imkân vermektedir. Model – 1'de tanımladığımız bu sistem, 3 değişkenin, birbirine göre olan değişimlerinin bir sonucudur. Dikkat edilmesi gereken bir nokta, hemen tüm

senaryolarda α , β , ve Φ değerlerinin toplamı 90 olur. Yani sistem sadece yüzey domainlerin, x ve y koordinatları arasındaki hareketini esas alır. Bu doğrultuda, analiz ettiğimiz malzemenin yüksek anizotropi içeriği göz ardı edilmemelidir. Şekil 4.27’de sistemin bu iki boyutlu, hareketinin bileşenleri olan model değişkenleri de, çok net bir şekilde gösterilmiştir. Bu bağlamda, daha şeffaf olmak için Çizelge 4.2’de her bir değişkenin açıkça tanımlamasını yapılmıştır.

Çizelge 4.2’de ki değişkenlerin kullanımıyla, ilgili grain içerisinde, belirli koşullar altında, tüm dönme doğrultu ve açıları önceden tahmin edilebilir. Bu modelde, esas dönme açıları olan α ve β ’ya karar veren değişken, domain duvarının başlangıçtaki konumunun kolay eksenle arasındaki Φ açısıdır.

Bu modelin üstünlüklerinden biri, dinamik olarak duvarın hareketinin tüm değişkenler açısından takip edilebilir olmasıdır. Böyle bir takip sistemi, model – 1’ de önerdiğimiz değişkenlerle, Şekil 4.26’da gösterilen yarı-kararlı Kerr görüntülerine uyguladık. Sabit başlangıç konumlarında elde edilen β ve α eğrileri, uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.27’de verilmiştir. Başlangıç konumları, $\Phi = 0^\circ$ (a) ve $\Phi = \pm 10^\circ$ (b)’ de olan domain duvarlarının hareketini gösteren eğriler arasında sırasıyla, $0,3 \times J_s$ ve $0,55 \times J_s$ alan yoğunluğunda bir kesişme gözlemlenmiştir. Ancak, $\Phi = \pm 20^\circ$ (c)’ deki eğriler arasında herhangi bir etkileşme söz konusu değildir. Buradan da anlaşılacağı gibi sıfır manyetik alanda, duvar eğriliği (Φ) arttıkça, yeniden organize olan domain duvarının hareketliliği azalır. Bu durum sistematik olarak, $0^\circ \leq \Phi \leq 20^\circ$ aralığında başlangıç konumlarına sahip duvar hareketinde tespit edilmiştir. Öte yandan, domain duvarlarının, yüksek alan etkisi altında kararlı yönelime sahip olması için gerekli olan alan gerilimi ortalama olarak $0,7 \times J_s$ olarak belirlenmiştir. Böyle bir tanımlamanın yapılabilmesi için tüm değişkenlerin bir araya getirilip, karşılaştırılması gerektiğinden, Şekil 4.29’da, hem başlangıç konumu hem de α ve β açısal değerleri, karşılaştırmalı $\beta(H)$ eğrilerinde gösterilmiştir. Model – 1 için kaynak noktalarındaki tek değişken olarak kabul edilen Φ değerindeki artış ya da azalış, doğrudan sapma açılarında değişimlere sebep olacak ve dolayısıyla domain yapısında da farklılaşmalar olacaktır.

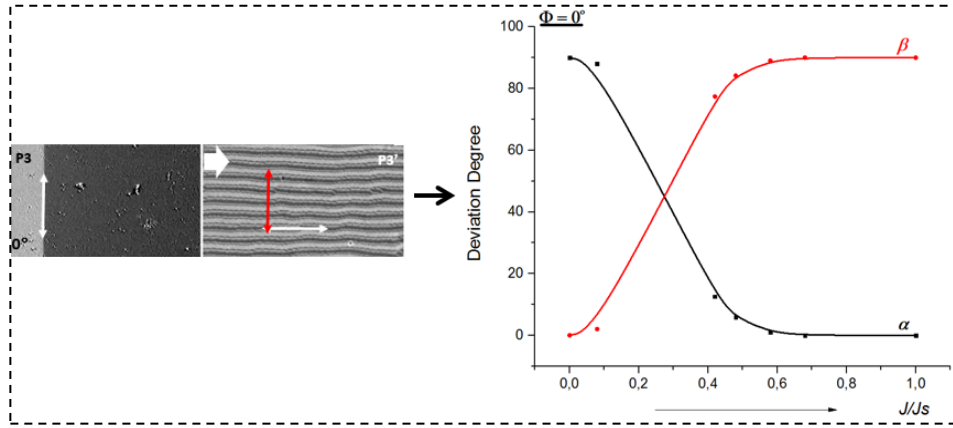


Şekil 4.27. Sıfır alanda, rastgele seçilen bir domain duvarı (P1) ve yüksek alan ile dallanmış bir örneğe dönüşen bu yapının duvarı (P1') ve kaynak noktaları (Kolay eksen ve H- doğrultusu) arasında tanımlanan sistem değişkenlerinin en açık gösterimi.

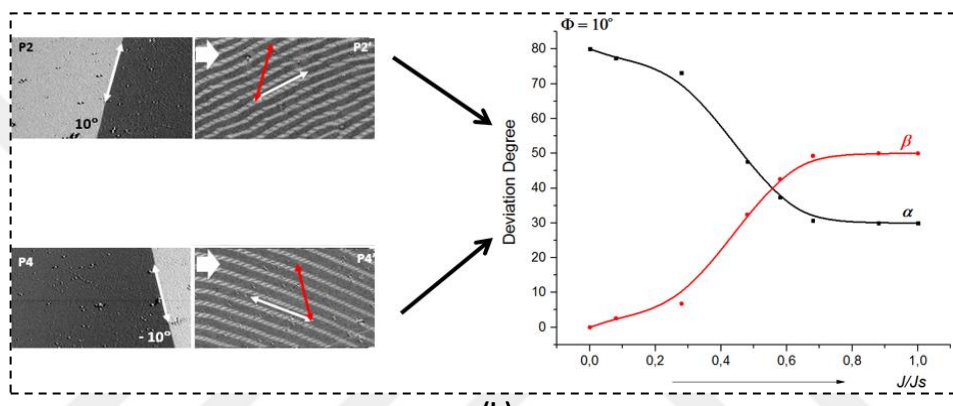
Çizelge 4.2. Dönme değişkenlerinin genelleştirilmiş tanımları

Değişken	Tanımı
Φ	Kolay Eksen – Duvarın Başlangıç Konumu (P1) arasında
β	Duvarın Başlangıç Konumu (P1) – Dallanmış Domainin (P1') konumu arasında
α	Dallanmış Domainin (P1') – Alan Doğrultusu (H) arasında

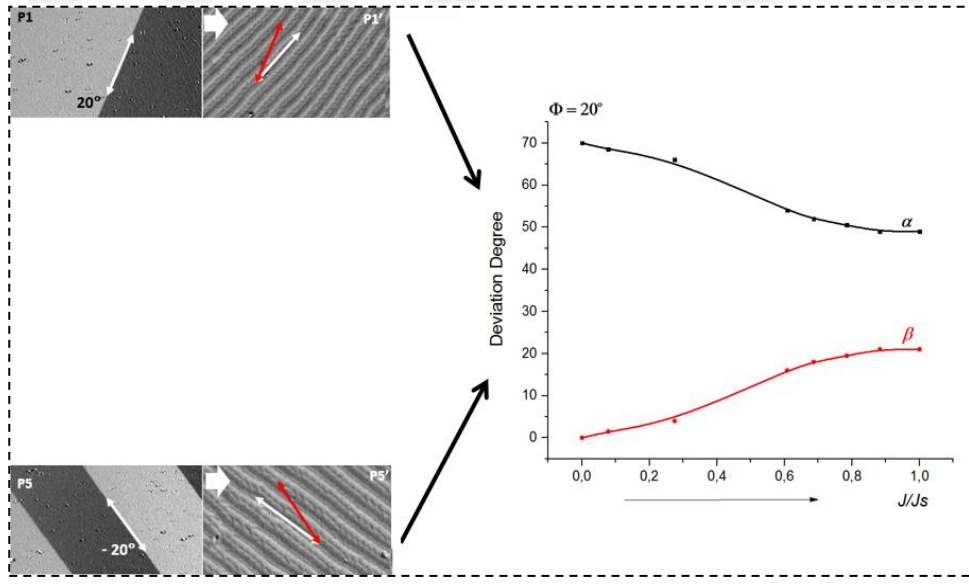
Şekil 4.28'de (a – b)' nin grafiklerinde gözlemlenen kesişim noktası, (c)' de oluşmamıştır. Bu durum, model değişkenlerinin, başlangıç konumuna bağımlılığını bir kez daha kanıtlamış olmanın yanı sıra domain yöneliminin, alan doğrultusundaki eğimin artışıyla ciddi şekilde etkilendiğini göstermektedir. Şekildeki tüm bileşenlerde, ilk konum ile uygun manyetik alan gerilimi altındaki son konum arasındaki açısal sapma, sırasıyla kırmızı ve beyaz oklarla gösterilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 4.27'de verilen kaynak eksenler göz önünde bulundurularak elde edilen grafikler, a ve b değişimlerinin çok başarılı bir biçimde tanımlayabilmektedir.



(a)



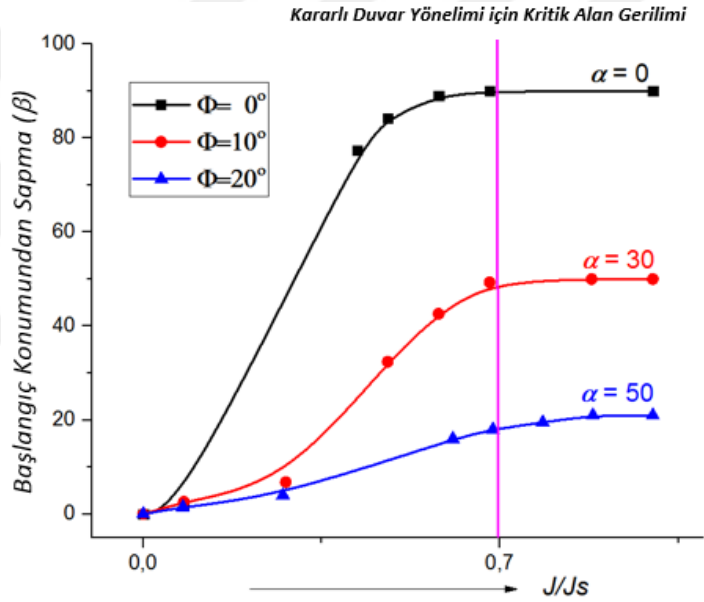
(b)



(c)

Şekil 4.28. $\Phi = 0^\circ$ (a), $\Phi = \pm 10^\circ$ (b) ve $\Phi = \pm 20^\circ$ (c) için oluşan her bir duvar yönelimi durumunda α ve β sistem değişkenlerinin gösterdikleri hem manyeto-optik hem de nicel sapma değerleri.

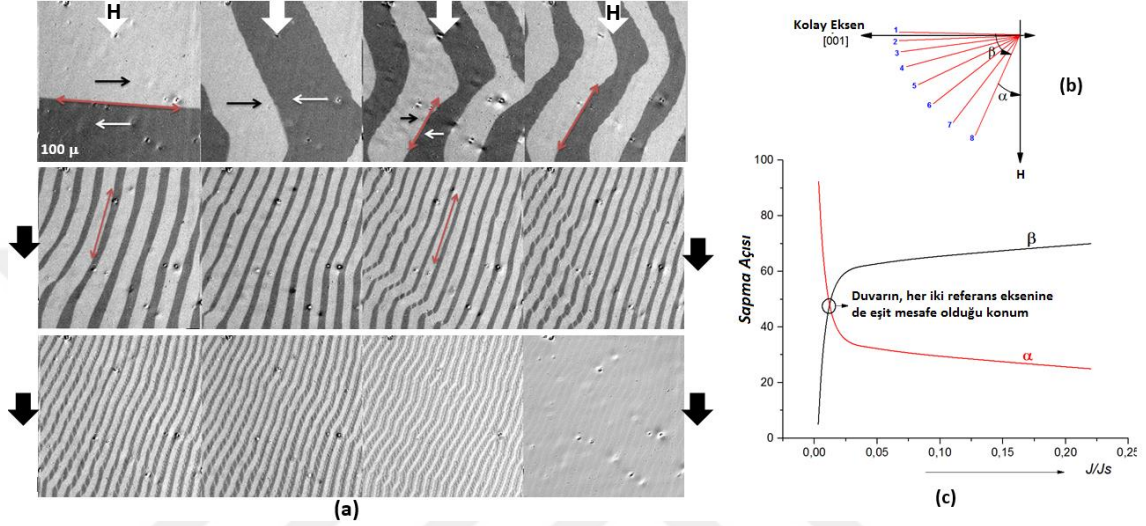
Bu bağlamda, Şekil 4.28 ve 4.29, dönme sisteminin esas değişkenlerini tanımlarken, Φ' ye olan açısal bağımlılığı göstermektedir. Model – 1'in sınır koşulları göz önüne alındığında, Şekil 4.29'da bulunan yönelim sabiti değerinin, tüm örnekler için de bir sabit kabul edilmesi pek mümkün görünmemektedir. Öyle ki, ayar örneğinde doyum mıknatıslanması, yüzey alanından dolayı oldukça yüksek değerlerde gözlenmiştir. Bu sorunun çözümü için tüm eğrilerde, manyetik alanın statik değerleri yerine alan yoğunluğu değerleri (J/J_s) kullanılmış olsa da, güvenilirliği, farklı yüzey alanına sahip malzemelere uygulanana kadar kesinlik kazanmaz. Bu doğrultuda, deliğin sağ tarafında bulunan iyi yönlendirilmiş bir grainden seçilen yaklaşık 5° eğimli bir domain duvarı, model – 1 değişkenleriyle delinmiş elektrik çeliğine uygulanmıştır.



Şekil 4.29. Domain yöneliminin kararlı olduğu kritik alan yoğunluğunda $0,7 \times J_s$ (doyum indüksiyonunun % 70' i), tüm fraksiyonlardaki yönelimin, sabit bir doğrultu üzerinde kaldığı nicel olarak gösterilmektedir.

Şekil 4.30 a'da adım adım tüm dönme hareketleri Kerr mikroskopuyla gözlemlenen domain desenlerinin kararlı yönelim doğrultusuna ulaşması $0,25 \times J_s$ 'de elde edilmiştir. Böyle bir tanımlamanın yapılması, (a)'da kırmızı oklarla gösterilen bir duvarın anlık hareketlerinin, statik Kerr görüntülerinden ölçülmesi sonucu elde edilen açısal değerlerle mümkün olmuştur. Bu dönme hareketinin bir şematik üzerinde düzenli olarak gösterimi (b)'de yapılmıştır. Burada aynı zamanda, numaralandırılmış okların her bir hareketiyle α ve β açısal değerlerinin nasıl elde edildiği de net bir biçimde görülmektedir. Öte yandan

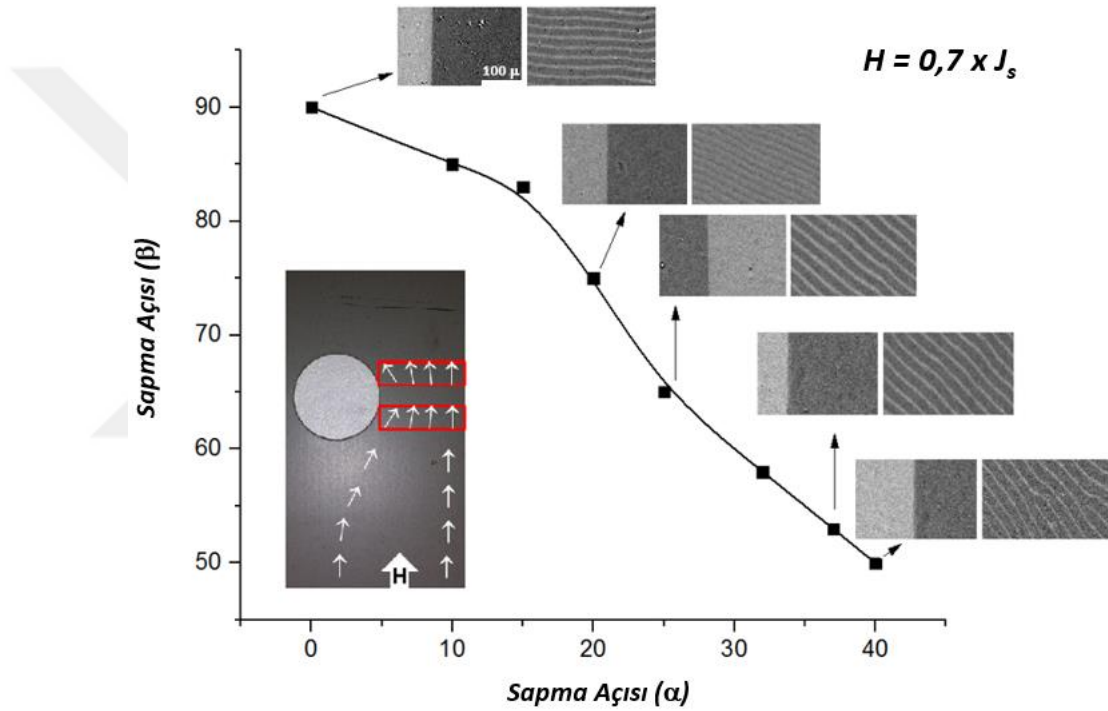
elde edilen veriler ışığında (c)'de karşılaştırılan α - β eğrileri, hem kararlı yönelimin $0,25 \times J_s$ 'de oluşabileceğini hem de ayar örneğinden elde edilen değer, başka bir değişken olarak tanımlanabileceğini göstermiştir. Böylece anlaşılmıştır ki, kararlı durum sabiti sadece malzemeye göre değil, aynı zamanda söz konusu malzeme içerisindeki konuma göre de değişmektedir. Yani artık bir *sabit* tanımlaması yapılamaz.



Şekil 4.30. Kerr görüntüleriyle (a)' da verilen desenlerdeki dönme, mıknatıslanma ve alan doğrultularından elde edilen açısal değerler, (b)' de şematik olarak gösterilmiştir. (c)' de ise α ve β açısal değerlerinin alan gerilimlerinde nasıl oluştuğu gösterilmiştir.

Söz konusu modelin değişkenleri incelendiğinde, domain yönelimi vasıtasıyla akı dağılımının nicel olarak gösterilebileceği anlaşılmıştır. Bununla ilgili olarak, deliğin sağ alt tarafında, delik kenarından, malzeme kesim kenarına kadar olan bölgede yatay olarak tüm iyi yönlendirilmiş grain ve domain desenleri incelenmiş ve yönelim doğrultuları üzerinden, Şekil 4.31'de ki gibi bir $\beta(\alpha)$ -eğrisi türetilmiştir. $\beta(\alpha)$ -eğrisinin ilgili noktalarına iliştilen sıfır ve $0,7 \times J_s$ alan yoğunluğundaki yarı-kararlı Kerr görüntüleri, o noktada elde edilen yönelim doğrultusunu göstermektedir. Eğrinin en tepesindeki görüntü, örneğinin kesme kenarından; en altındaki ise delik kenarından alınmıştır. Eğriye iliştilirilmiş fotoğraf dizilerinden herbiri, soldan sağa, sıfır ve $0,7 \times J_s$ manyetik alan yoğunluğunda elde edilmiş Kerr görüntüleridir. Sistem değişkenlerinin açısal değerlerine göre, delikli malzeme fotoğrafı üzerinde tanımlanan parabolik moment dağılımı, eğriden türetilen, delik etrafındaki manyetik alan dağılımının bir benzeşimi olarak verilmiştir. Bu durumda, Şekil 4.26 ve 4.27'de tüm değişkenleriyle tanımlanan modele göre, manyetik alan, örnek kenarına yaklaştıkça dik olarak etki etmekteyken, delik kenarına doğru

değişkenlerine ayrılıp eğimli bir yol izlemektedir. Bu durum, şekil içine yerleştirilen delikli örnek görüntüsü üzerindeki oklarla gösterilen şematik akı dağılımı çiziminde ifade edilmiştir. Böylelikle, deliğin manyetik alanı bozucu etkisinin boyutları sayısal olarak gösterilmiş olur. Gözlemlenen bölgelerin delik ve örnek kenarına olan uzaklıkları da ölçülmüş ve anizotropi içeriğinden bağımsız olarak, akı dağılımına yaklaşık % 60'lık bir bölgede doğrudan, %10' luk bölgede, grain yönelimine bağlı olarak kısmi şekilde etki ettiği tespit edilmiştir. Örnek kenarında (ilgili bölgenin kalan % 30' u) ise alan uygulandığı doğrultuda, ortalama domain dizilimine tam 90° olarak enine etki eder.



Şekil 4.31. Deliğin sağında oluşan dönme değişkenlerinin model – 1' deki değişkenlere uygulanmasıyla ortaya çıkan β (α) eğrisi.

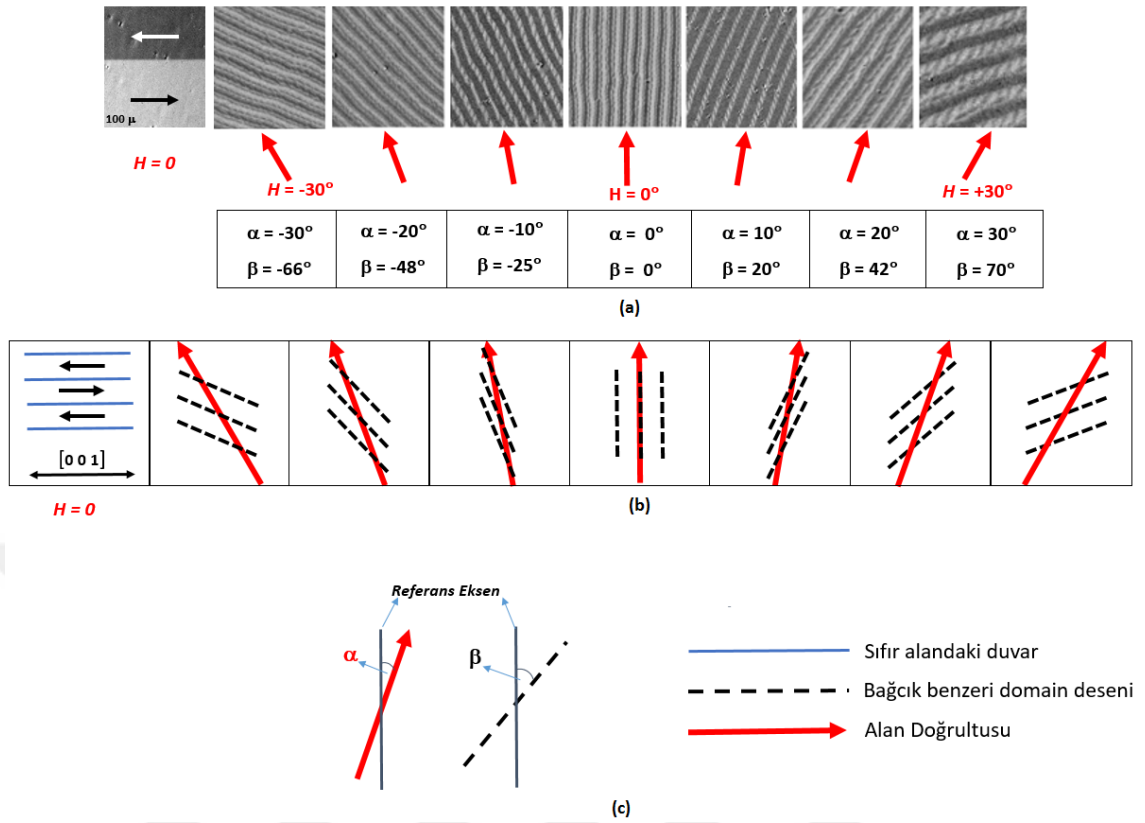
Önerilen modelin uygulanabilirliği, tanımlanan 3 değişkenden en az birinin bilinmesiyle mümkün olabilmektedir. Bunun yanı sıra, gözlemlenen grainin kristalografik yönelim dışı sapma açıları konusunda da oldukça katı kuralları vardır. Öte yandan, kısmi olarak bazı değişkenlerde sabitlik gereksinimi (Φ ya da H-doğrultusu) modelin en önemli sınır koşullarındandır. Çok karmaşık mikro yapı dizilimine sahip malzemelerde, modelin çözülmesi oldukça zorlaşır. Doğrudan Kerr görüntülerinden ölçülen değişkenlerin doğruluğu her ne kadar kanıtlanmış olsa da, bu kadar çok değişkenin, sisteme

uygulanması, kullanıcı açısından zorluklar üretebilir. Yine de, model – 1'in Örnek – 2'de oluşan dönme sistemine getirdiği açıklamalar ayar örneğinde elde edilen değişkenlerle büyük ölçüde örtüşmektedir. Dahası, delik etrafında oluşan akı dağılımı, model – 1'de tanımlanan dönme sistemiyle oldukça başarılı bir biçimde açıklanabilmektedir.

4.2.3.4. 2-Değişkenin ($\alpha - \beta$) kullanıldığı sistem [Model – 2]

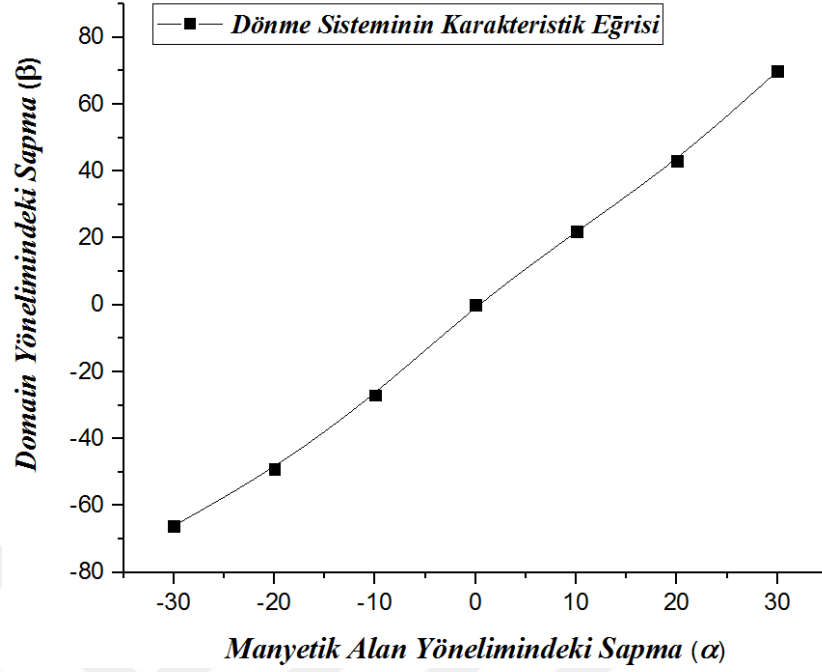
Model – 1' in karmaşık yapısı ve değişken sayısının fazlalığından dolayı, sadece sistem değişkenlerinin değiştirildiği, model – 2 önerilmiştir. Bu modelde, kaynak eksen sayısı bire, değişken sayısı ise ikiye indirilmiştir. Bu bağlamda, kullanıcının basitçe anlayabileceği bir model ortaya konmuştur. Şekil 4.32'de, şekil 4.25'de verilen ayar örneğinin Kerr görüntüleri üzerinden yeni modelin değişkenleri tanımlanmıştır. Model – 2' de, domain desenleri sabit konumda kabul edilmiş (yani tüm senaryolarda $\Phi = 0^\circ$), uygulanan manyetik alan ise delik etrafında eğimli olması beklendiğinden, $\pm 30^\circ$ aralığında geliş açısıyla kabul edilmiştir. Buna göre, belirlenen bağımsız bir kaynak eksenine göre, α ve β olmak üzere iki değişken açı değeri tanımlanmıştır. Her ne kadar kaynak eksenini, bağımsız olarak alınmış olsa da, kolay eksene 90° lik konumda alınması, kolay ekseni farklı bir malzemede çalışıldığında, göz önüne alınması gereken önemli bir değişkendir. Bu çerçevede, α , manyetik alan doğrultusundaki, β ise yeniden organize olan bağcık benzeri ya da dallanmış domain desenlerindeki açılal sapmaları ifade etmek üzere seçilmiştir. Şekil 4.26'da ki model tanımından bağımsız olarak ayar örneğinden alınan Kerr görüntülerinin, ölçülen α ve β değerleri, Şekil 4.32 a'da verilmiştir. Söz konusu görüntüler üzerinden gerçekleştirilen ölçümler, (c)'de gösterilen yöntemle yapılmış ve (b)' de verilen şematik çizimlerle gösterilmiştir. Çizimlerde verilen kesikli ve düz çizgilerle okların tanımlanması ve renklere göre farklılıkları (c)' de yine ayrıntılarıyla gösterilmiştir.

Şekil 4.32'de verilen, sıfır alandaki ($H = 0$) çok iyi yönlendirilmiş domain dizilimi göz önüne alındığında, $\pm 30^\circ$ aralığında onar derecelik açılarla, 7 periyotta incelenen sistemde, dallanmış domain yönelimlerinin, $0,7 \times J_s$ alan yoğunluğundaki, açı değerlerinin elde edilmesini esas alınmıştır. Model – 2'nin bu tanımlamasıyla, model – 1'den çok daha basit bir yaklaşımı olduğu net bir biçimde ortaya konmuştur.



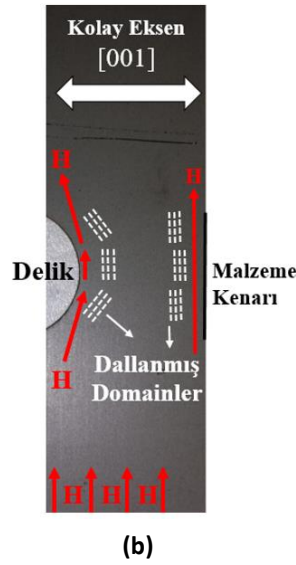
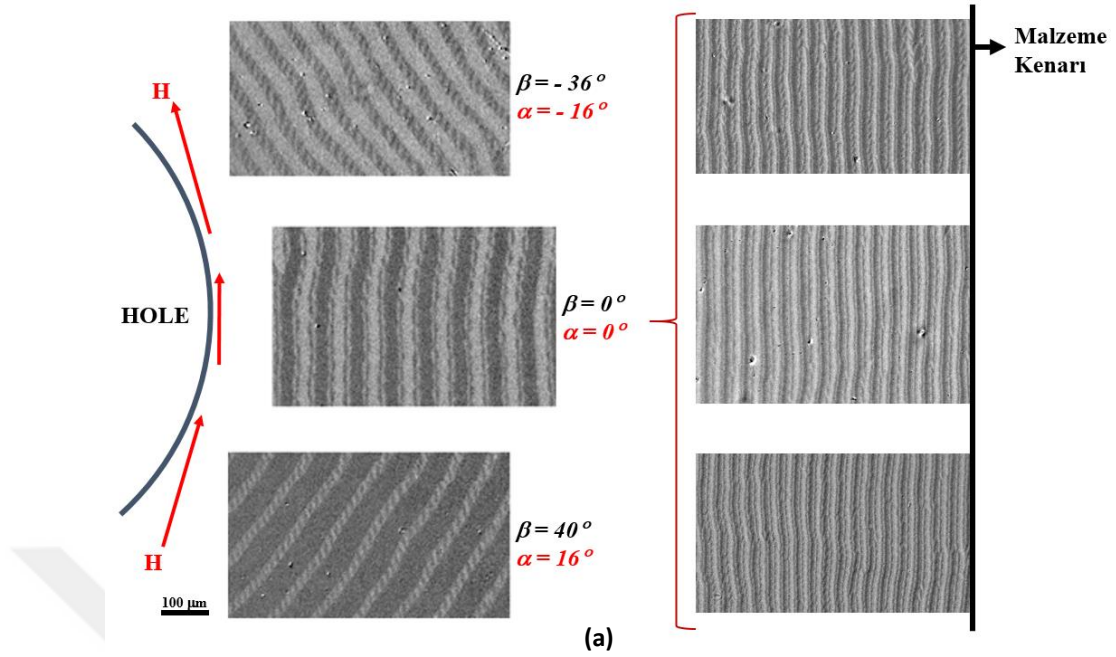
Şekil 4.32. Dönme sisteminin, Model – 2 ile tanımlanması. Domain dönmesi (b)' de, (c)' de tanımlanan mekanizmaya göre şematize edilmiştir. Değişkenlerin değerleri, (a)' da Kerr görüntüleri altında verilmiştir.

Ayar örneğinden elde edilen değerler, domain yönelim doğrultularının (β), görüntü üzerinden ölçülmesi ve alan doğrultularının (α) önceden bilinmesiyle mümkün olmuştur. Bu doğrultuda, elde edilen bu değerler, model – 2'nin ayar birimleri olarak kabul edilmiştir. Bunun anlamı, ayar birimlerinin kullanılmasıyla üretilcek bir $\beta(\alpha)$ grafiğinin, dönme sisteminin tüm karakteristik bilgilerini sağlayabilecek olmasıdır. Böylelikle, herhangi bir yüzey domain yapısında, bu iki değişkenden birinin herhangi bir şekilde bulunması ya da bilinmesiyle, tanımlanan karakteristik $\beta(\alpha)$ grafiği üzerinden diğer değişken de bulunabilmiş olur. Ayar örneğinden alınan ve Şekil 4.32'de tanımlanan model değişkenlerinin kullanıldığı, hemen hemen doğrusal artış gösteren $\beta(\alpha)$ grafiği, Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Dönmenin sistematik tanımlaması olarak kabul edilen eğri doğrusala yakın bir eğime sahiptir.



Şekil 4.33. Ayar örneğinden elde edilen verilerle üretilmiş olan $\beta(\alpha)$ grafiği.

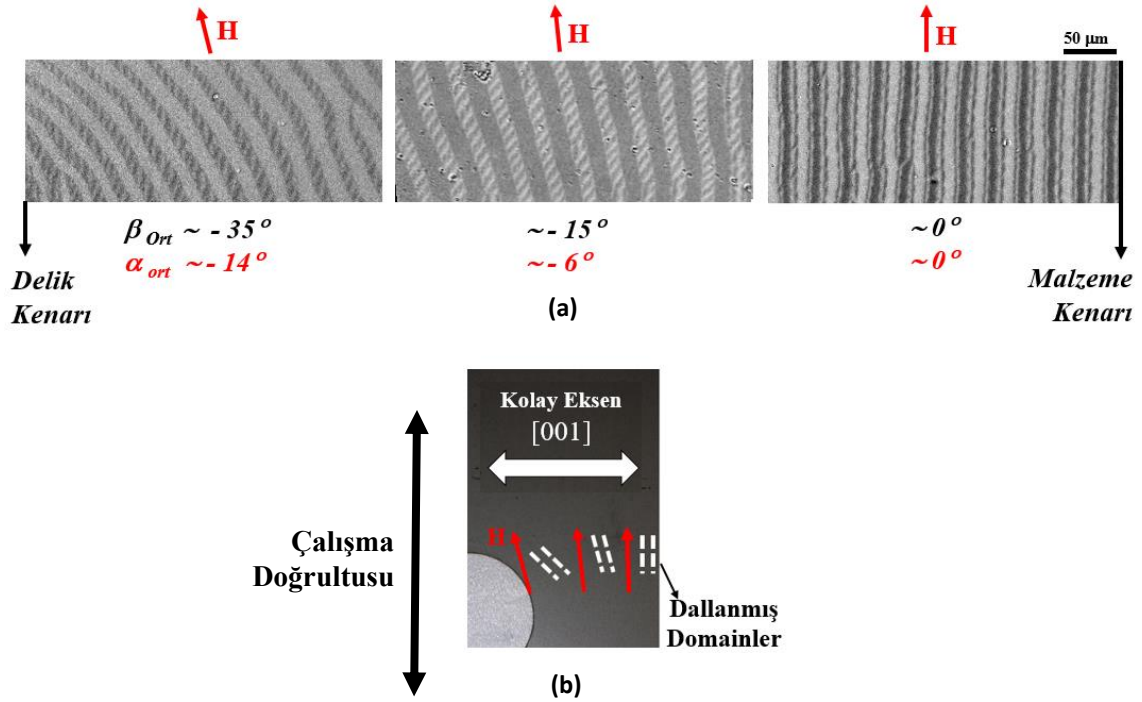
Bu eğri, standart boyutlara sahip, iç ve yüzey domain ayrımı bulunan tüm elektrik çeliklerinde, mikro yapılarına dik ya da eğimli alan uygulandığında, oluşacak domain yöneliminin karakterize edilmesinde kullanılabilir. Model – 2’de tanımlanan sisteminin karakteristiği olarak kabul edilen $\beta(\alpha)$ grafiği, Örnek – 2’ye de, delik etrafındaki manyetik alan doğrultularını nicel olarak bulabilmek için uygulanmıştır. Bu çalışma söz konusu örnekte, hem bölgesel hem de küresel ölçekli olarak tüm delik çevresinde gerçekleştirilmiştir. İlk bulgular, manyetik alanın, deliğin sağ tarafında delik kenarına yakın, doğrusal olmayan bir doğrultu üzerinde ilerlediğine işaret etmektedir. Model – 1’den de edinilen izlenime göre, manyetik alan ve bağlantılı olarak akı dağılımı doğrultusu, delik etrafında, delik boyutu ve şekline göre parabolik benzeri doğrultularla gerçekleşmektedir. Şekil 4.34 a’da verilen Kerr görüntülerinde, dallanmış ve bağcık benzeri domain desenlerinin yönelimleri, açık bir şekilde, bu öngörüğü doğrulamaktadır.



Şekil 4.34. Delik ve malzeme kenarları civarında gözlenen dallanmış ve bağcık benzeri domain yönelimlerinin (β) ve alan doğrultularının (α) ikinci modele göre sayısal tanımlaması (a) ile gerçek malzeme fotoğrafına çizilen şematik gösterimi (b).

Öte yandan, söz konusu şekilde, malzemenin kesilme kenarına doğru delik kenarındaki görüntülerin iz düşümündeki domain yönelimleri de verilmiştir. Burada gözlemlenen yapılardan, delik kenarından malzeme kenarına doğru, alan doğrultusundaki bozulmaların azaldığı izlenimi doğmaktadır. Öyle ki, enine ve yüksek manyetik alan etkisi altında, malzeme kenarında, domain yönelimleri delik boyunca tek bir doğrultu üzerinde uzanmaktadır. Bu doğrultu, ayar sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ise alanın,

domainlere tam 90° 'de etki ettiği senaryodaki gibi bir domain dizilimine sebep olmuştur. Pratikte, bu bölgede, domain desenlerine etki eden alan doğrultusunun belirlenmesi imkânsızdır. Oysa Model – 2’de önerdiğimiz sistem değişkenlerini göz önüne alırsak, değişkenlerden birini ölçüm yoluyla elde edebiliriz. Şekil 4.34’te bu değişken, domain yönelim doğrultusunu ölçebildiğimizden dolayı β olmuştur. β , bağcık benzeri domain yöneliminin açısal değişkeni olduğundan, değeri, buradaki yarı-kararlı Kerr görüntülerinden, hem pozitif hem de negatif değerde bulunabildi. Alan doğrultusundaki sapmanın bir sonucu olarak farklı doğrultulara yönelen desenler, Şekil 4.25’te verilen sıfır alandaki Kerr görüntüsündeki gibi çok iyi yönlendirilmiş bir grain içerisinde seçilmiştir. Şekil 4.32 a’da ki domain yönelimleri ve uygulanan alan doğrultuları (α) göz önüne alındığında, delik çevresinde pozitif ve negatif doğrultularda bir manyetik alan dağılımı olduğu ispatlanmış olur.



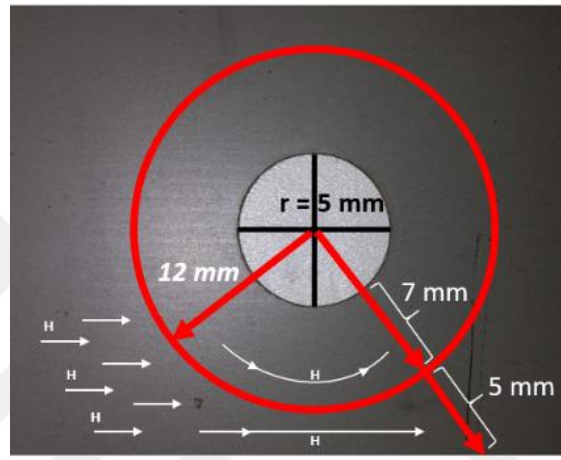
Şekil 4.35. Domain yönelimindeki sapmanın manyeto-optik analizi (a). Delik kenarından uzaklaştıkça, sistem değişkenlerinin değerleri sıfıra doğru yaklaşır. (b)’de ki şematik gösterimi, tamamen (a)’da ölçülen α - β değerlerinden esinlenilerek çizilmiştir.

Delik ve malzeme kenarlarında gerçekleştirilen manyeto-optik gözlemler, bu iki kesme kenarı arasında, kademeli bir şekilde, delik etkisinin domain dizilimi üzerindeki etkisinin azaldığına işaret etmektedir. Bunu ispatlamak için, delik civarında, domain

yönelimindeki sapmanın sıfırdan farklı olduğu ($\alpha \neq 0$), çalışma eksenine dik (kolay eksen doğrultusunda) ince bir kesit alanı incelenmek üzere seçilmiştir. Deliğin sağ üst kısmında, delik ve malzeme kenarları arasında çalışma eksenine dik seçilen ince bir kesit alanı boyunca, Şekil 4.35 a'da bu bölgenin 3 görüntüsü verilmiştir. Bu deneysel çalışma setinde, tüm değişkenler, Model – 2'de tanımlanan değişkenler ve eksenler üzerinden ölçülmüştür. Bu bağlamda, delik kenarından malzeme kesme kenarına doğru domain desenlerinde gözlemlenen yapısal ve yörüngesel farklılıkların, manyetik alan doğrultusundaki dalgalanmalardan kaynaklandığı gösterilmiştir. Hem domain yöneliminde hem de alan doğrultusundaki sapmaların sayısal açıklamasını sağlayan β ve α -değerlerinin kullanılmasıyla, Şekil 4.35 b'de ki şematik çizim elde edilebilmiştir. Model – 2'de ki tüm çizimlerdeki koşulların aynısının kullanıldığı (b)'de ki görüntü, (a)'da elde edilen domain yönelimlerinin geniş perspektiften görülmesine imkan tanımıştır. Anlaşılacağı gibi, delik civarında, yaklaşık 35° lik sapma açısına sahip olarak yeniden dizilen domainler, Şekil 4.33'te verilen genelleştirilmiş β (α) grafiği üzerinden uygun alan doğrultusuna eşleştirilmiş ($\alpha=14^\circ$) ve bölgedeki manyetik alan doğrultusu nicel olarak tespit edilebilmiştir. Bu yöne göre yapılan çalışma, malzeme kenarına kadar uygulanmış ve sistematik bir biçimde α -değerindeki azalma gösterilmiştir.

Hatırlanacağı gibi Şekil 4.18'de, Kerr kontrastının yardımıyla delik etrafında ciddi bir kutuplanma tespit edilmiş ve bu durum, uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak şiddet grafiği ile de desteklenmişti. Açık bir şekilde görülmektedir ki, yüksek çözünürlüklü Kerr modülünün kullanımıyla gözlemlenebilen bağcık benzeri ve dallanmış domain yönelimleri de bu sonucu desteklemektedir. Öyle ki, manyetik akı dağılımının domain yönelimleriyle nicel olarak gözlemlendiği, Şekil 4.34 a ve 4.35 a, bölgesel olarak pozitif ve negatif yönelimleri, Kerr görüntüleriyle sağlamaktadır. Ayrıca bu Kerr görüntülerinden elde edilen domain yönelimleri ile manyetik mikro yapıların deliğe olan mesafesine göre nicel olarak ne kadar yönelim dışına saptırıldığı da tespit edilebilmiş oldu. Örneğin, Şekil 4.34 b'de verilen şematik gösterimde kesikli çizgiler ile gösterilen bağcık benzeri ve dallanmış domainlerin doğrultuları, deliğe yakın bir noktadan alınmıştır ve bu nedenle, deliğin hem sağ hem de solunda, ciddi bir sapma olduğu tespit edilmiştir. Ancak, şekil 4.35 b'de verildiği gibi yerel olarak bu bölge incelendiğinde, delik kenarından malzeme kenarına giderken, 7 mm'den sonra, hemen hemen hiç sapma oluşmadığı fark edilmiştir. Yani malzeme kenarına 5 mm ve daha mesafelerde, manyetik

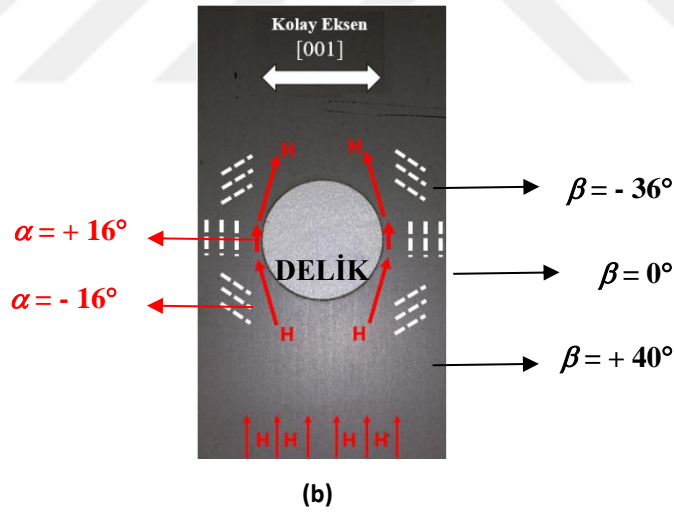
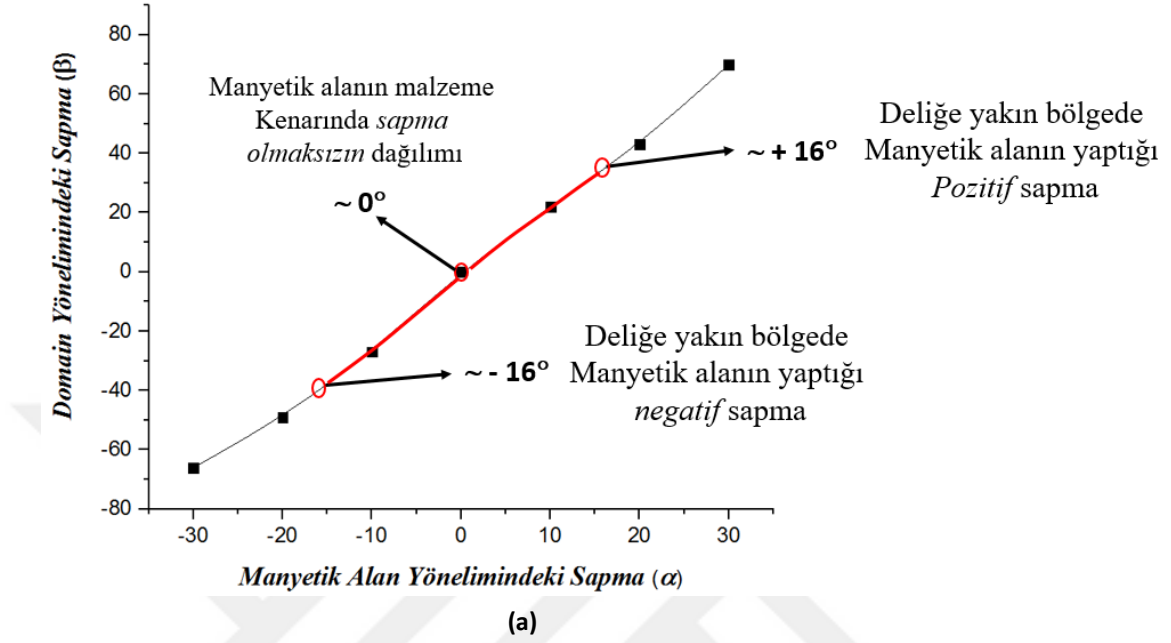
alanın doğrusal bir yayılma doğrultusuna sahip olduğu anlaşılır. Şekil 4.35’de incelenen, delik ve malzeme kenarları arasındaki bölgenin 12 mm olduğu bilindiğinden, deliğin buradaki bozucu etkisinin, kenarından itibaren 7 mm’lik bir yarıçapla kapsanan bölgede (tam merkezden hesap edilirse; 5 mm delik yarıçapı ve 7 mm çevresinde kapsadığı alan olmak üzere, 12 mm’lik bir alan) oluştuğu tespit edilmiş oldu. Aynı çalışma, diğer bölgelerde de yapılmış ve parabolik benzeri alan dağılımının etkisi ile delik etrafındaki bozucu etkinin, doğrusal olmayan bir şekilde dağıldığı anlaşılmıştır. Bu durum, Şekil 4.36’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Deliğin, manyetik alanı doğrultusundan saptıran bozucu etkisi, merkezinden itibaren 12 mm’lik bir yarıçapta çembersel bir alanı kapsamaktadır.

Elde edilen verilerin, genelleştirilmiş β (α) grafiğine uygulanmasıyla ortaya çıkan manyetik alan dağılımı ise Şekil 4.37 a’da net bir biçimde ortaya konulmuştur. Manyetik alanın, deliğin bozucu etkisi altında, $-16^\circ < \alpha < +16^\circ$ aralığında doğrusal olmayan doğrultular izlediği gösterilmiştir. Kırmızı ile işaretlenen eğrinin bir bölümü, delik civarında alanın izlediği doğrultuların sınırlarını verir (a). Ayrıca, söz konusu bölgede her iki değişkendeki anlık değişimlerin en büyük ve en küçük noktaları da yani sınırları da belirlenebilmiştir. β (α) grafiğinin geçerliliği, domain yöneliminin pozitif ve negatif doğrultuda farklı değerler vermesine rağmen alan doğrultusunda aynı değeri vermesiyle anlaşılabilir. Bu durum aynı zamanda, delik etrafındaki kuvvetli kutuplanmanın da sebebini açıklamak için oldukça güçlü bir kanıttır. Bu doğrultuda, Model – 2 değişkenlerinin tanımlandığı tüm görüntülerin ve sayısal açıklamanın gösterildiği β (α) grafiğinin yardımıyla, Şekil 4.37 b’de delik etrafında oluşan domain dağılımı küresel

olarak çizilebilmiştir. Buradaki tüm bileşenlerin doğrultuları, Çizelge 4.3'te verilen değerler esas alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.37. Genelleştirilmiş $\beta(\alpha)$ grafiği üzerinden delik etrafında oluşan domain yönelimi ve alan doğrultularının belirlenmesi (a). Delik etrafında oluşan alan ve domain dağılımı, (b)'de şematik olarak gösterilmiştir.

Böylelikle, Model – 2 değişkenleriyle elde edilen $\beta(\alpha)$ grafiği, manyetik alan dağılımının delik çevresindeki davranışlarını izlemek için oldukça kullanışlı bir yol sağlamıştır. Bu durumun çeşitli yansımaları da tartışılabilir. Örneğin, delik içerisinde hava yani manyetik olmayan ve geçirgenliği 1 civarında olan (akının geçişi için imkânsız)

bir yapı üzerinde çalışıldığından, malzeme içerisinde bu fiziki koşullara bağlı kalmak suretiyle kendiliğinden oluşan ya da bir dış etmenle oluşturulan, ortamlarla karşılaşıldığında da bu davranış beklenebilir. Ancak şu da göz önünde bulundurulmalıdır ki, bu ortamın ya da yapının, boyutu, şekli ve konumu gibi fiziksel değişkenleri, her iki modelde de sabit kabul edilmiştir. Çünkü Örnek – 2'nin delik çapı, tüm malzemelerde sabit (10 mm) alınmış ve delme işlemi de aynı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak yine de beklenen, delik çapının azaltılmasıyla β ve α -değerlerinde de bir azalma olmasıdır. Bu durum, deliğin çapındaki azalmayla malzeme içerisindeki manyetik olmayan ortamın da azaltılacağı ve dolayısıyla zıt mıknatıslayıcı alanın daha da azalacağı bilgisi göz önünde bulundurulduğunda, söylenebilir.

Çizelge 4.3. Ayar ve delikli malzemelerden elde edilen Model – 2 değişkenlerinin karşılaştırılması

Kalibrasyon Numunesi		Delikli Malzeme	
Domain Yönelimi (β)	Alan Doğrultusu (α)	Domain Yönelimi (β)	Alan Doğrultusu (α)
70°	30°	40°	16°
49°	20°		
27°	10°		
0°	0°	- 36°	- 16°
- 22°	- 10°		
- 43°	- 20°		
- 66°	- 30°		

Tüm modellerde üzerinde çalışılan Kerr görüntüleri, çok iyi yönlendirilmiş grainlerden alınmış anlık görüntülerdir. Ancak standart ölçeklerdeki %3 – SiFe transformatör çeliği malzemeleri her ne kadar temizlik ve ısıl müdahaleye maruz bırakılsa da, yapısında kristalografik yönelim dışı sapma açısı gösteren, çivi, tarak ya da çam ağacı benzeri gibi TD ve bağlı olarak grainler gözlemlenebilir. Bu durumda beklenen, TD yoğunluğuna göre kristalografik yönelim dışı sapma açısı tahmin edilebilen- öngörülebilir çivi benzeri domainlerin bu açı değerlerinin de, sıfır mıknatıslanmada hesaba katılmasıdır. Ancak yönelim dışı sapmanın üç boyutlu doğası (düzlem-içi ve düzlem-dışı) göz önüne alındığında, çalışmanın güvenilirliği sorgulanabilir. Bunun yerine, sapma açısı nispeten düşük kristallerde, domain duvarı bazen seçilebildiğinden, uygun alan uygulamasıyla, dallanmış domainlerin yönelimleri, Model – 2 değişkenlerine göre ölçülüp, sıfır alan

durumuyla ile karşılaştırılabilir ve aradaki fark, kristalin yönelim dışı sapma açısı olarak tanımlanabilir. Böylece, kristalografik bir yapının, mikro düzeyde nicel tanımlaması sağlanmış olur.

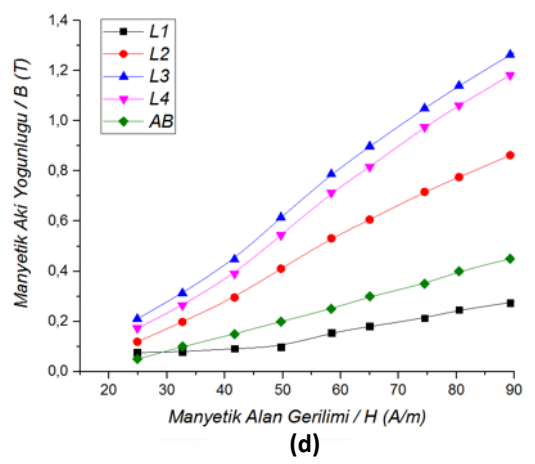
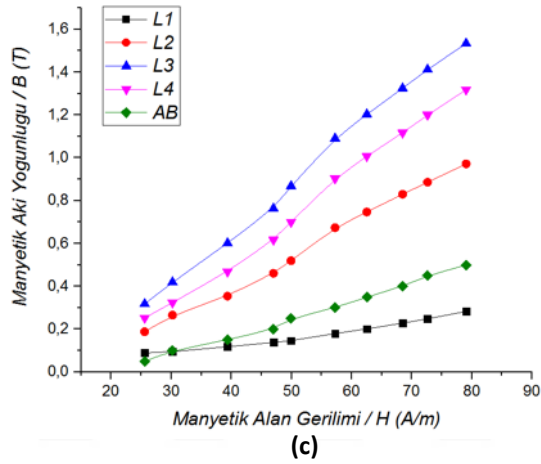
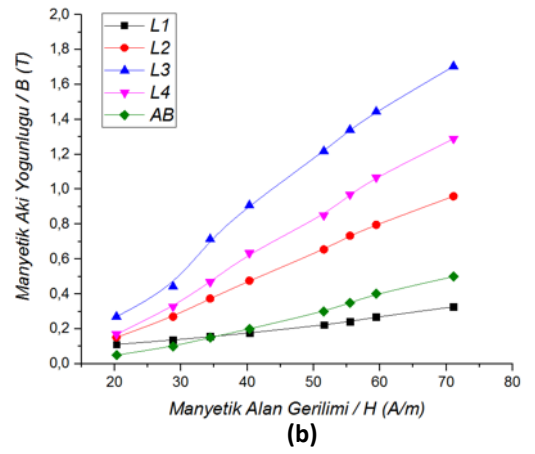
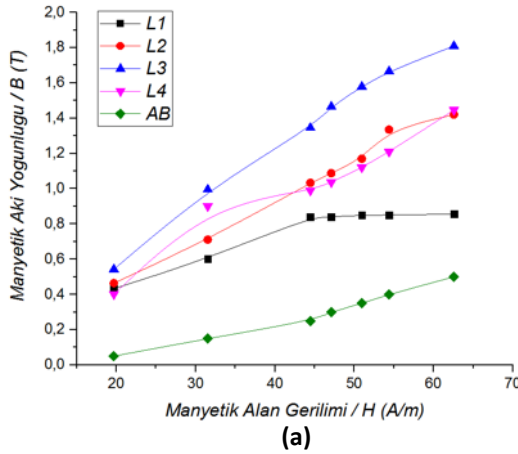
4.3. Örnek – 3 (Yönlendirilmemiş Elektrik Çeliği) Deneysel Sonuçları

Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinde, bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi farklı tip delme işlemi ve malzeme tasarımı esas alınmıştır. Bununla birlikte, bölüm 3.3.2’de ayrıntılarıyla aktarıldığı gibi ölçme devresi de diğer devreden daha farklı olarak el ile kontrol edilen bir sistemdir. Bu bağlamda, ilgili bölgelerdeki akı dağılımındaki pikler esas alınarak, 0,5 T’da her bir bobinden elde edilen mıknatıslanma eğrisi, frekansın ve alanın birer fonksiyonu olarak karşılaştırılmış ve bölgesel manyetik bozulmalar hakkında yorumlar yapılabilmektedir.

4.3.1. Mıknatıslanma eğrileri ve yorumlanması

Bu örnekten elde edilen tüm mıknatıslanma eğrileri, Şekil 3.15’te verilen ölçme devresinin kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Örneklere, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz ve 400 Hz olmak üzere 4 farklı frekans değeri, sabit alan geriliminde aşama aşama uygulanmıştır. Gözlemlenen sinüs dalga bozulmaları esas alınarak, 0,5 T akı değeri, tüm bölgelerde kurulan bobinler için en büyük değer olarak kabul edilmiştir. Öyle ki, karşılaştırma yapabilmek ve tüm bölgelerdeki (delik çevresi ve AB) akı yoğunluğunu tespit etmek ancak böyle mümkün olabilmektedir. Şu da unutulmamalıdır ki, malzeme graini yönlendirilmemiş olduğundan, en büyük değerlerin, bir GYEÇ’de çok daha düşük değerlerde elde edilmesi beklenen bir durumdur.

Bu bağlamda, Şekil 4.38 – 4.39’da, sırasıyla, yönlendirilmemiş çeliklerindeki büyük ve küçük deliklerin etrafındaki bobinlerden elde edilen 50 Hz – 400 Hz frekans aralığındaki mıknatıslanma eğrileri verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.4 – 4.5’te ise elde edilen akı değerleri, uygulanan manyetik alana ve frekansa bağlı olarak her bir bobin için ayrı ayrı verilmiştir. Hem büyük (20 mm çapında) hem de küçük (10 mm çapında) deliklerin etrafındaki akı dağılımı eşit koşullarda, mıknatıslanma eğrisinden elde edildiğinden, bu bobinler arasında karşılaştırma yapmak oldukça açıklayıcı bilgiler sağlayacaktır.

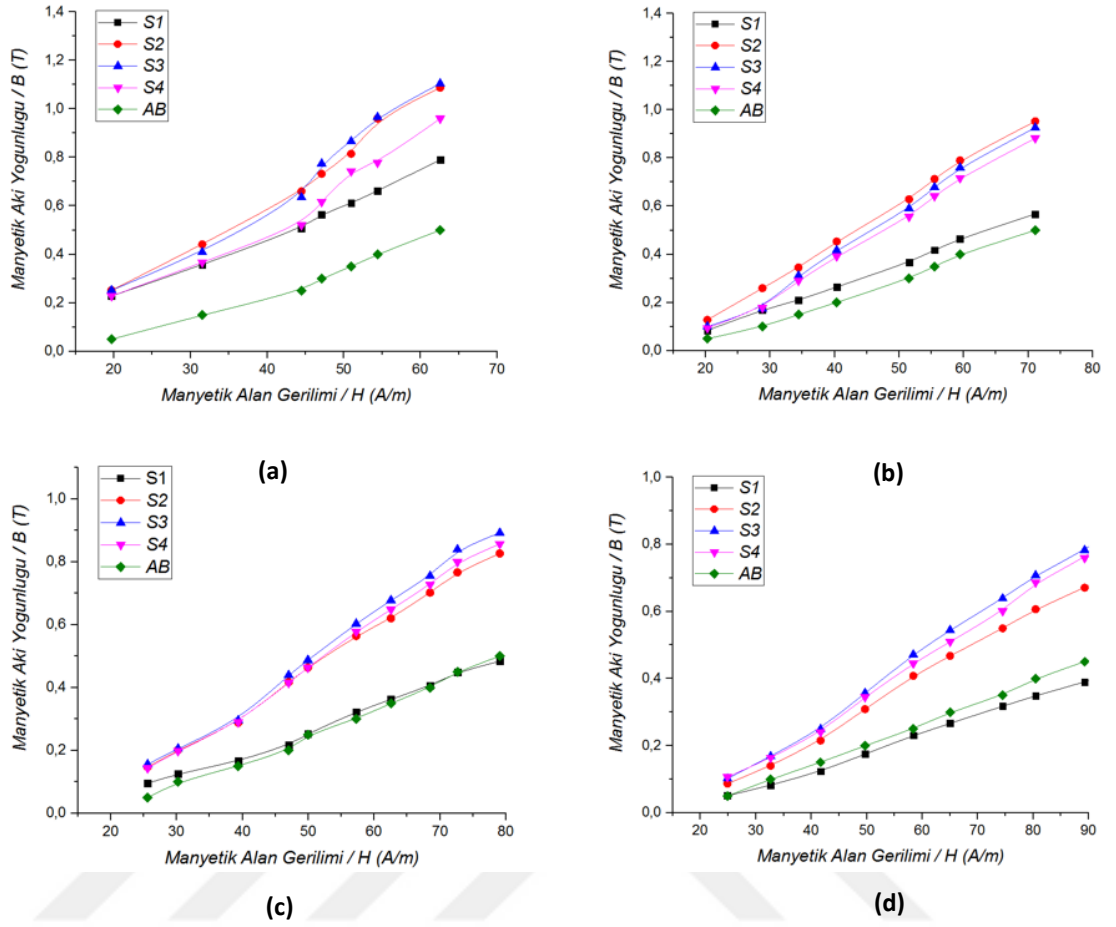


Şekil 4.38. Büyük delik etrafında “L” kodu ile sarılan bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrilerinin (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz ve (d) 400 Hz’te karşılaştırılmıştır.

Öncelikle, Şekil 4.38’de ki ayrıntılı karşılaştırmaya göre, her frekans değerinde, deliğe 25°’lik açıda sarılan L3 kodlu bobinden elde edilen eğri, uygulanan her frekans değerinde, birim alanda çok hızlı bir yerleşmiş akı artışının oluştuğunu ispatlamaktadır. Bunun yanı sıra, 50 Hz’te genel olarak gözlenen kararsız eğriler, frekans artışıyla üniform bir yapıya yaklaşırlar. Aslında buna benzer bir tespit, Şekil 4.4’te B_r değerlerinin karşılaştırılmasında da, GYEÇ için yapılmıştı. Ancak orada, muhtemelen kristalografik yapısından dolayı, eğriler arasındaki tutarlılık 50 Hz sonrası sağlanmaya başlamıştı.

Çizelge 4.4. Büyük delik etrafındaki “L” kodlu bobinlerden ve AB’den herbir frekans değerinde ayrı ayrı elde edilen akı yoğunluğu değerleri

Frekans (Hz)	H (A/m)	L1 (T)	L2 (T)	L3 (T)	L4 (T)	AB (T)
50	19,70	0,43	0,46	0,54	0,40	0,05
	31,53	0,60	0,71	1,00	0,90	0,15
	44,47	0,84	1,03	1,35	0,99	0,25
	47,11	0,84	1,09	1,47	1,04	0,30
	50,95	0,85	1,17	1,58	1,12	0,35
	54,39	0,85	1,34	1,67	1,21	0,40
	62,56	0,86	1,42	1,81	1,45	0,50
100	20,29	0,11	0,15	0,27	0,17	0,05
	28,83	0,14	0,27	0,44	0,33	0,10
	34,42	0,16	0,37	0,71	0,47	0,15
	40,32	0,18	0,48	0,91	0,63	0,20
	51,54	0,22	0,65	1,22	0,85	0,30
	55,49	0,24	0,73	1,34	0,97	0,35
	59,44	0,27	0,80	1,44	1,07	0,40
	71,09	0,33	0,96	1,70	1,29	0,50
200	25,59	0,09	0,19	0,32	0,25	0,05
	30,21	0,09	0,27	0,42	0,32	0,10
	39,36	0,12	0,35	0,60	0,47	0,15
	47,02	0,14	0,46	0,76	0,62	0,20
	49,94	0,15	0,52	0,87	0,70	0,25
	57,26	0,18	0,67	1,09	0,90	0,30
	62,54	0,20	0,75	1,20	1,01	0,35
	68,49	0,23	0,83	1,32	1,12	0,40
	72,64	0,25	0,89	1,41	1,20	0,45
	79,06	0,28	0,97	1,53	1,32	0,50
400	24,89	0,08	0,12	0,21	0,17	0,05
	32,68	0,08	0,20	0,31	0,26	0,10
	41,67	0,09	0,30	0,45	0,39	0,15
	49,69	0,10	0,41	0,61	0,54	0,20
	58,40	0,16	0,53	0,79	0,71	0,25
	65,04	0,18	0,61	0,90	0,82	0,30
	74,50	0,21	0,72	1,05	0,97	0,35
	80,45	0,25	0,78	1,14	1,06	0,40
	89,30	0,27	0,86	1,26	1,18	0,45
	97,60	0,32	0,95	1,37	1,30	0,50



Şekil 4.39. Küçük delik etrafında “S” kodu ile sarılan bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrilerinin (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz ve (d) 400 Hz’te karşılaştırılmıştır.

Öte yandan, Şekil 4.38’de, teorikte, uygulanan alana 25° ve deliğin düşey doğrultusuna 65° ’de sarılan L1 bobininde ciddi dalgalanmalar tespit edilmiştir. Bu durum iki şekilde açıklanabilir. Bunlardan ilki, konum itibariyle, bu bobinin algılayacağı bölge, akı dağılımının karmaşık bir hal aldığı ve gürültüyle birleştiğinde, anlamsızlaştığıdır. Bobinlerin sarılması için açılan 1 mm’lik delikler de bu bozulmaya, akı dağılımını yönlendirerek katkı vermiş olabilir. Kaldı ki, bu delikler aynı zamanda manyetik olmayan bölge sınırlarını temsil ettiğinden, eğrideki anlamsızlığı da açıklayabilir. Diğer bir sebep ise bobinin sarımından kaynaklanan eksikliklerdir. Yani sarım esnasında, kesme kenarlarının etkisiyle, bakır tellerde oluşabilecek bir hasar, temassızlaşmaya yol açmış da olabilir. Bunu anlamanın en etkin ve kolay yolu, küçük delik etrafında, aynı konumda elde edilen eğrilerin karşılaştırması olacaktır.

Çizelge 4.5. Küçük delik etrafındaki “S” kodlu bobinlerden ve AB’den her bir frekans değerinde ayrı ayrı elde edilen akı yoğunluğu değerleri

Frekans (Hz)	H (A/m)	S1 (T)	S2 (T)	S3 (T)	S4 (T)	AB (T)
50	19,70	0,23	0,25	0,25	0,23	0,05
	31,53	0,36	0,44	0,41	0,37	0,15
	44,47	0,51	0,66	0,64	0,52	0,25
	47,11	0,57	0,73	0,77	0,62	0,30
	50,95	0,61	0,82	0,87	0,74	0,35
	54,39	0,66	0,96	0,97	0,78	0,40
	62,56	0,79	1,09	1,10	0,96	0,50
100	20,29	0,08	0,13	0,10	0,09	0,05
	28,83	0,17	0,26	0,17	0,18	0,10
	34,42	0,21	0,35	0,31	0,29	0,15
	40,32	0,26	0,45	0,42	0,39	0,20
	51,54	0,37	0,63	0,59	0,56	0,30
	55,49	0,42	0,71	0,68	0,64	0,35
	59,44	0,47	0,79	0,76	0,72	0,40
71,09	0,57	0,95	0,93	0,88	0,50	
200	25,59	0,10	0,15	0,16	0,14	0,05
	30,21	0,13	0,20	0,21	0,20	0,10
	39,36	0,17	0,29	0,30	0,29	0,15
	47,02	0,22	0,42	0,44	0,42	0,20
	49,94	0,25	0,46	0,49	0,46	0,25
	57,26	0,32	0,56	0,60	0,58	0,30
	62,54	0,36	0,62	0,68	0,65	0,35
	68,49	0,41	0,70	0,75	0,73	0,40
	72,64	0,45	0,77	0,84	0,80	0,45
79,06	0,48	0,83	0,89	0,86	0,50	
400	24,89	0,05	0,09	0,10	0,11	0,05
	32,68	0,08	0,14	0,17	0,16	0,10
	41,67	0,12	0,21	0,25	0,24	0,15
	49,69	0,17	0,31	0,36	0,35	0,20
	58,40	0,23	0,41	0,47	0,44	0,25
	65,04	0,27	0,47	0,54	0,51	0,30
	74,50	0,32	0,55	0,64	0,60	0,35
	80,45	0,35	0,61	0,71	0,69	0,40
	89,30	0,39	0,67	0,78	0,76	0,45
97,60	0,43	0,74	0,87	0,86	0,50	

Şekil 4.39’de, küçük delik etrafında, 0° ile 65° aralığında dizilen “S” kodlu bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrileri, şekil 4.38’de ki gibi, 50 ile 400 Hz arasında karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, S1 kodlu bobinden elde edilen eğrinin tüm frekanslardaki davranışlarının, L1 ile birebir örtüşmekte olduğu görülmektedir. Buradan

da anlaşılacağı gibi yukarıda bahsi geçen ilk sebep, bozulmanın açıklanması için yeterli bir kanıt olmaktadır.

Her ne kadar, “L” ve “S” kodlu bobinlerden elde edilen eğriler, uygulanan frekansa göre benzer artış trendleri gösterebilir de, genel resme bakıldığında, büyük ve küçük deliklerin manyetik özellikler açısından çok ciddi farklılıkları olduğu anlaşılmıştır. Örnek – 2’de elde edilen mikro yapı araştırmaları ve Şekil 4.13’te gösterilen, GYEÇ ve yönlendirilmemiş çelik arasındaki histeresis karşılaştırmalarını birleştirirsek, delik boyutundaki artışın, domain dizilimine çok da bakılmaksızın hızlı bir doyuma sebep olduğu yorumu yapılabilir. Şekil 4.1, 4.3, 4.7, 4.9, 4.14-15 ve 4.22, bu konuyla ilgili kaynaklardır. Ayrıca, relüktansın, delik kenarlarındaki kesit alanına bağlı olarak değiştiği hem kuramsal hem de deneysel olarak çok açık bir şekilde kanıtlandığından, böyle bir farklılık zaten beklenmelidir. Zira L3 ve L4’ün, eşit manyetik alan uygulamalarında, S3 ve S4’e göre çok daha hızlı bir doyum indüksiyonuna sahip oldukları, tüm frekanslardaki karşılaştırmalarda tek tek gözlenmiştir. Şekil 4.13’te elektrik çelikleri arasındaki manyetik özellik karşılaştırmaları da, özellikle geçirgenlikte olmak üzere Örnek – 2 ile Örnek – 3 arasında ciddi benzerlikler olduğunu ortaya koymuştur. Bundan dolayı, manyetik direncin etkisiyle L ve S kodlu bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrilerinin eğimindeki farklılık beklenen bir durumdur.

Hem L hem de S bobinlerinden elde edilen eğrilerde 2, 3 ve 4 kodlu bobinlerin birbirlerinden, az da olsa farklı eğimler vermesi, delik etrafında, akının doğrusal olmayan bir doğru izlediğinin kanıtı olarak kabul edilebilir. Zaten böyle bir tanımlama, hem Model – 1’de hem de Model – 2’de başarılı bir şekilde, nicel olarak ta kanıtlanmıştır. Şekil 4.38 ve 4.39’da ise basitleştirilmiş akı dağılım analizleri yapılmıştır. Frekansa bağımlı olarak akı yoğunluğundaki dağılım üzerinden manyetik alan doğrultuları kestirilmeye çalışılsa da, mikro yapı analizlerinin yapılması, Örnek – 3’ün kristalografik yapısından dolayı mümkün olmamıştır. Çünkü Kerr mikroskobunda, bir malzemenin yüzey domainlerinin verimli bir şekilde gözlemlenmesi, Kerr hassasiyetinin boyuna ya da enine ayarlanmasıyla mümkündür. Fakat Örnek – 3’te grainler yönlendirilmediğinden böyle bir ayarlama yapmak mümkün değildir. Öte yandan, GYEÇ’de grain boyutları santimetre mertebesine çıkartılabilmekteyken, yönlendirilmemiş çeliklerde, grain boyutları bir kaç milimetre büyüklüğünde kalmakta ve bu durum, domain yapısının gözlenmesini hayli zor kılmaktadır. Hal böyle olduğundan, çalışma kapsamında, yönlendirilmemiş çeliklere,

anizotropi içeriği ve manyetik geçirgenlik gibi özellikleri açısından en yakın olduğu Şekil 4.13'te gösterilen, örnek – 2'nin domain analizleri kaynak olarak gösterilmiştir. Bu doğrultuda, örnek – 3 için öngörülen manyetik alan dağılımının nicel tanımlaması, kk hata paylarıyla, örnek – 2'de elde edilen sonuçlarla benzer olduğu söylenebilir. Ancak, Model – 2'de tanımlanan sistem değişkenlerinin doğrudan, örnek – 3 için uygulanabilir olduğunu söylemek oldukça güçtür. Öyle ki, yukarıda açıkladığımız nedenlerden ötürü, manyeto-optik gözlemlerin yapılması, bu örnek için oldukça zordur. Model tanımlaması ise tamamen Kerr kontrastına göre belirlenen domain duvar hareketini esas almaktadır.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, %3-SiFe GYEÇ’de ki dairesel bir deliğin, manyetik özellikleri bozucu etkileri, hem makroskobik hem de mikroskobik analiz yöntemlerin kullanılmasıyla araştırılmıştır. Manyetizmanın mikro ve makro doğası arasında kurulan köprü ile elde edilen Kerr görüntüleri ve ölçülen manyetik özellik değişkenleri başarılı bir şekilde tanımlanmıştır. Elde edilen bulgular üzerinden, daha önce gerçekleştirilmemiş bir yöntem ile manyetik alan doğrultuları yöne göre olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, GYEÇ’de kesme ve delmenin domain yapısına etkisi, MOKE’nin kullanılmasıyla çok net bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Kristal yapılarına bağlı olarak belirli konumlardaki her bir grain incelenmiş ve yarı kararlı Kerr görüntüleri olarak araştırma bulguları kısmında sunulmuştur. Bunun yanı sıra, incelenen malzemenin karakteristik manyetik özellikleri hem bölgesel hem de genel olarak araştırılmıştır. Delik etkisinin bir sonucu olarak ölçülen yerel ve genel manyetik bozulmaların sebepleri incelenmiş ve relüktansın akı dağılımına yaptığı etki sayısal olarak ispatlanmıştır. Bu bağlamda, söz konusu manyetik özelliklerin, mikro yapılarla karşılaştırması yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Öte yandan, malzemenin haddelenme koşuluna bağlı olarak yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş çelikler, delik etkisi açısından karşılaştırılmıştır. Yönlendirilmemiş çeliklerde, ayrıca, delik boyutunun manyetizmada oluşturacağı etki, algılayıcı bobinlerin yardımıyla makro ölçekte gösterilmiştir.

GYEÇ’de haddeleme doğrultusuna göre iki farklı mikro yapı yönelimine yani iki farklı kolay mıknatıslama eksenine sahip malzeme, bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Yönelimleri $(1\ 1\ 0)[1\ 0\ 0]$ ve $(1\ 1\ 0)[0\ 0\ 1]$ olan bu iki farklı malzemenin, kompozisyonlarında bir farklılık olmamasına rağmen, $(1\ 1\ 0)[1\ 0\ 0]$ kristalografik yönelime sahip GYEÇ’de, kolay eksene paralel manyetik alan uygulandığında delik çevresindeki anormallikler incelenirken, $(1\ 1\ 0)[0\ 0\ 1]$ malzemesinde, dik ve/veya eğimli alanın mikro yapılarda oluşturduğu farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu örnekler sırasıyla, Örnek – 1 ve Örnek – 2 olarak isimlendirilmiştir.

Örnek – 1’in manyetik özelliklerindeki bozulmalar, delik açılmadan önce ve sonra malzemenin belirli bir bölgesine ve deliğin sağ ve soluna sarılan bobinlerden elde edilen histeresis eğrileri ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre, Şekil 4.1 – 4.4’ten elde edilen verilerle, deliğin sağ ve solunda, geneline göre relüktansın çok yükseldiği anlaşılmıştır. Bağlı geçirgenliğin (μ_r), sağ ve solda genele göre %30 – 35 civarında arttığı

tespit edilmiştir. Bu değer, deliğin çapı (10 mm) ile sağ ve soldaki kesit alanları göz önüne alındığında, mükemmel yakın doğrulukta bir sonuç elde edildiğinin ispatı olmuştur. Öyle ki, söz konusu alan 3 ayrı bölge (sağ, delik ve sol bölgeler) olarak düşünülürse, AB'den elde edilen geçirgenlik miktarı yaklaşık 80×10^3 olduğundan, toplamda 240 birimlik akı geçişi olduğu kabul edilebilir. Sağ ve soldan hesap edilen geçirgenlikler yaklaşık olarak 120×10^3 ve 110×10^3 olduğundan, hemen hemen üçte birlik bir oranın elde edildiği çok açık bir gerçektir. Yani delikten dolayı dolanımını tamamlayamayan akı, deliğin sağ ve solundan kesit alanlarına oranla (yaklaşık olarak) dağılmaktadır. Temel manyetizma göz önüne alındığında, aslında malzeme içerisinde geçirgenliğin değişmesi beklenmez. Ancak manyetik direncin tersi olan manyetik iletkenlik (permeance) ve $P = 1/R$ eşitliği ile bu farklılık açıklanabilir. Bu değerler aynı zamanda, bölgedeki yüzey dışı zıt mıknatıslama alanının, doğru hesaplamalar ile kurulan ölçüm devresi sayesinde, en düşüğe tutulduğunun sayısal bir kanıtı olmuştur.

Örnek – 1'in sağ ve solunda elde edilen yüksek akı hareketliliği, manyetik mikro yapıların yarı kararlı Kerr görüntüleriyle incelenmesiyle de gözlemlenmiştir. Söz konusu bölgede gözlenen domain yapılarıyla mıknatıslanmanın bölgesel olarak aşama aşama nasıl gerçekleştiği histeresis eğrisiyle eşzamanlı olarak elde edilebilmiştir. Bunun yanı sıra, domain duvar hareketi ve domain kalınlıkları da, şiddet grafiğinden yarı kararlı olarak ölçülebilmektedir. Örnek yüzeyinde gözlem yapılmadan önce deliğin önündeki bölgenin, akı dağılımında en kararsız ve en durağan bölge olacağı tahmin edilmekteydi. Bu bağlamda, söz konusu konumdan alınan düşük çözünürlük Kerr fotoğrafları, TD ile açıklanmaya çalışılmış, dahası, hem yüzey hem de iç mıknatıslanma doğrultuları domain kuramıyla açıklanmıştır. Bu bölgede elde edilen sonuçlar, manyetik alanın, manyetik olmayan bir bölgedeki davranışını analiz etme imkânı da sağlamıştır. Ancak bu konuyla ilgili en doğru ve güvenilir sonuçlar, Örnek – 2'de tanımladığımız modeller ile yapılabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan Kerr mikroskobunun geniş perspektif modülüyle, tüm delik etrafındaki kontrast değişimleri izlenmiş ve köşegensel bir mıknatıslanma olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda deliğin etrafında şiddetli bir kutuplanmanın olduğunu gösteren bu mıknatıslanma dağılımı, söz konusu bölgedeki manyetik alanın doğrultuları hakkında da bazı ipuçları sağlamıştır. Manyetik bozulmanın bir etkisi olarak delik etrafında domain yapılarının yeniden organize olması, haddeme doğrultusuna dik kesilen yani kolay eksenine çalışma eksenine dik olan, böyle bir malzeme için beklenen bir

durumdu. Aslında, mikro yapılardaki bu hareketlilik, akının yön değiştirmesinin tasarım sebebiyle bir zorunluluk olduğu elektrik makinelerinde son derece olasıdır. Bu nedenle, domainlerin yeniden yapılanması ve buna bağlı mikro yapısal evirilmeler, bu model materyal ile açık bir şekilde gösterilmiş oldu. Çalışma süresince, yeniden organize olan böyle TD, testere dişi-, sütun-, dallanmış- ve bağcık benzeri yapılar ile sıkça gösterilmiş ve fiziksel yapıları ayrıntılı bir biçimde hem yüzey hem de iç domainler ile açıklanmıştır. Manyetik alanın ve dolayısıyla manyetik akı dağılımının delik etrafındaki sistematigi, tanımlanan modellerle verilmeye çalışılmıştır. Model – 1 ve Model – 2 olarak verilen ve değişkenleri başarılı bir şekilde tanımlanan sistemlerin her ikisi de, miknatislanmanın karmaşık doğasını da en küçük duruma getirmek için ortaya konulmuştur. Modeller, değişkenlerinin farklılıklarıyla birbirinden ayrılırlar da, manyetik alan doğrultusunu, basit matematiksel ve geometrik yaklaşımlarla göstermek üzere üretilmişlerdir. Model – 2'nin tanımlaması, Model – 1'e göre daha kullanışlı bulunmuştur. Tüm modeller, Örnek – 2 ile aynı mikro yapısal özellikleri gösteren bir örnekten alınmış ve ayar birimleri olarak tanımlanmıştır. Kartezyen koordinatların kullanımıyla, “sadece” yüzey domain duvarlarının iki-boyutlu açılal yer değiştirmelerinin esas alındığı, Model – 2'de, kaynak noktasından, domain yönelimindeki ve manyetik alandaki sapmalar sırasıyla β ve α olarak tanımlanmıştır. Ayar örneğinden ölçülen değerler esas alınarak, Şekil 4.33'te elde edilen $\beta(\alpha)$ -eğrisi karakteristik kabul edilmiş ve Model – 2'ye uyarlanmıştır. Bu bağlamda, Şekil 4.34 – 4.37'de gösterilen tüm Kerr görüntüleri, şematik çizimler ve grafik, tamamen Örnek – 2 ve ayar örneğinden ölçülen değerlere göre üretilmiştir. Model – 2'nin, delik etrafındaki manyetik alanın izlediği yolu bilimsel olarak temel değişkenlerle açıklamanın en makul yolu olduğuna karar verilmiştir. Öte yandan, modelin geçerliliğinin doğrulanması adına, deliğin küresel olarak tüm çevresinde, çok iyi yönlendirilmiş grainler, eşit koşullar altında incelenmiş ve deliğin varlığından dolayı oluştuğuna inanılan parabolik benzeri manyetik alan doğrultusunun, belirli bir sistematik dâhilinde bu doğrultuyu izlediği anlaşılmıştır. Bu bağlamda, Şekil 4.36'da gerçek örnek fotoğrafı üzerine çizilen diyagram, tamamen Model – 2'de üretilen değişkenler göz önüne alınarak çizilmiş ve Örnek – 2'de ki deliğin etkisinin, kenarından itibaren yaklaşık 7 mm civarında olduğu tespit edilebilmiştir. Elde edilen bu sonuç, literatürde bugüne dek verilen en kapsamlı ve en net, nicel manyetik alan dağılımı analizi olmuştur. Daha önce benzeşim yöntemleriyle yapılan çalışmalar sonucunda, sistemsel olarak manyetik alan ve

buna bağılı manyetik akı dağılımları pek çok kez elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada, mikroskobik görüntüler ile elde edilen domain fotoğrafları üzerinden ve domain kuramının uygun koşullarda kullanılmasıyla, böyle mikro yapısal dağılımlar nicel olarak elde edilebilmiştir. Böyle bir sayısal argüman, sadece Kerr görüntülerinin kullanılmasıyla üretilen Model – 2 ile verilebilmiştir. Öte yandan tanımlanan bu model, manyetik alan dağılımlarının sadece kullandığımız örnekle sınırlandırılmayacağını, benzer örneklerin tümünde kullanılabileceğini kanıtlamaktadır. Sistemin, hem çok iyi yönlendirilmiş hem de tamamlayıcı domainlerden oluşan grainlere uygulanabilirliği üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Örnek – 3 olarak tanımladığımız yönlendirilmemiş elektrik çeliği, Örnek – 1 ve Örnek – 2’de oluşturmaya çalıştığımız çalışma koşullarından tamamen farklı, sadece mıknatıslanma eğrilerinin karşılaştırılması temeline dayanmıştır. Bu bağlamda, aynı malzeme üzerine belirli mesafelerle, 20 mm ve 10 mm çapında lazer ile delinen delikler, etrafına 0°, 25°, 45° ve 65° açıyla sarılan bobinlerden elde edilen mıknatıslanma eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, delik etrafındaki akı dağılımında doğrusal olmayan doğrultular olduğu algılayıcı bobinlerin sağladığı eğriler üzerinden açıkça söylenebilir. Ancak, manyetik bozulmaya sebep olan bu doğrultu sapmalarının sayısal tanımlamasının, bu veriler üzerinden yapılması çok güvenilir bulunmamıştır. Ancak şu açık bir şekilde ispatlanmıştır ki, delik boyutunun artmasıyla, delik civarındaki geçirgenlik oranı ciddi şekilde uyarılmıştır. Buna örnek olarak, L3 ve S3 bobinlerinin uygulanan eşit alan gerilimlerde, algıladıkları indüksiyonlar sırasıyla, 1,8 T ve 1,1 T olarak ölçülmüştür. Böylelikle, manyetik geçirgenlikte kabaca %40 civarında bir artış oluşmuştur. Ayrıca ilişkili olarak manyetik özelliklerde ve malzemenin fiziki yapısındaki bozulmalar da hesaba katıldığında, çok ciddi bir mikro yapısal bozulmanın oluşması kuvvetle muhtemel olacaktır. Geliştirilen model ile tanımlanan değişkenlerin, yönlendirilmemiş çeliğe uygulanabilir olduğunu söylemek, karmaşık mikro yapısından dolayı bu aşamada çok güçtür. Model – 2’den de anlaşılacağı gibi sistem değişkenlerinin tanımlanması tamamen manyeto optik gözleme dayandığından, Örnek – 2’nin değişkenleri, belirli koşullarda Örnek – 3’e benzetilebilse de, birebir eşitlik sağlamak mümkün değildir.

Özetle, manyetik alanın, delik etrafında kat ettiği doğrultuları nicel bir analiz yöntemi olarak öneren modellerin sistematığı, literatürde bu alanda yapılan çalışmalar içerisinde

en kesin ve açık deliller sunan çalışma olmuştur. Bu çalışma kapsamında elde edilen verilerin, sanayide, yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin kullanıldığı elektrik makinesi çekirdeklerinde, herhangi bir sebeple delinen malzemelerin, mühendislik hesaplarının en iyi uyumuna çok açık bir katkısı olacağı kesindir.



KAYNAKLAR

Akulov, N.S., 1931. Zur Theorie der Magnetisierungskurve von Einkristallen (On the theory of the magnetization curve of single crystals). *Z. Phys.*, 67: 794–807.

Anonim, 2010. Lattice Planes and Miller Indices - How to Index a Lattice Plane. Cambridge University, UK. http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/miller_indices/lattice_index.php (Erişim tarihi 17.10.2010).

Anonim, 2013a. Grain oriented electrical steel; Product data bulletin. Product description list. Revision: 17.04.2013.

Anonim, 2013b. Measurements in bulk magnetic materials. <http://magnetism.eu/esm/2013/abs/fiorillo-abs.pdf> (Erişim tarihi: 01.10.2013)

Anonim, 2016. Electrical steels - Iron-Silicon transformer steels. Dusseldorf, Germany, <http://www.dierk-raabe.com/electrical-steels-fe-3-si/>. (Erişim tarihi: 01.02.2016).

Bardou, N., Bartenlien, B., Chappert, C., Megy, R., 1996. Magnetization reversal in patterned Co(0001) ultrathin films with perpendicular magnetic anisotropy. *J. Appl. Phys.* 79: 5848–5850.

Barkhausen, H., 1919. Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen (Two phenomena, discovered with the help of the new amplifiers). *Z. Phys.*, 20: 401–403.

Baudouin, P., Wulf, M.D., Kestens, L., Houbaert, Y. 2003. The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels. *J. Magn. Magn. Mater.*, 256: 32-40.

Becker, R., 1930. Zur Theorie der Magnetisierungskurve (On the theory of the magnetization curve). *Z. Phys.*, 62: 253–269.

Becker, R., Döring, W., 1939. Ferromagnetismus (Ferromagnetism) Springer, Berlin, Germany.

Belhadj, A., Baudouin, P., Breaban, F., Deffontaine, A., Dewulfd, M., Houbaert, Y., 2003. Effect of laser cutting on microstructure and on magnetic properties of grain non-oriented electrical steels. *J. Magn. Magn. Mater.*, 256: 20-31.

Belhadj, A., Baudouin, P., Houbaert, Y., 2002. Simulation of the HAZ and magnetic properties of laser cut non-oriented electrical steels. *J. Magn. Magn. Mater.*, 248: 34-44.

Bloch, F., 1932. Zur Theorie des Austauschproblems und der Remanenzerscheinung der Ferromagnetika (On the theory of the exchange problem and the remanence phenomenon of ferromagnets). *Z. Phys.*, 74: 295–335.

Boersch, H., Lambeck, M., 1960. Mikroskopische Beobachtung gerader und gekrümmter Magnetisierungsstrukturen mit dem Faraday-Effekt (Microscopical imaging of straight and curved magnetization structures by the Faraday effect). *Z. Phys.* 159: 248–252.

Brown, W.F. Jr., 1940. Theory of the approach to magnetic saturation. *Phys. Rev.*, 58: 736–743.

Bühler, H.-E., Pepperhoff, Wn., Schwenk, W., 1966. Zur Frage der Anätzbarkeit magnetischer Bereichsstrukturen auf Kobalt und Kobalt-Eisen-Legierungen (On the question of an etchability of magnetic domains on cobalt and cobalt-iron alloys). *Z. Metallk.*, 57: 201–205.

Carey, R., Isaac, E.D., 1966. Magnetic Domains and Techniques for their Observation. Academic Press, New York, USA, 168 pp.

Chen, N., Zaefferer, S., Lahn, L., Günther, K., Raabe, D., 2003. Effects of topology on abnormal grain growth in silicon steel. *Acta Mater.*, 51: 1755–1765.

Cotton, A., Mouton, H., 1907. Sur les propriétés magneto-optiques des colloïdes et des liqueurs hétérogènes (On magneto-optic properties of colloids and inhomogeneous liquids). *Ann. Chim. Phys.* 11 (8): 145–203.

Cullity, B.D., Graham, C.D., 2009. Introduction to magnetic materials. IEEE Press, Wiley, 2nd edition, New Jersey, USA, 544 pp.

Dedie, G., Niemeyer, J., Schwink, C., 1971. Ferromagnetic domain structure of the [110] SiFe crystals. *Phys. Status Solidi B*, 43: 163–173.

Derebasi, 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, 107 pp.

Dillon, J.F. Jr., 1958. Observation of domains in the ferrimagnetic garnets by transmitted light. *J. Appl. Phys.* 29, 1286–1291.

Dorner, D., Zaefferer, S., Dierk Raabe, D., 2007. Retention of the Goss orientation between microbands during cold rolling of an Fe3%Si single crystal. *Acta Mater.*, 55: 2519–2530.

Emura, M., Landgraf, F. J. G., Ross, W., J. R. Barreta, J.R., 2003. The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels. *J. Magn. Magn. Mater.*, 254: 358 – 360.

Erdem, S. 2006. Transformator çekirdeklerinde kullanılan elektrik çelikleri ve amorf şeritlerin uç uca gelen birleşim yerlerindeki manyetik akı dağılımının deneysel ve kuramsal incelenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.

- Evans, D.J., Garret, H.J., 1973.** Observation of magnetic domains in NdCo₅ using an electro-etching technique. *IEEE Trans. Magn.*, 9: 197–201.
- Faghihi, F., Heydari, H. 2009.** Reduction of leakage magnetic field in electromagnetic systems based on active shielding concept verified by eigenvalue analysis. *PIER*, 96: 217-236.
- Faraday, M., 1846.** On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force. *Phil. Trans. Royal Soc. (London)*, 136: 1–20.
- Frenkel, J., Dorfman, J., 1930.** Spontaneous and induced magnetization in ferromagnetic bodies. *Nature*, 126: 274–275.
- Fowler, C.A. Jr., Fryer, E.M., 1952.** Magnetic domains on silicon iron by the longitudinal Kerr effect. *Phys. Rev.* 86: 426.
- Fowler, C.A. Jr., Fryer, E.M., 1956.** Magnetic domains in thin films by the Faraday effect. *Phys. Rev.* 104: 552–553.
- Frommert, M., Zobrist, C., Lahn, L., Böttcher, A., Raabe, D., Zaefferer S., 2008.** Texture measurement of grain-oriented electrical steels after secondary recrystallization. *J. Magn. Magn. Mater.*, 320: 657-660.
- Goss, N.P., 1935.** New development in electrical strip steels characterized by fine grain structure approaching the properties of a single crystal. *Trans. Amer. Soc. Metals*, 23: 511–544.
- Gottstein, G., 2002.** Evolution of recrystallization textures - classical approaches and recent advances. *Mater. Sci. Forum*, 408: 1-24.
- Green, A., Prutton, M., 1962.** Magneto-optic detection of ferromagnetic domains using vertical illumination. *J. Sci. Instrum.* 39: 244–245.
- Gunes, T., Schäfer, R., Derebasi, N. 2016.** Investigation of magnetic properties and domain structures of Fe-3%Si steel regarding “Hole Impact” and energy efficiency. *IEEE Trans. on Mag. Submitted.*
- Gunes, T. Derebasi, N. Erdonmez, C., 2015.** Localized flux density distribution around a hole in non-oriented electrical steels. *IEEE Trans. Magn.*, 50(1): 2000204.
- Heisenberg, W., 1928.** Zur Theorie des Ferromagnetismus (On the theory of ferromagnetism). *Z. Phys.*, 49: 619–636.
- Heisenberg, W., 1931.** Zur Theorie der Magnetostriktion und der Magnetisierungskurve (On the theory of magnetostriction and the magnetization curve). *Z. Phys.*, 69: 287–297.
- Honda, K., Kaya, S., 1926.** On the magnetisation of single crystals of iron. *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ.*, 15: 721–754.

- Hribernik, B., 1982.** Influence of cutting strains on the magnetic anisotropy of fully processed silicon steel. *J. Magn. Magn. Mater.*, 26(1): 72–74.
- Hubert, A., Schäfer, R. 1998.** Magnetic Domains. 3rd edn, Heidelberg: Springer, New York, USA, 678 pp.
- Hubert, A., 1989.** The role of magnetization “swirls” in soft magnetic materials. *J. de Phys. (Coll.)*, 49:1859–1864.
- Hubert, A. 1965.** Beobachtung und Berechnung von magnetischen Bereichsstrukturen auf Siliziumeisen. *Z. Angew. Phys.*, 18: 474 - 479.
- Imamura, M., Sasaki, T., Yamaguchi, T., 1984.** Domain-wall eddy-current loss in a stripe domain structure of Si-Fe crystals inclined slightly from the perfect (110) [001] orientation. *IEEE Trans. Magn.*, 20: 2120 – 2129.
- Jameson, E.C., 2001.** Electrical discharge machining. Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA, 329 pp.
- Kaya, S., 1934.** Pulverfiguren des magnetisierten eisenkristalls (Powder patterns of the magnetized iron crystal I). *Z. Angew. Phys.*, 89: 796– 805.
- Kerr, K., 1877.** On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. *Phil. Mag.* 3 (5): 321–343.
- Kirenskii, L.V., Savchenko, M.K. Degtyarev, I.F., 1959.** On the magnetization process in ferromagnets. *Sov. Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 37: 616 - 619.
- Kittel, C., 1949.** Physical theory of ferromagnetic domains. *Rev. Mod. Phys.*, 21: 541–583.
- Kittel, C., Galt, J.K., 1956.** Ferromagnetic domain theory. *Solid State Phys.*, 3: 437–565.
- Küppers, D., Kranz, J., Hubert, A., 1968.** Coercivity and domain structure of silicon-iron single crystals. *J. Appl. Phys.*, 38(2): 608-609.
- Landau, L.D., Lifshitz, E., 1935.** On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjetunion*, 8: 153–169.
- Langevin, P., 1905.** Magnetisme et theorie des electrons (Magnetism and the theory of electrons). *Ann. Chim. Phys.*, 5 (8): 70–127.
- Martin, D.H., 1957.** Surface structures and ferromagnetic domain sizes. *Proc. Phys. Soc. B*, 70: 77–84.

Moses, A. J., Derebasi, N., Loisos, G., Schoppa, A., 2000. Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets. *J. Magn. Mater.*, 215: 690–692.

Park, J.Y., Han, K.S., Woo, J.S., Chang, S.K., Rajmohan, N., Szpunar, J.A., 2002. Influence of primary annealing condition on texture development in grain oriented electrical steels. *Acta Mater.* 50: 1825–1834.

Perevertov, O., Schäfer, R., 2014. Influence of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented Fe-3% Si steel. *J. Phys. D-App. Phys.*, 47: 185001.

Perevertov, O., Schäfer, R., 2012. Influence of applied compressive stress on the hysteresis curves and magnetic domain structure of grain-oriented transverse Fe-3%Si steel, *J. Phys. D-App. Phys.*, 45: 135001.

Petrovic D.S., 2010. Non-oriented electrical steel sheets. *Mater. and Tech.*, 44 (6): 317–325.

Rygal, R., Moses, A.J., Derebasi, N., Schneider, J., Schoppa, A., 2000. Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels. *J. Magn. Mater.*, 215: 687–689.

Saleem, A., Alatawneh, N., Chromik, R.R., Lowther, D.A., 2016. Effect of shear cutting on microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steel. *IEEE Trans. Magn.*, 52(5): 2001904.

Saleh, A.A., Pereloma, E.V., Gazder, A.A., 2011. Texture evolution of cold rolled and annealed Fe–24Mn–3Al–2Si–1Ni–0.06C TWIP steel. *Mater. Sci. Eng., A*, 528: 4537–4549.

Schmidt, K.H., 1976. Influence of punching on the magnetic properties of electric steel with 1% silicon. *J. Magn. Mater.*, 2(1): 136–150.

Sha, Y., Zhang, F., Li, S., Gao, X., Xu, J., Zuo, L., 2004. Effects of primary annealing condition on recrystallization texture in a grain oriented silicon steel. *J. Mater. Sci. Technol.*, 20 (3): 253-256.

Shilling, J. W., Houze, G.L. Jr. 1974. Magnetic properties and domain structure in 111 grain-oriented 3% Si-Fe. *IEEE Trans. Magn.*, 10: 195 – 223.

Shin S., Schäfer, R., Cooman, B.C.D., 2010. Grain boundary penetration by lancet domains in Fe-3%Si grain-oriented steel. *IEEE Trans. Magn.*, 46: 3574 – 3581.

Sixtus, K.J., Tonks, L., 1931. Propagation of large Barkhausen discontinuities. *Phys. Rev.* 37: 930–958.

- Siebert, R., Schneider, J., Beyer, E., 2014.** Laser cutting and mechanical cutting of electrical steels and its effect on the magnetic properties. *IEEE Trans. Magn.*, 50(4): 2001904.
- Stoyka, V., Kováča, F., Stupakov, O. Petryshynets, A., 2010.** Texture evolution in Fe–3% Si steel treated under unconventional annealing conditions. *Mater. Charact.*, 61: 1066-1073.
- Tang, Q., Guo, S. Wang, Z. 2015.** Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints. *J. Appl. Phys.*, 117:17D522.
- Toshito, T., Kazuhiro, H., Takehiro, S., 2016.** Recent Development of Grain-Oriented Electrical Steel in JFE Steel. *JFE Technical Report*, No:21.
- Van der Waals, J.D., 1873.** Over de continuiteit van den gas- en vloeistoftoestand (On the continuity of gas and fluid states). *Ph.D. Thesis*, University of Leiden, Leiden Holland.
- Voigt, W., 1898.** Doppelbrechung von im Magnetfeld befindlichem Natriumdampf in der Richtung normal zu den Kraftlinien (Birefringence of sodium vapour in a magnetic field along a direction perpendicular to the lines of force). *Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.* 4: 355–359.
- Weiss, P., 1907.** L'hypothese du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique (The hypothesis of the molecular field and the property of ferromagnetism). *J. de Phys. Rad.*, 6: 661–690.
- Williams, H.J., Foster, F.G., Wood, E.A., 1951.** Observation of magnetic domains by the Kerr effect. *Phys. Rev.* 82: 119–120.
- Williams, H.J., Bozorth, R.M., Shockley W., 1949.** Magnetic domain patterns on single crystals of silicon iron. *Phys. Rev.*, 75: 155–178.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Taylan GÜNEŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Uzunköprü / 26.08.1986
Yabancı Dili : İngilizce
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)
Lise : Muzaffer Atasay Anadolu Lisesi (2000 – 2004)
Lisans : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi (2004 – 2008)
Yüksek Lisans : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi (2008 – 2011)
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fak. (2011 - ...)
İletişim (e-posta) : taylan.gunes@yalova.edu.tr

Yayımları:

Gunes, T., Schäfer, R., Derebasi, N. 2016. Quantitative analysis of magnetic field distribution around circular non-magnetic region in grain-oriented Fe-3%Si steel. *Mater. Res. Expr.* Submitted.

Erdonmez, C., Derebasi, N., Gunes, T., 2016. Influence of Hole Geometry on Magnetic Flux Density Distribution in LaserCut Non-oriented Electrical Steels at Power Frequencies. *J Supercond. Nov. Magn.*, (DOI: 10.1007/s10948-016-3682-0): 1-5

Gunes, T. Derebasi, N. Erdonmez, C., 2015. Localized flux density distribution around a hole in non-oriented electrical steels. *IEEE Trans. Magn.*, 50(1): 2000204.