

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TANE YÖNLENDİRİLMİŞ SİLİSYUMLU ELEKTRİK SAÇLARINA
UYGULANAN MEKANİK VE ISIL İŞLEMLERİN
TRANSFORMATÖR BOŞTA KAYIPLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

NIHAT ÇELİK

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Sare ÇELİK
Doç. Dr. Ersin AKYÜZ
Doç. Dr. İjlal ŞİMŞEK
Dr. Öğr. Üyesi Adnan TÜRKER

BALIKESİR, MAYIS - 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Tane Yönlendirilmiş Silisyumlu Elektrik Saclarına Uygulanan Mekanik ve Isıl İşlemlerin Transformatör Boşta Kayıpları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nihat ÇELİK

ÖZET

**TANE YÖNLENDİRİLMİŞ SİLİSYUMLU ELEKTRİK SAÇLARINA
UYGULANAN MEKANİK VE ISIL İŞLEMLERİN TRANSFORMATÖR
BOŞTA KAYIPLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
DOKTORA TEZİ
NİHAT ÇELİK
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)
BALIKESİR, MAYIS - 2024**

Transformatörler elektrik iletim hatlarının en önemli makinelerinden birisidir. Manyetizmanın temel yasalarından biri olan Faraday yasasının teknolojik ürün haline dönüştüğü transformatörlerde neredeyse 200 yıl önce başlayan keşif ve geliştirme süreci hala devam etmektedir. Teknolojik ilerlemeler sayesinde elektrik enerjisi üretiminde ve uzak mesafelere iletiminde kavramsal konsept değişimi getiren yeni bir buluş ortaya çıkıncaya kadar transformatörler modern çağın önemli bir altyapı bileşeni olmaya devam edecektir. Transformatör manyetik nüve çelikleri alanında yapılan bu çalışma ile daha verimli bir elektrik dönüşüm ve iletim ekipmanı geliştirilmesi adına katkı sunulması hedeflenmiştir.

Transformatör üretiminin bir parçası olan manyetik nüve imalatında uygulanan açılı kesme süreci detaylı olarak incelenerek, kesme sürecinin sacın manyetik özelliklerine olan etkilerini, özellikle nüvenin demir kaybı parametresine olan etkilerini anlamaya ve azaltmaya yönelik incelemeler ve akademik çalışmalar yürütülmüştür. Geleneksel bir süreç olan nüve sacı makas kesme süreci regresyon analizi ile modellenmiş ve regresyon katsayısı $R^2 = 0,9896$ olan bir model elde edilmiştir. Mikroyapısal seviyede kesme kenarı civarında mikro sertlik ölçümleri, EBSD, XRD ve EDX analizleri yapılmış bu sayede tane yönelme paterni ve deformasyon etkin bölge hakkında gözlemler raporlanmıştır. EPSTEIN test düzeneğinde standart ve standart dışı numune ölçeğinde M5 tip numunelerle yapılan gerilim giderme ısıl işlemleri ile demir kaybının %3,7-6,4 oranlarında geri kazanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu ölçekte yapılan gerilim giderme ve ölçme çalışmalarından elde edilen öncül sonuçlar ışığında 40 kVA gücüne denk prototip kuru tip transformatör nüve bileşenlerine vakum altında 750 °C'de 3 saat boyunca ısıl işlemler uygulanarak, yapılan karşılaştırmalı ölçümlerde, üzerinde montaj deliği bulunan örneklerde ısıl işlem sayesinde demir kaybında %14,5-16,5 aralığında azalma olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Transformatör, çekirdek, nüve, manyetizma, tane yönlendirme, plastik deformasyon, tavlama, histerisiz, demir kaybı.

ABSTRACT

INVESTIGATING EFFECTS OF APPLIED MECHANICAL AND THERMAL PROCESSES OF GRAIN-ORIENTED SILICON ELECTRICAL STEELS ON NO-LOAD LOSSES OF TRANSFORMER

PH.D THESIS

NIHAT ÇELİK

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)

BALIKESİR, MAY - 2024

Transformers are one of the important machineries of electrical transmission lines. Faraday Law which is one of the main laws of magnetism turned into a technological product. The discovery and development process has started almost 200 years ago and still continuous. Thanks to technological advances, transformers will continue to be an important infrastructure component of the modern age until an invention emerges, which brings conceptual change in electrical energy generation and transmission to long distances. In this thesis, to the name of improving a more efficient electric transmission and transformation equipment, a minor contribution on transformer core steels processing area is aimed.

By examining the angle cutting process applied in magnetic core production, which is a part of transformer production, in detail, investigations and academic studies were carried out to understand and reduce the effects of the cutting process on the magnetic properties of the sheet, especially the effects of the core on the iron loss parameter. For these purposes, shear cutting process which is known very traditionally in industry analyzed with defined process parameters modelled statistically in which regression coefficient calculated as $R^2= 0,9896$. EBSD, EDX, XRD analyzes, and micro-hardness measuring applied in vicinity of cut edges, by this way, crystallographic textures and plastic deformation affected zones of cut edges observed in level of crystallography. As-cut vs. annealed form of standard and non-standard M5 grade EPSTEIN test samples measured and compared regarding to iron loss parameters and, ratio of 3.7-6.4% recovery of iron loss is reported. With the promotion of iron loss recovering results on test samples, rated as 40 kVA 4 pieces identical cast resin dry type transformer core legs and yokes are designed, sheared and, 2 of them are annealed under vacuum at 750 °C for 3 hours. Regarding comparison results of prototype cores having centering holes, 14.5-16.5% iron loss recovery observed on annealed cores.

KEYWORDS: Transformer, core, magnetism, grain orientation, plastic deformation, annealing, hysteresis, iron loss.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK BEYAN	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL ve KISALTIMA LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	7
3. NÜVE SACI VE TRANSFORMATÖRLER.....	48
3.1 Elektromanyetizma Prensipleri	48
3.2 Tane Yönlendirilmiş Elektrik Çeliklerinin Üretimi	56
3.3 Transformatörlerde Nüve Kayıpları.....	61
3.4 Transformatörlerde Nüve Yapısı	66
3.5 Kesme Kenarı Civarının Mikro İncelenmesi için EBSD Tekniği	71
3.6 EPSTEIN Testi ile Demir Kaybı Ölçümü	80
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	83
4.1 Malzeme seçimi ve numune hazırlama	84
4.2 İstatistiksel Modelleme Çalışmaları.....	85
4.2.1 Kesme Sürecinin İstatistiksel Modellenmesi	85
4.2.2 Numune Oluşturma Çalışmaları ve Ölçümler.....	88
4.2.3 İstatistiksel Analiz Aşaması	91
4.3 Kesme Kenarında Mikro İncelemeler	94
4.3.1 Numune Hazırlama Çalışmaları	95
4.3.2 XRD Kalıntı Gerilimi Analizleri.....	100
4.3.3 Mikrosertlik Taramaları	101
4.3.4 Optik Mikroskop Görüntülemeleri.....	101
4.3.5 Kesme Kenarı SEM ve EDX İncelemeleri.....	102
4.3.6 EBSD ve Ters Kutup Tekstürü Görüntüleme Çalışmaları	103
4.4 EPSTEIN Cihazında Demir Kaybı ve Histerisiz Ölçüm Çalışmaları	103
4.5 Isıl İşlem Çalışmaları	107
4.6 Prototip Nüve Tasarımı ve Nüve Bileşenlerinin Isıl İşlemleri.....	109
5. SONUÇLAR	115
5.1 Regresyon Analizi Sonucu Elde Edilen Model ve Tartışmalar	115
5.2 XRD Kalıntı Gerilim Ölçüm Sonuçları ve Tartışmalar	118
5.3 Mikrosertlik Tarama Sonuçları ve Tartışmalar	119
5.4 Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları ve Tartışmalar.....	124
5.5 Kesme Kenarı Civarı SEM ve EDX İnceleme Sonuçları ve Tartışmalar	127
5.6 SEM EBSD ‘den Elde Edilen Görüntülemeler ve Tartışmalar.....	128
5.7 EPSTEIN cihazında yapılan numune ölçekli ölçümlerin sonuçları.....	131
5.8 Prototip Nüve Kayıp Ölçümleri	136
6. GENEL SONUÇLAR.....	146
7. KAYNAKLAR	151
EKLER	158
ÖZGEÇMİŞ	177

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tane yönlendirilmiş çelikte demir kaybının tarihsel gelişim süreci [7].	4
Şekil 2.1: Kesme sonrası ortaya çıkan yüzey ve tane yapısı görünümleri [11].	9
Şekil 2.2: Kesme yüzeyinden itibaren mikrosertlik ölçümleri ve kesme yüzey profili [11].	10
Şekil 2.3: EPSTEIN numunesi ile ölçülen sacın manyetik özelliklerdeki değişimler [11].	11
Şekil 2.4: Makas ile lamine sisli sac kesim mekanizması ve kesme yüzeyi profilleri [13].	13
Şekil 2.5: Kesme yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri [13].	14
Şekil 2.6: Değişik kesim yöntemleri ile kesilmiş NGO sacın tavlama öncesi kesim profilleri [19].	17
Şekil 2.7: Değişik kesme yöntemleri ile kesilmiş NGO saclarda tavlama sonrasında histerisiz eğrileri [19].	18
Şekil 2.8: GO elektrik sacında kafes $\{110\}\{001\}$ yönlenmesi [27].	22
Şekil 2.9: Dilme süreç parametrelerinin incelendiği test düzeneğinin gösterimi [33].	26
Şekil 2.10: Dilme hızının v_2 kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [33].	27
Şekil 2.11: Üst bıçak yaklaşma açısının α kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [33].	28
Şekil 2.12: Bıçaklar arası dikey bindirme mesafesinin c_v kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [33].	29
Şekil 2.13: Bıçaklar arası (yatay) açıklığın h_c kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [33].	30
Şekil 2.14: Rastgele bir kutup noktası P ile hadde yönü RD arasındaki açını şematik gösterimi [49].	40
Şekil 2.15: Rastgele bir P kutup noktası ile projeksiyon dairesinin merkez arasındaki açının şematik gösterimi [49].	41
Şekil 2.16: Nicolas Bernier ve arkadaşlarının uyguladığı numune hazırlama yöntemi [50].	42
Şekil 2.17: GO saclarda RD doğrultusunun kolay mıknatıslanma doğrultularından iç ve dış sapma açıları (α ve β), GOSS doğrultusunun ND yüzey normalinden sapma açısı (γ) [50].	42
Şekil 2.18: Numune dizisinin EBSD haritalaması [50].	43
Şekil 2.19: (110) düzlemi boyunca konumlanmış Si atomlarının şematik gösterimi [53].	45
Şekil 2.20: (a) 0,7 Tesla, (b) 1,0 Tesla, (c) 1,3 Tesla ve (d) 1,5 Tesla'da elde edilen histerisiz eğrileri [53].	47
Şekil 3.1: AMPERE akım kanunu [27].	47
Şekil 3.2: Kapalı bir akım ilmeğinin merkezinde oluşan manyetik alan [54].	53
Şekil 3.3: Bir akım ilmeğinin içinden geçen manyetik çift kutbun farazi gösterimi [54].	54
Şekil 3.4: Ferromanyetik malzemelerde karakteristik histerisiz çevrimi [54].	56
Şekil 3.5: Ferromanyetik malzemelerde karakteristik histerisiz çevrimi [54].	57

Şekil 3.6:	Ferromanyetik malzemelerde karakteristik histerisiz çevrimi [54].	60
Şekil 3.7:	Elektrik saclarında kayıp dağılımı [63].	63
Şekil 3.8:	Manyetik domainlerin basit gösterimi [61].	66
Şekil 3.9:	Nüvenin 7 kademedan oluşan bacak dizilimi [61].	65
Şekil 3.10:	Nüve dizilimi alternatifleri [61].	67
Şekil 3.11:	Deliklerin ve köşelerin manyetik akıya etkisi [61].	68
Şekil 3.12:	Nüve diziminde adım bindirme teknikleri[61]	70
Şekil 3.13:	Köşegen (45°) formlu bacak ve boyunduruk saclarının step-lap dizim tekniği ile bir araya getirilme yöntemi [61].	71
Şekil 3.14:	EBSD cihazlarının genel yapısı [64].	72
Şekil 3.15:	Örnek bir kristalografik yönelenim haritası renk göstergesi [64].	73
Şekil 3.16:	Yüzey normaline göre kristalografik yönelimlerinin gösterildiği renk haritalaması [64].	74
Şekil 3.17:	BRAGG kırınım kanunu [64].	74
Şekil 3.18:	EBSD incelemesinde görülen KIKUCHI bantları [64].	76
Şekil 3.19:	HOUGH dönüşümünün şematik gösterimi [64].	76
Şekil 3.20:	Beyaz doğrunun HOUGH uzayındaki gösterimi [64].	77
Şekil 3.21:	Örnek bir kristalin EBSD ‘den elde edilen KIKUCHI bantları ve HOUGH uzayında karşılık gelen pik noktaları [64].	77
Şekil 3.22:	Kutup dağılımı tekstürünün stereografik gösterimi [64].	78
Şekil 3.23:	Tek kristalin ve çok sayıda kristalin kutup dağılımı paterni [64].	79
Şekil 3.24:	Tek kristalin ve çok sayıda çok kristalli örnek bir yapıda IPF gösterimi [64].	79
Şekil 3.25:	IEC 60404-2’ye göre EPSTEIN testi düzeneği ve dizim geometrisi [63].	81
Şekil 4.1:	Makaslama kesme prosesinde “makas / kesme açıklığının” gösterimi [13].	86
Şekil 4.2:	Kesme makinesinde üretilen 1 adet sac tabakasına ait geometrisi.	87
Şekil 4.3:	Makaslama işlemin de kesme yüzeyinde ortaya çıkan yüzey profili ve deformasyonlar [13].	91
Şekil 4.4:	SEM, EBSD ve EDX incelemeleri, kalıntı gerilimi ölçümleri, kesme kenarı görüntüleme çalışmaları için numune geometrisi.	95
Şekil 4.5:	Bakalite alınmış ve yüzeyi hazırlanmış ısıl işlem görmemiş kesildiği gibi numuneler.	97
Şekil 4.6:	SEM cihazı için küçültülmüş numuneler.	98
Şekil 4.7:	Bakalitten çıkarılmış ve incelemeler için hazırlanmış numuneler.	98
Şekil 4.8:	Tip-2 MoH 0,23 mm sac tipinden kalıntı gerilim ölçümleri için hazırlanmış numuneler P5 ve P6.	98
Şekil 4.9:	Isıl işlem maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm GO saclardan elde edilen inceleme numuneler.	98
Şekil 4.10:	Parlatma işlemleri için bakalite alınmış tavllanmış Tip-2 MoH 0,23 mm numuneler.	99
Şekil 4.11:	Mikro sertlik tarama numuneleri; P7 düşük çapak numunesi ve P8 yüksek çapak numunesi.	101
Şekil 4.12:	Tek fazlı transformatör 5 mm step-lap dizimi, 4 sıralı, üst sıradan görünüş.	106
Şekil 4.13:	Tek fazlı transformatör 5 mm step-lap dizimi, tüm sıraların üst görünüşü.	106
Şekil 4.14:	Fe-Si alaşımı faz diyagramı ve Silisyumun malzeme yapısına etkisi [66].	107

Şekil 4.15: Prototip nüve saclarının dizim sonrası üst görünüş.	109
Şekil 4.16: Tip-1 M5 0,30 mm sac ile üretilen prototip nüvenin C-C ve D-D kesitleri.	110
Şekil 4.17: Prototip numune A ve B köşelerinde <i>step-lap</i> birleşim detayları.	110
Şekil 4.18: Planlamaya uygun olarak Tip-1 M5 0,30 mm kalite sac tan delikli ve deliksiz olarak kesilen bacak ve boyunduruk sacları.	111
Şekil 4.19: Tavlanacak sac paketi için hazırlanmış taşıma paleti ve fırınlama öncesi genel görünüm.	112
Şekil 4.20: Delikli ve deliksiz sacların paslanmaz sac tan imal palet içinde yerleşimi.	112
Şekil 4.21: Vakumlu ve atmosfer kontrollü fırın içine yerleştirilmiş sac paketleri.	112
Şekil 4.22: Sac paketlerine uygulanan ısıl işlem rejim diyagramı.	113
Şekil 4.23: Kuru tip trafo nüve sıkıştırma düzeneği.	114
Şekil 5.1: 100 mikron aralıklı taramada düşük çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.	121
Şekil 5.2: 100 mikron aralıklı taramada yüksek çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.	121
Şekil 5.3: 200 mikron aralıklı taramada düşük çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.	123
Şekil 5.4: 200 mikron aralıklı taramada yüksek çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.	123
Şekil 5.5: Düşük çapaklı kesildiği gibi (P tipi) numunesinde 50X büyütme ile elde edilen görüntü.	124
Şekil 5.6: Yüksek çapaklı kesildiği gibi (P tipi) numunesinde 100X büyütme ile elde edilen görüntü.	125
Şekil 5.7: Yüksek çapak numunesi, kesme kenarı yakınında %10 derişim oranı sonucu yanmış bölge, yaklaşık derinliği 240 μ m.	125
Şekil 5.8: Kesildiği gibi P9 düşük çapak numunesinin kesme yüzeyi morfolojisi.	126
Şekil 5.9: Kesildiği gibi P10 yüksek çapak numunesinin kesme yüzeyi morfolojisi.	126
Şekil 5.10: P1 kesildiği gibi düşük çapak (a) ve P3 kesildiği gibi yüksek çapak (b) karakterli örneklerde SEM' den alınan kesme kenarı görüntüleri.	127
Şekil 5.11: P4 Düşük çapaklı (kesildiği gibi) numune EBSD ve IPF grafikleri.	128
Şekil 5.12: R8 Düşük çapaklı (tavlanmış) numune EBSD ve IPF grafikleri.	129
Şekil 5.13: P2 Yüksek çapaklı (kesildiği gibi) numune EBSD ve IPF grafikleri.	129
Şekil 5.14: R7 Yüksek çapaklı (tavlanmış) numune EBSD ve IPF grafikleri.	129
Şekil 5.15: Kristal yapıda Miller doğrultuları ve düzlemleri [68].	130
Şekil 5.16: 800 $^{\circ}$ C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde baskı kuvveti yok.	134
Şekil 5.17: 800 $^{\circ}$ C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde 1 N baskı kuvveti var.	135
Şekil 5.18: 800 $^{\circ}$ C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde baskı kuvveti yok.	135
Şekil 5.19: 800 $^{\circ}$ C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin 1,5 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde 1 N baskı kuvveti var.	136
Şekil 5.20: Delikli, deliksiz, kesildiği gibi ve tavlanmış olarak üretilen prototip nüveler.	137
Şekil 5.21: Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp miktarı: delikli kesildiği gibi yapıya karşı delikli tavlanmış yapı.	141

Şekil 5.22: Tavlama ile geri kazanılan boşta kaybın yüzdesi: delikli kesildiği gibi yapıya karşı delikli tavllanmış yapı.....	141
Şekil 5.23: Tavlama ile geri kazanılan boşta kaybın yüzdesi: deliksiz kesildiği gibi yapıya karşı deliksiz tavllanmış yapı.	142
Şekil 5.24: Deliksiz nüve tasarımında tavlamanın negatif etkisi: deliksiz kesildiği gibi yapıya karşı deliksiz tavllanmış yapı.	142
Şekil 5.25: Kesildiği gibi nüvelerin yapısal karşılaştırılması, boşta kayıp değerleri farkı: kesildiği gibi delikli yapıya karşı kesildiği gibi deliksiz yapı.	143
Şekil 5.26: Kesildiği gibi nüvelerin yapısal karşılaştırılması, boşta kayıp değişim oranı: kesildiği gibi delikli yapıya karşı kesildiği gibi deliksiz yapı.	143
Şekil 5.27: Nüvelerin boşta kayıplarının yapısal olarak karşılaştırılması: tavllanmış delikli yapıya karşı tavllanmış deliksiz yapı.....	144
Şekil 5.28: Nüvelerin boşta kayıp farkı oranı yapısal olarak karşılaştırılması: tavllanmış delikli yapıya karşı tavllanmış deliksiz yapı.....	144
Şekil A.1: Düşük çapaklı P5 ve yüksek çapaklı P7 kesildiği gibi örneklerin kesme yüzeyi morfolojisi karşılaştırmaları	14472
Şekil A.2: Çeşitli büyütme seviyelerinde (a) kesildiği gibi P1 düşük çapak ve (b) kesildiği gibi P3 yüksek çapaklı numunelerinin kesme kenarı ve civarından elde edilen malzeme yapısı..	144
Şekil A.3: P1 ve P3 örneklerinden elde edilen SEM EDX analizleri.	144
Şekil A.4: Düşük çapaklı tavllanmış R4 ve yüksek çapaklı tavllanmış R3 tavllanmış örneklerin kesme yüzeyi morfolojisi karşılaştırmaları.....	14476

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: BEST firmasında güç transformatörü üretiminde sıklıkla kullanılan tane yönlendirilmiş elektrik sac tipleri.	84
Tablo 4.2: Fe-%3,10 Si tane yönlendirilmiş elektrik çeliklerin kimyasal kompozisyonu.....	84
Tablo 4.3: Denemelerde kullanılan tane yönlendirilmiş elektrik saclarının mekanik özellikleri	85
Tablo 4.4: Tez çalışmasında örneklem kesimi yapılan örnek rulo sacların kataloglarında verilen manyetik kayıp değerleri.	85
Tablo 4.5: I. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.	89
Tablo 4.6: II. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.	89
Tablo 4.7: III. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.	90
Tablo 4.8: IV. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.	90
Tablo 4.9: Numune gruplarının kesme çapağı ve sac kalınlıkları ölçümü değerleri.	92
Tablo 4.10: Regresyon analizi veri tablosu.	93
Tablo 4.11: Tavlanmış Tip-2 MoH 0,23 saclardan elde edilen çapak ölçümleri.	96
Tablo 4.12: Tip 2 MoH 0,23 mm kesildiği gibi numuneler ile yapılan analizlerin planı.	99
Tablo 4.13: Isıl işlem maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm GO saclarda numune numarasına göre yapılan incelemeler.	100
Tablo 5.1: Tam karesel regresyon analizi katsayılar tablosu.....	116
Tablo 5.2: Y için Varyans analizi sonucu.	116
Tablo 5.3: Modelden elde edilen veriler ile gözlem sonuçları arasındaki farklar.	117
Tablo 5.4: Kesme sonrasında kesildiği gibi (tavlanmamış) örneklerde ortaya çıkan kalıntı gerilim seviyeleri.	119
Tablo 5.5: P7, P8 kesildiği gibi, R2 ve R5 kodlu tavlanmış numunelerde 100 mikron aralıklarla mikro sertlik (HV _{0,1}) taraması.	120
Tablo 5.6: P7, P8 Kesildiği gibi ve R2, R5 kodlu tavlanmış numunelerde 200 mikron aralıklarla mikro sertlik (HV _{0,1}) taraması.	122
Tablo 5.7: Tip-2, MoH, 0,23 mm saclarla yapılan ısıl işlemler sonrası sac kaybı ölçümleri.....	132
Tablo 5.8: Tip-1 M5 0,30 mm saclarla yapılan kesildiği gibi ve ısıl işlemler sonrası sac kaybı ölçümleri.....	133
Tablo 5.9: Tavlama sürecinin etkisinin delikli nüvelerde karşılaştırılması.....	138
Tablo 5.10: Tavlama sürecinin etkisinin deliksiz nüvelerde karşılaştırılması.....	139
Tablo 5.11: Yapısal farkların (delikli yapıya karşı deliksiz yapı) kesildiği gibi nüvelerde karşılaştırılması.....	139
Tablo 5.12: Yapısal farkların (delikli yapıya karşı deliksiz yapı) tavlanmış nüvelerde karşılaştırılması.....	140
Tablo 5.13: Prototiplerin birim kayıplarının, delik ve tavlama etkisinin karşılaştırılması.....	145

Tablo A.1: EPSTEIN cihazında (Tip-2) kesildiği gibi numuneler ile yapılan standart ve standart dışı ölçümlerin değerler	159
Tablo A.2: Tip-2 ve Tip-1 saclar ile kesildiği gibi ve ısıtıl işlem rejimi denemeleri sonrasında yapılan manyetik ölçümler.	160
Tablo A.3: Delikli yapıda tavlama sonucunun karşılaştırılması; kesildiği gibi ve tavllanmış numuneler	161
Tablo A.4: Deliksiz yapıda tavlama sonucunun karşılaştırılması; kesildiği gibi ve tavllanmış numuneler	163
Tablo A.5: Tavlama yapılmayan nüvelerde delik etkisinin karşılaştırması.	165
Tablo A.6: Tavlama yapılan nüvelerde delik etkisinin karşılaştırması.	167
Tablo A.7: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.....	169
Tablo A.8: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.....	169
Tablo A.9: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.....	169
Tablo A.10: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.....	170
Tablo A.11: 800 °C' de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.....	170
Tablo A.12: 800 °C' de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.....	170
Tablo A.13: 800 °C' de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.....	171
Tablo A.14: 800 °C' de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.....	171

SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

GO	: Tane yönlendirilmiş silisyum alaşımlı elektrik çeliği
GOES	: Tane yönlendirilmiş silisyum alaşımlı elektrik çeliği
CRGO	: Soğuk haddelenmiş / konvansiyonel tane yönlendirilmiş elektrik çeliği
CGO	: Konvansiyonel tane yönlendirilmiş elektrik çeliği
NGO	: Tane yönlendirilmemiş silisyum alaşımlı elektrik çeliği
HiB	: Yüksek geçirgenlikli tane yönlendirilmiş silisyum alaşımlı elektrik çeliği
HGO	: Yüksek geçirgenlikli tane yönlendirilmiş silisyum alaşımlı elektrik çeliği
GOSS	: P. Norman GOSS tarafından keşfedilen tekstür
EBSD	: Elektron arka saçılım kırınımı (<i>Electron Back Scattering Diffraction</i>)
SEM	: Taramalı elektrom mikroskopi (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
XRD	: X ışının kırınımı (<i>X-ray diffractometry</i>)
EDX	: Enerji dağılımı X ışını spektrometrisi (<i>Energy Dispersive X-Ray</i>)
H	: Manyetik alan vektörel büyüklüğü (A/m)
N	: Bir bobindeki akım ilmeği sayısı
I	: Akım (A)
Φ	: Manyetik indüksiyon vektörel büyüklüğü
V	: Elektromotor kuvvet büyüklüğü (V)
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik (H/m)
μ	: Ortamın yada malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m)
B	: Manyetik indüksiyon şiddeti (Weber, A/m)
F	: Manyetik kutuplar arası çekim kuvveti (N)
p	: Manyetik kutup şiddeti.
r	: Manyetik kutuplar arası mesafe (m)
m	: Manyetik moment vektörel büyüklüğü
l	: Akım çevriminden vektörel mesafe
M	: Birim hacimdeki manyetik moment
ϵ	: Elektromanyetik indüksiyon gerilimi (V)
χ	: Malzemelerin manyetik alınganlığı
B_r	: Histerisiz çevrimi kalıcı indüksiyon değeri (T).
M_r	: Histerisiz çevrimi kalıcı mıknatıslık değeri (T)
B_s	: Histerisiz çevrimi doyum indüksiyon değeri (T)
M_s	: Histerisiz çevrimi doyum mıknatıslık değeri (T)
H_c	: Koersivite alan büyüklüğü (A/m)
B_{maks}	: Histerisiz çevrimi en büyük indüksiyon değeri (T)
B_{eff}	: Belirli bir manyetik alana karşılık gelen indüksiyon miktarı (T)
B_m	: Manyetik indüksiyon seviyesi (T)
k_1 / k_2	: Malzeme sabitleri
n	: Steinmetz üsteli
ρ	: Tane yönlendirilmiş sacın elektriksel direnci (ohm.cm ²)
SSL	: Tek sıra bindirmeli dizim tekniği
MSL	: Çok sıralı bindirmeli dizim tekniği
α	: Dilme sürecinde üst bıçak yaklaşma açısı (°)
h_c	: Dilme sürecinde bıçaklar arası (yatay) açıklık miktarı (µm)
c_v	: Dilme sürecinde üst bıçak (dikey) bindirme miktarı (µm)
v_2	: Dilme sürecinde dilme lineer hızı (m/dak)
PHR	: Dilme sürecinde deneyleri histerisiz kayıp değeri (mT)

DAZ	: Deformasyon etkin bölge uzunluğu, (μm)
RD	: Haddelme doğrultusu (<i>Rolling Direction</i>)
TD	: Haddelme yönüne aynı düzlemde dik doğrultu
ND	: RD ve TD doğrultularının oluşturduğu düzleme dik olan doğrultu
<i>t</i>	: Ölçüm noktasında sac kalınlığı (μm)
<i>t_{ort}</i>	: Genişlik boyunca 3 kalınlık ölçüm değerinin aritmetik ortalaması (μm)
<i>U_{maks}</i>	: GO saclarda kolay miknatıslanma yönünden dış sapma açısı
<i>U</i>	: Ölçüm noktasında çapak yüksekliği, (μm)
<i>N₁/N₂₀</i>	: Ölçüm yapılan numune numarası, ilk numune ve son numune numarası
<i>Y</i>	: Regresyon analizi bağımlı girdi seviyesi (μm)
<i>X₁</i>	: 1 nolu bağımsız girdi için endeks
<i>X₂</i>	: 2 nolu bağımsız girdi, sac kalınlığı miktarı (μm)
DF	: Serbestlik derecesi
SS	: Karelerin toplamı
MS	: Karelerin ortalaması
<i>P</i>	: Anlamlılık değeri
<i>R²</i>	: Regresyon katsayısı
ρ	: Lamine elektrik sacının izolasyon direnci (ohm.cm^2)
<i>n</i>	: BRAGG kanunu, yansıma düzlemi numarası
λ	: BRAGG kanunu, elektronun dalga boyu (nm)
θ	: BRAGG kanunu, elektron çarpma açısı ($^\circ$)
θ	: HOUGH dönüşümü KIKUCHI bandı orijin normalinin orijine olan açısı, ($^\circ$)
<i>d</i>	: BRAGG kanunu, kristal yapı kafes düzlemleri arası mesafe (nm)
ρ	: KIKUCHI bandının orijin normalinin orijine olan mesafesi (nm)
IPF	: Ters kutup deseni (Inverse Pole Figure)
α	: GO saclarda RD doğrultusunun kolay miknatıslanma yönünden iç sapma açısı
γ	: GOSS doğrultusunun yüzey normali ND doğrultusundan sapma açısı.
<i>l_{eff}</i>	: Bir nüvede efektif manyetik akı yolu uzunluğu (m)
<i>P_h</i>	: Histerisiz kaybı (W)
<i>P_s</i>	: Elektrik sacı birim toplam kaybı (W/kg)
MoH	: BS 601' e göre HiB tane yönlendirilmiş elektrik sacı tipi kodu

ÖNSÖZ

Tez çalışmasını 2019-Covid pandemisinin getirdiği olağan üstü çalışma koşullarında zaman zaman konsantrasyon kaybı yaşamama rağmen başlangıçta kurguladığım içeriğe bağlı kalarak, tüm dış etkenlere ve iş hayatının getirdiği çelici faktörlere direnerek nihayetlendirmemde katkısı çok büyük olan değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ' a şükranlarımı sunarım.

Endüstride orta kademe teknik yöneticilik kariyerim boyunca, enerjimin büyük bir kısmı rutin işim olan işletme idareciliğinde, önemli bir kısmı da araştırma, geliştirme, projelendirme ve proje yürütümünde olmuştur. Dolayısıyla tez çalışmasının hiçbir döneminde tezime öncelikli işim olarak yaklaşma fırsatı yakalayamamış olmanın eksikliğini hissetmişimdir.

Tez çalışması kapsamında transformatör üretiminde kullanılan elektrik sacları konusunda derinlemesine bir literatür taraması yaparken literatürün üzerine inşa edildiği bilimsel araştırma disiplini de özümsemeye çalıştım. Endüstride Ar-Ge projesi oluşturma ve bitirme pragmatizmini özümsemiş olmam nedeni ile, bu pragmatizm ve proje kültürü bilimsel bir disiplin gerektiren akademik tez çalışmanın yürütülmesi esnasında tez yapısına önemli bir etki gösterdi. Detaylı bir okumada usul ve içerikte bu etkileşimden izler bulunacaktır. Proje kültürünün ortaya çıkardığı yazım dili deformasyonlarını olabildiğince düzeltmeye çalıştığımızı ifade etmek isterim.

Çalışmanın başlamasında mali ve çevre koşullarının oluşmasında desteği çok büyük olan bir yöneticisi olarak çalıştığım Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş. kurumsal kimliğine minnettarlığima ifade etmek üzerime borçtur. Aynı şekilde tez çalışmanın önemli bir parçası olan ölçme çalışmalarında destek aldığım Yalova Üniversitesi akademik personeli Sayın Doç. Dr. Sunay Türkdogan'a, yol göstericiliğinden ve eleştirel önerilerinden istifade ettiğim Sayın Doç. Dr. Taylan Güneş'e, test ve ölçme imkanlarını kullanımı konusunda beni karşılıksız destekleyen MKS kurumsal kimliğinde Sayın Korhan Akgün'e minnettarlığımı beyan ederim.

Son olarak, bu süreçte konsantrasyon kaybı yaşadığım dönemlerde beni tekrar mücadeleye çeken Sn. Doç. Dr. Ersin Akyüz'e, tez izleme değerlendirmelerinde yol gösterici yönlendirmeleri ile Sn. Prof. Dr. Sare Çelik'e, tezimin istatistiksel analiz kısmında beni destekleyen Sn. Prof. Dr. Aslan Deniz Karaoğlan'a, manevi varlıklarını her an yanımda hissettiğim ve özlediğim (müteveffa) Babam Adil Çelik ve Annem Raife Çelik'e, beni her türlü zorlu koşulda destekleyen eşim Ayşegül Çelik'e, varlığı ile büyük huzur duyduğum kızlarım İrem ve Elif'e ve oğlum Yusuf Çınar'a şükranlarima sunarım.

Bu çalışmayı ülkemiz akademik çevrelerinde bu konularda çalışma yapmayı planlayan yeni nesil Türk araştırmacı ve akademisyenlere ithaf ediyorum.

Balıkesir, 2024

Nihat ÇELİK

1. GİRİŞ

Sanayi devriminin başında buharın gücünün keşfedildiği ve makinelerde kullanılmaya başlandığı günlerde elektrik akımı ve manyetizma arasındaki ilişkilerin temel kuralları da gün yüzüne çıkarılıyor, elektrik üretimi, iletimi ve kullanımı açısından büyük teknolojik ilerlemeler kaydediliyordu. Manyetik alanın varlığı doğada bulunan doğal manyetizma kaynakları sayesinde yüzyıllardır biliniyordu. 1745 yılında Francis Hauksbee ve Pieter van Musschenbroek [1], Leyden Kavanozu' nu yani ilk kapasitörü icat ettiğinde elektriğin depolanabilir bir enerji olduğu da keşfedilmişti. 1752' de Benjamin Franklin yıldırımın bir elektrik yükü olduğunu bulutların statik elektrik yüklerini bir uçurtma sayesinde Leyden Kavanozu' na depolayarak ispat etmiştir. 18. Yüzyılın birikimini Charles-Augustin de Coulomb 1785' de bütünleştirmiştir ve iki elektrik yükü arasında çekme kuvvetinin matematiksel ifadesini önermiştir. 1800 yılında Alessandro Volta ilk pili yapmış, 1820 yılında elektrik akımının manyetik etkiler oluşturduğu, bir iletkenден geçen akımın pusula iğnesini saptırdığı Hans Christian Ørsted tarafından keşfedilmiştir. Aynı dönemde André-Marie Ampère eş yönde akım akan paralel iletkenlerin birbirini ittiğini, zıt yönde akanların çektiğini gözlemlemiştir. 1820' de Jean-Baptiste Biot ve Félix Savart bir iletkenден geçen akımın oluşturduğu manyetik alan hakkında BIOT-SAVART yasası olarak bilinen yasayı önermiştir. Joseph Henry endüktans kavramını önermiş ve ilk doğru akım motorunu icat etmiştir. Bir süre sonra, Michael Faraday manyetik alanı ve alan içinde oluşan akıyı değiştirerek bir elektromotor kuvveti indükleneceğini bulmuş ve ilk elektrik jeneratörünü icat etmiştir. Michael Faraday kendi adı ile anılan yasayı, yani manyetik alandaki değişikliğin gerilim indüklenmesine ve elektrik akımına neden olduğunu açıklayan yasayı önermiştir. Bunun tersi, yani elektrik alandaki değişimin bir manyetik alan indüklediği James C. Maxwell tarafından önerilmiştir. Maxwell günümüzde çok iyi bilinen dört bağıntı ile 1873' de elektrik ve manyetik alan ilişkilerini gösteren denklemlerini önermiştir. Maxwell tarafından önerilen elektro manyetik dalgalar Heinrich Hertz tarafından radyo dalgaları ile deneysel olarak kanıtlanıncaya kadar kabul görmemiştir. Nikola Tesla 19. Yüzyılın sonuna doğru ilk alternatif akım motorunu icat etmiştir. 1895' de Wilhelm Röntgen elektromanyetiğin başka bir dalını X-ışınlarını keşfetmiştir, 1897' de Joseph John Thomson elektrik yükünün temel taşıyıcısının elektronlar olduğunu öne sürmüştür. Maddeden kuantum seviyesinde elektromanyetik yayınım şeklinde foton saçınım formülünü Max Planck önermiştir ve 1900' de Albert Einstein elektromanyetiğin klasik dönemini sona erdirmiş; fotoelektrik etkiyi kuantum kavramını uygulayarak açıklamıştır [2].

Michael Faraday 1831 yılında bugünkü bilinen anlamı ile ilk transformatörü icat etmiştir. Faraday, halka / toroid şeklinde bir nüvenin etrafına sardığı primer sargıdan uyguladığı doğru akım (DC) ile toroid nüvede manyetik akı oluşturmuş ve bu akının sekonder sargı üzerinde bir gerilim indüklediğini göstermiştir. Faraday, alternatif akım (AC) uygulamaları henüz bilinmediğinden primer sargısını DC kaynağı olarak galvanik bir batarya ile beslemiştir. O dönemde alternatif akım kaynaklarının gerçek anlamda nasıl işlevsel olarak kullanılabileceği henüz keşfedilmemiştir. Değişken kutuplu AC akımın kullanışsız olarak değerlendirildiği yıllarda sargı ve endüktans uygulamaları kesikli doğru akım DC kaynakları ve mekanik kesiciler ile üretilmektedir. Elektrokimyasal galvanik pillerin ve elektroliz kaplamasının bilindiği ve yayıldığı bu dönemde AC akımın pratik amaçlar için kullanışsız olarak değerlendirilmesi anlaşılabilir. 1836’ da Nicholas Callan 2 bobinli ve demirden nüvesi olan, kesikli DC gerilimle beslemeli bir transformatör icat etmiştir ve sekonder sargısını ince tel ve primer sargısına göre daha fazla sargı ile sarmıştır. Callan böylece ilk gerilim yükseltici transformatörü icat etmiştir. 1838 yılında Amerikalı Charles Grafton Page ve 1842 yılında Fransız Antoine Philibert Masson kilovolt seviyesinde elde ettikleri yüksek gerilim ile sekonder sargısının kutupları arasında kıvılcım üretmişlerdir. Sekonder sargısında 2 kutup olması ve üretilen gerilim asimetrik dalga formunda olmasından dolayı bu cihazlar DC gerilim cihazları olarak görülmüşlerdir. 1853 yılında Heinrich Daniel Ruhmkorff, kıvılcım üreten kutupları arasındaki açıklığı 200 mm’den 450 mm’ye çıkarmıştır. 19. Yüzyıl sonuna doğru bu konuda ciddi bir yarış vardır, 1900 yılında Paris Fuar’ında 1500 mm boyunda kıvılcım gösterisi gerçekleştirilmiştir. Bu yarış atmosferi yalıtkan malzemeler, vakum altında impregnasyon, yüksek gerilim sargı tipleri ve lamine nüve demiri konusunda gelişmelere neden olmuştur. Bu dönemde bobin ve çekirdek tipi hala çubuk formundadır.

19. yüzyılın sonuna doğru elektrifikasyon ve aydınlatma konusunda teknolojik ilerlemeler elde edilmeye başlanmıştır. 1884 yılında 12 km’lik Londra Metro hattının aydınlatılması gerçekleştirilmiştir ve sonra bunu dünyanın diğer şehirlerinde daha uzun aydınlatma hatları takip etmiştir. Lucien Gaulard ve John Dixon Gibbs, 1882’ de aydınlatma şebekelerini beslemek için kullanılan öncül transformatör tasarımlarına “**sekonder jeneratörü**” adı ile patent almışlardır. Bu ikilinin çalışması ve yaygınlaşan aydınlatma şebekelerini inceleyen genç Macar mühendisler Károly Zipernowsky, Miksa Déri ve Ottó Bláthy Macaristan’da bulunan GANZ fabrikasında toroid nüve tipinde bilinen ilk dağıtım transformatörünü üretmişlerdir [3]. Aynı dönemlerde Amerika Birleşik Devletleri’nde Westinghouse Elektrik Firması’nda çalışan William Stanley [4] kapalı nüveli bir transformatör tasarlamıştır.

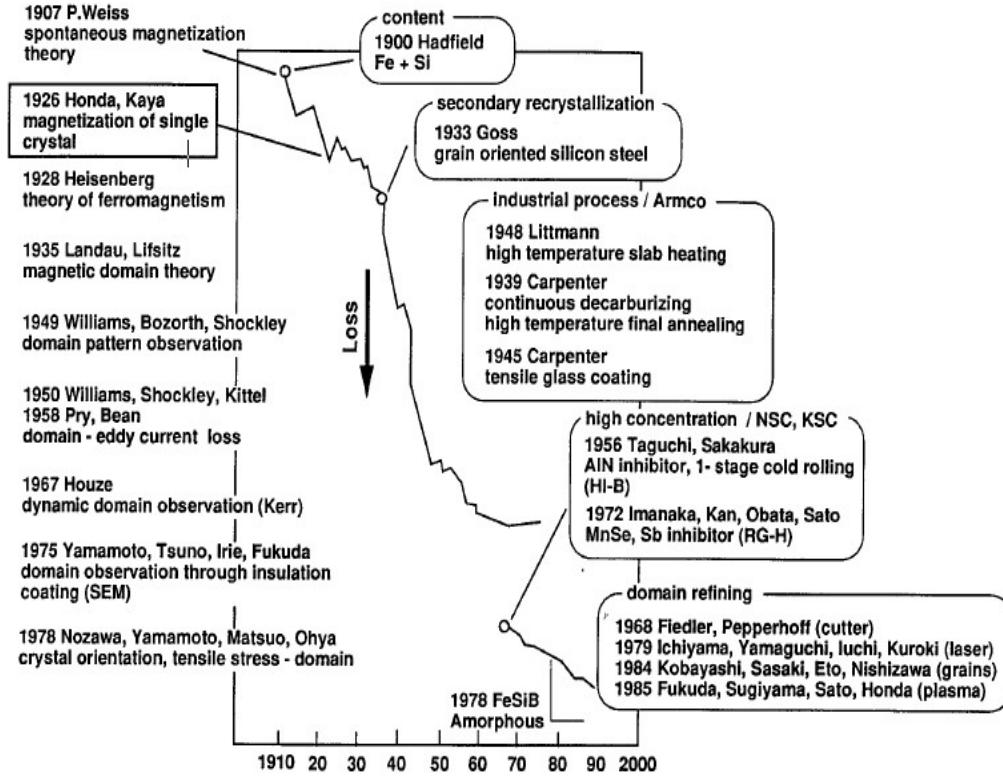
Stanley “E” tip kapalı lamine çelikten dizilmiş çekirdeğin orta bacağına sargı sarılmış aktif kısmı içi yağ dolu sızdırmaz bir kazan içine daldırarak bugün kullanılan ana formu ile yağ soğutmalı dağıtım transformatörünün patentini almıştır.

Transformatörlerde kullanılan lamine çelikler 1930’ lu yıllara kadar sıcak haddeme ürünü olarak ve %5,0-6,6 oranında silisyum alaşımlayarak üretilen çeliklerdir. Elektrik çelikleri o dönemlerde yüksek oranlarda kullanılan Silisyum nedeni ile soğuk işlemeye uygun olmayan gayet kırılğan çelik plakalar şeklinde haddelenirlerdi. Bu levhalar ile üretilen transformatörlerin demir kaybı 1,5 (Tesla) indüksiyon şiddetinde ve 60 Hz ’de 6,6 W/kg olacak şekilde gayet yüksekti [5] 1934 yılında Norman P. GOSS tarafından %3,0 oranında Silisyum içeren, çeliğin kübik kenar merkezli kristal formda ve {110}<001> düzlem ve doğrultuları boyunca yönlenmesini ve tane irileşmesini sağlayan üretim yöntemini geliştirilmeden önce transformatörlerde kullanılan çelik plakalar yönlenmemiş tane yapılı olarak kullanılıyordu. [6] Norman P. GOSS tarafından geliştirilen süreç sayesinde nüvelerde demir kaybında radikal bir düşüş elde edildi, demir kaybı 1,5 Tesla indüksiyonda ve 60 Hz’de 3,0 W/kg seviyelerine düşürülmüş oldu. Bu çığır açıcı keşiften sonra yıllar içinde günümüze kadar pek çok araştırmacı demir kaybı üzerinde çalışma ve araştırmalarına devam etmiştir.

Transformatörlerde demir kaybının (diğer anılan isimleri ile; boшта kayıp, çekirdek kaybı ya da nüve kaybı) 3 temel bileşeni olduğu bilinmektedir: (1) Ferromanyetik nüve malzemelerinin karakteristik özelliği olan histerisiz kaybı ile ilgili kayıplar, (2) İndüksiyon oluşan bir ferromanyetik malzemede oluşan Eddy akımlarının oluşturduğu kayıplar, (3) Literatürde anormal kayıplar olarak anılan diğer nüve kayıplarıdır.

Yıllar içinde gerçekleştirilen çalışmalar ile transformatör nüve çeliklerinde demir kayıpları 0,7 W/kg seviyelerine kadar düşürülmüş ticari elektrik sacları piyasaya arz edilmiştir. Aşağıda Şekil 1.1’ de transformatör çeliklerinin nüve kayıplarının gelişiminin tarihsel süreci Ushigami ve arkadaşları tarafından özetlenmiştir. [7]

Norman P. GOSS tarafından tane yönlendirilmiş sacların üretildiği günden günümüze transformatörlerde demir kaybı üzerinde yapılan çalışmaların yoğunlaştığı alanlar şunlar olmuştur:



Şekil 1.1: Tane yönlendirilmiş çelikte demir kaybının tarihsel gelişim süreci [7].

(1) Transformatör nüvesi levha saclarının soğuk haddelenebilirliğini geliştirmek ve kalınlığını Eddy kayıplarını düşürmek için pratik amaçlara hizmet edecek kadar inceltmesi; bugün piyasada en çok kullanılan tane yönlendirilmiş elektrik saclarının kalınlıkları 0,18-0,20 - 0,23 - 0,27 - 0,30 veya 0,35 mm' dir. (2) Taneleri yönlendirilmiş levha sac üretim sürecinin sonunda yer alan “ikincil rekristalizasyon” süreçleri ile tane yönlenme tektürünün keskinlik derecesini, ya da diğer tanımlamaları ile patern keskinliği seviyesini geliştirilmesi, (3) Domain düzenleme teknikleri ile manyetik akının hareket halinde olmasını sağlayan domain hareketlerinden kaynaklanan kayıpları azaltılması, (4) Mekanik işlemler neticesinde sacların manyetik özelliklerinde ortaya çıkan kayıpların kesme süreçleri azaltılması ve ısıl işlem süreçleri ile geri kazanılmasının araştırılması konularında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise yukarıda bahsedilen teknoloji alanında; yani transformatör saclarında mekanik işlemler neticesinde manyetik özelliklerde ortaya çıkan negatif değişkenliklerin ısıl işlem süreçleri ile geri kazanılması konusunda özgün çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar şunlardır: (1) Tez çalışmasının nüve kesme makinesinden elde edilen numunelerde yapılan ölçümlerle kesme çapağına etki gösteren makas kesim süreç

parametreleri arasındaki istatistiksel modeli oluşturmak için yapılan regresyon analizi çalışmalarından bahsedilmiştir. (2) Standart üretim proseslerinde kullanılan 2 tip tane yönlendirilmiş sac tipi ile numune oluşturma, numunelerle EPSTEIN cihazında standart ve standart dışı dizim teknikleri kullanılarak (*as-cut*) “**kesildiği gibi**” ve ısıl işlem görmüş örneklerle yapılan demir kaybı ölçümleri karşılaştırılmıştır. (3) Numunelere vakum altında ve atmosfer kontrollü tüp fırında değişik sıcaklıklarda yapılan gerilim giderme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. (4) Değişik gerilim giderme koşullarına tabi tutulan örneklerin standart ve standart dışı dizim tekniklerinde demir kayıplarının ölçülmüş, ısıl işlem ve dizim tekniğinin demir kaybı değişimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. (5) Kesme kenarı civarında tane yönlendirilmiş sacda makro ve mikro seviyede plastik deformasyonun izlerinin incelenmiş, bu maksatla kesme kenarı civarında mikro sertlik değişiminin incelenmesi, kesme ile oluşan yüzey morfolojisinin incelenmesi, kesme kenarı civarında plastik deformasyonunun SEM yöntemi ile incelenmesi ve kesme kenarı yakınlarında tane yönelme tekstür değişiminin EBSD yöntemi ile incelenmesi yapılmıştır. (6) Yukarıdaki incelemeler gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmuş ve tutulmamış örnekler için ve ayrıca, yüksek çapaklı ve düşük çapaklı örnekler için ayrı ayrı yürütülmüştür. (7) Prototip boyutlarında transformatör nüvesi tasarımı yapılmıştır. Nüve bileşenlerinin (bacaklar, alt ve üst boyunduruk grupları) vakum altında gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmuş ve tutulmamış versiyonları ile merkezleme deliği bulunan ve bulunmayan versiyonları olan 4 adet identik nüve imalatı yapılmış, bu nüvelerin demir kayıplarının tavlama süreci açısından ve yapısal farklar açısından karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Tane yönlendirilmiş sac üreticisi firmalar katalog değerlerinde demir kaybı ve diğer mekanik ve manyetik özelliklerini beyan ettikleri ürünlerini transformatör üreticilerine büyük bobinler şeklinde sevk ederler. Bu bobinler fabrikalarda önce haddeleme yönünde mekanik dilme kesme işlemine, daha sonra tasarım ölçülerinde hadde yönüne 45 derece açılı kenar kesme işlemine ve en son dizim esnasında merkezleme için kullanılan deliklerin delme işlemlerine tabi tutulurlar. Her kesme ya da delik açma / punç işlemi sayesinde oluşan yeni kesme kenarı, civarında plastik deformasyonun yoğunlaştığı, tane yönelme tekstürünün kesintiye uğradığı veya deforme olduğu, kesme çapağı oluşumunun gerçekleştiği zorunlu süreksizliklerdir. Bu süreksizlikler tane yönelme karakteristiğini, yani levha sacın anizotropik karakteristiğini değiştirir. Bu türden yapısal süreksizlikler nüvenin kolay mıknatıslanma doğrultusunda ortaya çıkan süreksizliklerdir. Akı yolundaki her bir süreksizlik malzeme içinde ve bileşenlerin bağlantı noktaları arasında ortaya çıkan manyetik

akı iletiminde kayba neden olur. Kesme süreksizliklerinden veya merkezleme deliklerinden dolayı ortaya çıkan kayıplar büyük güç trafoları için tasarlanan nüvelerde ihmal edilebilir seviyede kabul edilir iken, küçük güçlerdeki trafo nüvelerinde önemli bir kayıp noktası haline gelebilir. Özellikle küçük nüveli trafolarda oluşan kayıpların trafonun yaşam süresi boyunca verimliği ve kayıpları açısından incelenmesi durumunda önemli bir miktarda verimlik iyileştirme imkânı ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada çıkış noktamız ve motivasyonumuz, literatürde bilinen tane yönlendirilmemiş elektrik sacları konusunda çok çalışılmış kesme deformasyonu etkisini tane yönlendirilmiş saclarla yapılan transformatör nüvesinde anlamak ve daha verimli transformatör nüvesi üretimi konusunda kesim sonrası yapılacak ısıl işlemlerle literatüre katkı sunmak olmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde elektrik çeliklerinde üretim süreçlerinde uygulanan mekanik ve ısıl işlemler konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Landgraf ve arkadaşları [8] %2,2 Silisyum içeren tane yönlendirilmemiş (NGO) elektrik çeliklerinde delik delme işleminden sonra kalan plastik deformasyonun manyetik özelliklere olan etkisini incelemiştir. 700 °C’de nitrojen atmosferinde bir saat tavlama yapılan değişik seviyelerde (%0,5- %7,7) Silisyum içeren soğuk haddelenmiş NGO sac numunelerinde ısıl işlem sonrasında manyetik özelliklerde iyileşmeler olduğunu göstermişlerdir. Tavlama ile kalıcı gerilmelerin giderildiğini, tavlama sonrasında dislokasyon paterninde bir değişim olmadığını, bu dislokasyon yapısının 180 ° domain duvarı hareketleri ile etkileşimde olduğunu, toplam kayıpta %20 oranında bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir.

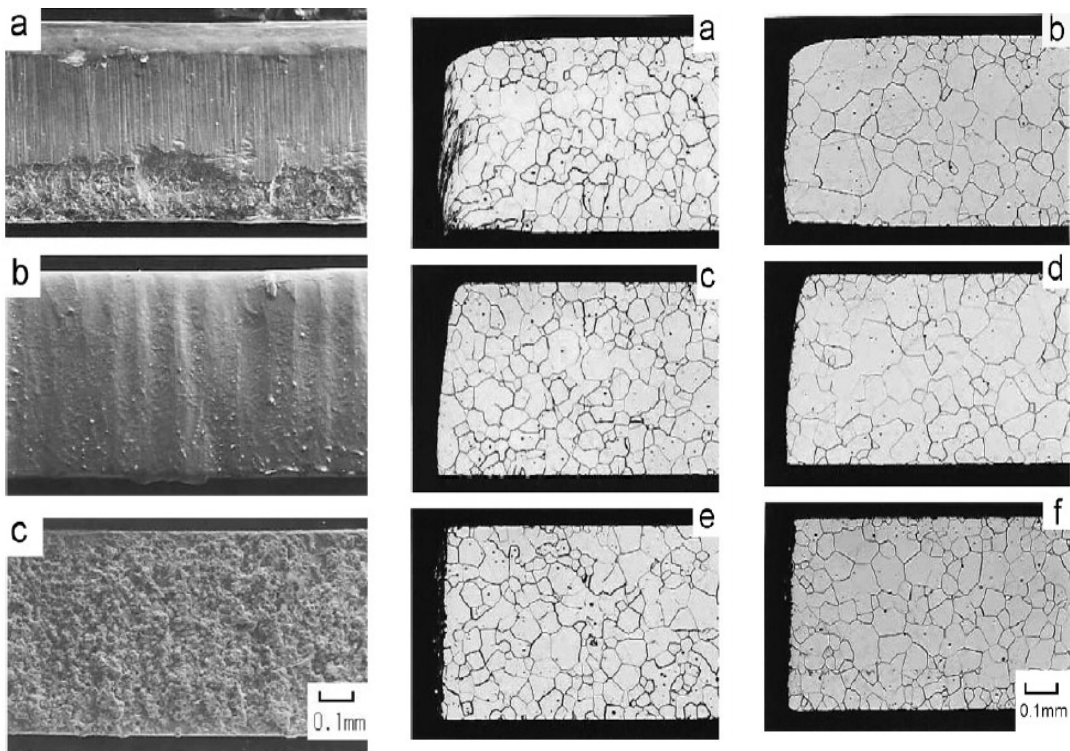
Bayraktar ve arkadaşı ise [9], silisli sacların kesme prosesinde tavlama ısıl işleminin manyetik özellikler üzerindeki etkileri konusunda yaptıkları çalışmada, literatürdeki elektrik motorlarında kullanılan NGO çeliklerde kesme prosesi tiplerinin kesme yüzeyi ve yakınlarında oluşturduğu plastik deformasyonu ve gerilim giderme tavlama sonucu elde edilen manyetik özelliklerde iyileşmelere referanslar vermişlerdir. Bayraktar ve arkadaşı dönel elektrik makinalarında statoru oluşturan silisli saclardaki demir kayıplarının toplam motor kayıplarındaki etkisini kesme prosesi tiplerine ve artı kalan plastik deformasyonla ilgisini açıklamaya çalışmışlar, motor kayıplarını sınıflandırdıktan sonra, literatürde kullanılan genel kayıp hesap formüllerini vermişlerdir. Mekanik kesme işlemi ve ortaya çıkan plastik deformasyonun kaynağını belirttikten sonra, mikroskopik tane yapısı incelemeleri ile tavlama öncesi ve tavlama sonrası kesme yüzeyine yakın bölgelerde malzemenin içyapısındaki değişimleri göstermişlerdir. Kesme prosesi farklılıklarının (su jeti, lazer, kesme kalıbı, tel erozyon, su jeti ile kesim gibi) ortaya çıkan demir kaybındaki etkisini gösteren çalışmalara değinmişlerdir. Bayraktar ve arkadaşının deneysel çalışmalarından ve literatür taramasından ulaştıkları sonuçları şunlar olmuştur; (1) Mekanik kesme yöntemleri ile sacların kesilmesi sonucunda, kesme gerilmeleri oluşmakta, bu gerilmeler manyetik özelliklerde bozulmalara neden olmaktadır. (2) Silisli sac şerit genişliğinin azalması ile histerezis kayıplarında artış olmaktadır. (3) Kesici takımında oluşan aşınma, silisli saclarda çapak oluşumuna dolayısı ile demir kayıplarının artmasına neden olmaktadır. (4) Manyetik kayıpların azaltılması için kesme boşluğunun iyi ayarlanması gerekmektedir. (5) Mekanik kesme işlemi esnasında oluşan kesme gerilmelerinin

giderilmesi için gerilim giderme tavlamaının uygulanabilir. (6) Gerilim giderme tavlamaının, silisli sacların manyetik özellikleri üzerinde olumlu etkileri gerçekleşmektedir. (7) Silisli saclarda, tavlama işlemi 700-800 °C sıcaklık değerleri aralığında yapılabilir. (8) Tavlama işlemi sadece mekanik kesme yöntemi ile kesilen silisli saclar için değil, aynı zamanda lazer, tel erozyon ve su jeti kesim yöntemleri ile kesilen silisli saclar da uygulanabilir.

Kesme sonucu ortaya çıkan plastik deformasyonun etkisini daha iyi anlayabilmek için Ken-Ichi Yamamoto ve arkadaşlarının [10] yaptığı çalışmadan bahsedilebilir. Araştırmacılar dönel elektrik makinelerindeki NGO sac paketlerini bir arada tutmak için kullanılan radyal sıkıştırma düzeneğinin oluşturduğu basma gerilmelerinin sacın manyetik geçirgenliğinde azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca manyetik alana maruz ferromanyetik malzemede gerçekleşen boyut değişimi kavramı olan “**manyetik striksiyon**” etkisinin artmasına ve dolayısıyla demir kaybının artmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Silisli sac paketlerinin bir düzen çerçevesinde bir arada durması için uygulanan her türlü kuvvetin manyetik özellikler üzerindeki etkisinin çok sayıda kaynakta görülebileceğini not eden Yamamoto ve arkadaşlarına göre, bu etkinin temel sebebi sadece uygulanan bası gerilmelerinden kaynaklı manyetik striksiyon enerjisinin artması ile açıklanamaz. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; dairesel formda uygulanan bası gerilmelerinin manyetik geçirgenlikte azalmaya, manyetik kayıplarda artışa neden olduğunu, manyetik kayıplardaki azalmanın uygulanan bası gerilmelerine neredeyse oransal olduğunu görmüşlerdir. Uygulanan bası gerilmelerinin manyetik striksiyon genliğinde artışa neden olduğunu, bası gerilmeleri nedeni ile domain yapısında radyal yönde daha fazla manyetik akı oluştuğunu, aynı zamanda artış gösteren manyetik striksiyonun mekanik işe dönüşerek kayıpları arttırdığını vurgulamışlardır.

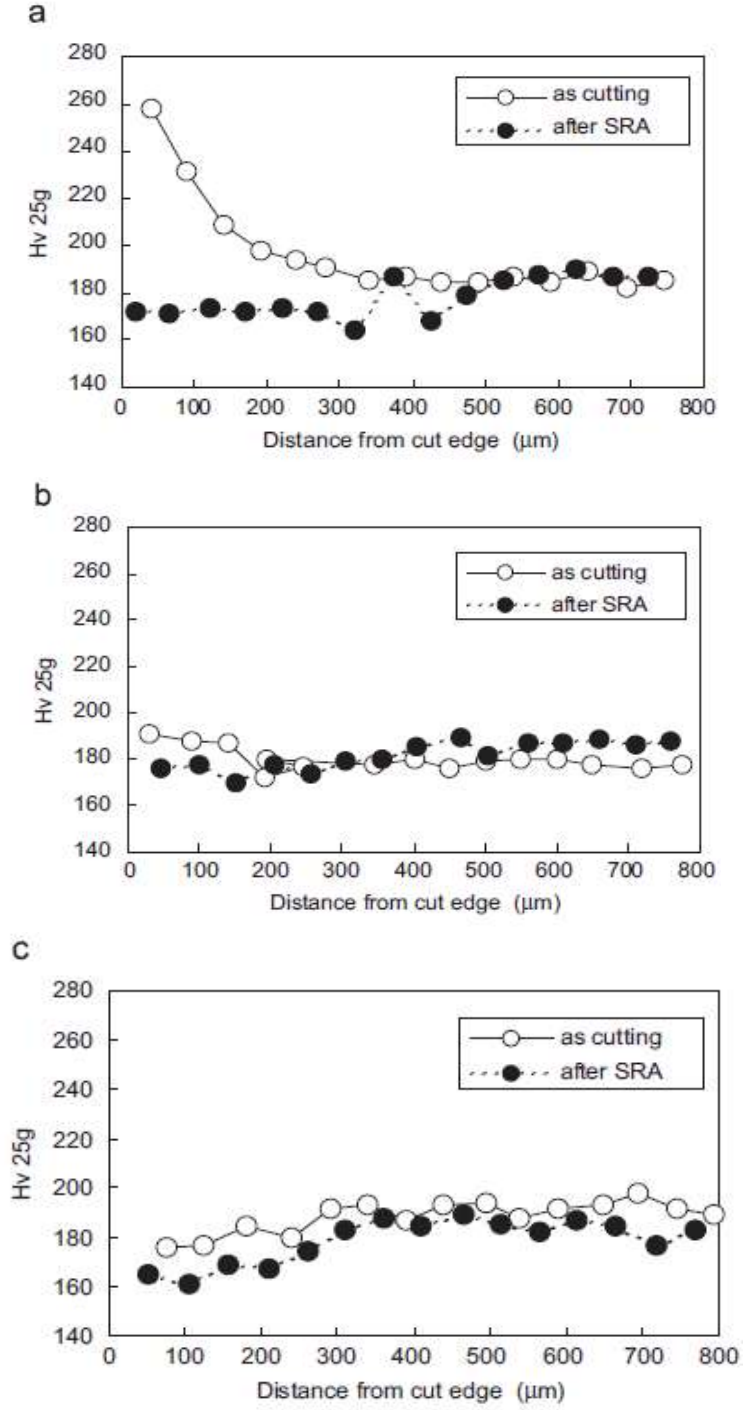
Yousuke Kurosaki ve arkadaşları [11] ise, dönel elektrik motorlarında kullanılan NGO saclarda verimlilik ekseni çalışmalarında sac paketlerindeki kesme ve sıkıştırma düzeneklerini incelemişlerdir. Kesme işlemi sonucu ortaya çıkan yüzey morfolojisini şu şekilde tanımlamışlardır; (1) kesme yuvarlanma bölgesi, (2) makaslama bölgesi, (3) kopma yüzeyi ve (4) kesme çapağı oluşumu bölgesi. Deneysel çalışmalarında makaslanma bölümünün toplam profilin yaklaşık %65’ni oluşturmakta olduğunu ve 20 mikron seviyesinde bir çapak oluşumunu ölçmüşlerdir. Makasla kesimden elde edilen yüzey morfolojisi ve tane yapısı incelendiğinde, kesme yüzeyi boyunca plastik deformasyon etkin

olduğu bölgenin seviyesini net bir şekilde gözlemlemişlerdir. Azot gazı atmosferinde, 750 °C’de 2 saat süren bir gerilim giderme tavlaması ile tane yapısı deformasyonunun büyük oranda geri kazanıldığı tespit etmişlerdir. Kesme yüzeyinden itibaren yapılan mikro sertlik tarama grafikleri, kesme yüzey pürüzlülüğü ve EPSTEIN numunelerinden ölçülen manyetik özellikleri aşağıda verilmiştir. Yousuke Kurosaki ve arkadaşları tarafından yapılan incelemeler ait sonuçlar aşağıda Şekil 2.1’ de verilmektedir. Şekil 2.1’ de (a) makas ile kesim, gerilim giderme öncesi ve sonrası tane yapısı, (b) lazer kesim, gerilim giderme öncesi ve sonrası tane yapısı ve (c) tel erozyon ile kesime ait, gerilim giderme öncesi ve sonrası tane yapısıdır.



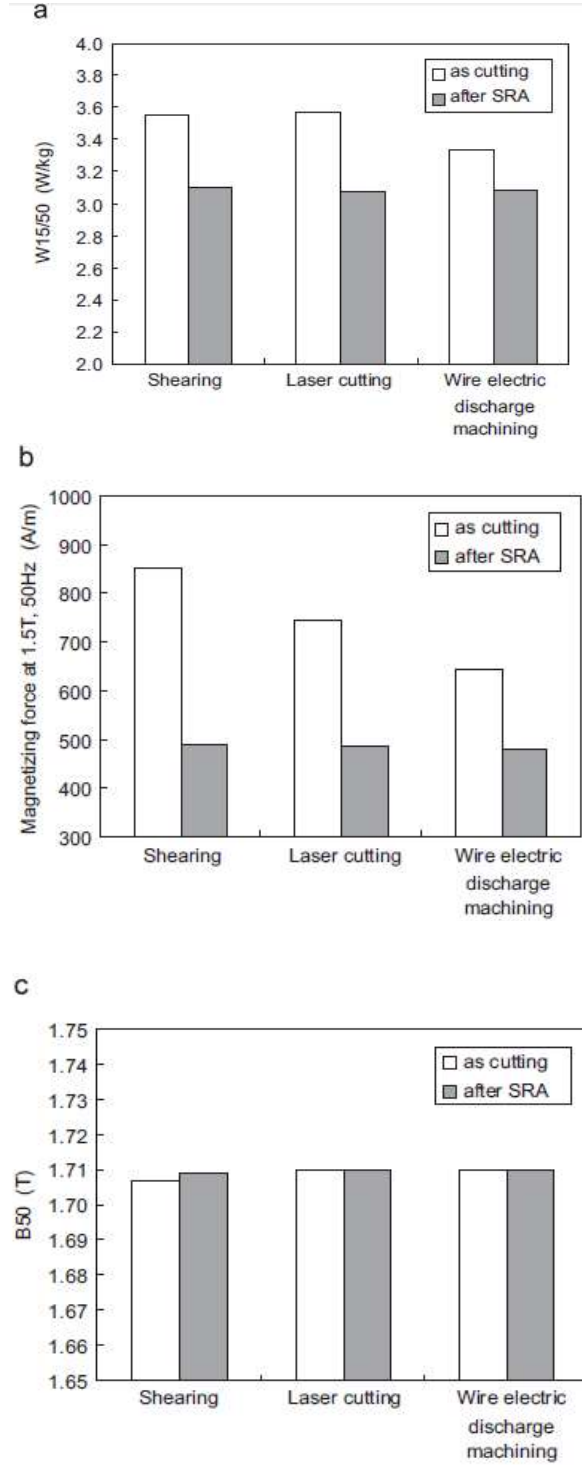
Şekil 2.1: Kesme sonrası ortaya çıkan yüzey ve tane yapısı görüntüleri [11].

Değişik kesme yöntemleri ile kesilmiş silisli saclarda EPSTEIN numunesi ile ölçülen manyetik özelliklerdeki değişimler, gerilim giderme tavlaması öncesi ve sonrası durumu aşağıdaki Şekil 2.2’ deki grafiklerde verilmiştir: (a) Makas (dilme) ile kesim, gerilim giderme öncesi ve sonrası mikro sertlik değişimi. (b) Lazer kesim, gerilim giderme öncesi ve sonrası mikro sertlik değişimi. (c) ise tel erozyon ile kesim, gerilim giderme öncesi ve sonrası mikro sertlik değişimini göstermektedir.



Şekil 2.2: Kesme yüzeyinden itibaren mikrosertlik ölçümleri ve kesme yüzey profili [11].

Şekil 2.3' de ise, farklı kesme yöntemleri ile kesilmiş silisli saclarda gerilim giderme tavlaması öncesi ve sonrası durumu gösterilmektedir. (a) Demir kaybı, (b) Sabit bir indüksiyon şiddetini (1,5 Tesla) oluşturmak için gerekli manyetik alan ihtiyacı, (c) Sabit bir manyetik alan altında ($H=500$ A/m) oluşan indüksiyonun karşılaştırmasıdır.



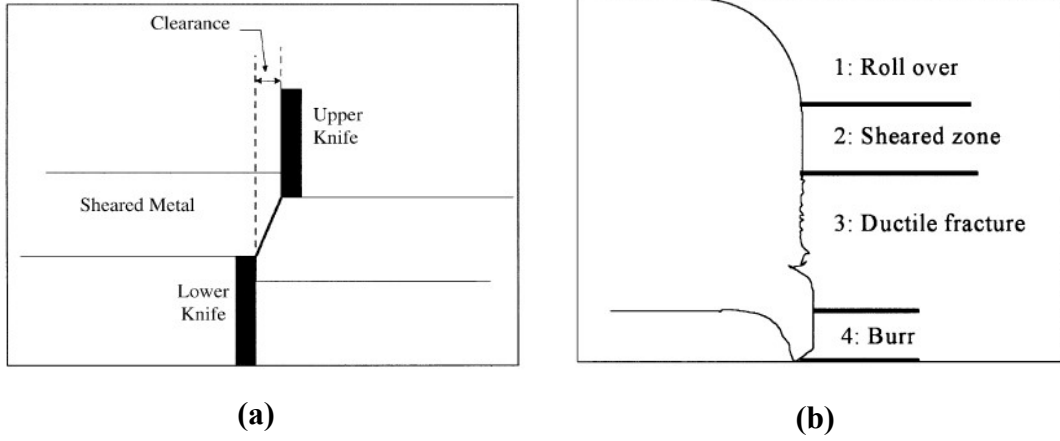
Şekil 2.3: EPSTEIN numunesi ile ölçülen sacın manyetik özelliklerdeki değişimler [11].

Youseke Kurosaki [11] ve arkadaşlarının ulaştığı sonuçlar şunlar olmuştur; dönel elektrik makinelerinde manyetik özellikler silisli sacların kesme yöntemlerinden ve sıkıştırma düzeneklerinden önemli derecede etkilenmektedir. Bu etkileşimleri en az indirmek için üretim esnasında mecburen ortaya çıkan deformasyonun etkisini en aza indirilmesi gerekmektedir.

Mekanik kesme işlemleri sonrasında yapılan gerilim giderme süreci konusunda, Zdenko Godec [12] ise, M5 sınıfı 0,30 mm kalınlıktaki tane yönlendirilmiş (GO) elektrik çelikleri ile yaptığı çalışmada değişik gerilim giderme süreçlerinin manyetik geçirgenlik ve manyetik yaşlanma üzerinde çalışmıştır Godec; dilme, delme, bükme gibi üretim operasyonlarının elastik ve plastik deformasyonlara ve yapıda iç gerilmelere neden olduğunu, bundan dolayı elektromanyetik özelliklerde kötüleşme olduğundan referanslar vererek bahsetmiştir.

Araştırmacının iki farklı gerilim giderme (sürekli veya kesikli) tavlama prosesini karşılaştırdığı çalışmasında, 5 ila 20 tabakadan oluşan silisli sac dizgilerini değişik rejimlerde gerilim giderme süreçlerinden geçirdikten sonra ulaştığı sonuçlar şunlar olmuştur; (1) Dilme, makaslama, bükme, delme gibi mekanik işlemler nedeni ile GO tane yapılı elektrik saclarında manyetik geçirgenlikte, nüve kaybı ve manyetizasyon eğrisinde önemli değişiklikler olmaktadır. (2) Mekanik süreçlerden dolayı yapıda kalan iç gerilmelerin ve kalıcı olarak yapıya yüklenen dış yüklerin tavlama ile manyetik özelliklerdeki kayıplar geri kazanılabilmektedir. (3) Kesikli ya da kesiksiz her iki gerilim giderme rejiminde karbürizasyona çok dikkat edilmelidir. Karbon oranında çok cüzi bir artış (% 0,1) gerçekleşmesi düşük manyetizasyon seviyesinde manyetik özellikleri önemli ölçüde kötüleştirmekte ve manyetik yaşlanma eğilimini arttırmaktadır. (4) Mekanik işlemler esnasında elastik ve plastik deformasyonlardan mümkün olduğunca kaçınılmalıdır, çünkü gerilim giderme süreçleri kaybedilen manyetik özellikleri ancak kısmen geri kazandırabilmektedir.

NGO elektrik çeliklerinde mekanik kesme süreçleri konusunda P. Baudouin ve arkadaşları [13], makas kesim boşluğunun manyetik özelliklerdeki etkisi üzerinde çalışmışlardır. Makas kesme açıklığı ile (toplam nüve kaybı, koersivite, bağıl manyetik geçirgenlik, kalıcı mıknatıslık şiddeti gibi) bazı manyetik özelliklerin zayıflaması arasında açık bir korelasyon görmüşlerdir. P. Baudouin ve arkadaşları, manyetik özellikler ile makas boşluğu arasındaki korelasyonda değişimin dramatik bir hal aldığı geçiş bölgelerini göstermişlerdir. Özellikle, “kırılma öncesi bıçak hareketi miktarı” parametresinin manyetik özelliklerdeki değişimlerde bir geçiş bir bölgesi oluşturacak şekilde etkin olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.4’ de (a) makas açıklığını, (b) kesme sonrası oluşan yüzeyleri temsili olarak gösterilmektedir. Kesmenin başında üst bıçak tarafından saca uygulanan kuvvet sacın yuvarlanmasına neden olmaktadır (1 nolu bölge). Kuvvet arttıkça kesme gerilimi dayanımı aşılır ve düz bir yüzey elde edilecek şekilde üst bıçak ilerler (2 nolu bölge).



Şekil 2.4: Makas ile lamine sisli sac kesim mekanizması ve kesme yüzeyi profilleri [13].

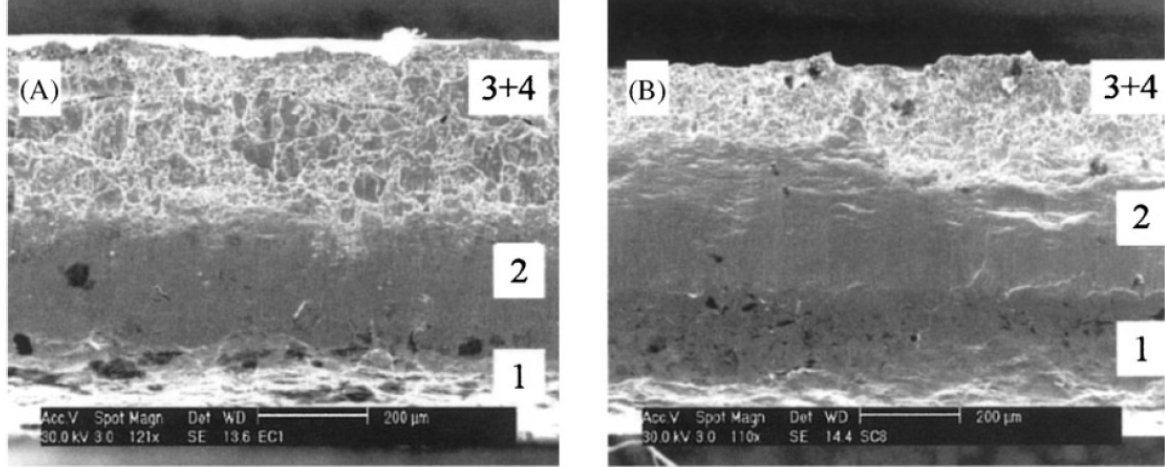
Uygulanan kuvvet arttıkça kesit içinde gerilim ve enerji yoğunlaşması sonucu bir çatlak başlangıcı oluşur. Bu çatlaktan hızlı ve sünek bir kırılma (3 nolu bölge) gerçekleşir. Kesme boşluğu, kesmenin son aşamasında uygulanan kesme gerilmesinin bağıl şiddeti aşırı yükseldiğinden alt bıçak üzerine sıvama etkisi ile çapak oluşturur (4 nolu bölge). Kesme işleminde takım keskinliği ve takım ömrü açısından “**kesme boşluğu**” çok önemlidir.

Kesilen parçada oluşan plastik deformasyon, kesme kalitesi, bıçak ömrü ve kesme için uygulanan yük gibi parametreler ile kesme boşlunun optimizasyonu gereklidir. Kesme boşluğu çok küçük olursa kesme basıncı yüksek olur, dolayısıyla kesme için gereken enerji yüksek olur, bu da gecikmiş çatlak oluşumuna gevrek bir kesme profiline neden olur. Diğer taraftan kesme boşluğu fazla tutulursa, uzun çapağa neden olur. İdeal bir kesme profilinde kesme derinliğinin yaklaşık ortasından sonra sünek kopmaya geçilmiş olmalıdır. Pratikte makas açıklığı sac kalınlığının %2-10’ nu oranında ayarlanabilir.

Şekil 2.5’ de (A) daha düşük kesme açıklığı, (B) daha büyük kesme açıklığı ile kesilen örnekleri, (1-4) nolu bölgeler ise Şekil 2.4 (b)’ de belirtilen bölgelerin numune üzerinden gösterimi yar almaktadır.

P. Baudouin ve arkadaşlarını ulaştıkları sonuçlara göre, (1) kopma öncesi bıçak hareketi miktarı uzunluğunun (yani: yuvarlanma + makaslama + çapak) ve çapak miktarının kesme kalitesini kesme esnasında oluşan plastik deformasyonu analiz etmek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Üzerinde çalıştıkları örnekleri tavllanmış numuneler ile karşılaştırıldıklarında (2) manyetik geçirgenlikte %40-60 oranında azalma, (3) koersivite

alan şiddetinde %20-30 artma olduğunu, (4) kesme açıklığının manyetik özelliklerdeki kötüleşmede önemli bir rol üstlendiğini, (5) optimum kesme açıklığının malzeme kalınlığının %2-3 oranında elde edildiğini, (6) düşük oranda dahi gerçekleşen plastik deformasyonun manyetik özellikler üzerinde çok fazla etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.5: Kesme yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri [13].

Diğer taraftan, Bacaltchuk ve arkadaşları [14] soğuk haddelenmiş NGO çeliklerini manyetik alan altında ve manyetik alan olmaksızın tavlama yaparak gerilim giderme süreçleri ile ortaya çıkan sonuçları paylaşmışlardır. Araştırmacılar, manyetik alan altında yapılan tavlamanın tane yönlenme seviyesini etkilediğini ifade etmişlerdir. Demir bileşiklerinde kristal oluşumunda manyetik alan uygulamasının anizotropi ile etkileşimde olduğu, rekristalizasyon süreçlerini geciktirdiğini ve dolayısıyla doğal (manyetik alan altında olmayan) rekristalizasyon sürecinden farklı bir tane yapısı ve tane yönlenme seviyesine yol açtığını belirtmişlerdir.

Elektrik makinelerinde nüve malzemesi olan elektrik saclarında tane büyüklüğünün çok önemli bir etkisi olduğu bilinir. Ortalama tane büyüklüğü arttıkça **histerisiz kayıpları** artar. **Eddy kayıpları** ise Şekil 4.2' de gösterilen (l : uzunluk, t : kalınlık iken l/t) sac kalınlığı ile ters orantılıdır. Dolayısıyla dönel elektrik makinelerinde ideal tane boyutu için optimum tane çapı aralığı önerilebilir; bazı araştırmacılar bu aralığı 150-200 mikron arasında vermektedirler.

Dönel elektrik makinelerinde NGO çeliklerin anizotropik performansları ile genelde ilgilenilmez. Transformatör gibi statik elektrik makinelerinde ise kristalografik yönlenme

yani anizotropinin manyetik avantajları işlevsel hale gelir. Ferromanyetik malzemelerin kristalografik yapısı konusunda daha detaylı anlatımlar ileriki bölümlerde yapılacaktır. Bu aşamada kısaca bahsederseniz; tane yönlendirilmiş elektrik sacı yapısında kristalografik olarak $\{100\}[100]$ Miller düzlemleri ve doğrultusu kolay manyetize düzlem ve doğrultusudur. İdeal anizotropik sacda bu düzlemlerin ve RD doğrultusunu sac yüzeyine paralel olması tercih edilir. GOSS yapısı olarak bilinen yönelim ise $\{110\} [100]$ yönelimidir. Bu yönelim manyetik geçirgenliğin $\{100\}[100]$ yöneliminden sonra en iyi olduğu tekstür yapısıdır.

Bacaltchuk ve arkadaşlarının yaptığı ve alıntılıdığımız çalışmalarının deneysel bölümünde (5 x 8 x 0,5) mm %10 soğuk haddelenmiş ve ardından 815 °C’de birincil tavllanmış NGO sac levhaları 8 Tesla gibi şiddetli bir manyetik alan uygulayarak ve uygulanmayarak ikincil tavlama maruz bırakmışlardır. İkincil tavlama ise değişik sıcaklıklar denemişlerdir. Daha sonra Philips X’Pert MPD optik mikroskopta tane boyutu ölçümü ve PC-Texture 3.0 ve PopLA yazılımı ile tane yönelimi analizi yapmışlardır. Manyetik alan altında tavlama ise tüp şeklinde bir fırında, sacı manyetik akı yönüne göre dik pozisyonda yani haddelenmiş sacın ND yönünde (hadde yönünün normali yönünde) konumlandırmışlardır. Numune tutucu kısıtlarında dolayı manyetik alan yönü ile sacın hadde yönünü RD paralel hale getirememişlerdir. Dolayısıyla ikincil rekristalizasyon aşamasında manyetik alan yönü ile kristalografik anizotropinin toplam etkileşimini gözlemleme şansları olmamıştır. İkincil tavlama sonrası manyetik alan altında olup olmadığına bakılmaksızın ortalama tane boyutunun 150 µm’ dan 200 µm’ a çıktığını tespit etmişlerdir. Hâlbuki manyetik alanın ikincil rekristalizasyonu geciktirdiğine dair önceki araştırmalar ışığında, aynı ısıl rejim ve süre uygulanan manyetik alan altında tavlama sonrası numunelerde tane boyutlarının daha küçük olması beklenirken ortaya çıkan büyük taneli yapıyı manyetik alanın şiddeti ile ilişkilendirmişlerdir.

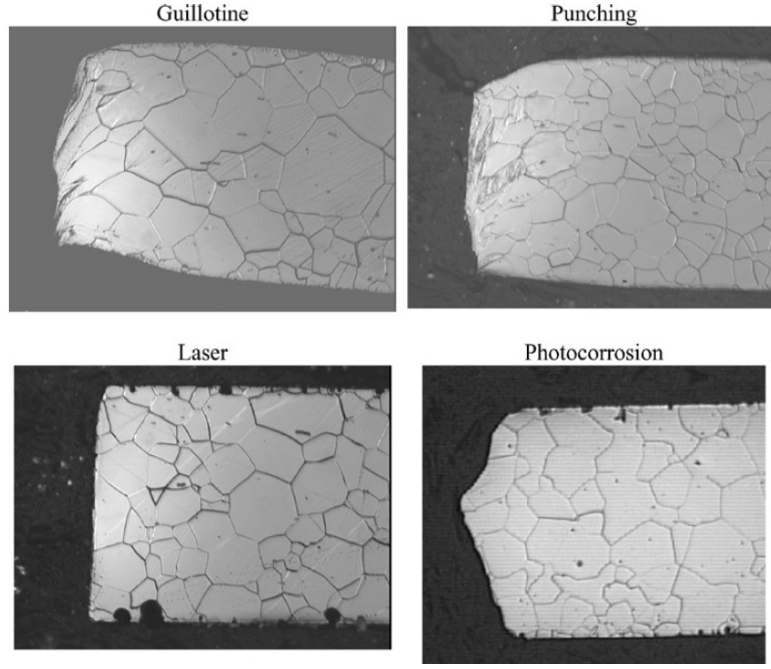
Bacaltchuk ve arkadaşlarının çalışmalarında yararlandıkları [15, 16] referanslarda 2 ve 5 Tesla şiddetinde düşük manyetik alan altında tavlama sonrası ortaya belirgin bir tane boyutu farkı olduğu ifade edilmektedir. Diğer çalışmalarda da 10 ve 15 Tesla gibi büyük manyetik alan altında yapılan tavlama sonrası ortaya tane boyutu farkı çıkmamış olduğunu belirtmişlerdir. [17, 18]. Bu sebeple, belirli bir manyetik alan şiddetine kadar manyetik alanın tane çekirdeklenme süreçlerini geciktirmiş olabileceğini, belirli bir şiddetin üzerinde

ise tane sınırı hareketinin uygulanan manyetik alan nedeni ile ortaya çıkan çekirdeklenme gecikmesinin etkisini bertaraf etmiş olabileceğini önermişlerdir.

Diğer taraftan atıf yapılan tüm araştırmacıların [15] uygulanan manyetik alanın şiddeti arttıkça tane yapısının yönlenme seviyesinin yani tane yönlenme tekstür keskinliğinin belirgin bir şekilde arttığına dair tespitlerde bulunmuşlardır. Bacaltchuk ve arkadaşları özetle aşağıdaki bulguları paylaşmışlardır; (1) tavlama esnasında manyetik alan uygulamasının tane büyümesinde küçük bir etkisi olabilmektedir. (2) GO tekstürünün manyetik alan altında tavlama yapıldığında en düşük tavlama sıcaklığında 737 °C’de dahi gözlemlenebildiğini, sıcaklık arttıkça GO dokusunun güçlendiğini, manyetik alan uygulanmadığında ise GO tekstürünün ancak en yüksek tavlama sıcaklığında (paramanyetik geçiş sıcaklığı) gözüküğünü, (3) bulguların, manyetik alan altında çekirdeklenmenin malzemenin anizotropik karakteristiğine etkinin olmadığı CURIE sıcaklığının üstünde paramanyetik bölgede dahi tane sınırı hareketi üzerinde etkisi olduğunu ve tane yönlenme tekstürünün gelişiminde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

M. Emura ve arkadaşları [19] %2 Silisyum alaşımı içeren NGO elektrik çeliğinde punç, makas kesim, lazer kesim ve foto-korozyon ile kesim tekniklerini karşılaştırmışlardır. Numunelerin; kesim sonrası (JCUT), kesim + tavlama sonrası (CUTA), tavlama + kesim sonrası (ACUT) ve tavlama + kesim + tavlama sonrası (ACUTA) şeklinde ayrı ayrı mekanik işlem öncesi ve sonrası maruz kaldıkları ısıl işlem tipine göre sınıflandırarak, uygulanan kesim sisteminin toplam manyetik kayıplardaki, histerisiz kaybındaki ve geçirgenlikteki etkisini gözlemlenmişlerdir. Örnekleri Azot atmosferinde 750 °C’de 1 saat boyunca tavlayarak, gerilim giderme ve rekristalizasyon etkisini de incelemişlerdir. Manyetik kayıp ve geçirgenlik ölçümlerini de 1,5 Tesla ve 60 Hz sinüzoidal manyetik indüksiyon altında IEC ve ASTM standartlarına uygun olarak ölçmüşlerdir. Histerisiz ölçümlerini ise 0,5 mHz frekansında manyetik indüksiyon eğrilerini oluşturarak ve histerisiz grafiği alanlarını hesaplayarak yapmışlardır.

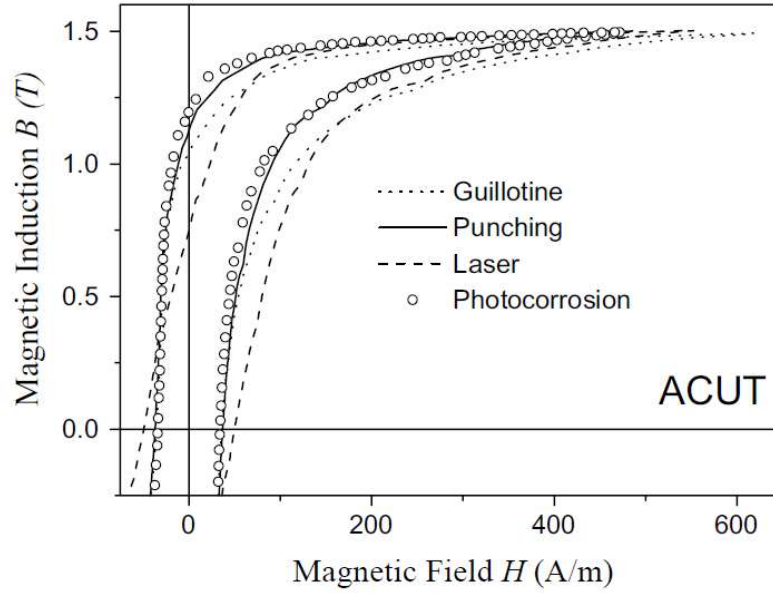
M. Emura ve arkadaşları yaptıkları kesme kenarı civarı tane yapısı incelemeleri Şekil 2.6’da verilmiştir. Şekilde özellikle giyotin kesme ve takımla delik delme profillerinde tane yapısını maruz kaldığı plastik deformasyonun yaklaşık 0,3 mm derinliğe kadar etkin olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.6: Değişik kesim yöntemleri ile kesilmiş NGO sacın tavlama öncesi kesim profilleri [19].

M. Emura ve arkadaşları aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır; (1) haddeleme yönünde (RD) ve haddeleme yönüne dik olan (TD) yönde kesilmiş numunelerin benzer sonuçlar ürettiği, (2) toplam kayıp değerleri arasındaki farkın %10 seviyelerinde olduğu, (3) geçirgenlik değerleri arasındaki farkın ise %20 değerinden fazla olduğu, (4) tavlamanın lazer kesim yöntemi ile kesilen örnekler haricinde manyetik kayıpları azalttığı, geçirgenlik değerlerini yükselttiği, bunun sebebinin lazer ile kesim esnasında açılan tane sınırları yapısına yüksek oranda oksijen ve nitrojen penetrasyonu olabileceği, (5) tavlama sonrası kesim ACUT ile sadece kesim JCUT örneklerin sonuçlarını benzeştirdiğini, her iki tipte de geçirgenlik kaybında ve manyetik kayıplarda yükseliş olduğu, (6) tavlamanın tüm kesim yöntemlerinde manyetik özellikleri iyileştirdiğini, (7) manyetik özelliklerdeki iyileşmenin en fazla CUTA örneklerde görüldüğü, (8) CUTA örneklerle ACUTA örnekler arasında manyetik kayıplar ve geçirgenliklerin benzeştirdiğini, (9) tavlamanın plastik deformasyon streslerini azaltmasının yanı sıra, alt yüzeylerde Oksijen ve Azot nedeni ile oluşan hata yapısını da azalttığı, (10) mekanik kesme işleminin histerisiz eğrisinde bir “**kesilme**” efekti oluşturduğunu, orijinal NGO sacın histerisiz eğrine göre daha düşük kalıcı mıknatıslık ve geçirgenliğe neden olduğunu, ACUT örneklerde bu durumun daha bariz olduğu, (11) Düşük indüksiyon seviyesinde JCUT örneklerin kesim öncesi rulo sarım ve rulo açmadan kaynaklanabilecek kalıcı gerilmeler nedeni ile ACUT örneklere göre daha fazla “**kesikli hale gelmiş bir histerisiz eğriye**” sahip olduğu, (12) CUTA ve ACUTA örneklerin neredeyse aynı

grafiklere sahip olduğunu, kalıcı mıknatıslık ve koersivite değerlerinin çok yakın olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır.



Şekil 2.7: Değişik kesme yöntemleri ile kesilmiş NGO saclarda tavlama sonrasında histerisiz eğrileri [19].

Metallerde ya da metalik alaşımlarda hacimsel özellikler ile ilgili çalışmalarının tümünün arka planında polikristal veya bi-kristal malzemelerle yapılmış “**tane sınırı ve tane ara yüzey mühendisliği**” (TSAYM) çalışmaları bulunur. Bu konuda yapılan araştırmalar ile malzemelerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerini geliştirme çalışmaları bir disiplin olarak devam edegelmektedir. Tadao Watanabe [20] tarafından hazırlanan, TSAYM’ ın güncel ve geçmiş araştırmalarından elde edilen kazanımlar, yıllar içinde oluşan literatürün tarihsel gelişimi ve gelecek perspektifi konusundaki makalesinden bahsetmek uygun olacaktır. Tane sınırı yapısı ilk defa dislokasyon teorisi ile Read ve Shockley tarafından keşfedilmiştir. Optik mikroskopi yöntemi ile mono kristal tane sınırlarını gözlemlene çalışmaları 1950’ lerde başarılı olmuş aynı dönemde Taramalı Elektro Mikroskobu ile deforme olmuş Alüminyum malzemede dislokasyon sınırları gözlemlenebilmiştir. Zamanla tane sınırları ve taneler arası faz yapıları bilimsel araştırmalarda çok ilgi çekmiş, polikristal malzemenin mikro yapısını dolayısıyla “**hacimsel**” özelliklerini kontrol etmeye çalışan çok fazla yaklaşım ve metot geliştirilmiştir. Bu metotlar temelde; katılaşma, alaşımlama ve termomekanik işlem süreçlerinin kontrol altına alınması ile oluşmuştur. Örneğin katılaşma süreçleri konusunda; hızlı katılaşma, yönlendirilmiş katılaşma, bölgesel ergime gibi alt konularda çeşitli süreçler

geliştirilmiştir. Daha sonraki dönemlerde de manyetik ve elektriksel alan altında katılma konusunda da süreçler geliştirilmiştir.

Herhangi bir bilimsel alanda gelişme sürecini temelde 4 aşamaya ayırmak mümkündür, (1) kavramsal aşaması; konu hakkında bilinenlerin gözlemlere dayanan temel bilimsel ya da felsefi yaklaşımlardan ibaret olduğu çok yavaş geçilen bir aşamadır. (2) Daha sonra hızlı bir ivmelenmenin olduğu buluşlar aşaması gelir. Bu aşamada buluşlar beklenmedik ve zihin kışkırtıcıdır. Gene bu aşamada birbiri ile zıtlaşan pek çok teori önerilebilir. Araştırma sonuçları bir bulmaca gibidir, pek çok araştırmacıyı kayda değer sonuçlar üretebilmek adına tahrik eder. (3) Üçüncü aşama büyük atılımlar aşamasıdır. Araştırma alanı bu aşamada hızla gelişir ve laboratuvar düzeyinde çok popüler hale gelir. Araştırma alanının bilimsel dokusu ve kanıtları genel olarak anlaşılır. (4) Son aşamada, klasik aşama gelir, bu aşamada bulmacadaki eksik parçalar yerini bulur, büyük atılım aşamasında ortaya konan ana yapı geleneksel hale gelir ve genelleşir, bu geleneksel bakış açısı ancak yeni bir büyük atılım aşaması yaşandığı takdirde tekrar değişir. Tadao Watanabe' ye göre TSAYM konusunda hala büyük atılımlar sürecini yaşamaktayız.

Gregory S. Rohrer [21] tarafından belirtilen 1940' lı yıllarda Cyril Stanley Smith tarafından yazılmış ve günümüze kadar çok fazla atıf almış olan tane büyüme mekanizmalarını anlamaya çalışan araştırmada tek fazlı malzemelerde tane sınırlarına ve çok fazlı malzemelerde taneler arası faz yapılarına özel ilgi gösterilmiştir. Ryo Kobayashi ve arkadaşları [22] polikristal malzemeler ile yapılan deneysel gözlemler sonucu "**tane ara yüzey enerjisi**" kavramının mikro yapı gelişiminde anahtar bir rolü olduğunu, tane sınırı oluşumunu teorik alt yapısı "**dislokasyon teorisi**" ni baz alınarak önermişlerdir. A. Oberlin [23] tarafından da alıntılanan literatüre göre, ilk olarak P.B. Hirsch ve arkadaşları plastik deformasyona uğramış alüminyumda dislokasyon sınırlarını gözlemlemek için Transmisyon Elektron Mikroskopu (TEM) yöntemini kullandı. Bu konudaki kapsamlı ilk kitap 1957 yılında Donald McLean tarafından yazılmıştır. 1980' lere gelindiğinde Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskoplarının (HREM) geliştirmesi ile tane yapısı ve tane sınırları hakkındaki kavramsal hipotezlerin deneysel olarak doğrulanması imkânı olmuştur. Bu sayede bi-kristal yapılar üzerinde yapılan çalışmalar polikristal yapılar ile yapılmaya başlanmıştır. Yaklaşık 30 yıl sonra A. Sutton ve R. Balluffi [24] Interfaces in Crystalline Materials adlı kitabını yayınlamıştır. 1990' lı yıllara gelindiğinde B. L. Adams ve arkadaşları tarafından Taramalı Elektrom Mikroskopu bazlı Elektron Arka Saçınım Difraksiyon (SEM-

EBSD) ve kristal Kristalografik Yönlenme Görüntüleme Mikroskobu (OIM) teknolojileri geliştirilince polikristal yapılar için bilgisayar destekli tane yönelme analizleri ile tane sınırı ilişkilerini anlamak mümkün hale gelmiştir. SEM-EBSD ve OIM analizleri metalik polikristallerin kantitatif analizleri için 100 µ boyutlarına kadar kesin sonuç veren bir yöntem haline gelmiştir. İleriki yıllarda Alan Emisyon Tabancalı – Taramalı Elektrom Mikroskobu ile Kristalografik Yönlenme Görüntüleme Mikroskobu (FEG-SEM/OIM) sayesinde 10 nm ölçeğine kadar inceleme yapmak mümkün hale gelmiştir.

Günümüzde kristal ara yüzeylerinin yapısı ve özelliklerinin anlaşılabilmesi için gereken teorik alt yapı hemen hemen kurulmuş olduğu ifade edilmiştir. Fakat teorik ve deneysel alt yapı konusunda, özellikle istatistiksel ve topolojik ara yüzey mikro yapısı ve bunlara bağlı olarak malzeme özelliklerinin geliştirmesi konusunda elektro-seramik malzemeler, yarı iletkenler gibi malzemelerde büyük bir araştırma potansiyeli mevcuttur. Bu sebeple taneler arası ara yüzeylere bağlı olarak yeni özelliklerin geliştirmesi konusunda kuvvetli bir talep bulunmaktadır.

Bu ana kadar taradığımız ve özetlediğimiz literatür (çoğunlukla) NGO elektrik çeliklerinin ve kısmen GO çeliklerin mekanik işlemleri, ısıl işlemleri konusunda, manyetik özelliklerin geri kazanımı, tane yapısı ve taneler arası yüzey etkileşimi literatürün gelişim süreci hakkında olmuştur. NGO çeliklerin mekanik işlemleri hemen hemen aynı şekilde GO çelikler için de geçerli olan işlemlerdir. GO çeliklerin ısıl işlemleri konusunda literatür taraması yaptığımızda karşımıza GO çeliklerin üretim süreçlerinin bir parçası olan ve tane yönelme tekstürünün büyük ölçüde elde edildiği süreç olan **“ikincil rekristalizasyon süreci”** çıkmıştır.

Dorothee Dorner ve arkadaşları [25], GO yapıda tercihli {110}⟨001⟩ yönelmeyi, yapıdaki süreksizlikler ve endüstriyel üretim aşamalarında uygulanan yüksek sıcaklıkta ikincil tavlama sürecinde ortaya çıkan anormal yönelmiş tane büyümesi ile ilişkisi üzerinde çalışmışlardır. Literatürde {110}⟨001⟩ yönelme dokusuna, tane yönlendirilmiş elektrik çelikleri konusunda öncül çalışmaları ve patenti [6] bulunan Norman P. GOSS' a hitaben GOSS tekstürü adı verilmektedir. Araştırmacılar GOSS tekstürünü ortaya çıkaran mekanizmaları uzun yıllardır belirlemeye çalışmışlardır. Günümüzde hala bu konuda genel bir fikir birliği oluşmamıştır. Bilinen şudur ki, ikincil tavlama ortaya çıkan tercihli yönelme, üretim sürecinin ilk aşamalarında uygulanan birincil tavlama sonra ortaya

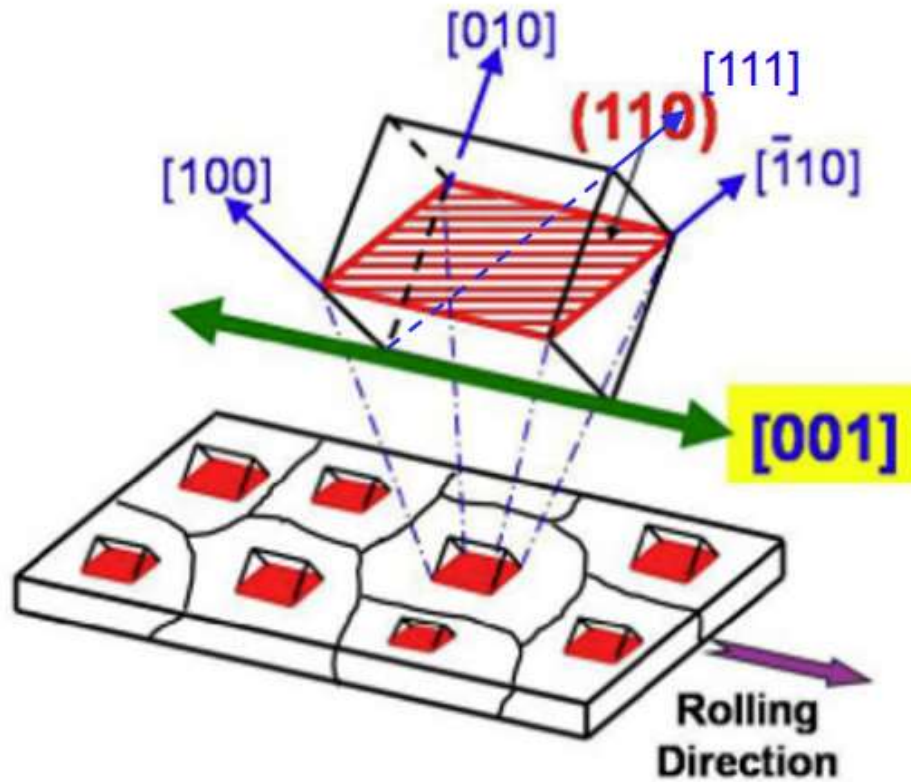
çıkan yapının mirasından yükselmektedir. Bu konuda çalışma yapan araştırmacılar sıcak haddeleme ve birincil tavlama sürecinden sonra ortaya çıkan sacın yüzeyini kaldırarak soğuk haddeleme ve ikincil tavlama yapılan örneklerde GOSS dokusunun oluşmadığını tespit etmişlerdir. Dorothee Dorner ve arkadaşlarını ulaştığı sonuçlara göre, anormal GOSS tane büyümesi, üretim prosesinin her aşaması ile ilgili olmak durumunda, çünkü tercihli GOSS dokusunun oluşumu, sürecin başındaki sıcak haddelemeden başlayarak ikincil tavlama süreçlerine kadar miras kalan mikro yapı ile devam etmektedir. Son aşamada ikincil rekristalizasyon aşamasında üründe oluşan GOSS dokusunun yoğunluğu sıcak haddeleme sonunda yapıda oluşan $\{111\}\langle 112 \rangle$ yönlenmesinin şiddeti ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Munetsugu Matsuo 1989 yılında [26] yayınladığı makalesinde GO elektrik çeliklerinde tekstür kontrolü süreçlerinin tarihsel gelişimi konusunda bilgi verilmiştir, tekstür kontrol süreçlerini etkileyen parametreleri ve tartışmalar özetlemiştir. Yazar özellikle yüksek manyetik geçirgenliğe sahip (HiB) elektrik çeliği olarak bilinir ve tane yönlenme sapması 4° den büyük değildir) tek kademede soğuk haddelenmiş çeliğin üretim prosesinde mükemmel bir ikincil rekristalizasyon ve $\{110\}\langle 001 \rangle$ kristalografik tane yönlenmesi elde edebilmek için tekstür ve mikro yapı safsızlıklarına özel vurgu yapılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu türden safsızlıkların ikincil rekristalizasyon sürecinde çekirdeklenme başlatıcısı olması ve tüm üretim sürecini kapsayacak şekilde tercih edilen yönde tane büyümeyi artırma potansiyeli yönünden önemli olduğu ifade edilmiştir. Matsuo'ya göre tartışılması gereken konular şunlardır; (1) birincil kristalizasyon matrisinde nasıl $\{110\}\langle 001 \rangle$ yönlendirilmiş taneler oluşturulabileceği. (2) ikincil rekristalizasyon başlatıcı $\{110\}\langle 001 \rangle$ yönlendirilmiş taneler çevrelerindeki tanelere doğru nasıl büyütülebileceği. (3) bu primer GO taneler ikincil rekristalizasyon sürecine kadar nasıl muhafaza edilebileceği. (4) ticari GO üretim proseslerinde daha da geliştirilmiş manyetik performans değerleri için mikro yapı ve tekstürün nasıl kontrol altına alınabileceği. (5) tekstür kontrolü açısından tek kademeli ve iki kademeli soğuk haddeleme içeren üretim prosesleri arasında farkların neler olduğudur.

GO elektrik çelikleri Fe kristalinin anizotropik karakteri üzerinde yapılan çalışmalar ile geliştirilmiştir. Anizotropik özellikleri ve tane yönlendirme kontrolü (yani tekstür kontrolü) çalışmalarının en başarılı örnekleri GO elektrik çeliklerinde elde edilmiştir. Tekstür kontrolü ile hedeflenen, kristal yapısının anizotropik karakterini kullanarak tercih edilen yönde malzemenin mekanik ve manyetik özelliklerini geliştirmektir. Tek kristal anizotropiktir.

Fiziksel ve manyetik özellikleri kristalografik yöne göre değişir. Demir kristali $\langle 001 \rangle$ doğrultuları boyunca kolay manyetize olur. Eğer bir tercihli yönlendirilmiş polikristal demir mikro yapısında, tüm tane yönelmeleri kolay eksen yönünde, yani her bir tanenin $\langle 001 \rangle$ doğrultularının tamamı haddeleme yönüne paralel olabilseydi en iyi manyetik özelliklere; en düşük nüve histerisiz kaybına, en yüksek manyetik geçirgenliğe ve en büyük manyetik akı yoğunluğu değerine ulaşılabilirdi.

Aşağıda Şekil 2.8' de GO çeliklerde kristalografik yönelim şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.8: GO elektrik sacında kafes $\{110\}\langle 001 \rangle$ yönelmesi [27].

GO silisyum alaşımlı çeliklerde 2 tip tercihli yönlendirme geliştirilmiştir. Yüzey merkezli küp kristal yapısında $\{100\}$ düzlemleri levha düzlemine paraleldir, kenar merkezli kübik kristal yapıda ise Şekil 2.8' de gösterildiği gibi $\{110\}\langle 001 \rangle$ yönelmesi bulunur ve $\{110\}$ düzlemleri $\langle 001 \rangle$ doğrultuları boyunca levha düzlemine paraleldir. GOSS $\{110\}\langle 001 \rangle$ düzlem ve doğrultusunda yönlendirilmiş GO saclar ticari olarak büyük miktarlarda üretilmektedir. İdeal bir tekstürde mükemmel yönlendirilmiş bir çelik için $H= 800$ (A/m)

manyetik alan altında teorik olarak 2,03 Tesla manyetik doyum değerine ulaşılabilirdi. Günümüzde piyasadaki ticari ürünlerde yukarıda belirtilen manyetik alan şiddeti altında ulaşılabilen doyum değeri 1,93 Tesla değerine kadar ulaşılmıştır.

Endüstride GOSS yönünden saçılım seviyesine göre iki sınıf GO silisli elektrik çeliği bulunur; konvansiyonel (CGO / CRGO) ve yüksek manyetik geçirgenlikte (HiB /HBO) sınıf sac tipleridir. HiB sınıf GO çeliklerde hadde yönü ile tanelerin $\langle 001 \rangle$ doğrultuları arasındaki saçılım açısı 3° ile 4° arasında değişir. CGO çeliklerde ise hadde yönüne göre saçılım 7° ye kadar çıkar. HiB çeliklerde $H= 800$ (A/m) manyetik alan altında 1,92 T manyetik doyum akı değerine ulaşılabilirken bu CGO çeliklerde 1,83 T' dir. CGO çeliklerde HiB çeliklere göre histerisiz kaybı yaklaşık %20 oranında daha fazladır.

Ülkemizde GO çeliklerin ticari üretimi söz konusu değildir. Bir kısmından daha önce bahsedilen akademik çalışmalar ise genellikle NGO çelikler, bu çelikler ile yapılan mekanik işlemler, mekanik işlemler sonucu yürütülen ısıl işlemler ve ısıl işlemlerin manyetik özellikler üzerindeki iyileştirici etkilerinin araştırılması üzerinde olduğu görülmektedir. Bunlardan biri olan Sezer Erdem ve Naim Derebaşı [28] tarafından yapılan çalışmada GO nüve çelikleri ile amorf nüve çeliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Yazarlar çalışmalarında dizim esnasında ortaya çıkan birleştirme tiplerinde, değişik geometriklerin manyetik akı yöneliminde ve akı kayıplarında oluşturduğu etkileri sonlu elemanlar analiz yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir.

Taylan Güneş [29], GO çeliklerde elektro-erozyon ve lazer yöntemi ile kesme yöntemlerinin sacın manyetik özelliklerine olan etkisini incelediği çalışmasında üç farklı indüksiyon frekansında (50, 200 ve 400 Hz) ortasında 10 mm çapında erozyon ve lazer yöntemi ile delik oluşturulmuş ve oluşturulmamış (0,3 x 30 x 280 mm) GO saclarda tavlama sonrası (900 °C, 1 saat) histerisiz kaybı ölçümleri yapmıştır. Aynı zamanda manyetizasyon düzeneğinde mıknatıslandırdığı örneklerde delik civarında oluşan domain tekstürünü Kerr Mikroskop yöntemi ile incelemiştir.

Taylan Güneş güç frekansında, yani 50 Hz' de örnekleri karşılaştırdığında, orijinal durumu temsil eden tavllanmış deliksiz yapıda en yüksek manyetik geçirgenlik değeri ($\mu_{max}= 47 \cdot 10^3$) ölçerken, tavllanmış numune ile numunenin kesim sonrası halinin farkını %6,3 olarak tespit etmiştir. En büyük manyetik geçirgenlik farkı ise erozyon yöntemi ile delinmiş numunede

kesildiği gibi ve tavllanmış örnekler arasında %59 seviyesinde ($\mu_{max}= 12,7 \cdot 10^3$ ve $\mu_{max}= 20,3 \cdot 10^3$) ölçülmüştür. Taylan Güneş, bu çalışmasında tavlama sürecinin GO sac manyetik geçirgenlik parametresi (μ_{max}) ve koersivite parametresi (H_c) üzerindeki etkisini tavlama öncesi ve sonrası koşullar için grafikler, tablolar ve Kerr Mikroskop görüntüleri ile tespit ederek, herhangi kesme prosesinin GO saclarda manyetik parametrelere olan olumsuz etkisinin tavlama süreci ile kısmen telafi edilebileceğini göstermiştir.

Taylan Güneş [30] diğer bir çalışmasında, GO saclarda, dışarıdan uygulanan manyetik alan yoluyla malzemenin içinde uyarılan anizotropi enerjisini yüzey domainleri vasıtasıyla incelemiştir. Malzemenin yüzeyinde oluşan domainleri Kerr Mikroskopuyla görüntülemiştir. Ayrıca, seçili bölgedeki tanelerin kristal yönelimlerini EBSD analiziyle görüntülemiş ve Kerr görüntüleriyle karşılaştırılmıştır. ANSYS benzeşim programıyla kare tipi bir transformatör çekirdeğinin eklem bölgelerinde, anizotropiye bağlı olarak akı dağılımındaki saçılımı simüle ederek, enine manyetik alan etkisi altında, yüzey domainlerin vereceği tepkiler ile çeliklerdeki güç kayıpları arasında orantısal bir bağ kurmuştur. Bir transformatör çekirdeğinde oluşan güç kayıplarının bileşenlerini, bu orantısal bağ ile hem teorik hem de deneysel olarak karşılaştırmıştır.

Cao ve arkadaşları [31], takım ile delik delme makinesi ile 20 mm çapında delik delme işlemi sonrasında oluşan kesme kenarı civarında ortaya çıkan kalıcı gerilmelerin tane yönlendirilmemiş NGO elektrik sacında manyetik domain yapısına olan etkisini incelemiştir. Kalıcı gerilmelerin seviyesini ise nano-indentasyon yöntemi ile belirlemiştir. Buna göre, kesme kenarı civarında gerilim gidermeye tabi tutulmuş örnekte 100 MPa olan bası gerilmeleri kenardan uzaklaştıkça 50 MPa seviyesine düşerken, gerilim gidermeye maruz bırakılmamış örnekte 350 MPa seviyesine ulaşan bası yönlü gerilmeler kenardan uzaklaştıkça 100 MPa seviyesine düşmektedir. Dolayısıyla takım ile delme operasyonu sonrası kalıcı gerilmelerin etkin olduğu, deformasyon etkin bölgenin genişliğini 0,4-0,5 mm kadar derinlikte olduğunu tespit ederek, gerilim giderme işlemi ile bu alanın bozucu etkisinin büyük oranda azaldığını belirtmişlerdir.

Manyetik alan altında oluşan domain yapısını Bitter metodu Fe_3O nano parçacıkları ile gözlemleyerek, gerilim giderme öncesi, gerilim giderme anında (750 °C'de 2 saat) ve fırında soğuma sonrası domain oluşumlarında kenar civarında büyük düzen farklılıkları gözlemlemiştir. Gerilim gidermeye maruz kalmamış örneklerde 3–8 μm aralığında

değişen karmaşık bir domain yapısı gözlemlenirken, gerilim gidermeye maruz bırakılmış örneklerde daha düzgün yönlenmiş daha kısa 1–3 µm domainlerden oluşan bir tekstür gözlemlenmiştir. Çalışmalarının sonunda kalıcı sıkışma yönlü gerilimlerin domainleri genişlettiğini, homojen oluşmuş iç gerilimlerin domain tekstürünün daha homojen oluşmasına katkı sağladığını tespit etmişlerdir.

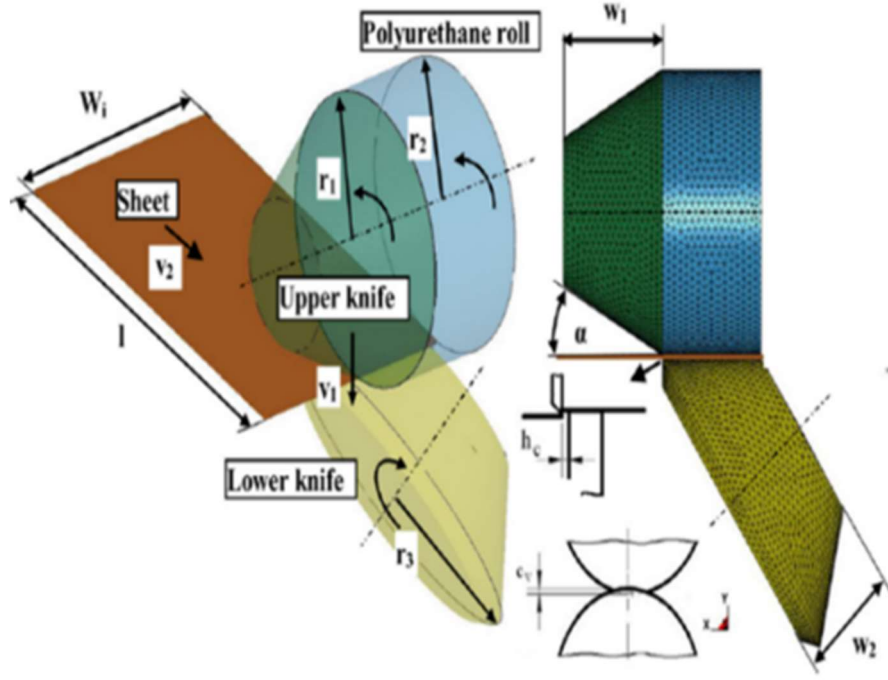
Elektrik saclarında demir kaybı olarak adlandırılan kaybın temel bileşenleri histerisiz kaybı ve Eddy akımları kayıplarının oluşturduğu belirtilmişti. Eddy akımı kaybının temel bileşenler ise “**klasik Eddy akımı kayıpları**” ve “**anormal Eddy kayıpları**” bileşenleri olarak tanımlanmaktadır.

Cao ve arkadaşları [31], transformatörler veya motorlarda yüklü iken oluşan kayıpların yaklaşık yarısının nüvenin toplam demir kaybının yarısına karşılık geldiğini ifade etmişlerdir. Domain boyları uzadıkça indükleyici gerilimin frekansı ve yönüne bağlı olarak duvar hareketi mesafesi artacağından, gerilim giderme işleminin sacın kaybına olan pozitif etkisi olacağını ifade etmişlerdir.

Bohdal ve arkadaşları [32], nüve imalatında uygulanan dilme (*slitting*) prosesinin sac üzerinde bıraktığı yapısal plastik deformasyonun etkisini incelemişlerdir. Dilme süreç parametrelerinin sac üzerinde oluşturduğu kalıcı gerilimlerin, elastik veya plastik gerinimin ve kesme kalitesinin oluşturduğu manyetik özelliklerde değişimleri deneysel metotlarla incelemişler ve bu etkileri (*SPH, Smoothed Particle Hydrodynamic*) yöntemi ile simüle ederek göstermişlerdir.

Bohdal ve arkadaşları [32] çalışmalarında kesme yüzeyinin morfolojik olarak 3 farklı yüzeyden oluştuğunu tanımladılar; (A) Sertleşme ve çatlak başlangıcının olduğu bölge, ya da diğer tanımı ile yuvarlanma bölgesi, (B) sünek kırılmanın gerçekleştiği bölge ya da diğer tanımı ile orta bölge ve (C) çapaklanmanın gerçekleştiği çapaklı bölgedir.

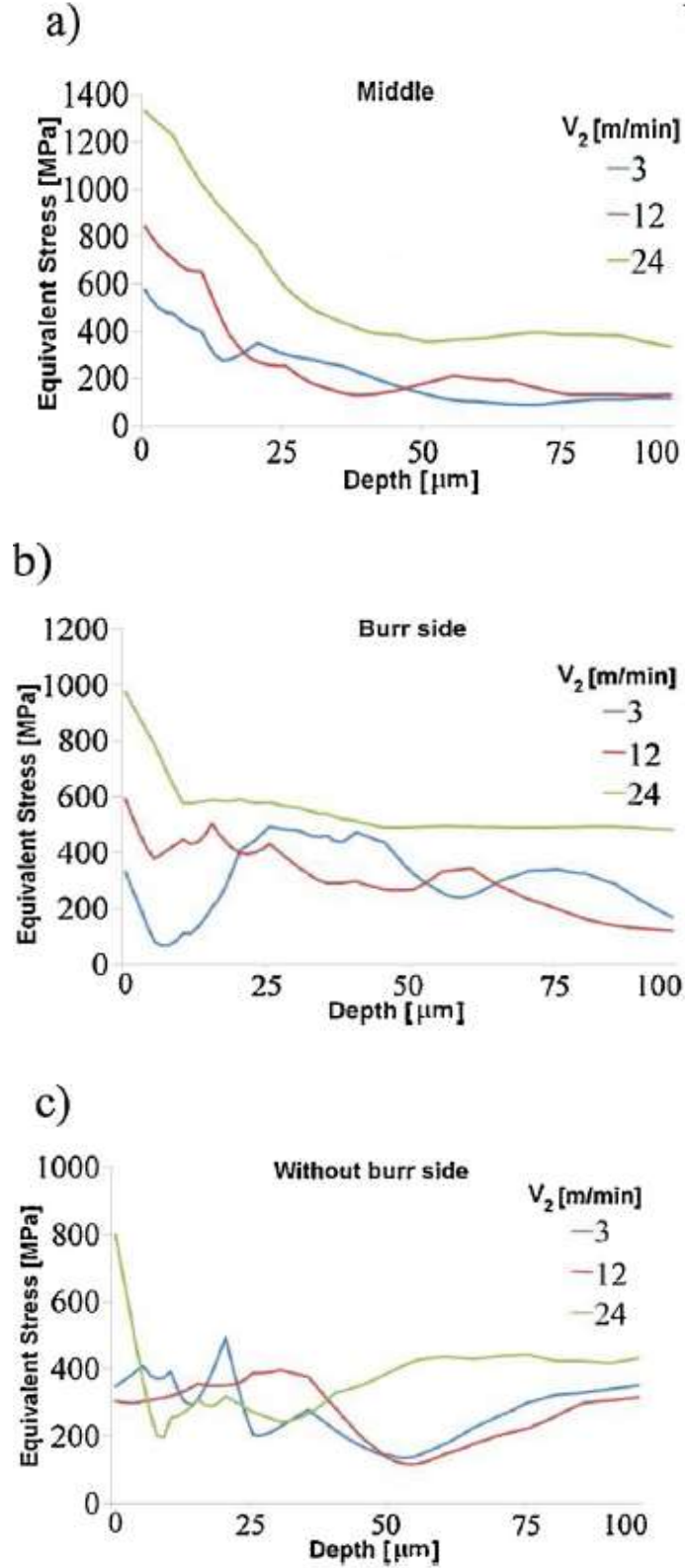
Araştırmacıların yaptığı incelemeler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar kesme süreç parametrelerinin kontrollü değişimlerin ile kesme yüzeyinde kalıcı gerilim oluşumuna önemli etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre kalıcı gerilim yüzeyde en yüksek seviyesine 1000-1400 MPa ulaşırken, orta bölgede 100 µm derinlikte bir 200 MPa seviyesine yakınsama gösterdiğini tespit etmişlerdir.



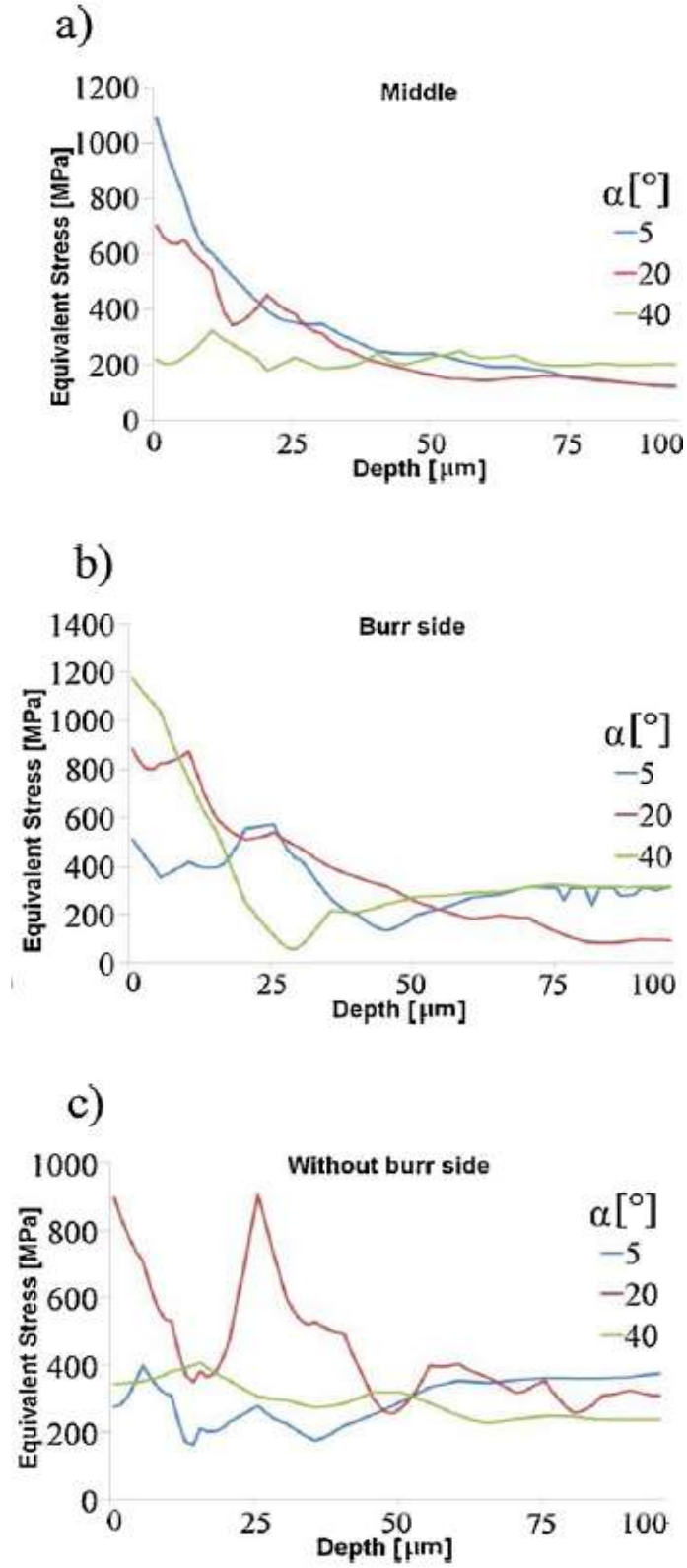
Şekil 2.9: Dilme süreç parametrelerinin incelendiği test düzeneğinin gösterimi [32].

Bohdal ve arkadaşları [32], dilmenin süreç parametreleri olan kesme hızı v_2 ve üst bıçak yaklaşma açısı α (*rake*) gibi parametrelerin kesme kalitesi üzerinde büyük bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında hasar görmüş bölge büyüklüğü artmakta, bu da malzemede daha yüksek gerilim seviyelerine ulaşıldığını göstermektedir. Üst bıçak yaklaşma açısı α , 5-40° arasında değiştirildiğinde, kenara yakın bölgede en düşük gerilim seviyesinin 40° 'de elde edildiğini buna karşılık kalıcı gerilimlerin 1200 MPa'dan 500 MPa seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Kesme bıçakları dikey bindirme mesafesi c_v parametresi incelendiğinde 0,1 mm bindirme seviyesinde en düzenli ve az gerilim seviyesi oluşurken yuvarlanma bölgesinde 400 MPa seviyesine bir yakınsama olduğu tespit etmişlerdir. Yakınsama gösterme derinliği sertleşme bölgesinde 100 μm 'a kadar çıkarken, sünek kırılma ve çapaklanma bölgesinde 25 μm 'da 100-200 MPa seviyesinde yakınsama gerçekleştiği tespit etmişlerdir.

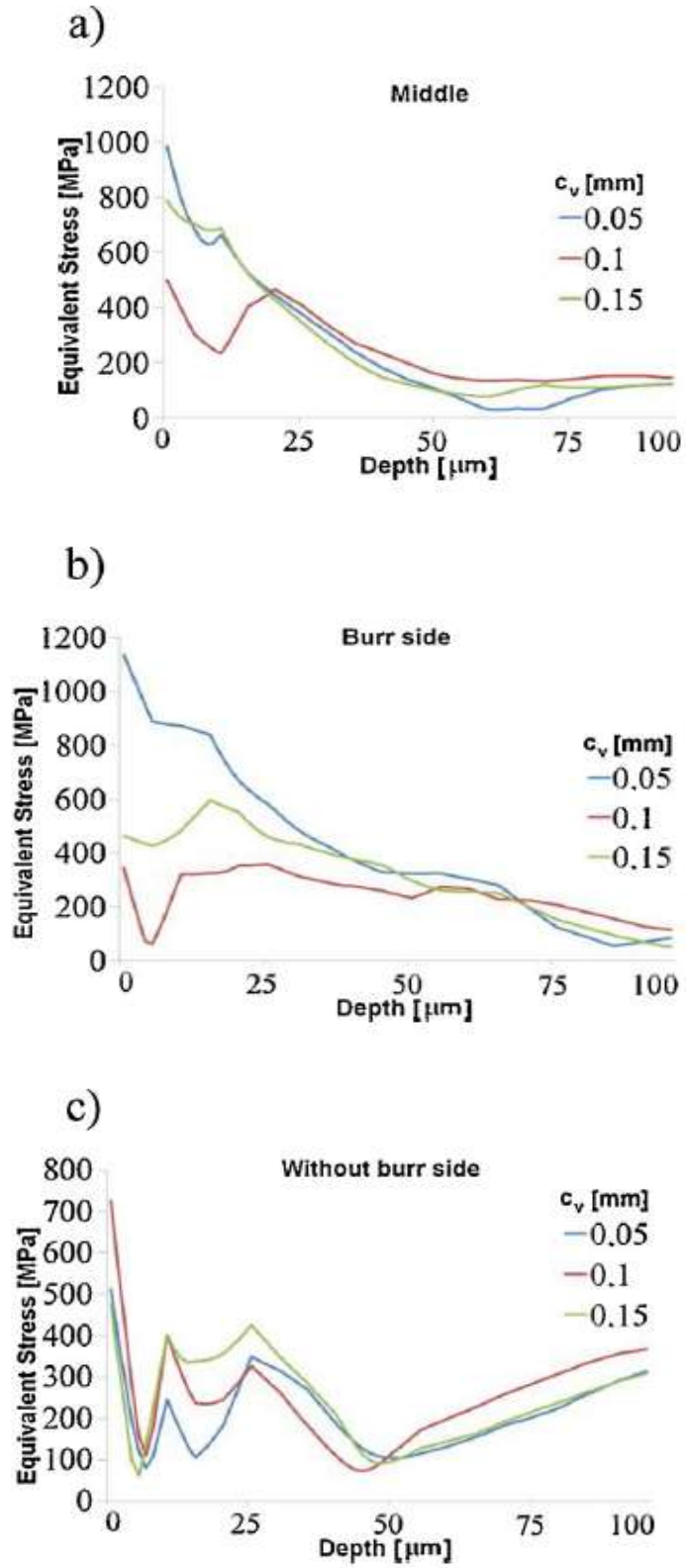
Son olarak analizlerde dikkate alınan üst ve alt bıçak arasındaki yatay kesme açıklığı h_c mesafesi parametresine göre, sünek kırılma (orta) bölgesinde kenardan 10–20 μm mesafede 800-1000 MPa seviyesinden 200 MPa seviyesine bir yakınsama başladığı görülmektedir. Çapaklı bölgede ise kesme açıklığı arttıkça 20, 40, 60, 80 μm yuvarlanma bölgesinde gerilim etkisi altındaki bölgeni derinleştiği ve çapak seviyesinin arttığı gözlemlenmiştir.



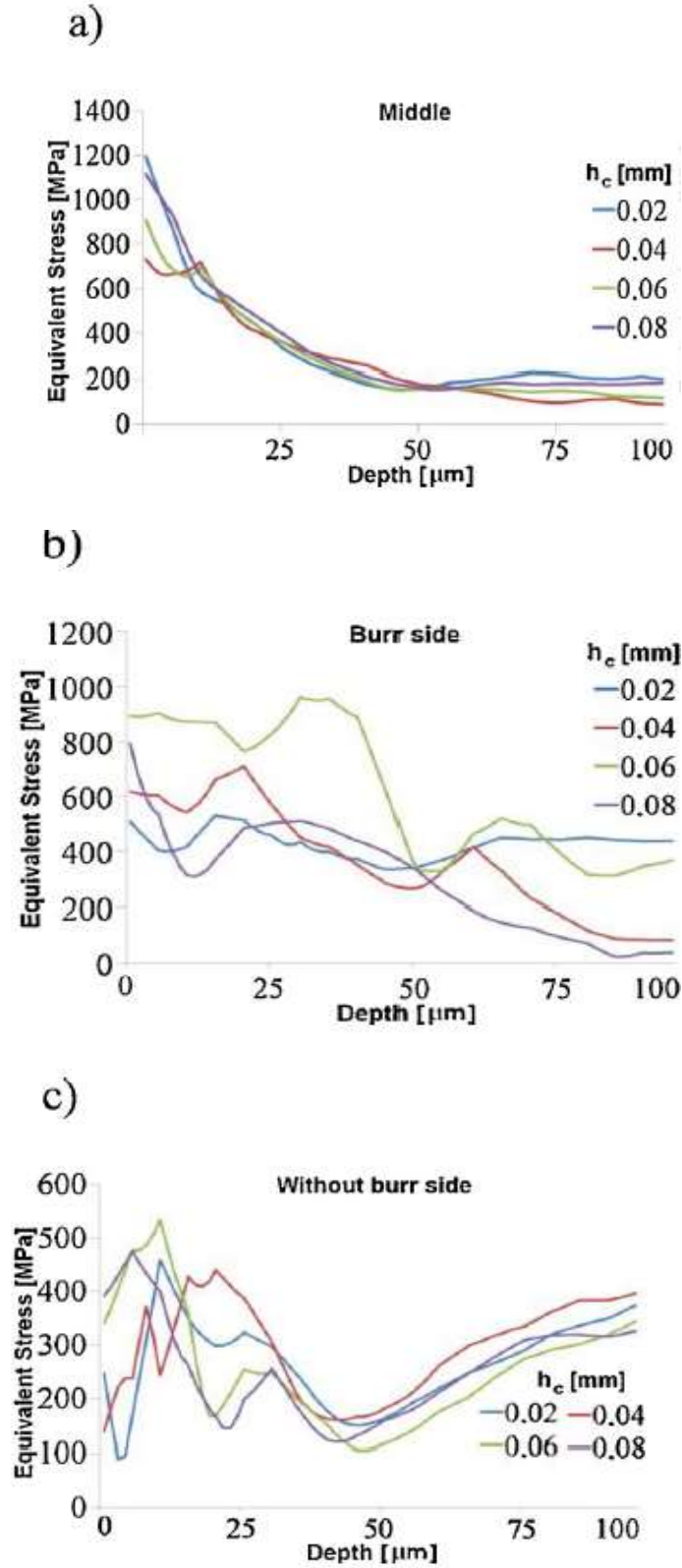
Şekil 2.10: Dilme hızının v_2 kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [32].



Şekil 2.11: Üst bıçak yaklaşma açısının α kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [32].



Şekil 2.12: Bıçaklar arası dikey bindirme mesafesinin c_v kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [32].



Şekil 2.13: Bıçaklar arası (yatay) açıklığın h_c kesme yüzeyinde oluşan kalıcı gerilim seviyesine etkisi. (a) orta bölge, (b) çapaklı bölge, (c) yuvarlanma bölgesi [32].

Literatürde kesme süreci sonrasında ortaya çıkan deformasyon etkisi altında kalan bölge (*Deformation Affected Zone, DAZ*) derinliğinin birkaç milimetreye kadar uzadığı bilgisi

olduğundan bahsedilerek, bu çalışmada ise yatay yöndeki kesme açıklığı arttıkça DAZ derinliğinin artmakta olduğu $h_c=0,1$ mm' de üst değere yakınsadığı, $h_c=0,02$ mm değerinde ise DAZ 'ın minimuma yakınsamakta olduğu tespit edilmiştir. Üst bıçak bindirme açısı $\alpha \approx 20-25^\circ$ aralığında ise istenmeyecek şekilde DAZ genişliği 170–190 μm aralığında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Üst bıçak yaklaşma açısının $\alpha \approx 40^\circ$ 'ye yaklaştığından DAZ bölgesinin daraldığı tespit edilmiştir.

Değişik kesme hızlarında ve yatay kesme açıklıklarında oluşan dilinmiş numuneleri incelediklerinde çapak yüksekliklerinin kesme hattı boyunca değişken olduğu görülmüştür. Yüksek çapak yüksekliğinin yüksek plastik deformasyona karşılık geldiği belirtilerek, çapak yüksekliğinin elektriksel kısa devreleri engellemek ve kayıpları azaltmak için düşük tutulması gerektiği ifade edilmiştir. Kesme yüzeyi yakından incelediklerinde, kimi bölgelerde kesme & yırtılma bölgeleri, kimi yerlerde ise derin profil bölgeleri gözlemlemişlerdir. Derin profil bölgeleri dilme esnasında gerilim yoğunlaşma bölgelerinin oluştuğuna işaret ettiğini belirtmişlerdir. Eğer kesme çizgisi ile üst bıçak yaklaşma açısı arasında $\alpha \approx 15^\circ$ 'den büyük bir fark varsa, çapaklar yüzeyden koparak ayrıldığını, böyle bir durumda malzeme de kesme & yırtılma ile kesme modları arasında geçiş bölgeleri olduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme & yırtılma bölgelerinde çapakların oluşan ilave kuvvetler nedeniyle yüzeyden ayrıldığı düşünülmektedir. Yani aslında dilme işlemi 2 boyutlu değil 3 boyutlu bir süreç olduğun, süreç parametrelerinin sürekli değişmesi nedeni ile kopma yüzeyinin oluşumu çok boyutlu değişken bir süreç halini aldığını önermişlerdir.

Dilme prosesinde çapak yüksekliğinin öneminden daha önceden bahsedilmişti, Bohdal ve arkadaşları [32] dilme prosesinde yukarıda tanımlanan süreç parametrelerinin çapak yüksekliğine olan etkisini incelediklerinde, üst bıçak açısının $\alpha \approx 10-15^\circ$ aralığında dilme hızının kesme çapağı yüksekliğine önemli bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Üst bıçak yaklaşma açısı α artırıldıkça yatay kesme açıklığı h_c ve üst bıçak bindirme miktarı c_v düşük ise, dilme hızını v_2 çapak yüksekliğine olan etkisinin azaldığını görmüşlerdir. Üst bıçak bindirme miktarı c_v arttırıldıkça üst bıçak yaklaşma α açısının etkisinin de arttığını tespit etmişlerdir. Üst bıçak bindirme miktarı c_v ve α üst bıçak yaklaşma açısının arttırılması çapak seviyesini arttırdığını, yatay makas açıklığı h_c değerinin değişiminin çapak yüksekliğine etkisi de aynı yönde olduğunu tespit etmişlerdir. Minimum çapak yüksekliği alabilmek için dilme hızı v_2 , üst bıçak bindirme mesafesi c_v ve yatay bıçak açıklığı h_c orta değerlerde

tutulması, üst bıçak yaklaşma açısının ise α , 20-40° aralığında olması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Bohdal ve arkadaşları [32] son olarak dilme sürecinde süreç parametreleri etkisiyle ortaya çıkan manyetik özelliklerde değişimi inceleyebilmek için halka formunda hazırlanan numuneleri manyetik ölçüm düzeneğinde ölçümlere tabi tutulmuşlardır. Numunelere $H_m=10-570$ A/m aralığında manyetik alan uygulayarak h_c , c_v , v_2 ve α süreç parametrelerinin sacın manyetik özelliklerine olan etkisi üzerine çalışma yaptılar. Denemelerde $\alpha=30^\circ$ ve $c_v=0,1$ mm olarak seçilmiştir. Değişik dilme hızlarının denendiği denemelerde maksimum indüksiyon $B_m \approx 160$ A/m seviyesi 3 m/min ve 24 m/min hızlarında yapılan dilmelerde elde edilmiştir. En düşük doyum indüksiyonu 6 m/min hızla yapılan kesimde $B_m \approx 130$ A/m olduğu görülmüştür. Yatay kesme açıklığı değerinin $h_c=0,03-0,06$ mm aralığındaki değişimin manyetik özellikler önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Yatay kesme açıklığını incelediği kesme hızının $v_2=13,5$ m/min olduğu numunelerde $h_c=0,1$ mm olduğu denemede elde edilen doyum değeri en düşük seviyesi olan ≈ 120 A/m civarında elde etmişlerdir. P_h histerisiz kayıplarının kesme hızı v_2 ve yatay makas açıklığı h_c parametrelerine göre incelendiği deneylerde, doyum mıknatıslanma B_s indüksiyon seviyesi ve kalıcı mıknatıslanma B_r değerinin histerisiz kaybı için belirleyici olduğunu tespit etmişlerdir. Kesme hızının $v_2=24$ m/s ve kesme açıklığının $h_c=0,1$ mm olduğu histerisiz çevrimi alanının minimum olduğu dolayısıyla kaybın en az olduğu kesme parametreleri olduğu gözlemlenmiştir.

Bohdal ve arkadaşları dilme ile GO sac kesme prosesinde süreç parametrelerini şu şekilde optimize etmişlerdir; (1) DAZ bölgesinin genişliği 130 μm değerini geçmemeli, (2) çapak yüksekliği b_h 60 μm 'den fazla olmamalı, (3) histerisiz alanı h_f ise 1900 (mT.A/m) değerinin altında olmalı. Buna uygun olarak deney tasarımı ve regresyon analizleri metodu ile kesme hızı v ve yatay makas açıklığı h_c girdi parametreleri ile yukarıdaki çıktıların regresyon analizi ve optimizasyon grafiğini üretmişlerdir. Dilme prosesi parametrelerinin sacın manyetik özelliklerini en az etkileyecek şekilde kurgulanması birbirini etkileyen pek çok parametre nedeni ile karmaşık bir konu olarak ele alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. Dilme sürecinin sacın manyetik özelliklerini etkileyen en önemli parametreleri kesme hızı v_2 , yatay kesme açıklığı h_c ve üst bıçak yaklaşma açısı α olduğu anlaşılmaktadır. Bu parametreler ile süreç sonunda elde edilen zarar görmüş kesme yüzeyi, kesme yüzeyinde plastik deformasyona maruz kalan alan, yapıda oluşan kalıcı gerilimler, çapağın yapısı ve kesme

sonrası manyetik özellikler belirlenmektedir. Kesme hızının yükselmesi, yatay kesme açılığının artması ve üst bıçak bindirme açısının azalması kesme kalitesini kötüleştirmektedir. İdeal kesme şartları $v=15$ m/min, $h_c = 0,03$ mm ve $\alpha= 15-30^\circ$ civarında olduğunu ifade etmişlerdir.

Diğer bir çalışmada Mazurek ve arkadaşları [33] 350 kVA anma gücünde bir transformatör için tasarlanmış nüvede kesme kenarını çapağını temsil edecek şekilde yapay bir kısa devre bölgesi oluşturarak bölgesel kayıpları, toplam kaybı ve akı dağılımının belirlemeye çalışmışlardır. Kenar kesme çapaklarının dizimi yapılmış bir nüvede katmanlar arasında kısa devreye sebep olabileceği ifade edilmiştir. Katmanlar arasında kısa devre olması, istenmeyen Eddy akımlarının artmasına, nüvenin aşırı ısınmasına dolayısıyla toplam kaybının artmasına neden olacağı bilinir. Bazen bu tür kısa devrelerden dolayı ortaya çıkan Eddy çevrimleri bölgesel olarak aşırı ısınmaya hatta nüvenin erimesine sebep olabilir. Örneğin kademelerden birinde çapak ve buna bağlı oluşan şiddetli Eddy akımları çevrimleri varsa, bu akımların oluşturduğu ters yönlü akılar sacın bu bölgesinde primer sargı vasıtasıyla oluşturulan ana manyetizasyon akısının zayıflatır, dolayısıyla toplam nüve kaybının artmasına neden olur. Kesme kenar çapakları önemli bir ısınma kaynağı olamayacak kadar küçük olduğu durumlarda bile yüksek manyetizasyon seviyelerinde önemli seviyede nüve kayıplarına neden olabilir. Kesme çapaklarının bir nüve diziminde rasgele dağılmış olması beklenir. Mazurek 3 bacaklı bir nüvede, ayaklardan bir tanesinin iç tarafına değişik boyutlarda 8 μ m kalınlığında ve 25 x 10, 25 x 25 ve 25 x 20 mm boyutlarda ince bakır levhalar baskılayarak yapay bir şekilde çeşitli büyüklüklerde kenar kısa devresi oluşturmuş, ortaya çıkan bölgesel kısa devre alanlarının nüve performansına olan etkisini incelemişlerdir. Ölçümlerini, daha önceden Pfutzner [34] ve arkadaşları tarafından da uygulanan manyetik akı ölçüm sapması $\pm 6,2$ sınırları içinde kalacak şekilde nüve üzerinde belirli bölgelerden **“iğne tipi manyetik problemler”** ile yapmışlardır. Yazarlar, toplam kayıp ölçümlerinde kullandıkları NORMA D6000 güç analizi sisteminin sapmasının $\pm 5,5\%$ olduğunu belirtmişlerdir. Kısa devre edilen bacağı simetrisinde yer alan bacağı aynı kademede yer alan sac grubunda yapılan spesifik kayıp ölçümlerine göre, kısa devre edilmemiş ve edilmiş 1,7 T manyetik akı koşullarında 1,2 W/kg civarında olan kayıp değerinin %66 değerinde artış ile 2,0 W/kg seviyesine çıktığını ölçmüşlerdir. Daha düşük 1,5 T indüksiyon şiddetinde %13 oranında ve doyum 1,8 T indüksiyonu koşullarında ise %100 oranında spesifik kayıpta artış tespit etmişlerdir. 1,5 T indüksiyon koşullarında kısa devre edilen bölgeden 10 mm

uzaklıkta spesifik kaybın 30 W/kg değerine kadar ulaştığını, 70 mm uzaklıkta ise 3 W/kg değerine kadar azaldığını da tespit etmişlerdir.

Benzer bir çalışmada Loizos ve arkadaşları [35] GO saclarda mekanik kesmenin ortaya çıkardığı plastik deformasyon ve kalıcı gerilimlerin kesme kenarı civarında etkisini konu alan çalışmalarında, kesme bozunumun kenar civarında oluşturduğu bölgesel manyetik akı yoğunlukları 4 farklı sac tipinde gözlemleyerek yorumlamışlardır. Mekanik kesme işlemi sürecinde başlangıçta elastik şekil deformasyonları sonrasında plastik deformasyonlar devrededir. Deformasyon etkin bölgenin büyüklüğü öncelikle malzemenin mekanik karakteristiklerine sonra kesme kalıplarının fiziksel durumuna (geometri, keskinlik, kesme açıklığı vb.) bağlıdır. Kesme sonrasında ortaya çıkan plastik gerinimler sacın manyetik ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtilmiştir.

Godec [36], dilmenin B-H eğrilerine olan etkisini incelediği çalışmasında, işlem esnasında aşırı basma gerilimi oluşturan düşük çaplı kesme takımı seçimi yapıldığında sacların kayıp değerlerinde önemli miktarda artma olduğunu tespit etmiştir. Godec tarafından özetlen literatüre göre, plastik deformasyon oluşan DAZ bölgesinin genişliği sac kalınlığının 2 katına kadar çıkmaktadır. Szymura ve Zawada [37] tarafından raporlanan çalışmada ise, gerilim altındaki bölgede kesme kenarından 7 mm mesafeye kadar uzanan ve gerilim giderme tavlama ile kalkabilen “**kayma bantları**” gözlemlemişlerdir. TeNyenhuis [38] ve arkadaşı ise, dilme operasyonunun etkisini inceledikleri çalışmalarında 200 mm’den daha dar bacalarda ve kademelerde önemli bir kayıp etkisinin olduğunu, bu etkinin 500 mm’den daha geniş bacalarda ve kademelerde ihmal edilebilir olduğunu önermişlerdir.

Makaslama ve dilme süreçleri GO sacın nüve imalatında kullanılan 2 yöntemdir. Bu 2 prosesin saca olan etkileri pek çok araştırmacı tarafından çalışılmış olsa da genel kabul görmüş istikrarlı yaklaşımlar henüz geliştirilebilmiş değildir. Loizos ve arkadaşı [40] referans verilen çalışmalarında değişik kalitelere sahip 300 x 100 mm GO sac plakalarda makaslama sürecinin etkisini anlamaya çalışmışlardır. Ölçümlerini “*Single Sheet Tester*” (SST) düzeneğinde 1,0 T ve 1,5 T manyetik akı yoğunluğunda, 300 mm kenar eksen boyunca dar eksende yarı hattından makaslanmış ve kesilmemiş sac örneklerinde, kesme kenarı civarında değişik mesafelere yerleştirdikleri küçük ölçme bobinlerinde indüklenen gerilimleri B-H eğrilerine dönüştürerek gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede kesme kenarı civarında oluşan manyetik akı yoğunlukları ile kesilmemiş numunede aynı ölçme bobini

yerleşim düzeninde ölçülen manyetik akı yoğunluklarını karşılaştırarak kesme prosesinin etkisini kesme kenarından başlayarak göstermeye çalışmışlardır. Loisos ve arkadaşı [39] elde ettiği sonuçları özetlersek, (1) ölçüm test düzeneği kaynaklı belirsizliklerin indüklenen akı ölçümlerinden elde edilen eğrileri %10-20 oranında değiştirebileceği not edilerek, ölçüm bobini yerleşimini simetrik düzende olmasına rağmen, elde edilen indüklenen akı eğrilerinin simetrik olmadığı tespit etmişlerdir. Bunun nedeni olarak kesme prosesinde bıçak altı alan parça ile bıçak üstü kalan parça arasında ortaya çıkan plastik deformasyon ve kalıntı gerilim seviyesi açısından farklılıkların olabileceğini belirtmişlerdir. (2) DAZ bölgesinin genişliğinin 5 mm değerine kadar ulaştığını, ölçüm belirsizlikleri nedeni ile grafiklerde 10 mm' ye kadar görülebilen etkilerin kesme etkisi ile ortaya çıkıp çıkmadığının belirlenemediği, (3) düşük manyetizasyon seviyesinde kesme etkisinin daha yüksek olduğu, manyetizasyon seviyesi arttıkça kesme etkisi ile oluşan etkinin daha da azaldığını ayrıca belirtmişlerdir. (4) Kesme etkisini karşılaştırmalı inceledikleri malzemelerde yüksek geçirgenlikli HGO saclarla konvansiyonel CGO saclar arasında bir fark olmadığını, bunu sebebinin her iki gruba ait sacların benzer akma 300 MPa ve kopma mukavemet 325 MPa değerlerine sahip olması olabileceğini ifade etmişlerdir. (5) Ayrıca karşılaştırdıkları 2 kalınlık seviyesi 0,27 & 0,30 mm için, kalınlığın bir etken olarak gözlenmediğini ifade etmişlerdir. Loisos ve arkadaşı [40] HGO saclarda yaptıkları ölçümlerden istifade ederek, kesilmiş ve kesilmemiş örneklerde kesme kenarı civarından itibaren manyetik akının kenardan uzaklığı ile değişimi için bir model önermişlerdir. Modellen belirsizliğinin $\pm\%10$ seviyesinde olduğunu belirterek, düşük indüksiyon 0,5-1,3 Tesla seviyesine kadar ilk modeli (2.1) doyuma yakın indüksiyon seviyelerinde kesme kenarı etkisinin ihmal edilebilir olması nedeni ile 1,4-1,6 Tesla ve üstü için ikinci modeli (2.2) önermişlerdir.

$$B_{cut}(x) = B_{uncut}(1 - e^{-kx}) \quad (2.1)$$

Bu denklemde $k=0,7$ ve $(B_{uncut}=1,0)$ Tesla 'dır.

$$B_{cut}(x) = \frac{B_{uncut}}{2} + \frac{B_{uncut}}{2}(1 - e^{-kx}) \quad (2.2)$$

Bu denklemde $k=4,0$ ve $B_{uncut}=1,5$ Tesla 'dır.

Sonuç olarak, kesme etkisi ile manyetik özelliklerdeki değişimin sac tipinden ve kalınlığından bağımsız olarak kenardan 5 mm kadar derine ulaşabildiğini, kesme etkisinin yüksek indüksiyon seviyelerinde daha göze çarpan nitelikte olduğunu önermişlerdir.

Bir başka çalışmada Antony J. Moses ve arkadaşları [40] dar kesilmiş NGO saclarda kesme kenarı kaynaklı kayıp artışının, odaklanmış manyetik akı dağılımı ve B-H eğrileri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dar kesilmiş NGO saclarda sac kaybının %30 oranında artabileceğini ve B-H karakteristik (*hysteresis*) eğrilerini önemli bir miktarda değiştirdiğini belirtmişlerdir. Kesme kenarları kaynaklı akı dağılımı değişiminin yüksek frekanslarda (400 Hz) düşük frekanslara (50 Hz) göre daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Saç şekil verme ve kesme teknolojileri endüstride uzun yıllardan beri uygulanan yöntemler olmakla beraber, kesme kalitesi beklentileri ve giderek karmaşıklaşan ürün geometrileri nedeni ile daima bilimsel çalışmalara konu olmuştur. Söz konusu süreçler istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak da analiz edilmiştir. Referans olarak verilebilecek diğer bir çalışma olan I. Wadi ve arkadaşlarının [41] makaslama sürecinin bağımlı ve bağımsız değişkenlerini “**yapay sinir ağları**” (*neutral networks*) yöntemi ile analiz çalışmasıdır. Yazarlar akustik emisyon ve kuvvet & yer değiştirme sensörlerinden elde ettikleri (*strain gage*) sinyalleri dijital sinyal işleme donanımları sayesinde belirlenen süreç varyantlarına göre kesilen malzeme sertliği, hareketli makas keskinliği, sabit makas keskinliği ve makas açıklığı ile eşleştirmişlerdir.

Diğer bir istatistiksel analiz çalışmasında T. Badgujar ve arkadaşı [42] ise otomotiv sektöründe çok yaygın olan kalıp ve pres ile form verme sürecini incelemişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile gerilim analizleri ve çok değişkenli polinomal regresyon analizi yöntemlerini kullanmışlardır. Pres ile şekil verme sürecinde bağımlı değişken olarak sacdaki incelme oranını, bağımsız varyantlar olarak; hareketli bıçak (*punch*) kesme kenarı yarıçapı ve aşınma miktarı, kalıp (*die*) kesme kenarı yarıçapı ve aşınma miktarı, sürtünme katsayısı gibi bazı ölçülebilen varyantların arasındaki model oluşturmuşlardır. Varyantların korelasyon ve regresyon katsayılarını hesaplamışlar, çalışmalarının sonunda %95 güvenilirlikle önerdikleri modelde $R^2= 0,9389$ regresyon katsayısını olarak hesaplamışlardır. Diğer bir çalışmada J. Park ve arkadaşları [43] sürekli merdane ile şekil verme sürecinde ortaya çıkan eğrisel form verilmiş ürün için belirledikleri girdi varyantlar ile çıktı varyantları arasında regresyon modeli oluşturmuşlardır. Girdi

parametreler olarak merdane hattında giren sacın maruz kaldığı sıkıştırma oranı X_1 ve merdane çiftinin TD yönünde sahip olduğu radyus (*curvature radius*) X_2 , bağımlı değişken olarak merdane hattından çıkan levha sacın sahip olduğu boyuna yöndeki bükülme radyus miktarı olarak belirlemişlerdir. İki serbestlik dereceli 9 adet deneme ile elde ettikleri veri tablosuna çok değişkenli polinomal regresyon analizi uygulayarak regresyon katsayısı $R^2=0,9869$ olan istatistiksel modellerini elde etmişlerdir.

Ahmet Peksöz ve arkadaşları [44] yaptıkları çalışmada NGO sacların kesim işleminden sonra kesme kenarı civarında ortaya çıkan deformasyon seviyesi için deneysel verilerle MATLAB programında elde edilmiş bir istatistiksel model önermişlerdir. 4 farklı NGO sac tipi için kesme kenarı 10 mm mesafeye kadar ortaya çıkan manyetik indüksiyon değişimi kesilen ve düşen parça (*cut-off pieces*) deneysel olarak ölçülerek MATLAB’da matematiksel bir modele dönüştürmüşlerdir. Yazarların önerdikleri matematiksel model (2.3)’ de verilmiştir. Modelin deneysel sonuçlarla uyum gösterdiğini ve kesme açıklığı 0,5 mm olan yani kesilen malzeme kalınlığına oranı %4-8 olan bir giyotin makas kullanılarak gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

$$B_{max}(T) = \frac{a}{(1 + e^{b-cx})^{\frac{1}{d}}} \quad (2.3)$$

Önerilen denklemde, B_{max} ölçülen en büyük manyetik indüksiyon değeri, a , b , c ve d tane büyüklüklerinden ve silisyum içeriğinden elde edilen birer sabit, x ise kesme kenarından itibaren uzaklık bilgisi olduğu belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada makas ile kesme süreci için çoklu regresyon yapay sinir ağları ile modelleme ve kesme kenarı kalite seviyesi tahminleme çalışması E. Al-Momani ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür [45]. Modelde kullanılan veriler sonlu elemanlar yöntemi ile üretilerek kesme kenarı kalitesi ve kesme çapağı varyantına göre modellenmiştir.

Diğer bir çoklu regresyon modeli otomotiv parçası üretim yöntemi ile olan pres ile form verme (derin çekme) yöntemi süreci için N. Kamal Bashas ve arkadaşları [46] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar derin çekme prosesindeki geri gelme (*spring back*) etkisini tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar presle form verme yöntemi ile üretilmiş değişik şekillerdeki parçalar için MINITAB 15 programında çoklu

regresyon analizi çalışmaları yapmışlar, analizlerinin sonucunda regresyon katsayılarını $R^2=0,820$ ve $R^2=0,736$ değerlerini elde etmişlerdir.

Benzer bir regresyon analizi ve optimizasyon yaklaşımı, dalga duvarlı tip dağıtım transformatörü tanklarının boyanması için özel bir süreç olan yaş üstü yaş boyama süreci için Aslan Deniz Karaoğlan ve Nihat Çelik tarafından [47] uygulanmıştır. Araştırmacılar özel bir proses olan “**akıtma boyama**” sürecine ait bazı süreç parametrelerini (viskozite X_1 ve katlar arası bekleme süresi X_2) bağımsız değişkenler olarak belirleyip bağımlı değişkenler (ölçülen kuru film kalınlığı Y_1 ve yüzey görsel kalitesi indeksi Y_2) üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Süreçte kontrol edilemeyen ya da sabit kaldığı bilinen ortam sıcaklığı, ortam nemi, akıtma süresi, boya sıcaklığı gibi diğer proses parametrelerini de deney tasarımı modeline (*Design of Experiment*) uygun olarak kayıt altına almışlardır. Yazarlar, pratik tecrübelerden gelen kabul edilebilir yüzey kalitesi indeksi Y_2 ve elde edilmesi gereken ideal kuru film kalınlığına göre önerilen modelin regresyon katsayılarını bağımlı değişkenler sırasıyla için $R^2=0,9965$ ve $R^2=0,8409$ olarak hesaplamışlardır.

Araştırmacılar O. Çavuşoğlu ve H. Gürün [48] kesme kuvvetleri, kesme açıklığı, sac kalınlığı ve çapak yüksekliği arasındaki ilişkiyi AA5754 sınıfı Alüminyum levha saclar ile çalışmışlardır. Regresyon analizi ve varyans analizi içeren çalışmalarında çapak oluşumunda makas açıklığı ve uygulanan kesme kuvvetlerinin aynı seviyede etkin olmadığını, sac kalınlığının ve makas açıklığının sırasıyla %23,40 ve %76,15 oranında etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çok sayıda test çalışmasından sonra çapak yüksekliği için makas açıklığı ve sac kalınlığı bağımsız değişkenlerini içeren modellerinde regresyon değerini $R^2_{adj}=0,979$ olarak elde etmişlerdir.

Haddeleme ile oluşmuş yüzeylerde tercihli kristalografik yönlenme olduğundan ve bu yönlenmenin kısaca “**tekstür**” veya “**patern**” olarak tanımlandığından bahsedilmiştir. Tekstür içeren anizotropik malzemelerin mekanik, optik, termo-elektrik, korozyon direnci, enerji soğurma kapasitesi ve elektromekanik özelliklerinin değişik doğrultular boyunca değişim gösterdiği bilinen bir durumdur. Bu sebeple malzemelerin yukarıda anılan özelliklerinden birini ya da birkaçını geliştirebilmek için malzemelerde tercihli tekstür oluşturulması konusunda sürekli araştırmalar devam etmektedir. Malzemenin sahip olduğu kristalografik tekstür Miller indisler $\{h\ k\ l\}$ $\langle u\ v\ w \rangle$ veya EULER açıları (θ, Φ, ϕ) ile

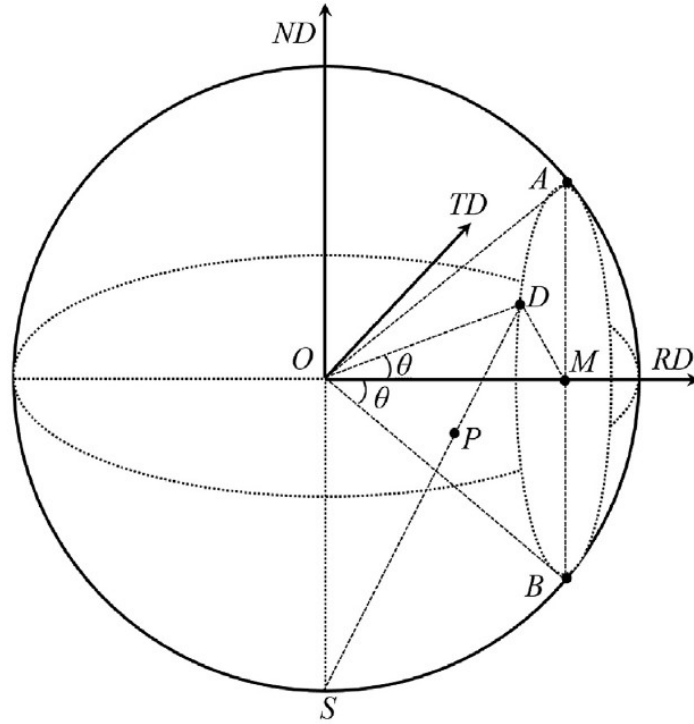
tanımlanabilir. Miller indisleri ile gösterim kristalografik olarak önemli düzlem ve yönlerin numuneye ait karakteristik düzlem ve yönleri ile eşleştirebilmesi nedeni ile tercih edilir.

Anizotropik tekstürlerin yönlenme ve doğrultularının tespit edilebilmesi kapsamında Fu Junwei [49], kübik ve hekzagonal yapıda kristalografik yönlenme tekstürünün PF (*Pole Figure*) yaklaşımı ile belirlenmesine dönük genel bir yaklaşım geliştirmiştir. Konunun anlaşılabilmesi için kübik kristalografi özelinde Junwei' nin yaklaşım şu şekilde özetlenebilir: (1) Haddeleme ile üretilmiş bir malzemede karakteristik $\{h k l\}$ düzlemleri ve karakteristik düzlemlerin ana doğrultu yönü $\langle u v w \rangle$ hadde yönü RD ile paraleldir. (2) Tekstür analizi kafes düzlemlerinin kutup dağılımının belirlenmesi ile yani (*Pole Figure*) PF analizi ile mümkündür. (3) Malzemelerin kristalografik tekstür yapısı, kutup dağılımı PF, ters kutup dağılımı IPF (*inverse pole figure*) veya yönlenme dağılım fonksiyonu (*Orientation Distribution Function, ODF*) araçlarından biri kullanılarak tanımlanabilir. (4) Levha formulu yüzey tekstürünün gösteriminde daha ziyade PF veya ODF tercih edilirken, fiber tekstür tanımlamada IPF tercih edilebilir.

Malzemelerde PF ve IPF gösterimleri yüzeye gönderilen X-ışını saçılım karakterinin görüntülenmesi veya EBSD teknikleri ile elde edilir. XRD ile elde edilen PF ve IPF görüntülemeler daha makro seviyede fikir verirken, EBSD ile elde edilen görüntülemeler mikro seviyede tekstür hakkında daha doğru bilgi içerir. PF ölçümlerinden hesaplanan ODF görüntülemeler ise tekstür karakterizasyonu konusunda daha kesin bilgiler içerir. Levha tekstürler fiber tekstürler ile karşılaştırıldığında RD haddeleme doğrultusu ve düzleminin belirlenmesi daha karmaşıktır. Bir PF gösteriminde RD doğrultu ve düzleminin belirlenmesi için kullanılan geleneksel yöntem, verilen PF tekstürünün standart bilinen PF gösterimleri ile karşılaştırılmasıdır. Bilinen PF gösterimleri sayıca limitli ve çok bilinen tekstürlere ait olduğundan karmaşık bir tekstür ile karşılatırıldığında yetersiz kalabilmektedir. Junwei, [49] kübik ve hekzagonal kristalografi için PF tekstürünü kullanarak malzemenin RD düzlemini $\{h k l\}$ ve doğrultusunu $\langle u v w \rangle$ belirlemek için bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde sadece kutup noktasının projeksiyon dairesinde merkeze olan uzaklığından istifade edilir. Stereografik denklemler, düzlemler ve doğrultuların temel bağıntılarından elde edilen modelleri nasıl elde edildiğine değinilmeden, RD yönünü ve düzlemini veren modeller aşağıda şekilde verilmiştir:

$$\cos \theta = \frac{L}{R} = \frac{2a}{a^2 + b^2 + 1} \quad (2.4)$$

Bu denklemde, Şekil 2.14' de gösterildiği üzere, küre içindeki herhangi bir noktanın küre merkezine olan uzaklığı (L), kürenin çapı (R) olmakla beraber, (θ) malzemenin PF tektüründeki herhangi bir kutup noktasının açısıdır. (a) ve (b) ise kutup noktasının ekvatorial dairede kartezyen P (aR , bR) koordinatı bileşenleri olan sabit sayılardır.

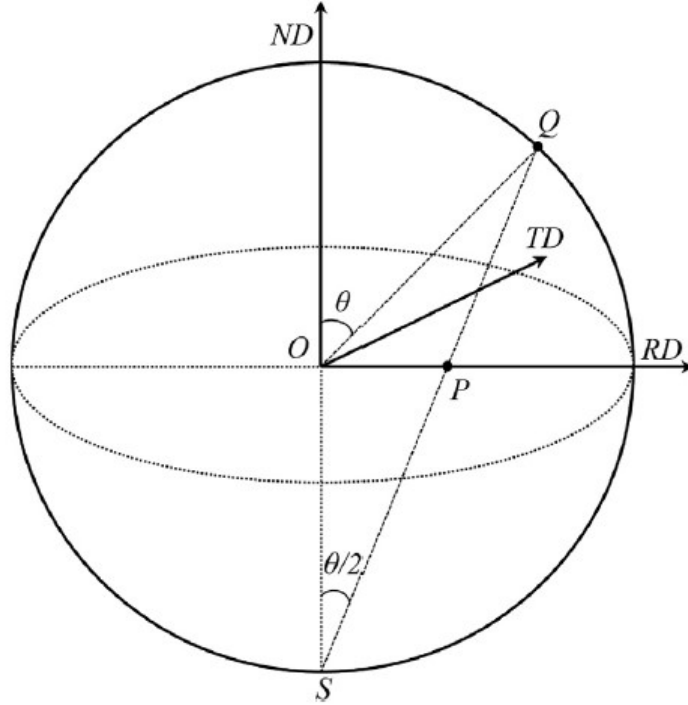


Şekil 2.14: Rastgele bir kutup noktası P ile hadde yönü RD arasındaki açını şematik gösterimi [49].

RD doğrultusu L/R oranı ile ilişkilidir ve (2.4) nolu eşitlikle hesaplanabilir. a ve b noktaları ise kutup noktasının tektürüne koordinat eksenine olan aksenal uzaklıklarıdır. Formülden hesaplanan açı değeri tablolar halinde sunulan bilinen açı değerleri ile karşılaştırılarak haddeleme doğrultusunu $\langle uvw \rangle$ belirlemek mümkün olur. Haddeleme düzleminin belirlenmesi için ise aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

$$\cos \theta = \left(1 - \left(\frac{OP}{R}\right)^2\right) / \left(1 + \left(\frac{OP}{R}\right)^2\right) \quad (2.5)$$

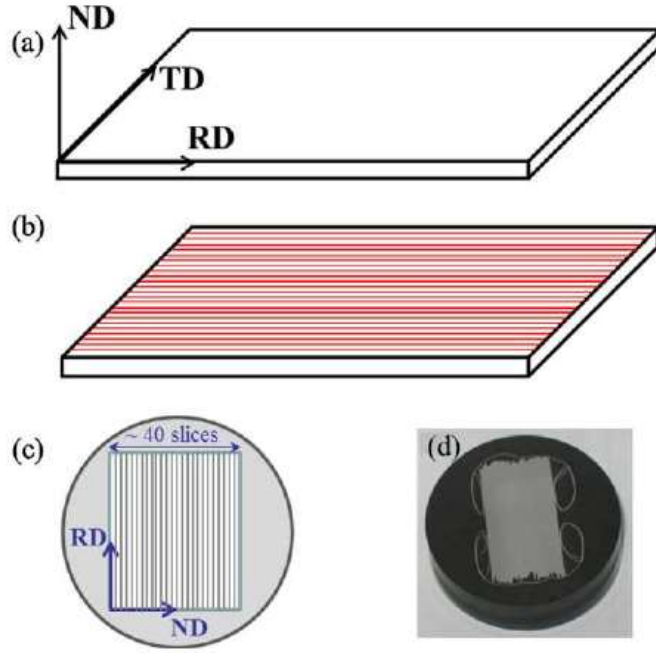
Bu denklemde Şekil 2.15 de gösterildiği üzere, OP ekvatorial dairedeki kutup noktası ile merkez arasındaki mesafe, R kürenin çapı olmakla beraber, θ küre üzerindeki herhangi bir noktanın ND doğrultusu ile yaptığı açiya denk gelir.



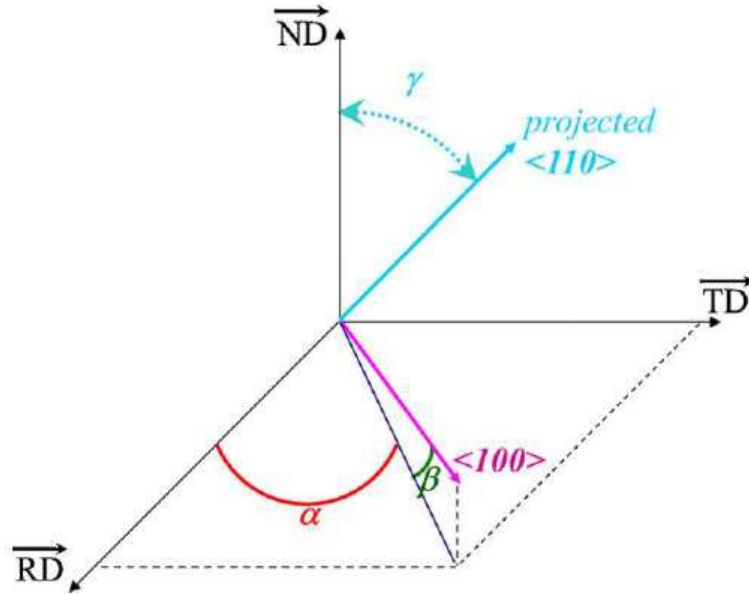
Şekil 2.15: Rastgele bir P kutup noktası ile projeksiyon dairesinin merkez arasındaki açının şematik gösterimi [49].

Şekil 2.15' de verilen gösterim incelediğinde ekvatorial projeksiyon dairesinin merkezinin RD düzlemini gösterdiği görülmektedir. Bu sayede kutup noktaları ile merkez noktası arasındaki açının büyüklüğü eş değer tablolardan karşılaştırılarak RD düzleminin Miller indisi $\{h k l\}$ belirlenebilir.

Nicolas Bernier ve arkadaşları [50], GO saclarda tane yönlenmesinin kolay mıknatıslanma doğrultularından $[1 0 0]$ ve GOSS doğrultusundan $\{1 1 0\}$ $\langle 100 \rangle$ sapma (α , β ve γ) açılarının sacın manyetizasyon karakteri ile olan ilişkisini analiz ettikleri çalışmalarında EBSD yöntemini kullanmışlardır. HKL NORDLYS kamera ataşmanı bulunan JEOL JSM-7001F FEG SEM cihazında yapılan çalışmalarda numune hazırlama süreçlerinde çok sayıda GO sac dilimi TD yüzeyleri üst yüzeyde yan yana duracak şekilde bakalite alınarak 80' den fazla tane sınırı görüntüsü elde etmişlerdir. Aşağıda Şekil 2.16' da yazarların tane yönlenme dağılımı inceleyebilme için hazırladıkları numune tasarımı verilmektedir. Şekil 2.17' de ise GO saclarda kolay mıknatıslanma doğrultularına göre ortaya çıkan sapma açılarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.16: Nicolas Bernier ve arkadaşlarının uyguladığı numune hazırlama yöntemi [50].

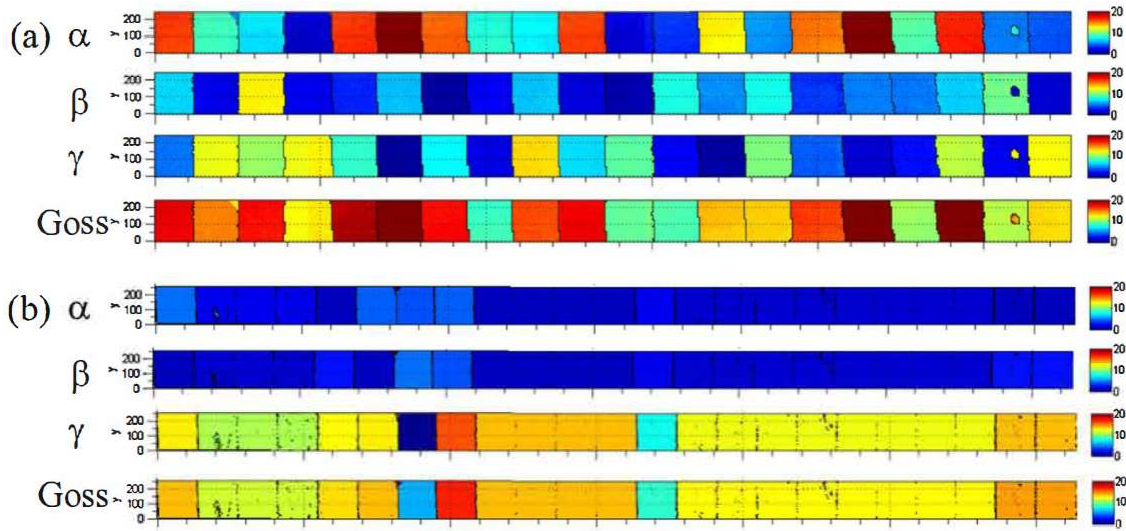


Şekil 2.17: GO saclarda RD doğrultusunun kolay mıknatıslanma doğrultularından iç ve dış sapma açıları (α ve β), GOSS doğrultusunun ND yüzey normalinden sapma açısı (γ) [50].

Nicolas Bernier [50] ve arkadaşlarının referans verdiği önceki çalışmalarında 800 (A/m) şiddetinde bir manyetik alan altında gerçekleşen polarizasyon (manyetik akı) miktarının α ve β açılarının büyüklükleri ile ters orantılı olduğu, yani RD doğrultusunun kolay mıknatıslanma $\langle 100 \rangle$ doğrultularından sapması ile ters orantılı olduğu, buna karşılık GOSS $\langle 110 \rangle$ düzleminin RD düzleminin γ çok az etkilendiğini belirtmişlerdir. HGO

/ HIB sac üretimi prosesinde yüksek polarizasyon seviyelerine ve yüksek bir tekstür keskinliğine ulaşmak için yapılan çalışmalarda, düzlem içinden α ve düzlem dışından β sapma açılarının sınırlanmasının önemli olduğu gibi, γ sapma açısının da sınırlanmasının daha önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, tane yönünün RD doğrultusundan saptırılması anlamında GOSS sapma açısının düşük tutulması ihtiyacına işaret eder.

Nicolas Bernier ve arkadaşları deneysel çalışmalarında CGO ve HGO/HIB tip numuneler için EBSD yöntemi ile yönelim (α , β , γ) haritası elde etmişlerdir. Bu haritadan ve açılardan “GOSS sapma açılarını” hesaplamışlardır. CGO ve HGO malzemeler her ne kadar çok farklı manyetik özellikler gösterebilirler de tanelerin GOSS sapma açısının genelinde yaklaşık (13°) olduğunu ve yaklaşık 20 ‘şer adet numunede α , β , γ ve GOSS sapma açısı dağılımını (a) CRGO sac için ve (b) HGO sac için aşağıda Şekil 2.18’ deki gibi göstermişlerdir.



Şekil 2.18: Numune dizisinin EBSD haritalaması [50].

EBSD yöntemi kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada Takajo ve arkadaşları [51] tarafından GO çeliklerinde kübik tekstür $\{100\} \langle 001 \rangle$ oluşumu incelenmiştir. Bu tekstürde $\langle 001 \rangle$ kolay miktatsızlanma doğrultuları RD ve TD doğrultularına paraleldir. GO sac imalat prosesleri esnasında yüksek oranlı soğuk haddeleme, vakum altında tavlama gibi ileri yöntemlerle tekstür keskinliğini artırılması önerilmektedir. Takajo ve arkadaşları ise tekstür keskinliğine arttırmak için daha geleneksel bir yöntem olan soğuk haddeleme öncesinde tane boyutunu büyütülmesini önermişlerdir. 900 C° sıcaklıkta tavlama yapılarak elde edilen keskin tekstürde soğuk haddeleme öncesinde iri tane yapısı gözlemlenmiştir. Çekirdeklenme ve tane büyüme aşamaları *in-situ* ve *ex-situ* EBSD yöntemleri ile incelendiklerinde

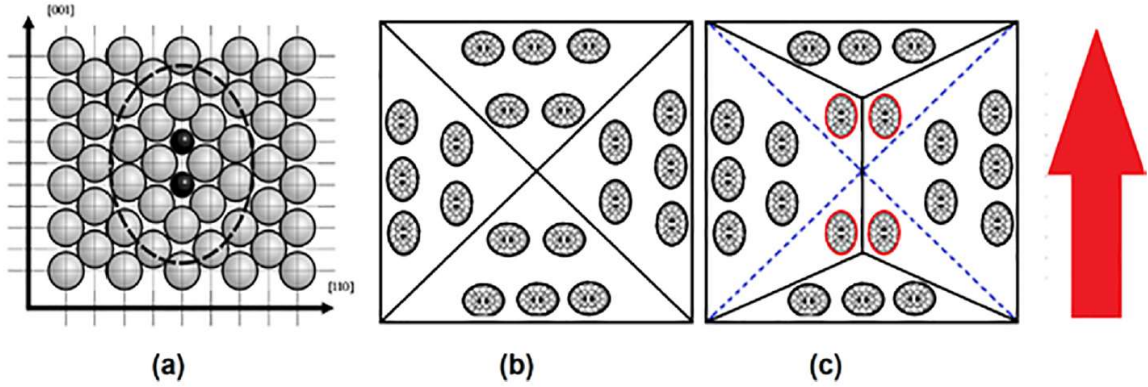
rekristalizasyon aşamasında tercihli kübik tekstür oluşumu ile ilgili olarak şu mekanizmanın yürürlükte olduğunu belirtmişlerdir; tavlama sıcaklığı 600 C° civarında olduğunda rekristalizasyonun erken aşamalarında deforme olmuş {111}<112> tanelerin GOSS tekstürüne eklendiğini, birkaç kübik tekstürlü tanenin düzgünce yönelik olan {100}<001> tanelerden ve daha azının {110}<110> deformasyonlu tanelerden çekirdeklendiği, yapıda deforme bir şekilde bulunan küp tekstürünün tavlama ile tekrar bilinen kübik tekstürüne dönüştüğü belirtmişlerdir. Tavlama sıcaklığının 700 C°' ye artırılması ile deforme durumdaki {411}<148> tanelerden küp tekstürünün çekirdeklendiği, rekristalizasyonu tamamlanmış yapının temel olarak 4 farklı tekstür & domain yapısı içerdiği bunların; rekristalize olmuş GOSS tekstürü {110}<001>, rekristalize olmuş küp tekstürü {100}<001>, rekristalize olmuş ND//<148> tekstürü ve rastlantısal tekstür olduğunu belirtmişlerdir. Bu tekstürlerin & domainlerin sınırlarını tavlama öncesi tane sınırları ile aynı olduğunu, küp tekstürünün önceki küp tekstürü içinde büyümesinden dolayı rekristalize olmuş tane sınırlarının önceki sınırların ötesine geçemediğini, tavlama sıcaklığının 900 C°' ye çıktığı durumda rekristalize olmuş tanelerin önceki sınırlarının ötesine geçebildiğini, küp tekstürlü tanelerin öncesinde büyük olmasından dolayı tavlama sonrasında diğer küçük taneleri bünyesine alarak tercihli olarak büyüdüğünü, en sonunda baskın tekstür haline geldiğini, bulguların deneysel olarak gözlemlenen yönelme saçılım açısı ve tane sınırı hareketlenme eşitlikleri ve sıcaklığın fonksiyonları ile açıklanabildiğini, dolayısıyla rekristalizasyon prosesinin orijinal kristalografik yapısına dayanarak tahmin edilebileceğini önermişlerdir.

Diğer bir çalışmada, Seil Lee ve arkadaşları [52], GO sac üretim prosesine dönük olarak birincil rekristalizasyon aşamasında oluşan anormal tane irileşmesi sürecini tahmin edebilmek için EBSD tekniğinin kullanmışlardır. Birincil rekristalizasyon aşamasında GOSS tekstürüne sahip taneler ortalama tane matrisine göre daha iri taneler olarak gözlemlenmişlerdir, öyle ki GOSS yönelmesinden 1 dereceden daha küçük sapma açısı gösteren tanelerin ortalama büyüklüğünün, matristeki tanelerin ortalama büyüklüğünden 2,6 kez daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Tane yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş elektrik sacları ile yapılan ısı işlem içerikli çalışmalar tarandığında aşağıdaki literatür ile karşılaşmıştır.

M. Dias ve arkadaşları, [53] GO elektrik sacının anizotropik özelliklerini gerilim altında ısı işlem süreci uygulayarak geliştirmeye çalışmışlardır. Dışsal bir stres ya da manyetik alan etkisinde düşük sıcaklıkta tavlama yapıldığı takdirde, malzemenin anizotropik özelliklerinin

geliştiği bilinen bir durum olmakla beraber, yazarlar GO eliklerde bu değişimin mekanizmasını kristalografik yapıda yer alan Silisyum atomu çiftlenimlerinin kısa mesafeli difüzyonları ile açıklamışlardır. Yapıya dışsal bir gerilim ya da manyetik alan uygulandığında kafes yapısında elastik bir gerilim oluşacağı, sıcaklık yeterince yüksek olduğunda Si iftlenimlerinin Şekil 2.19’da gösterildiği gibi yeni bir yönlenime kavuşacağı beklendiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.19: (110) düzlemi boyunca konumlanmış Si atomlarının Şematik gösterimi [53].

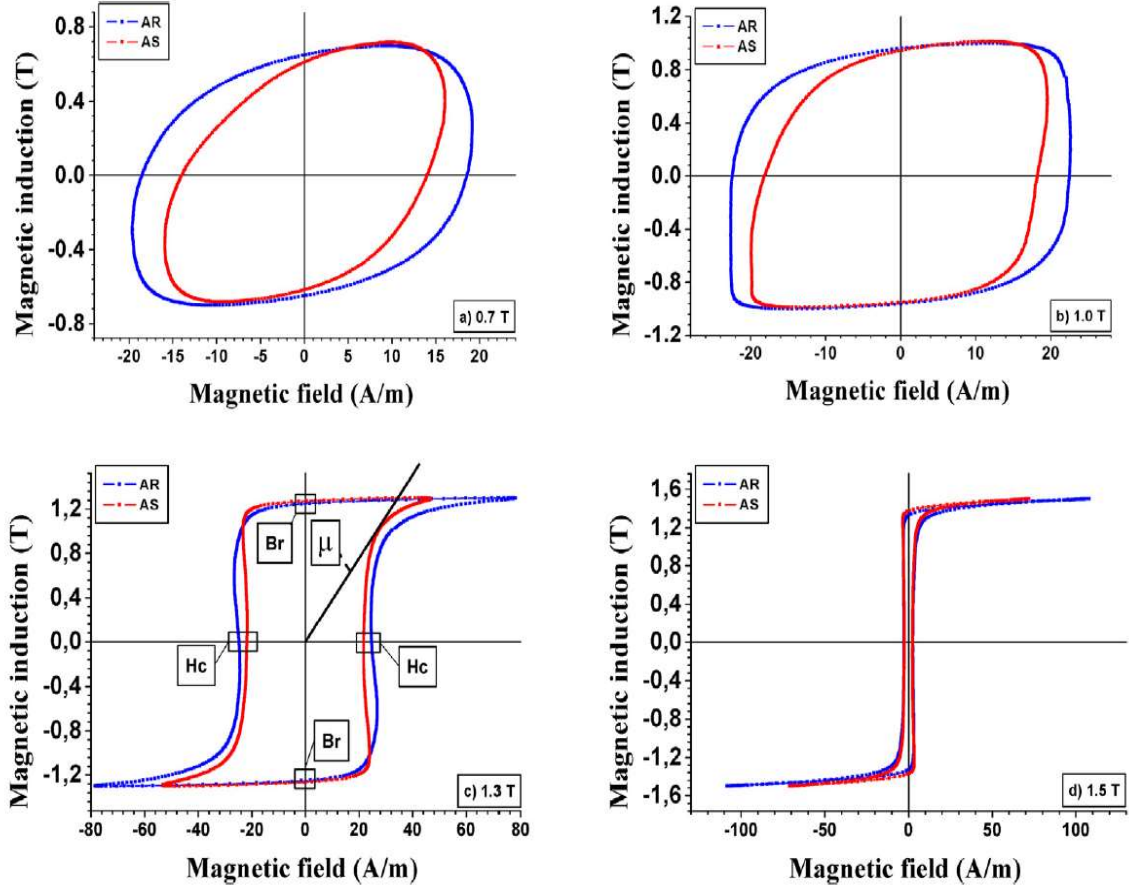
Şekil 2.19’ da (a) Si-Fe alaşımında (110) düzlemi boyunca konumlanmış Si yapısı, (b) dışsal bir manyetik alan uygulanmadan önce tane yapısı içinde ortaya çıkan doğal domain yönlenmesini, (c) kırmızı ok yönünde stres altında tavlama uygulandığında yön değiştiren Si iftlenimlerinin temsili olarak gösterimidir. Dışsal bir manyetik alan veya stres uygulandığında, manyetik alan ya da stres yönüne paralel oluşan 180° domainler büyürken, manyetik alan ya da stres yönüne dik yönde olan 90° domainler kafes gerilimini rahatlatmak amacı ile difüzyon etkisi ile hacmen küçüldüğünü ifade etmişlerdir. Alaşım sıcaklığı oda sıcaklığına düşürüldüğünde Si çiftlenimleri yeni yönlenimlerini muhafaza edeceğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla alaşımın anizotropik karakteri RD doğrultusunda gelişmiş olacağını, kristalografik olarak manyetik anizotropinin gelişmesi sac kaybının azalması yani histerisiz çevrimi kapalı eğirişinin alanın küçülmesi anlamına geldiğini belirtmişlerdir.

Dias ve arkadaşları [53], deney setleri için 210 x 30 x 0,27 mm boyutlarında 2 farklı ticari GO sacı hazırlamış, sacların uçlarında 10 mm çapında 2 adet delik oluşturmuş, kristal yapıda sacın üretim sürecinden kalması muhtemel kalıcı gerilimleri tavlama için 840 °C ‘de Argon atmosferinde 1 saat ısıl işleme tabi tutmuş, 80 °C’ lik (NaOH+HCl) asidik solüsyon ile sac üzerindeki dielektrik kaplamalarını tamamen temizlemişlerdir. Kaplaması temizlenmiş numuneler tek levha manyetik test (*Soken Single Sheet Tester*) cihazında 4 farklı büyüklükte

0,7 Tesla, 1,0 Tesla, 1,3 Tesla ve 1,5 Tesla manyetik alan ile manyetize edilerek B-H eğrileri elde edilmiştir. Numuneler daha sonra silindirik bir fırın içinde iken RD doğrultusunda yaklaşık 40 MPa çekme gerilimine maruz bırakılarak 300 veya 400 °C sıcaklıklarda 20 dakika boyunca ısıtılmışlardır. Dias ve arkadaşlarının ulaştıkları sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz; gerilim ve manyetik alan altında tavlanan (AS) kodlu numuneler, kaplaması temizlenmiş ve kalıcı gerilimleri giderilmiş (AR) kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında, AS kodlu numunelerin histerisiz eğrisinin kapalı alanının küçüldüğü tespit etmişlerdir. 400 °C de ısıtılan numunelerde kalıcı mıknatıslık seviyesi B_r aynı seviyede kalmışken, geçirgenliğin μ_r ve koersivite alan büyüklüğünün H_c azaldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla sac kaybı P_s değerinin toplamda azaldığı tespit edilmiştir. AS prosesi esnasında uygulanan 40 MPa civarındaki çekme gerilmesinin Si çiftlenimlerinin difüzyonuna sebep olduğu, 90° domainler (*lancet domains*) hacmen azalırken 180° lik domainlerin (*slab like domains*) hacmen arttığı, bu sayede malzemenin anizotropik karakterinin daha da geliştiği, bu gelişim seviyesinin A tipi numunelerde ve 400 °C’de yapılan AS işlemin sayesinde malzemenin manyetik özelliklerini geliştirdiği ve kaybın azalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. A tipi numuneler APREAM marka (R130-27) kodlu GO elektrik çeliğidir, tanelerin kristalografik kolay yönlenim düzlemi ve doğrultusu (110) [001] ile RD doğrultusundan saçılan α ve β açıları 10°’ye kadar çıkmaktadır. AS işleminden sonra 0,7 Tesla, 1,0 Tesla, 1,3 Tesla ve 1,5 Tesla indüksiyon seviyelerinde elde edilen sac kaybı P_s azalma oranları sırasıyla %18,5, %16,2, %8,5 ve %3,3 olarak ölçülmüştür.

A tipi numuneler ile 300 °C’de yapılan AS işleminin sonuçlarını incelendiğinde, Si çiftlenimlerinin difüzyon seviyesinin çok düşük kaldığını ve bu nedenle bilinen difüzyon parametrelerine (sıcaklık, stres ve süre) ilave bakış geliştirilerek, AS süreci etkisi ile difüzyona uğrayabilecek Si çiftlenimlerinin yoğunluğunun da dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. Saçılım açıları daha düşük olan B kodlu APREAM marka H110-27 kodlu GO numunelerde 400 °C’ de daha düşük seviyede %5 P_s sac kaybı iyileşmesi tespit etmişlerdir. Diğer taraftan saçılımı daha yüksek olan numunelerde 400 °C’de %15-20 ve 300 °’de %8-12 oranlarında daha yüksek seviyede P_s sac kaybı iyileşmesi gözlemlenmiştir. AR tipi numuneler arasındaki saçılım seviyesi farkı ile P_s sac kaybı iyileşmesi arasındaki net ilişkiyi bu şekilde kurmuşlardır. Sac kaybı iyileşmesi histerisiz alanın küçülmesi ile direkt ilgili olduğunu, histerisiz alanın küçülmesi için B_r kalıcı mıknatıslık değerinin düşmesi gerektiğini, H_c koersivite alan büyüklüğünün azalması gerektiğini ve μ_r bağıl geçirgenliğin

yükselmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Tüm bu ölçümlerin grafikleri aşağıda Şekil 2.20 'de verilmiştir.



Şekil 2.20: (a) 0,7 Tesla, (b) 1,0 Tesla, (c) 1,3 Tesla ve (d) 1,5 Tesla'da elde edilen histerisiz eğrileri [53].

Yukarıda sunulan literatür özeti ile, GO ve NGO nüve saclarında kesme işlemi, kesme sonrasında ortaya çıkan kalıcı deformasyon, bu deformasyonun sacın manyetik özelliklere etkisi, ısıl işlemler ile bu negatif etkilerin bertaraf edilmesi, saclarda anizotropinin ve kristalografik yönelimin anlaşılabilmesi ve tezin deneysel alt yapısının kurulabilmesi geniş bir literatür özeti verilmiştir. Bu aşamadan sonra ise tez çalışmasının teorik ve deneysel altyapısından bahsedilecektir.

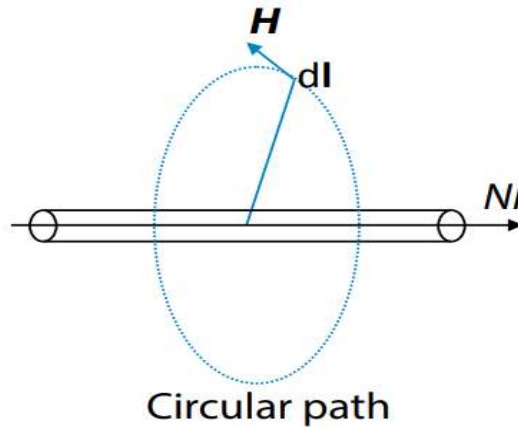
3. NÜVE SACI VE TRANSFORMATÖRLER

3.1 Elektromanyetizma Prensipleri

Manyetizmanın insanlık tarafından bilinen eski bir olgu olduğundan bahsedilmiştir. Gerçek anlamda ilk akademik çalışma ise yeryüzünün manyetik alanını keşfeden William Gilbert tarafından yapılmıştır [54]. Gilbert manyetik bir iğnenin dünyanın manyetik alanı doğrultusunda yönlendiğini keşfetmiştir. İçinden elektrik akım geçen bir telin manyetik alan ürettiğini Hans Christian Orsted keşfetmiştir. Bu keşif André-Marie Ampère ilham olmuş ve her türlü manyetik alanın kaynağında bir elektrik akımı olduğu hipotezini öne sürmesini sağlamıştır. Ampère (1856) kendi adı ile bilinen manyetizmanın temel bağıntılarından birisini aşağıdaki gibi önermiştir [27]:

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I \quad (3.1)$$

Bu eşitlik kapalı bir \mathbf{H} manyetik alanın, içinden elektrik akımı geçen bir iletken $d\mathbf{l}$ kadar uzaklıkta üretildiğini, büyüklüğünün ise onu üreten N akım ilmeği sayısı ve iletken I akımı miktarı ile değiştiğini ifade etmektedir. İçinden akım geçen bir iletken etrafında oluşan manyetik alan yani AMPERE kanunu basitçe Şekil 3.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.1: AMPERE akım kanunu [27].

Michael Faraday ise elektromanyetizmanın diğer önemli bir kanunu önermiştir (1831). FARADAY yasasına göre, bir elektrik akımı değişimi nedeni ile oluşan **manyetik akı Φ** ,

kendisini oluşturan akıdaki değişimin büyüklüğüne orantılı olacak şekilde bir **elektromotor kuvveti (emk)** (*electromotive force, emf*) V indüklemektedir [27]:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.2)$$

Formülasyondaki negatif işaret Heinrich Lenz'e ithafen LENZ kanunu olarak bilinir. Anlamı oluşan elektromotor kuvvetin yönünün kendisini oluşturan etkiye ters yönde olduğu anlamına gelmektedir. James Clerk Maxwell (1873) o güne kadar üretilen teoriyi özetlediği çalışmasında elektro manyetizma kuramı için 20 adet denklem önermiştir. Bu denklemler daha sonra bugün bilinen adıyla Maxwell denklemleri şeklinde 4 adet denkleme indirgenmiştir. MAXWELL kanunları 2 adet GAUSS denklemi, 1 adet AMPERE ve 1 adet FARADAY kanunundan müteşekkildir ve elektrik akımı ve manyetik alan arasındaki karşılıklı ilişkiyi açıklamaktadır. Aşağıda, Matthew N. O. Sadiku tarafından kaleme alınan "*Element of Electromagnetism*" kitabından (sayfa 384) Maxwell denklemlerinin integral formları verilmiştir [55]:

$$\text{GAUSS elektriksel alan denklemi: } \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho_v \cdot dv \quad (3.3)$$

$$\text{Manyetik tek kutupsuzluk yasası (*): } \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{FARADAY kanunu: } \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.5)$$

$$\text{AMPERE akım çevrimi kanunu: } \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{S} \quad (3.6)$$

(*): Bu yasa aynı zamanda "GAUSS Manyetik Alan Yasası" olarak da bilinir.

Yukarıdaki denklemlerde; \mathbf{E} elektriksel alan (V/m), \mathbf{H} manyetik alan (A/m), \mathbf{D} elektrik alan değişimi (Coulomb/m²), \mathbf{B} manyetik akı yoğunluğu (Tesla veya Weber/m²), ρ_v birim elektrik yük yoğunluğu (Coulomb /m³), \mathbf{J} akım yoğunluğu (A/m²), $d\mathbf{S}$ birim alan vektörü (m²), dv kapalı bir hacimde birim hacim diferansiyel elemanı, $d\mathbf{l}$ diferansiyel vektör elemanı yani bir konturun belirli bir noktadaki vektörel tanjantı, v ise bir $d\mathbf{l}$ vektörel yer değiştirme elemanının bir kontur üzerindeki hareketinde herhangi bir andaki hız vektörüdür (m/s).

Boşlukta bir **H** elektromanyetik alanın varlığı bir A alanının içinden geçen **Φ manyetik akısına** neden olur [27]:

$$\Phi = \mu_0 \mathbf{H}A \quad (3.7)$$

Burada μ_0 boşluğun **manyetik geçirgenliği** (*magnetic permeability*) olarak tanımlanır. **Φ** manyetik akısının birimi (Weber) veya (A/m)' dir. Manyetik akı çizgilerinin geçtiği ortamın herhangi bir birim alanında oluşan **manyetik akı yoğunluğu \mathbf{B}** aynı zamanda **manyetik indüksiyon şiddeti** (*magnetic inductance*) (Tesla) olarak aşağıdaki formüle göre tanımlanır [27]:

$$\mathbf{B} = \frac{\Phi}{A} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki (3.7) ve (3.8) denklemini beraber aldığımızda boşlukta yer alan bir manyetik alan içinde gerçekleşen manyetik akı şiddeti arasındaki temel bağıntı ortaya çıkar [27]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.9)$$

Uygulanan manyetik alan şiddeti **H** ve gerçekleşen manyetik akı yoğunluğu **B** ferromanyetik malzemelerde çok kullanılan elektromanyetizma kavramlarıdır. Malzemelerin diğer elektromanyetik parametreleri; örneğin kayıpları, manyetik geçirgenlikleri, polarizasyon şiddeti gibi kavramlar bu iki temel büyüklük ile değişkenlik göstermektedir [27].

Doğal manyetizmanın ve mıknatıslanma kutuplarının varlığı, zıt işaretli mıknatıs kutuplarının birbirini çektiğini, aynı işaretli kutupların ise birbirini ittiği bilinir. Dünya üzerinde de güney kutbundan kuzey kutbuna doğru akı gösteren zayıf bir manyetik alan bulunur. Manyetik kutuplar arasındaki çekim kuvveti COLOUMB yasasına benzer bir şekilde aşağıdaki gibi verilmektedir [54]:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{p_1 p_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki formülde p_1 ve p_2 kutup şiddetleridir, r kutup şiddetleri arasındaki mesafe vektörü, μ_0 ise serbest uzayın yani boşluğun manyetik geçirgenliğidir, değeri: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)'dir.

Şekil 3.2'de gösterilen basit akım ilmeği bir manyetik alan üreticisi olarak basit bir manyetik kutup oluşturur. Kutup algısı tarihsel arka plandan gelen farazi bir algıdır, bir akım ilmeği tarafından üretilen manyetik alan ve manyetik **çift-kutup** (*dipole*) momenti \mathbf{m} , 2 kutuplu doğal bir mıknatısın kutupları arasındaki manyetik alanı ve 2 kutup arasında oluşan manyetik moment ile özdeşleştirilmiştir. Akım ilmeğinden uzaklaştıkça akım ilmeği tarafından üretilen manyetik alanın farazi olarak 2 kutuplu bir mıknatısın kutupları arasındaki manyetik alana benzeşmesi nedeni ile 2 kutup arasındaki manyetik moment şu şekilde hesaplanır [54]:

$$\mathbf{m} = p \mathbf{l} \quad (3.11)$$

Burada p kutup şiddeti, \mathbf{l} ise akım ilmeğinden mesafedir. Kutup şiddeti p aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [27]:

$$p = \frac{\Phi}{\mu_0} \quad (3.12)$$

Buradan malzemelerin birim hacimleri için yeni bir nicelik türetebiliriz; \mathbf{M} birim hacimde yer alan manyetik moment miktarı ya da birim mıknatıslanma / manyetizasyon miktarı olarak aşağıdaki gibi formülize edilir [27]:

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{\text{Hacim}} \quad (3.13)$$

Elektrikte temel yük biriminin **birim elektrik yükü** olması gibi manyetizmada da temel manyetik birim (*magnetic dipole*) **manyetik çift kutup** 'dur. Yukarıdaki eşitlikleri beraber ele aldığımızda [27]:

$$\mathbf{M} = \frac{\Phi \mathbf{I}}{\mu_0 \cdot \text{Hacim}} = \frac{\Phi}{\mu_0 A} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad (3.14)$$

olur. (3.9) ve (3.14) beraber değerlendirildiğinde **B** manyetik akı yoğunluğunun iki farklı bileşeni olduğu görülür, ilki boşluktaki manyetik alandan gelen bileşen, diğere, ise malzemenin öz mıknatıslanma yeteneğinden kaynaklanan bileşendir [27]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.15)$$

Manyetik bir **H** alanı içinde bulunan ferromanyetik malzemelerin manyetik alana tepkisi malzemenin içinde manyetik **B** indüksiyon oluşturmasıdır ve aşağıdaki temel bağıntı ile özetlenir [27]:

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad (3.16)$$

Malzemelerin manyetik geçirgenlikleri sabit bir katsayı değildir, uygulanan manyetik alan şiddetine göre değişkenlik gösterir. Malzemeler manyetik alanlardaki tepkilerine göre ferromanyetik, paramanyetik, ferrimanyetik, amanyetik ya da diamanyetik malzeme şeklinde farklı tanımlamalar alabilir. Pratikte malzemeler için manyetik geçirgenlik tabiri yerine **bağlı manyetik geçirgenlik** (μ_r , *relative permeability*) teriminin kullanılması daha yaygındır [27]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.17)$$

Malzemelerin bağlı manyetik geçirgenlikleri mühendislik kavramı olarak işlevseldir. Boşluğun bağlı geçirgenlik değeri 1'dir. Malzemeler bağlı geçirgenliklerine göre şu şekilde sınıflandırılır, bağlı geçirgenliği 1 değerinden hafifçe düşük olan malzemeler diamanyetik malzemelerdir örneğin gümüş, altın ve bakır diamanyetik malzeme örneklerindedir. Bağlı geçirgenlik değeri 1 değerinden hafifçe büyük olan malzemeler paramanyetik malzemelerdir, Alüminyum, Wolfram ve Platinyum paramanyetik malzeme örneklerindedir. Bağlı manyetik geçirgenliği 10^3 değerinden büyük olan malzemeler ise ferromanyetik malzemelerdir. Demir, nikel ve kobalt bu türden malzemelere örnek olarak verilebilir. Transformator ve motor çelikleri ferromanyetik malzemelerdir.

Akım taşıyan düz bir iletkenin kendi etrafında manyetik alan oluşturduğundan bahsetmiştik. Oluşan manyetik alanın düzlemi tel doğrultusuna diktir. Bu alanın büyüklüğü ise tel dışındaki bir r mesafesi için Ampere ve Biot-Savart yasaları ile hesaplanabilir. Ampere yasası (3.1) eşitliğinde verilmişti. Biot-Savart yasası diferansiyel denklem olarak aşağıdaki gibi verilir [54]:

$$d\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{a}}{r^3} \quad (3.18)$$

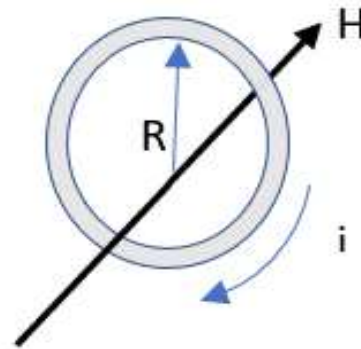
Burada r şiddeti hesaplanan manyetik alanın tele uzaklığı, l ise iletken uzunluğudur. Böylece hesaplanan manyetik alan şiddeti \mathbf{H} (A/m) telden geçen akımın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [54]:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I}}{2\pi r} \quad (3.19)$$

Çapı R olan bir telden geçen \mathbf{I} akımın tel merkezinde yarattığı manyetik alanın şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanır [54]:

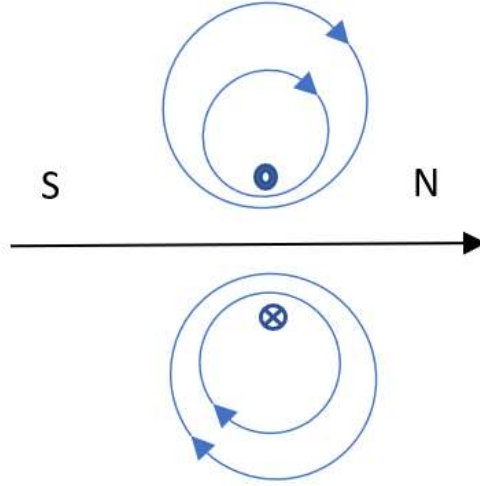
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I}}{2R} \quad (3.20)$$

Şekil 3.2' de içinden akım geçen tel halkanın ürettiği manyetik alanın basit gösterimi yer almaktadır. Şekil 3.3' de ise içinden akım geçen bir halka formunda telin (**solenoid** veya **sargı**' da) merkezinde oluşan manyetik alanın kutup formu verilmiştir.



Şekil 3.2: Kapalı bir akım ilmeğinin merkezinde oluşan manyetik alan [54].

Elektrik akımı ile düzgün bir manyetik alan oluşturmanın yöntemi akım ilmeklerinden selenoid yani sargı üretmektir. Toplam sarım sayısı N olan, uzunluğu L olan ve içinden I akımı geçen bir sargının merkezideki manyetik alan aşağıdaki eşitlik (3.21) ile verilir:



Şekil 3.3: Bir akım ilmeğinin içinden geçen manyetik çift kutbun farazi gösterimi [54].

$$\mathbf{H} = \frac{NI}{L} = n\mathbf{I} \quad (3.21)$$

Burada n , birim uzunluktaki sarım sayısıdır, sarım yoğunluğu olarak da tanımlanır. Zamana bağlı değişkenlik gösteren bir manyetik akı içinde yer alan sargı uçlarında gerilim indüklenir. Bu gerilime **elektromanyetik indüksiyon** denir. İndüklenen gerilim zamana bağlı olarak değişen manyetik akının değişim ile orantılı fakat akı yönü ile ters yönlüdür. (3.2) denkleminde verilen Faraday yasası bir selenoidin sargı uçlarında indüklenen gerilimin hesaplanması (V) için aşağıdaki şekilde tanımlanır [54]:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemde Φ , N sarımlı bobinin ortasından geçen akı miktarı, $(d\Phi/dt)$ ise bu akının zamanla değişimidir. Akının, akı değişiminin ve bobin uçlarında oluşan elektromotor kuvvetin (gerilimin / potansiyel enerjinin) her biri birer vektörel büyüklüktür. Manyetik geçirgenliklerine göre malzemeleri daha önceden sınıflandırmıştık. Ferromanyetik malzemelerde (3.17) bağıntısında verilen geçirgenlik değerinin tek değerli doğrusal bir terim

olmadığı ifade edilmişti. Manyetik geçirgenlik μ uygulanan manyetik alan \mathbf{H} ile değişim gösterdiği gibi (χ) **manyetik alınganlık** da malzemenin **mıknatıslanabilirlik** özelliğinin bir ölçüsü olarak uygulanan manyetik alının şiddeti ile değişkenlik gösterir [54]:

$$\chi = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}} \quad (3.23)$$

(3.17)' de verilen bağıl geçirgenlik ile (3.23)' da verilen manyetik alınganlık arasında aşağıdaki ilişki bulunur [54]:

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (3.24)$$

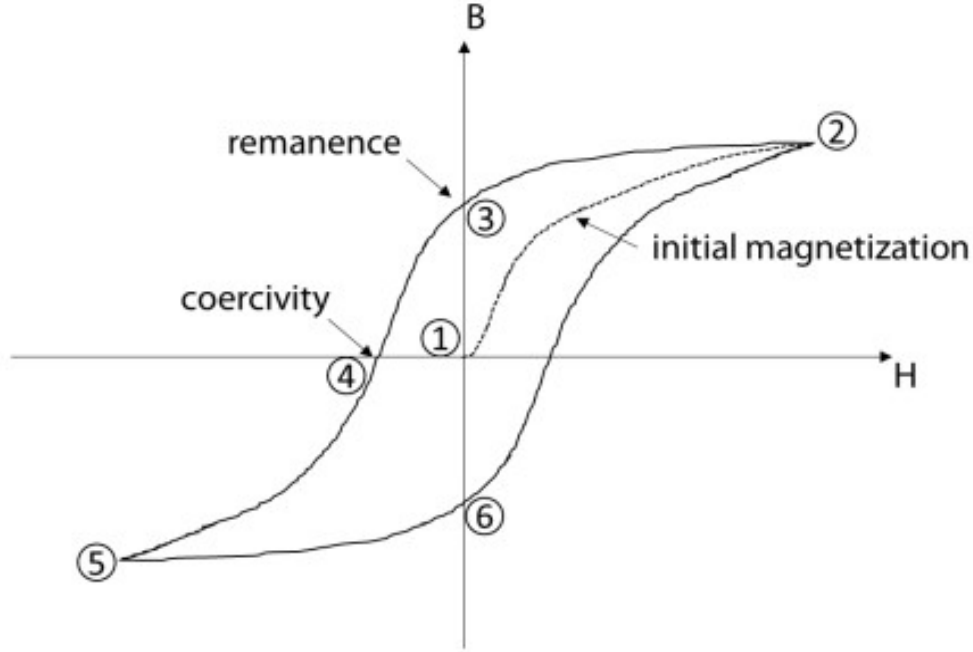
Manyetik alan içinde bulunan ferromanyetik malzemedeki oluşan manyetik akı yoğunluğunun 2 bileşeni olduğu (3.15)'de verilmişti. Bu bağıntıda mıknatıslanma \mathbf{M} yerine (3.23)' dan elde edilen karşılığı yazılırsa malzemelerin manyetik geçirgenliği ile manyetik alınganlığı arasında aşağıdaki bağıntı elde edilir [54]:

$$\mu = \mu_0(\chi + 1) \quad (3.25)$$

Ferromanyetik malzemeler kolay mıknatıslanabilir malzemelerdir. Küçük bir dış manyetik alan etkisi altına girdiklerinde hemen doyum mıknatıslanma M_s değerine yaklaşırlar. Dış manyetik alan kaldırıldığında bu tür malzemelerde bir miktar kalıcı mıknatıslanma görülür. Bazı malzemelerin doyum mıknatıslanma değerine ulaşmak için çok daha yüksek çevresel manyetik alan ihtiyacı vardır. Bu tür malzemelerde dış ortam manyetik etkisi ortadan kaldırılrsa dahi yüksek seviyede kalıcı mıknatıslanma görülür. Ferromanyetik malzemeler AC akım kökenli manyetik alan altında **histerisiz çevrimi** (*hysteresis loop*) gösterirler. Ferromanyetik malzemelerin bu karakteristik özelliği manyetik akı ile enerji transferinde en önemli kayıp kaynaklarından biridir.

Aşağıda Şekil 3.4' de ferromanyetik malzemelerin karakteristik histerisiz çevrimi verilmiştir. Şekil 3.4' deki grafikte basitçe gösterildiği gibi, bir ferromanyetik malzemenin bulunduğu dış ortamı H manyetize etmeye başladığımızda; (1) malzeme mıknatıslanmaya (M) ya da diğer bir ifade ile malzeme içinde manyetik indüksiyon (B) oluşmaya başlar. Dış ortam manyetizasyon arttırıldıkça malzemenin mıknatıslanması ve manyetik indüksiyon

seviyesi bir doyum noktasına ulaşır (2). Bu noktada dış ortam manyetizasyon sıfırlanırsa ferromanyetik malzemede bir miktar indüksiyon ve mıknatıslanma kalır (3).



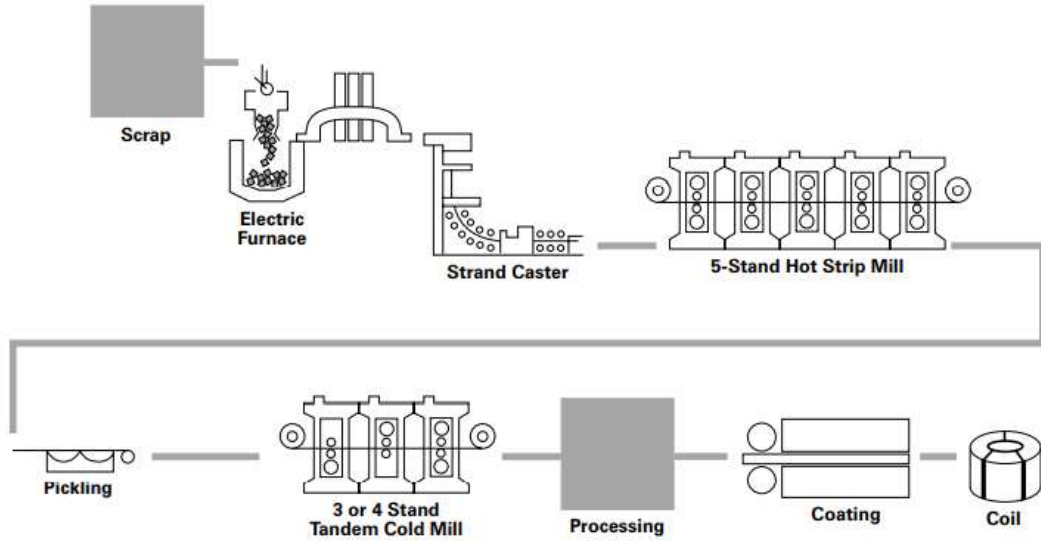
Şekil 3.4: Ferromanyetik malzemelerde karakteristik histerisiz çevrimi [54].

Bu seviyeye kalıcı mıknatıslanma (M_r) ya da kalıcı indüksiyon (B_r) denir. Kalıcı mıknatıslanmayı veya indüksiyonu yok etmek için ters yönde manyetik alan uygulamak gerekir. Kalıcı manyetik indüksiyonun ve mıknatıslanmasının sıfırlandığı ters yönde manyetik alan büyüklüğüne **koersiv manyetik alan** (H_c) büyüklüğü denir (4). Ters yönde dış manyetik alan büyüklüğü arttırılmaya devam ederse malzeme yeni bir doyum noktasına ulaşır (5). Aynı şekilde ters yönlü manyetik alan sıfırlanırsa malzemede ters yönlü kalıcı bir mıknatıslanma ve indüksiyon oluşur (6). AC akım ile tetiklenen bir manyetik alanda akımın frekansı ve oluşturulan manyetik alanın doyum manyetizasyon değerine ne kadar yakın olduğu ile ilgili olarak bu çevrim sürekli tekrarlanır. Ferromanyetik bir malzemede B-H kapalı eğrinin kapladığı alan basit olarak malzemenin histerisiz kaybı' na denk gelir.

3.2 Tane Yönlendirilmiş Elektrik Çeliklerinin Üretimi

GO elektrik çeliği üretim prosesleri temelde 2 tiptir. İlk tipte öncelikle Fe-Si alaşımının yüksek fırınlarda slab olarak üretilmesi sağlanır daha sonra slab formundaki yarı mamulün 1320 °C' ye ısıtılması ve sıcak haddelenmesi ile kalınlığı düşürülür, daha sonra 1 veya 2 kademede soğuk haddeleme ile son kalınlığına getirilir ve son rekristalizasyon tavlaması ile

tane yönlenme tekstürü elde edilmiş olur. İkinci tip prosesi yürüten bazı üreticiler ise uyguladıkları sürekli döküm yöntemleri ile direkt pikten üretim yapmaktadırlar. Aşağıda Şekil 3.5’ de bu tarz üretim yapan bir firmanın basit süreç şeması verilmektedir



Şekil 3.5: AK STEEL firmasının GOES üretim şeması [56].

Çelik levha soğuk haddelenme sonrası %0,003 C (karbon) değerinin altına düşürülecek şekilde uygun atmosferde dekarbürüze edilir. Bu esnada birincil rekristalizasyon yapısı elde edilir. Levha yüzeyleri MgO (magnezya) ile kaplanır ve hidrojen atmosferinde 1150 – 1200 °C sıcaklık aralığında bobin halinde kabin fırın içinde ikincil rekristalizasyon tavlamaına sokulur. Kabin fırın tavlamaı esnasında {110} <001> tane yönlenmesini elde edebilmek için; tane yapısındaki safsızlıklar çıkarılır, tane irileşmesini engelleyen inhibitörler çöktülür ve yüzeyde oluşturulan MgO tabakası tarafından absorbe ettirilir. İnhibitör olarak en fazla MnS (manganez sülfid) kullanılır. HiB GO çelik üretimi CGO üretimlerinden birkaç noktada farklılaşmaktadır; örneğin ilk tipte, inhibitör olarak MnS’e ilave olarak AlN (Alüminyum Nitrit) kullanılır ve soğuk haddelenme daha yüksek bir şekil değiştirme oranı ile tek kademede yapılır. Üreticiler arasında HiB üretim veya CGO üretim proseslerinde inhibitör tiplerinde, soğuk haddelenme oranlarında ve kademe sayılarında farklılıklar görülebilmektedir.

Norman P. GOSS tarafından keşfedilen tekstür kontrolü yaklaşımı elektrik çelikleri üretiminde çığır açan bir aşama olmuştur. GOSS’un buluşu ve devam eden geliştirme çalışmaları ile elektrik çeliklerinin manyetik geçirgenliği ve akı kapasitesi birkaç katına çıkarılmıştır. Tekstür kontrolünün ilk dönemlerinde haddelenme yönünde elde edilen

anizotropik kazanımlar sadece soğuk haddeleme ve tavlama süreçlerinin ardışık ve uygun diziliminden elde edilmişti. GOSS, söz konusu proses sonunda yaptığı X-ışını çalışmalarında tane yapısının tek bir tane gibi davranmaya yaklaştığını ve tanelerin tane yapısı içinde rast gele yönelmiş olduğunu düşünmüştü. GOSS' un yaklaşımındaki eksikliği R. M. Bozorth [57] daha detaylı X- ışını çalışmaları ile giderdi ve $\{110\}\langle 001 \rangle$ yönünde kuvvetli bir tercihli yönelme olduğunu ispatladı. Bozorth'un düzeltmesi Norman P. GOSS 'un keşfinin pratik sonuçlarını değiştirmeyecek bir düzeltme olduğundan tercihli yönelmiş tane yapılı çelikler konusunda çığır açıcı çalışmaların GOSS'un keşfi ile başladığı kabul edilir.

Keşfi takip eden yıllarda, $\{110\}\langle 001 \rangle$ tercihli GOSS yönelmesinin manyetik parametrelerdeki etkisi gözlemlenebilmekle beraber, tane yapısında tercihli yönelme oluşum mekanizması çok tartışıldı. Araştırmalar genellikle rekristalizasyon ve tane büyümesi konularına odaklandı. İlk defa 1949 yılında Cecil G. Dunn ve arkadaşları tarafından [58] ikincil rekristalizasyon prosesinin tercihli yönelmenin olduğu süreç olduğu belirtildi. Birincil kristalizasyon matrisi içindeki milyonlarca taneden son tavlama aşamasındaki ikincil rekristalizasyon süreci esnasında tercihli yönelmiş ve anormal seviyede büyümüş bir tane oluşumunu tespit ettiler. Paul A. Beck [59], ikincil rekristalizasyon süreci sonrasında ince ve yönelmiş tane yapısı elde etmenin koşullarını, tane büyümesini engelleyecek şekilde ikincil rekristalizasyon öncesi yapıya inhibitörlerin dahil edilmesi veya birincil küçük taneli yapıda bulunan tercihli yönelmiş tanelerin sayısını attırılması olarak önerdi. J.E. May ve D. Turnbull [60], ince taneli ticari GO çeliklerinin üretimi için yapıya tane irileşmesi önleyici ve tercihli yönelme katkısı sağlayıcı MnS ilavesi yapılabileceğini gösterdi. Tercihli yönelme konusunun araştırıldığı bu erken dönemde elde edilen bilgiyi şu şekilde özetlemek mümkündür; (1) ikincil rekristalizasyon aşamasında $\{110\}\langle 001 \rangle$ tercihli yönelmenin geliştirilebilmesi için birincil kristal matrisinde $\{110\}\langle 001 \rangle$ doğrultularında yönelmiş taneler ihtiyaç bulunmaktadır. (2) İkincil kristalizasyon aşamasında tercihli yönelmenin kaynağı olan birincil kristalizasyondan kalan $\{110\}\langle 001 \rangle$ tercihli yönelmiş tanelerin aşırı büyümesi önlenmelidir. (3) Yapıda, kuluçka sıcaklığında (tavlama sıcaklığı) $\{110\}\langle 001 \rangle$ tercihli yönelmiş tanelerin büyümesini sağlayacak inhibitör bileşikler hazır olmalıdır. Yüksek sıcaklıkta tavlama yapılması ortalama tane büyüklüğünü attırırken $\{110\}\langle 001 \rangle$ tercihli yönelmeyi sağlayan etkenleri azaltmaktadır.

1920' lerin başlarında silisyum alaşımlı çelik sacların kendiliğinden anizotropik bir karakter gösterdiği biliniyordu. Fakat yöntem ilk defa 1934 yılında Norman P. GOSS tarafından [6] patentli bir endüstriyel üretim metot olarak tescil edildi. İlk ticari ürünler “soğuk haddelememiş tane yönlendirilmiş” elektrik çeliği (CRGO) tanımlaması ile 0,32 mm kalınlığında (1,5 Tesla, 50 Hz, 1,5 W/kg) kayıp değerinde 1939 yılında üretildi. Tane yönlendirilmiş silisyumlu elektrik çeliği üretiminde 21. yüzyıl başına kadar uygulanan üretim akış şeması basitçe Şekil 3.6' da verilmiştir.[61]

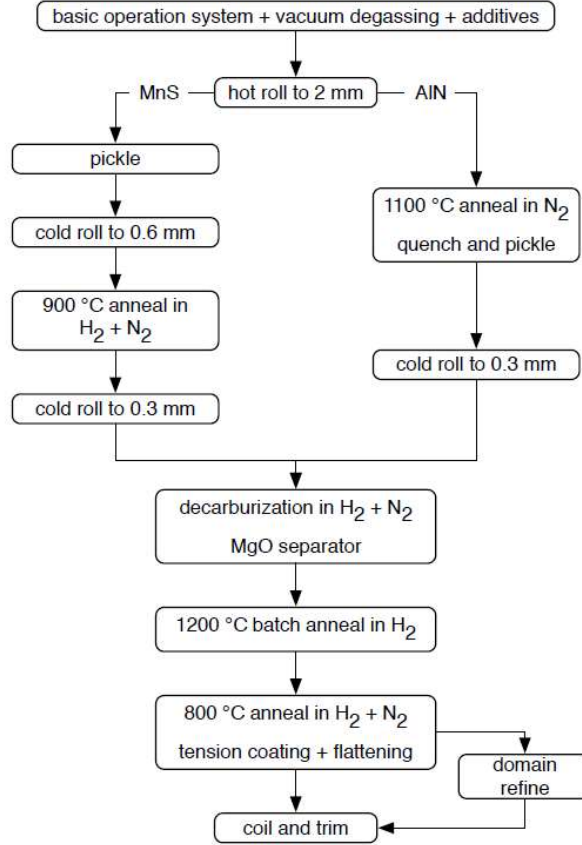
Akış şemasının sol tarafı konvansiyonel CRGO üretim yöntemidir. 1960' lı yıllara kadar bu yöntem ile üretim yapılmıştır. Başlangıçta sıcak haddelemeden elde edilmiş 2,0-2,5 mm kalınlığındaki slab yüzey oksitlerinden asit banyolarında temizlenir ve 0,6 mm kalınlık değerine kadar soğuk haddeleme ile kalınlıkları düşürülür. Bu aşamadan sonra malzemeye yeniden kristalleşme (ya da rekristalizasyon) tavlaması yapılarak nihai kalınlığa geleceği 2. kademe soğuk haddelemeye hazırlık yapılır.

Final soğuk haddeleme sonrasında dekarbürizasyon ile karbon oranı %0,003 değerinin altına düşürülürken yüzeye MgO kaplaması uygulanır, ikincil yeniden kristalleşme tavlaması esnasında (1200 °C, 24 saat) daha da saflaşma gerçekleşir, MgO yüzeydeki Silisyum ile reaksiyona girerek magnezyum silikat Mg_2SiO_4 ' dan oluşan **Forsterite** denilen cam filmi bir tabaka meydana getirir. Son olarak lamine saca düzleştirme tavlaması uygulanır, fazlalık MgO yüzeyden temizlenir ve yüzeye ince bir fosfat kaplama uygulanır

Fosfat kaplama yüzeydeki magnezyum silikat Mg_2SiO_4 tabaka ile reaksiyona girerek güçlü bir elektriksel direnç veren bir tabakaya dönüşür. Sıcak haddeleme esnasında küçük parçacıklar halinde Manganez-Sülfür ($MnSO_4$) bileşeni tane irileşmesi önleyicisi olarak kompozisyona ilave edilir, bu faz soğuma esnasında yapıdan ayrışır.

Sıcak haddeleme esnasında kristalografik olarak diğer doğrultularda olduğu gibi GOSS doğrultusunda da $\{110\}$ $\langle 001 \rangle$ taneler oluşur, bir veya 2 kademe uygulanan soğuk haddelemeden sonra GOSS tekstürüne sahip taneler dekarbürizasyon tavlaması esnasında yeniden kristallenir, malzeme bir kristalografik yapısal hafıza gelişir. Bu aşamada tane büyüklükleri ortalama 0,02 mm çapındadır, 800 °C civarında $MnSO_4$ parçacıklarının diğer yönlendirmelerdeki tanelerin büyümesini engellemesi nedeniyle GOSS tektürüne sahip taneler büyümeye başlar. İkincil yeniden kristalleşme aşamasında her bir GOSS tanesi yaklaşık

(10^6 - 10^7) adet miktarda taneyi bünyesine alarak, lamine sacın tüm kalınlığının kapsayacak şekilde ortalama tane çapı 10 mm'e kadar büyüyerek GOSS yönlenmesindeki tanelere dönüşür. Konvansiyonel üretim akışı ile üretilen CRGO saclarda tüm taneler ideal GOSS yönelememesinde değildir ama sapma miktarları ideal Goss doğrultusundan en fazla $5-7^\circ$ seviyesinde oluşur.



Şekil 3.6: CRGO/CGO ve HiB/HGO elektrik çeliği üretim akışları [61].

1960'lı yılların ortalarında, yüksek manyetik geçirgenlikli (HiB) veya (HGO) olarak tanımlanan elektrik çeliklerinin geliştirildiği duyuruldu. Üretim akışı Şekil 3.6' da tanımlanan akışın sağ tarafında gösterildiği gibi, soğuk haddeleme süreçlerinden bir tanesi eksiltilerek sadeleştirildi. Slab kompozisyonuna ergime esnasında MgO yerine %0,025 oranında Alüminyum Nitrit ilave edildi. Bu sayede (AlN) Alüminyum Nitrit bileşiği tane irileşme inhibitörü olarak iş görür hale geldi. Son üründe çok daha keskin bir GOSS tekstürü (maksimum 3° sapma açısı) verecek şekilde elde edilirken, tane bükülüklerinin 0,3 mm ortalama seviyesinde gerçekleşmesi sağlanmış oldu. Bu sayede efektif manyetik indüksiyon değerinin ($B_{eff} = 1,7$ Tesla) olduğu indüklenme koşullarında μ manyetik geçirgenlik değeri

konvansiyonel saca göre 3 kat daha fazla olarak elde edildi. Keskinleştirilmiş yönlenme tekstürü sayesinde ve sac yüzeyinde çekme gerilimi formu oluşturan gerilim kaplaması sayesinde manyetik striksiyon özelliği daha düşük seviyede gerçekleşti. Çekme gerilimi ihtiva eden kaplama Eddy kayıplarının da azalmasına yardımcı olmakla beraber, esas kayıp kazanımı histerisiz kayıplarının düşürülmesi ile elde edilmiştir. Böylece %30-40 seviyesinde histerisiz kaybı kazanımı geliştirilmiş tane yönlenmesinden elde edilmiştir. Yüksek geçirgenlikli HGO elektrik çelikleri 1968 yılından itibaren ticari ürün olarak piyasada yer almaya başlamıştır.

Transformatör nüve kayıplarını azaltmak için devam eden çalışmalar ve enerji verimliliği ile ilgili kurumsal baskılar ile daha ileri gelişmelere yol açmıştır. 1980' lerde yine Japonya'da lazer yöntemi ile domainleri düzenlenmiş tane yönlendirilmiş GO sac çalışmaları yürütülmüştür. 1983 yılında piyasaya (0,85 W/kg, 1,7 T, 50 Hz) kayıp değerinde 0,23 mm kalınlığında elektrik sacı verilmiştir. [61]

3.3 Transformatörlerde Nüve Kayıpları

Transformatör nüvesi amacı, primer sargı tarafından oluşturulan manyetik akının sekonder sargılarda gerilim ve akım indükleyebileceği manyetik akı iletim ortamı sağlamaktır. Transformatör nüvesi kapalı bir manyetik akı devresi olarak iş görürken nüve kaynaklı 2 tip kayıp devreye girer; bunlar **histerisiz kayıpları** ve **Eddy** kayıplarıdır. Bu kayıplar temel olarak ısınma şeklinde ortaya çıkar. Nüve içinde primer sargılara uygulanan alternatif gerilim nedeni ile yönü ve genliği sürekli değişen manyetik akı etkisi ile nüveyi oluşturan lamine saclarda sürekli olarak uzama ve kısalma oluşur, bu etkiye **manyetik striksiyon** denir. Uygulanan indükleyici gerilim ile sürekli yönü ve doğrultusu değişen manyetik genleşme ve büzüşmeler nüvede ses oluşumu gerçekleştirir. Manyetik striksiyon nedeni ile oluşan ses de bir enerji kaybıdır.

Bir transformatör enerjilendirildiğinde yük çekilip çekilmemesinden bağımsız olarak nüvede **boşta kayıp** ya da **nüve kaybı** ya da **demir kaybı** adı verilen kayıp oluşur. Bu kayıp sabit bir kayıptır ve transformatörden çekilen yüke göre bir değişkenlik göstermez. Transformatörden yük çekilmeye başlandığında sargıların elektriksel direncinden kaynaklanan kayıplar ortaya çıkar. Transformatörde toplam kayıp aşağıdaki formül ile verilebilir: [62]

$$P_t = P_o + P_k \quad (3.26)$$

Burada P_t toplam kayıp, P_o boşa kayıp ve P_k yükte kayıp değeridir. Trafonun boşa kayıp değerinin temel etkenleri nüve malzemesinin karakteristik histerisiz çevrimi, indükleyici gerilim seviyesi, indükleyici gerilim frekansı ve dielektrik özellikleridir. Transformatörde boşa kayıplar aşağıdaki formül ile verilir: [62]

$$P_o = P_{hys} + P_{eddy} + P_{ano} \quad (3.27)$$

$$P_o = (k_h \cdot f \cdot B_m^n) + (k_g \cdot f^2 \cdot B_m^2) + (k_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5}) \quad (3.28)$$

Yukarıdaki denklemlerde P_{hys} histerisiz kaybını, P_{eddy} nüvenin Eddy akımları nedeni ile oluşan kaybını, P_{ano} ise nüvedeki anormal kayıpları temsil eder. k_h , k_g , k_a deneysel olarak oluşturulan sabit sayılar olmakla beraber, B_m nüvede oluşacak maksimum indüksiyon seviyesi, f ise indükleyici gerilimin frekansı, n Steinmetz katsayısıdır ve değeri 1.6 'dır. Boşa kayıplar malzemenin mikro yapısı, laminasyon tabakaları arasındaki iletkenlik problemleri ile ilgilidir. Histerisiz kayıpları düşük frekanslarda doğruya yakın hesaplanabilir, kapalı histerisiz çevrimin alan miktarı kaybın değerini verir, düşük frekanslarda boşa kaybın en önemli bileşenidir. Eddy kayıpları ise boşa kayıpların diğer önemli bileşenidir, nüvenin manyetik indüksiyon seviyesi e değişim gösterir. Eddy kayıplarını azaltmak için nüvenin sıkı dizim karakteri, laminasyon kalınlıkları, kesme çapaklarından kaynaklanabilecek nüve kısa devreleri ve laminasyonlar arasındaki elektriksel direnç seviyesi dikkate alınır. Nüve anormal kayıpları histerisiz ya da Eddy kayıpları ile ilişkilendirilmeyen diğer kayıp türüdür, manyetik domain sınırı hareketleri, yönlendirme paterni, malzeme kafes yapısı, akı hareketi önündeki engeller, manyetik akı vektörel yön değişim noktaları, nüve süreksizlikleri ve manyetik genleşme gibi pek çok etkenden etkilendiği varsayılır ve üzerinde araştırmalar devam etmektedir. [62]

Nüve kayıpları her ne kadar enerjilendirilmiş ve yük çekilen bir transformatörün toplam kayıplarında düşük bir orana tekabül ediyor olsa da üretilen ve iletilmesi gereken elektrik enerjisinin yaklaşık %5' nin nüve kayıpları olarak yitirildiği varsayılmaktadır. [61] Tüm dünyada elektrik iletim ve dağıtım sisteminde yer alan tüm transformatörlerin benzer bir

şekilde kayıp verdiği düşünülürken çok büyük miktarda elektrik enerjisinin daha tüketim noktasına gelemeden kayıp haline geldiği anlaşılabilir.

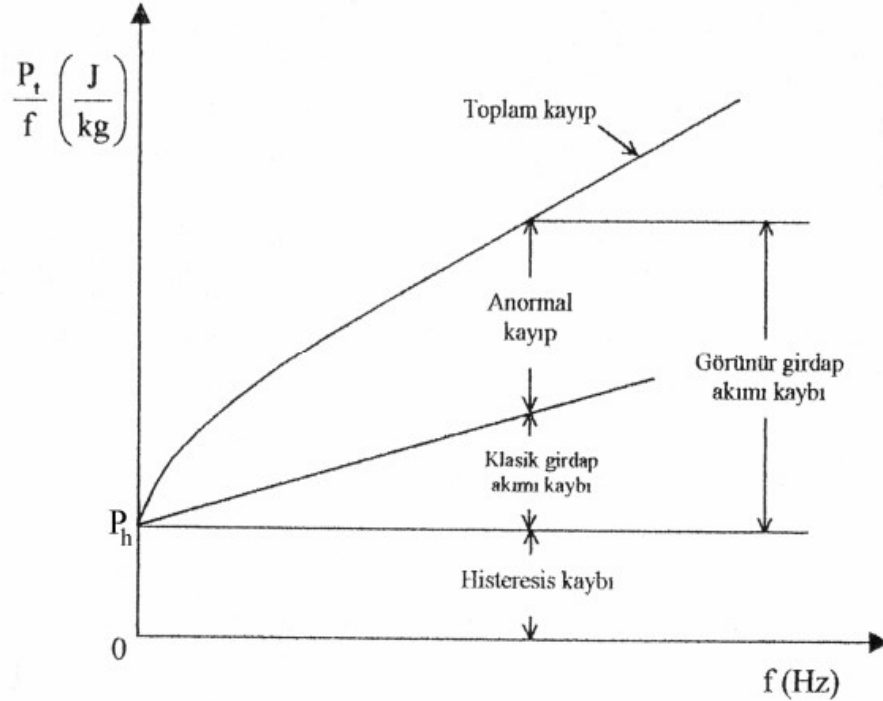
Nüve kaybının kaynaklarından bahsederken referans verdiğimiz kaynağa göre; [61] nüve demir kaybının temel bileşenlerinden biri olan histerisiz kaybı manyetik alan indükleyici primer gerilimin frekansı ile doğru orantılıdır. Aynı zamanda nüve malzemesinin karakteristik histerisiz eğrisinin kapalı çevrim alanına, yani nüvede kullanılan ferromanyetik sacın doyum indüksiyon ve mıknatıslanma (B_s / M_s) değerlerine, kalıcı indüksiyon ve mıknatıslık değerine (B_r / M_r) ve koersivite değerine (H_c) bağlı olarak değişen bağlı manyetik geçirgenliğine (μ_r) bağlıdır. Eddy kayıpları ise; indükleyici gerilimin frekansına ve akının hareket halinde olduğu kesit alanının karesi ile orantılıdır. Histerisiz kayıplarını azaltmak malzemenin manyetik karakteristiklerini iyileştirmekle mümkün iken, Eddy kayıpları ise manyetik akı hatlarının birbirlerine elektriksel direnç gösteren ince lamine saclar ile oluşturulması ile azaltılabilir. Bir nüvede histerisiz ve Eddy kayıplarının basit formülü aşağıdaki gibidir [61]:

$$W_h = k_1 \cdot f \cdot B_{max}^n \quad (3.29)$$

$$W_e = k_2 \cdot f^2 \cdot t^2 \frac{B_{eff}^2}{\rho} \quad (3.30)$$

Formüllerde; k_1 ve k_2 malzeme sabitleridir, f frekanstır. Laminasyon kalınlığı t (mm) cinsindedir. Sacın elektriksel direnci ρ (ohm.cm²), sacda oluşan en büyük akı yoğunluğu B_{max} değeri, B_{eff} ise uygulanan alternatif akımın etkin (*rms*) değerine tekabül eden akı yoğunluğu değeridir. n ise malzemenin bir fonksiyonu olan Steinmetz üstelidir, değeri 1,6 olmakla beraber yüksek akı yoğunluklarına ulaşılan malzeme tipleri için 1,6 ile 2,5 değerleri arasında değişebilir. Eddy akımları kayıplarının doğası gereği karmaşık bir yapıda olmakla beraber, basit olarak 2 bileşenden oluştuğu varsayılır. İlki yukarıdaki (3.30) numaralı denklemde tanımlandığı gibi kalınlığın, uygulanan indüksiyonun ve frekansın karesi ile doğru orantılı, malzemenin elektriksel direnci ile ters orantılı bileşendir. İkincisi malzemenin kristalografik yapısına, tane büyüklüğüne, malzeme içindeki domain tekstürü oluşumuna ve akı yönü değiştikçe ortaya çıkan domain hareketliliğine bağlı oluşan **anormal kayıplar** ya

da **kalıcı kayıplar** olarak bilinen kayıp türüdür. Transformatör nüvesindeki kayıpların toplam kayıptaki payları aşağıda Şekil 3.7' de basitçe gösterilmiştir.

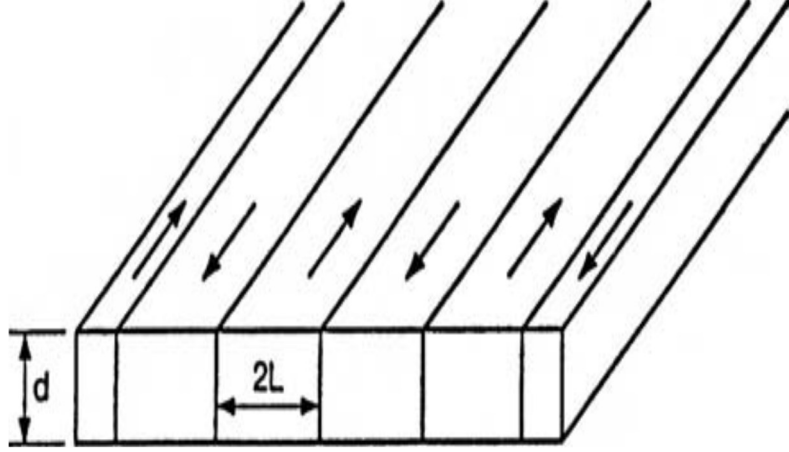


Şekil 3.7: Elektrik saclarında kayıp dağılımı [63].

Anormal kayıpların çekirdek kayıplarının yaklaşık yarısı kadar olduğu önerilir. Anormal kayıplar nüve sacı malzemesinde uygulanabilecek özel süreçler ile önemli ölçüde azaltılabilir.

Bu konu üzerine geçmişte pek çok çalışma yapılmıştır, günümüzde ise hala devam edilmektedir [61] 19.yy. sonlarında ilk transformatörler üretildiğinde nüve sacı dövme demirden üretilmişti. 20.yy. başında bir miktar Silisyum veya Alüminyum katkısının manyetik kayıpları önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştü. Bu noktadan sonra elektrik çelikleri için bilimsel ve endüstriyel literatür oluşmaya başlamıştır. Silisyum katkısının histerisiz kayıplarını düşürdüğü, manyetik geçirgenliği arttırdığı ve elektriksel direnci arttırdığı dolayısıyla Eddy kayıplarını azalttığı zamanla tespit edildi. Silisyumun oranı çeliği sert ve kırılğan bir hale getirmesi nedeni ile (4,5%) ile sınırlıdır. Kristal yapısındaki safsızlıkların elimine edilmesi, tane yönlenme tekstürünün iyileştirilmesi ve ana yapıdaki Karbon oranının düşürülmesi ile zaman içinde nüve saclarından kaynaklanan histerisiz kayıp değerleri önemli oranda azaltıldı. Kayıp değerinde 20. yüzyıl başında elde edilen (1,5 T ve 50 Hz, 7 W/kg) değerinden günümüz koşullarında 0,7 W/kg kayıp değerine sahip ticari elektriksel çeliklere gelinmiş oldu.

Anormal Eddy kayıpları, manyetik domain duvarlarının hareketliliği, domain sıklığı ile doğru orantılı ve sac kalınlığı ile ters orantılı olarak ortaya çıkmaktadır. Aşağıda Şekil 3.8’ de ideal bir tane yönlendirilmiş çelikte 180° doğrultuda sonsuz olmayan bir şekilde eşit aralıklarla uzayan domainler gösterilmiştir. Eddy akımı kayıplarının $2L$ genişliğindeki domain genişliklerinin L değerine yaklaştıkça azalacağı öngörülebilir.



Şekil 3.8: Manyetik domainlerin basit gösterimi [61].

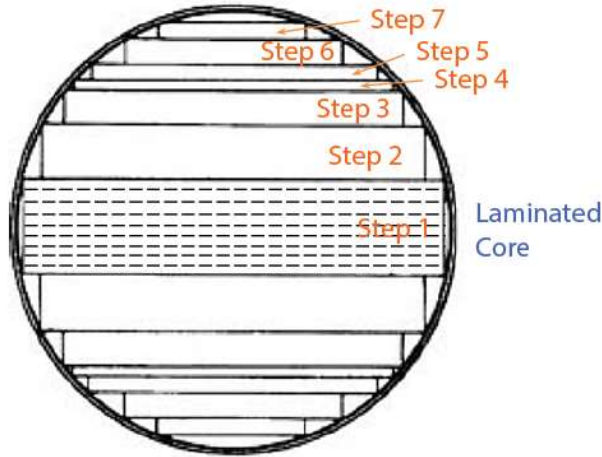
Şekilde 3.8’ de ok yönleri domain içindeki manyetizasyon doğrultularını göstermektedir. GO elektrik sacına uygulanan gerinimin manyetik domain aralıklarını küçülttüğü dolayısıyla nüve kayıplarını azalttığı uzun yıllardır bilen bir olguydu. Bu prensibe dayanarak sac üzerinde gerilim kaplaması metotları geliştirilmiştir. Gerilim kaplaması saca daha düşük olan genleşme katsayısı nedeni ile soğuma fazında etkimeye başlar. Bu aşamada kaplama üzerinde belirli aralıklarla RD doğrultusuna dik olacak şekilde çentikler (veya çizikler) oluşturulursa söz konusu çizikler etrafında yeni ve daha sert bir gerilim profili oluşturulur, bu sayede sac içinde akan ve sürekli yön değiştiren akı yolunda (lokal olarak) yüksek akı yoğunluğu bölgeleri ortaya çıkar ve bu nedenle manyetik akının aşırı yoğunlaştığı bölgelerde akı en yakınındaki laminasyon üzerinden akmaya meyilli hale geleceğinden toplam kayıpta artış olurdu. Bu sorun mekanik çentikler yerine lazer ile iz oluşturma yöntemi ile aşıldı. Yoğunlaştırılmış ve odaklanmış lazer ışını uygulanan sac yüzeyin üst tabakalarında buharlaşma etkisi ile birkaç atmosfer basınç altında düzenli aralıklarla elastik ve plastik deformasyon bölgeleri oluşturulur.

Plastik deformasyon nedeni ile yüksek yoğunlukta ve karmaşık yapıya dislokasyonların sac yüzeyinde kalıcı gerinimler oluşturması sağlanır. Bu sayede manyetik domain uzunlukları

belirlenmiş olur. Lazer ışın kaynağı şiddeti sadece en üst tabakada plastik bir deformasyon / çentik oluşturacak şekilde ayarlandığından sonrasında tekrar yüzeyin elektriksel izolasyonu gerekli hale gelir. Önemli bir detay şudur ki, yukarıda tanımlandığı şekilde domain düzenlemesi yapılarak oluşturulmuş kalıcı gerinimler 500 °C sıcaklığın üzerinde yapılacak ısı işlemler neticesinde ortadan kaybolur niteliktedir [61].

3.4 Transformatorlerde Nüve Yapısı

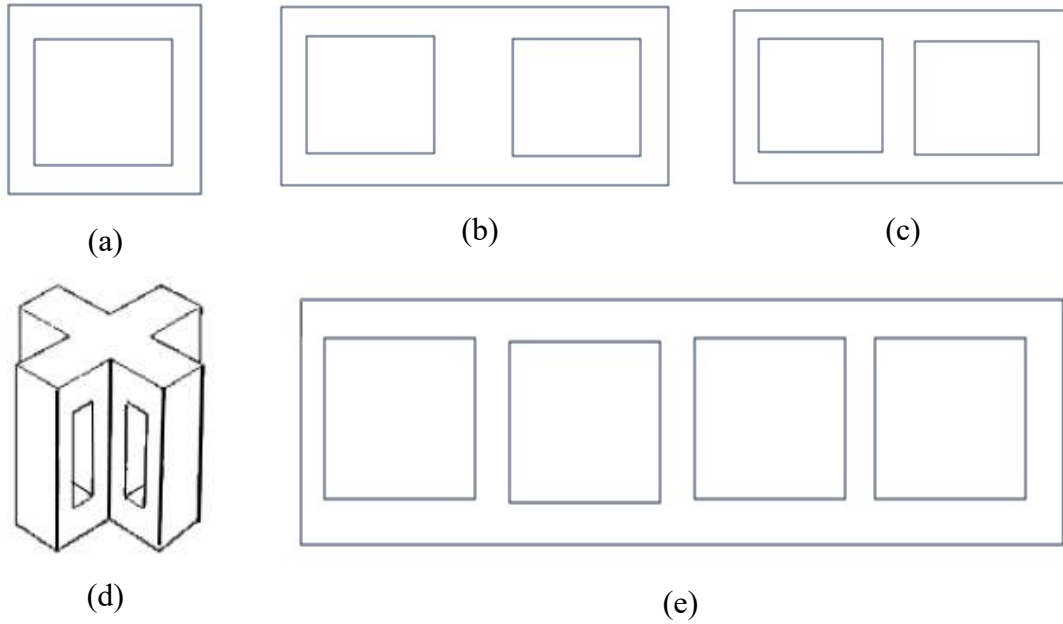
Nüve malzemesinde elde edilen gelişmelere paralel olarak transformator üreticileri zaman içinde nüve dizaynlarını sürekli geliştirerek toplam nüve kaybını azaltmaya çalışılmıştır. Günümüzde trafo nüve tasarımları 40-50 yıl öncesine göre yüzeysel olarak benzemekle beraber detayda pek çok ilerleme ve önemli kazanımlar elde edilmiştir. Nüve sacları kapalı bir manyetik devre oluşturmak için uygun bir dizim tezgâhında **bacak** şeklinde ayrı ayrı ve mümkün olduğu kadar daire kesitinde dizilirler. Bu sayede bobin (ya da sargı) iç çapında kalan silindirik dairesel hacim optimum bir ölçekte değerlendirilmiş olur. Adımlandırılmış kesitin daire formuna ne kadar yaklaşacağı adım yüksekliği ve sac genişliği birer tasarım parametresidir. Küçük nüvelerde 7 kademe tekniği uygulanırken büyük nüvelerde 11 kademe ve fazlası tasarlanabilir.



Şekil 3.9: Nüvenin 7 kademedan oluşan bacak dizilimi [61].

Teorik olarak kesit dairesinin doluluk oranı 93-95% ve üstü olur. Üreticiler nüveleri genellikle bacakların en geniş saclarına göre tanımlarlar, bu ölçüğe **orta kademe genişliği** tanımı verilir. Orta kademe genişliği küçük nüvelerde 60 mm, çok büyük nüvelerde 1000 mm değerine kadar değişkenlik gösterebilir. Nüve bacağı formu her bir nüve için karakteristik bir tasarım parametresidir. Bitmiş nüvenin geometrisi ise transformator tipine

göre değişmekle beraber birkaç alternatif nüve geometrisi söz konusudur. Şekil 3.10’ da çok bilinen ve kullanılan nüve geometrileri basitçe gösterilmiştir.

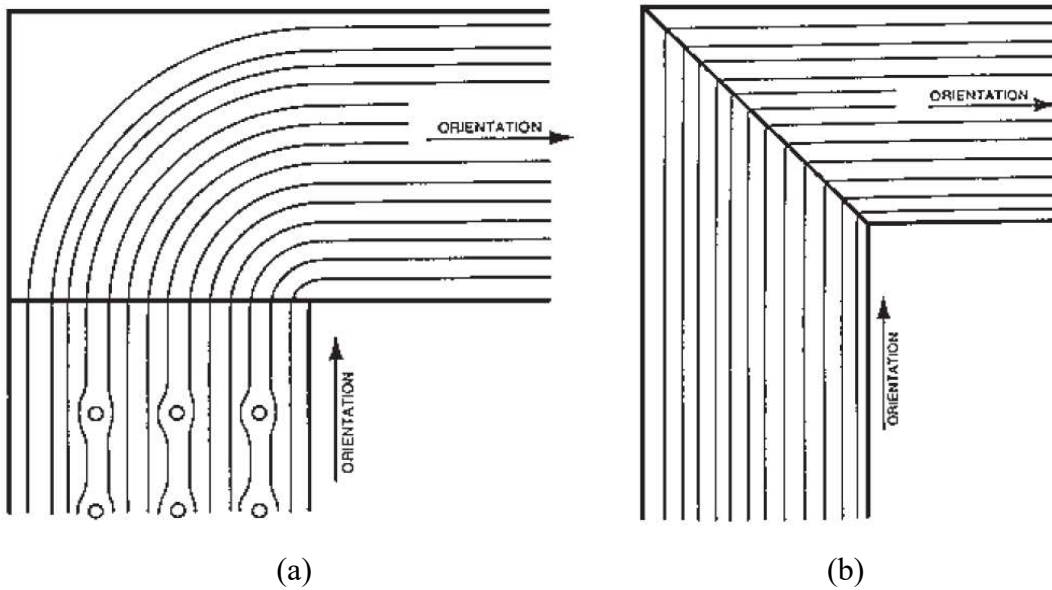


Şekil 3.10: Nüve dizilimi alternatifleri [61].

Şekil 3.10’ daki gösterimde; (a) 1 fazlı ve 2 bacaklı yapı, bir bacakta primer sargı diğer bacakta sekonder sargı bulunur, (b) 1 fazlı 3 bacaklı sadece orta bacakta hem primer hem de sekonder sargı bulunur, dış bacaklar manyetik akı devresi dönüş bacağıdır, (c) 3 fazlı ve 3 bacaklı yapı, her bacakta bir fazın primer ve sekonder sargısı bulunur. (d) 1 fazlı çapraz nüve formu. (e) 3 fazlı ve 5 bacaklı yapı, dış bacaklar dönüş bacağıdır.

Nüve imalatında ilk süreç lamine sacların tasarlanan bacak ve kademe genişliklerinde dilinmesidir. Pek çok transformatör üreticisi dilinmiş sacları hazır olarak sadece boy kesme süreci yürütür. Nüvenin toplam kayıp değeri daha önceden de belirtildiği gibi malzeme içindeki kalıcı gerilim seviyesine çok kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Dolayısıyla nüve imalatı için yürütülen mekanik işlemlerin malzemede oluşturduğu ilave iç gerilim minimuma indirgenmelidir. Nüve bacaklarının imalatında kullanılan mekanik kesme işlemi kaçınılmaz bir operasyon olarak kesme yüzeyinde ve yakınlarında plastik deformasyon ve kenar çapağı üretir. Kenar çapakları pratikte sac tabakaları arasında olası kısa devre kaynaklarıdır ve Eddy akımları için potansiyel kapalı akım çevrimleri üretir. 1980’ li yıllara kadar dilme ve boy kesme süreçlerinden sonra çapak giderme taşlaması süreçleri uygulanırdı. Çapak giderme taşlaması tabakaların izolasyonuna zarar verdiğinden ortaya ikincil izolasyon işçiliği

çıkmaktaydı. Çapak taşlama ve diğer mekanik diğer operasyonlar sacda kalıcı gerilim miktarını arttırdığından dolayı ilave tavlama / gerilim giderme operasyonları gerekirdi. Modern kesme ve dilme teknikleri ile bu ihtiyaç büyük ölçüde azaltıldı. 1970' lerde kullanılan kesme teknikleri ve donanımları ile çapak yüksekliğinde 50 µm seviyelerine izin verilirken günümüzde 25 µm seviyesinin altı çapak seviyesine izin (EN 10107) verilmektedir. Dolayısıyla ilave izolasyon gereksinimi ve gerilim giderme tavlama ihtiyacı günümüzde çoğunlukla önemsiz görülmektedir. Bu aşamada levhalar arasındaki izolasyon seviyesinden bahsetmek gerekirse, ilgili standarda göre (IEC 60404-11) belirli bir ölçüde hazırlanmış numune yüzeyinin 80%'lik kısmından minimum 2 (cm².ohm), en az 5%'lik bir kısmından ise 5 (cm².ohm) direnç ölçülmesini alt limit olarak belirlemiştir. Elektriksel izolasyon kaplaması sayesinde laminasyon tabakaları arasında akı hareketine dik düzlemlerde oluşan Eddy akımı çevrimlerinin oluşması engellenir, yani aynı yönde laminasyonlar arasında elektriksel potansiyel fark oluşması engellenmiş olur. Her bir tabaka içinde indüklenmiş gerilim miktarı tabakanın genişliği ile de doğru orantılıdır, 640 mm genişliğe kadar yukarıdaki izolasyon seviyesinin yeterli olacağı değerlendirildiğinden daha geniş bacak yapıları için aralara yalıtkan malzemelerden yağ kanalları oluşturacak kademeler konarak bacaklar parçalı hale getirilir. Laminasyonların elektriksel izolasyon seviyesi son yıllarda üretilen ve ticarileşen GO saclarda (>10 cm².ohm) seviyelerine kadar çıkmıştır. Kapalı bir manyetik devre olan nüvede manyetik akının yön değiştirmek zorunda kaldığı ayak ve boyunduruk birleşimlerinde genelde Şekil 3.11' de verilen 2 tipte birleşim geometrisi tasarlanır. [61]



Şekil 3.11: Deliklerin ve köşelerin manyetik akıya etkisi [61].

Şekil 3.11' deki gösterimde; (a) dikdörtgen formlu bacaklarda montaj deliği bulunan nüvelerde oluşan akı transferini, (b) ise köşegen formlu bacaklarda montaj deliği bulunmayan nüvelerde oluşan akı hareketini göstermektedir.

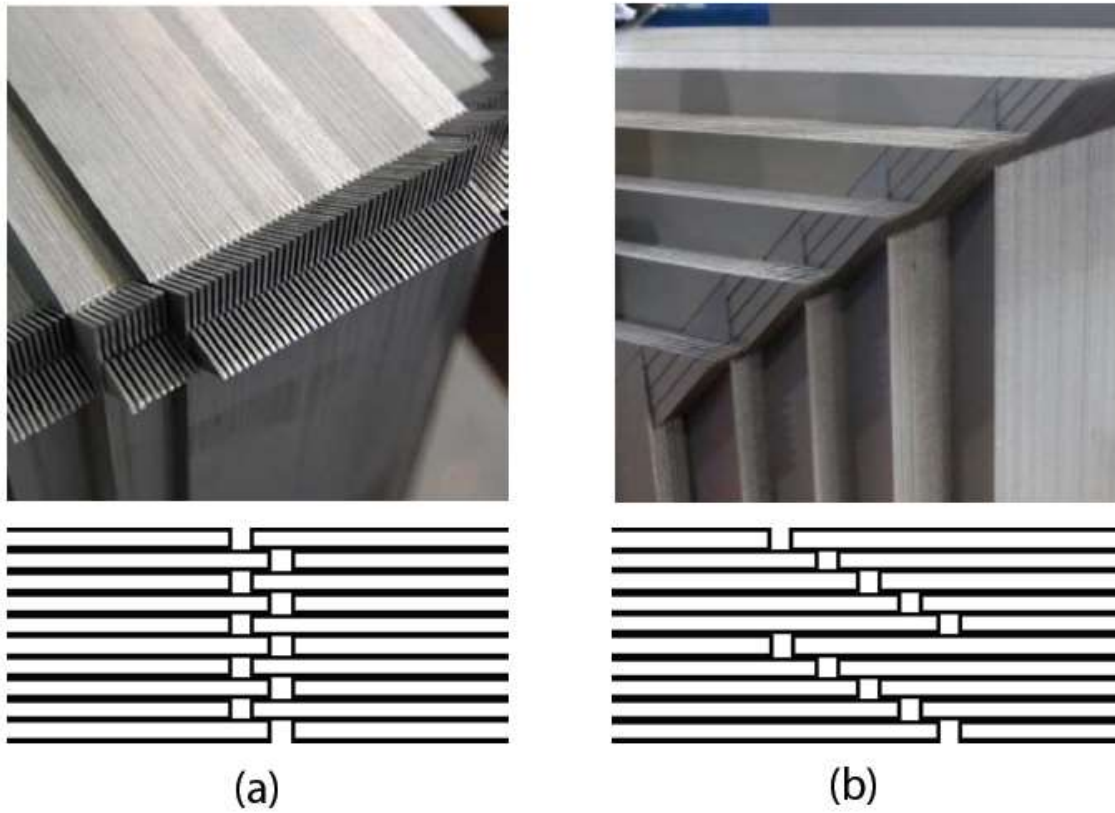
GO saclarda manyetik akı hareket doğrultusunu ideal tane yönlenme $\{110\}$ (001) doğrultusundan sapmasına neden olabilecek her türlü etken nüve kaybını olumsuz etkiler. Bu etkenlerin bir kısmı nüve imalatının yani lamine sacların ebatlanması ve üst üste dizilmesi esnasında nüve üretim sürecinin doğal sonuçları olarak ortaya çıkar. Örneğin montaj için gereken deliklerin etrafında, bacaklardan alt ve üst boyunduruklara dönüşlerde manyetik akı yolunda direnç noktaları oluşur. Bacak boyları uzadıkça ve daraldıkça bu kaybın genel oranında azalma olması beklenir. Kısa, dikdörtgen formlu bacaklarla tasarlanan trafolarla köşelerde veya bacak ortalarına konumlanan merkezleme / sıkma delikleri nedeni ile oluşan kayıp değerleri diğerlerine göre daha fazladır.

Nüve tasarımında önemli bir tasarım kriteri **yapı faktörü** olarak tanımlanan terimdir. Bu terim, tam montajlı hale getirilen nüvenin ölçülen kaybının nüvede kullanılan sac miktarı ve özgün sac kayıp değerinin çarpılması ile elde edilen teorik kayıp değeri ile karşılaştırılması sayesinde elde edilir. Yapı faktörü değeri genelde (1,15) değeri civarında kabul edilir. Uzun ve köşegen formlu bacaklarla elde edilen nüve dizilimlerinde yapısal faktörler daha iyi (yani 1,15 değerinin daha altında) değerlerde üretilebilir.

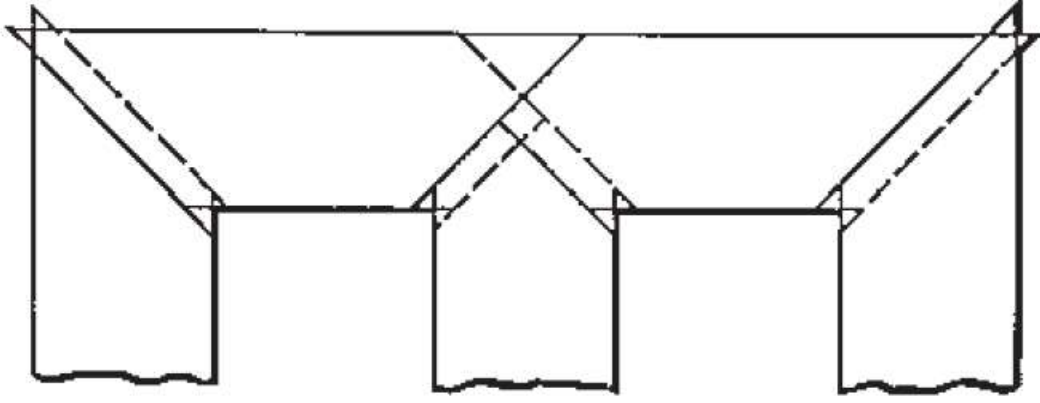
Akı yolundaki direnci azaltmak adına modern transformatörlerde bacaklar ve boyunduruklar (45°) köşegen formunda kesilirler. Dizim tekniğinde ise katmanlar arasında köşelerde üst üste binme tekniği uygulanır. Bu sayede manyetik akı aynı hizadaki karşılığı olan tabaka sac üzerinden akmak yerine, daha az direnç göreceği altında veya üstünde kalan bir sonraki tabaka üzerinden akmaya çalışır. Bu dizim tekniğine **step-lap dizim** (SL) tekniği adı verilmektedir [61]

Manyetik akının alt ve üst boyundurukların bacaklara bağlandığı köşelerde yön değiştirmeye zorlanması kaçınılmazdır. Dikdörtgen formlu bacak ve boyunduruklara sahip nüvelerde eskiden **tek kademeli bindirme** (SSL) tekniğine uygun dizim yapılırdı. Düşük güç ve gerilim seviyelerinde bu teknik hala uygulanagelmektedir. Yüksek güç ve gerilim kademelerinde ise **çok kademeli bindirme** (MSL) tekniği kullanılır. Manyetik akı yönündeki değişimin etkisini azaltmak için (45°) açılı köşegenler bir önceki veya sonraki

tabakanın üstüne bindirilecek şekilde dizilir. Bu dizim tekniğinin dezavantajı 7. seviyeye kadar harmonik frekanslar üretmesidir. Ayrıca her bir stepte 5 adet farklı boyda tabaka olması gerektiği için üretimi ve dizimi daha zordur. İlâveten üst boyunduruğun bobin geçirmeden sonra yeniden dizimi daha zahmetli bir iş haline gelir. Trafo nüve kayıpların büyük kısmı akının dönüş yapmak zorunda kaldığı köşelerde oluşur. Modern güç ve dağıtım trafoları MSL tekniğinde dizilir. Bu teknikte daha yumuşak bir manyetik akı dönüşü elde edilir. Aynı zamanda daha düşük ses seviyeleri elde edilir. Zaman içinde manyetik akı yolunda bulunan her türlü mekanik etkinin nüve kaybına olan olumsuz etkisini bertaraf edebilmek adına, bacaklardaki montaj delikleri mümkün olduğunca üretim tekniklerinden çıkarılmıştır. Tabakalar halinde dizilen sacların yapısal bütünlüğünü sağlamak için alt ve üst boyunduruk sıkıştırma demirleri kullanılmaya başlanmıştır. Bacaklarda ise öncelikle izolasyonu sağlanan çelik bandajlar ile sağlanan yapısal bütünlük zamanla cam elyaf reçine kökenli inorganik ve mukavim bandajlarla elde edilmeye başlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.12’de (a) tek adımlı bindirme SSL tekniğini, (b) ise çok adımlı bindirme MSL tekniğini göstermektedir. Şekil 3.13’de ise SL tekniğinin basit gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.12: Nüve diziminde adım bindirme teknikleri [61].



Şekil 3.13: Köşegen (45°) formlu bacak ve boyunduruk saclarının step-lap dizim tekniği ile bir araya getirilme yöntemi [61].

Nüve imalatı lamine sacların bir tezgâh üzerinde belirli bir sıraya göre üst üste dizilmesi ile başlar. Dizim esnasında her dönüş noktasında aynı seviyenin açılı kesilmiş sac kademeleri tasarlanan *step-lap* mesafesi boyunca alt veya üst tabakanın üzerine temas eder. Dizime başlamadan önce alt ve üst boyunduruk sıkıştırma demirlerinin alçak gerilim tarafı tezgâha sabitlenir. Ayrıca her bir bacak için alt ve üst boyunduruk sıkıştırma demirlerini birbirine bağlayacak şekilde **gergi lamaları** konumlandırılır. Dizim bittikten sonra alt ve üst boyunduruk sıkıştırma demirlerinin ve gergi lamalarının yüksek gerilim tarafları dizilmiş kütleyle konumlandırılarak tüm sıkıştırma düzeneği gerektiği şekilde torklanır. Böyle kendi ağırlığı ile gevşek bir yapıda olan bacak ve boyunduruk kütesinin yapısal bütünlüğü sağlanmış olur. Bu hali ile nüvenin dikleştirilmesi yani ayağa kaldırılması mümkün hale gelir. Bobinlerin geçirilebilmesi için üst boyunduruk sıkıştırma demirinin çıkarılması ve üst boyunduruk olarak dizilen sac kademelerin geri alınması gerekmektedir. Üst boyunduruk alındığında yukarı bakan “E” formundaki bacaklara her bir fazın alçak ve yüksek gerilim sargıları yerleştirildikten sonra üst boyunduruk sacı bu pozisyonda tekrar dizilerek sıkıştırma demirleri ile yapısal bütünlüğü tekrar sağlanacak şekilde gerekli torklamalar yapılır [61].

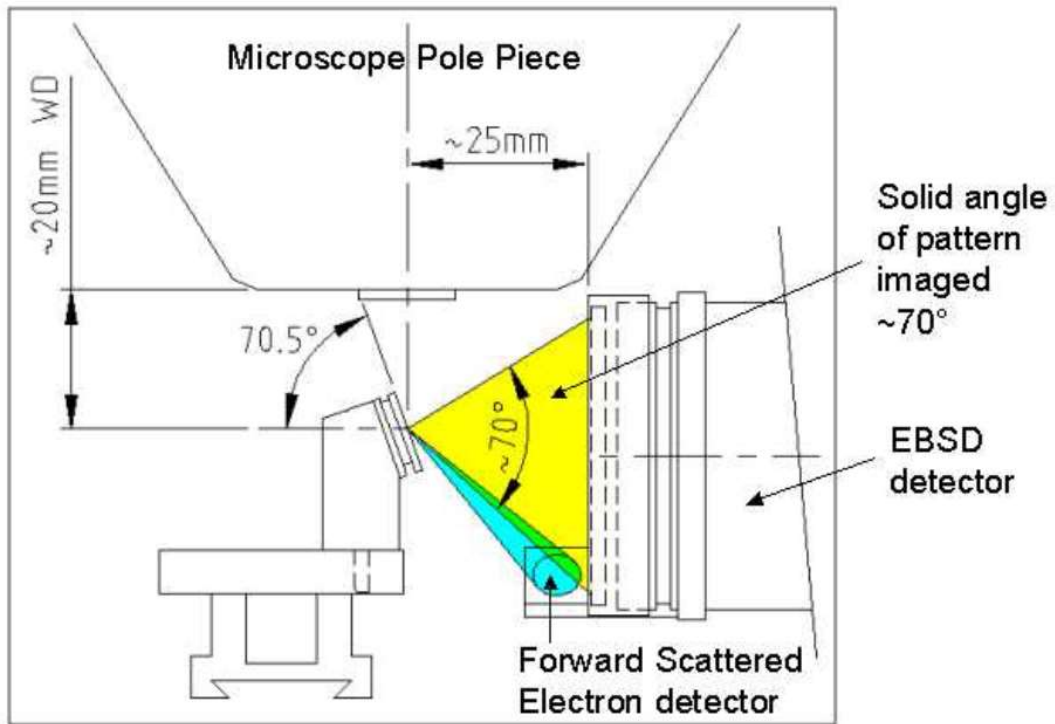
3.5 Kesme Kenarı Civarının Mikro İncelenmesi için EBSD Tekniği

EBSD tekniği kristalografik tekstür yapısını, kristalografik yönelim tekstürünü anlamakta kullanılan bir Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) tekniğidir. Numune hazırlama süreci gayet zorlu olmakla beraber nanometre seviyesinde yüksek çözünürlüklü analizler elde etmek mümkündür. EBSD grafikleri mükemmelen hazırlanmış numune yüzeyine gönderilen elektronların belirli açılarda BRAGG yasasına göre gösterdiği saçılım tekstürünün görüntülenmesi ile mümkün olur [64] Yüzeyden saçılan elektronların bir kısmı yüzeyin

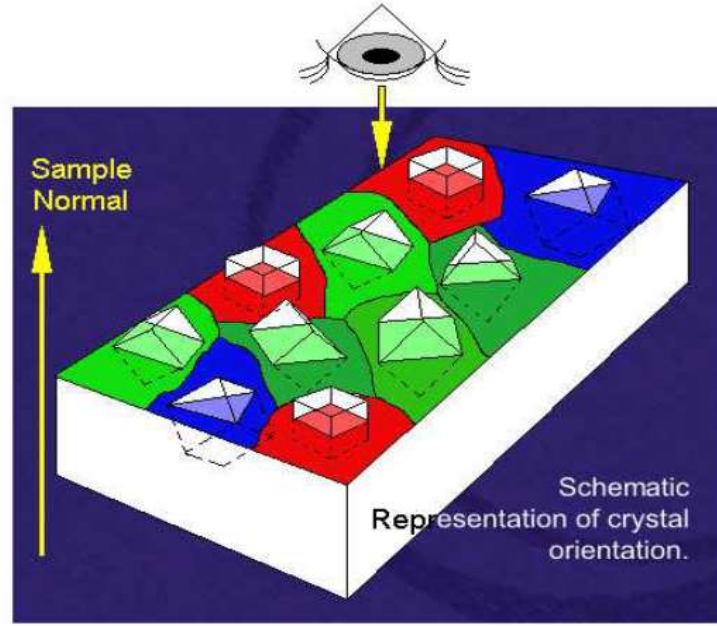
kristalografik yapısı hakkında bilgi taşır. Yüzeğe gönderilen elektronlar çarpma açısına ve BRAGG yasasına göre nanometre seviyesinde kafes yapısına nüfuz ederek saçılım gösterir. Elektron demetinin ideal çarpma açısı 70,5 derecedir ve analiz edebilir miktarda elektron 70 derecelik bir spektrumda saçılım gösterir. Spektrumun dışına saçılan elektronları da görüntüleyen (FSE) detektörler sayesinde daha detaylı görüntüler elde edilebilir.

EBSD patenleri sayesinde mikron altı ölçekte kristalografik yönlenim, faz analizi ya da haritalama yapmak mümkündür. Yönlenim haritalaması yapabilmek için, elektron demetinin yüzeğe çarpma noktalarını bir ağ formu boyunca adım adım değiştirmek ve kontrol edebilmek gereklidir.

Haritalamada öncelikle bir referans imaj oluşturulur, daha sonra da bir ızgara formu boyunca tarama yapılarak her adımda yeterince süre beklenerek saçılım pateni elde edilir. Her bir noktadan elde edilen paten bir yazılım sayesinde bir araya getirilerek kristalografik yönlenim haritası elde edilir. Aşağıda Şekil 3.14' de EBSD modülü buluna bir SEM mikroskobunun basit gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.14: EBSD cihazlarının genel yapısı [64].

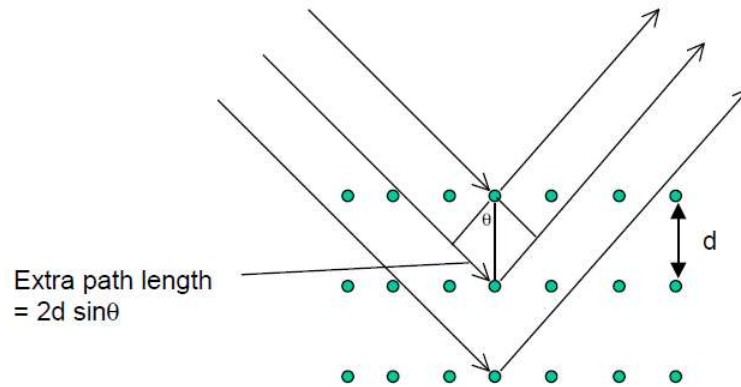


Şekil 3.16: Yüzey normaline göre kristalografik yönelimlerinin gösterildiği renk haritalaması [64].

EBSD görüntüleme tekniğinin temelinde yer alan saçılım teorisi BRAGG kanunudur. BRAGG kırınımı kristal düzlemleri arasından gerçekleşir, eğer kristal yapıda düzlemler yoğunsa, yani kristalin atom numarası yüksekse saçılım yapan elektron miktarı da yüksek olacaktır [64]:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (3.31)$$

Bu formülde; n yansıma düzlemi iken, λ elektronun dalga boyu, θ ise Bragg açısıdır ve d ise kristal yapıdaki kafes boşluğu miktarıdır.



Şekil 3.17: BRAGG kırınım kanunu [64].

Mükemmelen hazırlanmış yüzeye gönderilen elektronlar yüzeyden itibaren belirli bir derinliğe kadar penetre ederek kristal düzlemleri arasından saçılırlar. Dolayısıyla ortaya çıkan nihai tekstürde primer saçılım gösteren elektronlar ve sekonder saçılım gösteren elektronların tümleşik etkisi bulunur. İncelenen kristalin atom numarasına bağlı olarak primer ve sekonder saçılım gösteren elektronların oluşturduğu etki ile malzemede 20 ila 40 nm derinliğinde bir bölgeden saçılım paterni elde edilmiş olur. Bu sebeple numune hazırlama kalitesi çok etkilidir ve belirleyicidir, ayrıca numunedeki kalıcı gerilimlerin seviyesi ortaya çıkan paternin kalitesini belirler.

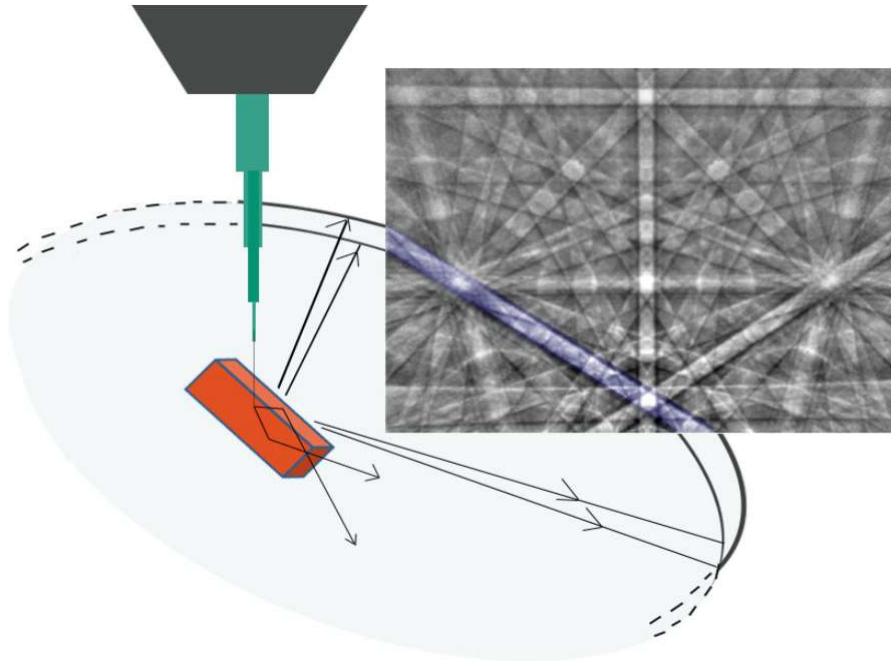
Numunede saçılım gösteren elektronların büyük bir kısmı herhangi bir patern oluşturmayacak şekilde fosfor ekran üzerine düşer. Bu elektronlar ekranda sadece arka plan parlaklığı oluşturur, KIKUCHI bantları bu arka plan üzerine biner, bu sebeple çok zayıf veya zor ayırt edilebilir şekilde gerçekleşebilir. Saçılım yapan elektronların oluşturduğu patern ilk olarak SEM incelemesi esnasında Seishi KIKUCHI tarafından tanımlanmış olduğundan ortaya çıkan desene KIKUCHI bantları adı verilmiştir.

Ortaya çıkan patern üzerinde değerlendirmeler yapabilmek için donanım ve tecrübe ile arka plan parlaklığı paternden çıkarılmalıdır. Şekil 3.18' den görülebileceği gibi, patern malzemenin kristalografisini temsil edecek şekilde değişik yönde ve pozisyonda çok fazla sayıda KIKUCHI bandı içerir.

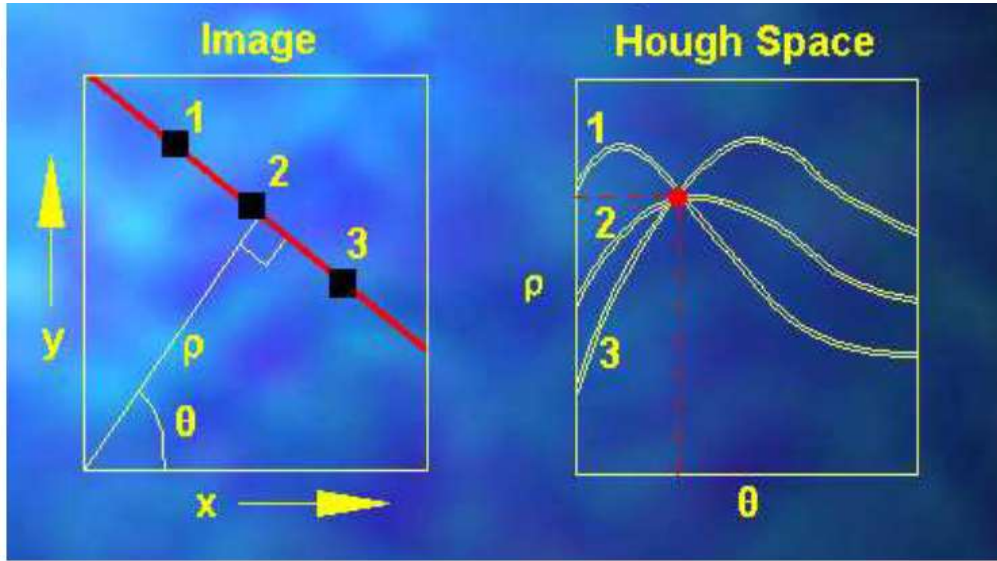
Paternin daha kolay anlaşılabilmesi ve kristal yönelimlerini tespit edebilmek için HOUGH transformasyonuna ihtiyaç vardır. HOUGH transformasyonu düzlemsel bantların yönü ve pozisyonunu anlamak için kullanılan bir tekniktir.

Şekil 3.19' da transformasyonun basit şematik hali yer almaktadır. 2 boyutlu bir aksenal sistemde yer alan bir doğru, kendi normalinin orijin ile arasındaki mesafe (ρ) cinsinden aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir [64].

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (3.32)$$



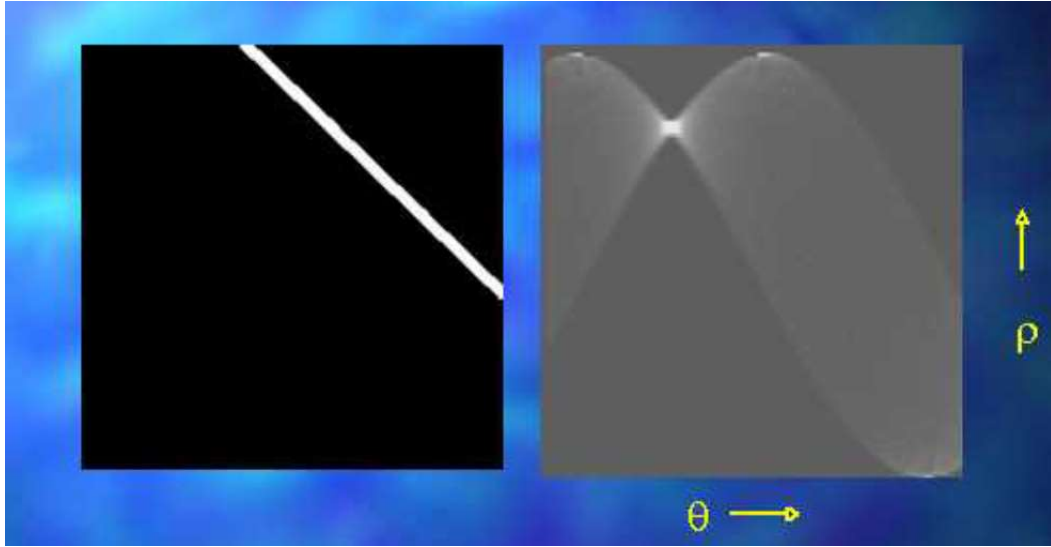
Şekil 3.18: EBSD incelemesinde görülen KIKUCHI bantları [64].



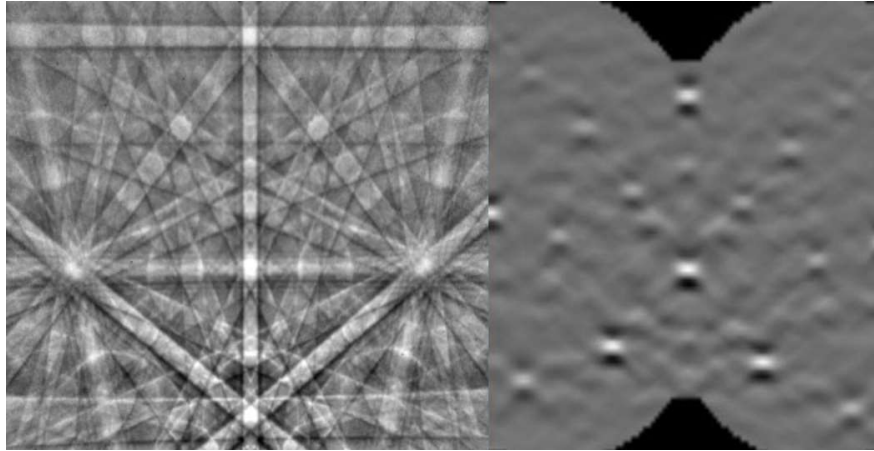
Şekil 3.19: HOUGH dönüşümünün şematik gösterimi [64].

Yukarıdaki (3.32) eşitliği kullanılarak yapılan dönüşümde Şekil 3.19' da resimdeki her bir nokta HOUGH uzayında bir sinüzoidal eğriye karşılık gelir. Bu eğrilerin kesiştiği nokta KIKUCHI bandının pozisyonu ve açısını verir. Dolayısıyla HOUGH uzayında yer alan her bir (ρ, θ) noktası bir doğruya karşılık gelir. Tepe noktaları HOUGH uzayındaki düzlemlerin kesişme noktalarını verir. Kesişme noktaları arasındaki mesafeler ve açılar bir yazılım ile çözümlenerek malzemenin kristal yapısı hakkında detaylı bilgilere ulaşılır. EBSD paterni HOUGH transformasyonunun sayesinde kristal düzlemleri arasındaki açılar, kristalin simetri

durumunu ve yönlenme bilgisini taşımaktadır. Şekil 3.20’ de her bir KIKUCHI bandı bir kristal düzlemin gösterir. HOUGH dönüşümü ile de kristal yönlenimine endekslenmiş olur. Bu dönüşüm tüm bantlara uygulandığında Şekil 3.21’ de verilen KIKUCHI bantları ve HOUGH transformasyonu elde edilmiş olur.



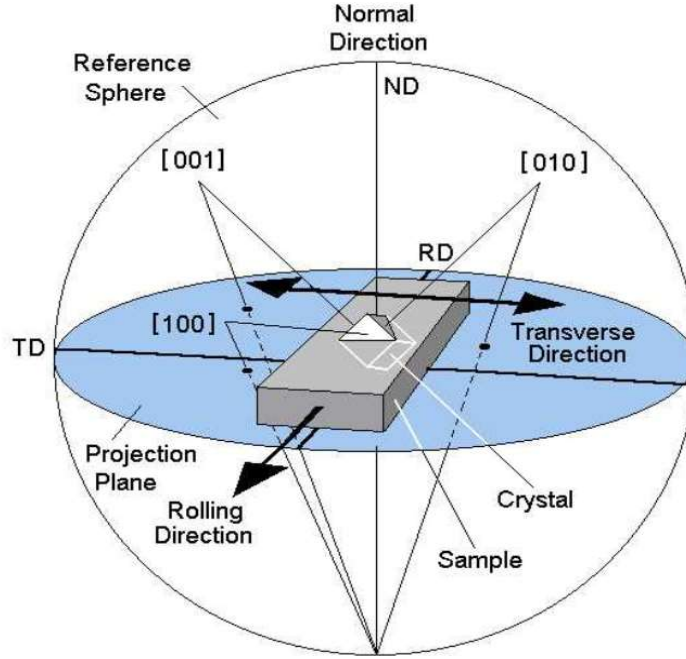
Şekil 3.20: Beyaz doğrunun HOUGH uzayındaki gösterimi [64].



Şekil 3.21: Örnek bir kristalin EBSD ‘den elde edilen KIKUCHI bantları ve HOUGH uzayında karşılık gelen pik noktaları [64].

Kutup tekstürü ise PF, kristal içindeki düzlem yönlerinin 2 boyutlu küresel bir projeksiyonudur. Bu tanımlamada “**kutup**”; belirli bir düzlem geometrisine göre kafes yapısındaki Miller düzlemlerinin yüzey normali vektörüdür. Kristalin düzlemleri ölçülen numune için önceden belirlenen temel doğrultulara göre tanımlanır; bu temel doğrultular, RD hadde doğrultusu, TD hadde doğrultusuna dik yönde yüzey düzlemine paralel doğrultu ve ND doğrultusu; yani RD ve TD yönlerinin oluşturduğu yüzeye normal (dik) doğrultudur.

Şekil 3.22’ de kutup dağılımı incelen bir yüzey ve bu yüzeyde yer alan tek bir kristal için referans doğrultular ve kutup dağılımı stereografik olarak basitçe gösterilmektedir.

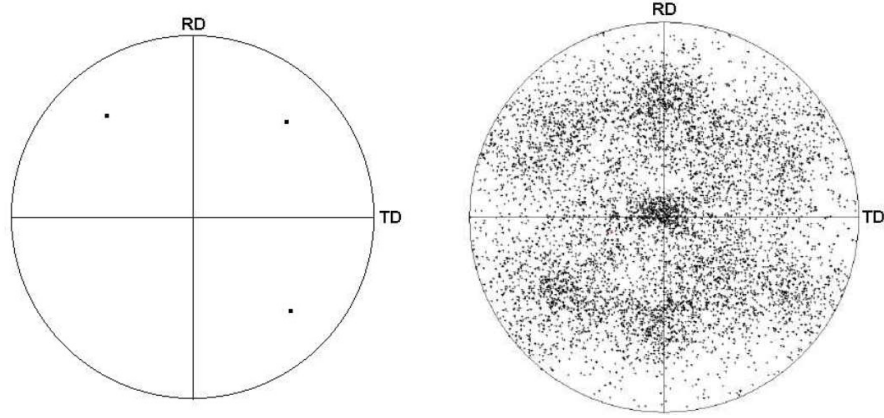


Şekil 3.22: Kutup dağılımı tekstürünün stereografik gösterimi [64].

Kutup dağılımı tekstürünün daha iyi anlaşılabilmesi için bir kürenin ekvator ekseninden kesilerek, ekvator düzleminin merkezinde belirli bir yönelimi olan kristal yapı olduğu varsayılır. Ekvator düzleminin belirli doğrultuları bulunur, bu doğrultular ile kristalin kendi doğrultuları beraber gösterilir.

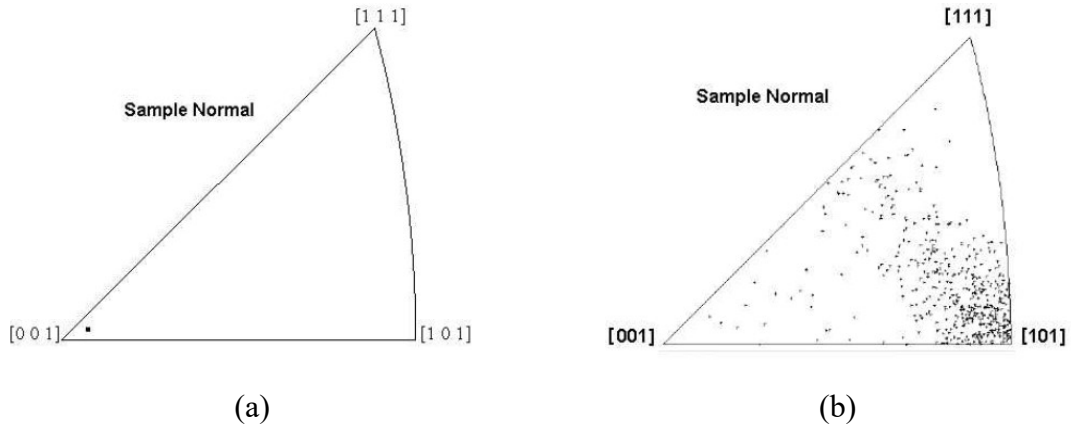
Kutup dağılımı gösterimlerinde kristal yapının sahip olduğu referans düzlemler ve kutuplar beraber gösterilir, bu referans doğrultular genelde (100), (110) ve (111) düzlemlerinin kutuplarıdır. $\langle 100 \rangle$ doğrultuları seçildiğinde, doğrultuların üst yarı küreyi kestiği referans noktaların alt kutup noktasına (güney kutup noktasına) olan projeksiyonlarının ekvator düzlemi ile kesiştiği noktalar işaretlenir. Numune üzerindeki her bir ölçüm değişik kristal yönelmesinden dolayı projeksiyon (ekvator) düzleminde farklı bir noktaya isabet edecektir. Bu sayede projeksiyon düzleminde kristal yapıdaki genel yönelim hakkında bir dağılım elde edilir. Bu sayede eğer numunede tercihli bir yönelme var ise gözükür hale gelir.

Numune yüzeyinin normalisi orta eksen merkezdedir. Şekil 3.23’ de verilen çok kristalli örnekte görüntüden [100] doğrultusunda tercihli bir yönelme olduğu görülebilmektedir



Şekil 3.23: tek kristalin ve çok sayıda kristalin kutup dağılımı paterni [64].

Benzer şekilde kristalografik yönlenme referans eksenlere göre ters kutup tekstürü IPF elde edilerek de değerlendirilebilir. IPF’ de öncekinden farklı olarak kristalin kendi doğrultuları yerine belirlenen referans doğrultulara göre patern oluşturulur. IPF grafiğinin anlamlı olabilmesi bu doğrultuların önceden tanımlanması gerekir. IPF’ de her bir kristal doğrultusu tek bir nokta ile ifade edilir, bu sebeple IPF oluşturulurken genelde numunenin ND, RD veya TD düzlemleri referans düzlemleri olarak kullanılır. Şekil 3.24’ de ise tek kristal ve çok kristalli yapıların ters kutup dağılım grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.24: Tek kristalin ve çok sayıda çok kristalli örnek bir yapıda IPF gösterimi [64].

Şekil 3.24 (a)’da ölçülen tek bir kristalde $[001]$ doğrultusunun neredeyse yüzey normaline paralel olduğu ya da (001) düzleminin numune düzlemine paralel olduğu görülür. (b)’de ise tanelerin tercihli bir şekilde yönlendiğini, yani (101) düzlemlerinin numune yüzeyine neredeyse paralel olarak hizalandığı ifade edilebilir. Özetle IPF (ters kutup tekstürü) seçilen

bir doğrultuya göre tane yapısında tercihli bir yönlenme olup olmadığını göstermekte daha kullanışlıdır.

EBSD paterni ile kristalografik yapıların incelenmesi, kutup tekstürlerinin oluşturulması ve yorumlanması konularında çok sayıda literatüre erişmek mümkündür. Tez kapsamında tane yönlendirilmiş elektrik çelikleri bağlamında daha derin bir teorik alt yapı kurabilmek için birkaçından bahsedilmiştir. Anılan literatürün yönlendirmesi ile bundan sonraki bölümlerde, transformatör nüve imalatında dilme prosesi ile ortaya çıkan kesme kusurlarının manyetik akı yolunda bir kesintiye sebep olmadığı için inceleme dışı bırakılmıştır. Akı yolunda incelemeye tabi tutulması gereken kesme kusurları nüvenin bacak ve boyunduruklarını oluşturan, akı hareketinin kesintiye uğradığı ve yön değiştirmek zorunda olduğu 45° açılı gönyeli kesimlerdir. Kesme kenarları boyunca ortaya çıkan plastik deformasyon, iç gerilim, gerilim, deformasyon etkin bölge genişliği, kesme yüzeyi, dislokasyon gradiyenti ve kristalografik yön değişimi sacın manyetik performanslarına olumsuz etkilemesi beklenir. Kesme kenarı yakınında ortaya çıkan fiziksel kusurlarının manyetik degradasyona etkisini incelediğimiz çalışmada, kesme kenarı civarında, düşük ve yüksek plastik deformasyon etkisi olan örneklerde, kristalografik yön değişimini karakterize etmeye, ısıl işlemler ile hangi seviyede bir geri kazanım elde edilebileceğini anlamaya çalışılmıştır.

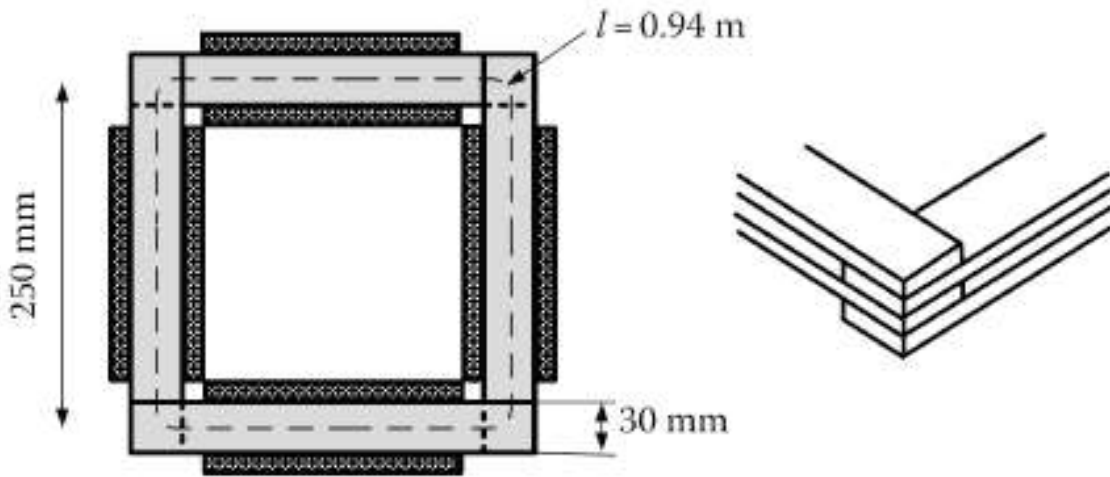
3.6 EPSTEIN Testi ile Demir Kaybı Ölçümü

Bu bölümde nüve imalatı için lamine saca uygulanan açılı kesme işleminin kesme kenarı civarında oluşturduğu plastik deformasyon, iç gerilim, deformasyon etkin bölge, kesme yüzeyi, dislokasyon gradiyenti ve kristalografik yön değişimi gibi süreksizliklerin sacın temel manyetik performansı olan demir kaybı değeri üzerine olumsuz etkileri ölçmek için başvurduğumuz yönteminden bahsedilecektir.

Bu çalışmada, 2 farklı sac tipi için uygulanan farklı ısıl rejimlerde gerilim giderme tavlama ile, numune seviyesinde manyetik özelliklerin nasıl değiştiğini, ne kadar geri kazanılabileceğini, standarda uygun dizim numuneler ile ve ayrıca tek fazlı trafo nüvesi *step-lap* dizim mantığına yakın olan standart dışı geometrideki dizim numuneleri ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerinde sonuçlarının daha iyi değerlendirilmesi için yöntem hakkında aşağıdaki materyali sunulabilir.

Transformatör nüveleri öngörülen doyum manyetizasyon noktasının altında bir akı yoğunluğu ile çalışacak şekilde tasarlanır. Dolayısıyla sac üreticileri 1,5 veya 1,7 Tesla akı yoğunluğu civarında ürünlerinin manyetik karakteristik değerlerini verirler. Aşırı manyetik yükleme koşullarında nüvenin kaçak akı kaybı artar, nüvede aşırı doymuş bölgelerde ısı enerjisi ortaya çıkabilir. Kaçak akı ve ortaya çıkan ısı, oluşma rejimine ve sürekliliğine göre nüveye ya da sargılara zarar verebilir. Bu sebeple GO ve NGO çeliklerde manyetik özelliklerin ölçümü ve bilinmesi çok önemlidir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) nüve malzemelerinde manyetik parametrelerin ölçümü konusunda standartlar yayınlamıştır; IEC 60402-2 ve 60404-3. Bu bölümde IEC 60404-2’ de tanımlanan EPSTEIN test metodu hakkında detaylı bilgi verilecektir [65]

IEC 60404-2’ de EPSTEIN test metodunda yukarıda Şekil 3.25’ de görülebileceği gibi 30 mm genişlikli ve 280-320 mm uzunluğu olan gerilim giderilmiş numuneler ile köşelerde tam bir kare formunda üst üste binme yapısı sağlanacak şekilde en az 4 sıra tabakaların birbiri üstüne konularak malzemenin manyetik karakteristiği ölçülebilir. Manyetik akı köşelerde bir kare formu boyunca bitişik olan levhaya transfer olacaktır. Köşelere konacak 1 N değerinde yüklerle ölçümlerde tekrarlanabilirlik hassasiyeti artırılır.



Şekil 3.25: IEC 60404-2’ye göre EPSTEIN testi düzeneği ve dizim geometrisi [63].

Standart bir EPSTEIN çerçevesinde manyetik akı uzunluğu l_{eff} yaklaşık 0,94 m olarak hesaplanır. Test esnasında primer sargılarla herhangi bir anda oluşturulan manyetik alanın şiddeti $H(t)$, (3.1)’ de verilen AMPERE yasasından üretilebilir. [65].

$$\oint H dl = N I \quad (3.33)$$

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i(t)}{l_m} \quad (3.34)$$

Burada N_1 primer sargının spir sayısı, $i(t)$ primer sargıya uygulanan akımın zamanla değişimi, $l_m=l_{eff}$ ise efektif manyetik akı yolu uzunluğudur. Herhangi bir anda EPSTEIN çerçevesinde oluşan manyetik akı şiddeti $B(t)$ ise, çerçevenin kesit alanı A , sekonder sargının spir sayısı N_2 ve sekonder sargıdan ölçülen indüklenmiş gerilim $v(t)$ iken aşağıdaki formül ile verilir [65]:

$$B(t) = - \frac{\int v(t) dt}{A N_2} \quad (3.35)$$

EPSTEIN ölçüm metodu ile elde edilen sonuçlardaki belirsizlikler literatürde hala müzakere edilmektedir. Ölçüm yöntemindeki belirsizliğin kaynağının köşelerde oluşan akı kaybı, değişen indüksiyon seviyesi neden ile değişen manyetik akı yolu l_m ile ilgili olduğu ifade edilmektedir. [66, 67]. Son dönemde yapılmış bir çalışmada [67] primer sargıdan sinüzoidal akım yüklemesi koşullarında konvansiyonel GO saclarda efektif manyetik akı yolu 1,5 T indüksiyonda $l_m=0,94$ m olarak hesaplanırken, HGO saclarda 1,5 T indüksiyonda $l_m=0,97$ m olduğu tespit edilmiştir. 1,7 T indüksiyon koşullarında ise konvansiyonel GO saclarda $l_m=0,90$ m 'ye düşerken HGO saclarda $l_m=0,98$ m değerine çıktığı raporlanmıştır.

EPSTEIN metodu ile sacların manyetik özelliklerinin ölçümünde diğer bir belirsizlik kaynağı ise indüksiyon kaynağı olan primer sargının formudur. Selenoidin orta ekseninden uzaklaştıkça selenoid içinde oluşan manyetik akımın formunun değiştiği bilinen bir durumdur. Klasik çember formlu selenoidlerde numune genişliğinin ancak %40 kadar olan kısmında hedeflenen değerde manyetize edilebilir, numunede uçlara doğru yaklaştıkça manyetik alan şiddeti azalır. Dikdörtgen kesit alanlı bir selenoidde ise bu oran %70' e kadar çıkar. Hedeflenen değerde manyetize olan kesit boyu uzamış olmasına rağmen, kesit boyunca manyetik akı dağılımı homojen değildir. Tüm be belirsizliklerine rağmen EPSTEIN testi IEC 60402-02 regülasyon numarası ile malzemelerin manyetik özelliklerini belirlemede kullanılan standart bir yöntem olarak uygulanmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kapsamında yürütülen faaliyetler şunlardır (1) Kesme süreci istatistiksel analizleri için değişik kalınlıklarda, farklı manyetik özelliklere sahip GO sac gruplarında farklı tarihlerde yapılan numune kesme çalışmaları, kesilen numuneler ile yapılan çapak ölçümleri. Bu çalışmalar ile BEST TRAFÖ firmasından bulunan GEORG TBA 400 sac kesme makinesi analiz edilmiştir. Regresyon analizleri ise MINITAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (2) Numune seviyesinde ısıtma işlem ve EPSTEIN düzeneğinde demir kaybı ölçümleri için ÇİZGİ MERMER firmasında su jeti ile kesimler yapılmıştır. Numuneler hem standarda uygun boyutlarda hem de standart dışı boyutlarda kesilmişlerdir. (3) Tip-1 ve Tip-2 numuneler ile Yalova Üniversitesi Enerji sistemleri Laboratuvarı' da Vacubrand CVC 3000 Thermocraft tipi vakumlu etüvde ısıtma işlem rejimleri uygulanmıştır. Bu sayede EPSTEIN numunesi ölçeğinde ısıtma işlemlerinin etkilerini ölçme imkânı oluşmuştur. (4) EPSTEIN ölçümleri IEC 60404-2 standardına göre ve standart dışı bindirmeli dizim teknikleri kullanılarak MKS firmasında yer alan BROCKHAUS MESSTECHNIK EPSTEIN 700 cihazında yürütülmüştür. (5) Kristalografik ve mikro seviyede yapılacak kesme kenarı incelemeleri için ısıtma işlem görmemiş numuneler TÜBİTAK Gebze Malzeme Araştırma Laboratuvarları' nda ve ısıtma işlem görmüş numuneler ise ÖNERLER Isıtma İşlem Firması Laboratuvarları' nda bakalite alınmış ve ilk parlatmaları bu laboratuvarlarda yapılmıştır. SEM ve EBSD patern çekimleri için son parlatmalar Ankara Yıldırım Bayezid Üniversitesi Makine Laboratuvarı' nda gerçekleştirilmiştir. (6) SEM, EBSD ve EDX çalışmaları Ortadoğu teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarları' da yer alan QUANTA 400F Field Emission SEM cihazında gerçekleştirilmiştir. Kesme kenarı civarında SEM incelemeleri ayrıca Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Merkezi (ARUM) bünyesinde bulunan JEOL JSM 5600 LV cihazında da yürütülmüştür. (7) Bakalite alınmış parlatılmış yüksek ve düşük çapaklı Tip-2 numunelerde mikro sertlik taraması TÜBİTAK MAM bünyesinde yer alan QNESS Q10 A+ cihazında 100 gr yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu testin tekrarı ısıtma işlem görmüş numuneler ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Mekanik Laboratuvarı' nda yer alan Instron Testor 930/250 Vickers Sertlik Cihazında gerçekleştirilmiştir. (8) Birincil optik mikroskop incelemeleri ise Karabük Üniversitesi Malzeme Geliştirme Laboratuvarları' nda yer alan NIKON Ters Metalurjik Mikroskop ile, daha hassas görüntüleme çalışmaları ARUM bünyesinde ZEISS STEMI 508 Mikroskop ile yürütülmüştür. (9) Prototip seviyede bacak ve boyunduruk sacı ısıtma işlem süreçleri ÖNERLER firmasında yer alan IPSEN marka vakum altında ve atmosfer kontrollü,

ıslıl rejimi dijital olarak kontrol edilebilen ıslıl işlem fırınında yrtlmştır. Prototip nüvelerin kayıpları ise BEST TRAFO bünyesinde bulunan akredite test ve ölçüm laboratuvarlarında gerektirilmştir.

4.1 Malzeme seçimi ve numune hazırlama

Tez çalışmasında kullanılan tane ynlendirilmş elektrik çelikleri transformatör üretim sektöründe yoğun olarak kullanılan marka ve tiplerden seilmştir. Deneysel çalışmaların yürütüldüğü tesiste nüve üretim süreçlerinde yoğun olarak kullanılan sac tipleri ve tanımlamaları Tablo 4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1: BEST firmasında g transformatörü üretiminde sıklıkla kullanılan tane ynlendirilmş elektrik sac tipleri.

Tip	Sac kalınlığı (mm)	Tanımlı
Tip 1	0,30	(M5- 0,30)
Tip 2	0,23	(MoH- 0,23)
Tip 3	0,27	(NV27S)
Tip 4	0,27	(MoH- 0,27)
Tip 5	0,30	(M4- 0,30 PH110)

Yukarıda tanımlamaları verilen tane ynlendirilmş elektrik sacı tiplerinin açık kaynaklardan ve malzeme kataloglarından ulaşılan kimyasal bileşimleri aşağıda Tablo 4.2’ de ve mekanik özellikleri ise Tablo 4.3’ de verilmiştir. Kesme denemelerinde ve daha sonra ileri inceleme ve analizlerde kullanılan tane ynlendirilmş sac tiplerinin üretici kataloglarında garanti edilmiş demir kaybı değerleri ise Tablo 4.4 ‘de verilmiştir.

Tablo 4.2: Fe-%3,10 Si tane ynlendirilmş elektrik çeliklerin kimyasal kompozisyonu

Element	Si	C	Mn	S	Cu	P	Al	Fe
W%	3,09	0,054	0,072	0,018	0,075	0,015	0,010	Geri kalan

Tablo 4.3: Denemelerde kullanılan tane yönlendirilmiş elektrik saclarının mekanik özellikleri.

Tip	Kalınlık (µm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (H _{v1})
Tip 1	300	361	336	12	205
Tip 2	230	352	330	12	200
Tip 3	270	358	333	13	204
Tip 4	270	358	333	13	204
Tip 5	300	361	336	12	205

Tablo 4.4: Tez çalışmasında örneklem kesimi yapılan örnek rulo sacların kataloglarında verilen manyetik kayıp değerleri.

Tip	Sac üreticisi	Isı numarası	Bobin numarası	Garanti edilen kayıp değeri (W/kg)				J800 (A/m)
				1,5 T / 50 Hz	1,7 T / 50 Hz	1,5 T / 60 Hz	1,7 T / 60 Hz	
Tip 1	STALPRODUKT	101689	1440090211	0,85	1,30			1,78
Tip 2	BAOSHON	19251815	19848241204	0,50	0,68	0,67	0,89	1,91
Tip 3	NLMK	1811591	2/46	0,77	1,08			1,88
Tip 4	BAOSHON	19251118	19848435805	0,59	0,78	0,79	1,03	1,92
Tip 5	POSCO	SB30555	EAF1225D	0,96			1,27	1,92

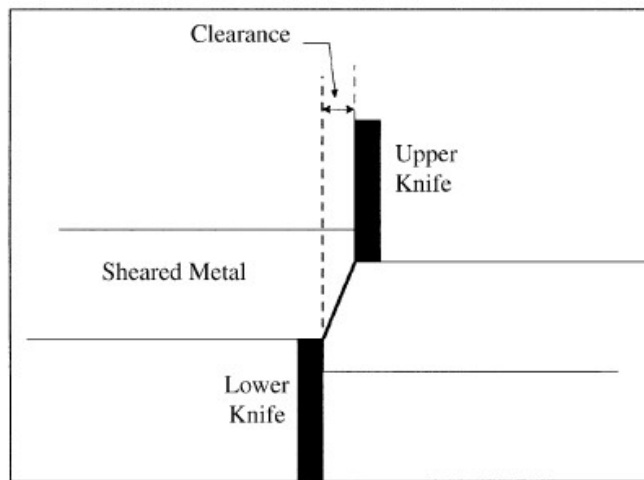
4.2 İstatistiksel Modelleme Çalışmaları

Bu bölümde öncelikle GO saclarda açılı kesme süreci üzerinde mevcut bir uygulama üzerinden sürecin varyanslarına odaklanılarak kurulan model ile, manyetik özelliklere etkisi açısından kritik bir öneme haiz olarak değerlendirdiğimiz **“kesme çapağı yüksekliği”** varyansı için istatistiksel bir analiz yöntemi olan regresyon analiz yöntemi kullanılarak kesme çapağını tahmin edebilen istatistiksel model konusunda çalışılmıştır.

4.2.1 Kesme Sürecinin İstatistiksel Modellenmesi

Transformatör nüve imalatında kullanılan makas kesme süreci çok yaygın bir üretim sürecidir. İşlem levha sacların belirlenen 2 boyutlu ölçülere açılı konumlandırılmış makaslar ile kesilmesi şeklindedir. Sürecin en önemli parametreleri;(1) hareketli üst bıçak ve sabit alt bıçağın kesme kenarı aşınma seviyeleri, (2) kesilecek ürün kalınlığına uygun olması gereken kesme boşluğu, (3) üst makasın kesme anında saca dalma açısı, (4) üst makasın ilerleme hızı ve (5) hareket miktarı, dolayısıyla üst makas tarafından kesilen parçaya transfer edilen (6) kuvvet ve kinetik enerji miktarı, (7) üst makastan önce kesilen parçaya baskı uygulayarak parçayı sabitleyen baskı plakasının uyguladığı kuvvet gibi pek çok parametre operasyon

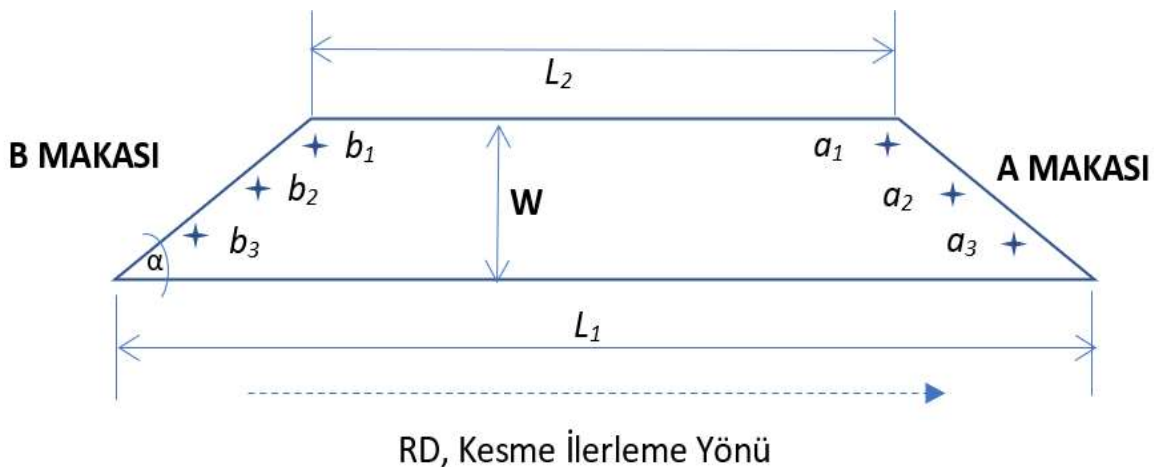
esnasında oluşan kesme yüzeyi, çapak ve deformasyon bölgesi profiline etki etmektedir. Kesilen levha sac ile ilgili parametreler ise (8) sacın kendi sertliği, (9) akma ve kopma mukavemeti gibi mekanik özellikleridir. Transformator nüvesi imalatlarında kullanılan taneleri yönlendirilmiş elektrik sacları önce dilme makineleri ile bobin formunda istenilen dizayn genişliklerine dilinerek tekrar bobin formunda sarılırlar. Daha sonra, trafo nüvesinin ayak ya da boyunduruk kısmının bir parçasını oluşturacak şekilde haddeleme RD yönüne ($\pm 45^\circ$) açı yapacak şekilde konumlandırılmış 2 bıçak seti (A ve B makasları) tarafından kenar kesmeye tabi tutulurlar. Çalışmanın bu bölümünde tane yönlendirilmiş elektrik saclarına uygulanan makas kesme süreci istatistiksel olarak incelenmiştir. Sürecin bağımlı ve bağımsız değişkenleri, hali hazırda üretim faaliyetlerinde kullanılmakta olan, kalıcı ön ayarları üreticisi firma tarafından yapılmış ve sabitlenmiş bir makinede operatörlerin müdahale edebildiği süreç parametreleri olacak şekilde belirlemiştir. Bu istatistiksel analiz çalışmasında süreç parametreleri hakkında yapılan kabuller şunlardır: (1) kesme açıklığının tüm imalat süreçleri boyunca değişmediği kabul edilir. Ön ayarlı kesme açıklığı iki makas arasından $10 \mu\text{m}$ kalınlığındaki “geçer” sentil geçecek, $20 \mu\text{m}$ kalınlığındaki “geçmez” sentil geçmeyecek şekilde yapılır. Bu sebeple Şekil 4-1’ de gösterilen kesme açıklığının ortalama $15 \mu\text{m}$ olduğu ve sabit bir değerde olduğu kabul edilmiştir. Sac kalınlığı, boy kesmeye maruz sac tipi ve kalınlığı üretilecek trafonun özelliklerine göre değişim göstermekle beraber çoğunlukla 230, 270 veya $300 \mu\text{m}$ gibi değerlerdedir. Bu durumda kesme açıklığının malzeme kalınlığına oranı sırasıyla %6,5- %5,5 ve %5,0 olarak gerçekleşmektedir. P. Baudouin ve arkadaşları [13], optimum kesme parametrelerini ifade ettikleri çalışmalarında bu oranın (% 2-7) oranında olması gerektiği belirtmişlerdir.



Şekil 4.1: Makaslama kesme prosesinde “makas / kesme açıklığının” gösterimi [13].

Kesme açıklığının kesim sonrası levha kenarında oluşan plastik deformasyon seviyesine etkisi büyük olduğundan istatistiksel modelin kontrollü değişkenlerinden ilki X_1 ; makas boşluğunun sabit kalması ve kesme açıklığı oranının sac kalınlığına orantılı olarak değişmesinden dolayı sac kalınlığı bağımlı değişken olarak alınmıştır. (2) Kesme bıçakları; sürekli kesim yapan alt ve üst makas kesme bıçak kenarları sertleştirilmiş malzemeden imal edilmiş olmalarına rağmen zamanla aşınmaya ve körelmeye maruz kalmaktadır. Pratikte makasların aşınma seviyesi üründeki çapak seviyesi sürekli ölçülerek kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Bilinmiş ya da yeni olarak temin edilerek takılmış makasların ürettiği çapak seviyesi 1 μm seviyesinde oluşurken, makaslarda yıpranma başlayınca ve devam ettikçe çapak yüksekliği 25 μm seviyesine kadar yükselmektedir. Kesme bıçaklarının maruz kaldığı kenar aşınmalarını makine çalışırken fiziki olarak ölçmek mümkün olmadığından, her iki makasın gerçekleşmiş makas vuruş sayıları aşınma seviyelerinin göstergesi ve X_2 ikinci bağımsız değişken olarak alınmıştır. (3) Kesme çapağı miktarı, malzeme içyapısında kesme sonrasında oluşan plastik deformasyonun, kalıcı gerilim gradiyentinin, dislokasyon gradiyentinin, kristalografik yönelim bozunumu gibi kantitatif değişimlerin kalitatif bir göstergesi olarak ve sürecin bağımlı değişkeni Y olarak önerilmiştir.

Yukarıda bahsedildiği üzere Y kesme sonucu oluşan çapak yüksekliği bağımlı değişkeni ile X_1 sac kalınlığı ve X_2 makas vuruş sayısı bağımsız değişkenleri arasındaki olduğu varsayılan regresyon modelinin oluşturulması için değişik zamanlarda 5 farklı sac tipinden Şekil 4.2' de verilen ölçülerde kesimler yapılmıştır. Yapılan kesme çapağı ölçümleri ise Tablo 4.7' de topluca verilmiştir.



Şekil 4.2: Kesme makinesinde üretilen 1 adet sac tabakasına ait geometrisi.
($L_1=300$ mm, $L_2=180$ mm, $W=60$ mm, $t=0,23$ mm ve $\alpha=45^\circ$)

4.2.2 Numune Oluşturma Çalışmaları ve Ölçümler

Çalışma kapsamında Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri (BEST) bünyesinde nüve imalatında kullanılan 5 tip tane yönlendirilmiş elektrik sacı belirlendi. Tablo 4.1’ de bu sac tipleri için tanımlayıcı terminoloji ve anma kalınlık değerleri verilmişti. Tez çalışmasında kullanılan tane yönlendirilmiş sac tipleri yukarıda tanımlı malzeme kodları ile stoklara alınmış değişik üretici firmalara ait tane yönlendirilmiş sac rulolarına aittir. Bu çalışmada BEST A.Ş nüve üretim fabrikasında bulunan silisli sac kesme makinesi (GEORG TBA 400) kesme süreç parametreleri açısından incelendi. Bu maksatla daha önceden dilme prosesinde belirli genişliklerde dilinerek bobin formunda stoklara alınan dilinmiş rulo saclar makinenin sac besleme tamburuna yerleştirilir ve Şekil 4.2’ de verilen resme göre açılı boy ve uç kesimleri yapılır. Kesme makinesinin süreç parametreleri detaylı olarak ele alınarak, kesme işlemi sonrasında kesme kenarı boyunca ortaya çıkan plastik deformasyonun kesme parametreleri arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılır.

Kesme süreci tamburda açılan bobinin ilerleme yönü açısından incelendiğinde önce A makası tarafından ilerleme yönüne $\alpha=45^\circ$ açı yapacak şekilde kesim yapılır. Daha sonra B makası tarafından ilerleme yönüne ters yönde $\alpha=45^\circ$ derece açı yapacak şekilde kesim yapılır. Kesme işi 2 farklı makas tarafından yapıldığından sac tabakasının her iki ucunda oluşan plastik deformasyon birbirinden farklıdır. Bu sebeple sac tabakasının uç deformasyonunu oluşturan farklı makaslara tanımlayıcı kod verilerek A ve B ucu olarak tanımlanmıştır. Makasların sahip olduğu dalma açısı dikkate alındığında, tabakanın W genişliği boyunca plastik deformasyonunun farklı karakterde olacağı düşünülmüştür. Makasların dalma açısı üretici, firma tarafından $2,0^\circ - 2,5^\circ$ olacak şekilde ayarlanmış ve sabitlenmiştir.

Dalma çizgisi boyunca makaslardan sac tabakasına aktarılan enerjinin farklı seviyede olması nedeni ile makasın malzemedeki çıkış noktası a_1 ve b_1 ilk ölçüm noktaları olarak kaydedilmiştir. Makasların tabakalara giriş kenarına en yakın ölçme noktaları a_3 ve b_3 olarak, orta noktaları ise a_2 ve b_2 noktaları olarak tanımlanarak W kenar boyunca oluşan kesme çapağı uzunluğu (S) değeri 3 ayrı noktadan ölçülmüştür. İstatistiksel analizlerde ise bu üç ölçümün en büyük değeri numune grubunu temsil eden değer olarak alınmıştır. Kesme sürecinde 2 farklı makasın devrede olması, dolayısıyla her makasın farklı bir kesme profili oluşturmasından yola çıkılarak, her iki makasın yıpranma seviyeleri bir süreç girdisi olarak ele alınmıştır. Makasların yıpranma seviyelerinin ve “**bilenmiş**” ya da “**sıfır**” makasın ilk

takılma esnasında ayarlanan kesme boşluklarının yapılacak istatistiksel analizde kesme parametresi olarak kabul edilmesi kaçınılmazdır. Bu parametreler aşağıda belirtilen esaslara göre çalışma numune üretimleri esnasında kayıt altına alınmıştır.

Makinede herhangi bir uçtaki makasın değişimi kararı makasların ürettiği çapak yüksekliği sürekli izlenerek alınmaktadır. Çapak yüksekliğinin 10 µm seviyesini istikrarlı bir şekilde aştığı ölçüldüğünde operatörler tarafından makas “**yıpranmış**” kabul edilir ve değiştirilir. Üst ve alt makas arasında Şekil 4.1’ de gösterilen makas açıklık değeri üretim pratiklerine göre 10 µm kalınlığında sentil boşluğa girecek ama 20 µm kalınlığında sentil geçmeyecek şekilde ayarlanmaktadır. Her iki makas için aynı kesme açıklık değeri makaslar ilk takıldığında veya bilenerek tekrar takıldığında ayarlanır ve tüm çalışma süreleri boyunca bu açıklığın muhafaza edildiği kontrol edilmektedir. GEORG TBA 400 makinesinde her makasın takılma tarihi ve yaptığı vuruş sayısı kayıt altına alınmaktadır. Numune üretme çalışmalarında yapılan 4 grup kesme işleminde kayıt altına alınan değerler Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’ de verilmiştir.

Tablo 4.5: I. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.

Numune tipi	Makas vuruş sayısı		Makas takılma tarihi		Kesme süresi (msn)	Kesme tarihi
	A Makası	B Makası	A Makası	B Makası		
Tip 1	69520	586753	02.04.20	22.02.20	260	08.04.20
Tip 2	69542	586801	02.04.20	22.02.20	260	08.04.20
Tip 3	69563	586825	02.04.20	22.02.20	260	08.04.20
Tip 4	69586	586846	02.04.20	22.02.20	260	08.04.20
Tip 5	69607	686867	02.04.20	22.02.20	260	08.04.20

Tablo 4.6: II. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.

Numune tipi	Makas vuruş sayısı		Makas takılma tarihi		Kesme süresi (msn)	Kesme tarihi
	A Makası	B Makası	A Makası	B Makası		
Tip 1	179132	668567	02.04.20	22.02.20	260	15.04.20
Tip 2	179154	668588	02.04.20	22.02.20	260	15.04.20
Tip 3	179176	668603	02.04.20	22.02.20	260	15.04.20
Tip 4	179198	668630	02.04.20	22.02.20	260	15.04.20
Tip 5	179220	668651	02.04.20	22.02.20	260	15.04.20

Tablo 4.7: III. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.

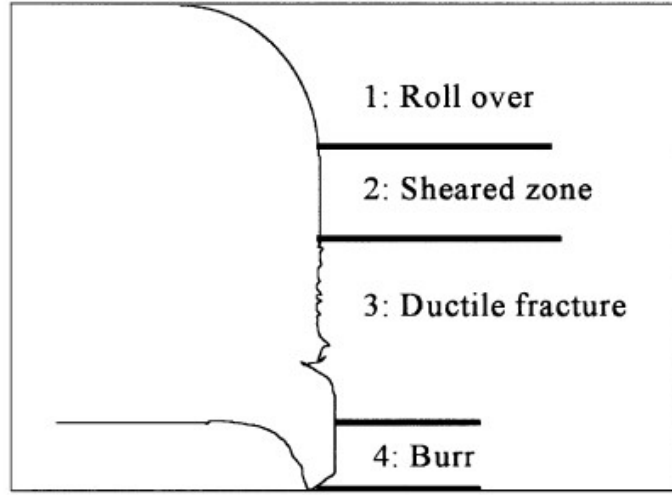
Numune tipi	Makas vuruş sayısı		Makas takılma tarihi		Kesme süresi (msn)	Kesme tarihi
	A	B	A	B		
	Makası	Makası	Makası	Makası		
Tip 1	203727	642597	19.01.21	28.10.20	260	04.02.21
Tip 2	203751	641979	19.01.21	28.10.20	260	04.02.21
Tip 3	203775	642001	19.01.21	28.10.20	260	04.02.21
Tip 4	203779	642023	19.01.21	28.10.20	260	04.02.21
Tip 5	203823	642045	19.01.21	28.10.20	260	04.02.21

Tablo 4.8: IV. Grup numunelere ait makas vuruş sayısı ve makas takılma tarihleri.

Numune tipi	Makas vuruş sayısı		Makas takılma tarihi		Numune tipi	Makas vuruş sayısı
	A	B	A	B		
	Makası	Makası	Makası	Makası		
Tip 1	429935	90466	19.01.21	15.02.21	260	25.02.21
Tip 2	429958	90487	19.01.21	15.02.21	260	25.02.21
Tip 3	429980	90508	19.01.21	15.02.21	260	25.02.21
Tip 4	430002	90529	19.01.21	15.02.21	260	25.02.21
Tip 5	430024	90550	19.01.21	15.02.21	260	25.02.21

Makaslama işleminde ortaya çıkan kesme kenarı profili ve plastik deformasyonu Şekil 4.3’ de gösterilmiştir. Transformator çekirdek sacı imalatında kesme kalitesinin sağlanması adına (4) numaralı bölgede tanımlanan kesme çapağı sürekli kontrol altına alınmaya çalışılır. Pratikte makasların ömrü kesme çapağının seviyesi ile takip edilir. Makas kesme ömürleri 700.000 vuruşa kadar çıkabilmektedir.

Deneysel çalışmamız esnasında numuneler 4 farklı zaman diliminde kaydedilmiştir. Ayrıca çapak ölçümleri 1 µm hassasiyetli verniyel ve dijital göstergeli mikrometre ile yapılmıştır. Hassas çapak yüksekliği ölçümleri “**fark alma metodu**” kullanılarak yapılır. Metotta mikrometrenin ölçüm ucu kenara yakın bir noktada sıfırlanmış, sıfırlanan cihaz kesme kenarı ölçüm ucunun ortasına gelecek şekilde tekrar konumlanarak aradaki fark çapak yüksekliği olarak kaydedilmiştir. Böylece her bir sac tabakasının A ve B kenarları için genişlik boyunca 3 farklı noktadan sac kalınlığı ve çapak yükseklikleri kaydedilmiş olur.



Şekil 4.3: Makaslama işleminde kesme yüzeyinde ortaya çıkan yüzey profili ve deformasyonlar [13].

Trafo imalatında sık kullanılan 5 tip tane yönlendirilmiş elektrik sac tipinde, A ve B makası tarafında ayrı ayrı kesilmiş 20' şer numunenin ilk ve sonuncusuna ait değerler kesme çapağı yüksekliği ve sac kalınlığı değerleri Tablo 4.9' da verilmiştir. Tabloda verilen sembollerin anlamları kısaltmalar bölümünde verilmiştir. İlave olarak makasları tanımlamak için aşağıdaki ifadeler ilave edilmiştir:

A tarafı: *A* makası tarafından kesilen kenara ait ölçümler.

B tarafı: *B* makası tarafından kesilen kenara ait ölçümler.

Aşağıdaki tablolarda verilen ölçümler sayesinde 2 farklı kesme denemesinde, 5 farklı tipte tane yönlendirilmiş sac örneğinden 20' şer adet numune kesimi yapılmıştır. Bu sayede kesme kenarlarında oluşan plastik deformasyonun kalitatif göstergesi olan çapak yükseklikleri kayıt altına alınarak, kesme sürecinin girdi ve çıktı parametreleri arasında olduğunu düşündüğümüz matematiksel modeli oluşturmak için istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir.

4.2.3 İstatistiksel Analiz Aşaması

Kesme süreci ile manyetik özellikler arasında literatüre dayanan kuvvetli ilişkilerin varlığından yukarıda bahsedilmişti. Bu aşamada odaklandığımız GO sac tiplerinde makasla kesme sürecini istatistiksel olarak incelenmiştir. Amacımız kesme sürecinin varyanslarını açıklayarak, bağımlı varyanslar ile bağımsız varyanslar arasındaki regresyon bağıntılarına ulaşmaktır. Literatürden örnek verilen çalışmalardan görülebileceği gibi az sayıda deney verisi ile ez az 2 serbestlik dereceli regresyon analizi yapmak mümkündür.

Tablo 4.9: Numune gruplarının kesme çapağı ve sac kalınlıkları ölçümü değerleri.

Numune tipi	A Tarafı								B Tarafı								
	N ₁				N ₂₀				N ₁				N ₂₀				
	t	t _{ort}	U _{maks}	U	t	t _{ort}	U _{maks}	U	t	t _{ort}	U _{maks}	U	t	t _{ort}	U _{maks}	U	
GRUP-1	Tip1	284			0	282			0	285			6	284			8
	M5-0,30 (1,3)	285	284	2	2	284	283	2	2	285	285	8	8	283	283	8	8
	80050010001	282			1	282			1	284			1	282			1
	Tip2	224			1	225			3	224			7	224			12
	MoH 0,23 (0,75)	225	223	1	1	224	224	3	3	224	224	11	11	223	224	12	11
	8,005E+11	220			1	224			2	224			1	224			0
	Tip3	260			1	258			1	259			2	255			13
	NV27S-0,27 (1,1)	261	260	2	2	256	257	2	2	260	259	2	2	258	257	13	10
	8050010110	259			1	257			1	257			1	258			1
	Tip4	265			5	263			2	266			7	264			8
	MoH 0,27 (0,85)	265	266	5	2	264	264	2	1	267	267	7	5	264	264	8	6
	8,005E+11	267			0	264			1	267			2	265			1
	Tip5	288			1	285			4	288			10	285			8
	M4-0,30PH110 (1,1)	287	287	2	2	285	284	4	1	288	288	10	0	285	284	8	2
8,005E+11	286			2	283			2	287			2	283			1	
GRUP-2	Tip1	288			6	289			0	288			10	289			11
	M5-0,30 (1,3)	287	286	6	0	288	288	1	1	287	287	10	10	288	288	11	8
	80050010001	284			0	286			1	285			2	288			2
	Tip2	224			1	223			1	222			11	222			12
	MoH 0,23 (0,75)	224	224	1	0	222	222	1	0	223	222	18	18	223	222	14	14
	8,005E+11	223			1	222			0	222			2	222			2
	Tip3	256			3	260			1	257			13	257			11
	NV27S-0,27 (1,1)	256	256	3	1	257	258	1	1	259	258	13	3	256	256	11	11
	8050010110	256			0	258			0	257			3	256			3
	Tip4	267			3	265			1	266			7	266			5
	MoH 0,27 (0,85)	268	267	3	1	266	266	1	1	266	266	7	6	267	266	5	5
	8,005E+11	267			1	266			0	265			1	266			2
	Tip5	287			1	284			2	287			13	288			12
	M4-0,30PH110 (1,1)	287	287	1	1	286	285	2	1	286	286	13	9	287	287	12	6
8,005E+11	287			0	285			1	286			4	286			1	
GRUP-3	Tip1	297			7	295			4	297			10	294			10
	M5-0,30 (1,3)	298	298	7	1	294	295	4	1	299	299	10	5	297	295	10	3
	80050010001	300			2	297			3	301			1	295			5
	Tip2	227			6	227			7	224			11	226			6
	MoH 0,23 (0,75)	224	225	6	4	228	227	7	4	224	224	14	14	227	227	10	10
	8,005E+11	223			3	225			3	224			5	228			8
	Tip3	258			9	260			12	260			13	260			15
	NV27S-0,27 (1,1)	259	258	9	2	282	268	12	4	257	259	13	2	260	260	15	9
	8050010110	258			1	262			1	260			7	261			2
	Tip4	259			10	261			9	261			16	260			10
	MoH 0,27 (0,85)	258	259	10	2	261	260	9	7	258	259	16	1	260	260	10	3
	8,005E+11	259			1	258			2	258			11	260			1
	Tip5	287			5	290			6	286			7	288			10
	M4-0,30PH110 (1,1)	285	286	5	3	289	289	6	3	286	286	7	7	287	287	10	1
8,005E+11	285			2	289			2	287			2	287			1	
GRUP-4	Tip1	290			1	293			2	287			1	291			1
	M5-0,30 (1,3)	288	287	4	1	290	290	3	3	286	286	1	1	287	287	1	1
	80050010001	282			4	288			1	286			1	283			1
	Tip2	228			3	226			1	228			2	225			2
	MoH 0,23 (0,75)	229	228	6	6	227	226	4	4	227	227	2	2	225	225	2	1
	8,005E+11	227			1	226			2	226			1	224			1
	Tip3	259			3	259			3	254			4	260			2
	NV27S-0,27 (1,1)	256	257	3	3	260	260	5	5	253	254	4	1	260	260	3	2
	8050010110	255			3	262			1	255			3	259			3
	Tip4	265			1	259			1	261			1	260			2
	MoH 0,27 (0,85)	259	262	6	6	257	258	4	1	261	261	2	2	260	259	2	2
	8,005E+11	261			3	257			4	261			2	258			2
	Tip5	289			1	288			4	289			2	292			1
	M4-0,30PH110 (1,1)	287	287	2	1	289	288	4	1	289	289	2	1	290	290	2	2
8,005E+11	286			2	288			2	288			2	289			2	

Tez çalışmamızda transformatör imalatında kullanılan GO sac kesme sürecimizin bağımsız ve bağımlı değişkeni aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Y : Bağımlı değişkeni, Y_A ve Y_B : A ve B makasların ürettiği çapaklar sürecin kontrol altında tutulması gereken çıktısıdır.
- X_1 : Bağımsız değişkeni, X_{1A} ve X_{1B} : A ve B makasının yıpranma seviyelerinin göstergesi olarak kaydedilen vuruş sayısıdır.
- X_2 : Bağımsız değişkeni: X_{2A} ve X_{2B} : Kesimi yapılan sacın kalınlık verisidir.

Kesme boşluğu, kesme hızı, üst makas stroğu, makasları hareket ettiren mekanizmanın mil gücü ve makasların dalma açısı gibi diğer kesme parametrelerinin birer sabit olarak kabul edildiği analizde, sac kalınlığı varyansı çapak seviyesini etkileyen bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Kalınlık değerleri Şekil 4.2’de verilen W genişliği boyunca 3 noktadan yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması olarak alınmıştır.

Tablo 4.9’ da verilen kalınlık ve çapak ölçümlerinin, makas vuruş sayıları ile verildiği, tüm süreç değişkenlerinin bir arada yer aldığı sadeleştirilmiş hali Tablo 4.10’ da verilmiştir.

Tablo 4.10: Regresyon analizi veri tablosu.

X_1	X_2	Y
179164	223,0	7
179208	266,5	3
203761	225,7	7
429945	288,5	4
429990	258,5	5
430012	259,7	6
430024	287,8	4
586763	283,8	8
586811	223,8	12
668877	286,0	10
668577	287,5	11
669613	257,0	13
642607	297,2	10
641989	225,5	14
642055	286,8	10
90518	256,8	4
90560	289,5	2

Tablo 4.10’ da verilen verilerle kurulan tam karesel regresyon genel denklemi aşağıda verilmiştir:

$$Y_u = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{iu} + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_{iu}^2 + \sum_{i<j}^n \beta_{ij} X_{iu} X_{ju} + e_u \quad (4.1)$$

Bu denklemin katsayıları aşağıdaki matris çarpımlarından yararlanılarak hesaplanır:

$$\beta^T = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n] \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} (X^T Y)$$

$$(4.4)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & x_{11} x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & x_{12} x_{22} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{13}^2 & x_{23}^2 & x_{13} x_{23} \\ \dots & & & & & \\ 1 & x_{1N} & x_{2N} & x_{1N}^2 & x_{2N}^2 & x_{1N} x_{2N} \end{bmatrix}$$

MINITAB yazılımı ile yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.1'de verilmiştir.

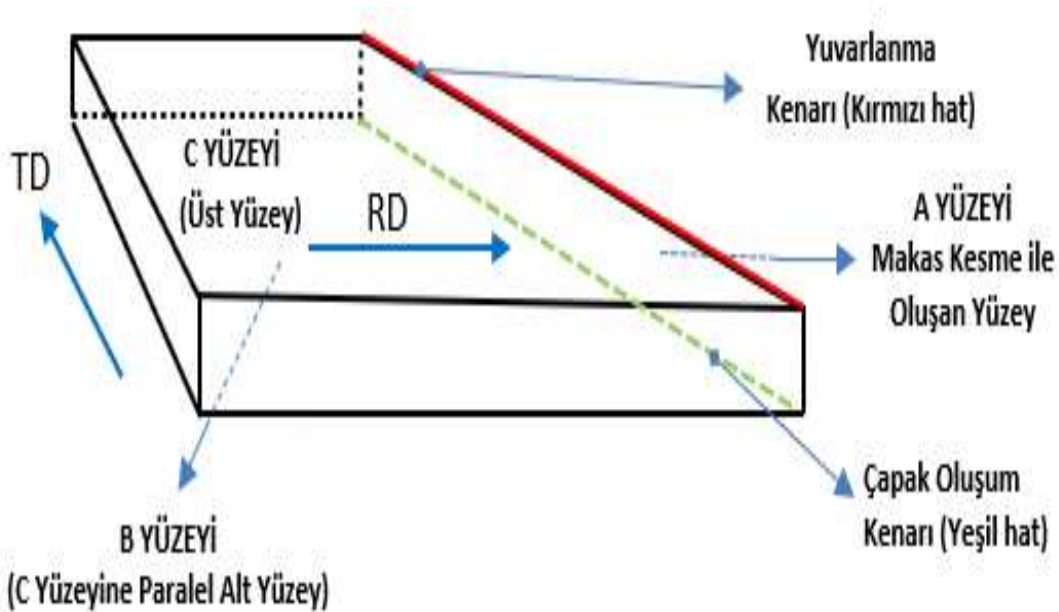
4.3 Kesme Kenarında Mikro İncelemeler

Kesme kenarı civarında GO sacın maruz kaldığı plastik deformasyon seviyesinin anlaşılması için yapılan çalışmalar bahsedilen literatürün yönlendirmesi ile aşağıdaki çalışmalardan oluşmaktadır: (1) Numune hazırlama çalışmaları; standart ve standart dışı EPSTEIN testleri için numunelerin kesildiği gibi ve tavllanmış sac örneklerin oluşturulması, (2) Bu numunelerin çeşitli sıcaklıklarda gerilim gidermeye tabi tutulması, kesildiği gibi ve tavllanmış örneklerin EPSTEIN test düzeneğinde standarda uygun ve standarda uygun olmayan dizim tekniği uygulanarak kayıp ölçümlerinin yapılması, (3) Elektron mikroskopi yöntemi ile kesme kenarı civarında malzeme incelemeleri için kesildiği gibi ve tavllanmış GO sac örneklerin oluşturulması ve ölçümler yapılması, (4) Prototip nüveler için sacların kesildiği gibi ve gerilim giderme sürecine tabi tutulmuş gruplarından üretilmesi, (5) Prototip nüve üretimi, farklı yapıda gerçek nüveler dizilmesi ve karşılaştırmalı olarak ölçümler yapılması.

4.3.1 Numune Hazırlama Çalışmaları

Tablo 4.1’de tanımlanan Tip-2 MoH 0,23 mm ve Tip-1 M5 0,30 mm GO sac grupları ile Şekil 4.2’de verilen ölçülerde ve Şekil 4.4’ de verilen geometrik yüzey ve kenar tanımlamalarına uygun olarak kesildiği gibi ve tavllanmış olarak hazırlanmış olan numuneler SEM, EDX, EBSD, XRD ve mikro sertlik incelemelerine tabi tutuldu. Örneklerin sahip olduğu kesme çapak seviyesinin incelenecek olgulardaki etkisini görebilmek için numune grupları her seferinde **yüksek çapak** ve **düşük çapak** seviyesini temsil edecek 2 ayrı grup şeklinde oluşturulmuştur. Örneklerde Şekil 4.2’ de verilen geometriye uygun olarak plastik deformasyonun oluştuğu A ve B tarafından çapak seviyesi ölçümleri kaydedildi. Bu amaçla, öncelikle Tip-2 MoH 0,23 mm örneklerin ısıtıl işlem sonrası ve kesildiği gibi hallerinin mukayesesini yapabilmek için gerekli numune hazırlama işlemleri yürütülmüştür.

Tavllanmış Tip-2 MoH 0,23 mm numunelerde kesildiği gibi örneklerde olduğu gibi örneklerin (düşük çapaklı ve yüksek çapaklı olarak) çapak seviyesi açısından incelenebilmesi için, her iki kenarda 2 noktadan çapak ölçümleri yapıldı, 4 adet düşük çapak ve 4 adet yüksek çapak numunesi belirlenmiştir. Tablo 4.11’ de seçimi yapılan örnekler renklendirilerek diğerlerinden ayrılmıştır.

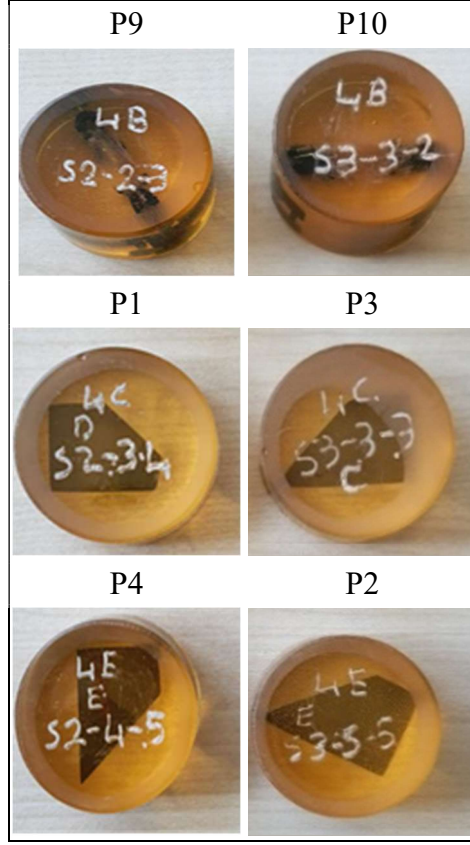


Şekil 4.4: SEM, EBSD ve EDX incelemeleri, kalıntı gerilimi ölçümleri, kesme kenarı görüntüleme çalışmaları için numune geometrisi.

Tablo 4.11: Tavlanmış Tip-2 MoH 0,23 saclardan elde edilen çapak ölçümleri.

Numune numarası	A Tarafı					B Tarafı				
	t_{ort} (μm)	t (μm)	t_{burr} (μm)	U (μm)	U_{maks} (μm)	t_{ort} (μm)	t (μm)	t_{burr} (μm)	U (μm)	U_{maks} (μm)
N ₁	227,0	227	228	1	1	226,5	227	238	11	11
		227	227	0			226	227	1	
N ₂	230,0	232	238	6	6	225,0	224	228	4	4
		228	228	0			226	226	0	
N ₃	226,0	226	235	9	9	223,5	223	231	8	8
		226	227	1			224	224	0	
N ₄	223,0	223	231	8	11	224,5	225	234	9	9
		223	234	11			224	226	2	
N ₅	226,0	226	232	6	6	225,5	226	231	5	5
		226	227	1			225	226	1	
N ₆	225,5	226	230	4	4	225,0	226	232	6	6
		225	225	0			224	226	2	
N ₇	226,0	226	233	7	7	225,5	226	233	7	7
		226	226	0			225	228	3	
N ₈	225,0	224	230	6	6	225,0	226	233	7	7
		226	227	1			224	226	2	
N ₉	223,5	223	229	6	6	224,0	224	234	10	10
		224	224	0			224	230	6	
N ₁₀	224,0	225	233	8	8	225,5	226	230	4	4
		223	228	5			225	226	1	
N ₁₁	227,0	226	229	3	3	226,0	226	228	2	2
		228	228	0			226	226	0	
N ₁₂	225,5	226	230	4	4	225,0	225	231	6	6
		225	227	2			225	229	4	
N ₁₃	226,0	225	228	3	3	224,5	226	231	5	13
		225	226	1			223	236	13	
N ₁₄	226,0	226	226	0	0	225,0	225	235	10	10
		226	226	0			225	231	6	
N ₁₅	225,0	225	230	5	5	224,0	222	232	10	10
		225	226	1			226	231	5	
N ₁₆	224,0	225	229	4	4	225,5	226	230	4	4
		223	223	0			225	225	0	

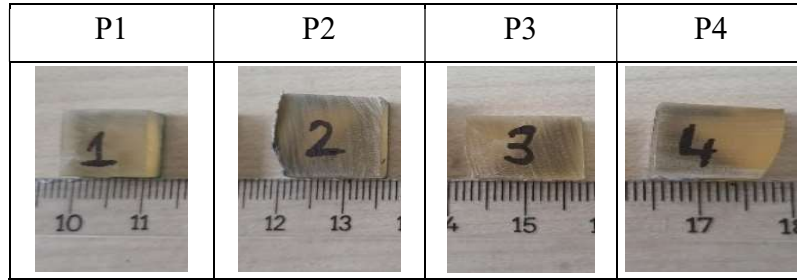
İlk aşamada Tip-2 MoH 0,23 mm sac tipinde kesildiği gibi numuneler Şekil 4.4' deki geometrik forma ve yüzey-kenar tanımlamalarına uygun olarak şeffaf bakalite alınarak mikro sertlik, SEM, XRD, EDX incelemeleri, EBSD ve kesme kenarı görüntüleme çalışmaları için yüzey hazırlama işlemine tabi tutuldu. Tez çalışmasının erken dönemlerinde numune kodlamada kullanılan "S" ile başlayan numune kodlamaları ilerleyen süreçlerde karmaşaya sebep olmaması adına kesildiği gibi numuneler için "P" ile başlayan kodlamalar ile, tavlama maruz kalmış numuneler için "R" ile başlayan kodlamalarla düzenlendi.



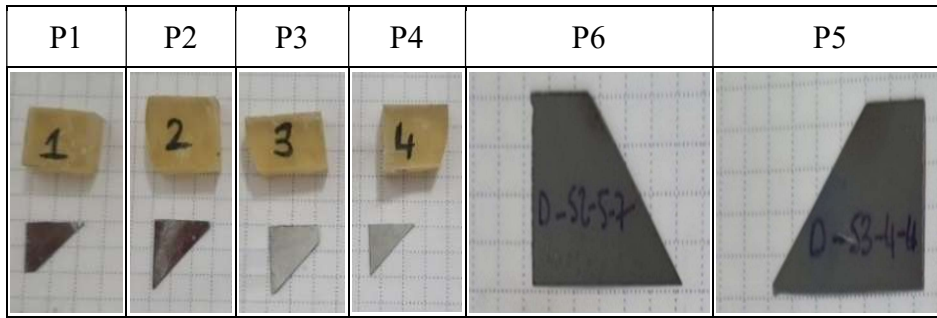
Şekil 4.5: Bakalite alınmış ve yüzeyi hazırlanmış ısıl işlem görmemiş kesildiği gibi numuneler.

Kesme esnasında oluşan kenarının yüzey morfolojisini görüntülenebilmesi amacıyla Tablo 4.12’ de verilen tanımlamaya göre P1 ve P3 kodlu numuneler bu incelemelere atanmıştır. Bu numunelerde yapılan incelemelerde kesme kenarına yakın bölgelerde, plastik deformasyonun etkili olduğu bölgenin derinliğini anlamaya çalışıldı. Şekil 4.4’te verilen geometride “C” yüzeyinde ve RD doğrultusunda, yuvarlanma kenarından yaklaşan doğrultuda GOSS doğrultusundan sapmayı haritalamak maksadı ile EBSD çalışması yapılması planlandı. EBSD çalışmalarında incelenmek üzere P4 ve P2 kodlu numuneler atandı. Kesme kenarı yakınında ve uzağında plastik deformasyon etkisi ile oluşan kalıntı gerilim ölçümlerinin XRD metodu ile ölçümleri için P5 ve P6 kodlu numuneler belirlendi. EBSD ve SEM incelemeleri olan SEM cihazı ODTÜ Merkez Laboratuvarları’ nda yapıldı. Cihazın tutucusuna yerleştirilebilmek için incelenecek çok hassas parlatılmış ve dokunulmamış yüzeyler dokunulmamış kalacak şekilde yaklaşık (10 mm x 10 mm) boyutlarına düşürülüp özel bir solüsyonla (*Colloidal Silica*) ile son yüzey parlatma işlemine tabi tutulduktan sonra SEM ve EBSD incelemeye hazır hale getirildiler. Aşağıda Şekil 4.6 ‘da bakalite alındıktan sonra parlatılmış ve bakalitten kesilerek çıkarılmış numuneler, Şekil

4.7’ de SEM ‘de malzeme tutucusu boyutlarına düşürülmüş halleri ve XRD numuneleri gösterilmektedir. Tablo 4.10’ da ise Tip-2 MoH 0,23 mm bakalite alınmış kesildiği gibi örneklerle yapılacak test ve deneylerin planı verilmiştir.

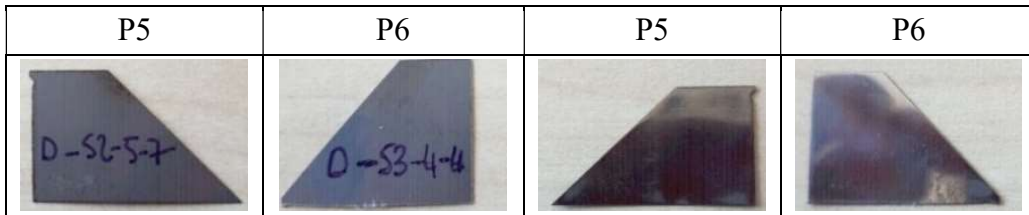


Şekil 4.6: SEM cihazı için küçültülmüş numuneler.

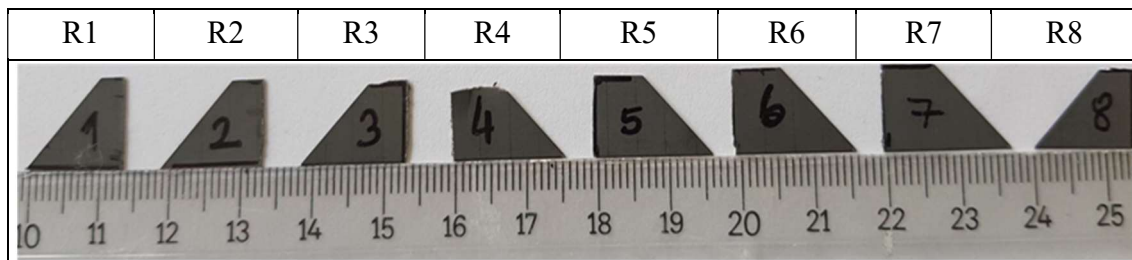


Şekil 4.7: Bakalitten çıkarılmış ve incelemeler için hazırlanmış numuneler.

Aşağıda Şekil 4.8’ de ise kalıntı gerilimi ölçümü için ayrılmış olan parlatılmış Tip-2 MoH 0,23 mm numuneler gösterilmektedir. Şekil 4.9 ‘da ise tavlamaya maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm örnekler topluca gösterilmektedir.

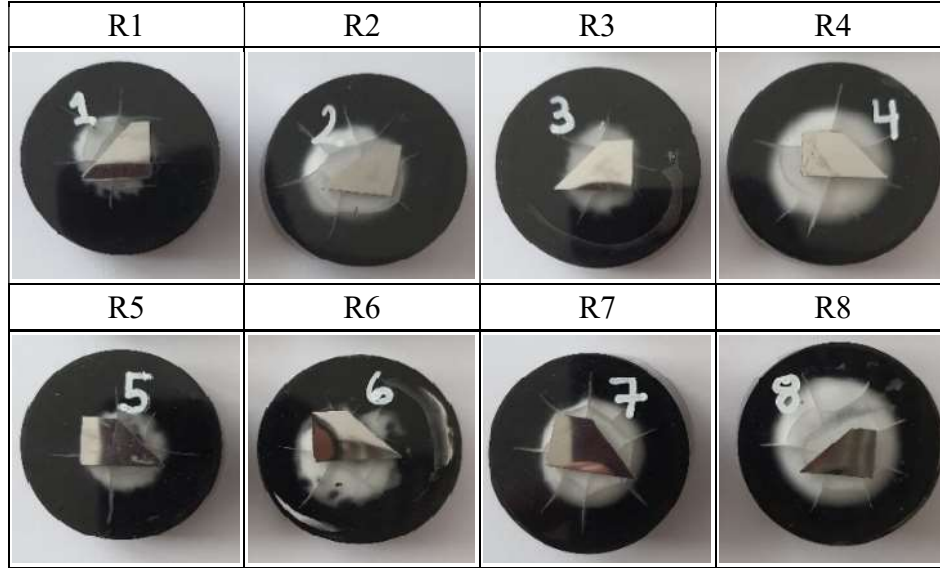


Şekil 4.8: Tip-2 MoH 0,23 mm sac tipinden kalıntı gerilim ölçümleri için hazırlanmış numuneler P5 ve P6.



Şekil 4.9: Isıl işlem maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm GO saclardan elde edilen inceleme numuneler.

Sonraki aşamada, Şekil 4.10’ da verilen Tip-2 MoH 0,23 mm sac grubundan 800 °C ‘de 2 saat boyunca gerilim giderme ve yeniden kristalleneme ısıl işlemine maruz bırakılmış örnekler aşağıda Tablo 4.11’ de planlamaya göre bakalite alınmıştır.



Şekil 4.10: Parlatma işlemleri için bakalite alınmış tavlanmış Tip-2 MoH 0,23 mm numuneler.

Tablo 4.12: Tip 2 MoH 0,23 mm kesildiği gibi numuneler ile yapılan analizlerin planı.

Talep edilen inceleme	Hedeflenen görüntüleme	Eski kod	Yeni kod
EBSD Numunesi-1	Bu numuneler karşılaştırmalı olarak EBSD’ de IPF paterni için kullanıldı.	(S2-4-5)	P4
EBSD Numunesi-2	Bu numuneler karşılaştırmalı olarak EBSD’ de IPF paterni için kullanıldı.	(S3-5-5)	P2
SEM Numunesi-1	Kesme kenarı civarında tane sınırı, tane sınır açısı, kesme bantları, 3 boyutlu hataları EDX analizleri, plastik deformasyonun etkili olduğu bölgenin derinliğini anlamak için kullanıldı.	(S2-3-4)	P1
SEM Numunesi-2	Kesme kenarı civarında tane sınırı, tane sınır açısı, kesme bantları, 3 boyutlu hataları EDX analizleri, plastik deformasyonun etkili olduğu bölgenin derinliğini anlamak için kullanıldı.	(S3-3-3)	P3
SEM Kesme Kenar Numunesi-1	XRD İç gerilim ölçme numunesi- Düşük çapak numunesidir.	(S2-5-7)	P5
SEM Kesme Kenarı Numunesi-2	XRD İç gerilim ölçme numunesi- Yüksek çapak numunesidir.	(S3-4-4)	P6

Tablo 4.12 Devamı

Mikro sertlik tarama numunesi-1	Kesme kenarında içeriye doğru mikro sertlik tarama; düşük çapak numunesidir.	(S2-1-2)	P7
Mikro sertlik tarama numunesi-2	Kesme kenarında içeriye doğru mikro sertlik tarama için yüksek çapak numunesidir.	(S3-3-1)	P8
Yüzey morfolojisi numunesi-1	Dik bakışla incelenen düşük çapak numunesidir.	(S2-3-3)	P9
Yüzey morfolojisi numunesi-2	Dik bakışla incelenen yüksek çapak numunesidir.	(S3-3-2)	P10

Aşağıda Tablo 4.13’ de ısıtılma maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm sac örnekleri için deney ve inceleme planı verilmiştir.

Tablo 4.13: Isıl işlem maruz bırakılmış Tip-2 MoH 0,23 mm GO saclarda numune numarasına göre yapılan incelemeler.

Deney tipi	Test ve inceleme içeriği	Minimum çapak numunesi kodu	Maksimum çapak numunesi kodu
Mikro sertlik tarama	Kesme kenarında 100 ve 200 mikron aralıklarla içe doğru tarama, gerilim giderme tavlama maruz kalmış örneklerdir. (800 °C, 2 saat)	R5	R2
SEM	Oluşan kesme kenarının yüzey morfolojisi görüntüleme numuneleri, (250X, 500X, 1kX, 5kX, 10kX)	R4	R3
SEM+ EDX	Kesme kenarı civarında yapılacak inceleme numuneleri.	R4	R3
EBSD	Karşılaştırmalı EBSD ile IPF paterni numuneleri.	R8	R7

Yapılan tüm deney ve incelemelerden elde edilen sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.2, 5.3 ve 5.4’ te verilmiştir.

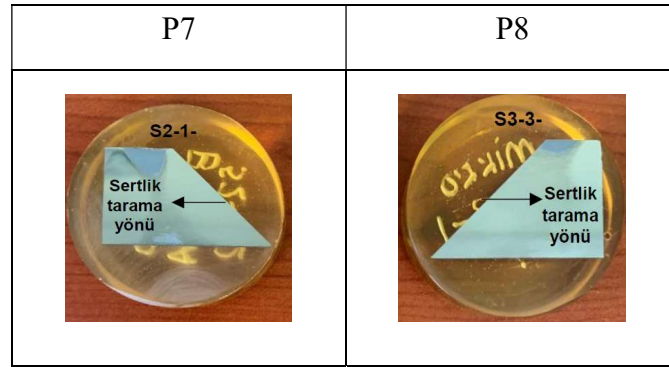
4.3.2 XRD Kalıntı Gerilimi Analizleri

Tip-2 MoH 0,23 mm GO saclardan hazırlanan 2 adet numune olan P5 ve P6, TÜBİTAK Marmara Malzeme Araştırma laboratuvarlarında yer alan PANalyticalX2pert Pro MPD model cihazda Cu-X ($\lambda=1,5406$ Angstrom) X- ışınına tabi tutularak kesme kenarı civarında ve numune ortası civarında plastik deformasyon sonucu oluşan kalıntı gerilimleri

ölçülmüştür. Kesme kenarı civarında alınan ölçüm plastik deformasyonun etkisinin göstergesi olarak kabul edilip numune ortasında ise deformasyon etkisinin oluşmadığı varsayılmıştır. P5 ve P6 numuneleri kesildiği gibi numunelerdir yani gerilim giderme ısıtma işlem sürecine tabi tutulmamışlardır. Yapılan bu ölçüm sayesinde kesme plastik deformasyonu sonrasında malzemede oluşan kalıcı iç gerilmeler konusunda fikir sahibi olmak amaçlanmıştır. Sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.2’ de verilmiştir.

4.3.3 Mikrosertlik Taramaları

Kesme kenarı civarında kesme kenarında uzaklaşan doğrultuda mikrosertlik taraması yapılarak numunelerde deformasyon etkin bölgesinin sınırları ve sertlik değişim gradiyenti belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda ilk ölçüm TUBITAK MAM Laboratuvarları’nda TS EN ISO 6507-1 standardına uygun olarak (QNESS Q10 A+) cihazında aşağıda Şekil 4.11’ de verilen P7 ve P8 kesildiği gibi numuneler ile gerçekleştirildi. Ölçümlerde 100 gr yük ile $Hv_{0,1}$ Vickers sertlik taraması yapıldı. Benzer bir tarama ODTÜ merkez laboratuvarlarında tavllanmış GO sac örnekleri Şekil 4.10’ da verilen R2 ve R5 örnekleri ile tekrar edildi. Elde edilen sertlik gradiyentleri tablolar, grafikler ve tartışmalar bölüm 5.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.11: Mikro sertlik tarama numuneleri; P7 düşük çapak numunesi ve P8 yüksek çapak numunesi.

4.3.4 Optik Mikroskop Görüntülemeleri

Bu bölümde konu başlığı hakkında yapılan çalışmalar, elde edilen sonuçlar ve tartışmalardan bahsedilecektir. İlk aşamada, Tip-2 MoH, 0,23 mm numune saclarla hazırlanan (10 x 10 mm) boyutlarındaki numunelerde kesme kenarı yakınlıklarında optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Şekil 4.4’ de tanımlanan geometriye göre “C” üst yüzeylerinden değişik büyütme oranlarında görüntüler elde edilmiştir. Numunelerde tane sınırlarını görebilmek için parlatma sonrası birkaç deneme ile %3,5 -10,0 arası değişen derişimlerde

Nital çözeltisi ile kademeli olarak dağlama yapılmıştır. Tane sınırları olduğunu değerlendirdiğimiz yapısal süreksizlikler ancak %10' luk çözelti ile yapılan dağlama sonrası görülebildi. Dolayısıyla, iri taneli çeliklerde beklenebilecek bir sonuç olarak aynı görüntü içine çok sayıda tane sınırı gözlemi veren görseller elde edilemedi. Sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.4' de verilmiştir.

Yukarıdaki çalışmanın yetersiz kaldığı değerlendirilerek, optik mikroskop ile yapılan incelemelerin ikinci aşamasında kesme yüzeyi morfolojisini görüntülemek için, Şekil 4.10 'da gösterilen ve Tablo 4.12' de verilen planlamaya göre P9 ve P10 kodlu şeffaf bakalite daldırılmış numuneler Şekil 4.4' te verilen geometrik tanımlamalara göre "A" yüzeyine dik bakışla optik mikroskop altında bir kez daha incelendi. İncelemeler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ARUM laboratuvarlarında (ZEIS STEMI 508) mikroskop ile yapıldı. Sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.4' de verilmiştir.

Son aşamada ise, optik mikroskopi yöntemi ile elde edilen görüntülemelerin çözünürlük ve büyütme skalası açısından yetersiz kaldığı değerlendirilerek ve tavlama numuneleri de kapsayacak şekilde ODTÜ Merkez Laboratuvarındaki SEM cihazında kesme yüzeyine dik bakışla kesme esnasında oluşan kenarda görüntüleme çalışmaları kesildiği gibi ve tavlama örnekler için tekrar elde edildi. Farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntülemeleri ekler bölümünde Şekil A.1' de ve Şekil A.2 'de verilmiştir. Şekil A.1' de P5 ve P7 kesildiği gibi örneklerde kesme sonrası oluşan yüzeye dik bakışla elde edilen düşük ve yüksek çapak örnekler karşılaştırılmıştır. Şekil A.2' de ise P1 ve P3 kesildiği gibi örneklerinde kesme kenar çizgisine üstten bakışla deformasyon etkin bölgedeki görüntülemeler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Şekil A.4' de düşük çapak R4 ve yüksek çapaklı R3 tavlama örneklerinin görüntüleri verilmektedir. Sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.4' de verilmiştir.

4.3.5 Kesme Kenarı SEM ve EDX İncelemeleri

Kesme kenarı civarında Şekil 4.4' de tanımlanan geometriye göre "C" üst yüzeylerinden yapılan SEM taramaları ve EDX çalışmaları kapsamında ilk aşamada kesildiği gibi örnekler için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Uygulama Merkezinde P1 ve P2 kodlu düşük çapak ve yüksek çapak içeren numunelerde SEM gözlemleri yapıldı. İncelemeler (JEOL JSM 5600 LV) tanımlı cihazda gerçekleştirildi. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve tartışmalardan bölüm 5.5' da bahsedilecektir.

4.3.6 EBSD ve Ters Kutup Tekstürü Görüntüleme Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde numuneler üzerinde bulunan açılı kesme kenarları yakınında kesme etkisi ile tavllanmış ve tavlınmamış örneklerde kristalografik yönelmenin nasıl gerçekleştiği ve değiştiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu maksatla P4, P2, R4 ve R8 kodlu numuneler, tavlınmış ve kesildiği gibi olarak incelenmiştir. Numuneler ayrıca düşük çapak ve yüksek çapak ayırımı yapılarak karşılaştırılmıştır. İncelemeler ODTÜ Merkez Elektron Laboratuvarlarında TLS OIM model cihazda ve 3µm çözünürlükte yapılan tarama ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve tartışmalardan bölüm 5.6' da detaylı olarak bahsedilecektir.

4.4 EPSTEIN Cihazında Demir Kaybı ve Histerisiz Ölçüm Çalışmaları

Tip-2 MoH 0,23 mm ve Tip-1 M5 0,30 mm sac örneklerinden su jeti ile numune hazırlama çalışmaları kapsamında plastik deformasyon seviyesinin ısıtılma öncesi ve sonrasında manyetik özelliklere etkisini anlayabilmek amacıyla EPSTEIN testi numuneleri hazırlanmıştır. Standart EPSTEIN testinde kullanılacak numune boyutları test standardında IEC 60404-2 belirtildiği [65] gibi (30 x 300 mm) boyutlarında hazırlanmıştır. Bu çalışmada standarda tarif edilenden farklı olarak cihaz üstünde **step-lap dizim metodu** uygulanarak da demir kaybı ve histerisiz kaybı ölçümleri yapılmıştır. Histerisiz grafikleri ısıtılma öncesi ve sonrası durum için Tip-1 M5 0,30 mm sac ölçümlerinde oluşturulmuş ve karşılaştırılması verilmiştir.

Tip-2 numuneler ile yapılan denemelerin her birinin boyutsal ve dizim tekniği açısından özeti aşağıda verilmiştir:

- (1) Standart dışı ölçümdür, 360/300 x 30 mm boyutlarında Tip-2 numuneler ile dört köşede $30 \times 30 = 900 \text{ mm}^2$ bir kare alanı boyunca yüzey teması veren şekilde dizilmiştir,
- (2) Standart dışı ölçümdür, 300/240x29 mm boyutlarında Tip-2 numune-ler ile 4 köşede 193 mm^2 temas yüzey alanı verecek şekilde dizilmiştir,
- (3) Standart dışı ölçümdür, 300/240x29 mm boyutlarında Tip-2 numuneler ile her köşelerde farklı miktarlarda temas yüzeyi verecek şekilde dizilmiştir, bu ölçüm sonucu değerlendirme dışı bırakılmıştır.

(4) Standart dışı 360/300x30 mm boyutlarında Tip-2 numuneler ile dört köşelerde 30x30=900 mm² bir kare alanı boyunca yüzey teması veren, köşelerde 1 N değerinde baskı kuvveti uygulanan ölçümdür. Köşelerde yük olarak 100 gr ağırlığında ferromanyetik olmayan bir kütle kullanılmıştır.

(5) Standart dışı ölçümdür fakat step-lap dizim tekniğine uygun olarak dizilmiş 280/220x30 mm boyutlarda Tip-2 numuneler ile yapılmıştır. Köşelerde baskı kuvveti yoktur.

(6) Standart dışı ölçümdür, 280/220x30 mm Tip-2 numuneler ile, step lap dizim tekniğinde dizildi. Köşelerde 1 N baskı vardır.

(7) Standart dışı ölçümdür, 360/300x30 mm Tip-2 numuneler standarda uygun dizilmiştir. Köşelerde baskı yoktur. (1) nolu ölçüm ile aynı koşullarda yapılan diğer ölçüm tekrarıdır.

(8) Standart dışı ölçümdür, 360/300x30 mm Tip-2 numuneler ile standarda uygun dizildi. İlâveten köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.

(9) EPSTEIN test standardına uygun 300x30 mm Tip-2 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde baskı kuvveti yoktur.

(10) EPSTEIN test standardına uygun 300x30 mm Tip-2 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.

Tip-1 M5 0,30 mm sac örneklerle yapılan ölçümler ise aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

(1) EPSTEIN test standardına uygun 300x31 mm kesildiği gibi Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde baskı kuvveti yoktur.

(2) EPSTEIN test standardına uygun 300x31 mm kesildiği gibi Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.

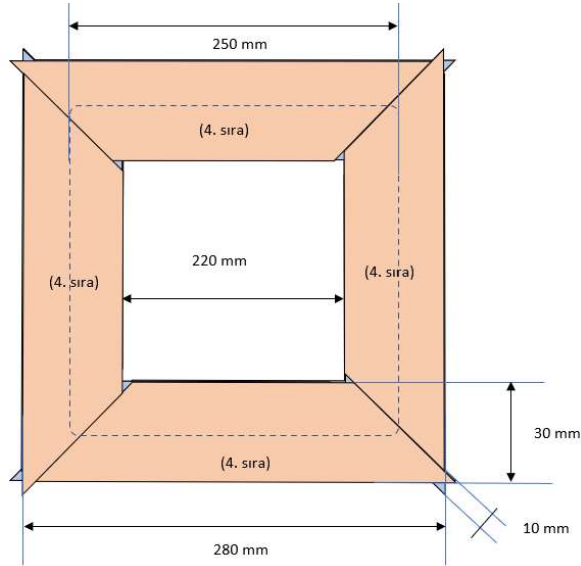
(3) Standart dışı ölçümdür, 267/219x328,5 mm kesildiği gibi Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. İlâveten köşelerde baskı kuvveti yoktur.

(4) Standart dışı ölçümdür, 267/219x328,5 mm kesildiği gibi Tip-1 numuneler ile standarda uygun dizildi. İlâveten köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.

- (5) EPSTEIN test standardına uygun 300x31 mm 800 °C ‘de tavllanmış Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde baskı kuvveti yoktur.
- (6) EPSTEIN test standardına uygun 300x31 mm 800 °C ‘de tavllanmış Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. Köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.
- (7) Standart dışı ölçümdür, 267/219x328,5 mm 800 °C ‘de tavllanmış Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. İlâveten köşelerde baskı kuvveti yoktur.
- (8) Standart dışı ölçümdür, 267/219x328,5 mm 800 °C ‘de tavllanmış Tip-1 numuneler ile yapılan ölçümdür. İlâveten köşelerde 1 N baskı kuvveti vardır.

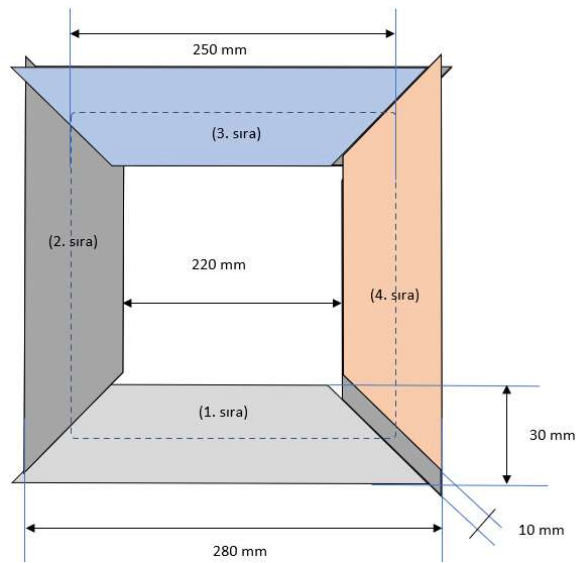
Tek fazlı bir trafoda kenarları 45° gönyeli kesilmiş *step-lap* nüve dizilimi Şekil 4-12’de gösterildiği gibi uygulanabilir. Bu tarzda bir dizim ile GO levhalar ile efektif manyetik akı yolu uzunluğu l_{eff} değerini standartta tarif edilen değerle aynı değerde olan manyetik akı devresi oluşturmak mümkündür. Bu sayede *step-lap* dizim geometrisinin EPSTEIN ölçümlerinde kayıp değerlerine etkisi hakkında yorum yapılabileceği değerlendirilmiştir. Bu maksatla ilk aşamada Tip-2 MoH 0,23 mm sac örnekler *step-lap* dizim tekniğinde (280/220x30 mm) boyutlarında ve 45° gönyelendirilmiş şekilde kesilerek ölçümlere tabi tutulmuştur. Uygulanan dizim şekli tek fazlı trafo dizim koşullarına en yakın dizim yöntemlerinden birisidir. Şekil 4.12’de verilen tek fazlı trafo nüvesi diziminde, manyetik akı uç uca getirilmiş ve karşılıklı olarak alttaki ve üstteki tabakaya yaklaşık 10 mm genişliğinde bindirme yüzeyi boyunca temas eden sacların dizimidir. Her bir tabakadaki izolasyonun temel görevi sac tabakaları arasında elektriksel kısa devre oluşmasını engellemektir. Test cihazında indükleyici primer sargıya uygulanan alternatif gerilimin oluşturduğu manyetik akı sekonder (ölçme bobininde) gerilim indüklerken nüvede oluşan manyetik devrede 7 önemli direnç faktörü veya değişken ile karşılaşır: (1) Akının bir üstteki veya alttaki sac tabakasına transferini zorlaştıran izolasyon tabakaları, (2) Akının bir üstteki veya alttaki sac tabakasına transferini zorlaştıran hava boşlukları, (3) Akının aynı hizada yer alan diğer sac tabakasına geçerken aşmak zorunda olduğu hava boşluğu, (4) Kesme kenarları civarında oluşan plastik kalıcı gerilim paterni, dislokasyon yoğunlaşması, çapak ve kesme yüzeyi paterni, (5) Kristalografik yönlendirmede kesme etkisiyle ortaya çıkan plastik deformasyon ve buna bağlı olarak manyetik geçirgenlikte lokal değişim, (6) Köşelerde üst üste bindirilebilen yüzey alanı miktarı. Dolayısıyla standart dışı dizim tekniği uygulamasıyla, EPSTEIN cihazında tek fazlı *step-lap* dizilmiş bir nüvenin benzeşimi de yapılmış ve kıyas mümkün

ölçümler elde edilmiştir. Şekil 4.12’ de standart dışı dizime en üst laminasyondan bakıldığında görüntüsü yer almaktadır. Kesikli çizgi ortalama manyetik akı yolunu l_{eff} göstermektedir. Uygulanan standart dışı dizimde ortalama manyetik akı yolu standart EPSTEIN testinde olduğu gibi $l_{eff} = 940$ mm uzunluğunda hesaplanmıştır.



Şekil 4.12: Tek fazlı transformatör 5 mm step-lap dizimi, 4 sıralı, üst sıradan görünüş.

Şekil 4.13’ de, dizim tekniğinin daha kolay anlaşılabilmesi için yan bacaklar (2. ve 4. sıralar), üst ve alt boyunduruklardan (3. sıra üst boyunduruk, 1. sıra alt boyunduruk) sac eksiltilerek step lap dizimin sıralaması gösterilmiştir.

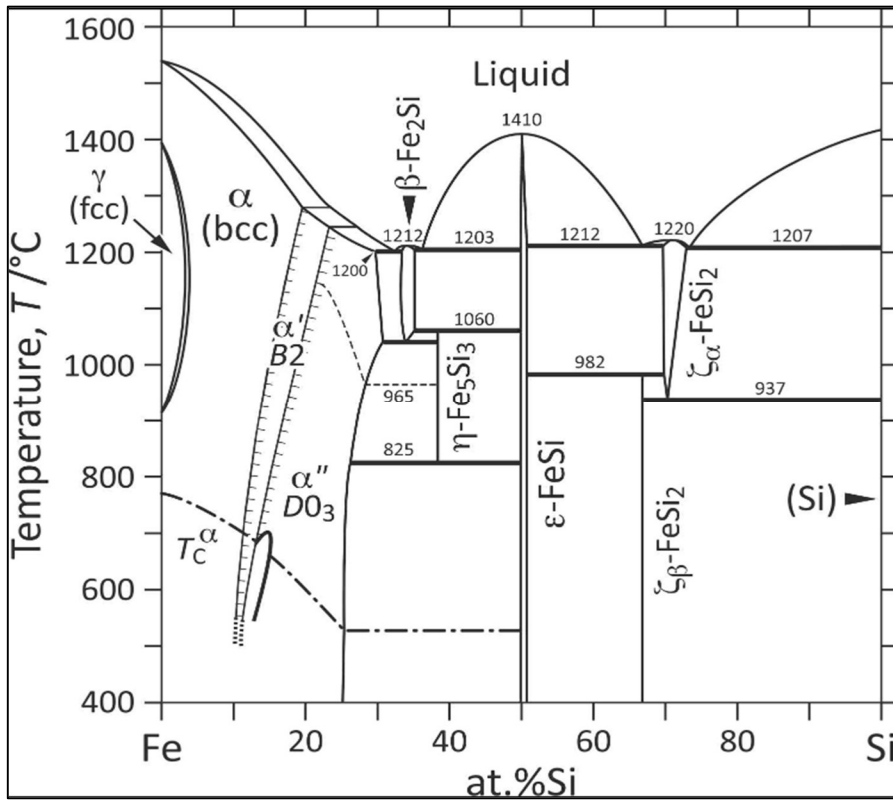


Şekil 4.13: Tek fazlı transformatör 5 mm step-lap dizimi, tüm sıraların üst görünüşü.

Geometriden hesaplanabileceği gibi, bu teknikte akının yön değiştirdiği köşelerde üst üste binen yüzeylerin kesişim yüzeyleri yaklaşık (374 mm^2) büyüklüğünde bir paralel kenardır. Buna karşılık standart EPSTEIN testinde uygulanan dizim tekniği farklıdır. Köşelerde üst üste binen yüzeylerin kesişim yüzeyleri ($30 \times 30 = 900 \text{ mm}^2$) alan genişliğinde bir kare formundadır. Standart dışı dizim tekniğinin uygulanması ile; gerçek trafo dizim tekniğine uygun yapılan dizim ile test metodolojisine uygun yapılan dizim tekniği arasındaki farklılıkların manyetik özelliklerinin ölçümüne etkisi anlaşılmaya, ayrıca Tip-1 M5 0,30 mm örneklerde her iki teknikte yapılan dizimler arasında tavlanmış örneklerde histerisiz çevrimi karşılaştırması yapılması mümkün olmuştur. Sonuçlar ve tartışmalar bölüm 5.7'de verilmiştir.

4.5 Isıl İşlem Çalışmaları

Aşağıda Şekil 4.14'de GO trafo nüvesi malzemesi Fe-%3Si alaşımının faz diyagramı verilmiştir. GO sac alaşımında oda sıcaklığından $900 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar α -ferritik faz yapısı görülür. Alaşımın manyetik paramanyetik geçiş sıcaklığı ($770 \text{ }^\circ\text{C}$) civarındadır ve pratikte $780\text{-}820 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında ısıtılma maruz bırakılabilir. [56,67]



Şekil 4.14: Fe-Si alaşımı faz diyagramı ve Silisyumun malzeme yapısına etkisi [68].

Deneyleerde kullandığımız sacların üreticisi tarafından da belirtildiği gibi [69], elektrik çeliklerin elektro-manyetik performansları kesme, dilme, delme ve bükme gibi mekanik işlemler sonrasında kötüleşme gösterebilir. Gerilim giderme süreçleri ile kayıplar kısmen geri kazanılabilir. Gerilim giderme süreç parametreleri sacın uğradığı deformasyon seviyesine göre belirlenmelidir, gerilim giderme ısı işleminde bazı prensipler göz önünde bulundurulmalıdır; (1) ısıtma ya da soğuma hızı ile elektro-manyetik özelliklerin geri kazanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur, ısıtma ve soğutma hızını belirlerken süreç sonunda ortaya çıkabilecek deformasyon dikkate alınmalıdır. (2) ısıtma aralığı ve bekleme aralığı 780-820 °C aralığı uygundur. Bu aralıkta yeteri kadar beklemek gerekir, bekleme süresi nüve kütlesine ve yapısına bağlı olarak değişebilir. (3) ısıtma veya soğuma esnasında karbürizasyonun ve oksidasyonun engellenmesi gerekir. Oksidasyon ve karbürizasyon elektromanyetik özelliklerin kötüleşmesine neden olur. (4) fırın atmosferindeki koruyucu gazların fırın içinde yoğunlaşma yapmayacak şekilde seçilmesi önemlidir. (5) sac üzerinde karbürizasyona sebep olacak her herhangi bir yağlayıcı olmamalıdır. Aynı zamanda fırın iç yapısında yüksek sıcaklıkta karbür kaynağı olabilecek malzemeler kullanılmamalıdır.

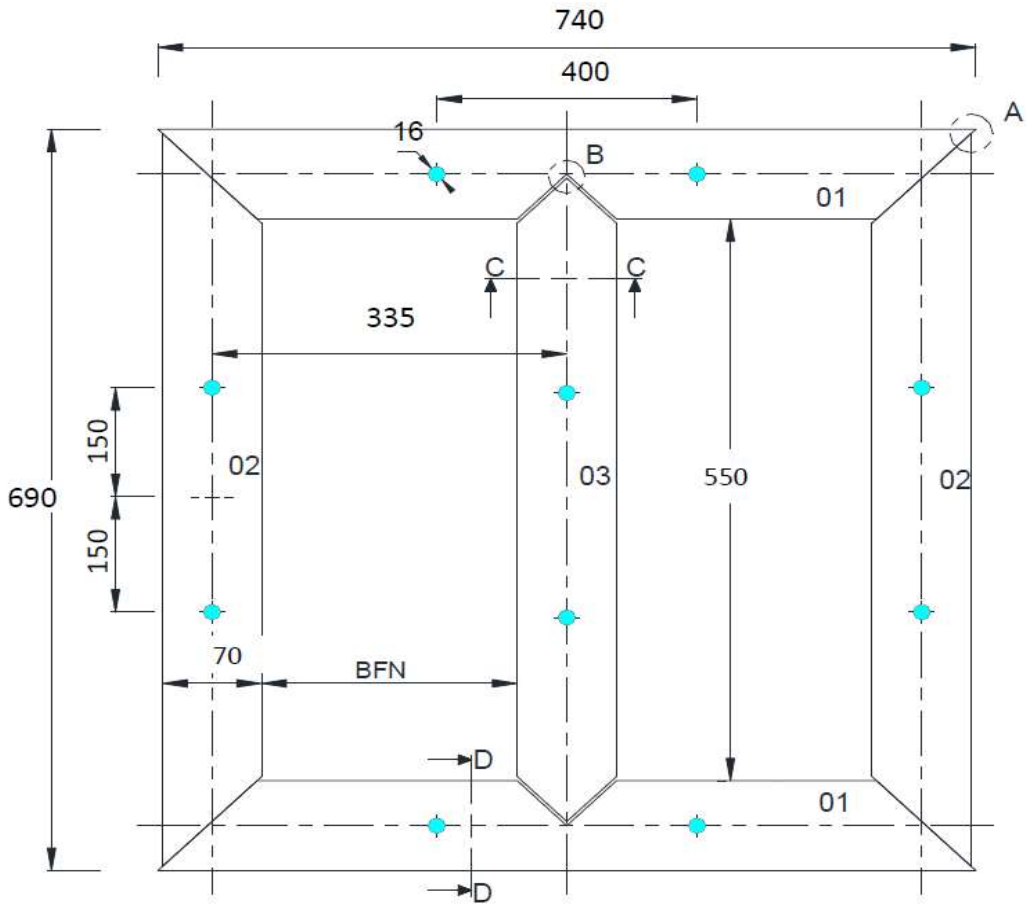
Elektrik saclarında ısı işlemler konusunda bahsettiğimiz literatürün yol göstericiliğinde tez çalışması kapsamında (Tip-2 MoH - 0,23 mm - 0,70 (W/kg) - 1,7 Tesla - 50 Hz) ve (Tip-1 M5 - 0,30 mm - 1,3 W/kg - 1,7 Tesla) katalog değerine sahip 2 farklı GO numune sac grubu değişik sıcaklıklarda ısı işlemlere maruz bırakılmışlardır. Isıl işlem süreçleri sonucu ortaya çıkan manyetik parametrelerin ölçümü EPSTEIN cihazında standart ve standart olmayan dizim teknikleri uygulanarak ölçülmüştür. Yapılan tüm ölçümlerin sonuçlarının özeti ve tartışmalara bölüm 5.6 'da değinilecektir. Tip-2 numuneler ile yapılan standart ve standart dışı ölçümler ek olarak Tablo A.1 'de verilmiştir. Tablo A.2' de ise tüm ısı işlem görmüş ve görmemiş numunelerin ölçümleri her iki tip için beraberce verilmiştir. Bu tablolarda gerilim giderme işlemi öncesinde yapılan standart ve standart olmayan kesildiği gibi numunelerin de ölçümleri yer almaktadır. Tip-2 numune tipi için uygulanan 3 farklı gerilim giderme sıcaklığı ve kesildiği gibi numunelerle yapılan ölçümlerin değerleri de Tablo 5.7' de verilmiştir. Tip-1 numunelere uygulanan bir ısı işlemler ve kesildiği gibi numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 5.8' de verilmiştir.

Gerilim giderme süreçleri Yalova Üniversitesi bünyesinde bulunan cam tüp hazneli vakum altında atmosfer kontrollü (Vacubrand CVC 3000 + Thermocraft) etüv setinde gerçekleştirildi. Süreçte önce ısınma haznesinin vakumu 60 torr altına çekildi, Nitrojen gazı

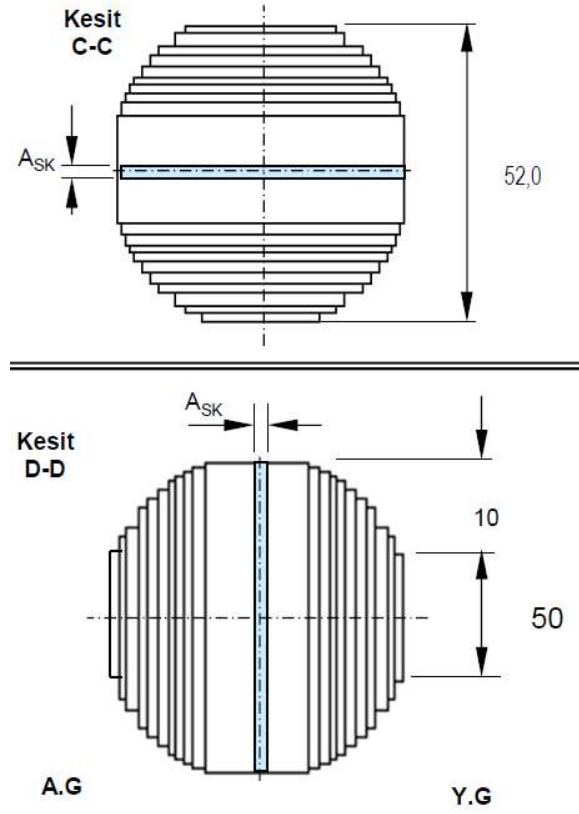
ile süpürme yapıldı ve ortalama 20 torr vakum altında 100-150 cmc (*centimeter cube*) debide Nitrojen debisi sağlanarak atmosferin oksidasyon veya karbürizasyon etkisi bertaraf edilmiş oldu. Vakum ve nötr gaz akışı koşulları oluştuktan sonra fırın 15-20 dk' da rejime gelmiş, 1 saat hedeflenen rejimde kalarak ve kendiliğinden soğuma rejimine geçecek şekilde ısı rejim planlaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve tartışmalardan bölüm 5.7 de bahsedilmiştir.

4.6 Prototip Nüve Tasarımı ve Nüve Bileşenlerinin Isıl İşlemleri

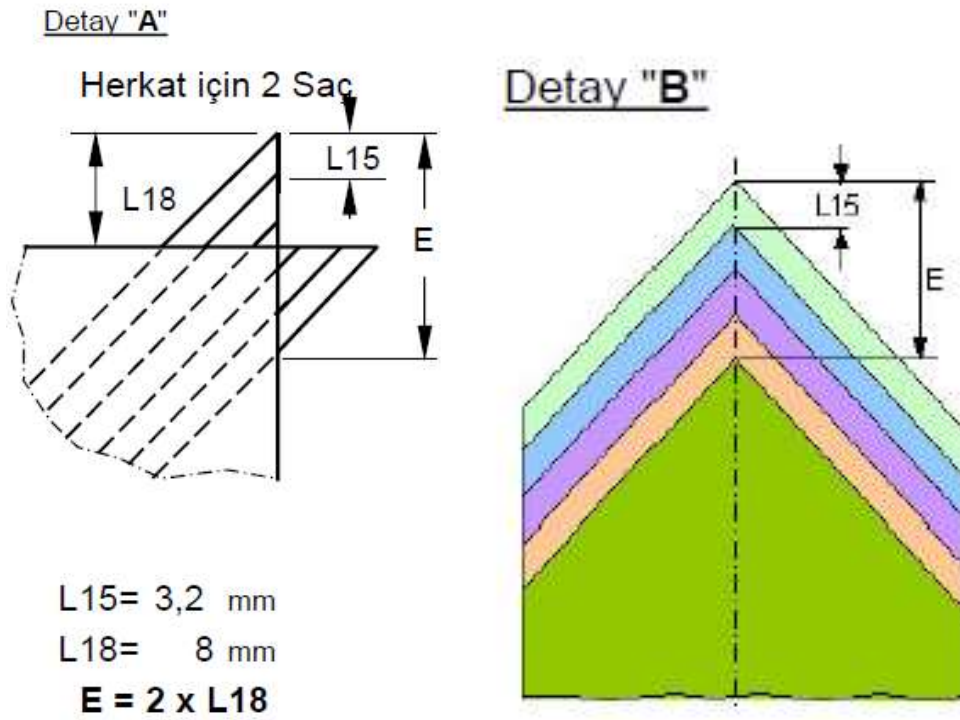
Yukarıda tanımlanan çalışmalardan sonra elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak ve Tip-1 M5 0,30 mm elektrik sacı kullanılarak Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23' de verilen prototip nüve dizayn resimlerine uygun olarak BEST TRAFO bünyesinde 4 adet nüve için sac kesimi yapılmış ve dizim süreci ve sıkıştırma düzeneğine alım sonrasında prototip nüve haline getirilmiştir.



Şekil 4.15: Prototip nüve saclarının dizim sonrası üst görünüş.



Şekil 4.16: Tip-1 M5 0,30 mm sac ile üretilen prototip nüvenin C-C ve D-D kesitleri.



Şekil 4.17: Prototip numune A ve B köşelerinde *step-lap* birleşim detayları.

Oluşturulan 4 nüvenin 2 tanesinde bacaklar ve boyunduruklarda Şekil 4.15’ de gösterilen 16 mm çapındaki merkezleme delikleri yer almakta, 2 adedinde ise yer almamaktadır. Manyetik akı yolunda yer alan her türlü mekanik işleminin (kesme, delme) manyetik akı için bir direnç ve kayıp noktası oluşturması nedeni ile üretilen 4 nüve sayesinde 3 ayrı olasılığın karşılaştırması yapılabilmektedir:

- Delikli bacak ve boyunduruk saclarından imal edilmiş kesildiği gibi ve tavllanmış saclarla dizilmiş nüvelerin karşılaştırması.
- Delik bulunmayan bacak ve boyunduruk saclarından imal edilmiş kesildiği gibi ve tavllanmış saclarla dizilmiş nüvelerin karşılaştırması.
- Aynı dizayndaki nüvelerde delikli ve deliksiz tasarımlar için tavllanmış ve tavlannmamış tiplerin karşılaştırılması.

Aşağıda Şekil 4.18’ de delikli ve deliksiz olarak kesimi yapılmış bacak ve boyunduruk sacları toplu olarak gösterilmiştir. Şekil 4.19’ ve 4.20’ de ise delikli ve deliksiz birer set sacın ısıtım işlemi için hazırlandığı ve konulduğu paslanmaz malzemedeki paleti gösterilmektedir. Platin fırın içine ya da dışına transferi yapılırken sacların düzenlerini muhafaza etmelerini sağlayacak ama aynı zamanda homojen bir şekilde ısınmalarını imkân verecek şekilde bir palet tasarımı yapılmıştır.

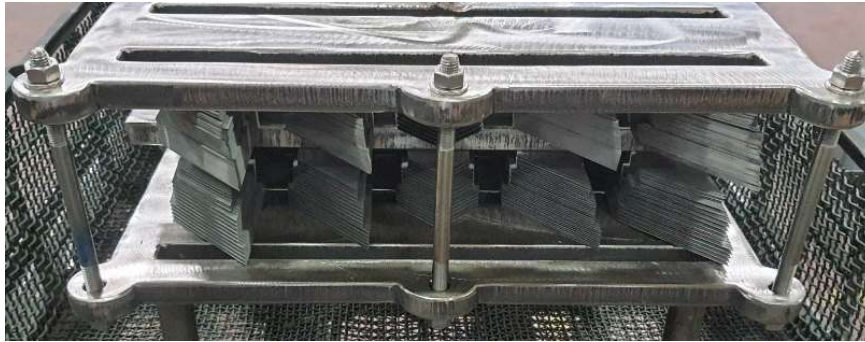


Şekil 4.18: Planlamaya uygun olarak Tip-1 M5 0,30 mm kalite sacdan delikli ve deliksiz olarak kesilen bacak ve boyunduruk sacları.

Delikli ve deliksiz kesimi yapılan her iki gruptan 1 set ısıl işlem süreçlerine tabi tutulmak için ayrıldı. Isıl işlem süreçlerinde kullanılmak üzere aşağıdaki şekilde verilen paslanmaz çelikten imal edilmiş bir taşıma paleti tasarlandı. Isıl işlem süreçleri Önerler Isıl İşlem firmasında vakum altında atmosfer kontrollü koşullarda gerçekleştirildi.

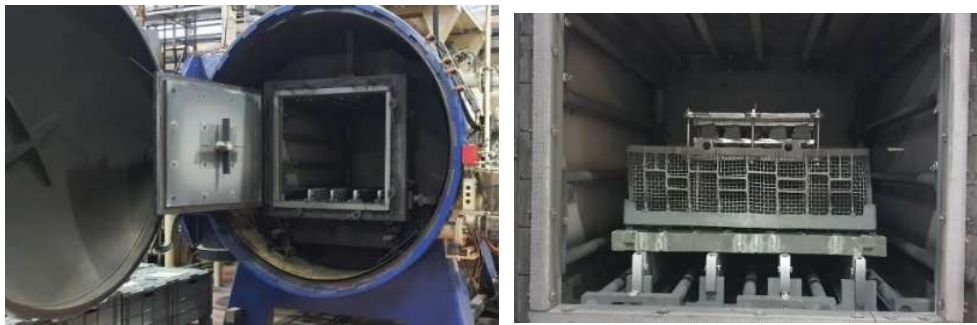


Şekil 4.19: Tavlanacak sac paketi için hazırlanmış taşıma paleti ve fırınlama öncesi genel görünüm.



Şekil 4.20: Delikli ve deliksiz sacların paslanmaz sacdan imal palet içinde yerleşimi.

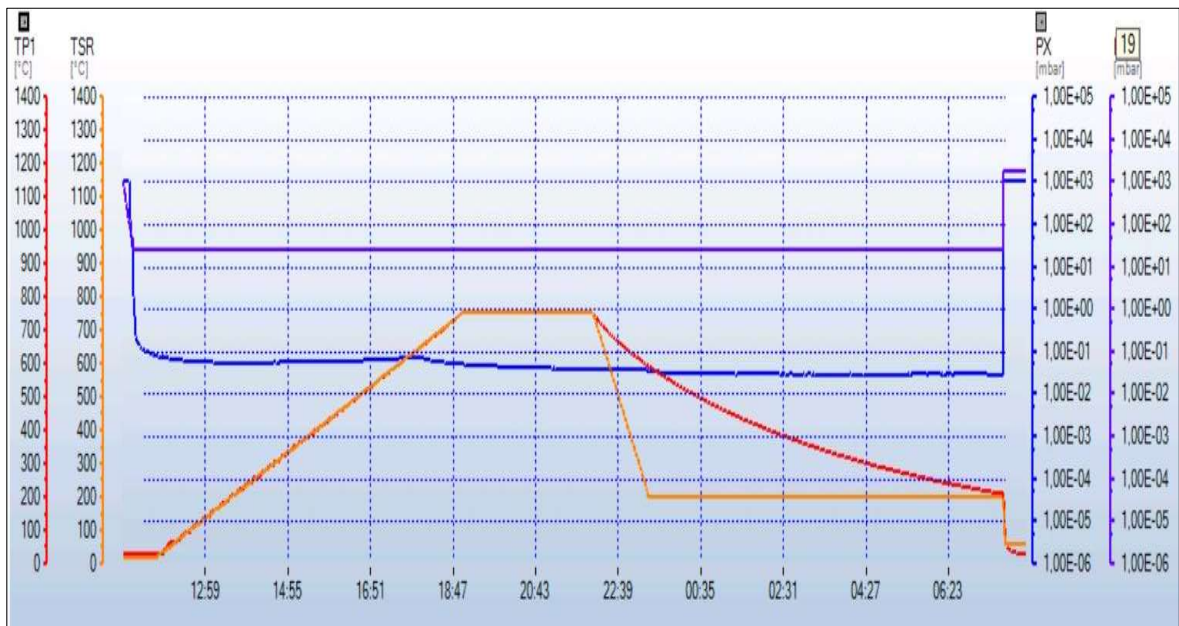
Aşağıda Şekil 4.21’ de ise bacak ve boyunduruk grupajlarının vakum altında atmosferik kontrollü ısıl, işlem fırınına yerleştirilmiş hali ile görülmesi mümkündür.



Şekil 4.21: Vakumlu ve atmosfer kontrollü fırın içine yerleştirilmiş sac paketleri.

Vakum altında atmosfer kontrollü fırına yerleştirilen sac paketleri Şekil 4.22’ de tanımlanan ısıtım sürecine tabi tutuldular. Isıtım rejimi şu şekilde uygulanmıştır: Önce fırın iç basıncı atmosfer basıncından altına 0,1 mbar seviyesine kadar düşürüldü. 21 saatlik süreç sonunda fırın iç basıncı 0,05 mbar seviyesine düştü. Fırın iç basıncının düşürülmesi kapalı hacim içindeki tüm havanın vakum pompaları tarafından tahliye edilmesi ve fırın iç ortamına azot (N₂) gazı gönderilmesi ile sağlandı.

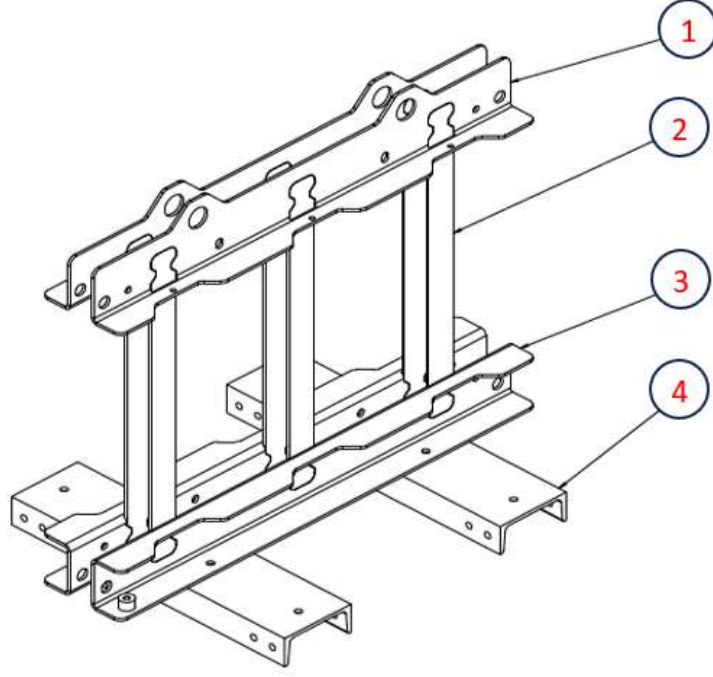
Fırın atmosferinin nötr hale getirilmesi ile ısınma esnasında oksidasyon yada karbürizasyon olma olasılıkları bertaraf edilmiş olmuştur.



Şekil 4.22: Sac paketlerine uygulanan ısıtım rejim diyagramı.

Yukarıdaki grafikte; TP1: fırın içindeki sıcaklığın fiziksel değişimi, TSR: Set edilen sıcaklık rejimini, PX: fırın içi vakum fiziksel vakum değerini ve mor renkli trend ise set edilen fırın içi vakum rejimini göstermektedir. Isınma rejiminde 150 °C/saat ısınma hızı ile 750 °C sıcaklığına kadar çıkıldı. Bu sıcaklık değerinde 3 saatlik bir bekleme gerçekleştirildi, bekleme sonunda fırın içinde doğal soğumaya bırakıldı.

Toplamda 21,2 saat süren ısıtım süreci gerçekleştirilmiş oldu. Isıtım görmüş ve görmemiş her 2 set sac paketi daha sonra BEST TRAFO Çekirdek Dizim Atelyesi bünyesinde aşağıda Şekil 4.23’ de resmi verilen kuru trafo (*cast resin*) tipi nüve sıkıştırma demirleri kullanılarak bitmiş nüve haline getirildi.



Şekil 4.23: Kuru tip trafo nüve sıkıştırma düzeneği.

- (1) Üst boyunduruk sıkıştırma demiri
- (2) Gergi lamaları
- (3) Alt boyunduruk sıkıştırma demiri
- (4) Taşıyıcı ayaklar.

Sıkıştırma demirleri üzerine dizilmiş, izole edilmiş, sıkıştırılmış ve dikleştirilmiş hali ile 4 adet prototip nüvenin görselleri aşağıda verilmiştir. Tip-1 M5-0,30 mm kalite sacdan imal edilmiş 4 adet prototip nüve için aşağıdaki tanımlama belirlenmiştir:

- Prototip Nüve-1 (PN-1): kesildiği gibi, delikli (merkezleme saplamalı, kahverengi izolasyon kâğıtlı)
- Prototip Nüve-2 (PN-2): kesildiği gibi, deliksiz (saplamasız, kahverengi izolasyon kâğıtlı)
- Prototip Nüve-3 (PN-3): tavllanmış, delikli (merkezleme saplamalı, beyaz renkli izolasyon kâğıtlı)
- Prototip Nüve-4 (PN-4): tavllanmış, deliksiz (saplamasız, beyaz renkli izolasyon kâğıtlı)

Prototip nüvelere indükleyici sargı sarılarak BEST TRAFO test laboratuvarlarında yapılan nüve kaybı ölçümleri ile ilgili sonuçlardan bölüm 5.9' da bahsedilecektir.

5. SONUÇLAR

5.1 Regresyon Analizi Sonucu Elde Edilen Model ve Tartışmalar

Bölüm 4.1’ de izah edilen çalışmalar sonucu elde edilen Tablo 4.10’ da verilen veri seti kullanılarak girdilerle çıktılar arasındaki tam karesel regresyon modeli MINITAB istatistiksel analiz programı ile hesaplanmıştır.

Bu model kesme operasyonu sonucu ortaya çıkan çapak problemini henüz istenmeyecek seviyeye ulaşmadan makasların hangi aşınma seviyesinde ortaya çıkacağını belirlemek için kullanılır. Modelde çıktı olan çapak yüksekliğini öngörebilmek için girdi değişkenler olan makas vuruş sayıları ve kesilecek sac sacların kalınlıkları veri olarak kullanılmaktadır. Model, virgülden sonra 15 hane alınarak kurulduğunda aşağıdaki gibidir:

$$Y = 72,060285244279100 - 0,000029801809832 X_1 - 0,42722756659429 \\ 0,000000000042389X_1^2 + 0,000654129416271X_2^2 + 0,000000045355136. \quad (5.1)$$

Modelde kullanılan girdi parametrelerin (X_1 ve X_2) modeli temsil etmekte yeterli olup olmadığını anlayabilmek için regresyon katsayısı R^2 hesaplanır. Regresyon katsayısının formülü aşağıdaki gibidir:

$$R^2 = \frac{\beta^T X^T Y - n\bar{Y}^2}{Y^T Y - n\bar{Y}^2} \quad (5.2)$$

Modelin regresyon katsayısı MINITAB kullanılarak $R^2=98,96$ olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı; modelde kullanılan X_1 ve X_2 değişkenleri Y ’deki değişimin $98,96$ ’ sını açıklamaktadır. Geri kalan $1,04$ ’ lük değişim modelde yer almayan başka değişkenlerden etkilenmektedir. Dolayısıyla daha güvenilir bir model kurmak için ilave X_3 , X_4 ve benzeri başka değişkenleri modele eklemeye ve ölçmeye gerek yoktur. Kurulan matematiksel modelin parametrelerinin yeterli olduğu görüldükten sonra, modelin anlamlı olup olmadığını testi için ANOVA testi yapılır MINITAB ile elde edilen ANOVA raporunda 95 güven düzeyi için P değeri $0,05$ ’ den (yani 5 ’ den) küçük ise model anlamlıdır denir. Elde edilen ve detayları ekte verilen varyans analizine göre P değeri $0,05$ ’ den çok daha küçük olarak hesaplandığı için literatüre uygun olarak MINITAB tarafında üretilen tablolarda çok küçük olan değerler $0,000$ şeklinde gösterilmiştir. Matematiksel modelin

katsayılar tablosu Tablo 5.1’ de verildiği gibidir. Tablo 5.1’ de modelin içinde yer alan lineer bileşenlerin (X_1 ve X_2), çarpanının (X_1X_2) ve karesel bileşenlerin (X_1^2 ve X_2^2) ve sabit terimin kendi içinde P- katsayıları yani güvenilirlik dereceleri görülmektedir. Varyans analizi ise Tablo 5.2’ de verilmiştir. Tablo 5.3’ de ise modelden elde edilen değerler ile gerçek ölçümler arasındaki %sapma değerleri verilmektedir. Tablo 5.3’ den görülebileceği gibi modele göre maksimum sapma %12,89 olacaktır.

Tablo 5.1: Tam karesel regresyon analizi katsayılar tablosu.

Terim	Katsayı	S Katsayısı	T-değeri	P-değeri
Sabit	72,0603	14,3432	5,024	0,000
X_1	-0,0000	0,0000	-4,568	0,001
X_2	-0,4272	0,1129	-3,783	0,003
X_1^2	0,0000	0,0000	11,363	0,000
X_2^2	0,0007	0,0002	2,950	0,013
X_1X_2	0,0000	0,0000	2,128	0,057

Tablo 5.2: Y için Varyans analizi sonucu.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	5	212,006	212,006	42,4013	209,25	0,000
Lineer katsayılar	2	180,915	8,259	4,1294	20,38	0,000
X_1	1	133,721	4,228	4,2282	20,87	0,001
X_2	1	47,194	2,900	2,9000	14,31	0,003
Kareler	2	30,174	30,325	15,1626	74,83	0,000
X_1^2	1	27,811	26,164	26,1640	129,12	0,000
X_2^2	1	2,363	1,763	1,7632	8,70	0,013
Etkileşim	1	0,918	0,918	0,9175	4,53	0,057
X_1X_2	1	0,918	0,918	0,9175	4,53	0,057
Kalıcı hata	11	2,229	2,229	0,2026		
Toplam	16	214,235				

Yukarıda önerilen model sayesinde, kesme çapağının kesimi yapılacak sac kalınlığı parametresi ve makasların vuruş sayısı parametreleri ile ne zaman problem çıkarmaya başlayacağını tahmin etmekte kullanılabilir. Çalışmanın özgün sonucu budur ve benzer bir uygulamaya literatürde rastlanmamıştır. Modelin güvenilirliği varyans analizi sonucu hesaplanmıştır ve gayet yüksektir. Bu çalışma ile daha önce literatürde uygulamaları görüldüğü üzere, yani regresyon analizi istatistiksel modelleme ve varyans analizi yöntemlerinin, pek çok süreç parametresinin sonuca etkin olduğu ölçülebilir ya da kontrol altında olan süreç parametreleri olan tüm süreçlerde uygulanabilir olduğu önerilmiştir. Bu örnekte regresyon analizi ve modelleme fiziksel mekanizması iyi bilinen ve endüstride çok rastlanan bir operasyon olan makas ile kesme sürecinde uygulanmıştır.

Tablo 5.3: Modelden elde edilen veriler ile gözlem sonuçları arasındaki farklar.

X_1	X_2	Üretim sahasından Gözlenen Y	Matematiksel model ile Tahmin Edilen Y	Hata (%)
179164	223	7	7,151102955	2,113002
179208	266,5	3	2,848615293	5,314326
203761	225,7	7	6,730009415	4,011742
429945	288,5	4	3,898184871	2,61186
429990	258,5	5	5,396568567	7,348532
430012	259,7	6	5,314467523	12,89936
430024	287,8	4	3,921268334	2,007811
586763	283,8	8	8,158505852	1,942829
586811	223,8	12	12,27467597	2,237745
586856	265,5	8	8,917299373	10,28674
668577	287,5	11	11,04108672	0,372126
669613	257	13	12,32334083	5,490874
642607	297,2	10	9,88155331	1,198665
641989	225,5	14	13,8872865	0,811631
642055	286,8	10	10,02789691	0,278193
90518	256,8	4	4,189616987	4,525879
90560	289,5	2	2,038520589	1,889635

Gerçekleştirilen regresyon analizi sayesinde, kesme çapağının daima istenen seviyede tutulabilmesini sağlayacak, çapak seviyesini makas yıpranmasına göre garanti altına alacak bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modele göre kesilen sac kalınlığı incelidikçe ve makas vuruş sayısı arttıkça çapak seviyesinin daha hızlı artacağını kritik seviye olan 10 - 12 mikron seviyesine ince sac kesimleri devam ettikçe 500.000 vuruş civarında ulaşılabileceği görülmüştür.

Literatür bölümünde özetlediğimiz diğer çalışmalar ile bakıldığında, dilme süreci konusunda yapılmış bir çalışmadan [32] detaylı olarak bahsedilmiştir. Dilme yönü tane yönlendirilmiş saclarda RD yönünde gerçekleşir. Yani kolay manyetizasyon yönündedir ve dilme sonrası ortaya çıkan plastik deformasyonun sac içinde akan manyetik akı için bir engel oluşturması beklenmez. Buna rağmen dilme çapağı demir kayıplarında önemli bir parametre olarak değerlendirilir.

Benzer çalışmalarda presle form verme prosesi için T. Badgujar ve arkadaşı [42] arkadaşlarının önerdikleri modelde regresyon katsayısını $R^2= 0,9389$ olarak, benzer şekilde derin çekme süreci değişkenleri için N. Kamal Bashas ve arkadaşları [46] tarafından önerilen modelde $R^2=0,820$ ve $R^2=0,736$ olarak, akıtma yöntemi ile boyama prosesi için önerilen modelde Aslan Deniz Karaoğlan ve arkadaşı tarafından [47] bağımlı değişkenler için $R^2=0,9965$ ve $R^2= 0,8409$ olarak, O. Çavuşoğlu ve arkadaşı [48] tarafından Alüminyum levha sacların kesim süreci için önerilen modelde $R^2_{adj}=0,979$ olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada ise (5.2)' de MINITAB programında yapılan analiz ve üretilen modele göre regresyon katsayısı $R^2=\%98,96$ olarak hesaplanmıştır. Tüm bahsi verilen örnekler sayesinde regresyon analizi yönteminin ve modelleme çalışmalarını başarılı bir şekilde uygulanabilirliği anlaşılmaktadır.

5.2 XRD Kalıntı Gerilim Ölçüm Sonuçları ve Tartışmalar

Tez kapsamında yapılan XRD deneylerinin amacı kesme kenarı civarında iç yapıda oluşan iç gerilmelerin büyüklüğünü ve yönünü anlayabilmek olmuştur. Ancak, yurt içinde ulaşabilen XRD modülü olan cihazlarda noktasal odaklanma yapabilmek mümkün olmamıştır. En fazla 2 odak noktasına odaklanabilmiş ve ölçümler bu odak noktaları civarında bölgesel ölçüm yapmaya imkân vermiştir. Testler kesildiği gibi ürünlere uygulanmıştır. P5 ve P6 kesildiği gibi örneklerde yapılan XRD kalıntı gerilim ölçümlerinden elde edilen sonuçları Tablo 5.4' de verilmiştir.

Tablo 5.4: Kesme sonrasında kesildiği gibi (tavlanmamış) örneklerde ortaya çıkan kalıntı gerilim seviyeleri.

Numune Kodu	Merkezde (MPa)	Kesme Kenarı Civarında (MPa)
Kesildiği gibi P5 Düşük çapak numunesi	-371,2 ± 75,1	-497,6 ± 63,4
Kesildiği gibi P6 Yüksek çapak numunesi	-548,9 ± 82,9	-445,5 ± 52,3

XRD ile kalıntı gerilimi Sertlik ölçümü yapılmadan önce numunelerde yüzeydeki elektriksel izolasyon kaplaması çıkartılmış ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Ölçümlerde yüksek çapak seviyeli örnekte numune ortası civarında yüksek bası gerilmesi ölçülmüştür. Düşük çapaklı örnekte ise örnek merkezi ile kenarı arasında bası gerilmeleri değişimi açısından belirli bir gradiyent söz konusudur.

Bu çalışmadan ortaya çıkan sonucun kesme plastik deformasyonun malzemede RD doğrultusunda belirgin bir bası gerilmesi gradiyenti oluşturduğu şeklinde oluşmuştur. Kesme kenarı civarında bası yönünde 450-500 MPa kalıntı gerilim ölçümü yapıldığı ifade edilmişti. Kalıntı gerilim konusunda çalışma yapan Bohdal ve arkadaşları [32] ise dilme prosesi için yapılan çalışmada, kesme kenarından yapılan analizlerde kalıcı gerilimler 1000-1400 MPa civarında, kesme kenarından 100 mikron kadar olan deformasyon etin bölgede is 200 MPa seviyesinde olduğu belirtmiştir.

5.3 Mikrosertlik Tarama Sonuçları ve Tartışmalar

Şekil 4.11' de verilen numunelerde belirtilen yönlerde 100 mikron aralıklarla mikro sertli taraması yapılmış ve sonuçları aşağıda Tablo 5.5' de paylaşılmıştır. Aşağıdaki tablo incelediğinde, kesildiği gibi numuneler ile tavlanmış numuneler düşük çapaklı örneklerde, ortalama sertlik değerinde hafif bir azalma gözlenirken, tavlanmış numuneler ile yapılan ölçümlerde standart sapma değerinin tipik olarak artmış olduğu gözlemlenmiştir. Medyan değerinde ise kayda değer bir azalma olduğu görülmektedir.

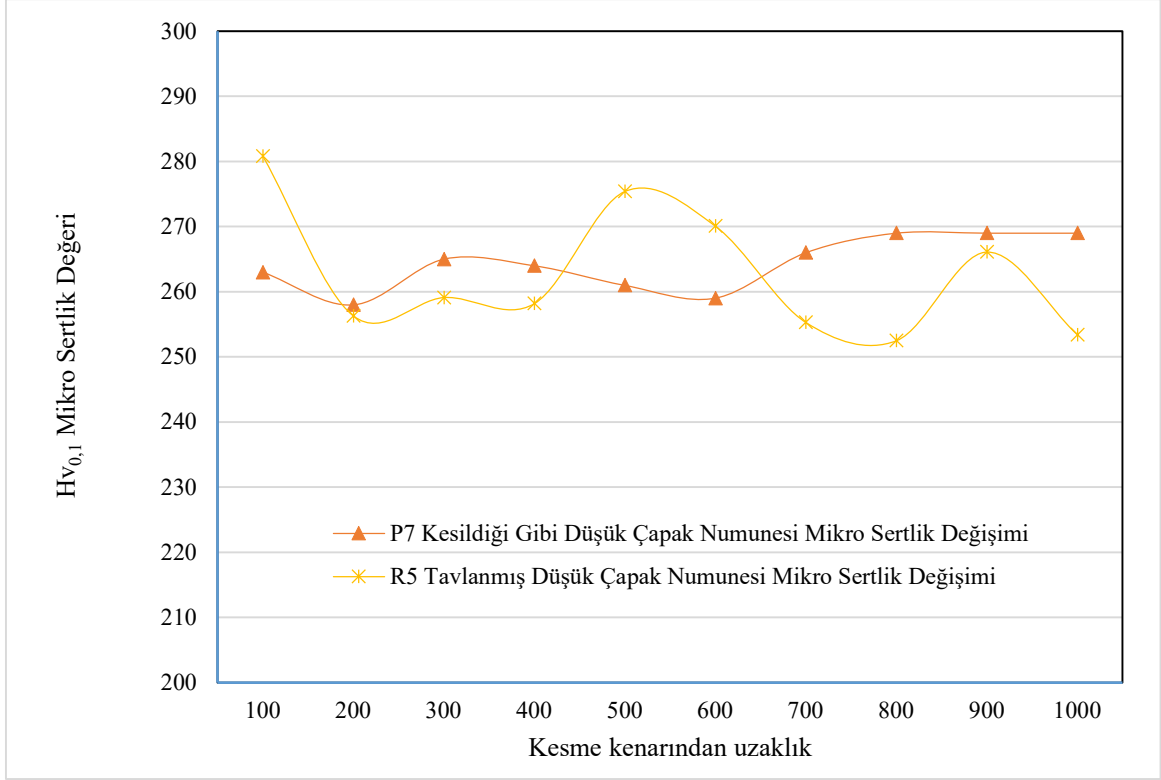
Tablo 5.5: P7, P8 kesildiği gibi, R2 ve R5 kodlu tavllanmış numunelerde 100 mikron aralıklarla mikro sertlik ($Hv_{0,1}$) taraması.

Kesme kenarından tarama aralığı (100 μ m)	P7 Kesildiği gibi Düşük Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	R5 Tavllanmış Düşük Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	P8 Kesildiği gibi Yüksek Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	R2 Tavllanmış Yüksek Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi
100	263,0	280,8	260,0	226,7
200	258,0	256,3	258,0	247,0
300	265,0	259,1	259,0	252,5
400	264,0	258,2	256,0	252,5
500	261,0	275,4	258,0	264,1
600	259,0	270,1	256,0	250,6
700	266,0	255,3	265,0	266,1
800	269,0	252,5	239,0	266,1
900	269,0	266,1	248,0	266,1
1000	269,0	253,4	260,0	254,4
Ortalama	264,3	262,7	255,9	254,6
Standart Sapma	4,08	9,86	7,32	12,24
Maks.	269,0	280,8	265,0	266,1
Min.	258,0	252,5	239,0	226,7
Medyan	264,5	258,7	258,0	253,5

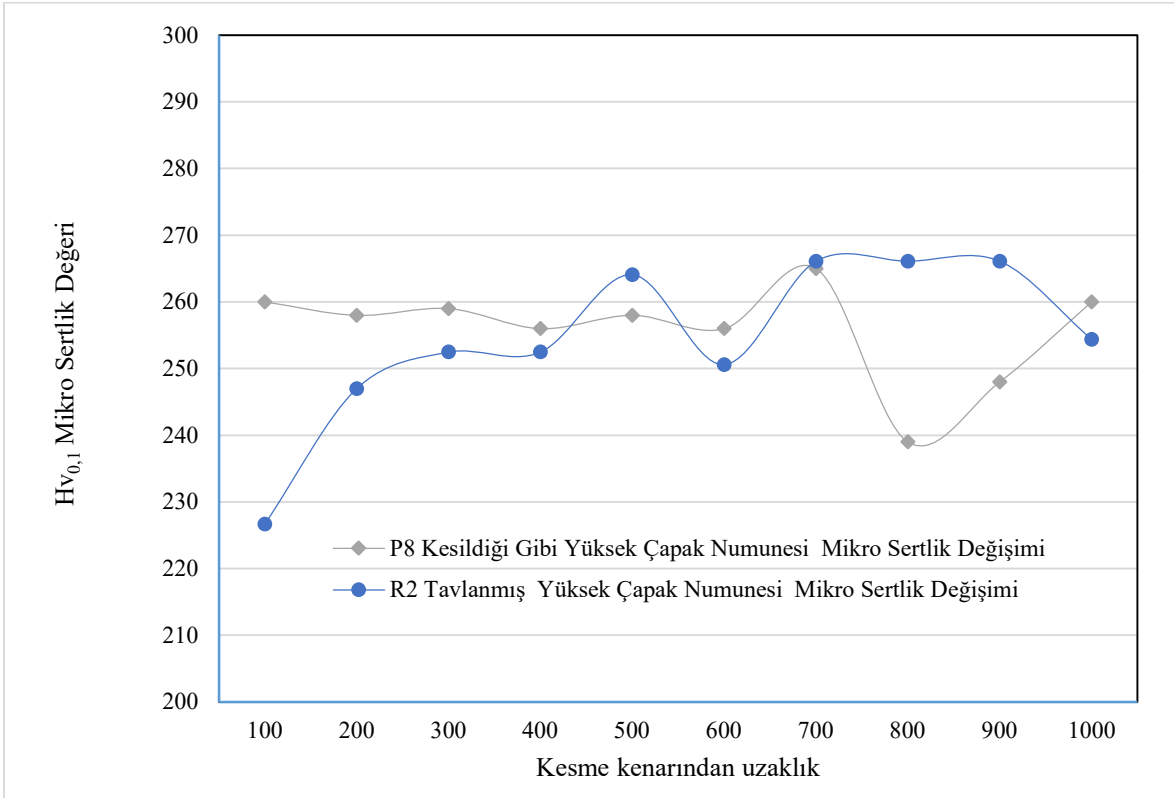
Yüksek çapaklı numunelerde ise; tavlama örneklerin ortalama sertlik değerinde çok az bir azalma ölçülürken, tipik olarak standart sapma değerinde artma gözlemlenmiş ve medyan değerinde bir miktar azalma olduğu ölçülmüştür.

Düşük çapaklı örneklerde tavlama sürecinin mikro sertlik profiline etkisini anlamak için oluşturduğumuz grafiklerde kesme kenarından 100-200 mikron mesafede tavlama etkisi ile gerçekleştiğini değerlendirebileceğimiz bir sertlik düşümü gözlemlenmektedir.

Ortalama sertlik ve medyan değerinin de tavlama etkisi ile bir miktar azaldığını tablodan yorumlayabilmekteyiz. Tablodaki verilerle oluşturulan grafikler bu bağlamda anlamlı gelmektedir.



Şekil 5.1: 100 mikron aralıklı taramada düşük çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.



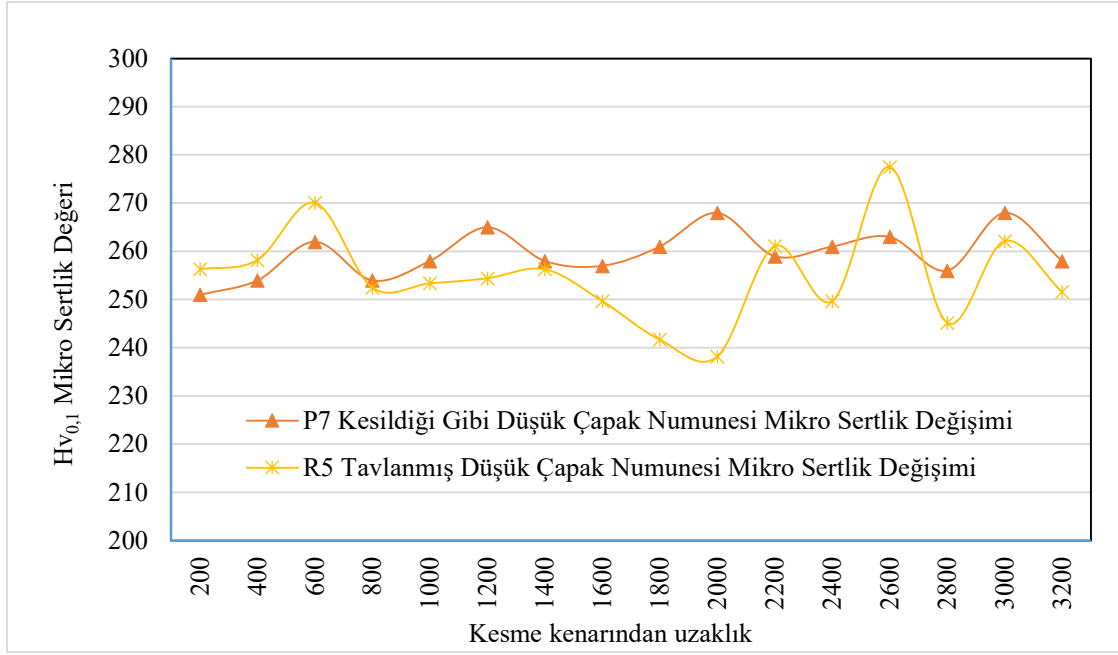
Şekil 5.2: 100 mikron aralıklı taramada yüksek çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.

Yüksek çapaklı örneklerde ise, kesme kenarında 200-300 mikron mesafede tavlama sürecinin mikro sertlik profiline etkisini görmek mümkündür. Kesme kenarına en yakın noktada yapılan düşük değerli ölçüm 200 mikron mesafesinden sonra ortalama değerine yakınsamaktadır. Benzer bir şekilde kesme etkisi ile ortaya çıkan sertlik profili, düşük çapaklı ve yüksek çapaklı örnekler için ayrı ayrı olarak daha geniş bir skalada ve daha uzun bir doğrultu taranarak ortaya konulmaya çalışılmıştır. Tablo 5.6’ da 200 mikron tarama aralıklı veriler incelediğinde, tıpkı 100 mikron aralıklı taramadan elde edildiği gibi, kesildiği gibi numuneler ile tavllanmış numuneler düşük çapaklı örneklerde, ortalama sertlik değerinde bir azalma gözlenirken, tavllanmış numuneler ile yapılan ölçümlerde standart sapma değerinin tipik olarak artmış olduğu gözlemlenmiştir. Medyan değerinde ise kayda değer bir azalma olduğu görülmektedir. Yüksek çapaklı numunelerde ise; tavlama örneklerin ortalama sertlik değerinde çok az bir azalma ölçülürken, tipik olarak standart sapma değerinde artma gözlemlenmiş ve medyan değerinde bir miktar azalma olduğu ölçülmüştür.

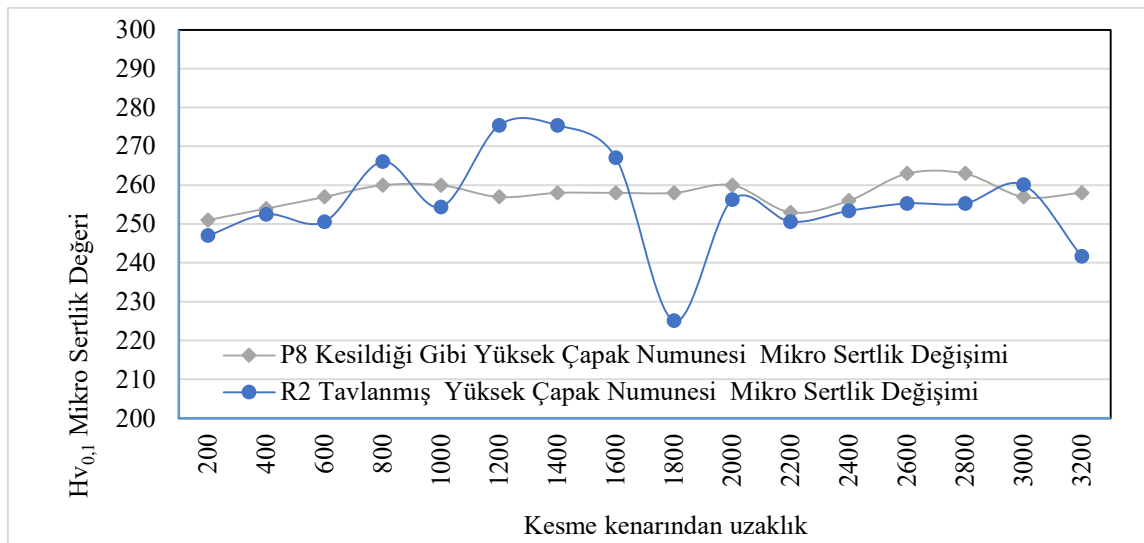
Tablo 5.6: P7, P8 Kesildiği gibi ve R2, R5 kodlu tavllanmış numunelerde 200 mikron aralıklarla mikro sertlik ($Hv_{0,1}$) taraması.

Kesme kenarından tarama aralığı (200 μ m)	P7 Kesildiği gibi Düşük Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	R5 Tavllanmış Düşük Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	P8 Kesildiği gibi Yüksek Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi	R2 Tavllanmış Yüksek Çapak Numunesi Mikro Sertlik Değişimi
200	251,0	256,3	251,0	247,0
400	254,0	258,2	254,0	252,5
600	262,0	270,1	257,0	250,6
800	254,0	252,5	260,0	266,1
1000	258,0	253,4	260,0	254,4
1200	265,0	254,4	257,0	275,4
1400	258,0	256,3	258,0	275,4
1600	257,0	249,7	258,0	267,1
1800	261,0	241,7	258,0	225,1
2000	268,0	238,2	260,0	256,3
2200	259,0	261,1	253,0	250,6
2400	261,0	249,7	256,0	253,4
2600	263,0	277,5	263,0	255,3
2800	256,0	245,2	263,0	255,3
3000	268,0	262,1	257,0	260,1
3200	258,0	251,6	258,0	241,7
Ortalama	259,6	254,9	257,7	255,4
Standart Sapma	4,87	9,89	3,24	12,41
Maks.	268,0	277,5	263,0	275,4
Min.	251,0	238,2	251,0	225,1
Medyan	258,5	253,9	258,0	254,9

Tavlanmış numune ölçümlerindeki tipik standart sapma artışının ölçüm cihazlarını arasındaki hassasiyet ve operatör etkisi nedeni ile ortaya çıktığı değerlendirilmiştir. Kesildiği gibi numune ölçümleri operatör yorumu gerektirmeyen hassas ve tamamen dijital sonuç veren bir cihaz ile yapılmış iken, tavlanmış örnekler için yapılan tekrar ölçümleri operatör bilgi ve tecrübesi gerektiren manuel bir cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple ölçüm tekrarlanabilirliği kaynaklı belirsizlikler sonuçlara dahil olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.3: 200 mikron aralıklı taramada düşük çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.

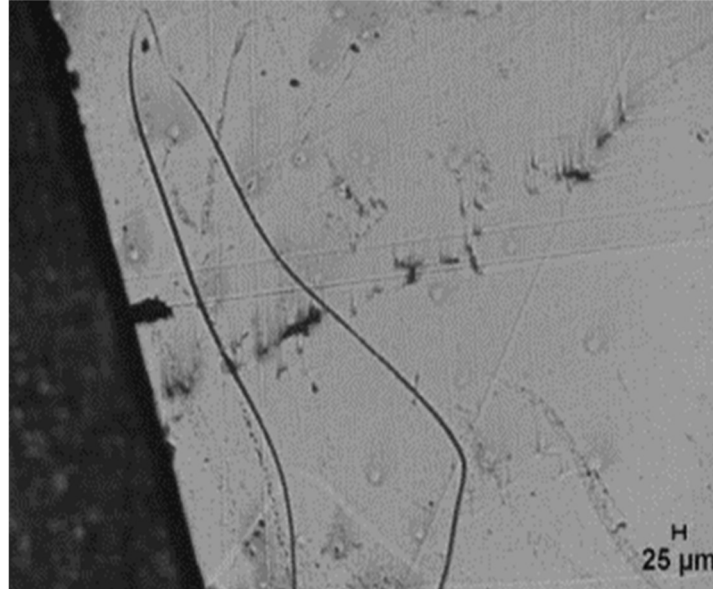


Şekil 5.4: 200 mikron aralıklı taramada yüksek çapaklı numunelerin kesme kenarından uzaklaşan doğrultuda sertlik değişimi.

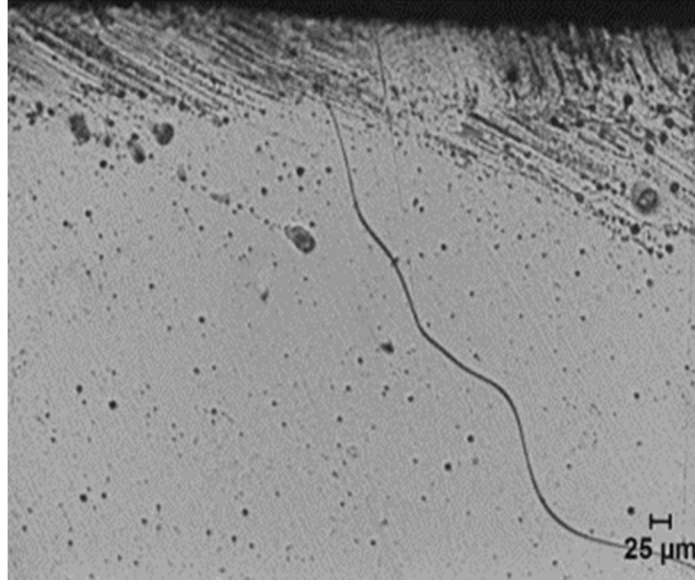
Kesme kenarından 200 mikron aralıklarla yapılan taramada, yüksek çapaklı kesildiği gibi ve tavllanmış örneklerde de aynı şekilde yorumlanarak, tavlama sürecinin mikro sertlik profiline etkisi net olarak belirlenememektedir. Halbuki, NGO saclarda makas ile kesim sonrası mikro sertlik taraması yapan Yousuke Kurosaki ve arkadaşları [11] arkadaşları Hv_{0,25} skalasında mikro sertlik ölçtükleri tavllanmış örneklerle kesildiği gibi örnekleri karşılaştırdıkları çalışmalarında, Şekil 2.2 (a) 'dan görülebileceği gibi, tavlama etkisini net bir şekilde gözlemleyebilmişlerdir. Kesme kenarı civarında 260 Vickers olan sertlik değeri tavlama etkisi ile 170 Vickers değeri civarına azaldığı ve 400 mikron ötede 180 Vickers değerine yakınsadığını tespit etmişlerdir. Benzer bir etkinin beklenmesine rağmen ölçülememesinin sebebi olarak tavllanmış ve kesildiği gibi örneklerde farklı ölçüm yöntemleri kullanılması, özellikle tavllanmış örneklerde klasik elle yapılan ölçümlerin belirsizliğinin etkin olduğu değerlendirilmiştir.

5.4 Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları ve Tartışmalar

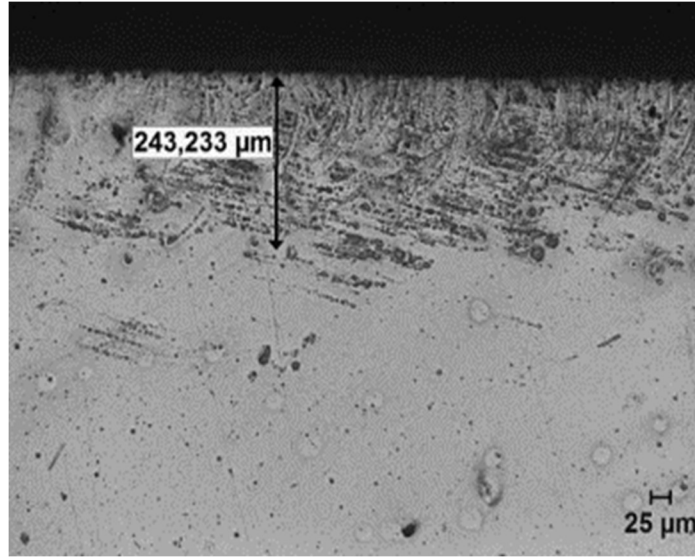
Aşağıda optik mikroskop ve dağlama yardımı ile düşük çapaklı ve yüksek çapak seviyeli numunelerden elde edilen kesme kenarı civarı görüntüleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 'da verilmiştir. Şekil 5.7' de ise yüksek çapaklı numuneden elde edilen kesme kenarı civarında aşırı dağlanmış bölgenin görünümü ve derinliği gösterilmiştir.



Şekil 5.5: Düşük çapaklı kesildiği gibi (P tipi) numunesinde 50X büyütme ile elde edilen görüntü.



Şekil 5.6: Yüksek çapaklı kesildiği gibi (P tipi) numunesinde 100X büyütme ile elde edilen görüntü.

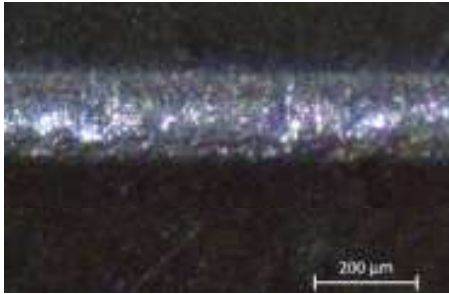


Şekil 5.7: Yüksek çapak numunesi, kesme kenarı yakınında %10 derişim oranı sonucu yanmış bölge, yaklaşık derinliği 240 µm.

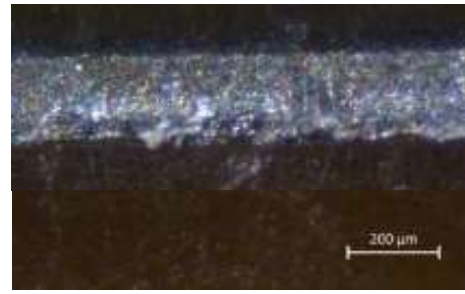
Görüntülemeler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM laboratuvarlarında NIKON ters metalurjik mikroskopta elde edilmiştir. Numunelerin iri taneli oldukları bilinmekle beraber, kesme kenarlarına yakın bölgede tane yüzeyi morfolojisindeki değişim hakkında sağlıklı ipucu verecek görüntüler için yeterli seviyede büyütme ulaşamadığı değerlendirilmiştir. Optik mikroskop ile ancak 50 ve 100 büyütmede net görüntülere ulaşılabilmiştir. Bu görüntülemelerde parlatma çizgilerinin homojen ve düzenli dağılımından farklı olarak, net görülebilen ancak ve rasgele yönelmiş doğal süreksizlikler

gözlenmiştir. Ayrıca, yüksek çapaklı P tipi kesildiği gibi yüksek çapaklı numunelerde ayırt edici gözlem olarak kesme kenarı civarında yaklaşık 240 mikron derinliğinde aşırı deformasyona uğramış bu sebeple aşırı dağlanmış bölge gözlemlenmiştir.

Optik mikroskopu ile kesme kenarı incelemeleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ARUM laboratuvarlarında bu sefer kesme kenarına dik bakışla tekrar edilmiştir. Yapılan incelemelere göre; Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’ da verilen, şeffaf bakalite dik konumlandırılmış kesme kenarları dik bakış eş büyütme skalalarında optik mikroskopu ile düşük ve yüksek çapak açısından karşılaştırıldığında, düşük çapaklı örnekte daha az hasar görmüş düzgün kesme yüzeyi ve daha az çapak çıkıntısı olduğu, yüksek çapaklı örnekte ise daha fazla deformasyona uğramış bir kesme yüzeyi görüntüsü ve daha yüksek çapak uzanımları net bir şekilde tespit edilmiştir. Bu çalışmada da ARUM laboratuvarlarında bulunan mikroskopun büyütme ve odaklanma kapasitesi kısıtı nedeni ile çözünürlüğü çok yüksek olmayan görüntülemeler elde edilmiştir. Son olarak, ODTÜ Merkez laboratuvarlarında kesildiği gibi ve tavllanmış örneklerde yapılan yüksek çözünürlüklü SEM görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil A.1 ve Şekil A.2 ‘de görüntülemelerde düşük ve yüksek çapaklı numuneler arasında kesme kenarında oluşan çapak farkı net olarak görüntülenmiştir.



Şekil 5.8: Kesildiği gibi P9 düşük çapak numunesinin kesme yüzeyi morfolojisi.



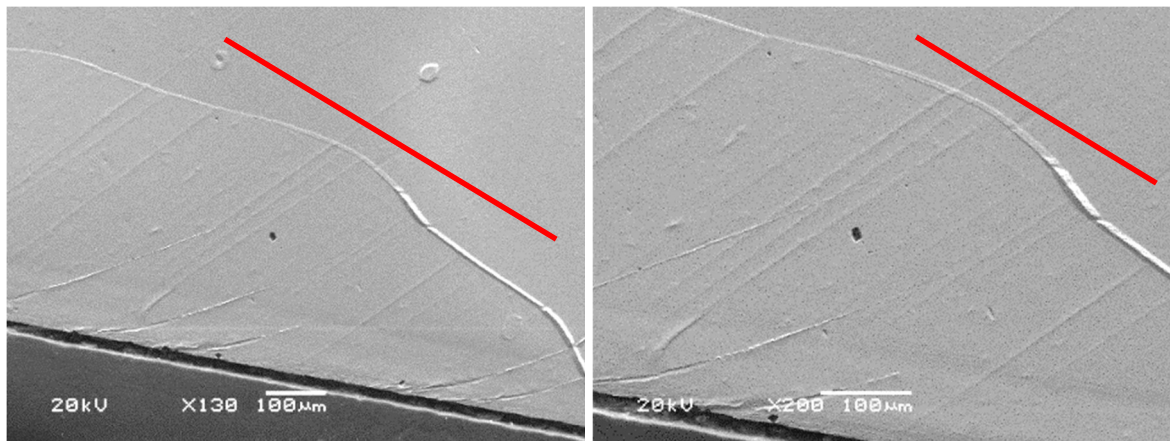
Şekil 5.9: Kesildiği gibi P10 yüksek çapak numunesinin kesme yüzeyi morfolojisi.

Düşük çapaklı örneklerde kesme yüzeyinde oluşan deformasyon izleri açısından daha az deformasyona uğramış bir kesilme yüzeyi oluşumu ifade edilebilir. Yüzeyde RD yönünde yırtılma ve ND doğrultusunda yüzey profili oluşumu düşük çapaklı numunede daha azdır. Düşük çapaklı numunelerde kesme etkisi ile oluşan deformasyon etkin bölgenin daha sığ olduğunu yorumlayabileceğimiz bir kesme yüzey profili de tespit edilmiştir. Kesme kenarı civarında NGO saclarda tane yapısı ve kesme profili incelemesi yapan M. Emura ve arkadaşları [19] %2 Silisyum alaşımı içeren NGO elektrik çeliğinde makas kesim ile kesimden elde edilen profil görüntülerde plastik deformasyona maruz bölgeyi 300 mikron

derinlikte olduğunu belirtmişlerdir. Aynı şekilde Yousuke Kurosaki ve arkadaşları [11], makas kesim ile elde edilen numunelerde kesme kenarından içeriye doğru yaptıkları mikro sertlik ölçümlerinde kenardan 350 mikron mesafede sertlik değerlerinin tavllanmış üründen elde edilen değere yakınsadığını raporlamışlardır. Baudouin ve arkadaşları ise [13], makas kesim sonrası çıkan kesme yüzeyinde Şekil 2.4’ de tanımlanan tipik profile yakın görseller elde etmişlerdir. Cao ve arkadaşları [31] ise takımla delme operasyonu sonrası kalıcı gerilimlerin etkin olduğu, deformasyon etkin bölgenin genişliğini 400 - 500 mikron kadar derinlikte olduğunu tespit etmişlerdir.

5.5 Kesme Kenarı Cıvarı SEM ve EDX İnceleme Sonuçları ve Tartışmalar

Şekil 5.10’ da verilen her iki görüntüde parlatma izleri olduğu değerlendirilen sık, paralel ve düzenli izler gözlenmiştir. Parlatma çizgilerinin doğal düzeninden farklılık gösteren eğrisel çizgiler de gözlemlenmiştir. Bunun dışında kesme kenarından başlayarak malzeme içine doğru yönelmiş parlatma izlerinin doğal düzeninden farklı bir form gösteren izler olduğu, bu izlerin üst makasın sahip olduğu dalma açısı ile ortaya çıkan kesme ilerlemesi nedeni ile hafif bir şekilde eğrisel form kazanmış kesme bantları olduğu değerlendirilmektedir. P1 düşük çapak ve P3 yüksek çapaklı numunelerde kesme bantlarının uzunluğunu birbirleri ile karşılaştıracak kadar detaylı bir görüntüleme yapma imkânı oluşmamakla beraber, Şekil 5.10’ da verilen P1 numunelerinden elde edilen aşağıdaki görüntüye referans verilerek kesme bantlarının derinliğinin 200-400 µm aralığında olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.10: P1 kesildiği gibi düşük çapak (a) ve P3 kesildiği gibi yüksek çapak (b) karakterli örneklerde SEM’ den alınan kesme kenarı görüntüleri.

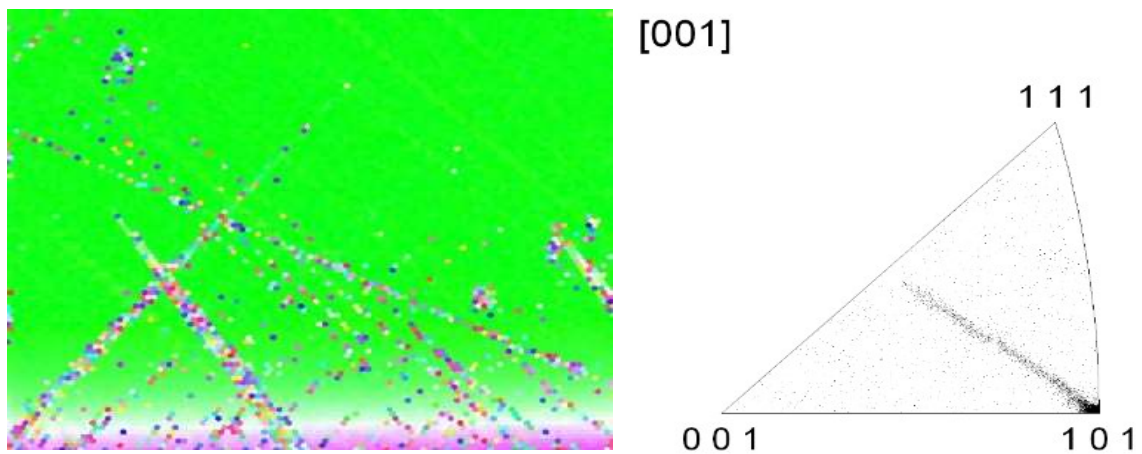
Numunelerde gözlemlenen safsızlıklar ve ana yapıya ait olmayan yapılar SEM' in EDX modülü ile analiz edildiğinde, yapının ana matrisinin α -ferrit tek fazlı bir ana matris yapısı olduğu görülmekle beraber, görüntülerdeki ikincil fazların çözülmüş Karbür yapıları olabileceği değerlendirilmiştir. Detaylı analiz sonuçları Şekil A.3' de verilmiştir.

5.6 SEM EBSD 'den Elde Edilen Görüntülemeler ve Tartışmalar

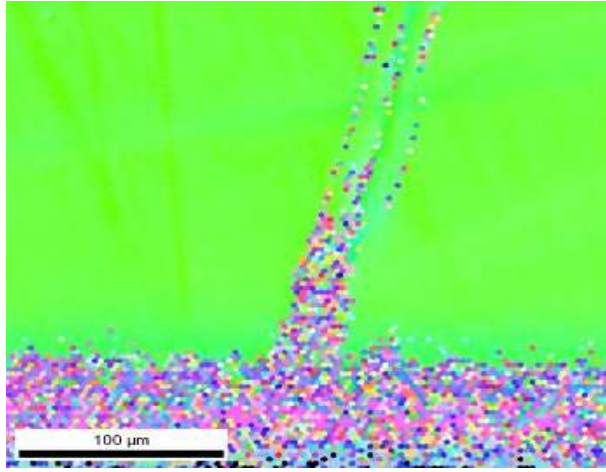
Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de görülen EBSD grafiklerinde yeşil kararlı bölge hemen hemen $\{110\}[001]$ GOSS yönlemindeki tek kristalin yönelimi verirken, düşük çapaklı kesildiği gibi P4 örnekte herhangi bir geçiş bölgesi olmaksızın tarama alanında metal olmayan gürültü bölgesine geçiş rahatlıkla gözükmemektedir.

Yüksek çapaklı kesildiği gibi P2 örnekte gürültü bölgesine geçişten önce yönelimin düzenli bir şekilde doğrultu değiştirdiği "mor renkli" bir geçiş bölgesi yer almaktadır. Bu örneklerde geçiş bölgesinin tahmini uzunluğu 40-50 mikron civarında olduğu görülmektedir. Tavlama yapılan örneklerde ise, hızlı bir şekilde gürültü bölgesine geçiş gözlemlenmekle beraber, geçiş bölgesinin 40-50 mikron olduğu tekrar edilebilir.

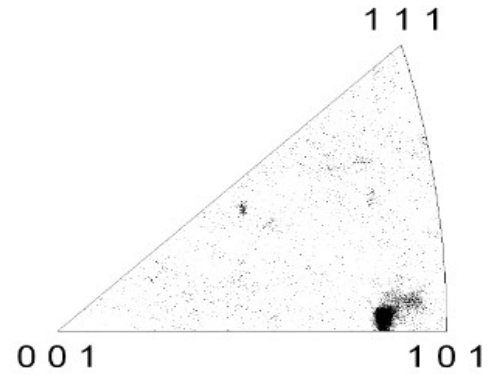
Yukarıdaki analizlerde EBSD tarama paternlerinin yan tarafında elde edilen IPF grafikleri verilmiştir. Yeşil bölgede matriste ana kristalografik yönelim $\{101\}$ düzlemleri yüzeye paralel yönelmiş tek kristalli bir yapı söz konusudur. Kenara yaklaşıldıkça yönelim paterni tüm doğrultularda değişime uğramaktadır. IPF tekstürünün daha kolay anlaşılabilmesi için Miller kristalografik düzlemleri Şekil 5.15' de verilmiştir.



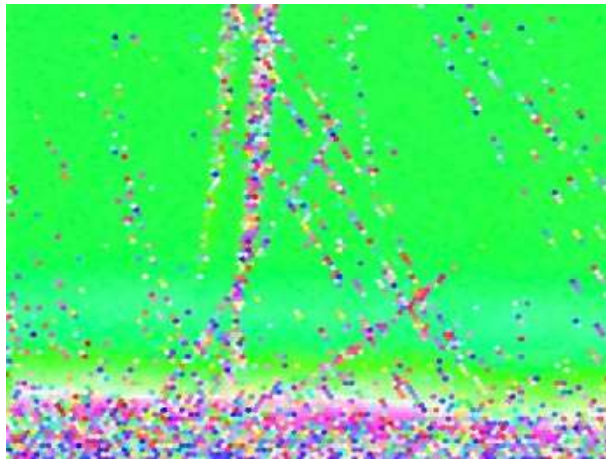
Şekil 5.11: P4 Düşük çapaklı (kesildiği gibi) numune EBSD ve IPF grafikleri.



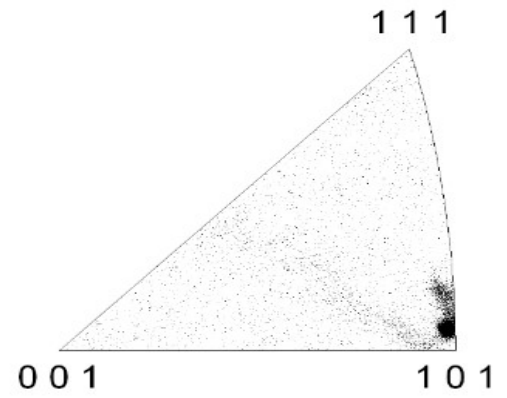
[001]



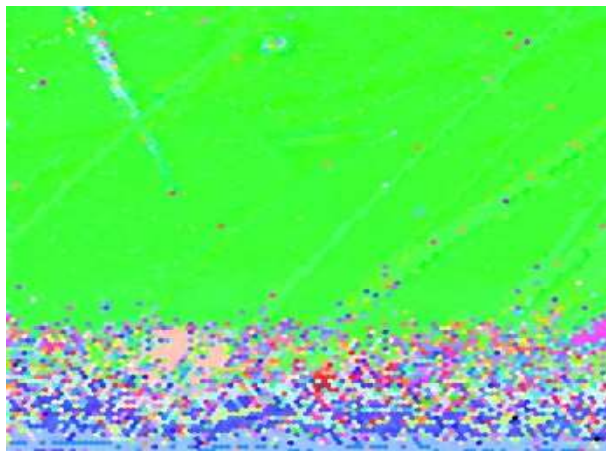
Şekil 5.12: R8 Düşük çapaklı (tavlanmış) numune EBSD ve IPF grafikleri.



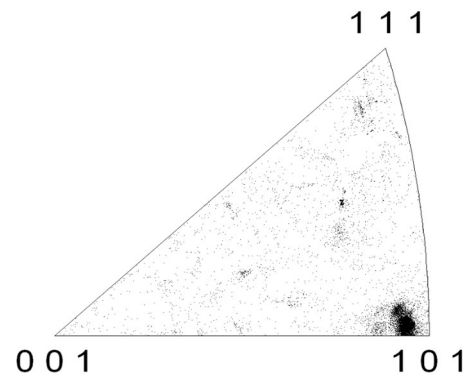
[001]



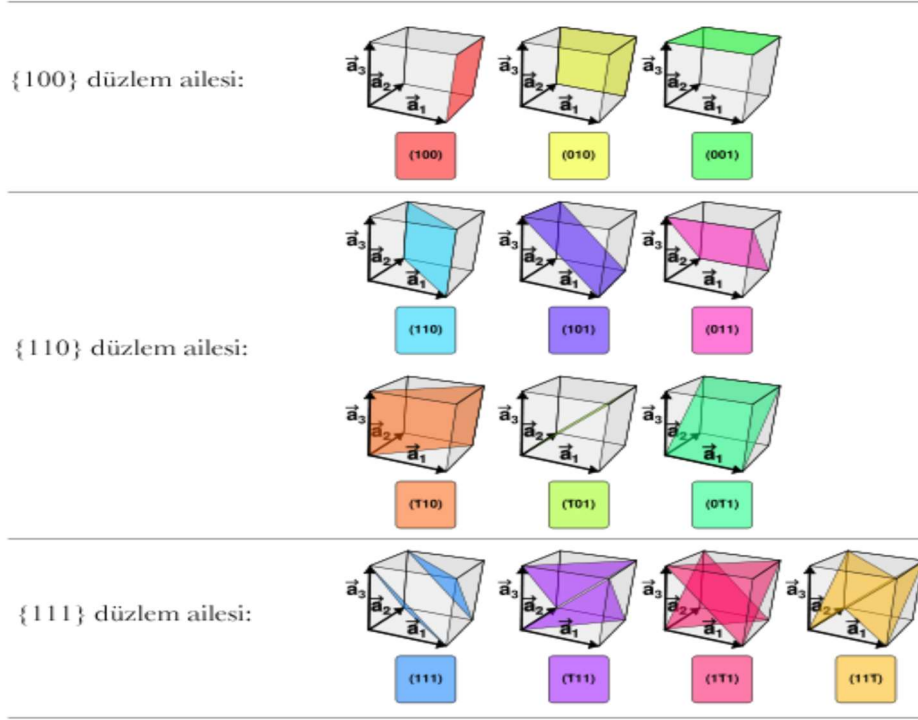
Şekil 5.13: P2 Yüksek çapaklı (kesildiği gibi) numune EBSD ve IPF grafikleri.



[001]



Şekil 5.14: R7 Yüksek çapaklı (tavlanmış) numune EBSD ve IPF grafikleri.



Şekil 5.15: Kristal yapıda Miller doğrultuları ve düzlemleri [70].

EBSD tarama paternleri ve IPF grafiklerinden elde edilen sonuçlar ve önermeler şunlar olmuştur:

- Tarama yapılan alanda tane yapısı tek kristal formundadır.
- Tarama kesme kenarı boyunca tane içinden kesme kenarına doğru yapılmıştır. Yani taramanın yönü kristalografik olarak RD doğrultusundadır.
- Tek kristalde $\{110\}$ düzlemlerinin $\langle 001 \rangle$ doğrultuları boyunca yüzeye nerdeyse paralel yönlendiği bilinmektedir.
- GOSS yönlenmesinin majör olduğu tarama alanında farklı düzene sahip kristal düzenlerine rastlanmaktadır. Bunların SEM görüntülerinde görebildiğimiz tane sınırı olmayan, kesme bantları ve dislokasyonları olarak tanımladığımız 2 boyutlu çizgisel kusurlar olması muhtemeldir.
- Kenara yaklaşıldıkça GOSS yönlenmesinin kesme kenar boyunca kaybolduğu bir geçiş bölgesi oluşumu izlenebilmektedir. Bu geçiş grafiklerde ince ve mor bir kuşak olarak fark edilmektedir.
- Geçiş bölgesi yüksek çapaklı numunelerde daha belirgindir ve genişliği 40-50 mikron seviyesine ulaşabilmektedir.

- Gerilim giderme tavlama sürecinin geçiş bölgesini kısaltmış olabileceği ifade edilebilir. Dolayısıyla tavlama ile kristalografik yönelimde plastik deformasyon etkisinin bir miktar azalması beklenebilir bir durumdur.

5.7 EPSTEIN cihazında yapılan numune ölçekli ölçümlerin sonuçları

EPSTEIN cihazında standart ve standart dışı dizim teknikleri uygulanarak kesildiği gibi ve tavllanmış numuneler için malzemenin üretici kataloglarında verilen değerler ile ölçülen değerleri karşılaştırmak mümkün olmuştur. Ayrıca Tip-1 numuneler ile yapılan çalışmalarla tavlamanın etkisini de anlama imkânı oluşmuştur. Tüm ölçümlerden elde edilen sonuçlar Tablo A.1 ve Tablo A.2' de topluca verilmiştir.

Kesildiği gibi Tip-2 numuneler ile elde edilen Tablo A.1 yakından incelendiğinde; IEC 60404-2 standardına uygun olarak yapılan 9 ve 10 nolu ölçümlerde, (1,7 Tesla) indüksiyon ve 50 Hz frekansta sac kaybı P_s değerinin 0,717 ve 0,713 W/kg olduğu görülmektedir. Bu değerlerin sacın katalog değerine 0,70 W/kg değerine yakın bir değer olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde Tablo A.1' de satır 1, 4, 7 ve 8'de verilen standarda uygun dizim tekniklerinin uygulandığı denemelerde katalog değerlerine yakın kayıp değerleri 0,723-0,723- 0,722- 0,721 W/kg değerleri elde edilmiştir.

Kesildiği gibi Tip-2 numuneler ile manyetik akı yolu *leff* sabit tutulacak şekilde step lap dizim tekniği uygulanan 5 ve 6 nolu denemelerde ise sırasıyla 1,030 ve 0,978 W/kg değerleri elde edilmiştir. Plastik deformasyon etkisi ve step-lap dizim bindirme yapan yüzey miktarı etkisi ile ortaya çıktığını değerlendirdiğimiz sac kaybının katalog değerine göre 0,4 W/kg artış göstermiş olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede EPSTEIN ölçümünde trafo dizim tekniğine uygun yapılan *step-lap* dizimin kayıp değerlerindeki yükseltici etkisi not edilmiştir.

Kesildiği gibi olarak ve tavlama rejimlerine maruz bırakılmış olarak, standart ve standart dışı Tip-2 ve Tip-1 numunelerde köşelerde (1 Newton) baskı olması ve olmaması koşullarında ölçülen kayıp değerleri Tablo A.2' de verilmektedir. Çok sayıda denemeden elde edilen en önemli sonuçlar, Tablo A.1 ve Tablo A.2' nin özeti mahiyetinde demir kaybı parametresi cinsinden özet Tablo 5.7 ve Tablo 5.8' de verilmiştir.

Tablo 5.7: Tip-2, MoH, 0,23 mm saclarla yapılan ısıl işlemler sonrası sac kaybı ölçümleri.

Ölçüm	Eşdeğer uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	P_s (W/kg) (1,7 T, 50 Hz, Kesildiği gibi)	P_s (W/kg) (1,7 T, 50 Hz, 550 °C)	P_s (W/kg) (1,7 T, 50 Hz, 650 °C)	P_s (W/kg) (1,7 T, 50 Hz, 800 °C)	(%) Kayıp kazancı (kesim sonrası karşı 800 °C'de tavlınmış)	Notlar
5	(280/220) 250 mm	30	1,0295	0,8743	0,8892	0,8933	%13,628	(280/220x30) numuneler ile step-lap dizim tekniğinde. Köşelerde baskı yok.
6	(280/220) 250 mm	30	0,9781	0,8512	0,8847	0,8776	%10,275	(280/220x30) numuneler ile step-lap dizim tekniğinde. Köşelerde (1 N) baskı var.
9	(300/300) 300 mm	30	0,7166	0,7611	0,7622	0,7918	- %10,494	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde baskı yok.
10	(300/300) 300 mm	30	0,7132	0,7602	0,7621	0,7789	- %9,212	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde (1 N) baskı var.

Tip-2 MoH 0,23 mm numune saclarla yapılan ölçümler esnasında gerilim giderme sonrası kayıp ölçme çalışmalarında beklenmedik bir yönelim olduğunu fark edilmiştir; kenar bindirmeli dizim tekniğine göre EPSTEIN cihazına yerleştirilen numunelerde gerilim giderme sıcaklıklarında kademeli artış yapılmış olmasına rağmen kayıp değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmemiştir. Aksine, Tip-2 MoH 0,23 mm kesildiği gibi numunelerden elde edilen kayıp değerlerinin ardışık yapılan tavlama işlemlerine rağmen en iyi değerler olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla numune seçimi noktasına geri dönülerek; Tip-2 MoH 0,23 mm numunelerde ürün üzerinde zorlukla fark edilebilen domain düzenleme tekstürü fark edilmiştir. Domain düzenleme etkinin 550 °C' de yapılan gerilim giderme işlemi ile ortadan kaybolduğu ve bu sebeple sac kaybında belirgin artış olduğu değerlendirilmiştir.

Domain düzenleme etkisini devre dışı bırakmak için bu etkinin söz konusu olmadığı Tip-1 M5 0,30 mm sac tipinden yeni bir numune seti üretilmiştir. Regresyon analizi aşamasında ön kesimi yapılan Tip-1 360-300x60 mm boyutlarındaki M5 kalite 0,30 mm sac grubundan su jeti ile yeni bir numune seti üretilmiştir. Önceki numunelere uygulanan su jeti ile kesim yöntemi ile 219/276x28 mm boyutlarında standart dışı ve 301x30 mm standarda uygun üretilen Tip-1 M5 0,30 mm elektrik saclarından elde edilen ölçümler aşağıdaki Tablo A.2' de toplu olarak verilmiştir. Önceki Tip-2 numuneler ile yapılan ölçümlerde olduğu gibi ilk

testler numunelerin kesildiği gibi hali ile yapılmıştır. İkinci testler ise numuneler 800 °C’de 1 saat gerilim giderme işlemi uygulandıktan sonra yapılmıştır. Tablo A.2’ nin özeti mahiyetinde sonuçlar Tablo 5.8’ de verilmiştir.

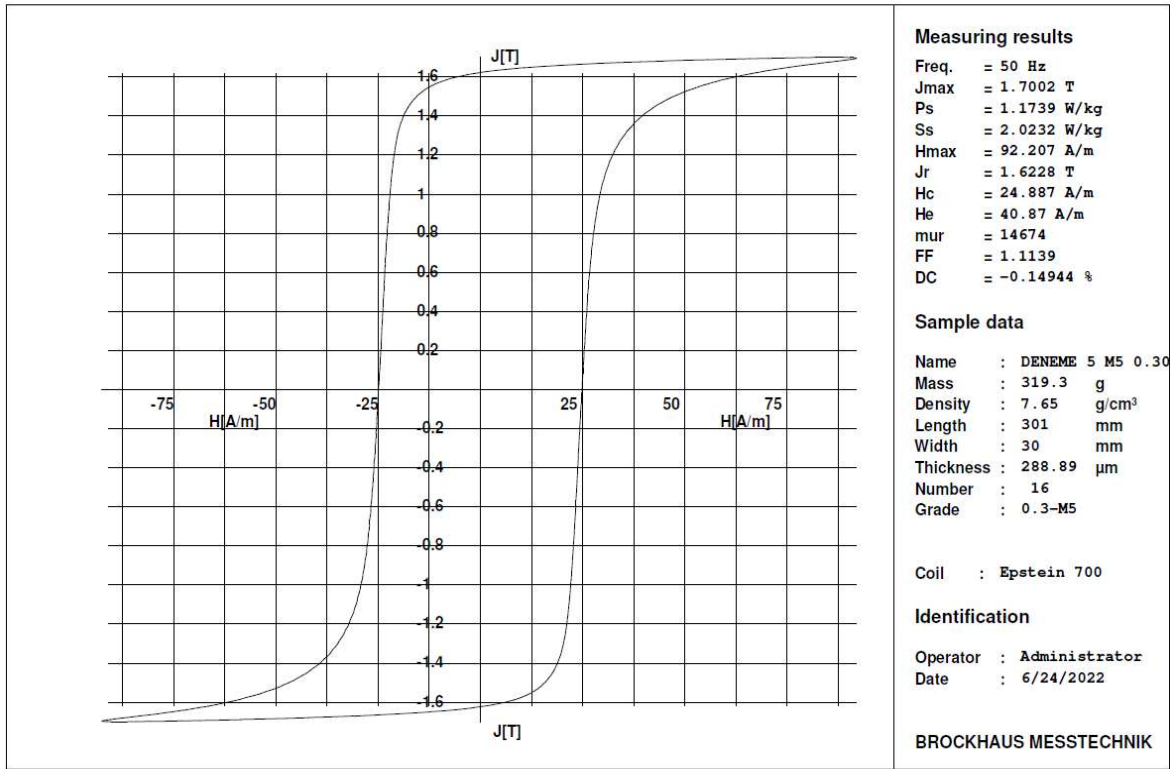
Tablo 5.8: Tip-1 M5 0,30 mm saclarla yapılan kesildiği gibi ve ısıt işlemler sonrası sac kaybı ölçümleri.

Ölçüm	Eşdeğer uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Ölçülen Kayıp P_s (W/kg) (1,7 Tesla, 50 Hz, Kesildiği gibi)	Ölçülen Kayıp P_s (W/kg) (1,7 Tesla, 50 Hz, 800 °C’de tavllanmış)	(%) Kayıp kazancı (Kesildiği gibiye karşı tavllanmış)	Not
1	(301/301) 301 mm	30	1,2551	1,1739	%6,470	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde baskı yok.
2	(301/301) 301 mm	30	1,2529	1,1726	%6,409	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde (1 N) baskı var.
3	(219/276) 247,5 mm	29	1,3721	1,2580	%8,315	Step lap dizim tekniğinde. Köşelerde baskı yok.
4	(219/276) 247,5 mm	29	1,2472	1,2001	%3,776	Step lap dizim tekniğinde. Köşelerde (1 N) baskı var.

Domain düzenleme etkisi olmayan, katalog sac kaybı değeri olarak 1,3 W/kg olarak verilen Tip-1 M5- 0,30 mm kalitesindeki sacın kesildiği gibi versiyonu 800 °C’de ısıt işleme tabi tutulmuş versiyonu ile karşılaştırıldığında, standarda uygun EPSTEIN ölçümcülerinde yaklaşık % 6,4 demir kaybı kazanımı, *step-lap* dizim tekniğinde dizim tekniğin uygulandığında ise köşe yükü uygulandığında %3,7, köşe yükü uygulanmadığı durumda ise %8,315 civarında demir kaybı azalması ölçülmüştür. Benzer bir iyileşme (Tip-2 numuneler ile yapılan ölçümlerin aksine) standart dizim tekniği kullanılarak yapılan ölçümlerde de tespit edilmiştir.

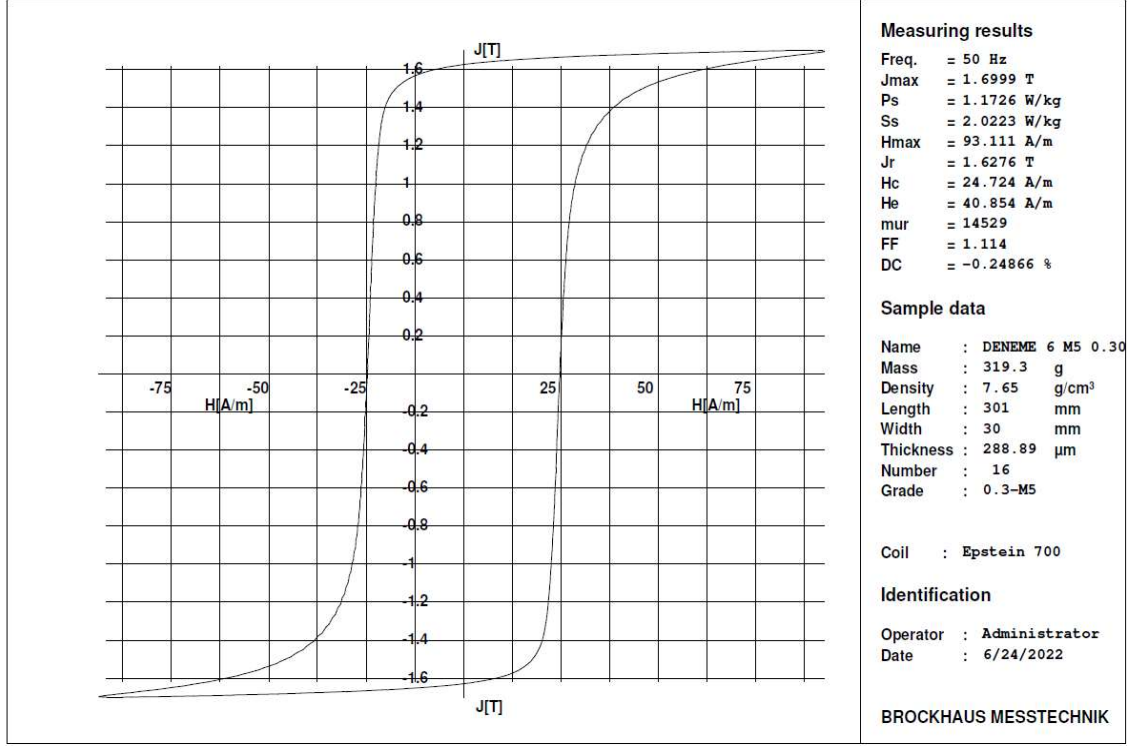
Yukarıdaki umut verici sonuçlar alındıktan sonra benzer bir kazanımın prototip ölçeğinde gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinin araştırılması adına prototip seviyesinde nüve üretimi çalışmaları başlatılmıştır. EPSTEIN ölçümlerinde numunelere ait diğer manyetik parametreler de aynı anda ölçülebilmektedir. Örnek olarak, ölçümler esnasında oluşan histerisiz eğrileri 800 C’de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm örnekler için verilmiştir. Grafikler BROCKHAUSS MESSTECHNIK EPSTEIN 700 cihazında elde ölçüm grafik çıktılarıdır. Şekil 5.16’da 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm standart dizim numunenin 1,7 T indüksiyonda, köşelerde baskı kuvveti uygulanmadığı halde oluşan histerisiz çevrimi görülmektedir. Şekil 5.17’ de ise köşelerde 1 N baskı kuvveti var iken oluşan histerisiz

çevrimi verilmektedir. Tablo A.11 ve Tablo A.12 bu ölçümlere ait özet veri tablolarıdır. Yük olması ve olmaması durumları için temel manyetik parametrelerdeki değişimler önemsizdir. Koersivite ölçümü değerinde (24,887 -->24,724 A/m), manyetik geçirgenlik değerinde (14674 -->14529), kalıcı mıknatıslanma indüksiyonunda (1,6228 -->1,6276 Tesla) ve sac kaybında (1,1739-->1,1726 W/kg) değişimleri ölçülmüştür.

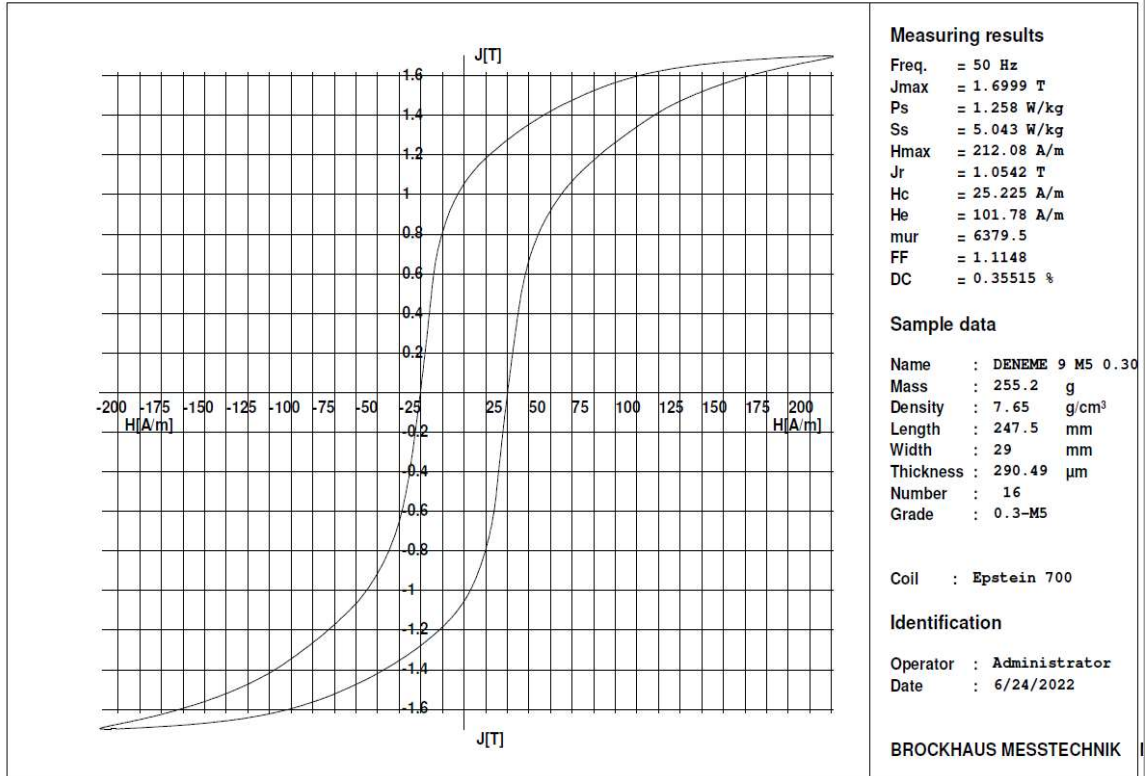


Şekil 5.16: 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde baskı kuvveti yok.

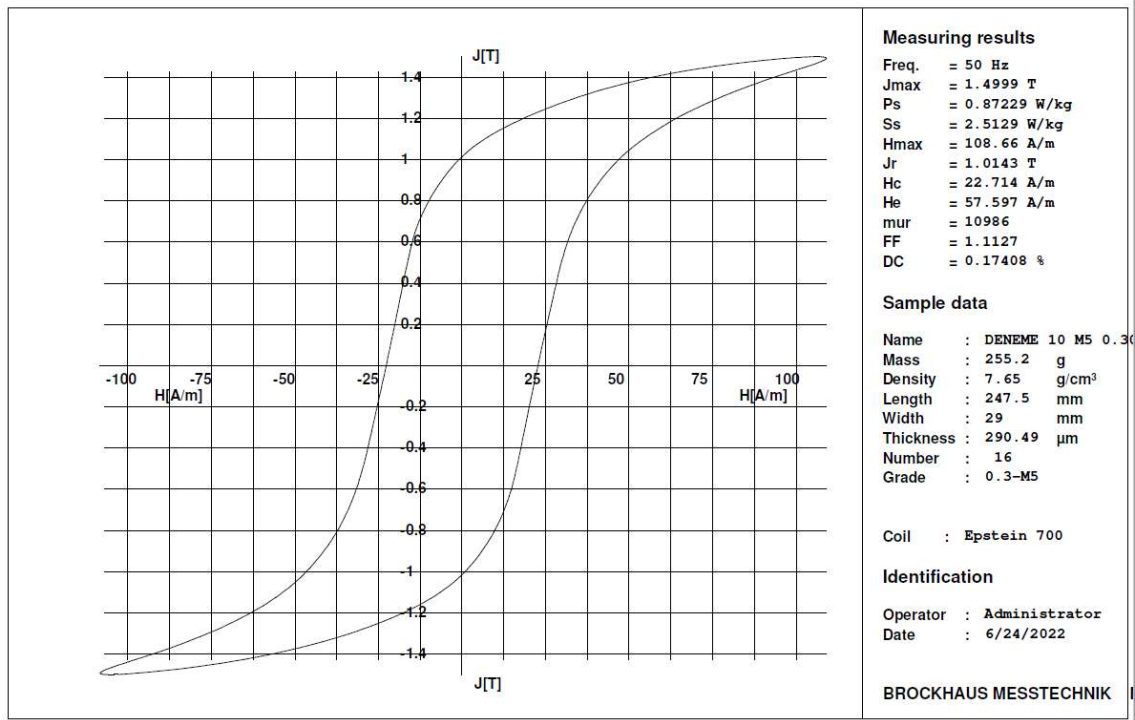
Şekil 5.18’ de 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm standart dışı dizim numunenin 1,7 T indüksiyonda, köşelerde baskı kuvveti uygulanmadığı halde oluşan histerisiz çevrimi görülmektedir. Şekil 5.19’ de ise köşelerde 1 N baskı kuvveti var iken 1,5 T indüksiyonda, oluşan histerisiz çevrimi verilmektedir. Tablo A.13 ve Tablo A.14 bu ölçümler ait özet veri tablolarıdır. Yük olması ve olmaması durumları için temel manyetik parametrelerdeki değişimler önemlidir. Her iki ölçüm için 1,7 Tesla doyum indüksiyonunda koersivite ölçümü değerinde (22,225 -->25,109 A/m), manyetik geçirgenlik değerinde (6380 -->6633), kalıcı mıknatıslanma indüksiyonunda (1,0542 -->1,0997 Tesla) ve sac kaybında (1,2580-->1,2001 W/kg) değişimleri ölçülmüştür.



Şekil 5.17: 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde 1 N baskı kuvveti var.



Şekil 5.18: 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin 1,7 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde baskı kuvveti yok.



Şekil 5.19: 800 °C’ de tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin 1,5 T indüksiyonda histerisiz çevrimi, köşelerde 1 N baskı kuvveti var.

Yukarıdaki grafikler tavllanmış Tip-1 M5 0,30 mm örneklerle yapılan standart ve standart dışı dizim teknikleri ölçümlerine aittir. Tüm ölçümlere ait veriler; kesildiği gibi ve tavllanmış olarak yapılan tüm ölçümlere ait veri tabloları Tablo A.7, A.8, A.9, A.10 A.11, A.12, A.13 ve Tablo A.14 ‘de ek olarak verilmiştir.

5.8 Prototip Nüve Kayıp Ölçümleri

Bölüm 4.5’ te ısıl işlem süreçleri detaylı anlatılan 4 adet prototip nüveye ait görseller aşağıda Şekil 5.20’ de gösterilmiştir. Sac grupları fırın içinde iken vakum yaklaşık 0,1 mbar değerine düşürülmüş, bu değerde yaklaşık olarak 3 saat 40 dakika boyunca 750 C sıcaklığı maruz bırakılmışlardır. Isıl işlem esnasında fırın içine Azot gazı beslemesi yapılmıştır. Bu sayede fırın iç ortamının nötr kalması sağlanmıştır.

Isı ve sıcaklık etkisiyle fırın içinde olabilecek yanıcı yabancı maddelerin Oksijen ile olası reaksiyonu engellenmiş olduğundan fırınlama sonrasında çıkan boyunduruk ve bacak saclarında önemli bir görsel değişim olmamıştır. Isıtma rejiminden sonra saclar fırın içinde yavaşça soğumaya bırakılarak ani soğumadan kaynaklanabilecek deformasyon olasılığını önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Daha sonra sıkıştırma demirine dizimi, nüve boyası ve torklaması yapılan her bir nüveye indükleyici ve ölçüm sarımları sarılmıştır. Bu sayede yapılan boşta kayıp ve boşta akım ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo A.3, Tablo A.4, Tablo A.5 ve Tablo A.6’ da verilmiştir. Ölçümler BEST TRAFO Kuru Trafo Test laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Spir sayıları, tel kesitleri ve indükleyici gerilim miktarları standart test prosedürlerine göre test mühendislerince belirlenmiştir. Şekil 5.20’ de dizimi yapılmış, indükleyici ve ölçüm sargıları sarılmış halde yapısal olarak delikli ve deliksiz yapısal, geçirdiği ısıl işlem açısından tavlanmış ve kesildiği gibi saclardan oluşan 4 adet eşdeğer nüve gösterilmektedir.



Şekil 5.20: Delikli, deliksiz, kesildiği gibi ve tavlanmış olarak üretilen prototip nüveler.

Tablo A.3, Tablo A.4, Tablo A.5 ve Tablo A.6’ da tavlama yapılması ya da yapıda merkezleme deliği bulunması koşullarına göre prototip nüvelerden elde edilen tüm sonuçlar belirlenen koşullara göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablolardaki boş hücreler sağlıklı veri oluşturulamayan ölçüm denemelerine ait satırlardır. Bu eksik veriye rağmen her ölçümde en az 4 tekrarın olması nedeni ile ortalama değer alınabildiğinden her bir indüksiyon kademesi için aritmetik ortalamaların ölçüm grubunu temsil etme yeteneğinde olduğu kabul edilmiştir.

Tablo A.3, Tablo A.4, Tablo A.5 ve Tablo A.6’ da verilen tüm ölçüm değerleri aşağıda Tablo 5.9, Tablo 5.10, Tablo 5.11 ve Tablo 5.12’ de özetlenerek daha kolay yorumlanabilir hale getirilmiştir. Bu tablolardaki renklendirilmiş satırlar nüvenin tam yükleme ve yarım yükleme indüksiyon koşullarını işaret etmektedir. Kırmızı çember içine alınan satırlar ise güvenli yükleme koşullarını temsil etmektedir. Tam yükleme koşulu nüve malzemesinin kataloglarda belirtilen indüksiyon değerlerinde manyetik akıya maruz kalacağına öngörüldüğü ($B=1,7$ Tesla) yükleme koşulunu temsil eder. Güvenli yükleme koşulu ($B=1,36$ Tesla) nüvenin uzun yıllar boyunca maruz kalacağı varsayılan operasyon koşulunu temsil etmektedir. Yarım yükleme koşulu ise pek çok trafo için ömrü boyunca maruz kalacağı ortalama indüksiyon değerine yakın bir yükleme koşulunu temsil etmektedir. Güvenli yükleme (1,36 Tesla) ve tam yükleme (1,70 Tesla) yükleme koşulunda kayıt altına alınan değişimler toplam yatırım değeri hesabında ayrı ayrı kullanılacaktır.

Tablo 5.9: Tavlama sürecinin etkisinin delikli nüvelerde karşılaştırılması.

Delikli yapı: (Kesildiği gibine karşı tavllanmış delikli yapı)				
İndüksiyon Kademesi	İndüksiyon Seviyesi (T)	Tavlama ile geri kazanılan birim boşa kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp oranı (%)
1	0,792	0,0395	2,8911	13,45%
2	0,905	0,0516	3,7731	13,54%
3	1,018	0,0618	4,5193	12,88%
4	1,131	0,0797	5,8310	13,35%
5	1,244	0,1017	7,4402	13,88%
6	1,358	0,1289	9,4330	14,42%
7	1,471	0,1486	10,8741	13,77%
8	1,584	0,2236	16,3643	16,56%

Tablo 5.9: (devam)

9	1,697	0,3283	24,0246	17,77%
10	1,810	0,4964	36,3244	17,41%
11	1,923	0,8417	61,5839	17,95%
12	2,036	1,3499	98,7708	17,66%

Tablo 5.10: Tavlama sürecinin etkisinin deliksiz nüvelerde karşılaştırılması.

Deliksiz yapı: (Kesildiği gibine karşı tavllanmış deliksiz yapı)				
İndüksiyon Kademesi	İndüksiyon Seviyesi (T)	Tavlama ile geri kazanılan birim boşa kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp oranı (%)
1	0,792	0,0005	0,0342	0,19%
2	0,905	0,0014	0,100	0,44,%
3	1,018	0,0011	0,080	0,28%
4	1,131	0,0014	0,100	0,28%
5	1,244	0,0023	0,167	0,39%
6	1,358	-0,0003	-0,025	-0,05%
7	1,471	-0,0044	-0,321	-0,53%
8	1,584	-0,0152	-1,123	-1,56%
9	1,697	-0,0258	-1,901	-2,22%
10	1,810	-0,0597	-4,403	-4,32%
11	1,923	-0,1718	-12,682	-10,40%
12	2,036	-0,3881	-28,644	-18,35%

Tablo 5.11: Yapısal farkların (delikli yapıya karşı deliksiz yapı) kesildiği gibi nüvelerde karşılaştırılması.

Yapısal karşılaştırma: (Kesildiği gibi Delikli yapıya karşı Kesildiği gibi Deliksiz yapı)				
İndüksiyon Kademesi	İndüksiyon Seviyesi (T)	Yapısal boşa kayıp birim (W/kg)	Yapısal boşa kayıp farkı (W)	Boşa kayıp fark oranı (%)
1	0,792	0,054	3,8172	18,47%
2	0,905	0,071	4,9992	18,64%
3	1,018	0,089	6,2904	18,64%
4	1,131	0,116	8,1557	19,38%
5	1,244	0,149	10,5218	20,33%
6	1,358	0,198	14,0276	22,13%
7	1,471	0,252	17,9458	23,40%

Tablo 5.11: (devam)

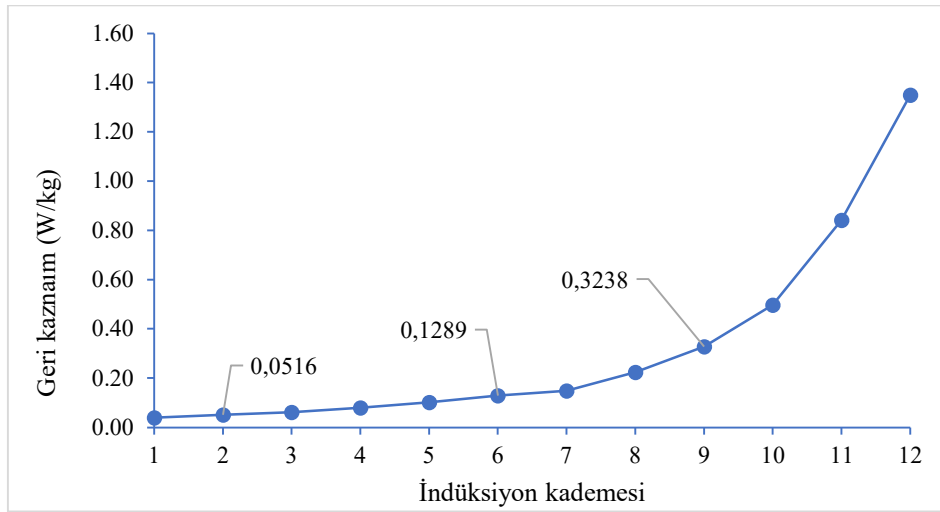
8	1,584	0,374	26,7740	27,72%
9	1,697	0,686	49,4690	37,13%
10	1,810	1,471	106,7774	51,61%
11	1,923	3,037	221,1300	64,77%
12	2,036	5,529	403,1908	72,33%

Tablo 5.12: Yapısal farkların (delikli yapıya karşı deliksiz yapı) tavllanmış nüvelerde karşılaştırılması.

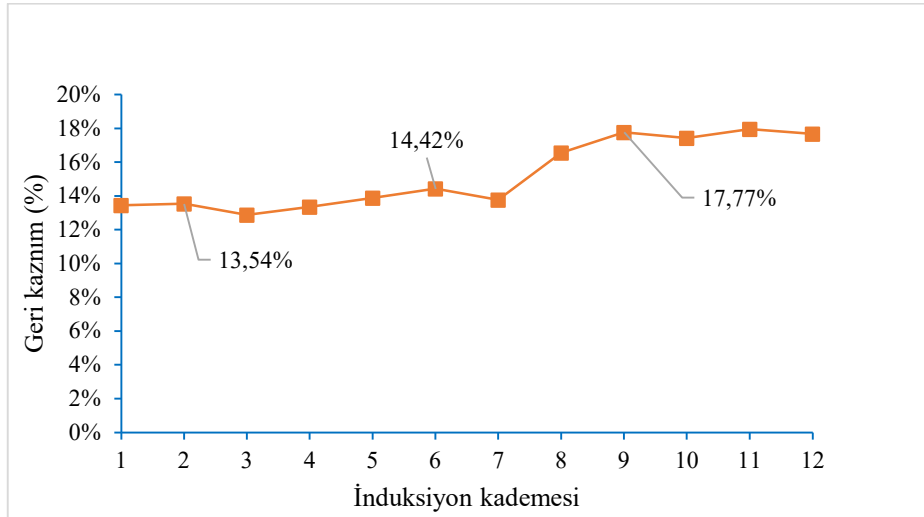
Yapısal karşılaştırma: (Tavllanmış Delikli yapıya karşı Tavllanmış Deliksiz yapı)				
İndüksiyon Kademesi	İndüksiyon Seviyesi (T)	Yapısal boşta birim kayıp farkı (W/kg)	Boşta kayıp farkı (W)	Boşta kayıp ortalamalar fark oranı (%)
1	0,792	0,0152	0,9603	5,98%
2	0,905	0,0208	1,3259	6,32%
3	1,018	0,0287	1,8516	6,87%
4	1,131	0,0373	2,4251	7,22%
5	1,244	0,0495	3,2482	7,84%
6	1,358	0,0685	4,5698	8,96%
7	1,471	0,0995	6,7503	10,70%
8	1,584	0,1356	9,2868	12,03%
9	1,697	0,3321	23,5431	21,86%
10	1,810	0,9153	66,0502	38,87%
11	1,923	2,0231	146,8645	52,60%
12	2,036	3,7909	275,7760	60,23%

Yukarıdaki tablolarda gösterilen değişimlerin grafik özetleri Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’ de verilmiştir. Değişim eğilimini doğru bir şekilde yorumlayabilmek adına belirtmek gerekir ki, tablolarda verilen 11 ve 12 nolu satırlarda bulunan değerler “**aşırı doyum**” koşullarının temsil ettiği değerlerdir ve normal koşullarda işletmedeki trafolarla oluşması beklenmez. Trafolarla aşırı doyum indüksiyonuna olağan üstü koşullarda (örneğin kısa devre koşullarında) ulaşılır ve aşırı doyumda kısa bir süre çalışılması durumunda dahi trafoda ısınma ya da kısmi deşarj nedeni ile arıza oluşabilir. Nüve tasarımları en kötü senaryo olan tam yük çekilmesi koşuluna göre tasarlanır. Fakat transformatörler uzun süreli olarak

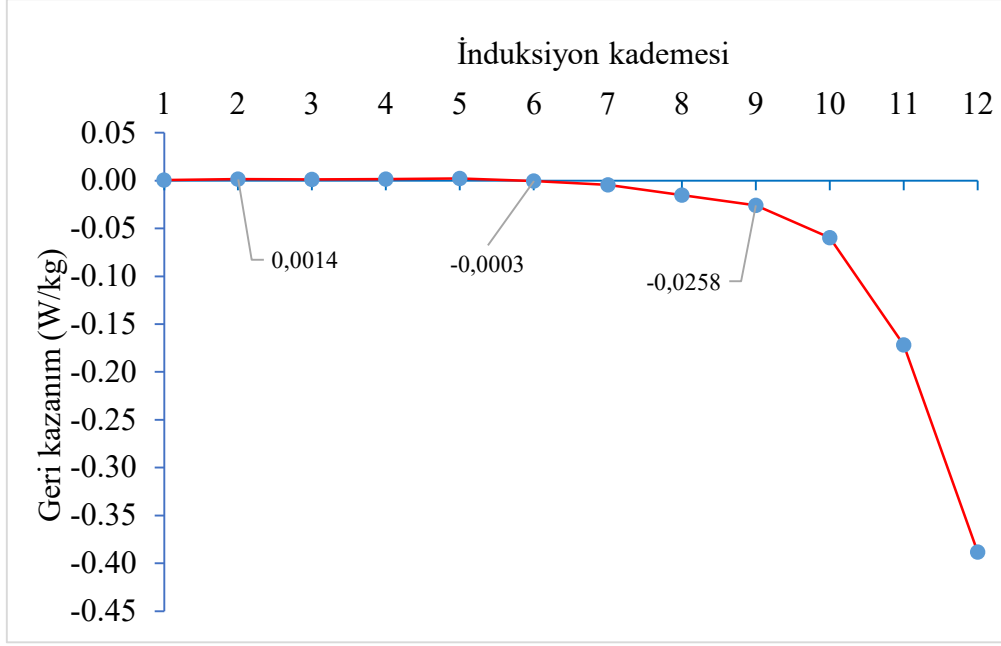
tam yükleme koşullarında çalışması istenmez. Çoğunlukla güvenli yükleme tasarım yükü olarak ($B= 1.36$ Tesla) indüksiyon değerinde ya da civarında, acil durumlarda devreye alınabilecek kapasite bırakılacak şekilde çalıştırılması tercih edilir. Gerçekte, trafolar yedekli olarak temin edildiklerinden, bağlı oldukları şebekedeki güç talebine bağlı olarak uzun süre yarım yük koşullarında (0,9 Tesla) işletmede kalabilir. Aşağıdaki grafikler yukarıda bahsedilen tablolardan bu prensiplere göre üretilmişlerdir. Grafiklerde 3 farklı yükleme koşulunu (0, 9 T – 1,36 T – 1,7 T) değişimi göstermek için bu noktalarda etiketleme yapılmıştır.



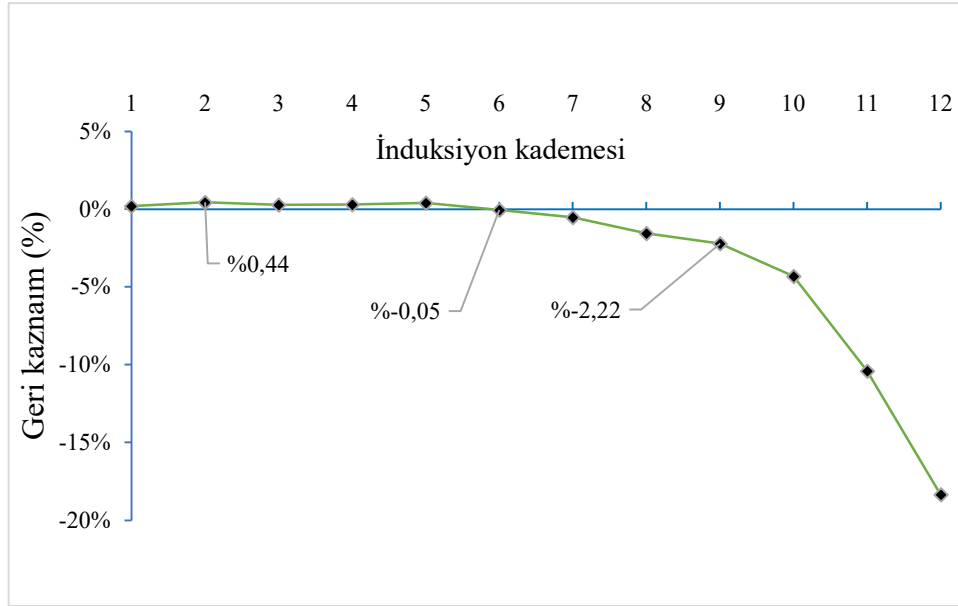
Şekil 5.21: Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp miktarı: delikli kesildiği gibi yapıya karşı delikli tavllanmış yapı.



Şekil 5.22: Tavlama ile geri kazanılan boşta kaybın yüzdesi: delikli kesildiği gibi yapıya karşı delikli tavllanmış yapı.



Şekil 5.23: Tavlama ile geri kazanılan boşta kaybın yüzdesi: deliksiz kesildiği gibi yapıya karşı deliksiz tavllanmış yapı.

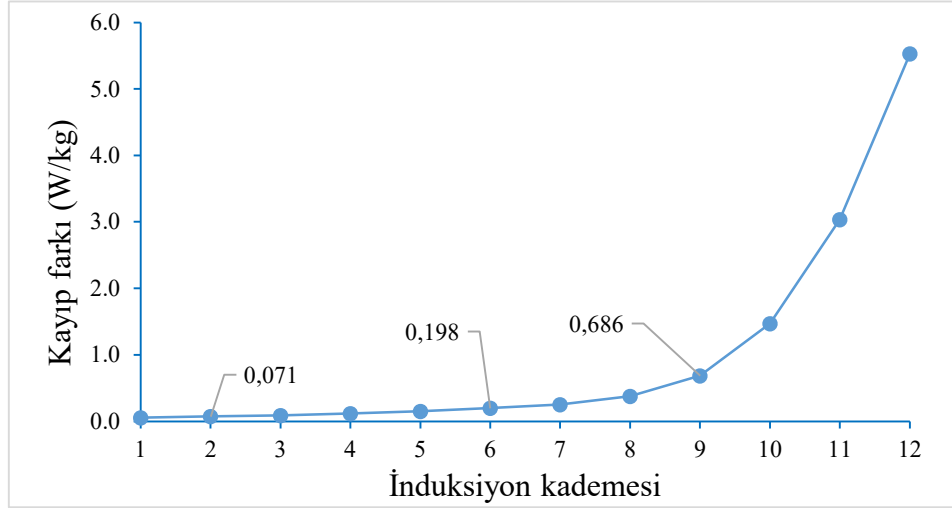


Şekil 5.24: Deliksiz nüve tasarımında tavlamanın negatif etkisi: deliksiz kesildiği gibi yapıya karşı deliksiz tavllanmış yapı.

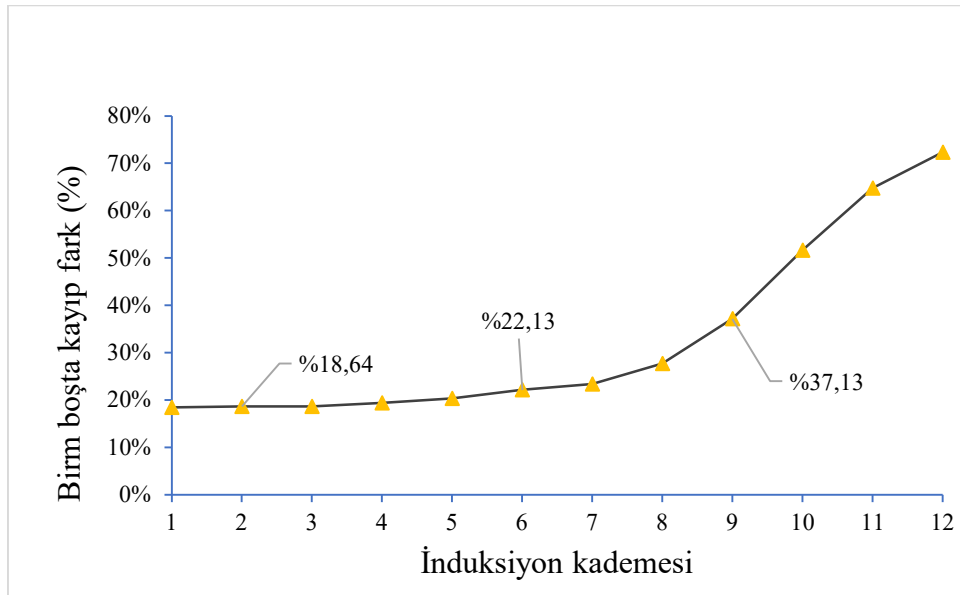
Aşağıdaki grafiklerde ise prototip nüvelerde yapısal farklılıkların karşılaştırması verilmektedir. Şekil 5.25' te kesildiği gibi nüveler delikli ve deliksiz olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 5.26' da ise kesildiği gibi nüvelerde delikli ve deliksiz nüvelerin eş değer indüksiyon koşullarında nüve kaybı farkı açısından gösterilmiştir. Şekil 5.27' de ise tavllanmış nüvelerde delikli ve deliksiz boşta kayıp farkı gösterilmektedir. Şekil 5.28' de ise

kesildiği gibi tavllanmış nüvelerde delikli ve deliksiz boşta kayıp oransal farkı gösterilmektedir.

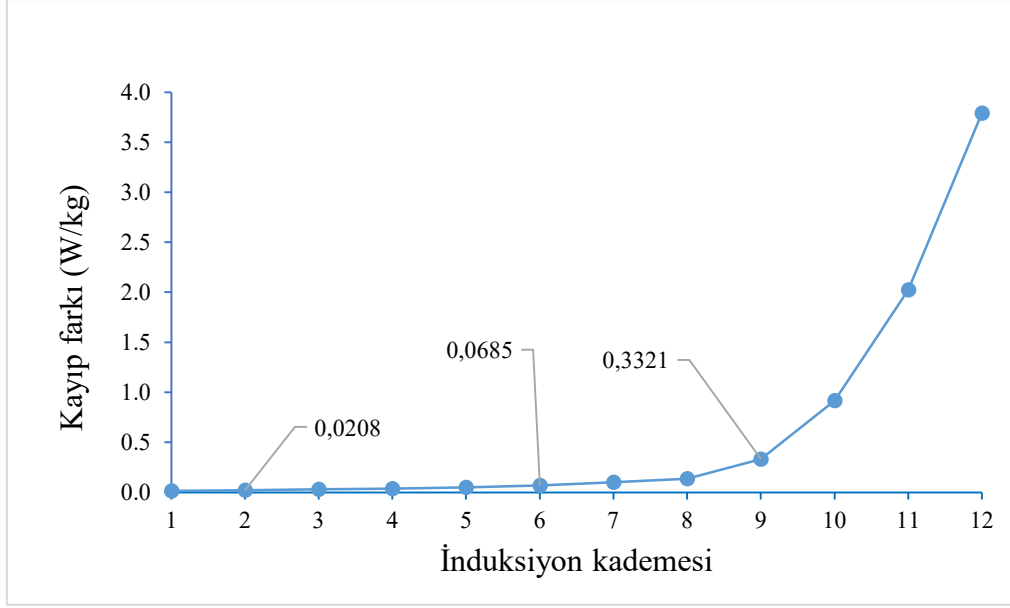
Şekil 26 ile Şekil 28’deki grafikler kıyaslandığında tavlama işleminin yapıdan kaynaklanan nüve kaybını indirgediği sonucuna ulaşabilir.



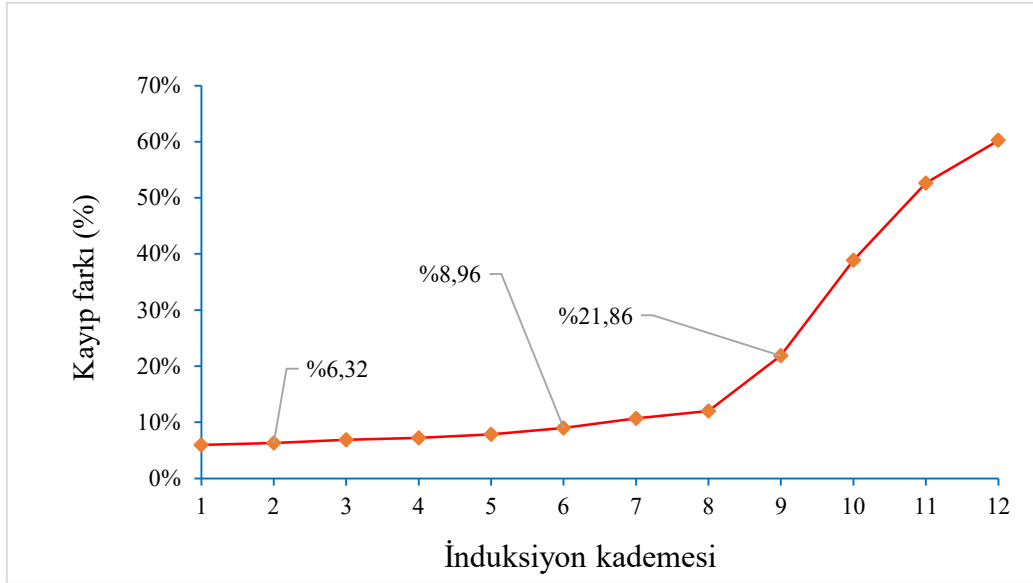
Şekil 5.25: Kesildiği gibi nüvelerin yapısal karşılaştırılması, boşta kayıp değerleri farkı: kesildiği gibi delikli yapıya karşı kesildiği gibi deliksiz yapı.



Şekil 5.26: Kesildiği gibi nüvelerin yapısal karşılaştırılması, boşta kayıp değişim oranı: kesildiği gibi delikli yapıya karşı kesildiği gibi deliksiz yapı.



Şekil 5.27: Nüvelerin boşa kayıplarının yapısal olarak karşılaştırılması: tavllanmış delikli yapıya karşı tavllanmış deliksiz yapı.



Şekil 5.28: Nüvelerin boşa kayıp farkı oranı yapısal olarak karşılaştırılması: tavllanmış delikli yapıya karşı tavllanmış deliksiz yapı.

Tüm prototiplerde birim boşa kayıp değerleri Tablo 5.13’ de toplu olarak verilmiştir. Tablo 5.13 sayesinde tüm nüvelerden elde edilen kayıp değerleri, kesildiği gibi ve tavllanmış nüveler arasındaki yapısal farklar birim kayıp (W/kg) cinsinden görülebilmektedir.

Tablo 5.13: Prototiplerin birim kayıplarının, delik ve tavlama etkisinin karşılaştırması.

Birim kayıpların karşılaştırılması (W/kg)							
İndüksiyon Kademesi	İndüksiyon Seviyesi (T)	No1- Kesildiği gibi (Delikli)	No2- Kesildiği gibi (Deliksiz)	No3- Tavllanmış (Delikli)	No4- Tavllanmış (Deliksiz)	Kesildiği gibi nüvelerde (Delikli - Deliksiz) farkı	Tavllanmış nüvelerde (Delikli - Deliksiz) farkı
1	0,792	0,2938	0,2395	0,2543	0,2520	0,0543	0,0417
2	0,905	0,3810	0,3099	0,3294	0,3266	0,0710	0,0544
3	1,018	0,4795	0,3901	0,4177	0,4141	0,0894	0,0654
4	1,131	0,5969	0,4812	0,5172	0,5127	0,1157	0,0842
5	1,244	0,7324	0,5835	0,6307	0,6253	0,1489	0,1072
6	1,358	0,8939	0,6961	0,7650	0,7584	0,1978	0,1356
7	1,471	1,0790	0,8265	0,9304	0,9223	0,2525	0,1567
8	1,584	1,3508	0,9764	1,1272	1,1174	0,3745	0,2334
9	1,697	1,8480	1,1618	1,5197	1,5065	0,6862	0,3415
10	1,810	2,8509	1,3795	2,3545	2,3341	1,4714	0,5169
11	1,923	4,6881	1,6515	3,8464	3,8131	3,0366	0,8750
12	2,036	7,6436	2,1148	6,2938	6,2392	5,5288	1,4045

Yukarıdaki tablolardan ve grafiklerden gerilim giderme sürecinin delikli yapıda boşta kayıpları olumlu yönde azalttığı net bir şekilde görülmektedir. Deliksiz yapıda ise yarım yük ve güvenli yükleme koşullarında önemli bir fark oluşturmaz iken, indüksiyon şiddeti artınca olumsuz yönde etki gösterdiği tespit edilmiştir.

Benzer sonuçlar Landgraf ve arkadaşları [8] tarafından NGO saclarla 700 °C ve 1 saat uygulanan ısı işlem süreçlerinden sonra yapılan ölçümlerde daha yüksek oranlarda (%20) manyetik kayıpta geri kazanım gözlemlendiği belirtilmişti.

6. GENEL SONUÇLAR

Transformatör imalatının önemli bir aşaması olan lamine elektrik sacı kesme prosesi kaynaklı süreksizliklerin ve kesme kenarı yakınında oluşan plastik deformasyonun nüvenin boşa kayıp değerine olan etkisini incelediğimiz çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Geleneksel bir trafo sacı kesme sürecinde sürecin kontrol altında tutulması gereken çıktısı olan kesme çapağı yüksekliği **regresyon analizi** ile modellenebilmiştir. Ortaya çıkan istatistiksel model sayesinde, aslında karmaşık bir teorik altyapısı olan, kontrol altında olan ve olmayan pek çok varyansı olan **makas kesme süreci**, ölçülebilen süreç girdileri (X_1 : **makas vuruş sayısı**, X_2 : **kesilen sacın kalınlığı**) ve çıktıları (Y : **kesme çapağı yüksekliği**) analiz edilerek modellenmiştir. Model sayesinde, kesme çapağının kritik seviyeye ulaşmadan engellenmesi, bıçak değişim sürelerinin tahmin edilmesi mümkün olmaktadır.

Kesme sonucu oluşan çapak yüksekliğinin sacın kesme esnasında maruz kaldığı ve bünyesine dahil ettiği plastik deformasyona yol açan enerjinin bir göstergesi olarak değerlendirdiğimizde, kafes yapısında oluşturduğu etkiyi anlamaya çalıştığımız çalışmalarda, kesme kenarı civarında malzemede oluşan iç gerilim XRD yöntemi ile ölçülmüş, RD yönünde örneklerde bası gerilimi gradiyenti oluşumu izlenmiştir. Genel eğilim olarak kesme kenarına yaklaşıldıkça bası gerilimlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Kesme kenarı civarında ortaya çıkan deformasyon etkin bölgenin 100 mikron civarında oluştuğunu EBSD analizlerinde net görebiliyoruz. Deformasyon etkin bölgede ortalama mikro sertlik ölçümleri incelendiğinde, düşük çapaklı numunelerde tavlama sürecinin sertlik üzerinde etkisinin olmadığını, yüksek çapaklı örneklerde ise yaklaşık %5,5 oranında bir azalmaya yol açtığını tespit edilmiştir.

Soğuk şekillendirilmiş ve tavllanmış tane yönlendirilmiş elektrik sacları iri taneli ve keskin yönelme tekstürü gösteren yapılardır. Yapılan EBSD incelemelerine göre, tane yönelme tekstürü kesme işlemi ile kesintiye uğrarken kesme kenarından ana malzemeye doğru ortaya çıkan yönelme bozunumu çapak seviyesine ve ısı işlem görmesine bağlı olarak farklı şekillerde oluşmaktadır. Kesildiği gibi düşük çapaklı örneklerde geçiş zonu oluşmuyorken yüksek çapaklı örneklerde 50 mikron seviyesinde bir geçiş bölgesi gözlenmektedir. Tavllanmış düşük çapaklı örneklerde de daha kısa olan geçiş bölgesi, yüksek çapaklı

örneklerde daha uzun bir mesafeye uzadığı tespit edilmiştir. Tavlama sürecinin tane yönelme tekstürüne direkt bir etkisinin olduğuna dair net patern elde edilememiştir. Yüksek çapak seviyesinin yüksek plastik deformasyon seviyesi anlamında geldiği, dolayısıyla deformasyon etkin bölgenin daha geniş oluşmasına neden olduğunu EBSD analizlerinden görebilmekteyiz.

Tane yönlendirilmiş elektrik saclarının global seviyede az sayıda üreticisi bulunmaktadır. Sac üreticilerinin transformatör üreticileri için piyasaya sürdükleri ve garanti verdikleri maksimum kayıp değerleri ölçümleri IEC 60402-2 'da belirlenmiş test koşullarına uygun numune ve dizim geometrisine göre yapılmaktadır. Test yönetiminde kullanılan dizim formunun trafo nüvesi dizim formu ile benzeşmemektedir. Yeni bir yaklaşımla bu çalışmada test standartlarına uygun olan ve uygun olmayan dizim teknikleri beraber kullanılmıştır. Standartta uygun olmayan dizim çalışmalarında standardın tanımladığı manyetik akı yoluna sadık kalınarak tek fazlı trafo nüvesi geometrisinde ve kenar bindirme dizim tekniği kullanılarak ölçümler yapılmıştır.

Domainleri düzenlenmemiş Tip-1 M5 0,30 numuneler ile her iki dizim tekniği, gerilim giderme tavlama sürecinin etkisi karşılaştırıldığında; standart dışı dizim tekniği ile yapılan ölçümlerde demir kaybı değerinin %3,7-%8,3 oranında azaldığı, standarda uygun numunelerle yapılan ölçümlerde ise %6,4-%6,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Numune seviyesinde her iki dizim tekniğinde yapılan ölçümlerde gerilim giderme tavlama sürecini kayıp değerine olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitlerin yönlendirmesi ile prototip nüve seviyesinde gerilim giderme ve demir kaybı ölçümü yapılmıştır.

Prototip nüve ölçümlerinde ve mukayeselerinde trafo nüvesi tasarım mühendislerinin kullandığı nominal indüksiyon 1,36 Tesla seviyesini dikkate aldığımızda, özetle üzerinde montaj deliği bulunan nüvelerde uygulanan gerilim giderme rejimi ile 1,36 Tesla doyum akı değerinde %14,42 oranında kayıp azalımı tespit edilirken, üzerinde montaj deliği bulunmayan nüvede kayıpta azalma olmadığı tespit edildi.

Nüve sacında bulunan deliklerin etkisini de anlamaya çalıştığımız ölçümlerde, üzerinde montaj deliği bulunmayan kesildiği gibi nüvelerin 1,36 Tesla akıda %22,13 oranında daha düşük kayıp gösterdiği ölçüldü. Sadece montaj deliği olmasının nüvenin toplam boşta kayıp

değerine katkısı belirlenmiş oldu. Tavlama yapılan nüvelerde ise avlanmış nüvelerde ise delik faktörünün %8,96 oranına düştüğü tespit edildi. Bu sayede tavlama sürecinin montaj deliklerinden kaynaklanan kayıp miktarını önemli bir seviyede azaltabileceği de tespit edilmiştir. Örneğin indüksiyon şiddetinin 1,36 Tesla olduğu durumda montaj deliklerinden kaynaklanan boşta kaybın tavlama yapılarak %31,47 oranında azaltabileceği tespit edilmiştir.

Denemeler 40 kVA gücünde, Tip-1 M5 0,30 mm kalitede nüve sacından imal edilmiş göreceli küçük kuru tip transformatör prototip nüvelerinde gerçekleştirilmiştir. Nüve kütlesi ve bacak genişlikleri büyüdükçe toplam histerisiz ve Eddy kayıpları da artacağından dolayı, tavlama işlemi ile elde edilecek kazanımı oransal olarak azalacağını öngörmek hatalı olmayacaktır. Diğer taraftan prototip nüvelerde yapılan ölçümlerde 40 kVA nominal anma gücü seviyesinde, üzerinde montaj delikleri bulunan yapısal dizayna sahip, nüve ağırlığı 73,17 kg olan ve 1,36 Tesla doyum akısı civarında indüklenecek bir trafoda boşta kayıp değeri 0,8939 W/Kg'dan 0,7650 W/kg değerine yaklaşık 0,1289 W/kg miktarında azalma tespit edilmiştir. Benzer şekilde 1,7 Tesla doyum akısında işletilecek bir trafo için ise boşta kayıp değeri 1,8480 W/kg'dan 1,5197 W/kg değerine yaklaşık 0,3283 W/kg miktarında azaldığı tespit edilmiştir.

Elde edilen kayıp kazancı 30 yıl olarak öngörülen işletme süresi ve güvenli işletme indüksiyon seviyesi 1,36 Tesla doyum manyetik akısında işletmede kalacak bir trafo için ele alındığında elde edilebilecek tasarruf miktarı şu şekilde hesaplanabilir:

Tasarruf edilebilecek enerji = Birim Kayıptan Kazanç Gücü x Nüve Kütlesi x İşletme Süresi

Tasarruf edilebilecek enerji = 0,1289 (W/kg) x 73,17 (kg) x (30 yıl) x 365 (gün) x 24 (saat)

Tasarruf edilebilecek enerji = 2.478,63 MWh olarak hesaplanmıştır.

Eğer nüvenin 30 yıl boyunca manyetik akı doyum seviyesinde 1,7 Tesla indükleneyeceği varsayılırsa bu süre içinde elde edilebilecek tasarruf miktarı ise:

Tasarruf edilebilecek enerji = 0,3283 (W/kg) x 73,17 (kg) x 365 (gün) x 24 (saat) x (30 yıl)

Tasarruf edilebilecek enerji = 6.312,90 MWh olarak hesaplanmıştır.

Her iki yükleme durumunu minimum ve maksimum değerler olarak dikkate alırsak, global elektrik fiyatlarının Türkiye’de konutlar için Eylül 2023 ‘deki seviyesi olan 0.051 USD/kWh dikkate alındığında öngörülen 30 yıllık işletme ömrü boyunca tasarruf edilebilecek bedelin

1,36 Tesla doyum akısında yüklenen trafolarla = 2.478,63 MWh x 51= 126.410 USD

1,70 Tesla doyum akısında yüklenen trafolarla = 6.312,90 MWh x 51= 321.912 USD

değerleri arasında olabileceği hesaplanmıştır. Ülkemizdeki Mayıs 2024 itibarı ile fiyatları tüm vergiler ve bedeller dahil konutlarda 240 kWh üzeri tüketim için 2210 TL/MWh’dir. Güncel kur ile 30/05/24 tarihinde 32,2781 TL/USD oranladığında birim elektrik gücünün tüketim fiyatının 68,46 USD/MWh olduğu hesaplanmaktadır. Dolayısıyla hesaplamının yapıldığı tarih itibarı ile:

1,36 Tesla doyum akısında yüklenen trafolarla = 2.478,63 MWh x 68,46= 169.687 USD

1,70 Tesla doyum akısında yüklenen trafolarla = 6.312,90 MWh x 68,46= 432.181 USD

değerleri arasında olabileceği hesaplanmıştır. Yukarıdaki kazançlar dikkate alındığında ısıtım işlem süreçlerinde tabi tutulmuş nüveye sahip trafonun ilk yatırım maliyeti olan yaklaşık 10.000 - 20.000 USD bedelin toplam yaşam süresi maliyetinde elde edilecek tasarruf miktarında çok küçük orana karşılık geldiği görülmektedir. Elde edilecek enerji tasarrufunun karbon ayak izi hesaplandığında 1 MWh elektrik enerjisinin 0,44 ton CO₂ gazı eşdeğeri olduğu dikkate alınca 1090,6 ila 2777,6 ton arasında CO₂ sera gazı emisyonunun doğaya salınması engellenmiş olur.

Benzer bir hesaplama yöntemi Fatih Işık ve arkadaşı [62] tarafından amorf ve konvansiyonel nüveli trafoların sunacağı enerji tasarrufu için yürütülmüştür. Araştırmacılar şebekede çalışan 36 kV - 1000 KVA nominal güçteki konvansiyonel GO nüveli transformatörlerin eş değer etiket gücündeki amorf nüveli prototip transformatörün yük altında kayıp oranları ile karşılaştırmışlar, gerçek işletme koşullarında yükleme grafiklerini oluşturarak yıllık kayıplarını hesaplamışlardır. Yıllık olarak 16,31 MWh hesapladıkları yük altında kayıp tasarrufunu 9786 ton CO₂ eşdeğerine çevirerek sunmuşlardır. Bu kazancın 30 yıl olan işletme süresince ele alınması durumunda kazanç miktarı toplam 489,3 MWh ve 293.580 ton eşdeğer CO₂ olacaktır. Yazarlar eşdeğer CO₂ çevrim katsayısını 600 ton.CO₂/MWh olarak kullanmışlardır.

Yukarıda verilen bulgular ve aşağıdaki önermeler çerçevesinde bu çalışma uygulama araştırmaları ile daha ileri aşamalara ilerletilebilir:

- Tez çalışmasını giriş kısmında gerçekleştirilen regresyon analizinden elde edilen güvenilirlik seviyesi, endüstrinin farklı alanlarında yer alan benzer geleneksel süreçler için modelleme çalışmaları yürütülebileceğini göstermektedir.
- Ulusal şebekede yer alabilecek glerde (50 kVA, 100 kVA, 250 kVA) trafoların nüve bacakları, st ve alt boyunduruk grubu aynı şekilde gerilim giderme tavlamasına tabi tutularak prototip trafo seviyesinde test laboratuvarlarında boşta ve yük altında karşılaştırılabilir. Bu sayede iletken kökenli, kaçak akı kökenli, Eddy ve histerisiz kökenli tüm kayıplar devreye girecektir. Yük altındaki kayıpların boşta kayıplardan daha yüksek olması beklenir. Bununla beraber boşta kayıp (trafo nüve kaybı) kazancının trafonun toplam kaybında anlamlı bir fark olup oluşturmadığını görmek mümkün olacaktır.
- Sac grubunun vakum altında kontrollü atmosferde tavllanması ve domain düzenlenmemiş sac tipinde olmamasına dikkat edilmelidir.
- Tez çalışmasında denemesi yapılan ısıl işlem rejimi ve başka rejimler (daha yüksek sıcaklık ve tavlama süreleri) denebilir, bu rejimlerin oluşturacağı ilave maliyetler trafoların toplam üretim maliyetine ilave edilmelidir. Bu sayede seri üretim çalışmalarında belirli bir parti büyüklüğü için trafo maliyet seviyesi ortaya çıkacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. Mussard, J. L. Le Mouél, and J. P. Poirier, “On some early attempts to determine the variation of the magnetic force with distance,” *Comptes Rendus - Geoscience*, vol. 345, no. 5–6, pp. 225–229, May 2013, doi: 10.1016/j.crte.2013.05.004.
- [2] S. Jeszenszky, “History of Transformers,” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 16, no. 12, 1996. doi: 10.1109/MPER.1996.546444.
- [3] F. T. Ulaby and U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*. ISBN: 978-0-13-335681-6, 2015.
- [4] W. Stanley, “Jtrio inductional transformer,” 1891
- [5] J. A. Salsgiver, “Future Prospects for Grain-Oriented Silicon Steels.”, *Journals of Metal*, 38, 27-31, 1986.
- [6] N. P. Goss, “Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test,” 1934
- [7] Y. Ushigami, M. Mizokami, M. Fujikura, T. Kubota, H. Fujii, and K. Murakami, “Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel,” in *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 254-255, pp. 307–314, Jan. 2003. doi: 10.1016/S0304-8853(02)00933-2.
- [8] F. J. G. Landgraf and M. Emura, “Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations,” *Jornal of Magnetic Material*, vol. 242–245, no. PART I, pp. 152–156, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0304-8853(01)01184-2.
- [9] Ş. Bayraktar and Y. Turgut, “Silisli Sacların mekanik kesme Prosesinde Gerilim Giderme Tavlamaşının Manyetik Özellikler Üzerindeki Etkileri: Bir Araştırma,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 459-460, 2015.
- [10] K. I. Yamamoto, E. Shimomura, K. Yamada, and T. Sasaki, “Effects of external stress on magnetic properties in motor cores,” *Electrical Engineering in Japan*, 123, No. 1, 1998. doi: 10.1002/(SICI)1520-6416(19980415)123:1<15:AID-EEJ3>3.0.CO;2-R.

- [11] Y. Kurosaki, H. Mogi, H. Fujii, T. Kubota, and M. Shiozaki, "Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 20, pp. 2474–2480, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.jmmm.2008.04.073.
- [12] Z. Godec, "Effect of various stress-relief annealing treatments on permeability and aging of grain-oriented electrical steel strips," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-14, no. 1, Jan. 1978, doi: 10.1109/tmag.1978.1059720.
- [13] P. Baudouin, M. De Wulf, L. Kestens, and Y. Houbaert, "The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 256, pp. 32–40, Nov. 2003.
- [14] C. M. B. Bacaltchuk, G. A. Castello-Branco, M. Ebrahimi, H. Garmestani, and A. D. Rollett, "Effect of magnetic field applied during secondary annealing on texture and grain size of silicon steel," *Scripta Material*, vol. 48, no. 9, pp. 1343–1347, May 2003, doi: 10.1016/S1359-6462(03)00015-0.
- [15] N. Masahashi, M. Matsuo, and K. Watanabe, "Development of preferred orientation in annealing of Fe-3.25% Si in a high magnetic field," *Journal of Material Research*, vol. 13, no. 2, pp. 457–461, Feb. 1998, doi: 10.1557/JMR.1998.0059.
- [16] T. Watanabe, Y. Suzuki, S. Tanii, and H. Oikawa, "The effects of magnetic annealing on recrystallization and grain boundary character distribution (GBCD) in iron-cobalt alloy polycrystals," *Philosophical Magazine Letters*, vol. 62, no. 1, pp. 9–17, 1990, doi:10.1080/09500839008203733.
- [17] H. Ohtsuka, Y. Xu, and H. Wada, "Alignment of ferrite grains during austenite to ferrite transformation in a high magnetic field," *Materials Transactions, JIM*, vol. 41, no. 8, pp. 907–910, 2000, doi: 10.2320/matertrans1989.41.907.
- [18] T. Matsuzaki, T. Sasaki, S. Tsunekawa, and T. Watanabe, "Effect of magnetic field on sintering of iron powder compact," *Materials Science Forum*, vol. 304–306, 1999, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.304-306.585.
- [19] M. Emura, F. J. G. Landgraf, W. Ross, and J. R. Barreta, "The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 254-255, pp. 358–360, Jan. 2003. doi: 10.1016/S0304-8853(02)00856-9.

- [20] T. Watanabe, "Grain boundary engineering: Historical perspective and future prospects," in *Journal of Materials Science*, vol. 46, pp. 4095–4115, Jun. 2011. doi: 10.1007/s10853-011-5393-z.
- [21] G. S. Rohrer, "Introduction to grains, phases, and interfaces-an interpretation of microstructure," *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2010. doi: 10.1007/s11661-010-0215-5.
- [22] R. Kobayashi, J. A. Warren, and W. C. Carter, "A continuum model of grain boundaries," *Physica D*, vol. 140, no. 1–2, 2000, doi: 10.1016/S0167-2789(00)00023-3.
- [23] A. Oberlin, "Electron microscopy of thin crystals by P. B. Hirsch, A. Howie, R. B. Nicholson, D. W. Pashley and M. J. Whelan," *Acta Crystallography*, vol. 21, no. 3, 1966, doi: 10.1107/s0365110x66003256.
- [24] A. Sutton and R. Balluffi, "Interfaces in Crystalline Materials Clarendon," *Monographs on the physics and chemistry of materials*, no. 51, 1995.
- [25] D. Dorner, S. Zaefferer, L. Lahn, and D. Raabe, "Overview of Microstructure and Microtexture Development in Grain-oriented Silicon Steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, vol. 304, no. 2, pp. 183–186, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jmmm.2006.02.116.
- [26] M. Matsuo, "Texture Control in the Production of Grain Oriented Silicon Steels," *ISIJ International*, vol. 29, no. 10, pp. 809–827, Feb. 1989, doi: 10.2355/isijinternational.29.809.
- [27] Q. Tang, "Investigation of Magnetic Properties of ES and Transformer Core at High Flux Densities," Thesis of Doctoral, University of Manchester, 2015.
- [28] S. Erdem and N. Derebasi, "Interlaminar flux density distribution at joints of overlapping stacked electrical steel and amorphous ribbons," *Journal of Magnetism*, vol. 15, no. 4, pp. 190–193, Dec. 2010, doi: 10.4283/JMAG.2010.15.4.190.
- [29] T. Gunes, "Effects of Laser-Cutting and Spark Erosion Techniques and Heat Treatment on the Magnetic Properties of Grain-Oriented Transformer Steels," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 31, no. 12, pp. 3933–3939, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10948-018-4639-2.

- [30] T. Gunes, “Silisyum alaşımlı çeliklerde indüklenen anizotropinin manyetik domain yapısına göre incelenmesi,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 1–12, Nov. 2018, doi: 10.25092/baunfbed.485868.
- [31] H. Cao *et al.*, “The influence of punching process on residual stress and magnetic domain structure of non-oriented silicon steel,” *Journal of Magnetism Magnetic Material*, vol. 406, pp. 42–47, May 2016, doi: 10.1016/j.jmmm.2015.12.098.
- [32] Bohdal, R. Patyk, K. Tandecka, S. Gontarz, and D. Jackiewicz, “Influence of shear-slitting parameters on workpiece formation, cut edge quality and selected magnetic properties for grain-oriented silicon steel,” *Journal of Manufacturing Process*, vol. 56, pp. 1007–1026, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.049.
- [33] R. Mazurek, H. Hamzeshbahmani, A. J. Moses, P. I. Anderson, F. J. Anayi, and T. Belgrand, “Effect of artificial burrs on local power loss in a three-phase transformer core,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1653–1656, 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2173668.
- [34] H. Pfützner and G. Krismanić, “The needle method for induction tests: Sources of error,” *IEEE Transactions of Magnetics*, vol. 40, no. 3, pp. 1610–1616, May 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.826617.
- [35] G. Loizos, A. J. Moses, and A. J. Moses, “Variation of Magnetic Flux Density with Distance from the Cut Edge of Grain Oriented Electrical Steel,” Jan. 2006, Conference, Paper 741.
- [36] Z. Godec, “Influence of Slitting on Core Losses and Magnetization Curve of Grain-Oriented Electrical Steels,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-13, no. 4, pp. 1053–1057, 1977, doi: 10.1109/TMAG.1977.1059514.
- [37] S. Szymura and A. Zawada, “Effect of cutting operation on core-loss of grain-oriented silicon iron,” *Journal of Material Science*, vol. 16, no. 11, pp. 3194–3198, Nov. 1981, doi: 10.1007/BF00540328.
- [38] E. TeNyenhuus and R. Girgis, “Effect of slitting electrical core steel on measured iron loss,” *J Magn Magn Mater*, vol. 215, pp. 110–111, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0304-8853(00)00087-1.

- [39] G. Loisos and A. J. Moses, “Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, Apr. 2005, pp. 151–155. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.061.
- [40] A. J. Moses, N. Derebasi, G. Loisos, A. Schoppa, “Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets”, *Journal of Magnetism and magnetic materials*”, vol 215-216, pp 690-692, 2000.
- [41] I. Wadi and R. Balendra, “Using neural networks to model the blanking process,” *Journal of Material Processing Technology*, vol. 91, pp. 52–65, 1999.
- [42] T. Y. Badgajar and V. P. Wani, “Stamping Process Parameter Optimization with Multiple Regression Analysis Approach,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 4498–4507, 2018.
- [43] J. W. Park, M. G. Kil, J. Kim, and B. S. Kang, “A Predictive Model of Flexibly-reconfigurable Roll Forming Process using Regression Analysis,” *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1266–1271, 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.881.
- [44] A. Peksoz, S. Erdem, and N. Derebasi, “Mathematical model for cutting effect on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented electrical steels,” *Computational Material Science*, vol. 43, no. 4, pp. 1066–1068, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.commatsci.2008.02.025.
- [45] E. S. Al-Momani, A. T. Mayyas, I. Rawabdeh, and R. Alqudah, “Modeling blanking process using multiple regression analysis and artificial neural networks,” *J Mater Eng Perform*, vol. 21, no. 8, pp. 1611–1619, Aug. 2012, doi: 10.1007/s11665-011-0079-x.
- [46] N. A. Kamal Bashah *et al.*, “Multi-regression modeling for springback effect on automotive body in white stamped parts,” *Mater Des*, vol. 46, pp. 175–190, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.10.006.
- [47] A. D. Karaoglan and N. Celik, “A new painting process for vessel radiators of transformer: wet-on-wet,” *Journal of Applied Statistics*, vol. 43, no. 2, pp. 370–386, Jan. 2016, doi: 10.1080/02664763.2015.1063114.

- [48] O. Cavusoglu and H. Gürün, “The relationship of burr height and blanking force with clearance in the blanking process of AA5754 aluminium alloy,” *Transactions of Famena*, vol. 41, no. 1, pp. 55–62, 2017, doi: 10.21278/TOF.41105.
- [49] F. Junwei, “A general approach to determine texture patterns using pole figure,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 1284–1291, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.062.
- [50] N. Bernier, E. Leunis, C. Furtado, T. Van De Putte, and G. Ban, “EBSD study of angular deviations from the Goss component in grain-oriented electrical steels,” *Micron*, vol. 54–55, pp. 43–51, 2013, doi: 10.1016/j.micron.2013.08.003.
- [51] S. Takajo, C. C. Merriman, S. C. Vogel, and D. P. Field, “In-situ EBSD study on the cube texture evolution in 3 wt% Si steel complemented by ex-situ EBSD experiment — From nucleation to grain growth,” *Acta Materialia*, vol. 166, pp. 100–112, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2018.11.054.
- [52] S. Lee, K. J. Ko, S. J. Kim, and J. T. Park, “Statistical analysis of EBSD data to predict potential abnormal grain growth in 3.0 wt% Si grain-oriented electrical steel,” *Materials Characterization*, vol. 167, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110450.
- [53] M. B. S. Dias, D. P. M. Bentancour, F. G. P. Araújo, A. D. Santos, and F. J. G. Landgraf, “Power loss reduction of uncoated grain oriented electrical steel using annealing under stress treatment,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 504, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166632.
- [54] N. Derebaşı, *Manyetizma - Manyetik Maddeler ve Uygulamaları*, Cinius Yayınları, 2018.
- [55] Matthew N. O. Sadiku, *Element of Electromagnetism*, Oxford University Press, 2007.
- [56] “Selection of electrical Steels for Magnetic Cores,” *Bulletin: AK Steel*, 2007.
- [57] R. M. Bozorth, “Magnetic domain patterns” *Journal de Physique et le Radium*, vol. 12, no. 3, pp. 308–321, 1951, doi: 10.1051/jphysrad:01951001203030800.
- [58] C. G. Dunn and B. L. Johnson, “Selective Grain Growth of Silicon Steel,” 1950

- [59] P. A. Beck, “Annealing of cold worked metals” *Advance in Physics*, vol. 3, no. 11, 1954, doi: 10.1080/00018735400101203.
- [60] T. D. May J.E., “Secondary recrystallization in silicon-iron,” *Trans. AIME*, vol. 212, no. December 1958.
- [61] M. J. Heathcote, *Transformer Book*, Johnson and Phillips, 12th ed. 1998.
- [62] F. Işık, Y. Uyaroğlu, “Amorphous core transformers efficiency analysis in Turkish electrical distribution systems”, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 43, 6, 2015, <https://doi.org/10.3906/elk-1401-195>.
- [63] S. Erdem, “Transformatör çekirdeklerinde kullanılan elektrik çelikleri ve amorf şeritlerin uc uca gelen birleşim yerlerindeki manyetik akı dağılımının deneysel ve kuramsal incelenmesi,” Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2006.
- [64] K. Dicks, “Introduction to EBSD,” *Oxford Instruments Analytical*”, <http://www.EBSD.com>, 2003.
- [65] *Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame*, IEC 60404-2, Geneva, 2008.
- [66] J. D. Siovert, “Determination of AC magnetic power loss of electrical steel sheet: Present status and trends,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 5, pp. 1702–1707, 1984, doi: 10.1109/TMAG.1984.1063278.
- [67] P. Marketos, S. Zurek, and A. J. Moses, “A method for defining the mean path length of the epstein frame,” *IEEE Trans Magn*, vol. 43, no. 6, pp. 2755–2757, 2007, doi: 10.1109/TMAG.2007.894124.
- [[68] K. Han, M. Saito, J. Xia, I. Ohnuma, R. Kainuma,” Experimental determination of phase diagram involving silicides in the Fe-Si binary system” , *Journal of Alloys and Compounds*, 919, 165810, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165810>.
- [69] Baosteel China, “Grain-Oriented Electrical Steel Contents,” *Catalog*, 2013.
- [70] A. Çetin, “Yön ve düzlem aileleri”, *Mühendishane Malzeme Bilimi, Mühendislik ve Teknoloji*, Erişim adresi: <https://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/yon-ve-duzlem-aileleri>, Erişim tarihi: 6 Haziran 2024.

EKLER

Tablo A. 1: EPSTEIN cihazında (Tip-2) kesildiği gibi numuneler ile yapılan standart ve standart dışı ölçümlerin değerleri.

Ölçüm	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (µm)	Kütle (gr)	Over-lap alanı (mm ²)	Manyetik akı yolu uzunluğu (l_{eff}) (mm)	P_s (W/kg) (1,7 t-50 Hz)	P_s (W/kg) ($B_s=800$ A/m)	J_{max} (W/kg) ($H_s=800$ A/m)	H_c (A/m) (1,7 T-50 Hz)	J_r (A/m) (1,7 T-50 Hz)	Bağıl geçirgenlik (1,7 T-50 Hz) (μ_r)	Notlar:
1	7,65	(360/300) x 330	30	215,1	260,6	900	≈940	0,7230	0,7279	1,8908	15,978	1,1855	12842	(360/300X30) numuneler ile standarda uygun dizim. Köşelerde baskı yok. (7) nolu ölçümlerle aynı koşullarda.
2	7,65	(300/240) x 270	29	217,5	207,0	193	≈940	0,7470	1,2686	1,8967	16,382	1,1386	11975	(300/240X28,8) numunelerle yapılan bir ölçümdür.
4	7,65	(360/300) x 330	30	216,1	261,8	900	≈940	0,7232	1,2260	1,8920	15,760	1,2056	13044	(360/300X30) numuneler ile standarda uygun dizim. Köşelerde (1 N) baskı var.
5	7,65	(280/220) x 250	30	229,9	198,0	374	≈940	1,0295	1,2084	1,7549	18,799	0,8639	3315	(280/220X30) numuneler ile step-lap dizim tekniğinde. Köşelerde baskı yok.
6	7,65	(280/220) x 250	30	229,9	198,0	374	≈940	0,9781	1,1588	1,7546	18,413	0,9430	3300	(280/220X30) numuneler ile step lap dizim tekniğinde. Köşelerde (1 N) baskı var.
7	7,65	(360/300) x 330	30	216,1	261,8	900	≈940	0,7222	1,2232	1,8925	15,840	1,1819	12957	(360/300X30) numuneler ile standarda uygun dizim. Köşelerde baskı yok. (1) nolu ölçümlerle aynı koşullarda.
8	7,65	(360/300) x 330	30	216,1	261,8	900	≈940	0,7206	1,2227	1,8927	15,733	1,2024	13220	(360/300X30) numuneler ile standarda uygun dizim. Köşelerde (1 N) baskı var.
9	7,65	(300 x 300)	30	216,1	237,8	900	≈940	0,7166	1,2199	1,8970	15,818	1,1930	13403	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde baskı yok.
10	7,65	(300 x 300)	30	216,1	237,8	900	≈940	0,7132	1,2158	1,8969	15,680	1,2124	13766	Standart EPSTEIN numunesi- Köşelerde (1 N) baskı var.

Tablo A. 2: Tip-2 ve Tip-1 saclar ile kesildiği gibi ve ısıt işlemler rejimi denemeleri sonrasında yapılan manyetik ölçümler.

Satır No	Tip	Grade	Ölçüm Sıra No	Tarih	Gen. (mm)	Boy (mm)	Kalın. (µm)	Kütle (gr)	J_{max} (T)	J_e (T)	J_r (T)	%DC	FF	H_{maks} (A/m)	H_e (A/m)	H_c (A/m)	S_s (AV/kg)	P_s (W/kg)	(μ_r)	Köşe Yüğü (N)	EPSTEIN FRAME ölçme sistemi hassasiyeti: J=>±0,00021 T, W=>±0,00047 W/kg
1	TİP-2	MoH-0,23	1	6.08.2021	30	360/300	215	261	1,7001	1,2052	1,1855	0,20376	1,1137	105,35	48,691	15,978	2,4099	0,7279	12842	0	Büyük numune, standart dizim
2	TİP-2	MoH-0,23	2	6.08.2021	28,8	300/240	217	207	1,6998	1,2053	1,1386	0,31337	1,1138	112,96	52,929	16,382	2,62	0,7470	11975	0	Küçük numune, step lap dizim,
3	TİP-2	MoH-0,23	3	6.08.2021	28,8	300/240	217	207	1,6984	1,2089	0,3606	-0,1204	1,1184	428,76	226,53	20,374	11,247	0,9433	3153	0	Değerlendirme dışı, step-lap dizim
4	TİP-2	MoH-0,23	4	17.09.2021	30	360/300	216	262	1,7000	1,2053	1,2056	0,2289	1,1139	103,72	47,92	15,76	2,372	0,7237	13044	1	Büyük numune, standart dizim
5	TİP-2	MoH-0,23	5	17.09.2021	30	280/220	230	211	1,6998	1,2140	0,8639	0,0600	1,1225	408,10	167,20	18,799	8,3399	1,0295	3316	0	Step-lap dizim
6	TİP-2	MoH-0,23	6	17.09.2021	30	280/220	230	211	1,6998	1,2143	0,9439	0,1096	1,1227	410,01	167,22	18,413	8,3417	0,9781	3300	1	Step-lap dizim
7	TİP-2	MoH-0,23	7	17.09.2021	30	360/300	216	262	1,6995	1,2050	1,1819	0,3444	1,1138	104,38	48,66	15,84	2,4075	0,7222	12957	0	Büyük numune, standart dizim
8	TİP-2	MoH-0,23	8	17.09.2021	30	360/300	216	262	1,6996	1,2051	1,2024	0,3069	1,1138	102,31	47,54	15,773	2,2527	0,7206	13220	1	Büyük numune, standart dizim
9	TİP-2	MoH-0,23	9	17.09.2021	30	300	216	238	1,6999	1,2052	1,1930	0,2577	1,1137	100,93	47,23	15,818	2,3371	0,7166	13403	0	Standart numune, standart dizim
10	TİP-2	MoH-0,23	10	17.09.2021	30	300	216	238	1,6997	1,2050	1,2124	0,2473	1,1137	98,26	45,88	15,68	2,2705	0,7132	13766	1	Standart numune, standart dizim
11	TİP-2	MoH-0,23	1	11.02.2022	30	300	216	238	1,6999	1,2045	1,5044	0,2755	1,1129	59,11	28,19	17,002	1,3942	0,7611	22886	0	550 °C 'de tavllanmış, standart dizim
12	TİP-2	MoH-0,23	2	11.02.2022	30	300	216	238	1,6999	1,2044	1,5198	0,3477	1,1129	57,45	27,46	16,962	1,358	0,7602	23548	1	550 °C 'de tavllanmış, standart dizim
13	TİP-2	MoH-0,23	3	11.02.2022	30	300	216	238	1,6999	1,2042	1,5032	-0,0512	1,1128	56,59	27,37	16,732	1,3532	0,7530	23904	0	550 °C 'de tavllanmış, standart dizim
14	TİP-2	MoH-0,23	4	11.02.2022	30	300	216	238	1,6997	1,2040	1,5144	-0,0036	1,1128	55,46	26,86	16,685	1,3281	0,7515	24387	1	550 °C 'de tavllanmış standart dizim
15	TİP-2	MoH-0,23	5	11.02.2022	30	280/220	216	198	1,6997	1,2055	1,1988	0,4619	1,1143	128,35	59,02	18,878	2,9213	0,8743	10539	0	550 °C 'de tavllanmış, step lap dizim
16	TİP-2	MoH-0,23	6	11.02.2022	30	280/220	216	198	1,6996	1,2054	1,1698	0,4912	1,1141	123,00	57,02	18,87	2,8226	0,8520	10997	1	550 °C 'de tavllanmış, step lap dizim
17	TİP-2	MoH-0,23	1	18.03.2022	30	300	216	238	1,6999	1,2038	1,6031	-0,3146	1,1125	42,01	22,49	17,823	1,1115	0,7747	32200	0	650 °C 'de tavllanmış, standart dizim
18	TİP-2	MoH-0,23	2	18.03.2022	30	300	216	238	1,6998	1,2036	1,6056	0,1496	1,1123	38,85	21,50	17,595	1,0625	0,7622	34817	0	650 °C 'de tavllanmış, standart dizim
19	TİP-2	MoH-0,23	3	18.03.2022	30	300	216	238	1,7000	1,2037	1,6144	0,1678	1,1123	37,59	21,06	17,605	1,0409	0,7621	35992	1	650 °C 'de tavllanmış, standart dizim
20	TİP-2	MoH-0,23	4	18.03.2022	30	280/220	215	198	1,6998	1,2056	1,0857	0,3656	1,1143	153,73	74,46	19,745	3,6867	0,8866	8800	0	650 °C 'de tavllanmış, 4. test, step lap dizim
21	TİP-2	MoH-0,23	5	18.03.2022	30	280/220	215	198	1,6998	1,2056	1,0979	0,0157	1,1141	140,35	68,33	19,715	3,3829	0,9100	9639	0	650 °C 'de tavllanmış, 4. testin 1. tekrarı
22	TİP-2	MoH-0,23	6	18.03.2022	30	280/220	215	198	1,7000	1,2067	1,1383	0,1778	1,1150	167,64	77,53	19,814	3,8414	0,9187	8071	0	650 °C 'de tavllanmış, 4. testin 2. tekrarı
23	TİP-2	MoH-0,23	7	18.03.2022	30	280/220	215	198	1,7000	1,2057	1,2897	-0,2753	1,1142	119,03	53,93	19,321	2,6698	0,8892	11366	0	650 °C 'de tavllanmış, 4. testin 3. tekrarı
24	TİP-2	MoH-0,23	8	18.03.2022	30	280/220	215	198	1,6999	1,2057	1,2700	-0,1209	1,1141	120,71	55,22	19,367	2,7342	0,8847	11207	1	650 °C 'de tavllanmış, step lap dizim
25	TİP-2	MoH-0,23	1	24.06.2022	30	300	216	238	1,7000	1,2036	1,6151	-0,3163	1,1122	35,53	21,14	19,065	1,0448	0,7919	38071	0	800 °C 'de tavllanmış numune
26	TİP-2	MoH-0,23	2	24.06.2022	30	300	216	238	1,6998	1,2035	1,6303	-0,4712	1,1122	33,35	20,26	18,644	1,0014	0,7789	40560	1	800 °C 'de tavllanmış numune
27	TİP-2	MoH-0,23	3	24.06.2022	30	280/220	215	198	1,7001	1,2054	1,1686	-0,1097	1,1138	120,01	58,20	19,572	2,881	0,8933	11274	0	800 °C 'de tavllanmış numune
28	TİP-2	MoH-0,23	4	24.06.2022	30	280/220	215	198	1,7001	1,2054	1,1748	-0,1510	1,1139	119,23	57,25	19,534	2,8343	0,8776	11347	1	800 °C 'de tavllanmış numune
29	TİP-1	M5-0,30	1	13.05.2022	30	301	289	319	1,6998	1,2075	1,5692	0,1518	1,1160	170,14	66,52	25,171	3,2986	1,2551	7951	0	Standart dizim, kesildiği gibi ölçümü
30	TİP-1	M5-0,30	2	13.05.2022	30	301	289	319	1,6999	1,2076	1,5749	0,2497	1,1160	170,57	66,39	25,018	3,2927	1,2529	7932	1	Standart dizim, kesildiği gibi ölçümü
31	TİP-1	M5-0,30	3	13.05.2022	28,5	276/219	290	255	1,7001	1,2076	0,9457	-0,0233	1,1161	274,17	129,22	26,853	6,4092	1,3721	4935	0	Step lap dizim, kesildiği gibi ölçümü
32	TİP-1	M5-0,30	4	13.05.2022	28,5	276/219	290	255	1,7001	1,2074	1,0697	0,0940	1,1159	251,96	115,31	25,752	5,7183	1,2472	5370	1	Step lap dizim, kesildiği gibi ölçümü
33	TİP-1	M5-0,30	5	24.06.2022	30	301	289	319	1,7002	1,2054	1,6228	-0,1494	1,1139	92,21	40,87	24,887	2,0232	1,1739	14674	0	800 °C 'de tavllanmış numune
34	TİP-1	M5-0,30	6	24.06.2022	30	301	289	319	1,6999	1,2053	1,6276	-0,2487	1,1140	93,11	40,85	24,724	2,0223	1,1726	14529	1	800 °C 'de tavllanmış numune
35	TİP-1	M5-0,30	7	24.06.2022	28,5	276/219	290	255	1,6998	1,2064	1,1207	-0,0175	1,1149	208,69	99,25	25,445	4,9264	1,3360	6483	0	800 °C 'de tavllanmış numune
36	TİP-1	M5-0,30	8	24.06.2022	28,5	276/219	290	255	1,6997	1,2062	1,1274	0,0074	1,1147	193,38	91,84	25,109	4,5494	1,2486	6995	1	800 °C 'de tavllanmış numune
37	TİP-1	M5-0,30	9	24.06.2022	28,5	276/219	290	255	1,6999	1,2064	1,0542	0,3552	1,1148	212,08	101,78	25,225	5,043	1,2580	6380	0	7. testin tekrarı, 800 °C 'de tavllanmış
38	TİP-1	M5-0,30	10	24.06.2022	28,5	276/219	290	255	1,6997	1,2062	1,0997	0,3303	1,1148	203,95	96,08	25,109	4,7599	1,2001	6633	1	8. testin tekrarı, 800 °C 'de tavllanmış

Tablo A. 3: Delikli yapıda tavlama sonucunun karşılaştırılması; kesildiği gibine karşı tavllanmış numuneler.

Isıl işlem sonucunun karşılaştırması		No1- Kesildiği gibi (Delikli)					Nüve kütlesi (kg)	73.170	No3- tavllanmış (Delikli)			Nüve kütlesi (kg)	73.170	Karşılaştırma		
Uygulanan induksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (Amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp farkı (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp değişim oranı (%)		
0.792	5.385	5.3847	21.5110	3.7610			5.3808	18.5880	2.9126							
		5.3757	21.4220	3.7647			5.3803	18.6710	2.9178							
		5.3863	21.5160	3.7501	21.4946	0.2938	5.3832	18.6060	2.9221	18.6035	0.2543	0.0395	2.8911	13.45%		
		5.3869	21.5180	3.7721												
		5.3860	21.5060	3.7608				5.3764	18.5490	2.8995						
0.905	6.154	6.1544	27.9550	4.2926			6.1571	24.0630	3.2589							
		6.1500	27.7570	4.3040			6.1536	24.1070	3.2548							
		6.1572	28.0210	4.3421	27.8766	0.3810	6.1550	24.0520	3.2577	24.1035	0.3294	0.0516	3.7731	13.54%		
		6.1558	27.7630	4.3042												
		6.1529	27.8870	4.3156				6.1523	24.1920	3.2589						
1.018	6.923	6.9247	35.1940	4.9034			6.9283	30.5990	3.6498							
		6.9229	35.1420	4.9295			6.9231	30.5270	3.6424							
		6.9251	34.9660	4.9030	35.0840	0.4795	6.9242	30.5290	3.6410	30.5648	0.4177	0.0618	4.5193	12.88%		
		6.9230	35.1240	4.9355												
		6.9199	34.9940	4.9128				6.9258	30.6040	3.6559						
1.131	7.692	7.6928	44.0680	5.7814			7.6922	37.8060	4.0907							
		7.6903	43.5470	5.7335			7.6952	37.9240	4.1160							
		7.6922	43.4130	5.7506	43.6765	0.5969	7.6917	37.8420	4.1066	37.8455	0.5172	0.0797	5.8310	13.35%		
		7.6977	43.6780	5.7650												
								7.6928	37.8100	4.1005						
1.244	8.462	8.4605	53.8620	6.8968			8.4638	46.1570	4.6730							
		8.4625	53.7760	6.9632			8.4646	46.2090	4.6855							
		8.4639	53.3450	6.9593	53.5902	0.7324	8.4603	46.1080	4.6866	46.1500	0.6307	0.1017	7.4402	13.88%		
		8.4684	53.5470	6.9364												
		8.4619	53.4210	6.8987				8.4640	46.1260	4.6755						
1.358	9.231	9.9231	66.0100	9.0566			9.2300	56.0470	5.6093							
		9.2300	65.3770	9.2805			9.2303	55.8930	5.6062							
		9.2311	65.4070	9.1605	65.4098	0.8939	9.2307	55.9680	5.6244	55.9768	0.7650	0.1289	9.4330	14.42%		
		9.2338	65.0770	9.0985												
		9.2298	65.1780	9.1447				9.2292	55.9990	5.6411						
1.471	10	10.0062	80.1350	13.8168	78.9526	1.0790	10.0094	68.4290	8.5602	68.0785	0.9304	0.1486	10.8741	13.77%		

Isıl işlem sonucunun karşılaştırması		No1- Kesildiği gibi (Delikli)			Nüve kütlesi (kg)	73.170	No3- tavllanmış (Delikli)			Nüve kütlesi (kg)	73.170	Karşılaştırma			
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşa kayıp (W)	Ölçülen boşa akım (amper)	Ortalama boşa kayıp (W)	Gerçekleşen boşa kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşa kayıp (W)	Ölçülen boşa akım (Amper)	Ortalama boşa kayıp (W)	Gerçekleşen boşa kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp farkı (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşa kayıp değişim oranı (%)	
1.584	10.769	10.0043	78.1270	13.9200			10.0007	67.9850	8.6034						
		10.0053	79.1380	14.1539			10.0068	68.1390	8.7039						
		10.0007	78.7280	14.0060											
		10.0001	78.6350	13.9498				10.0054	67.7610	8.8279					
		10.7721	100.6510	22.6221				10.7706	83.2880	15.8689					
		10.7778	98.7030	23.5266				10.7793	82.4180	16.1209					
		10.7769	98.1660	22.8674	98.8410	1.3508	10.7738	82.3150	16.1445	82.4768	1.1272	0.2236	16.3643	16.56%	
		10.7645	98.1660	22.8327											
		10.7744	98.5190	23.1107				10.7723	81.8860	15.9157					
		11.5405	138.4480	36.2711				11.5475	113.8610	28.9426					
1.697	11.538	11.5349	133.1840	36.9571			11.5375	110.4730	28.8810						
		11.5447	135.1110	36.9477	135.2208	1.8480	11.5425	110.7650	29.2840	111.1963	1.5197	0.3283	24.0246	17.77%	
		11.5419	134.9800	36.7807											
		11.5388	134.3810	36.6397				11.5263	109.6860	28.6165					
		12.3111	212.5140	55.8999				12.3085	173.8490	47.2412					
		12.3208	207.8000	55.6749				12.3161	172.1980	47.9202					
1.81	12.308	12.3036	207.1610	56.4171	208.6014	2.8509	12.3069	169.9910	47.4511	172.2770	2.3545	0.4964	36.3244	17.41%	
		12.3094	207.4980	56.4096											
		12.3048	208.0340	56.5000				12.3179	173.0700	48.1701					
		13.0883	348.0320	82.0801				13.0764	283.1960	70.9231					
		13.0709	345.4750	81.9666				13.0786	280.3290	70.7404					
		13.0813	340.4870	82.3270	343.0264	4.6881	13.0826	281.7860	71.3247	281.4425	3.8464	0.8417	61.5839	17.95%	
1.923	13.077	13.0809	340.5390	82.3190											
		13.0771	340.5990	82.4841				13.0881	280.4590	71.1865					
		13.8533	559.5960	113.7600				13.8409	459.7450	99.5344					
		13.8718	558.3780	114.8030				13.8430	461.2130	99.6944					
		13.8517	558.8350	114.1030	559.2858	7.6436	13.8429	459.6140	99.7542	460.5150	6.2938	1.3499	98.7708	17.66%	
		13.8532	559.0370	114.0820											
13.8586	560.5830	114.0600				13.8546	461.4880	99.5312							

Tablo A. 4: Deliksiz yapıda tavlama sonucunun karşılaştırılması; kesildiği gibine karşı tavllanmış numuneler.

Isıl işlem sonucu karşılaştırma		No2- Kesildiği gibi (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg)	73.810	No4- tavllanmış (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg)	73.810	Karşılaştırma	
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (Amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp farkı (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp değişim oranı (%)			
0.792	5.385	5.3892	17.7990	2.9623	17.6774	0.2395	5.3814	17.6220	2.7882	17.6432	0.2390	0.0005	0.0342	0.19%			
		5.3857	17.6770	2.9304			5.3809	17.5960	2.7933								
		5.3836	17.6250	2.9423			5.3904	17.6970	2.7966								
		5.3863	17.6580	2.9401			5.3808	17.5770	2.7934								
		5.3879	17.6280	2.9361			5.3896	17.7240	2.7937								
0.905	6.154	6.1508	22.9350	3.2851	22.8774	0.3099	6.1528	22.8510	3.1059	22.7776	0.3086	0.0014	0.0998	0.44%			
		6.1544	22.9020	3.2759			6.1512	22.7870	3.0936								
		6.1555	22.9340	3.2794			6.1488	22.7640	3.0896								
		6.1554	22.7950	3.2679			6.1537	22.7550	3.0919								
		6.1597	22.8210	3.2725			6.1643	22.7310	3.0829								
1.018	6.923	6.9223	28.8450	3.6383	28.7936	0.3901	6.9202	28.6630	3.4188	28.7132	0.3890	0.0011	0.0804	0.28%			
		6.9239	28.7900	3.6241			6.9224	28.7550	3.4282								
		6.9238	28.7880	3.6329			6.9299	28.7080	3.4230								
		6.9221	28.7590	3.6295			6.9248	28.7530	3.4249								
		6.9225	28.7860	3.6278			6.9239	28.6870	3.4083								
1.131	7.692	7.6928	35.5830	4.0210	35.5208	0.4812	7.6922	35.3930	3.7780	35.4204	0.4799	0.0014	0.1004	0.28%			
		7.6916	35.4880	4.0126			7.6923	35.4090	3.7818								
		7.6928	35.5830	4.0249			7.6904	35.3580	3.7760								
		7.6923	35.4060	4.0106			7.6929	35.4940	3.7866								
		7.6933	35.5440	4.0206			7.6957	35.4480	3.7950								
1.244	8.462	8.4630	43.1040	4.4764	43.0684	0.5835	8.4658	42.9400	4.1989	42.9018	0.5812	0.0023	0.1666	0.39%			
		8.4624	43.0780	4.4638			8.4627	42.9180	4.2009								
		8.4651	43.0720	4.4750			8.4629	42.8810	4.1979								
		8.4624	43.0420	4.4691			8.4622	42.9160	4.1992								
		8.4645	43.0460	4.4697			8.4657	42.8540	4.2036								
1.358	9.231	9.2387	51.6460	5.0485	51.3822	0.6961	9.2327	51.3800	4.7411	51.4070	0.6965	-0.0003	-0.0248	-0.05%			
		9.2915	51.3910	5.0250			9.2283	51.3650	4.7453								
		9.2313	51.2430	5.0224			9.2289	51.1930	4.7314								
		9.2311	51.2420	5.0183			9.2310	51.5160	4.7459								
		9.2319	51.3890	5.0287			9.2306	51.5810	4.7476								

Isıl işlem sonucu karşılaştırma		No2- Kesildiği gibi (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg)	73.810	No4- tavllanmış (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg)	73.810	Karşılaştırma		
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (Amper)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp farkı (W/kg)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp (W)	Tavlama ile geri kazanılan boşta kayıp değişim oranı (%)				
1.471	10	10.0076	61.1740	5.8256	61.0068	0.8265	10.0073	61.3380	5.6161	61.3282	0.8309	-0.0044	-0.3214	-0.53%				
		10.0007	60.9560	5.8196			10.0011	61.2340	5.6072									
		10.0071	60.9590	5.8199			10.0086	61.1900	5.6004									
		10.0039	60.8270	5.8000			10.0082	61.5080	5.6338									
		10.0089	61.1180	5.8501			10.0045	61.3710	5.6662									
1.584	10.769	10.7632	72.1910	7.0778	72.0670	0.9764	10.7731	73.2020	7.2332	73.1900	0.9916	-0.0152	-1.1230	-1.56%				
		10.7656	72.0320	7.0552			10.7678	73.2810	7.2828									
		10.7740	72.2190	7.0808			10.7734	73.1230	7.2578									
		10.7737	72.0450	7.0642			10.7677	72.6020	7.2067									
		10.7765	71.8480	7.0698			10.7847	73.7420	7.3994									
1.697	11.538	11.5409	85.1670	9.3629	85.7518	1.1618	11.5313	87.9700	10.6998	87.6532	1.1876	-0.0258	-1.9014	-2.22%				
		11.5433	85.7250	9.4390			11.5401	87.7980	10.7184									
		11.5401	85.5100	9.3552			11.5412	87.8160	10.7560									
		11.5434	85.7790	9.4416			11.5453	87.4940	10.5849									
		11.5407	86.5780	9.5248			11.5378	87.1880	10.7376									
1.81	12.308	12.3166	102.1960	13.7238	101.8240	1.3795	12.3138	106.3440	16.9730	106.2268	1.4392	-0.0597	-4.4028	-4.32%				
		12.3125	101.4040	13.6106			12.3260	106.6410	17.0878									
		12.3176	101.8270	13.8179			12.3103	105.9950	17.0054									
		12.3182	101.6690	13.7234			12.3115	105.2760	16.9855									
		12.3089	102.0240	13.8795			12.3163	106.8780	16.9351									
1.923	13.077	13.0835	122.5890	21.2288	121.8964	1.6515	13.0847	135.1650	27.7182	134.5780	1.8233	-0.1718	-12.6816	-10.40%				
		13.0811	121.9460	21.1098			13.0763	134.4860	27.8119									
		13.0825	121.8840	21.0873			13.0786	133.8550	27.5851									
		13.0788	121.9530	21.2355			13.0799	133.2760	27.9426									
		13.0811	121.1100	21.4765			13.0747	136.1080	28.2270									
2.036	13.846	13.8592	156.6260	33.9811	156.0950	2.1148	13.8564	186.2910	45.3496	184.7390	2.5029	-0.3881	-28.6440	-18.35%				
		13.8538	156.0720	33.8713			13.8476	186.6620	45.2239									
		13.8500	155.5470	33.9178			13.8461	185.7050	44.9727									
		13.8477	155.8200	33.7591			13.8530	183.1240	44.6069									
		13.8259	156.4100	34.6697			13.8520	181.9130	44.4524									

Tablo A. 5: Tavlama yapılmayan nüvelerde delik etkisinin karşılaştırması.

Yapısal karşılaştırma (Delikli - Deliksiz)		No1- Kesildiği gibi (Delikli)					Nüve kütlesi (kg)	73.170	No2- Kesildiği gibi (Deliksiz)			Nüve kütlesi (kg)	73.810	Karşılaştırma		
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W)	Yapısal boşta kayıp değişim oranı (%)		
0.792	5.385	5.3847	21.5110	3.7610	21.4946	0.2938	5.3892	17.7990	2.9623	17.6774	0.2395	0.0543	3.8172	18.47%		
		5.3757	21.4220	3.7647			5.3857	17.6770	2.9304							
		5.3863	21.5160	3.7501			5.3836	17.6250	2.9423							
		5.3869	21.5180	3.7721			5.3863	17.6580	2.9401							
		5.3860	21.5060	3.7608			5.3879	17.6280	2.9361							
0.905	6.154	6.1544	27.9550	4.2926	27.8766	0.3810	6.1508	22.9350	3.2851	22.8774	0.3099	0.0710	4.9992	18.64%		
		6.1500	27.7570	4.3040			6.1544	22.9020	3.2759							
		6.1572	28.0210	4.3421			6.1555	22.9340	3.2794							
		6.1558	27.7630	4.3042			6.1554	22.7950	3.2679							
		6.1529	27.8870	4.3156			6.1597	22.8210	3.2725							
1.018	6.923	6.9247	35.1940	4.9034	35.0840	0.4795	6.9223	28.8450	3.6383	28.7936	0.3901	0.0894	6.2904	18.64%		
		6.9229	35.1420	4.9295			6.9239	28.7900	3.6241							
		6.9251	34.9660	4.9030			6.9238	28.7880	3.6329							
		6.9230	35.1240	4.9355			6.9221	28.7590	3.6295							
		6.9199	34.9940	4.9128			6.9225	28.7860	3.6278							
1.131	7.692	7.6928	44.0680	5.7814	43.6765	0.5969	7.6928	35.5830	4.0210	35.5208	0.4812	0.1157	8.1557	19.38%		
		7.6903	43.5470	5.7335			7.6916	35.4880	4.0126							
		7.6922	43.4130	5.7506			7.6928	35.5830	4.0249							
		7.6977	43.6780	5.7650			7.6923	35.4060	4.0106							
							7.6933	35.5440	4.0206							
1.244	8.462	8.4605	53.8620	6.8968	53.5902	0.7324	8.4630	43.1040	4.4764	43.0684	0.5835	0.1489	10.5218	20.33%		
		8.4625	53.7760	6.9632			8.4624	43.0780	4.4638							
		8.4639	53.3450	6.9593			8.4651	43.0720	4.4750							
		8.4684	53.5470	6.9364			8.4624	43.0420	4.4691							
		8.4619	53.4210	6.8987			8.4645	43.0460	4.4697							
1.358	9.231	9.9231	66.0100	9.0566	65.4098	0.8939	9.2387	51.6460	5.0485	51.3822	0.6961	0.1978	14.0276	22.13%		
		9.2300	65.3770	9.2805			9.2915	51.3910	5.0250							
		9.2311	65.4070	9.1605			9.2313	51.2430	5.0224							
		9.2338	65.0770	9.0985			9.2311	51.2420	5.0183							
		9.2298	65.1780	9.1447			9.2319	51.3890	5.0287							

Yapısal karşılaştırma (Delikli - Deliksiz)		No1- Kesildiği gibi (Delikli)					Nüve kütlesi (kg) 73.170	No2- Kesildiği gibi (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg) 73.810	Karşılaştırma		
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W)	Yapısal boşta kayıp değişim oranı (%)		
1.471	10	10.0062	80.1350	13.8168			10.0076	61.1740	5.8256							
		10.0043	78.1270	13.9200			10.0007	60.9560	5.8196							
		10.0053	79.1380	14.1539		78.9526	1.0790	10.0071	60.9590	5.8199	61.0068	0.8265	0.2525	17.9458	23.40%	
		10.0007	78.7280	14.0060				10.0039	60.8270	5.8000						
		10.0001	78.6350	13.9498				10.0089	61.1180	5.8501						
1.584	10.769	10.7721	100.6510	22.6221			10.7632	72.1910	7.0778							
		10.7778	98.7030	23.5266				10.7656	72.0320	7.0552						
		10.7769	98.1660	22.8674		98.8410	1.3508	10.7740	72.2190	7.0808	72.0670	0.9764	0.3745	26.7740	27.72%	
		10.7645	98.1660	22.8327				10.7737	72.0450	7.0642						
		10.7744	98.5190	23.1107				10.7765	71.8480	7.0698						
1.697	11.538	11.5405	138.4480	36.2711			11.5409	85.1670	9.3629							
		11.5349	133.1840	36.9571				11.5433	85.7250	9.4390						
		11.5447	135.1110	36.9477		135.2208	1.8480	11.5401	85.5100	9.3552	85.7518	1.1618	0.6862	49.4690	37.13%	
		11.5419	134.9800	36.7807				11.5434	85.7790	9.4416						
		11.5388	134.3810	36.6397				11.5407	86.5780	9.5248						
1.81	12.308	12.3111	212.5140	55.8999			12.3166	102.1960	13.7238							
		12.3208	207.8000	55.6749				12.3125	101.4040	13.6106						
		12.3036	207.1610	56.4171		208.6014	2.8509	12.3176	101.8270	13.8179	101.8240	1.3795	1.4714	106.7774	51.61%	
		12.3094	207.4980	56.4096				12.3182	101.6690	13.7234						
		12.3048	208.0340	56.5000				12.3089	102.0240	13.8795						
1.923	13.077	13.0883	348.0320	82.0801			13.0835	122.5890	21.2288							
		13.0709	345.4750	81.9666				13.0811	121.9460	21.1098						
		13.0813	340.4870	82.3270		343.0264	4.6881	13.0825	121.8840	21.0873	121.8964	1.6515	3.0366	221.1300	64.77%	
		13.0809	340.5390	82.3190				13.0788	121.9530	21.2355						
		13.0771	340.5990	82.4841				13.0811	121.1100	21.4765						
2.036	13.846	13.8533	559.5960	113.7600			13.8592	156.6260	33.9811							
		13.8718	558.3780	114.8030				13.8538	156.0720	33.8713						
		13.8517	558.8350	114.1030		559.2858	7.6436	13.8500	155.5470	33.9178	156.0950	2.1148	5.5288	403.1908	72.33%	
		13.8532	559.0370	114.0820				13.8477	155.8200	33.7591						
		13.8586	560.5830	114.0600			13.8259	156.4100	34.6697							

Tablo A. 6: Tavlama yapılan nüvelerde delik etkisinin karşılaştırması.

Yapısal karşılaştırma (Delikli - Deliksiz)		No3- tavllanmış (Delikli)					Nüve kütlesi (kg) 73.170	No4- Tavllanmış (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg) 73.810	Karşılaştırma		
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W)	Yapısal boşta kayıp değişim oranı (%)		
0.792	5.385	5.3808	18.5880	2.9126	18.6035	0.2543	5.3814	17.6220	2.7882	17.6432	0.2390	0.0152	0.9603	5.98%		
		5.3803	18.6710	2.9178			5.3809	17.5960	2.7933							
		5.3832	18.6060	2.9221			5.3904	17.6970	2.7966							
0.905	6.154	5.3764	18.5490	2.8995	24.1035	0.3294	5.3808	17.5770	2.7934	22.7776	0.3086	0.0208	1.3259	6.32%		
		6.1571	24.0630	3.2589			5.3896	17.7240	2.7937							
		6.1536	24.1070	3.2548			6.1528	22.8510	3.1059							
		6.1550	24.0520	3.2577			6.1512	22.7870	3.0936							
		6.1523	24.1920	3.2589			6.1488	22.7640	3.0896							
		6.9283	30.5990	3.6498			6.1537	22.7550	3.0919							
1.018	6.923	6.9231	30.5270	3.6424	30.5648	0.4177	6.1643	22.7310	3.0829	28.7132	0.3890	0.0287	1.8516	6.87%		
		6.9242	30.5290	3.6410			6.9202	28.6630	3.4188							
		6.9258	30.6040	3.6559			6.9224	28.7550	3.4282							
		7.6922	37.8060	4.0907			6.9299	28.7080	3.4230							
		7.6952	37.9240	4.1160			6.9248	28.7530	3.4249							
		7.6917	37.8420	4.1066			6.9239	28.6870	3.4083							
1.131	7.692	7.6928	37.8100	4.1005	37.8455	0.5172	7.6922	35.3930	3.7780	35.4204	0.4799	0.0373	2.4251	7.22%		
		8.4638	46.1570	4.6730			7.6923	35.4090	3.7818							
		8.4646	46.2090	4.6855			7.6904	35.3580	3.7760							
		8.4603	46.1080	4.6866			7.6929	35.4940	3.7866							
		8.4640	46.1260	4.6755			7.6957	35.4480	3.7950							
		9.2300	56.0470	5.6093			8.4658	42.9400	4.1989							
1.244	8.462	8.4627	46.9180	4.2009	46.1500	0.6307	8.4629	42.8810	4.1979	42.9018	0.5812	0.0495	3.2482	7.84%		
		8.4622	42.9160	4.1992			8.4627	42.9180	4.2009							
		8.4657	42.8540	4.2036			8.4629	42.8810	4.1979							
		9.2327	51.3800	4.7411			8.4622	42.9160	4.1992							
		9.2303	55.8930	5.6062			8.4657	42.8540	4.2036							
		9.2307	55.9680	5.6244			9.2283	51.3650	4.7453							
1.358	9.231	9.2289	51.1930	4.7314	55.9768	0.7650	9.2289	51.1930	4.7314	51.4070	0.6965	0.0685	4.5698	8.96%		
		9.2310	51.5160	4.7459			9.2310	51.5160	4.7459							
		9.2306	51.5810	4.7476			9.2306	51.5810	4.7476							
1.471	10	10.0094	68.4290	8.5602	68.0785	0.9304	10.0073	61.3380	5.6161	61.3282	0.8309	0.0995	6.7503	10.70%		

Yapısal karşılaştırma (Delikli - Deliksiz)		No3- tavlınmış (Delikli)					Nüve kütlesi (kg) 73.170	No4- Tavlınmış (Deliksiz)					Nüve kütlesi (kg) 73.810	Karşılaştırma		
Uygulanan indüksiyon (Tesla)	Referans gerilim (Volt)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen gerilim (Volt)	Ölçülen boşta kayıp (W/kg)	Ölçülen boşta akım (A)	Ortalama boşta kayıp (W)	Gerçekleşen boşta kayıp (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W/kg)	Yapısal boşta kayıp farkı (W)	Yapısal boşta kayıp değişim oranı (%)		
1.584	10.769	10.0007	67.9850	8.6034	82.4768	1.1272	10.0011	61.2340	5.6072	73.1900	0.9916	0.1356	9.2868	12.03%		
		10.0068	68.1390	8.7039			10.0086	61.1900	5.6004							
							10.0082	61.5080	5.6338							
		10.0054	67.7610	8.8279			10.0045	61.3710	5.6662							
		10.7706	83.2880	15.8689			10.7731	73.2020	7.2332							
		10.7793	82.4180	16.1209			10.7678	73.2810	7.2828							
		10.7738	82.3150	16.1445			10.7734	73.1230	7.2578							
							10.7677	72.6020	7.2067							
							10.7847	73.7420	7.3994							
							10.7847	73.7420	7.3994							
1.697	11.538	11.5475	113.8610	28.9426	111.1963	1.5197	11.5313	87.9700	10.6998	87.6532	1.1876	0.3321	23.5431	21.86%		
		11.5375	110.4730	28.8810			11.5401	87.7980	10.7184							
		11.5425	110.7650	29.2840			11.5412	87.8160	10.7560							
							11.5453	87.4940	10.5849							
		11.5263	109.6860	28.6165			11.5378	87.1880	10.7376							
		12.3085	173.8490	47.2412			12.3138	106.3440	16.9730							
		12.3161	172.1980	47.9202			12.3260	106.6410	17.0878							
		12.3069	169.9910	47.4511			12.3103	105.9950	17.0054							
							12.3115	105.2760	16.9855							
							12.3179	173.0700	48.1701							
1.923	13.077	13.0764	283.1960	70.9231	281.4425	3.8464	13.0847	135.1650	27.7182	134.5780	1.8233	2.0231	146.8645	52.60%		
		13.0786	280.3290	70.7404			13.0763	134.4860	27.8119							
		13.0826	281.7860	71.3247			13.0786	133.8550	27.5851							
							13.0799	133.2760	27.9426							
		13.0881	280.4590	71.1865			13.0747	136.1080	28.2270							
		13.8409	459.7450	99.5344			13.8564	186.2910	45.3496							
		13.8430	461.2130	99.6944			13.8476	186.6620	45.2239							
		13.8429	459.6140	99.7542			13.8461	185.7050	44.9727							
							13.8530	183.1240	44.6069							
							13.8520	181.9130	44.4524							
2.036	13.846	13.8546	461.4880	99.5312	460.5150	6.2938				184.7390	2.5029	3.7909	275.7760	60.23%		

Tablo A. 7: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification										
Name	: TIP 1 M5-0.30			Operator:	Administrator									
Mass	: 319.3 g			Date	: 5/13/2022									
Density	: 7.65 g/cm ³			Time	: 11:06:59 AM									
Length	: 301 mm													
Width	: 30 mm													
Thickness	: 288.89 µm													
Number	: 16													
Grade	: M5-0.30	Parameter file: bbbb.msa												
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.4996	1.0618	1.3789	0.23056	1.1122	48.373	28.219	22.452	1.2305	0.8611	24670	50
2	1.7		1.6998	1.2075	1.5692	0.15179	1.116	170.14	66.516	25.131	3.2986	1.2551	7951.1	50
3		800	1.8307	1.3002	1.6502	0.21556	1.1157	796.35	275.01	27.645	14.685	1.7337	1830.4	50

Tablo A. 8: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification										
Name	: TIP 1 M5-0.30 2. OLCUM			Operator:	Administrator									
Mass	: 319.3 g			Date	: 5/13/2022									
Density	: 7.65 g/cm ³			Time	: 11:13:53 AM									
Length	: 301 mm													
Width	: 30 mm													
Thickness	: 288.89 µm													
Number	: 16													
Grade	: M5-0.30	Parameter file: bbbb.msa												
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.4998	1.0619	1.3922	0.32227	1.1122	46.942	27.55	22.357	1.2015	0.85844	25426	50
2	1.7		1.6999	1.2076	1.5749	0.24969	1.116	170.57	66.39	25.018	3.2927	1.2529	7931.9	50
3		800	1.8312	1.3005	1.6522	0.27185	1.1157	801.32	276.86	27.61	14.788	1.7321	1819.6	50

Tablo A. 9: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification										
Name	: TIP 1 M5-0.30 3. OLCUM			Operator:	Administrator									
Mass	: 255.5 g			Date	: 5/13/2022									
Density	: 7.65 g/cm ³			Time	: 11:51:05 AM									
Length	: 248 mm													
Width	: 28.5 mm													
Thickness	: 295.33 µm													
Number	: 16													
Grade	: M5-0.30	Parameter file: bbbb.msa												
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.4999	1.0627	0.85926	0.15992	1.1131	143.48	78.155	24.104	3.4111	0.99286	8319.4	50
2	1.7		1.7001	1.2076	0.94572	-0.02334	1.1161	274.17	129.22	26.853	6.4092	1.3721	4935.4	50
3		800	1.8318	1.3005	1.0173	0.22171	1.1154	798.31	297.55	29.289	15.893	1.8567	1826.9	50

Tablo A. 10: Kesildiği gibi Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification	
Name	: TIP 1 M5-0.30 4. OLCUM	Operator	: Administrator	Date	: 5/13/2022
Mass	: 255.5 g	Date	: 5/13/2022	Time	: 11:59:15 AM
Density	: 7.65 g/cm ³				
Length	: 248 mm				
Width	: 28.5 mm				
Thickness	: 295.33 µm				
Number	: 16				
Grade	: M5-0.30	Parameter file:	: bbbb.msa		

Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.4997	1.0625	1.0021	0.20247	1.1129	125.82	86.45	23.093	2.899	0.88734	9486.4	49.99
2	1.7		1.7001	1.2074	1.0697	0.09398	1.1159	251.96	115.31	25.752	5.7183	1.2472	5370.4	50
3		800	1.8353	1.3028	1.1228	0.22365	1.1152	799.34	291.91	28.473	15.615	1.7192	1828.1	49.99

Tablo A. 11: 800 °C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification	
Name	: DENEME 5 M5 0.30 STD	Operator	: Administrator	Date	: 6/24/2022
Mass	: 319.3 g	Date	: 6/24/2022	Time	: 11:31:34 AM
Density	: 7.65 g/cm ³				
Length	: 301 mm				
Width	: 30 mm				
Thickness	: 288.89 µm				
Number	: 16				
Grade	: 0.3-M5	Parameter file:	: bbbb.msa		

Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.5	1.0616	1.4209	0.4135	1.1118	33.961	22.987	22.052	1.0022	0.81738	35150	50
2	1.7		1.7002	1.2054	1.6228	-0.14944	1.1139	92.207	40.87	24.887	2.0232	1.1739	1467.4	50
3		800	1.8647	1.3243	1.7419	-0.011888	1.1156	794.15	260.54	30.081	14.17	1.8869	1869.5	50

Tablo A. 12: 800 °C' de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification	
Name	: DENEME 6 M5 0.30 STD	Operator	: Administrator	Date	: 6/24/2022
Mass	: 319.3 g	Date	: 6/24/2022	Time	: 11:35:04 AM
Density	: 7.65 g/cm ³				
Length	: 301 mm				
Width	: 30 mm				
Thickness	: 288.89 µm				
Number	: 16				
Grade	: 0.3-M5	Parameter file:	: bbbb.msa		

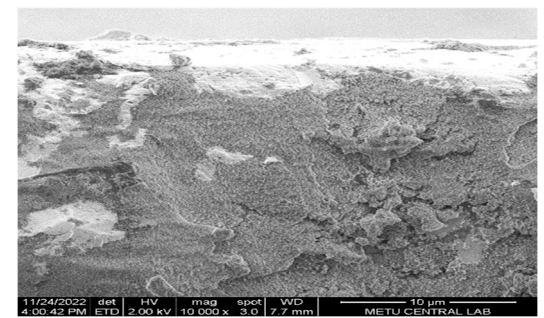
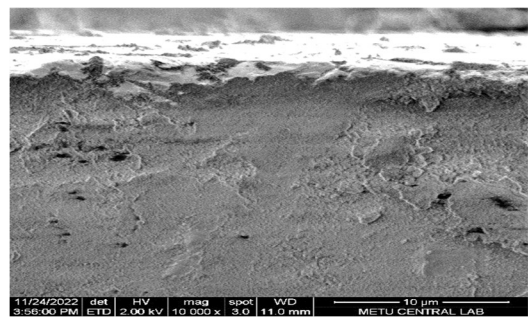
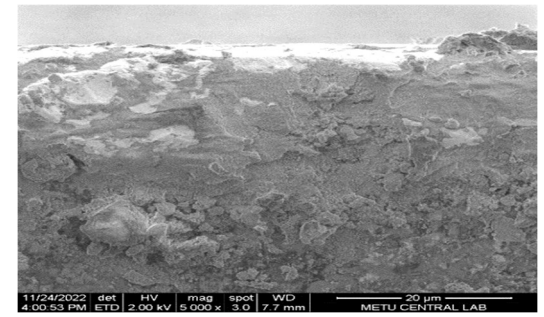
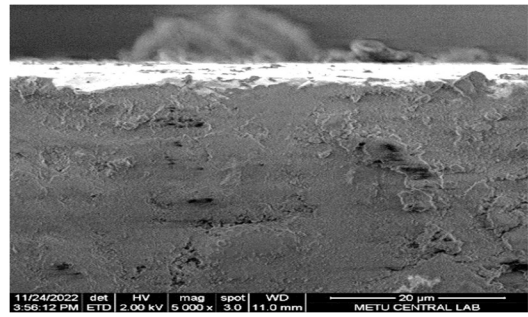
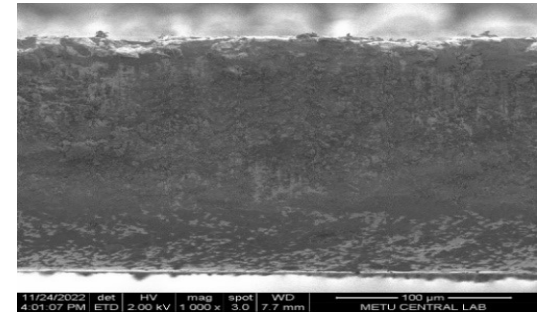
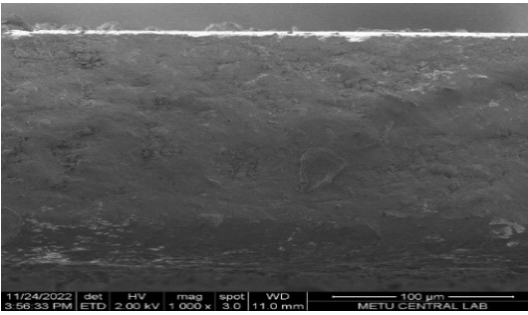
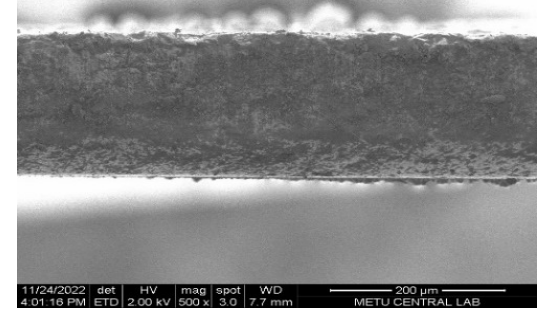
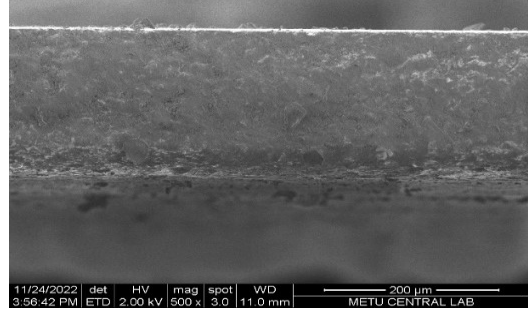
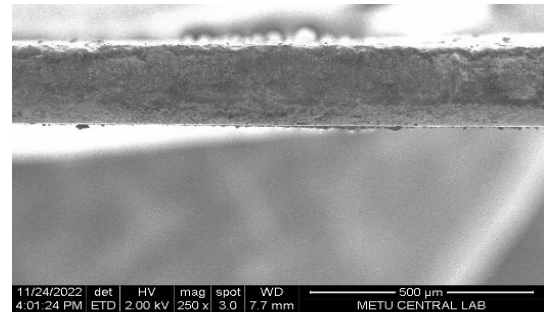
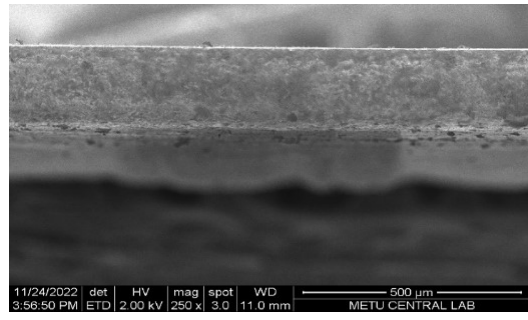
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.5	1.0616	1.4308	0.37874	1.1118	32.571	22.467	21.92	0.97953	0.81342	36648	50
2	1.7		1.6999	1.2053	1.6276	-0.24866	1.114	93.111	40.854	24.724	2.0223	1.1726	14529	50
3		800	1.8635	1.3239	1.7397	-0.01406	1.116	797.45	262.68	29.749	14.282	1.8837	1860.6	50

Tablo A. 13: 800 °C’ de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, baskı kuvveti yok.

Sample data		Coil : Epstein 700		Identification										
Name	: DENEME 9 M5 0.30 STD_DISI	Operator	: Administrator	Date	: 6/24/2022									
Mass	: 255.2 g	Time	: 12:15:06 PM											
Density	: 7.65 g/cm ³													
Length	: 247.5 mm													
Width	: 29 mm													
Thickness	: 290.49 µm													
Number	: 16													
Grade	: 0.3-M5	Parameter file:	: bbbb.msa											
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.5	1.0626	0.95758	0.069442	1.1129	125.48	67.395	22.862	2.9406	0.9205	9513.4	49.99
2	1.7		1.6999	1.2064	1.0542	0.35515	1.1148	212.08	101.78	25.225	5.043	1.258	6379.5	50
3		800	1.8579	1.3191	1.1619	0.50108	1.1153	796.14	281.67	28.997	15.256	1.8363	1858.1	49.99

Tablo A. 14:800 °C’ de tavlanmış Tip-1 M5 0,30 mm Standart Dışı Numunenin EPSTEIN 700 cihazında ölçüm sonuçları, 1 N baskı kuvveti var.

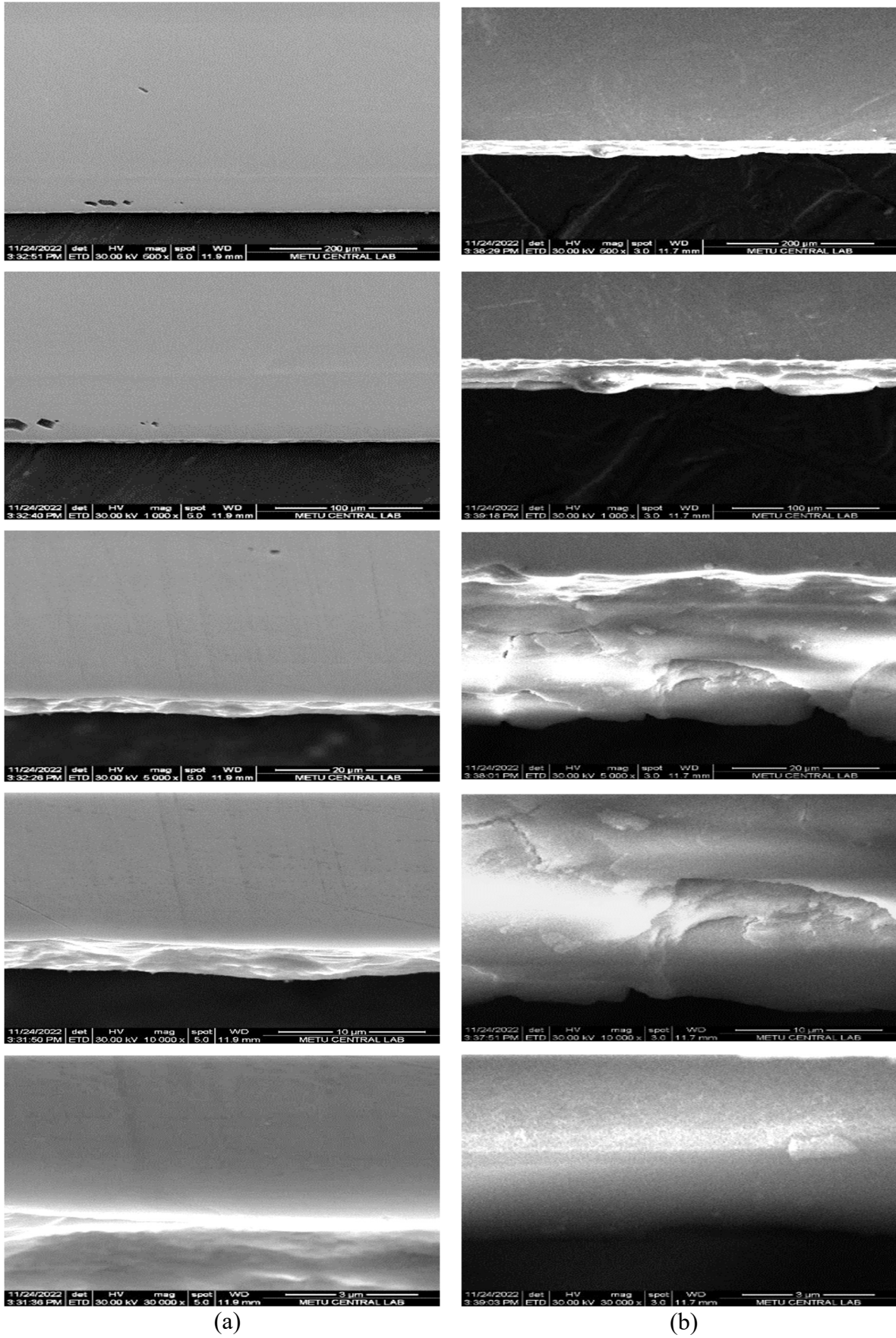
Sample data		Coil : Epstein 700		Identification										
Name	: DENEME 10 M5 0.30 STD_DISI	Operator	: Administrator	Date	: 6/24/2022									
Mass	: 255.2 g	Time	: 12:17:39 PM											
Density	: 7.65 g/cm ³													
Length	: 247.5 mm													
Width	: 29 mm													
Thickness	: 290.49 µm													
Number	: 16													
Grade	: 0.3-M5	Parameter file:	: bbbb.msa											
Measuring results														
Mess.	Js T	Hs A/m	Jmax T	Je T	Jr T	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	1.5		1.4999	1.0624	1.0143	0.17408	1.1127	108.66	57.597	22.714	2.5129	0.87229	10986	50
2	1.7		1.6997	1.2062	1.0997	0.33025	1.1148	203.95	96.081	25.109	4.7599	1.2001	6633	50
3		800	1.8585	1.3194	1.1945	0.43744	1.1152	794.26	279.52	29.053	15.147	1.7934	1863.1	50



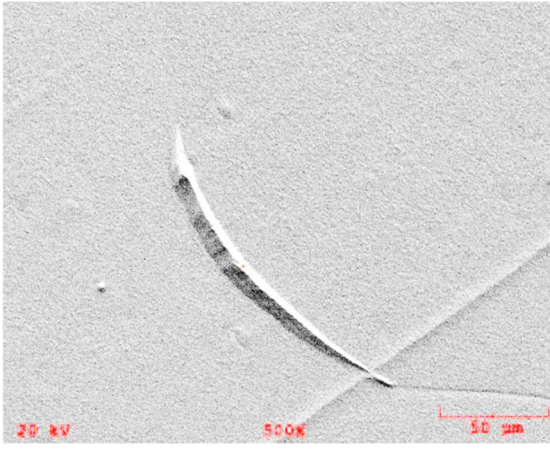
(a)

(b)

Şekil A. 1: Düşük çapaklı P5 ve yüksek çapaklı P7 kesildiği gibi örneklerin kesme yüzeyi morfolojisi karşılaştırmaları.

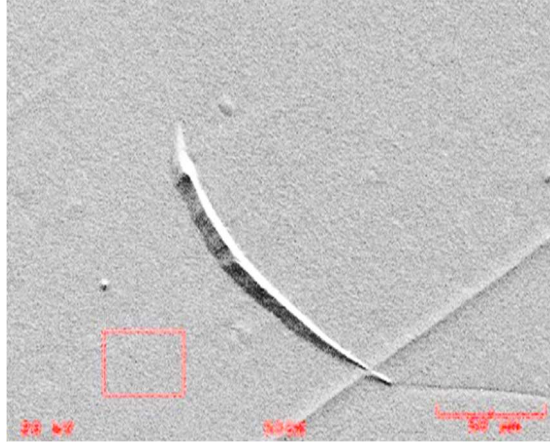


Şekil A. 2: Çeşitli büyütme seviyelerinde (a) kesildiği gibi P1 düşük çapak ve (b) kesildiği gibi P3 yüksek çapaklı numunelerinin kesme kenarı ve civarından elde edilen malzeme yapısı.



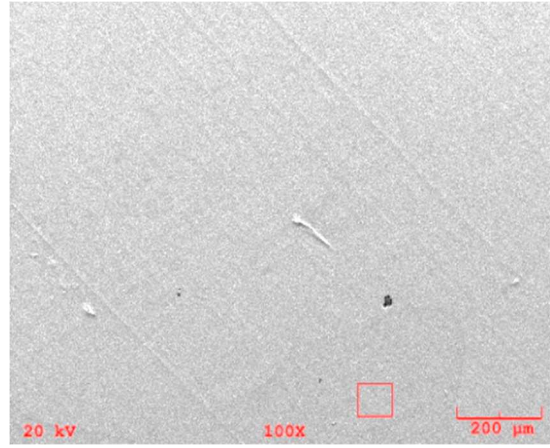
Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsan trasyon
C	3.03	1.101	2.189
Si	50.65	4.500	6.038
Fe	543.02	14.733	91.773
Toplam	(%kütle)		100.00

(P1) (S2-3-4)' den alınan görüntü.



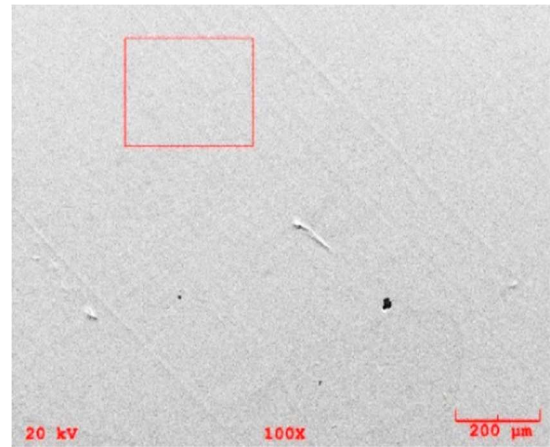
Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsan trasyon
C	0.00	0.000	0.000
Si	47.04	4.338	5.897
Fe	535.65	14.637	94.103
Toplam	(%kütle)		100.00

(P1) (S2-3-4)' den alınan görüntü.



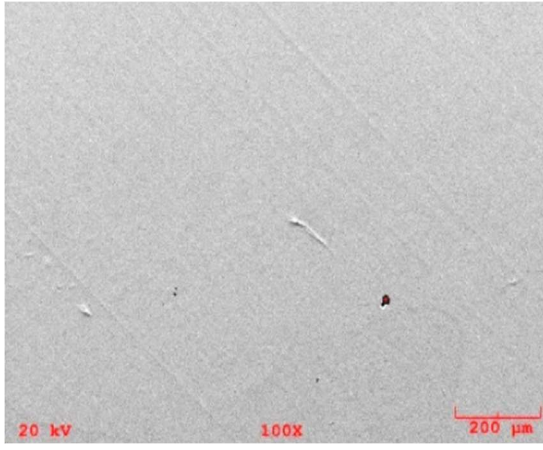
Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsan trasyon
C	19.84	2.816	9.786
Si	59.67	4.884	5.094
Fe	680.82	16.497	85.120
Toplam	(%kütle)		100.00

(P3) (S3-3-3)' den alınan görüntü.



Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsan-trasyon
C	7.32	1.711	4.188
Si	56.64	4.760	5.463
Fe	656.42	16.203	90.348
Toplam	(%kütle)		100.00

(P3) (S3-3-3)' den alınan görüntü.



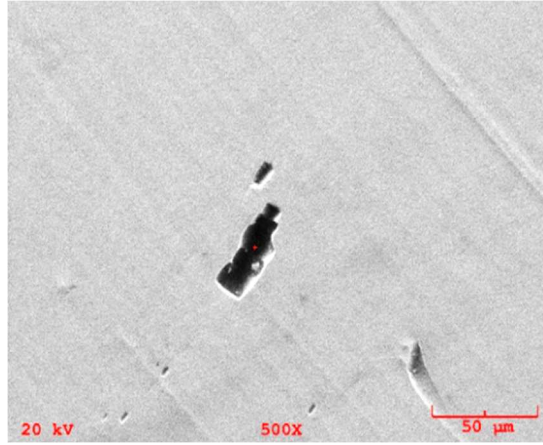
Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsantrasyon
C	0.78	0.560	0.493
Si	58.62	4.842	6.050
Fe	644.05	16.050	93.457
Toplam	(%kütle)		100.00

(P3) (S3-3-3)'den alınan görüntü.



Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsantrasyon
C	4.79	1.383	2.909
Si	62.85	5.013	6.282
Fe	637.67	15.966	90.809
Toplam	(%kütle)		100.00

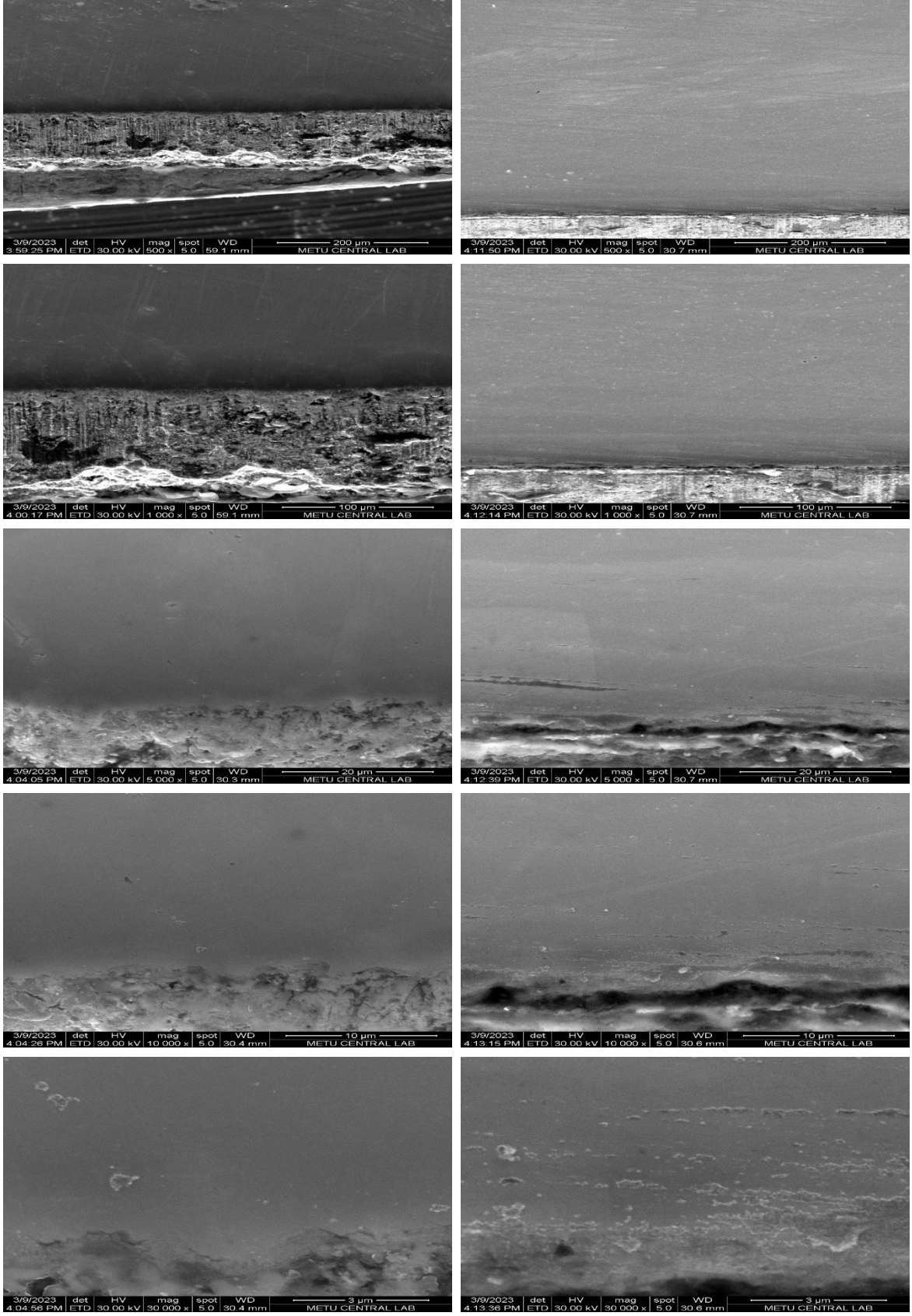
(P3) (S3-3-3)'den alınan görüntü.



Element	Şiddet (c/s)	Ölçüm Hatası (2Σ)	Konsantrasyon
C	314.86	11.222	59.958
Si	46.01	4.290	2.181
Fe	415.08	12.885	37.861
Toplam	(%kütle)		100.00

(P3) (S3-3-3)'den alınan görüntü.

Şekil A. 3: P1 ve P3 örneklerinden elde edilen SEM EDX analizleri.



(a) (b)
Şekil A. 4: Düşük çapaklı tavllanmış R4 ve yüksek çapaklı tavllanmış R3 tavllanmış örneklerin kesme yüzeyi morfolojisi karşılaştırmaları.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Nihat ÇELİK
Doğum tarihi ve yeri : 05.01.1973-Eskişehir.
e-posta : nicelik73@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.	2016
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	1995
Lise	Eskişehir Yunus Emre Endüstri Meslek Lisesi	1990

Yayın Listesi

N. Çelik and A. Toktaş, "Mathematical Modelling of Shear Cutting Process of Grain Oriented Electrical Steels Using Regression Modelling", Sakarya University Journal of Science, vol. 27, no. 4, pp. 724-734, Aug. 2023, doi:10.16984/saufenbilder.1183741.
[Tezden türetilmiştir]