KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EPSTEİN ÇERÇEVESİ KULLANARAK MANYETİK MALZEME B-H EĞRİSİ VE KAYIPLARININ BELİRLENMESİ

KAZIM ZENGİN

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EPSTEİN ÇERÇEVESİ KULLANARAK MANYETİK MALZEME B-H EĞRİSİ VE KAYIPLARININ BELİRLENMESİ

KAZIM ZENGİN

Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN		
Danışman,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Zafer BİNGÜL		
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Yrd. Doç. Dr. Emin YILDIRIZ		
Jüri Üyesi,	Düzce Üniversitesi	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.07.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada transformatör ve elektrik motorlarında kullanılan elektriksel çelik sacların manyetik kayıplarının ölçülmesine yönelik test düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen test düzeneği ile taneciği yönlendirilmiş H085-23P elektriksel sacı ile taneciği yönlendirilmemiş M270-35A numunesinin farklı koşullarda histerezis eğrileri elde edilmiştir.

Tez çalışmam sürecinde desteğini her zaman yakınımda hissettiğim, değerli bilgi ve tecrübeleriyle çalışmama yapmış olduğu katkılarından dolayı değerli danışmanım ve hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN' a,

Ayrıca kıymetli bilgileri ile test cihazının üretiminde destek olan Yrd. Doç. Dr. Engin HÜNER'e, çalışma sürecimde her zaman destek olan Yrd. Doç. Dr. Evren ÇAĞLARER'e, test işlemlerinde bilgisine danıştığım Arş. Gör. Ersin YOLAÇAN'a, Arş Gör. Mehmet GÜLEÇ'e ve Yücel DEMİR'e, grafiksel modellerin çiziminde Sn. Beyzanur TAŞKESEN'e,

Test cihazının imalatı sürecinde atölyelerinin kapılarını bana açan, Çerkezköy Türk Tekstil Vakfı METEM müdürü Sn. Murat KIROĞLU'na,

Son olarak beni bugünlere getiren her zaman destekçim olduklarını hissettiğim babam İsmail ZENGİN, annem Hülya ZENGİN ve ablam Şule Azime YENİÇERİ'ye sonsuz minnet duygularımla,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz – 2016 Kazım ZENGİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
2. MANYETİK MALZEMELER VE SINIFLARI 7
2.1. Diyamanyetik Malzemeler 7
2.2. Paramanyetik Malzemeler 8
2.3. Ferromanyetik Malzemeler 9
2.3.1. Sert ferromanyetik malzemeler 10
2.3.2. Yumuşak ferromanyetik malzemeler 10
2.3.2.1. Taneciği yönlendirilmiş manyetik malzemeler 11
2.3.2.2. Taneciği yönlendirilmemiş manyetik malzemeler 13
2.4. Elektriksel Sac Sınıflarının Numaralandırılması 14
2.4.1. ASTM standartı 14
2.4.2. IEC standartı 15
2.4.3. AISI standartı 16
3. MANYETİK MALZEMELERDE DEMİR KAYIPLARI 18
3.1. Demir Kayıplarının Fiziksel Oluşumu 18
3.1.1. Histerezis kayıpları 20
3.1.2. Klasik girdap akımı kayıpları 21
3.1.3. Anormal kayıplar 24
4. MANYETİK KAYIP ÖLÇME STANDARTLARI 27
4.1. 25 cm Epstein Çerçevesi 27
4.2. Tek Sac Test Yöntemi(Single Sheet Tester - SST) 33
4.3. Toroid Test Yöntemi 35
5. EPSTEİN ÇERÇEVESİ TASARIMI ve ÜRETİMİ 37
5.1. Çerçeve Gövdesi Tasarım ve Üretimi 37
5.2. Numune Dizme Kolları Tasarım ve Üretimi 39
5.3. Dengeleme Bobini Tasarım ve Üretimi 42
5.4. Dengeleme Bobini ile Ayarlama İşlemi 44
6. MANYETİK ÖZELLİKLERİN ÖLÇÜMÜ 48
6.1. Demir Kayıplarının Ölçümü 48
6.2. Test Düzeneği ve Elde Edilen Sonuçlar 50
6.2.1. Yükseltici devre 51
6.2.2. RC integratör devresi 53
6.2.3. Test numuneleri 55
6.2.4. Test verilerinin alınması 57
6.2.4.1. Kesim açısının etkisi 58

6.2.4.2. Manyetik alan şiddeti artışının etkisi 61
6.2.4.3. Numune sayısının etkisi 62
6.2.4.4. 50Hz ve altı çalışma frekanslarının etkisi 64
6.2.4.5. 50Hz üstü çalışma frekanslarının etkisi 65
6.2.4.6. Sabit gerilim altında değişen numune sayısı 66
6.2.4.7. Sıcaklık artışının etkisi 67
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 71
EKLER 75
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 78
ÖZGEÇMİŞ 79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Elektronların yörüngesel hareketlerinin gösterimi 7
Şekil 2.2. Diyamanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları 8
Şekil 2.3. Paramanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları 8
Şekil 2.4. Ferromanyetik malzemelerde alan duvarlarıyla ayrılmış farklı yönlü alanlar 9
Şekil 2.5. Ferromanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları 9
Şekil 2.6. Haddeleme yönünde tanecik yönelimleri 11
Şekil 2.7. Hacim merkezli kübik kristal yapısındaki alaşımın geçirgenlik doğrultuları 12
Şekil 2.8. Taneciği yönlendirilmiş malzemede haddeleme yönünde kristal dizilimleri 13
Şekil 3.1. Histerezis etkisinden kaynaklı enerji kaybı 20
Şekil 3.2. Laminasyonsuz ve laminasyonlu gövdede girdap akımları 22
Şekil 3.3. Laminasyonlarda girdap akımları hesaplama kesitleri 23
Şekil 3.4. Normal ve alan duvarları hareketiyle oluşan ilave girdap akımları 26
Şekil 4.1. Epstein'in ilk test düzeneği elektriksel devresi ve dış görünüşü 27
Şekil 4.2. Tek sarımlı Epstein düzeneğinde ölçüm devresi 28
Şekil 4.3. Sekonder sarımlı Epstein düzeneğinin test devresi 29
Şekil 4.4. Epstein çerçevesi manyetik yol uzunluğu ve numune dizim yöntemi 32
Şekil 4.5. Tek sac ölçüm yöntemi düzenek yapısı 33
Şekil 4.6. Tek sac yöntemi boyundurukları üretiminde laminasyon dizilimleri 34
Şekil 5.1. Tasarlanan Epstein çerçevesi 37
Şekil 5.2. Çerçeve gövdesi imalat ölçüleri 38
Şekil 5.3. Numune dizme kolları tasarımı 40
Şekil 5.4. Numune dizme kolu bobin karkası montajı 41
Şekil 5.5. Numune dizme kollarında primer sargılarının sarımı 41
Şekil 5.6. Kolların gövdeye montajlanması ve sargıların seri bağlantısı 42
Şekil 5.7. Dengeleme bobini sarım karkası tasarım ölçüleri 43
Şekil 5.8. Kol sarımları ile dengeleme bobini sarımlarının elektriksel bağlantısı 44
Şekil 5.9. Dengeleme bobini bağlanmadan önce primer gerilimi, akımı ve sekonder gerilimi 44
Şekil 5.10. Dengeleme bobini bağlandıktan sonra primer gerilimi, akımı ve sekonder gerilimi 45
Şekil 5.11. Dengeleme bobininden bir miktar sarım boşaltılmasının yaratmış olduğu değişim 46
Şekil 5.12. Dengeleme bobinin son ayarlanmış durumu 46

Şekil 6.1. Epstein çerçevesi ile ölçüm devresi 48
Şekil 6.2. Deney düzeneği 51
Şekil 6.3. Yükseltici devre şeması 51
Şekil 6.4. Yükseltici devresi kartı tasarımı 52
Şekil 6.5. Gerilim yükselticisi 53
Şekil 6.6. RC integratör devresi 54
Şekil 6.7. Farklı Rin ve Cin oranlarının etkisi 55
Şekil 6.8. Üç farklı kesim doğrultusuyla elde edilmiş test numuneleri 56
Şekil 6.9. Numunelerin hassas terazi ile tartımı 56
Şekil 6.10. Osiloskop kanallarından alınan veriler 58
Şekil 6.11. 145mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi 59
Şekil 6.12. 780mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi 59
Şekil 6.13. 1519mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi 60
Şekil 6.14. Taneciği yönlenmiş sacda kesim acısının etkisi 60
Şekil 6.15. Manyetik alan şiddeti artışıyla histerezis eğrisi değişimi-1 61
Şekil 6.16. Manyetik alan şiddeti artışıyla histerezis eğrisi değişimi-2 62
Şekil 6.17. Sabit manyetik alan şiddetinde numune sayısı değişimi-1 63
Şekil 6.18. Sabit manyetik alan şiddetinde numune sayısı değişimi-2 63
Şekil 6.19. 50Hz altı frekanslarda frekans değişiminin etkisi-1 64
Şekil 6.20. 50Hz altı frekanslarda frekans değişiminin etkisi-2 65
Şekil 6.21. 75Hz frekansın değişiminin etkisi 66
Şekil 6.22. Sabit manyetik alan şiddetinde numune miktarındaki azalmanın etkisi 67
Şekil 6.23. Sıcaklık artışının etkisi 68

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. ASTM standartı harf kodları tablosu 15
Tablo 2.2. Elektriksel sacların gauge numarası tablosu 17
Tablo 5.1. Düzenek sarımlarının L ve R ölçüm değerleri 47
Tablo 6.1. Her katmandaki dörtlü numune ağırlıkları 57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A : Numune kesit alanı, (m^2)
B : Manyetik akı yoğunluğu, (T)
B_m : Manyetik akı yoğunluğu tepe değeri, (T)
C_{in} : İntegral Alıcı Devre Kondansatör Sığası, (F)
E : İndüklenen Etkin Gerilim, (V)
f : Besleme Gerilimi Frekansı, (Hz)
G : Kazanç
H : Manyetik Alan Şiddeti, (A/m)
h : Laminasyon Yüksekliği, (m)
I_{lim} : Sınırlama Akımı, (A)
I_p : Primer Akımı, (A)
i_c : Kondansatör Akımı, (A)
i_s : Sekonder Akımı, (A)
k_e : Girdap Kayıpları Katsayısı
k_{ex} : İlave Kayıplar Katsayısı
k_{ff} : Form Faktör Katsayısı
k_h : Histerezis Kayıp Katsayısı
L : Laminasyon uzunluğu, (m)
L_f : Bobin İndüktansı, (H)
L_{pr} : Primer İndüktansı, (H)
L_{sk} : Sekonder İndüktansı, (H)
l : Numune Uzunluğu, (m)
l_m : Manyetik Yol Uzunluğu (m)
m : Toplam Numune Ağırlığı, (kg)
m_e : Etkin Ağırlık, (kg)
N_p : Primer Sarım Sayısı
N_s : Sekonder Sarım Sayısı
P_c : Toplam Demir Kaybı, (W)
P_e : Girdap Kaybı, (W)
P_{ex} : İlave Kayıplar, (W)
P_h : Histerezis Kaybı, (W)
P_{kg} : Kilogram Başına Güç Kaybı, (W/kg)
P_w : Wattmetre Ölçüm Değeri, (W)
R : Direnç, (Ω)
R_{CL} : Yükseltici Akım Sınırlama Direnci, (Ω)
R_{G1} : Yükseltici 1. Kazanç Direnci, (Ω)
R_{G2} : Yükseltici 2. Kazanç Direnci, (Ω)
R_{in} : İntegral Alıcı Devre Direnci, (Ω)
R_{pr} : Primer Sargı Direnci, (Ω)
R_s : Manyetiklendirme Akımı Ölçme Direnci, (Ω)
R_{sk} : Sekonder Sargı Direnci, (Ω)

R_{yol} : Laminasyon Akı Yolu Direnci, (Ω)
$r_{eş}$: Test Cihazları eşdeğer Direnci, (Ω)
r_1 : Voltmetre Direnci, (Ω)
r_2 : Watmetre Direnci, (Ω)
r_3 : Sargı Direnci, (Ω)
U : Ölçülen Etkin Sargı Gerilimi, (V)
v_s : Sekonder Gerilimi, (V)
w : Besleme Gerilimi Açısal Frekansı, (rad/sn)
x : Laminasyon Kesiti Orta Genişliği, (m)
X_c : Kondansatör Empedansı, (Ω)
ϕ : Akı, (Wb)
ρ : Öz İletkenlik
τ : Laminasyon kalınlığı, (m)
σ : Elektriksel İletkenlik, (Ωcm)
δ : Yoğunluk, (kg/m^3)

Kısaltmalar

AC : Alternative Current (Alternatif Akım)
AISI : American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyal Cemiyeti)
CNC : Computer Numeric Control (Bilgisayar Tabanlı Sayısal Kontrol)
CRML : Cold Rolled Motor Lamination (Soğuk Haddelenmiş Motor Laminasyonu)
CRO : Cathode Ray Ossiloscope (Katot Işınımlı Osiloskop)
CSV : Comma-Separated Variables (Virgülle Ayrılmış Veriler)
DC : Direct Current (Doğru Akım)
EFF1 : Yüksek Verimli Motor
EFF3 : Standart Verimli Motor
EMERF : The Electric Motor Education and Research Foundation (Elektrik Motoru Eğitim ve Araştırma Kurumu)
EMK : Elektromotor Kuvveti
EPF : Epstein Frame (Epstein Çerçevesi)
FR : Flat Rolled (Düz Haddelenmiş)
GOST : Rusya Standartları Enstitüsü
GO : Grain Oriented (Taneciği Yönlendirilmiş)
IEC : International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
JIS : Japanese Industrial Standards (Japon Endüstri Standartları)
NGO : Non Grain Oriented (Taneciği Yönlendirilmemiş)
SST : Single Sheet Tester (Tek Sac Test Yöntemi)

EPSTEİN ÇERÇEVESİ KULLANARAK MANYETİK MALZEME B-H EĞRİSİ VE KAYIPLARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Elektrik makinalarındaki kayıplarda demir kayıpları ciddi yer tutmaktadır. Kullanılan elektriksel sac malzemesinin kayıp değerlerinin, makinanın çalışacağı frekans ve akı yoğunluğu değerlerine göre tespit edilmesi makine tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisidir. Bu çalışmada, elektriksel sacların farklı frekans, akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti değerlerinde testlerinin yapılabileceği Epstein Çerçevesi, standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. H085-23P taneciği yönlendirilmiş sacı ve M270-35A taneciği yönlendirilmemiş elektriksel sacı için farklı frekanslarda, farklı alan şiddetlerinde, farklı numune kesim doğrultularında ve farklı numune sayılarında ve farklı sıcaklık değerlerinde testler yapılarak histerezis eğrileri elde edilmiş ve elektrik makinası tasarımı ile uğraşan mühendislere ışık tutacak bilgiler raporlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demir Kayıpları, Elektriksel Saclar, Epstein Çerçevesi, Histerezis.

DETERMINING MAGNETIC MATERIAL B-H CURVE AND LOSSES WITH EPSTEIN FRAME

ABSTRACT

A significant portion of losses in the electric machines is considered to be iron losses. Electric machine designers must pay special attention to loses in electric steel, operating frequency and flux density. In this study, and Epstein Frame system is designed and manufactured based on IEEE standarts and tests can be made at different frequency and flux density values of electrical steel The measurements are made for two different materials oriented H084-23P and non-oriented M270-35A. Hysterisis curves are obtained in various cutting directions, various magnetic field strange and various number of specimen. The work reported in detail so that it will enlighen electric machine designers.

Keywords: Iron Losses, Electrical Steels, Epstein Frame, Hysterisis.

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte insan veya hayvan gücüne dayalı çalışan sistemlerin yerini makinalar almaya başlamıştır. Bunun yanında gelişen ve hızlanan yaşama adapte olabilmek için yeni teknolojik cihazlar insan hayatına girmiştir. Bu gelişen teknoloji ile kolaylaşan yaşam, farklı enerji kaynaklarına ihtiyaç yaratmıştır.

Teknolojinin yeni gelişmeye başladığı dönemlerde üretilen cihazlara talep daha az olduğu için üretim miktarları da sınırlı sayılardaydı. Bu sebeple üreticiler dünyada var olan hammadde ve enerji kaynaklarının az kullanımını değil, daha bol kullanımını tercih ediyorlardı. İlerleyen yıllarda teknoloji kullanımının artması var olan enerji kaynaklarının tüketimini hızlandırmıştır. Bu sebeple dünya çapında enerji verimliliği konularında çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Daha küçük boyutlarda daha hafif ve daha az enerji tüketen teknolojileri üretmek temel hedef olmuştur.

Dünyada tüketilen enerjinin %46'lık bölümünü elektrik motorları oluşturmaktadır [1]. Bu miktarı düşürmek için dünya genelinde verimlilik çalışmaları yapılmaktadır. Günümüzde sanayi, ticaret ve konut uygulamalarında elektrik motorlarının enerji verimliliği büyük önem arz etmeye başlamıştır. Amerika enerji bakanlığı 2015 yılına kadar enerji verimliliğini arttırmak konusunda aşağıdaki hedefleri belirlemiştir;

- Ortalama binalar 1990 yılına oranla %20 daha az enerji kullanacak.
- Yeni evler, şuan ki evlere göre %50 daha az enerji kullanacak.
- Yeni ticari binalar 1990 yılına oranla %30 daha az enerji kullanacak.

Ayrıca üretilen elektriğin %64'ünün elektrik motorları tarafından tüketilmekte olduğu ve elektrik motorları tarafından tüketilen enerjinin yüksek yüzdesinin ise ticari ve konutlardaki motorlarda tüketilmekte oldu rapor edilmiştir. Bu rapora göre enerji bakanlığı 2015 hedeflerini tutturabilmek için "Konut ve ticari binalarda yüksek verimli motor tasarımı" başlıklı üç yıllık proje başlatmış ve desteklemiştir [2] .

Ülkemiz ise 2010 yılında yayınlanan Enerji ve Enerji Verimliliği Çalışma Raporu'na OECD ülkeleri içinde en fazla enerji tüketen ülkedir. Bu sebeple 10 yıllık %10 - 15

tasarruf hedefi planlanmaktadır. Yine rapordaki verilere göre ülkemizde tüketilen elektriğin %40'ı elektrik motorları tarafından harcanmaktadır. Verimli motorların dağılımında ise ülkemizde %65'lik payı EFF3 sınıfı motorlar, %7'lik payı ise EFF1 sınıfı motorlar kaplamaktadır. Bahsedilen hedeflere ulaşılması için verimli motorların üretilmesi ve kullanılası kaçınılmaz bir ihtiyaç oluşturmaktadır.

Elektrikli motor üretiminde önemli bir artış olmadan, yüksek verimli motor tasarımı, manyetik özellikleri detaylı şekilde bilinen uygun malzemelerin seçimiyle gerçekleştirilebilir. Elektrik makinaları, generatörler ve motorlar, stator ve rotor saçlarına uygulanan manyetik akı hareketini enerjiye çevirir. Makine tasarımcıları tarafından tercih edilen elektrik saçları çok çeşitlilik göstermektedir. Elektrik saçlarının manyetik özellikleri laminasyon kalınlığı, tavlama metodu, üretim metodu, silikon içeriği gibi birçok özelliğe göre değişir. Hatta aynı adı taşıyan elektrik saclarının manyetik özellikleri üreticiden üreticiye veya aynı üreticinin örnek numuneyi ana sacdan aldığı bölgeye göre bile değişir. Hatta bazı elektrik sacları belli uyartımlarda diğerlerine göre daha iyi performans verir. Elektrik saclarının manyetik karakteristiklerinin kapsamlı şekilde bilinmesine büyük ihtiyaç vardır.

Elektrik saclarının manyetik kalitelerinin ölçülmesine yönelik uluslararası standartları oluşturulmuş iki yöntem mevcuttur. Epstein Çerçevesi ve Tek Sac Test metodu. Bu tezde bu yöntemler üzerine detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde kayıplar ve test metotları hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Demir kayıplarının tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. Demir kayıpları ve ölçüm metotları üzerine yapılan literatür çalışmaları hakkında geniş incelemeler sunulmuştur.

İkinci bölümde manyetik malzeme çeşitleri ve ferromanyetik malzemelerin sınıflandırılması hakkında bilgiler verilmiştir. Elektriksel sacların çeşitleri, sınıflandırmaları ve standartlarına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde manyetik malzemelerde demir kayıplarının oluşumu mekanizması açıklanmıştır. Demir kayıpları modellenmesi konusundaki yaklaşımlardan bahsedilmiştir. Kayıpların ayrımı modellinde kayıpların hesaplanması açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde Epstein Çerçevesinin tarihsel gelişimi anlatılmıştır. Epstein Çerçevesinin ve Tek Sac Test yönteminin ASTM ve IEC standartları açıklanmıştır. Toroid test yöntemi hakkında bilgiler sunulmuştur.

Beşinci bölümde standartlara uygun Epstein Çerçevesi tasarımına ait bilgiler özetlenmiştir. Malzeme secimi ve çerçeve üretimi ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Dengeleme bobininin ayarlanması ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Altıncı bölümde ise Epstein Çerçevesi ile ölçümlerin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Test düzeneğinde kullanılan yükseltici devre tasarımından bahsedilmiştir. Kurulan test düzeneği ve Epstein Çerçevesi ile yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Son bölümde ise yapılan çalışmadan elde edilen çıktılar özetlenmiştir. Bundan sonra yapılabilecek çalışmalar ve geliştirilebilecek iyileştirmeler hakkında fikirler sunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

Elektrik makinalarının verimliliği, son yirmi yılda malzeme bilimi ve üretim yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte büyük gelişme göstermiştir. Mevcut makinelerdeki toplam elektromanyetik kayıpların (demir kayıpları + bakır kayıpları) önemli kısmı nüve kayıplarıdır, geri kalan güç kayıpları ise sürtünme ve rüzgar kayıpları gibi mekanik kayıplardır. Nüve kayıpları genel olarak histerezis, klasik girdap akımları ve normal olmayan girdap akımlarının (parazit yük kaybı) toplamı olarak tanımlanır. Steinmetz'den bu yana nüve kayıplarının anlaşılmasına yardımcı birçok metot geliştirilmesine rağmen, hala sinüzoidal olmayan uyartım gerilimleri için nüve kayıplarını tanımlayan kesin bir yöntem yoktur. Güç elektroniği ve motor kontrolündeki gelişmeler yüksek harmonikli uyartım gerilimlerinde demir kayıplarının doğru tanımlanabilmesine ihtiyaç doğurmuştur.

Demir kayıpları ve hesaplanması; Charles Steintmez'in ilk olarak 1892 yılında yayınladığı deneysel çalışmalarını içeren "On The Law Of Hysteresis" başlıklı yayını ve akabinde 1897 yılında yayınladığı "Theory and calculation of alternating current phenomena" başlıklı yayınlarından bu yana mühendislerin ve malzeme bilimcilerinin üzerine çalışmalara devam ettiği bir konudur. Steintmetz histerezis kayıpları ve kayıp mekanizması hakkında ilk çalışmayı yapan kişi olarak bilinmektedir. Bu çalışmalarında tek bileşenden oluşan histerezis kaybı formüle etmiştir. Çalışmasında deneysel sonuçlara göre eğri uydurma yöntemini kullanmıştır [3][4].

Steintmetz denkleminden sonra Jordan kayıpların hesaplanması için kayıp ayırma modelini sunmuştur. Bu modelinde kayıpları, histerezis kayıpları ve dinamik kayıplar olarak ikiye ayırmıştır[10].

Steinmetz'den sonra onu temel alan birçok model geliştirilmiştir. Bertotti yaptığı çalışmalarda kayıpların malzeme cinsine, boyutlarına bağlı olduğunu göstermiş ve Jordan'ın denklemine ilave girdap akımı kayıpları adını verdiği üçüncü kayıp bileşenini eklemiş, malzemedeki alan duvarlarının hareketinden kaynaklandığını ifade etmiştir [5]. Daha sonraki süreçte bu denklemleri temel alan birçok kayıp modeli

düzenlenmiş ya da geliştirilmiştir [6-9]. Nüve kayıplarının ölçülmesine yönelik, nüve malzemesine göre değişen farklı test metotları geliştirilmiştir. ASTM, IEC, GOST ve JIS standartları tanımlanmış olan Epstein Çerçevesi, tek sac testi ve toroid test metotları benzer prensiple çalışan farklı test metotlarıdır. Üç test metodunda da primer sargısı vasıtasıyla oluşturulan indüksiyonun sekonder sargısından ölçülerek kayıp miktarı hesaplanır ve Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon ve Ampere'in yasalarına dayanır [11].

Slawomir Tumanski and Marek Stabrowski ise laminasyon sacı yüzeyindeki manyetik alan dağılımını ölçmeyi temel alan farklı bir yöntem geliştirmiş ve bu yönteme Magnetovision adını vermişlerdir. Yüksek geçirgenlikli manyetik dirençli sensör vasıtasıyla teğetsel manyetik alan ölçülmüş ve buna göre renk haritası elde edilmiştir [12].

Demir kayıplarının ölçümleriyle ilgili literatürde bulunan çalışmalar tarihsel süreçleriyle birlikte aşağıdaki gibi ele alınabilir:

1977 yılında yapılan çalışmada 2000 sarımlık Epstein Çerçevesi kullanılarak, haddeleme yönünden farklı açılarda kesilen numuneler, karışık dizim şekilleriyle test edilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır [13].

T. Meydan ve H. Kökçar yaptıkları çalışmada Epstein Çerçevesini kullanarak amorf manyetik malzeme ile taneciği yönlendirilmiş silisli saçların manyetik özelliklerini karşılaştırmışlardır [14].

Fuat Küçük yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında farklı toroid nüvelerin manyetik kayıplarını ölçmüştür. Deney düzeneği olarak kendi tasarladığı farklı frekans ve genlikte çıkış veren güç kaynağını kullanmıştır. Ölçüm değerlerini osiloskop vasıtasıyla bilgisayarda toplayarak kayıp modeli ve yüzey grafikleri oluşturmuştur [15].

Pragasen Pillay laminasyon kayıplarının ölçülmesi üzerine 2003 yılından bu yana birçok çalışmalarda bulunmuştur. EMERF tarafından 2,3 T ve 3,2 kHz frekanslarda test yapabilecek bir yeni Epstein Çerçevesi oluşturmak hedeflenmiştir ve bu kapsamda, T. L. Mthombeni ve R. Strnat ile yaptıkları 280 sarımdan oluşan, her kolda

tek numune kullanılan bir çerçeve geliştirilmiştir. Bu çerçeve ile 200Hz - 300Hz - 400Hz - 600Hz ve 1kHz frekanslarda 1,8T'ya kadar ölçümler yapılmıştır [16][17]. Daha sonra M. J. Manyage ile yine yüksek frekanslar ve yüksek manyetik alan yoğunluğunda ölçüm yapabilecek 200 sarımlı, daha küçük boyutlarda ve daha az numune ile çalışan çerçeveyi geliştirmiştir. 2008 yılında bu çerçeve ile daha önce tasarladığı 280 sarımlı ve endüstriyel olarak kullanılan 352 sarımlı çerçevelerle, 1,8T'ya kadar 4kHz ve 6kHz frekanslarda yapılan ölçüm sonuçlarını kıyaslamalı yayınlamıştır [18].

Aleandora A. De Espindola ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Epstein Çerçevesi ile standardı oluşturulmamış, benzer mantıkla çalışan yığın nüve ölçüm(Ring Core) yöntemini karşılaştırmışlardır [19].

M.S. Muhit 2011 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında dSpace kullanarak manyetik sacların histerezis eğrileri ve manyetik kayıplarını elde etmiştir. 0,1-150Hz arası değişen frekanslarda ve 1,5T manyetik alana kadar ölçümler yapmıştır [20].

Ahmet Demir tez çalışmasında SST test metodu ile manyetik malzemelerin kayıplarının ölçümünü yapmıştır. Bertotti'nin kayıp denklemini kullanarak ölçümler sonucu elde edilen değerler ile M3, M4, M5 kalite Si-Fe sac malzemelerinin kayıp modelleri oluşturulmuştur [21].

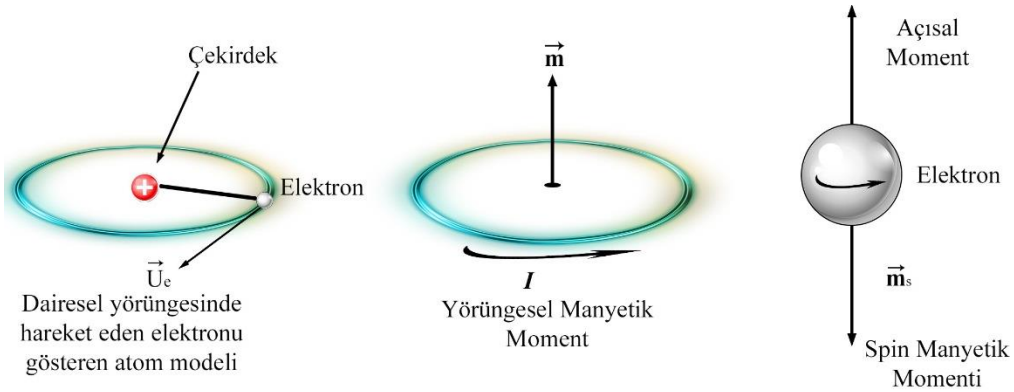
Yapılan bir çalışmada taneciği yönlendirilmemiş 0,35 ve 0,50mm kalınlıktaki manyetik saclar 25x3cm boyutlarında 12 adet numune kullanılarak test edilmiştir. Numuneler çerçeveye dizilirken, trafo benzeri bir örme yöntemi ile kenar kenara temaslı şekilde düzeneğe dizilmiş ve ölçümler yapılmıştır [22].

Prof P. Parthasaradhy ve Dr S.V Ranganayakulu yaptıkları çalışmada Epstein Çerçevesi kullanarak manyetik malzemenin histerezis ve Eddy kayıplarını hesaplamışlardır. 50Hz frekansında oto trafosu ile Epstein Çerçevesi 20V gerilimden 240V gerilime kadar beslenmiş ve ölçümler CRO Osilaskopa bağlanarak B-H eğrisi elde edilmiş ve osiloskopta gözlemlenmiştir [23].

2. MANYETİK MALZEMELER VE SINIFLARI

Faraday yapmış olduğu çalışmalarda bütün malzemelerin manyetik alana tepki gösterdiğini göstermiştir. Manyetik alana göstermiş oldukları tepkilere göre malzemeler diyamanyetik(eksi duyarlı) malzeme, paramanyetik(artı duyarlı) malzeme ve ferromanyetik malzeme olarak üçe ayrılırlar. Diyamanyetizma ve paramanyetizma uygulanan manyetik alanla ortaya çıkar ve alan ortadan kalkınca yok olur. Ferromanyetizma ise istenildiği zaman oluşturulup istenildiğinde ortadan kaldırılabilen yüksek manyetik kuvvetlerin oluşturulmasını sağlar.

Manyetizma kuvvetleri temel elektrik yükü olan elektronların hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Elektronlar hem kendi ekseninde, hem de çekirdek yörüngesinde dönme hareketi yaparlar bu hareketler Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Elektronların kendi ekseni etrafında dönmesi sonucu oluşan spin momentleri ile çekirdek yörüngesinde dönmesi sonucu oluşan açısal momentlerinin toplamı o elektronun manyetik momentini oluşturmaktadır. Toplam elektronların manyetik momentleri ise atomun manyetik momentini oluşturmaktadır [24][25].

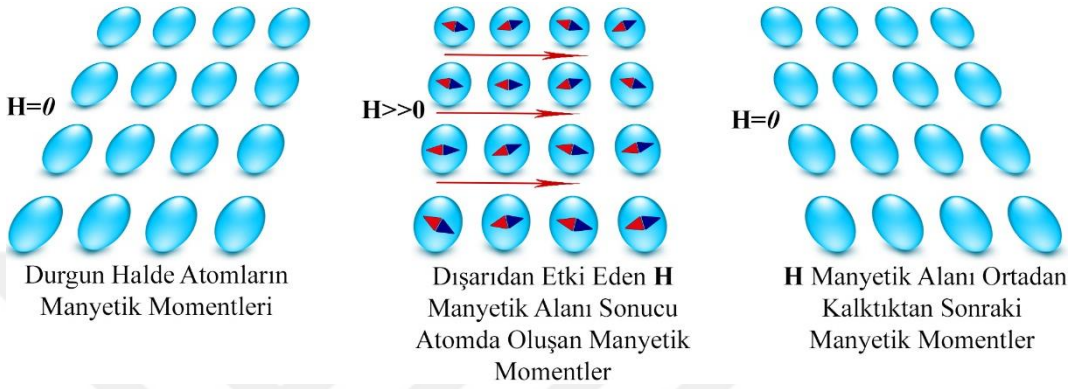


Şekil 2.1. Elektronların yörüngesel hareketlerinin gösterimi

2.1. Diyamanyetik Malzemeler

Diyamanyetik malzemelerde atomların net bir manyetik momenti yoktur. Bu malzemelere dışarıdan bir manyetik alan uygulandığın da manyetik alan elektronların

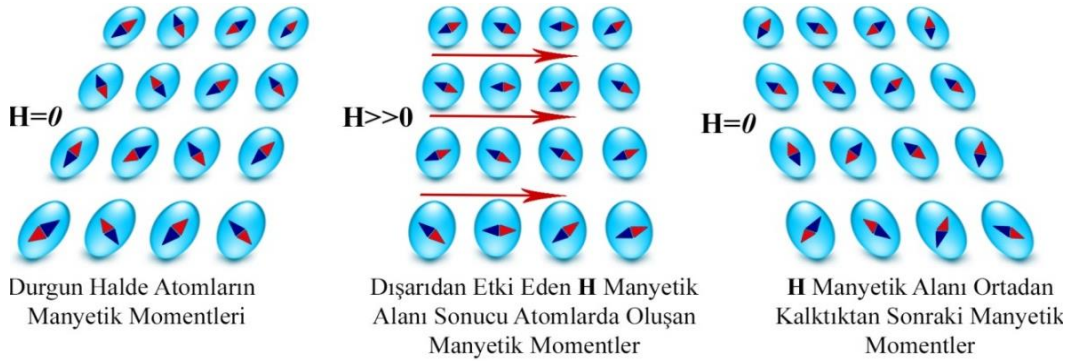
hareketine etkide bulunmaktadır. Bu etki sonucu malzeme üzerinde çok az miktarda manyetik moment oluşur fakat bu manyetik moment uygulanan manyetik alana ters yönde oluşarak manyetik alanı iterler ve zayıflatmaya çalışır. Diyamanyetik malzemelerin bağıl geçirgenlikleri 1'den küçük fakat 1'e çok yakın değerdedir (0,9999 gibi). Bakır, gümüş, kalay diyamanyetik malzeme örneklerindendir.



Şekil 2.2. Diyamanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları

2.2. Paramanyetik Malzemeler

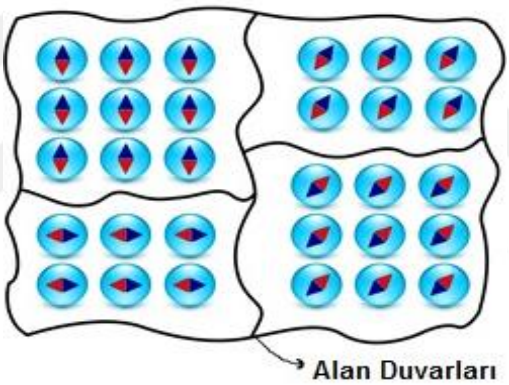
Paramanyetik malzemeyi oluşturan atomların net manyetik momentleri vardır fakat atomların yönelimleri rastgele olduğu için malzemenin toplam manyetik momenti yoktur. Dışarıdan harici bir manyetik alan uygulandığında malzemeyi oluşturan atomlar manyetik alan ile aynı yönde dizilirler ve çok az miktarda manyetik alanı kuvvetlendirirler. Sıcaklık ile malzeme dizilimi bozulduğu için sıcaklıktan etkilenirler. Paramanyetik malzemelerin bağıl geçirgenliği 1'den büyük fakat 1'e çok yakın değerlerdedir(1,001 gibi). Alüminyum, kalsiyum ve platin paramanyetik malzeme örneklerindendir.



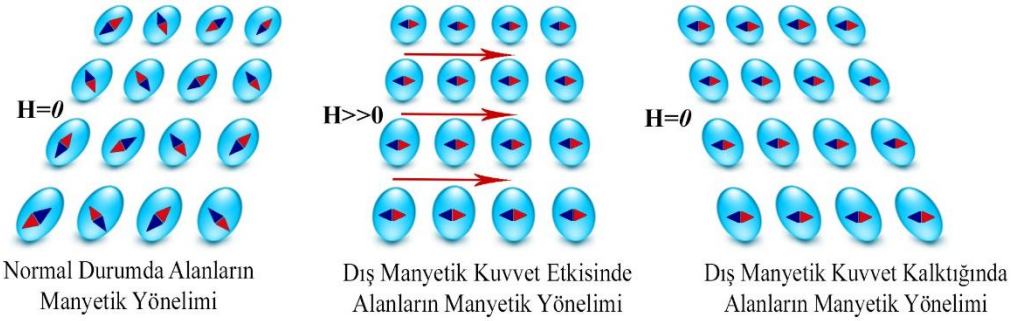
Şekil 2.3. Paramanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları

2.3. Ferromanyetik Malzemeler

Ferromanyetik malzemeler Şekil 2.4'de görüldüğü gibi manyetik momentleri paralel olarak dizilmiş yaklaşık 10^{12}-10^{18} adet atomdan oluşan birçok farklı yönelimli manyetik bölgelere sahiptir. Dışarıdan az miktarda manyetik alan uygulandığında bütün manyetik bölgeler, etki eden manyetik alanla aynı yönelime geçerler. Bu yönelim sonucunda malzeme güçlü mıknatıslık özelliği kazanır. Manyetik alanın ortadan kalması durumunda malzeme yönelimini korumaya devam eder. Sıcaklık ve darbe etkisiyle manyetik alanların yönelimleri değişir. Ferromanyetik malzemelerin geçirgenlikleri çok yüksek değerlerdedir(örn. 10^2 - 10^5). Bu sebeple mühendislikte yüksek güçlü, kontrol edilebilir manyetik alanların eldesi için kullanılırlar. Demir, nikel, kobalt ve alaşımları ferromanyetik malzemelerdir.



Şekil 2.4. Ferromanyetik malzemelerde alan duvarlarıyla ayrılmış farklı yönlü alanlar



Şekil 2.5. Ferromanyetik malzeme atomlarının manyetik alan etkisinde davranışları

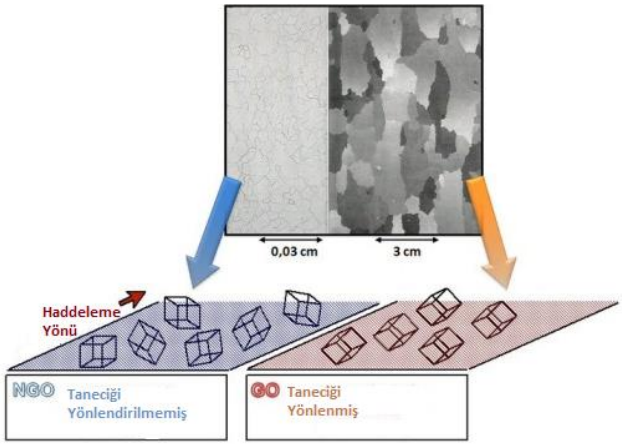
2.3.1. Sert ferromanyetik malzemeler

Sert ferromanyetik malzemeler kalıcı mıknatıslar olarak da adlandırılmaktadır. Bu malzemelerin histerezis eğrileri oldukça geniştir. Koersif enerjisi 1000A/m'den fazla olan manyetik malzemeler genel olarak sert manyetik malzeme olarak adlandırılır. Yüksek miktarda kalıntı manyetik akı yoğunluğu içerirler. Bu malzemelerin mıknatıs yönlerinin değiştirilmesi için çok yüksek manyetik alan uygulanmaktadır. Malzeme içindeki manyetik bölgelerin yönelimleri değiştirildikten sonra manyetik alan ortadan kalsa bile yönelimleri kolay değişmez ve ilk durumuna göre oldukça yüksek manyetik özellik kazanırlar. Sert ferromanyetik malzemelerin mıknatıslık potansiyeli, o malzemenin B-H eğrisindeki en büyük enerji çarpımı ile belirlenir. En büyük enerji çarpımını elde etmek için B-H eğrisinin 2. bölgesine yerleştirilebilecek en büyük dikdörtgenin alanı hesap edilir. Sert manyetik malzemeler Al-Ni-Co alaşımlarından, Fe-Cr-Co alaşımlarından, Nd-Fe-B alaşımlarından ve Sm-Co alaşımlarından elde edilirler.

2.3.2. Yumuşak ferromanyetik malzemeler

Elektrik motorları, transformatörler ve bobinlerin nüve yapılarının oluşturulduğu malzemeler yumuşak ferromanyetik malzeme grubunda yer almaktadır. Bu malzemelerin histerezis eğrileri oldukça dardır, kolayca manyetize edilip yine kolay bir şekilde manyetikliği yok edilebilmektedir. Koersif enerjisi 1000A/m'nin altında olan manyetik malzemeler genel olarak yumuşak manyetik malzeme olarak adlandırılır.

Manyetik saclar soğuk haddeleme yöntemiyle üretilirler. Soğuk haddeleme sonucu malzemenin kalıp kesilme karakteristiğinde iyileşme, malzeme yüzeyinin düzlüğünde artış ve çapakların azalması gibi faydalar sağlamaktadır. Bu sebeple laminasyonların birleştirilmesi kalitesi yükselmektedir. Temel olarak manyetik saclar taneciği yönlendirilmiş (Grain Oriented, anisotropic) ve taneciği yönlendirilmemiş (Non Oriented, isotropic) olarak iki temel tipe ayrılırlar.

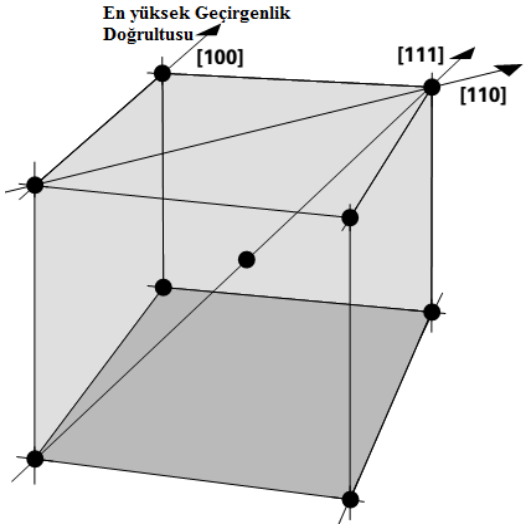


Şekil 2.6. Haddeleme yönünde tanecik yönelimleri[32]

2.3.2.1. Taneciği yönlendirilmiş manyetik malzemeler

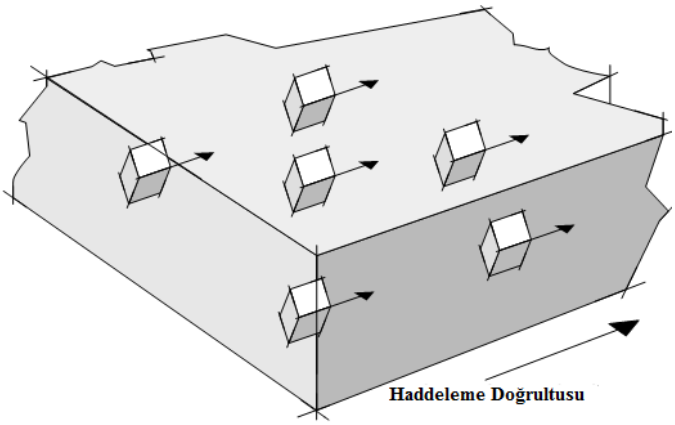
Bu malzemelerin manyetik özellikleri haddeleme yönünde oldukça geliştirilmiştir. Haddeleme yönünde kayıpları azaltılmış ve manyetik geçirgenlik değerleri güçlendirilmiştir. Belirli koşullar altında yönlendirilmiş sacların manyetik kayıpları gerek haddeleme yönünde gerekse haddeleme yönünün dışında dolaşan akılar için, normal manyetik saclardan 20 kata yakın iyi performans gösterirler. Genel olarak yönlendirilmiş Fe-Si alaşımları %3, %3,5 civarında silisyum içerirler. Silisyum miktarı olması gerekenden az olursa, aynı kalınlıktaki malzemenin girdap akımı kayıpları çok yüksek olur, fazla olursa da bu sefer malzemenin sünekliği azalır sertleşir ve gevrek yapı kazanır. Fazla silisyum malzemenin doyum noktasını da düşürür, bu durumda ihtiyaç duyulan akım değerleri yükselir. Silisyum katkısı aynı zamanda demirin mıknatıslarının yönelmesi kolaylaştırır ve yönelim sırasında tükettikleri enerji miktarını da düşürürler. Mıknatıs yönelmelerindeki kolaylık yüksek güçlü trafoların çalışması sırasında oluşan gürültüyü de azaltır.

Demir alaşımlarının manyetik geçirgenlikleri, manyetik akının alaşımı oluşturan metalik kristal yapıdan hangi doğrultuda geçtiğine göre değişiklik göstermektedir. Hacim merkezli kübik yapıdaki bir taneciğin geçirgenliğinin en fazla olduğu doğrultu kenar [100] doğrultusudur, bunu yüzey köşegeni doğrultusu [110] daha sonra ise hacim köşegeni doğrultusu takip eder [111]. Aşağıdaki şekilde hacim merkezli kübik kristal yapısındaki metalik alaşım taneciğinin doğrultuları gösterilmektedir [26].



Şekil 2.7. Hacim merkezli kübik kristal yapısındaki alaşımın geçirgenlik doğrultuları[26]

Kübik yapıdaki kristaller yönlendirilmiş saclarda 4 kenarı haddeleme doğrultusunda yönlendirilir [100]. Kalan 8 kenarı ise sac yüzeyi ile 45^{o} açı oluşturacak şekilde yönlendirilerek [110] doğrultusunun laminasyon yüzeyine paralel olması sağlanır. Şekil 2.8 haddeleme doğrultusunda yönlendirilmiş taneciklerin dizilimi görülmektedir. AISI adlandırılmasında M10'den M1'e kadar olan malzemeler taneciği yönlendirilmiş malzemelerdir. Günümüzde M1-M6 arası saçlar ticari olarak bulunmaktadır. Taneciği yönlendirilmiş saclar 0,18mm, 0,23mm, 0,27mm, 0,30mm, ve 0,35mm kalınlıklarda üretilmektedir. Yüksek geçirgenlik özelliğine sahip sınıfları da mevcuttur.



Şekil 2.8. Taneciği yönlendirilmiş malzemede haddeleme yönünde kristal dizilimleri[26]

2.3.2.2. Taneciği yönlendirilmemiş manyetik malzemeler

Bu malzemelerin manyetik özellikleri haddeleme yönünden bağımsız olarak malzeme yüzeyinde hemen hemen benzerdir. Taneciği yönlendirilmiş saclar haddeleme yönünde dolaşan akılarda mükemmel değerler sunarken, bu malzemeler ise her yönde eşit özellikler sunmaktadır. AISI adlandırmasında M15'den M47'ye kadar olan malzemeler bu sınıftaki malzemelerdir. Bu malzemeler motor nüvesi gibi akının herhangi bir şekilde dolaşabileceği ya da maliyetlerin fazlaca ön planda olduğu uygulamalar için elverişlidir. Ticari olarak 0,35mm, 0,47mm, 0,50mm, 0,65mm ve 1,00mm kalınlıklarda bulunabilirler. Taneciği yönlendirilmemiş manyetik saclar ise yarı işlenmiş ve tam işlenmiş olarak iki sınıfa ayrılırlar.

Soğuk haddele sonrası ve tavlama işlemi yapılmamış malzemelere yarı işlenmiş malzeme adı verilir. Bu malzemeler kesilme işleminden sonra manyetik özelliklerinin daha da iyileşmesi için tavlama işlemine tabi tutulmalıdır. Kesim sonrası tavlama işlemi genel olarak 790^{o}C ile 845^{o}C arasındaki sıcaklıklarda karbonsuzlaşma atmosferinde(%20H_2, %80N_2, su buharı) bir-iki saat kadar bekletilerek yapılmaktadır. Bu işlem malzemedeki kesim gerilmelerini yok eder, tanecik boyutunu iyileştirir ve karbon, nitrojen ve sülfür parçacıklarının yarattığı kirliliği azaltır. Malzemenin mikro yapısı tamamen yeniden kristallenir.

Tam işlenmiş manyetik malzemeler kesimden sonra ilave bir tavlama işlemine gereksimin olmayan malzemelerdir. İstenilen manyetik karakteristikleri üretim aşamasında uygun olarak oluşturulduğu için ayrıca bir ısıl işlemene gerek

duyulmamaktadır. Çelik üreticileri bu malzemeleri yaklaşık 825^{o}C sıcaklıkta ve nemli hidrojen atmosferinde karbonsuzlaşmaya tabi tutarlar ve böylelikle malzemenin karbon miktarı azaltılır. Tavlamanın son aşamasında ise 1100^{o}C gibi yüksek sıcaklıkta malzemenin tanecik büyütmesi sağlanır ve manyetik özellikleri güçlendirilir. Daha sonra malzeme tamamen tavlanmış durumda kesim makinasına gönderilir. Kesim sırasında malzemenin kesim kenarlarında deformasyon oluşur fakat bu en uygun mikro yapı değerinden daha az miktarda olur.

2.4. Elektriksel Sac Sınıflarının Numaralandırılması

Elektriksel saclara içerdikleri düşük karbon değerinden dolayı demir silikon alaşımları da denmektedir. Bu malzemeler akının frekansa bağımlı değiştiği uygulamalarda katmanlı nüve yapılarında oldukça güzel elektriksel ve manyetik özellik gösterirler. Bu sebeple özel uygulamalar için geliştirilmiş birçok sınıflar mevcuttur ve bu sınıflar kendi içinde de farklı derecelere ayrılırlar. Aşağıda üç ayrı standarta göre elektriksel sacların isimlendirmeleri gösterilmiştir.

2.4.1. ASTM standartı

ASTM standartına göre manyetik malzemelerin adlandırılmasında 6 karakterli gösterim metodu kullanılmaktadır. Bu adlandırma aynı zamanda malzemenin manyetik özellikleri hakkında bilgi verir. İlk iki rakam malzemenin kalınlığını belirtmektedir. Bu değer malzeme kalınlığının mm cinsinden değerinin 100 katına eşittir. Örneğin 35 ile başlayan malzemenin gerçek kalınlığı 0,35mm'dir. Amerika da kullanılan gauge numarası ile kalınlık gösterimi pratik olarak bu adlandırma yöntemine uygun değildir ve kullanılmaz. İhtiyaç durumunda Tablo 2.2 kullanılmaktadır. 3. Sembol kod harfidir. Bu kod harfi manyetik malzemenin hangi sınıf ve derecede olduğunu hangi test yöntemi ve koşullarında test edildiği bilgisini taşımaktadır. Aşağıdaki tabloda bu harfler ve anlamları yer almaktadır [27]. Son 3 rakam ise malzemenin harf kodu ile belirtilen test koşulunda elde edilen W/Ib cinsinden kayıp değerinin 100 katını göstermektedir.

Tablo 2.1. ASTM standartı harf kodları tablosu [27]

Kod Harfi	Malzeme Sınıfı	Test Metodu	Numune Kesimi	Tavlama	Test Koşulu
D	Yarı İşlenmiş CRML	EPF	%50 L - %50 T	790 °C 1 Saat	1,5 Tesla 60 Hz
F	Tam İşlenmiş (NGO) Yönlendirilmemiş	EPF	%50 L - %50 T		1,5 Tesla 60 Hz
S	Yarı İşlenmiş NGO	EPF	%50 L - %50 T	845 °C 1 Saat	1,5 Tesla 60 Hz
T	Tam İşlenmiş İnce Gauge NGO	EPF	%50 L - %50 T		1,0 Tesla 400 Hz
G	Tam İşlenmiş Flat Roll SiFe Yönlendirilmiş(GO)	EPF	%100 L	790 °C - 845 °C 1 Saat	1,5 Tesla 60 Hz
H	Tam İşlenmiş FR SiFe GO	EPF	%100 L	790 °C - 845 °C 1 Saat	1,7 Tesla 60 Hz
P	Tam İşlenmiş FR SiFe GO Yüksek Geçirgen	EPF	%100 L	790 °C - 845 °C 1 Saat	1,7 Tesla 60 Hz
Q	Tam İşlenmiş FR SiFe G.O. Y.G. Lazer Çizimli	EPF	%100 L		1,7 Tesla 60 Hz

2.4.2. IEC standartı

IEC standartına göre elektriksel çelikler sınıflandırılırken çeliğin ön harf olarak “M” harfi kullanılmaktadır. M harfi manyetik kelimesinin ilk harfini temsil eder. Yani M ile ön kodlanmış bir çelik sac, elektriksel sac sınıfına girmektedir. M harfinden sonra 3 basamaklı bir sayı kodu yazılır. Bu kodun yüzde biri; taneciği yönlendirilmemiş malzemeler için 1,5T akı yoğunluğu ve 50Hz frekansta ölçülen W/kg cinsinden kayıp değerini ifade ederken, taneciği yönlendirilmiş malzemeler için 1,7T akı yoğunluğu ve 50Hz frekansta ölçülen W/kg cinsinden kayıp değerini ifade etmektedir. Kayıp değerini ifade eden 3 basamaklı sayıdan sonra tire (-) konulur ve iki basamaklı bir sayı yazılır. Bu iki basamaklı sayı malzeme kalınlığının yüz katına eşittir ve malzeme kalınlığını bildirir. Kalınlık ifadesinden sonra ise ikinci bir harf kodu konulmaktadır. Yönlendirilmemiş malzemeler için K ve A harfleri kullanılırken, yönlendirilmiş malzemeler için ise S ve P harfleri kullanılmaktadır;

- K harfi malzemenin yarı işlenmiş olduğunu ifade etmektedir. Yani malzeme üretici tarafından son tavlama işlemine tabi tutulmamıştır.
- A harfi malzemenin son tavlama işlemine tabi tutulduğunu yani tam işlenmiş malzeme olduğunu ifade etmektedir.
- S harfi malzemenin standart bir taneciği yönlendirilmiş sac olduğunu ifade etmektedir.
- P harfi ise malzemenin yüksek geçirgenliğe sahip taneciği yönlendirilmiş sac olduğunu ifade etmektedir.

2.4.3. AISI standartı

Elektriksel sac üreticileri ürettikleri farklı özellikteki malzemeler için kendi ticari isimlerini vermektedir. Bu sistem kullanıcılar arasında kafa karışıklığı yaratmaktaydı. Bu karmaşayı sonlandırmak için AISI bu sınıflandırmayı geliştirmiştir. Bu sınıflandırmada yine isimlendirme M harfi ile başlamaktadır. M harfinden sonra ise 29 Gauge kalınlıktaki malzemenin 15kG manyetik akı ve 60Hz frekanstaki kaybının W/Ib cinsinden değerinin 10 katına eşit olan değer yazılarak isimlendirme tamamlanmaktadır. Günümüzde elektriksel çeliklerin manyetik ve elektriksel özellikleri önemli ölçüde geliştiği için tip numaraları ile kayıp değerleri arasında bahsedilen ilişki kalmamıştır kullanım çok tercih edilmemektedir. Tablo 2.1'de Gauge numaralarının hangi kalınlık değerlerine sahip olduğu gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Elektriksel Sacların Gauge Numarası Tablosu

Gauge Numarası	Anma Kalınlığı	
	mm	inc
16	1,59	0,0625
17	1,42	0,0560
18	1,27	0,0500
19	1,15	0,0453
20	0,952	0,0375
21	0,864	0,0340
22	0,787	0,0310
23	0,711	0,0280
24	0,635	0,0250
25	0,559	0,0220
26	0,470	0,0185
27	0,432	0,0170
28	0,394	0,0155
29	0,356	0,0140
30	0,318	0,0125
31	0,254	0,0100

3. MANYETİK MALZEMELERDE DEMİR KAYIPLARI

3.1. Demir Kayıplarının Fiziksel Oluşumu

Demir kayıplarının hesaplanması konusunda en yaygın yöntem kayıpların ayrılması metodudur. Kayıplar, histerezis ve girdap akımları olarak ikiye ayrılırlar. Burada toplam kayıpların iki ayrı fiziksel etkinin birleşimi ile elde edildiği varsayılır. Malzeme ve fizik konusunda çalışan bazı uzmanlar bu hipotezle çelişse de birçok mühendis ve teknisyenler hala bu yöntemi kullanmaktadır.

Konuyu aydınlatmak açısından kayıpların oluşum mekanizmasına bakılmalıdır. Bilindiği gibi ferromanyetik malzemelerdeki manyetiklenme eş dağılımlı değildir. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi malzemenin içyapısı, manyetik vektörlerinin yönleriyle birbirinden ayrılmış doygun haldeki bölgelerden oluşmaktadır. Alan duvarları, bu ayrık bölgeleri birbirinden ayırırlar. Manyetik malzemenin bütününün manyetizasyonunun değişebilmesi için bu alan duvarlarının hareket etmesi gerekmektedir. Bu demek oluyor ki malzemenin manyetizasyonunun değişimi eş dağılımlı olarak değil, oldukça bölgesel olarak değişmektedir. Manyetizasyon değişimi alan bakımından ayrıktır.

Malzeme içindeki kirlilik ve noksanlıklar alan duvarlarının hareketine engel olur ve böylece alan duvarlarının ani hareketine sebep olur, buna Barkhausen atlaması adı verilir. Bu sebeple alan duvarlarının hareketi düzensizdir. Bunun sonucu alan duvarlarının hareket hızları, manyetik alan değişimiyle aynı değildir. Yani manyetizasyon zamandan ayrık değişim göstermektedir.

Bu bölümde mevcut demir kayıplarının hesaplanma metotları kısaca tanıtılmış ve her metodun avantajları ve dezavantajlarından söz edilmiştir. Tasarım hesaplamalarını kolaylaştıracak daha gelişmiş demir kaybı modeli öneriler yapılmıştır. Bunun devamında lamine sacların demir kayıplarının ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan metotlar açıklanmıştır.

Demir kayıpları tahmini konusunda ilk çalışmalar Steinmetz tarafından yapılmıştır. Steinmetz'in orijinal demir kaybı modeli Denklem (3.1),

$$P_c=kf^{\alpha}B_m^n \tag{3.1}$$

tek bileşenden oluşmaktadır. Denklemde (3.1)'deki α,n ve k kat sayıları deneysel olarak elde edilen sabitlerdir. Jordan yaptığı çalışmalarla kayıpların iki ayrı bileşenden oluştuğunu göstermiştir. Bunlara histerezis ve girdap akımları kaybı(ya da klasik kayıplar) adını vermiştir ve Denklem (3.2)'yi,

$$P_c=k_hfB_m^n+k_ef^2B_m^2 \tag{3.2}$$

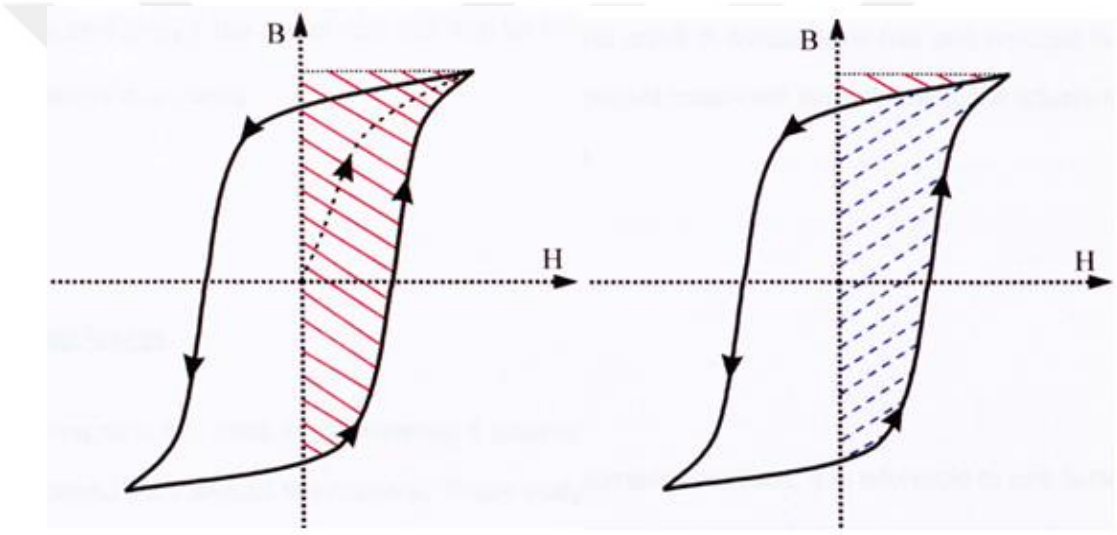
sunmuştur. Denklem (3.2)'deki k_h, k_e parametreleri sırasıyla histerisiz ve girdap (eddy) akımları kayıpları katsayıları, n ise Steinmetz sabiti olarak adlandırılır ve her zaman 1,6' ya eşit kabul edilir. Denklemde f frekans değeri, B_m ise manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerini göstermektedir. Ancak ilerleyen yıllarda Bertotti, Steinmetz'in denklemini temel alarak 3 terimli yeni kayıp modelini Denklem (3.3)'ü,

$$P_c=k_hfB_m^n+k_ef^2B_m^2+k_{ex}f^{1,5}B_m^{1,5} \tag{3.3}$$

sunmuştur. Bu denklemde anormal kayıplar ya da ilave kayıplar adını verdiği ilave bir kayıp eklemiştir. Bu kayıp alternatif manyetik alan şiddeti etkinde alan duvarlarının hareketi sonucu oluşan girdap akımları sonucu oluşmaktadır. Denklem (3.3)'deki n değeri Steinmetz denkleminde olduğu gibi sabit bir değer değildir. Malzeme cinsine göre değişmektedir. Günümüzdeki kayıp ayırım temeline dayalı geliştirilen kayıp denklemlerinin temelini oluşturmuştur. Motor tasarım programlarında kullanılan en yaygın modeldir. Bu denklem ile oluşan hatalar %30'a kadar çıkabilmektedir. Bu denklemdeki katsayılar eğri uydurma yöntemine göre bulunmaktadır. Ancak k_h malzemenin içyapısı ve geçirgenliği ile bağlantılıdır. Burada k_e sabit olarak düşünülür fakat yüksek frekanslarda deri etkisi hesaba katılmalıdır. k_{ex} ise hem frekans hem de akı yoğunluğuna göre değişmektedir. Sonraki bölümlerde bu kayıp ayırım metodu bileşenleri daha detaylı açıklanmaktadır.

3.1.1. Histerezis kayıpları

Histerezis laminasyon materyalinin mükemmel olmayışından kaynaklanır ve uygulanan manyetik alan ortadan kalktığında materyal üzerinde az miktarda artık manyetizasyon tutar. Materyal tamamen demanyetize edildiğinde alanlar rastgele hizalanırlar. Yeterince büyük manyetik alan uygulandığında, bütün alanlar aynı hizaya gelene kadar hizalanmaları devam eder. Uygulanan manyetik alan ortadan kalkarsa hizalanmış haldeki alanlar serbest hale geçerler fakat bazı alanlar serbest hale geçmez, hizalı durumunu korurlar. Bu sebepten malzeme üzerinde belli seviyede manyetizasyon kalır.



Şekil 3.1. Histerezis etkisinden kaynaklı enerji kaybı[35]

Şekil 3.1.'deki örnekte malzemeye H manyetik alanı uygulanmıştır. Kırmızı taralı alan, H manyetik alanının uygulanması için gerekli olan enerjiyi göstermektedir. Referans oluşturması için başlangıç manyetiklenme eğrisi noktalı çizgi ile gösterilmiştir. Uygulanan alan ortadan kalktığında Şekil 3.1.'deki ikinci eğriden görüldüğü gibi malzeme bir miktar manyetizasyonu üzerinde tutmaktadır. Manyetik alan ortadan kalktığında geri kalan enerji böylece başlangıçta kullanılandan daha azdır. Bu enerji Şekil 3.1.'de ikinci eğrideki kırmızı taralı alanla orantılıdır. Kaybolan enerji ise mavi taralı alanla orantılıdır. Buradan görülebilir ki bir tam manyetizasyon periyotunda, manyetizasyon için harcanmış enerji ile kalan manyetik enerji arasındaki fark histerezis eğrisinin kapladığı alana eşit olmaktadır. Uyartım frekansına göre güç kaybı, enerji kaybı ile bağıntılıdır. Verilen frekansa göre güç kaybı Denklem (3.4)'e,

$$P_h = \oint H.dB \tag{3.4}$$

göre ölçüm sonucu elde edilen histerezis eğrisinin alanından hesaplanır. Steinmetz 1900'ların başında demir kayıplarının oluşumu üzerine öncü çalışmalar yapmıştır fakat çalışmalar değişmez deneyler ve düşük seviyeli akı yoğunluğu ile sınırlı kalmıştır. Bulunan model sadece bu koşullar altında doğru sonuç vermiştir. Steinmetz tarafından bulunan histerezis kaybı Denklem (3.5),

$$P_h = k_h f B_m^n \tag{3.5}$$

akı yoğunluğunun tepe değeri ile orantılıdır ve bugün elektrik makinalarındaki histerezis kaybı için sıklıkla kullanılır fakat bu eşitlik sinüzoidal ve düşük miktardaki manyetik akı yoğunluğunda doğru sonuçlar vermektedir. Steinmetz n parametresini 1,6 olarak tanımladı fakat deneyler göstermiştir ki gerçekte kullanılan malzemeye göre 1,5 ila 2,5 arasında herhangi bir değer olabilir. k_h ise manyetik malzemenin cinsine ve hacmine bağlı bir katsayıdır. Steinmetz deneylerini sadece DC ölçümlerle bulmuştu, frekansa bağımlı olması da daha sonra eklenmiştir.

3.1.2. Klasik girdap akımı kayıpları

Girdap akımı kayıpları aslında nüve içerisinde meydana gelen direnç kayıplarıdır ve Denklem (3.6),

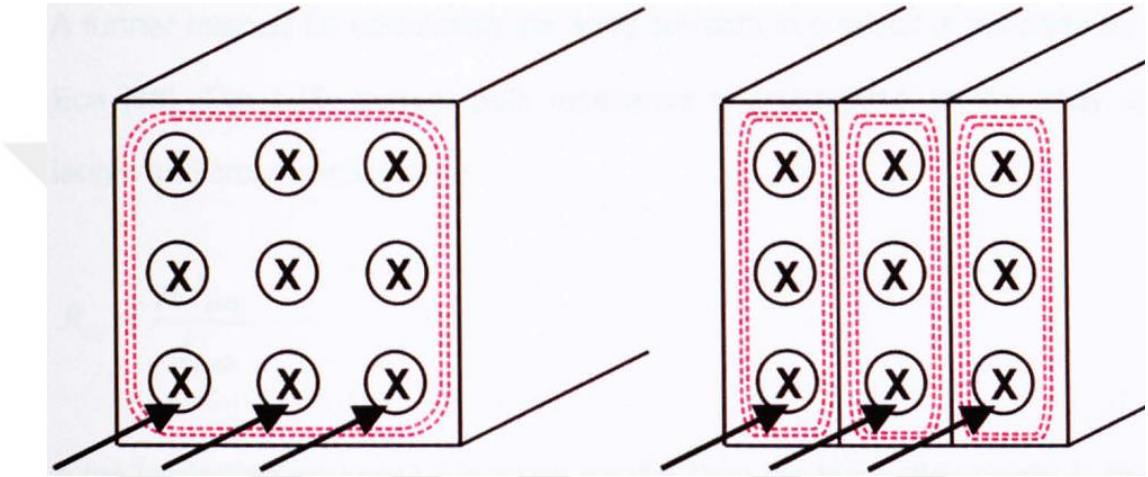
$$\frac{I^2}{R} \tag{3.6}$$

ile gösterilir. Manyetik malzeme üzerinden alternatif manyetik akı aktığı zaman, bu malzeme içindeki uygun kapalı yörüngelerde girdap akımlarının oluşmasına sebep olur. Bu girdap akımları manyetik alan indüklemesine karşı koyarlar ve sonuç olarak sıcaklık yükselmesi oluşur ve malzemenin akı kapasitesi düşer. Girdap akımı kayıpları uygulanan gerilimin karesi ile orantılıdır ve Denklem (3.7)'e,

$$P_e \propto f^2 B_m^2 \tag{3.7}$$

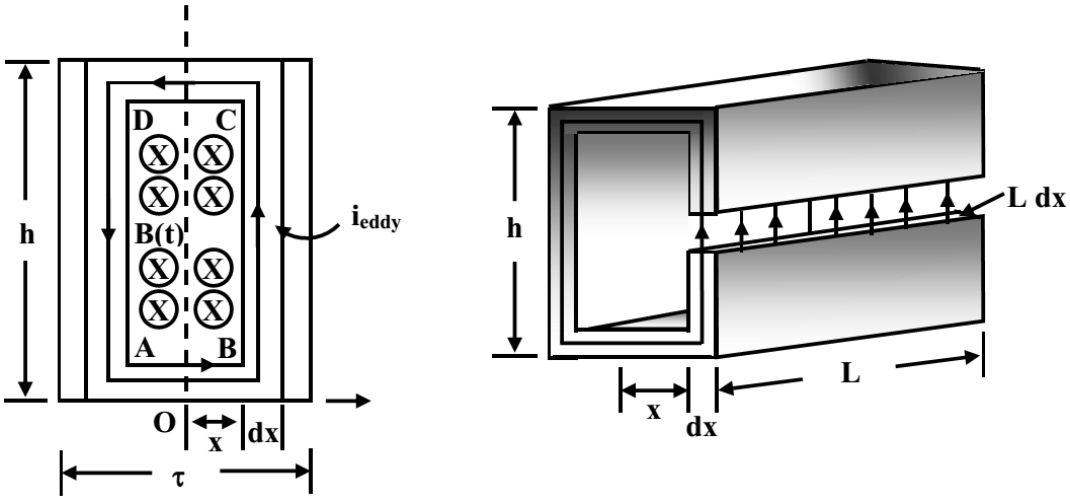
göre değişmektedir. Bu sebeple oluşan girdap akımlarını düşürmek için, bütün nüve yerine laminasyonlu gövde kullanılması tavsiye edilir. Şekil 3.2'de bulunan ilk çizim

bütün nüvedeki girdap akımlarının yörüngesini göstermektedir. Akımlar geniş bir alan çevrelediği için malzeme üzerinde indüklenen elektromotor kuvveti de büyük olur. Şekil 3.2'de bulunan ikinci çizimde gösterildiği gibi laminasyonlu gövde kullanılırsa vernik kaplı laminasyon yüzeyleri yalıtılmış tabaka oluşturur ve böylece laminasyonlar arasında girdap akımları akmaz. Girdap akımlarının çevrelediği yol tek laminasyonla sınırlıdır bu da oluşan elektromotor kuvvetini düşürmektedir. Her bir laminasyon toplam akıyı eşit olarak üzerlerinde taşır fakat güç kaybı düşürülmüş olur.



Şekil 3.2. Laminasyonsuz ve laminasyonlu gövdede girdap akımları[35]

Girdap akımları kaybı analitik hesaplarla ya da sonlu elemanlar analizi ile hesaplanabilir. Analitik hesaplama için Şekil 3.3 gösterilen laminasyon ele alınmıştır. Bu laminasyonun kalınlığının τ, yüksekliğinin h, uzunluğunun ise L olduğu gösterilmektedir. Bu laminasyon ölçülerinde τ'nun L ve h değerlerinden oldukça küçük olduğu düşünülmektedir. Burada yapılacak olan hesaplamalarda laminasyon malzemesinin ideal manyetik dağılımlı bir malzeme olduğu varsayılmaktadır. Manyetik özelliklerin malzemenin her yerinde eşit olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.3. Laminasyonlarda girdap akımları hesaplama kesitleri[34]

Laminasyon üzerindeki herhangi bir ABCDA kapalı yörüngesinden akan girdap akımı, bu alandan akan akım bile bu yörüngenin direncine eşit olacaktır. Laminasyonun ortasından bir eksen çizdiğimizde B noktasının merkeze uzaklığı x olarak gösterilmiştir. Ele alınan yörüngenin kalınlığının ise dx olduğunu gösterilmiştir.

ABCDA kapalı yörüngesinin akıya dik alanı Denklem (3.8)'da,

$$A=h2x \tag{3.8}$$

gösterildiği gibidir. Bu alandan $B=B_m\sin(wt)$ büyüklüğünde bir manyetik akı yoğunluğu geçtiğini varsaydığımızda oluşan akı miktarı Denklem (3.9)'de,

$$\phi=2hxB_m\sin(wt) \tag{3.9}$$

gösterildiği gibi olacaktır. İndüklenen gerilimin etkin değeri ise akının türevi alınarak bulunan değerin karekökü hesaplandığında bulunur ve Denklem (3.10)'deki,

$$E=\sqrt{2}\pi fB_m2hx \tag{3.10}$$

gibi elde edilmektedir. Bu yörüngenin direnci ise özdirenç ile yörünge uzunluğunun çarpımının yörünge alanına oranıyla hesaplanır, Denklem (3.11)'deki,

$$R_{yol}=\rho\frac{(2h+4x)}{Ldx} \tag{3.11}$$

gibi elde edilir. $\tau << h$ olduğu düşünüldüğünde Denklem (3.11)'i, Denklem (3.12),

$$R_{yol} = \rho \frac{2h}{Ldx} \tag{3.12}$$

olarak kabul edilebilir. Bu durumda ele alınan dx kesiti için girdap akımı kaybı Denklem (3.13)'de,

$$dP_e = \frac{E^2}{R_{yol}} = \frac{E^2 L d_x}{\rho 2h} \tag{3.13}$$

gösterildiği gibi elde edilir. Toplam girdap akımı kayıplarını bulmak için Denklem (3.13)'de gerilim ifadesi yerine yazılır ve x'e göre integral alınırsa Denklem (3.14),

$$P_e = \frac{4\pi^2 f^2 B_m^2 hL}{\rho} \int_{x=0}^{\tau/2} x^2 dx = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 \tau^2}{6\rho} (hL\tau) \tag{3.14}$$

elde edilir. hLτ ifadesi ele alınan laminasyon malzemenin hacim değeridir. Anlaşılacağı üzere girdap akımı kayıpları malzemenin hacmine ve malzemenin öz iletkenliğine ve laminasyon kalınlığına bağlıdır. Denklem (3.3) ile denklem (3.14)'yi incelediğimizde girdap akımları kayıp katsayısı Denklem (3.15)'deki,

$$k_e = \frac{\pi^2 \tau^2}{6\rho} (hL\tau) \tag{3.15}$$

gibi elde edilmektedir. Yukarıda anlatılan metot girdap akımı kayıplarının başta laminasyon kalınlığı olmak üzere laminasyon malzemesinin özelliklerine bağlı olduğunu göstermektedir. Tavlama gibi ısıl yöntemler ile laminasyon malzemesinin direnci arttırılarak girdap akımı kayıpları azaltılmaya çalışılmaktadır.

3.1.3. Anormal kayıplar

Yukarıda anlatılan girdap akımı hipotezinde manyetik alanın numune boyunca homojen dağıldığı varsayılmaktadır. Histerezis ve girdap akımı kayıplarını toplayarak bir demir kaybı tahmini yaptığımızda bu bize gerçek kayıp değerinden biraz daha az bir değer üretir. Hesap edilen ve ölçülen değerler arasındaki fark genel olarak anormal ya da ilave kayıplar (abnormal, excess) olarak adlandırılır ve malzemenin alanlardan oluştuğu düşünülerek açıklanır.

Anormal kayıplar ilk olarak Bertotti tarafından ortaya atılmıştır. Bertotti Denklem (3.2)'deki ifadeyi frekansa bölündüğünde Denklem (3.16)'yı,

$$\frac{P_c}{f}=k_h B_m^n+k_e B_m^2 f \tag{3.16}$$

elde etmiştir ve sonuca göre her periyottaki kayıp değerinin frekansla doğru orantılı olması gerekmektedir. Fakat yapılan çalışmalarda frekansın değişmesiyle, bir periyottaki kayıp değerinin doğrusal değişmediğini gözlemlenmiştir. Bu durum Denklem (3.2) ile hesaplanamayan ilave kayıpların varlığını göstermektedir. Denklem (3.2) makroskobik yaklaşımla elde edilmiş bir denklemdir ve malzemenin içyapısına bağlı mikroskobik özellikleri içermemektedir. Girdap akımları kaybı hesaplanırken malzemenin manyetik özelliklerinin malzemenin her yerinde eşit dağıldığı varsayılmaktadır. Bertotti alan duvarları teorisi kapsamında mikroskobik manada uzun çalışmalar yapmıştır ve manyetik nesne adını verdiği yeni bir fiziksel kavram sunmuştur. Alan teorisine göre manyetik malzemeler aynı yönelimli birçok atomun oluşturduğu ve birbirinden alan duvarları ile ayrılmış farklı alanların birleşmesinden oluşmaktadır. Günümüz teknolojisiyle malzeme yüzeyindeki farklı yönelime sahip alanlar görülebilmektedir. Bu alanlar dışarıdan uygulanan manyetik alan şiddeti etkisinde genişler ve büzülürler. Bu hareketlerin sonucunda manyetik malzemelerde kayıplar ve ısı oluşmaktadır.

Bertotti Denklem (3.16)'dan daha iyi sonuç üreten Denklem (3.17)'yi,

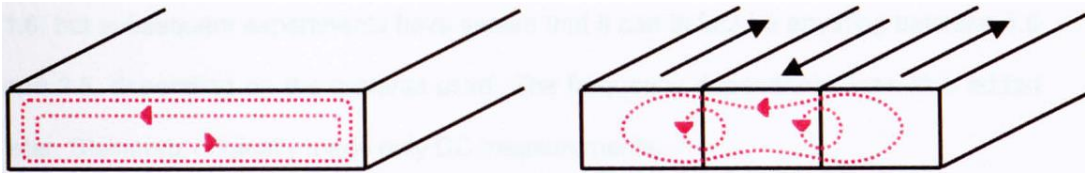
$$\frac{P_c}{f}=k_h B_m^n+k_e B_m^2 f+k_{ex} B_m^{1,5}\sqrt{f} \tag{3.17}$$

önermiştir. Burada k_{ex} ilave kayıp katsayısını ifade etmektedir ve Denklem (3.18)'de,

$$k_{ex}=8\sqrt{\sigma G A V_0} \tag{3.18}$$

Gösterildiği gibi malzemenin içyapısı ve kesit alanına bağımlı bir değerdir. Denklemde G≈0,1356 büyüklüğünde malzeme içyapısına bağlı birimsiz bir katsayıdır, V_0 değerleri de malzeme içyapısına bağlı katsayıdır, A malzemenin kesit alanı olarak alınır.

Manyetizasyon sırasında, malzeme üzerinde bulunan alanlar şekil değiştirir, alanların bazılarının boyutları alanlar arasındaki duvarların hareketi sonucu büyür. Alan duvarlarının hareketi bölgesel akı yoğunluğunda değişiklik meydana getirir ayrıca Şekil 3.4'de gösterildiği gibi bölgesel girdap akımına neden olur. Manyetik alan bu sebeple her yerde homojen değildir aksine alan duvarları etrafındaki alanlarda yoğunlaşır.



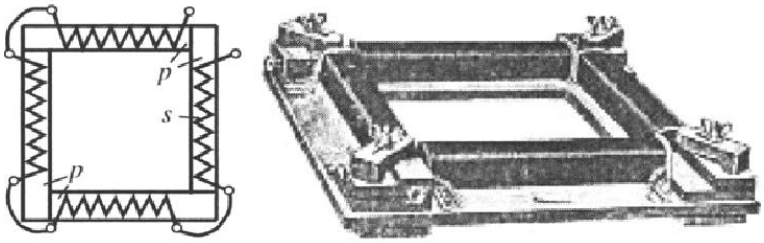
Şekil 3.4. Normal ve alan duvarları hareketiyle oluşan ilave girdap akımları[35]

4. MANYETİK KAYIP ÖLÇME STANDARTLARI

4.1. 25 cm Epstein Çerçevesi

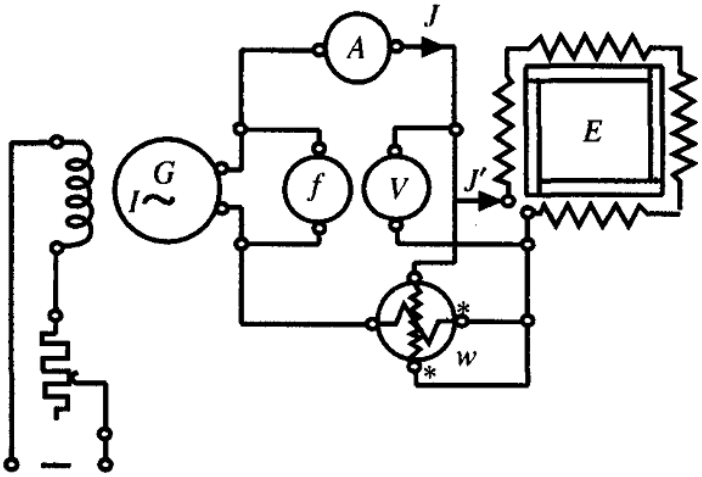
Manyetik kayıpların ölçülmesine yönelik ilk çalışmalar toroid ya da halka şeklindeki malzemeler üzerinde yapılmaktaydı. Manyetizasyon ve ölçme sargılarının numune üzerine sarılmasıyla ölçüm yapılırdı ve çok emek isteyen bir ölçüm şekliydi.

1900 yılında Joseph Epstein (PhD 1887 Leipzig) bu zorlukları ortadan kaldıracak bir tasarım önermiştir. Önerdiği tasarımda her birinde 150 adet tek sargı bulunan 4 adet bobin sarılı kol, kare şeklinde dizilmişti ve sarımlar birbiri ile seri bağlanmıştı. Toplamda 10kg olacak şekilde 50x3cm ölçülerindeki numuneler yığın halinde istiflenip bobinlerin içine yerleştirilmişti ve köşelerden çıkan uçlar alın alına temas etsin diye tahta ayaklarla birbirine bastırılmışlardı. Bu şekilde kapalı manyetik devre oluşturulmuştu. Bu düzenek 1903 yılında Alman standartı olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.1'de Epstein'in ilk tek sargılı tasarımı görülmektedir.



Şekil 4.1. Epstein'in ilk test düzeneği elektriksel devresi ve dış görünüşü[33]

Bu düzenekte ölçüm yapmak için watmetrenin akım sargıları ile ampermetre, düzeneğin sargılarına seri bağlanırdı. Watmetrenin gerilim sargıları ile etkin değer ölçen voltmetre ise düzeneğin sargılarına paralel bağlanırdı. Şekil 4.2'de bağlantı devresi gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Tek sarımlı Epstein düzeneğinde ölçüm devresi[33]

Uygulanan manyetik alan yoğunluğundaki kayıpları ölçebilmek için, düzeneğin toplam sargı gerilimi ölçülüyordu. Bu ölçülen gerilim Denklem (4.1),

$$E=4k_{ff}fN_pAB_m \tag{4.1}$$

ile hesaplanır. Denklemdeki k_{ff} emk eğrisinden elde edilen form faktörü katsayısıdır ve sinüzoidal gerilimle beslenmesi durumunda 1,11 değerine eşittir. f besleme frekansı, N_p düzenekteki sargı sayısı, A düzenekteki numunelerin kesit alanı, B_m manyetik alan yoğunluğunun tepe genliğidir.

Voltmetre değeri okunarak istenen gerilim ayarlandıktan sonra, watmetre ve ampermetre değerleri not edilirdi. Sonuç olarak ölçülen manyetik kayıp Denklem (4.2),

$$P_c=P_w-\frac{U^2}{r_{eş}}-I_p^2r_3 \tag{4.2}$$

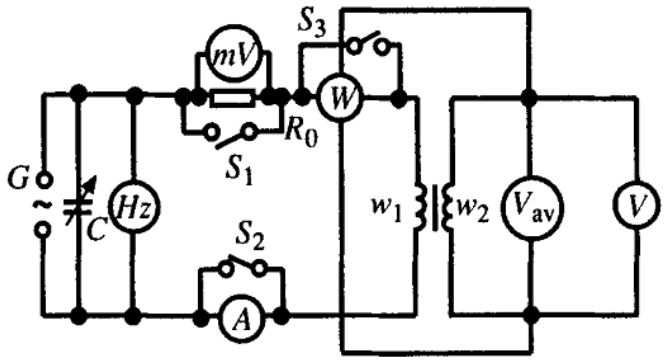
ile hesap edilirdi ve P_c numunenin manyetik kaybı, P_w watmetreden ölçülen güç, U düzenek sargılarından ölçülen etkin gerilim değeri, I_p uyartım akımı, r_3 düzenek sargılarının toplam direnci, $r_{eş}$ ise ölçüm cihazlarının eş değer direncidir ve Denklem (4.3),

$$\frac{1}{r_{eq}}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2} \tag{4.3}$$

ile hesaplanır. Burada r_1 voltmetrenin sargı direnci, r_2 ise watmetrenin voltaj ölçüm sargısının direncidir. Denklem (4.2) formülünden görüldüğü kayıp miktarı watmetreden ölçülen güçten, ölçüm aletlerinde tüketilen güç ile düzenek sargılarında tüketilen gücün çıkartılmasıyla elde edilirdi.

Manyetik indüklenme ölçülmesi sıranda ektin değer ölçen voltmetre sargılara paralel bağlanırken, watmetre ve voltmetre devreden çıkartılırdı. Diğer yandan dc manyetik indükleme ölçüleceği sırada ise düzenek sargılarına balistik galvanometre bağlanırdı.

J. Epstein daha sonra bu düzeneğine alma sargısı adını verdiği ikinci sargıyı ekleyerek geliştirdi. Geliştirdiği düzeneğin manyetik devresinde bir değişiklik yoktu fakat yeni düzenekte manyetizasyon sargılarındaki ısı kaybı bileşeni hesap dışında kalmıştır. Şekil 3'de Esptein'in geliştirdiği ikinci düzeneğin ölçüm devresi görülmektedir. Watmetrenin gerilim ölçme bobinleri, indükleme bobinlerine paralel bağlanmıştır. Ortalama ve etkin değer voltmetreleri yine indükleme sargılarına paralel bağlanmıştır. Böylece $I_p^2 r_3$ bileşeni hesap dışında kalmaktadır. Fakat watmetrenin gerilim ölçme bobini direnci ile indükleme sargı dirençleri hesaba katılmaktadır.



Şekil 4.3. Sekonder sarımlı Epstein düzeneğinin test devresi[33]

Şekil 4.3.'deki devreyi kullanarak manyetik ölçüm yapmak için ilk olarak ortalama gerilim ölçen voltmetre ile gerilim değeri ölçülür(U=E). Ölçülen gerilim Denklem (4.4),

$$U=E+\Delta'U-\Delta''U-\Delta'''U \quad (4.4)$$

ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.1)'de k_{ff} değerini yerine yazarsak Denklem (4.5),

$$E=4,44fAN_sB_m \quad (4.5)$$

elde edilir. Denklemlerdeki; E indükleme sargılarında oluşan EMK gerilimi, Δ' hava tarafından harcanan manyetik akı düzeltmesi, Δ'' ölçü aleti kalibrasyonu düzeltmesi, Δ''' alıntı sargılarındaki gerilim düşümü düzeltmesidir. Eğer denklemdeki $\Delta'U-\Delta''U-\Delta'''U/E < \%0,2$ ise ihmal edilmektedir. Bu durumda güç kaybı Denklemi (4.6)'daki,

$$P_c=\left(P_w\frac{N_p}{N_s}-\frac{E^2}{r_{eş}}\right)\left(1+\frac{r_2}{r_{eş}}\right) \quad (4.6)$$

şekli almaktadır. Bu denklemde; P_c güç kaybı miktarını, N_p primer sargı sayısını, N_s sekonder sargı sayısını, E^2 etkin sekonder gerilimini, $r_{eş}$ sekondere seri bağlanan voltmetre ve watmetre dirençlerinin eşdeğer direnci, r_2 sekonderdeki watmetre direncidir. Bu denklemde $r_2/r_{eş}$ oranı 0,002 değerinde küçük ise hesaba alınmamalıdır.

İlerleyen dönemde 1936 yılında Epstein'in düzeneği 25cm'lik çerçeve halini almıştır. Alıntı sargıları korunmuştur fakat sargılar 4 adet olan kolların boyunca homojen olarak sarılmıştır. 1952 yılında 700 sarımlık Epstein düzeneği Amerikan Standartı olarak oluşturulmuştur.

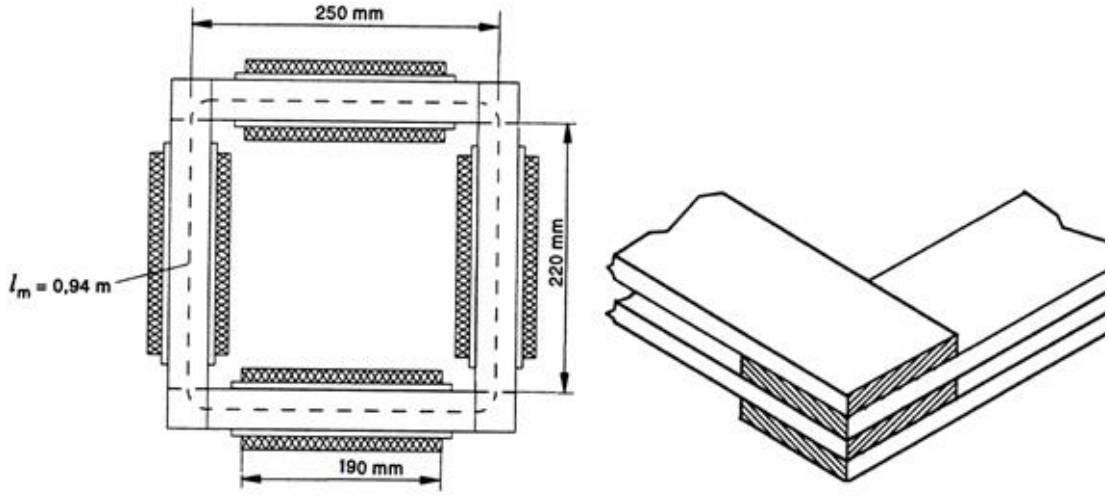
25 cm Epstein Çerçevesi, elektriksel çelik sacların manyetik karakteristiğinin ölçülmesinde en çok kabul görmüş ve kullanılan ölçüm yöntemidir ve ASTM A343 ve IEC 60404-2 tarafından standartı oluşturulmuştur. 25Hz ile 400Hz arasındaki frekanslarda ve taneciği yönlendirilmiş saclar için 1,8T, taneciği yönlendirilmemiş saclarda 1,5T değerine kadar ve 12000A/m manyetik alan şiddeti değerine kadar ölçüm yapılabilmektedir.

Yapısı dört adet bobinin kare oluşturacak şekilde konumlandırılmasıyla oluşturulur. Bobinler primer(manyetiklenme) ve sekonder(gerilim) sargılarından oluşmaktadır. Bobinler manyetik ve iletken olmayan boyutları eşit dört karkas üzerine sarılırlar. Bu

karkasların ortası testi yapılacak numunelerin dizileceği ölçüde boş olmalıdır. Numuneler kolların içine eşit sayıda ve köşelerde Şekil 4.4'de gösterilen bindirme yöntemine göre dizilirler ve manyetik nüve oluşturulmuş olur. Şekil 4.4'de kesik çizgi ile de gösterildiği gibi etkin manyetik yol uzunluğu 0,94m'dir. Dört kol olarak bölünen sargılarda eşit sarım sayısına sahip bobinler bulunur. Kollarda bulunan ayrık bobinlerin primer sargıları birbirine sıralı şekilde seri, sekonder sargıları da aynı şekilde sıralı olarak seri bağlanırlar. Bu şekilde toplamda 700 sarımdan oluşan primer ve 700 sarımdan oluşan sekonder sargıları elde edilmiş olur.

Manyetiklenme bobinlerinin kesit alanı bobin karkasına bağlıdır. Bobin karkasının iç kesit alanı numunelerin kolay dizilmesi için numune kesit alanından daha büyüktür. Bu sebeple sekonder sargılarında indüklenen gerilim sadece numune üzerinden akan akıyla orantılı değildir. Hava akısından kaynaklı bir indükleme de meydana gelir ve bu değerin çıkartılması gereklidir.

Hava akısı dengeleme bobini bu hava akısından kaynaklı olan indüklemeyi dengelemek için kullanılır. Bu dengeleme bobininin primer sargısı, Epstein Çerçevesi'nin primer sargıyla aynı yönlü ve seri olarak bağlanır, sekonder sargısı ise Epstein Çerçevesi'nin sekonder sargısına seri fakat zıt yönlü bağlanır. Hava akısı dengeleme bobininin indüktası ayarlıdır. Bu ayar öyle bir yapılır ki test düzeneğinde numune yokken hava akısı dengeleme bobininin sekonder sargısında indüklenen gerilim, Epstein Çerçevesi'nin sekonder sargısında indüklenen gerilimi sıfırlayacak büyüklükte olmalıdır.



Şekil 4.4. Epstein çerçevesi manyetik yol uzunluğu ve numune dizim yöntemi[28]

Epstein Çerçevesi'nde kullanılacak numuneler 30mm genişlikte ve en az 280mm en fazla 305mm uzunlukta olmalıdır. Numuneler kollara eşit sayıda dizilmelidir ve köşelerde oluşacak dizilim yapısı Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi olmalıdır. Numune toplam ağırlıkları 0,5kg ile 2kg arasında olmalıdır. Burada kullanılan Epstein Çerçevesi'nin hangi ağırlığa göre üretilmiş olduğu önemlidir.(0,5kg-1kg-2kg). Ölçümler sırasında kullanılacak numunenin sayısı kalınlığına göre değişmekle birlikte kalın numuneler için toplam numune ağırlığı 240gr'ın altında olmamak koşulu ile en az 12, ince numuneler için ise en fazla 176 adet numune kullanılması gerekebilir. Köşelerde meydana gelecek temas zayıflığını gidermek için köşelere 100gr gibi bir ağırlık konulmalıdır.

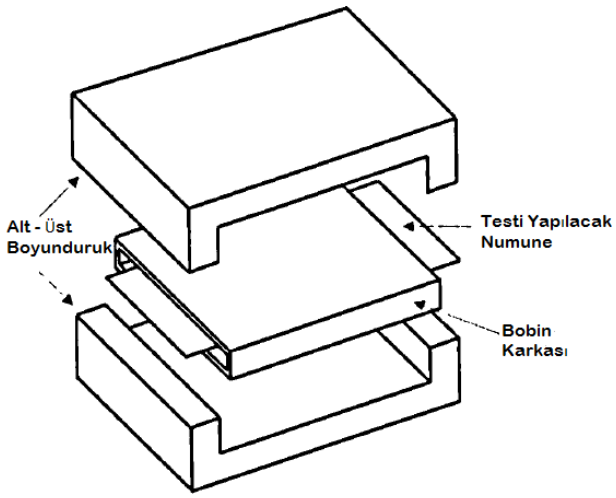
Epstein Çerçevesi'nin bazı olumsuz yönleri de mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Çok sayıda numune kullanıldığı için hazırlaması zaman alıcıdır.
- Diğer test yöntemlerine göre daha fazla malzeme kullanılarak test yapılmaktadır.
- Taneciği yönlendirilmiş malzemeler kullanılarak ölçüm yapılacaksa, numunelerin kesim doğrultusu ile haddeleme doğrultusu arasında çok az toleranslar olmalıdır.
- Test düzeneğinin yapısından dolayı, oluşan manyetik alan homojen olmaz.
- Numune üzerindeki akı dağılımı dengeli değildir, köşelerde üst üste binmeden dolayı kaçak akılar ve dönel akı vektörleri oluşur.

Epstein Çerçevesi'nin bu olumsuzlukları yeni test yöntemlerinin gelişmesine sebep olmuştur ve son zamanlarda Tek Sac Test yöntemi en çok kullanılan alternatif yöntem halini almıştır.

4.2. Tek Sac Test Yöntemi(Single Sheet Tester - SST)

Tek Sac Test Yöntemi, Epstein Çerçevesi yöntemine göre sağladığı bazı avantajlardan dolayı son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Bu yöntemde daha az miktarda malzeme kullanılır ve kolay üretilebilir, malzeme yüzeyi daha geniştir ve böylece test malzemesinin yüzeyinin daha homojen olması sağlanmaktadır. Malzemede kesme gerilmelerinin etkileri daha az görülür. Malzemenin ölçümü tek bir sac ile yapıldığından dolayı Epstein Çerçevesi'ndeki dizme işlemi gibi süre alıcı değildir. Bu yöntem Amerikan(ASTM A804/A804M-99) ve uluslararası ölçüm standartları(IEC 60404-3) tarafından kabul görmüştür. Taneciği yönlendirilmemiş malzemeler için 0,8T ile 1,6T, taneciği yönlendirilmiş malzemeler için 0,8T ile 1,8T arasında ölçümler yapılmaktadır. Manyetiklenme sargılarındaki sıcaklığın yükselmesi akı yoğunluğunun tepe değerini sınırlar. Bu sebeple standart bir nüvenin maksimum alanı 12000 A/m civarındadır.[29][31]

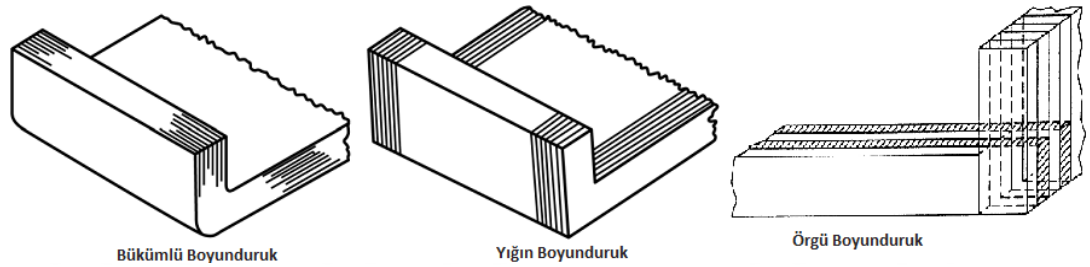


Şekil 4.5. Tek sac ölçüm yöntemi düzenek yapısı[31]

Tek Sac Test cihazının tek boyunduruklu ve Şekil 4.5'de görüldüğü gibi çift boyunduruklu olarak iki farklı yapıda olanı vardır. Tek boyunduruklu olanında C şeklideki boyunduruğun en tepesine ölçüm yapılacak numune yerleştirilir. Çift boyunduruklu olanında ise iki adet C şeklinde boyunduruk bulunur. Testi yapılacak

numune bu iki boyunduruğun ortasına yerleştirilir. Çift boyunduruklu olanı daha doğru sonuçlar üretir testlerde daha sık kullanılır.

Boyundurukları oluşturan C şeklideki nüveler ya taneciği yönlendirilmiş silikon sacdan ya da nikel demir alaşımı malzemeden üretilir. Boyunduruğu oluşturacak saçların kesim ve birleşim şekline göre boyunduruklar Şekil 4.6'da gösterildiği gibi bükümlü olarak, yığın şeklinde birleştirilerek ya da kısa uzun kesilmiş saclarla trafo benzeri örülerek üretilebilir. ASTM standarttı bükümlü tip olanı önerirken IEC standarttı ise örgü tip boyunduruğu oluşacak girdap akımlarını azalttığı için önerir. Önerilen boyunduruk boyutları standartlara göre değişmektedir. Boyunduruk uzunluğu ASTM standartı için 360mm iken IEC standartı için boyunduruk ölçüsü 500mm'ye 500mm'dir ve kutup yüzeyleri kalınlığı en az 25mm'dir[35].



Şekil 4.6. Tek sac yöntemi boyundurukları üretiminde laminasyon dizilimleri[31][29]

Epstein Çerçevesi'ne benzer olarak iki adet sargıdan oluşur. Dış sargıya primer(manyetiklendirme) sargısı, içte yer alan sargıya ise (sekonder)indüklenme sargısı denir. Primer sargısı bir birine paralel bağlanmış birçok katman çeklinde sarılabilir. Sekonder sargısı, primer sargısı ile oluşturulan manyetik akının yarattığı indüklemeyi ölçmek için kullanılır. Bu sebeple sekonder sargısı numuneye olabildiğince yakın sarılır. Fakat malzemeyi rahat bir şekilde sargıların arasına sokabilmek için sargıları manyetik olmayan bir karkas üzerine sarmak gerekir. Bunun sonucunda Epstein Çerçevesi'nde de olduğu gibi sekonder sargılarında oluşan gerilim sadece numuneden akan akıyla indüklenmiş gerilimden kaynaklı değildir, hava akısından kaynaklı bileşen de içermektedir. Bu kaçak akı bileşeni burada da hava akısı dengeleyici bobin ile giderilir.

Tek Sac Test yönteminde uygulanan manyetik alanın ölçülme yöntemi hakkında farklı görüşler vardır. IEC standartında, Epstein Çerçevesi'nde olduğu gibi manyetiklenme akımı yöntemi kullanılır. Bu yöntem kolay bir ölçüm yöntemidir fakat doğruluk

konusunda yetersizdir. Etkin manyetik uzunluk çenelerin kutuplarının içten içe mesafesi olarak kabul edilir fakat gerçekte bu uzunluk testi yapılan numuneye ve indüklenme seviyesine göre değişir.

Amerikan standartı hem manyetiklenme akımı yöntemini hem de H bobini yöntemini kullanır fakat H bobini yöntemini daha uygun görür. Bu yöntemde iki sargının haricinde H bobini adı verilen ve direkt olarak numune yüzeyine temas eden bir sargı kullanılır. Yöntem H bobinindeki gerilimin eksiksiz olarak integrasyonunu gerektirir ve bu yöntem ilave kaçaklara ve hava akısı bileşenlerine karşı hassastır. H bobinin pozisyonuna göre doğruluk değişir. Bu sebeple çalışmalarda H bobini yönteminde ölçümler 10 kez tam doğrulukla yapılmalıdır. Bu zorluklar sebebiyle manyetiklenme akımı yöntemi hala popüler olarak kalmaktadır.

Tek Sac Test yönteminde yapılacak ölçümlerde bir adet geniş boyutlu numune gerekmektedir. Numunenin eni ölçüm yapılacak düzenekte kullanılan çene genişliğinin %60'ından az olmamalıdır. Numune boyu ise en az çeneler arası dıştan dışa uzunluk kadar olmalıdır. Çenelerden az miktarda taşma kabul edilebilir numunenin rahat bir şekilde yerleştirilmesine imkân veren bir taşma uygundur fakat bunun aşırısına kaçılmamalıdır. Üst çenenin ağırlığından kaynaklı olarak numune yerleştirildiğinde kutup yüzeylerinde aşırı baskı olacaktır. Bu baskıyı önlemek için üst çenenin ağırlığı askı tertibatı ile dengelenmelidir. Dengeleme sonucu numune üzerinde oluşacak kuvvet 100N ile 200N arasında olmalıdır. Testi yapılacak numunenin ölçümden önce mutlaka demanyetize edilmesi gereklidir.

SST yönteminin kullanılabilmesi için Epstein Çerçevesi ile kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu durum ASTM standartına göre hala gerekli olmakla birlikte 1992'den sonra IEC standartına göre bu durum ortadan kalkmıştır.

4.3. Toroid Test Yöntemi

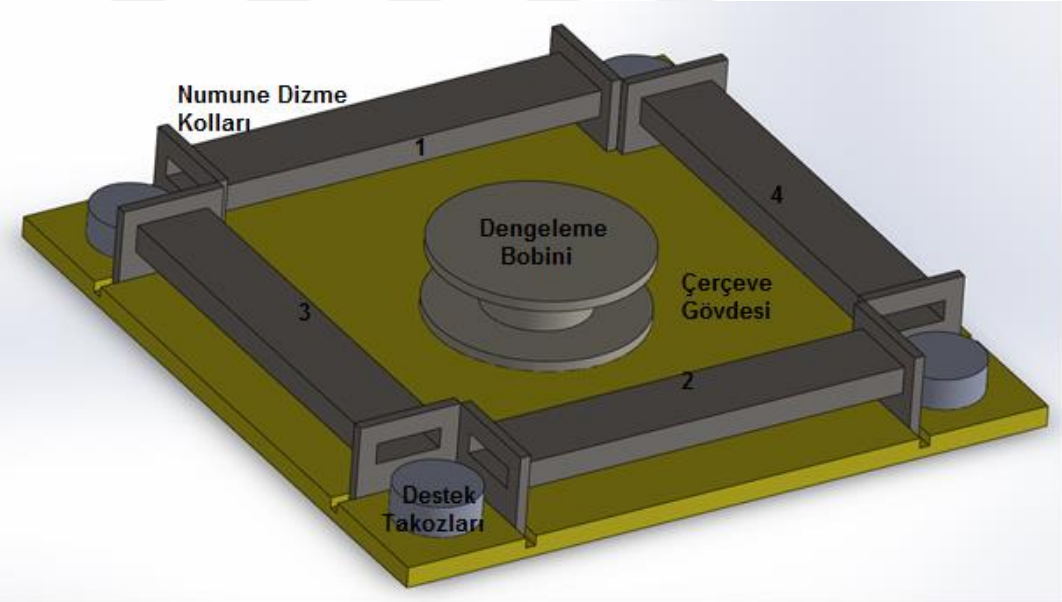
Toroid test yöntemi ASTM927 ve IEC60404-6 ile standartları oluşturulan ve genel olarak halka şeklindeki malzemelerin manyetik özelliklerinin ölçülmesi için kullanılan test yöntemidir. Bu tip malzemeler için Epstein Çerçevesi ya da Tek Sac Test yöntemi için uygun numune oluşturulamaz bu sebeple geliştirilmiş bir yöntemdir. Toroidlerde manyetik akı tamamen kapalı ve dairesel bir yörünge boyunca akmaktadır, bunun

sonucunda relüktans değerleri oldukça düşüktür. Akının izlediği dairesel yol elektrik motorlarının statorlarındaki akı dolaşımına benzemektedir. Bu sebeple motor tasarımcıları tarafından tercih edilen fakat numune hazırlama süreci zor ve uzun süre alan bir test yöntemidir. Bu özelliklerinden dolayı elektriksel sac üreticileri tarafından tercih edilmezler [36].

Toroid test yönteminde de manyetiklendirme ve indükleme bobinleri olmak üzere iki adet sarım bulunur. Bu sarımlardan ilk olarak sekonder sargısı, numune üzerine halka boyunca eşit yayılacak şekilde sarılır, bu sebeple indüklenme sargısının kesit alanı ile malzemenin kesit alanı aynı olur. Manyetiklendirme sargısı ise indükleme sargılarının üzerine sarılır ve yine numune boyunca eşit olarak yayılarak sarılırlar Numunenin iç çap ve dış çap oranı en az 0,82 olmalıdır böylelikle manyetik yol iki çapın ortalaması alınabilir [35].

5. EPSTEİN ÇERÇEVESİ TASARIMI ve ÜRETİMİ

Epstein Çerçevesi yapı olarak aynı yatay düzeleme yerleştirilmiş primer ve sekonder sargılarından oluşan 4 ayrı kolun kare yapı oluşturacak şekilde yerleştirilmesi ve oluşan kare yapının tam merkezine ise yine primer ve sekonder sargıları içeren silindirik yapıdaki dengeleme bobininin yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Standartlarda belirtilen ölçü ve sarım sayılarına bağlı kalmak koşulu ile farklı tasarımlar gerçekleştirilebilir. Şekil 5.1'de tasarımı yapılan Epstein Çerçevesi'nin montaj yapısı görülmektedir. Kare yapının köşelerine, yerleştirilen numunelerin çıkan uçlarında sarkma olmaması için destek olacak takozlar da konulması faydalı olacaktır[28][30].



Şekil 5.1. Tasarlanan Epstein çerçevesi

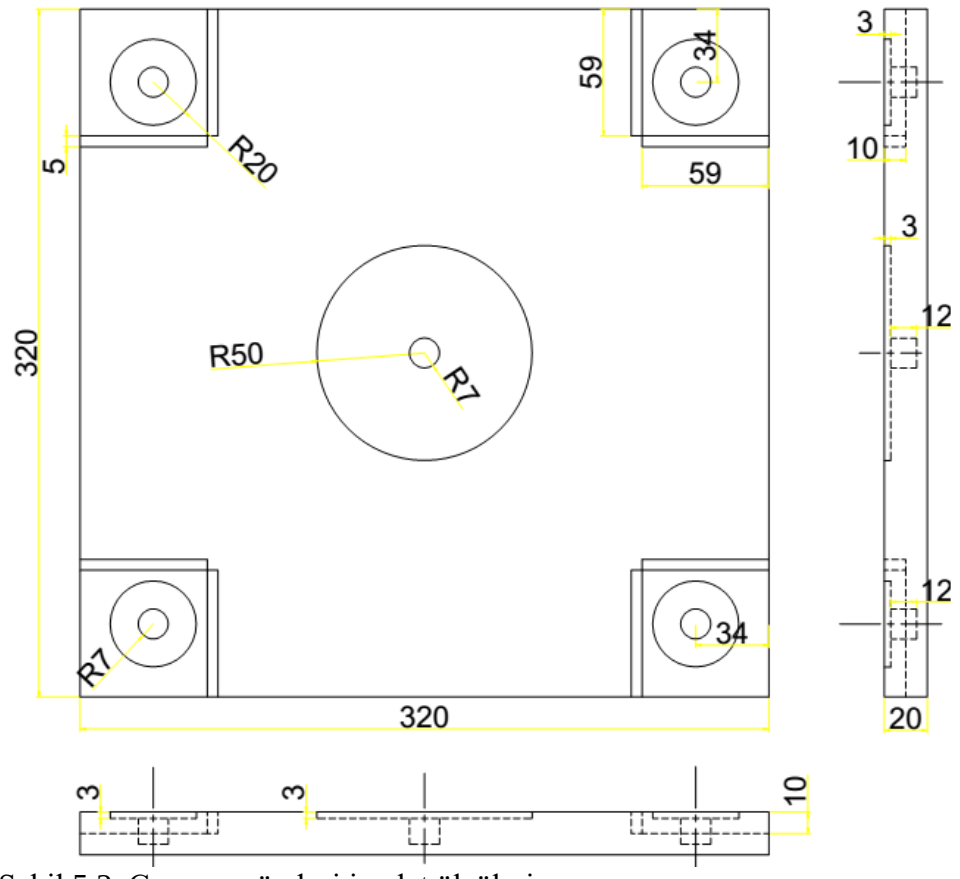
5.1. Çerçeve Gövdesi Tasarım ve Üretimi

Standartlar gereği Epstein Çerçevesi üretiminde yapı malzemeleri iletkenlik ve manyetik özellik taşımayan malzemelerden seçilmelidir. Bu sebeple çerçeve gövdesinde 20mm kalınlıkta plastik esaslı PE300 malzemesi kullanılmıştır. PE300 malzemesi kolay işlenebilme, hafiflik, düşük maliyet, kırılgan olmama ve kayganlık özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle tercih edilmiştir.

Çerçeve gövdesi tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddelenmiştir;

- Numune yerleştirme kolları tam kare oluşturacak şekilde yerleştirilmelidir.
- Birbirine paralel yerleştirilen kolların orta noktaları arasındaki mesafe 250±0,3mm olmalıdır.
- Kollara sarılacak olan bobinlerin sarım boyları ise 191mm'den az olmamalıdır.
- Kullanılan malzeme iletkenlik ve manyetik özellik taşımamalıdır.

Şekil 5.2'de yukarıda bahsedilen özelliklere dikkat edilerek tasarlanan çerçeve gövdesinin tasarım çiziminin ön, sağ ve yan görünüşleri mm cinsinden ölçülü olarak gösterilmektedir. 20mm kalınlıktaki PE300 levha malzeme CNC router ile tasarım ölçülerine göre işlenmiştir.



Şekil 5.2. Çerçeve gövdesi imalat ölçüleri

5.2. Numune Dizme Kolları Tasarım ve Üretimi

Standartlar gereği Epstein Çerçevesinde kullanılan numune ölçüleri 30x300mm ölçülerindedir. Üretilecek kolların bu numuneler içerisine rahat girecek genişlikte olmaları gerekmektedir. Standartlar gereği iç boşluğun genişliği 32mm olmalıdır. İç boşluğun yüksekliği ise IEC standartlarında 10mm, ASTM standartlarında ise üretilecek düzeneğin kaç kiloluk numune ile çalışacağında göre değişmektedir. En fazla 1kg numune ile ölçüm yapacak düzenek için 10mm yeterli bir ölçüdür.

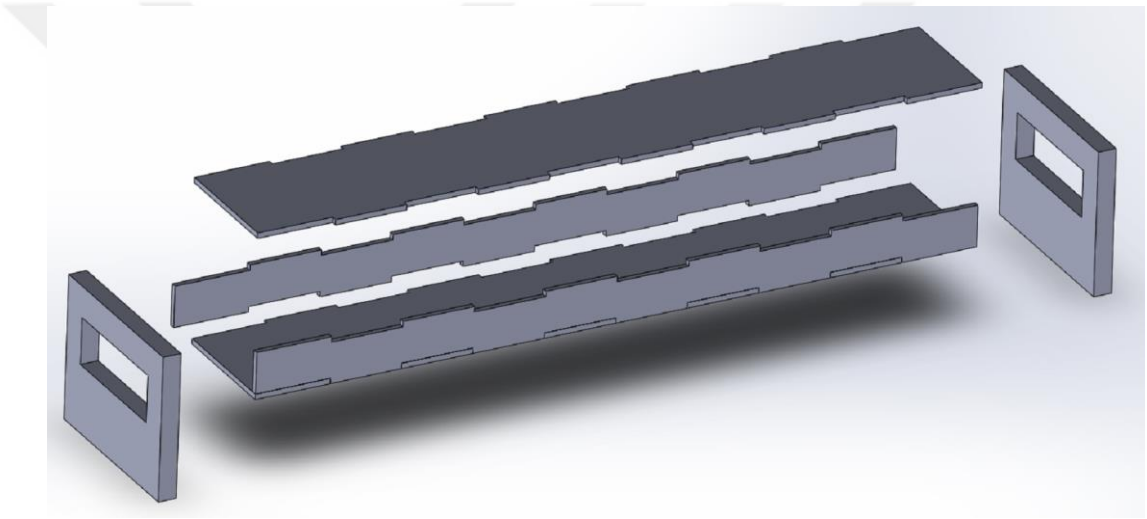
Standartlar gereği bobinlerin sarılacağı karkas yapısının 1,5mm kalınlıkta fenolik reçine esaslı malzeme olması tavsiye edilmektedir. Bu sebeple epoksi fiber levha, fiber levha ya da pertinaks malzeme karkas malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek gerilim ve ısı izolasyonu özelliklerine sahiptir. Bu sebeplerle karkasların üretiminde 1,5mm kalınlıkta fiber levha kullanılmıştır. Karkasların rijit bir bütünlük sağlayabilmeleri için üst ve yan yüzeyler birbiri ile kitlenmeli montajlanabilecek şekilde tasarlanıp lazer kesimle üretilmişlerdir.

700 sarımlık bir Epstein Çerçevesi sarım değerleri için IEC standartı gereği R_{pr} direncinin 0,612Ω değerine, L_{pr} ve L_{sk} indüktansının 1,225mH değerine, R_{sk} direncinin 2,45Ω değerine eşit ya da az olması gerekmektedir. ASTM standartları gereği ise R_{pr} direncinin yaklaşık 0,5Ω değerine, L_{pr} indüktansının yaklaşık 0,99mH değerine, R_{sk} direncinin yaklaşık 1,85Ω değerine, L_{sk} indüktansının 0,65mH değerlerine eşit ya da az olması gerekmektedir. Tablo 5.1 incelendiğinde üretim sonrası elde edilen değerlerin standartlar içerisinde olduğu görülmektedir.

Standartlar gereği bobinlere sarılacak sargıların 191mm uzunlukta homojen olarak sarılmaları gerekmektedir. Sarım yapılırken ilk önce 1mm çapında bakır tel ile 175 sarımlı sekonder sargısı sarılmalıdır. Sekonder sargısı sarımı yapıldıktan sonra üzerine ince(0,02mm civarı kalınlık) bir yalıtım malzemesi sarılması önerilmektedir. Daha sonra ise sekonder sargısı ile aynı yönlü olacak şekilde 1,5mm çaplı iki bakır tel paralel şekilde 3 katman halinde sarılarak toplam 175 sarım elde edilecek şekilde sıkı olarak sarılmaktadır. Birinci katmanda 59, ikinci katmanda 59, üçüncü katmanda ise 57 sarım yapılarak primer sargısı tamamlanmaktadır. Bu şekilde iç tarafta 175 sekonder sargısı, dışarıda ise 175 adet primer sargısı içeren 4 adet kol bobini sarılmaktadır.

Sarılan bobinlerin çerçeve gövdesine montajının yapılabilmesi için bobinlerin iki ucuna taşıyıcı ayaklar takılmaktadır. Bu ayaklar tasarım gereği 5mm kalınlıktadır. Her kolda bobin ve numune ağırlığı toplamı bir ağırlık olacağı için ayak malzemesi olarak delrin malzeme kullanılmıştır. Delrin malzeme yüksek kırılma dayanımına sahiptir.

Kollar çerçeve gövdesine montajlanırken 4 koldaki bobinlerin sarım yönleri birbiri ile aynı olacak şekilde yerleştirilmeleri gerekmektedir. Daha sonra 4 koldaki sekonder sargıları ve primer sargıları birbirleri ile aynı yönlü olacak şekilde seri bağlanarak 700 sarımlı sekonder ve primer sargıları elde edilir. Şekil 5.3'de tasarlanan numune dizilen kolunun patlatılmış montaj hali görülmektedir.

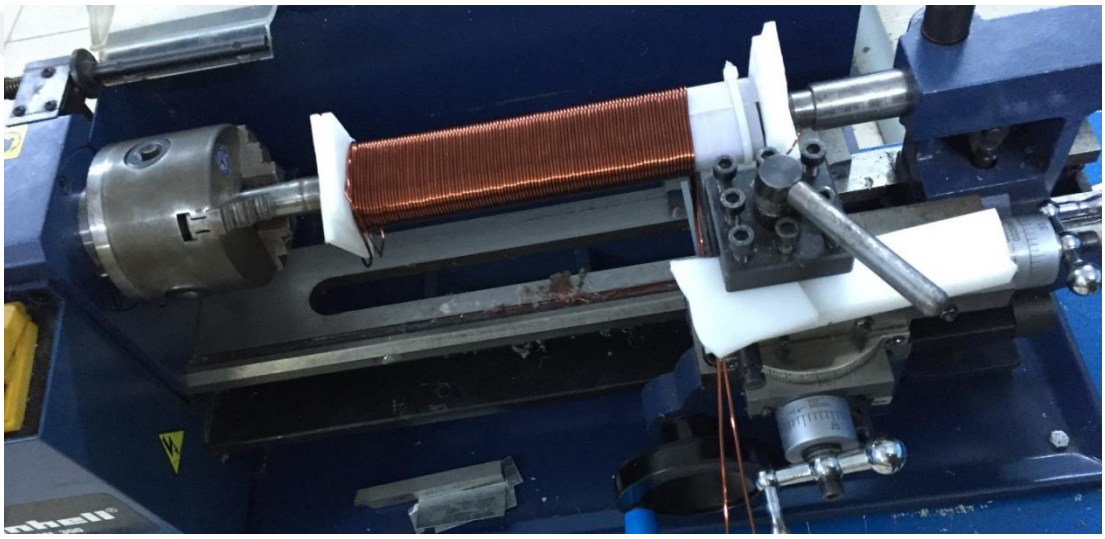


Şekil 5.3. Numune dizme kolları tasarımı

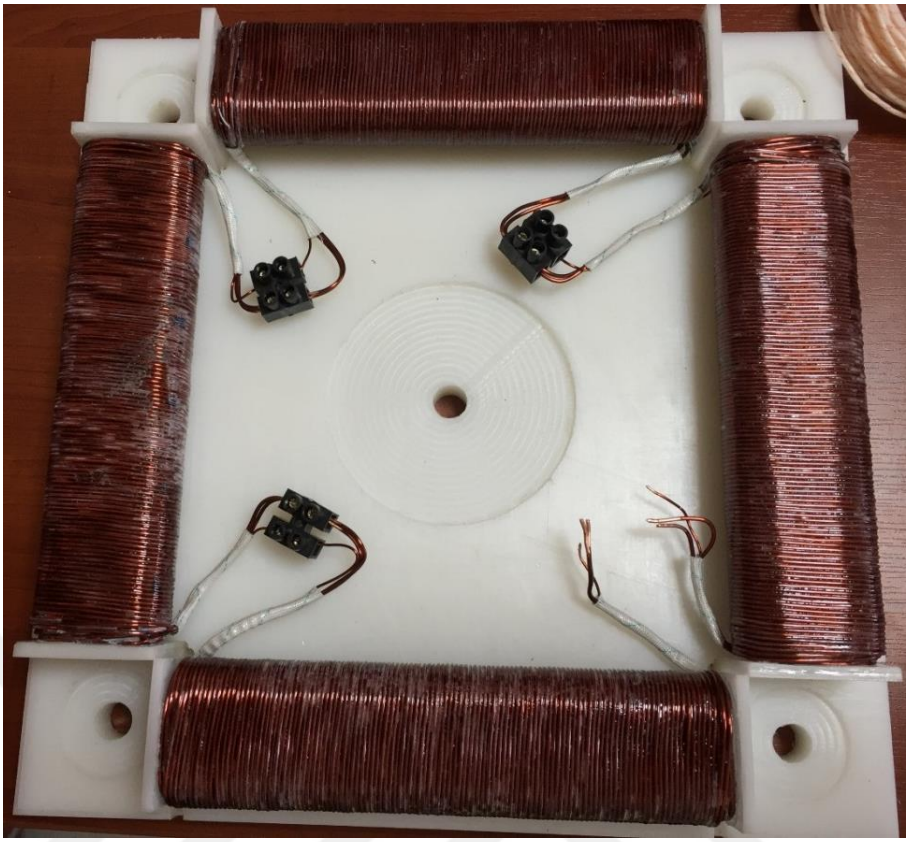
Şekil 5.4'de ise lazer kesim ile üretilen üst ve yan yüzeylerin kilitlemeli olarak montajlanmış hali görülmektedir. Şekil 5.5'de ise sekonder sarısı üzerine yalıtım malzemesi sarıldıktan sonra iki paralel 1,5mm çaplı bakır emaye kaplı telin, primer sargısının ilk katmanını oluşturacak şekilde sarımı gösterilmektedir. Şekil 5.6'de ise çerçeve gövdesine montajı yapılmış kollar görülmektedir.



Şekil 5.4. Numune dizme kolu bobin karkası montajı



Şekil 5.5. Numune dizme kollarında primer sargılarının sarımı

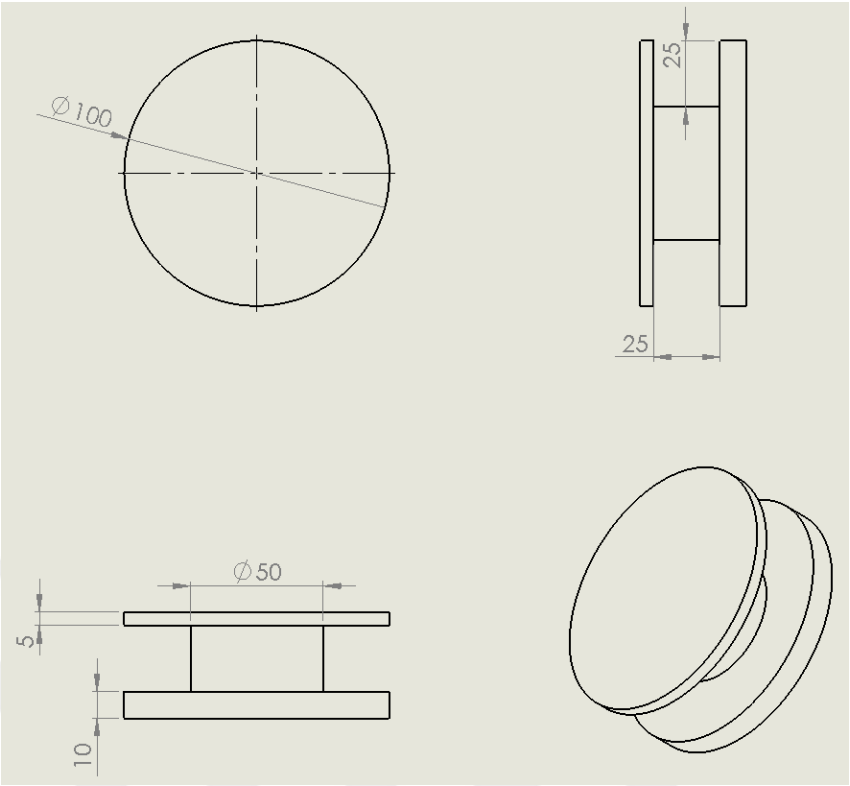


Şekil 5.6. Kolların gövdeye montajlanması ve sargıların seri bağlantısı

5.3. Dengeleme Bobini Tasarım ve Üretimi

Standartlar gereği Epstein Çerçevesi üretilirken çerçeve üzerindeki bobin kollarında oluşan ortak indüktansı yok etmek için dengeleme bobini kullanılmaktadır. Dengeleme bobini sarılırken çerçeve kollarındaki sarımın aksine alta primer sargısı onun üzerine ise sekonder sargısı sarılır.

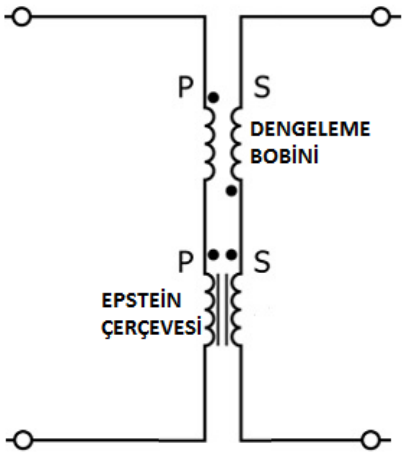
Standartlar gereği dengeleme bobininin sarılacağı karkas yine iletkenlik ve manyetik özellikler taşımayan malzemeden üretilmelidir, üretimde 100mm çapında silindirik PE1000 malzemesi kullanılmıştır. Karkas üzerinde sarım yapılacak silindirin yarıçapı 25mm, sarım yapılacak silindir uzunluğu ise yine 25mm civarında olmalıdır. Bu silindirin altına ve üstüne yaklaşık 5cm çapında alt ve üst kapaklar kullanılarak karkas tamamlanmaktadır. 100mm çaplı malzeme Şekil 5.7'de gösterilen tasarım ölçülerine göre tornada işlenerek dengeleme bobinin karkası üretilmiştir.



Şekil 5.7. Dengeleme bobini sarım karkası tasarım ölçüleri

Dengeleme bobininde primer sargısı, 2mm çapa sahip bakır emaye tel kullanılarak 44 sarımdan oluşur. Primer sarımı yapılırken 4 katman halinde sarılır ve her katmanda 11 sarım bulunur. Primer sargısı tamamlandıktan sonra üzerine ince bir yalıtım malzemesi sarıldıktan sonra primerle aynı sarım yönüne sahip olacak şekilde sekonder sargısı sarılır. Sekonder sargısı 1mm çapında bakır emaye tel kullanılarak sarılır. Bu sarımın belirli bir sarım miktarı bulunmamaktadır. Yaklaşık olarak 300-350 sarım yapılması daha sonra yapılacak sıfırlama ayarı için yeterli olacaktır.

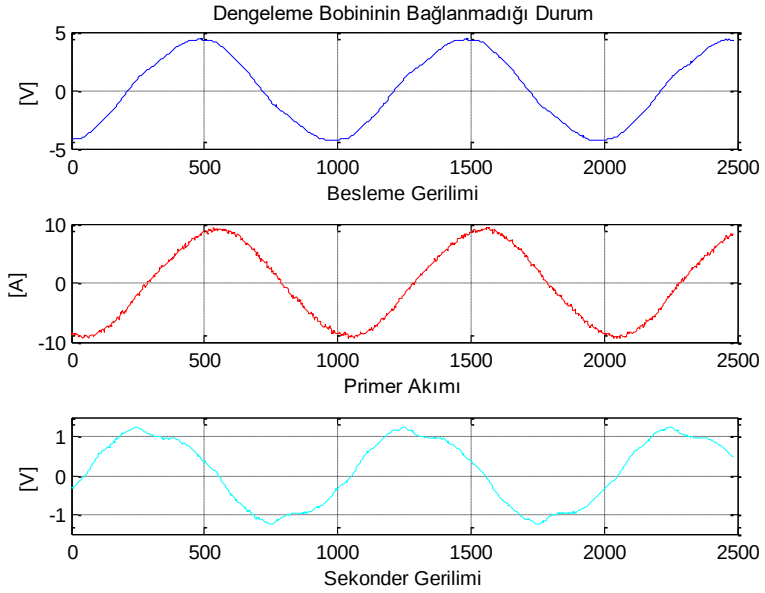
Dengeleme bobini manyetik devreye bağlanırken primer sarımı, kolların primer sarıma seri olarak bağlanır. Sekonder sarımı ise yine kolların sekonder sarımına seri olarak bağlanır fakat akımın akma yönü, primerinin akım akma yönüne zıt olacak şekilde ters bağlanmalıdır. Şekil 5.8'de Epstein Çerçevesinin bobinlerinin bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Kol sarımları ile dengeleme bobini sarımlarının elektriksel bağlantısı

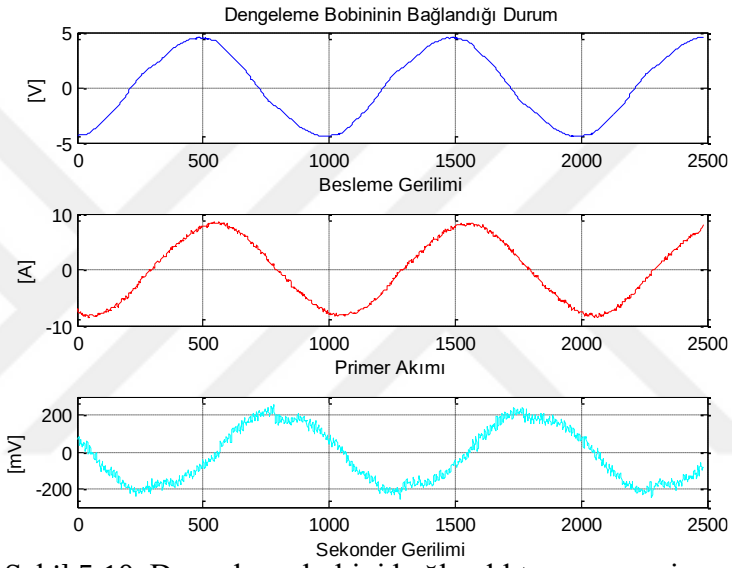
5.4. Dengeleme Bobini ile Ayarlama İşlemi

Epstein Çerçevesi'nde kullanılan primer ve sekonder sarımları üst üste sarıldıkları için meydana gelen ortak indüktans ve aynı zamanda kollarda numune yerleşim boşlukları olduğu için meydana gelen hava akısından kaynaklı, çerçevede numune yokken dahi sekonder sargısında gerilim indüklemesi meydana gelmektedir. Şekil 5.9'de dengeleme bobini bağlama öncesi primer ve sekonder gerilimleri ve manyetiklendirme akımı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.9. Dengeleme bobini bağlanmadan önce primer gerilimi, akımı ve sekonder gerilimi

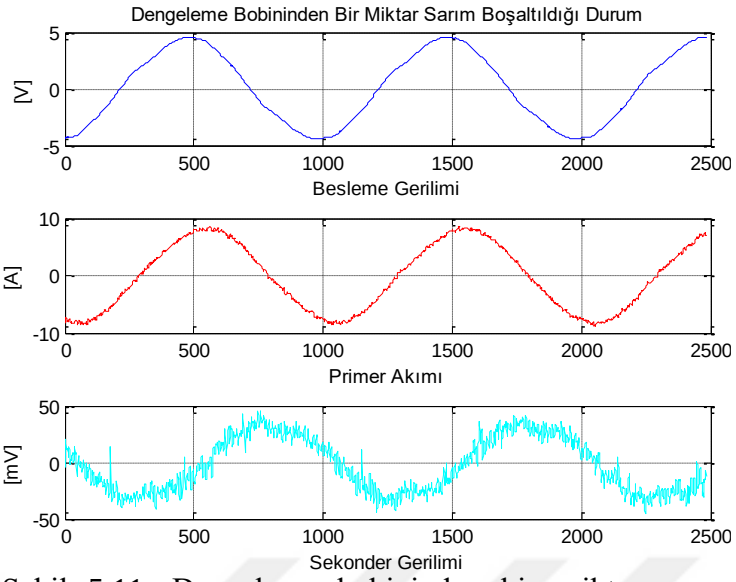
Numune olmadığı halde sekonderde indüklenen bu gerilim değeri ölçüm sonuçlarının hatalı olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple devreye dengeleme bobini eklenmektedir. Dengeleme bobinin sekonder sargısı, çerçevenin sekonder sargısına ters yönlü bağlanarak, numune olmadığı durumda sistemin toplam indüklenen gerilimini sıfıra çekmek amaçlanmaktadır. Şekil 5.10'de dengeleme bobini bağlandığında oluşan indükleme değerleri görülmektedir. Şekil 5.10 ile Şekil 5.9 beraber incelendiğinde dengeleme bobini eklemenin sekonder geriliminin faz farkına etkisi de görülmektedir.



Şekil 5.10. Dengeleme bobini bağlandıktan sonra primer gerilimi, akımı ve sekonder gerilimi

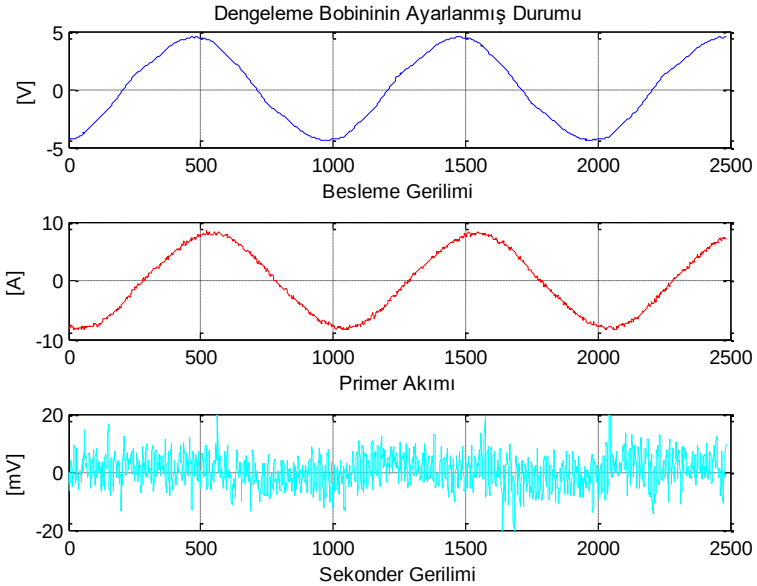
ASTM standartına göre sıfırlama işlemi yapmak için; dengeleme bobini manyetik devreye eklendikten sonra çerçevede numune yokken primer sarımından 2A ile 5A arası bir akım dolaştırılır. Bu akımın sekonderde indüklediği gerilim 1mV-2mV arasına düşünceye kadar dengeleme bobininin sekonder sargısından sarım boşaltma işlemi yapılır. Bu şekilde dengeleme bobininin sıfırlama ayarı yapılmış olur.

IEC standartına göre sıfırlama işlemi yapmak için; dengeleme bobini manyetik devreye eklendikten sonra çerçevede numune yokken primer sargıları herhangi bir gerilim değeri ile beslenir. Sekonderde indüklenen gerilim primeri besleyen gerilim binde birine düşünceye kadar dengeleme bobininin sekonder sargısından sarım boşaltımı yapılmaktadır. Şekil 5.11'de ise bir miktar sarım boşaltmanın sekonderde indüklenen gerilime etkisi görülmektedir.



Şekil 5.11. Dengeleme bobininden bir miktar sarım boşaltılmasının yaratmış olduğu değişim

Şekil 5.12'de ise gürültülerden dolayı düşürülebilen en düşük sekonder gerilimi görülmektedir ve bu durum ayarlanmış durumdur. Tablo 5.1'de Epstein Çerçevesi kollarının ve dengeleme bobininin primer ve sekonder sarımlarının 50Hz, 100Hz ve 200Hz frekanslardaki indüktans değerleri ve dc direnç değerleri verilmiştir.



Şekil 5.12. Dengeleme bobinin son ayarlanmış durumu

Tablo 5.1. Düzenek sarımlarının L_f ve R ölçüm değerleri

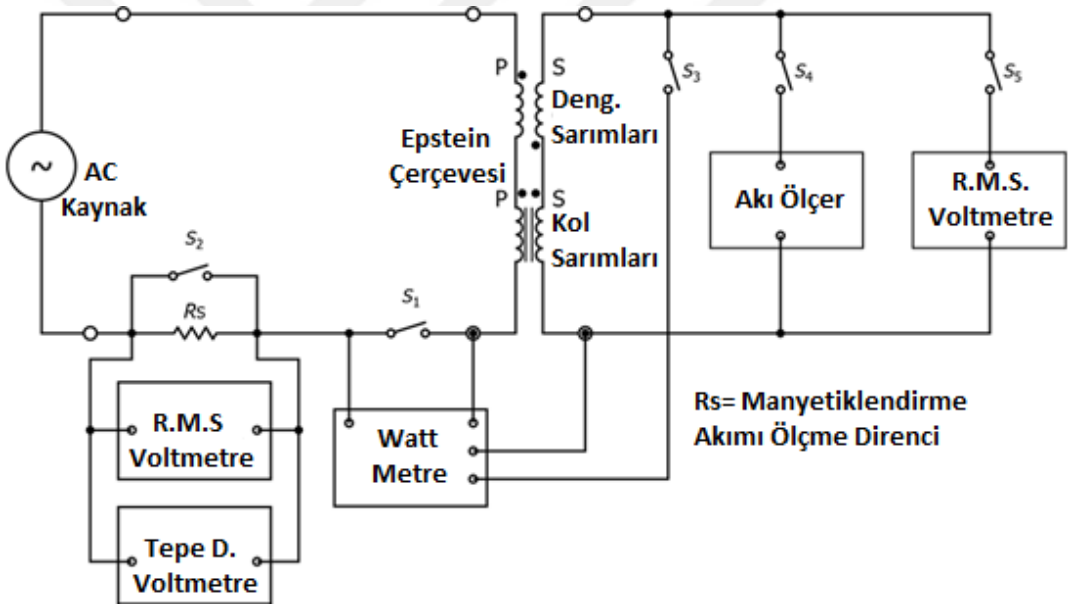
Sargı Adı	**L(50Hz)**	**L(100Hz)**	**L(200Hz)**	**R**
1.Kol -Primer	162,2 µH	162,2 µH	162,2 µH	100 mΩ
1.Kol -Sekonder	105,7 µH	104 µH	103,5 µH	381 mΩ
2.Kol -Primer	161 µH	160,5 µH	160,5 µH	100,6 mΩ
2.Kol -Sekonder	109,3 µH	107,5 µH	107,5 µH	382 mΩ
3.Kol -Primer	161,5 µH	161,2 µH	161,3 µH	101 mΩ
3.Kol -Sekonder	108 µH	105,8 µH	105,8 µH	384,3 mΩ
4.Kol -Primer	157 µH	157,4 µH	157,2 µH	100,2 mΩ
4.Kol -Sekonder	107,5 µH	105,7 µH	105 µH	387 mΩ
Dengeleme – Primer (Ayarlama Öncesi)	104 µH	105 µH	105 µH	45,7 mΩ
Dengeleme – Sekonder (Ayarlama Öncesi)	7,9 mH	7,9 mH	7,9 mH	1,72 Ω
Dengeleme – Primer (Ayarlama Sonrası)	104 µH	105 µH	105 µH	45,7 mΩ
Dengeleme – Sekonder (Ayarlama Sonrası)	3,462 mH	3,4625 mH	3,464 mH	1,092 Ω
Toplam Primer (Dengeleme Bobini Öncesi)	654 µH	651 µH	651 µH	406 mΩ
Toplam Sekonder (Dengeleme Bobini Öncesi)	423 µH	425 µH	425 µH	1,54 Ω
Toplam Primer (Dengeleme Bobini Bağlı)	50 µH	150 µH	258,3 µH	800 mΩ
Toplam Sekonder (Dengeleme Bobini Bağlı)	432,25 mH	311,26 mH	198,53 mH	2,65 Ω

6. MANYETİK ÖZELLİKLERİN ÖLÇÜMÜ

Epstein Çerçevesi ile manyetik malzemelerin AC gerilimdeki kayıp değerleri, manyetik kutuplanmanın tepe değeri, manyetik alan şiddetinin etkin ve tepe değerleri ve DC gerilimdeki kutuplanma değerleri ölçümü yapılabilmektedir.

6.1. Demir Kayıplarının Ölçümü

Demir kayıplarının ölçülebilmesi için numuneler test cihazına dizildikten sonra aşağıdaki elektriksel devre kurulur.



Şekil 6.1. Epstein çerçevesi ile ölçüm devresi[30]

Şekil 6.1'den görüldüğü gibi manyetiklendirme sargıları tarafından oluşturulan manyetik alan şiddetinin bulunabilmesi için R_s direnci üzerinden geçen akım değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple R_s direnci olarak %5 hassasiyete sahip 0,1Ω değerinde bir direnç seçilerek bu direncin üzerindeki gerilim değeri okunmaktadır. Bu durumda etkin manyetik alan şiddeti amper yasası gereği Denklem (6.1),

$$H.l_m=N_p.I_p \tag{6.1}$$

ile elde edilir. Burada yer alan l_m değeri Epstein düzeneğinin manyetik devre yol uzunluğu olarak ifade edilir ve standartlarca 0,94m olarak tanımlanır, N_p manyetiklendirme bobinlerinin sarım sayısını ifade eder ve bizim düzeneğimizde 700'e eşittir, I_p ise manyetiklendirme bobininden geçen akımın amper cinsinden etkin değeridir. Denklem (6.1) düzenlendiğinde manyetik alan şiddeti Denklem (6.2),

$$H=\frac{N_p I_p}{l_m} \tag{6.2}$$

olarak elde edilir. Oluşturulan manyetik alan şiddetinin yaratmış olduğu akının indüklemiş olduğu gerilim değeri Denklem (6.3),

$$E=\sqrt{2}\pi f N_s A B_m \tag{6.3}$$

ile hesaplanmaktadır. Burada f Hz cinsinden frekansı değeridir, N_s indüklenme bobininin sarım sayısını ifade eder ve bizim cihazımızda 700'e eşittir, $A_m$test numunelerinin m^2 cinsinden etkin kesit alanıdır, $B_m$ise maksimum akı yoğunluğudur.

Epstein Düzeneğinde A değerinin kesin olarak bulunabilmesi için ölçümü yapılacak toplam numuneler %0,1 hassaslıkla tartılarak toplam ağırlık değeri kg cinsinden ölçülür. Düzenekte numuneler 4 kola eşit olarak dağıldıkları için $A_m$değeri Denklem (6.4),

$$A=\frac{m}{4l\delta} \tag{6.4}$$

ile hesaplanır. Burada m tartılan toplam numunenin kg cinsinden değeridir, l bir adet numunenin m cinsinden uzunluğudur, δ ise test edilecek manyetik malzemenin kg/m^3 cinsinden yoğunluğudur.

Demir kaybının bulunması için watmetreden ölçülen gücün, sekonder sargılarında harcanan güçten çıkartılması gerekmektedir ve Denklem (6.5),

$$P_c = P_w - \frac{E_2^2}{r_{eş}} \tag{6.5}$$

ile hesaplanır. Burada P_c ölçülen toplam güç kaybı, P_w wattmetreden okunan güç değeri, E_2 sekonder geriliminin etkin değeri, $r_{eş}$ ise indüklenme sargılarına bağlı tüm cihazların ve bobinlerin eşdeğer direncidir.

Kilogram başına kayıp değerini hesaplamak için Denklem (6.5)'den elde edilen sonuç etkin ağırlık değerine bölünür. Etkin ağırlık değeri ise Denklem (6.6),

$$m_e = \frac{m l_m}{4l} \tag{6.6}$$

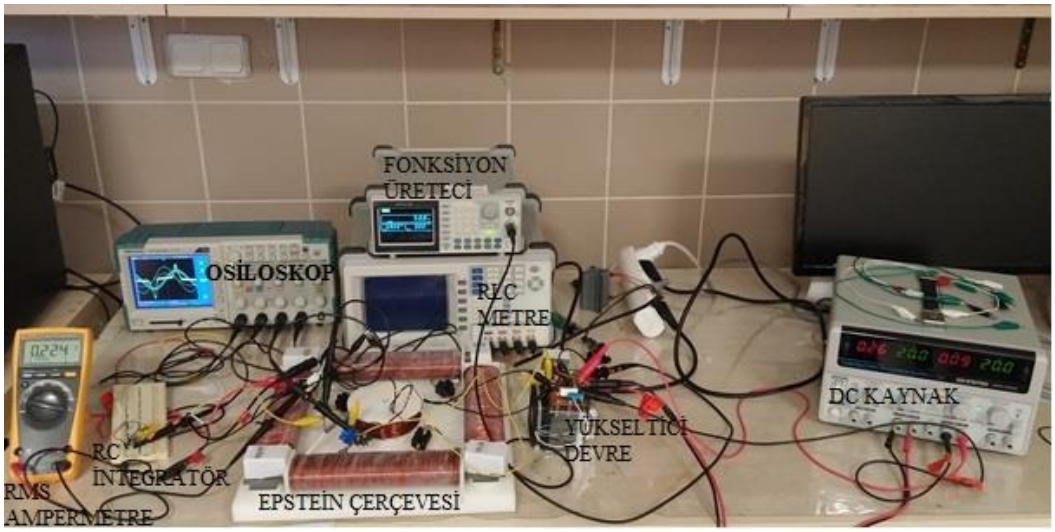
ile elde edilir. Bu durumda kilogram başına güç kaybını veren ifade Denklem (6.7),

$$P_{kg} = \frac{P_c}{m_e} \tag{6.7}$$

gibi elde edilir.

6.2. Test Düzeneği ve Elde Edilen Sonuçlar

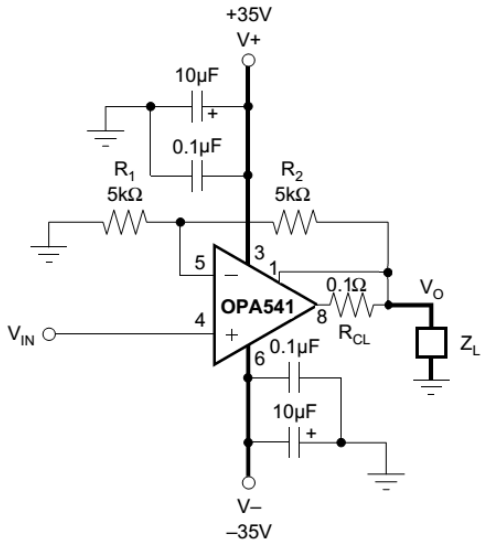
Epstein Çerçevesi yardımıyla gereken ölçümlerin yapılabilmesi için Şekil 6.2'de görülen deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 6.2'de görülen ampermetre Epstein Çerçevesinin manyetiklendirme akımını ölçmek için kullanılmıştır. Fonksiyon üreteciyle üretilen farklı frekans ve genliklerdeki sinüzoidal gerilim Şekil 6.5 de devresi gösterilen yükseltici devre ile güçlendirilerek Epstein Çerçevesinin manyetiklendirme sarımı beslenmiştir. RC integratör devresi ile de akı değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.2. Deney düzeneği

6.2.1. Yükseltici devre

Epstein Çerçevesinin farklı genlik ve frekanslardaki gerilimlerle beslene bilmesi için fonksiyon üreteci tarafından oluşturulan referans gerilimin gereken gerilim ve akım değerlerini sağlayabilmesi amacıyla güçlendirmesi gerekmektedir. Bu sebeple OPA541AM opamp entegresi kullanılarak ve Şekil 6.3'deki devre kurulmuştur.



Şekil 6.3. Yükseltici devre şeması

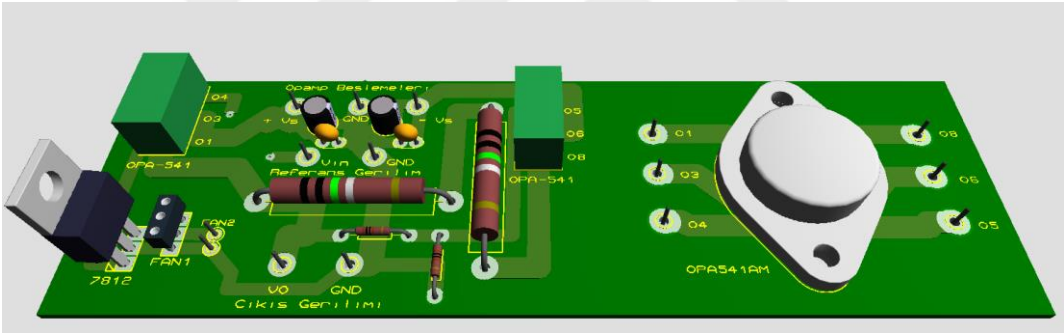
Bu opamp 40V simetrik besleme ve 5A sürekli akım değerlerine sahiptir. Opambın devresinin gerilim yükseltme kazancını kullanılan devrede ikidir fakat Denklem (6.8)'e,

$$G=1+\frac{R_{G1}}{R_{G2}} \tag{6.8}$$

göre R_{G1} ve R_{G2} dirençleri değiştirilerek istenilen oranda yükseltme yapılabilmektedir. Burada yükseltme sonucu elde edilecek gerilim opampın maksimum besleme geriliminin üzerine çıkmaması gerektiğine dikkat edilmelidir. OPA541 entegresi ayarlanabilir akım sınırına sahiptir. İstenilen çıkış akımının tepe değerine göre kullanılması gereken R_{CL} direnci Denklem (6.9)'a,

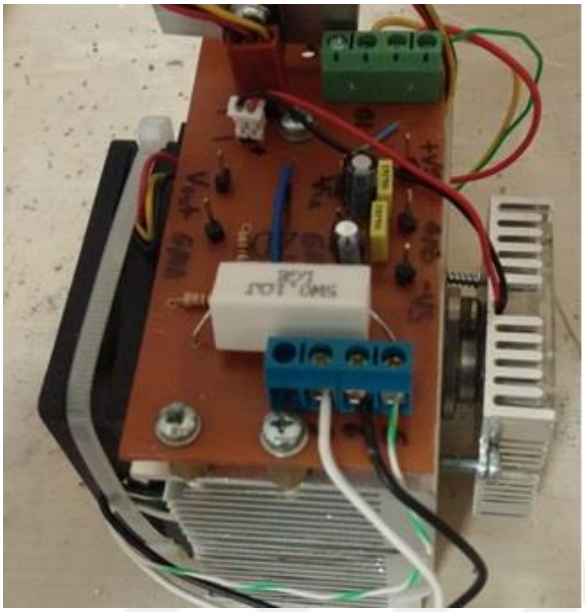
$$R_{CL}=\frac{0,809}{|I_{lim}|}-0,057 \tag{6.9}$$

göre hesaplanır ve devrede 0,1Ω olarak kullanılmıştır. Bu R_{CL} değerine göre devrenin verebileceği akımın tepe değeri 5,15A değerinde sınırlanmaktadır. Şekil 6.3'de kullanılan devreye göre tasarlanan yükseltici devre kartı Şekil 6.4'de gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Yükseltici devresi kartı tasarımı

OPA541AM opampının güç kaybı 125W değerine kadar ulaşmaktadır. Bu sebeple kullanılan devrenin iyi şekilde soğutulması gerekmektedir. Opampın en yüksek çalışma sıcaklığı 125°C'dir, ve yükselen sıcaklık opampın çalışma karakteristiğini bozmaktadır. Şekil 6.5'de soğutucularla birlikte oluşturulmuş gerilim yükselticisi görülmektedir.



Şekil 6.5. Gerilim yükselticisi

6.2.2. RC integratör devresi

Epstein çerçevesinde manyetik alan şiddetinin manyetizasyon akımı ile orantılı olduğu Denklem (6.2)'de gösterilmişti ve buna göre H değerinin zamanla değişiminin, primer akımının zamanla değişimiyle aynı grafik şekline sahip olacağı açıktır fakat genlik değerleri farklı olacaktır.

B-H grafiğinin elde edilebilmesi için benzer şekilde akı yoğunluğu değerinin de zamana göre değişimini elde etmek gerekmektedir. Oluşturulan manyetik alan şiddeti sonucunda sekonder sargılarında Denklem (6.10)'a,

$$v_s(t)=N_s\frac{d\phi}{dt}=N_s\frac{d(BA)}{dt} \tag{6.10}$$

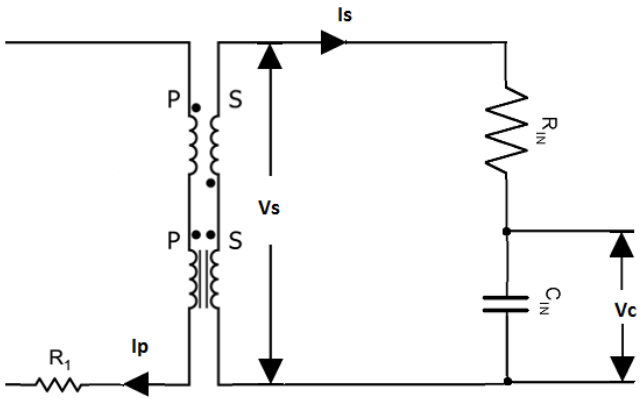
göre hesaplanan gerilim indüklenmektedir. Burada N_s sekonder sarım sayı, A ise manyetik devrede akı doğrultusuna dik kesit alanıdır. Denklem (6.10) düzenlendiğinde Denklem (6.11),

$$v_s(t)dt=N_sAdB \tag{6.11}$$

elde edilmektedir. Denklem (6.11)'den akı yoğunluğunun zamanla değişiminin sekonder geriliminin integrali ile doğru orantılı olduğu görülmektedir ve bu oran Denklem (6.12),

$$B(t)=\frac{1}{N_s A}\int v_s(t)dt \tag{6.12}$$

ile gösterilmektedir. Sekonder gerilimin integralinin alınabilmesi için Şekil 6.6 da gösterildiği gibi sekonder sargılarına seri olarak bağlanan basit bir RC devresi kullanılabilir.



Şekil 6.6. RC integratör devresi

RC devresinde direnç değeri kondansatör empedansına göre oldukça büyük seçilirse ($R_{in} \gg X_c$) sekonder devresinden akan akım Denklem (6.13),

$$i_s(t)=\frac{v_s(t)}{R_{in}} \tag{6.13}$$

değerine yakın olur. Kondansatör üzerinden akan akım Denklem (6.14)'e,

$$i_c(t)=C_{in}\frac{dV_c(t)}{dt} \tag{6.14}$$

göre hesaplanmaktadır. I_s akımı aynı zamanda I_c kondansatör akımına da eşit olduğuna göre kondansatör gerilimi Denklem (6.15)'deki,

$$v_c(t)=\frac{1}{R_{in}.C_{in}}\int v_s(t)dt \tag{6.15}$$

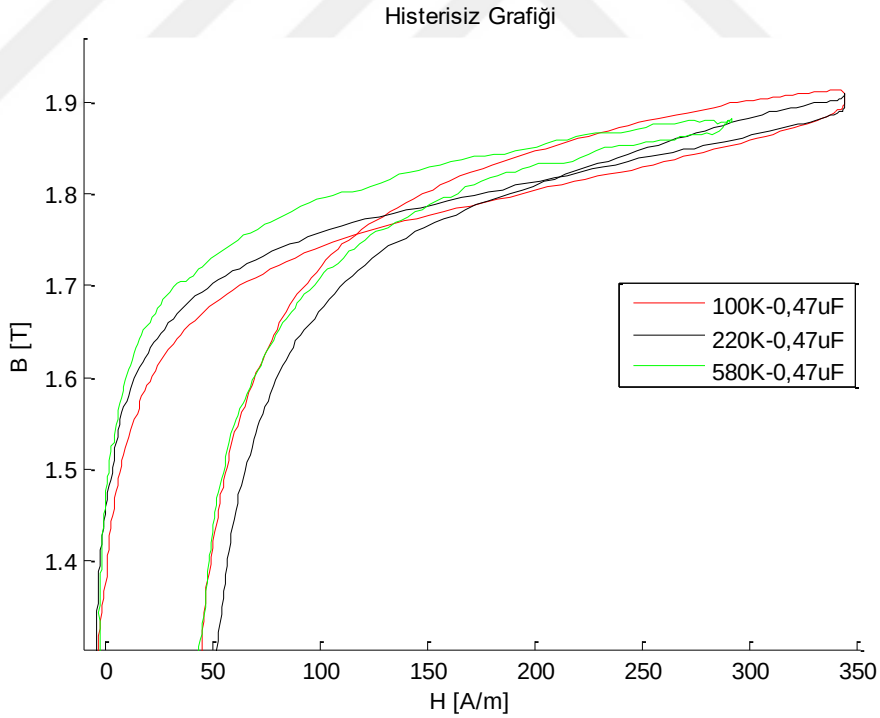
gibi elde edilir. Denklem (6.15)'deki v_s gerilimi yerine Denklem (6.11) ile verilen değeri yerine yazılırsa Denklem (6.16),

$$v_c(t)=\frac{1}{R_{in}C_{in}}\int N_s A dB=\frac{N_s A}{R_{in}C_{in}}\int dB \tag{6.16}$$

elde edilir. Denklem (6.16)'dan görüldüğü gibi kondansatör geriliminin integralinin zamanla değişim grafik şekli ile akı yoğunluğunun zamanla değişim grafik şekli benzer yapıdadır. Bu durumda akı yoğunluğunun zamanla değişimini veren ifade Denklem (6.17)'deki,

$$B(t)=\frac{v_c(t)R_{in}C_{in}}{N_s A_m} \tag{6.17}$$

gibi elde edilmektedir. Farklı frekanslarda ölçümler yapılacağı zaman X_c değerinin frekansa göre değişeceğine dikkat edilmesi gerekmektedir. İntegral alıcı devrede R_{in}=1MΩ, C_{in}=0,47uF büyüklüğünde kullanıldı. Şekil 6.7'de farklı RC değerleri için histerezis eğrisindeki oluşan hata gösterilmektedir.

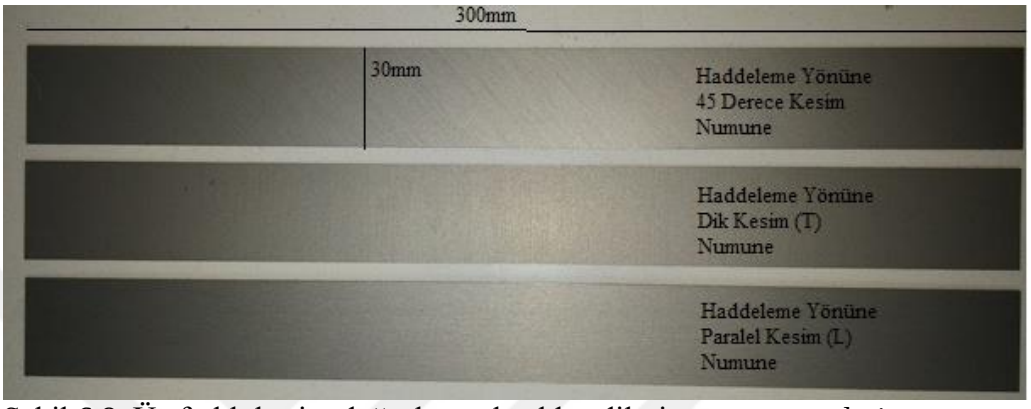


Şekil 6.7. Farklı R_{in} ve C_{in} oranlarının etkisi

6.2.3. Test numuneleri

Epstein Çerçevesinde ölçümü yapılacak numuneler 280-320mm aralığındaki herhangi bir uzunlukta kesilebilir fakat numunelerin uzunlukları arasındaki tolerans ±0,5mm'i

geçmemelidir. Numunelerin eni ise 30mm±0,2mm genişlikte olmalıdır. Standartlara göre ölçümü yapılacak bir numunenin taneciği yönlendirilmiş saclar için haddele doğrultusuna göre $\pm 1^{o}$ toleransla kesilmesi gerekmektedir. Bu tolerans değeri taneciği yönlendirilmemiş sac numuneleri için ise $\pm 5^{o}$'dir. Şekil 6.8'de ölçümü yapılan numuneler görülmektedir.



Şekil 6.8. Üç farklı kesim doğrultusuyla elde edilmiş test numuneleri

Şekil 6.8'deki numuneler M270-35A taneciği yönlendirilmemiş malzemeden, haddeleme doğrultusuna paralel, haddeleme doğrultusuna dik ve haddeleme doğrultusuna 45^{o} açıyla olacak şekilde 3 farklı şekilde kesilmiştir. Şekil 6.8'ye dikkatli bakıldığında haddeleme doğrultuları görülebilmektedir. Her gruptan ayrı ayrı 32 adet numune ile testler yapılmıştır. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi test işlemine başlanmadan önce numuneler ±%0,1 hassaslıkta tartılmalıdır.



Şekil 6.9. Numunelerin hassas terazi ile tartımı

Test sırasında numuneler dizilirken Şekil 5.1'de görüldüğü gibi önce bir ve iki numaralı karşılıklı kollara birer numune konulur daha sonra ise üç ve dört numaralı karşılıklı kollara birer numune dizilerek ilk katmanın dizimi tamamlanır. Diğer katmanlarda bu sıra ile dizilerek numune dizme işlemi tamamlanır ve 4 köşe noktasına 100'er gramlık ağırlıklar konarak temas kuvvetlendirilir. Her katmanı oluşturan 4 numuneye aynı katman numarası verilerek tartımlar yapılmıştır. Tablo 6.1'de katman ağırlıkları verilmiştir.

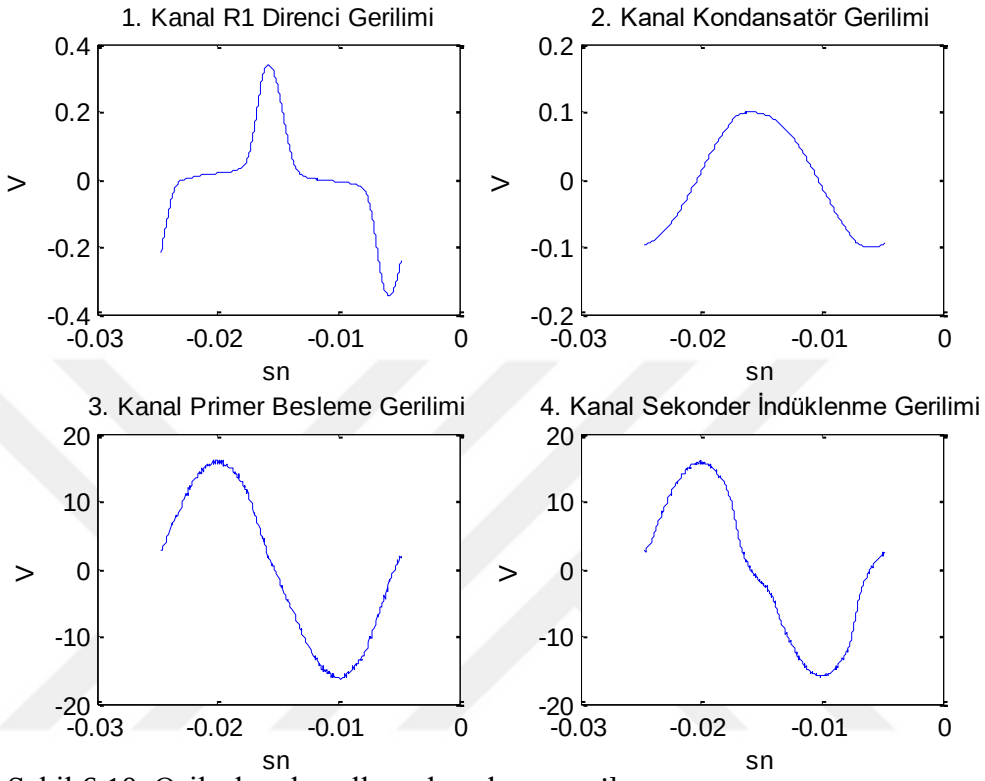
Tablo 6.1. M270-35A için her katmandaki dörtlü numune ağırlıkları

Katman Numarası	Haddeleme Yönünde Kesim	Haddeleme Yönüne Dik Kesim	Haddeleme Yönüne 45^o Eğimli Kesim
1	95,85gr	96,50gr	96,88gr
2	95,47gr	96,61gr	96,85gr
3	96,53gr	96,59gr	96,95gr
4	95,15gr	96,25gr	94,79gr
5	94,77gr	96,50gr	94,96gr
6	95,68gr	96,21gr	95,37gr
7	95,76gr	95,87gr	95,56gr
8	96,12gr	95,24gr	95,78gr

6.2.4. Test verilerinin alınması

Numune dizimi yapıldıktan sonra Epstein Çerçevesine farklı genlik ve frekanslarda gerilimler verilerek, farklı numune sayılarında ölçümler alınmıştır. Ölçümler verileri 4 kanallı osiloskop ile kaydedilmiştir. Birinci kanaldan primer sargısına bağlı seri direnç gerilimi alınmıştır. İkinci kanaldan RC devresinde kondansatör gerilimi alınmıştır. Üçüncü kanaldan primer sargıları besleme gerilimi, dördüncü kanaldan ise

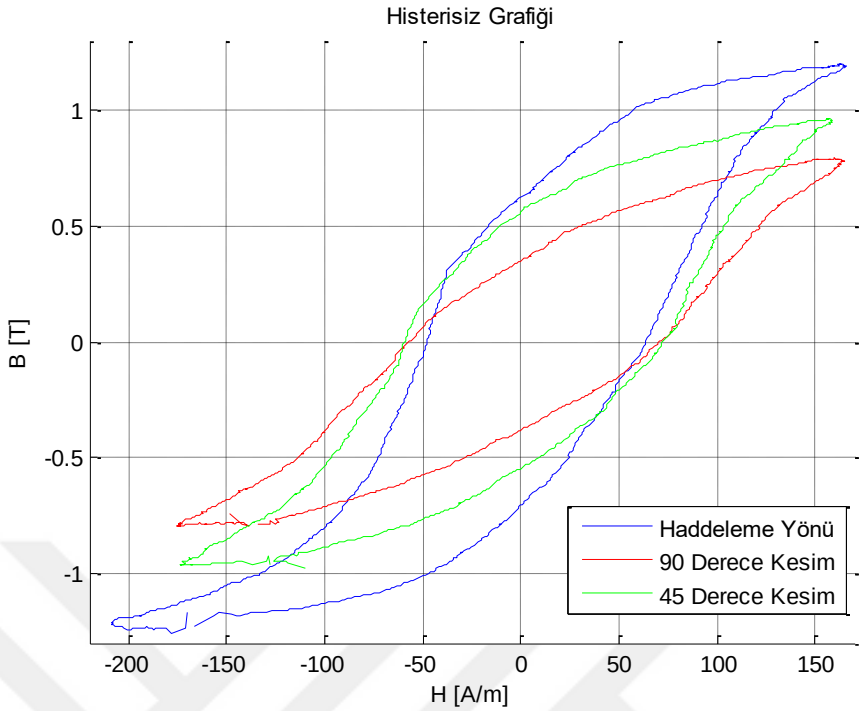
sekonder gerilimi alınarak dijital olarak kaydedilmiştir. CSV formatında kaydedilen veriler MATLAB programında işlenerek B-H eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6.10'da her kanaldan elde edilen gerilim değerleri görülmektedir.



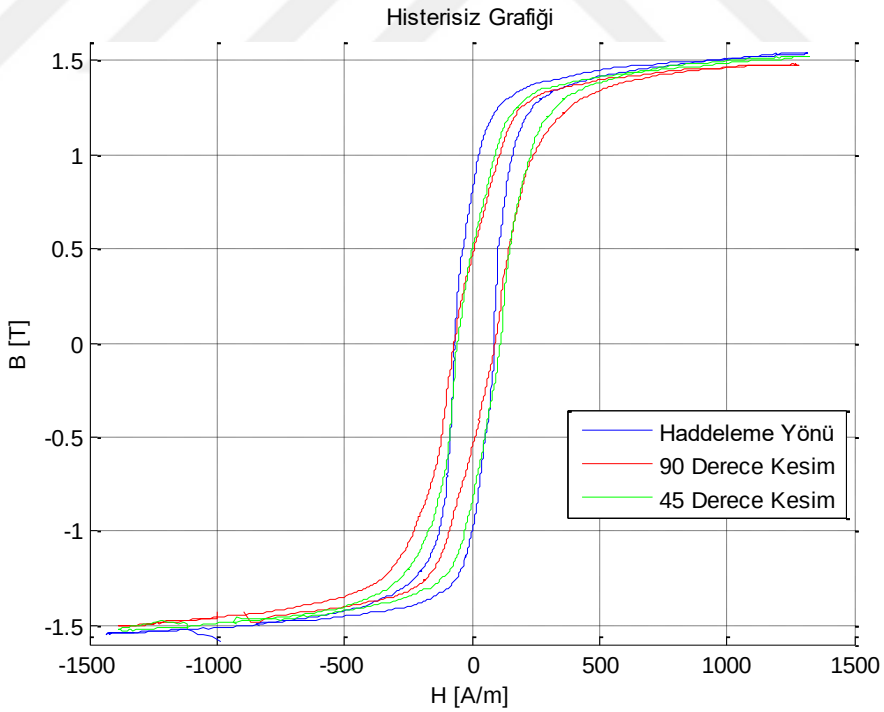
Şekil 6.10. Osiloskop kanallarından alınan veriler

6.2.4.1. Kesim açısının etkisi

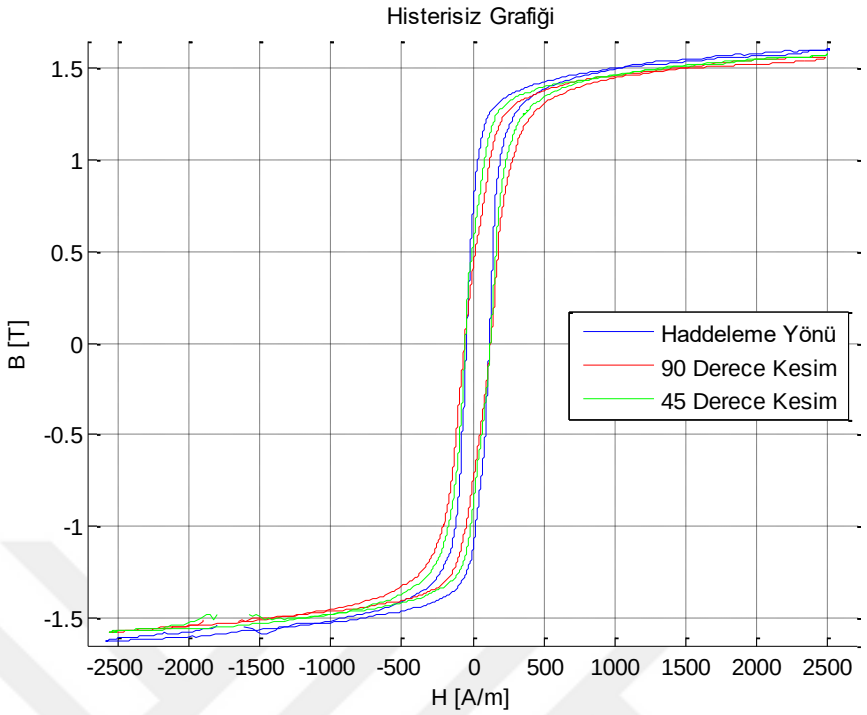
Test düzeneğine ilk olarak haddeleme yönünde kesilmiş 16 numune yerleştirilerek 145mA-780mA-1519mA değerlerinde etkin manyetiklendirme akımı dolaştırılarak veriler saklandı, daha sonra aynı işlemler haddeleme yönüne dik kesimli numuneler ve haddeleme yönüyle 45^{o} açılı kesilmiş numuneler ile tekrarlandı. M270-35A numunesi için sonuçlar Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 görüldüğü gibi elde edildi. Taneciği yönlendirilmiş numune için elde edilen sonuç Şekil 6.14'de gösterilmektedir.



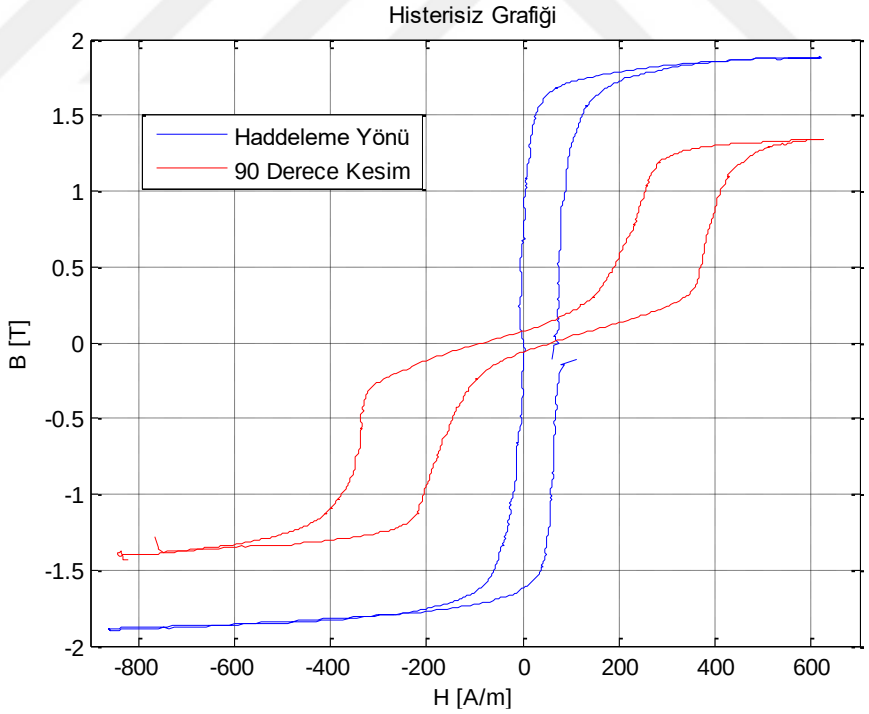
Şekil 6.11. 145mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi



Şekil 6.12. 780mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi



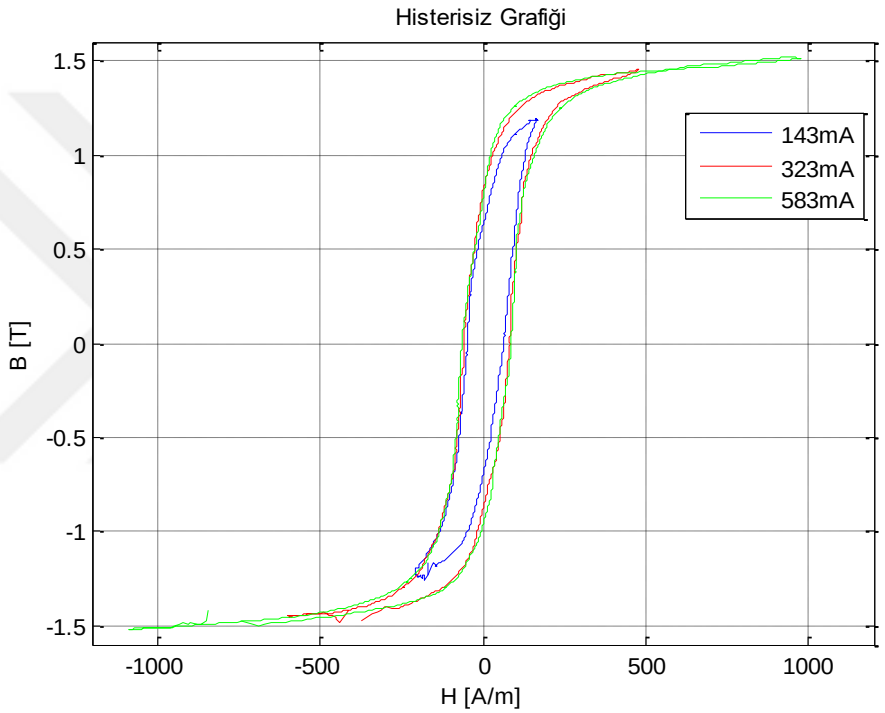
Şekil 6.13. 1519mA manyetiklenme akımında kesim açısının etkisi



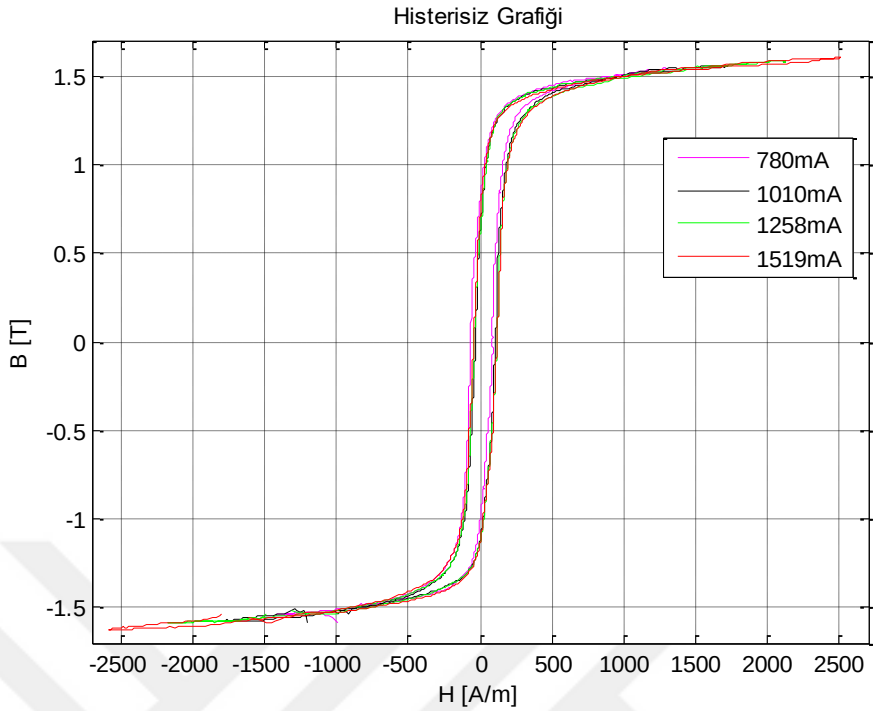
Şekil 6.14. Taneciği yönlenmiş sacda kesim acısının etkisi

6.2.4.2. Manyetik alan şiddeti artışının etkisi

Haddeme doğrultusunda kesilmiş 16 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra 50Hz frekansındaki besleme gerilimi kademeli olarak arttırılarak avometreden okunan akım değeri not edilerek o değerlerdeki veriler kayıt edilmiştir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'de sırasıyla 143mA, 323mA, 583mA ve 780mA, 1010mA, 1258mA,1519mA manyetiklendirme akımlarında elde edilen histerezis grafikleri görülmektedir.



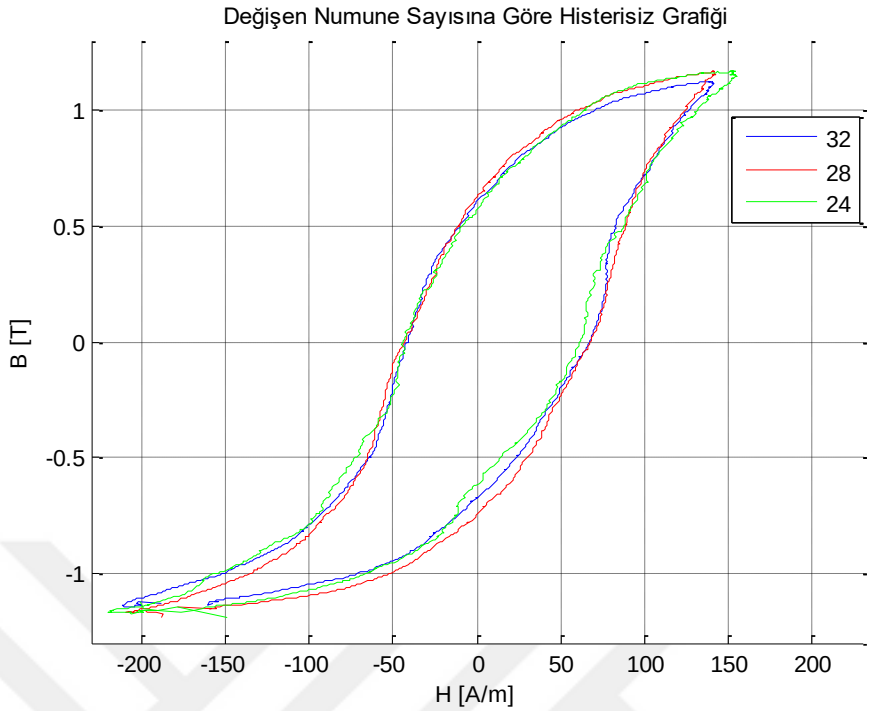
Şekil 6.15. Manyetik alan şiddeti artışıyla histerezis eğrisi değişimi-1



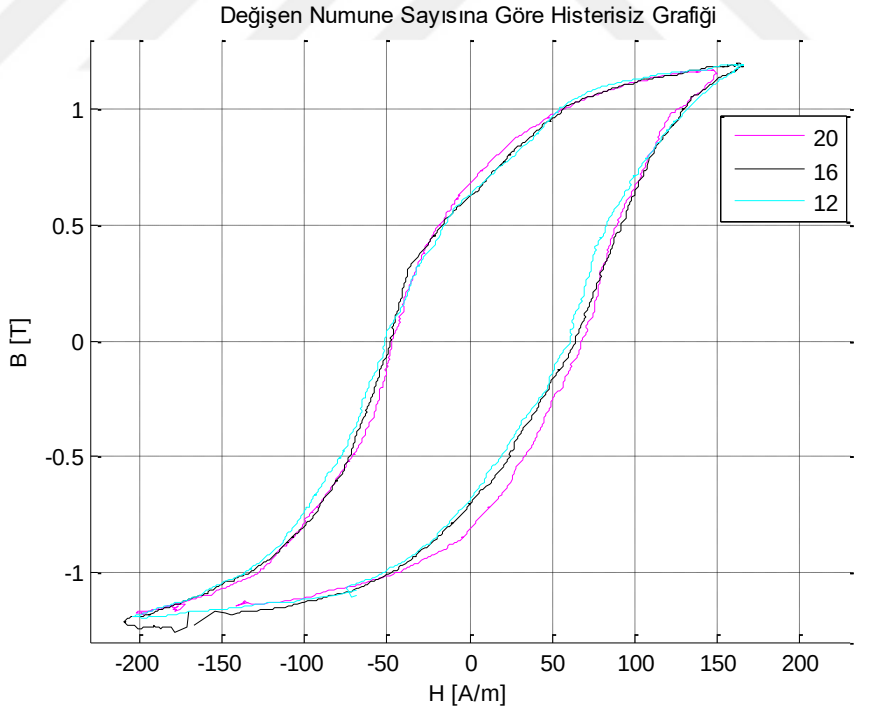
Şekil 6.16.Manyetik alan şiddeti artışıyla histerezis eğrisi değişimi-2

6.2.4.3. Numune sayısının etkisi

Haddeme doğrultusunda kesilmiş 32 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra 50Hz frekansındaki besleme gerilimi avometreden okunan akım değeri 145mA değerinde sabit kalacak şekilde ayarlanarak her farklı numune sayısı için veriler kayıt edilmiştir. Numuneler her seferde 4'er tane azaltılarak elde edilen histerezis eğrileri Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'da sırasıyla 32, 28, 24 ve 20, 16, 12 adet numune için gösterilmektedir.



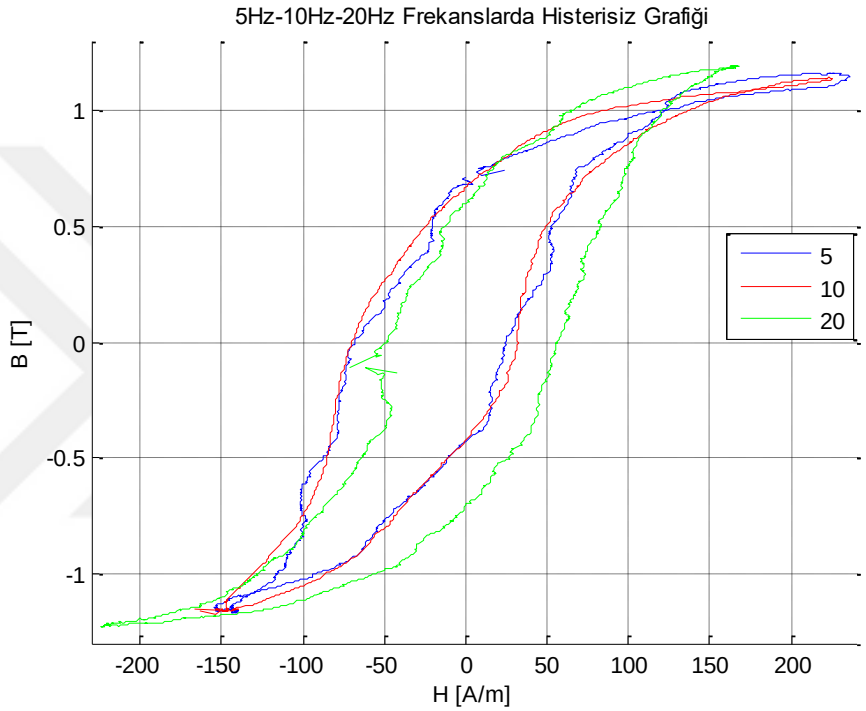
Şekil 6.17. Sabit manyetik alan şiddetinde numune sayısı değişimi-1



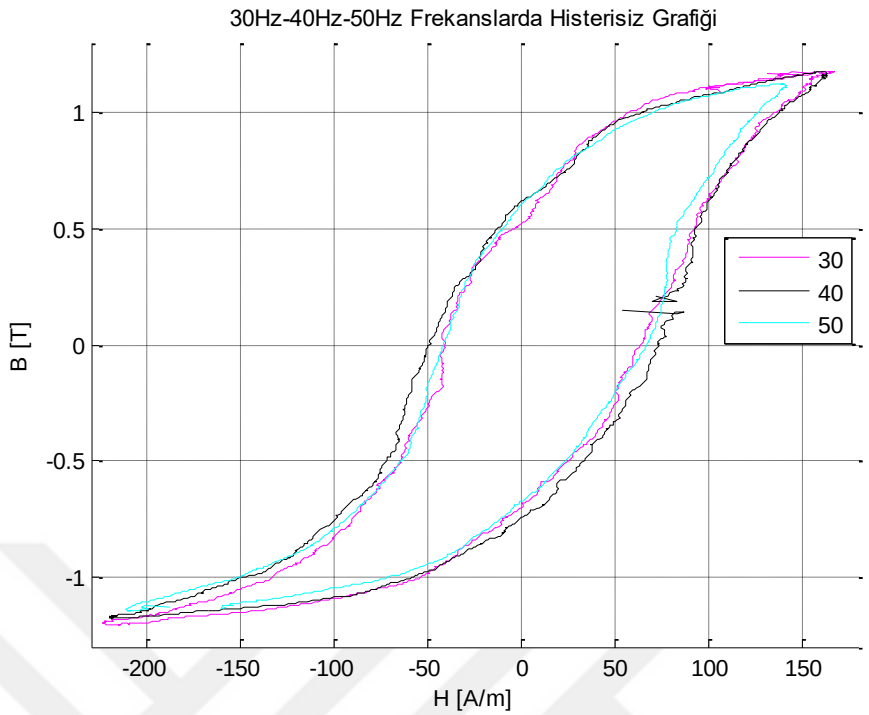
Şekil 6.18. Sabit manyetik alan şiddetinde numune sayısı değişimi-2

6.2.4.4. 50Hz ve altı çalışma frekanslarının etkisi

Haddeme doğrultusunda kesilmiş 32 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra besleme gerilimi avometreden okunan akım değeri 145mA değerinde sabit kalacak şekilde ayarlanarak her farklı frekans değeri için veriler kayıt edilmiştir. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de sırasıyla 5Hz, 10Hz, 20Hz ve 30Hz, 40Hz, 50Hz frekanslarda elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



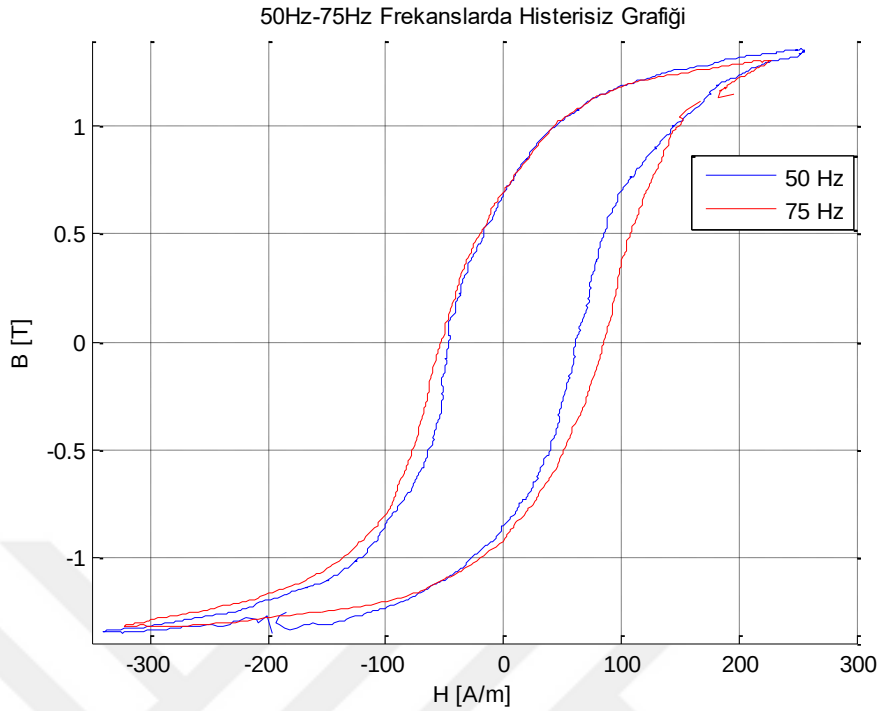
Şekil 6.19. 50Hz altı frekanslarda frekans değişiminin etkisi-1



Şekil 6.20. 50Hz altı frekanslarda frekans değişiminin etkisi-2

6.2.4.5. 50Hz üstü çalışma frekanslarının etkisi

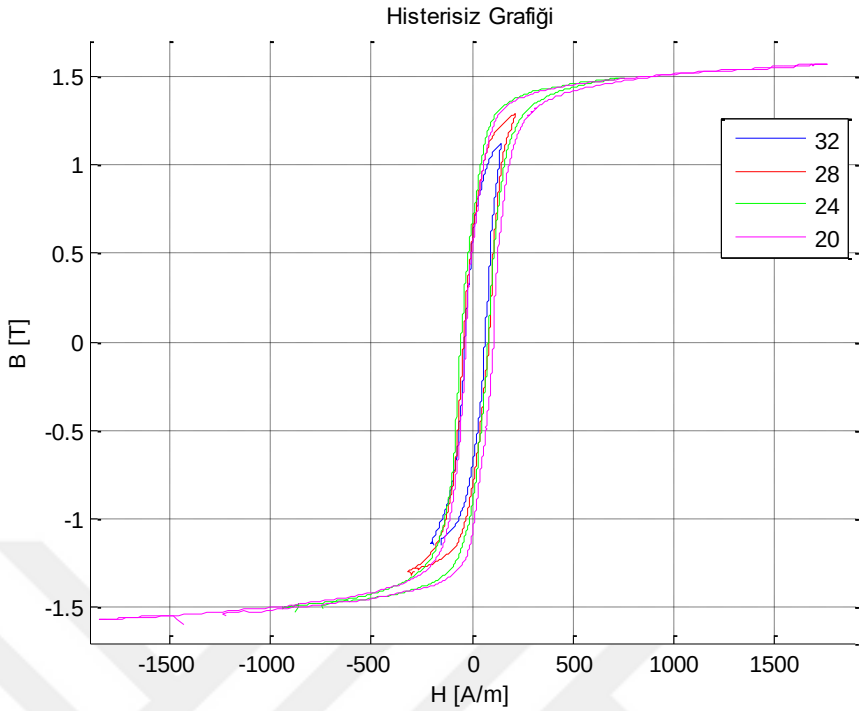
Haddeme doğrultusunda kesilmiş 16 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra besleme gerilimi avometreden okunan akım değeri 200mA değerinde sabit kalacak şekilde ayarlanarak 50Hz ve 75Hz frekans değeri için veriler kayıt edilmiştir. Şekil 6.21'da elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 6.21. 75Hz frekansın değişiminin etkisi

6.2.4.6. Sabit gerilim altında değişen numune sayısı

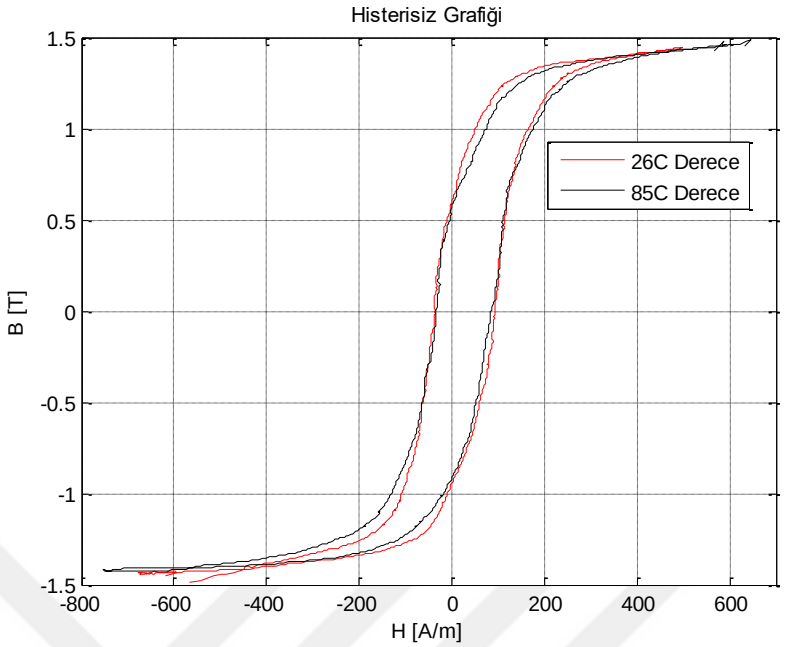
Haddeme doğrultusunda kesilmiş 32 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra 50Hz frekansındaki besleme gerilimi en yüksek genlik değerine alınmıştır. 32 numune için veriler alındıktan sonra her seferinde 4 numune azaltılarak 20 numuneye kadar sırasıyla veriler alınmıştır. Şekil 6.22'de elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 6.22. Sabit manyetik alan şiddetinde numune miktarındaki azalmanın etkisi

6.2.4.7. Sıcaklık artışının etkisi

Haddeme doğrultusunda kesilmiş 16 adet numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra 50Hz frekansındaki gerilim beslenmiştir. Lazer sıcaklık ölçer ile numune sıcaklığı 26^{o}C ölçülmüş ve bu sıcaklıkta veriler alınmıştır. Daha sonra sıcak hava fanı ile numuneler ısıtılmış ve 85^{o}C'ye ulaşıldığında yeniden veriler alınmıştır. Şekil 6.23'de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Sıcaklık artışının etkisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında manyetik malzemelerin çeşitleri ve sınıflandırılması hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Manyetik malzemelerin test yöntemleri belirtilmiş, özellikle Epstein Çerçevesi detaylı olarak açıklanmıştır. Demir kayıplarının oluşumu hesaplanması konularında bilgiler verilmiştir.

Manyetik özelliklerin ölçülebilmesi için Epstein Çerçevesi standartları IEC ve ASTM standartlarına göre detaylı şekilde araştırılmış, iki standart arasındaki farklılıklar ve yakınlıklar irdelenmiş ve tezde detaylı olarak sunulmuştur.

Standartları paralelinde Epstein Çerçevesi tasarımı detaylı olarak yapılmış, bu imalata göre uygun malzeme seçimleri hakkında bilgiler verilmiştir. Tasarımı yapılan Epstein Çerçevesi standartlara uygun şekilde üretilerek gerekli değerleri sağladığı görülmüştür.

Deney düzeneğinin kurulabilmesi için yükselteç devresi tasarlanarak üretilmiş ve deneyde kullanılmıştır. İleri çalışmalarda yükseltici kazancı arttırılarak ve daha güçlü bir opamp entegresi kullanılarak daha yüksek manyetik alan şiddeti değerlerinde ölçümleri yapılabilir.

Farklı kesim açılarına sahip numuneler test edilerek farklı koşullar için histerezis eğrisinin değişimi gözlemlenmiştir. Taneciği yönlendirilmemiş saclar için kesim doğrultusu ile haddeleme yönündeki açı değeri yükseldikçe histerezis eğrisinde saat yönünde dönme görülmektedir bunun sonucu doyum noktası çok düşük miktarda azalmaktadır. Taneciği yönlendirilmiş numunede ise dik kesim doğrultusunda histerezis eğrisi oldukça büyümüş kayıplar artmış doyum noktası ise oldukça azalmıştır. Numune sayısındaki değişmenin histerezis eğrisine önemli bir etkisi görülmemiştir. Düşük frekanslarda kondansatör empedansındaki yükselme o frekanslardaki sonuçları bozmaktadır. Düşük frekans değeri için kondansatörün daha küçük sığalı ile değiştirilmesi gerekmektedir. Yüksek frekans değerlerine çıkıldıkça histerezis eğrisinin alanı azalmaktadır. Sabit gerilimde numune sayısındaki azalma

relüktans değerini düşürmekte ve manyetik alan şiddetini arttırmaktadır. Numuneler ısıtılarak daha yüksek sıcaklıklarda test edildiklerinde doyuma ulaşması yavaşlarken aynı uyartım akımıyla daha yüksek manyetik alan şiddetlerine ulaşılmaktadır.

İlerleyen çalışmalarda her katmanda farklı kesim açısına sahip taneciği yönlendirilmiş saçtan kesilmiş numunelerin dizimiyle histerezis eğrisi değişimi elde edilebilir. Daha güçlü bir besleme kaynağı ile yüksek frekanslarda testler gerçekleştirilebilir. Numuneler dizildikten sonra trafo ve motor imalatında kullanılan sac birleştirilme yöntemleri etkileri oluşturularak farkları incelebilir. Ayrıca numunelere kaynak yapılarak Epstein test sisteminde kaynağın etkileri de incelenerek kaynaklı elektromanyetik sistemlere etkisine bakılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Waide P., Brunner C. U., Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, *Inernational Energy Agency* , 35, 2011.

[2] Little A. D., Inc. Guide For Evaluation of Energy Saving Potential Prepared for the Office of Building Technology State and Community Programs(BTS) *U.S. Department of Energy*, 1999.

[3] Dunlop C. J., Modeling Magnetic Core Loss for Sinusoidal Waveforms, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Massachusetts, 2008.

[4] Ibrahim M., Modeling of Core Losses in Electrical Machine Laminations Exposed High Frequency and Non-sinusoidal Flux, Master Thesis, Concordia University, Electrical and Computer Engineering, Canada, 2011.

[5] Bertotti G., Space-Time Correlation Properties of The Magnetization Process and Eddy Current Losses Theory, *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**, 5293-5305.

[6] Ionel D. M., Popescu M., Dellinger S. J., Miller T. J. E., Heideman R. J., McGilp M. I., On Variation With Flux And Frequency of The Core Loss Coefficients in Electrical Machines, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2006, **42**(3), 658-667.

[7] Chen Y., Pillay P., An Improved Formula For Lamination Core Loss Calculations In Machines Operating With High Frequency And High Flux Density Excitation, *IEEE 37th IAS Annual Meeting*, 2002, **2**, 759-766.

[8] Deng F., An Improved Iron Loss Estimation For Permanent Magnet Brushless Machines, *IEEE Transactions On Energy Conversions*, 1999, **14**(4), 1391-1395.

[9] Slemon G. R., Liu X., Core Losses In Permanent Magnet Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1990, **26**(5), 1653-1655.

[10] Jordan H., Die Ferromagnetischen Konstanten Für Schwache Wechselfelder, *Allgemeine Elektricitats Gesellschaft*,1924, **1**, 8.

[11] Zhang Y., Alatawneh N., Cheng M. C., Pillay P., Magnetic Core Losses Measurement Instrumentations and a Dynamic Hysteresis Loss Model, *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, DOI: 10.1109/EPEC.2009.5420918

[12] Tumanski S., Stabrowski M., The Magnetovision Method As A Tool To Investigate The Quality of Electrical Steel, *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**, 488-495.

[13] Moses A. J., Phillips P. S., Effects of Stacking Methods on Epstein-Square Power Loss Measurements, *Electrical Engineers, Proceeding of Institution of*, 1977, **124**(4), 413-416.

[14] Köçkar H., Meydan T., Specific Power Loss Comparisons of Magnetic Strips Using Standart Epstein Frame, *Journal of the Korean Physical Society*, 2002, **40**(5), 918-920.

[15] Küçük, F., Manyetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.

[16] Mthombeni T. L., Pillay P., Strnat R. M. W., A New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drivers*, DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195784.

[17] Mthombeni T. L., Pillay P., Strnat R. M. W., New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2007, **22**(3), 614-620.

[18] Manyage M. J., Pillay P., New Epstein Frame for Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities, *Industry Applications Society Annual Meeting*, DOI: 10.1109/08IAS.2008.51.

[19] De Espíndola A. A., Tristão F., Schlegel J. P., Batistela N. J., Sadowski N., Kuo-Peng P., Rigoni M., Comparison of Iron Losses Evaluations by Different Testing Procedures, *XIX International Conference on Electrical Machines*, DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608253.

[20] Muhit M. S., Magnetic and Electric Characterization of Materials for Electrical Machine, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2011

[21] Demir A., Tek Saç Testi Yöntemi İle Nüve Malzemelerinin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2012, 320695

[22] Yanawati Y., Norjasmi A. R., Syatirah M. N., Nor Shafiqin S., Pungut I., Baharudin N. H., Azuddin B., Nominal Power Loss on 0.35mm and 0.50mm Thicknesses of Non-oriented Steel Sheets Using Epstein Tester Frame, *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*, Langkawi, Malaysia. 3-4 June 2013

[23] Parthasaradhy P., Ranganayakulu S. V., Hysteresis and Eddy Current Losses of Magnetic Material by Epstein Frame Method-Novel Approach, *The International Journal Of Engineering And Science*, 2014, **1**, 85-93.

[24] Gürdal O., *Elektromanyetik Alan Teorisi*, 1. Baskı, Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, Bursa, 2015

[25] Smith W. F. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 6. Baskı, Literatür, İstanbul, 2012

[26] http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/mag_cores_data_bulletin.pdf, (Ziyaret Tarihi:06 Mayıs 2016)

[27] ASTM-A664-15, Standard Practice for Identification of Standard Electrical Steel Grades in ASTM Specifications, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2015.

[28] BS EN 60404-2:1998 +A1:2008, Magnetic Materials - Part 2: Methods of Measurement of The Magnetic Properties of Electrical Steel Strip and Sheet by Means of an Epstein Frame, *International Electrotechnical Commission*, London, 2008

[29] IEC 404-3: 1992, Magnetic Materials - Part 3: Methods of Measurement of The Magnetic Properties of Magnetic Sheet and Strip by Means of a Single Sheet Tester, *International Electrotechnical Commission*, London, 1992

[30] ASTM A343/A343M−14, Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2014

[31] ASTM A804/A804M−04 (Reapproved 2009), Standard Test Methods for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Sheet-Type Test Specimens, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2009

[32] http://www.dierk-raabe.com/electrical-steels-fe-3-si/, (Ziyaret tarihi: 09 Haziran 2016)

[33] Korzunin G. S., Chistyakov V. K., Rimshev F. F., Developing Techniques for Testing Magnetic Properties of Electric Steels I. Epstein's Apparatus, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, **36**(11), 2000, 782-799.

[34] http://nptel.ac.in/courses/108105053/pdf/L-22(TB)(ET)%20((EE)NPTEL).pdf, (Ziyaret Tarihi:09 Temmuz 2016)

[35] Walker J. A., Aspects of Magnetisation and Iron Loss Characteristics In Switched-Reluctance and Permanent-Magnet Machines, PhD Thesis, The University of Glasgow, The Department of Electronics and Electrical Engineering of The Engineering Faculty, Glasgow, 2006

[36] Pillay P., Improved Design of Motors for Increased Efficiency in Residentail and Commercial Buildings, *Clarkson University*, 2008

EKLER

EK-A

Bölüm 6.2.1'de kullanılan OPA541 entegresinin aşağıda verilen bilgi sayfasına göre yükseltici devresi oluşturulmuştur.

BURR-BROWN®



OPA541

High Power Monolithic OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- POWER SUPPLIES TO ±40V
- OUTPUT CURRENT TO 10A PEAK
- PROGRAMMABLE CURRENT LIMIT
- INDUSTRY-STANDARD PIN OUT
- FET INPUT
- TO-3 AND LOW-COST POWER PLASTIC PACKAGES

APPLICATIONS

- MOTOR DRIVER
- SERVO AMPLIFIER
- SYNCHRO EXCITATION
- AUDIO AMPLIFIER
- PROGRAMMABLE POWER SUPPLY

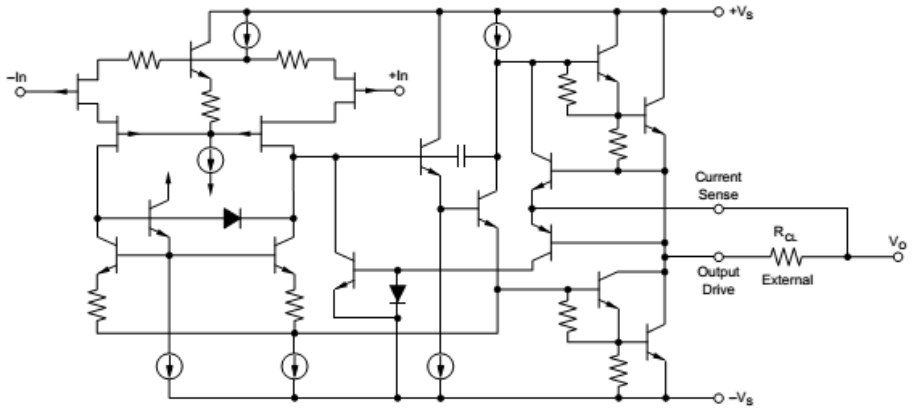
DESCRIPTION

The OPA541 is a power operational amplifier capable of operation from power supplies up to ±40V and delivering continuous output currents up to 5A. Internal current limit circuitry can be user-programmed with a single external resistor, protecting the amplifier and load from fault conditions. The OPA541 is fabricated using a proprietary bipolar/FET process.

Pinout is compatible with popular hybrid power amplifiers such as the OPA511, OPA512 and the 3573.

The OPA541 uses a single current-limit resistor to set both the positive and negative current limits. Applications currently using hybrid power amplifiers requiring two current-limit resistors need not be modified.

The OPA541 is available in an 11-pin power plastic package and an industry-standard 8-pin TO-3 hermetic package. The power plastic package has a copper-lead frame to maximize heat transfer. The TO-3 package is isolated from all circuitry, allowing it to be mounted directly to a heat sink without special insulators.

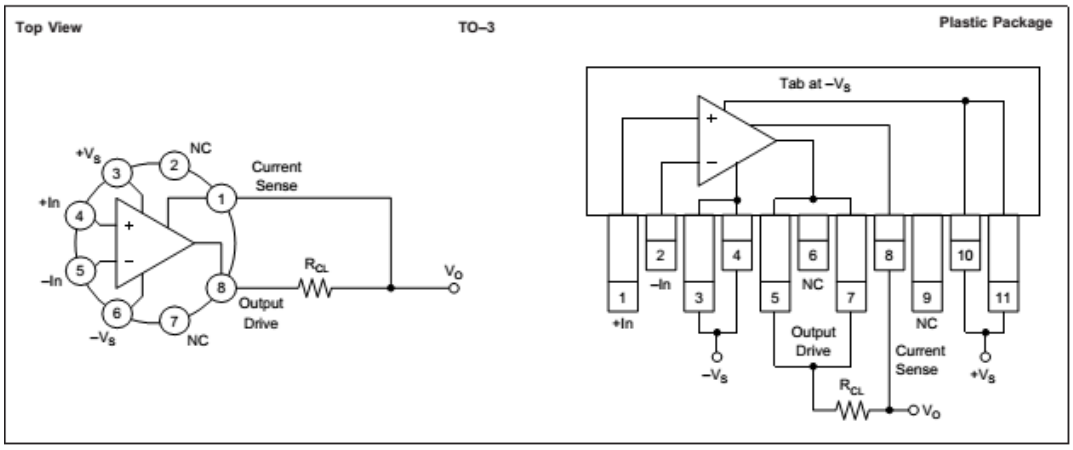


International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111
Internet: http://www.burr-brown.com/ • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

PDS-737H

BURR-BROWN®

CONNECTION DIAGRAMS



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, $+V_S$ to $-V_S$	80V
Output Current	see SOA
Power Dissipation, Internal[1]	125W
Input Voltage: Differential	$\pm V_S$
Common-mode	$\pm V_S$
Temperature: Pin solder, 10s	+300°C
Junction[1]	+150°C
Temperature Range:	
AM, BM SM	
Storage	–65°C to +150°C
Operating (case)	–55°C to +125°C
AP	
Storage	–40°C to +85°C
Operating (case)	–25°C to +85°C

NOTE: (1) Long term operation at the maximum junction temperature will result in reduced product life. Derate internal power dissipation to achieve high MTTF.

ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	TEMPERATURE RANGE	CONTINUOUS CURRENT
OPA541AP	Power Plastic	–25°C to +85°C	5A at 25°C
OPA541AM	TO-3	–25°C to +85°C	5A at 25°C
OPA541BM	TO-3	–25°C to +85°C	5A at 25°C
OPA541SM	TO-3	–55°C to +125°C	5A at 25°C

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER[1]
OPA541AP	Power Plastic	242
OPA541AM	TO-3	030
OPA541BM	TO-3	030
OPA541SM	TO-3	030

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

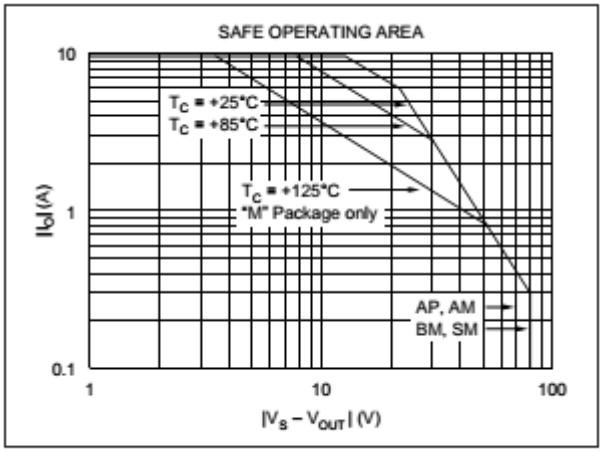


FIGURE 1. Safe Operating Area.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Gül E., Kara Y. E., **Zengin K.**, Toprak İletkenliği Kontrollü Otomatik Sulama Prototipi, *6. Ulusal Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi*, Ankara, 15 Haziran 2015

ÖZGEÇMİŞ

Kazım ZENGİN, Temmuz 1987, Burdur doğumludur. İlköğretimini Mersin'de, Orta ve lise öğrenimini Alanya'da tamamladı. 2005 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliğini bölümünden 2009 yılında mezun oldu. 2009 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2009-2014 yılları arasında Çerkezköy Türk Tekstil Vakfı Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi'nde uzman eğitici olarak çalışmıştır. 2013 yılı nisan ayında Karkamış Hudut Karakolu Karakol Komutanı göreviyle, yedek subay olarak askerliğini tamamlamıştır. 2014 yılında Kırklareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve halen devam etmektedir.