

**TEK SAÇ TESTİ (SINGLE SHEET TESTER-SST) YÖNTEMİ İLE NÜVE
MALZEMELERİN MANYETİK KAYIPLARININ ÖLÇÜLMESİ**

Ahmet DEMİR

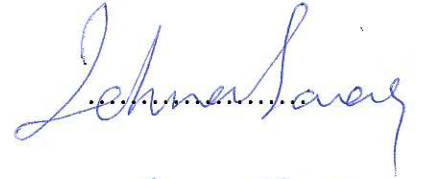
**Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK
Haziran 2012**

KABUL:

Ahmet DEMİR tarafından hazırlanan “TEK SAÇ TESTİ (SINGLE SHEET TESTER-SST) YÖNTEMİ İLE NÜVE MALZEMELERİN MANYETİK KAYIPLARININ ÖLÇÜLMESİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir. 14/06/2012

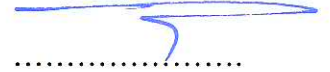
Başkan: Doç. Dr. Zehra SARAÇ (BEÜ)



Üye : Doç. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK (BEÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet UZUNTARLA (BEÜ)



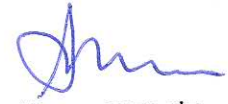
ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2012



Prof. Dr. Özden ÖZEL GÜVEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Ahmet DEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK SAÇ TESTİ (SINGLE SHEET TESTER-SST) YÖNTEMİ İLE NÜVE MALZEMELERİN MANYETİK KAYIPLARININ ÖLÇÜLMESİ

Ahmet DEMİR

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zehra SARAC

Haziran 2012, 95 sayfa

Dünyada enerji verimliliği gün geçtikçe önem kazanmaya devam etmektedir. Elektrik makinaları elektrik tüketiminin çoğundan sorumludur. Dolayısıyla makine verimliliğinde küçük bir kazanım ile büyük bir enerji tasarrufu elde edilebilir. Elektrik makinelerinin geliştirilmesi için makine kayıpları doğru ölçülmelidir. Elektrik makinelerindeki kayıpların önemli bir kısmı nüve kayıplarından kaynaklanır.

Nüve kayıplarının azaltılması, enerji sorunu ile başa çıkmada önemli adımlardan biridir. Manyetik akı yoğunluğu veya frekans arttığı zaman, manyetik kayıplar artar. Değişik frekans ve akı yoğunluğunda çalışacak verimli cihaz üretmek günümüzde önemli bir esastır. Makine verimliliğini artırmak için makine tasarım aşamasında nüve kayıpları doğru ölçülmelidir. Nüve kayıp verileri genellikle sınırlı bir frekans ve akı yoğunluğu aralıkları içinde çelik üreticileri tarafından sağlanmaktadır. Bu veriler elektrikli makinelerde nüve kayıpları tahmini için yeterli değildir.

ÖZET (devam ediyor)

Bu çalışmada bilim çevresinde son yıllarda avantajlarından dolayı ilgiyle izlenen tek saç test cihazı (SST) nüve kaybı ölçümlerinde kullanılmıştır. Mıknatıslanma akımı yöntemi ile manyetik alan şiddeti, akım değerleri ve nüve kayıpları hesaplanmış, değişik manyetik akı ve frekanslarda nüve kayıp eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen nüve kayıp test değerlerinden eğri uydurma yöntemi ile kayıp katsayıları bulunmuştur. Elde edilen histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları vasıtasıyla nüve malzemelerin kayıp modelleri oluşturulmuştur.

Çoğunlukla nüve kayıplarının sadece 50Hz frekanstaki değerleri, nüve üreticileri tarafından verilmektedir. Verimli elektromanyetik makina tasarlamak için, geniş frekans ve manyetik akı yoğunluğu bölgesinde nüve kayıplarının bilinmesi gereklidir. Bu çalışma mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kayıp ölçümleri için, SST nüve kaybı ölçme cihazı tasarlanmıştır. Literatürde mıknatıslanma akımı yöntemi ile çalışan SST cihazı ile kayıp katsayılarının bulunması yapılmamıştır. Bu tezde bu husus üzerinde çalışılarak literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır. SST cihazı ile değişken frekans ve manyetik akı yoğunluğunda nüve kaybı testleri yapılmıştır. Elde edilen değerler yardımıyla nüve kaybı modelleri oluşturulmuştur. Bu kayıp modelleri vasıtasıyla 50Hz ile 500Hz frekans aralığında ve farklı akı yoğunluklarında nüve kaybı değerleri verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Nüve kayıpları, tek saç testi (SST), histerisiz kaybı, girdap akımı kaybı, anormal kayıplar, mıknatıslanma akımı yöntemi, eğri uydurma.

Bilim Kodu: 609.04.01

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MEASUREMENT OF CORE LOSSES IN MAGNETIC MATERIALS WITH SINGLE SHEET TESTER(SST) METHOD

Ahmet DEMİR

**Bülent Ecevit University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Zehra SARAÇ

June 2012, 95 pages

Energy efficiency continues to gain importance in the world day by day. Electrical machines are responsible for most of the electricity consumption. Therefore, with a small increase in the efficiency of the machine, a large energy-saving can be achieved. The development of electrical machines requires accurate measurement of losses in the machine. An important part of the losses in electrical machines is caused by core losses.

Reduction of core losses is one of the most important steps to deal with the energy problem. When the magnetic flux density or the frequency increases, the magnetic losses increase. Producing efficient device which works at different frequencies and flux density is essential nowadays. Accurate measurement of core losses is required to improve the efficiency of the machine during the machine design. Core loss data, usually within a limited range of frequency and flux density is provided by steel producers. These data are not sufficient to estimate the core losses of electrical machines.

ABSTRACT (continued)

In this study, mentioned with interest in scientific communities in recent years due to the advantages, SST tester is proposed and implemented for core loss measurement. With the magnetization current method the magnetic field strength, current values and core losses are calculated, core loss curves were obtained for various frequencies and magnetic flux. Then, with the help of test core loss values, the loss coefficient was found using curve fitting method. Through the obtained hysteresis, eddy current and abnormal core loss coefficient, the loss models of the core materials have been developed.

Often the core loss values only at 50Hz frequency are given by the core manufacturers. For efficient electromagnetic machine design, core losses must be known at wide frequency and magnetic flux density ranges. The study was carried out using the method of magnetizing current. For loss measurements, SST core loss tester is designed. In the literature, there is no study for determination of the loss coefficients with SST which is worked with the magnetization current method. This thesis aims to contribute to the literature by working on this issue. The core loss tests were carried out with SST device at variable frequency and magnetic flux density conditions. Core loss models have been developed with the help of the obtained values. Through the loss models, in the frequency range of 50Hz to 500Hz for different flux densities, core loss values were calculated.

Key Words: Core losses, single sheet tester(SST), hysteresis loss, eddy current loss, abnormal losses, magnetizing current method, curve fitting.

Science Code: 609.04.01

TEŞEKKÜR

Bana her konuda yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen ve çalışma ile ilgili olarak eksik noktaları görmemde, gidermemde büyük katkısı bulunan saygı duyduğum danışman hocam Sayın Doç. Dr. Zehra SARAÇ'a (BEÜ) teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca teknik her konuda imkânları sunmasından dolayı değerli hocamız Doç. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK'e (BEÜ), desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 NÜVE KAYIPLARI.....	 7
2.1 NÜVE KAYBI ÖLÇME İHTİYACI.....	7
2.2 NÜVE KAYIP MODELLERİNİN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ.....	8
2.3 MIKNATISLANMA VE HİSTERİSİZ EĞRİSİ	10
2.4 MANYETİK (NÜVE) KAYIPLAR	14
2.4.1 Histerisiz Kaybı	14
2.4.2 Girdap Akımı Kaybı.....	20
2.4.3 Anormal Kayıplar	24
 BÖLÜM 3 NÜVE KAYBI ÖLÇME YÖNTEMLERİ.....	 27
3.1 TORK-METRİK YÖNTEM	28
3.2 TERMO-METRİK YÖNTEM	28
3.3 ALAN-METRİK YÖNTEM	29
3.4 WATT-METRİK YÖNTEM.....	30
3.5 B VE H BİLEŞENLERİ ÖLÇÜM TEKNİKLERİ.....	31

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	Sayfa
3.5.1 Mıknatıslanma Akımı Yöntemi	31
3.5.2 H Algılayıcı Bobini Yöntemi	32
3.5.3 B Algılayıcı Bobini Yöntemi.....	34
3.5.4 Rogowski-Chattock Bobini	35
3.5.5 Hall Elemanı	37
3.5.6 B İğneleri.....	38
 BÖLÜM 4 NÜVE KAYBI ÖLÇÜM CİHAZLARI.....	39
 4.1 EPSTEIN CİHAZI.....	39
4.2 TOROİD TEST CİHAZI	43
4.3 SST (SINGLE SHEET TESTER)	44
 BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
 5.1 TEST DÜZENEGİ.....	49
5.1.1 Ölçüm Tekniği	50
5.1.2 SST Test Düzenegi.....	54
5.2 HİSTERİSİZ EĞRİLERİ	57
5.2.1 M4 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri	58
5.2.2 M5 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri	59
5.2.3 M3 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri	60
5.3 SABİT FREKANS NÜVE KAYIP VE H MANYETİK ALAN EĞRİLERİ.....	61
5.3.1 M4 Test Örneği İçin 50Hz Testleri	61
5.3.2 M5 Test Örneği İçin 50Hz Testleri	63
5.3.3 M3 Test Örneği İçin 50Hz Testleri	65
5.4 NÜVE KAYBININ BİLEŞENLERİNE AYRILMASI VE MODELLENMESİ	67
5.4.1 M4 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması.....	68
5.4.2 M5 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması.....	76
5.4.3 M3 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması.....	83

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Sayfa
1.1	SST için etkin manyetik yol.....3
2.1	Mıknatıslanma olayı, a) N sarımlı toroit nüve, b) İndükleme akımı..... 11
2.2	Histerisiz ve mıknatıslanma eğrisi 12
2.3	Manyetik alan şiddetinin değişimiyle oluşan histerisiz eğrileri 12
2.4	Toroit nüvesinin sargılarında indüklenen gerilim(e), manyetik akı yoğunluğunun(B) ve akımın(i) değişimleri 13
2.5	Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış halde atomların dizilimi 17
2.6	Histerezis çevrimindeki manyetik alan oluşumundaki enerji transferleri. 18
2.7	%3 Si-Fe elektrik çeliği için histerezis eğrisi. 19
2.8	Manyetik malzemede girdap akımları, a) Bütün manyetik nüve malzeme, b) Yalıtılmış ince saçlardan oluşmuş nüve malzeme 21
2.9	Nüve malzemenin tek laminasyonun detay resmi..... 21
2.10	Transformatör nüvelerinde kayıpların klasik ayrılması 25
3.1	Baily(1896) tarafından yumuşak demir ve sert çelik için elde edilen döner ve alternatif manyetik alanlar altında histerisiz kayıpları 27
3.2	Alan-metrik yönteminin kullanıldığı bir ölçme sistemi, a) 2 Boyutlu manyetik test sistemi blok şeması, b) Kare örnekli SST, c) Manyetik kutuplar arasındaki test örneğinin yerleşimi..... 30
3.3	H bobini, a) Tek boyutlu H bobini, b) 2 boyutlu H bobini, c) H bobininin yerleşimi 32
3.4	Çift H bobinli yerleşim..... 33
3.5	H bobinlerinin kalibrasyonu yapılabilecek selenoit düzeneği 34
3.6	B bobinlerinin yerleşimi, a) B homojen ise, b) B homojen değilse 35
3.7	Rogowski-Chattock bobini-manyetik potansiyometre..... 36
3.8	Hall etkisi olayında manyetik alan, akım ve indüklenen gerilimin ilişkisi 37
3.9	B iğnelerini kullanarak B bileşenini ölçme prensip şeması..... 38
4.1	Epstein cihazının genel görünümü 39
4.2	Epstein cihazında elektrik şerit saç örneklerinin kare yerleşim düzeni 40
4.3	Epstein çerçevesine örneklerin yerleştirilmesi 40
4.4	Epstein çerçevesinde nüve kaybını hesaplamada kullanılan devre..... 42
4.5	Toroit cihazının sargı ve nüve malzemeden oluşan yapısı 43
4.6	Sarımlı yapılmış toroidal nüveli yapı 44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Küçük test örnekleri için tasarlanmış bir SST	45
4.8 SST’de test edilecek örnek sacın boyunduruklar arasındaki yerleşimi.....	45
4.9 SST için ölçüm prensibini gösteren devre	47
5.1 SST ölçme sisteminin genel prensip şeması.....	50
5.2 SST ölçme sisteminin geri-beslemeli çalışma prensip şeması.....	50
5.3 M5 kalite Si-Fe nüve saç örnek test malzemesinin kayıp eğrisi.....	52
5.4 M4 kalite Si-Fe örnek için değişken frekanslı kayıp eğrisi.....	53
5.5 M4 kalite Si-Fe örnek için manyetik alan şiddeti eğrisi.....	53
5.6 SST ile nüve malzeme özelliklerinin ölçüldüğü sistemin ana cihazları.....	54
5.7 SST bobinlerinin yerleşimi, a) Boş bobin karkası, b) Sarılmış B ve mıknatıslanma bobinleri, c) Bobinlerin ve test örneğinin kesitten görünümü.....	55
5.8 SST’de boyunduruklar, bobinler ve test örneği için yerleşim resimleri.....	56
5.9 SST’yi geri-beslemeli olarak beslemek için kullanılan devre	56
5.10 Geri-beslemeyi içeren elektronik kartın uygulanması.....	57
5.11 Histerisiz, H ve B eğrilerini oluşturmak için kullanılan düzenek.....	58
5.12 M4 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.....	58
5.13 M4 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.....	59
5.14 M5 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.....	59
5.15 M5 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.....	60
5.16 M3 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.....	60
5.17 M3 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.....	61
5.18 M4 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.....	63
5.19 M5 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.....	65
5.20 M3 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.....	67
5.21 M4 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	69
5.22 M4 için 1T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	70
5.23 M4 için 0,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	70
5.24 B=1,5T ‘da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.....	72
5.25 B=1 T ‘da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.....	73
5.26 B=0,5 T ‘da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.....	74
5.27 M4 nüve malzeme için 50Hz’de ve değişken akıda kayıp eğrileri.....	75
5.28 M5 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	77
5.29 M5 için 1T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	77
5.30 M5 için 0,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.31 B=1,5 T 'da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.	79
5.32 B=1 T 'da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.	80
5.33 B=0,5 T 'da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.	81
5.34 M5 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri.	83
5.35 M3 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.	84
5.36 B=1,5 T'da M3 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.	86
5.37 M3 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri.	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Elektrik çelik saçları standart ölçüm yöntemleri için değerlendirme ölçütleri.....	4
2.1 Elektrik çeliklerinde nüve kayıplarını azaltma metotları	26
5.1 Kayıp eğrilerini oluşmak için kullanılan örnekleme tablosu.....	52
5.2 M4 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşmak için kullanılan tablosu.....	62
5.3 M5 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşmak için örnekleme tablosu.....	64
5.4 M3 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşmak için örnekleme tablosu.....	66
5.5 M4 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.....	69
5.6 M4 kayıp modelinden $B=1,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	71
5.7 M4 kayıp modelinden $B=1 T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	72
5.8 M4 kayıp modelinden $B=0,5 T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	74
5.9 M4 için $f=50\text{Hz}$ 'de nüve kaybı örnekleme tablosu.....	75
5.10 M5 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.....	76
5.11 M5 kayıp modelinden $B=1,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	79
5.12 M5 kayıp modelinden $B=1 T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	80
5.13 M5 kayıp modelinden $B=0,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	81
5.14 M5 için $f=50\text{Hz}$ 'de nüve kaybı örnekleme tablosu.....	82
5.15 M3 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.....	84
5.16 M3 kayıp modelinden $B=1,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.....	85
5.17 M3 için $f=50\text{Hz}$ 'de nüve kaybı örnekleme tablosu.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	: Bağlı geçirgenlik
B	: Akı yoğunluğu
H	: Manyetik alan şiddeti
B_m	: Maksimum akı yoğunluğu
H_m	: Maksimum manyetik alan şiddeti
i	: Akım
v	: Gerilim
V	: Efektif gerilim
R	: Elektriksel direnç
N	: Sarım sayısı
N_p	: Primer sarım sayısı
N_s	: Sekonder sarım sayısı
e	: İndüklenen gerilim
ϕ	: Akı
A_c	: Akının geçtiği yüzeye dik olan etkin kesit
ω	: Açısal hız
f	: Frekans
l_c	: Ortalama manyetik yol(toroit için)
l_m	: Ortalama manyetik yol(SST, Epstein cihazları için)
p	: Ani güç
P	: Ortalama güç
ϑ_C	: Manyetik malzemenin hacmi
A_h	: Histerezis kapalı eğrisinin alanı
P_h	: Histerezis kaybı
k_h	: Histerezis kayıp katsayısı
P_g	: Girdap akımları kaybı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

k_g	: Girdap akımları kaybı katsayısı
P_a	: Anormal kayıplar
k_a	: Anormal kayıp katsayısı
ρ	: Malzemenin öz direnci
δ	: Kalınlık, deri kalınlığı
P	: Toplam nüve kaybı
p	: Oranlanmış nüve kaybı
V_s	: Besleme gerilimi
C	: Kondansatör
V_c	: Kondansatör gerilimi
V_i	: Giriş gerilimi
V_o	: Çıkış gerilimi
J	: Akım yoğunluğu
σ	: Elektriksel iletkenlik
d	: İletken çapı
T	: Periyot, sıcaklık
R_i	: Sargı iletken direnci

KISALTMALAR

SST	: Single Sheet Tester (Tek Saç Testi)
FE	: Sonlu Eleman Yöntemi
IEC	: International Electrotechnical Commission
Si-Fe	: Silisyum ve demir karışımı nüve malzeme

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yüzyılda dünyada enerji verimliliği çok önemli bir konu haline gelmiştir. Elektromekanik cihazların giderek artışı günlük yaşamda enerji tüketimini arttırmıştır. Enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bir dünyada elektrik enerjisi harcayan cihazların tasarımı önemlidir. Düşük enerji maliyetli üretim, elektrikli makine tasarımcılarının hedefidir. Yüksek verimde tasarlanan bir elektromanyetik cihaz kullanılırken enerji tüketimi daha azdır. Artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için ilave enerji santrallerinin devreye girmesi gerekmektedir. Bu yöntem hem çok maliyetlidir, hem de çevreye CO₂ saldığı için zararlıdır. Enerji talebini karşılamak için diğer çözüm, mevcut enerjinin tasarruflu şekilde kullanılmasıdır. Ekonomik ve çevresel nedenler yüksek verimli elektrikli cihazların araştırılmasını öne çıkarmıştır.

Elektrik makineleri dünyada üretilen elektriğin çoğunluğunu kullanmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisini en fazla tüketen küçük ve büyük güçlü elektrik motorlarının tasarımı, enerji verimliliği açısından üzerinde dikkatle durulması gereken noktadır. Küresel elektrik enerjisi tüketiminde büyük bir orana sahip makinelerin verimliliğinde küçük bir iyileştirme, önemli oranda enerji tasarrufuna neden olacaktır. Nüve kayıplarının azaltılması bu sorunla başa çıkmak için önemli adımlardan biridir.

Gelişen teknolojik nedenlerden dolayı elektrik makinelerinin yapısında mevcut olan manyetik malzemelerin yüksek akı yoğunluklarında ve az kayıpla çalıştırılması gerekir. Manyetik akı yoğunluğunun ve frekansın artışı, manyetik kayıpları artırır. Verimli cihaz üretmek için, manyetik malzemelerin kayıplarını daha geniş frekans ve akı yoğunluğu bölgesinde bilmek gerekir. Bilim adamlarının yüksek verimli elektromanyetik aygıt tasarımları ülke ekonomisine önemli katkı sağlayacaktır.

Elektrik makinelerinin en önemli yapısal parçası nüve malzemelerdir. Transformatörlerde, motor ve jeneratörlerde az kayıplı nüve malzemelerinin kullanımı için talep artmaktadır.

Genel olarak en çok Si-Fe alaşımlı nüve malzemesi tercih edilmektedir. Tanecikleri yönlendirilmiş(Grain-Oriented) %3 Si-Fe çelikler transformatör nüvelerinde kullanılır. Yönlendirilmemiş Si-Fe çelikleri motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılır. Kullanılan manyetik malzemelerin histerisiz çevrimi ve nüve kaybı gibi manyetik özellikleri, birçok tasarımcı ve üretici için araştırma konusu olmuştur (Zhong vd. 2007).

Elektrik makinelerinin verimli çalışması için nüvelerde meydana gelen kayıpların çok iyi şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bunun bilinebilmesi için imalat öncesinde modellemeye ihtiyaç vardır. Elektrik makinelerinin verimli çalışacak şekilde tasarlanıp üretilmeleri için, kayıpların üretim öncesinde bilinmesi gereklidir.

Manyetik malzemelerde kayıp ölçmede en çok kullanılan manyetik test cihazlarında uyartım ve ölçme olmak üzere iki sargı mevcuttur. Bu iki sargı test yapılacak nüve malzeme üzerine sarılır. Epstein, toroit ve SST olmak üzere üç çeşit nüve kayıp cihazı kullanılmaktadır. Epstein yöntemi (IEC publ. 60404-2 Ed.3.0) ve SST(tek saç test) yöntemi (IEC publ. 60404-3 Ed.2.0) elektrik çelik saç manyetik özelliklerinin ölçümü için yürürlükte olan iki standart yöntemdir. Farklı sonuçlar üretebilen iki standart yöntem olan Epstein çerçevesi ve SST cihazı paralel bir şekilde kullanılmaktadır.

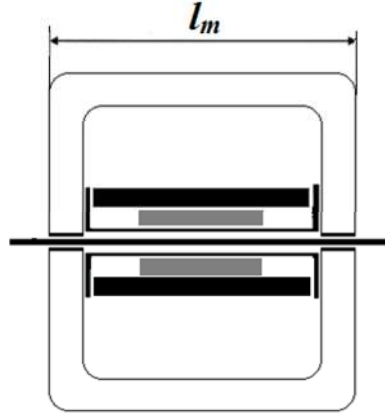
Sievert (2000) makalesinde nüve kaybının fiziksel ve mühendislik yaklaşımına yer vermiştir. Mühendislik yaklaşımına göre mıknatıslanmış bir nüvenin ortalama manyetik kaybı, o nüve malzemenin manyetik kalitesini ortaya çıkarır. Sievert'e göre Epstein çerçevesinde test örneklerinin köşe dizilişinden dolayı kaçak akılar oluşmaktadır. Dolayısıyla manyetik akı homojenliğini bozarak sistematik hataya neden olmaktadır. Fakat buna rağmen Epstein çerçevesi standart manyetik özellik test cihazı olarak kabul edilmiştir.

Epstein çerçevesinin bazı sakıncaları vardır. Test olacak örneklerin kesme gerilimlerinin azaltılması için ısı ile tavlama işi zaman alıcıdır. Tavlama yapılmazsa sonuçlar yüksek çıkacaktır. Tavlama en azından yönlendirilmiş tanecikli malzemelerde yapılmalıdır. SST'ye göre Epstein çerçevesine örnek yerleştirmek daha zordur. Ayrıca her malzemeye Epstein metodunu kolayca uygulamak mümkün değildir. Bu nedenlerden dolayı SST geliştirilmiş ve standart olarak kabul edilmiştir. Önceki yıllarda Epstein değerlerine o kadar bağlılık vardı ki 1882 yılında yayımlanan SST standardına göre SST değerlerinin kalibrasyonunda daha önce Epstein cihazında ölçülmüş örnek şeritlerin kullanılması şart koşulmuştur. Bu uzun işlemler

piyasa için uygunsuzdur, çünkü farklı laboratuvarlarda ve farklı referans örnekleri kullanılarak kalibre çok zaman alıcıdır (Zhong vd. 2007).

Bu işlem sonuçlarda hatırı sayılır farklılık oluşturarak SST'nin farklı laboratuvarlardaki kalibrasyonları yöntemi karıştırmış ve Epstein cihazına bağımlılık SST'nin tekrarlanabilirliğini yani farklı zaman ve yerdeki test sonuçlarının benzerliğini zayıflatmıştır. Bu yüzden SST standardı 1992 yılında revize edilerek özellikleri iyileştirilmiş ve Epstein' den bağımsız hale gelmiştir. SST revize sırasında tabî ki yeni standart için, SST çalışmalarındaki çeşitli tasarım parametre alternatifleri dikkate alınmıştır. Bunların içinde örnek olarak, tek ve çift boyundurukla tasarım çalışmaları, laminasyon(test örneği) değişiklikleri, boyunduruktaki kaybın dahil ve hariç olması, manyetik alan şiddetinin(H) ve kayıp gücün hesabında H-bobin metodu veya mıknatıslanma akımı yöntemlerinin kullanılması verilebilir.

1992 yılında Epstein metodundan bağımsız olarak standartlara giren SST ölçüm metodunun etkin manyetik yolu 45cm olarak sabitlenmiştir. Bu uzunluk Şekil 1.1'deki boyunduruğun iç ölçüsü l_m ile belirtilmiştir.



Şekil 1.1 SST için etkin manyetik yol.

Bununla birlikte, Epstein yönteminde yönlendirilmiş tanecikli malzeme ile 1,5-1.7T aralığında %3-8 arasında düşük sonuçlar alınırken, SST tarafından %2 kadar yüksek sonuçlar alınabilmektedir. Bu iki metot arasındaki önemli fark teknik dünya için özellikle de transformatör tasarımcıları için endişelendiricidir. Epstein ve SST yöntemlerinin farklı sistematik hata özellikleri, toplam güç kayıp değerleri arasında da %10 kadar farkların oluşmasını sağlar. Bu durum Epstein ve SST ölçümleri referans alındığında, örneğin transformatör nüve kaybı yapı faktörleri değerleri üzerinde darbe etkisi yapar.

Epstein değerleri, standartların sunduğu referans değerler olmasına rağmen SST kullanımı artmaktadır. Kullanım kolaylığı, yönlendirilmiş tanecikli malzemelerde uygulanabilirliğinin yüksek olması SST'nin tercih edilme nedenleri olarak sıralanabilir. Avrupa'daki son karşılaştırmalar SST'nin Epstein çeręevesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Yani SST iyi bir standart metot için gerekli tüm teknik şartları yerine getirmektedir. Bu SST ve Epstein sonuçları ilişkisinin oluşturduğu derin bilgi birikimi, daha ekonomik olan SST kabulünü kolaylaştıracaktır. Çizelge 1.1'de Epstein ve SST yöntemlerinin özellikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.1 Elektrik elik saçları standart ölçüm yöntemleri için değerlendirme ltleri.

	Epstein- Bağımsız (IEC 404-2)	SST(1982 standartı)- Epstein Bağımlı Model (IEC 404-3(1982))	SST(1992 standartı)- Bağımsız Model (IEC 404-3(1992))
Kabul	İyi	Orta	Zayıf
Tekrarlanabilirlik	İyi	Zayıf	İyi
Kalibrasyon Kolaylığı	İyi	Zayıf	İyi
Kullanım Basitliği	Zayıf	İyi	İyi
Çok eşitli Malzemede Uygulama Yeteneği	Zayıf	Zayıf	İyi

Si-Fe malzemeden üretilmiş toroitler de nüve kaybı hesabında kullanılan cihazlardır. Kullanımı elektrik sa üreticileri için kolay olmadığından ticari açıdan uygun değildir. Deneysel çalışmalarda kullanımı yaygındır. Toroit yapılı başka bir çalışmada %3 Si-Fe içerikli 0,27mm kalınlığında M4 model elektrik elik şeritleri ile toroidal nüve inşa edilmiştir (Küçük 2006). Tahmin edilen kayıp katsayıları, bileşenleri ayırma modeline dayanan  kaybın hesaplanması için kullanılabilir.

Başka bir çalışmada SST ile ölçülen nüve kayıplarının boyunduruğun tipine bağlı olduğu araştırılmıştır (Nakata vd. 1990). Bu nedenle ölçüm ve sayısal analizi ile SST incelenmiştir. Çift boyunduruklu SST cihazının standart bir test cihazı olarak kullanılması uygun

görülmüştür. Tek boyunduruklu test cihazı kullanıldığında numunenin iki yüzeyi üzerindeki indüksiyon akımı dağılımları birbirinden farklı olacaktır.

Diğer bir makale üç standart nüve kaybı ölçüm yönteminden bahseder. Bunlar Epstein çerçevesi, toroitler ve SST. Epstein çerçevesi ve toroit test sonuçlarının karşılaştırılması tavllanmış ve tavlannmamış çelik için sunulmuştur (Mthomben and Pillay 2004).

Dünyada enerji ve verimliliğin önemli konu olması, araştırmacıları kayıp ölçümü konusuna yoğunlaştırmıştır. Nüve kayıplarının azaltılması bu sorunla başa çıkmak için önemli adımlardan biridir. Manyetik akı yoğunluğu ve frekans arttığı zaman, manyetik kayıplar artar. Verimli cihaz üretmek için, değişik frekans ve akı yoğunluğunda kullanılan manyetik malzemenin kayıpları bilinmelidir. Elektrikli cihazların verimliliğini artırmak için makine tasarım aşamasında nüve kayıplarının doğru ölçümü gereklidir. Nüve kayıp verileri genellikle sınırlı bir frekans ve akı yoğunluğu aralıkları içinde çelik üreticileri tarafından sağlanmaktadır. Bu veriler elektrikli makinelerde nüve kayıpları tahmini için yeterli değildir. Üreticilerin sınırlı kayıp eğrileri ve literatürdeki kayıp modellerinin hala farklılık arz etmesi çalışmaya başlamamız için yeterli sebeplerdir.

Bu çalışmada bilim çevresinde son yıllarda avantajlarından dolayı ilgiyle izlenilen SST test cihazı nüve kaybı ölçümünde kullanılmıştır. Çalışmada amaç, literatürde bahsedilmeyen mıknatıslanma akımı yöntemini kullanılarak SST test cihazı ile nüve kayıplarının ve bileşenlerinin ölçülmesidir. Mıknatıslanma akımı yöntemini kullanılarak kayıp katsayılarının SST cihazı ile elde edilmesi literatürde yoktur. Manyetik alan şiddeti ve mıknatıslanma akımını ölçmede kolaylıklar sağlayan mıknatıslanma akımı yönteminin SST cihazına uygulanma kolaylığı Epstein çerçevesindekinden daha zor değildir. Bu yöntem deneysel kolaylığı yüzünden SST cihazında başarı ile kullanılmıştır.

Mıknatıslanma akımı yöntemi ile manyetik alan şiddeti, akım değerleri ve nüve kayıpları hesaplanmış, değişik manyetik akı ve frekanslarda nüve kayıp eğrileri elde edilmiştir. Mıknatıslanma akımı yöntemi ile H, B ve akım değerleri dijital osiloskop üzerinde gözlemlenmiştir. Güç hesaplamalarında osiloskobun fonksiyonları kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen nüve kayıp test değerlerinden eğri uydurma yöntemi ile kayıp katsayıları bulunmuştur. Elde edilen histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları vasıtasıyla nüve malzemelerin nüve kayıp modelleri oluşturulmuştur. Deneysel çalışmaların olduğu

5.bölümdeki nüve kayıp modelleri trafo tasarımcısından temin edilen M4, M5 ve M3 kalite Si-Fe nüve malzemeleri için oluşturulmuştur.

Literatürde kayıp çeşitleri histerisiz, girdap akımı ve anormal olmak üzere üç çeşittir. Bu çalışmada kayıp çeşitlerinin modellerini oluşturmak için kullandığımız kayıp katsayıları eğri uydurma yöntemi ile bulunmuştur. Literatürde toroit, SST ve Epstein cihazları ile kayıp ölçümleri yapılmıştır. SST cihazı bu iki cihaza göre hızlı, örnek miktarı az ve hassastır. Bu yüzden bu tezde gittikçe yaygınlaşan ve üstünlükleri fazla olan geleceğin ölçüm cihazı SST ile nüve kayıplarının ölçümü yapılmıştır.

Günümüzde nüve kayıpları, nüve malzemesi üreticilerinin verdikleri grafikler ile sınırlıdır. Mıknatıslanma akımı yönteminin kullanıldığı SST cihazı test çalışmaları ile nüve kayıp değerleri makine tasarımcılarının istediği kadar geniş frekans ve manyetik akı yoğunluğu bölgesinde belirlenebilir. Bu tezde bu ispatlanmıştır. Söz konusu yöntemin SST cihazı ile deneysel uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslama akımı yöntemli bir SST nüve kayıp ölçme sisteminin sonuçları verilerek literatüre katkı sağlanmıştır.

BÖLÜM 2

NÜVE KAYIPLARI

Manyetik veya nüve kayıpları elektrik santrallerinde elektriğin üretimiyle ilk karşımıza çıkar. Son kullanıcıya kadar elektrik saçlarının, demir veya çelik nüvenin olduğu her elektromanyetik cihazda kayıp söz konusudur. Teknolojinin etkisiyle bu kayıp enerji sürekli artmaktadır. Küresel ısınmayı azaltma talepleri, verimlilik sınıflarını yükseltme girişimleri, düşük elektrik giderleri isteği ve enerji darboğazı gibi konular yüzünden nüve kayıplarını azaltma projeleri bilim adamlarının üzerinde çok çalıştığı konular haline gelmiştir.

2.1 NÜVE KAYBI ÖLÇME İHTİYACI

Elektromekanik cihazların giderek artışı günlük yaşamda enerji tüketimini fazlalaştırdı. Bu konu elektrikli makine tasarımcılar için ciddi bir endişe haline gelmiştir. Elektrik makineleri dünyada üretilen elektrik çoğunluğunu kullanmaktadır. Makinalar küresel elektrik tüketiminin çoğunu tüketir, dolayısıyla da makine verimliliğinde küçük bir iyileştirme önemli oranda enerji tasarrufuna neden olacaktır. Nüve kayıplarının azaltılması bu sorunla başa çıkmak için önemli adımlardan biridir.

Elektrik makinelerinde kayıplar genel olarak dört gruba ayrılmıştır: İletken kayıpları, nüve kayıpları, mekanik kayıplar ve kaçak kayıplar. Sinüzoidal kaynakları ile çalışan asenkron makinelerde toplam kayıpların % 15-25 arasında değişen sorumluluğu nüve kayıplarına aittir (İbrahim 2011).

Bilim adamları ve makine tasarımcıları nüve kayıplarının önemli kısmında ferromanyetik malzemelerin manyetik indüksiyon davranışının ilişkili olduğunu buldular. Böylece, her uygulamada uygun bir malzeme belirlemek için ferromanyetik malzemelerde manyetik alan davranışlarını anlama ve analiz önemli hale gelmiştir.

Manyetik indüksiyon altında ferromanyetik malzemelerin özelliklerinin incelenmesi güç kayıplarını azaltan böyle bir malzeme tasarlamak için yardımcı olabilir. Bu nedenle, elektrik çelik saçlarının güç kayıpları değerlendirmek önemlidir. Daha gerçekçi verileri hesaplamak ve verimliliği artırmak için deneysel çalışmalar yapmak makine tasarımcıları için tek mümkün yoldur (Alkar 2009).

Tasarım optimizasyonu ile makine verimliliğini artırmak için makine tasarım aşamasında nüve kayıpların doğru ölçümü gereklidir. Laminasyonlu elektrik saçları için nüve kayıp verileri genellikle sınırlı bir frekans ve akı yoğunluğu aralıkları içinde çelik üreticileri tarafından sağlanmaktadır. Bu veriler, yüksek frekans ve yüksek akı yoğunluklarında çalışan yüksek hızlı elektrikli makinelerde nüve kayıpları tahmini için yeterli değildir.

2.2 NÜVE KAYIP MODELLERİNİN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

Ferromanyetik malzemelerde manyetik alan değişimi enerji yayılımı yapar ve geleneksel nüve kaybı olarak bilinen bir mekanizmaya neden olur. Bu olgu yıllardır merakla bugüne kadar araştırma nesnesi olarak kalmıştır. Birçok çalışma olmasına rağmen, nüve kayıplarını belirlemek için kesin bir prosedür bile hala oluşturulmuş değildir. Mıknatıslanma işleminin karmaşıklığı enerji konusunu büyük bir sorun olarak anlaşılmasını sağlamıştır.

Nüve kaybını modelleme 1800'li yıllardan bu yana ilgi çeken bir konu olmuştur. 1892 yılında deneysel bir çalışmaya dayanarak, Steinmetz nüve kaybı modelleme için oluşturduğu iki terimli eşitliği sundu (Küçük 2002). Çalışmasında, bir manyetik malzemenin nüve kaybının histerisiz ve girdap akımı kayıplarının toplamından oluştuğu kabul etmiştir. Toplam nüve kaybı şu şekilde ifade edilir:

$$P = k_h \cdot f \cdot B^n + k_g \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (2.1)$$

k_h ve k_g histerisiz ve girdap akım kaybı katsayıları deneysel veriler ile elde edilebilir. n bir Steinmetz sabitidir ve 1.6'ya eşittir. Bu formül elektrik makine tasarımında en çok kullanılan nüve kaybı modelidir. Steinmetz, histerisiz kaybındaki manyetik akı yoğunluğu değerinin üssü olan n sabiti malzemenin türüne ve akı yoğunluğuna bağlı olduğu bulmuştur. Steinmetz sabiti manyetik akı yoğunluğu seviyesi 1 Tesla'dan daha düşük akı yoğunluğu için geçerlidir

ve bu akı seviyesi çoğu elektrikli makineleri için düşüktür. Elektromanyetik alanların temel teorisi Maxwell denklemlerine dayanmaktadır (Eşitlik 2.2, 2.3 ve 2.4).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.4)$$

$\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{H}$ ve $\vec{J}$ sırasıyla elektrik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğudur. Düzgün manyetik alan dağılımı varsayımı ile Maxwell denklemlerinden, girdap akım kaybı katsayısı k_g , malzemenin elektriksel iletkenliği(σ) ve laminasyon kalınlığının ($2L$) fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$k_g = (2L)^2 \pi^2 \sigma / 6 \quad (2.5)$$

Kayıp katsayısı eşitlik 2.5 ile hesaplanan girdap akımı kaybı, klasik girdap akımı kaybı olarak bilinir. Gerçek girdap akımı kayıpları bu hesaplanan klasik bir girdap akımı kayıplarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Farkı anormal(aşırı) kayıplar olarak bilinir.

Anormal kayıpları genel olarak domain yapısı ve dinamiği ile açıklanmıştır (Steinmetz 1984). İstatistiksel kayıp teorisine dayanarak, Bertotti anormal kayıpları hesaba katan ek bir terim önermiştir (Bertotti 1988). Bu nedenle, Steinmetz nüve kaybı formülü aşağıdaki şekilde değişime uğramıştır:

Toplam nüve kaybı = Histerisiz kaybı + Girdap akımı kaybı + Anormal kayıplar

$$P = k_h \cdot f \cdot B_m^n + k_g \cdot f^2 \cdot B_m^2 + k_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6 malzemenin mikro yapısına, iletkenliğine ve laminasyon kesit alanına bağlıdır. Üç terimli eşitliğin katsayıları ölçülen toplam nüve kayıp verilerinden elde edilmiştir. Bununla birlikte, bu konuda eşitlik 2.6 ile hesaplanan kayıplar belirli frekans ve akı

yoğunluğu aralığı içinde geçerlidir. En son geliştirilen modellerde bu aralık, frekans ve manyetik akı yoğunluğuna göre katsayıları değiştirerek uzatılmıştır (Chen and Pillay 2002). Ancak, bu değişken katsayılarının belirlenmesi, yüksek frekans ve yüksek manyetik akı yoğunluklarında ek nüve veri kaybını gerektirir.

Sonlu eleman (FE) benzetim yoluyla nüve kayıplarının hesaplanması hızlı nüve kaybı hesapları gerektiren elektrikli makine tasarımı için pratik değildir. Deri etkisi dikkate alınarak girdap akım kaybı hesaplamak için analitik bir model bildirilmiştir (İbrahim 2011). Bununla birlikte buradaki kayıp formülünün, sadece düşük akı yoğunluklu bölgede uygulanabilir olduğu bulunmuştur. Birçok makinenin doyma bölgesinde çalışması nedeniyle, formül elektrik makine tasarımı için yeterli değildir.

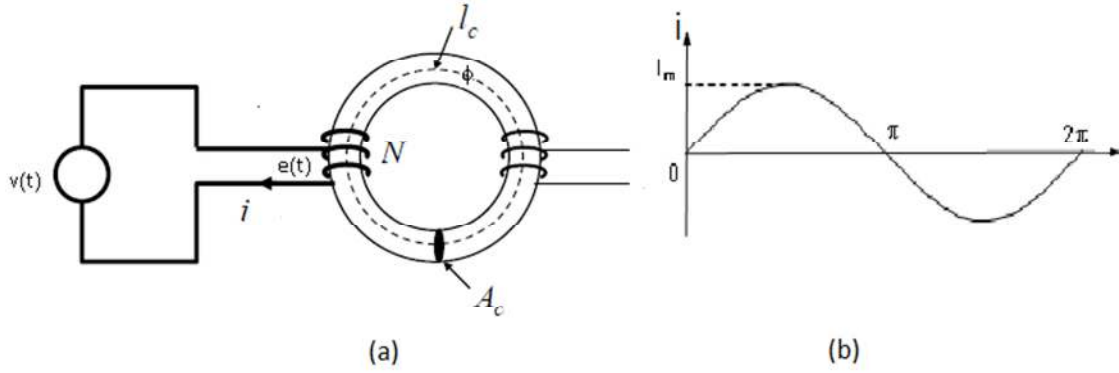
2.3 MIKNATISLANMA VE HİSTERİSİZ EĞRİSİ

Manyetik alandaki manyetik malzemede manyetik akı oluşumu mıknatıslanma olarak tarif edilir. Mıknatıslanma değeri manyetik geçirgenlik ile ölçülür. Manyetik malzemelerde önemli bir kavram o malzemenin manyetik geçirgenliğidir. Manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti değişimlerinin oranı manyetik geçirgenliktir. Eşitlik 2.7 ile ifade edilir.

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (2.7)$$

Burada B akı yoğunluğu (T), μ manyetik geçirgenlik (H/m), ve H ise manyetik alan şiddetidir(A/m). Boşluk için olan manyetik geçirgenlik μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) ile manyetik malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği μ_r 'yi çarparsak oluşan manyetik geçirgenlik eşitlik 2.8 ile ifade edilir.

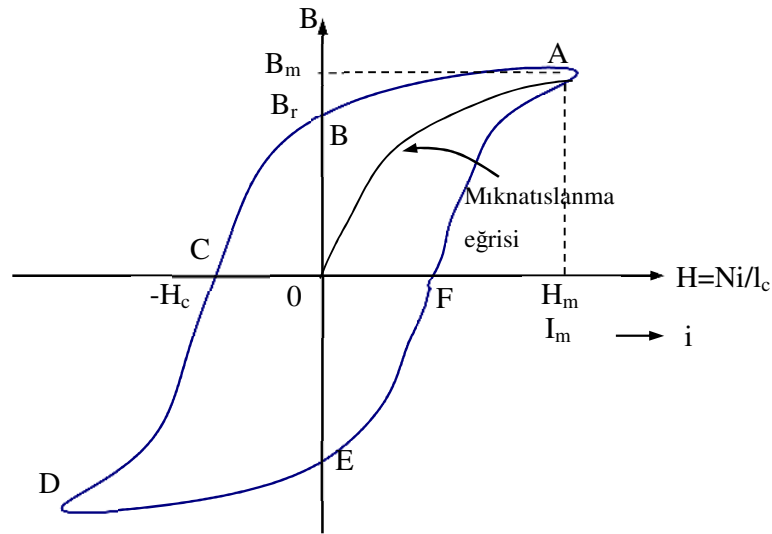
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.8)$$



Şekil 2.1 Mıknatıslanma olayı, a) N sarımlı toroit nüve, b) İndükleme akımı (Küçük 2002).

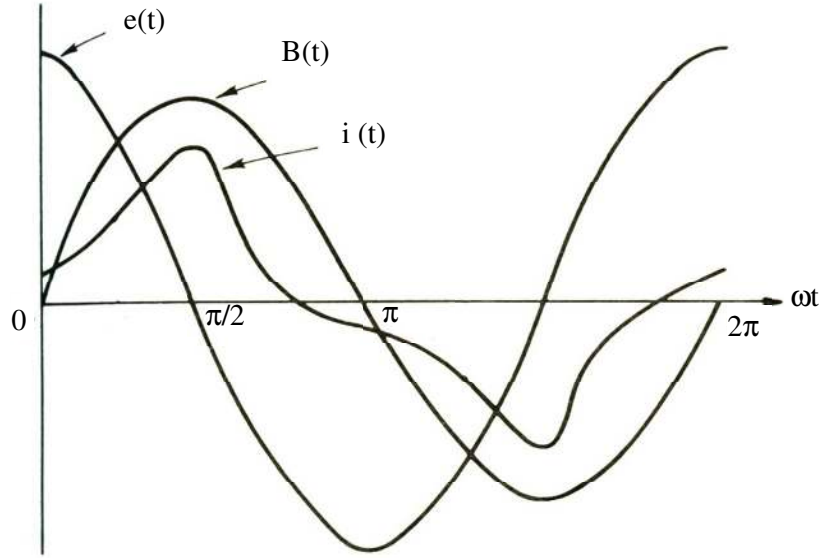
Şekil 2.1.a’da gösterilen N sarımlı toroit nüvenin başlangıçta kalıcı mıknatıslanmasının sıfır olduğunu düşünelim. Eğer i indükleme akımı (Şekil 2.1.b) sıfırdan itibaren I_m tepe değerine arttırılacak olursa, manyetik alan şiddeti H de artacak ve H_m değerini alacaktır (Şekil 2.2). Çünkü manyetik alan şiddeti akımla doğrusal artış gösterir. Fakat akı yoğunluğu B , bu artışa doğrusal cevap veremez ve Şekil 2.2’ de gösterilen 0A yolunu izler. Eğer akım değeri I_m tepe değerinden sıfır değerine getirilirse manyetik alan şiddeti de sıfır değerine düşer fakat manyetik akı yoğunluğu AB yolunu izleyerek B_r değerinde kalır. B_r ’ ye artık akı yoğunluğu denir. Bu sefer akım sıfırdan $-I_m$ değerine arttırıldığında manyetik alan şiddeti de $-H_m$ değerine çıkar ve akı yoğunluğu BCE yolunu izleyerek $-B_m$ değerini alır. Manyetik akı yoğunluğunun sıfır olduğu H_C değerine koersivite(giderme) manyetik alanı denir. Manyetik alan, azaltıldığında akı yoğunluğu DEF yolunu izler. Artık akım ikinci periyoda başladığında akı yoğunluğu 0A yolunu izlemez, FA yolunu izler ve ilk periyotta kapalı eğri oluşmaz.

Şekil 2.2’ deki eğri birkaç periyottan sonra oluşur. Meydana gelen bu kapalı eğriye histerisiz eğrisi denir. Şekil 2.2’ den anlaşılacağı gibi manyetik akı yoğunluğu $B(t)$, manyetik alan şiddeti $H(t)$ ’ deki değişimin gerisinde kalır, aralarında doğrusal olmayan durum oluşur. Manyetik malzemelerde görülen bu olaya histerisiz denir. Histerisiz, manyetik nüve malzemelerdeki kaybı belirleyen başlıca etkidir.



Değişik birçok histerisiz eğrileri elde etmek için akımın genliğini yani manyetik alan şiddetini değiştirmelidir. Böylece Şekil 2.2'deki gibi birçok histerisiz çevrimi oluşturulabilir. Bu eğrilerin uç noktalarının birleştirilmesiyle Şekil 2.2' de ve Şekil 2.3' de gösterilen OA mıknatıslanma eğrisi elde edilir. Demek ki, mıknatıslanmamış bir nüve mıknatıslanarak mıknatıslanma eğrisini takip edersek histerisiz eğrisine ulaşılır.

Toroide uygulanan gerilimi sinüzoidal kabul edersek indüklenen gerilim ve akı yoğunluğu da sinüzoidal olacağı için histerezis eğrisinden, manyetik alan şiddetinin ve besleme akımının sinüzoidal olamayacağı anlaşılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Toroit nüvesinin sargılarında indüklenen gerilim(e), manyetik akı yoğunluğunun(B) ve akımın(i) değişimleri (Küçük 2002).

Şekil 2.1.a'daki N sarımlı manyetik toroit malzemede manyetik akı yoğunluğu $B(t)$ sinüzoidal olsun.

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (2.9)$$

Akı $\phi(t) = B(t).A_C$ olduğuna göre,

$$\phi(t) = \Phi_m \sin \omega t = A_C . B_m . \sin \omega t \quad (2.10)$$

olur. Faraday indüklenen gerilim yasası,

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.11)$$

dır. İndüklenen gerilim eşitlik 2.10, eşitlik 2.11’te vasıtasıyla,

$$e(t) = \omega N A_C B_m \cos \omega t \quad (2.12)$$

eşitlik 2.12 bulunur. Burada $\omega = 2\pi f$ dir. İndüklenen gerilim sinüzoidal olduğundan efektif değerleri için,

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot B_m \cdot A_C \quad (2.13)$$

yazılır. Eşitlik 2.13 temel gerilim yasası olarak bilinir ve trafo hesaplamalarında kullanılır. Bu ifadede E indüklenen gerilimin birimi volt, f frekansının birimi Hz, B_m manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri Tesla ve A_C nüve faydalı kesitinin birimi m^2 ’dir.

2.4 MANYETİK (NÜVE) KAYIPLAR

Değişken manyetik alanın içerisinde çalışan bir manyetik malzemede meydana gelen manyetik kayıplar veya nüve kayıpları genelde üç bileşene ayrılır: Histerisiz kayıpları, girdap akımı kayıpları ve anormal kayıplar.

2.4.1 Histerisiz Kaybı

Histerezis kaybı, histerezis kapalı eğrisinin alanı ile orantılıdır. Şekil 2.1.a’deki toroidin N sarımının direncini ihmal edilirse sargıda indüklenen gerilim, giriş gerilimi olur, $e(t)=v(t)$ yazılır. Manyetik toroitte ϕ manyetik akısı oluştuğunda, Faraday yasasından,

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.14)$$

eşitlik 2.14 yazılabilir. Harcanan enerji, eşitlik 2.15 ile bulunur.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} v \cdot i \cdot dt \quad (2.15)$$

dir. Eşitlik 2.14 ve 2.15 den, eşitlik 2.16'yı kullanarak,

$$W = \int N \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot i \cdot dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} N \cdot i \cdot d\phi \quad (2.16)$$

$$\phi = B \cdot A_C$$

ve

$$i = \frac{H \cdot l_C}{N}$$

olduğuna göre,

$$W = l_C \cdot A_C \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB = \vartheta_C \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \quad (2.17)$$

eşitlik 2.17 elde edilir. Burada $\vartheta_C = l_C \cdot A_C$ toroidin hacmidir (m^3). l_C ortalama manyetik yol uzunluğu (m) ve A_C de manyetik akının geçtiği toroidin kesitidir (m^2). Bir periyot boyunca transfer edilen enerji eşitlik 2.18' deki gibidir.

$$W_T = \vartheta_C \oint H \cdot dB \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.18' den, bir periyotta manyetik toroidde harcanan enerji, manyetik malzemenin hacmi ile çalışma noktasındaki histerisiz eğrisinin alanının çarpımına eşittir. Frekansı f olduğuna göre histerisiz kaybı, eşitlik 2.19 ile bulunur.

$$P_h = \vartheta_C \cdot A_h \cdot f \quad (2.19)$$

Şekil 2.2' den görüleceği üzere B-H eğrisi doğrusal değildir ve iki değerlidir (bir H için iki B değeri vardır). Dolayısıyla altındaki alanın hesaplanması zordur. Birçok deney yapıldıktan

sonra histerisiz eğrisinin alanını kabaca ifade eden eşitlik 2.20 Steinmetz tarafından bulunmuştur (Küçük 2002).

$$A_h = k_h \cdot (B_m)^n \quad (2.20)$$

Burada k_h manyetik malzemenin özelliğine bağlı bir katsayı, Steinmetz sabiti olarak anılan n 1,5 ile 2,5 arasında değişen bir katsayıdır. Böylece histerisiz kaybı, eşitlik 2.21 ile ifade edilir.

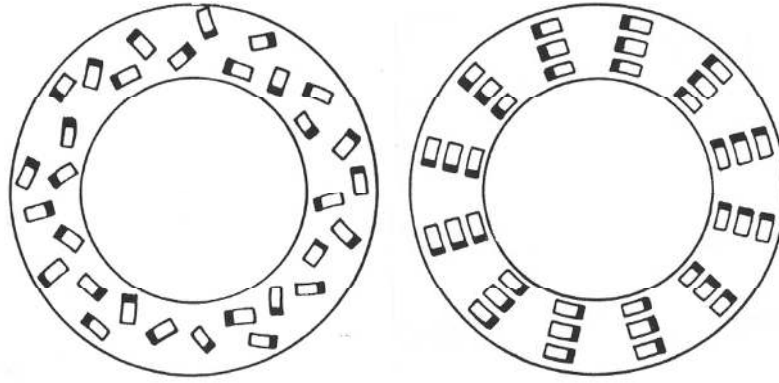
$$P_h = k_h \cdot B_m^n \cdot f \quad (2.21)$$

Burada k_h manyetik malzemenin cinsine ve hacmine bağlı bir katsayıdır. Histerisiz, manyetik malzemelerin mıknatıslanması sonucunda meydana gelen olaydır. Statik kayıp olarak da anılan histerisiz kaybı, histerisiz olgusundan kaynaklanır. Mıknatıslanan malzemedeki domain duvarları hareket eder, ancak bu hareket iç gerilim, malzemenin safsızlığı vb. nedenler ile engellenmektedir. Uygulanan mıknatıslanma kuvveti bu nedenle domain duvarlarını bağlayan kuvveti aşmalıdır. Bir ferromanyetik madde mıknatıslanmış olduğunda, uygulanan enerjinin çoğu malzemenin içinde saklanır. Ancak bir kısım enerji, isteksiz domain duvarlarını hareket ettirerek ısıya dönüştürülür. Elektrik makinelerinde boşta kayıplar içinde büyükçe bir katkı histerisiz kayıplardan gelir.

Histerisiz kayıplar elektrik nüve malzemelerinde değişen manyetik alan tarafından manyetize ve demanyetize edilmeye direnen moleküler manyetik bölgelerden kaynaklanmaktadır. Histerisiz nedeniyle oluşan histerisiz kaybı; manyetik nüve moleküllerinin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sırasında birbirleri ile sürtünmeleri sonucu ısı şeklinde ortaya çıkar. Histerisiz nüve kaybının bir kısmıdır, mıknatıslanma B-H histerisiz çevrim alanına ve frekansa bağlıdır. Temel malzemelerin çeşitli farklı mıknatıslanma yetenekleri olduğundan, nüve malzeme seçimi nüve kayıpları azaltmada önemli bir faktördür.

Histerisiz enerji kaybını açıklayabilmek için manyetik malzemenin molekül yapısı göz önüne alınmalıdır. Materyal manyetize olmamış durumda iken yapısındaki atomsal veya molekül mikromıknatısların yönleri geliş güzel dağılmıştır (Şekil 2.5). Bu durumda toplam manyetik moment sıfır olduğundan malzeme manyetik özellik göstermez. Ancak, mıknatıslanma

kuvveti uygulandığında mikro mıknatıslar manyetik alan yönünde yönelmeye ve kuvvet çizgileri ile paralel durum almaya çalışırlar. Bu yönelme moleküler sürtünme ile engellenmeye çalışır. Manyetik alanın yükseltilmesi ile yenilmeye çalışılan bu sürtünme kuvvetine karşı yapılan iş histerisiz enerji kaybı biçiminde ortaya çıkar ve ısı enerjisine dönüşür (Tacer 2004).

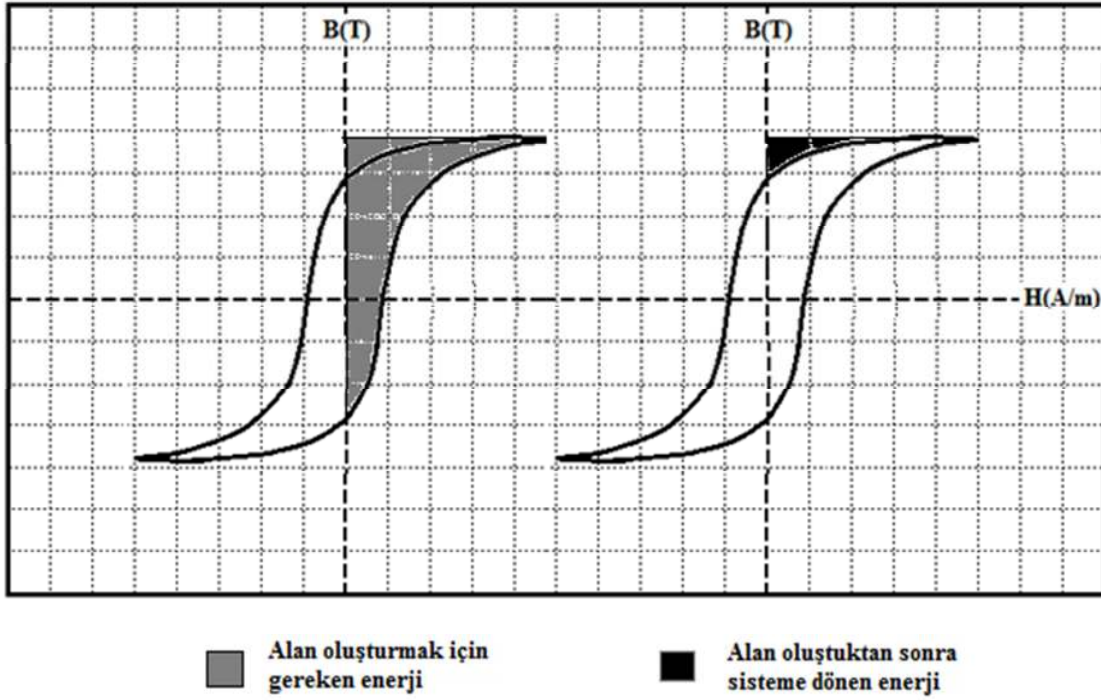


Şekil 2.5 Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış halde atomların dizilimi (Tacer 2004).

Mıknatıslanma kuvveti küçültülürken mikro mıknatısların kutupları arasındaki çekme ve itme kuvvetleri bunların başlangıç durumlarına dönmelerini sağlamaya çalışır, ancak moleküler sürtünme kuvvetleri bu kez de buna engel olmaya çalışır ve yine sürtünme enerjisi ısı enerjisine dönüşür.

Bu arada mikro mıknatıslar arasındaki sürtünme kuvvetleri atom veya moleküllerin başlangıçtaki özgün durumlarına dönmelerine engel olduğundan, mıknatıslanabilen malzemede, bir miktar mıknatıslanma kaybolmadan kalır. Dolayısıyla artık mıknatıslanmaya özgün durumlarına dönmeyip, yönelmiş olarak kalan mikro mıknatıslar neden olmaktadır (Tacer 2004).

Aynı olaylar histerisiz çevrimin sonraki aşamalarında da olduğundan önemli enerji kaybı ortaya çıkar. Bir histerisiz çevrimi sırasında ısı enerjisine dönüşerek kayıp enerji niteliği kazanan enerji miktarının histerisiz çevrimi altında kalan alan ile orantılı olduğu gösterilebilir. Şekil 2.6'daki histerisiz çevrimlerinde manyetik alan oluşturmak için gerekli enerji ve sonrasında geri kazanılan enerji gösterilmektedir. İki grafiğin yani yeşil ve mavi alanların farkı toplam kayıp enerjinin yarısını oluşturur.

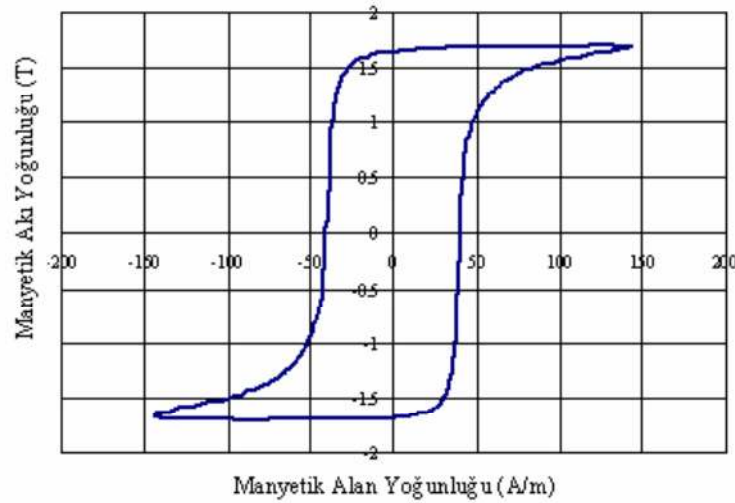


Şekil 2.6 Histerezis çevrimindeki manyetik alan oluşumundaki enerji transferleri.

Verilen bir malzeme için histerisiz çevrimi altında kalan alanın, dolayısıyla çevrim başına kaybolan enerjinin maksimum akı yoğunluğunun 1,6. kuvveti ile orantılı olduğu Steinmetz tarafından gösterilmiştir. Steinmetz'e göre belirli bir B_m için çevrim başına enerji kaybı malzemenin cinsine bağlıdır. Malzeme periyodik olarak manyetize ve demanyetize edilirse her periyoda enerji kaybı tekrarlanacağından kayıp enerji miktarı çevrimin tekrarlanma frekansına da bağlı olacaktır. Dolayısıyla bir manyetik malzemede meydana gelen histerisiz kaybı eşitlik 2.15 ile hesaplanır. Burada k_h materyalin cinsine, hacmine ve akı yoğunluğunun birimine bağlı bir sabittir. Bu sabitin değeri çeşitli manyetik malzemeler için yaklaşık şu mertebelerdedir: Permaloy = $5 \cdot 10^{-7}$, dökme demir= $6 \cdot 10^{-5}$, levha çelik = $4 \cdot 10^{-6}$.

Ferromanyetik malzemelerin özellikleri histerisiz çevrimi ile elde edilir. Histerisiz çevrimi, tam bir mıknatıslanma periyodunda malzemenin manyetik alan şiddeti H ile manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişkiyi gösterir.

Steinmetz tarafından geliştirilen histerisiz kayıpları eşitliği 2.15’de histerisiz katsayısı k_h ve Steinmetz sabiti n olmak üzere iki bilinmeyen var olup kaybın hesaplanması için bunların hesaplanması gerekir. Genellikle Steinmetz sabiti, Si-Fe alaşımlı tanecik uyumlu ve uyumsuz manyetik malzemeler için 1 ile 3 arasında değişmektedir. Histerisiz katsayısı ise manyetik devre parametreleri ile ilişkili olup çeşitli manyetik akı yoğunluklarında ölçülen manyetik kayıpların oranlanması sonucu belirlenir. Yumuşak manyetik malzeme olarak sınıflandırılan %3 Si-Fe alaşımında bu olay, Şekil 2.7’de gösterildiği biçimde oluşur. Elde edilen histerisiz çevrimi o manyetik malzemeye ait olan çoğu koersivite, manyetik doyma (saturasyon) vb. gibi parametrik özelliklerin bilinmesini sağlar (Şimşir 2007).



Şekil 2.7 %3 Si-Fe elektrik çeliği için histerisiz eğrisi (Tutkun 1998).

Histerisiz kapalı alanı aynı zamanda bir manyetik malzemede birim hacimde harcanan toplam enerji kaybına karşılık gelir.

Alternatif olarak, histerisiz kayıpları dinamik histerisiz yolunun modellenmesi yardımıyla belirlenebilir. Dinamik histerisiz yolunu model alan en önemli modeller, Preisach modeli ve Jiles-Atherton modelleridir. Yapılan araştırmalarda elde edilen deneysel sonuçlar her iki modelin de geçerli olduklarını göstermiştir. Bu modeller elektrik çeliği üreten firmalar tarafından ilgili kataloglarda genelde kullanılmazlar. Ancak üretici firma kataloglarında çoğunlukla sadece DA mıknatıslanma eğrisi verilir.

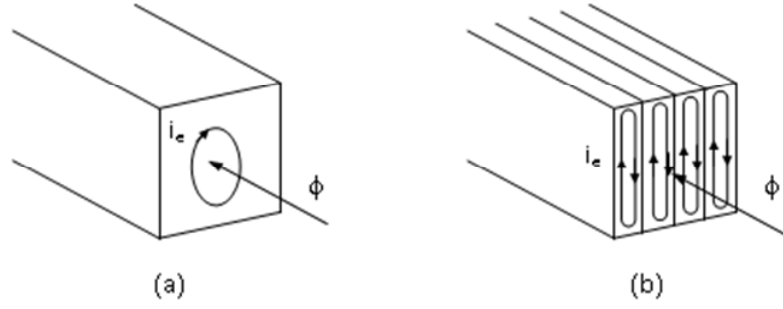
2.4.2 Girdap Akımı Kaybı

Manyetik malzemelerde oluşan bir diğer kayıp da girdap akımları kaybıdır. Akı yoğunluğunun zamana göre değişmesinden kaynaklanır. Nüve üzerinde indüklenen akı yoğunluğunun zamana göre değişmesi, akının geçtiği yola dik olan kesitte gerilim indükleyecektir. İndüklenen bu gerilim iletkenin kesitinin kapalı devre oluşturması nedeniyle girdap akımı adı verilen akımın akmasına neden olur. Bu akan akımın karesi ile manyetik malzemenin direncinin çarpımı da girdap akımı kayıpları adı altında ısı şeklinde ortaya çıkar. Bu gereksiz kaybı engellemek için nüve tek bir parça yerine ince dilim saçlardan meydana getirilir.

Değişken manyetik alanlar teknolojiye birçok fayda sağlamaktadır. En önemli faydalarından biri elektrik üretiminin temelini teşkil etmektedir. Değişken elektrik ve manyetik alanlar elektrik enerjisinin taşınmasında da önemli rol oynamaktadır. Değişken manyetik alan içinde bulunan maddelerde Faraday'ın indüksiyon kanununa göre akım meydana gelir. Manyetik alan etkisindeki nüvelerde akının değişmesiyle, akı etrafındaki girdaplarda yayılan ikincil akımların oluşması şeklinde görülür. İletken içinde akımın izleyeceği yol, akım geçen bir telde olduğu gibi izleyeceği yol belirli olmadığından, akım en küçük direnci gösteren yol veya yollar üzerinden devresini tamamlar. Böyle akımların izledikleri yollar şekil olarak girdaba benzedikleri için Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bu akımlar "Girdap Akımları" veya "Eddy Akımları" olarak isimlendirilirler.

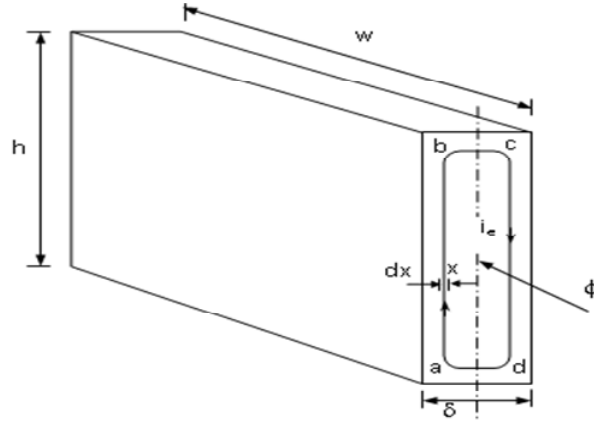
Girdap akımı kayıpları azaltılması için, yüksek dirençli nüve malzeme ve daha ince nüve laminasyon kullanılmalıdır. Bu kayıp sıcaklık artışı ile son derece azalır. Bu değişim çok küçüktür ve tüm pratik amaçlar için ihmal edilmektedir. Girdap kayıpları nüve kayıplarının yaklaşık % 50' sini bulur.

Şekil 2.8.a' da kütsel bir manyetik malzemedede, Şekil 2.8.b' de ise dilimlenmiş bir manyetik malzemedeki zamanla değişen akının dik kesitte oluşturduğu girdap akımları gösterilmiştir. Girdap akımları, manyetik malzemenin elektriksel direncinden dolayı $i^2.R$ kadar güç kaybına neden olurlar.



Şekil 2.8 Manyetik malzemede girdap akımları, a) Bütün manyetik nüve malzeme, b) Yalıtılmış ince saçlardan oluşmuş nüve malzeme (Küçük 2002).

Şekil 2.8.b’ deki manyetik malzemeyi oluşturan saçlardan bir tanesinin büyütülmüş görüntüsü Şekil 2.9’ da verilmiştir.



Şekil 2.9 Nüve malzemenin tek laminasyonun detay resmi (Küçük 2002).

Sacın kalınlığı δ , eni w yüksekliği de h olsun. $\delta \ll h$ olduğu durumda, abcd kapalı eğrisinin sınırladığı alandaki akı, eşitlik 2.22 ile bulunur.

$$\phi_m = 2hx B_m \quad (2.22)$$

Kapalı eğride indüklenen gerilim (eşitlik 2.23), eşitlik 2.16’ da verilen temel gerilim yasasından yararlanarak bulunabilir:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B_m \cdot 2hx \quad (2.23)$$

abcd yolunun direnci,

$$R = \rho \frac{l_c}{A_c} = \rho \frac{2h}{w dx} \quad (2.24)$$

dir. Burada ρ malzemenin özdirencidir ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$). Kapalı eğride indüklenen gerilim nedeniyle akan diferansiyel akım,

$$dI_g = \frac{E}{R} = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m w x dx}{\rho} \quad (2.25)$$

bulunur. Eşitlik 2.25 ve 2.23 kullanılarak, abcd kapalı eğrisi üzerinde akan girdap akımının meydana getirdiği güç kaybı eşitlik 2.26 ile bulunabilir.

$$dP_g = E dI_g = \frac{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 2whx^2 dx}{\rho} \quad (2.26)$$

Eşitlik 2.26' nın, sac kalınlığının tümü için integrali alınırsa, eşitlik 2.27 ve 2.28 elde edilir

$$P_g = \int_0^{\delta/2} dP_g = \frac{2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 wh}{\rho} \int_0^{\delta/2} x^2 dx \quad (2.27)$$

$$P_g = \frac{\vartheta \pi^2 f^2 \delta^2 B_m^2}{6\rho} \quad (2.28)$$

Burada $\vartheta = w.h.\delta$ olup sacın hacmini (m^3) belirtir. Manyetik malzemedeki girdap akımı kaybı eşitlik 2.29' deki gibi kısaltılarak ifade edilebilir.

$$P_g = k_g \cdot B_m^2 \cdot f^2 \quad (2.29)$$

Bu ifadede kullanılan k_g manyetik malzemenin kalınlığına ve malzemenin cinsine bağlı bir girdap kaybı katsayısıdır.

Eşitlik 2.28’ deki ifade yüksek olmayan frekanslarda (50 Hz – 1 kHz), akı yoğunluğu dağılımının girdap akımlarından etkilenmediği durumlarda geçerli olmaktadır. Si-Fe malzemeler üzerinde yapılan araştırmalar göstermiştir ki, eşitlik 2.28 ile hesaplanan kayıp değerleri ölçülen değerlerden % 50 hatalı çıkabilmektedir (Küçük 2002). Bu yüzden bazen ilave girdap akımları olarak da anılan anormal kayıplar hesaba katılmalıdır. Fakat yine de bu eşitlik, girdap akımı kayıplarının hangi değişkenlere bağlı olduğu hakkında bilgi verir. Eşitlik 2.28’ ye dayanarak, girdap akımı kayıplarını azaltmak için iki yöntemden bahsedilebilir:

1. İletkenliği düşük manyetik malzeme kullanmak. Nüve malzeme olarak ekonomik olduğu için demir-çelik türevleri tercih edilir. İletken olan bu malzemelerin girdap akımı kayıpları fazladır. Demirin içine %3 silisyum katıldığında iletkenlikle birlikte girdap akımı kayıpları azalır. Elektrik makinelerinde, manyetik malzeme olarak en çok Si-Fe saçlar kullanılır.
2. Lamine edilmiş ince saç kullanarak girdap akımı kayıpları azalır. Çünkü kayıplar kullanılan manyetik malzemenin kalınlığının karesi ile ters orantılı değişir. Elektrik makinelerinde, ince ve birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış Si-Fe saçlar kullanılır.

Yüksek frekanslarda kaybı azaltmak için manyetik devreyi oluşturan Si-Fe saçların kalınlığını azaltmak ve direncini artırmak yeterli olmaz. Girdap akımları kaybı frekansın karesi ile artış gösterdiğinden, yüksek frekanslarda kullanılmaları uygun değildir. Bunun yerine çoğunlukla Ferit nüveler kullanılır. Öz direncinin yüksek olması (demirin öz direncinden 106 - 1011 oranında yüksek) yüksek frekanslarda kayıplarının düşük olmasını sağlar. Ferit malzemelerin üretiminde metal oksitler öğütülür, elenir ve elektriksel yalıtkanlığı iyi olan yapışkan malzeme ile karıştırılır. Bu işlem sonucunda metal tanecikleri izole edilmiş ve girdap akımı kayıpları yüksek oranda azaltılmış olur. İstenen forma göre preslenerek yüksek sıcaklıklarda (1100 – 1400 °C) fırınlanır. Si-Fe malzemeye göre düşük akı yoğunluklarında doymaya (0,4 – 0,5 T) girerler (Küçük 2002).

2.4.3 Anormal Kayıplar

Bu kayıplar adından da anlaşılacağı üzere histerisiz ve girdap akım kayıpları sınıfına sokamadığımız ve nüve kayıpları testlerinde ilave ek kayıp olarak gözüken kayıplardır. Bu kayıplar bilinmeyen kayıplar olarak da adlandırılmakla beraber bazı araştırmacılar tarafından fazladan kayıplar olarak da adlandırılır.

Bir malzeme de domain varlığı ihmal edilirse, mıknatıslanma boşlukta homojen ve sürekli olacaktır. Toplam girdap akımları kaybı yalnızca malzeme veya parçacıkların kesitindeki mikroskobik akımlardan kaynaklanacaktır. Dışarıdan uygulanan alan tarafından üretilen bu girdap akımı kaybına bazen klasik girdap akım kaybı da denir. Ancak, domainler ihmal edilemez, etkisi malzemenin bileşimine bağlı olarak daha fazla veya daha az önemlidir.

Mıknatıslanma sırasında domainler çevreleyen duvarlar, sıçramalar yaparak mıknatıslanma içinde süresiz adımlar doğurmaktadır. Bu domain hareketi duvarlarda girdap akımlarına yol açmaktadır. Bu mikroskobik girdap akımları ile ilgili kayba anormal kayıp ya da bazen aşırı girdap akım kaybı denir. Tanecikleri yönlendirilmiş veya büyük olan malzemelerde bu kayıp türü daha fazla önem kazanmaktadır. Anormal kayıplar eşitlik 2.30 ile hesaplanabilir.

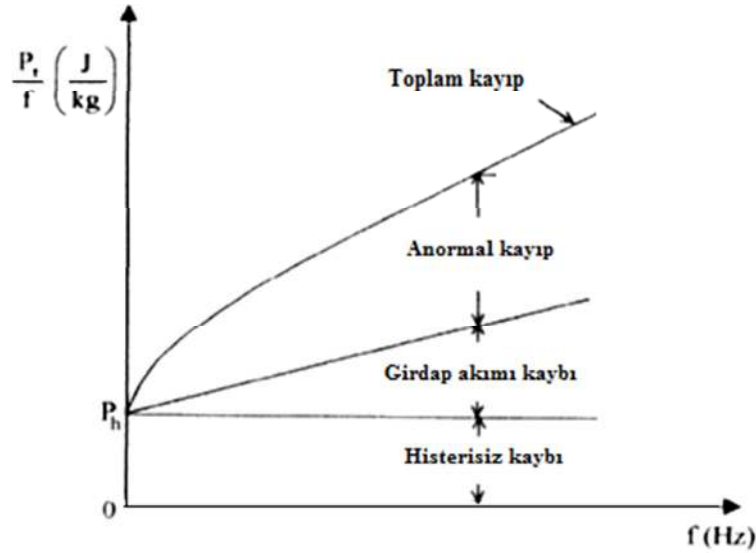
$$P_a = k_a \cdot B_m^{1,5} \cdot f^{1,5} \quad (2.30)$$

Burada, f mıknatıslanma frekansı, B_m manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri ve k_a ise elektrik çeliğinin şekil ve elektriksel özelliklerine bağlı katsayıdır. Anormal kayıp katsayısı k_a eşitlik 2.31 ile ifade edilir.

$$k_a = \sqrt{\sigma G S V_o} \quad (2.31)$$

Burada σ , G , S ve V_o sırasıyla elektriksel iletkenlik, manyetik malzemenin elektriksel sönümleme faktörü, laminasyonun kesit alanıdır. V_o üreticiler tarafından verilmeyen çok özel bir parametre olduğundan yukarıdaki denklem kullanılarak doğrudan bir güç kaybı hesaplaması yapılamaz. Bunun yerine k_a katsayısı kayıp dağılımı ve eğri uydurma hesap yöntemleri ile bu kayıplar tahmin edilebilir (Şimşir 2007).

Eşitlik 2. 21 ve 2.29 ile açıklanamayan kayıplar anormal kayıplardır. Toplam güç kayıpları ve bileşenleri Şekil 2.10'da görülmektedir. Anormal kayıplar kristal büyüklüğü, madde içindeki gerilmeler, domain duvarı hareketleri, madde içindeki kusurlar, yanlış yerleşimler gibi birçok maddeye ait özelliklere bağlıdır. Girdap akımı kayıp bileşeni, ince levhalarda frekanstan bağımsız olan periyot başına histerisiz kaybının toplamdan çıkarılmasıyla tanımlanır.



Şekil 2.10 Transformator nüvelerinde kayıpların klasik ayrılması (Erdem 2006).

Bununla birlikte bu yapıldığında, görünür girdap akımı kaybının eşitlik 2. 28'de hesaplanmış olan değerden daima daha büyük olduğu bulunur. Bu, anormal bir kayıp olarak adlandırılan ileri bir kayıp bileşenini verir (Erdem 2006). Yukarıda anlatılan güç kayıplarının bileşenlerini azaltmak için yapılan yöntemler Çizelge 2.1'de verilmektedir. Çizelge 2.1'de histerisiz kayıplarının azaltılması için, kristal yönelimlerinin geliştirilmesi demir içindeki manyetik olmayan maddelerin mümkün olduğunca azaltılması ve iç gerilmelerin giderilmesi gereklidir.

Çizelge 2.1 Elektrik çeliklerinde nüve kayıplarını azaltma metotları (Erdem 2006).

Nüve kaybı çeşidi	Nüve kaybı azaltma metodu
Histerisiz	Yönelmeyi geliştirmek(tanecik yönlendirme vb.)
	Manyetik olmayan maddeleri azaltmak
	İç gerilmeleri gidermek(ısıl işlem vb.)
Girdap akımı	Elektrik çelik sacını inceltmek ve saçları yalıtmak
	Si katkısını çoğaltıp, maddenin direncini arttırmak
Anormal	Kristalleri küçültmek
	Yüzeyi ince bir filmle kaplamak
	Fiziksel yöntemlerle(soğuk haddeleme vb.) domainleri inceltmek

Elektrik çeliklerinin üretiminde farklı işlemler kullanılıp kristal boyutları küçültülmelidir. Çeşitli kimyasal yöntemlerle çelik içindeki manyetik olmayan maddeler örneğin karbon(C) azaltılmaktadır. Üretim ve maddenin mekanik işlenmesi sırasında oluşan iç gerilmeler elde edilen ürünün tavlanmasıyla giderilmekte ve manyetik özellikler yeniden kazandırılmaktadır.

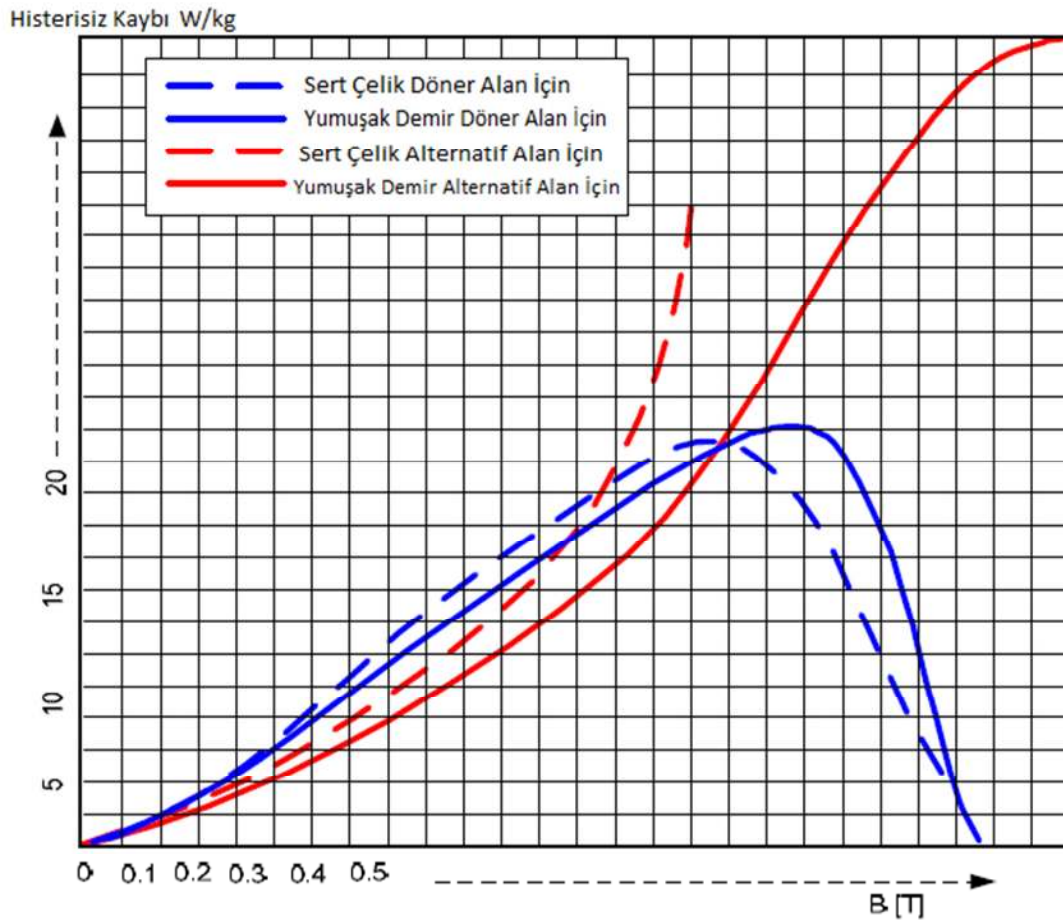
Klasik girdap akımları levha haline getirilmiş elektrik çeliklerinin inceltilmesi ve silisyum katkısıyla azaltılmaktadır. Anormal kayıplar ise kristal boyutlarının küçültülmesi, levha yüzeyinin magnezyum-oksit(MgO) gibi ince bir filmle kaplanması ve fiziksel olarak domainlerin inceltilmesi yöntemleriyle azaltılmaktadır. Anormal kayıp, yüksek frekanslarında amorf maddelerinin toplam güç kaybının % 90-99'undan sorumludur. Tanecikleri yönlendirilmiş %3 Fe-Si malzeme için bu oran %30-90 aralığında değişmektedir. Anormal kaybın temeli malzemenin çeşitli özelliklerine bağlıdır. Fikir verebilecek faktörler şunlardır:

- Domain duvar oluşumu ve açıları
- Sinüzoidal olmayan, düzgün olmayan ve tekrarlanmayan domain duvarı hareketi.
- Akının tam nüfuz etmemesi ve domain duvarının eğilmesi,
- Sinüzoidal olmayan akı yoğunluğu ve akı yoğunluğunun bölgesel değişimi,
- Tanecik arası etkileşim, tanecik büyüklüğü, tanecik yönlendirme ve malzemenin kalınlığının etkileri,
- Domain duvarının yeniden oluşması ve yok olması (Dunlop 2002).

BÖLÜM 3

NÜVE KAYBI ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Geçen yüzyıl boyunca çok sayıda araştırmacı nüve kaybı üzerinde çalışma yaptı. İlk çalışmalar döner histerisiz kaybı üzerine yoğunlaştı. Sert çelik ve yumuşak demirin dönel histeresis kaybı üzerine ilk nicel araştırma Bailly tarafından 1896 yılında yapılmıştır. Şekil 3.1 döner ve alternatif manyetik alanlar altında elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 3.1 Bailly(1896) tarafından yumuşak demir ve sert çelik için elde edilen döner ve alternatif manyetik alanlar altında histerisiz kayıpları (Belkasim 2008).

Sert çelik ve yumuşak demir için hem döner makinalardaki histerisiz kayıpları, alternatif histerisiz kayıplarından daha büyüktür. Bu durum saturasyonun %70'ine kadar geçerlidir. Akı yoğunluğu daha da artarsa, akı yoğunluğu doyma değerine ulaştığında döner histerisiz kaybı hızla düşer ve ortadan kaybolur, alternatif histerisiz kaybı artmaya devam eder. Bu döner histerisiz kayıp mekanizmasının alternatif kayıp mekanizmasından farklı olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki bölümlerde tanımlanan nüve kaybını ölçmek için dört ana yöntem vardır.

3.1 TORK-METRİK YÖNTEM

Tork-metrik yöntem genellikle test yapılacak örnek malzeme bir disk veya ring şeklinde olduğu zaman kullanılır. Numunede meydana gelen döner nüve kaybının nedeniyle oluşan tork, mekanik bir tork-metre ile ölçülür ya da örneğin açısal hız değişiminden hesaplanır.

Bu yöntemin avantajları da vardır. Tork-metre ile okunan tork değerinden karşılığı olan nüve kaybı bilinebilir. Ayrıca yüksek akı yoğunluğunda bile tork-metre ile kayıplar hesaplanabilir. Dezavantajı ise karmaşık mekanizmadan dolayı tork-metre yapım zorluğudur.

3.2 TERMO-METRİK YÖNTEM

Termo-metrik yöntemde, örneğin sıcaklığı, termokupl, termistörler veya ısı izleyici ile elde edilir. Eğer herhangi bir soğutma işlemi yoksa döner nüve kaybı başlangıç sıcaklık artışı ile orantılıdır. Eşitlik 4.4 numunenin döner kaybı ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi gösterir.

$$P = C \frac{dT}{dt} \quad (3.1)$$

Burada P W/kg olarak güç kaybı, C numune malzemenin özgül ısısı, T örneğin sıcaklığı ve t ise anlık zamandır. Yöntem çok esnektir ve manyetik alanın çeşitli tipleri ile kare, disk, halka ve çapraz numune tipleri kullanılarak uygulanabilir. Ayrıca yöntem, üç fazlı bir transformatör nüvesinin T eklemlerindeki sınırlandırılmış nüve kayıplarını ölçmek içinde uygundur. Bu yöntemin başlıca dezavantajları, kurulum zorlukları, ısı algılayıcı kalibrasyonu ve çevreye karşı izolasyonudur. Bu nedenlerden dolayı alan-ölçüm tekniği bu yöntemin yerini almıştır.

3.3 ALAN-METRİK YÖNTEM

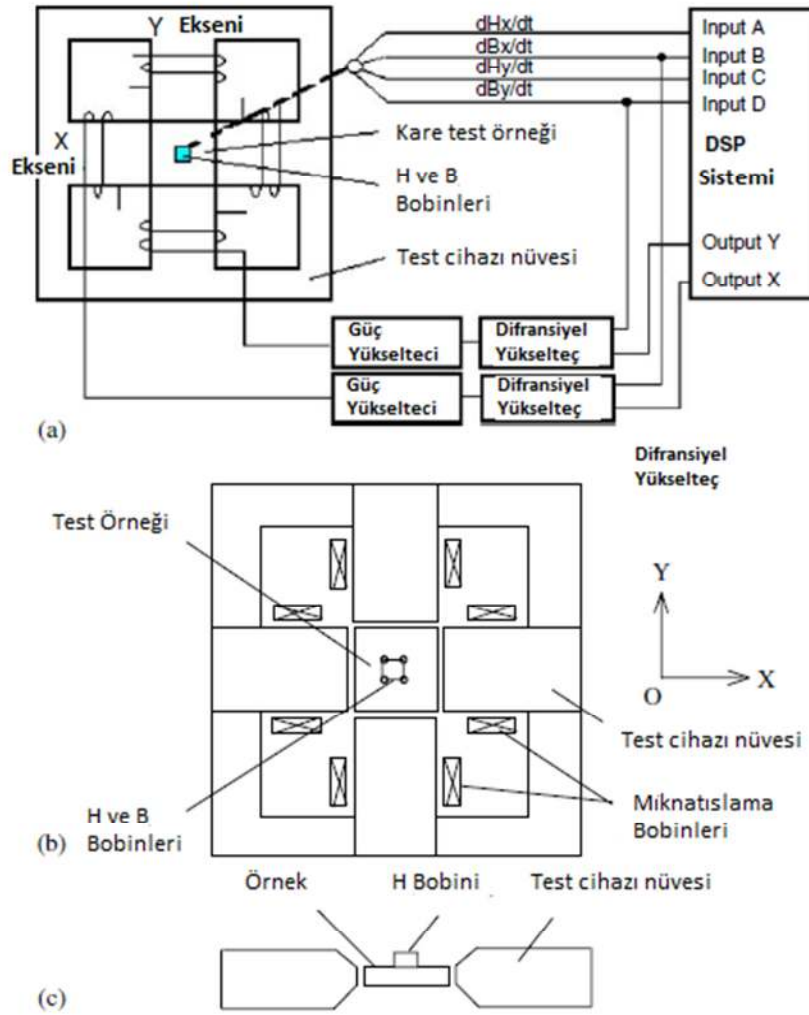
Alan-metrik yönteminde, nüve kaybı numune yüzeyindeki manyetik alan yoğunluğu H ve numunedeki akı yoğunluğu B ile hesaplanır. Yöntem, yüksek doğruluk ve çok yönlülük sunar. Dahası, ölçülen anlık H ve B değerleri çeşitli kayıp bileşenleri, H ve B vektörlerinin konumları ve diğerleri arasındaki harmonik gibi bilgileri vererek daha fazla tercih edilir. Dezavantaj olarak üretim zorluğu, B ve H algılayıcılarının kurulumu ve kalibrasyonu, ölçüm sisteminde kullanılan güç yükselteçlerinin faz açısı hata hassasiyetleri gibi teknik işler sayılabilir.

Eşitlik 3.2'deki Poynting teoremi kullanılarak, ölçülen manyetik alan kuvveti H ve manyetik akı yoğunluğu B bileşenlerinden toplam nüve kaybı P hesaplanır.

$$P = \frac{1}{T\rho_m} \int_0^T \left(H \frac{dB}{dt} \right) dt = \frac{1}{T\rho_m} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad (3.2)$$

Burada T mıknatıslanma periyodu, ρ_m test edilen malzemenin yoğunluğu, H_x , H_y , B_x ve B_y H ve B için x,y bileşenleridir.

Bu ölçüm yöntemini kullanan bir çalışmada (Şekil 3.2) yumuşak manyetik kompozit bir malzeme için manyetik özelliklerin ölçümü ve modellenmesi ele alınmıştır (Guo vd. 2006). Değişik akı yoğunluğu ve frekanslarda sistemli olarak ölçüm değerleri toplanmıştır. Bu toplanan değerlerden güç kaybına ait modelin katsayıları tespit edilmiştir. Ölçme sisteminde kare test örneği iki boyutlu SST test cihazında mıknatıslanmıştır. Çeşitli B ve H değerleri alınarak eşitlik 3.2 yardımıyla toplam nüve kayıpları bulunmuştur. Bulunan toplam kayıp, histerisiz, girdap ve anormal olmak üzere üç kaybın toplamıdır. Kayıp dağılımı yöntemi ve sayısal eğri uydurma yöntemleri yardımıyla güç dağılımındaki katsayılar ulaşılabilir.



Şekil 3.2 Alan-metrik yönteminin kullanıldığı bir ölçme sistemi, a) 2 Boyutlu manyetik test sistemi blok şeması, b) Kare örnekli SST, c) Manyetik kutuplar arasındaki test örneğinin yerleşimi (Guo vd. 2006).

3.4 WATT-METRİK YÖNTEM

Watt-metrik yöntemi, H alan şiddeti manyetizasyon akımı tarafından belirlenen alan-metrik yönteminden farklıdır. Bu yöntem, yaygın olarak alternatif nüve kaybı ölçümleri için Epstein çerçevesinde ve SST’de kullanılır. İlk olarak, H, B ve nüve kaybı, sırasıyla, ampermetreler, voltmetreler ve wattmetreler ile ölçüldü. Bu yöntemin watt-metrik yöntem olarak bilinmesinin nedeni budur. Bu yöntemin bir göze çarpan avantajı H manyetik alan şiddetini belirleme basitliğidir. Bu yöntem, SST için dikey boyunduruğuna uygulanabilmektedir. Çünkü test örneği ve boyunduruğu arasında hava boşlukları bulunmamaktadır. Döner nüve kaybına ait test boyunduruğu sistemindeki örnekteki etkin manyetik akı yolu, alternatif nüve kaybı test

cihazına göre iyi tanımlanmış değildir. Bu durum amper yasası uygulayarak manyetik alan şiddeti ölçümünde aşırı sistematik hataya neden olur. Akı yoğunluğu örnekte düzgün olmamasından dolayı, manyetik akım yoğunluğu numunedeki örnek merkezindeki deliklerden sarılmış sargılar, ya da B uçları(iğneleri) ile ölçülür. Ölçüm hassasiyeti manyetik akı yolunu tanımlayan boyunduruğun yapısına ve numunenin şekline bağlıdır.

3.5 B VE H BİLEŞENLERİ ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Elektriksel çelik saçlarında nüve kaybı ölçümünün hassas değerlendirilmesi, örnek içindeki manyetik akım yoğunluğuna ve yüzeyindeki manyetik alan şiddetinin ölçüm doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle, bu tür bileşenleri ölçmek için teknikler geliştirilmesi ve iyileştirilmesi bir zorunluluk haline gelir. B ve H bileşenlerinin ölçülmesi için kullanılmış olan pek çok yöntem ve teknik mevcuttur.

3.5.1 Mıknatıslanma Akımı Yöntemi

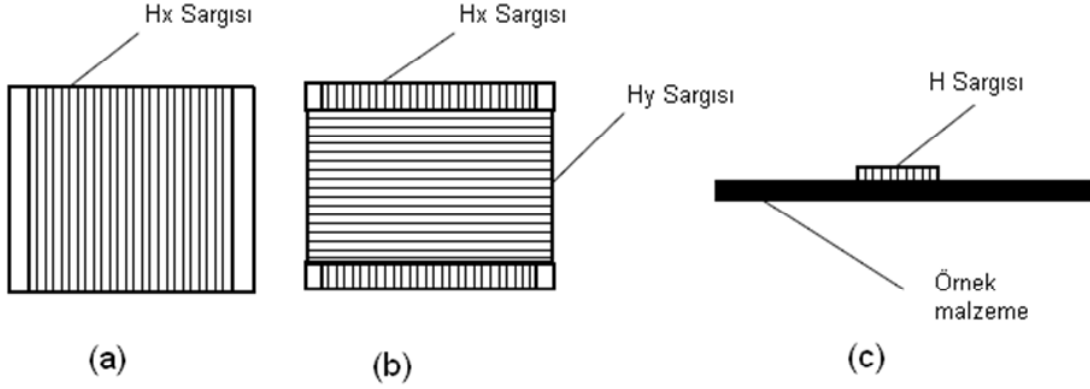
Bu teknikte, manyetik alan şiddeti H, Amper kanununu uygulayarak mıknatıslanma akımı i vasıtasıyla belirlenebilir.

$$H = \frac{Ni}{l_m} \quad (3.3)$$

H manyetik alanın şiddetinin hesaplandığı eşitlik 3.3 de N mıknatıslanma sargısının sarım sayısını, l_m ortalama manyetik akı yolunu gösterir. Bu yöntem, yaygın olarak alternatif nüve kaybı için kullanılan toroit, Epstein çerçeve ve SST gibi örnek içindeki manyetik akı yollarının iyi tanımlanabildiği cihazlarda uygulanabilir. Döner nüve kaybı cihazları için kullanıldığı zaman, örneğin içindeki manyetik akı yolları belirsiz olduğundan, yöntem hassas değildir. Bu tez içindeki deneysel çalışmalarımızda avantajlarından dolayı manyetik alan şiddeti, akım ve kayıp ölçümlerinde mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılmıştır.

3.5.2 H Algılayıcı Bobini Yöntemi

H algılayıcı bobini yöntemi, manyetik malzeme yüzeyindeki manyetik alan şiddetini ölçmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. İnce H algılayıcı bobini Şekil 3.3c’deki gibi malzeme yüzeyine yerleştirilir.



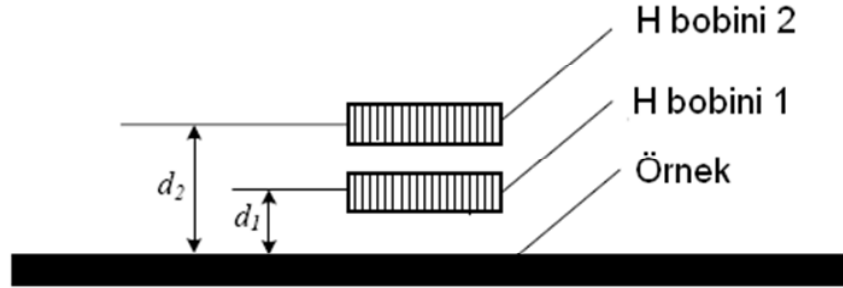
Şekil 3.3 H bobini, a) Tek boyutlu H bobini, b) 2 boyutlu H bobini, c) H bobininin yerleşimi (Belkasim 2008).

Manyetik alan örnek malzeme yüzeyine paralel olduğu durumda manyetik alan şiddeti eşitlik 3.4 ile hesaplanabilir.

$$H = \frac{1}{\mu_0 K_H} \int V_H dt \quad (3.4)$$

Burada $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Tm/A vakum ortamın manyetik geçirgenliğidir. K_H bobin için kalibrasyon ile bulunan bir katsayıdır. V_H ise H algılayıcı bobininin uçlarından okunan gerilim değeridir. Hall elemanı da manyetik alan şiddeti ölçümünde kullanılabilir fakat genel olarak SST için örnek yüzeyine konmuş H algılayıcı bobini tercih edilir. Çünkü H bobininin cevabı daha lineerdir. Ayrıca örnek yüzeyine daha yakın yerleşimi söz konusudur. Bu yöntem alternatif nüve kaybı ölçüm cihazlarında çokça kullanılan bir yöntemdir. Örnek yüzeyinde manyetik alan şiddeti düzgün olduğunda hassas değerler elde edilebilir. Fakat döner nüve kaybı cihazlarında manyetik alan, H bobini ile örnek arasındaki değişen mesafeden dolayı etkili bir şekilde değişir. Bunu önlemek için H bobini çok ince yapılmalı ve örnek yüzeyine yakın konmalıdır. Fakat bu çoğu zaman zordur.

Örnek yüzey üzerindeki mesafe değişimlerinden dolayı oluşan manyetik alan değişimlerinin oluşturduğu hatayı azaltmak için iki tane H bobinli ölçüm düzenine geçilmesi uygun olacaktır. Şekil 3.4 de gösterilen iki H bobinli düzenleme kullanılarak örnek yüzeyindeki manyetik alan şiddeti eşitlik 3.5 e göre hesaplanır.



Şekil 3.4 Çift H bobinli yerleşim (Belkasim 2008).

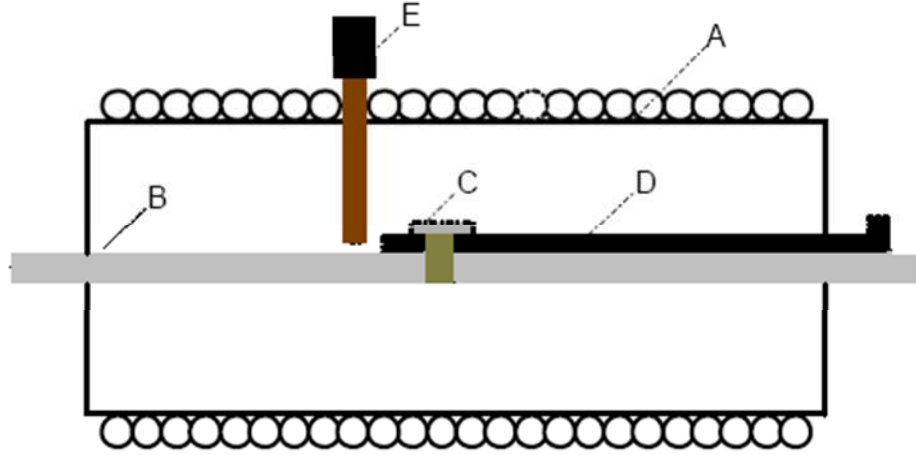
$$H = \frac{d_2 H_1 - d_1 H_2}{d_2 - d_1} \quad (3.5)$$

Burada H_1 ve H_2 örneğe yakın mesafede yerleştirilen H bobini 1 ve H bobini 2 nolu bobinlerden ölçülen manyetik alan şiddeti değerleridir. d_1 ve d_2 H bobinlerinin örnek yüzeye olan mesafeleridir.

Gerçekte eşitlik 3.4 daha detaylı şekli eşitlik 3.6 gibidir.

$$H = \frac{1}{\mu_0 NA} \int V_H dt \quad (3.6)$$

H bobininin bir sarımının oluşturduğu yüzeyi A alanıdır. N ise toplam sarım sayısıdır. Yani burada $K_H = NA$ eşitliğinde H bobininin A alanı net olmamasından dolayı, hassas hesaplamayı gerçekleştirmek için, NA çarpımı katsayıya dönüşerek kalibrasyonla hassas bulunacaktır. Genel uygulama H bobinleri Şekil 3.5'deki gibi bir selenoit bobini içinde kalibre edilir.



A-Selenoit, B-destek masası, C- H bobini, D-yönlendirme aparatı, E-Gauss metre sensörü.

Şekil 3.5 H bobinlerinin kalibrasyonu yapılabilecek selenoit düzeneği (Zhu 1994).

Kalibrasyon yapılırken H bobinleri selenoit içinde manyetik alanın düzgün olduğu merkeze yerleşimi yapmak gerekir. Manyetik alan şiddeti iki farklı ölçüm ile kontrol edilir. Birisi selenoit akımı ölçümü, diğeri Gauss metre ile yapılacak akı yoğunluğu ölçümüdür. Yönlendirme aparatı ile bobinde indüklenen gerilimin en yüksek olduğu nokta bulunur. Bu noktada iken eşitlik 3.7 yardımı ile H bobin sabiti değeri hesaplanır.

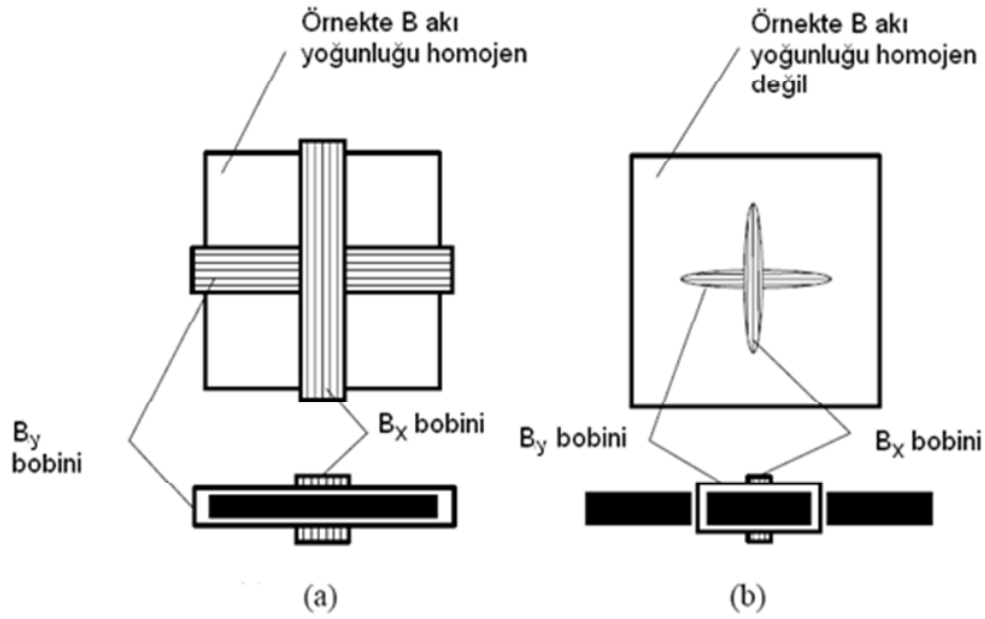
$$K_H = \frac{V_H}{\sqrt{2\pi f \mu_0 H_M}} \quad (3.7)$$

Burada V_H gerilim değeri, f frekansında selenoit bobini akım ile beslenince H bobini uçlarındaki etkin değerdir. H_m ise selenoit merkezindeki manyetik alan şiddetidir. H bobini uçlarındaki birkaç noktadan elde edilen değerlerin ortalamasının alınması hatayı azaltacaktır.

3.5.3 B Algılayıcı Bobini Yöntemi

Nüve kaybı ölçen sistemlerde B manyetik akı yoğunluğu da Şekil 3.6'deki gibi algılayıcı bir bobin yardımıyla ölçülebilir. Manyetik akı yoğunluğu manyetik malzeme üzerinde düzgün dağıldığı durumlarda algılayıcı bobin örneğin tamamını kapsayacak şekilde sarılabilir. Epstein ve SST ölçüm sistemlerinde bu bobin yapısı (Şekil 3.6a) kullanılmaktadır. Eğer manyetik akı

yoğunluğu manyetik malzeme üzerinde düzgün dağılmıyorsa algılayıcı bobin örnek sacın istenen noktasına açılacak deliklere Şekil 3.6b’deki gibi sarılabilir.



Şekil 3.6 B bobinlerinin yerleşimi, a) B homojen ise, b) B homojen değilse (Belkasim 2008).

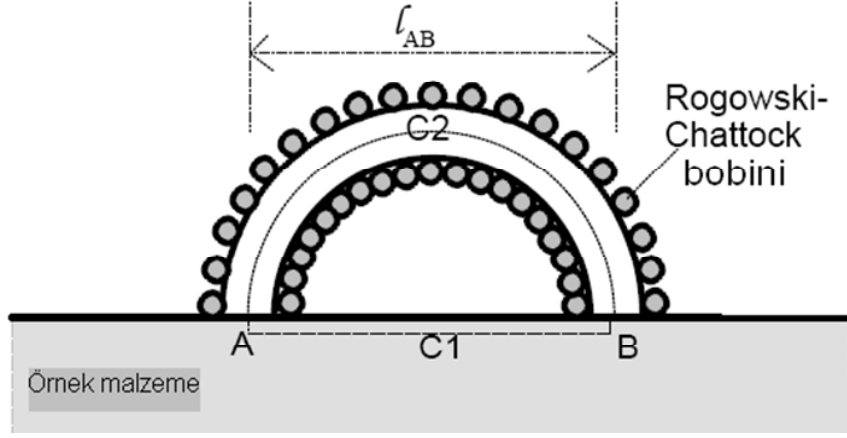
Örnekteki manyetik akı yoğunluğu eşitlik 3.8 ile hesaplanır.

$$H = \frac{1}{NA_B} \int V_B dt \quad (3.8)$$

Burada N sarım sayısıdır. V_B B bobini uçlarında indüklenen gerilimdir. A_B ise bobinin kesit alanıdır. Bu yöntem hassas sonuçlar verir, fakat örnekten çok ölçüm sonucu alınacaksa avantajlı değildir (Zhu 1994).

3.5.4 Rogowski-Chattock Bobini

Yüksek hassasiyetli manyetik alan şiddeti ölçen diğer bir yöntem Rogowski-Chattock bobini yöntemidir. Manyetik potansiyometre olarak da bilinir. Çalışma prensibi akım olmaksızın sayısal manyetik potansiyeli (V_m) oluşumu ilkesine dayanmaktadır. Şekil 3.7’de A ile B noktaları arasındaki manyetik potansiyel farkı eşitlik 3.9 ile tespit edilebilir.



Şekil 3.7 Rogowski-Chattock bobini-manyetik potansiyometre (Zhu 1994).

$$V_{mA} - V_{mB} = \int_{C1_A}^{C1_B} Hdl = \int_{C2_A}^{C2_B} Hdl \quad (3.9)$$

Eğer manyetik alan A ve B arasında homojen ise H'nin integrali C1 yolu boyunca hesaplanırsa eşitlik 3.10 elde edilir.

$$\int_{C1_A}^{C1_B} Hdl = Hl_{AB} \quad (3.10)$$

l_{AB} uzunluğu A ve B arasındaki mesafedir. Manyetik alan zamanla değiştiğini zaman bobin uçlarında indüklenen gerilim eşitlik 3.11 ile hesaplanır.

$$V_H = \frac{d\lambda}{dt} = \mu_0 A_H n \frac{d}{dt} \int_{C2_A}^{C2_B} Hdl \quad (3.11)$$

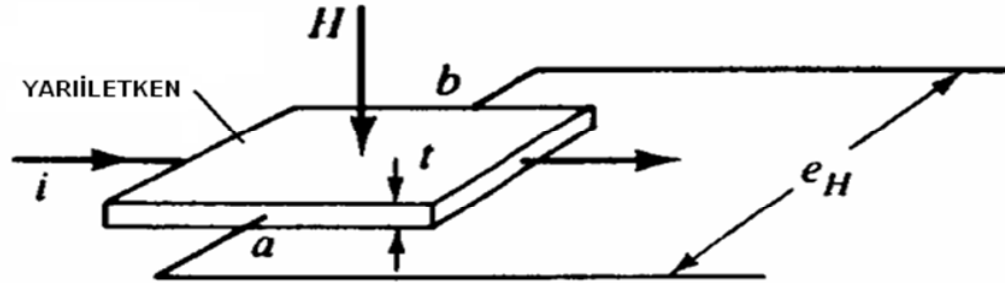
Burada λ toplam kaçak akı, A_H kesit alanı ve n bobinin birim uzunluğunun sarım sayısıdır. Eşitlik 3.9 ve eşitlik 3.10, eşitlik 3.11'de yerine konursa eşitlik 3.12 elde edilir.

$$V_H = \mu_0 A_H n \frac{d(Hl_{AB})}{dt} = \mu_0 K_H \frac{dH}{dt} \quad (3.12)$$

Burada $K_H = A_H n l_{AB}$ kalibrasyonla bulunacak bobin katsayısıdır. Demek ki örnek üzerindeki manyetik alan şiddeti, V_H geriliminin zamana bağlı integrali alınarak da bulunabilir. Bobinin iki ucu da örnek yüzeyine çok yakın yerleştirildiği için doğru ve hassas H alan şiddeti ölçülebilir. Daha büyük bobin katsayısı K_H ile yüksek hassasiyet elde edilebilir. Hassasiyet bobinin birim uzunluğunun sarım sayısı ile orantılıdır.

3.5.5 Hall Elemanı

Bu yöntem, enine manyetik alandaki akım taşıyan herhangi bir iletkende oluşan Hall etkisinden yararlanır. Bu etki yarı iletkenlerde metallerden çok daha büyüktür. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi yassı şekilli yarıiletkende i akımı varsa, a ve b noktaları arası gerilim aynı seviyede olacaktır. Uygun açıda H manyetik alanı uygulanınca akımın yolunu saptıracak, a ve b noktaları arası e_H gerilimini indükleyecektir.



Şekil 3.8 Hall etkisi olayında manyetik alan, akım ve indüklenen gerilimin ilişkisi (Zhu 1994).

Hall geriliminin büyüklüğü akımın ve manyetik alanın fonksiyonudur. Buradan manyetik alan şiddeti eşitlik 3.13 ile ifade edilebilir.

$$H = \frac{e_H t}{R_H i} \quad (3.13)$$

Burada t malzeme kalınlığı ve R_H malzemeye bağlı Hall katsayısıdır.

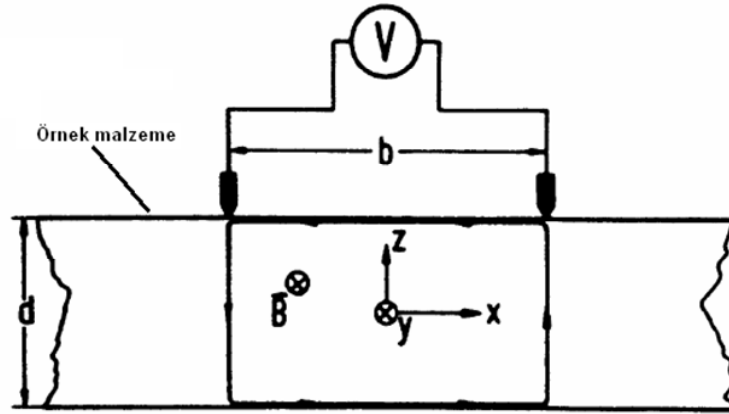
3.5.6 B İğneleri

Bu yöntem ilk defa Werner tarafından 1949’ da bulunmuş ve daha sonra döner nüve kaybı ölçümü için kullanılmıştır (Zhu 1994). Şekil 3.9’da gösterildiği gibi iki ölçüm iğne ucu belli mesafede örnek malzemenin yüzeyi üzerine temas ederek yerleştirilir. Örnek malzeme kalınlığı iğneler arası mesafeye göre yeterince ince ise, iğneler arası indüklenen gerilim Maxwell denklemi yardımıyla eşitlik 3.14 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$V = \frac{bd}{2} \frac{dB_y}{dt} \quad (d \ll b) \quad (3.14)$$

Burada d örnek malzeme kalınlığı, b iğneler arası mesafe, B_y ise örnekteki manyetik akı yoğunluğunun y bileşenidir (Şekil 3.9). Böylelikle B_y eşitlik 3.15 ile hesaplanır.

$$B_y = \frac{2}{bd} \int V dt \quad (3.15)$$



Şekil 3.9 B iğnelerini kullanarak B bileşenini ölçme prensip şeması (Zhu 1994).

B iğneleri yöntemi, B algılayıcı yöntemine göre bir dizi örnek ölçümlerinde daha uygundur. Bu yöntem tek sarım B ölçüm bobininin eşdeğeridir. Uygulamada iğnelerden ölçülen gerilim çok küçük olduğundan yüksek kaliteli yükselteçlere ihtiyaç vardır. Özellikle küçük örnek testlerinde kaçak akıları ihmal etmek oldukça zordur. Bu yüzden bu yöntemin hassaslığı B algılama bobinine göre azdır.

BÖLÜM 4

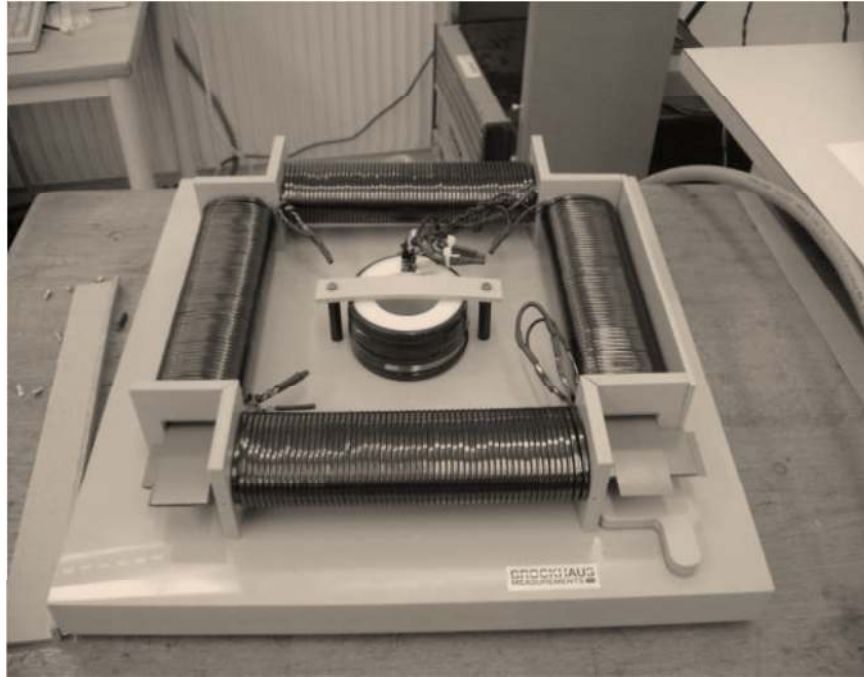
NÜVE KAYBI ÖLÇÜM CİHAZLARI

Bu bölümde üç farklı ve uluslararası standart kabul edilen nüve kaybı ölçüm cihazları gözden geçirilecektir. Bunlar Epstein çerçevesi, SST ve toroitlerdir.

4.1 EPSTEIN CİHAZI

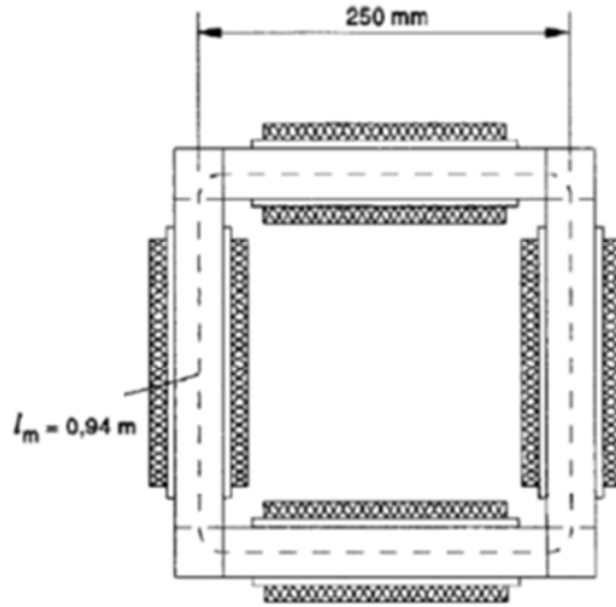
Epstein çerçevesi elektrik makinelerinde kullanılan laminasyonlu çelik saçlarının manyetik özelliklerini ölçmek için en sık kullanılan cihazdır. Manyetik malzeme özellik ölçümlerinde IEC60404-2 (1996) nolu uluslararası standartlar test prosedürü olarak takip edilmektedir.

Genel görünüşü Şekil 4.1’de verilen Epstein cihazında şerit elektrik saçları kare şeklinde manyetik devre oluşturacak şekilde yerleştirilir (Şekil 4.2).



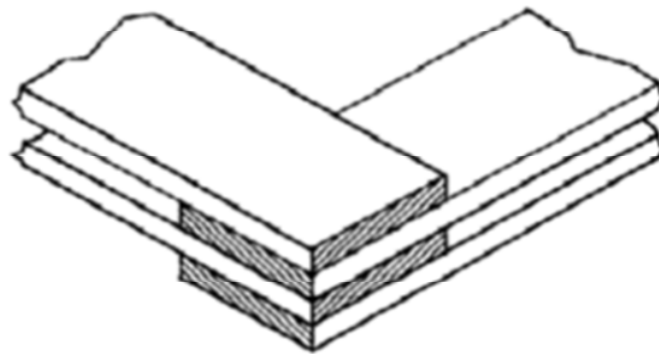
Şekil 4.1 Epstein cihazının genel görünümü (Muhit 2011).

Epstein çerçevesi, yerleşimin ortasında olacak şekilde (Şekil 4.1) hava manyetik akısı dengeleme bobini olarak da bilinen H dengeleme bobinine sahiptir. Bu bobin test sonuçlarının bozulmasını önlemek için H manyetik alanını dengeler.



Şekil 4.2 Epstein cihazında elektrik şerit saç örneklerinin kare yerleşim düzeni (Muhit 2011).

Epstein çerçevesinde şerit saç test örnekleri Şekil 4.3'deki gibi iç içe geçmeli ve bindirmeli olarak yerleştirilir.



Şekil 4.3 Epstein çerçevesine örneklerin yerleştirilmesi (Muhit 2011).

Epstein çerçevesi endüstriyel standart göre genellikle 28cm(± 2.05 cm) kenar ölçülü kare çerçeveden oluşur. 400Hz'e kadar olan test frekansları için primer ve sekonder sargıları 700 sarımlıdır. 4kHz'e kadar frekanslar için nüve kaybı ölçümlerine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. 400Hz'den yüksek frekanslı ölçümlerde 280 gibi düşük sarımlı tasarlanırlar. Elektrik saç şerit örnekleri 28cm uzunluğunda ve 3cm genişliğinde olmalıdır. Önerilen minimum sayı 12 adettir (Mthombeni vd. 2007).

Her iki kenarı için manyetik yolu 25cm olan çerçevenin eşdeğer manyetik yol uzunluğu 94cm olarak kabul edilmiştir. Saç örnekleri testten önce demagnetize edilmelidir. Saç örneklerindeki nüve kayıpları primer akım(ikaz) ile sekonder gerilimin çarpımının oluşturduğu anlık güç dalga şeklinin ortalaması alınarak elde edilir. Epstein yönteminin bazı eksiklikleri vardır. Test örneklerinin birleşme noktaları çevresindeki kaçak akı yoğunluğu nedeniyle manyetik akı yoğunluğu düzgün değildir. Köşelerin birleşimlerinin ölçüm hatalarına neden olduğu tespit edilmiştir (Lancarotte and Penteado 2001).

Manyetik yol uzunluğu (94 cm) tahminidir ve hassas değildir. 3cm şerit genişliği kesim gerilimini saç örneğinin merkezine yayılmasını önlemek için yeterli değildir. Bu yüzden nüve kayıp ölçümleri etkilenmiş olur. Bu nedenle, teste alınacak malzeme tavllanmış olmalıdır (İbrahim 2011). Özellikle yönlendirilmiş çelik test örneklerinde, test öncesi stresi azaltmak için tavlama şarttır. Dolayısıyla Epstein test düzeneği üzerine örnek şerit hazırlama ve yerleştirme zaman alıcıdır.

Test örneğinin toplam nüve kaybı eşitlik 4.1 ile verilir.

$$P = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.11|\overline{U_2}|)^2}{R_i} \quad (4.1)$$

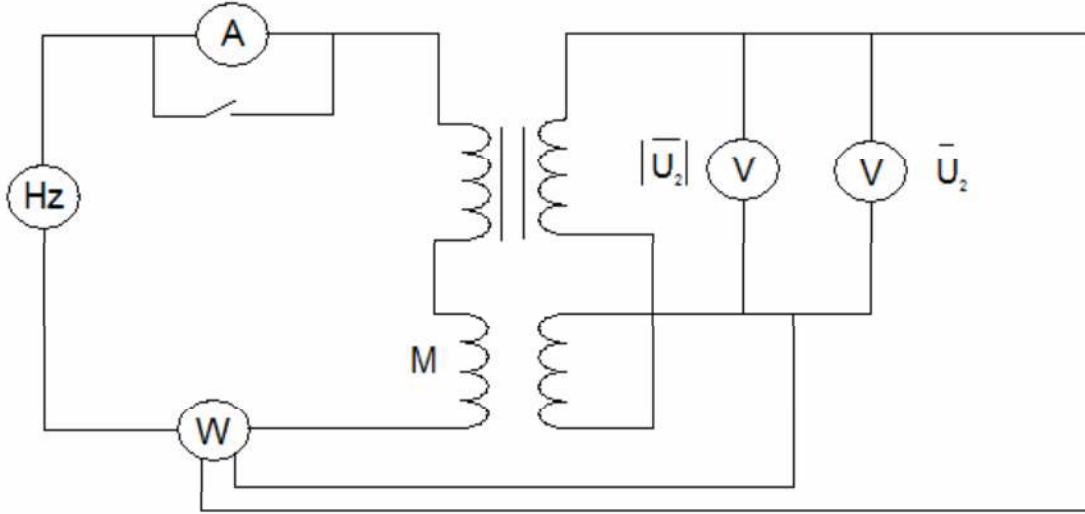
N_1 ve N_2 primer ve sekonder sarım sayısını, P_m wattmetre ile ölçülen gücü, R_i sekonderdeki ölçü aletlerinin toplam direncini ve $|U_2|$ sekonderde indüklenen doğrultulmuş gerilimin ortalama değerini gösterir.

Birim kütle başına güç kaybı ise eşitlik 4.2 ile bulunur.

$$W = \frac{P_c}{m_a} = 4l \frac{P_c}{ml_m} \quad (4.2)$$

Burada W birimi W/kg olan ölçülen toplam spesifik kaybı belirtir ve P_c değerinin, m_a aktif kütleye bölünmesi ile elde edilir. Manyetik akı çizgilerine maruz kalan ve test edilen elektrik sac örneğinin kütlesine aktif kütle denir. l bir test numunesi şeridinin uzunluğu olduğunda, l_m klasik etkin manyetik yolu uzunluğu ve m test örneğinin toplam kütlesidir (Ahmed 2007).

Şekil 4.4' de Epstein çerçevesinde nüve kaybını hesaplamak için kullanılan devre gösterilmektedir. Nüve kayıp ölçümleri watt-metrik ölçüm yöntemine göre yapılmaktadır.

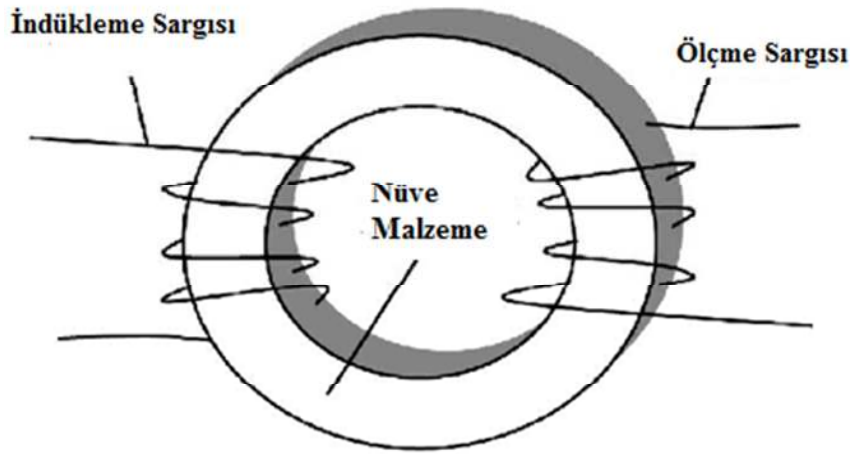


Şekil 4.4 Epstein çerçevesinde nüve kaybını hesaplamada kullanılan devre (Ahmed 2007).

Epstein çerçevesindeki manyetik akı koşulları transformatörlerde de bulunduğu için, kayıp güç hesaplama ve ölçümleri transformatörlerle uyumluluk içindedir. Epstein çerçevesine yerleştirilen test örneklerinin köşe yerleşimlerinin benzeri transformatörlerde de vardır. Epstein çerçevesi yapısal olarak da tek fazlı bir transformatöre benzemektedir. Bununla birlikte, bu tür uyumluluk indüksiyon motorları için görülmez. İndüksiyon motorları için Epstein test sonuçlarında hata %50 daha büyük olabilir (Torres 2002).

4.2 TOROİD TEST CİHAZI

Daha çok araştırmacıların tercih ettiği ve elektrik saç üreticilerinin tercih etmediği bir ölçüm cihazıdır. Toroitin üzerinde genel olarak indüklenme(primer) ve ölçme(sekonder) olmak üzere iki adet sargı bulunur (Şekil 4.5). Primerden ikaz akımı uygulanarak sekonderden oluşan gerilim okunur. Test kurulumu Epstein çerçevesine çok benzerdir. Toroitin örnek ferromanyetik nüvesi üzerine sargı sarılması, Epstein çerçevesinden farklı tarafıdır.



Şekil 4.5 Toroit cihazının sargı ve nüve malzemedeki yapı (Zurek vd. 2005).

Küçük motorlar için, toroidal armatürleri Epstein çerçevesine göre nispeten doğru sonuçlar çıkarabilir. Bunun nedeni, Epstein çerçevesine göre toroit geometrisinin daha fazla motorlara benzemesidir (Mthombeni 2007). Bununla birlikte, toroit boyutları küçüldükçe elektrik saçlarının kesme gerilmeleri numunelerin merkezine yayılabilir ve sonuçlarını etkileyebilir. Çünkü kesme gerilmeleri, kayıpları etkileyerek hatalı nüve kayıpları sonuçları elde edilmiş olacaktır. Bu nedenle doğru sonuç elde etmek için ısıtma ile gerilim giderme gerekli olacaktır. Nüve kayıpları Epstein çerçevesindeki yöntemle ölçülebilir.

Toroitin geometrisi indüksiyon motorlarının stator geometrisine daha çok benzemesinden dolayı (Boglietti 2003), bazen Epstein çerçevesi yerine toroit tercih edilir. Toroidin problemlerinden bir tanesi akı yoğunluğu dağılımının her yerde aynı olmamasıdır. Epstein çerçevesi ile karşılaştırıldığında bu test cihazının bir dezavantajı da, örnek test malzemesi olan nüvenin üzerine sargının düzgün şekilde sarılması (Şekil 4.6) zaman alıcı olmasıdır. Toroidal test düzeneği hazırlamak ve kurmak uzun sürmektedir.



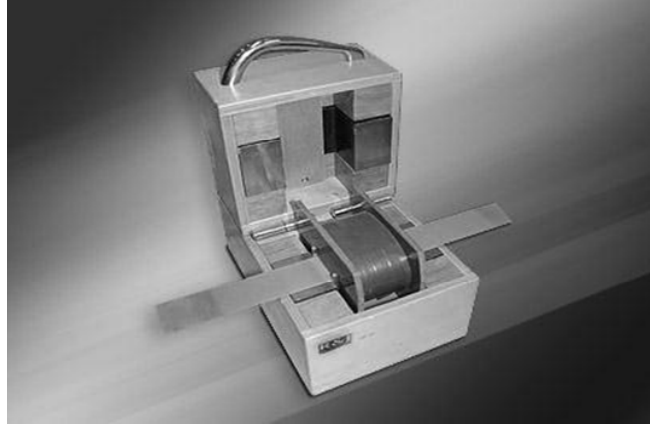
Şekil 4.6 Sarımı yapılmış toroidal nüveli yapı (Soong 2008).

Manyetik ölçmede kullanılan toroit test örneği hazırlanırken, ince dairesel elektrik saç çeliği üst üste dizilir ve halka şeklinde dairesel nüve oluşturulur. Her bir saç kendi arasında elektriksel olarak yalıtılmıştır. Girdap akımları kaybını etkileyen önemli faktörlerden birisi de toroidal nüvenin yapısındaki dilimlenmiş elektrik sacının kalınlığıdır. Dilimlenmiş elektrik çeliğinin dilimleri inceldikçe girdap akımları kayıpları azalmaya başlar. Bunun nedeni malzemenin kesit alanının küçülmesi, dolayısıyla girdap akımlarına karşı uygulanan direncin artmasıdır (Şimşir 2007).

4.3 SST (SINGLE SHEET TESTER)

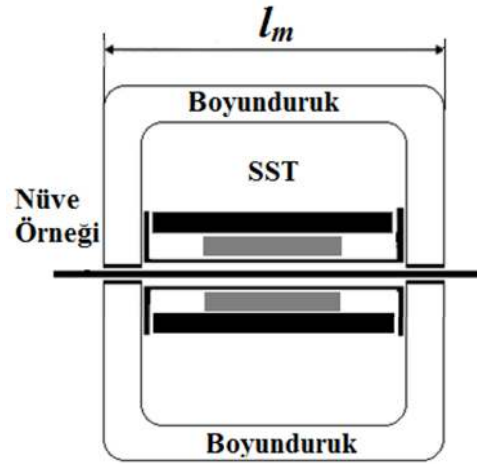
SST manyetik özellikleri ve nüve kayıplarını ölçen yeni nesil diyebileceğimiz test cihazıdır. Adı da tek saç test cihazı (Single Sheet Tester) kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Birçok avantajının içinde en belirgin olanı kullanım kolaylığıdır. Tek saç örneği ile nüve kaybı testi yapılabilir.

SST genel olarak boyunduruk ve bobinlerden oluşan bir ölçüm cihazıdır. Şekil 4.7’de küçük test örnekleri için SST görülmektedir. Uygun bir mekanik düzen ile iki boyunduruk arası açılır ve bobin merkezlerindeki boşluğa tek saç örneği yerleştirilir.



Şekil 4.7 Küçük test örnekleri için tasarlanmış bir SST (URL-1 2012)

2 adet U tip boyundurukların uçlarındaki yüzeyler birbirini eş yüzey olacak şekilde karşılayacaktır. Her iki boyunduruk yüzeyi arasına Şekil 4.8'deki gibi test sacı örneği yerleştirilir.



Şekil 4.8 SST'de test edilecek örnek sacın boyunduruklar arasındaki yerleşimi.

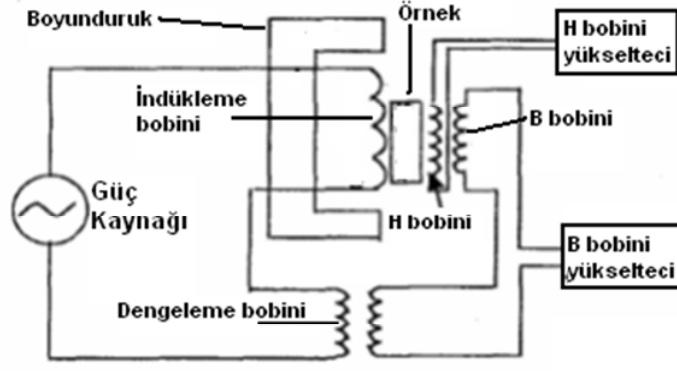
SST test cihazı olarak ele alındığında, test malzemesinin tek bir şerit çelik levhası kullanılarak manyetik özelliklerinin belirlendiği bir düzeneştir. Uluslararası IEC 60404-3 numaralı standart test sırasında takip edilmektedir. Test numunesi akısı yolunu tamamlamak için iki özdeş U tip boyunduruk arasına yerleştirilir. Uyarım (indükleme) bobini tek sürekli sargılı veya paralel tabakalar halinde bağlı birkaç sargılı tasarlanabilir.

Ölçme bobini sarım sayısı, ölçüm aletleri özelliklerine bağlı olarak sargı değişebilir. Ayrıca, hava akı dengeleme bobini primer sargılarının içinde bulunur. Temel çalışma prensibi Epstein çerçevesi ile benzerdir. Kurulum, numune hazırlama ve yükleme noktasından avantajlıdır. Dolayısıyla test zamanı azaltılabilir. Sonuçların tekrarlanabilirliği % 2 standart sapma içinde yer almaktadır.

Bazı araştırma makaleleri bahsedildiği üzere, önemli oranda kolay numune hazırlama ve malzemeden tasarruf nedeniyle, boyunduruklu tek saç test (SST) cihazı giderek Epstein çerçevesi yerini alacaktır (Nakata1986) ve gelecekte SST tercih edilen yöntem olacaktır. SST yönteminin en hassas yöntem olduğunu ifade edilmektedir. SST, Epstein çerçevesi ve toroit yöntemine göre manyetik çelik levhaların manyetik özellikleri ölçümü için ekonomik bir yöntemdir.

SST ölçüm prensibi için küçük bir açıklama Şekil 4.9'de verilmiştir. Burada güç kaynağı ile indükleme çeşitli manyetik akı değerleri için sağlanır (Shou 2001). Dengeleme sargısı ile özellikle yüksek akılarda manyetik akı dalga şeklinin sinüs şeklinden uzaklaşması azaltılır. Genelde H ve B bobinlerinin çıkış değerleri küçük olduğundan yükselteç ile değerler istenen noktaya getirilir.

SST yöntemi ile klasik yöntemler arasındaki fark, SST'de bir H bobinin manyetik alan şiddeti ölçümleri için kullanılmasıdır. Aynı bir B bobini ile akı yoğunluğu ölçülmektedir. Bu test cihazının önemli bir dezavantajı ya Epstein çerçevesi ya da bir toroit test cihazı ile kalibrasyon gerektirmesidir. Yani kalibrasyon için Epstein çerçevesi ve toroit test cihazı sonuçlarına bağlı olmasıdır. Ayrıca sacın hasar görmesini önlemek için manyetik sacı boyunduruğa yerleştirmek amaçlı havalı süspansiyon gerekebilir.



Şekil 4.9 SST için ölçüm prensibini gösteren devre (Shou 2001).

Bu bölümde bahsedilen üç test yönteminin içinde test örneği hazırlamak ve kurulum açısından en kolay olanıdır. Epstein çerçevesinde en 12 örnek şerit gerekli iken burada tek bir tane yeterlidir. Bununla birlikte SST, Epstein çerçevesinin aynı kusurlarına sahiptir, yani manyetik akısı sadece şeritlerin merkezinden ölçülür. Deneysel test 25,4 cm etkin manyetik yol uzunluğu olan bir Nikel-demir boyunduruklu tek saç test cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Ölçümler bir uzunlamasına örnek ve bir enine örnek üzerinde ayrı ayrı SST cihazı kullanılarak yapılır. İki test sonucunun daha sonra ortalaması alınır. SST, Epstein çerçevesi testinin iyi yönlerini alan bir yöntemdir.

Uluslararası standartlar çift boyunduruklu, 50cm kenar uzunluklu kare alanı ve 45cm eşdeğer manyetik uzunluğu olan örnek levhanın kullanıldığı SST'yi önermektedir. Uyarma sarımı örnek saç merkezine etrafına sarılır. Manyetik akı boyunduruk ve saç yolu etrafında dolaşır. İndüklenen gerilim elektrik sacı içinde akıma neden olarak nüve kayıpları üretir. Büyük örnek yüzey alanı kesme geriliminin numunelerin merkezine yayılmasını önler. Böylece, kayıp sonuçları mekanik gerilimlerden etkilenmez. Boyundurukların temas yüzeyleri girdap akımları kayıplarını azaltmak için pürüzsüz olmalıdır.

SST ve Epstein çerçevesi arasındaki kayıp ölçüm sonucu farklılıkları olabilir. Bu farklar eşdeğer manyetik yol uzunluğu tahmini doğruluğu ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, Epstein çerçevesi yumuşak manyetik malzemeleri test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelecekte SST, basit geometrisi ve kolaylığı yüzünden tercih edilen hale gelebilir.

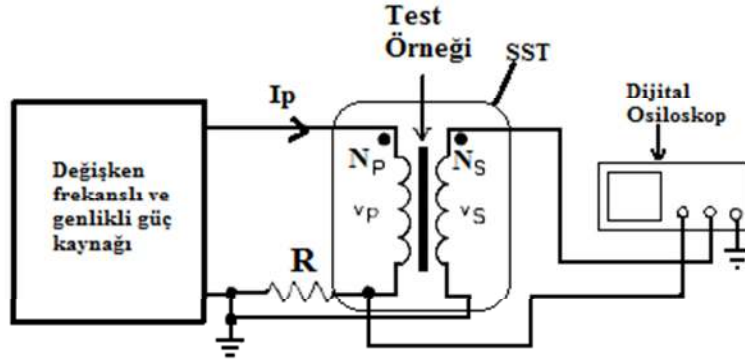
BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

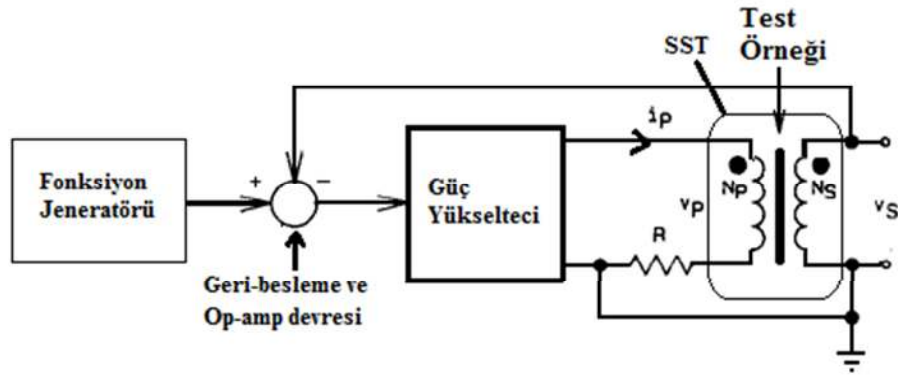
Nüve kayıplarını ölçmeye ve ayırtırmaya yönelik bu çalışmada 3 çeşit silisli çelik sac için birçok test yapılmıştır. Kullanılan örnekler trafo gibi elektrik donanımlarında kullanılan M3, M4 ve M5 kalite olarak bilinen %3 silisli çelik lamine saclardır. Kayıpları ve histerisiz eğrilerini elde ederken 3.bölümde bahsedilen mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada 4.bölümde bahsedilen SST ölçüm cihazı kullanılmıştır. SST için kullanılan besleme kaynağı sinüzoidal kaynaktır. Normal veya geri-beslemeli test düzenekleri kullanılarak 50Hz frekanstaki nüve kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde 50Hz ile 500Hz arasında kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerin eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemler bu bölümde görüleceği üzere toplam kaybın 3 bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılacaktır.

5.1 TEST DÜZENEGİ

Manyetik özelliklerin elde edildiği SST ölçme sistemi en basit olarak güç kaynağı, SST cihazı, R ölçüm direnci ve dijital osiloskoptan oluşur (Şekil 5.1). Ayrıca yüksek akılarda SST çıkış v_s geriliminin sinüzoidal şekilden uzaklaşmaması için geri-besleme devresi kullanılmaktadır. Eğer geri-besleme amaçlı toplayıcı işlemsel kuvvetlendirici(Op-amp) devresi kullanılırsa fonksiyon jeneratörü ve güç yükselteci, güç kaynağı yerine kullanılır (Şekil 5.2). Fonksiyon jeneratörü yeterli akımı sağlamadığı ve op-amp devresi çıkış gücü güç küçük olduğu için yükselteci kullanılmıştır.



Şekil 5.1 SST ölçme sisteminin genel prensip şeması.



Şekil 5.2 SST ölçme sisteminin geri-beslemeli çalışma prensip şeması.

Geri-besleme ile B manyetik akı ölçmelerini hesaplamak için SST sekonder gerilim şeklinin sinüzoidal veya çok az bozulmuş olması istenir. Manyetik nüve malzemenin yüksek manyetik akı yoğunluğu ile yapılan ölçmelerinde SST'nin ölçme(sekonder) bobininde indüklenen gerilimin dalga şekli sinüzoidal biçimden uzaklaşır. Bunu azaltmak ve hassas değer almak için yüksek akılarda geri-besleme kullanımı önem taşımaktadır.

5.1.1 Ölçüm Tekniği

Bu çalışmada nüve malzemelerin kayıp güç ve H manyetik alan şiddeti ölçümlerinde mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin bir göze çarpan avantajı H manyetik alan şiddetini belirleme basitliğidir. Bu yöntem, SST için dikey boyunduruğuna uygulanabilmektedir. Çünkü test örneği ve boyunduruk arasında hava boşlukları bulunmamaktadır. Yöntemin basitliği ve SST'de uygulanabilirliği çalışmada kullanılma sebepleridir. Kilogram başına nüve kayıp değeri eşitlik 5.1 ile hesaplanır.

$$p = \frac{P}{m} = \frac{P}{\rho V} = \frac{1}{\rho V} \frac{N_p}{N_s} \frac{1}{T} \int_0^T v_s i_p dt = \frac{N_1}{N_2} \frac{P_m}{m} \quad (5.1)$$

Burada N_p , i_p primer yani mıknatıslanma sargısı parametreleri, N_s , i_s ise sekonder(B akısı ölçme bobini) sargı parametreleridir. P_m aktif gücü mıknatıslanma akımı ve B ölçme bobininde indüklenen gerilim ile hesaplanır. Test örneğinin kütlesi m ile ifade edilir. Kilogram başına nüve kaybı p ile belirtilmiştir. Kütle olarak SST boyundurukları arasında kalan örneğin ağırlığı testlerde kullanılmıştır.

Bir kayıp eğrisini oluşturmak için bir seri test yapılmıştır. Her bir hesaplanan güç noktası birleştirilerek eğriler oluşturulmuştur. Çizelge 5.1’de gösterildiği gibi, Şekil 5.3’deki nüve kayıp grafiği için 11 adet ayrı B manyetik akı yoğunluğunda test yapılmıştır. Her bir test noktasından sonra nüve test örneği demanyetize edilerek sonraki nokta testine geçilmiştir. Demanyetize için test örneği yüksek akı değerini(doyma, saturasyon) görmesi ve daha sonra akı yavaşça azaltılarak sıfıra kadar inmesi gereklidir. Osiloskopta okunan çıkış güç değeri yeterince küçük olduğunda bir sonraki test noktası için teste başlanabilir.

B akı değeri eşitlik 5.2 ile hesaplanır. V_s gerilim değeri SST’nin B ölçme bobininden alınan etkin değerdir. N_s B ölçme bobininin sarım sayısı, f mıknatıslanma akımını oluşturan gerilimin frekansı, A ise test örneğinin kesit alanıdır. H manyetik alan şiddeti eğrisi de kayıp eğrisi gibi test noktalarının birleşiminden oluşur. Kayıp testini yaparken H değerleri de elde edilmiş olur. H değerini mıknatıslanma akım yönteminden çıkarılmış eşitlik 5.3’e göre hesaplanır. Mıknatıslanma akımı i_p , SST sistemindeki mıknatıslanma (primer) sargısına seri bağlı R ölçme direncinden okunan değerdir. Etkin manyetik yol uzunluğu olarak belirtilen l_m ise SST boyundurukları arası iç mesafedir.

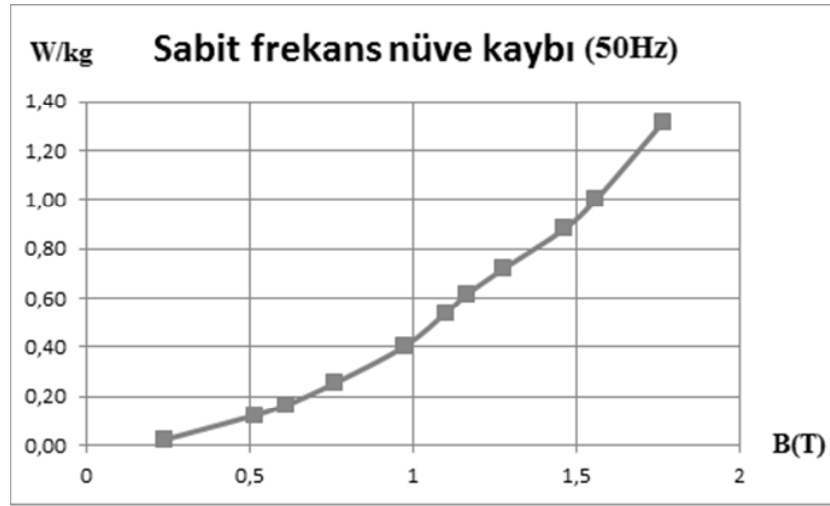
$$B = V_s / (4,44 \cdot N_s \cdot A \cdot f) \quad (5.2)$$

$$H = N_p \cdot i_p / l_m \quad (5.3)$$

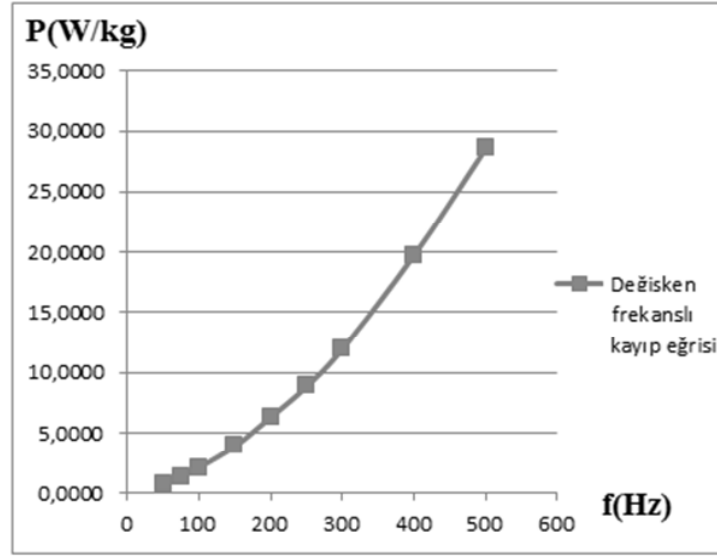
Çizelge 5.1 Kayıp eğrilerini oluşturmak için kullanılan örnekleme tablosu.

Test No	Mıknatıslanma akımı- i_p (A)	H(A/m)	B(T)	Vs	Osiloskop güç değeri	W/kg	Vp/Vs	W/kg-son
1	0,0014	3,837647	0,075625	0,033	1,00E-05	6,79E-04	2,24038	0,00152
2	0,0019	5,208235	0,12375	0,054	1,40E-05	9,50E-04	2,24038	0,00213
3	0,0023	6,304706	0,17875	0,078	5,00E-05	3,39E-03	2,24038	0,00760
4	0,0039	10,69059	0,389584	0,17	4,00E-04	2,71E-02	2,24038	0,06080
5	0,00635	17,40647	0,790626	0,345	1,46E-03	9,91E-02	2,24038	0,22193
6	0,00705	19,32529	0,893751	0,39	1,84E-03	1,25E-01	2,24038	0,27970
7	0,00912	24,99953	1,203127	0,525	2,86E-03	1,94E-01	2,24038	0,43475
8	0,0118	32,34588	1,41396	0,617	4,26E-03	2,89E-01	2,24038	0,64756
9	0,02	54,82353	1,615627	0,705	6,10E-03	4,14E-01	2,24038	0,92726
10	0,0315	86,34706	1,714169	0,748	6,92E-03	4,70E-01	2,24038	1,05191
11	0,056	153,5059	1,803544	0,787	8,21E-03	5,57E-01	2,24038	1,24800

İki çeşit nüve kayıp eğrisi oluşturulmuştur. Birinci tip kayıp eğrisinde frekans sabit, manyetik akı değişkendir (Şekil 5.3). İkinci tip kayıp eğrisinde frekans değişken, manyetik akı sabittir (Şekil 5.4).

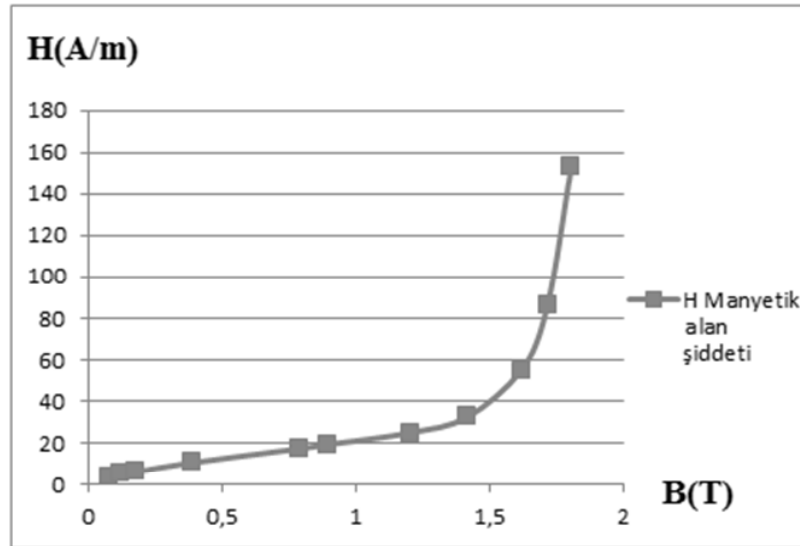


Şekil 5.3 M5 kalite Si-Fe nüve sac örnek test malzemesinin kayıp eğrisi.



Şekil 5.4 M4 kalite Si-Fe örnek için değişken frekanslı kayıp eğrisi.

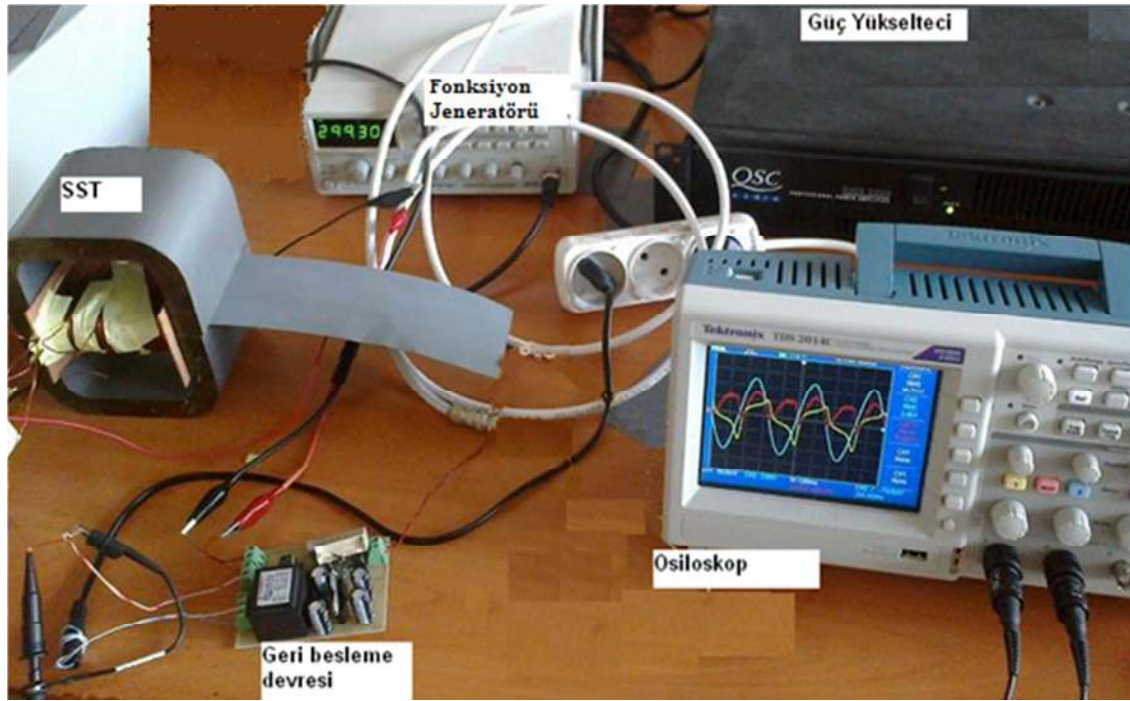
Ayrıca eşitlik 5.3'e göre çizilmiş H manyetik alan şiddeti eğriler de çalışmada elde edilmiştir (Şekil 5.5).



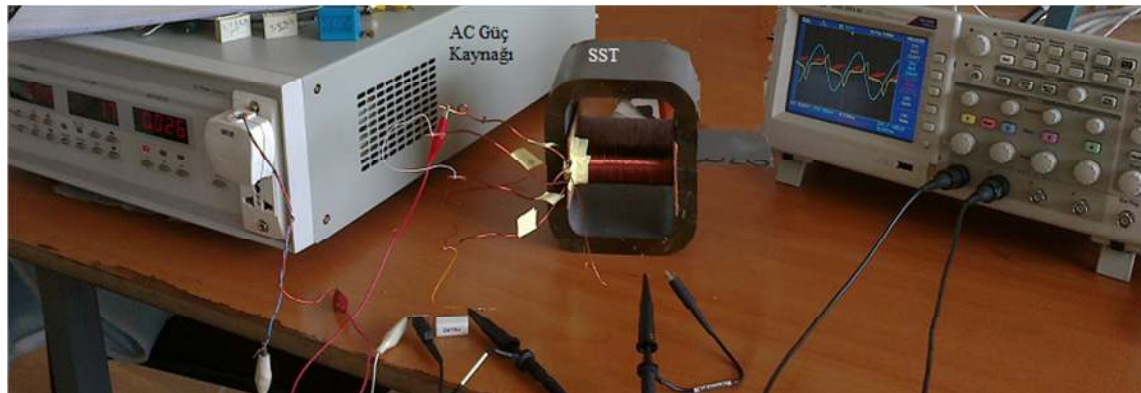
Şekil 5.5 M4 kalite Si-Fe örnek için manyetik alan şiddeti eğrisi.

5.1.2 SST Test Düzenegi

SST ölçme sistemi fonksiyon jeneratörü, güç yükseltici, SST cihazı, R ölçüm direnci ve dijital osiloskoptan oluşur (Şekil 5.6a). Ayrıca yüksek akılarda SST çıkış v_s geriliminin sinüzoidal şekilden uzaklaşmaması için geri-besleme devresi kullanılmaktadır. Yüksek akılara çıkmadan ölçme yapıldığı durumlarda fonksiyon jeneratörü ve güç yükseltici yerine frekans-genlik ayarlı AC sinüzoidal güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 5.6b).



a) Geri-beslemeli test düzeneği



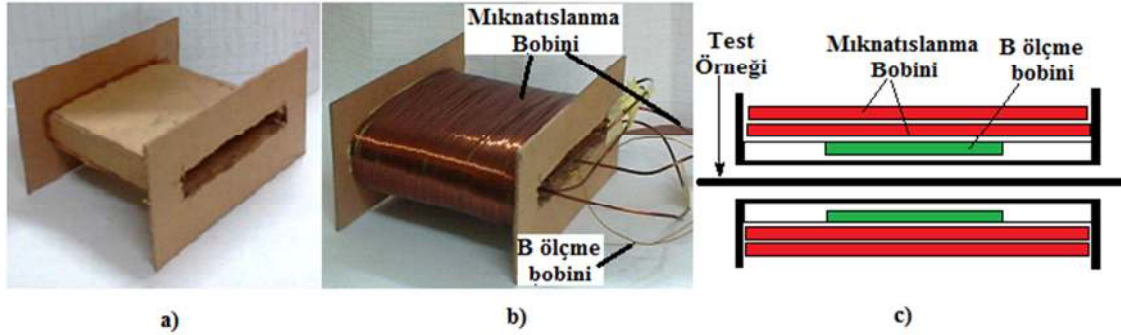
b) Geri-beslemesiz test düzeneği.

Şekil 5.6 SST ile nüve malzeme özelliklerinin ölçüldüğü sistemin ana cihazları.

SST cihazı alt, üst boyunduruklar ve karkas üzerine sarılmış B ölçme bobini ile mıknatıslanma bobininden oluşur (Şekil 5.7). Karkas merkezindeki boşluk saç şeklindeki test örneğini yerleştirmek içindir. B ölçme bobini kaçak akıdan etkilenmemesi için iç kısma sarılıdır. Mıknatıslanma bobini bu yüzden her zaman üste sarılır.

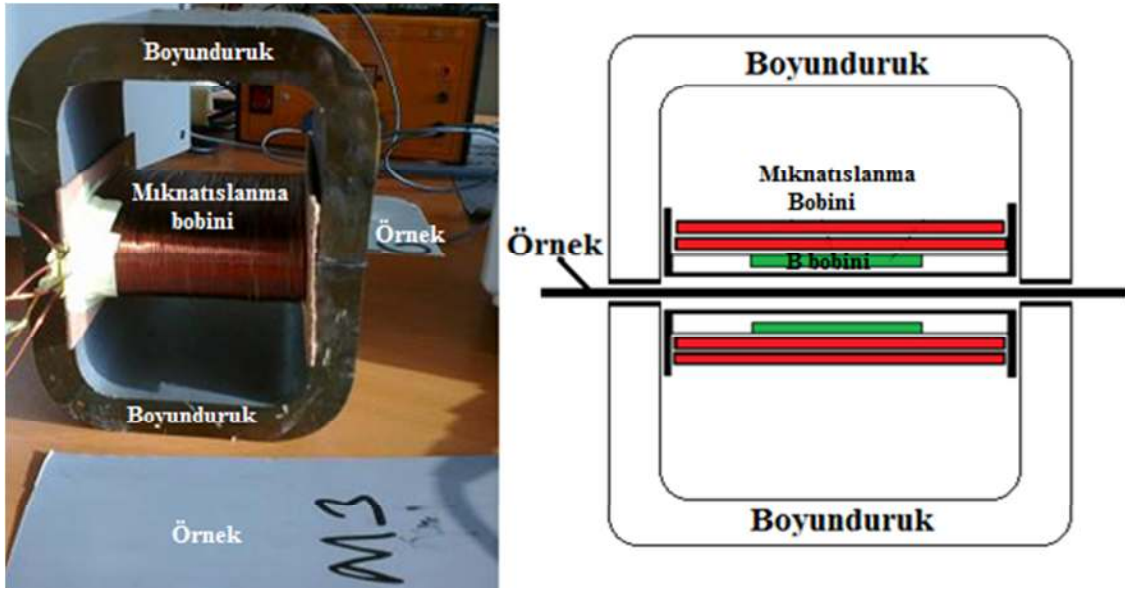
Boyunduruklar lamine Si-Fe trafo saçlarının üst üste bindirilip U şeklinde bükülmesiyle oluşturulmuştur. Test esnasında U boyundurukların açık uçları birbiri üzerine kapatılır. Böylece iki boyunduruk arasında kalan test örneği manyetik devreyi boyunduruklar üzerinden tamamlar. Kullanılan boyunduruklar 1992 yılında yayımlanan SST standartlarındaki ölçülerden küçüktür. Standartların verdiği değerleri sağlamak hem masraflı ve zor, hem de küçük örnek testlerinde kullanımı imkânsızdır. Çoğu elektrikli makinanın nüve saç boyutları daha küçüktür. Özellikle küçük boyutlu test örnekleri için küçük boyutlu SST'ler kullanılmaktadır.

Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemler bu bölümde görüleceği üzere toplam kaybın 3 bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılacaktır.



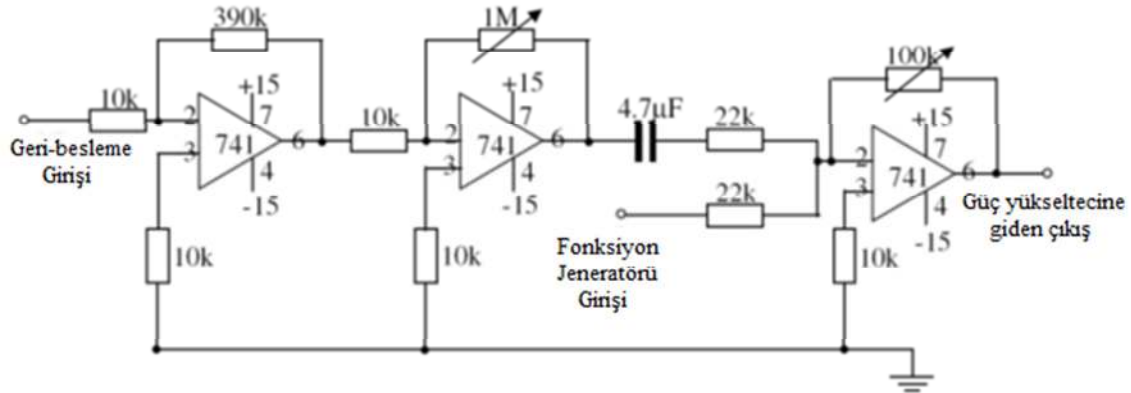
Şekil 5.7 SST bobinlerinin yerleşimi, a) Boş bobin karkası, b) Sarılmış B ve mıknatıslanma bobinleri, c) Bobinlerin ve test örneğinin kesitten görünümü.

SST'de test örneğinin boyunduruklar arasına yerleşimi ve teste hazırlanması önem taşımaktadır (Şekil 5.8). Numunenin kesilmesi ile oluşan gerilmeler kayıp değerlerini arttırmakta ve doğru olmayan değerlere sebep olmaktadır. Sonuçları etkilememesi için örnek boyu uzun tutularak mekanik gerilmeler merkezden uzaklaştırılmıştır.

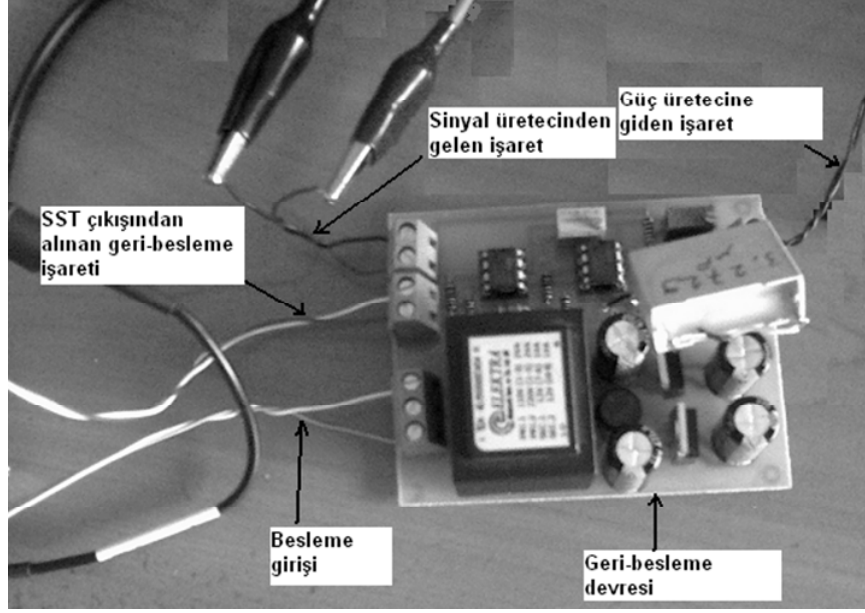


Şekil 5.8 SST’de boyunduruklar, bobinler ve test örneği için yerleşim resimleri.

Yüksek akıların testinde geri-besleme devresi kullanılmıştır. Bu devre op-amp ile yapılmıştır (Şekil 5.9). Elektronik devre üzerinde yerleştirilen ayarlı dirençler ayarlanarak istenen ideal çıkışlar alınmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.9 SST’yi geri-beslemeli olarak beslemek için kullanılan devre (Derebaşı 1994).

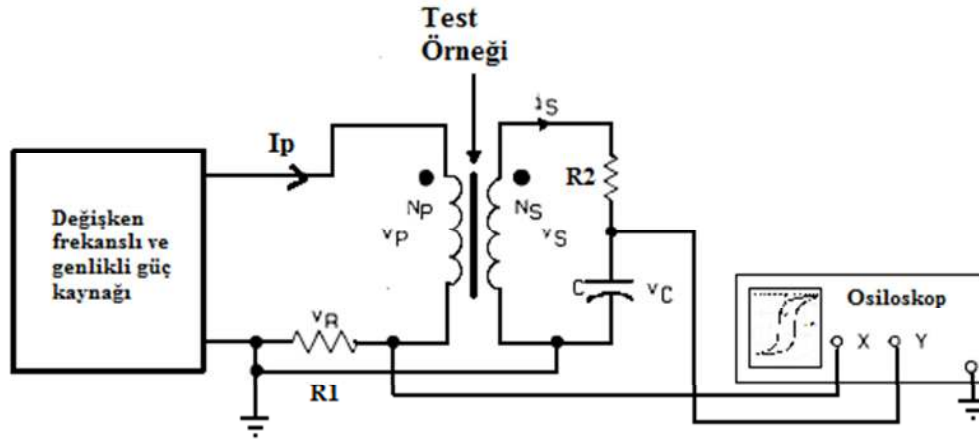


Şekil 5.10 Geri-beslemeyi içeren elektronik kartın uygulanması.

5.2 HİSTERİSİZ EĞRİLERİ

Histerisiz, manyetik malzemelerin mıknatıslanması sonucunda meydana gelen olaydır. Statik kayıp olarak da anılan histerisiz kaybı, histerisiz olgusundan kaynaklanır. Histerisiz kaybı eşitlik 2.15 ile hesaplanmaktadır. B akısının ve f frekansının artışı histerisiz kaybını arttırmaktadır. Ayrıca k_h katsayısının büyük olması kaybı artırır. Bu katsayı ise nüve malzemenin kalitesi ile ilişkilidir. Histerisiz çevrimindeki kapalı alanın büyüklüğü histerisiz kaybıyla orantılıdır. Bu yüzden histerisiz kaybı az olan bir nüve için bu eğriler daha ince olacaktır.

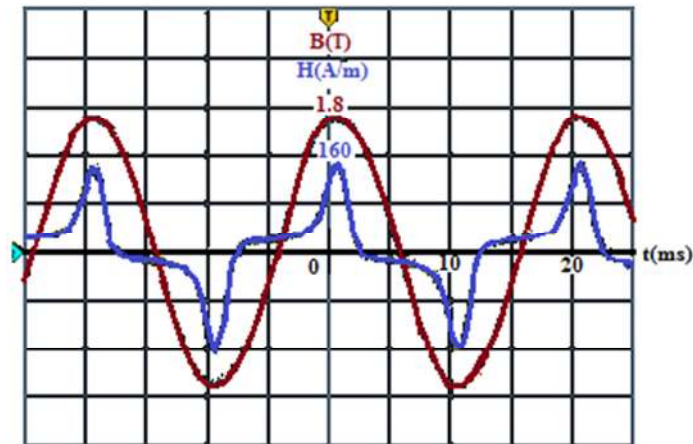
Bu çalışmada 3 farklı nüve malzemesi için histerisiz eğrisi elde edilmiştir. Kullanılan test örnekleri M3, M4 ve M5 kalite %3 silisli çelik lamine saçlardır. Histerisiz, H ve B eğrilerini oluşturmak için kullanılan düzeneğe integral almak için RC devresi eklenmiştir (Şekil 5.11).



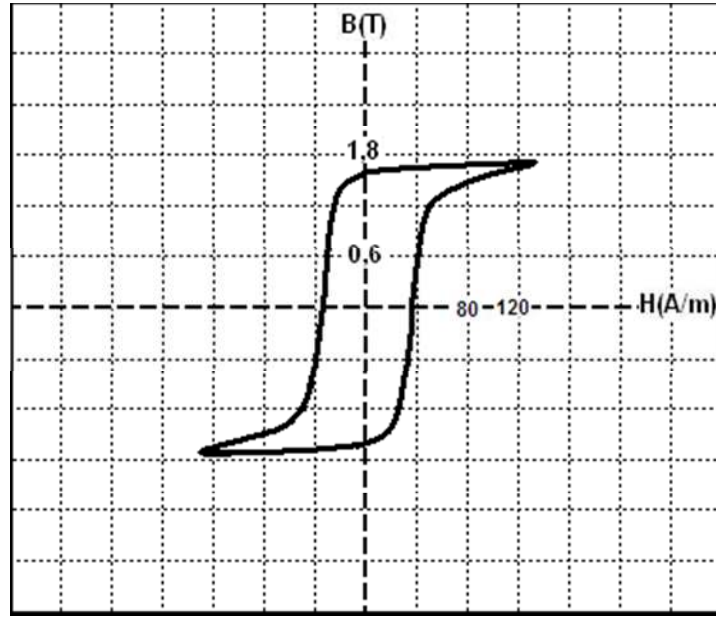
Şekil 5.11 Histerisiz, H ve B eğrilerini oluşturmak için kullanılan düzenek.

5.2.1 M4 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri

Histerisiz, B ve H eğrileri oluşturulurken güç kaynağı frekansı 50Hz seçilmiştir. R1 direnci üzerinden H eğrisi, C kondansatörü üzerinden B eğrisi çizdirilmiştir. B ve H eğrilerinin zamana bağlı eğrileri Şekil 5.12’de gösterilmiştir. M4 için histerisiz eğrisi Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



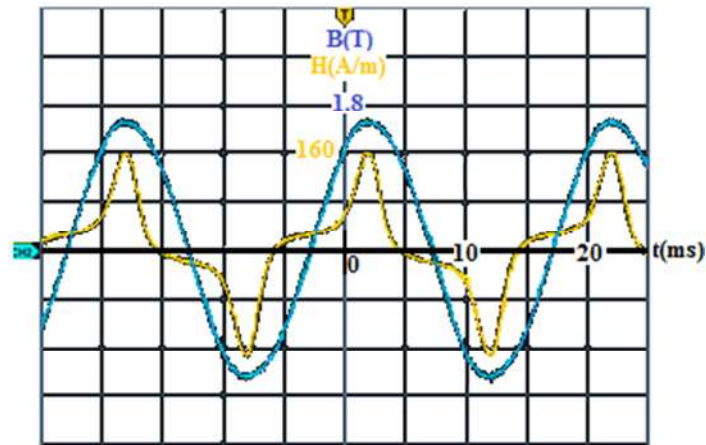
Şekil 5.12 M4 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.



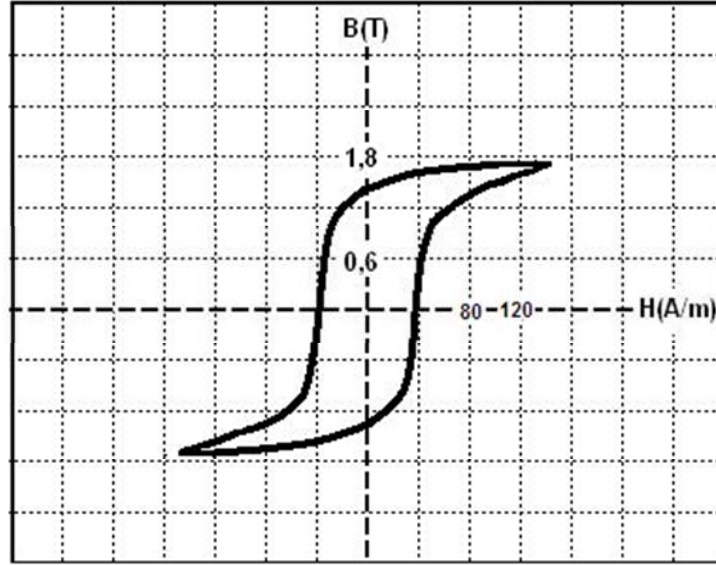
Şekil 5.13 M4 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.

5.2.2 M5 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri

Histerisiz, B ve H eğrileri oluşturulurken güç kaynağı frekansı 50Hz seçilmiştir. R1 direnci üzerinden H eğrisi, C kondansatörü üzerinden B eğrisi çizdirilmiştir. B ve H eğrilerinin zamana bağlı eğrileri Şekil 5.14’de gösterilmiştir. M5 için histerisiz eğrisi Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



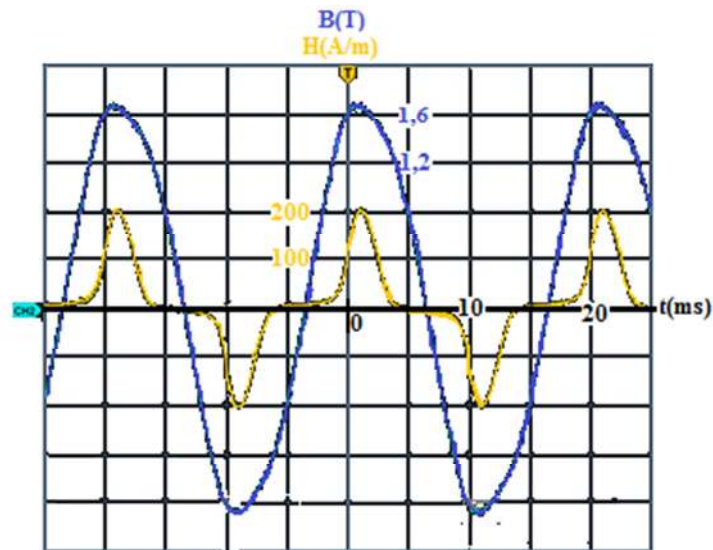
Şekil 5.14 M5 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.



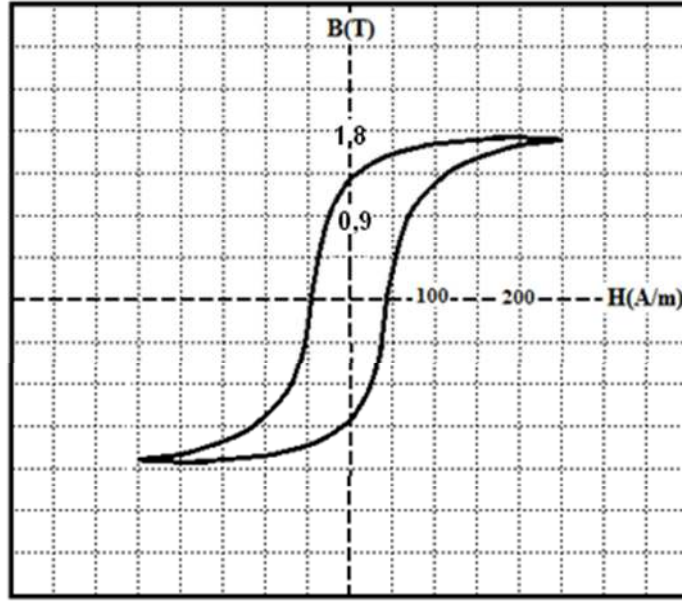
Şekil 5.15 M5 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.

5.2.3 M3 Kalite Si-Fe Nüve Çeliği Eğrileri

Histerisiz, B ve H eğrileri oluşturulurken güç kaynağı frekansı 50Hz seçilmiştir. R1 direnci üzerinden H eğrisi, C kondansatörü üzerinden B eğrisi çizdirilmiştir. B ve H eğrilerinin zamana bağlı eğrileri Şekil 5.16’de gösterilmiştir. M3 için histerisiz eğrisi Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.16 M3 kalite Si-Fe nüve çeliğinin zamana bağlı B ve H eğrileri.



Şekil 5.17 M3 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.

5.3 SABİT FREKANS NÜVE KAYIP VE H MANYETİK ALAN EĞRİLERİ

Bu bölümde sabit 50Hz frekansta 3 çeşit kalitede tanecikleri yönlendirilmiş silisli çelik sac için testler yapılmıştır. Kullanılan örnekler M3, M4 ve M5 kalite silisli çelik lamine saclardır. Ölçümün yapıldığı SST için kullanılan besleme kaynağı sinüzoidal kaynaktır. Normal veya geri-beslemeli test düzenekleri kullanılarak 50Hz frekanstaki nüve kayıp ve H manyetik alan şiddeti değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen noktalardan kayıp ve H eğrileri çizdirilmiştir.

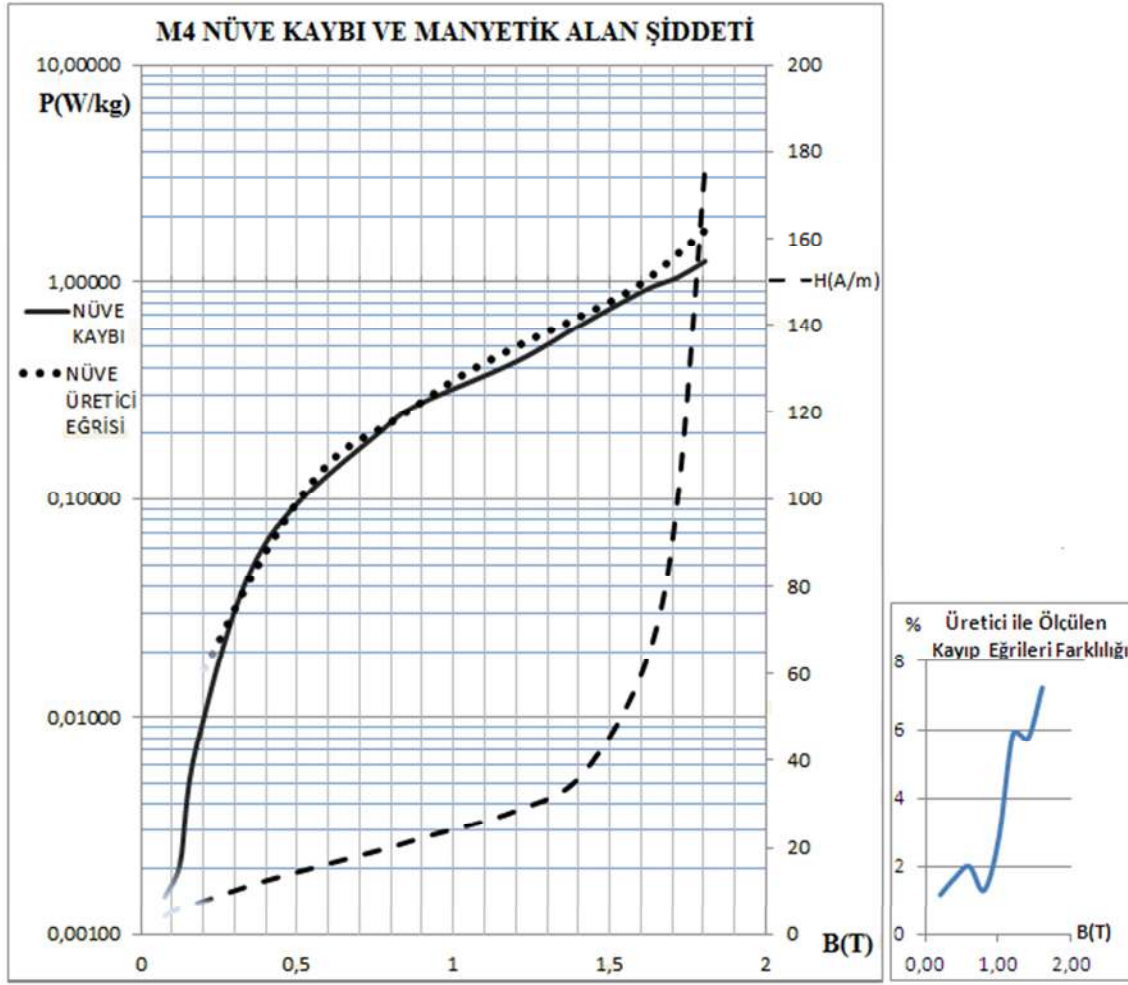
5.3.1 M4 Test Örneği İçin 50Hz Testleri

M4 kalite Si-Fe elektrik çeliği 0,27mm kalınlığında özellikle trafo gibi elektromanyetik cihazlarda kullanılmaktadır. Bu kadar ince olması girdap kayıplarını azaltmak içindir. Silis katılarak da girdap kayıpları azaltılmıştır. Trafolar da tanecikleri yönlendirmiş M4 kalite seçilmesi histerisiz kaybını azaltmak içindir. Çizelge 5.2’de M4 ile 50Hz frekansta yapılan 11 grup test değerleri ve bu değerlerden hesaplanan H manyetik alan şiddeti, B akı yoğunluğu ve kilogram başına nüve kaybı değerleri vardır.

Çizelge 5.2 M4 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşturmak için kullanılan tablosu.

Test No	Mıknatıslanma akımı- i_p (A)	V_s	Osiloskop güç değeri	H(A/m)	B(T)	P(W/kg)
1	0,0014	0,033	0,00001	4,4	0,08	0,0015
2	0,0019	0,054	0,000014	6,0	0,12	0,0021
3	0,0023	0,078	0,00005	7,3	0,18	0,0076
4	0,0039	0,17	0,0004	12,3	0,39	0,0608
5	0,00635	0,345	0,00146	20,0	0,79	0,2219
6	0,00705	0,39	0,00184	22,2	0,89	0,2797
7	0,00912	0,525	0,00286	28,7	1,20	0,4347
8	0,0118	0,617	0,00426	37,2	1,41	0,6476
9	0,02	0,705	0,0061	63,0	1,62	0,9273
10	0,0315	0,748	0,00692	99,3	1,71	1,0519
11	0,056	0,787	0,00821	176,5	1,80	1,2480

SST ile yapılan ölçüm sonuçlarından faydalananarak M4 nüve malzemesi için Şekil 5.18’de kayıp(düz çizgili eğri) ve H eğrileri(kesik çizgili eğri) gösterilmiştir. Dikkat edilirse yüksek akı değerlerinde kaybın ve manyetik alan şiddetinin daha hızlı arttığı görülür. Bunun sebebi M4 için 1,5T ile 1,7T değerindeki akı yoğunluğu Si-Fe nüve malzemeler için doyma bölgesi olmasıdır. Nüve kaybı için yapılan ölçekleme logaritmiktir. Nüve malzeme üreticileri logaritmik kayıp çizelgeleri ile ürünlerini sundukları için bu çalışmada bu uyumluluk devam ettirilmiştir. H ve B için doğrusal çizelge kullanılmıştır. Ayrıca nüve üretici firmasına ait 50Hz frekanstaki kayıp eğrisi(noktalı eğri) eklenmiştir. Çalışmada elde edilen kayıp eğrileri ile üretici kayıp eğrilerinin fark eğrisi Şekil 5.18’e eklenmiştir. Burada noktalı üretici nüve kayıp eğrisi SST ile ölçtüğümüz değerlere çok yakındır. Ortalama farklılık oranı %3,5’tur.



Şekil 5.18 M4 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.

5.3.2 M5 Test Örneği İçin 50Hz Testleri

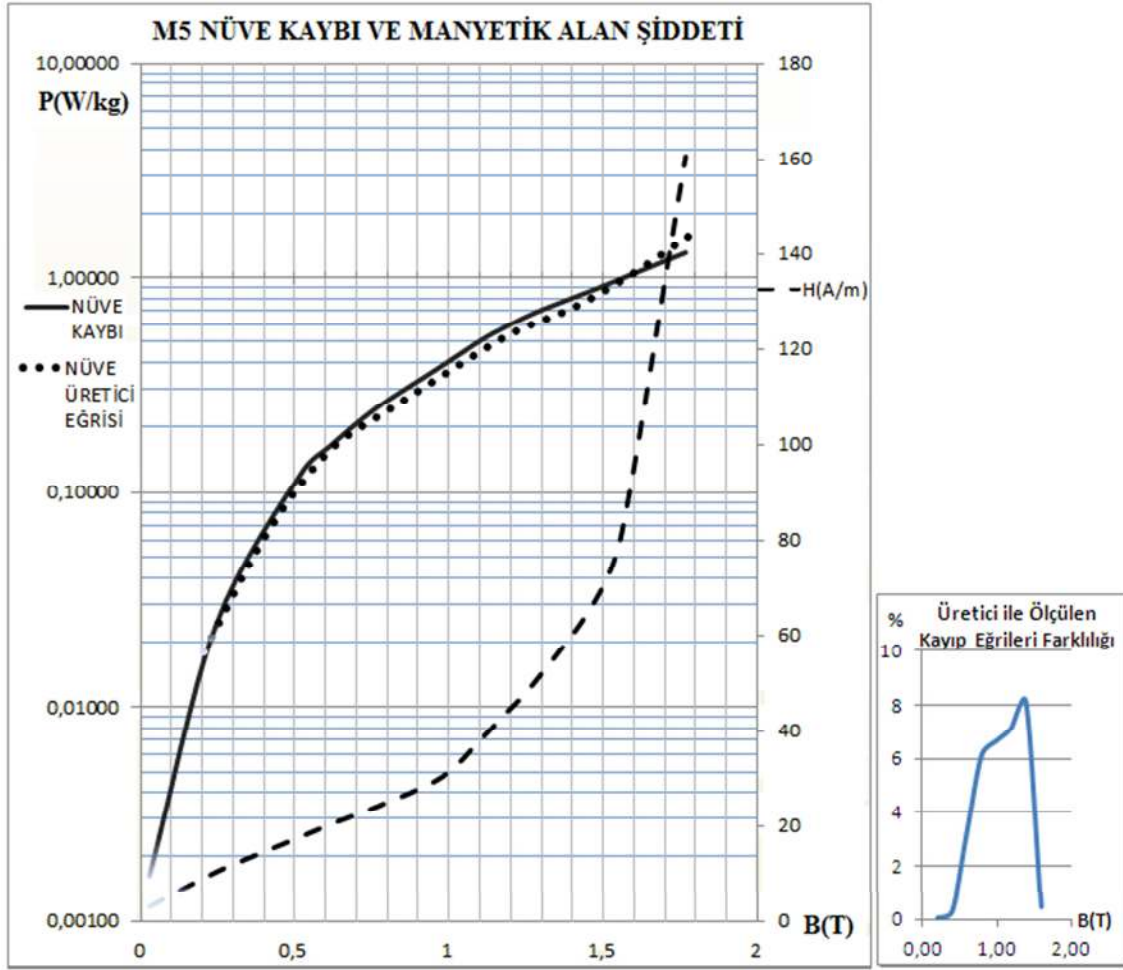
M5 kalite Si-Fe elektrik çeliği 0,30mm kalınlığında özellikle trafo gibi elektromanyetik cihazlarda kullanılmaktadır. Trafolarla tanecikleri yönlendirmiş M5 kalite seçilmesi histerisiz kaybını azalmak içindir. Çizelge 5.3’de M5 ile 50Hz frekansta yapılan 12 grup test değerleri ve bu değerlerden hesaplanan H manyetik alan şiddeti, B akı yoğunluğu ve kilogram başına nüve kaybı değerleri vardır.

Çizelge 5.3 M5 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşturmak için örnekleme tablosu.

Test No	Mıknatıslanma akımı- i_p (A)	V_s	Osiloskop güç değeri	H(A/m)	B(T)	P(W/kg)
1	0,001	0,012	0,000012	3,2	0,02	0,0016
2	0,00335	0,116	0,000175	10,6	0,24	0,0239
3	0,0057	0,25	0,0009	18,0	0,52	0,1231
4	0,0065	0,295	0,0012	20,5	0,61	0,1642
5	0,0077	0,368	0,00186	24,3	0,76	0,2545
6	0,0097	0,472	0,00295	30,6	0,97	0,4036
7	0,0122	0,533	0,00394	38,5	1,10	0,5390
8	0,0136	0,564	0,0045	42,9	1,16	0,6156
9	0,016	0,618	0,00525	50,4	1,27	0,7182
10	0,0212	0,71	0,00645	66,8	1,46	0,8824
11	0,026	0,755	0,0073	82,0	1,56	0,9987
12	0,051	0,855	0,0096	160,8	1,76	1,3134

SST ile yapılan ölçüm sonuçlarından faydalanarak M5 nüve malzemesi için Şekil 5.19’de kayıp(düz çizgili eğri) ve H eğrileri(kesik çizgili eğri) gösterilmiştir. Dikkat edilirse yüksek akı değerlerinde kaybın ve manyetik alan şiddetinin daha hızlı arttığı görülür. Bunun sebebi M5 için 1,5T ile 1,7T değerindeki akı yoğunluğu Si-Fe nüve malzemeler için doyma bölgesi olmasıdır. M5 malzemenin kalınlığı M4 ve M3 malzemedan fazladır. Kayıp eğrilerinde bunun etkisi kayıp artışı olarak gözlemlenmektedir.

Nüve kaybı için yapılan ölçekleme logaritmiktir. Nüve malzeme üreticileri logaritmik kayıp çizelgeleri ile ürünlerini sundukları için bu çalışmada bu uyumluluk devam ettirilmiştir. H ve B için doğrusal çizelge kullanılmıştır. Ayrıca nüve üretici firmasına ait 50Hz frekanstaki kayıp eğrisi(noktalı eğri) eklenmiştir. Çalışmada elde edilen kayıp eğrileri ile üretici kayıp eğrilerinin fark eğrisi Şekil 5.19’e eklenmiştir. Burada noktalı üretici nüve kayıp eğrisi SST ile ölçtüğümüz değerlere çok yakındır. Ortalama farklılık oranı %4’tür.



Şekil 5.19 M5 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.

5.3.3 M3 Test Örneği İçin 50Hz Testleri

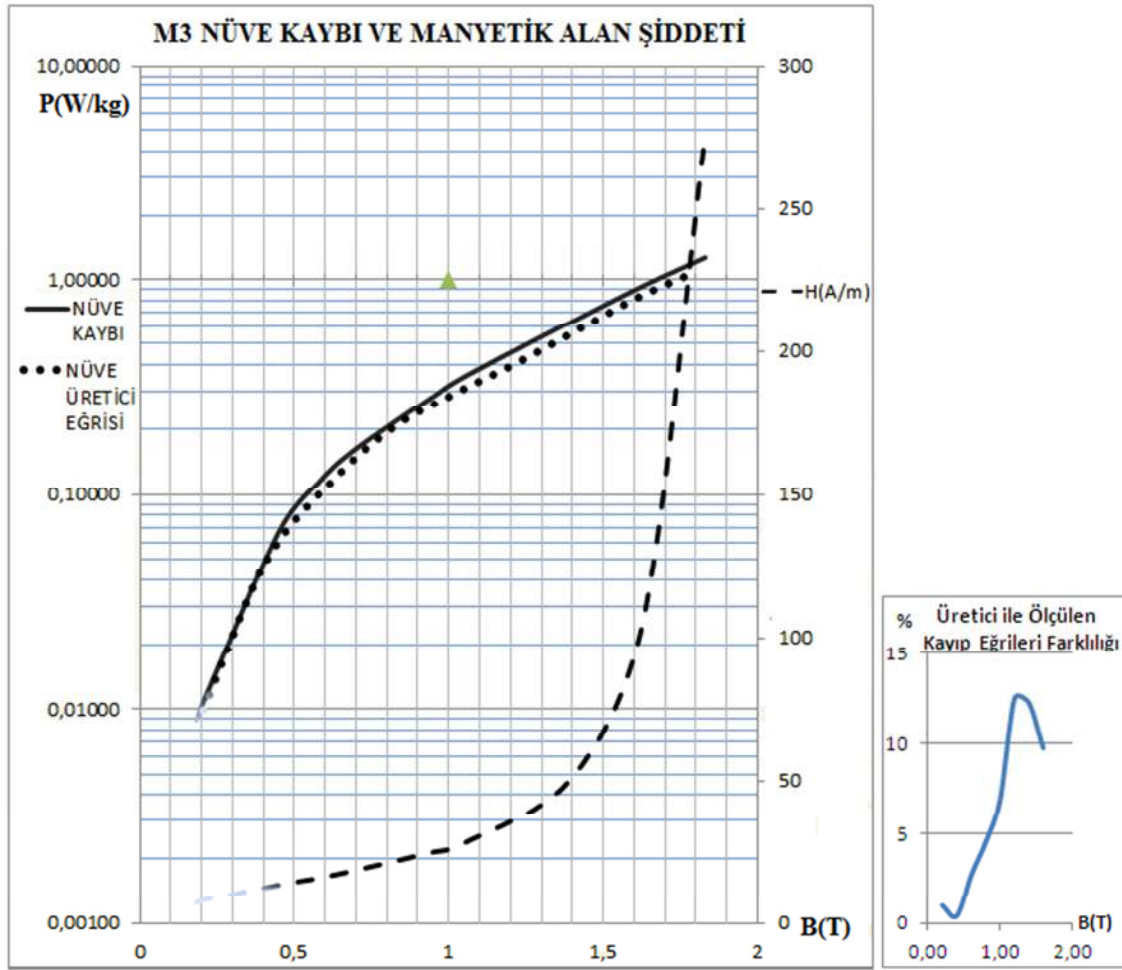
M3 kalite Si-Fe elektrik çeliği 0,23mm kalınlığında özellikle trafo gibi elektromanyetik cihazlarda kullanılmaktadır. Bu kadar ince olması girdap kayıplarını azaltmak içindir. Silis katılarak da girdap kayıpları azaltılmıştır. Trafolarda tanecikleri yönlendirmiş M3 kalite seçilmesi histerisiz kaybını azaltmak içindir. Çizelge 5.4’de M3 ile 50Hz frekansta yapılan 10 grup test değerleri ve bu değerlerden hesaplanan H manyetik alan şiddeti, B akı yoğunluğu ve kilogram başına nüve kaybı değerleri vardır.

Çizelge 5.4 M3 nüve malzemesinin kayıp eğrilerini oluşmak için örnekleme tablosu.

Test No	Mıknatıslanma akımı- i_p (A)	V_s	Osiloskop güç değeri	H(A/m)	B(T)	P(W/kg)
1	0,0024	0,068	0,00005	7,6	0,18	0,0089
2	0,0028	0,076	0,000061	8,8	0,20	0,0109
3	0,0045	0,167	0,00038	14,2	0,45	0,0678
4	0,0053	0,215	0,00065	16,7	0,58	0,1160
5	0,0061	0,257	0,00091	19,2	0,69	0,1624
6	0,008	0,346	0,00156	25,2	0,93	0,2784
7	0,0091	0,39	0,002	28,7	1,05	0,3569
8	0,0166	0,522	0,00365	52,3	1,40	0,6513
9	0,0345	0,607	0,00533	108,8	1,63	0,9511
10	0,0876	0,68	0,00715	276,1	1,83	1,2759

SST ile yapılan ölçüm sonuçlarından faydalanarak M3 nüve malzemesi için Şekil 5.20’de kayıp(düz çizgili eğri) ve H eğrileri(kesik çizgili eğri) gösterilmiştir. Dikkat edilirse yüksek akı değerlerinde kaybın ve manyetik alan şiddetinin daha hızlı arttığı görülür. Bunun sebebi M3 için 1,5T ile 1,7T değerindeki akı yoğunluğu Si-Fe nüve malzemeler için doyma bölgesi olmasıdır. M3 malzeme, M4 ve M5 malzemedan daha incedir. İnce nüve malzemenin girdap akımı kayıpları diğerlerine göre az olduğundan kayıp eğrilerinde bunun etkisi düşük kayıp olarak gözlemlenmektedir.

Nüve kaybı için yapılan ölçekleme logaritmiktir. Nüve malzeme üreticileri logaritmik kayıp çizelgeleri ile ürünlerini sundukları için bu çalışmada bu uyumluluk devam ettirilmiştir. H ve B için doğrusal çizelge kullanılmıştır. Ayrıca nüve üretici firmasına ait 50Hz frekanstaki kayıp eğrisi(noktalı eğri) eklenmiştir. Çalışmada elde edilen kayıp eğrileri ile üretici kayıp eğrilerinin fark eğrisi Şekil 5.20’e eklenmiştir. Burada noktalı üretici nüve kayıp eğrisi SST ile ölçtüğümüz değerlere çok yakındır. Ortalama farklılık oranı %6’dır.



Şekil 5.20 M3 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.

5.4 NÜVE KAYBININ BİLEŞENLERİNE AYRILMASI VE MODELLENMESİ

Nüve malzeme üreticileri nüve kayıp bilgilerini genellikle tablolar halinde vermektedir. Elektrik makine tasarımcıları için daha geniş alanlı B manyetik akı ve frekans aralığında kayıpları bilme ihtiyacı duyar. Bu yüzden nüve kayıp modellemesi ve kayıp katsayılarının bilinmesi önem taşır. Nüve kayıplarının modellenmesi için standart uygulama kaybın üç bileşene ayrılmasıdır. Bu bileşenler histerisiz kaybı, girdap akımı kaybı ve anormal kayıplardır (Eşitlik 5.4).

$$P = P_h + P_g + P_a = k_h f B^n + k_g f^2 B^2 + k_a f^{1,5} B^{1,5} \quad (5.4)$$

Burada k_h, k_g, k_a, B, f sırasıyla histerisiz, girdap akımı, anormal kayıp katsayıları, manyetik akının tepe değeri ve frekanstır. Katsayıları bulmak için eşitlik 5.4 f frekansına bölünürse eşitlik 5.5 elde edilir.

$$P/f = P_h/f + P_g/f + P_a/f = k_h B^n + k_a \sqrt{f} B^{1.5} + k_g f B^2 \quad (5.5)$$

$\sqrt{f}$ değişken kabul edilirse 2. dereceden denklem elde edip. $F(x,y) = \sqrt{f} - P/f$ - eğrisini parabol olarak elde ederiz. Bu eğriler eşitlik 5.6 ile daha basit şekilde ifade edilir.

$$P/f = D + G\sqrt{f} + E(\sqrt{f})^2 \quad (5.6)$$

D, E, G katsayıları eğri uydurma yöntemiyle bulunabilir. $\sqrt{f}$ x ekseninde, P/f y ekseninde olacak şekilde eğriler çizdirilip 2. dereceden denklem edilir. Bu denklemin katsayıları D, E, G katsayılarıdır. Burada $D = k_h B^n$, $G = k_a B^{1.5}$ ve $E = k_g B^2$ olarak kabul edilmiştir. Böylelikle k_h, k_a, k_g ve n katsayıları hesaplanabilir.

5.4.1 M4 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması

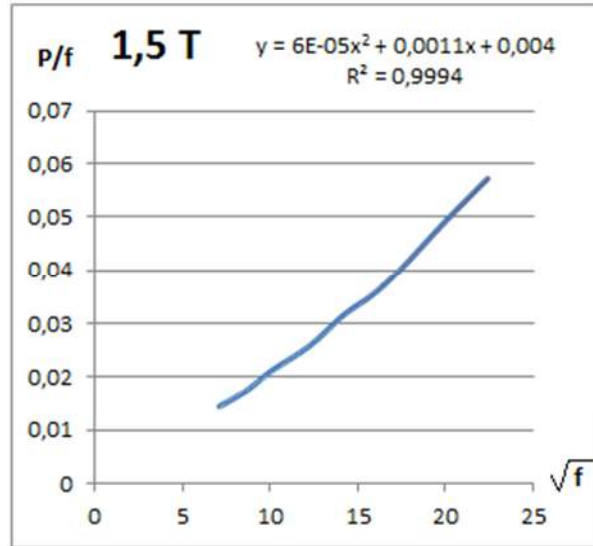
1,5T, 1T, 0,5T sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde ve 50Hz ile 500Hz frekansları arasındaki bölgede kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerden $\sqrt{f} - P/f$ eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Burada görüleceği üzere elde edilen denklemler toplam kaybın 3 bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılacaktır.

Çizelge 5.5’de M4 nüve malzemesinin kayıp katsayılarını oluşturmak için kullanılan örnekleme tablosu, SST sisteminde ölçülen değişken frekanslı kayıp değerlerini içerir. Eğri uydurma ile kayıp katsayılarını bulmak için gerekli işlemler çizelgede yapılmıştır.

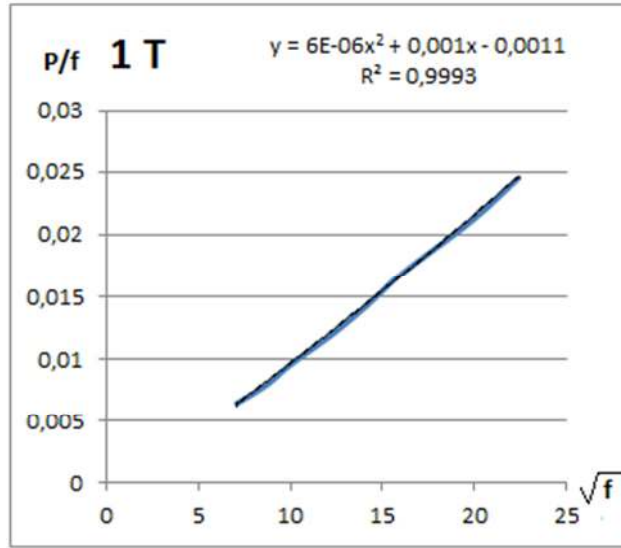
Çizelge 5.5 M4 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.

B	1,5 T			1 T			0,5 T		
Frekans	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f
50	0,73	7,07	0,01465	0,32	7,07	0,00647	0,01	7,07	0,00015
75	1,32	8,66	0,01763	0,59	8,66	0,00790	0,17	8,66	0,00223
100	2,11	10,00	0,02113	0,96	10,00	0,00957	0,26	10,00	0,00258
150	3,89	12,25	0,02594	1,79	12,25	0,01196	0,48	12,25	0,00320
200	6,31	14,14	0,03154	2,86	14,14	0,01429	0,78	14,14	0,00391
250	8,85	15,81	0,03538	4,15	15,81	0,01660	1,11	15,81	0,00445
300	11,98	17,32	0,03992	5,50	17,32	0,01834	1,60	17,32	0,00532
400	19,76	20,00	0,04939	8,53	20,00	0,02132	2,42	20,00	0,00604
500	28,57	22,36	0,05715	12,27	22,36	0,02453	3,43	22,36	0,00687

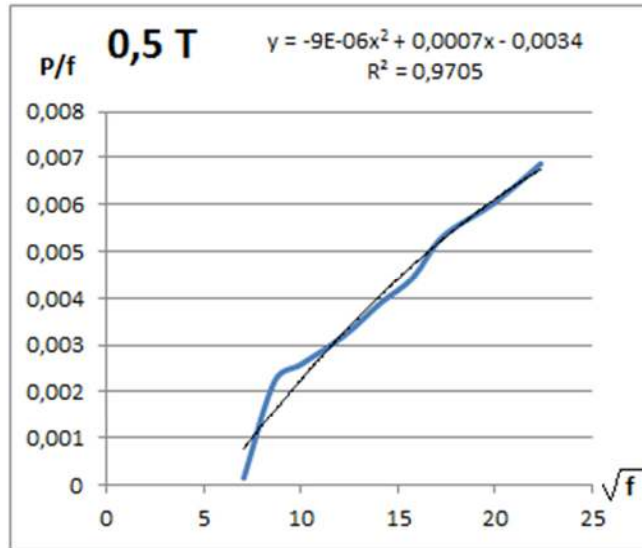
Daha sonra 1,5T, 1T ve 0,5T manyetik akı değerleri için ayrı ayrı eğriler Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23'deki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 5.21 M4 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.



Şekil 5.22 M4 için 1T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.



Şekil 5.23 M4 için 0,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.

Eğri uydurma ile 2.derece denklemler oluşturulmuştur. Kayıp bileşenleri katsayıları bu denklem katsayılarından hesaplanmıştır. Regresyon değerleri küçük, değişik frekans ve akı değerlerinde az hatalı olan 1,5T denklemi kayıp katsayı modellemesi için seçilmiştir. Eşitlik 5.6 yardımıyla D , E , G katsayıları bulunmuştur. $D= 4,00 \cdot 10^{-3}$, $E= 6,00 \cdot 10^{-5}$ ve $G= 1,10 \cdot 10^{-3}$ dir. D , E ve G eşitlikleri yardımıyla histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları bulunabilir. Eşitlik 5.4 denklemi iki farklı B akı değeri için çözülünce n üstel değeri

bulunabilir. Tüm işlemlerden sonra $k_h= 4,13 \cdot 10^{-04}$, $k_g= 2,67 \cdot 10^{-05}$, $k_a= 5,99 \cdot 10^{-04}$ ve $n= 5,6$ bulunmuştur.

M4 için kayıp katsayılarını kullanarak oluşturulan nüve kaybı modeli eşitlik 5.7 ile oluşturulmuştur.

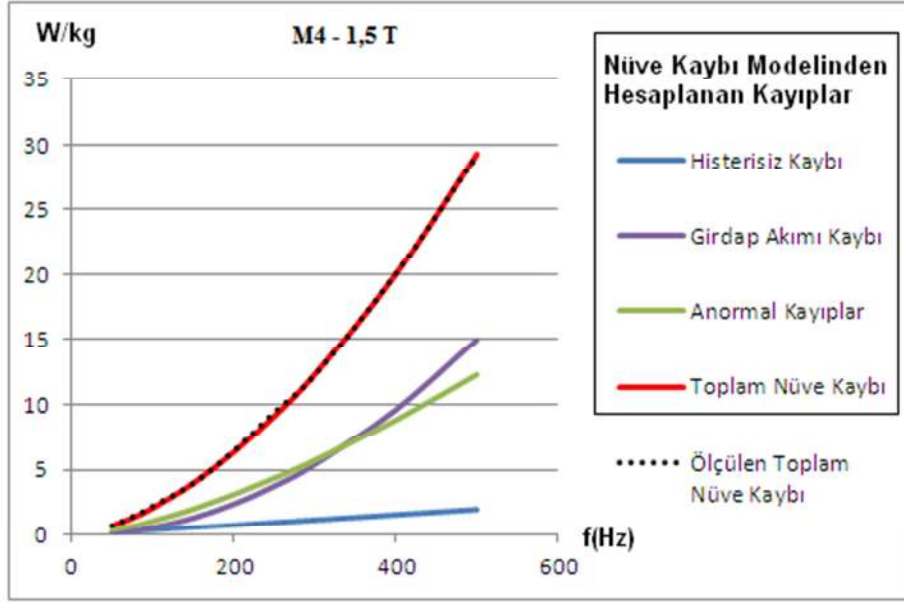
$$P = k_h f B^n + k_g f^2 B^2 + k_a f^{1,5} B^{1,5}$$

$$P = 4,13 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot B^{5,6} + 2,67 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 \cdot B^2 + 5,99 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (5.7)$$

Bu kayıp modeline göre sabit 1,5T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.6'da görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil 5.24'de kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine çok yakındır.

Çizelge 5.6 M4 kayıp modelinden B=1,5T 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST' de ölçülen toplam güç
	P	P _h	P _g	P _a	
50	0,739	0,200	0,150	0,389	0,733
75	1,352	0,300	0,338	0,714	1,444
100	2,100	0,400	0,600	1,100	2,249
150	3,971	0,600	1,350	2,021	3,952
200	6,311	0,800	2,400	3,111	6,414
250	9,098	1,000	3,750	4,348	9,423
300	12,316	1,200	5,400	5,716	12,250
400	20,000	1,600	9,600	8,800	20,062
500	29,298	2,000	15,000	12,298	29,181



Şekil 5.24 B=1,5T ‘da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.

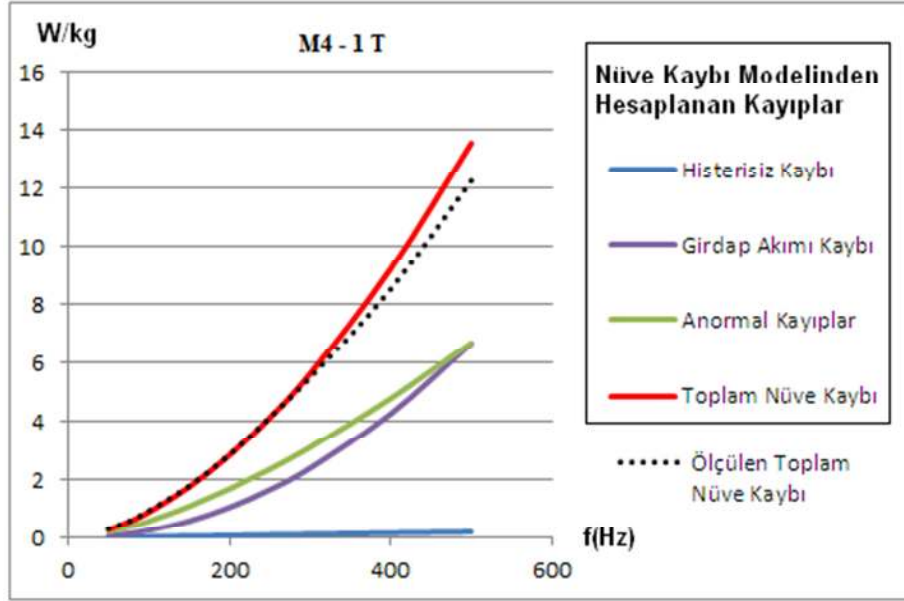
Eşitlik 5.7’deki kayıp modeline göre sabit 1T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.7’de görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır.

Çizelge 5.7 M4 kayıp modelinden B=1 T ‘da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST’de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,299	0,021	0,067	0,212	0,324
75	0,570	0,031	0,150	0,389	0,593
100	0,907	0,041	0,267	0,599	0,957
150	1,762	0,062	0,600	1,100	1,793
200	2,843	0,083	1,067	1,694	2,857
250	4,137	0,103	1,667	2,367	4,149
300	5,635	0,124	2,400	3,111	5,502
400	9,222	0,165	4,267	4,790	8,526
500	13,568	0,206	6,667	6,694	12,265

Şekil 5.25’de 1T manyetik akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine genel olarak yakındır. Fakat 500Hz frekansa çıkıldıkça kayıp modeli ile ölçülen arasındaki fark yükselmiştir. Sebebi

manyetik akının 1,5T olduğu eğri ile modelleme yapılmıştır. 1T akı değerinde kullanılan model yüksek frekanstan etkilenmiştir.

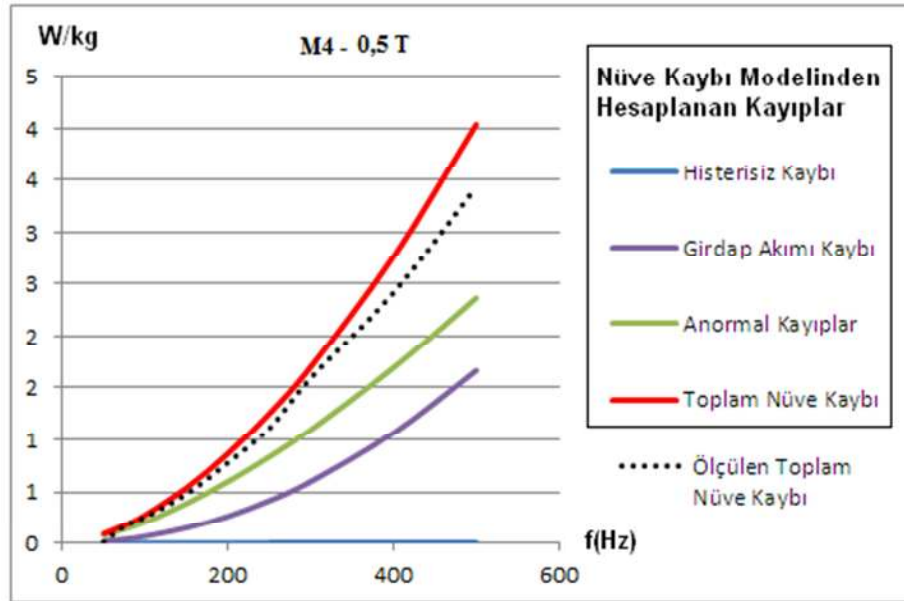


Şekil 5.25 B=1 T ‘da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.

Eşitlik 5.7’deki kayıp modeline göre sabit 0,5T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.8’da görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil 5.263’da 0,5T manyetik akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine genel olarak yakındır. Fakat frekans yükseldikçe kayıp modeli ile ölçülen arasındaki fark yükselmiştir. Sebebi manyetik akının 1,5T olduğu eğri ile modelleme yapılmıştır. Kayıp modeli yüksek frekansa çıkıldıkça ve düşük akıya inildikçe etkilenmektedir. Ayrıca 0,5T için alınan değerler daha çok küçük kayıp değerleridir. Ölçme sisteminin hassasiyeti açısından küçük değerlerin olduğu ve ölçmenin zorlaştığı bir bölgedir.

Çizelge 5.8 M4 kayıp modelinden $B=0,5$ T 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST' de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,092	0,000	0,017	0,075	0,008
75	0,176	0,001	0,038	0,138	0,167
100	0,279	0,001	0,067	0,212	0,258
150	0,540	0,001	0,150	0,389	0,480
200	0,867	0,002	0,267	0,599	0,781
250	1,256	0,002	0,417	0,837	1,113
300	1,703	0,003	0,600	1,100	1,596
400	2,764	0,003	1,067	1,694	2,417
500	4,038	0,004	1,667	2,367	3,435



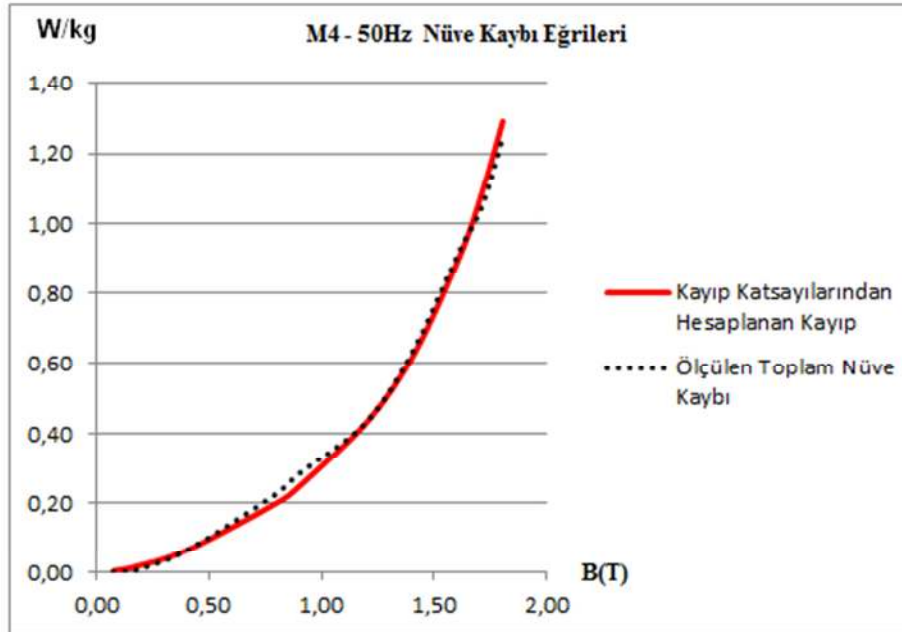
Şekil 5.26 $B=0,5$ T 'da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST' de ölçülen kayıp eğrileri.

İlave olarak 50Hz kayıp karşılaştırma test eğrileri de çalışmada elde edilmiştir. Çoğunlukla elektrikli cihazlar 50Hz frekansta yoğun çalışmaktadır. Bu yüzden Çizelge 5.9'de ölçülen ile kayıp modelinden gelen değerleri gösterilmektedir. Burada amaç 50Hz ve değişken manyetik akıda kaybın değişimini görmektir.

Çizelge 5.9 M4 için $f=50\text{Hz}$ 'de nüve kaybı örnekleme tablosu.

B(T)	Ölçülen Kayıp(W/kg)	Modelden Hesaplanan Kayıp(W/kg)
0,0756	0,0015	0,0048
0,1238	0,0021	0,0102
0,1788	0,0076	0,0181
0,3896	0,0608	0,0617
0,7906	0,2219	0,1960
0,8938	0,2797	0,2431
1,2031	0,4347	0,4340
1,4140	0,6476	0,6329
1,6156	0,9273	0,9119
1,7142	1,0519	1,0933
1,8035	1,2480	1,2909

Çizelge 5.9 yardımıyla M4 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Burada modelden hesaplanan ile ölçülen kayıp eğrileri karşılaştırmak için çizilmiştir. İki kayıp eğrisinin yakın olması, kayıp katsayıları ve kayıp modelinin doğru sonuçlar vermesinin göstergesidir.



Şekil 5.27 M4 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri.

5.4.2 M5 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması

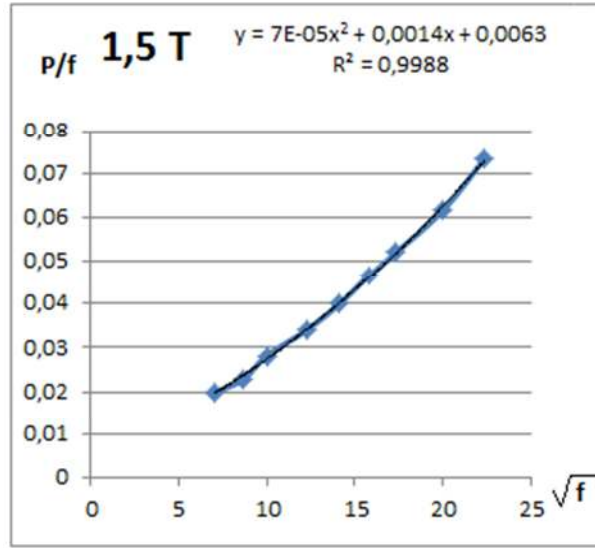
1,5T, 1T, 0,5T sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde ve 50Hz ile 500Hz frekansları arasındaki bölgede kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerden $\sqrt{f} - P/f$ eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Burada görüleceği üzere elde edilen denklemler toplam kaybın 3 bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılacaktır.

Çizelge 5.10'de M5 nüve malzemesinin kayıp katsayılarını oluşmak için kullanılan örnekleme tablosu, SST sisteminde ölçülen değişken frekanslı kayıp değerlerini içerir. Eğri uydurma ile kayıp katsayılarını bulmak için gerekli işlemler çizelgede yapılmıştır

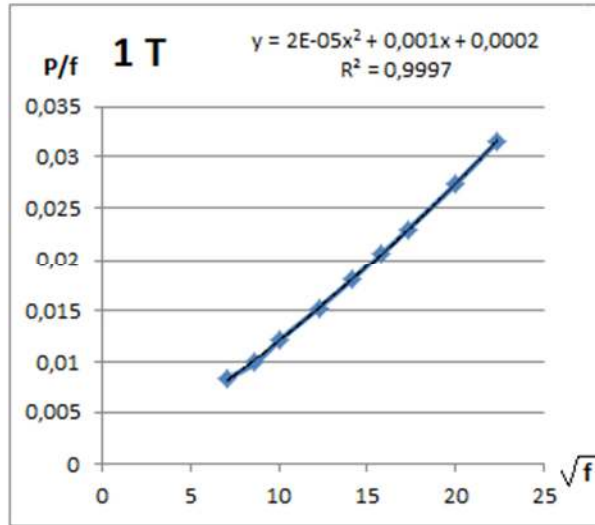
Çizelge 5.10 M5 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.

B	1,5 T			1 T			0,5 T		
Frekans	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f
50	1,00	7,07	0,01997	0,42	7,07	0,00848	0,12	7,07	0,00246
75	1,71	8,66	0,02280	0,75	8,66	0,00999	0,21	8,66	0,00283
100	2,82	10,00	0,02818	1,21	10,00	0,01211	0,33	10,00	0,00328
150	5,09	12,25	0,03392	2,28	12,25	0,01523	0,61	12,25	0,00406
200	7,99	14,14	0,03994	3,60	14,14	0,01799	0,97	14,14	0,00486
250	11,63	15,81	0,04651	5,16	15,81	0,02063	1,41	15,81	0,00564
300	15,59	17,32	0,05198	6,91	17,32	0,02303	1,85	17,32	0,00616
400	24,62	20,00	0,06155	10,94	20,00	0,02736	2,94	20,00	0,00735
500	36,66	22,36	0,07332	15,73	22,36	0,03146	4,24	22,36	0,00848

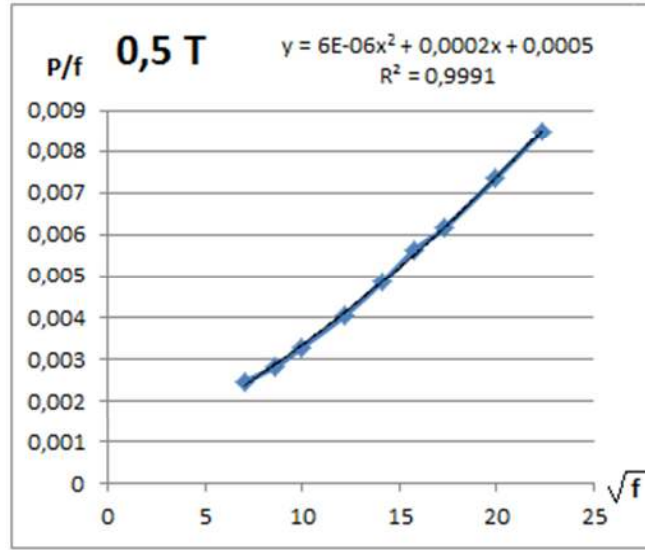
Daha sonra 1,5T, 1T ve 0,5T manyetik akı değerleri için ayrı ayrı eğriler Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30'deki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 5.28 M5 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.



Şekil 5.29 M5 için 1T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.



Şekil 5.30 M5 için 0,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.

Eğri uydurma ile 2. derece denklemler oluşturulmuştur. Kayıp bileşenleri katsayıları bu denklem katsayılarından hesaplanmıştır. Regresyon değerleri küçük, değişik frekans ve akı değerinde az hatalı olan 1,5T denklemi kayıp katsayı modellemesi için seçilmiştir. Eşitlik 5.6 yardımıyla D , E , G katsayıları bulunmuştur. $D= 6,30 \cdot 10^{-03}$, $E= 7,00 \cdot 10^{-05}$ ve $G= 1,40 \cdot 10^{-03}$, dir. D , G ve E eşitlikleri yardımıyla histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları bulunabilir. Eşitlik 5.4 denklemi iki farklı B akı değeri için çözülünce n üstel değeri bulunabilir. Tüm işlemlerden sonra $k_h=5,53 \cdot 10^{-04}$, $k_g= 3,11 \cdot 10^{-05}$, $k_a= 7,62 \cdot 10^{-04}$ ve $n= 6$ alınmıştır.

M5 için kayıp katsayılarını kullanarak oluşturulan nüve kaybı modeli eşitlik 5.8 ile oluşturulmuştur.

$$P = k_h f B^n + k_g f^2 B^2 + k_a f^{1,5} B^{1,5}$$

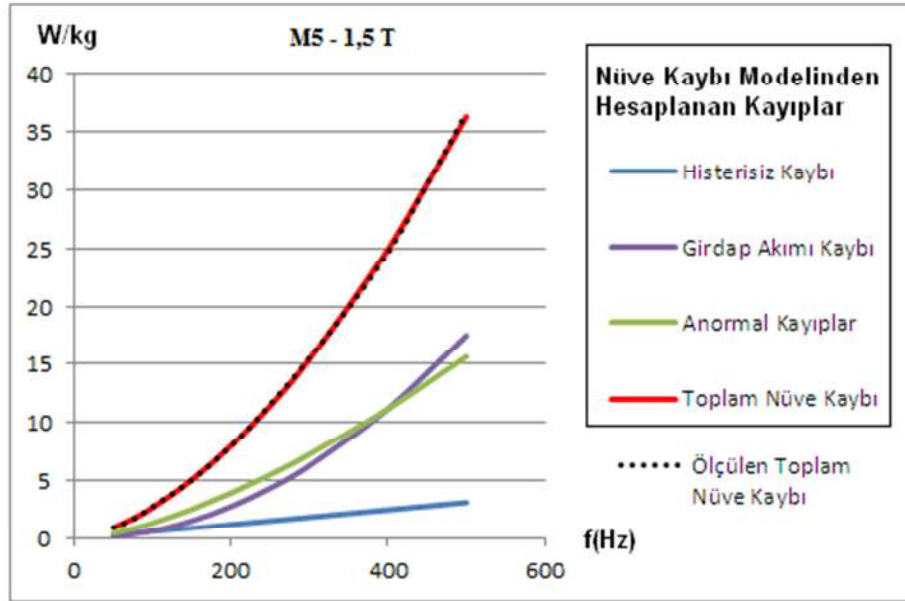
$$P = 5,53 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot B^6 + 3,11 \cdot 10^{-5} f^2 B^2 + 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1,5} B^{1,5} \quad (5.8)$$

Bu kayıp modeline göre sabit 1,5T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.11’de görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil 5.31’de 1,5T manyetik

akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine çok yakındır.

Çizelge 5.11 M5 kayıp modelinden $B=1,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST' de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,985	0,315	0,175	0,495	0,999
75	1,776	0,473	0,394	0,909	1,710
100	2,730	0,630	0,700	1,400	2,818
150	5,092	0,945	1,575	2,572	5,088
200	8,020	1,260	2,800	3,960	7,988
250	11,484	1,575	4,375	5,534	11,627
300	15,465	1,890	6,300	7,275	15,594
400	24,920	2,520	11,200	11,200	24,621
500	36,302	3,150	17,500	15,652	36,659



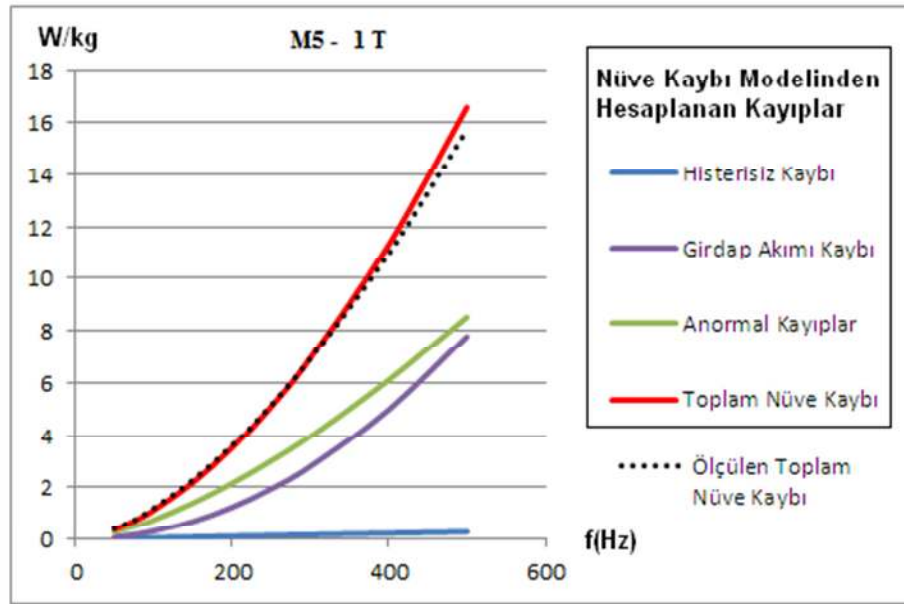
Şekil 5.31 $B=1,5 T$ 'da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.

Eşitlik 5.8'deki kayıp modeline göre sabit 1T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.12'da görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kayıp değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil

5.32’de 1T manyetik akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine genel olarak yakındır. Fakat 500Hz frekansa çıkıldıkça kayıp modeli ile ölçülen arasındaki fark yükselmiştir. Sebebi manyetik akının 1,5T olduğu eğri ile modelleme yapılmıştır. Model yüksek frekanstan ve düşük akıdan etkilenmiştir.

Çizelge 5.12 M5 kayıp modelinden B=1 T ‘da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST’ de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,375	0,028	0,078	0,269	0,424
75	0,711	0,041	0,175	0,495	0,750
100	1,128	0,055	0,311	0,762	1,211
150	2,183	0,083	0,700	1,400	2,284
200	3,511	0,111	1,244	2,155	3,597
250	5,095	0,138	1,944	3,012	5,157
300	6,926	0,166	2,800	3,960	6,908
400	11,296	0,221	4,978	6,097	10,943
500	16,574	0,277	7,778	8,520	15,730



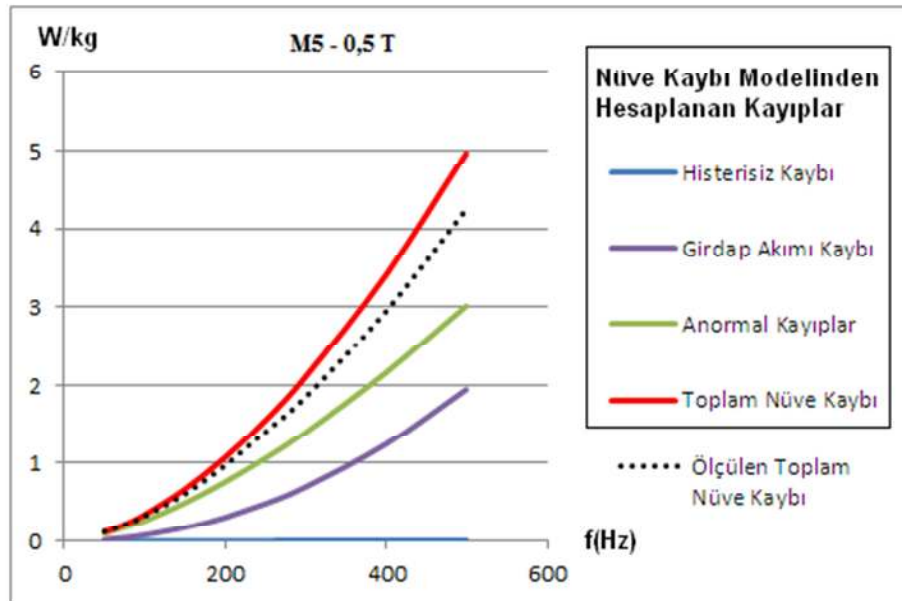
Şekil 5.32 B=1 T ‘da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.

Eşitlik 5.8’deki kayıp modeline göre sabit 0,5T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemleri Çizelge 5.13’da görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen

toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil 5.33'de 0,5T manyetik akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine genel olarak yakındır. Fakat frekans yükseldikçe kayıp modeli ile ölçülen arasındaki fark yükselmiştir. Sebebi manyetik akının 1,5T olduğu eğri ile modelleme yapılmıştır. Kayıp modeli yüksek frekansa çıkıldıkça ve düşük akıya inildikçe etkilenmektedir. . Ayrıca 0,5T için alınan değerler daha çok küçük kayıp değerleridir. Ölçme sisteminin hassasiyeti açısından küçük değerlerin olduğu ve ölçmenin zorlaştığı bir bölgedir.

Çizelge 5.13 M5 kayıp modelinden $B=0,5T$ 'da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST' de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,115	0,000	0,019	0,095	0,123
75	0,219	0,001	0,044	0,175	0,212
100	0,348	0,001	0,078	0,269	0,328
150	0,671	0,001	0,175	0,495	0,609
200	1,075	0,002	0,311	0,762	0,971
250	1,553	0,002	0,486	1,065	1,409
300	2,103	0,003	0,700	1,400	1,847
400	3,403	0,003	1,244	2,155	2,941
500	4,961	0,004	1,944	3,012	4,240



Şekil 5.33 $B=0,5 T$ 'da M5 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri.

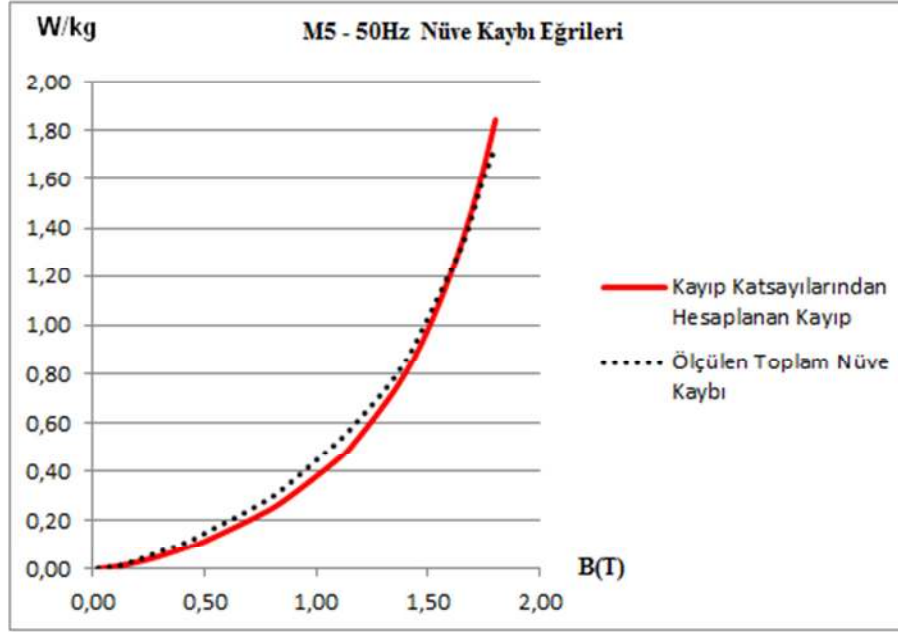
Sonuç olarak kayıp katsayılarının bulunması, kayıpların modellenmesi ve bunların ölçülen kayıp değerleri ile karşılaştırılması daha dar frekans ve manyetik akı bölgesinde olması gerekiyor. Böylelikle yüksek frekans veya düşük akı için başka kayıp katsayıları bulunabilir. Bu yeni katsayıların her biri kendi aralığında yeni nüve kayıp modelleme yaparak doğruluk arttırılabilir.

İlave olarak 50Hz kayıp karşılaştırma test eğrileri de çalışmada elde edilmiştir. Elektrikli cihazlar 50Hz frekansta yoğun çalışmaktadır. Bu yüzden Çizelge 5.14’de ölçülen ile kayıp modelinden gelen değerleri gösterilmektedir. Burada amaç 50Hz ve değişken manyetik akıda kaybın değişimini görmektir.

Çizelge 5.14 yardımıyla M5 nüve malzeme için 50Hz’de ve değişken akıda kayıp eğrileri Şekil 5.34’de gösterilmiştir. Burada modelden hesaplanan ile ölçülen kayıp eğrileri karşılaştırmak için çizilmiştir. İki kayıp eğrisinin özellikle yüksek akılarda yakın olması, kayıp katsayıları ve kayıp modelinin doğru sonuçlar vermesinin göstergesidir.

Çizelge 5.14 M5 için $f=50\text{Hz}$ ‘de nüve kaybı örnekleme tablosu.

B(T)	Ölçülen Kayıp(W/kg)	Modelden Hesaplanan Kayıp(W/kg)
0,0247	0,0016	0,0011
0,1402	0,0178	0,0157
0,2826	0,0637	0,0467
0,4331	0,1168	0,0916
0,5115	0,1533	0,1194
0,7425	0,2629	0,2199
0,8642	0,3382	0,2861
1,0787	0,5091	0,4359
1,1674	0,5898	0,5158
1,3633	0,8014	0,7510
1,4932	1,0192	0,9716
1,6046	1,2313	1,2200
1,6789	1,3955	1,4246
1,7346	1,5733	1,6027
1,8006	1,7375	1,8455



Şekil 5.34 M5 nüve malzeme için 50Hz’de ve değişken akıda kayıp eğrileri.

5.4.3 M3 Malzemesi Değişken Frekans Testleri ve Kayıp Katsayılarının Bulunması

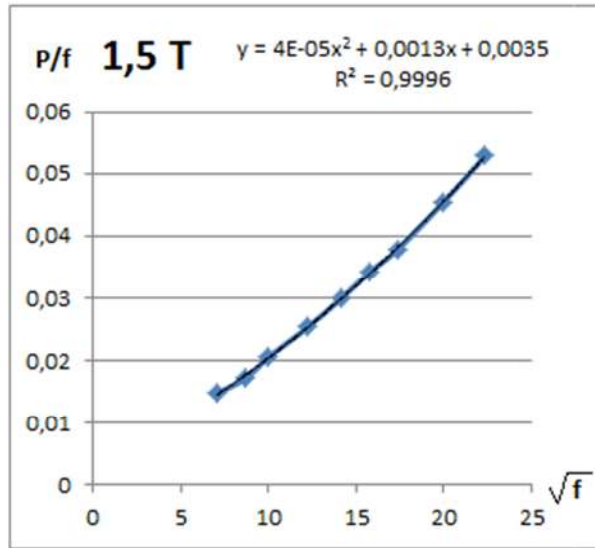
SST’de M3 ile yapılan testlerde 1,5T sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde ve 50Hz ile 500Hz frekansları arasındaki bölgede kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerden $\sqrt{f} - P / f$ eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Burada görüleceği üzere elde edilen denklemler toplam kaybın 3 bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılacaktır.

Çizelge 5.15’de M3 nüve malzemesinin kayıp katsayılarını oluşturmak için kullanılan örnekleme tablosu, SST sisteminde ölçülen değişken frekanslı kayıp değerlerini içerir. Eğri uydurma ile kayıp katsayılarını bulmak için gerekli işlemler çizelgede yapılmıştır.

Çizelge 5.15 M3 malzemesinin kayıp katsayılarını bulmak için kullanılan örnekleme tablosu.

B	1,5 T		
Frekans	W/kg	$\sqrt{f}$	P/f
50	0,74	7,07	0,01481
75	1,28	8,66	0,01713
100	2,05	10,00	0,02052
150	3,80	12,25	0,02533
200	5,98	14,14	0,02988
250	8,56	15,81	0,03426
300	11,33	17,32	0,03776
400	18,20	20,00	0,04550
500	26,41	22,36	0,05281

Daha sonra 1,5T manyetik akı değeri için eğri Şekil 5.35'deki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 5.35 M3 için 1,5T akıda kayıp katsayılarını bulan parabol eğrisi ve denklemi.

Eğri uydurma ile 2.derece denklemler oluşturulmuştur. Kayıp bileşenleri katsayıları bu denklem katsayılarından hesaplanmıştır. 1,5T denklemi kayıp katsayı modellemesi için seçilmiştir. Eşitlik 5.6 yardımıyla D , E , G katsayıları bulunmuştur. $D=3,50 \cdot 10^{-03}$, $E=4,00 \cdot 10^{-05}$ ve $G=1,30 \cdot 10^{-03}$ 'dir. D , G ve E eşitlikleri yardımıyla histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları bulunabilir. Eşitlik 5.4 denklemi iki farklı B akı değeri için çözülünce n üstel değeri bulunabilir. Tüm işlemlerden sonra $k_h= 3,07 \cdot 10^{-04}$, $k_g= 1,78 \cdot 10^{-05}$, $k_a= 7,08 \cdot 10^{-04}$ ve $n= 6$ alınmıştır.

M3 için kayıp katsayılarını kullanarak oluşturulan nüve kaybı modeli eşitlik 5.9 ile oluşturulmuştur.

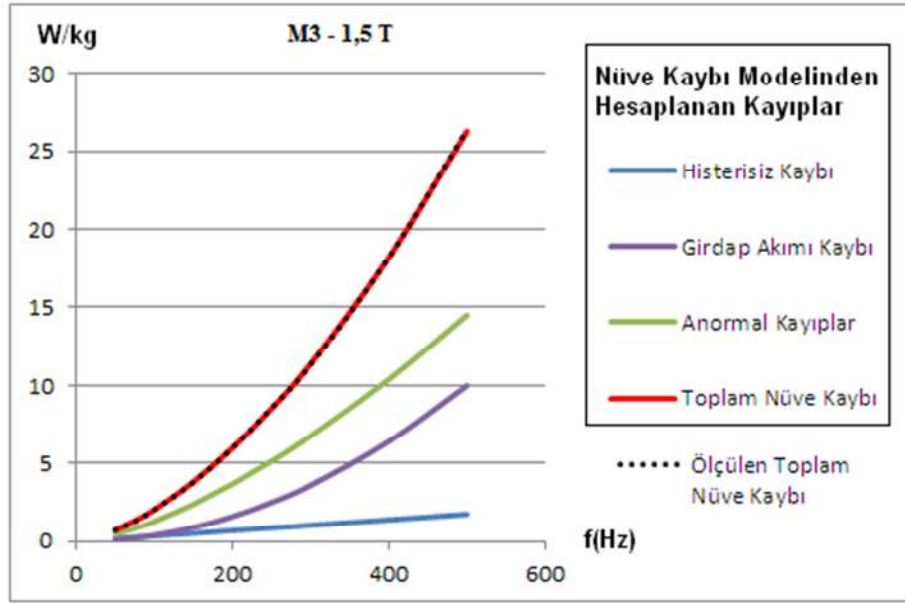
$$P = k_h f B^n + k_g f^2 B^2 + k_a f^{1,5} B^{1,5}$$

$$P = 3,07 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot B^6 + 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 B^2 + 7,08 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1,5} B^{1,5} \quad (5.9)$$

Bu kayıp modeline göre sabit 1,5T manyetik akı değerinde hesaplanan kayıp örneklemeleri Çizelge 5.16’da görülmektedir. Bu çizelgeye ayrıca SST cihazı ile ölçülen toplam nüve kaybı değerleri eklenmiştir. Böylelikle kayıp katsayıları ile modellenen toplam kayıp ile ölçülen kayıplar arasında uyumluluk ve fark miktarı görülmüş olacaktır. Şekil 5.36’de 1,5T manyetik akı yoğunluğunda kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine çok yakındır.

Çizelge 5.16 M3 kayıp modelinden B=1,5T ‘da hesaplanan kayıp çeşitleri örnekleme tablosu.

Frekans	Nüve Modelinden Gelen Kayıp Değerleri				SST' de ölçülen güç
	P	Ph	Pg	Pa	
50	0,735	0,175	0,100	0,460	0,740
75	1,332	0,263	0,225	0,844	1,285
100	2,050	0,350	0,400	1,300	2,052
150	3,813	0,525	0,900	2,388	3,800
200	5,977	0,700	1,600	3,677	5,977
250	8,514	0,875	2,500	5,139	8,564
300	11,405	1,050	3,600	6,755	11,329
400	18,200	1,400	6,400	10,400	18,198
500	26,284	1,750	10,000	14,534	26,405



Şekil 5.36 B=1,5 T’da M3 kayıp modelinden hesaplanan ve SST’de ölçülen kayıp eğrileri.

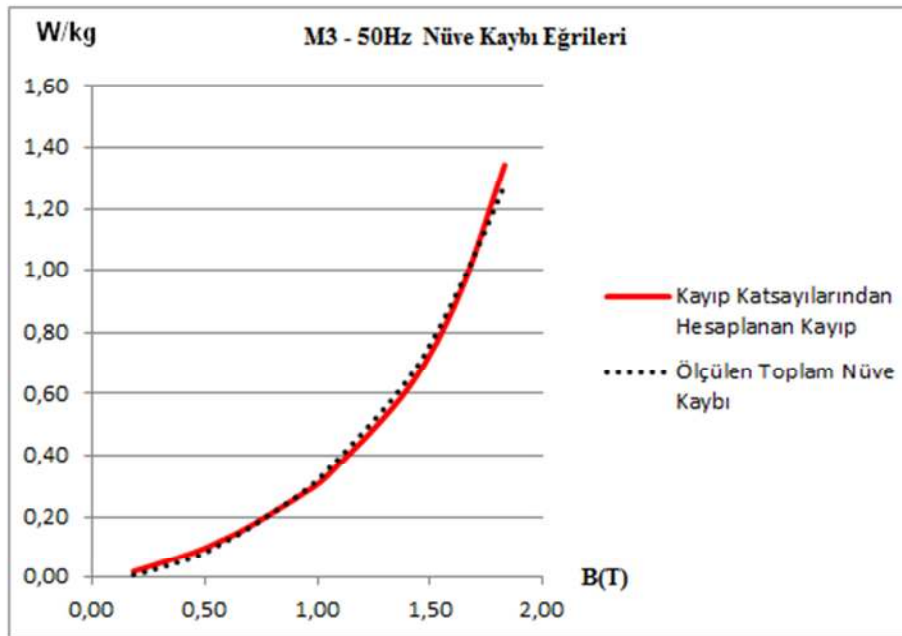
M3 nüve malzemesi kayıp eğrileri dikkat ettiğimiz zaman girdap kayıplarının 500Hz civarı 10W/kg olmasıdır. M4 ve M5 nüve malzemesinde bu değer 15W/kg ve üstüdür. M3 diğerlerine göre ince test örneği olduğundan SST cihazı girdap kayıplarını az ölçmüştür. Buradan anlaşıyor ki SST ile ölçülüp ve kayıp katsayıları bulunan kayıp modellemesi mantıklı sonuçlar vermiştir.

Çoğunlukla elektrikli cihazlar 50Hz frekansta yoğun çalışmaktadır. Bu yüzden Çizelge 5.17’de ölçülen ile kayıp modelinden gelen değerleri gösterilmektedir. Burada amaç 50Hz ve değişken manyetik akıda kaybın değişimini görmektir.

Çizelge 5.17 M3 için $f=50\text{Hz}$ 'de nüve kaybı örnekleme tablosu.

B(T)	Ölçülen Kayıp(W/kg)	Modelden Hesaplanan Kayıp(W/kg)
0,1829	0,0089	0,0211
0,2045	0,0109	0,0250
0,4493	0,0678	0,0844
0,5784	0,1160	0,1255
0,6914	0,1624	0,1668
0,9308	0,2784	0,2732
1,0492	0,3569	0,3383
1,4043	0,6513	0,6218
1,6330	0,9511	0,9319
1,8293	1,2759	1,3435

Çizelge 5.17 yardımıyla M3 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri Şekil 5.37'de gösterilmiştir. Burada modelden hesaplanan ile ölçülen kayıp eğrileri karşılaştırmak için çizilmiştir. İki kayıp eğrisinin yakın olması, kayıp katsayıları ve kayıp modelinin doğru sonuçlar vermesinin göstergesidir.



Şekil 5.37 M3 nüve malzeme için 50Hz'de ve değişken akıda kayıp eğrileri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

SST(tek saç testi) cihazı ile mıknatıslanma akımı yönteminin beraber olduğu nüve kayıpları ölçüm çalışması yapılmıştır. Tek saç testi çalışmasında H manyetik alanı, B manyetik akı yoğunluğu, nüve kayıp ve bileşenleri yeni bir teknikle ölçülmüştür. Çalışma sonunda amaçlanan, mıknatıslanma akımı yönteminin uygulandığı SST ile toplam nüve kaybının hesaplanması ve daha sonra eğri uydurma yöntemi ile kayıp katsayılarının tespit edilmesidir. Çalışma sonunda M4, M5 ve M3 kalite Si-Fe çelik nüve malzemelerinin kayıp katsayıları bulunmuştur. Bulunan katsayılar kullanılarak M4, M5 ve M3 için 3 ayrı kayıp modeli oluşturulmuştur. Böylece M4, M5 ve M3 için nüve kayıplarının 50Hz-500Hz frekanslar arasındaki değerleri belirlenmiştir. Kayıp modellerindeki f ve B değişkenlerini değiştirerek istediğimiz frekans ve manyetik akı noktasındaki nüve kaybı değerleri tahmin edilmiştir.

Nüve malzeme üreticileri manyetik malzemelerin kayıp değerlerini çoğunlukla tek bir çizelge üzerinde 50Hz frekansta değişken manyetik akı şartlarında sunmaktadırlar. Bazen de sadece 1,5T manyetik akı yoğunluğundaki kayıp değerini firmalardan alabiliriz. Günümüzde yüksek frekans kontrol tekniğinin yaygınlaşması sebebiyle değişik frekanslarda ve akıda kayıp bilgilerine ulaşmak gerekmektedir. Özellikle elektrik makinası tasarımcısı, geniş frekans ve akı bölgesinde kayıp değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyacı gidermek için iki adet U boyunduruğa sahip SST cihazı lamine saçlardan oluşturulmuştur. SST bobin karkası üzerine mıknatıslanma akımı bobini ve B ölçme bobini sarılmıştır. Akım ve H manyetik alan şiddeti değerleri mıknatıslanma akımı yöntemi ile okunmuştur. SST ile elde edilen tüm bu değerler yardımı ile eğriler oluşturulmuştur. Oluşturulan sabit 50Hz frekans ve değişken akıdaki eğrilerin üretici eğrilerine çok yakın olması SST yöntemi için iyi bir sonuçtur. Üretici nüve kaybı eğrisi ile elde ettiğimiz nüve kaybı eğrisi arası ortalama farklılık M4 için %3,5, M5 için %4 ve M3 için %6 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonunda geniş frekans ve akı bölgesinde nüve kayıp değerlerini elde etmek için kayıp modelleri oluşturulmuştur. Kayıp modellemeden hesaplanan nüve kaybı ile ölçtüğümüz kayıp değerleri eğri üzerinde karşılaştırılmıştır. Buna göre manyetik akı yoğunluğu

azaldıkça ve frekans yükseldikçe modelleme ile ölçülen kayıp farkı artmıştır. Çünkü kayıp modellemesi yüksek sayılan 1,5T akı değerinde yapılmıştır. Çalışmada modelleme frekans aralığı 50Hz ile 500Hz arasındır. Kayıp modelleme hatasını azalmak için 50-250Hz ve 250-500Hz olmak üzere 2 farklı frekans bölgesi için farklı kayıp katsayıları bulunmuştur. Bulunan katsayılar kendi frekans bölgesine uygulanarak yeni kayıp modellemesi elde edilebilir.

Nüve kayıp modellemesi söz konusu olunca kayıp katsayılarının belirlenmesi çalışmada önem kazanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için M4, M5 ve M3 nüve malzemeleri için 50Hz-500Hz arasında sabit manyetik akıda nüve kaybı değerleri toplanmıştır. Modellemede kullandığımız eğri uydurma yöntemi için oluşturulan eğrilerden denklemler bulunmuştur. Denklem katsayıları vasıtasıyla istenen kayıp katsayılarına ulaşılmıştır. Katsayıları kullanarak M4, M5 ve M3 nüve malzemeleri için histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp bileşenlerini içeren nüve kayıp modellemesi gerçekleştirilmiştir. Yüksek manyetik akıda hassasiyeti arttırmak için geri-beslemeli mıknatıslanma akımı yöntemi de çalışmada yer almıştır. Modelden hesaplanan kayıplar ile ölçülen kayıpların eğrileri aynı tablo üzerinde karşılaştırılarak nüve kaybı ölçüm çalışmasının duyarlılığı gözlenmiştir.

Kayıp eğrilerini genel anlamda yorumladığımız zaman yüksek frekans ve akı yüksek kayba sebep olmaktadır. Ayrıca malzemenin teknik özelliklerinin de etkisi eğrilerde görülmüştür. Mesela M3 nüve malzemesi M4 ve M5 malzemelere göre daha incedir. Bu durum kayıp modellemesi ile elde edilen girdap akımı kayıplarının daha düşük olmasına sebep olmuştur. Manyetik nüve malzemesinin temel eğrilerinden olan histerisiz eğrileri her üç nüve malzemesi için çizilmiştir. Eğrilerin çiziminde integral alıcı devre kullanılmıştır. 1,5-1,7 Tesla manyetik akı değerlerinde silisli nüve malzemesi doymaya gitmiştir. Yani yüksek manyetik alan şiddeti uygulanmasına rağmen bu bölgede akı artışı çok az olmaktadır.

Manyetik kayıpların tespitine yönelik yapılan çalışmalar daha çok manuel testler ile gerçekleştirilmiştir. Bu ise zahmetli ve zaman alıcıdır. Üreticinin SST ölçme sistemini daha hızlı ve otomatik olarak kullanması gerekmektedir. Ayrıca tüm kayıp hesaplarının ara bir yazılım ile hızlı bir şekilde yapılarak, eğrilerin gözlemlenmesi mümkündür. İleriki çalışmada bu teknik donanımlar sisteme eklenerek ölçme hızı arttırılabilir. Ayrıca görsellik, duyarlılık ve otomasyon özellikleri iyileştirilebilir. Ek olarak kayıp bileşenlerini bulmak için kullanılabilecek genetik iyileştirme, yapay sinir ağları gibi çözüme yönelik metotlar çalışmaya katılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed M S** (2007) Effect of Harmonics on Iron Losses, M.Sc.Thesis, Chalmers University of Technology, Electric Power Engineering, Göteborg.
- Alkar K** (2009) Measuring Power Losses of Electrical Steel Sheets In One and Two Dimensional Magnetic Fields, M.Sc.Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communication Engineering, Helsinki.
- Belkasim M** (2008) Identification of Loss Models From Measurements of The Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets, M.Sc.Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical Engineering, Helsinki.
- Bertotti G** (1988) General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions On Magnetics*, 24: 621-630.
- Boglietti A** (2003) The Annealing Influence Onto The Magnetic And Energetic Properties in Magnetic Material After Punching Process. *IEEE Electric machines and drives conference*, pp 503- 508.
- Chen Y and Pillay P** (2002) An Improved Formula For Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating With High Frequency and High Flux Density Excitation. *IEEE 37th IAS Annual Meeting*, 2: 759– 766.
- Erdem S** (2006) Transformator Nüvelerinde Kullanılan Elektrik Çelikleri ve Amorf Şeritlerin Uç Uca Gelen Birleşim Yerlerindeki Manyetik Akı Dağılımının Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Guo Y G, Zhu J G and Zhong J J** (2006) Measurement and Modelling of Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Material Under 2D Vector Magnetisations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 302: 14–19.
- IEC publ. 60404-2 Ed.3.0** (1996) (amended version Ed.3.1 (2008)), Methods of Measurement of The Magnetic Properties of Electrical Steel Strip And Sheet By Means of An Epstein Frame, International standard. *Magnetic Materials – Part 2*.
- IEC publ. 60404-3 Ed.2.0** (1992) (amended version Ed.2.2 (2010)). Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of a Single Sheet tester, International standard. *Magnetic Materials – Part 3*.
- İbrahim M** (2011) Modeling of Core Losses in Electrical Machine Laminations Exposed to High Frequency and Non-sinusoidal Flux, M.Sc.Thesis, Concordia University, Department of Electrical and Computer Engineering, Montréal.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Küçük F** (2002) Manyetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Küçük İ** (2006) Multilayered Perceptron Neural Networks to Compute Energy Losses in Magnetic Core. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 307:53–61.
- Lancarotte M S and Penteado A** (2001) Prediction of Magnetic Losses Under Sinusoidal or Non Sinusoidal Induction By Analysis of Magnetization Rate. *IEEE Transactions. Energy Conversion*, 16: 174–179.
- Mthomben L and Pillay P** (2004) Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 40(5):1325-1332.
- Mthomben L, Pillay P and Strnat R M W** (2007) New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22: 614 – 620.
- Muhit M S** (2011) Magnetic and Electric Characterization of Materials for Electrical Machines, M.Sc.Thesis, Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.
- Nakata T** (1986) Numerical Analysis and Experimental Study of The Error of Magnetic Field Strength Measurements With Single Sheet Testers. *IEEE transaction on magnetics*, 22: 400 – 402.
- Nakata T, Fujiwara K, Nakano M and Kayada T** (1990) Influence of Yoke Construction on Magnetic Characteristics of Single Sheet Testers. *IEEE Translation Journal On Magnetics In Japan*, 5(7):618-624.
- Shuo L** (2001) Study of Single Sheet Tester For A.C Magnetization Characteristics Measurment. *IEEE transaction on Electrical machines and systems*, 1: 361 – 364.
- Sievert J** (2000) The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel – Survey on Methods and Situation of Standards. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215–216:647–651.
- Soong W L** (2008) BH Curve and Iron Loss Measurements for Magnetic Materials. *Power Engineering Briefing Note Series*, 5:3–3.
- Steinmetz C P** (1984) On the law of hysteresis (originally published in 1892). *Proc. IEEE*, 72(2):196-221.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Şimşir M** (2007) Elektronik Olarak Üretilen Dalga Şekilleri Altında Manyetik Aygıtlarda Meydana Gelen İlave Demir Kayıplarının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Torres A G** (2002) A Generalized Epstein Test Method For The Computation Of Core Losses in Induction Motors. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, pp 1150-1155.
- Tutkun N** (1998) Investigation of Power Loss Under Pwm Voltage Excitation in Wound Toroidal and Stator Cores, *Ph.D. Thesis*, Cardiff University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Wales.
- URL-1** (2012) <http://www.rjmeasurement.com.pl/pages/ANG/JM100.html>, R&J Measurement, Single Strip Tester, 05 Mayıs 2012.
- Zhong J, Guo Y, Zhu J, Lu H and Jin J** (2007) Development of Measuring Techniques for Rotational Core Losses of Soft Magnetic Material. *Nature Sciences*, 2(1):1-12.
- Zhu J G** (1994) Numerical Modelling of Magnetic Materials For Computer Aided Design of Electromagnetic Devices, *Ph. Dr. Thesis*, University of Technology, Sydney.
- Zurek S, Marketos P, Meydan T and Moses A** (2005) Use of Novel Adaptive Digital Feedback for Magnetic Measurements Under Controlled Magnetizing Conditions. *IEEE Transactions On Magnetics*, 41(11): 4242-4249.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet DEMİR 1977’de Bursa’da doğdu; lise öğretimini Bursa Demirtaşpaşa Anadolu Meslek Lisesinin elektrik bölümünde tamamladı. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünden 1999 yılında mezun olduktan sonra EKA Elektronik A.Ş. firmasında 1 yıl Arge mühendisi olarak görev yaptı. 2000-2002 yılları arası Ankara ve İstanbul’da yedek subay olarak askerlik görevini yaptı. 2003 yılından beri Ereğli Demir Çelik Fabrikasında elektrik mühendisi olarak çalışmakta ve BEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Bağlık mh. Hatip sk. Yaşam kent sitesi
C/12 Kdz. Ereğli

Tel : (535) 578 50 09

E-posta : ahmetfatmademir@hotmail.com