

T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

95215

**GİRDAP AKIMLARI TEKNİĞİNİN FİZİKSEL PRENSİPLERİ VE SANAYİDE
UYGULAMALARI**

KEMAL SERTAN AKAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

BURSA - 2000

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİRDAP AKIMLARI TEKNİĞİNİN FİZİKSEL PRENSİPLERİ VE SANAYİDE
UYGULAMALARI

KEMAL SERTAN AKAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİMDALI

Bu tez ...01.09.2000... 2000 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet AVİNÇ
(Danışman)

01.09.2000 ...*[Signature]*...

Prof. Dr. Mümin YAMANKARADENİZ

01.09.2000 M. ...*[Signature]*...

Doç. Dr. Z. Gökay KAYNAK

01.09.2000 ...*[Signature]*...

ÖZET

Bu çalışmada sanayide özellikle uçak sanayisinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden olan girdap akımları test metodunun fiziksel prensipleri ile kullanım alanları üzerinde durulmuştur. Bu anlamda THY uçak bakım ünitesi ile Gebze TÜBİTAK – MAM laboratuvarlarında çeşitli örnek numunelerle deneyler yapılmış olup, bu deneylerden elde edilen sonuçların malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Girdap akımları test yöntemi yüzey ve yüzeyaltı hataları test etmek için kullanılan bir yöntemdir. Prob tarafından oluşturulan birincil manyetik alan numunede girdap akımlarını oluşturur. Numunede oluşan girdap akımları ikincil manyetik alanı oluşturur. Eğer numune test edilirken girdap akımlarının yönünde herhangi bir sapma olursa bu değişim bobin tarafından algılanır . Bu sonuçta bize teste tabi tutulan numunede süreksizlik olduğunu gösterir.

Anahtar kelimeler : Tahribatsız muayene, girdap akımları.

ABSTRACT**THE PHYSICAL PRINCIPLES of EDDY CURRENT TECHNIC and ITS INDUSTRIAL APPLICATIONS**

This study concentrates on the physical principles of eddy current testing method, which is one of the nondestructive testing techniques widely used in industry, especially in aviation, and its fields of application. In this context, several tests were conducted on various samples in THY aircraft maintenance unit and at the laboratories of Gebze TÜBİTAK – MAM. The impacts of the results obtained from these tests were evaluated.

Eddy current testing method is a technique, used to test nonconformance on and under the surface. The primary magnetic field formed by the probe produces eddy currents on the samples. Eddy current on the sample make up the secondary magnetic field. If a deviation takes place in the direction of eddy current during testing, this change is detected by the bobbin. Eventually this shows that there is a discontinuity in the sample tested.

Key words : Nondestructive Testing, Eddy Current.

2. 3. 3. Temel Prensipler	33
2. 3. 3. 1. Malzeme İçinde Girdap Akımlarının Oluşması	33
2. 3. 3. 2. Bobin Empedansı	35
2. 3. 3. 3. Elektriksel İletkenlik	39
2. 3. 3. 3. 1. İletkenlik Üzerine Etkisi Olan	
Değişkenler	40
2. 3. 3. 4. Manyetik Geçirgenlik	40
2. 3. 3. 4. 1. Seyirme (Hysteresis) Eğrisi	41
2. 3. 3. 5. Temas Etkisi	43
2. 3. 3. 6. Aralık Faktörü (Lift – Of Effect)	44
2. 3. 3. 7. Doldurma Faktörü	44
2. 3. 3. 8. Deri Etkisi	45
2. 3. 3. 9. Kenar Etkisi	45
2. 3. 4. Standart Nüfuziyet Derinliği	46
2. 3. 5. Standart Faz Gecikmesi	49
2. 3. 6. Girdap Akımlarının Meydana Gelmesi	49
3. MATERYAL ve YÖNTEM	52
3. 1. Cihazın Tanıtımı	52
3. 2. Kalibrasyon	54
3. 3. Girdap Akımları Test Problemleri	55
3. 3. 1. Girdap Akımı Problemlerinin Çalışma Prensipleri	55
3. 3. 1. 1. Prob Seçimi	55
3. 3. 1. 2. Prob Çeşitleri	56
3. 3. 1. 3. Mutlak ve Diferansiyel Problemler	60
3. 3. 1. 3. 1. Mutlak Problemler	60
3. 3. 1. 3. 2. Diferansiyel Problemler	61
3. 4. Girdap Akım Devre Araçları	63
3. 4. 1. Temel Test Devresi	63
3. 4. 2. Temel Köprü Devresi	64
3. 4. 3. Diğer Köprü Devre Türleri	65
3.5. Çalışma Frekansı	67
4. BULGULAR	68

4. 1. Değişik Türdeki Malzemelerin Girdap Akımı Test Cihazları	
Yardımlı İle Test Edilmesi	68
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	80
KAYNAKLAR	83
TEŞEKKÜR	84
ÖZGEÇMİŞ	85



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Sekil

2. 1 Örnek Süreksizlik Diyagramı	16
2. 2 Malzeme İçindeki Girdap Akımları Yoğunluğunun Derinliğin Fonksiyonu Olarak Değişimi	27
2. 3 Malzeme İçindeki Girdap Akımlarının Faz Açısındaki Gecikmenin Derinliğin Fonksiyonu Olarak Değişimi	28
2. 4 Girdap Akımları İle Tahribatsız test Metodunun İki Elektronik Devre İle Simülasyonu	29
2. 5 Simüle Edilen Elektronik Devrenin Fiziksel Tanımı	30
2. 6 Empedans Diyagramı	32
2. 7 Temel Girdap Akım Test Sistemi	33
2. 8 Girdap Akımlarının Süreksizlik Üzerinde Sapması	35
2. 9 Empedansın Vektörel Gösterimi	36
2. 10 Test Bobin Karakteristiklerinin Empedans Grafiği Üzerinde Gösterimi	38
2. 11 Hysteresis Eğrisi	42
2. 12 Kenar Etkisi Nedeniyle Girdap Akımlarının Saçılması	46
2. 13 Yoğunluk Fonksiyonu Olarak Girdap Akımları Derinliğinin Değişimi	47
2. 14 Farklı Türdeki Materyaller İçin Frekansa Karşı Standart Nüfuziyet Derinlikleri	48
3. 1 Girdap Akımları Test Yöntemleri	53
3. 2 Tipik Bir Yüzey Probu ve İç Yapısı	56
3. 3 Çukur Boşlukların Kontrolunda Kullanılan Yüzey Probları	57
3. 4 İç Prob	58
3. 5 Çevresel Bobin	59
3. 6 Geniş ve Dar Çevresel Bobinler	59
3. 7 Tek Bobin – Mutlak Düzenleme	60
3. 8 Kendisi İle Karşılaştırmalı Diferansiyel Prob	62
3. 9 Dışardan Karşılaştırmalı Diferansiyel Prob	62
3. 10 Temel Test Devresi	63
3. 11 Temel Köprü Devresi	64

3. 12 Bir Referans Bobini ve Kontrol Bobinine Yarıyan Köprü Devresi	65
3. 13 Bir Referans ve Kontrol Bobininin Değişik Kullanımı	66
3. 14 Değişebilen Reaktans ve Dirençli Köprü Devresi	66
4. 1 Yüksek Frekansta Alüminyum Kontrolü	68
4. 2 Farklı Malzemeler İçin İletkenlik Testi	69
4. 3 Tipik Bir İletkenlik Testi Örneği	70
4. 4 Yüksek Frekansta Çelik Parçasının Yüzey Kontrolü	71
4. 5 Alüminyumun Kaplama Kalınlığı Ölçümü	72
4. 6 A310 Airbus Yolcu Uçağı Arka Kapılarının Stringer Kontrolü	74
4. 7 Delikteki Süreksizlik Kontrolü	76
4. 8 Uçak Motorunun Test Edilmesi	77
4. 9 Çelik Numunedeki Süreksizliğin Yazıcıdan Görüntülenmesi	78



SİMGELER ve KISALTMALAR

A	: Vektör Alanı
A.c	: Alternatif Akım
b	: Kalınlık
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
C ₁	: Sabit Katsayı
C ₂	: Sabit Katsayı
D	: Boyut
D.c	: Doğru Akım
E	: Elektrik Alan
E _{OY}	: OY – Eksenindeki Elektrik Alan
f	: Frekans
G ₂	: İletkenlik
H	: Manyetik Alan Şiddeti
H ₀	: O – Noktasındaki Manyetik Alan Şiddeti
H _{OZ}	: OZ – Eksenindeki Manyetik Alan Şiddeti
H _p	: Bobinin Manyetik Alanı
H _s	: Girdap Akımlarının Manyetik Alanı
H _Z	: Z – Eksenindeki Manyetik Alan Şiddeti
I	: Akım Miktarı
I ₁	: Birinci Devredeki Akım Miktarı
I ₂	: İkinci Devredeki Akım Miktarı
I _s	: Malzeme İçinde Oluşan Akım Miktarı
IACS	: International Annealed Copper Standart
J	: Akım Yoğunluğu
J / J ₀	: Relatif Dalma Derinliği
J _{OY}	: OY – Eksenindeki Akım Yoğunluğu
J _Y	: Y – Eksenindeki Akım Yoğunluğu
K	: Sabit Katsayı
k ₁	: Sabit Katsayı
k ₂	: Sabit Katsayı
k _c	: Etkileşim Katsayısı

l	: Uzunluk
L_0	: Bobinin Boşluktaki İndüktansı
L_1	: Birinci Devredeki İndüktans
L_2	: İkinci Devredeki İndüktans
M_{12}	: Karşılıklı İndüktans
N	: Sarım Sayısı
r	: Yarıçap
R_1	: Birinci devredeki Direnç
R_2	: İkinci Devredeki Direnç
s	: Sabit Katsayı
t	: Zaman Sabiti
w	: Açısal Frekans
x	: Malzeme Derinliği
X_L	: İndüktif reaktans
V	: Gerilim Farkı
V_p	: Malzeme Üzerinde Oluşan Gerilim
V_s	: Malzeme İçinde İndüklenen gerilim
Z	: Empedans
Z_s	: Malzemenin İçinden Geçen Akıma Karşı Koyan Malzemenin Empedansı
γ	: Gama
ρ	: Elektriksel Direnç
σ	: İletkenlik Katsayısı
ϵ	: Epsilon
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
μ_r	: Relatif Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
α	: Faz Açısı
π	: pi (sabit katsayı)
φ	: Faz Gecikmesi
Φ_E	: Denge Akısı

1. GİRİŞ

Üretim, insan ihtiyaçlarının tabiat tarafından tam olarak karşılanamaması sonucu ortaya çıkan bir faaliyettir. Üretimin amacı, bir ürün veya hizmet yaratmaktır. İnsanlık tarihi kadar eski olan üretim faaliyeti sonunda ortaya çıkan mal ve hizmetin amaçlanan gereksinmeyi karşılama derecesi diğer bir deyişle kalitesi, çok eski çağlardan günümüze kadar yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Öte yandan, bir malı en iyi biçimde üretebilecek duruma gelmek için bilgi ve tecrübe kazanma zorunluluğu kalite seviyesini yükseltmek için konulmuştur.

Üretici firmalar müşterilerini tatmin etmek, korumak ve muhafaza etmek için kaliteli ürün üretmeye yönelmektedir. Bu nedenle firmalar üretilen ürünün kalitesi için belirlenen istekleri karşılamalı ve yeterli güveni sağlamak için de kaliteyi bir güvence altına almalıdırlar. Böylece müşterilere güven duygusu aşılınmış olacaktır. Herkesin genel olarak uzlaşacağı bir kalite tanımı yapılması neredeyse olanaksızdır. Değişik kalite tanımlarının yapılması kalitenin çok boyutlu olmasından kaynaklanmaktadır. Kalite, bir ürün veya hizmetin belirlenen veya olabilecek ihtiyaçları karşılama kabiliyetine dayanan özelliklerin toplamıdır (Anonim 1997, Anonim 1991). Günümüzün ileri teknolojisinin bir çok sanayi dallarında (nükleer, uçak, ve uzay endüstrisi) aranan kaliteyi tutturamamak riskini, ne kadar küçük olursa olsun kabullenmek, doğabilecek büyük hata ve felaketlere peşinen evet demek olacaktır. Bu

Girdap akımları yöntemi, yüzey ve yüzeyaltı süreksizlikleri kontrol etmek için uygulanan bir tahribatsız test yöntemidir.

Bu test yöntemi ucuz, güvenilir, hızlı ve metaller üzerindeki geniş uygulama alanı olan test tekniklerini kapsamaması nedeniyle endüstriyel tahribatsız muayenede vazgeçilmez bir test yöntemi konumundadır. Bu özellikleri nedeniyle girdap akımları test yöntemi diğer tahribatsız test yöntemlerine göre avantajlıdır.

Bu tez çalışmasında girdap akımları metodunun hata tespiti amacıyla kullanımında temel fiziksel prensipleri ile diğer tahribatsız test yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Bu amaçla THY uçak bakım ünitesi ve Gebze TÜBİTAK – MAM laboratuvarlarında malzemelerde oluşan süreksizliklerin tespiti amaçlı araştırma ve deneyler yapılmıştır. TÜBİTAK – MAM laboratuvarlarında girdap akımları test cihazları hakkında bilgi toplanıp, THY uçak bakım ünitesinde ise malzeme içerisinde oluşan süreksizliklerin tespiti için çeşitli deneyler yapıp bu süreksizliklerin malzeme kullanımını etkileyip etkilemediği tartışılmıştır. Deneysel çalışmalar için girdap akımları test yönteminin yaygın olarak kullanıldığı THY uçak bakım ünitesi seçilmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Kalite Tanımı ve Kavramları

2.1.1. Kalite Nedir?

Bir ürün veya hizmetin belirlenen veya olabilecek ihtiyaçları karşılama kabiliyetine dayanan özelliklerinin toplamıdır. Kalite iki boyutludur; tasarım kalitesi ve uygunluk kalitesi. Tasarım kalitesi, tercih edilen özelliklerin ürün tasarımında yer alması – pazar araştırması ve tasarım fonksiyonunu kapsamaktadır (Anonim 1991) .

Uygunluk kalitesi, gerçekleşen üretimin tasarımda belirtilen özelliklere uyması demektir. Kabul edilebilir kalite düzeyi. Hedef sıfır hata. Bu her zaman, zamanında ve ilk defasında doğru iş yapmak olarak da tarif edilmektedir.

2.1.2. Kalite Politikası

Hedefe ulaşmanın birinci koşulu organizasyon içinde herkesin bir bütün olarak uyum içinde çalışmasıdır. Tüketici isteklerini en ekonomik biçimde karşılamak amacı ile işletme organizasyonu içindeki çeşitli ünitelerin, kalitenin yaratılması, yaşatılması ve geliştirilmesi yolundaki çabalarını birleştirip koordine eden sisteme “Toplam Kalite Kontrolü” denir (Avinç ders notları 1999) .

Kalite politikası, üst yönetim tarafından kabul edilen politikanın bir parçasıdır (Anonim 1995) .

2.1.3. Kalite Yönetimi

Genel yönetim fonksiyonunun kalite politikasını tespit eden ve uygulayan bölümüdür. Kalite yönetimi, stratejik planlama, kaynakların tahsisi ve kalite planlaması, işletmesi ve değerlendirilmesi gibi kalite içi yapılan diğer sistematik faaliyetleri kapsamaktadır. Kalite yönetimi, belirlenmiş ve tüm ilgililerce kabul gören bir kalite

politikasının mevcudiyeti ve bu politikanın uygulanması amacıyla gerekli faaliyetlerin gerçekleştirilmesidir. Bu politikanın hayata geçirilmesi gerekli olan organizasyonel önlemlerin teknik ve araçların sağlanmasını gerektirir (Anonim 1995) .

2.1.4. Kalite Güvencesi

Ürün veya hizmetin, kalite için belirlenen istekleri karşılamak amacıyla, yeterli güven sağlanması için gereken planlı ve sistematik faaliyetlerin bütünüdür. Kaliteye yönelik faaliyetlerin planlı ve sistematik olarak yürütülmesiyle gerek firma çalışanlarına gerekse müşterilere güven duygusu aşılanmış olacaktır. Belirlenen istekler, kullanıcının ihtiyaçlarını tam olarak karşılamadığı sürece, kalite güvencesi tamamlanmış sayılmaz (Anonim 1991) .

2.1.5. Kalite Kontrol

Kalite isteklerini sağlamak için kullanılan uygulama teknikleri ve faaliyetlerdir. Kalite kontrol, hataları saptamak ve eğilimleri görmek amacıyla kullanılan teknikler ve araçlardır. Karışıklığın önlenmesi amacıyla, kalite kontrolün alt grubu “ İmalatta kalite kontrol ” veya geniş açıdan bakıldığında “ Kuruluş çapında kalite kontrol ” gibi farklılığı ifade eden terimlerin kullanılmasına dikkat edilmelidir (Anonim 1991) . Kalite kontrol, hammadde – üretim aşamaları – servis sürecinde üretilen mal’da gözlenen eksikliklerin kalitesinin tespitidir.

2.2. Tahribatlı ve Tahribatsız Malzeme Testleri

Metalik bir malzemenin kullanım yerlerine göre ihtiyaca uygun olup olmadığı veya malzemenin üretimi esnasında ve üretim sonrası tabi tutulduğu gerekli işlemlerin yapıldığı sırada üretilme şartlarını sağlayıp sağlamadığını, kusurlu olup olmadığını anlamak için malzemelere uygulanan muayene usullerini “Tahribatlı ve Tahribatsız Test” olarak iki grupta toplamak mümkündür.

2.2.1. Tahribatlı Muayene

Üretimde klasik kalite kontrolün iyi bilinen örnekleme yönteminde, genellikle bütünden alınan numunelere önceden tasarlanmış mekanik deneyler uygulanarak servis özellikleri ölçülür. Kelime anlamından da anlaşılacağı gibi Tahribatlı Test, test uygulanan numunenin fiziksel yapısını bozmak anlamına gelmektedir. Teknolojide kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan başlıca tahribatlı deneyler şunlardır:

(a) Çekme Deneyi,

(b) Sertlik Deneyi,

(c) Basma Deneyi,

(d) Burma Deneyi,

(e) Yorulma Deneyi,

(f) Darbe Deneyi,

(g) Eğme ve Katlama Deneyi.

2.2.2. Teknolojik Deneyler

Pratik, çok hassas olarak yapılmış deney neticelerine bağlı olmaktan çok, basit ve çabuk yapılan deneylere ve bu deneylerin sonuçlarından bir malzeme veya iş parçasının işleme ve çalışma süresi içinde yeterliliği hakkında karar vermeye yönelmiştir.

Teknolojik malzeme usulleri:

- (a) Kıvılcım Deneyi,
- (b) Eğme ve Katlama Deneyi,
- (c) Yığma Deneyi,
- (d) Sızdırmazlık Deneyi (Boruların muayenesi),
- (e) Sıvama Deneyi,
- (f) İleri-Geri Eğme Deneyi,
- (g) Kıvrırma Deneyi,
- (h) Sarma Deneyi,
- (i) Basınç Deneyi.

Bu deneyler, malzemelerin üretim ya da kullanılmaları sırasında uğradıkları yüklemeler ve şekil değişimleri hakkında bilgi vermektedirler. Bir parçadan çok sayıda üretim yapılıyorsa, sonuçlar istatistiksel yöntemlerle bütüne genişletilebilir. Numuneler testler sonucunda genellikle tahrip olduklarından, üzerinde deney yapılan parça sayısının küçük tutulması maliyetin düşürülmesi gereğidir. Ancak ürünün kalite standartının yükseltilmesi için de numune sayısını arttırmak gerekmektedir (Avinç ders notları 1999) .

2.2.3. Tahribatsız Muayene

Yıllardan beri teknolojiye pek çok tahribatsız muayene yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler birbirine rakip olmaktan çok tamamlayıcı niteliktedir. Çünkü her

yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Tahribatsız muayeneler bugün endüstrinin vazgeçilmez bir yardımcısı ve endüstriyel üretimin çok önemli aşaması olmuşlardır. Ancak tahribatsız muayene hala büyüme ve gelişme çağındadır. İlerleyen teknolojinin ihtiyaçlarına cevap verebilmek için eski yöntem ve teknikler islah edilmeli, yeni yöntem ve tekniklerle birlikte yeni aygıtlar geliştirilmelidir. Bunun içinde temel araştırma ve geliştirme programları uygulanmalı ve geliştirilmelidir.

Tahribatsız muayeneler ve teknikleri için, ilk kez 1963 yılında Uluslararası Tahribatsız Muayeneler Konferansı'nda şöyle bir tanım yapılmıştır: "Tahribatsız muayeneler, bir malzeme, parça ve sisteme, servis yapabilirliğini etkilemeden uygulanan test, kontrol ve ölçme işlemlerini kapsar".

2.2.3.1. En Çok Kullanılan Tahribatsız Test Yöntemlerinin Tanımları ve Uygulama Alanları

Bütün tahribatsız test yöntemleri iki esas fonksiyonla tanımlanır. Bunlardan biri nüfuziyet, diğeri de algılama fonksiyonudur.

Nüfuziyet fonksiyonu, nüfuz edici elemanın test malzemesi içerisine giriciliği ve fiziksel süreksizlikleri algılama elemanına aktarmasıdır. Algılama elemanı ise, nüfuz edici elemandan aldığı bilgileri test operatörünün algılayabileceği belirtiler haline getirmesidir. Örneğin, radyografide malzemeye nüfuz edici eleman radyasyon, algılayıcı eleman radyografik filmidir. Film üzerindeki bilgiler kimyasal işlemlerden sonra gözle algılanabilen belirtiler haline gelir (Anonim 1979) .

Tahribatsız test yöntemlerini genel olarak üç ana bölüme ayırmak mümkündür:

- Yüzey Yöntemleri,
- Hacimsel Yöntemler,
- Birleşik Yöntemler.

1 - Yüzey yöntemleri, malzemenin yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında bulunan hataların tespitinde uygulanır ve aşağıdaki yöntemleri kapsar:

- Sıvı Penetrant,
- Manyetik Parçacık,
- Girdap Akımları.
- Gözle Test

2 - Hacimsel yöntemler, malzemede test bölgesinin tamamına nüfuz etmek suretiyle hataların algılanmasını sağlar ve aşağıdaki yöntemleri kapsar:

- Radyografik,
- Ultrasonik,
- Termografi.

3 - Birleşik yöntemler, parçanın tamamının aynı anda test edilebilmesidir. Aşağıdaki yöntemler bu gruba girmektedir.

- Kaçak Testi,
- Akustik Emisyon.

Süreksizliklerin tiplerini, boyutlarını ve konumlarını belirlemek için her yöntem farklı tekniklerle uygulanabilir. Yukarıda sınıflandırılan tahribatsız test yöntemleri aşağıda kısaca tanımlanacaktır.

2.2.3.1.1. Sıvı Penetrant

Bir yüzey yöntemi olup, yüzey hatalarının tespit edilmesinde uygulanır. Yöntemin uygulanacağı test malzemesinin yüzeyi gayet düzgün olmalıdır. Gözenekli bir yüzeyde hata belirtileri ile diğer belirtileri birbirinden ayırmak zordur.

Bir penetrant sıvı; viskozitesi, yüzey gerilimi ve yoğunluğu ile nitelendirilir. Görünürlüğü boya veya floresan maddelerle sağlanır. Sıvı penetrant testinde kullanılan diğer elemanlar temizleyici ve developerdir.

Yöntem uygulanmadan önce test edilecek malzeme yüzeyi dikkatli bir şekilde temizlenir. Yüzey kuruduktan sonra üzerine penetrant sıvı uygulanır. Yeterli bir nüfuziyet süresinden sonra, penetrantın fazlası yüzeyden temizlenir ve üzerine developer uygulanır.

Developer, hataların içerisine nüfuz etmiş olan penetrant sıvısının tekrar malzeme yüzeyine emilmesini ve görünür hale gelmesini sağlar. Developer genellikle beyaz, penetrant ise kırmızı veya sarımsı yeşil floresan renkte olur. Bu renk farkının sağladığı kontrast görünürlüğü kolaylaştırır.

Sıvı penetrantın en küçük yarıkları dedekte etmekte yüksek kabiliyete sahip olmasına rağmen, Girdap akımları ve Ultrasonik yöntemlere göre ikinci planda kalmaktadır (Karainci ve ark. 1993, Avinç ders notları 1999) .

2.2.3.1.2 Manyetik Parçacık

Manyetik parçacık yöntemi yüzey ve yüzeyaltı hataların tespitinde uygulanır. Bu yöntemle yüzeyaltı hatalarının algılanması, hatanın konumu ve yüzeye yakınlığı tespit edilmektedir. Sadece ferromanyetik malzemelere uygulanır.

Ferromanyetik malzemeler manyetik parçacık testinin odak noktasıdır ve bu malzemeler belirli bir mıknatıslığı tutma yeteneği ile karakterize edilmektedirler.

Dışarıdan manyetik alan yoksa ferromanyetik malzeme manyetizasyon göstermemektedir. Manyetik alan içerisine yerleştirilen maddenin diamanyetik, paramanyetik veya ferromanyetik oluşuna bağlı olarak manyetizasyon şiddeti sırayla azalmaktadır.

Manyetizasyon için gerek alternatif akım gerekse doğru akım kullanılabilir. Doğru akım içinden geçtiği parçanın tüm kesiminde aynı şekilde dağılır. Bu nedenle, parça yüzeyinin altında yeterli derecede akı yoğunluğu elde edilebildiğinden yüzeyaltı süreksizlikleri bulmak için d.c kullanılır. Alternatif akım ise, parça içinde girdap akımları meydana getirir. Bu akımlar Lenz yasasına göre kendini meydana getiren etkiye karşıdır ve malzemenin yüzey tabakasında akan akımın dağılımını etkiler. A.c akımı yalnız yüzeye açılmış veya yüzeye çok yakın süreksizliklerin yerini bulmada kullanılır. Özellikle yüzey belirsizliklerini dedekte etmekte a.c, d.c'ye göre çok iyidir (Avinç ve Özalp 1997) .

Manyetik parçacık yönteminin önemli elemanı olan manyetik tozlar malzemenin üzerine serptildiğinde manyetize olurlar ve süreksizlik üzerinde yoğunlaşarak kaçak alan çizgilerinin geçişi için köprü oluştururlar. Bu yoğunlaşma süreksizliği belirgin hale getirir. Test malzemesi ile kontrast oluşturmak ve görünürlüğü arttırmak için manyetik tozlar farklı renklerde ve floresan olarak üretilirler. Yüzey hataları keskin, yüzeyaltı hataları ise daha zayıf ve dağınık görünüm verirler (Karainci ve ark. 1993) .

2.2.3.1.3. Akustik Emisyon

Akustik emisyon yönteminde, yük ve basınç altında bulunan parçalardaki süreksizliklerin ürettiği esnek dalgalar algılanır. Esnek dalgalar parçaya uygulanan gerilmeden dolayı süreksizliklerin genişleyip daralmasından doğar. Bu dalgalar algılanmak suretiyle süreksizliklerin yerleri ve boyutları tespit edilebilir. Eğer parça bir gerilme altında değilse süreksizliklerden herhangi bir sinyal alınamaz ve varlıklarında tespit edilemez. Esnek dalgaların kaynağı (süreksizlikler) parça yüzeyine yerleştirilen ve ultrasonik problara benzeyen dedektörlerle algılanır. Algılanan sinyaller,

genliklerinden, titreşim şeklinden (sürekli veya kesikli) ve zamandan gidilerek bilgisayarda değerlendirilir (Karainci ve ark. 1993) .

2.2.3.1.4. Ultrasonik Muayene

Tahribatsız muayene yöntemleri içinde, kısa zamanda süratle gelişen ve uygulanmasında kolaylık sağlanan, geniş uygulama alanına sahip, parçayı sökmeden yerinde kontrol, kontrolde hassasiyet ve yeni tespit edilen pek çok sayıdaki üstünlükleri nedeniyle Ultrasonik Tahribatsız Muayene oldukça önemli bir yere sahiptir.

Yüksek frekanslı ses titreşimlerinin endüstrideki uygulaması genel olarak iki ana grupta toplanmaktadır.

1. Alçak Güç,

2. Yüksek Güç.

Endüstride kullanılan yüksek frekanslı ses titreşimleri kulağın işitebileceği sınırın çok üstündedir. Tahribatsız muayenede kalınlık ölçme, kalite kontrolü, koruyucu bakım alanları ultrasonik titreşimlerin en çok ve pratik uygulama alanı olmuştur.

Tahribatsız muayene işlemlerinde kullanılan ultrasonik titreşimler, birinci grupta yer alan alçak güç, oldukça kısa frekans aralığında (1MHz – 10 MHz) olan titreşimleridir.

Cihazın içinde, bir ossilatör tarafından üretilen elektrik gerilim bir transdüser tarafından mekanik titreşimler haline dönüştürülür. Hava yüksek frekanslı ses titreşimlerini yeteri kadar iletemediği için transdüser elemanın ucuna yağ veya su sürülerek bir kavrayıcı ortam oluşturularak, muayene edilecek parça ile transdüser arasında hava kalmaması sağlanır .

Ultrasonik muayene genellikle sesin parça içinde gidip gelmesi için geçen zamanla ilgilidir. Burada hız malzeme yapısının bir fonksiyonudur. Sesin gidip gelme zamanı cihazda ölçülür. Böylece sınır mesafesi tayin edilir.

Ultrasonik tahribatsız muayene üç ana yöntem veya üç ana tip cihaz ihtiva eder. Bunlar;

A-) İletkenlikle Kontrol,

B-) Puls – Eko (Yankı),

C-) Ultrasonik Rezonas Yöntemi.

Bu yöntemler ve yöntemlere göre gereken cihazlar vardır. Her üç yöntemde ses dalgalarının yayılması oldukça benzer olmakla beraber, akustik sinyallerin üretilmesi ve bilgilerin değerlendirilme şekilleri oldukça farklıdır (Karainci ve ark. 1993) .

Boyuna dalgalar şeklinde yayılan ses dalgalarının yayılması için maddi ortama gereksinim vardır. Bu gaye ile kullanılan ultrasonik dalgalar genelde piezoelektrik maddeler (kuartz, baryum) tarafından oluşturulurlar (Karainci ve ark. 1993) .

Bu yöntemde uygulayıcı için bir risk yoktur. Muayenede sonuç kısa zamanda alınır. X – ışınlarına göre daha derindeki hatalar tespit edilebilir (Anonim 1979) .

İletkenlikle kontrol yönteminde bir numunedeki süreksizlik şu şekilde tespit edilmektedir. İncelenen cismin her iki yüzeyinde birer ultrasonik transdusere gereksinim vardır. İstenilen frekansta birkaç peryoda kadar uygun bir elektrik pulsu, verici kristale uygulanacak olursa, oluşan ultrasonik dalga paketi, örnek içinden geçerek karşı yüzeye ulaşacaktır. Bu yüzey üzerine yerleştirilmiş olan ikinci transduser titreşimleri alarak bir elektrik sinyaline çevirecektir. Bu sinyaller yükseltildikten sonra bir ossiloskobun ekranında görülmektedir. Ultrasonik dalga geçişi sırasında bir süreksizliğe rastlamamışsa alınan sinyal daha büyük olacaktır. Oysa yol üzerindeki bir süreksizlik

nedeniyle sinyal küçülmesi, hatanın varlığını göstermiş olacaktır. Bu gaye için kullanılan Hipersonik analizörler vardır. Böyle bir analizörle genelde hatanın varlığı belirlenir. Fakat cinsi, derinliği kesin değildir (Avinç ders notları 1999) .

2.2.3.1.5. Radyografik Test Yöntemleri

İnsan gözü, şeffaf olmayan malzemelerin ancak yüzeylerini görebilir. Eğer bir metal yada plastik içerisindeki saklı hataların incelenmesi istenirse ışıktan daha fazla girebilen bir enerji şekli kullanılması gerekir. X – ışınları santimetrelerce kalınlıkta çeliğin içerisinde geçip, bir radyografik film yada bir floresan ekran üzerine hataları gösterebilir.

γ ve x - ışınlarının nüfuz etme gücünden yararlanarak cisimlerin iç kısımlarının etüdü ve bunun bir film üzerine kaydetme işlemine “**Radyografik Muayene**” denir. Her ne kadar yüklü parçacıklarla çalışmak mümkünse x – ışını, γ ve nötronlarla gerçekleştirilen radyografi daha yaygındır. Bu işlemin yapılmasında üç ana kademe vardır.

A-) Film çekimi için hazırlıklar dahil olmak üzere film çekimi
(radyasyona tabi tutma),

B-) Film işlemleri (banyo v.b),

C-) Radyografin değerlendirilmesi.

İşlemlerin geliştirilmesinde ve kalite kontrolunda altı tip radyografik muayene usulü kullanılmaktadır. Bunlar;

a) X – Işınları Soğurulması,

b) Gama Işınları,

- c) Fluros kopi,
- d) Foto Fluros kopi,
- e) X – Işınları Difraksiyonu,
- f) Nötronlar.

Radyasyon, cisimlerin içinden geçerek ya görülemeyen ya da belirli bir şeklin görüntüsünü film üzerine yansıtır. Gerekli işlem yapıldığında film bir radyograf yada cismin bir gölge resmi haline gelir. İnce kesitlerden ya da bir boşluktan veya hatadan daha fazla radyasyon geçer ve söz konusu alanlar film üzerinde daha koyu karanlık olarak belirir. Radyograf cismin bilinen tabii hali ile karşılaştırılarak değerlendirilir.

Bir kalite kontrol işlemi olarak radyografik muayenenin uygulaması aşağıdaki fonksiyonları sağlamak suretiyle zaman ve malzeme tasarrufu sağlar.

- 1- Doğru imalat işlemini gösterir,
- 2- Malzemenin en iyi şekilde üretimini sağlar,
- 3- Periyodik muayene kadar servis kabiliyetinin incelenmesini sağlar,
- 4- Bir değişiklik, zarar yada tahribat olmaksızın malzemenin kalitesini inceler,
- 5- Kabul edilebilir malzemeyi edilmeyenden ayırır.

Endüstride radyografi birçok parçadan oluşmuş cisimlerin kaynaklarının ve dökümlerin muayenesinde uygulanır. Çeşitli metaller ve metalik olmayan malzemeler başarı ile muayene edilebilirler.

Radyografi saydam olmayan cisimlerin iç kısımlarını da göstermesine rağmen düzensizlik ve süreksizliklerin (iç kısmında) bütün tiplerini göstermez. Kalın cisimlerdeki küçük hatalar, örneğin küçük çatlaklar ya da tabakaların keşfedilmesi güçtür (Avinç ders notları 1999) .

2.2.4. Malzemeler

Tahribatsız testin amacı, malzemelerin üretim ve işletme sırasındaki sağlamlıklarını kontrol etmektir. Malzemeler daha başlangıçta hatalı olarak üretilebilir veya işletme esnasında maruz kaldıkları yüklenme, yorulma, sıcaklık ve çevre etkenlerinden dolayı bazı hatalar doğabilir.

Günümüzde, her tür metal, seramik ve sentetik malzemeler tahribatsız yöntemle test edilebilmektedir.

2.2.5. Süreksizlikler

Süreksizlik, bir malzemenin normal yapısında meydana gelen kesiklik olarak tanımlanmaktadır. Süreksizlikler; kalıntı, gözenek, gaz boşluğu, çatlak gibi üretimden kaynaklanan hatalardan meydana gelmektedir.

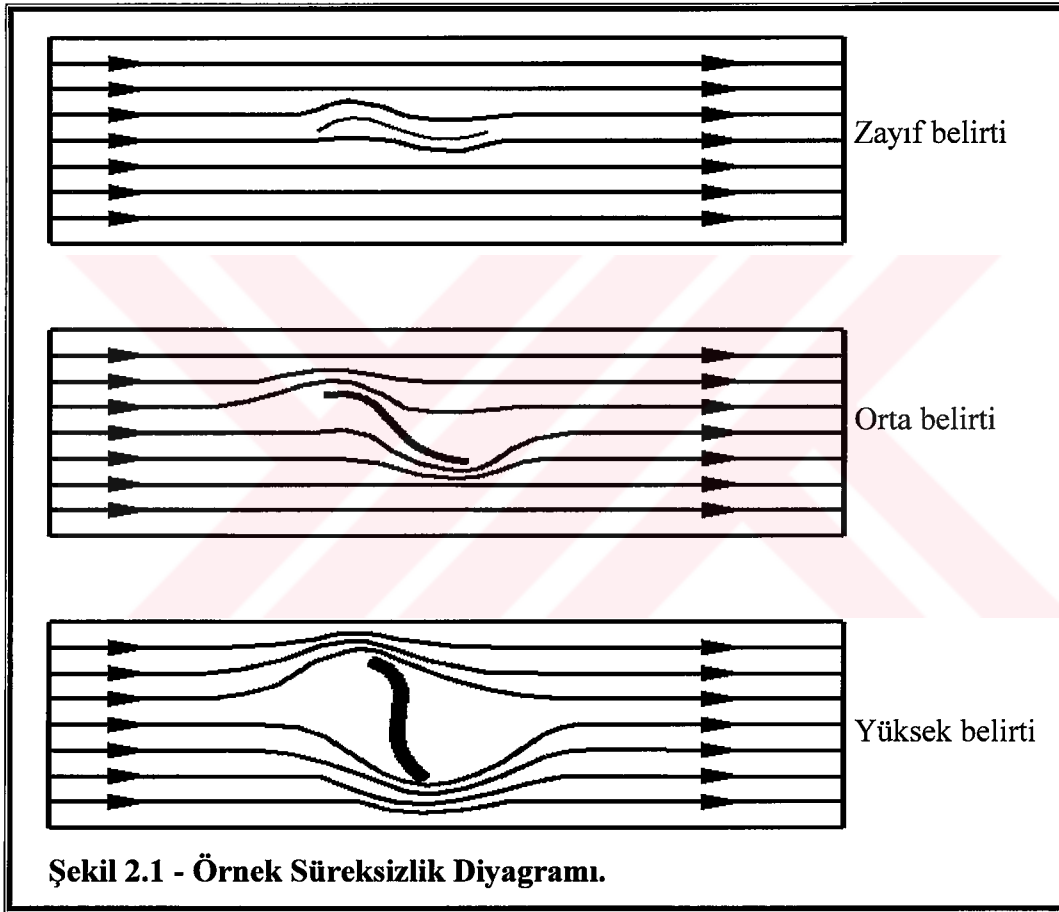
Süreksizlikleri mikro ve makro olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Tane sınırları, kristal örgüdeki boşluklar ve çarpıklıklar mikro süreksizlikler olup, klasik tahribatsız test yöntemleriyle algılanmaları mümkün değildir. Makro süreksizlikler malzemenin üretimi, şekillendirilmesi ve işletmede kullanımı sırasında meydana gelir ve tahribatsız yöntemlerle test edilebilirler (Karainci ve ark. 1993) .

Hatalar bir süreksizlik olarak nitelendirilmektedir. Ancak bu süreksizlikler belirlenen standartları aştıkları zaman hata olarak değerlendirilmektedirler.

Süreksizlik konumu, girdap akımı etki alanına göre süreksizliğin bulunduğu yer anlamına gelmektedir (Karainci ve ark. 1993) . Şekil 2.1 de görüldüğü gibi, bir test

numunesinde oluşturulan çeşitli konumlardaki süreksizliklerin girdap akımları yönünü nasıl etkilediği görülmektedir. Girdap akımları süreksizliklerin etrafında dolaşırlar ve böylece manyetik alanda bir değişime neden olurlar ve bu değişim göstergede bir sapma olarak gözlenmektedir.

Yüzeydeki veya yüzeye yakın süreksizlikler için, süreksizlik boyutu ile sapma arasında kaba bir oran vardır. Uygulamada ise duyarlılık, bilinen bir hata için kalibre edilir ve daha sonra malzemedeki süreksizlikler buna göre belirlenir.



2.2.6. Malzemelerin Özellikleri

Tahribatsız test uygulanacak olan malzemenin cinsini ve yapısal özelliklerini önceden bilmenin uygun test parametrelerini doğru seçebilme açısından büyük önemi vardır. Tahribatsız testin ilgi alanı daha ziyade metaller olmaktadır.

Metaller üç önemli özelliğe göre nitelendirilirler. Bunlar;

- Mekanik,

- Fiziksel,

- Korozyon,

dur.

Mekanik özellikler tahribatsız testi en çok ilgilendiren konu olup, kristal yapısı, üretim ve işlem şekli ve malzeme boyutu gibi faktörlerden etkilenebilir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde aşağıdaki büyüklükler ölçülmektedir.

- Mukavemet,

- Süneklik,

- Kırılganlık,

- Sertlik.

A - Mukavemet

Mukavemet; malzemenin deformasyona uğramaksızın bir yükü taşıyabilme yeteneğidir. Mukavemet; gerilme, yorulma ve sürünme olmak üzere üç genel gruba ayrılır.

Gerilme mukavemeti, çekme uygulanan bir metalin kopmaya karşı gösterdiği direnç olup, buna “kopma gerilmesi mukavemeti” de denir. Ayrıca, çekilen metalin kalıcı deformasyona uğrayıncaya kadar gösterdiği dirence de “sünme mukavemeti” denir.

Yorulma mukavemeti, periyodik olarak yüke maruz kalan bir metalin kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir.

Yüksek sıcaklıkta gerilime maruz kalan bir metalin özellikleri oda sıcaklığında gerilime maruz kalanından daha yüksektir. Yüksek sıcaklıkta yük altında kalan bir metal, sürekli olarak plastik deformasyona uğrar. Buna “sürünme” denir. Sürekli olarak sürünmeye maruz kalan bir metalin boyu gittikçe uzar ve kesiti incelir. Yükü taşımadığı anda da kopar.

Sürünme mukavemeti, yüksek sıcaklıkta strese maruz kalan bir metalin, verilen bir süre içerisinde belli bir deformasyona karşı gösterdiği dirençtir.

B - Süneklik

Süneklik, plastik deformasyona maruz kalan bir malzemenin kopmaksızın uzama yeteneğidir. Süneklik, gerilme mukavemeti testi ile tespit edilir ve metalin boyuna göre uzama miktarının yüzdesi olarak ifade edilir.

C - Kırılmalık

Kırılmalık dayanımı, metalin darbeye karşı gösterdiği dirençtir. Darbe çentik testi ile belirlenir.

D - Sertlik

Sertlik malzemenin mukavemeti ile ilgilidir. Mühendislik uygulamalarında sertlik baskıya karşı direnç olarak düşünülür. Bu, test edilen malzemenin yüzeyine

bastırılan bir yabancı parçanın nüfuziyeti olarak kabul edilir ve uygulanan yönteme göre Brinell, Vickers v.b. birimlerle ifade edilir (Avinç ders notları 1999) .

2.3. Girdap Akımları İle Tahribatsız Muayene

Girdap Akımları, yüzey ve yüzeyaltı hataların tespiti için uygun bir yöntemdir. Yöntem elektrik iletkenliğe sahip bütün metal ve alaşımlarına uygulanabilir. Ancak ferromanyetik olmayan malzemelerde daha etkindir.

2.3.1. Tarihsel Gelişim

Girdap Akımları sözcüğü, Eddy Current veya Foucault Akımlarına uzanır. Bu metodla süreksizliklerden başka diğer malzeme özelliklerinin algılanması da mümkündür.

Girdap Akımları üzerine araştırmalar 1831 tarihinde Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu bulmasıyla başlamıştır. Elektromanyetik indüksiyon kavramı pile bağlı bir sargı devresinin açılıp kapanması neticesinde herhangi bir iletkenlik teması olmayan ikinci bobin devresinde meydana gelen elektrik akımının bulunması ile ortaya çıkmıştır.

Daha sonra Maxwell elektromanyetik alanlar teorisini buldu. 1871' lerde ise Hughes girdap akımları ile ilk ölçümleri yaptı. Bu ölçümler;

- Malzemelerin elektrik iletkenliği,
- Malzemelerin manyetik geçirgenliği,
- Bunların sıcaklıkla değişimi olmuştur.

O günlerde laboratuvar uygulamalarından atölyeye geçilmedi. Çünkü o günlerin mühendisliği ve teknolojisi buna gereksinim duymamıştır. 1920' lerde Kratz cidar kalınlığı ölçen bir girdap akımı sistemi geliştirdi. 1930 – 35' te Forrow kaynaklı

boruların kontrolü için bir sistem geliştirdi. 1940' larda Förster girdap akımlarıyla çalışan sayısız sistemlerin geliştirilmesine öncülük etti (zden ve ark. 1979).

2.3.2. Elektromanyetik Alan ve Girdap Akımları

Zamanla değişen manyetik alana maruz kalan bütün iletkenlerde girdap akımları bulunur. Tasarımcılar bazen bu akımları verimli amaçlarla kullanılabilmektedirler. Bu kullanımlara en iyi iki örnek girdap akımları ile tahribatsız muayene ve indüksiyon fırınlarıdır. Bazı durumlarda girdap akımları, transformatör çekirdeklerinde ve elektrik motorlarında olduğu gibi istenmeyen etkiler meydana getirmektedir. İstenen ve istenmeyen etkileriyle girdap akımları 1831 yılında Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonun farkına varmasından sonra teorik ve deneysel çalışmalarda önemli bir uğraş alanı olmuştur. Faraday deneyinin sonuçları ve verdiği fikirler doğrultusunda Maxwell (Maxwell 1960), daha önce yapılmış çalışmaları da (Coulomb, Ampere, Biot - Savart) göz önüne alarak elektromanyetizmanın temel denklemlerini oluşturmasından sonra bütün elektromanyetik spektrum dahilinde oluşturulan modellerin belli değer sınırlarına göre matematiksel olarak incelenebilmesi girdap akımlarının araştırılmasını ve bilimsel olarak anlaşılmasında sağlamıştır.

Maxwell denklemleriyle oluşturulan teorik modeller, girdap akımlarının iletkenler içerisinde davranışlarının incelenmesinde temel olduğundan bu denklemlerin incelenmesi gerekmektedir.

2.3.2.1. Elektromanyetik Alan ve Deri Etkisi

Makro ölçümlerde elektromanyetik olaylar Maxwell denklemleri ile tanımlanır. Bu denklemler;

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

olarak verilmiştir.

Metallerde serbest yük yoğunluğunun (ρ) sıfır olduğunu kabul ederek, dik koordinat sisteminde bulunan bir metal, eksenlerin kesiştiği noktadan uzakta XZ – düzlemine paralel ve Y – eksenine dik olarak ince bir levhadan geçen akımın yarattığı pozitif Z – yönündeki bir manyetik alan içine yerleştirerek, metal içindeki manyetik alan şiddetinin değişimini gösteren bir denklem elde edelim.

Denklem (2.6), (2.7) ve (2.3)' ü kullanarak;

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

denklemini elde ettikten sonra eşitliğin her iki tarafı diferansiyel operatör ile vektörel olarak çarpılırsa,

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{H} = \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (2.9)$$

denklemini elde edilir. Herhangi bir A vektörü için,

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} \quad (2.10)$$

özdeşliği gözönüne alınır ve

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.11)$$

eşitliği kullanılırsa, denklem (2.9)

$$-\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{H} = \vec{\nabla} \times \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{E} \quad (2.12)$$

şekline girer. Denklem (2.4) kullanılırsa;

$$\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{H} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

tek değişkenli diferansiyel denklemi elde edilmiş olur. Bu noktada manyetik alan şiddetinin zamanla sinüsoidal olarak değişen bir yapıda ve $H = H_0 \exp(i \omega t)$ şeklinde olduğunu kabul edersek;

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i \omega \vec{H}_0 \exp(i \omega t) = i \omega \vec{H} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 \vec{H}_0 \exp(i \omega t) = -\omega^2 \vec{H} \quad (2.15)$$

denklemlerini elde ederiz. Bu denklemleri, denklem (2.13) de yerine koyarsak,

$$\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{H} = i \omega \mu \sigma \vec{H} - \omega^2 \mu \varepsilon \vec{H} \quad (2.16)$$

$$\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{H} - k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.17)$$

$$k^2 = i \omega \mu (\sigma + i \omega \varepsilon) \quad (2.18)$$

denklemini elde edilmiş olur.

Metal içindeki akımlar YZ- düzleminde ve Y- eksenine paralel, manyetik alan şiddetinin de Z – eksenini yönünde olmasından dolayı diferansiyel operatörü,

$$\bar{\nabla} \equiv \frac{d}{dx} \hat{x} \quad (2.19)$$

şekline girer. Bu durumda denklem (2.16) tekrar yazıldığında;

$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} - k^2 H_z = 0 \quad (2.20)$$

ve bu diferansiyel denklemin çözümü;

$$H_z = C_1 \exp(-kx) + C_2 \exp(kx) \quad (2.21)$$

şeklindedir. C_1 ve C_2 sabitleri belirlenen özel sınır şartlarına göre değer alacak katsayılardır. C_2 katsayısı sonsuzda sıfır olur.

Böylece denklem (2.21),

$$H_z = C_1 \exp(-kx) \quad (2.22)$$

şekline girer. Burada k_1 değeri,

$$k_1 = [i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)]^{1/2} \quad (2.23)$$

şeklindedir. Metaller için $\omega\varepsilon$ değeri çok küçük olduğundan denklemden çıkartılabilir. Bu durumda denklem (2.22),

$$H_z = C_1 \exp(-k_2 x) \quad (2.24)$$

olur ve k_2 değeri;

$$k_2 = (iw\mu\sigma)^{1/2} = \frac{1+i}{\sqrt{2}}(w\mu\sigma)^{1/2} \quad (2.25)$$

$$i = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \quad (2.26)$$

şekline dönüşür ve metal içindeki düzlem dalğanın ilerleme sabiti olarak isimlendirilir. Denklem (2.25) de reel ve sanal kısımlar oluşunun özelliği (2.24) yerine konulunca açıkça görülmektedir.

$$H_z = C_1 \exp\left[-\frac{w\mu\sigma}{2}x\right] \exp\left[-i\left(\frac{w\mu\sigma}{2}\right)^{1/2}x\right] \quad (2.27)$$

Reel kısım elektrik alanın metal kalınlığının artmasıyla üstel şekilde azaldığını ve sanal kısım ise metal kalınlığının artmasıyla faz açısındaki geri kaymanın doğrusal olarak arttığını göstermektedir. C_1 sabiti $x = 0$ da hesap edilirse, $C_1 = H_{oz}$ olur. Bu durumda denklem (2.26),

$$H_z = H_{oz} \exp\left[-\frac{1+i}{\sqrt{2}}(w\mu\sigma)^{1/2}x\right] \quad (2.28)$$

olmaktadır.

Manyetik alanın iletken içinde oluşturduğu elektrik akımının durumunu belirleyecek ifadeler denklem (2.23) kullanılarak elde edilebilir.

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{J} \quad (2.3)$$

$$\frac{dH_z}{dx} = -J_y \quad (2.29)$$

Denklem (2.28) ve (2.29) birleştirilirse,

$$J_y = -\frac{d}{dx} \left\{ H_{oz} \exp \left[-\frac{1+i}{\sqrt{2}} (w\mu\sigma)^{1/2} x \right] \right\} \quad (2.30)$$

$$J_y = (1+i) \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} H_{oz} \exp \left[-(1+i) \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} x \right] \quad (2.31)$$

$x = 0$ da yüzeydeki akım yoğunluğu,

$$J_{oy} = (1+i) \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} H_{oz} \quad (2.32)$$

şeklindedir. Denklem (2.32) ve (2.7) birleştirilerek iletken yüzeyindeki elektrik alan;

$$E_{oy} = (1+i) \left(\frac{w\mu}{2\sigma} \right)^{1/2} H_{oz} \quad (2.33)$$

şeklinde bulunur. Akım yoğunluğunun iletken derinliğiyle değişimini veren ifade denklem (2.31) ve (2.32) birleştirilerek elde edilebilir.

$$J_y = J_0 \exp \left[-\left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} x \right] \exp \left[-i \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} x \right] \quad (2.34)$$

Denklem (2.34) de birinci üstel fonksiyon malzeme içinde oluşan girdap akımlarının derinlik ile azalmasını, ikinci üstel fonksiyon ise girdap akımlarının faz gecikmesinin derinlik ile değişimini vermektedir.

Girdap akımları ile tahribatsız muayenede malzeme içindeki akım miktarı ile yüzeydeki akım miktarının oranının $1 / e = 0.37$ olduğu değer standart dalma derinliği olarak kabul edilmektedir. Yani;

$$\frac{J_y}{J_0} = e^{-1} = 0.37 \quad (2.35)$$

şartının sağlanabilmesi $(w \mu \sigma / 2)^{1/2} x$ değerinin bire eşit olmasını gerektirmektedir. Bu terimdeki x ifadesi standart dalma derinliğini ifade ettiğinden uluslararası yayınlarda δ ile ifade edilmektedir. Buna göre, standart dalma derinliğini ifade eden denklemler;

$$\left(\frac{w \mu \sigma}{2}\right)^{1/2} \delta = 1 \quad (2.36)$$

$$\delta = \left(\frac{2}{w \mu \sigma}\right)^{1/2} = \left(\frac{1}{\pi f \mu \sigma}\right)^{1/2} \quad (2.37)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde;

$$\pi = 3.1416$$

f = Frekans (hertz)

μ = Manyetik geçirgenlik katsayısı

δ = Standart dalma derinliği (m)

σ = İletkenlik (mhos/m)

Manyetikleşmeyen metaller için;

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$$

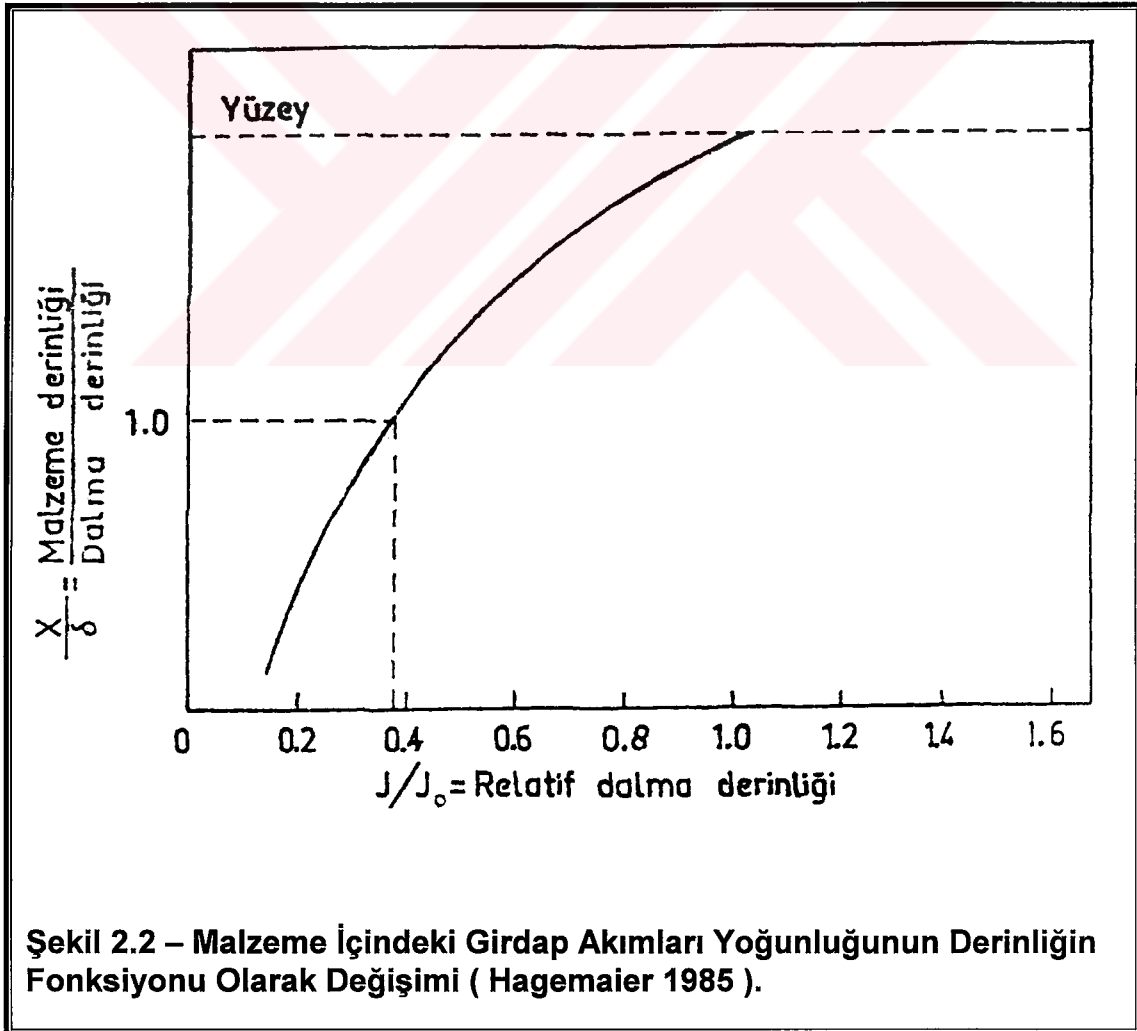
Manyetikleşen metaller için;

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.38)$$

μ_r = Relatif manyetik geçirgenlik katsayısı

μ_0 = Boşluk için manyetik geçirgenlik katsayısıdır.

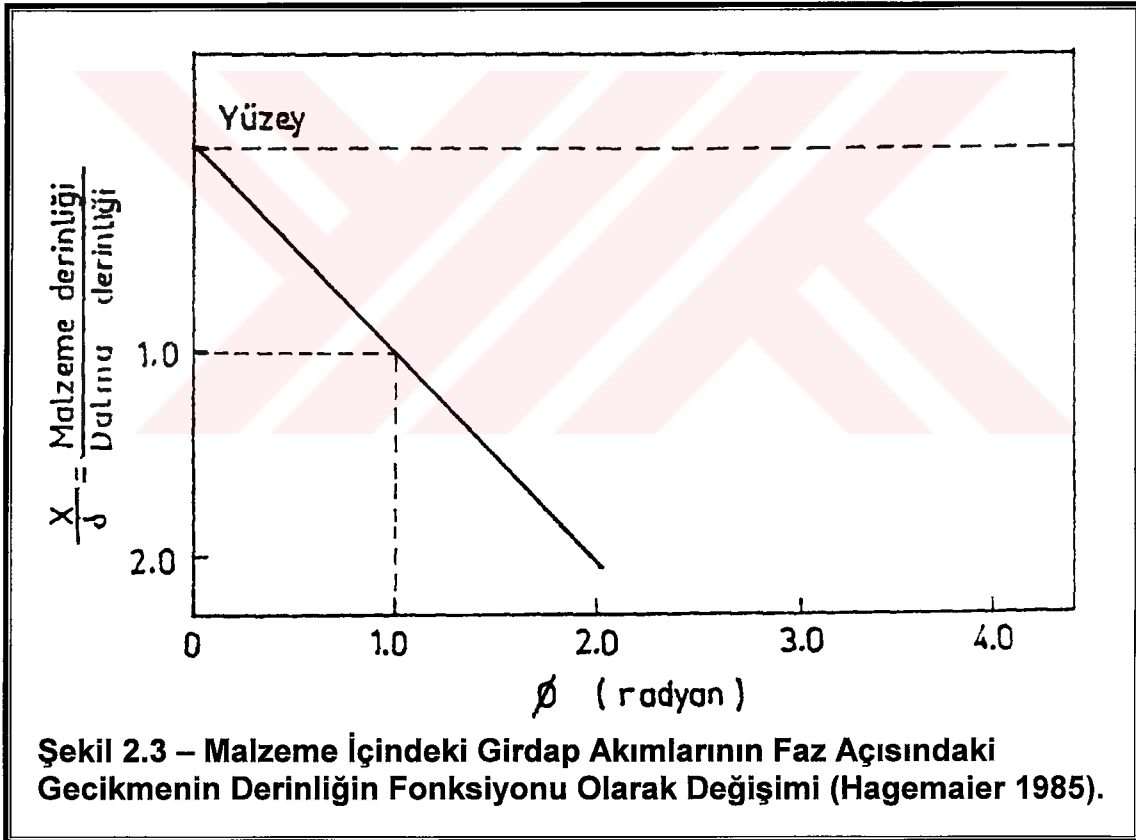
Malzeme içinde oluşan girdap akımları derinlik arttıkça azalmaktadır. Bu değişim test frekansına, malzemenin elektriksel iletkenliğine ve manyetik geçirgenlik katsayısının değerine bağlıdır. Girdap akımlarının derinlikle değişimi şekil 2.2 de görülmektedir.



Yüzeydeki akım yoğunluğuna göre malzeme içindeki akımlardaki faz gecikmesi, girdap akımları ile malzeme testinin bir başka çeşididir. Faz gecikmesi derinlik ile lineer olarak değişmektedir. Denklem (2.34) den faz açısı ile derinlik ilişkisi,

$$\phi = x \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilebilir. Standart dalma derinliğinde faz gecikmesi bir radyan (57°) kadardır. Şekil 2.3 de faz açısındaki gecikmenin derinliğin fonksiyonu olarak değişimi görülmektedir.



Bir ortamda toplam elektrik alanının toplam manyetik alana oranı bu ortamın karakteristik empedansı olarak isimlendirilir.

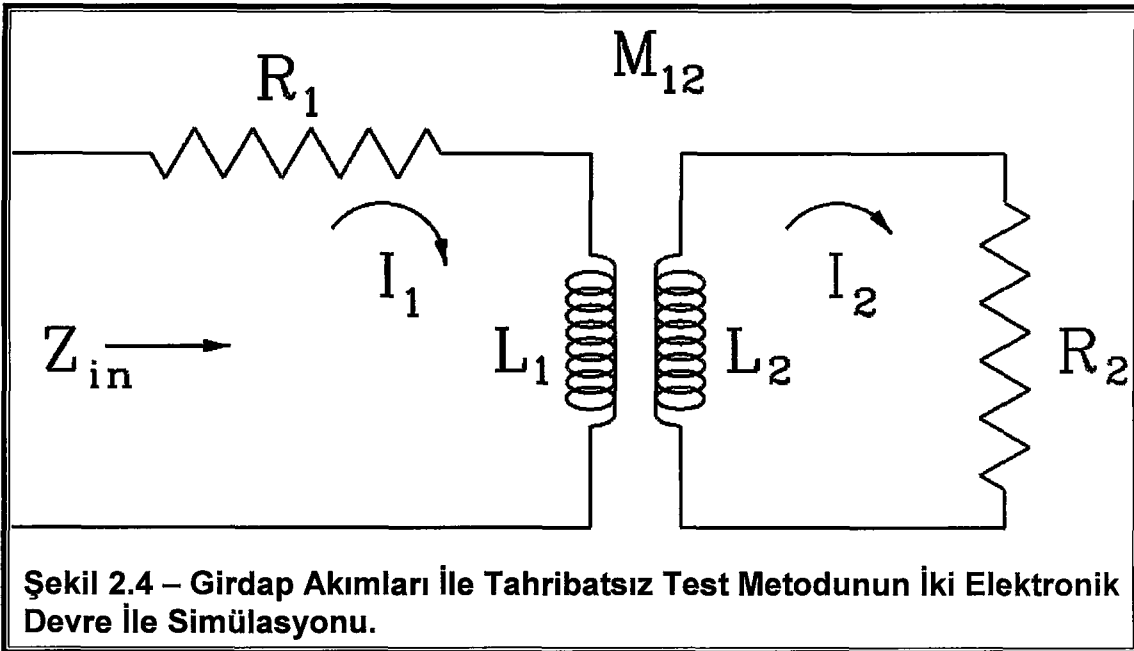
Denklem (2.33) kullanılarak;

$$Z_0 = \frac{E_{oy}}{H_{oz}} = (1+i)\left(\frac{w\mu}{2\sigma}\right)^{1/2} = \left(\frac{iw\mu}{\sigma}\right)^{1/2} \quad (2.40)$$

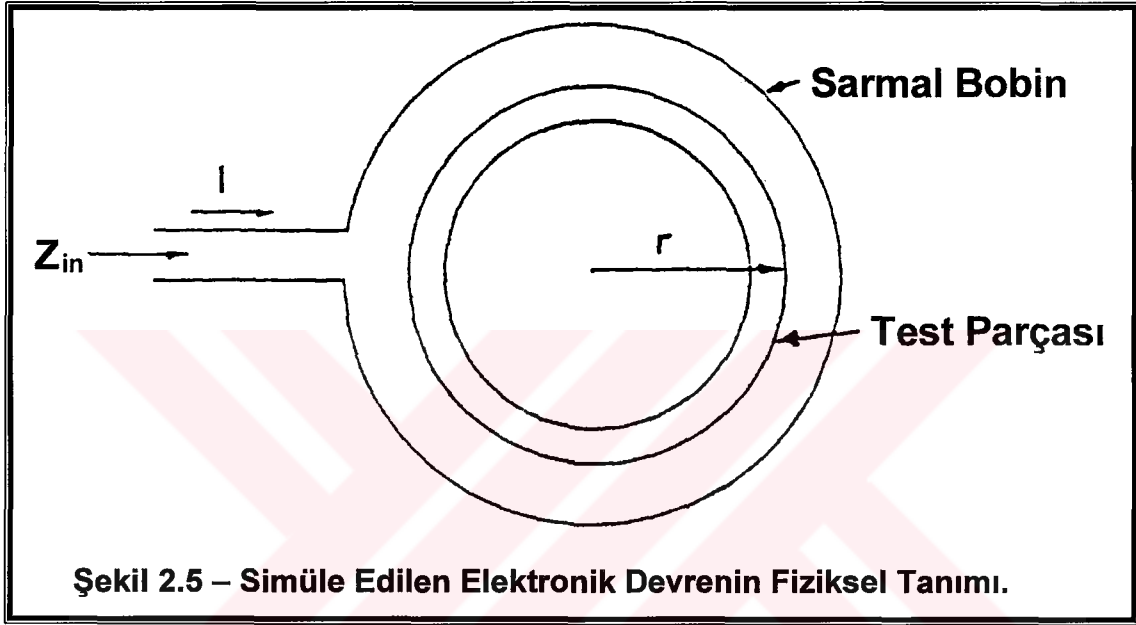
şeklinde iletken bir ortam için karakteristik empedans ifadesi bulunabilir. Denklemdeki $(iw\mu/\sigma)$ terimi, $x = 0$ değeri ile elde edildiğinden bazen yüzey empedansı olarak isimlendirilmektedir. Bununla beraber (2.28), (2.31) ve (2.32) denklemlerinin incelenmesi durumunda düzlem dalga koşulunda E_y / H_z oranı yüzey empedans ifadesini vermektedir. Karakteristik empedans uygulanan alan frekansının ve ortam özelliklerinin bir fonksiyonudur.

2.3.2.2. İki Bobin Sisteminin Simülasyonu

Girdap akımlarıyla tahribatsız test metodu en basit yolla şekil 2.4 de görüldüğü gibi iki bobin devresiyle mümkün olabilmektedir. Birincil devrede self indüktansı L_1 seri rezistans R_1 ikincil devrede self indüktans L_2 ve iletkenlik $G_2 = 1 / R_2$ olacak şekilde iki bobinin birbirini etkilemesi sonucu aralarında oluşan indükleme katsayısı M_{12} olduğunda $L_2 G_2$ elementinin düşük değerleri için iyi bir simülasyon vermektedir.



Kullandığımız simülasyon devresinin fiziksel tanımını şekil 2.5 de görüldüğü gibi üzerinden akım geçen bir bobin ve içinde girdap akımlarının oluştuğu iletken bir malzemedan ibarettir. Bobine ya da diğer bir deyişle birincil devreye uyguladığımız V gerilme voltajı devrelerde sırasıyla I_1 ve I_2 akımlarını oluşturmaktadır. Devrelerin çalışması standart elektrik devre prensiplerinin kullanılması ve iki ayrı diferansiyel denklem yardımıyla ifade edilebilir.



Şekil 2.5 – Simüle Edilen Elektronik Devrenin Fiziksel Tanımı.

$$R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \frac{dI_2}{dt} = V \quad (2.41)$$

$$M_{12} \frac{dI_1}{dt} + L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 = 0 \quad (2.42)$$

Bu iki denklemin çözümü için, başlangıçta devredeki bütün akımları sıfır kabul ederek, diferansiyel operatörü sanal bir değişken ile yerdeğiştirip, Laplace transforasyonunu uyguladığımızda,

$$\frac{d}{dt} \rightarrow s = z + i \quad (2.43)$$

$$(R_1 + sL_1)I_1(s) - sM_{12}I_2(s) = V(s) \quad (2.44)$$

$$-sM_{12}I_1(s) + (R_2 + sL_2)I_2(s) = 0 \quad (2.45)$$

elde edilen bu iki denklemden (2.43) I_2 için çözümlenerek elde edilen diğer denklem

(2.42) de kullanılırsa,

$$(R_1 + sL_1)I_1(s) - \frac{s^2 M_{12}^2}{R_2 + sL_2} I_1(s) \quad (2.46)$$

denklemini elde ederiz. Böylece birincil bobin empedansı,

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I_1(s)} = R_1 + sL_1 - \frac{s^2 M_{12}^2}{R_2 + sL_2} \quad (2.47)$$

şeklinde hesap edilebilir. Denge şartlarında $s = i\omega$ ifadesi kullanılarak;

$$Z = R_1 + i\omega L_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2 + sL_2} \quad (2.48)$$

$$M_{12} = k_c^2 L_1 L_2 \quad (2.49)$$

denklemlerini oluşturabiliriz. Burada k_c etkileşim katsayısıdır.

Etkileşim katsayısı bir bobinde oluşan manyetik akının diğer bobini etkileme oranıdır. Örnek olarak ideal koşullarda $k_c = 1$ için birinci bobinde oluşan manyetik akı diğer bobine hiçbir kayıp olmadan geçer. Elde edilen son denklem tekrar düzenlendiğinde,

$$Z = R_1 + i\omega L_1 + \frac{\omega^2 k_c^2 L_1 L_2 (R_2 - i\omega L_2)}{R_2^2 + \omega L_2^2} \quad (2.50)$$

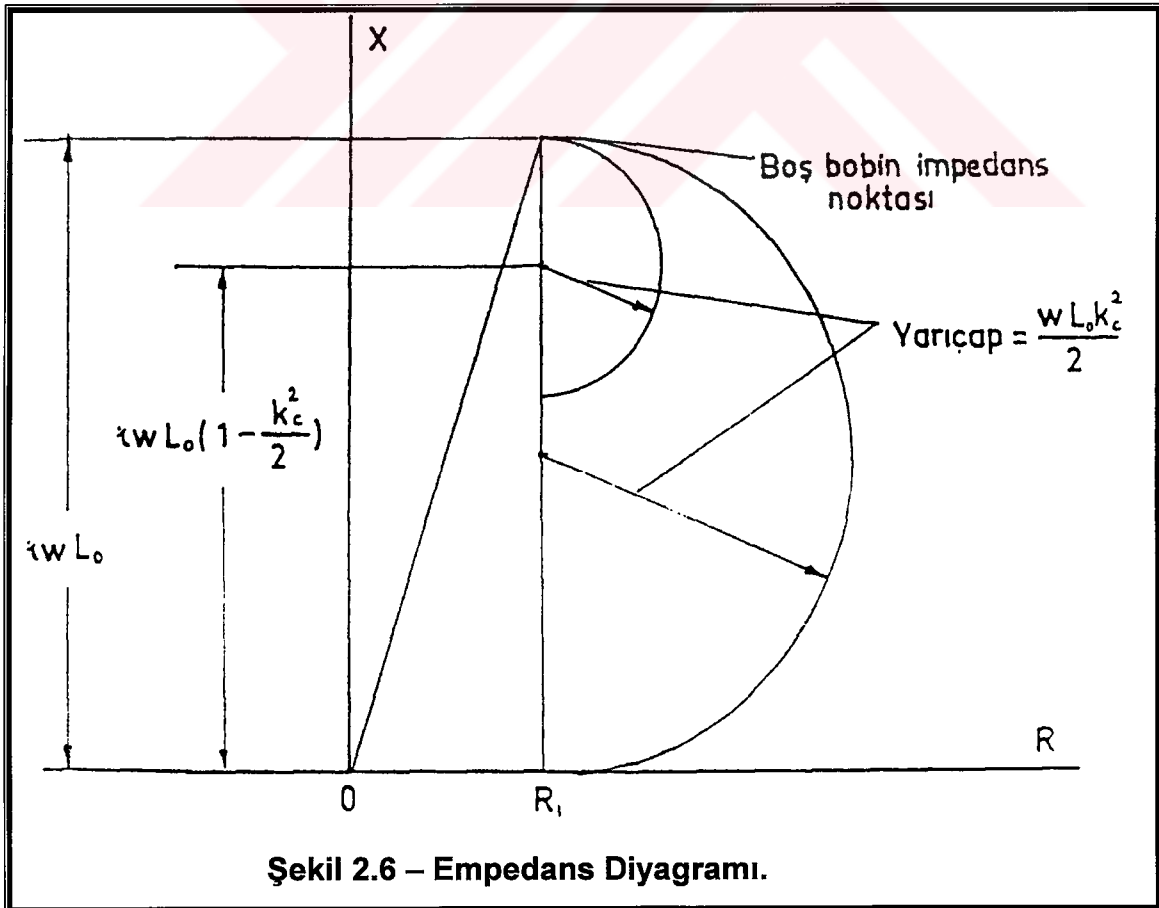
$$Z = R_1 + i\omega L_1 + \omega k_c^2 L_1 \left[\frac{R_2 / \omega L_2 - i}{R_2 / \omega^2 L_2^2 + 1} \right] \quad (2.51)$$

denklemlerini elde etmiş oluruz. Boş bobin empedansını L_0 ve test malzemesinin iletkenliğini de $G_2 = 1 / R_2$ şeklinde gösterirsek,

$$Z = R_1 + i\omega L_0 + \omega L_0 k_c^2 \left[\frac{(\omega L_2 G_2)^{-1} - i}{(\omega^2 L_2^2 G_2^2)^{-1} - 1} \right] \quad (2.52)$$

denklemini elde ederiz. Köşeli parantez içindeki terimler Reaktans – Direnç gösteriminde dördüncü bölgede merkezleri $x = 0$, $y = i / Z$ ve yarıçapı $1 / 2 (\omega L_2 k_c^2)$ olan yarı çember denklemlerini ifade etmektedir.

Sabit frekans altında, değişken etkileşim katsayısı k_c ve referans numarası $(\omega L_2 G_2)$ için çizilen empedans diyagramı şekil 2.6 da görülmektedir.

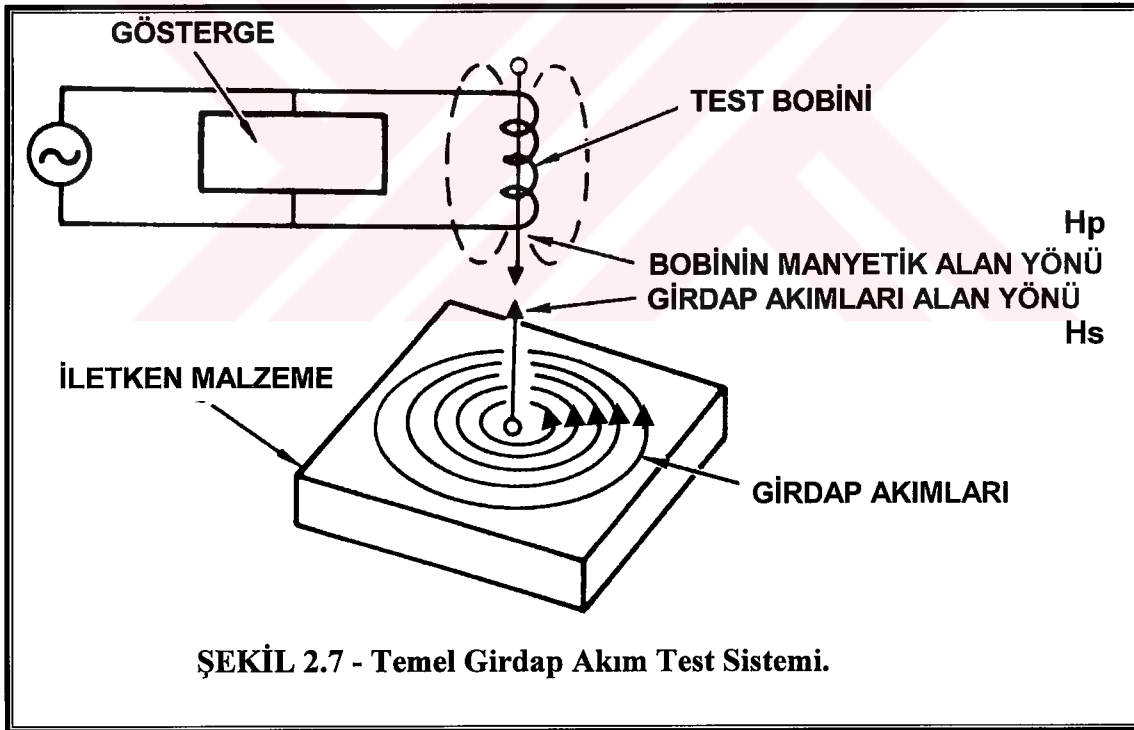


2.3.3. Temel Prensipler

2.3.3.1. Malzeme İçinde Girdap Akımlarının Üretilmesi

Bir manyetik alan tarafından iletken bir malzemede oluşturulan alternatif akıma “Girdap Akımları” denir. Girdap akımları aynı merkezli bir seri daire şeklindedir. Girdap Akımlarının bulunduğu düzlem, onu oluşturan manyetik alana diktir.

Girdap Akımları testinde, test edilecek malzeme, içinden alternatif akım geçen bir bobinin oluşturduğu alternatif manyetik alan içine yerleştirilir. Alternatif manyetik alan, test parçası içinde girdap akımlarını indükler. Girdap akımlarında bu sırada test parçası civarında ilave bir alternatif manyetik alan oluştururlar. Bu kurgu şekil 2.7 de gösterilmektedir.



Şekilde (H_p) bobinin alternatif manyetik alanını, (H_s) ise test parçası içinde meydana gelen girdap akımlarının manyetik alanını göstermektedir. Her iki halde de meydana gelen iki alternatif manyetik alan üstüste binmekte, diğer bir deyişle, test bobini civarındaki manyetik alan, içine bir iletken malzeme girmesi durumunda modifiye edilmektedir.

A-) Birincil Manyetik Alan: İletken bir malzemedede girdap akımlarının oluşabilmesi için zamanla değişen bir manyetik alana gereksinim vardır. Bu değişken manyetik alan, alternatif akım taşıyan bir bobin tarafından sağlanabilir. Bobindeki alternatif akım değiştikçe onunla birlikte manyetik alan da değişecektir. İletken malzemenin yüzeyindeki manyetik alan şiddeti, test bobininin boyutuna ve şekline bağlıdır.

B-) Girdap Akımları: Test bobinindeki değişken manyetik alana dik iletkene nüfuz ederek iletkenin yüzeyine paralel, ancak uygulanan manyetik alana dik yönde dairesel olarak girdap akımlarını oluştururlar. Girdap akımlarının akış yönü birincil manyetik alana zıt yönde ve onun değişimiyle aynı hızdadır. İletken malzemenin yüzeyindeki girdap akımlarının şiddeti aşağıdaki değişkenlerin artmasıyla artar.

a-) Birincil manyetik alanın büyüklüğü,

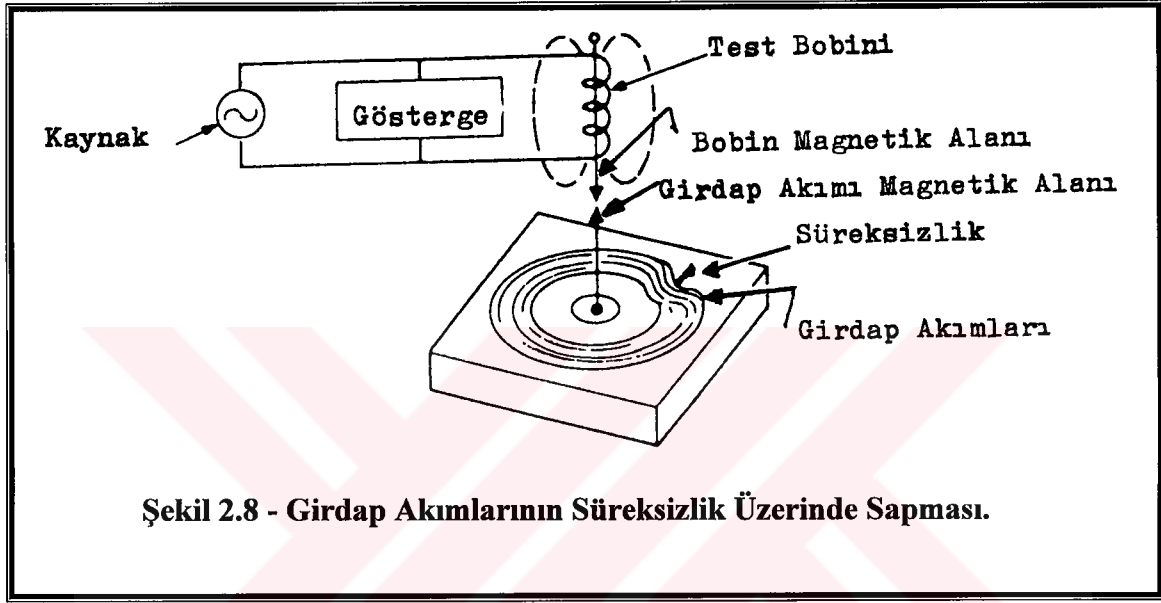
b-) Manyetik alanın değişim hızı (frekans),

c-) Malzemenin elektrik iletkenliği,

d-) Malzemenin elektrik geçirgenliği.

C-) İkincil Manyetik Alan: Girdap akımlarının akış yönündeki değişimi, test bobininin oluşturduğu birincil manyetik alana zıt yönde ikincil bir manyetik alan oluşturur.

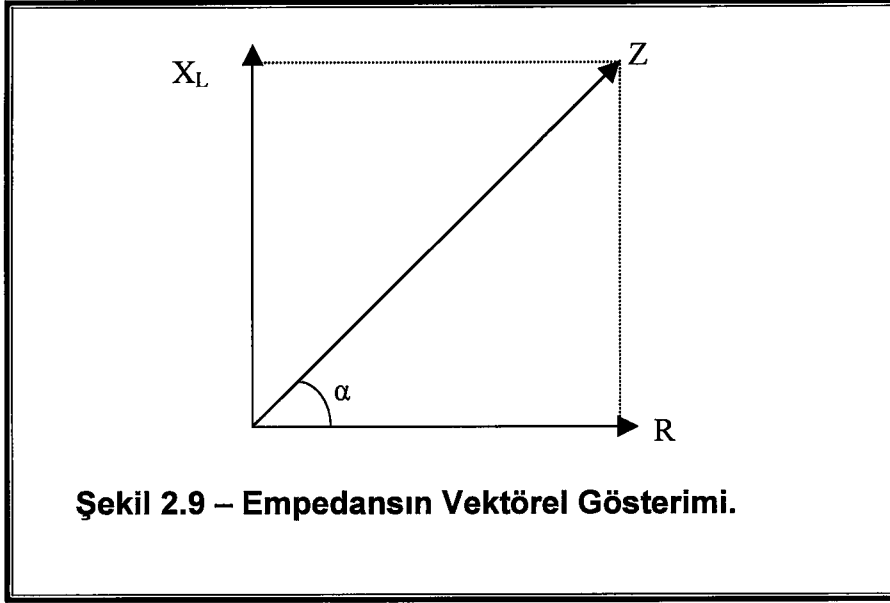
İkincil manyetik alanın birincil manyetik alana zıt yönde olması nedeniyle toplam manyetik alan etkilenir ve test bobininden geçen akımı değiştirir. Akımdaki değişimler, kontrol parçasındaki değişkenlerin (çatlak, boşluk v.s) etkisini belirlemek için cihaz tarafından algılanır ve gösterilirler. Bu olay şekil 2.8 de görüldüğü gibi gerçekleşmektedir. Süreksizlik üzerine gelen girdap akımları sapar. Bu değişim test bobininden algılanır (Karainci ve ark. 1993) .



Girdap akımları testinde, muayene edilen malzeme hakkında bilgi, test bobininin karakteristikleri vasıtasıyla alınır. Çıkış indüksiyonu ya doğrudan bobin üzerinden alınır veya bu amaç için ikinci bir bobin kullanılır (Baykara 1992) .

2.3.3.2 Bobin Empedansı

Empedans (Z), devreden geçen akıma etki eden R direncinin ve X_L indüktif reaktansının bileşkesine verilen isimdir. Bu iki faktörden empedansı tayin etmek ancak onların vektörel toplamları ile mümkün olmaktadır. Bu şekil 2.9 da görülmektedir.



$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (\Omega) \quad (2.53)$$

$$\text{tg}\alpha = \frac{X_L}{R} \quad (2.54)$$

$$X_L = 2\pi f L = \omega L \quad (2.55)$$

Burada;

f = Frekans (hertz),

L = İndüktans (henry),

ω = Açısal frekans (rad / s) olarak ifade edilir.

Girdap akımları test problemlerinde α açısının değeri 60° ile 90° arasında olmalıdır. Çünkü bu açı değerleri arasında test bobini verimli bir şekilde çalışmaktadır.

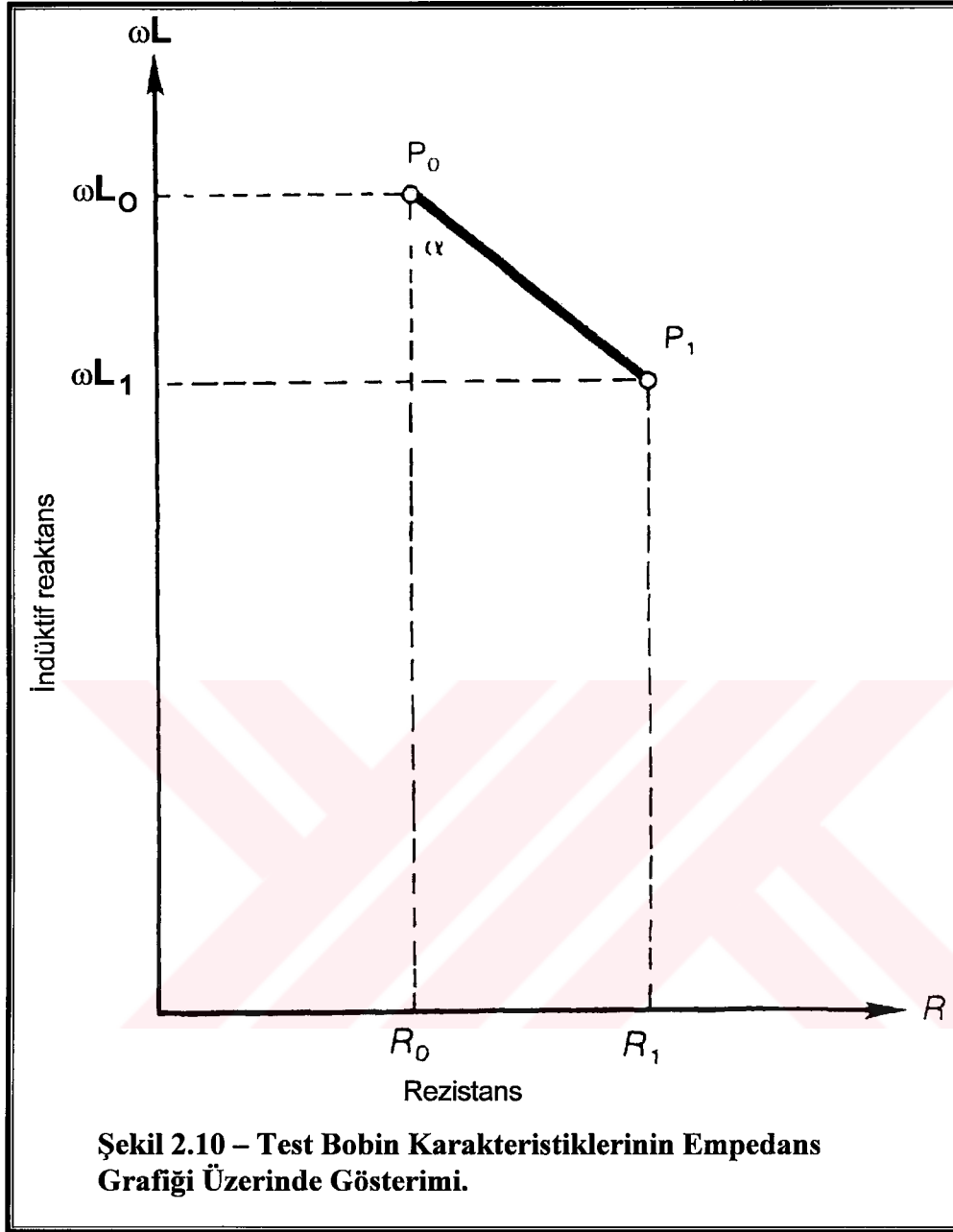
Uzunluğu l , dik kesit yüzeyi (kalınlığı) b olan N sarım sayısına sahip r yarıçaplı bobinin indüktansı (Karainci ve ark. 1993) :

$$L = \frac{0.8(rN)^2}{6r + 9l + 10b} \quad (2.56)$$

eşitliği ile verilir.

Test bobininin empedansı bobin parçaya yaklaştırıldığında değişmektedir. Bobinin manyetik alanı parçada girdap akımlarını indüklemekte ve girdap akımları da birincil manyetik alana ters yönde farklı fazda ikincil bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bu ikincil manyetik alanın büyüklüğündeki ve fazındaki farklılık, bobinin direnç ve indüktansını, dolayısıyla empedansını etkilemektedir. Empedansa meydana gelen değişme, bobinden geçen akımı değiştirecektir. Empedans ölçümüne dayanan sistemler, empedans değişimlerinin bağlı büyüklüklerini göstermektedir (Karainci ve ark 1993).

Bir bobin, üzerinden geçen (I) akımı ve uçları arasındaki (V) potansiyel farkı ile karakterize edilebilir. Bobinin, üzerinden geçen akıma karşı koyması ise “**Empedans**” olarak adlandırılır. Empedans, indüktif reaktans ($X_L = \omega L$) ile rezistansın (R) bir vektörel niceliğidir. Bu niceliklerden (X_L) reaktansını düşey eksen ve (R) rezistansını yatay eksen olarak alıp bir empedans düzlemi çizmek yaygındır. Böyle bir kurgu şekil 2.10 da görülmektedir.



Test parçasının bulunmadığı halde, boş test bobini, koordinatları ($X_{L0} = \omega L_0$) ve (R_0) olan bir karakteristik empedansa (P_0) sahiptir. Eğer test bobininin manyetik alanı içine bir test parçası yerleştirilirse boş bobinin orjinal alanı, girdap akımlarının manyetik alanıyla modifiye edilecektir. Test parçasının etkisi, dolaylı olarak bobinin karakteristik empedansındaki değişim ile izah edilebilir. Bu durumda bobinin empedansı göreceli olarak (ωL_1) ve (R_1) değerlerine göre (P_1) noktasına yer değiştirmiştir. Empedansın, test parçasının etkisiyle (P_0)'dan (P_1)'e yer

değiştirmesinin büyüklüğü ve yönü, test parçasının özelliklerinin ve enstrümantasyon karakteristiklerinin bir fonksiyonudur (Baykara 1992, Anonim 1979) .

2.3.3.3. Elektriksel İletkenlik

İletkenlik, bir malzemenin elektrik akımını iletme yeteneğine verilen isimdir. Dirençle zıt yöndedir. Yüksek direnç değerine sahip malzemeler zayıf iletkenliğe, düşük direnç değerine sahip malzemeler yüksek iletkenliğe sahiptir. İletkenlik birimi “mho” dur ve sayısal ifadesi direncin tersidir. Bu şöyle ifade edilebilir.

$$\text{İletkenlik } (\sigma) = \frac{1}{\text{direnç}(R)} \quad (2.57)$$

Bir başka deyişle iletkenlik, malzemede elektronların akış yeteneğinin bir ölçüsüdür. İletkenlik arttıkça verilen bir sürede malzemedden geçen elektron sayısı artar. Her malzemenin kendine özgü bir iletkenlik değeri vardır. Örneğin, bakır, gümüş, altın yüksek iletkenliğe, karbon düşük iletkenliğe sahiptir. Girdap akımları, bir iletken malzemeye uygulanan alternatif manyetik alan tarafından oluşturulan elektron akışıdır. Dolayısıyla malzemenin iletkenliği arttıkça oluşacak girdap akımları da artacaktır. İletkenlik direncin tersi olduğundan “mho / birim uzunluk” olarak gösterilir. Girdap akımları cihazları ile bu birim kullanılarak iletkenlik ölçümleri güç olduğundan daha basit ve kullanışlı %IACS (İnternational Annealed Coper Standart) değeri birim olarak seçilmiştir. Birimin esası, elektrolitik saflıktaki (%99.99 bakır içeren) bakırın iletkenliğinin %100 IACS olarak kabul edilmesine dayanır. Diğer metallerin iletkenlikleri buna göre kıyaslanarak ölçülür (Karainci ve ark. 1993) .

Malzemenin iletkenliği üzerine çok sayıda değişkenin etkisi vardır. Doğru bir ölçüm için diğer değişkenler elimine edilerek sadece bir değişken incelenmelidir.

2.3.3.3.1. İletkenlik Üzerine Etkisi Olan Değişkenler

A-) Kimyasal Bileşim: Saf metallerin veya elementlerin iletkenliği doğrudan kusursuz kristal yapılarına (atom dizilişlerine) göre ölçülür. Fakat gerek alaşımlar gerekse çevremizde gördüğümüz malzemelerin çoğu birden fazla elementten oluşmuştur. Dolayısıyla kristal yapı ve iletkenlik değeri değişmektedir. Alaşım elemanı ilavesiyle iletkenliği artan veya azalan alaşımların bileşimi, iletkenlik ölçümü ile tayin edilebilir.

B-) Isıl İşlem: Isıl işlem metallerin kristal yapılarında değişiklik oluşturduğundan iletkenlik üzerinde etkilidir. Özellikle alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemin uygun şekilde yapılıp yapılmadığı iletkenlik ölçümleriyle tayin edilir.

C-) Soğuk İşlem: Metallerin ısıtılmaksızın şekil değişikliğine uğratılmasına (haddeleme, kesit daraltılması, v.b) “Soğuk İşlem” denir. Soğuk işlem kristal yapıyı değiştirdiğinden iletkenlik üzerinde etkili olur.

D-) Sıcaklık: Bir malzemenin iletkenliği ile sıcaklığı arasında kesin bir ilişki vardır. Sıcaklığın artması kristal yapının büyümesine neden olur. Kristal yapıdaki büyüme ve atomların ısıl hareketi, malzemenin iletkenliğini düşürecektir. İletkenliğin kritik ve toleransların dar olduğu yerlerde ölçüm sıcaklığı mutlaka belirtilmelidir.

Elektrik iletkenliği ölçümlerinden; malzeme cinsinin ayırt edilmesinde, sertlik ölçümlerinde ve ısıl işlem, kimyasal bileşim, fiziksel özellikler ve manyetik geçirgenliğin belirlenmesinde yararlanılmaktadır (Karainci ve ark 1993) .

2.3.3.4. Manyetik Geçirgenlik

Bir devrenin indüktansı ve onun etrafındaki manyetik alanda depo edilebilecek enerji miktarı, büyük oranda, manyetik alanın etki ettiği bölgenin özelliklerine bağlıdır.

Bütün cisimler manyetik geçirgenliklerine göre üç grup halinde toplanmışlardır. Diamanyetik cisimler için μ manyetik geçirgenliği 1'den küçük, paramanyetik cisimler için 1'den büyüktür. Ferromanyetik cisimler için ise 1'den çok daha büyüktür.

Herhangi bir ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenliği sabit olmayıp alan şiddetine bağlıdır.

Malzemenin mıknatıslanabilme yeteneğinin ölçüsüne “Manyetik Geçirgenlik” denir. Bir diğer deyişle “Permeabilite”, bir malzemenin manyetik akı geçişine izin verme yeteneğinin bir ölçüsü olup, B / H oranı ile tanımlanır. Burada, B manyetik akı yoğunluğu ve H manyetik alan kuvvetini gösterir (Karainci ve ark. 1993).

Bir bobin ve dolayısıyla onun manyetik alanı bir manyetik malzemeye uygulandığında malzemedeki akı yoğunluğu miktarı, bobinin tek başına sağladığı akıdan daha büyüktür. Bunun nedeni malzemenin manyetik domainleri tarafından ilave bir akı yoğunluğu oluşturmasıdır. Buna karşılık manyetik olmayan malzemelerde manyetik domainler çok zayıf olup akı yoğunluğu sadece bobinin manyetik alanı tarafından oluşturulur. Bu nedenle, manyetik malzemelerdeki girdap akımlarının manyetik olmayan malzemelerinkinden daha büyük olduğu söylenebilir.

Manyetik olmayan malzemelerde girdap akımları miktarı, doğrudan bobinin manyetik alan kuvvetine bağlıdır. Bu malzemenin iletkenliği, ya da bobinin manyetik alan kuvveti tarafından meydana getirilir.

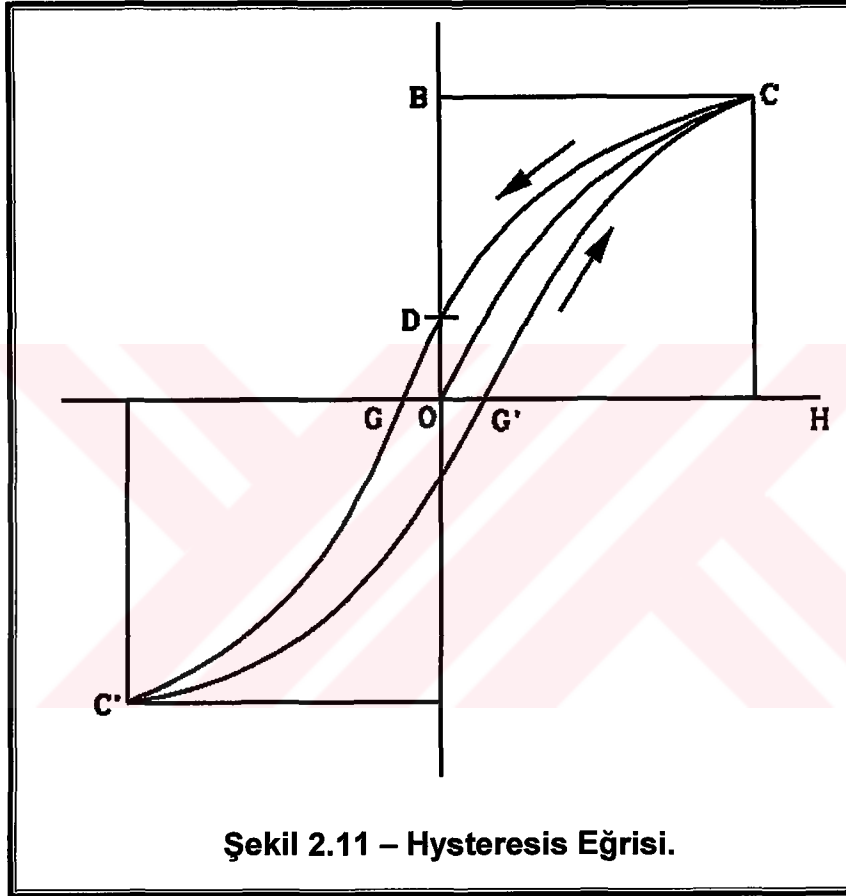
Manyetik malzemelerde, geçirgenliğin girdap akımları üzerine kesin bir etkisi vardır. Bu durum seyirme (hysteresis) eğrisinde gözlemlenebilir (Karainci ve ark. 1993).

2.3.3.4.1. Seyirme (Hysteresis) Eğrisi

Bir demir parçasını mıknatıslarken molekül sel mıknatısların sıralanmalarını değiştirmek için bir iş yapmak gerekir. Bir alternatif akım elektromıknatısında olduğu gibi, saniyede birçok kere önce bir yönde, sonra başka bir yönde sıralanmaları için,

yapılması gereken iş çok büyüktür ve fazla miktarda ısı açığa çıkabilir. Çevrimsel mıknatıslanmadan dolayı demir içinde enerji kaybı olmasına “**Seyirme kaybı**” denir.

Bir ferromanyetik malzemeye sıfırdan itibaren uygulanan akımın istenilen bir maksimum değere kadar artırılması durumu, H alan şiddeti ve B akı yoğunluğu ile bir mıknatıslanma eğrisinde şekil 2.11 de gösterilmektedir.



Mıknatıslanmamış bir malzeme başlangıçta 0 noktasındadır. Mıknatıslama akımı arttırıldığında, manyetik alan şiddeti ile beraber akı yoğunluğu artar ve malzeme C noktasında doyuma ulaşır. C noktasından itibaren akım yavaş yavaş azaltılırsa ilk mıknatıslanma eğrisinden geri dönülmez, ordinatların değeri daha büyük olan bir C – D eğrisinden geri dönülür. Akım tekrar sıfıra indirildiği zaman halkada bir miktar akı kalır ve bu şarta karşılık olan OD ordinatı “ artık mıknatıslanmayı” gösterir. Halkanın

mıknatıslığını tamamen gidermek için akımın yönünü ters çevirmek ve alan şiddetini OG' ye kadar çıkarmak gerekir.

Ters çevrilmiş akım maksimum arttırılmaya devam ederse biraz öncekinin aynı bir maksimum değere kadar gidildiğinde C' noktasına ulaşılır. Sonra akım sıfıra indirilir, yön değiştirilir ve tekrar ilk maksimum değerine getirilir. Bu suretle mıknatıslanma çevrimi $C' - G'$ arası ve oradan da tekrar C noktasına kadar çizilerek tamamlanır. C - C' arasında elde edilen kapalı eğriye “Malzemenin Seyirme Çevrimi” denir (Anonim 1979).

Geçirgenlik bir değişkendir ve girdap akımları üzerinde değişken bir etki gösterir. Yüksek geçirgenlikli bir malzemede bu etki hata belirtilerini gizliyebileceğinden elimine edilmesi gerekir. Geçirgenlik etkisini elimine etmek için test parçası, seyirme eğrisinin doyum noktası civarında değişken olmayan bir manyetik alana tabi tutulur (Mijo 1980).

2.3.3.5. Temas Etkisi

Prob ile test parçası arasında oluşturulan manyetik alan bağlantısına “**Manyetik Temas**” denir. Probun manyetik alan kuvveti probtan uzaklaştıkça azalmakta, dolayısı ile prob ile test parçası arasındaki uzaklığa göre girdap akımlarının şiddeti değişmektedir (Karainci ve ark 1993).

Manyetik temas etkisi; test probunun boyutuna ve şekline, test parçasının yüzey durumuna ve şekline, test parçası üzerindeki kaplama malzemelerin varlığına bağlıdır.

Prob titreşmesi, yani, test işlemi esnasında bobin ile parça arasında oluşan titreşimler çıkış sinyalinde değişimlere neden olur. Bu etkiyi en aza indirebilmek için düşük frekanslar ve geometriye uygun özel problar kullanılması gerekmektedir (Avinç ders notları. 1999).

2.3.3.6. Aralık Faktörü (Lift – Off Effect)

Girdap akımları ile muayenede aralık (prob – deney parçası uzaklığı) faktörü son derece önemlidir. Girdap akımları üretimi bu uzaklığa son derece duyarlıdır. Çok küçük bir aralık değişikliği çok farklı okumalara sebep olur (Anonim 1967) .

Aralık etkisi önemli güçlüklerle de sebep olur. Karışık geometrili büyük yüzeylerin muayene için taranması çok güçtür ve özel problemlere gereksinim vardır. Girdap akımlarının aralık faktörüne olan büyük duyarlılığının sağladığı bir diğer üstünlük ise, manyetik malzeme yüzeyindeki, manyetik olmayan ince kaplama kalınlıklarının ölçülebilmesidir. Korozyon ölçümlerinde de aralık faktörü büyük bir kolaylık sağlar. Korozyona uğramış bir malzemenin yüzeyi çok pürüzlüdür (Özden ve ark. 1979) .

“Aralık Etkisi” manyetik teması etkileyen diğer önemli bir büyüklüktür. Yüzey probun test parçası yüzeyinden uzaklaştırılması ile parçada oluşturulan akımın yoğunluğunda bir düşme olmakta ve böylece test sisteminin çıkış sinyalinde değişim olmaktadır. Girdap akımları testinde istenmeyen bu etkiden iletken bir malzeme üzerindeki iletken olmayan kaplama kalınlığı ölçümünde yararlanılmaktadır (Karainci ve ark.1993) .

2.3.3.7. Doldurma Faktörü

Girdap akımları ile muayenede, muayene edilecek parça ve girdap akımları üreten bobinin birbirlerine göre konumları iki durumda tarif edilebilir.

a – Deney parçası bobinin dışında,

b – Deney parçası bobinin içinde.

Deney parçasının bobinin içinde olduğunu düşünürsek, bobinin içinin doldurulması söz konusudur. Deney parçası üzerinde, bobinin içini doldurduğu ölçüde girdap akımları üretilir (Özden ve ark. 1979) .

Dolgu faktörü tüp şeklindeki malzemelerde, bobin dış çapının tüp iç çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. İyi bir duyarlık elde edebilmek için dolgu faktörü 0.8 – 0.95 arasında olmalıdır. Dolgu faktörü 0.8’ den küçük olduğunda duyarlık yetersiz kalmakta ve sinyal / gürültü oranı küçülmekte, dolayısıyla küçük süreksizliklerin tespiti zorlaşmaktadır (Karainci ve ark 1993) .

Küçük dolgu faktörünün etkisi gücün artırılması ile bir miktar azaltılabilmekte, ancak bu durumda gürültü oranı artmaktadır. Dolgu faktörü tüpteki çöküklerde ve kıvrım yerlerinde değişebilmekte, sabit tutulabilmesi için özel prob tutucuları veya amortisörlü problar kullanılmasını gerektirmektedir (Mijo 1980) .

2.3.3.8. Deri Etkisi

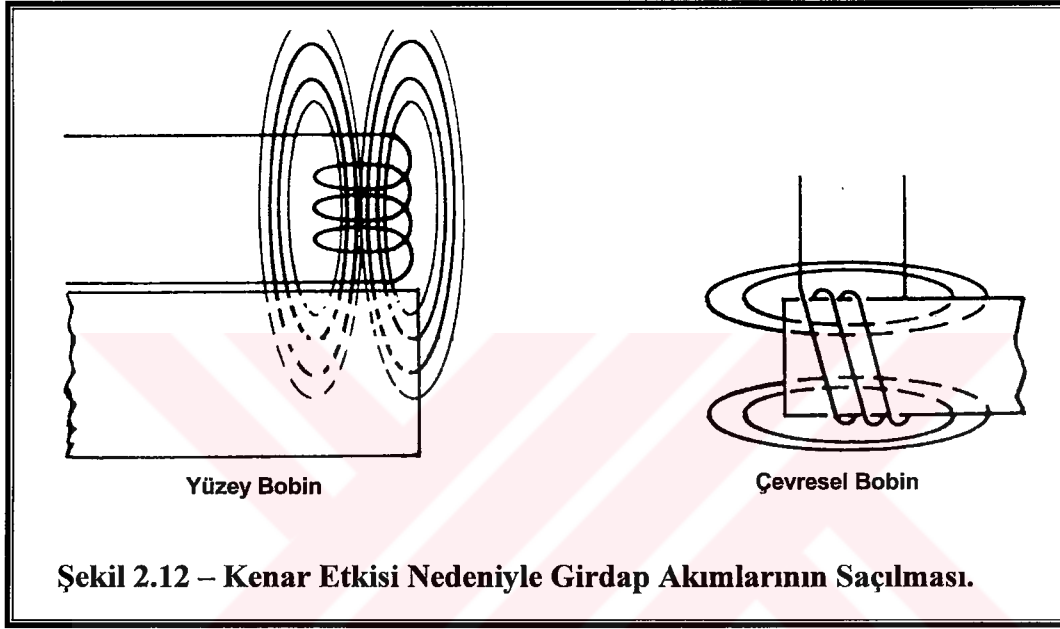
Girdap akımları; malzemeye, yeterli derecede yaklaştırılmış bobinin, değişken manyetik alanı vasıtasıyla ve malzeme yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşacak şekilde meydana gelir. Nüfuziyet derinliği malzemenin manyetik geçirgenliği ve elektriksel iletkenliğinin bir fonksiyonudur ve test frekansı ile azalır. Buna “**Deri Etkisi**” denir (Karainci ve ark. 1993) . Test malzemesinin herhangi bir derinliğinde oluşmuş olan girdap akımları kendi manyetik alanlarını üretirler. Bu manyetik alanlar birincil alanla zıt yöndedir. Bu net (toplam) manyetik alanın düşmesine ve derinlere doğru girdap akımları yoğunluğun azalmasına neden olur. Öte yandan yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde oluşan girdap akımlarının, bobin manyetik alanını zorladığı görülür. Bu nedenle bobin manyetik alanı daha derinlere nüfuz edemez ve üretilen akım yoğunluğu azalır (Mijo 1988) .

2.3.3.9. Kenar Etkisi

Girdap akımları, prob malzemenin kenarına veya sonuna yaklaştığında bozulur. Bu bozulma sonucunda yanıltıcı belirtiler ortaya çıkar. Bu etki düz malzemelerin testi “**Kenar Etkisi**” olarak adlandırılır (Karainci ve ark. 1993) .

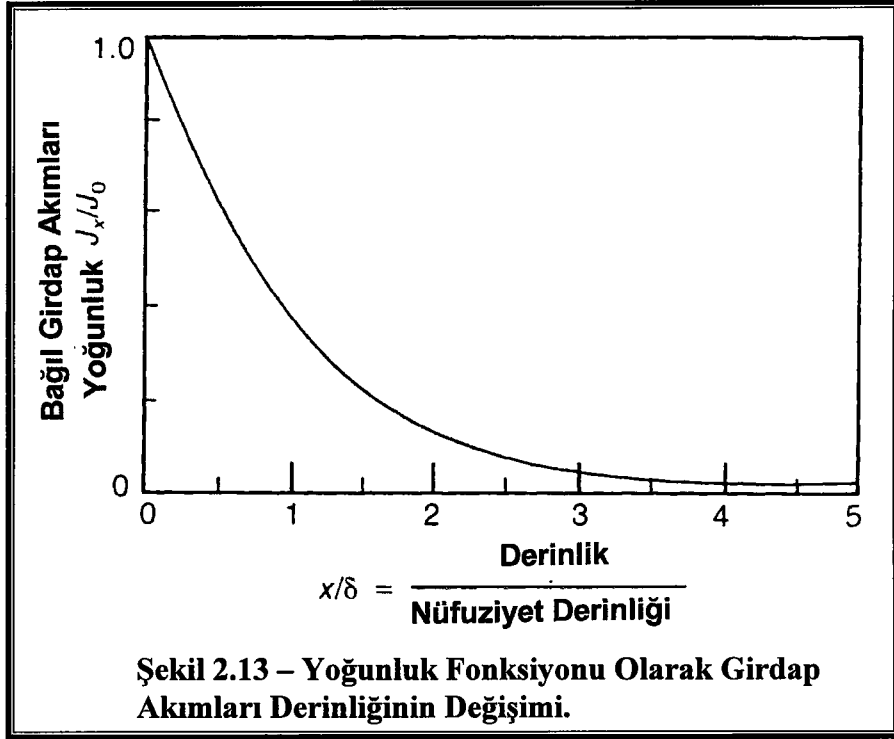
Kenar etkisi genellikle, test bobininin etrafına manyetik zırların sarılması ve bobinin çapının küçültülmesi ile azaltılabilir (Özden ve ark. 1979, Karainci ve ark. 1993).

Şekil 2.12 de yüzey ve çevresel bobinlerle örnek numuneler üzerinde oluşan kenar etkisi görülmektedir (Anonim 1979).



2.3.4. Standart Nüfuziyet Derinliği

Girdap akımları, testi yapılan malzeme içinde uniform olarak yayılmazlar. Akım yoğunluğu yüzeyde ve yüzeyden az aşağıda en fazladır. Yüzeyden aşağılara inildikçe akım yoğunluğu azalır, yüzeyden çok aşağılarda ise akım sıfıra yaklaşır. Bu kurgu şekil 2.13 de görülmektedir.



Girdap akımlarının ferromanyetik olan ve olmayan malzemeler için deneysel nüfuziyet derinliği değişmektedir.

a – Ferromanyetik malzemeler için,

$$\delta = K \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad (2.58)$$

b – Ferromanyetik olmayan malzemeler için,

$$\delta = K \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.59)$$

K = katsayı

ρ = öz direnç ($\mu \Omega \text{ cm}$)

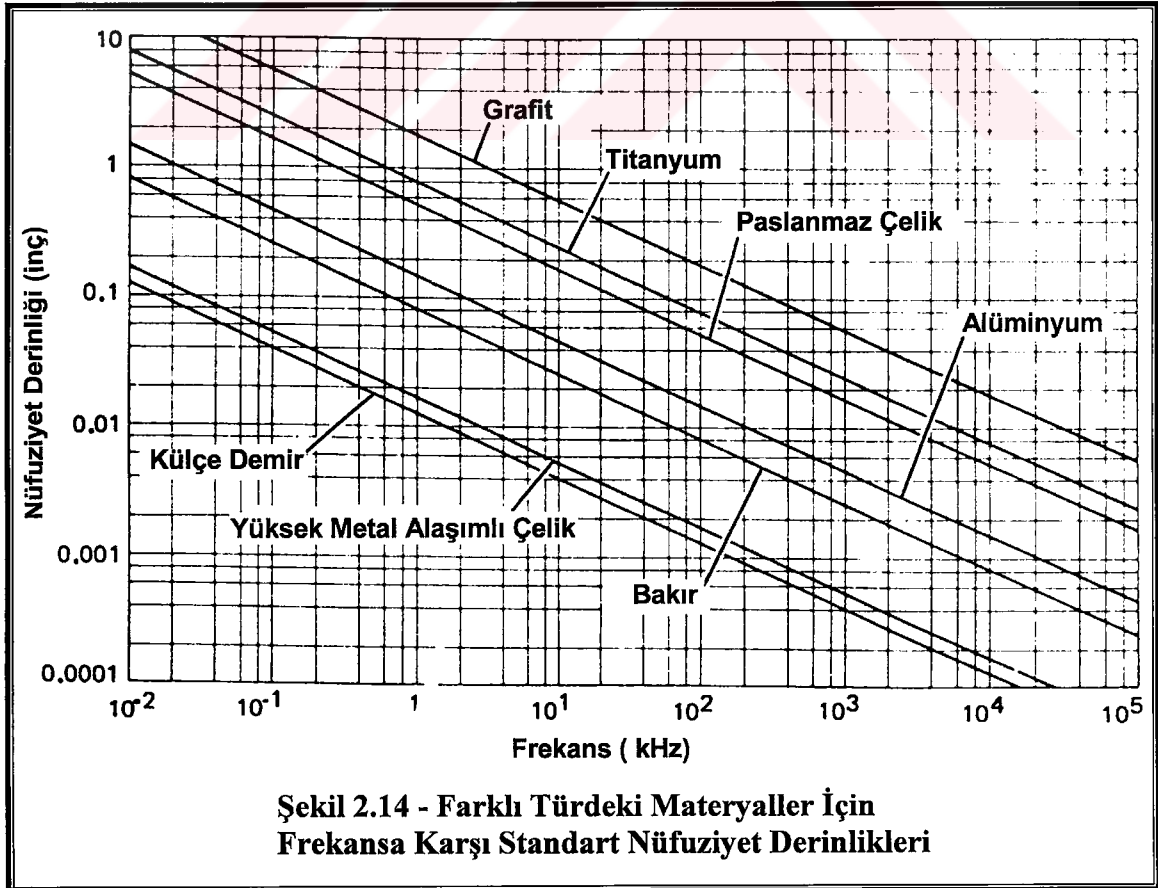
f = Frekans

μ_r = Bağıl geçirgenlik

Bir süreksizliğe duyarlılık, süreksizliğin bulunduğu yerdeki girdap akımı yoğunluğuna bağlıdır. Girdap akımları akım yoğunluğu derinlikle, süratle azalmasına rağmen bir standart nüfuziyet derinliğinden (δ) daha derinlere nüfuz edebilir. İki standart nüfuziyet derinliğinde (2δ) girdap akımları yoğunluğunun % 13.5 düştüğü görülür (Karainci ve ark 1993) .

Yüzeyaltı süreksizliklere karşı duyarlılıkla, derinlikle değişen girdap akımları yoğunluğuna bağlıdır. Bu hassasiyet sınırı, etkin nüfuziyet derinliği olarak bilinen önemli bir kavramdır (Mijo 1980) .

Standart nüfuziyet derinliği, girdap akımları yoğunluğunun, yüzey yoğunluğunun yaklaşık % 37 sine rastgelen bir derinlik değeridir. Şekil 2.14 da çeşitli frekanslarda, farklı iletkenliklere sahip birkaç madde için standart nüfuziyet derinlikleri gösterilmektedir.



Eğer standart nüfuziyet derinliği, test altındaki malzemenin derinliğini aşarsa, girdap akım yollarının kısıtlanması malzemenin iletkenliğinde bir değişim olarak görülür (Anonim 1979) .

2.3.5. Standart Faz Gecikmesi

Malzeme içindeki herhangi bir süreksizlik, girdap akımlarının akışına engel olacak şekilde tesir eder (Karainci ve ark 1993) . Küçük bir yüzey süreksizliği veya büyük bir iç süreksizlik, bobin empedansının büyüklüğüne benzer olarak tesir edebilir. Fakat, derinlikle orantılı olarak faz açısı değişeceğinden, bobin empedansı vektöründe karakteristik farklılıklar meydana gelecektir. Bu etki süreksizliğin yerinin ve büyüklüğünün tayin edilmesine imkan sağlar(Mijo 1988) .

2.3.6. Girdap Akımlarının Meydana Gelmesi

Faraday yasasına göre, malzeme üzerine değişik bir manyetik alanın tatbik edildiği bölgede bir V_p gerilimi üretilir. Bu yasaya göre, bobinimiz vasıtasıyla,

$$V_s = - N_p \frac{d\phi_p}{dt} \quad (2.60)$$

$$\phi_p = \phi_0 \sin (w t) \quad (2.61)$$

$$V_s = - N_p w \phi_0 \cos (w t) \quad (2.62)$$

gerilimi üretilir.

Eğer bobin, test parçasına yakın bir durumda ise; Ohm Yasası, bir V_s sürme geriliminin olduğu ve malzeme empedansının sonlu bir değerde bulunduğunu bildirir. Bu durumda akım,

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \quad (2.63)$$

şeklinde olur. Burada;

I_s = Malzemenin içinde oluşan akım,

V_s = Burada indüklenen gerilim,

Z_s = Malzemenin içinden geçen akıma karşı koyan malzemenin empedansını

ifade eder.

Bu şekilde indüklenen akımlar dairesel bir yol boyunca hareket etmelerinden dolayı girdap akımları olarak isimlendirilirler. Malzeme üzerinde oluşturulan girdap akımları Lenz Yasasına göre birincil manyetik alana (bobin manyetik alanı) zıt yönde kendi manyetik alanlarını üretirler. Manyetik akılar,

$$\phi_s \propto I_s \quad (2.64)$$

$$\phi_E = \phi_p - \phi_s \quad (2.65)$$

şeklindedir. Burada;

$\phi_E \rightarrow$ Test malzemesinin önündeki ve bobinin etrafındaki manyetik akıların bileşkesi olan denge akısıdır. İndüklenen girdap akımları öz dirençte bir azalma ve manyetik akıda bir düşme meydana getirir. Bu prob empedansında bir azalma demektir. Bu durumda;

$Z \propto \Phi_E \rightarrow$ Bobin empedansının bobin etrafındaki manyetik alan ile numunede indüklenen girdap akımları manyetik alanın bir fonksiyonu olduğunu gösterir.

$$V = Z I_p \quad (2.66)$$

olacaktır.

Özet olarak, akı test bobininin içinden alternatif akım geçirilerek oluşturulur. Eğer bu bobin; iletken bir malzemeye yeterli bir miktarda yaklaştırılırsa, girdap akımları üretilir. İlave olarak, girdap akımları manyetik akı ile ona zıt yönde olan manyetik akısı, bileşke bir manyetik akısı meydana getirir. Bu bobin empedansının ve voltajının değişmesine neden olur (Avinç ders notları 1999) .



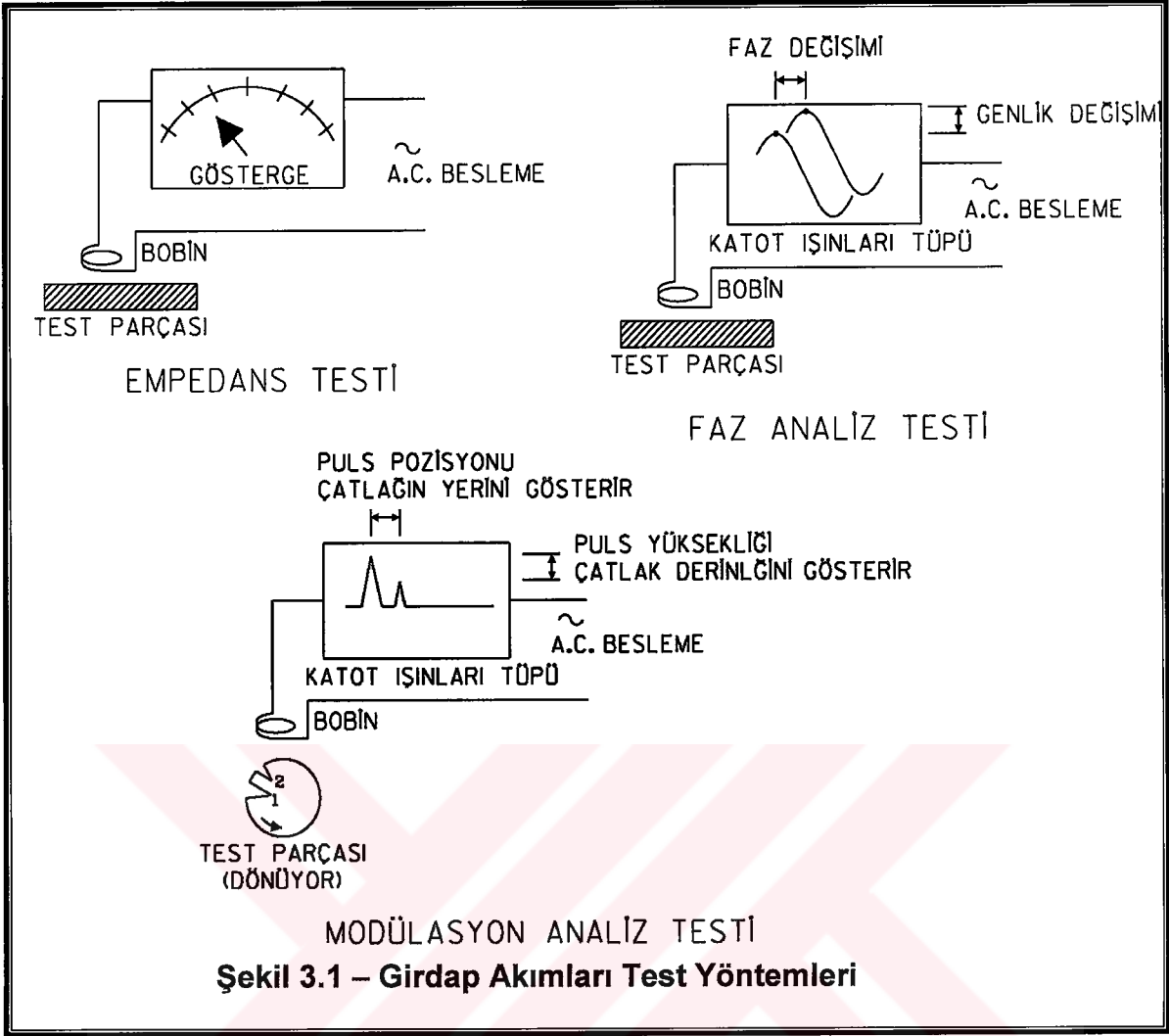
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Girdap akımlarının oluşumunu bir önceki bölümde anlatmıştık. Bu bölümde ise daha çok kullanılan ölçüm sistemleri üzerinde durulacaktır. Ölçüm sistemleri yanında bobin türleri ve çalışma frekansı gibi önemli etkenlerde açıklanacaktır.

3.1.Cihazın Tanıtımı

Bir Girdap Akımı Test Sistemi esas olarak bir alternatif akım üreticisi, verici ve alıcı olarak çalışan test bobini, test malzemesi ve sonuçların gösterildiği sinyal göstergesi elemanlarından oluşur. Burada göz önünde bulundurulması gerekli en önemli husus, test malzemesinin manyetik olan ve manyetik olmayan bir malzeme olabileceği, fakat mutlaka elektrik iletkenliğe sahip olması gerektiğidir.

Girdap akımları test yönteminde uygulanan üç temel teknik vardır. Bunlar; Empedans Testi, Faz Analizi, Modülasyon Analizi olarak adlandırılırlar. Şekil 3.1 de üç test yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Empedans testi, malzeme özellikleri değişikçe test bobini empedansının da değişmesi esasına göre kurulmuştur. Bütün parametreler empedansı etkilediği için bu teknik ile iletkenlik (σ) etkisinin manyetik geçirgenlik (μ) veya boyut değişimi (D) etkisinden ayırtililmesi olanaksızdır.

Faz analizi tekniği ile parametreler birbirinden ayırtildebilmektedir. Bu teknik, iletkenlik değişimlerini faz kayması olarak, manyetik geçirgenlik ve boyut değişimlerini ise genlik farklılıkları olarak gösterir.

Modülasyon analizi tekniği, genellikle dinamik uygulanır ve prob malzemeye göre relatif olarak hareket ettirilirken girdap akımı değişimleri saptanır. Bu teknikte

çıkış indüksiyonu bir dizi frekanslar ailesinden oluşur. Uygun filtreler kullanılarak ilgi duyulan değişken değerlerinden ayırteedilebilir (Baykara 1992) .

Girdap akımı test cihazları tek frekanslı ve çok frekanslı cihazlar olmak üzere iki ayrı grupta incelenir.

A-) Tek Frekanslı Girdap Akımı Test Cihazları: Tek bir test frekansına sahiptirler. Test değişkenlerine göre önceden tespit edilecek olan bir frekansa ayarlanarak, test durumuna uygun bir prob kullanılır ve teste başlanır. Gösterge kısmı, bir osiloskop veya bir şeritli kaydedici olabilir. Bu ana birimlere ek olarak gereksinime göre banda kaydediciler, uzaktan kumada aletleri, prob itici ve çekicileri gibi yardımcı cihazlar eklenebilir.

Bu cihazlarla verilerin yorumlanması oldukça zordur ve büyük bir yorumlama deneyimi gerektirir. Bütün süreksizlikler tespit edilemez ve sadece tek bir test frekansında test yapılabilir. Bu tip cihazlar nükleer teknolojide hemen hemen kullanılmazlar.

B-) Çok Frekanslı Girdap Akımı Test Cihazları: Bu cihazlar iki veya daha fazla test frekansına sahiptir. Test durumuna göre bir prob kullanılarak test yapılır. Analizörden alınan bilgi osiloskop veya diğer gösterge elemanlarından herhangi birisi ile gözlenebilir. Bu ana birimlere ek olarak gereksinime göre banda kaydediciler, uzaktan kumada aletleri, prob itici ve çekicileri gibi yardımcı cihazlar eklenebilir.

Gelişmiş girdap akımı test cihazları; veri toplama, veri yorumlama, veri yönetim bilgisayarları ile grafik çizicileri ve yazıcılarına sahiptir (Anonim 1979) .

3.2. Kalibrasyon

Girdap akımı sinyal analizi esas olarak, bir karşılaştırma yöntemidir. Bunun için standart malzemelere gereksinim vardır.

Test sisteminin performansını kontrol eden referans blokları vardır. Bu bloklar testin başlangıcında sistemin doğru ayarlanıp ayarlanmadığını kontrol etmek amacıyla kullanılırlar. Standart kalibrasyon malzemeleri ise, test malzemesi ile aynı özellikleri taşıyan ve üzerinde yapay hatalar bulunan bloklardır (Karainci ve ark 1993).

3.3. Girdap Akımı Test Propları

3.3.1. Girdap Akımı Proplarının Çalışma Prensibi

Test bobini tarafından değişken manyetik alanın büyüklüğü ve dağılımı, bobin iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında değişir. Birincil manyetik alandaki değişim, birincil alana zıt olan ve girdap akımları tarafından oluşturulan ikincil manyetik alandan kaynaklanır. Manyetik alandaki toplam değişim, test bobininden geçen akıma karşı olan dirençleri arttırır veya azaltır. Akıma karşı olan dirençlerdeki değişim, ya bobinde bir voltaj değişimi ya da bobinden geçen akımdaki bir değişim olarak gözlenir. Bobinden geçen akım alternatif akım kaynağından gelen akımla dengelenir. Böylece iki akım arasındaki fark tespit edilebilir. Dengelemeyi sağlamada kullanılan yöntemlerden biriside “Girdap Akımları Devre Sistemleri” dir.

3.3.1.1. Prob Seçimi

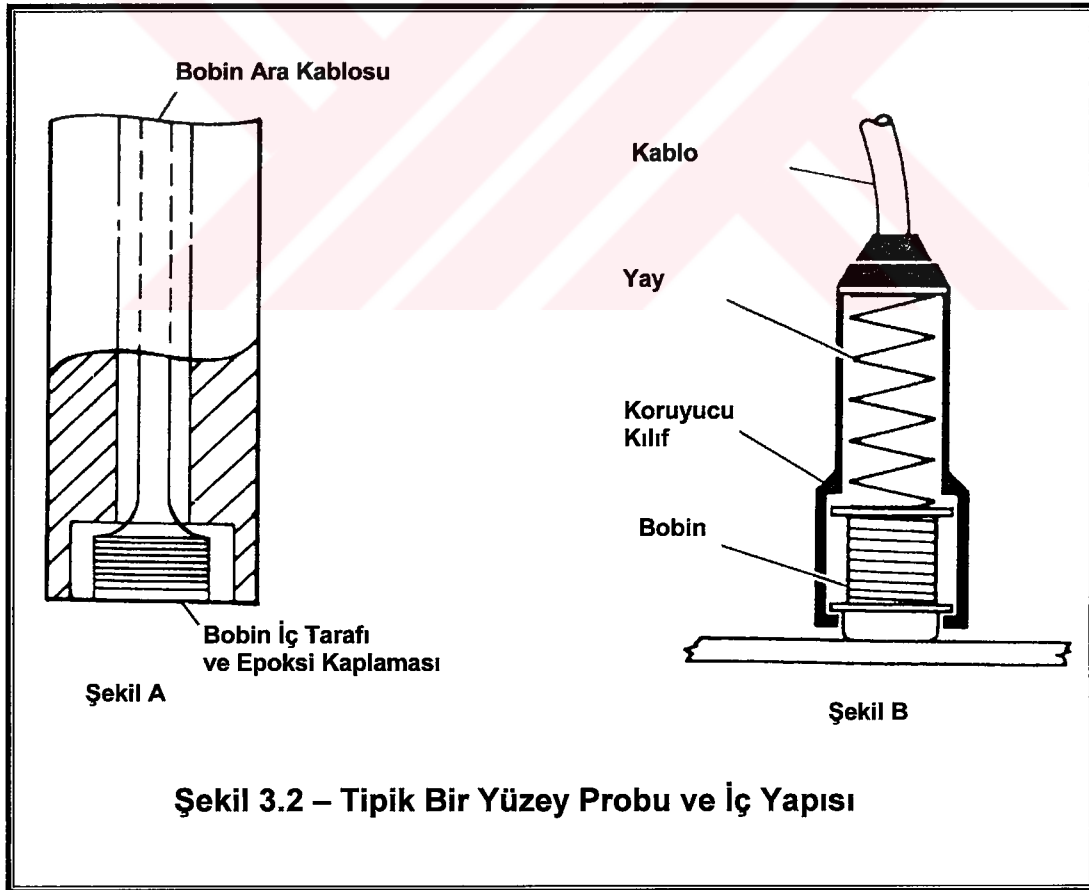
Girdap akımları probunun seçiminde göz önüne alınan temel faktör kullanım amacıdır. Küçük çaplı problar küçük süreksizliklerin tespitinde çok daha iyi bir ayırt edebilme yeteneğine sahip olacaktır. Daha büyük çaplı problar kütleli özelliklerin tespitinde daha iyi sonuç verir. Probun kullanılan köprü devre empedans aralığı ile uyum içinde olması gerekir. Empedans ihtiyacını karşılamak için probun kullanılacağı frekans aralığı göz önünde tutulmalıdır. Uygulamaların çoğunda; test parçası ile bobin arasındaki uzaklık, malzeme içinde mümkün olan en büyük alan şiddetini elde etmek amacıyla, minimumda tutulmalıdır. Yüzey problemlerinin yapımında, küçük çatlakların tespitinde daha büyük duyarlılık sağlayacak olan manyetik akıyı küçük bir hacimde yoğunlaştırma işlemini gerçekleştirmek için, genellikle demir çekirdekler kullanılır.

Uygulamaların hepsinde, kontrol edilecek alana yerleştirilecek probun girebileceği kadar bir boşluğa gereksinim vardır (Cecco ve ark 1981).

3.3.1.2. Prob Çeşitleri

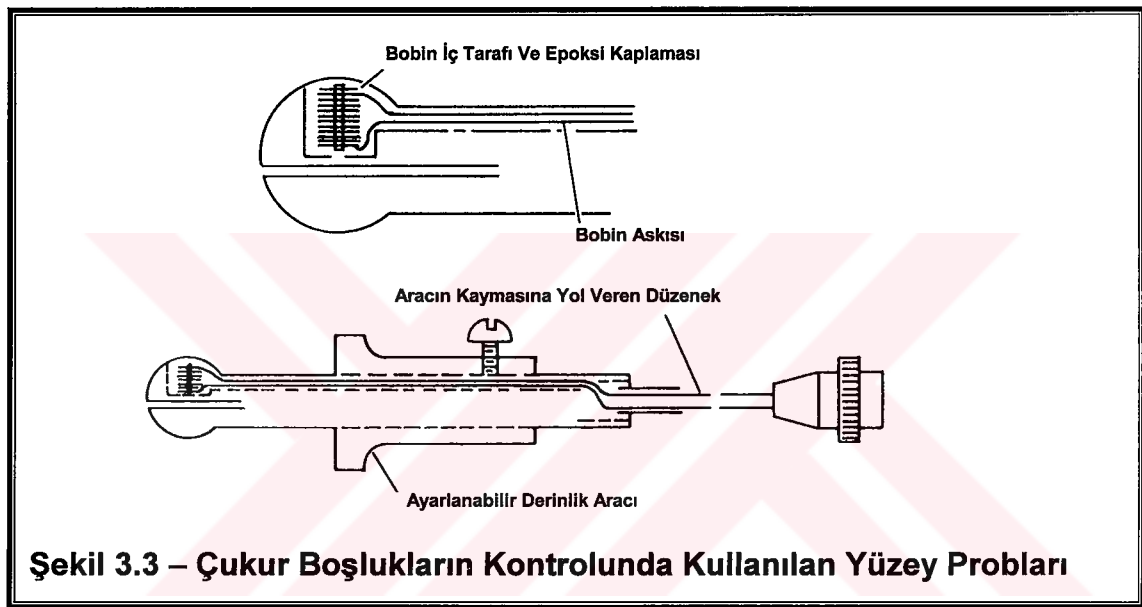
Problar değişik formlara sahiptirler ve farklı uygulamalarda kullanılabilirler. Kullanılacak prob test edilecek malzemeye göre seçilmektedir.

A-) Yüzey Probu: Uygulamada, girdap akımları testinin çoğu yüzey problemleri ile yapılır. Yüzey problemleri plakalar, levhalar veya düzensiz şekilli parçaların testinde kullanılabilir (Karainci ve ark 1993). Şekil 3.2 de tipik bir yüzey probu görülmektedir. Şekil A' da proba monte edilmiş bir bobin görülmektedir. Şekil B' de ise üzerine bir yay muhafaza edilmiş bobin görülmektedir.



Sabit basınçla üzerine yay baskısı bulunan sistem, test altındaki numunenin yüzeyinden bobinin kaymasını (sapmasını) engellemek için uygulanmaktadır. Yüzey probu elde taşınabilir veya otomatik tarayıcı aracına monte edilen bobin, giydirilmiş yüzey olarak işler yapabilmesi için koruyucu epoksi kaplaması ile sağlamlaştırılır.

Bobin tarafından üretilen manyetik alan yaklaşık olarak bobin boyutundadır. Şekil 3.3 de değişik bir yüzey probu görülmektedir. Bu, çukur boşlukların kontrolunda belirli uygulamalar için dizayn edilmiş bir yüzey probudur.

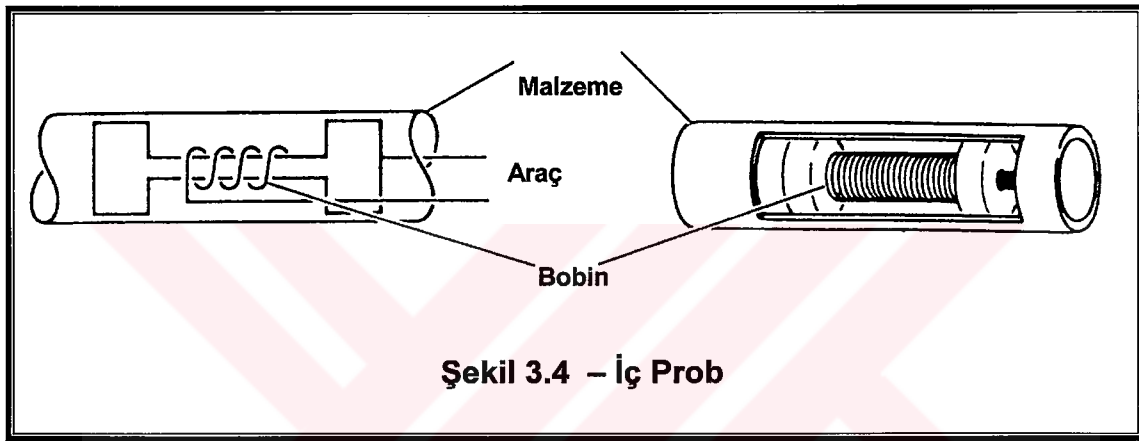


Bobin, belirli fonksiyonlarda işlev yapmak için boyut ve biçim olarak bir tutucuya monte edilmiştir (Anonim 1979) .

Yüzey problemlerinin çapı test edilecek alanın büyüklüğü ile ilişkilidir. Kontrol edilecek alan geniş olduğunda; kontrol süresini kısalttığı için geniş tabanlı yüzey problemleri tercih edilir. Küçük hataların tespiti gerekiyorsa çapı 1 / 32 inç kadar inebilen küçük çaplı test bobinleri kullanılabilir. Civata yuvaları veya deliklerin kontrolu için genellikle özel şekillerde üretilmiş yüzey problemleri kullanılır (Mijo 1980, Cecco ve ark. 1981) .

B-) İç Problar: İç problar tüplerin, boruların ya da iç kısmına girebilen benzeri diğer parçaların testinde kullanılırlar. İç problar iyi bir test duyarlığı sağlamak için, mümkün olduğu kadar parça boşluğu doldurulmalıdır. İç bobinlerin kullanılması, bükülme durumları ya da sabit olmayan çaplar nedeniyle sınırlıdır (Mijo 1980, Cecco ve ark. 1981).

Şekil 3.4 de, tüpün iç kısmındaki süreksizlikleri test etmek için tüp içerisine yerleştirilen bobin görülmektedir.

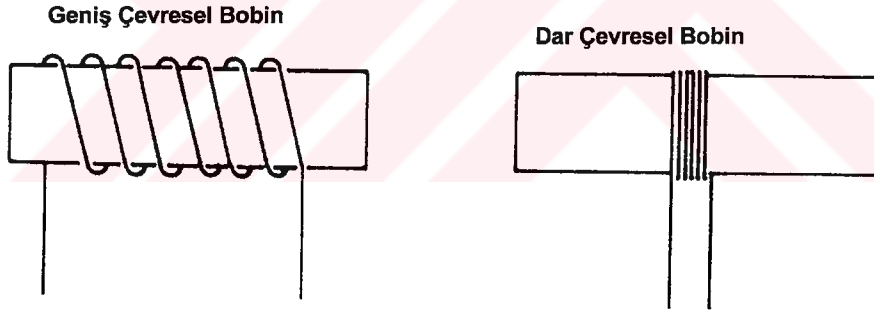
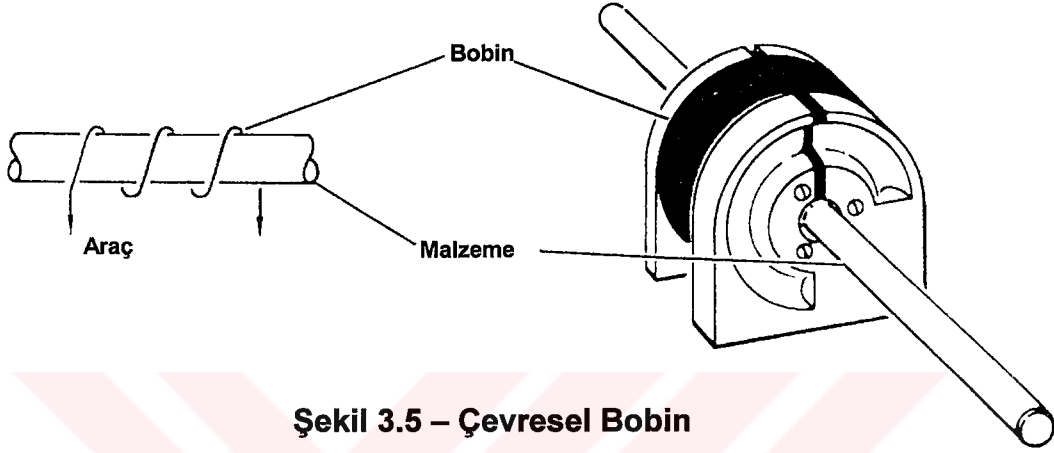


Şekil 3.4 – İç Prob

Sarımlı bobinde olduğu gibi, iç bobin de tübün tüm çevresini kaplayan akım üretir. Böylece tübün iç kısmındaki süreksizlikler tespit edilir. Malzemede indüklenen akım bobin yanında çok güçlü olduğundan, iç bobin tübün iç yüzeyine yakın veya iç kısmında bulunan süreksizlikleri dedekte etmekte daha duyarlıdır (Anonim 1979).

C -) Çevresel Problar: Çevresel Problar öncelikle içi dolu çubukların, kütüklerin silindirlerin ya da tel gibi parçaların fabrikasyon kontrollerinde kullanılır. Çevresel veya iç problarla test parçasının tüm çevresi bir defada test edilebilir. Fakat süreksizliklerin yerleri kesin olarak tespit edilemez. Bu yüzden yüzey problemleri süreksizliklerin yerlerinin tespitinde bu problara göre daha uygundur ve daha çok kullanılırlar (Karainci ve ark. 1993).

Şekil 3.5 de çevresel bir bobin görülmektedir. Çevresel bobin, biçim benzerliği nedeniyle test çubuğuna hemen hemen benzemektedir. Manyetik alan, çubuk veya tütün tüm çevresini çevrelemiş olan sarımlar nedeniyle çubukta girdap akımları oluşmasını sağlar. Böylece, bobin altındaki tüm bölge tespit edilir.



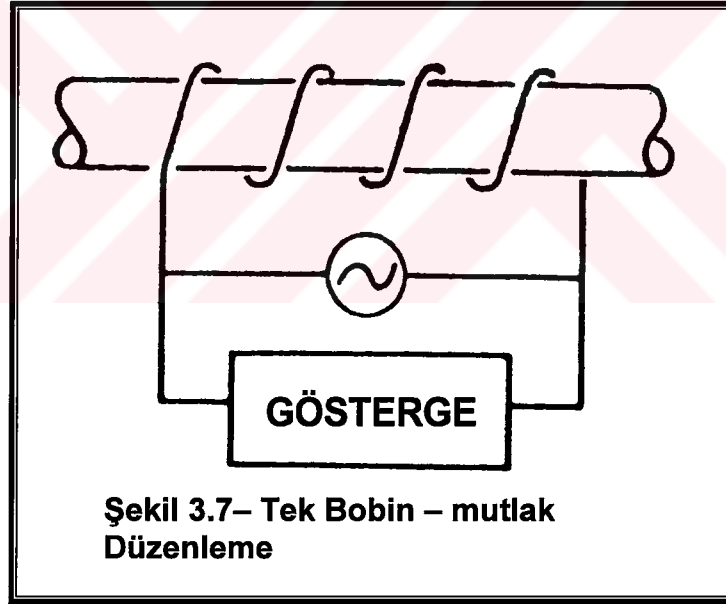
Şekil 3.6 - Geniş ve Dar Çevresel Bobinler

Şekil 3.6 da bobin genişliği uygulama fonksiyonudur. Geniş çevresel bobinler daha büyük alanı sararlar, böylece iletkenlik gibi bulk etkisine cevap verirler. Bunun aksine dar çevresel bobinler, küçük alanda duyarlı olurlar ve süreksizlik nedeniyle oluşan küçük değişiklikleri dedekte etmekte daha duyarlıdırlar (Anonim 1979).

3.3.1.3. Mutlak ve Diferansiyel Problar

3.3.1.3.1. Mutlak Problar

A-) Tek Bobinli Mutlak Prob: Bu tip problarda; aynı bobin, hem test parçası üzerinde girdap akımlarını oluşturur hemde girdap akımı şiddetindeki değişimleri algılar. Bu problarda alternatif akım güç kaynağı ve gösterge elemanı tek bir bobine bağlıdır. Böyle bir kurgu şekil 3.7 de görülmektedir.



B-) Çift Bobinli Mutlak Prob: Bu problarda birincil bobin, üzerinde oluşan manyetik alan aracılığıyla malzemede girdap akımlarını üretir. İkincil bobin de malzeme üzerinde oluşan girdap akımlarındaki değişimleri algılar. Birincil bobin sadece

alternatif akım güç kaynağına, bağlı olduğu halde ikincil bobin ise sadece gösterge elemanına bağlıdır (Anonim 1979) .

Mutlak problarda sinyali bozan etkenler şunlardır:

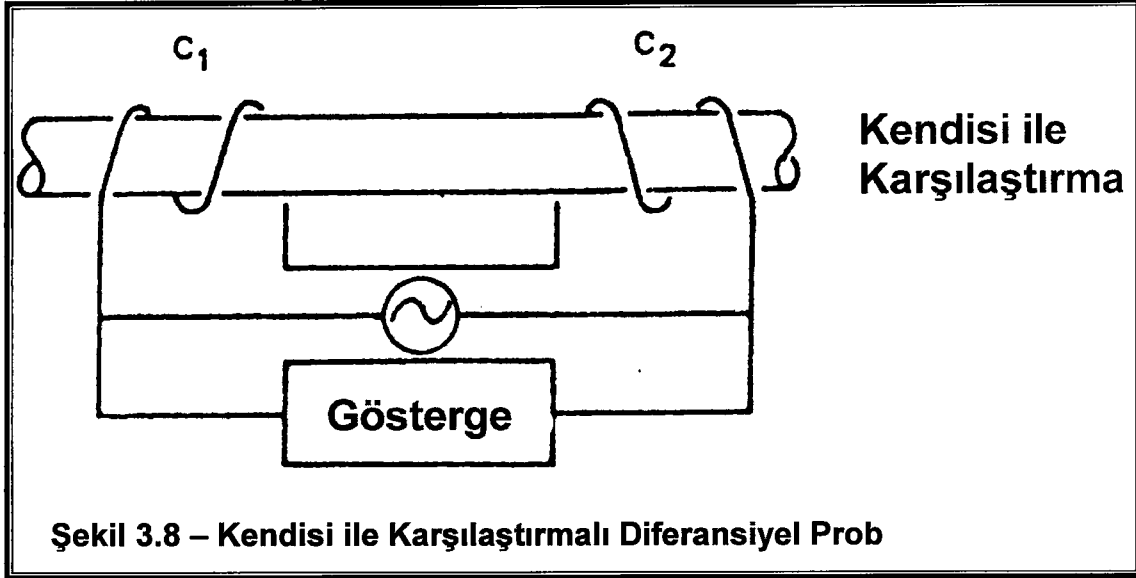
- Temassızlık etkisi,
- Titreşimler,
- Boru testlerinde cidar kalınlığı değişimleri,
- Çaptaki değişimler,
- Sıcaklık değişimleri.

Bu etkenleri gidermek için diferansiyel problar geliştirilmiştir. Mutlak problar yukarıdaki etkenler nedeniyle çatlak testinde genellikle kullanılmazlar. (Karainci ve ark. 1993) .

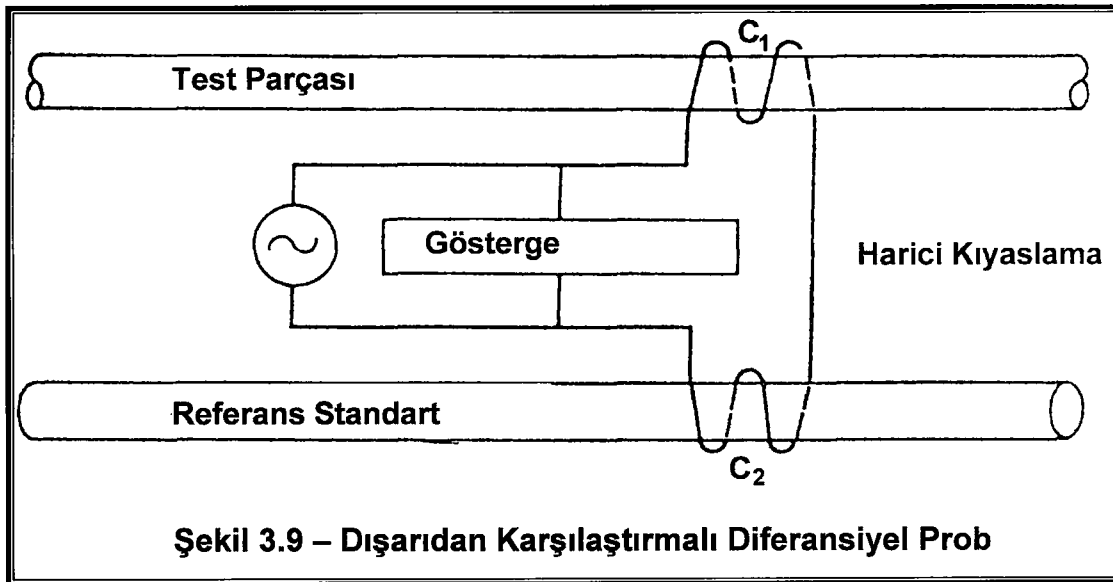
3.3.1.3.2. Diferansiyel Problar

Diferansiyel problarda her iki bobinin çıkışı birbirlerine bağlı olduğu gibi, yine bobinlerin çıkışları da hem alternatif akım güç kaynağına hemde gösterge elemanına bağlıdır. Şekil 3.8 de diferansiyel prob görülmektedir. Burada,her iki bobinin altındaki malzeme aynı özellikte ise çıkışlar birbirini yok eder. Malzeme özelliğinde küçük bir farklılık olduğunda denge bozulur ve göstergede bir sinyal belirir.

(Anonim 1979, Anonim 1980, Karainci ve ark. 1993) .



Bundan başka dışardan karşılaştırmalı diferansiyel problemler de vardır. Bobinlerden biri (referans bobin), üzerinde süreksizlik bulunmayan ve test malzemesi ile aynı özelliklere sahip olan bir referans standart malzeme üzerinde sabit tutulurken, test bobini test malzemesi üzerinde hareket ettirilir Burada da her iki bobinin altındaki malzeme aynı özellikte ise çıkışlar birbirini yok eder. Malzeme özelliğinde küçük bir farklılık olduğunda denge bozulur ve gösterge elemanında bir sinyal belirir. Şekil 3.9 da böyle bir karşılaştırmalı diferansiyel probu görülmektedir (Sharp ve ark. 1981).



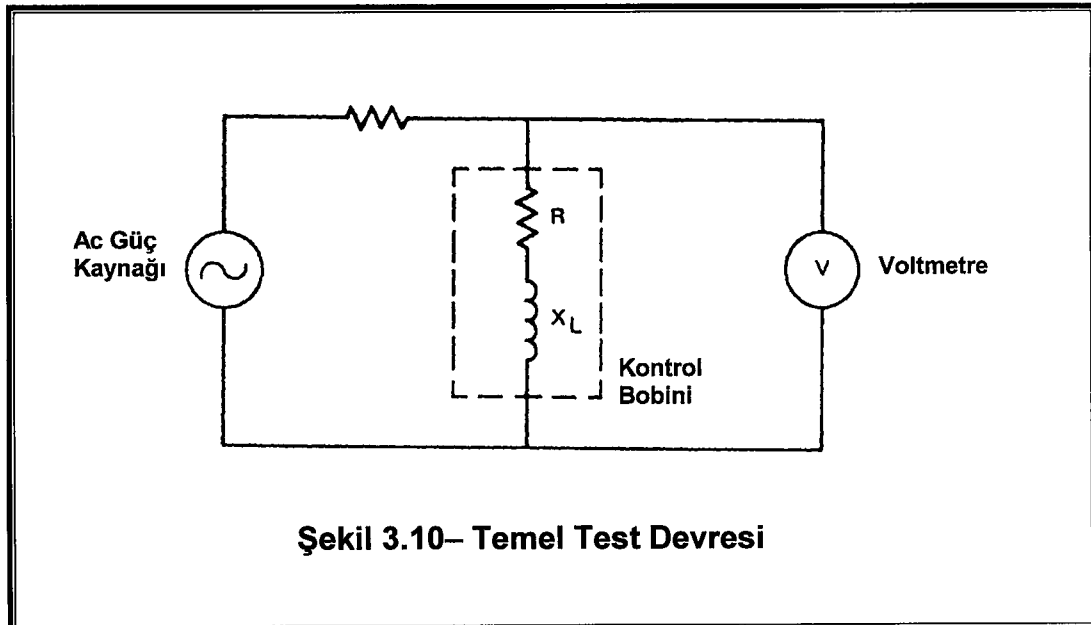
3.4. Girdap Akım Devre Araçları

Günümüzde, değişik türde birçok girdap akım araçları vardır ve bunlar birçok yönde birbirine benzerdir. Otomobiller gibi, ilke bakımından benzer, fakat fonksiyon ve aksesuar bakımından değişiktirler. Herhangi bir girdap akım aleti bir alternatif akım kaynağı içerir. Bazı araçlarda kaynak sabit bir frekanstadır, diğerlerinde frekans değişebilir. Birçok test devrelerinde dedekte edilen sinyal gücünü arttırmak için yükselteçler kullanılmaktadır.

Tüm girdap akım araçlarında bobinler kullanılmaktadır. Girdap akım araçları, empedans tayini veya test bobinindeki empedans değişimi gibi bazı metodlara sahiptir. Bunlar araçlar arasında büyük değişimlerin olduğu elektronik devrelerdir.

3.4.1. Temel Test Devresi

Şekil 3.10 da, bobindeki voltajı ölçmek için kontrol bobinine karşı bağlanmış voltmeter ve kontrol bobinini destekleyen a.c güç kaynağını içeren basit test devresinin diyagramı görülmektedir. Bobin test numunesine yaklaştırılınca veya test numunesi üzerine yerleştirilince, bobinin empedansı değişir. Empedanstaki bu değişim voltmetredeki okumanın değişmesine neden olur. Bu tür test devresi duyarlı değildir. Bu nedenle voltmetrede büyük bir değişim olmayacaktır. Voltajı değiştirmek bir yükseltecin devreye eklenmesiyle yapılabilir ve böylece bu olgu devrenin daha küçük değişiklikleri algılamasını sağlar (Anonim 1979).

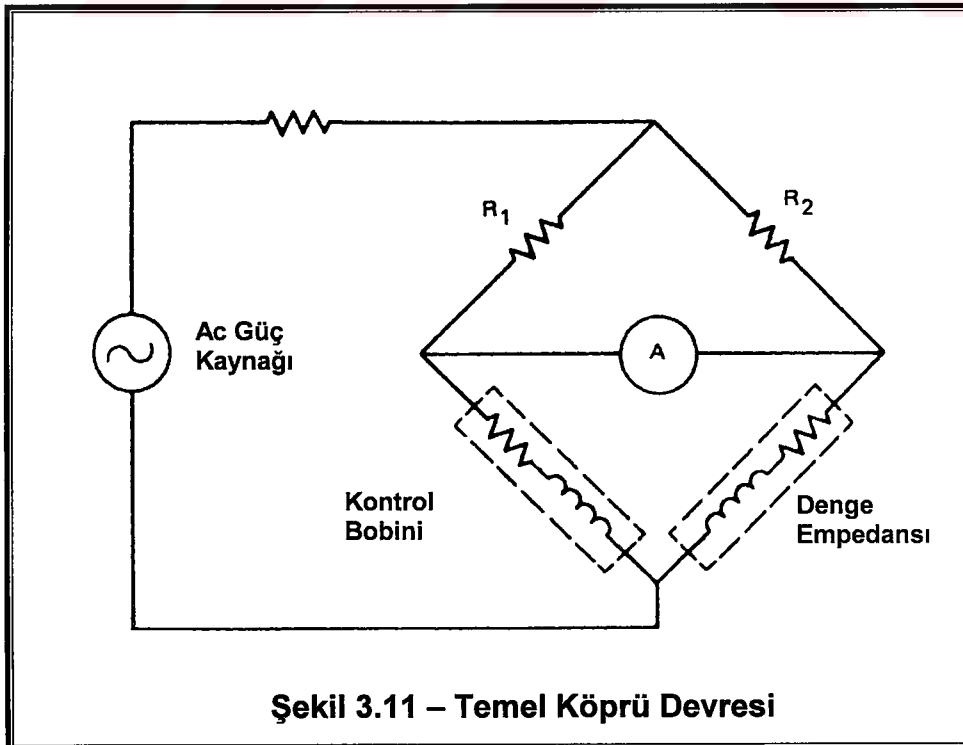


3.4.2. Temel Köprü Devresi

Temel test devresinden daha duyarlı olan temel köprü devresi şekil 3.11 de görülmektedir. A.c alternatif akım kaynağı, bir ampermetre, dengeli empedans, kontrol bobini ve R_1 , R_2 dirençlerinden oluşan köprüye karşı güç sağlar. Bu birimler, örneğin, direnç ve kontrol bobini devrenin bir kolunda, direnç, dengeli empedans devrenin diğer kolunda ve her iki kola bağlı bir ampermetreden oluşan kurguda bir köprü devresine bağlantılıdır. Köprü dengede olduğunda yani dirençler ile empedans eşit olduğunda, ampermetre sıfır akım gösterir.

Kontrol bobini test örneğine yakın ya da test örneğine yerleştirildiği zaman, empedansta bir değişim gözlenmektedir. Köprü devresi denge durumundan uzaklaşır ve ampermetre dengesizliğe orantılı olan bir akım gösterecektir.

Temel köprü devresi kullanmada, köprü devresinin bu şartlar altında dengede olduğunu anlamak önemlidir. Burada açıklandığı gibi, köprü devresi, kontrol bobini herhangi bir iletken malzemeden uzakta olduğunda yani boşlukta olduğunda dengededir. Bobin iletken malzemeye yerleştirildiği zaman, ampermetredeki okunan değer boşluk ile numunedeki empedans değişimidir (Anonim 1979) .

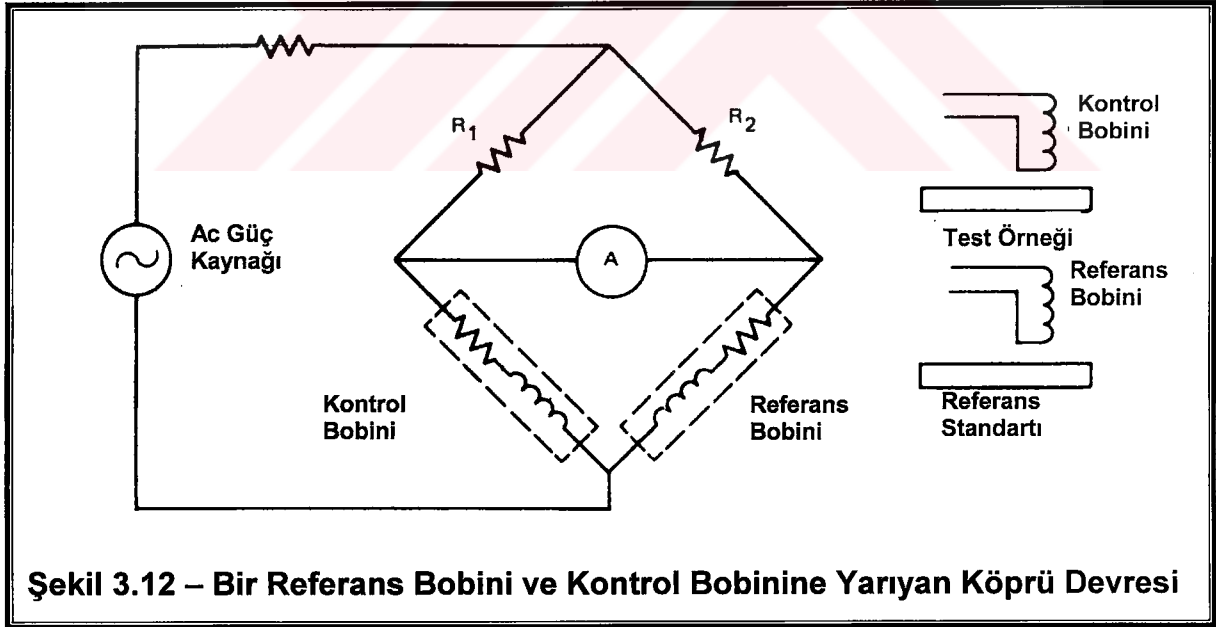


3.4.3. Diğer Köprü Devre Türleri

Herhangi bir noktada kalibre edilmiş yani sıfıra ayarlanmış bir köprü devresine sahip olmak olasıdır. Köprü devresine bağlantılı ampermetrenin değişik değerler okuyacağı göz önünde bulundurulacağından köprünün denge durumuna getirilmesi gerekmektedir. Şimdide değişik kurguları olan köprü devrelerini inceleyelim.

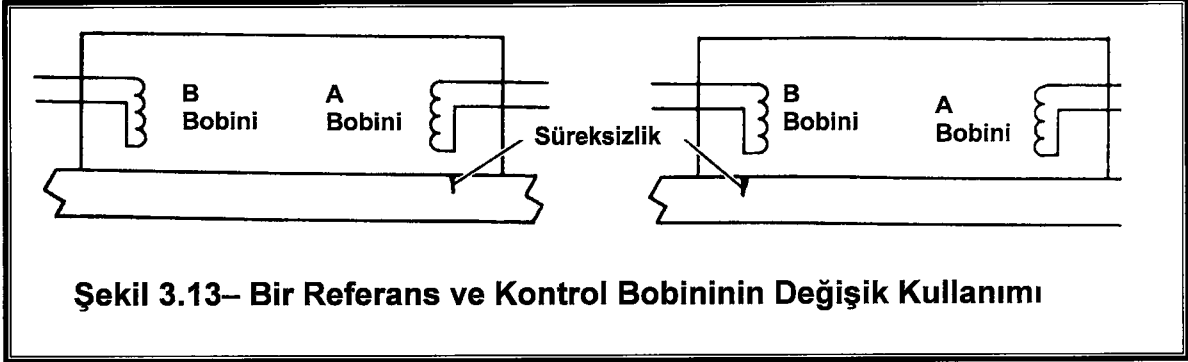
A-) Şekil 3.12 deki köprü devresinde, köprünün her iki koluna bağlı iki tane benzer kontrol bobini mevcuttur. Bu bobinlerden birisi kontrol bobini diğeri ise referans bobini olarak adlandırılmıştır.

Eğer referans bobini örnek numune üzerine yerleştirilirse ve kontrol bobinide diğeri bir örnek numune üzerine yerleştirilirse, ampermetre ibresi iki örnek arasındaki bazı farklılıklardan dolayı yön değiştirecektir. Böylece, referans standartı, referans bobini altında kullanılabilir ve ampermetre test örneği ve referans standartı arasında değişiklikler dedekte edecektir (Anonim 1979) .

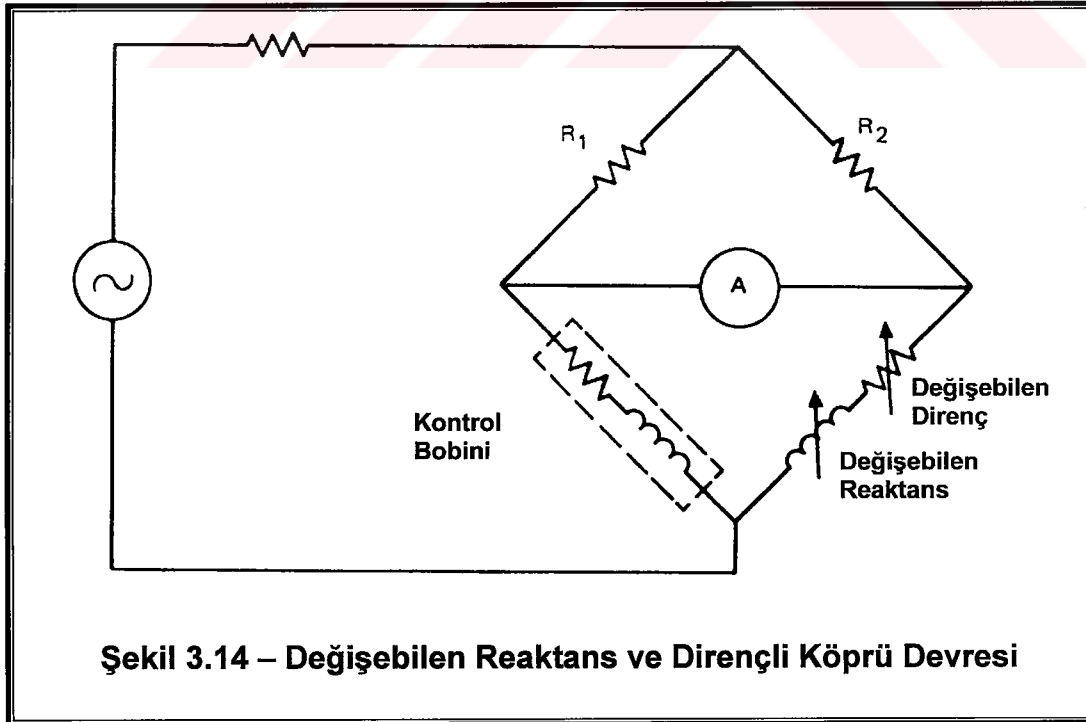


B-) Bir başka köprü devresi ise şekil 3.13 de görülmektedir. İki bobin belli aralıklarla ayrılmıştır. Yüzey üzerinde hareket ettiklerinde, A bobini süreksizlikler

üzerinden geçerken, B bobini numune üzerinde kusursuz bölgede sabit kalacaktır. Bu durumda ampermetre dengede olmama durumunu gösterecektir. Bu kez yukarıdakinin tam tersi olursa, yani B bobini süreksizlik üzerinde ve A bobini kusursuz bölgede ise ampermetre yine dengede olmama durumunu gösterecek fakat ibre bu kez ilk durumuna göre ters yönde olacaktır (Anonim 1979) .



C-) Şekil 3.14 deki köprü devresinde direnç ve reaktans değişkendir. Bunların değerleri operator tarafından belirlenebilir. Bu tür bir kurguda köprünün yeniden denge durumuna gelmesi için eksiltilen ya da eklenen direnç ve rezistans doğrudan ölçülebilir. Böylece direnç ve rezistansın kesin değerleri ölçülebilir (Anonim 1979) .



3.5. Çalışma Frekansı

Test malzemesindeki bir süreksizliğin tespit edilmesinde maksimum sinyal / gürültü oranı sağlayan frekansa “Optimum Test frekansı” denir. Her süreksizliğin kendine özgü bir optimum frekansı vardır.

Ferromanyetik malzemeler için test frekansı (f) aşağıdaki bağıntıda verilmektedir:

$$f = \frac{k^2 \rho}{\delta^2 \mu_r} \quad (\text{Hz}) \quad (3.1)$$

Ferromanyetik olmayan malzemeler için test frekansı ise aşağıdaki şekildedir:

$$f = \frac{k^2 \rho}{\delta^2} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2)$$

K = katsayı

ρ = öz direnç ($\mu \Omega \text{ cm}$)

f = Frekans

μ_r = Bağıl geçirgenlik

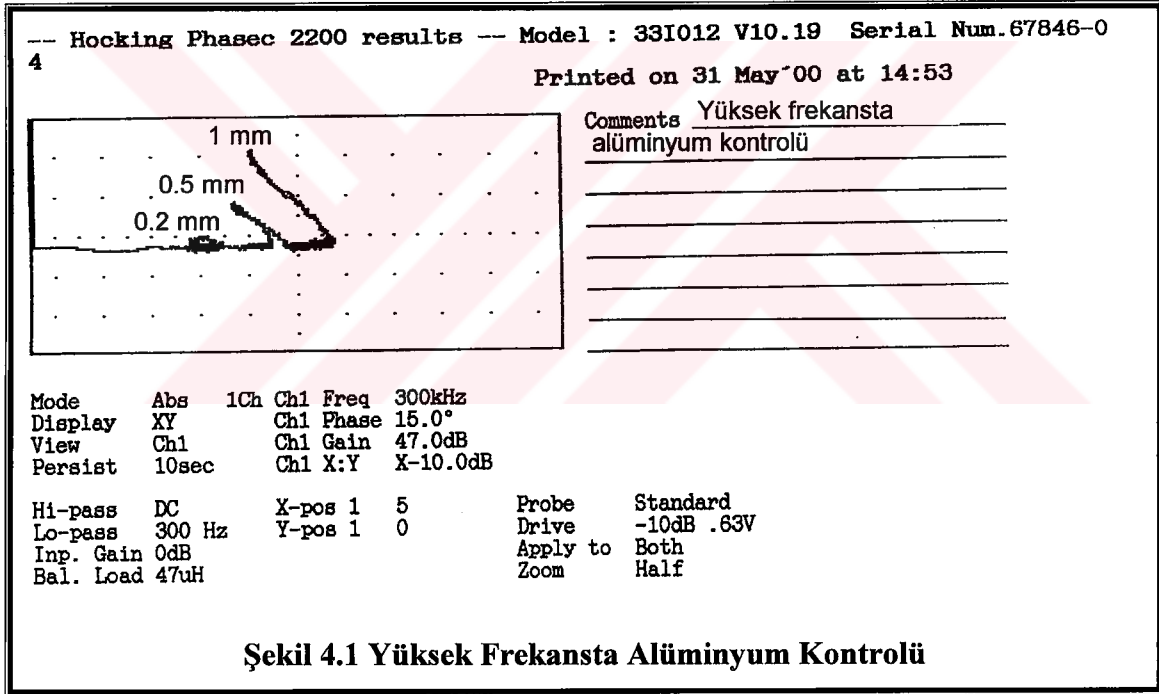
olarak ifade edilmektedir (Karainci ve ark. 1993).

4. BULGULAR

Bu bölümde THY ve Gebze TÜBİTAK MAM'daki laboratuvarlar bünyesinde yapılan deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Girdap akımları test cihazları kullanılarak değişik malzemeler için iletkenlik, kaplama kalınlığı gibi belli başlı deneyler ve sonuçlarından bahsedilecektir. Kullanılan girdap akımları test cihazı en son geliştirilen ve kısa zamanda istenilen verileri elde etmeye yarayan Phases 2200 test cihazı ile diğer girdap akımı test cihazlarıdır.

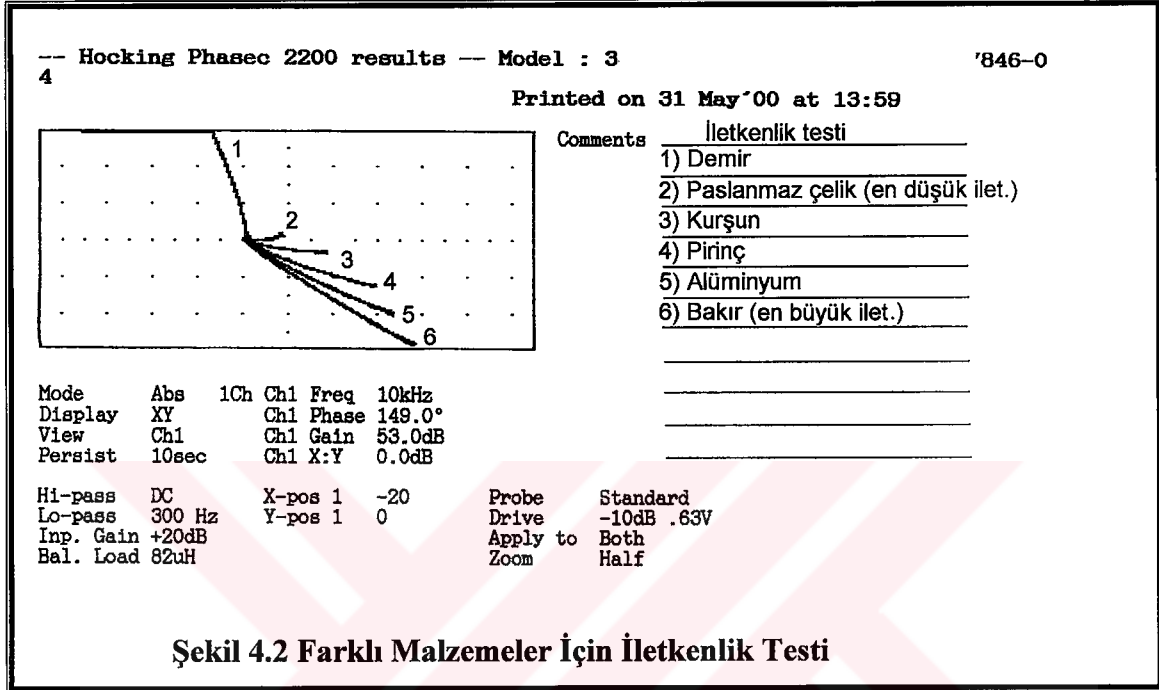
4.1. Değişik Türdeki Malzemelerin Girdap Akımı Test Cihazları

Yardımları İle Test Edilmesi



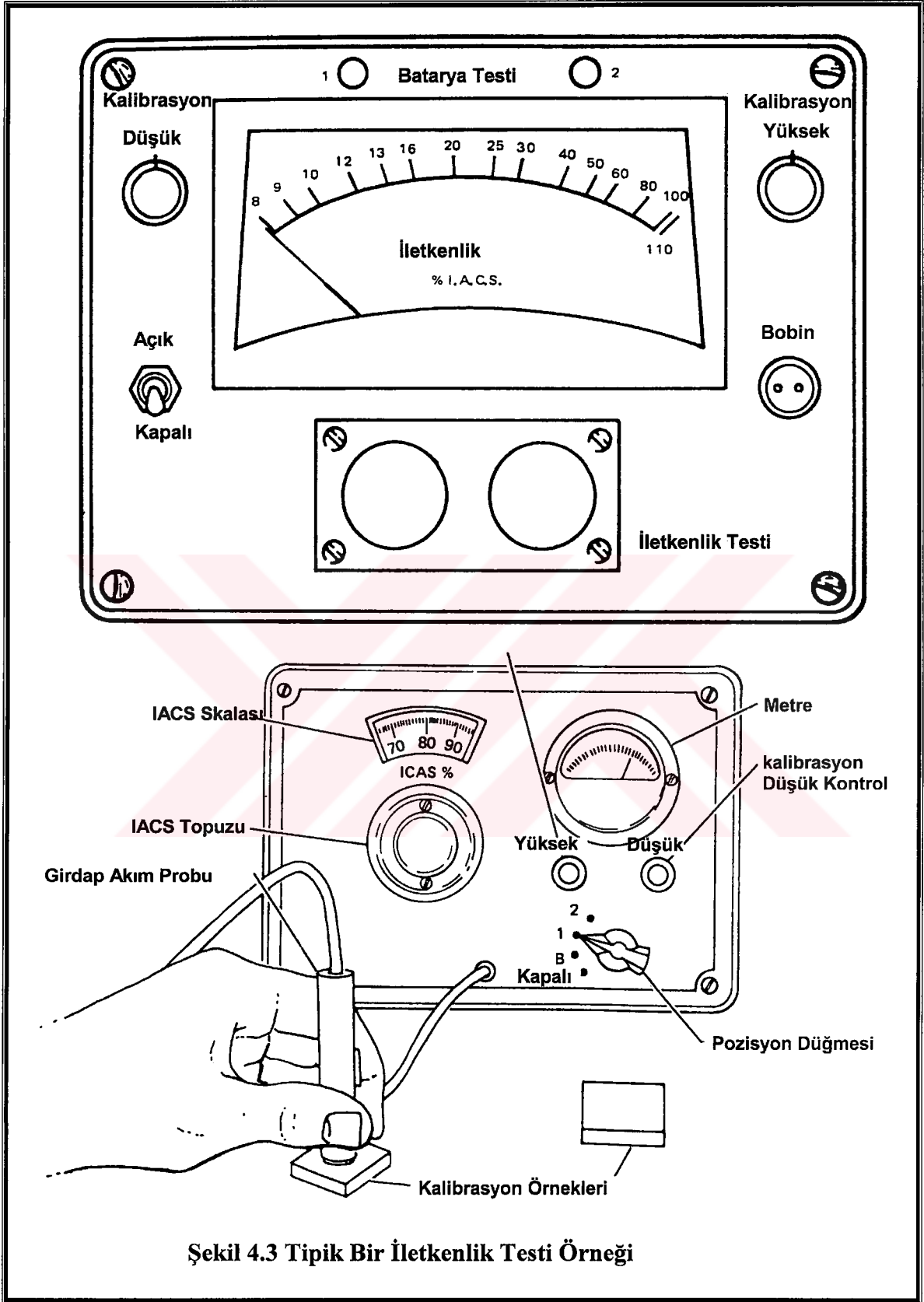
Şekil 4.1 de yüksek frekansta alüminyum malzemesi için yapılan kontrol görülmektedir. Örnek numune üzerinde belirli kesiklikler oluşturularak bu test işlemi gerçekleştirilmiştir. Üç yapay derinlik oluşturularak (0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm) ekranda görülen sinyaller elde edilmiştir. Bu sinyaller o derinliğe karşılık gelen süreksizliklerin konumlarını belirtmektedir. Kullanılan bobin, frekans, faz açısı ve kazanç değerleri şekilden görülebilmektedir. Bu yüksek frekansta elde edilen sinyaller, ayrıca

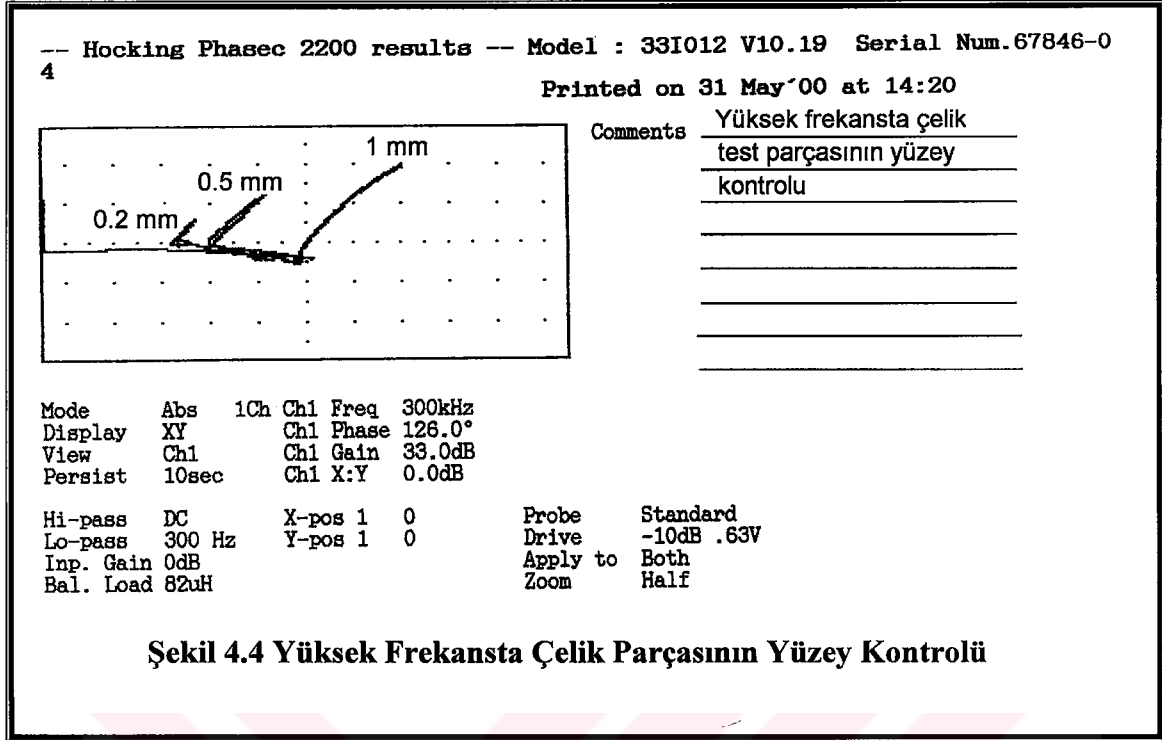
alüminyum için kalibrasyon bloğu olarakta kullanılmaktadır. Süreksizliğin yeri bilinmiyorsa yapılan ölçümler sonucunda bulunan değerlerle kalibrasyon bloğundaki değerlerle karşılaştırılarak süreksizliğin boyutu tayin edilebilmektedir.



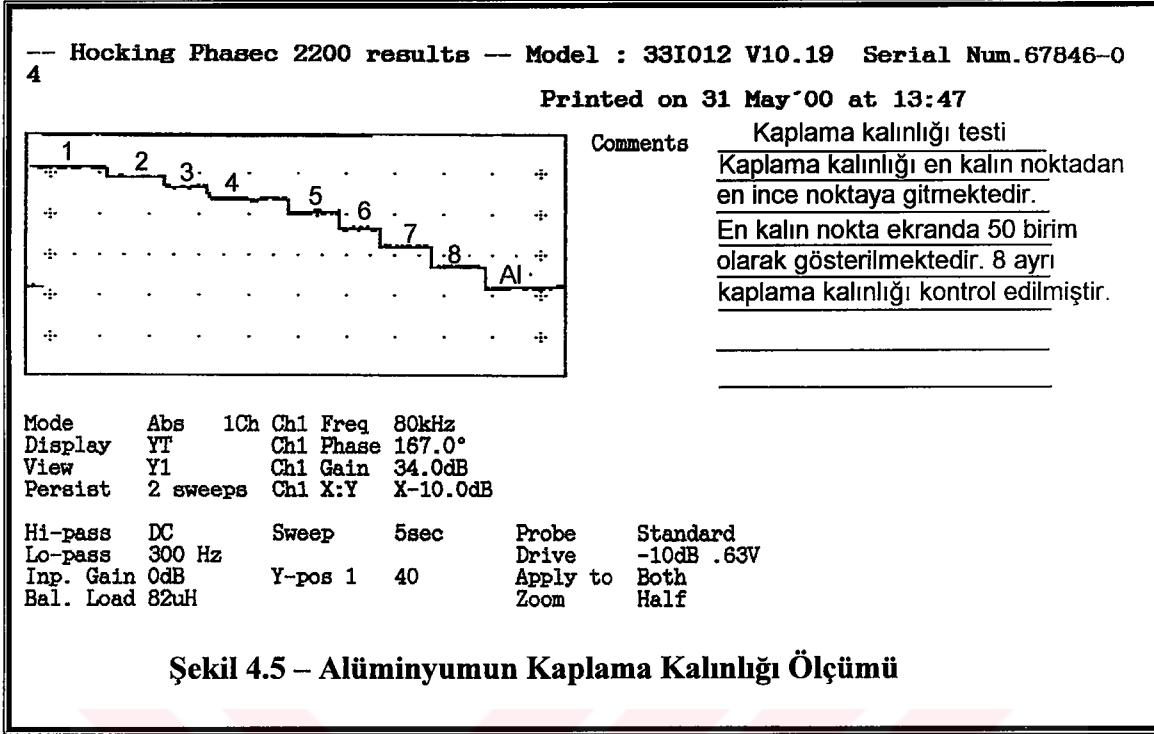
Şekil 4.2 de farklı malzemeler için iletkenlik testi yapılmıştır. Bu test bir kalibrasyon bloğundan faydalanılarak elde edilmiştir. Farklı malzemelerden oluşan kalibrasyon bloğunda elde edilen iletkenlik ölçümü şekilde de görülmektedir. Buradan elde edilen sonuca göre ekranda 6 (altı) numara ile belirtilen sinyal en fazla iletkenliğe sahip olan bakırdır. En düşük iletkenliğe sahip olan malzemenin ise 2 (iki) numara ile belirtilen paslanmaz çelik olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar malzemelerin iletkenlik diyagramındaki değerleri göz önüne alınarak belirtilmiştir.

Şekil 4.3 de ise tipik bir iletkenlik ölçüm cihazı görülmektedir. Girdap akımları test cihazını kullanmadan da iletkenlik ölçümü yapılabilir. Bu ölçümler yapılırken bir kalibrasyon bloğundan yararlanılmaktadır. İletkenlik değerleri IACS birim sistemine göre verilmektedir.





Şekil 4.4 de yüksek frekansta çelik test parçası teste tabi tutulmuştur. Alüminyumun yüksek frekansta olduğu gibi çelik numunesi üzerinde üç farklı derinlikte (0.2mm, 0.5mm, 1.0mm) süreksizlikler oluşturulmuştur. Bu oluşturulan düzenek aynı zamanda çelik için kalibrasyon bloğu olarakta kullanılmaktadır. Buradan elde edilen sinyaller süreksizliği bilinmeyen bir başka çelik numune yüzeyinde tespit edilen hataların tespitinde de kolaylık sağlamaktadır.



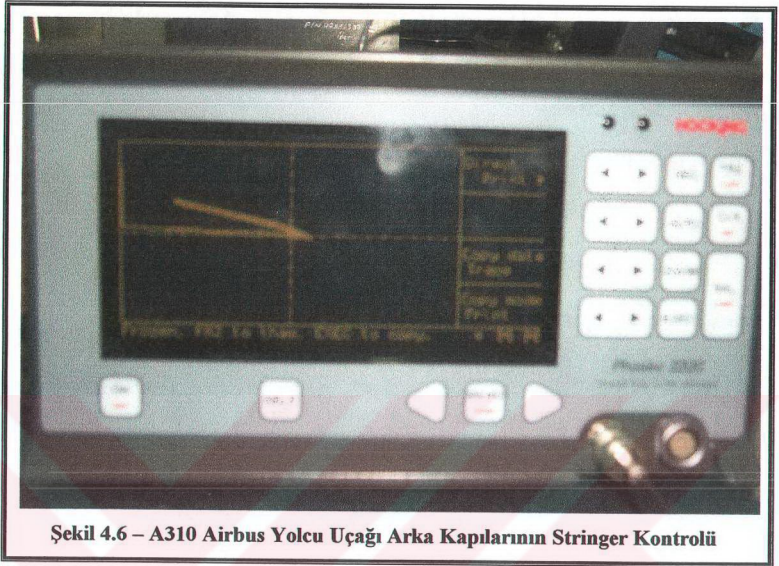
Şekil 4.5 de kaplama kalınlığı ölçüm sonuçları görülmektedir. Elde edilen verileri açıklamadan önce kaplama kalınlığı ölçümü hakkında bilgi vermemiz gerekmektedir. Çünkü teste tabi tutulan malzemenin iletken olup olmamasına göre farklılıklar gözlenmektedir. Eğer teste tabi tutulan malzeme iletken ise bu malzemenin kaplama kalınlığı ölçümü empedans tekniğine dayanmaktadır. Bu uygulama için test frekansı, kaplama malzemesine göre seçilmektedir. Ayrıca nüfuziyet derinliğide en kalın kaplama kalınlığından biraz daha fazla olacak şekilde seçilmelidir.

İletken olmayan kaplama kalınlığı ölçümünde ise, kaplama malzemesi iletken olmadığından dolayı empedans tekniği uygulanmaz. Yüzey problemleri ile aralık etkisi ölçülerek kaplama kalınlığı belirlenmektedir(Karainci ve ark. 1993).

Her iki teknikte ana numune ile kaplama kalınlığı aynı cins malzemeden olmalıdır. Aksi takdirde ana numunedeki hatalar ölçümü olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Üstteki şekilden de görüleceği gibi alüminyum iletken bir malzeme olduğundan empedans tekniği kullanılmıştır. Ana numune ile kaplama kalınlığı aynı cins malzemedен oluşmaktadır. Yapılan teste alüminyuma ait sekiz tane kaplama kalınlığı tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığı en kalın noktadan en ince noktaya doğru sıralanmıştır. Ekrandaki şekilde görülebileceği gibi en kalın nokta 1 (bir) ile belirtilen ve her bir aralığın 10 birim olduğu düşünülürse, 50 birime denk gelmektedir. En ince kaplama kalınlığı yani 8 (sekiz) ise 30 birime denk gelmektedir.





Test cihazı : Hocking eddy Current

Model : Phases 2200

Test Malzemesi : Alüminyum (A310 Airbus yolcu uçağı arka kapılarının stringer kontrolü)

Prob : Özel prob kullanıldı. (A310 Airbus yolcu uçağı arka kapılarının stringer ölçümü için kurumca belirtilen problar kullanılmaktadır) .

Frekans : 1.25 MHz

CH1 Kazancı : 1.2 MHz

Faz Açısı : 164.0⁰

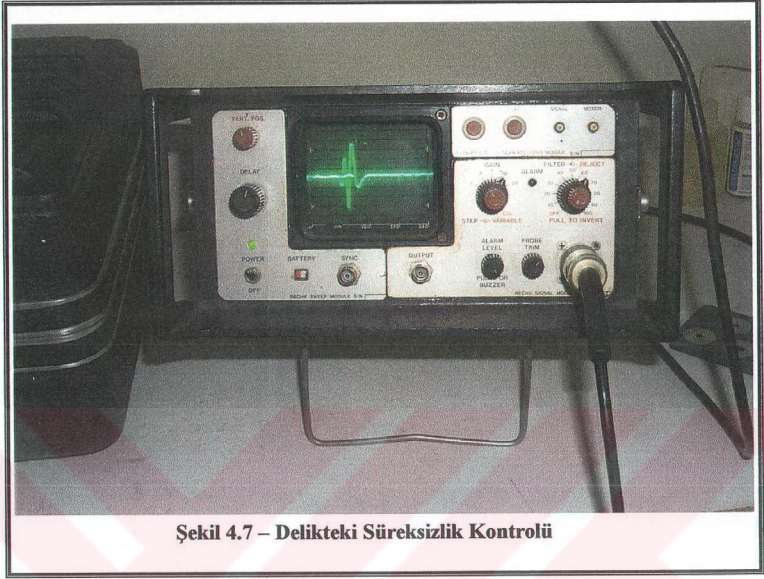
Kazanç : 43.0 dB.

Kalibrasyon bloğu üzerinde yapılan ölçümlerde

1 mm'lik çentikten alınan sinyal %80

0.5 mm' lik çentikten alınan sinyal %40 olarak görölmüştür.

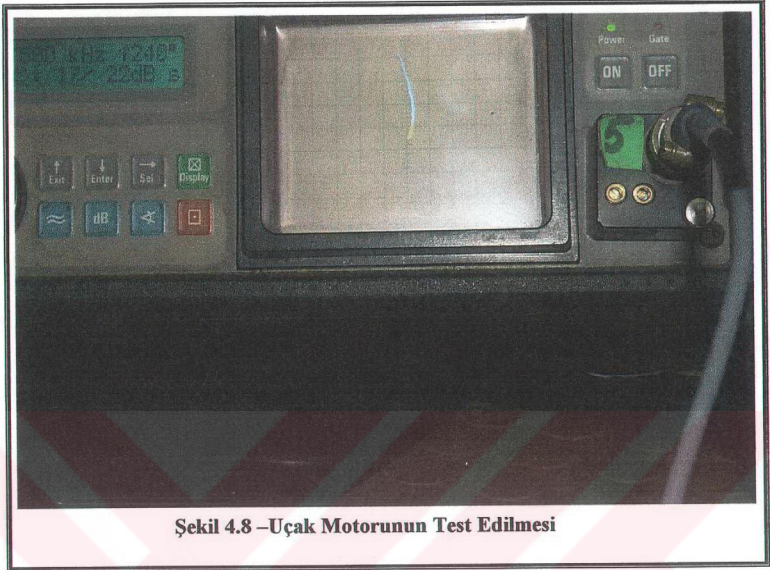
Bu iş için verilen limitler kontrol bölgesinde %40 üzerinden alınan sinyallerin çatlak olarak değerlendirilebilecektir.



Şekil 4.7 – Delikteki Süreksizlik Kontrolü

Test Cihazı	: Nortech
Model	: Rechii 1
Malzeme	: Alüminyum
Prob	: 5.16 çaplı bobin

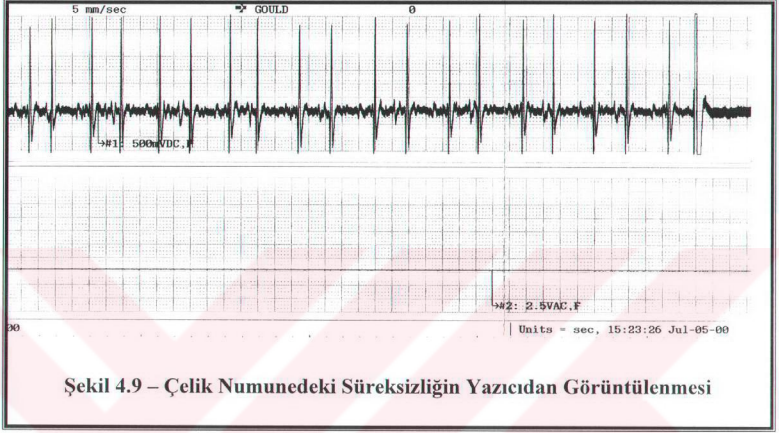
Delikteki çatlaktan alınan sinyal %80'e ayarlanmıştır. Bu değer üzerinde algılanan sinyaller çatlak olarak kabuledilecektirler.



Şekil 4.8 –Uçak Motorunun Test Edilmesi

Test Cihazı	: Rohmann
Model	: Elotest B1
Test Malzemesi	: Uçak motoru (Titanyum malzeme)
Prob	: Özel prob kullanılmaktadır.
Frekans	: 500 kHz
Faz Açısı	: 240 ⁰
Kazanç	: 22 dB

Test parçası kalibrasyon standartı üzerindeki çentikten alınan sinyal cihaz üzerindeki ekranda 4 kareye ayarlanmıştır. İşlem esnasında 4 kareyi geçen sinyal çatlak olarak kabul edilmektedir.



Test Malzemesi	: Çelik
Prob	: Özel prob
Frekans	: 2 MHz
Faz Açısı	: 327^0
Kazanç	: 65 dB

Çelik malzemenin test edilmesinde elde edilen sonuca göre 8 kareyi geçen sinyaller çatlak olarak değerlendirilecektir. Grafikten de görülebileceği gibi pikler süreksizlik yani hatanın olduğu yeri belirtmektedir. Piklerin aralarındaki sinyaller ise o bölgede herhangi bir süreksizliğin olmadığını belirtmektedir. Bu işlemler grafikten de

okunabileceği gibi 5 mm / saniye modunda çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Eğer test etme hızı 1 mm / saniye olsaydı grafik üzerinde boye bir sıklıkla pik elde edilemeyecekti. Pikler arasındaki mesafe değişecekti.

Gebze TÜBİTAK – MAM'daki araştırma ve incelemelerimde ise daha çok girdap akımlarının malzemeye uygulanması ve test cihazı hakkında bilgi edinme amaçlı olmuştur. İletkenlik lmleri ve empedans grafiklerinin oluşumu hakkında da gerekli bilgiler elde etmekle daha ileriki araştırmalar için kendime zemin hazırlama açısından verimli bir araştırma süreci geçirdim.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzün açık pazar koşulları ve rekabet nedeniyle sadece üretmek yeterli olmamakta; güvenilir, kaliteli, çevre dostu ve rekabet edebilir maliyetlerde üretim ve imalat gerçekleştirmek gerekmektedir. Firmalar yeni üretim teknikleri ve kalite stratejileri geliştirerek, sürekli olarak gelişen, güvenilir ve sonuçta tüketicinin ihtiyaçlarına cevap veren ürünleri üretmek gayreti içindedirler.

Artık hatalı bir ürün veya yanlış bir sistemin işletmelerde verdiği maddi ve manevi yükün ağırlığı çok iyi anlaşılmış durumdadır. Kalite güvence stratejilerinin geliştirilmesiyle birlikte ürün ve tesis güvenliğinin sağlanmasında tahribatsız muayene yöntem ve uygulamaları gerek kalite ve çevre özellikle de bu kavramların en önemli bileşeni olan güvenilirlik konusunda bilgi veren ve yol gösteren uygulamalar olarak önemini giderek artırmaktadır. Tahribatsız testlerle gerçekleştirilen muayenelerde, malzeme yapısında oluşan süreksizliklerin anında ve malzemeyi tahrip etmeden her türlü işletme şartlarında ve üretimin her aşamasında kontrolü mümkündür.

Gelişmiş ülkelerde kontrol amacına dönük çeşitli yöntemlerin kullanılabilmesi fizikçinin sanayi ile içiçe olmasının sonucudur. Çünkü bilimsel araştırmalarla sistemleşen bilginin, ortaya çıkarılan gerçeklerin belirli bir süreç içinde ürüne dönüştürülmesi, kullanılan üretim yöntemlerini, araç – gereç ve sistemleri kapsayan bilgileri içeren teknoloji fiziğin ürünü ve sanayi ise onun alıcısı ve uygulayıcısı durumundadır. Endüstride uygulanan yöntemlerin temelinde fizikçinin laboratuvarında uyguladığı ölçüm sistemlerinin yattığı görülür.

Endüstride kullanılan test metodlarının, herbiri diğerinin tamamlayıcısı olarak ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla her test metodu, uygulama prensipleri açısından kendine has avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bütün tahribatsız test metodlarında olduğu gibi, girdap akımlarıyla tahribatsız test metodunda da bazı avantaj ve dezavantajlar vardır.

Girdap akımlarıyla tahribatsız test metodunun en önemli dezavantajı iletken malzemelerle sınırlı olmasıdır. Bununla beraber bu metod, iletken malzemeler

üzerindeki boya ve kaplama gibi iletken olmayan kısımların kalıntılarının ölçümü amacıyla da kullanılmaktadır. Diğer bir dezavantajda girdap akımları nüfuziyet derinliğinin maksimum 10 mm gibi düşük seviyede olmasıdır. Test bobininde yaratılan manyetik alanın malzemeye geçmesi, bobin ve malzeme arasındaki mesafeye bağlı olduğundan, bu mesafenin test sırasında değişmesi yanıltıcı sonuçlar yaratmaktadır. Girdap akımları tahribatsız muayene metodu manyetikleşmeyen malzemelere uygulanmaktadır. Manyetikleşen malzemelere uygulanması durumunda test öncesi malzemenin manyetik doygunluğa ulaşması gerekmektedir.

Avantajları ise; malzeme içinde oluşturulan girdap akımları, malzemenin yapısını oluşturan birkaç parametreye bağlı olduğundan, hata tespiti dışında elektriksel iletkenlik, manyetik geçirgenlik, mikro yapı özelliklerinin incelenmesinde ve bu özelliklere bağlı sertlik, gerilim ve ısıl işlem gibi birçok parametrenin tespitinde kullanılabilir. Yüzey ve yüzeye yakın malzeme kusurlarına karşı diğer test metodlarına göre maksimum test hassasiyetine sahiptir. İstenilen geometride ve boyutta prob yapımı mümkün olduğundan, çok küçük ara yüzeylerin kontrolü mümkün olabilmektedir. Ayrıca metallerde safiyet derecesi ve homojenlik tayini, stok malzemelerin veya hurdaların cinslerine göre sınıflandırılması, Küçük çaplı ve et kalınlıklı boruların, silindirik yüzeylerin perçin ve civata deliklerinin muayenesinde en elverişli tahribatsız muayene tekniğidir.

Tahribatsız muayene uygulamalarının anlam ve gereğinin vazgeçilmez olduğu konular ve bu konuların disiplinlerarası karakteri mutlaka gözönünde bulundurulmalıdır. Tahribatsız muayene olgusunun yüksek eğitim sürecinde eğitim programlarında yer alması büyük önem sağlayacaktır.

Fizikçinin Türk Sanayiindeki yerinin bulunmasında bugüne kadar güçlüklerle karşılaşmıştır. Ancak montajdan kurtulup gerçek ve ulusal sanayimizin kurulmasında kendi ana ürünlerini üretmeye başlayan Türk sanayiinde karşılaşılan güçlükleri çözümlenecek fizikçilerimizin sanayimize girmesi sanıldığından daha hızlı olmuştur. Gerek değişik sanayi sektörlerindeki işletmelerde yaptığımız araştırma ve uygulamalarda gerekse TÜBİTAK – MAM'daki Tahribatsız Muayene

laboratuvarlarında ve Türk Hava Yolları Uçak bakım atölyelerindeki deneysel çalışmalarında fizikçilerin gelecekte bu anlamda çok daha yararlı olacağını görmekten mutluyum.



KAYNAKLAR

- ANONİM, 1967. NDT Eddy Current Testing Volume I Basic Principle.
- ANONİM, 1979. Nondestructive Testing Second Edition, 1-63s
- ANONİM, 1991. TS 9000 Kalite Sözlüğü, 7s
- ANONİM, 1995. Kalite Güvencesi Yönetim Eğitim Kitabı, TSE, 7s
- ANONİM, 1997. ISO 9000 Kalite Güvence Sistemleri, 4s
- AVINÇ, A. 1999. Fiziksel Kalite Kontrol Yöntemleri Ders Notları
- AVINÇ, A., S. ÖZALP. 1997. I. Kızılırmak Fen Bilimleri Sempozyumu Tahratsız Muayenede Manyetik Parçacık Metodu
- BAYKARA, TARIK. 1992 . Marmara Araştırma Merkezi 1991 – 1992 Seminerleri Dizisi Bildirileri II
- CECCO, V.S., G. VAN.DRUNEN, F.L.SHARP, 1981. Eddy Current Testing Manual on Eddy Current Metod Volume I
- HAGEMAIER D.J., Eddy Current Standart Penetration, 1985. Material Evaluation 1438 – 1454s
- KARAİNCİ, N., Ş. EKİNCİ, Ü. BULUBAY, M.DOĞRUSÖZ. 1993 . Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi (Ç.N.A.E.M.), Endüstriyel Uygulama Bölümü Girdap Akımları Seviye I 1-63s
- MAXWELL J.C., 1960. Scientific Paper of James Clerk Maxwell, 97 – 526s
- MİJO, M., 1980 . Eddy Current Testing, Level I (Lecture Course Notes)
- MİJO, M., 1988 .Eddy Current Testing, Level II (Lecture Notes)
- ÖZDEN, N., M.BULUT, A.TAŞKIN.1979. Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi (S.E.G.E.M.) Girdap Akımları İle Muayene 1-10s

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana sahip olduğu engin bilgileriyle yol gösteren, desteğini esirgemeyen çok kıymetli hocam Prof. Dr. Ahmet AVİNÇ' e , deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan Türk Hava Yolları Anonim Ortaklığı Bakım Merkezi NDT Atölyesi Müdürü Makine Mühendisi sayın Ethem AKDEMİR' e, Türk Hava Yolları Uçak Bakım nitesi personeline, Gebze Marmara Araştırma Merkezi Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Tahribatsız Muayene – NDT Araştırma Uzmanı Fizik Yüksek Mühendisi sayın Sabri TUNCEL' e, Gebze TÜBİTAK – MAM personeline, tezimin yazım aşamasında benden yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaŐım Ferhan YALÇIN' a ve hayatımın her aşamasında yanımda olup eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme saygı ve sevgimi borç bilip teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

23.02.1975 yılında Kıbrıs'ın Lefke kasabasında doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Kıbrıs'ta tamamladı. 1993 yılında üniversite sınavlarına girip Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. 1997 yılında bölümünü birincilikle bitirip Fizikçi ünvanı aldı. 1998 yıl Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Genel Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya başladı. 1998 yılı Ekim ayından itibaren aynı bölüme Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmektedir.