İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİRDAP AKIMI PROBU İLE YÜZEY ÇATLAKLARININ ALGILANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elek. Müh. Aydın YAKUPOĞLU

Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİRDAP AKIMI PROBU İLE YÜZEY ÇATLAKLARININ ALGILANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elek. Müh. Aydın YAKUPOĞLU
(518021005)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2005

Tez Danışmanı :	**Yard.Doç.Dr. Levent OVACIK (İ.T.Ü.)**
Diğer Jüri Üyeleri	**Yard.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM (İ.T.Ü.)**
	Yard.Doç.Dr. Serhat İKİZOĞLU (İ.T.Ü.)
	Arş.Gör. Aydın KIZILKAYA (İ.T.Ü.)

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak müşterilerin satın aldıkları sistemler daha kompleks hale gelmiştir. Bu sistemleri oluşturan her parçanın dayanım ömrünün yüksek standartlarda tutulması, sistemin kullanım ömrünü de uzatmaktadır. Bu parçaların dayanımlarının ölçümü için tahribatsız test yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tezde tahribatsız test yöntemlerinden olan "girdap akımları metoduyla metaller üzerindeki çatlakların algılanması" incelenmiştir.

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde büyük katkılarından dolayı Elektronik Müh. Ali BAŞARAN'a, malzeme temini ve şekillendirmesinde yardımlarını esirgemeyen Makine Yük.Müh. Ahmet YAKUPOĞLU ve Makine Yük.Müh. Taner BAŞARAN, Elek. Müh. Emre SAYMAN'a, test çalışmasında kullanılan cihazları temin ettiğinden dolayı Elektronik Müh. Celil CİNOĞLU'na, tezin yazım aşamasında yardımlarından dolayı Sinan BAŞARAN'a, çalışmamın hazırlanmasında bana destek olan, bilgi ve birikimini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Levent OVACIK'a, sabır ve desteklerinden ötürü aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2004 Aydın YAKUPOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR vı
TABLO LİSTESİ vıı
ŞEKİL LİSTESİ vıı
SEMBOL LİSTESİ x
ÖZET xı
SUMMARY xıı

BÖLÜM 1. GİRİŞ HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
1.1 Genel Bakış **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
1.2 Çalışmanın Amacı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
1.3 Çalışmanın Kapsamı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

BÖLÜM 2. TAHRİBATSIZ TEST YÖNTEMLERİNİN TANIMLARI VE UYGULAMA ALANLARI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
2.1 Giriş **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.2 Yüzey Yöntemleri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.2.1 Sıvı Penetrant **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.2.2 Manyetik Parçacık **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.2.3 Girdap Akımları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3 Hacimsel yöntemler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.1 Radyografi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.2 Ultrasonik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3 Birleşik yöntemler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.1 Kaçak testi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.1.1 Kabarcık Testi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.1.2 Halojen Diyot Detektörü Testi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.1.3 Helyum Kütle Spektrometresi Testi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
2.3.2 Akustik Emisyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

BÖLÜM 3. "GİRDAP AKIMLARI TEST YÖNTEMİ" İLE ÇALIŞAN CİHAZLARIN FİZİKSEL PRENSİPLERİ. HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
3.1 Giriş **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.2 Malzeme İçinde Girdap Akımlarının Üretilmesi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3 Girdap Akımlarını Etkileyen Faktörler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.1 Manyetik Geçirgenliğin Girdap Akımlarına Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.1.1 Manyetik Cisimler ve Manyetik Geçirgenlik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

3.3.1.2 Ferromanyetik Malzemelerin Ölçüm Esasları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.2 Elektriksel İletkenliğin Girdap Akımlarına Etkisi ve Elektriksel İletkenliği Değiştiren Faktörler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.2.1 Kimyasal Bileşim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.2.2 Isıl İşlem **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.2.3 Soğuk İşlem **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.2.4 Sıcaklık **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.3 Geometri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.4.1 Malzeme Kalınlığı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.4.2 Aralık Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.4.3 Kenar ve Uç Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.4.4 Süreksizlikler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.4.4.5 Nüfuziyet Derinliği **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.4 Test Şartları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.4.1 Test Frekansı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.4.2 Manyetik Temas **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.4.3Test Bobininin Akımı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
3.3.4.4 Sıcaklık **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

BÖLÜM 4. GİRDAP AKIMI PROBLARI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
4.1.Girdap Akımı Problarının Çalışma Prensibi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2 Prob Çeşitleri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.1 Şekillerine Göre Girdap Akımı Probları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.1.1 Yüzey Probları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.1.2 İç Problar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.1.3 Çevresel Problar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.2 Kullanılan Test Cihazına Göre Prob Çeşitleri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.2.1 Mutlak Problar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.2.2 Diferansiyel Problar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.2.3 Yansıma Probları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.2.2.4 Karma Problar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3. Prob Üretiminde Göz Önüne Alınan Faktörler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3.1. Genel Üretim Şartları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3.2.Bobin Dizaynı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3.3.Çekirdek **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3.3. Bağlantı Kabloları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.3.4. Bobin Endüktansı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.4 Prob Empedansına Etki Eden Faktörler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.4.1 Süreksizlik Konumunun ve Yönünün Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.4.2 Sıcaklığın Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.4.3 Yapı ve Geometrinin Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
4.4.5 Temas Etkisi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

BÖLÜM 5. GİRDAP AKIMLARI TEST YÖNTEMİ İLE ÇALIŞAN CİHAZLARIN İÇ YAPISI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
Giriş 5.1 **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
5.2 Girdap Akımı Probu – Malzeme İkilisi İçin Prob Empedansının Türetilmesi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
5.3 Probların Bağlantı Şekilleri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

BÖLÜM 6. SONUÇLAR, GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
6.1 Giriş **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.2. Kalibrasyon Çubuğunun Girdap Akımları Yöntemi İle Testi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.2.1 İşlem Süreci **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.2.2 Sonuçlar Ve Öneriler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.3. Girdap Akımları Test Yöntemi İle Yüzey Çatlaklarının Haritalanması **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.3.1 İşlem Süreci **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.3.2 Sonuç ve Öneriler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4 Girdap Akımı Probu İle Ferromanyetik Olmayan Metaller Üzerindeki Çatlakların Algılanması İçin Geliştirilen Cihazın İç Yapısı **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4.1 İşaret Üretici Devre **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4.2 Kuvvetlendirici Devre **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4.3 Köprü Devresi **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4.4 Kalibrasyon Çubukları **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
6.4.5 Sonuç ve Öneriler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

KAYNAKLAR HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

EK-A ÜZERİNDE "0,2-0,5-1,0 MM" DERİNLİĞİNDE ÇATLAKLAR OLAN PLAKANIN ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

EK-B ÜZERİNDE "0,2-0,5-1,0 MM" DERİNLİĞİNDE ÇATLAKLAR OLAN PLAKANIN ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN GİRİLDİĞİ ENDÜKTANS VE DİRENÇ DEĞİŞİMLERİNİ ÖLÇÜMÜ İÇİN HAZIRLANMIŞ MATLAB PROGRAMI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

EK-C ÜZERİNDE "S" ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

EK-D ÜZERİNDE "Y" ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

EK-E ÜZERİNDE "Y VE S" ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN HARİTALAMA İŞLEMİ İÇİN GİRİLDİĞİ MATLAB PROGRAMI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

ÖZGEÇMİŞ HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

KISALTMALAR

DA : Doğru Akım
AA : Alternatif Akım
IACS : International Annealed Copper Standard , (=Uluslararası tavlanmış bakır standartları)
CRT : Catode ray tube, (=Katot ışığı tüpü)
LCD : Liquid cristal display, (=Sıvı kristal gösterge)
ADC : Analog to digital converter, (=Analog sayısal dönüştürücü)

TABLOLAR LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1.	Tipik nüfuziyet derinliği.....	**23**
Tablo 6.1.	Probun çeşitli frekanslarda endüktans ve direnç değerleri….	**53**
Tablo 6.2.	İşaret üretici devrenin çıkışından elde edilen gerilim ve frekans değerleri.....	**61**
Tablo 6.3.	Çatlak deriliğine göre köprü ve kuvvetlendirici devre çıkışı gerilimleri……...	**68**

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Nüfuz edici sıvı yöntemiyle metaller üzerindeki çatlakların bulunması…….…… **6**

Şekil 2.2 : Manyetik parçacık yöntemi ile ferromanyetik metaller üzerindeki çatlakların bulunması……. **7**

Şekil 2.3 : Girdap akımları yöntemiyle metaller üzerindeki çatlakların bulunması……... **8**

Şekil 2.4 : Radyografi testi ile süreksizliklerin bulunması……... **9**

Şekil 2.5 : Ultrasonik yöntemle materyaldeki yüzey altı çatlağının bulunması……... **10**

Şekil 3.1 : Girdap akımı empedans düzlemi cevapları…… **14**

Şekil 3.2 : Silisli çeliğe ait mıknatıslanma eğrisi…….. **15**

Şekil 3.3 : (a) Manyetik domainlerin gelişigüzel yönelmiş hali (b) Domainlerin dış manyetik alan tesiri ile yönelmiş hali..... **16**

Şekil 3.4 : Mıknatıslanma eğrisinin doyum bölgesindeki durumu..... **18**

Şekil 3.5 : Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrileri... **19**

Şekil 3.6 : Girdap akımları nüfuziyet derinliği..... **22**

Şekil 4.1 : Girdap akımı yüzey probları..... **28**

Şekil 4.2 : Girdap akımı iç probları..... **28**

Şekil 4.3 : Girdap akımı çevresel probları .....…..... **29**

Şekil 4.4 : Mutlak prob..... **30**

Şekil 4.5 : Kendisi ile karşılaştırılmalı diferansiyel prob..... **30**

Şekil 4.6 : Dışarıdan karşılaştırmalı diferansiyel prob..... **31**

Şekil 4.7 : Yansıma probları..... **31**

Şekil 4.8 : Ayrık D probu..... **32**

Şekil 4.9 : Derinliklerine göre süreksizliklerin girdap akımları cihazlarında gözlenen hata sinyalleri büyüklükleri..... **36**

Şekil 4.10 : Süreksizliklerin girdap akımlarının yönüne göre girdap akımları cihazlarında gözlenen hata sinyali büyüklükleri..... **36**

Şekil 5.1 : Çeşitli frekanslarda titanyum, alüminyum, bakır ve çelik metallerin nüfüziyet derinliği tablosu..... **39**

Şekil 5.2 : Girdap akımları test metoduyla çalışan cihazların AC empedans köprü devresi..... **40**

Şekil 5.3 : (a) Bir bobin ve test malzemesi modeli (b) Eşdeğer paralel devresi (c) Eşdeğer seri devresi..... **42**

Şekil 5.4 : Prob empeansının normalize edilmiş grafik gösterimi..... **44**

Şekil 5.5 : Test malzemesi içinde akan bir girdap akımı dairesinin üstten görünüşü……..... **45**

Şekil 5.6 : Test malzemesi içinde akan bir girdap akımı dairesinin kesiti. Değişimi……..... **45**

Şekil 5.7 **:** (a) Dirence göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (b) Cidar kalınlığına göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (c) frekansa göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (d) tüp veya bobin çapına göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi…… **47**

Şekil 5.8 **:** (a) Tek sargılı birincil bobin (b) Birincil ve ikincil bobin (c) İki birincil sargıdan oluşan bobinin köprü devresi (d) İki birincil ve iki ikincil sargıdan oluşan köprü devresi (e) Kendisiyle karşılaştırmalı iki birincil bobin köprü devresi (f) Kendisi ile karşılaştırmalı iki birincil ve iki ikincil bobinden oluşan köprü devresi **..... 49**

Şekil 6.1 : Üzerine 5 cm aralıklarla 0.2, 0.5, ve 1.0 mm derinliğinde genişliği 0.3 mm olan çatlaklar açılmış bakır kalibrasyon çubuğu. ……... **51**

Şekil 6.2 **:** 5 cm x 20 cm ve 0.5 cm aralıklı çizgilerin bulunduğu aydınger kağıdı…….. **51**

Şekil 6.3 **:** Hocking firmasının 500 kHz için ürettiği 121P1A kalem probu……..……... **51**

Şekil 6.4 **:** Prob tespit ayağı.....……... **52**

Şekil 6.5 **:** INSTEK LCR METER-819…… **52**

Şekil 6.6 **:** a) Yüzde endüktans değişimi grafiği, 20 kHz, Nüfuziyet Derinliği = 0,352 mm. b) Yüzde endüktans değişimi grafiği, 50 kHz , Nüfuziyet Derinliği = 0,226 mm. c) Yüzde endüktans değişimi grafiği, 100 kHz , Nüfuziyet Derinliği = 0,159 mm……. **54**

Şekil 6.7 **:**20 kHz – 50 kHz – 100 kHz'te yüzde direnç değişimi grafiği…… **55**

Şekil 6.8 **:** Üzerine S ve Y harfi en boyunca açılmış plakalar…….. **56**

Şekil 6.9 **:** 10x10 cm ve üzeri kenar uzunluğu 0.5 cm olan karelere ayrılmış aydınger kağıdı……... **57**

Şekil 6.10 **:** Üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın direnç bileşenine göre haritalanması .....…….. **58**

Şekil 6.11 **:** Üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın endüktans bileşenine göre haritalanması..... **58**

Şekil 6.12 **:** Üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın direnç bileşenine göre haritalanması..... **59**

Şekil 6.13 **:** Üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın endüktans bileşenine göre haritalanması..... **59**

Şekil 6.14 **:** Gerilim ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre…….. **62**

Şekil 6.15 **:** Kuvvetlendirici devre…….. **63**

Şekil 6.16 **:** OPA541AP'nin pinlerinin bağlantı şeması……. **64**

Şekil 6.17 **:** AA köprü devresi, kuvvetlendirici ve gösterge paneli…… **66**

Şekil 6.18 **:** a) Üzerine derinliği 0.1 mm' den 0,1 mm artımlarla 1mm'ye kadar olan, genişliği 0.3 mm olan çatlakların açılmış plaka b) derinliği 1,5 mm' den 1 mm artımlarla 6 mm' ye kadar olan, genişliği 0.3 mm olan çatlaklar açılmış plaka…… **67**

SEMBOL LİSTESİ

K : Bobin boyutları (bobin uzunluğu, dış ve iç çap) ile ilgili karakteristik.
f : Frekans
N : Sarım sayısı
μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik
H : Bobin ekseni boyunca oluşan manyetik alan
N : Sarım sayısı
I : Bobin akımı
ℓ : Bobin boyu
L : Çekirdekli bobinin endüktansı
$L_Ç$: Çekirdeksiz bobinin endüktansı
r_0 : Bobin yarıçapı
r_c : Çekirdek yarıçapı
μ : Manyetik geçirgenlik
μ_0 : Telin manyetik geçirgenliği
μ_r : Çekirdeğin manyetik geçirgenliği
R_p : Bobin teli ve probun bağlantı kablolarının toplam direncidir
L_p : Bobinin test metali üzerinde tutulduğunda endüktansı
L_0 : Bobin test metalinden uzaklaştırıldığında (havada)endüktansı
Z_p : Prob-malzeme ikilisinin toplam empedansı
X_p : Bobinin test edilen materyal üzerindeki endüktif reaktansı
N_p : Test bobinin sarım sayısı
R_s : Malzemenin direnci (bobine getirdiği ek yük)
Ls : Tek sarımlı telin endüktansı
N_s : Tek sarımlı telin sarım sayısı
D : Girdap akımı halkasının çapı.
d : Girdap akımı kesit çapı
t : Test malzemesinin kalınlığı
H_c : Koerzif manyetik alan şiddeti
B_r : Artık manyetik akı yoğunluğu
H_{sat} : Doyum manyetik alan şiddeti
B_{sat} : Doyum manyetik akı yoğunluğu
X_p : Bobinin test edilen materyal üzerindeki endüktif reaktansı

GİRDAP AKIMI PROBU İLE YÜZEY ÇATLAKLARININ ALGILANMASI

ÖZET

Günümüzde kullanılmakta olan cihazların belli bir süre bakıma ihtiyaç duymadan çalışabilmesi için cihazı oluşturan her bir parçanın kalite standartları yüksek tutulmalıdır. Bu cihazları oluşturan parçaların kalite standartları ne kadar yüksek tutulursa cihazın kullanım ömrü ve güvenilirliği de o kadar yüksek olacaktır.

Bu çalışmada tahribatsız test yöntemlerinden biri olan Girdap Akımları Yöntemi ile metal parçalardaki yüzey çatlaklarının konumunun, şeklinin ve derinliğinin algılanarak haritalanması için kullanılacak bir ölçüm sistemi laboratuar ortamında geliştirilmiş ve denenmiştir.

Metal malzemelerin yüzeyinde oluşan çatlaklarının algılanmasında kullanılan girdap akımı probu gerilim ve frekans seviyeleri değiştirilebilen bir güç kaynağı tarafından sürülmüştür. Test edilecek parçayı oluşturan metal malzemenin cinsine göre gerekli gerilim ve frekans seviyelerinin belirlenmesi için standart bir test plakası imal edilmiştir. Bu testlerde kullanılan 50 mm x 200 mm boyutlarında bakır malzemeden yapılmış, 10 mm kalınlığındaki bir test plakası imal edilmiştir. Bu bakır plaka üzerine eşit aralıklarda 0.2 mm, 0.5 mm ve 1.0 derinliğinde ve 0.3 mm genişliğinde yapay çatlaklar oluşturulmuştur. Prob empedansının aktif ve reaktif bileşenlerinin çeşitli frekans değerleri için yapılan ölçümlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çatlakların derinliğinin ve konumunun belirlenmesi mümkün olmuştur. Bu sonuçlar yardımıyla girdap akımı probunu sürmek için en uygun gerilim ve frekans seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen bu gerilim ve frekans değerleri kullanılarak, 100 mm x 100 mm boyutlarında ve 10 mm kalınlıkta bakır plakalar üzerine sabit derinlik ve çeşitli şekillerde oluşturulmuş çatlak şekillerinin empedans haritaları elde edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen yöntemler ve ölçüm sisteminin sayesinde metal yüzeyler üzerinde yapay olarak oluşturulmuş çatlakların şekilleri 5 mm çözünürlükle tespit edilebilmektedir. Daha ileri çalışmalarda bu çözünürlüğün daha iyileştirilmesi mümkün olabilecektir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen bulgular, metallerdeki yüzey çatlaklarının otomatik olarak yüksek bir çözünürlükle haritalanmasını sağlayan bilgisayar destekli bir tarama sisteminin tasarlanması aşamasında önemli bir temel oluşturacaktır.

DETECTION OF SURFACE CRACKS WITH EDDY CURRENT PROBES

SUMMARY

If it is expected for a product we use in our daily lives to work without a maintenance for a certain period of time, the quality standards for every part forming this product has to be set high. The higher the standards for the parts of this apparatus, the longer the operation life and the more reliable it operates.

In this study, a measurement system using eddy current techniques, one of the non-destructing test techniques, to map the surface cracks on metallic objects by detecting their location, shape and depth has been developed and tested in a laboratory environment.

The eddy current probe used for detecting surface cracks on metallic objects is driven by a power supply with adjustable voltage and frequency. A standard test plate is manufactured to determine the optimum voltage and frequency levels for the material used in the metallic object to be tested. A copper test plate of 10-mm-thick, 50-mm-wide and 200-mm-long is manufactured to be used in these tests. Artificial cracks with depths of 0.2 mm, 0.5 mm and 1.0 mm are placed at equal intervals along the surface of the test plate. Evaluating the results obtained from the measurements of active and reactive components of the probe impedances for each crack depth at various frequency values, the depths and locations of all the cracks are successfully determined. These experiments also provided optimum frequency and voltage values for driving the eddy current probe. Using these frequency and voltage values, impedance maps of various crack shapes with fixed depths carved on a 10-mm-thick, 100-mm-wide and 100-mm-long copper plate are successfully obtained. It has been shown that the measurement system and methodologies developed in this study is capable of detecting the various shapes of surface cracks with a resolution of 5 mm. Improvement of this resolution will be possible in future studies.

The results obtained from this research will constitute a major foundation to be used in the design phase of a high-resolution, computer-aided scanner for automatically mapping surface cracks on metallic objects.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

Günümüzde müşteriler satın aldıkları her sistemle beraber kaliteye daha fazla önem vermektedirler. Bunun nedeni basittir. Piyasadaki kompleks ürünlerin belli bir süre servise ihtiyaç duymadan çalışabilmesi için her bir parçanın güvenirliliği yüksek olmalıdır. Buz dolaplarımızın, arabalarımızın veya günlük yaşantımızda kullandığımız araçların uzun yıllar boyunca bozulmadan çalışmasını beklemek en doğal hakkımızdır. Bu ürünlerden her biri bir çok bileşen içerir. Bu bileşenlerin kalitesi yüksek olursa, cihazın kullanım ömrü de yüksek olur [1].

Kalite standartlarının yüksek olması gereken daha kompleks cihazlara jet uçaklar örnek gösterilebilir. Bu uçakların gövdesi, kanatları ve buna benzer bir çok parçasında dayanıklılık büyük önem taşır. Pervanelerindeki mikro çatlaklar daha önceden belirlenmez ise uçuş esnasında büyük sorunlar yaşanabilir ve bu sorunlar yolcuların hayatını tehlikeye atabilir. Nükleer santrallerde de güvenirlilik çok önemli olup nükleer reaksiyonun gerçekleştiği havzanın bakımı sık sık kontrol edilmelidir [2, 3-9].

Günlük hayatımızda kullandığımız ve yaşamımızı kolaylaştıran bir çok sistem parçasının test işlemlerinde tahribatlı ve tahribatsız test metotları kullanılmaktadır. Tahribatlı ve tahribatsız testler kullanılan materyalde bir hata olup olmadığını anlamak için yapılırlar. Bir çok performans ve dayanıklılık testi ise bazı koşullar altında parçanın çalışıp çalışmadığını saptamak için kullanılır. Yani bir devreye elektrik verilerek test edilmesi bir tahribatlı veya tahribatsız test yöntemi değildir [5].Tahribatsız testler, tahribatlı testlerin tamamlayıcısıdırlar. Tahribatlı testler test edilen malzemeyi daha sonradan kullanılamayacak hale getirirler. Bu testler sonucunda parça bükülür veya kırılır. Bu testler malzemeyi bozduğundan dolayı pahalıya mal olur. Test edilen her bir malzeme kalite ve güvenlik standartlarına uymalıdır, fakat tahribatsız testlerde ise test edilmemiş parçalarla test edilen parçalar aynı kalitede olduğu varsayımı yapılır. Bu yüzden tahribatlı testleri tamamlamak

için tahribatsız testler yapılmaktadır. Tahribatsız testlerde amaç parçanın fiziksel kalitesini ve kullanımını bozmadan onun kalitesini tayin etmektir. Böylece tahribatsız testler tahribatlı testleri destekler ve test edilecek bütün parçaların kalite standartlarına uygun olduğundan emin olunur [1, 2].

Tahribatsız testin amacı, malzeme süreksizliklerini ve boyutlarını, o malzemeyi tahrip etmeden tespit etmektir. Malzemenin sağlamlığına ve güvenilir bir şekilde kullanılmasına süreksizlikler uygulanan kod ve şartnamelere göre değerlendirildikten sonra karar verilir. Süreksizliklerin tip ve boyutları standartlarla karşılaştırılır. Standardın müsaade ettiği sınırı aşan süreksizlikler hata olarak kabul edilir ve malzeme tamir veya reddedilir [5].

Tahribatsız test yöntemleri çeşitli fiziksel prensiplere dayanmakta olup, farklı şartlar altında uygulanır. Yöntem test edilen malzemeye ve aranan hatanın türüne göre seçilir. Her birinin diğerine göre üstün yönleri vardır. Bazı durumlarda birbirlerinin tamamlayıcısı olup bileşik olarak da kullanılırlar [1].

Tahribatsız test yöntemleri ürün malzemeler üzerinde ve çalışma esnasında yaygın olarak uygulanmaktadır. Tahribatsız oluşu ve tahribatlı yöntemlere göre daha hızlı olması hemen her sahada yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır. Uygulamaları işletme anında sistemler durdurulmadan yapılabilir ve çoğu uygulamalarda sonuçlar test sırasında alınır [1].

1.2 Çalışmanın Amacı

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 getirir. Örneğin, radyografide malzemeye nüfuz edici eleman radyasyon, algılayıcı eleman radyografik filmdir. Film üzerindeki bilgiler kimyasal işlemlerden sonra gözle algılanabilen belirtiler haline getirir [3].

Bu çalışmanın amacı tahribatsız test yöntemlerini tanıtmak ve bu yöntemlerden biri olan "girdap akımı probuyla metaller üzerindeki çatlakların algılanması" metodunu incelemektir. Bu metotla çalışan cihazların çalışma prensibi hakkında araştırma

yapılmış, bu prensiple çalışan bir cihaz pratikte gerçeklenmiştir. Algılanan çatlakların bilgisayarda haritalanması araştırılmış ve de kalibrasyon blokları yardımıyla haritalama işlemi yapılmıştır. Aynı zamanda bu metotla çalışan cihazların çalışma prensibi incelenmiştir.

Bu cihaz metal üzerindeki çatlakların var olup olmadığı hakkında bize bilgi vermektedir. Cihazdan alınan veriler dahilinde çatlağın derinliği hakkında mutlak doğru bilgi alınmamaktadır. Bu çalışma sonradan metal yüzeyindeki çatlakların derinliği ve yüzey altı hataları hakkında güvenilir bir şekilde bilgi verecek olan yeni cihazların yapımına ışık tutacaktır.

1.3 Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. BÖLÜM 1'de çalışma hakkında genel bakış, çalışmanın amacı ile kapsamı hakkında görüş ve düşünceleri aktaran bir giriş bölümü yer almaktadır.

BÖLÜM 2'de tahribatsız test yöntemleri genel olarak tanıtılmış ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir.

BÖLÜM 3'de "girdap akımları test yöntemi" bazlı çalışan cihazların fiziksel prensipleri anlatılmıştır. Malzeme içinde girdap akımlarının üretilmesi ve girdap akımlarını etkileyen faktörler hakkında bilgiler verimiştir.

BÖLÜM 4'de girdap akımı problarının çalışma prensipleri hakkında bilgiler verilmiş, şekillerine göre ve kullanılan test cihazına göre prob çeşitleri anlatılmıştır. Prob üretiminde hangi faktörlere dikkat edinilmesi gerektiği açıklanmıştır.

BÖLÜM 5'de girdap akımları test yöntemi ile çalışan cihazların iç yapısı incelenmiştir. Girdap akımı ve malzeme ikilisi için prob empedansının türetilmesi için transformatör benzetimi formüllerle açıklanmıştır. Probların bağlantı şekilleri hakkında bilgiler verilmiş ve bu amaçla üretilmiş ürünler ve özelliklerin tanıtılmış ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir.

BÖLÜM 6'da girdap akımı probu ile ferromanyetik olmayan metallerin üzerindeki çatlakların algılanması için bir cihaz geliştirilmiş ve bu cihazın iç yapısı anlatılmıştır. Ayrıca girdap akımları yöntemiyle, MATLAB programlama dilinde hazırlanan program yardımıyla, yüzey çatlakları haritalanmıştır. Buna ek olarak bir

kalibrasyon çubuğunun girdap akımları yöntemi ile testi MATLAB programı yardımıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, yapılan bu çalışmanın zayıf ve kuvvetli yanları tartışılarak, ilerideki aşamalarda yapılacak çalışmaları yönlendirecek öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. TAHRİBATSIZ TEST YÖNTEMLERİNİN TANIMLARI VE UYGULAMA ALANLARI

2.1 Giriş

Tahribatsız test materyaller üzerindeki süreksizliklerin algılanmasını ve değerlendirilmesini bütün metotlarıyla inceleyen bir mühendislik dalıdır. Süreksizlikler materyalin veya yapının işe yararlılığına etki edebilir, bundan dolayı tahribatsız test kalite kontrolünde ve ürün ömrünün bulunmasında önemli olduğu kadar operasyonların güvenle yapılmasını garanti altına almaktadır. Süreksizlikler materyal üzerindeki çatlaklar, kaynak yerlerindeki düzensizlikler, döküm hataları, güç kaybına ve servis hatalarına neden olabilecek olan çeşitli yapısal özellikler olabilir [5].

Tahribatsız testin en önemli özelliği ise test işleminin işlem süreci içerisinde bulunan parçaya veya yapıya bu süreci bozacak şekilde bir zararlı etki üretmemesidir [1].

Tahribatsız test tam olarak belli sınırlar içinde tanımlandırılmamıştır. Sınırları basit teknikler olan yüzeyin gözle muayene edilmesinden daha karışık metotlar olan radyografi, ultrasonik test, manyetik parçacıkla çatlak algılanması şeklinde geniş bir alana yayılmıştır. Ayrıca tahribatsız testle ölçümü yapılacak olan parçanın sertliği, iç gerilmesi, iletkenliği gibi fiziksel özelliklerinin ölçümü de yapılabilir [5].

Tahribatsız test metotları bir sistemin belli bir parçasının lokal olarak analiz edilmesinde veya otomasyon sistemi içerisindeki ürün güvenirliliğinin kontrolünde kullanılabilir [9].

Bu bölümde tahribatsız test yöntemleri ve uygulamaları hakkında bilgi verilecektir.

2.2 Yüzey Yöntemleri

Yüzey yöntemleri malzemelerin yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında bulunan hataların tespitinde uygulanır ve aşağıdaki yöntemleri kapsar.

2.2.1 Nüfuz Edici Sıvı

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 nüfuz edici sıvı; viskozitesi, yüzey gerilimi ve yoğunluğu ile nitelendirilir. Görünürlüğü boya veya floresan maddelerle sağlanır. Nüfuz edici sıvı testinde kullanılan diğer elemanlar temizleyici ve emilim sıvısıdır.

Yöntem uygulanmadan önce test edilecek malzeme yüzeyi dikkatli bir şekilde temizlenir. Yüzey kuruduktan sonra yüzeyine nüfuz edici sıvı uygulanır. Yeterli bir nüfuziyet süresinden sonra, nüfuz edici sıvının fazlası yüzeyden temizlenir ve üzerine emilim sıvısı uygulanır. Emilim sıvısı, hataların içersine nüfuz etmiş olan nüfuz edici sıvının tekrar malzeme yüzeyine emilmesini ve görünür hale gelmesini sağlar. Emilim sıvısı genellikle beyaz, nüfuz edici ise kırmızı veya sarımsı yeşil floresan renkte olur. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bu renk farkının sağladığı kontrast görünürlüğü kolaylaştırılır. Floresan nüfuz edici ultraviyole ışık ile görünür hale getirilir [1, 3, 5].



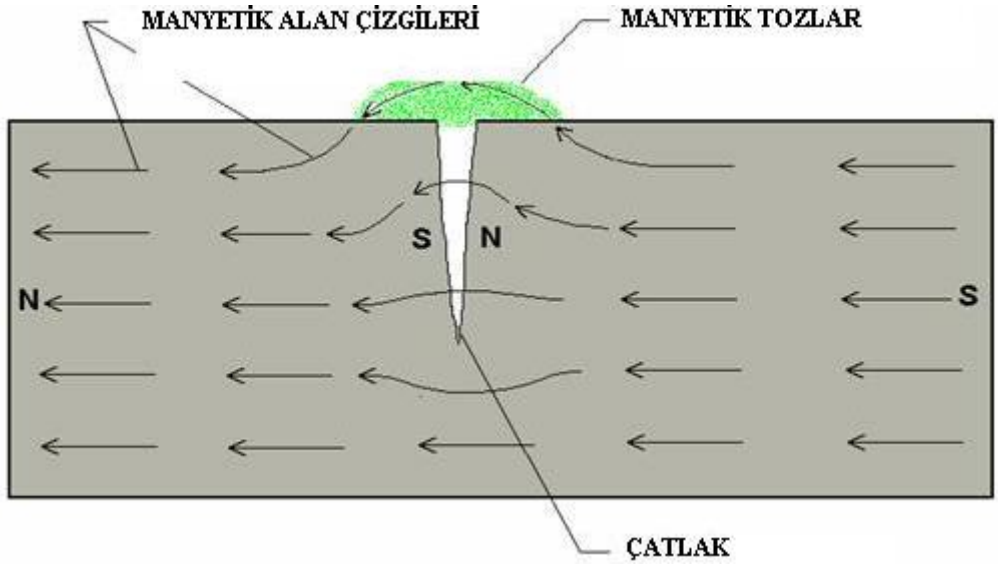
Şekil 2.1: Nüfuz edici sıvı yöntemiyle metaller üzerindeki çatlakların bulunması.

2.2.2 Manyetik Parçacık

Manyetik parçacık yöntemi yüzey ve yüzey altı hatalarının tespitinde uygulanır. Bu yöntemle yüzey altı hatalarının algılanması, hatanın konumuna ve yüzeye yakınlığına bağlıdır. Sadece ferromanyetik malzemelere uygulanır.

Yöntemin esası test malzemesinin manyetize edilmesine dayanır. Manyetize etme, test parçasından elektrik akımı veya doğrudan manyetik akı geçirilerek yapılabilir. Parçanın test edilen kısmında herhangi bir süreksizlik varsa geçirgenlik farkından dolayı manyetik akı çizgileri süreksizlikten sapar ve süreksizlik üzerinde yoğun bir kaçak alanı oluşturur.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi manyetik parçacık yönteminin önemli elemanı olan manyetik tozlar malzemenin üzerine serpildiğinde 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 floresan olarak üretilirler. Yüzey hataları keskin, yüzey altı hataları ise daha zayıf dağınık görüntü verirler [1, 3, 5].



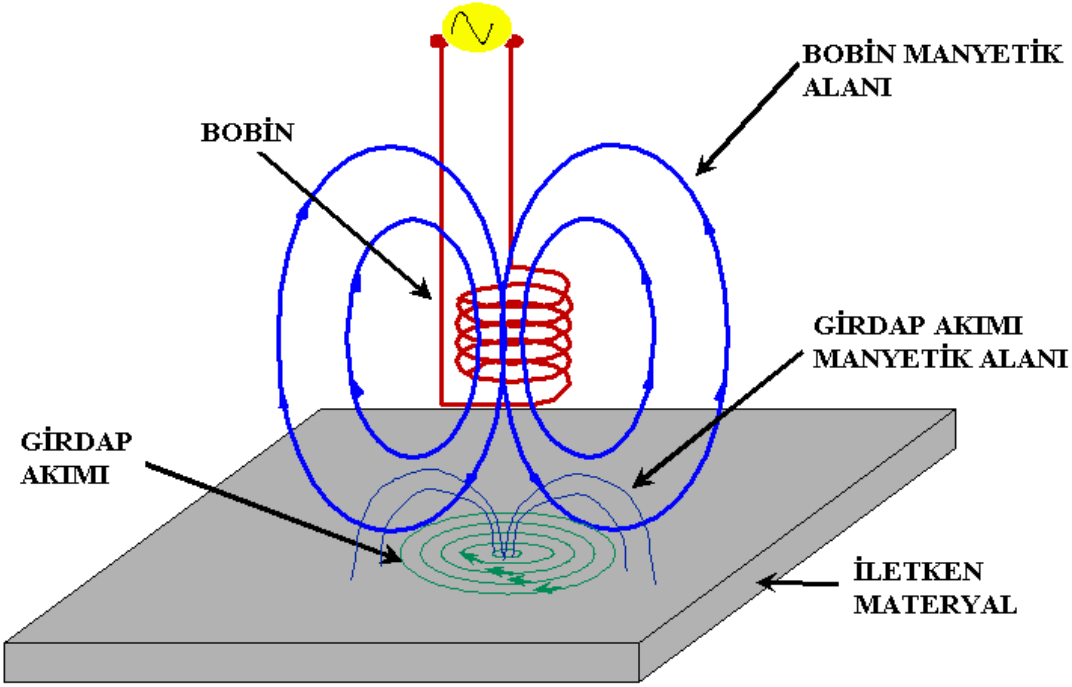
Şekil 2.2: Manyetik parçacık yöntemi ile ferromanyetik metaller üzerindeki çatlakların bulunması.

2.2.3 Girdap Akımları

Girdap akımları yüzey ve yüzey altı hatalarının tespiti için uygun bir yöntemdir. Yöntem elektrik iletkenliğine sahip bütün metal ve alaşımlarına uygulanabilir. Ancak, ferromanyetik olmayan malzemelerde daha etkindir.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bir alternatif akım bobini tarafından oluşturulan değişken manyetik alanın malzeme yüzeyinde dairesel girdap akımlarını indüklemesine dayanır. İndüklenen bu girdap akımları, bobindeki manyetik alana zıt yönde ikinci bir manyetik alan meydana getirir. Test parçasında girdap akımlarının oluştuğu bölgede bir süreksizlik varsa, test malzemesi ve süreksizlik arasındaki elektrik direnci farkından dolayı akımlar farklı bir yörünge izleyeceklerdir. Bu farklılık bobin tarafından algılanır.

Hata tespitinden başka girdap akımları; kaplama kalınlığı; elektrik iletkenliği ölçümleri ve metallerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmasında da kullanılmaktadır [1, 3, 5].



Şekil 2.3: Girdap akımları yöntemiyle metaller üzerindeki çatlakların bulunması.

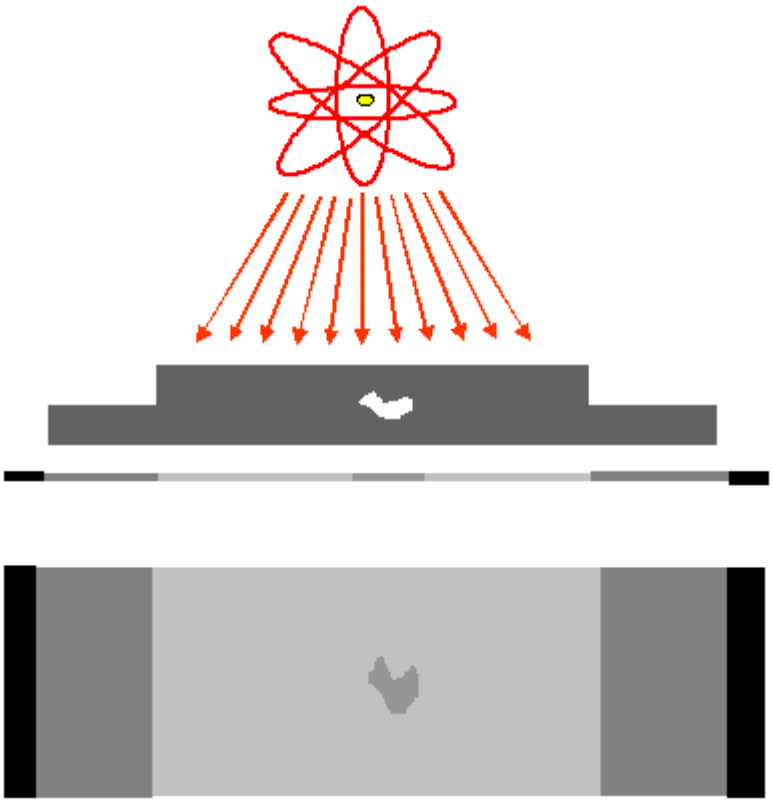
2.3 Hacimsel yöntemler

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

2.3.1 Radyografi

Test kayıtlarının kalıcı ve yöntemin oldukça hassas olmasından dolayı radyografi çok yaygın olarak uygulanmaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi test parçası bir kaynaktan çıkan radyasyon demeti ile (x veya gama ışınları) ışınlanır. Radyasyon malzeme içinden geçtikten sonra parçanın arka yüzeyine yerleştirilmiş olan filme ulaşır. Süreksizlikler radyasyonu farklı olarak sönümleyeceklerinden, süreksizliklerin olduğu bölgelerden radyasyonun şiddeti ve film üzerinde oluşturacağı kararma da olacaktır. Filmin banyo işleminden sonra, film üzerindeki karamalar hatanın belirtisi olarak algılanır.

Düzlemsel hatalar radyasyon demetine dik doğrultuda bulundukları sürece radyografi yöntemi ile algılanabilirler [1, 3, 5].

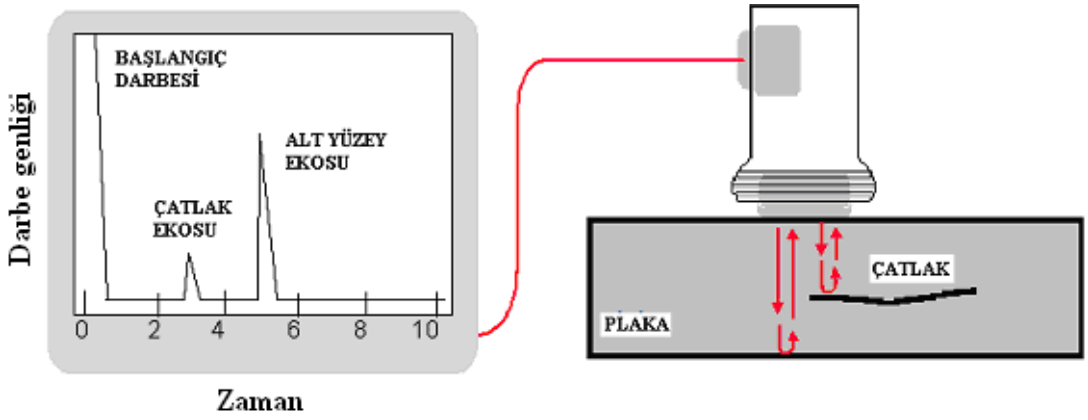


Şekil 2.4: Radyografi testi ile süreksizliklerin bulunması.

2.3.2 Ultrasonik

Ultrasonik testin prensibi, prob tarafından üretilen yüksek frekanstaki (0.1 – 20 MHz) dalgaların test malzemesi ortamında yayılması ve bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansıması esasına dayanır. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi prob tarafından algılanan dalgalar elektrik sinyallerine dönüştürülür ve katot ışınları tüpü ekranında malzeme iç yapısının habercisi olan yankılar halinde görülür. Ekran üzerinde gözlenen yankıların konumları ve genlikleri hatanın bulunduğu yer ve boyutları hakkında bilgi verir.

Ultrasonik yöntemle bütün hatalar duyarlık sınırları dahilinde test edilebilir. Hatalar ultrasonik demete dik doğrultuda olduklarında en iyi şekilde algılanırlar. Kaba taneli yapılar ultrasonik testi zorlaştırır [1, 3, 5].



Şekil 2.5: Ultrasonik yöntemle materyaldeki yüzey altı çatlağının bulunması.

2.3 Birleşik yöntemler

Birleşik yöntemlerin en önemli yönü, parçanın tamamının aynı anda test edilebilmesidir. Aşağıdaki yöntemler bu gruba girmektedir:

2.3.1 Kaçak testi

Kaçak testi malzemenin tüm kalınlığı boyunca uzanan süreksizliklerin tespitinde uygulanan bir yöntemdir. Test, malzemenin belli bir bölgesine uygulanacağı gibi, tamamını da kapsayabilir. Süreksizliklerin içine nüfuz edecek olan madde bir sıvı veya gaz olabilir. Süreksizliğin içinden sızıp karşı yüzeye geçen sıvı veya gaz tespit edilmek suretiyle kaçağın yeri bulunur. Yöntem iki gruba ayrılabilir. Birincisinde, süreksizliğin boyutuna bakılmaksızın sadece yeri tespit edilir. İkincisinde ise, süreksizliğin yeri ve boyutu tespit edilir. Kaçak testi farklı tekniklerle uygulanabilir. Çeşitli kaçak testleri aşağıda sıralanmıştır.

2.3.1.1 Kabarcık Testi

Bu teknik sadece kaçağın yerini tespit etmede kullanılır. Kaçağın boyutları hakkında bilgi vermez. İki ayrı şekilde uygulanabilir:

- **Basınç Testi**: Basınçlı kaplara uygulanır. Kaçak aranan bölgeye uygun bir sıvı sürülür. Karşı yüzeyden uygulanan basınçtan dolayı, süreksizlik içerisinden sızacak olan hava, kabarcıklar oluşturur. Bu kabarcıklar kaçağın belirtisi olarak algılanır.
- **Vakum Kutusu Testi:** Basınç uygulanmayan kaplardaki kaçakları uygulamada tespit etmede kullanılır. Parçanın test edilecek bölgesine uygun

bir sıvı sürülür ve üzerine vakum kutusu yerleştirilir. Yeterli derecede sızdırmazlık sağlandıktan sonra kutu içindeki hava boşaltılır. Ters basınçtan dolayı, test yüzeyindeki herhangi bir kaçak, kabarcıkların oluşmasına neden olur [1].

2.3.1.2 Halojen Diyot Detektörü Testi

Bu teknikte, bir halojen gazı izleyici olarak kullanılır. Test edilecek kap izleyici gaz ile doldurulur ve içine basınç uygulanır. Özel bir sistem yardımıyla, kaçaktan geçen gaz miktarından kaçağın boyutları yarı kantitatif olarak tespit edilir [1].

2.3.1.3 Helyum Kütle Spektrometresi Testi

Test edilecek kap bir vakum pompası ve spektrometre aleti ile bağlanır. Önce kap içerisindeki hava boşaltılır. Sonra kabın dış yüzeyine helyum gazı püskürtülür. Vakumdan dolayı helyum gazı kaçak yerlerinden kabın içine sızar ve bu, spektrometre aleti tarafından kantitatif olarak değerlendirilir [1].

2.3.2 Akustik Emisyon

Akustik emisyon yönteminde, yük veya basınç altında bulunan parçalardaki süreksizliklerin ürettiği esnek dalgalar algılanır. Esnek dalgalar parçaya uygulanan stresten dolayı süreksizliklerin genişleyip daralmasından doğar. Bu dalgalar algılanmak suretiyle süreksizliklerin yerleri ve boyutları tespit edilebilir. Eğer parça bir stres altında değil ise süreksizliklerden herhangi bir sinyal alınamaz ve varlıkları da tespit edilemez. Esnek dalgaların kaynağı (süreksizlikler) parça yüzeyine yerleştirilen ve ultrasonik problara benzeyen detektörlerle algılanır. Algılanan sinyaller, genliklerinden, titreşim şeklinden (sürekli veya kesikli) ve zamandan gidilerek bilgisayarda değerlendirilir [1].

BÖLÜM 3. "GİRDAP AKIMLARI TEST YÖNTEMİ" İLE ÇALIŞAN CİHAZLARIN FİZİKSEL PRENSİPLERİ.

3.1 Giriş

Girdap akımları testinin orijinleri Michael Faraday'ın 1831 yılında elektromanyetik indüksiyonu buluşuna dayanmaktadır. Michael Faraday 1800'lü yılların başlarında İngiltere'de yaşamış bir kimyager olup elektromanyetik indüksiyon, elektromanyetik rotasyon, mıknatıslanma gibi bir çok buluşuyla tanınır. Başka bir bilim adamı olan Hughes 1879 yılında iletken ve geçirgenliği değişken metallere dokundurulan bobin özelliklerinin değişimini kaydedebilmiştir. Bununla birlikte 2. Dünya Savaşının sonlarına kadar bu yöntem metallerin süreksizliklerinin bulunmasında kullanılan bir yöntem olamamış, 1950 ve 1960'lar da uçak ve nükleer endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise girdap akımları tekniği geniş kapsamlı kullanılan bir metottur [2, 3, 5].

Bu bölümde girdap akımları testinin fiziksel prensipleri anlatılmış girdap akımları testine etki eden faktörlerden bahsedilmiştir.

3.2 Malzeme İçinde Girdap Akımlarının Üretilmesi

Bir alternatif 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.

İletken bir malzemede girdap akımlarının oluşabilmesi için zamanla değişen bir manyetik alana ihtiyaç vardır. Bu değişken manyetik alan, alternatif akım taşıyan bir bobinle sağlanabilir. Bobindeki alternatif akım değiştikçe onunla birlikte manyetik alan da değişecektir. İletken malzemenin yüzeyindeki manyetik alan şiddeti, test bobininin boyuna şekline, bobinden geçen akıma ve bobinin yüzeye olan uzaklığına bağlıdır.

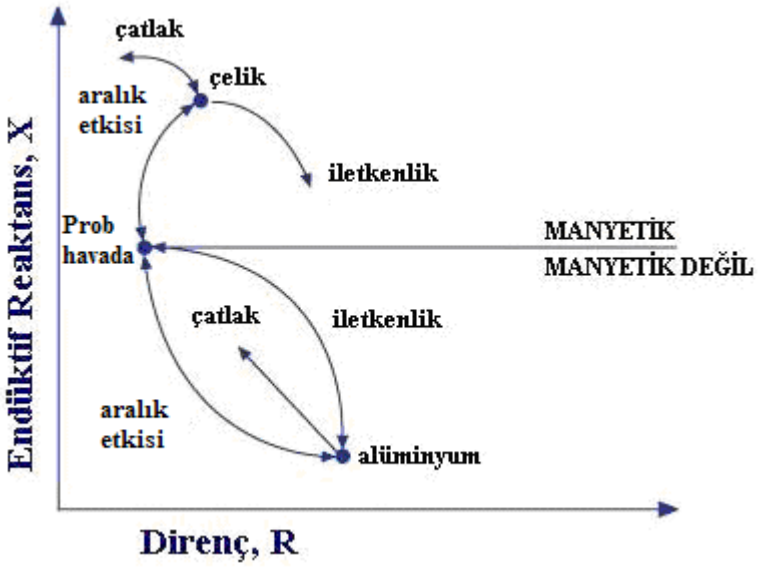
Test bobinindeki değişken manyetik alan iletkene nüfuz ederek; iletkenin yüzeyine paralel, ancak uygulanan manyetik alana dik yönde dairesel olarak girdap akımlarını oluşturur. Girdap akımlarının akış yönü birincil manyetik alana zıt yönde ve onun değişimiyle aynı hızdadır. İletken malzemenin yüzeyindeki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

- Birincil manyetik alanın büyüklüğü,
- Manyetik alanın değişim hızı (frekansı),
- Malzemenin elektrik iletkenliği,
- Malzemenin manyetik geçirgenliği (permeabilitesi),

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 gereken en önemli husus, test malzemesinin manyetik veya manyetik olamayan bir malzeme olabileceği, fakat mutlaka elektrik iletkenliğine sahip olması gerektiğidir.

Şekil 3.1'de girdap akımı devresi havada balans durumuna getirildikten sonra alüminyum plakaya yaklaştırılmış ve burada empedansın direnç bileşeninde bir artma gözlenmiştir. Bunun nedeni alüminyum plaka üzerinde oluşan girdap akımlarının bobin enerjisini bobinden uzaklaştırmasıdır, bu etken dirençte bir artıma neden olmaktadır. Bobinin endüktif reaktans bileşeninde ise bir azalma gözlenir, bunun nedeni ise girdap akımları tarafından oluşturulan birincil manyetik alana ters yönde olan ikincil bir manyetik alan meydana gelmesidir. Toplam manyetik alan böylece zayıflar. Eğer iletkenlik artıyor veya azalıyorsa empedans eğrisinde Şekil 3.1'de ki gibi bir değişim gözlenir. Materyalde çatlak mevcutsa endüktif reaktans havadaki değerine yaklaşır, direnç ise havadaki değerinden uzaklaşır.

Ferromanyetik metallerde ise durum biraz farklıdır. Çelik gibi bir ferromanyetik metal üzerine getirilen bobinin enerjisi yine bobinden uzaklaşır bu etki direnç bileşeninde bir artma olarak karşımıza çıkar. Bundan farklı olarak endüktif reaktans bileşeninde alüminyumda görülen etkinin tersi oluşur. Bunun nedeni manyetik geçirgenliğin bobin manyetik alanını konsantre etmesidir. Girdap akımı tarafından oluşturulan ikincil manyetik alanı gölgeler. İletkenlikteki ve çatlak üzerindeki değişim ise alüminyum metaldeki ile aynı şekilde gözlenmiştir [1-4, 10-4].



Şekil 3.1: Girdap akımı empedans düzlemi cevapları.

3.3 Girdap Akımlarını Etkileyen Faktörler

Girdap akımlarını etkileyen bir çok parametre mevcuttur. Bu yöntemle çalışan cihazları kullanan kişinin çalışma prensiplerini çok iyi bilmesi gerekmektedir. Çünkü girdap akımları test ortamdaki en küçük değişmeden etkilenmektedir. Bu bölümde girdap akımlarını etkileyen faktörler incelenmiştir.

3.3.1 Manyetik Geçirgenliğin Girdap Akımlarına Etkisi

3.3.1.1 Manyetik Cisimler ve Manyetik Geçirgenlik

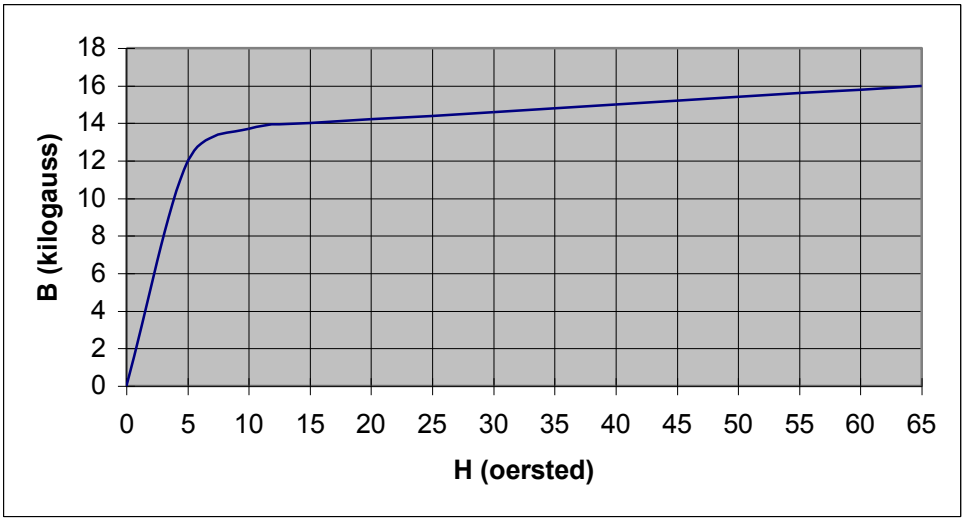
Bir devrenin endüktansı ve onun etrafındaki manyetik alanda depo edebilecek enerji miktarı, büyük oranda, manyetik alanın etki ettiği bölgenin özelliklerine bağlıdır.

Bütün cisimler manyetik geçirgenliklerine göre üç gurup halinde toplanmışlardır. Diyamanyetik cisimler için μ manyetik geçirgenliği 1'den küçük, paramanyetik cisimler için 1'den büyüktür. Ferromanyetik cisimler için ise 1'den çok daha büyüktür. Bilinen bütün diyamanyetik cisimler için μ'nün değeri 1'den küçük fakat pek az farklıdır. En fazla diyamanyetik olan bizmutun geçirgenliği 0,99998'dir. Paramanyetik cisimlerin geçirgenlikleri ise 1'den büyük fakat pek az farklıdır. Örneğin platin'in geçirgenliği 1,00002'dir.

Demir, nikel, kobalt ve bunların bazı alaşımları da ferromanyetiktir. Mıknatıslar ferromanyetik malzemelerden yapılırlar.

Herhangi bir ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenliği sabit olmayıp alan şiddetine bağlıdır. Geçirgenlik(μ) ile alan şiddeti (H) arasındaki ilişki eğrilerle gösterilebilir. Bu eğrilere 'mıknatıslanma eğrileri' denir. Mıknatıslanma eğrilerinin koordinatları, alan şiddeti H (Oersted) ve akı yoğunluğu B (Gauss) 'dir (μ =B/H).

Şekil 3.2'de elektrik aletlerinde ve makinelerde çok sık kullanılan silisli çeliğe ait bir mıknatıslanma eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.2: Silisli çeliğe ait mıknatıslanma eğrisi.

Zayıf alan şiddetleri için B akı yoğunluğunun H alan şiddeti ile orantılı arttığı fakat büyük alan şiddetleri için malzemenin akıya doymuş hale geldiği, alan şiddetindeki büyük bir artmanın akı yoğunluğunda ancak hafif bir artmaya sebep olduğu görülmektedir [2].

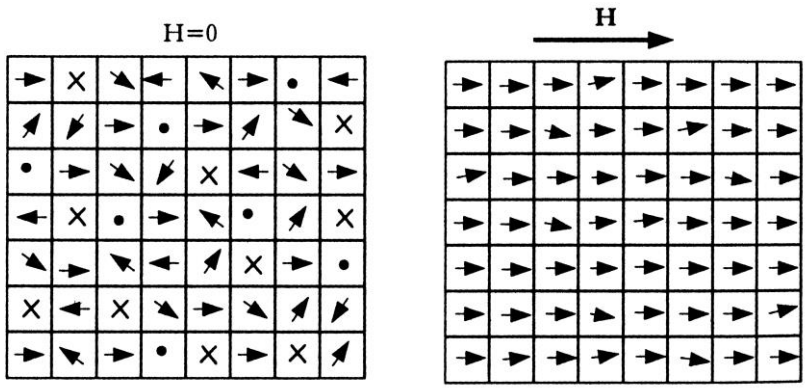
3.3.1.2 Ferromanyetik Malzemelerin Ölçüm Esasları

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 bölgeleri tarafından ilave bir akı yoğunluğu oluşturulmasıdır. Buna karşılık manyetik olmayan malzemelerde manyetik bölgeler 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 malzemelerde girdap akımlarındaki herhangi

bir değişiklik malzemenin iletkenliği, yada bobinin manyetik alan kuvveti tarafından meydana getirilir.

Atom içindeki elektronlar hem atom yörüngelerinde hem de kendi eksenleri etrafında dönerler. Kendi etraflarında dönmelerinden dolayı spin manyetik alanı, atomlar etrafında dönmelerinden dolayı orbital manyetik alanlarını oluştururlar. Aslında bu dönme hareketlerini atomik boyutta bir elektromıknatıs gibi düşünebiliriz. Çoğu malzemelerde, bu tür manyetik alanları engelleyen başka elektronlar da mevcuttur. Yani bir yörüngenin alt basamaklarında normal olarak birbirine eşit sayıda pozitif ve negatif spinler oluşmuştur. Dolayısıyla manyetik momentleri de sıfırdır. Ancak demir, nikel, kobalt gibi ferromanyetik malzemelerdeki elektron yapılarında bu denge sağlanamaz. Ferromanyetik malzemeler içinde aynı manyetik alan yönüne sahip atom gruplarından oluşan küçük bölgeler vardır. Bundan dolayı ferromanyetik malzemeler içindeki her bölge iki kutuplu küçük bir kalıcı mıknatıs gibi davranır. Manyetize olmamış malzemede bölgelerler gelişigüzel şekilde dağılmıştır. Bu malzeme herhangi bir dış manyetik alan etkisi altında bırakılırsa, bölgeler manyetik alanı kuvvetlendirecek yönde yönlenir. Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b'de bölgelerin gelişigüzel ve diş manyetik alan ile yönlenmiş hali görülmektedir [15].



Şekil 3.3: (a) Manyetik bölgelerin gelişigüzel yönelmiş hali (b) Bölgelerin dış manyetik alan tesiri ile yönelmiş hali.

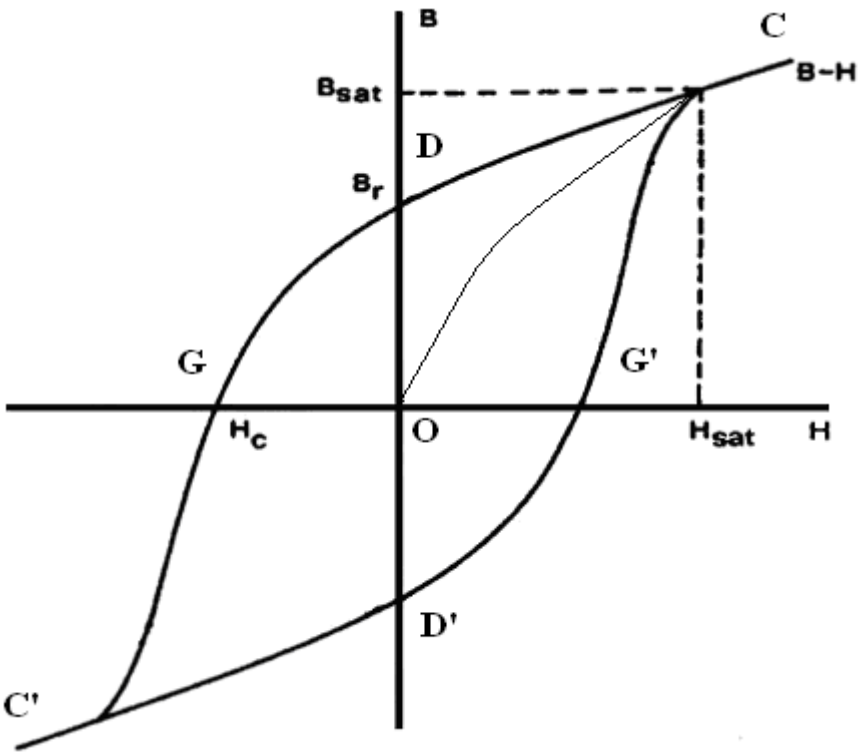
Manyetik alan şiddeti artırılmaya devam edilirse malzemedeki bütün bölgeler manyetik alan yönüne yönlendirilecektir. Bu alan şiddetini değeri (H_{sat}) doyum manyetik alan şiddetidir. Buna karşılık gelen manyetik akı yoğunluğuna da, doyum manyetik akı yoğunluğu (B_{sat}) denir. Şekil 3.4'de mıknatıslanma eğrisinin doyum bölgesindeki durumu görülmektedir.

Malzeme mıknatıslığının giderilmesi için uygulanması gereken alan şiddetine koerzif alan şiddeti (H_c) denir. Bunun dışında manyetik malzemeler Curie sıcaklığına kadar ısıtılırsa manyetik özelliğini kaybederler. Ayrıca büyük mekanik şoklar mıknatıslığı gideren diğer bir etkendir [15].

Mıknatıslanmamış bir malzeme başta sıfır noktasındadır. Mıknatıslanma 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, ordinatlarının değeri daha büyük olan 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 arttırılmaya devam ederse biraz öncekinin 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 ve bunun içinde kalan alan, kaybolan enerjiyi gösterir.

Eğer örnek, bir alternatif akım aracılığıyla mıknatıslandırılırsa, bu eğrinin temsil ettiği kayıp, akım şiddetinin her çevrimi için bir defa tekrarlanacaktır. Eğer iki yönde, mıknatıslanma değeri daha küçük olan maksimumlara kadar gidilirse, seyirme çevrimi daha küçük olur ve alan da küçülmüş olur.

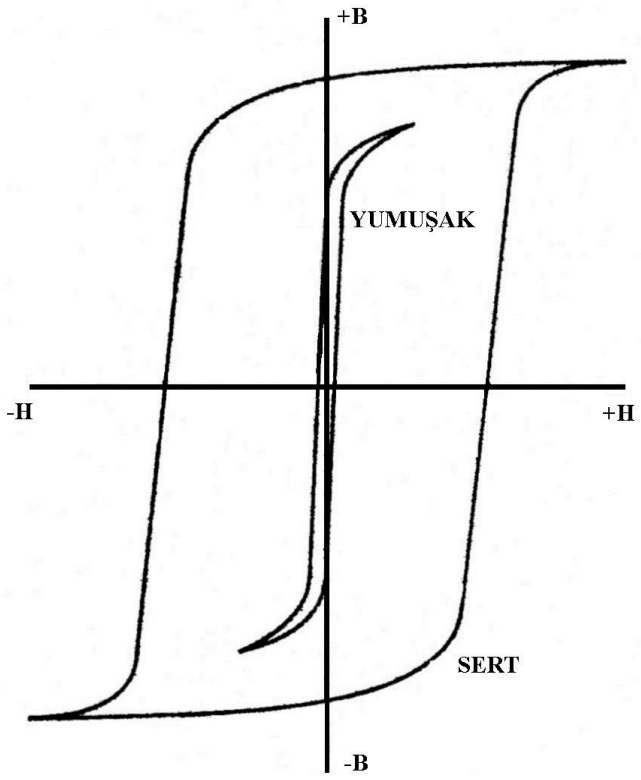


Şekil 3.4: Mıknatıslanma eğrisinin doyum bölgesindeki durumu.

Bölge dizilişinin dış alan etkisinin ortadan kalkmasıyla ilk haline göre az yada çok değişiklik göstermesi malzemenin manyetik özelliğine bağlıdır. Bu farklılık sert ve yumuşak manyetik malzemelerin tanımında kullanılır. Yumuşak manyetik malzemeler kolay manyetize ve demanyetize olurlar. Yani koerzif alan şiddetleri küçüktür. Bu yüzden yüksek manyetik iletkenliğe ve düşük kayıplara sahiptirler. Sert manyetik malzemeler ise zor manyetize ve demanyetize olan malzemelerdir. Dolayısıyla koerzif alan şiddetleri büyüktür. Sürekli mıknatıslar bu tür malzemelerin özeliklerini gösterirler. Şekil 3.5'de sert ve yumuşak manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrileri görülmektedir [15].

Elektrik makinelerinin manyetik kısımları için yumuşak demir veya silisli demir kullanmak zorunludur. Çünkü çalışma şartları altında bunlardaki seyirme kaybı daha az ve manyetik geçirgenlik daha yüksektir. Diğer taraftan sürekli (kalıcı) mıknatıslar tungstenli çelik, kromlu çelik veya alnikodan yapılırlar. Çünkü bu malzemelerin artık mıknatıslanmaları büyüktür ve mıknatıslıklarını gidermek için büyük bir manyetik alan gerekir. Ayrıca sert çelik malzemelerin seyirme eğrisi geniş, yumuşak çelik malzemelerin ise dardır.

Örneğin, çevresel girdap akımları bobini kullanılarak çelik borularının kontrolü sırasında, boru kalın bakır tellerden oluşan ve üzerinden doğru akım geçirilen bir manyetik alan üreticisi bobin içersinden geçirilir. Böylece boru ekseni boyunca manyetik akı üretilmiş olur. Test, manyetik akı üreticisi bu güçlü bobin ile birlikte çevresel girdap akımları bobini kullanılarak yapılır.



Şekil 3.5: Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrileri.

3.3.2 Elektriksel İletkenliğin Girdap Akımlarına Etkisi ve Elektriksel İletkenliği Değiştiren Faktörler

İletkenlik daha önceki konularda da kısaca değinildiği gibi, malzemede elektronlarının akış yeteneğinin bir ölçüsüdür. İletkenlik arttıkça verilen sürede malzemeden geçen elektron sayısı artar. Her malzemenin kendine özgü bir iletkenlik değeri vardır. Örneğin, bakır, altın, gümüş 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 tersine olduğundan ‘mho/birim uzunluk’ olarak gösterilir. Girdap akımları cihazları ile bu birim kullanılarak iletkenlik ölçümleri güç olduğundan daha basit ve kullanışlı %IACS (International Annealed Copper Standard) değeri birim olarak seçilmiştir.

Birimin esası, elektrolitik saflıktaki (%99.999 bakır içeren) bakırın iletkenliğinin %100 IACS olarak kabul edilmesine dayanır. Diğer metallerin iletkenlikleri buna göre kıyaslanarak ölçülür.

Malzemenin iletkenliği üzerine çok sayıda değişkenin etkisi vardır. Doğru bir ölçüm için diğer değişkenler elimine edilerek sadece bir değişken incelenmelidir. İletkenlik üzerine etkisi olan değişkenler 4 grupta incelenir. Bunlar aşağıda incelenmiştir.

3.3.2.1 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 [1].

3.3.2.2 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 [1].

3.3.2.3 Soğuk İşlem

Metallerin ısıtılmaksızın şekil değişikliğine uğratılmasına (haddeleme, kesit daraltılması v.b.) 'Soğuk İşlem' denir. Soğuk işlem kristal yapıyı değiştirdiğinden iletkenlik üzerine etkili olur [1].

3.3.2.4 Sıcaklık

Bir malzemenin iletkenliği ile sıcaklık 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 [1].

3.3.3 Geometri

3.3.3.1 Malzeme Kalınlığı

Girdap akımları kalın bir maddenin derinliklerine nüfuz edemez, ancak yüzeye yakın yerlerine nüfuz edebilir. Bu yüzden sonlu veya sınırsız bir ‘nüfuziyet derinliği’ kavramına sahiptirler. Standart nüfuziyet derinliği, malzemenin yüzeyindeki girdap akımı yoğunluğunun başlangıç değerinin %37‘sine düştüğü derinlik değeri olarak ifade edilir.

Verilen bir malzeme için girdap akımlarının nüfuziyet derinliği, malzemenin doğal iletkenliğine (daha büyük iletkenlik daha küçük nüfuziyet derinliğine karşılık gelir) ve uygulanan alternatif akımın frekansına (daha küçük frekans daha büyük nüfuziyet derinliğine karşılık gelir) bağlıdır [2, 10-14].

3.3.3.2 Aralık Etkisi

İçinden akım geçen bir yüzey probu iletken malzemeden belirli bir uzaklıkta havada tutulduğunda bobin empedansı belirli bir değerdedir. Probu malzemeye yaklaştırdığımızda bu değer değişecektir. Çünkü prob malzemeye yaklaştıkça bobin alanının şiddeti malzeme üzerinde kendini daha fazla hissettirecek, dolayısıyla empedans değeri sürekli bir değişim gösterecektir. Bu değişim, malzemeden gelecek olan birçok belirtiyi maskeleyecektir [2, 10-14].

3.3.3.3 Kenar ve Uç Etkisi

Girdap akımları, prob malzemenin kenarına veya sonuna yaklaştırıldığında bozulur. Bu bozulma sonucunda yanıltıcı belirtiler ortaya çıkar. Bu etki düz malzemelerin testinde ‘kenar etkisi’, boruların testinde uç etkisi olarak adlandırılır.

Kenar etkisi genellikle, test bobinin etrafına manyetik zırhların sarılması ve bobinin çapının küçülmesi ile azaltılabileceği gibi, uç etkisi de bobin uzunluğunun kısaltılması ile azaltılabilir [2, 10-14].

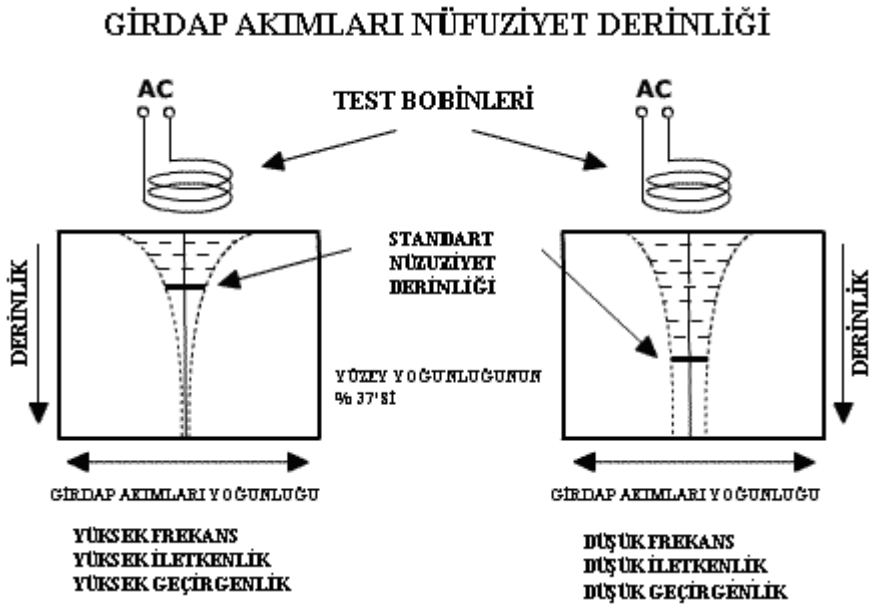
3.3.3.4 Süreksizlikler

İletken bir malzemedeki girdap akımının akışını etkiler. Süreksizlikler; kalıntı (cüruf), gözenek, gaz boşluğu gibi, çatlaklar şeklinde kullanımdan da kaynaklanabilir. Girdap akımları süreksizliklerin etrafından dolaşırlar ve böylece manyetik alanda bir değişme neden olarak göstergede bir ibre sapması verirler.

Yüzeydeki veya yüzeye yakın süreksizlikler için, süreksizliğin boyutu ile sapma arasında kaba bir orantı vardır. Uygulamada, duyarlık bilinen bir hata için ayarlanır. Daha sonra test malzemesindeki süreksizlikler buna göre karşılaştırılır. Bu amaca yönelik olarak boyutları bilinen hatalar içeren referans blokları kullanılır. Süreksizliğin derinliği ve çeşidi girdap akımlarının değişiminde rol oynayan önemli etkenlerdir [2-4, 10-14].

3.3.3.5 Nüfuziyet Derinliği

Girdap akımları, testi yapılan malzeme içinde eşit yoğunlukta yayılmazlar. Akım yoğunluğu yüzeyde ve yüzeyden az aşağıda en fazladır. Yüzeyden aşağılara inildikçe akım yoğunluğu azalır, yüzeyden çok aşağılarda ise akım sıfıra yaklaşır. Şekil 3.6'da bir malzeme içindeki girdap akımlarının dağılımı görülmektedir. Nüfuziyet derinliği frekansın artması ile azalacağından test frekansının uygun seçimi girdap akımı testinde büyük önem taşır [2-4, 10-14].



Şekil 3.6: Girdap akımları nüfuziyet derinliği.

Girdap akımlarının yoğunluğu ve nüfuziyet derinliği metalden metale uygulanan frekansa göre değişiklik gösterir. Frekans arttıkça nüfuziyet derinliği azalır. "Deri etkisi" denilen bu olayın sebebi girdap akımlarının metalin yüzeyinde toplanmasıdır. İletkenlik ve geçirgenlik arttıkça nüfuziyet derinliği azalacaktır. Tablo 3.1'de farklı metallerin üzerinde oluşan farklı test frekanslarındaki girdap akımlarının nüfuziyet derinliği gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Tipik nüfuziyet derinliği.

MALZEME	İLETKENLİK	MANYETİK GEÇİRGENLİK	ÇEŞİTLİ FREKANSLARDA %37 DERİNLİK (cm)			
			4 kHz	64 kHz	256 kHz	1 MHz
BAKIR	100	1	0,104	0,025	0,012	0,0066
ALÜMİNYUM	32	1	0,182	0,045	0,022	0,011
MAGNEZYUM	37	1	0,17	0,043	0,02	0,01
KURŞUN	7,8	1	0,37	0,093	0,045	0,023
PASLANMAZ ÇELİK	2,5	1,02	0,65	0,165	0,0081	0,004
YÜKSEK ALAŞIMLI ÇELİK	2,9	750	0,024	0,006	0,003	0,0015
DÖKME ÇELİK	10,7	175	0,0226	0,0055	0,0027	0,015

Girdap akımlarının metal malzemeler için nüfuziyet derinliği Denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma \pi f \mu}} \tag{3.1}$$

δ : standart nüfuziyet derinliği (m)

f : test frekansı (Hz)

σ : test malzemesinin elektiriksel iletkenliği (1/Ωm)

μ : test malzemesinin manyetik geçirgenliği (H/mm)

3.3.4 Test Şartları

3.3.4.1 Test Frekansı

Girdap akımlarında frekans, değişken manyetik alan oluşturmada kullanılan alternatif akımın saniyedeki salınım sayısını belirtir. Manyetik alanın değişim hızı, test probundaki alternatif akımın frekansı ile aynıdır. Test parçasının yüzeyindeki girdap akımlarının büyüklüğü, manyetik akımın frekansı veya değişim hızı ile

orantılı olarak artar. Girdap frekansı şiddetinin artması daha güçlü bir ikincil manyetik alan oluşturur. Güçlü ikincil manyetik alan ise uygulanan birincil manyetik alan şiddetinin malzeme kalınlığı boyunca hızlı bir şekilde düşmesine sebep olur. Diğer değişkenler sabit tutulduğunda, frekans yükseldikçe nüfuziyet derinliği azalır, girdap akımları yüzeyde toplanır. Buna 'deri etkisi' denir. Frekans ile girdap akımları testinin doğruluğu ve güvenirliği arasında doğrudan bir ilişki vardır. Bir başka deyişle, frekans malzemede ilgilenilen değişkenden (çatlak, porozite v.b.) maksimum sinyal alabilecek şekilde seçilmelidir. Frekansın seçiminde nüfuziyet derinliği tarama hızı gibi faktörlerde dikkate alınmalıdır [2, 10-14].

3.3.4.2 Manyetik Temas

Test parçası ile test bobini tarafından oluşturulan değişken manyetik alanın ilişkisine manyetik temas adı verilir. Bobinin manyetik alan kuvveti bobinden uzaklaştıkça düşer. Bu nedenle test parçasındaki girdap akımlarının şiddeti, bobin ile test parçası arasındaki uzaklığa göre değişir. Manyetik temasın seviyesi test bobininin boyutuna ve şekline parçanın yüzey durumuna ve şekline test parçası üzerindeki yüzey kaplamasının varlığına bağlıdır [2].

3.3.4.3 Test Bobininin Akımı

Test bobininin akımı arttırıldığında parçaya uygulanan manyetik alan kuvveti de artacaktır. Test bobinin akımını bobin sarım telinin direnci sınırlamaktadır. Yüksek akımlarda test probuna zarar verilebilir. Test akımını bobin çekirdeği de sınırlar. Akım arttırıldığında çekirdek doymaya gider ve çatlak testinden alınan ölçümler yanıltıcı olur [1].

3.3.4.4 Sıcaklık

Daha önceki konularda değinildiği gibi sıcaklık; gerek malzemelerin iletkenliği, gerekse manyetik özellikleri üzerine etki eden bir faktördür. Atomların ısıl hareketleriyle iletimi sağlayan elektronlar yüksek sıcaklıklarda saçıldığından iletkenlik düşer. Sıcaklığın düşmesi ise iletkenliğin artmasına neden olacaktır.

Sıcaklığın manyetik özellikler üzerine etkisi vardır. Belirli bir sıcaklıktan (curie noktası sıcaklığı) sonra manyetizma yok olur. Sıcaklığın etkisi ile parçanın yüzeyindeki girdap akımları şiddeti düşer ve nüfuziyet derinliği artar. Sıcaklık değişimi ayrıca bobinin endüktansını da etkiler. Ortam, kontrol parçası ve test

bobinin arasındaki sıcaklık farkı kararlı olmayan girdap akımı okumalarına neden olur. Sıcaklığın kararlı hale gelebilmesi için, test parçası ve test sisteminin 15 dakikalık bir ön bekletmeye tabii tutulur [1].

BÖLÜM 4. GİRDAP AKIMI PROBLARI

4.1 Giriş

Bu bölümde endüstride kullanılan girdap akımı problarının dizaynı, probların çeşitleri ve prob parametrelerine etki eden fiziksel büyüklükler anlatılmıştır.

4.2 Girdap Akımı Problarının Çalışma Prensibi

Test bobini tarafından oluşturulan değişken manyetik alanın büyüklüğü ve dağılımı, bobin iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında değişir. Birinci 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 yada bobinden geçen bir akımdaki değişim olarak gözlenir. Bobinden geçen akım alternatif akım kaynağından gelen akımla dengelenir. Böylece iki akım arasındaki fark tespit edilebilir. Dengelemeyi sağlamada kullanılan yöntemlerden biri olan "köprü devre sistemi" de görülmektedir.

Basit sinyal analiz devreleri bu köprü devresinden geçen akımın büyüklüğündeki değişimleri ölçer. Alternatif akımdaki değişimler yükseltilir ve okunmadan önce doğru akıma çevrilir. Geliştirilmiş sistemlerde genlik ve faz değişimi de tespit edilir. Bu durumda köprü devresinden gelen yükseltilmiş sinyal ile karşılaştırma yapabilmek için bir referans sinyal sağlanmalı ve buna göre faz ölçümü yapılmalıdır. Test sonuçlarının gösterimi; basit cihazlarda gösterge panelleri ve kaydedicilerle, gelişmiş cihazlarda hafızalı osiloskoplar ve otomatik kaydediciler ile yapılır.

Girdap akımları probunun seçiminde göz önüne alınan temel faktör kullanım amacıdır. Küçük çaplı problar küçük süreksizliklerin tespitinde çok daha iyi bir çözünürlük yeteneğine sahip olacaktır. Daha büyük çaplı problar kütlesel özelliklerin tespitinde daha iyi sonuç verir. Probun kullanılan köprü devre empedans

aralığı ile uyum içinde olması gerekir. Empedans aralığını karşılamak için probun kullanacağı 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 problarının yapımında, küçük çatlakların tespitinde daha büyük duyarlık 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 gereksinin vardır [2, 10-14].

4.3 Prob Çeşitleri

Girdap akımı probları şekil ve boyları bakımından bir çok farklılık gösterir. Aslında bu probların en büyük avantajlarından biri geniş uygulama alanlarına göre prob dizaynı yapılabilmesidir. Girdap akımı probları biçimlerine ve işletme biçimine göre sınıflandırılabilirler.

4.3.1 Şekillerine Göre Girdap Akımı Probları

Girdap akımı probları ilgilenilen metalin yapısına göre şekil alırlar. Yaygın olarak kullanılanlar; yüzey süreksizliklerinin algılanmasında yüzey probları, tüplerin iç kısımlarındaki süreksizlikler için iç problar, tüplerin dış yüzeylerindeki süreksizlikler için çevresel problar kullanılır.

4.3.1.1 Yüzey Probları

Uygulamada girdap akımları testlerinin çoğu yüzey problarıyla yapılır. Yüzey probları plakalar, levhalar veya düzensiz şekilli parçaların testlerinde kullanılır. Şekil 4.1'de bir yüzey probları görülmektedir. Yüzey probları elle tutulmaya uygun olarak dizayn edilir ve metalin yüzeyi ile temas edecek şekilde kullanılırlar. Bu tür problar bir bobin ve onu çevreleyen koruyucu kılıftan oluşur. Yüzey probu ölçüm esnasında yüzeye dik olarak tutulmalıdır. Yüzey problarının çapı test edilecek alanın büyüklüğü ile ilişkilidir. Kontrol edilecek alan geniş olduğunda, kontrol süresini kısalttığı için geniş tabanlı yüzey probları tercih edilir. Küçük hataların tespiti gerekiyorsa küçük çaplı test probları kullanılabilir. Cıvata yuvaları veya deliklerin kontrolü için genellikle özel şekillerde üretilmiş yüzey probları kullanılır [3-9].



Şekil 4.1: Girdap akımı yüzey probları.

4.3.1.2 İç Problar

İç problar tüplerin yada iç kısmına girilebilen diğer parçaların testinde kullanılırlar. Bu parçalar üzerindeki süreksizlikler içten dışa doğru taranır. İç problar iyi bir test duyarlılığı sağlamak için mümkün olduğu kadar parça boşluğunu doldurmalıdır. İç probların koruyucu kılıfları probu test yapılan materyalin merkezinde tutacak şekilde dizayn edilir. Şekil 4.2'de bir iç probun şematik resmi görülmektedir. İç bobinlerin kullanılması bükülme durumları yada sabit olmayan çaplar nedeniyle sınırlıdır [3-9].



Şekil 4.2: Girdap akımı iç probları.

4.3.1.3 Çevresel Problar

Öncelikle içi dolu çubukların, silindirlerin yada tel gibi parçaların fabrikasyon kontrollerinde kullanılır. Bu parçalar üzerindeki süreksizlikler dıştan içe doğru

taranır. Şekil 4.3'te bir çevresel probun resmi görülmektedir. Çevresel veya iç problarla test parçasının tüm çevresi bir defada test edilebilir [3-9].



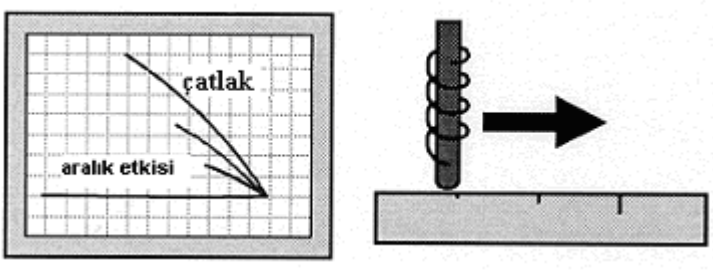
Şekil 4.3: Girdap akımı çevresel probları.

4.3.2 Kullanılan Test Cihazına Göre Prob Çeşitleri

Girdap akımı ile metal cisimlerin süreksizliklerinin algılanması metoduyla yapılmış çok çeşitli cihazlar vardır. Bu cihazların çalışma prensibine göre seçilen bobinlerde çeşitlilik gösterir.

4.3.2.1 Mutlak Problar

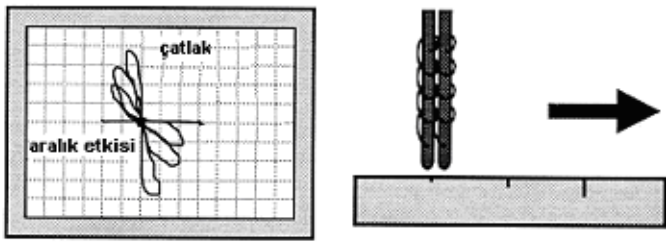
Mutlak problar genelde bir adet test bobinine sahiptirler. Bu tip problarda; aynı bobin hem test parçası üzerinde girdap akımları oluşturur ve hem de girdap akımları şiddetindeki değişimleri algılar. Bu problarda alternatif akım güç kaynağı ve gösterge elemanı tek bir bobine bağlıdır. Bu problar malzemeyi hiçbir karşılaştırma yapmaksızın test ederler. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi bobin iletken materyal üzerinde girdap akımları oluşturur. Oluşan girdap akımları bobin empedansını etki eder ve bunun sonucunda bobin empedansı, havada, materyal üzerinde, ve materyaldeki süreksizlik üzerinde farklı empedanslar gösterir. Bu empedans bilgisinden yararlanılarak, süreksizlik, iletkenlik, tabaka kalınlığı, yada aralık etkisi gözlemlenebilir. Şekil 4.4'te tek bobinli mutlak bir prob gösterilmiştir. Bu probun metalin üzerindeki süreksizlikler üzerinde gezdirildiğinde test cihazındaki gösterge panelinde nasıl bir grafik çizdiği görülmektedir [2-9, 10-14].



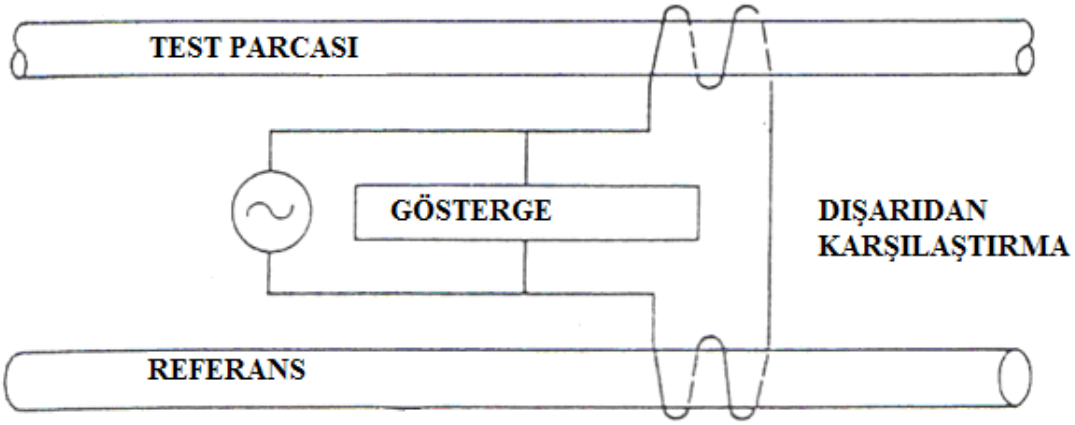
Şekil 4.4: Mutlak prob.

4.3.2.2 Diferansiyel Problar

Bu tip problarda genelde iki bobin ters yönde sarılıdır. Bobin çıkışı da hem alternatif akım güç kaynağına hem de gösterge akımına bağlıdır. Şekil 4.5'de kendisiyle karşılaştırılmalı diferansiyel probun şematik resmi ve bu probun metalin üzerindeki süreksizlikler üzerinde gezdirildiğinde test cihazındaki gösterge panelinde nasıl bir grafik çizdiği görülmektedir. Burada her iki bobinin altındaki malzeme aynı özellikteyse çıkışlar birbirini yok eder. Malzeme özelliğinde küçük bir farklılık olduğunda denge bozulur ve göstergede bir sinyal belirir. Bundan başka dışarıdan karşılaştırılmalı diferansiyel problarda vardır. Bobinlerden biri (referans bobini), üzerinde süreksizlik bulunmayan ve test malzemesiyle 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 özellikteyse çıkışlar birbirini yok eder. Malzeme özelliğinde küçük bir farklılık olduğunda denge bozulur ve gösterge elemanında bir sinyal belirir. Şekil 4.6'da dışarıdan karşılaştırılmalı diferansiyel probun şematik resmi görülmektedir. Bu yöntemle yüzey süreksizliklerinin algılanmasında son derece iyi sonuçlar vermektedir. Fakat bu yöntemin dezavantajı iletkenlik veya sıcaklık değişimlerinin çatlak bilgileri ile karıştırılabilmesidir. Bir diğer dezavantaj ise iki bobin aynı süreksizliğin üzerinde aynı anda kalıyor ise süreksizlik bilgisinin okunamamasıdır [2-9, 10-14].



Şekil 4.5: Kendisi ile karşılaştırılmalı diferansiyel prob.

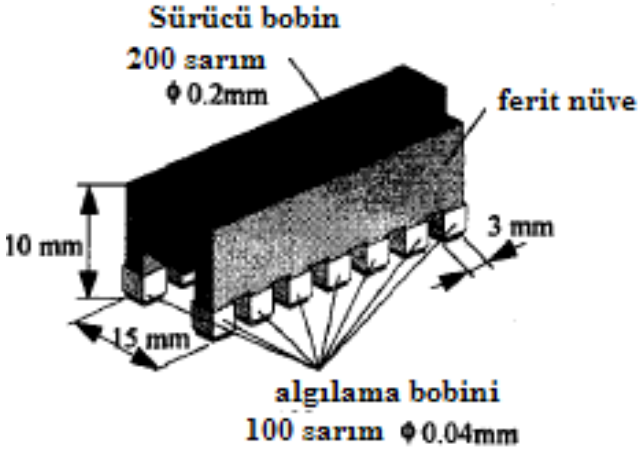


Şekil 4.6: Dışarıdan karşılaştırmalı diferansiyel prob.

4.3.2.3 Yansıma Probları

Bu tür problar da 2 adet bobin bulunur. Fakat diferansiyel problardan farkı bir bobin materyal üzerinde girdap akımı oluştururken diğerinin görevi sadece girdap akımı değişimlerinin algılanmasıdır. Bu tür problara "sürücü-algılayıcı" problar da denir.

Yansıma problarının avantajı sürücü bobinin güçlü ve orantılı bir manyetik alan yaratmasıdır. Algılama bobini ise çok küçük yapılır, bunun nedeni daha küçük süreksizliklerin yakalanmasıdır.

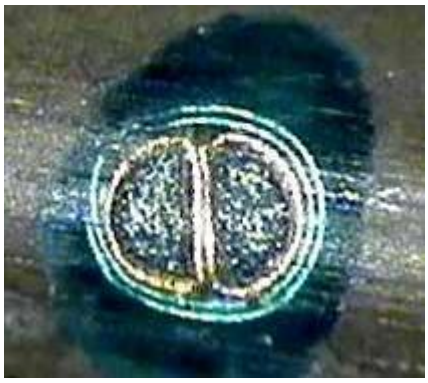


Şekil 4.7: Yansıma probları.

Şekil 4.7'de bir yansıma probu görülmektedir. Bu prob bir tane sürücü on dört tane algılayıcı bobinden oluşmaktadır. Bobinler ferit nüve etrafında simetrik olarak sarılmışlardır. Sürücü bobin 200 sarımlı olup, 0.2 mm kullanılan telin çapıdır. Algılayıcı bobinler ise 100 sarımlı olup, kullanılan telin çapı 0.04 mm olarak seçilmiştir. Algılayıcı bobinlerin çokluğu aynı anda birçok noktadan veri toplanmasına yardımcı olur [16].

4.3.2.4 Karma Problar

Bu problar daha önce anlatılan üç probun bazı özelliklerinden faydalanılarak yapılmış problardır. Şekil 4.8'de iki D şeklinde bobinin yan yana gelmesi ile oluşturulmuş bir bobin gözükmektedir. Bunların etrafını saran bobin ise sürücü bobin olup, test edilen materyal üzerinde girdap akımlarını oluşturur. Burada gözüken D bobinler birbirine diferansiyel şekilde bağlıdır ve bu tür problar yüzey çatlaklarının algılanmasında çok iyi sonuç vermektedir.



Şekil 4.8: Ayrık D probu.

Başka bir örnek ise Hall etkisi sensörlerinin kullanıldığı girdap akımı problarıdır. Bu tür problar iletken materyal üzerinde girdap akımı üreten bir sürücü bobin ve onun hemen altına yerleştirilen Hall etkisi sensöründen oluşur. Hall etkisi sensörü doğrudan manyetik alan içindeki akıyı algılayarak süreksizliğin bulunmasına yardımcı olur. Karma probların dizaynı özel uygulama alanlarına göre çeşitlilik gösterir [3].

4.4 Prob Üretiminde Göz Önüne Alınan Faktörler

Prob üretiminin bilinmesi ve üretimin yapılmasının prob satın alınmasına göre çeşitli avantajları vardır. Örneğin gerektiğinde özel uygulamalar için istenen özelliklerde problar üretilebilir. Bobinin yerleştirilme şekli, bobin şekli ve hata boyutları göz önüne alınarak uygulama değişkenleri en iyi duruma getirilebilir. Burada probların üretimine ilişkin genel bilgiler verilecektir.

4.4.1 Genel Üretim Şartları

Şayet bobinin yarıçapı sabit kabul edilip diğer sabitlerle birleştirilirse, bir bobinin manyetik alan şiddetinin bobinin sarım sayısına ve bobinden geçen akıma bağlı olduğu anlaşılır. Sarım sayısı ve akım değeri sınırsız olarak arttırıldığında alan şiddetinin de orantılı olarak arttırılabileceği gibi bir durum gözükmesine rağmen, böylesine bir artış olanaksızdır. Çünkü, bobin telinin değişken yarıçapından ve her bir sarımın manyetik alanlarının girişiminden kaynaklanan direnç kayıpları (ısıl kayıplar) söz konusudur [10-13].

4.4.2 Bobin Dizaynı

Prob üretiminde bobinin şekli bobinin bağıl konumu ve bobinin sarıldığı ferit çekirdek büyük önem taşır. Küçük çaplı bobinler, parçanın şekli ya da aranan hata boyutu küçük olduğu zaman önemlidir. Küçük çaplı bobinlerin üretiminde küçük çaplı bobin telleri kullanmak gereklidir. Mıknatıs teli olarak ta isimlendirilen bobin teli, sarıldığında yaylanma yapıp sarımı engelleyici bir durum meydana getirmemesi için, genellikle tavlanmış olmalıdır. Sıcaklık test parametrelerini değiştiren önemli bir etken olduğundan, bobin teli çeşitli malzemelerle (örneğin poliüretan, modifiye edilmiş polyesterler, naylon yada polimit gibi) tek yada çift kat olarak izole edilebilir [2, 14].

Bir metal parçası üzerinde oluşturulan girdap akımları yaklaşık olarak test probunun bobin çapına eşit bir alanda yoğunlaşır. Genel bir kural: bobin çapı aranan hata boyutunun iki katından daha büyük olmalıdır. Bobinin çapı probun yerleştirileceği alanın şekline göre de değişim gösterir.

Üretilen manyetik alanın herhangi bir şekilde bozulmasının önüne geçmek için genellikle bobinler iletken olmayan bir yuvaya yerleştirilir ve yuva ile bobin arasında bir koruyucu malzeme ile doldurulur. Bobin teli ise elektromanyetik girişimleri önlemek için daha önceden izole edilmiş olmalıdır.

4.4.3 Çekirdek

Problarda duyarlılığı arttırmak için ferit çekirdekler kullanılır. Ferit çekirdekler bobinin endüktansını, Denklem 4.1'de görüldüğü gibi, bobinin çekirdeksiz durumdaki endüktansı ile çekirdeğin manyetik geçirgenliğinin çarpımı kadar arttırır.

$$L = \mu L_{Ç} \tag{4.1}$$

L : çekirdekli bobinin endüktansı

$L_{Ç}$: çekirdeksiz bobinin endüktansı

μ : çekirdeğin manyetik geçirgenliği

Çekirdek boyutu (çekirdek boyu ve çapı) prob üretiminde önemli bir faktör olarak karşımızı çıkar. Çekirdeğin uzunluğu ve bobinin boyu arasında önemli bir ilişki vardır. Çekirdek boyu bobinin boyuna yakın olduğunda duyarlılıkta bazı kayıplar olabilir. Prob üretiminde bulunulan öneri çekirdeğin boyu bobinin boyundan iki kat uzun olmalıdır [2].

4.4.3 Bağlantı Kabloları

Prob yuvası elektrik bağlantılarını da içine alabilir fakat bobin uçlarının uygun bir kabloya lehimlenmesi en çok kullanılan yöntemdir. Prob üzerinde bir elektrik bağlayıcısı kullanımının gerekli olduğu durumlarda bir elektrik anahtarı kullanılması tavsiye edilir [2].

4.4.4 Bobin Endüktansı

Bobinin çekirdek üzerindeki konumuyla sahip olduğu endüktans arasında yakın bir ilişki vardır. Çekirdeğin ortasına yerleştirilmiş bir bobin en büyük endüktans değerine sahip olacaktır. Endüktans değeri, bobinin çekirdeğin uçlarına kaydırılması sonucunda çok küçük bir değere inecektir. Yukarıda açıklandığı gibi bobin çekirdeğin tam ortasına yerleştirilmeli ve endüktans, bobin bu konumdayken ölçülmelidir. Böylece maksimum duyarlılık elde edilecektir [2].

Girdap akımları üretiminde kullanılan bobin çekirdeğinin üzerine sarılan tel manyetik doyuma gitmemesi için genelde bakırdan yapılmaktadır. Seçilen bir frekansta bobin endüktansı ne kadar fazla ise girdap akımı testinden o kadar iyi hassasiyette sonuç alınır. Bobinden geçen akımın mümkün olduğunca az olması istenir. Bunun nedeni;

- Akım artışının beraberinde getirdiği ısı artımı bobinin genişlemesine neden olur ve buda bobin endüktansını değiştirir.

- Eğer bir ferit çekirdek kullanıldıysa, çekirdek doyuma gidebilir ve bu etki küçükte olsa test sonuçlarında karışıklığa yol açabilir.

Ferit çekirdek kullanılarak dizayn edilen bobinlerin endüktansı Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanır [3].

$$L = KN^2\pi\left(\left(r_0^{\,2} - r_c^{\,2}\right) - \mu_r r_c^{\,2}\right)\mu_0 / l \tag{4.2}$$

L : ferit çekirdekli bobinin endüktansı.

K : bobin boyutları (bobin uzunluğu, dış ve iç çap) ile ilgili karakteristik.

N : sarım sayısı.

r_0 : bobin yarıçapı.

r_c :çekirdek yarıçapı.

μ_r :çekirdeğin manyetik geçirgenliği.

μ_0 : telin manyetik geçirgenliği.

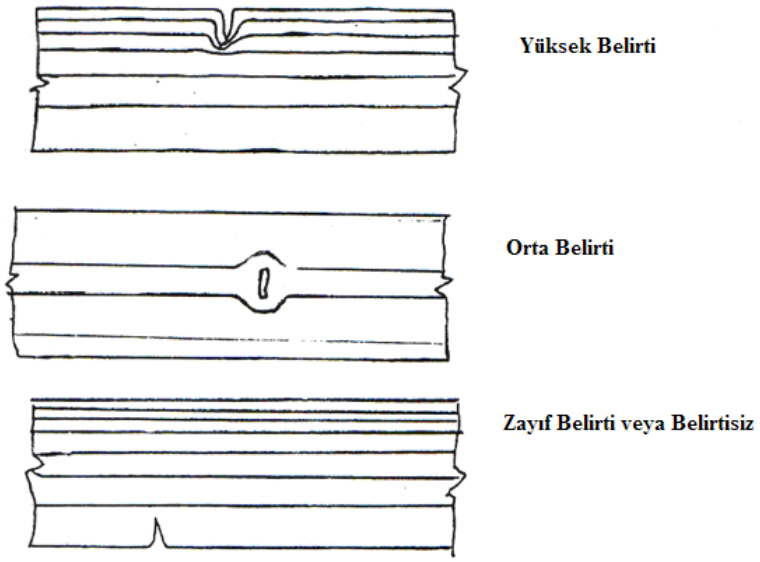
$/$: bobinin boyu.

4.5 Prob Empedansına Etki Eden Faktörler

Girdap akımı test yöntemi ile yapılan test işleminde hata konumu ve yönü, sıcaklık, malzeme geometrisi ve yapısı, temas şekli, prob hızı, frekans, kullanılan referans standardı ve test kaydı gibi faktörlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Uygulanan test türüne ve ölçülmek istenen büyüklüğe göre bu faktörler değişik oranlarda etki etmektedir.

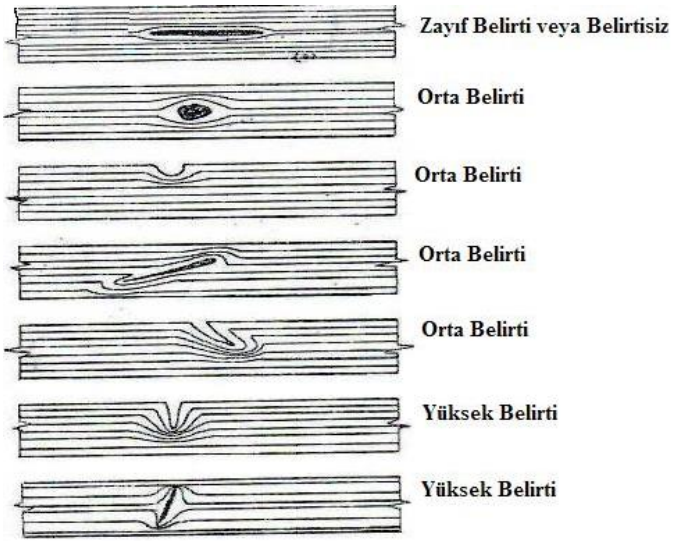
4.5.1 Süreksizlik Konumunun ve Yönünün Etkisi

Süreksizlik konumu, girdap akımı etki alanına göre süreksizliğin bulunduğu yer anlamına gelmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, bir süreksizlik malzemenin üst yüzeyinde, içinde veya alt yüzeyinde olabilmektedir. Girdap akımının uygulandığı konuma göre, üst yüzeydeki bir süreksizlikten yüksek oranda bir belirti, malzeme içindeki bir süreksizlikten derinliğe bağlı olarak düşük oranda bir belirti ve alt yüzeydeki bir süreksizlikten çok düşük oranda bir belirti elde edilebilir veya hiçbir belirti elde edilemez [2-14].



Şekil 4.9: Derinliklerine göre süreksizliklerin girdap akımları cihazlarında gözlenen hata sinyalleri büyüklükleri.

Süreksizlik yönü, malzemenin herhangi bir konumdaki bir süreksizliğin girdap akımı alanına göre olan yönüdür. Şekil 4.10'da görülebileceği gibi, girdap akımlarına dik yöndeki bir süreksizlikten oldukça yüksek, paralel doğrultudaki bir süreksizlikten de çok zayıf bir belirti elde edilmektedir. Burada süreksizliği yönü kadar konumu da önem taşımaktadır.



Şekil 4.10: Süreksizliklerin girdap akımlarının yönüne göre girdap akımları cihazlarında gözlenen hata sinyali büyüklükleri.

4.5.2 Sıcaklığın Etkisi

Test malzemesinin veya test ortamının sıcaklığı girdap akımı probuna, test sonuçlarına ve testi yapan kişiye etki eden önemli bir faktördür. Probun ömrü test malzemesinin sıcaklığına bağlı olup, sıcaklık arttıkça ömür azalır. 200 C'nin üzerinde probun özellikleri değişmektedir. Bu sıcaklığın üzerinde bakır tel yerine alüminyum veya gümüş tel kullanılması gerekmektedir. Test sıcaklığının 50 C'nin altında tutulması tavsiye edilmektedir [14].

4.5.3 Yapı ve Geometrinin Etkisi

Test malzemesinin yapısı, elektrik iletkenliğine ve geçirgenliğine etki eden önemli bir faktördür. Girdap akımları, bir iletken malzemeye uygulanan değişken manyetik alan tarafından oluşturulan elektron akısı olup, iletkenlik arttıkça oluşacak girdap akımları da artmaktadır. İletkenliğe; malzemenin kimyasal bileşimi, ısıl ve soğuk işlemi ve sıcaklık etki etmektedir.

Denklem 4.3'te gösterildiği gibi, malzemenin manyetik akı geçirme özelliğinin ölçüsü olarak da tanımlanabilen manyetik geçirgenlik (μ), manyetik akı yoğunluğu B'nin (Gauss) manyetik alan şiddeti H'a (Oersted) oranı olarak verilmektedir.

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{4.3}$$

Manyetik olmayan malzemelerde girdap akımları oluşumu, doğrudan bobinin manyetik alan kuvvetine bağlıdır. Girdap akımlarındaki herhangi bir değişiklik, geçirgenlikten veya süreksizliklerden ileri gelmektedir.

Ferromanyetik olmayan bir malzemede manyetik kalıntıların varlığı, geçirgenlik değişikliğine, dolayısıyla hata sinyallerine benzer sinyallerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Manyetik kalıntıların neden olduğu geçirgenlik değişikliğinin hata belirtisinden ayırt edilebilmesi için 'doyurma probları' kullanılmaktadır.

Test malzemesinin geometrisi, uygun prob ve test frekansı seçebilme açısından önem taşımaktadır. Düz plaka şeklindeki malzemeler normal yüzey problarıyla test edilmesine karşılık, silindirik yapıya sahip kütük, boru, tüp v.b. malzemeler için bobin veya halka şeklinde problar gerekmektedir. Malzemenin yüzey pürüzlülüğü testi etkileyen önemli bir faktör olup, çoğu kez gürültü oranının artmasına neden olmaktadır.

Malzeme kalınlığı, uygun test frekansı seçebilme açısından önem taşımaktadır. Her bir kalınlık için optimum test frekansı söz konusu olup, belli bir kalınlık için kullanılan frekans başka bir kalınlığa uygulandığında girdap akımı alanı değişmekte ve bu da hataların algılanmasında karışıklığa neden olmaktadır.

Girdap akımları alanın malzemenin kenarlarına taşması durumunda, empedans değişikliği olmaktadır. Buna 'Kenar etkisi' denir. Benzer etkiler bobin veya halka tipi problarda malzeme ucunun proba gelmesiyle 'Uç Etkisi' olarak ortaya çıkmaktadır. Prob ile malzeme arasında boşluk kalmasıyla ortaya çıkan 'Dolgu etkisi' ise diğer bir geometrik faktördür [2, 10-14].

4.5.4 Temas Etkisi

Prob ile test parçası arasında oluşturulan manyetik alan bağlantısına 'Manyetik Temas' denir. Probun manyetik alan kuvveti probdan uzaklaştıkça azalmakta, dolayısı ile prob ile test parçası arasındaki uzaklığa göre girdap akımlarının şiddeti değişmektedir. Manyetik temas etkisi; test probunun boyutuna ve şekline, test parçasının yüzey durumuna ve şekline, test parçası üzerindeki kaplama malzemelerinin 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 olan problar kullanılması gerekmektedir.

'Aralık Etkisi' manyetik teması etkileyen diğer önemli bir büyüklüktür. Yüzey probunun 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 [2, 10-14].

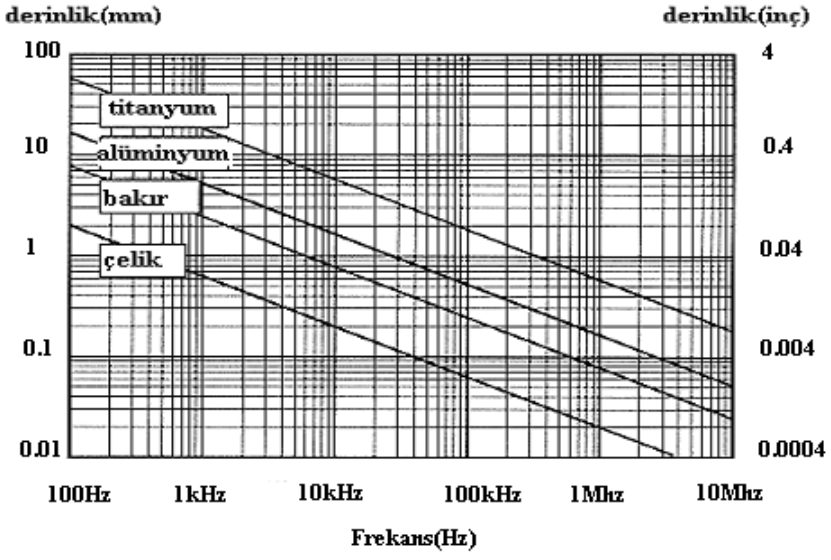
BÖLÜM 5. GİRDAP AKIMLARI TEST YÖNTEMİ İLE ÇALIŞAN CİHAZLARIN İÇ YAPISI

Giriş 5.1

Bu bölümde endüstriyel uygulamalar da kullanılan cihazların çalışma prensipleri ve iç yapısı anlatılmıştır. Girdap akımları test yöntemi ile çalışan cihazlar genel olarak üç bölümden oluşur. Bunlar ;

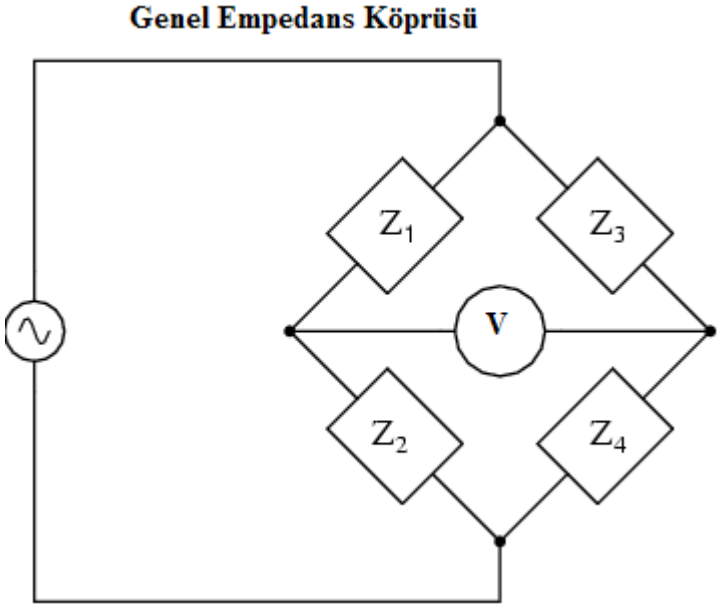
- Sinyal üreteci devresi
- AA köprü devresi
- Gösterge paneli

Bu tür test cihazlarında genel olarak test işlemleri 10 kHz ile 6 MHz arasında yapılır. Frekans seçimi birçok değişkene bağlıdır. Frekans seçimini belirleyecek faktörler test edilecek materyalin kalınlığı, manyetik geçirgenliği, materyalin şekli, algılanacak en küçük süreksizlik derinliği ve çevresel faktörler olarak sıralanabilir. Şekil 5.1'de titanyum, alüminyum bakır ve çeliğin değişen frekansa göre girdap akımlarının nüfuziyet derinliğini gösteren bir şema görülmektedir [3-9, 7].



Şekil 5.1: Çeşitli frekanslarda titanyum, alüminyum, bakır ve çelik metallerin nüfüziyet derinliği tablosu.

Sinyal üreteci devre ürettiği sinüzoidal işareti AA köprü devresine gönderir. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi AA köprü devrelerinde dört adet empedans şekilde görüldüğü gibi devreye yerleştirilir. Bobin bu empedansların herhangi bir tanesi olarak seçilebilir. Prob test edilecek materyalin süreksizlik olmayan yüzeyine getirildiğinde köprü devresinde bir çıkış gerilimi oluşur. Diğer empedanslar köprüyü dengelemek için ayarlanarak çıkış gerilimi sıfırlanır. Prob bir süreksizlik üzerine getirildiğinde AA köprü devresinin dengesi bozulur ve devrede bir çıkış gerilimi gözlenir.



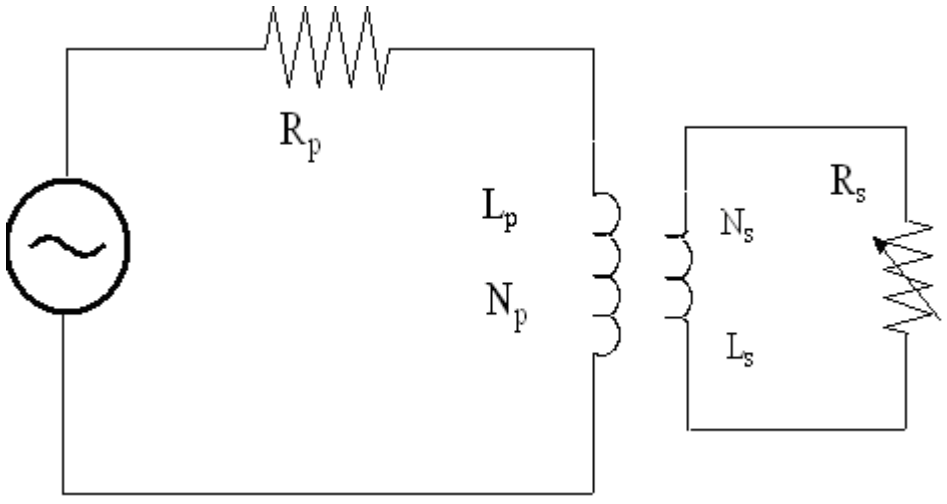
Şekil 5.2: Girdap akımları test metoduyla çalışan cihazların AC empedans köprü devresi.

Bu sinyal işlenerek gösterge paneline gönderilir. Uygulamalarda kullanılan bir çok gösterge paneli vardır. Bunlardan en basiti voltmetredir. Köprüden gelen gerilim çıkışı bir voltmetre tarafından okunur. Bu yöntemde sadece süreksizliğin var olup olmadığına dair bilgi elde edilebilir. Diğer gösterge panelleri CRT, osiloskoplar, şerit kaydediciler ve LCD paneller olabilir. Köprü çıkış gerilimi işlenerek süreksizliğin derinliği hakkında da bilgi alınabilir. Sinyal işleme devresi karmaşıklaştıkça daha detaylı bilgi verebilecek gösterge panelleri kullanılır [12, 13].

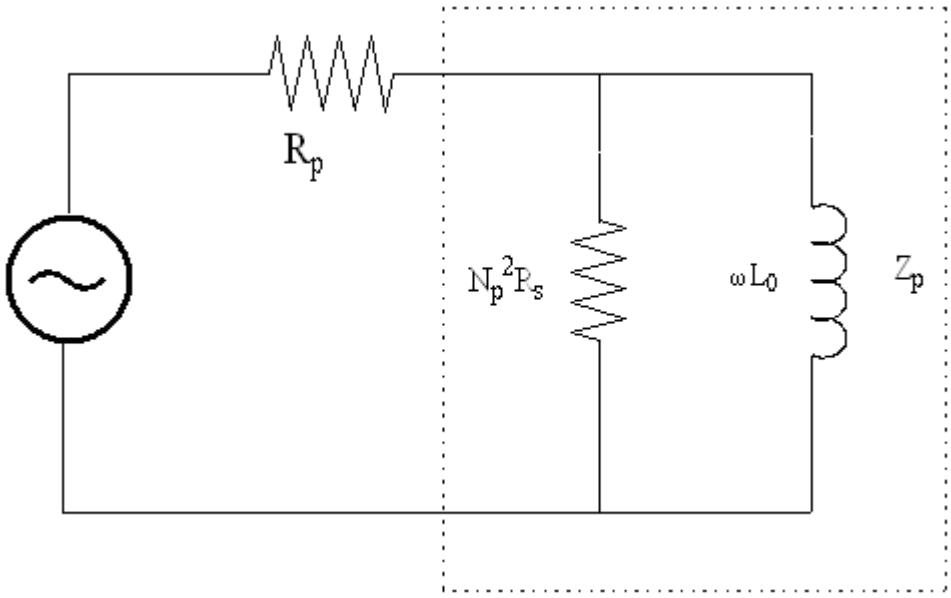
5.2 Girdap Akımı Probu – Malzeme İkilisi İçin Prob Empedansının Türetilmesi

Bu bölümde test malzemesindeki değişimlerin ve test frekansının bobin empedansına etkileri anlatılacaktır. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, prob iletken bir materyalin üzerine yerleştirildiği zaman, probun empedansında bir değişim

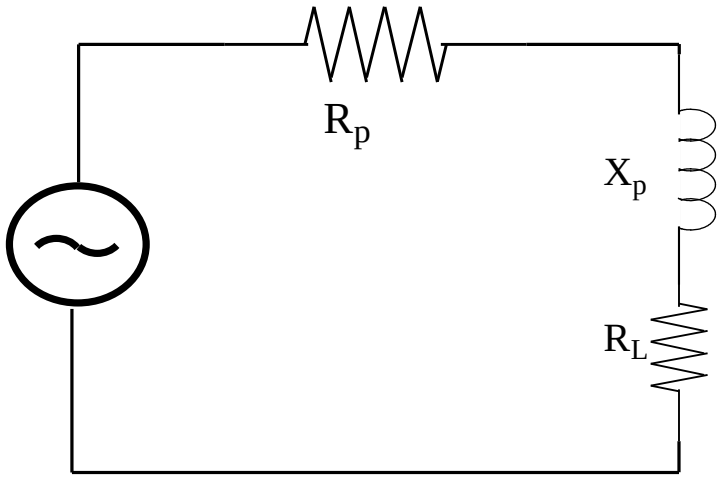
meydana gelir. Bir yaklaşım metodu olarak probun çok sarımlı bir tel, test edilen metalin tek sarımlı bir tel olduğu düşünülebilir. Bu ikili birbirinden manyetik olarak etkilenmektedir. Bundan yola çıkılarak prob-malzeme ikilisi bir transformatöre benzetilebilir. Şekil 5.3a'da böyle bir devre görülmektedir. Bu devrede R_p bobin teli ve probun bağlantı kablolarının toplam direncidir. L_p bobin endüktansı, N_p bobinin sarım sayısıdır. Rs malzemenin cinsine göre değişir, bobin test malzemesine yaklaştırıldığında bobin direncine ek bir yük getirir. Bu modelde malzemenin tek sarımlı bir tel olduğu düşünülür, tek sarımlı telin endüktansı Ls, sarım sayısı ise Ns'dir. Bu devre Şekil 5.3b'de görülen birbiri ile paralel olarak bağlanmış bir bobin ve direnç ikilisinden oluşmuş bir devre gibi düşünülebilir. Bu devre gerçek bir bobin modelidir. Bobin manyetik alanı çok ince malzemelerde görüldüğü gibi test malzemesinin dışına taşar. Bu taşma bobinin tüm manyetik alanının girdap akımı oluşturamamasına neden olur. Bu modelde bu etki yok sayılmıştır. Burada L_0 bobinin havadaki test malzemesine uzakta iken bobinin endüktansını göstermektedir. $N_p^2R_s$ ise test malzemesinin bobin direncine eklediği ek yüktür ve N_s = 1'dir (test metalinin tek sarımlı bir tel olduğu düşünülür). Şekil 5.3c'de ise, Şekil 5.3b'deki paralel kollar seri hale dönüştürülmüştür. Eşdeğer devre kavramı girdap akımı testinde uygulanan sadeleştirilmiş empedans diyagramlarını bulmak için kullanılır. Bu diyagramlar deri etkisinin sebep olduğu değişimleri ihtiva eden daha detaylı diyagramların anlaşılmasında temel teşkil eder.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.3: (a) Bir bobin ve test malzemesi modeli (b) Eşdeğer paralel devresi. (c) Eşdeğer seri devresi.

Bobin-malzeme devresi modeli aşağıdaki matematiksel işlemlerle daha basit seri devrelere dönüştürülebilir. Şekil 5.3b'de görülen paralel devrenin empedansı Denklem 5.1'de hesaplanmıştır.

$$Z_1 = N_p{}^2 R_s$$

$$Z_2 = jX_0 \tag{5.1}$$

$$Z_p = \frac{Z_1.Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$X_0 = \omega L_0$ ise bobinin havadaki endüktif reaktansıdır. Denklem 5.1'de Z_p'deki Z_1 ve Z_2 ifadeleri yerlerine koyulduğunda Denklem 5.2 elde edilir.

$$Z_p = \frac{jN_p{}^2 R_s X_0}{N_p{}^2 R_s + jX_0} \tag{5.2}$$

Denklem 5.2'deki ifadeyi reel ve imajiner kısımlarına ayrılırsa, bobinin endüktif reaktans ve direnç bileşenleri Denklem 5.3'te görüldüğü gibi hesaplanır.

$$Z_p = \frac{N_p{}^2 R_s X_0{}^2}{\left(N_p{}^2 R_s\right)^2 + X_0{}^2} + j\frac{\left(N_p{}^2 R_s\right)^2 X_0}{\left(N_p{}^2 R_s\right) + X_0{}^2} \tag{5.3}$$

Denklem 5.3'te görülen bobin empedansının reel kısmı Şekil 5.3c'de görülen R_L direncine, imajiner kısmı ise X_p endüktif reaktansına eşittir. Denklem 5.4'te Şekil 5.3c'deki seri devre empedansı görülmektedir. Burada R_L, bobinin test malzemesinden dolayı kaynaklanan direnci, X_p ise bobinin endüktansını göstermektedir.

$$Z_p = R_L + jX_p \tag{5.4}$$

Prob, malzemeden çok uzakta (havada) olduğunda $R_s = \infty$ ifadesi yerine konulursa, R_L=0 ,$X_p = X_0$ ve $Z_p = jX_0$ olur. Burada $R_s = \infty$ bir açık devreyi gösterir.

Test malzemesinde ve test frekansındaki değişimlerin bobin empedansına etkilerini görebilmek için, Denklem 5.3'ü daha basite indirgemek amacıyla denklem 5.5'teki tanımlar yapılmıştır. Bu tanımlar Denklem 5.3'te yerine koyulduğunda Denklem 5.6 bulunur.

$$C_0 = X_0 G$$

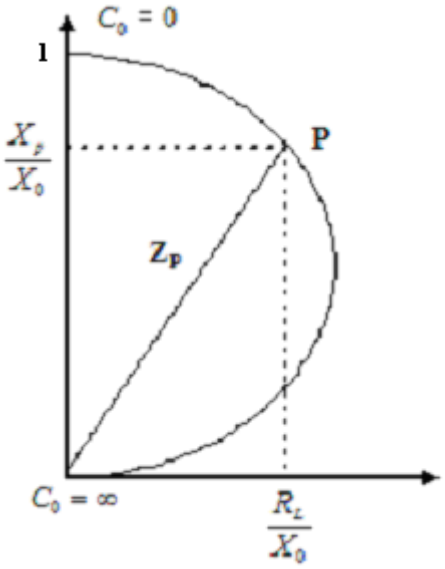
$$G = \frac{1}{N_p{}^2 R_s} \tag{5.5}$$

$$Z_p = \frac{X_0 C_0}{1 + C_0{}^2} + j\frac{X_0}{1 + C_0{}^2} \tag{5.6}$$

Prob ile metalin arasında aralık olmadığı zaman Denklem 5.6'daki formül geçerlidir. Bu formülün X_0 ile normalizasyonu neticesinde Denklem 5.7 bulunur.

$$\frac{Z_p}{X_0} = \frac{C_0}{1 + C_0{}^2} + j\frac{1}{1 + C_0{}^2} \tag{5.7}$$

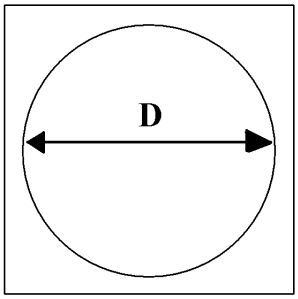
Denklem 5.7'yi oluşturan parametrelerin değişimleri sonucunda Şekil 5.4'teki empedans eğrisi grafiği çizilir. Bu grafikte bobinin endüktif reaktansı ve direnci normalize edilmiştir. X_p bobinin endüktif reaktansı, R_L ise bobinin direncidir.



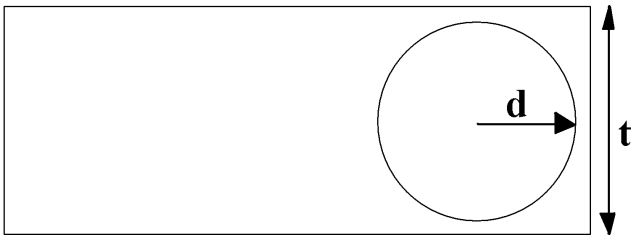
Şekil 5.4: Prob empedansının normalize edilmiş grafik gösterimi.

Denklem 5.7'den yararlanarak, $C_0 = X_0 / N_p{}^2 R_s$ denkleminde her bir parametre yerine koyulduğunda; bu parametrelerdeki artış C_0'da bir artışa sebep oluyorsa empedans diyagramındaki P çalışma noktası aşağıya doğru hareket edecektir, parametredeki bir artış C_0'ın azalmasına sebep olursa bu defa P çalışma noktası yukarıya doğru hareket edecektir. Denklem 5.7 incelendiğinde aşağıdaki bulgular ortaya çıkar [14].

- $R_s = \rho\lambda/A$ şeklinde düşünülebilir. Burada ρ elektriksel özdirenç, λ girdap akımlarının aktığı mesafe, A ise akımın aktığı bölgenin alanıdır. Eğer elektriksel özdirenç arttırılırsa R_s artacak, buna bağlı olarak P çalışma noktası yukarı doğru hareket edecektir. Elektriksel iletkenlik dirençle zıt yönlü olduğundan dolayı, Şekil 5.7a'da görüldüğü gibi iletkenlikteki artış P çalışma noktasını aşağı çekecektir.
- Kalınlık değeri t olan plaka malzemeler için $R_s = \rho\lambda/A$ ifadesi başka bir anlayışla $R_s = \rho\pi D/2td$ olarak yazılabilir. Bu formül, malzeme- prob ikilisinin girdap akımları oluşumunu engelleyen dirençleri göz önüne alarak, test metali içerisinde daire şeklinde akan bir girdap akımı tüpü düşünülerek yazılmıştır ($t << \delta$).



Şekil 5.5: Test malzemesi içinde akan bir girdap akımı dairesinin üstten görünüşü.



Şekil 5.6: Test malzemesi içinde akan bir girdap akımı dairesinin kesiti.

D: girdap akımı halkasının çapı.

d: girdap akımı kesit çapı.

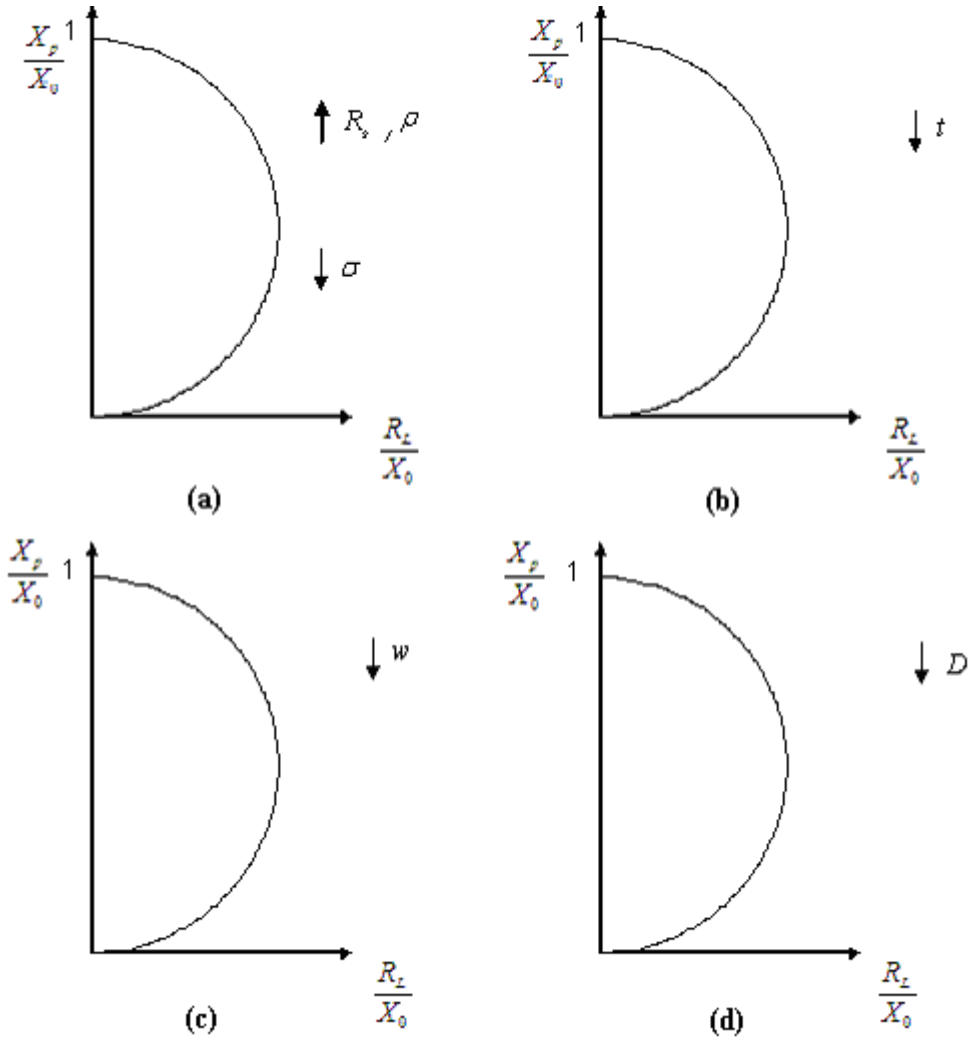
t: test plakasının kalınlığı.

δ : nüfuziyet derinliği.

Bu durumda R_s = sabit/t şeklinde formül plaka kalınlığı hariç diğer parametreler sabit tutulduğunda plaka kalınlığındaki artış, empedans eğrisindeki P çalışma noktasını Şekil 5.7b'de görüldüğü gibi aşağıya çeker.

- Daha öncede görüldüğü gibi $C_0 = \omega L_0/N_p^2 R_s$ ifadesinde frekanstaki bir artış, empedans eğrisindeki P çalışma noktasını Şekil 5.7c'de görüldüğü gibi aşağıya çekecektir.
- L_0 prob endüktansı daha önce Denklem 4.1'de görüldüğü gibi prob çapının karesi ile orantılı olarak artmaktadır. L_0 = sabit*D^2 şeklinde diğer bobin değişkenleri sabit tutulduğunda, daha önce belirtilen $R_s = \rho\pi D/2td$ formülü $C_0 = wL_0/N_p^2 R_s$ ifadesinde yerlerine yazılırsa C_0 = sabit*D ifadesi elde edilir. Yani prob çapındaki bir artış, empedans eğrisindeki P çalışma noktasını Şekil 5.7d'de görüldüğü gibi aşağı çekecektir.

Yukarıda çeşitli parametrelerin değişimi ile empedans eğrisindeki çalışma noktasının nasıl değişeceği formüllerle anlatılmıştır. Bu formüllerde bobin akımının tamamının girdap akımı üretiminde kullanıldığı varsayılmıştır. Eğer malzeme ve bobin temas etmiyorsa empedans noktası küçülen yarım daireler şeklinde izler meydana getirir [6].



Şekil 5.7: (a) Dirence göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (b) Cidar kalınlığına göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (c) frekansa göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi. (d) tüp veya bobin çapına göre empedans eğrisindeki çalışma noktası değişimi.

5.3 Probların Bağlantı Şekilleri

Daha önceki bölümlerde bahsedilen diferansiyel probların içindeki bobinler birbirlerine farklı şekillerde bağlanırlar.

Şekil 5.8a'da görülen girdap akımı probu en basit yapıdakilerden biridir. Bu prob tek sargıdan oluşur. Sinüzoidal işaret bu bobine uygulanır, değişen endüktif reaktans ve direnç değerleri aynı bobinin üzerinden okunur.

Şekil5.8b'deki sistem iki bobinden oluşur. Sinüzoidal işaret birincil bobine uygulanır. Bu bobin test silindiri üzerinde girdap akımları oluşturur. Oluşan girdap

akımları ikincil bobin üzerinde gerilim oluşturur, bu gerilim sinyali işlenerek süreksizlik algılanır.

Şekil 5.8c'de iki tane birincil bobinden oluşmuş bir devre görülmektedir. Test silindiri bobinin içine yerleştirildiğinde devrede çıkış gerilimi ölçülür. Başka bir test silindiri diğer birincil bobine yerleştirilirse, daha önce devre çıkışında görülen gerilim sıfırlanır. Test silindirlerinden biri hareket ettirildiğinde eğer altında bir süreksizlik varsa, devre çıkışında fark gerilimi gözlenir.

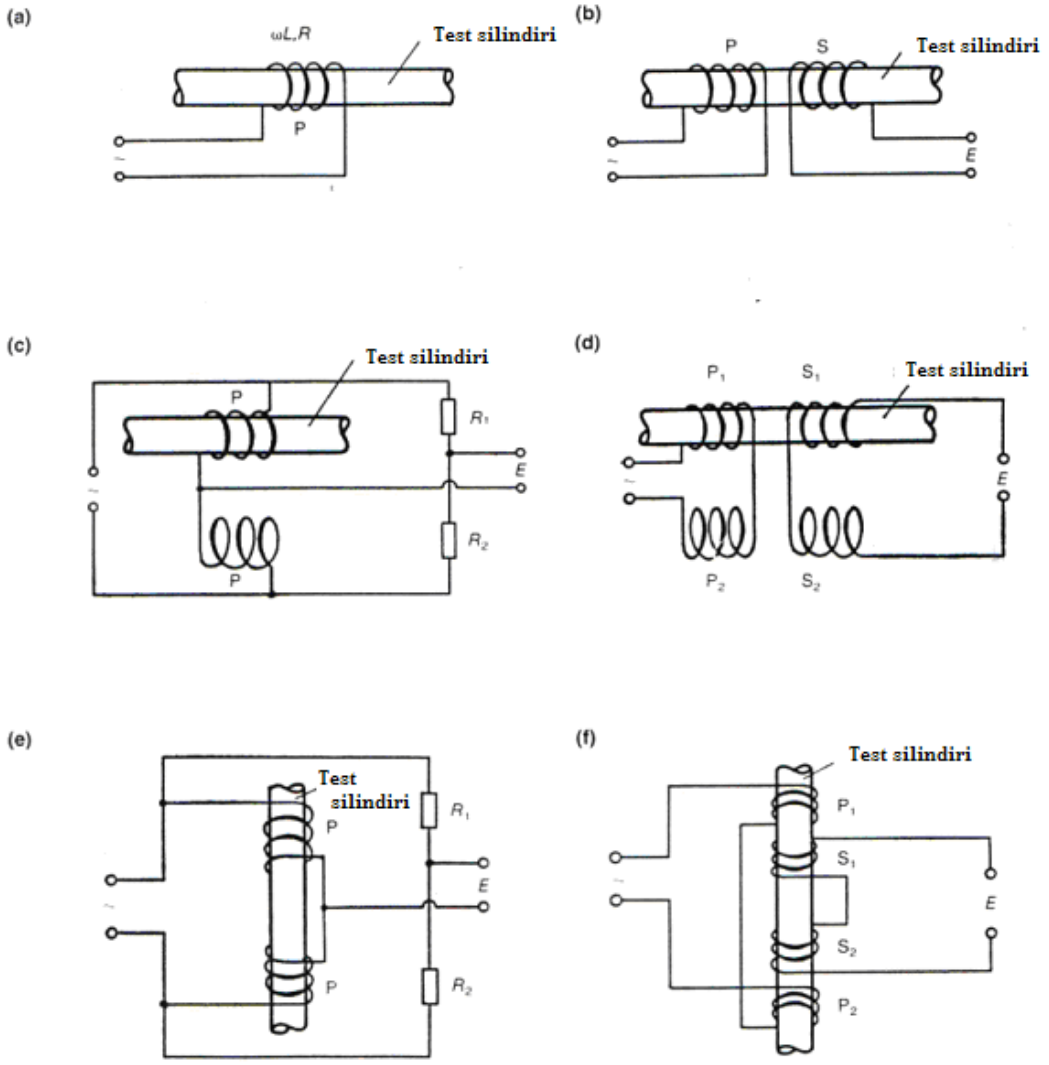
Şekil 5.8d'de sistem iki adet birincil bobin ve iki adet ikincil bobin olmak üzere dört bobinden oluşur. İlk birincil ve ikincil bobinin görevi girdap akımı oluşturmaktır. İkinci bobin çiftinde girdap akımlarının meydana getirdiği gerilim ölçülebilir.

Şekil 5.8e ve f, Şekil 5.8c ve d'den farklı olarak test yapılacak silindir üzerinde çatlağın var olup olmadığı anlaşılması için, birincil bobinlerden ilki çatlağın bulunmadığı bir yere getirilir, diğer bobin aynı silindir üzerinde gezdirilir. Bu yöntem, test silindirinde boylu boyunca sabit olan bir süreksizliğin bulunmasında kullanılamaz. Çünkü böyle bir süreksizlik çıkış gerilimini sıfırlar.

Şekil 5.8e'de görüldüğü gibi iki adet birincil bobin aynı test silindiri üzerinde gezdirilir. Herhangi bir süreksizlik anında devrenin çıkışında bir fark gerilimi meydana gelir. Bu gerilim sinyali işlenerek süreksizliğin derinliği hakkında bilgi elde edilir.

Şekil 5.8f'de ise birincil bobinler test silindiri üzerinde girdap akımı oluşumunda, ikincil bobinler ise bu girdap akımının algılanması için kullanılmıştır. Yani devremizde iki adet sürücü ve iki adet algılayıcı bobin mevcuttur. Algılayıcı bobinler (ikincil bobinler) birbirine diferansiyel olarak bağlıdır. Bu bobinlerde oluşan gerilim farkı sinyali işlenerek çatlağın derinliği hakkında bilgi elde edilir [12].

Karşılaştırmalı devrelerle süreksizliklere ek olarak başka fiziksel farklılıklarda algılanabilmektedir. Bunlara manyetik geçirgenlik, iletkenlik veya ölçümü yapılacak olan test materyalinin kalınlığı örnek verilebilir.



Şekil 5.8: (a) Tek sargılı birincil bobin. (b) Birincil ve ikincil bobin. (c) İki birincil sargıdan oluşan bobinin köprü devresi. (d) İki birincil ve iki ikincil sargıdan oluşan köprü devresi. (e) Kendisiyle karşılaştırmalı iki birincil bobin köprü devresi. (f) Kendisi ile karşılaştırmalı iki birincil ve iki ikincil bobinden oluşan köprü devresi.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR, GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

6.1 Giriş

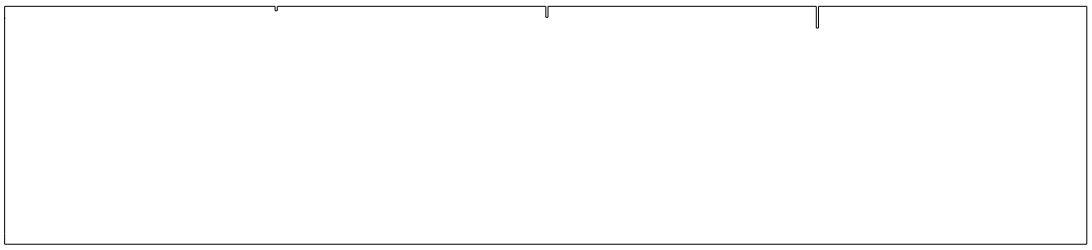
Bu bölümde, daha önceki bölümlerde konu hakkında yapılmış olan araştırmalara dayanarak çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu amaçla bir kalibrasyon çubuğunun endüktansında ve direncinde meydana gelen değişimler gözlenmiş, üzerine "S ve Y" şeklinde en boyunca çatlaklar açılan plakalar haritalanmış, voltmetre tipi gösterge panelli metaller üzerindeki çatlakları algılayan bir cihaz pratikte gerçekleşmiştir. Bu uygulamalarda elde edilen bulgular incelenmiş, uygulamaların eksik tarafları belirtilmiş ve nasıl iyileştirme yapılabileceği anlatılmıştır.

6.2. Kalibrasyon Çubuğunun Girdap Akımları Yöntemi İle Testi

Bu bölümde, bakır kalibrasyon çubuğunda oluşturulmuş farklı derinlikteki çatlaklar üzerinde gezdirilen probun endüktansında ve direncinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

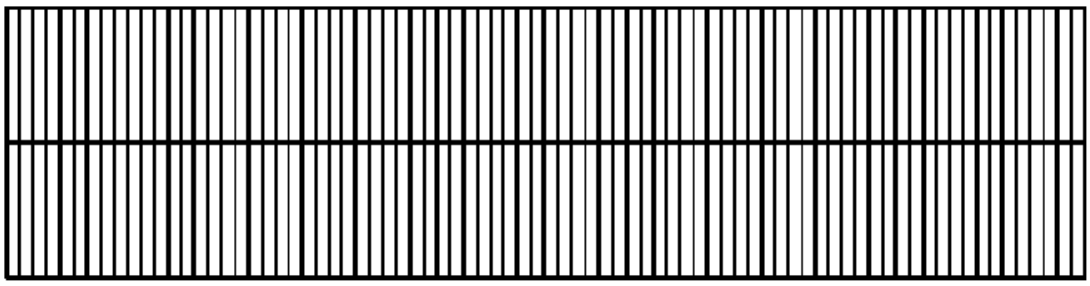
6.2.1 İşlem Süreci

Şekil 6.1'de görülen kalibrasyon çubuğu boyutları 1 cm x 5 cm x 20 cm olacak şekilde kesilmiş, kesim işlemi tamamlandıktan sonra yüzeyi temizlenmiş, üzerine 5 cm aralıklarla 0,2 mm 0,5 mm ve 1,0 mm derinliğinde genişliği 0,3 mm olan üç ayrı çatlak FANUC tel erozyon makinesi ile açılmıştır. Tel erozyon makinesinin çalışma prensibi yüksek gerilim verilen bir telin iki ucunun iki noktaya sabitlenmesi ve şekil verilecek parçaya sürtünmesi ile değil, ark atlaması ile "aşındırarak" şekillendirmektir.



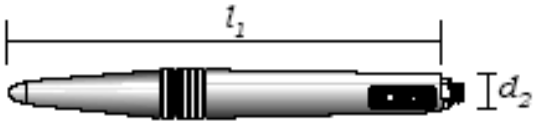
Şekil 6.1: Üzerine 5 cm aralıklarla 0,2 mm 0,5 mm ve 1,0 mm derinliğinde genişliği 0,3 mm olan çatlaklar açılmış bakır kalibrasyon çubuğu.

Bu işlemden sonra Şekil 6.2'de görülen aydınger kağıdı plakaların yüzeyini kapsayacak şekilde 5 cm x 20 cm boyutunda kesilmiş, üzerinde 0,5 cm aralıklar olacak şekilde çizgiler oluşturulmuştur. Aydınger kağıdı biçimlendirildikten sonra plaka üzerine yapıştırılmıştır.



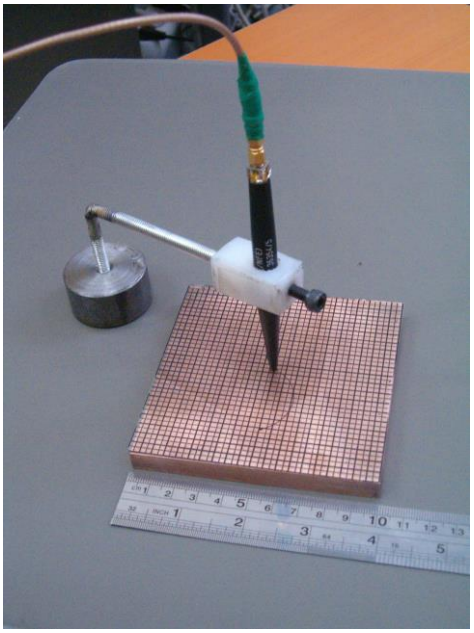
Şekil 6.2: Boyutları 5 cm x 20 cm ve üzerinde 0,5 cm aralıklı çizgilerin bulunduğu aydınger kağıdı.

Şekil 6.3'te test için kullanılan Hocking firmasının 500 kHz için ürettiği girdap akımı kalem probu görülmektedir. Bu pobun uzunluğu l_1 = 100 mm, genişliği d_2 = 95 mm'dir.



Şekil 6.3: Hocking firmasının 500 kHz için ürettiği 121P1A kalem probu.

Bu probu dik tutabilmek için Şekil 6.4'te gösterilen prob tespit ayağı kullanılmıştır. Prob tespit ayağının kullanılmasının bir diğer sebebi ise ölçüm sırasında meydana gelebilecek olan prob titreşimlerini engellemektir.



Şekil 6.4: Prob tespit ayağı.

Şekil 6.5'te gösterilen INSTEK firmasının ürettiği LCR METER-819 cihazı probun endüktans ve direnç değerleri ölçümü için kullanılmıştır.



Şekil 6.5: INSTEK LCR METER-819.

INSTEK LCR METER-819, 0-100 kHz sürekli değişken frekansta ölçüm yapabilme özelliğine sahiptir. Bu cihaz % 0,05 hata payı ile çalışmakta ve üzerinde 240 x 128 matrix LCD panel bulunmaktadır.

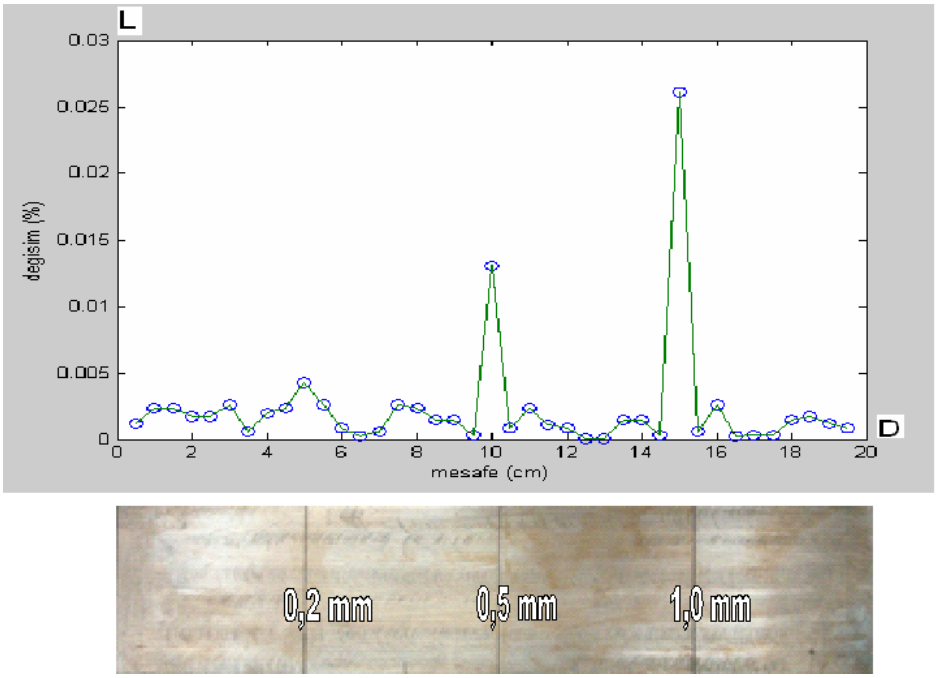
Tablo 6.1'de probun test metalinin çatlaksız yüzeyinde iken (prob-malzeme aralığı = 0 mm) INSTEK LCR METER-819 ile çeşitli frekanslarda ölçülmüş endüktans ve direnç değerleri görülmektedir. Kalibrasyon çubuğundan 0,5 cm aralıklarla soldan sağa doğru alınan endüktans ve direnç değerleri Ek-A'da görüldüğü gibi EXCEL programına girilmiştir. Bu tabloda L endüktansı, Q ise kalite faktörünü belirtmektedir. Direnç değerleri Q = ωL/R formülü ile bulunmuştur. Bu işlemden sonra tekrar MATLAB programında Ek-B'de görüldüğü gibi kod yazılmıştır ve Ek-A'daki veriler derlenmiştir.

Tablo 6.1. Probun çeşitli frekanslarda endüktans ve direnç değerleri.

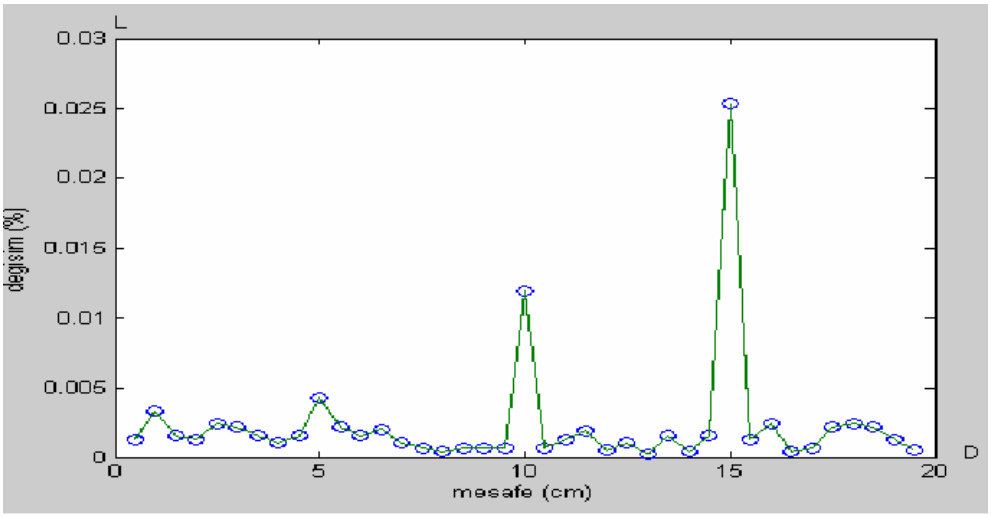
Frekans (kHz)	L (μH)	R (Ω)
20	41,87	2,884586
50	41,72	2,921014
100	41,42	3,047387

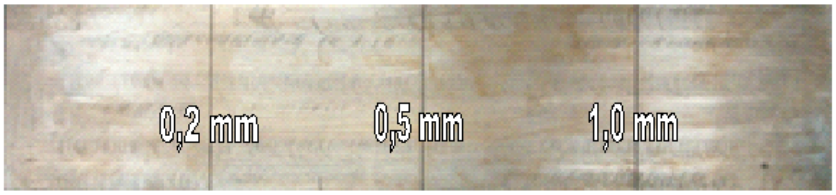
6.2.2 Sonuçlar Ve Öneriler

Şekil 6.6'da plaka üzerinde soldan sağa doğru ölçülen endüktans değerlerinin 20 kHz, 50 kHz ve 100 kHz'teki yüzde değişimleri görülmektedir. Yüzde değişimler lineer olup üç frekansta da birbirine yakın olarak ölçülmüştür. Şekil 6.7'de çatlak derinliklerine göre direncin yüzde değişim grafikleri görülmektedir.

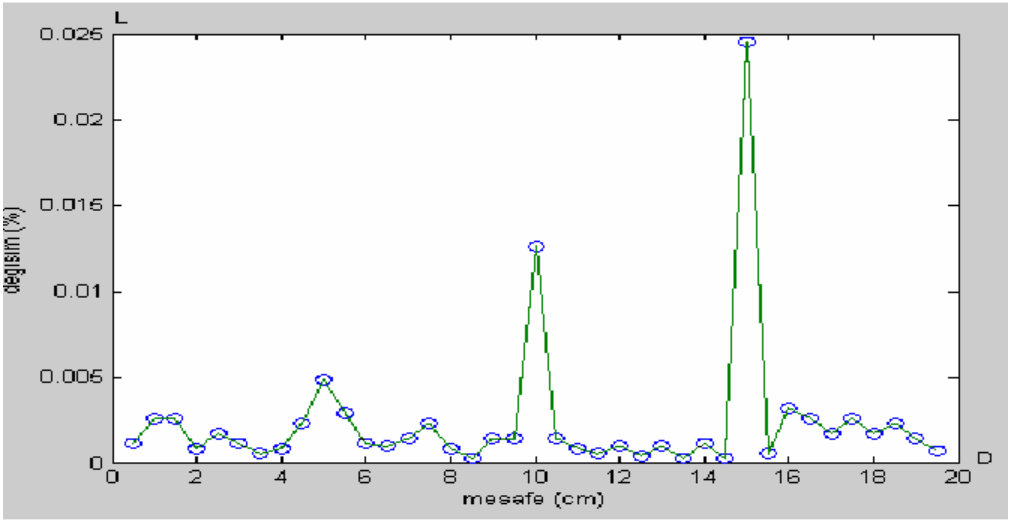


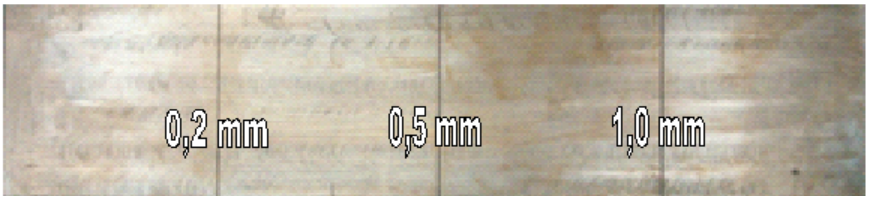
a)





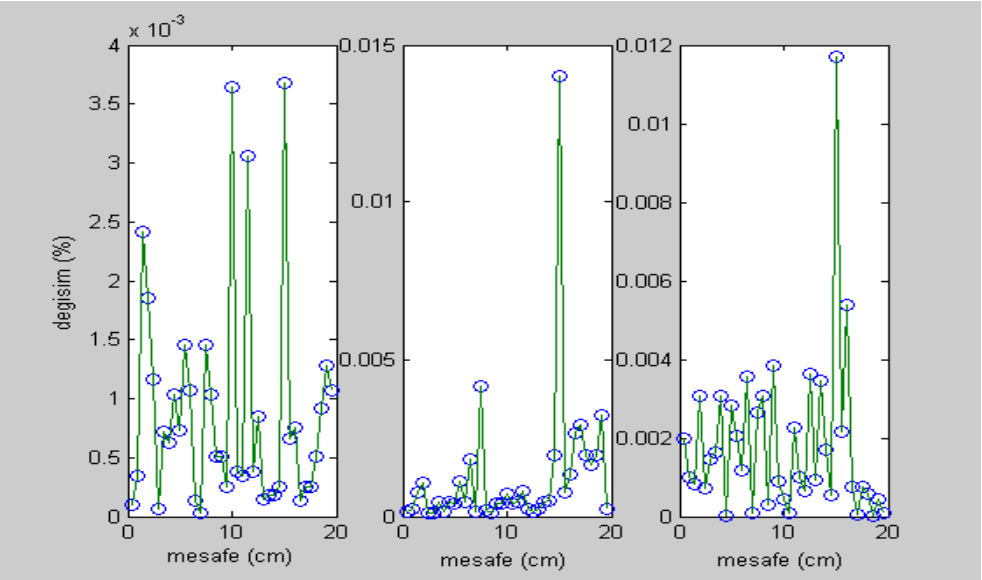
b)





c)

Şekil 6.6: a) Yüzde endüktans değişimi grafiği 20 kHz, Nüfuziyet Derinliği = 0,352 mm. b) Yüzde endüktans değişimi grafiği 50 kHz , Nüfuziyet Derinliği = 0,226 mm. c) Yüzde endüktans değişimi grafiği 100 kHz , Nüfuziyet Derinliği = 0,159 mm.



Şekil 6.7: 20 kHz – 50 kHz – 100 kHz'te direncin yüzde değişim grafiği.

Denklem 6.1'de % değişim için uygulanan formül görülmektedir. Burada X_i plaka üzerinden alınan değeri, X_o ise plaka üzerinden alınan değerlerin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Grafikler bu formül kullanılarak MATLAB programında çizdirilmiştir.

$$X(\%) = \left| \frac{X_0 - X_i}{X_o} \right| * 100 \qquad (6.1)$$

Dirence göre yüzde değişim grafiklerinden yeterli derecede doğru sonuçlar alınamamıştır. Bunun en büyük nedeni probun tam olarak çatlakların üzerine gelmemesi ve girdap akımlarının çatlakların etrafından dolanması isteğidir. Girdap akımları olabilecek en kısa yolu takip ederler. Frekansın daha yüksek tutulması halinde (girdap akımları yüzeyde toplanacağından), ölçülen direnç değerlerinin çatlakların algılanmasında daha doğru sonuçlar verebileceği görülmüştür. Ayrıca prob titreşimlerine dikkat edilmesi gerekir. 20 kHz – 50 kHz ve 100 kHz'de yapılan deneylerde endüktansın yüzde değişimlerinde meydana gelen değişimler birbirine yakındır, fakat burada frekans seçmek gerekirse bu frekans 100 kHz olmalıdır. Bunun nedeni, frekans arttırıldıkça endüktif reaktansın yüzde değişiminin sabit kalmasına rağmen mutlak endüktif reaktans değerinin büyümesidir. Örnek olarak Ek-A'da görülen plakanın çatlak olmayan bir yerinde, x = 3 cm konumunda ölçülen endüktans değerlerini inceleyelim (plaka değerleri soldan sağa doğru alınmıştır). 20 kHz, 50 kHz ve 100 kHz'de sırayla endüktans değerleri 0,035160 µH, 0,034130 µH,

0,03348 µH'dir. Buna bağlı olarak endüktif reaktans değerleri $X_L=2\pi fL$ formülü ile sırayla 4,42 Ω, 10,72 Ω, 21,04 Ω bulunur. Bu nedenle 100 kHz'de prob çatlak üzerine getirildiğinde meydana gelen endüktif reaktans değişimleri, düşük frekanslardaki değişimlerden daha büyük olur.

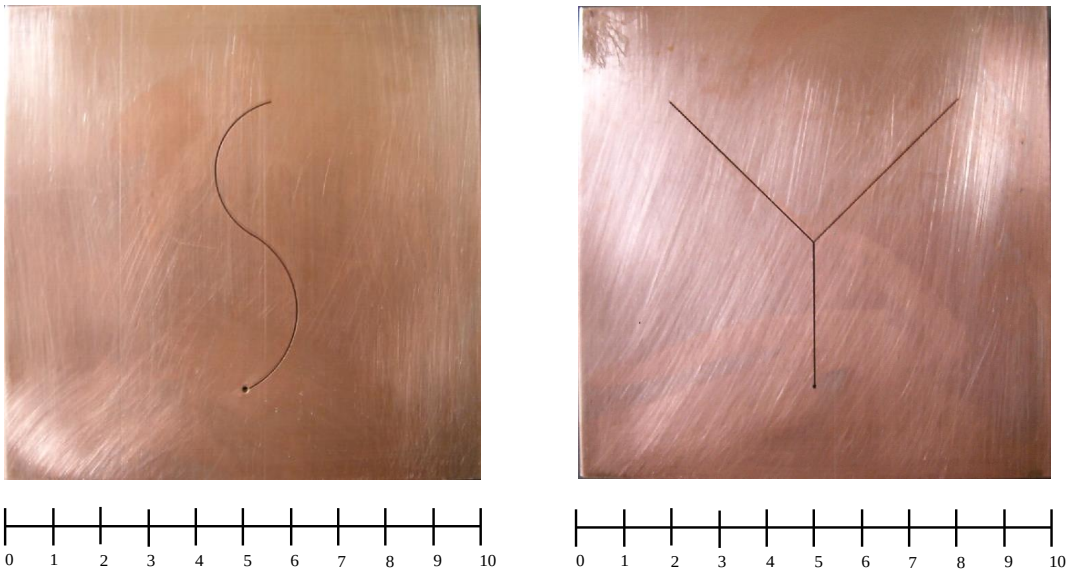
Derin çatlakların derinliğinin ölçülebilmesi için düşük, sığ çatlakların derinliğinin saptanması için yüksek frekanslar kullanılmalıdır.

6.3. Girdap Akımları Test Yöntemi İle Yüzey Çatlaklarının Haritalanması

Bu bölümde bakır plakalar üzerine "S ve Y" şeklinde, tüm en boyunca açılmış çatlakların nasıl haritalanabileceği anlatılmıştır.

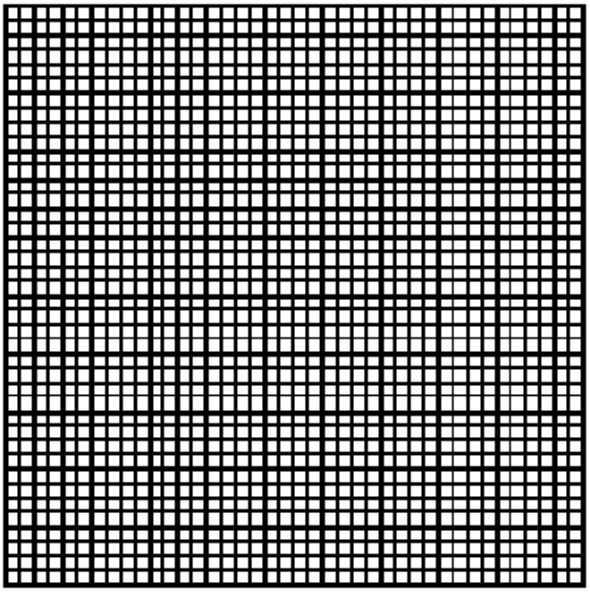
6.3.1 İşlem Süreci

Haritalama işlemi için boyutları 1cm x 10cm x 10 cm olan iki bakır plaka kesilmiş ve yüzeyi temizlenmiştir. Bu işlemden sonra bakır plakaların her birinin yüzeyine FANUC marka tel erozyon makinesinde Şekil 6.8'de görüldüğü gibi "S ve Y" şeklinde en boyunca çatlaklar açılmıştır.



Şekil 6.8: Üzerine S ve Y harfi en boyunca açılmış plakalar.

Plakalar üzerinde çatlaklar açıldıktan sonra Şekil 6.9'da görüldüğü gibi aydınger kağıdı, plakaların yüzeyini kapsayacak şekilde 10 cm x 10 cm boyutlarında kesilmiş ve üzerinde kenar uzunluğu 0,5 cm olan kareler çizilmiştir. Bu şablon kağıtlar plakalar üzerine yapıştırılmıştır.

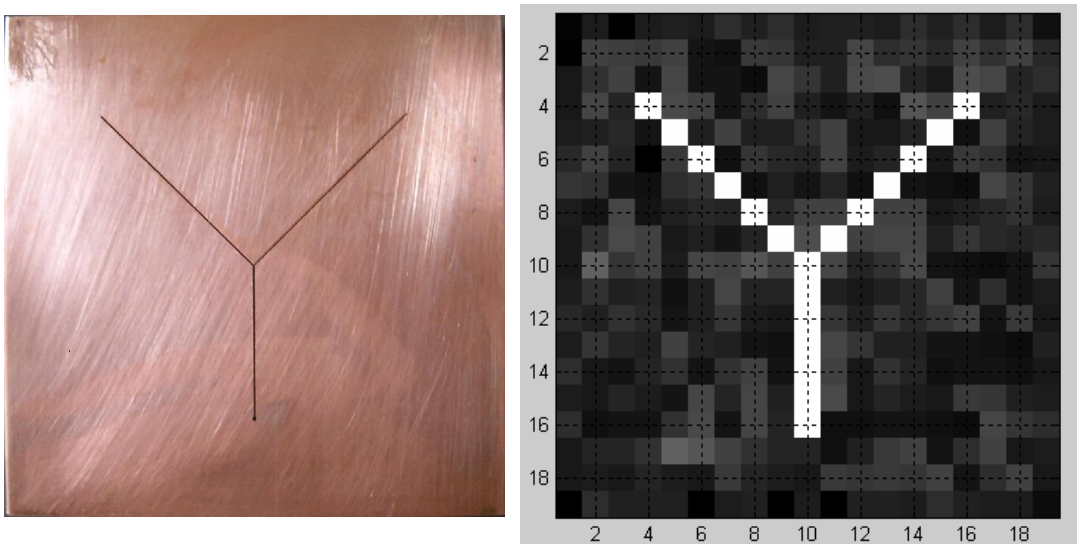


Şekil 6.9: Boyutları 10 cm x10 cm olan ve üzeri kenar uzunluğu 0,5 cm olan karelere ayrılmış aydınger kağıdı.

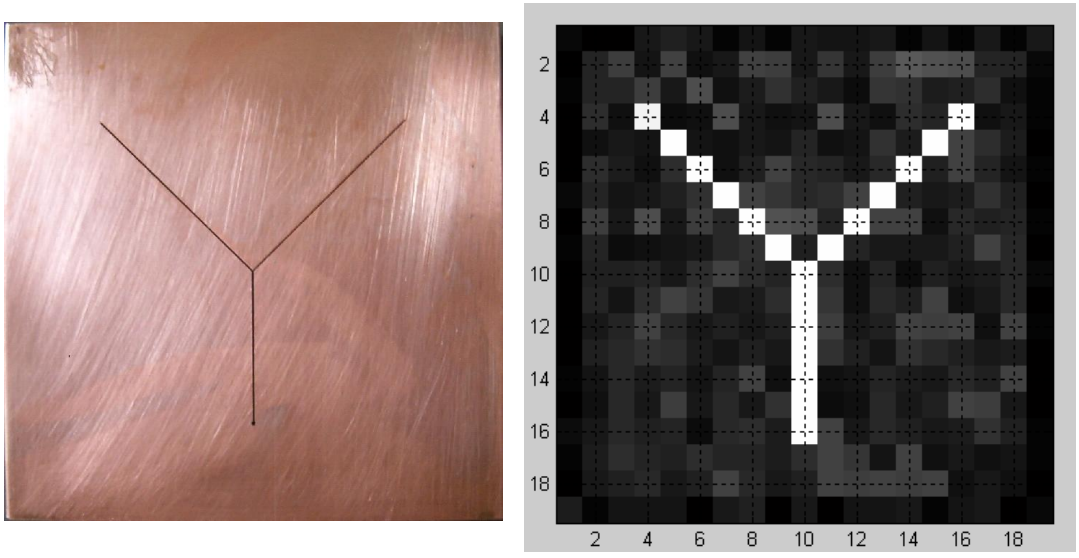
Endüktans ve kalite faktörü değerleri soldan sağa ve yukarıdan aşağı doğru 0,5 cm aralıklarla ölçülmüştür (prob-malzeme aralığı = 0 mm). Kullanılan frekans 100 kHz'dir. Bu veriler daha sonra EXCEL programına Ek-C ve Ek-D'de görüldüğü gibi girilmiştir. L endüktans, Q ise kalite faktörüdür. Endüktans ve kalite faktörü değerleri ile haritalama yapabilmek için MATLAB programında Ek-E'de görüldüğü gibi bir kod yazılmıştır. Programda plakalar üzerinden alınan ölçümlerin Denklem 6.1'deki formül ile endüktans ve direnç bileşenlerindeki yüzde değişimleri bulunmuş ve bu değerlere göre haritalama işlemi yapılmıştır.

6.3.2 Sonuç ve Öneriler

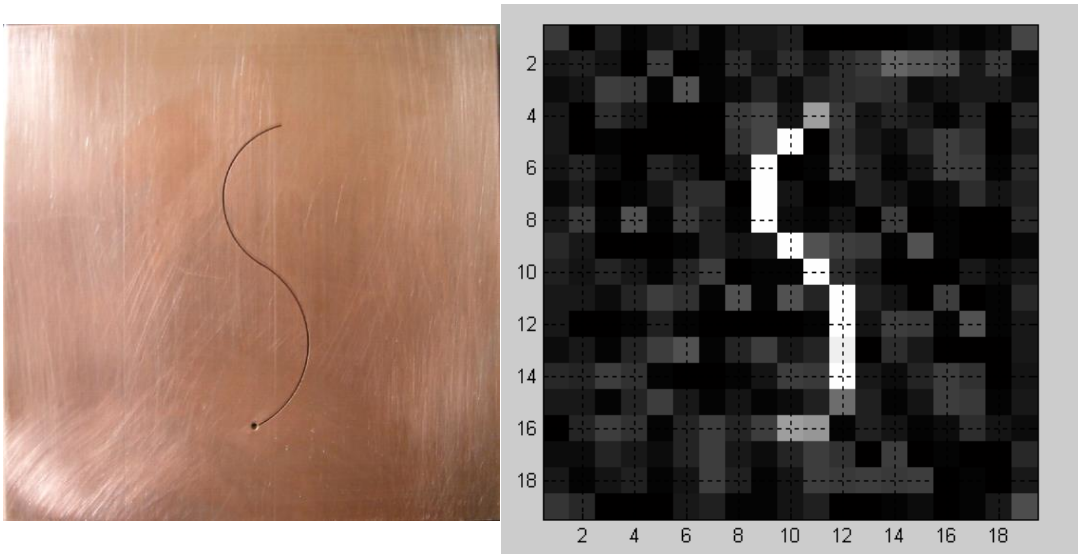
Şekil 6.10'da üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın dirence göre haritalanması, Şekil 6.11'de üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın endüktansa göre haritalanması, Şekil 6.12'de üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın dirence göre haritalanması ve Şekil 6.13'de üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın endüktansa göre haritalanması görülmektedir. Haritalama işlemi 256 farklı (beyazdan siyaha doğru) renkle yapılmıştır.



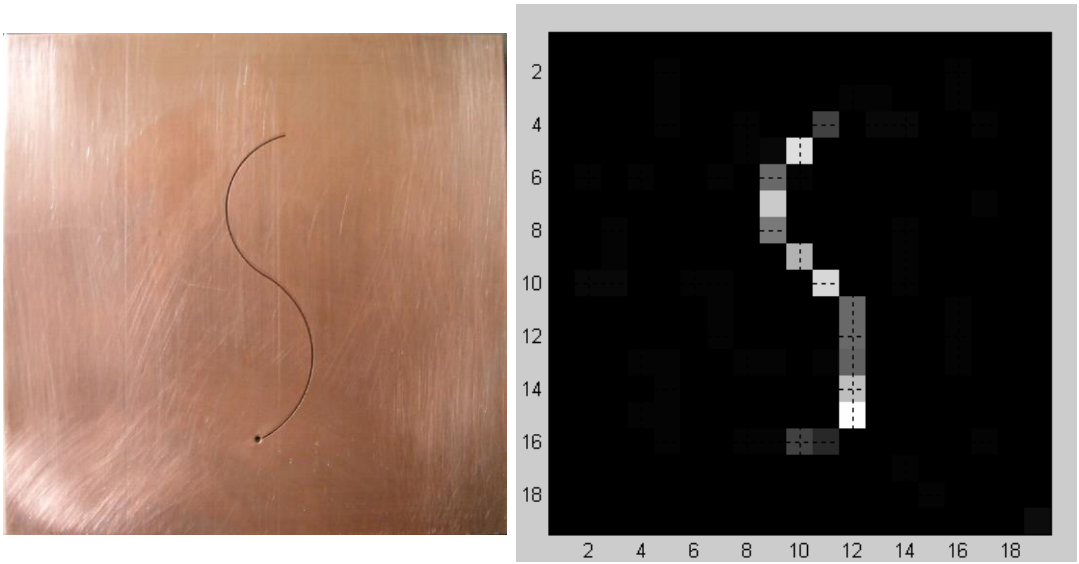
Şekil 6.10: Üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın direnç bileşenine göre haritalanması.



Şekil 6.11: Üzerinde Y şeklinde çatlak olan plakanın endüktans bileşenine göre haritalanması.



Şekil 6.12: Üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın direnç bileşenine göre haritalanması.



Şekil 6.13: Üzerinde S şeklinde çatlak olan plakanın endüktans bileşenine göre haritalanması.

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, endüktans bazlı haritalama ve direnç bazlı haritalama birbirine yakın görüntülerdir. Bunun nedeni veri alınan noktalarla çatlakların tam olarak örtüşmesidir. Çatlağın "Y" şeklinde açılmış olması bu örtüşmeye neden olmuştur. Çatlakların tüm en boyunca açılmış olması, çatlakların iyi bir şekilde görüntülenmesinde büyük bir etkendir.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'de görülen "S" şeklinde çatlak açılmış plakanın görüntüsünde, çatlak üzerindeki görüntü beyaz ve grinin tonları şeklinde, "Y"

şeklinde çatlak açılmış plakada ise çatlak üzerindeki görüntü beyazdır. “S” şeklinde açılmış çatlak görüntülerinin, “Y” şeklinde açılmış çatlak görüntülerinden daha kötü olmasının sebebi, çatlakların tam olarak veri alınan noktalarla örtüşmemesi ve bu noktaların çatlaktan uzaklaşmasıdır. Haritalama işleminin daha iyi sonuçlar verebilmesi için 0,5 cm olan adım aralığı daha düşük tutulmalıdır. “S” şeklinde çatlak açılmış olan plakada, endüktif reaktans bazlı görüntüde çatlak olmayan yerlerde görüntünün siyah ve tonları olarak görüntülenmesi tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun nedeninin anlaşılabilmesi için veri alma işlemi tekrarlanmalıdır.

Sistemden alınan verilerin elle alınıp kayıt edilmesi çok uzun süren bir işlemdir. Bu işlem sürecini kısaltmak ve bilgilerin daha doğru alınması amacıyla plakanın “X ve Y” eksenini tarayabilecek bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu amaçla probu X ve Y eksenin de gezdirebilecek iki motora ihtiyaç vardır. Bu motorlar birbiri ile haberleşebilmeli ve hızları iyi kontrol edilebilmelidir. Bunun nedeni yüksek tarama hızlarında probta meydana gelen endüktans ve direnç değişimlerinin doğru ölçülememesidir. Ayrıca motorların hızı sabit tutulmalıdır. Probun taraması plakanın dışında başlatılmalı, prob plakaya ulaştığında hızının belli bir hıza gelmiş olmalı ve bu sabit hızla taramanın devam ettirilmelidir. Y eksenindeki motorun hareketi probun yerini bir adım aralığı uzunluğu kadar değiştirmelidir ve X motorunun bir satırı taraması bittikten sonra hareket etmelidir. Bu sistemde test işlemi bittikten sonra X ve Y ekseninde hareketi sağlayan motorlar probu başlangıç durumuna getirebilmelidirler.

Yukarda anlatılan düzenek hazırlandıktan sonra probtan gelen sinyalleri kuvvetlendirmesi için prob çıkışına bir kuvvetlendirici eklenmeli, kuvvetlendiriciden gelen sinyaller ADC ile dijitale çevrilmelidir. Gelen dijital ölçümler bir sinyal işleme kartı tarafından işlenmeli ve bir kodla derlenip haritalama işlemi yapılmalıdır. Kod yazımında modern nümerik teknikler, optimizasyon teknikleri, yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi teknikler kullanılır [3].

6.4 Girdap Akımı Probu İle Ferromanyetik Olmayan Metaller Üzerindeki Çatlakların Algılanması İçin Geliştirilen Cihazın İç Yapısı

Bu bölümde girdap akımı probunun çalışma prensiplerine uygun olarak geliştirilen cihazın tasarımı ve içyapısı anlatılacaktır. Daha önceki testlerde elde edilen bobinin

endüktans ve direnç değerleri LCR metre ile ölçülmüştür, bu bölümde pratikte aynı işlevi görecek düşük maliyetli ve basit bir cihaz geliştirilmiştir. Cihaz dört bölümden meydana gelmektedir. Bunlar sinüzoidal işaret üreten devre, güçlendirici devre, AA köprü devresi ve gösterge panelidir.

6.4.1 İşaret Üretici Devre

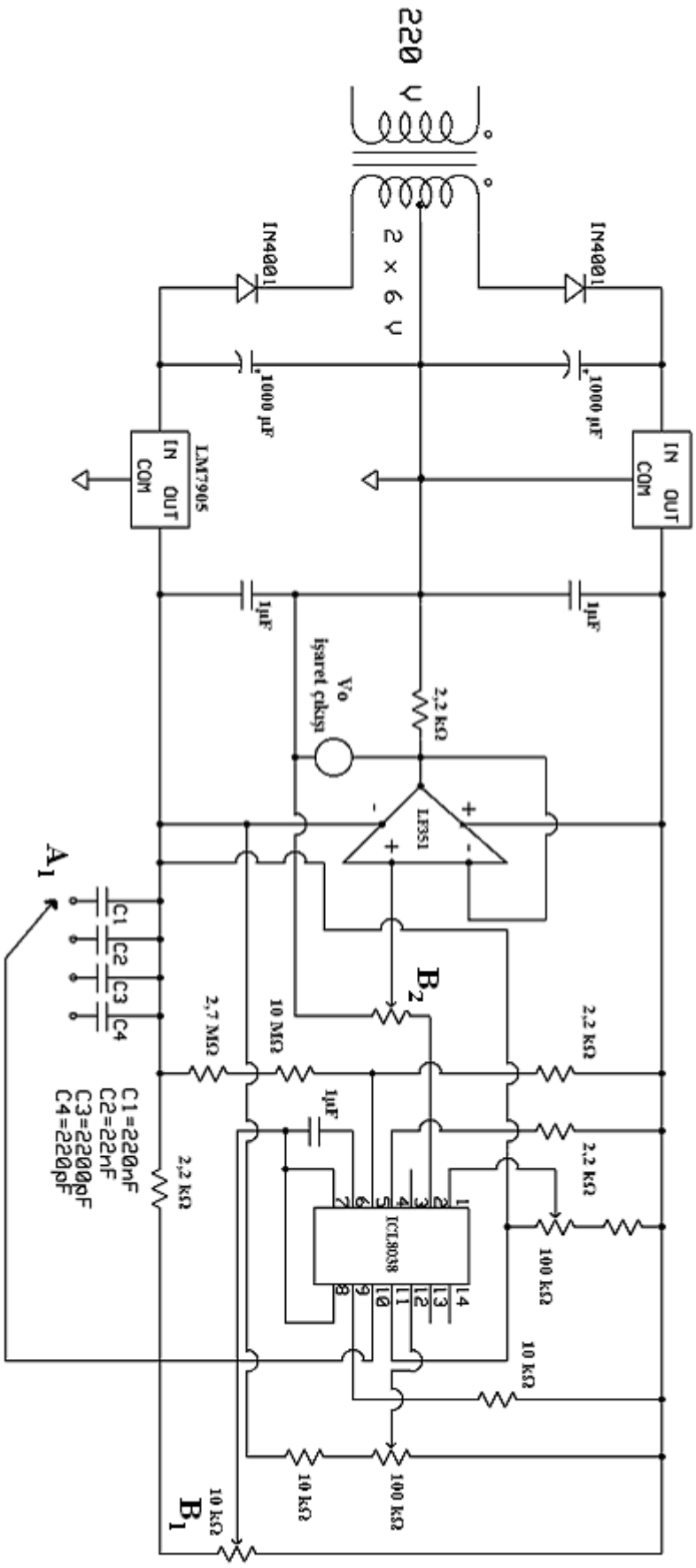
Şekil 6.14'te genel şeması verilen sinüzoidal işaret üretici devresinin en önemli elemanı ICL8038'dir. ICL8038 elemanı etrafında oluşturulan bu devrenin frekans aralığı A1 anahtarı sayesinde belirlenebilmektedir. Tablo 6.2'de gerilimi ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre için frekans ve gerilim tablosu verilmiştir. A1 anahtarı ile yapılan dört farklı anahtarlama için frekans 20 Hz – 200 kHz arasında değiştirilebilmektedir.

Devrenin beslemesi için 5 VA, 220 / 2 x 6 V'luk orta uçlu transformatör kullanılmıştır. Kontrolsüz yarım dalga doğrultucu devresiyle gerilim doğrultulmuştur. Devrenin ihtiyaç duyduğu gerilim ±5 V'tur. Bunu sağlamak amacıyla LM7805 ve LM7905 gerilim regülatörleri kullanılmıştır. Sinüzoidal işaret üreten devrenin frekansı, dört üçlu A1 kondansatörler ve 10 kΩ'luk ayarlı direnç olan B1 üzerinden değiştirilmektedir. Çıkıştan elde edilen sinüs işaretinin saflığı ise iki adet 100 kΩ'luk ayarlı dirençlerle sağlanmaktadır.

LF351'in girişine bağlı olan 10 kΩ'luk ayarlı direnç olan B2 çıkış geriliminin genliğini ayarlamaktadır. Çıkış gerilimi 0,75 V'tur.

Tablo 6.2. İşaret üretici devrenin çıkışından elde edilen gerilim ve frekans değerleri.

A1 anahtarının konumu	Frekans ayar aralığı (kHz)
C1	0,02 – 0,85
C2	0,027 – 7,5
C3	2,5 – 65
C4	21 - 200

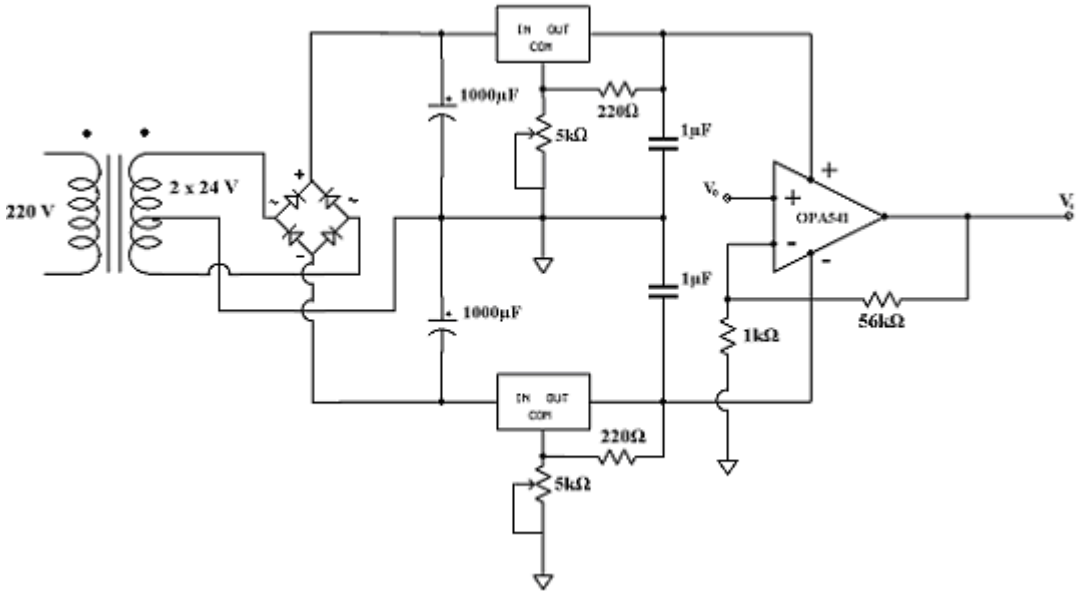


Şekil 6.14: Gerilim ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre.

6.4.2 Kuvvetlendirici Devre

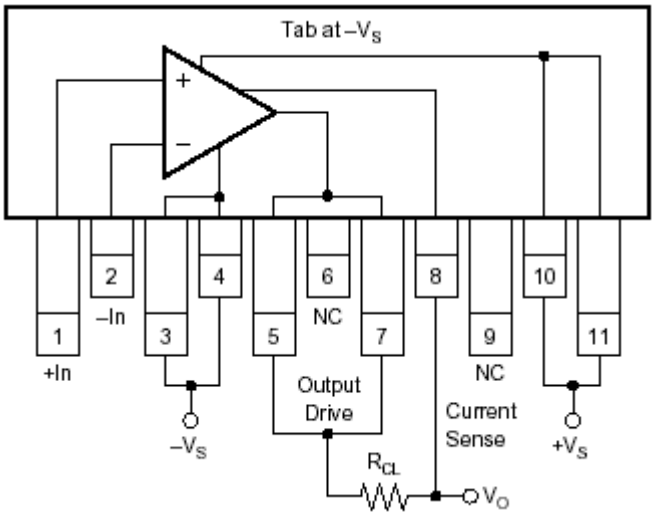
Şekil 6.14'te ki devrenin çıkışından elde edilecek işaret düşük güçlü olduğu için kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Kuvvetlendirme işlemi için Şekil 6.15'de ki devre kullanılmıştır.

Bu devrenin çalışmasını ve güç kapasitesini belirleyici en önemli devre elemanı OPA541'dir. OPA541, ±40 V 'luk gerilimle beslenebilen ve çıkışında 10 A tepe akımı alınabilen bir güç kuvvetlendiricisidir. Devrede plastik ambalajlı OPA541 kullanılmıştır. OPA541'in genel olarak 11 bacaklı plastik paketli ve 8 bacaklı hermatic paketli iki çeşidi mevcuttur. Sinyal kuvvetlendirici devrede 11 bacaklı plastik paketli OPA541AP kullanılmıştır.



Şekil 6.15: Kuvvetlendirici devre.

OPA541AP'nin iç yapısı Şekil 6.16'da görüldüğü gibidir. Bu şekilde pozitif ve negatif gerilim beslemelerinin ve sinyal girişinin hangi bacaklardan yapılacağı gösterilmektedir.



Şekil 6.16: OPA541AP bacaklarının bağlantı şeması.

±40 V dc besleme geriliminde, çıkışından maksimum ±40 V ve 5 A' lik tepe akımı alınabilmektedir. Bunun için OPA541'in yeterince soğutulmuş olması gerekmektedir. Güç kuvvetlendiricisinin DC beslemesinin sağlanması amacı ile 60 VA'lik 220/2 x 24 V'luk transformatör kullanılmıştır.

Elde edilen pozitif ve negatif gerilimler sırayla LM317 ve LM337 ayarlı gerilim regülatörlerine bağlanmış, sonrasında gerilim güç kuvvetlendiricisine uygulanmıştır. Bu iki gerilim regülatörü 1,2 – 37 V arası gerilim ayarı yapılabilmekte, yeterince soğutulmuş olmaları durumunda 1,5 A'e kadar akımı taşıyabilmektedirler. Gerilim ayarı ise ayar ucu ve çıkış ucu arasına koyulan iki dirençle sağlanmaktadır. Çıkış geriliminin dirençlere bağlı ifadesi Denklem 6.2'de ki gibidir.

$$V_0 = 1{,}25.\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \tag{6.2}$$

Denklem pozitif gerilim regülatörü LM317'ye göre yazılmıştır. Şekil 6.15'te ki kuvvetlendirici devresinde görüldüğü gibi R_2 = 5 kΩ ve R_1 = 220 Ω seçilmiştir. Bu değerler Denklem 6.2'de yerine konduğunda Denklem 6.3'de görüldüğü gibi çıkış gerilimi hesaplanabilir.

$$V_0 = 1{,}25.\left(1 + \frac{5}{0{,}22}\right) = 29{,}7V \tag{6.3}$$

Devrenin vereceği akımı sınırlayan gerilim regülatörleridir. Girdap akımları probları yüksek akımlarda doymaya gittiğinden dolayı bu regülatörler bu uygulama için yeterlidir.

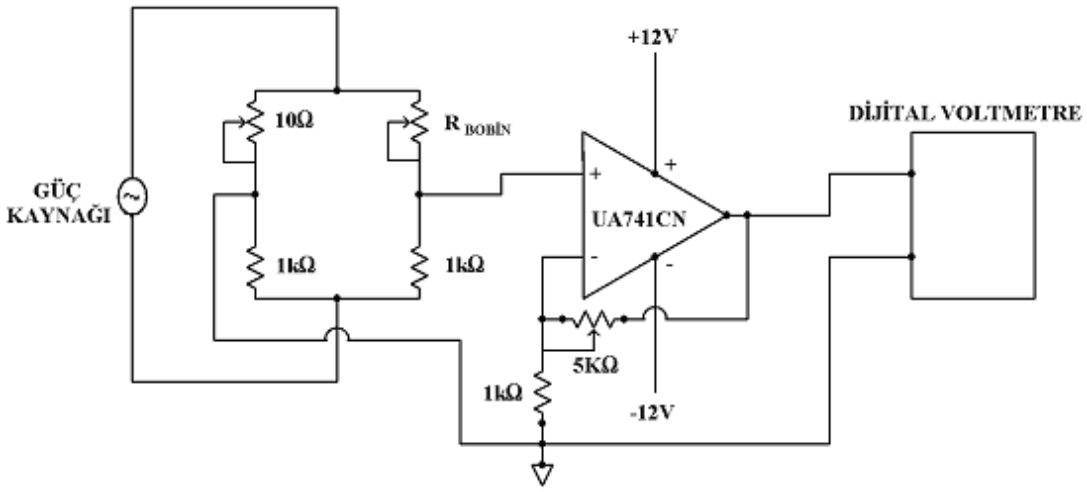
Gerilim ve frekansı ayarlanabilir güç kaynağını oluşturan her iki devrenin referans noktalarının birleştirilmiş olmasına dikkat edilmelidir. Kuvvetlendirici devrenin girişine uygulanan gerilim ile çıkışında alınan gerilim arasındaki ilişki Denklem 6.4'de görüldüğü gibidir.

$$V_s = V_0.\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \tag{6.4}$$

Burada R_2 = 56 kΩ ve R_1 = 1 kΩ'dur. Değerler Denklem 6.4'te yerine konduğunda kazanç değerinin 57 olduğu görülmektedir. OPA541'in beslemesine dikkat edilecek olunursa bu değerin 30V olduğu görülür.

6.4.3 Köprü Devresi

Köprü devresinde Hocking firmasının ürettiği 121P1A ferit nüveli prob kullanılmış ve bu prob köprü tespit ayağı kullanılarak plakalar üzerinde gezdirilmiştir. Köprüde diğer kullanılan dirençler ise 10 Ω'luk ayarlı direnç ve iki adet 1 kΩ'luk dirençlerdir. Şekil 6.17'de AA köprü devresi gösterilmektedir.

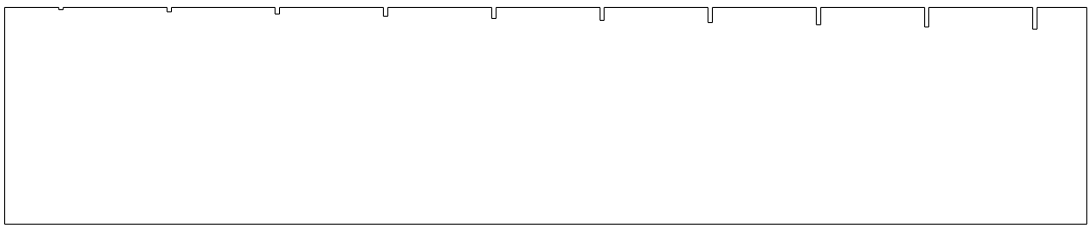


Şekil 6.17: AA köprü devresi, kuvvetlendirici ve gösterge paneli.

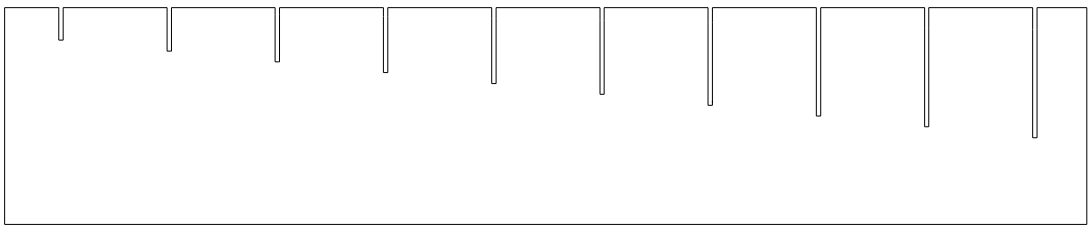
Bu köprü devresinden sonra yine Şekil 6.17'de gösterildiği gibi ikinci bir kuvvetlendirici devre yapılmıştır. Devrede UA741CN opampı kullanılmıştır. Devrenin kazancını belirleyecek dirençler 1 kΩ'luk direnç ve 5 kΩ'luk ayarlı dirençlerdir. Opampı beslemek için bir güç kaynağı kullanılmış ve köprünün sıfırı ile güç kaynağının sıfır noktası birleştirilmiştir. Dijital voltmetre ile köprü çıkış gerilimi ve kuvvetlendirilmiş gerilim ölçülmüştür.

6.4.4 Kalibrasyon Çubukları

Kalibrasyon çubukları saflığı %99'a yakın bakır plakalardan yapılmıştır. Bu bakır plakaların boyutu 1cm x 5cm x 10 cm'dir. Yüzey temizliği yapıldıktan sonra FANUC marka tel erozyon cihazında yüzeyine Şekil 6.18a'da görüldüğü gibi ilk plakaya derinliği 0,1 mm'den 0,1 mm artımlarla 1 mm'ye kadar olan, genişliği 0,3 mm olan çatlaklar açılmıştır. Şekil 6.18b'de görülen plakaya derinliği 1,5 mm'den 0,5 mm artımlarla 6 mm'ye kadar olan, genişliği yine 0,3 mm olan yarıklar açılmıştır.



a)



b)

Şekil 6.18: a) Üzerine derinlik olarak 0,1 mm'den 0,1 mm artımlarla 1 mm'ye kadar, genişliği 0,3 mm olan çatlaklar açılmış plaka b) Üzerine derinliği 1,5 mm'den 1 mm artımlarla 6 mm'ye kadar, genişliği 0.3 mm olan çatlaklar açılmış plaka.

Tablo 6.3'te çatlak derinliğine göre köprü ve kuvvetlendirici devre çıkışından alınan gerilim değerlerinin efektif değerleri gösterilmektedir. Test frekansı 100 kHz olarak

uygulanmıştır. Köprü devresine 6 V'luk sinüzoidal bir işaret uygulanmıştır, köprü devresi ana akımı 7 mA olarak ölçülmüştür. Prob test malzemesinden uzakta tutulduğunda (havada) köprü çıkış geriliminin efektif değeri 95 mV, UA741CN tarafından kuvvetlendirilen gerilimin efektif değeri 320 mV olarak ölçülmüştür.

Tablo 6.3. Çatlak derinliğine göre köprü ve kuvvetlendirici devre çıkışı gerilimleri.

Çatlak Derinliği (mm)	Köprü Veff (mV)	Kuvvetlendirici Veff (mV)
0	65	238
0,1	65	239
0,2	66	240
0,3	66	242
0,4	66	243
0,5	67	244
0,6	67	245
0,7	67	246
0,8	67	246
0,9	67	247
1	68	247
1,5	69	248
2	69	249
2,5	69	250
3	70	251
3,5	70	252
4	70	252
4,5	70	253
5	70	253
5,5	70	254
6	70	255

6.4.5 Sonuç ve Öneriler

Test işlemi sırasında prob ilk olarak plakanın çatlak olmayan yeri üzerine getirilmiş ve Şekil 6.17'de görülen AA köprü devresinde bulunan 10 Ω'luk ayarlı direnç köprüden alınan çıkış gerilimini minimum değerine düşünceye kadar ayarlanmıştır. Köprü devresinin kullanılmasının sebebi bobin empedansındaki en küçük değişimleri ölçebilmektir. Bobin direnci, bobin çatlak olmayan bir yer üzerinde tutulduğunda, Ek-A'da gösterildiği gibi Q = 3,8 değeri için 5,43 Ω'dur. Plakanın üzerinde gezdirilen prob çatlak bulunmayan bir yere getirildiğinde, köprü çıkış geriliminin 65 mV olduğu, kuvvetlendirildikten sonra 238 mV olduğu gözlemlenmiştir. Bu gerilimin sıfırlanamamasının nedeni olarak endüktif etkiler,

bobin sargılarında meydana gelen kapasitif etkiler, AA köprüsündeki direnç değerlerinin hassasiyeti gösterilebilir.

Bu işlemden sonra prob çatlaklar üzerinde gezdirilmiş, farklı çatlak derinliklerine göre köprü çıkış gerilimlerinin efektif değeri ve bu gerilimlerin kuvvetlendirildikten sonraki değerleri dijital voltmetre ile ölçülmüştür. Tablo 6.3 incelendiğinde çatlak derinlikleri değiştiği halde köprü çıkış gerilimlerinin bazı derinlikler için sabit kaldığı görülüyor. Örnek olarak 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm derinliklerinde köprü çıkış gerilimi 67 mV olarak ölçülmüştür. Köprü çıkışından 67 mV olarak ölçülen bir gerilim bize çatlağın derinliği hakkında tam olarak bir bilgi vermemiştir. Bu nedenle çatlak derinliğinin daha iyi ayırt edilebilmesi için köprünün çıkışına UA741CN opampı bağlanmıştır. Opampın kazanç değeri 3,25 olarak ayarlanmıştır. Kuvvetlendirildikten sonra 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm derinliklerinde gerilimler sırası ile 244 mV, 245 mV ve 246 mV olarak ölçülmüştür. Bu opampın kazancı daha fazla arttırılırsa çatlak derinliği daha iyi bir şekilde ayırt edilebilecektir çünkü her çatlakta çıkış gerilimi farklı bir değer olarak ölçülecektir.

Frekans seçiminde dikkat edilmesi gereken nokta AA köprü devresinden farklı derinliklerdeki çatlaklar için farklı gerilim çıkışları ölçebilmektir. Düşük frekanslar derin çatlakların algılanmasında, daha yüksek frekansların ise sığ çatlakların algılanmasında kullanılır. Bunun nedeni yüksek frekansta belli derinliğin geçildikten sonra köprü devresindeki çıkış geriliminin değişmemesidir. Bu test plakalarındaki çatlak derinlikleri hakkında yeterli bilgi alınması için 100 kHz frekansının uygun olduğu görülmüştür.

Bir iyileştirme yolu ise AA köprüsünün çıkış geriliminin DA'ya dönüştürülmesi ve fark kuvvetlendirici bir opampla köprü çıkış gerilimini plakanın çatlaksız yüzeyinde sıfırlamaktır. Bundan sonra prob çatlakların üzerinde gezdirildiğinde her çatlak için ayrı bir köprü çıkış gerilimi ölçülebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Akgün A. F., Yıldırım A., Baş N.,** 1991. **T**ahribatsız Testlerde Malzeme Süreksizlikleri, TR – 301, Ç.N.A.E.M, İstanbul.

[2] **Karainci N., Ekinci Ş., Bulubay Ü., Doğruöz M.,** 1993. Girdap Akımları, Seviye 1, TR – 304,Ç.N.A.E.M, İstanbul.

[3] Eddy Current Instruments, Probes-Mode of Operation, Probes-configuration, Probes-shielding and loading, Probes-Coil design, Basic principles of eddy current testing - **www.ndt-ed. org.** 26.12.2004

[4] Products, Theory, Applications - **www.hocking. com.** 26.12.2004

[5] Defination of nondestructive testing, Discontinuity detection, Public demands for greader safety, classification of ndt methods **www.asnt.org.** 26.12.2004

[6] Eddy current testing principles, flaw detection, probes - **www.testexs-ndt.org.** 26.12.2004

[7] Basic eddy current - **www.foerstergroup.com.** 26.12.2004

[8] Ndt testing Technologies, Eddy current basics, Remote field testing for ferromagnetic materials, comparative sorting. **www.zetec.com.** 26.12.2004

[9] What is non-destructive testing? Principles of eddy current testing **www.bindt.org.** 26.12.2004

[10] **Libby, Hugo L.,** 1979. Introduction to Elecromagnetic Nondestructive Test Methods, Robert E. Krieger Publishing Company Malabar, Florida.

[11] **Blitz, Jack,** 1997. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, Chapman & Hall, London.

[12] **Hagemaier, D. J.,** 1990. Fundamentals of Eddy Current Testing, ASTN Press, United States of America.

[13] **George, C.,** 1980. Programmed Instruction Book, Nondestructive Testing, Eddy Current, General Dynamics, United States of America.

[14] **Karainci N., Ekinci Ş., Kurtçebe M., Doğruöz M.,** 1993. Girdap Akımları, Seviye 2, TR – 310, Ç.N.A.E.M, İstanbul.

[15] **Alkan S.** 2004. Sürekli mıknatıslı senkron makinelerin simülasyonu için Fourier serisi ve relüktans devresi yaklaşımıyla bir karma modelin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[16] **Sikora R., Enokizono M., Chady T.,** 1999. Crack Detection and Recognition Using an Eddy Current Differantial Probe, *IEEE Transactions on Magnetics,* Vol. 35, No: 3, pp. 1849 – 1852.

[17] **Tsuchida Y., Enokizono M., Chady T.,** 1998. Crack Size and Determination by Moving Magnetic Field Sensor , *IEEE Transactions on Magnetics,* Vol. 34, No: 4, pp. 1252 – 1254.

[18] **Özçetin S.** 2001. Girdap akımlarının ve deri etkisinin modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ek-A ÜZERİNDE "0,2-0,5-1,0 mm" DERİNLİĞİNDE ÇATLAKLAR OLAN PLAKANIN ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ

FREKANS		PROBUN KONUMU (cm)						
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
20 Khz	L	0,03521	0,03517	0,03517	0,03519	0,03519	0,03516	0,03523
	Q	1,444	1,443	1,446	1,446	1,445	1,442	1,446
50Khz	L	0,03416	0,03409	0,03415	0,03416	0,03412	0,03413	0,03415
	Q	3,254	3,247	3,256	3,258	3,251	3,252	3,255
100Khz	L	0,03343	0,03343	0,03343	0,03348	0,03346	0,03348	0,0335
	Q	3,785	3,785	3,792	3,802	3,795	3,8	3,803

4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
0,03518	0,03517	0,0354	0,03516	0,03522	0,03526	0,03523	0,03516	0,03517
1,442	1,441	1,453	1,44	1,443	1,446	1,445	1,44	1,441
0,03417	0,03415	0,03435	0,03413	0,03415	0,03427	0,03417	0,03418	0,03419
3,256	3,252	3,274	3,248	3,252	3,271	3,256	3,243	3,258
0,03349	0,03344	0,03368	0,03342	0,03348	0,03355	0,03347	0,03344	0,03349
3,784	3,79	3,828	3,78	3,79	3,816	3,793	3,78	3,784

8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5
0,0352	0,0352	0,03524	0,03571	0,03522	0,03517	0,03529	0,03522	0,03525
1,443	1,443	1,445	1,47	1,444	1,442	1,443	1,444	1,447
0,03418	0,03418	0,03418	0,03461	0,03418	0,03416	0,03414	0,03422	0,03417
3,256	3,255	3,255	3,295	3,255	3,253	3,25	3,261	3,255
0,03351	0,03347	0,03347	0,03394	0,03347	0,03349	0,0335	0,03355	0,03353
3,799	3,808	3,79	3,845	3,793	3,787	3,793	3,8	3,814

13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17
0,03525	0,0352	0,0352	0,03524	0,03617	0,03523	0,03516	0,03526	0,03524
1,446	1,444	1,444	1,445	1,489	1,444	1,441	1,446	1,445
0,03421	0,03415	0,03419	0,03415	0,03507	0,03416	0,03412	0,03419	0,03418
3,26	3,252	3,259	3,26	3,295	3,257	3,255	3,266	3,266
0,03355	0,03351	0,03348	0,03351	0,03434	0,0335	0,03354	0,03343	0,03346
3,806	3,811	3,801	3,8	3,847	3,805	3,807	3,786	3,792

17,5	18	18,5	19	19,5
0,03524	0,0352	0,03519	0,03521	0,03522
1,445	1,443	1,442	1,446	1,443
0,03413	0,03412	0,03413	0,03416	0,03422
3,258	3,256	3,258	3,265	3,261
0,03354	0,03346	0,03344	0,03347	0,0335
3,801	3,79	3,79	3,795	3,805

Ek-B ÜZERİNDE "0,2-0,5-1,0 mm" DERİNLİĞİNDE ÇATLAKLAR OLAN PLAKANIN ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN GİRİLDİĞİ ENDÜKTANS VE DİRENÇ DEĞİŞİMLERİNİ ÖLÇÜMÜ İÇİN HAZIRLANMIŞ MATLAB PROGRAMI

```
clear all;
freq(1)=20.0e3;
freq(2)=50.0e3;
freq(3)=100.0e3;
% Veri Dosyasinin Açilmasi
% ----------------------
size=39;
fid01=fopen('indat.dat','r');

dist = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
X=dist;



ind     = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
qfactor = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
L1=ind*1.0e-3;
Q1=qfactor;


ind     = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
qfactor = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
L2=ind*1.0e-3;
Q2=qfactor;


ind     = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
qfactor = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
L3=ind*1.0e-3;
Q3=qfactor;

status = fclose(fid01);

for i=1:size
   R1(i)=2*pi*freq(1)*L1(i)/Q1(i);
   R2(i)=2*pi*freq(2)*L2(i)/Q2(i);
   R3(i)=2*pi*freq(3)*L3(i)/Q3(i);
end


aveR1=mean(R1);
aveR2=mean(R2);
aveR3=mean(R3);
```

```
aveL1=mean(L1);
aveL2=mean(L2);
aveL3=mean(L3);

for i=1:size
   DR1(i)=abs((R1(i)-aveR1)/aveR1);
   DR2(i)=abs((R2(i)-aveR2)/aveR2);
   DR3(i)=abs((R3(i)-aveR3)/aveR3);

   DL1(i)=abs((L1(i)-aveL1)/aveL1);
   DL2(i)=abs((L2(i)-aveL2)/aveL2);
   DL3(i)=abs((L3(i)-aveL3)/aveL3);
end


figure(1)
subplot(1,3,1), plot(X,DL1,'o',X,DL1) ;xlabel('mesafe (cm)');ylabel('degisim (%)')
subplot(1,3,2), plot(X,DL2,'o',X,DL2)
subplot(1,3,3), plot(X,DL3,'o',X,DL3)


figure(2)
subplot(1,3,1), plot(X,DR1,'o',X,DR1);xlabel('mesafe (cm)');ylabel('degisim (%)')
subplot(1,3,2), plot(X,DR2,'o',X,DR2)
subplot(1,3,3), plot(X,DR3,'o',X,DR3)
```

Ek-C ÜZERİNDE “S” ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ

	PROBUN "X" EKSENİNDEKİ KONUMU							
PROBUN "Y" EKSENİNDEKİ KONUMU (HER KONUM İÇİN L VE Q DEĞERLERİ)		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	0,5L	0,0335	0,03341	0,03346	0,03338	0,03336	0,03346	0,03338
	0,5Q	5,816	5,81	5,802	5,799	5,797	5,802	5,799
	1,0L	0,03345	0,03334	0,03336	0,03339	0,03329	0,0334	0,03338
	1,0Q	5,812	5,794	5,8	5,81	5,795	5,8	5,805
	1,5L	0,03343	0,03336	0,03329	0,0333	0,03338	0,03326	0,03338
	1,5Q	5,807	5,803	5,787	5,783	5,812	5,776	5,801
	2,0L	0,03345	0,03339	0,03332	0,03335	0,03341	0,0334	0,03339
	2,0Q	5,81	5,803	5,79	5,801	5,818	5,814	5,8
	2,5L	0,03345	0,0334	0,03338	0,03339	0,0334	0,03339	0,0334
	2,5Q	5,812	5,804	5,803	5,799	5,811	5,803	5,802
	3,0L	0,03344	0,03333	0,03337	0,0334	0,03333	0,03335	0,0334
	3,0Q	5,813	5,802	5,8	5,79	5,8	5,793	5,786
	3,5L	0,03342	0,03335	0,03339	0,03338	0,03336	0,03332	0,03332
	3,5Q	5,814	5,801	5,799	5,796	5,801	5,796	5,788
	4,0L	0,03345	0,0333	0,03338	0,03326	0,03338	0,0333	0,03334
	4,0Q	5,812	5,783	5,812	5,776	5,801	5,789	5,795
	4,5L	0,03347	0,03335	0,03341	0,0334	0,03339	0,03338	0,03334
	4,5Q	5,814	5,801	5,818	5,814	5,8	5,801	5,79
	5,0L	0,03346	0,03336	0,03333	0,03335	0,03338	0,03333	0,03329
	5,0Q	5,815	5,817	5,808	5,805	5,8	5,803	5,795
	5,5L	0,03345	0,03335	0,03337	0,03333	0,03329	0,03331	0,03338
	5,5Q	5,81	5,8	5,8	5,793	5,78	5,789	5,812
	6,0L	0,03345	0,0334	0,03339	0,03338	0,03334	0,03338	0,03341
	6,0Q	5,812	5,814	5,8	5,801	5,79	5,801	5,818
	6,5L	0,03343	0,03335	0,03338	0,03333	0,03329	0,03326	0,03338
	6,5Q	5,813	5,805	5,8	5,803	5,795	5,776	5,801
	7,0L	0,03347	0,03333	0,03329	0,03331	0,03338	0,0334	0,03339
	7,0Q	5,815	5,793	5,78	5,789	5,812	5,814	5,8
	7,5L	0,03345	0,03335	0,03338	0,03333	0,03329	0,03335	0,03338
	7,5Q	5,812	5,805	5,8	5,803	5,795	5,805	5,8
	8,0L	0,03341	0,03333	0,03329	0,03331	0,03338	0,03333	0,03329
	8,0Q	5,81	5,793	5,78	5,789	5,812	5,793	5,78
	8,5L	0,03343	0,03337	0,03333	0,03335	0,03337	0,03333	0,03329
	8,5Q	5,807	5,8	5,793	5,8	5,8	5,793	5,78
	9,0L	0,03345	0,03338	0,03336	0,03334	0,03338	0,03336	0,03329
	9,0Q	5,81	5,799	5,795	5,795	5,799	5,795	5,793
	9,5L	0,03349	0,03347	0,03339	0,03339	0,03339	0,03345	0,03346
	9,5Q	5,811	5,815	5,803	5,803	5,803	5,812	5,802

4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
0,03345	0,03345	0,03334	0,03339	0,03339	0,03339	0,03339	0,03338
5,812	5,812	5,794	5,803	5,803	5,803	5,803	5,799
0,03332	0,03336	0,03332	0,03336	0,03332	0,0333	0,03323	0,03325
5,797	5,804	5,794	5,803	5,797	5,791	5,781	5,78
0,03337	0,03333	0,03337	0,03333	0,03332	0,03331	0,03332	0,03337
5,803	5,798	5,79	5,781	5,801	5,802	5,792	5,796
0,0333	0,03328	0,03344	0,03366	0,0333	0,03336	0,03333	0,03335
5,802	5,793	5,8	5,752	5,78	5,817	5,808	5,805
0,03331	0,03328	0,03501	0,03341	0,03331	0,03335	0,03337	0,03333
5,8	5,76	5,764	5,8	5,782	5,8	5,8	5,793
0,03336	0,03391	0,03341	0,03338	0,0333	0,03334	0,03338	0,03336
5,788	5,736	5,79	5,801	5,789	5,795	5,799	5,795
0,0334	0,03499	0,03336	0,03339	0,03338	0,03334	0,03336	0,03338
5,793	5,79	5,8	5,8	5,801	5,79	5,794	5,796
0,03338	0,03409	0,03337	0,03338	0,03336	0,03339	0,03329	0,0334
5,799	5,745	5,8	5,796	5,8	5,81	5,795	5,8
0,03336	0,03335	0,03478	0,03326	0,03329	0,0333	0,03338	0,03326
5,794	5,801	5,785	5,776	5,787	5,783	5,812	5,776
0,0334	0,03338	0,03338	0,03504	0,03332	0,03335	0,03341	0,0334
5,8	5,805	5,796	5,78	5,79	5,801	5,818	5,814
0,03326	0,03338	0,03326	0,03333	0,03395	0,03334	0,03336	0,03339
5,776	5,801	5,776	5,793	5,745	5,794	5,8	5,81
0,0334	0,03339	0,0334	0,03338	0,03388	0,03336	0,03329	0,0333
5,814	5,8	5,814	5,801	5,733	5,803	5,787	5,783
0,03333	0,03329	0,03335	0,03333	0,03379	0,03339	0,03332	0,03335
5,803	5,795	5,805	5,803	5,73	5,803	5,79	5,801
0,03338	0,03336	0,03329	0,0333	0,0349	0,03335	0,03337	0,03333
5,799	5,795	5,793	5,793	5,79	5,8	5,8	5,793
0,03336	0,03338	0,03337	0,03346	0,03358	0,03334	0,03338	0,03336
5,794	5,796	5,793	5,802	7,767	5,795	5,799	5,795
0,03333	0,03329	0,03366	0,03365	0,03338	0,03334	0,03336	0,03338
5,803	5,795	5,752	5,78	5,796	5,79	5,794	5,796
0,03335	0,03337	0,03333	0,03329	0,03331	0,03339	0,03329	0,0334
5,8	5,8	5,793	5,78	5,789	5,81	5,795	5,8
0,03334	0,03338	0,03336	0,03329	0,0333	0,03329	0,0333	0,03329
5,795	5,799	5,795	5,793	5,793	5,793	5,793	5,795
0,03338	0,03338	0,03336	0,03346	0,03339	0,03339	0,03338	0,03343
5,799	5,799	5,797	5,802	5,803	5,803	5,799	5,813

8	8,5	9	9,5
0,03343	0,03338	0,03343	0,03352
5,813	5,799	5,813	5,82
0,03326	0,03335	0,0333	0,03342
5,79	5,805	5,796	5,81
0,03336	0,03335	0,03335	0,03343
5,811	5,8	5,805	5,813
0,03338	0,03333	0,0334	0,03347
5,8	5,803	5,805	5,815
0,03329	0,03331	0,0334	0,03345
5,78	5,789	5,802	5,812
0,03329	0,0333	0,03338	0,03347
5,793	5,793	5,801	5,814
0,03337	0,03332	0,03336	0,03346
5,793	5,801	5,803	5,815
0,03338	0,0334	0,03339	0,03347
5,805	5,814	5,8	5,815
0,03338	0,03339	0,0334	0,03342
5,801	5,803	5,802	5,814
0,03339	0,03335	0,03337	0,03345
5,8	5,8	5,8	5,812
0,03329	0,0334	0,03338	0,03347
5,795	5,8	5,805	5,814
0,03338	0,03326	0,03338	0,03345
5,812	5,776	5,801	5,81
0,03341	0,0334	0,03339	0,03345
5,818	5,814	5,8	5,812
0,03329	0,03331	0,0334	0,03344
5,78	5,789	5,802	5,813
0,03329	0,0333	0,03338	0,03345
5,793	5,793	5,801	5,812
0,03337	0,03332	0,03336	0,03343
5,793	5,801	5,803	5,813
0,03338	0,0334	0,03339	0,03347
5,805	5,814	5,8	5,815
0,0334	0,03338	0,0334	0,03345
5,8	5,805	5,814	5,81
0,03339	0,03338	0,03345	0,03353
5,803	5,799	5,812	5,8

Ek-D ÜZERİNDE “Y” ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN EXCEL PROGRAMINA GİRİLİŞİ

	PROBUN "X" EKSENİNDEKİ KONUMU							
PROBUN "Y" EKSENİNDEKİ KONUMU (HER KONUM İÇİN L VE Q DEĞERLERİ)		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	0,5L	0,03348	0,03345	0,03346	0,03338	0,03336	0,03338	0,03343
	0,5Q	5,809	5,812	5,802	5,799	5,797	5,799	5,813
	1,0L	0,03346	0,03335	0,0333	0,03339	0,03329	0,0334	0,03338
	1,0Q	5,802	5,805	5,796	5,81	5,795	5,8	5,796
	1,5L	0,03343	0,03335	0,03335	0,0333	0,03338	0,03326	0,0334
	1,5Q	5,807	5,8	5,805	5,783	5,812	5,776	5,8
	2,0L	0,03345	0,03333	0,0334	0,03402	0,03341	0,0334	0,03326
	2,0Q	5,81	5,803	5,805	5,767	5,818	5,814	5,776
	2,5L	0,03345	0,0334	0,03338	0,03339	0,03409	0,03339	0,0334
	2,5Q	5,812	5,804	5,803	5,799	5,816	5,803	5,814
	3,0L	0,03344	0,03333	0,03337	0,0334	0,03333	0,03426	0,0334
	3,0Q	5,813	5,802	5,8	5,79	5,8	5,747	5,786
	3,5L	0,03342	0,03335	0,03339	0,03338	0,03336	0,03332	0,03508
	3,5Q	5,814	5,801	5,799	5,796	5,801	5,796	5,803
	4,0L	0,03345	0,0333	0,03338	0,03326	0,03338	0,0333	0,03334
	4,0Q	5,812	5,783	5,812	5,776	5,801	5,789	5,795
	4,5L	0,03347	0,03335	0,03341	0,0334	0,03339	0,03338	0,03334
	4,5Q	5,814	5,801	5,818	5,814	5,8	5,801	5,79
	5,0L	0,03345	0,03336	0,03336	0,03335	0,03338	0,03333	0,03329
	5,0Q	5,81	5,817	5,803	5,805	5,8	5,803	5,795
	5,5L	0,03345	0,03335	0,03339	0,03333	0,03329	0,03331	0,03338
	5,5Q	5,812	5,8	5,803	5,793	5,78	5,789	5,812
	6,0L	0,03344	0,03338	0,03335	0,03329	0,03334	0,03338	0,03336
	6,0Q	5,813	5,801	5,8	5,787	5,79	5,801	5,803
	6,5L	0,03345	0,03336	0,03334	0,03332	0,03333	0,03337	0,03339
	6,5Q	5,812	5,803	5,795	5,79	5,802	5,8	5,803
	7,0L	0,03343	0,03339	0,03334	0,03337	0,03335	0,03339	0,03335
	7,0Q	5,813	5,8	5,79	5,8	5,801	5,799	5,8
	7,5L	0,03345	0,0334	0,03334	0,03338	0,0333	0,03338	0,03334
	7,5Q	5,812	5,802	5,795	5,799	5,783	5,812	5,795
	8,0L	0,03341	0,03338	0,03334	0,03336	0,03335	0,03341	0,03334
	8,0Q	5,81	5,796	5,79	5,794	5,801	5,818	5,79
	8,5L	0,03343	0,03337	0,03333	0,03335	0,03336	0,03333	0,03335
	8,5Q	5,807	5,8	5,793	5,8	5,817	5,808	5,805
	9,0L	0,03345	0,03338	0,03336	0,03334	0,03338	0,03336	0,03329
	9,0Q	5,81	5,799	5,795	5,795	5,799	5,795	5,793
	9,5L	0,03353	0,03343	0,03339	0,03339	0,03339	0,03346	0,03338
	9,5Q	5,813	5,813	5,803	5,803	5,803	5,802	5,799

4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
0,03339	0,03343	0,03338	0,03339	0,03339	0,03338	0,03343
5,803	5,813	5,799	5,803	5,803	5,799	5,813
0,03329	0,0333	0,03338	0,03331	0,03338	0,0333	0,03323
5,793	5,793	5,801	5,789	5,812	5,791	5,781
0,03337	0,03332	0,03336	0,03338	0,03341	0,03331	0,03332
5,793	5,801	5,803	5,801	5,818	5,802	5,792
0,03338	0,0334	0,03339	0,03326	0,03338	0,0334	0,03333
5,805	5,814	5,803	5,776	5,801	5,786	5,808
0,03338	0,03339	0,03335	0,0334	0,03339	0,03332	0,03337
5,801	5,803	5,8	5,814	5,8	5,788	5,8
0,03336	0,03329	0,03334	0,03335	0,03338	0,03334	0,03521
5,803	5,787	5,795	5,805	5,8	5,795	5,834
0,03329	0,03331	0,03334	0,03333	0,03329	0,03523	0,03336
5,78	5,789	5,79	5,793	5,78	5,81	5,794
0,03427	0,03325	0,03326	0,03335	0,0352	0,03329	0,03329
5,725	5,78	5,79	5,805	5,841	5,795	5,795
0,03332	0,03492	0,03336	0,03511	0,03335	0,03338	0,03338
5,792	5,79	5,811	5,822	5,805	5,812	5,812
0,03333	0,03335	0,03582	0,03333	0,0334	0,03335	0,03341
5,808	5,805	5,96	5,803	5,805	5,801	5,818
0,03337	0,03333	0,03534	0,03331	0,0334	0,03334	0,03336
5,8	5,793	5,837	5,789	5,802	5,794	5,8
0,03338	0,03336	0,03525	0,0333	0,03338	0,03336	0,03329
5,799	5,795	5,868	5,793	5,801	5,803	5,787
0,03336	0,03338	0,03523	0,03332	0,03336	0,03339	0,03332
5,794	5,796	5,808	5,801	5,803	5,803	5,79
0,03329	0,0334	0,03518	0,0334	0,03339	0,03335	0,03337
5,795	5,8	5,784	5,814	5,8	5,8	5,8
0,03338	0,03332	0,03511	0,03341	0,0334	0,03334	0,03338
5,812	5,79	5,774	5,818	5,802	5,795	5,799
0,03333	0,03337	0,0348	0,03329	0,03338	0,03334	0,03336
5,803	5,8	5,826	5,78	5,796	5,79	5,794
0,03335	0,03337	0,03333	0,03329	0,03331	0,03339	0,03329
5,8	5,8	5,793	5,78	5,789	5,81	5,795
0,03334	0,03338	0,03336	0,03329	0,0333	0,03329	0,0333
5,795	5,799	5,795	5,793	5,793	5,793	5,793
0,03336	0,03346	0,03338	0,03346	0,03339	0,03339	0,03338
5,797	5,802	5,799	5,802	5,803	5,803	5,799

7,5	8	8,5	9	9,5
0,03339	0,03343	0,03338	0,03343	0,03352
5,803	5,813	5,799	5,813	5,82
0,03325	0,03326	0,03335	0,03335	0,03342
5,78	5,79	5,8	5,805	5,81
0,03337	0,03336	0,03333	0,0334	0,03343
5,796	5,811	5,803	5,805	5,813
0,03335	0,03414	0,0334	0,03338	0,03347
5,805	5,768	5,804	5,803	5,815
0,03538	0,03329	0,03333	0,03337	0,03345
5,825	5,78	5,802	5,8	5,812
0,03336	0,03329	0,03335	0,03339	0,03347
5,795	5,793	5,801	5,799	5,814
0,03338	0,03337	0,03332	0,03336	0,03346
5,796	5,793	5,801	5,803	5,815
0,0334	0,03334	0,03336	0,03335	0,03347
5,802	5,794	5,8	5,8	5,815
0,03338	0,03336	0,03329	0,03334	0,03344
5,801	5,803	5,787	5,795	5,813
0,03336	0,03338	0,03337	0,03334	0,03342
5,794	5,796	5,793	5,79	5,814
0,03329	0,0334	0,03338	0,03334	0,03345
5,795	5,8	5,805	5,79	5,812
0,0333	0,03329	0,0334	0,03329	0,03347
5,793	5,795	5,8	5,793	5,814
0,03334	0,03336	0,03338	0,03337	0,03346
5,79	5,794	5,796	5,793	5,815
0,03338	0,03334	0,03336	0,03329	0,03345
5,796	5,79	5,794	5,78	5,81
0,03336	0,03329	0,0333	0,03338	0,03345
5,795	5,793	5,793	5,801	5,812
0,03338	0,03337	0,03332	0,03336	0,03343
5,796	5,793	5,801	5,803	5,813
0,0334	0,03338	0,0334	0,03339	0,03347
5,8	5,805	5,814	5,8	5,815
0,03329	0,0334	0,03338	0,0334	0,03345
5,795	5,8	5,805	5,814	5,81
0,03343	0,03339	0,03338	0,03345	0,03348
5,813	5,803	5,799	5,812	5,801

Ek-E ÜZERİNDE "Y ve S" ŞEKLİNDE ÇATLAK OLAN PLAKA ÜZERİNDEN ALINAN VERİLERİN HARİTALAMA İŞLEMİ İÇİN GİRİLDİĞİ MATLAB PROGRAMI

```
clear all;
freq=100.0e3;
size=19;
% Veri Dosyasinin Açilmasi
% ------------------------
fid01=fopen('indat-y.dat','r');
for row=1:size
ind = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
qfactor = fscanf(fid01,'%e',[1,size]);
L(row,1:size)=ind*1.0e-3;
Q(row,1:size)=qfactor;

end
status = fclose(fid01);

for row=1:size
   for col=1:size
   R(row,col)=2*pi*freq*L(row,col)/Q(row,col);
end
end
for row=1:size
   for col=1:size
   arrayL((row-1)*size+col)=L(row,col);
   arrayR((row-1)*size+col)=R(row,col);
end
end
aveR=mean(arrayR);
aveL=mean(arrayL);

for row=1:size
   for col=1:size
   DR(row,col)=abs((R(row,col)-aveR)/aveR);
   DL(row,col)=abs((L(row,col)-aveL)/aveL);
end
end

maxDL=max(max(DL));
maxDR=max(max(DR));
minDL=min(max(DL));
minDR=min(max(DR));

imgDR=DR/maxDR;
imgDL=DL/maxDL;

figure(1)
image(fix(255*imgDR))
grid on;
```

```
axis('square');
colormap('gray');
figure(2)
image(fix(255*imgDL))
grid on;
axis('square');
colormap('gray');
```

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul'da doğdu. 1998 yılında Kabataş Erkek Lisesi'nden mezun oldu. Lisans eğitimini 1998-2002 yılları arasında, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünde tamamladı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği 'nde yüksek lisans eğitimine başladı.