

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME
MUAYENESİNDE
MALZEME AYIRIMI, YÜZEYSEL ÇATLAK
KONTROLÜ, BORU, MİL VE BİLET KONTROLÜ
VE DÖNER BOBİNLİ TEST SİSTEMLERİNDE
MUAYENEYE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN
DENEYSEL OLARAK OPTİMİZASYONU**

Hakan GÜNAY

**Şubat, 2008
İZMİR**

**GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME
MUAYENESİNDE
MALZEME AYIRIMI, YÜZEYSEL ÇATLAK
KONTROLÜ, BORU, MİL VE BİLET KONTROLÜ
VE DÖNER BOBİNLİ TEST SİSTEMLERİNDE
MUAYENEYE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN
DENEYSEL OLARAK OPTİMİZASYONU**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Hakan GÜNAY

Şubat, 2008

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HAKAN GÜNAY, tarafından **PROF.DR.SÜLEYMAN KARADENİZ** yönetiminde hazırlanan **“GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME MUAYENESİNDE MALZEME AYIRIMI, YÜZEYSEL ÇATLAK KONTROLÜ, BORU, MİL VE BİLET KONTROLÜ VE DÖNER BOBİNLİ TEST SİSTEMLERİNDE MUAYENEYE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DENEYSEL OLARAK OPTİMİZASYONU”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Süleyman KARADENİZ

Yönetici

Prof.Dr.Tevfik AKSOY

Prof.Dr. Sami AKSOY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr.Vural CEYHUN

Prof.Dr.Yılmaz TAPTIK

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans ve doktora tez çalışmalarım sırasında bana gösterdiği destek ve değerli yardımları için tez danışmanım Prof.Dr.Süleyman KARADENİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Özel sektörde bana Tahribatsız Malzeme Muayene yöntemleri ile çalışma imkânı sağlayan ve deneyimlerini benimle paylaşan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Etem HELVACI'ya sonsuz saygılarımı sunarım.

Doktora tezim sırasında tez çalışmalarımı izleyerek beni yönlendiren değerli hocalarım Prof.Dr.Tevfik AKSOY ve Prof.Dr.Sami AKSOY'a minnettarlığımı ifade etmek isterim.

T.M.M LTD.ŐTİ personeline, Ender Elektrik çalışanlarına, asistan arkadaşlarıma ve deneylerim sırasında yardımcı olan Borusan Mannesmann Boru Fabrikaları camiasına teşekkür ederim.

Tüm hayatım ve eğitimim boyunca beni cesaretlendiren, maddi ve manevi destekleri esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak tezim ve iş hayatım sırasında değerli destekleri ve gösterdiği sabırdan ötürü eşim Diğdem Günay'a özellikle teşekkür ederim.

Hakan GÜNAY

**GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME MUAYENESİNDE
MALZEME AYIRIMI, YÜZEYSEL ÇATLAK KONTROLÜ, BORU, MİL VE
BİLET KONTROLÜ VE DÖNER BOBİNLİ TEST SİSTEMLERİNDE
MUAYENEYE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DENEYSEL OLARAK
OPTİMİZASYONU**

ÖZ

Yapılan çalışma, girdap akımlarının bir tahribatsız malzeme muayene yöntemi olarak sanayi ortamında kullanılabilirlik olanaklarının araştırılmasıdır. Öncelikle girdap akımlarının fiziksel prensipleri incelenmiş ve literatür araştırmaları yapılmış, ardından da değişik malzeme imalat proseslerinde girdap akımları ile tahribatsız muayene çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Online ve offline boru kontrolleri, yüzeysel çatlak kontrolleri, malzeme ayırımı ve kontrollerinde girdap akımları için en uygun test teknikleri belirlenmiş ve test parametreleri optimize edilmiştir. Standart girdap akımı test cihazları ile yapılan değişik sanayi uygulamaları laboratuvar deneyleri ile karşılaştırılarak olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yöntemin laboratuvar uygulamaları için çeşitli test aparatları imal edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Girdap akımları, Tahribatsız Malzeme Muayenesi, Çatlak Kontrolü, Malzeme Ayırımı

**EXPERIMENTAL PARAMETER OPTIMIZATION
WHICH IS EFFECTED ON MATERIAL SORTING, SURFACE CRACK
DETECTION, TUBE, BAR AND BILLET TESTING AND ROTATING
PROBE TEST SYSTEMS IN EDDYCURRENT MATERIAL TESTS**

ABSTRACT

The study investigates the usability of eddy currents as a nondestructive testing method in industrial applications. First, the physical principles of eddy currents are studied together with literature search. Then nondestructive testing experiments are made using eddy currents in various material manufacturing processes. The most suitable test techniques for eddy current method are defined and test parameters are optimized for online and offline tube investigation, surface crack detections and material sorting. Test results obtained by using standard eddy current test equipments in various industrial applications are compared to the laboratory results. Some test apparatus are manufactured for laboratory applications.

Keywords: Eddycurrent, Nondestructive Testing, Crack Detection, Material Sorting

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Tahribatsız Malzeme Muayenesi Yöntemleri	2
1.2 Girdap Akımları ile Malzeme Muayenesi	3
1.2.1 Tarihçe	3
1.3 Metodun Potansiyeli	8
1.3.1 Girdap Akımı Testlerinin Uygulama Alanları	8
1.3.2 Girdap akımı testlerinin avantajları ve dezavantajları	9
1.4 Yönteme Teknik Bakış	10
1.5 Literatür Araştırmaları	12

BÖLÜM İKİ – GİRDAP AKIMLARI TEORİSİNE GİRİŞ..... 17

2.1 Magnetik İndüksiyon	17
2.2 Girdap Akımı Proplarının Karakteristikleri	17
2.3 Girdap Akımları ile Test Prensipleri	18

BÖLÜM ÜÇ – ELEKTRİK AKIMININ MAGNETİK ETKİLERİ..... 24

3.1 Faraday'ın İndüksiyon Denemeleri	24
3.2 Akım Taşıyan İletkenlerin Magnetik Alanı	26
3.3 Magnetik Alan	27
3.4 Magnetik Akı Kavramı	28
3.5 Self İndüktans Kavramı	29
3.6 Elektromagnetik İndüksiyonda Faraday Kanunu	30

BÖLÜM DÖRT – MAGNETİK DEVREYE EŞDEĞER ELEKTRİK DEVRELERİ	31
4.1 Ortak İndüktans Kavramı	31
4.2 Kaçak İndüktans Kavramı	32
4.3 Ortak İndüktansların Transformatör Davranışı	33
4.4 Ortak İndüktans Devrelerinde Gerilimler.....	35
4.5 Girdap Akımı Test Sistemlerinde Transformatör Etkisi	35
BÖLÜM BEŞ – AC DEVRELERDE ZAMANA BAĞLI PARAMETRELER..	38
5.1 Sinüzoidal Fonksiyonlar	38
5.2 Maksimum ve Efektif Değerler	39
5.3 Frekans ve periyot	39
5.4 Faz Açısı.....	40
5.5 Sinüzoidal Fonksiyonların Matematiksel Bağlılıkları.....	40
5.6 Faz Farkı.....	41
BÖLÜM ALTI – KOMPLEKS BİLEŞENLERLE DEVRE ANALİZLERİ	42
6.1 Seri Bağlı Direnç ve İndüktans Devrelerinde Alternatif Empedans	43
6.2 R-L Devresindeki Empedansa Frekansın Etkisi.....	46
BÖLÜM YEDİ – GİRDAP AKIMI TEST SİSTEMLERİNE VE PROPLARIN SINIFLANDIRILMASINA GENEL BAKIŞ.....	47
7.1 Girdap Akımı Test Sistemlerine Genel Bakış	47
7.2 Propların Sınıflandırılması	49
7.2.1 Çalışma Şekillerine Göre Proplar	49
7.2.2 Hassasiyetlerine Göre Proplar	50
7.2.3 Kullanım Yerlerine Göre Proplar	51

BÖLÜM SEKİZ – GİRDAP AKIM PROPLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	54
8.1 Lift-Off Etkisi (Sıçrama)	54
8.2 Doldurma Faktörü (Fill Factor).....	54
8.3 Deri Etkisi (Skin Effect).....	55
8.4 Magnetik Doyma	56
BÖLÜM DOKUZ – GİRDAP AKIMI PROPLARININ DİZAYNI.....	60
9.1 Prop Omik Direncinin Hesaplanması.....	62
9.2 Prop İndüktif Reaktansının Hesaplanması	63
9.3 Çok Bobinli Proplar.....	65
9.4 Kompleks Propların Dizaynı	66
BÖLÜM ON – GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME AYIRIMI	68
10.1 Çok Frekanslı Girdap Akımı Cihazı ile Çelik Cıvata Ayırımı	68
10.1.1 Deneyin Hazırlanışı	70
10.2 Cıvata Ayırım Deneyleri	71
10.3 Mutlak Bobin ile Çelik Cıvataların Birbirinden Ayrılması.....	76
10.3.1 Deneyin Hazırlanışı	76
10.4 Mutlak Bobinle Cıvata Ayırımı.....	78
10.5 Girdap Akımları ile Otomatik Malzeme Ayırım sistemi.....	79
10.5.1 Deneysel Uygulamalar	82
BÖLÜM ONBİR – YÜZEYSEL ÇATLAK KONTROLÜ	87
11.1 Yüzeysel Çatlak Kontrolü Prensipleri.....	87
11.2 Yüzeysel Çatlak Kontrolünde Deneysel Çalışmalar	89
11.3 Yüzeysel Çatlak Kontrolünde Deney Sonuçları.....	93

BÖLÜM ONİKİ – BOYUNA DİKİŞLİ BORU KONTROLÜ..... 99

12.1 Giriş	99
12.1.1 Boyuna Dikişli Çelik Boruların Girdap Akımları ile Testi	102
12.1.2 Boyuna Dikişli Çelik Borular İçin Online Test Sistemleri.....	103
12.1.3 Boyuna Dikişli Çelik Borular İçin Offline Test Sistemleri	106
12.2 Girdap Akımı Test Sistemlerinde Kalibrasyon	109
12.2.1 Kalibrasyon Borusunun Hazırlanması.....	112
12.3 Sistem Ayar Parametreleri.....	115
12.3.1 Frekans (kHz)	115
12.3.2 Kazanç (dB).....	117
12.3.3 Filtre.....	117
12.3.4 Faz Açısı	118
12.3.5 Eşik Seviyeleri.....	118
12.3.6 Çalışma Aralığı.....	118
12.4 Boyuna Dikişli Borularda Online Test Deneysel Çalışmaları.....	119
12.5 Boyuna Dikişli Borularda Offline Test Deneysel Çalışmaları	123

BÖLÜM ONÜÇ – DÖNER BOBİNLİ TEST SİSTEMLERİ 129

13.1 Giriş	129
13.2 Döner Bobinli Sistemlerde Deneysel Çalışmalar	130
13.2.1 Sistemin Genel Tanıtımı	130
13.2.2 Temel Ayarlar	131
13.3 Hata Kataloğu.....	135
13.4 Döner Sistem Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	137

BÖLÜM ONDÖRT – BORU VE MİL TESTLERİNDE OPTİMİZASYON... 138

14.1 Optimizasyon Deney Seti.....	138
14.2 Optimizasyon Deneyleri.....	139
14.3 Optimizasyon Deney Sonuçları.....	141

BÖLÜM ONBEŞ – SICAK TEL VE MİL KONTROLÜ 146

- 15.1 Tel ve Mil İmalatlarına Genel Bakış 146
15.2 Tel ve Mil İmalatlarında Girdap Akımı Test Sistemleri 148
15.3 Sıcak Tel ve Mil Testlerinde Tespit Edilebilen Hatalar 149
15.4 Sıcak Tel Kontrolünde Gerçek Hata Örneği 152

BÖLÜM ONALTI – GİRDAP AKIMLARI İLE KABLO KONTROLÜ 155

- 16.1 Defrost Kablolarına Genel Bakış 155
16.2 Defrost Kablo Deney Kurulumu 157
16.3 Girdap Akımları İle Defrost Kablosu Markalama Sonuçları 159

BÖLÜM ONYEDİ – SONUÇLAR 160

- 17.1 Malzeme Ayırımı 160
17.2 Yüzeysel Çatlak Kontrolü 161
17.3 Boyuna Dikişli Çelik Boru Kontrolü..... 162
17.4 Döner Bobinli Test Sistemleri..... 162
17.5 Sıcak Tel ve Mil Kontrolü..... 163

KAYNAKLAR 164

EKLER..... 166

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Çağımızda giderek artan kalite ihtiyaçları Tahribatsız Malzeme Muayene Sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu aşamada Eddycurrent adıyla da anılan Girdap akımları prosedürü önem kazanmaktadır. Bu yöntem, güvenilir ve oldukça ekonomik bir test yöntemidir. Özellikle otomatik sistemlere uygulanabilirliği ile birlikte; yapısal analizlerde, kaynak dikişi kontrollerinde, çekme borularda, mil ve tellerde hatanın tanımlanabilirlik kapasitesi oldukça yüksektir. Girdap akımları test yöntemi, boru ve mil kontrolünde ülkemizde çok yaygın kullanım alanına sahiptir.

Girdap akımları, sadece çatlak kontrolünde değil, aynı zamanda kaplama kalınlığı ölçümlerinde, malzeme kalınlığı ölçümlerinde, iletkenlik ölçümlerinde ve malzeme tanımlamada kullanılabilirliği dolayısıyla da yaygın olarak kullanılan ve güvenilir bir test yöntemidir. Avantajlarının çok fazla sayıda olmasına rağmen; sadece elektrik iletkeni malzemelere uygulanabilmesi, yüzey pürüzlülüklerine karşı hassas olması, penetrasyon derinliğinin sınırlı olması ve deneyimli ve eğitimli bir personele ihtiyaç duyması gibi nedenlerle birtakım dezavantajlara da sahiptir. Fakat girdap akımı test sistemlerinde test proplarının yüzey temasına gereksinim duymaması, testlerin tekrar edilebilirliği ve sonuçların anında alınabilmesinden ve bilgisayar ortamında saklanabilmesinden dolayı pek çok sektörde Tahribatsız Malzeme Muayene testlerinde vazgeçilmez yöntemlerden birisi olarak kullanılmaktadır.

Hazırlanan bu çalışmada öncelikle girdap akımlarının fiziksel prensipleri teorik olarak incelenmiş, ardından da yöntemin uygulamaları deneysel olarak gösterilerek değişik imalat yöntemlerinde ve değişik malzemelerin muayenesinde kullanılmıştır. Yapılan teorik ve pratik çalışmalarla tezin konusu olan pek çok değişik girdap akımı uygulaması için deney düzenekleri hazırlanmış ve parametre optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

1.1 Tahribatsız Malzeme Muayenesi Yöntemleri

Boşluklar ve çatlaklar mühendislik yapılarının performansında hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden de bir katı içerisindeki hataların tespit edilebilmesi pratikte o yapının güvenilirliğini ve uygulamadaki başarısını da göstermektedir. Aslında endüstriyel kullanımının yanında günlük hayatta da farkında olmadan Tahribatsız Malzeme Muayene uygulamaları yapmaktayız. En bilinen tahribatsız malzeme muayene yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

- Ultrasonik Test
- Radyografik (X, Gama, Nötron) muayene
- **Girdap Akımları** ile muayene
- Penetrant Muayene
- Magnetik Parçacıklarla Test
- Akustik Emisyon Testi
- İnfrared termografi
- Görsel Testler
- Sızdırmazlık testleri

Girdap akımlarına, indüklenen akımlar, fuko akımları veya eddy akımları da denilmektedir. Girdap sözcüğü; belirli koşullar altında gaz veya sıvıların akışları esnasında bir engelle karşılaştıklarında engelin etrafında dairesel bir yörünge çizmelerinden esinlenerek bu yönteme isim olarak verilmiştir. Eddy akımlarının karşılığı olarak Türkçe’imizde kullanılan “Girdap akımları” terimi tam karşılığını vermesi dolayısıyla ülkemizde yoğunlukla kullanılmaktadır.

Girdap akımı metodu, kesin teorik altyapısı ile olgunlaşmış ve güvenilir bir Tahribatsız Malzeme Muayenesi yöntemidir. Otomotiv sektöründe ve uçak endüstrisinde geniş bir kullanım alanı vardır. Ayrıca güç santrallerinde muayene ve bakım işlerinde ve aynı zamanda da proses kontrollerinde yoğunlukla kullanılmaktadır. Şekil 1.1 yöntemin başlıca kullanım alanlarını özetlemektedir.



Şekil 1.1 Girdap akımı testlerinin kullanım alanları.

Tahribatsız muayene uygulamalarında girdap akımı prop ve bobinleri birkaç Hz'den birkaç MHz'e değişen belirli frekans aralıklarında, malzemelerin elektromagnetik alanlara cevabını ölçerler. Bu cevaplardan; sertlik, sertlik derinliği, kalınlık, korozyon kalınlığı şeklindeki malzemenin yapısal durumu ile, porozite ve yüzey çatlakları gibi hatalar çıkartılabilir. Girdap akımı probunun sorguladığı iki özellik elektriksel iletkenlik (kondüktivite) ve magnetik geçirgenlik (permeabilite)' dir. Bu yüzden bu metot genellikle metaller gibi sadece iletken malzemelerin testinde kullanılır. Fakat bunun yanı sıra grafit, epoxy kompozit gibi düşük iletkenlikli malzemelerde de uygulanabilir.

1.2 Girdap Akımları ile Malzeme Muayenesi

1.2.1 Tarihçe

Girdap akımı metodunun tarihçesi elektromagnetizma konusundaki gelişmelerle yakından ilgilidir. Bu gelişmeler gerçek girdap akımı testleri olarak 19.ncu yüzyılda kendilerini göstermişlerdir. Prensibin temelleri 1819'da H.C.Öersted tarafından atılmıştır. Öersted, bir bobinden geçen akımın oluşturduğu magnetik alanın bir

pusula ibresini saptırabileceğini göstermiştir. 1820'den önce elektrik ve magnetizma arasındaki ilişki hakkında çok az kanıt vardı. Bu yılda Hans Christian Öersted deneysel olarak ferromagnetik bir iğnenin akım taşıyan bir tele paralel olarak yerleştirildiğinde sapabileceğini göstermiştir. Öersted bu kavramı şu şekilde açıklamıştır: “Akımın kendisi bu hareketin sebebidir ve “elektrik çekim dönme şeklinde kendini gösterir”. Bu, elektrik ileten bir telin yakınına getirilen mıknatısın kendini tele dik duruma getirmesi ve telin çevresinde dolaştırılan mıknatısın hep aynı ucunun ileriye göstermesi şeklinde görülür. Bu kuvvetin olduğu bölge magnetik alan olarak adlandırılabilir” (Schull,1997).

Biot ve Sevart Öersted'in deneylerini tekrar etmişler ve kendi isimleri ile anılan kanunu keşfetmişlerdir. Biot ve Sevart, akım taşıyan bir iletkenin çevresindeki magnetik alanın doğrultusu ve büyüklüğü ile ilgili olarak, magnetik alanın uzaklıkla ters orantılı olarak azalmakta olduğunu bulmuşlardır.

1824'de Arago deneysel olarak magnetik bir iğnenin titreşimlerinin, yanına bir iletken getirildiğinde hızla düştüğünü göstermiştir.

Esasen eddy ya da girdap akımlarının varlığını ilk ortaya çıkaran bilim adamı 1830'da J.B.Foucault olmuştur. (Günümüzde Fransa'da ve Kanada'da girdap akımları Foucault akımları olarak bilinmektedir). Foucault, sabit değerde olmayan bir magnetik alanda hareket eden bir bakır diskte elektrik akımının oluştuğunu göstermiştir.

Merak konusu olan bu durum, Amerika'da Joseph Henry ve İngiltere'de Michael Faraday bağımsız olarak elektromagnetik indüksiyonu keşfedene kadar, yani 1831'den önce açıklanamamıştır. Elektromagnetik indüksiyon kanunu adıyla bilinen prensibi de 1832 yılında M.Faraday ve Henry ortaya koymuşlardır. Bu kanunu, değişken bir magnetik alanın bir elektrik iletkeninde gerilim indükleyebileceği şeklinde açıklamışlardır.

Onların deneysel aparatları günümüzde bir toroid üzerindeki primer ve sekonder sargıları olan bir transformatör idi. Primer sargıları bir volta piline bağlanmıştı. Bu pil akımın akışını sağlamak, durdurmak ve ters çevirmek için kullanılmakta idi. Daha sonraları ise galvanometreler kullanılmıştı. Faraday, ana akım kapatıldığında iğnenin anlık olarak bir tarafa döndüğünü, devre açıldığında diğer (zıt) tarafa döndüğünü bulmuştu. Bu sonuç açıkça bize elektromagnetik indüksiyonun zamanla değişen bir akıma bağlı olduğunu göstermiştir. Faraday deneylerini demir ve ağaç nüveler kullanarak tekrarlamış ve benzer sonuçlar almıştır. Fakat ağaç nüve için iğnenin sapmalarındaki büyüklük azalmıştır.

1879 yılında D.E.Hughes bir mikrofona sargısındaki elektrik darbelerinin metallerde tahribatsız muayenede kullanılan girdap akımlarını indüklediğini göstermiştir. Girdap akımlarının tahribatsız muayenede bu ilk kullanımı R.Hochschild tarafından anlatılmıştır. Elektromagnetik dalgaların tahribatsız malzeme muayenesinde metallerin çatlakları ve fiziksel özellikleri için kullanılması, bu dalgaların deneysel olarak gerçekliği kanıtlanmadan çok önceleri gerçekleştirilmiştir. Maxwell öldüğünde, 1879, teorisiyle ilgili birçok sorular var iken ve Hertz'in elektromagnetik dalgaların varlığını ispat etmesinden 7 yıl önce, D.E.Hughes indüklenen girdap akımları yardımıyla karışmış malzemeleri ve alaşımları birbirinden ayırt edebilmiştir.

Elektronik osilatörler henüz yok iken, Hughes bir saatin darbelerini bir mikrofona üzerine vurdurarak uyarıcı sinyali elde etmiştir. Sonuç elektrik impulsları bir çift eş bobinden geçmekte ve bobin içerisindeki iletken malzemelerde girdap akımları indüklenmektedir. Bir telefon alıcısından (A.G.Bell 2 yıl önce icat etmiştir) sinyalleri dinleyerek sesler kaybolana kadar bobinlerin balans ayarını yapabilmiştir.

Hughes kendi girdap akımı cihazının hassasiyetini eleştirirken;

“Bir miligram bakır veya saf bir demir tel insan saçından iyidir ve güçlü bir sesle duyulur. Ben bir şilini parmaklarım arasında sürterek veya bobinlerin yakınında sadece nefes alarak sıcaklığını değiştirerek bu farkları oluşturabildim.” demiştir (Schull,1997).

Hughes, referans standart olarak bakır kullanarak kendi geliştirdiği induksiyon balansı ile pek çok farklı metalin kondaktivitesini (iletkenliğini) ölçmüştür. Bu standart ile, “Uluslararası tavllanmış bakır standardı”, bakıra göre yüzde olarak iletkenlik ölçümleri yapılır ve bu yaygın olarak günümüzde halen kullanılmaktadır.

Sonraki 50 yılda girdap akımı testlerinde belirgin bir ilerleme kaydedilmemiştir.

F.Krantz 1920 yılında girdap akımlarını kullanarak malzeme kalınlığı ölçüm işlemini gerçekleştirmiştir. 1920’lerin sonunda, girdap akımı cihazları çelik endüstrisinde biletlerin, boruların, millerin ve tellerin ölçülmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel anlamda girdap akımlarını çelik boruların testi için kullanan kişi de 1925 yılında C.Farrow olmuştur. Fakat elektronik donanımlardaki sınırlar (stabil osilatörlerin olmayışı) basit ayırma uygulamalarının ötesine izin vermemekteydi. Donanımlar ve elektromagnetik teoriler II. Dünya Savaşı sırasında geliştirildi. Özellikle magnetik mayınların tespit edilebilmesi için çok sağlam cihazlar ve test metotları geliştirildi.

Bu alandaki en büyük gelişmeler pek çok konuda olduğu gibi II. Dünya Savaşı ve sonrasında meydana gelmiştir. 1948 yılında Almanya’da Reutlingen Enstitüsü’nde girdap akımı test cihazları geliştirilmeye başlanmıştır.

1954 yılında F.Förster empedans düzlemi diyagramlarını ortaya çıkarmıştır. Bu diyagramlar, girdap akımlarının anlaşılmasında ve analiz edilmesinde çok faydalı olmuşlardır. Dr.Frederico Förster, Tahribatsız muayenede yeni bir çağı başlatan çalışmalar gerçekleştirmiştir. Förster basit deneysel cihazlarla çok hassas teorik ve pratik çalışmaları bir araya getirmiştir. Çok zekice deneylerini sıvı civa ile gerçekleştirmiş ve etiketlerle izolasyon oluşturarak net ölçümler yapabilmıştır. Bu deneysel sonuçlarını Maxwell denklemleri ile karşılaştırmıştır. Förster pek çok malzeme geometrileri ve pek çok prop için çok kesin teorik çözümler oluşturmuştur.

Girdap akımı testlerinde elde edilen büyük gelişmelerden bir diğerini de yine Förster, Charles Proteus Steinmetz’in sinüsoidal sinyaller için kompleks gösterim yöntemini kendi analiz sistemine uygulayarak geliştirmiştir. Förster, girdap akımı

cevaplarını kompleks empedans düzleminde göstermiş, indüktif reaktans (depolanan enerji) ve omik direnç'e (enerji kayıpları) bağlı olarak çizmiştir. Günümüzdeki konvansiyonel girdap akımı testleri ve analizleri bu basit empedans düzlemi metoduna dayanmaktadır. Bu akılcı ve detaylı deneylerle kanıtlanan teorik çalışmalara ek olarak Förster ve arkadaşları çok yetenekli ölçüm cihazları dizayn etmişlerdir. 1950 ve 1960'lı yıllarda Förster'in cihaz ve metotları sanayide girdap akımlarını vazgeçilmez bir araç haline getirmiştir. Förster'in bu çalışmaları onu modern girdap akımı testlerinin babası olarak tanımlamamıza yetmektedir.

1950 ve 1960 yılları arasında bu alanda pek çok çalışmalar yapılmış ve test tekniği günümüzde kesin sonuçlar vermekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. 1960'lardan bu yana teorik modellemede, cihazlarda ve metotlarda belirgin gelişmeler kaydedilmiştir. Daha fazlası elektromagnetik bobinler ve test malzemesi arasındaki etkileşimlerin anlaşılması ve çatlak malzemelerin tespiti için yapılagelmektedir.

Hugo Libby, 1971 yılında standart bir test parçasını referans olarak self balanslama işleminin ve multifrekans ve palslı girdap akımı testlerinin öncülüğünü yapmıştır. Bu sayede lift-off veya sıcaklık gibi büyük cevap sinyallerinin hata sinyallerini etkilemesi önlenebilmiştir.

En son yapılan çalışmalarda palslı girdap akımı test sistemlerinin alüminyum uçak gövdelerinde bağlantı elemanlarının altında oluşan çatlakların tespitinde Gibbs ve Campbell tarafından 1999 yılında kullanıldığı rapor edilmiştir. Bağlantı elemanının altında gözle görülemeyen hataların radyal pozisyonları, yaklaşık derinlikleri ve boyutları tespit edilebilmiştir.

Günümüzde girdap akımları Tahribatsız muayene yöntemlerinin en belirgin ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden birisi haline gelmiştir. Ülkemizde girdap akımı test cihazları 1981 yılından bu yana kullanılmaktadır (E.Helvacı, 20 Nisan 2004). En yaygın kullanımlar, boyuna dikişli boru imalatları, dövme, döküm malzeme kontrolleri ve uçak bakım endüstrilerinde göze çarpmaktadır.

1.3 Metodun Potansiyeli

Girdap akımı metotları araştırma-geliştirme, imalat, güç üretimi, muayene ve bakım gibi çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Metotlar proses kontrolü, kalite kontrolü ve çalışan malzemelerin muayenesi için uygulanmaktadır. Pek çok Tahribatsız Malzeme Muayene metodunda olduğu gibi, girdap akımı sensörleri de iletkenlik, magnetik permeabilite ve geometri gibi sadece birkaç parametreye duyarlı olmaktadır. Fakat bu basit parametreler bile iletken malzemeler hakkında geniş ve yeterli bilgi almamıza yetmektedir.

1.3.1 Girdap Akımı Testlerinin Uygulama Alanları

1. Metal folyoların, yaprakların, boruların ve diğer tarafına ulaşamayan makine parçalarının kalınlıklarının ölçülmesinde,
2. Ana malzeme üzerindeki kaplama kalınlıklarının ölçülmesinde (kaplama ve ana malzemenin elektriksel ve magnetik özelliklerinin çok farklı olduğu durumlarda),
3. Yapısal olarak malzemeleri tanımak ve birbirinden ayırmak için
4. Çatlaklar, boşluklar, atlamalar, izler, kesikler, delikler ve benzeri malzeme süreksizliklerini tespit etmek için,
5. Isıl işlem koşullarını ve metalik yapılardaki yanma kusurlarının tanımlanması ve kontrol edilmesi amacıyla,
6. Çelik ve bazı demir alaşımlarındaki sertlik ve sertlik derinliklerinin belirlenmesinde,
7. Yeraltı boruları, gömülü bombalar, mayınlar veya maden cevherleri gibi gizli metalik objelerin tespitinde,
8. Konveyörlerdeki malzemelerin ve mekanizmaların görünmeyen parçalarının hareketini tespit etmek ve sıralama ve zamanlama işlemlerini yapmak amacıyla,
9. Simetrik işlenmiş veya taşlanıp parlatılmış metalik parçaların, örneğin rulman bilyaları, bilezikleri ve küçük makina parçalarının hassas boyut ölçümleri için kullanılır.

1.3.2 Girdap akımı testlerinin avantajları ve dezavantajları

Girdap akımı testleri pek çok sebepten dolayı popülerdir:

1. Girdap akımları beton içerisindeki metallerin testinde kullanılır.
2. Girdap akımları temas gerektirmez. Magnetik partikül, penetrant, ultrasonik yöntemler gibi yöntemlere göre belirgin bir üstünlüğü vardır. Bu sayede otomatik ve hızlı teste izin verir.
3. Penetrant ve magnetik partikül metotlarında olduğu gibi yüzey temizliği ve hazırlığı gerektirmez.
4. Radyografik muayene yöntemlerine göre temiz, güvenli ve düşük maliyetlidir.
5. Yüksek sıcaklıklarda uygulama imkânı sağlayan birkaç yöntemden biridir. (Tel kontrollerinde $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 'yi aşan malzeme sıcaklıklarında)
6. Taşınması kolay sistemlerdir.
7. Girdap akımı metotları, malzeme parametreleri ve geometriksel olarak geniş bir yelpazede oldukça hassas metotlardır.

Diğer taraftan girdap akımı testleri bazı eksikliklere de sahiptir.

En büyük zorluk test malzemesinin iletken olması zorunluluğudur. Aslında çok geniş bir yelpazede malzeme ve geometrik özelliklere cevap verebilse de bazen yanıt alabilmek oldukça zor olmaktadır. Girdap akımı propları sadece iletkenlik, süreksizlik vb malzeme karakteristiklerine odaklanmaz, bunların yanında lift-off (prop-metal uzaklığı ve bu uzaklığın değişimi) ve istenmeyen malzeme özelliklerine de (iletkenlik ve magnetik permeabilite) maruz kalırlar. Cevap sinyallerini istenmeyen sinyallerden ayırmak hassas elektroniklere ve sıkı bir kullanıcı eğitimine ihtiyaç duyar.

Tablo 1.1 girdap akımı metodunun avantaj ve dezavantajlarını özetlemektedir.

Tablo 1.1 Girdap akımı testlerinin avantajları ve dezavantajları (Schull,1997)

Avantajlar	Dezavantajlar
İletken malzemeler test edilebilir.	Sadece iletkenler test edilebilir.
İletkenlik, magnetik permeabilite ve geometri ile ilişkili birçok parametreye reaksiyon gösterir. (Hatalar, kalınlık, kaplama, yaklaşım ve kenarlar)	Sadece yüzey ve yüzeye yakın bölgelerin testi mümkündür (Karbonlu çelik boruların 6-10mm derinliğe kadar testi mümkündür.)
Hızlı bir test yöntemidir.	Yüksek hassasiyet ihtiyacı, test işlemini karmaşıktırır.
Aşırı güvenliğe ihtiyaç duymaz.	Lift-off değişimlerine hassastır.
Çalışma sıcaklık aralığı fazladır. Çok yüksek sıcaklıklarda çalışma imkânı vardır. (1000-1100°C)	Sadece test edilen yüzey ile açığı yapan çatlaklara hassastır.
Küçük prop boyutları ile küçük malzemelerin testi mümkündür.	Yüzey pürüzlülüğünden etkilenir.
Hafif ve taşınabilir cihaz ve sistemlerdir.	
Maliyetleri diğer yöntemlere göre göreceli olarak düşüktür.	
Kanıtlanmış bir teknolojiye sahiptir. Uluslararası standartlara girmiştir.	

1.4 Yönteme Teknik Bakış

Girdap akımı metotları iletken malzemeyi magnetik indüksiyonla sorgular. Proben kendisi bir alternatif akım transformatöründen farksızdır. Bu yüzden girdap akımı probunun yapısını incelemeden önce, temel elektromagnetik bilgilerin tazelenmesi gerekmektedir:

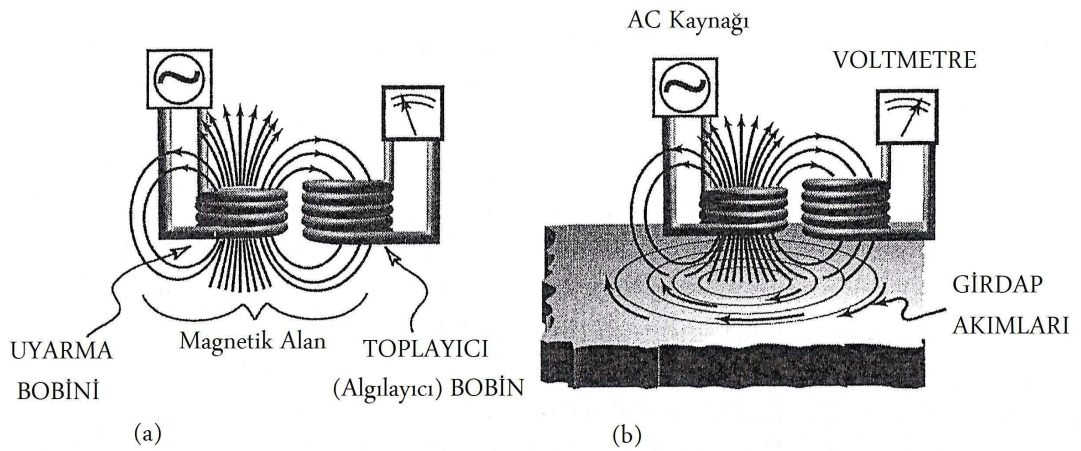
- İçerisinden akım akan bir telin etrafında ve içinde bir magnetik alan oluşur. Bu magnetik alan kapalı çemberler şeklindedir.
- Değişken bir magnetik alan, bir iletkeni yaklaşıtırlırsa iletkende bir endüksiyon elektromotor kuvveti (EMK) oluşur. İletken kapalı bir devre oluşturursa da iletkenin bir akım akar.

Her iki durum için de teller uzun bir bobin (solenoid) şeklinde sarılmışsa, etkiler sarım sayısı ile orantılı olarak artar. Bu sayede sinyalin güçlendirilmesi için bobinler çok kullanışlı bir mekanizma halini alır. Unutulmamalıdır ki bu kavram sadece AC (alternatif akım) kavramıdır.

Girdap akımı ölçümleri 4 adımdan oluşur:

- 1.Sinyal oluşturma
- 2.Malzeme ile iletişim
- 3.Sinyalin geri alınması
- 4.Sinyalin işlenmesi ve gösterilmesi

En basit girdap akımı probu bir çift bobin sargısından oluşur (Şekil 1.2). Bir bobin uyarma bobini, AC akım ile uyarılır, diğeri ise alıcı bobin bir voltmetreye bağlanır. Uyarma bobini ana magnetik alanı oluşturur. Bu alanın bir kısmı alıcı bobine doğru geçer. Böylece algılayıcı bobinde bir endüksiyon elektromotor kuvveti (EMK) oluşturur. Şayet sabit bir sürücü akımı ve sabit bir bobin pozisyonu oluşturulursa alıcı bobinden okunan gerilim sabit kalır. Bu sabitlik bobine ferromagnetik veya iletken bir malzeme yaklaştırılması ve alanın dağıtılması ile değişime uğrar. Magnetik alandaki değişiklik alıcı bobinde indüklenen elektromotor kuvvetini değiştirir.



Şekil 1.2 Girdap akımı probu veya bobini.

Bir iletkenin akan akımın oluşturduğu magnetik alan içine bir iletken getirildiğinde ana magnetik alan test malzemesinde akımlar oluşturur. Bu akımlar genellikle dairesel kapalı çevrimler şeklinde oluşurlar ve girdap akımları olarak adlandırılırlar. Girdap akımları da akım olmaları dolayısıyla ana alana zıt yönde ikincil bir magnetik alan oluştururlar. Alıcı bobin toplam magnetik alandaki azalmayı bize gösterir. Girdap akımlarının, dolayısıyla ikincil alanın büyüklüğü, test malzemesinin iletkenliğine bağlıdır. Kusursuz bir iletken ana alanda güçlü bir azalma meydana getirir (Örneğin prop test malzemesine tamamen temas etmekte ise).

Buradan malzemenin iletkenliği hakkında şaşırtıcı derecede büyük bilgiler elde edilebilir. İletkenlik değişimleri malzemenin işlenmesinden, sertlik ve sıcaklık değişmelerinden oluşabilir. Çatlak, boşluk gibi malzeme eksiklikleri, kaplamalar ve kaplama kalınlıkları gibi özellikler hatasız bir malzemenin iletkenliğini büyük ölçüde değiştirir. Ayrıca girdap akımı metodu tabiatı gereği magnetik permeabilitedeki değişikliklerden etkilenir.

Girdap akımı metodunda cevap sinyali değişik şekillerde gösterilebilir. Fakat tamamı alıcı bobindeki empedans değişikliklerinin bir formudur. Pek çok özel uygulamada sistemler EMK'deki büyüklük değişimlerini ölçerken, kaplama kalınlığı, sertlik gibi istenilen parametreleri gösterirler. Daha ileri girdap akımı test sistemleri ise hem büyüklüğü hem de fazı ölçer. Bu cevap sinyalleri empedans düzlemi olarak adlandırılan kompleks düzlemler üzerinde gösterilirler (omik direnç ve indüktif reaktans).

1.5 Literatür Araştırmaları

Girdap akımı uygulamaları ile ilgili ulaşılabilen pek çok yayın incelenmiş ve çalışmalar esnasında ve sonunda bu yayınlarda elde edilmiş olan sonuçlar ve takip edilen metotlar göz önünde tutulmuştur. Aşağıda incelenen bazı yayınlar hakkında yaptığımız değerlendirmeler bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarımızdan elde ettiğimiz bulgular ve sonuçlar bu çalışmalarla örtüşmektedir.

Helifa ve diğeri (2006), girdap akımları kullanarak ferromagnetik malzemelerin yüzeysel çatlaklarının tespiti çalışmalarında çatlakları simüle edebilecek yapay hatalar oluşturmuş ve girdap akımı cihazından alınan sinyaller yardımıyla hataların yeri, şekli ve büyüklüğü hakkında bilgiler elde etmeye çalışmışlardır. Çok geniş bir frekans aralığında yürüttükleri çalışmalarda penetrasyon derinliği ve lift-off etkilerini araştırmışlardır. Kullandıkları prop çapı 25mm'dir. Ferromagnetikliğin çatlak tespitine etkisini göstermek amacıyla karşılaştırma için östenitik paslanmaz çelik numuneler kullanmışlardır. Yapay hataları EDM (electro discharge machining) yöntemiyle 0,14mm ile 0,35mm aralığında değişen büyüklüklerde oluşturmuşlar ve 1kHz ile 1MHz aralığında frekanslar kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda kullanılan frekanslarda ferromagnetikliğin, magnetik permeabilitedeki değişikliklerin, yüzey çatlaklarının tespitinde büyük etkisinin olmadığını, kullandıkları probun rezonansa ulaşması sebebiyle 100kHz değerinde en iyi hata tespitinin sağlandığını göstermişlerdir. Hata sinyallerinin yüksekliğinin, hata derinliğinin limit bir değerinden sonra neredeyse sabit olduğunu kanıtlamışlardır. Hata derinliğinin limit değerini 0,16mm olabildiğini ve daha küçük hata boyutlarının tespiti için daha küçük prop çaplarının kullanılması gerektiğini açıklamışlardır.

Çalışmada yüzey çatlaklarının tespiti deneylerinde 10mm'lik prop çapı kullanılmış, prop rezonansa gelmeden 50kHz-1MHz aralığında çalışma imkânı elde edilmiştir. Supapların sap bölgesinde (X45CrSi93 çeliği) lazer markalama yöntemiyle oluşturulan hataların tespitinde minimum hata büyüklüğü 50µm olarak elde edilmiştir. 250kHz ve üzeri frekansların bu tespit için kullanılabilmesi deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Ferromagnetik olmayan malzemelerde delikler etrafındaki çatlakların girdap akımları ile tespit edilmesi çalışmalarında Doyum ve Ertekin (1997), uçak parçalarındaki civata ve perçin deliklerinin içerisindeki çatlakları tespit etmeye çalışmışlardır. Uçak gövdelerindeki bağlantı elemanlarına ait deliklerde gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerden başlayan hatalar zamanla çatlağa dönüşmekte ve erken tespit gerektirmektedir. Araştırmacılar 4mm çapında döner diferansiyel prop kullanmışlardır ve cihazlarını 0,2, 0,5 ve 1,0mm derinliklerde çentikler içeren

standart alüminyum kalibrasyon bloğu kullanarak kalibre etmişlerdir. Yapılan deneylerde 6,5mm çapındaki bir deliğin içerisindeki 0,15mm derinliğindeki hataları tespit edebilmişlerdir.

Mook ve diğerleri (2006), girdap akımlarının deri etkisi dolayısıyla kalın malzemelerdeki hataların (derinlerdeki hatalarının) tespit edilememe problemi üzerine yaptıkları çalışmada kalınlık ölçme veya yüzey altı hatalarının tespitinde daha büyük değerlere ulaşabilmek için değişik bir girdap akımı probu ve yöntemi kullanmışlardır. Standart penetrasyon derinliği δ , girdap akımı yoğunluğunun yüzeydeki değerinin $1/e$ 'ye düştüğü derinlik olarak bilinmektedir. Araştırmacılar 350 Hz'lik düşük frekansda çalışan özel bir girdap akımı probu ile paslanmaz çeliklerde 15mm derinlikteki yüzey altı hataları tespit edebilmişlerdir. Alüminyum alaşımları için ise bu derinliği 25mm olarak ifade etmişlerdir. Fakat bu derinliklere inebilmek için 50Hz gibi oldukça küçük frekanslara inilmesi zorunludur ve derinlere doğru inildikçe de sinyallerin zayıfladığı ve çok yüksek kazanç miktarlarında çalışılması gerektiği bilinmektedir.

Tellerin, millerin ve boruların girdap akımları ile Tahribatsız muayeneleri için yeni bir sensör geliştirmeye çalışan Grimberg ve arkadaşları (2000), herhangi bir doğrultudaki büyük veya küçük hataları aynı hassasiyette tespit edebilecek döner magnetik alanda çalışan gönderici ve algılayıcı sargılara sahip bir sensör elde etmişlerdir. Normalde mutlak, diferansiyel döner prop olarak bilinen sensör tiplerine ilave olarak harici alternatif magnetik alanın döndürüldüğü döner proplara alternatif olduğunu ifade ettikleri bir sensör geliştirmişlerdir. Yüksek permeabilitede ferrit bir halka üzerine sarılan 3 çift bobin sargısına aynı büyüklükte fakat birbirlerini 120° açı ile takip eden alternatif akım uygulayarak döner magnetik alanı elde etmişlerdir. Bu döner magnetik alan malzemede girdap akımlarını oluşturmuştur. Birbirine zıt yönde sarılmış iki alıcı sargıdan gelen sinyaller güçlendirilip filtre edilmiştir. Bu sensör su soğutmalı bir gövde içerisine yerleştirilerek sıcak malzemelerin test edilmesinde kullanılmıştır. 6mm çaplı paslanmaz çelik üzerinde hazırlanan 0,1mm genişliğindeki ve 30 - 100 μ m derinliğindeki yapay hataların tespiti üzerine yaptıkları çalışmalarda enine ve boyuna hatalar için 100m/sn gibi yüksek hızlara çıkabilmişlerdir.

Joubert ve Bihan (2006) boru kontrolleri için tasarladıkları çok sensörlü propları ile buhar jeneratörlerinde kullanılan borulardaki küçük hataları tespit etmişlerdir. Nükleer tesislerdeki buhar jeneratörlerinin çalışma esnasında kontrolleri hayati önem arz etmektedir. Borunun içerisine gönderilen gönderici ve alıcı sargılara sahip bobinlerde 100kHz, 240kHz ve 400kHz uyarma frekansları ile çalışmışlardır. 100kHz frekans ile borunun tüm kalınlığını kontrol ederken, 400kHz ile yoğunlukla iç yüzeyini test etmişlerdir. 240kHz'lik frekansı iç ve dış hatalardan gelen sinyallerin faz farklılıklarını analiz edebilmek için kullanmışlardır. 22,22mm dış çapında ve 1.27mm et kalınlığında örnek boruların içine ve dışına değişik boyutlarda oluşturdukları yapay çentik hatalarını tespit etme çalışmalarında et kalınlığının %10 derinliğinde, 100µm genişliğinde ve 15mm uzunluğundaki hataları tespit edebilmişlerdir.

Düktil dökme demirlerin girdap akımları ile sınıflandırılması çalışmasında Konoplyuk ve diğerleri (2005) ultrasonik test metoduna alternatif bir teknik geliştirmişlerdir. Normalde ferritik mühendislik malzemelerinde ultrasonik, infrared termografi gibi metotlar kullanılırken girdap akımlarının da uygulama olanağını araştırmışlardır. Dökme demirin matris yapısı içerisinde grafit çökeltilerinin sayısı ve boyutlarının elektromagnetik özellikleri etkilediği bilindiğinden sertlik, çekme ve akma gerilmeleri ile ilişkili bilgiler elde edilebilir. Mekanik özellikler veya hatalar bobin empedansını nasıl değiştiriyorsa kimyasal özellikler de o şekilde değişiklik yaratır. Örneğin ferrit miktarı fazla dökme demir perlitte göre daha yumuşak magnetik özellikler sergiler ve iletkenlikleri de yüksektir. Bu farklılıklar da bobin empedansını değiştirecek etki yapar. Dökme demirlerin iletkenlik ve permeabilite değerleri penetrasyon derinliği formülüne konulduğunda 5, 10, 50 ve 600kHz için sırasıyla 0,55, 0,39, 0,17 ve 0,05mm deri derinliği (skin depth) bulunur. Bobin empedansları her numune için ölçülüp kaydedilir ve ardından brinell sertliği, çekme gerilmesi ve yüzde uzama deneyleri ile alınan sonuçlar kıyaslanır. Bu şekilde bobin empedanslarından yola çıkılarak hızlı bir şekilde malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bu prensipler deneysel olarak girdap akımları ile malzeme ayırma bölümünde incelenmiştir (Bölüm 10).

Sıcak haddelenmiş çubuklar ve tellerin girdap akımları ile test edilmesi konusunda deneysel çalışmalar yapan Kling (2006) yöntemin proses kontrolü amacıyla kullanılabilceğini ve çok faydalı sonuçlar alınabileceğini göstermiştir. Sıcak haddeleme esnasında haddeleme makaralarında oluşabilecek hasarlar girdap akımı test yöntemiyle işlem sırasında hemen tespit edilebilmekte ve imalat prosesi kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda bu bilet imalat prosesine de faydalı sonuçlar verebilmektedir. 0.15mm'den büyük hatalar, ezikler, bindirmeler ve kabuklanmalar çok erken tespit edilerek ürünlerin genel kalitesi yükseltilebilmektedir. Bu konu deneysel çalışmalarımızda sıcak tel ve mil kontrolü bölümünde incelenmiştir (Bölüm 15).

BÖLÜM İKİ

GİRDAP AKIMLARI TEORİSİNE GİRİŞ

Girdap akımları ile Tahribatsız Muayene ve analizlerinde kullanılan ana teori, bir direnç (R) ve bir indüktans (L) içeren alternatif akım devresinde kullanılan teori ile benzerdir. Alternatif akım (AC) devre analizlerinde kullanılan yöntem ve terminolojiler girdap akımları testinde de kullanılabilir. Bu prosedürler ve terminolojiler elektrik mühendisi olmayan kişiler tarafından bile oldukça iyi bilinirler. Fakat yine de bu bölümde temel elektrik ve elektromagnetik teorileri gözden geçirmenin sağlıklı bir çalışma yapılmasında fayda sağlayacağına inanılmaktadır. Bu sayede çalışmanın konusu olan parametrelerin anlaşılması da kolaylaşacaktır. Gözden geçirilmesi gereken prensiplerin en önemlileri magnetik indüksiyon ve empedans kavramı olmaktadır.

2.1 Magnetik İndüksiyon

Elektrik akımı, magnetik alan ve elektromotor kuvveti arasındaki ilişki girdap akımı cihazlarının temelini oluşturur. Basitçe ele alınırsa, içerisinden akım geçen bir tel akımla ilişkili bir magnetik alan oluşturur ve zamanla değişen bu magnetik alanda bulunan iletken telde bir gerilim (EMK) indüklenir. Tel kapalı bir çevrim oluşturursa da içerisinden bir akım akar. Bu akım, gerilim ve magnetik alan arasındaki karşılıklı ilişki magnetik indüksiyon olarak adlandırılır.

2.2 Girdap Akımı Proplarının Karakteristikleri

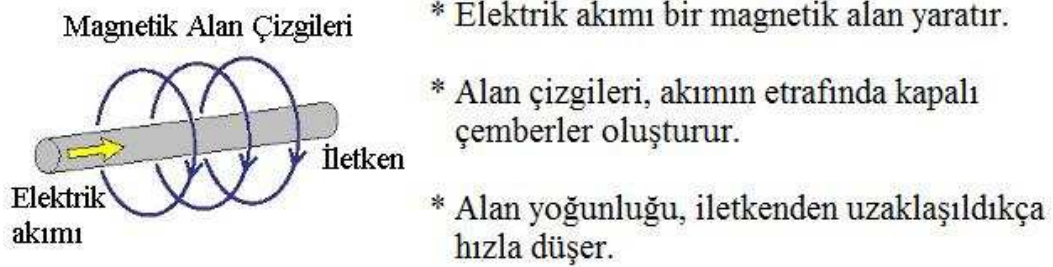
Aslında girdap akımı probu bir elektromagnetik transformatördür. Girdap akımı metotları, magnetik indüksiyon prensipleri olarak incelenebilir. Yöntemin fiziksel prensiplerine ancak Maxwell denklemleri kullanılarak ulaşılabilir. Bunun yanı sıra metodun fiziksel prensipleri daha nitel (kalitatif) deneylerle de elde edilebilir. Testler, alternatif akımla uyarılmış bir bobinin bir malzemeye oldukça yakın getirilmesiyle bobinin uçları arasındaki empedansın değişmesi üzerine kurulmuştur. Yapılan testler, elektrik iletkeni malzemede girdap akımı bobini tarafından indüklenen girdap akımlarının ana alanında oluşturduğu değişim ilişkilerini araştırır.

2.3 Girdap Akımları ile Test Prensipleri

Bilindiği gibi elektrik akımı taşıyan bir iletken çevresinde ve içinde bir magnetik alan oluşur. Alan çizgileri, akımın çevresinde sıralanmış kapalı çemberler şeklindedir. Alan şiddeti iletkeniden uzaklaştıkça hızla düşer (Şekil 2.1).

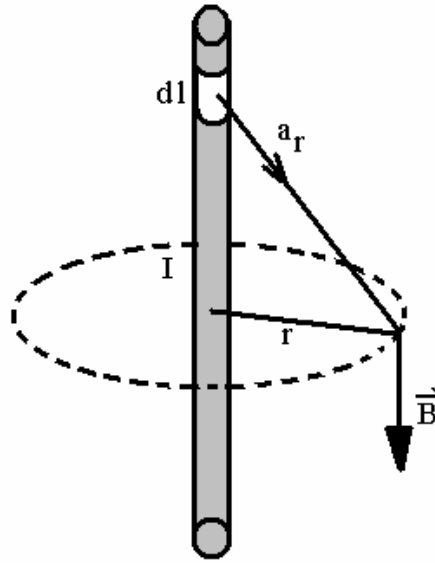
Deneyisel olarak magnetik alanın yönünü; içinden akım taşıyan bir tel geçirdiğimiz bir kâğıdın üzerine demir tozları dökerek veya bir mıknatısı hareket ettirerek tespit edebiliriz. Oluşan magnetik alanı, akımın yönüne dik ve eş eksenli halkalar şeklinde görebiliriz. Magnetik alanın doğrultusu pusulanın kutuplarına bakılarak anlaşılır ve akımın akış yönüne bağlıdır. Magnetik alanla ilişkili olan bu akımın yönü sağ el kaidesi ile açıklanır. Şayet sağ elin 4 parmağı magnetik alanı saracak şekilde tutulursa başparmak akımın akış yönünü gösterir. Dairesel magnetik alan kendi üzerinden başlar ve biter. Magnetik alan kapalı bir çevrim oluşturur.

Magnetik alan şiddeti, aynı zamanda kendisini oluşturan akımla doğru orantılıdır. Bu yüzden, zamana bağlı olarak büyüklüğü değişen bir akım, ki bu alternatif akımdır, değişken bir magnetik alan yaratır (Wirbelstromprüfung W1,1988).



Şekil 2.1 Bir iletkenin çevresinde magnetik alanın oluşumu.

Biot-Savart yasası, iletkeniden geçen akım ve indüklenen magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak açıklar (Şekil 2.2). Enerjinin korunumu ile ilgili olarak, indüklenen magnetik alan, telden radyal mesafe arttıkça $-1/r$ ile orantılı azalır.

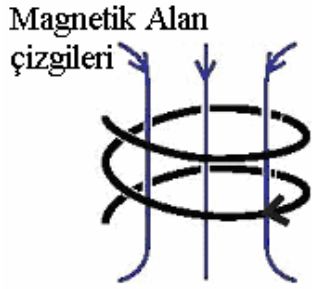


Şekil 2.2 İletkenden geçen akım ve magnetik akı yoğunluğu.

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{a}_r}{r^2} \quad (2.1)$$

Burada r, \vec{B} 'nin hesaplanacağı noktanın tele olan dik uzaklığı, \vec{a}_r ise tel üzerindeki kaynak noktanın \vec{B} 'nin hesaplanacağı noktaya olan birim vektörü gösterir. İntegral tüm tel boyunca, l , hesaplanır. $l \times \vec{a}_r$ çarpımı \vec{B} 'nin hem akıma hem de \vec{a}_r yön vektörüne dik olduğunu gösterir.

Bir iletken bobin şeklinde sarılırsa, iletkenden akan akımın oluşturduğu magnetik alan çizgileri bobinin içerisinde yoğunlaşacaktır. Bobinin içerisindeki magnetik alan tek yönlü ve homojendir. Eğer iletkenden geçen akım alternatif akımsa magnetik alan da alternatif olacaktır (Şekil 2.3). Bu prensip, girdap akımlarıyla teste uyarma bobininin arkasında yatan prensiptir. Uyarma bobini, test bobininin ya da sensörünün en önemli parçasıdır. Girdap akımı test sistemlerinde değişken bir magnetik alan kaynağına, bir algılama sensörüne (magnetik alandaki %0.01'lik değişimlere duyarlı) ve hassas elektronik devrelere ihtiyaç vardır. Test sistemi manuel veya otomatik olabilir.



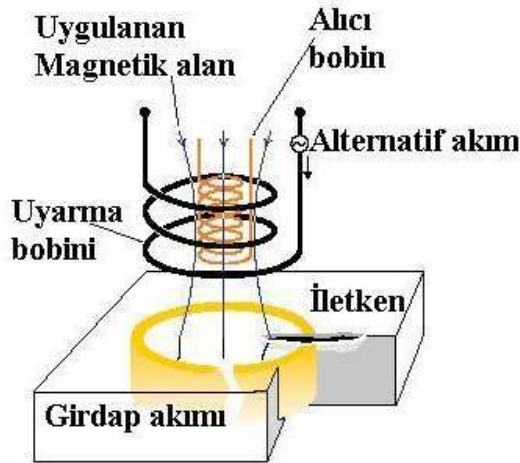
Tel bir bobinden akan akım,
bu bobinin içerisinde bir
magnetik alan yaratır.

- * Magnetik alan çizgileri bu tel bobinin içerisinde yoğunlaşmıştır.
- * Bobinin içerisindeki alan tek yönlü ve homojendir.

Şekil 2.3 Bir bobinde magnetik alanın oluşumu.

Şayet bir malzeme test bobininin değişken magnetik alanına bırakılırsa, malzeme içerisinde değişken bir EMK indüklenir ve eğer bu malzeme elektrik iletkeniyse bu gerilim de malzemede bir akım akıtır. Bu akım girdap akımı olarak bilinmektedir. Girdap akımları da daha küçük bir alıcı bobin tarafından algılanan bir magnetik alan oluşturacaktır (Şekil 2.4). Magnetik alanın şiddeti de malzeme özelliklerine bağlıdır.

Girdap akımları bobin sargılarının oluşturduğu düzleme paralel olarak akar. Test cihazları, gerilimdeki ve akımdaki zamana bağlı değişimleri algılayabilmelidir. Bunun yanında birçok diğer faktör, örneğin boyut farklılıkları ve sıcaklık değişimleri, test şartlarını etkileyebilmektedir.

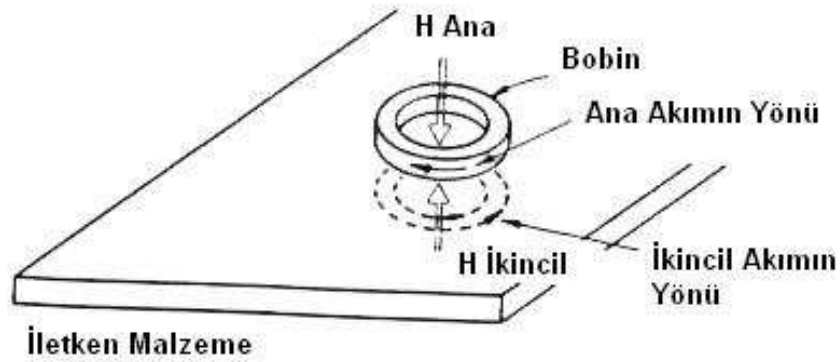


- **İndüksiyon kanunu:** Bir alternatif akım bir iletkende girdap akımları olarak bilinen bir akım indükler.
- Girdap akımları yeni bir magnetik alan oluşturur. Bu alan alıcı bobinlerle tespit edilir.
- Şayet akım bir malzeme hatasına rastlarsa, alıcı bobinde bir reaksiyon oluşacaktır.

Şekil 2.4 Girdap akımlarının oluşumu.

Şayet girdap akımları malzeme hatasına rastlarsa, örneğin çatlaklar, boşluklar, yüzeyde hasar izleri ya da hatalı kaynak bağlantıları, normal akış doğrultularında yayınamazlar. Bu ise, varolan magnetik alanda ve dolayısıyla da test bobininin ayarlarında karışıklık meydana getirir. Bu kavram, girdap akımı test prosedüründe malzeme hatalarının tanımlanmasında kullanılmaktadır. Hata sinyalinin büyüklüğü hatanın büyüklüğüne bağlı olarak artar. Aynı şekilde hata sinyalinin büyüklüğü, hatanın tipine, inhomojenliğine ve test malzemesinin elektromagnetik özelliklerine de bağlıdır.

Lenz kanununa uygun olarak, indüklenen girdap akımlarının ve dolayısıyla bu akımların oluşturduğu ikincil alanların yönü (Şekil 2.5) ana alandaki değişimin tersi yöndedir.



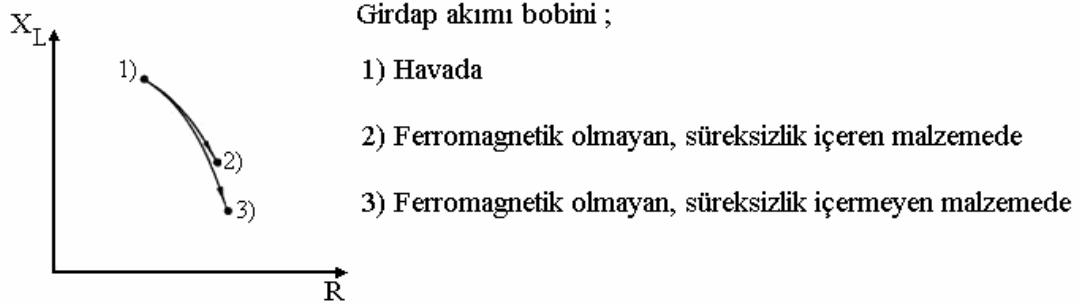
Şekil 2.5 Bobin iletken malzemenin üzerinde iken ana ve ikincil akımların yönleri .

İletken malzemenin ferromagnetik olmadığını varsayarsak ana ve ikincil alanların zıt tabiatı dolayısıyla bobinle ilişkili akı zincirleri azalır.

Bobinin self indüktansı amper başına düşen akı zincirleri olarak tanımlanır ki bu bobinin azalan indüktansıdır. Ana uyarma kaynağı ile karşılaşan test malzemesinde oluşan girdap akımı kayıpları sebebiyle indüktanstaki azalmaya rezistanstaki artış eşlik edecektir. Bu azalma rezistanstaki değişimle kendisini gösterecektir.

Test malzemesinde süreksizlik veya homojensizlikler durumunda girdap akımlarının yeniden oluşmasına ve azalmasına neden olacaktır. Netice olarak, uyarma bobinindeki indüktans ve rezistanstaki değişime karşılık olarak azalacaktır.

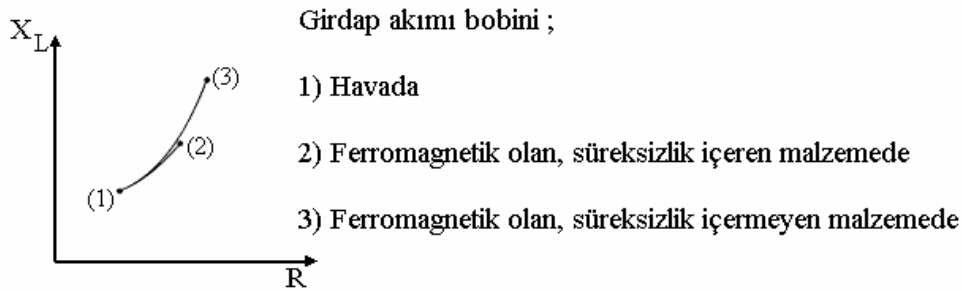
Şekil 2.6'da ferromagnetik olmayan, süreksizlik içeren ve içermeyen bir iletken malzemeye yaklaşan bobinin empedansındaki değişimler gösterilmiştir. Şekil üzerinde değişimlerin büyük ölçüde abartılarak gösterildiği unutulmamalıdır.



Şekil 2.6 Ferromagnetik olmayan , süreksizlik içeren ve içermeyen bir malzeme üzerindeki bobinin empedans düzlemi. Değişimler anlaşılrlık için oldukça abartılı çizilmiştir.

Test parçası ferromagnetik olduğunda prosesin temeli çok daha karmaşıktır. İndüktanstaki artış, malzeme içerisinde indüklenen girdap akımlarının etkisi nedeniyle, malzemedeki yüksek permeabiliteye dayandırılabilir. Bu son söylenen etki genellikle daha baskındır ve bu sebeple de ferromagnetik malzeme üzerine bir bobin geldiğinde bobinin indüktansı artar (Şekil 2.7). İndüktanstaki değişime aynı zamanda rezistanstaki artış eşlik eder ve bu değişim de girdap akımlarına ve histeresis kayıplarına dayandırılır (Stöwer,K.,1978).

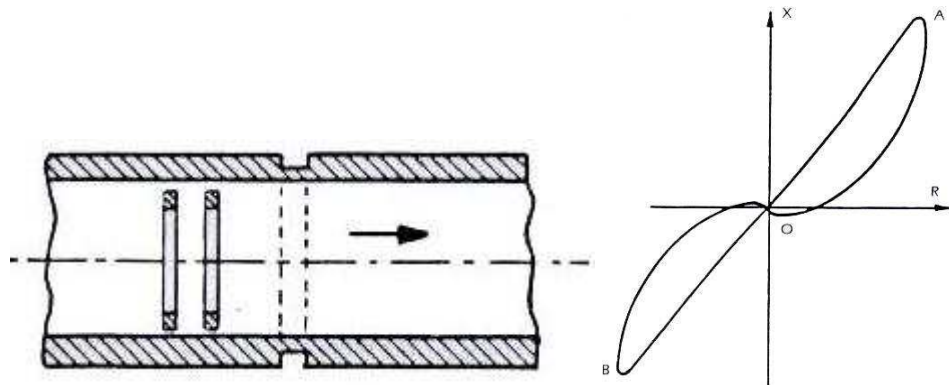
Test parçasındaki süreksizliklerin oluşturduğu bobinin empedansındaki değişimler, genellikle bobin empedansının boşa çalışma (malzeme yok iken) değeri ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu küçük değişimleri ölçmek ve tespit edebilmek için genellikle köprü devrelerinden faydalanılır.



Şekil 2.7 Ferromagnetik olan, süreksizlik içeren ve içermeyen malzeme üzerindeki bobinin empedans düzlemi. Değişimler anlaşılrlık için oldukça abartılı çizilmiştir.

Mutlak (absolut) ve diferansiyel olmak üzere iki tür girdap akımı probu bulunmaktadır. Bunlar ileride daha detaylı olarak açıklanacaktır. Mutlak girdap akımı probu kullanılmadaki dezavantaj empedanstaki havaya oranla çok küçük değişimleri tespit etmekteki zorluklarla ilişkilidir. Ek olarak dış etmenler ve sıçrama (lift-off) dolayısıyla bobin parametrelerindeki değişimler, süreksizliklerden oluşan değişimleri yok eder ve sinyal işlemeyi zorlaştırır. Diferansiyel girdap akımı proplarında ise birbirine eş ve aynı ekseninde iki adet bobin bulunmaktadır. Fakat araları küçük bir aralıkla ayrılmıştır. Bu iki bobin yukarıda bahsedilen köprü devresinin iki kolunu oluşturur. Köprünün balanssızlık sinyali, iki bobinin empedansları arasındaki voltaj farklılığıdır. Prob ya da bobin bir süreksizlik üzerinden geçerse ve bu süreksizlik balanssızlık oluşturursa bobinin empedansı değişir. Diferansiyel empedans çizgilerinin izdüşümü OAO (Şekil 2.8) empedans düzleminde gösterilmiştir. Aynı şekilde izleyen bobin bir hata ile karşılaşınca diferansiyel empedans çizgilerinin izdüşümü OBO ters yönde oluşur. Empedans düzleminin izdüşümünün şekli süreksizliğin yapısının bir fonksiyonudur.

Daha açık söylemek gerekirse girdap akımları ile tahribatsız malzeme muayenesinin temeli, girdap akımları proplarının empedansındaki değişimin ölçülmesinde yatar. Bu yüzden devre analizlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi ve özümsebilmesi için gerilim, akım, rezistans ve indüktans gibi temel kavramların açıklanması gerekmektedir.



Şekil 2.8 Hatalı bir borunun diferansiyel bobinle testinde empedans düzlemi izdüşümü.

BÖLÜM ÜÇ

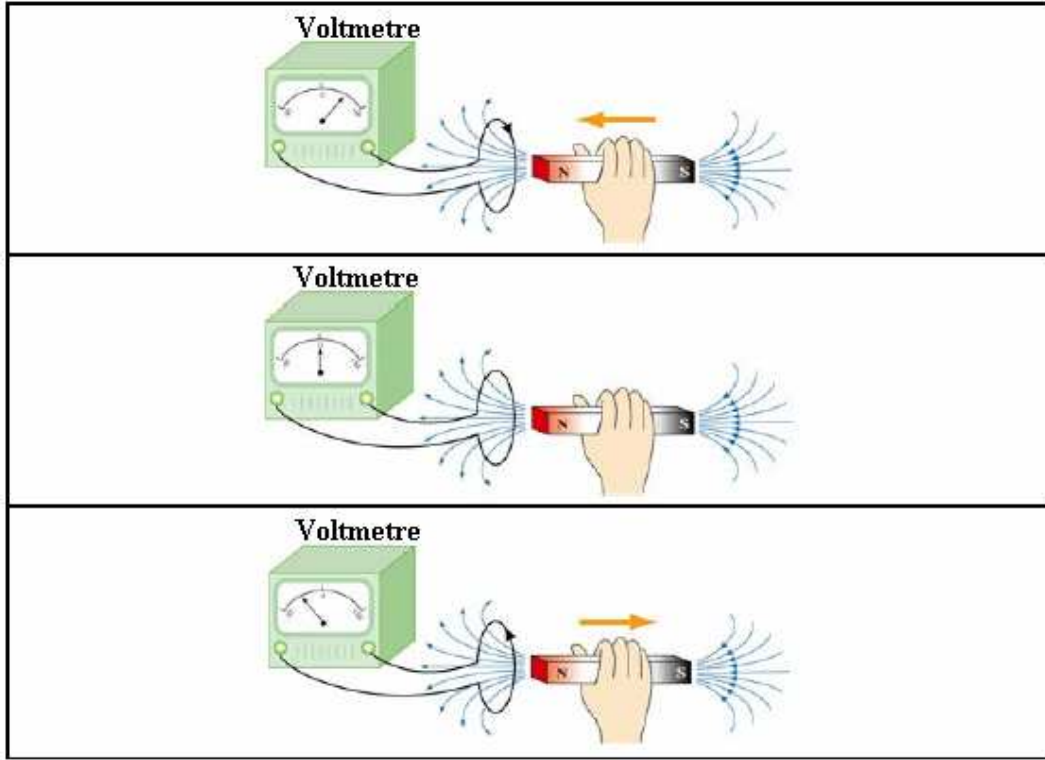
ELEKTRİK AKIMININ MAGNETİK ETKİLERİ

Propların girdap akımı testlerinde esas fonksiyonu, test malzemesi içerisine girdap akımlarını indükleyen AC magnetik alanlarını oluşturmaktır. Sonuç olarak elektrik akımının magnetik etkisi esas önceliklidir. Proplardan uyarma akımının akışı ile magnetik alanlar oluşur. Bunların esas amacı test malzemesine temas enerjisi vermek ve bu alanlar etkisinde test malzemesinin reaksiyonlarını gözlemek ve ölçmektedir. Propların belirgin indüktansı ve indüktif gerilim düşümü magnetik alan etkileri sonucunda görülür.

3.1 Faraday'ın İndüksiyon Denemeleri

1831 yılında, Michael Faraday zamana bağlı olarak değişen magnetik alanın elektrik akımı oluşturabileceğini göstermiştir. Bu kavram elektromagnetik indüksiyon olarak bilinmektedir. Bu sayede elektrik ve magnetizma arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Faraday yasasına göre bir devrede indüklenen elektromotor kuvvetinin büyüklüğü, devreden geçen magnetik akının zamanla değişim hızıyla doğru orantılıdır.

Faraday ilk deneylerine ağaç bir silindir üzerine yan yana ve arası yalıtılmış iki sarım sararak (bobin) başlamıştı. Sarımlardan birisinin uçlarını bir pile ve diğer sarımın uçlarını da bir galvanometreye bağlamıştır. Faraday pile bağlı sarımlardan ne kadar akım akarsa aksın diğer sarımdan akım akmadığını bulmuştur. O çok can alıcı bir gözlemde bulunmuştu. Aslında o, pili devreye bağladığı ve kestiği anlardaki galvanometredeki anlık sapmalara bir yorum getirmişti. Bu yüzden elektromagnetik indüksiyonu keşfetmiş ve deneyle de göstermiştir. Takip eden deneylerinde Faraday, demir çekirdek üzerindeki sarımlarla indüklenen akımın akışının magnetik akıdaki değişimlerin sonucu olduğunu da göstermiştir. Magnetik akıdaki değişiklik enerji verilen sargılardaki değişken akım akışından kaynaklanmıştır.



Şekil 3.1 Faraday'ın denemelerinde elektromagnetik indüksiyon.

Faraday daha ileriki deneylerinde indüklenen akımların bir tel bobinin içerisinde bir mıknatıs geçirilerek de elde edilebileceğini ve bu etkiyi sağlamak için gerekli olan şeyin bobin ve mıknatısın birbirleri arasındaki relatif hareket olduğunu göstermiştir. Şekil 3.1 Faraday'ın bu deneylerini özetlemektedir. Faraday çubuk mıknatısın bobine göre hareketsiz olduğu durumda voltmetrede bir hareket gözlememiştir. Buna rağmen, çubuk mıknatıs ve bobin arasında relatif bir hareket olduğu durumlarda bir akımın indüklendiğini ispatlamıştır. Deneysel olarak voltmetrenin ibresinin çubuk mıknatıs bobine yaklaşırken bir yöne, uzaklaşırken diğer yöne saptığını gözlenebilir. Deneysel olarak bulunan bir diğer sonuç da indüklenen elektromotor kuvvetin bobinden geçen magnetik akının miktarı ile ilişkili olduğudur. Diğer bir deyişle Faraday'ın deneyleri bobin halkasında indüklenen elektrik akımının magnetik alandaki değişim sonucu oluştuğunu göstermiştir.

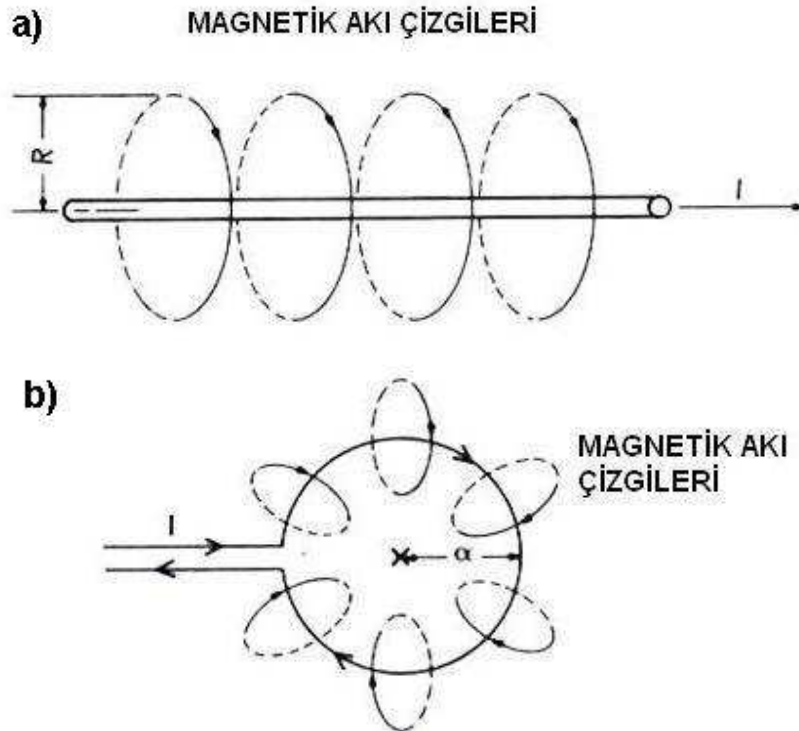
3.2 Akım Taşıyan İletkenlerin Magnetik Alanı

Akım taşıyan iletken bir magnetik alanla çevrelenmiştir ve uzun düz bir iletken tek yönlü bir akım taşıyor ise magnetik kuvvet çizgileri (ya da akı) iletkenin ekseni çevresinde kapalı dairesel bir yörüngededirler. Elektrik akımının sağa doğru olduğu varsayılırsa akı çizgilerinin yönü herkesce bilinen sağ el kaidesi ile bulunur. Şayet sağ el baş parmağı akımın akış yönünde tutulursa ve tel avuç içerisinde tutulursa iletkeni saracak şekilde parmaklar kapatıldığında magnetik akı çizgilerinin pozitif yönü bulunmuş olur (Şayet bir pusula bu dairesel magnetik alana getirilirse, pusulanın ibresi kendisini akı çizgilerine uyacak şekilde ayarlayacaktır). Magnetik akı yoğunluğu B , sonsuz uzunlukta ve akım taşıyan iletken ve R (m) radyal uzunlukta iken (2.1) formülünden tesla cinsinden türetilebilir.

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot R} \quad (3.1)$$

I : iletkenen geçen akım (amper)

μ : malzemenin permeabilitesi (henry /metre)



Şekil 3.2. a) Uzun bir iletkende oluşan b) Dairesel akım taşıyan iletkende oluşan magnetik alan.

Bu formüldeki ilişki akı yoğunluğu vektörü B 'nin iletkeni tüm çevresini kapsayan kapalı bir zarf şeklinde düşünülüp entegre edilirse aşağıdaki denklem (3.2) haline dönüşür.

$$\int B \cdot dl = \mu \cdot I \quad (3.2)$$

Sonsuz uzunlukta akım taşıyan iletkenin yüzeyinde maksimum olan akı yoğunluğu eksenden uzaklaştıkça hızla azalır. Denklem (3.1) ve (3.2)'deki permeabilite μ değeri doğrudan doğruya test malzemesi ile ilişkilidir. Genelde izotropik malzemelerde permeabilite;

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_{rel} \quad (3.3)$$

ile verilir.

μ_0 : boşluğun permeabilitesi ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ henry/metre)

μ_{rel} :relatif permeabilite (boyutsuz)

Relatif permeabilite hava ve ferromagnetik olmayan malzemeler için pratiklik amacıyla 1 olarak alınabilir. Malzemenin ferromagnetik olması durumunda relatif permeabilite sabit bir değer değildir ve akı yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Bununla birlikte girdap akımı testleri düşük magnetizasyon değerlerinde yapılıyorsa, permeabilite çok küçük hatalar göz ardı edilerek sabit alınabilir. Permeabilite konusu Bölüm 8'de detaylı olarak incelenecektir.

3.3 Magnetik Alan

Denklem (3.2)'yi malzemedan bağımsız hale getirmek için magnetik alan H 'yı tanımlamak fayda sağlar. H (amper/metre)

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4), denklem (3.2) ve (3.3)'de yerine konulursa

$$\int H \cdot dl = I \quad (3.5)$$

N tur sarımlı bir bobin olması durumunda integralin sınırları bir turdan fazla alınır.

$$\int H \cdot dl = N \cdot I \quad (3.6)$$

$N \cdot I$ ifadesi magnetomotor kuvveti (MMK) olarak bilinir. Yine denklem (3.1)'den sonsuz uzun bir iletkende radyal R mesafedeki magnetik alan

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (3.7)$$

türetilir. Akım taşıyan R yarıçapında N sarım sayısındaki bir bobinin merkezden z metre mesafede alan şiddeti H_z aşağıdaki gibi verilebilir.

$$H_z = \frac{N \cdot I \cdot R^2}{\sqrt{(R^2 + Z^2)^3}} \quad (3.8)$$

Tüm çevredeki akı yoğunluğu ise;

$$B_z = \frac{N \cdot I \cdot \mu \cdot R^2}{\sqrt{(R^2 + Z^2)^3}} \quad (3.9)$$

3.4 Magnetik Akı Kavramı

Toplam magnetik akı ϕ , tek bir akım taşıyan iletken ile veya magnetik akı yoğunluğu B 'nin tüm magnetik akı çizgilerini kapsayacak şekilde entegre edilmesi ile ilişkilidir. Uzun ve düz bir iletken durumunda integral alanı, iletkenin dış

çevresinden sonsuza kadar olan radyal düzlem formunda alınabilir. Akım taşıyan halka veya bobin durumunda tüm magnetik akı çizgilerinin entegre edilmesi mümkündür.

$$\phi = \iint B.dA \quad (3.10)$$

veya üniform magnetik akı yoğunluğu B tüm alan için toplanırsa;

$$\phi = B.A \quad (3.11)$$

Magnetik akı birimi MKSA birim sisteminde weber'dir (1 weber= 10^8 maxwell).

Bir magnetik akı zinciri, akım taşıyan iletkeni 1 tur çevreleyen 1 weberlik magnetik akı olarak tanımlanır. Toplam magnetik akı ψ , sarım sayısıyla tüm magnetik akıların toplamalarının çarpımına eşittir.

$$\psi = N.\phi \quad (3.12)$$

MKSA birim sisteminde akı zincirleri birimi weber-tur'dur.

3.5 Self İndüktans Kavramı

İndüktans elektrik devrelerinin ana elemanıdır. Tıpkı mekanik sistemlerin ana elemanı olan kütleyle benzetilebilir. Self indüktans (L) sistemin toplam magnetik akının, onu oluşturan akımın büyüklüğüne oranıdır.

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N.\phi}{I} \quad (3.13)$$

L , self indüktans (henry), ψ , toplam akı (weber-tur), N , tur sayısı, I , magnetizasyon akımı (amper) ve ϕ magnetik akı (weber) olarak ifade edilir. Buradan,

$$L.I = \psi = N.\phi \quad (3.14)$$

Lenz kanununa uygun olarak magnetik alanın reaksiyonu, daima self indüktanstan geçen elektrik akımındaki değişimin tersi şeklinde olur.

3.6 Elektromagnetik İndüksiyonda Faraday Kanunu

Faraday kanununa uygun olarak, bir elektromotor kuvveti (emf) bir elektrik devresinde akımın büyüklük olarak değişmesiyle akı zincirleri üzerinde indüklenir. Bu elektromotor kuvveti (emk) akımın zamana oranı ile orantılıdır ve (3.15) ile verilir.

$$EMK = e = \frac{d\psi}{dt} = L.\frac{dI}{dt} = N.\frac{d\phi}{dt} \quad (3.15)$$

EMK : indüklenen elektromotor kuvveti (volt)

ψ : toplam akı zincirleri (weber-tur)

t : zaman (saniye)

I : akım (amper)

L : self indüktans (henry)

ϕ : eşlenik magnetik akı (weber)

N : magnetik akı ile eşlenik tur sayısı

Lenz kanunu uyarınca indüklenen EMK'nın yönü magnetik alanda oluşan değişmenin zıt yönünde akan bir akım oluşturma yönündedir. Tam tersi düşünülürse, magnetik alanın reaksiyonu elektrik akımının büyüklüğündeki değişimin daima tersi yönündedir. Örneğin, bir iletkenin akan elektrik akımındaki ani bir kesilme, iletkenin uçları arasında oldukça büyük bir gerilim indüklenmesine neden olur. Gerilimin doğrultusu akan akımın orijinal yönünü ve büyüklüğünü koruma eğilimindedir.

BÖLÜM DÖRT

MAGNETİK DEVREYE EŞDEĞER ELEKTRİK DEVRELERİ

Elektromagnetik test teknikleri test edilen malzemenin elektromagnetik enerji ile ilişkisinin analizi üzerine dayanır. Enerji, malzemeye alternatif akım kaynağı tarafından uyarılan test bobini tarafından aktarılır. Bu kavram ortak eşdeğer devrelere benzer varsayılabilir.

4.1 Ortak İndüktans Kavramı

İki veya daha fazla elektrik devre elemanı bir ortak magnetik alanda birleştirilirse ortak indüktans etkisi altına girerler. Ortak birleşme ile bir devre elemanındaki akımların oluşturduğu magnetik akının bazı çizgileri diğer devre elemanının iletkenini sarar ve eşlenik akı zinciri üretir. Örneğin, 2 dairesel bobin yüz yüze getirildiğinde Şekil 4.1 (a)'da olduğu gibi bir bobindeki akımın oluşturduğu magnetik akı çizgilerinin pek çoğu ikinci bobinin içinden de geçer. Her iki bobinin içerisinden geçen bu akı çizgilerine ortak akı çizgileri denir ψ_{12} .

Yüz yüze getirilen iki bobinin arasındaki mesafeye ve giriş akımına bağlı olarak, bobin 1'deki akımın oluşturduğu akı çizgilerinin bazıları bobin 2'ye geçerken yok olabilir. Bunlar çoğu zaman bobin 1'in kaçak akısı olarak adlandırılır. Bunlar bobin 1'in self indüktansı L_1 'e katkıda bulunurken ikinci bobine herhangi bir etki yapmazlar. Benzer şekilde sadece bobin 2'nin sargılarından da akım geçerse bobin 1'in içerisinden geçen akı çizgileri ortak akı zincirleri ψ_{21} 'i oluşturur. Bobin 2'den geçen akımın oluşturduğu ve bobin 1'in içinden geçen akı çizgileri bobin 1'e bir etki yapmazlar. Bununla beraber L_2 ile bilinen bobin 2'nin self indüktansına katkıda bulunurlar.

Ortak indüktans her iki bobinin içerisinden geçen akı çizgisi zincirlerinden dolayı birbirine eşittir ($M_{12} = M_{21}$). Bu bağıntılar aşağıdaki denklemde (4.1) verilmiştir.

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{I_1} = \frac{N_2 \cdot \phi_{12}}{I_1} = M_{21} = \frac{\psi_{21}}{I_2} = \frac{N_1 \cdot \phi_{21}}{I_2} \quad (4.1)$$

$M_{12} = M_{21}$: her iki bobinin ortak indüktansı (henry)

ψ_{12} : bobin 1 akısı tarafından oluşturulan ve bobin 2 içerisinde geçen akı

ψ_{21} : bobin 2 akısı tarafından oluşturulan ve bobin 1 içerisinde geçen akı

I_1 : bobin 1'den geçen akım (amper)

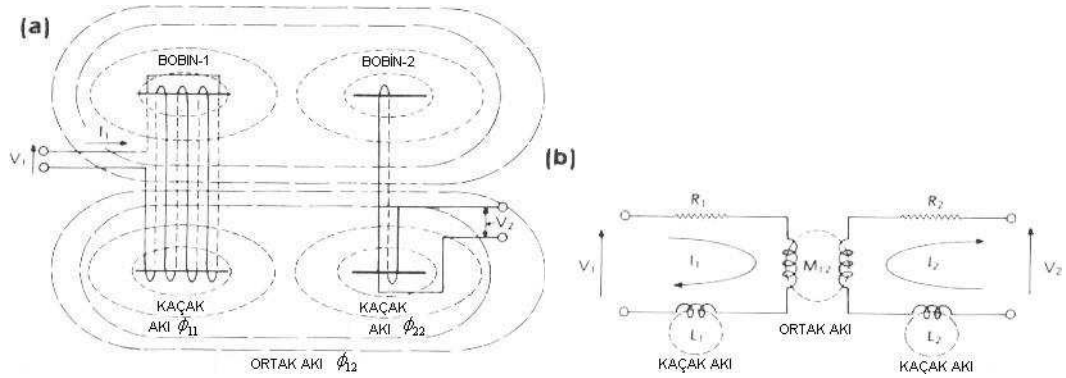
I_2 : bobin 2'den geçen akım (amper)

N_1 : bobin 1'in tur sayısı

N_2 : bobin 2'nin tur sayısı

ϕ_{12} : bobin 1 akımı tarafından oluşturulan ve bobin 2'ye geçen ortak akı

ϕ_{21} : bobin 2 akımı tarafından oluşturulan ve bobin 1'e geçen ortak akı



Şekil 4.1 Ortak ve kaçak akılar.

4.2 Kaçak indüktans kavramı

Şekil 4.1 (a)'da magnetik akının bazı çizgilerinin bobin 1 ve bobin 2 ile birlikte temaslı olmadığı görülür. Bu magnetik akı çizgileri kaçak magnetik akı çizgileri olarak bilinir. Bu kaçak akı çizgileri tek bobinin self indüktans bileşenine katkıda bulunur. Self indüktanslar (4.2) formülleriyle belirtilir.

$$L_1 = \frac{\psi_{11}}{I_1} \quad \text{ve} \quad L_2 = \frac{\psi_{22}}{I_2} \quad (4.2)$$

Bu self indüktanslar denklem (3.13)'de geçen self indüktansla benzerdir ve her birinin devreye benzer etkisi vardır.

4.3 Ortak İndüktansların Transformatör Davranışı

Bir elektrik transformatörü indüktif olarak birbirine bağlı 2 devre şeklinde düşünülebilir (Şekil 4.2). Transformatörler, bir devrede AC gerilimini arttırmak veya azaltmak amacıyla kullanılır. Tipik bir transformatör telden sarılmış 2 adet sargı, primer ve sekonder, ve demir bir nüveden oluşur. N_1 tur sayısındaki primer sargı alternatif gerilim kaynağı $V_1(t)$ 'ye, N_2 tur sayısındaki sekonder sargı da yük direnci R_2 'ye bağlanır. Transformatörlerin çalışma prensibi primer bobindeki alternatif akımın indüklediği alternatif elektromotor kuvvetin, sekonder bobinde ortak indüktans oluşturmasıdır.

Primer devreye, sargının direnci ihmal edilerek, Faraday'ın indüksiyon yasası uygulanırsa, Transformatörün ikincil sargılarında indüklenen gerilim, ikincil sargılardaki akı çizgilerinin zamanla değişimiyle orantılıdır. Ana sargılardaki akım değişimlerinin oluşturduğu magnetik alan değişimleri dönen akı çizgileridir. Şayet Şekil 4.1 (b)'de bobin 1 dış bir kaynak ile akım verilerek uyarılırsa (ana sargılar), bobin 2'de Faraday indüksiyon kanununda verilen bir gerilim indüklenir (bkz. denklem 3.15)

$$V_2 = M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (4.3)$$

bulunur. Burada ϕ , primer sargının her bir turundan geçen magnetik akıyı göstermektedir. Primer sargıdan sekonder sargıya ulaşan nüve, primer sargının oluşturduğu magnetik akının hemen hemen tamamını sekonder sargının her bir sargısına iletir. Diğer yandan şayet bobin 2 dış bir kaynak ile akım verilerek uyarıldığında da bobin 1'de bir gerilim indüklenenecektir.

$$V_1 = M_{21} \cdot \frac{dI_2}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dt} \quad (4.4)$$

İdeal bir transformatörde, ısıya dönüşen güç kayıpları ihmal edildiğinde, Primer sargıda üretilen güç tamamen sekonder sargıya iletilir. $I_1 V_1 = I_2 V_2$

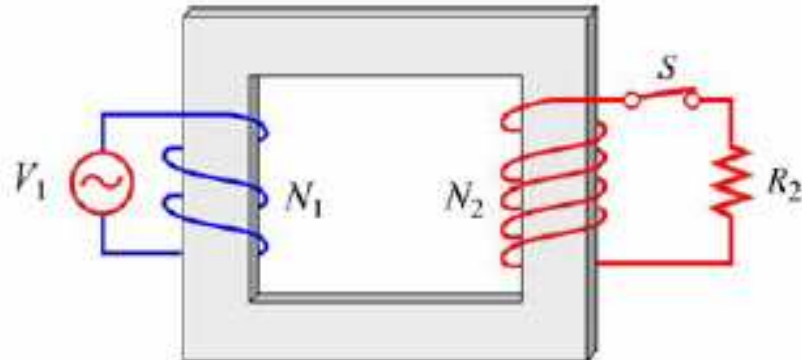
$M_{12} = M_{21}$ 'e eşit olduğundan ve ortak akımın her iki bobini de kapsamasından dolayı her bir bobinde eşdeğer gerilimler indüklenir. Bu indüklenen eşdeğer gerilimler sargıların sarım sayısı ile orantılıdır (Kaçak akı etkileri ve dirençten doğan gerilim düşümleri ihmal edilir).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = TR \quad (4.5)$$

Burada TR bu iki bobinin sarım oranlarını ifade eder. Yüksek permeabiliteli nüvesi bulunan ideal bir transformatörde ana sargıların amper-turu, ikincil sargıların amper-turu ile eşittir. İdeal kapalı bir çevrimde kısa devre durumunda;

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad \text{ve} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = TR \quad (4.6)$$

bulunur. Her iki sargının sarım sayısı ile akımlar ters orantılıdır.



Şekil 4.2 Örnek bir transformatör.

4.4 Ortak İndüktans Devrelerinde Gerilimler

Pratikte hava nüveli transformatör veya ortak indüktans devreleri, self indüktansları ile birlikte iki bobin sargısı içerir. Bu şartlar altında sargıların uçları arasındaki toplam gerilim;

1. Ortak indüktans etkileri tarafından indüklenen gerilimlerin,
2. Self indüktans etkileri tarafından indüklenen gerilimlerin ve
3. Sargıların direnci dolayısıyla akan akımın oluşturduğu gerilimlerin

toplamı şeklinde verilir.

Bu durumda bobin 1 ve bobin 2'nin uçları arasında görülecek toplam gerilimler;

$$V_1 = M_{21} \cdot \frac{dI_2}{dt} + L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot R_1 \quad (4.8)$$

$$V_2 = M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2 \cdot R_2$$

şeklinde olur. Denklem (4.8)'deki ortak indüktansın işareti, analizde kullanılan gerilimlerin pozitif veya negatif oluşuna veya ikincil sargı devrelerinin bağlantı şekillerine bağlıdır. Ortak indüktansın işareti Lenz kanununa göre belirlenebilir.

4.5 Girdap Akımı Test Sistemlerinde Transformatör Etkisi

Tipik girdap akımı testlerinde kullanılan uyarma bobinleri ve test malzemelerini, hava nüveli ve iki sargılı transformatörlere benzetilebileceği daha önce belirtilmişti. Test parçası aslında tipik tek sarımlı bir bobin gibi de düşünülebilir. (Özellikle dairesel bobinle dairesel boru veya çubukların testi durumunda veya ince yaprak ve folyoların testinde)

Şayet test parçası tek bir halka şeklinde ise ve çapı test bobini çapı ile eşdeğer ise bu yukarıda verilen transformatör ilişkisi geçerlidir. Bununla birlikte pek çok test parçası uzundur, farklı şekillerdedir ve uyarma bobini ile test malzemesi arasındaki ilişki kompleks bir fonksiyonla belirlenebilir. Hem havadaki ve hem de test malzemesindeki elektromagnetik alanların oluşturduğu indüklenen akımların dağılımı Maxwell denklemlerine uygun olmaktadır.

Daha basit bir açıklama ile, tipik girdap akımı testlerinde propların uyarma bobinini primer ve tek turlu test malzemesini de sekonder olarak düşünmek kolaylık sağlayacaktır. Girdap akımları, test malzemesi üzerinde sadece primer magnetize akımındaki değişimin sekonder test malzemesindeki etkisi sonucu oluşur. Uyarma bobininin akısı test malzemesinde self indüktansın geriliminin etkisiyle azalır. Test bobininin gerilimi test malzemesi ile ilgili bir bilgi taşımazken; test bobini ile malzeme yüzeyi arasındaki mesafe ile değişim gösterir. Silindirik çubukların dairesel bobin ile testlerinde bu mesafe doldurma faktörü (fill factor) olarak adlandırılır ve bobin içerisindeki boşluğun test malzemesi ile doldurulma oranını belirtir. Prop bobin kullanılması halinde bu mesafe sıçrama (lift-off) şeklinde ifade edilir. Mesafe etkileri, uyarma bobinindeki veya uyarma bobinine çok yakın alıcı bobindeki ortak indüktans etkilerinden yararlanılarak dairesel bobin testlerinde silindirik çap ölçümü yapmak için kullanılabilir. Mesafe etkileri benzer şekilde prop-metal mesafesinin (lift-off) algılanmasında kullanılabilir (Schiebold ve Knöll,2006).

Girdap akımı testlerinde, test parçasının özellikleri ve boyutları transformatör etkisi sonucunda uyarma ve alıcı bobininin gerilimlerini etkiler. Ortak indüktans etkilerinin sonucu indüklenen gerilimler, eşlenik sargıların sarım sayısı ile orantılıdır (Denklem 4.5). Ana ve ikincil akımlar, sarım sayılarının tersi ile ilişkilidirler (Denklem 4.6).

Test malzemesinden I_2 akımının aktığı ve sekonder veya test malzemesindeki reaksiyonla ilişkili olarak primer bobinin gerilimini veren bağıntı aşağıdaki gibi türetilebilir.

$$V_1' = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_2 \cdot R_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot I_1 \cdot R_2 \quad (4.9)$$

Buradan test bobininin uçları arasında görülen toplam gerilim (4.8)'de yerine konularak, uyarma bobininden alternatif akım akışındaki dinamik durum için

$$V_1 = \left[R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 \right] \cdot I_1 + L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (4.10)$$

çıkartılabilir.

Denklem (4.9) ve (4.10), $N_2 = 1$ olduğunda V_1' 'nin N_1^2 , R_2 ve I_1 'in bir fonksiyonu olduğunu gösterir. R_1 'deki gerilim düşümü ($I_1 \cdot R_1$) sadece limit bobin akımında oluşur ve parçadan bir bilgi içermez. $L_1 \cdot \left(\frac{dI_1}{dt} \right)$ terimi bobin ve hava arasındaki gerilim düşümünü ifade eder ve self indüktastan gelen gerilim yok sayılabilir. Bu durumda da V_1' , N_1^2 , R_2 ve I_1 'in bir fonksiyonu haline gelir.

$$V_1' = f(N_1^2, R_2, I_1) \quad (4.11)$$

V_1' 'nin artması N_1 veya I_1 'den birinin veya her ikisinin birden artışı ile gerçekleştirilebilir. Yalnızca N_1 'in artması L_1 'i artırır ve I_1 'i düşürür. Çok açıkça görülür ki, $N_1 \cdot I_1$ 'in artması (girdap akımlarını oluşturan amper-tur'lar) cevap V_1' gerilimini artırır ve kontrol edilmez. Zira N_1 ve I_1 ters orantılıdır ve birinin etkisi diğerini yok eder. Daha ileride test hassasiyetinin artırılması amacıyla artırılması düşünülebilir.

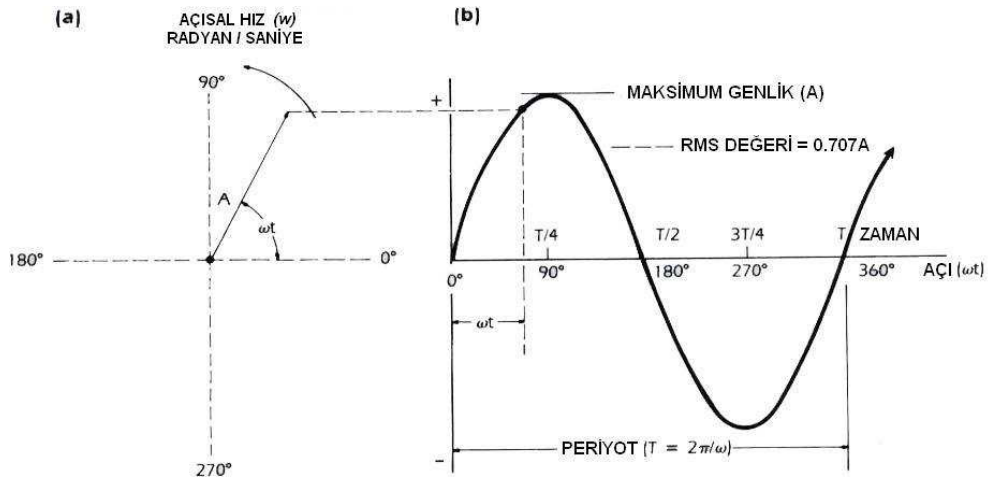
BÖLÜM BEŞ

ALTERNATİF AKIM (AC) DEVRELERİNDE ZAMANA BAĞLI PARAMETRELER

Büyük bir çoğunlukla girdap akımı test sistemlerinde propların uyarılmasında sinüzoidal alternatif akım kullanılır. Buraya kadarki rezistans ve indüktans açıklamalarında özellikle doğru akımın veya gerilimin anlık değerleri incelenmişti. Alternatif akım sistemlerinde elektrik akımları, gerilimler ve magnetik alanlar zamanın trigonometrik (sinüs, kosinüs) fonksiyonlarıdır. Zamanla sinüzoidal, zamanla değişen fonksiyonların analizlerini kolaylaştırmak için kompleks sayılar ve fazör analizleri kullanılmaktadır.

5.1 Sinüzoidal Fonksiyonlar

Şekil 5.1 genel olarak tek frekanslı alternatif akım devresinde akımların ve gerilimlerin veya alternatif akımla uyarılan girdap akımı probu tarafından oluşturulan değişken magnetik alanın zamana bağlı sinüzoidal fonksiyonunu gösterir. Zamanın sinüzoidal fonksiyonu ω sabit açısal hızı rad/sn hızla dönen radyal çizginin düşey izdüşümü şeklinde çizilir. Şekil 5.1'de sol tarafta bu radyal çizgi görülmektedir. Dönen radyal çizginin düşey izdüşümü sağ taraftaki şekilde düşey koordinat eksenine izdüşürülmüştür. Burada görülen eğri A'nın genliği, açısal frekans ω ve faz açısı α ile de tanımlanabilmektedir.



Şekil 5.1 Sinüzoidal fonksiyon a) Doğru parçası ω açısal hızı ile dönmekte iken b) Dönen doğru parçasının sinüzoidal düşey izdüşümü.

5.2 Maksimum ve Efektif Değerler

Yukarıdaki şekilde A'nın pik veya maksimum değeri, dönen radyal çizginin uzunluğuna eşittir. Sinüzoidal fonksiyonun efektif değeri ise $0,707A$ veya $A/\sqrt{2}$ şeklinde tanımlanır. Sadece bir direnç içeren devreden alternatif akım geçerse veya alternatif gerilim direncin uçlarına bağlanırsa omik güç kayıpları oluşur. Direnç güç kayıpları denklem kullanılarak hesaplanabilir. Fakat bu durumda sadece alternatif akımın veya gerilimin efektif değeri kullanılmalıdır.

Efektif değer kullanılması devre analizlerinde kolaylık sağlar ve doğru akım devrelerine benzetilebilir. Bu efektif değerler AC akım ve gerilim ölçen cihazlarla ölçülebilir.

5.3 Frekans ve Periyot

Şekil 5.1'de görülen açısal frekans w , radyal çizginin açısal hızına eşittir (rad/sn). Bu çizginin tam turu tamamlaması, toplam yer değiştirmenin 360° veya 2π radyan olması için gereken zaman $T = \frac{2\pi}{w}$ sn olur. Sinüzoidal dalganın tam çevrimi için radyal çizgi de tam bir tur yapmalıdır. Bu radyal çizgi dönmeye devam ettiğinde, dalga şekli de kendini tekrarlar. Zamana bağlı olarak 1 tam çevrim, 1 pozitif pik değerinden bir sonraki pozitif pik değerine geçişi sinüzoidal dalga fonksiyonunun periyodu (T) olarak bilinir. Alternatif sinüzoidal fonksiyonun frekansı (f), AC akım veya gerilimin saniyedeki tamamlanmış çevrimlerinin sayısıdır.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{2\pi} \quad \text{ya da} \quad w = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \quad (5.1)$$

f : Alternatif dalganın frekansı (hertz veya çevrim/sn)

T: Alternatif dalganın periyodu (sn /çevrim)

w : Alternatif dalganın açısal frekansı (radyan/sn)

Girdap akımı testlerinde, test koşullarının kontrol edilmesinde test frekansı (f , hertz) büyük önem taşır. Magnetik alanın büyüklüğü ve neticesinde girdap akımlarının penetrasyon derinliği test frekansının seçimi ile bağlantılıdır ve kritik önem taşır. Ek olarak propların gerilimi ve empedans değerleri aynı şekilde test frekansının (f) seçiminde önem taşımaktadır. Pratikte girdap akımı testlerinde test frekansları 25Hz ile 2MHz arasında değişen değerlerde uygulanabilmektedir.

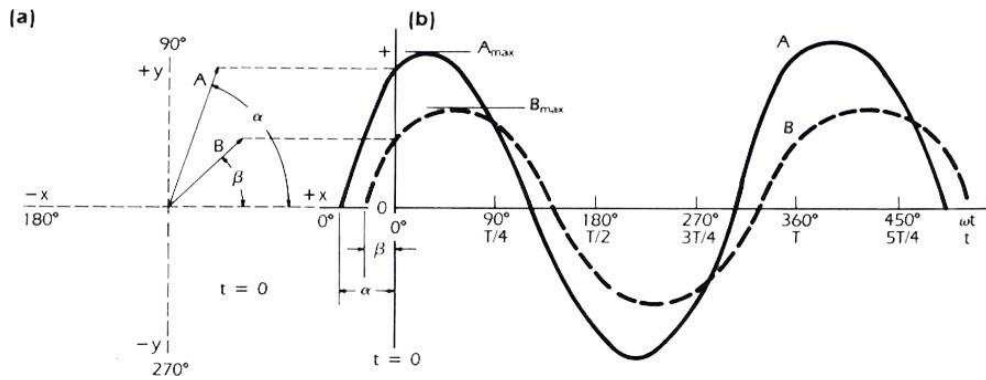
5.4 Faz Açısı

$$t_0 = \frac{\alpha}{\omega} \quad \text{ya da} \quad \alpha = \omega.t_0 \quad (5.2)$$

t_0 : Sinüzoidal dalganın zamanla hareketi

α : radyan olarak radyal çizginin açısal hareketi

ω : Sinüzoidal zaman fonksiyonunun açısal frekansı (rad/sn)



Şekil 5.2 İki sinüzoidal fonksiyonun (büyüklükleri ve faz açıları farklı) çizimi.

5.5 Sinüzoidal Fonksiyonların Matematiksel Bağlılıkları

Sinüzoidal dalga fonksiyonu matematiksel veya trigonometrik bağıntılarla verilebilir.

Örneğin Şekil 5.2'deki A 'nın fonksiyonu;

$$f(t) = y = A.\sin(\omega t + \alpha) \quad (5.3)$$

$$f(t) = y = A.\cos(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2})$$

Bu iki eşitlik $\sin\alpha = \cos(\alpha - \frac{\pi}{2})$ olduğu durumda birbirine eşittir. $\frac{\pi}{2}$ radyanlık açı 90° 'dir.

5.6 Faz Farkı

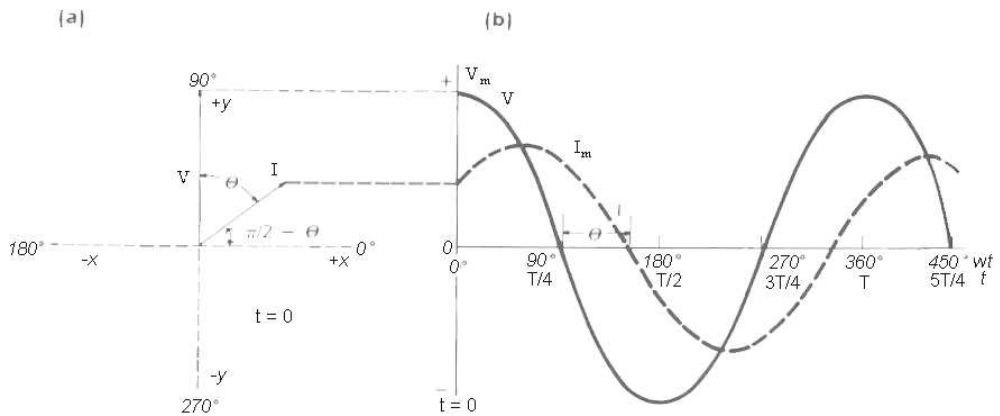
Şekil 5.3 aynı frekansta farklı genliklerdeki iki sinüzoidal zaman fonksiyonunun karşılaştırılmasını göstermektedir. Örneğin, voltaj fonksiyonu V ve akım fonksiyonu I , girdap akımı test sistemindeki proptan geçen gerilim ve akımı ifade eder. $t=0$ anında gerilim dalgası maksimum değerine ulaşmış durumdadır. Akım sinyali I , gerilim sinyalinden θ açısı kadar geriden geldiği varsayılabilir. Sinüzoidal fonksiyonlar olarak, gerilim ve akım sinyallerinin matematiksel bağıntıları

$$V = V_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = V_m \cdot \cos\omega t$$

(5.4)

$$I = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \theta\right) = I_m \cdot \cos(\omega t - \theta)$$

şeklindedir. θ açısı V voltaj çizgisini takip eden akım çizgisi arasındaki açıdır. Bu değer akım ve gerilim arasındaki faz açısı ya da gecikme açısı olarak adlandırılır.



Şekil 5.3 Girdap akımı testlerinde kullanılan gerilim ve akımın fazör ve sinüzoidal dalga gösterimleri.

BÖLÜM ALTI

KOMPLEKS BİLEŞENLERLE DEVRE ANALİZLERİ

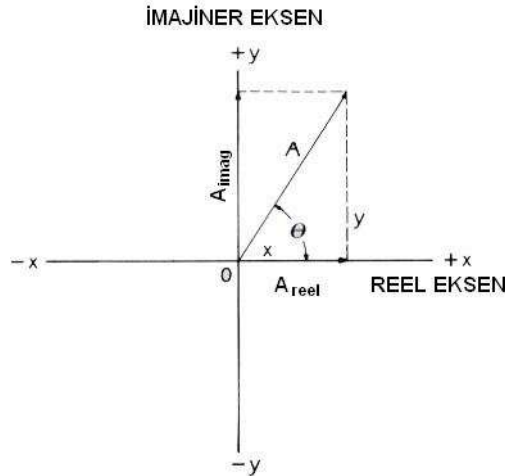
Fazörler ve kompleks bileşenler, tek frekanslı alternatif akım devrelerinde ve girdap akımı test sistemlerinin analizinde empedans parametrelerini ifade ederler. Kompleks sayılar reel ve imajiner olarak iki farklı sayı içerirler. Bunlar genellikle x-y grafiğinde çizilen bileşenler gibi kompleks sayı düzlemindeki bileşenleri ifade eder. Genellikle reel sayılar x yatay eksen boyunca çizilirler. İmajiner sayılar ise düşey y eksenini boyunca çizilirler. j sembolü kompleks bileşenlerde imajiner bileşenin karıştırılmaması için $j = \sqrt{-1}$ olarak kullanılır. Bir kompleks sayı;

$$A = A_{reel} + j.A_{imajiner} = x + j.y \quad (6.1)$$

şeklinde gösterilir.

Şekil 6.1'deki A kompleks büyüklüğünü ifade eder. A kompleks sayısının iki bileşeni dik kenarları oluştururken, üçgenin hipotenüsü A'yı gösterir. Pisagor teoremine göre üçgenin kenarları arasındaki bağıntı

$$|A| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6.2)$$



Şekil 6.1. Reel ve imajiner bileşenler.

6.1 Seri Bağlı Direnç ve İndüktans Devrelerinde Alternatif Empedans

Tek frekanslı alternatif akım ($i = I_{\max} \cdot \sin \omega t$) salt bir saf omik direnç R üzerinden geçirilirse direncin uçları arasında ohm kanununa göre gerilim düşümü olur.

$$V_R = i \cdot R = I_{\max} \cdot R \cdot \sin \omega t \quad (6.3)$$

Saf omik direnç R durumunda gerilim ve akım aynı fazdadırlar. Gerilim ve akımın maksimum ve efektif değerleri aşağıdaki gibidir.

$$V = I \cdot R \text{ ve } I = \frac{V}{R} \text{ ve } R = \frac{V}{I} \quad (6.4)$$

Bununla birlikte aynı sinüzoidal akım saf self indüktans L üzerinden geçerse Faraday'ın indüksiyon kanununa göre indüktanstan geçen gerilim anlık olarak akımdaki değişimin zamana oranı şeklindedir.

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{d(I_{\max} \cdot \sin \omega t)}{dt} \text{ ve} \quad (6.5)$$

$$V_L = \omega \cdot L \cdot I_{\max} \cdot \cos \omega t = \omega \cdot L \cdot I_{\max} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Bu durumda sinüzoidal gerilim V_L akımdan $\frac{\pi}{2}$ radyan ya da 90° ileridedir. Diğer bir deyişle akım gerilimi 90° faz açısı kadar geriden takip eder. İndüktans için gerilim ve akımın efektif değerleri

$$V_L = I \cdot \omega \cdot L \text{ ve } I = \frac{V_L}{\omega \cdot L} \quad (6.6)$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{V_L}{I} \quad (6.7)$$

X_L , self indüktans (L)'nin indüktif reaktansı olarak bilinir ve artan frekansla (f) artar. İndüktif reaktans gerilim ve akımın büyüklüklerinin oranını ölçtüğünden ohm (Ω) cinsinden ölçülür.

Alternatif akım durumunda, ($i = I_{\max} \cdot \sin \omega t$), seri bağlı direnç ve self indüktans devresinde Şekil 6.2'de görüldüğü gibi toplam gerilim Kirchoff kanununa bağlı olarak bulunur.

$$V_0 = V_R + V_L \quad (6.8)$$

$$V_0 = R \cdot I_{\max} \cdot \sin \omega t + L \cdot \frac{d(I_{\max} \cdot \sin \omega t)}{dt} \quad (6.9)$$

$$V_0 = I_{\max} \cdot R \cdot \sin \omega t + \omega \cdot L \cdot I_{\max} \cdot \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

ya da fazör gösterimiyle

$$V_0 = I \cdot R + j \cdot \omega \cdot L \cdot I = I \cdot (R + j \cdot X_L) \quad (6.10)$$

Toplam gerilimin akıma oranının seri bağlı AC empedans devresinde

$$Z = \frac{V_0}{I} = R + j \cdot \omega \cdot L \quad (6.11)$$

formülü ile verilir. Toplam empedans Z 'nin reel bileşeni direnç bileşeni olan R 'dir. Bu empedansın imajiner bileşeni ise indüktif reaktans $X_L = \omega \cdot L$ 'dir. Her ikisinin de birimi ohm olarak verilir. Empedans bileşenleri Şekil 6.3'deki üçgende pisagor teoremine göre belirlenir (Wirbelstromprüfung W1,1988).

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (6.12)$$

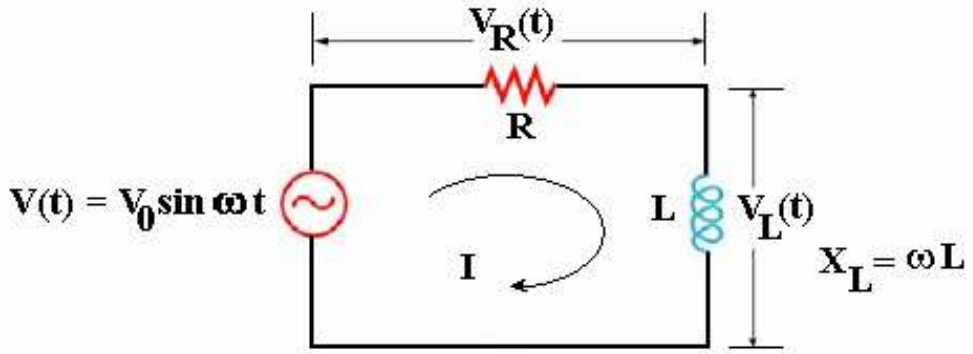
Empedans fazörü, Z , θ açısıyla görülür.

$$\tan \theta = \frac{X_L}{R} \quad \text{ya da} \quad \cos \theta = \frac{R}{Z} \quad \text{ya da} \quad \sin \theta = \frac{X_L}{Z} \quad (6.13)$$

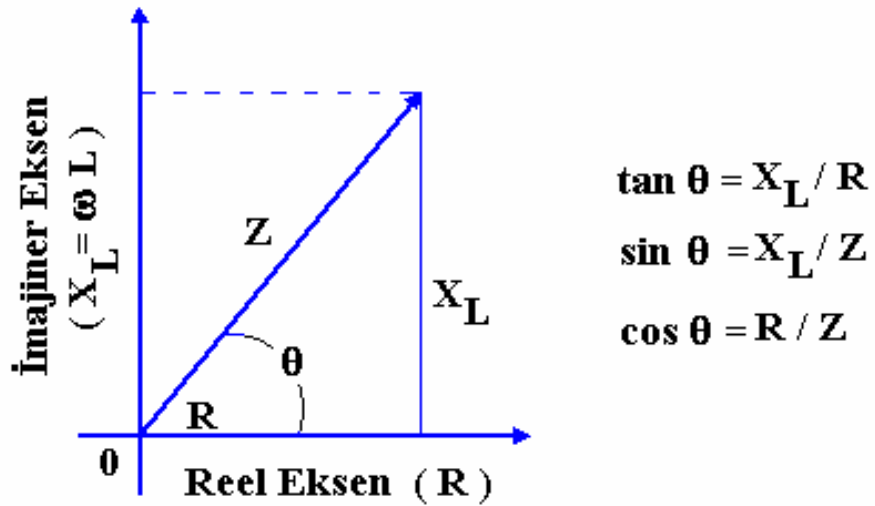
Empedans buradan

$$Z = R + j.X_L \quad (6.14)$$

olarak bulunur.



Şekil 6.2. Girdap akımı probuna eşdeğer elektrik devresi (R-L).



Şekil 6.3. Kompleks empedans düzleminde empedans bileşenleri.

6.2 R-L Devresindeki Empedansa Frekansın Etkisi

Rezistans ve indüktans içeren alternatif akım devresinde elektriğin frekansı değıştikçe empedansın büyüklüğü ve açısı da değışir. Çünkü indüktif reaktans bileşeni frekansla değışmektedir (Denklem 6.7, $X_L = \omega.L = 2.\pi.f.L$).

İndüktif reaktans frekansla doğru orantılıdır ve artan frekansla artar. Çok yüksek frekanslarda indüktif reaktans çok yüksek olur. Bu koşullar altında sabit AC gerilimi altındaki bobin akımı oldukça azalır. Bu yüzden sabit akım güç kaynakları kullanmak amper-tur kayıplarını ya da probun yüksek frekanslarda alan şiddeti kayıplarından korunmayı sağlar. Ek olarak frekans arttığında X_L ve $\tan \theta$ artar. Sonuç olarak seri bağı R-L devresinde akım ve gerilim arasındaki faz açısı 90° 'ye çıkar.

Frekansın daha küçük ikincil etkisi empedansın direnç R bileşeni ile ilgilidir. Çok düşük (frekanslarda veya doğru akımda $f=0$) akım taşıyan iletken kesitindeki akım yoğunluğu neredeyse üniform olma eğilimindedir. Bununla birlikte, alternatif akımın frekansı çok yüksek değerlere çıkarsa, deri etkisi (skin-effect) gözlenir. Bu durumda iletkenin dış yüzeyinde akımın yoğunluğu, iç bölgelerine kıyasla çok yüksek değerlere çıkar. Yüksek frekanslarda iletkenin ve test malzemesinin efektif AC direnci, DC ya da düşük frekanslardaki direncinden çok fazla olur. Bu durum ince kesitli iletkenlerde de aynı şekilde görülür.

BÖLÜM YEDİ

GİRDAP AKIMI TEST SİSTEMLERİNE VE PROPLARIN SINIFLANDIRILMASINA GENEL BAKIŞ

7.1 Girdap Akımı Test Sistemlerine Genel Bakış

Girdap akımı test sistemleri pek çok avantajları dolayısıyla geniş bir kullanım alanı edinmiştir. En büyük avantajı ölçüm işleminin tekrar edilebilirliğidir. Kalınlık ölçümü için kullanılan mutlak iletkenlik ölçer ve cihazları belirli metal ve alaşımları için %1'den daha hassas ölçümler yapabilmektedir. Karşılaştırma cihazları, malzeme geometrisindeki veya özelliklerindeki değişimlerin veya malzeme süreksizliklerinin algılanmasında çok hassastırlar ve bu testlerin de tekrar edilebilirliği oldukça yüksektir.

Referans standartlarda kullanılan delikler, çentikler, kademeli et kalınlıkları ve doğal süreksizlikler test esnasında cihazların kalibrasyonu, ayarı ve teste başlangıç için büyük kolaylık sağlar. Silindir simetrik ve basit yapılı test malzemelerinde ve özellikle ferromagnetik olmayan malzemelerde bu avantajlardan çok faydalanılır. Ferromagnetik malzemelerin testinde veya kompleks geometrilerde farklı bir takım zorluklar da vardır.

Magnetik bias (magnetik olarak doyurma) işlemi sayesinde ferromagnetik malzeme içerisine girdap akımlarının penetrasyon derinliği oldukça artar (Epik ve Karadeniz, 2001). Test parçasındaki yüzey süreksizliklerinin yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak test edilebilmesi, sertlik ve sertlik derinliği değişimleri ve magnetik permeabilitesindeki farklılıklar bu ölçme yöntemiyle test edilebilir. Çok büyük ve çok küçük çaplı çekme borular, miller, kaynaklı borular hatta profiller yöntemin uygulama alanı içerisinde bulunmaktadır. Hataların üzerinin otomatik olarak markalanması (boya tabancası ile) taşlama ve kaynakla tamire olanak sağlar. Çeliklerin üzerindeki süreksizliklerin test edilmesinde çok kullanılan bu yöntem, fiziksel ve metalurjik anlamda testler için pek uygun değildir.

Girdap akımı test sistemleri hatalı malzemenin otomatik olarak markalanması, ıskarta olarak ayıklanması, korna ve lamba gibi uyarma çıkışları proses kontrolü gibi pek çok işi aynı anda yapabilir.

Girdap akımı testlerinde bobin kullanılarak hataların tespitinde girdap akımı sinyallerinin sadece çok küçük değişimler göstermesi bir dezavantaj gibi gözükmemektedir. Bobin çapına oranla çok küçük hata büyüklüklerinin oluşturduğu süreksizlik sinyalleri ancak çok yüksek hassasiyetli devreler kullanılarak tespit edilebilir.

Bir diğer dezavantajı da yüksek frekanslarla test etme zorunluluğudur. Algılama bobinindeki gerilimin büyüklüğü test frekansı ile doğru orantılıdır. Şayet çok küçük frekanslarla test edilmeye çalışılırsa sinyal çok küçük olacak ve gürültü sinyalleri arasından tespit edilebilmeleri zorlaşacaktır.

Sabit voltajlı girdap akımı test sistemlerindeki dezavantaj da magnetizasyon akımının büyüklüğündeki değişimdir. Yüksek test frekansları test bobinindeki akımı verilen miktarda tutabilmek için yüksek güç kaynağı gerilimi gerektirir. Şayet test frekansı değişirse magnetizasyon akımı da değişir ve oluşan harmonik sinyaller girdap akımı sinyallerini karıştırır. Bu yüzden sabit akım magnetizasyonu elde edilemezse bunun yerine daha geniş bir frekans aralığında frekanslar denenerek sabit akım seviyeleri elde edilir.

Bir diğer sınırlama da sadece AC sinüzoidal uyarma akımlarının kullanılma zorunluluğudur. Bu sebeple girdap akımlarının temel parçası olarak yüksek frekans jeneratörleri (fonksiyon jeneratörü) kullanılır. Yüksek frekans jeneratörleri pratikte 100Hz ila 250kHz frekans aralığında ve kademeli olarak ayarlanabilir şekilde olmalıdır. Bobin sarımlarını besleyebilecek ve malzeme üzerinde girdap akımlarını indükte edebilecek kadar değişken gerilim ve sabit akım verebilecek şekilde dizayn edilmiş olmaları da gerekir.

7.2 Propların Sınıflandırılması

Yapılarına ve çalışma şekillerine göre çeşitlilik gösteren pek çok farklı prop çeşidi bulunmaktadır.

7.2.1 Çalışma Şekillerine Göre Proplar

Çalışma şekillerine göre proplar 3 farklı grupta incelenebilir:

1. Absolut (mutlak) girdap akımı propları
2. Diferansiyel girdap akımı propları
3. Mutlak ve diferansiyel girdap akımı propları (birleştirilmiş)

Absolut girdap akımı propları tek bir bobin veya eşdeğerinden oluşur. Bobin kapasitansını kompanze etmek için bazen sargılar iki veya daha fazla parçaya ayrılmış olsalar da yine de mutlak bobin olarak adlandırılırlar. Bu tip proplarda empedans ya da bobinde indüklenen voltaj doğrudan doğruya ölçülebilir. Genel olarak mutlak girdap akımı propları en kolay bulunabilen ve en yaygın olarak kullanılan proplardır.

Diferansiyel girdap akımı propları birbirine ters yönde sarılan bir çift bobin içerir ve şayet bu iki bobin birbirlerine tamamıyla eş üretilmiş ise ölçülen net empedans ya da indüklenen voltajlar ihmal edilir. Bu bobinler sadece test malzemesindeki değişikliklere duyarlıdırlar ve bu yüzden her iki bobinden gelebilecek istenmeyen sinyaller ve gürültüler giderildiğinde sadece test malzemesindeki değişikliklere yanıt verirler. Bunların malzemedeki süreksizliklere karşı gösterdikleri hassasiyet mutlak proplardan daha fazladır. Lift-off etkileri ve bobinin yalpalamasından doğacak hassasiyet azalmaları her iki prop tipi için eşit şekilde etki yaptığı unutulmamalıdır.

Birleştirilmiş proplar mutlak ya da diferansiyel şekilde çalışıyor olmalarına rağmen ayrı bir grup altında incelenmektedir. Bobinler gerçek yapılarına ve bağlantı şekillerine bağlı olarak çıkışları oldukça farklılık gösterir. Şöyle ki, örneğin, çok sayıda küçük bobin propların dış yüzeyi üzerinde seri bağlanmış olabilir. Bu

durumda prop, mutlak olarak sınıflandırılabilir. Aynı prop bobin çiftlerinin diferansiyel şekilde bağlanmasıyla diferansiyel prop olarak da sınıflandırılabilir. Benzer şekilde probu çoklu mutlak veya çoklu diferansiyel prop olarak kullanmak da olanaklıdır. Bu gibi durumlarda her bir bobin veya bobin çifti ayrı ayrı takip edilip incelenebilir. Böylece test malzemesinin çevresi boyunca hataların yerinin tespitinde farklılıklar görülebilir.

7.2.2 Hassasiyetlerine Göre Proplar

Prop karakteristiklerinde hassasiyet değişimlerini temel alan sınıflandırma yöntemine göre proplar iki farklı sınıfa ayrılabilir:

- 1) Empedans metodu
- 2) Gönderici - alıcı metot

Empedans metodunda sürücü (uyarıcı) bobin izlenmektedir. Çünkü bobin voltajındaki değişimler (sabit akım kaynakları için) veya bobin akımındaki değişimler (sabit gerilim kaynakları için) bobindeki empedans değişimleri ile ilişkilidir. Bu yüzden bu metot empedansta değişiklik yaratabilecek her türlü malzeme parametresinin algılanması için kullanılabilir. Tüm bu değişiklikler empedansın reel kısmı (iletkenlik, kayıplar v.s) ya da imajiner kısmındaki (permeabilite) değişikliklerle ilişkilidir.

Gönderici-alıcı metot, birbirinden ayrı sürücü (uyarıcı) bobin (bobinler) ve toplayıcı (algılayıcı) bobin (bobinler)'den oluşmuştur. Bu durumda algılayıcı bobinin uçları arasındaki indüklenen voltaj ölçülmektedir.

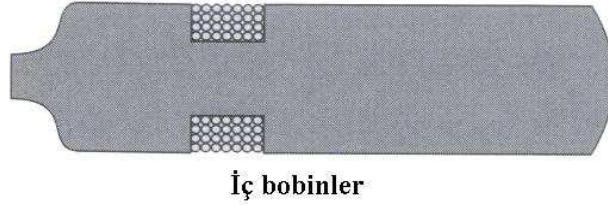
İki metot birbirinden çok farklı gözükse de temelde birbirlerine benzerler. Pratikte bir yöntem diğerinden daha uygun veya daha hassas görülebilir. Her iki metot da mutlak veya diferansiyel girdap akımı proplarında kullanılmaktadır.

7.2.3 Kullanım Yerlerine Göre Proplar

Kullanım yerleri ile ilişkili olarak proplar 4 kısımda incelenir:

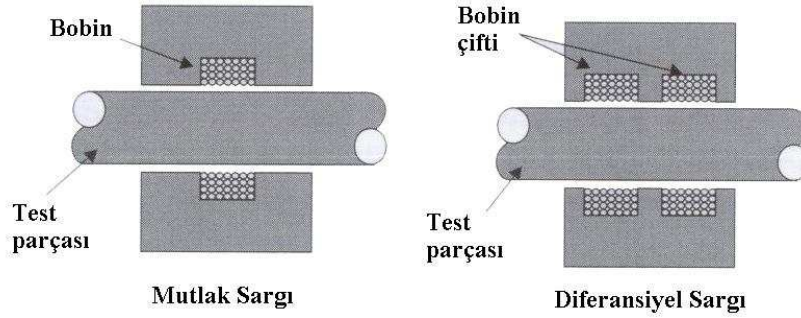
- 1) İç proplar (feed through)
- 2) Dairesel saran proplar (encircling coils)
- 3) Yüzey propları (surface)
- 4) Çatallı proplar (forked)

İç proplar dairesel delikleri ve boruların içlerini test etmek için kullanılan dairesel bobinler içerirler (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 İç proplar (bobinler).

Dairesel saran bobinler iç bobinlere benzer bir yapı gösterirler. Fakat burada test malzemesi bobinin içerisinden geçirilmektedir. Genellikle boru veya mil türü malzemelerin dış yüzeylerinin testi amacıyla kullanılırlar (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 Dairesel proplar (bobinler).

Yüzey propları girdap akımı proplarının en yaygın kullanılan şeklidir. Pek çok durumda düz bobinler, düz yüzeylerin veya oldukça büyük eğrilik yarıçaplı yüzeylerin testinde kullanılırlar. Yüzey proplarının tabanı test malzemesinin eğrilik şekline göre de yuvarlatılabilmektedir.

Çatallı bobinler genellikle düz, ince metal yaprakların testinde kullanılır. Bu tip proplar genellikle mükemmel lift-off özellikleri ve malzeme kalınlığına hassasiyetlerinin fazlalığı nedeniyle ince şeritlerin testi için özellikle uygundur.

Yukarıda bahsedilen her bir konfigürasyon değişik proplarda kullanılmaktadır. Örneğin iç bobinler mutlak veya diferansiyel olabilir, ya da empedans veya indüklenen voltaj ölçümlerinde kullanılabilir.

İkincil bir sınıflandırma metodu propların dış şekilleri ile ilişkili olarak yapılabilir. U nüveli proplar, E nüveli proplar, mantar proplar ve kalem proplar gibi. Çok yoğun kullanılmamalarına ve önemlerinin fazla olmamasına rağmen dış görünüşlerine ve dizaynlarındaki bazı özelliklerine bakılarak daha başka prop türleri ve isimleri de verilebilir. Proplara bazı örnekler Şekil 7.3’de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Bazı prop ve bobin örnekleri.

Çok rastlanılan bazı bobin türleri ile ilgili şematik gösterimler Şekil 7.4'de gösterilmiştir. Bu gösterimde boru ve mil kontrolllerinde kullanılan tipik bobinler şematize edilmiştir. (Schull,1997)

		ABSOLUT (MUTLAK)	DİFERANSİYEL
DAİRESEL BOBİNLER	Çift Sargı		
	Tek Sargı		
İÇ BOBİNLER			
YÜZEY BOBİNLERİ	Tek Sargı		
	Çift Sargı		

Şekil 7.4 Boru ve mil kontrolllerinde kullanılan değişik bobinler.

BÖLÜM SEKİZ

GİRDAP AKIMI PROPLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

8.1 Lift-Off Etkisi (Sıçrama)

Bir girdap akımı probu, probun dizaynına bağlı olarak bir empedansa (boş, nüvesiz bobinin empedansı) sahiptir. Bu, girdap akımı proplarının bir özelliğidir ve bazen de sonsuz *lift-off* empedansı olarak da adlandırılır. Probu test malzemesine doğru yaklaştırılmasıyla malzeme yüzeyine temas edinceye kadar empedansın reel ve imajiner bileşeni değişecektir. Temas durumunda sıfır lift-off empedansı oluşacaktır. Probu bu iki nokta arasında hareketiyle tanımlanan empedans eğrisi lift-off eğrisi olarak adlandırılır ve girdap akımı testlerinde çok önemli bir etkisi bulunmaktadır. Girdap akımı proplarının doğası gereği bu eğri lineer değildir. Alandaki değişiklik yüzeye yaklaştıkça büyür. Özellikle küçük çaplı propların kullanılması durumunda alanın hızla azalması çok belirgin lift-off etkisindedir. Büyük çaplı bir propta ya da çatal propta bu etki oldukça küçüktür.

Lift-off, pek çok zorluğu yüzünden minimize edilmesi gereken bir etki durumundadır. Lift-off etkileri sürücü propları veya multifrekans ölçüm metotları ile minimize edilebilmektedir. Aynı zamanda bazı girdap akımı testleri lift-off etkisine bağlıdır. Örneğin iletken bir yüzey üzerinde kaplanmış, iletken olmayan kaplama kalınlığı ölçümü ve yüzey pürüzlülüğü testleri bu etki yardımıyla yapılır.

8.2 Doldurma Faktörü (Fill Factor)

Dairesel bobinlerde lift-off etkisi yerine doldurma faktörü terimi kullanılır. Bu terim test parçasının bobini ne kadar iyi doldurduğunu ölçer. En büyük sinyaller malzemenin bobini tamamen doldurduğu durumlarda elde edilir (doldurma faktörü $\eta=1$). Aslında doldurma faktörü maksimize edilmek istenirse de bazı testler doldurma faktörü değişimlerine göre yapılmaktadır. Doldurma faktörü 0,5...1 arasında tercih edilmelidir (Schiebold ve Knöll,2006).

$$\eta = \frac{\text{Test malzemesi hacmi}}{\text{Bobin iç hacmi}} \quad (8.1)$$

8.3. Deri Etkisi (Skin Effect)

Girdap akımları test malzemesinde indüklenir, fakat tüm malzeme içerisinde üniform dağılım göstermez. Girdap akımları yüzeyde oldukça yoğundur ve malzeme içerisine girildikçe exponansiyel olarak azalır. Girdap akımlarının malzeme içerisine etkin olarak girebildiği derinlik penetrasyon derinliği olarak adlandırılır. Standart penetrasyon derinliği şu formülle hesaplanır.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (8.2)$$

δ : Standart penetrasyon derinliği (m)

σ : Malzemenin kondüktivitesi (iletkenlik)

f : frekans (hertz)

μ_r : relatif permeabilite

μ_0 : Boşluğun permeabilitesi (geçirgenlik)

Standart penetrasyon derinliği girdap akımı yoğunluğunun yüzeydeki değerinin 1/e (%37) sine düştüğü derinliktir (e =2,718281...). Bu, aynı zamanda deri derinliği olarak da bilinir. Pratikte 5 penetrasyon derinliğinde girdap akımı yoğunluğu yüzeydeki değerinin %0.7 sine düşer.

Denklem (8.2)'de görüldüğü gibi penetrasyon derinliği kondüktiviteye, permeabiliteye ve frekansa bağlıdır. Fakat örneğin 100kHz'de bakır için 0,2mm gibi küçük bir değerdir.

Deri etkisi girdap akımı proplarının dizaynında iki önemli sonucu karşımıza çıkarır. Birincisi girdap akımlarını yüzeysel testler için çok uygun hale getirmesidir. İkincisi ise, yüzey altı testleri için düşük frekanslar gerektirmesidir. Bu durumda deri derinliğini arttırmak için magnetik doyurma gibi özel tekniklere ihtiyaç vardır.

8.4. Magnetik Doyma

Magnetiklik malzeme içerisindeki moleküler ve atomik hareketlilikler ile tanımlanır. Her bir atom orbital moment, dönme momenti ve nükleer momentden oluşan toplam magnetik momente sahiptir. Magnetik momentler sadece harici bir magnetik alan olduğu durumlarda aktiftirler. Böyle bir magnetik alan olmadığı durumlarda ise magnetik olarak nötr olurlar. Bu harici magnetik alanlar da atomların tümünde Lenz kanununa bağlı olarak harici magnetik momentler üretirler. Malzemeler, diamagnetik, paramagnetik ve ferromagnetik olmak üzere 3 kısma ayrılırlar. Diamagnetik malzemelerin atomlarının bütün orbitalleri dolu ve dönme momentleri karşılıklı doyumda olduklarından aktif bir dış magnetik momentleri yoktur. Diamagnetik malzemelere örnek olarak bakır, kurşun ve çinko verilebilir. Bu malzemeler magnetik alanlarda hemen hemen hiç hareket etmezler ve çok hafif bir biçimde itilirler. Paramagnetik malzemelerde atomların orbitalleri ve dönme momentleri tamamen dolu olmadığından magnetik momente sahiptir. Bu momentler harici magnetik alanlarda kendilerini hizaya sokarlar ve paramagnetik malzemeler magnetik alanlarda çok hafif çekilirler. Paramagnetik malzemelere örnek olarak alüminyum, magnezyum ve kalay verilebilir. Ferromagnetik malzemelerde ise durum biraz farklıdır. Ferromagnetik malzemeler, rastgele sıralanmış pek çok küçük mıknatıştan oluşmuştur. Bu küçük mıknatışçıklar harici bir magnetik alan olmasa bile kuzey ve güney kutbu oluşturacak şekilde davranırlar. Ferromagnetik malzemelerin malzeme özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Magnetikleştirilebilme özelliği sıcaklıkla birlikte düşer ve Curie sıcaklığında ortadan kaybolurlar. Bu sıcaklık demir için 769°C , kobalt için 1120°C ve nikel için 355°C civarındadır.

Ferromagnetikliğin 2 özel türü antiferromagnetiklik ve ferrimagnetiklikdir. Antiferromagnetik malzemelerin içi ferromagnetik, dışı diamagnetiktir. Ferrimagnetik malzemeler (ferrit olarak da bilinirler), elektriksel iletken değildirler ve çoğunlukla demir ve mangan oksitden sinterlenerek üretilirler. Ferrimagnetik malzemeler girdap akımlarında yüzey çatlaklarının tespitinde kullanılan prop ve tarama bobinlerinin nüvelerinde kullanılırlar.

Ferromagnetik malzemelerin magnetik davranışlarını tanımlamak için permeabilite tanımı kullanılır. Permeabilite, magnetik akının iletilebilirliğini karakterize eder. Magnetik olamayan iletkenlerin girdap akımı testleri en kolay ve güvenilir olanlarıdır. Çünkü, test sistemi sadece elektrik iletkenliğinden etkilenir. Relatif permeabilite, vakum ortamına göre herhangi bir ortamda magnetik geçirgenliği ifade eder ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ V s/A m}$ veya $\mu_0 = 1,256637 \times 10^{-6} \text{ V s/A m}$) ve formül 8.3 ile tanımlanır (Wirbelstromprüfung W2,1986). Bazı malzemelerin relatif permeabiliteleri Tablo 8.1’de gösterilmiştir.

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (8.3)$$

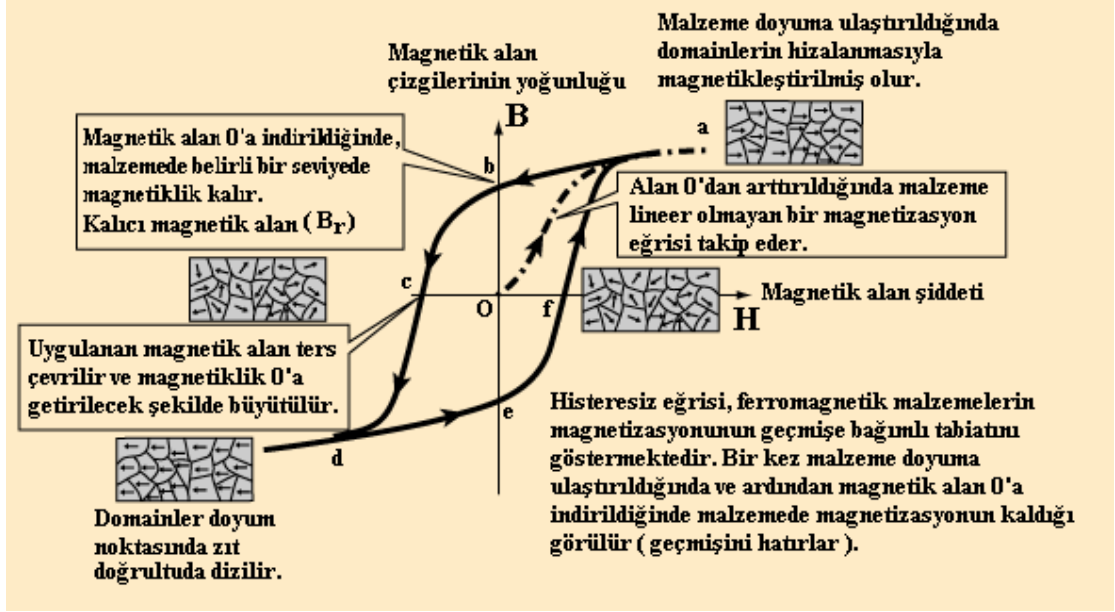
Tablo 8.1. Bazı malzemelerin relatif permeabiliteleri (Schiebold ve Knöll, 2006)

Magnetik malzemeler		Relatif permeabilite μ_{rel}
Diamagnetik malzemeler	Bakır	0,999993
	Bizmut	0,999847
	Cam	0,99999
Paramagnetik malzemeler	Aluminyum	1,000021
	Platin	1,000264
	Östenitik çelik (delta ferritsiz)	1,001...1,1
	Östenitik çelik (5% delta ferritli)	1.3
Ferromagnetik malzemeler	Saf demir	280.000
	Demir-Nikel alaşımları	15.000...300.000
	Demir-Silisyum alaşımları	10.000...20.000
	Demir-Kobalt alaşımları	2000...6000
	Nikel	2400
	Kobalt	245
	Dökme demir	350...550

Ferromagnetik malzemelerin testinde, eksklüzyonlar, dislokasyonlar, mekanik ve termal etkiler ve magnetik alanların etkileri permeabilitede küçük değişiklikler oluşturabilirler. Bunlar da girdap akımları için bozucu girişim sinyallerine neden olabilirler ve et kalınlığının herhangi bir yerinde kendilerini gösterebilirler.

Bu bozucu sinyalleri bastırmak ve gerçek hata sinyallerinden ayırtedebilmek için malzemelerin magnetik olarak doyurulması ile mümkün olabilir. Dışarıdan uygulanacak bir magnetik etki ile test edilen bölgeye komşu olan ve permeabilitesi değişiklik gösterebileceği için bozucu girişim sinyalleri verebilecek bölgeler önceden baskı altına alınmış olurlar. Bu nedenle ferromagnetik malzemelerin girdap akımları ile testinde magnetik olarak doyurulmaya ihtiyacı vardır.

Ferromagnetik malzemelerin magnetizasyon eğrileri histeresiz eğrileri olarak adlandırılır (Şekil 8.1). Bu eğriler, malzemenin kimyasal kompozisyonu ile değişim gösterir. Mıknatıslığı tamamen giderilmiş bir malzemeye değişken bir dış magnetik alan şiddeti uygulandığında, bu alan şiddeti ile akı yoğunluğu ölçülerek histeresiz eğrileri çizilebilir. Histeresiz, ferromagnetik malzeme kütesine etki eden magnetik alan şiddeti değiştirildiğinde, magnetik etkinin gecikmesi anlamına gelmektedir. Eğrinin düşey eksenini B , malzemedeki akı yoğunluğunu, H ise uygulanan alan şiddetini göstermektedir. Eksenlerin kesişim noktası, 0 , mıknatıslamanın olmadığı ve hiçbir kuvvetin uygulanmadığı durumu temsil eder. Magnetik alan şiddeti artırıldığında, akı yoğunluğu önce hızlı, sonra maksimum ya da doyma noktasına ulaşmaya kadar yavaşlayarak artar. Magnetik alan şiddetinin daha fazla artırılması akı yoğunluğunda bir artış meydana getirmez. Akı yoğunluğunun yükselişi noktalı çizgi ile gösterilmiştir. Magnetik alan şiddeti ters yönde 0 'a düşürüldüğünde B_r noktasında malzemede bir miktar mıknatıslanma mevcut kalır. Buna malzemenin artık mıknatıslığı (remanens) adı verilir. Mıknatıslama akımı ters çevrilerek yavaşça 0 'a düşürüldüğünde malzemedeki akı yoğunluğu azalır. Artık mıknatıslık c noktasında 0 olur. Yatay eksenindeki mesafe, giderme kuvveti (koersitif) olarak adlandırılır. Giderme kuvveti, mıknatıslanma sonrasında malzemelerdeki magnetik akı yoğunluğunu 0 'a indirmek için gerekli olan magnetik alan şiddeti değeridir. Bu noktadan magnetik alan şiddeti daha da artırılırsa malzeme tekrar doyuma ulaşır (d). Magnetik alan şiddeti tekrar yavaş yavaş 0 'a düşürüldüğünde, akı yoğunluğu bir miktar azalır (e). Bu noktada da malzemede bir miktar artık mıknatıslanma görülür. Magnetik alan ilk yönde artırılmaya devam edilirse artık akı yoğunluğu azalır ve f noktasında 0 olur. F noktasından magnetik alan artırılmaya devam edilirse başlangıç doyma noktasına (a) ulaşılır.



Şekil 8.1. Histeresiz eğrisi.

Histeresiz eğrisinin daralması malzemenin kolay mıknatıslanabileceğini ve düşük artık mıknatısa sahip olacağını, genişlemesi ise malzemenin zor mıknatıslanabileceği ve daha kuvvetli bir artık mıknatıslığa sahip olacağını gösterir.

Ferromagnetik malzemelerin girdap akımı testlerinde relatif permeabilite değişimlerinin etkilerinden uzak durabilmek amacıyla (a) noktasında çalışılmak hedeflenir. Bu amaçla yoğun dış magnetik alan kaynakları kullanılarak malzemeler geçici olarak ön mıknatıslanır. Tabi bu mıknatıslık etkisinin giderilmesi için demagnetizasyon işlemlerine ayrıca ihtiyaç duyulacaktır.

Ferromagnetik malzemeler Curie noktasının üzerine ısıtıldığında ferromagnetiklik ortadan kalkar (Epik ve Kardeniz,2001). Bu sayede sıcak tel ve millerin girdap akımları yöntemi ile kontrollerinde magnetik doyum kullanılmaz.

BÖLÜM DOKUZ

GİRDAP AKIMI PROPLARININ DİZAYNI

Girdap akımı propları oldukça basit prensiplere dayanır ve yapılarında bir veya birden fazla bobin içerir. Bobinin şekli, kesit alanları, boyutları ve çalışma tipleri belirli bir uygulama ya da uygulama aralığı için dizayn edici kişi tarafından belirlenir. Pratikte girdap akımı propları 2.5mm çaptan 300mm çapa kadar olabilir. Uzun, kısa, kare, yuvarlak veya elips kesitli olabilirler. Bu temel dizayn değişkenleri aşağıdaki ana parametreler temel alındığında aynı kalırlar:

1. Bobin indüktansı
2. Bobin rezistansı (omik direnç)
3. Yüzeyde alanın dağılımı
4. Malzeme özelliklerinin değişimiyle ilişkili bobin cevapları
5. Lift-off karakteristikleri
6. Çentik, delik veya diğer benzeri süreksizliklere alınan cevaplar

Ek olarak, kaynak özellikleri (güç, frekans), minimum veya maksimum gerekli alan, prop empedansı, bobinin özel şekilleri ve alanının dağılımı gibi parametreler de prosesi etkilerler.

Prop dizaynında 3 ana metot bulunmaktadır:

1. Deneysel veya ampirik dizayn
2. Analitik dizayn
3. Nümerik dizayn

Temel olarak proplar deneysel olarak dizayn edilebilir ve ardından analitik ve nümerik metotlar kullanılarak probun değişik parametreleri hesaplanabilir. Daha pratik olan yol ise, analitik bağıntılar kullanılarak temel gereklilikleri esas alan prop dizayn edilir ve ardından deneysel olarak performans değerlendirmesine tabi tutulur. Gerekirse kabul edilebilir bir dizayna ulaşıncaya kadar bu işleyişe devam edilir. Her

durumda çok keskin analitik hesaplamalar gerekmesi de basit prop parametrelerine ve mantıklı yaklaşımlara başvurulabilir. Bu anlamda propların nümerik dizaynı şu avantajlara sahiptir:

1. Proplar bütün komponentleri ile (bobin, nüve, yalıtım v.s) analiz edilir. Test ortamındaki prop karakteristikleri sonradan elde edilir.
2. Prop üretilmeden önce oldukça doğru bir dizayna ulaşılır.
3. Analitik ve deneysel olarak ulaşılamayacak durumlarda nümerik metotlarla analiz edilebilir (yüzey altı süreksizlikleri, katmanlı malzemeler v.s)

Bu yüzden genelde nümerik dizayn tercih edilmektedir. Literatürde ise girdap akımı araştırmalarında deneysel çalışmaların çokluğu göze çarpar. Tahribatsız muayenenin ilk zamanlarından beri baskın görülen de kesinlikle deneysel çalışmalardır. Deneysel dizaynlardaki sorun ise yapılan bobinin en iyi olup olmadığının ise bilinmesinin zor olmasıdır. Bu yüzden girdap akımı proplarının deneysel dizaynı kesin sonuçlar vermez. Deneysel çalışmalar genellikle deneme-yanılma prosedürü uygulanarak en uygun ölçüm sonuçları elde edilinceye kadar devam eder. Deneysel dizaynın karşılaştığı problemlerde de Maxwell denklemleri kullanılır. Daha hızlı, daha ucuz ve güvenilir dizaynlar deneysel olarak elde edilenlerdir.

Girdap akımı proplarının analitik dizaynında ise bobin empedansları veya gerekli empedansı verebilecek prop boyutlarının hesaplanması hedeflenir.

Prop parametrelerinin tamamı birbirinden bağımsız dizayn edilemez. Örneğin, verilen ve gerekli bir frekansta bilinen bir prop çapı ve reaktansı için bir prop dizayn etmek mümkün olmayabilir. Örneğin, boyu uzun ya da kısa gelebilir. Bu yüzden prop dizaynındaki temel analitik bağıntıların bilinmesi gerekmektedir.

9.1 Prop Omik Direncinin Hesaplanması

Herhangi bir bobinin empedansı reel ve imajiner bileşenlere sahiptir.

$$Z = R + j.w.L \quad (9.1)$$

Reel bileşen DC direncidir ve ohm kanununa göre

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (9.2)$$

Çok genel olarak bobinin yakınındaki bir iletken için empedansın reel bileşeni iletken gövde içerisindeki girdap akımı kayıplarının etkilerini de içerir. Prop dizaynında prop çapı genellikle en önemli parametre olduğundan probun ortalama çapına bağlı olarak R şu şekilde yazılabilir.

$$R = \frac{\pi.\rho.d.N}{A} \quad (9.3)$$

- N : Bobinin tur sayısı
 $\pi.d.N$: Toplam tel uzunluğu
 d : Bobinin ortalama çapı

Prop empedansının reel bileşeni için bu basit hesaplama sadece hava nüveli bobinler için kullanılabilir. Nüvenin magnetik veya iletken olduğu durumlarda kullanılmaz. Sıcaklık sabitse DC direnci aslında değişmez, fakat nüvedeki veya test malzemesindeki kayıpların eklenmesi gerekir. Kayıplar çok genel olmasa da hesaplanabilir ve bunun için basit formüller de mevcuttur. Bunun yanısıra ferrit malzemelerin özel yapılarından dolayı imalatçıların deneysel tablo ve verilerinden de yararlanılabilir.

9.2 Prop İndüktif Reaktansının Hesaplanması

En basit haliyle bobin reaktansı; sadece Denklem 9.1’de verilen indüktif reaktansın alınıp, ortak indüktansın ihmal edilmesiyle hesaplanabilir. Bu durumda havadaki bobin indüktansı, çok bilinen bir formül kullanılarak hesaplanabilir.

Başlangıç olarak, uzun, dairesel akım taşıyan levhadaki indüktans

$$L = \frac{4.\pi.A}{l}.10^{-7} \quad (\text{henry}) \quad (9.4)$$

l : levhanın boyu (cm)

A : bobinin kesit alanı (cm^2)

cinsinden hesaplanabilir. Fakat dizayn için bu formül kullanışlı değildir. Çünkü bobin pek çok bağımsız sargıdan oluşmuştur ve boyutu da oldukça kısadır. Bu yüzden Denklem 9.4’deki yaklaşım sadece üniform akım dağılımı ve uzun bobin şartlarında kullanılır. Bununla birlikte literatürde bu basit formül düzeltilerek pek çok bobin için kullanılmıştır.

Kısa, akım taşıyan selenoid sargı için Nagaoka düzeltmesi kullanılır. (Selenoidin uzunluğunun, bobin ortalama yarıçapına oranı küçük değil ise)

$$L = \frac{4.\pi.A}{l}.K.10^{-7} \quad (9.5)$$

K değeri Nagaoka formülü kullanılarak veya tablolardan r/l ‘ye bağlı olarak bulunabilir. K değeri, r/l 0’a yaklaştıkça 1’e doğru yakınsar. Yine de akım taşıyan levha ve yalıtılmış sargılara eşdeğer selenoid arasında daha ileri bir düzeltmeye ihtiyaç duyulur. Bu da aşağıdaki Denklem 9.6’da verilmektedir.

$$L = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot N^2}{l} \cdot K \cdot \left[1 - \frac{l \cdot (A + B)}{\pi \cdot r \cdot N \cdot K} \right] \quad (9.6)$$

A : $2,3 \log_{10} \cdot 1,73 d / p$

B : $0,336 \cdot (1 - 2,5 / N + 3,8 / N^2)$

p : sarım adımı

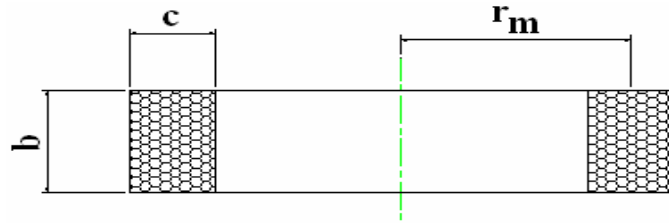
r : bobinin ortalama yarıçapı

K : Nagaoka sabiti

Formüldeki A faktörü tel çapı d ve sarım adımı p 'ye, B faktörü de N tur sayısına bağlıdır.

Girdap akımı propları genellikle kısa, çok katlı sarılmış ve dikdörtgen kesitli yapılırlar. Şekil 9.1'de görülen sargıların kalınlığı b ve genişliği c olacak şekilde dikdörtgen kesitli bobinlerde istenilen oranı verecek 2 bağıntı mevcuttur:

1. Oldukça uzun bobinler için $b > c$
2. Kısa ve düz bobinler için $b < c$



Şekil 9.1 Analitik dizaynlarda kullanılan bobin kesiti.

Temel seviye için $b \cong c$ alınabilir. 1. durum için

$$L = 0,019739 \cdot \frac{2r}{b} \cdot N^2 \cdot r \cdot (K - k) \quad (9.7)$$

Bu formülde K , b uzunluğunda bir selenoid için Nagaoka sabitidir ve $2r/b$ veya $b/2r$ 'nin fonksiyonu olarak tablolardan alınabilir. k büyüklüğü ise radyal doğrultuda sargıların yayılması dolayısıyla indüktansın azalmasını göz önüne alır. Bu da $c/2a$ ve c/b 'nin fonksiyonu olarak tablolardan alınabilir.

Benzer bağıntı segment bobinler için;

$$L = 0,001.(N^2.r.P.F) \quad (9.8)$$

şeklinde yazılabilir. P terimi $c/2a$ 'nın fonksiyonudur. F, radyal doğrultuda sargıların yayılması sonucu indüktansın azalmasını göz önüne alır, $c/2r$ veya c/b 'nin bir fonksiyonudur.

Yukarıda verilen formüller oldukça doğrudur. Fakat tablo ya da grafiklerden alınan interpolate edilmiş değerlere ihtiyaç duyarlar. Pek çok durumda bu yüzden daha akıllıca net ve basit sonuçlar veren yaklaşık formüller kullanılmaktadır. Uzun, ince bir bobin için ($b/c > 10$) indüktans

$$L \cong \frac{r^2.N^2}{9r+10b} - \frac{c.r.N^2}{10.\pi.b} \quad (9.9)$$

Kısa bobinler için b ve c 'nin bobin yarıçapından küçük olduğu durumlarda

$$L \cong \frac{r^2.N^2}{13,5} \cdot \log_{10} \frac{4}{\sqrt{b^2+c^2}} \quad (9.10)$$

$$L = \frac{0,394 r^2 . N^2}{9 r + 10 l} \quad \text{alınabilir (Purdie, 2002)}. \quad (9.11)$$

9.3 Çok Bobinli Proplar

Çoklu bobinlerde indüktansın hesaplanması daha karmaşıktır. Çünkü bobinlerin ortak indüktansı hesaba katılmalıdır. Bazı durumlarda ise istisnalar vardır. Örneğin bobinler birbirlerinden yeterince uzakta iseler ortak indüktans çok küçüktür. Basit bir yaklaşımla bir diğer bobinden oluşacak etki rahatlıkla ihmal edilebilir. Elbette kesin bir dizayn için toplam indüktans hesaplanmalıdır. Genel bir çözümü olmasa da birbirine çok yakın iki bobinin ortak indüktansı aşağıdaki denkleme göre bulunabilir.

$$M_{12} = (N_1 \cdot N_2 \cdot f \sqrt{r_1 \cdot r_2}) \quad (9.12)$$

- f : İki bobinin boyutlarına bağlı olarak tablolanmış değer
 r_1 ve r_2 : Bobinlerin ortalama yarıçapları
 N_1 ve N_2 : Bobinlerin sarım sayıları

İki bobinin toplam indüktansı, bobinlerin ortak indüktansına ve bağlantı şekillerine bağlı olarak değişecektir. Seri bağlı ve birbirini destekler şekilde iseler ortak indüktans toplanır. Seri fakat zıt bağlı iseler ortak indüktans çıkartılır.

$$L = L_1 + L_2 \pm 2.M_{12} \quad (9.13)$$

- L_1 ve L_2 : Self indüktanslar
 M_{12} : Ortak indüktanslar

Bu ilişki çok bobinli durumlarda her bir bobin çiftinin ayrı ayrı toplam indüktanslarının toplamı şeklindedir.

9.4 Kompleks Propların Dizayını

Yukarıdaki açıklamalardaki prop ve bobinler en basit yapıları içerirler. Bunlar hava nüveli bobinlerdir ve testle ilgili diğer konuları açıklamada dikkate alınmazlar. İletken malzemelerin etkileri, incelenen malzemenin etkisi veya süreksizliklerin etkisi düşünülmez. Benzer sınırlama, probun içerisindeki magnetik veya iletken malzemeyi açıklamaya izin vermez ve başarısız kalır. Çünkü prop dizaynında en akılcı yol onun çalışma şartlarına, iletken ve magnetik malzemeye bağlıdır.

İletken veya magnetik nüveli propların dizaynında karşılaşılan iki büyük zorluk nüve ile iletken yapıların arasındaki ilişkide probun alanındaki kayıplar ve proba gelen cevapların frekansa bağlı olmasıdır.

Bunlardan ikincisi sabit bir frekansta bobin parametrelerinin hesaplanması ile daha kolay aşılabılır. Fakat iletken yapılar için kayıpların hesabı oldukça zordur ve prop empedansını tahmin edebilmek için mutlaka gereklidir. Bunlar basit nüveler için analitik olarak, magnetik yol üzerindeki hava boşluklarının çok küçük ve kaçak alanın ihmal edilebilir olması durumları için hesap edilebilirler.

Girdap akımı testleri esas olarak probun yaklaşık değerleri için imalatçıların verdikleri değerlere ve formüllere dayanır. Yine de bu tablosal verilerle çalışırken dikkatli olunması gerekir. Çünkü buralardan alınan değerler her bir girdap akımı probuna uygulanamazlar.

Girdap akımı proplarının dizaynında mevcut formüllerin sınırlamaları oldukça fazladır. Aynı şekilde probun içerisindeki malzemelerin çeşitliliğinden dolayı da oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu yüzden girdap akımı testleri için prop dizaynında başlangıçta deneysel metotların ne kadar gerekli olduğunu açıklamak kolaydır.

Nümerik dizaynlarda ise sonlu elemanlar ve sonlu farklar metotları kullanılmaktadır. İlk nümerik dizaynlar Dodd ve diğerleri tarafından 1970'lerin başlangıcında yapılmaya başlanmıştır. Nümerik çözümlenelerde elektromagnetik alan, malzeme özellikleri ve bobin parametreleri gözönüne alınarak kurulan modeller bilgisayarlar aracılığıyla çözümlenerek prop karakteristikleri şekillendirilmektedir.

BÖLÜM ON

GİRDAP AKIMLARI İLE MALZEME AYIRIMI

Girdap akımları yöntemleri kullanılarak malzeme tanıma ve ayırma işlemleri gerçekleştirilebilir. Girdap akımları, tabiatı gereği elektriksel iletkenlik ve magnetik geçirgenlikteki her türlü değişikliğe reaksiyon gösterir. Bunun sonucu olarak da sertlik, sertlik derinliği, ısıl işlem farklılıkları, dekarbürizasyon, tane yapısı değişiklikleri, kaplama kalınlığı gibi elektriksel iletkenlikte ve magnetik permeabilitede değişiklik oluşturacak tüm özelliklerin tespit edilmesi ve parçaların otomatik ayrılması işlemlerinde kullanılabilir.

Bazı mühendislik malzemelerinin girdap akımı metoduyla otomatik ayırımı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar bu bölümde anlatılmıştır.

10.1 Çok Frekanslı Girdap Akımı Cihazı ile Çelik Cıvata Ayırımı

Bir makina elemanı olarak cıvataların hayatımızdaki önemi tartışılmaz. Çoğu zaman yük taşıma özelliklerinden dolayı vazgeçemediğimiz araçlardır. Cıvatalar kullanım yeri, malzemeleri ve yük taşıma kabiliyetleri açısından pek çok çeşitte olabilir. Bir cıvata fabrikası da bu pek çok farklı ürünü işletme içerisinde üretip, depolayabilir. Fakat bir günde onlarca değişik türde yüz binlerce cıvata üreten bu işletmelerde malzeme karışımları ve ısıl işlem hatalarından dolayı büyük karışıklıklar yaşanabilir.

Örneğin dış görünüşü birbiri ile aynı olan cıvatalar iki farklı kalitede olabilir. Buradaki örneğimiz 8.8 ve 12.9 kalitede çelik cıvatalardır (Şekil 10.1). 12.9 cıvata kalitesinde bir cıvatanın çekme dayanımı, sertliği, akma gerilmesi 8.8 kalitedekilere göre daha büyük ve kopma uzaması da daha küçüktür. Dış görünüşü birbiri ile aynı olan bu malzemelerin imalattan sonra karışması halinde birbirinden seri bir şekilde ayrılması ihtiyacı duyulduğunda girdap akımlarından faydalanılabilir. Çünkü malzemenin birinin elektriksel iletkenliği ve özellikle magnetik permeabilitesi diğerinin aynı değildir. Girdap akımlarının hassas olduğu bu farklılıkları algılayabilmek standart bir çok frekanslı girdap akımı test cihazı ile mümkün olabilir.







Şekil 10.1 8.8 ve 12.9 kalite M10x30 gömme başlı civatalar.

Ayırım işleminde, ilk etapta IBG firmasının bir ürünü olan Eddyliner P cihazı ve test bobinleri kullanılmıştır (Şekil 10.2). Bu cihaz, 8 farklı frekansı sırası ile aynı bobine uygulayan ve alıcı sargılardaki empedans farklılıklarını ölçen, hassas bir girdap akımı test cihazıdır. Sanayide özellikle dövme yöntemiyle şekillendirilip, ısı işlem görmüş mazlemeler için belirtilen toleranslar haricindeki parçaların tespitinde kullanılmaktadır.

Test cihazında absolut (mutlak) bobinler kullanır. Absolut bobinler bir gönderici ve bir alıcı sargıdan oluşmaktadır. Gönderici ve alıcı sargıların rezistans ve indüktans değerleri Tablo 10.1’de gösterilmiştir.

Tablo 10.1 Test bobinlerinin sarım değerleri

	Ø [mm]	Sargı Tipi	İndüktans	Rezistans
	16	Uyarıcı	1,508Mh	6,340Ω
		Alıcı	8,57mH	118,48Ω
	25	Uyarıcı	1,601mH	3,162Ω
		Alıcı	9,715mH	68,80Ω
	40	Uyarıcı	1,536mH	2,240Ω
		Alıcı	8,688mH	30,86Ω
	63	Uyarıcı	1,793mH	1,992Ω
		Alıcı	10,148mH	22,36Ω

10.1.1 Deneyin Hazırlanışı

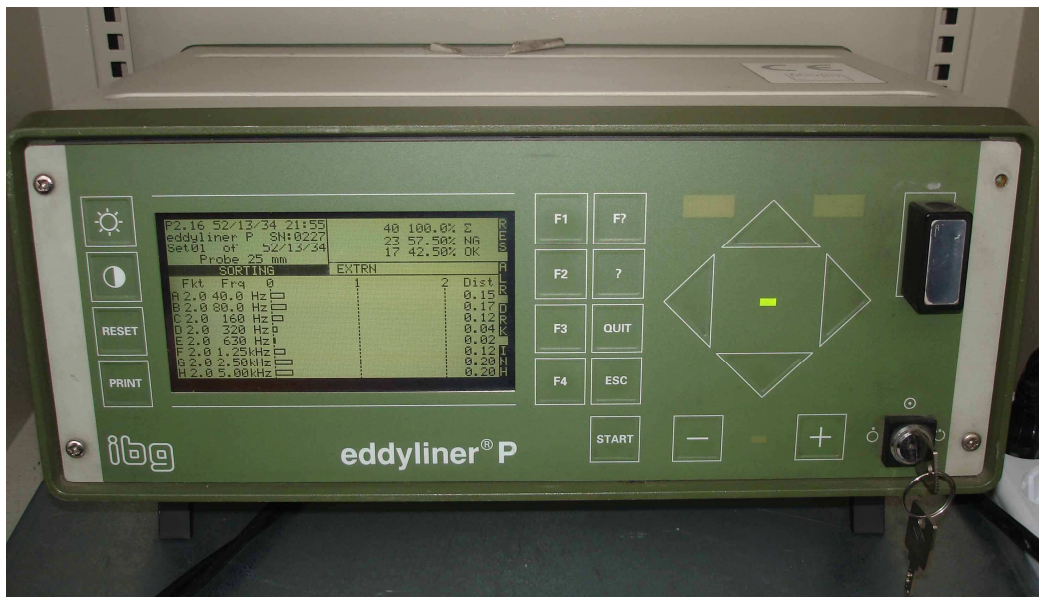
Şekil 10.1'de görülen ve bir cıvata imalatçısından temin edilen 15 adet 8.8 kalite ve 15 adet 12.9 kalite M10x30 gömme başlı (imbus) cıvata numaralandırılmıştır. 8.8 kalite cıvatalar referans parçalar olarak test cihazına tanıtılmıştır. Tanıtım esnasında 8 farklı frekans için elde edilen tolerans alanları ve bobinlerin empedans değerleri ölçülmüştür.

Farklı frekans uygulamaları parçaların pek çok özelliği test edilmek istenildiğinde faydalı olmaktadır. Çünkü her bir frekans malzemenin farklı derinliklerinden bilgi alınmasına imkan sağlayacaktır.

Tolerans alanının oluşturulmasının ardından 12.9 kalite cıvatalar test edilmiş bobin empedansında oluşan farklılıklar kaydedilmiştir. Bu işlemler farklı bobin çapları ve dolayısı ile farklı doluluk oranları için tekrar edilmiştir.

$$\text{Bobin doluluk oranları için } V_{\text{malzeme}} = \frac{\pi \cdot (15^2 \cdot 10 + 10^2 \cdot 30)}{4} \text{ mm}^3 \text{ alındığında sırası}$$

ile $\eta_{\phi 16\text{mm}} = 0,60$, $\eta_{\phi 25\text{mm}} = 0,25$, $\eta_{\phi 40\text{mm}} = 0,10$, $\eta_{\phi 63\text{mm}} = 0,03$ hesaplanır. En uygun doldurma faktörü $\phi 16\text{mm}$ 'lik bobinde elde edilmiştir.



Şekil 10.2 Eddyliner P Test cihazı.

10.2 Cıvata Ayırım Deneyleri

Tablo 10.2 8.8 kalite cıvatalar için ϕ 16mm bobinde ölçülen empedans değerleri (mV)

Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	1		2		3		4		5	
20.0Hz	34	-49	1	-6	41	-59	38	-60	10	-13
63.0Hz	128	-145	13	-10	154	-175	162	-182	42	-41
200Hz	522	-614	-5	-72	580	-727	640	-839	138	-205
630Hz	142	-2152	118	-56	106	-2452	96	-2801	94	-642
2.0kHz	-1837	-2704	-10	-344	-2209	-2851	-2356	-3346	-500	-936
6.30kHz	-2302	-862	-293	-192	-2519	-506	-2833	-849	-773	-264
20.0kHz	-598	-105	393	-307	-370	183	-641	127	276	-215
63.0kHz	947	-1640	1301	-1946	1234	-1665	1094	-1584	1300	-1894
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	6		7		8		9		10	
20.0Hz	38	-58	-7	0	1	-5	36	-60	22	-51
63.0Hz	135	-166	-3	4	17	3	144	-182	115	-163
200Hz	510	-690	44	-70	129	-86	555	-801	377	-762
630Hz	164	-2192	42	-271	313	-458	29	-2500	-320	-2046
2.0kHz	-1862	-2750	-170	-467	-390	-950	-2042	-2973	-1681	-1857
6.30kHz	-2430	-851	-172	-69	-835	-277	-2487	-910	-1299	-296
20.0kHz	-622	15	639	-266	217	-146	-627	-54	104	-274
63.0kHz	1048	-1577	1469	-2011	1334	-1884	980	-1622	1145	-1907
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	11		12		13		14		15	
20.0Hz	1	-9	22	-36	29	-52	26	-71	5	-44
63.0Hz	34	-22	80	-97	111	-160	125	-179	57	-92
200Hz	170	-223	376	-437	419	-672	536	-852	235	-515
630Hz	112	-779	238	-1549	-90	-1994	-45	-2481	68	-1226
2.0kHz	-466	-1142	-1405	-2153	-1689	-2215	-2046	-2612	887	-1417
6.30kHz	-828	-547	-1871	-498	-1814	-456	-2201	-554	1111	-320
20.0kHz	48	-313	-169	28	-84	1	-323	18	157	-163
63.0kHz	1166	1812	1234	-1742	1269	-1782	1166	-1707	1269	-1868

Tablo 10.3 12.9 kalite M10x30 imbus cıvataların ϕ 16mm bobinde 8 değişik frekansda ayırım %'leri

Frekans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20.0Hz	1,73	1,65	1,68	1,75	1,65	1,68	1,66	1,72	1,63	1,69	1,68	1,63	1,66	1,72	1,73
63.0Hz	6,18	6,03	6,07	6,21	6,14	6,11	6,03	6,32	5,99	6,17	6,16	6,09	6,18	6,24	6,44
200Hz	1,85	1,76	1,78	1,89	1,82	1,79	1,75	1,87	1,71	1,78	1,82	1,8	1,83	1,83	1,94
630Hz	1,87	1,78	1,78	1,89	1,82	1,87	1,81	1,88	1,79	1,81	1,88	1,83	1,84	1,83	1,96
2.0kHz	1,11	1,02	1,04	1,17	1,08	1,09	1,03	1,13	1,06	1,04	1,05	1,06	1,12	1,01	1,13
6.30kHz	1,38	1,32	1,35	1,5	1,08	1,37	1,36	1,44	1,33	1,31	1,23	1,34	1,47	1,27	1,33
20.0kHz	1,72	1,72	1,7	1,82	1,43	1,74	1,79	1,81	1,69	1,69	1,63	1,71	1,8	1,69	1,72
63.0kHz	1,97	1,97	1,94	2,02	1,79	2,0	2,07	2,04	1,92	1,9	1,88	1,93	2,01	1,94	1,97

Tablo 10.4 8.8 kalite cıvatalar için $\phi 25\text{mm}$ bobinde ölçülen empedans değerleri (mV)

Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	1		2		3		4		5	
20.0Hz	36	-56	1	-6	41	-61	41	-61	8	-13
63.0Hz	121	-166	6	-7	137	-182	153	-194	33	-34
200Hz	421	-676	-25	-46	474	-727	528	-821	94	-162
630Hz	-221	-1953	64	32	-206	-2159	-263	-2459	-12	-458
2.0kHz	-1727	-1598	7	-149	-2017	-1729	-2151	-2053	-379	-474
6.30kHz	-1245	-112	-41	-72	-1394	95	-1551	-66	-240	-50
20.0kHz	211	-139	602	-369	316	-34	215	-31	572	-330
63.0kHz	1613	-1909	1696	-2041	1697	-1929	1668	-1901	1704	-2027
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	6		7		8		9		10	
20.0Hz	37	-59	-5	-5	6	-7	38	-65	30	-57
63.0Hz	121	-169	-3	-6	25	-7	137	-202	124	-192
200Hz	398	-666	9	-61	114	-83	430	-809	321	-792
630Hz	-153	-1854	-44	-143	210	-409	-357	-2160	-581	-1913
2.0kHz	-1715	-1586	-25	-158	-466	-667	-1835	-1693	-1535	-1137
6.30kHz	-1287	-67	153	-35	-485	-22	-1268	-126	-675	13
20.0kHz	234	-91	727	-420	530	-239	219	-138	450	-301
63.0kHz	1652	-1901	1741	-2085	1715	2004	1625	-1911	1645	-2002
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	11		12		13		14		15	
20.0Hz	3	-11	26	-42	32	-56	34	-67	6	-19
63.0Hz	28	-27	85	-120	109	-171	126	-190	38	-46
200Hz	113	-181	295	-479	343	-686	428	-797	148	-279
630Hz	-54	-558	-35	-1362	-363	-1774	-364	-2132	-10	-803
2.0kHz	-355	-510	-1336	-1323	-1505	-1300	-1846	-1502	-638	-767
6.30kHz	-214	-129	-1020	-9	-900	-28	-1126	48	-432	-36
20.0kHz	531	-363	386	-127	415	-182	353	-132	543	-297
63.0kHz	1679	-2010	1699	-1956	1696	-1976	1678	-1948	1697	-2021

Tablo 10.5 12.9 kalite M10x30 imbus cıvataların $\phi 25\text{mm}$ bobinde 8 değişik frekansta ayırım %'leri

Frekans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20.0Hz	2,41	2,26	2,19	2,35	2,23	2,08	2,05	2,28	2,26	2,32	2,33	2,12	2,2	2,27	2,39
63.0Hz	6,19	6,01	5,99	6,18	6,19	5,97	5,86	6,2	5,93	6,13	6,21	6,06	6,11	6,27	6,44
200Hz	2,69	2,63	2,61	2,72	2,67	2,53	2,51	2,72	2,56	2,64	2,72	2,61	2,66	2,73	2,85
630Hz	2,51	2,42	2,42	2,5	2,44	2,51	2,47	2,51	2,42	2,46	2,57	2,48	2,46	2,5	2,65
2.0kHz	1,58	1,47	1,48	1,61	1,52	1,57	1,52	1,57	1,49	1,51	1,6	1,54	1,55	1,5	1,67
6.30kHz	1,51	1,44	1,44	1,6	1,5	1,5	1,48	1,52	1,44	1,45	1,41	1,47	1,55	1,4	1,49
20.0kHz	1,6	1,58	1,56	1,68	1,63	1,61	1,63	1,65	1,54	1,56	1,53	1,58	1,65	1,56	1,6
63.0kHz	1,89	1,89	1,86	1,93	1,89	1,87	1,93	1,92	1,79	1,83	1,79	1,84	1,91	1,85	1,89

Tablo 10.6 8.8 kalite cıvatalar için $\phi 40$ mm bobinde ölçülen empedans değerleri (mV)

Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)											
Frekans	1		2		3		4		5		
20.0Hz	22	-36	1	-2	26	-38	25	-40	5	-10	
63.0Hz	67	-116	4	-5	75	-124	78	-126	15	-26	
200Hz	213	-400	-17	-17	244	-438	257	-473	29	-99	
630Hz	-304	-1126	-17	52	-301	-1262	-338	-1377	-102	-205	
2.0kHz	-976	-468	37	57	-1127	-536	-1134	-644	-135	-18	
6.30kHz	-252	170	204	45	-328	248	-361	172	171	74	
20.0kHz	695	-305	793	-407	718	-268	691	-267	799	-403	
63.0kHz	1941	-2137	1950	-2171	1954	-2137	1952	-2129	1955	-2172	
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)											
Frekans	6		7		8		9		10		
20.0Hz	24	-37	-5	-2	4	-5	26	-42	20	-36	
63.0Hz	69	-116	-10	-2	14	-6	74	-142	69	-127	
200Hz	205	-404	-40	-8	60	-45	202	-496	152	-477	
630Hz	-282	-1090	-86	70	53	-223	-433	-1236	-519	-1104	
2.0kHz	-983	-453	159	155	-256	-181	-987	-452	-799	-262	
6.30kHz	-263	210	379	27	0	107	-222	155	-24	144	
20.0kHz	718	-287	844	-461	774	-348	701	-313	745	-371	
63.0kHz	1952	-2138	1959	-2191	1957	-2161	1944	-2138	1945	-2155	
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)											
Frekans	11		12		13		14		15		
20.0Hz	2	-7	20	-32	21	-37	24	-38	4	-7	
63.0Hz	11	-22	55	-101	63	-124	69	-120	14	-15	
200Hz	26	-99	151	-346	171	-442	217	-437	57	-88	
630Hz	-141	-218	-244	-865	-413	-1079	-384	-1184	-53	-291	
2.0kHz	-103	30	-792	-361	-827	-368	-980	-382	-223	-126	
6.30kHz	234	77	-158	190	-128	132	-174	221	103	83	
20.0kHz	820	-422	753	-309	731	-332	750	-314	789	-392	
63.0kHz	1956	-2181	1965	-2151	1952	-2147	1959	-2151	1951	-2170	

Tablo 10.7 12.9 kalite M10x30 imbus cıvataların $\phi 40$ mm bobinde 8 değişik frekansta ayırım %'leri

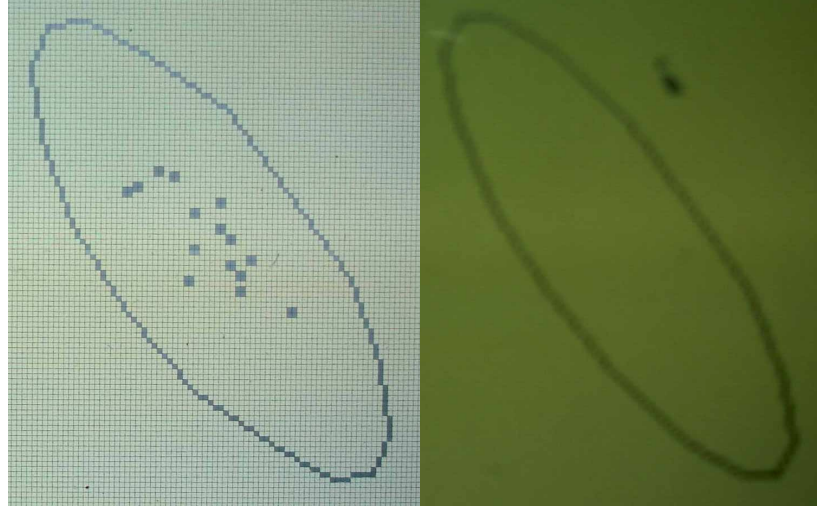
Frekans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20.0Hz	1,86	1,76	1,82	1,83	1,83	1,86	1,91	1,8	1,88	1,82	1,86	1,85	1,86	1,92	1,9
63.0Hz	5,43	5,31	5,25	5,34	5,41	5,45	5,55	5,32	5,39	5,29	5,37	5,43	5,39	5,47	5,62
200Hz	3,53	3,48	3,46	3,49	3,53	3,56	3,63	3,58	3,56	3,43	3,5	3,62	3,56	3,61	3,72
630Hz	3,22	3,13	3,13	3,18	3,16	3,26	3,31	3,25	3,21	3,12	3,19	3,39	3,23	3,24	3,45
2.0kHz	2,74	2,61	2,59	2,72	2,65	2,76	2,79	2,77	2,7	2,61	2,67	3,01	2,73	2,71	3,05
6.30kHz	1,99	1,85	1,82	2,02	1,89	1,97	1,96	1,97	1,91	1,88	1,91	2,15	1,93	1,89	2,16
20.0kHz	2,05	1,97	1,92	2,11	2,02	2,06	2,05	2,04	2,05	1,98	2,0	2,15	2,02	2,0	2,2
63.0kHz	1,95	1,95	1,93	2,0	1,96	1,99	1,99	1,98	1,94	1,88	1,91	2,01	1,9	1,92	2,04

Tablo 10.8 8.8 kalite cıvatalar için $\phi 63\text{mm}$ bobinde ölçülen empedans değerleri (mV)

Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	1		2		3		4		5	
20.0Hz	6	-10	-3	1	9	-13	8	-13	4	-6
63.0Hz	11	-27	-6	10	18	-38	17	-37	9	-15
200Hz	52	-94	-11	25	65	-131	62	-129	3	-54
630Hz	-105	-275	5	72	-131	-360	-132	-355	-76	-68
2.0kHz	-195	-40	82	86	-286	-63	-256	-78	-31	63
6.30kHz	181	72	305	36	146	110	146	84	270	63
20.0kHz	933	-512	964	-540	944	-496	936	-498	964	-529
63.0kHz	2452	-2870	2456	-2882	2457	-2869	2458	-2867	2458	-2878
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	6		7		8		9		10	
20.0Hz	13	-19	-3	0	0	0	10	-17	8	-13
63.0Hz	30	-58	-7	4	1	4	22	-52	19	-46
200Hz	65	-189	-27	13	14	-2	50	-169	29	-156
630Hz	-186	-413	-29	87	3	-42	-189	-361	-201	-289
2.0kHz	-337	-64	117	126	-34	21	-256	-40	-177	23
6.30kHz	123	122	355	33	240	66	164	87	233	78
20.0kHz	937	-489	979	-554	961	-521	934	-505	950	-524
63.0kHz	2458	-2865	2460	-2888	2458	-2877	2454	-2867	2456	2874
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	11		12		13		14		15	
20.0Hz	-1	-2	4	-9	6	-11	4	-9	-1	-2
63.0Hz	-1	-3	9	-25	13	-34	10	-26	2	-3
200Hz	-5	-17	37	-80	34	-118	48	-92	8	-22
630Hz	-48	-6	-89	-208	-149	-256	-118	-265	-34	-48
2.0kHz	36	87	-156	-7	-157	0	-177	-5	-14	44
6.30kHz	307	46	210	82	217	69	213	84	272	59
20.0kHz	968	-543	953	-513	949	-517	952	-517	964	-532
63.0kHz	2457	-2881	2458	-2874	2457	-2874	2457	-2874	2458	-2878

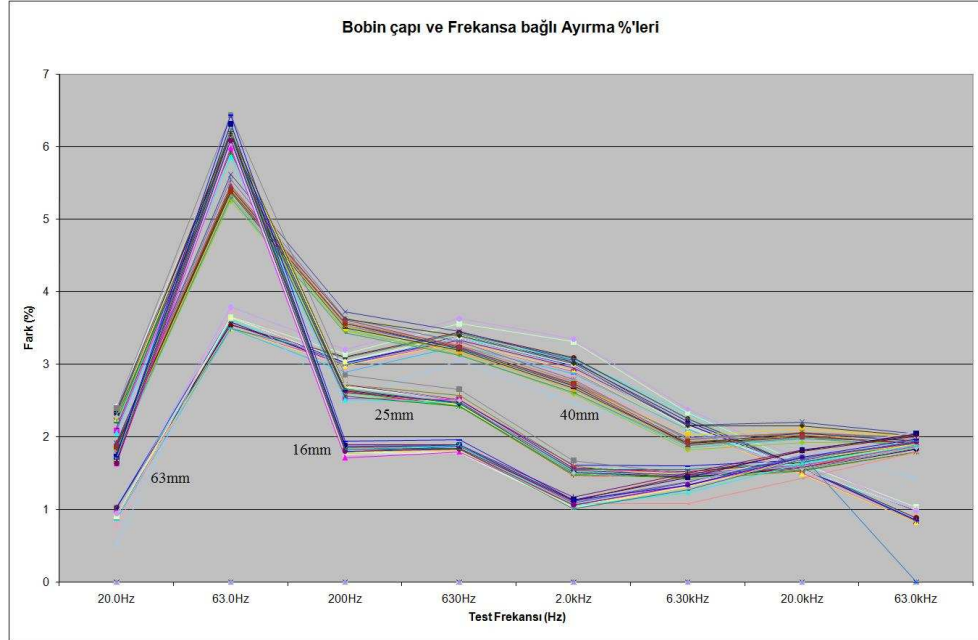
Tablo 10.9 12.9 kalite M10x30 imbus cıvataların $\phi 63\text{mm}$ bobinde 8 değişik frekansta ayırım %'leri

Frekans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20.0Hz	0,9	0,94	0,94	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	0,86	0,94	0,9	0,9	0,52	0,76	0,94
63.0Hz	3,58	3,49	3,49	3,6	3,55	3,54	3,49	3,65	3,49	3,65	3,65	3,64	3,83	3,76	3,79
200Hz	2,98	3,0	2,98	3,0	3,02	3,1	3,09	3,02	2,89	3,04	3,14	3,04	2,52	2,91	3,2
630Hz	3,4	3,3	3,3	3,36	3,33	3,44	3,42	3,36	3,25	3,36	3,56	3,4	3,05	3,3	3,63
2.0kHz	3,03	2,9	2,91	3,07	2,95	3,09	3,08	2,98	2,87	2,99	3,31	3,01	2,46	2,81	3,35
6.30kHz	2,21	2,09	2,09	2,32	2,17	2,25	2,25	2,17	2,1	2,13	2,33	2,15	2,06	2,02	2,38
20.0kHz	1,58	1,5	1,49	1,63	1,56	1,58	1,57	1,57	1,55	1,55	1,63	1,57	1,87	1,58	1,68
63.0kHz	0,98	0,82	0,82	0,85	0,84	0,88	0,85	0,85	1,0	0,99	1,03	1,0	1,43	1,0	0,98



Şekil 10.3 (a) $\phi 16\text{mm}$ bobinde 8.8 kalite cıvatalar için oluşturulan tolerans alanı (b) 12.9kalite cıvataların tolerans alanının dışındaki yerleşimi.

Şekil 10.3(a)'da görülen tolerans alanı esas alınarak 12.9 kalite M10x30 cıvataların malzeme ayırımı Şekil 10.3(b)'de gösterilmiştir. Tablo 10.3, Tablo 10.5, Tablo 10.7 ve Tablo 10.9 incelendiğinde bu iki kalite cıvatanın birbirinden en iyi ayırma frekansının 63Hz olduğu Şekil 10.4'de özetlenmiştir.



Şekil 10.4 12.9 kalite cıvata ayırımında bobin çapı ve frekansa bağlı ayırma %'leri.

Yukarıdaki deneylerden, malzeme özelliklerinin birbirinden oldukça farklı olduğu bu özel durum için tek frekansla ayırma işleminin yapılması yeterli olacağı görülmektedir.

10.3 Mutlak Bobin ile Çelik Cıvataların Birbirinden Ayrılması

Malzeme ayırma ile ilgili deneysel çalışmaların bu kısmında çalışma için özel tasarlanan mutlak bobin düzeneği ile benzer çelik cıvataların ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu düzeneğin ileride yapılacak sanayi tipi malzeme ayırma cihazlarına temel teşkil edeceği düşünülmektedir.

10.3.1 Deneyin Hazırlanışı

Teflon malzemeden üretilmiş bobin gövdesi üzerine $\phi 0,3\text{mm}$ olan bakır tel belirli turlarda sarılarak bir girdap akımı bobini elde edilmiştir. Gönderici ve algılayıcı sargıların direnç ve self indüktans değerleri aşağıda belirtilmiştir. R ve L ölçüm işlemleri CHY LCR ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

$$R_g = 11,160\Omega \quad R_a = 5,501\Omega$$

$$L_g = 3,023\text{mH} \quad L_a = 968,1\mu\text{H}$$

Sarım sayıları ve imalat boyutları bilinen test bobininin empedans değerleri denklem (9.11) kullanılarak da hesaplanabilir. Burada $r = 1,1\text{cm}$, $N_g = 440\text{tur}$, $N_a = 200\text{tur}$, $l_g = 2\text{cm}$ ve $l_a = 1\text{cm}$ alınarak ve self indüktans için;

$$L = \frac{0,394 r^2 \cdot N^2}{9r + 10l} \text{ kullanılarak}$$

$$L_g = 3086,8\text{mH} \text{ ve } L_a = 958,2\mu\text{H}$$

bulunabilir. Formülden elde edilen sonuçlar ile self indüktans ölçümlerinin birbirlerine yakın çıkması hesap hassasiyetini göstermesi açısından önemlidir.

Bölüm 10.1'deki cıvata ayırım çalışmasından yola çıkılarak ve en iyi ayırım frekansının 63Hz olduğu göz önüne alınarak yukarıda üretilen bobin 50Hz'lik şebeke voltajı ile çalışan bir transformatör ile bobin beslenerek basit bir girdap akımı ayırım düzeneği elde edilmiştir.

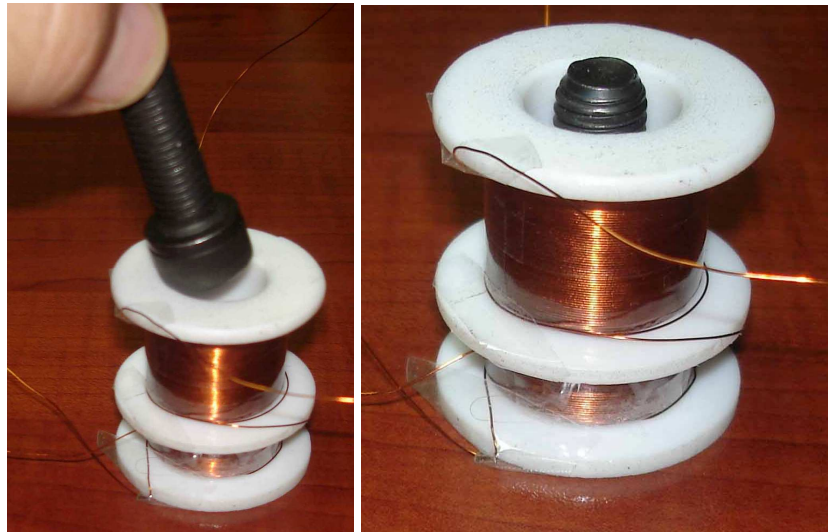
Gönderici sargıların direnç ($R_g = 11,160\Omega$) ve self indüktans ($L_g = 3,023mH$) değerleri kullanılarak bobinin indüktif reaktansı ve empedansı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi 50 3,023/1000 = 0,949\Omega$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} = \sqrt{(11,160^2 + 0,949^2)} = 11,7\Omega$$

Tel çapının 0,3mm ve tel kesitinin $0,07mm^2$ olduğunu göz önüne alınırsa ve akım taşıma kapasitesi 5 öngörülerek, böyle bir bobinden 0,3 Amper'lik bir akımın güvenli bir şekilde geçirilebileceği düşünülerek besleme transformatörünün çıkış geriliminin $U = I R = 0,3 \times 11,7 = 3,5V$ olması gerektiği hesaplanır.

Bu özelliklere sahip bir transformatör ile gönderici sargılar uyarıldığında ve algılayıcı sargılar bir ampermetre ile ölçüldüğünde bir sabit gerilim girdap akımı test sistemi elde edilmiş olur (Şekil 10.5).



Şekil 10.5 Mutlak bobin uygulaması ile çelik cıvataların ayrılması.

10.4 Mutlak Bobinle Cıvata Ayırımı

Yapılan deneylerde algılayıcı sargıların boşluktaki akım değerleri 0,23...0,24A aralığında ölçüldü. Malzeme bobinin içerisine girdiğinde bobinin indüktansının ve dolayısıyla empedansının değişimleri gözlemlendi ve kaydedildi. 8.8 ve 12.9 kalite çelik cıvatalar için algılayıcı bobin sargılarının akım değerlerine bakılarak bu iki cıvata türünün bu düzenele ayırt edilebileceği ispatlandı.

Tablo 10.10 8.8 ve 12.9 kalite M10x30 imbus cıvatalar için alıcı bobin akım değerleri

	Cıvata No	Alıcı Bobin akım değerleri (Amper)		Cıvata No	Alıcı Bobin akım değerleri (Amper)
8.8 Kalite M10x30 İmbus Cıvatalar	1	0,172	12.9 Kalite M10x30 İmbus Cıvatalar	1	0,178
	2	0,172		2	0,177
	3	0,171		3	0,177
	4	0,172		4	0,177
	5	0,171		5	0,177
	6	0,172		6	0,179
	7	0,172		7	0,180
	8	0,172		8	0,178
	9	0,173		9	0,178
	10	0,172		10	0,178
	11	0,172		11	0,178
	12	0,171		12	0,179
	13	0,173		13	0,181
	14	0,173		14	0,180
	15	0,172		15	0,179

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi hazırlanan bu test düzeneği ile çelik cıvataların birbirinden ayrılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Fakat ayırma düzeneğinin sanayide rahat kullanımı amacıyla elde edilen bu küçük akım değerlerini büyütecek ve daha kolay gözlenir hale getirebilecek amplifikatör devreleri kurulması gerekmektedir.

10.5 Girdap Akımları ile Otomatik Malzeme Ayırım Sistemi

Bu bölümde sıcak dövme yöntemiyle imal edilmiş biyel kollarının, bir çok frekanslı girdap akımı test cihazı ve kendi tasarlayıp imal ettiğimiz bir ayırma sistemi kullanılarak otomatik test ve ayırım işlemi verilmiştir.

Öncelikle bu parçaların muayenesinde test sisteminden beklenen, dövme işleminden sonra ısıl işlem gören biyel kollarının malzeme özellikleri ve metalurjik açıdan istenilen özelliklere sahip olup olmadığının belirlenmesidir. Ardından da seri imalat hızına cevap verebilecek şekilde ve güvenilir biçimde uygun olmayan biyel kollarının uygun olanlardan ayrılması hedeflenmiştir. Daha net bir deyişle test sisteminden beklenen 4sn'de 1 adet biyel kolunun girdap akımları ile tahribatsız muayenesinin tamamlanması ve ait olduğu bölüme gönderilmesidir. Kısacası, basit bir hesapla bir günde 20.000 adet parçanın test edilmesi sağlanmalıdır. Tasarlanan ve imal edilen test sistemi Şekil 10.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 10.6 Girdap akımı ile otomatik malzeme test ve ayırım sistemi.

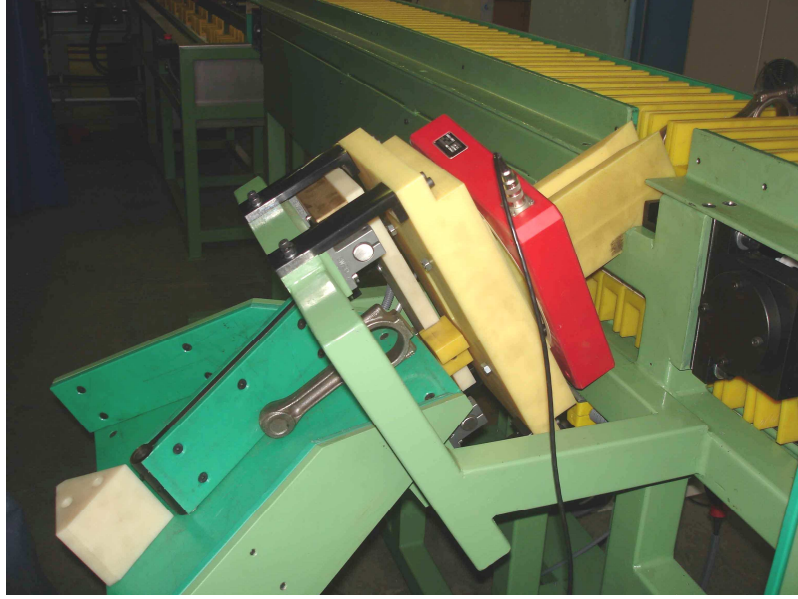
Şekil 10.6’da genel görünüşü bulunan test sistemi seri imalatta kullanılacağı için çelik konstrüksiyondan imal edilmiştir. Modüler iletici bant sistemi üzerine monte edilen fikstürlerin içerisine operatör tarafından yerleştirilen biyel kolları bir step motor-redüktör grubu ile hareket ettirilerek pnömatik itici önüne getirilir Şekil 10.7’de pnömatik parça itici görülmektedir. Pnömatik itici her adımda bir adet biyel kolunu girdap akımı bobininin içerisine doğru iter.



Şekil 10.7 Pnömatik itici.

Girdap akımı test cihazı PLC üzerinden gönderilen teste başla komutu ile 8 farklı frekansta bobine uyarma akımlarını gönderir. Her bir frekans sıra ile malzemeye uygulanır ve alıcı sargılardan ölçülen empedans farklılıkları hafızaya kaydedilir. Bu esnada daha önce test cihazının hafızasında sağlam malzemelerden alınan empedans değerleri ile kıyaslama yapılır. 8 frekansın herhangi birisinde tolerans alanının dışında kalan biyel kolu ıskarta olarak değer kazanır.

Test cihazının değerlendirme çıkışı yine PLC üzerine alınarak biyel kolu sağlam ise pnömatik hareketli ayırıcı kapak bir yöne, ıskarta ise diğer yöne çekilerek parça hareket etmeden önce gideceği bölge belirlenir. Şekil 10.8’de pnömatik hareketli ayırıcı kapak görülmektedir.



Şekil 10.8 Test bobini, pnömatik yönlendirici kapak ve durdurucu kapak.

Bobinin hemen altında yer alan ve parçayı durduran kapak, pnömatik piston ile hareketlendirilir ve parça eğik ayırma platformu üzerinden belirlenen bölgeye kayarak düşer (Şekil 10.8).

Düşme noktasında sağlam parçaların hasar görmemesi amacıyla motor redüktör tahrikli bir döner tabla uygulaması yapılmıştır. Döner tabla üzerinde toplanan ve sağlamlığı bilinen biyel kolları Şekil 10.9'da gösterilmiştir.



Şekil 10.9 Döner tabla.

10.5.1 Deneysel Uygulamalar

Deneysel çalışmalarda biyel kolu üreticisi firmadan temin edilen deneme numuneleri kullanılmıştır. Genellikle biyel kollarında malzeme olarak C40, C43, C70S6, 45M5UA2.. vs kullanılmaktadır. Mevcut deneme numunelerinin iki farklı zamanda, aynı malzemeden (C40) fakat farklı imalat koşullarında üretildiği bilinmektedir. Farklı imalat koşullarından, farklı ısıl işlem ve farklı soğutma prosesi anlaşılmalıdır.

Pek çok dövme malzemedede olduğu gibi biyel kollarının da doğru ısıl işlem prosesinden geçirilmiş olması gerekmektedir. Fakat imalatta pek çok farklı sebepten dolayı prosesde sapmalar meydana gelebilmektedir. Isıl işlem fırın sıcaklığındaki düzensizlikler, parçaların gereğinden az ya da fazla ısıl işlem tesirinde kalması, malzemenin kimyasal kompozisyon farklılıkları gibi sebeplerle biyel kolları istenen özelliklere sahip olamayabilir. Örneğin deneyde kullanılan malzeme için biyel kolunun yüzey sertliğinin 215 - 245 HB arası olması hedeflenir. Ne var ki en uygun proseslerde bile bu değerlerden sapmalarla karşılaşılabilir. Burada amaç, tolerans dışındaki ürünleri sistemin dışarısına taşıyabilmektir.

Deneme çalışmalarına başlayabilmek için öncelikle biyel kollarının birbirinden farklı 2 gruba ayrılması gerekmektedir. Kalibrasyon için özellikleri birbirine benzeyen parçaların kullanılması gerekmektedir. Bunun için girdap akımı test cihazının manuel kalibrasyon modu kullanılmıştır. Manuel kalibrasyon modunda ölçülen her parçanın 8 farklı frekanstaki empedans değerlerinin görülmesi mümkündür. Bu özellik kullanılarak mevcut tüm parçaların empedans değerleri kaydedilerek bu olası 2 grup malzeme belirlenmeye çalışılmıştır.

Dış görünüşleri tamamen birbirinin aynı olan biyel kolları test cihazında önce manuel olarak test edilerek birbiri ile benzer empedans değeri veren 14 adet parça belirlenmiştir. Test sistemine bu 14 adet parça sağlam parça olarak tanıtılmıştır. Geriye kalan parçaların cihaz tarafından ayrılabilmesi için tolerans alanı bu 14 adet parça ile ve yeterli miktarda geniş oluşturulmuştur.

Tablo 10.11 Sağlam çelik dövme biyel kolları için ölçülen empedans değerleri (mV)

Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	1		2		3		4		5	
40.0Hz	103	305	87	332	97	315	97	309	101	305
80.0Hz	381	289	388	332	383	300	379	290	382	297
160Hz	709	17	727	67	709	39	703	32	716	21
320Hz	970	-679	1003	-623	978	-647	968	-653	974	-682
630Hz	671	-1789	721	-1743	696	-1754	683	-1755	667	-1789
1.25kHz	-359	-2543	-300	-2512	-323	-2525	-331	-2513	-359	-2530
2.5kHz	-1564	-2522	-1507	-2519	-1533	-2527	-1530	-2515	-1555	-2513
5.0kHz	-2439	-1678	-2402	-1694	-2425	-1693	-2414	-1688	-2429	-1676
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	6		7		8		9		10	
40.0Hz	90	298	94	309	105	292	86	337	106	302
80.0Hz	373	299	389	299	381	265	384	356	385	286
160Hz	699	33	720	21	701	-10	731	103	716	8
320Hz	960	-640	976	-675	949	-707	1026	-576	970	-702
630Hz	692	-1739	676	-1783	641	-1801	765	-1712	654	-1813
1.25kHz	-313	-2510	-347	-2537	-386	-2541	-265	-2508	-382	2552
2.5kHz	-1519	-2521	-1550	-2529	-1578	-2514	-1489	-2520	-1582	-2525
5.0kHz	-2414	-1695	-2436	-1691	-2443	-1670	-2391	-1694	-2452	-1676
Ölçülen empedans değerleri X(mV) Y(mV)										
Frekans	11		12		13		14			
40.0Hz	97	306	93	302	102	309	98	317		
80.0Hz	387	285	377	301	377	299	391	297		
160Hz	709	12	703	32	705	35	724	25		
320Hz	966	-684	962	-644	971	-652	984	-682		
630Hz	665	-1790	688	-1740	688	-1755	673	-1797		
1.25kHz	-359	-2541	-315	-2508	-326	-2521	-361	-2545		
2.5kHz	-1562	-2525	-1516	-2517	-1531	-2524	-1565	-2521		
5.0kHz	-2440	-1684	-2410	-1693	-2422	-1692	-2439	-1677		

Tablo 10.12 Hatalı ısıl işlem görmüş biyel kollarının 8 değişik frekansta ayırma %'leri

Frekans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
40.0Hz	0,5	0,56	0,32	0,71	0,55	0,9	0,1	0,09	0,95	0,34	0,32	0,49	0,42	0,53	0,34
80.0Hz	0,11	0,9	0,6	0,42	0,12	0,59	0,41	0,4	0,46	0,37	0,51	0,71	0,71	0,61	0,89
160Hz	0,04	0,6	0,04	0,36	0,19	0,63	0,4	0,12	0,34	0,22	0,53	0,56	0,92	0,49	0,76
320Hz	0,39	0,92	1,25	0,37	0,4	0,63	1,04	0,33	0,31	0,45	0,85	0,53	1,33	0,47	1,02
630Hz	1,32	0,35	0,66	0,23	0,27	0,43	0,04	1,38	0,23	0,3	0,37	0,34	0,69	0,31	0,46
1.25kHz	3,5	0,99	0,87	0,74	0,8	1,3	0,12	3,43	0,66	0,71	0,94	1,34	0,9	1,33	0,84
2.5kHz	4,91	2,69	2,16	1,64	2,34	2,05	1,49	4,06	1,7	2,21	2,48	2,87	2,3	2,8	2,13
5.0kHz	4,1	2,5	2,3	1,93	2,60	3,02	1,86	4,1	1,88	2,52	2,5	3	2,39	2,95	2,06

Tablo 10.11'de görülen uygun biyel kollarına göre oluşturulan tolerans alanına göre toplam 15 adet uygun olmayan biyel kolu ayırımı yapılmıştır. Empedans farklılıkları ve ayırma yüzdeleri Tablo 10.12'de gösterilmiştir.



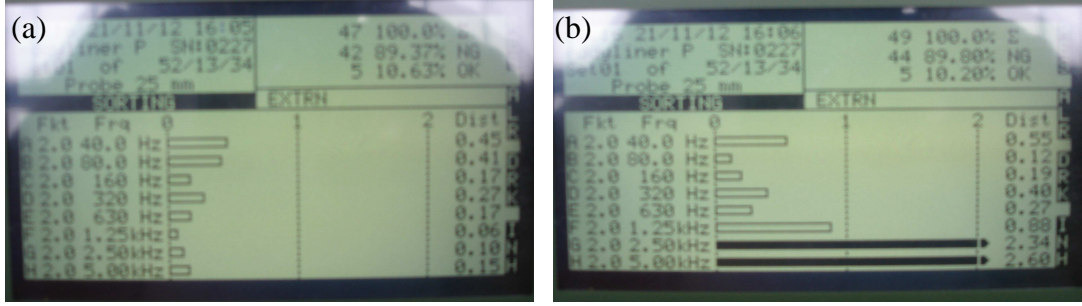
Şekil 10.10 Otomatik girdap akımı malzeme test-ayırma sistemi.

Şekil 10.10'da görüldüğü gibi biyel kolları test sistemine karışık vaziyette dizilmiş ve Şekil 10.9'da görüldüğü gibi doğru ayırım sağlanmıştır.

Şekil 10.11'de uygun olan ve uygun olmayan 2 adet biyel kolu görülmektedir. Şekil 10.11'de ise bu 2 biyel koluna ait girdap akımı test sonuçları gösterilmiştir.

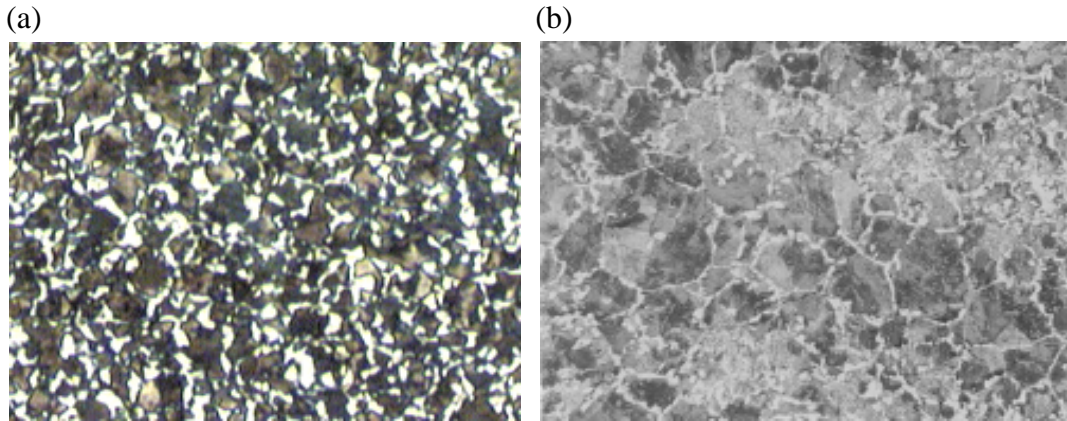


Şekil 10.11 (a)Uygun (b) Uygun olmayan biyel kolları.

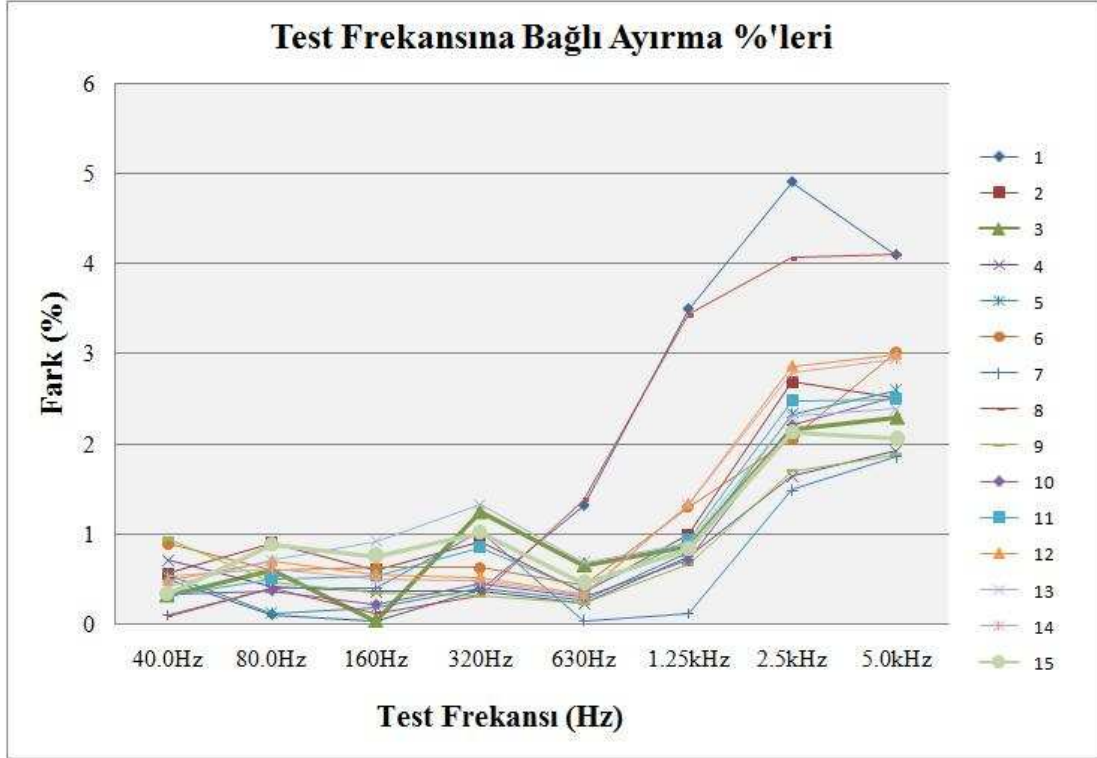


Şekil 10.12 (a) Uygun (b) Uygun olmayan birer biyel koluna ait ayırım %'leri.

Aşağıda resimlerde deneyler sonucunda ayrılan biyel kollarının mikroskop ile elde edilen kimyasal kompozisyonları görülmektedir. Şekil 10.13(a)'da sağlam olduğu kabul edilen biyel kollarının düzgün dağılımlı ferritik ve perlitik yapısı gösterilirken, Şekil 10.13(b)'de ise hatalı olarak ayrılan biyel kollarının soğuma düzensizliğine bağlı oluşan iri taneli yapısı gösterilmiştir.



Şekil 10.13 (a) Uygun malzeme, ferrit+perlit yapısı (b) Uygun olmayan malzeme, ferrit+perlit+beynit yapısı, segregasyon görüntüsü.



Şekil 10.14 Biyel kollarının ayırımında frekansa bağlı ayırma %'leri.

Şekil 10.14'de görüldüğü gibi biyel kollarının ısıtma işlem farklılıklarının algılanmasında ve uygun olmayan malzemelerin sistem dışına atılmasında girdap akımları rahatlıkla kullanılabilir. Isıtma işlem koşullarının değişmesiyle parçalarda, özellikle yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde, oluşabilecek içyapı farklılıkları permeabilitede değişiklik yaratmakta ve özellikle yüksek test frekanslarında girdap akımı bobin empedansında büyük değişimler meydana getirerek kendilerini gösterebilmektedir. Böyle bir test ve ayırma durumunda 5kHz ve üzeri test frekansları kullanılabilir.

BÖLÜM ONBİR

YÜZEYSEL ÇATLAK KONTROLÜ

Girdap akımları yöntemi kullanılarak yüzeysel çatlak kontrol uygulamaları özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygın kullanım imkânı bulmaktadır. Periyodik aralıklarla uçak kanatlarında, civata ve perçin deliklerinin etrafında, türbin kanatçıklarında ve silindir simetrik parçalarda yüzeysel kusurların tespit edilebilmesi hayati önem taşımaktadır. Benzer uygulamalar otomotiv sektöründe örneğin, sızdırmazlığın ve yük taşıma kabiliyetlerinin önemli olduğu durumlarda ve özellikle imalat esnasında % 100 parça kontrolü amacıyla da yapılmaktadır.

Yüzeysel çatlak kontrolü girdap akımı uygulamalarının en zor olanlarından birisidir. Yüzey pürüzlülüğü, prop veya malzemenin dönüş ve ilerleme hızları ve lift-off etkisi gibi parametreler yüzeysel çatlak kontrolünü girdap akımlarının özel uygulaması haline getirmektedir.

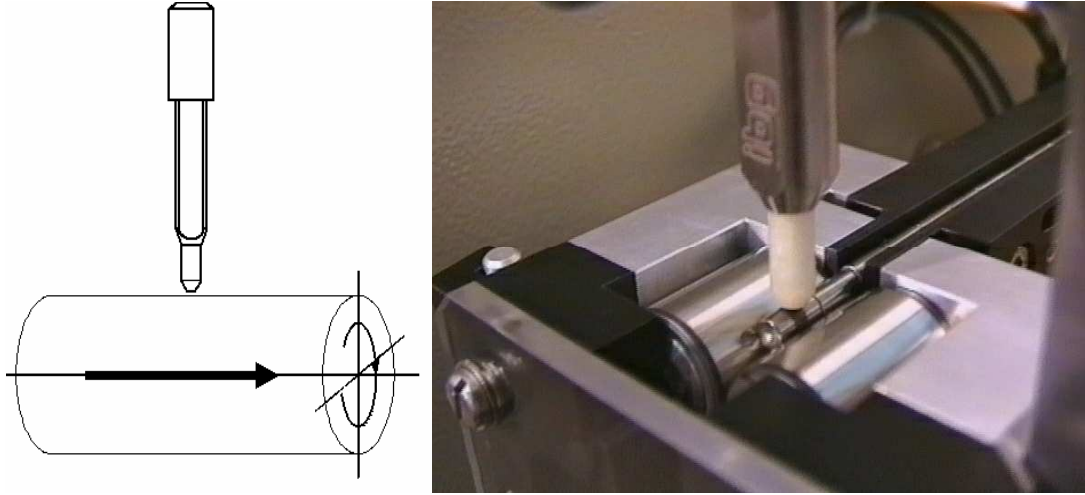
Uygulamaların başarısı bu pek çok parametrenin optimize edilmesi ile sağlanabilmektedir. Girdap akımları ile yüzeysel çatlak kontrolünde parametrelerin optimizasyonu deneylerinde IBG firmasının Eddydetector girdap akımı çatlak kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 40 kHz ile 2,5 MHz aralığında frekans üretebilmekte ve bir kalem prop ile magnetik veya elektrik iletken malzemelerin yüzey ve yüzeyin hemen altındaki çatlak ve porozitelerin tespitinde kullanılabilir. Deneysel çalışmalarda parçanın döndürülmesi ve prop hareketi için hız sürücülü bir universal tornadan yararlanılmıştır.

11.1 Yüzeysel Çatlak Kontrolü Prensipleri

Girdap akımları ile yüzeysel çatlak kontrollerinde 2 farklı yöntem izlenmektedir.

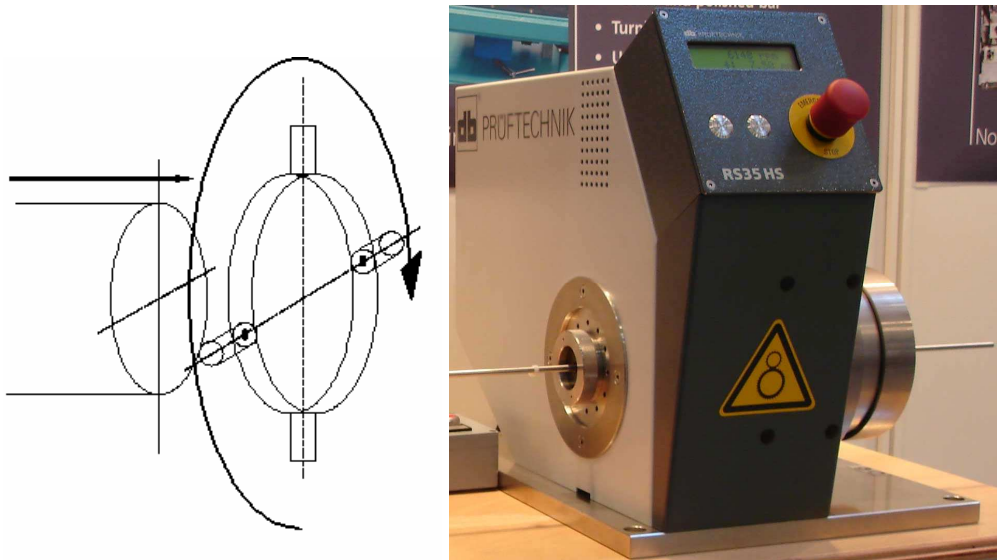
1. Parçanın kendi eksenini etrafında dönerken, parçanın veya probun ilerlediği
2. Probu döndüğü ve parçanın ilerlediği sistemler

1. türden sistemlerde özellikle tek prop kullanıldığı durumlarda parçanın dönüş hızı 1500 d/dak ile sınırlıdır. Prop hızı ise 25mm/sn olduğu durumda 1mm adım elde edilerek maksimum tarama yüzeyi sağlanır. Bu tür sistemler genellikle basit mekanikler içerirler (Şekil 11.1).



Şekil 11.1 Parça dönerken prop veya parçanın ilerlediği test sistemleri.

2. türden sistemlerde ise proplar döner ve parça doğrusal hareket eder. Bu tür sistemlerde test hızları oldukça fazladır. Yaklaşık 12.000d/dak ile çalışabilen sistemler mevcuttur. Bu hızda 2 proplu bir sistemde 1mm test adımı için 800mm/sn parça ilerleme hızına ulaşılabilir (Şekil 11.2).



Şekil 11.2 Probu döndüğü ve parçanın ilerlediği test sistemleri.

11.2 Yüzeysel çatlak kontrolünde deneysel çalışmalar

Girdap akımları ile yüzeysel çatlak kontrolünde pek çok parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, malzeme türü, düzlemsellik, simetriklik, parça veya prop dönüş hızı, malzeme veya prop hızı, prop sayısı, prop malzeme arasındaki mesafe, lift-off etkisi, kazanç, frekans ve filtreleme gibi pek çok parametre yüzeysel çatlak kontrolünde etkin rol oynar. Esas parametreleri, malzeme ve cihaz parametreleri olarak 2 ana kısımda inceleyebiliriz:

1. Malzeme parametreleri

Elektriksel iletkenlik, yüzey pürüzlülüğü ve permeabilite gibi malzemeye bağlı parametreler testi etkileyebilecek unsurlardır. Örneğin standart çelik kaliteleri ile yapılan çalışmalarda elde edilebilecek minimum hata boyutları, sinter metal bir parçadan elde edilebilecek minimum hata boyutlarından çok daha küçüktür. Yani değişik malzemeler için farklı minimum hata boyutları algılanabilmektedir. Benzer şekilde malzemenin yüzey pürüzlülüğü minimum algılanabilir hata boyutunu etkiler. Yüzey pürüzlülüğü azaldıkça test hassasiyeti artar.

2. Cihaz parametreleri

Çalışma frekansı, prop yapısı, probun dönüş hızı, filtreleme özellikleri, kazanç, faz açısı ve lift-off etkileri de testi etkileyen faktörlerdendir.

Bu iki ana parametrenin dışında yüzey çatlaklarının tespitinde önem taşıyan parametrelere, parçanın dönüş hızı veya probun ilerleme hızı da eklenmelidir.

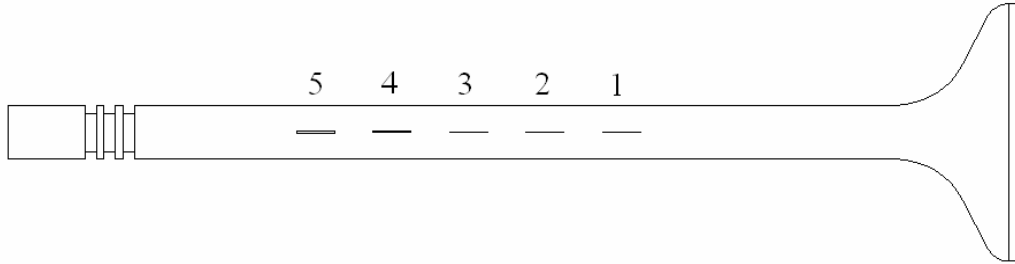
Takip eden çalışmada, silindir simetrik çelik miller (egzoz supabı) üzerinde oluşturulan değişik boyutlardaki boyuna hatalar için, parça dönüş hızı (devir/dak), prop ilerleme hızı (mm/sn), prop-parça mesafesi (lift-off (mm), kazanç (dB), frekans (kHz), alçak geçiş ve yüksek geçiş filtreleri (Hz) değişkenlerine bağlı olarak tespit edilebilecek minimum hata boyutları araştırılacak ve bu parametreler optimize edilecektir.

Deney düzeneği Şekil 11.3’de görüldüğü gibidir. Eddydetector cihazına akuple edilmiş, 2 kanallı bir osiloskop ile girdap akımlarının fiziksel cevapları gözlemlenmiştir.



Şekil 11.3 Yüzeysel çatlak kontrol deney düzeneği.

Yüzey çatlakları, yüzey pürüzlülüğü $\sim 2R_a$ olan egzoz supapları ve üzerine açılmış 5 farklı büyüklükte boyuna hata ile simüle edilmiştir. Supap üzerindeki hatalar ve konumları Şekil 11.4’de gösterilmiştir.

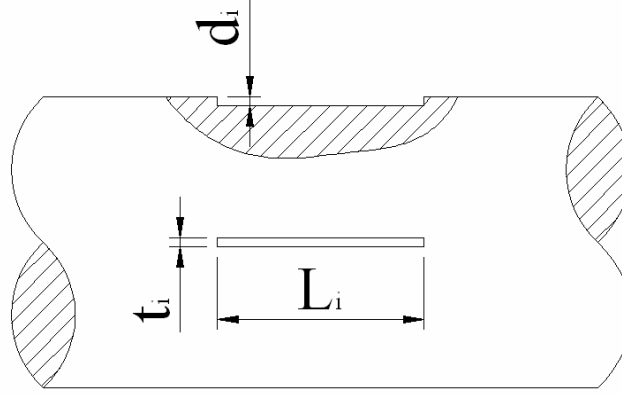


Şekil 11.4 Supap üzerindeki hatalar ve konumları.

Boyuna hatalar aşağıdaki Tablo 11.1’de belirtilen boyutlarda oluşturulmuştur. Hata uzunluğu, tüm hatalar için $L_1=5\text{mm}$ ’dir. Şekil 11.5’de Tablo 11.1’de belirtilen hata büyüklükleri şematik olarak resmedilmiştir.

Tablo 11.1 Yapay hata büyüklükleri (t_i , genişlik, d_i , derinlik), ($i=1,2,3,4,5$)

Hata boyutları	Hata Numarası				
	1	2	3	4	5
$t_i = d_i$ (mm)	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20



Şekil 11.5 Supap üzerindeki hataların şematik boyutları.



Şekil 11.6 Supap üzerindeki yapay hatalar.

Hata oluşturma aşamasında elektro erozyon, mekanik pantograf, asit indirme ve talaşlı imalat yöntemleri denenmiş fakat hassasiyet ve keskin kenarlar elde edilememiştir. En uygun hata örnekleri Lazer markalama cihazıyla elde edilmiştir Şekil 11.6.

Deneysel çalışmalar Girdap akımı probu/supap mesafesi (mm), supap dönüş hızı (dev/dak), test frekansı (kHz) değişkenleri ile her bir hata boyutu için tekrar edilmiştir. Supap veya benzeri mil türündeki malzemeler için boyuna yüzeysel çatlakların tespitinde en uygun test koşulları tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneyde kullanılacak parametreler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 11.2 Deney parametreleri

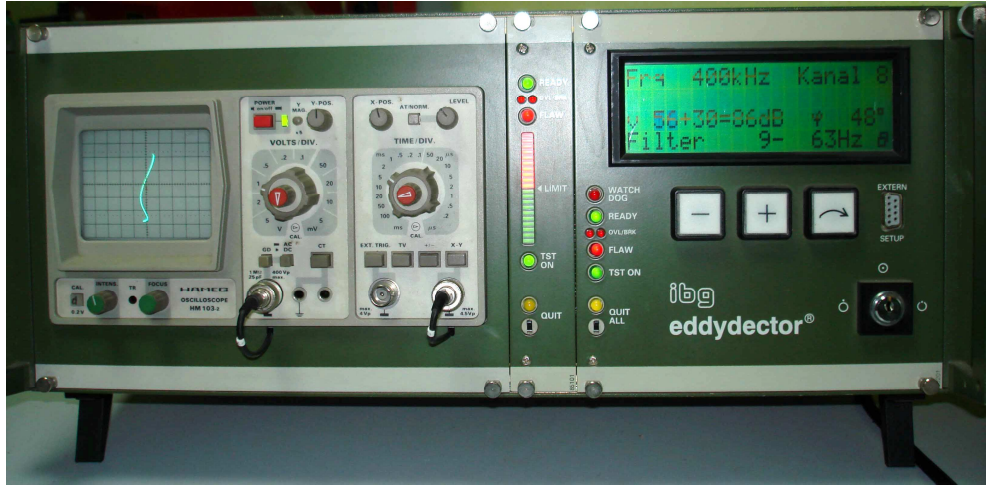
Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)	Hata Tespiti (%)
1	0.25	40	100				
2	0.5	50	200				
3	0.75	63	300				
4	1,00	80	400				
5	1,25	100	500				
	1,50	125	600				
	1,75	160					
	2,00	200					
	2,25	250					
	2,50	320					
	2,75	400					
	3,00	500					
		630					
		800					
		1000					

Dizayn aşamasında Tablo 11.2'deki parametrelerin kullanılması hedeflenmiştir. Tabloda görüldüğü gibi girdap akımı probu ile supap yüzeyi arasındaki mesafe (lift-off) sırası ile 3,0, 2,75, 2,5, 2,0, 1,75, 1,5, 1,25, 1,0, 0,75, 0,5 ve 0,25 mm ayarlanabilir. Test frekansları da 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800 ve 1000kHz aralıklarında değiştirilebilir. Supap dönüş hızları ise 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 devir/dak olarak set edilebilir. Deney düzeneği bu parametrelerin tamamını uygulama imkânına sahiptir. Ancak yukarıda belirtilen deney parametrelerinin tamamı hesaba katıldığında yaklaşık 5000 adet farklı test gerektirecek çalışma üç farklı öngörü ile sadeleştirilmiştir.

1) Malzemelerin ovalitesi ve salgılı dönüşler neticesinde probun hasar görmemesi düşünülerek, test hassasiyeti kaybedilmeden, 0,5, 0,75 ve 1 mm aralıklarda çalışılabilir. 2) Supap tur sayısı 100, 200, 400 ve 600 dev/dak alınmıştır. 3) 5 adet birbirinden ayırt edilebilir test frekansı tespit edilerek deney parametre dizaynı tamamlanmıştır. Yapılan bu yaklaşımlarla deney sayısı 300'e indirgenmiştir.

11.3 Yüzeysel çatlak kontrolünde deney sonuçları

Girdap akımı test düzeneği ile yapılan deneylerde cihaz parametreleri Şekil 11.7'de görüldüğü gibidir. Test frekansı belirlendikten sonra, supap tur sayısı, prop/supap arası mesafe ayarlanarak her bir hata için en uygun kazanç değerleri bulunur.



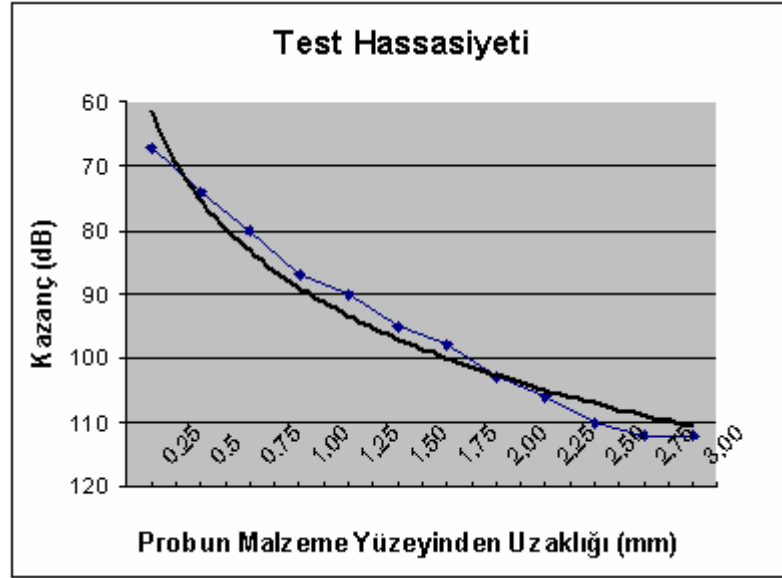
Şekil 11.7 Girdap akımı cihazı ayar parametreleri.

Prop/supap arası mesafeler hız ayarlı üniversal torna katerinin ayar mekanizması kullanılarak değiştirilmiştir. Ayar hassasiyeti 0,025mm'dir. Şekil 11.8'da prop-supap arasındaki mesafe gösterilmiştir.



Şekil 11.8 Prop-Supap mesafesi (mm).

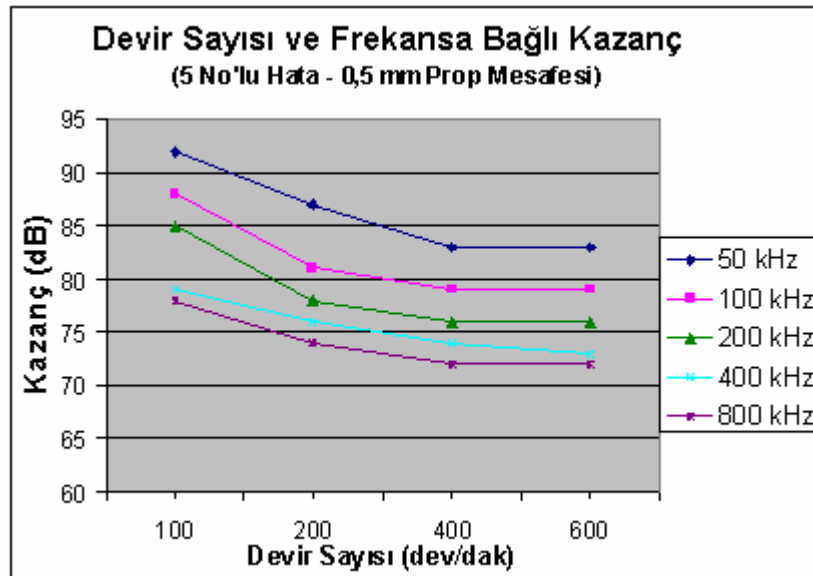
1) Hata tespitinde hassasiyet, girdap akımı probunun malzemeye olan yakınlığı ile doğrudan ilişkilidir. Test hassasiyetinin probun malzemeye yakınlığı ile arttığı aşağıdaki grafikte özetlenmiştir (Şekil 11.9). 1.5mm'den büyük çalışma mesafelerinde bütün hata büyüklükleri için test hassasiyeti sağlanamamış ve hata tespitleri gerçekleştirilememiştir.



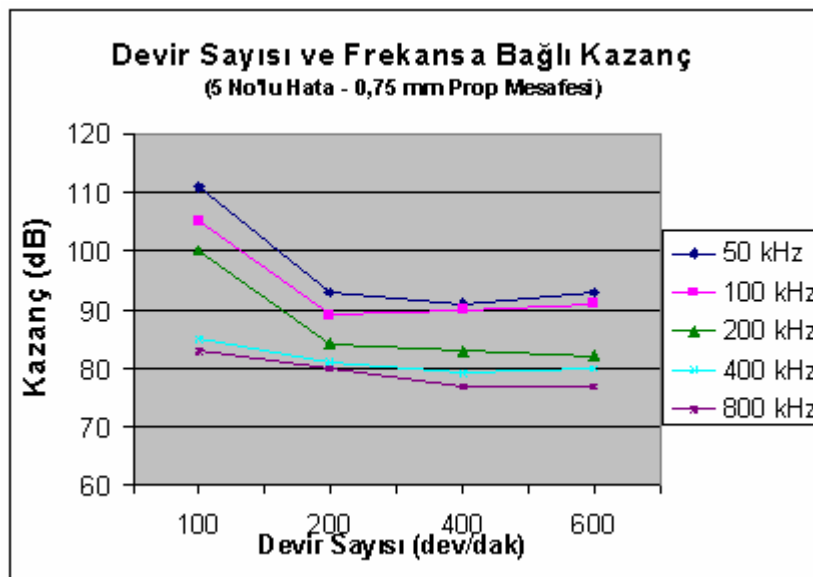
Şekil 11.9 Test hassasiyetinin prop/supap mesafesi ile ilişkisi.

2) Testin hassasiyetini etkileyen en önemli parametre hata boyutudur. En büyük hata boyutu (5 no'lu hata) en rahat tespit edilebilir. 5 no'lu hatanın tespitinde devir sayısı ve frekansa bağlı olarak kazanç eğrileri aşağıdaki gibi çizilmiştir. Şekil 11.10'da prop malzeme uzaklığı 0,5mm iken 50, 100, 200, 400 ve 800kHz test frekanslarında belirlenen devir sayıları için kazanç miktarları gösterilmiştir. 400 ve 800 kHz test frekanslarında en düşük kazanç miktarlarında hata tespitinin yapıldığına dikkat edilmelidir.

Şekil 11.11'de 5no'lu hatanın prop malzeme uzaklığı 0,75mm iken tespit edilme çalışmalarının sonucu gösterilmiştir. Bu deneylerde de test frekansının 400 ve 800kHz olduğu koşullarda en düşük kazanç miktarları ile hata tespiti yapılabildiği görülmektedir.

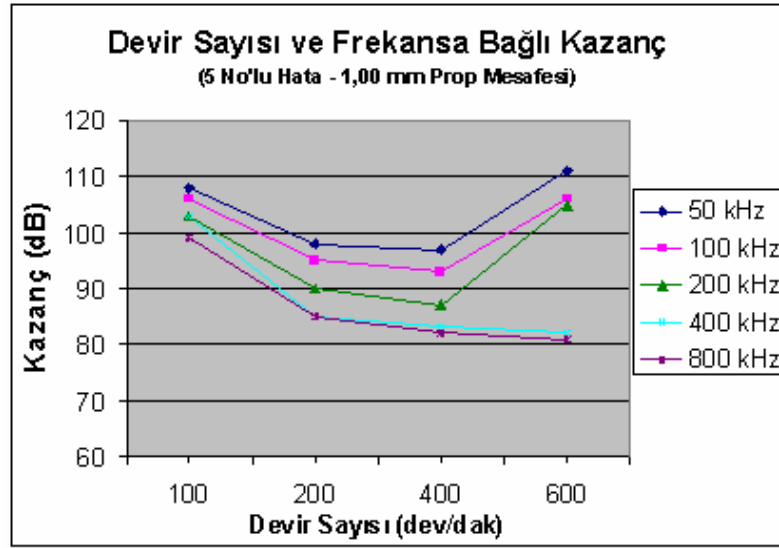


Şekil 11.10 Devir sayısı ve frekansa bağlı olarak kazanç miktarı (5no'lu hata için 0,5mm prop iş parçası mesafesinde).



Şekil 11.11 Devir sayısı ve frekansa bağlı olarak kazanç miktarları (5no'lu hata için 0,75mm prop iş parçası mesafesinde).

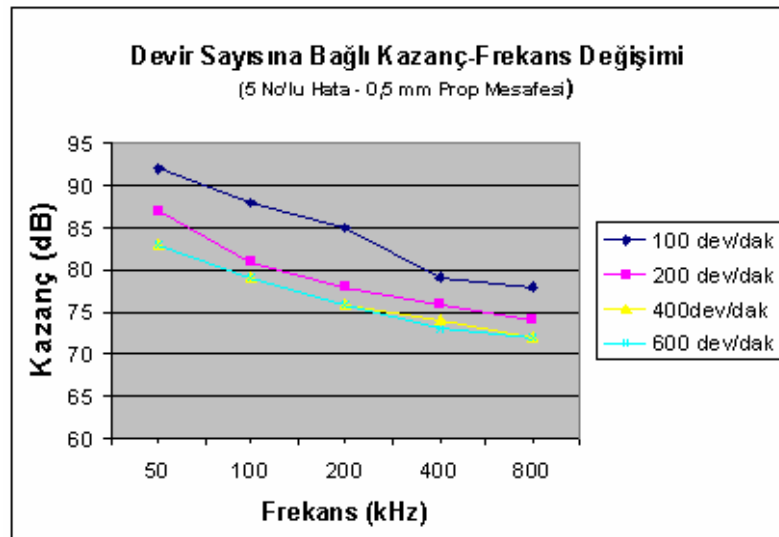
Şekil 11.12'de 5no'lu hata için prop malzeme mesafesi 1mm iken tespit edilme çalışmalarının sonuçları görülmektedir. Prop 1mm mesafede test ederken yine 400 ve 800 kHz frekans değerlerinde en düşük kazanç miktarları ile hata tespiti yapılabildiği görülmüştür.



Şekil 11.12 Devir sayısı ve frekansa bağlı olarak kazanç miktarları (5no'lu hata için 1mm prop iş parçası mesafesinde).

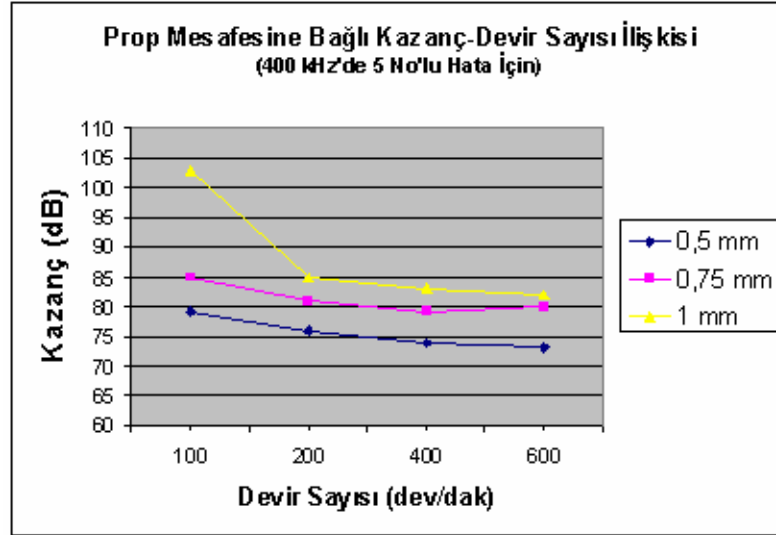
Yukarıdaki grafiklerden probun malzemenen uzaklaştıkça düşük frekanslar için test hassasiyetlerinin azaldığı çıkartılabilmektedir.

3) Şekil 11.13'de devir sayılarına bağlı olarak kazanç ve frekans değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Bütün devir sayıları için yüksek frekanslar tercih edilmelidir.



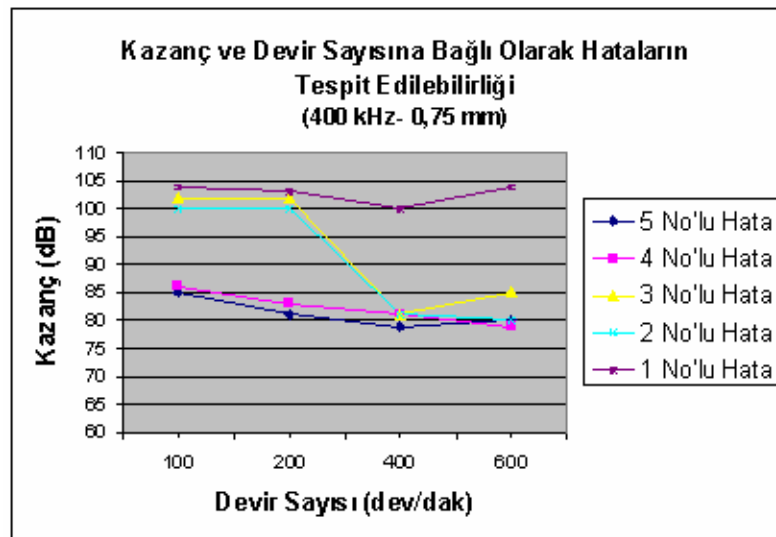
Şekil 11.13 Devir sayılarına bağlı olarak frekansın test hassasiyetine etkisi (5no'lu hata 0,5mm prop iş parçası mesafesinde, en uygun frekanslar 400 ve 800kHz).

4) Şekil 11.14'de 400kHz test frekansında 5 no'lu hata için prop mesafesinin etkisi gösterilmiştir. Prop mesafesi arttıkça test hassasiyetinin düştüğü bu deneyler sonucunda görülmüştür. 0,5 ve 0,75mm prop mesafelerinde tüm devirler için eş hassasiyetler elde edilse de prop mesafesinin 1mm olduğu durumda düşük devir sayıları tercih edilmemelidir.



Şekil 11.14 Prop mesafesine bağlı olarak kazanç ve devir sayısı ilişkisi (400kHz test frekansında prop 5no'lu hata üzerinde).

5) Şekil 11.15'de 5 adet farklı büyüklükte hatanın hangi devir sayılarında en uygun test edilebileceğini gösterilmiştir.



Şekil 11.15 Kazanç ve devir sayılarına bağlı olarak hataların tespit edilebilirliği (400kHz test frekansında, prop 0,75mm'de).

Şekil 11.5’de görülen grafik, yapılan deneylerin bir özeti niteliği taşımaktadır. 1 no’lu hatanın tespiti mümkün gözükmemektedir. Girdap akımı test yöntemi ile 40µm ve daha küçük derinlik ve genişlikteki bir hatanın tespiti yapılamaz. 2 ve 3 no’lu hatalar ancak 400 ve 600 devir/dak’larda tespit edilebilmektedir. 4 ve 5 no’lu hataların tespitinde devir sayısının hassasiyetle bir ilişkisi yoktur.

Hassasiyet ile kazanç arasındaki ilişkilerde hedeflenen minimum kazanç ile maksimum hata yüksekliğinin elde edilebilmesidir. 40µm boyutlarındaki hata probun maksimum kazancı ile dahi tespit edilemediği göz önüne alındığında bu test sisteminin 40µm ve daha küçük boyutlardaki hataların tespitinde kullanılmasının mümkün olmadığı görülür.

En iyi prop iş parçası mesafesinin 0,5mm olduğu tespit edilmiştir. Ancak prop hasarlarından korunmak amacıyla hassasiyet kaybedilmeden 0,75mm prop mesafelerinde çalışmanın uygun olduğu gösterilmiştir.

Yapılan deney sonuçları tablolar halinde Ekler’de yer almaktadır(bkz.EK 1.1-8).

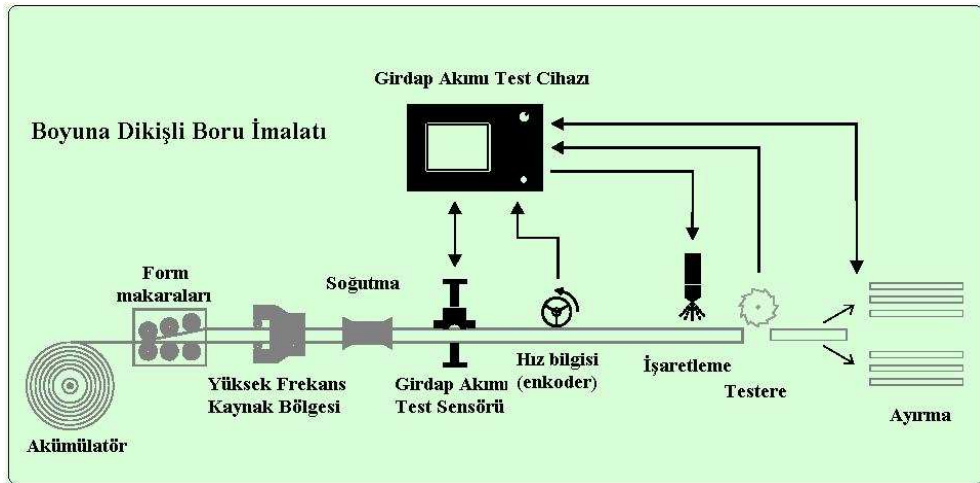
Sonuç olarak yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip piston, silindir gömleği, rotil, poyra, flanşlı parçalar, kromlu, indüksiyonlu miller ve benzeri pek çok değişik parçanın kontrolünde girdap akımları test tekniği kullanılabilir.

BÖLÜM ONİKİ

GİRDAP AKIMLARI İLE BOYUNA DİKİŞLİ BORU KONTROLÜ

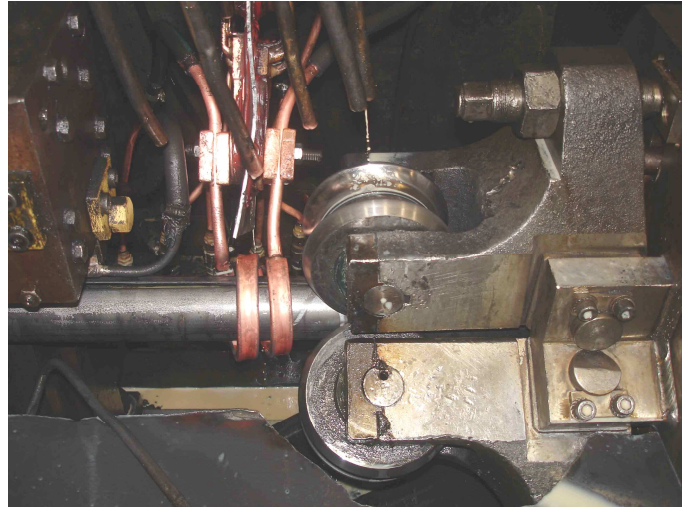
12.1 Giriş

Çelik boru fabrikaları, içerisinde pek çok farklı imalat türünü barındıran ağır sanayi tesisleridir. Bu fabrikalarda hammadde veya yarı mamul olarak gelen saç rulolar nihai ürün haline gelinceye kadar pek çok safhadan geçirilir. Öncelikle saç rulolar belirli genişliklerde dilme işlemine tabi tutulur. Dilme genişlikleri borunun çevresinden bir miktar büyük tutulur. Bu fazlalık basınç kaynağı esnasında oluşan kaynak çapağını karşılamak için gereklidir. Dilinmiş saç rulolar, şayet gerekiyorsa ön tavlama işlemine tabi tutulur ve ardından da akümülatör tabir edilen besleyici makara sisteminin içerisine yerleştirilir. Bir dizi makara sistemi ile çekilen dilinmiş rulo saçlar, form makaralarının arasında soğuk şekil değiştirilerek yuvarlak hale getirilir. Bu noktada yüksek frekansla ısıtılmış yuvarlak saç, kaynatma makaralarında uygulanan basınç yardımıyla kaynatılır. Bu kaynak işlemi genellikle yüksek frekans induksiyon basınç yöntemi (ERW, HF) olarak adlandırılır. Kaynak noktasının hemen sonrasında borunun iç ve dış çapak tabir edilen kaynak artıkları temizlenir. Boru, kalibre makaralarına doğru ilerlerken tam yuvarlak, kare veya dikdörtgen formlarına dönüştürülür. Son şekline ulaşmış olan mamul, hareketli döner testerelerle istenilen boylara kesilerek konveyör sistemleri ile kaynak hattından uzaklaştırılır. Boyuna dikişli boru imalatlarına bir örnek aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 12.1).



Şekil 12.1 Boyuna dikişli boru imalat hattı.

Yüksek frekans indüksiyon kaynaklı boru üretiminde kaynak dikişi kalitesi üzerine yöntem parametrelerinin çok büyük etkisi vardır. Bu parametrelerin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması yüksek kaynak güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Bu parametrelere, birleşme noktasının kaynak noktasına uzaklığı, bant kenarlarının V-ağız açıklığının geometrisi ve birleşme pozisyonu, indüktif enerji girdisi, indüktör ve empeder tasarımı ve yerleşimi, kaynak birleşme yerlerindeki oksit oluşumu ve kaynak noktasındaki yabancı maddeler ve hat hızı gibi pek çok örnek verilebilir. Pratikte hiçbir zaman bu kadar çok parametreyi bir arada ve kontrol altında tutabilmek mümkün olamamaktadır. Şekil 12.2’de yüksek frekans kaynak eksenini görülmektedir. Çoğu zaman birleşme noktasındaki baskı kuvvetleri, indüktif enerji girdileri, bant kenarlarının v-ağız açıklıkları anlık değişebildiğinden boruların sürekli istenilen kalitede tutulabilmesi zor veyahut imkânsızlaşır (Şirin ve diğerleri,1997).



Resim 12.2 Yüksek frekans basınç kaynağı.

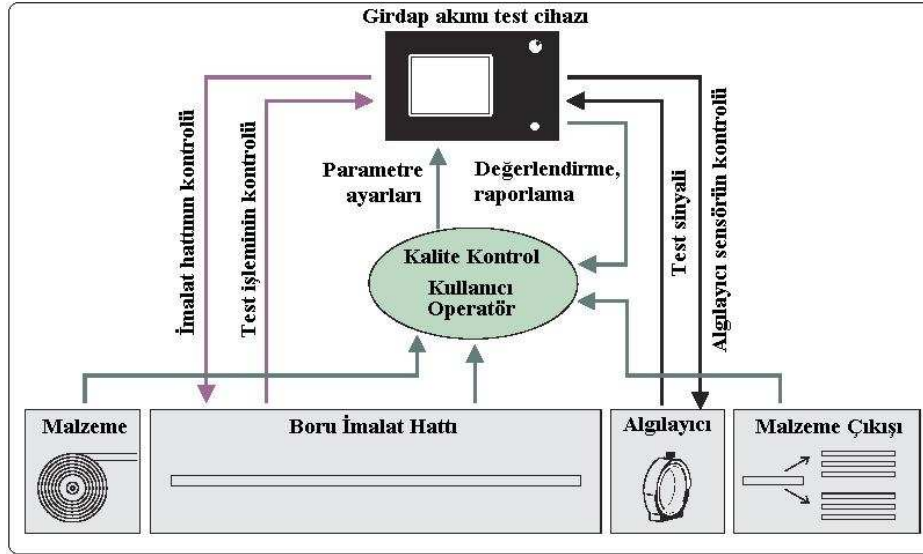
Bu sebeplerden dolayı imalat faaliyetleri sürerken doğal olarak değişik tahribatlı ve tahribatsız malzeme muayene yöntemleri ile üretilen borunun hatalı olup olmadığının kontrol edilmesi zorunludur. Pratikte boyutsal kontroller kumpas ve mikrometreler ile, mekanik mukavemet değerlerinin kontrolü ise çekme ve basma cihazlarında yapılır. Mekanik kontrollerde imalat borusundan kesilen bir parça boru baskı presinin altına yerleştirilir (Şekil 12.3). Oluşacak yırtılma ile kaynak dikişinin sağlamlığı tahribatlı olarak test edilebilir. Kaynak dikişi sağlam olmayan bir boruda genellikle bu basma deneyi sonrasında kaynak dikişinde gözle görülür bir yırtılma

meydana gelir. Bu sayede kaynak parametrelerinden bazılarının doğru olmadığı anlaşılır. Benzer mekanik testler boruya iç basınç uygulanarak da tekrarlanır. Su presi tabir edilen tezgâhlarda boru iki ucundan kapatılarak içerisine basınçlı su gönderilerek olası hatalar tespit edilmeye çalışılır. Fakat bu yöntemlerin hiç birisi tüm imalatın sağlamlığını garanti edemez ve imalata hızlı bir reaksiyon gösteremez. Çünkü imalat esnasındaki pek çok değişken, boruda küçük bölgesel hatalar oluşturabilmektedir. Boyuna dikişli borular bazı durumlarda ultrasonik test yöntemleriyle de incelenebilir. Fakat bu yöntemde test süreleri daha uzun, uygulamaları da hayli pahalı ve zordur. Bu sebepten oldukça hızlı süren bu imalat tarzı ancak hızlı bir test yöntemi ile kontrol altında tutulabilir. Bu yöntem de çoğunlukla girdap akımı test yöntemidir.



Şekil 12.3 Yassılma testi ile kaynak dikişinin tahribatlı muayenesi.

Girdap akımı test sistemi, temel olarak bir bobin sistemi ya da sensör sisteminden ve bunları kontrol eden, sinyalleri işleyen ve çevreyle haberleşen girdap akımı test cihazından oluşmaktadır. Test sisteminin imalat hattıyla haberleşmesi otomatik olarak kalite kontrolünü ve proses kontrolünü imkanı kılar. Hazırlanan test raporları ile ürünün gerçek kalitesi karşılaştırılarak, kalite gereksinimleri için en iyi parametreler ayarlanabilir. Operatör, şayet test malzemesinin özelliklerini, imalat prosesinin karakterlerini biliyorsa test için en doğru parametreleri seçebilir. Şekil 12.4’de girdap akımı test cihazı ile imalat hattı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

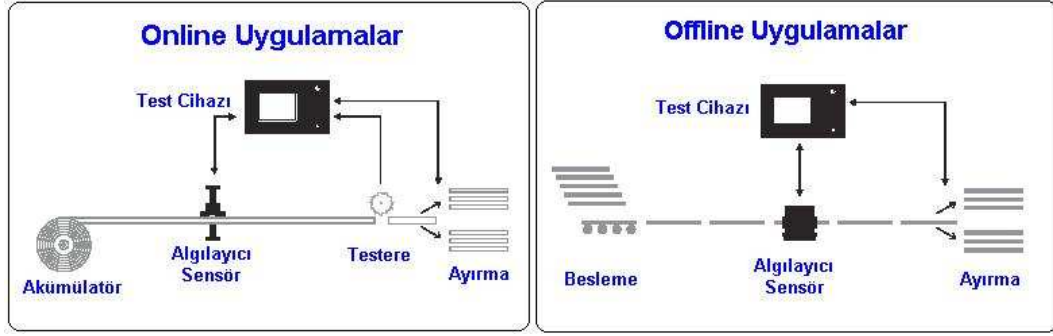


Şekil 12.4 Test ekipmanı ve imalat hattı arasındaki ilişki.

Yukarıda verilenlerin ışığında boyuna dikişli çelik boru imalatı yapan fabrikalarda kalite kontrol ve imalat birimlerinin en önemli yardımcıları girdap akımı test sistemleri olmaktadır. Girdap akımı test sistemleri sadece kaynaktan hemen sonra borunun testi için değil, aynı zamanda da belirli boylara kesilmiş ve farklı mekanik işlemlerden geçirilmiş parça borular için de kullanılabilir. Test sistemleri için genel kullanılan tabirler de bu yüzden imalat hattı üzerinde (online) ve imalat hattı dışında (offline) kontrol sistemleri olarak adlandırılmaktadır.

12.1.1 Boyuna Dikişli Çelik Boruların Girdap Akımları ile Testi

Boru fabrikalarında genellikle, online veya offline çalışan girdap akımı test sistemleri ile boyuna dikişli boruların kontrolü yapılmaktadır. Online sistemler hem boruyu ve hem de imalat hat parametrelerini kontrol ederken, offline sistemler son kullanıcıya gidecek nihai ürünü kontrol etmektedir. Sistemlerin genel şematik görünümü aşağıdaki resimlerde olduğu gibidir (Şekil 12.5 (a) ve (b)).



Şekil 12.5 (a) Online ve (b) Offline boru kontrolü şematik gösterimi.

Şematik olarak gösterilmiş test sistemlerine örnek iki uygulama Şekil 12.6 (a) ve (b)'de görüldüğü gibidir.



Şekil 12.6 a) Online ve b) Offline boru kontrollerinde örnek uygulamalar.

12.1.2 Boyuna Dikişli Çelik Borular İçin Online Test Sistemleri

Şekillendirme makaralarının arasında bulunan magnetizasyon üniteleri ve sensör sistemi yardımıyla borular online teste tabi tutulur (Şekil 12.6(a)). Test işlemleri online devam ederken hareketli testereler kullanılarak borular istenilen boylarda kesilir. Boruların testinde 2 farklı sensör tipi ve magnetizasyon ünitesi kullanılır. Birincisi, dairesel bobinler için dairesel magnetizasyon üniteleri, ikincisi ise segment tip bobinler için boyuna magnetizasyon üniteleridir. Dairesel bobinler ile tüm hacim kontrolü yapılabilirken, segment bobinler ile yalnızca kaynak dikişi kontrolleri yapılabilir. Standartlar her iki kontrol tipine izin verirken boru çapı $\text{Ø} 177,8 \text{ mm}$ 'den büyük olduğu durumlarda segment kontrole geçiş yapılır. Segment bobin ile kare ve dikdörtgen kesitli boruların kaynak dikişi kontrolleri de mümkün olabilmektedir. Hangi sistemin tercih edileceği ise tamamen boru çapına, kesit türüne ve sistemin donanım özelliklerine bağlıdır. Her iki sistemin kalibrasyon prosedürü, sistem girdi

ve çıktıları tamamen aynıdır. Şekil 12.7’de magnetizasyon ünitesi ve dairesel bobin ile online tüm hacminin (full body) kontrol uygulaması gösterilmiştir. Şekil 12.8(a) ve (b)’de doğrusal magnetizasyon ünitesi ve segment bobin ile online kaynak dikişi test uygulamalarına iki örnek gösterilmiştir.



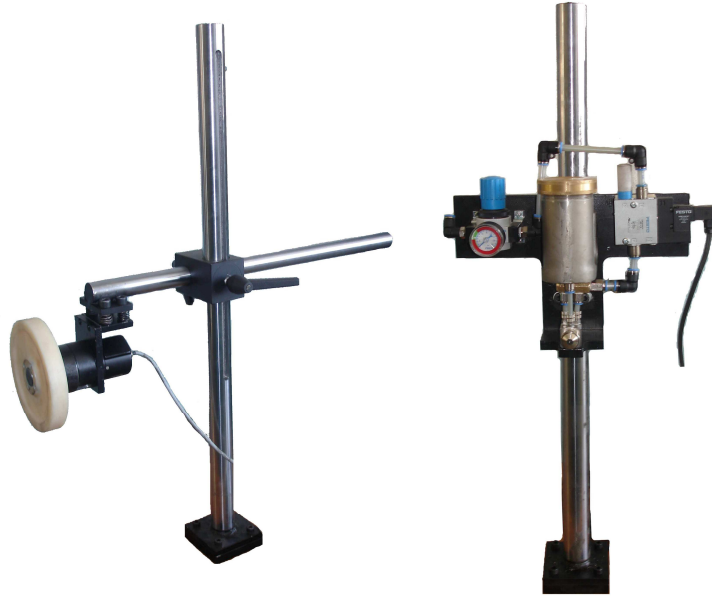
Şekil 12.7 Girdap akımları ile online boru kontrolü.



Şekil 12.8 (a) Segment bobinle boru kontrolü, (b) Segment bobinle profil kontrolü.

Magnetizasyon üniteleri ile boru magnetik olarak doyuma ulaştırılırken, aradaki test bobini ile de malzeme girdap akımı prensibi ile test edilir. Magnetizasyon bobini kullanılmadığı durumlarda test bobininden alınan sinyaller oldukça gürültülü olacağından test işlemi hassasiyetini kaybedecektir. Bu yüzden güçlü bir magnetik alan oluşturan magnetize üniteleri test sırasında mutlaka açık tutulmalıdır.

Girdap akımı test cihazları genelde testere kesme sinyali ile birlikte değerlendirme sinyali verecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ölçüm bilgileri testere kesim noktasına kadar sistemin hafızasında tutulur ve ardından kesme bilgisi ile birlikte borunun sağlam veya ıskarta olduğuna karar verilir. Hat sonunda bulunan bir yaklaşım sensörü sayesinde borunun değerlendirme kararı oluşturulur ve borular sağlam veya ıskarta keselerine doğru yönlendirilir. Tüm bu işlemler imalat hızında devam eder ve test sistemi hattın hız değişimlerine anında reaksiyon gösterir. İstenildiği takdirde form makaralarının herhangi birine yerleştirilmiş bir enkoder sayesinde hat hızı bilgisi test cihazına yönlendirilebilir test cihazının tespit ettiği hataların üzeri boya tabancası ile işaretlenebilir. Şekil 12.9'da boru kontrolünde kullanılmak üzere tasarlanmış bir enkoder ve boya tabancası görülmektedir. Hat hızı ve boya tabancasının sensöre uzaklığı bilindiği takdirde hatanın tam üzerinin boya ile işaretlenmesi mümkündür. Pratikte karşılaşılan hat hızları boru çapı ve et kalınlıklarına da bağlı olarak 30-40 m/dak'dan 140-150 m/dak'lara kadar çıkabilmektedir.



Şekil 12.9 Boru kontrolünde kullanılan enkoder ve boya tabancası.

Boya tabancasının yanı sıra sistemlere korna ve lamba gibi uyarıcı ekipmanlar da bağlanabilmektedir. Online test sistemleri bu özellikleri dolayısıyla imalat operatörüne anında bir geri besleme bilgisi sağlamakta ve imalatı en az kayıp verecek şekilde yapabilmesine imkân tanımaktadır.

12.1.3 Boyuna Dikişli Çelik Borular İçin Offline Test Sistemleri

Offline girdap akımı kontrol sistemlerini online sistemlerden ayıran en büyük özellik boruların belirli boylarda kesilmiş olmasıdır. İmalat hattından 3 ila 12 metre arasındaki boylarda kesilmiş olarak çıkan borular çapak alma, soğuk çekme, ısıl işlem v.b operasyonlardan geçirildikten sonra ve müşteriye gönderilmeden önce mutlaka girdap akımı test işleminden geçirilmek zorundadır. Aksi takdirde yukarıda bahsedilen imalat kademelerinin her birinde borularda hatalar oluşabilir ve ürünün kalitesi düşer.

Offline test sistemlerinde kesilmiş borular bir konveyör sistemi üzerinde sabit hızla, magnetizasyon bobini ve sensör sisteminin içerisinden geçirilerek test edilirler. Boruların, test sisteminin tam merkezinden geçebilmesi için magnetizasyon ünitesi ve sensörü mutlaka yatay ve düşey ekseninde ayarlı bir tabla üzerine monte edilmelidir.

Offline test sistemlerinde dairesel bobin uygulamalarının yanı sıra, döner bobin uygulamaları da yapılmaktadır. İmalat tipine bağlı olarak iki test sistemini kombineli kullanmak da mümkündür. Dairesel bobin test sistemleri ile delik, boşluk v.b enine hatalar tespit edilirken döner sistemler ile çok küçük boyuna çatlaklar tespit edilebilmektedir. Dairesel bobinli test sistemleri özellikle çelik çekme boru imalatı sırasında oluşan kaynak bölgesindeki yüzey çatlaklarını yakalamada yetersiz kalmaktadır.

Bu noktada döner bobinli (rotating) test sistemlerinin kullanılması faydalı olmaktadır. Fakat döner proflu sistemler yüzey pürüzlülüğü ve doğrusallıktan aşırı derecede etkilendiği için standart dikişli boru imalatında kullanılamaz. Bir diğer sakınca da standart boruların döner bobinli sistemlerle testinde girdap akımları kaynak dikişi üzerinden geçerken mutlaka farklı bir sinyal algılayacak ve yanlış hata sinyalleri üretecektir. Bu yüzden boyuna dikişli borularda sadece tavlanmış, ve doğrultulmuş çelik çekme boruların testlerinde kullanılabilir. Bu sebeple döner bobinli test sistemlerinin uygulamaları mil kontrolleri bölümünde anlatılmıştır.

Offline test uygulamalarına örnekler Şekil 12.10 ve Şekil 12.11(a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 12.10'da görülen sadece dairesel bobin kontrol uygulaması, Şekil 12.11(a) ve (b)'de görülenler ise dairesel bobin ve döner sistem kombineli test uygulamasıdır.



Şekil 12.10 Offline dairesel bobin test sistemi.



Şekil 12.11 (a) ve (b) Kombine test uygulamaları.

Şekil 12.11 (a)'da RS65 ve ME90 kombine offline test uygulaması, Şekil 12.11 (b)'de RS130 ve ME120 kombine offline test uygulaması görülmektedir. Her iki sistem de çelik çekme boruların boyuna ve enine hatalarını aynı anda tespit etmek amacıyla hizmet etmektedir. Benzer sistem mil kontrollerinde de kullanılmaktadır.

Offline test işlemlerinin en belirgin özelliği ve sorunu boruların giriş ve çıkış bölümlerinde test edilemeyen bölgelerin oluşmasıdır. Teste başlama ve bitiş bilgisi magnetizasyon bobininin girişindeki fotosel ile belirlenir. Boru magnetizasyon bobinine girerken gelen sinyal, hat hızı bilgisi ve limit switch-bobin arasındaki mesafe göz önüne alınarak teste bir miktar geç başlanır. Aksi takdirde bobinin içerisinde boru yok iken gelen sinyaller çok büyük değerlerde olur ve boru ıskarta olarak işaretlenir. Benzeri durum borunun çıkışı için de geçerlidir. Fotoselden boru sonu bilgisi alındığında belirlenen süre sonunda test işlemi bitirilerek çıkış sinyallerinin alınması engellenir. Sonuç olarak boru giriş ve çıkışında test edilemeyen birer bölüm kalır. Bu bölümlerin yeterince kısa tutulması fotosellerin reaksiyon zamanlarına, test sisteminin işlem hızlarına ve hat hızının düzgünlüğüne bağlı olmaktadır. Pratikte test edilemeyen boru başlangıcı ve boru sonu mesafeleri 5cm den 20 cm'ye kadar değişebilmektedir. Test edilemeyecek boru başı ve boru sonu mesafeleri operatör tarafından kalibrasyon esnasında belirlenir.

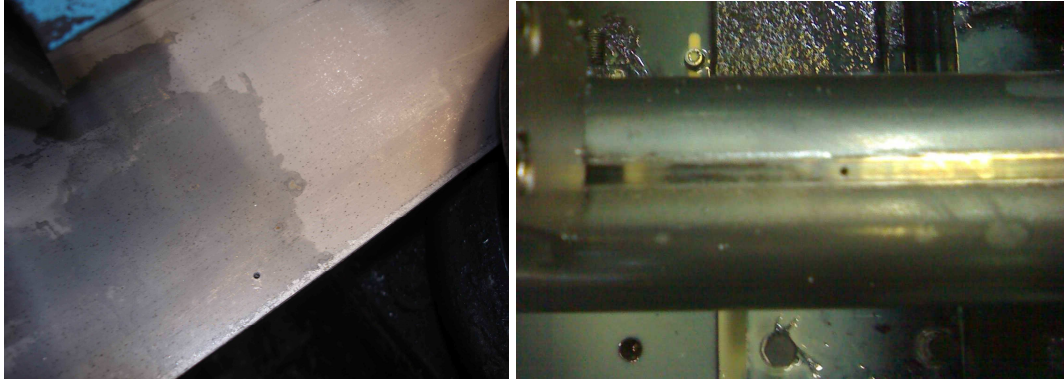
Girdap akımı test cihazları, offline kontrollerde genelde borunun atma noktasına geldiği anda değerlendirme sinyali verecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ölçüm bilgileri konveyör çıkış noktasına kadar sistemin hafızasında tutulur ve yaklaşım sensöründen gelen sinyal ile birlikte borunun sağlam veya ıskarta olduğuna karar verilir. Tüm bu işlemler konveyörün ayarlanan hızında devam eder ve test sisteminde enkoder var ise hattın hız değişimlerine anında reaksiyon gösterir. Enkoder'den gelen hız bilgisi sayesinde hataların tam üzeri boya tabancası ile işaretlenebilir. Pratikte offline test sistemlerinde karşılaşılan kontrol hızları 100...250 m/dak olabilmektedir. İmalat ve online test hızından daha büyük bir offline kontrol hızı, ara operasyonlarda kaybedilen zamanları telafi edebildiğinden nihai ürünün kontrolü açısından çok büyük önem taşımaktadır.

Boru fabrikalarında son birkaç yılda hem online hem offline girdap akımı kontrol uygulamalarını bir arada yaparak ürün kalitelerini en üst düzeye çıkarma eğilimi görülmektedir.

12.2 Girdap Akımı Test Sistemlerinde Kalibrasyon

Boyuna dikişli çelik boruların otomatik girdap akımı muayenesini tanımlayan pek çok standart bulunmaktadır. Hangi standarda göre imalat ve kontrollerin yapılacağını yaygın olarak boruyu alan müşteriler belirlemektedir. Bu standartlardan en bilinenleri ASTM, API, BS, JIS, ETTC, ENEL, DIN, SEP 1925 /1917 /1914, EN 10246 v.b. standartlarıdır. Ülkemizdeki uygulamalarda en çok kullanılan ise API, SEP 1917 ve EN 10246 standartlarıdır.

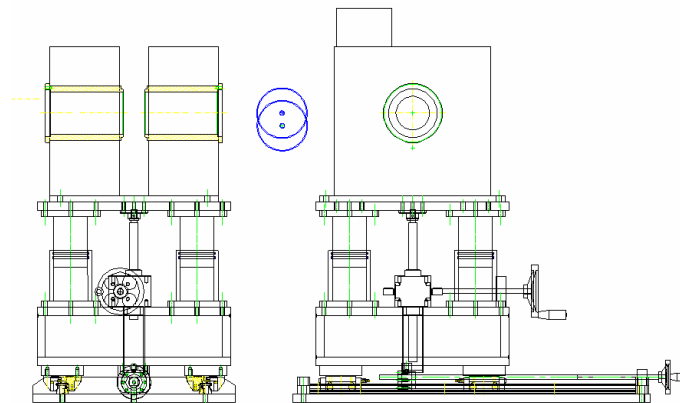
Online ve offline test sistemlerinin kalibrasyonu için genelde 2 yöntem izlenmektedir. Birinci yöntemdeki kalibrasyon, magnetizasyon ünitesi ve test bobininin imalat hattının dışına çıkarılması ve referans delik hataları ile kazanç ve frekans ayarlarının yapılması şeklinde gerçekleştirilir. Ancak bu yöntemde hat hızından bağımsız örnekleme test modları kullanıldığından tam manasıyla bir filtreleme işlemi yapılamamakta ve imalat koşullarından uzaklaşmaktadır. İkinci ve daha çok önerilen kalibrasyon metodu ise, kalibrasyonun imalat hattı veya konveyör sistemi üzerindeki boru üzerine referans deliklerin delinmesi ve bu yapay hatalar yardımıyla ayarların yapılmasıdır (Epik ve diğerleri, 2001). Bu amaçla online sistemlerde akümülatör bölgesindeki saç üzerine belirli aralıklarla delinen referans hata delikleri, gerçek hat hızında tespit edebilmek üzere sistem ayarlamalarının yapılmasına imkan tanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, boru form alırken delinen referans deliklerin standartlarda belirlenen çaplardan farklılık göstermesidir. Bazı ön denemelerle delinmesi gereken gerçek delik çapı tayin edilebilir. Şekil 12.12 (a)'da bant üzerine delinen kalibrasyon deliği görülmektedir. Online testlerde diğer bir kalibrasyon şekli de, imalatın geçici olarak durduğu bir anda kaynak bölgesinden sonra ve soğutma bölgesinden önce referans deliğin açılması şeklindedir. Bu uygulama diğerine nazaran daha kolay olduğundan daha çok kabul görmektedir. Şekil 12.12 (b)'de boru üzerine oluşturulan kalibrasyon deliği görülmektedir. Offline test sistemlerinde ise, her boru çapı ve et kalınlığı için hazırlanmış bir kalibrasyon borusu olmalıdır. Test sisteminin kazanç, filtre ve merkezleme ayarlarının tümü bu kalibrasyon borusu yardımıyla yapılmaktadır (TS EN 10246-3, 2005).



Şekil 12.12 Online kontrollerde (a) bant (b) boru üzerinde kalibrasyon delikleri.

Bu şekilde ayarlamaları tamamlanmış bir test sistemi ile, bir sonraki boru ebadı değişimine kadar sorunsuz test işlemi gerçekleştirilme imkânı sağlanmaktadır. Pek çok test cihazında bulunan dosyalama sistemi sayesinde ayarlar hafızaya kaydedilebilmekte ve benzer imalatlarda tekrar tekrar kullanılabilir.

Girdap akımı testlerinde en önemli hususlardan bir tanesi de, test bobininin merkezlemesinin düzgün yapılması şarttır. Doğru merkezlenmemiş bir boru gerçekten hassas test edilmiş sayılamaz. Bu yüzden boru ile koruyucu klavuzlar arasındaki mesafeler kurulum aşamasında mutlaka mesafe şimleri veya kumpas ile ölçülmelidirler. İmalat hatlarının ve konveyör sistemlerinin merkezleri genelde sabit olduğundan magnetizasyon ünitesi ve sensör sisteminin bu sabit merkeze göre ayarlanması gereklidir. Bu nedenle magnetizasyon kutuları 2 eksenli raylı arabalı ve vidalı tahrikle hareket edebilecek tablalar üzerinde sisteme entegre edilirler. Şekil 12.13’de bu amaçla imal edilen bir ayar sehpası görülmektedir. Bu sehpa bir boyuna dikişli paslanmaz boru fabrikasında online test sehpası olarak kullanılacaktır.



Şekil 12.13 2 eksenli ayarlı online test sehpası.

Cihazların kalibrasyonu için değişik standartlar değişik kalibrasyon şartları önermekte ise de, temelde mantık aşağı yukarı aynıdır. Sadece uygulamada bazı farklılıklar oluşmaktadır. Bilinen bütün test standartları imalat borusundan 1 adet kalibrasyon için sağlam boru ayrılmasını ve bu boru üzerine kalibrasyon delik ve çentiklerinin hazırlanmasını öngörmektedir. Kalibrasyon borusunun üzerinde hazırlanacak delikler için en pratik yöntem matkap ile deliklerin delinmesidir. Delik çapları testin hassasiyetini belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Gereğinden büyük açılmış deliklerin testin hassasiyetini düşüreceği açıktır. EN 10246'da Dairesel bobinli sistemler için üretilen boru çap aralıklarına bağlı olarak delik çapları Tablo 12.1'de belirlenmiştir.

Çentikler için standartlarda verilen değerler de, benzer özellikler taşır. Çentikler "N" tipinde olmalı ve borunun ana eksenine paralel olmalıdır. Hazırlanan çentik derinliği en az 0,5 mm, en çok 1,5 mm olmalıdır. Referans çentikler elektro-erozyon veya ince dairesel freze çakıları ile açılabilir. Çentik kalibrasyonu genellikle döner sistem kalibrasyonlarında tercih edilmektedir.

Tablo 12.1 Boru dış çapına göre referans kalibrasyon deliği çapları

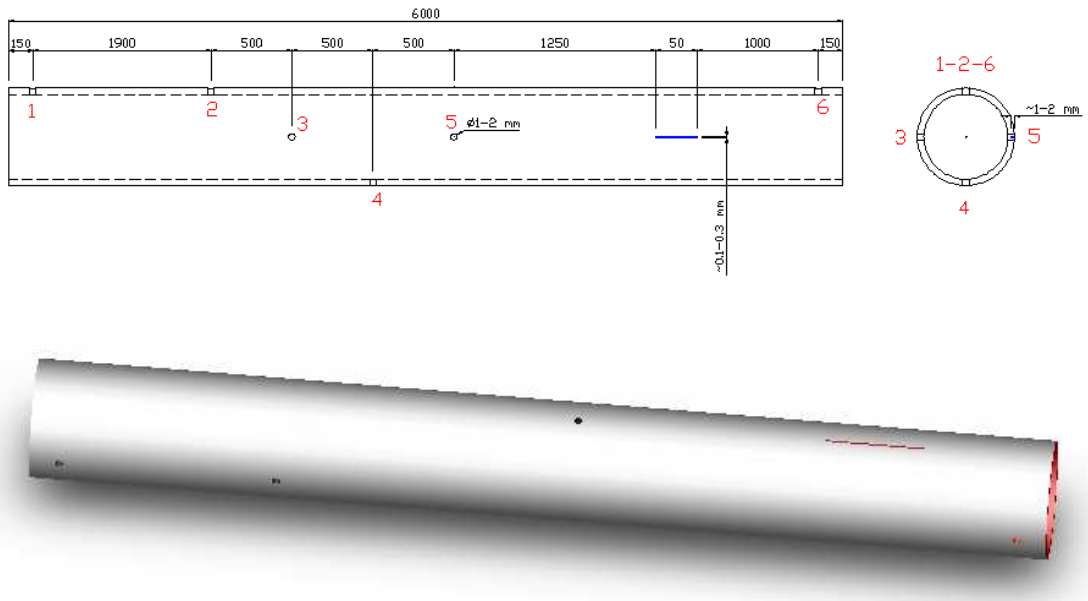
Boru dış çapı ¹⁾ Ø mm	Matkap Çapı ²⁾ mm			Boru dış çapı ¹⁾ Ø mm	Matkap Çapı ²⁾ mm
	E1H	E2H	E3H		E4H
Ø ≤ 10	0,6	0,7	0,8	Ø ≤ 26,9	1,2
10 < Ø ≤ 20	0,7	0,8	1,0	26,9 < Ø ≤ 48,3	1,7
20 < Ø ≤ 44,5	0,8	1	1,3	48,3 < Ø ≤ 63,5	2,2
44,5 < Ø ≤ 76,1	1,0	1,2	1,6	63,5 < Ø ≤ 114,3	2,7
76,1 < Ø ≤ 177,8	1,2	1,4	2,0	114,3 < Ø ≤ 139,7	3,2
177,8 < Ø ³⁾	1,2	1,4	2,0	139,7 < Ø ≤ 177,8	3,7
				177,8 < Ø ³⁾	

1) ENV 10200'e göre
2) ISO 235'e göre toleranslar (Jobber serileri) ve EN 20 286-2 (h8)
3) Sadece segment bobin kullanıldığı durumlarda uygulanır.

12.2.1 Kalibrasyon Borusunun Hazırlanması

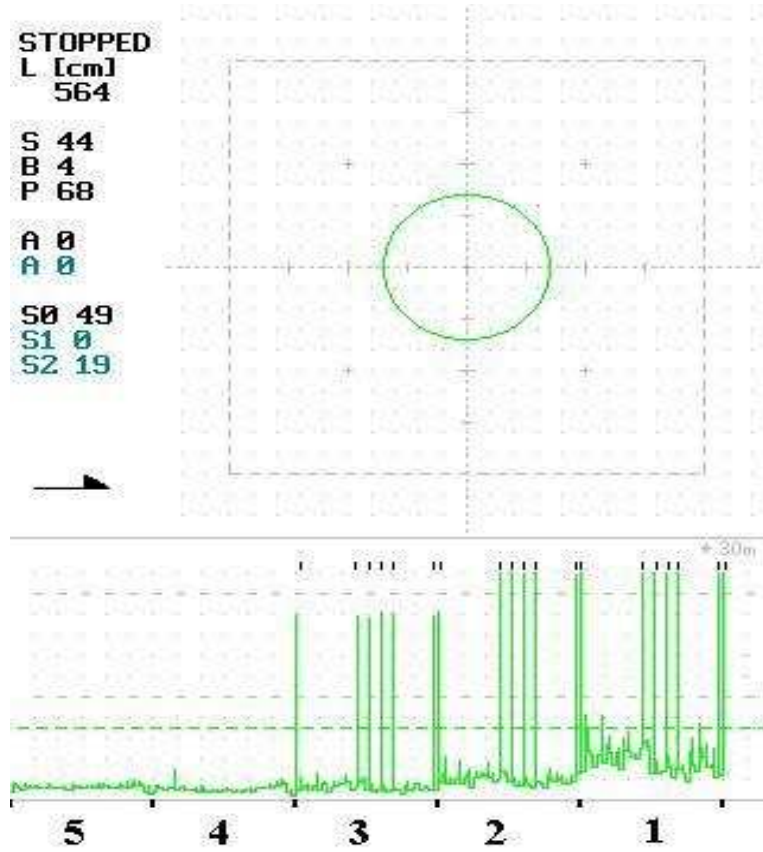
Offline sistemler için pek çok standartta kalibrasyon borusunun, borunun et kalınlığı boyunca radyal olarak açılmış üç dairesel delik ihtiva etmesi gerektiği belirtilir. Bu üç deliğin birbirine göre 120° açı ile çevresel olarak konumlanmasının ve hata sinyalleri açıkça elde edilebilecek şekilde birbirlerinden ve muayene parçasının uç noktalarından yeterince uzakta olmasının gerektiği vurgulanır. Alternatif olarak da kalibrasyon borusunun tek bir delikle oluşturulabileceği ve kalibrasyonun deliğin 0° , 90° , 180° ve 270° konumlandırılarak test sisteminden geçirilebileceği söylenir. Son söylenen yöntem pratikte oldukça zor ve zaman alıcıdır. 3 delikle oluşturulan kalibrasyon borusu ile de, borunun merkezlemesinin yapılması, uygulamalarda pek çok zorluğu beraberinde getirmektedir.

Bunların yerine çalışmada geliştirilen 4 ve 6 delikli kalibrasyon boruları çok daha kolay ve doğru merkezleme olanağı sağlamaktadır. Belirtilen çaplardaki borunun uçlarına açılan 2 delik ile, boru giriş ve çıkışlarındaki test edilemeyen boru başı ve boru sonları kontrol edilirken, diğer 4 delik ile de, tam bir merkezleme yapılarak kontrol olanağı sağlanır. Örnek bir kalibrasyon borusu Şekil 12.14'de gösterilmiştir.



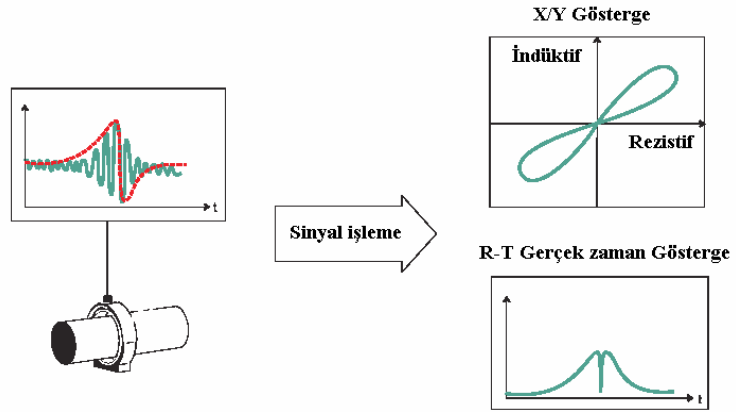
Şekil 12.14 Kalibrasyon borusu.

Şekil 12.15’de 6 delikli bir kalibrasyon borusu ile merkezlemenin ve cihaz ayarlarının yapılışı gösterilmiştir. 1. testte kazanç oldukça yüksek ve filtre oldukça geniş tutulmuştur. 2. testte filtre bir miktar daraltılmıştır. 3. testte kazanç daha da düşürülerek sinyaller ekran yüksekliğinin %80-90 değerine çekilmiştir. Kalibrasyon borusunun 3 kez sistemde test edilmesiyle tüm ayarlar yapılmış olur. 4. ve 5. test sonuçları imalattan gelen 2 borudan alınmıştır. Bu son iki boru sağlam boru olarak değerlendirilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, şayet sistemde döner proflu test imkanı yok ise, kalibrasyon borusunun üzerine çentik hatasının oluşturulmaması gerektiğidir.



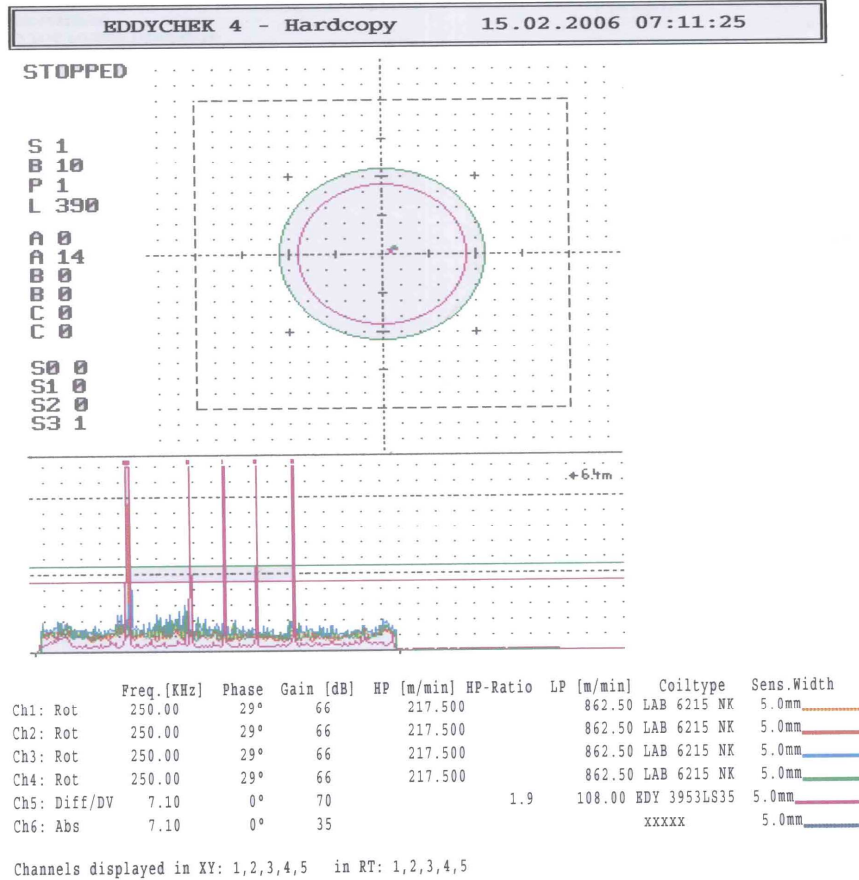
Şekil 12.15 6 delikli bir kalibrasyon borusu ile test sisteminin ayarlanması.

Tüm girdap akımı test sistemlerinde yukarıda görülen 2 farklı gösterge ekranı mevcuttur. Üstte bulunan dairesel gösterge XY gösterge ekranıdır ve bobinlerin empedans değişimlerinin kapalı halkalar şeklinde gösterildikleri bölümdür. Aşağıda bulunan gösterge ise RT (gerçek zaman) göstergesidir ve borunun hareketini de simüle etmektedir (Şekil 12.16).



Şekil 12.16 Gösterge şekilleri.

Test sistemi döner proflu kombine test olanağına sahip ise, kalibrasyon borusu üzerine deliklerden bağımsız olarak Şekil 12.17’de gösterilen koşullarda çentik oluşturulması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde benzer bir kombine sistemde 4 delik ve 1 çentikle hazırlanan kalibrasyon borusunun test sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 12.17 4 delik ve 1 çentikle hazırlanmış kalibrasyon borusunun test sonucu.

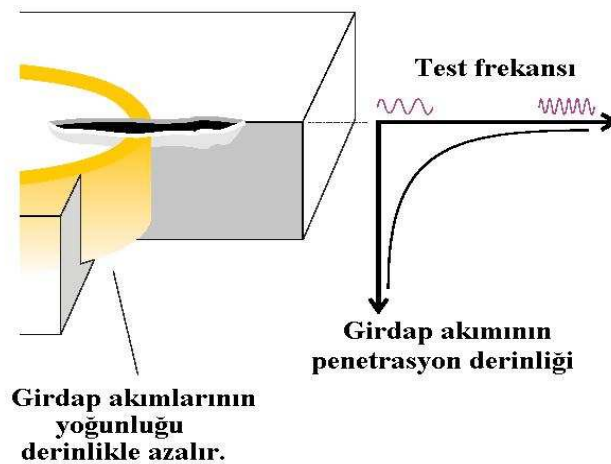
Kalibrasyon kontrolleri yapılırken, kalibrasyon esnasındaki hız ile imalat esnasındaki hızın aynı olmasına dikkat edilmelidir. Frekans, kazanç, faz açısı, filtreler ve magnetik doyurma gibi sistem ayarları da mutlaka aynı olmalıdır. Kalibrasyon kontrolleri en az dört saatte bir sıklıkta yapılmalıdır. Ayrıca operatör değişimlerinde ve imalatın başlangıcında ve sonunda da kalibrasyon kontrolü yapılmalıdır. Başlangıç kalibrasyonu sırasında kullanılan parametrelerden herhangi biri değiştirildiğinde cihaz yeniden kalibre edilmelidir.

12.3 Sistem Ayar Parametreleri

Boyuna dikişli çelik boruların Girdap akımı test cihazlarında yer alan sistem parametreleri frekans, kazanç, filtre, faz açısı, çalışma genişliği ve eşik seviyeleri olarak 5 ana kısma ayrılabilir.

12.3.1 Frekans (kHz)

Frekans, alternatif akımın frekansına bağlı olarak malzemenin içerisinde inilebilecek derinliği, diğer bir deyişle de penetrasyon derinliğini belirleyen en önemli test parametresidir. Şekil 12.18’de gösterildiği üzere girdap akımı frekans arttıkça, girdap akımları yüzeye doğru yoğunlaşırken, frekans azaldığında derinlere doğru iner (Özçetin, S. 2001). Ancak derinlere inildikçe alınan sinyal büyüklüğü azalır ve dolayısıyla testin duyarlılığı da azalmış olur.



Şekil 12.18 Test frekansının penetrasyon derinliğine etkisi.

Girdap akımlarının malzeme içerisine etkin olarak girebildiği mesafe penetrasyon derinliği olarak adlandırılır. Standart penetrasyon derinliği aşağıdaki formülle hesaplanır. Standart penetrasyon derinliği girdap akımı yoğunluğunun yüzeydeki değerinin 1/e (%37) sine düştüğü derinliktir. Bu, aynı zamanda deri derinliği olarak da bilinir. Pratikte 5 penetrasyon derinliğinde girdap akımı yoğunluğu yüzeydeki değerinin %0.7 sine düşer (Epik ve Karadeniz, 2001).

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

δ : Standart penetrasyon derinliği (mm)

σ : Malzemenin kondaktivitesi

f : frekans (hertz)

μ_r : relatif permeabilite

μ_0 : Boşluğun permeabilitesi

Malzemenin test edilmesi istenen kalınlığı ve malzeme özellikleri bilindiği takdirde sistemde hangi frekansın kullanılması gerektiği yukarıdaki formülden hesaplanabilir. Aynı zamanda belirli malzemeler için hazırlanmış frekansa bağlı olarak penetrasyon derinliğini gösteren tablo ve grafikler de kullanılabilir (Tablo 12.2). Genel uygulamalarda test frekansları minimum 1 kHz, maksimum 250 kHz aralığında seçilmektedir. Boru kontrollerinde et kalınlıkları göz önüne alınarak $t=5...6\text{mm}$ için 5kHz. $t=2...3\text{mm}$ için 10kHz. $t=0....2.5\text{mm}$ için 20 kHz değerleri tercih edilmektedir. Döner sistemlerde yüzey kontrolleri amacıyla 250 kHz test frekansı kullanılmaktadır.

Tablo 12.2 Penetrasyon derinliğinin frekansa göre değişimi (Günay, H., çev.,2001)

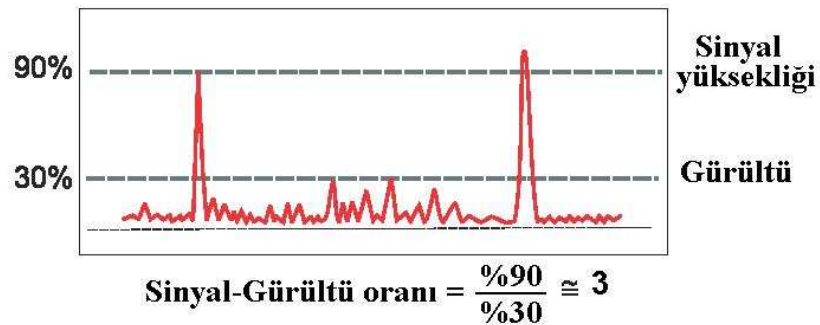
Malzeme	Permeabilite	$\mu\Omega\text{cm}$	Penetrasyon Derinliği				
			1kHz	2,5kHz	10kHz	20kHz	100kHz
Bakır	1	1,7	2,07	1,31	0,65	0,46	0,207
Aluminyum	1	2,82	2,67	1,68	0,84	0,59	0,26
Pirinç	1	7,5	4,35	2,75	1,37	0,97	0,43
Çelik (normal)	500	20	0,31	0,2	0,1	0,071	0,03
Çelik (magnetik doyurulmuş)	1	20	7,11	4,49	2,24	1,59	0,71
Östenitik çelik	1	75	13,77	8,71	4,35	3,08	1,37

12.3.2 Kazanç (dB)

Kalibrasyon borusundaki delik sinyallerinin genliği ekran yüksekliğinin minimum %50'sine getirecek şekilde artırılıp azaltılan bir değerdir. Kazancın çok fazla olması gürültü sinyallerine artırır, az olması da var olan hataların tespit edilememesine yol açar. Pratikteki uygulamalarda kalibrasyon deliklerinden gelen sinyallerin ekran yüksekliğinin %80'ine getirilmesi tavsiye edilir. Bu artış tamamen test hassasiyetinin artırılmasını sağlamaktadır. Bu amaçla 2-3 dB'lik bir artış öngörülebilir. Standart girdap akımı cihazlarında kazancın 6dB'lik artışı sinyal yüksekliğini 2 katına çıkaracağı benimsenmiştir.

12.3.3 Filtre

Hata sinyallerinin çevreden gelen ve gürültü olarak adlandırılan sinyallerden arındırılması amacıyla sinyaller filtrelenir. Filtre uygulamalarındaki esas nokta, kalibrasyon deliklerinden gelen hata sinyallerinin net bir şekilde diğer sinyallerden ayırt edilmiş şekilde görüntülenebilmesidir. Pratikte, sinyal-gürültü oranı 3 olarak benimsenebilir (Şekil 12.19). Filtre ayarları bu oranı sağlayacak şekilde yapılır. Pratikteki uygulamalarda filtreler hat hızına (m/dak) bağlı olarak ayarlanır. Filtreleme çok önemlidir ve mutlaka imalat hattı üzerinde deneyler sonucunda yapılmalıdır.



Şekil 12.19 Sinyal gürültü oranı.

12.3.4 Faz Açısı





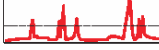

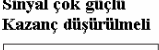



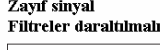
Faz açısı alarm maskeleye uygulamalarında hata sinyallerinin döndürülmesi amacıyla kullanılır. Girdap akımları prensip gereği farklı özelliklerden farklı açılarda ekrana yansır. Örneğin yüzey sinyalleri ile hata sinyalleri farklı açılarda oluşur. Maskeleye uygulamaları yapılarak bazı sinyaller değerlendirme kriterleri içerisine alınırken bazıları değerlendirme dışında bırakılabilir. Faz açısı $0..360^\circ$ değişir.

12.3.5 Eşik Seviyeleri

Hata sinyallerini büyüklüklerine göre kategorilere ayırmak amacıyla kullanılır. Standart eşik seviyeleri %30, %50 ve %80 alınarak imalat kalitelerine göre 3 farklı kategoriye ayrılabilir. Bu kategoriler iyi, orta ve kötü kalite olarak isimlendirilebilir. Pratik uygulamalarda yalnızca 1 eşik seviyesi belirlenir. Örneğin eşik seviyesi %50 olarak belirlenmişse hata sinyalinin büyüklüğü %50'yi geçtiğinde boru ıskarta boru, altında kaldığında ise sağlam boru olarak değerlendirilir.

12.3.6 Çalışma Aralığı

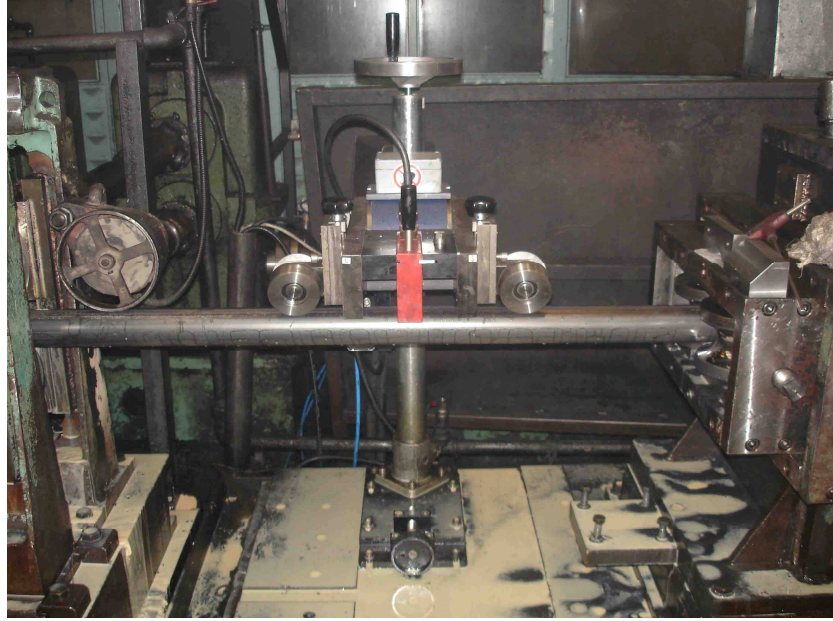
Propların etkin test genişliğini belirler. Bobin sargılarının genişliği 5-6mm civarında değişebilmektedir. Genel test parametrelerinden bazıları Şekil 12.20'de gösterilmiştir.

Genel Test Parametreleri	
 <p>Frekans (1kHz...400kHz)</p>	 <p>Faz açısı (0...360°)</p> 
 <p>Kazanç</p>  <p>İyi sinyal</p>  <p>Sinyal çok güçlü Kazanç düşürülmeli</p>  <p>Sinyal çok zayıf Kazanç artırılmalı</p>	 <p>Filtre</p>  <p>İyi sinyal</p>  <p>Zayıf sinyal Filtreler daraltılmalı</p>  <p>Zayıf sinyal Filtreler genişletilmeli</p>

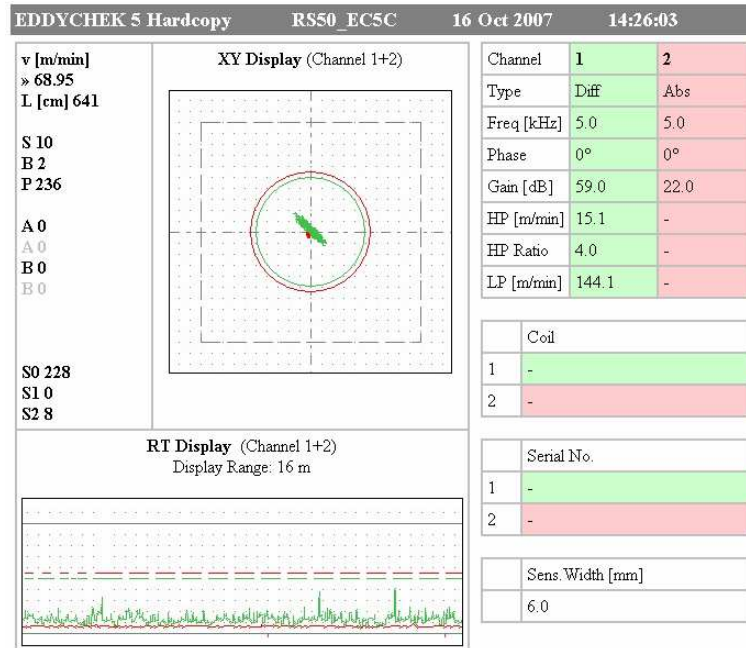
Şekil 12.20 Girdap akımı test sistemlerinde genel test parametreleri.

12.4 Boyuna Dikişli Borularda Online Test Deneysel Çalışmaları

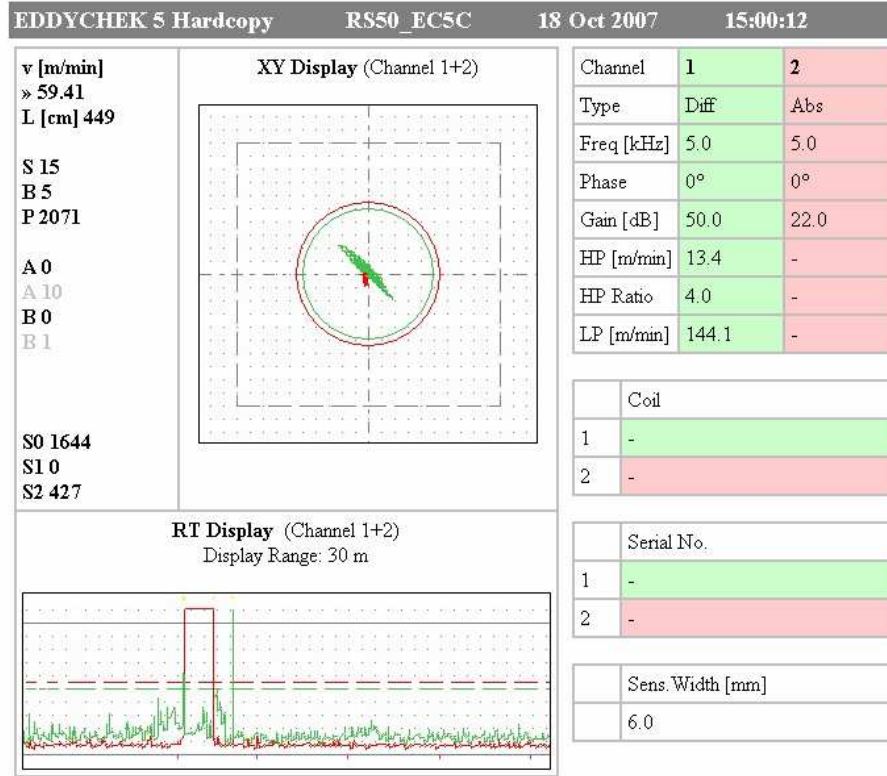
Ülkemizde mevcut çalışan online boyuna dikişli boru test sistemlerinden birisinde yapılan deneysel çalışmalardan örnekler aşağıda verilmiştir. Segment bobin kullanılarak kaynak dikiş test uygulaması genel görünümü Şekil 12.21’de görüldüğü gibidir.



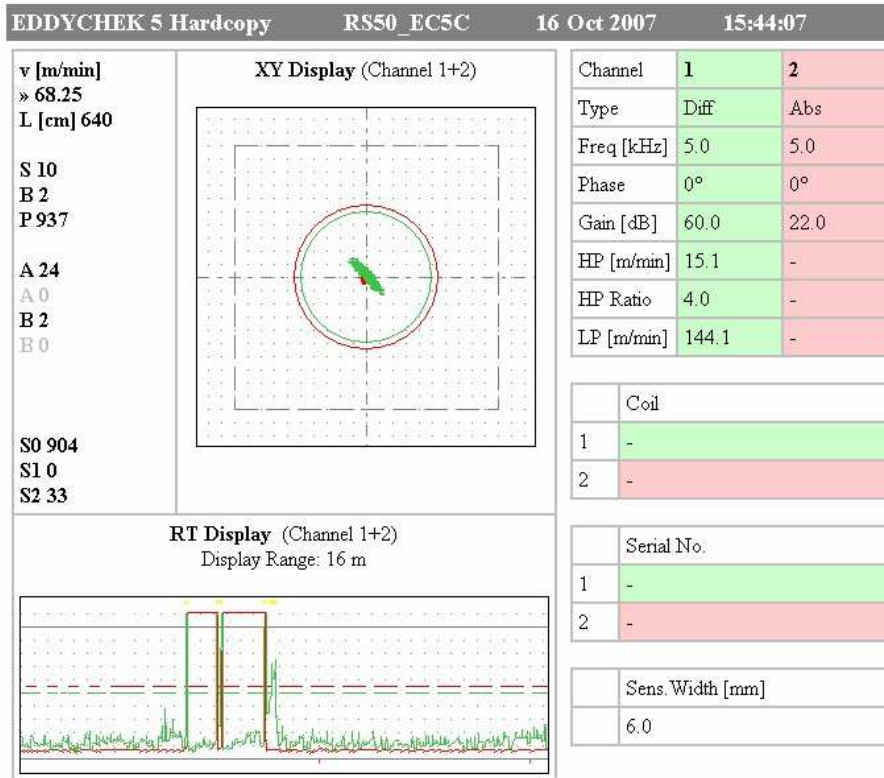
Şekil 12.21 Segment bobinle online test uygulaması.



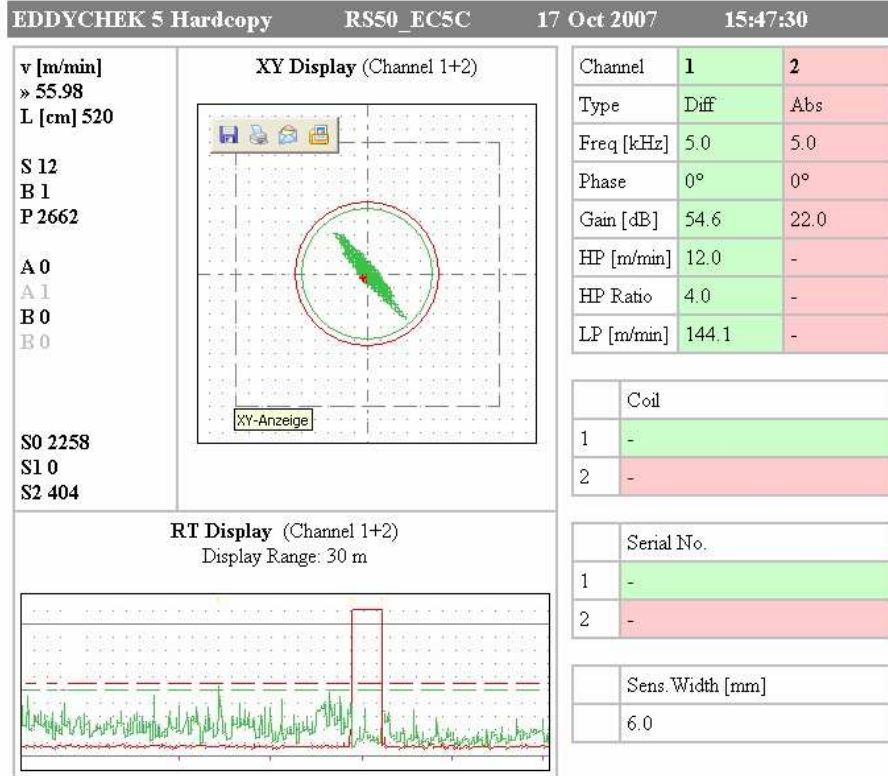
Şekil 12.22 Online hat normal imalat verileri.



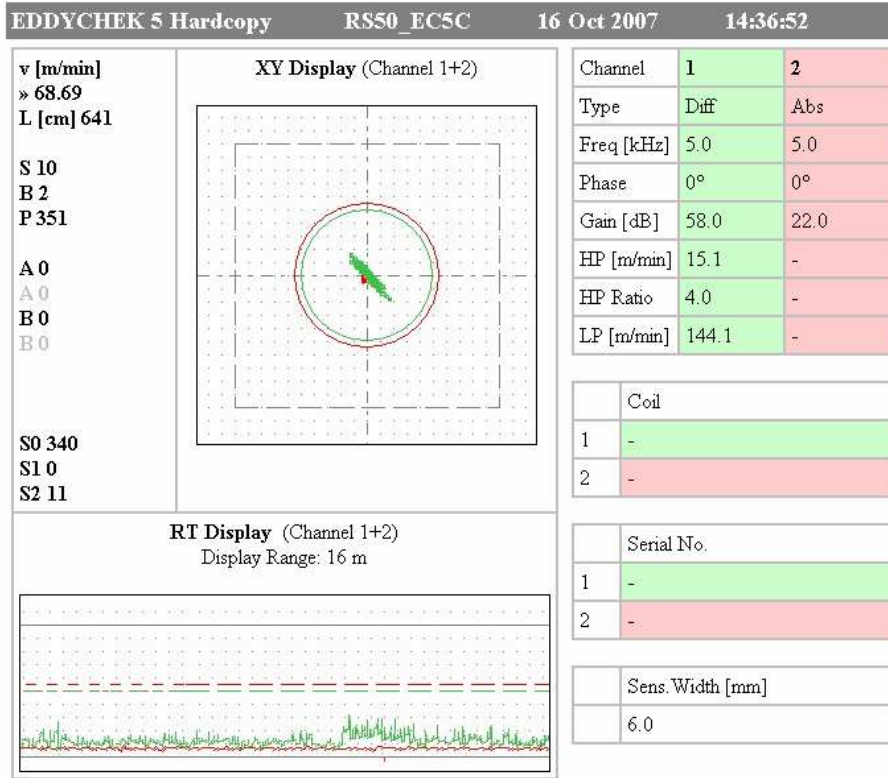
Şekil 12.23 Online kalibrasyon deliği ve açık kaynak.



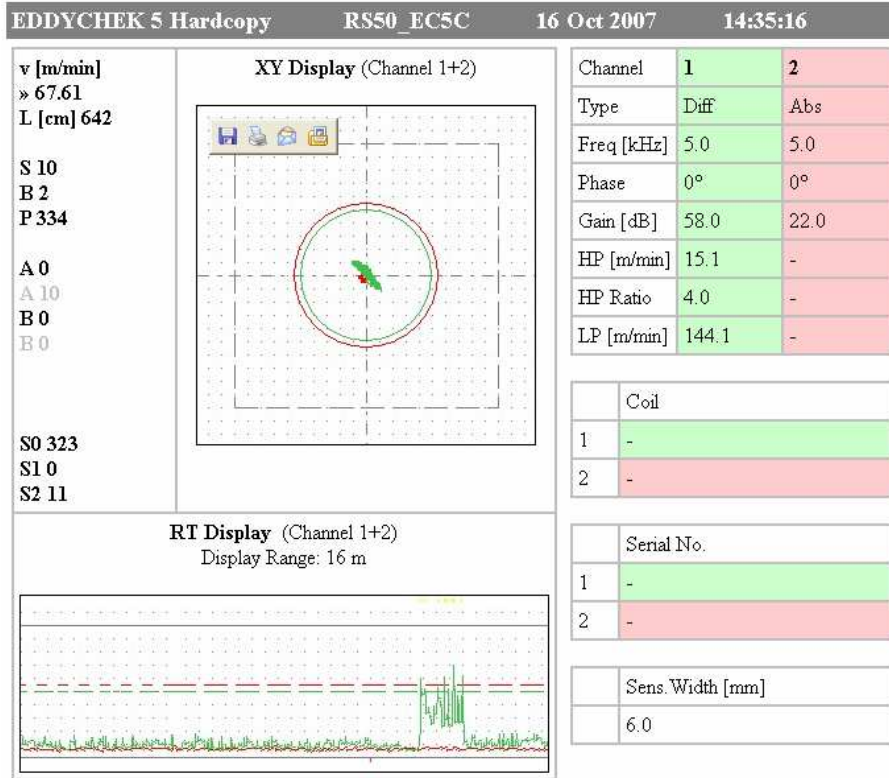
Şekil 12.24 Online hat açık kaynak.



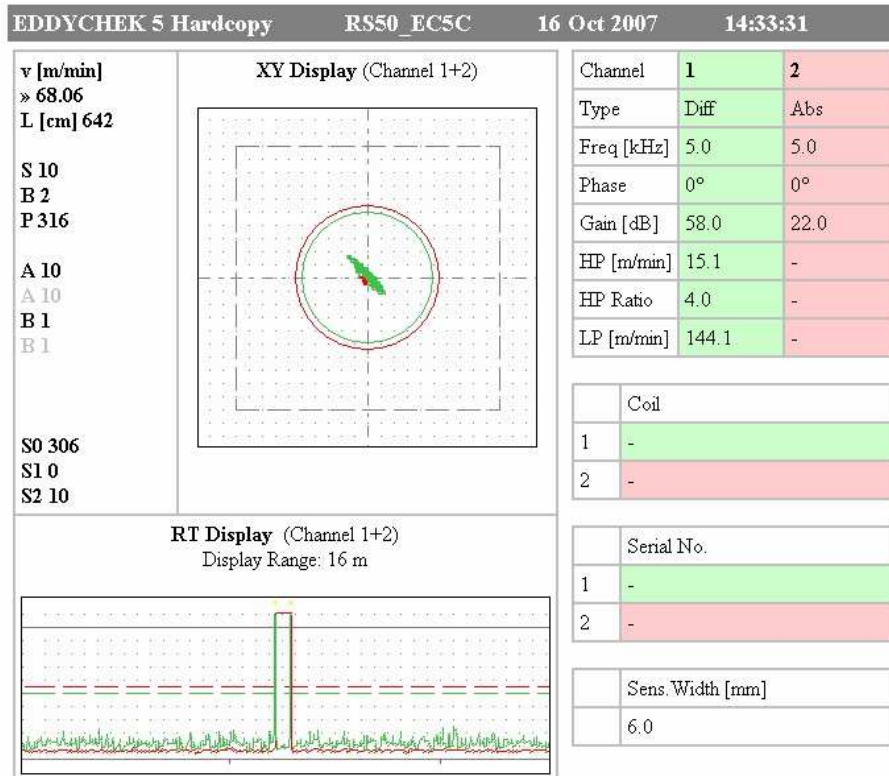
Şekil 12.25 Online hat band değişimi 08KP sağda S235 solda.



Şekil 12.16 İç çapak alınmamış bölgeden, çapak alınmış bölgeye geçiş.



Şekil 12.27 Dış çapak alınmamış bölge.



Şekil 12.28 Kaynak gücünde anlık değişiklik.

12.5 Boyuna Dikişli Borularda Offline Test Deneysel Çalışmaları

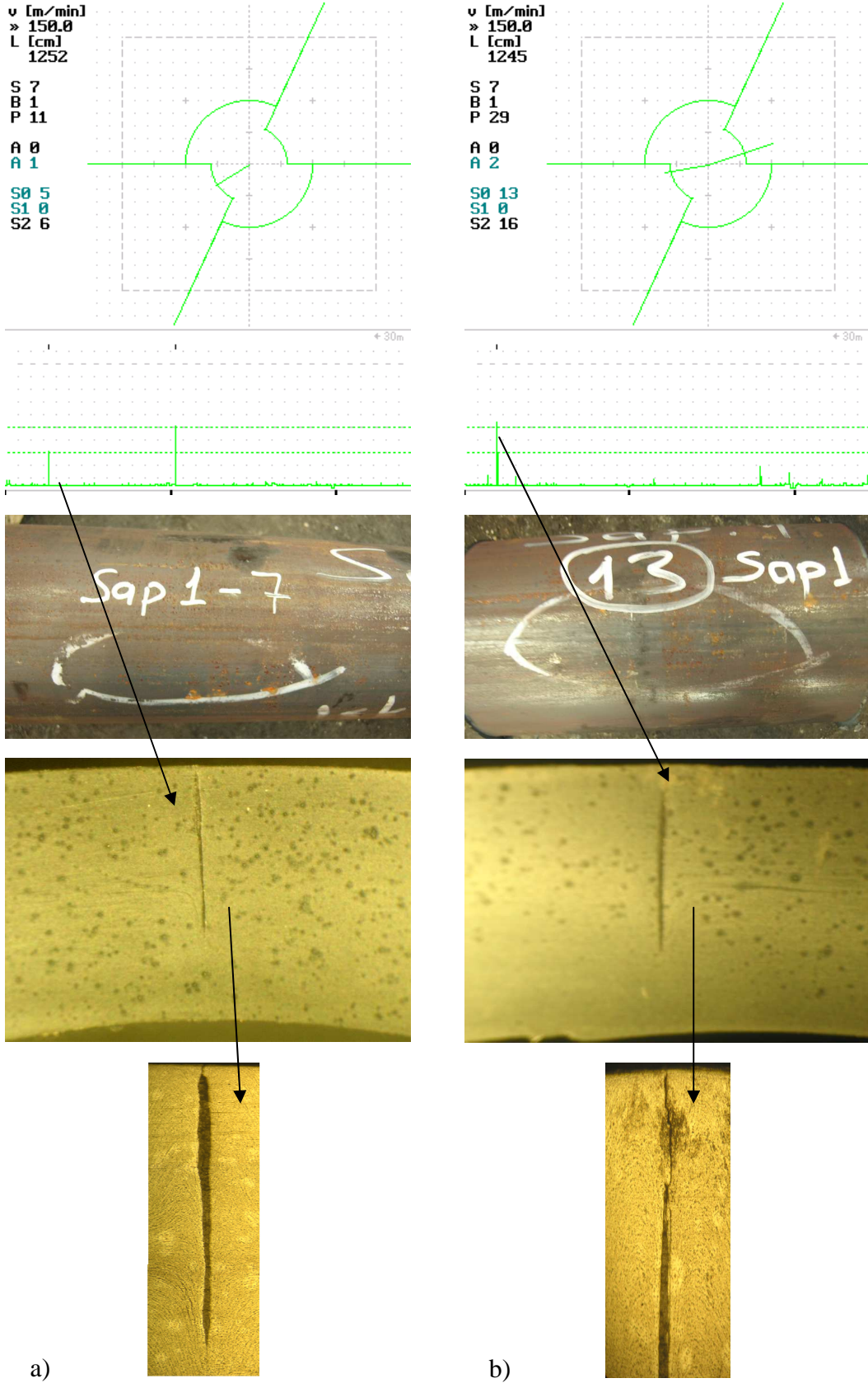
Ülkemizde mevcut çalışan offline boyuna dikişli boru test sistemlerinden birisinde yapılan deneysel çalışmalardan örnekler aşağıda verilmiştir. Dairesel diferansiyel bobin kullanılarak tüm boru hacminin (full body) test uygulamasına ait genel görünümü Şekil 12.29’de görüldüğü gibidir.



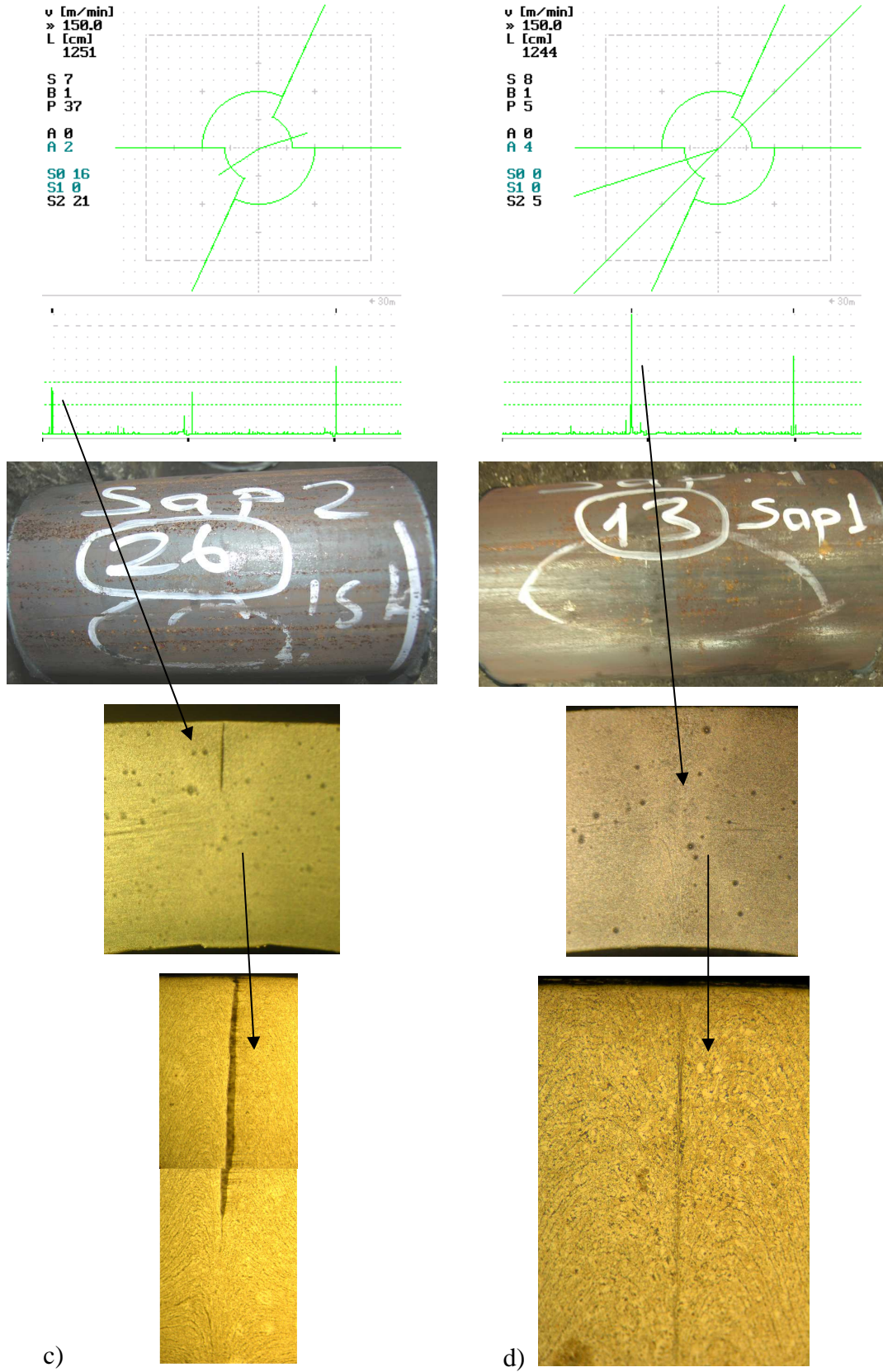
Şekil 12.29 Offline boru kontrol sistemi.

Offline test sistemlerinde esas olan boru çapı değiştiğinde tabla ekseninin değiştirilmesi ihtiyacıdır. Borunun tam bobin ekseninden götürülebilmesi ve minimum titreşimlerle hareket ettirilebilmesi amacıyla sağlam ve hassas ayarlanabilen konstrüksiyonlara ihtiyaç duyulur

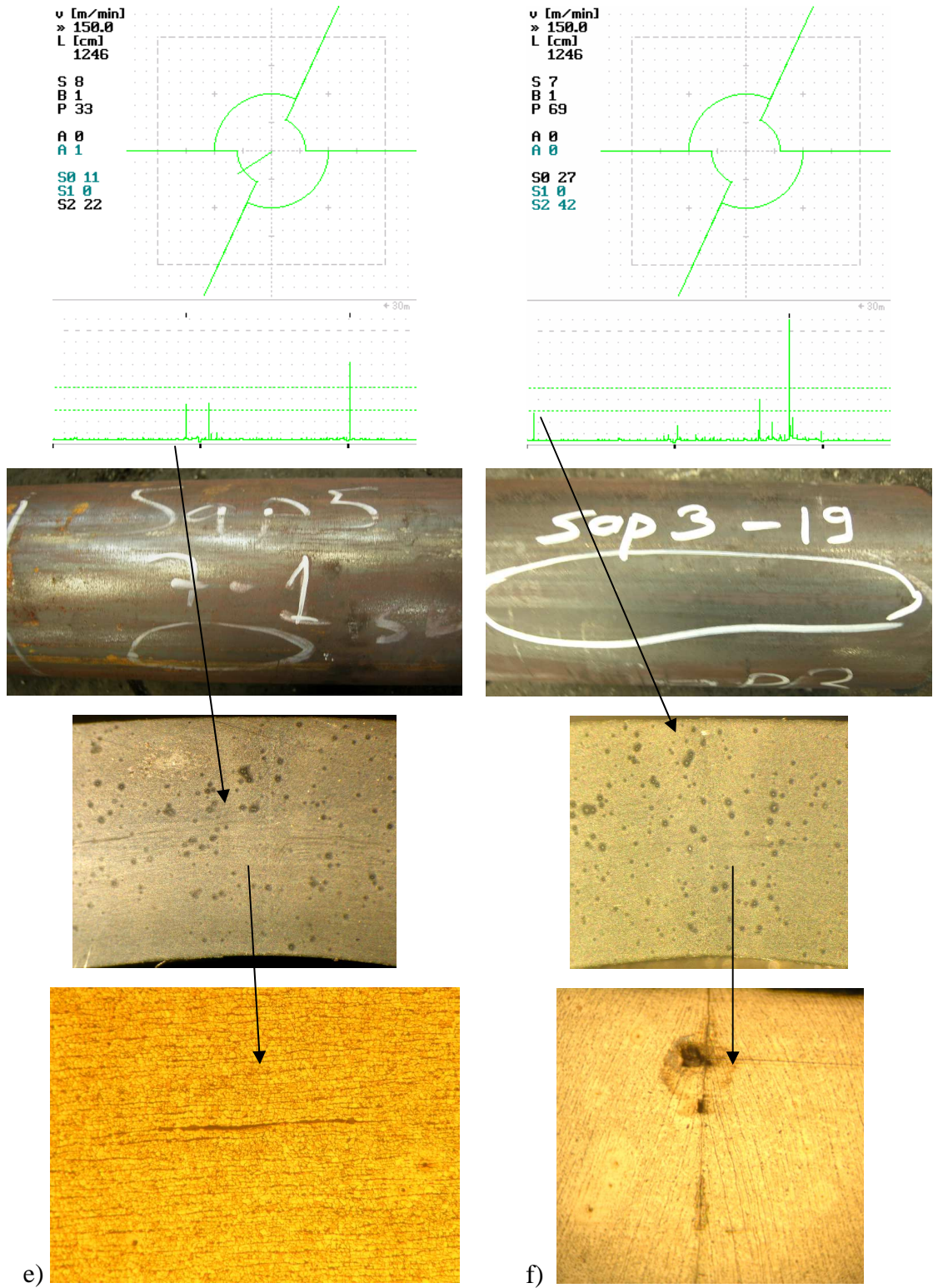
Yukarıdaki resimde görülen sistemde ferromagnetik borularda penetrasyon derinliğinin artırılması DC akımla çalışan magnetizasyon ünitesi ile sağlanır. Magnetize ünitesi bir çift yoğun bobin sargısından ve doğrultma köprü devresinden ibarettir. Test bobininin yerleştirildiği orta bölgede çok yoğun magnetik alanlar oluşturularak girdap akımlarının derinlere inebilmesi ve gürültü sinyallerinin azalması sağlanır. Bu esnada boruda DC kalıcı magnetik alan oluşur. Bunun giderilebilmesinde DC ve bazen de DC ve AC kombineli demagnetizasyon bobinlerine ihtiyaç duyulur. Yukarıdaki uygulamada DC demagnetizasyon ünitesi sağ tarafta görülmektedir.



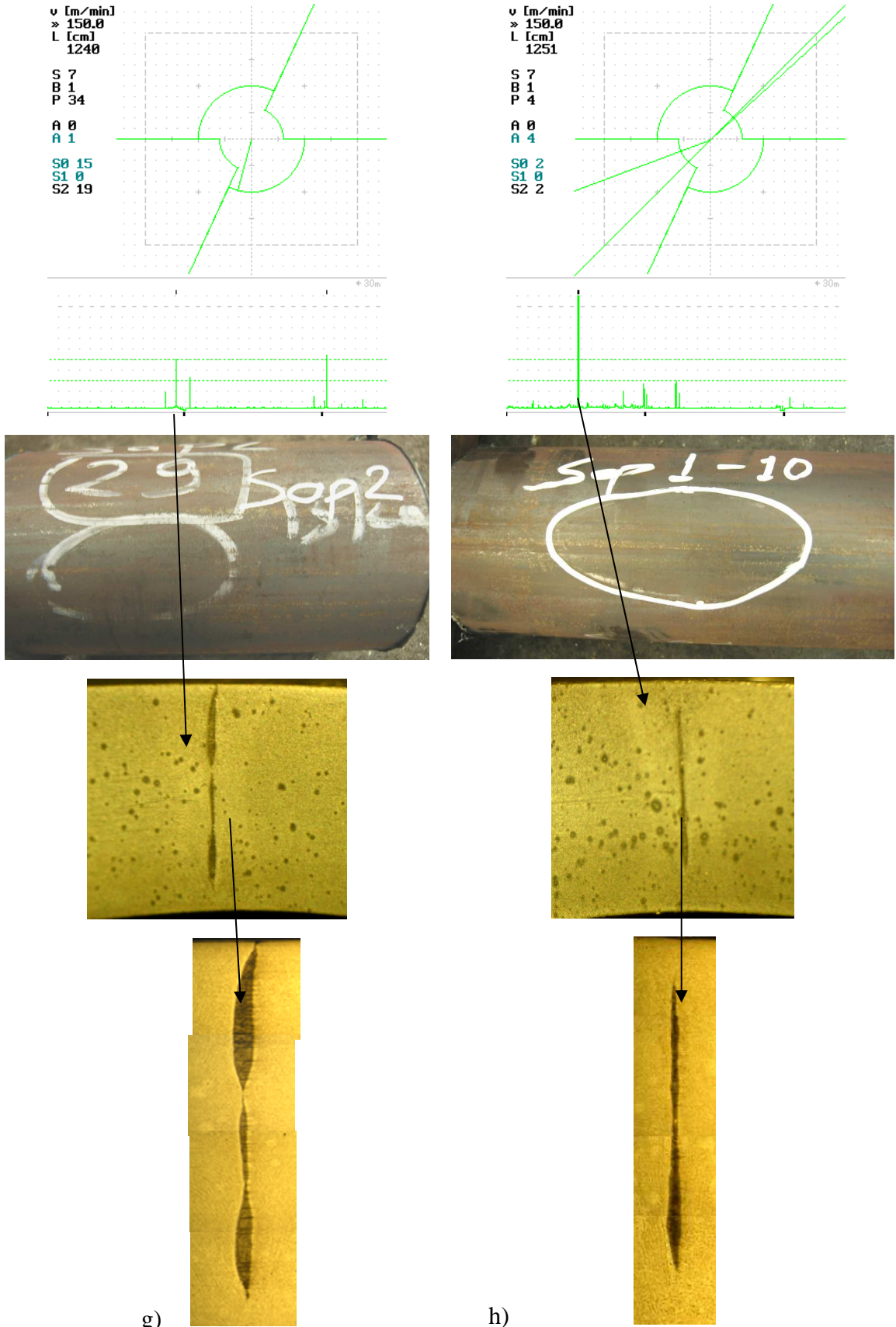
Şekil 12.30 Offline boru kontrollerinde hata tespiti a ve b. Boru çapı: 125,7mm, Boru hızı 150m/dak, $t=4,4\text{mm}$, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı 5kHz, Kazanç 62dB.



Şekil 12.31 Offline boru kontrollerinde hata tespiti c ve d. Boru çapı: 125,7mm, Boru hızı 150m/dak, $t=4,4$ mm, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı 5kHz, Kazanç 62dB.



Şekil 12.32 Offline boru kontrollerinde hata tespiti e ve f. Boru çapı: 125,7mm, Boru hızı 150m/dak, $t=4,4$ mm, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı 5kHz, Kazanç 62dB.



Şekil 12.33 Offline boru kontrollerinde hata tespiti e ve f. Boru çapı: 125,7mm, Boru hızı 150m/dak, $t=4,4$ mm, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı 5kHz, Kazanç 62dB.

BÖLÜM ONÜÇ

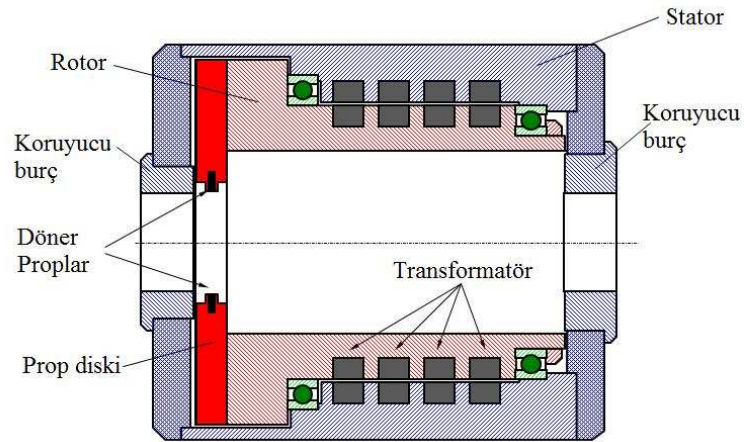
DÖNER BOBINLİ GİRDAP AKIMI TEST SİSTEMLERİ

13.1 Giriş

Çok küçük boyuna hataların, çatlak ve çentiklerin, tespit edilmesi istenilen durumlarda dairesel bobinli test sistemlerinin kullanımı yeterli olmaz. Bu test sistemlerinin yerine veya bunlara ilave olarak, çelik çekme borularında olduğu gibi, döner bobinli test sistemlerinin kullanılması gerekir.

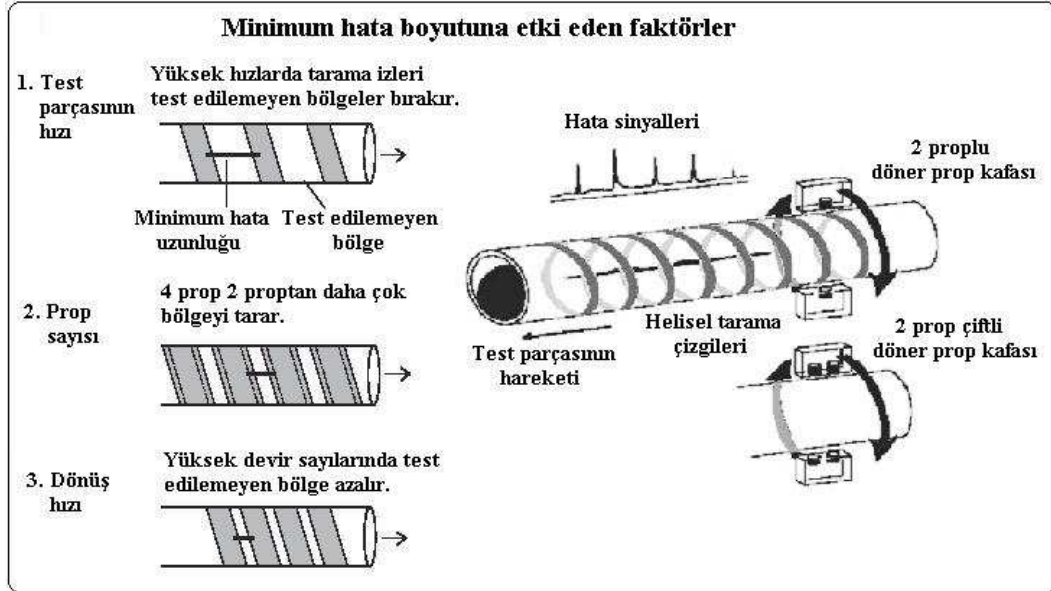
Otomotiv, otomotiv yan sanayi ve makina imalat sektörlerinin en önemli girdilerinden olan dolu malzeme veya millerde işte bu döner prop lu test sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Büyük çaplardan küçük çaplara, sıcak veya soğuk şekillendirme ile çekilen miller, kabuk soyma ve doğrultma işlemlerinden sonra mutlaka tahribatsız malzeme muayene operasyonlarından geçirilmek zorundadır. Silindir simetrik, yüzey pürüzlülüğü kabul edilebilir seviyedeki ve doğrultulmuş millerin yüzey hatalarının en iyi test yöntemi de yine girdap akımı test yöntemlerinden birisi olan döner bobinli girdap akımı test sistemleri olmaktadır.

Bu test sistemlerinde de yine miller, kesilmiş halde veya kesilmeden önce girdap akımı test sisteminin içerisinden geçirilmek durumundadır. Şekil 13.1’de bir döner prop lu test sisteminin iç yapısı görülmektedir.



Şekil 13.1 Döner prop lu bir test sisteminin şematik gösterimi.

Döner bobin kullanılan sistemlerde test hızı, tespit edilmek istenen minimum hata boyutuna bağlıdır. Propların sayısı, dönüş hızları ve milin ilerleme hızı minimum hata boyutunu belirleyen en önemli 3 parametredir. Bu ilişkiler Şekil 13.2 ve Tablo 13.1’de gösterilmiştir.



Şekil 13.2 Döner proplu sistemlerde tespit edilebilen minimum hata boyutuna etki eden faktörler.

Döner proplu sistemlerde şayet test hızları yüksek tutulmak isteniyorsa mutlaka 2 prop çifti kullanılması ve prop devir sayılarının artırılması gerekmektedir. Aksi durumda test edilemeyen bölgeler ortaya çıkar ve minimum hata uzunlukları artar.

Tablo 13.1 İlerleme hızı, devir sayısı ve prop sayısının tespit edilebilen minimum hata boyutuna etkisi

Adım genişliği	Tur Sayısı d/dak	Minimum hata uzunluğu (mm)												
		4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
2 prop		İlerleme Hızı (m/sn) *												
4	750	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
	1500	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0
	3000	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	6000	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
4 prop		İlerleme Hızı (m/sn) *												
4	750	0,13	0,23	0,25	0,28	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,93	1,05	1,18	1,3
	1500	0,27	0,45	0,50	0,55	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,85	2,10	2,35	2,6
	3000	0,53	0,90	1,00	1,10	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,70	4,20	4,70	5,2
	6000	1,07	1,80	2,00	2,20	4,80	5,20	5,60	6,00	6,40	7,40	8,40	9,40	10,4

Tablo 13.1’de görüldüğü gibi örneğin 3000d/dak hızla dönen 2 propla 4mm’lik minimum hata boyu için 0,4m/sn ilerleme hızı gerekirken 4 propla aynı hata boyutu için ilerleme hız 0,53 m/sn olmaktadır.

13.2 Döner Bobinli Sistemlerde Deneysel Çalışmalar

- Test sistemi : RS 35 HS (6000 dev/dak), T-prob
 EDDYCHEK 5 compact, 2 kanal
 ME 15 magnetikleştirme ünitesi, dairesel bobin
 EDDYCHEK 5 compact, 1 kanal
- İmalat hızı : 200 m/dak
- Malzeme : ferritik çelik çekme çubuk, çap Ø7mm- Ø12.0 mm

13.2.1 Sistemin Genel Tanıtımı

İmalat hattı soldan sağa doğru olacak şekilde sistem kurulmuştur (Şekil 13.3). Döner sistem ve magnetizasyon ünitesi, çubukların imalat esnasındaki titreşimlerinin azaltılması amacıyla klavuz makaraları arasında monte edilmiştir. Girdap akımı sinyalleri 3 kanallı cihaz aracılığıyla her bir sensörden ayrı ayrı alınmış ve saklanmıştır.



Şekil 13.3 Test sisteminin genel görünümü.

13.2.2 Temel Ayarlar

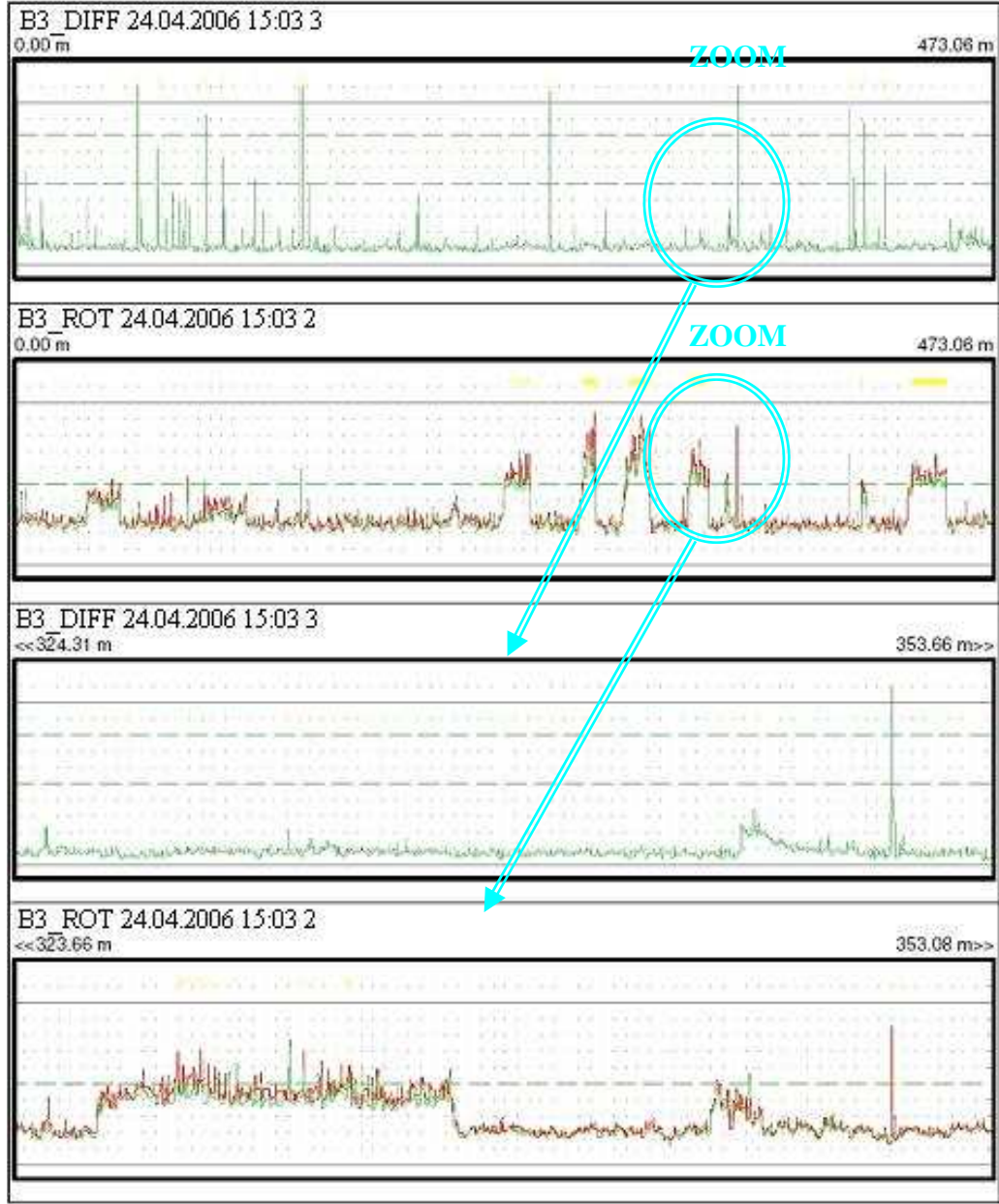
İki adet EDDYCHEK 5 Compact cihazı aynı kabin içerisine monte edilmiştir. Her bir test elektroniği tek bir bilgisayar tarafından kontrol edilmiştir. Sensörlerin temel ayarları aşağıda görüldüğü gibi yapılmıştır.

Tablo 13.2 Test sensörlerinin temel ayarları

Döner sistem (RS35HS – T-prob)		Dairesel bobin (EDY 3951LM9)	
Test frekansı	330 kHz	Test frekansı	30 kHz
Kazanç - Kanal 1	58.0 dB	Kazanç - Kanal 1	56.0 dB
Kazanç - Kanal 2	56.8 dB		
Filtre aralığı (Band geçiş filtresi)	778.9 – 967.1 m/dak	Filtre aralığı (HP oranı 4.0)	30 - 161.7 m/dak
Alarm maskeleri	50%	Alarm maskeleri	% 50 ve %80

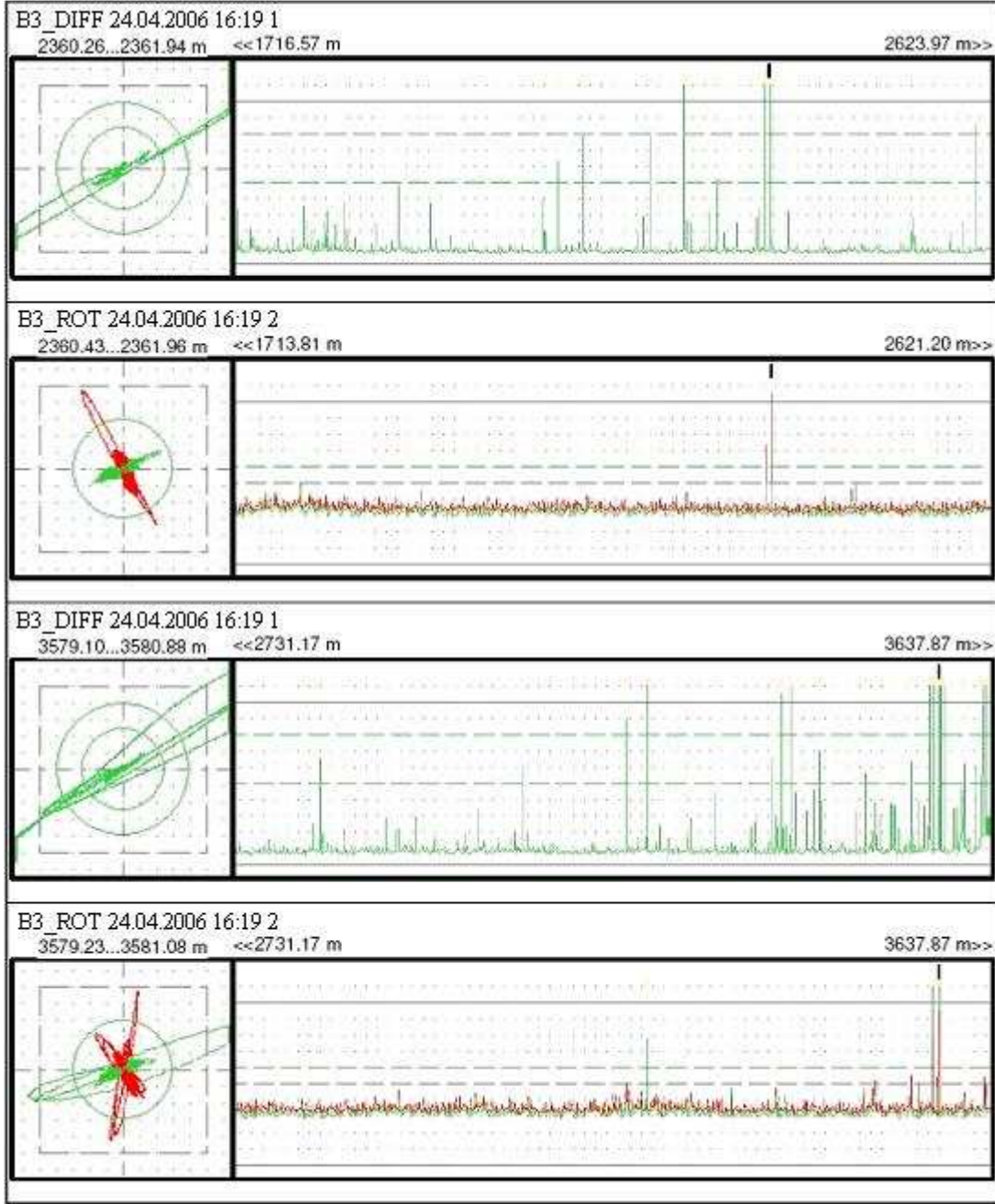
Takip eden sayfalarda deneyler esnasında ve üretim aşamasında elde edilen bazı sonuçlar yer almaktadır. Şekil 13.4’de hem dairesel bobin hem de döner sistemden elde edilen sinyaller karşılaştırma oluşturması açısından birlikte verilmiştir.

Döner sistemlerin boyuna hataların tespit edilmesinde çok faydalı olduğunu göstermek amacıyla bazı çekme hataları simüle edilmiştir. Bu amaçla keskin bir çakı malzeme yüzeyine 10-15m’de bir değerlendirilerek yapay hatalar üretilmiştir. Bu hataların derinliği ve genişliği 0,08-0,35mm ile 0,035-0,12mm aralığında değişmektedir. Hata sinyalinin gürültü sinyaline oranı boyuna hatalar için 2,5:1 den 4:1 ‘e kadar değişme göstermektedir.



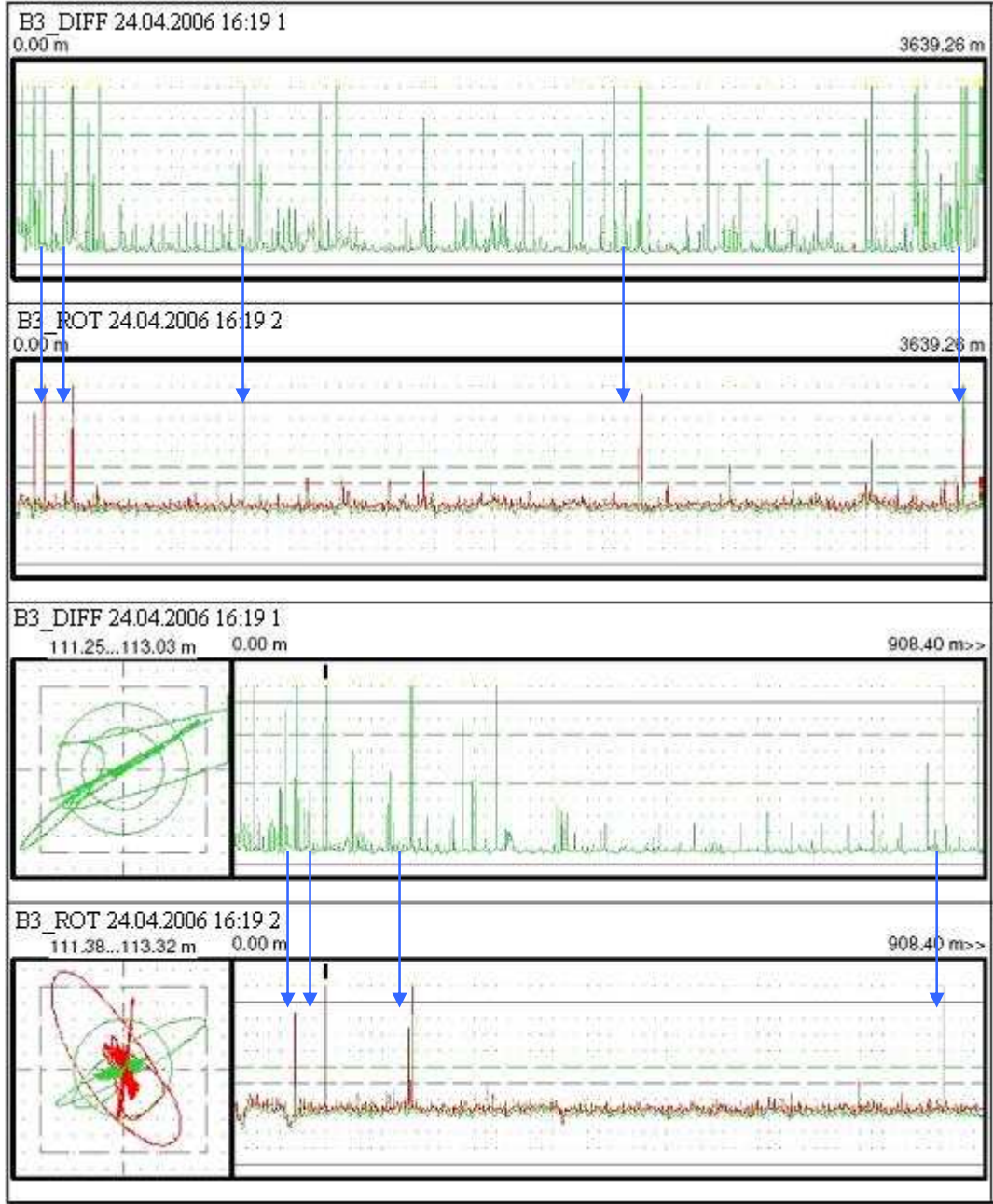
Şekil 13.4 Yapay boyuna hatalardan alınan sonuçlar.

Büyütülmüş kesit görüntülerinde görüldüğü gibi dairesel bobinli sistem çekme malzemelerde görülen saf boyuna hataların tespitine yanıt vermemektedir. Bu amaçla döner bobinli sistemlerle kombineli kullanılması gerekmektedir.



Şekil 13.5 İmalat modunda test sonuçları (1).

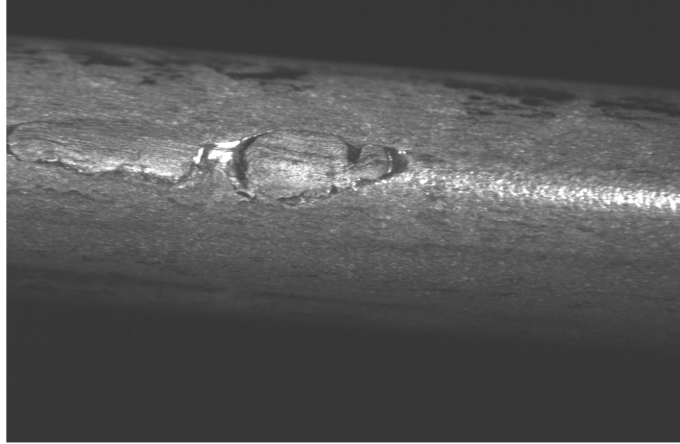
İmalat esnasında bazı sonuçlar yukarıda görüldüğü gibi kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir. Şekil 13.5'in 3. kısmında çok büyük bir enine hatanın oluşturduğu sinyal işaretlenmiştir. Belirgin büyüklükteki enine hatalar örneğin boruların uç kaynaklarında olduğu gibi elbette her iki sensör tipi ile saptanabilir. Dairesel bobin ve döner sistemler bu türden hataların tespitinde sorunsuz çalışırlar.



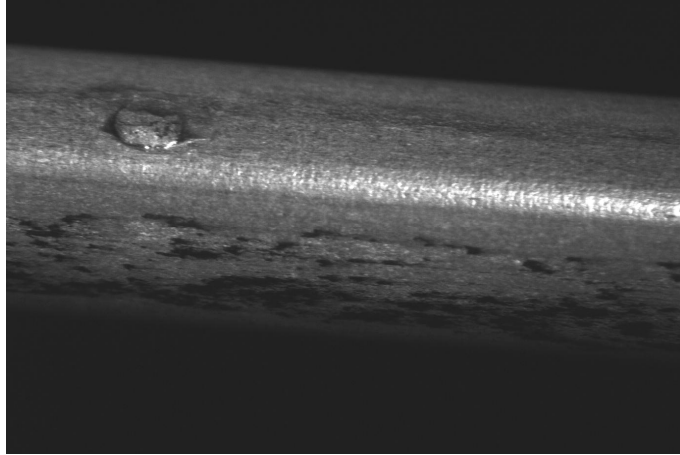
Şekil 13.6 İmalat modunda test sonuçları (2).

Yukarıdaki imalat sonuçlarından çıkarıldığı üzere döner sistemler belirli hata tipleri ve boyutları bakımından dairesel bobinli sistemlerin tespit edebildiği hataları da yakalayabilmektedir. Buna rağmen dairesel sistemlerin tespit edebildiği ve döner sistemlerin reaksiyon gösteremediği pek çok hatanın bulunduğu da bir gerçektir. Bu bakımdan dairesel bobinler küçük ve kısa yüzey hatalarının tespitinde, döner sistemlerin küçük ve kısa boyuna hataları tespit etmesindeki hassasiyetleri kadar etkin oldukları söylenebilir.

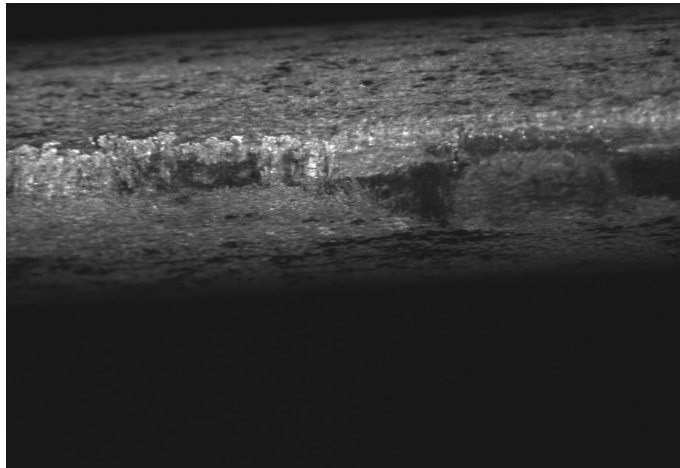
13.3 Hata Kataloğu



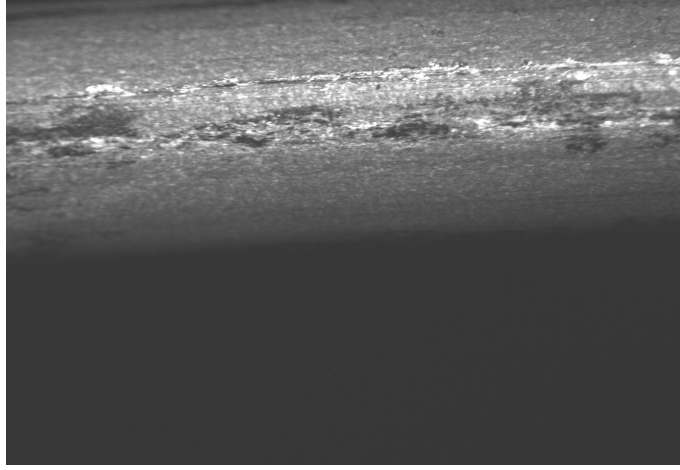
Şekil 13.7 Yuvarlanma hatası (ezilme) dairesel bobin tarafından tespit edilmiştir.



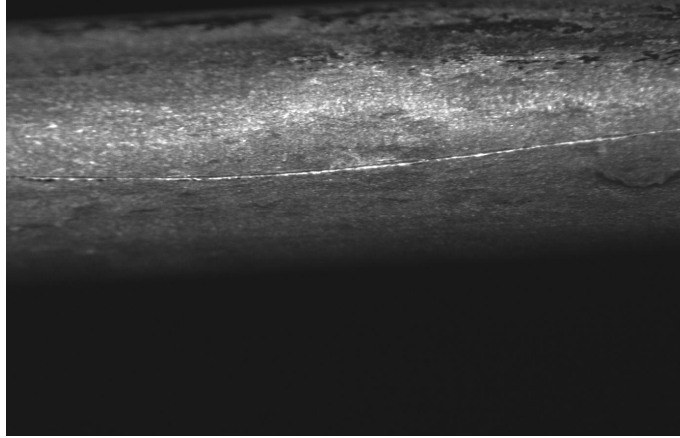
Şekil 13.8 Yuvarlanma hatası (ezilme) dairesel bobin tarafından tespit edilmiştir.



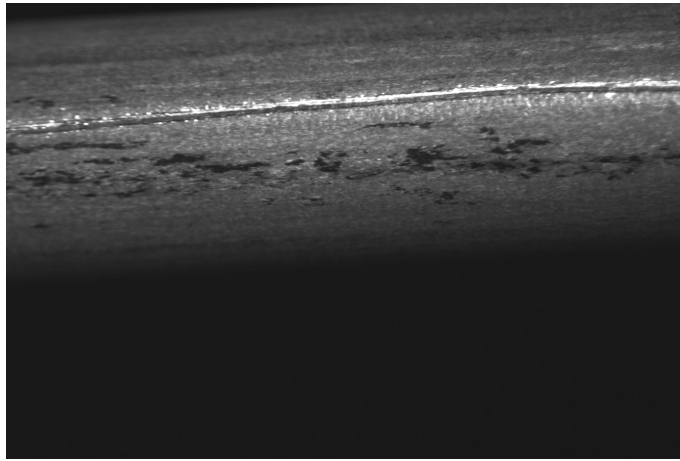
Şekil 13.9 Haddleme hataları her iki sensör tipi tarafından tespit edilmiştir.



Şekil 13.10 Boyuna hata, her iki sensör tipi tarafından tespit edilmiştir.



Şekil 13.11 Boyuna hata, döner sistem tarafından tespit edilmiştir.



Şekil 13.12 Boyuna hata, döner sistem tarafından tespit edilmiştir.

Hata fotoğrafları, Ø8mm çelik miller üzerinden fotoğraf makinası ile kaydedilmiştir.

13.4 Döner Sistem Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yukarıdaki deneylerin sonuçları çekme izleri gibi boyuna hataların güvenli bir şekilde sadece döner sistemler tarafından tespit edilebileceğinin kanıtlarını göstermiştir. En güvenilir sonuçların ise dairesel bobinli test sistemleri ile döner sistemlerin kombineli ve birbiri ardınca kullanıldığı sistemlerde elde edilebileceği görülmektedir.

Fakat sanayide göze çarpan pek çok uygulamada sadece magnetize ünitesi ile birlikte kullanılan dairesel bobinli test sistemler tercih edilmektedir. Bunun en büyük sebebi de bu sistemlerin döner bobinli sistemlerle kombineli sistemlerin yanında oldukça ucuz olmaları ve kullanımlarının daha kolay olmasıdır.

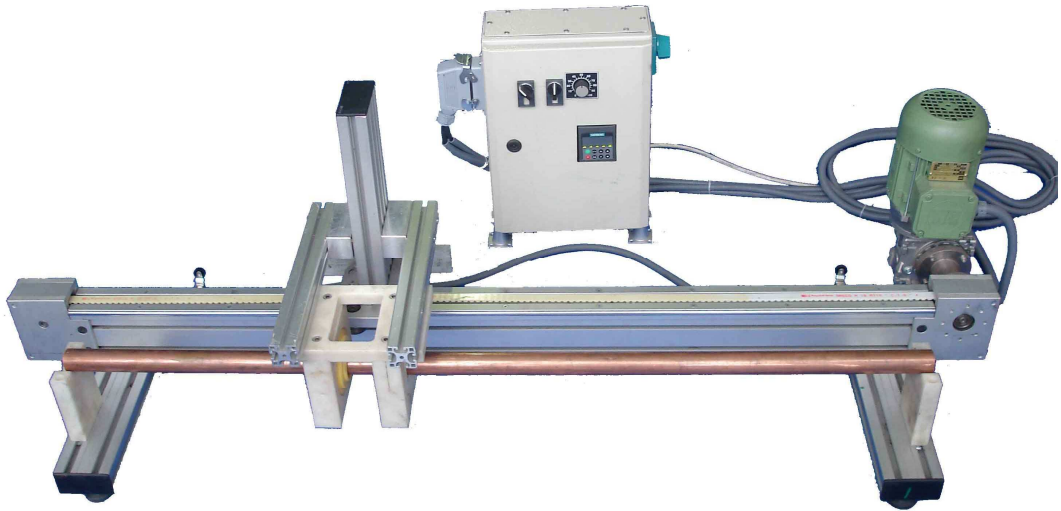
BÖLÜM ONDÖRT

BORU VE MİL TESTLERİNDE OPTİMİZASYON

Bu bölümde boru ve millerin girdap akımları ile testlerinde parametrelerin optimizasyonu için hazırlanan deney düzeneği ile yapılan çalışmalar yer almaktadır. Hazırlanan test düzeneği standart bir girdap akımı test cihazı ile akuple edilerek değişik borular için en uygun test koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Denemelerde bakır, pirinç ve çelik çekme kalibrasyon boruları kullanılmıştır.

14.1 Optimizasyon Deney Seti

Bölüm 12’de detaylı bir biçimde anlatıldığı üzere girdap akımları boru ve mil kontrollerinde yoğun bir kullanım alanına sahiptir. En uygun test koşullarını belirlemede imalat ortamından uzaklaşmak ve deneylerin tekrar edilebilirliğini sağlamak amacıyla bir deney seti tasarlanıp imal edilmiştir. Deney seti borunun bobin içerisindeki hareketini simüle edecek şekilde girdap akımı bobininin hareket ettirilmesi esasına dayanır. Normal imalat koşullarında bobin sabit boru bobin içerisinde geçerken, deney setimizde boru sabit bobin hareketli düşünülmüştür. Bu yaklaşım deneylerin tekrar edilebilirliğini arttırdığı gibi yerden tasarruf edilmesini de sağlamaktadır. Deney seti Şekil 14.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 14.1 Optimizasyon deney seti.

Alüminyum gövdeli dişli kayışlı lineer eksene bir motor redüktör grubu ile tahrik verilmiştir. Test hızının ayarlanabilmesi amacıyla bir motor tahrik ünitesi kullanılmıştır. Strok sonlarında hareketin kesilmesi ve ters yöne harekete başlanabilmesi için 2 adet röle kullanılmıştır. Elektriksel ekipmanlar bir pano içerisine yerleştirilmiş, kumanda butonları, hız ayar potansiyometresi pano kapağına monte edilmiştir. Elektrik panosunun iç ve ön görünümü Şekil 14.2’de gösterilmiştir. Tüm yapı hafiflik düşünülerek alüminyum profillerden oluşturulmuştur.

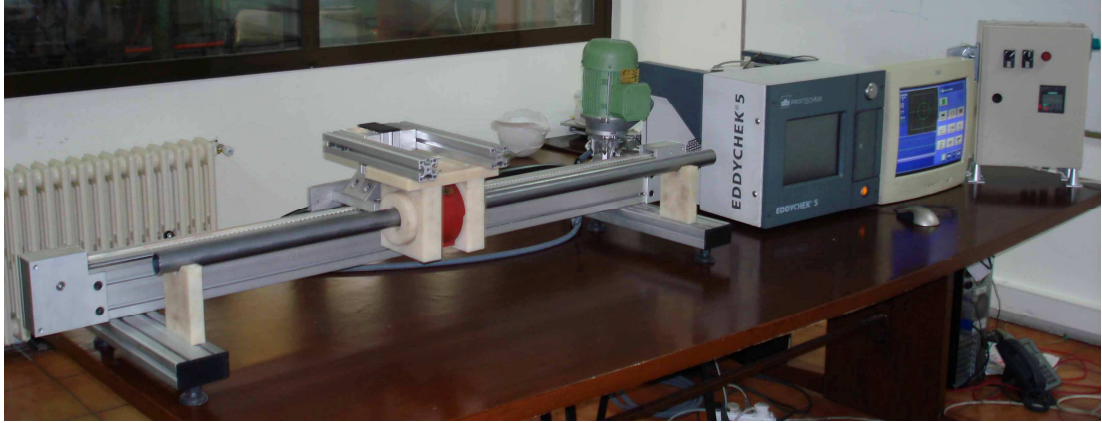


Şekil 14.2 Elektrik panosu ön ve iç görünümü.

14.2 Optimizasyon Deneyleri

Optimizasyon deneylerinde 35mm dış çaplı ve 1,2mm et kalınlığında bakır, pirinç ve çelik çekme borular kullanılmıştır. Bu borular üzerinde EN 10246 test standardına uygun kalibrasyon delik ve çentikler oluşturulmuştur. Borular 44 ve 47 mm iç çaplı test bobinleri ve standart girdap akımı boru test cihazı Eddycek 5 ile test edilmiştir. Test düzeneği Şekil 14.3’da görüldüğü gibidir.

Test hızı, test frekansı, bobin doluluk oranı, kazanç ve filtre parametreleri değiştirilerek standart hata büyüklüklerinin tespiti için en uygun çalışma parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 14.3 Optimizasyon deney düzeneği.

Deney parametreleri Tablo 14.1’de görüldüğü şekildedir. $\varnothing 35\text{mm}$ $t=1,2\text{mm}$ et kalınlığındaki bakır, pirinç ve çelik çekme boru örneklerinde değişik boyutlarda açılan delik hatalarının en uygun tespit edilebileceği parametreler araştırılmıştır. Bobin doluluk oranının etkisini görebilmek amacıyla iç çapı $\varnothing 44$ ve 47mm olan bobinler kullanılmıştır.

Tablo 14.1 Optimizasyon deney parametreleri

Malzeme $\varnothing 35 \times 1,2$ boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekans (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Bakır	44	3.0	2						
Pirinç	47	9.0	3						
Çelik çekme		18.0	5						
		30.0	10						
			15						
			20						
			30						
			50						

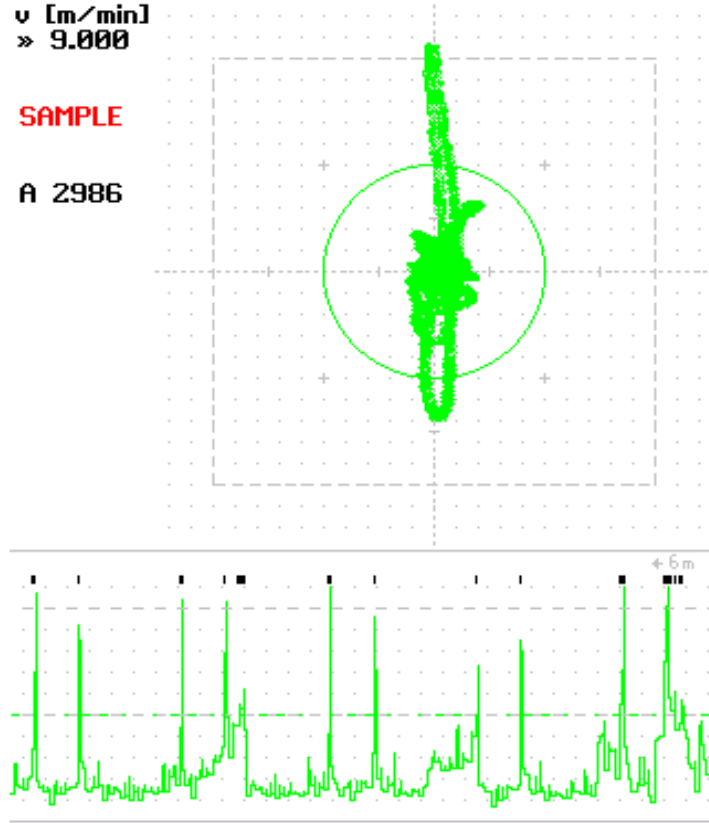
Her bir hat hızı ve bobin tipi için belirlenen frekanslara ait deney sonuçları Ekler bölümünde verilmiştir (bkz. EK 2A.1-6). Tablo 14.2’de optimum sonuçlar özetlenmiştir.

14.3 Optimizasyon Deney Sonuçları

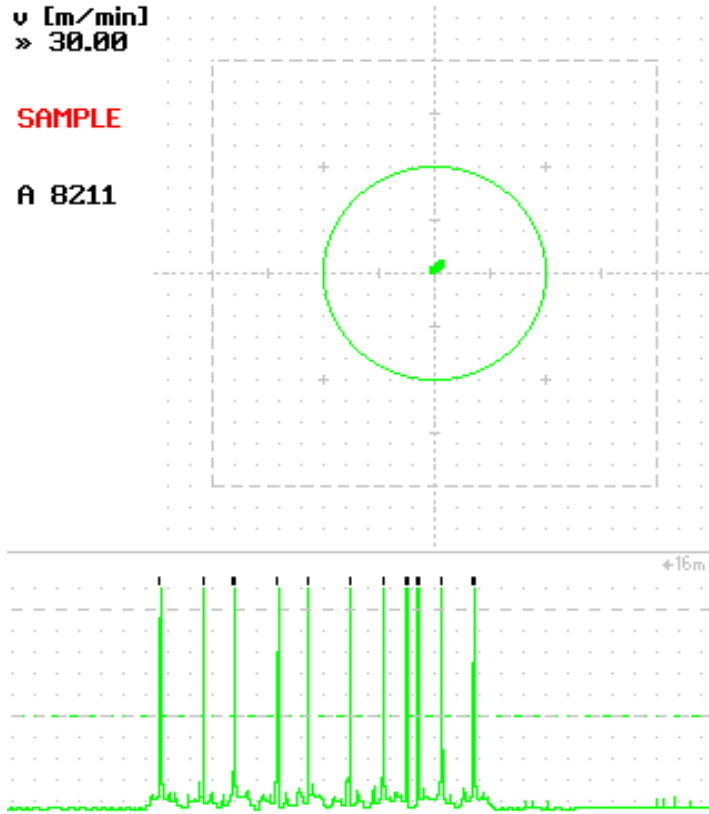
Tablo 14.2 Boru kontrolünde optimum test sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekans (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Bakır	44	3.0	3	90,6	1,76	7,56	90	30	3
		9.0	3	89,6	5	21,3	105	20	5,25
		18.0	3	87,6	8,89	37,9	105	25	4,2
		30.0	3	88	15,8	60	95	23	4,13
	47	3.0	3	81	1,4	6,01	85	12	7,08
		9.0	3	80	1,4	19	100	15	6,6
		18.0	3	86	7,07	33,7	110	20	5,5
		30.0	3	85	14,1	60	110	15	7,3
Pirinç	44	3.0	30	84,6	1,76	7,56	90	15	6
		9.0	20	84,2	4,46	19	100	30	3,3
		18.0	50	85,6	11,2	33,7	100	40	2,5
		30.0	30	84,2	17,7	53,5	90	40	2,25
	47	3.0	5	90	1,4	9,51	105	30	3,5
		9.0	5	88	3,54	19	90	25	3,6
		18.0	5	88	7,92	37,9	95	35	2,7
		30.0	5	90	15,8	53,5	100	30	3,3
Çelik çekme	44	3.0	15	62	1,57	7,56	92	15	6,1
		9.0	20	60	4,46	19	90	15	6
		18.0	30	55,8	7,07	37,9	90	10	9
		30.0	30	60	15,8	60	95	15	6,3
	47	3.0	30	68	3,13	9,51	90	20	4,5
		9.0	30	61	5,61	19	92	10	9,2
		18.0	30	59	9,98	37,9	80	10	8
		30.0	30	59	14,1	60	95	15	6,3

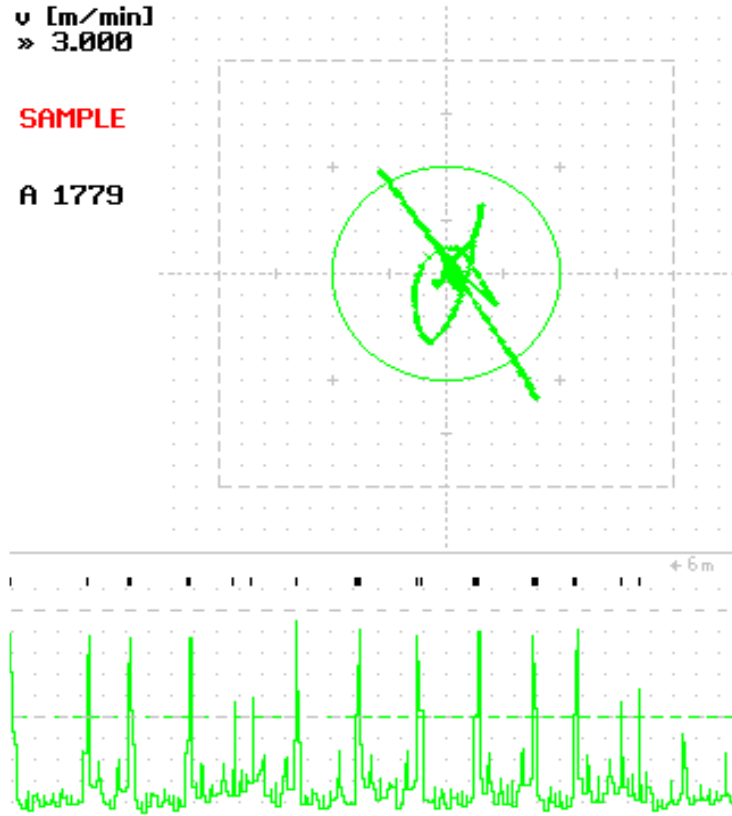
Yukarıdaki tabloda kırmızı renk ile işaretlenen deney sonuçları her bir boru için Şekil 14.4, 5, 6, 7, 8 ve 9'da gösterilmiştir. Bu sonuçlar yapılan deneylerden elde edilen en uygun test parametrelerini vermeleri dolayısıyla seçilmiştir.



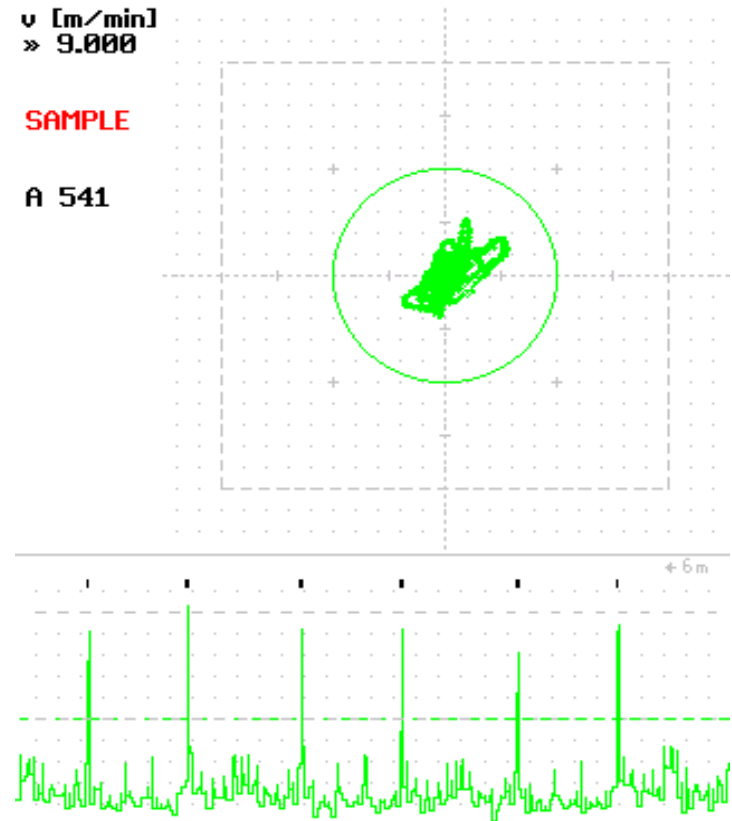
Şekil 14.4 Bakır boru Ø44 bobin 9m/dak hız , 3kHz test frekansı.



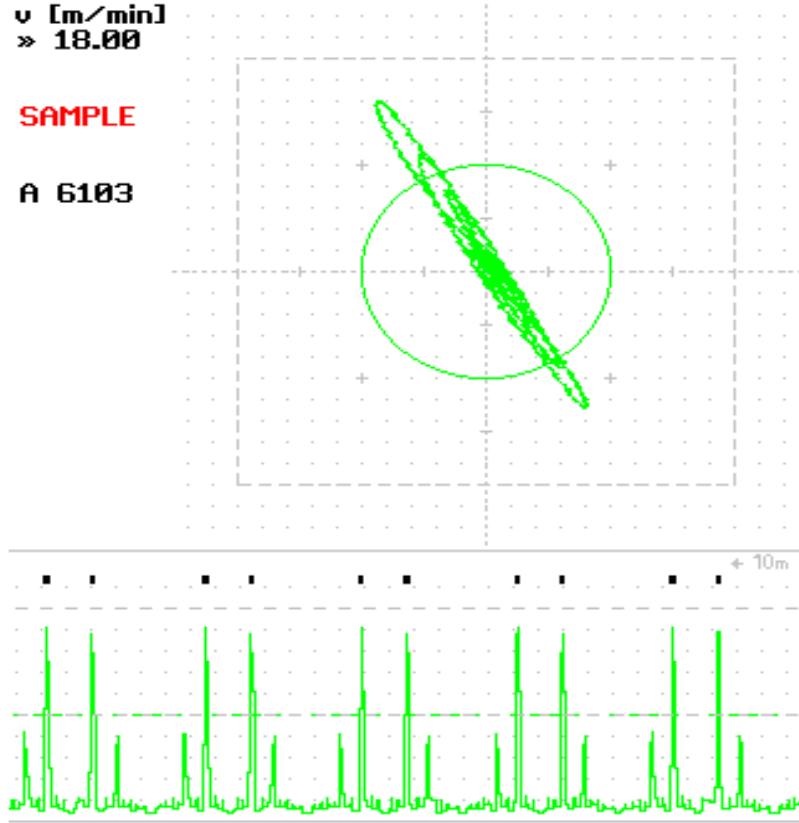
Şekil 14.5 Bakır boru Ø47 bobin 30m/dak hız , 3kHz test frekansı.



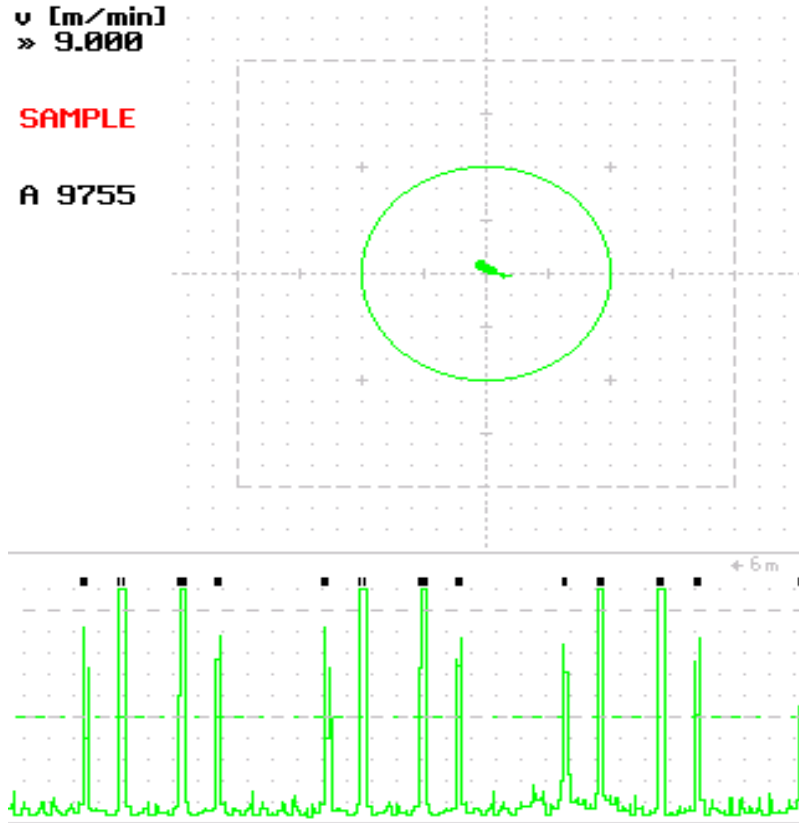
Şekil 14.6 Pirinç boru Ø44 bobin 3m/dak hız , 30kHz test frekansı.



Şekil 14.7 Pirinç boru Ø47 bobin 9m/dak hız , 5kHz test frekansı.



Şekil 14.8 Çelik çekme boru Ø44 bobin 18m/dak hız , 30kHz test frekansı.



Şekil 14.9 Çelik çekme boru Ø47 bobin 9m/dak hız , 30kHz test frekansı.

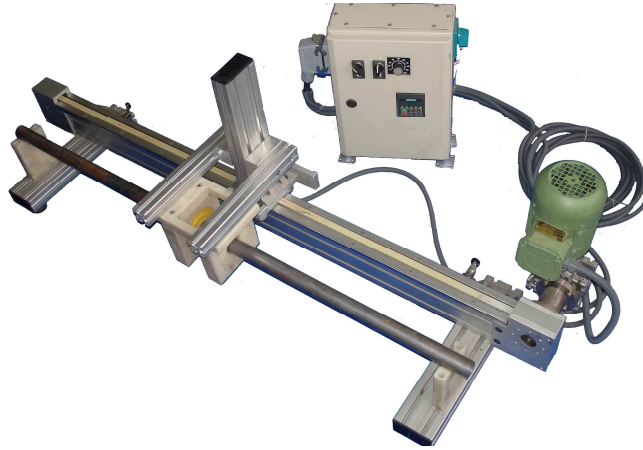
1,2mm et kalınlığındaki bakır boruların girdap akımları ile test edilmesinde en uygun test frekansı 3kHz ve test hızı 30m/dak'dır. Yüksek frekanslar gürültü sinyallerinin artmasına neden olmakta ve bu gürültüler filtre edilememektedir.

1,2mm et kalınlığındaki pirinç boruların girdap akımları ile test edilmesinde en uygun test frekansı 5kHz ve test hızları 9m/dak'dır. Bu frekansta test hızlarındaki artış test hassasiyetinde önemli bir değişiklik meydana getirmemektedir. Bakır ve pirinç boru yüzeylerindeki çekme izleri yüksek frekansların kullanılması esnasında gürültü sinyallerinin artmasına neden olur. Yüksek frekanslar et kalınlığının küçük olduğu durumlarda tercih edilir. Et kalınlıkları arttıkça test frekansları düşürülür.

Düşük ve yüksek geçiş filtreleme yöntemiyle gürültü kontrolünde yüksek geçiş filtresi $\frac{V_{HAT HIZI}}{2}$, düşük geçiş filtresi de $V_{HAT HIZI} \times 2$ alınmalıdır.

Çelik çekme borularında yüzey pürüzlülüğü daha az olduğundan yüksek frekansların gürültü etkisi hissedilmez. En uygun test frekansı 30 kHz, en uygun test hızları 9m/dak ve üzeri alınmalıdır.

Deney düzeneği dairesel bobinler kullanılarak 1,5m uzunluğundaki boruların test edilmesinde kullanılabilir (Şekil 14.10). Aynı düzenek segment veya düz bobin uygulamalarına da müsaittir. Segment bobinle düz malzemeler üzerindeki hata kontrolleri daha ileriki çalışmalara bırakılmıştır.



Şekil 14.10 Deney düzeneğinin genel görünümü.

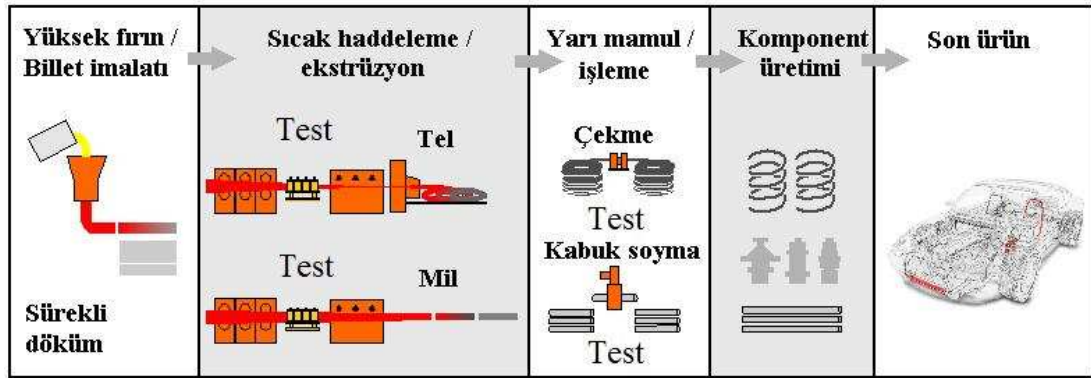
BÖLÜM ONBEŞ

SICAK TEL VE MİL KONTROLÜ

Bu bölümde girdap akımı test yöntemlerinin kullanım alanlarına örnek olmak üzere sıcak tel ve mil kontrolleri verilmiştir. Bilindiği gibi girdap akımı yöntemleri yarı mamul malzemelerin yüzeysel kontrolleri için kullanılabilir. Son yıllarda sıcak malzemelerin imalat esnasında test edilme gereksinimi, girdap akımı test yöntemine olan ilgiyi arttırmıştır. Hızlı bir imalat yöntemi olan tel ve mil imalatları da malzeme kalitesini ve imalat prosesini kontrol altında tutabilecek hızlı bir kontrol yöntemine ihtiyaç duymaktadır. Bu hızlı imalata çok çabuk cevap veren ve prosesi denetleyebilen yegâne test yöntemi de girdap akımı test yöntemleri olabilecektir. Girdap akımları ile kabuklar, boşluklar, delikler, inklüzyonlar ve hasarlı makaralardan doğan tekrar edici hatalar gibi çok geniş bir yelpazede hata tespiti yapılabilmektedir.

15.1 Tel ve Mil İmalatlarına Genel Bakış

Artan imalat hızları ve yüksek kaliteli ürün talepleri tel ve mil imalatçılarına test esnasında kullanabilecekleri yeni proses ve kalite kontrol tekniklerine yönlendirmektedir. Geçmişte bu istekler ancak soğumuş malzemeler üzerinde karşılanabilirken, günümüzde malzemeler sıcakken ve henüz imal edilirken de test edilebilmektedir. Şekil 15.1’de ana hatlarıyla tel ve mil imalatları gösterilmiştir.



Şekil 15.1 Tel ve millerin imalat akış şeması.

Değişik kalitelere çelik malzeme yüksek fırınlarda ergitilerek sürekli döküm yöntemiyle öncelikle billet haline getirilir. Bu ilk ürünler genellikle büyük çelik fabrikalarından temin edilir. Bazı çelik fabrikaları kendi bünyelerinde de tel ve mil imalatı yapabilmektedir. Soğuk haldeki billetler ısıtma fırınlarında yeniden ısıtılarak (1100-1200°C) akkor haline getirilirler. Ardından sıcak malzeme fırından alınarak çekme hattı üzerine getirilir ve çekme işlemine başlanır. Çekme işlemi birçok çekme makara grupları arasından geçerken malzemenin kesiti küçülür ve hızı artar. Bu aşamada imalat türüne göre malzemeler ya tel ya da mil haline getirilir. Teller kilometrelerce uzunlukta ve kangal şeklinde sarılırken, miller belirli boylarda çubuklar haline getirilirler. Şekil 15.2'de tel imalat fabrikasında kangal haline getirilen teller görülmektedir. Nihai ürün ne olursa olsun bu işlemler ~1000...1100 °C arasında gerçekleşir. Yarı mamul tel ve miller soğutulduktan sonra yeniden çekme veya kabuk soyma operasyonları ile istenilen çap ve yüzey kalitelerine getirilebilirler. En sonunda da değişik imalat yöntemleri ile inşaat demiri, cıvata, somun, yay, dövme ana malzemesi, kaynak filmaşini v.b çeşitlilikte nihai ürün olarak karşımıza çıkarlar.



Resim 15.2 Sıcak telin kangal şeklinde serilmesi.

15.2 Tel ve Mil İmalatlarında Girdap Akımı Test Sistemleri

Tel ve mil imalatı yapan fabrikalar yapılan işlerin zorluğu ve önemi dolayısıyla ağır sanayi tesisleri olarak adlandırılırlar. Fabrikalar modernize edildikçe ve verimlilik artırma çabaları içerisine girildikçe, sıcak malzeme testleri üretimin ve kalite kontrolün vazgeçilmez bir parçası haline gelmektedir.

Yöntemin faydaları 2 kısımda incelenebilir. Birincisi imalat problemlerini çabucak operatörlere bildirmesi, ikincisi de hatalı malzemelerin azalması ve bunlardan doğacak zaman ve enerji kaybını engellemesidir. Bu ikinci fayda, sadece yarı mamul ürünün imalatı esnasında değil aynı zamanda ileriki imalat proseslerinde oluşacak kayıpları da ilgilendirmesi açısından hayati önem arz etmektedir. Tel ve mil imalatlarında girdap akımı test sistemlerinden beklenenler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Prosesin istikrarı için anlık geri beslemeler (feedback) sağlamak
- Hasarlı veya aşınmış haddeleme silindirlerinin tespit etmek
- İmalat sonuçlarını ve kaliteyi iyileştirmek
- Billet imalat bölümüne veya fabrikasına geri besleme
- Hasarlı ürünlerin daha sonraki imalat aşamalarına geçişini engellemek
- İstatistiksel değerlendirme ile imalatın birden fazla kalite sınıfına ayrılması
- Test edilen ürünlerin %100 dokümantasyonu

Tel ve imalatlarında girdap akımı test sistemleri malzemenin nihai çapa indirildikten sonra ve soğutma bölümüne girmeden önce yerleştirilir. Şekil 15.3'de örnek bir test sistemi gösterilmiştir. Yaklaşık 5mm'den 120mm'ye kadar geniş bir aralıkta sıcak testlerin yapılabilmesi mümkündür (Prüftechnik ürün kataloğu,2006).

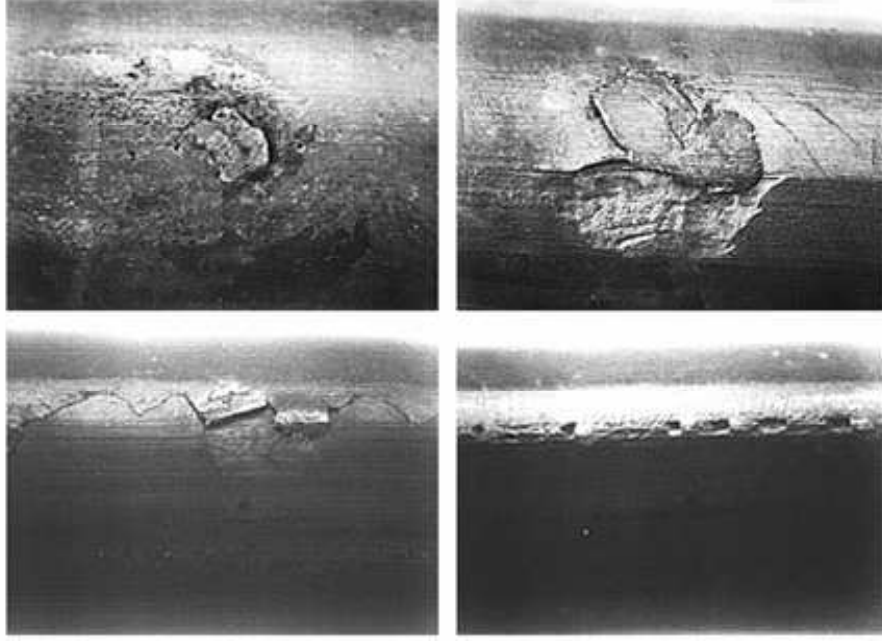


15.3 Girdap akımları ile sıcak tel ve mil kontrolü.

Sıcak tel ve mil kontrollerinde en büyük problem test bobininin maruz kaldığı yüksek sıcaklıklardır. Bobinin yüksek sıcaklıktan etkilenmemesi amacıyla su soğutmalı bobin taşıyıcı blok kullanılmaktadır. Bu blok bobinin soğutulmasını sağlarken aynı zamanda sıcak malzemenin üzerindeki tufalların ve istenmeyen maddelerin sıyrılmasını da sağlar. Yüksek sıcaklıklardan ve korozyondan korunmak için taşıyıcı bloğun tamamı paslanmaz çelikten imal edilir.

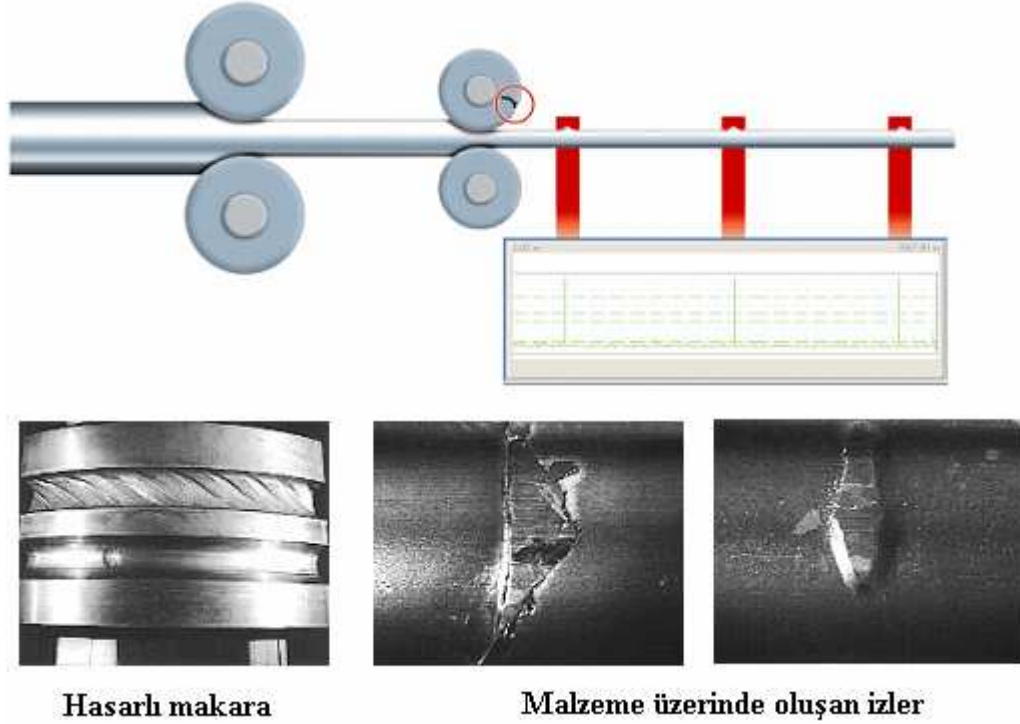
15.3 Sıcak Tel ve Mil Testlerinde Tespit Edilebilen Hatalar

Sıcak mil ve tel imalatlarında kötü kalitede biletler, aşınmış merdane makaraları ve prosesin kötüye gitmesi neticesinde Şekil 15.4'de görülen inklüzyonlar, çatlaklar, kabuklar, delikler ve bindirmeler girdap akımı test cihazları ile tespit edilebilir. Tespit edilebilir hata boyutları 0,15mm'den büyüktür.



Şekil 15.4 Sıcak mil ve tellerde rasgele oluşan yüzey hataları.

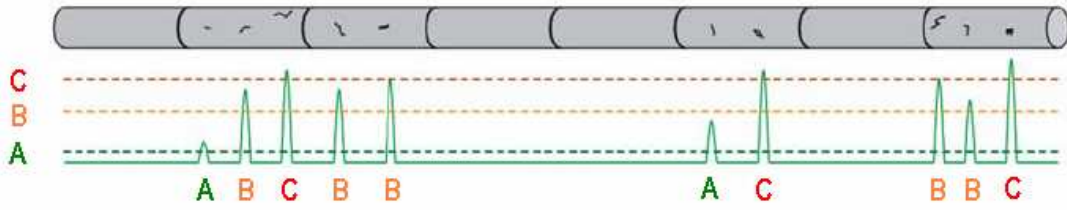
Makaralar ve merdaneler çekme tezgâhlarının en ağır şartlarda çalışan elemanlarıdır. Sıcak metalle büyük kuvvetlerin etkisi altında temas halinde olan makara ve merdaneler aşınır ve kullanım ömürleri sınırlıdır. Belirli aralıklarla tornalanarak temizlenip işlenilmesine rağmen bu malzemeler normal çalışma şartlarında kısa zamanda çatlayıp kullanılamaz hale gelebilirler. Makaraların üzerindeki çatlaklar çok değişik şekil ve boyutta olabilir. Bu çatlaklar sabit aralıklarla malzeme üzerine iz bırakırlar. Şekil 15.5’de hasarlı makaraların malzeme üzerinde oluşturduğu hatalara ait iki örnek görülmektedir. Girdap akımları ile bu periyodik tekrarlanan hatalar çok küçük olsalar bile tespit edilebilir. Bu tespit oluşturdukları tekrar frekansı ile yapılmaktadır. Test sistemi iki ardışık kangal veya grup için aynı tekrar frekansı tespit ederse alarm sinyali üreterek hattı durdurur ve ilgili makaraların değiştirilmesini sağlar. Bu tekrar frekansına bağlı olarak hat üzerinde hatayı oluşturan hasarlı elemanın bulunması mümkündür. Bu sayede proses sürekli kontrol altında tutulur ve hatalı malzemelerin üretilmesi önlenir.



Şekil 15.5 Hasarlanmış makaranın oluşturduğu periyodik hatalar.

Test sisteminin bir diğer amacı da imalat prosesinin her zaman stabil olmasının ve üretilen tüm ürünlerin kalitesi hakkında değerlendirme bilgileri oluşturmasının sağlanmasıdır. Yaklaşık 100..120 m/sn hızla ve kangal boyları 10km'nin üzerinde yapılan bir imalat türü için hatalı bölgelerin belirlenmesi ve kesilip ayrılması mümkün olmadığı gibi istenilmeyen bir durumdur. Ayrıca tekil bir hatanın değerlendirilmesi de amaçlanmaz. Bu imalat türünde girdap akımı test sisteminden beklenen, temel olarak imalatın tümünün, kangal kalitesinin ve proses problemlerinin belirlenmesidir. Bu yüzden doğru bir test sistemi operatörü makaralar hasar görmeden ve imalat kötüye gitmeden uyarı çıkışları verebilmelidir.

Test sistemi sinyalleri diğer pek çok girdap akımı test sisteminde olduğu gibi eşik seviyeleri ile değerlendirilir. Bu eşik seviyeleri genellikle A, B ve C olarak belirlenir. Bu eşik seviyelerini geçen sinyaller ilgili grup altında kategorize edilir ve test parçasının veya kangalın toplam kalitesi her bir kategorideki hata sayılarına bakılarak değerlendirilir (Şekil 15.6).



Şekil 15.6 Eşik seviyeleri ve hata kategorileri ile sinyallerin değerlendirilmesi.

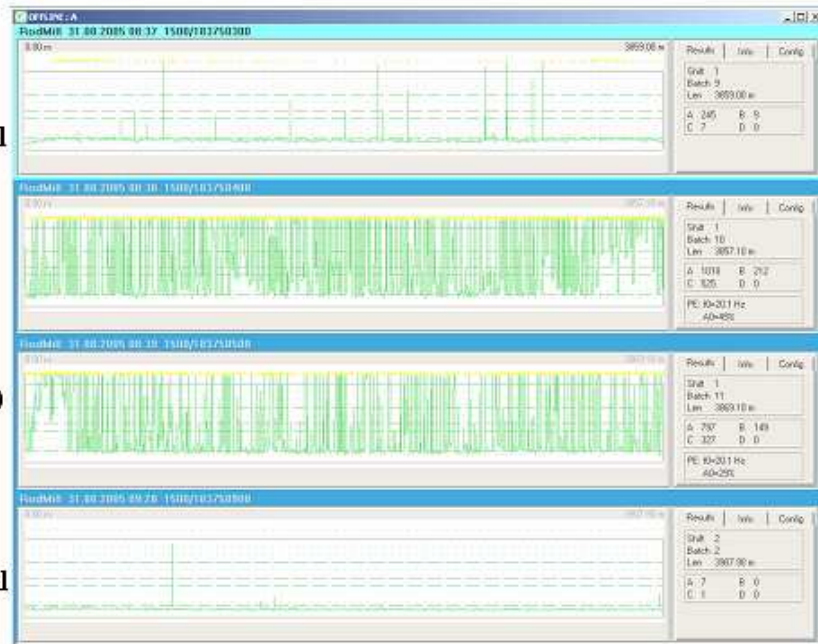
15.4 Sıcak Tel Kontrolünde Gerçek Hata Örneği

Sıcak tel imalatı yapan bir işletmede karşılaşılan aşağıdaki durum gerçek hata örneği olarak Şekil 15.7’de açıklanmıştır. 19 no’lu standdaki hadde makarasının çatlaması neticesinde malzeme yüzeyinde periyodik tekrarlanan hatalar meydana gelmiştir. Üstteki göstergede makaranın kırılmadan önceki son kangal telden alınan sinyaller görülmektedir. Ortada bulunan göstergede ise aniden çatlayan makaranın 2 ardışık kangal üzerinde oluşturduğu hatalara ait sinyalleri görülmektedir. Bu hatalar tespit edildiğinde girdap akımı cihazı imalat hattını durdurmuştur. Yapılan incelemede hasarlı makara tespit edilmiş ve yenisi ile değiştirilmiştir. Altta göstergede de makara değişiminden sonra alınan sinyaller görülmektedir. Şekil 15.8’de hasarlı makara ve malzeme üzerinde oluşturduğu etki görülmektedir.

Makara kırılmadan önceki son kangal

İki ardışık kangalda tespit edilen hata frekansı (kırılmış makara)

Kırılan makara değiştirildikten sonraki ilk kangal

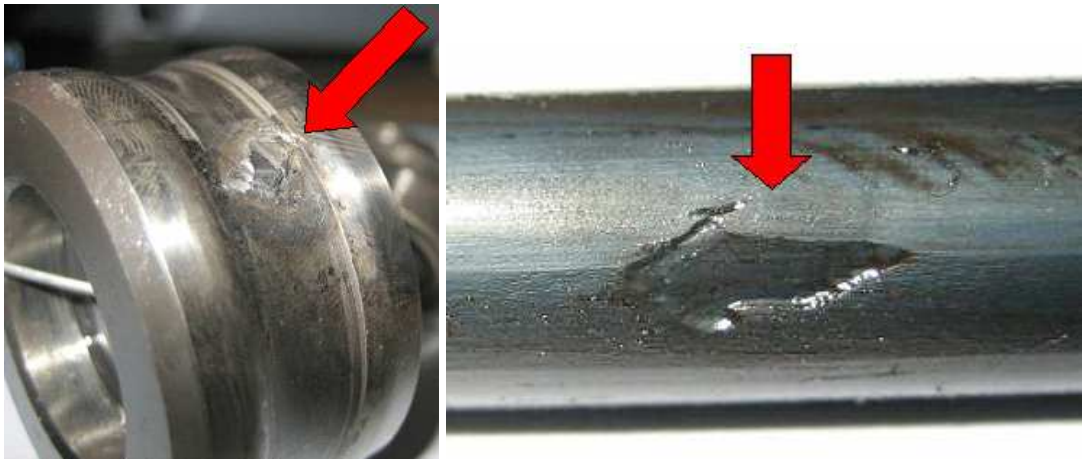


Şekil 15.7 Girdap akımı test cihazından alınan sinyaller.



Şekil 15.8 Kırılan makara ve malzeme üzerinde oluşturduğu etki (yüzey deformasyonu).

Bir diğer fabrika örneği de yuvarlanma izlerinin tespit edilmesidir. Yuvarlanma izleri kötüye giden prosesin habercisidir. Herhangi bir şekilde haddeleme makaralarının üzerine yapışan bir malzeme tıpkı bir kopya makinesi gibi kendi izini tel veya mil üzerine vermektedir. Şekil 15.9'da makara üzerine yapışan bir malzeme ve bu malzemenin tel üzerinde meydana getirdiği iz görülmektedir.

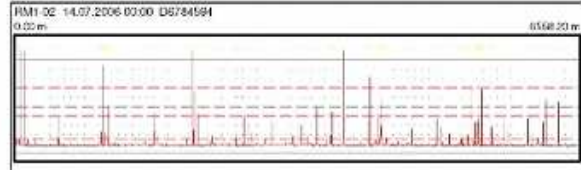


Şekil 15.9 Makara üzerine yapışan malzeme ve tel üzerinde oluşan yuvarlanma izi.

Yukarıda resimleri görülen makaranın oluşturduğu hatalara ait girdap akımı sinyalleri Şekil 15.10'da gösterilmiştir. Giderek artan hata sayıları (A,B ve C) operatörü uyarılmış ve hasarlı makara değiştirilmiştir.

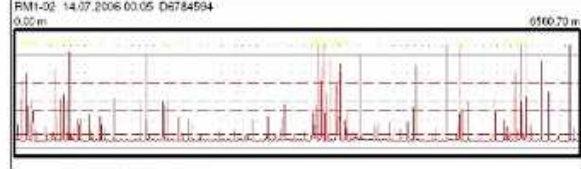
**Kötüye giden proses ve
hata sayılarının artması
(Yuvarlanma izleri)**

**Kangal #1
00:00**



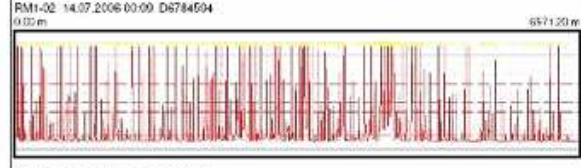
A	B	C
109	33	22

**Kangal #4
00:05**



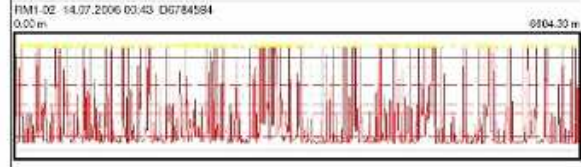
A	B	C
343	113	151

**Kangal #7
00:09**



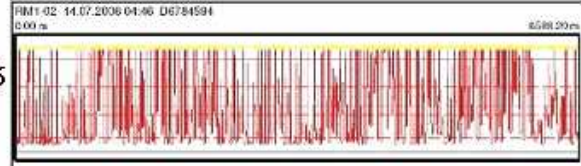
A	B	C
607	192	195

**Kangal #26
00:43**



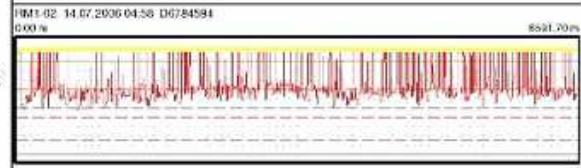
A	B	C
863	334	423

**Kangal #156
04:46**



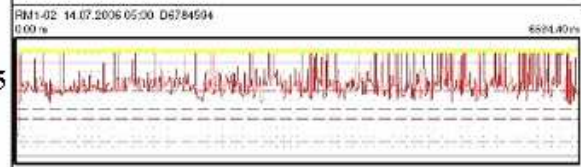
A	B	C
55926	40547	1613

**Kangal #164
04:58**



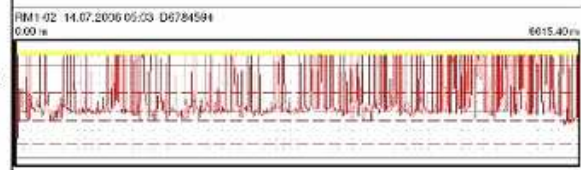
A	B	C
66675	36249	5058

**Kangal #165
04:58**



A	B	C
66675	36249	5058

**Kangal #167
05:03**



Şekil 15.10 Kötüye giden proses - Makarada ezilen malzeme neticesinde oluşan yuvarlanma izleri.

Sonuç itibari ile sıcak haddeleme tesislerinde girdap akımı test sistemleri kullanılarak problemlerin kaynağı tanımlanabilir, hatalı ürün miktarı azaltılabilir ve ürün kalitesi geliştirilebilir. Sıcak malzeme testlerinde proses kontrolü amacıyla girdap akımlarının dışında bir tahribatsız muayene tekniği henüz bulunmamaktadır.

BÖLÜM ONALTI

GİRDAP AKIMLARI İLE KABLO KONTROLÜ

Girdap akımları kullanılarak gerçekleştirilen özel bir uygulama bu bölümde anlatılmıştır. Standart bir girdap akımı cihazı kullanarak dışı plastik kaplı defrost kablolarının içerisindeki soğuk bölgelerin hat üzerinde tespiti başarı ile gerçekleştirilmiştir.

16.1 Defrost Kablolarına Genel Bakış

Şekil 16.1’de ısıtıcılarda kullanılan bükülebilen defrost kabloların bakır bağlantı bölgelerinin işaretlenmesi ve tam bakırlı bölge üzerinden kesilmesi gerekmektedir. İmalat esnasında plastik kaplama yapıldıktan sonra bu bölgelerin hızlı bir şekilde tespit edilmesi ancak girdap akımları ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla çok hızlı bir şekilde markalama yapılması gerekmektedir. Girdap akımları ile bu işlem rahatlıkla gerçekleştirilmiştir.



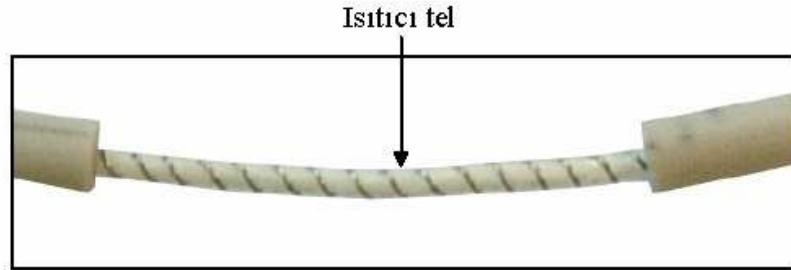
Şekil 16.1 Defrost kablosunun genel özellikleri.

Sonsuz uzunlukta defrost kablonun içerisinde değişken mesafelerde boyları yaklaşık 100mm olan bakır tel parçaları bulunur. Bu tel parçalarının bulunduğu bölgelerden kesilerek kısa devre amacıyla bağlantı yapılır. Defrost kablonun teknik özellikleri Tablo 16.1’de gösterilmiştir.

Tablo 16.1 Defrost kablo teknik özellikleri

Isıtıcı malzeme cinsi	: Kanthal A1 (Cr 22, Al 5.8) veya eşdeğer rezistans teli.
Isıtıcı malzeme çapı	: 0.08 - 0.30 mm
Isıtıcı malzeme hatve	: 0.1 – 5.0 mm
Isıtıcı malzemenin sarıldığı çekirdek malzeme cinsi	: Cam elyaf lifli iplikler
Isıtıcı malzemenin sarıldığı çekirdek malzeme çapı	: 1.0 - 1.5 mm
Bakır parçanın minimum uzunluğu	: 100mm.
Isıtıcı rezistans altına kısa devre için bakır	: 3 adet 0.20 mm çapında bakır tel.
Isıtıcı malzeme dış yalıtım çapı	: 2.50 – 5.00 mm
Dış yalıtım malzeme tipi	: 180 °C özel silikon
Kablo işaretleme, kesim hızı	: maksimum 150 metre/dakika.

Defrost kablosunun ısıtıcı tel kesiti Şekil 16.2’de görülmektedir. Kablo içerisinde 100mm uzunlukta soğuk bölgede kısa devre amacıyla kullanılacak 3 adet bakır telin bulunduğu bölge Şekil 16.3’de görülmektedir.



Resim 16.2 Isıtıcı tel bulunan kesit.



Şekil 16.3 Bakır tel bulunan kesit.

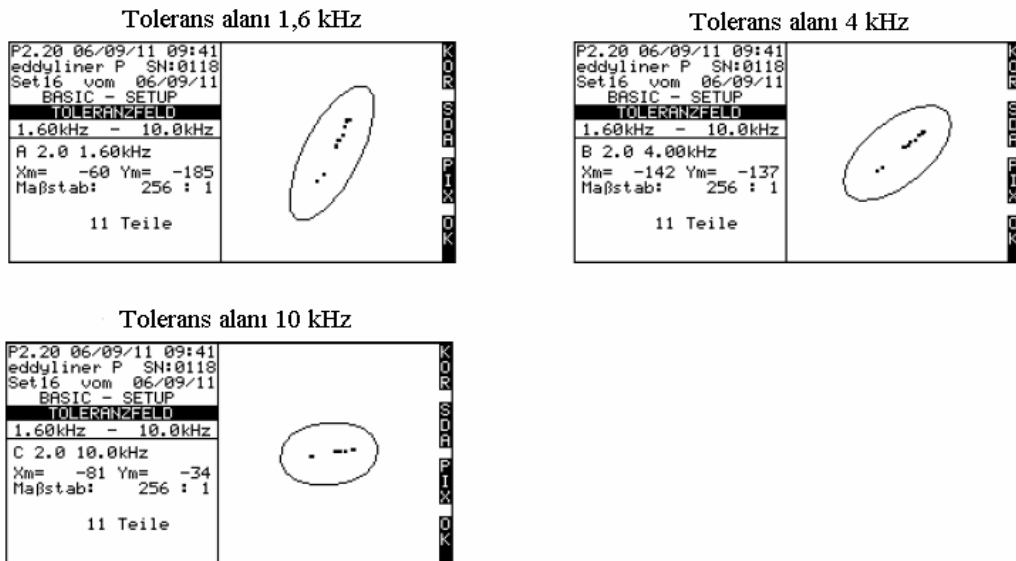
16.2 Defrost Kablo Deney Kurulumu

Laboratuar ortamında Eddyliner P test cihazı ve 10mm dairesel bobin kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 16.4’de görülmektedir.



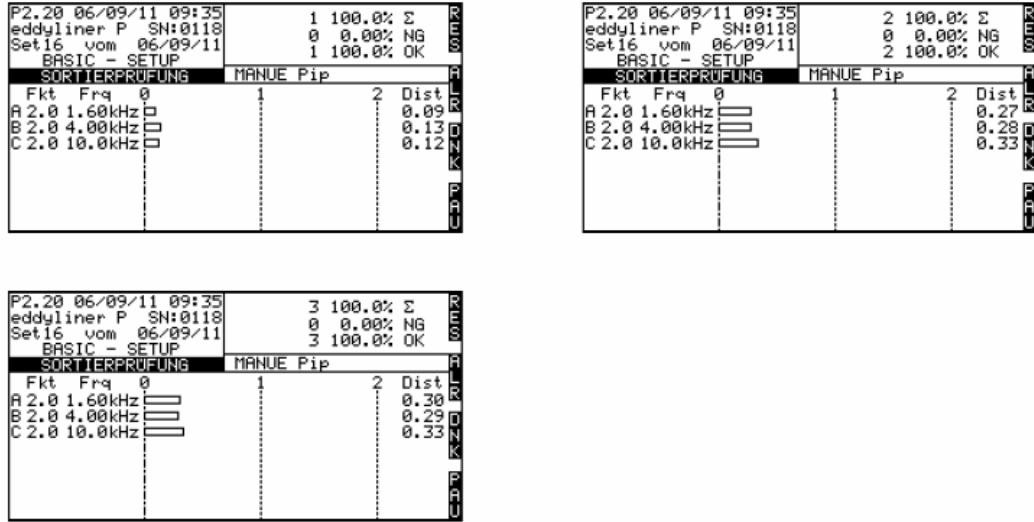
Şekil 16.4 Deney düzeneği.

Isıtıcı kablunun bakır olmayan bölümlerinde yapılan testlerle oluşturulan tolerans alanı Şekil 16.5’de görülmektedir. Testler 3 farklı frekans ile yapılmıştır.



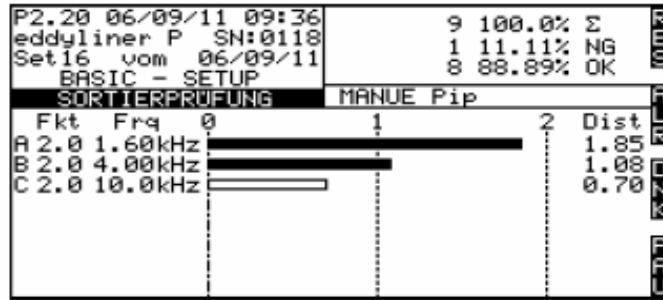
Şekil 16.5 Isıtıcı kablunun bakırsız bölümünde 1.6, 4 ve 10kHz’de tolerans alanı oluşturulması.

Tolerans alanı oluşturulduktan sonra normal test esnasında bakır olamayan bölgelerden alınan ölçüm sonuçları Şekil 16.6'da gösterilmektedir.

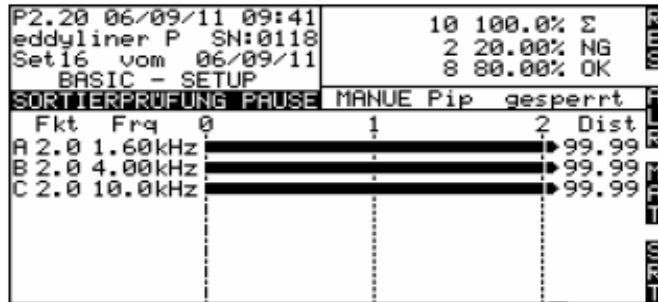


Şekil 16.6 Test esnasında bakır olamayan bölgelerden alınan sonuçlar.

Tam bakır bölgeye geçiş anında alınan test sonuçları Şekil 16.7'de bakır bölgenin tamamı bobin içerisinde iken alınan ölçüm sonuçları Şekil 16.8'de gösterilmiştir.



Şekil 17.7 Bakır bölgeye geçiş esnasında alınan sonuç.



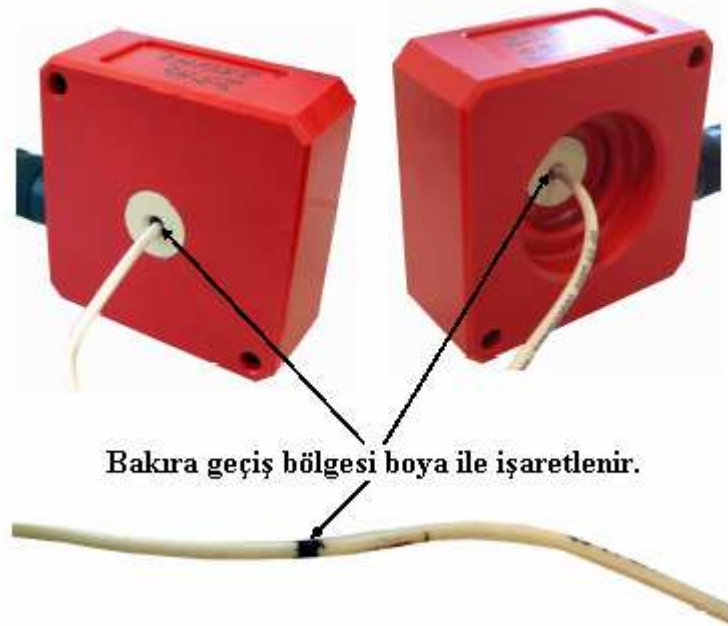
Şekil 16.8 Tam bakır bölgeden alınan test sonucu.

16.3 Girdap Akımları ile Defrost Kablosu Markalama Sonuçları

Yapılan çalışmalarımız sonunda 1,5m/sn hızla 12mm'den daha az bir tolerans içerisinde geçiş bölgeleri işaretlenebilmektedir.

Bakır bölgenin tespiti için tek test frekansı kullanılmasının yeterli olduğu görülmüştür. Sadece 1,6kHz test frekansı kullanıldığı durumda test süresi 8ms olur. Diğer 2 frekans kullanılmayarak 16ms zaman kazanılmıştır. Test süresinin 8milisaniye olduğu durumda kablo ve kesim hızı 1,5m/sn iken markalama hassasiyeti yaklaşık 12mm olmaktadır. Kablo hızı arttığında markalama hassasiyeti azalır.

Geçiş bölgesi üzerine yapılan boya ile markalama Şekil 16.9'da gösterilmiştir. Test sistemi bir kablo imalatçısına tarafından etkin bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 16.9 Bakıra geçiş bölgesinin işaretlenmesi.

BÖLÜM ONYEDİ

SONUÇLAR

Çalışmada girdap akımı test sistemlerinin en yaygın kullanılan türlerine ait uygulama örnekleri incelenmiştir. Bu test türleri için sanayi uygulamalarının yanı sıra laboratuvar deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmaları için değişik test aparatları ve deney düzenekleri tasarlanıp, imal edilmiştir. Doğru test yöntemi ve uygun ekipmanlar ile girdap akımlarının elektrik iletkeni malzemelerin tahribatsız muayene işlemlerinde kullanılabilirlikleri araştırılmıştır.

Girdap akımı yöntemleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular ve sonuçlar aşağıda konu başlıkları altında özetlenmiştir.

17.1 Malzeme Ayırımı

Girdap akımlarının mutlak bobin uygulamaları malzeme ayırımlarında kullanılabilir. Malzemelerin elektriksel iletkenlik ve magnetik permeabilite değişimleri bobin empedansı değiştirdiğinden farklı frekans uygulamaları ile farklı özellikler tespit edilebilir. Cıvata ayırım uygulamalarında görüldüğü üzere, malzeme farklılıklarının (karışmış malzeme ve içyapı farklılıkları) tespitinde düşük frekans uygulamaları 50-100Hz aralığında bu tür testler için uygun olur. Yüzey sertliği, sertlik derinliği gibi ısı işlem özelliklerinin tespitinde yüksek frekanslar uygulanır (bkz.biyel kolu ayırım uygulamaları). Bu uygulamalarda 5-50kHz aralığında frekanslar seçilebilir. Diğer bir deyişle yüzeysel özelliklerin araştırılacağı durumlarda girdap akımlarının deri etkisinden faydalanılır. Şayet özellikler bütünü test edilmek istenirse multifrekans test cihazları kullanılması gerekir.

Malzeme ayırımında sabit gerilim ve sabit akım uygulamalarının her ikisi de yapılabilir. Ancak sabit akım cihazlarının daha yaygın kullanıldığı göze çarpar.

Test cihazları otomasyon olanakları kullanılarak seri parça kontrollerinde kullanılabilir. Ayırma işlemi için sağlam olduğu bilinen parçalar ile her bir test

frekansı için ayrı ayrı tolerans alanlarının oluşturulması gerekir. Tolerans alanları oluştururken seçilen parçalar birbirine ne kadar yakın özelliklerde ise, ayırım işlemi o kadar hassas olacaktır.

Test süreleri kullanılan test frekansına, parça besleme, değerlendirme ve ayırma hızlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ağır ve karmaşık şekilli parçalar için toplam test süreleri 3-5sn arasında değişim gösterir.

Elektrik iletken malzemelerin ayırım işlemlerinde girdap akımı yöntemlerinden daha hızlı ve etkin bir test yöntemi bulunmamaktadır.

17.2 Yüzeysel Çatlak Kontrolü

Yüzeysel çatlak kontrollerinde diferansiyel prop uygulamaları yapılmaktadır. Minimum hata boyutlarının tespit edilebilmesi ve yüksek hassasiyet elde edilebilmesi için parçaların silindirik simetrik ve yüzey pürüzlülüklerinin minimum olması istenir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça tespit edilebilir hata boyutu büyür. Deri etkisi nedeniyle ve sadece yüzeysel kusurlar arandığından ötürü 250-800kHz aralığında yüksek frekanslar tercih edilir.

Yüzeysel çatlak kontrolleri; parçanın döndüğü-probun doğrusal hareket ettiği veya probun döndüğü-parçanın doğrusal hareket ettiği otomasyon sistemleri ile gerçekleştirilebilir. Prop malzeme arasındaki mesafe maksimum 1mm olmalıdır. Hatanın büyüklüğü azaldıkça tespit edilmesi zorlaşır. Parça veya prop dönüş hızları arttıkça hatanın tespit edilebilirliği kolaylaşır. Test parçasının döndürüldüğü uygulamalarda 400-600d/dak aralığında dönüş hızları uygundur. Propların döndürüldüğü uygulamalarda ise test parçasının çapına ve ilerleme hızlarına bağlı olarak 3.000-12.000 dev/dak dönüş hızları uygulanabilir.

Girdap akımları ile yüzeysel çatlak kontrol uygulamalarında 40µm ve daha küçük genişlik ve derinlikteki hataların tespiti yapılamaz.

17.3 Boyuna Dikişli Çelik Boru Kontrolü

Girdap akımları boyuna dikişli çelik boruların kontrolünde kullanılabilecek en uygun ve güvenilebilir test sistemlerinden birisidir. İlk yatırım maliyetleri ultrasonik kontrollere göre çok düşüktür. Test hızları ise ultrasonk kontrollerden 5-10 kat daha fazladır. Dairesel bobin, segment bobin ve döner prop uygulamalarından birisi veya döner prop bobin kombinasyonları birlikte yapılabilir. Mutlak ve diferansiyel prop veya bobinler kullanılır.

Dairesel ve segment bobin uygulamaları 2-25kHz aralığında yapılır. Döner prop uygulamaları 150-250kHz aralığında tercih edilir. Borular imalat esnasında online test edilebileceği gibi belirli boylara kesildikten sonra da offline test edilebilirler. Testler, 5m/dak'dan 250m/dak'ya kadar değişen geniş bir aralıktaki hızlarda gerçekleştirilebilir.

Minimum tespit edilebilir hata boyutu bobin doluluk oranına, kazanca, frekansa, eşik seviyesine, cihazların filtreleme kabiliyetlerine, uygulanan kalibrasyon standardına bağlı olarak değişme gösterir.

17.4 Döner Bobinli Test Sistemleri

Boru, mil ve tellerin kontrollerinde kullanılabilir. Daha çok nihai ürün kontrollerinde tercih edilir. Prop ile malzeme arası mesafe 1mm'den fazla olamaz. Çok stabil mekanik düzeneklere ihtiyaç duyulur. Lift-off etkisinin giderilebilmesi için özel elektronik devrelere ihtiyaç vardır. Kazanca, frekansa, prop sayısına, eşik seviyelerine, cihazların filtreleme ve lift-off giderme kabiliyetlerine, kalibrasyon standardına, yüzey pürüzlülüğüne, parça çapına, test hızına ve prop dönüş hızlarına bağlı olarak tespit edilebilir minimum hata boyutu değişir. En ideal şartlarda 4mm boyunda 50µm genişliğinde ve 50µm derinliğinde bir hata tespiti yapılabilir.

17.5 Sıcak Tel ve Mil Kontrolü

Girdap akımı test sistemleri sıcak tel ve mil kontrollerinde 100m/sn test hızlarında ve 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılabilir. Ø20mm mil kontrollerinde 100kHz, daha büyük çaplar için 50kHz test frekansları tercih edilir. Bu sistemlerde amaç proses kontrolüdür. Kötüye doğru giden bilet kalitesi ve hadde makaralarındaki arızaların tespiti için en ideal yöntemdir. Test sistemleri su soğutmalı diferansiyel test bobinleri ile birlikte kullanılır. Yüksek sıcaklıklar prop ömürlerini kısıtlar. Bobin soğutma grubunun fonksiyonlarını yerine getirmesi çok önemlidir.

Curie noktası üzerinde çalışıldığı için ortam sıcaklığında yapılan boru ve mil kontrollerindeki gibi magnetik doyurma uygulaması yapılmaz.

Yukarıda bahsedilen hususlar göz önüne alındığında, bir Tahribatsız Malzeme Muayene yöntemi olarak girdap akımı test sistemlerine ilginin gün geçtikçe artacağı rahatlıkla söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Doyum, A.B, Ertekin, S. (1997). A practical hole testing technique using a meter display eddy current instrument. *NDT&E International*, 31, 11-15.
- Epik, Ö., Epik, H. ve Karadeniz, S. (2003). Girdap akımları yöntemi ile boru testi, *Malzeme Bilimi ve Üretim Yöntemleri Sempozyumu*, İzmir
- Epik, Ö., Karadeniz, S. (2001). Ferromagnetik parçaların girdap akımı yöntemiyle muayenesi, *II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu*, Manisa
- Grimberg, R., Savin, A., Radu, E., Chifan, S.M. (2000). Eddy current sensor for non-destructive evaluation of metallic wires, bars and pipes. *Sensors and Actuators A*, 81, 224-226. 2000, Elsevier.
- Günay, H., (2001). *Prüftechnik Girdap akımı eğitim notları*. Bursa
- Helifa, B., Oulhadj, A., Benbelghit, Lefkaier, I.K., Boubenider, F., Boutassouna, D. (2006). Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing. *NDT&E International*, 39, 384-390. 2006, Elsevier.
- Iwan, J. (2002). *Manual Eddydetector* (1), Germany: IBG Prüfcomputer GmbH.
- Joubert, P.Y, Bihan, Y.L. (2006). Multi sensor probe and defect classification in eddy current tubing inspection. *Sensors and actuators A*, 129, 10-14.
- Konoplyuk, S., Abe, T., Uchimoto, T., Takagi, T., Kurosawa, M. (2005). Characterization of ductile cast iron by eddy current method. *NDT&E International*, 38, 623-626.
- Kling, S. (2006). Advanced process and quality control, eddy current inspections in hot Rolling mills. *ECNDT 2006*, 25-32

McMaster, R.C., McIntire, P., Mester, M.L.,(2nd ed.). (1986). Nondestructive Testing Handbook (2):American Society for Nondestructive Testing.

Mook, G., Hesse, O. ve Uchann V. (2006). Deep penetrating eddy currents and probes. *ECNDT 2006* , 3.6.2.

Özçetin, S. (2001). *Girdap akımları ve deri etkisinin modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul

Purdie, I. (2002), Inductance, 17 Kasım 2007, <http://www.electronicstutorials.com/basics/inductance.htm>

Schiebold, K., Knöll, T. (2006), *Defectoscopy Using Eddycurrents* (1). Wuppertal: Castell-Verlag GmbH.

Schull, P.J. (2005). Nondestructive Evaluation Theory, Techniques and Applications. New York: Marcel Dekker Inc.

Stöwer, K.(1978). *Einführung in die Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung metalischer Werkstoffe mit elektromagnetischen Verfahren*. Reutlingen. Institut Dr.Förster.

Şirin, K., Şirin, Ş. ve Kaluç, E. (1997). Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynaklı Borularda Yöntem Parametrelerinin Kaynak Dikiş Özelliklerine Etkisi, *Kaynak Teknolojisi 1.Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı 1* (1), 137-147.

TS EN 10246-3- Türk Standartları. (2005). Çelik Boruların Tahribatsız Muayenesi Bölüm 3, *Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.

Wirbelstromprüfung W1 Grundkursus. (1988), DGZfP, Berlin

Wirbelstromprüfung W2 Aufbaukursus. (1986), DGZfP, Berlin

EKLER

EK 1.1 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (5 no'lu hata, 0,5 ve 0,75mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)	
5	0.5	50	100	64+28	92	4	28-100	
			200	59+28	87	4	28-100	
			400	57+26	83	48	40-140	
			600	57+26	83	46	63-220	
		100	100	63+25	88	64	28-100	
			200	55+26	81	92	20-71	
			400	53+26	79	98	40-140	
			600	53+26	79	86	63-220	
			200	100	63+32	85	100	80-280
				200	52+26	78	160	20-71
		400		51+25	76	158	40-140	
		600		50+26	76	158	56-200	
		400	100	49+30	79	26	12-63	
			200	50+26	76	42	20-71	
			400	50+24	74	44	40-140	
			600	48+25	73	150	450-1600	
		800	100	52+26	78	116	28-100	
			200	47+27	74	110	20-71	
			400	46+26	72	110	40-140	
			600	46+26	72	114	56-200	
	0.75	50	100	80+31	111*	30	125-450	
			200	66+27	93	56	16-63	
			400	64+27	91	58	40-140	
			600	66+27	93	28	450-1600	
		100	100	75+30	105	112	11-63	
			200	63+29	89	106	20-71	
			400	66+24	90	56	320-1100	
			600	66+25	91	52	500-1800	
		200	100	68+32	100	84	50-180	
			200	57+27	84	170	16-63	
			400	57+26	83	170	40-140	
			600	56+26	82	174	56-200	
		400	100	58+27	85	136	56-200	
			200	55+26	81	56	16-63	
			400	52+27	79	56	40-140	
			600	53+27	80	128	500-1800	
		800	100	57+26	83	120	10-63	
			200	53+27	80	120	20-71	
			400	52+25	77	120	32-110	
			600	51+26	77	118	50-180	

EK 1.2 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (5 no'lu hata, 1mm,ve 4 no'lu hata 0,75mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
5	1,00	50	100	76+32	108	22	36-125
			200	70+28	98	60	20-71
			400	70+27	97	68	32-110
			600	80+31	111*	20	450-1600
		100	100	74+32	106	48	90-320
			200	71+24	95	54	180-630
			400	70+23	93	52	160-560
			600	74+32	106	42	450-1600
		200	100	71+32	103	116	28-100
			200	63+27	90	4	20-71
			400	62+25	87	6	32-110
			600	73+32	105	76	450-1600
		400	100	78+25	103	130	32-110
			200	59+26	85	62	16-63
			400	57+26	83	60	32-110
			600	56+26	82	64	40-140
		800	100	68+31	99	20	56-200
			200	58+27	85	122	20-71
			400	57+25	82	124	32-110
			600	56+26	81	126	40-140
4	0,50	50	100	69+31	100	24	36-125
			200	65+26	91	66	20-71
			400	63+26	89	62	40-140
			600	74+32	106	8	710-2500
		100	100	76+26	102	60	110-400
			200	67+32	99	48	110-400
			400	70+32	102	50	360-1250
			600	69+32	101	52	500-1800
		200	100	62+36	94	98	63-220
			200	69+32	101	96	220-800
			400	70+32	102	84	560-2000
			600	66+32	98	92	500-1800
		400	100	49+32	81	52	11-63
			200	52+26	78	62	20-71
			400	50+25	75	56	40-140
			600	50+24	74	56	56-200
		800	100	54+32	86	102	25-90
			200	50+26	76	118	20-71
			400	46+27	73	118	40-140
			600	47+26	73	120	56-200

EK 1.3 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (4 no'lu hata, 0,75 ve 1mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
4	0,75	50	100	76+32	108	22	80-280
			200	70+27	98	80	20-71
			400	70+26	96	74	40-140
			600	80+31	111*	8	450-1600
		100	100	73+31	104	46	90-320
			200	64+27	91	136	20-71
			400	64+26	90	134	32-110
			600	73+32	105	50	400-1400
		200	100	68+32	100	84	45-160
			200	72+32	104	84	140-500
			400	57+27	84	12	40-140
			600	71+32	103	80	450-1600
		400	100	58+28	86	60	10-63
			200	57+26	83	62	20-71
			400	56+25	81	64	40-140
			600	53+25	79	68	40-140
		800	100	62+21	83	128	8-63
			200	55+26	81	126	20-71
			400	53+25	78	124	32-110
			600	52+26	78	128	50-180
4	1,00	50	100	78+32	110	60	16-63
			200	73+29	102	86	16-63
			400	80+32	112*	16	560-2000
			600	80+32	112*	12	800-2800
		100	100	80+24	104	50	32-110
			200	76+32	108	48	80-280
			400	68+26	94	146	32-110
			600	76+32	108	36	320-1100
		200	100	80+27	107	98	110-400
			200	74+32	106	84	110-400
			400	62+25	87	14	32-110
			600	73+32	105	86	500-1800
		400	100	74+32	106	132	125-450
			200	60+26	86	70	16-63
			400	56+27	83	66	32-110
			600	57+26	83	70	45-160
		800	100	71+32	103	172	63-220
			200	58+27	85	128	20-71
			400	57+25	82	130	32-110
			600	57+25	82	130	50-180

EK 1.4 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (3 no'lu hata, 0,5 ve 0,75mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
3	0,50	50	100	69+27	96	80	10-63
			200	71+32	103	20	125-400
			400	74+32	106	6	360-1250
			600	72+32	104	20	320-1100
		100	100	67+31	98	54	90-320
			200	68+32	100	60	180-630
			400	67+32	99	58	140-500
			600	69+32	101	52	400-1400
		200	100	64+32	96	84	90-320
			200	66+32	98	88	160-560
			400	67+32	99	92	360-1250
			600	53+26	79	28	56-200
		400	100	64+32	96	148	80-280
			200	64+32	96	132	110-400
			400	50+25	75	72	40-140
			600	50+24	74	68	50-180
		800	100	64+32	96	16	56-200
			200	50+26	76	128	20-71
			400	49+25	74	124	40-140
			600	47+26	73	128	56-200
3	0,75	50	100	76+31	107	12	40-140
			200	78+32	110	6	100-360
			400	78+31	109	16	360-1250
			600	80+31	111*	8	400-1400
		100	100	80+25	105	64	90-320
			200	73+32	105	64	90-320
			400	73+32	105	40	320-1100
			600	76+32	108	46	900-3200
		200	100	69+32	101	84	90-320
			200	72+32	104	84	220-800
			400	57+26	83	24	32-110
			600	73+32	104	78	560-2000
		400	100	70+32	102	136	100-360
			200	70+32	102	142	125-450
			400	55+26	81	74	40-140
			600	59+26	85	132	40-140
		800	100	53+32	85	136	12-63
			200	54+27	81	132	20-71
			400	52+27	79	130	40-140
			600	52+26	78	132	40-140

EK 1.5 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (3 no'lu hata, 1mm ve 2 no'lu hata 0,50mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
3	1,00	50	100	80+32	112*	24	140-500
			200	80+30	110*	22	90-320
			400	80+31	111*	12	220-800
			600	80+32	112*	8	450-1600
		100	100	78+31	109	50	110-400
			200	80+26	106	52	80-280
			400	78+32	110*	46	560-2000
			600	76+32	108	44	400-1400
		200	100	73+32	105	86	10-400
			200	73+32	105	94	125-450
			400	62+26	88	30	32-110
			600	73+32	105	64	50-1800
		400	100	73+32	105	144	125-450
			200	73+32	105	148	140-500
			400	59+25	84	78	32-110
			600	58+25	83	78	40-140
		800	100	73+32	105	6	125-450
			200	59+27	86	134	20-71
			400	58+25	83	136	32-110
			600	56+25	81	136	40-140
2	0,50	50	100	74+29	103	26	100-360
			200	71+32	103	22	110-400
			400	76+32	108	14	500-1800
			600	73+32	105	16	400-1400
		100	100	68+32	100	48	140-500
			200	66+32	98	48	90-320
			400	60+26	86	176	40-140
			600	59+26	85	170	63-220
		200	100	65+31	96	86	125-450
			200	63+32	95	106	80-280
			400	56+26	82	176	40-140
			600	58+24	82	78	63-220
		400	100	64+32	96	142	125-450
			200	52+26	78	80	20-71
			400	51+25	76	78	40-140
			600	50+25	75	80	63-220
		800	100	53+28	81	130	12-63
			200	51+25	76	126	20-71
			400	49+25	74	126	40-140
			600	49+25	74	128	56-200

EK 1.6 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (2 no'lu hata, 075 ve 1mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
2	0,75	50	100	76+32	108	14	140-500
			200	76+31	107	6	110-400
			400	72+28	100	140	40-140
			600	80+31	111*	16	500-1800
		100	100	71+31	102	50	80-280
			200	80+32	112*	50	560-2000
			400	69+32	101	48	140-500
			600	73+32	105	48	500-1800
		200	100	76+25	101	86	125-450
			200	68+32	100	96	140-500
			400	71+32	103	90	40-140
			600	70+32	102	84	450-1600
		400	100	68+32	100	136	125-450
			200	68+32	100	134	125-450
			400	56+25	81	78	40-140
			600	55+25	80	80	56-200
		800	100	59+27	86	132	16-63
			200	56+26	82	130	20-71
			400	55+25	80	130	40-140
			600	54+25	79	134	56-200
2	1,00	50	100	80+31	111*	22	140-500
			200	80+27	107		140-500
			400	80+30	110*	20	140-500
			600	78+32	110*	36	500-1800
		100	100	78+31	109	52	140-500
			200	76+31	107	58	100-360
			400	76+32	108	34	360-1250
			600	76+32	108	36	500-1800
		200	100	80+26	106	84	110-400
			200	74+27	101	80	40-140
			400	63+27	90	30	40-140
			600	72+27	99	134	50-180
		400	100	80+26	106	138	100-360
			200	66+27	93	134	20-71
			400	61+26	87	76	40-140
			600	63+27	90	134	50-180
		800	100	73+32	105	22	90-320
			200	60+27	87	134	20-71
			400	57+27	84	132	32-110
			600	57+24	84	134	50-180

EK 1.7 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (1 no'lu hata, 0,5 ve 0,75mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)		
1	0,50	50	100	80+28	108	16	16-63		
			200	76+32	108	2	20-71		
			400	74+31	105	174	40-140		
			600	74+31	105	166	40-140		
		100	100	73+32	105	162	63-220		
			200	76+32	108	26	160-560		
			400	70+27	97	10	20-71		
			600	80+31	111*	16	630-2200		
		200	200	73+32	105	80	160-560		
			400	78+31	109	32	360-1250		
			600	76+32	108	32	560-2200		
		400	100	70+30	100	80	110-400		
			200	68+32	100	80	160-560		
			400	68+31	99	60	125-450		
			600	64+27	91	118	40-140		
		800	100	67+30	97	122	90+320		
			200	65+32	97	124	140-500		
			400	65+32	97	120	125-450		
			600	58+27	85	118	40-140		
		1	0,75	50	100	-	-	-	-
					200	80+31	111*	2	16-63
					400	80+32	112*	168	32-110
					600	80+32	112*	150	32-110
				100	100	80+32	112*	168	160-560
200	78+32				110*	18	180-630		
400	80+31				111*	14	180-630		
600	74+30				104	172	25-90		
200	100			76+32	108	18	110-400		
	200			80+27	107	24	125-450		
	400			80+29	109	124	32-110		
400	600			72+32	105	60	560-2000		
	100			78+26	104	80	110-400		
	200			73+30	103	84	80-280		
	400			73+27	100	124	32-110		
800	600			73+31	104	84	400-1400		
	100			78+27	105	116	220-800		
	200			76+27	103	116	220-800		
	400			67+27	94	124	32-110		
600	65+27			92	124	32-110			

EK 1.8 Supaplarda yüzey hatalarının tespiti (1 no'lu hata, 1mm mesafede)

Referans Hata No	Prop/Supap Mesafesi (mm)	Frekans (kHz)	Supap Tur sayısı (devir/dak)	Kazanç (dB)	Kazanç Toplam (dB)	Faz açısı (°)	Filtre (Hz)
1	1,00	50	100	-	-	-	-
			200	-	-	-	-
			400	-	-	-	-
			600	80+32	112*	10	630-2200
		100	100	80+32	112*	154	90-320
			200	80+32	112*	154	125-400
			400	78+31	109	176	16-63
			600	80+32	112*	24	710-2500
		200	100	76+31	107	40	80-280
			200	78+30	108	34	140-500
			400	78+31	109	64	180-630
			600	74+32	106	64	500-1800
		400	100	78+31	109	64	140-500
			200	78+27	105	90	110-400
			400	74+32	106	90	200-710
			600	76+32	108	116	710-2500
		800	100	74+32	106	126	220-800
			200	78+25	103	134	125-450
			400	76+27	103	110	125-450
			600	78+27	105	146	450-1600

- Tespit edilemez

* Maksimum kazanç

EK 2.1 Bakır boru için Ø44mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Bakır	44	3.0	2	97,8	1,76	7,56	90	30	3
			3	90,6	1,76	7,56	90	30	3
			5	89,4	1,76	7,56	90	35	2,57
			10	90,6	1,76	7,56	95	55	1,72
			15	90,6	1,76	7,56	95	60	1,58
			20	92	1,76	7,56	105	65	1,6
			30	92	1,76	7,56	100	60	1,6
			50	92,4	1,76	7,56	110	70	1,57
		9.0	2	94,2	5	21,3	100	20	5
			3	89,6	5	21,3	105	20	5,25
			5	87,4	5	21,3	95	30	3,16
			10	89	5	21,3	100	45	2,2
			15	89	5	21,3	100	45	2,2
			20	90	5	21,3	100	45	2,2
			30	89	5	21,3	90	40	2,25
			50	90	5	21,3	90	40	2,25
		18.0	2	94	8,89	37,9	100	25	4
			3	87,6	8,89	37,9	105	25	4,2
			5	86	8,89	37,9	100	40	2,5
			10	86	8,89	37,9	90	50	1,8
			15	86	8,89	37,9	100	50	2
			20	86	8,89	37,9	95	50	1,9
			30	87	8,89	37,9	100	55	1,8
			50	88	8,89	37,9	90	50	1,8
		30.0	2	94	15,8	60	90	20	4,5
			3	88	15,8	60	95	23	4,13
			5	86,6	15,8	60	95	30	3,1
			10	87,6	15,8	60	100	40	2,5
			15	89	15,8	60	105	50	2,1
			20	88	15,8	60	100	50	2
			30	89	15,8	60	100	70	1,4
			50	90,4	15,8	60	105	70	1,5

EK 2.2 Bakır boru için Ø47mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Bakır	47	3.0	2	81	1,4	6,01	45	5	9
			3	81	1,4	6,01	85	12	7,08
			5	81	1,4	6,01	95	20	4,75
			10	83	1,4	6,01	95	25	3,8
			15	85	1,4	6,01	95	30	3,16
			20	87	1,4	13,4	110	40	2,75
			30	87	1,4	13,4	100	30	3,3
			50	87	1,4	12,0	80	25	3,2
		9.0	2	85	1,4	33,7	100	25	4
			3	80	1,4	19	100	15	6,6
			5	79	1,4	19	100	20	5
			10	78	1,4	19	70	20	3,5
			15	82	1,4	15,1	90	30	3
			20	84	1,4	15,1	105	35	3
			30	85	1,4	7,56	90	40	2,25
			50	88	1,4	7,56	100	40	2,5
		18.0	2	86	7,07	33,7	90	15	6
			3	86	7,07	33,7	110	20	5,5
			5	86	7,07	33,7	110	30	3,6
			10	86	7,07	33,7	110	35	3,14
			15	86,4	7,07	33,7	110	50	2,2
			20	87	7,07	33,7	100	50	2
			30	87	7,07	33,7	100	50	2
			50	87	7,07	33,7	80	35	2,28
		30.0	2	86	7,07	60	90	15	6
			3	85	14,1	60	110	15	7,33
			5	83	14,1	60	100	15	6,6
			10	85	14,1	60	100	25	4
			15	85	14,1	60	90	25	3,6
			20	86	14,1	60	90	30	3
			30	86	14,1	60	85	30	2,83
			50	87	14,1	60	75	25	3

EK 2.3 Pirinç boru için Ø44mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Pirinç	44	3.0	2	99	1,76	7,56	90	40	2,25
			3	91	1,76	7,56	90	40	2,25
			5	87	1,76	7,56	90	30	3
			10	86,6	1,76	7,56	90	30	3
			15	85	1,76	7,56	85	35	2,429
			20	85	1,76	7,56	90	30	3
			30	84,6	1,76	7,56	90	15	6
			50	86,2	1,76	7,56	95	30	3,1
		9.0	2	97,4	4,46	19	95	25	3,8
			3	89,4	4,46	19	90	30	3
			5	85	4,46	19	90	20	4,5
			10	85,2	4,46	19	95	35	2,71
			15	84,8	4,46	19	100	35	2,85
			20	84,2	4,46	19	100	30	3,33
			30	83,5	4,46	19	90	30	3
			50	85	4,46	19	93	30	3,1
		18.0	2	98,6	11,2	33,7	95	40	2,37
			3	91,4	11,2	33,7	95	40	2,37
			5	86,6	11,2	33,7	90	35	2,57
			10	86,8	11,2	33,7	95	50	1,9
			15	85,2	11,2	33,7	95	50	1,9
			20	84,6	11,2	33,7	95	50	1,9
			30	84,6	11,2	33,7	95	40	2,37
			50	85,6	11,2	33,7	100	40	2,5
		30.0	2	98,6	17,7	53,5	95	40	2,37
			3		17,7	53,5			
			5	86,8	17,7	53,5	90	40	2,25
			10	87	17,7	53,5	100	55	1,81
			15	86	17,7	53,5	100	50	2
			20	84,6	17,7	53,5	95	50	1,9
			30	84,2	17,7	53,5	90	40	2,25
			50	85	17,7	53,5	90	45	2

EK 2.4 Pirinç boru için Ø47mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Pirinç	47	3.0	2	99	1,4	12	80	30	2,66
			3	93	1,4	9,51	90	30	3
			5	90	1,4	9,51	105	30	3,5
			10	90	1,4	9,51	95	30	3,16
			15	92	1,4	9,51	100	42	2,38
			20	92	1,4	9,51	90	35	2,57
			30	92	1,4	9,51	95	50	1,9
			50	93	1,4	9,51	90	35	2,57
		9.0	2	99	3,54	19	95	30	3,16
			3	92	3,54	19	95	30	3,16
			5	88	3,54	19	90	25	3,6
			10	88	3,54	19	98	38	2,57
			15	89	3,54	19	89	40	2,22
			20	91	3,54	19	90	50	1,8
			30	91	3,54	19	92	40	2,3
			50	93	3,54	21,3	98	50	1,96
		18.0	2	99	7,92	37,9	95	40	2,37
			3	92	7,92	37,9	92	30	3,06
			5	88	7,92	37,9	95	35	2,71
			10	88	7,92	37,9	90	40	2,25
			15	90	7,92	37,9	95	50	1,9
			20	90	7,92	37,9	85	50	1,7
			30	91	7,92	37,9	95	50	1,9
			50	92	7,92	37,9	92	50	1,84
		30.0	2	99	15,8	53,5	75	30	2,5
			3	94	15,8	53,5	100	30	3,3
			5	90	15,8	53,5	100	30	3,3
			10	90	15,8	53,5	95	40	2,375
			15	91	15,8	53,5	90	40	2,25
			20	92	15,8	53,5	100	50	2
			30	92	15,8	60	100	60	1,6
			50	93	15,8	60	95	55	1,72

EK 2.5 Çelik çekme boru için Ø44mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Çelik Çekme	44	3.0	2	81	1,57	7,56	88	20	4,4
			3	75	1,57	7,56	90	25	3,6
			5	69	1,57	7,56	85	20	4,25
			10	64	1,57	7,56	90	20	4,5
			15	62	1,57	7,56	92	15	6,13
			20	61	1,57	7,56	90	15	6
			30	60,4	1,57	7,56	90	15	6
			50	61	1,57	7,56	85	15	5,6
		9.0	2	80	4,46	19	100	25	4
			3	73,8	4,46	19	100	25	4
			5	67	4,46	19	85	18	4,72
			10	62	4,46	19	85	15	5,6
			15	60	4,46	19	85	18	4,72
			20	60	4,46	19	90	15	6
			30	59,6	4,46	19	93	15	6,2
			50	60	4,46	19	90	15	6
		18.0	2	77	7,07	37,9	105	28	3,75
			3	70	7,07	37,9	95	18	5,2
			5	65	7,07	37,9	100	15	6,67
			10	59,2	7,07	37,9	92	15	6,13
			15	57,4	7,07	37,9	92	15	6,13
			20	57	7,07	37,9	98	13	7,5
			30	55,8	7,07	37,9	90	10	9
			50	56,6	7,07	37,9	90	15	6
		30.0	2	80.4	15,8	60	100	25	4
			3	74	15,8	60	90	20	4,5
			5	67,8	15,8	60	90	18	5
			10	63	15,8	60	95	15	6,3
			15	60,8	15,8	60	90	15	6
			20	60	15,8	60	90	15	6
			30	60	15,8	60	95	15	6,3
			50	60	15,8	60	93	18	5,16

EK 2.6 Çelik çekme boru için Ø47mm bobinle optimizasyon deney sonuçları

Malzeme Ø35x1,2 boru	Bobin İç çapı (mm)	Test Hızı V (m/dak)	Test Frekansı (kHz)	Kazanç (dB)	HP Filtre (m/dak)	LP Filtre (m/dak)	Hata yüksekliği (%)	Gürültü yüksekliği (%)	Sinyal- Gürültü Oranı
Çelik Çekme	47	3.0	2	86	3,13	9,51	90	22	4,09
			3	80	3,13	9,51	95	22	4,31
			5	75	3,13	9,51	100	30	3,3
			10	69	3,13	9,51	80	28	2,8
			15	69	3,13	9,51	90	30	3
			20	68	3,13	9,51	90	30	3
			30	68	3,13	9,51	90	20	4,5
			50	69	3,13	9,51	85	18	4,72
		9.0	2	78	5,61	19	75	15	5
			3	73	5,61	19	90	20	4,5
			5	67	5,61	19	85	20	4,25
			10	63	5,61	19	90	12	7,5
			15	62	5,61	19	92	15	6,13
			20	61	5,61	19	88	12	7,33
			30	61	5,61	19	50	5	10
			50	61	5,61	19	50	5	10
		18.0	2	78	9,98	37,9	78	15	5,2
			3	72	9,98	37,9	90	18	5
			5	67	9,98	37,9	100	18	5,55
			10	61	9,98	37,9	88	10	8,8
			15	60	9,98	37,9	90	12	7,5
			20	59	9,98	37,9	85	12	7,08
			30	59	9,98	37,9	80	10	8
			50	61	9,98	37,9	90	15	6
		30.0	2	76	14,1	60	85	20	4,25
			3	70,8	14,1	60	95	20	4,75
			5	65	14,1	60	90	18	5
			10	60,6	14,1	60	90	18	5
			15	59	14,1	60	90	15	6
			20	59	14,1	60	95	15	6,3
			30	59	14,1	60	95	15	6,3
			50	61	14,1	60	100	18	5,5