T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

İLETKEN KABLOLARIN YÜZEY HATALARININ TESPİTİNDE KULLANILAN TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ İÇİN GİRDAP AKIM BOBİNİ TASARLANMASI

Hazırlayan
Halim Burak TAŞKIN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2020
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

İLETKEN KABLOLARIN YÜZEY HATALARININ TESPİTİNDE KULLANILAN TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ İÇİN GİRDAP AKIM BOBİNİ TASARLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Halim Burak TAŞKIN

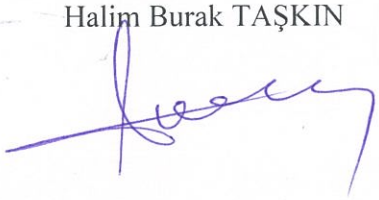
Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

Haziran 2020
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Halim Burak TAŞKIN



"İletken Kabloların Yüzey Hatalarının Tespitinde Kullanılan Tahribatsız Muayene Yöntemi İçin Girdap Akım Bobini Tasarlanması" adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Halim Burak TAŞKIN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU danışmanlığında **Halim Burak TAŞKIN** tarafından hazırlanan **"İletken Kabloların Yüzey Hatalarının Tespitinde Kullanılan Tahribatsız Muayene Yöntemi İçin Girdap Akım Bobini Tasarlanması"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

…….. /…… / 2020

JÜRİ:

Danışman	:Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU	…….
Üye	:…….	…….
Üye	:…….	…….
Üye	:…….	…….
Üye	:…….	…….

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...… tarih ve ……..…… sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca teknik bilgileri ve kapsamlı inovatif yorumlarıyla, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince imkanlarından faydalandığım HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş'ye ve tüm çalışma arkadaşlarıma desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm hayatım ve eğitimim boyunca beni motive eden, cesaretlendiren, maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim çok kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK 1501 programı kapsamında desteklenmiştir.

Halim Burak TAŞKIN

Kayseri, Haziran 2020

İLETKEN KABLOLARIN YÜZEY HATALARININ TESPİTİNDE KULLANILAN TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ İÇİN GİRDAP AKIM BOBİNİ TASARLANMASI

Halim Burak TAŞKIN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2020

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

ÖZET

İletken kabloların, boruların ve çeşitli amaçlar için kullanılacak olan metal materyallerin üretimi için sanayide farklı işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlerin başında ısıl işlem ve soğuk işlemler gelmektedir. Haddeleme, eğme, bükme, kıvırma, tavlama, döküm, dövme, kaynak yapma ve kesme gibi işlemler metal endüstrisinde ürün ortaya çıkarmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. İletken kablo sektöründe bir iletkenin üretimi için haddeleme, ekstrüzyon ve döküm işlemleri uygulandığından, iletken yüzeylerinde çeşitli çizikler ve kusurların meydana gelmesi olası bir durumdur. Bu kontrolü sağlamak için günümüze kadar çeşitli yöntemler denenmiştir ve bu yöntemler üretim prosesinde uygulanmaktadır. Bu yöntemler tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri olarak iki temel başlık altında toplanmıştır. Tahribatlı muayene yöntemleri masrafları ve zaman kayıplarını beraberinde getirmektedir. Tahribatsız muayene yöntemleri ise daha hızlı ve daha kusursuzdur.

Tahribatsız muayene yöntemlerinden yaygın olarak kullanılanlardan birisi de girdap akımları ile muayene yöntemidir. Girdap akımları ile muayene tekniğinde, test sonuçları anında elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, iletken yüzeylerinde meydana gelen çeşitli kusurların tespit edilmesinde kullanılacak olan girdap akım muayene test cihazının sensör/bobin teorisi Maxwell denklemlerinden başlanarak incelenmiş ve modellenmiştir. Aynı zamanda gerekli hesaplamalar ile bobin tasarımı gerçekleştirilerek bobinin verdiği tepkiler gözlemlenmiştir. Çıktılar, sonuçlar bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tahribatsız muayene yöntemleri; iletken kablo; girdap akımları; bobin; sensör.

DESIGN OF EDDY CURRENT COIL FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD USING DETECTION SURFACE DEFECTS OF CONDUCTIVE CABLES

Halim Burak TAŞKIN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, June 2020

Supervisor: Asst. Prof. Nurettin ÜSTKOYUNCU

ABSTRACT

Different processes are applied in the industry for the production of conductive cables, pipes and metal materials used for various purposes. The main processes are heat treatments and cold treatments. Processes such as rolling, bending, like bending, twisting, annealing, casting, forging, welding and cutting are widely used in metal industry to produce products. Since rolling, extrusion and casting processes are applied for the production of a conductor in the conductive cable industry, it is possible that various scratches and defects may occur on the conductor surfaces. Various methods have been tried to achieve this control and these methods are applied in the production process. These methods are grouped under two main titles as destructive and non-destructive testing methods. Destructive inspection methods brings with it costs and time losses. Non-destructive inspection methods are faster and more precise.

One of the widely used non-destructive testing methods is the method of inspection with eddy currents. With eddy-current testing, test results can be obtained instantly.

In this thesis, the eddy current inspection tester sensor / coil theory, which will be used to detect various defects on the conductor surfaces, has been studied and modeled starting from the Maxwell equations. At the same time, the coil design was performed with the necessary calculations and the responses of the coil were observed. The outputs are presented in detail in the results section.

Keywords: Non-destructive testing methods; conductive cable; eddy currents; coil; sensor.

İÇİNDEKİLER

İLETKEN KABLOLARIN YÜZEY HATALARININ TESPİTİNDE KULLANILAN TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ İÇİN GİRDAP AKIM BOBİNİ TASARLANMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
YÖNERGEYE UYGUNLUK. ii
KABUL VE ONAY. iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
KISALTMA VE SİMGELER x
TABLOLAR LİSTESİ xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ xv

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Maddelerin Manyetik Özellikleri 3
1.2. Manyetizma 4
1.2.1. Mıknatıslanma 5
1.2.2. Manyetik Geçirgenlik 6
1.3. Alüminyum Kaplı Çelik Tel (ACS) 8
1.4. Malzeme Muayene Yöntemleri 10
1.4.1. Tahribatlı Muayene Yöntemleri 11
1.4.1.1. Çekme Deneyi 11
1.4.1.2. Basma Deneyi 12
1.4.1.3. Kırma Deneyi 13
1.4.1.4. Eğme Deneyi 14
1.4.2. Tahribatsız Muayene Yöntemleri 15

1.4.2.1. Ultrasonik Muayene Yöntemi 15
1.4.2.2. Penetrant İle Muayene Yöntemi 16
1.4.2.3. Manyetik Partiküller İle Muayene Yöntemi 17
1.4.2.4. Radyografi İle Muayene Yöntemi 17
1.4.2.5. Girdap Akımları İle Muayene Yöntemi 18
1.5. Tezin Amacı Ve Literatürdeki Yeri 23

2. BÖLÜM
YÖNTEMLER

2.1. Teori 27
2.2. Potansiyel Dalga Denklemleri Fazörel İfadeleri ve Elektromanyetik Güç Akışı 34
2.3. Deri Derinliği 37
2.4. Manyetik Geçirgenlik 39

3. BÖLÜM
TASARIM MATERYALLERİ

3.1. Eşdeğer Devre Analizi ve Empedans Değişimi 43
3.1.1. Denge Durumu 48
3.1.2. Empedans Değişimi 49
3.1.2.1. Elektriksel İletkenlik 52
3.1.2.1.1. Pratik Yaklaşımlarda İletkenlik Üzerine Etkisi Olan Değişkenler 54
3.1.2.2. Frekans 55
3.1.3. Girdap Akımı Probu – Malzeme İkilisi Sisteminin Eşdeğer Devresi 56

4. BÖLÜM
DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

4.1. Test Numuneleri 60
4.2. Bobin/Sensör Tasarımı ve Hesaplamaları 65
4.3. Bobinin LCR Metre Ölçüm Sonuçları 69
4.4. Bobin/Sensör Empedans Köprü Devresi Kurulumu ve Ölçüm Sonuçları 79
4.4.1. Empedans Köprü Devresi Kalibrasyonu 83

4.5. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) 89

5. BÖLÜM

TARTIŞMA – SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Tartışma 95

5.2. Sonuç ve Öneriler 96

KAYNAKLAR 98

ÖZGEÇMİŞ 101

KISALTMA VE SİMGELER

E	:Elektrik Alan (Volt/metre)
B	:Manyetik Akı Yoğunluğu (Tesla)
μ	:Manyetik Geçirgenlik Katsayısı (Henry/metre)
μ_r	:Bağıl Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
μ_0	:Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
H	:Manyetik Alan Şiddeti (Amper/metre)
ACS	:Aluminium Clad Steel (Alüminyum Kaplı Çelik Tel)
OPGW	:Optical Ground Wire (Optik Topraklama Kablosu)
NDT	:Non-Destructive Testing (Tahribatsız Muayene Yöntemi)
π	:Pi Sayısı
PEC	:Pulsed Eddy Current (Darbeli Girdap Akımı)
A	:Vektör Manyetik Potansiyel
∇	:Del/Nabla Operatörü
ρ	:Yük Yoğunluğu (C/m^3)
J	:Akım Yoğunluğu (A/mm^2)
SI	:Uluslararası Birim Sistemi
t	:Zaman
$\vec{D}$	:Elektrik Akı Yoğunluğu (C/m^2)
ε	:Ortamın Dielektrik Sabiti
∂	:Türev Operatörü
σ	:Ortamın Elektrik İletkenliği (Siemens/metre)
$\equiv$	:Denktir
$\cdot$	:Skaler Çarpım

$\times$	:Vektörel Çarpım
∇^2	:Laplasyen Operatörü
r	:Yarıçap
φ	:fi Açısı
z	:z Ekseni
V	:Skaler Elektrik Potansiyel
w	:Açısal Frekans (rad/s)
j	:Kompleks Katsayı
k	:Sabit Bir Sayı
u	:Hız Terimi (m/s)
γ	:Propagasyon Sabiti
$\vec{P}$	:Poynting Vektörü
$\propto$	:Zayıflatma Sabiti
β	:Faz Sabiti
$\gg$	:Çok çok Büyük İşareti
$Re\{\}$	:Reel (Gerçek) İfadesi
$Im\{\}$	:İmajiner (Sanal) İfadesi
e^j	:Euler Eşitliği
δ	:Deri Derinliği (mm)
f	:Frekans (Hz)
$\vec{M}$	:Mıknatıslanma Vektörü
N	:Bobin Sarım Sayısı
I	:Akım (Amper)
l	:Bobin Sarım Uzunluğu
L	:İndüktans (Henry)

S	:Kesit Alan (mm^2)
Z	:Empedans (Ohm)
D	:Bobin Karkas Çapı ($D_{inç} = D_{mm}/25.4$)
d	:Emaye Tel Çapı İzolesiz ($d_{inç} = d_{mm}/25.4$)
c	:Çok Katlı Bobin Katman Uzunluğu ($c_{inç} = c_{mm}/25.4$)
θ	:Teta Açısı
R	:Direnç (Ohm)
X_L	:İndüktif Reaktans (Ohm)
AC	:Alternatif Akım (Amper)
Ω	:Ohm Sembolü
SST	:Stainless Steel (Paslanmaz Çelik)
Ni	:Nikel
Cu	:Bakır
IACS	:International Annealed Copper Standard (Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı)
%	:Yüzde
G	:İletkenlik (Siemens)
M_{12}	:Ortak İndüktans (Henry)
s	:Laplace s Domeni
k_c	:Etkileşim Katsayısı
POM	:Polioksimetilen
CNC	:Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayısal Kontrolü)
$J_1(x)$	:Birinci Tür Birinci Dereceden Bessel Fonksiyonu
Vrms	:Karekök Ortalama Voltaj
LCR	:Bobin (L) Kondansatör (C) Direnç (R)
USB	:Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)

SEA	:Sonlu Elemanlar Analizi
3D	:Three-Dimensions (Üç Boyut)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Malzeme Manyetik Geçirgenlikleri 7
Tablo 3.1. Çeşitli Malzemelerin Direnç ve İletkenlik Değerleri 53
Tablo 4.1. Çok Katmanlı Bobin İndüktans Hesabı 67
Tablo 4.2. Selenoid Self İndüktans Hesabı 68
Tablo 4.3. Kusur Derinliklerine Göre Bobin İndüktansı Alt ve Üst Sınır Değerleri 70
Tablo 4.4. ACS Tel Yüzeyinde 3D Eksende Oluşturulan Kusurların Nitelikleri 89

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektrik Alan İçerisindeki Paramanyetik Madde 4
Şekil 1.2. Elektrik Alan İçerisindeki Diyamanyetik Madde 5
Şekil 1.3. Elektrik Alan İçerisindeki Ferromanyetik Madde 5
Şekil 1.4. Bir Ferromanyetiğin Histerezis Eğrisi 6
Şekil 1.5. OPGW Kablo Yapısı 8
Şekil 1.6. Haddeleme İşlemleri İçin Tipik Merdane Düzenleri (a) İki-İleri Çekici (b) İki-İleri Geri Dönebilen (c) Üç-İleri (d) Dört-İleri (e) Kümeli 9
Şekil 1.7. ACS Tel 10
Şekil 1.8. Malzeme Muayene Yöntemleri 11
Şekil 1.9. Çekme Deneyi Cihazı 12
Şekil 1.10. Basma Deneyi Düzeneği 13
Şekil 1.11. Kırma Deneyi Düzeneği 14
Şekil 1.12. Eğme Deneyi Düzeneği 15
Şekil 1.13. Ultrasonik Muayene Yöntemi 16
Şekil 1.14. Penetrant Sıvı İle Hata Tespiti 16
Şekil 1.15. Manyetik Partiküller İle Muayene Yöntemi 17
Şekil 1.16. Radyografi İle Muayene Yöntemi 18
Şekil 1.17. Bobin Tarafından Bir İletkende Girdap Akımları İndüklenmesi 19
Şekil 1.18. İletken Bir Yüzeyde İndüklenen Girdap Akımları 20
Şekil 1.19. Dahili Tip Girdap Akımları Test Probu 21
Şekil 1.20. Çevreleyici Tip Girdap Akımları Test Probu 21
Şekil 1.21. Yüzey Tip Girdap Akımları Test Probu 22
Şekil 1.22. Analog Girdap Akımları Test Sisteminin Blok Şeması 23
Şekil 2.1. Silindirik Koordinat Sistemi 31
Şekil 2.2. Elektromanyetik Alan İçerisindeki İletken Tel Üzerinde Oluşan Vektörel Nicelikler 36
Şekil 2.3. Manyetik Geçirgenliklerin Karşılaştırılması 40
Şekil 2.4. ACS Tel Kesitli Görünümü 41
Şekil 3.1. Karkas Boyu Sarıma Sahip Mutlak Tip Sensör Yapısı 43
Şekil 3.2. Karkasa Kısmi Sarılı Mutlak Tip Sensör Yapısı 44
Şekil 3.3. Karkasa Kısmi Sarılı Diferansiyel Tip Sensör Yapısı 44

Şekil 3.4. Muayene için Sensörlerden Oluşan Köprü Devresi 45
Şekil 3.5. Harici Kıyaslamalı Karkas Boyu Sarıma Sahip Mutlak Tip Bobin 45
Şekil 3.6. Harici Kıyaslamalı Mutlak Tip Bobin 46
Şekil 3.7. Dahili Kıyaslamalı Diferansiyel Tip Bobin 46
Şekil 3.8. Çok Katmanlı Bobin Sarımı 47
Şekil 3.9. Sarımı Gerçekleştirilmiş Mutlak Tip Bobin 47
Şekil 3.10. Sensörler İle Temsil Edilen Empedans Köprü Devresi 48
Şekil 3.11. Muayene Esnasında İndüktans Değişimi 50
Şekil 3.12. Empedans Düzlemi 50
Şekil 3.13. Normalize Empedans Diyagramı 52
Şekil 3.14. İletkenliğin Normalize Empedans Üzerindeki Etkisi 54
Şekil 3.15. Ferromanyetik Malzemelerin Farklı Frekanslarda Faz Açılarındaki 56
Değişim 56
Şekil 3.16. Bobin – Malzeme İkilisi Fiziksel Tanımı 57
Şekil 3.17. Bobin – Malzeme İkilisi Eşdeğer Devresi 57
Şekil 4.1. 1 Numaralı Yüzeysel Çizeğe Sahip ACS Tel Numunesi 61
Şekil 4.2. 1 Numaralı Yüzeysel Eziğe Sahip ACS Tel Numunesi 61
Şekil 4.3. 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS Tel Numunesi
..... 62
Şekil 4.4. 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe 63
Sahip ACS Tel Numunesi 63
Şekil 4.5. 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Numunesi 63
Şekil 4.6. 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Numunesi 64
Şekil 4.7. 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Numunesi 64
Şekil 4.8. Kestamit Çubuk 65
Şekil 4.9. Girdap Akımları Bobin İndüktansı Hesaplama Programı 66
Şekil 4.10. Tasarlanan Mutlak Tip Test Bobini 68
Şekil 4.11. Tasarlanan Mutlak Tip Referans Bobini 69
Şekil 4.12. Ölçümler İçin Kullanılan LCR Metre 69
Şekil 4.13. Tasarlanan Mutlak Tip Test Bobini İndüktans Ölçümü (μH) 70
Şekil 4.14. Tasarlanan Mutlak Tip Referans Bobini İndüktans Ölçümü (μH) 71
Şekil 4.15. İçerisinde 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Varken Test Bobini 71
İndüktans Ölçümü (mH) 71

Şekil 4.16. İçerisinde 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Varken Referans Bobini 72
İndüktans Ölçümü (mH) 72
Şekil 4.17. İçerisinde 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Varken Test 72
Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 72
Şekil 4.18. İçerisinde 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Varken 73
Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 73
Şekil 4.19. 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test 73
Bobini İndüktans Değişimi (mH) 73
Şekil 4.20. İçerisinde 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS .. 74
Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 74
Şekil 4.21. 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS Tel
Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH) 74
Şekil 4.22. İçerisinde 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip 75
ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 75
Şekil 4.23. İçerisinde 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip 75
ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 75
Şekil 4.24. 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip ACS Tel 76
Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH) 76
Şekil 4.25. İçerisinde 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Varken 76
Şekil 4.26. İçerisinde 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Varken 77
Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 77
Şekil 4.27. 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Muayenesi 77
Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH) 77
Şekil 4.28. İçerisinde 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel 78
Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 78
Şekil 4.29. İçerisinde 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel 78
Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH) 78
Şekil 4.30. 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Muayenesi .. 79
Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH) 79
Şekil 4.31. Empedans Köprü Devresi Şematiği 80
Şekil 4.32. Empedans Köprüsü Denge Durumu 80
Şekil 4.33. Empedans Köprüsü Dengesinin Bozulma Durumu 81
Şekil 4.34. Empedans Köprü Devresi Uygulaması 82

Şekil 4.35. Sensörler İçerisinde Kusursuz ACS Teller Varken Dengeye Getirilen 82
Empedans Köprü Devresi....82
Şekil 4.36. Empedans Köprü Devresi Kalibrasyon Ayarı....83
Şekil 4.37. Test Bobini İçerisinde 1 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi....84
Şekil 4.38. Test Bobini İçerisinde 1 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali 84
Şekil 4.39. Test Bobini İçerisinde 2 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi....85
Şekil 4.40. Test Bobini İçerisinde 2 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali 85
Şekil 4.41. Test Bobini İçerisinde 3 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi....86
Şekil 4.42. Test Bobini İçerisinde 3 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali 86
Şekil 4.43. Test Bobini İçerisinde 4 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi....87
Şekil 4.44. Test Bobini İçerisinde 4 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali 87
Şekil 4.45. Test Bobini İçerisinde 5 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi....88
Şekil 4.46. Test Bobini İçerisinde 5 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali 88
Şekil 4.47. 3D ACS Tel Modeli 89
Şekil 4.48. Çizik Kusuru Üzerindeki Manyetik Akı Yoğunluğu Çizgileri 90
Şekil 4.49. Çizik Kusuru Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Eğrisi....90
Şekil 4.50. Çizik Kusuru Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi 91
Şekil 4.51. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı....91
Yoğunluğu Çizgileri 91
Şekil 4.52. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı....92
Yoğunluğu Eğrisi 92
Şekil 4.53. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi 92

Şekil 4.54. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Çizgileri 93
Şekil 4.55. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Eğrisi 93
Şekil 4.56. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi 94

GİRİŞ

Günümüzde metal endüstrisi alanında üretilen veya endüstriyel uygulamalarda kullanılan manyetik ve manyetik olmayan materyallerin yapılarında oluşabilen çizik, çatlak, korozyon, ezilme gibi kusurlar, malzemenin kullanım alanına göre maddi kayıplar veya riskler oluşturabilmektedir. Bu kayıp ve riskleri önlemek için üretim aşamasında veya üretimden sonra Tahribatsız Test Yöntemleri (Non-Destructive Testing Methods) veya Tahribatlı Test Yöntemleri (Destructive Testing Methods) kullanılarak kusurlu materyal bölgeleri tespit edilebilmektedir. Tahribatlı test yöntemleri, muayenesi yapılacak olan materyalden numune alınarak deneyler ile kusur tespiti yapmak için kullanılmaktadır. Bu test yöntemlerinde numuneler üzerine çekme, bükme gibi kuvvetler uygulanarak muayene gerçekleştirilir. Bu fiziksel müdahaleler materyale zarar vererek, sonradan kullanılamayacak hale getirebilmektedir. Tahribatsız test yöntemlerinde ise numunenin fiziksel bütünlüğü bozulmadan kalite ölçümü gerçekleştirilir. Tahribatsız test yöntemleri ile gerçekleştirilen muayenelerde test yapılan materyal hiçbir şekilde deforme olmamaktadır. Tahribatsız test yöntemleri, tahribatlı test yöntemlerine göre daha hızlı olmaları sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. En yaygın tahribatsız tekniklerden bazıları elektromanyetik, ultrasonik ve sıvı penetran testleridir. Tahribatsız test yöntemlerinde manyetik malzemeler üzerine uygulama konusunda girdap akımları tekniği oldukça popüler bir yöntemdir. Özellikle amacını yerine getirebilmesi için üzerinde herhangi bir kusur olması istenmeyen iletkenlerde, mukavemetinin yüksek olması ve güvenli bir kullanım için herhangi bir kusura sahip olması istenmeyen metallerde girdap akımları tekniği oldukça başarılı sonuçlar vererek muayene gerçekleştirebilmektedir.

Girdap akımı, manyetik partikül, radyografik ve ultrasonik yöntem gibi elektromanyetik yöntemlerin tümü, incelenen malzemeye özelliklerini çıkarmak için elektromanyetik veya ses dalgaları ekler. Girdap akımı tekniğinin prensibi, manyetik alan kaynağı ile test materyali arasındaki etkileşime dayanmaktadır.

Bu etkileşim test parçasındaki girdap akımlarını indükler [3]. Girdap akım akışındaki değişiklikler izlenerek çok küçük çatlakların varlığı bile tespit edilebilmektedir.

Tahribatsız test yöntemleri arasında, yüksek hızda test gerçekleştirebilecek en uygun teknik girdap akımları tekniğidir. Zorlu çalışma koşullarında, 150 m/s'ye [4] kadar yüksek hızda test yapılmasına izin veren sistemler bulunmaktadır. Girdap akımı testi, özellikle üretim hatlarındaki teller, çubuklar, borular veya profiller gibi yarı mamul ürünlerin seri hat üzerinde incelenmesinde hızlıdır. Girdap akımı testinin sonuçları pratik olarak anlıktır, oysa sıvı nüfuz testi veya optik muayene gibi diğer teknikler, tüm üretimi incelemeyi imkansız kılan zaman alıcı prosedürler gerektirir. Girdap akımı testi ferromanyetik veya ferromanyetik olmayan çok çeşitli iletken malzemelerde çatlak tespitini gerçekleştirebilirken, manyetik parçacık yöntemi gibi diğer tahribatsız teknikler ferromanyetik metallerle sınırlıdır. Girdap akımı yönteminin diğer tekniklere göre bir diğer avantajı da denetimin sensör ile denetlenen parça arasında doğrudan fiziksel temas olmadan gerçekleştirilebilmesidir [2]. Bu tez çalışmasının amacını, üretim aşamasında iletken teller üzerinde meydana gelebilecek herhangi bir kusurun tespit edilmesinde algılayıcı olarak kullanılan girdap akımları sensör / bobinin tasarımı oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tahribatsız girdap akımları tekniğinin teorik ve pratik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Girdap akımları tekniğini ilgilendiren temel kavramlar ve literatür çalışması Bölüm 1'de yer almaktadır. Bölüm 2'de materyaller ve tekniğin kullanımı, en temelinden, Maxwell denklemlerinden başlanarak elektromanyetik eşitlikler ile detaylı bir şekilde verilmiştir. Bölüm 3'de daha önceki bölümden yola çıkarak, bobin tasarlanmasında kullanılan matematiksel eşitlikler ve eşdeğer devreler detaylı olarak verilmiştir. Bölüm 4'de teknik ile ilgili daha önceki bölümlerde aktarılan ifadelerin pratik sonuçları verilmiştir. Bölüm 5'de ise bu çalışma ile ilgili tartışma, sonuç ve öneriler verilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Maddelerin Manyetik Özellikleri

Doğada bulunan hemen hemen her madde manyetik özelliklere sahiptir. Manyetik özellik barındıran maddeler, bir başka manyetik özellik barındıran madde ile manyetik olarak etkileşime girebilmektedir. Maddenin manyetik özellikleri, onu oluşturan elektronların hareketine bağlıdır. Elektronların yörüngesel ve spin hareketleri maddenin yapıtaşı olan atomda bir akım, buna bağlı olaraktan bir dipol moment oluşturur. Maddedeki net dipol momentin büyüklüğü maddenin manyetikliğini belirler [5].

Manyetik özelliklerine göre maddeler temel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır:

a. **Paramanyetik:** Mıknatısa yaklaştırıldıklarında çok az etkilenen maddelerdir. Manyetik alanın varlığında çok az etkileşim gösterirler. Bu maddelere örnek olarak; sodyum, uranyum, hava, oksijen, platin, manganez ve alüminyum verilebilir [5].
b. **Diyamanyetik:** Bir mıknatıs yaklaştırıldığında, mıknatıs tarafından itilir. Manyetik alanın varlığında bu alana zıt yönde zayıf bir manyetik moment oluşur. Bu maddelere örnek olarak; bakır, kurşun, bizmut, karbon, gümüş, cıva verilebilir [5].
c. **Ferromanyetik:** Ferromanyetik maddeler mıknatıs tarafından çekilirler. Manyetik alanın varlığında manyetik alan çizgileri ile aynı yönde mıknatıslanırlar. Bu maddelere örnek olarak; permaloy, nikel, demir, çelik, kobalt verilebilir [5].

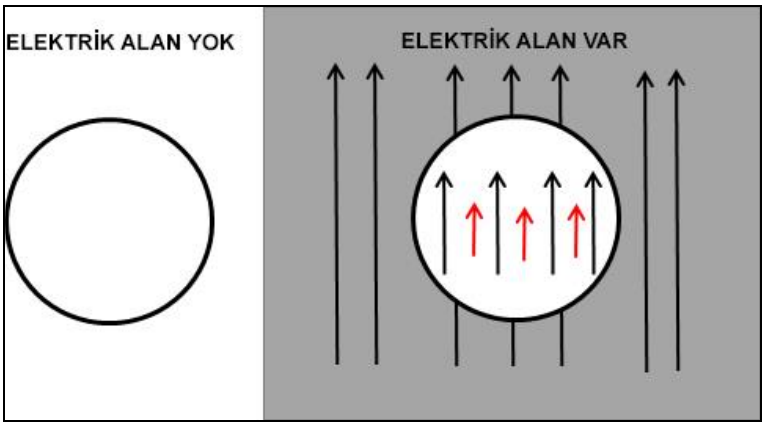
1.2. Manyetizma

Manyetizma, maddelerin manyetik alana maruz kaldıklarında oluşan bir olgudur. Elektrik akımı veya manyetik bir madde herhangi bir manyetik alan oluşturabilir. Oluşan bu manyetik alan başka elektrik akımlarını veya manyetik momentleri etkileyebilir.

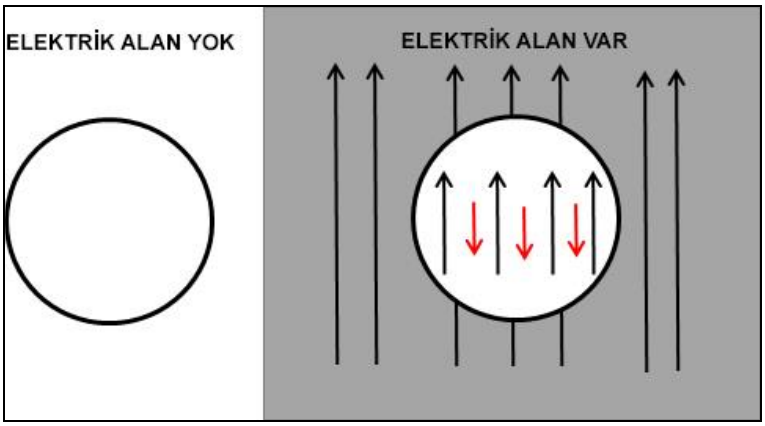
Maddenin özelliklerine bağlı olarak manyetik alan oluşumu ve manyetik alandan etkilenmeleri belirli ölçülerde değişiklik gösterir. Manyetizmanın temel kaynakları, durgun elektrik yüklerinin oluşturduğu elektrik alan ve hareketli elektrik yüklerinin oluşturduğu manyetik alandır.

Paramanyetik maddeler, elektrik alanla aynı yönde küçük bir manyetik alan oluşturur.

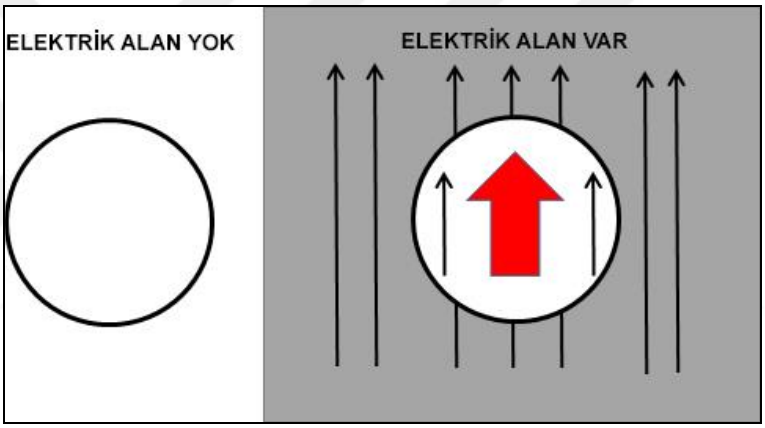
Diyamanyetik maddeler, elektrik alanın tersi yönünde küçük bir manyetik alan oluşturur. Ferromanyetik maddeler, manyetik alan yönünde devamlı bir manyetik etkiye sahiptir [6]. Şekil 1.1'de paramanyetik, Şekil 1.2'de diyamanyetik ve Şekil 1.3'de de ferromanyetik maddelerin elektrik alan ile ilişkisi görülmektedir [6].



Şekil 1.1. Elektrik Alan İçerisindeki Paramanyetik Madde [6]



Şekil 1.2. Elektrik Alan İçerisindeki Diyamanyetik Madde [6]

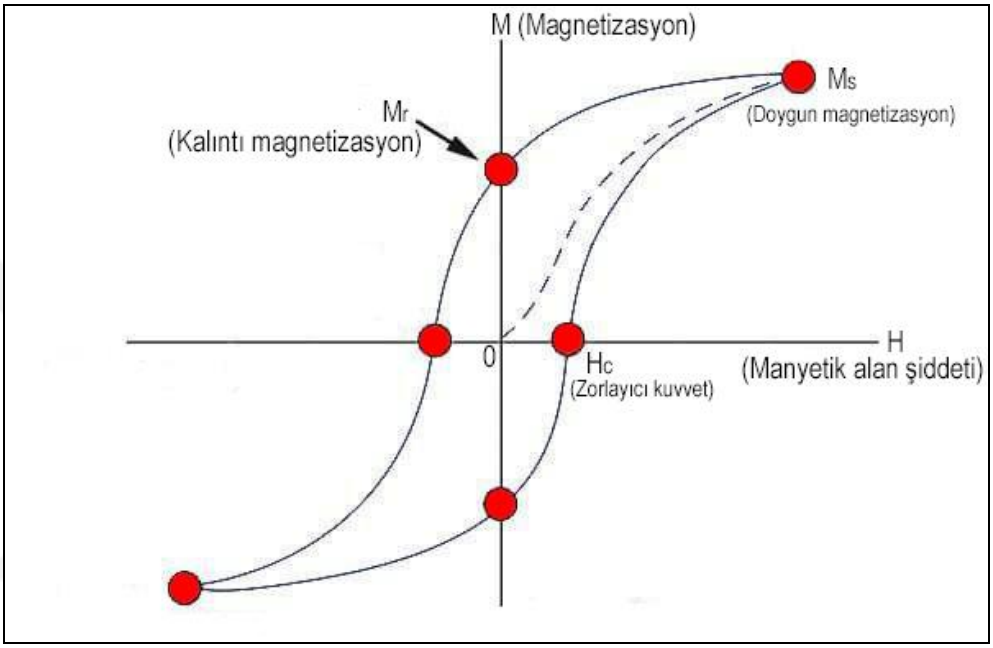


Şekil 1.3. Elektrik Alan İçerisindeki Ferromanyetik Madde [6]

1.2.1. Mıknatıslanma

Mıknatıslanma, bir maddenin manyetik durumunu belirtmektedir. Mıknatıslanma vektörünün büyüklüğü, maddenin birim hacmindeki manyetik moment sayısıyla doğru orantılıdır. Mıknatıslanma, elektronların yörüngedeki hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Maddelerde mıknatıs özelliğinin bulunup bulunmaması, maddeyi oluşturan elektronların atom çekirdeği etrafındaki dönüşünün yanı sıra kendi eksenleri etrafındaki dönüşleri ile ilgilidir. Buna bağlı olarak kendi ekseni etrafında dönen bir elektron çevresinde bir manyetik alan oluşur. Bazı maddeler mıknatıs özelliği göstermemesine rağmen elektrostatik alana maruz kaldıklarında manyetik etki gösterebilirler [7]. Elektromanyetik etki alanından uzaklaştıklarında ise özellikle ferromanyetik maddelerde mıknatıslanma özelliği kalıcı olabilmektedir. Maddenin bu

mıknatıslanma durumunun gözlenebilmesi histerezis olarak adlandırılabilmektedir. Histerezis eğrisi maddenin geçmiş manyetik bilgilerini barındırır. Yapısındaki değişikleri gecikme ile tepki şeklinde ifade etmektedir. Şekil 1.4'te tipik bir histerezis eğrisi görülmektedir [8].



Şekil 1.4. Bir Ferromanyetiğin Histerezis Eğrisi [8]

1.2.2. Manyetik Geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik (μ), manyetik bir materyalin manyetik alan gelişimini destekleme yeteneğidir. Başka bir deyişle manyetik geçirgenlik, manyetik alan şiddeti (H) ve manyetik akı yoğunluğu (B) arasındaki sabittir. Malzemenin manyetik geçirgenliği ne kadar büyük olursa, manyetik kuvvet çizgileri için iletkenlik o kadar büyük olur ve bunun tersi de geçerlidir. Bir malzemenin manyetik geçirgenliği, harici bir manyetik alanın malzeme içinde daha yüksek bir manyetik çekim gücü oluşturma kolaylığını gösterir. Manyetik geçirgenliğin birimi SI birim sisteminde Henry/metre'dir.

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{1.1}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{1.2}$$

Burada;

μ : Manyetik geçirgenlik (Henry/metre)

μ_r: Bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı

μ_0: Boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı

B : Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)

H : Manyetik alan şiddeti (Amper/metre)

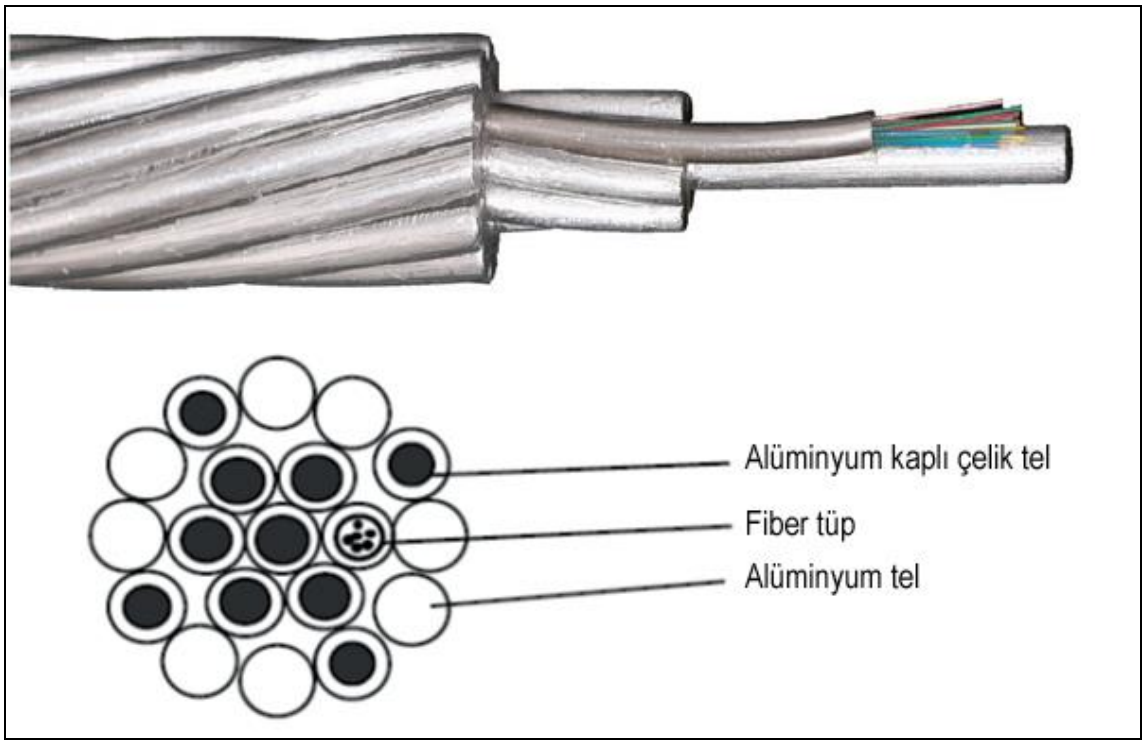
Tablo 1.1'de yaygın olarak bilinen maddelerin manyetik geçirgenlik değerleri verilmiştir [9].

Tablo 1.1. Malzeme Manyetik Geçirgenlikleri [9]

Malzeme	Manyetik Geçirgenlik (μ) H/m	Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ_r)
Hava	$1.25663753 \times 10^{-6}$	1.00000037
Alüminyum	1.256665×10^{-6}	1.000022
Östenitik Paslanmaz Çelik	1.260×10^{-6} - 8.8×10^{-6}	1.003 – 7
Bizmut	1.25643×10^{-6}	0.999834
Karbon Çeliği	1.26×10^{-4}	100
Demir	6.3×10^{-3}	5000
Bakır	1.256629×10^{-6}	0.999994
Platin	1.256970×10^{-6}	1.000265
Tavlı Paslanmaz Çelik	1.26×10^{-3} - 2.26×10^{-3}	1000-1800
Teflon	1.2567×10^{-6}	1
Safir	1.2566368×10^{-6}	0.99999976
Vakum Ortamı	$4\pi \times 10^{-7}$	1
Su	1.256627×10^{-6}	0.999992
Ahşap	$1.25663760 \times 10^{-6}$	1.00000043
Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelik	5.0×10^{-5} – 1.2×10^{-4}	40-95
Nikel	1.26×10^{-4} - 7.54×10^{-4}	100 - 600

1.3. Alüminyum Kaplı Çelik Tel (ACS)

Optik topraklama kabloları (Optical Ground Wire - OPGW) havai güç hatlarında kullanılan bir kablo türüdür. Bu kablo, topraklama ve iletişim işlevlerini bir arada yerine getirmektedir. Bu kablo alüminyum tel, alüminyum kaplı çelik tel ve optik fiber tüplerinin bir arada bükülüp tek bir yapı haline getirilmesi ile oluşturulur. Şekil 1.5'te OPGW kablo yapısı görülmektedir [10].

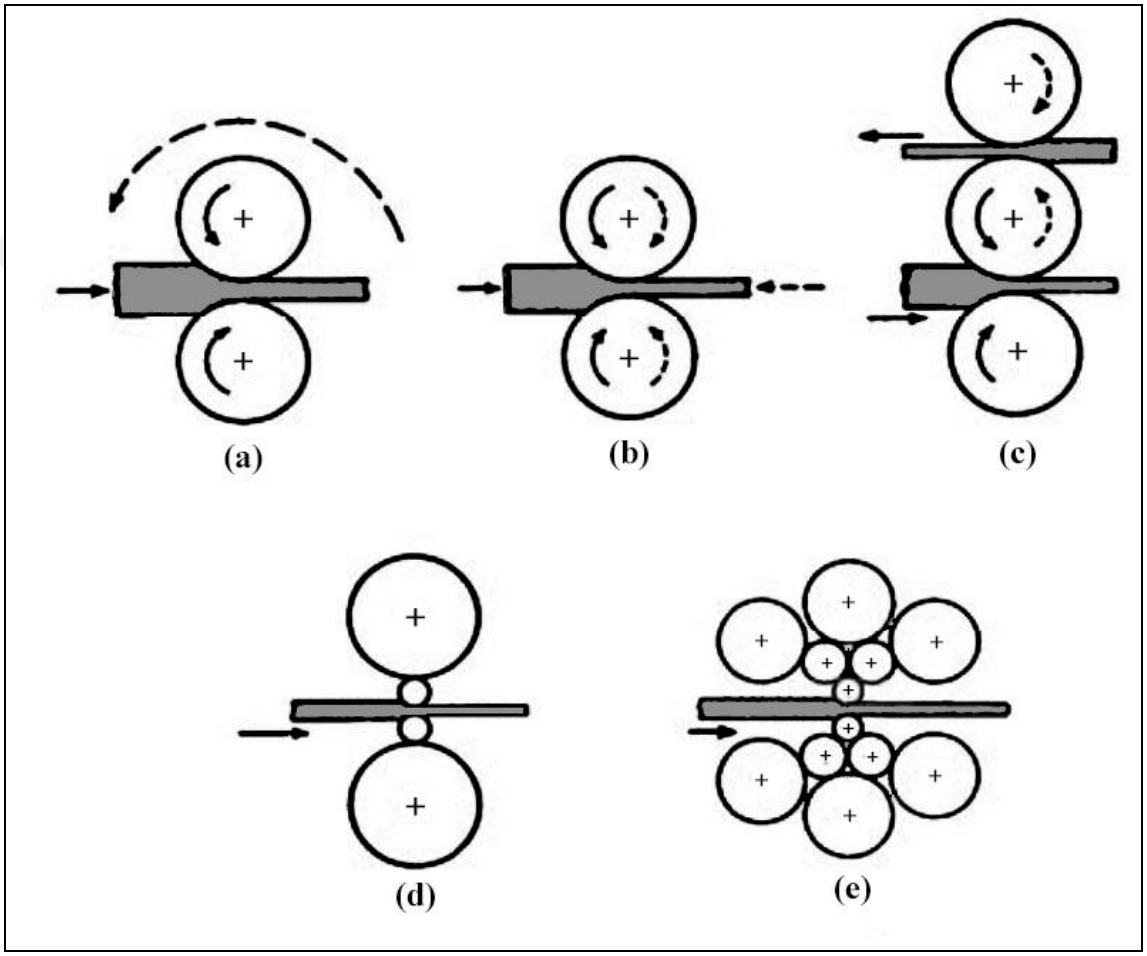


Şekil 1.5. OPGW Kablo Yapısı [10]

Bu kablonun üretiminde kullanılan teller soğuk işlem olarak adlandırılan çeşitli üretim süreçlerinden geçmektedir. Bu süreçlerin başında da haddeleme gelmektedir. Filmaşin olarak adlandırılan kalın çaptaki silindir metal çubuklar, daha ince çaptaki tellere dönüştürülmek istendiğinde haddeleme işlemlerine tabi tutulurlar.

Haddeleme, bir metalin veya malzemenin mukavemeti yüksek olan, kendi eksenleri etrafında dönebilen iki silindir arasından geçirilerek şekil verme işlemidir. Silindirler bir çekiç gibi davranarak malzeme çekilirken sürekli bir dövme işlemi uygular. Tipik bir

haddeleme işlemi Şekil 1.6'da görülmektedir [11]. ACS tellerde, daha kalın çaptaki metalin haddelenmesiyle üretilir. Şekil 1.7'de haddeleme işlemi ile üretilmiş bir ACS tel görülmektedir [12].



Şekil 1.6. Haddeleme İşlemleri İçin Tipik Merdane Düzenleri **(a)** İki-İleri Çekici **(b)** İki-İleri Geri Dönebilen **(c)** Üç-İleri **(d)** Dört-İleri **(e)** Kümeli [11]

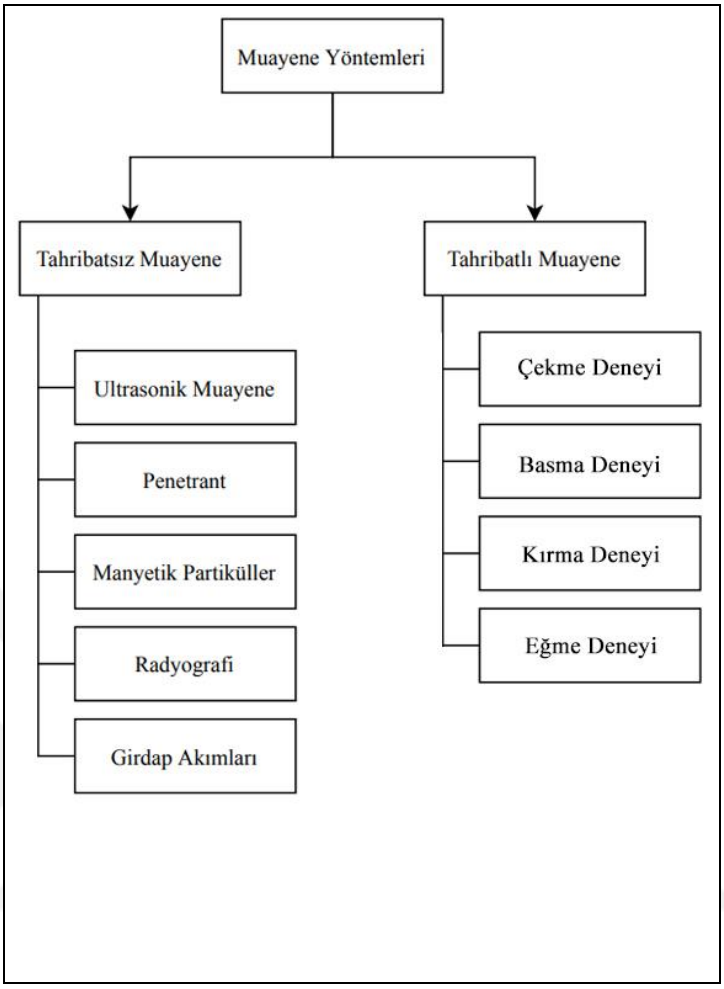


Şekil 1.7. ACS Tel [12]

Haddeleme işlemi yapılırken, ACS tel yüzeylerinde çizikler, ezikler veya alüminyum kaplama kalkmaları gibi kusurlar meydana gelebilmektedir. Bu kusurlar türüne göre kablonun kullanım amacı dışına çıkması ve güvenlik riskleri oluşturması gibi sorunlar meydana getirebilmektedir. Bunun için üretim esnasında bu tarz kusurlara mahal verilmemesi üreticinin olmazsa olmazlarındandır. İnsan gözüyle bu kusurların tespit edilmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için çeşitli muayene yöntemleri geliştirilmiştir. Bu başlığı takiben diğer başlıkta bu muayene yöntemlerinden bahsedilmektedir.

1.4. Malzeme Muayene Yöntemleri

Malzeme yapı ve özelliklerini incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan iki tür muayene yöntemi bulunmaktadır. Bunlar tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleridir. Tahribatsız muayene yöntemleri tahribatlı muayene yöntemlerine göre daha yeni ve daha çok kullanılan muayene yöntemidir. Şekil 1.8'de bu iki muayene yönteminin türleri yer almaktadır.



Şekil 1.8. Malzeme Muayene Yöntemleri

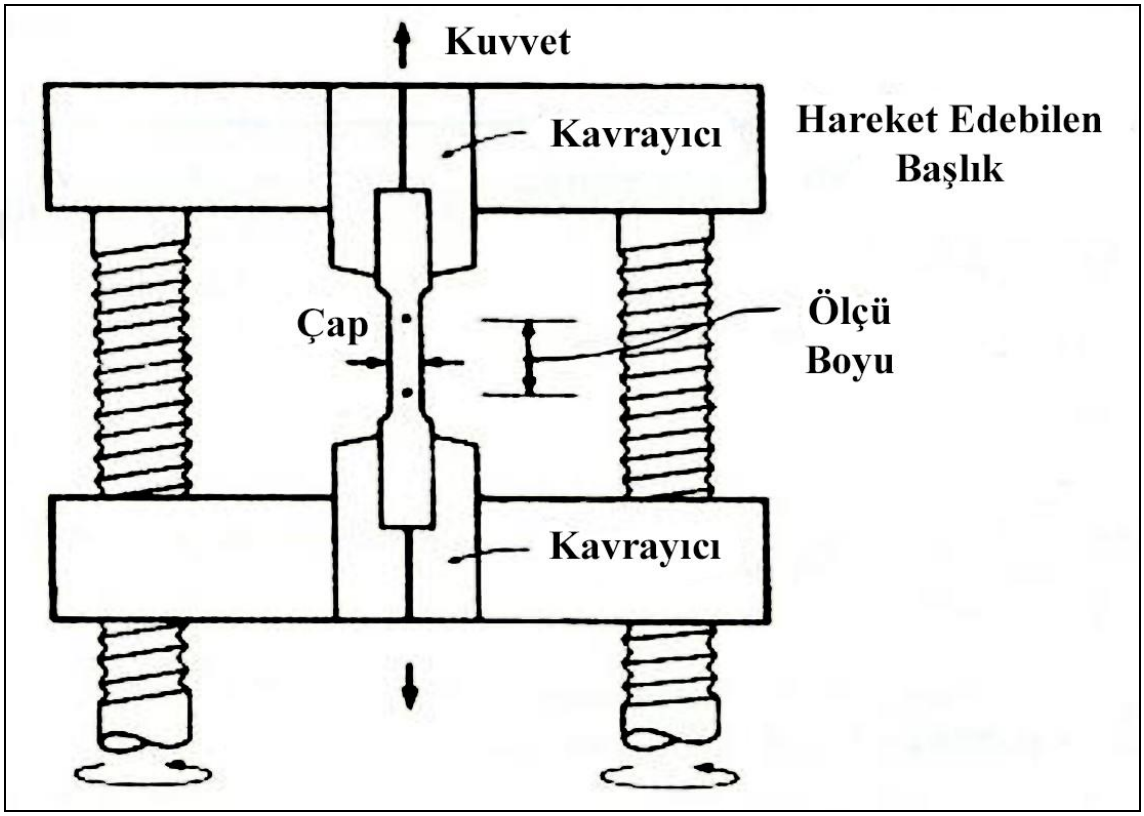
1.4.1. Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Malzemelerin kullanım alanına göre kalıcı şekil değişikliklerine karşı göstereceği direnci ve dayanımı belirlemek için uygulanan muayene yöntemleridir. Dış ortam koşullarında veya uygulama alanlarında malzemeye etkiyecek çeşitli fiziki yüklere karşı malzemenin dayanma kabiliyetini test etmek için uygulanmaktadır. Başlıca dört çeşit tahribatlı muayene yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; çekme deneyi, basma deneyi, kırma deneyi ve eğme deneyidir.

1.4.1.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bir malzemeye kuvvet uygulayarak, kopma mukavemetinin ölçülmesi için

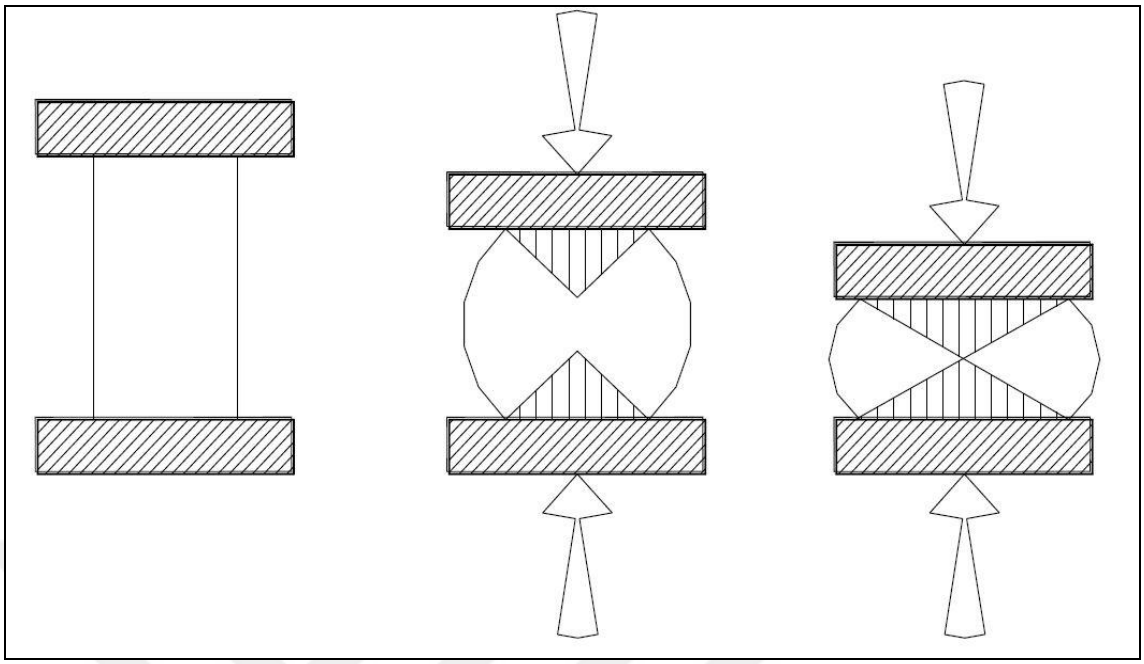
gerçekleştirilir. Bu yöntemde kurulu bir deney düzeneğinde deney numunesine artırımlı bir kuvvet uygulanır. Belirlenen eşik seviyesine göre malzemenin dayanımı ölçülmüş olur. Deney düzeneği, sabit bir alt çene, hareketli üst çene ve uzamanın ölçüldüğü ekstensometreden oluşur. Şekil 1.9'da çekme deneyi cihazı görülmektedir [13].



Şekil 1.9. Çekme Deneyi Cihazı [13]

1.4.1.2. Basma Deneyi

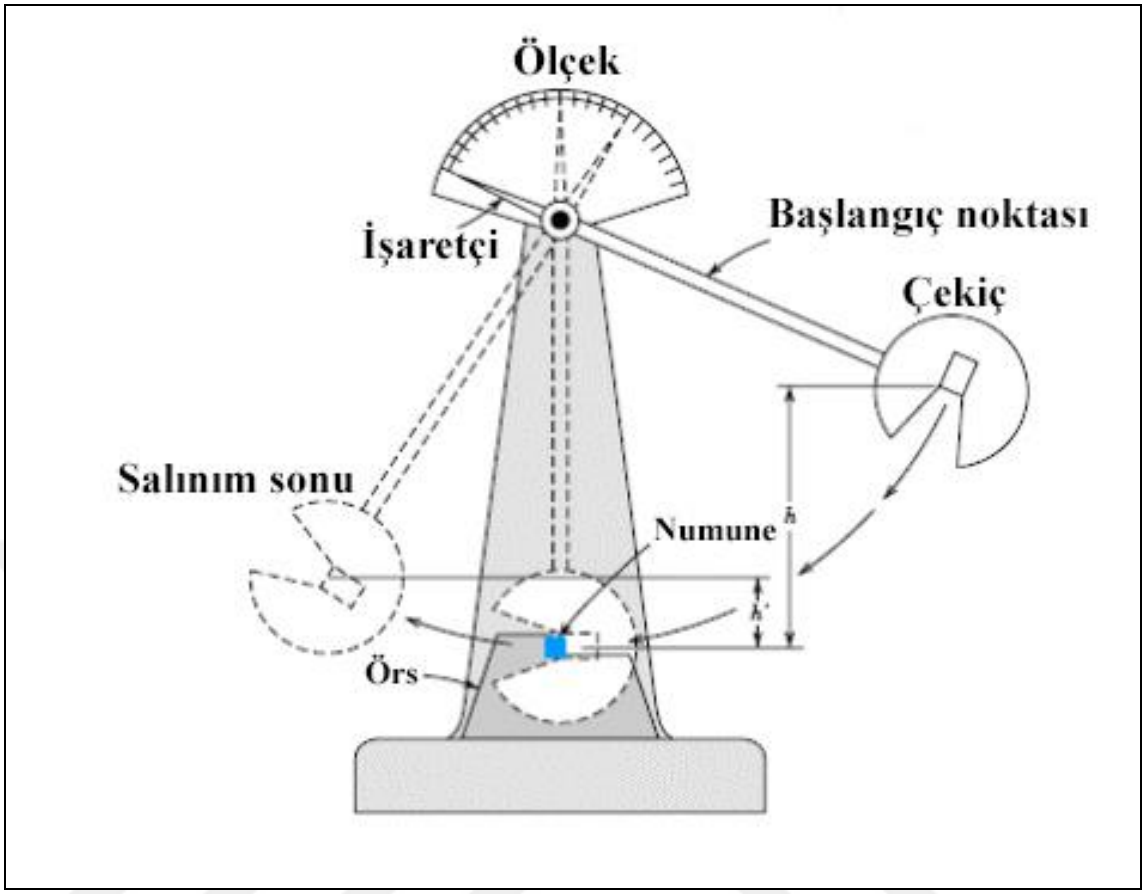
Malzemelerin yüzeyine uygulanan, iç yapısına doğru etkiyen dış kuvvetlere basma kuvvetleri denir ve bu kuvvetler malzemelerde basınç gerilmeleri oluşturur. Belirli basınçlarda kırılgan malzemelerin mukavemet değerlerinin tespit edilmesinde kullanılır. Basma deneyinde silindir veya küp formundaki test numuneleri iki paralel tabla arasına yerleştirilir ve hidrolik bir ünite ile uygulanan kuvvetle oluşan şekil değişiklikleri ekstansometre yardımı ile ölçülür. Şekil 1.10'da temsili olarak basma deney düzeneği görülmektedir [13].



Şekil 1.10. Basma Deneyi Düzeneği [13]

1.4.1.3. Kırma Deneyi

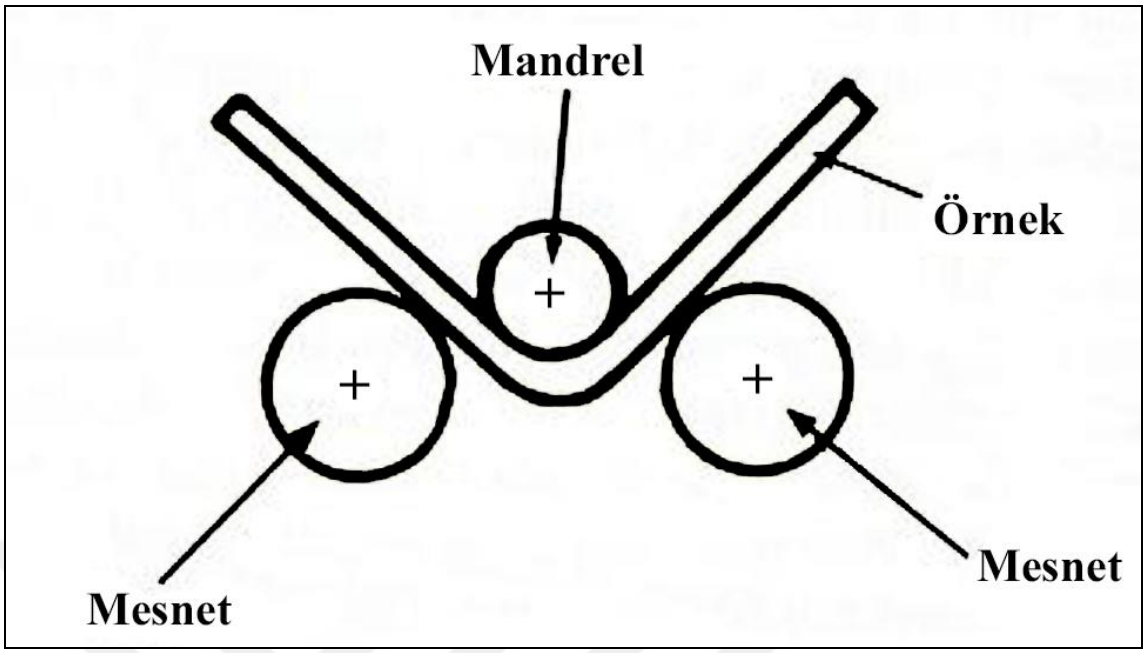
Bu yöntem, belirli ölçütlere sahip tam orta bölgelerine çentik atılmış test numunelerinin bir sarkaç ucundaki çekiç yardımıyla kırılmasıdır. Kırma deneyleri malzemelerin darbelere karşı mukavemetlerini veya kırılması için uygulanması gereken enerji miktarlarını ölçmek için yapılır. Şekil 1.11'de kırma deney düzeneği yer almaktadır [13].



Şekil 1.11. Kırma Deneyi Düzeneği [13]

1.4.1.4. Eğme Deneyi

Bu deney, malzemelerin uzunluğuna göre belirli noktalarına uygulanan basınç ile eğme zorlamalarına karşı yapısındaki değişmelerin gözlemlenmesidir. İki mesnet üzerine yerleştirilmiş küp veya silindir kesitli deney numunesini eğme amacıyla ortasına bir kuvvet uygulanmasıdır. Şekil 1.12'de eğme deney düzeneği yer almaktadır [13].



Şekil 1.12. Eğme Deneyi Düzeneği [13]

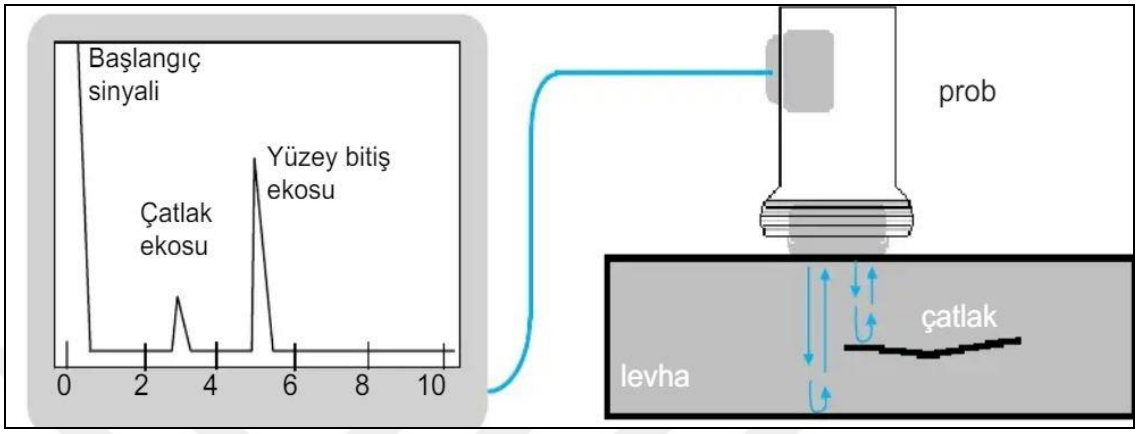
1.4.2. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Malzemenin özelliklerini ve yapısını bozmadan, numune almadan bütün bir malzemenin muayenesine imkan veren yöntemlerdir. Malzemenin incelenen bölgesindeki hataların nereden kaynaklı olduğunu tespit edip üretim başlangıcından itibaren hataların bildirilmesine imkan verir. Bu yöntemler tüm malzemeyi muayene edebilme imkanı sunduğu için malzemenin güvenilirliğini artırmaktadır. Başlıca tahribatsız muayene yöntemleri; ultrasonik muayene, penetrant, manyetik partiküller, radyografi ve girdap akımları tekniğidir.

1.4.2.1. Ultrasonik Muayene Yöntemi

Yüksek frekansa sahip ses dalgaları ile malzeme muayene etme yöntemidir. Malzemeye uygulanan yüksek frekansa sahip ses dalgaları, yayıldığı yol üzerinde bir engele çarptığında yansır. Çarpma açısına bağlı olarak yansıyan sinyal, detektör (prob) tarafından algılanabilir veya algılanmayabilir. Detektöre yansıyan sinyal, kullanıcı panelinin ekranında dalga çizgileri (eko) oluşturur. Algılanan sinyalin konumuna göre hatanın koordinatları hesaplanabilir. Ayrıca algılanan sinyalin büyüklüğü de hata

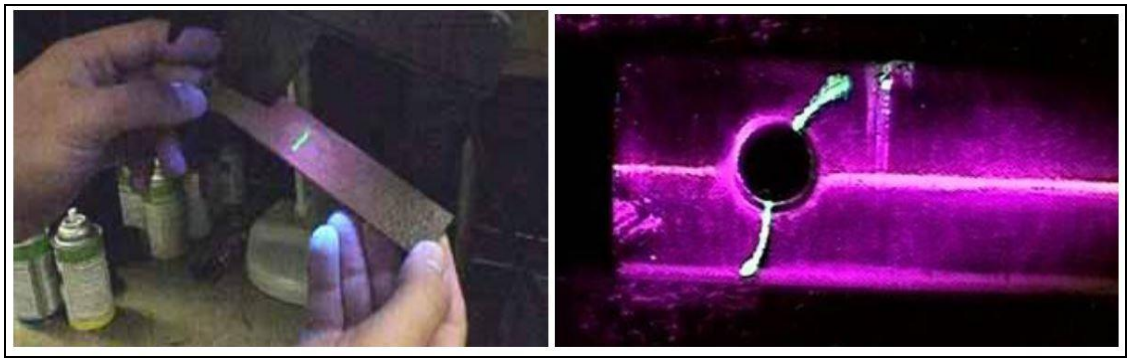
hakkında bilgi verir [14]. Şekil 1.13'te temsili olarak ultrasonik muayene sistemi görülmektedir [15].



Şekil 1.13. Ultrasonik Muayene Yöntemi [15]

1.4.2.2. Penetrant İle Muayene Yöntemi

Bu yöntem, yüzey hatalarının tespitinde kullanılır. Malzeme yüzeyinde oluşan çatlaklara penetrant sıvı uygulanarak sıvı yüzeyden uzaklaştırılıp süreksizlik içerisinde kalan sıvının dışarı çıkarılması sonucunda çatlaklar tespit edilir. Endüstride, metal veya metal olmayan bütün malzemelerde oluşabilecek olası yüzey hatalarının tespiti için kullanılır. Şekil 1.14'te penetrant sıvı ile muayene yöntemi görülmektedir [14].



Şekil 1.14. Penetrant Sıvı İle Hata Tespiti [14]

1.4.2.3. Manyetik Partiküller İle Muayene Yöntemi

Bu yöntem, bir noktasında çentik açılmış herhangi bir mıknatısın kullanılmasıyla metalik malzemeler üzerinde hata tespiti yapmaktadır. Bir mıknatısın herhangi bir noktasına çentik açıldığında mıknatıs üzerinde oluşan manyetik kuvvet çizgileri açılan bu çentiğin etrafını dolaşarak yoluna devam etmektedir. Çentik açılan bölgeye bir miktar demir tozu döküldüğünde çentiğin bulunduğu bölgede mıknatıslanma oluşmaktadır. Bu bölgede demir tozları elektrik akımının geçişi için bir köprü vazifesi görmektedir. Deney sonucunda malzeme üzerinde demir tozu kalan bölgeler hatalı bölgeleri ifade etmektedir. Şekil 1.15'te manyetik partiküller ile muayene yöntemi görülmektedir [15].

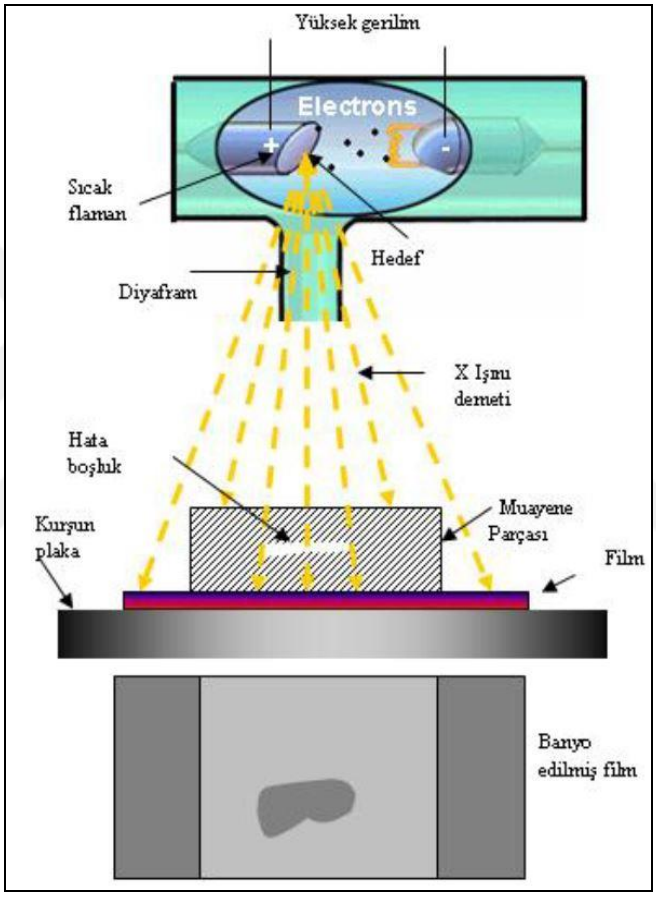


Şekil 1.15. Manyetik Partiküller İle Muayene Yöntemi [15]

1.4.2.4. Radyografi İle Muayene Yöntemi

Bu yöntemde; yüksek enerjili, ışınım şeklinde elektromanyetik dalgalar kullanılarak, bu dalgaların test edilecek malzemeye nüfuz ettiği yüzeye simetrik olarak (malzemenin arka tarafı) yerleştirilen ışınıma duyarlı filmlere görüntü düşürme tekniği uygulanır. Elde edilen filmler çeşitli banyo işlemlerinden geçirildikten sonra malzemenin iç kısmının görüntüsü elde edilir. Bu görüntüler ile, malzeme içindeki boşluklar, kalınlıklar ve şekil bozuklukları gibi hatalar tespit edilmiş olur. Malzemenin iç yapısının

bu şekilde görüntülenmesi radyografi olarak adlandırılır. Bu yöntem ile yapılan analize de radyografi ile muayene yöntemi denir. Diğer taraftan, test numunesinin arka tarafına film yerine bir detektör konulup numuneden geçen ışınım toplanarak bir monitöre aktarıldığı teknik ise radyoskopi olarak isimlendirilir. Şekil 1.16'da radyografi ile muayene yöntemi gösterilmiştir [14].



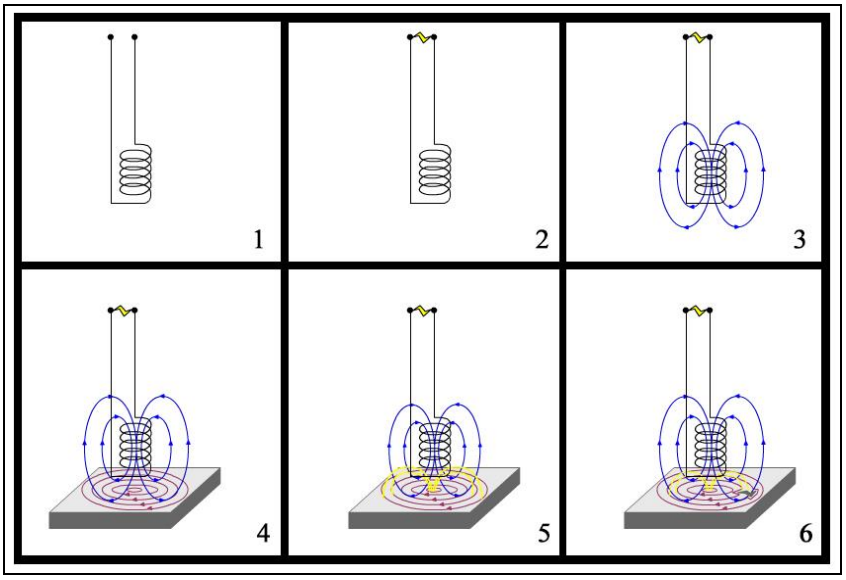
Şekil 1.16. Radyografi İle Muayene Yöntemi [14]

1.4.2.5. Girdap Akımları ile Muayene Yöntemi

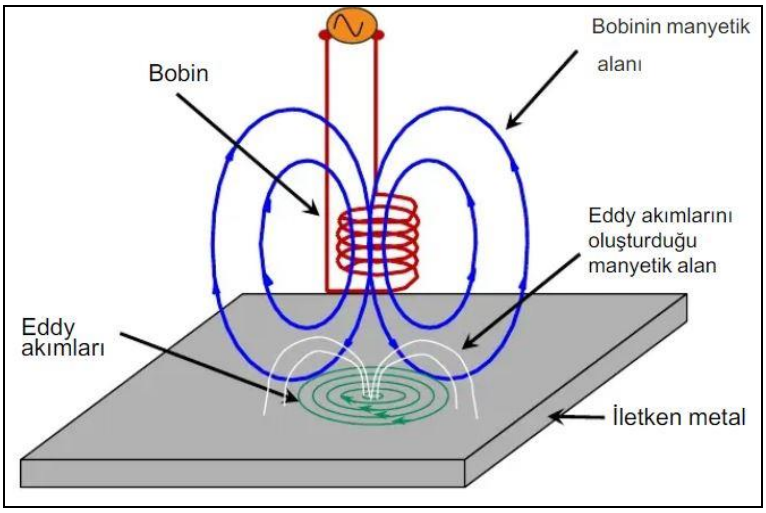
Girdap akımları yönteminde, sistemin sensörü olan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile iletken malzemeler üzerinde girdap akımları (eddy akımları) olarak adlandırılan küçük dairesel akımlar oluşturulur. Bu akımlardaki bozuklukların yorumlanmasıyla hata tespiti yapılır.

Girdap akımı testinin kökeni, Michael Faraday'ın 1831'deki elektromanyetik indüksiyon keşfine dayanır. Faraday, 1800'lerin başında İngiltere'de bir kimyagerdir ve elektromanyetik indüksiyon, elektromanyetik rotasyonlar, manyeto-optik etki, diamagnetizm ve diğer benzer olguların keşfiyle tanınmıştır. 1879'da Hughes adlı başka bir bilim adamı, farklı iletkenlik ve geçirgenliğe sahip metallerle temas ettiğinde bir bobinin özelliklerinde değişiklikler kaydetmiştir. Ancak, İkinci Dünya Savaşı'na kadar bu etkiler test malzemelerinde pratik olarak kullanılmaya başlanmamıştır. 1950'lerde ve 1960'larda, özellikle uçak ve nükleer endüstrilerde bu konuyla ilgili çok çalışma yapılmıştır. Girdap akımı testi bu çalışmaların sonucunda artık yaygın olarak kullanılan ve iyi anlaşılan bir inceleme tekniği olmuştur [16].

Girdap akımları elektromanyetik indüksiyon adı verilen bir işlemle oluşturulur. Bakır tel gibi iletkene alternatif akım uygulandığında, iletken içinde ve çevresinde manyetik bir alan gelişir. Bu manyetik alan, alternatif akım maksimuma yükseldikçe genişler ve akım sıfıra düştükçe çöker. Bu değişen manyetik alana daha yakın bir başka elektriksel iletken getirilirse, bu ikinci iletkende akım indüklenir. Girdap akımları, dairesel bir yolda akan indüklenmiş elektrik akımlarıdır. Şekil 1.17'de girdap akımlarının nasıl oluştuğu temsili olarak gösterilmiştir [16]. Şekil 1.18'de de iletken bir yüzey üzerinde indüklenen girdap akımları görülmektedir [15].



Şekil 1.17. Bobin Tarafından Bir İletkende Girdap Akımları İndüklenmesi [16]



Şekil 1.18. İletken Bir Yüzeyde İndüklenen Girdap Akımları [15]

Tahribatsız muayene yöntemi (Non-Destructive Techniques - NDT) aracı olarak girdap akımları uygun şartlar altında aşağıdaki malzeme testleri için uygundur [16]:

- Çatlak tespiti,
- Malzeme kalınlığı ölçümleri,
- Kaplama kalınlığı ölçümleri,
- İletkenlik ölçümleri.

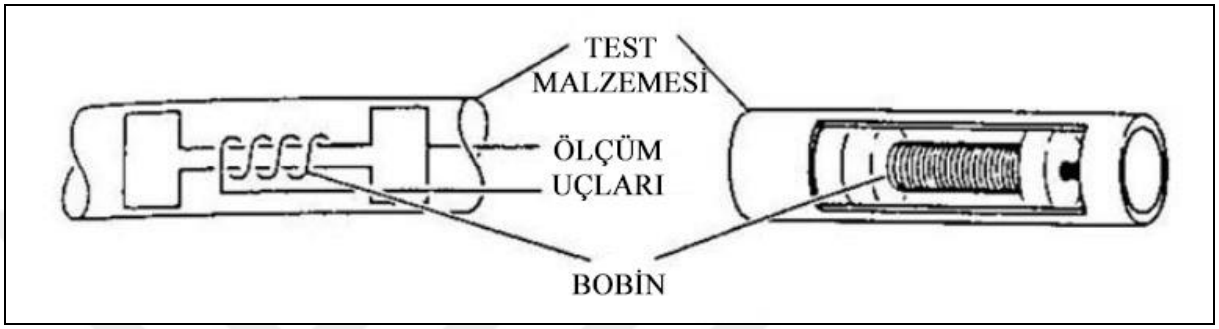
Girdap akımı tekniğinin bazı avantajları şunlardır [16]:

- Küçük çatlak ve kusurlara karşı hassastır,
- Yüzey ve yüzeye yakın kusurları tespit eder,
- Anında sonuç verir,
- Test sistemi taşınabilir,
- Numune hazırlığı en minimum düzeydedir,
- Test probunun numune ile temas etmesine gerek yoktur.

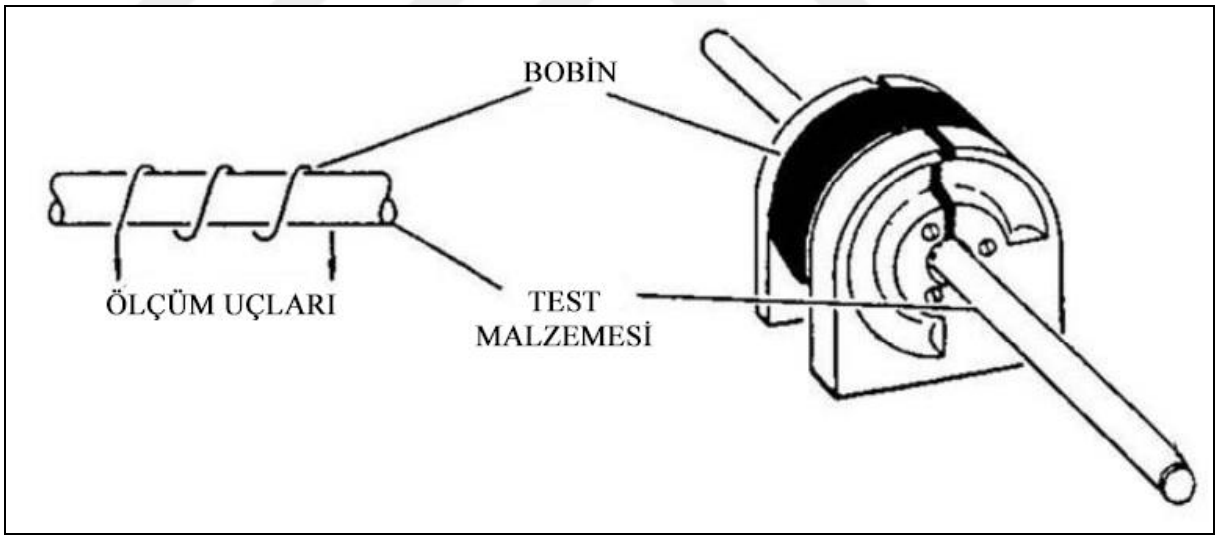
Girdap akımı tekniğinin bazı dezavantajları şunlardır [16]:

- Sadece iletken malzemeler kontrol edilebilir,
- Gereken beceri ve eğitim diğer tekniklerden daha kapsamlıdır,
- Penetrasyon derinliği sınırlıdır.

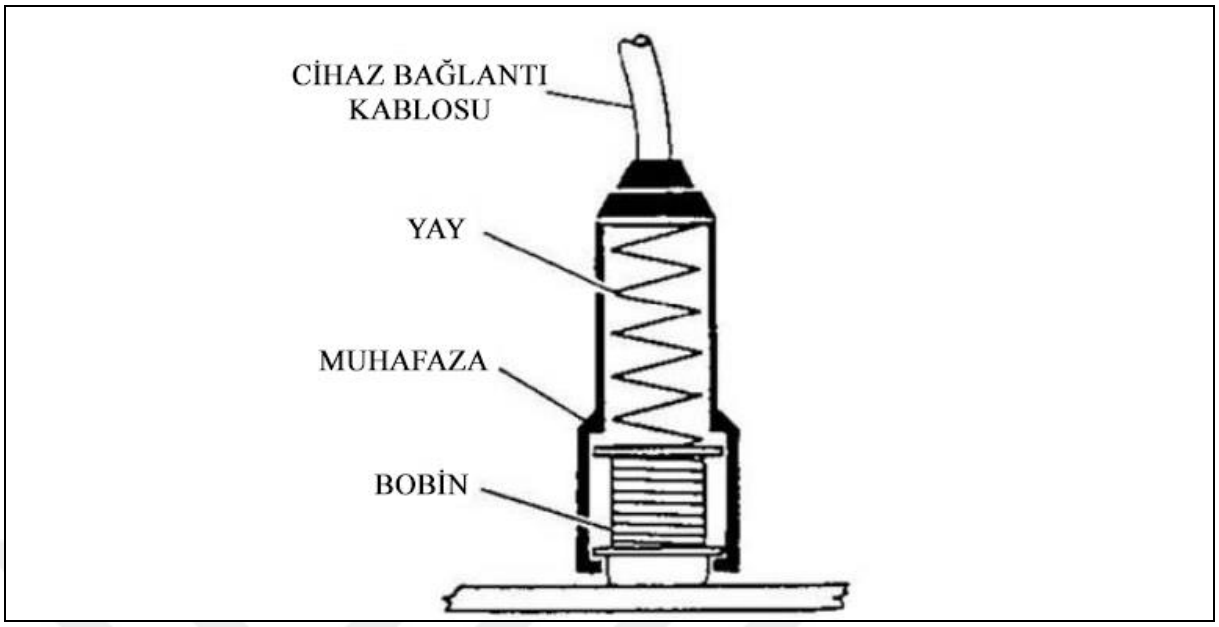
Girdap akımları tekniğinde malzeme türüne göre çeşitli problar kullanılır. Boru şeklindeki iletkenler için dahili problar, içi dolu silindir şeklindeki iletkenler için çevreleyici problar ve plaka şeklindeki metaller için yüzey problar kullanılır. Şekil 1.19, 1.20 ve 1.21'de bu prob türleri görülmektedir.



Şekil 1.19. Dahili Tip Girdap Akımları Test Probu [11]

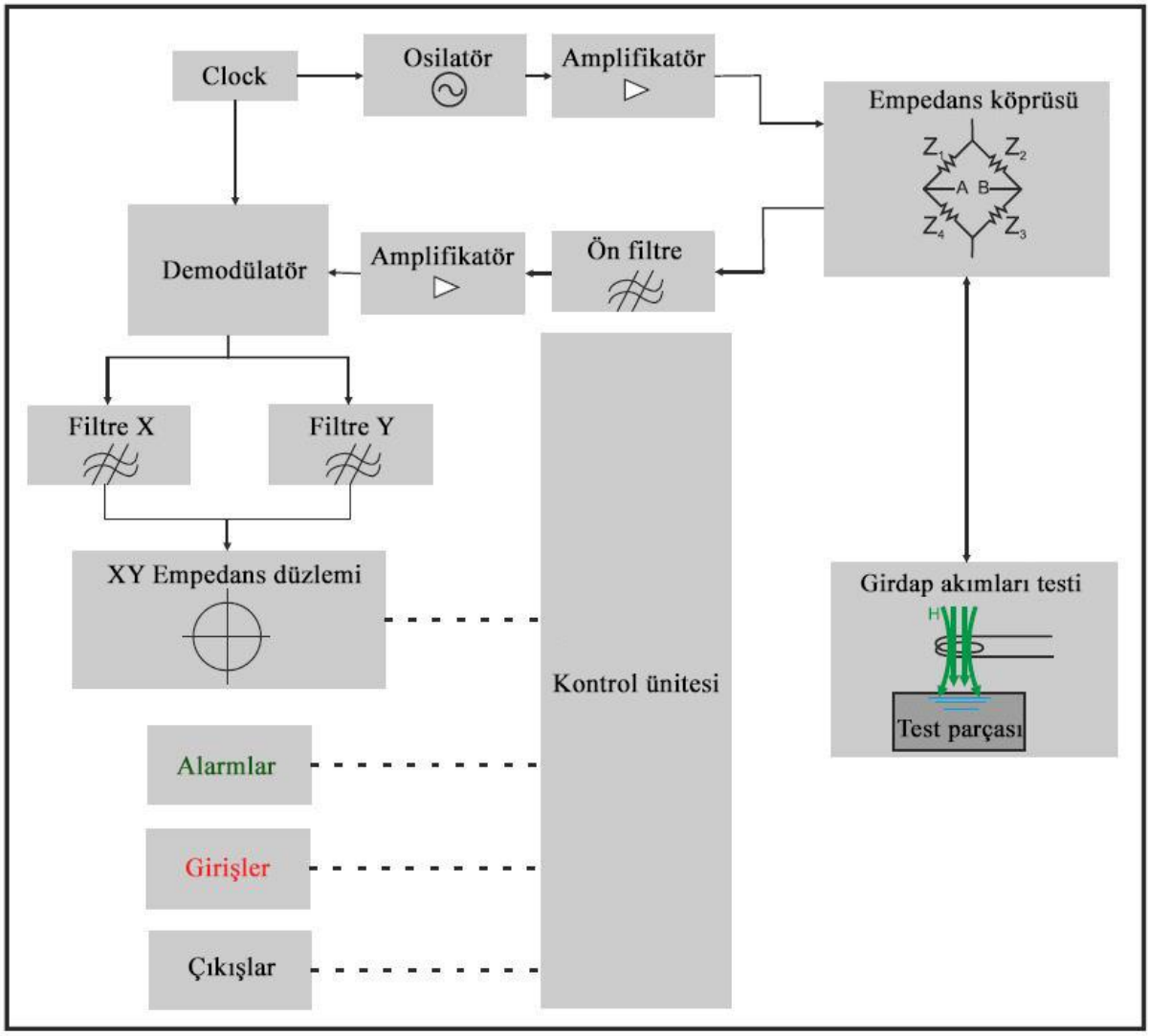


Şekil 1.20. Çevreleyici Tip Girdap Akımları Test Probu [11]



Şekil 1.21. Yüzey Tip Girdap Akımları Test Probu [11]

Aynı zamanda bu prob yapıları kendi aralarında mutlak ve diferansiyel tip olarak çeşitlilik gösterebilmektedir. Mutlak tip problarda uyarıcı ve alıcı bobin tektir. Diferansiyel tip problarda uyarıcı ve alıcı olmak üzere iki bobin bulunur. Problar tarafından algılanan sinyallerin yorumlanması için girdap akımları test sistemi çeşitli devre yapılarından oluşur. Şekil 1.22'de girdap akımları test sistemi blok şeması görülmektedir [2].



Şekil 1.22. Analog Girdap Akımları Test Sisteminin Blok Şeması [2]

1.5. Tezin Amacı ve Literatürdeki Yeri

Girdap akımları ile muayene yöntemi teorisiyle ilgili ulaşılabilen birçok yayın taraması yapılmış olup, elde edilen sonuçlar ve teorinin sunulma şekli göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda incelenen bazı yayınlar ile ilgili açıklamalar bulunmaktadır.

Bean vd. (1959) metallerin özdirençlerini ölçmek için girdap akımları yöntemleri geliştirmişlerdir. Yayında teorik olarak bu yöntemler açıklanmıştır. Ölçüm, hızlı bir şekilde sıfıra düşürülen harici bir manyetik alanda bulunan bir çubuktan akının bozulma hızına dikkat edilerek yapılmıştır. Yöntem, sabit kesitli çaplara sahip metal çubuklar üzerinde ve manyetik alanın bu kesite dik bir z yönelimli eksen boyunca uygulamasını

içermektedir. Enine kesit şekline uygun difüzyon denklemi ile aniden uygulanan H manyetik alanın akı yoğunluğunu numunedeki boşluk ve zamanın bir fonksiyonu olarak ifade etmektedir [17].

Lipkin ve Peshkin (1972), metalik silindirlerde indüklenen girdap akımlarının bozulmasını gözlemleyerek iletkenliklerinin ölçülmesini teorik olarak analiz etmişlerdir. İletken bir silindiri çevreleyen bobine alternatif akım uygulayarak, bobin üzerindeki değişimleri analiz ederek iletkenlik ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Teorik hesaplamaları; bakır, alüminyum ve pirinç silindirler için gerçekleştirmişlerdir. Bobin tarafından uygulanan silindirin ekseni boyunca hizalı bir manyetik alana silindirin tepkisini dikkate almışlardır. Ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirerek, deneysel sonuçların teori ile ±%5 arasında uyumlu olduğunu görmüşlerdir [18].

Dodd ve Deeds (1968), harmonik bir akım uyarımı ile düzlemsel ve silindirik iletkenlerde dairesel bobinler tarafından üretilen girdap akımlarını tanımlayan manyetik vektör potansiyel formülasyonunu kullanarak kapalı integral form çözümlerini formüle etmişlerdir. Hacimsel kusurlara karşı prob tepkisini tahmin etmek için hacim integrali yöntemini önermişlerdir. Bu çalışmada, sabit genlikli alternatif akım tarafından uyarılan dikdörtgen kesitli dairesel bir bobin tarafından iletken üzerinde girdap akımları üretilmiştir. Bobin hesaplamalarını da vererek, iletken bir düzlem üzerindeki bobin durumunu hesaplamışlardır. Deneysel ve teorik sonuçları kıyasladıklarında mükemmel bir sonuç elde etmişlerdir [19].

Theodoulidis ve Kriezis (2005), daha önceki yapılmış çalışmalarda önerilmiş girdap akımlarını tanımlayan kapalı form integral çözümlerini seriye açarak yeniden incelemişlerdir. Çözüm için sınır bölgelerini, kaynak bobinden uygun bir mesafede manyetik yalıtım sınırları içerisinde tutmuşlardır. Böylece, kısmi diferansiyel denklem teorisinden, elektromanyetik alan ve empedans için ortaya çıkan ifadeleri bir integral yerine bir seri biçimine dönüştürmüşlerdir. İntegral çözüm formunu seri çözüm formuna dönüştürürek, hesaplama hızı, doğruluk kontrolü ve modelin kolaylıkla bilgisayar uygulamasına geçirilmesini amaçlamışlardır. Sonuç olarak, integral ve seri metotları kıyaslayarak hesaplama süresi ve hesaplama doğruluğu açısından avantaj sağladığını görmüşlerdir [20].

Martín vd. (2011), girdap akımları testinin temelleri ve ana değişkenlerine teorik olarak genel bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca sensörlerin, çok frekanslı darbeli sistemlerde tepkilerini incelemişlerdir. Girdap akımları test sistemini bobin tepkisinden başlayarak alınan sinyalin yorumlanması ile sonuçlandırarak teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sensörün empedansını ve direncini, etkiyen parametreler ile modelleyerek, değişimleri gözlemlemişlerdir. Test sisteminde hataların yorumlanması için elektronik donanımlar ile işlenen tepki sinyallerinin açıklamalarını vermişlerdir [2].

Desjardins (2015), gerçekleştirdiği tez çalışmasında girdap akımları testindeki geçici dalga prob tepkisinin analitik modellemesi incelemiştir. Bu çalışmada, voltaj uyarımıyla indüktif olarak bağlı devrelerde ortaya çıkan tüm elektromanyetik etkileşimleri tanımlayan çözümlerin elde edilmesini sağlayan bir strateji sunmuştur. Anlık bir voltaj uyarımı ile indüktif sistemlerde ortaya çıkan manyetik alanlar ile diferansiyel devre denklemleri Faraday yasası ve konvolüsyon kullanılarak formüle edilir ve Fourier dönüşümü kullanılarak çözülür. Bu çalışmadaki yaklaşım, bir veya birden fazla sayıda uyarıcı ve alıcı bobin içeren sistemlerin iletken ve ferromanyetik yapılardaki etkilerini dikkate almıştır. Özellikle çözümler, ferromanyetik iletken bir test parçası ile uyarma ve algılama bobinleri arasındaki geri beslemeyi açıklar ve bobinlerin doğru voltaj tepkisini sağlar. Çalışma sonucunda, anlık dalga uyarımı ile elde edilen deneysel sonuçların, analitik tahminlerle mükemmel uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [21].

Uemura (2018), gerçekleştirdiği tez çalışmasında alüminyum uçak bileşenlerinin yapılarındaki yüzey veya yüzeye yakın kusurları tespit etmek için kullanılan girdap akımları tekniğini analitik olarak incelemiştir. Uçak parçalarındaki vida deliklerinin kenarlarında zamanla oluşan yorgunlukların tespit edilmesi için, vidanın yerinden çıkarılmadan malzemenin iç katmanındaki çatlakların tespitini gerçekleştirebilen bir girdap akım tekniği sistemini teorik olarak incelemiştir. Kullanılan bu teknikte prob tasarımı, malzeme içinde daha büyük derinliklerde girdap akımlarını indükleyen demir bir bağlayıcıyı bir akı kanalı olarak kullanan dört çift diferansiyel bağlı toplama bobiniyle çevrelenmiş bir ferrit çekirdekten oluşmaktadır. Darbeli Eddy Current (Pulsed Eddy Current - PEC) tekniği olarak adlandırılan yöntem ile yüksek hızda ve güvenilir bir şekilde malzemenin yüzeyden daha derin iç yapısında meydana gelen çatlakların tespit edildiğini deneysel sonuçlar ile görerek, algılayıcı probun analizini gerçekleştirmiştir [22].

Xue vd. (2020), PEC problarının tasarımını optimize etmek için analitik hesaplama verimliliklerini artıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Empedans değişikliklerinin analitik modellerine dayanarak, PEC modelinin boru hatları için hesaplama verimliliklerinin düşük olduğunu varsayarak bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Sayısal hesaplamanın verimliliğini artırmak için bu makalede, empedans değişikliğinin bütünleşik modeline dayanarak, boru hatlarında kullanılan PEC'in analitik modeli için hızlı bir sayısal hesaplama yöntemi önermişlerdir. Çalışma sonucunda, sadece iletkenlik değiştirildiğinde önerilen yöntemin, boru hatlarında kullanılan PEC modeli hesaplama verimliliğinin artırılmasında kullanılabileceği gösterilmiştir [23].

Bu tez çalışmasında, metal malzemelerin üretim sürecinde veya kullanım esnasında yapısında meydana gelen gözle görülemeyecek kadar küçük kusurlarda dahil olmak üzere fiziksel değişikliklerinin algılanmasında oldukça yaygın olarak kullanılan, güvenilir bir muayene sistemi olan girdap akım testi sisteminin prob tasarımı ele alınmıştır. Ele alınan tasarım yöntemi, teorik hesaplamalar sonucu pratik uygulamalardan oluşmaktadır. Farklı tiplerdeki malzemelerin muayenesi için prob tasarımlarıda farklılık göstermektedir. Bunun için literatürde, gerçekleştirilmiş farklı tiplerde prob tasarım çalışmaları yer almaktadır. Literatürde genel itibariyle analitik yaklaşım ile meydana gelen manyetik değişiklikler incelenmiştir. Bu incelemelerin akabinde prob tasarım çalışmalarına yer verilmiştir.

2. BÖLÜM

YÖNTEMLER

2.1. Teori

Bu kısımda, Maxwell denklemleriyle başlanarak, Geçici Girdap Akımı tekniği bağlamında elektromanyetik alan teorisinin bir özeti sunularak, sınır değer problemlerine analitik çözümler formüle etmek için gerekli matematiksel ifadeler incelenmiştir. Bu tezde gerçekleştirilecek bobin analizleri, sonsuz bir çubuğu çevreleyen sonsuz bir bobin olduğu varsayılarak daha genel çözümler ile yapılacaktır.

Muayenesi gerçekleştirilecek olan materyal homojen olmayan kapalı formda (alüminyum kaplı çelik tel) bir iletken olduğu için kapalı form (silindirsel) çözümü sunulacaktır.

Statik şartlar altında elde edilmiş olan *"A"* vektör manyetik potansiyele ilişkin çözüm ifadeleri ile modellemeye başlanacaktır. Vektör manyetik potansiyel, manyetik alanı oluşturan vektördür. Kıvrılmasıyla manyetik alan oluşur. Denklem (2.1) ve (2.2)'de Poisson denkleminin [24] çözümü olan kaynak fonksiyonları (statik şartlar altında elde edilmiş olan potansiyel fonksiyonlar) verilmiştir.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{2.1}$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \tag{2.2}$$

Denklem (2.1) ve (2.2)'deki ifadeler, *"ρ"* ve *"$\vec{J}$"* parametrelerinin zamana göre değişimin var olduğu ve hızlı olduğu durumlarda iken bobinin modellemesinde kullanılacaktır.

Elektromanyetik teorinin temeli, elektrik ve manyetik alanların nasıl yayıldığını, etkileştiğini ve malzeme parametrelerinden nasıl etkilendiğini açıklayan Maxwell'in alan denklemleridir. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) geçerli Maxwell'in alan denklemleri aşağıdaki (2.3), (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemlerinde gösterilmiştir [24]. Bu alan denklemlerindeki elektrik akı yoğunluğu (D) ve manyetik akı yoğunluğu (B) ifadeleri sırasıyla Denklem (2.7) ve (2.8)'de verilmiştir:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{(Maxwell – Faraday Denklemi)} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{(Maxwell – Amper Denklemi)} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{(Maxwell – Gauss Denklemi)} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{(Maxwell – Gauss Denklemi)} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

Elektromanyetik alanlar, H manyetik alanın şiddetinin ve D elektrik akı yoğunluğunun Denklem (2.7) ve (2.8)'de görüldüğü üzere birbirine bağlı olduğu B manyetik akı yoğunluğu ve E elektrik alanı, akım yoğunluğu J ve yük yoğunluğu ρ tarafından belirlenir. Maxwell denklemlerinde sunulan malzeme parametreleri arasında ortamın manyetik geçirgenliği μ ve elektrik geçirgenliği ε bulunur.

Elektromanyetik sistemlere genel çözümler formüle etmek için geçirgenlik ve iletkenlik gibi özellikleri göz önünde bulundurarak çeşitli malzemelerin elektriksel tepkisini tanımlayan ek kurucu ilişkilere de ihtiyaç vardır. Akım yoğunluğunun ifadesi Denklem (2.9)'da görülmektedir.

$$J = \sigma E \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) akım yoğunluğunu elektrik alanı ile ilişkilendirir, burada σ ortamın elektrik iletkenliğidir.

Akım yoğunluğu manyetik vektör potansiyeli ile ilişkilidir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik vektör potansiyelinin arasında ki ilişki Denklem (2.10)'da verilmiştir.

$$\vec{B} = \nabla \times E \tag{2.10}$$

Bu ilişki kullanılarak Denklem (2.3), Denklem (2.11)'deki gibi ifade edilebilir [21].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \nabla \times A}{\partial t} = -\nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} \tag{2.11}$$

Zamana göre değişimin olmadığı (ρ ve J nin zamana göre değişmediği) statik durumdaki elektrik alan ifadesi Denklem (2.12)'de verildiği üzere skaler elektrik potansiyelinin gradyantıdır [24].

$$\vec{E} = -\nabla \mathrm{V} \tag{2.12}$$

Bu ifadeden ve Denklem (2.11)'den hareket ile

$$\nabla \times \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right] = 0 \tag{2.13}$$

aşağıda ki vektör özdeşliği kullanılarak [24],

$$\nabla \times \nabla \cdot V \equiv 0 \tag{2.14}$$

$$\Rightarrow \qquad -\nabla V = \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\Rightarrow \qquad \vec{\mathrm{E}} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

ifadesi elde edilir.

Denklem (2.14)'te bulunan elektrik alan ifadesi Denklem (2.9)'da verilen ifadede yerine yazılarak akım yoğunluğu manyetik vektör potansiyeli olarak Denklem (2.15)'deki gibi ifade edilir.

$$J = -\sigma \nabla V - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{2.15}$$

Manyetik vektör potansiyeli için yarı statik (quasi statik) alanlarda aşağıdaki Coulomb ölçer ifadesi kullanılır [26]. Bu ifade bobinin yarı statik alanda bulunurken akım yoğunluğuyla ilişkilendirilen yük ifadesini açıklar.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \tag{2.16}$$

Denklem (2.4)'te verilen ifadede $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ ve $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$ alınarak Denklem (2.17) elde edilir.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \tag{2.17}$$

Bu ifadede Denklem (2.10) ve Denklem (2.14)'te elde edilen ifade yerine yazılırsa,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial\left(-\nabla V - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right)}{\partial t} \tag{2.18}$$

Denklem (2.19)'daki vektör özdeşliği kullanılarak [24],

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla\left(\nabla \cdot \vec{A}\right) - \nabla^2\vec{A} \tag{2.19}$$

Tam dalga denklemi Denklem (2.20)'de olduğu gibi elde edilir [21].

$$\nabla^2\vec{A} = \mu\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2} \tag{2.20}$$

Maxwell denklemlerinin manyetik alan için değiştirilmiş dalga denklemi Denklem (2.20)'de bulunan ifadeden yararlanarak aşağıda ki şekilde yazılabilir [22].

$$\nabla^2\vec{B} = \mu\sigma\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} \tag{2.21}$$

Benzer şekilde elektrik alan için değiştirilmiş dalga denklemi ifadesi de Denklem (2.22)'de olduğu gibi yazılabilir [22].

$$\nabla^2\vec{E} = \mu\sigma\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \tag{2.22}$$

İletken metallerde girdap akımları yayılması düşük frekanslarda (tipik olarak <10-12 Mhz) [21, 22] gerçekleşir. Bu durumda iletkenlik (σ), dielektrik sabitine göre çok yüksek değerlerdedir. Bu bilinenlerden yola çıkarak elde edilen Denklem (2.20-21-22)'deki ikinci türev kısmı ($\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$) neredeyse sonuca etkisiz olacağından ihmal edilebilir [22]. Bu terim Deplasman ($\vec{D}$) akımı nedeniyle karşımıza çıkar ve akımlar yavaş bir hızda değiştiği için sistemin dengede olduğu düşünülür. Dolayısıyla Denklem (2.20-21-22) Denklem (2.23)'teki gibi yazılırlar.

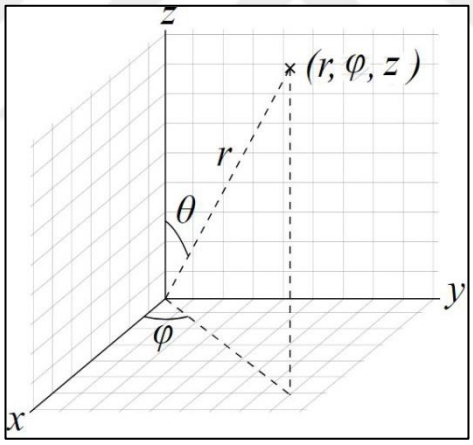
$$\nabla^2 \vec{A} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{2.23}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.24}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{2.25}$$

Laplasyen (∇^2) operatörü farklı koordinat sistemleri için farklı bir form alır. Bobin, sarmal (encircling) olduğu için tam dalga denklemi silindirik koordinatlarda Denklem (2.26)'daki gibi ifade edilir.

Silindirik koordinatlar; ρ(r) yarıçapında silindir, x ekseninde ϕ açısına sahip ve z eksenine z izdüşümü ile temsil edilir. Şekil 2.1'de tanımlanan silindirik koordinat sistemi görülmektedir.



Şekil 2.1. Silindirik Koordinat Sistemi

Denklem (2.23) (vektör laplasyen) silindirik koordinatlarda yazılırsa [27],

$$\nabla^2 \vec{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \vec{A}_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vec{A}_r}{\partial r} - \frac{\vec{A}_r}{r^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 \vec{A}_r}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial \vec{A}_\varphi}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial^2 \vec{A}_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vec{A}_\varphi}{\partial r} - \frac{\vec{A}_\varphi}{r^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 \vec{A}_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r^2}\frac{\partial \vec{A}_r}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vec{A}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial \varphi^2} \end{bmatrix} \begin{matrix} \hat{r} \\ \hat{\varphi} \\ \hat{z} \end{matrix} \tag{2.26}$$

Yukarıda elde edilen denklem parametreleri için vektör büyüklüklerinin olmadığı ifadeler sadeleştirilebilir. Örnek olarak, Poission eşitliğinin bir çözümü olarak verilen Denklem (2.2)'de akım yoğunluğu sadece $\hat{\varphi}$ yönünde dolaşıyorsa $\vec{A}_{r,z} = 0\ ve\ \frac{\partial \vec{A}_{\varphi}}{\partial \varphi} = 0$ alınır. Dolayısıyla Denklem (2.26), Denklem (2.27)'deki ifadeye dönüşür [21].

$$\nabla^2 \vec{A} = \left[\frac{\partial^2 \vec{A}_{\varphi}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_{\varphi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vec{A}_{\varphi}}{\partial r} - \frac{\vec{A}_{\varphi}}{r^2} \right] \hat{\varphi} \tag{2.27}$$

Denklem (2.23)'de elde edilen dalga yayılma ifadesi sınır koşulları kısıtlaması ilave edilerek, girdap akımı sınır değer problemlerinin temelini oluşturur.

Bir sonraki aşamada skaler elektrik potansiyel (V) dalga denklemi ile vektörel manyetik potansiyel ($\vec{A}$) dalga denklemleri ifade edilip, potansiyeller için fazörler cinsinden dalga denklemleri elde edilecektir. Bu işlemler, sensörün empedansını, kaynak varlığında elektromanyetik güç akışını modelleme de ve elektromanyetik dalga genliğinin "z" ekseninde kat ettiği mesafeyi ifade eden deri derinliği/kalınlığı denkleminin çıkarılmasında fayda sağlayacaktır.

Denklem (2.28)'de verilen manyetik akı yoğunluğu ifadesi,

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{2.28}$$

Denklem (2.3)'teki Maxwell – Faraday denkleminde yerine yazılarak aşağıda ki işlemler sonucunda skaler elektrik potansiyeli (V) cinsinden elektrik alan ($\vec{E}$) ifadesi elde edilir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{A})}{\partial t} \tag{2.29}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla \times \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = 0$$

Vektör özdeşliğinden;

$$\nabla \times (\nabla \cdot V) \equiv 0 \tag{2.30}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \nabla V$$

olduğu görülür. Statik durum için bu elektrik alan ifadesi ($\vec{E}$),

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{2.31}$$

şekline dönüşür.

Skaler elektrik potansiyele (V) ilişkin dalga denklemini türetebilmek için Denklem (2.5) ve (2.7)'de yer alan Maxwell – Gauss denkleminden hareketle;

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2.32}$$

ifadesi türetilir. Bu ifadede Denklem (2.31) yerine yazılırsa;

$$\nabla \cdot (-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = \frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2.33}$$

$$\Rightarrow \qquad \nabla^2 V + \frac{\partial (\nabla \cdot \vec{A})}{\partial t} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

Lorentz şartından [24];

$$\Rightarrow \qquad \nabla \cdot \vec{A} = -\mu\varepsilon \frac{\partial V}{\partial t} \tag{2.34}$$

alınarak V skaler potansiyeline ait dalga denklemi Denklem (2.35)'deki gibi türetilmiş olur [24].

$$\Rightarrow \qquad \nabla^2 V - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2.35}$$

Benzer şekilde $\vec{A}$ vektör potansiyeline ait dalga denklemi aşağıdaki işlemler ile elde edilir.

Denklem (2.4)'de verilen Maxwell – Amper denkleminde, Denklem (2.7) ve (2.8) ifadeleri yerlerine yazılarak;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (\vec{B} = \mu\vec{H}, \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} ve\ \vec{D} = \varepsilon\vec{E}) \tag{2.36}$$

$$\Rightarrow \qquad \nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} + \frac{\partial (\varepsilon \vec{E})}{\partial t}$$

$$\Rightarrow \qquad \nabla \times \vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon \frac{\partial (\vec{E})}{\partial t}$$

elde edilir.

Bu ifade de vektör manyetik potansiyel ifadesini ($\vec{A}$) içerecek şekilde Denklem (2.28) ve (2.31) kullanılarak Denklem (2.37)'deki gibi revize edilir.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial}{\partial t}(-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \tag{2.37}$$

Burada sırasıyla Denklem (2.19) vektör özdeşliği ve (2.34) Lorentz şartı kullanılarak vektör manyetik potansiyeline ait dalga denklemi elde edilir.

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2\vec{A} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial}{\partial t}(-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \tag{2.38}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2\vec{A} = \mu\vec{J} - \nabla\left(\mu\varepsilon\frac{\partial V}{\partial t}\right) - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla^2\vec{A} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J} + \nabla\left(\nabla \cdot \vec{A} + \mu\varepsilon\frac{\partial V}{\partial t}\right)$$

Denklem (2.34)'deki Lorentz şartından,

$$\Rightarrow \quad \nabla^2\vec{A} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J} + \nabla(0)$$

dolayısıyla $\vec{A}$ vektör potansiyeline ait dalga denklemi aşağıda ki gibi türetilmiş olur [24].

$$\Rightarrow \quad \nabla^2\vec{A} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J}$$

2.2. Potansiyel Dalga Denklemleri Fazörel İfadeleri ve Elektromanyetik Güç Akışı

Zamana göre harmonik dalgaları çözümleyebilmek için fazörel nicelik olarak ifade etmek gerekir. Fazörel ifadeler herhangi bir niceliğin genlik ve faz değeri hakkında bilgi verir.

Sinüzoidal bir dalga denkleminin fazörel olarak ifadesi Denklem (2.39)'daki eşitlikte görülmektedir.

$$\mathrm{v(t)} = A\mathrm{coswt} + \emptyset \quad \Rightarrow \mathrm{v(t)} = \mathrm{Re}\{\mathrm{A}e^{j\emptyset}e^{jwt}\} \tag{2.39}$$

Bu denklemdeki zamana dönüşüm ifadesi olan "e^{jwt}" türev ve integral ifadeleri içeren zamana bağlı potansiyel dalga denklemlerinin dönüşümünde aşağıdaki şekilde karakterize edilir.

$$Türev\ için : jw$$

$$İntegral\ için : \frac{1}{jw}$$

Buradan hareketle sırasıyla Denklem (2.35)'te türetilen V skaler elektrik potansiyel ifadesi ve Denklem (2.38)'de türetilen $\vec{A}$ vektör manyetik potansiyel ifadeleri fazörel olarak Denklem (2.40) ve (2.41) ile gösterilir [24].

$$\nabla^2 V - \mu\varepsilon(jw)(jw)V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2.40}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla^2 V + w^2\mu\varepsilon V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad , \quad \left.\begin{matrix} \mathrm{k} = \mathrm{w}\sqrt{\varepsilon\mu}\,, \mathrm{rad/m} \\ \mathrm{u} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad , \mathrm{m/s} \end{matrix}\right\} \Rightarrow \mathrm{k}=\frac{W}{u}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla^2 V + k^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\varepsilon(jw)(jw)\vec{A} = -\mu\vec{J} \tag{2.41}$$

$$\Rightarrow \quad \nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu\vec{J}$$

İletken bir ortamda herhangi bir yönde yayılan bir dalganın genliğinde ki değişimin ölçüsü olarak propagasyon sabiti [24];

$$\gamma = jk_c \quad , \quad k_c = \frac{\gamma}{j} \quad , \quad {k_c}^2 = \frac{\gamma^2}{j^2} = -\gamma^2 \tag{2.42}$$

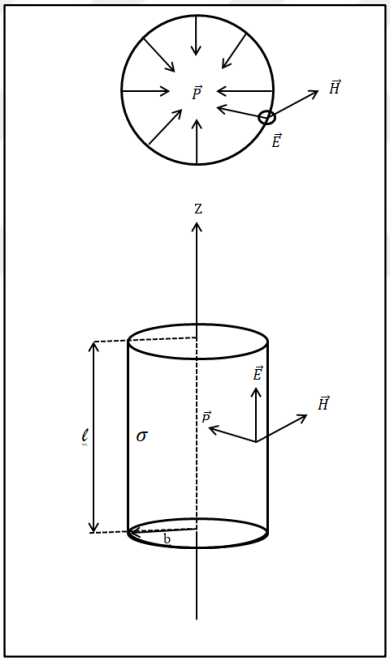
şeklinde ifade edilir. Ölçülen nicelik gerilimden ziyade elektrik alan veya akı yoğunluğu da olabilir [18]. Böylece Denklem (2.40)'da yer alan V skaler elektrik potansiyel ifadesi ve Denklem (2.41)'de yer alan $\vec{A}$ vektör manyetik potansiyel ifadesi aşağıda ki gibi düzenlenirse;

$$\nabla^2 V - \gamma^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2.43}$$

$$\nabla^2\vec{A} - \gamma^2\vec{A} = -\mu\vec{J} \tag{2.44}$$

denklemleri elde edilir. Burada çıkartılan denklemler ile daha sonra alt başlıklarda empedans ve deri derinliği/kalınlığı ifadeleri türetilecektir.

İletken bir telin sensör ile muayenesi esnasında oluşan manyetik alan şiddeti ($\vec{H}$) ve yüzeyinde oluşan elektrik alan ($\vec{E}$) vektörlerinin oluşturduğu bileşke vektör, poynting vektörünü ($\vec{P}$) ifade etmektedir. Açığa çıkan bu vektör, iletken tel üzerinde ki elektromanyetik güç akışını gösterir. Şekil 2.2'de iletken tel yüzeyindeki poynting vektörü diğer bir deyişle oluşan güç akışı görülmektedir.



Şekil 2.2. Elektromanyetik Alan İçerisindeki İletken Tel Üzerinde Oluşan Vektörel Nicelikler [24]

Oluşan bu güç akışı Denklem (2.45)'teki eşitlik ile gösterilir [24].

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{2.45}$$

Bir sonraki alt başlıkta yukarıda Denklem (2.42)'de verilen propagasyon sabitinin ifade ettiği elektromanyetik bir dalganın iyi iletken bir ortamda nüfuz ettiği mesafeyi göstermek için deri derinliği/kalınlığı ifadesi türetilecektir.

2.3. Deri Derinliği

Propagasyon sabiti aynı zamanda reel ve sanal kısımlardan oluşan Denklem (2.46)'daki ifade ile de gösterilebilmektedir [24].

$$\gamma = jk_c = \mathrm{jw}\sqrt{\varepsilon\mu}(1+\frac{\sigma}{jw\varepsilon})^2 = \propto + j\beta \tag{2.46}$$

Bu denklemde $\propto: Re\{\gamma\}$ olup, girdap akımlarının derinlik ile azalmasını ifade eden zayıflatma sabitidir. $\beta: Im\{\gamma\}$ olup, girdap akımlarının faz gecikmesinin derinlik ile değişimini ifade eden faz sabitidir.

İyi iletken bir ortamda, ele aldığımız propagasyon sabitinin girdap akımlarını temsil ettiğini varsayacak olur isek aşağıda ki işlemler ile "$\propto$" zayıflatma sabiti ve "β" faz sabitinin frekans parametrelerini içeren ifadeleri elde edilebilir.

İyi iletken bir ortam için,

$$\frac{\sigma}{w\varepsilon} \gg 1 \tag{2.47}$$

dir. Bundan dolayı,

$$\gamma = jk_c = \mathrm{jw}\sqrt{\varepsilon\mu}(1+\frac{\sigma}{jw\varepsilon})^{1/2} = \propto + j\beta \tag{2.48}$$

denkleminde ki $(1+\frac{\sigma}{jw\varepsilon})$ ifadesinde "1" değeri ihmal edilerek ifade Denklem (2.49)'daki gibi yazılabilir.

$$\gamma = \sqrt{j}\sqrt{w\mu\sigma} \tag{2.49}$$

Euler eşitliğinden,

$$e^j = e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + \mathrm{j}\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \mathrm{j} \tag{2.50}$$

olduğu görülür.

Denklem (2.49)'daki ifade de "$\sqrt{j}$" çarpanı Euler eşitliğine açılırsa [24],

$$\sqrt{\mathrm{j}} = e^{j\frac{\pi}{4}} = \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \mathrm{j}\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \tag{2.51}$$

$$\Rightarrow \quad \gamma = \frac{(1+j)}{\sqrt{2}}\sqrt{w\mu\sigma} \quad , \quad \mathrm{w}=2\pi\mathrm{f}$$

$$\Rightarrow \quad \gamma = (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad , \quad \propto: Re\{\gamma\} = \sqrt{\pi f\mu\sigma}$$

$$\beta: Im\{\gamma\} = \sqrt{\pi f\mu\sigma}$$

ifadesi elde edilir.

"z" ekseni yönünde yayılan bir düzlem dalga için,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\propto z}\, e^{-j\beta z} \tag{2.52}$$

e^{-1} ifadesi baz alınırsa, dalga genliğinin 0,37 olduğu "z" mesafesine deri derinliği denir.

$$= 0{,}37 (z = \frac{1}{\propto} \text{ olursa } e^{-\propto\frac{1}{\propto}} = 0{,}37 \text{ (dalga genliği 0,37'e düşer))} \tag{2.53}$$

Deri derinliği ifadesi literatürde (δ) sembolü ile gösterilir. Dolayısıyla Denklem (2.51)'de kullanılarak,

$$\delta = \frac{1}{\propto}\ veya\ \delta = \frac{1}{\beta}\ olmak\ \text{üzere}\ \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \tag{2.54}$$

ifadesi türetilmiş olur. Burada;

f: İşaret frekansı (Hz)

μ: Manyetik geçirgenlik katsayısı, (Manyetik metaller için $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

H/m'dir)

(Manyetik olmayan metaller için $\mu = \mu_0\mu_r$'dir)

(μ_r: Bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı)

(μ_0: Boşluk için manyetik geçirgenlik katsayısı)

σ: İletkenlik (s/m)

2.4. Manyetik Geçirgenlik

Sensör tasarımında bir başka çıkartılabilecek bağlantılı ilişki harici bir manyetik alan şiddeti (H) ile toplam manyetik akı yoğunluğu (B) arasında ki ilişkiyi bir katsayı değeriymiş gibi sağlayan (μ) manyetik geçirgenliktir.

Malzeme türüne göre manyetik geçirgenlikler 1'den küçük veya çok yüksek olabilmektedir. Hatırlamak amacıyla Bölüm 1'de yer alan Tablo 1.1'de yaygın olarak bilinen malzemelerin manyetik geçirgenlik değerlerine bakılabilir. Malzemeye etkiyen zamanla değişen manyetik alan malzeme türüne göre ek bir mıknatıslanma oluşturur. Bu etki matematiksel olarak aşağıda ki gibi ifade edilir. Bu ifade sözel olarak, toplam akı yoğunluğunun ($\vec{B}$) uygulanan manyetik alanın ($\vec{H}$) mıknatıslanma alanı ($\vec{M}$) ile toplamına eşit olduğunu göstermektedir [28].

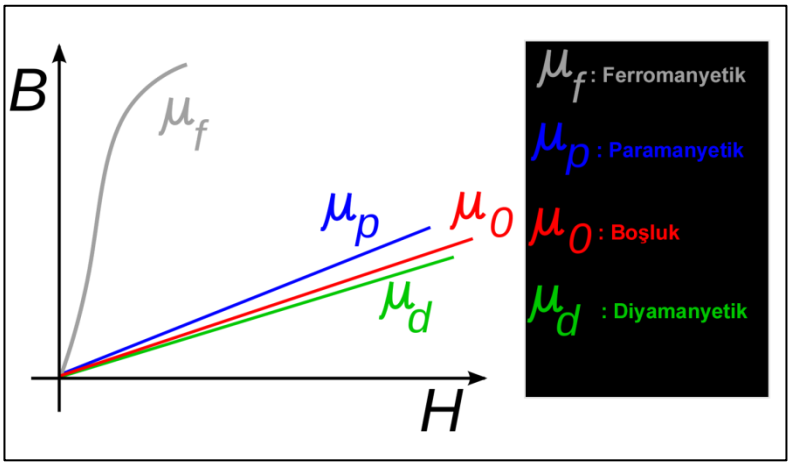
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{2.55}$$

Burada (μ_0) boşluğun manyetik geçirgenliğidir. ($\vec{M}$) mıknatıslanma vektörünü ifade etmektedir. Doğrusal manyetik malzemeler için Denklem (2.55), Denklem (2.56)'daki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$\vec{B} = \mu_0 \left(1 + \frac{\vec{M}}{\vec{H}}\right) \vec{H} = \mu \vec{H} \tag{2.56}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{2.57}$$

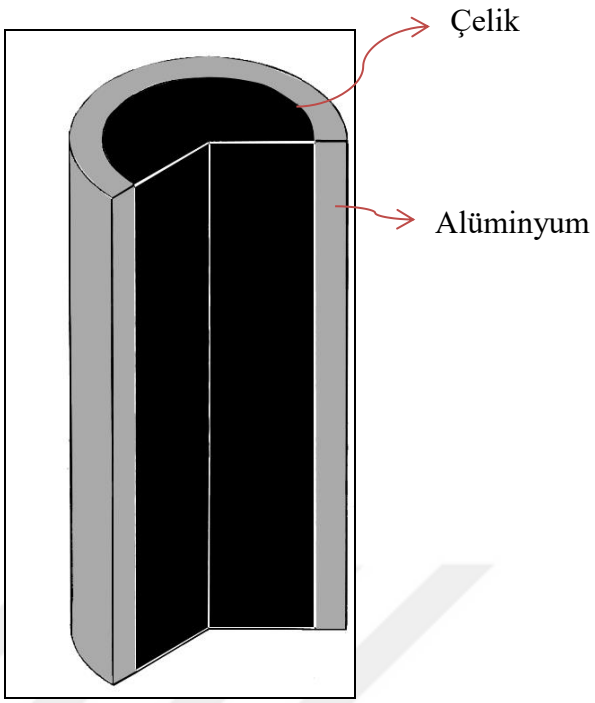
Denklem (2.57)'de verilen (μ) ve (μ_r) parametresi sırasıyla malzemenin manyetik geçirgenliği ve malzemeye ait olan bağıl manyetik geçirgenlik katsayısıdır. Şekil 2.3'te (μ_r) parametresine göre B-H grafiğinde yaygın olarak kullanılan manyetik malzemeler arasındaki ilişki verilmiştir [29].



Şekil 2.3. Manyetik Geçirgenliklerin Karşılaştırılması [29]

$(\vec{M})$ ve $(\vec{H})$ arasında ki ilişkiye bakıldığında diyamanyetik ve paramanyetik maddeler için bu iki nicelik doğru orantılıdır. Ferromanyetik maddelerde ise manyetik kesiklikten dolayı bu iki nicelik arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Düşük akı yoğunluklarında ilk geçirgenlik, daha yüksek akı yoğunluklarında ki geçirgenlikten çok daha azdır. Ferromanyetik malzemelerin düşük alanlardaki davranışı Rayleigh yasası ile tanımlanabilir, böylece uygulanan alan yeterince küçük olduğunda (0-0.5 mT) başlangıç geçirgenliği doğrusal olarak gösterilir [21]. Verilen bu ifade sensör tasarımında kullanılacak olan uyarıcı bobinde akan akımın tipik olarak zayıf olduğunu göstererek girdap akımı muayenesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu zayıf alandan dolayı oluşan doğrusal geçirgenlik matematiksel modellemede karmaşıklığı büyük ölçüde azaltmaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere özellikle bu tez kapsamında tasarlanacak olan sensörün muayene edeceği malzeme ACS telde kusur tespiti esnasında kusurlu bölgede alüminyum kaplama incelip çeliğe doğru bir derinlik oluşacaktır.

Bu esnada malzemenin manyetik geçirgenliğinde değişiklikler meydana gelecektir. Çeliğin mukavemetini artırmak için içerisindeki karbon miktarı daha da artırılırsa malzemenin manyetik geçirgenliğinde daha da azalma olacaktır. Bu artış ile beraber aşağıda elde edilen ifadelere göre sensör/bobin indüktansında değişim meydana gelecektir ve kusurlu bölgenin tespiti bu değişime göre yapılabilecektir. İfadeler manyetik akı ve indüktansın ilişkilendirilmesiyle elde edilecektir.



Şekil 2.4. ACS Tel Kesitli Görünümü

Sensör/bobin yapımızı bir selenoid gibi düşünecek olur isek muayene esnasında ACS tel veya muayenesi yapılacak olan çubuk veya tel, bu selenoidin çekirdiğini oluşturacaktır. Denklem (2.58)'de verilen ifade muayene esnasında oluşan manyetik akıyı ($\vec{B}$) temsil etmektedir [30].

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l} \tag{2.58}$$

Burada (N) bobinin sarım sayısını, (I) akıyı oluşturan akımı, (l) bobin sarımının uzunluğunu ifade etmektedir. Aşağıda verilen denklem de bobinin muayene esnasında ki self indüktansını ifade etmektedir [30].

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} \tag{2.59}$$

Burada (S) parametresi çekirdeği temsil eden telin kesit alanını ifade etmektedir. Denklem (2.58) ve (2.59)'dan yola çıkarak muayene esnasında ki manyetik akı yoğunluğu ($\vec{B}$) ve indüktans (L) arasında aşağıda ki gibi bir ifade kuracak olursak,

$$L = \frac{\vec{B} N S}{I} \tag{2.60}$$

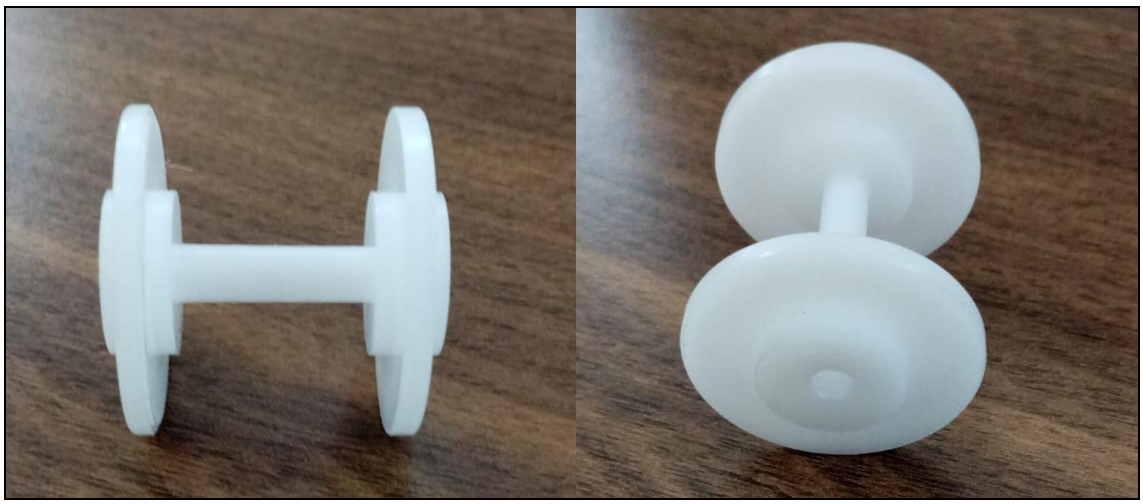
ifadesi elde edilir. Bu ifadelere göre malzemenin manyetik geçirgenliğinde meydana gelecek olan değişikliklerde bobin indüktansındaki değişim gözlemlenebilir.

3. BÖLÜM

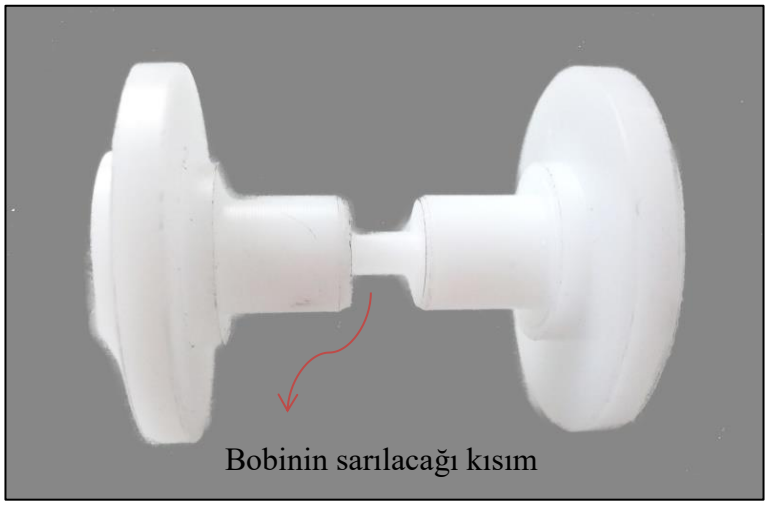
TASARIM MATERYALLERİ

3.1. Eşdeğer Devre Analizi ve Empedans Değişimi

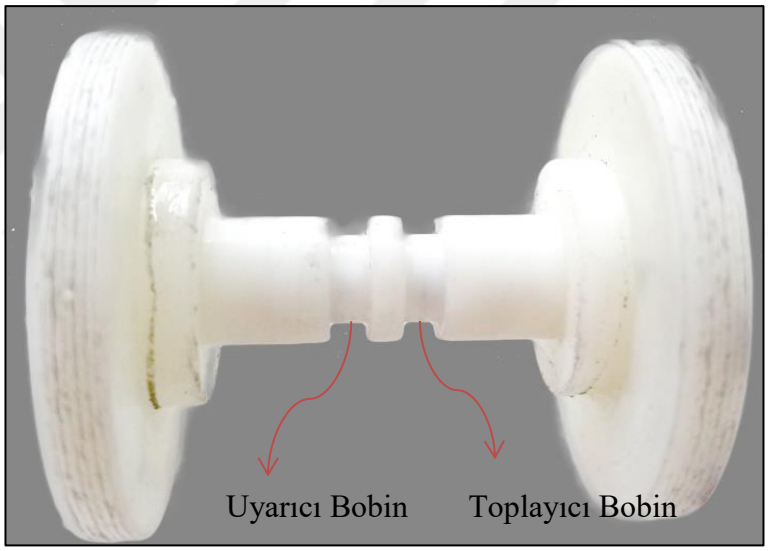
Sensörün muayene esnasındaki kusurları hassas bir şekilde tespit edebilmesi için indüktans hesabının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Tasarlanacak olan sensör yapısı, Şekil 3.1'de yer alan mutlak tip bobindir. Şekil 3.2 ve 3.3'te sırasıyla farklı tipte mutlak ve diferansiyel tip sensörlere ait görseller yer almaktadır.



Şekil 3.1. Karkas Boyu Sarıma Sahip Mutlak Tip Sensör Yapısı

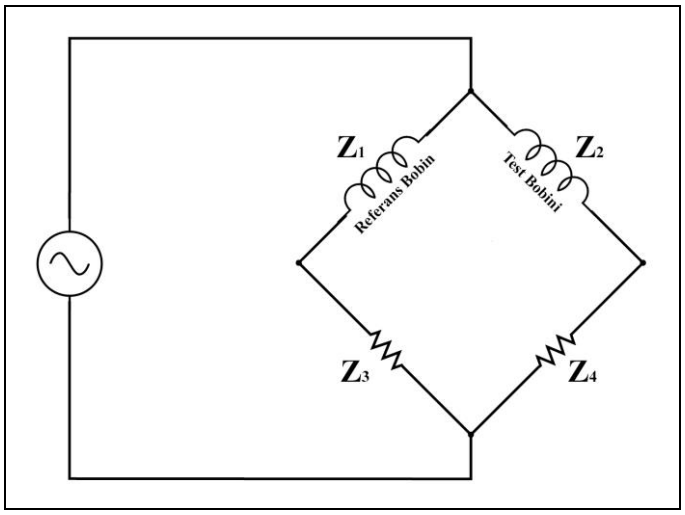


Şekil 3.2. Karkasa Kısmi Sarılı Mutlak Tip Sensör Yapısı



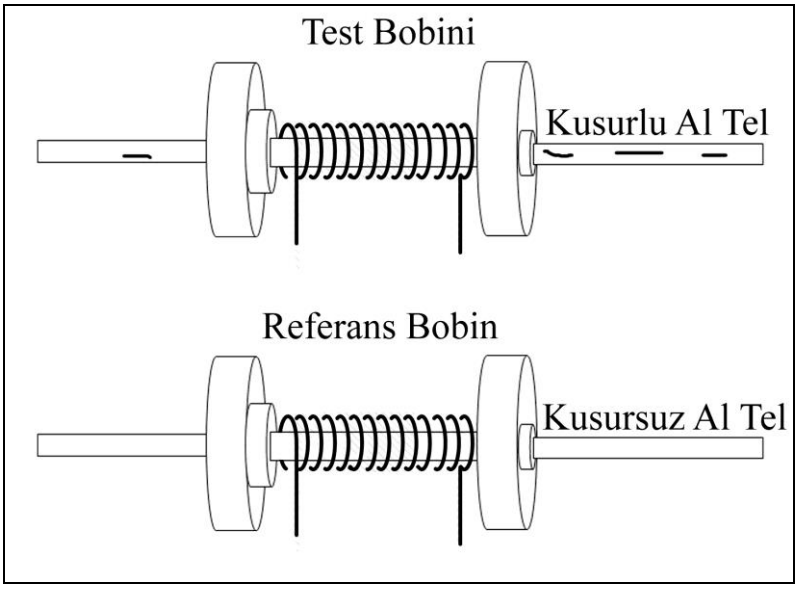
Şekil 3.3. Karkasa Kısmi Sarılı Diferansiyel Tip Sensör Yapısı

Şekil 3.1'de bobinin sarılacağı karkasın uzunluğuna göre bir indüktans hesaplama ifadesi bu bölümde elde edilecektir. Sensör tasarımında kusur tespiti, test ve referans numuneler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunun için bobinleri içeren bir köprü devresi tasarlanmaktadır. Şekil 3.4'te test ve referans bobinlerini içeren bir köprü devresi görülmektedir.

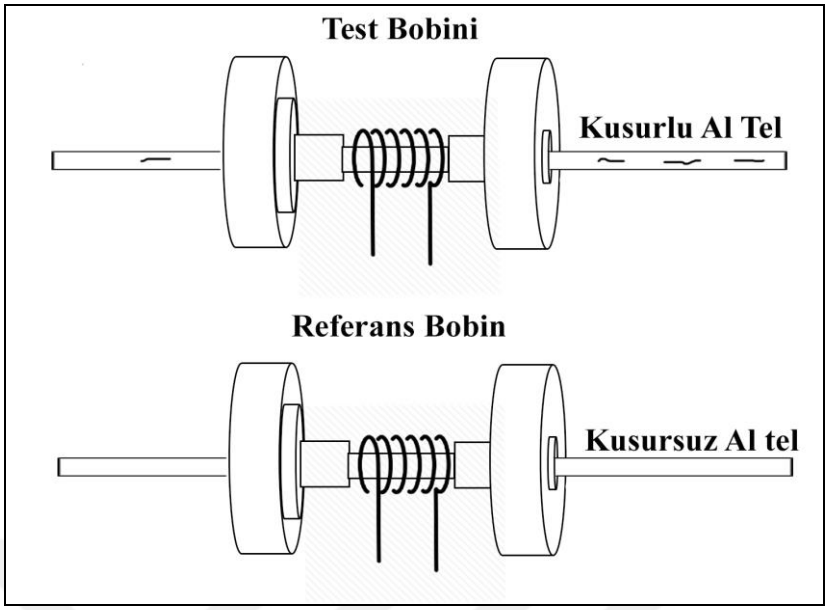


Şekil 3.4. Muayene için Sensörlerden Oluşan Köprü Devresi

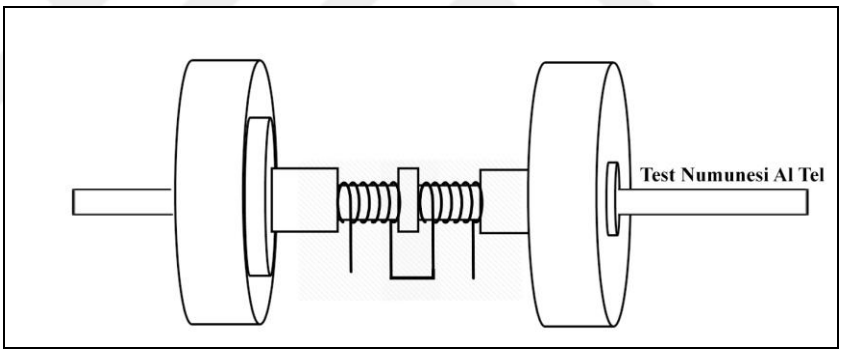
Sensörler tasarlanırken mutlak ve diferansiyel tip olarak adlandırılmasının yanı sıra harici kıyaslamalı veya dahili kıyaslamalı olarak da adlandırılmaktadır. Harici kıyaslamalı tasarımda yani mutlak tip sensörlerde, referans ve test bobinleri ayrı ayrı karkaslara sarılır. Dahili kıyaslamalı tasarımda yani diferansiyel tip sensörlerde ise referans ve test bobinleri tek bir karkas üzerine sarılır. Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7'de harici ve dahili kıyaslamalı bobin sarımları görülmektedir.



Şekil 3.5. Harici Kıyaslamalı Karkas Boyu Sarıma Sahip Mutlak Tip Bobin



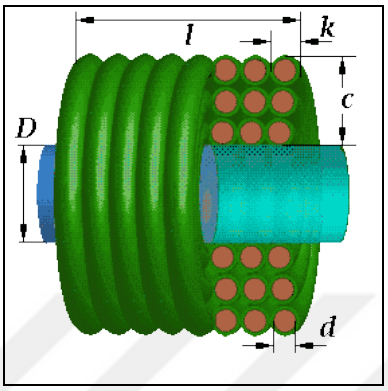
Şekil 3.6. Harici Kıyaslamalı Mutlak Tip Bobin



Şekil 3.7. Dahili Kıyaslamalı Diferansiyel Tip Bobin

Şekil 3.5 ve 3.6'da görülmekte olan harici kıyaslamalı bobinler test ve referans bobin olarak ayrı ayrıdır. Bu bobinler Şekil 3.4'te verilen köprü devresinde "Z_1" ve "Z_2" empedanslarını temsil ederler. Köprü devresi "Z_3" ve "Z_4" empedansları ile dengeye getirilir yani bobinler içerisinde test ve referans numunesi yokken empedans değerleri karşılıklı olarak eşit olur. Test numunesi varken tel üzerinde kusurlu kısım bobin tarafından indüklenen girdap akımlarına maruz kaldığında "Z_1" empedansında değişme meydana gelir. Referans bobin indüktansında ise bu sırada bir değişim söz konusu değildir. Ardından köprü çıkışları alınarak çıkış sinyalleri kıyaslanır ve hata algılaması voltaj farklılıklarına göre gerçekleştirilmiş olur. Burada "Z_1" ve "Z_2" empedans değerleri bobin indüktans değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Sensör tasarımı

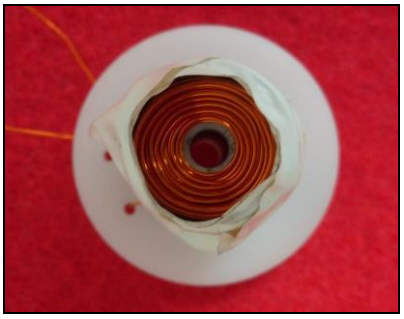
mutlak tip harici kıyaslamalı bobinler olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar ile belirlenen bobin indüktans değerinin pratikte sağlanabilmesi için Şekil 3.8'de yer alan çok katmanlı bobin sarımı baz alınarak Denklem (3.1)'deki bir formül türetilmiştir [31].



Şekil 3.8. Çok Katmanlı Bobin Sarımı [32]

$$L_0 = \frac{0{,}8D^2N^2}{6D+9l+10c} \tag{3.1}$$

Şekil 3.9'da ise sarımı gerçekleştirilmiş mutlak tip bobin yer almaktadır.

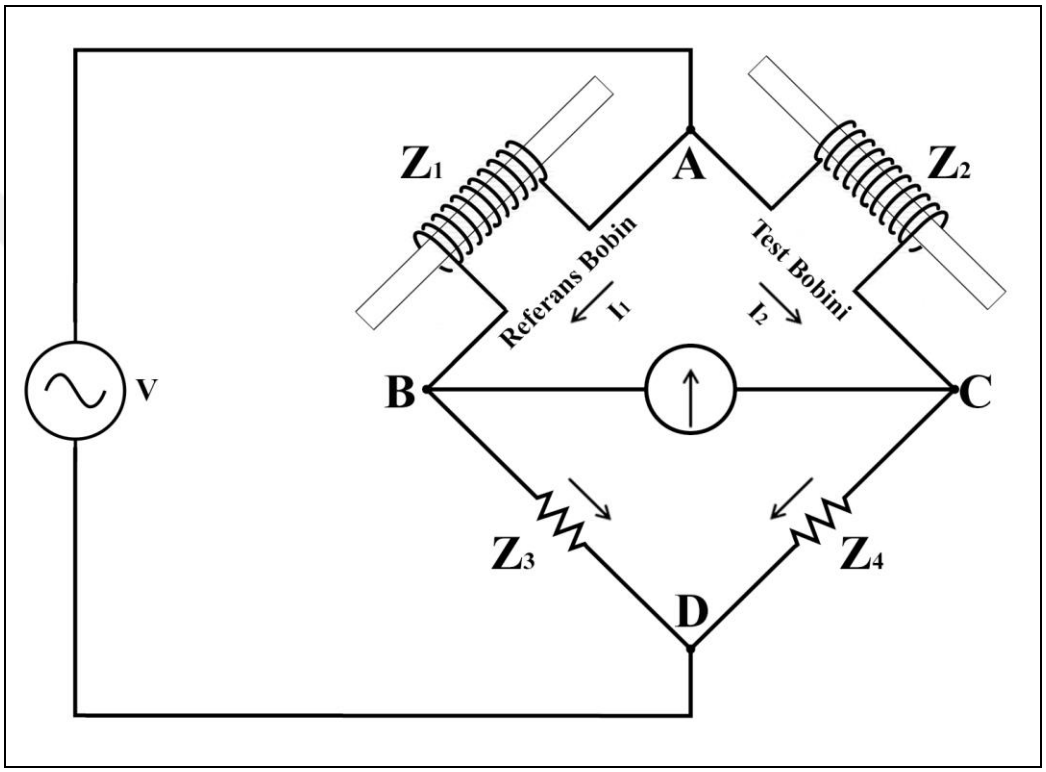


Şekil 3.9. Sarımı Gerçekleştirilmiş Mutlak Tip Bobin

İndüktans, bobin karkas çapı (D), sarım uzunluğu (l), sarım sayısı (N), bobin sarımında kullanılan emaye tel çapı (izolesiz) (d), emaye tel çapı (izoleli) (k) ve katman uzunluğu (c) parametreleri ile hesaplanabilmektedir. Bu formüldeki tüm parametrelerin birimleri inçtir. Milimetre birime sahip parametrelerin her biri, 25.4'e bölünerek inç cinsinden elde edilmektedir. Bu formül ile içerisinde iletken tel bulunmayan çevreleyici mutlak tip bobin indüktansı µH cinsinden hesaplanır.

3.1.1. Denge Durumu

Tasarımı gerçekleştirilen bobin ile numuneler muayene edildiğinde bobin indüktansında değişimler meydana gelmektedir. Sensörler dengeli köprü devresinin bir empedansını temsil ederek köprü dengesinin bozulması ile tel yüzeylerindeki kusurlar çeşitlerine göre tespit edilmektedir. Şekil 3.10'da harici kıyaslamalı sensörler ile kurulan köprü devresi yer almaktadır.



Şekil 3.10. Sensörler İle Temsil Edilen Empedans Köprü Devresi

Bobin empedansı normalde bir AC köprü devresi kullanılarak dengelenir. İçerisinde ACS tel varken çevreleyici bobinlerin empedansı (Z_1) ve (Z_2) ile (Z_3) ve (Z_4) empedans oranları eşitlenerek köprü denge durumuna getirilir [11].

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \tag{3.2}$$

Çevreleyici bobin empedansı veya üzerine düşen gerilim içerisinde kusurlu bir tel varken değişim gösterir. Bu değişim için eşik seviyeleri belirlenerek tespit edilmesi istenen kusurlar algılanır. Algılayıcı bir voltmetre olarak düşünülürse, denge durumunda B ve C noktalarına düşen gerilimler eşit olup voltmetrenin ölçtüğü gerilim değeri 0

Volttur. (Z_1) ve (Z_2) empedansları farklı değerlere sahip olduklarında, B ve C noktaları üzerine farklı gerilim değerleri düşecek olup voltmetre üzerinde gerilim değeri görünecektir. B ve C noktalarına düşen AC sinyal genlik ve faz olarak birbirlerini dengelemektedir [33].

$$I_1 = \frac{V}{Z_1+Z_3} \tag{3.3}$$

$$I_2 = \frac{V}{Z_2+Z_4} \tag{3.4}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_{L_1} = R_1 + jwL_1$$

$$Z_2 = R_2 + jX_{L_2} = R_2 + jwL_2$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(\frac{X_{L_1}}{R_1})$$

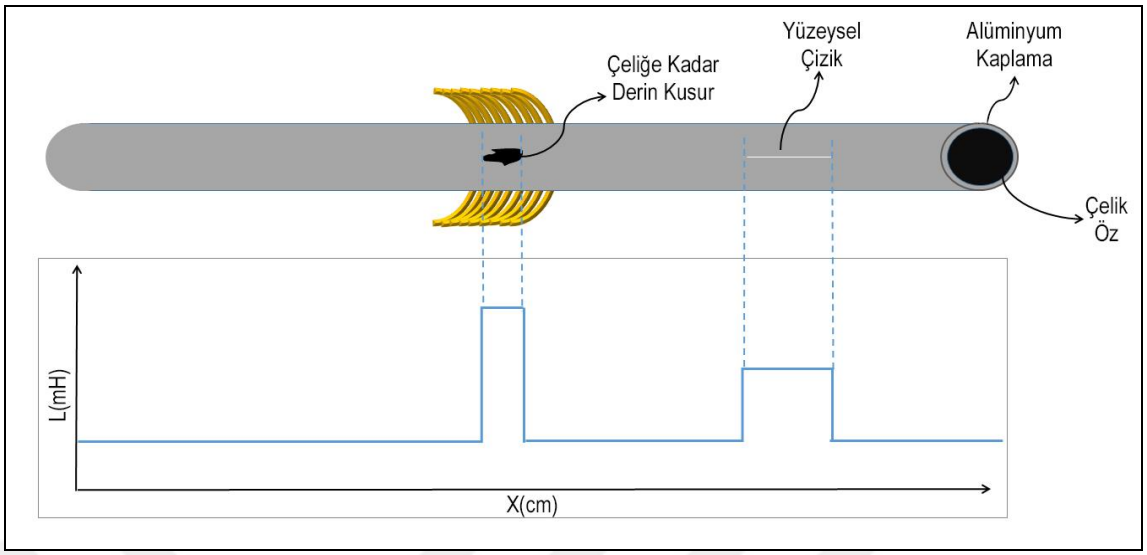
$$\theta_2 = \tan^{-1}(\frac{X_{L_2}}{R_2})$$

$$\angle\theta_1 + \angle\theta_4 = \angle\theta_2 + \angle\theta_3 \tag{3.5}$$

Denklem (3.3) ve (3.4) sensör bobinleri üzerinden geçen akımları ifade etmekte olup, klasik ohm yasası ile eşitlik ifade edilmiştir. Denklem (3.5)'de ki ifade ise empedanslar üzerine düşen AC sinyallerin faz dengesi ifadesini temsil etmektedir.

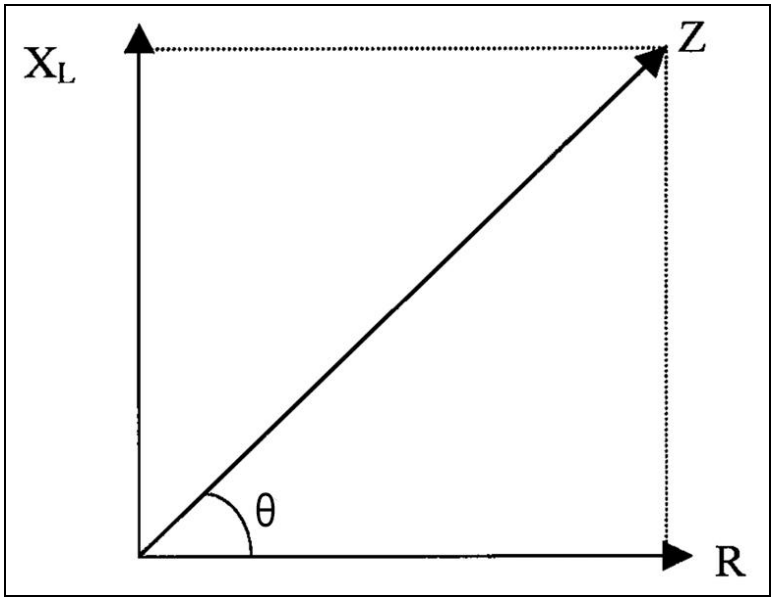
3.1.2. Empedans Değişimi

Muayene edilecek ACS tel üzerinde ki kusurların, sensörler ile Şekil 3.10'da verilen köprü devresinin B ve C uçlarına düşen voltaj farklıları ile algılanabileceği bir önceki başlıkta ifade edilmiştir. Bu voltaj farklılarının kaynağı olan empedans değişimi bobin içerisinde tel yokken, bobin içerisinde tel varken fakat tel üzerinde kusur yokken ve bobin içerisinde tel varken fakat tel üzerinde kusur varkenki durumlara göre meydana gelmektedir. Şekil 3.11'de bu üç durumda empedansın bir parametresi olan indüktansın nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.11. Muayene Esnasında İndüktans Değişimi

Empedans büyüklüğü (Z), devreden geçen akıma karşı gösterilen R direnci ve X_L indüktif reaktansın bileşkesine verilen isimdir. Empedans, bu iki parametrenin vektörel toplamları ile ifade edilir. Şekil 3.12'de empedans düzlemi görülmektedir.



Şekil 3.12. Empedans Düzlemi

Değişimin ifade edildiği üç durumda da indüktans değişimine bağlı olarak empedans değişimi meydana gelmektedir. Bu değişimler Denklem (3.6) ve (3.7) üzerinden görülebilmektedir.

$$Z = \sqrt{{X_L}^2 + R^2} \tag{3.6}$$

$$X_L = wL = 2\pi fL \tag{3.7}$$

Burada;

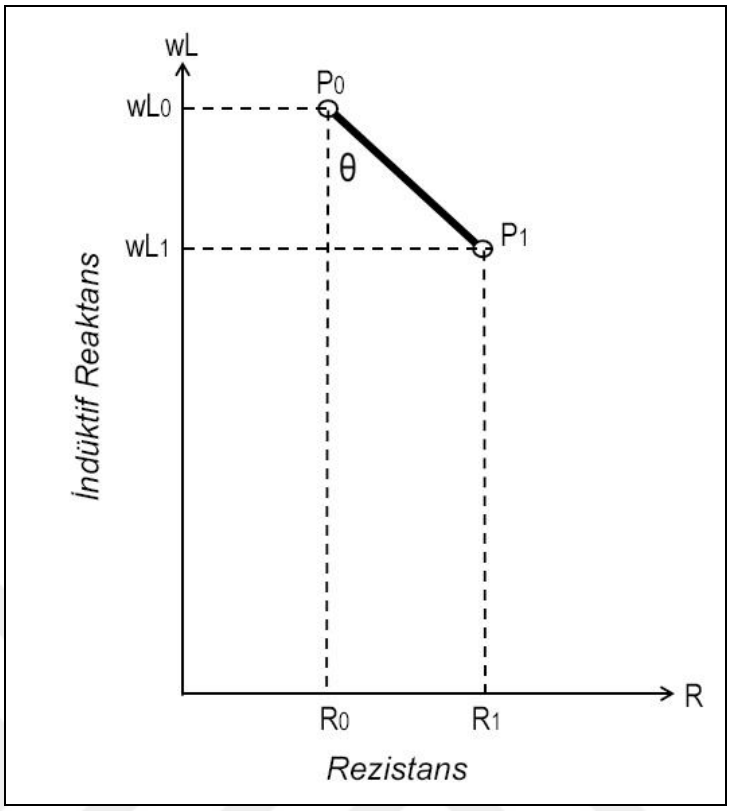
w : Açısal frekans (rad/s),

L : İndüktans (Henry),

f : frekans (hertz)'dır.

Muayene esnasında bobinde oluşan manyetik alan, test numunesi üzerinde girdap akımlarını indüklemekte ve birincil manyetik alana ters yönde farklı fazda ikincil bir manyetik alan oluşmaktadır. Test numunesi üzerinde oluşan ikincil manyetik alanın büyüklüğündeki ve fazındaki farklılık, bobinin direnç ve indüktansını buna bağlı olarakta empedansını etkilemektedir [34].

Yaygın olarak çalışmalarda, empedansı oluşturan rezistif ve indüktif parametrelerin sırasıyla yatay ve düşey eksenlerini tayin ettiği bir empedans düzlemi ile değişimler gözlemlenmektedir. Şekil 3.13'te, bobin karakteristiklerinin arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 3.13. Normalize Empedans Diyagramı

Bobin içerisinde herhangi bir numune yokken, P_0 noktası boş bobin empedansını temsil etmektedir. Bobin üzerinde manyetik alan varken bir numune bobin içerisine yerleştirildiğinde, boş bobin manyetik alanı girdap akımlarının manyetik alanıyla etkileşime girecektir. Test numunesinin etkisi, bobinin karakteristik empedansındaki değişim ile izah edilebilir. Bu durumda bobinin empedansı Şekil 3.13'te görüldüğü gibi P_1 noktasına yer değiştirmiştir. Empedansın test numunesinin etkisiyle P_0 dan P_1 e yer değiştirmesinin büyüklüğü ve yönü test numunesinin özelliklerine ve enstrümantasyon karakteristiklerinin bir fonksiyonudur [34].

3.1.2.1. Elektriksel İletkenlik

İletkenlik bir malzemenin elektrik akımı iletme kabiliyeti olarak tanımlanır. σ ile gösterilir. İletkenlik birimi metre başına Siemens veya metre başına mho'dur.

$$İletkenlik\ (\sigma) = \frac{1}{direnç(R)}\ \text{Siemens/metre} \tag{3.8}$$

Bir iletkenin iletkenliği, sıcaklıktaki artışla azalır. Her elemanın benzersiz bir iletkenlik değeri vardır. Bakır, gümüş ve altın yüksek iletkenliğe sahipken, karbon çok düşük iletkenliğe sahiptir. Girdap akımı bir elektron akışıdır. Elektriksel olarak iletken bir malzemeden geçen elektron akışı miktarı, doğrudan malzemenin iletkenliği ile ilgilidir. İletkenlik artarsa girdap akımının akışı artar. Direnç iletkenliğin tersidir. Bu nedenle yüksek özdirençli malzemelerin iletkenliği zayıf, düşük özdirençli malzemelerin iletkenliği yüksektir.

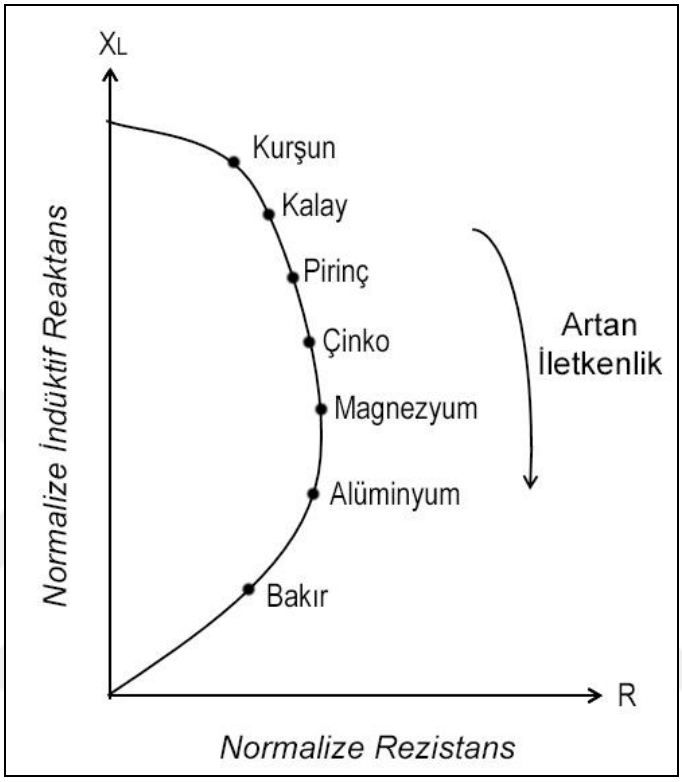
İletkenlik, girdap akımları incelemesinde ana değişkenlerden biridir. Çeşitli malzemelerin özdirenç ve iletkenliği Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çeşitli Malzemelerin Direnç ve İletkenlik Değerleri [11]

Malzeme	Özdirenç ($\mu\Omega$-cm), $\times 10^{-7}$	İletkenlik (mho/m), $\times 10^{7}$	İletkenlik (%IACS)
Gümüş	1.6	6.14	105
Bakır	1.7	5.81	100
Altın	2.4	4.10	70
Alüminyum	2.8	3.55	61
7075-T6 (Al Alaşım)	5.3	1.89	32
Çinko	5.9	1.70	29
Magnezyum	4.6	2.17	37
Amirallik Pirinç	7.0	1.43	24
Demir	9.7	1.03	18
Fosfor Bronz	16	0.63	11
Kurşun	20.6	0.49	8.4
70 Cu-30 Ni	37.4	0.27	4.5
Monel	48.2	0.21	3.6
Zirkonyum	50	0.20	3.4
Titanyum	54.8	0.18	3.1
304 SST	70	0.14	2.5
Sircalloy-2	72	0.14	2.5
Inconel	98	0.10	1.7
Hastelloy X	115	0.087	1.5
Waspaloy	123	0.081	1.4
Ti-6A I-4V	172	0.058	1.0

Girdap akımları testlerinde iletkenlik sıklıkla, uluslararası tavlanmış bakır standardının (% IACS) bir yüzdesi olarak verilir.

Bazı malzemelerin iletkenliğinin empedans üzerindeki etkisi Şekil 3.14'teki eğride görülmektedir [11].



Şekil 3.14. İletkenliğin Normalize Empedans Üzerindeki Etkisi [11]

En yüksek iletkenliğe sahip malzemeler en güçlü girdap akımlarına sahip olmaktadır ve sonuçta elde edilen vektör daha büyük olmaktadır. Daha yüksek iletkenliğe sahip malzemeler Şekil 3.14'de görüldüğü gibi eğrinin alt kısmında (boş bobin noktasından daha uzak olan) yer almaktadır.

3.1.2.1.1. Pratik Yaklaşımlarda İletkenlik Üzerine Etkisi Olan Değişkenler

Bir malzemenin doğal iletkenliği her zaman aynı olsa da doğal iletkenlikte bir değişikliğe neden olabilecek iç faktörler vardır [11]:

a) Alaşımlar:

Diğer metaller veya kimyasal elementlerin bir baz metal ile kombinasyonlarıdır. Her metal veya kimyasal element, baz metalin iletkenliği üzerinde bireysel bir etkiye sahiptir. Baz metalin iletkenliği, alaşımın bileşimi ile ilgili bir değere değiştirilir.

b) Sertlik:

Bir metal veya alaşım ısıl işleme tabi tutulduğunda (veya normal çalışma sırasında aşırı ısıya maruz kaldığında) metal, malzemeye bağlı olarak daha sert veya daha yumuşak hale gelir. Sertlikteki bu değişiklik, malzemenin iletkenliğini de etkileyen dahili bir değişiklikle meydana gelir. İletkenlikteki bu değişiklik, girdap akımı test yöntemleri ile de tespit edilebilir. Uygun olmayan bir ısıl işlem bu şekilde tespit edilebilir.

c) Sıcaklık ve Gerilmeler:

Test edilen bir malzemenin ortam sıcaklığı ve dahili gerilmeleri de malzemenin iletkenliği üzerinde bir etkiye sahiptir. Bu değişiklikler girdap akımı testi ile de tespit edilebilir. Malzemenin sıcaklığındaki bir artış normal olarak malzemenin iletkenliğinde bir azalmaya neden olur. Artık gerilmeler iletkenlikte öngörülemeyen, ancak saptanabilir bir değişikliğe neden olur.

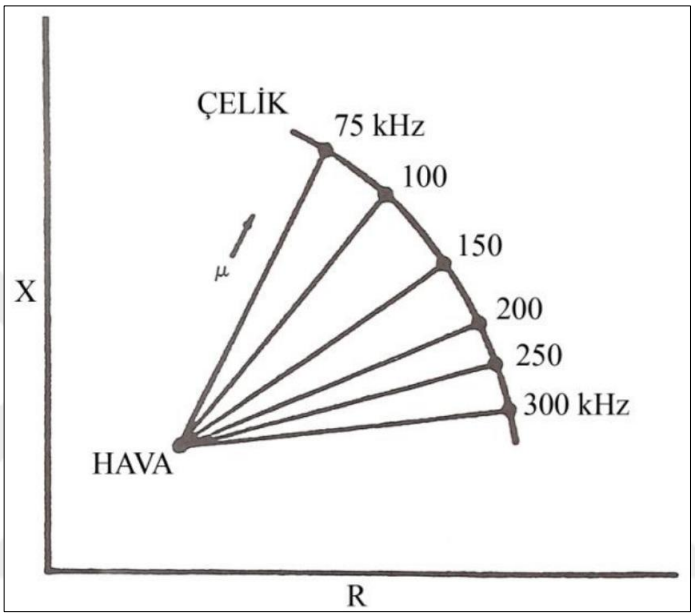
d) İletken Kaplamalar:

İletken bir malzeme üzerinde iletken bir kaplamanın varlığı, baz metalin doğal bir iletkenliğini tıpkı bir alaşım gibi değiştirir. Bununla birlikte, kaplamanın kalınlığı değişirse, iletkenlik değişecektir. Kalınlıktaki bu değişiklik girdap akımı test yöntemleri ile tespit edilebilir.

3.1.2.2. Frekans

Frekans, girdap akımı testinde operatör tarafından kontrol edilen değişkendir. Frekansın ana kullanımı, indüklenen girdap akımlarının penetrasyon derinliğini, yoğunluğunu ve fazını kontrol etmektir. Genel olarak, yüzey kırılma süreksizliklerini tespit etmek için daha yüksek frekanslar ve alt yüzey testi için daha düşük frekanslar kullanılır [11].

İndüktif reaktans parametresi Denklem (3.7)'de de verildiği üzere indüktans ve frekansın bir fonksiyonudur. Buna bağlı olarak frekans değiştikçe empedans vektörünün faz açısı değişmektedir. Bu değişimin empedans düzlemine yansıması manyetik olmayan bir materyal için Şekil 3.15'te görülmektedir.

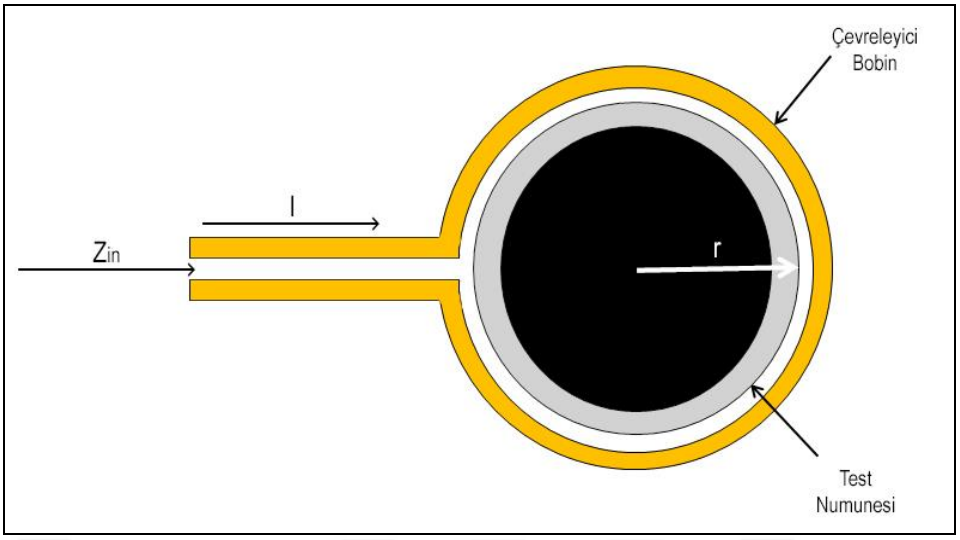


Şekil 3.15. Ferromanyetik Malzemelerin Farklı Frekanslarda Faz Açılarındaki Değişim [35]

Frekans değişimi ile bazı test sonuçlarında daha etkili sonuçlar elde edilebilmektedir.

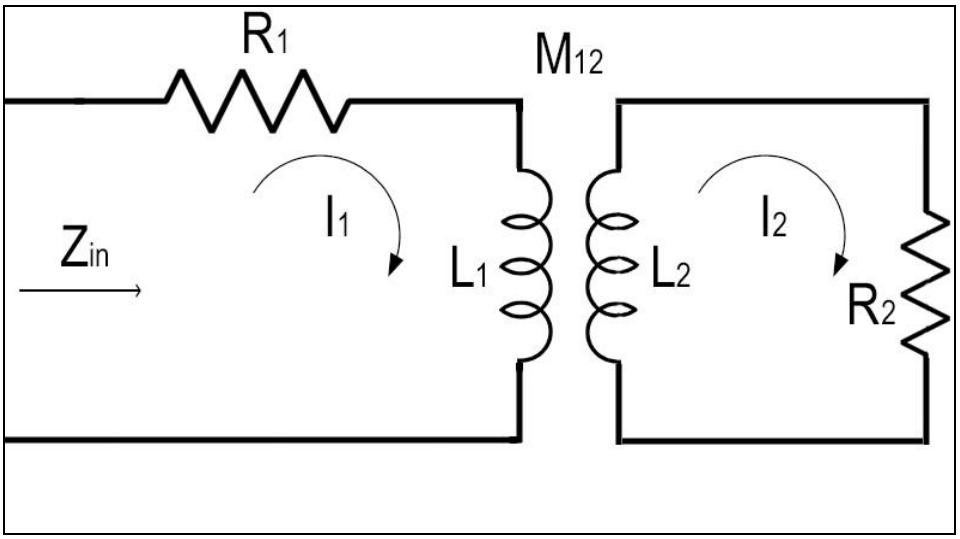
3.1.3. Girdap Akımı Probu – Malzeme İkilisi Sisteminin Eşdeğer Devresi

Girdap akımları ile tahribatsız muayene metodu en temel şekilde etkileşimde olan iki bobin devresiyle açıklanabilmektedir. Şekil 3.16'da, eşdeğer devresinin analizi yapılacak olan içerisinde bir test numunesi bulunan çevreleyici bobin sistemi yer almaktadır.



Şekil 3.16. Bobin – Malzeme İkilisi Fiziksel Tanımı [34]

Şekil 3.16'da üzerinden akım geçen bir bobin ve içerisinde girdap akımlarının oluştuğu numune iletken görülmektedir. Bu fiziksel tanım Şekil 3.17'deki eşdeğer devre ile simüle edilebilir.



Şekil 3.17. Bobin – Malzeme İkilisi Eşdeğer Devresi [34]

Yukarıdaki birincil devrede self indüktansın L_1 seri rezistansın R_1, ikincil devrede self indüktansın L_2 ve iletkenliğin $G_2 = 1 / R_2$ olduğu iki bobinin birbirini etkilemesi sonucu aralarında oluşan indükleme katsayısınında M_{12} olduğu eşdeğer devre görülmektedir.

Devrenin analizi için ilk önce aşağıdaki denklemlerde görüldüğü üzere Kirchoff yasaları kullanılarak, denklemler çıkarılır.

$$R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \frac{dI_2}{dt} = V \tag{3.9}$$

$$M_{12} \frac{dI_1}{dt} + L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 = 0 \tag{3.10}$$

Başlangıçta devredeki bütün akımlar sıfır kabul edilerek, bu iki denklemin çözümü için Laplace transformu uygulanır.

$$\frac{d}{dt} \rightarrow s = z + i \tag{3.11}$$

$$(R_1 + sL_1) I_1(s) - sM_{12} I_2(s) = V(s) \tag{3.12}$$

$$-sM_{12} I_1(s) + (R_2 + sL_2) I_2(s) = 0 \tag{3.13}$$

Laplace transformu uygulanan Denklem (3.12) ve (3.13) I_2 akımı için çözülerek Denklem (3.14) elde edilir.

$$(R_1 + sL_1) I_1(s) - \frac{s^2 {M_{12}}^2}{R_2 + sL_2} I_1(s) \tag{3.14}$$

Bu denklemden birincil bobin empedansını Denklem (3.15)'deki gibi elde edilir.

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I_1(s)} = R_1 + sL_1 - \frac{s^2 {M_{12}}^2}{R_2 + sL_2} \tag{3.15}$$

Denge şartlarında s = jw ifadesi kullanılarak,

$$Z = R_1 + jwL_1 + \frac{w^2 {M_{12}}^2}{R_2 + jwL_2} \tag{3.16}$$

$$M_{12} = {k_c}^2 L_1 L_2 \tag{3.17}$$

denklemleri oluşturulur. Bu ifadelerde k_c etkileşim katsayısıdır.

Etkileşim katsayısı, bir bobinde oluşan manyetik akının diğer bobini etkileme oranıdır. İdeal koşullarda $k_c = 1$ için birinci bobinde oluşan manyetik akı diğer bobine hiçbir kayıp olmadan geçer. Elde edilen denklemler aşağıdaki gibi düzenlenir ve empedans ifadesi elde edilmiş olur [34].

$$Z = R_1 + jwL_1 + \frac{w^2 {k_c}^4 (L_1 L_2)^2 (R_2 - jwL_2)}{R_2 + jwL_2} \quad (3.18)$$

Bu denklem ile empedans değişimine etkiyen parametreler görülmektedir.

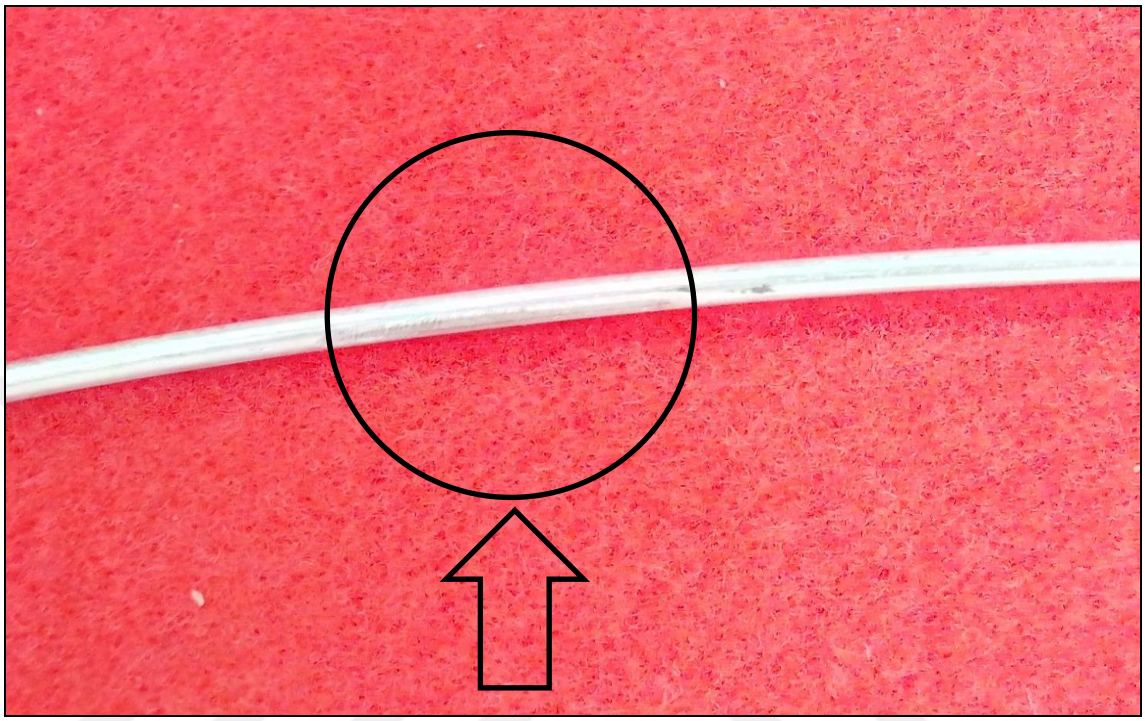
4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

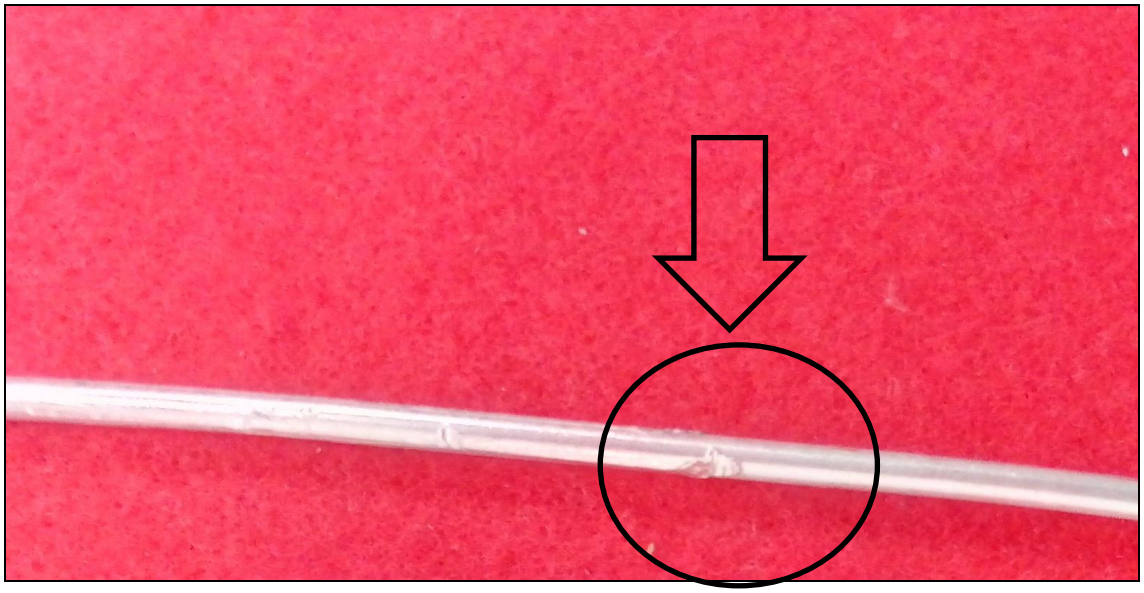
4.1. Test Numuneleri

ACS tel üretim hattında alüminyum kaplama ve haddeleme işlemleri yapılırken yüzeylerinde meydana gelen çeşitli kusurlara sahip teller bobin tasarımı için numune olarak toplanmıştır. Numune teller yaklaşık olarak 30 cm, 40 cm ve 70 cm ebatlarında olup, çapları 2.5 ila 4 mm arasındadır. Üretim esnasında tel yüzeylerinde; alüminyum yüzeyde çizik, alüminyum yüzeyde ezik, alüminyumdan çelik öze doğru hafif derin kusur ve alüminyum kaplamanın tamamen kalkması gibi kusurlar meydana gelmektedir. Bu tür kusurlara sahip numune iletken örnekleri Şekil 4.1 ve 4.7 arasında verilen resimlerde yer almaktadır. Sonuçların alınacağı numune iletkenler sırasıyla; 3 mm, 3,5 mm, 3 mm, 3 mm, 3 mm ve 2,5 mm ebatlarında olmak üzere 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı olarak sınıflandırılmıştır.

Bir numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resimler Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

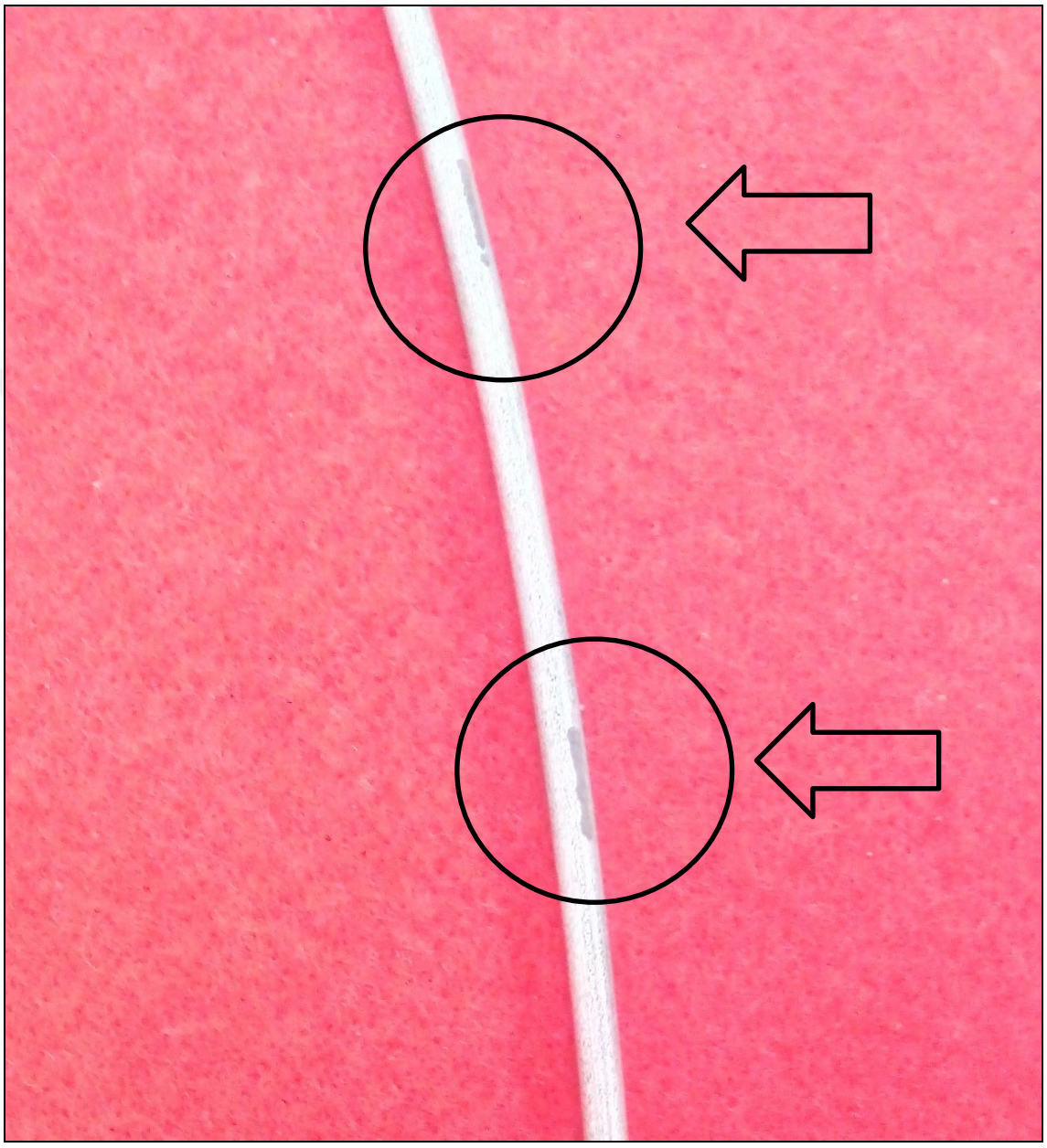


Şekil 4.1. 1 Numaralı Yüzeysel Çizeğe Sahip ACS Tel Numunesi



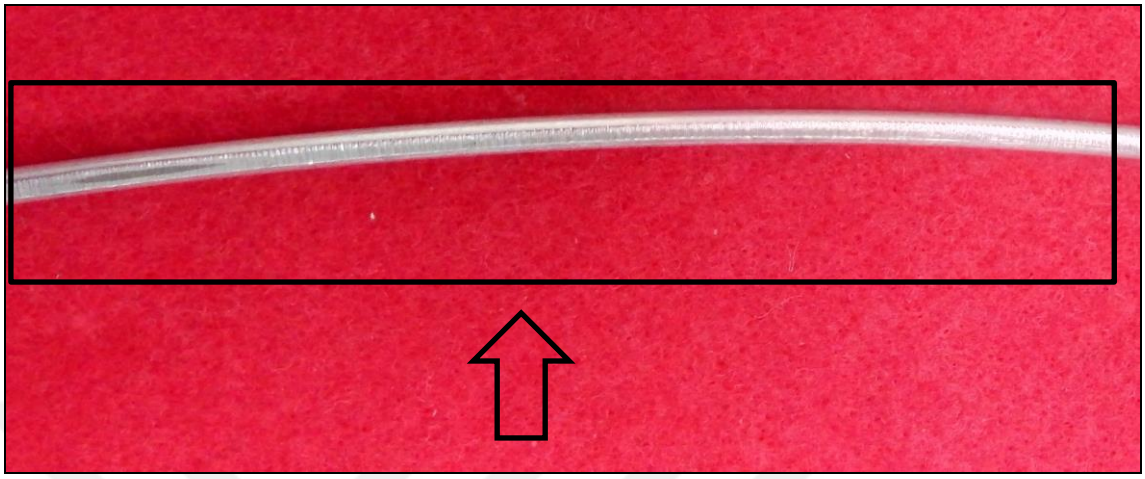
Şekil 4.2. 1 Numaralı Yüzeysel Eziğe Sahip ACS Tel Numunesi

İki numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resim Şekil 4.3’te verilmiştir.



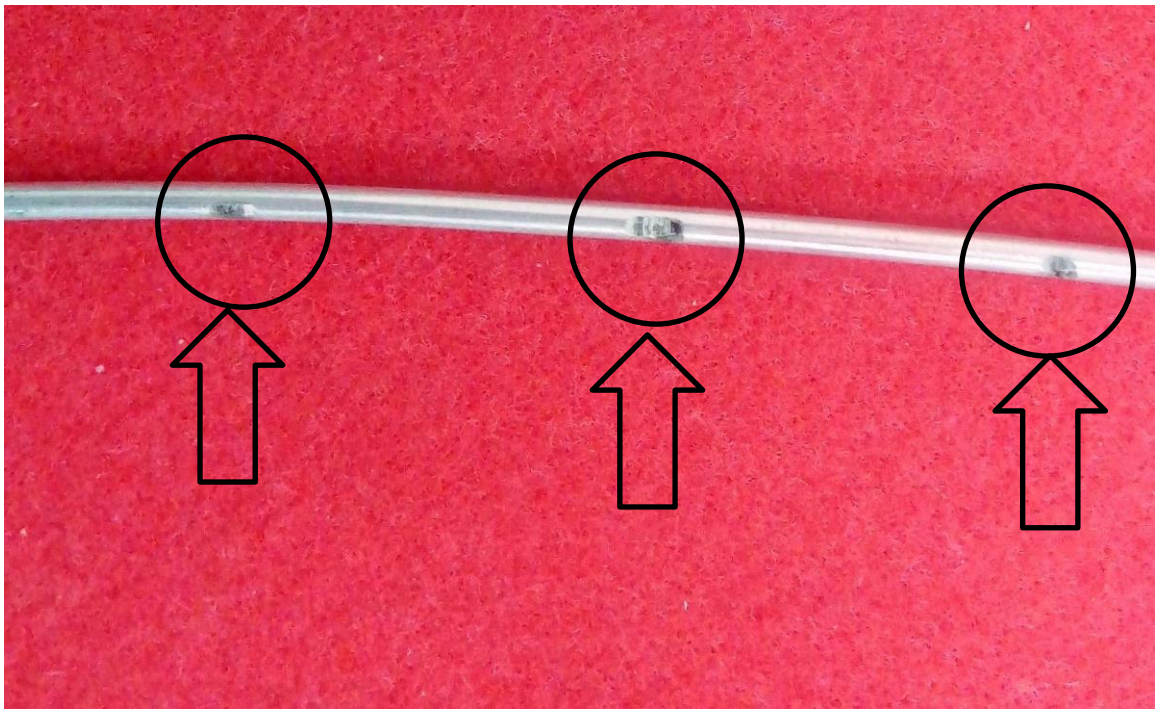
Şekil 4.3. 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS Tel Numunesi

Üç numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resim Şekil 4.4'te verilmiştir.



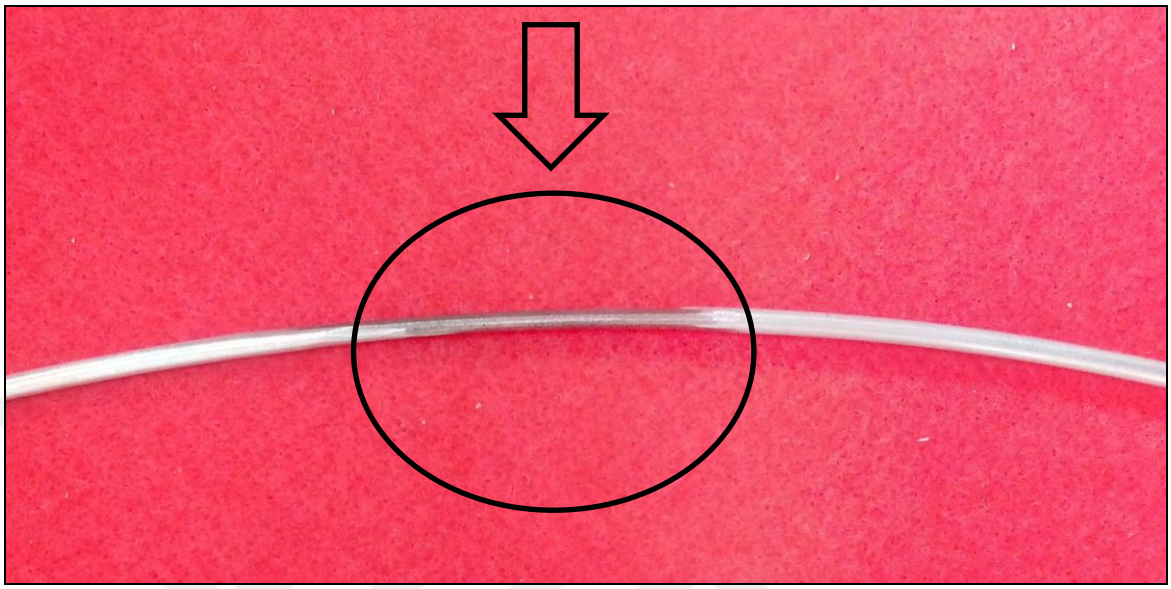
Şekil 4.4. 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip ACS Tel Numunesi

Dört numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resim Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Numunesi

Beş numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resim Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Numunesi

Altı numaralı numune ile ilgili bilgileri içeren resim Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Numunesi

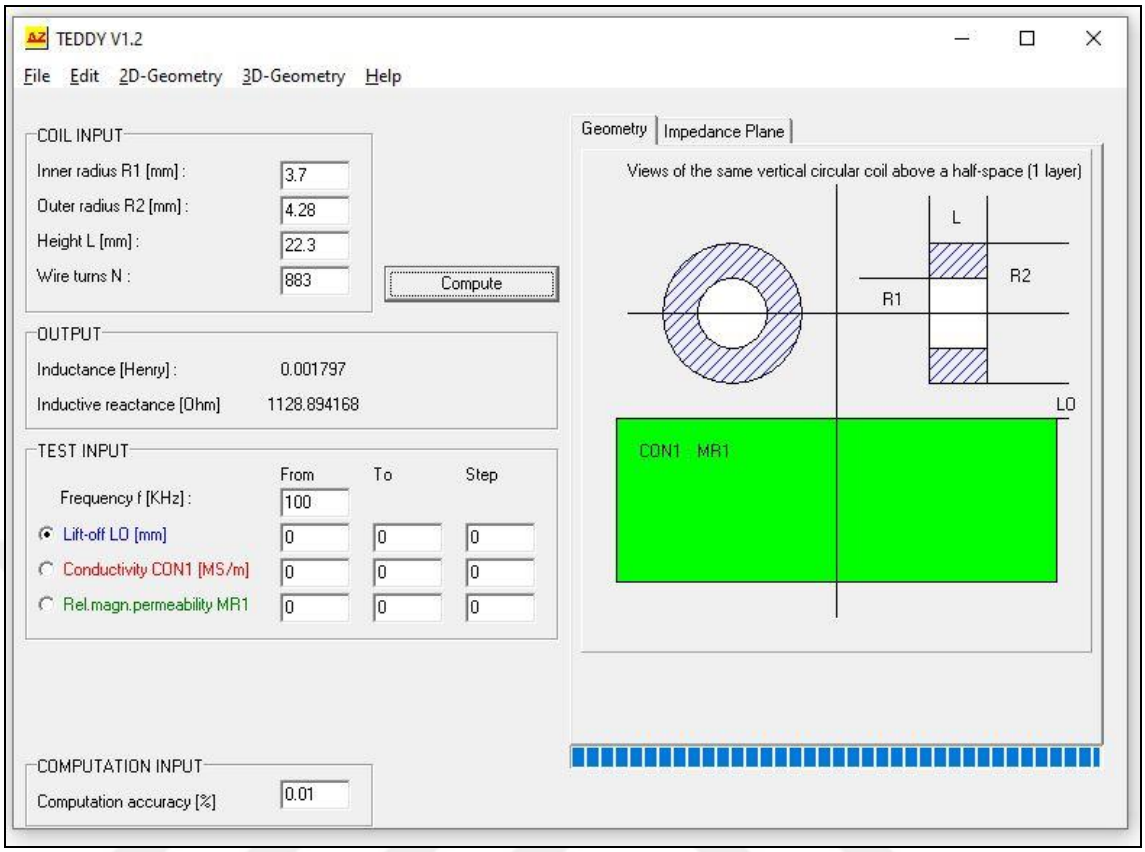
4.2. Bobin/Sensör Tasarımı ve Hesaplamaları

Girdap akımları tekniği ile yapılacak olan içi dolu silindir formundaki malzemelerin muayenesi için bobinlerin sarılacağı en uygun sensör yapısı, makara şeklindeki aşınmaya dayanaklı ve manyetik alanı hiçbir şekilde etkilemeyen sert plastiklerden oluşmaktadır. Bunun için en uygun malzemeler polioksimetilen (POM) termoplastiği diğer bir adıyla delrin ve poliamid plastiği diğer bir adıyla kestamittir. Bu tez çalışmasında bobin tasarımı kestamit malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de kestamit bir hammadde görülmektedir.



Şekil 4.8. Kestamit Çubuk

Kestamit, döküm yolu ile üretilen bir plastik çeşididir. Aşınma dayanımı çok yüksektir. Torna, CNC tezgahlarında mükemmel bir işlenebilirliğe sahip bir malzemedir. Bu malzemenin bobinin sarılacağı karkas/makara malzemesi olarak seçilmesindeki amaç, girdap akımlarının tel yüzeyinde indüklenebilmesi için bobin tarafından oluşan manyetik alanı etkilememesi ve muayene esnasında ACS telin salınımlarından ve tel çekilme hızından kaynaklı olarak meydana gelen sürtünmelere dayanıklı olmasıdır. Kestamit çubuktan bobin karkasının elde edilmesi için Dr. Theodoros P. Theodoulidis tarafından geliştirilen bir masaüstü program kullanılmıştır [36]. Bu programa bobin parametreleri girilerek, tasarlanacak olan bobinin indüktans değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.9. Girdap Akımları Bobin İndüktansı Hesaplama Programı [36]

Bu tez çalışmasındaki tasarlanan bobin karkası, Şekil 4.9'da görülmekte olan programa girilen parametre değerlerine sahiptir. Bu programın kullandığı indüktans formülasyonu Denklem (4.1)'de verilmiştir [37].

$$L_{air} = \frac{2\pi\mu_0 N^2}{H^2(R_{out}-R_{in})^2}\int_0^{\infty}\frac{I^2(kR_{in},kR_{out})}{k^5}\left(H+\frac{e^{-kH}-1}{k}\right)dk \tag{4.1}$$

Burada;

$\omega = 2\pi f$: açısal frekans (rad / sn),

f: (Hz) cinsinden çalışma frekansı,

$\mu_o = 4\pi 10^{-7}$: boşluğun manyetik geçirgenlik sabiti (N /A^2),

R_{in}: bobinin iç yarıçapı (mm),

R_{out}: bobinin dış yarıçapı (mm),

H: bobinin yüksekliği (mm),

N: tur sayısı.

Aynı zamanda:

$$I(a,b) = \int_a^b xJ_1(x)dx \tag{4.2}$$

dir. Bu denklemdeki $J_1(x)$ birinci tür birinci dereceden Bessel fonksiyonudur.

Bobin karkası bu hesaplamalar ile tasarlanarak 1,79 mH indüktans değerine sahip olacağı öngörülmüştür. Aynı zamanda girdap akımları sensörleri, çok katmanlı bobin yapısına sahiptir. Bunun için Denklem (3.1)'de verilen çok katmanlı bobin indüktans formülü ile indüktans hesabını gerçekleştirdiğimizde de indüktans değeri tolerans sınırları içerisinde yaklaşık olarak aynı çıkmaktadır. Tablo 4.1'de Denklem (3.1)'deki parametre değerleri ve hesaplama sonucunda bulunan indüktans değeri verilmiştir.

Tablo 4.1. Çok Katmanlı Bobin İndüktans Hesabı

Bobin Parametreleri	Değerler	Bobin İndüktansı (L)
Bobin Karkas Çapı (D)	4.28 mm = 0.1685 inç	1.67 mH
Sarım Sayısı (N)	883	
Sarım Uzunluğu (l)	22.3 mm = 0,8779 inç	
Katman Uzunluğu (c)	4.25 mm = 0.1673 inç	

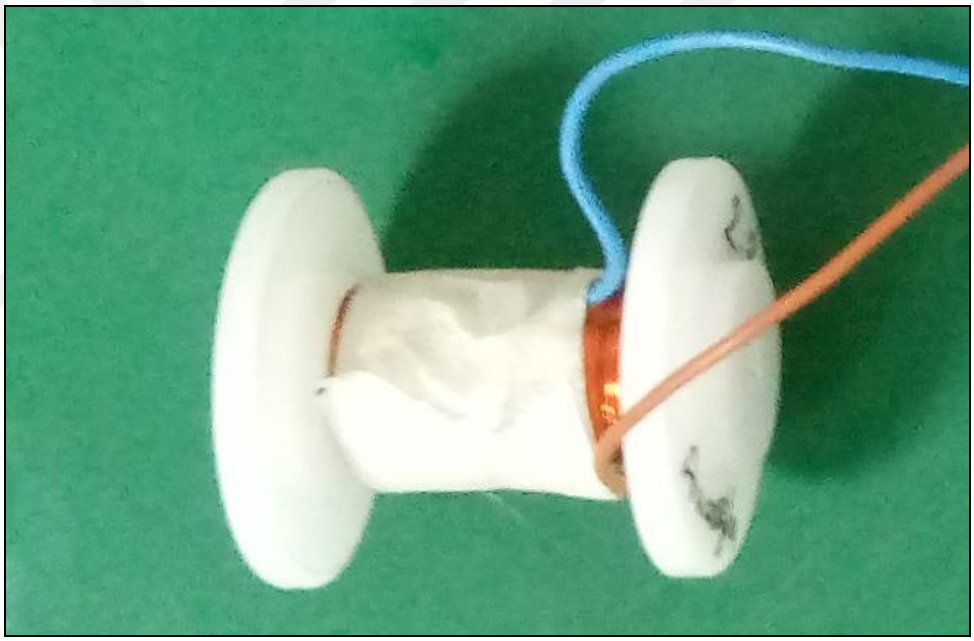
Görüldüğü üzere iki hesaplama sonucuda hemen hemen benzer indüktans değerlerini vermişlerdir.

Muayene esnasında bobin içerisinde ACS tel varken Denklem (2.60)'da verilen selenoid self indüktans hesabından, kusur durumunda bobin indüktans değerinin artacağı da görülebilmektedir. Tablo 4.2'de bu denklem ile indüktans değişimi görülebilmektedir. Bu hesaplama sadece indüktansta ki artışı göstermek için verilmiştir.

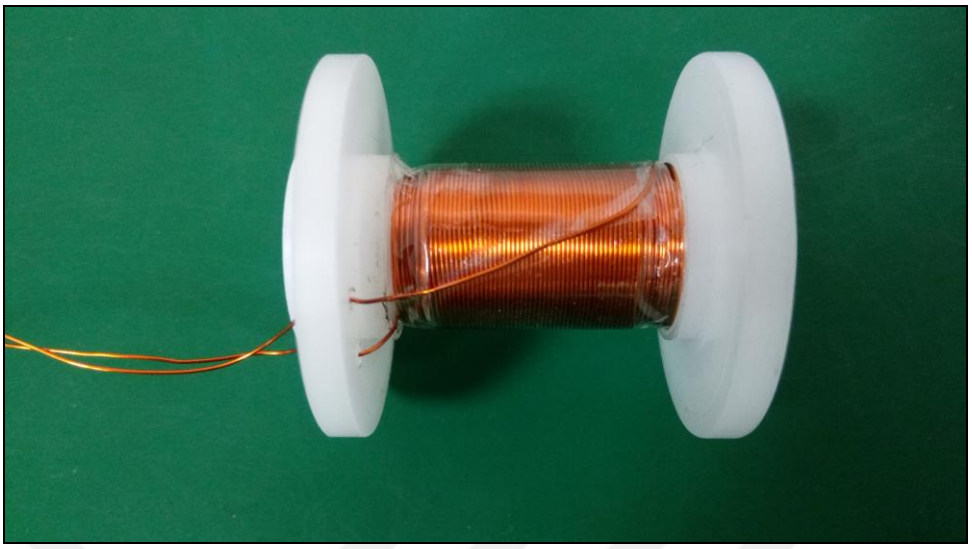
Tablo 4.2. Selenoid Self İndüktans Hesabı

Malzeme	μ_0	μ_r	N	S	l	L
Çelik	$4\pi \times 10^{-7}$	40	883	2.83×10^{-5}	22.3×10^{-3}	49.7 mH
Alüminyum	$4\pi \times 10^{-7}$	1	883	2.83×10^{-5}	22.3×10^{-3}	1.24 mH

Tabloda verilen parametrelerden sarım sayısı, bobin tasarımındaki parametre değeridir. Kesit alan değeri 3 mm çapındaki ACS tel baz alınarak hesaplanmıştır. Bobin uzunluğu tasarımdaki bobin uzunluk değeridir. Şekil 4.10 ve 4.11'de, tasarlanan mutlak tip harici kıyaslamalı bobinler/sensörler görülmektedir.



Şekil 4.10. Tasarlanan Mutlak Tip Test Bobini



Şekil 4.11. Tasarlanan Mutlak Tip Referans Bobini

4.3. Bobinin LCR Metre Ölçüm Sonuçları

Tasarlanan bobinin indüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüştür. Ölçüm için UNI-T marka UT612 model, 0.6 Vrms ölçüm voltajına, 100 kHz'e kadar ölçüm frekans değerlerine ve % 0.5 hata toleransına sahip bir LCR metre kullanılmıştır. Şekil 4.12'de kullanılan LCR metre görülmektedir.



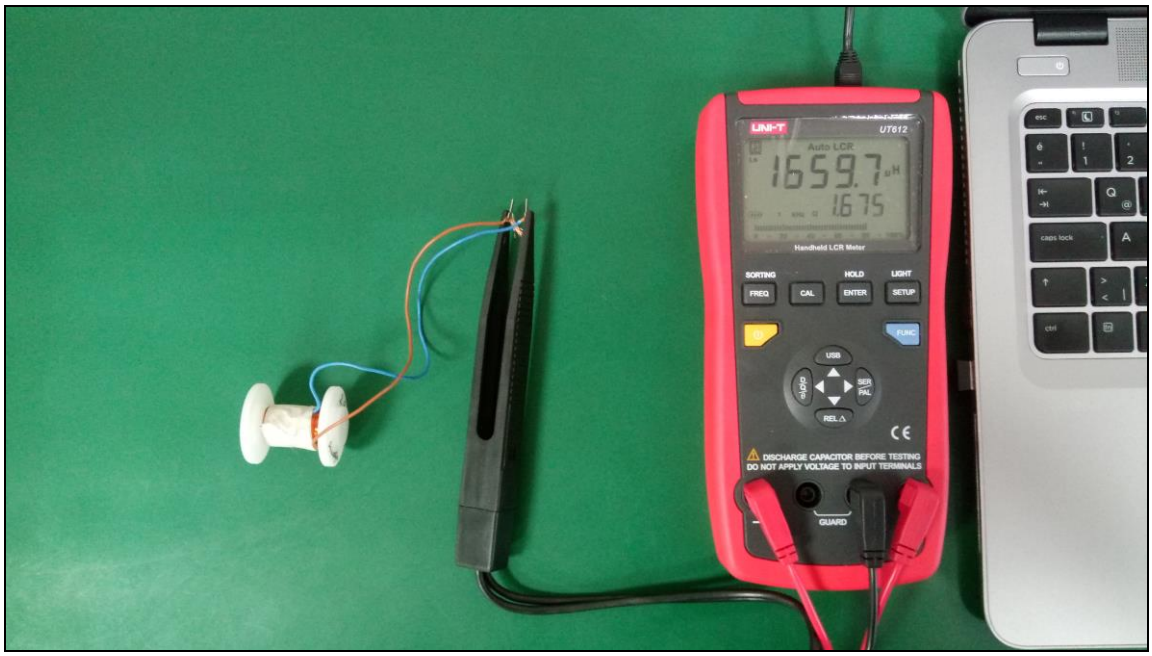
Şekil 4.12. Ölçümler İçin Kullanılan LCR Metre

İndüktans ölçümleri; bobin içerisinde ACS tel yokken, bobin içerisinde kusursuz ACS tel varken ve toplanan numune ACS teller ile gerçekleştirilmiştir.

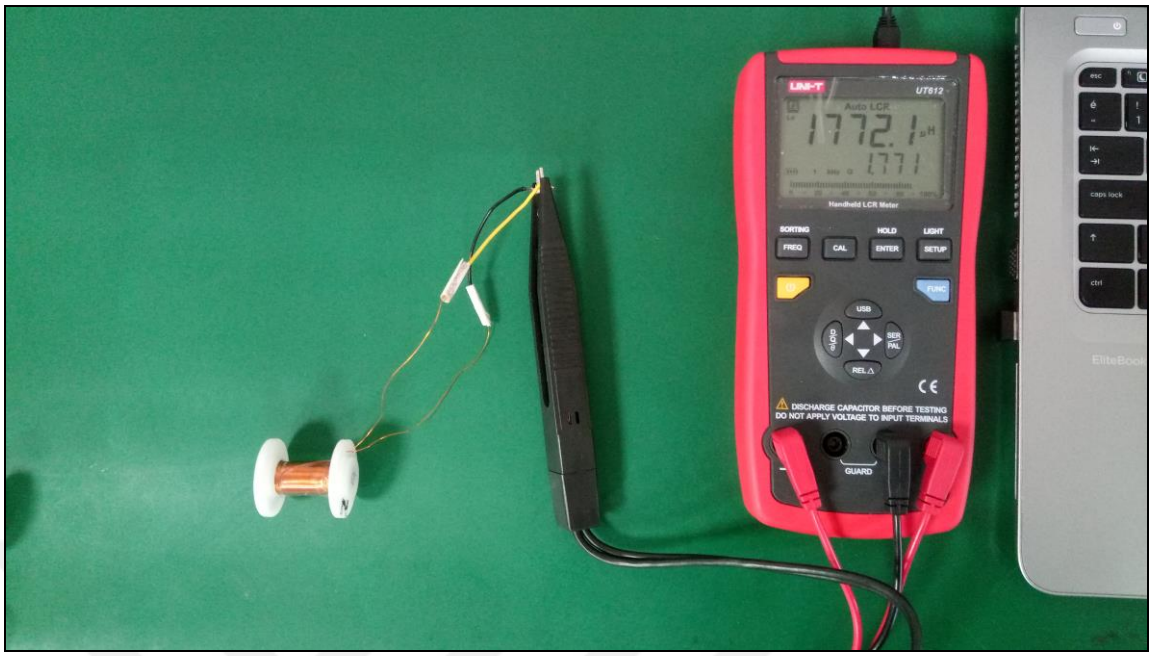
Numune teller ile yapılan ölçümlerde, kusur seviyelerine göre bobin indüktans değerleri alt ve üst sınırları gözlemlenerek Tablo 4.3 oluşturulmuştur. Şekil 4.13 ile 4.30 arasındaki resimlerde numunelerin LCR metre ile ölçüm değerleri ve LCR metreden USB aracılığıyla alınan indüktans değerlerine göre çizdirilmiş grafikleri görülmektedir.

Tablo 4.3. Kusur Derinliklerine Göre Bobin İndüktansı Alt ve Üst Sınır Değerleri

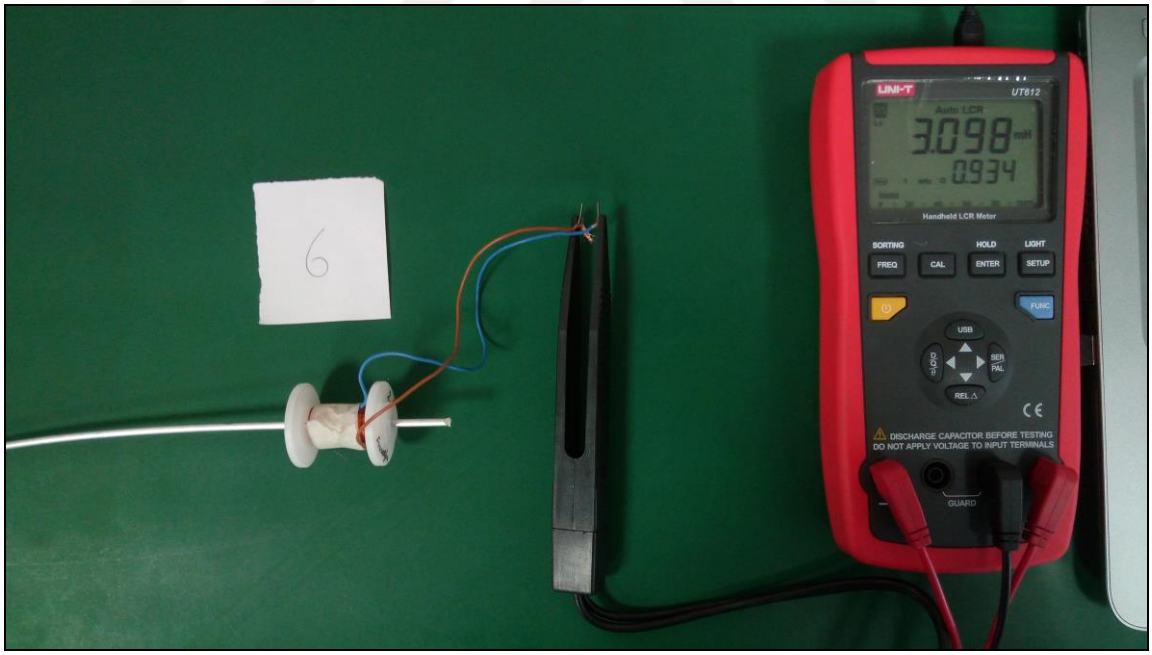
Kusur Türü	Alt Sınır Değeri (mH)	Üst Sınır Değeri (mH)
Yüzeysel Çizik Kusuru	3,085	3,309
Yüzeysel Ezik Kusuru	3,161	3,254
Çeliğe Kadar Ezik Kusuru	3,184	3,586
Derin Kusur	3,980	5,886



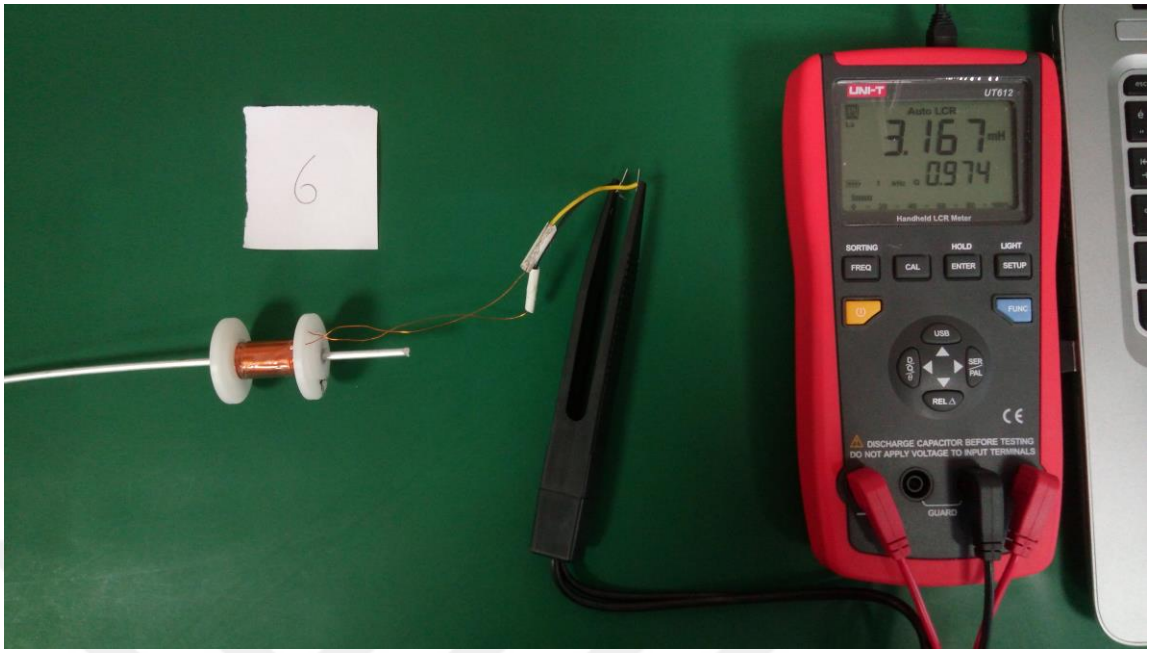
Şekil 4.13. Tasarlanan Mutlak Tip Test Bobini İndüktans Ölçümü (µH)



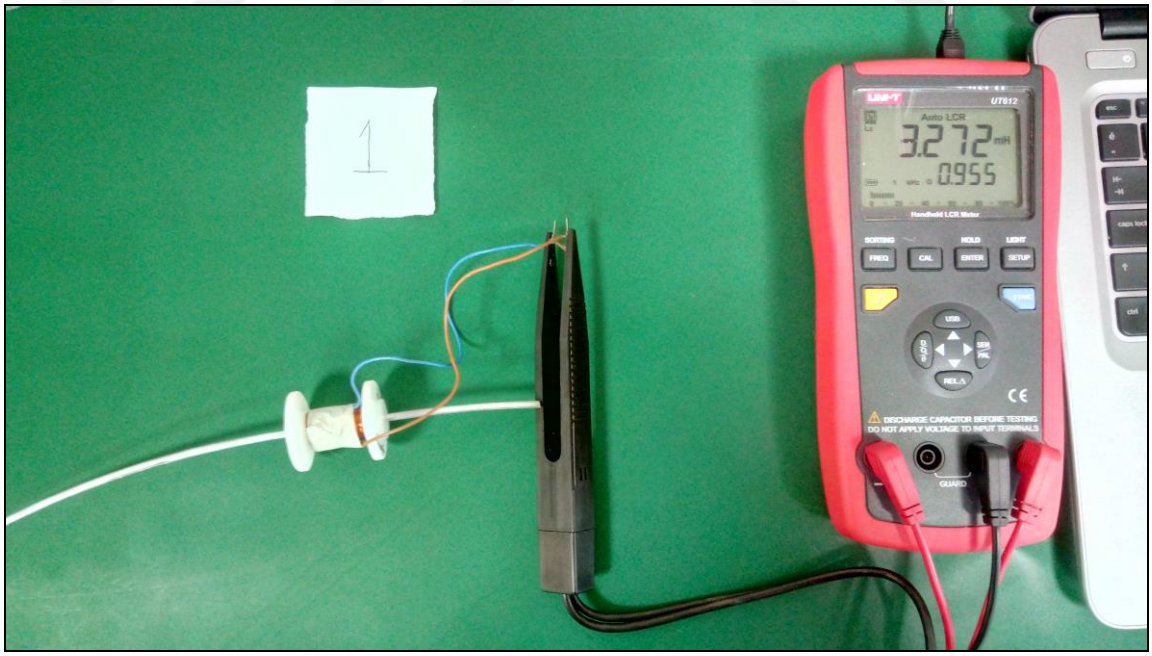
Şekil 4.14. Tasarlanan Mutlak Tip Referans Bobini İndüktans Ölçümü (µH)



Şekil 4.15. İçerisinde 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



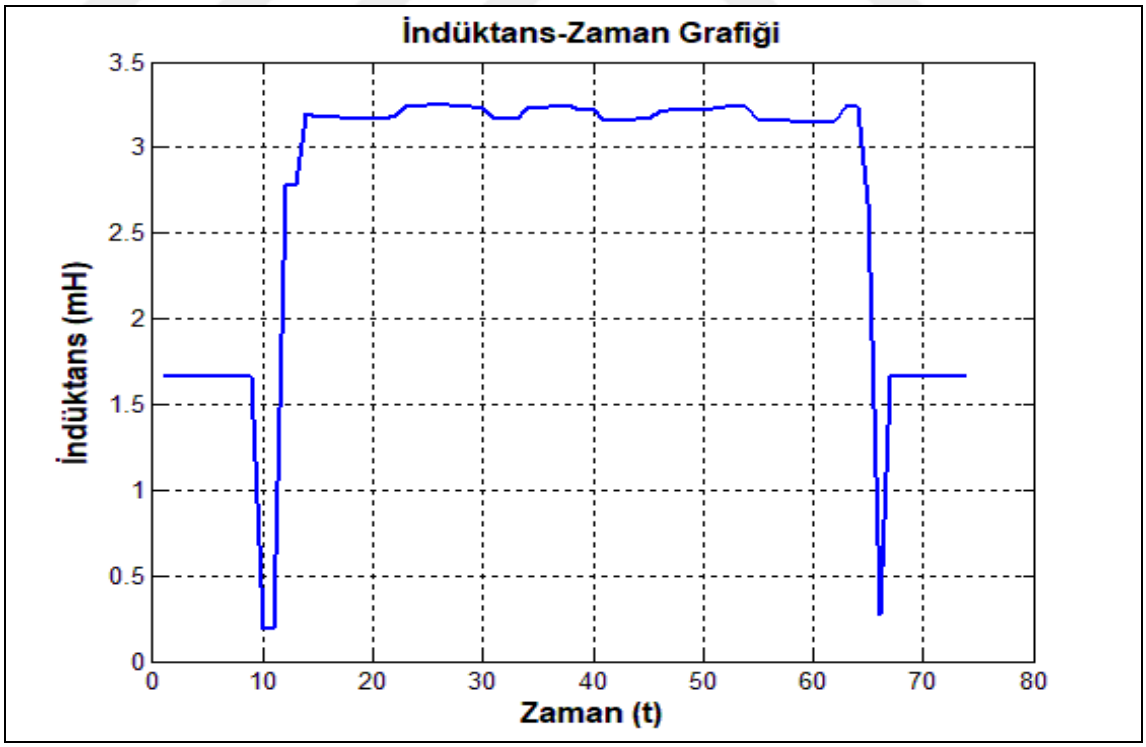
Şekil 4.16. İçerisinde 6 Numaralı Kusursuz ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



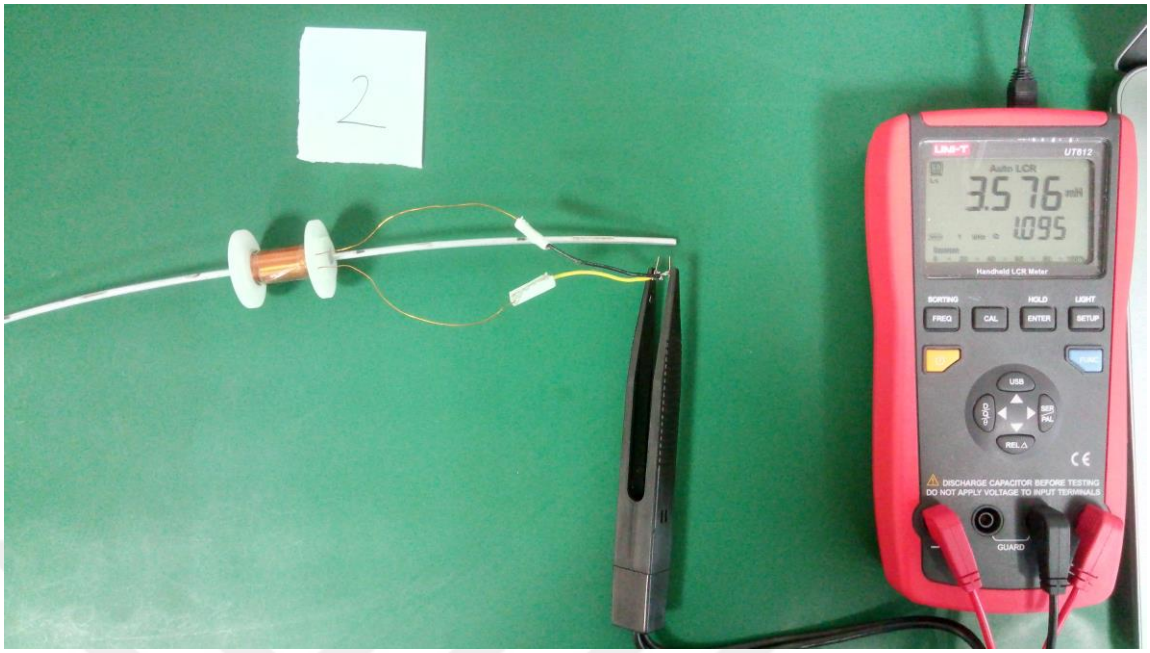
Şekil 4.17. İçerisinde 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



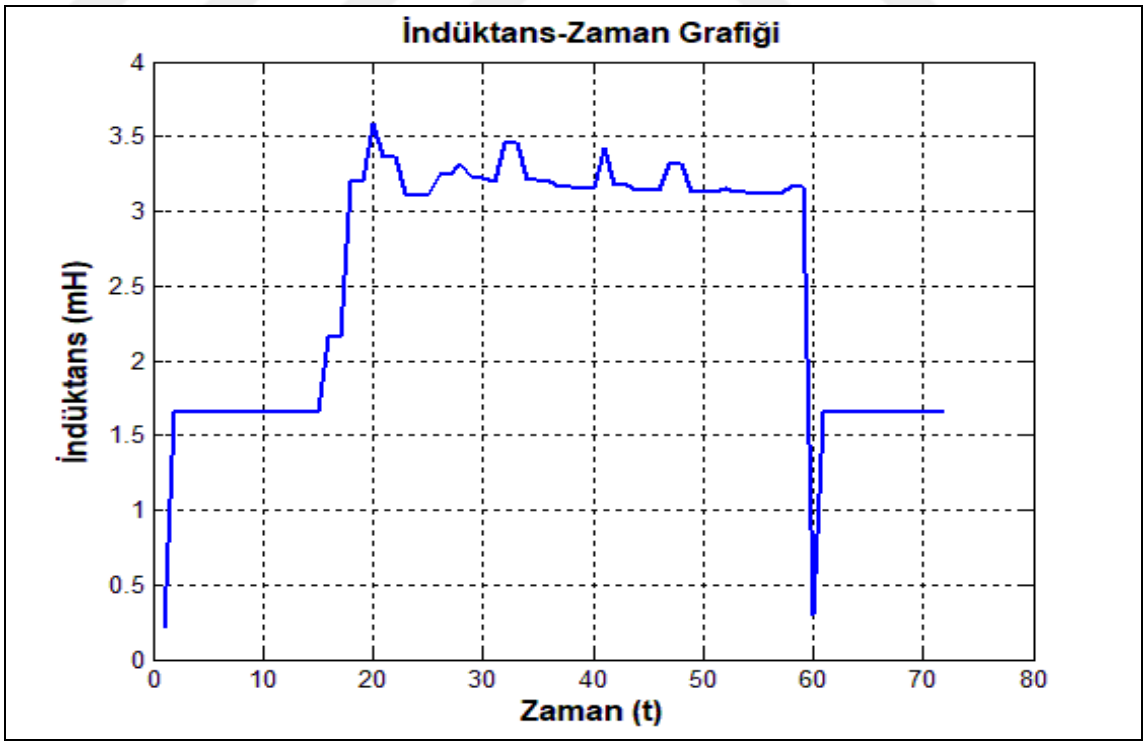
Şekil 4.18. İçerisinde 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



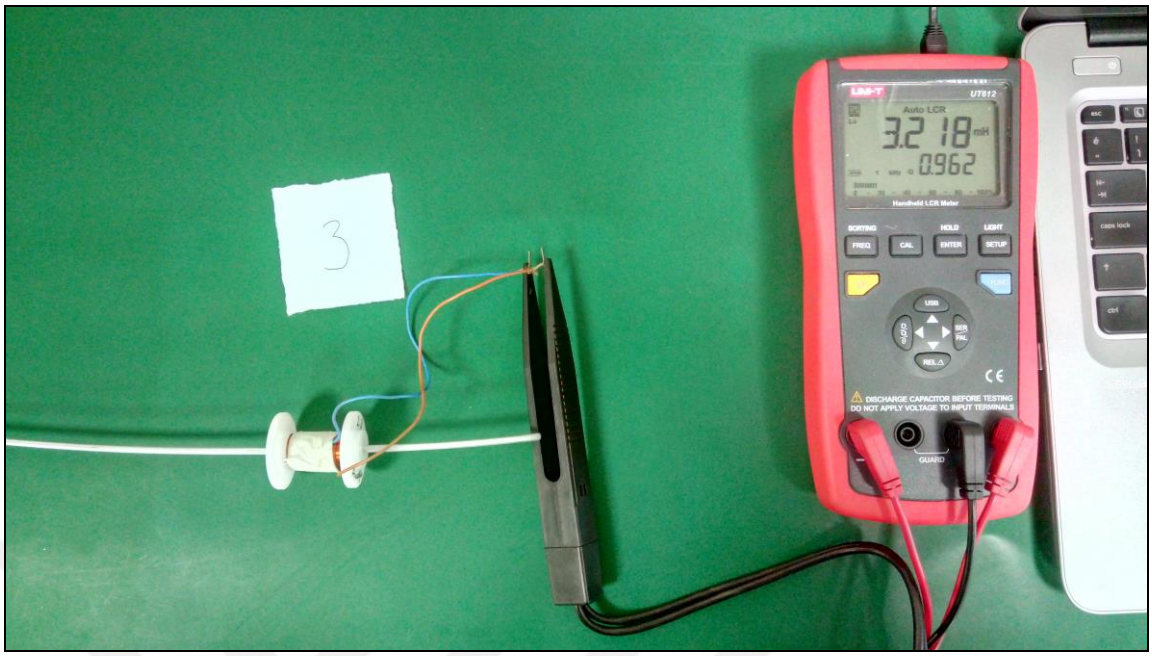
Şekil 4.19. 1 Numaralı Yüzeysel Çiziğe Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH)



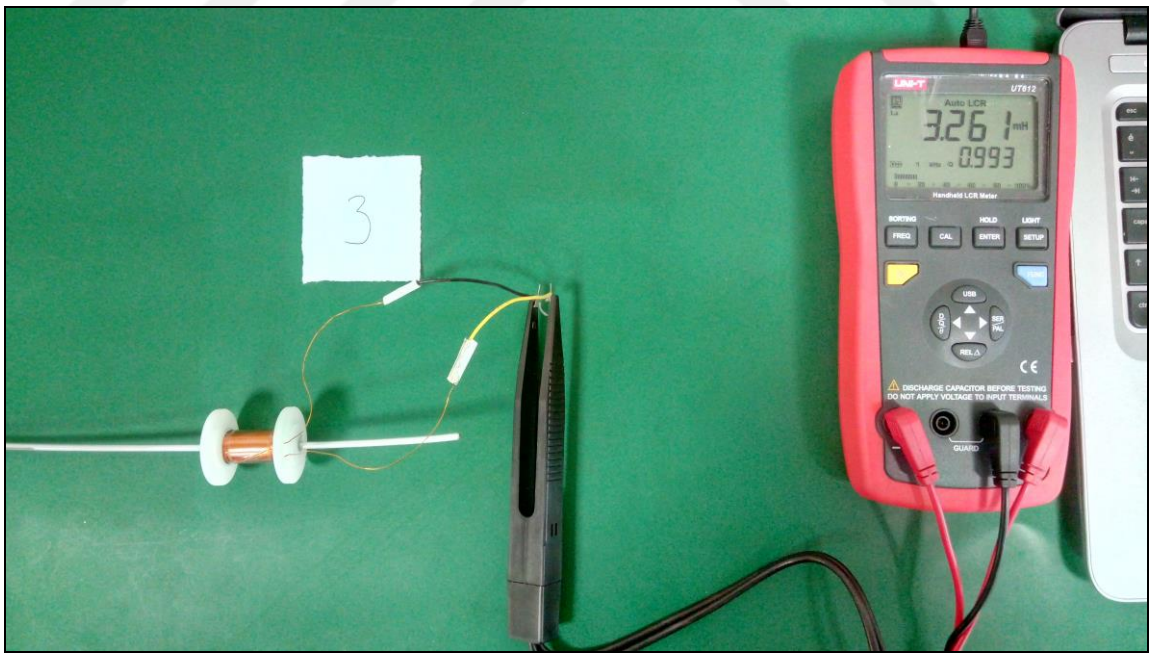
Şekil 4.20. İçerisinde 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



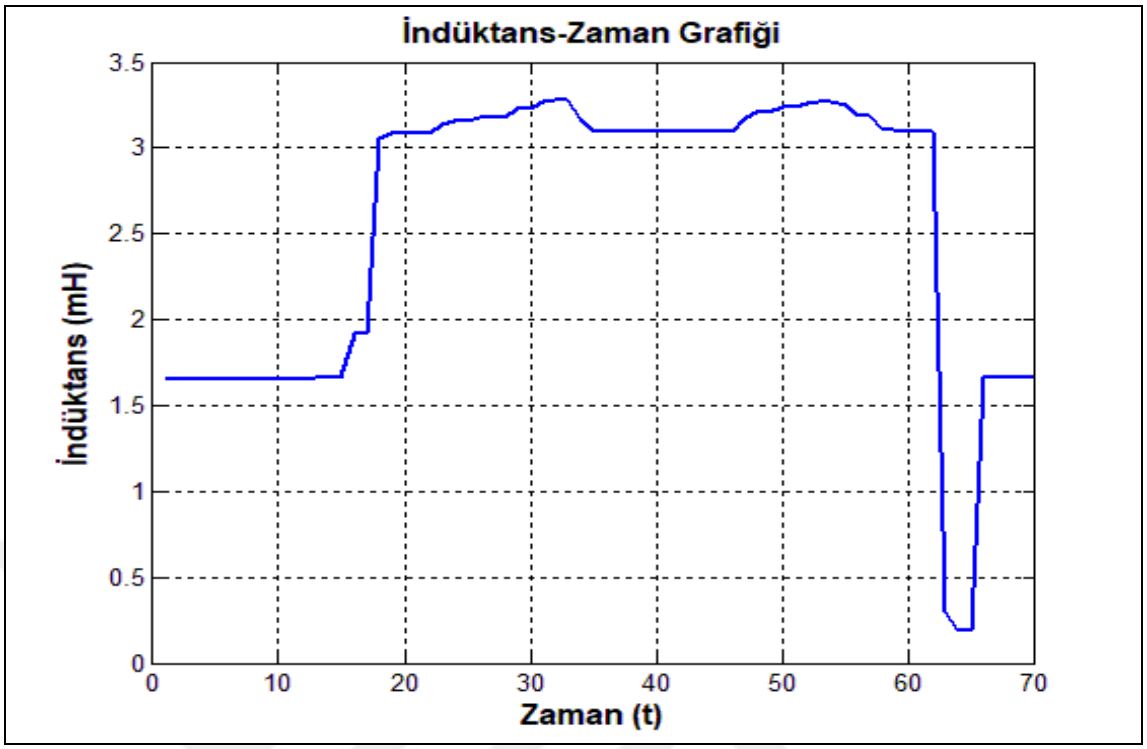
Şekil 4.21. 2 Numaralı Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusura Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH)



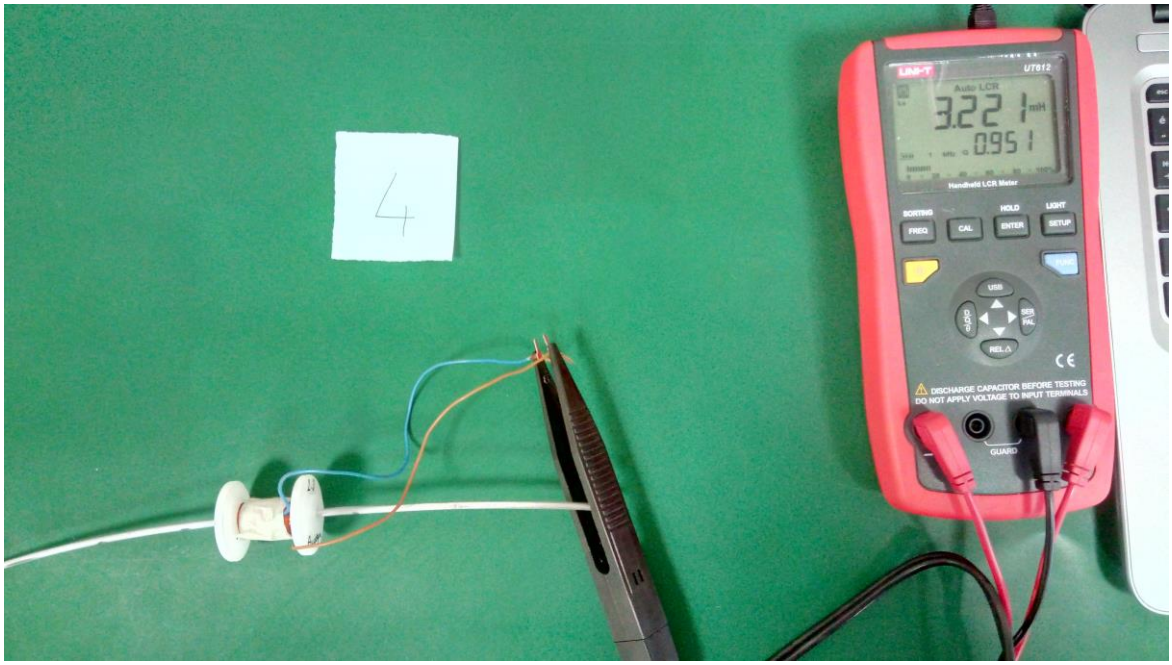
Şekil 4.22. İçerisinde 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



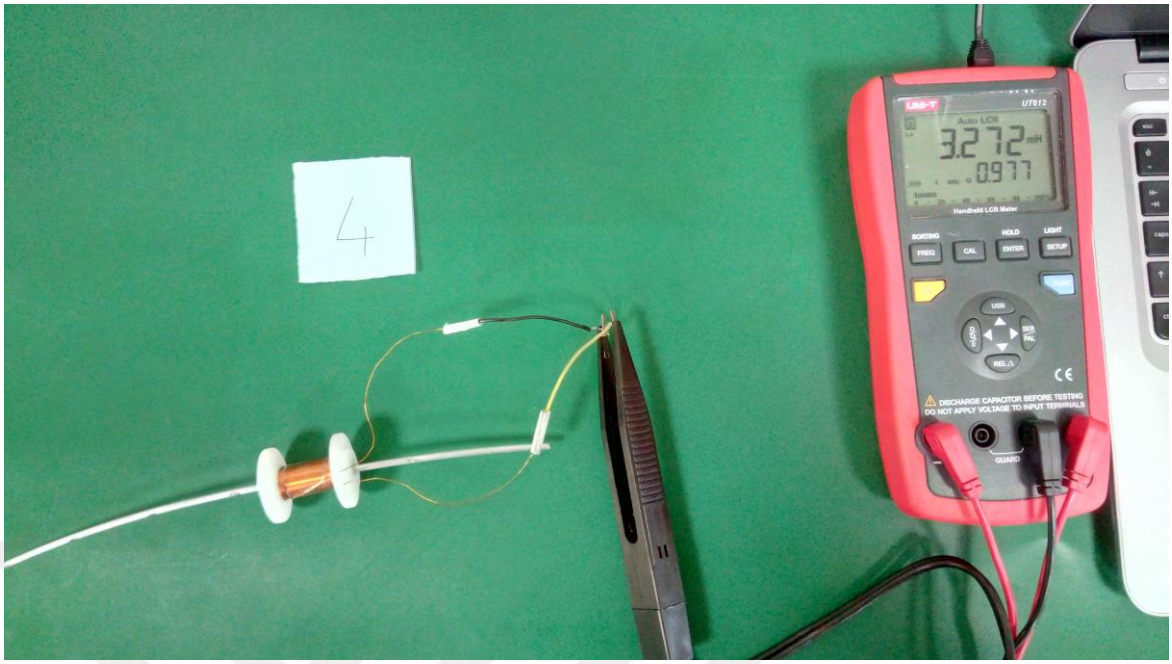
Şekil 4.23. İçerisinde 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



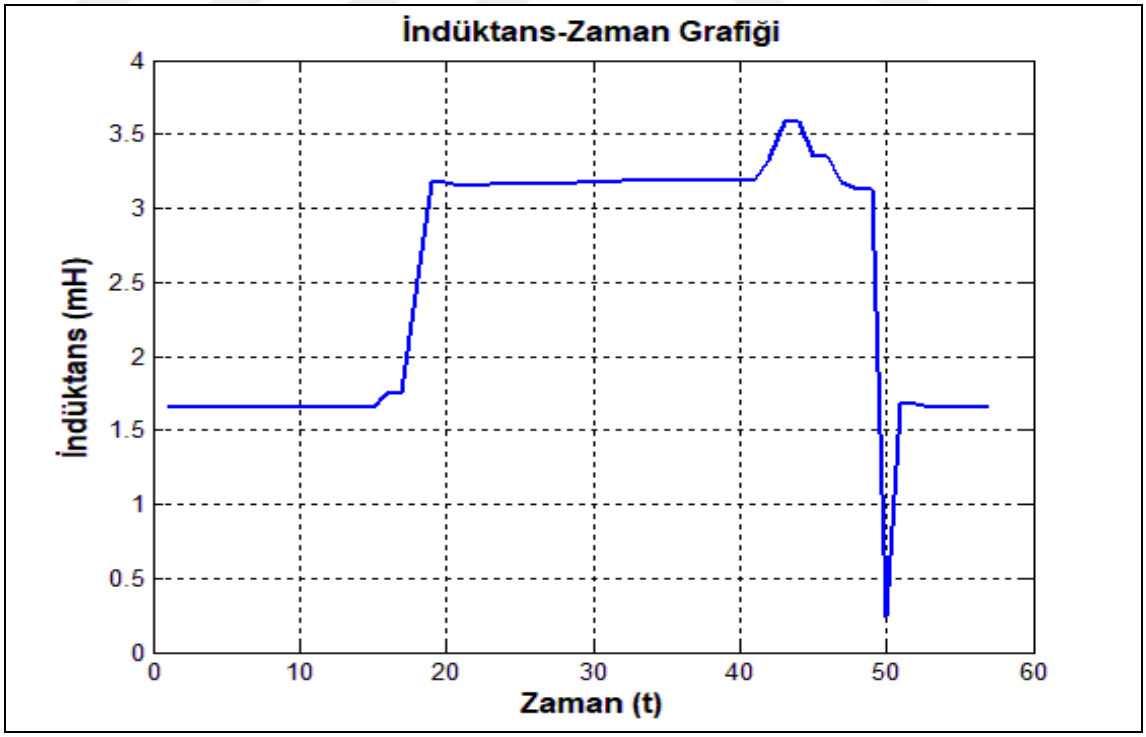
Şekil 4.24. 3 Numaralı Yüzey Uzunlamasına Hafif Derin Çiziğe Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH)



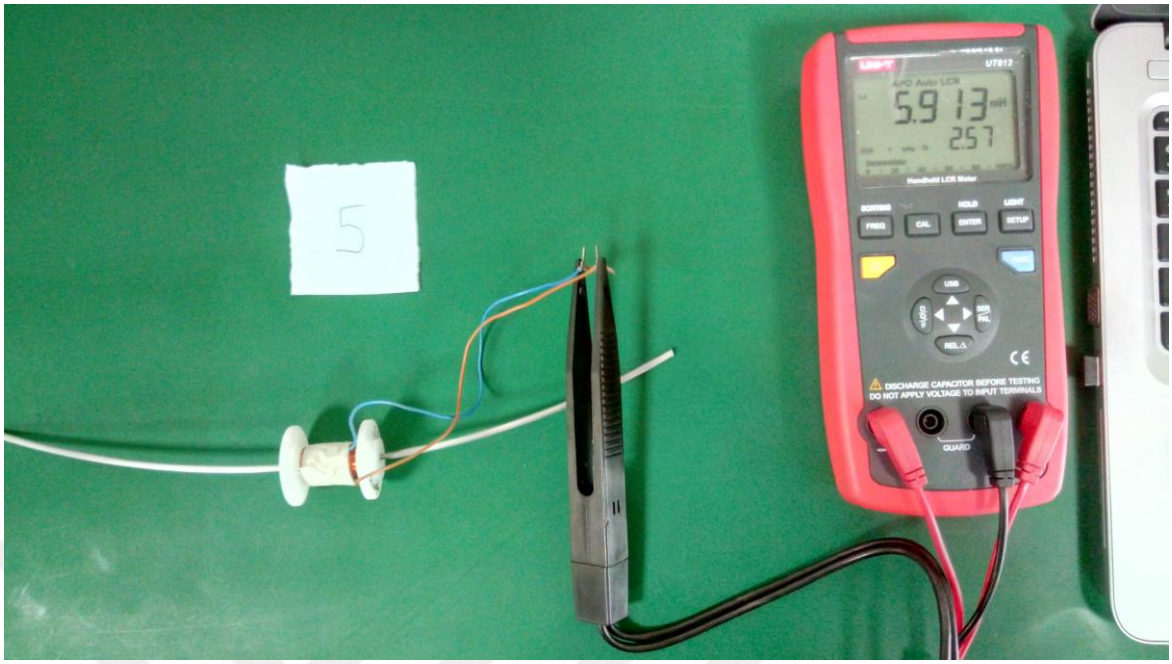
Şekil 4.25. İçerisinde 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



Şekil 4.26. İçerisinde 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



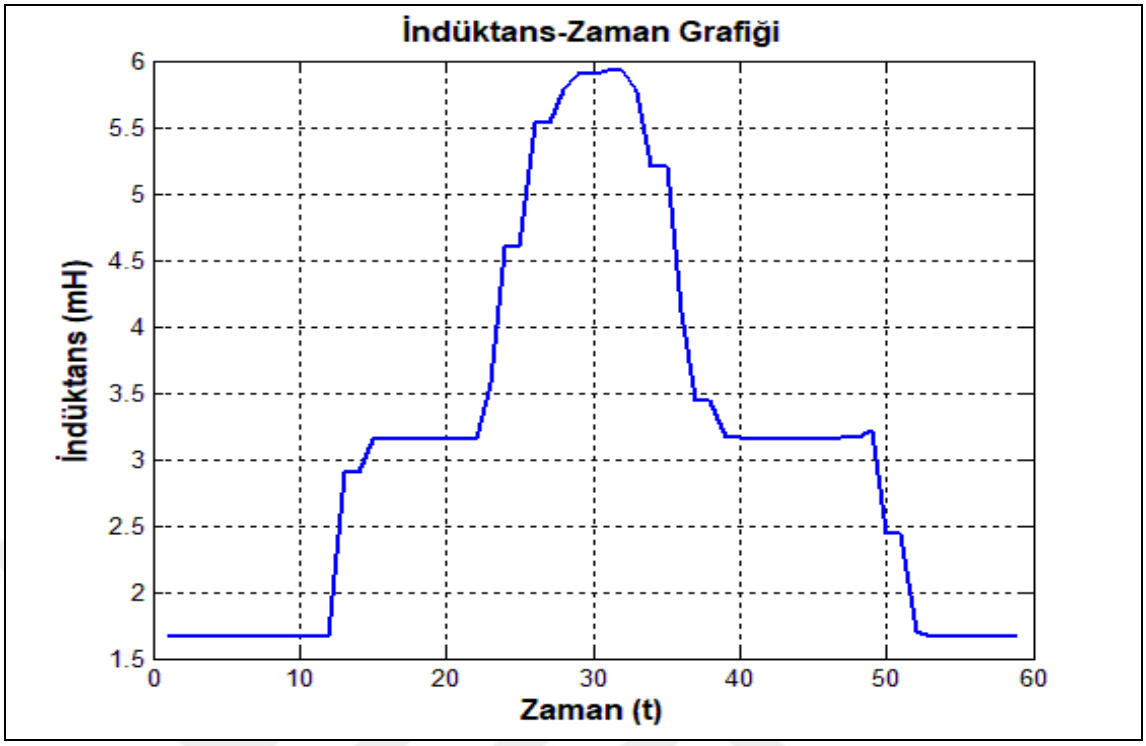
Şekil 4.27. 4 Numaralı Çelik Öze Doğru Eziğe Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH)



Şekil 4.28. İçerisinde 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Varken Test Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



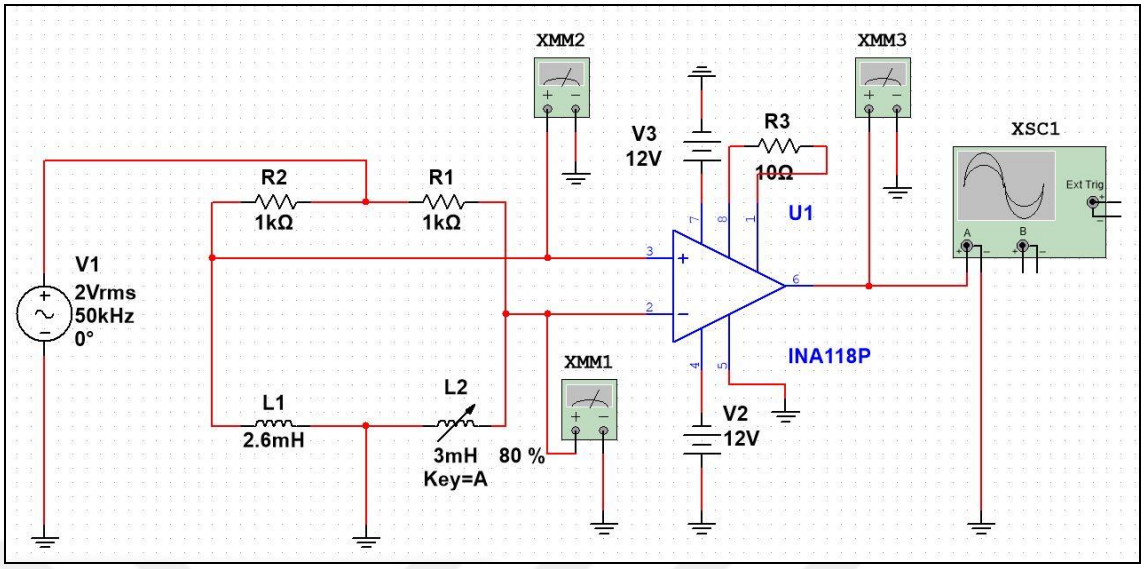
Şekil 4.29. İçerisinde 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Varken Referans Bobini İndüktans Ölçümü (mH)



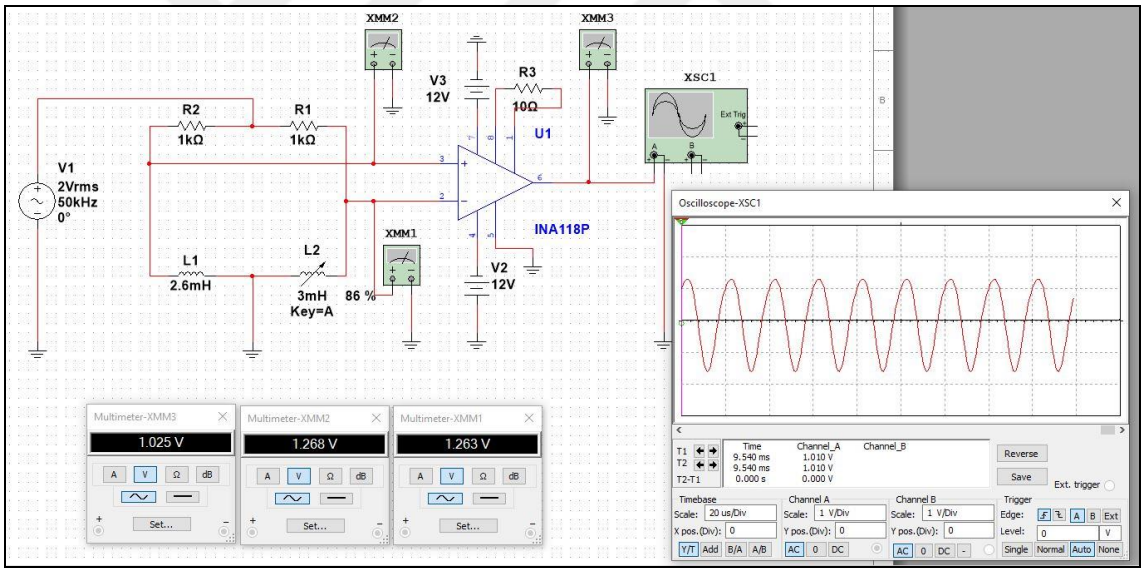
Şekil 4.30. 5 Numaralı Çelik Öze Doğru Derin Kusura Sahip ACS Tel Muayenesi Esnasında Test Bobini İndüktans Değişimi (mH)

4.4. Bobin/Sensör Empedans Köprü Devresi Kurulumu ve Ölçüm Sonuçları

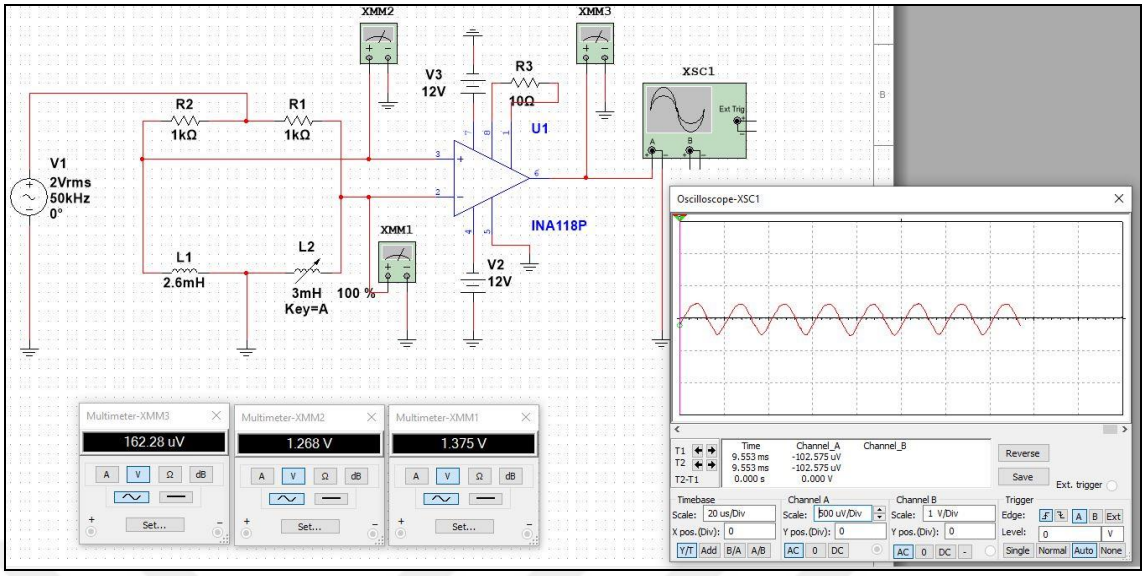
Bu başlık altında, Şekil 3.10'da verilen sensörler ile kurulmuş empedans köprü devresinin simülasyon programları ile üzerlerinde indüklenen gerilim değerleri gözlemlenerek, köprünün pratik uygulaması yapılmıştır. Kurulan pratik uygulama devresinde de bir enstrümantasyon yükseltici kullanılarak sensörler üzerine düşen mV'lar seviyesindeki voltaj değerleri karşılaştırılarak kuvvetlendirilmiş bir şekilde çıkışa verilmiştir. Kuvvetlendirici olarak INA118P Düşük Güçlü Enstrümantasyon Kuvvetlendiricisi kullanılmıştır. Simülasyon için muayene esnasında indüktans değerleri değişen sensörleri temsil eden ayarlı indüktörler kullanılmıştır. Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de, kurulan empedans köprü devresinin şematiği ve simülasyon sonucu görülmektedir.



Şekil 4.31. Empedans Köprü Devresi Şematiği



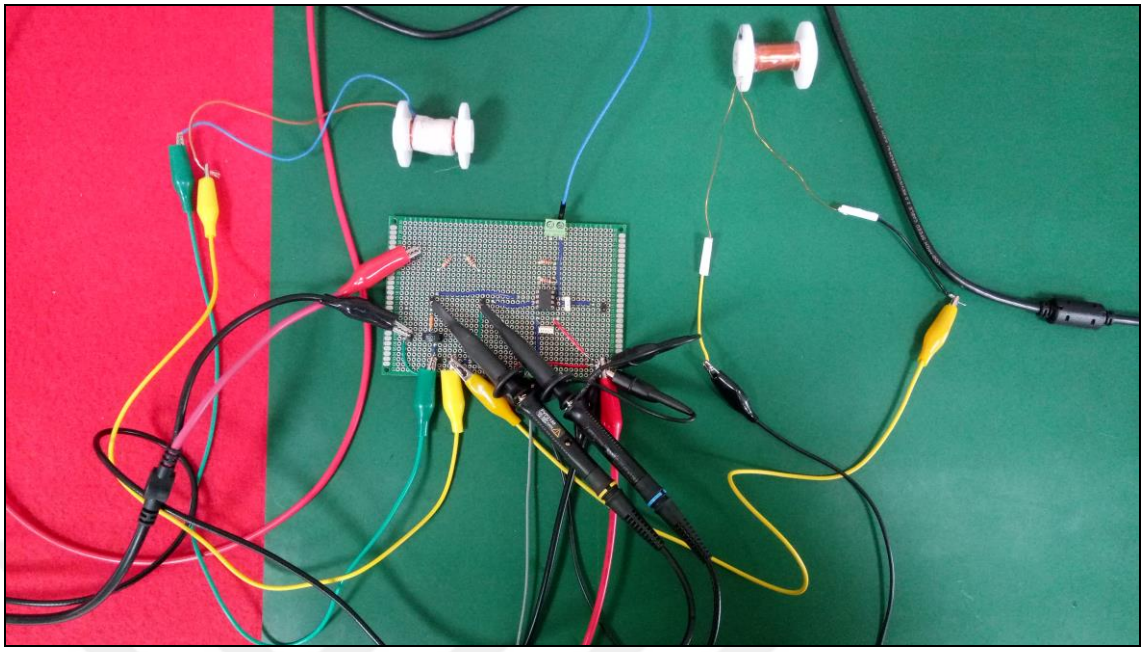
Şekil 4.32. Empedans Köprüsü Denge Durumu



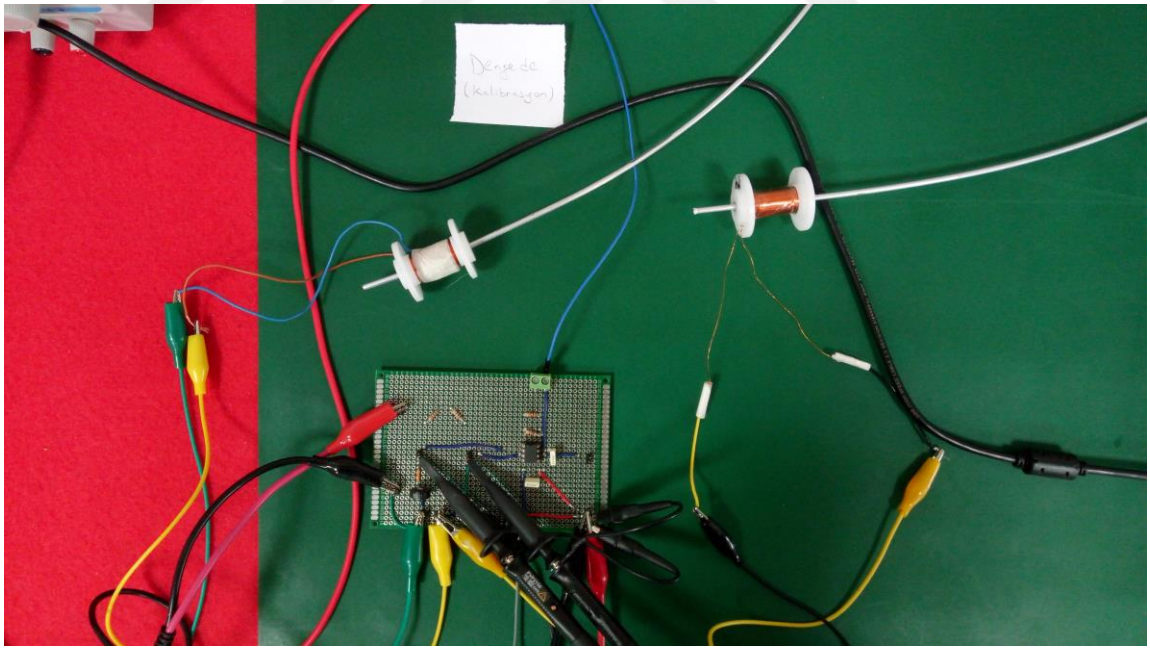
Şekil 4.33. Empedans Köprüsü Dengesinin Bozulma Durumu

Devre şemasında yer alan L_1 indüktörü referans bobinini/sensörünü, L_2 ayarlı indüktörü ise test bobinini/sensörünü temsil etmektedir.

Devre simülasyonlarından, kusurlu teller üzerinde hata olması durumunda indüklenen voltajın değişimi görülmüştür. Simülasyonu gerçekleştirilen empedans köprü devresi bir delikli plaket üzerine kurularak, gerçekte bu devrenin verdiği sonuçlar gözlemlenmiştir. Köprü çıkışında oluşan gerilim seviyelerinin rahatlıkla gözlenebilmesi için kullanılan kuvvetlendirici, +/- 5 Volt ile beslenmiştir. Köprü devresine uygulanan AC gerilim seviyesi 0,5 Vpp ve frekansı ise 50 kHz'dir. Şekil 4.34 ve 4.35'de kurulan bu köprü devresi görülmektedir.



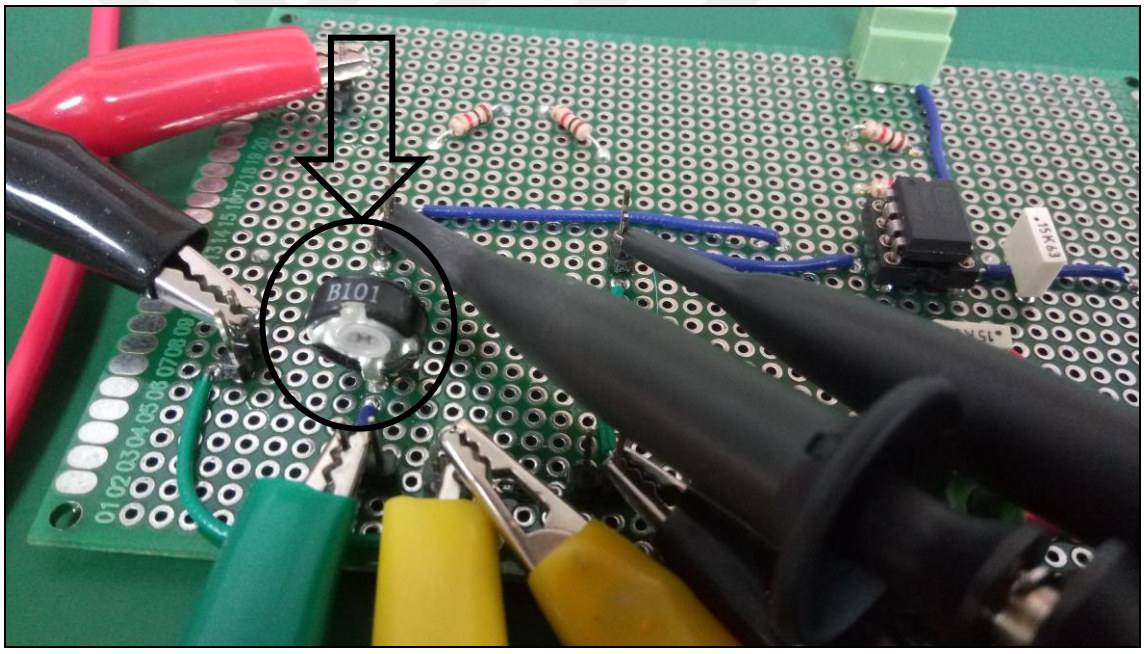
Şekil 4.34. Empedans Köprü Devresi Uygulaması



Şekil 4.35. Sensörler İçerisinde Kusursuz ACS Teller Varken Dengeye Getirilen Empedans Köprü Devresi

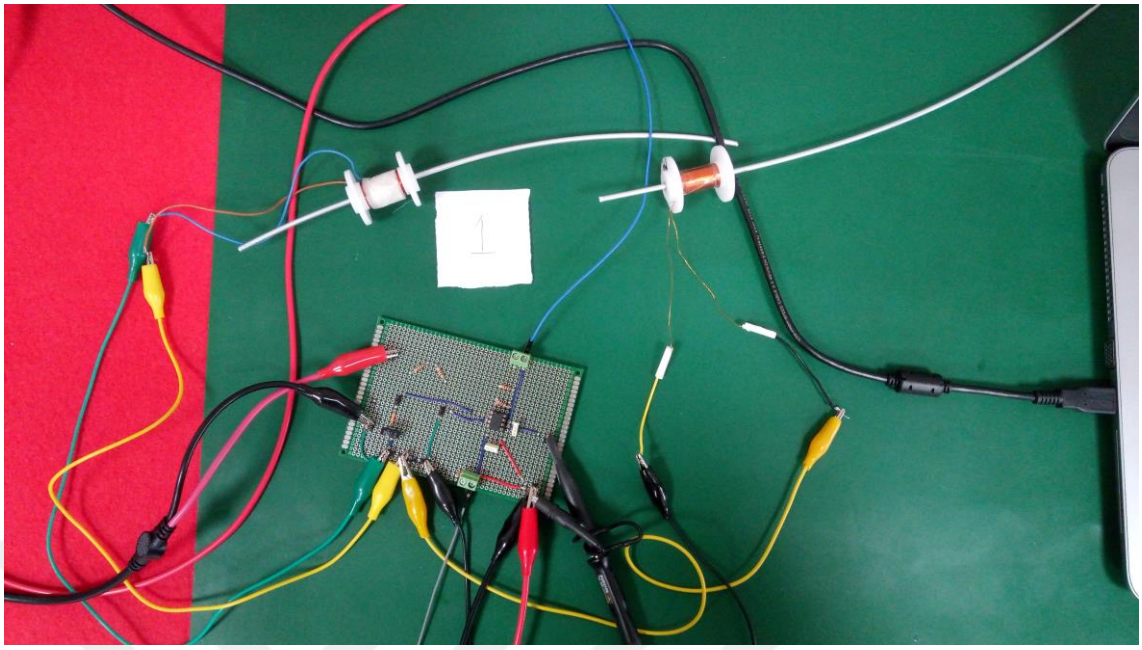
4.4.1. Empedans Köprü Devresi Kalibrasyonu

Köprü devresi kurulduktan sonra, Bölüm 3'te de belirtildiği üzere dengeye getirilir. Köprü devresinde değişken empedans değerini test bobini sağlamaktadır. Bu empedans değişkenliğinin etkisi ölçüm esnasında bir kusura denk gelindiğinde görülmektedir. Ölçüme başlanmadan önce test bobini ve referans bobini içerisinde hiçbir kusur içermeyen ACS teller yer alır. Köprü devresi alt kollarında ise ayarlanabilir direnç veya dirençler yer alır. Kalibrasyon aşamasında köprü çıkışlarına bir voltmetre veya osiloskop bağlanarak, ayarlanabilir direnç değerleri değiştirilerek empedans uyumluluğu sağlanır ve köprü dengeye getirilmiş olur. Kalibrasyon ayarı, Şekil 4.36'da görüldüğü üzere köprü üzerinde yer alan trimpot ayarlanarak yapılır.

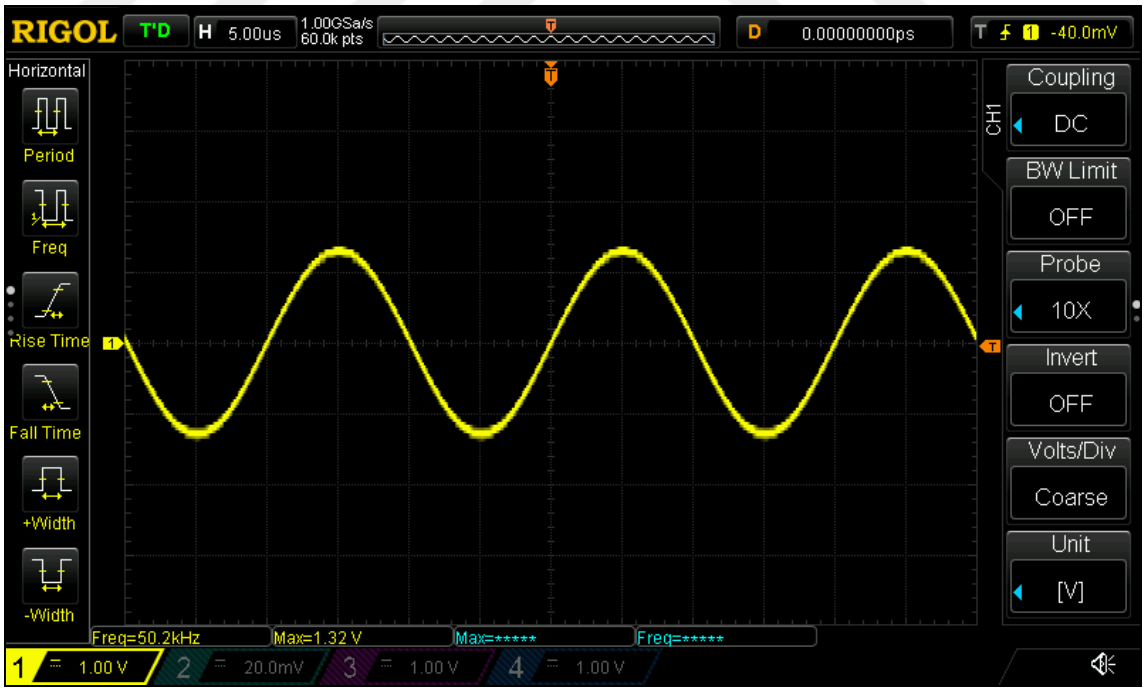


Şekil 4.36. Empedans Köprü Devresi Kalibrasyon Ayarı

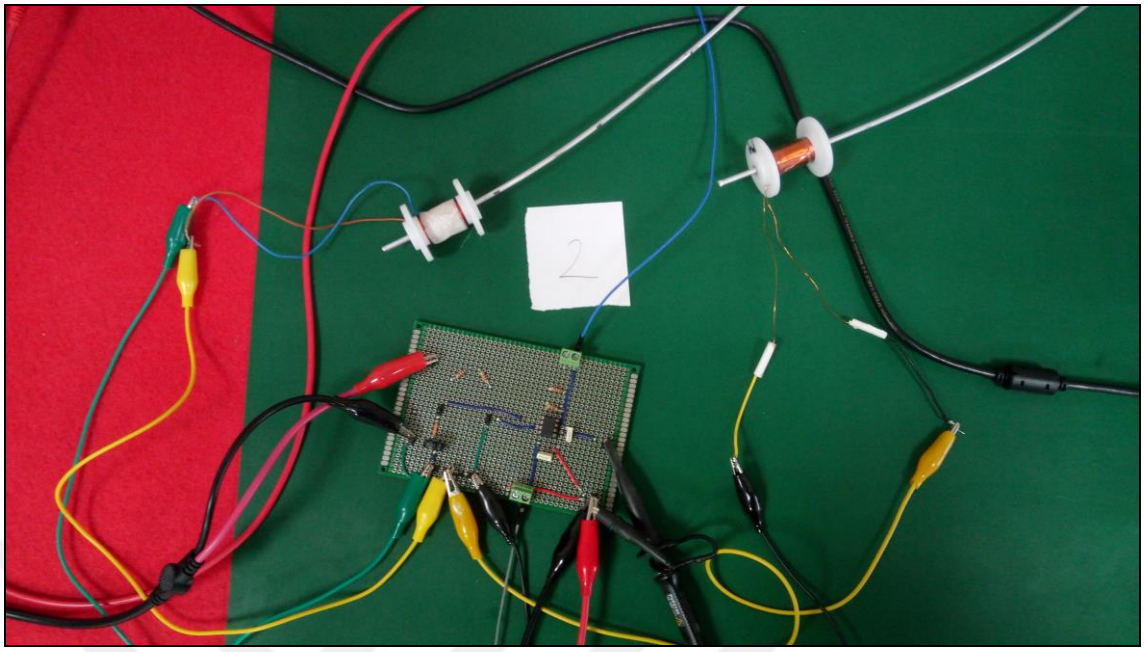
Şekil 4.37 ile 4.46 arasındaki verilen şekillerde, şeması oluşturulan empedans köprü devresinin uygulaması gerçekleştirilmiş ve toplanan numune teller bobin içerisindeyken indüklenen voltaj değişimi kuvvetlendirici çıkışından osiloskop ile gözlemlenmiştir.



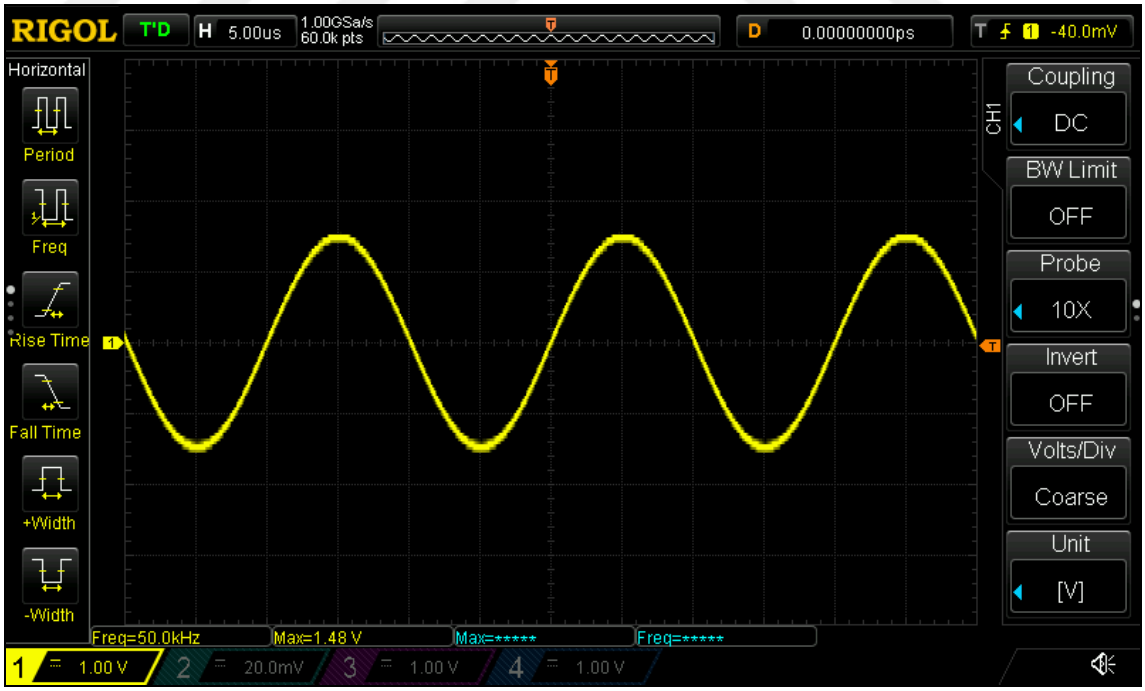
Şekil 4.37. Test Bobini İçerisinde 1 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi



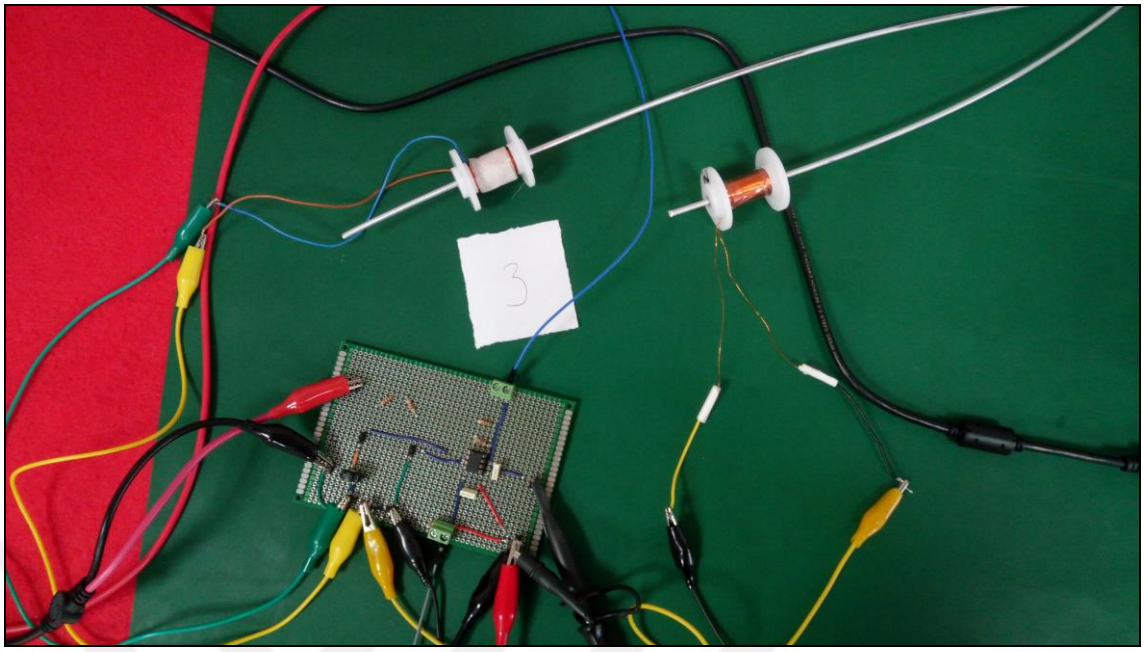
Şekil 4.38. Test Bobini İçerisinde 1 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali



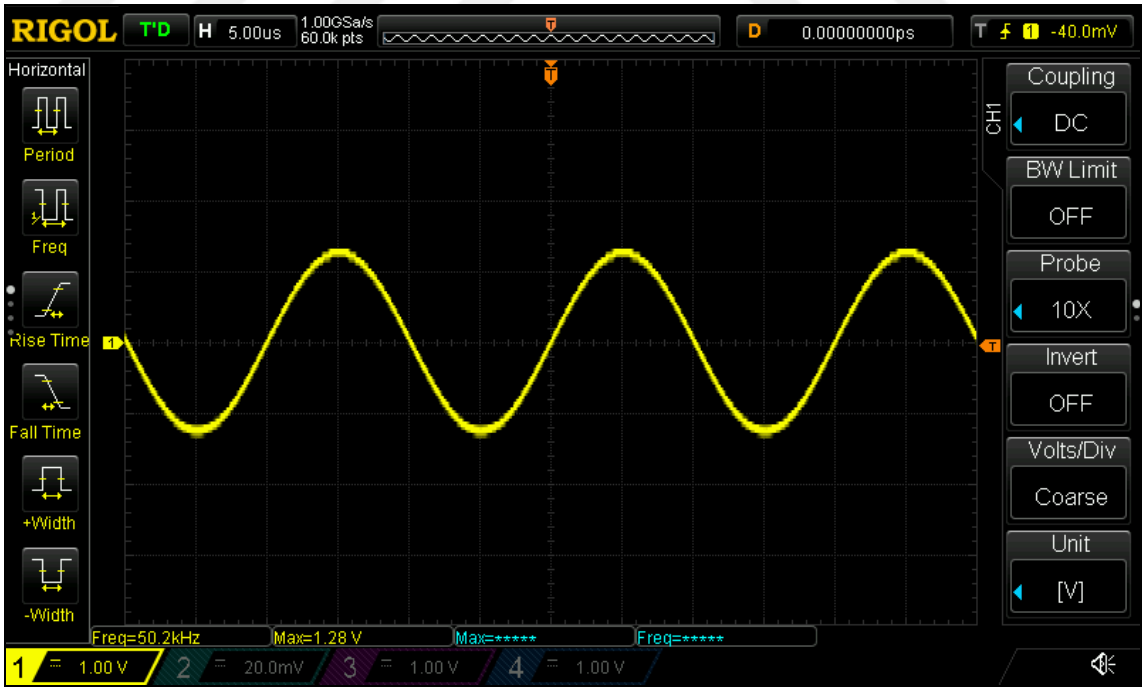
Şekil 4.39. Test Bobini İçerisinde 2 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi



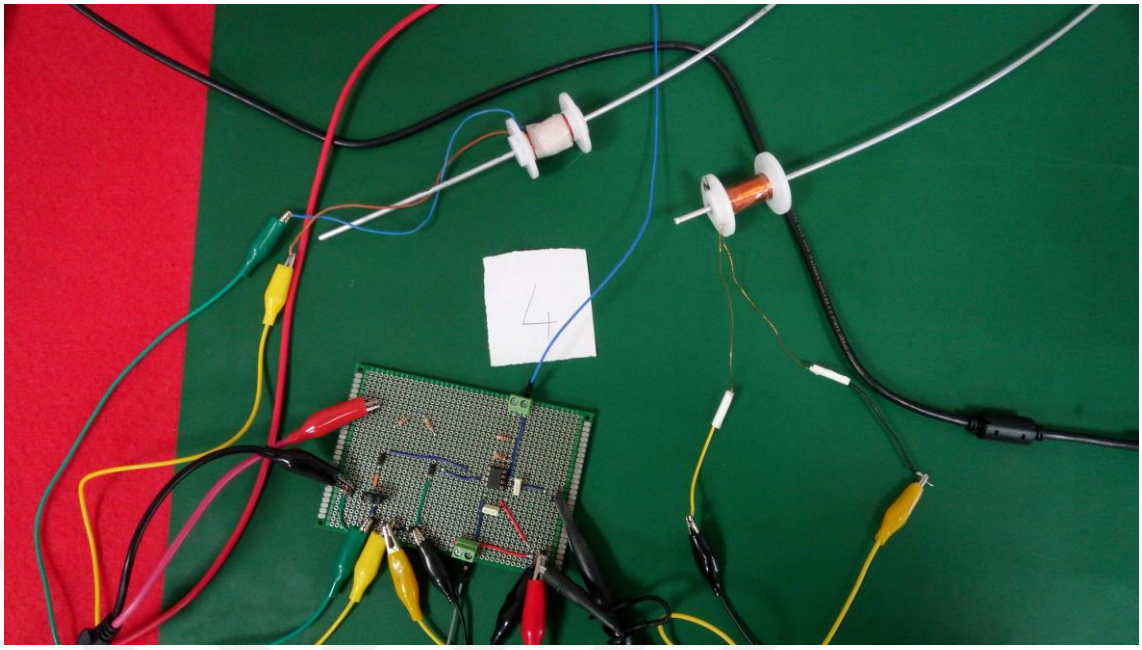
Şekil 4.40. Test Bobini İçerisinde 2 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali



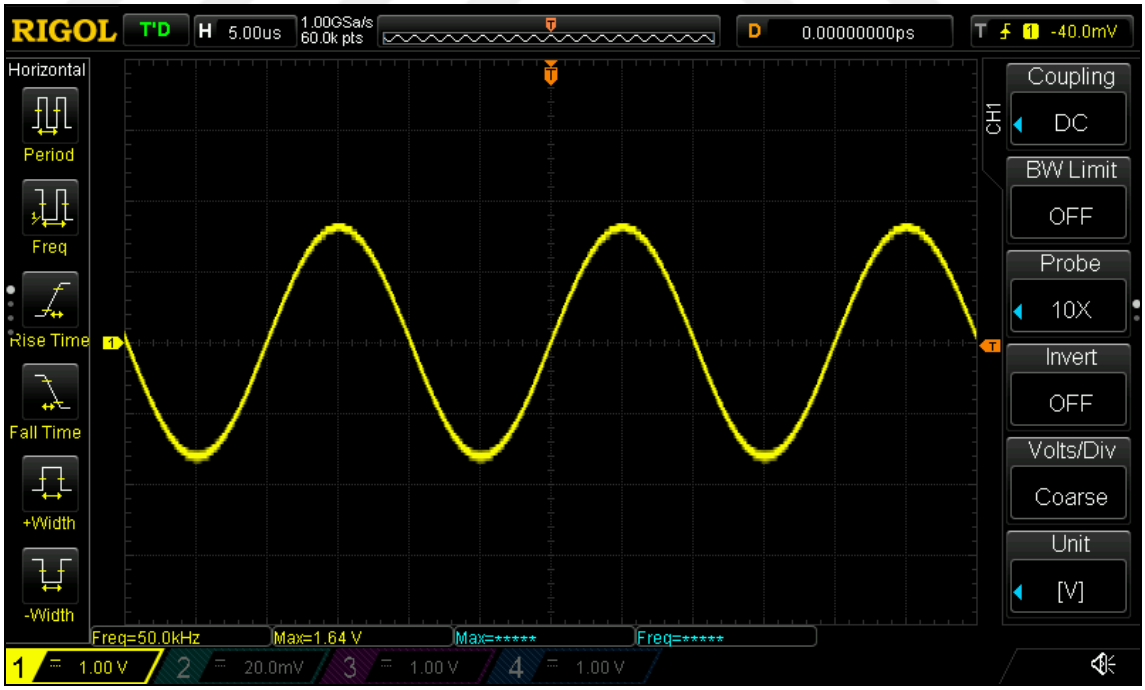
Şekil 4.41. Test Bobini İçerisinde 3 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi



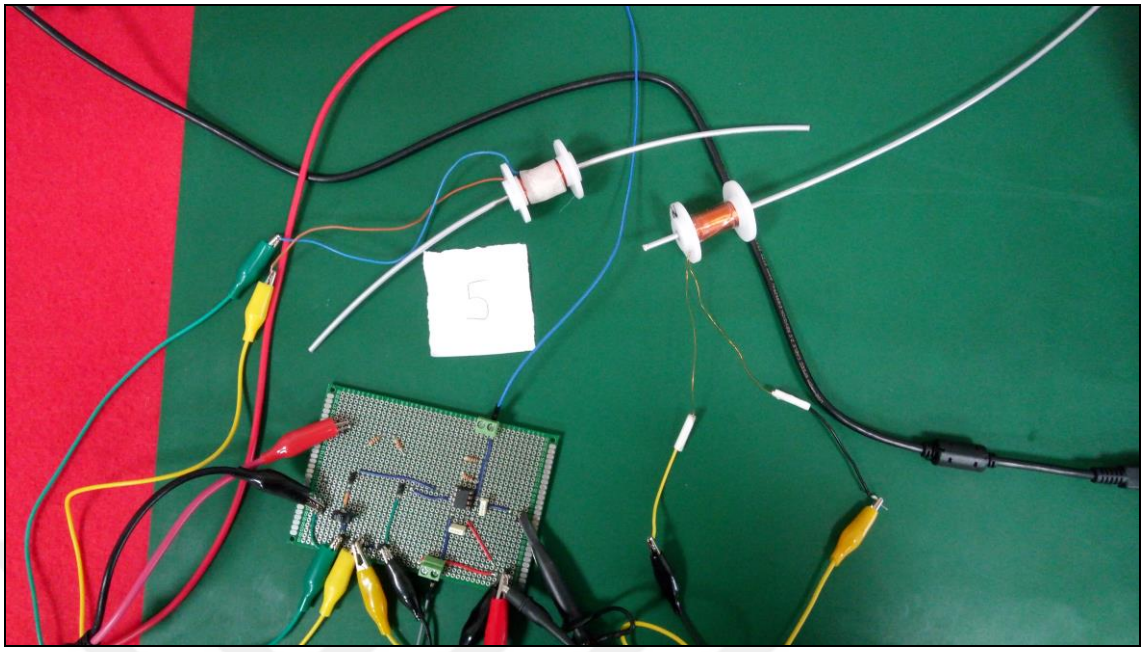
Şekil 4.42. Test Bobini İçerisinde 3 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali



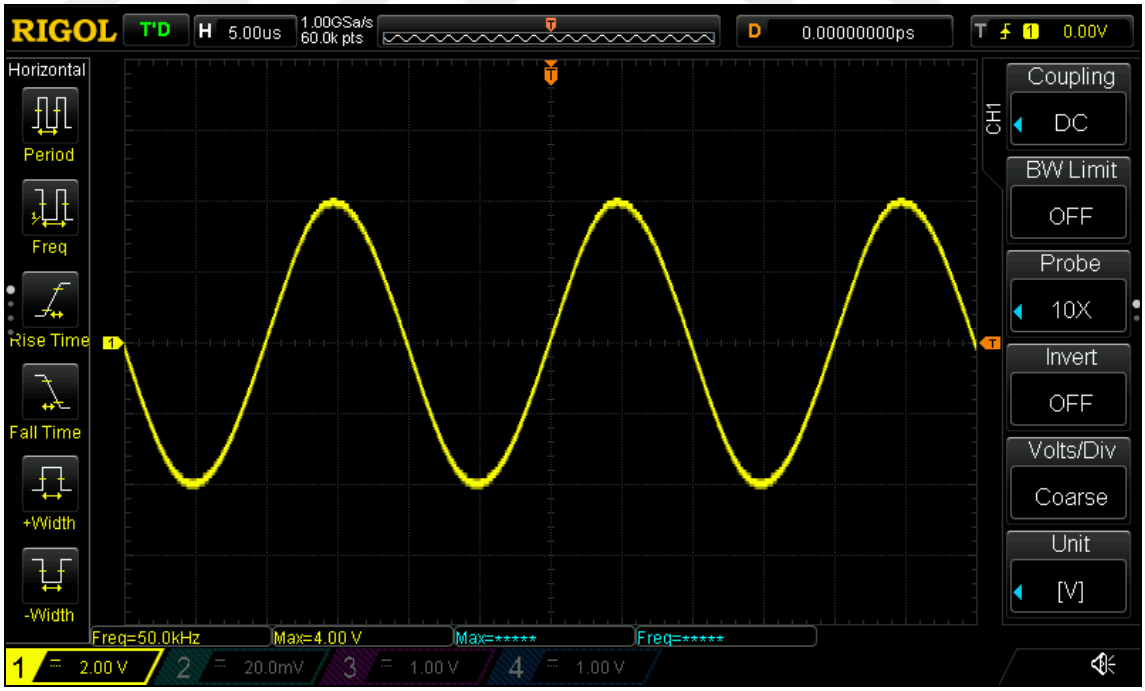
Şekil 4.43. Test Bobini İçerisinde 4 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi



Şekil 4.44. Test Bobini İçerisinde 4 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali



Şekil 4.45. Test Bobini İçerisinde 5 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Empedans Köprü Devresi



Şekil 4.46. Test Bobini İçerisinde 5 Numaralı Numune İletken ve Referans Bobini İçerisinde Kusursuz ACS Tel Varken Kuvvetlendirici Çıkış Sinyali

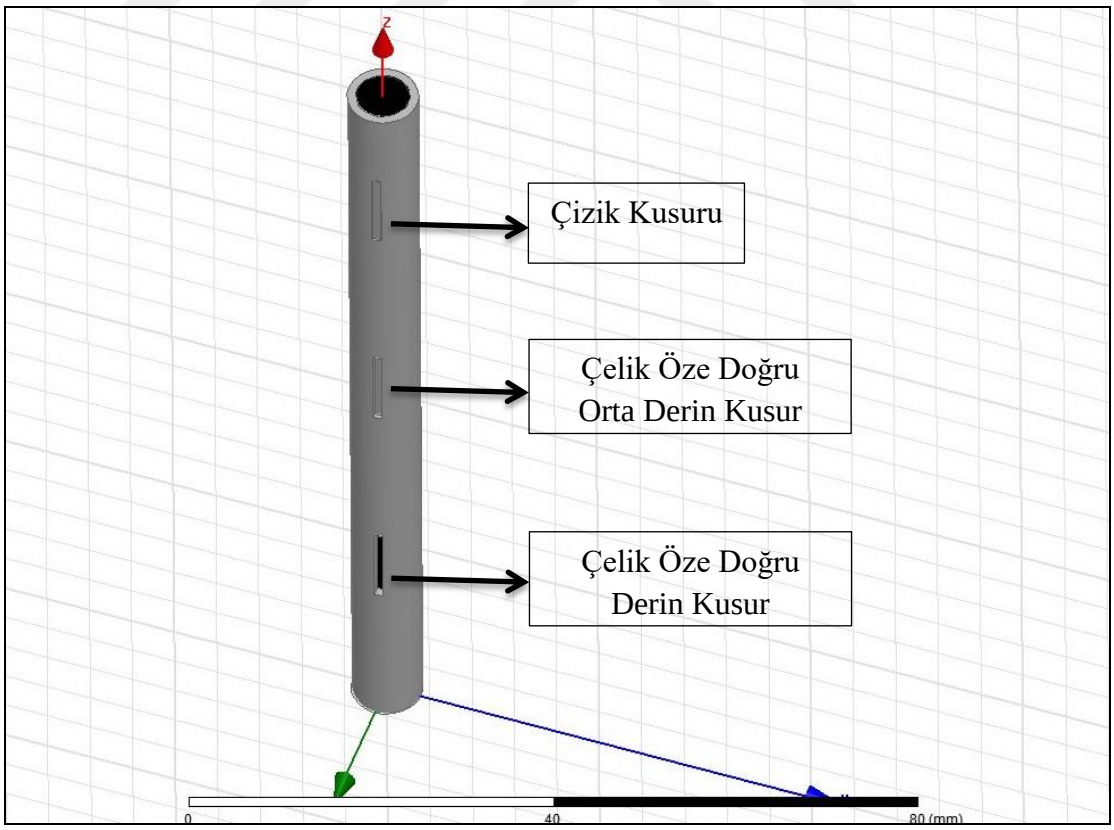
4.5. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA)

Sonlu elemanlar analizi için ilk önce 100 mm uzunluğa ve 4 mm çapa sahip bir ACS tel 3D olarak çizilmiştir. Ardından tel yüzeyinde olası kusurlar oluşturulmuştur. Kusurların özellikleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 4.4. ACS Tel Yüzeyinde 3D Eksende Oluşturulan Kusurların Nitelikleri

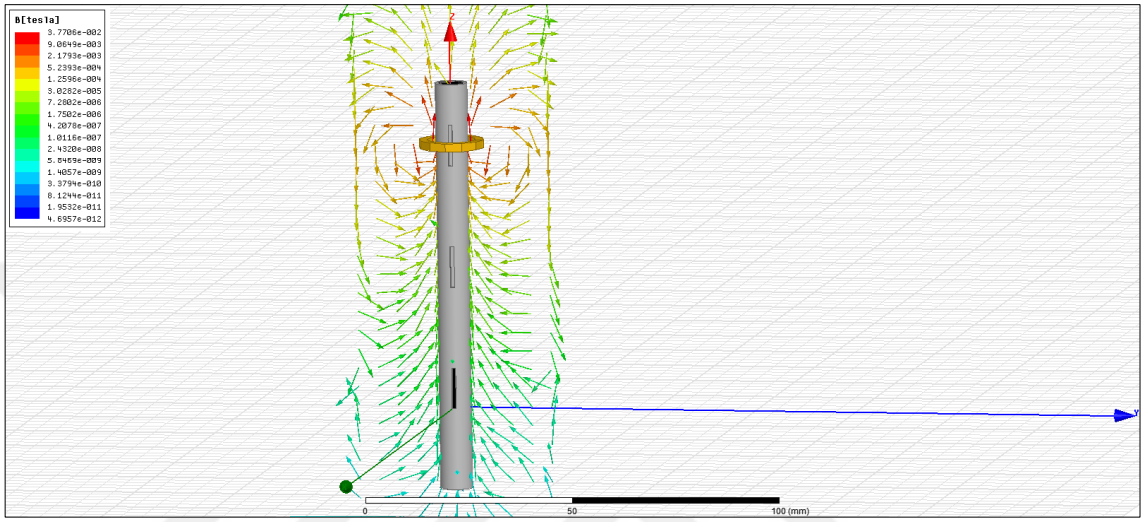
Kusur Türü	Kusur Derinliği	Kusur Uzunluğu
Çizik Kusuru	0.3 mm	10 mm
Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur	0.6 mm	10 mm
Çelik Öze Doğru Derin Kusur	1 mm	10 mm

Şekil 4.47'de, oluşturulan kusurlu ACS tel görülmektedir.

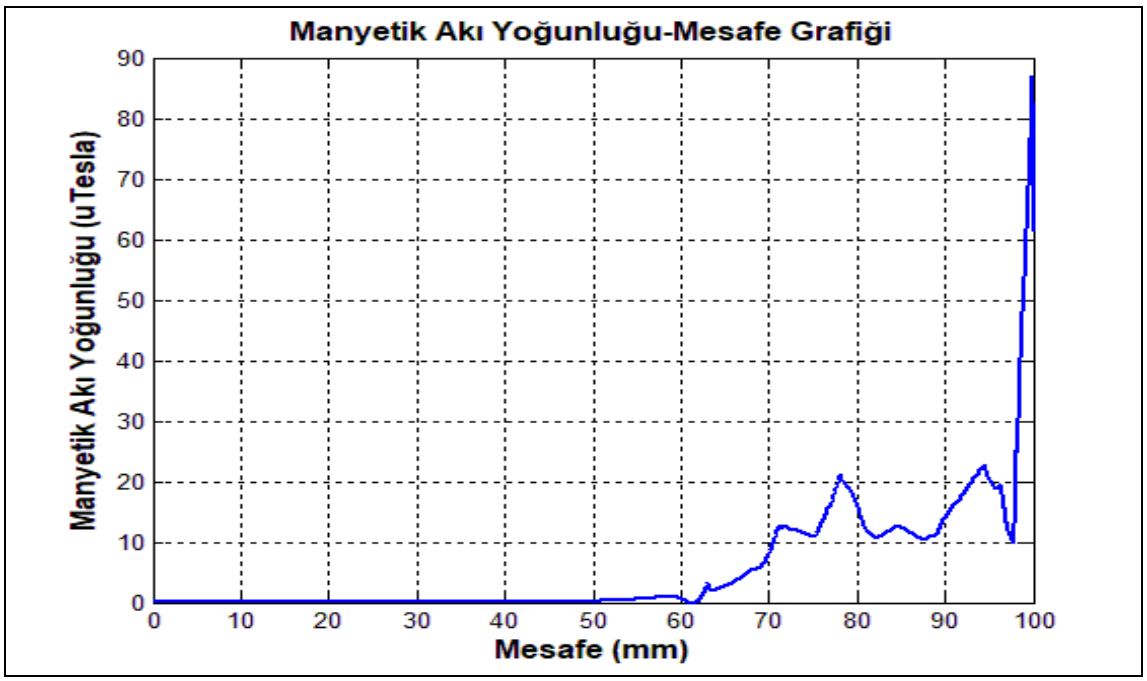


Şekil 4.47. 3D ACS Tel Modeli

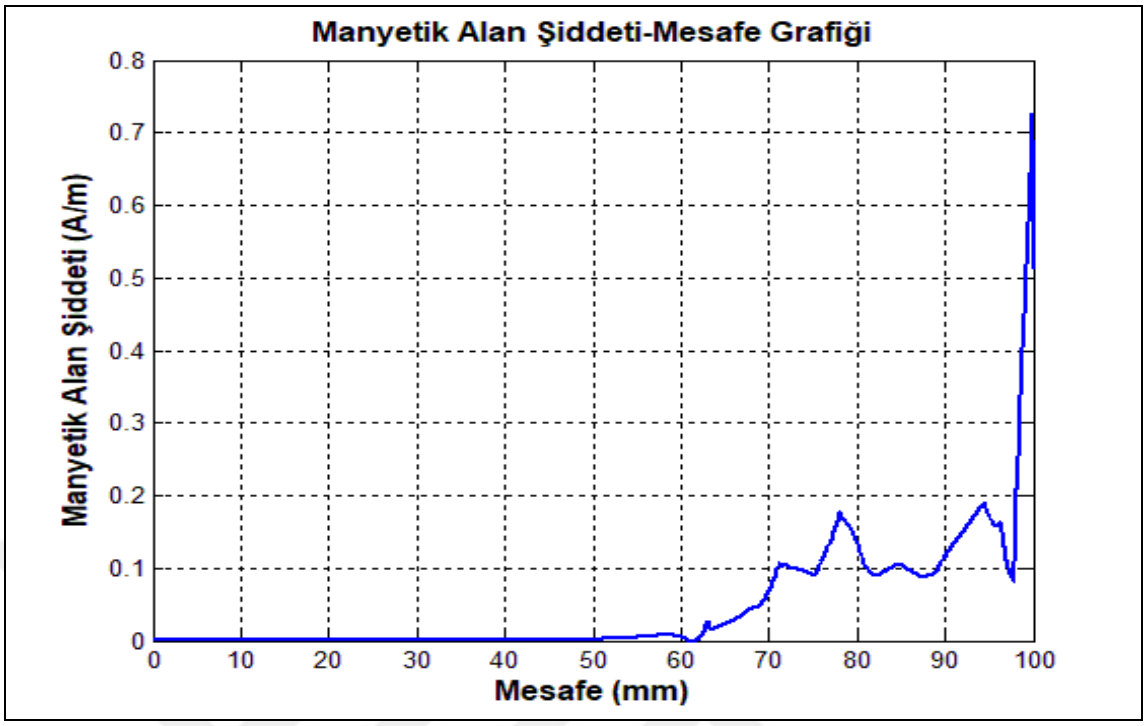
Modellenen 3D ACS telin bir bobin ile SEA analizleri yapılarak, manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alanın kusurlar üzerindeki değişimi görülmüştür. Şekil 4.48 ile 4.56 arasındaki şekillerde analiz sonuçları yer almaktadır.



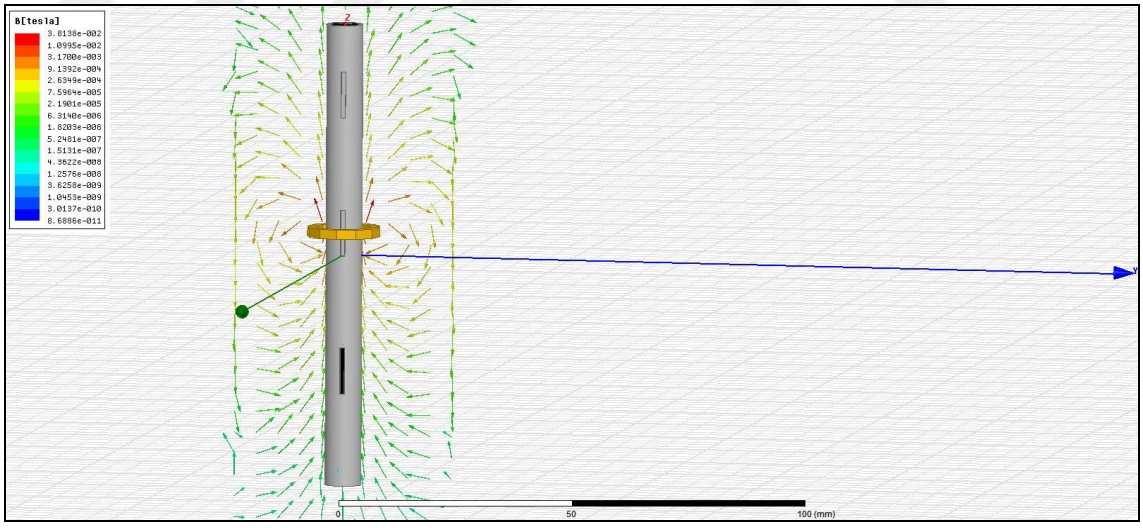
Şekil 4.48. Çizik Kusuru Üzerindeki Manyetik Akı Yoğunluğu Çizgileri



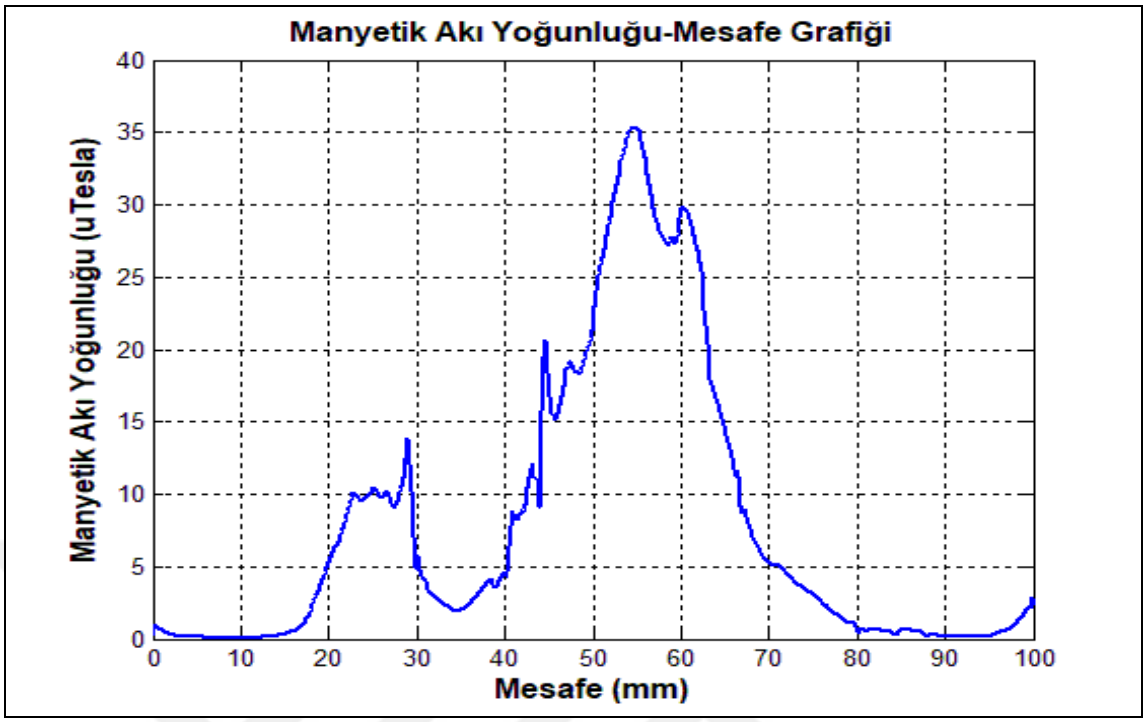
Şekil 4.49. Çizik Kusuru Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Eğrisi



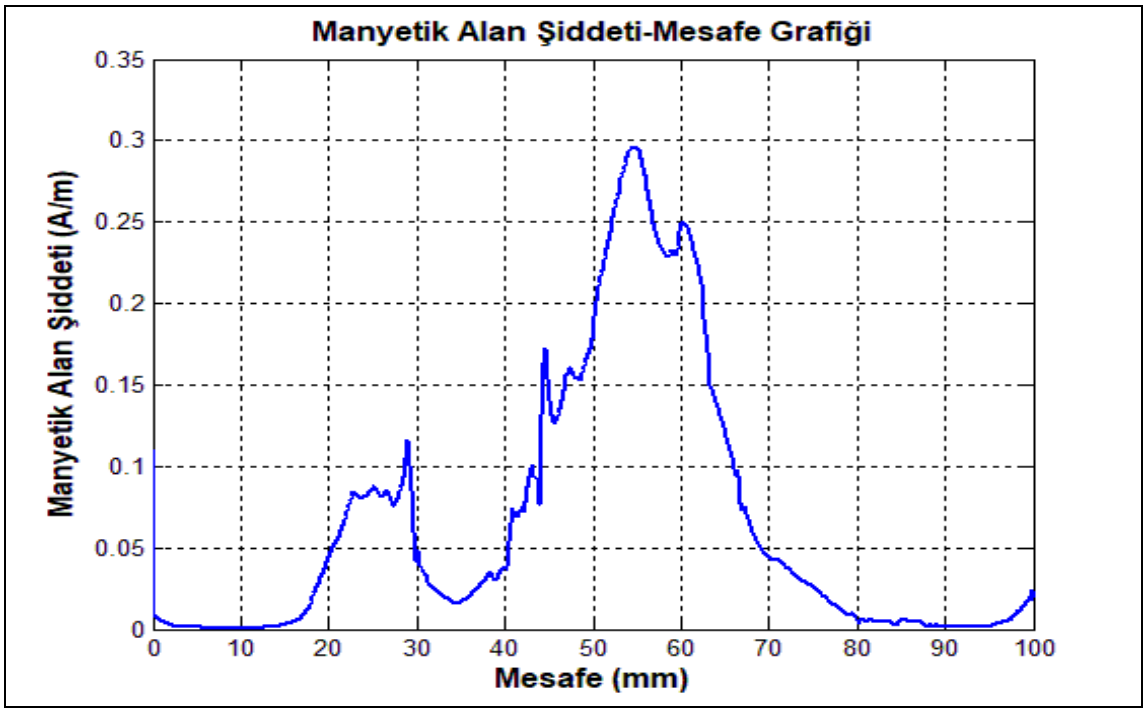
Şekil 4.50. Çizik Kusuru Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi



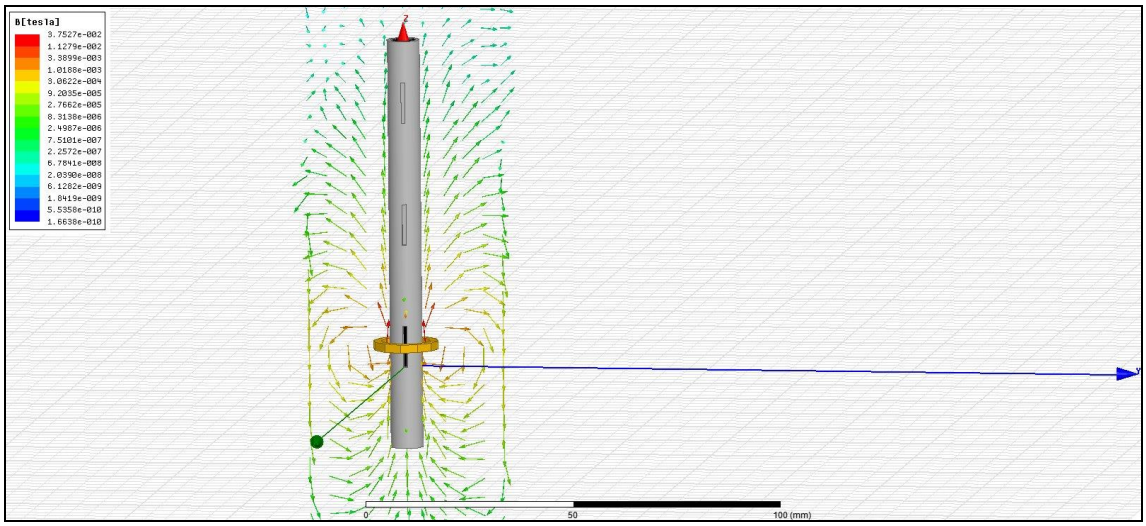
Şekil 4.51. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Çizgileri



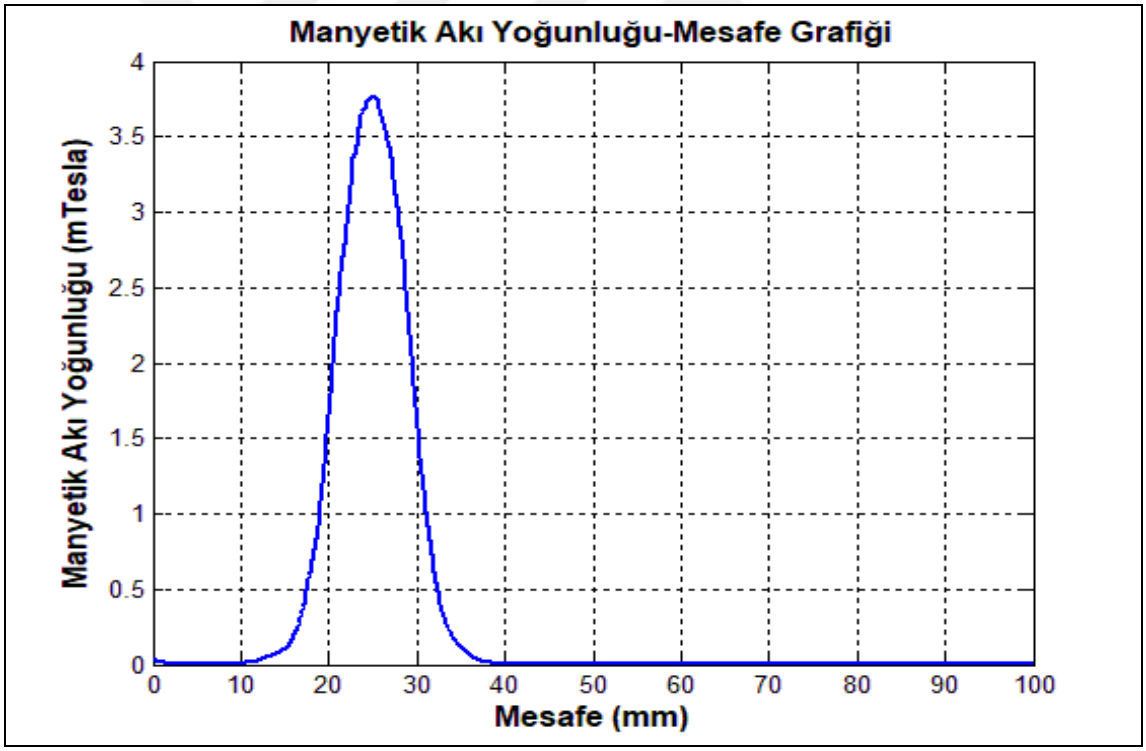
Şekil 4.52. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Eğrisi



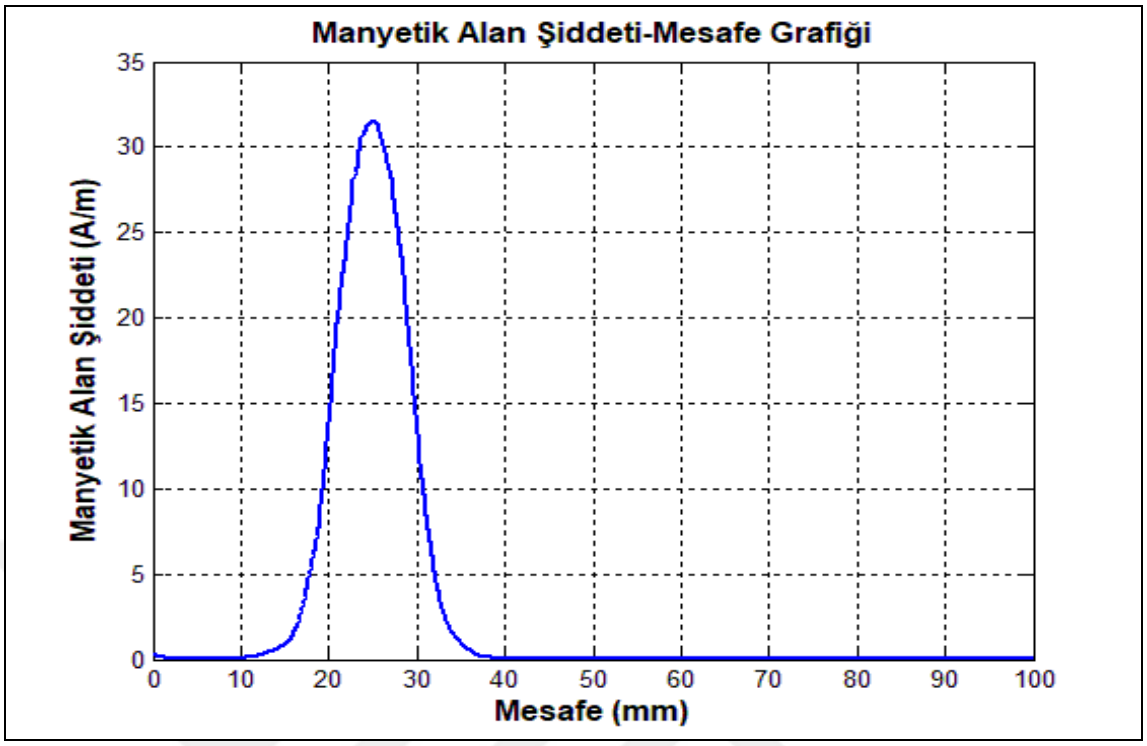
Şekil 4.53. Çelik Öze Doğru Orta Derin Kusur Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi



Şekil 4.54. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Çizgileri



Şekil 4.55. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Akı Yoğunluğu Eğrisi



Şekil 4.56. Çelik Öze Doğru Derin Kusur Üzerinde Manyetik Alan Eğrisi

SEA sonuçlarına bakıldığında, 100 mm uzunluğundaki ACS telin belirli mesafelerine denk gelen kusurlar esnasında manyetik akı yoğunluğu ve oluşan manyetik alan şiddetinde artış görülmektedir. Bu artış yorumlanacak olur ise, kusur durumunda malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğindeki (μ_r) değişimden kaynaklanmaktadır. Artış ise çizik ve ezik durumunda alüminyum kaplamanın incelmesine ve çelik öze kadar alüminyum kaplamanın soyulmasına bağlı olarak fazla veya az olmaktadır.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA – SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Tartışma

Tahribatsız muayene yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar bilimin gelişmesiyle beraber akademik ve sanayi açısından artmıştır. Akademik olarak yapılan çalışmalarda önceki çalışmalara göre farklı bulgularla sonuçlanmış olmasına önem verilmektedir. Bundan dolayı yeni muayene teknikleri ortaya çıkmakta veya var olan bir teknik geliştirilmektedir. Bu tekniklerden kullanım alanı iletken malzemeler olan girdap akımları tekniği de günümüzde çeşitli firmalar tarafından çeşitli formdaki ve içerikteki malzemeler için üretilmektedir. Girdap akımları sistemi, iletkenliği, mukavemeti ve kusursuzluğu yüksek olması istenen metalik malzemelerde üreticiler tarafından kaliteyi artırmak için sıkça tercih edilmektedir. Metalik malzemenin iletkenliğinin ölçülmesi, kalınlığının ölçülmesi, üzerinde bulunan kusur derinliğinin ölçülmesi ve üretim esnasında yüksek sıcaklıktaki malzemelere uygulanabilir olması açısından ilgili endüstri alanında oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Bu tekniğin avantajlarından ziyade dezavantajları da bulunmaktadır. En başta gelen dezavantajlarından birisi her çeşit malzemeye uygulanabilir olmamasıdır. Sensör tarafından elde edilen sinyaller değerlendirme açısından önemli olduğundan gürültüden etkilenebilir olması da dezavantajları arasında sayılabilir. Maliyet açısından değerlendirildiğinde hassas elektronik donanım içermesi ve sistemin kullanımı için eğitim gerektirdiğinden bu durumlar dezavantajlar arasına alınabilir. Bu tez çalışması, avantajları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

Literatüre bakıldığı zaman bu teknik ile ilgili yapılan tez, makale ve yayın çalışmaları genel itibariyle manyetik alan ifadeleri ile teorik analiz şeklinde gerçekleştirilmiştir. Girdap akımları tekniğinin teorik çalışmaları için en dikkat çeken makaleler arasından en eskisi Dodd ve Deeds [19] in gerçekleştirdiği çalışmadır. Bu çalışmada iletken bir örnek ile etkileşime giren tek bir bobin için analitik hormonik çözümler sunmuşlardır. Çalışma genel itibariyle formülasyonları içermektedir. İletkenlik ölçümü için yakın yıllarda Bean ve DeBlois [17] in çalışması mevcuttur. Bu çalışmada da teorik analizlere yer verilmiştir. Bazı tez çalışmalarına bakıldığı zaman bu teknik ile ilgili Desjardins [21] kapsamlı bir teorik analiz gerçekleştirmiştir. Ülkemizde de bu teknik ile ilgili gerçekleştirilen tez çalışmaları mevcuttur. Örnek bir çalışma, Akay [34] tarafından teorik ifadelere yer verilerek gerçekleştirmiştir. Bu tez çalışmasında ise diğer çalışmalara kıyasla derinlemesine teorik ifadeler ve pratik formüller, bobin tasarımında kullanılan materyaller, çıktı sonucu indüktans ölçümleri ve sensörlerin yer aldığı köprü devresi ve sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuştur.

5.2. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında girdap akımları sisteminin önemli bir parçası olan bobin/sensör tasarımı gerçekleştirilip, teorik ve pratik olarak derinlemesine analizleri yapılmıştır. Teorik olarak verilen ifadelere göre muayenesi gerçekleştirilecek olan materyalin hatalı kısımlarında formülasyondaki parametre değişikliklerine bağlı olarak farklı sonuçlar türettiği görülmüştür. Bu çalışmada, en temel vektör manyetik potansiyel oluşumundan başlanarak bobin indüktansına kadar ifadelere yer verilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi için yapılan çalışmalarda da HASÇELİK Kablo San. Ve Tic. A.Ş. firmasından alınan ACS tel numuneleri üzerine bobin/sensör testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında bobin indüktansının kusur durumunda değiştiği ve bu değişikliğe bağlı olarak kusur algılamasının türüne bağlı olarak yapılabileceği görülmüştür. Manyetik olarak analizlere bakıldığında da, kusurların bobin tarafından iletken tel üzerinde oluşturulan girdap akımlarını etkilediği ve buna bağlı olarak da bobin manyetik alanını etkilediği görülmüştür.

Öneri değerlendirmesi yapılacak olur ise, farklı şekil ve yapıdaki malzemelerin muayenesini gerçekleştirebilmek için bobin/sensör yapıları değişebilmektedir. Girdap

akımları sistemi için farklı geometrik şekillere sahip algılaması yüksek yeni bobin ve sensör tasarımı gerçekleştirilebilir. Sıcaklık etkisiyle algılamanın bozulmaması için uygun malzemeler kullanılabilir. Bobin/sensör yapılarında gürültü etkilemesini göz önünde bulundurarak sensör yapıları bu kritere göre tasarlanabilir ve uygun malzemeler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kara, O., Erdal, H., Çelik, H. H., 2017. Bazı tahribatsız test yöntemleri: karşılaştırmalı bir derleme çalışması.**Marmara Fen Bilimleri Dergisi**, 29(3): 82-93.

2. Martín, J. G., Gil, J. G., Sánchez, E. V., 2011. Non-destructive techniques based on eddy current testing. **Sensors**, 11(3): 2525-2565.

3. Janousek, L., Capova, K., Yusa, N., Miya, K., 2008. Multiprobe inspection for enhancing sizing ability in eddy current nondestructive testing. **IEEE Transactions on Magnetics**. 44, 1618-1621.

4. Institut Dr. Foerster., 2020. DEFECTOMAT Sensor System Thermal Coil. (Web page: http://www.foerstergroup.com/fileadmin/user_upload/downloads/Broschueren/FOERSTER_DEFECTOMAT_EN.pdf) (Date accessed: April 2020).

5. Taşkan, M., 2012. Elektrik ve manyetizma. (Web sayfası: https://www.academia.edu/9007152/ELEKTR%C4%B0K_VE_MANYET%C4%B0ZMA (Erişim Tarihi: Nisan 2020).

6. Sozen, S., 2015. Maddelerin manyetik özellikleri. (Web sayfası: https://slideplayer.biz.tr/slide/3639622/ (Erişim Tarihi: Nisan 2020).

7. Elektrikport, 2011. Mıknatıslanma ve manyetizma. (Web sayfası: https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/miknatislanma-ve-manyetizma-1-bolum/4310 (Erişim tarihi: Nisan 2020).

8. Beşergil, B., Manyetik davranışlar. (Web sayfası: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/magnetik-davranslar-magnetic-behavior.html (Erişim tarihi: Nisan 2020).

9. The Engineering Toolbox, 2016. Permeabilty. (Web page: https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html (Data accessed: April 2020).

10. Shenzhen Kaishengda Cable, OPGW Optical Ground Wire Stranded Tube. (Web page: https://tr.pinterest.com/pin/600315825305141971/ (Data accessed: April 2020).

11. IAEA, 2011. Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628.Rev. 2 "Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques". Industrial Applications and Chemistry Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, Vienna, 237 pp.

12. AFL, Aluminum-Clad Steel Wire. (Web page: https://www.aflglobal.com/Products/Aluminum-Clad-Steel/Antenna/Alumoweld-Aluminum-Clad-Steel-for-Antenna-Use.aspx (Data accessed: May 2020).

13. MEB, 2011. Metal Teknolojisi Tahribatlı Muayene. Milli Eğitim Bakanlığı Bireysel Öğrenme Materyalleri, Ankara, 38 s.

14. MEB, 2011. Metal Teknolojisi Tahribatsız Muayene. Milli Eğitim Bakanlığı Bireysel Öğrenme Materyalleri, Ankara, 54 s.

15. Alsaran, A., 2016. Malzeme muayenesi. (Web sayfası: https://www.academia.edu/9601893/Tahribatl%C4%B1_ve_tahribats%C4%B1z_muayene (Erişim tarihi: Nisan 2020).

16. NDT Resource Center, Introduction to eddy current testing. (Web page: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm (Data accessed: April 2020).

17. Bean, C. P., DeBlois, R. W., Nesbitt, L. B., 1959. Eddy-Current method for measuring the resistivity of metals. **Journal Of Applied Physics**, 30(12): 1976-1980.

18. Lipkin, H. J., Peshkin, M., 1972. Measurement of the conductivity of metallic cylinders by means of an inductive method. **Journal Of Applied Physics**, 43(7): 3040-3046.

19. Dodd, C. V., Deeds, W. E., 1968. Analytical solutions to eddy current probe-coil problems. **Journal Of Applied Physics**, 39(6): 2829-2838.

20. Theodoulidis, T., Kriezis, E., 2005. Series expansions in eddy current nondestructive evaluation models. **Journal of Materials Processing Technology**, 161: 343-347.

21. Desjardins, D., 2015. Analytical Modeling For Transient Probe Response In Eddy Current Testing. Queen's University, Graduate Program in Physics, Engineering Physics & Astronomy, Doctoral Thesis, Ontario, 175 pp.

22. Uemura, C. O., 2018. Probabilty Of Detection For Pulsed Eddy Current Inspection Of Second Layer Cracks In Aircraft Lap-Joint Structures. Royal Military College of Canada, Division of Graduate Studies, Master of Science Thesis, Ontario, 245 pp.

23. Xue, Z., Fan, M., Cao, B., Wen, D., 2020. A fast numerical method for the analytical model of pulsed eddy current for pipelines. **The Journal of The British Institute of Non-Destructive Testing**. 62(1), 27-33.

24. Yıldız, C., 2004. Elektromanyetik Dalga Teorisi Ders Notları. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 189 s.

25. Wikipedia, Magnetic potential. (Web page: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_potential (Data accessed: April 2020).

26. Wikipedia, Gauge fixing. (Web page: https://en.wikipedia.org/wiki/Gauge_fixing (Data accessed: April 2020).

27. Wolfram MathWorld, Vector laplacian. (Web page: https://mathworld.wolfram.com/VectorLaplacian.html (Data accessed: April 2020).

28. Vikipedi, Mıknatıslanma. (Web sayfası: https://tr.wikipedia.org/wiki/M%C4%B1knat%C4%B1slanma (Erişim tarihi: Nisan 2020).

29. Wikipedia, Permeability (electromagnetism). (Web page: https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism) (Data accessed: April 2020).

30. Nave, R., Inductance of a coil. (Web page: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/indcur.html (Data accessed: April 2020).

31. Terman, F. E., 1943. Radio Engineers' Handbook, First Edition, Tenth Impression. McGraw-Hill Book Company, New York And London, 1033 pp.

32. Coil32, 2015. Calculation of the multilayer inductor. (Web page: https://coil32.net/multi-layer-coil.html (Data accessed: April 2020).

33. Singh, C., 2017. AC bridges: balance condition. (Web page: https://www.slideshare.net/Nitians/ac-bridges-balance-condition (Data accessed: April 2020).

34. Akay, K. S., 2000. Girdap Akımları Tekniğinin Fiziksel Prensipleri Ve Sanayide Uygulamaları. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 96 s.

35. Yıldız, H., 2010. Girdap Akımları Yöntemi İle Çelik Dövme Otomotiv Parçalarında Isıl İşlem Sonrası Yapısal Test Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 119 s.

36. Theodoulidis, T. P., 2010. TEDDY current freeware. (Web page: http://meander.uowm.gr/downloads.html (Data accessed: April 2020).

37. Martinos, J., Martinos, T., 2015. Self-inductance of air-core cylindrical coil in air / coil calculator. **Simulation Modelling Practice and Theory**.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Halim Burak TAŞKIN
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 27 Kasım 1994, Kocasinan
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 507 654 98 51
Fax: -
email: halimburaktaskin@gmail.com
Yazışma Adresi: Yeni Mahalle 5. Cadde 30. Sokak No: 55/4 38090 Kocasinan/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	EÜ M.F Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2018
Lise	Arif Molu Anadolu Teknik Lisesi, Kayseri	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019- Halen	HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş.	Ar-Ge Araştırmacı
2019–2019	Atlas Sayaç ve Ölçü Aletleri A.Ş.	Elektrik-Elektronik Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce