KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GİRDAP AKIMLARI TEMELLİ BİR HATA TESPİTİ YAKLAŞIMININ GERÇEK ZAMANLI GERÇEKLENMESİ

MURAT ÇELİKADAM

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GİRDAP AKIMLARI TEMELLİ BİR HATA TESPİTİ YAKLAŞIMININ GERÇEK ZAMANLI GERÇEKLENMESİ

MURAT ÇELİKADAM

Prof. Dr. Oğuzhan URHAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Orhan AKBULUT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Cem ÜNSALAN
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tahribatsız muayene yöntemleri ile malzemenin iç ve dış yapısında bulunan ve gözle görülemeyen bozukluklar tespit edilebilmektedir. Görsel test, radyografik test, manyetik parçacık testi, akustik emisyon, penetrant testi, ultrasonik test ve girdap akımları başlıca yöntemlerdir. Bu yöntemlerden olan girdap akımı test yöntemi ülkemizde çok yaygın kullanım alanına sahiptir. Yapısal analizlerde, kaynak dikişi kontrollerinde, çekme borularda, mil ve tellerde üretim hatalarının bulunma kapasitesi çok yüksektir. Buna rağmen test cihazları ülkemizde üretilmemektedir. Sonuç olarak Türkiye'de ilk defa üretimi gerçekleştirilen girdap akımları test sistemi için yurt içindeki fabrikalardan da talep gelmiştir.

Girdap akımları test sisteminin üretilmesi ve geliştirilmesi konusunda bana çalışma fırsatı veren değerli hocama ve Tahribatsız Malzeme Muayene San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen aileme ve eşime de sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Mayıs – 2019 Murat ÇELİKADAM

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. GİRDAP AKIMLARI İLE TAHRİBATSIZ MUAYENE VE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR 3
1.1. Girdap Akımları 3
1.2. Darbesel Girdap Akımı ile İzolasyonlu Borularda İç Duvar Çatlak Testi 6
1.3. Boru Testi İçin Kalıcı Mıknatıs ile Uyarılan Girdap Akımı Uygulaması 7
1.4. Ray Anahtarları Tespiti ile Tren Konumu Belirleme 9
1.5. Girdap Akımları Test Metodu ile Kusurların Tespiti İçin Test Cihazı 9
2. DENEYSEL SİSTEM, VERİ KÜMESİ VE PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ 11
2.1. Deneysel Sistem 11
2.2. Veri Kümesi 17
2.3. Performans Ölçütleri 18
3. GERÇEKLENEN HATA TESPİT YAKLAŞIMI 19
3.1. Ham Veri 19
3.2. Filtreleme 22
3.3. Örnek Seyreltme 25
3.4. Demodülasyon 26
3.5. Örnek Seyreltme 30
3.6. Filtreleme 31
3.7. Faz – Empedans Grafiği 37
3.8.Algoritmanın Gerçek Zamanlı Uygulanması 41
4. DENEYSEL SONUÇLAR 44
5. SONUÇLAR 46
KAYNAKLAR 47
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 49
ÖZGEÇMİŞ 50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Girdap Akımı Oluşumu 4
Şekil 1.2. (a) Mutlak Bobin (b) Yarık Test Edilirken Mutlak Bobinden Alınan Sinyal 4
Şekil 1.3. (a) Sarmal Diferansiyel Bobin (b) Pankek Tip Diferansiyel Bobin (c) Çatlak Test Edilirken Diferansiyel Bobinden Alınan Sinyal 5
Şekil 1.4. Darbesel Girdap Akımı Sistem Düzeneği 6
Şekil 1.5. Darbesel Girdap Akımı Sinyalleri 7
Şekil 1.6. Sabit Mıknatıslı Girdap Akımı Sistem Düzeneği 7
Şekil 1.7. Alınan Sinyaller - 305mm'den Daha Yakın (üst), 305mm'den Daha Uzak (Alt) 8
Şekil 1.8. Kusurlu Borudan Alınan Sinyaller 8
Şekil 1.9. Tren Hızı Test Sistemi ve Referans Sinyal Gösterimi 9
Şekil 1.10. US20130187643 Numaralı Patent Algoritması 10
Şekil 2.1. Girdap Akımları Test Sistemi 11
Şekil 2.2. Test Cihazı Blok Diyagramı 12
Şekil 2.3. Sinyal Oluşturma Kartı 12
Şekil 2.4. a) DSP Kart (Ön) b) DSP Kart (Arka) 13
Şekil 2.5. ADC Kart 13
Şekil 2.6. Ana Kart 13
Şekil 2.7. Çevre Haberleşme Kartı (Ön) 14
Şekil 2.8. Çevre Haberleşme Kartı (Arka) 14
Şekil 2.9. Girdap Akımları Test Donanımı Çizim Görseli 14
Şekil 2.10. Girdap Akımları Test Donanımı Fotoğrafı 15
Şekil 2.11. Besleme Sinyali (a) 11.5V (b) 15.5V 15
Şekil 2.12. Besleme Sinyali (a) 16.5V (b) 17.1V 16
Şekil 2.13. Besleme Sinyali (a) 2kHz (b) 24.990kHz 16
Şekil 2.14. Besleme Sinyali (a) 24.995kHz (b) 100kHz 16
Şekil 2.15. Bobin Görseli 17
Şekil 3.1. Bobinden Alınan Ham Veri 19
Şekil 3.2. Boru Bobine Girmeden Önce Alınan Sinyal (Yakınlaştırılmış Görüntü) 20
Şekil 3.3. Baskı Makara Motorunun Oluşturduğu Gürültü 20
Şekil 3.4. Boru Giriş Anında Sinyalde Oluşan Dalgalanma 21
Şekil 3.5. Boru Üzerinden Alınan Sinyaller 22
Şekil 3.6. Şekil3.5'in Yakınlaştırılmış Görünümü 22
Şekil 3.7. Veri Setinde Bulunan Örneklerin Frekans Düzlemindeki Görünümü 23
Şekil 3.8. Şekil 3.7'nin Yakınlaştırılmış Görünümü 23
Şekil 3.9. Filtre Sonrası Boru Üzerinden Alınan Sinyaller 24
Şekil 3.10. Filtrelenmiş ve Filtrelenmemiş Sinyaller 24
Şekil 3.11. Sinyal Sıçramasının Grafik Üzerinde Yakınlaştırılması 25
Şekil 3.12. Örnek Seyreltme Sonrası Sinyal 26

Şekil 3.13. Demodülasyon Sonrası Sinüs Bileşeni 26
Şekil 3.14. Şekil3.13'ün Yakınlaştırılmış Görünümü 27
Şekil 3.15. Demodülasyon Sonrası Kosinüs Bileşeni 27
Şekil 3.16. Şekil 3.15'in Yakınlaştırılmış Görünümü 27
Şekil 3.17. Sinüs Bileşeni Frekans Spektrumu 28
Şekil 3.18. Şekil 3.17'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1kHz) 28
Şekil 3.19. Şekil 3.17'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-15Hz) 29
Şekil 3.20. Kosinüs Bileşeni Frekans Spektrumu 29
Şekil 3.21. Şekil 3.20'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1kHz) 29
Şekil 3.22. Şekil 3.20'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-15Hz) 30
Şekil 3.23. Uygulanan Algoritmanın Blok Diyagramı 31
Şekil 3.24. Filtrelenmiş Sinüs Bileşeni 32
Şekil 3.25. Şekil 3.24'ün Yatay Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü 32
Şekil 3.26. Şekil 3.24'ün Dikey Eksende Yakınlaştırılmış Görüntü 32
Şekil 3.27. Filtrelenmiş Kosinüs Bileşeni 33
Şekil 3.28. Şekil 3.27'nin Yatay Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü 33
Şekil 3.29. Şekil 3.27'nin Dikey Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü 33
Şekil 3.30. Filtrelenmiş Sinüs Bileşeni 34
Şekil 3.31. Şekil 3.30'un Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1000 Örnek) 34
Şekil 3.32. Şekil 3.30'un Yakınlaştırılmış Görünümü (2000-8500 Örnek) 35
Şekil 3.33. Filtrelenmiş Kosinüs Bileşeni 35
Şekil 3.34. Şekil 3.33'ün Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1000 Örnek) 35
Şekil 3.35. Şekil 3.33'ün Yakınlaştırılmış Görünümü (2000-8000 Örnek) 36
Şekil 3.36. Sinüs ve Kosinüs Bileşen 36
Şekil 3.37. Faz Grafiği (1,5mm 1. Delik) 37
Şekil 3.38. Faz Grafiği (1,5mm 2. Delik) 38
Şekil 3.39. Faz Grafiği (2,3mm 1. Delik) 38
Şekil 3.40. Faz Grafiği (2,3mm 2. Delik) 39
Şekil 3.41. Faz Grafiği (1mm 1. Delik) 39
Şekil 3.42. Faz Grafiği (1mm 2. Delik) 40
Şekil 3.43. Sayısal Kazanç Uygulanmış Sinyalin Faz Grafiği (1mm 2. Delik) 41
Şekil 3.44. Girdap Akımları Test Cihazı 42
Şekil 4.1. Firma İçi Test Görüntüsü 45

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. ISO10893-2 Kabul Seviyeleri 44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	:	Manyetik Alan, (Tesla)
μ_0	:	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği, (Wb/A.m)
I	:	Akım, (A)
N	:	Sarım Sayısı
L	:	Bobin Makara Boyu, (metre)
Φ	:	Manyetik Akı, (Wb)
A	:	Alan, (m^2)
ε	:	Elektro Motor Kuvvet, (V)
R	:	Direnç, (Ω)

Kısaltmalar

MFL	:	Magnetic Flux Leakage (Manyetik Akı Sızıntısı)
N	:	North (Kuzey)
S	:	South (Güney)
GPS	:	Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
ADC	:	Analog to Digital Converter (Analogdan Sayısala Çevirici)
PCB	:	Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
HDMI	:	High Definition Multimedia Interface (Yüksek çözünürlüklü çokluortam arayüzü)
IO	:	Input Output (Giriş Çıkış)
SPI	:	Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
TWI	:	Two Wire Interface (İki Kablolu Arayüz)
Uart	:	Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Evrensel Asenkron Alıcı ve Gönderici)
dB	:	Decibel (Desibel)
FFT	:	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
IIR	:	Infinite Impulse Response (Sonsuz Darbe Cevabı)
FIR	:	Finite Impulse Response (Sonlu Darbe Cevabı)
DC	:	Direct Current (Doğru Akım)
AC	:	Alternative Current (Alternatif Akım)
DSP	:	Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşlemcisi)
D	:	Diameter (Çap)

GİRDAP AKIMLARI TEMELLİ BİR HATA TESPİTİ YAKLAŞIMININ GERÇEK ZAMANLI GERÇEKLENMESİ

ÖZET

Üretim teknolojisinin gelişmesi tahribatsız muayene standartlarını da gelişmeye zorlamaktadır. Test doğruluğu ve bu yüksek doğruluğun artan üretim hızlarında da sağlanması çözüm bulunması gereken en önemli konulardan birisidir. Test doğruluğu ve test hızı açısından önemli avantaja sahip olan girdap akımları ile tahribatsız muayene başlıca yöntemlerdendir. Bu tez boru üretim sektöründe kullanılan ve Türkiye'de üretimi mevcut olmayan girdap akımları ile çatlak ve delik tespit sisteminin kontrol algoritmalarının ve gömülü yazılımının geliştirilmesini kapsamaktadır. Ayrıca bu çalışmada diğer çatlak ve delik kontrol cihazlarından farklı olarak tamamen dijital bir sistem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bobinden alınan analog sinyal RF bandı filtreleme ve analog sinyal kazanç işlemleri haricinde analog olarak hiçbir sinyal işleme yapmadan dijitale dönüştürülmüştür. Analog dijital dönüşüm sonrası elde edilen dijital sinyal analiz edilerek gerçek zamanlı çalışabilecek bir algoritma oluşturulmuştur. Algoritmanın çift çekirdekli bir DSP üzerinde gerçek zamanlı çalıştırılması ile borularda bulunan üretim hataları gerçek zamanlı tespit edilmiştir. Yapılan deneyler geliştirilen yöntemin ISO10893-2 standardında test doğruluğu sağladığını göstermektedir. Ayrıca geliştirilen yöntemlerin tamamen sayısal işaret işleme temelli olması, ürünün ileride sadece yazılımsal değişikliklerle geliştirmeye açık olmasını da sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Girdap Akımları, Girdap Akımları ile Çatlak ve Delik Tespiti, Girdap Akımları ile Tahribatsız Muayene.

REAL TIME IMPLEMENTATION OF A EDDY CURRENT BASED DEFECT DETECTION APPROACH

ABSTRACT

The development of production technology forces non-destructive testing standards to improve. The accuracy of the test and the provision of this high accuracy at increasing production speeds is one of the most important issues to be found a solution. Nondestructive testing by eddy currents, which have significant advantages in terms of test accuracy and test speed, is one of the main methods. This thesis covers development of embedded software and control algorithms of flaw and hole detection system by eddy current which used in pipe production and not manufactured in Turkey. In addition, this study aims to develop a completely digital system, unlike other flaw and hole control devices. Analog signal received from the coil is converted to digital without any analogue signal processing except for RF band filtering and analogue signal gain operations. The digital signal obtained after the analogue digital transformation was analyzed and an algorithm was created to be able to operate in real time. Production defects in pipes have detected by real time execution of the algorithm on a dual core DSP. The experiments show that the developed method provides test accuracy in ISO10893-2 standard. Moreover, the methods developed based on fully digital signal processing have ensured the product to be open to development with only software changes in the future.

Key Words: Eddy Current, Flaw and Hole Detection by Eddy Current, Non-Destructive Testing by Eddy Current.

GİRİŞ

Tahribatsız muayene günümüzde oldukça sık kullanılan bir kalite kontrol tekniğidir. Malzemedeki kalıntıları, gerilmeleri, hata boyutunu, kırılma dayanımı ile yapının güvenli bir şekilde çalışmasını belirlemek amacıyla kullanılabilmektedir. Tahribatsız muayene testi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Bunlardan bazıları sıvı penetrant (girinim), manyetik parçacık, girdap akımları (eddy current), radyografik muayene, ultrasonik muayene ve akustik emisyon olarak sayılabilir. Bu yöntemlerinden olan girdap akımları 19. yüzyılda bulunmuş ve tahribatsız muayene alanında 20. yüzyılın ortalarında kullanılmaya başlanmıştır.

Girdap akımları kullanılarak malzemenin üzerindeki ve yapısındaki üretim hataları tespit edilebilmektedir. Bu yöntem ile bakır, alüminyum, çelik gibi elektriksel olarak iletken olan malzemeler muayene edilebilmektedir [1]. Ayrıca bu yaklaşım boru, mil ve tel benzeri formda olan malzemelerin üretim hatalarının tespitinde de sıklıkla kullanılmaktadır [2]. Girdap akımları ile tahribatsız muayene yaklaşımı havacılık [3] ve nükleer [4] alanlarında 1950 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle yöntemin otomatik sistemler ile beraber çalışabilir olması ve yüksek hızlarda test yapabilmesi seri üretim yapılan alanlardada büyük avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla malzemenin üretim hızına herhangi bir olumsuz etki oluşturmaması yöntemin yaygınlaşmasında önemli etki yaratmıştır [5]. Çünkü test zamanının uzun olması toplam üretim zamanına doğrudan artırıcı etkide bulunmaktadır [6].

Girdap akımları test sistemi en basit haliyle bobin veya prob, sinyal işleme donanımı ve kullanıcının gözlem ve kontrol etmesini sağlayan ekrandan oluşur. Bobin veya prob farklı sargı tiplerinden oluşmaktadır. Bu sargı tiplerine diferansiyel ve mutlak sargılar örnek verilebilir [7]. Sinyal işleme donanımı gerçek zamanlı işlem yapabilmek ve sonuç üretebilmek için yüksek sinyal işleme kapasitesine sahip olmalıdır. Türkiye'de genel olarak boru üretim sektöründe kullanılan girdap akımları test cihazları 300 m/dk üretim hızına uyum sağlamaktadır. Sinyal işleme donanımı

bu hızlarda test yapabilmeli ve bir ekran üzerinden operatöre test sonuçlarını göstermelidir.

Bu tez kapsamında girdap akımları ile tahribatsız muayene konusunda yapılan çalışmalar araştırılmış ve incelenmiştir. Literatür çalışmaları ve ülkemiz koşulları göz önünde bulundurularak hedef başarım ölçütleri belirlenmiştir. Ardından geliştirme yapılacak algoritma belirlendikten sonra test ekipmanları hazırlanmış ve algoritma çalışmaları için veri toplanmıştır. Toplanan veriler ve iyileştirme yapılan algoritma ile hedef başarım ölçütleri yakalanmıştır. Son olarak girdap akımları ile tahribatsız muayene algoritması gömülü sisteme uygulanmış ve başarım ölçütleri tekrar test edilmiştir.

Tezin 1. bölümünde girdap akımları kanunu ve literatürde bulunan bazı çalışmalar özetlenmiştir. 2. bölümde çalışmalarda kullanılacak sistem, algoritmada kullanılmış veri kümesi ve başarım ölçütleri tanıtılmıştır. Sonraki bölümde algoritmanın geliştirme aşamaları ve gömülü sisteme uygulanması açıklanmıştır. 4. bölümde başarım ölçütleri ve elde edilen test sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Son bölümde ise bütün olarak tez kapsamındaki sonuçlara yer verilmiştir.

1. GİRDAP AKIMLARI İLE TAHRİBATSIZ MUAYENE VE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. Girdap Akımları

Bir bobine değişken bir akım uygulandığında bobin çevresinde manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan büyüklüğü Denklem (1.1)'deki gibi;

$$B = (\mu_0 * I * N)/L \tag{1.1}$$

şeklinde olacaktır. Manyetik alan etki ettiği yüzeye orantılı olarak manyetik akı değerinin oluşmasına sebep olur. Manyetik akı formülü Denklem (1.2)'deki gibi;

$$\Phi = B * A \tag{1.2}$$

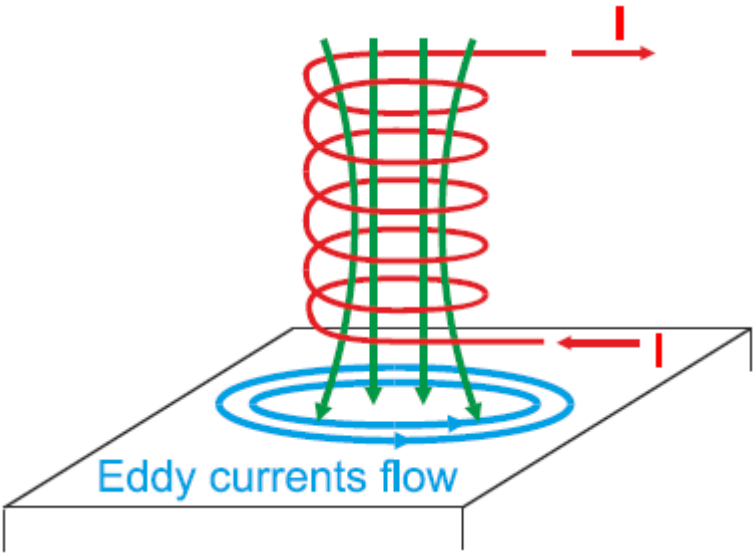
şeklinde olacaktır. Buradan Faraday kanununa göre indüklenen elektro motor kuvveti (EMK) Denklem (1.3)'deki gibi;

$$\varepsilon = (d\Phi_B)/dt \tag{1.3}$$

şeklinde olacaktır. Yukarıdaki formüllerden yola çıkarak elektriksel olarak iletken bir malzeme bobine yaklaştırıldığında bobin çevresindeki manyetik alanın oluşturduğu EMK'dan dolayı malzeme üzerinde girdap akımı oluşur. Oluşan girdap akımı malzemenin direnci ile ters, EMK değeri ile doğru orantılıdır. İndüklenen girdap akımı Denklem (1.4)'deki gibi;

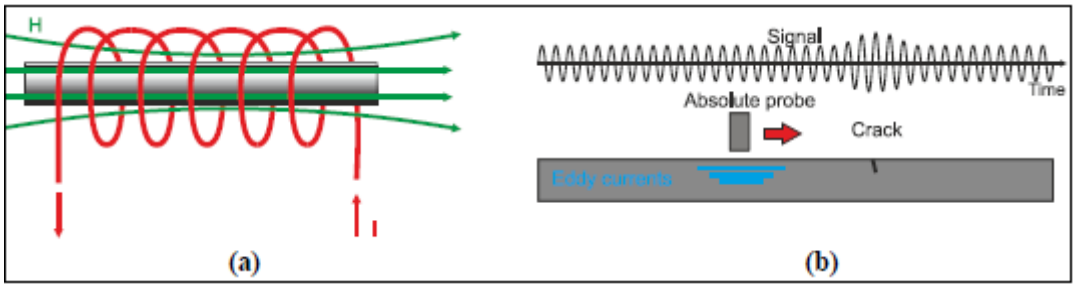
$$I = \varepsilon/R \tag{1.4}$$

şeklinde olacaktır. Girdap akımı ikincil bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan uygulanan manyetik alan ile zıt yönlüdür. Bir alıcı bobin kullanılarak girdap akımının oluşturduğu manyetik alanı potansiyel farka dönüştürülebilir. Girdap akımı sistemi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Girdap Akımı Oluşumu [2]

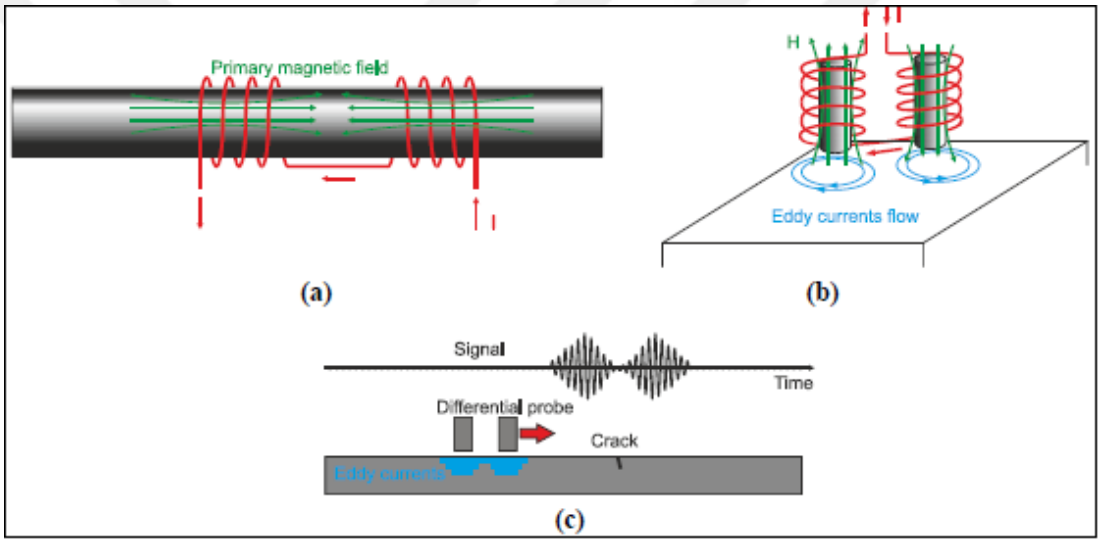
Girdap akımları ile tahribatsız muayenede sıklıkla iki tip alıcı bobin kullanılır. Bunlar mutlak bobin ve diferansiyel bobindir. Mutlak bobin aynı yönde sarılmış tel sargıdan oluşur. Boyuna hata olarak adlandırılan yarık gibi büyük tipteki üretim hatalarının tespitinde kullanılır. Malzemede bulunan düzensizlik mutlak bobin kullanılarak sinyale dönüştürüldüğünde sinyalde düzensizlik boyunca seviye değişimi görülür. Dolayısıyla malzemedeki düzensizlik çok küçük olduğunda yani enine hatalarda görülen seviye değişimi anlık sinyal sıçramalarına benzediğinden gürültülerden dolayı meydana gelen seviye değişiminden ayırt edilememektetir. Mutlak bobinin yapısı ve algılanan ikincil manyetik alana ait görüntü Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. (a) Mutlak Bobin (b) Yarık Test Edilirken Mutlak Bobinden Alınan Sinyal [2]

Diferansiyel bobin tek parça tel ile zıt yöne sarılmış ve sargılar arası belirli mesafe bulunan en az 2 sargıdan oluşur. 4 adet sargıdan oluşan alıcı bobinler tam diferansiyel bobin olarak adlandırılır. Tam diferansiyel bobinler normal 2 sargılı

diferansiyel bobinlere göre bazı avantajları vardır. Bunlar; bölgesel ve uzun çatlaklarda daha hassas, derine nüfuz etme oranı daha fazla ve lift-off etkisini bastırmada daha etkilidir [8]. Diferansiyel bobinler enine hata olarak adlandırılan delik, çatlak gibi noktasal üretim hatalarının tespitinde kullanılır. Malzemede bulunan düzensizlik diferansiyel bobin kullanılarak sinyale dönüştürüldüğünde sinyalde düzensizliğin her bir sargıya etkisi farklı olmaktadır. Sargılar birbirine zıt yönde sarımlarla oluşturulduğu için düzensizlik sargılardan birinde potansiyel fark genliğinde artışa neden olursa diğer sargıda potansiyel fark genliğinin azalmasına neden olur. Diferansiyel bobinin yapısı ve algılanan ikincil manyetik alana ait görüntü Şekil 1.3'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 (a) Sarmal Diferansiyel Bobin (b) Pankek Tip Diferansiyel Bobin (c) Çatlak Test Edilirken Diferansiyel Bobinden Alınan Sinyal [2]

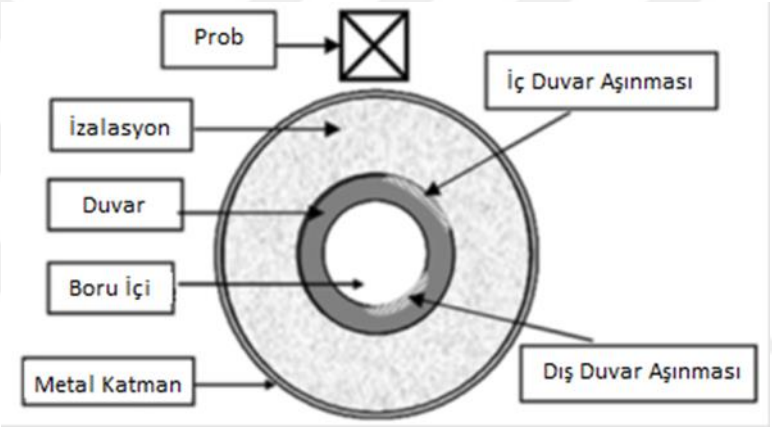
Potansiyel farka dönüştürülen manyetik alan malzemenin kalitesi hakkında önemli bilgiler taşır. Çünkü malzeme üzerinde herhangi bir süreksizlik olduğu durumda malzeme direncinde değişim olacağından dolayı Denklem (1.4)'e göre EMK sabit olduğu için girdap akımında değişime neden olur. Girdap akımındaki bu değişim bobin empedansında değişiklik meydana getirir [2]. Potansiyel farka dönüştürülen manyetik alan bütün bu değişimlere sahip veriyi barındırdığı için malzeme kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir.

Girdap akımları ile tahribatsız muayene çok uzun yıllardır kullanılmaktadır. Kullanım alanına ve test edilecek malzemenin özelliğine göre farklı yöntemler veya kullanım alanına özel problar kullanılarak girdap akımları ile tahribatsız muayene

yapılmaktadır. Günümüze kadar bu alanda birçok araştırma yapılmıştır. Yapılmış olan akademik araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

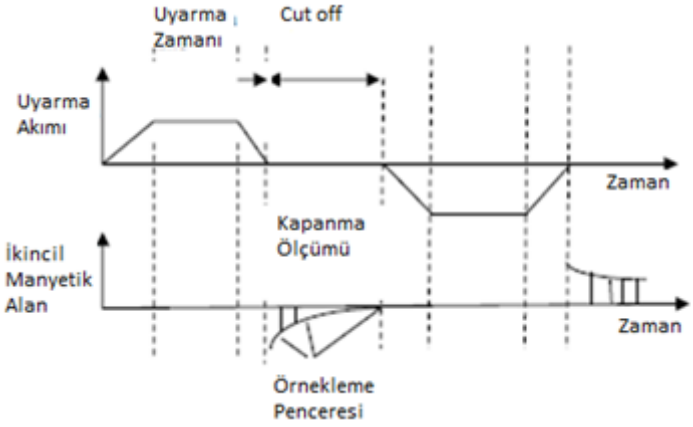
1.2. Darbesel Girdap Akımı ile İzolasyonlu Borularda İç Duvar Çatlak Testi

Bu bölümde [9]'de sunulan çalışmanın kısa özeti yapılmıştır. Bu çalışma petrol, enerji, kimyasal, güç ve diğer endüstrilerde kullanılan ferromanyetik boruların iç ve dış duvarında bulunan paslanmaları ve çatlakları tespit edebilmek için yapılmıştır. Bu alanlarda kullanılan borular dış dünyadan izoleli olduğu için amaç izoleyi ayırmadan borunun iç duvarında bulunan düzensizlikleri tespit edebilmektir. Darbesel girdap akımı test düzeneği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Darbesel Girdap Akımı Sistem Düzeneği [9]

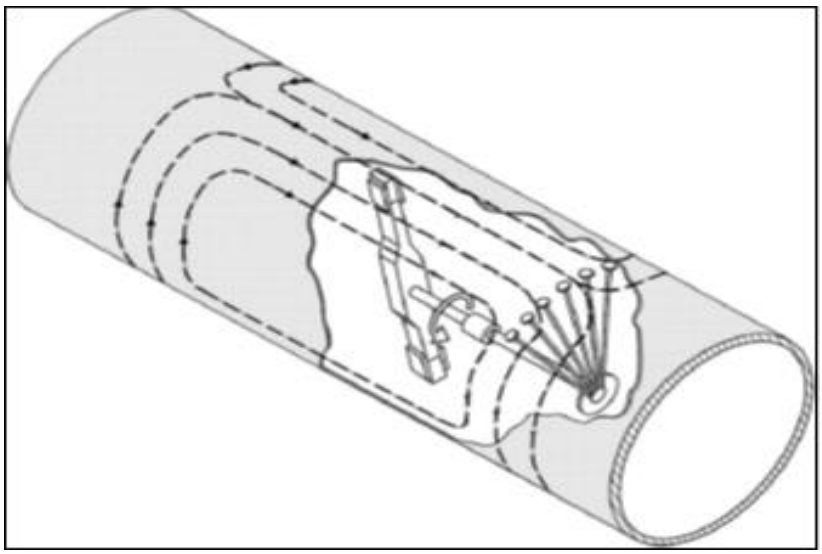
Bu yöntemde uyarıcı sargıya düşük frekans çift polariteli kare dalga uygulanır. Kare dalganın anlık olarak cut-off bölgesine girdiği anda uyarıcı bobin manyetik alan darbesi üretir ve bu darbe çok hızlı sönümlenir. Darbe manyetik alanı boru üzerinde darbesel girdap akımı oluşturur. Darbesel girdap akımı etkisi ile ikincil manyetik alan oluşur ve en son sönümlenir. Alıcı sargılar ile potansiyel farka dönüştürülen ikincil manyetik alan borunun iç ve dış duvarlarında bulunan metal kayıplarını yansıtır. Bobin sinyalleri Şekil 1.5'de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Darbesel Girdap Akımı Sinyalleri [9]

1.3. Boru Testi İçin Kalıcı Mıknatıs ile Uyarılan Girdap Akımı Uygulaması

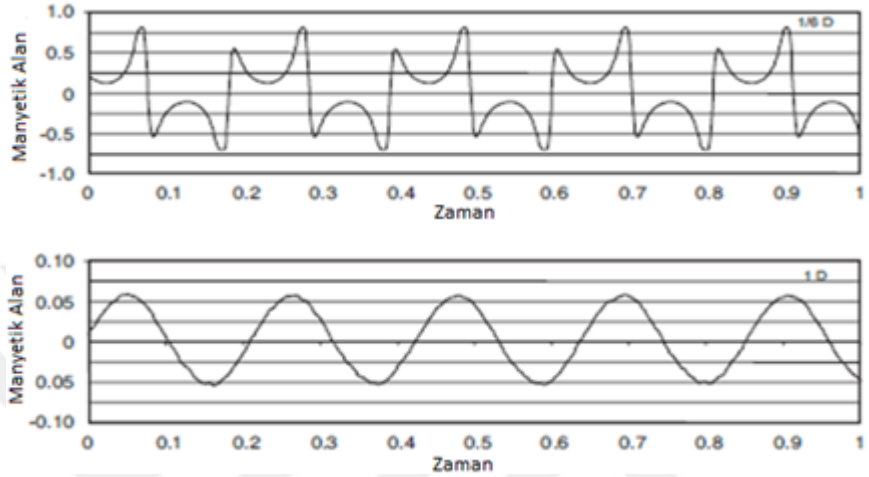
Bu bölümde [10]'da sunulan çalışmanın kısa özeti yapılmıştır. Bu çalışma geleneksel ortak merkezli bobine alternatif olarak yapılmıştır. Çünkü fiziksel zorluklardan dolayı uyarıcı akım temelli test yöntemi tüm borular için kullanılamayabilmektedir. Sistem iki veya dört adet kuzey (N) ve güney (S) kutuba sahip mıknatıs, mıknatısı sabit hızda dairesel dönderen şaft ve Hall effect sensörlerden oluşmaktadır. İki mıknatıstan oluşan test düzeneği Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Sabit Mıknatıslı Girdap Akımı Sistem Düzeneği [10]

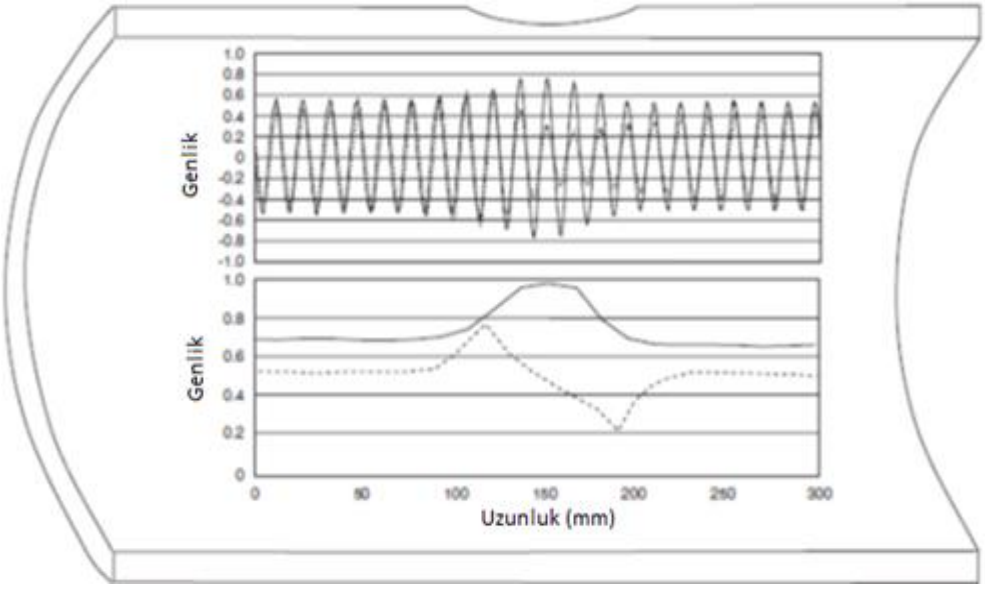
Dönen mıknatıslar boru üzerinde girdap akımını indükler. Mıknatısların dönmesi ile oluşan akım çevrimi Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Girdap akımı belirtilen çevrimde eliptik olarak akar. Çalışmada girdap akımlarının oluşturduğu ikincil manyetik alanı algılamada Hall effect sensörlerin borudan uzaklığının önemli olduğu görülmüştür.

Buna gore sensörler borudan 305mm'den daha yakın olursa alınan sinyalde mıknatısların etkisi görülmekte ve sinüsoidallik bozulmaktadır. 305mm'den daha uzakta ölçümler alındığında sinyal sinüzoidal olmaktadır. Sensörlerin 305mm'den daha yakın ve daha uzak konumlandırıldığı durumlara ait alınan sinyaller Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Alınan Sinyaller - 305mm'den Daha Yakın (üst), 305mm'den Daha Uzak (Alt) [10]

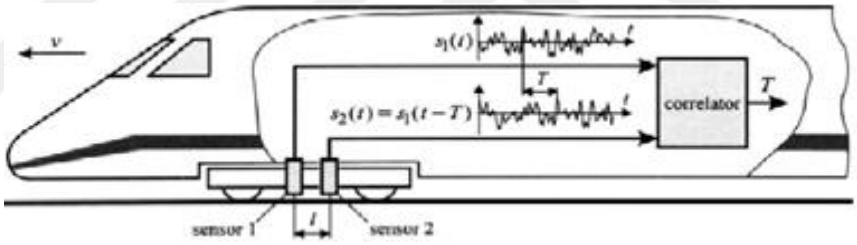
Boru üzerinde herhangi bir düzensizlik olduğunda alınan sinyallerde bozulma meydana gelmektedir. Çalışma kapsamında kusurlu boru kullanılarak alınan sinyaller Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Kusurlu Borudan Alınan Sinyaller [10]

1.4. Ray Anahtarları Tespiti ile Tren Konumu Belirleme

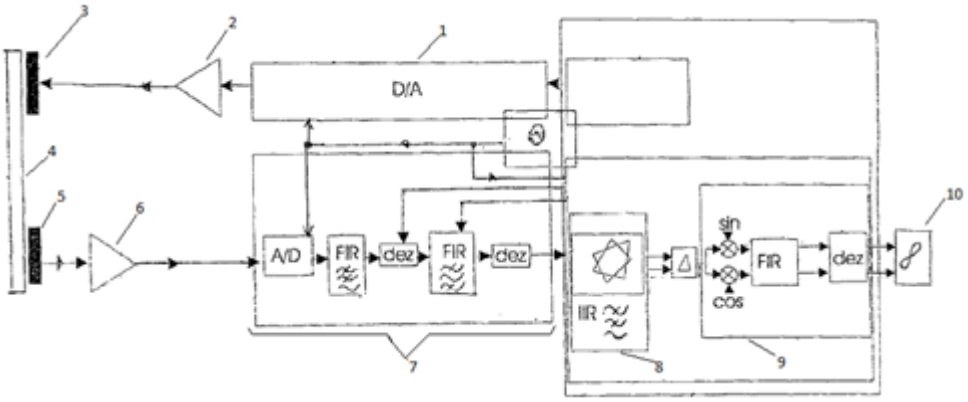
Bu bölümde [11]'da sunulan çalışmanın kısa özeti yapılmıştır. Girdap akımları ile tahribatsız muayene kullanılarak ilerleyen cisimlerin hızları hesaplanabilmektedir. Tünellerde küresel konumlama sisteminin (GPS) çalışmamasından ve teker devrinin ölçümünün yetersiz kalmasından dolayı girdap akımları ile tahribatsız muayene yöntemi trenlere konum/hız tespiti amacıyla uygulanmıştır. Yöntem ile temassız ve kararlı hız ölçümü yapılabilmektedir. Sistem iki adet eş bobin ve sinyal işleme biriminden oluşmaktadır. Sinyal işleme birimi düzensizlik algılama ve ilinti yöntemi ile hız tespiti için kullanılır. Bobinler raylara paralel olarak belirli bir mesafe ile trene yerleştirilir. Ray makaslarında ve ray üzerinde bulunan düzensizlikler bobinler aracılığı ile algılanır. Aynı düzensizlik her iki eş bobinde de aynı sinyalin üretilmesine neden olacağı için her iki sinyal arasında geçen süre hesaplanır. Bobinler arası uzaklık bilindiği için tren hızı belirlenebilmektedir. Sistem ve referans sinyal gösterimi Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Tren Hızı Test Sistemi ve Referans Sinyal Gösterimi [11]

1.5. Girdap Akımları Test Metodu ile Kusurların Tespiti İçin Test Cihazı

Bu bölümde [12]'de sunulan çalışmanın kısa özeti yapılmıştır. US20130187643 numaralı patent girdap akımları ile tahribatsız muayene yöntemini kullanan uygulamayı anlatmaktadır. Patentte verilen algoritma ile mamül ve yarı mamül ürünlerde üretim hatası testi yapılabilmektedir. Algoritma Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. US20130187643 Numaralı Patent Algoritması [12]

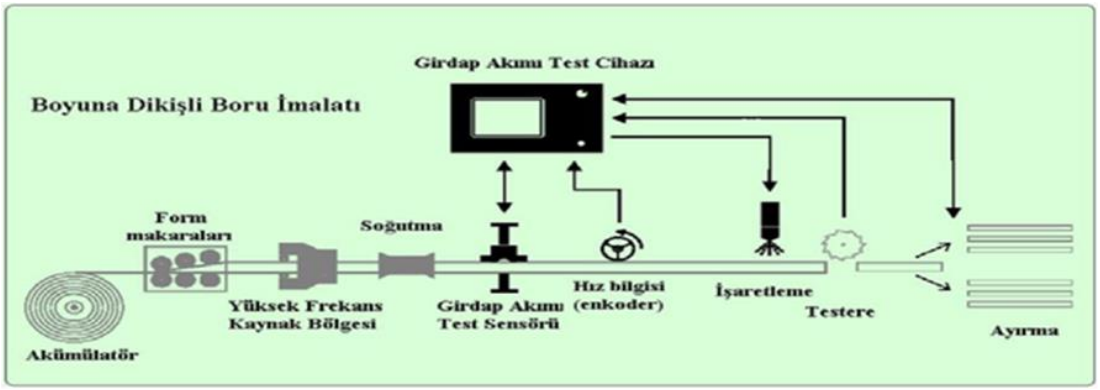
Şekil 1.10'da 1 numaralı blok bobinin uyarılması için kullanılacak analog sinyalin üretilmesini sağlayan dijital analog dönüştürücüyü göstermektedir. 2 numaralı blok üretilen uyarıcı sinyalin yükseltilmesinde kullanılmaktadır. 3 numaralı blok bobinin uyarıcı sargısını 4 numaralı blok ise test edilen malzemeyi temsil etmektedir. 5 numaralı blok bobinin alıcı sargısını göstermekte olup 6 numaralı blok alınan analog sinyalin yükseltilmesinde kullanılmaktadır. 7 numaralı blokta analog sinyalin sayısal sinyale dönüştürülmesi, analog filtre ve örnek seyreltme işlemleri gerçekleştirilirken 8 numaralı blok sayısal filtre bloğunu temsil etmektedir. 9 numaralı blok sinyale uygulanacak sayısal demodülasyon [13], filtre ve örnek seyreltme işlemlerinin yapıldığı bölümdür. 10 numaralı blok ise elde edilen son sinyallerin kullanıcıya gösterildiği görselleştirme bölümüdür.

2. DENEYSEL SİSTEM, VERİ KÜMESİ VE PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ

2.1. Deneysel Sistem

Girdap akımları test sistemi mamül ve yarı mamül olan boruların kalite testini yapabilmesi için tasarlanmıştır. Bu tip cihazlar genel olarak fabrikalarda boruların üretim aşamasında veya üretilmiş boruların testinde kullanılmaktadır. Üretim aşamasında levha halinde olan plakalar form makaraları yardımı ile boru şeklini alır. Form verilen levhaların uçları yüksek frekans kaynağı ile birleştirilir. Kaynak işlemi aşamasında ısınan borular tahribatsız muayeneyi etkilememesi için soğuma işleminden geçirilir. Girdap akımları ile muayene işlemi boru üretiminin bu aşamasında iken yapılabilmektedir.

Test cihazına bağlanan bobin soğutma biriminden sonra konumlandırılır. Hız bilgisi isteğe bağlı olarak enkoder kullanılarak veya cihaz ekranından hız bilgisi girilerek belirlenebilir. Ek olarak kusurlu olarak belirlenen boruların operatör tarafından gözle muayene yapabilmesi için boru üzerindeki kusur boya tabancası ile işaretlenir. Borular belirli uzunluklarda testere ile kesilir. Kesilmiş olan borular ayırma birimine geldiğinde sağlam veya ıskarta keselerine ayırma robotu yardımıyla atılır. Girdap akımları test sistemi ve çalışma alanına örnek bir blok diyagram Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



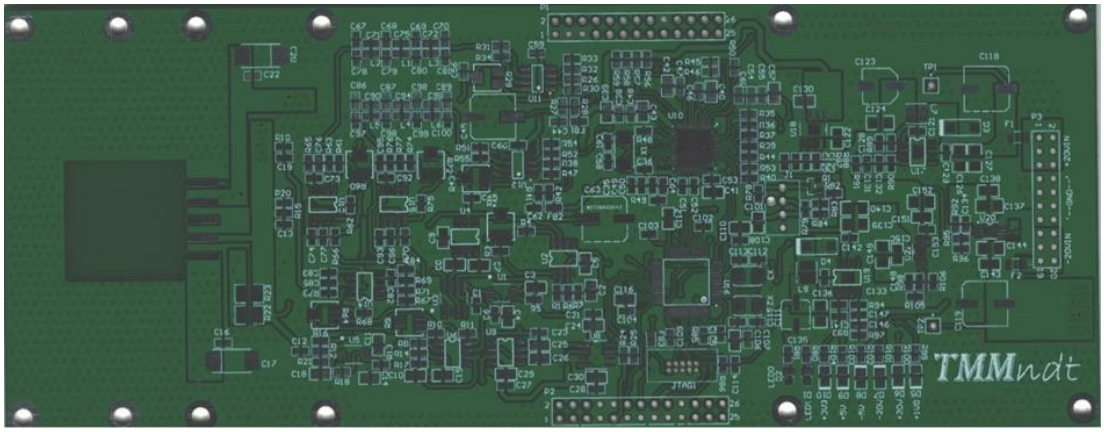
Şekil 2.1. Girdap Akımları Test Sistemi

Bu tez çalışması kapsamında fabrika ortamında gerçek zamanlı olarak çatlak ve delik tespiti yapabilecek sinyal işleme algoritmasının donanım üzerinde geliştirilmesi ve uygulanması konularında çalışılmıştır. Girdap akımları test cihazı 27mm iç çapa sahip olan bobin, bobinin uyarılması için tasarlanmış sinyal oluşturma kartı, bobinden alınan sinyalleri sayısallaştırılması için tasarlanmış analogdan sayısala çeviren kart (ADC), sinyal işleme algoritmalarının çalıştırılması için tasarlanmış olan sinyal işleme kartı ve testere, boya tabancası gibi çalışma sahasında bulunan cihazlarla eş zamanlı çalışabilmesi için tasarlanmış çevre haberleşme kartından oluşmaktadır. Ayrıca kartlar ve bilgisayarı bir arada tutan ve bunların birbirleri ile haberleşmesi için altyapı sağlayan anakart mevcuttur. Girdap akımları test cihazını gösteren blok diyagram Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

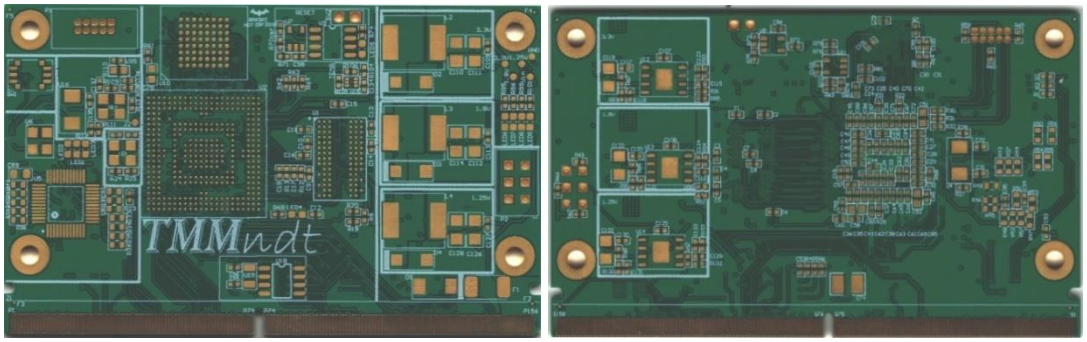


Şekil 2.2. Test Cihazı Blok Diyagramı

Şekil 2.2'deki blok diyagramda bulunan kartların PCB fotoğrafları Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8'deki gibidir.

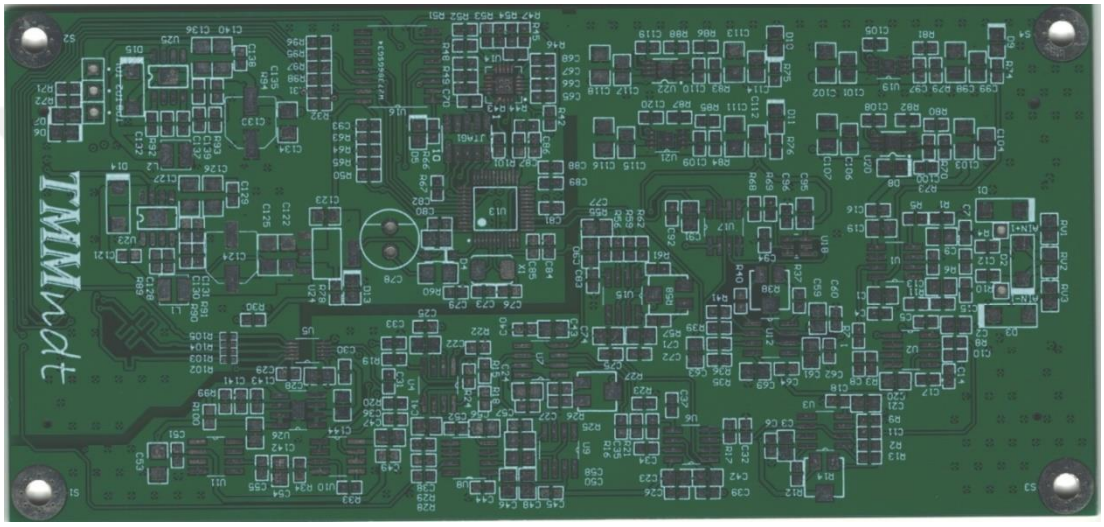


Şekil 2.3. Sinyal Oluşturma Kartı

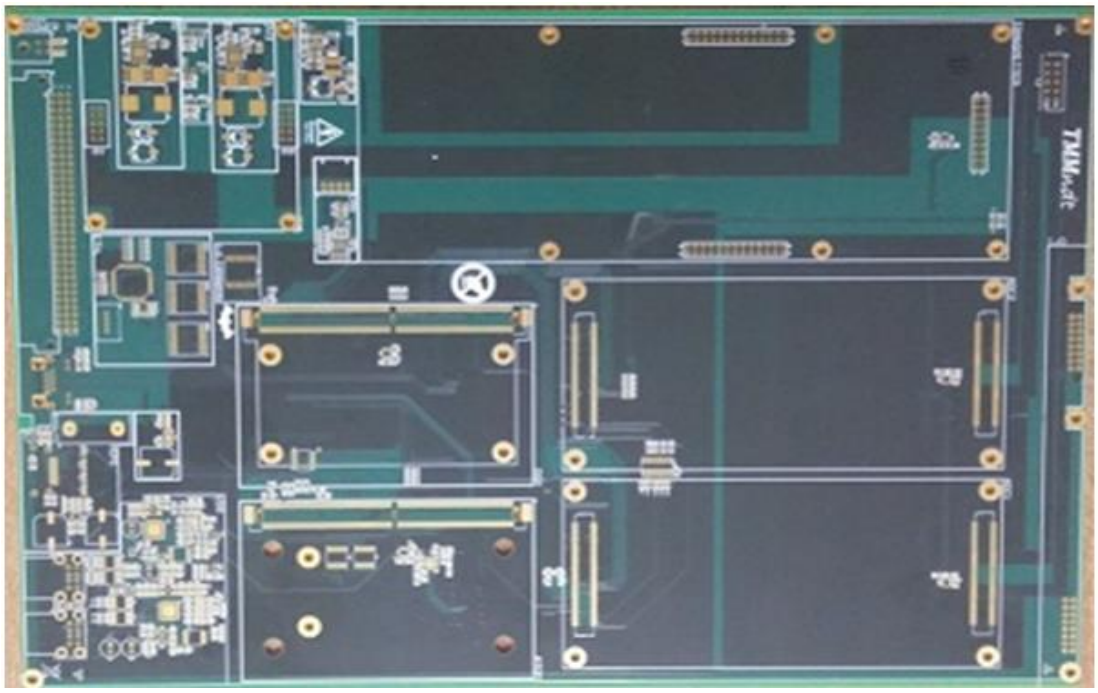


(a) (b)

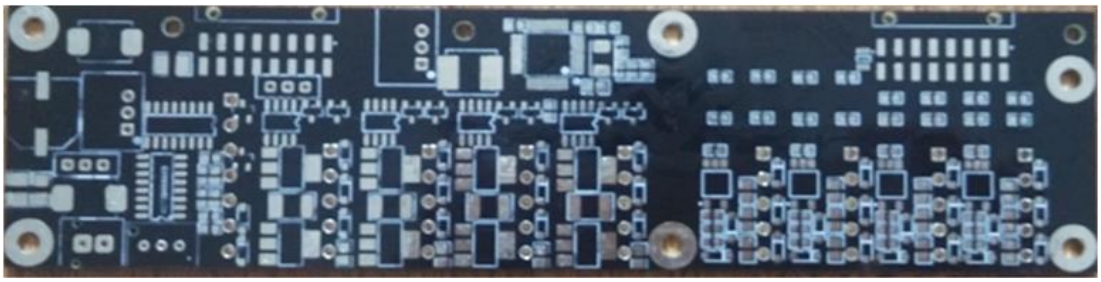
Şekil 2.4. a) DSP Kart (Ön) b) DSP Kart (Arka)



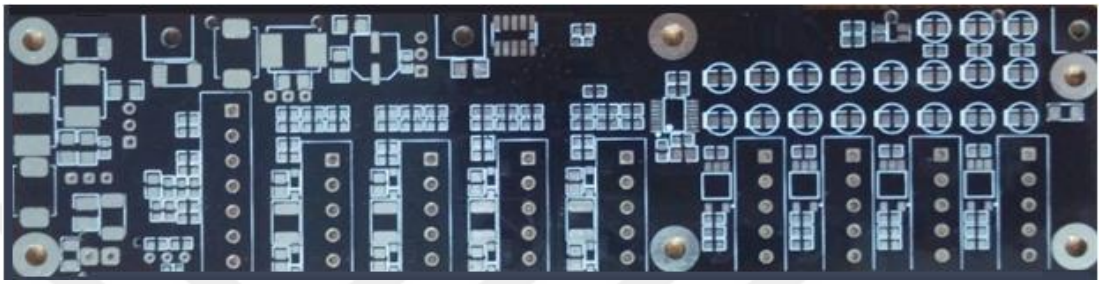
Şekil 2.5. ADC Kart



Şekil 2.6. Ana Kart

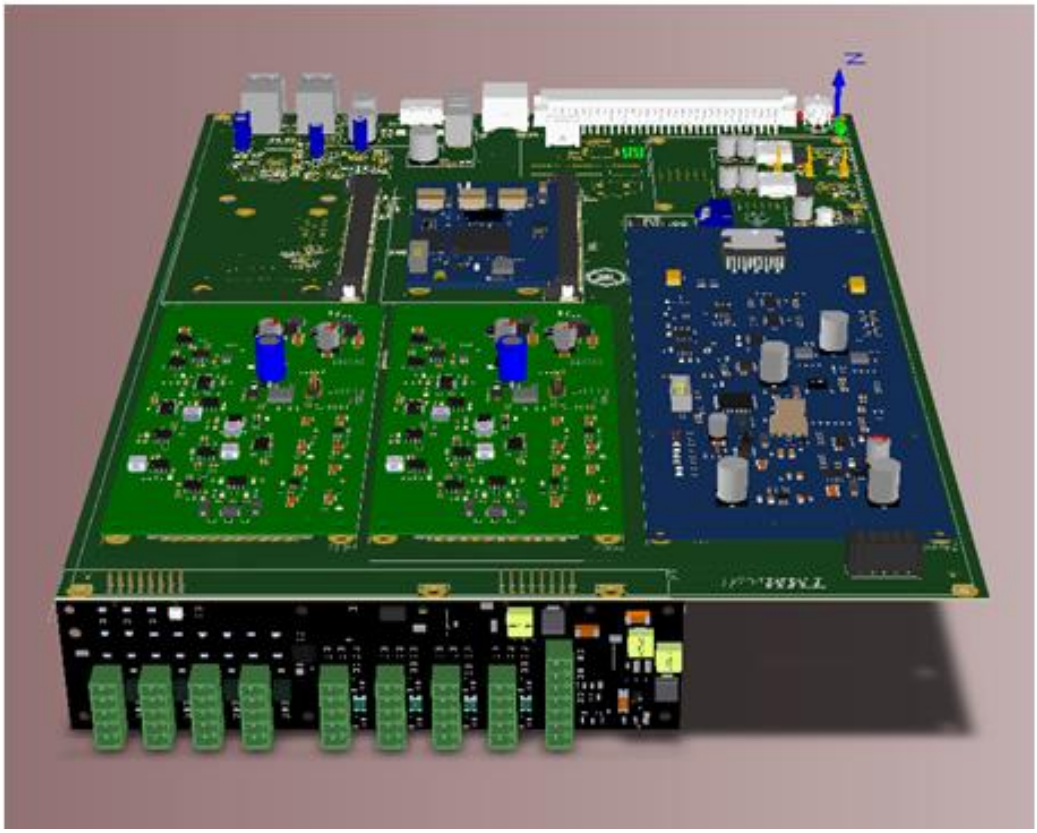


Şekil 2.7. Çevre Haberleşme Kartı (Ön)

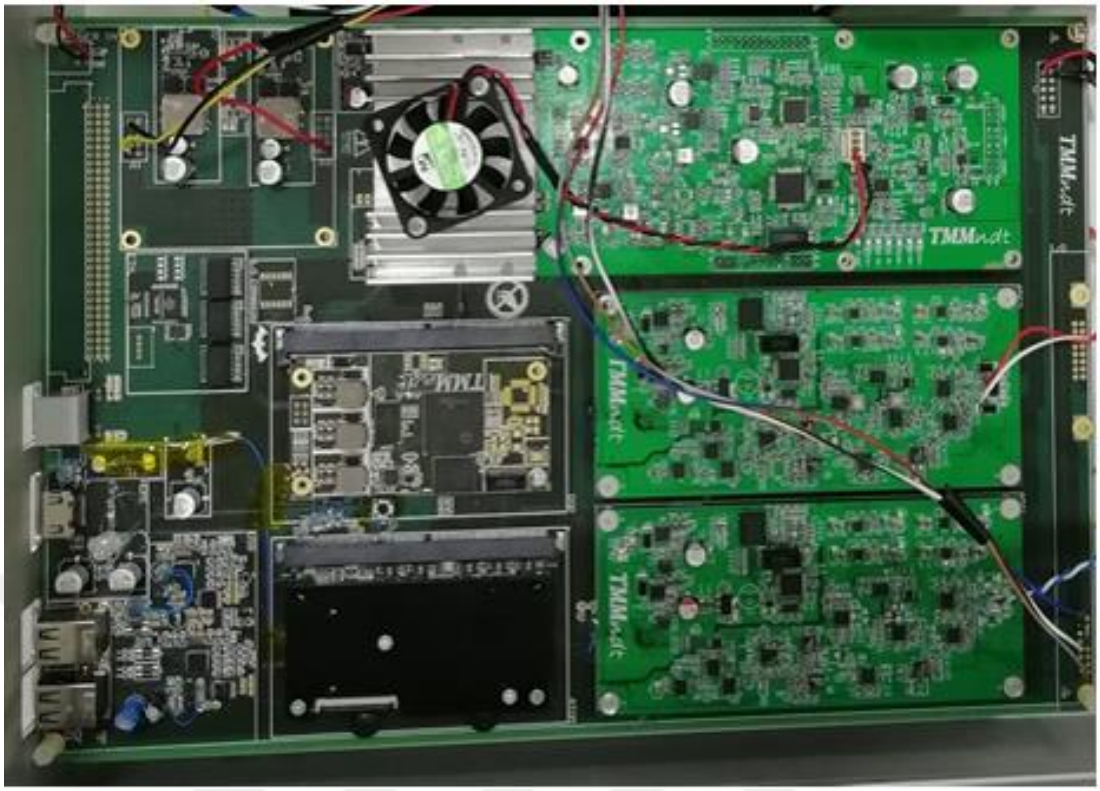


Şekil 2.8. Çevre Haberleşme Kartı (Arka)

Test sistemini oluşturan kartların birbirleri ile bağlantılarının yapıldığı tümleşik donanımın çizim görüntüsü ve donanımın gerçek görseli Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'daki gibidir.

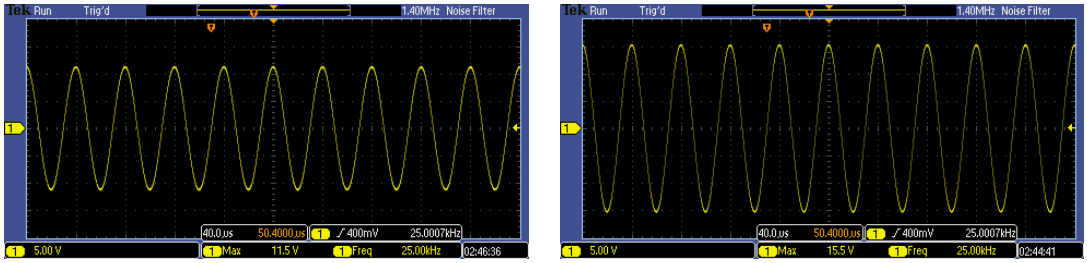


Şekil 2.9. Girdap Akımları Test Donanımı Çizim Görseli



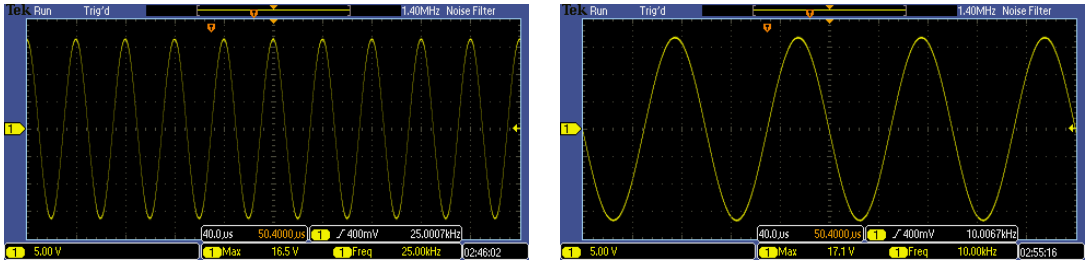
Şekil 2.10 Girdap Akımları Test Donanımı Fotoğrafı

Şekil 2.3'de gösterilen sinyal oluşturma kartı ile en fazla ±17V genlikte ve 2 kHz ile 100 kHz frekans aralığında 5 Hz adım aralığı ile sinüzoidal sinyal üretilebilmektedir. Sinyal oluşturma kartı kullanılarak farklı frekans ve genlikteki sinyallerin osiloskoptan alınan ekran görüntüleri Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil 2.14'deki gibidir.



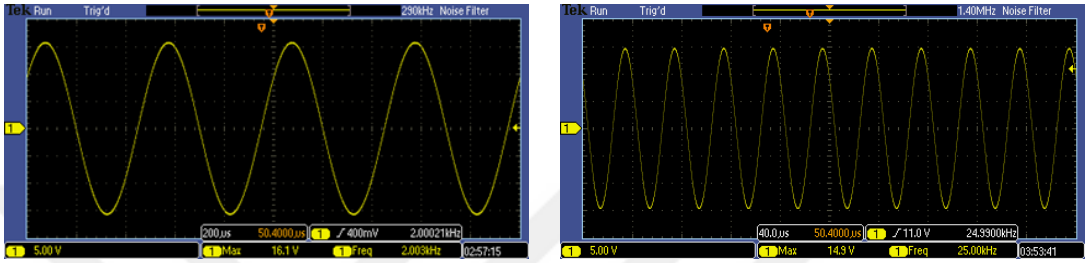
(a) (b)

Şekil 2.11. Besleme Sinyali (a) 11.5V (b) 15.5V



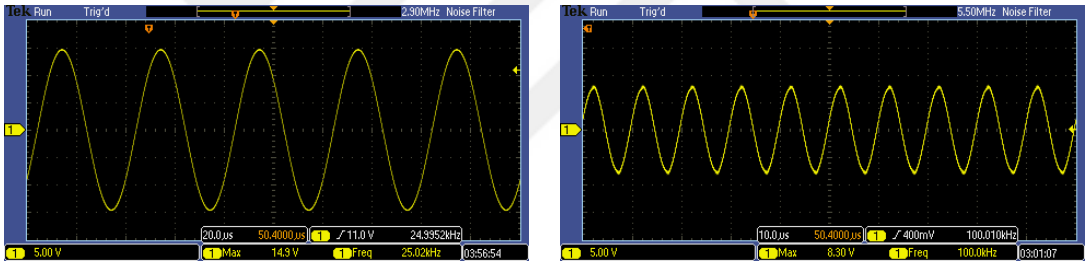
(a) (b)

Şekil 2.12. Besleme Sinyali (a) 16.5V (b) 17.1V



(a) (b)

Şekil 2.13. Besleme Sinyali (a) 2kHz (b) 24.990kHz

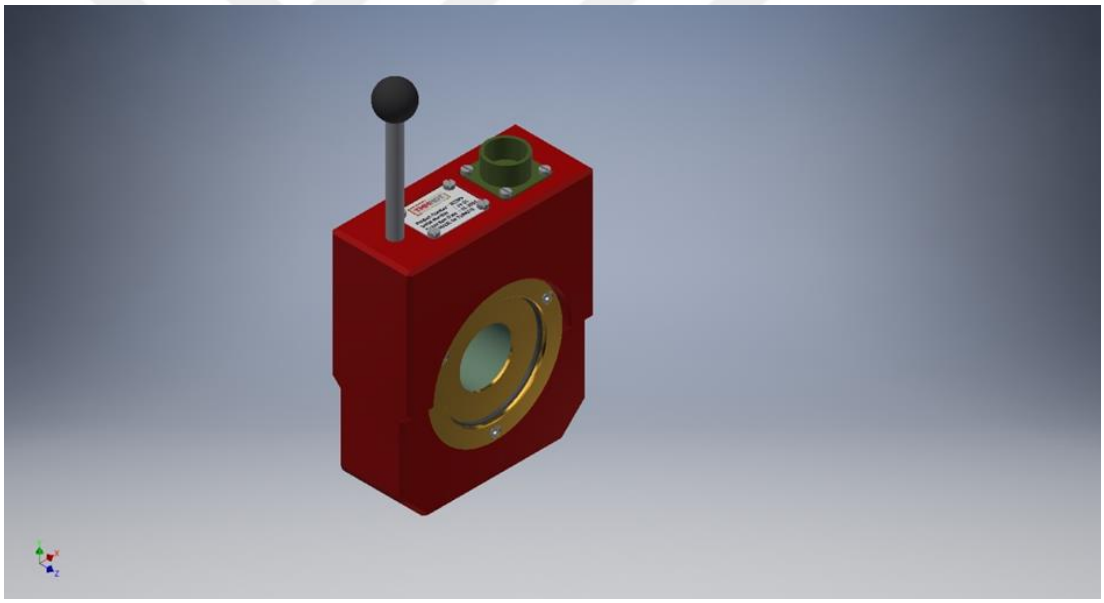


(a) (b)

Şekil 2.14. Besleme Sinyali (a) 24.995kHz (b) 100kHz

ADC kartlar ile bobinden alınan analog sinyaller en fazla 2 MSPS örnekleme hızında 16 bit olarak sayısallaştırılabilmektedir. Ayrıca ADC kart üzerinde bulunan yükseltme katmanları ile alınan sinyale analog kazanç uygulanabilmektedir. Sinyal işleme kartı 500 MHz saat frekansında çalışan iki çekirdekli bir DSP'ye sahiptir. DSP UART, SPI, TWI, Ethernet gibi haberleşme protokolleri ile yeterli miktarda giriş çıkış (IO) pinlerine sahiptir. ADC karttan alınan sayısal sinyaller üzerinde sinyal işleme algoritmasının sinyal işleme kartında çalıştırılmasıyla muayene sonucu üretilmektedir. Anakart girdap akımları test cihazını oluşturan bütün kartları, bilgisayarı, bobini ve ekranı birbirine bağlayan karttır. Ekran cihaza anakart üzerinde bulunan HDMI ile bağlanabilmektedir. Bütün kartların ayrı olması ve anakart üzerinde birleştirilebilir olması sistemi modüler hale getirmiştir.

Test cihazında kullanılacak bobinin alıcı sargıları bir adet tam diferansiyel sargı bir adet mutlak sargı ve bir adet gönderici sargıdan oluşmaktadır. Seçilen bobin tipinde test edilen malzeme sargıların içinden geçtiği için malzeme üzerinde birden fazla hatayı tespit edebilmeye imkân sağlar. Enine hatalar her bir diferansiyel sarımdan sırası ile geçeceği için her bir sarıma etki eden girdap akımlarının toplam manyetik alanı kuvvetlenmektedir. Böylelikle test malzemesinin bütün yüzeyi test edilmektedir. Test cihazında kullanılacak bobinin uyarıcı sargıları bir adet gönderici sargıdan oluşmaktadır. Gönderici sargı sinyal oluşturma kartı kullanılarak enerjilendirilir. Malzeme üzerinde oluşturulan ikincil manyetik alan diferansiyel sargı ve mutlak sargı ile alınır. Diferansiyel kart ADC kartlarından biri ile sayısallaştırılır. Mutlak sargıdan alınan sinyal ise diğer ADC kart ile sayısallaştırılır. Bobine ait çizim görseli Şekil 2.15'deki gibidir.



Şekil 2.15. Bobin Görseli

2.2. Veri Kümesi

Araştırmada kullanılan veriler 6 metre paslanmaz borunun toplam uzunluğu 15 metre olan konveyör bant üzerinde yaklaşık olarak 110 m/dk. hızla ilerlemesiyle elde edilmiştir. Paslanmaz boru üzerinde 2 adet 1mm, 2 adet 1,5mm ve 2 adet 2,3mm çapa sahip 6 adet delik bulunmaktadır. Veri setinde bu deliklere karşılık gelen örneklerin yaklaşık olarak yerleri;

- 1,5mm çaplı 1. delik 2230000 ile 2290000 arası örnekler,

- 1,5mm çaplı 2. delik 2338000 ile 2342500 arası örnekler,
- 2,3mm çaplı 1. delik 2417000 ile 2426000 arası örnekler,
- 2,3mm çaplı 2. delik 2510000 ile 2519000 arası örnekler,
- 1mm çaplı 1. delik 2608000 ile 2612500 arası örnekler,
- 1mm çaplı 2. delik 2797000 ile 2801000 arası örneklerden oluşmaktadır.

Veri toplamada Bölüm 2.1'de açıklanan sinyal oluşturma kartı, sinyal toplama kartı, sinyal işleme kartı ve bobin kullanılmıştır. Sadece diferansiyel sargıdan gelen veriler kaydedilmiştir. Sinyal işleme algoritması için yapılacak analizler diferansiyel sargı verileri ile yapılmıştır. Deneyler için uyarıcı bobine ±15V genlik ve 25kHz frekansa sahip bir sinüzoidal sinyal uygulanmıştır. Veri seti 500 KSPS örnekleme hızında toplanmış yaklaşık 3,7 milyon örnekten oluşmaktadır.

2.3. Performans Ölçütleri

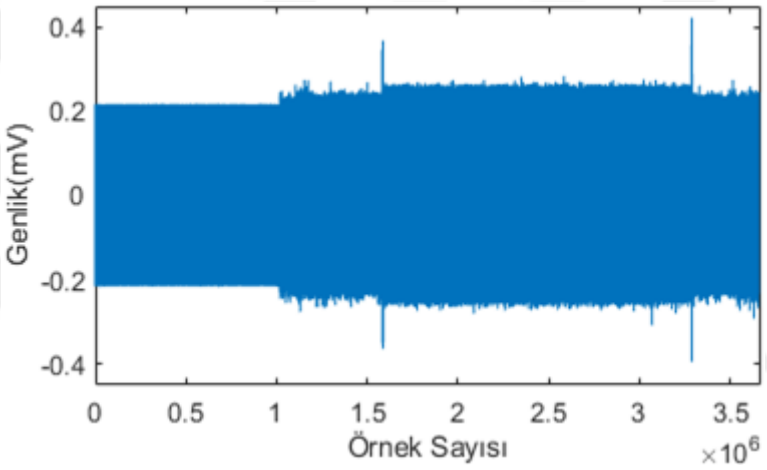
Girdap akımları test cihazı üretim aşamasındaki borular için gerçek zamanlı çatlak ve delik tespiti yapabilmelidir. Fabrikalarda boru üretim hatları genellikle en fazla 300 m/dk. hıza çıkabilmektedir. Tahribatsız muayene standartlarından olan ISO10893-2 standardına uygun olarak çatlak ve delik tespiti yapabilmelidir.

Fabrika ortamında veri toplama işlemi yapılamaması sebebiyle Tahribatsız Malzeme Muayene San. ve Tic. Ltd. Şti. firması bünyesinde bulunan ve en fazla 110 m/dk. hıza çıkabilen konveyör bant kullanılmış olup bu nedenle 300 m/dk. hızda test yapılması mümkün olmamıştır.

3. GERÇEKLENEN HATA TESPİT YAKLAŞIMI

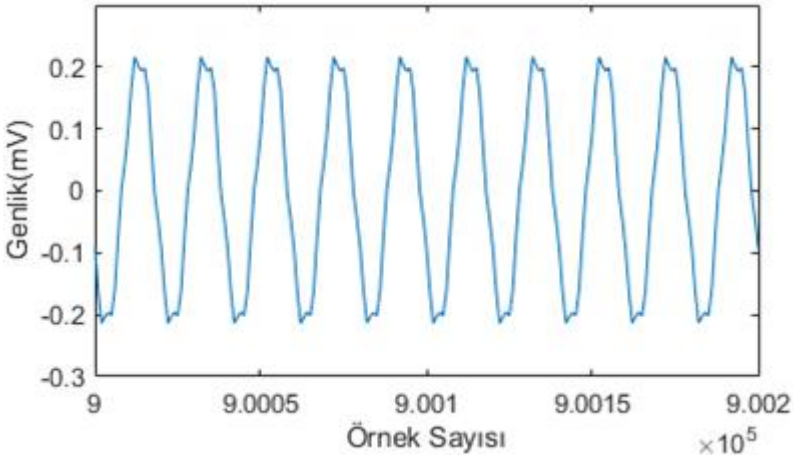
3.1. Ham Veri

Bölüm 2'de detayları açıklanan deneysel sistem kullanılarak konveyör hatta 110m/dk hızda ilerleyen test borusundan ham veri elde edilmiştir. Ham veri yaklaşık olarak 3,7 milyon sayısal örnekten oluşmaktadır. Ham verinin grafiksel gösterimi Şekil 3.1'daki gibidir.



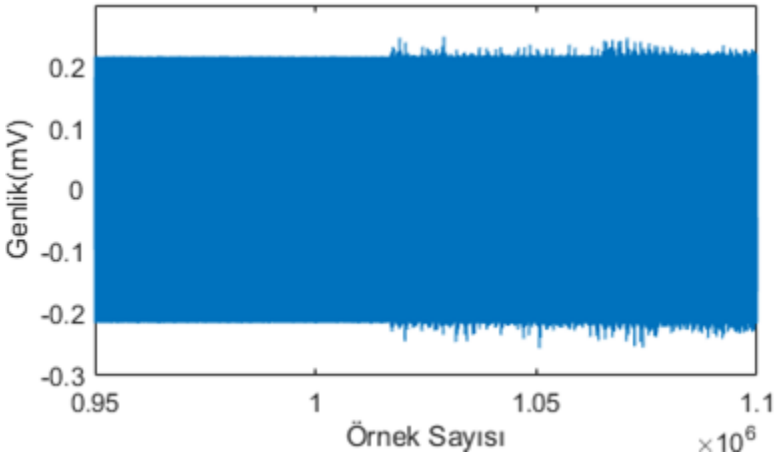
Şekil 3.1. Bobinden Alınan Ham Veri

Ham veride gürültüler açık olarak gözlemlenmektedir. Bunun nedeni borunun konveyör hat üzerindeki ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. İlk 1 milyon veri boru konveyör hat üzerinde bobine girmeden önce bobine doğru ilerlerken alınmıştır. Bobinin alıcı sargısı gönderici sargıdan dolayı oluşan manyetik alanı trafo etkisi ile potansiyel farka dönüştürmüştür. Bu kısımda bobinin içinde boru olmadığı için sinyalde bulunan gürültü çok azdır. Yakınlaştırılmış ham veri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Boru Bobine Girmeden Önce Alınan Sinyal (Yakınlaştırılmış Görüntü)

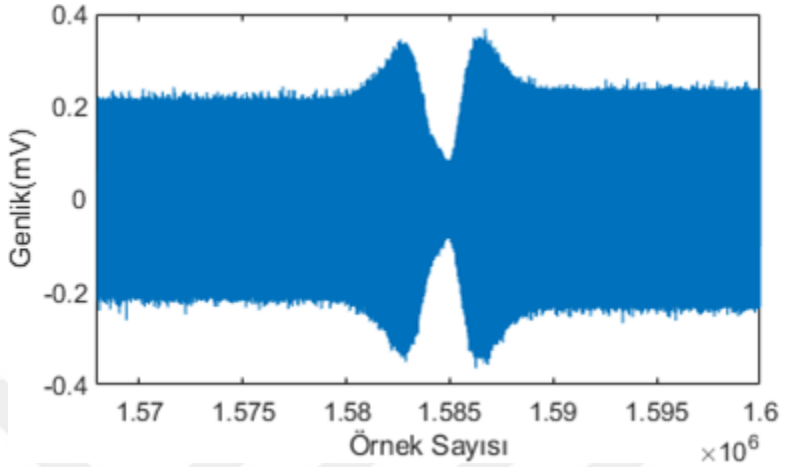
Borunun bobinin içinden merkezli geçmesi ve sarsıntının azaltılması için bobin öncesi ve bobin sonrası eş uzaklıkta baskı makaraları bulunmaktadır. Boru bobine girmeden hemen önce baskı makarasının altından geçer ve makara motorunun çalışmasına neden olur. Borunun baskı makarası ile bobin arasında bulunduğu anlarda elde edilen ham veri grafikte 1 milyon ile 1,5 milyon arasında bulunan örneklere karşılık gelmektedir. Sinyalde oluşan gürültü baskı makarasına ait motordan kaynaklanmaktadır. Baskı makarasının çalışmadan hemen önce ve hemen sonra sinyaldeki değişimi gösteren grafik Şekil 3.3'deki gibidir.



Şekil 3.3. Baskı Makara Motorunun Oluşturduğu Gürültü

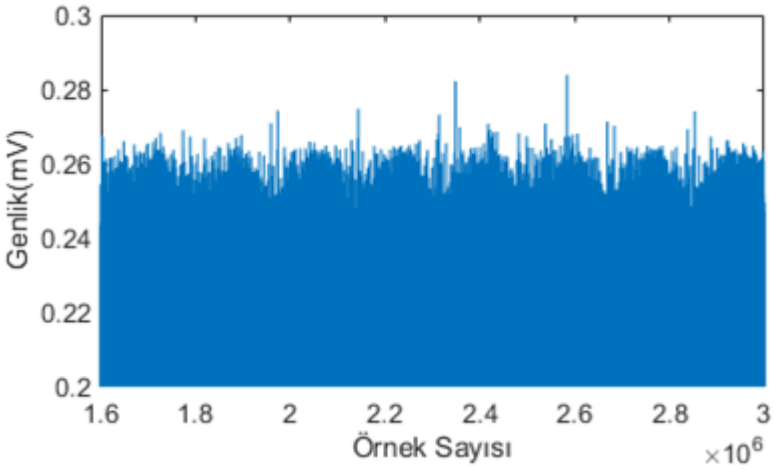
Şekil 3.1'de yaklaşık 1,6 milyona den gelen örneklerde görülen sinyal sıçraması borunun bobinin içine ilk giriş anında oluşmuştur. Bu sıçrama yakından incelendiğinde sinyal genliğinde oluşan değişimin motor gürültüsünden farklı olduğu gözlemlenmektedir. Boru giriş anında sinyalde oluşan değişim borunun hat

üzerindeki ilerleme hızı ile orantılıdır. Boru hızı arttıkça sinyalde oluşan dalgalanmanın frekansı artmakta, hız yavaşladıkça dalgalanma frekansı azalmaktadır. Sinyal dalgalanması Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



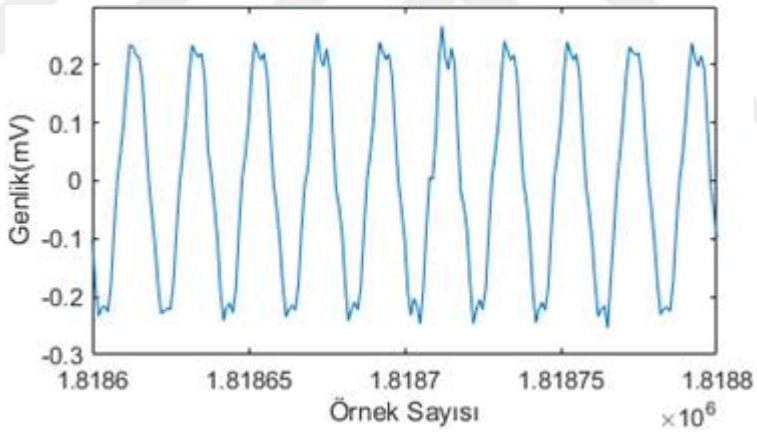
Şekil 3.4. Boru Giriş Anında Sinyalde Oluşan Dalgalanma

Benzer olarak borunun bobinin içinden çıkma anında da sinyal seviyesinde dalgalanma görülmektedir. Dalgalanmanın sinyal genliğine etkisi motor gürültüsünden dolayı oluşan yüksek frekans bileşenlerinin etkisinden daha büyüktür. Boru giriş ve çıkış anı arasındaki örnekler dikkate alındığında burada bulunan örnekler boru bobinin içinde iken alınan örneklerden oluşmaktadır. Dolayısı ile alıcı sargılardan alınan sinyaller uyarıcı sargıların paslanmaz boru üzerinde oluşturduğu girdap akımlarının sinyallerdir. Boru üzerinde çeşitli çaplarda delikler olduğu için alınan sinyallerde bu deliklere ait bilgiler bulunmaktadır. Ham veri üzerinde herhangi bir işlem yapılmadığı için deliklere ait bilgiler ham veride görülememektedir. Boru tam bobin üzerinden geçerken alınan sinyaller Şekil 3.5'deki gibidir.



Şekil 3.5. Boru Üzerinden Alınan Sinyaller

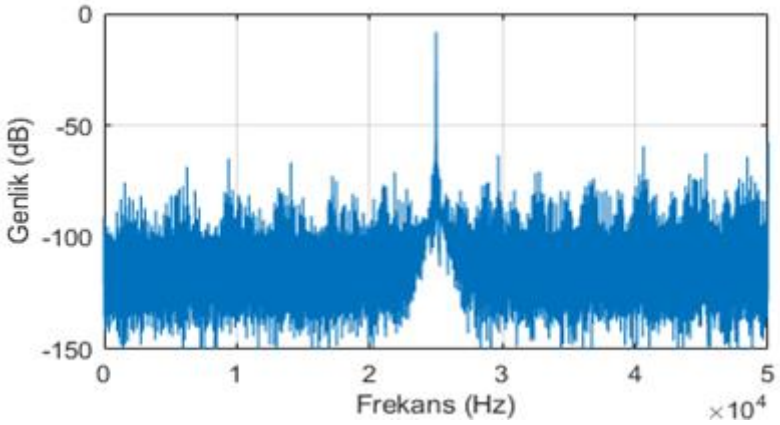
Ham veride görülen gürültüler baskı makara motorlarından ve lift-off etkisi [14] olarak adlandırılan borunun bobinin içinde tam merkezli ve sarsıntısız ilerleyememesinden dolayı oluşmaktadır. Borunun bobin içerisinde hareketi sırasında alınan ham sinyalin yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.6'deki gibidir.



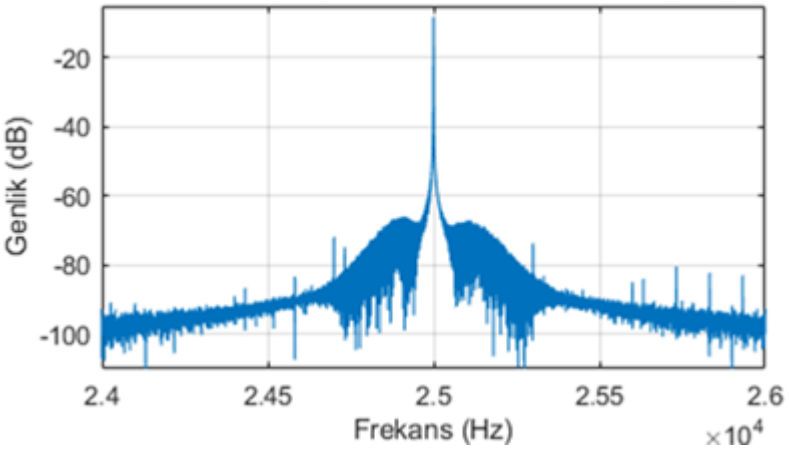
Şekil 3.6. Şekil3.5'in Yakınlaştırılmış Görünümü

3.2. Filtreleme

Boru üzerinden alınan ham veri incelendiğinde sinyalde yüksek frekans gürültüsünün olduğu gözlemlenmektedir. Deliklere ait bilgiyi tespit etmek için ilk olarak veri setinde bulunan ham verinin tamamı frekans düzleminde incelenmiştir. Ham verinin frekans düzleminde gösterimi Şekil 3.7 ve yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.8'deki gibidir.

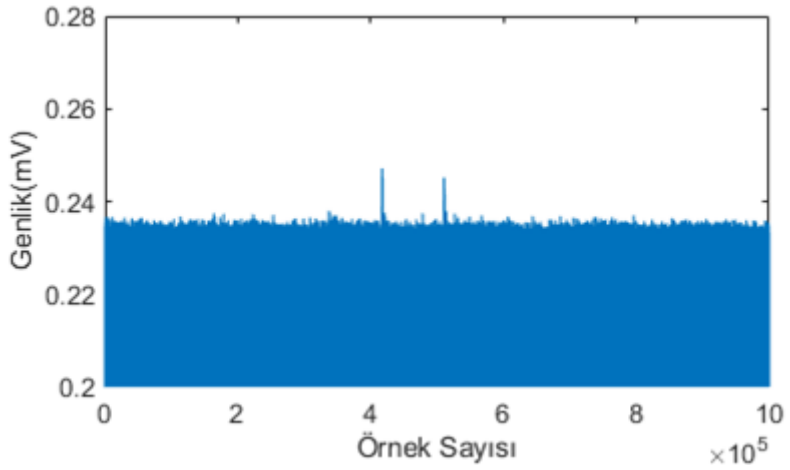


Şekil 3.7. Veri Setinde Bulunan Örneklerin Frekans Düzlemindeki Görünümü



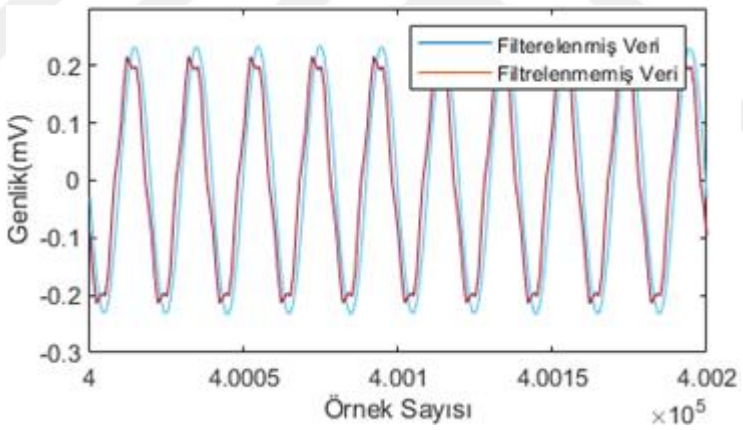
Şekil 3.8. Şekil 3.7'nin Yakınlaştırılmış Görünümü

Frekans düzleminde bulunan ham veri incelendiğinde 25 kHz frekansta -5 dB genlikte sinyal olduğu görülmektedir. Alıcı bobinden alınan sinyal ile uyarıcı bobine uygulanan sinyal frekansı aynıdır. Bunun nedeni uyarıcı bobin ile alıcı bobinler birbirine çok yakın olduğu için bobinler arasında trafo etkisi oluşmaktadır. Bundan dolayı alıcı bobinden alınan sinyalin frekansı uyarıcı bobine uygulanan sinyal frekansına eşittir. Ayrıca frekans düzleminde 25 kHz ana sinyalin her iki yanında -70 dB genliğe ulaşan bant görülmektedir. Bunun dışında bulunan bantlarda motor gürültüsü ve lift-off etkisinden oluşan gürültü görülmektedir. Motor gürültüsü ve lift-off etkisini azaltmak için ham veriye basit bir 2. derece IIR filtre uygulandığında filtrelenmiş veri Şekil 3.9'daki gibi olmaktadır.



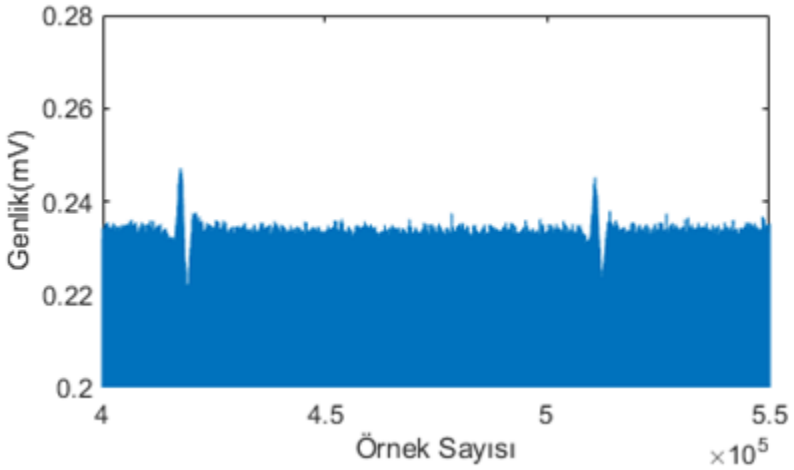
Şekil 3.9. Filtre Sonrası Boru Üzerinden Alınan Sinyaller

Şekil 3.5 ile karşılaştırıldığında filtrelenmiş sinyaldeki genlik dalgalanmasının çok daha az olduğu görülmektedir. Grafikte 1 milyon veri olduğu için sinyaller bu grafikte sinüzoidal olarak görülememektedir. Sinyalin periyodik hareketini gösteren yakınlaştırılmış grafik görüntüsü Şekil 3.10'daki gibidir.



Şekil 3.10. Filtrelenmiş ve Filtrelenmemiş Sinyaller

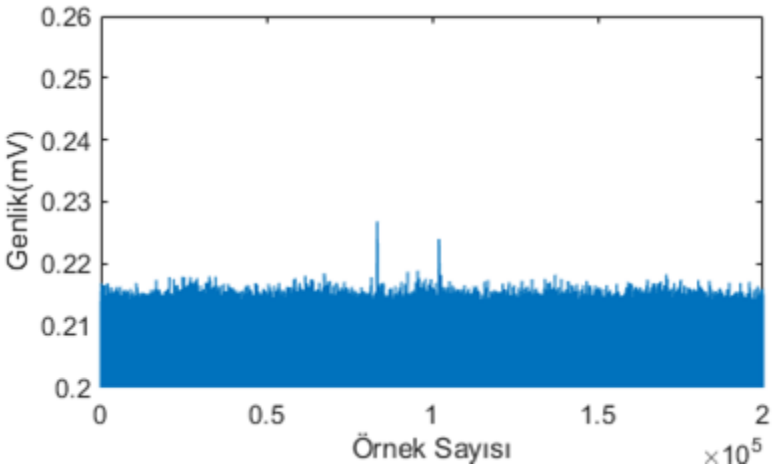
Benzer olarak Şekil 3.10'daki filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sinyaller incelendiğininde gürültünün gözle görülür oranda azaldığı, sinyalin motor gürültüsünden ve lift-off etkisinden arındırıldığı görülebilmektedir. Şekil 3.9'da görülen 2 adet sinyal sıçraması grafik üzerinde yaklaştırıldığında bu iki sinyal sıçramasının gürültüden farklı olduğu görülmektedir. Sıçrama yapan sinyallerin yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.11'deki gibidir.



Şekil 3.11. Sinyal Sıçramasının Grafik Üzerinde Yakınlaştırılması

3.3. Örnek Seyreltme

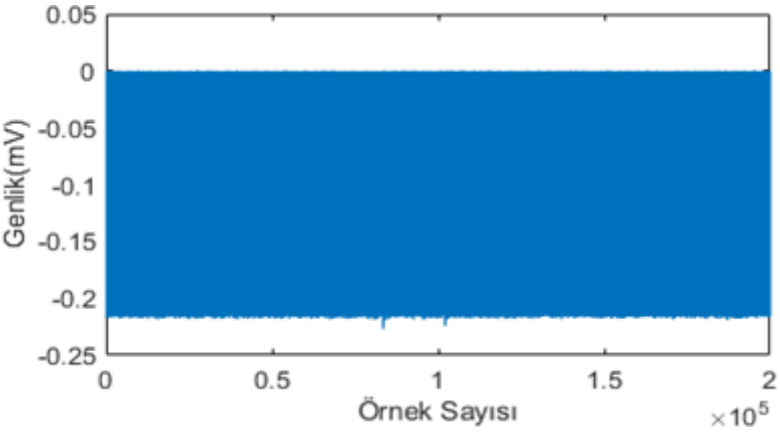
Şekil 3.11'de bulunan sinyaller ile frekans düzleminde yapılan incelemeler göz önünde bulundurulduğunda sinyalde modülasyon oluştuğu anlaşılmaktadır. Modülasyon borunun üzerindeki kusurların diferansiyel bobin sargılarının altından geçmesi ile oluşmaktadır. Çünkü diferansiyel bobinin sarım tekniğinden dolayı alınan sinyal seviyesinde önce artma sonra azalma görülmektedir. Boru hızı arttıkça genlik değişim hızı artar, boru hızı azaldıkça genlik değişim hızı azalır. Genlik değişimindeki bu dalgalanma frekans düzleminde yan bantlar olarak karşımıza çıkmıştır. Frekans düzleminde 25 kHz'de bulunan sinyalin her iki yanında bulunan bandı frekans düzleminde 0 Hz frekansının her iki yanına taşımak için demodülasyon işlemi uygulanmıştır. Örnekleme frekansının taşıyıcı frekans olan 25 kHz frekansından çok yüksek olması ve yapılacak işlem sayısının azaltılması için filtrelenmiş veride demodülasyon öncesi 5 kat örnek seyreltme yapılmıştır. Örnek seyreltme oranı belirlenirken gerçek zamanlı işlem yapabilme kısıtı, Nyquist oranı ve uyarıcı bobine uygulanacak sinyalin 2kHz - 100kHz aralığında olması nedeni ile yazılım tasarlama iş yükü göz önünde bulundurulmuştur. Örnek seyreltme sonrası boru filtrelenmiş sinyal Şekil 3.12'deki gibidir



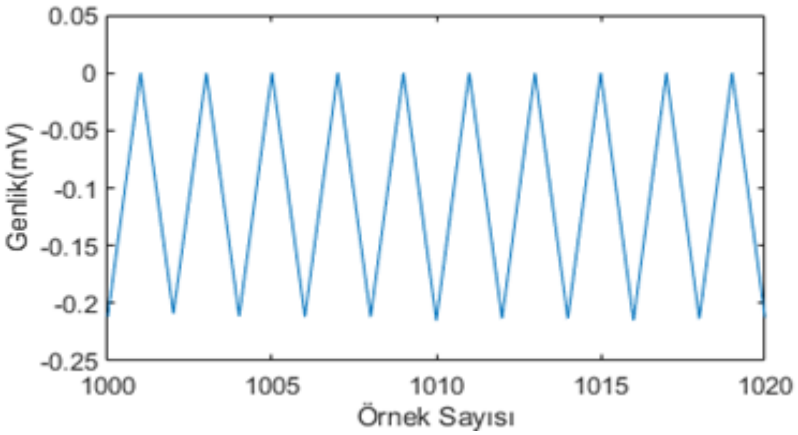
Şekil 3.12. Örnek Seyreltme Sonrası Sinyal

3.4. Demodülasyon

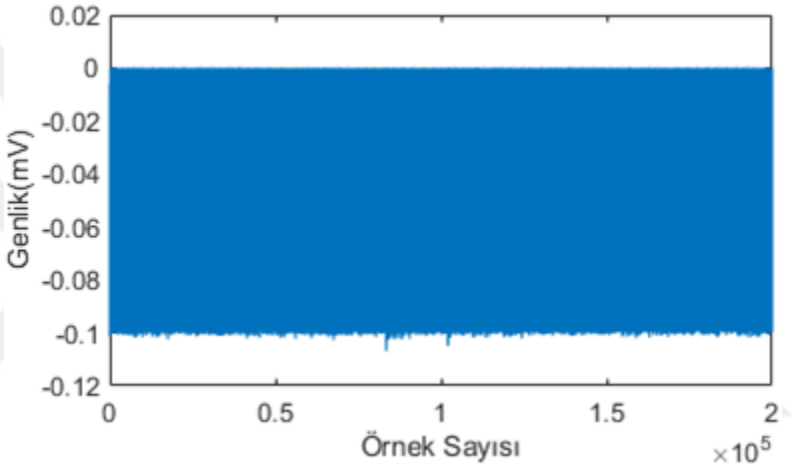
Örnek seyreltme işlemi ile sinyalin örnekleme frekansı 100 KSPS olmuştur. Yani sinyaldeki veri miktarı %80 oranla azaltılmıştır. Örnek seyreltme işlemi ile sonraki adımların işlem yükü önemli ölçüde azaltılmış ve hata tespit algoritmasının gömülü sistem üzerinde gerçek zamanlı çalışabilmesinin önü açılmıştır. Şekil 3.12 incelendiğinde örnek seyreltme sonrası sinyalde gürültünün arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum alt örnekleme işleminin doğal bir sonucudur. Seyreltilmiş sinyale karesel genlik demodülasyonu (Quadrature Amplitude Demodulation) uygulanmıştır. Bunun için sinyal birbiri ile 90 derece faz farkı olan sinüs ve kosinüs sinyalleri ile ayrı ayrı demodüle edilmiştir [15]. Demodülasyon sonrası sinyalin sinüs ve kosinüs bileşenlerine ve bu sinyallerin grafik üzerinde yakınlaştırılmış gösterimleri Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16'daki gibidir.



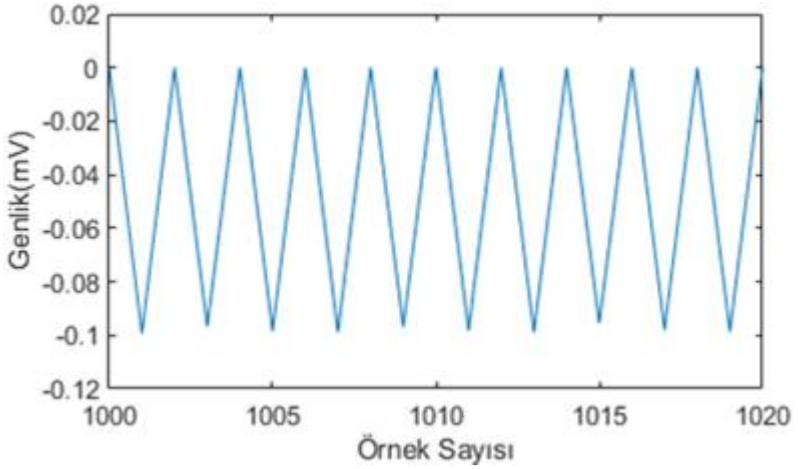
Şekil 3.13. Demodülasyon Sonrası Sinüs Bileşeni



Şekil 3.14. Şekil3.13'ün Yakınlaştırılmış Görünümü



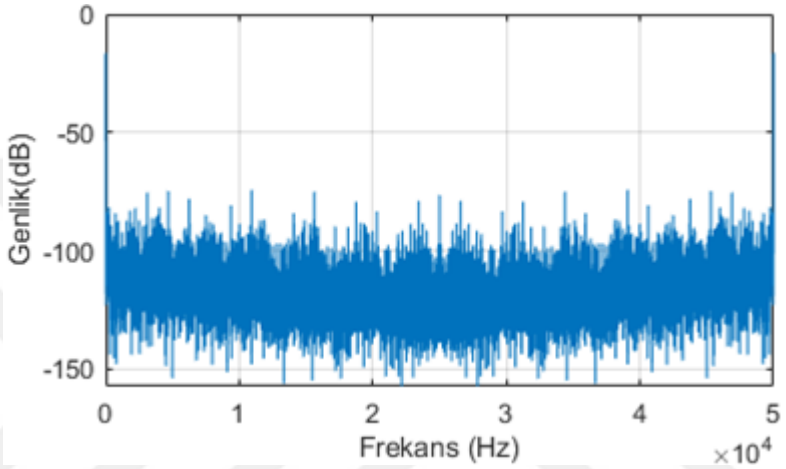
Şekil 3.15. Demodülasyon Sonrası Kosinüs Bileşeni



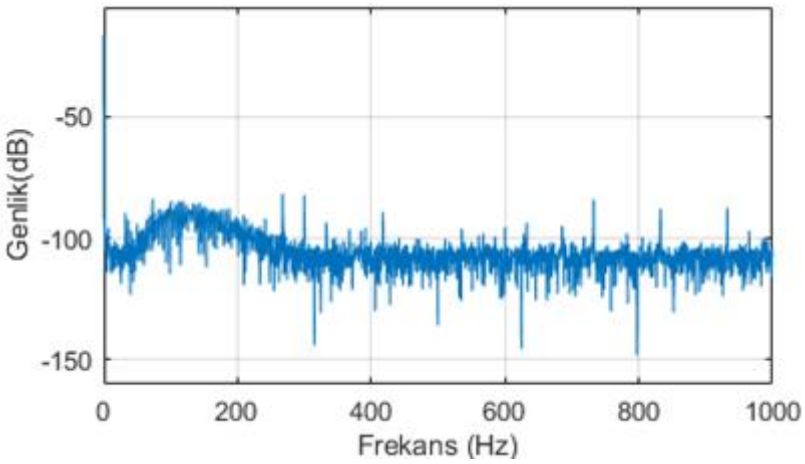
Şekil 3.16. Şekil 3.15'in Yakınlaştırılmış Görünümü

Şekil 3.14 ve Şekil 3.16 incelendiğinde testere dişi benzeri sinyal gözükmektedir. Bunun nedeni sinyalimizin frekansı 25 kHz olması ve örnekleme frekansımızın 100 KSPS olmasıdır. Yani her periyotta sadece 4 örnek olduğu için sinyal sinüzoidal

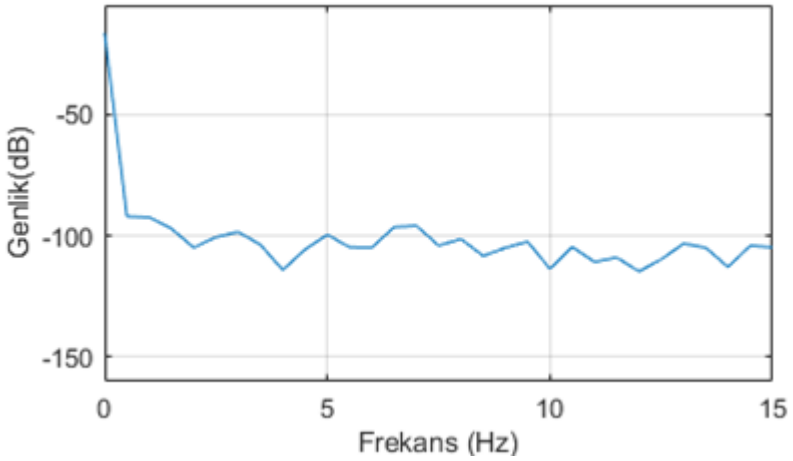
görünümden uzaklaşmıştır. Şekil 3.13 ve Şekil 3.15 incelendiğinde bu grafiklerden bir anlam çıkarılamamaktadır. Taşıyıcı frekansın yanında bulunan bantların 0 Hz frekansının yanına taşındığını görebilmek ve bant frekansına ait bilgiler elde etmek için sinyaller frekans düzleminde incelenmelidir. Sinüs ve kosinüs bileşenine ait sinyallerin hızlı fourier dönüşümü (FFT) yanıtı ve grafiklerin yakınlaştırılmış görünümleri Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22'deki gibidir.



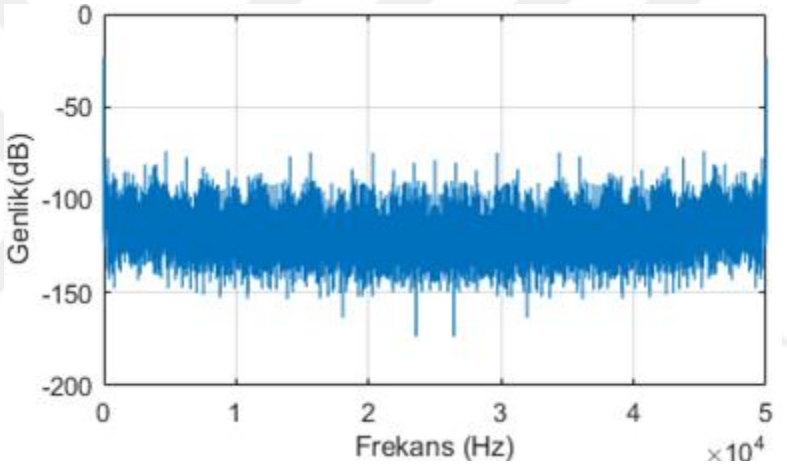
Şekil 3.17. Sinüs Bileşeni Frekans Spektrumu



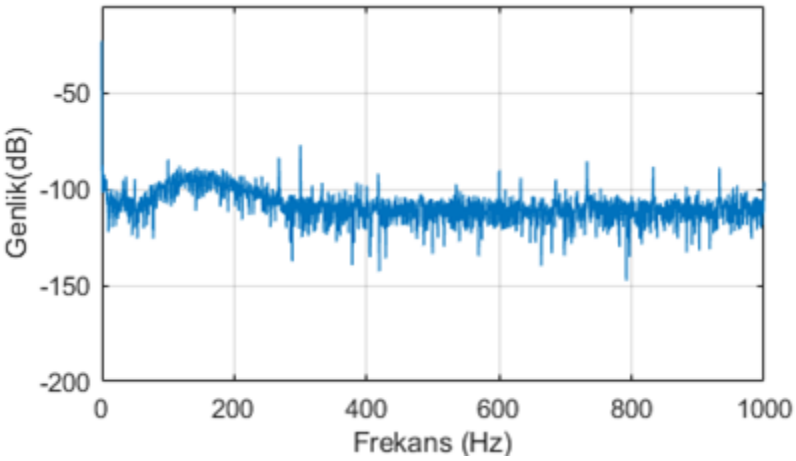
Şekil 3.18. Şekil 3.17'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1kHz)



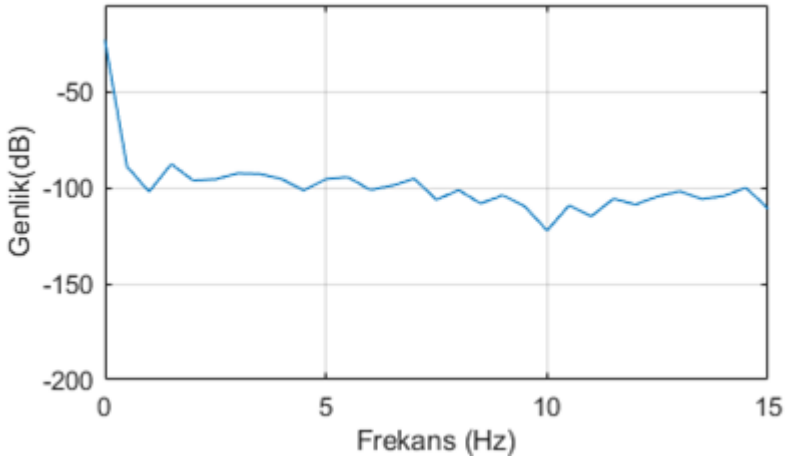
Şekil 3.19. Şekil 3.17'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-15Hz)



Şekil 3.20 Kosinüs Bileşeni Frekans Spektrumu



Şekil 3.21. Şekil 3.20'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1kHz)

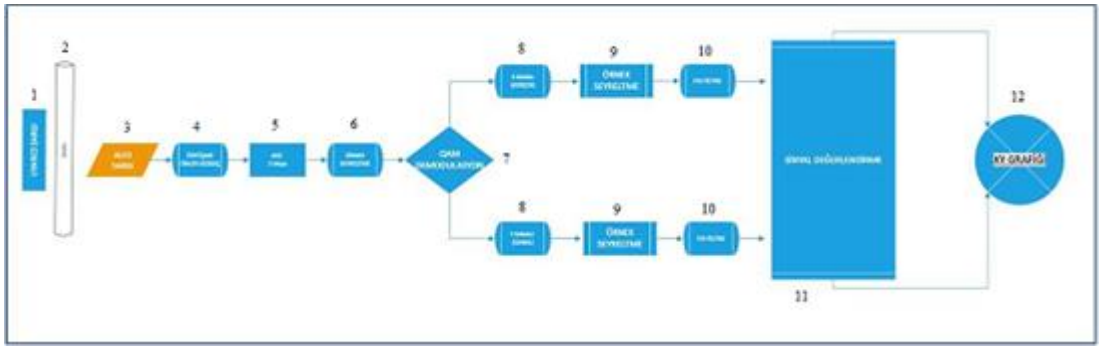


Şekil 3.22. Şekil 3.20'nin Yakınlaştırılmış Görünümü (0-15Hz)

3.5. Örnek Seyreltme

Grafiklerden anlaşılacağı üzere sinüs ve kosinüs bileşenlerinin her ikisinde de işaretin bulunduğu frekans bandındaki genliğine oranla yüksek DC bileşen mevcuttur. Bu bant yaklaşık olarak 70 Hz ile 210 Hz aralığındadır. Bant dışında bulunan frekanslarda yoğun gürültü mevcuttur. DC bileşeni ve gürültüyü bastırmak için sinyale 6. derece IIR filtre uygulanmıştır. İlgili bantta bulunan sinyallerde kayıp olmaması için kesim frekansları 40 ve 240 Hz olan filtre tasarlanmıştır. Filtre uygulanmadan önce alt örnekleme işlemi yapılmıştır. Çünkü 25kHz frekansa sahip olan taşıyıcı sinyal demodülasyon sonrası bastırılmış ve sadece düşük frekanstaki bilgi bandı kalmıştır. Örnekleme hızı olan 100ksps,bant frekansımız olan 70 Hz ile 210 Hz'e oranla çok yüksektir. Yapılacak işlem sayısını azaltmak için ikinci bir alt örnekleme yapmak gerekmektedir. Alt örneklemeden dolayı oluşacak gürültüyü en aza indirmek için örtüşme önler (anti-aliasing) filtre uygulanmıştır. Örnekleme frekansı banttaki en yüksek frekansın 10 katı olması gerektiği deneysel olarak bulunmuştur. Örnekleme frekansı 10 kattan daha az olduğunda sinyal işleme sonucunda elde edilen kelebek eğrisinde köşeler oluşmaktadır. Farklı frekans ve farklı hızlarda genel geçer bir çözüm oluşturması için örnekleme frekansı 5 KSPS olarak seçilmiştir.

Filtreleme işlemlerine devam etmeden önce buraya kadar yapılan işlemlere Şekil 3.23'de bulunan blok diyagram üzerinden göz atmak iyi olacaktır.

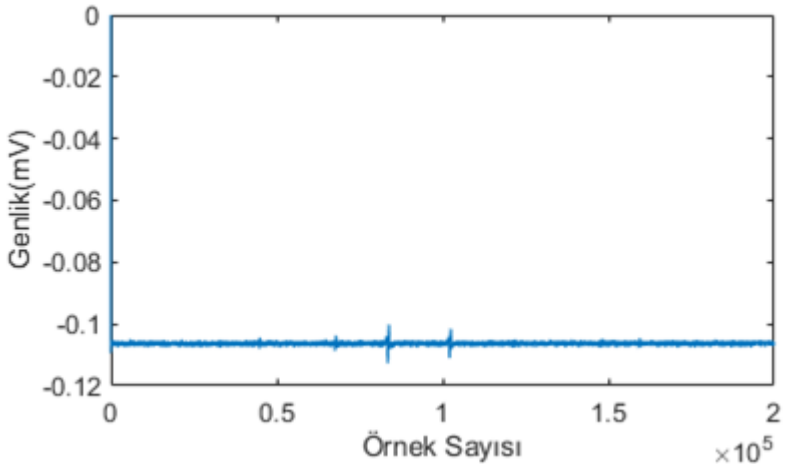


Şekil 3.23. Uygulanan Algoritmanın Blok Diyagramı

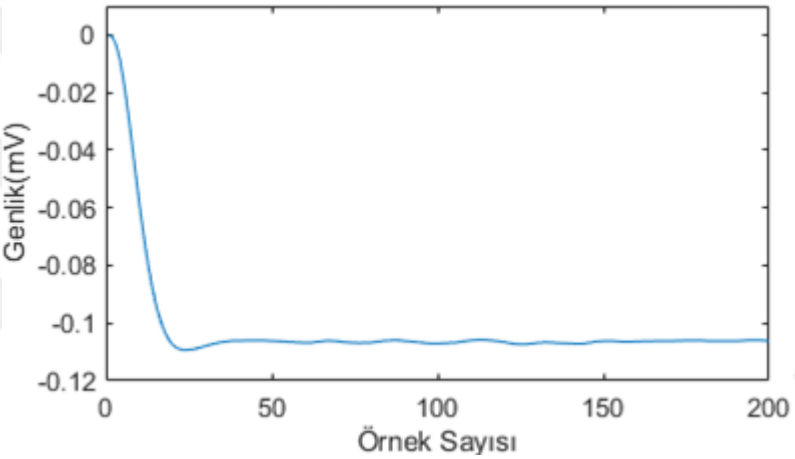
Şekil 3.23'de bulunan 1 numaralı blok uyarıcı bobin simgesidir. Uyarıcı bobine 25kHz frekansa sahip uyarıcı sinyal uygulanmıştır. 2 numaralı blok boru simgesidir. 3 numaralı blok alıcı bobin simgesidir. 4 numaralı blok ADC kartı simgelemektedir. Alıcı bobinden aldığı analog sinyali sayısala çevirir. 500 KSPS hız ile veri toplanmıştır. 5 numaralı simge 2. derece bant geçiren filtredir. Motor sürücülerinin ve diğer gürültüleri bastırmak için kullanılmıştır. 6 numaralı blok ile örnek seyreltme işlemi yapılmıştır. Örnekleme hızı 500 KSPS'dan 100 KSPS'a düşürülmüştür. 7 numaralı blok demodülatörü simgelemektedir. Karesel genlik demodülasyon işlemi ile sinyal sinüs ve kosinüs bileşenlerine ayrılmıştır. Sinüs ve kosinüs bileşenlerine sanal ve gerçek bileşenler de denmektedir. 8 numaralı blok ile ikinci örnek seyreltme işlemi yapılmıştır. Bunun sebebi demodülasyon sonrası sinyal frekansının örnekleme hızına oranla çok düşük olmasıdır. 9 numaralı blok ile örnekleme hızı 100 KSPS'dan 5 KSPS'a düşürülmüştür. Bu blokta 20 kat örnek seyreltme yapılmıştır. 10 numaralı blokta yapılan işlemler Bölüm 3.6'da anlatılmaktadır. 5-10 nolu bloklarda yapılan işlemlerin hepsi DSP kartı üzerinde sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

3.6. Filtreleme

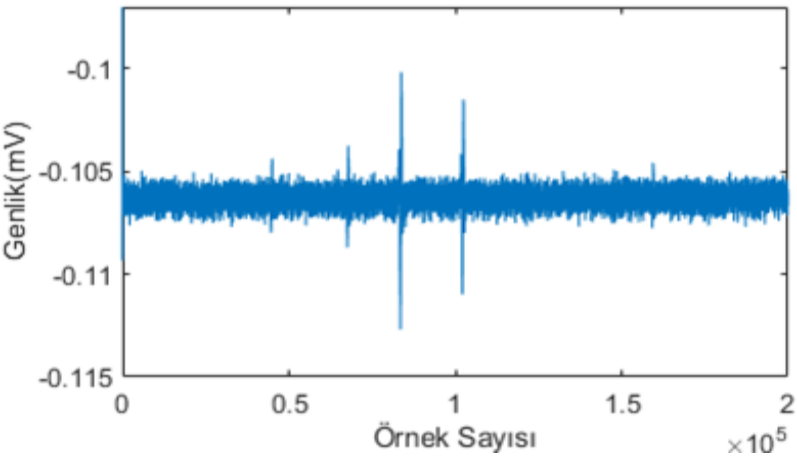
Seçilen örnekleme frekansına göre 4kHz kesim frekansına sahip örtüşme önler filtre tasarlanmıştır. Bu filtre 2. derece alçak geçiren IIR filtredir. Sinüs ve kosinüs bileşen filtrelendiğinde Sinüs ve kosinüs bileşenleri ve bu sinyallere ait grafiklerin yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'daki gibidir.



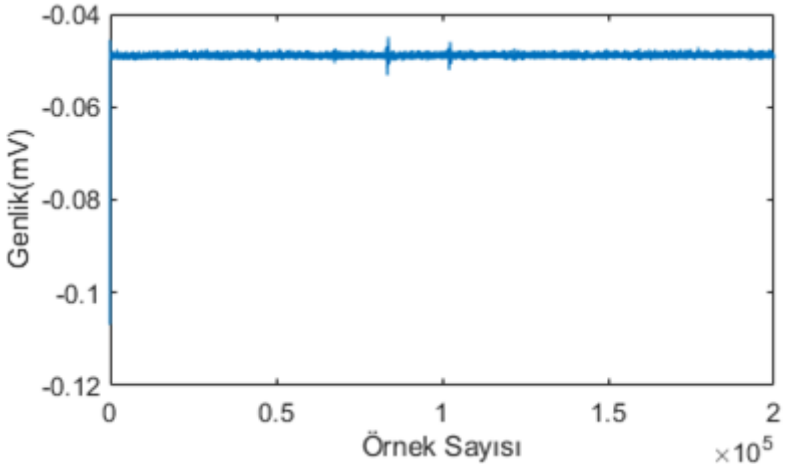
Şekil 3.24. Filtrelenmiş Sinüs Bileşeni



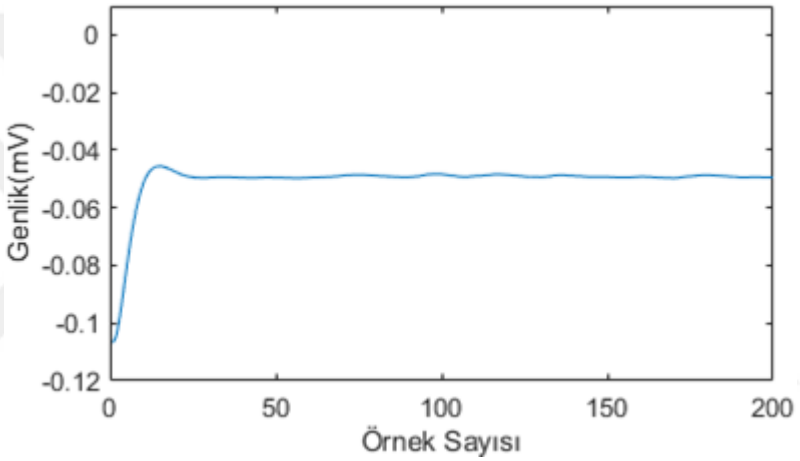
Şekil 3.25. Şekil 3.24'ün Yatay Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü



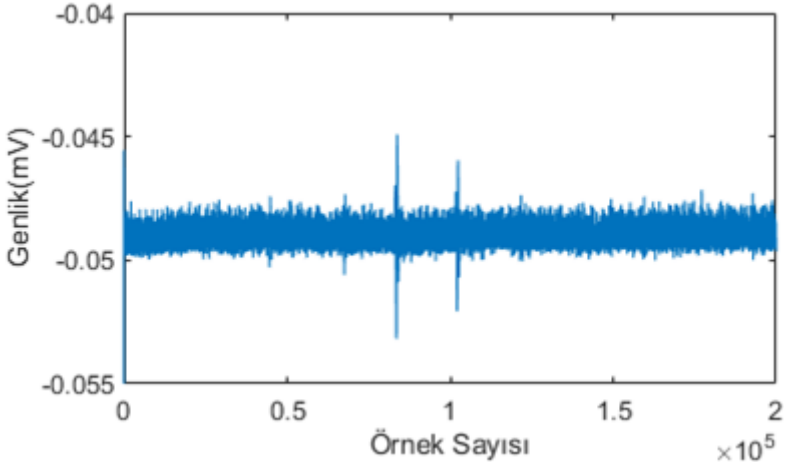
Şekil 3.26. Şekil 3.24'ün Dikey Eksende Yakınlaştırılmış Görüntü



Şekil 3.27. Filtrelenmiş Kosinüs Bileşeni

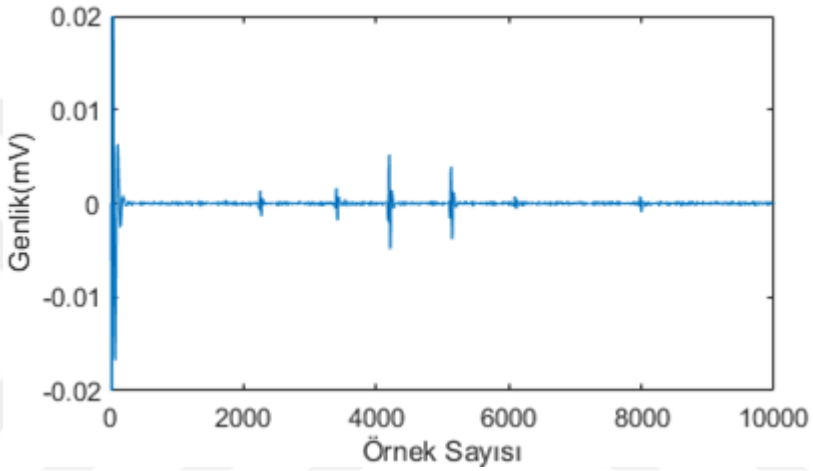


Şekil 3.28. Şekil 3.27'nin Yatay Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü

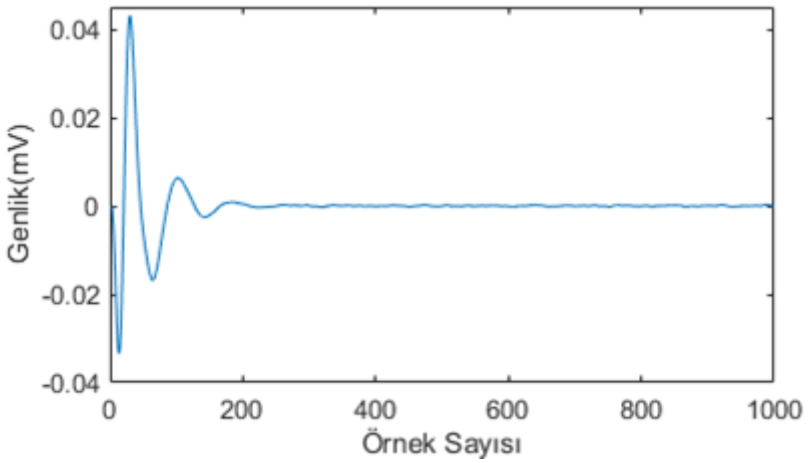


Şekil 3.29. Şekil 3.27'nin Dikey Eksende Yakınlaştırılmış Görünümü

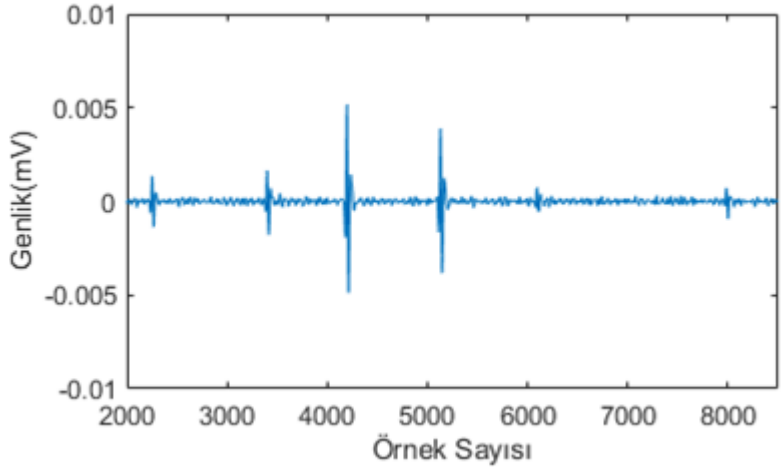
Grafikler incelendiğinde yüksek frekans gürültüsünün bastırılması ile en büyük çapa sahip deliklere ait sinyal sıçraması tekrar görünür olmuştur. Ayrıca 1,5 mm çaplı deliklere ait sinyal sıçraması da sinüs bileşende seçilebilmektedir. Filtrenin alçak geçiren olması nedeniyle sinyaldeki DC bileşen kendini korumuştur. Alt örnekleme işlemi ile örnekleme frekansı 5 KSPS değerine düşürülmüştür. Seyreltme işlemi sonrasında sinüs ve kosinüs bileşenlerine tasarlanmış olan 6. derece IIR filtre uygulanmıştır. Filtreleme sonrasında sinyallere ait grafikler Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'deki gibidir.



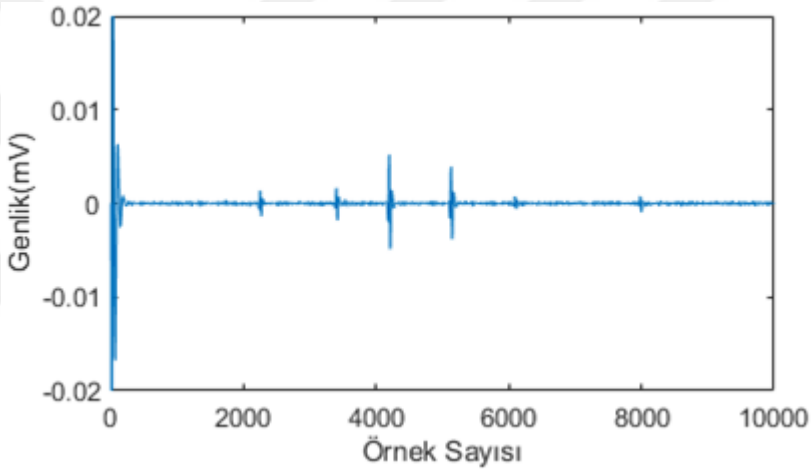
Şekil 3.30. Filtrelenmiş Sinüs Bileşeni



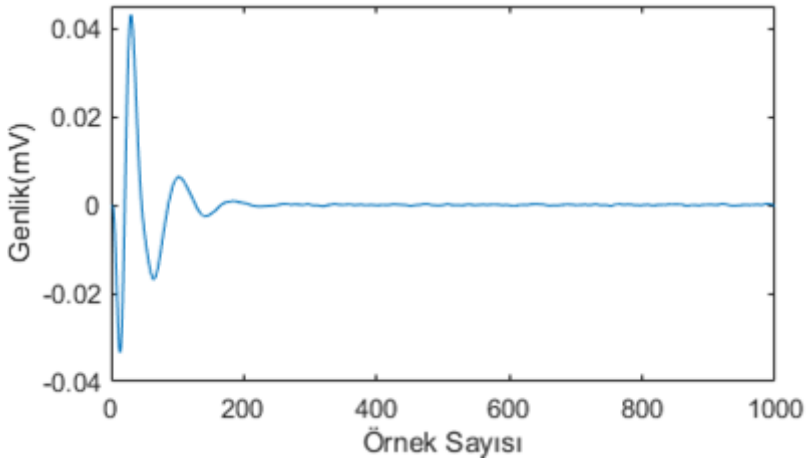
Şekil 3.31. Şekil 3.30'un Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1000 Örnek)



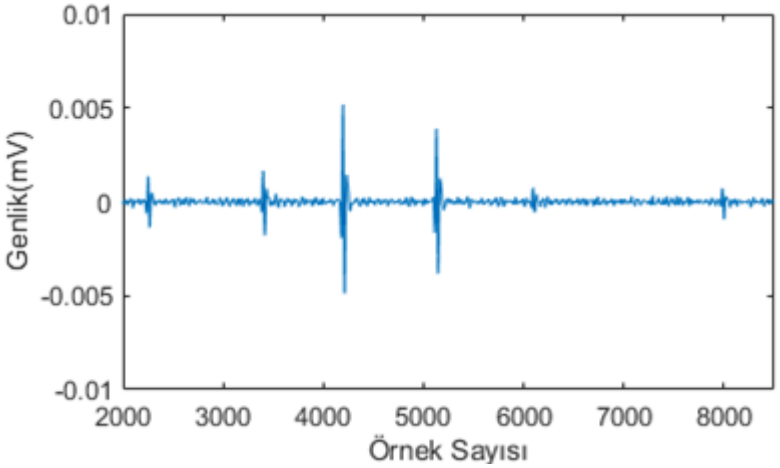
Şekil 3.32. Şekil 3.30'un Yakınlaştırılmış Görünümü (2000-8500 Örnek)



Şekil 3.33. Filtrelenmiş Kosinüs Bileşeni

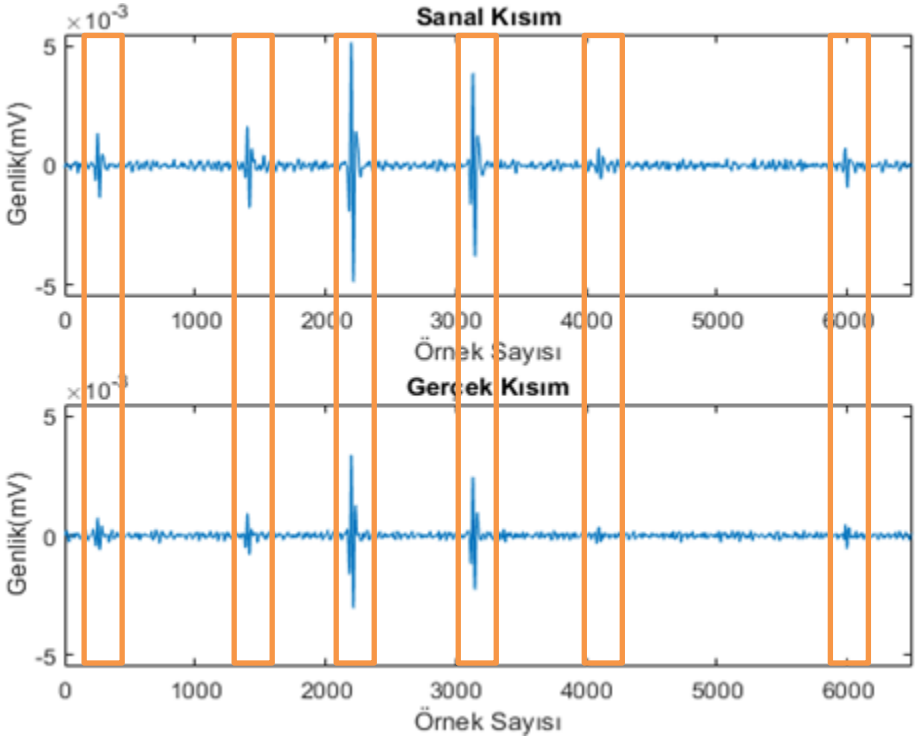


Şekil 3.34. Şekil 3.33'ün Yakınlaştırılmış Görünümü (0-1000 Örnek)



Şekil 3.35. Şekil 3.33'ün Yakınlaştırılmış Görünümü (2000-8000 Örnek)

Şekil 3.31 ve Şekil 3.34'de görülen sinyaller filtrenin giriş değerlerinin 0 olmasından kaynaklanmaktadır. Filtreye giren sinyaller sürekli olduğunda bu durum oluşmamaktadır. Diğer grafikler incelendiğinde 1mm çaplı deliklere ait sıçramalar dâhil tüm delikler görünür hale gelmiştir. Sinüs ve kosinüs bileşenlerine ait grafikler alt alta koyulduğunda deliklere ait sıçramalar daha anlaşılır olmaktadır. Grafiklerin alt alta görünümü Şekil 3.36'daki gibidir.

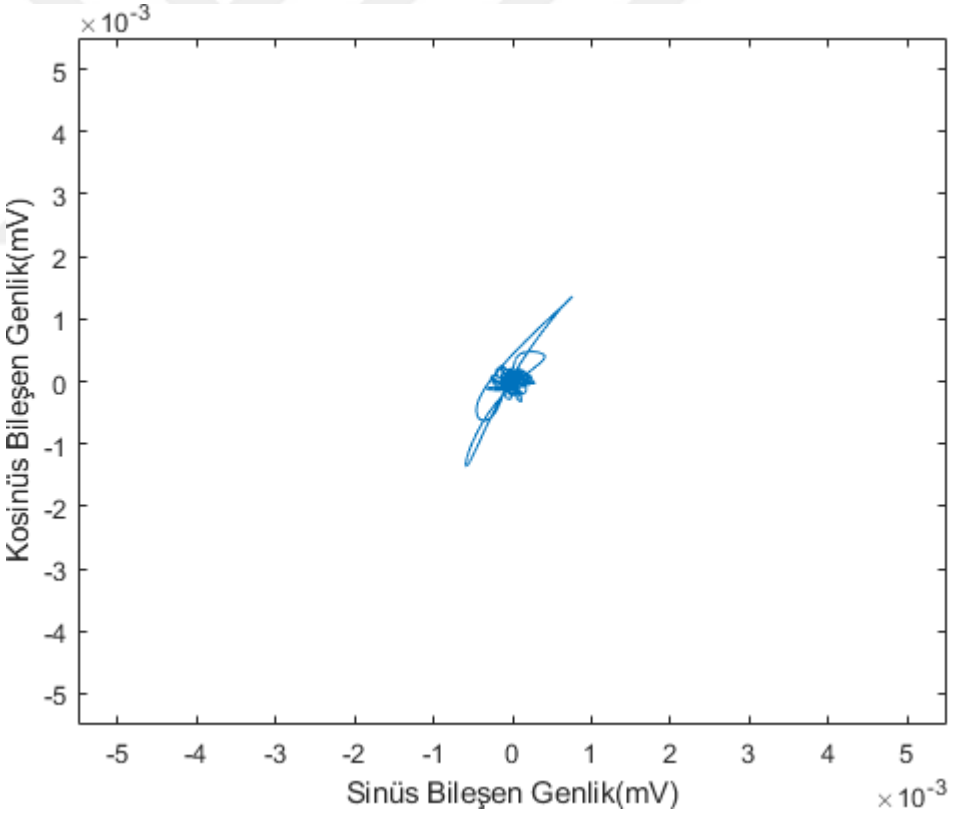


Şekil 3.36. Sinüs ve Kosinüs Bileşen

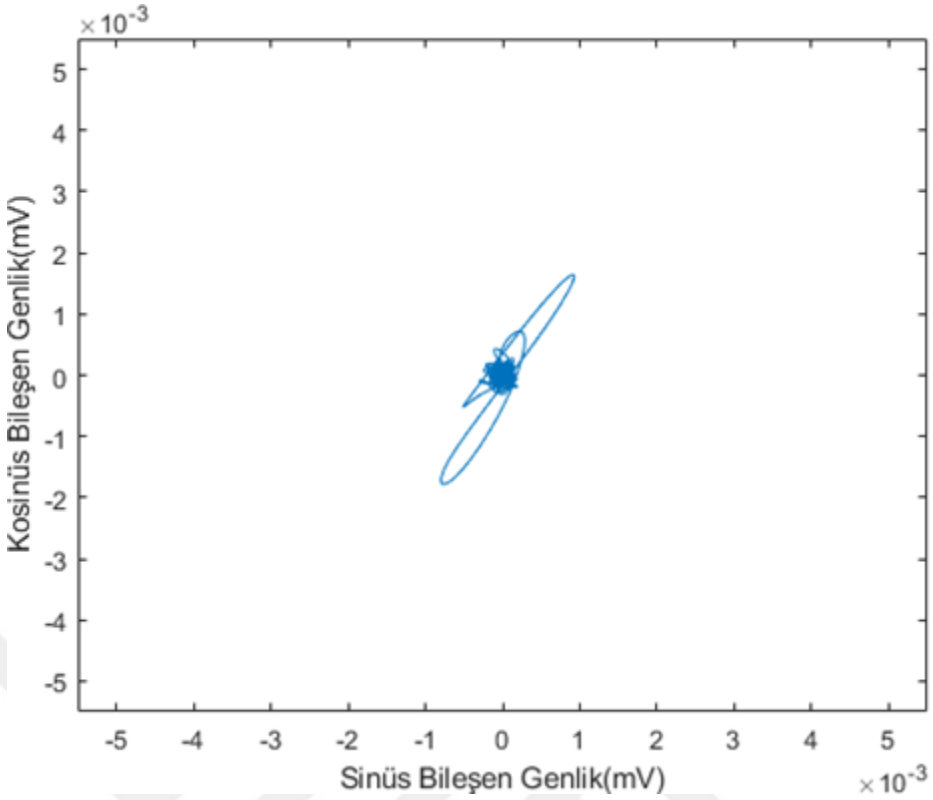
Grafikte solda görülen ilk 2 delik 1,5 mm dış çapa sahiptir. Ortada bulunan en büyük genliğe sahip 2 delik 2,3 mm dış çapa sahiptir. En sağda bulunan ve en küçük genliğe sahip 2 delik ise 1 mm dış çapa sahiptir. Eşit dış çapa sahip deliklere ait sinyallerin aynı genlikte olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi borunun bobinden tam merkezli geçmemesidir. Delik bobin iç duvarına yakın noktadan geçtiğinde sinyal genliği daha büyük, uzak noktadan geçerse genlik daha küçük olmaktadır. Fabrikalarda kurulan konveyör hatlar çok daha kararlı olduğu için bu durumun etkisi daha az görülmektedir.

3.7. Faz – Empedans Grafiği

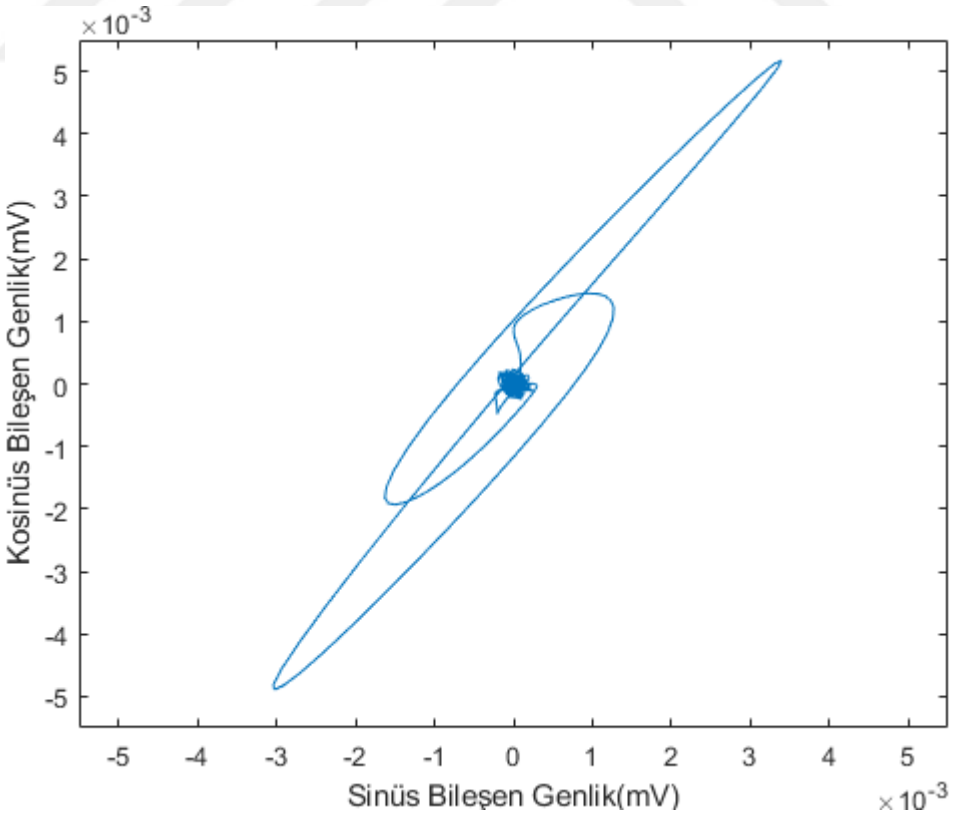
Elde edilen sanal ve gerçek bileşenler grafiğin eksenleri olarak seçildiğinde XY grafiğinde her bir delik için aşağıdaki grafikler elde edilmektedir.



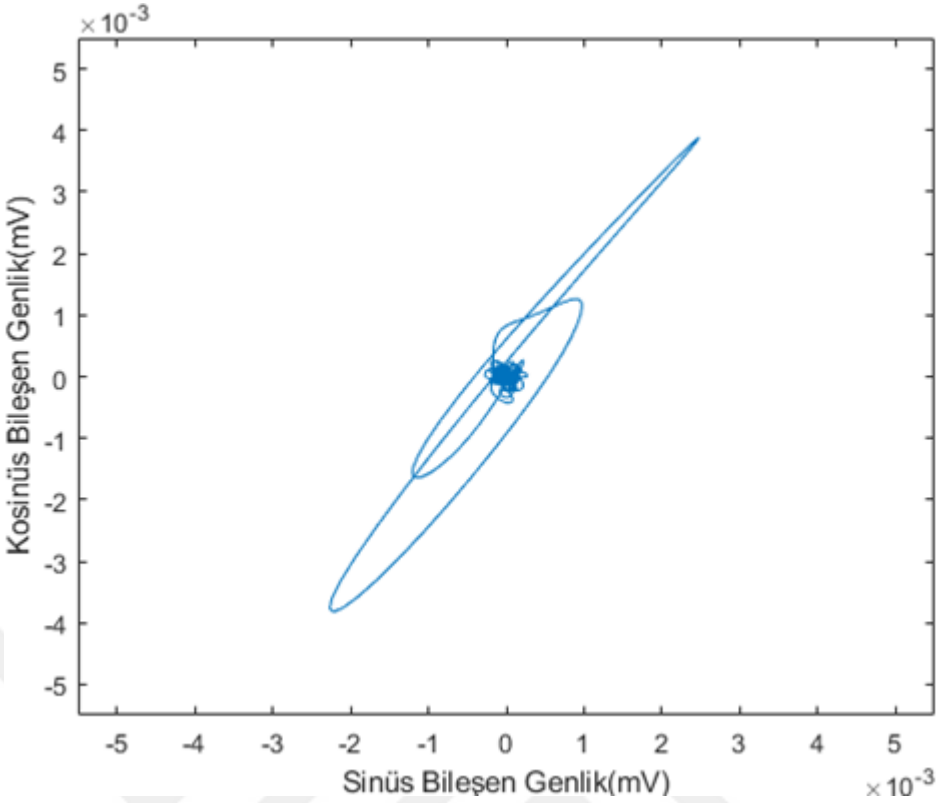
Şekil 3.37. Faz Grafiği (1,5mm 1. Delik)



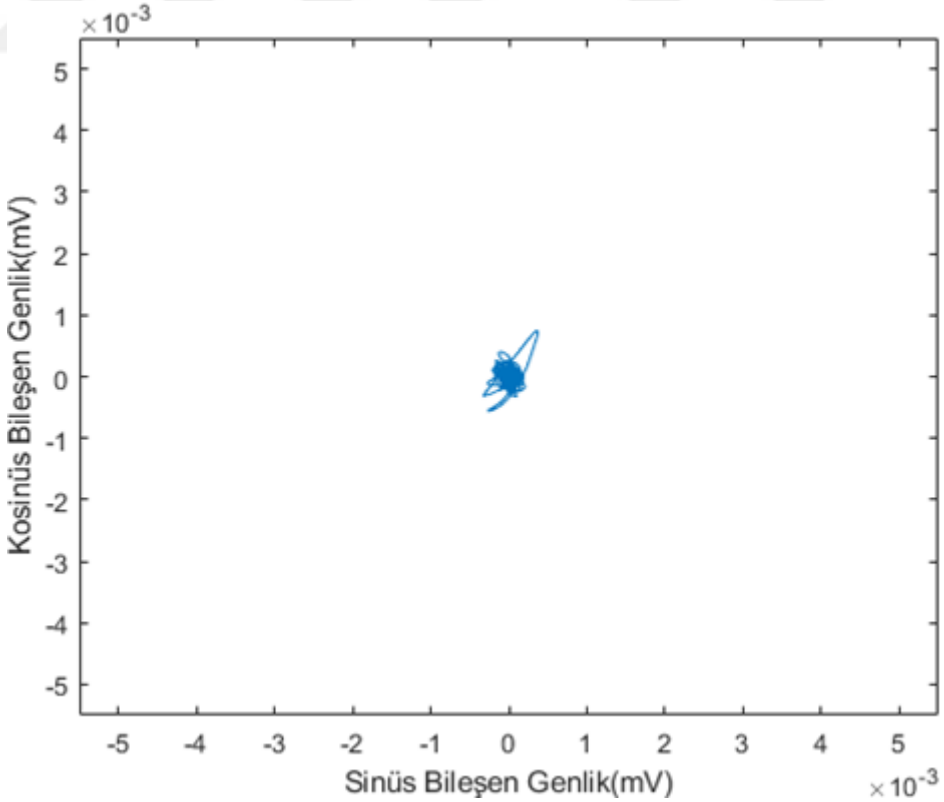
Şekil 3.38. Faz Grafiği (1,5mm 2. Delik)



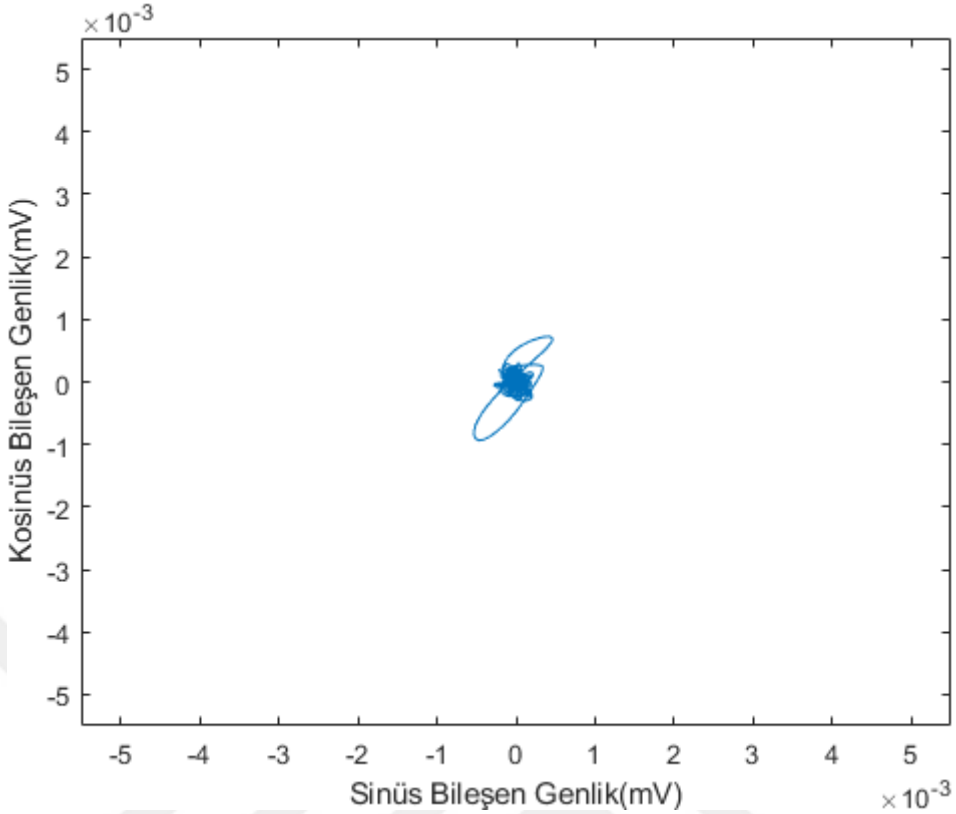
Şekil 3.39. Faz Grafiği (2,3mm 1. Delik)



Şekil 3.40. Faz Grafiği (2,3mm 2. Delik)

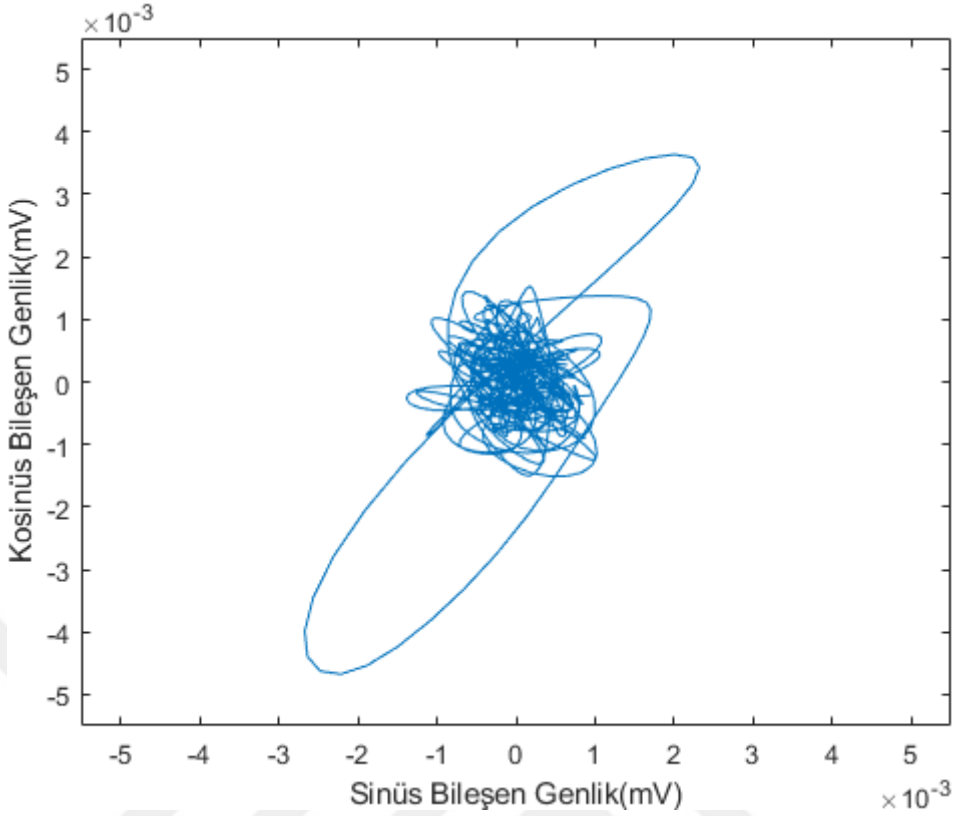


Şekil 3.41 Faz Grafiği (1mm 1. Delik)



Şekil 3.42. Faz Grafiği (1mm 2. Delik)

Grafiklerde de görüldüğü gibi delik çapı küçüldükçe deliğin alıcı sargılarda oluşturduğu sinyal genliği küçülmektedir. Küçük delikleri gürültüden daha iyi ayırabilmek için 2 tip işlem uygulanmaktadır. Bunlar analog kazanç ve sayısal kazanç işlemleridir. Analog kazanç bobinden alınan sinyal sayısala çevrilmeden önce çeşitli işlemsel yükselteçler ile sinyal seviyesinin yükseltilmesi işlemidir. Sayısal kazanç ise elde edilen son sinyallerin belirli oranlar ile çarpılma işlemidir. Sayısal kazanç ile sinyalde bulunan gürültü de aynı oranda artmaktadır. 1mm çaplı deliğe ait sayısal kazanç işlemi sonucu elde edilen grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.43. Sayısal Kazanç Uygulanmış Sinyalin Faz Grafiği (1mm 2. Delik)

Kazanç işlemlerinden hangisinin kullanılacağı tespit edilmesi istenen delik çapına ve sinyale etki eden gürültü oranına göre değişiklik göstermektedir. Kazanç işlemi fabrikalarda üzerinde eş aralıklar ile 4 adet eşit çaplı delik bulunan referans borunun test edilmesi ile ayarlanmaktadır. Operatör borudaki deliklerden elde edilen sinyal seviyeleri eşit ve istenen genlik seviyesinde olana kadar borunun bobin içindeki merkezini ve istenen kazanç ayarını yapar. Sonrasında yapılan bu ayarlar ile sistem gerçek zamanlı olarak çalıştırılır. Belirlenen genliği aşan sinyaller boruda kusur olduğunu göstermektedir. Fabrika ortamında girdap akımları test cihazının boya tabancası, korna, lamba, testere, ayırma birimi gibi diğer çevre cihazlar ile eşzamanlı çalışması ile kusurlu borular işaretlenir ve ıskarta kasasına atılır.

3.8.Algoritmanın Gerçek Zamanlı Uygulanması

Algoritmanın gömülü sistem üzerinde gerçek zamanlı uygulanması için öncelikle sinyal işleme donanımını oluşturan sinyal oluşturma kartı, DSP kart, ADC kart, çevre haberleşme kartı ve ana kart birleştirilmiştir. Donanımların birlikte uyumlu

çalışmaları test edildikten sonra donanım koruyucu kasa içine yerleştirilmiştir. Cihaz ile bobin ve ekran bağlantıları yapılmıştır. Test cihazı Şekil 3.44'deki gibidir.



Şekil 3.44. Girdap Akımları Test Cihazı

Bobin konveyör hat üzerine bağlandıktan sonra sinyal işleme alt yapısı oluşturulmuştur. ADC kart ile 500 KSPS frekansında örnekler alınmıştır. Sinyal işleme sırasında örnek kaçmaması için ping-pong buffer yöntemi uygulanmıştır ve her 500 örnek toplandıktan sonra algoritmada bulunan işlemlerinden geçirilmiştir. Yani ilk 500 örnek toplandıktan sonra ilk bufferda bulunan örneklerle sinyal işleme yapılırken diğer buffer yeni örneklerle doldurulmaktadır. Sinyal işleme bittiğinde diğer bufferın dolması beklenir ve aynı işlemler 2. bufferda bulunan örneklere uygulanır. Böylelikle süreklilik sağlanmış olur. Örnekleme frekansımız 500 KSPS olduğu için 500 örnek en geç 1 ms sürede algoritma işlemlerinden geçmelidir. Algoritmada sürekli olarak örnek seyreltme yaptığımız için bu süre rahatlıkla

yetmektedir. Algoritmanın gerçek zamanlı uygulanmasına dair detay bilgiler TÜBİTAK projesi ve firma gizlilik kapsamında olduğu için verilememektedir.

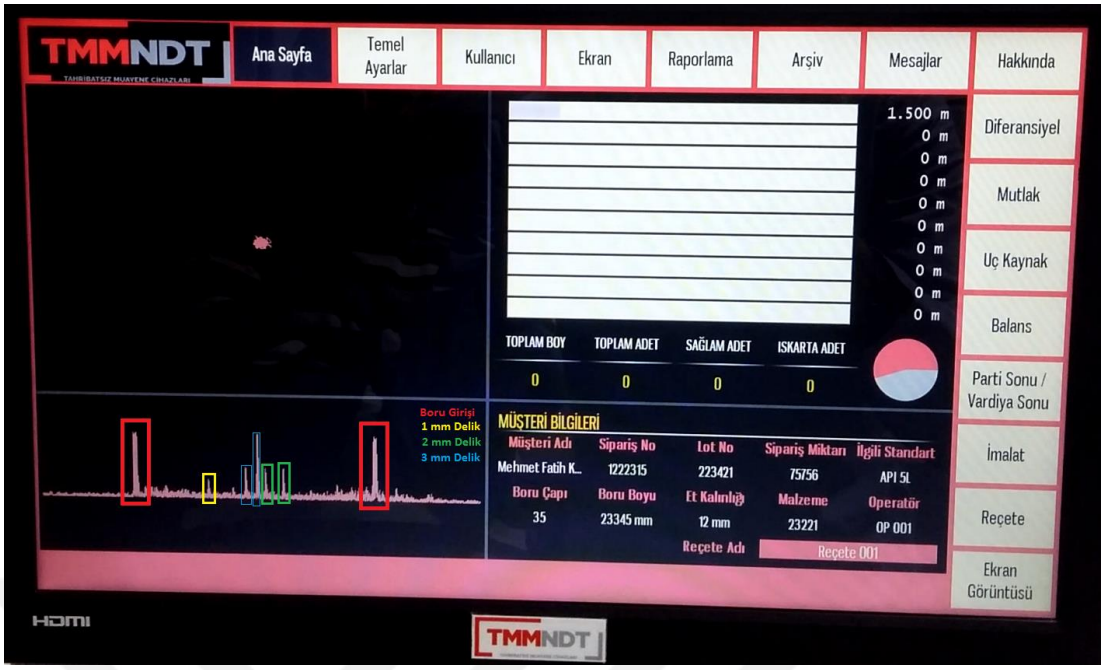
4. DENEYSEL SONUÇLAR

Tez kapsamında geliştirilen ve gerçeklenen girdap akımları test sistemi ile çatlak ve delik tespiti yapabilmektedir. Firmada yapılan testlerde ISO10893-2 standardında E2H, E3H ve E4H kabul seviyelerinde [16] başarım sağlanmıştır. ISO10893-2 standardının kabul seviyeleri Tablo 4.1'deki gibidir.

Tablo 4.1. ISO10893-2 Kabul Seviyeleri [16]

Belirtilen Boru Dış Çapı (D) mm	**Kabul Edilen Delik Çapı Seviyesi** mm			**Belirtilen Boru Dış Çapı (D)** mm	**Kabul Edilen Delik Çapı Seviyesi** mm
	E1H	E2H	E3H		E4H
$4 \leq D \leq 10$	0,60	0,70	0,80	$4 \leq D \leq 15,8$	1,20
$10 < D \leq 20$	0,70	0,80	1,00	$15,8 < D \leq 26,9$	1,40
$20 < D \leq 44,5$	0,80	1,00	1,30	$26,9 < D \leq 48,3$	1,70
$44,5 < D \leq 76,1$	1,00	1,20	1,60	$48,3 < D \leq 63,5$	2,20
$76,1 < D \leq 180$	1,20	1,40	2,00	$63,5 < D \leq 114,3$	2,70
$180 < D$	1,40	1,80	2,20	$114,3 < D \leq 139,7$	3,20
				$139,7 < D$	3,70

E1H kabul seviyesinde bulunan başarım ölçütü firma içi yapılan testlerde olumlu sonuçlanmamıştır. Tablo 4.1'de 27mm dış çapa sahip boru için E1H kabul seviyesi 0,8mm olarak belirtilmektedir. Delik çapının çok küçük olmasından ve deneysel sistemin yarattığı titreşim nedeni ile oluşan liftoff gürültüsü nedeniyle ayırt edici sinyal alınamamaktadır. Konveyör hattının hassasiyet yetersizliğinden dolayı E1H kabul seviyesi yeterliliği veya yetersizliği net olarak belirlenememiştir. Firmada yapılan testlere dair görüntü Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1. Firma İçi Test Görüntüsü

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında girdap akımları temelli bir test sisteminde gerçek zamanlı olarak delik tespiti yapabilecek bir algoritma geliştirilmiş ve bu yaklaşım gömülü olarak gerçeklenmiştir. Çalışma TMM Ltd. Şti. firmasının TÜBİTAK-TEYDEB projesi kapsamında yapılmış ve projede hedeflenen başarım ölçütlerini sağlamıştır. Böylelikle tamamen sayısal sinyal işlemeye dayalı bir cihaz geliştirilmiştir.

Ölçüm sistemi geliştirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli kısıt gerçek zamanlı işlem yapmak ve sonuç üretebilmekti. Sinyal işleme algoritmasında kullanılan filtrelerin doğru seçilmesi ve örnek seyreltme işlemlerinin en uygun şekilde yapılması ile gerçek zamanlı işlem yapılması sağlanmıştır.

Geliştirilen sistemde analog olarak sinyal işleme yapılmadığı için maliyetler ile birlikte cihaz boyutundan önemli oranda kazanç sağlanmıştır. Geliştirme süresince lift-off etkisinin yanında test malzemesi hızının girdap akımları ile tahribatsız muayeneye etkisinin büyük olduğu gözlemlenmiştir. Malzemenin hızında oluşacak farklılıklar test doğruluğunu azaltmaktadır. Hız tespitinin doğru yapılması ile test doğruluğunun artırılacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Janousek L., Capova K., Yusa N., Miya K. (2008), Multiprobe Inspection for Enhancing Sizing Ability in Eddy Current Nondestructive Testing, *IEEE Trans. Magn.* 2008, 44, 1618-1621.

[2] Martín J., Gil J., ve Sánchez E., Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, *Sensors*, 2011, 11, 2525-2565

[3] Morozov M., Rubinacci G., Tamburrino A., Ventre S. (2006) Numerical Models of Volumetric Insulating Cracks in Eddy-Current Testing with Experimental Validation, *IEEE Trans. Magn.* 42, 1568-1576.

[4] Förster F., Sensitive Eddy-Current Testing of Tubes for Defects on the Inner and Outer Surfaces, *Non-Destructive Testing*, 1974, 28-36

[5] Bae J., Kim S., Hot Wire Inspection Using Eddy Current, *Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2001)*, Budapest, Hungary, 2001

[6] Rao B.P.C., Eddy Current Testing: Basics, *Basics*, 2011, 10, 3, 7-16

[7] Cecco V.S., Drunnen V.G. and Sharp F.L., *Eddy Current Manual: Test Method*, 1, AECL-7523, Chalk River, Ontario, 1983.

[8] Mook G., Uchanin V. (2006), Deep Penetrating Eddy Currents and Probes, *ECNDT*, DOI: 10.3139/120.100810

[9] Lai S., Chen D.Y., Chen H. ve Fu Y.W., Pulsed Eddy Current Testing of Inner Wall Flaws in Pipe under Insulation, *Procedia Engineering*, 2015, 130, 1658 – 1664

[10] Nestleroth J.B., Davis R.J., Application of Eddy Currents Induced by Permanent Magnets for Pipeline Inspection, *NDT&E International*, 2007, 40, 77–84

[11] Engelberg T., Design of a Correlation System for Speed Measurement of Rail Vehicles, *Elseiver*, 2001, 29, 157-164

[12] Lysen H. ve BRÄU W., Testing Device and Testing Method for Non Destructive Detection of a Defect in a Test Piece by Means of an Eddy Current, 2013, U. S. Patent No: US20130187643A1, *Google Patent*

[13] Sugawara H., Digital Demodulation Circuit, 1992, Japan Patent No: JPH05292133A, *Google Patent*

[14] Dziczkowski L., Elimination of Coil Liftoff From Eddy Current Measurements of Conductivity, *IEEE Trans. Magn*., 2013, 62, 3301-3307.

[15] Yu Y., Du P. (2007), Two Approaches to Coil Impedance Calculation of Eddy Current Sensor, *Researchgate*, DOI: 10.1243/09544062JMES395

[16] TS EN ISO 10893-2, Çelik Boruların Tahribatsız Muayenesi - Bölüm 2: Kusurların Tespiti İçin Dikişsiz ve Kaynaklı (Tozaltı Ark-Kaynaklı Parçalar Hariç) Çelik Boruların Otomatik Girdap Akımları ile Muayenesi (ISO 10893-2:2011), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2011.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çelikadam M., Urhan O., Girdap Akımları Temelli Bir Hata Tespiti Yaklaşımının Gerçek Zamanlı Gerçeklenmesi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, 23-25 Kasım 2018.

Çelikadam M., Urhan O., Girdap Akımı Temelli Tahribatsız Muayene Yaklaşımı ile Gerçek Zamanlı Hata Tespiti, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, 26-28 Nisan 2019.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Boğazlıyan/Yozgat'ta doğdu. İlk ve ortaokul ile liseyi Boğazlıyan'da okudu. 2008 yılında Çukurova Üniversitesi Elektrik Elektronik Nühendisliği Bölümü'ne başladı ve 2013 yılında mezun oldu. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı ve 2019 yılında mezun olma aşamasındadır. İş hayatına 2013 yılında Bedsel İnşaat Ltd. Şti. firmasında başladı ve bir buçuk yıl bu firmada çalıştı. 2016-2019 yılları arasında TMM Ltd. Şti. firmasında gömülü sistem mühendisi olarak çalıştı. 2019 yılında Digitest Elektronik Ltd. Şti firmasında gömülü yazılım mühendisi olarak işe başladı ve halen devam etmektedir.