

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOKLU FREKANS METAL DEDEKTÖRÜ
TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan BELLİKLİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOKLU FREKANS METAL DEDEKTÖRÜ
TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan BELLİKLİ
504111204**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Öğr. Gör. Dr. H. Bülent YAĞCI

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111204 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hasan BELLİKLİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇOKLU FREKANS METAL DEDEKTÖRÜ TASARIMI VE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Öğr. Gör. Dr. H. Bülent YAĞCI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Selçuk PAKER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan AKSOY
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2015**

Canım karım Şeyda'ya ve kızım Erva'ya,

ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca yardımını esirgemeyen ve değerli vaktini ayıran danışmanım Dr. Bülent YAĞCI'ya teşekkür ederim. Ayrıca tez konumda yardımlarından dolayı Prof. Dr. Serkan AKSOY'a ve TÜBİTAK iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bu noktaya ulaşmamda sonsuz emekleri bulunan aileme ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır ve ilgiden dolayı sevgili karıma sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2014

Hasan Bellikli
Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Metal Dedektörü Çeşitleri	2
1.1.1 Askeri amaçlı dedektörler	2
1.1.2 Ticari amaçlı dedektörler	3
1.2 Tez Çalışmasının Amacı ve İçeriği	4
2. METAL DEDEKTÖRÜ TEMELLERİ.....	7
2.1 Manyetik Metal Dedektörleri	7
2.2 İndüksiyon Metal Dedektörleri	7
2.3 Bobinler	10
2.4 Metal Dedektörü Bobin Çeşitleri	11
2.5 Metal Dedektörleri Çalışma Yöntemleri	12
2.5.1 Sürekli dalga metal dedektörleri	12
2.5.2 Darbe indüksiyonlu metal dedektörleri	16
3. ELEKTROMANYETİK DEVRE MODELİ VE ANALİZİ	19
3.1 Quasi-Statik Yaklaşım.....	19
3.2 Eş Değer Devre Modeli	20
3.3 Sabit Manyetik Alan Durumu	23
3.4 Cisimlerin Genel EM Cevabı	24
3.5 Ferromanyetik ve Ferromanyetik Olmayan Cisimlerin EM Cevabı	25
4. ÇOKLU FREKANS DONANIM TASARIMI	27
4.1 Alıcı ve Verici Bobin Tasarımı	28
4.1.1 Paralel rezonans devreleri	28
4.1.2 Bobin değerlerinin belirlenmesi.....	30
4.1.3 Bobinin hazırlanması	31
4.1.4 İndüksiyon sıfırlama	33
4.1.5 Bobin koruma.....	33
4.2 Verici ve Alıcı Devresinin Tasarımı	34
5. METAL DEDEKTÖRÜ VERİ ANALİZİ	39
5.1 Deney Düzenekinin Kurulması	39
5.2 Uzaktan Kontrol Program Arayüzü.....	40
5.3 LabVIEW® ile İşaret Üretici ve Osiloskop Ayarlarının Yapılması.....	42
5.4 LabVIEW® ile Verilerin İşlenmesi	43
5.5 Test Cisimleri	44
5.6 Alınan Verilerin İşlenmesi	45

5.7 Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi	46
5.7.1 4 cm çapındaki silindirik alüminyum sonuçları	46
5.7.2 4.5 cm çapındaki silindirik alüminyum sonuçları	47
5.7.3 8 cm çapındaki silindirik demir sonuçları	49
5.7.4 Farklı cisimleri karşılaştırma sonuçları	50
5.7.5 Mayın ve diğer cisimlerin karşılaştırma sonuçları	52
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR

GPR	: Ground Penetration Radar (Yere Nüfuz Eden Radar)
CW	: Continuous Wave (Sürekli Dalga)
BFO	: Beat Frequency Oscillator (Vuru Frekans Osilatörü)
EM	: Elektromanyetik
DDS	: Direct Digital Synthesizer
CMRR	: Common Mode Rejection Ratio (Ortak mod bastırma oranı)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Malzemelere göre deri derinliği	9
Çizelge 3.1 : Metalik malzemelerin sınıflandırılması.....	25
Çizelge 4.1 : Bobinin hesaplanan ve ölçülen değerleri.....	31
Çizelge 5.1 : Dikevrelili değerlerinin tepe frekansı.	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : a) Vallon marka metal dedektörü [21] b) ETMTS-2 GPR ve Metal dedektörü [22].	2
Şekil 1.2 : Garrett marka define arama dedektörü [23].	3
Şekil 1.3 : Güvenlik sistemlerinde metal dedektörleri [24].	4
Şekil 2.1 : Birincil ve ikincil manyetik alan.	8
Şekil 2.2 : Cisim üzerinde oluşan manyetik alan.	9
Şekil 2.3 : İletken hedefin konumuna göre oluşan manyetik akı [9].	10
Şekil 2.4 : Bobin çeşitleri a) tek bobin, b) çift-D bobin, c) 4B bobin, d) eş merkezli bobin.	11
Şekil 2.5 : Vuru frekans osilatörü.	13
Şekil 2.6 : Sürekli dalga metal dedektörleri blok diyagramı.	14
Şekil 2.7 : Sürekli dalga metal dedektörü gönderilen ve alınan işaret.	14
Şekil 2.8 : Alınan işaretin kompleks düzlemde gösterimi.	15
Şekil 2.9 : Darbe indüksiyonlu metal dedektörü blok şeması.	16
Şekil 2.10 : Metal cinsine göre sönümlleme eğrisi [26].	17
Şekil 3.1 : Elektromanyetik basit devre modeli [9].	20
Şekil 3.2 : Elektromanyetik devre modeli transfer fonksiyonu cevabı.	22
Şekil 3.3 : Manyetik geçirgenliğe bağlı a) faz cevabı ve b) genlik cevabı [9].	25
Şekil 3.4 : Manyetik geçirgenliğe bağlı gerçel ve sanal fonksiyon cevabı [9].	26
Şekil 4.1 : Çoklu frekans metal dedektörü şeması.	27
Şekil 4.2 : Paralel rezonans devresi ve bobin eş değer devresi.	28
Şekil 4.3 : Rezonans -empedans değişimi ve rezonans bant genişliği.	29
Şekil 4.4 : İndüktans değerine göre bobine aktarılan gerilim.	30
Şekil 4.5 : a) Verici ve b) alıcı rezonans devreleri.	32
Şekil 4.6 : Verici rezonans devresi benzetim sonucu.	32
Şekil 4.7 : Alıcı rezonans devresi benzetim sonucu.	32
Şekil 4.8 : Çift-D bobini ve kuplaj mesafesi.	33
Şekil 4.9 : Hazırlanan başlığın açık ve kapalı hali.	34
Şekil 4.10 : Alıcı kuvvetlendirici devresi.	36
Şekil 4.11 : Hazırlanan alıcı ve verici kartı.	37
Şekil 5.1 : Çoklu frekans metal dedektörü test düzeneği.	39
Şekil 5.2 : Test ortamı.	40
Şekil 5.3 : Veri toplama akış diyagramı.	41
Şekil 5.4 : LabVIEW® kontrol arayüzü.	42
Şekil 5.5 : İşaret üretici kontrol blok diyagramı.	42
Şekil 5.6 : Osiloskop kontrol blok şeması.	43
Şekil 5.7 : LabVIEW® Osiloskop verilerinin işleme ve kayıt blok şeması.	44
Şekil 5.8 : Test cisimleri.	44
Şekil 5.9 : Faz doğrulama.	45
Şekil 5.10 : R=4 cm Alüminyum Silindir faz açısı ve genlik oranı.	46
Şekil 5.11 : R=4 cm Alüminyum silindir dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.	47

Şekil 5.12 : R=4.5 cm alüminyum silindir faz farkı ve genlik oranı	48
Şekil 5.13 : R=4.5 cm alüminyum silindir dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.	48
Şekil 5.14 : R=8 cm demir silindir faz farkı ve genlik oranı.	49
Şekil 5.15 : R=8 cm demir silindir, dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.	49
Şekil 5.16 : R=8 cm demir silindir, dikevrelili ile eşevrelili ölçüm karşılaştırması.	50
Şekil 5.17 : Dört cismin faz farkı ve genlik oranı.....	50
Şekil 5.18 : Dört cismin dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.....	51
Şekil 5.19 : R=8 cm demir silindir, dikevrelili ve eşevrelili ölçüm karşılaştırması.	51
Şekil 5.20 : Mayınlar ve diğer cisimlerin faz farkı ve genlik oranı.	52
Şekil 5.21 : Mayınlar ve diğer cisimlerin dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.	52
Şekil 5.22 : Mayınlar ve diğer cisimlerin dikevrelili ile eşevrelili ölçümü karşılaştırması.	53

ÇOKLU FREKANS METAL DEDEKTÖR TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Metal dedektörleri mayınlı arazilerin temizlenmesinde, el yapımı patlayıcıların tespitinde, jeofizik taramalarında ve define aramalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik cisimlerin tespiti için geliştirilen bu cihazların tasarımları kullanım alanlarına göre değişmektedir. Mayın dedektörleri olarak kullanılan metal dedektörleri insan hayatı için önem arz etmektedir. Dünyada halen farklı bölgelerde 100 milyona yakın mayın bulunmaktadır. Bu yüzden her yıl 15,000-20,000 arasında insan mayın patlamasından ölmektedir. Metal dedektörleri mayın tespitinde ve temizlenmesinde günümüzde halen sıklıkla kullanılmaktadır. İnsani mayın temizleme ve mayın ve el yapımı patlayıcıların tespiti farklı konseptlerdir. İnsani mayın temizlemede zaman önemli değilken, mayınların % 100'e yakın tespit edilmesi gerekmektedir. Diğerinde ise askeri birliklerin gitmesi gereken bölgeye bir an önce ulaşması gerekmektedir. Hızlı ve güvenli şekilde mayınların taraması yapılmalıdır. Bunu engelleyen en büyük faktör doğada bulunan metalik parçalardır. İstenmeyen bu metalik parçalara şarapnel, patlamamış mühimmat (UXO), mermi kovarı, hurdalar örnek verilebilir. Bunlar yanlış alarma neden olurlar. Metal dedektörün performansını düşürürler. Klasik tek frekanslı metal dedektörlerinde bu oran yüksek iken çoklu frekans metal dedektörlerinde yanlış alarm oranı azalmaktadır. Çünkü birçok frekanstan cisim hakkında bilgi edinilir.

Bu tezde metalik cisimlerin sınıflandırılmasına olanak sağlayan çoklu frekans metal dedektörleri tasarımı ve analizi anlatılmıştır. Tasarlanan dedektörün çalışma yöntemi, sürekli dalga metal dedektörü ile benzerdir, fakat tek frekans yerine 1 kHz - 100 kHz aralığında çalışmaktadır. Hedef cisimden gelen ayırt edici bilgi miktarı arttığı için sınıflandırma kolaylaşmaktadır.

Tezin teorik analiz kısmında metal dedektörlerinin çalışma prensipleri anlatılmıştır. İlaveten, darbe indüksiyon metal dedektörleri ve sürekli dalga metal dedektörlerinin çalışma yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. Frekans uzayında elektromanyetik analizini yapmak için temel indüksiyon devre modeli oluşturulmuştur. Düşük frekanslarda çalışıldığı için quasi-statik yaklaşım kullanılarak denklemler daha kolay hale getirilmiştir ve çözümleri yapılmıştır.

Donanım tasarlama kısmında bobinlerin 1 kHz - 100 kHz bant aralığında uygun olan indüktans değeri hesaplanmıştır. Tasarım için uygun olan çift-D bobinin indüksiyon sıfırlaması yapılmıştır. Sonrasında metalik kumaş ile kapasitif etkilerden ve dış EM gürültülerden izole edilmiştir. Faz eviren diferansiyel kuvvetlendirici ile alınan zayıf işaretler kuvvetlendirilmiştir.

Veri analiz kısmında, laboratuvar ortamında uzaktan bilgisayar kontrollü test düzeneği kurulmuştur. İşaret üretici ve osiloskop, LabVIEW® programı ile bilgisayar üzerinden kontrol edilmiştir. LabVIEW® arayüzü ile alınan işaretin faz ve genlik verileri dosyaya kaydedilmiştir. MATLAB® programı ile faz ve genlik verilerinden eşvreli ve dikevrelili işaret kısımları oluşturulmuştur. Test cisimlerinden alınan

işaretin faz, genlik, eşevreli ve dikevreli verilerine göre grafikleri çizdirilmiştir ve analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, ölçüm sonuçlarının teorik analizle uyumlu olduğu görülmüştür. Ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan metalik cisimler faz ve eşevreli kısım verisiyle ayırt edilebilmektedir. Alınan ve gönderilen işaret arasındaki faz farkının ferromanyetik malzemelerde uzaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Ferromanyetik olmayan malzemelerde ise faz farkının uzaklığa bağlı olmadığı tespit edilmiştir.

MULTI-FREQUENCY METAL DETECTOR DESIGN AND ANALYSIS

SUMMARY

Metal detectors are widely used in a number of applications, such as mine clearance, improvised explosive detection, treasure hunting and geophysical survey. In the world, 60-100 million mines have been buried in different regions. Every year, 15,000 to 20,000 people are killed by mine explosions. Metal detectors are currently the most frequently used tool to detect landmines. Humanitarian demining and landmine detection for military purposes have different difficulties. Aim of the first one is that troops must quickly pass from a mine field without losing more time. The most difficult problem in mine detection is the other metallic fragments, which are also called “clutters” in a mined area. Each of these metallic objects must be considered as a potential UXO or mine. Undesired metallic clutters such as bullet casings, small arm fragments and shrapnel cause false alarms. Mine detectors must not only detect extremely small quantities of metals but also reject the metallic clutter.

Classical metal detectors use single frequency. The main disadvantage of this system is to have extremely high false alarm rate due to clutter and magnetic soils. They could detect metallic objects but could not discriminate one metallic object from another. For that reason, the false alarm rate in real mined regions can be unacceptably high. This significantly reduces the efficiency of the system. Furthermore, the classical single frequency systems are also slow because of having many false alarms. High false alarm rate increases the duration of area survey and detection costs. The false alarms are also produced by soil heterogeneities and regional soil features. Therefore, more information about the object is required for identification and discrimination.

Basically, objects show different responses at different frequencies depending on their magnetic or electrical properties. The multi-frequency metal detectors are used to avoid or reduce the false alarm rate and retain the high detection rate. In order to obtain lower false alarm rates, the information of the objects is used in signal processing algorithms. Multi-frequency detectors reveal much more information about buried metallic object. They have stronger discrimination and identification abilities. In these systems, ferrous and nonferrous objects exhibit opposite polarities at certain frequencies and the phase also depends on the physical size and material properties of the targets.

In this thesis, the design and analysis of multi-frequency metal detectors, which enables the identification of metallic objects, are explained. The working principle of the multi-frequency metal detector is similar to a continuous metal detector but instead of single frequency, it uses multi frequency range varying from 1 kHz to 100 kHz sinusoidal signals. The design parameters of metal detectors detecting the metallic objects are modified for different usage areas. Advanced metal detectors could provide a lot of information, such as depth and type of the buried metallic objects.

In the theoretical analysis part, basic principles of metal detectors are explained. Magnetic devices depend on the influence of ferromagnetic objects. They generate magnetic field themselves. Other types of metal detectors, which are called electromagnetic induction devices, generate time-varying signals towards the metallic objects. Magnetic properties of the target and soil structure modify the primary magnetic field. Eddy currents occur on the metallic object exposed to primary magnetic field. In the opposite direction, secondary magnetic field is generated by the eddy currents. It causes a change in the induced voltage on receiver coils due to the magnetic field influence. The variation of the amplitude and the phase of the induced signal contain information about the object's properties. Later in the theoretical analysis part, pulse induction and continuous wave metal detector technologies are explained in detail.

The analysis of metallic objects in frequency domain is based on a simple electromagnetic induction model. Quasi-static approach has simplified the equations solved. Maxwell's equations based model mainly uses quasi-static solution at low frequencies. To satisfy the quasi-static condition, all problem space must be assumed as a lossy medium. In this state, displacement currents can be neglected in Maxwell equations.

In the hardware design part, the designed hardware system is described in details. The system consists of two parts, which are the search head and the electronic circuits. Search head covers the transmitter and the receiver coil, which are very important parts of the detector. It directly affects the performance and the sensitivity of the metal detector. Inductance values are selected from 1 kHz-100 kHz frequency band. The operating frequencies are selected from the lower resonance frequency of the coils for the reason that there is the more linear region there, according to impedance change. The system could not work properly in the entire operating frequency, if the inductance values of the coils are not appropriate. Measurement results show that lower inductance values than 8 mH, especially around 500 μ H, transmitted signal power dramatically reduces because of impedance mismatching. Therefore, transmitter and receiver coil inductance values should be greater than 8 mH. Double-D coil type is suitable for continuous wave metal detector. Double-D coil nulling must be done properly using the oscilloscope, because transmitted signal is induced to the received signal. Then coils are wrapped with metallic fabric, so that the capacitive effects and the EM interferences are isolated from the coil and the receiver circuit. Inverting differential op amps are used for the amplification of the weak signals. Received signal is amplified 33 dB to increase the sensitivity of the detector. Amplifier gain can be adjusted as high as possible while avoiding the saturation caused by a big metallic object is very close to the search head of the metal detector.

In the data analysis part, remote controllable test setup is installed in the laboratory environment. Signal generator and oscilloscope are controlled by LabVIEW[®] program. The phase difference of the two signals and the amplitude data of the received signals are acquired by LabVIEW[®] signal processing tool. Signal pre-processing is done by MATLAB[®]. Phase and amplitude data are converted to in-phase and quadrature data. There are seven different test objects to measure the performance of the designed multi-frequency metal detector. These are aluminum and iron cylinders, iron stick, coin (50 Kuruş, Turkish lira), TS-50 and PMN anti-personnel land mines. The measured data of the test objects, which are phase difference, amplitude, in-phase and quadrature data are plotted.

As a result, the experimental data and the theoretical analysis turned out to be similar. Ferromagnetic and non-ferromagnetic metallic objects are distinguished using the phase and in-phase part of the received signals. The phase difference between the received and the transmitted signals depends on the distance to the ferromagnetic metallic objects. On the other hand, this difference does not depend on the distance for non-ferromagnetic metallic objects.

1. GİRİŞ

Metal dedektörleri, metalik cisimleri tespit için kullanılan cihazlardır. Günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Askeri amaçlı metal dedektörleri mayın, patlamamış mühimmat ve el yapımı patlayıcı gibi tehlikeli cisimleri tespit etmede kullanılır. Bilimsel ve ticari amaçlı metal dedektörleri jeofizik incelemelerinde, gıda sanayisinde, güvenlik sistemlerinde ve define aramalarında kullanılır.

İlk metal dedektörü tanımı 1868 yılında Saxby [1] tarafından ortaya koyulmuştur. Ancak bu dedektör sadece manyetik metalleri tespit etmekteydi. Bu pasif metal dedektörlerinin temelini oluşturur. 1872 yılında Hughes tarafından metalik bütün cisimleri tespit eden ilk metal dedektörü tasarlanmıştır [1].

İlk tasarlandığı günden günümüze kadar çok farklı çalışma tekniğine sahip metal dedektörleri geliştirilmiştir. Jeofizik çalışmalarda yerin 100 metre altı görüntülenirken, gıda ve ilaç sanayisinde yakın mesafedeki küçük metal parçalarını bulması beklenir. Bu yüzden farklı amaçlara göre tasarımı değişmektedir.

Gelişmiş metal dedektörleri, metali tespit edebilmenin yanında metalin cinsi, derinliği gibi birçok bilgiyi de verebilmektedir. Çalışma yöntemlerine göre zaman uzayında veya frekans uzayında çalışmaktadır. Birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Zaman uzayında çalışan darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinde metallerin sınıflandırılması karmaşık iken, frekans uzayında çalışan sürekli dalga metal dedektörlerinde ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan metallerin sınıflandırılması daha kolaydır. Yapılan araştırmalarda, metalik cisimler frekans uzayında manyetik özelliklerine ve fiziksel özelliklerine göre karakteristik işaretler ürettiği görülmüştür [2]. Bu karakteristik özellikler kullanılarak dedektörlerde yanlış alarm azaltılmaktadır.

Tez konusu “çoklu frekans metal dedektörü tasarımı ve analizi” ile 1 kHz-100 kHz frekans aralığında çalışan sürekli dalga metal dedektörü tasarlanmıştır. Metalik cisimlerin elektromanyetik tepkileri analiz edilmiştir. Metallerin sınıflandırılması için öneride bulunulmuştur.

1.1 Metal Dedektörü Çeşitleri

1.1.1 Askeri amaçlı dedektörler

Mayınlı arazilerin temizlenmesi birçok ülke için büyük bir problemdir. Savaş döneminden kalan mayınlar, patlamamış mühimmatlar ve terörist gruplar tarafından gömülen el yapımı patlayıcılar insanlar için hayati tehlike oluşturmaktadır. Askeri amaçlı metal dedektörleri kullanılarak bu arazilerin temizliği yapılmaktadır. Şekil 1.1'de örnek elde taşınabilir mayın dedektörleri verilmiştir.



a)



b)

Şekil 1.1 : a) Vallon marka metal dedektörü [21] b) ETMTS-2 GPR ve Metal dedektörü [22].

Mayın ve gömülü patlayıcıları temizleme amaçlı uluslararası ve ulusal merkezler kurulmuştur. Cenevre Uluslararası İnsani Mayın Temizleme Merkezi (GICHD) ve Afganistan, Kamboçya gibi ülkelerde ulusal Mayın Hareket Merkezleri (MAC) tehlikeli patlayıcıların temizlenmesinde ülkelere yol göstermektedir.

Mayınlar maliyeti ucuz, fark edilmesi ve bulunması zor olması nedeniyle terörist gruplar tarafından çokça kullanılmaktadır. Anti personel mayınlar çok az metal içerdiği için tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Bunun nedeni düşük metal yoğunluğu ve topraktaki mineralli yapıdır. Patlayıcı cisim ile aynı ya da daha fazla seviyede

işaretler üreterek yanlış tespitle neden olabilmektedir. Yanlış tespitler, dedektörün performansının düşmesine ve mayınlı bölgelerin temizlenmesinin uzun zaman almasına neden olmaktadır. Askeri amaçlı kullanımda metal dedektörlerinin yanlış alarm oranlarının yüksek olmaması için gelişmiş metal dedektörler teknolojileri kullanılmaktadır [1].

1.1.2 Ticari amaçlı dedektörler

Define dedektörleri, eski dönemlerden kalan değerli madeni paraları ve metalleri bulmak için geliştirilen dedektörlerdir. Bu dedektörler maddi olarak değerli olan gümüş, altın gibi metalleri ayırt etmektedir. Şekil 1.2'de örnek metal dedektörü gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Garrett marka define arama dedektörü [23].

Derin mesafedeki metallerin tespitine yönelik büyük arama başlığına sahip define dedektörleri mevcuttur. Ticari olarak Minelab, Fisher, Garrett vb. birçok marka bulunmaktadır.

Güvenlik kapı dedektörleri, bina veya ortama güvenli geçiş sağlamak için günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır. İçerisinden yürünerek geçilen ve üst arama için elde taşınabilir çeşitleri vardır. Kötü niyetli kişilerin silah, bıçak gibi tehlikeli cisimlerle kalabalık yerlerde gezinmesini engellemek önem kazanmıştır. Alışveriş merkezlerinde, iş yeri girişlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Bu tip dedektörlere örnek Şekil 1.3'de verilmiştir. Jeofizik çalışmalarında yerin manyetik alan çizgi karakteristiği çıkartılmasında metal dedektörün bir çeşidi olan manyetometre kullanılmaktadır. Yeryüzünün metalik açıdan incelenmesi ve haritalandırma çalışmalarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.3 : Güvenlik sistemlerinde metal dedektörleri [24].

Metal dedektör teknolojisi tahribatsız testlerde (Non-Destructive Testing, NdT) kullanılmaktadır. İnceleme yapılacak olan malzemenin bütününe zarar vermeden yapılan test işlemidir. Çubuk, levha gibi metalik malzemelerin analizini yapmak için kullanılır. Malzemedeki görülmeyen süreksizlikleri, bozulmaları tespit eder [3].

1.2 Tez Çalışmasının Amacı ve İçeriği

Metal dedektörlerinde karşılaşılan en büyük problem yanlış alarm oranlarının yüksek olmasıdır. Doğada bulunan birçok metal parçası yanlış alarma neden olur. Toprakta metalik cisim olmasa bile toprağın içerisindeki demir içeriğine göre metal dedektörleri tespit verebilmektedir. Özellikle volkanik yanardağ bölgesinde bulunan topraklardaki demir içerik birçok anti personel mayından daha fazla genlikte tepki vermektedir. Bu yüzden toprak etkisinin ihmal edildiği toprak kompanzasyonu yöntemleri, metal dedektörleri için vazgeçilmez bir özelliktir. Toprak kompanzasyonu, frekans uzayında çalışan sürekli dalga metal dedektörleri ile yapılabilmektedir. Ayrıca cisimlerin ayırt edilmesi bu dedektörlerle mümkündür. Temel prensipte her metalik cismin frekansı değiştikçe farklı cevap vermesi beklenir. Bu yüzden çoklu frekans metal dedektörleri yanlış alarmları azaltabilmektedir [2,6]. Bu özellikleri ile cisimlerin karakteristiği çıkarılabilir. Cisimlerin boyutlarının tahmini, hedef görüntüleme ve hedeflerin imza çıkartılması konularında çoklu frekans metal dedektörleri çok daha fazla bilgi verebilmektedir [3,6,7]. Bu tez çalışmasının amacı metal dedektörlerinin en büyük dezavantajı olan yanlış alarmları azaltarak, kullanımını daha verimli hale getirmektir. 1 kHz-100 kHz aralığında çalışan metal dedektörünün farklı cinsteki metallere olan tepkisi araştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak tasarlanan dedektörün performansı ortaya çıkarılmıştır.

Birinci bölümde metal dedektörlerin genel kullanım alanları anlatılmıştır. İkinci bölümde metal dedektörlerinin çalışma prensibi anlatılmıştır. Darbe indüksiyon ve sürekli dalga metal dedektör yapıları hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde frekans uzayında çalışan metal dedektörlerinin elektromanyetik modeli oluşturulup cismin özelliklerine göre ve frekansa göre verdiği cevaplar incelenmiştir. Dördüncü kısımda 1 kHz-100 kHz frekans bandında çalışan metal dedektörünün donanım tasarımı anlatılmıştır. Bobin yapısı, alıcı kuvvetlendirici katı detaylı şekilde anlatılmıştır.

Son bölümde ise uzaktan kontrol edilebilir deney düzeneği kurulmuştur. Tasarlanan metal dedektörü ile farklı boyut ve özellikteki cisimlerin elektromanyetik karakteristikleri çıkartılmıştır. Elektromanyetik analizlerden beklenildiği gibi cisimlerden ayırt edici işaretler elde edilmiştir.

2. METAL DEDEKTÖRÜ TEMELLERİ

Bu bölümde metal dedektörlerinin temel çalışma prensibi, kullanılan metal dedektörü teknolojilerinin genel yapısı, avantajları ve dezavantajları anlatılmaktadır.

2.1 Manyetik Metal Dedektörleri

Manyetik alan kaynağına ihtiyaç duymadan dünyanın statik manyetik alan değişiminden yararlanarak manyetik metal parçaları tespit edebilen metal dedektörleridir [15]. Uyarıcı manyetik alana sahip olmadıkları için pasif dedektörlerdir. Örnek olarak manyetometre ve gradyometreler verilebilir. Dünyanın manyetik alan yoğunluğu mikrottesla mertebesindedir. Hassas manyetometreler ve gradyometreler nanotesla ve pikotesla çözünürlükte ölçüm yapabilmektedir. Yeryüzünün manyetik alan dağılımları bu cihazlarla ölçülerek jeofizik ve arkeolojik çalışmalarda kullanılmaktadır. Ayrıca bu dedektörler patlamamış gömülü mühimmatların tespitinde de kullanılmaktadır.

2.2 İndüksiyon Metal Dedektörleri

İndüksiyon metal dedektörleri manyetik alan kaynaklarına sahiptir. Düşük frekans elektromanyetik indüksiyon prensibi Maxwell denklemlerine dayanır.

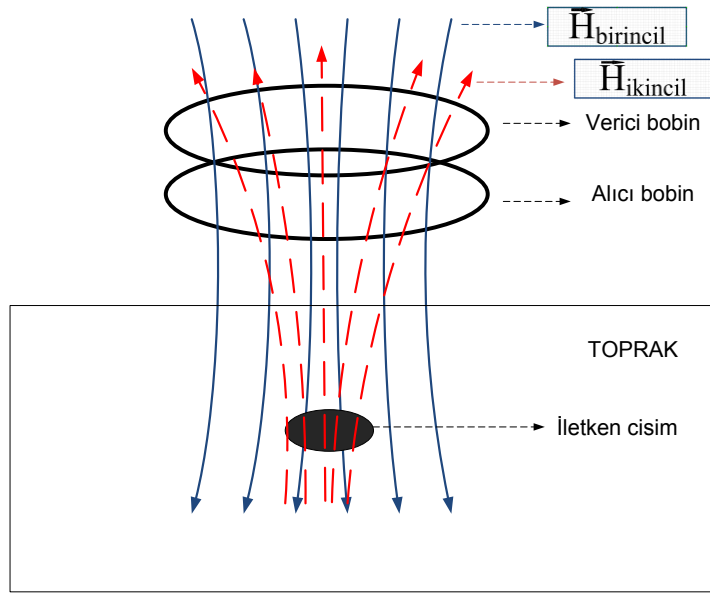
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Denklemlerde; $\vec{E}$ elektrik alan, $\vec{H}$ manyetik alan, $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğu, $\vec{D}$ elektriksel yer değiştirme alanı, $\vec{J}$ serbest akım yoğunluğu, ρ ise uzaysal yük yoğunluğudur. Metal dedektörü başlıklarında bulunan verici bobine zamanla değişen akım uygulandığında $\vec{H}_{\text{birincil}}(t)$ manyetik alanı oluşur. Zamanla değişen $\vec{H}_{\text{birincil}}(t)$ manyetik alan, Lenz kanununa göre iletken cisim üzerinde E elektrik alanını oluşturur ve iletken cisim üzerinde girdap akımı meydana gelir. Oluşan girdap akımı ters yönde $\vec{H}_{\text{ikincil}}(t)$ manyetik alanını oluşturur. Şekil 2.1'de birincil ve ikincil manyetik alan gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1 : Birincil ve ikincil manyetik alan.

Alıcı bobinde ikincil manyetik alan sonucu gerilim indüklenir. $\vec{H}_{\text{ikincil}}(t)$ manyetik alan hedef cismin bulunduğu ortamın iletkenliğine ve cismin manyetik özelliklerine ve fiziksel boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Girdap akımı metalik cisimlerin yüzeyinde halka şeklinde akım oluşturur. Oluşan girdap akımı iletken cismin iletkenlik sabitine bağlıdır. Yüksek olması durumunda metalik cisimlerin tespiti kolaylaşır. İletkenliği düşük alaşım, paslanmaz çelik gibi cisimlerde düşük girdap akımı olduğu için tespit etmek daha zordur. Elektrik iletkenliği düşük mıknatıslar ise bobindeki $\vec{H}$ manyetik alan akışını değiştirerek alıcı bobinde empedans ya da voltaj değişikliğine neden olur.

Elektromanyetik alan iletken bir ortamda deri etkisiyle $e^{-\frac{r}{\delta}}$ oranında azalarak yayılır. r yüzeye uzaklık ve δ yüzey derinliğini ifade eder. Deri etki derinliği, f frekansına, malzemenin σ iletkenliğine ve μ manyetik geçirgenliğine bağlıdır.

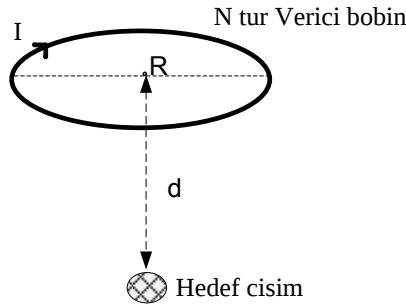
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \cong \frac{500}{\sqrt{\sigma f}}, \quad \mu = \mu_0 \text{ iken} \quad (2.5)$$

Çizelge 2.1'de malzemelere göre deri derinlikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Malzemelere göre deri derinliği.

Malzeme	İletkenlik σ , (10^7 S/m)	Manyetik Geçirgenlik μ_r	Deri Derinliği δ , 1 kHz,	Deri Derinliği δ , 20 kHz	Deri Derinliği δ , 100 kHz
Bakır	5.8	1	2,06 mm	0.47 mm	0.21 mm
Alüminyum	3.54	1	2.6 mm	0.58 mm	0.26 mm
Nikel	1.46	600	0.17 mm	0.038 mm	0.017 mm

Metal dedektörlerinin oluşturduğu manyetik alan düşük frekanslar için uzaklığın küpü oranında azalarak değişmektedir. Şekil 2.2'de gösterilen dairesel bobinden d uzaklıktaki bir hedef üzerindeki birincil manyetik alan, verici bobinin sarım sayısına N , akımına I , ve bobin R çapına bağlı olarak değişmektedir.

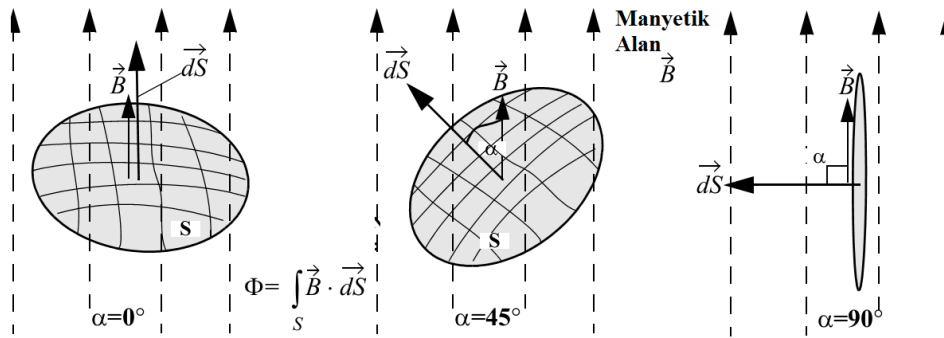


Şekil 2.2 : Cisim üzerinde oluşan manyetik alan.

$$B_z(d) = \frac{NI\mu_0}{2} \frac{R^2}{\sqrt{(R^2 + d^2)^3}} \quad (2.6)$$

Buna bağlı olarak bobin çapı büyütüldükçe daha derinlerdeki metalik cisimler bulunabilir. Ancak çapının çok büyük olması durumunda küçük cisimlere olan hassasiyeti azalır.

Cisim yüzeyi normali ile $\vec{H}_{\text{birincil}}(t)$ alan çizgileri arasındaki α açısına bağlı olarak ikincil manyetik alan değişmektedir. Cisim yüzeyi manyetik alan çizgilerine dik olduğu durumda ($\alpha=0^\circ$) oluşan manyetik akı en fazladır. Bunun sonucunda alıcı bobinde indüklenen gerilim artar. Cisim yüzeyi ile manyetik alan çizgileri paralel olduğu durumda ($\alpha=90^\circ$) manyetik akı iki boyutlu cisimler için sıfır olur. α açısı 90° 'ye yaklaştıkça alıcı bobinde indüklenen gerilim azalır. Şekil 2.3'te farklı konumlarda iletken cisim gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : İletken hedefin konumuna göre oluşan manyetik akı [9].

Maxwell denklemlerinde genel çözümün tek olmamasından dolayı alınan işaretten cisim hakkında kesin sonuç elde etmek imkansızdır. Yani farklı cisimler için aynı genlik ve faz bilgisi alınabilir. Saçılım teorisiyle buna çözüm geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yere nüfuz eden radar (GPR) metalik olmayan cisimlerin tespiti ve derinliği ve boyutu hakkında bize bilgi verir. Basit işaret işleme ile bu bilgilere ulaşamaz. Karmaşık işaret işleme teknikleri kullanılarak cisimler sınıflandırılmaya çalışılmaktadır.

2.3 Bobinler

Bobinler işaretlerin ortama gönderilip alınmasında ya da ortamdaki manyetik alanı algılanmada kullanılmaktadır. Bobinlerin çalışma mantığı Faraday kanunuyla açıklanabilir. N tur sarılmış bobinde anlık $V_i(t)$ gerilimi oluşur.

$$V_i(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d(N\mu_0\mu_r H(t))}{dt} \quad (2.7)$$

Manyetik akı , $\Phi=B.A$ ifade edildiğinde

A: Bobin kesit alanı

H: Bobindeki manyetik alan

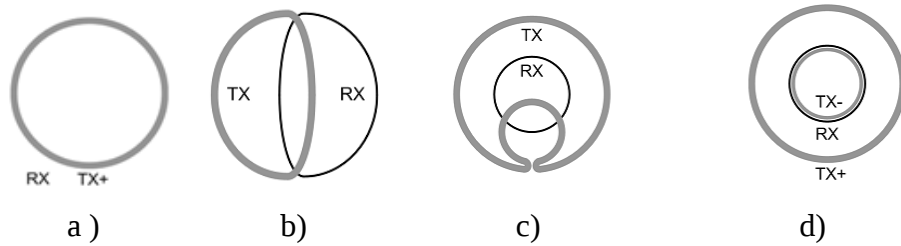
μ_r : Bobin çekirdeğinin bağıl geçirgenliği

Bobin çekirdeği hava ya da manyetik malzemeden olabilir. Bobinler içerisindeki malzemeye göre özellikleri değişmektedir. Hava çekirdekli bobinler lineer olmayan manyetik malzeme içermezler. Bu yüzden indüklenen gerilim karakteristiği doğrusal ve karardır. Sıcaklığın hassasiyete etkisi kullanılan malzemenin ısı genleşmesine bağıdır. Bobinlerde bu küçük ve ihmal edilebilir düzeydedir. Bobin üretilirken bakır tel veya alüminyum tel kullanılabilir. Alüminyum tel % 45 daha hafiftir. Alüminyum telin iletkenliği daha düşük olmasına rağmen bobin aynı voltaj hassasiyetine ve gürültüsüne sahiptir.

Manyetik çekirdekli bobinler ise çok hassas olmalarına karşın daha az karardır. Metal dedektörü sistemlerinde karardlık ve lineerlik önemli olduğu için hava çekirdekli bobinler kullanılır [10].

2.4 Metal Dedektörü Bobin Çeşitleri

Metal dedektörlerinde alıcı ve verici bobinin birbirleriyle olan konumları kullanım amaçlarına göre ve çalışma teknolojilerine göre farklılık göstermektedir. Birbirlerine göre artı ve eksileri bulunmaktadır. Askeri ve hobi amaçlı metal dedektörlerinde en yaygın kullanılan başlık şekilleri Şekil 2.4'de verilmiştir. Darbe işareti ile çalışan darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinde tek bobin yaygın olarak kullanılmaktadır. Sinüs işareti ile oluşturulan sürekli dalga metal dedektörlerinde verici bobin üzerinden alıcı bobine indüklenen gerilim en az seviyede olması gerekir. Bunun için çift-D, eş merkezli bobinler ve 4B şeklindeki bobinler kullanılmaktadır. Dairesel ya da kare şeklinde olabilirler. Performansı etkilemez ancak arazi koşullarında yuvarlak ya da elips şeklindeki bobinler daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 2.4 : Bobin çeşitleri a) tek bobin, b) çift-D bobin, c) 4B bobin, d) eş merkezli bobin.

Tek bobinli metal dedektörlerinde en hassas bölgesi merkezleridir. Tek bobin hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilir. Birincil manyetik alan oluşturulduktan birkaç mikro saniye sonra ikincil manyetik alan aynı bobinle okunarak metal tespiti yapılabilir. Bunun dezavantajı bobinde çevresel sıcaklık, nem gibi faktörler değiştiğinde bobinin indüktans ve direnci değişebilmektedir. Bu da karakteristiğini değiştirir. Bu yüzden aynı büyüklükte bir alıcı ve bir verici bobinler daha kararlı çalışır.

Çift-D şeklindeki bobinler, alıcı ve verici bobinin kesişmesiyle oluşur. Aradaki mesafe, alıcı bobin üzerinde indüklenen gerilimin sıfır ya da sıfıra yakın (10 mV) yapılarak ayarlanır. Bobinin en hassas bölgesi iki bobinin kesişim bölgesidir. Define dedektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Eş merkezli bobinlerde farklı çaplarda 2 adet verici bobin bulunur. Küçük çaplı verici bobin ile büyük çaplı bobin işaretleri arasında 90° faz farkı bulunur. Böylece alıcı bobine verici bobinden voltaj indüklenmez. En hassas bölgesi alıcı bobinin merkezidir. Define dedektörlerinde en yaygın olarak kullanılan başlık türüdür.

2.5 Metal Dedektörleri Çalışma Yöntemleri

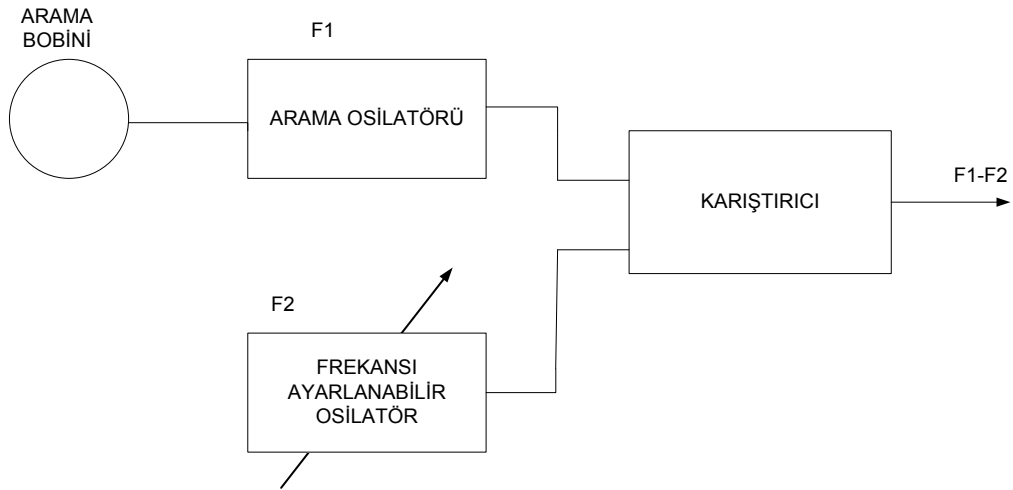
Metal dedektörleri elektromanyetik alan oluşturma yöntemlerine göre ikiye ayrılır. Darbe üreterek manyetik alan oluşturan yöntemle darbe indüksiyon yöntemi denir. Belirli bir frekansta sürekli olarak sinüs işareti ile manyetik alan oluşturan yöntemle sürekli dalga yöntemi denir.

2.5.1 Sürekli dalga metal dedektörleri

Frekans uzayında çalışan sürekli dalga metal dedektörleri sinüs şeklinde işaret yayar. Tasarım amacına göre çalışma frekansı 100 Hz-100 kHz aralığında olabilmektedir. Bir periyotta tek bir frekans ya da birden fazla frekansta işaret göndererek çalışabilirler. Toprağın yapısında bulunan mineraller metalik cisim gibi davranmaktadırlar. Topraktaki çivi, teneke parçaları gibi istenmeyen metaller toprağı metalik açıdan kirletmektedir. Bu yüzden toprakta istenilen metalik hedefleri bulmak zorlaşmaktadır. Sürekli dalga yönteminde ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan cisimler ayırt edilebilmektedir. Defnecilikte sürekli dalga yöntemiyle çalışan metal dedektörleri kullanılmaktadır. Gümüş, altın gibi değerli metaller ile çivi, demir teneke gibi değersiz metalleri ayırt ederek zaman kaybına neden olmaz. Askeri

mayın tarama cihazlarında sürekli dalga dedektörleri de kullanılmaktadır. Schiebel ATMID metal dedektörü örnek gösterilebilir [27]. Ayrıca geliştirilen bazı dedektörlerde tek frekans yerine iki ya da daha fazla frekansta çalışmaktadır. Kullanılan her frekanstan gelen verilerle cisimleri sınıflandırmak ve toprak kompanzasyonu yapmak kolaylaşır.

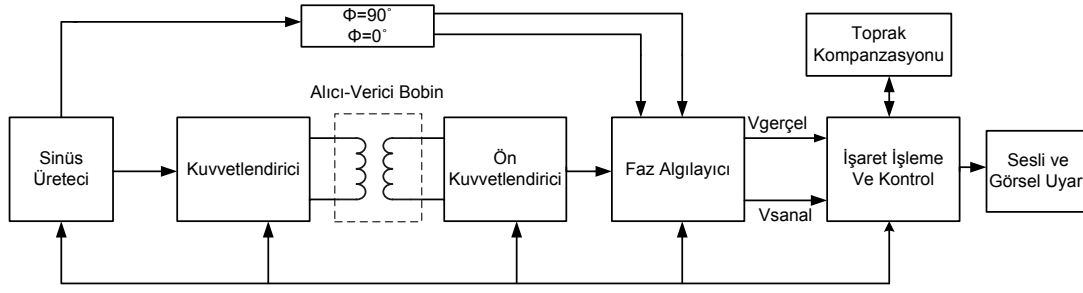
Frekans uzayında çalışan en ilkel vuru frekans osilatör (BFO) dedektörleridir. Tek bir bobin, alıcı ve verici olarak kullanılır. Blok yapısı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Vuru frekans osilatörü.

Bobin bir kapasite ile tek frekansta LC rezonans yaptırılır. Frekansı ayarlanabilir referans bir osilatör istenilen hassasiyete göre ayarlanır. Karıştırıcı ile iki frekans karşılaştırılır. Metalik bir hedef olduğunda bobinin indüktans değeri değişir ve sonuç olarak rezonans frekansı değişir. Çıkışta işaret işleme yoktur ve frekanstaki değişim doğrudan hoparlöre verilerek tespit yapılır. BFO dedektörlerinin eksik yönleri toprak kompanzasyonu özelliği yoktur. Uzun süreli çalışmalarda kararlılığı azdır ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilenecek performansı değişmektedir.

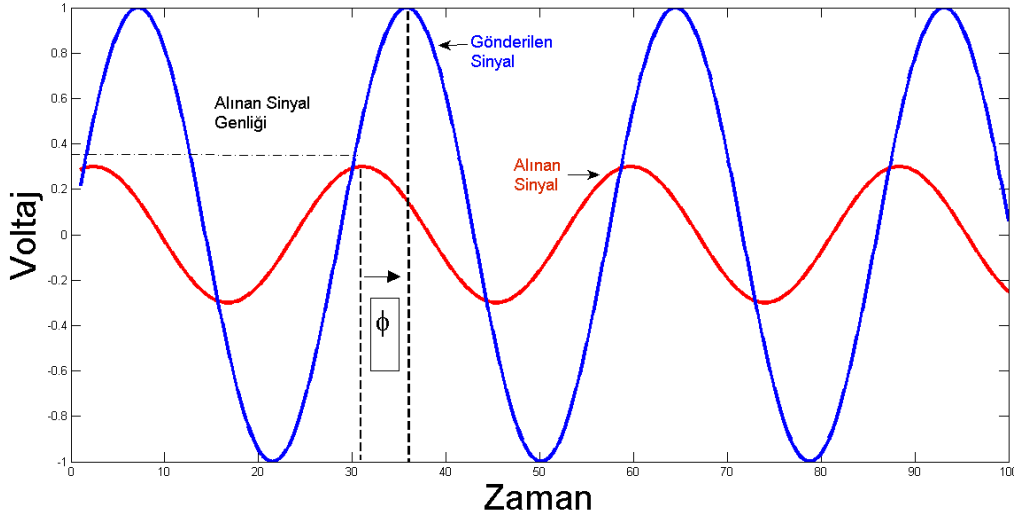
Daha karmaşık yapı olan çok düşük frekans dedektörlerinin blok diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 : Sürekli dalga metal dedektörleri blok diyagramı.

Osilatör ya da herhangi işaret kaynağı ile sinüs işareti üretilir. Kuvvetlendirici yardımıyla işaretin gücü artırılır ve verici bobin ile ışıma yapar. Alıcı bobin ile alınan işaret ön-kuvvetlendiriciden ve filtreden geçer. Gönderilen işaretin 90° faz kaymış hali ve alınan işaretin filtreden geçmiş hali senkron çözücüye girer. Çıkışında gerçel ve sanal olmak üzere iki değer elde edilir. Elde edilen veriler işaret işleme prosedürüne sokulur. Metal olduğu durumlarda dedektör yapısına göre sesli ya da görsel uyarı verir.

Hedeften gelen sinyalin gerçel ve sanal kısımları cismin özellikleri hakkında bilgi verir. Cismin sınıflandırılmasında ve tespitinde kullanılır. Gönderilen sinyal ve ϕ faz farkıyla alınan sinyal Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Sürekli dalga metal dedektörü gönderilen ve alınan işaret

Hedeften gelen ikincil gerilim sinyali açtığımızda:

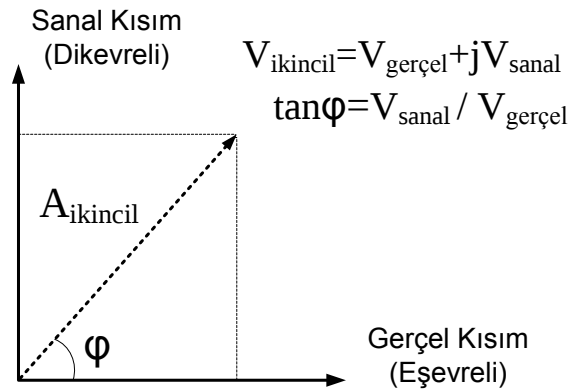
$$V_{ikincil}(t) = A_{ikincil} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.8)$$

$$A_{ikincil} \sin(\omega t + \varphi) = V_{gerçel} \sin(\omega t) + V_{sanal} \cos(\omega t) \quad (2.9)$$

$$V_{gerçel} = A_{ikincil} \cos(\varphi), \quad V_{sanal} = A_{ikincil} \sin(\varphi) \quad (2.10)$$

$V_{gerçel}$ bileşenine eşevreli bileşen denir. V_{sanal} bileşenine ise dikevrelili bileşen denir. Kompleks koordinatta $V_{ikincil}(t) = V_{gerçel} + jV_{sanal}$ şeklinde gösterilebilir.

Alınan işaretin karmaşık düzlemde gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Sürekli dalga metal dedektörlerinde frekans seçimi önemlidir.



Şekil 2.8 : Alınan işaretin karmaşık düzlemde gösterimi.

Düşük ve yüksek frekanslarda çalışmanın birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır.

Düşük frekansta:

- Elektromanyetik alan daha derinlere nüfuz eder.
- Toprak yapısından daha az etkilenir.
- Yüksek frekanslara oranla çözünürlüğü düşüktür.

Yüksek frekansta:

- Girdap akımı yoğunluğu artar.
- Daha az derine nüfuz eder.
- Topraktan daha fazla etkilenir.
- Çözünürlüğü yüksektir. Yani küçük cisimleri tespit etmede daha hassastır.
- Faz açısı frekansla azaldığı için ayırt etme yeteneği azalır.

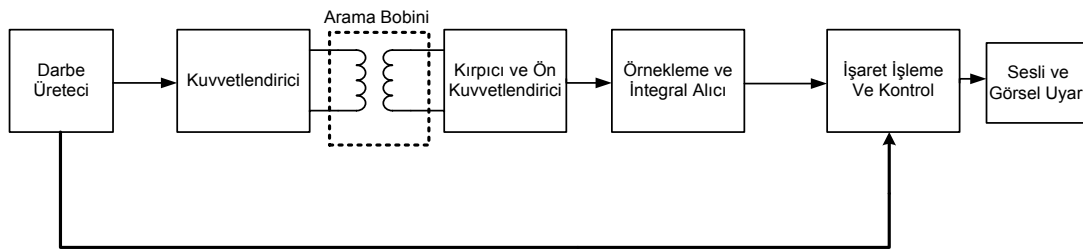
Çoklu frekans metal dedektörlerinde iki özellik sağlandığı için tek frekanslı dedektörlere göre çok daha üstündürler. Mayın temizleme çalışmalarında ve değerli metal (altın, gümüş) aramalarında çoklu frekans metal dedektörleri daha çok tercih edilir.

2.5.2 Darbe indüksiyonlu metal dedektörleri

Darbe indüksiyonlu metal dedektörleri mikro saniye mertebelerinde dar darbeler üretir. Yüksek akımlı bu darbeler verici bobine aktarıldığında 100 V mertebelerinde darbe oluşur. Anlık yüksek manyetik alan oluşması ile metalik cisim üzerinde girdap akımı oluşur. İkincil manyetik alan zamanla sönümlenir. Sönümlenme zaman sabiti denklem (2.11) ile hesaplanabilir.

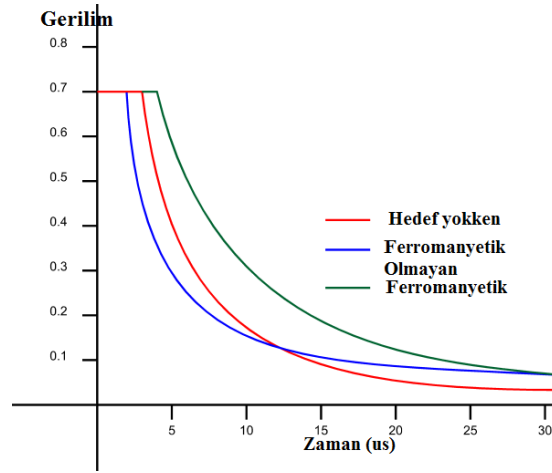
$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.11)$$

Sönümlenme süresi bobine, hedef cismin iletkenliğine, manyetik geçirgenliğine ve fiziksel boyutlarına bağlıdır. Tekrarlama frekansları 1 kHz'e kadar çıkabilir. Manyetik alandaki sönümlenmeye milisaniye mertebelerine çıkabildiği için daha yüksek tekrarlama frekansları uygun değildir. Darbe işareti tek veya çift kutuplu olabilir. Çift kutuplu darbe şekli, tehlikeli patlayıcıları üzerinde herhangi bir tetiklemeye neden olmadığı için tercih edilir. Yüksek akımı anahtarlayabilen transistörlerle anlık dar darbeler üretilir. Alınan işaret kuvvetlendirildikten sonra sönümlenme süresi okunarak metalik cisimler tespit edilir. Şekil 2.9'da blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.9 : Darbe indüksiyonlu metal dedektörü blok şeması.

İşaret işleme kısmında sönümlenme süresi ve sönümlenme eğrisindeki farklılıklardan yararlanılır. Şekil 2.10'da farklı cisimler için sönümlenme grafiği verilmiştir. Çok iyi iletken malzemelerin dirençleri düşük olduğundan sönümlenme süresi daha uzun olur. Zayıf iletkenlerde ise aksine daha kısa olur.



Şekil 2.10 : Metal cinsine göre sönümlenme eğrisi [26].

Darbe indüksiyonlu metal dedektörleri mineralli topraklarda çok derinlere nüfuz edebilmektedir ve kararlı olarak çalışmaktadır. Dedektörün elektronik tasarımı da frekans uzayında çalışan metal dedektörlerine göre daha basittir. Ancak en büyük eksisi, ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan cisimleri ayırt etmesi oldukça zordur.

3. ELEKTROMANYETİK DEVRE MODELİ VE ANALİZİ

Mayın temizlemede kullanılan metal dedektörleri ticari oldukları için bu alanda yapılan bilimsel araştırmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle cisimlerin şekillerine (silindir, küre) göre oluşturdukları girdap akımı, toprağın etkisi gibi konularda çok fazla deneysel çalışma bulunmamaktadır. Frekans uzayında çalışan metal dedektörleri hakkında yapılan bilimsel çalışmalar genellikle farklı çalışma alanlarından çıkmaktadır. Jeofizik ve tahribatsız test (NdT) çalışmaları kapsamında frekans uzayında çalışmalar mevcuttur. Bu kısımda temel girdap akımı teoremi ve bu problemin analitik çözümünü anlatılacaktır.

3.1 Quasi-Statik Yaklaşım

Quasi statik yaklaşım düşük frekanslarda elektromanyetik problemlerin çözümünü kolaylaştırmak için kullanılır. Hedef cismin alıcı ve verici bobinlere uzaklıkları ve cismin yarıçapının dalga boyundan daha küçük olduğu varsayılır. Yer değiştirme akımı (J) ihmal edilebilir olmalıdır [16].

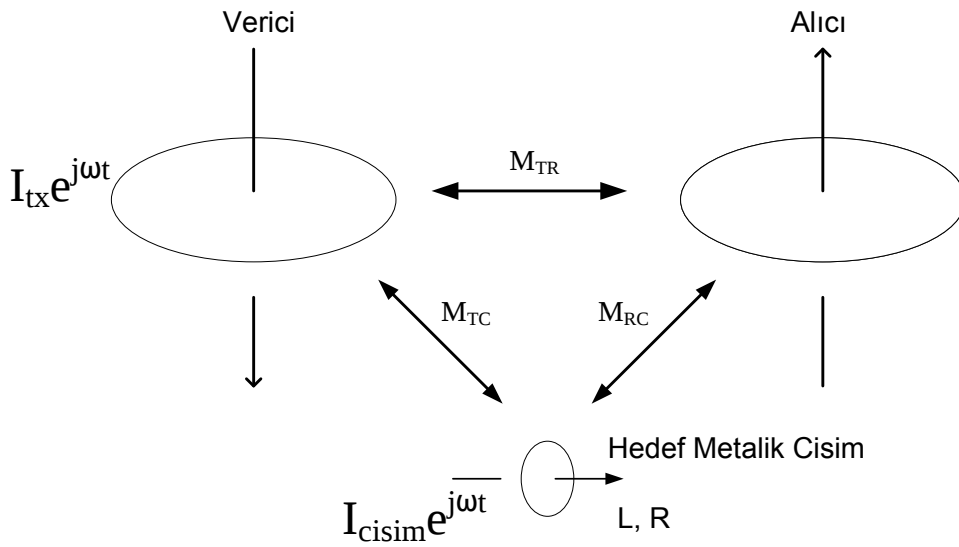
μ manyetik geçirgenlik sabiti, ϵ yalıtkanlık (dielektrik) katsayısı ve ω çalışma frekansı olsun. Yer değiştirme akımının ihmal edilebilmesi için $\mu\epsilon\omega^2 \ll \mu\epsilon\omega$ ifadesi sağlanmalıdır. Bu durumda $\sigma \gg \epsilon\omega$ olur. Yayılım sabiti yalıtkanlık sabitine bağımlılık kaybolur ve yayılım sabiti

$$k^2 = i\sigma\mu\omega \quad (3.1)$$

ifade edilir. $\mu\epsilon\omega^2 \ll \mu\epsilon\omega$ ifadesi metallerde çok iyi sağlanırken, iletkenlik düşük olduğu ($\sigma=10^5$ S/m) durumlarda 1 MHz'de $\frac{\epsilon\omega}{\sigma}$ değeri 5.6×10^{-10} olur. Bu durum topraklarda bile geçerli olabilir ancak çok düşük iletkenlikte ve yüksek frekanslarda bu denklem sağlanmaz [9]. Çoğu toprağın iletkenliği 10^{-3} -1 S/m civarındadır [13]. Bu yaklaşımla, ortamda herhangi bir noktadaki manyetik alan tanımlanırken iletken bir cisim veya ortam boyunca meydana gelen anlık akı yoğunluğu kullanılır. Hesaplamak içinse Biot-Savart kanunu kullanılır. J yer değiştirme akımları ihmal edildiğinde dalga denklemleri elektrik ve manyetik alan için azalır ve basitleşir [14].

3.2 Eş Değer Devre Modeli

Metal dedektörleri transfer fonksiyonları oluşturularak modellenenebilir. Transfer fonksiyonu eşdeğer devre modeli ya da manyetik alan çözümü yöntemlerinden biri kullanılarak hesaplanabilir. Bu iki modelde de, fonksiyon cevabı $F(\alpha)$, indüksiyon sayısı α olarak da bilinen α parametresine bağlı olarak oluşturulur. α , cismin manyetik özelliklerine ve boyutlarına bağlıdır. Şekil 3.1'de EM basit modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Elektromanyetik basit devre modeli [9].

Modeli kolaylaştırmak ve sonlu iletkenliğe sahip metalik cisimlerin çözümünü gösterebilmek için hedef nesne halka tel (iletken bir çevrim tel) olarak alınır. Düşük frekanslarda halka tel R direnci ve seri L indüktansı ile modellenir.

$$Z_{cism}(j\omega) = R + j\omega L \quad (3.2)$$

Faraday kanununa göre, çevrim telde ya da bobinde manyetik akı değişimi nedeniyle cisim üzerinde gerilim oluşur. İndüklenen gerilim verici bobine uygulanan akımla orantılıdır. Verici bobin üzerinde akan akım $I_{tx}e^{j\omega t}$, hedef cisim üzerinde oluşan akım $I_{cism}e^{j\omega t}$ alınır.

$$V_{cism}(j\omega) \propto j\omega I_{tx}e^{j\omega t} \quad (3.3)$$

Alıcı bobin, verici bobin ve cismin birbirini etkilemesi karşılıklı (ortak) indüktans olarak tanımlanan belirli bir değere göre olmaktadır. M_{TC} , verici bobin ile cisim arasındaki ortak indüktanstır. Cisim üzerinde oluşan akım

$$I_{cism}e^{j\omega t} = -\frac{M_{TC}}{L} \left[\frac{j\omega L(R - j\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] I_{tx}e^{j\omega t} \quad (3.4)$$

Alıcıda birincil ve ikincil oluşan gerilimler denklem 3.5'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} V_{rx-birincil}(\omega) &= -j\omega M_{TR} I_{tx}e^{j\omega t}, \\ V_{rx-ikincil}(\omega) &= -j\omega M_{CR} I_{cism}e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Alıcıda birincil ve ikincil oluşan gerilimler oranı $G(\omega)$ olarak alınırsa transfer fonksiyonu

$$G(\omega) = \frac{V_{rx-ikincil}(\omega)}{V_{rx-birincil}(\omega)} = -\frac{M_{TR}M_{CR}}{M_{TR}L} \left[\frac{j\omega L(R - j\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] = \beta \left[\frac{\alpha^2 + j\alpha}{1 + \alpha^2} \right] \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{\omega L}{R}, \quad \beta = -\frac{M_{TR}M_{CR}}{M_{TR}L} \quad (3.7)$$

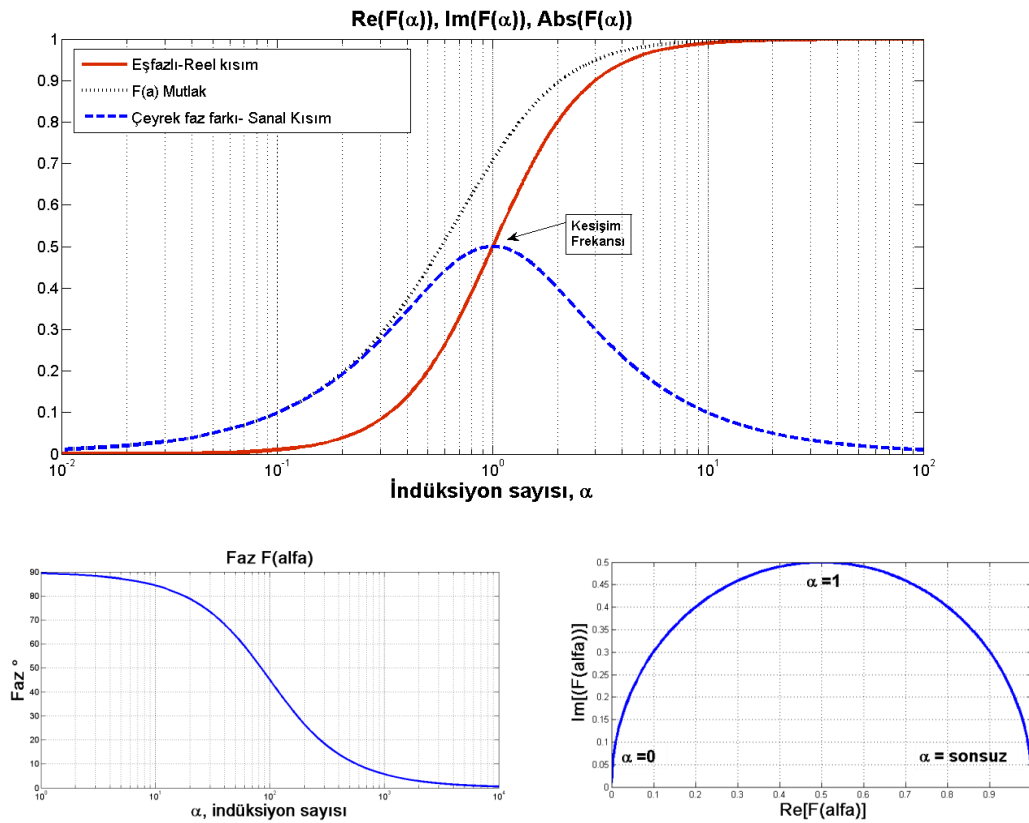
Bu modelde β , alıcı-verici bobinlerin konumu ve birbirlerine göre boyutlarına bağlıdır. β sabit olarak alınırsa hedefin elektromanyetik özellikleri (L,R) ve frekans (ω) değerlerine bağlı olarak $G(\omega)$ değişmektedir. Buradan sistemin fonksiyon cevabı $F(\alpha)$ olarak tanımlanabilir [8]. $X(\alpha)$ gerçel (reel), $Y(\alpha)$ ise sanal kısmını ifade eder. Gerçel kısma eşevreli, sanal kısma dikevrelili de denilmektedir. Bu ifade sistemin eşdeğer devre modeli için geçerlidir.

$$F(\alpha) = \left[\frac{\alpha^2 + j\alpha}{1 + \alpha^2} \right] = \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} + j \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} = X(\alpha) + jY(\alpha) \quad (3.8)$$

Yukarıdaki fonksiyon yaklaşık olarak sistemin karakteristik limitleri gösterilebilir. α değeri sonsuza yaklaştığında $X(\alpha)$ terimi 1, $Y(\alpha)$ terimi ise 0 olur. Buna indüktif limit denir. $F(\alpha)$ fonksiyonu tamamen gerçeldir. $G_L(\omega) = \beta$ olur ve hedef cisimden en büyük genlikte cevap gelir. Bu durum yüksek frekanslarda çalışırken ya da iletkenliğin yüksek (düşük direnç, R) olduğu durumunda meydana gelir. Yüksek indüktif hedeflerde gözlemlenir.

α değeri sıfıra yaklaştığında $X(\alpha)$ terimi 0, $Y(\alpha)$ terimi ise 1 olur. Bu rezistif limit olarak gösterilir. Fonksiyon cevabı tamamen sanal olur. $G_R(\omega) = i\beta\alpha$ olur. Bu durum düşük frekanslarda, düşük iletkenlik (yüksek direnç, R) durumunda gözlemlenir.

Özet olarak, düşük α değerinde başlangıç olarak düşük genlikte işaretler elde edilirken α değeri arttıkça indüktif limite yaklaşılr ve genlik artar. Faz ise rezistif limitte 90° iken giderek 0° 'ye düşer. Bu davranış grafikleri Şekil 3.2'de verilmiştir [9].



Şekil 3.2 : Elektromanyetik devre modeli transfer fonksiyonu cevabı.

Transfer fonksiyonunun gerçel ve sanal kısmı $\alpha=1$ durumunda kesişir.

$$f_{kesişim} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{R}{2\pi L}, \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (3.9)$$

Kesişim frekansı rezonans frekansına eşit olarak da ifade edilmektedir. Cisimlerin sınıflandırılmasında bu özelliğe bakılabilir. Çünkü cisimlerin özelliklerine bağlı olarak rezonans frekansı değişmektedir [16]. Sanal kısmın tepe yaptığı frekans ile kesişim frekansı ile her zaman aynı nokta olmayabilir [2]. Sanal kısmın tepe noktası ağırlıklı olarak cismin konumuna ve eksensel uzunluğuna bağlıdır [17].

3.3 Sabit Manyetik Alan Durumu

İdeal durumu ifade eder. Kaynak olarak verici bir halka yerine sabit bir manyetik alan saçıcı olsun. Eğer akım kaynağı sadece $\sin(\omega t)$ olarak ifade edilebilirse, üretilen birincil manyetik akı yoğunluğu

$$B_{kaynak} = A_0 \cos(\omega t) = \text{Re}\{A_0 e^{j\omega t}\} \quad (3.10)$$

İkincil manyetik alan ϕ faz farkıyla

$$B_{alınan} = A_0 \cos(\omega t + \phi) = \text{Re}\{A_0 e^{j\phi} e^{j\omega t}\} \quad (3.11)$$

ve fazörü de $A_0 e^{j\phi}$ ifade edilir. Faz uzayında $\phi = 0$ kabul edildiğinde indüklenen gerilim

$$V_{indüklenen} = -j\omega B_s = -j\omega A_0 \quad (3.12)$$

ve indüklenen akım, iletken hedef empedansı Z_{cisim} üzerinde

$$I_{indüklenen} = \frac{V_{indüklenen}}{Z_{cisim}} = \frac{-j\omega A_0}{Z_{cisim}} = -j\omega \frac{A_0}{R_{cisim} + j\omega L_{cisim}} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) α olarak ifade edilirse, $\alpha = \frac{\omega L_{cisim}}{R_{cisim}}$ için

$$\begin{aligned} I_{indüklenen} &= -j\omega \frac{A_0}{L_{cisim}} \left(\frac{\alpha^2 + j\alpha}{1 + \alpha^2} \right) = -j\omega \frac{A_0}{L_{cisim}} \left(\frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} + j \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \right) \\ &= -j\omega \frac{A_0}{L_{cisim}} (X(\alpha) + jY(\alpha)) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Bu bilgilerle geniş bantlı sistemler için üç temel bölge tanımlanabilir [2].

Rezistif bölgesi, $\alpha < 1$ ve $\omega < \frac{R_{cisim}}{L_{cisim}}$

- Sanal kısım gerçel kısma göre daha baskın olur. İndüklenen akım ile uygulanan alan arasında 90° faz farkı olur.

Kesişim bölgesi, $\alpha = 1$ ve $\omega = \frac{R_{cisim}}{L_{cisim}}$

- Gerçel ve sanal kısımlar birbirine eşittir. İndüklenen akım ile uygulanan alan arasında 45° faz farkı olur.

İndüktif bölgesi, $\alpha > 1$ ve $\omega > \frac{R_{cism}}{L_{cism}}$

- Gerçel kısım maksimuma yaklaşırken sanal kısım sıfıra yaklaşır. 180° 'lik faz farkı indüklenen akım ve uygulayan alan arasında oluşur.

3.4 Cisimlerin Genel EM Cevabı

Denklem 3.8'deki $F(\alpha)$ temel devre modeli referans alınarak hesaplanmıştır. Ancak cisimlerin gerçek modelleriyle analiz etmek çok daha karmaşıktır. Hedef cismin karakteristiğini gösteren indüksiyon sayısı, α cismin boyutlarına göre tanımlanabilir [17-19].

$$\alpha = \sigma \mu \omega l_j l_k \quad (3.15)$$

Burada l_j ve l_k hedefin lineer boyutlarıdır. a yarıçapına sahip küre ve silindir için $\sigma \mu \omega a^2$ alınabilir. t kalınlığına sahip disk için $\sigma \mu \omega t a$ alınarak EM analizleri yapılabilir. Küre şekli, analitik modelleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Analitik çözümü kolaylaştırdığı için kullanılmaktadır. İki eş merkezli bobin alıcı ve verici bobin olsun. Homojen hedefin özellikleri: cismin yarıçapı a , iletkenliği σ ve manyetik geçirgenliği μ olarak tanımlansın. Küre şeklindeki hedef cisim yeterince bobinden uzak olduğunda ($d \gg a$) ya da bobin çapı cismin çapından yeterince büyük ($a \ll R$) ise birincil manyetik alan dipol yaklaşımına göre homojen olarak cisme etki eder [17,19].

Genel olarak küre için dipol yaklaşımına göre transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X(\alpha) + jY(\alpha) = \frac{[\mu_0(1 + k^2\alpha^2) + 2\mu] \sinh(k\alpha) - (2\mu + \mu_0)k\alpha \cosh k\alpha}{[\mu_0(1 + k^2\alpha^2) - \mu] \sinh(k\alpha) + (\mu - \mu_0)k\alpha \cosh k\alpha} \quad (3.16)$$

Dipol yaklaşımda transfer fonksiyonu yalnızca cismin parametrelerinden etkilenir. Cismin bobine göre olan konumundan etkilenmez.

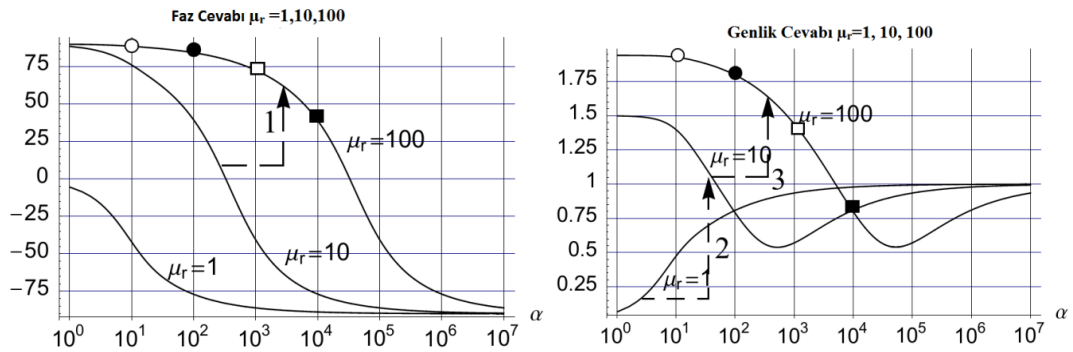
3.5 Ferromanyetik ve Ferromanyetik Olmayan Cisimlerin EM Cevabı

Metalik cisimleri ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan malzemeler olarak sınıflandırabiliriz. Elektromanyetik indüksiyon sensörlerinde cismin tespitini önemli derecede etkiler. Ferromanyetik malzemeler demir içerdikleri için manyetikler. Bu malzemelere dışarıdan manyetik alan uygulandığında güçlü bir manyetik alan üretirler. Manyetik alan kaynağı kaldırılrsa bile aynı yönde manyetik moment etkisini sürdürür. Ferromanyetik olmayan malzemeler ise demir içermedikleri için manyetik değildir. Manyetik malzemeleri sınıflandırmada manyetik geçirgenlik sabiti μ_r kullanılır. Çizelge 3.1'de metalik malzemelerin sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Metalik malzemelerin sınıflandırılması

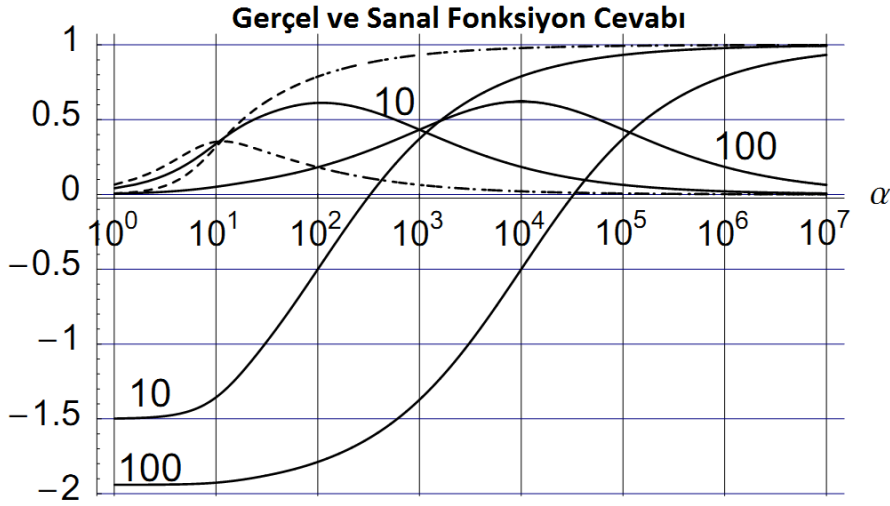
Manyetik Moment	Diyamanyetik, $\mu_r < 1$	Paramanyetik, $\mu_r > 1$	Ferromanyetik, $\mu_r \gg 1$
Malzeme Cinsi	Cu, Ag, Zn, Au	Al, Ti, Zr, Cr, Na	Fe, Ni, Co
Mıknatıslanma	Oldukça zayıf	Zayıf	Güçlü

İletken malzemelerin manyetik geçirgenlik özelliği transfer cevabını etkilemektedir. Şekil 3.3'de manyetik geçirgenliğe bağlı faz değişim ve genlik grafiği verilmiştir. İndüksiyon sayısı α , ferromanyetik olmayan cisimlerde sonsuza yaklaştığında transfer fonksiyonunun gerçel kısmı doyuma gider ve faz açısı da -90° 'ye yaklaşır. Ferromanyetik cisimlerde faz α sıfırken $+90^\circ$ 'ye yaklaşır ve artı sonsuza gittiğinde faz açısı -90° 'ye yaklaşır. Bu ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan cisimleri ayırt etmek için kullanılan bir özelliktir.



Şekil 3.3 : Manyetik geçirgenliğe bağlı a) faz cevabı ve b) genlik cevabı [9].

Cismin σ , a ve ω çalışma frekansı sabit iken, manyetik geçirgenlik μ_r arttığında faz değeri de artar. Büyük α değeri için Şekil 3.3'te gözüktüğü üzere faz açısı negatife inmektedir. Şekil 3.4'te manyetik geçirgenliğe bağlı gerçel ve sanal fonksiyon cevabı grafiği verilmiştir. $\mu_r=10$ olduğunda gerçel bileşeni negatife inmektedir. Ferromanyetik cisimler için ayırt edici özelliktir.



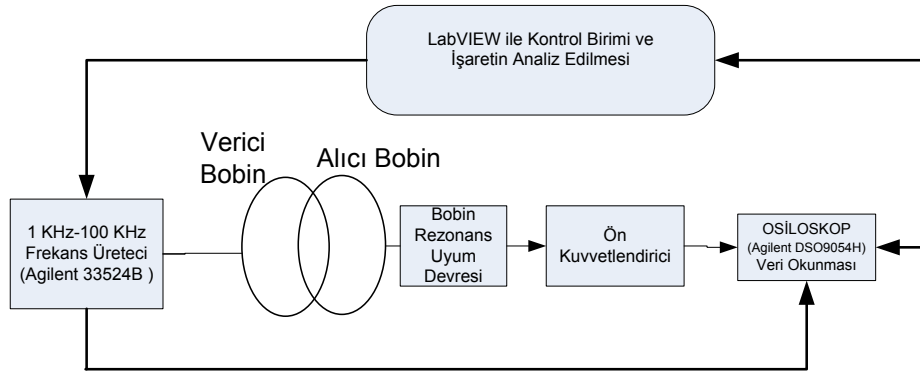
Şekil 3.4 : Manyetik geçirgenliğe bağlı gerçel ve sanal fonksiyon cevabı [9].

Bu yüzden tek frekansta çalışırken cismin ferromanyetik olup olmadığı net değildir. İki veya daha fazla frekans kullanılması daha kesin sonuçlar verir. Ayrıca düşük frekans değerlerinde transfer fonksiyonun gerçel kısmı negatif değerlere düşebilmektedir [23].

4. ÇOKLU FREKANS DONANIM TASARIMI

Bu bölümde 1 kHz-100 kHz frekans bandında çalışan metal dedektörü tasarımı anlatılacaktır. Frekans aralığına uygun alıcı ve verici bobin tasarlanmıştır. Geniş frekans bandında empedans uyumu ve indüksiyon sıfırlaması yapılmıştır. Ön kuvvetlendirici tasarımı ile alınan zayıf işaret kuvvetlendirilmiştir.

Sistem yapısı genel olarak sürekli dalga metal dedektörü yapısına benzemektedir. Tek frekansta çalışan sürekli dalga dedektörlerinde, alıcı ve verici bobin çalışma frekansında rezonansa getirilir. Çoklu frekans çalışmalarında ise rezonans frekansının altında, lineer bölge kullanılmıştır. Tasarlanan çoklu frekans metal dedektörü blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir



Şekil 4.1 : Çoklu frekans metal dedektörü şeması.

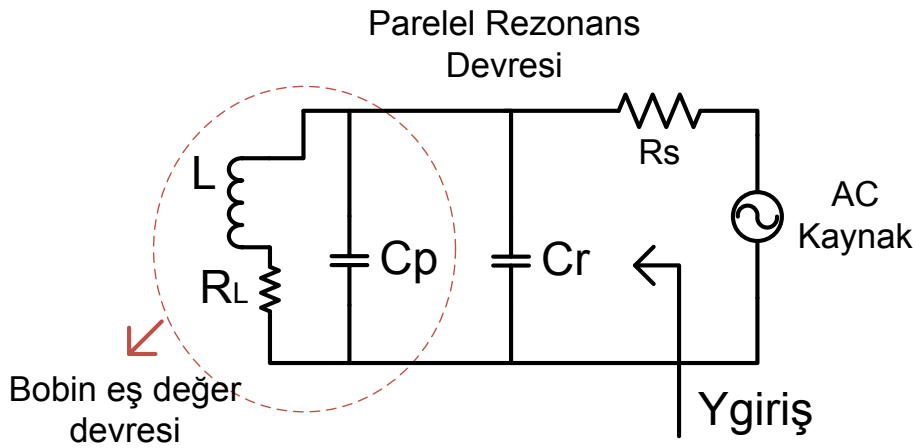
1 kHz-100 kHz arasındaki sinüs işareti 1 kHz aralıklarla verici bobine verildi. İşaretin genliği 20 Vpp (+10 V, -10 V)'dir. Verici bobine paralel kapasite bağlanarak rezonans devresi oluşturuldu. Alıcı bobine de rezonans kapasitesi bağlandı. Rezonans kapasitesini bağlamanın amacı lineer çalışma bant aralığı elde etmek ve empedans uyumu gerçekleştirerek gönderilen ve alınan işaretin aktarımını verimli hale getirmektir. Her bir frekansta alınan işaret 33 dB kuvvetlendirici ile seviyesi yükseltildi. Agilent DSO9054H osiloskop ile gönderilen ve alınan işaret yüksek örnekleme ile dijital veriye çevrildi. LabVIEW® [28] arayüz programı ile alınan verilerin faz ve genlik bilgileri çıkartıldı.

4.1 Alıcı ve Verici Bobin Tasarımı

Tasarlanan çoklu frekans metal dedektöründe çift-D bobini kullanılacaktır. Bobinlerin indüktans değeri empedans uyumuna göre belirlenmiştir. Bobinler uygun frekansta rezonansa getirilerek empedans uyumu sağlanmıştır.

4.1.1 Paralel rezonans devreleri

Rezonans devreleri, işaret kaynağı ile çıkış yükü arasında istenilen frekansların iletilmesini sağlayan iki kapılı devrelerdir. Alıcı ve verici bobinin tezde çalışma frekansı olan 1 kHz-100 kHz 'de gücü aktarabilmesi gerekmektedir. Bobinlerin ya da indüktansların temel eş değer devresi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Paralel rezonans devresi ve bobin eş değer devresi.

Bobinler N tur sarılması sonucu $L(\omega)$ indüktansına ve buna seri R_{dc} seri direncine sahiptir. Bunlara paralel olarak parazitik C_p kapasitesi oluşur. C_p kapasitesi bobinlerin sarılma şekillerine bağlıdır. Düzensiz sarılması ve bobin telleri arasındaki boşlukların fazla olması parazitik C_p kapasitesini artırır. Bu da bobinin doğal rezonans frekansını düşürür [16]. Eşdeğer devre paralel rezonans devresidir. $C_r \gg C_p$ olduğu için hesaplamalarda C_p ihmal edildi. Verilen frekansta indüktans ve kapasitenin reaktansı

$$X_L = j\omega L, \quad X_C = \frac{1}{j\omega C_r} \quad (4.1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Giriş admitansı

$$Y_{Giris} = j\omega Cr + \frac{1}{R_L + j\omega L} = \frac{(1 - \omega^2 LCr) + j\omega Cr R_L}{R_L + j\omega L} \quad (4.2)$$

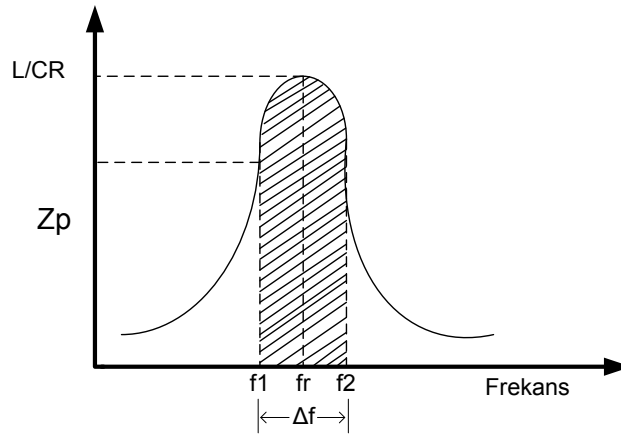
$$Y(\omega)_{Giris} = \frac{[(1 - \omega^2 LCr) + j\omega Cr R_L](R_L - j\omega L)}{R_L^2 + \omega^2 L^2} = G(\omega) + jB(\omega) \quad (4.3)$$

$$G(\omega) + jB(\omega) = \frac{R_L}{R_L^2 + \omega^2 L^2} + j\omega \frac{(Cr^2 - L) + \omega^2 L^2 Cr}{R_L^2 + \omega^2 L^2} \quad (4.4)$$

olarak bulunur [11]. Gerçel ve sanal kısımdan oluşur. Buradan devrenin rezonans frekansı bobinin seri direnci ihmal edildiği durumlar için ω_0 , dahil edildiği durumlarda ω_r :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad \omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{L^2}} \quad (4.5)$$

hesaplanır. Öz salınım frekansı rezonans frekansından daha küçüktür ($\omega_0 < \omega_r$). İki frekans indüktans seri direnci R_L küçük olduğu ($<100k$) , yani Q kalite faktörünün çok büyük olduğu değerlerde birbirine eşittir. Şekil 4.3'te frekansa bağlı empedans değişimi verilmiştir.



Şekil 4.3 : Rezonans -empedans değişimi ve rezonans bant genişliği.

Rezonans frekansında en büyük değerine ulaşır. Rezonans frekansında $X_L = X_C$ olur ve seri empedansı indüktif elemanın R_L direncine eşit olur. Rezonansta devrenin paralel direnci

$$Z_p = \frac{2\pi fL}{2\pi fCxR_{dc}} = \frac{L}{CR_{dc}} \quad (4.6)$$

denklemlerle hesaplanır. Rezonans devresinin bant genişliği empedansın 3 dB düştüğü frekans aralığıdır. Devrenin kalite faktörü büyük olduğunda bant genişliği azalır.

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}, \text{ Bant Genişliği } \Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_r}{Q} \quad (4.7)$$

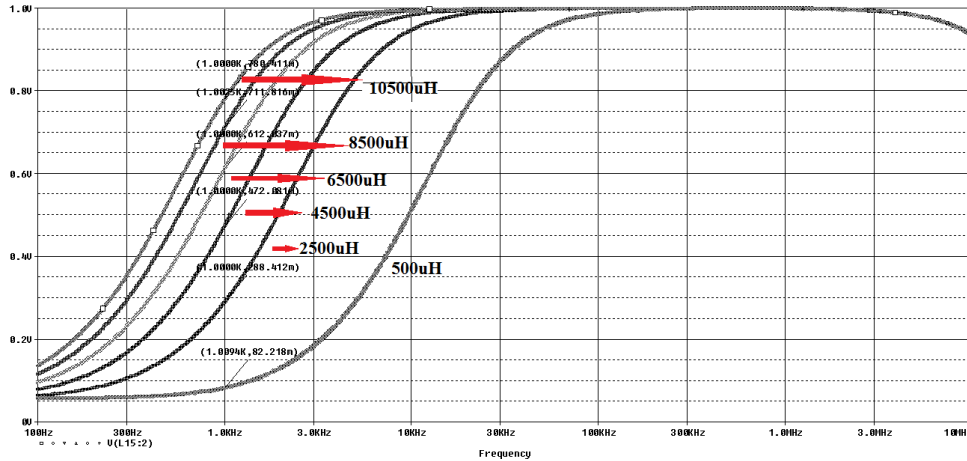
4.1.2 Bobin değerlerinin belirlenmesi

Tekli frekans metal dedektörlerinde çalışma frekansı rezonans frekansı seçilmektedir. Rezonans frekansı sistemin en hassas ve verimli çalıştığı frekanstır. Çoklu frekans yönteminde ise çalışma frekansları 3 dB bant genişliği içindedir. Rezonans frekansı bobinin öz frekansından en az iki kat düşük olması gerekmektedir. Pratik uygulamalarda en az 5 kat alt frekansında çalışılmaktadır [12].

İşaret üretici çıkış direnci 50 Ω 'dur. 1 kHz'de devrenin giriş empedansı 3 dB bant aralığı için en az Z_{giris} 50 Ω olmalıdır.

$$Z_{Giris} = R_L + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_r} \quad (4.8)$$

Kapasite düşük frekanslarda yüksek empedans gösterir. Bobinin 1 kHz'de 50 Ω olduğu değer $j\omega L = 50 \rightarrow L = 7961 \text{ mH}$ 'dir. 500 μH - 10.5mH aralığında 2mH aralıklarla bobine aktarılan gerilim grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : İndüktans değerine göre bobine aktarılan gerilim.

Bobin değeri 8 mH'den büyük olmalıdır. 500 µH 'de verilen gerilimin sadece % 8.2'si bobine aktarılabilmiştir. Bu yüzden alıcı ve verici değerleri 8mH'den büyük alınmıştır.

4.1.3 Bobinin hazırlanması

Alıcı ve verici bobin değerleri denklem (4.9) ile hesaplanmıştır [20].

$$L_S = R\mu_0\mu_r N^2 \left[\ln\left(\frac{8R}{a}\right) - 2 \right] \quad (4.9)$$

L_S = Hesaplanan indüktans

R= Bobin çapı

a = Bobin telinin kalınlığı

N=Sarım sayısı

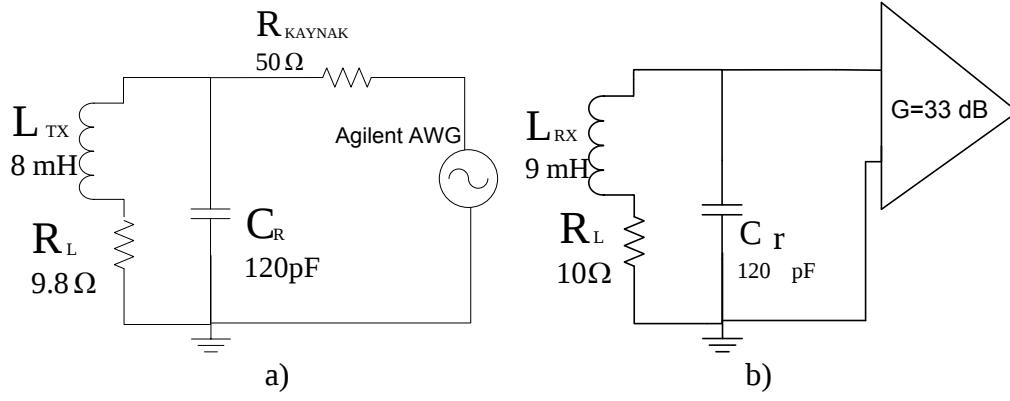
Bobin değerleri 8 mH'nin üstünde olacak şekilde bobin sarılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan değerler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Bobinin hesaplanan ve ölçülen değerleri.

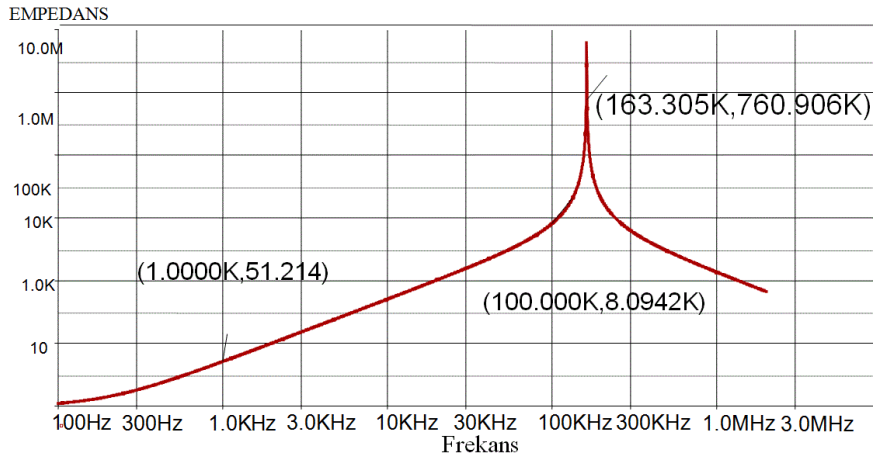
Çift-D bobini	Sarım sayısı (tur)	Bobin çapı	Tel çapı	Hesaplanan indüktans	Ölçülen indüktans	Ölçülen Q
Alıcı bobin	90	25 cm	0.35 mm	11.06 mH	9 mH	14.2
Verici bobin	80	25 cm	0.35 mm	8.74 mH	8 mH	13.1

Bobin ölçümü Agilent/HP 4285A marka LCR metre ile yapılmıştır. Ölçüm frekansı 75 kHz olarak ayarlanmıştır.

Verici ve alıcı rezonans devreleri Şekil 4.5' te verilmiştir. Ölçüm sonucu elde edilen değerlerle Orcad Pspice programında benzetimleri yapılmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. 1 kHz'de giriş empedansları istenildiği gibi 50Ω'dan yüksektir.

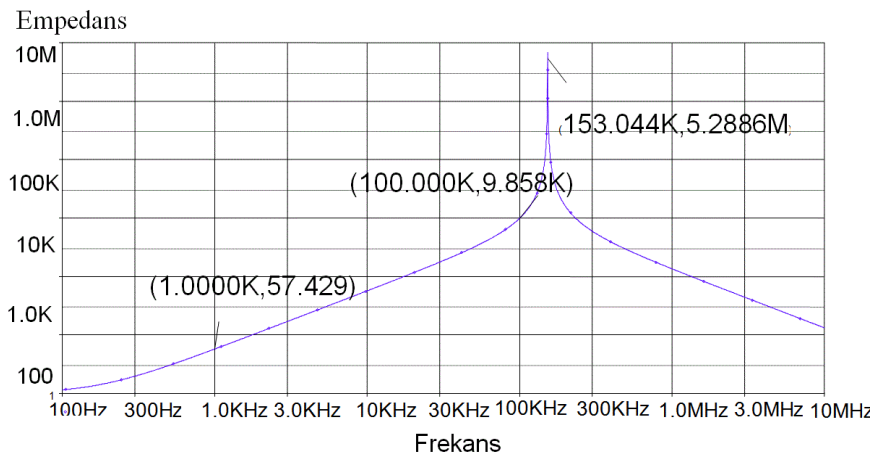


Şekil 4.5 : a) Verici ve b) alıcı rezonans devreleri.



Şekil 4.6 : Verici rezonans devresi benzetim sonucu.

Rezonans frekansları 100 kHz'in üstünde rezonansa getirilmiştir. Amaç 1 kHz-100 kHz aralığında lineer değişim elde etmektir.

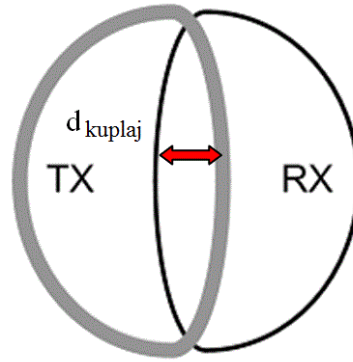


Şekil 4.7 : Alıcı rezonans devresi benzetim sonucu.

4.1.4 İndüksiyon sıfırlama

Frekans uzayında alıcı bobin (halka) konumu, kuplaj etkisini minimize edecek şekilde konumlandırılır. Aksi takdirde ikincil işaret birinci işaretin içinde kaybolacaktır. Alıcının girişinde yapay, fazı ters, aynı genlikte bir işaret olursa kuplaj etkisi ideal durumda ortadan kalkar.

İki bobinin indüksiyon sıfırlaması yapılırken herhangi bir metal yokken alıcıdaki voltaj seviyesi en aza getirilir. Bunun ölçülebilecek seviyede olması cisim olmadığı durumlarda işaretin gerçel ve sanal kısımlarını okunabilir kılar. Bu tek bir frekansta en iyi sonucu verir. Geniş frekans aralığında $\vec{H}_{\text{birincil}}$ ve $\vec{H}_{\text{ikincil}}$ manyetik alan değişir. Alıcıda ve vericide faz kayması meydana gelir. Uyumlama değişerek alıcıda kuplaj seviyesi artmaktadır [16]. Çift-D bobininde alıcı ve verici bobin arasında Şekil 4.8'de gösterildiği gibi d_{kuplaj} mesafesi bırakılarak kuplaj etkisi ortadan kaldırılır.



Şekil 4.8 : Çift-D bobini ve kuplaj mesafesi.

4.1.5 Bobin koruma

Bobin etrafı iletken kumaş, alüminyum folyo ya da iletken boya ile kaplanır. Sadece bir yerinden 10 mm-5 mm aralığında bir boşluk bırakılarak manyetik alan ışımasına izin verilir. Dışarıdan elektromanyetik alan etkileşimini engelleyerek gürültüyü azaltır. Metal dedektörü çalışırken bobinin dış yüzeyinde gerilim oluşur. Oluşan bu gerilim ile toprak arasında kapasitif kuplaş oluşur. Bobinin yere yaklaşması yahut uzaklaşması kapasitif etkiyi değiştireceği için bobinin de indüktansını değiştirir. Bu da topraktan etkilenmesine neden olur. Hazırlanan çift-D başlık iletken kumaş ile sarılmıştır. Koruma kumaşı devrenin toprağına bağlanır. Üzeri teflon bant ile sarılarak sıkı ve rijit hale getirilmiştir. İndüksiyon sıfırlama iki bobinin konumundan

etkilendiği için katı plastik bir başlık içine alınarak şekli korunmuştur. Hazırlanan başlığın resimleri şekil 4.9 'da verilmiştir.



şekil 4.9 : Hazırlanan başlığın açık ve kapalı hali.

4.2 Verici ve Alıcı Devresinin Tasarımı

Tekli frekans çalışmalarında Colpitts, Hartley, Armstrong gibi osilatörler kullanarak sinüs üretilmektedir. Ancak geniş bantta işaret üretmek için bu osilatörler kullanılamaz. Üretilen işaretin frekansı ayarlı kapasiteler ile değiştirilebilir. Ancak her ölçümde el ile ayarlanması gerekmektedir ve birden fazla alınan ölçümlerde aynı değer elde edilmesi zordur.

Günümüzde hazır yongalar sayesinde dijital olarak ayarlanabilir işaret üreteçleri mevcuttur. Bu işaret üreteçlerini kullanırken toplam harmonik bozulma (THD)

oranına dikkat edilmelidir. Sinüs işaretinin THD oranı düşük olduğunda, daha saf sinüs işareti gönderilir. Bu dedektörün ya da frekans uzayındaki EM algılayıcının hassasiyetini arttırır. Daha derine nüfuz etmesini sağlar [12]. Doğrudan dijital işaret üreteçlerinin (DDS) çıkış güçleri düşüktür. Bunların çıkışına 1 kHz-100 kHz bandında çalışan kuvvetlendiriciler koyularak işaret gücü artırılmalıdır. Ses kuvvetlendiricilerin 20 kHz'e kadar toplam harmonik bozulmaları düşüktür. Ancak 20 kHz'den sonraki toplam harmonik bozulmaları fazla olduğu için sinüs işareti bozulmaktadır.

Tezde 1 kHz-100 kHz sinüs kaynağı olarak Agilent 33524 serisi işaret üretici kullanılmıştır. Voltaj seviyesinin ayarlanabilir olması ve THD düşük olmasından dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca otomatik ölçüm düzeneği kurulumunda kolaylık sağlamaktadır.

İkincil manyetik alan sonucu, alıcı bobinde indüklenen gerilim seviyesi düşüktür. Alınan işaret ölçülebilir seviyeye gelmesi için kuvvetlendirilmesi gerekir. Analog Devices AD8065 entegresi kullanılmıştır. AD8065 işlemsel kuvvetlendirici $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (10 kHz'de) düşük gürültüye ve 145 MHz geniş bant genişliğine sahiptir.

İşlemsel kuvvetlendirici çalışma frekansında lineer kuvvetlendirme yapmalıdır. Kazanç çok yüksek tutulursa bant genişliği yetersiz kalır. Faz eviren yapıdaki AD8065 entegresi açık çevrim keşişim frekansı 65 MHz olarak verilmiştir. Kapalı çevrim durumunda keşişim frekansı

$$f_{-3\text{dB}} = f_{\text{keşişim}} \frac{R3}{R3 + R4} = 65 \text{ MHz} \times \frac{2.2\text{k}}{2.2\text{k} + 100\text{k}} = 1.4 \text{ MHz} \quad (4.10)$$

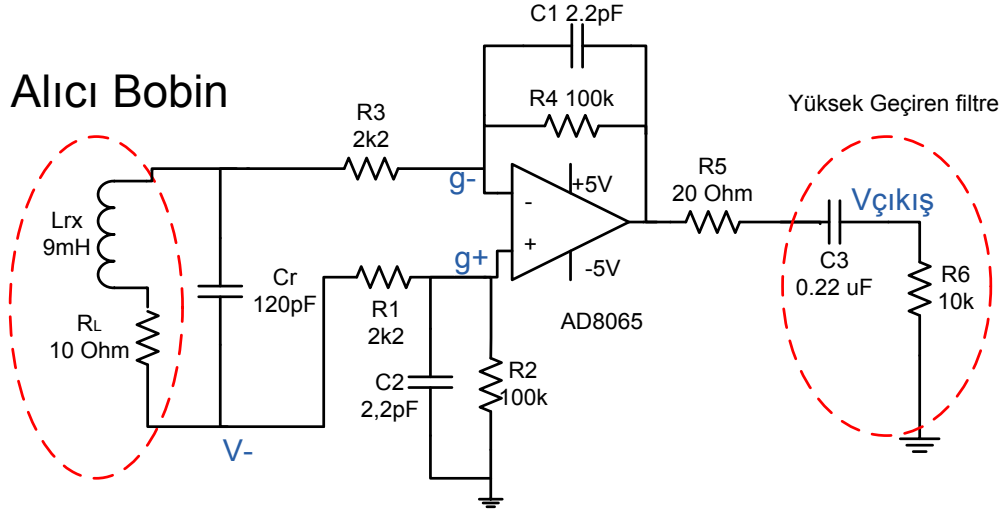
bulunur. 1.4 MHz'e kadar işlemsel kuvvetlendirici kullanılabileceği görülmektedir. Alıcı bobin rezonans devresi 1 kHz-100 kHz aralığında empedansı 57Ω -9.8 k Ω arasında değişmektedir. Kuvvetlendirici ile arasında empedans uyumu olması için kuvvetlendirici giriş empedansı $R4/R3=1.8 \text{ k}\Omega$ olarak belirlenmiştir. $R2=2.2 \text{ k}\Omega$ olur. Devrede alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre ile istenmeyen işaretler bastırılmıştır. C3 ve R6 ile yüksek geçiren filtre tasarlanmıştır. Elektrik hat gürültüsü ve motor gürültüsü gibi düşük frekanslı işaretler yüksek geçiren filtre ile zayıflatılmıştır.

$$f_{\text{Yüksek}} = \frac{1}{2\pi C_3 R_6} = 72 \text{ Hz} \quad (4.11)$$

Alçak geçiren filtre ile güç kaynaklarında oluşan yüksek frekanslı bileşenler ve çevredeki istenmeyen işaretler bastırılır.

$$f_{\text{Alçak}} = \frac{1}{2\pi C_1 R_4} = 723.4 \text{ kHz} \quad (4.12)$$

Alıcı kuvvetlendirici devresi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 : Alıcı kuvvetlendirici devresi.

Devrenin çıkış gerilimi:

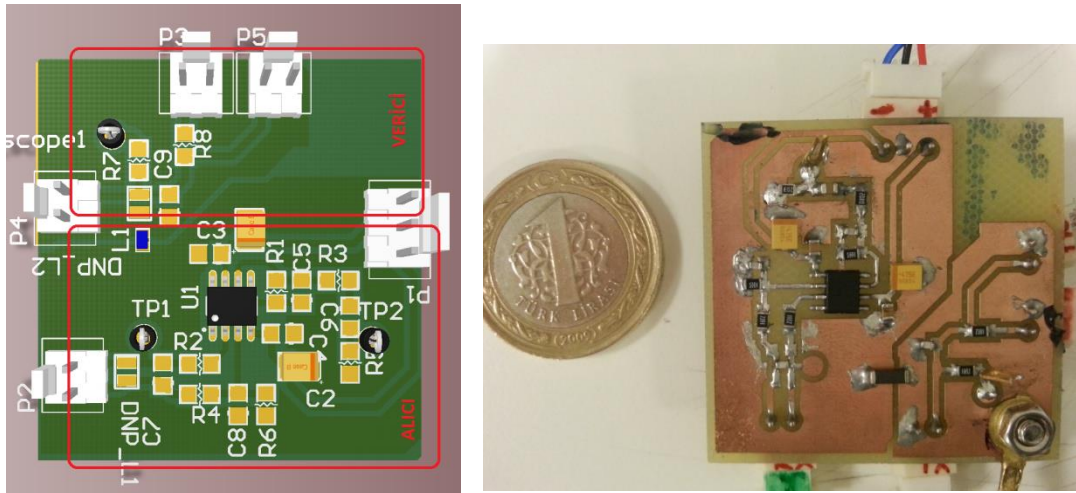
$$g_+ = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_- \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{çıkış}} &= g_- + iR_4 = g_- + \left(\frac{g_- - V_+}{R_3} \right) R_4 = -\frac{R_4}{R_3} V_+ + \frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} V_- \\ &= -V_+ \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + V_- \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$R_1=R_3$ ve $R_4=R_2$ olursa denklem basitleşir. Ortak-mod kazancı azalır ve CMRR oranı artarak istenmeyen işaretler bastırılır.

$$V_{\text{çıkış}} = -\frac{R_4}{R_3} (V_+ - V_-) = -\frac{100k}{2k2} = 45,45 \approx 33.1 \text{ dB} \quad (4.15)$$

4 cm x 4 cm boyutunda alıcı ve verici devresi Altium programı ile çizilmiştir. Kartın PCB'si Şekil 4.11'de verilmiştir. Hazırlanan kart dizgi sonrası gerilimleri ve kazanç değeri kontrol edilmiştir. Doğru çalıştığından emin olunduktan sonra testlere başlanmıştır.



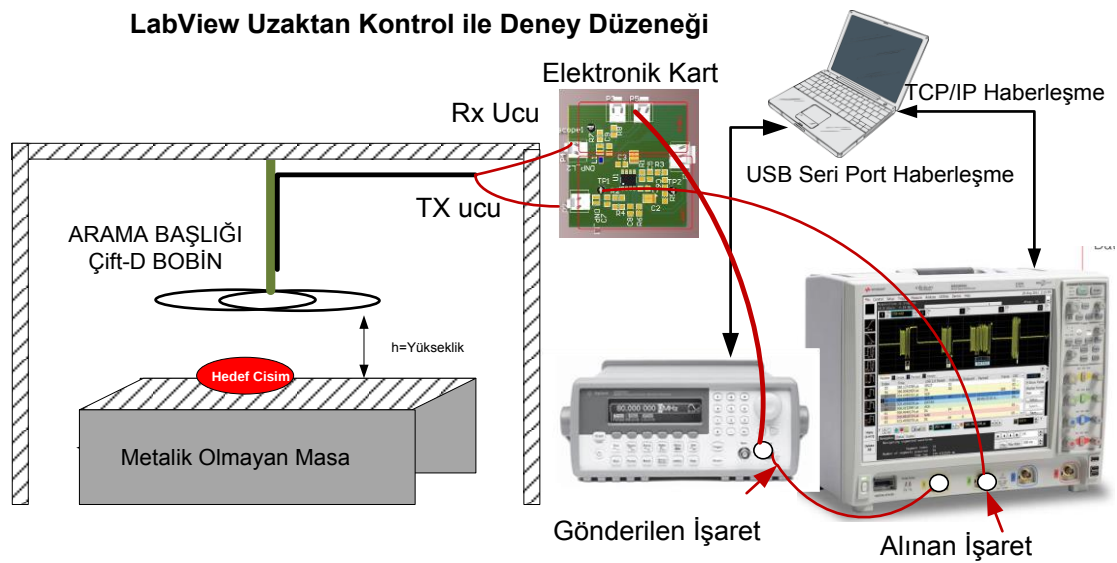
5. METAL DEDEKTÖRÜ VERİ ANALİZİ

Hazırlanan metal dedektörü ile laboratuvar koşullarında test cisimlerinden veriler alınmıştır. Frekans uzayında cisimlerin elektromanyetik teorik cevapları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tezde 1 kHz-100 kHz aralığında, 1 kHz aralıklarla 100 farklı frekansta veriler toplanmıştır. İşaret üretici olarak Agilent 33521B AWG kullanılmıştır. Dataların dijitalle çevrilmesinde osiloskop daha güvenilir olduğu için bu aşamada analog-dijital çeviriciler kullanılmamıştır. Agilent DSO9054H osiloskobu kullanılmıştır. İşaret üretici ve osiloskop LabVIEW® programı ile kontrol edilmiştir. LabVIEW® programı National Instrument firmasının geliştirmiş olduğu yazılım platformudur. Görsel programlama dili sayesinde ölçüm cihazlarını kontrolünü sağlamada etkin ve kolay çözüm sunmaktadır. Alınan veriler LabVIEW® programı ile işlenerek istenilen faz ve genlik dataları elde edilmiştir.

5.1 Deney Düzenekinin Kurulması

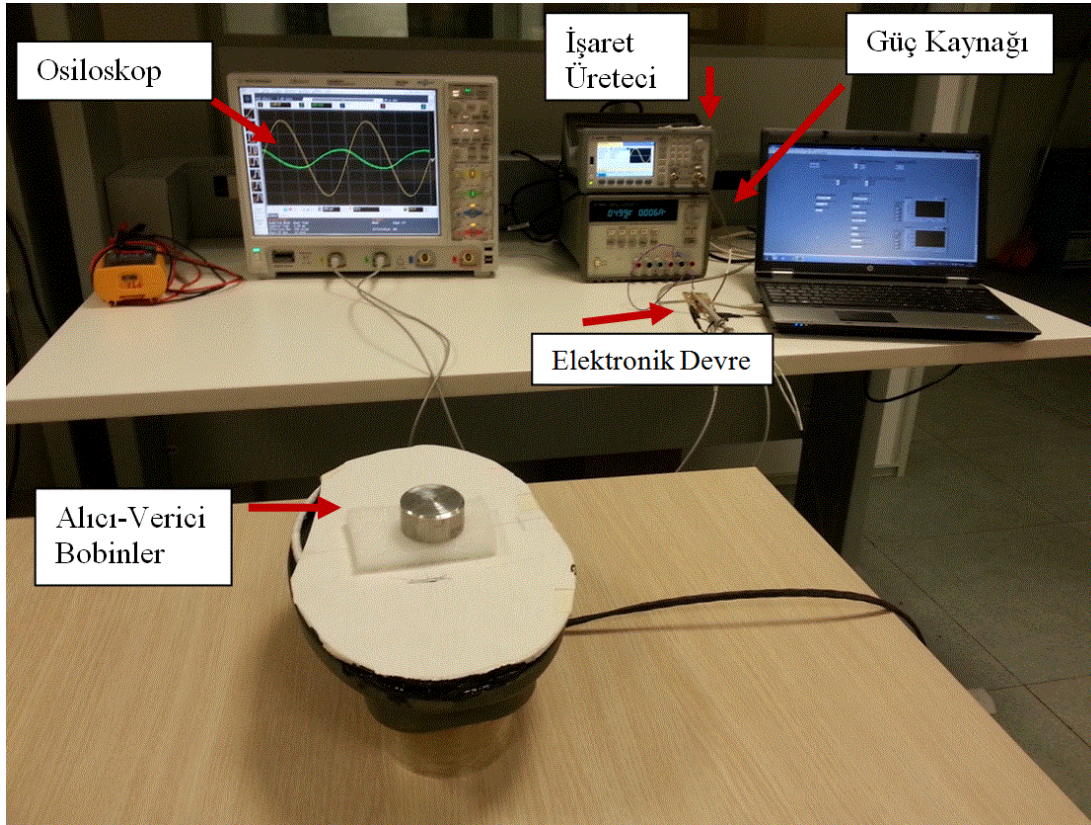
Hazırlanan deney düzeneği Şekil 5.1'de verilmiştir. Bobinlerin bulunduğu arama



Şekil 5.1 : Çoklu frekans metal dedektörü test düzeneği.

başlığı, metal içermeyen kutu üzerine konulmuştur. Tasarlanan elektronik kartta alıcı ve verici devreleri bulunmaktadır. Gönderilen işaret ile kuvvetlendirici çıkışına test noktaları konulmuştur. Bu noktalara osiloskobun ölçüm uçları bağlanarak işaretler ölçülmüştür. Ölçüm düzeneği metalik cisimlerden uzakta kurulmuştur. Düşük frekanslı gürültü yayan anahtarlamalı güç kaynaklarından, floresan benzeri ışık kaynaklarından uzak tutularak gürültüden etkilenmesi engellenmiştir.

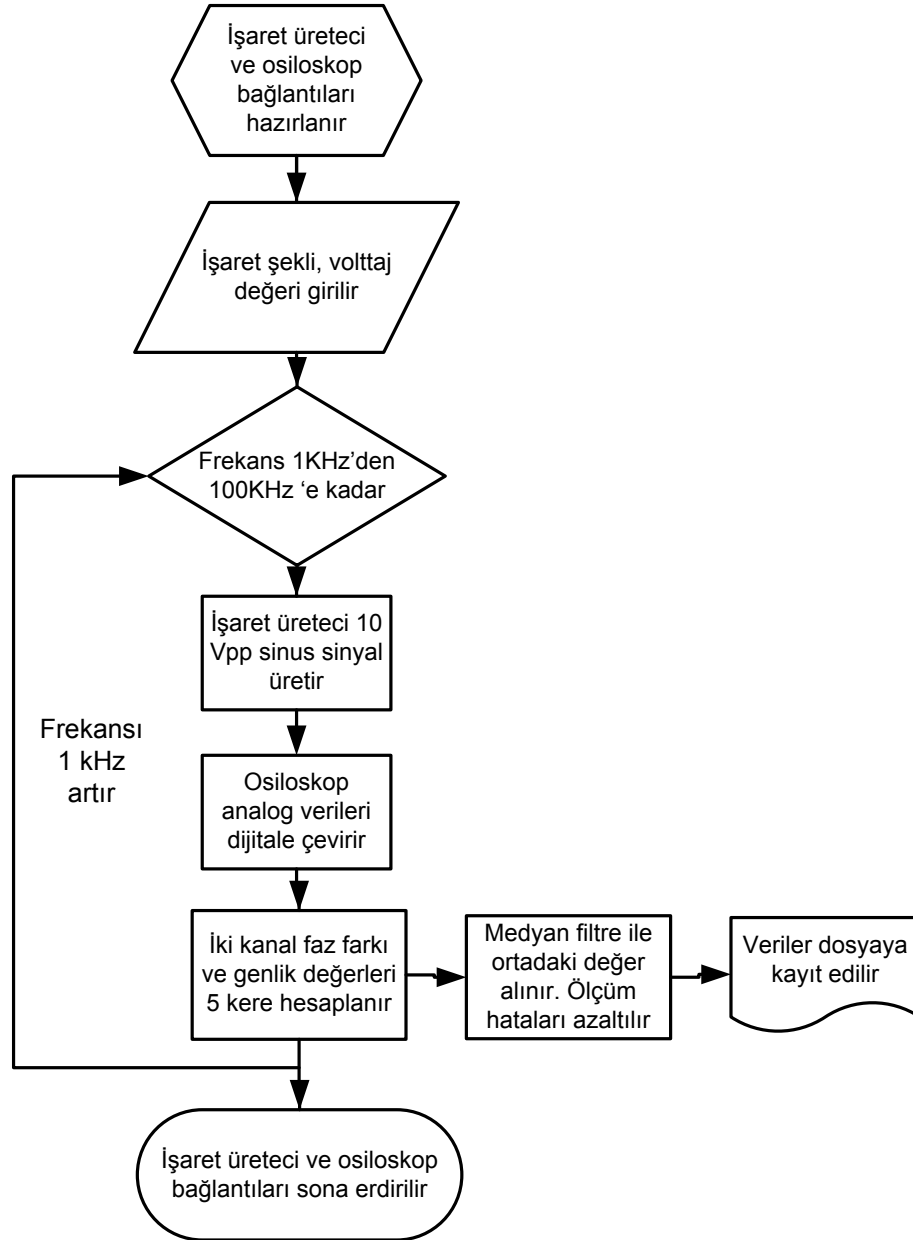
LabVIEW® programı, deney düzeneğine dokunmadan ve her seferinde aynı şekilde veri alınmasını sağlamaktadır. Test ortamı Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Test ortamı.

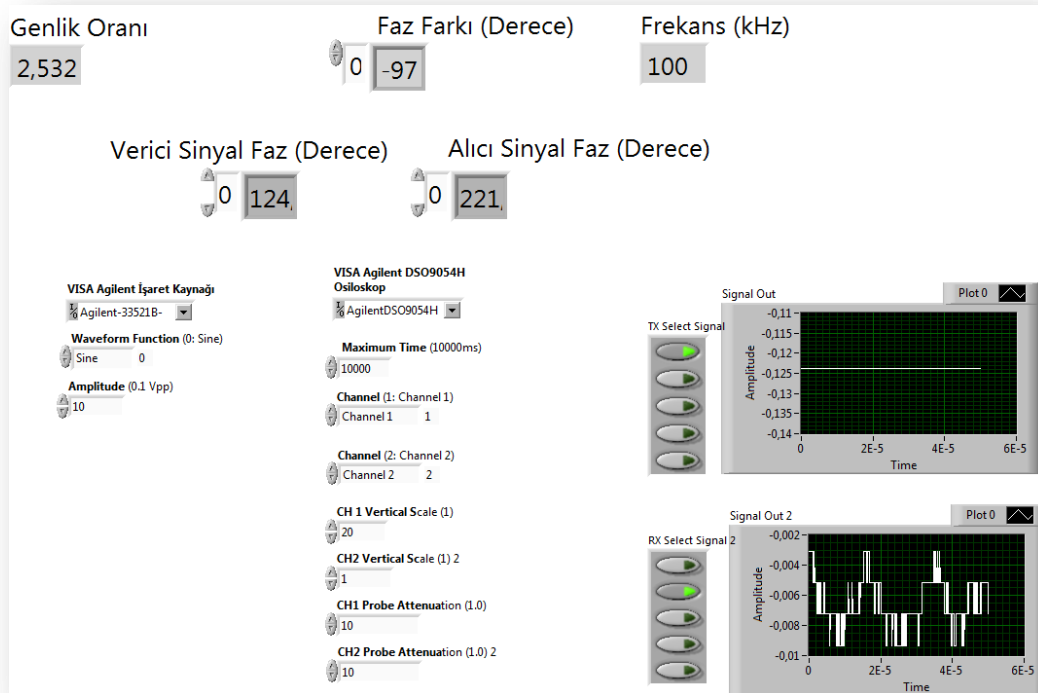
5.2 Uzaktan Kontrol Program Arayüzü

Program arayüzünde işaret üretici ve osiloskobun ayarları yapılmaktadır. Programda her frekans ölçümü 5 kez tekrarlanmaktadır. Alınan veriler faz ve genlik olarak iki farklı dosyada kaydedilmiştir. Şekil 5.3'te programın akış diyagramı verilmiştir.



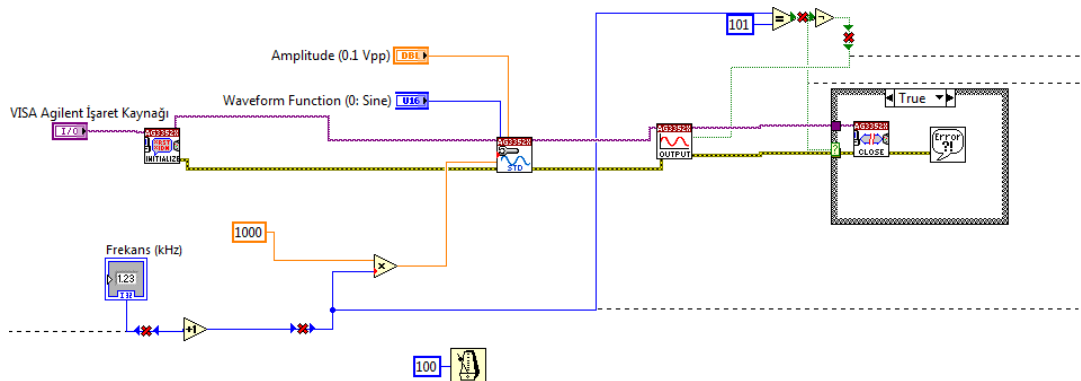
Şekil 5.3 : Veri toplama akış diyagramı.

Gönderilen işaret ve cisimden gelen kuvvetlendirilmiş işaret grafikleri arayüzde çizdirilmektedir. Her iki işaretin faz bilgisi derece cinsinden arayüzden takip edilebilir olarak tasarlanmıştır. Sadece alınan işaretin faz bilgisi anlamlı bir veri olmayabilir. Osiloskobun işareti yakaladığı noktaya göre faz bilgisi kaymaktadır. Bu yüzden iki kanalın faz farkı alınarak kararlı faz bilgisi elde edilmiştir. Genlik oranı, alıcı çıkışındaki işaretin verici işarete oranını ifade eder. LabVIEW® arayüzünün görünüşü Şekil 5.4'te verilmiştir.



5.3 LabVIEW® ile İşaret Üretici ve Osiloskop Ayarlarının Yapılması

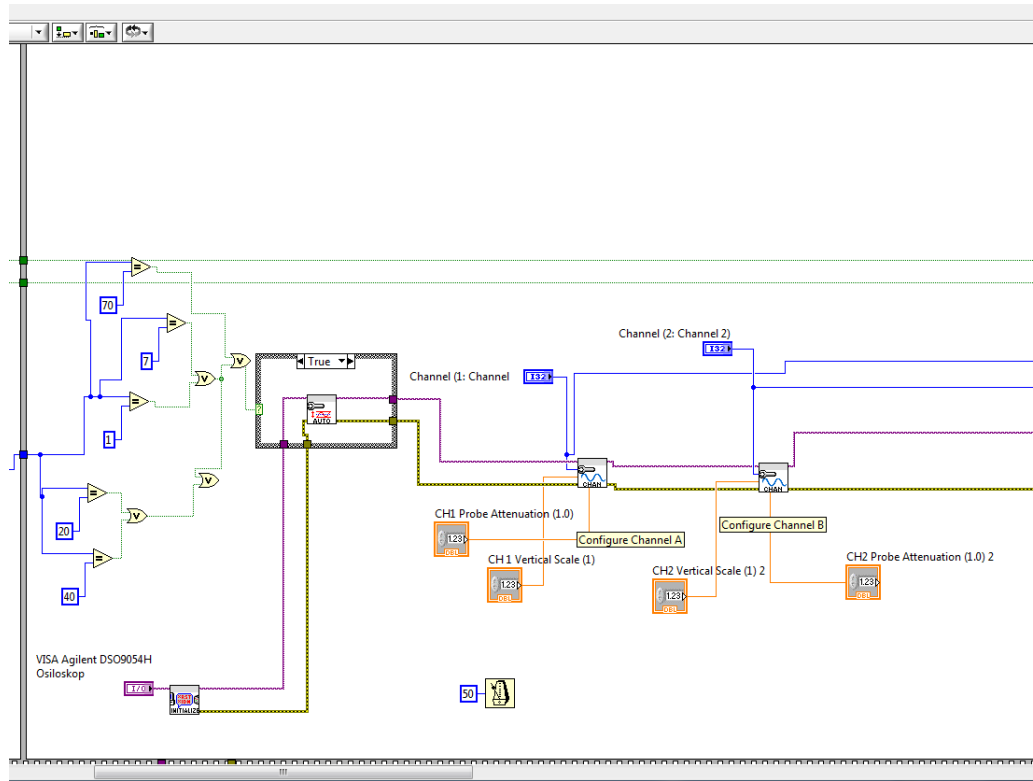
Agilent 33521B işaret üretici, bilgisayara USB ile bağlanmıştır. Programın sağladığı ayarlama kutularıyla işaret üretici kontrol şeması oluşturulmuştur. İşaret şekli ve genliği kullanıcı tarafından ayarlanabilir yapılmıştır. Blok şeması Şekil 5.5'te verilmiştir.



Program çalıştırıldığında 1 kHz 10 Vpp sinüs işareti üretilir. Gönderilen işaret her bir aşamada 1 kHz artırılır ve 100 kHz'e kadar devam eder. Frekans ayarlandıktan sonra osiloskop zaman bölmesi oranında hafızasındaki dijital veriyi LabVIEW® işlem

bloklarına aktarır. Elde edilen verilerle işaretlerin faz ve genlik değerleri hesaplanır. 50 ms bekledikten sonra bu işlem 5 kez tekrarlanır. 100 kHz'in sonunda bilgisayar-cihaz bağlantısı sonlandırılır.

Agilent DSO9054H osiloskobu ilk başladığında otomatik ayar yaparak zaman skalasını ve voltaj skalasını ayarlar. Gelen işaretin doğru ölçülebilmesi için 1 kHz, 7 kHz, 20 kHz, 40 kHz ve 70 kHz'de otomatik ayar yapmaktadır. Ölçüm ucuna bağlı işaretleri a ve b kanalları ile dijital veriye çevirir. Blok şeması Şekil 5.6'da verilmiştir.

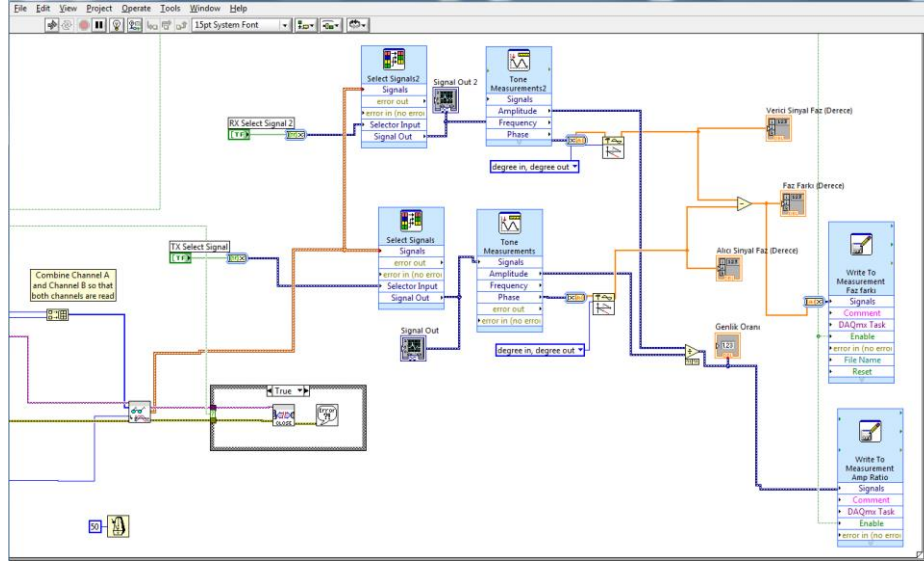


Şekil 5.6 : Osiloskop kontrol blok şeması.

5.4 LabVIEW® ile Verilerin İşlenmesi

Osiloskoptan gelen verilere LabVIEW® işlem blokları kullanılarak yapılmıştır. Test cisimlerinden gelen verileri frekans uzayında incelemek üzere hızlı fourier dönüşümü (FFT) ile genlik ve faz verileri hesaplanır. FFT sonucunda dikevreli (quadrature) ve eşevreli (in-phase) veriler elde edilir. Faz ve genlik verileri için bu değerler kullanılarak dönüşüm yapılır. LabVIEW® programında kullanılan blok faz ve genlik değerini vermektedir. Dikevreli (quadrature) ve eşevreli (in-phase) veriler ters dönüşüm yapılarak elde edilmiştir.

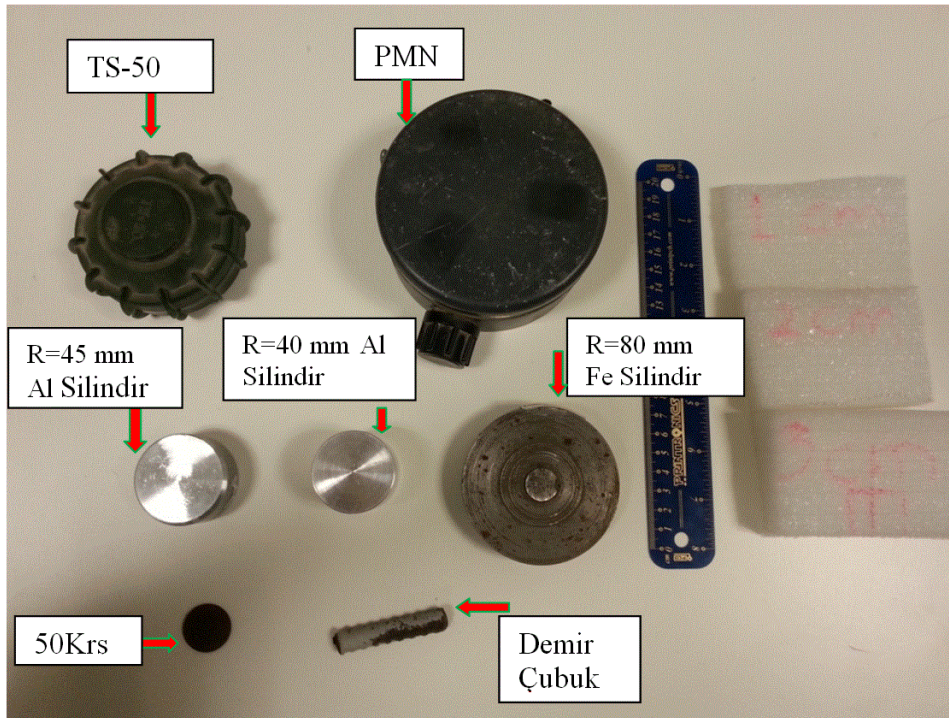
Şekil 5.7'de oluşturulan blok şeması verilmiştir. Ölçümler her frekansta 5 kez tekrarlanarak elde edilen değerler kaydedilmiştir.



Şekil 5.7 : LabVIEW® Osiloskop verilerinin işleme ve kayıt blok şeması.

5.5 Test Cisimleri

Tasarlanan çoklu frekans metal dedektörünü test etmek için 7 farklı cisim kullanılmıştır. Şekil 5.8'de test cisimleri verilmiştir.



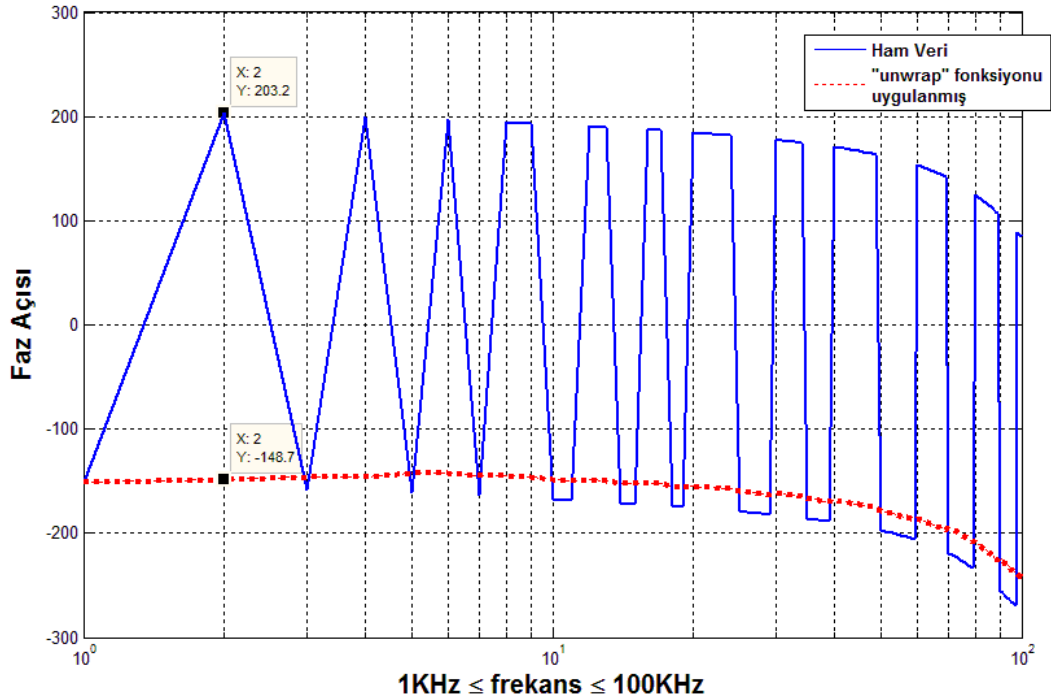
Şekil 5.8 : Test cisimleri.

Ferromanyetik demir silindir $R=8$ cm $\varnothing$ unda ve $h=2$ cm yüksekliğindedir. Ferromanyetik olmayan alüminyum silindirlerin ölçüleri sırasıyla $R=4.5$ cm $\varnothing$ ap ve $h=2.2$ cm yükseklik ile $R=4$ cm ve $h=3.4$ cm'dir.

Mayınların karakteristiklerini görebilmek için PMN ve TS-50 anti personel mayınları kullanılmıştır. Metal yoğunlukları az oldukları için tespitleri zordur. Kullanılan mayınlar gerçek olmayıp, gerçeğiyle eş metal yoğunluğuna ve fiziksel yapıya sahiptir. 50 Krş ve demir çubuk doğada bulunan, mayınlar ile karıştırılan metalik cisimlerin etkisini görebilmek için kullanılmıştır. Demir ubuk $R=1$ cm $\varnothing$ unda ve $h=5.5$ cm yüksekliğindedir.

5.6 Alınan Verilerin İşlenmesi

Alınan datalar MATLAB® programı kullanılarak incelenmiştir. Değerlendirme faz ve genlik dasetının yanında işaretlerin gerçel ve sanal kısımlarına bakılarak yapılmıştır. LabVIEW® programı ile alınan işaretlerin faz ve genlik dataları çıkarılır. İşaretlerin FFT'si alınarak faz ve genlik değerlerini hesaplanmaktadır. İşaretler faz açısı değerlerinde, osiloskobun işareti yakalama noktası değişebildiğinden 360°'lik kaymalar olabilmektedir. Örneğin 160° civarında seyreden faz ölçümü -200° olarak da gelmektedir. Düzeltilmiş hali şekil 5.9'da verilmiştir.



şekil 5.9 : Faz doğrulama.

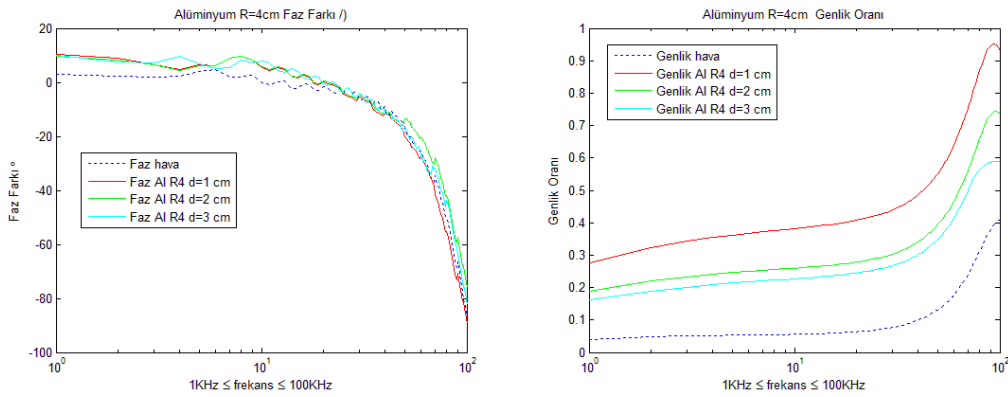
5.7 Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi

Farklı 7 test cismi için metal dedektöründen 10 mm, 20 mm ve 30 mm farklı uzaklıklar için veriler toplanmıştır. Cisimlerin uzaklığa bağlı faz ve genlik değişimleri, eşevreli-dikevreli değerlerinin frekans aralığındaki değişimi incelenmiştir. 1 kHz-100 kHz çoklu frekans metal dedektöründen elde edilen değerler EM analitik çözüm sonuçları ile karşılaştırılacaktır..

5.7.1 4 cm çapındaki silindirik alüminyum sonuçları

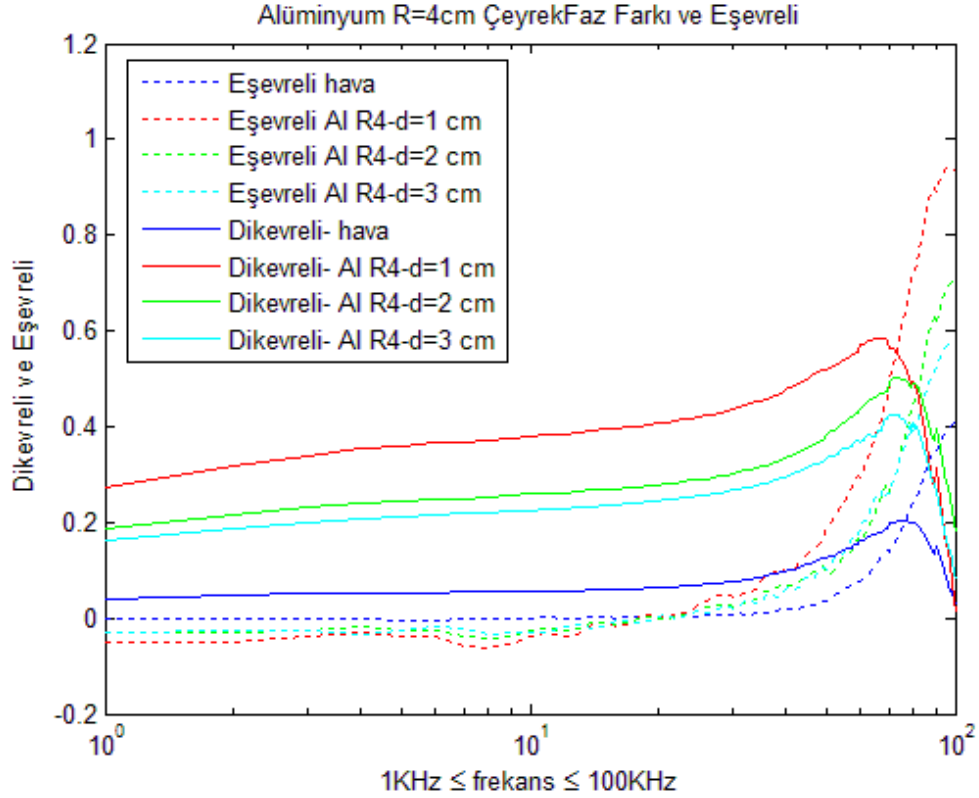
Faz ve genlik ölçüm sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir. Metalik cisimler, metal dedektörlerine yaklaştıkları zaman birincil manyetik alan üssel olarak artmaktadır. Genlik oranı grafiği incelendiğinde 10 mm-20 mm ve 20 mm-30 mm arasındaki değişimin üssel olarak değişmektedir.

Alüminyum ferromanyetik olmayan bir metaldir. Ölçüm sonuçlarında faz açısı 1 kHz'de 10°'dir. Frekans arttıkça giderek azalmaktadır. 100 kHz'de -90° ulaşmaktadır. Teorik olarak 0° ile -90° arasında değişmesi beklenmektedir. Ölçüm sonucu ve teorik sonuç birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10 : R=4 cm Alüminyum Silindir faz açısı ve genlik oranı.

Alüminyum cisminde faz açısı yüksekliğe bağlı olmadığı görülmektedir. Ölçülen dikevrelili ve eşevrelili veriler Şekil 5.11'de verilmiştir.

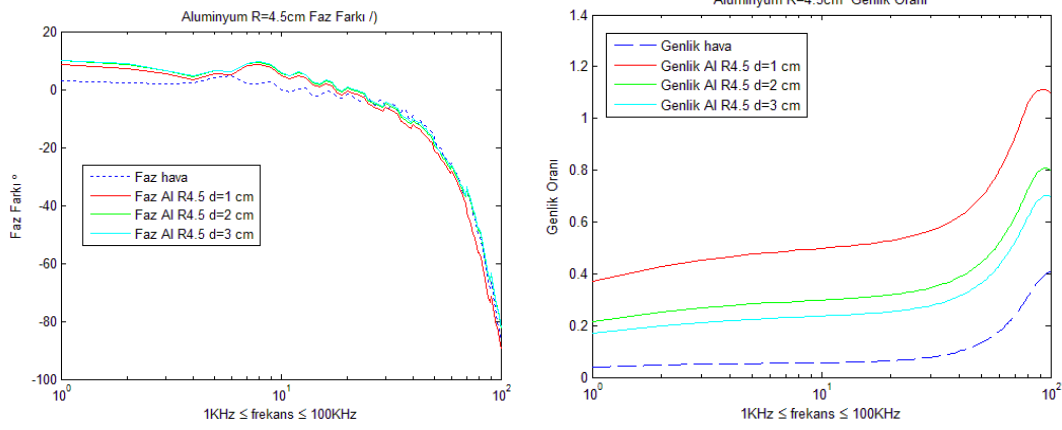


Şekil 5.11 : R=4 cm Alüminyum silindir dikevrelili ve eşvrelili ölçümü.

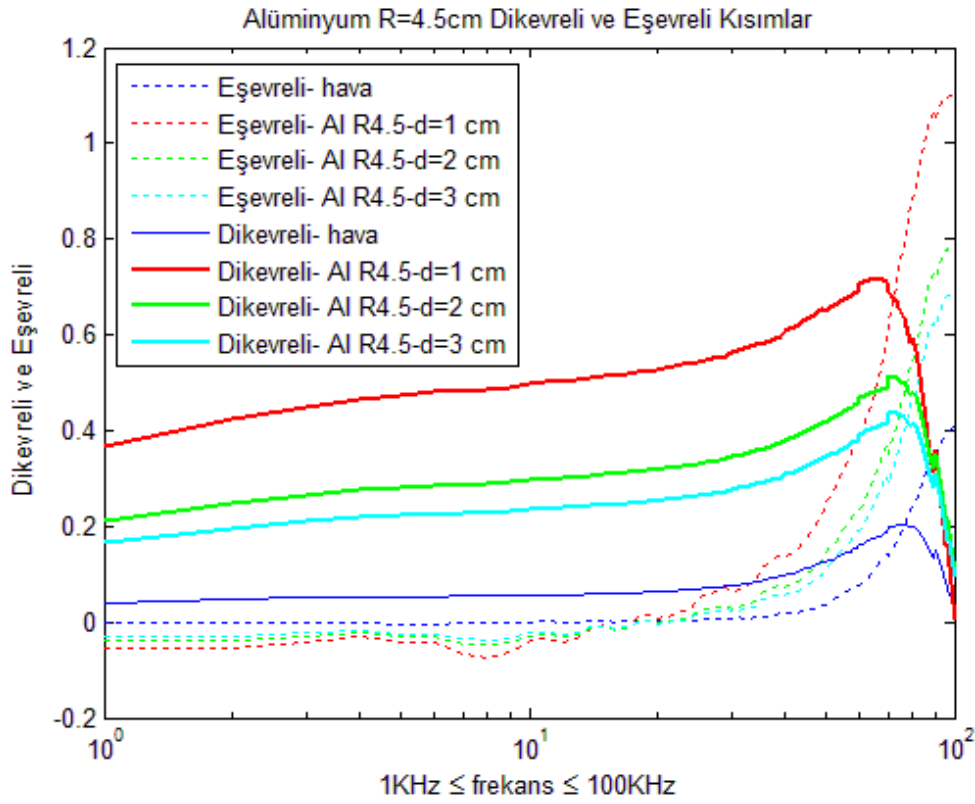
Sonuçlar teorik değerlerle örtüşmektedir. Eşvrelili (gerçel) değerleri, cismin uzaklığına bağlı olarak değişmektedir. Herhangi bir metal olmadığı durum hava verisi olarak gösterilmektedir. Cisim başlığa yaklaştıkça boşdaki eşvrelili değeriyle kesişim frekansı azalmaktadır. d=10 mm için 18 kHz, d=20 mm için 22 kHz, d=30 mm için 23 kHz olarak ölçülmüştür. Kesişim frekansından sonra eşvrelili eğrileri hava eğrisinin üstüne çıkmaktadır.

5.7.2 4.5 cm çapındaki silindirik alüminyum sonuçları

R=4.5 cm çapındaki alüminyum silindir ölçüm sonucu Şekil 5.12'de ve Şekil 5.13'te verilmiştir. R=4 cm çapındaki alüminyum silindirden çapı ve yüzey alanı farklıdır. $\vec{H}_{birincil}(t)$ manyetik alana dik yüzey alanı genişledikçe alıcı bobinde indüklenen gerilim artması beklenmektedir. Genlik oranı verilerini karşılaştırdığımızda R=4.5 cm çapındaki alüminyum silindirin oluşturduğu voltaj daha fazladır. Faz her iki cisimde de yüksekliğe bağlı değildir.



Şekil 5.12 : R=4.5 cm alüminyum silindir faz farkı ve genlik oranı

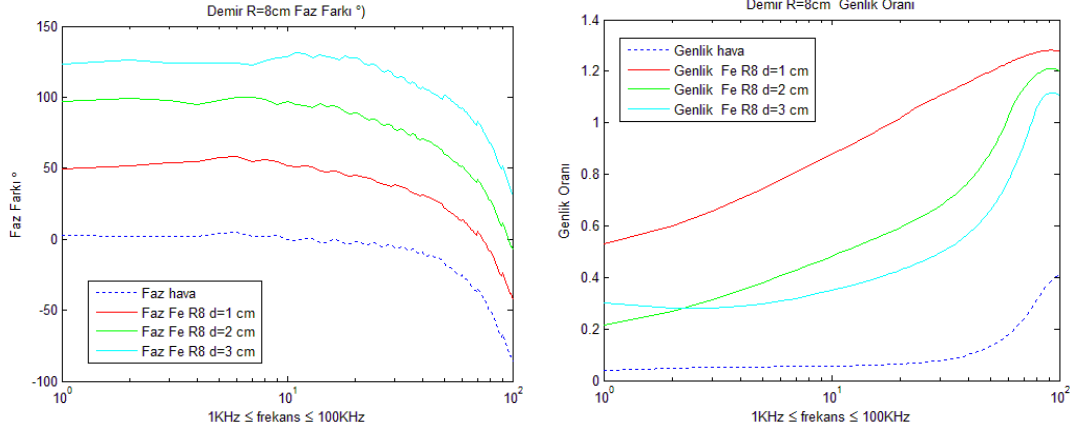


Şekil 5.13 : R=4.5 cm alüminyum silindir dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.

Cisim başlığa yaklaştıkça boşdaki eşevrelili değeriyle, cismin eşevrelili kesişim frekansları d=10 mm için 17.5 kHz, d=20 mm için 22 kHz, d=30 mm için 23 kHz olarak ölçülmüştür. Farklı çaptaki iki alüminyum silindir görüldüğü üzere benzer sonuç vermiştir. Faz farkları da benzerdir. Genlik oranları 45mm çapındaki alüminyumda daha fazladır. Buna bakılarak cismin daha büyük olduğu anlaşılabılır. Ancak bobinlere göre pozisyonu (yatay-dikey) önemlidir. Sonuçlar aynı pozisyonda alınmıştır.

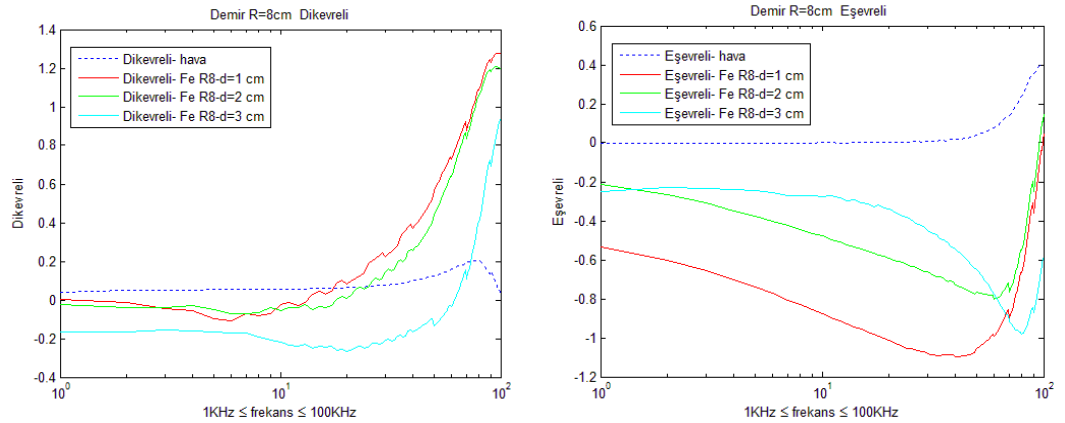
5.7.3 8 cm çapındaki silindirik demir sonuçları

Ölçüm sonuçları Şekil 5.14'te ve Şekil 5.15'te verilmiştir. Demir ferromanyetik bir malzemedir ve $\mu_r \gg 1$ 'dir. Ölçüm sonuçları beklendiği gibi faz farkı açıları boş durumdakinden oldukça yüksektir. Bu özelliği ile alüminyum ve demir rahatlıkla ayırt edilmektedir.



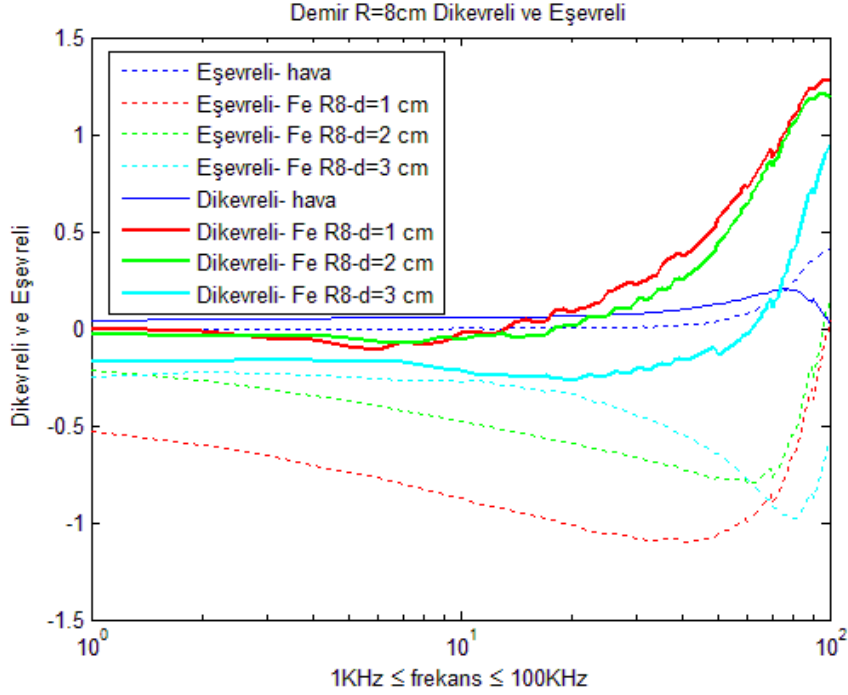
Şekil 5.14 : R=8 cm demir silindir faz farkı ve genlik oranı.

Genlik değerleri cisim başlığa yakınlıkla artması beklenen durumdur. Elektromanyetik teorik analizde, düşük frekanslarda genlik oranı daha yüksekken frekansla beraber azalmaktadır. Manyetik geçirgenliğine μ_r bağlı olarak tekrardan artmaya başlamaktadır. Alınan ölçümlerde demir silindir için bu görülmemiştir. Faz farkı açısı cismin uzaklığına bağlı olarak değişmiştir. Alıcı-verici bobine yaklaştıkça faz farkı azalmaktadır.



Şekil 5.15 : R=8 cm demir silindir, dikevreli ve eşevreli ölçümü.

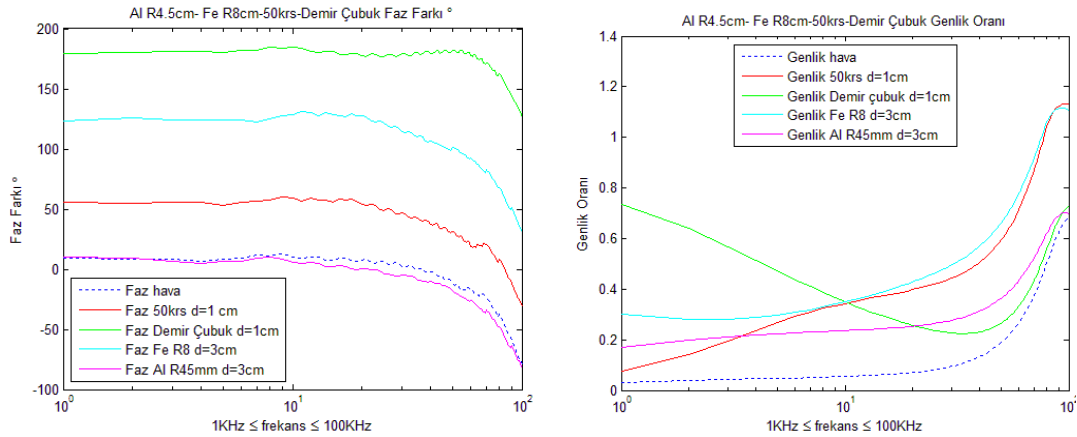
Eşevreli değerler sıfırın altındadır. Bu ferromanyetik malzemelerin belirgin özelliğidir.



Şekil 5.16 : R=8 cm demir silindir, dikevrelili ile eşevrelili ölçüm karşılaştırması.

5.7.4 Farklı cisimleri karşılaştırma sonuçları

4 farklı cismin faz ve genlik ölçüm sonuçları Şekil 5.17'de verilmiştir. Cisimler 50 kuruş, demir çubuk , R=8 cm demir silindir ve R=4.5 cm alüminyum silindiridir. Boyutları ve manyetik özellikleri farklı 4 cisimden ölçüm alınarak frekans karakteristikleri incelenmiştir.

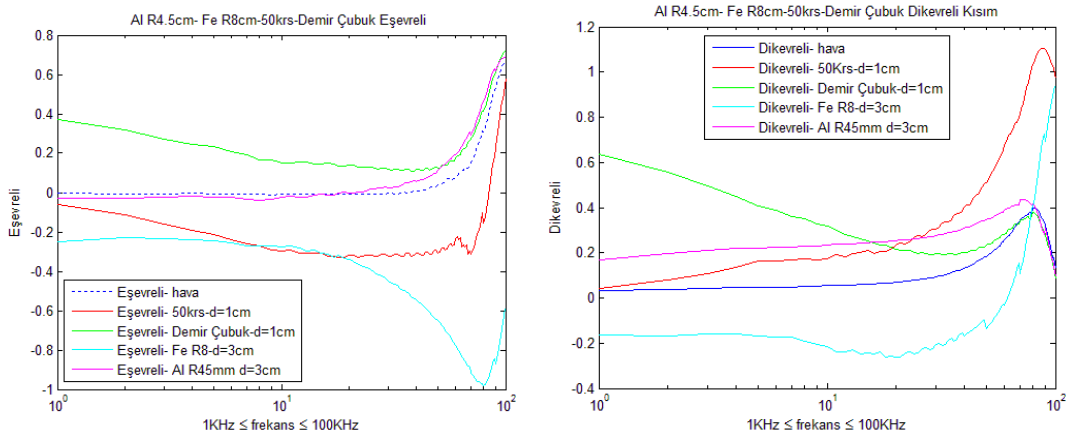


Şekil 5.17 : Dört cismin faz farkı ve genlik oranı.

50 kuruş madeni para malzemesi demir, krom ve nikel alaşımıdır. Ferromanyetik malzemedir. 50 kuruş, demir çubuk ve demir silindirde faz farkı ferromanyetik olmayan alüminyuma göre büyüktür ve ayırt edilebilir. Demir çubuk genlik oranı teorik analiz sonuçlarıyla uymaktadır. Demir silindirin de bu şekilde azalan sonra

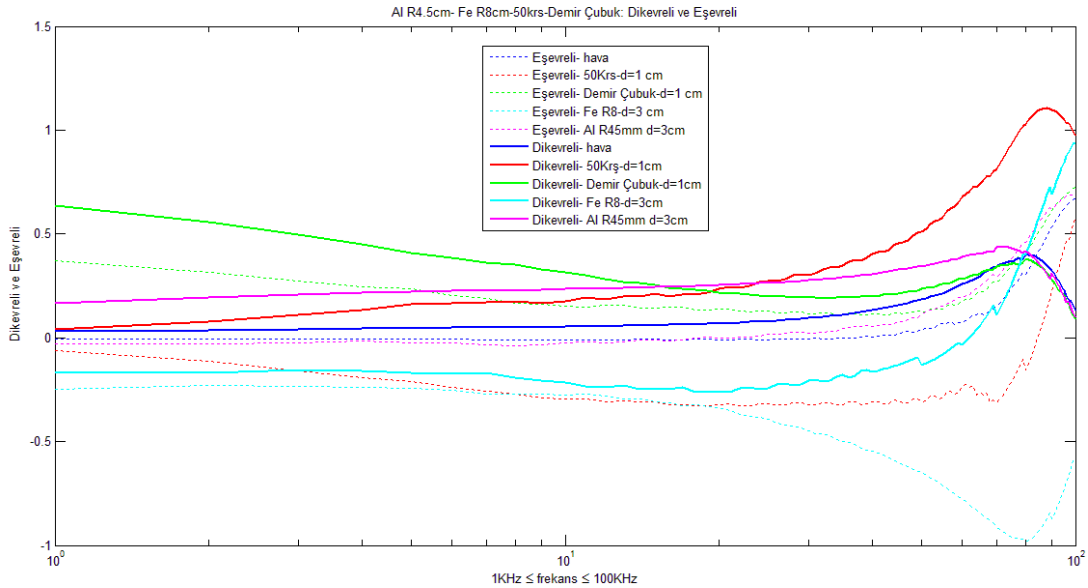
tekrar artan genlik değerine sahip olması beklenmekteydi. Demir silindirden aynı sonuç alınamamasının nedeni çapının büyük olmasından kaynaklanabilir.

50 krş ve demir silindir yaklaşık olarak genlik oranları birbirlerine yakındır. İki farklı malzeme faz farkından ayrılmaktadır. 50 krş için 3 kHz'de faz farkı 55°'dir. Demir silindir için ise 124.1°'dir. Bütün çalışma frekansı boyunca iki cismin faz farkları 69°'dir. Bu veriler kullanılarak cisimler sınıflandırılabilir. Şekil 5.18'de ve Şekil 5.19'da dikevrelili ve eşevrelili ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.18 : Dört cismin dikevrelili ve eşevrelili ölçümü.

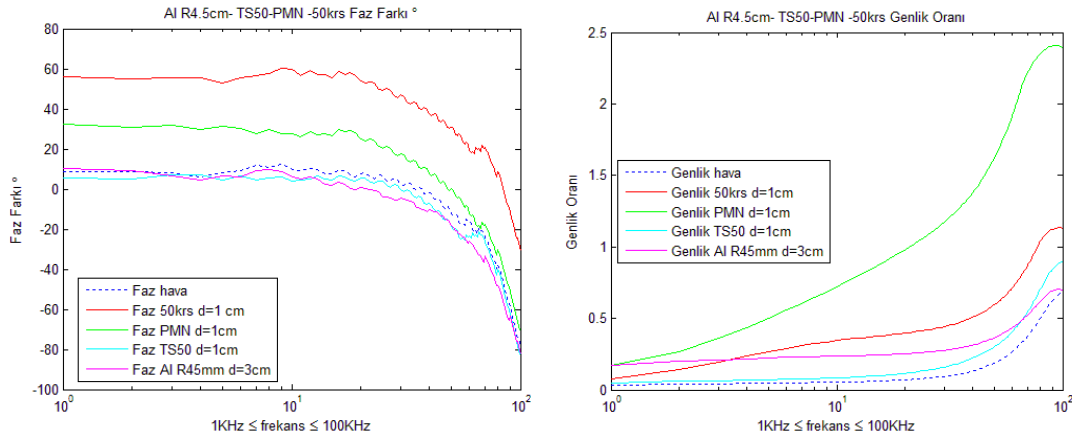
50 kuruş ile demir silindir eşevrelili-frekans karakterleri benzemektedir. Şekil olarak ikisi de silindir olmasından kaynaklanabilir.



Şekil 5.19 : R=8 cm demir silindir, dikevrelili ve eşevrelili ölçüm karşılaştırması.

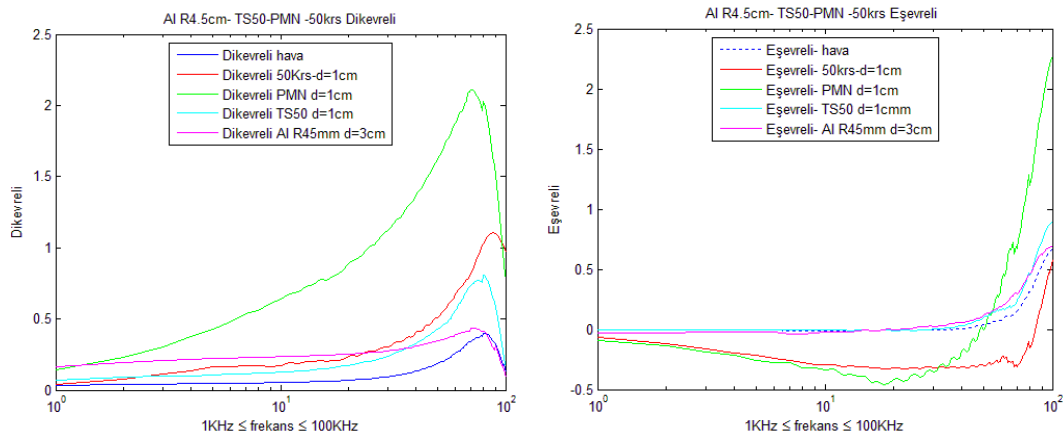
5.7.5 Mayın ve diğer cisimlerin karşılaştırma sonuçları

Kullanıcıların metal dedektörlerinden beklentileri metalik cisimleri tespit edebilmesi ve cisimleri sınıflandırarak, istenmeyen metalik cisimlerin tespit vermemesidir. Bu test senaryosunda mayın ve diğer cisimlerin frekans uzayında karakteristikleri çıkartılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 5.20'de, Şekil 5.21'de verilmiştir. Test cisimleri olarak 50 kuruş, PMN anti personel mayın, TS50 anti personel mayın ve R=4.5 cm alüminyum silindir kullanılmıştır.



Şekil 5.20 : Mayınlar ve diğer cisimlerin faz farkı ve genlik oranı.

Faz verilerine baktığımızda PMN mayınının içindeki ateşleyici parçanın ferromanyetik malzemeden yapıldığını görebiliriz. TS-50 ve alüminyum diskte faz kayması beklendiği gibi çok azdır. İki cismi ayırt etmede faz bilgisi yetersiz kalmaktadır. 66 kHz'de genlik oranı aynı seviyededir ancak tüm frekans bandında genlik oranı farklı sonuç vermektedir.

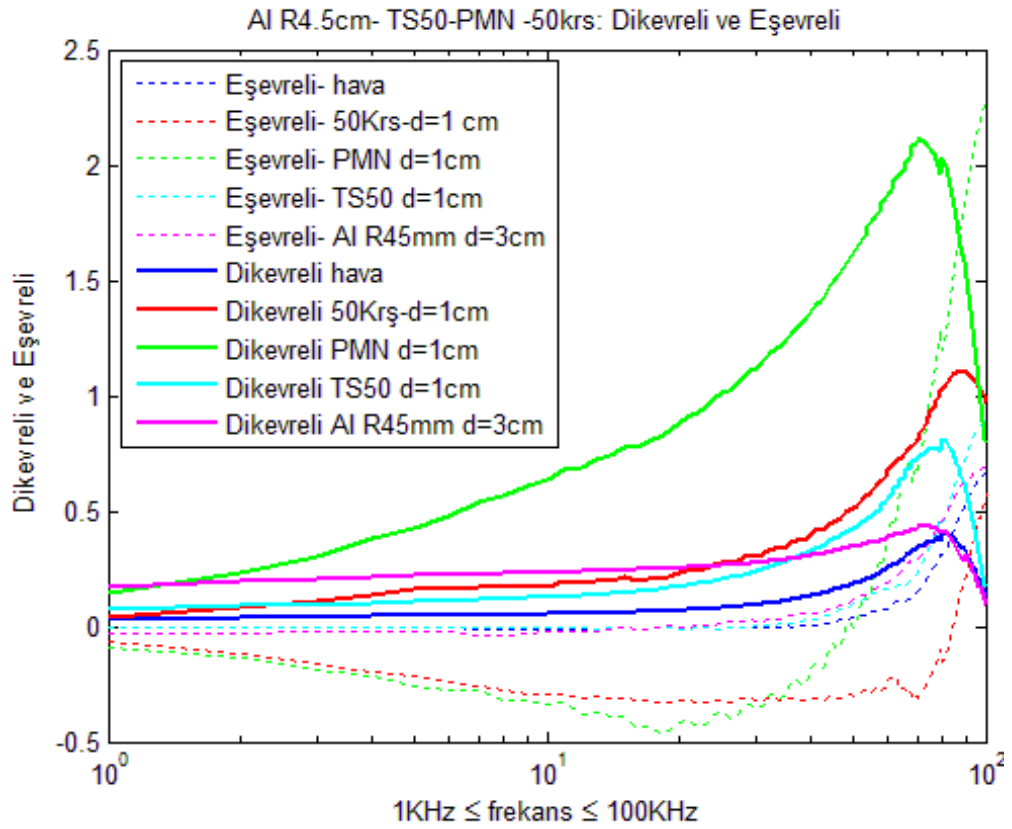


Şekil 5.21 : Mayınlar ve diğer cisimlerin dikevreli ve eşevreli ölçümü.

Cisimlerden alınan işaretin dikevrelili kısmında TS-50 ve alüminyum silindir farkı net gözükmemektedir. 50 krş ve PMN anti personel mayının dikevrelili kısım sonuçları iki cismin ayırt edilmesinin mümkün olduğunu gösterir. Dikevrelili değerlerin tepe noktaları incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.1 sunulmuştur. Hava ve 50 kuruş cisimlerinin tepe noktası aynı frekanstadır. Ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan cisimler için belirgin bir tepe frekansı olmadığı görülmüştür.

Çizelge 5.1 : Dikevrelili değerlerinin tepe frekansı.

Hava	PMN	TS-50	50 kuruş	R=4.5 cm Alüminyum silindir
80 kHz	70 kHz	82 kHz	80 kHz	71 kHz



Şekil 5.22 : Mayınlar ve diğer cisimlerin dikevrelili ile eşevrelili ölçümü karşılaştırması.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezde 1 kHz - 100 kHz aralığında, 1 kHz aralıklarla 100 farklı frekansta çalışan çoklu metal dedektörü tasarlanmıştır. Laboratuvar koşullarında ölçümler alınarak analiz edilmiştir. Ölçüm sonuçları teorik analiz sonucu ile karşılaştırılarak sistemin elektromanyetik indüksiyon modeline uygun çalıştığı görülmüştür.

Donanım kısmında 1 kHz-100 kHz aralığında çalışmaya uygun bobin değerleri hesaplanmıştır. Çalışma frekansı tek frekans çalışan metal dedektörlerinden farklı olarak bobinin rezonans frekansının alt lineer kısmıdır. Bobin değerleri uygun seçilmediği takdirde ve kalite faktörü Q'nun yüksek olması durumunda çalışma frekansının tamamında verimli çalışmadığı görülmüştür. İndüktans değerinin 8 mH'den küçük olduğu değerlerde, özellikle 500 μ H değeri civarında geniş bant çalışmaya uygun olmadığı ölçüm sonuçlarında görülmüştür. Çift-D bobini hesaplanan indüktans değerine göre alıcı bobin için 90 tur, verici bobin için 80 tur bakır tel sarılarak hazırlanmıştır. Bobinleri dışları metalik kumaş sarılarak dış EM parazitlerden korunur. Ayrıca yüzey ile bobin arasında kapasitif etki oluşması engellenir. Kapasitif etki ile bobinlerin indüktansının değişmesi yanlış alarmı neden olur. Alıcı devresi işaret gürültü oranının yüksek olması için düşük gürültülü kuvvetlendirici seçilmiştir. 33 dB alınan işaret kuvvetlendirilmiştir. Kuvvetlendiricinin kazancı büyük metalik cisim yaklaştığı durumda kuvvetlendiriciyi doyuma sokmayacak seviyede ayarlanmıştır.

Yapılan çalışmayla farklı cisimlerin faz cevaplarına göre sınıflandırılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca yanlış tespiti neden olan cisimlerin gerçel ve sanal verilerinin farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Bu veriler kullanılarak metal dedektörlerinin performansını düşüren yanlış alarm oranı azaltılabilir. Faz cevapları incelendiğinde ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan cisimler arasında ayırt edilebilir belirgin fark olduğu görülmüştür. Özellikle 1 kHz-20 kHz aralığında oluşan faz farkı daha belirgindir. Frekans 100 kHz'e gittikçe faz farkı ferromanyetik olmayan cisimlerdeki gibi sifıra yaklaşmaktadır. Ticari tekli frekans çalışan ürünlerde genel olarak 1 kHz-20 kHz kullanılmasının nedeni budur. Ferromanyetik

olmayan alüminyum gibi metallerde faz farkı cismin yüksekliğiyle değişmediği, ancak ferromanyetik olan demir gibi metallerde faz farkının yüksekliğe bağlı olduğu görülmüştür. Förster Minex dedektörü analizlerinde de bu farklılık olmuştur [9]. Yapılan çalışmanın hem elektromanyetik indüksiyon modeli ile hem de diğer ticari ürünler ile benzer çalıştığı görülmüştür.

Tez çalışması sonucunda çoklu frekans metal dedektörünün çalışma mantığı ve cisimlerden gelen işaretleri yorumlama bilgisi edinilmiştir. Bundan sonraki çalışmalar için önemli bir bilgi birikimi olmuştur. Sonraki çalışmalarda daha gerçekçi veriler almak amacıyla cisimler farklı özellikteki topraklara gömülerek analizleri yapılacaktır. Toprağın içinde metalik cisimlerin frekans uzayında karakteristikleri çıkartılacaktır. Toprak kompanzasyonuna etkisi araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Turk, A., Hocaoglu, A. ve Vertiy, A. (2011). *Subsurface sensing*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- [2] Aksoy, S. (2014). *Advanced Metal Detectors Webbook*. Alındığı tarih: 15.12.2014, adres: <http://anibal.gyte.edu.tr/dosya/102/~saksoy/Metal%20Detectors/Advanced%20Metal%20Detectors%20-%20Book.html>
- [3] Haines, N. (1986). Research techniques in nondestructive testing volume VIII. NDT International, 19(6), Sf. 419-420.
- [4] Svatos, J., Vedral, J. ve Fexa, P. (2011). Metal Detector Excited By Frequency-Swept Signal. Metrol. Meas. Syst. , vol. XVIII, no. 1, Sf. 57–68.
- [5] Svatos, J., ve Vedral, J. (2012). The Usage of Frequency Swept Signals for Metal Detection. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 4, Sf. 1501-1504, Nisan.
- [6] Gao Ping Gao, Collins, L., Garber, P., Geng, N., ve Carin, L. (2000). Classification of landmine-like metal targets using wideband electromagnetic induction. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38(3), 1352-1361.
- [7] Lahrech, A., Zaoui, A., Benyoubi, F., ve Sakoub, A. (2013). Modeling of inductive metal detector with swept frequency excitation. 2013 International Conference On Electromagnetics In Advanced Applications (ICEAA).
- [8] Gaffney, C. (2008). Detecting trends in the prediction of the buried past: A review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry*, 50(2), 313-336.
- [9] Bruschini, C. (2002). *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining* (doktora tezi). Brussels, Belgium: Vrije Universiteit Brussels.
- [10] Ripka, P. (2001). *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House.
- [11] Dehmel, G. (1989). Magnetic Field Sensors: Induction Coil (Search Coil) Sensors. Weinheim, Germany: *Sensors*, s. 205-253.
- [12] Telford, W. (1976). *Applied geophysics*. London: Cambridge University Press, Cambridge, Sf. 362-365.
- [13] McFee, J.E. (1989). Electromagnetic Remote Sensing: Low Frequency Electromagnetics, Defence Research Establishment Suffield, Ralston, Alberta, Canada, Suffield Special Publication No.124 (report DRES-SP-124), Ocak 1989.
- [14] Kaufman, A., Eaton, P., ve Kaufman, A. (2001). *The theory of inductive prospecting*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.

- [15] Riggs, L., Mooney, J., ve Lawrence, D. (2001). Identification of metallic mine-like objects using low frequency magnetic fields. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 39(1), 56-66.
- [16] Carin, L., Won, I., Keiswetter, D. (1999). Wideband frequency- and time-domain EMI for mine detection, *Proc. SPIE*, 3710, 14-25.
- [17] Shubitidze, F., O'Neill, K., Sun, K., ve Shamatava, I. (2002). Application of broadband EMI responses to infer buried object's aspect ratio. *IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. (IGARSS '02), 3, 1542-1545, 24-28 Haziran, Toronto, CANADA.
- [18] Grant, F., & West, G. (1965). *Interpretation theory in applied geophysics*. New York: McGraw-Hill.
- [19] Özakın, M.B. (2011). *Metal Dedektörünün Üç boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi İle Modellenmesi* (yüksek lisans tezi). Gebze, Türkiye: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [20] Wheeler, H. (1982). Inductance Formulas for Circular and Square Coils, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, No. 12, Aralık, 1449-1450.
- [21] Vallon Metal Detectors. (2014). *Vallon Mine Detection Multi-Sensor Systems VMM3*. Alındığı tarih: 15.12.2014, adres: <http://www.vallon.de/products.lasso?a=mine-detection&b=3>
- [22] TÜBİTAK. (2014). *ETMTS-2 Elde Taşınabilir Mayın Tespit Sistemi*. Alındığı tarih: 15.12.2014., Adres: <http://bilgem.tubitak.gov.tr/tr/icerik/etmts-2-elde-tasinabilir-mayin-tespit-sistemi>.
- [23] Garrett Metal Detectors (t.y.). *Garrett Sport Division, Hobby Gold Detectors*. Alındığı tarih: 15.12.2014, adres: http://www.garrett.com/hbby_at_gold_main_international.aspx
- [24] Secuda Üst Arama Dedektörleri. (t.y.). *Secuda Güvenlik Sistemleri*. Alındığı tarih 15.12.2014, adres: <http://www.secuda.com.tr/secuda-crx-guvenlik-el-ust-arama-dedektoru>.
- [25] Candy, B. (2014). *Minelab Metal Detector Technical Notes*. Alındığı tarih 15.12.2014, adres: <http://www.minelab.com/emea/consumer/knowledge-base/minelabtechnologies>.
- [26] Bies, L. (2014). *Easy to build pulse induction metal detector with DSP*. *Lammertbies.nl*, Alındığı tarih 15.12.2014, adres: http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.
- [27] Mine Detection Systems. (2014). *Introduction - Schiebel*. Alındığı tarih: 15.12.2014, adres: <https://www.schiebel.net/Products/MineDetectionSystems/ATMID.aspx>.
- [28] Ni.com. (2014). *NI LabVIEW National Instruments*. Alındığı tarih 15.12.2014, adres <http://www.ni.com/labview>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hasan Bellikli
Doğum Yeri ve Tarihi : Aksaray, 4 Mart 1987
E-Posta : bellikli@itu.edu.tr-hasan.bellikli@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği