T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



BETONARME YAPILARDA KOROZYON TESPİTİ İÇİN TAHRİBATSIZ MUAYENE SİSTEM TASARIMI

Melikhan EREN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2023

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARDA KOROZYON TESPİTİ İÇİN TAHRİBATSIZ MUAYENE SİSTEM TASARIMI

Melikhan EREN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez TÜBİTAK 1001- Deprem Araştırmaları çağrısı tarafından 121E405 nolu proje ile desteklenmiştir.

MAYIS 2023

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARDA KOROZYON TESPİTİ İÇİN TAHRİBATSIZ MUAYENE SİSTEM TASARIMI

Melikhan EREN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZ

Bu tez 29/05/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk HELHEL (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Doç. Dr. İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT

ÖZET

BETONARME YAPILARDA KOROZYON TESPİTİ İÇİN TAHRİBATSIZ MUAYENE SİSTEM TASARIMI

Melikhan EREN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Mayıs 2023; 59 Sayfa

Yapı sektöründe, yapıların kalan yaşam ömürlerinin ve dayanıklılıklarının tespit edilmesi sadece deprem koşulları altında değil normal koşullar altında da önemli bir konudur. Ülkemiz çok sayıda aktif fay hattının üzerinde bulunmaktadır ve bu fay hatlarının üzerinde güncel deprem yönetmeliğinden çok önce, risk değerlendirmesi yapılmamış ve 2018 tarihli son deprem yönetmenliğine göre "güvensiz" olarak tahmin edilen yüzbinlerce yapı stoku bulunmaktadır. Bu kadar çok sayıda yapının hızlı ve ekonomik şekilde risk durumunun tespiti oldukça önemlidir. Bu açıdan bakıldığında, yapıların deprem performans analizinde özellikle de betonarme yapılardaki donatı sayısı ve korozyonunun tespitinde sıyırma gibi tahribatlı yöntem yerine tahribatsız yöntemlerin kullanılması zaman ve ekonomik bakımdan ciddi avantaj sağlayacaktır.

İlgili çalışma alanıyla ilgili literatür incelendiğinde, bina donatılarında gerekli tespit ve kontrolün yapılabilmesi adına kullanımda olan tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerin; yüksek maliyet, uzun süren zaman kayıpları, yüksek hata payı gibi sorunları olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı kabul edilebilir hata payı ile çalışan, hızlı sonuç üreten ve daha ekonomik bir alternatif çözüme ihtiyaç vardır. Yapı denetimlerinde kullanılacak karar destek mekanizmalarının parçası olması planlanan tahribatsız muayene cihazı; kendi içinde olgun bir teknoloji olan ve korozyon ölçümünde özgünlük sunan frekans modüleli sürekli dalga (FMSD) yöntemi kullanımına dayanan bir yere nüfuz eden radar (YNR) sistemidir.

Bu doğrultuda, prototip bir FMSD Radarı tasarlanarak, yazılım bileşenleri ile hayata geçirilmiştir. Benzetim ortamı üzerinde farklı senaryolarda benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ardından, cihazın korozyon tespit kabiliyetini doğrulamak için hem korozyona uğramış hem de temiz durumdaki silindirik metal malzemeler kullanılarak ölçümler alınmıştır. İlgili çalışma prototip bir FMSD Radar sisteminin hayata geçirilmesini içerdiğinden cihaz ile alınan ölçümler ön çalışma niteliği taşıyan ilk ölçümlerdir. FMSD Radarından elde edilen veri setleri sayısal işaret işleme tekniklerinin kullanıldığı algoritmalar ile incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, yüksek seviyede korozyona uğramış hedeften ve temiz durumdaki hedeften alınan ölçümlerde maksimum genlik noktaları arasında 0.24 V ve çalışma bölgesi olarak nitelendirilen bölgede ise 0.309 V değerinde gerilim kayıpları gözlemlenmiştir. Maksimum genlik noktaları arasında frekans kayması ise 117 MHz olarak hesaplanmıştır. Cevap işaretlerinin faz kayması açısından incelenmesi sonucunda +21 ile -31 derece arasında toplam 52 derecelik bir faz farkı olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen tarama ölçümleri ile tarama alanında bulunan demir malzemenin yerinin tespit edilebildiği, yüksek seviyede korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir malzemenin ölçüm sonuçları arasında yoğunluk farkı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler, hedef nesnelerin cevap işaretlerinde korozyona bağlı olarak genlik bozulması, yoğunluk farkı, frekans kayması ve faz kaymasının varlığını ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELER: FMSD, Korozyon, Radar, Sayısal İşaret İşleme, Tahribatsız Muayene, YNR

JÜRİ: Prof. Dr. Selçuk HELHEL
Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Doç. Dr. İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT

ABSTRACT

NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEM DESIGN FOR CORROSION DETECTION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Melikhan EREN

MSc Thesis in Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

May 2023; 59 Pages

Assessing the residual life and durability of structures in the construction industry is a major concern, not only in dangerous earthquake situations but also under normal conditions. Our country is located on many active fault lines and hundreds of thousands of building stocks on these fault lines were not risk-assessed long before the current earthquake regulations and are estimated to be "unsafe" according to the latest earthquake regulations of 2018. It is very important to determine the risk status of such a large number of buildings quickly and economically. From this perspective, the use of nondestructive methods instead of destructive methods such as stripping in the earthquake performance analysis of structures, especially in the determination of reinforcement number and corrosion in reinforced concrete structures, will provide significant advantages in terms of time and economy.

When the literature on the related field of study is examined, it is understood that the destructive and non-destructive methods in use for the necessary detection and control of building reinforcements have problems such as high cost, long time losses, and high margin of error. For these reasons, there is a need for an alternative solution that works with an acceptable margin of error, produces fast results, and is more economical. The non-destructive testing device planned to be part of the decision support mechanisms to be used in building inspections is a ground penetrating radar (GPR) system based on the use of frequency modulated continuous wave (FMCW) method, which is a mature technology and offers uniqueness in corrosion measurement.

In this direction, a prototype FMCW Radar has been designed and implemented with software components. Simulations were carried out in different scenarios on the simulation environment. Then, measurements were taken using both corroded and clean cylindrical metal materials to verify the corrosion detection capability of the device. Since this study involves the realisation of a prototype FMCW Radar system, the measurements taken with the device are preliminary measurements. The data sets obtained from the FMCW Radar were analysed with algorithms using digital signal processing techniques. As a result of the analyses, voltage losses of 0.24 V between the maximum amplitude points and 0.309 V in the working region were observed in the measurements taken from the highly corroded target and the clean target. The frequency shift between the maximum amplitude points was calculated as 117 MHz. As a result of the examination of the response signals in terms of phase shift, it was observed that there was a total phase difference of 52 degrees between +21 and -31 degrees. The scanning measurements showed that the location of the iron material in the scanning area could be determined, and that there was an intensity difference between the measurement results of highly corroded iron and clean iron material. The analyses revealed the presence of amplitude distortion, intensity difference, frequency shift and phase shift in the response signals of the target objects due to corrosion.

Keywords: Corrosion, Digital Signal Processing, FMCW, GPR, Non-Destructive Testing, Radar

COMMITEE: Prof. Dr. Selcuk HELHEL
Prof. Dr. Sukru OZEN
Assoc. Prof. Dr. Ibrahim Bahadir BASYIGIT

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim sürecinde emek ve katkılarıyla beni yönlendiren, yardımlarını ve desteklerini benden esirgemeyen, gelecekteki akademik çalışmalarıma yön veren ve her zaman örnek alacağım danışman hocam Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Özellikle yakın alan laboratuvarında gerçekleştirilen ölçümlerde ve çalışmalarda yardımlarından ötürü Ercan MENGÜÇ ve Emin SAPMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Tecrübesini, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Atalay KOCAKUŞAK hocama ve tüm değerli hocalarıma ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Destekleri ile her an yanımda olduklarını hissettiren değerli aileme; annem Şükran EREN'e, babam Sadık EREN'e, ablam Şerife SEÇGİN EREN, ağabeyim İbrahim EREN'e ve Aslıhan ERİS'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖNSÖZ v
AKADEMİK BEYAN vii
SİMGELER VE KISALTMALAR viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 5
2.1. Elektromanyetik Dalga ve Yayılım 5
2.2. RADAR 6
2.3. Yere Nüfuz Eden RADAR (YNR) 7
2.4. Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) Biçimi 12
2.5. RF Devre Yapısı 17
2.6. Kullanılan Anten 18
2.7. Hızlandırılmış Korozyon Tekniği (HKT) 20
2.8. Sayısal İşaret İşleme 21
3. MATERYAL ve YÖNTEM 24
3.1. Benzetim Çalışması 24
3.2. FMSD RADAR Kurulumu 25
3.2.1 Sistem entegrasyonu 25
3.3. Ölçüm Düzeneği ve Veri Toplama 27
3.3.1. Tek nokta ölçümleri 28
3.3.2. Tarama ölçümleri 30
3.4. Yakın Alan Tarama Yazılım Algoritması 32
3.5. FMSD Radar Yazılım Algoritması 34
3.6. Veri İşleme 35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 39
5. SONUÇLAR 49
6. KAYNAKLAR 51
7. EK – 1 55
8. EK- 2 58
9. EK-3 59
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Betonarme Yapılarda Korozyon Tespiti için Tahribatsız Muayene Sistem Tasarımı" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

29/05/2023

Melikhan EREN

İmzası 

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V : volt

MHz : megahertz

GHz : gigahertz

cm : santimetre

τ : zaman kayması

ε : elektriksel geçirgenlik

μ : manyetik geçirgenlik

$\vec{J}$: akım yoğunluğu

$\vec{A}$: manyetik vektör potansiyeli

$\vec{B}$: manyetik akı yoğunluğu

Kısaltmalar

FMSD : Frekans Modüleli Sürekli Dalga

HKT : Hızlandırılmış Korozyon Tekniği

LSTM : Long Short Time Memory

RF : Radyo Frekans

SAR : Sentetik Açıklıklı Radar

SD : Sürekli Dalga

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

YNR : Yere Nüfuz Eden Radar

RMSE : Root Mean Square Error

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Beton içerisindeki çeliğin korozyona uğrama süreci (Ahmad,2003)..... 2

Şekil 1.2. Karot alma..... 3

Şekil 1.3. YNR ile korozyon tespiti..... 3

Şekil 2.1. Temsili korozyon tespiti..... 11

Şekil 2.2. Temsili Paslı Çelik..... 12

Şekil 2.3. FMSD radar kavramı..... 13

Şekil 2.4. a) SD radar blok diyagram; **b)** FMSD radar blok diyagram..... 13

Şekil 2.5. Zamana bağlı korozyon derecesi..... 14

Şekil 2.6. Atım frekansı (Kurt, 2007)..... 15

Şekil 2.7. FMSD radar blok şeması..... 18

Şekil 2.8: Kullanılan anten..... 19

Şekil 2.9. HKT düzeneği..... 21

Şekil 3.1. Benzetim sonuçları; **a)** Uyarı işareti; **b)** Hava ortamında temiz inşaat çeliği; **c)** Beton ortamında temiz inşaat çeliği; **d)** Beton ortamında korozyonlu inşaat çeliği; **e)** Benzetim sonuçları..... 25

Şekil 3.2. RF devre gerçeklemesi..... 26

Şekil 3.3. FMSD radar süreçleri; **a)** Doğrulama ölçümleri; **b)** RF devre kutulanması; **c)** FMSD radar son hal; **d)** FMSD radar anten ve platform bağlantısı..... 27

Şekil 3.4. Ölçüm düzeneği; **a)** Ölçüm düzeneği blok şeması; **b)** Ölçüm düzeneği laboratuvar ortamı..... 28

Şekil 3.5. Tek noktadan ölçüm arayüzü..... 28

Şekil 3.6. Laboratuvar ölçümleri; **a)** Yüksek seviye korozyonlu demir silindir ölçümü; **b)** Orta seviye temiz demir silindir ölçümü; **c)** Temiz demir silindir ölçümü..... 29

Şekil 3.7. Tek nokta ölçüm sonucu..... 30

Şekil 3.8. İki boyutlu tarama görünümü..... 31

Şekil 3.9. Korozyonlu ve temiz metal ölçümü; **a)** Korozyonlu demir; **b)** Temiz demir..32

Şekil 3.10. 2-boyulu tarama arayüzü..... 33

Şekil 3.11. Ölçüme hazırlık..... 33

Şekil 3.12. FMSD radar yazılımı akış diyagramı 34

Şekil 3.13. Doğrulama ve kalibrasyon ölçümleri; **a)** Referans anten kullanarak ölçümler; **b)** Arka plan ölçümü; **c)** Düz metal plaka ölçümü; **d)** Paslı ve passız çubuk referans ölçümü 37

Şekil 3.14. Veri işleme akış diyagramı 38

Şekil 4.1. VCO giriş işareti 39

Şekil 4.2. Temiz inşaat çeliği cevap işareti grafiği 40

Şekil 4.3. Temiz demir, orta seviye korozyona uğramış demir, yüksek seviye korozyona uğramış demir cevap işaretleri ham verileri arasında karşılaştırma grafiği 40

Şekil 4.4: Ölçüm hataları giderilmiş veriler arasında karşılaştırma grafiği 41

Şekil 4.5: Temiz demir ve korozyonlu demir analiz grafiği 42

Şekil 4.6. Temiz inşaat çeliği cevap işareti ve korozyona uğramış inşaat çeliği cevapişareti arasında faz kayması karşılaştırma grafiği 43

Şekil 4.7. Korozyona uğramış inşaat çeliği ve temiz durumdaki inşaat çeliği arasında faz kayması fark sonuçları 44

Şekil 4.8. Ölçüm sonuçlarının 3- boyutlu gösterimleri; **a)** Korozyona uğramış demir 3-boyutlu sonuç gösterimi; **b)** Temiz durumdaki demir 3- boyutlu sonuç gösterimi…....45

Şekil 4.9. Faz kayması sonuçlarının kümelendirilmesi; **a)** Korozyona uğramış demir sonuç gösterimi; **b)** Temiz durumdaki demir sonuç gösterimi 46

Şekil 4.10. Korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir arasında faz kayması farklarının kümelendirilmesi 46

Şekil 4.11. Tarama ölçüm sonuçlarının ısı haritasında gösterilmesi; **a)** Orta seviyede korozyona uğramış demir ısı haritası; **b)** Yüksek seviyede korozyona uğramış demir ısı haritası; **c)** Temiz durumdaki demir ısı haritası 47

Şekil 4.12. Temiz demir ve yüksek seviyede korozyona uğramış demir sonuçları arasında farkın ısı haritasında gösterilmesi 48

Şekil 7.1. Mikroşerit log-periyodik dipol anten dizisi 55

Şekil 7.2. Carrel grafiği 56

Şekil 9.1. Ölçümlere ait ortalama karekök hatası 59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Tarama ölçümlerinin toplam gerilim değerleri 47

Çizelge 9.1. Ölçümlerin ortalama karekök hatasına bağlı olarak incelenmesi 59

1. GİRİŞ

Yapı sektöründe, yapıların kalan yaşam ömürlerinin ve dayanıklılıklarının tespit edilmesi sadece deprem koşulları altında değil normal koşullar altında da önemli bir konudur. Ülkemiz çok sayıda aktif fay hattının üzerinde bulunmaktadır ve bu fay hatlarının üzerinde eski inşaat tarihli, risk değerlendirmesi yapılmamış ve günümüz 2018 deprem yönetmenliğine göre "güvensiz" olarak tahmin edilen yüzbinlerce yapı stoku bulunmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) 2017 tarihli Ulusal Adres Veri Tabanı (UAVT) verilerine göre Türkiye'de toplam konut sayısı (konut, lojman, yazlık/mevsimlik konut, kapıcı dairesi) 32,7 milyondur. Bu sayının sadece 6,5 milyonu son 10 yılda yani 2007 Deprem Yönetmeliğinin yürürlüğe girdiği tarihten sonra üretilen konutlardır (Kalkınma Bakanlığı, 2018). Bu durumda yaklaşık 26 milyon konutun risk değerlendirmelerinin yapılması gerekmektedir. Rakamlara bakıldığında, tehlikeli fay hatlarını da barındıran ülkemizde, denetimden geçmesi gereken, deprem riski altındaki bitmiş ve insanlar tarafından kullanılan bina sayısı yüz binlerle ifade edilmektedir. Bu kadar çok sayıda yapının hızlı ve ekonomik şekilde risk durumu tespiti oldukça önemlidir.

Bu açıdan bakıldığında, yapıların deprem performans analizinde özellikle de betonarme yapılardaki donatı sayısı ve donatılarda korozyonunun tespitinde sıyırma gibi tahribatlı yöntem yerine tahribatsız yöntemlerin kullanılması zaman ve ekonomik açılarından ciddi avantaj sağlayacaktır. Bu kadar çok sayıda yapının hızlı ve ekonomik şekilde risk durumunun tespiti oldukça önemlidir. Alternatif yöntemler ile kıyaslandığında oldukça ekonomik olacaktır. Yapılarda risk oluşturan en önemli unsurlardan olan ve aynı zamanda farklı endüstriyel maddelerde, demiryollarında da büyük sorunlar oluşturan korozyon; bir metalin ya da alaşımın oksijen, hidrojen, elektrik akımı hatta kir ve bakteri gibi başka bir maddeyle reaksiyona girdiğinde paslanarak bozulması olarak tanımlanmaktadır.

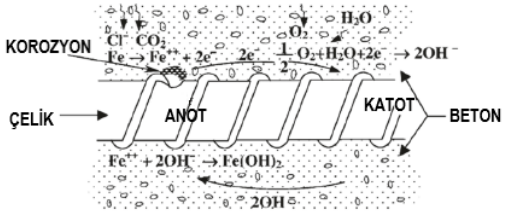
Şekil 1.1'de bir inşaat çeliğinin nemli bir ortamda nasıl paslanabileceği gösterilmiştir. Anodik reaksiyon olarak bilinen oksidasyon süreci sonucunda metalde bir kayıp oluşur (Bakınız Denklem 1.1) ve metal anot olarak işlev görmeye başlar. İçerisinde inşaat çeliğinin bulunduğu betonda oluşan nem nedeniyle beton ise bir elektrolit olarak işlev görür ve Denklem 1.2'de gözüktüğü gibi ortamda bulunan oksijen ile birleşerek OH^- oluşumuna neden olur. Ardından anot olarak işlev görmeye başlayan metal ve OH^- Denklem 1.3'te görüldüğü üzere tepkimeye girerek bir pas bileşeni yani $Fe(OH)_2$ üretimi gerçekleşir (Ahmad, 2003). Ayrıca korozyon, çelik gibi metal malzemelerin çok fazla baskı altına alındığında çatlaması durumunda da oluşabilir. Aktif korozyon aşaması başladıktan sonra korozyon ürünlerinin ($Fe(OH)_2$, FeO, Fe_2O_3 gibi) betonu kırabilecek bir hacimde genişlemesinden dolayı betonda çatlaklar, tabakalaşma ve dökülmeler meydana gelerek ancak gözle görülebilir olur (Li vd., 1998). Korozyon olarak adlandırılan bozulma malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliklerinde değişimlere neden olarak malzemenin uygulandığı amaç için artık yeterli olamamasına sebebiyet verir (Çakır, 2016).

Günümüzde, malzemelerin korozyona uğraması mühendislerin karşılaştığı en büyük ve en maliyetli sorunlardan birisidir. Yapılan araştırmalardan anlaşıldığı üzere korozyonun doğrudan maliyetinin tüm dünya ülkelerinin Gayri Safi Yurtiçi Hasılalarının (GSYH) %3 ila %4'ü oranında olduğu gözlemlenmektedir (Zhang vd., 2015). Ülkemizin 2019 yılı GSYH'sinin 4.320.191 milyon TL olduğu göz önünde bulundurulursa korozyon nedeniyle kaybedilmiş maddi miktar 129,6 milyar TL olarak tahmin edilebilir.

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^- \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- \quad (1.2)$$

$$Fe^{+2} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (1.3)$$



Şekil 1.1. Beton içerisindeki çeliğin korozyona uğrama süreci (Ahmad,2003)

İlgili çalışma alanıyla ilgili literatür incelendiğinde, yapıların kalan yaşam ömürlerinin, dayanıklılıklarının tespit ve kontrolünün yapılabilmesi için tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere çeşitli muayene yöntemleri mevcut olduğu görülmektedir. Karot alma (Bakınız Şekil 1.2) olarak da adlandırılan tahribatlı muayene yöntemi ile yüksek bir oranda doğru sonuç alınabilmektedir. Ancak karot, taşıyıcı kolonlardan veya perdelerden alındığı için örnek alınırken yapılan bir yanlışlık, yapının taşıyıcılığını doğrudan etkileyebilmektedir. Ayrıca karot alımı insana bağlı iş yükünü arttırmakta, karotun taşınması ve test edilmesi aşamaları ciddi zaman kaybına mal olmaktadır. Tahribatsız muayene yöntemleri ise mekanik yöntemler (Schmidt Çekici, Sızma Tabancası), akustik emülsiyon testi ve elektromanyetik temelli görüntüleme radarı (tomografi gibi) gibi yöntemleri barındırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemler incelendiğinde; mekanik yöntemlerde hata payının yüksek olduğu, akustik emülsiyon testinin çatlaklıkların tespitini sağladığını ancak yapı hakkında detaylı bilgi vermediği rapor edilmektedir. Dünya genelinde kullanımı giderek yaygınlaşan Şekil 1.3'te gösterilen görüntüleme radarlarının iyi bir alternatif olmalarına karşın maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle alternatif bir tahribatsız muayene yöntemi gerekliliği mevcuttur.

Korozyon tespiti için alternatif tahribatsız muayene yöntemleri araştırmasında karşımıza Chen vd. (2014) çalışması çıkmıştır. İlgili çalışmada erken korozyon tespiti için karbon çeliği kullanarak çelik malzemenin yüzey morfolojisindeki değişimin gözlemlendiği kapasitör tabanlı bir sensör geliştirilmiştir. Twigg ve Molinara (2016) çalışmasında test edilen benzer bir kapasitör tabanlı korozyon tespit sensörü sonuçları da incelendiğinde; inşaat çeliği yüzeyinde oluşacak korozyonun sensör ile tespit edilebileceği görülmektedir. Ancak, bu tarz sensörlerin kullanılabilmesi için sensörün yapı inşa halindeyken bir güç kaynağına ve belirli noktalarda inşaat çeliklerine temas edecek şekilde bağlantısının gerçekleştirilmesi ve sensör verilerinin kablosuz olarak alınabilmesi için baz istasyonlarının kurulması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ilgili yöntem inşa edilmiş durumdaki yapılarda korozyon tespiti için etkin değildir. İş bu nedenle bir karar destek mekanizması olarak kullanılabilecek kabul edilebilir hata payı barındıran, ucuz maliyetli ve kolay taşınabilir alternatif bir çözüme ihtiyaç vardır.



Şekil 1.2. Karot alma



Şekil 1.3. YNR ile korozyon tespiti

Bahsi geçen alternatif çözüm ihtiyacının karşılanabilmesi ve literatüre bir katkı sağlanabilmesi maksadıyla; yapı denetimlerinde kullanılacak karar destek mekanizmalarının parçası olacak şekilde kabul edilebilir hata payı barındıran, hızlı sonuç üreten alternatif bir tahribatsız muayene yöntemi olarak frekans modüleli sürekli dalga (FMSD) kullanımına dayanan bir yere nüfuz eden radar (YNR) sistemi tasarlanmıştır. YNR'lerin çalışma prensibi YNR tarafından gönderilen elektromanyetik dalgaların hedef cisimler üzerinde akım indüklemesinden yola çıkarak açıklanabilir. İndüklenen akımın miktarı cismin iletkenliği ile doğru orantılıdır ve doğal olarak farklı cisimler üzerinde farklı akımların indüklenmesi beklenir. İndüklenen akım nedeni ile cisimler yeniden ışıma yapar. Bu ışımalar YNR tarafından algılanır, gönderilen ve yansıyan işaret arasındaki geçen süre veya eşlenik olarak ortaya çıkan faz farkı bilgisinden yararlanarak gömülü cismin yeri, derinliği veya fiziksel özellikleri hakkında yorumlar yapmak mümkün olur.

Yere nüfuz eden radarlar (YNR) beton, duvar, asfalt, ağaç, toprak gibi maddelerin içine yerleştirilmiş ve gömülmüş nesnelerin yerini ve katman kalınlıklarını belirlemek için kullanılırlar. Cihazın hassas ölçüm sunabilmesi ve minimum maliyetle üretilmesi için kendi içinde olgun bir teknoloji olan ve korozyon ölçümünde özgünlük sunan Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) teknolojisi kullanılmaktadır. Tasarlanacak sistem sayesinde denetimden geçen yapının taşıyıcı kolonları YNR sistemi ile muayene edilecek ve tehlikeli bir korozyonlanma şüphesi durumunda daha yüksek bir oranda doğru sonuç veren sıyırma ve/veya devamında karot alma olarak bilinen tahribatlı muayeneye gerek vardır kararı alınabilecektir. Bu şekliyle ilgili sistem kanser şüphesi olan hastalara biyopsi yapılarak kesin tanı konulmasından önce hastaların tomografi ya da MR gibi tıbbi görüntüleme sonuçlarının incelenerek biyopsiye karar verilmesine benzetilebilir.

Yapılacak sistemin ölçüm hassasiyetinin anlaşılabilmesi ve gerçek hayatta karşılaşılabilecek korozyon sorunlarını ölçebilmesi için öncelikle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY2018) göre kolonlarda kullanılması gereken kolon kalınlıkları, donatı çapları ve donatı adetleri dikkate alınarak benzetim ortamı üzerinde farklı senaryolarda benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ardından, benzetimde oluşturulan önermeyi doğrulamak için, benzetim aşamasında oluşturulan senaryolardaki bileşenlerin tıpkı benzerlerinden oluşan gerçek senaryolar oluşturulacaktır. Doğrulama senaryosu olarak adlandırılan bu senaryoda kullanılacak kolon kesitleri hızlandırılmış korozyon tekniğiyle (HKT) kontrollü olarak korozyona uğratılmıştır. Farklı korozyon değerleri için tasarlanan doğrulama ölçümleri FMSD yöntemini kullanan radar aracılığı ile bilimsel olarak anlamlı olacak sayıda ve şekilde tekrarlanarak elde edilen cevap işaretlerinden doğrulama ölçümleri veri seti oluşturulmuştur.

Oluşturulan doğrulama ölçümleri veri setindeki cevap işaretleri, sayısal filtreleme işlemleriyle güçlendirilmiş FMSD analiz algoritması ile sayısal işaret işleme analizine tabi tutularak cevap işaretinin düzeltilmesi sağlanacaktır. Ardından, FMSD yönteminin sağladığı bir avantaj olan zamana bağlı değişebilir frekans değerlerinden yararlanarak elde edilecek genlik verileri, frekans kayması, faz kayması ve diğer cevap işareti öznitelikleri oluşturulan korozyon derecelendirmesi veritabanında kayıt altına alınmıştır. Daha sonra bir makine öğrenimi tekniği olan LSTM Autoencoder kullanılarak iyileştirilmiş cevap işaretlerinde anomali tespiti yapılarak korozyon derecelendirmesi veritabanına öznitelik olarak kaydedilir. Korozyon derecelendirmesi veritabanında bulunan cevap işareti öznitelikleri, bir diğer makine öğrenimi tekniği olan lojistik regresyon işlemine tabi tutularak 0-4 dereceleri aralığında korozyon derecesi kararları verilir ve cihaza ait kullanıcı arayüzü üzerinden cevaplar ekranda gösterilir.

Farklı ölçümler yapıldıkça elde edilen cevap işareti öznitelikleri ve korozyona uğrama oranları oluşturulan veritabanında kayıt altına alınmaktadır. Veritabanı makine öğrenmesi ile sisteme entegre edilmiş olması sayesinde sistem hassasiyetinin veritabanına eklenen her ölçümde artacağı düşünülmektedir. Şu anki aşamasında bir karar destek mekanizması olarak kullanılması planlanan sisteme ait veritabanı genişledikçe bağımsız bir şekilde yapı sağlamlığına karar verilebilmesi mümkün olacaktır.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde problemin kısa tanımı ve tezin ana kapsamından bahsedilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde kuramsal bilgiler, üçüncü bölümünde ise çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler ile o yöntemlerin açıklamaları anlatılmıştır. Dördüncü bölümünde yapılan deneysel gerçeklemeler ve sonuçlardan, beşinci bölümünde ise çalışma ile elde edilen nihai sonuçlardan bahsedilmiştir. Çalışmada başvurulan kaynaklar ise altıncı bölümde listelenmiştir

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Elektromanyetik Dalga ve Yayılım

Elektromanyetik dalgalar, uzayda ışık hızında yayılan bir enerji türüdür. Bir elektrik yükü hızlandırıldığında, birbirlerine ve yayılma yönüne dik olan elektrik ve manyetik alanlardan oluşurlar (Cheng 1989; Hayt ve Buck 2011). Dalga, $c = f.\lambda$ denklemi ile ilişkili olan frekansı (f) ve dalga boyu (λ) ile karakterize edilir, burada c elektromanyetik dalganın boşluktaki hızını yani ışık hızını belirtir (Cheng 1989).

Elektromanyetik dalgaların en önemli özelliklerinden biri boşlukta hareket edebilmeleridir, yani yayılmak için bir ortama ihtiyaç duymazlar (Mosca ve Tipler 2008; Purcell ve Morin 2013; Ulaby ve Ravaioli 2015). Bu, onları hava, su ve hatta kaya ve toprak gibi katı malzemelerden geçebildikleri radar ve YNR uygulamalarında kullanım için çok uygun hale getirir (Daniels 2004).

Elektromanyetik dalgaların yayılımı, elektrik ve manyetik alanları onları üreten kaynaklarla ilişkilendiren Maxwell denklemleri ile tanımlanabilir (Cheng 1989). Elektromanyetik alanların uzay ve zamandaki davranışını tanımlayan dört kısmi diferansiyel denklem kümesidir. Adlarını 1860'larda ilk kez formüle eden James Clerk Maxwell'den alırlar (Kraus ve Carvel 1980). Bu denklemler, elektromanyetik dalgaların uzayda yayılırken davranışlarını tanımlayan dalga denklemini türetmek için kullanılabilir (Cheng 1989; Hayt ve Buck 2011). Dalga denklemi Denklem 2.1'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\nabla^2 \mathrm{E} - [(\mu' - i.\mu'').(\varepsilon' - i.\varepsilon'')].\frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{t}^2} = 0 \qquad (2.1)$$

Burada E elektrik alanı, μ ortamın manyetik geçirgenliği, ε ortamın elektriksel geçirgenliği ve t zamandır. Manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenlik karmaşık olarak ifade edilmiştir. Bu denklem, bir elektromanyetik dalganın elektrik alanının hem içinden geçtiği ortamın özelliklerine (μ ve ε ile ifade edildiği gibi) hem de zaman içinde değişen kendi özelliklerine ($\frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{t}^2}$ ile ifade edildiği gibi) tabi olduğunu gösterir (Cheng 1989; Hayt ve Buck 2011).

Elektromanyetik dalgaların bir ortam içinde yayılırken sergiledikleri davranış, dalganın ortamın elektrik ve manyetik özellikleriyle etkileşimi tarafından belirlenir. Örneğin, su gibi yüksek geçirgenliğe sahip bir malzemede, bir elektromanyetik dalganın elektrik alanı yavaşlayacak ve dalganın yön değiştirmesine neden olacaktır (Ulaby ve Ravaioli 2015). Demir gibi yüksek geçirgenliğe sahip bir malzemede ise dalganın manyetik alanı güçlenerek dalganın emilmesine veya yansımasına neden olacaktır (Hayt ve Buck 2011).

Elektromanyetik dalgaların yayılmasıyla ilgili önemli bir kavram da yansıma kavramıdır. Bir elektromanyetik dalga, hava ve toprak arasındaki sınır gibi farklı elektriksel özelliklere sahip iki ortam arasındaki bir sınırla karşılaştığında, dalganın bir kısmı kaynağına doğru geri yansır (Balanis 2005; Pozar 2011). Bu yansıma, YNR uygulamalarında yeraltı özelliklerini ve yapılarını tespit etmek için kullanılabilir (Conyers ve Goodman 1997; Daniels 2004; Jol 2009).

Elektromanyetik dalgaların yayılmasıyla ilgili bir diğer önemli kavram da kırınım kavramıdır. Kırınım, bir elektromanyetik dalga bir engelle ya da bir bariyerdeki küçük bir açıklıkla karşılaştığında meydana gelir (Born ve Wolf 1999; Hecht 2017). Dalga yayılır ve

engelin veya açıklığın etrafında bükülür, engelin veya açıklığın şeklini ve boyutunu belirlemek için kullanılabilecek bir girişim modeli oluşturur.

Elektromanyetik dalgaların önemli bir özelliği de polarize olabilmeleridir. Polarizasyon, dalgadaki elektrik alanının yönünü ifade eder (Griffiths 1999; Hecht 2017). Bir dalga üç yoldan biriyle polarize edilebilir: dikey, yatay veya dairesel olarak. Polarizasyon, radar ve YNR uygulamalarında istenmeyen sinyalleri filtrelemek ve verilerin kalitesini artırmak için kullanılabilir (Daniels 2004).

Sonuç olarak, elektromanyetik dalgaların farklı ortamlarda yayılabilmesi ve bu ortamların elektrik ve manyetik özellikleriyle etkileşime girme yetenekleri, onları görüntüleme ve algılama uygulamaları için güçlü bir araç haline getirmektedir. Elektromanyetik dalga yayılımının matematiği karmaşık olabilir, ancak bu teknolojilerin nasıl çalıştığını anlamak için temeldir. Elektromanyetik dalgaların özelliklerini ve davranışlarını anlamak, radar ve YNR sistemlerinin tasarımı ve işletimi için çok önemlidir.

2.2. RADAR

Radar, Radyo Algılama ve Uzaklık Ölçümü anlamına gelen İngilizce “Radio Detection and Ranging” kelimelerinin kısaltması olup, uzaktaki nesneleri tespit etmek ve yerlerini belirlemek için radyo dalgalarını kullanan bir teknolojidir (Skolnik 2008; Nathanson 1991). Havacılık, deniz konumlama, hava tahmini ve askeri gözetleme gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Radarın temel prensibi basittir: bir verici bir radyo sinyali gönderir ve bu sinyal bir nesneyle karşılaşana kadar havada ilerleyerek elektromanyetik yayılım yapmış olur (Melvin ve Sheer 2013). Elektromanyetik yayılım sonucunda gönderilen sinyalin bir kısmı alıcıya geri yansır, alıcı geri dönen sinyali tespit eder ve nesneye gidip gelmek için geçen süreyi hesaplar. Radar, geri dönen sinyalin zamanlamasını ve gücünü analiz ederek nesnenin mesafesini, hızını, yönünü belirleyebilir (Jol 2009). Aynı zamanda bizim senaryomuzda da olduğu üzere nesne sınıflandırılması hakkında bilgiler elde edilmesini sağlar.

Radarın en önemli avantajlarından biri gece ya da gündüz, her türlü hava koşulunda, çok çeşitli ortamlarda çalışabilmesidir. Örneğin, radar havadaki uçakları tespit etmek, denizdeki gemilerin yerini belirlemek ve hava koşullarını takip etmek için kullanılabilir. Ayrıca radar, gözetleme ve silah yönlendirme de dahil olmak üzere askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Radar bulutlara, sise ve hatta duvar veya arazi gibi katı nesnelere nüfuz edebilir (Skolnik 2008; Jol 2009). Bu da onu, betonarme yapılarda inşaat çeliklerinin, gömülü borular, kamu hizmetleri, arkeolojik eserler gibi yeraltı özelliklerinin incelenmesi için radarı kullanan, yere nüfuz eden radar (YNR) gibi uygulamalar için yararlı kılar. Bu uygulamada, radar sinyali zemine iletilir ve yansıyan sinyal analiz edilerek yüzey altı nesnelerin konumu ve özellikleri belirlenir (Daniels 2004; Jol 2009). Belirlenen özelliklere göre nesne sınıflandırılması yapılması mümkün olur.

Radarın teknik detayları oldukça karmaşık olabilir; anten tasarımı, sinyal işleme ve elektromanyetik dalga yayılımı gibi kavramları içerir (Skolnik 2008). Bununla birlikte, bir radar sisteminin temel bileşenlerinden bazıları bir verici, bir alıcı ve bir antendir. Verici radyo sinyalini üretir ve bu sinyal anten tarafından güçlendirilerek çevreye gönderilir. Alıcı daha sonra, genellikle gönderilen sinyalden çok daha zayıf olan geri dönen sinyali algılar ve hedef hakkında yararlı bilgiler elde etmek için işler (Richards 2010).

Radar teknolojisi yıllar içinde hızla gelişmiştir; performansı artırmak ve maliyetleri düşürmek için sürekli olarak yeni teknikler ve algoritmalar geliştirilmektedir. Bu ilerlemelerden biri, çevrenin yüksek çözünürlüklü görüntülerini oluşturmak için hareketli bir anten kullanan sentetik açıklıklı radarın (SAR) geliştirilmesidir (Ozdemir 2019). 3.3.2. Tarama Ölçümleri başlığında anlatılan tarama sistemi de bir SAR örneği olarak düşünülebilir. Diğer gelişmelerden bazıları ise geniş bir alanın hızlı bir şekilde taranmasına olanak tanıyan ve radar sistemlerinin hava trafik kontrolü ve füze savunması gibi uygulamalarda kullanılmasını sağlayan faz dizili radarın kullanılması ve kendi vericisine ihtiyaç duymadan hedefleri tespit etmek için televizyon veya cep telefonu kulelerinden gelen sinyaller gibi mevcut radyo sinyallerini kullanan pasif radarı içerir.

Özetle, radar navigasyondan gözetlemeye ve bilimsel araştırmalara kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip güçlü bir teknolojidir. Engelleri aşma ve her türlü hava koşulunda çalışma kabiliyeti, onu özellikle yeraltı özelliklerinin hassas bir şekilde görüntülenmesini gerektiren yere nüfuz eden radar gibi uygulamalar için kullanışlı kılmaktadır. Teknoloji gelişmeye devam ettikçe, gelecekte daha da sofistike ve güçlü radar sistemleri görmeyi bekleyebiliriz.

2.3. Yere Nüfuz Eden RADAR (YNR)

Yere nüfuz eden radar (YNR), dünyanın yeraltı yüzeyini araştırmak için elektromanyetik dalgalar kullanan tahribatsız bir jeofizik tekniğidir. Jeofizik, arkeoloji, inşaat mühendisliği ve çevre bilimlerinde çok sayıda uygulaması vardır (Daniels 2004; Benedetto ve Pajewski, 2015). Gömülü kamu hizmetleri, boşluklar, ana kaya ve arkeolojik eserler gibi yüzey altı özelliklerini görüntüleme ve haritalama yeteneğine sahiptir (Conyers 2012).

YNR'nin çalışma prensibi, elektromanyetik dalgalar ve malzemeler arasındaki etkileşime dayanmaktadır. Sistem, zemine yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar gönderen bir verici anten ve yansıyan sinyalleri tespit eden bir alıcı antenden oluşur. Gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasındaki zaman gecikmesi, yeraltı özelliklerinin derinliğini ve konumunu hesaplamak için kullanılır. Yansıyan sinyaller ayrıca yeraltının iki boyutlu veya üç boyutlu bir görüntüsünü oluşturmak için de kullanılır (Daniels 2004; Benedetto ve Pajewski, 2015).

YNR sistemleri demir, çelik, beton, toprak, kaya ve buz dahil olmak üzere çeşitli malzemeler üzerinde kullanılabilir. Sistem, malzemelerin dielektrik özelliklerindeki değişiklikleri tespit ederek yeraltı özelliklerinin veya anomalilerin varlığını gösterir (Lai vd. 2017). Malzemelerin dielektrik özellikleri bileşimlerine, su içeriklerine ve yoğunluklarına bağlıdır. Toprak ve kil gibi yüksek su içeriğine sahip malzemeler, kaya ve beton gibi düşük su içeriğine sahip malzemelerden daha yüksek dielektrik özelliklere sahiptir. Benzer şekilde temiz durumdaki bir inşaat çeliği de korozyona uğramış bir inşaat çeliğine göre daha yüksek dielektrik özelliklere sahiptir (Daniels 2004; Lai vd. 2010).

YNR'nin ana avantajlarından biri, çeşitli derinliklerdeki özellikleri tespit etme yeteneğidir. İnceleme derinliği, iletilen sinyalin frekansına ve incelenen malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Düşük frekanslı sinyaller zemine daha derin nüfuz edebilir, ancak daha düşük çözünürlüğe sahiptirler. Yüksek frekanslı sinyaller daha yüksek çözünürlüğe sahiptir, ancak bu kadar derine nüfuz edemezler (Wan vd. 2001; Bristow ve Jol 2003; Daniels 2004). Bu çalışma için hangi frekans aralığının seçildiği ve neden seçildiği 2.3 RF Devre başlığı içerisinde anlatılmıştır.

YNR, çelik ve alüminyum gibi iletken malzemelerdeki korozyonun tespiti için etkili bir yöntemdir ve bu da yapısal hasarların önlenmesine ve güvenliğin artırılmasına yardımcı olur. Korozyon, malzemelerin yapısını zayıflatarak bütünlüklerini tehlikeye atmaktadır. YNR, malzemelerin kalınlığındaki ve iletkenliğindeki değişiklikleri tespit eder. Bu bilgiler kullanılarak korozyonun varlığına işaret edilebilir. YNR, ayrıca korozyon sürecini hızlandırabilecek nem varlığını da tespit edebilir (Barnes ve Trottier 2000; Mechbal ve Khamlichi 2014; Zaki vd., 2018; Tešić vd. 2021).

Çeşitli alanlarda kullanılabilen YNR'nin bazı yaygın uygulamaları şunlardır:

Arkeoloji: YNR, gömülü binalar, mezarlar ve eserler gibi arkeolojik özellikleri haritalamak ve bulmak için kullanılabilir. YNR ayrıca toprak bileşimindeki değişiklikleri de tespit edebilir, bu da gömülü nesnelerin varlığını gösterebilir.

Jeoloji: YNR, ana kaya ve toprak katmanları gibi yeryüzünün alt yüzeyini incelemek için kullanılabilir. YNR ayrıca faylar, kıvrımlar ve kırıklar gibi jeolojik yapıları incelemek için de kullanılabilir.

İnşaat Mühendisliği: YNR, betonarme ve çelik yapılarda meydana gelen korozyona uğrama tehlikesini yapıda gözle görünür sorunlar oluşmaya başlamadan ve yapıya zarar vermeden tespit edebilir. Borular ve kablolar gibi yeraltı tesislerini zemine zarar vermeden tespit etmek için kullanılabilir. YNR ayrıca yolların, köprülerin ve diğer yapıların durumunu araştırmak için de kullanılabilir.

Çevresel Çalışmalar: YNR, yeraltı suyu ve toprak nemi gibi yeryüzünün alt yüzeyini incelemek için kullanılabilir. YNR ayrıca toprak ve sudaki kirleticilerin yerini tespit etmek için de kullanılabilir.

YNR'nin temel prensibi, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların zemine nüfuz etmesi ve bu dalgaların çeşitli yeraltı nesnelerinden veya katmanlarından yansımasını ölçmek üzerinedir (Daniels 2004; Tešić vd. 2021). Bu dalgaların iletimi ve alımı, zemin yüzeyine yerleştirilen antenler kullanılarak yapılır. Verici anten toprağa kısa elektromanyetik dalga darbeleri gönderir. Bu dalgalar bir nesne veya malzemede bir değişiklikle karşılaşana kadar zemin boyunca ilerler. Dalgalar bir nesneye veya bir sınıra ulaştığında, alıcı anten tarafından tespit edildikleri yüzeye geri yansıtılırlar. Dalganın iletilmesi ve alınması arasındaki zaman gecikmesi ölçülür ve bu zaman gecikmesi anten ile nesne arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılır. Yansıyan dalganın genliği de ölçülebilir, bu da nesnenin veya katmanın bileşimi ve özellikleri hakkında bilgi sağlayabilir.

Elektromanyetik dalgalar ve malzemeler arasındaki bu etkileşim, YNR tarafından gönderilen elektromanyetik dalgalar nedeni ile cisimler üzerinde akım indüklemesi ile oluşmaktadır. İndüklenen akımın miktarı cismin iletkenliği ile doğru orantılıdır ve doğal olarak farklı cisimler üzerinde farklı akımların indüklenmesi beklenir (Conyers 2004; Neal 2004). İndüklenen akım nedeni ile cisimler yeniden ışıma yapar. Bu ışımalar YNR tarafından algılanır, gönderilen ve yansıyan işaret arasındaki geçen süre veya eşlenik olarak ortaya çıkan faz farkı bilgisinden yararlanarak gömülü cismin yeri, derinliği veya fiziksel özellikleri hakkında yorumlar yapmak mümkün olur.

Ayrıca belirtilen bu zaman farkı yani hız sayesinde hedef malzemenin dielektrik sabitinin hesaplanması da mümkündür (Rust vd., 1999). Bu nedenle inşaat çeliğinin korozyonunun, görsel hasar veya diğer korozyon belirtileri ortaya çıkmadan önce erken bir aşamada tespit edilebilmesi için YNR tercih edilmiştir (Zaki vd., 2018). Bu tespit ise betonarme yapı olarak tabir edilen betonun çelik ile desteklenmesi suretiyle inşa edilen yapılar ve çelik

yapı sistemlerinde mevcut olan çelik malzemelerin korozyona uğramaya başladıktan sonra manyetik geçirgenliğinde (μ) ve elektriksel geçirgenliğinde (ε) oluşacak değişimlerden dolayı YNR'nin çelik ve beton üzerinde indüklediği akım miktarının değişmesi ile mümkün olacaktır (Jamil vd., 2013; He 2019). Ayrıca, korozyona uğrayan inşaat çeliğinin üzerinde bulunan betonda oluşan korozyon ürünleri nedeniyle de zamana bağlı olarak elektriksel geçirgenlik (ε) değişimi gözlenecektir (Lai vd., 2013).

YNR, yapı/malzeme durumlarını ve yeryüzünün alt yüzeyini araştırmak için güçlü bir araç olmasına rağmen, elbette bazı sınırlamaları vardır. YNR'nin yaygın sınırlamalarına baktığımızda, bazı yaygın sınırlamaları şunlardır:

İnceleme Derinliği: YNR'nin inceleme derinliği, kullanılan elektromanyetik dalgaların frekansına ve incelenen malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Genel olarak, YNR 30 metre derinliğe kadar araştırma yapabilir, ancak bu koşullara bağlı olarak değişebilir. Bu çalışmada ele alınan senaryoda ilk adımlar olarak yalın durumdaki metal malzemelerde korozyon tespiti amaçlandığı ve ilerleyen senaryolarda ise güncel deprem yönetmeliğine uygun 30 cm kalınlığındaki kolon ve kiriş muayeneleri amaçlandığı için 30 metre gibi bir sınırlamaya maruz kalınmamaktadır.

Toprak Koşulları: YNR verilerinin kalitesi, nem içeriği ve iletkenlik gibi toprak koşullarından etkilenebilir. Islak topraklar ve yüksek iletkenliğe sahip topraklar elektromanyetik dalgaları zayıflatarak YNR verilerinin kalitesini düşürebilir.

Yorumlama: YNR verilerinin yorumlanması yüksek düzeyde uzmanlık ve deneyim gerektirir. YNR'den elde edilen veriler karmaşık olabilir ve verilerin yorumlanması yeraltının fiziksel özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirir. Elde edilen verilerin yorumlanması konusundaki sınırlama ilgili çalışmanın başarıya ulaşması konusunda oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir.

Elektromanyetik dalgalar ve malzemeler arasındaki etkileşime dayalı çalışan YNR'nin araştırma derinliği ve verilerin yorumlanması gibi sınırlamaları olsa da yüzey altı araştırmaları için değerli bir araçtır ve iletken malzemelerdeki korozyonu tespit etmeye yardımcı olabilir. Korozyon tespiti için YNR kullanımı, yeraltını incelemek, korozyonla ilgili sorunları tanımlamak ve kapsamlarını belirlemek için teknikler sağlayabilir (Pennock vd. 2010; Kabir ve Zaki 2011). İletken malzemelerde korozyon nem, sıcaklık, agresif kimyasallara maruz kalma ve mekanik stres gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak meydana gelebilir. Korozyon, yapının bütünlüğünü tehlikeye atabilecek ve arızaya yol açabilecek çatlaklara, delaminasyona ve diğer yapısal hasar türlerine neden olabilir.

Korozyonun erken tespiti daha fazla hasarı önleyebilir ve yapının ömrünü uzatabilir. Korozyon tespitinde YNR kullanımı, maliyetli onarımların önlenmesine yardımcı olarak yapıların ve altyapının güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlayabilir. Hedeften yansıyan elektromanyetik dalgalar yani cevap işaretleri, malzemenin iç yapısı hakkında bilgi sağlayarak malzeme özelliklerinde korozyon göstergesi olabilecek değişiklikleri tespit edebilir. Cevap işaretleri ayrıca takviye çubuklarının, çelik boruların ve korozyona eğilimli olabilecek diğer yüzey altı bileşenlerinin yerini belirlemek için de kullanılabilir.

Korozyon tespitinde YNR kullanmak için birkaç faktörün göz önünde bulundurulması gerekir. İlk olarak, YNR elektromanyetik dalgaların iletken malzemelerden yansımasına dayandığından, denetlenen malzemenin iletken olması gerekir. İkinci olarak, kullanılan elektromanyetik dalgaların türü ve frekansı, hedefin derinliğine ve gereken çözünürlüğe göre

seçilmelidir. Üçüncü olarak, YNR verilerinin detaylı bir veri işleme algoritması ile anlamlı hale getirildikten sonra verimli bir şekilde eğitilmiş bir derin öğrenme algoritması ya da aşina olan deneyimli profesyoneller tarafından yorumlanması gerekir.

Sonuç olarak, YNR iletken malzemelerdeki korozyonu tespit etmek için kullanışlı bir araçtır. Yapıya veya altyapıya zarar vermeden yüzey altı koşullarının incelenmesine olanak tanır. YNR, malzemenin iç yapısı hakkında değerli bilgiler sağlayabilir, malzeme özelliklerindeki değişiklikleri tespit edebilir ve korozyona eğilimli olabilecek yüzey altı bileşenlerinin yerini belirleyebilir. Korozyon tespiti için YNR kullanılırken göz önünde bulundurulması gereken çeşitli faktörler olsa da uygun planlama ve yorumlama ile YNR, yapıların ve altyapının denetimi ve bakımı için doğru ve güvenilir sonuçlar sağlayabilir.

Korozyon tespiti için YNR kullanmanın avantajlarından biri, korozyonla ilgili hasarı malzeme yüzeyinde görünür hale gelmeden önce tespit edebilmesidir. Bu özellikle ilgili çalışmanın konusu olan betonarme yapılar gibi, yüzeyde herhangi bir görünür işaret olmadan malzeme içinde korozyonun meydana gelebileceği durumlar için önemlidir. YNR, malzemenin dielektrik özelliklerindeki değişiklikleri tespit edebilir ve bu da korozyona bağlı hasarın göstergesi olabilir. Malzemenin dielektrik sabitindeki değişiklikler korozyonun neden olabileceği boşlukların, çatlakların veya diğer anormalliklerin varlığına işaret edebilir (Li vd. 2023). YNR, yeraltından yansıyan sinyalleri analiz ederek, korozyonla ilgili hasarın yeri ve kapsamı da dahil olmak üzere malzemenin iç yapısı hakkında bilgi sağlayabilir.

Korozyon tespiti için YNR kullanmanın bir diğer avantajı da korozyona bağlı hasarın derinliği hakkında bilgi sağlayabilmesidir. YNR'nin inceleme derinliği, elektromanyetik dalgaların frekansı, incelenen malzemenin özellikleri ve malzemenin üzerindeki herhangi bir katman veya yapının varlığı dahil olmak üzere çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Uygun frekansın seçilmesi ve verilerin dikkatli bir şekilde yorumlanmasıyla YNR, korozyonla ilgili hasarın derinliği hakkında bilgi sağlayabilir ve bu da onarım ve bakımın planlanmasına yardımcı olabilir.

Bununla birlikte, korozyon tespiti konusunda da YNR kullanımında bazı sınırlamalar da vardır. Ana sınırlamalardan biri, YNR'nin korozyonu doğrudan tespit edememesidir; yalnızca malzemenin dielektrik özelliklerinde korozyonla ilgili hasarın göstergesi olabilecek değişiklikleri tespit edebilir. Bu nedenle, YNR verilerinin detaylı bir algoritma tarafından dikkatle yorumlanması gerekir. Buna ek olarak, YNR her tür malzeme ve yapı için uygun olmayabilir. Örneğin, YNR bakır veya pirinç gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemelerdeki korozyonu tespit etmek için etkili olmayabilir. YNR, elektromanyetik dalgaları yansıtabilen veya saçabilen inşaat çeliği veya metal borular gibi engelleyici nesnelerin veya yapıların varlığıyla da sınırlı olabilir.

Özetle, yeryüzünün alt yüzeyini araştırmak için elektromanyetik dalgaları kullanan tahribatsız bir jeofizik tekniğidir. Jeofizik, arkeoloji, inşaat mühendisliği ve çevre bilimlerinde çok sayıda uygulaması vardır. YNR, yeraltı özelliklerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağlayabilir ve çeşitli malzemeler üzerinde kullanılabilir. Aynı zamanda, iletken malzemelerin iç yapısı hakkında değerli bilgiler sağlayabilir ve korozyonla ilgili hasarları tespit etmek için kullanılabilir. YNR, malzemenin dielektrik özelliklerinde korozyona bağlı hasarın göstergesi olabilecek değişiklikleri tespit edebilir ve hasarın derinliği hakkında bilgi sağlayabilir. Bununla birlikte, YNR verilerinin yorumlanması, yüzey altı koşullarının ve iletken malzemenin özelliklerinin dikkatle değerlendirilmesini gerektirir ve belirli durumlarda korozyon tespiti için YNR kullanımında sınırlamalar olabilir. Sistemin bazı sınırlamaları ve zorlukları vardır, ancak

teknoloji ve veri yorumlama tekniklerinde devam eden ilerlemelerle, gelecekte yeraltı araştırmalarında önemli bir rol oynamaya devam etmesi muhtemeldir.

YNR ile hangi koşullarda neler yapılabileceği, karşılaşılabilecek sınırlamalar ve çalışma prensibinin teorik olarak incelenmesinin ardından yere nüfuz eden radarın nasıl çalıştığının matematiksel olarak ele alınması da gerekmektedir.

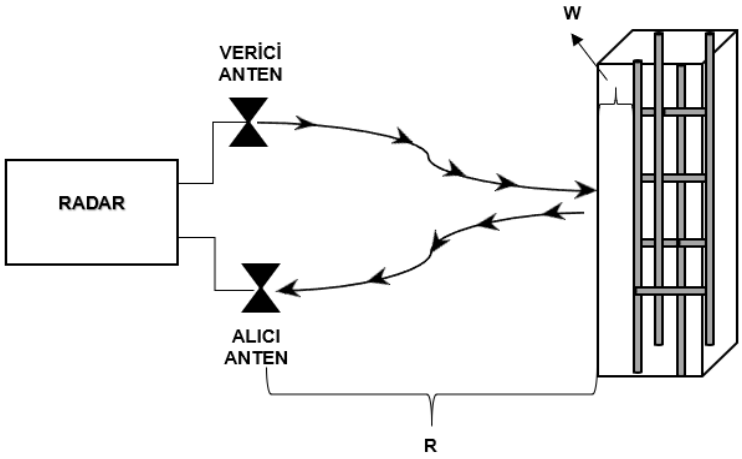
YNR tarafından gönderilen elektromanyetik dalgalar (Bakınız Şekil 2.1) sayesinde Denklem 2.2'de formüle edildiği gibi bir akım yoğunluğu ($\vec{J}$) oluşur. Oluşan bu akım yoğunluğu ise hedef cisim olan inşaat çeliğinde indüklenerek çapına (w) ve karmaşık elektriksel geçirgenliğine (ε) bağlı olarak yeni bir akım yoğunluğu ($\vec{J}_i$) meydana getirir (Bakınız Denklem 2.3). İnşaat çeliği artık YNR tarafından gönderilen elektromanyetik dalgalar nedeniyle akım taşıyan bir iletken konumundadır. Üzerinde bulunan akım yoğunluğu sebebiyle Denklem 2.4 ile gösterilen manyetik vektör potansiyelini ($\vec{A}$) oluşturur. Ardından, manyetik vektör potansiyelinin rotasyonu alınarak (Bakınız Denklem 2.5) alıcı anten tarafından ölçülecek olan manyetik akı yoğunluğu ($\vec{B}_{Alınan}$) elde edilmiş olunur. (Cheng, 1993; Gürdal, 2017). Denklem 2.2- 2.5 ve yapılan açıklamalar incelendiğinde öncesinde bahsedildiği gibi YNR kullanarak korozyon tespitinin manyetik geçirgenlik (μ) ve elektriksel geçirgenlik (ε) değişimlerine bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

$$\vec{J} = \overrightarrow{\sigma E} \tag{2.2}$$

$$\vec{J}_i = \varepsilon''.\vec{E} \tag{2.3}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi}\int_0^l \frac{\vec{J}.e^{-i\beta z}}{R}.dz' \tag{2.4}$$

$$\vec{B}_{Alınan} = \nabla \times \vec{A} \tag{2.5}$$

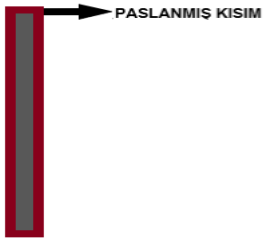


Şekil 2.1. Temsili korozyon tespiti

Korozyon ürünü olan Fe_2O_3 için 2450 MHz seviyesinde karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri $\varepsilon = 8.42 - j1.03$'tür (Gallion, 2019) ve karmaşık manyetik geçirgenlik değeri

ise $\mu = 1 + j0$'dır (Peng vd.,2012). Kuru beton için elektriksel geçirgenlik değeri $\varepsilon = 4.94 - j0.69$ (Hui vd.,2008) ve manyetik geçirgenlik değeri $\mu = 1$'dir. İnşaat çeliği için ise bu değerlere bakıldığında $\varepsilon = 1$ ve $\mu = 100$ olarak gözükmektedir (Alvarez vd.,2017; He, 2019). Yapılan literatür taraması sonucu elde edilen değerler incelendiğinde inşaat çeliğinin yüksek bir manyetik geçirgenliğe sahip olduğu ve korozyona uğradıkça manyetik geçirgenliğinin 2,4 kat kadar düştüğü anlaşılmaktadır (Mosharafi vd., 2020). Bu nedenle korozyon tespitinde önem teşkil etmektedir.

Belirtilen manyetik geçirgenlik (μ) ve elektriksel geçirgenlik (ε) değişimlerinin yanı sıra inşaat çeliğinin çapında oluşacak paslanma kaynaklı kayıp (Bakınız Şekil 2.2) ve oluşacak korozyon ürünleri de doğal olarak gönderilen YNR işaretini etkileyecektir (Senin vd., 2019; Lai vd., 2013). Laurens vd. (2000) ve Barnes vd. (2008), yüksek oranda korozyonun YNR işaretinin genliğini azalttığı ve seyahat süresini uzattığını gözlemlemiştir. Buradan anlaşılıyor ki beton içerisinde oluşan korozyon, inşaat çeliklerinden geri yansıyan işareti zayıflatır ve dalga yayılma hızını azaltarak tepe noktalarının varış sürelerini artırır (Tosti ve Ferrante,2019).



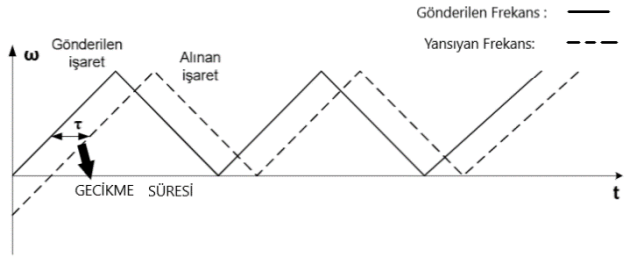
Şekil 2.2. Temsili Paslı Çelik

Kolondaki konumu bilinen inşaat çeliğinin YNR ile taranarak sağlamlık durumunu ortaya çıkarabilmek için ne tür bir tarama yöntemi kullanılacağına karar vermek gerekir. YNR için A-tarama, B-tarama ve C-tarama olmak üzere 3 görüntüleme çeşidi vardır. A-tarama, derinlik ekseni boyunca tek bir radar izi; B-tarama, belirli bir tarama yönü boyunca toplanan bir dizi sıralı tek radar izidir ve x ekseni boyunca alınan A-tarama işaretlerinden oluşur; C-tarama, x-y düzleminde eşzamanlı B tarama görüntülerinin birleştirilmesiyle oluşturulan üç boyutlu bir görüntüdür ancak diğer tarama türlerine göre daha fazla zaman aldığı ve çok pahalı olduğu için tercih edilmez (Tosti ve Ferrante,2019; Altın ve Dolma,2019).

Bu çalışmada, inşaat çeliklerinin daha detaylı muayenesinin yapılabilmesi için A-tarama ve B-tarama yöntemleri kullanılmıştır. A-tarama yöntemi ile hedef bölgeden elde edilen cevap işaretleri genlik dağılımı vasıtasıyla bölgenin radar fotoğrafı çıkartılmıştır. B-tarama için düzlemsel tarama yöntemi vasıtası ile ölçümleri alınmıştır.

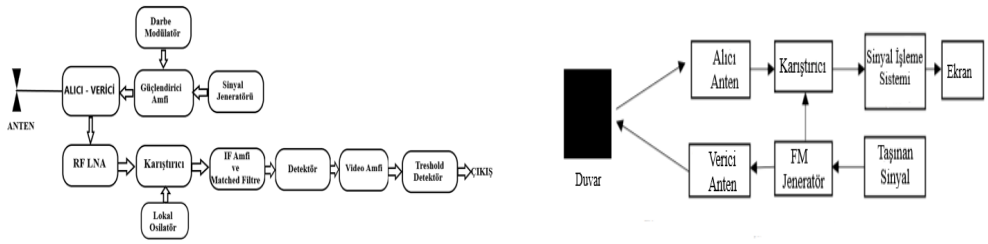
2.4. Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) Biçimi

İlgili çalışma ile gerçekleştirilen YNR sisteminin yapımında Sürekli Dalga metodu (SD) yerine FMSD olarak tabir edilen Frekans Modüleli Sürekli Dalga metodu (Bakınız Şekil 2.3) kullanımı planlanmıştır. SD radarlar frekanslı bir işareti sürekli yayarlar ve sürekli alıcı durumundalardır (Browne, 2018). Bir SD radarının frekans değeri ölçüm sırasında değiştirilemez, bu nedenle gönderilen ve yansıyan işaretin arasındaki sürenin hesaplanıp nesnenin bulunduğu mesafenin belirlenebilmesi için zaman işaretlemesine gerek duyar (Kurt, 2007).



Şekil 2.3. FMSD radar kavramı

FMSD radarlarda ise SD radarın aksine işaretin modüle edilebiliyor oluşu sayesinde gönderilen işaretin frekansı değiştirilebilir ve bu sayede gidiş-geliş süreleri kolaylıkla hesaplanabilir (Shen ve Wen, 2010). FMSD radarlar çok kısa mesafelerde ölçüm olanağı, menzil ölçümü doğruluğu, fazla maliyetten kurtarması nedenleriyle ölçüm yöntemi olarak tercih sebebi olmuştur (Prabaswara vd.,2011). Bu avantajlara ek olarak FMSD radarların, SD radar karşısında Şekil 2.4.a'da bulunan blok diyagramında gözüken basit yapısı sayesinde SD radar yapısına (Bakınız Şekil 2.4.b) göre çok daha az eleman ve maliyet gerektiren bir ürün olduğu anlaşılmaktadır (Carroll vd., 2016). Bahsedilen nedenlerden dolayı, gerçekleştirilen tahribatsız muayene sisteminin çalışma prensibi olarak FMSD yöntemi seçilmiştir.



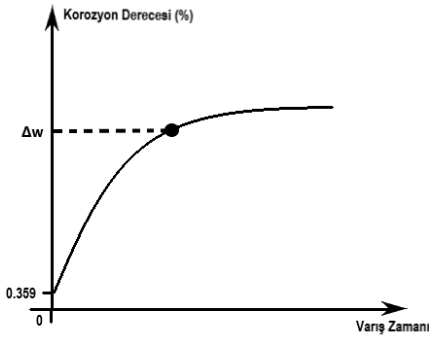
(a) **(b)**

Şekil 2.4. a) SD radar blok diyagram; **b)** FMSD radar blok diyagram

FMSD radarı, iletilen işaretin frekansının doğrusal olarak arttığı kabul edilen bir frekans aralığında işaret gönderir yani frekansı periyodik olarak değişen bir işaret gönderilmiş olur. Frekansı periyodik olarak değişen bu işaret, eğer radara "R" mesafe uzaklığında bulunan bir hedefle karşılaşırsa, bu hedeften yansıyan yankı işareti Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir zaman kaymasına (τ) uğrayarak geri dönecektir (Lin vd., 2016; Kurt, 2007). Yansıyan işaret ve iletilen işaret arasında oluşan zaman farkı ise hareketli bir objenin ortalama hızını veren klasik hareket denkleminden (Bakınız Denklem 2.6) yola çıkarak elde edilir.

YNR'den gönderilen işaret hedefe çarpıp gelerek aynı yolu iki kez alacaktır bu neden R mesafesi formülde 2R olarak kullanılır. Ancak cihaz tarafından gönderilecek elektromanyetik dalganın Şekil 2.1'de gösterildiği gibi havada R mesafe yol aldıktan sonra "W" kalınlığı bulunan beton ortamı da geçerek hedefe ulaşacağını ihmal etmemek gerekir. Bu nedenle zaman kaymasını elde etmemizi sağlayacak Denklem 2.9 iki kısımdan oluşmaktadır. Denklem 2.7 ile verilen ilk kısım ε_{hava}'ya bağlı olarak elektromanyetik dalganın toplam seyahat süresini

vermektedir. Elektromanyetik dalgalar vakumlu ortamda ışık hızında ilerler ve ε_{hava}= 1.0006 değeri vakum ortamının dielektrik sabiti (ε_{vakum}= 1) ile neredeyse aynı olduğu için gönderilen işaret ışık hızında gidiyor kabul edilebilir. Denklem 2.8 ile verilen ikinci kısma bakıldığında ise seyahat süresinin beton kalınlığına ve ortamın dielektrik sabiti olarak verilen ε_r değerine bağlı olduğu görülmektedir. ε_r değerini; betonun elektriksel geçirgenliği olan 4.94 - j0.69 değeri ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi korozyona uğrayan inşaat çeliklerinden kaynaklı oluşacak korozyon ürününün elektriksel geçirgenliği olan 8.42 - j1.03 değeri etkilemektedir. Beton ve korozyon ürünün elektriksel geçirgenlik değerlerine bakıldığında belirli bir fark gözükmektedir. Bu fark gönderilen işaretin varış süresinde bir gecikmeye neden olabilir ancak korozyon ürünleri "W" beton kalınlığında homojen olarak dağılmayacağından dolayı Şekil 2.5'te gösterilen korozyon derecelendirmesini yapabilmek için korozyonun, gönderilen işaretin varış süresini ne oranda etkileyeceğini hesaplayabilmek güç bir konu olarak gözükmektedir ve bu hesabı yapabilmek için kompleks, pahalı cihazlara ihtiyaç olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle 3.5 Veri İşleme başlığında anlatıldığı gibi cevap işareti, oluşturulacak algoritmada genlik değişimler, faz kayması, frekans kayması ve işaretteki şekil bozuklukları açısından incelenir. Gelecek senaryoda ise makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak hedefte mevcut korozyon oranı hakkında bilgi sahibi olunması planlanmaktadır.



Şekil 2.5. Zamana bağlı korozyon derecesi

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{2.6}$$

$$\tau_{hava} = \frac{2R}{c/\sqrt{\varepsilon_{hava}}} = \frac{2R}{c} \tag{2.7}$$

$$\tau_r = \frac{2W}{c/\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.8}$$

$$\tau = \tau_{hava} + \tau_r \tag{2.9}$$

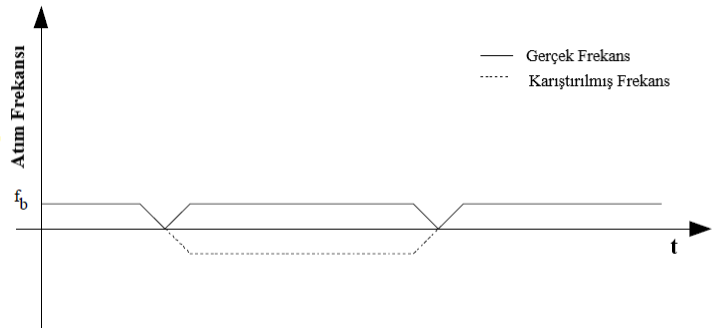
τ : Gecikme süresi, R: Mesafe, c: Işık Hızı

Oluşturulan tahribatsız muayene cihazına ait RF devresinde bulunan karıştırıcı adlı bir eleman sayesinde iletilen işaret ve yankı işareti birleştirilir ve ardından karıştırıcı çıkışının yüksek frekans terimi filtrelenir. Bu işlem sonucunda, matematiksel olarak Denklem 2.10'da gösterilen atım frekansı (f_b) olarak da bilinen ve düşük frekanslı bir bileşen olan bir ara frekans elde edilmiş olur (Jankiraman,2018).

$$f_b = f_b = \tau . m_f = (\frac{2R}{c} + \frac{2W}{c/\sqrt{\varepsilon_r}}) . m_f \quad (2.10)$$

m_f : İletilen işaretin eğimi

FMSD radarlarda gönderim işaretinin modüle edilebiliyor olduğundan daha önce bahsetmiştik. Bu modülasyon, üçgen dalga, sinüzoidal dalga, kare dalga gibi şekillerde yapılabilir (Wolff). Eğer bu modülasyon Şekil 2.3'te gözüktüğü gibi bir üçgen dalga modülasyonu olursa karıştırıcı çıkışında yüksek frekans terimlerinin filtrelenmesinden sonra elde edilecek atım frekansı Şekil 2.6'daki gibi olacaktır.



Şekil 2.6. Atım frekansı (Kurt, 2007)

Şekil 2.6'da gözüktüğü gibi atım frekansı, dönüş bölgeleri haricinde sabit ilerlemektedir. Eğer frekans f_m oranında modüle edilir ve frekans sapması Δf olarak alınırsa, dönüş bölgeleri dışında atım frekansı (f_b) için gereken iletilen işaret eğimi (m_f) Denklem 2.11'deki gibi elde edilir.

$$m_f = \frac{\Delta f}{1/2f_m} = 2f_m \Delta f \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'un denklem 2.10 içerisinde kullanılması ile atım frekansı Denklem 2.12'deki haliyle yeniden yazılır.

$$f_b = (\frac{2R}{c} + \frac{2W}{c/\sqrt{\varepsilon_r}}).2f_m \Delta f \quad (2.12)$$

Denklem 2.11'den anlaşıldığı gibi atım frekansı hedef ve radar arasındaki menzile bağlıdır (Jankiraman, 2018; Kurt, 2007).

Karıştırıcı çıkışında elde edilen düşük frekans bileşenli atım frekansı anlatıldığı üzere çıkış işareti ile giriş işareti arasında kalan toplam uzunluğa karşılık düşen faz gecikmesini ifade eden bir büyüklüktür. Bu büyüklük, Denklem 2.13'te gösterildiği üzere bir kosinüs işaretinden oluşmaktadır. Kosinüs işareti olduğu dikkate alındığında negatif kısımlarına karşılık düşen bir değer üretilemediğinden sıfır olacaktır. Bu işaretin, Şekil 2.7'de verilen blok şemasında belirtilmiş mikrodenetleyici girişi olan analog-sayısal dönüştürücü (ADC) ile işlenebilir sayısal bir işarete dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Mikroişlemci ve analog sayısal dönüştürücüde yürütülen işlemler sonucunda elde edilecek sayısal işaret ile bu işaretin bağlı olduğu uzunluk

değişkeni arasında anlamlı bir ilişki kurabilmek için bir düzeltme doğrulama matrisinin (DDM) elde edilmesi gerekmektedir.

$$Cos(\omega t) * Cos(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}.l) = A'Cos(2\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}.l) + B'Cos(\frac{2\pi}{\lambda}.l) \quad (2.13)$$

Bu ilişkiyi daha açıklayıcı bir şekilde ele almak için denetimli faz kaydırıcı kullanılan bir senaryo üzerinden ilerleyelim. Beklenildiği üzere ADC girişi ile yüksek frekansa sahip bileşenler okunamayacak ve düşük frekansa sahip bileşenler okunacaktır. Düşük frekansa sahip bileşenler ise Denklem 2.13'te $B'Cos(\frac{2\pi}{\lambda}.l)$ belirtilmiştir. Bu bileşen denetimli faz kaydırıcı kullanılan senaryo için ise Denklem 2.14 ile okunan değer (O.D.) olarak gösterilmektedir. Okunan değer, mesafeye bağlı meydana gelen faz kayması ile detaylandırıldığında 2.15 denklemi elde edilmektedir. Burada $2c\Delta t$ ifadesi gidiş-geliş mesafesine karşılık gelir. Gönderilen ve alınan işaretler arasındaki zaman farkı ise 2.17 ile açıklanmaktadır. Bu durumda okunan değerdeki faz, genlik ve zaman farkına bağlı olarak korozyona uğrama hakkında yorum yapmak mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

$$O.D. = K.\cos(\Delta\delta + \not\exists) \quad (2.14)$$

$$\text{O.D.} = \text{K.}\cos(\frac{2\pi f}{V_P}.(2c\Delta t)) \quad (2.15)$$

$$\frac{2\pi f}{V_P}.(2c\Delta t) = \cos^{-1}\frac{O.D.}{K} \quad (2.16)$$

$$\Delta t = \frac{V_P}{4\pi f c}.\cos^{-1}\frac{O.D.}{K} = \frac{1}{4\pi f\sqrt{\varepsilon_r}}\cos^{-1}\frac{O.D.}{K} \quad (2.17)$$

(O.D.: Okunan Değer, ∄: Denetimli Faz Kaydırıcı)

Denklem 2.13'n sağ tarafında kalan $B'Cos(\frac{2\pi}{\lambda}.l)$ ifadesinin büyüklüğünün Şekil 2.7'de mavi ve kırmızı ile gösterilen okların oluşturduğu toplam yol (l) ile dalga boyunu etkileyen ortam elektriksel geçirgenliğine bağlı olduğunu ($\lambda=c\sqrt{\varepsilon r}$) hatırlamak gerekir. Bu nedenle, değişkenleri kontrol altında tutabilmek ve farklı senaryolarda alınacak ölçümleri anlamlı hale getirebilmek için referans ölçümler alınmalı ve buna bağlı bir DDM çıkartılmalıdır. Bunun için mükemmel iletken ya da referans hedef malzeme ve belirli uzunlukta bir çift eş eksenli kablo kullanılarak ideal koşullarda elde edilen referans ölçümler alınması gerekmektedir.

Referans ölçümler ile uzunluk arasında bir ilişki kurularak DDM elde edilir. DDM kullanılarak mikroişlemci tarafından üretilen işaret matematiksel olarak ispatlanmış ideal koşullarda elde edilen referans ölçümlerine indirgenmiş olacaktır. DDM gerçekte bir ağrılık fonksiyonunu ifade etmektedir. Buna göre DDM ile anlamlandırılmış değerin ortaya çıkartılması Denklem 2.18 ile ifade edilir. Ölçüm alınan her bir adım için DDM uygulanacağı için ilgili denklem bir matris işlemidir. Denklemde bulunan tüm matris elemanlarının boyu seçilen çalışma frekans aralığındaki toplam adım sayısına eşittir. Örneğin, 2.4 GHZ – 2.6 GHz aralığında 1 MHz adımlar ile hareket ediliyorsa, eleman sayısı 200 MHz/1MHz +1 = 201 olacaktır.

[Anlamlandırışmış Değer] = [DDM]. [Okunan Değer] (2.18)

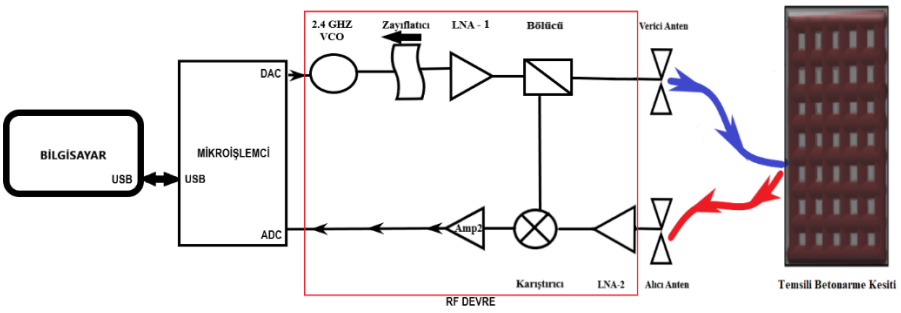
2.5. RF Devre Yapısı

YNR'de kullanılan elektromanyetik dalgaların frekansı tipik olarak 10 MHz ile 2,6 GHz arasındadır. Frekans seçimi hedefin derinliğine (sızma/penetrasyon derinliği) ve gereken çözünürlüğe bağlıdır. YNR sistemi, araştırmanın ihtiyaçlarına uyacak şekilde farklı frekanslarda çalışacak şekilde ayarlanabilir. Burada, kolon içi inşaat çeliği ve betonda korozyona bağlı indüklenecek akım miktarının tespitini yapabilmek adına YNR sisteminin çalışma frekans aralığını doğru tayin etmek gerekmektedir. Düşük frekans aralığında (200-400 MHz) çalışan radarlar daha derin noktalara nüfuz eder ve jeolojik katmanlar, madenler gibi daha büyük ölçekli yapıları görebilir. Ancak sızma derinliği artarken çözünürlük oranı düşeceğinden, küçük ve dar yapılı nesneleri fark edemeyecektir. Düşük frekansların aksine yüksek frekans aralığında çalışan radarlarda ise durum tam tersine olacaktır. Yüksek frekanslarda sızma derinliğinin düşüp, çözünürlüğün yükselmesi ile ufak çaplarda bulunan inşaat demiri gibi yapılar fark edilir olacaktır (Karbhari ve Lee, 2011; Karbhari, 2013; Harmon, 2020).

TBDY2018 uyarınca, klasik bir kolunun kalınlığı en az 30 cm olacak şekilde yapılmaktadır. Bu kalınlık dikkate alındığında, yüksek çözünürlüklü bir YNR sisteminin iyi sonuçlar vereceği anlaşılmaktadır. İlgili literatür taraması ile beton yapı bileşenleri için 1000-2500 MHz frekans aralığında çalışan yer radarlarının birkaç santimetre ila 1 metre aralığında araştırmalar için kullanıldığı görülmektedir (Karbhari, 2013). Betonarme yapı kolonlarında inşaat çeliğinin, sıva ve boya kalınlığına bağlı olarak yüzeyin 2- 3 cm altında olduğu ve çaplarının 8 mm'ye kadar düşebildiği bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında, yapılacak tahribatsız muayene sisteminin daha uygun fiyatlı olabilmesi için literatür taraması sonucu elde edilen frekans aralığı, inşaat çeliğinin yapı içerisindeki derinliği ve kalınlığı dikkate alınarak sistemin çalışma frekans aralığı 2300- 2600 MHz aralığında belirlenmiştir.

İlgili çalışma ile hayata geçirilen tahribatsız muayene sisteminin çalışma prensibi olan FMSD yönteminin çalışması için tasarlanan ve tipik bir FMSD radar yapısı olan RF devresini de gösteren YNR sistemine ait blok diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmektedir (Başarslan ve Yaldız 2017; Pramudita vd. 2018). Bu RF devresi, gerilim kontrollü sinyal üretici (VCO), zayıflatıcı, düşük gürültü yükselteci (LNA), bölücü, karıştırıcı ve bir yükselteçten oluşur. RF devre tasarımı yapılırken devre elamanlarının hangi amaçlarla seçildiği önem teşkil etmektedir.

Öncelikle, istenen frekans aralığının üretilebilmesi için VCO gerilim girdi değerleri göz önünde tutularak, bilgisayardan karta gönderilen gerilim bilgileri dijital- analog dönüştürücü (DAC) vasıtasıyla, belirli bir eğim ve periyot ile rampa işaret şeklinde, girdi olarak VCO elemanına iletilir ve çalışma frekans aralığında istenen gönderim işaretinin oluşturulması sağlanır. Gönderilen işaretin iki farkı hat üzerinde ilerlemesine olanak sağlayan bölücü elemanından kaynaklanabilecek yansımaların ve empedans uyumsuzluğu nedeniyle geri dönebilecek işaretlerin bastırılması için zayıflatıcı isimli eleman kullanılmıştır. Zayıflatıcıdan çıkan işaretin üzerindeki gürültünün azaltılması ve işaret gücünün arttırılması için gönderilen işaret LNA elemanından geçtikten sonra bölücü isimli elemana ulaşır. Bölücüden çıkan bir hat doğrudan verici antene giderken ikinci hat ise karıştırıcı adı verilen elemana gider. Karıştırıcı elamanına, bölücü ile gelen gönderilen işaret ve alıcı anten ile alınarak LNA ile güçlendirilen cevap işareti çarpılarak atım frekansı elde edilir. Atım frekansı ise işarette oluşacak devre kaybını engellemek için bir yükselteçten geçerek analog- dijital dönüştürücü (ADC) üzerinden karta ve oradan bilgisayara alınır. Atım frekansı ile gönderilen işaretin hedef ile karşılaşması sonucu değişimi incelenir ve kolon hakkında bilgiler 3.5 Veri İşleme başlığında anlatılan işlemler yapılarak korozyon cevapları aranır.



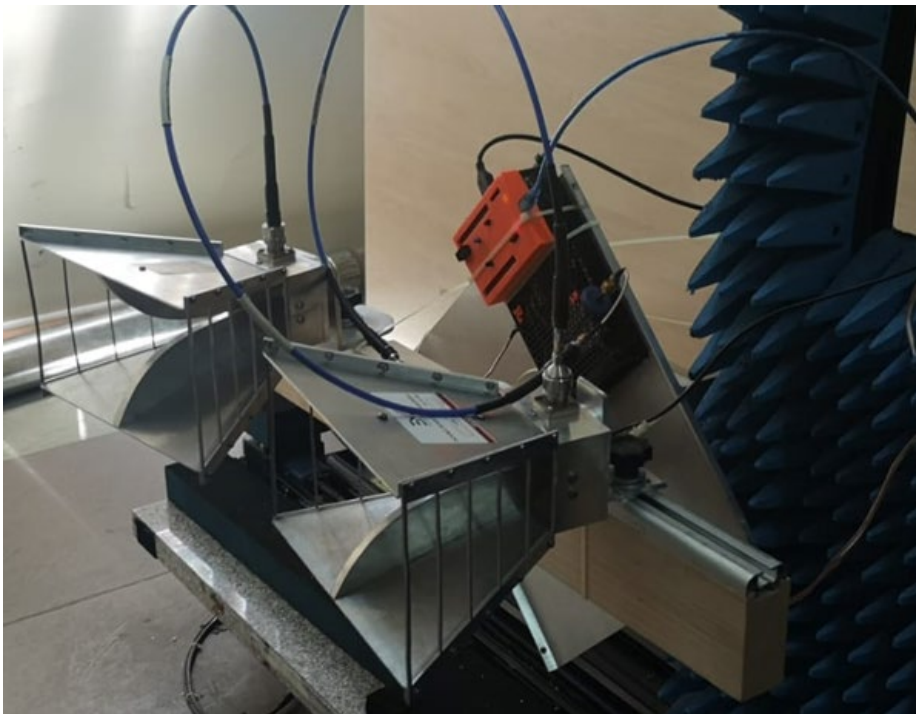
Şekil 2.7. FMSD radar blok şeması

2.6. Kullanılan Anten

Antenler, elektromanyetik dalgaları iletmek ve almak için kullanılan cihazlardır. Modern iletişim sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdırlar ve radyo ve televizyon yayıncılığı, kablosuz iletişim, radar ve uydu iletişimi gibi çeşitli uygulamalara sahiptirler.

Ele aldığımız problemde beton içerisindeki inşaat demirleri birbirine yakın konumlarda durmaktalardır. Bu inşaat demirlerini birbirlerinden ayırmak için kullanılacak olan antenin açısal çözünürlüğünün yüksek olması gerekir. Açısal çözünürlük ya da diğer adıyla azimut çözünürlüğü; antenle aralarındaki menzilleri aynı olan iki farklı hedefin anten tarafından ayırt edilebilmesi ve iki ayrı işaret olarak görüntülenebilmesi için aralarında bulunması gereken en küçük yatay açıya azimut açısı denir. Azimut açısına ise o radarın açısal çözünürlük yeteneği ya da azimut çözünürlüğü denir. Antenler ile ilgili literatür taraması yapıldığında, LPDA anten olarak bilinen log-periyodik dipol dizi anten dikkat çekmektedir. Ölçümlerde LPDA anten kullanılmadığı için LPDA anten ile ilgili detaylı bilgi Ek-2'de verilmiştir.

Ölçümler yakın alan laboratuvarında proje ekibi tarafından hazırlanmış bir düzenek ile Şekil 2.8'de gösterilen iki adet özel yapım eş boynuz antenler kullanılarak alınmıştır. Şu an ele alınan senaryoda tekil durumdaki metallerde korozyonun varlığının tespiti amaçlandığı için açısal çözünürlük ihtiyacı bulunmamaktadır. Ancak, projenin gelecek senaryolarında saha koşullarında ölçümler alınabilmesi için açısal çözünürlük ve polarizasyon konuları tekrar ele alınmalıdır.



Şekil 2.8: Kullanılan anten

Boynuz anten, mikrodalga ve milimetre dalga sistemleri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir anten türüdür. Boynuz antenler, antenin kazancını artırmaya yardımcı olan genişletilmiş bir şekle sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Boynuz antenlerin temel çalışma prensibi, elektromanyetik dalgaların iki ortam arasında dönüştürülmesine dayanır. Bir elektromanyetik dalga yüksek empedanslı bir ortamdan düşük empedanslı bir ortama geçtiğinde, yansımaya uğrar ve enerjinin bir kısmı kaynağa geri iletilir. Yansıyan enerji orijinal dalga ile etkileşime girerek iletilen sinyalin gücünde bir azalmaya neden olur. Bir boynuz antende, genişletilmiş şekil verici ve alıcı ortamın empedansına uyacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan boynuz antenler özel yapım olduğu için ortam ihtiyaçları göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Bu, elektromanyetik dalganın minimum düzeyde yansımasını sağlayarak sinyalin verimli bir şekilde iletilmesini ve alınmasını sağlar.

Boynuz antenlerin tasarımı, istenen çalışma frekansına, bant genişliğine ve kazanca dayanır. Bir boynuz antenin tasarım parametreleri arasında parlama açısı, uzunluk ve açıklık boyutu yer alır. Flare açısı antenin huzme genişliğini belirlerken, boynuzun uzunluğu çalışma frekansını belirler. Boynuz antenin açıklık boyutu ise antenin kazancını belirler.

Boynuz antenler, parlamanın şekline göre iki tipte sınıflandırılabilir: konik ve piramidal. Konik boynuzlar dairesel bir açıklığa ve konik bir parlamaya sahipken, piramidal boynuzlar kare veya dikdörtgen bir açıklığa ve piramidal bir parlamaya sahiptir. Boynuz şeklinin seçimi uygulamaya ve istenen radyasyon modeline bağlıdır.

Ele alınan senaryoda korozyon tespitinde kullanılan boynuz antenler ile hedef arasındaki mesafe korozyon ölçümünde önemli bir konudur. Genel olarak, anten ile hedef malzeme arasındaki mesafe, sinyal gücünün doğru ölçümler için yeterince yüksek olmasını sağlayacak kadar küçük olmalıdır. Bununla birlikte, mesafe çok küçük seçilirse, ölçümlerde yakın alan etkilerinden dolayı hatalı sonuçlar elde edilebilir. Genel olarak, boynuz anten ile hedef malzeme arasında önerilen mesafe 0,5 ile 1 metre arasındadır. Bu mesafe radarın uzak alan bölgesinde çalışmasını sağlar ve bu da yakın alan etkilerini azaltmaya yardımcı olur.

Boynuz antenlerin açıları da korozyon ölçümünde önemli bir rol oynar. Antenin açısı, gönderilen ve alınan sinyallerin yönünü etkiler ve radarın kapsama alanını belirler. Radarın kapsama alanı, radarın korozyonu tespit edebildiği bölgedir. Genel olarak boynuz antenler, gönderilen ve alınan sinyallerin odaklanmasına yardımcı olan dar bir huzme genişliğine sahip olacak şekilde tasarlanır. Antenin huzme genişliği, boynuzun parlama açısına bağlıdır. Genel olarak, antenin dar bir huzme genişliğine sahip olmasını sağlamak için boynuzun genişleme açısı 10 ila 30 derece arasında olmalıdır.

İletken bir malzeme üzerindeki korozyonu ölçmek için boynuz antenler, iletilen sinyalin malzemeye nüfuz etmesine ve yansıyan sinyalin alınmasına izin verecek bir açıyla yerleştirilmelidir. Antenin açısı, maksimum sinyal gücünün elde edilmesini sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Antenin açısı, anteni eğerek veya döndürerek ayarlanabilir.

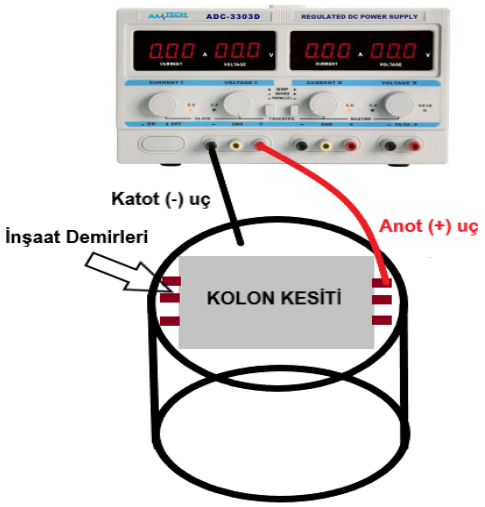
2.7. Hızlandırılmış Korozyon Tekniği (HKT)

Korozyon tespiti için kullanılan cihazların kabul edilebilir hata payı barındırması, pratik ve uygun fiyatlı olmalarının önemine ek, korozyona uğratma teknikleri de korozyon muayenesi için kritik bir öneme sahiptir. YNR ile yapılacak betonarme yapı muayenelerinde arka arkaya inşaat çeliklerin gelmesi ve sarılma noktası olarak geçen etriye bağlantı noktalarında oluşabilecek yanlış ölçümler açık birer problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, burada önemli olan YNR ile alınacak ölçümlerde gerçek ortam sonuçlarına ulaşabilmek için inşaat çeliklerinin beton içerisine gömülü konumdayken hızlandırılmış korozyon tekniğinin uygulanmasıdır çünkü korozyon sonucu oluşacak korozyon ürünleri nedeniyle betonda da birtakım değişiklikler meydana gelecektir. (Zaki vd. 2018; Hasan ve Yazdani 2016). Aynı zamanda sarılma noktalarında oluşabilecek problemler (temiz etriye paslı çelik gibi) ve arka arkaya inşaat çeliklerinden (Paslı-Sağlam ya da Sağlam-Paslı gibi) kaynaklı oluşabilecek problemleri de çözüme kavuşturabilmek adına inşaat çelikleri beton içerisindeyken paslandırılmalıdır.

Twumasi ve Yu (2017) çalışması incelendiğinde inşaat çeliği korozyon araştırması için inşaat çeliklerinin betona gömülü olmadan sadece elektrolit bir çözelti içerisinde paslandırılması ve ardından paslandırılan malzemelerin vektör network analizöre (VNA) bağlı bir sonda ile elektriksel geçirgenliklerinin ölçülmesi yoluyla korozyon derecelerinin araştırıldığı görülmektedir. Hasan ve Yazdani, (2016) çalışmasında ise inşaat çeliği paslandırma işlemleri için betonun dielektrik özelliklerini dikkate alınarak hazırlanan bir çözelti kullanılmış ve korozyona uğratılan inşaat çelikleri bir yeraltı görüntüleme radarı ile ölçülmüştür. Belirtilen çalışmalarda korozyona uğratma işleminin beton içerisindeyken yapılmaması, inşaat çeliklerinin bağlantı noktalarının paslandırma işleminde göz ardı edilmesi ve ölçümler için inşaat çeliklerine bağlı bir ölçüm cihazının ya da pahalı bir yeraltı görüntüleme radarının kullanılması nedenlerinden dolayı inşa edilmiş yapılarda korozyon tespiti için etkili birer yöntem olmadıkları gözlemlenmektedir. Betonarme yapılarda korozyona uğrama olayının araştırılması için inşaat çelikleri beton içerisindeyken paslandırılması bakımından Hong vd. (2012) ile Karunanayake vd. (2014) çalışmaları güzel birer örnek teşkil etmektedir. Ancak korozyona uğratılan beton kesitlerinin muayeneleri için kullanılan yeraltı görüntüleme sistemleri nedeniyle pahalı muayene yöntemleri içerdikleri görülmektedir. Kullanılan muayene sistemi açısından bakıldığında FMSD yöntemine dayalı ucuz ve pratik YNR yapımları mevcuttur ancak genellikle betonarme yapılarda inşaat çeliğini yerinin tespiti için kullanılmış ve korozyon muayenesi için çalışmalar ise hiç yapılmamış ya da yeterli gözükmemektedir (Wibowo ve Zülkifli, 2019; Ferrara vd.,2016).

Belirtildiği üzere gerçek hayat ölçümlerinin yapılabilmesi için inşaat çeliklerinin beton bloklar içerisindeyken kontrollü bir şekilde korozyona uğramış olmaları gerekmektedir. Korozyona uğrama süreçleri için uzun zamanlar beklenemeyeceğinden dolayı bir hızlandırılmış korozyon tekniğine ihtiyaç vardır. Normal sofra tuzu (NaCl) ve saf suyun %5 oranında karıştırılmasıyla yapılacak tuzlu su çözeltisi ve bir DC gerilim kaynağı kullanarak hızlandırılmış korozyon tekniği (HKT) oluşturulacaktır. Bu teknik sayesinde kontrollü akım verilmesi suretiyle inşaat çelikleri istenen oranlarda paslandırılacaktır.

İlgili paslandırma işlemini yapabilmek için tuzlu su çözeltisi ve DC güç kaynağından oluşan HKT düzeneği Şekil 2.10'da görüldüğü gibi betonun içine koyulabileceği bir yalıtkan tank kullanarak hazırlanır. Düzenekte DC güç kaynağının artı (+) ucu anot olarak inşaat çeliğine ve eksi (-) ucu ise çözeltinin içine tamamen batırılacak bakır bir levhaya katot olarak bağlanır (Zaki vd., 2018) ve güç verilerek korozyona uğratma işlemine başlanmış olunur.



Şekil 2.9. HKT düzeneği

2.8. Sayısal İşaret İşleme

Sayısal işaret işleme, radar ile elde edilen cevap işaretleri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda sinyalleri işlemek, analiz etmek ve yorumlamak için önemli bir araçtır. Sayısal işaret işleme, sayısal teknikler kullanılarak sinyallerin manipüle edilmesi ve analiz edilmesidir. Sayısal işaret işlemenin amacı, bir sinyalden frekans, faz veya genlik gibi yararlı bilgileri çıkarmak ve gürültüyü veya istenmeyen bileşenleri kaldırarak sinyalin kalitesini artırmaktır. Fourier dönüşümü, pencereleme, eşleştirilmiş filtremeleme ve ayrık dalgacık dönüşümü dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan birkaç teknik vardır.

Fourier Dönüşümü: Bir işareti frekans bileşenlerine ayırmak için kullanılan matematiksel bir algoritmadır. FMSD radarda, Fourier Dönüşümünü, hedefin hızını ve yönünü belirlemek için kullanılabilecek Doppler etkisinin neden olduğu frekans kaymasını çıkarmak için kullanabilir.

Pencereleme: Fourier analizinde spektral sızıntıyı azaltmak için kullanılan bir tekniktir. Spektral sızıntı, Fourier Dönüşümünün sınırlı çözünürlüğü nedeniyle bir sinyalin frekans içeriği

bitişik frekans kutularına "sızdığında" meydana gelir. Pencereleme, Fourier Dönüşümünü uygulamadan önce sinyalin kenarlarını daraltarak bu etkiyi azaltır.

Eşleştirilmiş Filtreleme: Bir radar sisteminin işaret-gürültü oranını iyileştirmek için kullanılan bir tekniktir. Gönderilen ve alınan işaretler arasındaki korelasyonu en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmış bir referans işareti ile alınan işaretin konvolüsyonu ile çalışır.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü: Bir sinyali farklı frekans alt bantlarına ayrıştırmak için kullanılan bir sinyal işleme tekniğidir. Burada her alt bant, sinyaldeki farklı bir frekans içeriği aralığını temsil eder. Veri sıkıştırma, gürültü azaltma, özellik çıkarma dahil olmak üzere sinyal işlemede birçok pratik uygulamaya sahip güçlü bir tekniktir. DWT için kullanılabilecek, her biri farklı uygulamalar için uygun hale getiren farklı özelliklere sahip birçok farklı dalgacık ailesi vardır. Bazı popüler dalgacık aileleri Haar, Daubechies, Coiflets ve Symlets'i içerir.

Bu dalgacık aileleri ve dalgacık tiplerinden hangisinin ele alınan sinyal için mantıklı olduğuna karar verebilmek önemli bir konudur. Bunun için uygulanabilecek bir yaklaşım, bir dizi eğitim verisi üzerinde farklı dalgacık ailelerinin ve dalgacık türlerinin performansını değerlendirmek için çapraz doğrulama kullanmaktır. Bu, verilerimiz bir eğitim setine ve bir doğrulama setine bölmeyi ve ardından ortalama kare hata veya sinyal-gürültü oranı gibi seçilen bir performans ölçütünü kullanarak eğitim setindeki farklı dalgacıkların performansını karşılaştırmayı içermektedir. Eğitim setinde en iyi performans gösteren dalgacık ailesini ve dalgacık türünü belirledikten sonra, bunları test verilerinizi analiz etmek için kullanabilirsiniz. Başka bir yaklaşım ise sinyalinizin özelliklerine dayalı sezgisel yöntemler kullanmaktır. Örneğin, sinyaliniz keskin geçişler veya süreksizlikler içeriyorsa, Daubechies dalgacık ailesi gibi iyi zaman-frekans yerelleştirme özelliklerine sahip bir dalgacık ailesi kullanmak isteyebilirsiniz. Sinyaliniz salınımlı bileşenler içeriyorsa, Morlet dalgacık ailesi gibi iyi frekans çözünürlüğüne sahip bir dalgacık ailesi kullanmak isteyebilirsiniz.

Anlatıldığı üzere sayısal işarete işleme, radar sistemlerinde sinyalleri analiz etmek için önemli bir araçtır. Radar uygulamalarında sayısal işaret işleme, metal yapılar da dahil olmak üzere nesnelerden yansıyan sinyallerden bilgi çıkarmak için kullanılır. Bu çalışmada ele alınan metal malzemeden korozyon tespiti ile ilgili bilgi çıkartılması da buna dahildir. Korozyon, nem, tuz ve kimyasallar gibi çevresel faktörler nedeniyle metal yapıların kademeli olarak bozulmasıdır. Korozyon, metal yüzeyin yansıma özelliklerini değiştirebileceğinden metal yapılardan elde edilen radar sinyallerinin kalitesini etkileyebilir. Bu durum, korozyona uğramış ve temiz metalden elde edilen cevap işaretlerinin özelliklerinde farklılıklara yol açabilir. Korozyon metal yapılarda yaygın bir sorundur ve bu yapılardan elde edilen işaretlerin kalitesini etkileyebilir.

HKT işlemi ile korozyona uğratılma işlemi yapılmış kolon kesitlerinden, temiz inşaat çeliği bulunan kolon kesitinden ve inşaat çeliği bulunmayan kolon kesitinden ya da tekil durumdaki korozyona uğramış ve temiz metal malzemelerden, arka plan ölçümlerinden alınan cevap işaretlerinin optimizasyonu için öncelikle sayısal işaret işleme algoritması uygulanmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, çapraz-doğrulama yaklaşımı ile analiz yapılması seçilmiştir. Çapraz doğrulama yapmak ve farklı dalgacık ailelerinin ve türlerinin performansını değerlendirmek için “PyWavelets” kütüphanesinin kullanımı ile Python’da bir fonksiyon yazılmıştır. Bu fonksiyon ölçümler ile elde edilen cevap işareti verilerini bir eğitim seti ve bir doğrulama setine böler. Ardından performans ölçütü olarak ortalama karesel hatayı kullanarak

eğitim setindeki farklı dalgacık ailelerinin ve dalgacık türlerinin performansını değerlendirir. Daha sonra en iyi performans gösteren dalgacık ailesini ve türünü seçer ve bunları doğrulama setini analiz etmek için kullanır.

Çalışmanın bu bölümü ile sayısal işaret işleme tekniklerini kullanarak korozyona uğramış metal malzemeden ve temiz durumdaki metal malzemeden alınan FMSD Radar cevap işaretleri arasındaki farkların nasıl tespit edilebileceği araştırılmıştır. Sinyallerin genlik, faz farkı, frekans kayması, faz farkı bilgisinin kümeleme dağılımı gibi çeşitli özellikleri incelenmiştir. Sonuçlarımız, sayısal işaret işleme ile korozyona uğramış ve temiz metalden elde edilen sinyaller arasında ayrım yapılabildiğini ve tahribatsız muayene ile bakım-denetim uygulamaları için değerli bilgiler sağladığını göstermektedir.

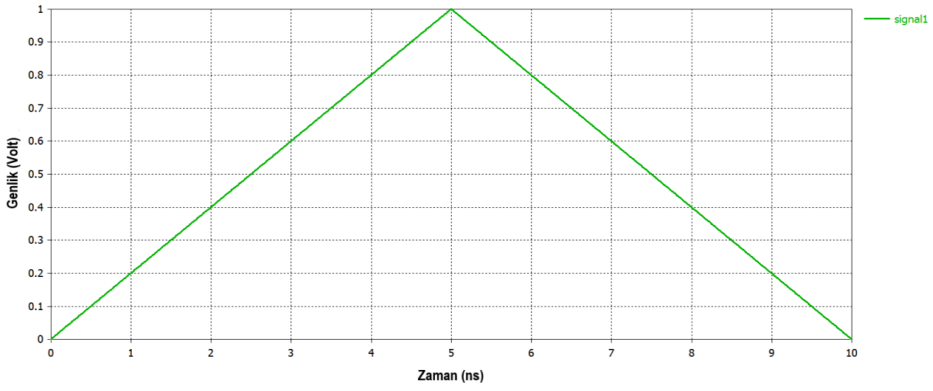
3. MATERYAL ve YÖNTEM

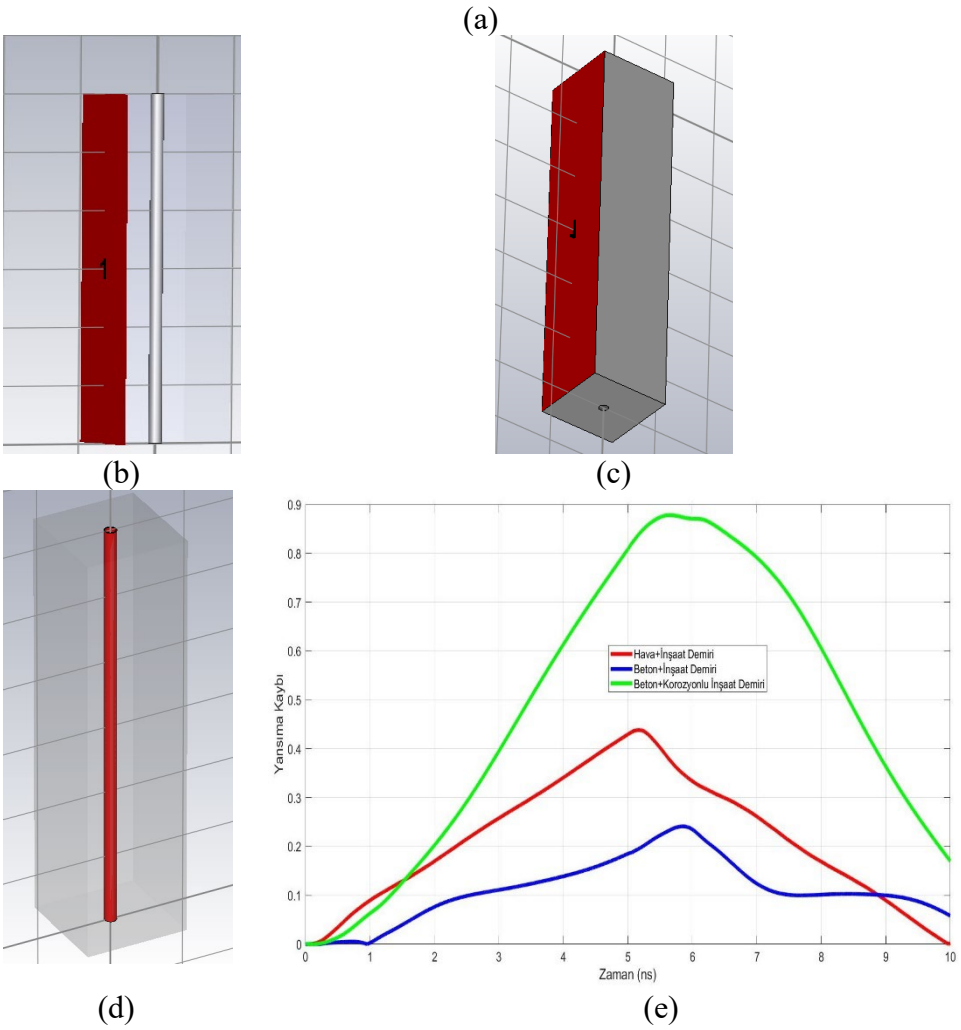
3.1. Benzetim Çalışması

İlgili projenin korozyon tespiti ve korozyon derecelendirilmesi açısından uygunluğunun saptanabilmesi için literatür taraması sonucunda elde edilen değerler kullanılarak evrensel bir benzetim ortamı olan CST Microwave Studio'da 3 farklı senaryo hazırlanmıştır ve senaryoların S11 değeri olarak bilinen yansıma kayıpları incelenmiştir. Bahsedilen senaryolara dair gösterimler Şekil 3.1'de verilmiştir.

İlk senaryo (Bakınız Şekil 3.1.b) olarak benzetim ortamında 30 cm uzunluğunda ve 8 mm çapındaki inşaat çeliğinin etrafına 3 cm kalınlığında bir hava ortamı oluşturuldu ve ardından eklenen port sayesinde +x yönünde hava ortamından inşaat çeliğine doğru Şekil 3.1.a'da gösterildiği gibi 10ns boyunca normalize edilmiş genliğe sahip bir üçgen dalga uyarı işareti olarak gönderildi. Bu sayede belirtilen inşaat çeliğinin yansıma kaybı elde edilmiştir. Şekil 3.1.c'de gösterilen ikinci senaryoda ise aynı çapta ve uzunluktaki inşaat çeliği, etrafında 3 cm kalınlığında beton olacak şekilde benzetim ortamında hazırlanan beton ortamın merkezine yerleştirildi. Ardından, beton ortamından inşaat çeliğine doğru, bir önceki senaryoda belirtildiği gibi uyarı işareti gönderilerek ilgi senaryoya ait yansıma kaybı elde edildi. Yine beton ortam içerisinde gerçekleştirilen üçüncü senaryoda ise inşaat çeliğinin çapı, yüzeyde oluşacak korozyon kaybı dikkate alınarak 8 mm'den 7 mm'ye düşürüldü ve inşaat çeliği etrafına Şekil 3.1.d'de gözüktüğü gibi korozyon ürünü dielektrik özelliklerine sahip 1 mm kalınlığında ve 30 cm boyunda bir korozyon ortamı oluşturuldu. Belirtildiği gibi üçüncü senaryo için inşaat çeliği etrafına korozyon ve beton ortamları oluşturulduktan sonra eklenen port ile +x yönünde sırasıyla beton ve korozyon ortamından geçerek inşaat çeliğine çarpıp geri yansıyan uyarı işareti sayesinde üçüncü senaryonun da yansıma kaybı elde edilmiş olunur.

Üç farklı senaryo kullanılarak frekansa bağlı desibel cinsinden elde edilen yansıma kayıpları, "time-gating" olarak bilinen zaman sınırlaması uygulanarak Şekil 3.1.e'de gözüktüğü gibi gönderilen uyarı işaretinin sahip olduğu maksimum 1 V genlik değerinin ne kadarının kaybedildiğini zamana bağlı gösteren bir grafik olarak yeniden elde edilmiştir. Şekil 3.1.e'ye bakıldığında yeşil grafik ile temsil edilen korozyona uğramış inşaat çeliğinden kaynaklı yansıma kaybının diğer senaryolardan büyük oranda ayrıştığı anlaşılmaktadır. Ancak mavi grafik ile temsil edilen temiz inşaat çeliğinin bulunduğu beton ortamdan alınan sonuç ve korozyona uğramış inşaat çeliğinden alınan sonuç dikkate alındığında aralarındaki varış süresi (zaman) farkının belirgin olmadığı gözükmekte ve buna ek olarak 2.2 Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) başlığında da bahsedildiği gibi gerçek hayat ölçümlerinde ölçülebilir bir fark elde edilip edilemeyeceği konusu bilinememektedir. Bundan dolayı elde edilecek cevap işaretleri 3.5 Veri İşleme başlığında incelenecektir.





Şekil 3.1. Benzetim sonuçları; **a)** Uyarı işareti; **b)** Hava ortamında temiz inşaat çeliği; **c)** Beton ortamında temiz inşaat çeliği; **d)** Beton ortamında korozyonlu inşaat çeliği; **e)** Benzetim sonuçları

3.2. FMSD RADAR Kurulumu

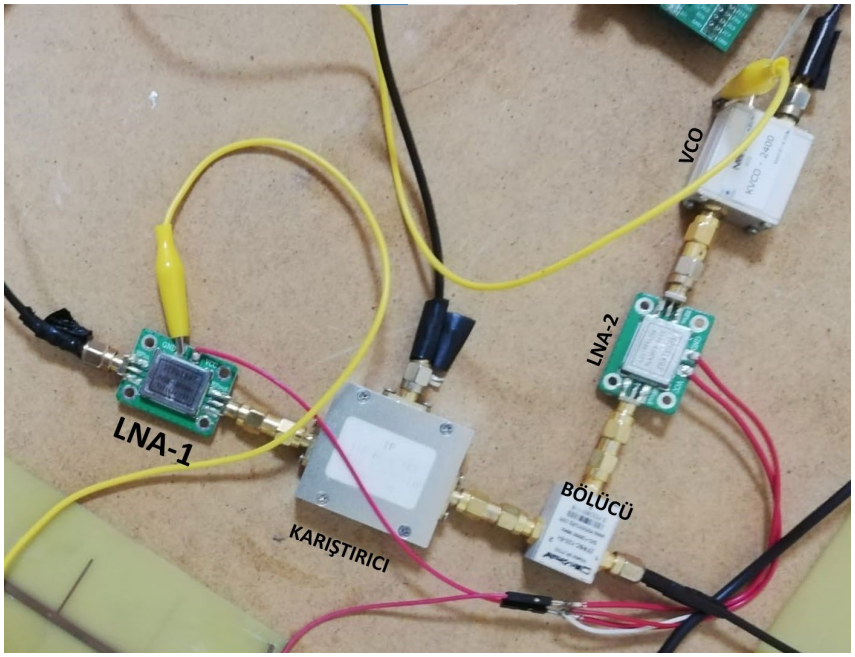
Bu bölümde, bu yüksek lisans çalışması kapsamında geliştirilen FMSD radar sisteminin elemanlarının montajı ele alınacaktır. Radar sistemi, çalışan bir sistem oluşturmak için dikkatle seçilen ve entegre edilen çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. FMSD Radara ait RF devre ve ölçümlerde kullanılan antenler ile ilgili ayrıntılı bilgiler 2.5. RF Devre ve 2.6. Anten bölümlerinde verilmiştir. Aşağıdaki bölümde bileşenlerin montajı daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

3.2.1 Sistem entegrasyonu

Bölüm 2.3'te RF Devre ile ilgili verilen bilgiler ve Şekil 2.7'de gösterilen devre blok şeması uyarınca FMSD Radar cihazının bir araya getirilerek kurulması işlemi gerçekleştirilerek veri toplama aşamasına geçilmiştir.

Cihazın bir araya getirilmesi için öncelikle gerekli malzemeler temin edilmiştir. Bu malzemeler 2.3 başlığında anlatıldığı üzere VCO, LNA, Bölücü, Karıştırıcı, Alıcı ve Verici

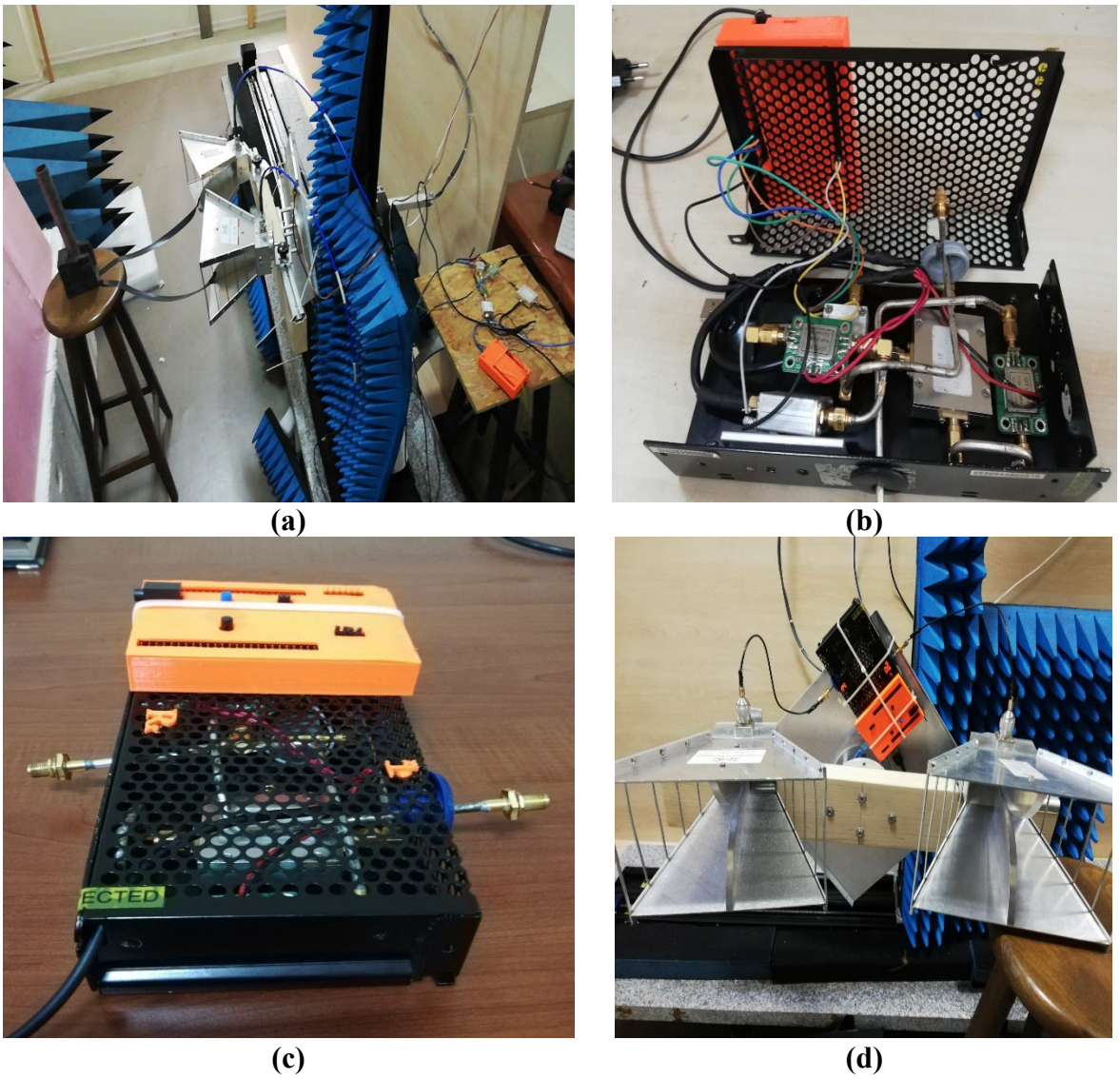
Antenler ve mikrodenetleyici karttır. Şekil 3.2'de verilen RF Devre fotoğrafında görüldüğü üzere belirtilen devre elemanlarına ait veri paylaşım sayfaları incelenerek bağlantı noktaları belirlenmiş ve bu doğrultuda bir araya getirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Cihaz kurulup test edildikten sonra Şekil 2.7'de gösterilmiş olan zayıflatıcı elemanına ihtiyaç bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle zayıflatıcı kullanılmamıştır. FMSD Radar cihazında mikrodenetleyici kart olarak STM32F4 Discovery geliştirme kartı seçilmiştir. Şekil 2.7'de de gösterildiği üzere bu mikrodenetleyici kart cihazın kullanıcı arayüzü ve RF devre arasındaki veri alışverişini kontrol etmektedir.



Şekil 3.2. RF devre gerçeklemesi

Tüm bileşenler bir araya getirildikten sonra, sistemin çalıştığından emin olmak için Şekil 3.3.a'da gösterildiği üzere çeşitli hedefler kullanılarak test edilmiştir. Bu testler için REM kaplı alandan alınan arka plan ölçümü, maksimum noktanın tespitini sağlayan düz metal levha ölçümü, uç-uca bağlı ölçüm, temiz demir silindir ölçümü ve korozyonlu demir silindir ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

RF Devre elemanlarının ısınmasını engellemek için Şekil 3.3.b'de gösterildiği üzere RF devre metal bir kutu içerisine yerleştirilmiştir. Mikrodenetleyici kart ile devre elemanları arasında oluşabilecek ısı ve elektromanyetik etkileşimi minimize edebilmek için mikrodenetleyici kart ayrı bir kutu içerisine yerleştirilmiştir. Bu kutu, Şekil 3.3'te gözükmekte olan turuncu renkli kutudur. 3-Boyutlu yazıcı kullanılarak STM32F4 Discovery geliştirme kartına özel olarak üretilmiştir. 3-Boyutlu yazıcı ile anten bağlantı noktalarının belirlenmesi için alıcı uç anlamında Rx ve iletim ucu anlamın Tx harfleri de basılarak kutu üzerine yerleştirilmiştir. Yapılan doğrulama ölçümleri ile sistemin doğru çalıştığı anlaşıldıktan sonra kutulama işlemi yapılarak Şekil 3.3.c'de gözüken son hali meydana gelmiştir. Montajı ve kutulanması biten FMSD radar sistemi, sistemin performansını etkileyebilecek herhangi bir mekanik titreşimi önlemek için Şekil 3.3.d'de görüldüğü üzere sabit bir platforma monte edilmiştir. Bu sabit platform aynı zamanda cihazın ısınmasını engellemesi için geniş alanlı bir metal olarak seçilmiştir.



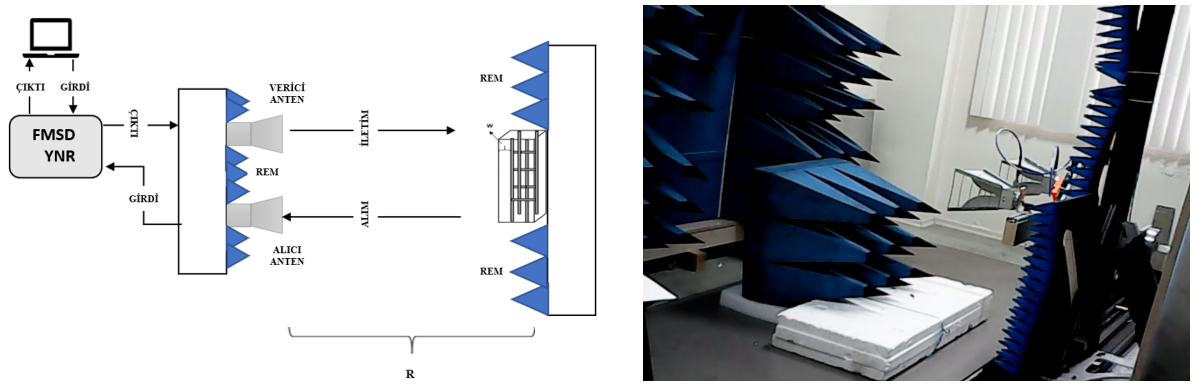
Şekil 3.3. FMSD radar süreçleri; **a)** Doğrulama ölçümleri; **b)** RF devre kutulanması; **c)** FMSD radar son hal; **d)** FMSD radar anten ve platform bağlantısı

Sonuç olarak, radar sisteminin montajı bu yüksek lisans tez projesinin geliştirilmesinde kritik bir adım olmuştur. STM32F4 Discovery kartının VCO ve ADC girişi için bir kontrolör olarak kullanılması ve DSP algoritması, hedef bilgilerinin işlenmesine ve görüntülenmesine olanak sağlamıştır. Bir sonraki bölümde radar sistemi ile alınacak ölçümler için kullanılan ölçüm düzeneği ve veri toplama anlatılacaktır.

3.3. Ölçüm Düzeneği ve Veri Toplama

Bu bölümde, bu yüksek lisans çalışması için veri toplamak amacıyla kullanılan ölçüm düzeneği ve veri toplama prosedürleri ele alınacaktır. Gerçekleştirilen FMSD Radar sistemi ile tek nokta ölçümleri ve tarama ölçümleri olmak üzere iki tür veri toplanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde her bir ölçüm türü için ölçüm kurulumu ve veri toplama süreci açıklanacaktır.

Şekil 3.4.a'da ölçüm sisteminin blok şeması gösterilmektedir. 1-18 Ghz frekans aralığında çalışan iki adet özel yapım boynuz anten, bistatik radar formunu oluşturan alıcı ve verici antenler olarak kullanılmaktadır. Antenlerin karşısında, ölçümü alınacak materyallerin duracağı yerde ise Radar emici materyal (REM) kaplı bir arka panel mevcuttur. Hedef, dış ortam etkisini indirgemek için emici materyallerin hemen önüne yerleştirilir. Antenler FMSD YNR cihazına alıcı ve verici antenler olarak bağlanır. Gerçekleştirilen kurulumun laboratuvar ortamı Şekil 3.4.b'de gösterilmiştir.

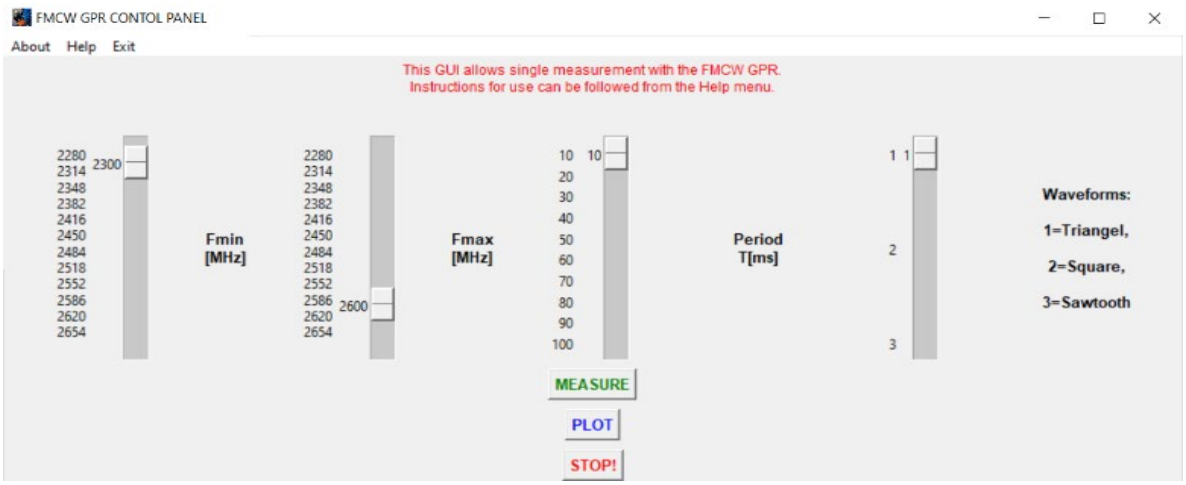


(a) **(b)**

Şekil 3.4. Ölçüm düzeneği; **a)** Ölçüm düzeneği blok şeması; **b)** Ölçüm düzeneği laboratuvar ortamı

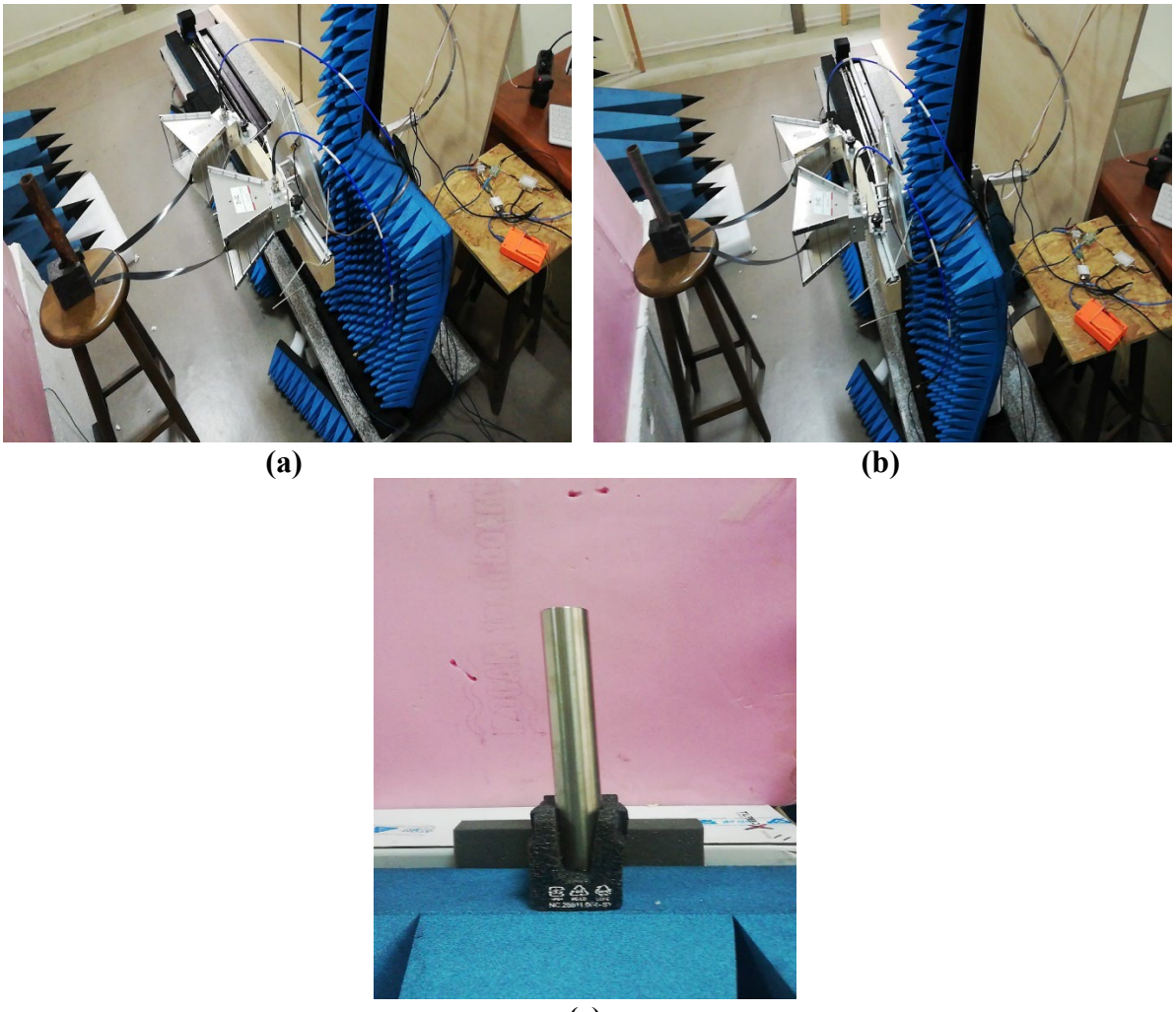
3.3.1. Tek nokta ölçümleri

Tek nokta ölçümleri, bir hedefin radar anteninden sabit bir mesafeye yerleştirilmesi ve tek bir frekans için radar verilerinin toplanmasıyla elde edilmiştir. Hedef, antenden 40 santimetre uzaklığa yerleştirilmiş ve radar verileri 2300- 2600 MHz frekans aralığı için toplanmıştır. Her ölçüm başına toplam 200 veri noktası elde edilmiştir. Şekil 3.5 ile gösterilen arayüz ile tek noktadan 200 verilik bir ölçüm alınmaktadır.



Şekil 3.5. Tek noktadan ölçüm arayüzü

Tek nokta ölçümlerini toplamak için Şekil 3.6'da gösterildiği üzere hedef, radar anteninden sabit bir uzaklıkta bulunan sabit bir platform üzerine yerleştirilmiştir. Hedef olarak yüksek seviyede korozyona uğramış, orta seviyede korozyona uğramış ve temiz durumdaki demir silindir malzemeler kullanılmıştır. Hedeften alınan cevap işaretleri düşük gürültülü bir amplifikatör (LNA) tarafından yükseltili ve karıştırıcıya alınır. Karıştırıcı içerisinde gönderilen işaret ve alınan cevap işareti çarpılarak atım frekansı elde edilir. Bu atım frekansına ait genlik bilgileri ise STM32F4 Discovery kartındaki bir analog-dijital dönüştürücü (ADC) tarafından örneklenerek kullanıcı arayüzüne iletilir. Elde edilen veriler ise daha sonra analiz edilmek için otomatik olarak bir Excel tablosuna kaydedilir. Tek nokta ölçümleri için veriler, hedef konumdaki maksimum sinyal genliği, frekans ve faz kayması açısından bir algoritma kullanılarak işlenir.

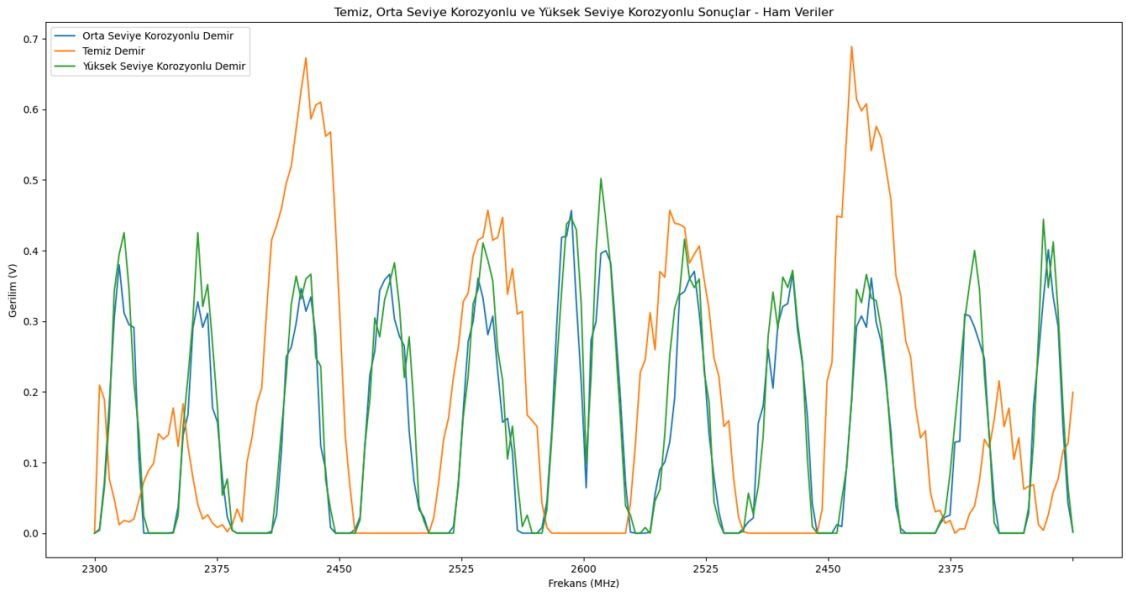


(a) **(b)**

(c)

Şekil 3.6. Laboratuvar ölçümleri; **a)** Yüksek seviye korozyonlu demir silindir ölçümü; **b)** Orta seviye temiz demir silindir ölçümü; **c)** Temiz demir silindir ölçümü

Şekil 3.7'te temiz, orta seviye korozyonlu ve yüksek seviye korozyonlu metallerden alınmış tek nokta ölçüm sonuçları verilmiştir. Aynı mesafede bulunan ve birebir aynı büyüklüklere sahip eş demir malzemelerden alınan ölçüm sonuçlarına bakıldığında korozyona uğramış metal malzemelerin temiz durumdaki metal malzemeye oranla genlik miktarı bastırılma olduğu görülmektedir.

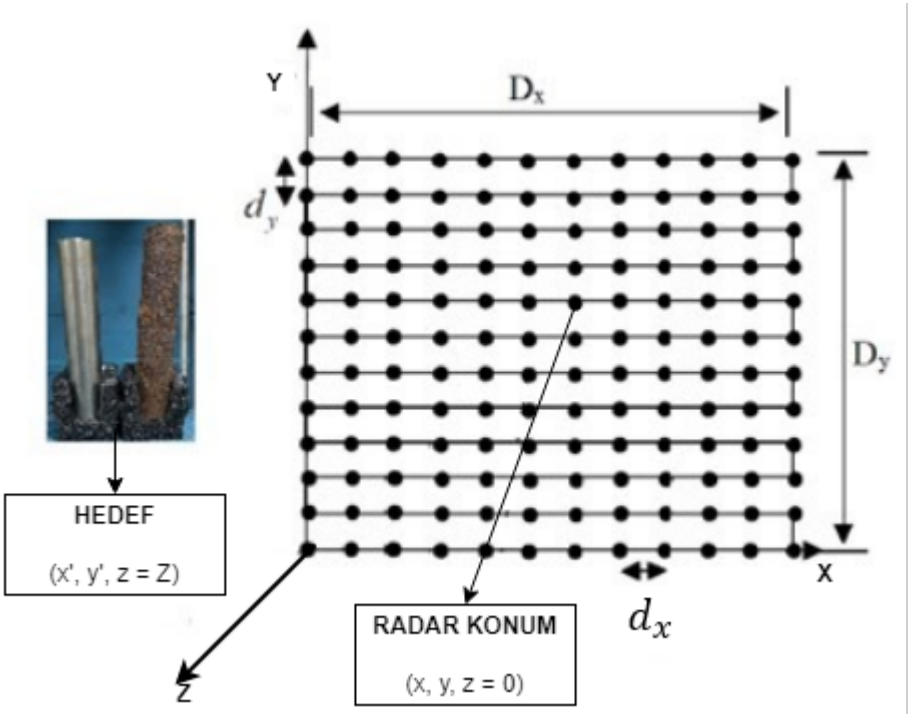


Şekil 3.7. Tek nokta ölçüm sonucu

3.3.2. Tarama ölçümleri

Hedef alanın daha kapsamlı bir görüntüsünü elde etmek için taramalı ölçüm tekniği de kullanılmıştır. Bu ölçümlerde, radar sistemi ve antenler motorlu bir platform tarafından hareket ettirilirken hedef REM kaplı alan önünde sabit bırakılmıştır. Motorlu platform, radar sistemini ve antenleri iki boyutu bir düzlem üzerinde hareket ettirecek ve antenler her ölçüm noktasında sinyal yakalayacak şekilde programlanmıştır. Her ölçüm noktasında, radar sistemi sabit hedefe doğru iletilen elektromanyetik sinyal üreterek yansıyan sinyaller antenler tarafından cevap işareti olarak yakalandı. Daha sonra radar sistemi tarafından işlenerek hedeflerin konumunu ve gücünü gösteren bir ısı haritası oluşturularak hedefin konumu ve özellikleri daha detaylı bir şekilde analiz edilebilecektir.

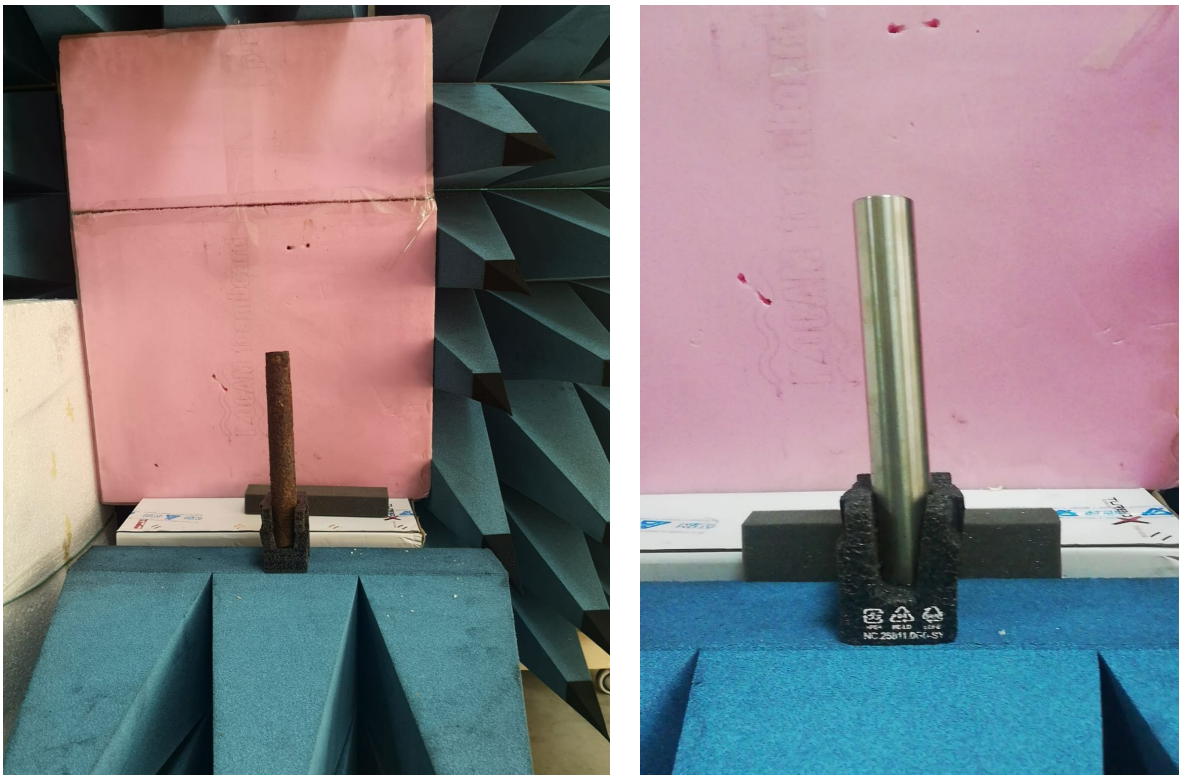
Yakın alan ortamında iki boyutlu tarama yöntemi ile tarama ölçümleri alınmaktadır. Tarama algoritması ile bilgiler 3.3. Yakın Alan Tarama Yazılım Algoritması başlığında verilmektedir. Şekil 3.8'de tarama ile kapsanan yapay açıklık verilmektedir. Dx ve Dy, antenin sentetik açıklık alanını çevreleyen sırasıyla yatay ve dikey yönlerdeki tarama aralıklarıdır. Ele aldığımız senaryoda 21x20 adımdan oluşan ve 25x26,25 cm'lik bir tarama alanı kullanılmıştır. Bir ölçümümüz için tarama adımları boyunca her bir adımda 200 noktalı bir ölçüm alınarak toplam 420 adımda 84.000 ölçüm verisi elde edilmiştir. Yüksek seviyede korozyona uğramış metal, orta seviyede korozyona uğramış metal ve temiz metal malzemelerden birer adet, toplam 3 adet tarama ölçümü alınmıştır.



Şekil 3.8. İki boyutlu tarama görünümü

Şekil 3.9'da EMUMAM Yakın Alan Laboratuvarında alınan iki adet ölçüm gösterilmektedir. Şekil 3.8'te Dx ve Dy arasında kalan ve temsilen gösterilen her bir noktadan veri toplanmaktadır. 3.4. FMSD RADAR Yazılım Algoritması başlığında anlatıldığı üzere Python programlama dili kullanarak yazılan kullanıcı arayüzü ve veri oluşturma algoritması vasıtasıyla istenen frekans aralığındaki veriler, USB ile bilgisayara bağlı durumdaki FMSD Radar cihazına UART üzerinden iletilir. UART ile cihaz tarafından alınan frekans genişliğine dair gerilim verileri ise gerilim kontrollü üretecin bağlı olduğu uca iletilir. Böylece elektromanyetik dalgaların üretilerek FMSD Radar çıkışında bulunan Tx anten vasıtasıyla REM arasında bulunan hedefe gönderilmesi sağlanır. Hedeften yansıyan cevap işareti ise Rx anten ile alınarak cihazın kontrolcüsü olan mikrodenetleyici kartında C programlama dili ile dijital verilere çevrilir ve UART üzerinden bilgisayara iletilerek konum bilgileriyle birlikte Excel dosyasına kaydedilir.

Genel olarak, tarama ölçümleri, tek nokta ölçümlerine kıyasla hedef alanın daha kapsamlı bir görünümünü sağlamıştır. Belirli bir alandaki birden fazla hedefin tespit edilmesine ve karakterize edilmesine olanak sağlamış ve hedeflerin uzamsal dağılımı hakkında değerli bilgiler sunmuştur.



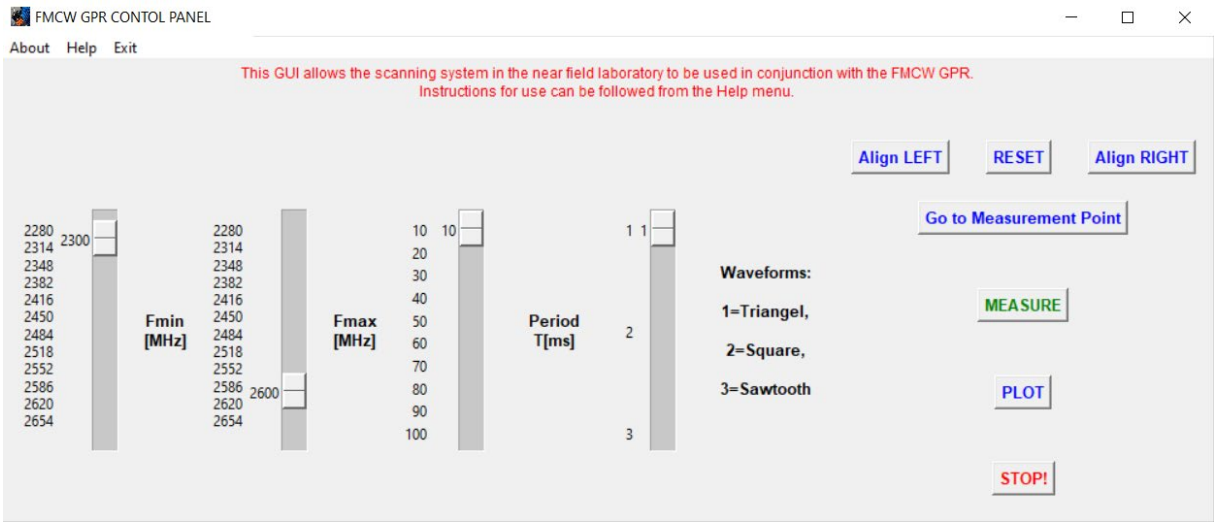
(a) **(b)**

Şekil 3.9. Korozyonlu ve temiz metal ölçümü; **a)** Korozyonlu demir; **b)** Temiz demir

Sonuç olarak, projede kullanılan ölçüm düzeneği ve veri toplama prosedürleri, daha ileri analizler için veri toplanmasında kritik öneme sahiptir. Projenin kilit taşı mahiyetindedir. Radar sistemi, 2300- 2600 MHz frekans aralığında tek nokta ölçümleri ve tarama ölçümleri ile veri toplamak için kullanılabilir hale getirilmesi için gerekli yazılımlar gerçekleştirildi. Elde edilen veriler, hedef bilgilerini çıkarmak için FMSD analiz algoritması ve ısı haritası çıkartma algoritmaları kullanılarak işlenmiştir.

3.4. Yakın Alan Tarama Yazılım Algoritması

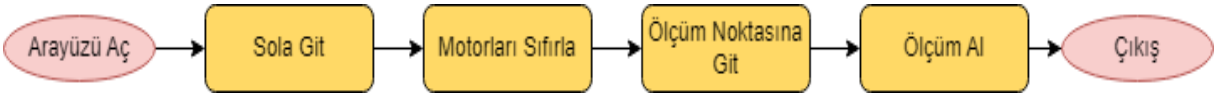
Proje ekibi tarafından tasarlanıp geliştirilen tarama düzeneğinin, Şekil 3.8'de gösterilen x ve y hareketinin sağlanması için Velmex BiSlide tek eksenli iki adet motor kullanılmıştır. Motorların sürülmesi için ise Velmex VXM motor kontrolcüsü kullanılmıştır. İlgili sistemde 360° dönüş sağlayabilecek bir döner tabla da bulunmaktadır ancak bu fazda yakın alan tarama algoritmasına entegre edilmemiştir. İlerleyen dönemde döner tablanın da algoritmaya entegrasyonu ile polarizasyonun ölçümlere etkisi araştırılacaktır.



Şekil 3.10. 2-boyulu tarama arayüzü

Algoritma tasarımında uygulanan hususlar;

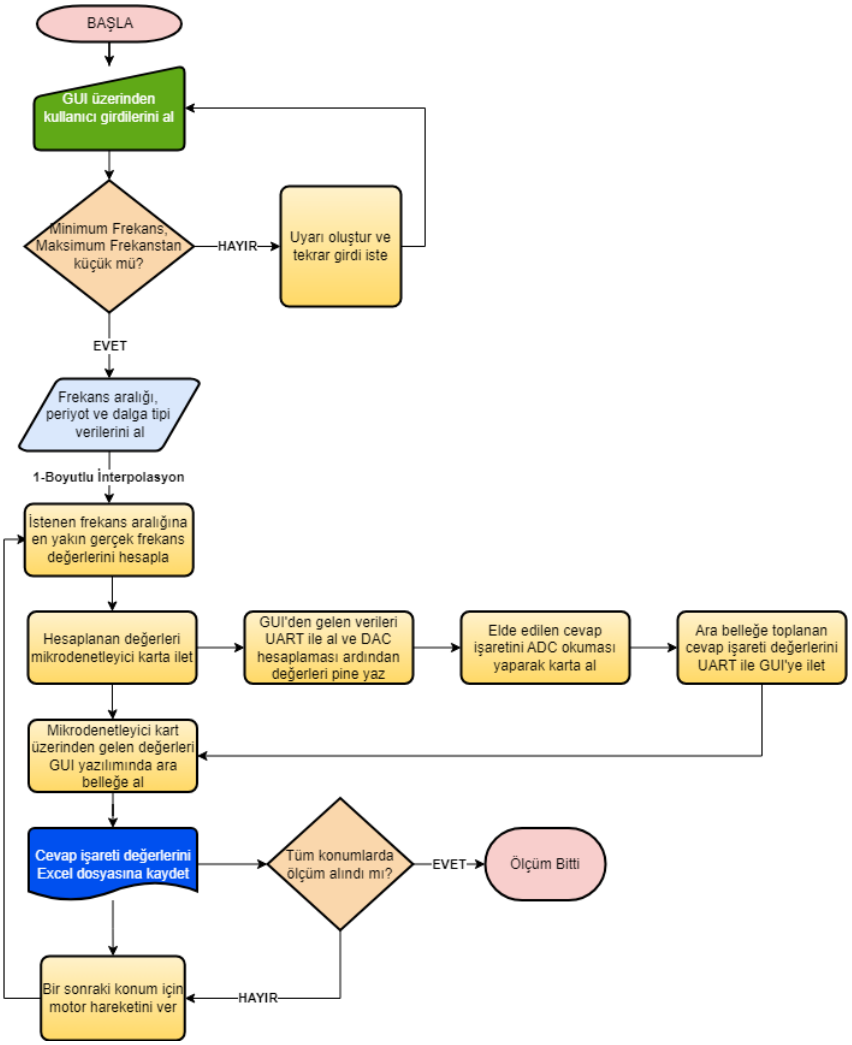
- VXM Motor kontrolcüsü ile bilgisayarın haberleşmesi için RS-232 bağlantısı gerçekleştirdi.
- Python ile yazılan programda motorlara seri port üzerinden bağlanabilmek için bir Python kütüphanesi olan "Serial" kütüphanesi kullanılarak aşağıda belirtilen komut ile ilgili porta bağlantı sağlandı.
  - serMotor = serial.Serial(port="COM3", baudrate=9600, bytesize=8, parity='N', stopbits=1, timeout=0)
- Seri port bağlantısı kontrol edilerek bağlantıda sorun olmadığından emin olundu.
- Şekil 3.10'te gösterilen kontrol paneline eklenen "Sola Git", "Sağa Git", "Reset", "Ölçüm Noktasına Git" butonlarının işlevsellik kazanması için motor komutları yazıldı.
- Şekil 3.11'de gösterildiği sırayla motor komutları girilerek ölçüme başlanır.
  - **Sola Git Komutu:** serMotor.write("F, I1M-411028, R". encode())
  - **Motorları Sıfırla Komutu:** serMotor.write("F, D, C setPA10, B1, A1M1, A2M2, A3M1, IA1M-0, IA2M-0, IA3M-0, S1M3000, S2M3000, S3M1000, R". encode())
  - **Ölçüm Noktasına Git Komutu:** serMotor.write("F, I1M151944, P10, I2M-25324, R". encode())
- Ölçüm başladıktan sonra motorların yapacağı hareketler ise Şekil 3.8'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.11. Ölçüme hazırlık

3.5. FMSD Radar Yazılım Algoritması

Şekil 3.12'de FMSD Radar yazılımına ait akış diyagramı verilmiştir. İlgili şeklin devamında ise akış diyagramının detaylı açıklaması maddeler halinde sunulmuştur.



Şekil 3.12. FMSD radar yazılımı akış diyagramı

- ✓ Şekil 3.12'de gösterildiği üzere kullanıcının girdileri toplanarak işleme başlanır. Kullanıcı girdilerinde yer alan istenen frekans aralığı "FMCWSignalProcess" kütüphanesinde anlatıldığı gibi uygulanabilen gerçek frekans aralığına çevrilir. Bu çevrim için VCO giriş gerilim değerleri ve çıkış frekans değerleri arasında 1 boyutlu enterpolasyon ile bir ilişki kurulur. Ardından, kullanıcının arzu ettiği frekans değerleri üzerinden uygulanabilir frekans değerleri ve gerekli girdi gerilim değerleri hesaplanmış olunur.

- ✓ Hesaplanan gerilim değerleri kapladığı bit alanına dikkat edilerek virgülden sonra üç hane olacak şekilde ve her bir değerden sonra yeni satır karakteri ("\n") eklenerek 6 bit şeklinde bir arabelleğe (buffer) alınır. Bir ölçümde gönderilen veri adedi toplamı

200'dür. Ardından veriler arabellek üzerinden sırasıyla STM32F4 Discovery mikrodenetleyicisine seri port bağlantısı ile iletilir.

- ✓ Mikrodenetleyici yazılımında ise UART ile "HAL_UART_Receive_IT(&huart2, (uint8_t *) Rx_data, 6);" komutu kullanılarak arayüzden gönderilen gerilim verileri arabelleğe alınır. Alınan verilere, denklem 3.4.1'de verilen formül kullanılarak dijital – analog dönüşüm (Digital to Analog Converter) dönüşümü yapılır. 12bit çözünürlüğünde DAC kullanılarak yapılan dönüşüm sonucu veriler DAC pinine gönderilir.

  (DATA[i] / 3.300) * (0xfff + 1); (3.4.1)

- ✓ DAC pini vasıtasıyla VCO elemanına iletilen gerilim bilgileri frekansa dönüştürülerek 2.3 RF Devre başlığında anlatıldığı üzere hedefe gönderilir ve cevap işareti elde edilir. Elde edilen cevap işareti mikrodenetleyici kartın ADC pininin okunması ile mikrodenetleyici karta alınır. Alınan değerlere denklem 3.4.2'de gösterildiği üzere 12 bit çözünürlüğünde analog – dijital dönüşüm (Analog to Digital Converter) gerçekleştirilerek gerilim karşılıkları hesaplanır. Hesaplanan bu değerler de bir ara belleğe toplanır.

  (HAL_ADC_GetValue(&hadc1) * 3.300) / (0xfff + 1) (3.4.2)

- ✓ Ara belleğe toplanan cevap işareti değerleri "HAL_UART_Transmit_IT(&huart2, (uint8_t *)tmp, strlen(tmp));" komutu kullanılarak UART ile arayüz tarafına iletilir. Arayüze alınan veriler ölçüm sonuçları için oluşturulan klasör altında voltaj, frekans, konum bilgileri ile Excel tablosuna yazılarak kaydedilir.

- ✓ Mikrodenetleyiciye 200 verilik bir ölçüm seti gönderildikten ve cevap işareti alınarak Excel dosyasına kaydedildikten sonra tarama sistemi Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bir sonraki x konumuna geçer ve yeni ölçüm verilerini alarak ölçüme devam eder. 1. Satırdaki 21 adet ölçüm bittikten sonra bir üst satıra geçilir ve -x yönünde hareket başlar. Bu işlemler 20 satır boyunca devam ettirilerek 25x26,25 cm'lik, 656,25 cm^2 alanında bir ölçüm gerçekleştirilmiş olur.

Kullanılan kütüphaneler ile ilgili detaylı bilgiler EK-2'de sunulmuştur.

3.6. Veri İşleme

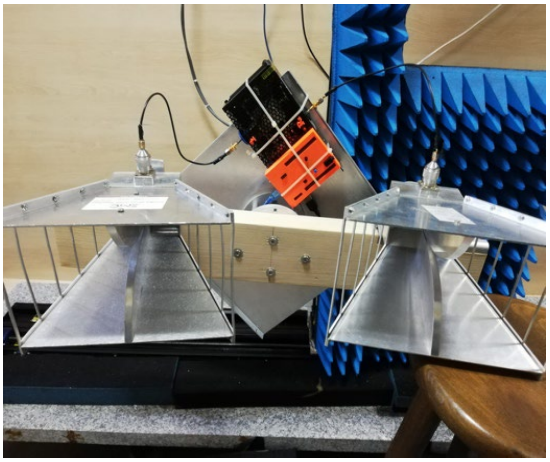
Gerçek hayat ölçümlerinde oluşacak hatayı en aza indirmek önemli bir konudur. Bu nedenle, cihaz ile ölçümlere başlamadan önce oluşabilecek toplam hatayı en aza indirmek için bir en iyileştirme yöntemi uygulanmıştır. Denklem 3.1'de Toplam Hata olarak belirtilen toplam sistem hatası ölçüm alınırken oluşabilecek hatalardan ve ölçüm sonucu elde edilen verilerin incelenmesi sırasında oluşabilecek hatalardan oluşmaktadır. Ölçüm alınırken oluşabilecek hataları en aza indirgemek için YNR sistemine 3 boyutlu yazıcı ile bir kılıf hazırlanarak dış ortamdan gelebilecek toz vb. etmenlere karşı dayanıklılık arttırılmış ve RF devrenin içerisine yerleştirildiği metal kutu ile cihazın ısınmasına karşı önlem alınmıştır. Ölçümlerde oluşabilecek dış ortam etkisini en aza indirgemek için tüm ölçümler, EMUMAM bünyesinde bulunan yakın alan laboratuvarı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Toplam hatayı etkileyecek diğer bileşen olan veri işleme hatasını en aza indirmek için ise kalibrasyon işleminin yapılması ve cevap işaretinde oluşacak hataların giderilmesi için dijital filtreleme işlemleri yapılır.

$$\text{Toplam Hata} = \text{Ölçme Hatası} + \text{Veri İşleme Hatası} \quad (3.1)$$

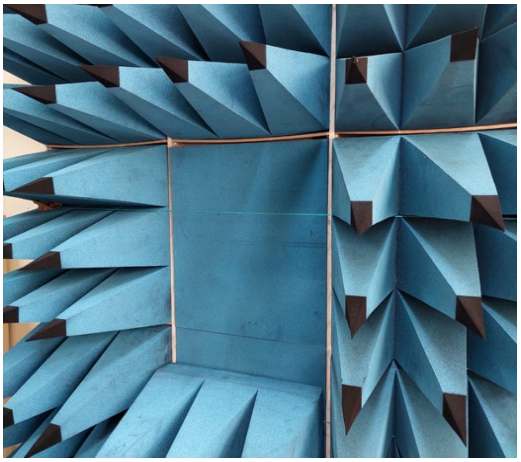
YNR cevap işaretlerinde ön işleme tipik olarak verilerin kalitesini artırmak için filtreleme, kazanç ayarlamaları ve arka planın kaldırılmasını içerir. Filtreleme, gürültüyü gidermek ve verilerin sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için kullanılabilir. Kazanç ayarlamaları zayıf sinyalleri güçlendirmek ve güçlü sinyalleri azaltmak için kullanılır. Arka plan kaldırma, zemin yüzeyinden veya yakındaki diğer nesnelerden gelen istenmeyen yansımaların etkilerini ortadan kaldırmak için kullanılabilir. Ön işlemeden sonra veriler makine öğrenimi teknikleri ile ve eğitimli bir analist tarafından yorumlanabilir. Yapılan yorumlama ile derinlik, konum ve korozyon durumu hakkında bilgiler ortaya çıkartılmış olunur.

Yapılan çalışmada kazanç ayarlamaları ve sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için donanımsal olarak LNA olarak adlandırılan düşük gürültü yükselteci, güç amplifikatörü kullanılmıştır. Filtreleme işlemleri için ise dijital filtreleme işlemleri ile cevap işaretinde hatalı olan yerlerin çıkartılması, işaretin anlamlı hale getirilmesi sağlandıktan sonra gönderilen işarete bağlı frekans kayması, genlik dağılımının tespiti, faz kaymasının derece cinsinden tespiti gerçekleştirilmiştir. Arka plan etkisinin ve cihaz kaynaklı oluşabilecek etkilerin kaldırılabilmesi için de-embedding adı verilen işlem gerçekleştirilmiştir.

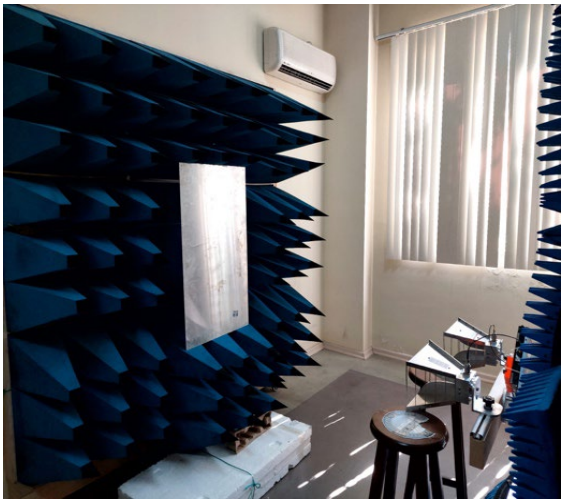
Kalibrasyon için FMSD YNR cihazının giriş ve çıkışının birbirine bağlandığı uç uca (through) bağlantı gerçekleştirilerek cihaz etkisinin de-embedding işlemi gerçekleştirilir. Ölçümde kullanılan cihaz ile ilgili hataları en aza indirmek için through bağlantı ile bir de-embedding yapılmıştır. Cevap işaretinde, arka plandan gelebilecek yansımaların da önlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle de-embedding işleminin devamında background ölçümü için Şekil 3.13b'de gösterilen sadece REM kaplı arka panelin ölçümü alınarak veri işleme yazılımına eklenmiştir. Bu sayede gerçek senaryo ölçümüne geçilmeden önce arka plan etkisinin de ölçümden de-embedded edilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.13c ile gösterilen düz plaka ölçümü ile cihazın maksimum noktasının tespiti amaçlanmıştır. Korozyonlu metalin varlığına ve gelecek senaryosunda korozyon derecesince karar verebilmek için referans ölçüm olarak kullanılmak üzere 3.13.d'de gösterilen korozyona uğramış ve temiz durumdaki bir metal silindirlerden ölçümler alınmıştır. Tüm ölçümlerde 3.13a'da gösterilen referans antenler kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

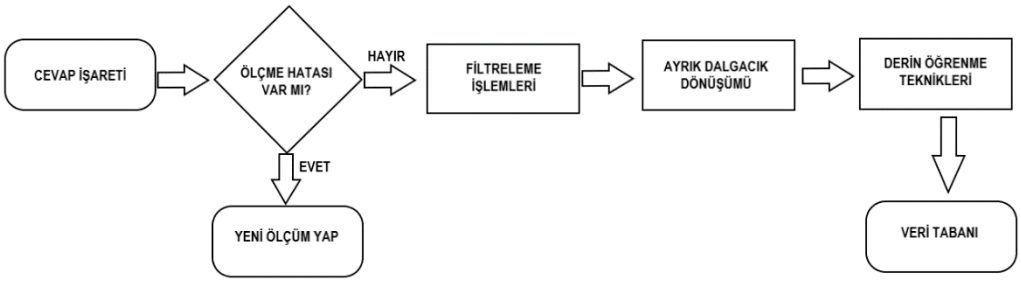


(d)

Şekil 3.13. Doğrulama ve kalibrasyon ölçümleri; **a)** Referans anten kullanarak ölçümler; **b)** Arka plan ölçümü; **c)** Düz metal plaka ölçümü; **d)** Paslı ve passız çubuk referans ölçümü

Cihaz kalibrasyonu ve referans ölçümlerinin ardından gerçek durum senaryolarından veriler toplanmıştır. Elde edilen verileri anlamı bir hale getirebilmek önem teşkil etmektedir. Bu nedenle, Şekil 3.14'te gösterilen, FMSD analiz algoritması olarak adlandırdığımız bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen cevap işaretlerinde öncelikle herhangi bir ölçme hatasının olup olmadığını anlayabilmek için standart sapma ile veri değerlerinin yayılımı incelenerek işarette ölçme hatası aranır (Acer vd., 2014). Bir ölçme hatası olmaması durumunda filtreleme işlemleriyle yalın bir hale getirilen cevap işareti ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) adı verilen yöntem ile hem frekans hem de konum bilgileri kapsamında incelenir. Böylece, işaretin tepe noktaları genlik değerleri, frekans kayması, faz kayması verileri ve anomalileri bulunur. Bu sayede gönderilen elektromanyetik dalganın metal ile karşılaşma zamanı ve bu karşılaşma neticesinde işaretin ne kadarlık bir değişime ya da zayıflamaya uğradığı tespit edilerek cevap işareti anlamlı bir hale getirilmiş olur. Bunun sonucunda, korozyonun varlığına karar verilir.

Gelecek planımızda ise veriler anlamlı hale getirildikten sonra ölçüm alınan metalin korozyon derecesinin makine öğrenmesi teknikleri yardımıyla tespit edilmesi ve oluşturulacak veri tabanına kaydedilmesi bulunmaktadır. Veri tabanı ile amaçlanan ise şudur; benzetim ortamında parametrik olarak gerçekleştirilen farklı senaryolar ve laboratuvar ortamında ilgili senaryolar için alınan ölçüm sonuçları veri tabanına eklendikçe veri tabanı genişleyecek ve korozyon derecelendirmesinin hassasiyetinin artması sağlanacaktır. Yapılacak cihaz tüm hatlarıyla hayata geçirilerek yapılar üzerinde kullanılmaya başlandığında, alınan her ölçüme ait sonuç ve daha detaylı bir inceleme için karot alımına ihtiyaç var mıdır sorusuna verilecek cevap, rapor hazırlanması için ek bir zaman harcanmadan kullanıcı arayüzü üzerinden otomatik olarak gerçekleştirilecektir.

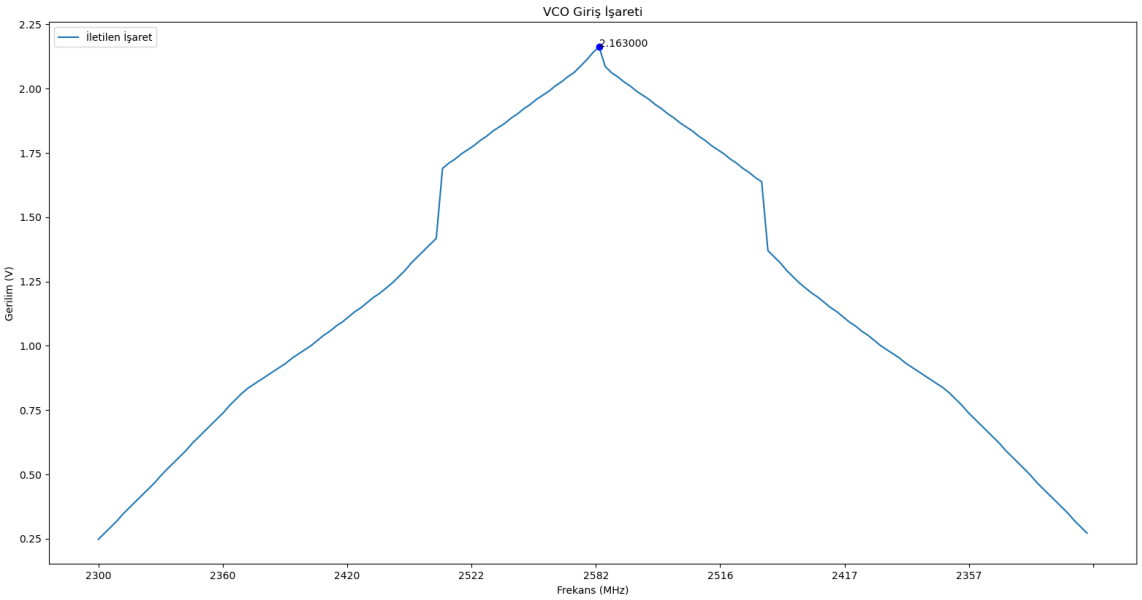


Şekil 3.14. Veri işleme akış diyagramı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

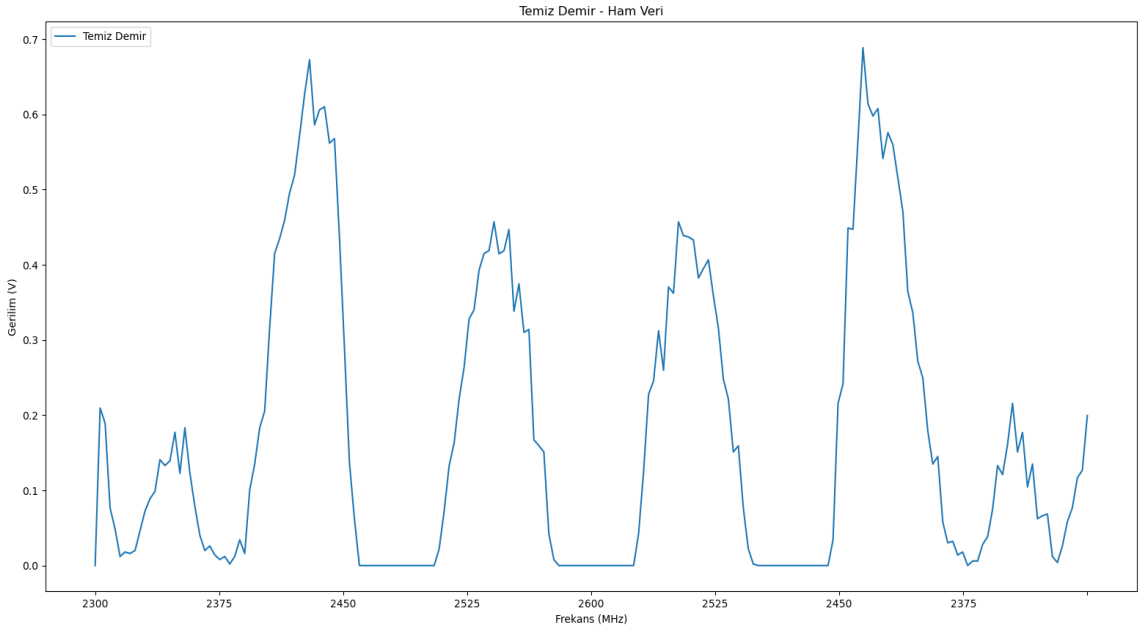
Bu çalışmada, karar destek mekanizmalarının bir parçası olarak kullanılmak üzere bina denetimleri için alternatif bir tahribatsız muayene yöntemi olarak geliştirilen bilgisayar tabanlı Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) RADAR kullanılarak korozyon tespiti araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle kalibrasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar arasında uç-uca bağlantı ölçümleri, arka plan ölçümleri ve düz iletken plaka ölçümleri yer almaktadır. Gerekli kalibrasyon ölçümlerinin ardından, cihazın korozyon tespit kabiliyetini doğrulamak için hem korozyona uğramış hem de temiz silindirik metal malzemeler üzerinde ölçümler alınmıştır. Çalışma, her biri 200 veri içeren 16 adet tek nokta ölçümleri ve 3 adet 20x21 boyutunda tarama ölçümleri olarak tasarlanmıştır.

Mikrodenetleyici kartın DAC çıkışı vasıtasıyla VCO girişine gönderilen işarete ait gerilim değeri ve gerilim değerine karşılık üretilen frekans verilerinin gösterildiği grafik Şekil 4.1'de verilmektedir. DAC çıkışından VCO girişine ilgili gerilim verileri gönderilerek frekans işareti oluşturulmaktadır.



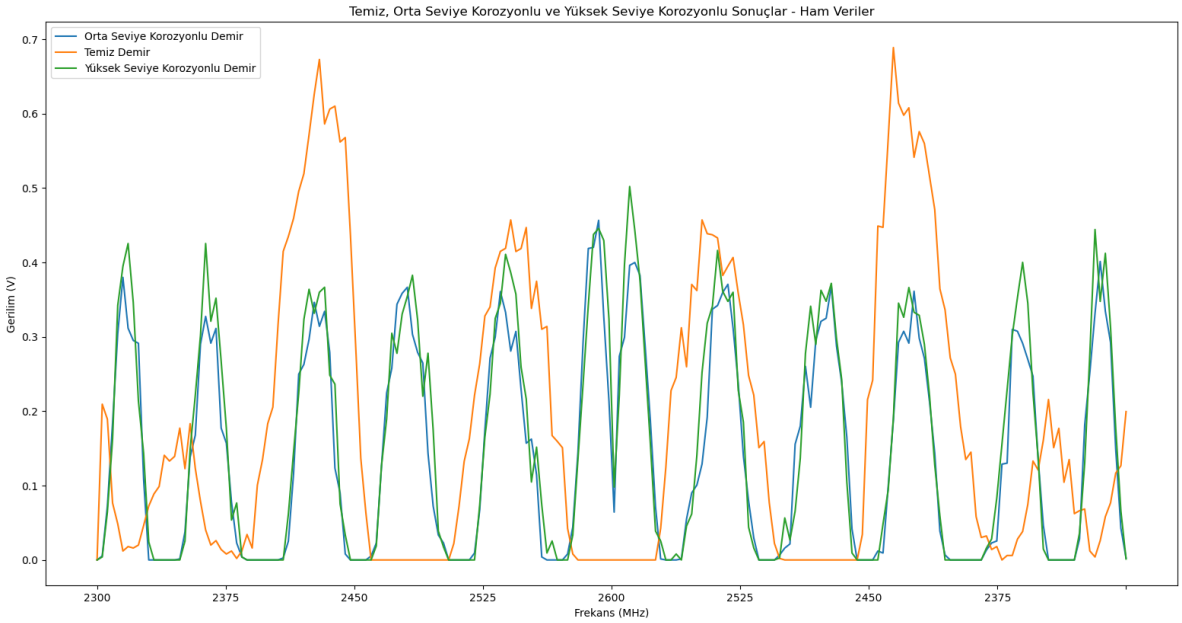
Şekil 4.1. VCO giriş işareti

Şekil 4.2'de temiz inşaat çeliğine ait cevap işareti verilmektedir. 2375- 2450 MHz bölgeleri incelendiğinde diğer bölgelere karşı daha net bir işaret alındığı görülmektedir. Bu işaretin alındığı bölge cihazın çalışma bölgesi olarak yorumlanmaktadır. Cevap işareti genliğine bakıldığında ise radar ile hedef arasındaki mesafe, saçılma ve yansıma kayıplarından dolayı genlik verisinin beklenildiği gibi gönderilen işaretin genlik verisinden düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Temiz inşaat çeliği cevap işareti grafiği

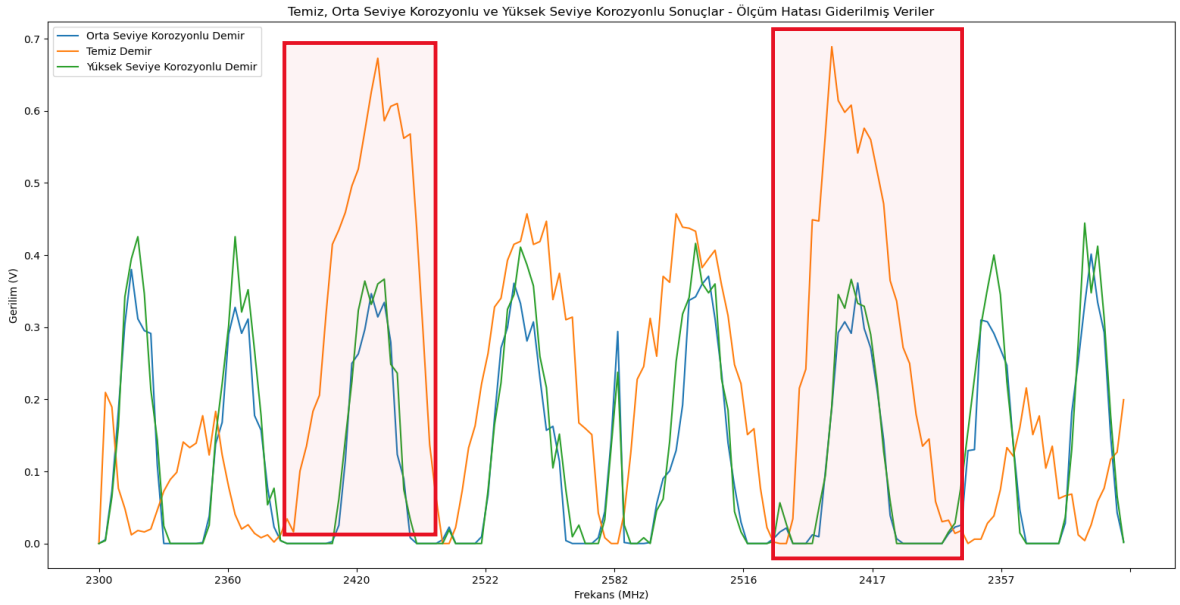
Temiz durumdaki demir malzemeden alınan cevap işareti, orta seviyede korozyona uğramış demirden alınan cevap işareti ve yüksek seviye korozyona uğramış demirden alınan cevap işaretine dair karşılaştırma grafiği Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekildeki grafikte çalışma bölgesi olarak düşünülen 2375- 2450 MHz frekans aralığındaki cevap işaretleri incelendiğinde temiz metal cevap işaretinin büyük farkla korozyonlu hedeflerden ayrılabildiği anlaşılmaktadır. Genlik açısında gözle görülebilen bu fark, hayata geçirilen tahribatsız muayene cihazı ile korozyonun varlığının anlaşılabileceğini bize göstermektedir.



Şekil 4.3. Temiz demir, orta seviye korozyona uğramış demir, yüksek seviye korozyona uğramış demir cevap işaretleri ham verileri arasında karşılaştırma grafiği

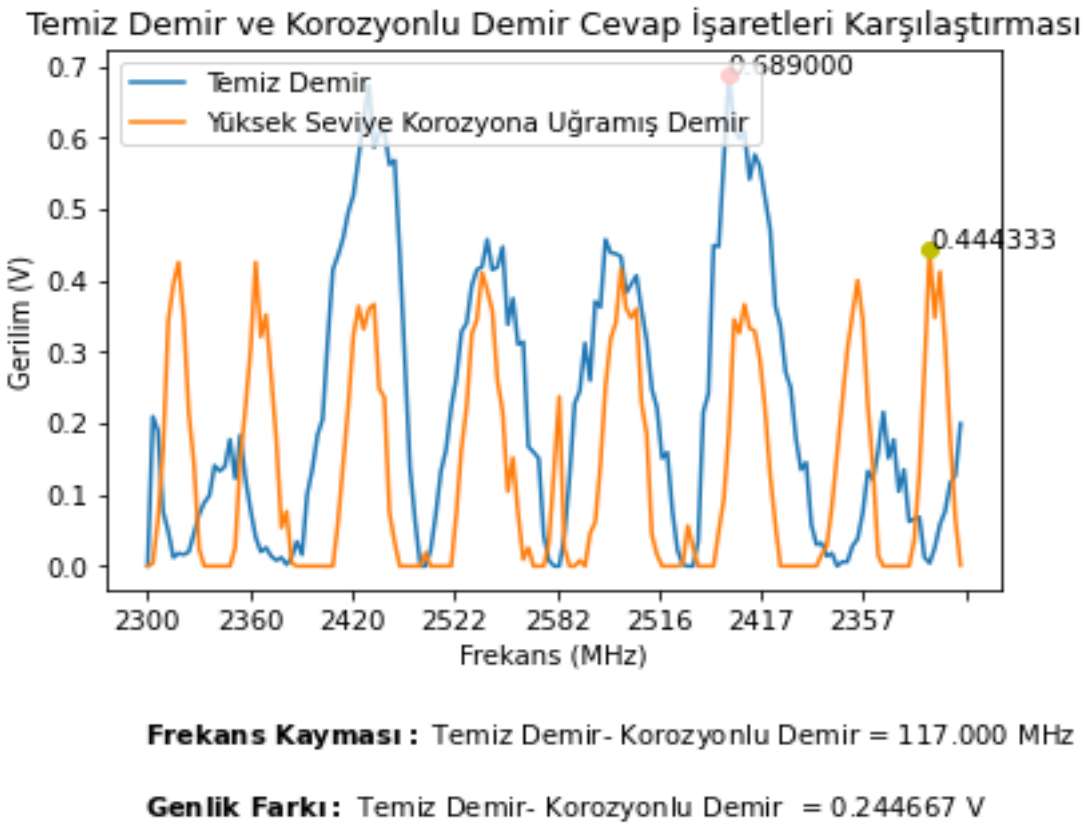
Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere cevap işareti verileri ADC girişi vasıtasıyla okunduğundan dolayı negatif genlikteki işaretlerin okunamamaktadır. Buda, aslında negatif değerler görmemiz gereken yerlerde sıfır (0) volt gerilim okumamıza neden olmaktadır. Bu ölçüm hatasını giderebilmek için temiz demir cevap işareti sonuçları baz alınarak sürekli sıfırların olduğu bölgelerde ilk ve son sıfır değerler haricinde kalan sıfırlar silinmiştir. Silinen verilerin olduğu yerlere denk gelen veriler orta seviyede korozyon ve yüksek seviyede korozyon sonuçlarından da silinmiştir. Belirtilen ölçüm hatasının giderildiği sonuçlar Şekil 4.4'te verilmektedir. Korozyona uğramış hedeflere ait sonuçlarda, temiz demir cevap işaretinden giderilen 0 değerler haricinde bulunan 0 volt noktaların korozyon kaynaklı sıfır olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.4'te cihaz kırmızı dikdörtgenler ile gösterilen FMSD Radar çalışma bölgeleri olarak belirtilen bölgeler ve Şekil 3.1.e'de verilen benzetim sonuçları incelendiğinde gerçek hayat sonuçları ile benzetim sonuçlarının birbiri ile uyuştuğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.4: Ölçüm hataları giderilmiş veriler arasında karşılaştırma grafiği

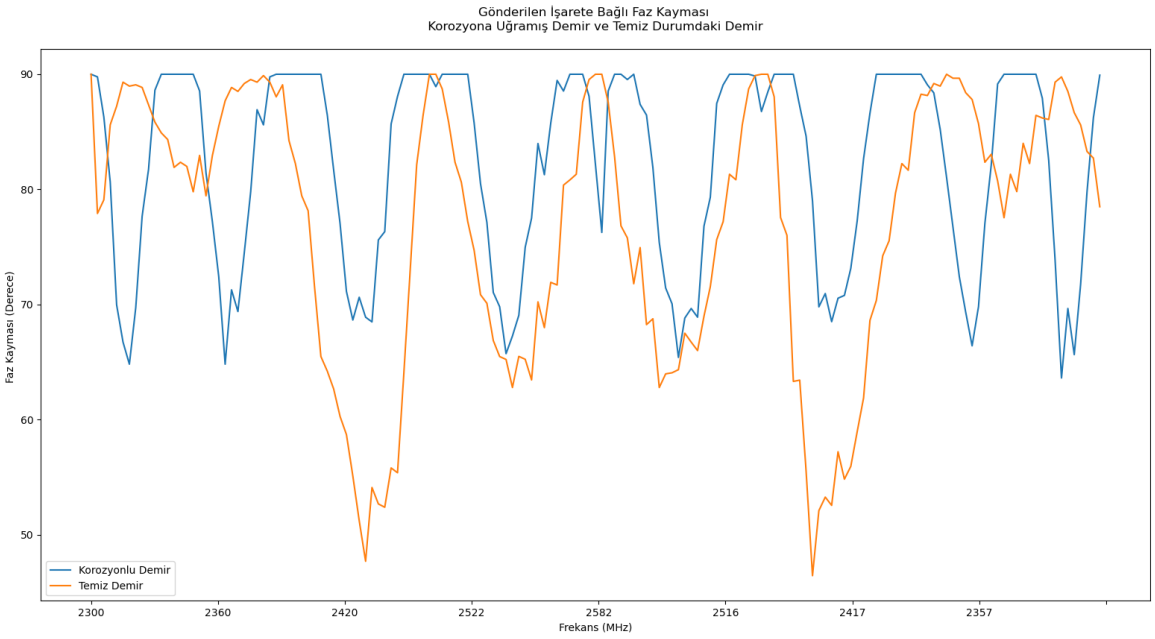
Radar devresinde kullanılan mikrodenetleyici kartın analog-dijital dönüştürücü (ADC) biriminden elde edilen veri setlerinin incelenmesi ile Şekil 4.5'te görüldüğü üzere temiz ve korozyona uğramış metal nesnelerin cevap işaretlerinde genlik bozulması ve frekans kayması olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.5: Temiz demir ve korozyonlu demir analiz grafiği

Frekans bölgesi, frekans kayması ve genlik karşılaştırmaları haricinde incelenmesi gereken bir diğer nokta ise faz farkıdır. 2.4. numaralı Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) başlığında anlatıldığı üzere teoride cevap işaretindeki faz farkı üzerinden de korozyona uğrama hakkında yorum yapmak mümkündür. Elde edilen cevap işareti ve gönderilen frekans değerleri kullanılarak frekansa bağlı faz farkına ait grafikler çizdirilmiştir. Burada faz farkının hesaplanabilmesi için Denklem 2.13 baz alınmıştır. Mesafeye bağlı D.D.M olarak kullanılması gereken K sabiti bu aşamada 1 olarak alınmıştır. Bu nedenle elde edilen faz farkı bilgilerinin çözünürlüğü bu aşamada netleştirilmemiştir.

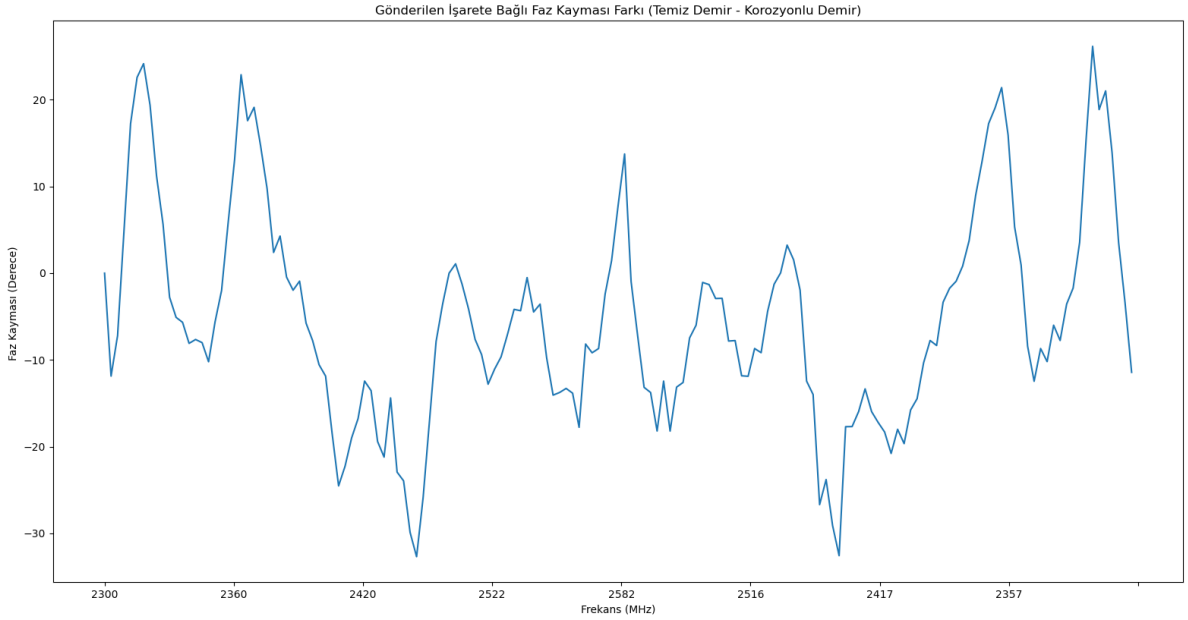
Şekil 4.6'da korozona uğramış demir ve temiz durumdaki demir cevap işaretlerinden elde edilmiş faz kayması bilgilerinin gönderilen frekansa bağlı çizdirilmesi gösterilmektedir. Üst üste çizdirilen sonuçlar incelendiğinde; iletilen işaretin 2375- 2450 MHz değerleri arasında faz kaymaları arasında daha büyük farklar gözükmektedir.



Şekil 4.6. Temiz inşaat çeliği cevap işareti ve korozyona uğramış inşaat çeliği cevap işareti arasında faz kayması karşılaştırma grafiği

Kararlı bir sonuç çıkarımı yapabilmek adına Şekil 4.6'da gösterilen temiz durumdaki ve korozyona uğramış hedeften elde edilen iletilen işarete bağlı faz kayması bilgileri arasındaki fark ve Şekil 4.8'de verilen 3-boyutlu gösterimler kullanılarak gelecek çalışmalarda hata payının düşürüleceği ön görülmektedir.

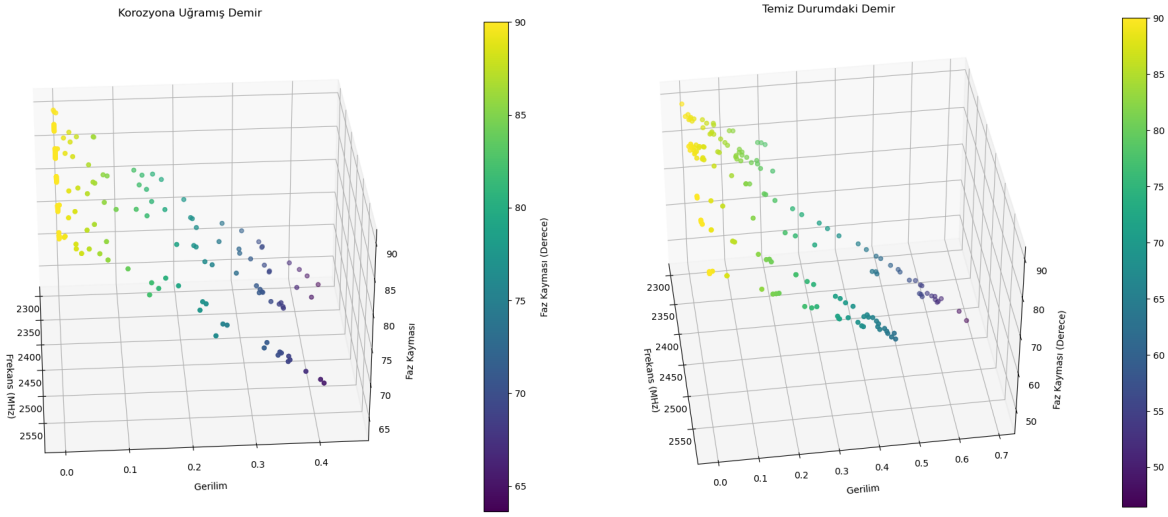
Şekil 4.6 incelendiğinde 2375- 2450 MHz bölgesini kapsayan alanda, +21 derece, -31 derece olmak üzere toplam 52 derecelik bir farkın faz kaymasında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Ancak, bu aşamada DDM oluşturulamadığı için şuan tam olarak anlamlandıralamamıştır. Şekil 4.5'in yorumlanmasında belirtildiği üzere 2375- 2450 MHz değerleri arasında oluşan faz kayması farkı Şekil 4.7 incelendiğinde daha net olarak gözükmektedir. İlerleyen dönemde alınacak çok sayıda ölçüm ile elde edilen faz kayması farkları kullanılarak korozyon kararı noktasında bir imza örüntü ortaya çıkartılarak korozyon durumu ve derecesi hakkında düşük hata payına sahip cevaplar vermek mümkün olacaktır. Bu fark bölgeler gelecek çalışmalarda kullanılacak makine öğrenimi tekniği için geliştirilecek modele öznitelik olarak verilerek cihaz hassasiyeti arttırılacaktır.



Şekil 4.7. Korozyona uğramış inşaat çeliği ve temiz durumdaki inşaat çeliği arasında faz kayması fark sonuçları

Korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir malzemelerden elde edilen cevap işaretlerinin gönderilen frekans, cevap işareti gerilim değerleri ve faz kayması bilgilerinin 3-boyutlu gösterimi Şekil 4.8'de verilmiştir. 3-boyutlu gösterimde faz kayması verilerinin frekans ve gerilime bağlı dağılımı renklendirilmiş noktalar ile gösterilmektedir. Renkler hakkında bilgilendirme grafiklerin sağ tarafında gösterilen renk ölçeklendirmesinde verilmektedir. Sarı renkle belirtilen faz kayması 90 derece değerini göstermektedir.

Ortaya çıkartılan bu 3-boyutlu grafik kullanılarak verilerin frekans, gerilim eksenlerindeki dağılımı ve faz kayması bilgisini belirten renkler analiz edilerek elde edilen cevap işareti hakkında korozyon derecesi kararı alınmasının kolaylaşacağı öngörülmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 4.8. Ölçüm sonuçlarının 3- boyutlu gösterimleri; **a)** Korozyona uğramış demir 3-boyutlu sonuç gösterimi; **b)** Temiz durumdaki demir 3- boyutlu sonuç gösterimi

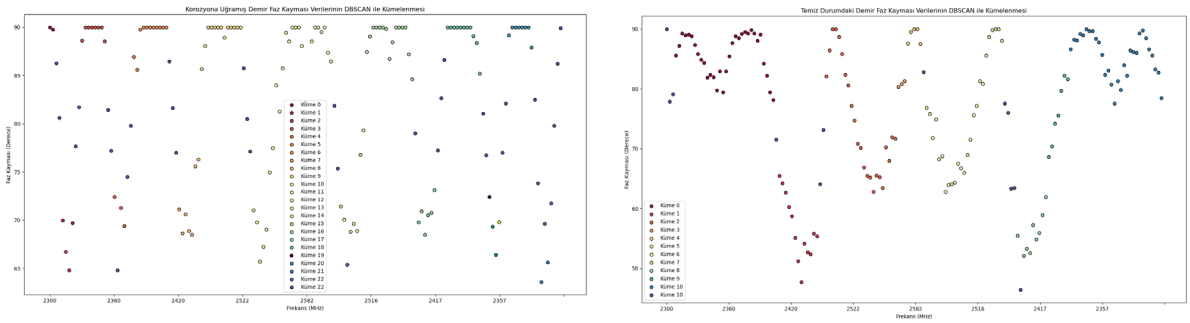
Faz kayması bilgisinin daha detaylı ele alınabilmesi için kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kümeleme için Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekânsal Kümelenmesi anlamına gelen DBSCAN kullanılmıştır. DBSCAN, veri madenciliği ve makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan bir veri kümeleme algoritmasıdır.

Bir dizi noktayı temel alan DBSCAN, noktaların birbirine ne kadar yakın olması gerektiğini belirten "eps" parametresine ve yoğun bir bölge oluşturmak için minimum nokta sayısına dayalı olarak birbirine yakın noktaları bir araya getirir. Ayrıca düşük yoğunluklu bölgelerde bulunan noktaları aykırı değer, gürültü, olarak işaretler.

DBSCAN için optimum parametre değerlerinin bulunabilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmada "eps" parametresi için siluet puanı dediğimiz bir metrik hesaplanmaktadır. Siluet puanı -1 ile +1 arasında değişir ve daha yüksek puan daha yüksek kümelenmeyi ifade eder. Siluet puanı, sklearn.metrics modülündeki silhouette_score işlevi kullanılarak her kümeleme sonucu için hesaplanır. En yüksek siluet puanıyla sonuçlanan minimum nokta sayısı değeri en uygun değer olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, siluet puanı ile ölçülen daha iyi bir kümeleme kalitesine yol açan en iyi minimum nokta sayısı değerinin bulunmasına yardımcı olur.

Diğer parametre olan "eps" parametresini belirlemek için k-mesafe grafiği çizdirilerek optimum "eps" değerini belirlemek için dirsek noktası (elbow point) gözlemlemesi yapıldı. Ancak, hem insan hatasını en aza indirgemek için hem de çok sayıda ölçüm olduğu durumda hızlı olabilmek adına bu işlem otomatik hale getirildi. Otomatikleştirme için sıralanmış k-mesafelerini girdi olarak alan ve dirsek noktasının indeksini döndüren bir "find_elbow" fonksiyonu yazıldı. Dirsek değeri indeksi ise k-mesafe değerlerinin bulunduğu dizi içerisinde kullanılarak optimum eps değeri elde edildi.

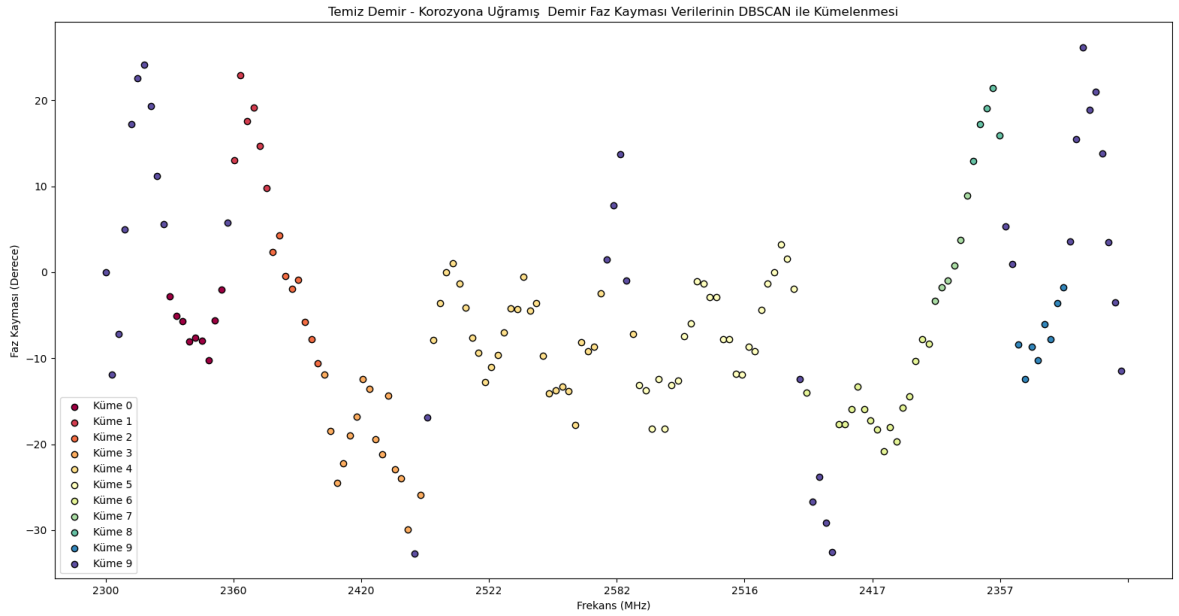
Değerler belirlendikten sonra Şekil 4.9'da verilen kümeleme sonuçları elde edilmiştir. Mevcut ölçümler ile elde edilen Şekil 4.9 sonucu incelendiğinde korozyon ilişkisinin varlığı zayıfta olsa gözükmektedir. Korozyonlu demire ait olan Şekil 4.9.a'daki sonuçların, temiz demire ait olan Şekil 4.9.b'de verilen sonuçlara karşın daha fazla sayıda kümeye sahip olması ve dağınık bir yapıda bulunması korozyon varlığını belirtmektedir. Faz kayması verilerinin kümelendirme sonuçlarında oluşan veri dağılım yapısının ve küme sayılarının bize korozyonun anlaşılmasında yardımcı olduğu düşünülmektedir. Bu inceleme sonucu ile gelecek çalışmalarda alınacak çok sayıda ölçüm ile bu ilişkinin daha net gösterileceği ön görülmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 4.9. Faz kayması sonuçlarının kümelendirilmesi; **a)** Korozyona uğramış demir sonuç gösterimi; **b)** Temiz durumdaki demir sonuç gösterimi

Şekil 4.10'da korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir arasındaki faz kayması farkının DBSCAN ile kümeleme sonucu gösterilmektedir. Elde edilen bu sonucun nihai hedefimiz olan korozyon derecelendirilmesi için kullanılabileceği düşünülmektedir. Faz kayması farkının kümelendirilmesi ile ortaya çıkan örüntünün korozyon derecelendirilmesinde kullanılması planlanmaktadır. Referans temiz durum ölçümleri ve derecelendirilecek korozyonlu durum ölçümleri sonrasında ilgili sonuç elde edilerek söz konusu ölçümün referans temiz durum ölçümüne ne derecede benzediğinin tespit edilmesi planlanmaktadır. Benzerlik tespiti ile korozyon derecesi sonucuna varmak mümkün olabilecektir.



Şekil 4.10. Korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir arasında faz kayması farklarının kümelendirilmesi

Yüksek seviye korozyona uğramış demir, orta seviyede korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir silindir malzemelerden 20x21 boyutunda tarama ölçümleri alınmıştır. Bu tarama ölçümlerine dair sonuçlar Şekil 4.11'de verilmektedir. Sonuçların gösterilmesinde ısı haritası yöntemi kullanılmıştır. Bir konumdan alınan veri setinin ortalaması alınarak ilgili konumun ısı haritasındaki değeri elde edilmiştir. Tarama alanı içerisindeki hedef malzeme uzunluğu 22 cm, çapı ise 4 cm'dir. Hareketli düzeneğin bir adım genişliği 1,25 cm olarak ayarlanmıştır. Hedef malzemenin koyulmuş olduğu yer yatayda [7-10] konumları arasında, dikeyde [1, 17.6] konumları arasındadır.

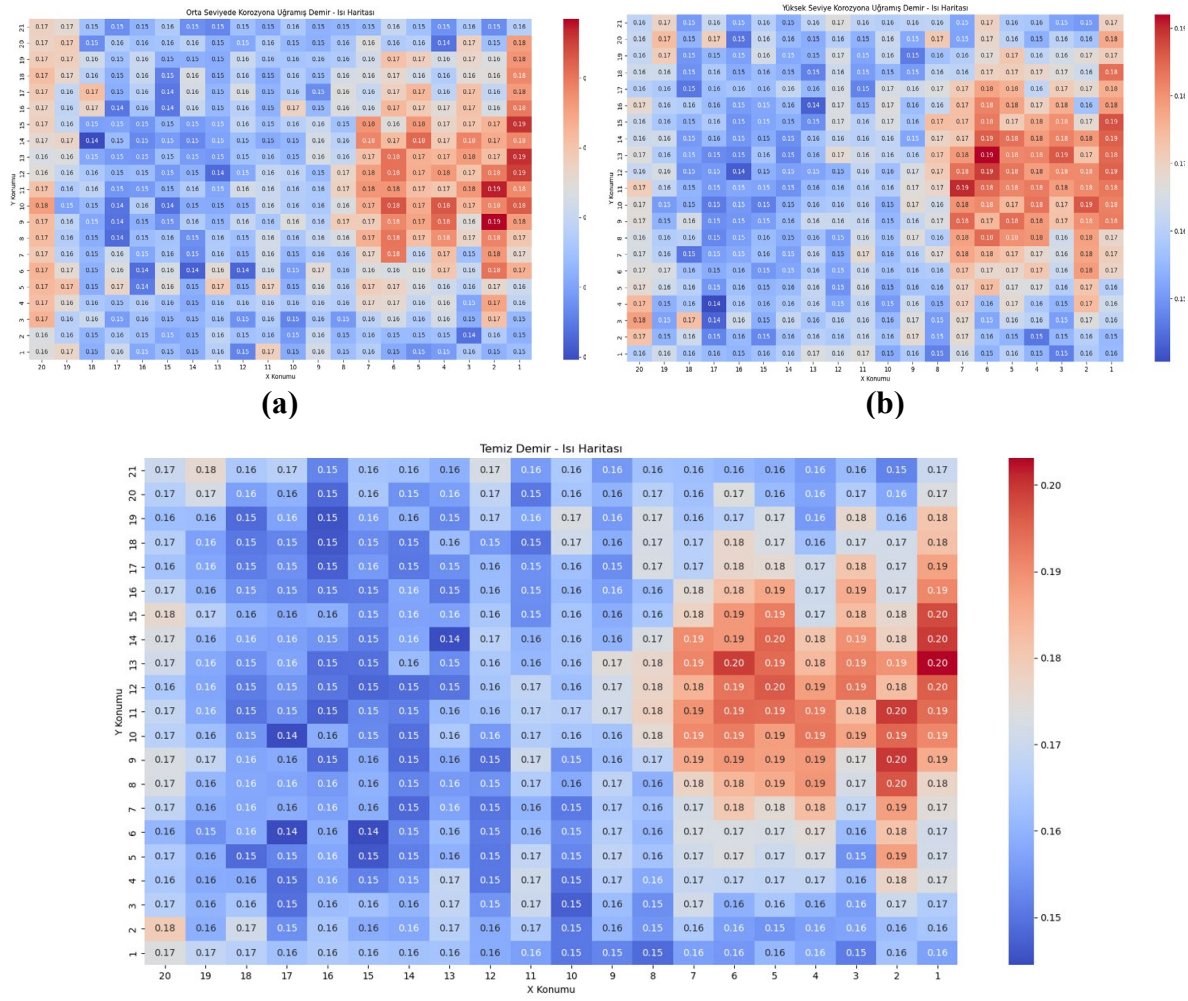
Şekil 4.11 incelendiğinde yatayda 1-7 konumları ve dikeyde 7-17 konumları arasında yoğunluk artışı gözle görülür şekildedir. Bu bölge hedef malzemenin koyulmuş olduğu yatay [7-10], dikeyde [1, 17.6] konumunun içinde kalmaktadır. Şekil 4.11'de yer alan yüksek seviye korozyonlu ve temiz durumdaki demirlerden alınan sonuçlar incelendiğinde az da olsa bir yoğunluk farkı gözlemlenmektedir.

Yüksek seviyede korozyona sahip demir ve temiz demir ölçümlerinden elde edilen sonuçlarının toplam gerilim değerleri incelendiğinde Çizelge 4.1'de verilen değerleri elde

edilmiştir. Bu sonuç bize temiz durumdaki demir malzemeden alınan ölçümde daha yüksek gerilim değerleri elde edildiğini göstermektedir. Korozyona uğramış malzemenin ise gönderilen elektromanyetik dalgayı daha az oranda yansıttığını ve bir kısmını soğurduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. Tarama ölçümlerinin toplam gerilim değerleri

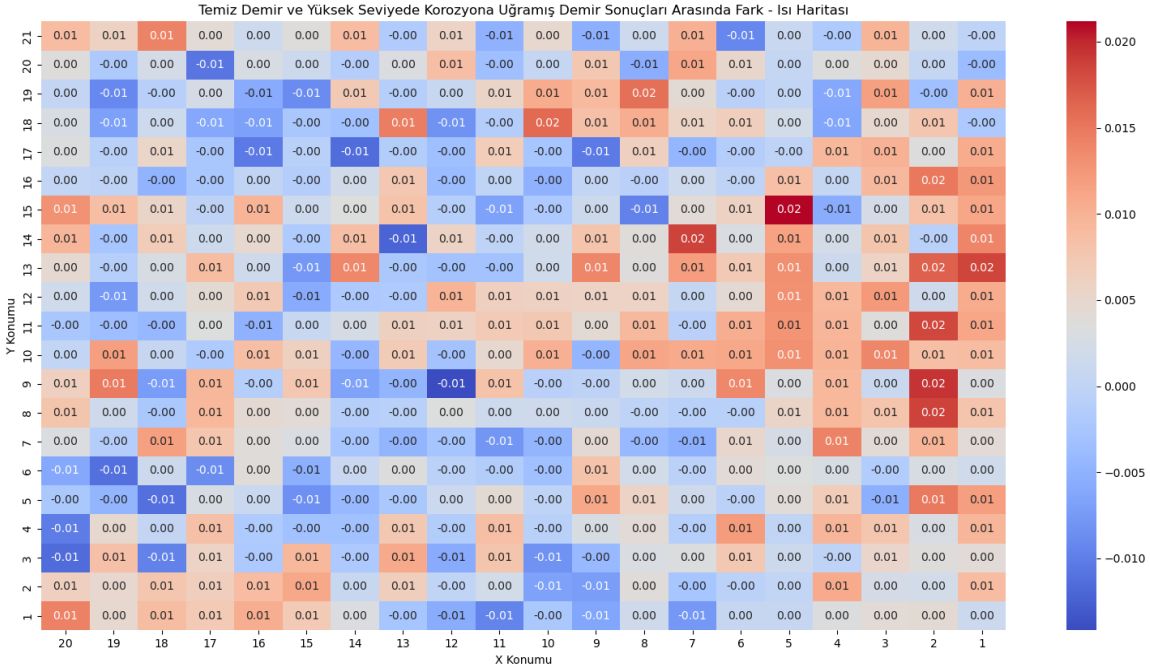
Yüksek Seviyede Korozyona Uğramış Demir	13578.283 V
Parlak Demir	13814.158 V



Şekil 4.11. Tarama ölçüm sonuçlarının ısı haritasında gösterilmesi; **a)** Orta seviyede korozyona uğramış demir ısı haritası; **b)** Yüksek seviyede korozyona uğramış demir ısı haritası; **c)** Temiz durumdaki demir ısı haritası

Yüksek seviyede korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir malzemelerin arasındaki bahsedilen yoğunluk farkının daha net anlaşılabilmesi için fark sonucunun da bir ısı haritası çıkartılmıştır. Şekil 4.2'de temiz demir ve yüksek seviyede korozyona uğramış demir tarama sonuçlarının konum bazlı farkı ısı haritası olarak verilmiştir. Temiz demir gerilim değerleri, korozyonlu demir gerilim değerlerinden çıkartılmıştır. Şekil incelendiğinde bahsedilen hedef malzemenin konumunda iki malzeme arasında bir yoğunluk farkı olduğu görülmektedir. Hedef malzeme konumu dışındaki alanlara bakıldığında daha düşük yoğunluklu alanlar olduklarını ve dolayısıyla hedef malzemenin olmadığı konumlarda bir fark olmadığı

görülmektedir. Bu inceleme de bize korozyona bağlı olarak bir yoğunluk farkı meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.12. Temiz demir ve yüksek seviyede korozyona uğramış demir sonuçları arasında farkın ısı haritasında gösterilmesi

Korozyon derecelendirmesinin düşük hata payı ile yapılabilir bir noktaya getirilmesi için gelecek senaryoda çok sayıda ölçüm alınarak DDM ortaya çıkartılacaktır. DDM belirlendikten sonra korozyon kararının alınması için kontrollü ortamda alınan referans ölçümler sonucunda elde edilecek imza verileri üzerinden ilerlenecektir. Bunun yapılabilmesi için güncel TBDY'de belirtilen inşaat çeliği özellikleri, beton kalitesi, etriye sarımları dikkate alınan kolon kesitleri hazırlanacak ve HKT ile korozyona uğratılacaktır. Kontrollü bir şekilde korozyona uğratılan kolon kesitlerinden çok sayıda ölçüm alınarak ölçümler alınacaktır. Ölçüm sonuçları gerilim, faz kayması, faz kayması farkı, cevap işareti üzerindeki anomalilerin tespiti, cevap işaretinin ayrık dalgacık dönüşümü yöntemi ile işaret hakkında özniteliklerin çıkartılması sonucu elde edilecek bilgiler kullanılarak imza veriler ile karşılaştırılması gerçekleştirilecektir. Karşılaştırma sonucunda korozyon derecesi hakkında düşük hata payına sahip bir karara varılacaktır.

5. SONUÇLAR

İlgili çalışma sonucunda korozyon tespiti için tahribatsız muayene cihazı olarak kullanılması amaçlanan bir Frekans Modüleli Sürekli Dalga Radarı tasarlanarak hayata geçirilmiştir. FMSD Radar gerçekleştirilmesi süresince; CST Microwave Studio ile benzetim senaryoları, radara ait RF devrenin tasarlanması, devre entegrasyonu, cihazın kontrolcü kartı olan mikrodenetleyici kartın programlanması, ölçüm arayüzü tasarımı ve programlanması, tarama ölçümleri yapabilmek amacıyla bir 2-boyutlu tarama arayüzü tasarımı ve programlanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçümlerin analiz edilmesi için Python modülleri kullanılarak bir veri işleme algoritması yazılmıştır. Bu algoritma ile cevap işaretleri; genlik değerleri, frekans kayması, faz kayması, sonuçların 3-boyutlu gösterimleri altında incelenmiştir.

Alınan ölçümler çerçevesinde; temiz durumdaki malzemenin cevap işareti ile yüksek seviyede korozyona sahip malzemenin maksimum genlik noktaları arasında 117 MHz frekans kayması gözlemlenmiştir. Genlik değerleri incelendiğinde ise yüksek seviyede korozyona uğramış hedeften ve temiz durumdaki hedeften alınan ölçümlerde maksimum genlik noktaları arasında 0.24 V değerinde ve çalışma bölgesi olarak nitelendirilen bölgede ise 0.309 V değerinde gerilim kayıpları gözlemlenmiştir. Cevap işaretlerinin faz kayması açısından incelenmesi sonucunda +21 ile -31 derece arasında toplam 52 derecelik bir faz farkı olduğu görülmüştür. Tarama ölçüm sonuçları incelendiğinde ise tarama sistemi ile demir malzemenin yerinin tespit edilebildiği, yüksek seviyede korozyona uğramış demir ve temiz durumdaki demir malzemenin ölçüm sonuçları arasında yoğunluk farkı olduğu anlaşılmıştır. Bu çıkarımlar, bize eş demir çubuklardaki korozyona uğramaya bağlı olarak cevap işareti genlik değerinde bir bastırılma olduğunu, frekans kayması yaşandığını, yoğunluk farkı meydana geldiğini ve faz kayması olduğunu göstermektedir.

Ölçümler esnasında FMSD Radara giriş ve çıkışında kullanılan bir çift eş eksenli kablo uzunluklarının ölçüm sonucunda değişimlere neden olduğu ve çözünürlüğü etkilediği görülmüştür. Bu etmenin ölçüm sonuçlarını etkilememesi ve çözünürlüğün arttırılabilmesi için uzunluğa bağlı bir DDM oluşturulması düşünülmektedir. Referans bir ölçümde farklı uzunluktaki bir çift eş eksenli kablolar kullanılarak elde edilecek DDM ile çözünürlüğün artacağı ve daha güvenilir sonuçlara ulaşılacağı düşünülmektedir.

Cevap işaretlerinin incelenmesi için bir makine öğrenimi algoritması da oluşturulmuştur. Bu algoritmada öğrenim modeli olarak rastgele orman (random forest) modeli kullanılmıştır. Modelin eğitilmesi için kullanılacak özniteliklerin elde edilmesi için ayrık dalgacık yöntemi kullanılarak verilerin çok düzeyli 1 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü analizini sağlayan “pywt.wavedec” fonksiyonu kullanılmıştır. İlgili fonksiyon ile korozyona uğramış ve temiz durumdaki hedeften elde edilen ölçüm sonuçlar analiz edilerek model üzerinde kullanılacak veriler elde edilmiştir. Elde edilen verilen eğitim ve doğrulama verileri olarak bölünerek eğitim verileri ile model eğitilmiştir. Analizde kullanılacak optimum dalgacık ailesinin ve seviyesinin belirlenebilmesi için ölçüm verisi üzerinde ayrık dalgacık dönüşümü ve ayrık dalgacık dönüşümü yöntemleri ile katsayılar elde edilerek aralarında ortalama hata karesi (mean squared error) analizi yaptırılarak optimum dalgacık seçilmiştir. Model eğitildikten sonra doğrulama verileri kullanılarak sonuç alınmıştır. Mevcut veriler kullanılarak alınan sonuç bize korozyonlu ölçüm sonuçlarının %66,666 oranında korozyonlu bir metalden alındığını söylemiştir. Ancak, kullanılan ölçüm sayısının yetersiz olması ve ölçüm çözünürlüğünün istenen seviyede olmaması nedeni ile bu teknikten alınan cevap ilgili çalışma süresince belirtilmemiştir.

İlgili yüksek lisans tezi kapsamında tasarımı ve yazılım bileşenleri gerçekleştirilerek hayata geçirilen tahribatsız muayene cihazının çalıştığı ve korozyon tespitinde kullanılabileceği alınan ölçümler ile ortaya çıkartılmıştır. Ancak, mevcut ölçüm sayısı ve çeşitliliği cihaz hassasiyetinin arttırılması için yeterli değildir. Hassasiyetin arttırılabilmesi için planlanan işlerden olan kolon kesitlerinin HKT ile korozyona uğratılması ve bu kolon kesitlerinden ölçümler alınması işi bu aşamada gerçekleştirilememiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi sonucunda kontrollü ortamda alınacak çok sayıda veri ile bir veri havuzu oluşturulması gelecek senaryo için planlanmaktadır. Kontrollü bir şekilde korozyona uğratılan kolon kesitlerinden alınacak çok sayıda cevap işareti kullanılarak bir makine öğrenimi modeli yüksek bir hassasiyet ile eğitilebilecektir.

Bulgularımız, bir tahribatsız muayene cihazı olarak üretilen FMSD Radar ile metal bir nesne üzerindeki korozyonun tespit edilebileceğini göstermektedir. Korozyon tespitinin çevresel etkilerini analiz etmek ve en aza indirmek için gelecekte saha çalışmaları yapılacaktır. FMSD Radar gibi tahribatsız yöntemlerin kullanılması, inşaat sektöründeki yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını sağlarken zaman ve maliyeti optimize edecektir.

6. KAYNAKLAR

Ahmad, S. 2003. “Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review”, Cement and Concrete Composites, 25, 459-471.

Altın, G. ve Dolma, A. 2019. “Buried Objects Segmentation and Detection in GPR B Scan Images.”, The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 6, 11-17.

Alvarez, J. K., Sutjipto, S. and Kodagoda, S. 2017. "Validated ground penetrating radar simulation model for estimating rebar location in infrastructure monitoring,", 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),1460-1465.

Balanis, C. A. 2005. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.

Barnes, C. and Trottier, J. 2000. Ground-penetrating radar for network-level concrete deck repair management. Journal of Transportation Engineering, 126(3), 257-264.

Benedetto, A. and Pajewski, L. 2015. Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. Sensors, 15(12), 30748-30768

Bristow, C. and Jol, H. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. Geological Society, London, Special Publications. 211. 1-7. 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.01.

Browne, J. 2018 “Pulsed vs. CW Signals: Both Loom on a Designer’s Radar”. Microwaves & RF. https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849213/pulsed-vs-cw-signals-both-loom-on-a designers-radar [Son erişim tarihi: 20 Mart 2021.

Senin, S., Hamid, R., Ahmad, J., Ikmal, F., Yusuff, A., Rohim, R., Ghani, K. ve Mohamed Noor, S. 2019. “Damage detection of artificial corroded rebars and quantification using non-destructive methods on reinforced concrete structure”, Journal of Physics: Conference Series,1349.

Carroll, J., Paparisto, G. and Vye, D. 2016. "The "Coffee-Can" Radar Redesigned as an Inexpensive RF PCB [Application Notes]", IEEE Microwave Magazine,17, 62-74.

Chen, D., Yen M., Lin P., Groff, S., Lampo, R., McInerney, M. and Ryan, J. 2014. “A Corrosion Sensor for Monitoring the Early-Stage Environmental Corrosion of A36 Carbon Steel”, Materials, 7, 5746-5760.

Cheng, D. K. 1989. Field and Wave Electromagnetics. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, USA.

Cheng, D. K. 1993. Fundamentals of Engineering Electromagnetics. New York: Addison-Wesley Publishing Company

Conyers, L. (2012). Ground-Penetrating Radar for Archaeology. AltaMira Press.

Conyers, L. B. (2004). Ground-penetrating radar for archaeology (pp. 35-36). Altamira Press.

Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. AltaMira Press.

Daniels, D. J. 2004. Ground penetrating radar (2nd ed.). The Institution of Electrical Engineers, London, UK.

Gallion, J. R. 2019. Microwave detection of surface breaking cracks in metallic structures under heavy corrosion and paint. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, Missouri Üniversitesi.

Gürdal, O. 2017. Elektromanyetik Alan Teorisi (4. Basım). Bursa: Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları.

Hasan, M.I. and Yazdani N. 2016. "An Experimental Study for Quantitative Estimation of Rebar Corrosion in Concrete Using Ground Penetrating Radar", Journal of Engineering, 2016, 8.

Hayt, W. H., & Buck, J. A. 2011. Engineering Electromagnetics. McGraw-Hill Education, New York, NY, USA.

He, D. 2019. "Development of electromagnetic method to evaluate the corrosion of steel rebar", 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation.

Holzman, B. K. 2009. Advanced Radar Techniques and Systems (2nd ed.). Artech House, Norwood, MA, USA.

Hong, S.-X., Lai, W. L. and Helmerich, R. 2012. "Monitoring accelerated corrosion in chloride contaminated concrete with ground penetrating radar," 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (YNR), 561 566.

Jamil, M., Hassan, M.K., Al-Mattarneh, H.M.A. ve Zain M. F. M. 2013. "Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques." Materials and Structures, 46, 77–87.

Jankiraman, M. 2018. FMCW Radar Design. London: Artech House.

Jol, H. M. 2009. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier.

Kabir, S., & Zaki, A. 2011. Detection and quantification of corrosion damage using ground penetrating radar (GPR).

Karunanayake, K. T. S., Dissanayake, P. B. R. ve Galagedara, L. W. 2014. "Ground Penetrating Radar wave behavior under different corrosion levels of concrete", Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 317-322.

Kraus, J. D., & Carver, K. R. 1980. Electromagnetics. McGraw-Hill Education, New York, NY, USA.

Kurt, S. 2017. Range Resolution Improvement of FMCW Radars. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, ODTÜ, Ankara.

Lai, W. W. L., Dérobert, X., & Annan, P. 2017. "A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis". NDT & E International, 96, 14-28.

Lai, W. W. L., Kind, T., & Wiggenhauser, H. (2010). Detection of accelerated reinforcement corrosion in concrete by ground penetrating radar. Proceedings of the 13th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2010, 1-5.

Lai, W.L., Kind, T., Stoppel, M. and Wiggenhauser, H. 2013. "Measurement of Accelerated Steel Corrosion in Concrete Using Ground-Penetrating Radar and a Modified Half-Cell Potential Method.", Journal of Infrastructure Systems, 19, 205- 220.

Li, P., Yu, H., Li, Z., Zhang, B., Wu, T., Pu, Z., & Wang, S. (2023). Corrosion detection of reinforced concrete structures based on microwave nondestructive technique. AIP Advances, 13

Li, Z., Li, F, Zdunek, A., Landis, E. ve Shah, S. P. 1998. "Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Rebar Corrosion in Concrete", ACI Materials Journal, 95.

Lin, JJ., Li, YP., Hsu, WC. Lee, TS. 2016. "Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application", SpringerPlus, 5.

Melvin, W. L., & Scheer, J. A. (2013). Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. SciTech Publishing.

Mosharafi, M., Mahbaz, S.B., Dusseault, M.B. and Vanheeghe, P. 2020. "Magnetic detection of corroded steel rebar: Reality and simulations", NDT & E International,110.

Nathanson, R. E. 1991. Radar Design Principles: Signal Processing and the Environment. Springer, New York, NY, USA.

Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. Earth-Science Reviews, 66, 261-330.

Ozdemir, C. (2019). Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB. International Journal of Advanced Science and Technology, 28(17), 125-133.

Peng Z., Hwang, J. Park, C., Kım, B., Andrıese M. and Wang X. 2012. "Microwave permittivity, permeability, and absorption capability of ferric oxide", ISIJ International, 52, 1535- 1538.

Pennock, S.R., Chapman, D., Rogers, C., Royal, A.C.D., Naji, A., & Redfern, M. (2010). Effects of iron pipe corrosion on GPR detection. In Proceedings of the 13th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2010 (pp. 1-5)

Pozar, D. M. 2011. Microwave Engineering (4th ed.). Wiley.

Prabaswara, A., Munir, A. and Suksmono, A. B. 2011. "GNU Radio Based Software-Defined FMCW Radar for Weather Surveillance Application", The 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications.

Resmî Gazete. "Deprem Etkisi Altında Önüretimli Betonarme Bina Taşıyıcın Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar". https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf [Son erişim tarihi: 07 Mart 2021].

Resmî Gazete. "Deprem Etkisi Altında Yerinde Dökme Betonarme Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar". https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf [Son erişim tarihi: 07 Mart 2021].

Richards, M. A. 2010. Fundamentals of Radar. McGraw-Hill Education.

Rust, A.C., Russell, J.K. and Knight, R.J. 1999. "Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks", Journal of Volcanology and Geothermal Research,91, 79-96.

Shen, W. ve Wen, B. 2010. "A New Demodulation andModulationMethod Designed for FMCW Radar", Journal of Electrical and Computer Engineering.

Skolnik, M. I. 2008. Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill Education, New York, NY, USA.

Tešić, K., Baričević, A., & Serdar, M. (2021). Non-destructive corrosion inspection of reinforced concrete using ground-penetrating radar: A review. Materials, 14(4), 975.

Tosti, F. and Ferrante, C., 2020. “Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures”, Surveys in Geophysics, 41, 485–530.

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. “Konut Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu”. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/04/KonutPolitikalariOzelIhtisasKomisyonuRaporu.pdf [Son erişim tarihi: 05 Mart 2021].

Twigg, H. K. and Molinari, M. 2016. “Test results for a capacitance-based corrosion sensor.”, Thirteenth International Conference on Condition Monitoring and Machine Failure Prevention Technologies.

Twumasi, J. O. and Yu, T. 2017. "Corrosion current level estimation of rust samples using inverse dielectric spectroscopy,", 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 404-407.

Wan, M., Zhao, Y., Wang, J., & Wu, J. (2001). Ground Penetrating Radar Technique and its Application in Non-Destructive Testing of Reinforced Concrete. Asia Pacific Conference on NDT - 2001, Brisbane (Australia). e-Journal of Nondestructive Testing, 6(10).

Wibowo, T. P. and Zulkifli, F. Y. 2019. "Design of FMCW Ground Penetrating Radar For Concrete Inspection At ISM Band 2.4–2.5 GHz," 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC),1232-1234.

Wolff, C. “Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar)”. Radar Tutorial. https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html

Mechbal Z., and Khamlichi A. 2014. Identification of corrosion in reinforcement rebars by using the GPR. MATEC Web of Conferences, 16.

Mistry, K., Zaharis, Z., Tziris, E., Lazaridis, P., Xenos, T., and Glover, I. 2018. An optimal design of printed log-periodic antenna for L-band EMC applications. In 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe) (pp. 614-619). IEEE.

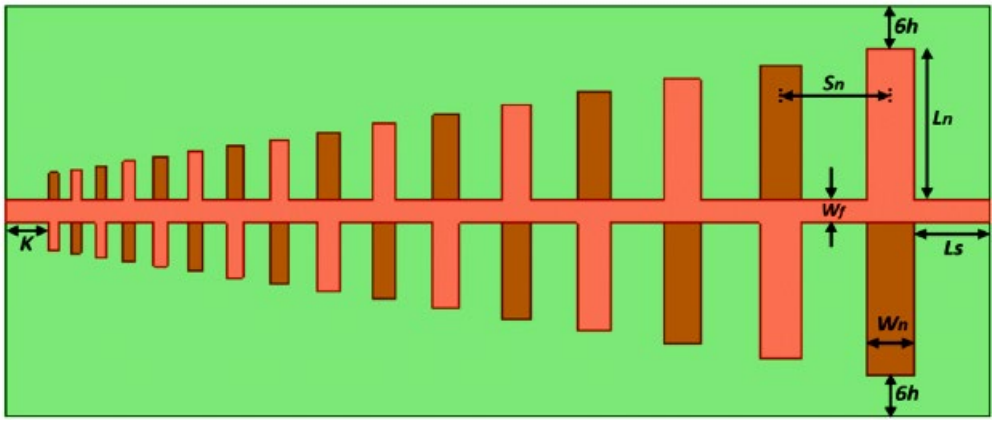
Zaki, A., Megat Johari, M. A., Hussin, W. ve Jusman, Y. 2018. “Experimental Assessment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar (YNR)”, International Journal of Corrosion, 2018, 10.

Zhang, H., Xu L., XU L., Wu J. and HE Y. 2015. “An Investigation into Atmospheric Corrosion Detection under Paint with K-band Microwave NDT”, IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 218-222.

7. EK – 1

LPDA, frekansın logaritmik fonksiyonu olarak aralıklarla yerleştirilmiş yarım dalga dipollerinden oluşur. Dipoller, Şekil 7.1'de görüldüğü gibi bir ön bir yüz arka yüzde olacak şekilde birbirlerine paralel olarak büyükten küçüğe ve iki yüzde de bulunan besleme hattına dik olacak şekilde bağlanırlar.

Yagi-Uda anten ve LPDA yapısal olarak birbirlerine oldukça benzerdir ve aynı zamanda benzer kullanım alanlarına sahiptirler. Yagi-Uda, yüksek yönlülüğe sahip olmasının yanı sıra dar bant genişliği sağlamaktadır. Ancak LPDA, yarım dalga dipollerinin karşılıklı yüzeylerde ve frekansın bir logaritmik fonksiyonu olarak konumlandırılması sebebiyle; iyi bir yönlülük, açısal çözünürlük yeteneği ve geniş bant genişliği sağlayabilmektedir.

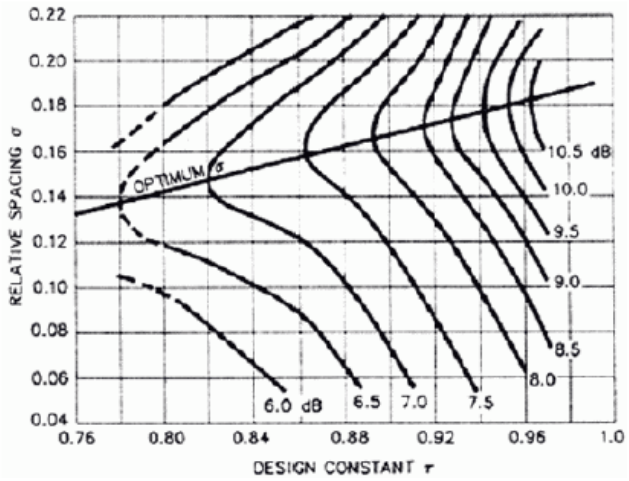


Şekil 7.1. Mikroşerit log-periyodik dipol anten dizisi

Mikroşerit yama anten olarak da kullanılabilen LPDA anten bu sayede geniş bant genişliği ve iyi yönlülüğünün yanı sıra küçük boyut ve düşük fiyat avantajı da sağlamaktadır. Betonarme yapılarda kullanılan inşaat çeliklerinin tespit edilebilmesi için belirlenen 2300- 2600 MHz geniş çalışma frekansı da düşünüldüğünde yapılan tahribatsız muayene cihazının alıcı ve verici antenleri için LPDA antende karar kılınmıştır.

LPDA anteni oluşturan dipoller kare, dairesel ya da eliptik şekillerde olabilir. Antenin performansını belirlemede; alt katman materyalinin kalınlığı (t_s), dipol genişlikleri (w_n), besleme hattı genişliği (w_f), dipol uzunlukları (l_n) ve dipoller arası mesafe ($s_{n-1,n}$) önemli rol oynamaktadır. Ancak LPDA tasarımı için en önemli parametreler dipol uzunluklar ve dipoller arası mesafedir. Bu iki parametre ölçeklendirme faktörü (τ) ve aralıklandırma faktörüne (σ) bağlıdır.

Bir LPDA tasarımına, antenin boş uzayda olduğu varsayılarak τ ve σ değerlerinin belirlenmesi ile başlanır. Aralıklandırma ve ölçeklendirme faktörleri hedeflenen kazanç değerine bağlı olarak Şekil 7.2'de gösterilen Carrel grafiği yardımıyla bulunurlar (Mistry vd. 2018).



Şekil 7.2. Carrel grafiği

LPDA anten tasarımının matematiksel olarak gerçekleştirilmesinde kullanılan formüller ve tanımlar aşağıda verilmiştir.

Gereken dipol sayısını bulmak için kullanılması gereken formül:

$$N = 1 + \frac{\log B_s}{\log 1/\tau} \tag{7.1}$$

Yapı bant genişliği olan B_s, aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$B_s = \frac{f_{max}}{f_{min}} . B_{ar} \tag{7.2}$$

Aktif bölge bant genişliği olan B_{ar} :

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 [\frac{4\sigma}{1-\tau}] \tag{7.3}$$

Olarak bulunması ile Denklem 7.8 üzerinde 7.9'un kullanılması ardından yeni elde edilecek denklemin 7.7 üzerinde kullanılması ile dipol sayısı bulunabilir.

En uzun dipol en düşük frekans değerine bağlı olacağından bu değer:

$$L_1 = \frac{1}{2} [\frac{c}{f_{min}}] \tag{7.4}$$

c: ışık hızını temsil eder.

Ardışık dipollerin uzunlukları ise:

$$L_{n+1} = L_n . \tau \text{ olur.} \tag{7.5}$$

En uzun dipol ve ardışığı ile arasındaki mesafe:

$$S_1 - S_2 = [\frac{L_1 - L_2}{2}] . [\frac{4\sigma}{1-\tau}] \tag{7.6}$$

$S_{n+1} = S_n.\tau$ (7.7)

Dipol genişliği, silindirik dipol karakteristik empedansı Z_0 kullanılarak belirlenebilir:

$Z_0 = \frac{\eta_0}{\pi} x [\ln(\frac{l_n}{a_n}) - 2.25]$ (7.8)

a_n**:** Eşdeğer silindirik dipol yarıçapı, $\frac{\eta_0}{\pi}$ = 120 alınır.

$W_n = \pi . a_n$ (7.9)

Denklem 7.1'den 7.9'a kadar olan denklemler sayesinde LPDA için gerekli parametreler hesaplanabilir. Ancak anten tasarlanırken alt tabakanın dielektrik sabiti de dikkate alınmalıdır.

8. EK- 2

- **Tkinter,** Şekil 3.5'te gösterilen arayüz tasarımı için kullanılmıştır.
- **Openpxl,** elde edilen verilerin konuma bağlı olarak gerilim ve frekans başlıkları ile kaydedilmesi için kullanılmıştır.
- **Numpy**, veri gönderilmesi ve alınması sırasında kullanılan dizilerin (array) oluşturulması ve diziler üzerinde hızlı matematiksel işlemler yapılabilmesi için kullanılmıştır.
- **Serial,** seri port erişiminin sağlanmasını sağlar. Böylece motor sürücü ve mikrodenetleyici kart arasında veri alışverişi gerçekleştirilir.7
- **Struct.pack,** seri porta yazılacak verileri paketlerken ve paketten çıkartırken herhangi bir düzensizlik olmaması için kullanılmıştır.
- **Matplotlib,** işaretlerin ekrana çizdirilmesi için kullanılmıştır.
- **Scipy.interpolate,** VCO'ya ait gerilim ve frekans değerleri arasında ilişki kurulabilmesi için kullanılmıştır.
- **FMCWSignalProcesses,** kullanıcı tanımlı bir kütüphanedir. Proje ihtiyacı doğrultusunda üçgen dalga, kare dalga ve testere diş dalgaların ürettirilmesi için çeşitli hesaplamalar yapan fonksiyonlar yazılmıştır.
    - def Predistort(f_desired) fonksiyonu ile arzu edilen ve uygulanabilir frekans değerleri arasında gerçekleştirilebilir en yakın değerleri bulur. En yakın değerin bulunabilmesi için VCO veri sayfası ("datasheet") üzerinden elde edilen giriş gerilim değerleri ve üretilebilir frekans değerleri arasındaki ilişkiyi bize veren bir fonksiyon gerekmektedir. "interp_func" adını verdiğimiz bu fonksiyon ise 1 boyutlu enterpolasyon ile elde edilmektedir. "interp_func" fonksiyonuna VCO girdi gerilimlarını kapsayan ve mikrodenetleyici kart pin gerilimları arasında olan 800 adet değer girdi olarak verilerek VCO'nun üretebileceği gerçek frekans değerleri yüksek hassasiyetli olarak hesaplanır. Böylece arzu edilen frekans değerlerine karşın üretilebilecek en yakın değerler hesaplanmış olur. Gerçek frekans değerinin dizide bulunduğu indis alınarak gerilim dizisinden gerekli gerilim değeri çıkartılır ve mikrodenetleyici karta iletilmek üzere bir buffer'a kaydedilir.

9. EK-3

Ortalama Hata Karekökü (RMSE), bir model tarafından tahmin edilen değerler ile gözlemlenen gerçek değerler arasındaki farkların bir ölçüsüdür. RMSE, tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki hatanın ortalama büyüklüğünü ölçen bir ölçüdür. Özellikle, amacın sürekli değerleri minimum hata ile tahmin edebilecek bir model oluşturmak olduğu regresyon analizinde kullanışlıdır. Denklem 9.1'de verilen formül RMSE hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$\text{RMSE} = \sqrt{(\Sigma(\frac{(P_i - O_i)^2}{N})} \tag{9.1}$$

Burada P_i tahmin edilen değeri, O_i gözlenen değeri ve N toplam gözlem sayısını göstermektedir. Tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki farkların karesi alınır, toplanır ve ardından gözlem sayısına bölünür. Son olarak, RMSE'yi elde etmek için sonucun karekökü alınır.

Daha düşük bir RMSE, modelin tahminlerinin gerçek gözlemlenen değerlere daha yakın olduğunu gösterdiğinden daha iyi bir uyuma işaret eder.

Şekil 9.1'de verilen tablo görseli yüksek seviye korozyona uğramış demir, orta seviye korozyona uğramış demir ve temiz demir hedeflerinden alınmış tek nokta ölçümlerine ait ortalama karekök hatası (RMSE) değerlerini göstermektedir.

Ölçüm / Hedef Malzeme	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
Orta Seviye Korozyona Uğramış Demir	0.0007514705010682 02	0.0007414547148572378	0.0007590655630284477	0.0007215396502565615	0.0007402248872926126	0.0008037088167369414
Yüksek Seviye Korozyona Uğramış Demir	0.0008042095420780857	0.0008530253115545738	0.0008071099646698983	0.0007937813004764 67	0.0008143255041665533	0.0008132870865010977
Temiz Demir	0.0009227119649985918	0.0010148871678549 11	0.0010084398869858642	0.0010417202223253431		

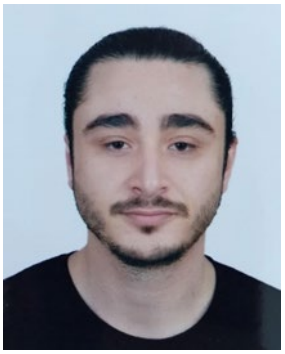
Şekil 9.1. Ölçümlere ait ortalama karekök hatası

Çizelge 9.1'de ise RMSE değerlerine bağlı olarak en hatalı ve en az hatalı ölçümler listelenmiştir.

Çizelge 9.1. Ölçümlerin ortalama karekök hatasına bağlı olarak incelenmesi

	En Hatalı Ölçümler	En Az Hatalı Ölçümler
Orta Seviye Korozyona Uğramış Demir	6. Ölçüm	4. Ölçüm
Yüksek Seviye Korozyona Uğramış Demir	2. Ölçüm	4. Ölçüm
Temiz Demir	4. Ölçüm	1. Ölçüm

ÖZGEÇMİŞ



MELİKHAN EREN

melikhaneren@gmail.com

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2015-2020	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Yazılım Test Mühendisi 2022-Devam Ediyor	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara

ESERLER

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1. M. Eren, E. Mengüç, A. Kocakuşak ve S. Helhel. "Investigation of Usage Possibility FMCW Radar for Non-Destructive Corrosion Detection in Building Structures," Progress In Electromagnetics Research Symposium, Prague, Czech Republic, 3-6 July 2023. (Kabul edildi.)