

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**FMSD RADAR KULLANARAK DEMİR DONATILARDA PAS SEVİYESİ
TAHMİNİ**

Güllühan IRMAK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**FMSD RADAR KULLANARAK DEMİR DONATILARDA PAS SEVİYESİ
TAHMİNİ**

Güllühan IRMAK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FMSD RADAR KULLANARAK DEMİR DONATILARDA PAS SEVİYESİ
TAHMİNİ

Güllühan IRMAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

TEMMUZ 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FMSD RADAR KULLANARAK DEMİR DONATILARDA PAS SEVİYESİ
TAHMİNİ

Güllühan IRMAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 31/07/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk HELHEL (Danışman)
Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖZET

FMSD RADAR KULLANARAK DEMİR DONATILARDA PAS SEVİYESİ TAHMİNİ

Güllühan IRMAK

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Temmuz 2024; 60 Sayfa

Türkiye gibi jeolojik olarak genç oluşumlu ve diri fay hatları üzerinde bulunan ülkelerde deprem çok büyük bir doğal tehdittir. Ülkemizde en son yaşanan 6 Şubat 2023 depremlerinin elim sonuçları da bu tehditin ne denli önemsenmesi ve ivedilikle depreme yönelik adımlar atılması gerektiğini bir kez daha göstermiştir. Günümüzdeki çalışmalarla ve teknolojiyle depremin ne zaman olacağı, hangi şiddette ve yıkıcılıkta gerçekleşeceği önceden tahmin edilememekte veya bilinmemektedir. Ancak önceden depremin yıkıcı etkisini azaltmak can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek için yapılacak veya mevcut binaların risk analizlerin gerçekleştirmek mümkündür. Bu açıdan bakıldığında yapı stoklarının dayanıklılık ve risk kontrollerinin gerçekleştirilmesi depremlerden önce uygulanması gereken zaruri bir işlemdir. Sayıları milyonları bulan ve deprem yönetmeliklerine uymayan, yönetmeliklere uysa bile korozyon seviyesindeki değişimin belli periyotlarla sürekli kontrol edilmesi gereken bu yapıların testlerinin kısa sürede, az maliyetli ve insan gücüne en az ihtiyaç duyulacak şekilde gerçekleştirilmesi için bu çalışmada FMSD radar ile demir donatılardaki korozyon seviyesinin tahmini önerilmiştir. Halihazırda en çok kullanılan yöntem tahribatlı bir yöntem olan karot alma tekniğidir. Bu teknik, analiz süreçlerinin uzunluğu, kolonlara hasar vermesi ve insana olan ihtiyacı fazla olması nedeniyle alternatif arayışlara itmektedir. Önerilen çalışma bu dezavantajları gidermek açısından oldukça tercih edilebilir bir tahribatsız muayene yöntemidir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında silindirik beton bir kalıp içerisinde bulunan demir üzerinde meydana gelen korozyon varlığının, FMSD radar ile gerçek ölçümler alınarak tespiti amaçlanmıştır. Bu amaçla MATLAB daraltılmış senaryo ile faz farkı değişimi gözlemlenmiş ve ardından benzetim ortamında sonuçlar elde edilmiştir. Gerçek hayatta da betonlu silindirik kalıp içindeki demirler üzerinden 2.3-2.6 GHz arasında FMSD radar taramaları alınarak veriler değerlendirilmiştir. Elektromanyetik dalga malzeme içinde hareket ederken ortamların fiziksel ve kimyasal özellikleri ilerleyen dalganın genliğini fazını etkiler. Dalganın katmanlar arasında ilerleyişinden bu bilgilere bakılarak çıkarımlar yapılır. Beklenen sonuçlara göre betonun içindeki demirde bulunan korozyon seviyesinin artışı beraberinde faz değişimine sebep olacaktır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre 0 mm kalınlığında korozyon seviyesinde yani korozyonsuz durum ile 1 mm korozyon varlığında 2.45 GHz seviyesinde 6° faz farkı oluşmuştur. Daraltılmış MATLAB senaryosuna göre 2.43 GHz seviyelerinde 1 mm korozyonlu levhada oluşan faz derecesi ile korozyonsuz levha arasında yaklaşık 8° faz farkı gözlemlenmiştir. Gerçek demir üzerinden alınan FMSD ölçümlerine göre ise temiz

demir ile korozyonlu demir arasında 28° faz farkı oluşmuştur. Ardından demirler, silindirik beton kalıp içerisine yerleştirilip FMSD taraması yapıldığında temiz demir ile korozyonlu demir arasında korozyon tespiti sağlanmıştır 2.4 GHz seviyelerinde yaklaşık 5° faz farkı oluşmuştur, ancak orta seviye korozyona ait demir için anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Sonuç olarak FMSD radar ile korozyon varlığı kesin olarak belirlenmiş ancak korozyon derecelendirmesi için elde edilen matematiksel modellerin güvenilirliğinin artırılması gerekmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Betonarme Kontrolü, Faz Farkları, FMSD Radar, Beton, Korozyon, Mikrodalga Görüntüleme Sistemi, Tahribatsız Muayene

JÜRİ: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE LEVEL OF CORROSION IN REINFORCED STEEL BY USING FMCW RADAR

Güllühan IRMAK

MSc Thesis in Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

July; 60 pages

In countries like Turkey, which are geologically young and located on active fault lines, earthquakes are a major natural threat. The tragic results of the most recent earthquake in our country on February 6, 2023 have once again shown how much this threat should be considered and how urgent steps should be taken against earthquakes. With today's studies and technology, it is not possible to predict or know when an earthquake will occur, how severe and destructive it will be. However, it is possible to perform risk analyses of existing buildings or to reduce the destructive effects of earthquakes in advance and to minimize loss of life and property. From this perspective, it is essential to perform durability and risk checks of building stocks before earthquakes. In order to perform the tests of these structures, which number in the millions and do not comply with earthquake regulations, and which must be constantly checked for changes in corrosion levels at certain intervals even if they comply with regulations, in a short time, at low cost and with minimal need for manpower, the estimation of corrosion levels in iron reinforcements with FMCW radar is proposed in this study. The most commonly used method is currently the coring technique, which is a destructive method. This technique pushes for alternative searches due to the length of analysis processes, damage to columns and high human demand. The proposed study is a highly preferable non-destructive testing method in terms of eliminating these disadvantages. In the thesis study, it was aimed to determine the presence of corrosion on the iron in a cylindrical concrete mold by taking real measurements with FMCW radar. For this purpose, the phase difference change was observed with the MATLAB narrowed scenario and then the results were obtained in the simulation environment. In real life, FMCW radar scans were taken between 2.3-2.6 GHz from the irons in the concrete cylindrical mold and the data were evaluated. While the electromagnetic wave moves in the material, the physical and chemical properties of the environments affect the amplitude and phase of the advancing wave. Inferences are made by looking at this information from the wave's progress between layers. According to the expected results, the increase in the corrosion level in the iron in the concrete will cause a phase change. According to the simulation results obtained, a phase difference of 6 degrees occurred at 2.45 GHz level in the presence of 1 mm corrosion with a corrosion level of 0 mm thickness, i.e. without corrosion. According to the narrowed MATLAB scenario, a phase difference approximately 8 degrees, was observed between the phase degree formed in the 1 mm corroded plate at 2.43 GHz levels and the corroded plate. According to the FMCW measurements taken on real iron, a phase difference of 28 degrees occurred between clean iron and corroded iron. Then, when the irons were placed in a cylindrical concrete mold and FMCW scanning was performed, corrosion

detection was achieved between clean iron and corroded iron a phase difference of approximately 5° occurred at 2.4 GHz levels, but no significant result was obtained for iron with medium level corrosion. As a result, the presence of corrosion was determined accurately with FMCW radar, but the reliability of the mathematical models obtained for corrosion grading needs to be increased.

KEYWORDS: Concrete, Corrosion, FMCW Radar, Microwave Imaging System, Non-Destructive Testing, Phase Differences, Reinforced Concrete Control

COMMITTEE: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖNSÖZ

O'nun ilmi dışında bir yaprak bile düşmez. (Enam, 59) İlmin sahibi, sebepleri sonuçları ve ikisi arasındaki olayları yaratan Allah'a hamdolsun.

Yüksek lisans sürecimin en başından en sonuna kadar yol gösteren, ilminden istifade ettiğim, çalışma azmini her zaman örnek alacağım danışman hocam Prof. Dr. Selçuk Helhel'e teşekkür ederim. Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Araştırma ve Uygulama Merkezi (EMUMAM) laboratuvar çalışmaları boyunca yardımları dokunan Dr. Atalay Kocakuşak ve Emin Sapmaz'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca nazımı ve sitemimi çeken; sabır, emek ve dualarını üzerimden esirgemeyen annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ediyorum. Allah onlardan razı olsun.

Filistin'den tüm dünyaya saçılan tohumlar şehit Rim ve onun gibi şehit binlerce çocuğa Batı medeniyetini ve koyduğu kuralların ne demek olduğunu alenen gözler önüne serdikleri için şükranlarımı sunuyorum. Müslüman bir halk soykırıma uğrarken bunu sadece seyrediyor olmanın derin acısını duyuyorum ve sözlerimi bütün bu katliamlar gerçekleşirken yaşamaya nasıl tutunmam gerektiğine vesile olan terör devleti işgalci İsrail tarafından katledilen şehit edebiyatçı Prof. Dr. Rıfat el-Arır'ın şiirinden bir kesitle sonlandırmak istiyorum; eğer ölmem gerekiyorsa, hikayemi anlatmak için yaşamam gerekiyor.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Muayene Yöntemleri.....	1
1.2. Betonarme Yapı ve Korozyon.....	5
1.3. Korozyon Tespiti.....	7
2. KAYNAK TARAMASI	10
2.1. Elektromanyetik Dalga ve Yayılım.....	10
2.2. Radar Tabanlı Görüntüleme Sistemleri.....	13
2.2.1. Yere Nüfuz Eden Radar (YNR).....	16
2.2.2. Mikrodalga Görüntüleme.....	20
2.2.3. Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) Biçimi	22
3. MATERYAL VE METOT	29
3.1. Benzetim Çalışmaları	29
3.1.1. Daraltılmış Senaryo Benzetimi.....	29
3.1.2. Evrensel Yazılımlar Kullanarak Benzetim Çalışması	32
3.2. Anten Tasarımı ve Ölçüm Kumpanyası	33
3.2.1. Anten Tasarımı	33
3.3.2. Ölçüm Düzeneği	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
5. SONUÇLAR	53
6. KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “FMSD Radar Kullanarak Demir Donatılarda Pas Seviyesi Tahmini” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

31/07/2024

Güllühan IRMAK



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işıık hızı
cm	: Santimetre
dB	: Desibel
GHz	: Gigahertz
MHz	: Megahertz
ϵ	: Dielektrik geçirgenlik
μ	: Manyetik geçirgenlik
σ	: İletim katsayısı
η	: Ortam empedansı
E	: Elektrik alan

Kisaltmalar

$AI\dot{C}$	: Analog İşaret evrici
FMSD	: Frekans Modeleli Sürekli Dalga
GD	: Gerilim Denetimli İşaret reteci
MEİ	: Mkemmek Elektrik İletken
YNR	: Yere Nüfuz Eden Radar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Karot alma tekniği; a) Karot alma makinesi (Köseoğlu, 2010); b) Basınç altındaki karot (Köseoğlu, 2010).....	2
Şekil 1.2. Yüzey sertliği ölçümünde kullanılan malzeme; a) Schmidt çekici (Alshaikh ve Zeyad, 2022); b) Schmidt çekici cihazı yapısı (Özkan ve Kaya, 2020).....	3
Şekil 1.3. Ultrasonik test.....	4
Şekil 1.4. Beton içindeki demir üzerinde meydana gelen korozyon.....	7
Şekil 2.1. Geliş açısına göre değişen yansıma katsayısı	13
Şekil 2.2. Klasik radar sistemi (Richards vd., 2010)	15
Şekil 2.3. Tipik bir YNR sistemi	17
Şekil 2.4. İki uçlu mikrodalga devre şematiği	21
Şekil 2.5. FMSD radar blok şeması	23
Şekil 2.6. FMSD radarda gönderilen ve alınan işaret	24
Şekil 2.7. FMSD radar testere dişi dalganın atım frekansı	25
Şekil 2.8. Korozyon meydana gelen bir inşaat çeliği ve FMSD işareti	26
Şekil 3.1. FMSD ve daraltılmış MATLAB senaryosunda dalga yayılımı	29
Şekil 3.2. İdeal referans ortamı ve dalga yayılımı	31
Şekil 3.3. Benzetim ortamında korozyonlu levha	32
Şekil 3.4. Benzetim ortamında betonlu korozyonlu levha	33
Şekil 3.5. Sarmal anten geometrisi ve parametreleri	33
Şekil 3.6. Sarmal antenin benzetim ortamında önden ve üstten görünümü.....	34
Şekil 3.7. Sarmal anten ve 3 boyutlu silindir kılavuz	36
Şekil 3.8. Benzetim ortamında antenin S_{11} parametresi	37
Şekil 3.9. Üretilen sarmal anten.....	37
Şekil 3.10. Sarmal antenin VNA ile ölçümü	38
Şekil 3.11. Sarmal anten VNA ile ölçülen S_{11} grafiği.....	38
Şekil 3.12. Sarmal anten simülasyon ortamında kazançı a)Crosspolar kazanç; b)Copolar kazanç.....	39
Şekil 3.13. Sarmal antenin benzetim ortamında ve üretildikten sonra kazanç karşılaştırması a)Crosspolar kazanç; b)Copolar kazanç	39
Şekil 3.14. Sarmal anten ölçülen yönlülük ve yarı güç bant genişliği.....	40
Şekil 3.15. Sarmal anten eksenel oran	40
Şekil 3.16. FMSD radar elemanları	41
Şekil 3.17. Temiz, orta, korozyonlu demirler için ölçüm düzeneği.....	41
Şekil 3.18. Silindirik kalıp a) Yandan görünüm; b) İçinde ölçüm yapılacak demir ve kalıbın üstten görünümü.....	42
Şekil 3.19. Silindirik kalıplı FMSD radar ölçüm düzeneği a) Boş kalıp; b) İç demirli kalıp.....	42
Şekil 4.1. Korozyon seviyesine bağlı faz grafiği	43
Şekil 4.2. Referans ortamı dahil edildiğinde elde edilen faz cevabı.....	44
Şekil 4.3. Belli frekanslar için korozyona bağlı değişen faz cevabı	45

Şekil 4.4. Korozyonlu MEİ levha faz değerleri	46
Şekil 4.5. Korozyonlu MEİ levha frekans 2.45 GHz’de faz değerleri.....	46
Şekil 4.6. Betonlu korozyonlu MEİ levha faz değerleri	47
Şekil 4.7. Betonlu korozyonlu MEİ levha 2.45 GHz faz değerleri.....	47
Şekil 4.8. Frekansa bağlı AİÇ çıkışında okunan gerilim değerleri değişimi	48
Şekil 4.9. Frekansa bağlı faz değişimi	49
Şekil 4.10. Korozyon kalınlığı ve faz cevabının 2.33 GHz frekansta ilişkisi.....	50
Şekil 4.11. Silindirik boş beton kalıbın ve silindirik beton kalıbın içindeki demirlerin frekansa bağlı faz cevabı.....	51
Şekil 4.12. Boş beton kalıplı faz cevabından betonlu demirli faz cevabını çıkartınca elde edilen faz farkı.....	52



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Muayene yöntemlerinin karşılaştırılması (Başyigit vd., 2013)	5
Çizelge 3.1. Sarmal anten ölçüleri	35



1. GİRİŞ

Tektonik hareketler yerkürenin oluşumundan itibaren sürekli meydana gelmektedir. Bu hareketlerin sonucunda yıkıcı etkisi değişkenlik gösteren sarsıntılar ve depremler de her an gerçekleşmektedir. Yer levhalarının hareketleri dünyanın farklı yerlerinde farklı deprem kuşaklarının oluşmasına sebep olmuştur. Türkiye de jeolojik olarak genç oluşumlu bir ülkedir. Ülkemiz, en büyük deprem kuşaklarından biri olan Alp Himalaya Deprem Kuşağında, aktif fay hatları üzerinde bulunur (Uzun ve Balyemez, 2020). Birinci derece deprem riski bulunduran bölgelerde yaşayan insanlar Türkiye nüfusunun %90'ını oluşturmaktadır ve mevcut yapı stoğunun olası bir depremde zarar görme ihtimali çok yüksektir (Öcal ve İnce, 2012). Türkiye'de yaklaşık olarak toplam 19 milyon konut bulunmaktadır ve 2000 yılından sonra yapılanlar hariç 14 milyon konutun afet riski açısından değerlendirilmesi gerekmektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu yapı stoğunun yaklaşık %40'ı yani 6-7 milyonu deprem yönetmeliklerine aykırı, malzeme dayanımı yetersiz binalar, kaçak veya mühendislik hizmeti almayan yapılardan oluşmaktadır ve yenilenmesi ya da güçlendirilmesi gerektiği tahmin edilmektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Buna ek olarak ülkemizde 2018 deprem yönetmeliğine uygun yapılmamış güvensiz olarak nitelendirilen ve risk analizi bulunmayan yüzbinlerce yapı bulunmaktadır (Eren, 2023). Kahramanmaraş merkezli 6 Şubat 2023 depremleri 7.6 ve 7.8 büyüklüğünde iki deprem yaşanmış ve 10 il etkilenmiştir (Salik Ata, 2023). Resmi kaynaklara göre bu depremlerde 50.783 insanımız hayatını kaybetmiştir (AFAD, 2023). Ayrıca son verilerine göre yıkılan bina sayısı 18.200, acil yıkılacak ağır hasarlı ve yıkılmış işyeri sayısı 61.890, hafif veya orta hasarlı 197.825 bina vardır (Şahin, 2023). Yaşanılan bu depremlerin gayri safi milli hasılaya etkisi 2 trilyon TL (yaklaşık 104 milyar dolar) olacağı tahmin edilmektedir (Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Ortaya çıkan bu can ve mal kayıplarına dair yıkıcı etkilerle sonuçlanan deprem manzarası değerlendirildiğinde acil bir şekilde yapı stoklarıyla ilgili gereken adımların atılması, kontrollerinin gerçekleştirilmesi ve önlemlerin alınmasının önemi tekrar ortaya çıkmıştır.

Yeni kentsel çevrelerin planlanması ve geliştirilmesinden ayrı olarak mevcut kentsel çevrenin planlanması ve yönetilmesi kentsel dönüşüm olarak ifade edilir (Öztürk vd., 2023). Kentsel dönüşüm açısından yapı stoklarına bakıldığında kontrol edilmesi gereken sayıca çok fazla bina bulunmaktadır. Sadece riskli yapılar değil, yönetmeliklere uygun olan ve rutin kontrollerinin gerçekleştirilmesi kalan ömürlerinin belirlenmesi açısından yapılar için önem arz eder. Yani ister risk taşıyan ister taşımanın yapıların kontrolü için ulaşımı kolay, analiz süreçleri kısa süren, az maliyetli bir kontrol mekanizması gerekmektedir.

1.1. Muayene Yöntemleri

Yaygın olarak kullanılmakta olan imalatı tamamlanmış betonarme yapıların kontrol yöntemlerinden biri tahribatlı bir muayene yöntemi olan karot alma ve bir diğer yöntem de tahribatsız muayene yöntemi olan yüzey sertliği metodudur, ikisi birlikte veya ayrı ayrı kullanılıp analizler gerçekleştirilmektedir (Yazıcı vd., 2006). Karot tekniğinde Şekil 1.1'de verildiği gibi alınan silindir eşdeğer dayanımı için karot numunelerinde uzunluğun çapın en az 2 katı, küp eşdeğer dayanımı için karot numunelerinde ise bu oran 1 kat olması gerekmektedir (Akakin, 2013). Örnek kesit

alırken en önemli konulardan biri inşaat demirinin kesilmesini önlemektir. Yani numune alınırken kolonun demirsiz kısmının tespiti gerekir. Yapıya verilen fiziksel zararın yanı sıra alınan karot numunesinde kolonu çevreleyen demirlerden parçalar bulunması da basınç dayanım testinde hatalı sonuçlara yol açmaktadır (Mahmoodian vd., 2012). İlâveten, karot alma tekniğinin yine dezavantajlarından biri de yapının farklı yerlerinden farklı sayılarda alınması gerekmektedir, bu da ekstra iş ve analiz yükü olarak test sürecine negatif yansımaktadır, süre uzamaktadır. Numune sayılarına ve özelliklerinde dair bilgiler karot standartlarında belirlenmiştir ve basınç dayanım testi için gereken analiz süresi 28 gündür (Engin, 2021). Bu analiz sonucunda karotun kırılma modları da değerlendirilir. Normal mod kırılmada alınan numunenin yaklaşık orta noktasında mafsalsal ve diyagonal kırılma çizgileri oluşur, hatalı mod kırılmada ise paralel çizgiler ve yarılmalar, kırılma, çatlaklar gözlenir (Köseoğlu, 2010).



(a)



(b)

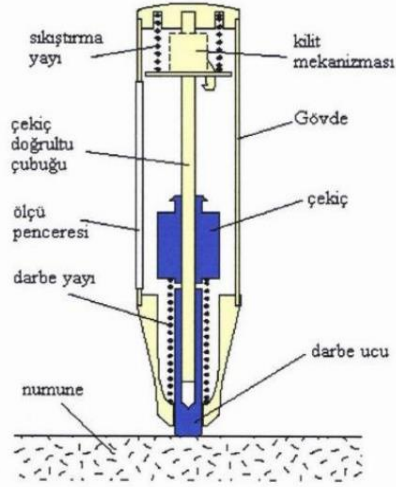
Şekil 1.1. Karot alma tekniği; a) Karot alma makinesi (Köseoğlu, 2010); b) Basınç altındaki karot (Köseoğlu, 2010)

Yüzey sertliği testi malzemenin mukavemeti hakkında bilgi sağlar. Bu sertliğin ölçümü için 1950'lerde İsviçreli mühendis Ernst Schmidt tarafından geliştirilmiş olan, günümüzde hala yaygın olarak kullanımı tercih edilen Şekil 1.2'de de verilen Schmidt çekici kullanılmaktadır. Kaya ve beton ile ilgili değişik çalışma alanlarında hem laboratuvar ortamında hem de saha koşullarında kullanılabilir. Çekiç, sıkıştırılmış yay ve bir pistondan oluşur. L ve N tip Schmidt çekici bulunur. Bunların farkı farklı tip basınç darbe seviyelerine uygun tasarlanmış olmalarıdır (Aydın ve Basu, 2005). L tipi 0.735 ve N tipi 2.207 Nm darbe enerji seviyesine sahiptir, genellikle darbe enerji seviyesi yüksek olan pürüzlü ve farklı mineral özelliklerinin bulunduğu heterojen yüzeylerde N tipi çekiç; zayıf, ayrılmış ve gözenekli yüzeylerde ise L tipi çekiç kullanışlıdır (Karaman, 2023). Schmidt çekici yüzey sertliği ölçülecek malzeme üzerine getirildiğinde yay serbest kalır ardından malzeme sertliği pistonun geri tepmesine sebep olur bu mesafe malzemenin yüzeyi tarafından emilen toplam enerji ile doğru orantılıdır ve toplam mesafe cihaz üzerindeki sayısal ölçekten okunur (Akbaş ve Ekinioğlu, 2023). Schmidt çekiciyle test sonuçlarının güvenilirliğini etkileyecek çok fazla dezavantaj oluşturacak çekiç tipi, numune boyutları, numune yüzeyinin düzgünlüğü, hava koşulları geri tepme değerlerinin normalleştirilmesi verilerin değerlendirilirken

azaltılması ve uygulanan analiz prosedürü gibi oldukça dikkat edilmesi gereken etmen vardır (Aydın ve Basu 2005; Külekçi vd., 2022; Karaman, 2023).



(a)



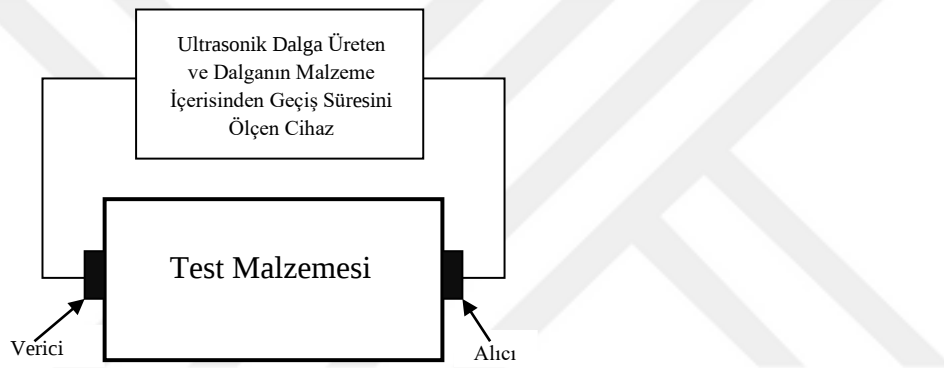
(b)

Şekil 1.2. Yüzey sertliği ölçümünde kullanılan malzeme; a) Schmidt çekiçi (Alshaikh ve Zeyad, 2022); b) Schmidt çekiçi cihazı yapısı (Özkan ve Kaya, 2020)

Yapı dayanıklılığının kontrolünde kullanılan bir diğer yöntem çekip çıkarma (ingilizcesi pull out) tahribatlı bir tekniktir. Bu test ile betonarme yapıya döküm sırasında yerleştirilen şekli ve boyutları belli bir standart çelik çubuğa bir süre geçtikten sonra kuvvet uygulanarak bir mekanizma ile çubuk çekilir. Beton içine yerleştirilen çelik çubuğu çıkarmak için uygulanan çekme kuvveti daha sonra basınç dayanımı ile ilişkilendirilir (Malhotra ve Carino, 2004; Brencich, 2015). Deney alanı etrafında oluşan normal olmayan çatlamlar nedeniyle hatalı sonuçlar elde edilebilir (Sert, 2011). Bu da doğru olmayan analiz sonuçlarına sebebiyet verir. Ayrıca bu test önceden çelik çubuğun doğru bir şekilde yapıya yerleştirilmiş olmasını zorunlu kılar. Bu da mevcut yapı stoğunda eğer önceden çelik çubuk yerleştirilmemişse bu testin uygulanması için delinen yere bir manşon yerleştirip genişlemeye zorlanır ve önceden yerleştirilen metal formuna benzer şekilde monte edilir, sonradan yerleştirilen çubukların testte değişikliklere sebep olarak hatalı sonuçlar vermesi, önceden yerleştirilen çubuklara göre daha fazladır (Bovio vd., 2013).

Windsor probe penetrasyon testi yapı kontrolünde kullanılan tahribatsız muayene yöntemidir. Betona geçirilmeye çalışılan bir sondanın nüfuz etme derinliğinin ölçülmesine ve bu derinliğin betonun gösterdiği mukavemet ile ilişkilendirilmesine dayanır (Alyamaç vd., 2017). Yüzeyden içeriye sondanın az girmesi betonun basınç dayanımının yüksek olduğunu gösterir, bu yöntem ile en fazla %5 hata payıyla beton basınç dayanımı tespit edilebilmektedir (Erdal vd., 2003). Yöntemin dezavantajı olarak da betonun heterojenliğinden prob sisteminin doğruluğunun sınırlandığı sonucuna varılmıştır ve basınç dayanımından ziyade sertliğini ölçmektedir, tahribatsız bir yöntem olsa da yüzey işlem sonunda onarım gerektirebilir (Clifton, 1975). Ek olarak bazı çalışmalarda sondanın çimento hamurunu ve agregaları sıkıştırarak bu iki bileşen arasındaki yapışmayı engellediğini ve bu yüzden 100 MPa üzerindeki dayanımlarda sondanın doğru bir şekilde batırılamadığını, genellikle eğilip veya kırıldığını bu sebeple testten güvenilir sonuçların alınamadığını belirtilmiştir (Sert, 2011).

Tahribatsız yöntemlerden biri olan ultrasonik test ile bir test cihazı vasıtasıyla beton yapının içinden geçen ses dalgalarının hızı ölçülür ve beton hakkında bilgi edinilir. Ultrasonik test, mühendislik malzemelerinin özelliklerini değerlendirmek için kullanılır ve polimer kompozitler gibi malzemelerin elastik dalgalarının analiziyle süreksizlikleri tespit edilerek mekanik özellikleri belirlenir, analizde ölçülen malzemenin özelliğine göre frekans aralığı genellikle 20 kHz ile 1 GHz arasında değişir (Arı, 2022). Test edilen betonun bir yüzeyinden içine doğru cihazın gönderici kısmı ile dalgalar gönderilir ve test yüzeyinin diğer tarafından alıcı ile toplanır, bu beton kalınlığını ne kadar sürede aldığı hesaplanarak beton özellikleri ve dayanımı konusunda yorum yapılır (Pekgökgöz vd., 2018). Bu testte beton basınç dayanımı ile hızın doğrudan bir ilişkisi yoktur ve daha çok betonun yoğunluğu, malzeme kalitesi, ağrega yapısı gibi konularla ilişkilendirilir (Zebari vd., 2017). Ultrasonik test, yüksek çözünürlük, hızlı tarama ve kusur tespiti gibi avantajlara sahip olsa da, kurulumun zorluğu, doğru tarama için beceri gerekmesi ve doğru test için numuneye olan gereksinim gibi dezavantajlara da sahiptir (Arı, 2022).



Şekil 1.3. Ultrasonik test

Gömülü numune sistemi beton basınç dayanımını öğrenmeye yarayan tahribatlı muayene yöntemlerinden birisidir. Aynı termal geçmişe sahip ve aynı çevresel etkilere maruz kalmış numunelerle çalışmayı sağlayan bir yöntemdir (Parlar, 2019). Gömülü numune yönteminde, betonun dökümü sırasında döküm yapılacak yere koyulan silindirik numunelerin içi beton dolar ve beton kuruduktan sonra çıkartılarak basınç dayanım testleri yapılır. Bu yöntem karot alma tekniğinden farklıdır, betona sonradan müdahale edilmez, delme veya kesme işlemi uygulanmaz bu da beton basınç dayanımının etkilenme ihtimalini ortadan kaldırır (Kürklü, 2005).

Yapı stoklarının muayenelerinde tercih edilen tahribatlı ve tahribatsız yöntemler uygulama kolaylığı, güvenilirlik, doğruluk ve ekonomiklik açısından değerlendirilmesi Çizelge 1.1’de verildiği gibidir (Başyigit vd., 2013). Yukarda bahsedildiği ve çizelgede de görüldüğü gibi her bir yöntemin ayrı ayrı iyi yanları olsa da zayıf yanı da mevcuttur. Değerlendirmeler sonucu anlaşılmaktadır ki doğruluk oranının yüksek olduğu, uygulama kolaylığı sunan, ulaşılabilir ekonomik seviyelerde güvenilir olması nedeniyle tercih edilebilir, hızlı bir şekilde mevcut yapı stoğunun kontrol edilmesine olanak sağlayacak yeni bir muayene sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bahsedilen yöntemlerin çoğu betonların basınç dayanımlarının analizine yöneliktir. Betonarme yapıların çok önemli bileşenlerinden birisi de inşaat çelikleridir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında silindirik beton kalıp içerisindeki demirlerin korozyon kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1.1. Muayene yöntemlerinin karşılaştırılması (Başyigit vd., 2013)

Muayene Yöntemi	Uygulama Kolaylığı	Güvenilirlik	Doğruluk	Ekonomiklik
Karot Alma	Zayıf	İyi	İyi	Zayıf
Yüzey Sertliği (Schmidt Çekici)	Çok İyi-İyi	Zayıf	Zayıf-İyi	Çok İyi
Çekip Çıkarma	İyi	İyi	İyi	Zayıf-İyi
Penetrasyon	İyi	İyi	İyi	Zayıf-İyi
Ultrasonik	Zayıf	Zayıf-İyi	Zayıf-İyi	Zayıf-İyi
Gömülü Numune	Çok İyi	İyi	İyi	Zayıf-İyi
Önerilen Yöntem*	İyi	İyi	İyi	İyi

*Önerilen çalışmanın öngörülen çıktıları

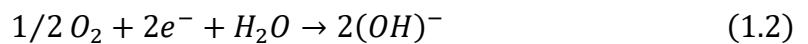
1.2. Betonarme Yapı ve Korozyon

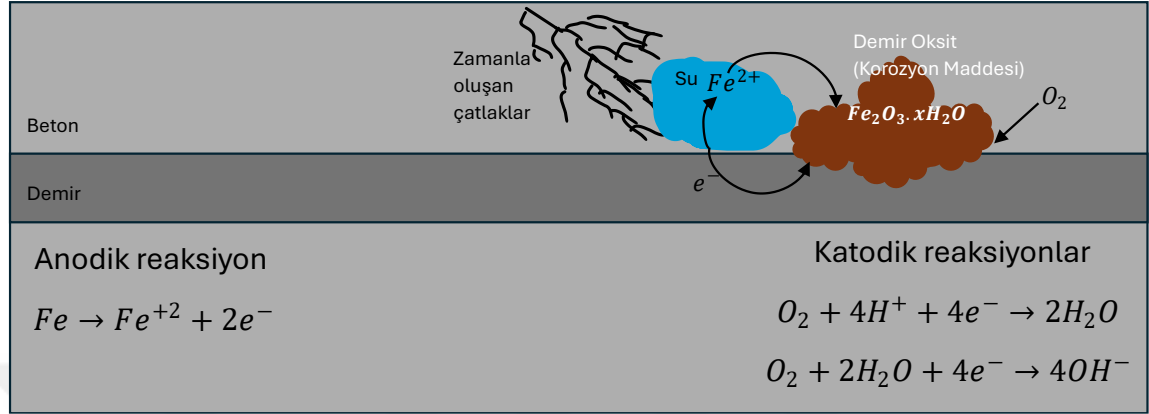
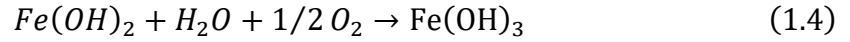
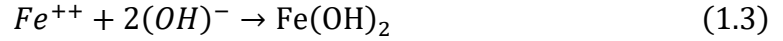
Yüksek dayanıklılığı, ekonomikliği, bakımının az olması, kolay işlenebilirliği gibi avantajları nedeniyle dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olan betonarme, beton bileşenleri ve çeliğin bir araya gelmesiyle oluşturulan kompozit bir yapı malzemesidir (Başaran vd., 2019). Beton, belirli bir oranda karıştırılmış çimento, su, agrea ile gerektiğinde kullanılan değişik katkı maddeleriyle oluşturulur ve genellikle, betonda %10 oranında çimento, %20 oranında su ve %70 oranında agrea kullanılır, ancak katkı maddelerinin kullanımıyla bu oranlar değişebilir (Şaştım, 2016). Beton, tipik bir yarı kırılğan malzemedir ve çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşüktür, bu nedenle betonarme yapıların sağlamlaştırılmasında donatı çelikleri kullanılır, bu haliyle de çok yüksek mekanik özellikler ve fiziksel performans sergilediği için son yüzyılda dünyada yeri doldurulamayacak kadar üst düzey yapı malzemesi haline gelmiştir (Zhang vd., 2021). Donatı ve betondan meydana gelen bu yapıların betonarme şeklinde davranabilmesi için donatı ve betonun kenetlenmesi gerekir, bu kenetlenmede beton ile donatı arasında oluşan kayma gerilimine aderans ismi verilir. Donatı ile beton arasındaki moleküler bağ kuvvetlerine, mekanik dış kuvvetlere ve oluşan sürtünme kuvvetlerine bağlı olan aderans, donatı çapı, çeliğin akma, betonun çekme dayanımı, donatının yüzey geometrisi, kenetlenme boyu, betonun içinde kullanılan malzemeler, donatı etrafındaki pas payı vb. gibi değişkenlerden etkilenir (Bingöl ve Gül, 2009).

Günümüzde, tüm dünyada betonarme yapıların bozulmasının ana nedenlerinden ve mühendislerin çözüm aradığı önemli sorunlardan biri donatı çeliği korozyonudur. Çoğu kişi tarafından korozyon demirin paslanması olarak bilinse de korozyon tüm metallerde gerçekleşebilmektedir (Özer, 2021). Yeni teknolojiler ve malzemeler, beton içindeki donatının korozyonunu geciktirmek, azaltmak veya kontrol altına almak ve dayanıklılığını artırmak için geliştirilmektedir. En son istatistiklere göre, 2019'da küresel korozyonun maliyetinin 2.5 trilyon dolar olduğu ve bunun dünya gayri safi hasılasının %3.4'üne denk geldiği tespit edilmiştir (Yavuz vd., 2022). GSYH'sinin

ülkemiz için 2019 yılında 4.320.191 milyon TL olduğu ve bunun korozyon sebebiyle kaybedilmiş miktarı 129,6 milyar TL olarak tahmin edilmektedir (Eren, 2023).

Korozyon, metallerin ve metal alaşımlarının çevreleriyle kimyasal etkileşime girerek aşınması ve bozulması ile sonuçlanan bir elektrokimyasal süreçtir. Demirde meydana gelen paslanma, alüminyumdaki oksitlenme ve bakırdaki kararma korozyona örnek gösterilebilir. Betonarme korozyonu farklı şekillerde oluşabilir genelde dört grupta incelenmektedir. Bunlardan ilki atmosferik korozyondur ve bu türde korozyon genellikle kirli oksijen ve nemin donatıyı etkilemesiyle oluşur hava koşulları süreci hızlandırır, ikinci tür korozyon mekanizması elektrolitik korozyondur, burada korozyon ilk önce noktasal başlar ve yarı hücre reaksiyonları bu korozyon türünde gerçekleşir, üçüncü olarak kloroid korozyonu en riskli türü içerir, beton karbonatlaşır ve üzerinde çatlaklar boşluklar oluşur buralardan da donatıya klor iyonları ulaşır, dördüncü ve son tür ise temas korozyonudur, bu tür nadir görülmekle birlikte farklı potansiyellere sahip metallerde temas durumunda gerçekleşir (Doğan ve Akgül, 2020). 1950'li yıllara kadar betonun karbonatlaşması korozyonun ana nedeniydi, o zamandan bu yana klorür kaynaklı korozyon, klorür içeren ortamlara örneğin buz çözücü tuz, deniz iklimi, tuzla kirlenmiş agregalara maruz kalan yapılar için çok daha önemli hale geldi (Böhni, 2005). Çoğunlukla karbonatlaşmış beton durumlarında genel korozyon, betonun erken çatlaması ve dökülmesine neden olurken klorür iyonlarından kaynaklanan lokal korozyon, çelik çubuklar boyunca rastgele dağılmış çukurlara neden olur (Böhni, 2005). İki durum için de korozyon betonarme yapı için önemli risk teşkil eder. Beton içerisinde başlayan bu korozyon sürecinde çelik donatı yüzeyi, anodik ve katodik bölgelerden oluşan birer elektrot görevi görür ve genel olarak anot ile katotta meydana gelen bu kimyasal reaksiyonlara yarım hücre reaksiyonları adı verilir (Prasanna Chinthala, 2018). Katodik reaksiyon, çözünmüş oksijeni azaltarak hidroksit iyonlarının oluşumuna neden olan bir redüksiyon (indirgeme) reaksiyonu, anodik reaksiyon ise metalin kaybolması veya çözünmesiyle neticelenen bir oksidasyon (yükseltgenme) reaksiyonudur. (Ahmad, 2003) Korozyon ürünleri, Denklem 1.1'den başlayıp Denklem 1.4'e kadar gösterilen ve Şekil 1.4'te de verilen anodik ve katodik reaksiyonlar sonucu oluşan maddelerin bir araya gelmesiyle meydana gelir. Denklem 1.1'de görüldüğü gibi anodik reaksiyonda demir (Fe) atomları elektronlarını kaybeder ve Denklem 1.2'de katodik işlemde katoda bu elektronlar aktatılır, burada oksijen ve su ile birleşen elektronlar hidroksit iyonlarını oluştururlar, ardından Denklem 1.3'te demir iyonları anottan çözeltiye taşınır ve demir hidroksitin oluşması için hidroksit iyonları ile kimyasal reaksiyona girer bu aşamada demir hidroksit yani $Fe(OH)_2$ suda çözünür ve kararsız yapıdadır bu sebeple daha sonra Denklem 1.4'teki gibi oksijen ve suyla bir araya gelerek donatı etrafında sarı renkli bir pas katmanı oluşturur (Sassine vd., 2018; Yavuz, 2022).





Şekil 1.4. Beton içindeki demir üzerinde meydana gelen korozyon

Tüm yapı malzemeleri, dolaylı veya doğrudan korozyona maruz kalabilir fakat korozyon özellikle metallerde yavaş ilerleyen bir yapı hasarı olarak kendini gösterir ve korozyon derecesi, malzemenin türü, ortam koşulları (nem, sıcaklık, havadaki oksijen, suyun pH değeri vs.) ve kimyasal özellikler gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Mimari yapılar içinde özellikle metal elemanlar ve betonarme sistemler korozyondan birincil derecede etkilenir (Özer, 2021). Korozyonun betonarme yapıların çelik donatılarında gelişmesi, yapıların beklenen güvenlik seviyesi ve hizmet ömrünü önemli ölçüde etkiler. Donatılarda meydana gelen korozyonla birlikte betonarme elemanların performansında çeşitli kayıplar oluşur, bu kayıplar pas payı tabakasının çatlamasına bağlı olarak donatının kesit alanlarının azalması, buna bağlı donatıların mekanik performansında düşüş ve donatılı betonların aderans performansında azalmayı içerir. Yapıya hayati derecede zarar veren, yapının servis ömrünü azaltan korozyonun tespiti ve önceden önlem alınması oldukça önemlidir.

1.3. Korozyon Tespiti

Korozyonun tespit edilmesinde farklı yöntemler kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Yaygın yöntemlerden biri betonarme yapıların elektrik özdirenç yöntemi ile haritası oluşturularak korozyon durumu belirlenmektedir. Betonun elektrik özdirenç dağılımı, betonun nem oranını ve içerdiği çelik çubukların korozyon durumunu belirlemede önemli bir parametredir. Özdirenç değeri, genellikle içerdiği boşluklar, çatlaklar, kırıklar, çimento türü, sıcaklık ve nem gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bu yöntemde yere iki elektrot çakılarak akım uygulanır, elektrotlar arasındaki mesafeler eşittir ve diğer iki noktadaki elektrotlarda oluşan gerilim farkı ölçülür, yüksek özdirenç sahip betondaki korozyon, düşük özdirençli betona göre daha yavaş olur yani beton özdirençinin azalması betondaki korozyon oranını artırır, elde edilen özdirenç değerleri

korozyon riskine göre değerlendirilir örneğin 10 kOhm.cm'den düşük özdirence sahip bir beton yüksek korozyon riskine sahip olarak değerlendirilir (Özçelik ve Gelişli, 2018). Yapı jeofiziğinde kullanılan özdirenç ölçüm cihazları genelde Wenner dizilimine göre ölçülür ve bu dizilim aynı derinlikten bilgi sağlar, farklı profillerden elde edilen özdirenç değerleri ile yapının özdirenç dağılımı oluşturulur, demir korozyonu arttıkça betonun özdirenci azalır (Okur vd., 2019). Betonların elektriksel özdirençleri arttıkça elektriği iletmeleri zorlaşır ve dolayısıyla beton içerisindeki klor iyonlarının donatı yüzeyindeki elektron akışını azaltır; ancak, betonun elektriksel özdirenç değerinin azalmasıyla birlikte donatı yüzeyindeki elektron akışı betondaki klor iyonları aracılığıyla kolaylaşır ve korozyon süreci hızlanır (Ağaca, 2019). Bu yöntemde ölçüm yapılacak donatının bulunduğu derinlik önemlidir derinliğin değişkenlik göstermesi ölçüm sonucunun yanlış olmasına sebep olabilir ve bu tekniğin diğer dezavantajı da birden fazla noktadan ölçüm alınması gerektirmesidir.

Korozyon tespit yöntemlerinden birisi de manyetik kaçak akı tekniğidir. Manyetik alan ferromanyetik bir malzemeye yaklaştırıldığında, manyetik akı çizgileri demir çubuktan geçmeye başlar çünkü demirin manyetik geçirgenliği ortaminkinden daha yüksektir, ferromanyetik malzemede, korozyon gibi bozukluklar varsa bu düşük dirençli yol tıkanır ve akımın bir kısmı havada akmaya başlar (Özboylan, 2019). Bu yöntemle yüzey ve yüzey altındaki korozyon ya da çatlakların tespiti gerçekleştirilmektedir, manyetik kaçak akı yönteminde ferromanyetik materyalin test bölgesine manyetik alan uygulanarak doyuma ulaştırılması sağlanır bu sırada materyalin kusurlu bölgelerinde manyetik akılar yön değiştirerek kaçak akılara neden olur, bu kaçak akılar bir dizi manyetik hall-effect sensörleri ile algılanarak tespitleri gerçekleştirilir (Kara vd., 2017; Wilcke vd., 2018). Bu yöntemin etkinliği, test yüzeyinde manyetik doyum noktasına ulaştıracak akı şiddetinin uygunluğuna bağlıdır, doyum noktasının altında veya üstünde etki yaratan bir manyetik akı seviyesi, kaçak akıların zayıflamasına ve dolayısıyla kusurların tespit edilmesinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olabilir (Kara vd., 2017). Ölçülen manyetik akı, beton örtü kalınlığı, boru tipi, borular arasındaki mesafe, borudaki tel sayısı, korozyon seviyesi, çelik şeritlerin gerilme kuvveti düzeyi, sensör ve korozyon noktası arasındaki mesafe gibi birçok parametreden etkilenebilir, bu değişkenler arasındaki karmaşık etkileşim, elde edilen işaretlerin yorumlanmasını zorlaştırır (Özboylan, 2019).

Korozyon tespitine ve izlemesine yönelik geliştirilen sensörler de vardır. Bunlardan biri bir çeliğin üzerinde oluşan korozyon tespiti için önerilen bir kapasitör çalışmasıdır, bu kapasitör bir zamanlayıcı devresine bağlanmış ardından korozyonlu bir çelik üzerine yerleştirilerek pas varlığına göre sistemin çıkış frekansı değerlendirilmiştir, sık pas seviyesinde yani düşük seviye korozyonda kapasitif etki oluşmadığı için bir farklılık gözlenmemiş ve işaret alınmamıştır (Twigg ve Molinari, 2016). Bir diğer korozyon takibi için sensör çalışması yine kapasitif etkili sensör çalışmasıdır, bu çalışmada da betonarme yapı içine önceden gömülen bir sensörün çeliğin korozyona uğradığında geçirdiği kapasitif etkisi çalışılmıştır, farklı ortamlarda

(asitler, alkali ve nötr) empedans kapasitif, yüksek frekansa doğru istikrarlı bir şekilde azalır ve neredeyse sıfıra yaklaşır yani korozyon seviyesi ile gözlemlenen frekans arasında ters orantı olduğu sonucuna varılmıştır (Rahman vd., 2012). Bu tür sensörlerin kullanılabilmesi için, yapı inşa aşamasındayken donatı çeliklerine farklı noktalardan temas etmesi, sensörün güç kaynağına bağlanması gerekmektedir. Yani bu sensörler mevcut yapı stoklarının kontrolünde işlevsiz kalmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda korozyon oluşumu sensörün doğru çalışmasını da etkilemektedir oluşan korozyon sensör yüzeyinde de oluşmaktadır.

Bu çalışmada korozyon tespiti için FMSD radar kullanılacaktır. FMSD radar ile pas seviyesi tespiti için mevcut yapı stoklarının kontrolünde insan gücüne en az seviyede ihtiyaç olacak şekilde, ekonomik, kısa sürede ve doğru cevap üreten bir sistem geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada elektromanyetik dalga yayılımıyla ilişkili olan daraltılmış senaryo ile korozyonlu yüzeyde meydana gelen faz değişimleri incelenmiş ve ek olarak benzetim ortamındaki faz değişim sonuçları elde edilmiştir. Son olarak da FMSD radar ile farklı korozyon seviyesindeki demirlerden, ardından da silindirik kalıp içindeki demirlerden korozyon tespitine yönelik ölçümler alınmıştır.

Bu tez çalışmasının birinci kısmında yani girişi bölümünde üzerine çalışılan problem tanımlanarak halihazırdaki çözüm yöntemleri ve önerilen yöntem anlatılmıştır. Tezin ikinci kısmı olan kaynak taraması bölümünde çalışmayla ilgili görülen araştırmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü kısımda ise çalışmada kullanılan yöntemin anlatımı yapılarak daraltılmış senaryo ve benzetim çalışmalarından bahsedilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde elde edilen tüm bulgular değerlendirilmiş, grafiklerle birlikte sunulmuştur, beşinci bölümünde de elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp değerlendirilmiştir. Tezin en son bölümü olan altıncı kısımda ise çalışmada kullanılan kaynaklar listelenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Elektromanyetik Dalga ve Yayılım

Elektromanyetik dalgaları, dalgaların ortamlarda yayılımını anlamak ve yorumlamak YNR gibi radar sistemlerinin çalışma prensiplerini oluşturmak için önem arz eder. Elektrik alanın ve manyetik alanın yayılma yönüne ve birbirine dik, bir arada yayılmasıyla oluşan ve enerji taşıyan dalgalara elektromanyetik dalga denir. Elektrik alanın kaynağı olan negatif ve pozitif yükler hareket halinde olduklarında bir akım oluştururlar, bu da bir manyetik alan oluşturur, zamanla değişen bir elektrik alana bir manyetik alan eşlik eder ya da tam tersi de gerçekleşebilir yani başka bir deyişle zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların varlığı bir elektromanyetik dalga oluşturur, bunun sonucunda belli şartlar altında elektromanyetik alan bir kaynaktan yayılım gerçekleştiren elektromanyetik dalgayı meydana getirir (Cheng, 1993). Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızı $c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ile hareket eder, bu ışığın da karakteristik olarak bir elektromanyetik dalga olduğunu gösterir (Kraus ve Carvel 1973; Sadıku, 2000). Farklı ortamlarda ise yayılma hızı ortam özelliklerine göre değişir, örneğin daha yoğun ortamda elektromanyetik dalganın yayılma hızı azalır (Gürdal, 2020). Işık gibi elektromanyetik dalgaların yayıldığı ortam boşluk/vakum olabilir, ortamlar dalga geçişlerinde kalıcı olarak değişmez, bir enine dalga türü olan elektromanyetik dalga hareket ettiği doğrultuya dik olarak salınım sergiler (Gürdal, 2020). Elektromanyetik dalgaların en basit biçimli olanı düzlem dalgalar, dalga yayılımı ile ilgili pek çok temel özelliğin gösterilmesine olanak sağlar (Pozar, 2012).

1873 yılında Maxwell tarafından yayınlanmış Maxwell denklemleri ile elektrik ve manyetik olaylar ifade edilir, bu denklemler ile Maxwell, teoriden yola çıkarak elektrik yer değiştirme varlığı hipotezini kurmuştur ayrıca bu denklemler Hertz'in deneysel olarak elektromanyetik dalganın yayılımını keşfetmesini sağlamıştır (Pozar, 2012). Bu dört Maxwell denklemi Gauss, Ampere, Faraday ve diğerleri tarafından deneysel ve teorik geliştirilen bilgileri temel almaktadır (Pozar, 2012). Maxwell denklemlerinden bir ortamda yayılım gerçekleştiren elektromanyetik dalgaların genel dalga denklemi de türetilir, bu denklem Helmholtz denklemi olarak da bilinir (Hayt ve Buck, 2001). Helmholtz dalga denklemi kayınsız ortamda Denklem 2.1'de verildiği gibidir, kayıpsız ortamda $\sigma = 0$ olacağından bu denklem Denklem 2.2'deki halini alır (Balanis, 1989). FMSD radar düzeneğinde elektrik alanlar kullanılarak işlemler yapıldığı için elektrik alan denklemleri verilmiş, manyetik alan denklemleri verilmemiştir.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Bu denklemlerden de anlaşıldığı gibi elektik alan içerisinde ilerlediği ortamın özelliklerine (dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri) ve zamanla değişen elektrik alana bağlıdır. Malzemeler bir elektrik alana maruz kaldığında malzeme içindeki elektronlar, katı sıvı veya gaz malzemelerin polarizasyon dipolleri bu uygulanan elektrik alanla etkileşime girer, bu etkileşim malzemeye elektrik enerjisi depolama yeteneği sağlar, yani başka bir deyişle malzemenin dielektrik sabiti ϵ enerji depolama kapasitesini gösterir büyüdükçe enerji depolama yeteneği artar, benzer şekilde malzemelerin manyetik geçirgenlik değeri μ de hem manyetik alan depolanma kapasitesini ve hem de oluşan elektrik alanı etkiler (Balanis, 1989). Elektromanyetik dalgaların malzeme içerisindeki etkileşimleri örneğin iletimi, yansıması, kırınımı dalgaın ortamların kırılma indisleri, malzemenin elektrik ve manyetik özellikleri ile değişir. Suyun dielektrik sabiti $\epsilon=81$ 'dir, demir ferromanyetik bir maddedir ve manyetik geçirgenliği $\mu=5000$ 'dir (Balanis, 1989). Elektromanyetik dalga suda ilerlerken elektrik alan yavaşlar ve dalga yön değiştirir, elektromanyetik dalga demirde ilerlerken ise dalgaın manyetik alanı güçlenir dalga emilir veya yansır.

Elektromanyetik dalgalar pratikte birden fazla ortamın olduğu sınırlı bölgede yayılırlar, bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalga farklı ortam empedansına sahip bir başka yüzeye çarptığında belli bir kısmı kaynağa doğru geri yansır, çarpılan ortam mükemmel iletken değilse gelen gücün bir kısmı ikinci ortama iletilir (Cheng,1993). Özellikle yansıyan işaretlerin işlenmesi ve yorumlanmasıyla YNR uygulamalarında yeraltındaki görünmeyen cisimlerin veya yapıların tespiti gerçekleştirilmektedir (Yalın, 2018; Yousef vd., 2020; Eren, 2023; Vallianatos ve Hloupis, 2023). Ortam empedansları, ortamların sahip olduğu dielektrik ve manyetik geçirgenliğe göre değişir, ortam empedansının formülü düşük kayıplı ortamlarda Denklem 2.3'te verildiği gibidir (Balanis, 1989).Elektromanyetik dalga farklı ortam empedansına sahip katmanlarda ilerlerken belli açılarda kırılır, iletilir veya belli açılarda kırılır, yansır. Bu açılar geliş açısına göre değişkenlik gösterir. Açılar arasındaki bağlantı Snell kanunu ile açıklanır ve yansıma açısının formülü Denklem 2.4'te kırılma formülü de Denklem 2.5'te verildiği gibidir (Balanis, 1989).

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 - i \frac{\sigma}{2\omega\epsilon} \right) \quad (2.3)$$

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.4)$$

$$\beta_1 \cdot \sin\theta_i = \beta_2 \cdot \sin\theta_t \quad (2.5)$$

Elektromanyetik dalgaların yayılırken sergiledikleri yön kavramı polarizasyon olarak geçmektedir. Elektrik alan dikey, yatay, dairesel olarak polarize olabilmektedir. Polarizasyon radar sistemlerinde istenmeyen işareti filtrelemek, işaret kalitesini arttırmak için kullanılabilir. Bu çalışmada elektromanyetik dalgaın yüzeye eğik açılı (ingilizcesi oblique incidence) ve dikey polarize (ingilizcesi perpendicular polarization) olduğu durum incelenmiştir. Eğik açılı durumda dalgaın yansıma katsayısını

ortamların dielektrik özellikleri ve açıları da etkiler, yansımaya katsayısı formülü Denklem 2.6'da iletim katsayısı formülü de Denklem 2.7'de verildiği gibidir (Balanis, 1989). Şekil 2.1'deki grafikte de görüldüğü gibi iki ortam için $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ arttıkça yansımaya katsayısının değeri artarken iletim katsayısının değeri azalmaktadır bu oranın büyümesi süreksizlik meydana getirdiği için iletimde de süreksizlikler oluşur ek olarak $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ için yansımaya katsayısının büyüklüğü $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ oranı ne olursa olsun yok olmaz. (Balanis, 1989)

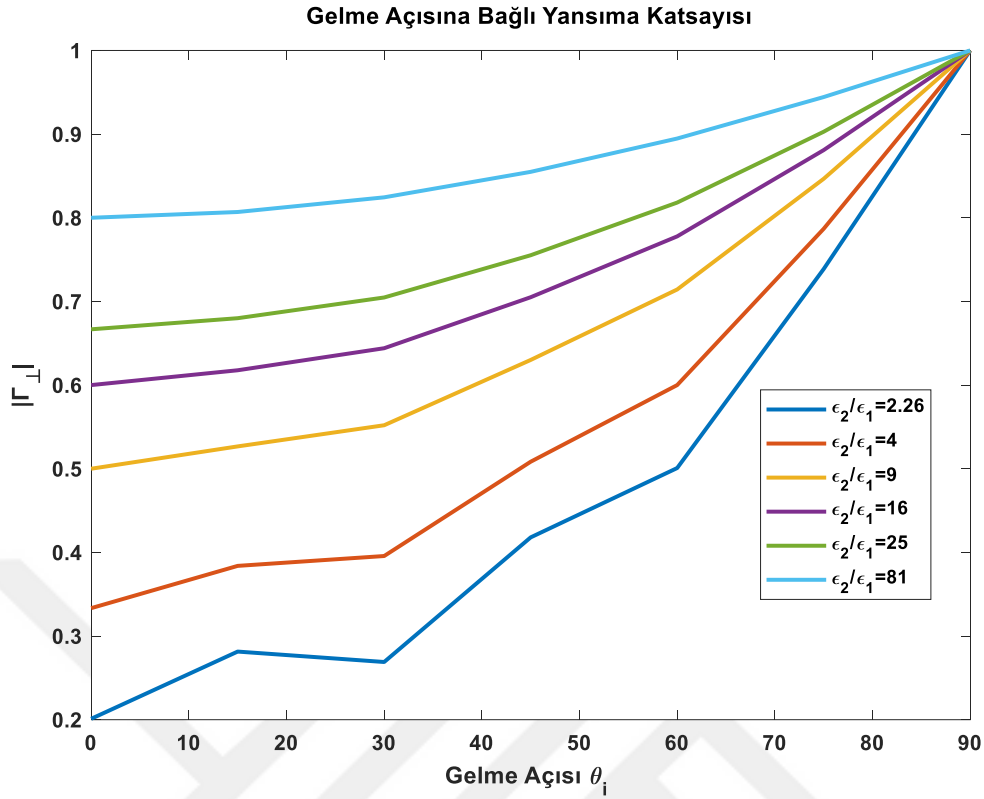
$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{\perp}^r}{E_{\perp}^i} = \frac{\eta_2 \cdot \cos\theta_i - \eta_1 \cdot \cos\theta_t}{\eta_2 \cdot \cos\theta_i + \eta_1 \cdot \cos\theta_t} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \cdot \cos\theta_i - \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cdot \cos\theta_t}{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \cdot \cos\theta_i + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cdot \cos\theta_t} \quad (2.6)$$

$$T_{\perp} = \frac{E_{\perp}^t}{E_{\perp}^i} = \frac{2\eta_2 \cdot \cos\theta_i}{\eta_2 \cdot \cos\theta_i + \eta_1 \cdot \cos\theta_t} = \frac{2\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \cdot \cos\theta_i}{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \cdot \cos\theta_i + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cdot \cos\theta_t} \quad (2.7)$$

Ferromanyetik malzemeler hariç çoğu dielektrik ortam için manyetik geçirgenlikler $\mu_1=\mu_2=\mu_0$ (μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliği $\approx 4\pi 10^{-7}$ H/m) şeklindedir. Denklem 2.6'daki yansımaya katsayısı manyetik geçirgenliklerin eşit olmasına ve sadece geliş açısına bağlı olarak ifade edilirse Denklem 2.8'deki formül elde edilir (Balanis, 1989).

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \sin^2 \theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \sin^2 \theta_i}} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de verilen dikey polarize için yansımaya katsayısı formülünden de anlaşılacağı üzere yansımaya katsayısı dalganın yüzeye geliş açısı olan θ_i 'ye, ortamların dielektrik geçirgenlikleri olan ε_2 ve ε_1 'e bağlıdır. Şekil 2.1'de de verildiği gibi geliş açısı arttıkça yansımaya katsayısı artmaktadır. Gelme açısının yani antenlerin tarama noktasına odaklanma açısının ne olacağı ve elektromanyetik dalganın geliş açısına göre yansımaya değerinin dolayısıyla okunan genliğin değişkenlik göstereceği buradan açıkça görülmektedir. Denklem 2.8'in ifadesi 0-90 derece geliş açısına ve bazı $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ oranlarına göre çizdirildiğinde Şekil 2.1'de verilen geliş açısına göre değişen yansımaya katsayısı grafiği elde edilir. Bu grafiğe göre de dielektrik oranı sabitken geliş açısı arttıkça yansımaya katsayısı da artmaktadır. Örneğin $\varepsilon_2/\varepsilon_1=2.26$ iken 40 derece geliş açısına sahip bir elektromanyetik dalganın yansımaya katsayısı, 60 derece geliş açısına sahip olandan daha küçüktür.



Şekil 2.1. Geliş açısına göre değişen yansımaya katsayısı

Gelen, yansıyan ve iletilen elektrik alanların ifadeleri sırasıyla Denklem 2.8, Denklem 2.9 ve Denklem 2.10'da verildiği gibidir (Balanis, 1989). İşaretlerin hesaplamaları yapılırken elektrik alan değerleri göz önüne alındığı için manyetik alan ile ilgilenilmemiştir.

$$E_{\perp}^i = \hat{a}_y \cdot E_0 \cdot e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.8)$$

$$E_{\perp}^r = \hat{a}_y \cdot \Gamma_{\perp} \cdot E_0 e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.9)$$

$$E_{\perp}^t = \hat{a}_y \cdot T_{\perp} \cdot E_0 e^{-j\beta_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.10)$$

2.2. Radar Tabanlı Görüntüleme Sistemleri

Elektromanyetik bir sistem olan radar konum ve nesne tespitine olanak sağlar, belirli bir dalga formu (örneğin darbe modülasyonlu sinüs dalgası) kullanarak nesneden yansıyan işaretin bilgisi radar çalışmaları ile incelenir, radarın değerli oluşu gözün yerine geçmesi değildir, göz kadar çözünürlüğü yüksek değildir ve nesnelerin renklerini o kadar iyi tayin edemez ancak insan görüşünün etkilendiği karanlık, sis, pus, yağmur, kar gibi koşullarda ve görüşe imkan olmayan durumlar için uygun tasarım yapılarak radar ile nesne tespiti gerçekleştirilebilir (Skolnik, 1980). Radar kelime anlamı olarak radyo algılama ve menzil anlamına gelen İngilizce radio detection and ranging kelimelerinin kısaltılmış halidir (Richards vd., 2010). Radarlar askeri ve sivil

uygulamalarda izleme, tanımlama, güdümlenme, takip gibi farklı amaçlarla kullanılabilir. Uzayda, deniz konumlama sistemlerinde, hava tahminlerinde ve askeri gözetleme uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır.

Radar denklemi bir radar tasarımında performansı etkileyen tüm parametreleri içerir ve radar tasarımı yapılırken bu parametrelere dikkat edilir, radar denklemi Denklem 2.11’de verildiği gibidir (Wibowo ve Zulkifli 2019). Denklemde P_r alıcı anten tarafından alınan gücü (watt), P_t gönderici antenin gücünü (watt), G sistemin toplam kazancını (dB), λ çalışılan dalga boyunu, ϵ_r elektriksel geçirgenliği (relative permittivity), h anten ve yüzey arasındaki mesafeyi (m), d hedefin derinliğini (m), σ ise radar kesit alanını (m^2), L ise sistemde meydana gelen toplam kaybı ifade eder. Bu değişkenlerin hepsi radar tasarımında önemli parametrelerdir.

$$P_r \approx \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \sigma \left(\frac{\lambda}{\epsilon_r}\right)^2}{4\pi^3 \cdot (h + d)^4 \cdot L_{total}} \quad (2.11)$$

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında korozyon tespiti Denklem 2.11’de verilen radar kesit alanı üzerinden gerçekleştirilmemiştir. Yansıyan dalganın faz bilgisi TE düzlem dalgalarının düz bir plakadan saçılma mantığı ile ilişkilendirilebilir. Denklem 2.12 ve 2.13’te TE modundaki düzlem dalgalar için elektrik ve manyetik alan ifadesi verilmiştir. Denklemlerdeki θ_i geliş açısı, θ_s saçılma açısıdır.

$$E^i = \eta \cdot E_0 \cdot (\hat{a}_y \cos \theta_i + \hat{a}_z \sin \theta_i) \cdot e^{-j\beta(y \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (2.12)$$

$$H^i = \hat{a}_x \cdot H_0 \cdot e^{-j\beta(y \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (2.13)$$

Plakadan saçılan elektrik alan ifadesi Denklem 2.13, 2.14, 2.15’teki ifadeler olur (Ara basamaklar için bkz. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, 1989, syf. 589.). Denklem 2.17 ve 2.18’de X ve Y ifadeleri λ ’nın fonksiyonlarıdır, a plakanın uzunluğu b ’de genişliğidir, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ yayılma sabiti $\gamma = \alpha + j\beta$ içinde bulunur ve β ifadesi faz bilgisini taşır.

$$E_r^s \simeq 0 \quad (2.14)$$

$$E_\theta^s = C \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cdot (\cos \theta_s \sin \theta_s) \left(\frac{\sin(X)}{X} \right) \left(\frac{\sin(Y)}{Y} \right) \quad (2.15)$$

$$E_\phi^s = C \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cdot (\cos \theta_s) \left(\frac{\sin(X)}{X} \right) \left(\frac{\sin(Y)}{Y} \right) \quad (2.16)$$

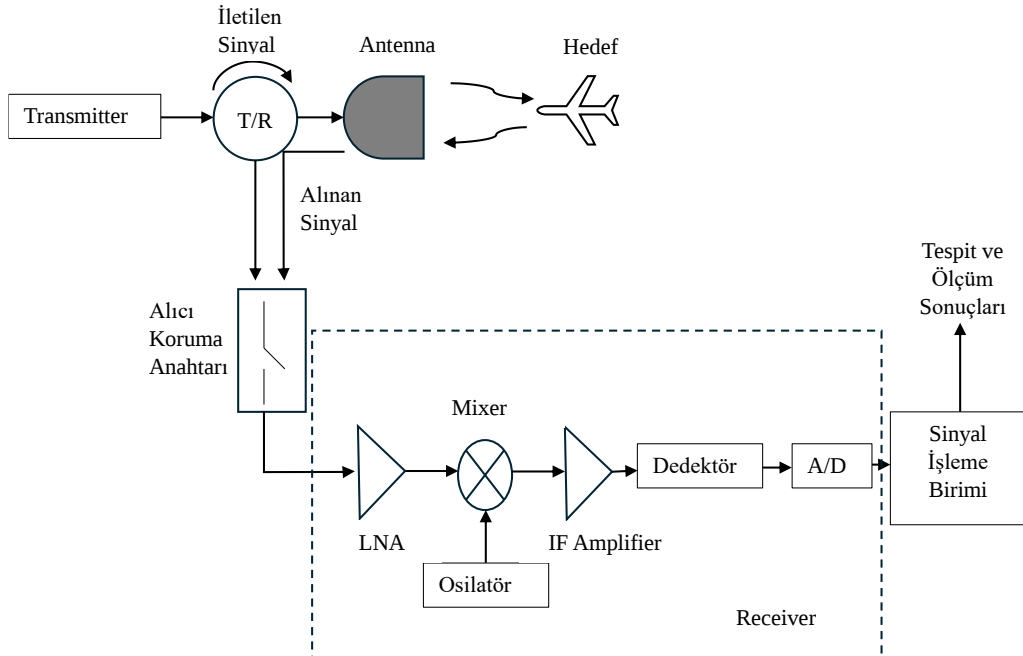
$$X = \frac{\beta a}{2} \sin \theta_s \cos \theta_s \quad (2.17)$$

$$Y = \frac{\beta b}{2} (\sin\theta_s \sin\phi_s - \sin\theta_i) \quad (2.18)$$

Korozyon tespitinde radar kesit alanı ölçülmemiştir ama bunun faz beklentileriyle ilişkili olması ve cevap üretmesi beklenir. Denklem 2.19’da ifade edildiği gibi radar kesit alanı λ ile ilişkilidir yani dalganın faz bilgisine ulaşılır. Bu faz bilgisinin de yapıda oluşan korozyon varlığı ve seviyesiyle ilişkili bilgi taşıması beklenir.

$$\sigma_{3D} = 4\pi \cdot \left(\frac{ab}{\lambda}\right) \cdot (\cos^2\theta_s + \sin^2\phi_s) \left(\frac{\sin(X)}{X}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin(Y)}{Y}\right)^2 \quad (2.19)$$

Radar sistemlerinin detayları farklılık gösterse de temel bir radar biçimi, bir tür osilatör tarafından üretilen elektromanyetik radyasyon yayan bir verici, anten, bir alıcı ve bir enerji tespit cihazı (işaret işlemcisi) içerir (Skolnik, 1980; Richards vd., 2010). Şekil 2.2’de de gösterildiği gibi bir radar sisteminde elektromanyetik dalgalar bir verici ile antene iletilir, buradan yayılma ortamına dalgalar ilerler, T/R cihazı hem vericinin hem de alıcının antene bağlanabilmesi için bir bağlantı noktası sağlama işlevine sahiptir bir nevi anahtarlama yapar, çevrede yayılan işaret hedefe ulaştığında akım indüklenir ve bu işaretler hedeften tekrar yayılırlar, radarın alıcı anteni hedeften gelen bu işareti alır ve bu işaret LNA (low noise amplifier) aşamasında güçlendirilerek osilatörden gelen orijinal işaret ile mixerde karıştırılır ve IF (integrated frequency) ile RF işareti ara bir frekansa dönüştürülür, dedektör ile taşıyıcı işaret modüle edilmiş hedeften gelen işaretten çıkarılır ve işaretler analog dijital dönüştürücü ile işaret işleme birimine iletilir ve burada radarın hedef üzerindeki tespit sonuçları elde edilir (Richards vd., 2010).



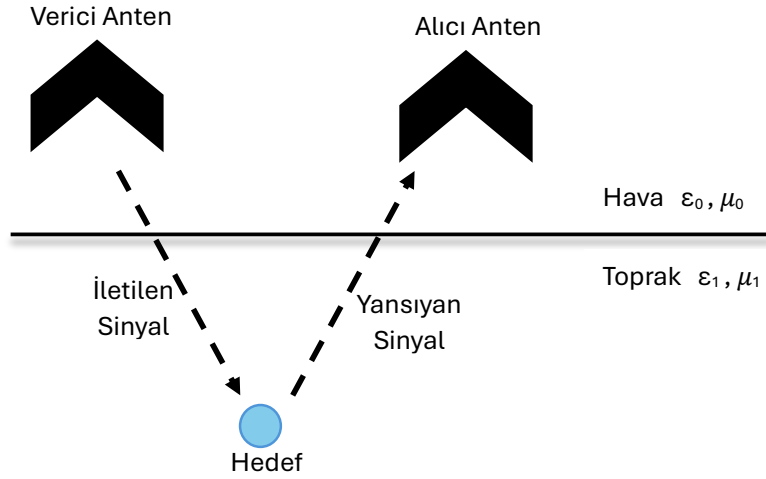
Şekil 2.2. Klasik radar sistemi (Richards vd., 2010)

Radarın geniş uygulama alanları, engelleri aşma ve her türlü hava koşulunda çalışabilme yeteneği sayesinde, özellikle yeraltı özelliklerinin hassas bir şekilde görüntülenmesi amaçlanarak penetrasyon radarı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, gelecekte daha sofistike ve güçlü radar sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Bu çalışmada beton içi korozyon varlığı, seviyesi tespiti yapılırken yere nüfuz eden radar ve frekans modüleli sürekli dalga biçimi çalışma prensibi temel alındığı için ağırlıklı olarak ikisi üzerinde durulmuştur.

2.2.1. Yere Nüfuz Eden Radar (YNR)

Yeraltına gömülü cisimlerin ve yapıların tespitinde yaygın şekilde yere nüfuz eden radar kullanılmaktadır. YNR, jeofizik alanında kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik bir tekniğe dayanır ve yüzeyin yakınındaki araştırmalar için uygundur; bu yöntem, araştırma yapılacak alanda herhangi bir zararlı etkisi olmaksızın hızlı veri toplama olanağı sunar ve santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü 2B ve 3B detaylı görüntüler elde etmeyi mümkün kılar ve ek olarak tahribatsız şekilde kolaylıkla inceleme yapılabilmesi bu tekniği cazip kılar; YNR, gömülü veya yeraltındaki hedeflerin derinlik ve konum bilgilerini net bir şekilde belirleyebilme yeteneği nedeniyle gittikçe daha fazla popülerlik kazanmaktadır (Yalın, 2018). YNR'nin yaygın kullanım alanları arasında gömülü boru tespiti, gaz sızıntısı konumu, gömülü kara mayını tespiti, tünel tespiti ve kaldırımlarda beton değerlendirmesi ve boşluk tespiti yer alır (Richards vd., 2010). Uygulamaların çoğu doğal jeolojik malzemelerde olmuştur, ancak beton, asfalt ve diğer inşaat malzemeleri gibi insan yapımı kompozitlerde de yaygın kullanım söz konusudur. (Annan, 2003). Malzemeler içindeki yapıları ve malzeme özelliklerindeki değişiklikleri tespit etmek amacıyla kayıplı dielektrik malzemeleri araştırmak için YNR'de elektromanyetik alanlar kullanılır, elektromanyetik dalga malzemede ilerlerken sınırlı bir derinliğe kadar nüfuz edebilirler bu nedenle penetrasyon yani nüfuz edilen derinlik her zaman bir sorundur (Annan, 2003). Neredeyse tüm gömülü nesneler dielektrik özelliklerinden dolayı, çevredeki zemin ile dielektrik bir süreksizlik yaratacak ve bu da iletilen dalganın yansımaya neden olacaktır, YNR uygulamalarında son derece yüksek aralıklı çözünürlük (2–3 cm veya daha az) oldukça önemlidir ve bu YNR sistemlerin zorluğu, yüksek bant genişliği yüzdesine sahip olan ve EM dalgasını yere veya diğer malzemeye verimli bir şekilde bağlayan bir anten sistemi tasarlamaktır (Richards vd., 2010).

Tipik bir YNR sistemi Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bir çift verici ve alıcı anten dizisinden oluşur; verici antenler nesneye doğru elektromanyetik dalgayı yayar ve alıcı antenler iletilen işaretlerin geri saçılımını kaydeder; antenlerin türü, araştırma işaretinin seçimi ve menzil tahmini için kullanılan işaret işleme yöntemleri, YNR sisteminin tasarlandığı uygulamaya bağlıdır (Foroozan ve Asif, 2010).



Şekil 2.3. Tipik bir YNR sistemi

Verici anten tarafından ortama gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmı, ortamın dielektrik geçirgenlik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik gibi fiziksel özelliklerine bağlı olarak geri yansır, diğer kısmı daha derin bölgelere doğru yayılmaya devam eder (Yiğit, 2007). Alıcı anten tarafından toplanan işaretler, her bir yansımanın gidiş ve geliş zaman farklarını içerir ve bu sayede radar işaretlerinin gidiş-geliş zamanlarından yararlanarak, elektriksel özelliklerdeki değişikliklerin derinliği ve geometrisi belirlenir.

Elektromanyetik dalgalarının yayılma hızı Denklem 2.12’de verildiği gibi esas olarak konak ortamın yani ilerlenen ortamın dielektrik sabiti tarafından belirlenir, topraktaki elektromanyetik dalga hızı ve dielektrik sabiti toprağın su oranından etkilenir, su için $\epsilon=80$, yaygın jeolojik malzemeler için $\epsilon= 5-15$, hava için de $\epsilon=1$ ’dir (Galagedara vd., 2005). Suyun dielektrik geçirgenliği yüksektir ve iletkenidir, bu özellikleri YNR’nin çalışma performansını olumsuz etkilemektedir, YNR sistemlerinde incelenilecek ortamın nem ve su oranının olabildiğince az olması YNR performansını artırır. YNR’de elektromanyetik dalganın yayılımını direkt etkileyen ortam yoğunluğu, su miktarı, araştırma zeminin tanecik yapısı, su miktarı ile tuz miktarı ve yüzey dokusu gibi parametreler vardır (Bristow ve Jol, 2003).

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.12)$$

YNR’de araştırılan ortamın düşük iletkenlikli (düşük iletkenliğin matematiksel ifadesi $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$) olması bir avantajdır çünkü düşük iletkenlikli ortamlarda elektromanyetik dalganın enerjisi daha az sönümlenir ve işaretlerin yüksek iletkenlikli ortamlarda penetrasyon derinliği dalga soğurulup sönümlendiği için 1 m ya da daha az olurken düşük iletkenlikli ortamlarda bu değer yaklaşık 50-60 m olabilmektedir (Yalın, 2018).

YNR'de işaretin ulaşması gereken hedefin olduğu derinliğin tayini oldukça önemlidir. Bu nüfuz derinliğinin anten frekansı ile doğrudan ilişkisi vardır. Düşük frekanslı antenlerde dalga boyu yüksektir, bu antenler yeraltında daha derin noktadaki hedeflere ulaşım sağlayabilirler, ancak bu durum genellikle üzerindeki cisimlerin çözünürlüğünün azalmasına yol açar. Çünkü düşük frekanslı antenlerin daha uzun dalga boyları vardır, bu da daha düşük çözünürlük anlamına gelir. Çözünürlüğü artırmak için yüksek frekanslı antenlerin kullanılması gerekebilir. Yüksek frekanslı antenler, daha kısa dalga boylarına sahiptir, bu da daha yüksek çözünürlük sağlar. Ancak, yüksek frekanslı antenlerin kullanılması, araştırma derinliğini düşürür. Bu sebeple yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar, yeraltında daha az nüfuz edebilir ve daha sıkı derinliklerde yansıma alabilirler. Bu nedenle, yeraltı radarı uygulamalarında, çözünürlük ve araştırma derinliği arasında bir denge kurulması önemlidir. Hangi frekansın kullanılacağı, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine, hedeflerin derinliğine ve çözünürlük gereksinimlerine bağlı olacaktır.

YNR darbe işaretlerin merkez frekansları ve bant genişlikleri uygulamanın performansı açısından oldukça önemlidir, çünkü toprak iletken bir dielektrik ortam olduğu için YNR'nin çalışma frekansı arttıkça dalga yayılım kaybı da artar, hedef derinliği azalır fakat hedefin radar kesit alanı frekansla yükselir, çözünürlük artar (Türk, 2004). Dolayısıyla hem yüzeye yakın küçük cisimleri tespit etmek hem de derindeki büyük boyutlu yapıları algılayabilmek için alçak ve yüksek frekans bileşenlerini bir arada bulunduran çok geniş bantlı veya geniş bantlı antenler YNR'lerde tercih edilir; anten tasarımındaki parametreler yüksek kazanç, geniş bant kararlılığı, düşük anten kuplajı, doğrusal faz cevabı ve düşük geri yansımadır; bu sayede yüksek verimlilik, düşük çınlama seviyesi ve düzgün biçimli darbe ışıması ile yeraltı hedef algılamasında yüksek performans elde edilebilir (Türk, 2004).

YNR'de geliştirilen uygulamaya göre tarama çeşitleri mevcuttur bunlar A-tarama, B-tarama, C-tarama olarak isimlendirilmektedir (Özdemir vd., 2014). A-tarama, radarın tek frekansta veya tek bir darbesinde elde edilen menzil profili olarak tanımlanabilir, kısaca radarın tek bir darbesi veya tek frekans tarama neticesinde elde edilen menzil profili olarak adlandırılabilir ve bu taramada tek bir noktada verici antenden yollanan darbe işareti aynı veya başka bir anten tarafından alınarak işaretin genliği yorumlanır (Yiğit, 2007). B-tarama, A-tarama işaretlerinin bir hat boyunca birleştirilmesiyle elde edilir ve B-tarama görüntüleri iki boyutlu verilere sahiptir (Özkaya, 2020). C- taramada ise üç boyutlu veriler, düzlem boyunca tekrarlanan B-tarama verilerinin birleştirilmesi ile elde edilir (Altın, 2020). Genellikle YNR uygulamalarında işaretler yansıtıcı hedeften tek hat boyunca toplanır, kara manyırları gibi küçük gömülü cisimlerin tespitinde hedef hat dışında ise hedefin kaçırılma ihtimali vardır, bu sebeple çok boyutlu C- tarama ile görüntüleme kritiktir (Özdemir vd., 2006). Bu çalışmada beton içindeki demir üzerinde meydana gelen korozyon tespiti için A ve B-tarama kullanılmıştır. Çünkü burada üzerinde durulan konu korozyonun var olup

olmadığıdır, yani korozyonun tespiti, C-tarama ile yani korozyonun 3-boyutlu görüntülenmesi ile ilgilenilmemiştir.

Çalışma prensibi elektromanyetik dalganın malzeme ile etkileşimine dayanan YNR sistemleri betonarme yapılarıdaki korozyon tespiti için de kullanılmaktadır. YNR ile kolon demirlerinde meydana gelen dielektrik değişiklikler yorumlanabilir ve bunun sonucunda da oluşan korozyon ve seviyesi tespit edilebilir. Malzemelerde gerçekleşen dielektrik değerinin değişimleri boşlukların, çatlakların veya diğer anormalliklerin sonucunda oluşabilir. İnşaat demirinde korozyon meydana geldiğinde demirde meydana gelen dielektrik sabiti ϵ ve manyetik geçirgenliği μ gibi parametrelerdeki değişiklik nedeniyle, inşaat demiri içindeki mikrodalganın dalga empedansı ve faz farkı değişir, bu da S parametrelerinin değişmesine neden olur, betonarme yapının iç korozyon durumu, S_{11} ve S_{21} 'in değişiklikleri ölçülerek yorumlanabilir (Li vd., 2023). YNR işaretleri kolon içindeki çelik donatıya ulaştığında bu iletken yapı üzerinde bir akım indüklenir. Elektrik alan uygulandığında ortaya çıkan bu akım Denklem 2.13'te verildiği gibi iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamı şeklinde ifade edilir. Oluşan iletim akım yoğunluğunun matematiksel ifadesi Denklem 2.14'te ifade edildiği gibidir, iletkenlik arttıkça oluşan akım yoğunluğu da artar. Ayrıca yer değiştirme akım yoğunluğu iletken donatının çapına ve karmaşık elektriksel geçirgenliği yani dielektriğine bağlı olarak Denklem 2.15'te ifade edildiği gibi yeni bir akım yoğunluğu oluşturur. Kolon donatısı artık üzerinde akım indüklenmiş bir iletken ve üzerinde oluşan bu akım sebebi ile Denklem 2.16'da gösterilen manyetik vektör potansiyeli de matematiksel olarak elde edilir, buradaki R hedefe işaret gönderen antenin hedefe uzaklığıdır. Bu manyetik vektör potansiyeli herhangi bir cihaz ile ölçülemez ara bir işlem, vektör potansiyelin Denklem 2.17'de verildiği gibi rotasyonu alınır ve alıcı antenden ölçülen değer olan manyetik akı yoğunluğu ölçülür. Ardından bu manyetik akı yoğunluğunun zamanla değişiminden elektrik alana geçiş yapılabilir.

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_D \quad (2.13)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (2.14)$$

$$\vec{J}_D = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\vec{J} e^{-i\beta z}}{R} dz \quad (2.16)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.17)$$

Denklemlerden de anlaşıldığı gibi YNR sistemlerinde korozyon tespit ederken korozyon elemanlarının ϵ ve μ değerlerinde meydana gelen değişimler indüklenen akımları, vektör potansiyeli ve manyetik akı yoğunluğunu etkilemektedir. Yani korozyon varlığı tespitinde ve korozyon seviyesinin belirlenmesinde ϵ ve μ

değerlerinde meydana gelen değişimler dikkate alınması gereken en önemli parametredir. Bu çalışmada gözlemlenecek olan betonarme kolon içindeki inşaat demirinin korozyon tespiti için betonarme malzemesi olan kuru betonun, inşaat çeliğinin ve korozyon ürününün elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine ihtiyaç vardır. Kuru betonun elektriksel geçirgenlik değeri $\varepsilon = 4.94 - j0.69$ 'dur (Hui vd.,2008). Kuru betonun manyetik geçirgenlik değeri $\mu = 1$ 'dir. İnşaat çeliğinin elektriksel geçirgenliği, $\varepsilon = 1$ ve manyetik geçirgenliği $\mu = 100$ olarak tespit edilmiştir (Alvarez vd., 2017). İnşaat çeliği mükemmel elektrik iletken (ingilizcesi PEC) özelliği gösterir. Fe_2O_3 bir korozyon ürünüdür ve 2450 MHz frekans seviyesinde karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri $\varepsilon = 8.42 - j1.03$ olarak tespit edilmiştir (Gallion, 2019). Fe_2O_3 için karmaşık manyetik geçirgenlik değeri ise $\mu = 1 + j0$ 'dır (Peng vd., 2012).

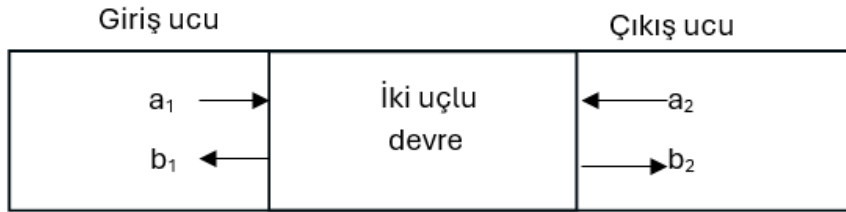
YNR sistemleri ile donatı korozyonunun tespitinde korozyon ve donatıda meydana gelen çatlaklar oluşmadan önce donatıdan yansıyan işaretlerin genliğinin arttığını, korozyon oluşuktan sonra ise işaretlerin zayıflayıp genliğinin azaldığı görülmüştür (Hong vd., 2022). Betondaki korozyona sebep olan yüksek seviyedeki klorür iyonları ve nem elektromanyetik dalganın daha fazla zayıflamasına ve elektromanyetik dalganın hızının azalmasına katkıda bulunan temel faktörlerdendir (Boldrin P. vd., 2024). Buradan anlaşılabileceği gibi gerçekleştirilen bu tez çalışmasında özetle beklenen durum şudur; demir üzerinde meydana gelen korozyon, demirden yansıyan radar işaretlerinin genliğini azaltır, dalganın alıcıya dönüş süresi artar ve korozyon seviyesi arttıkça dalganın hızı azalacağından faz farkı artar.

2.2.2. Mikrodalga Görüntüleme

Mikrodalga görüntülemenin temeli, çeşitli malzemelerin dielektrik özelliklerinin görüntüye dönüştürülmesi prensibine dayanır, belli bir frekansa sahip işaretler gönderilen bir nesneden yansıyan işaretler geniş bantlı bir anten tarafından alınarak taranan alandaki diğer nesnelerin belirlenmesi ve ayırt edilmesi için kullanılır ve görüntüleme işlemi, gönderilen işaretin taranan alandaki diğer nesnelerden yansıması sonucunda oluşur (Kaya ve Ölçer, 2012). Diğer tahribatsız muayene yöntemleriyle karşılaştırıldığında mikrodalga ölçümü ve görüntülemenin metal ve metal olmayanlar için uygunluk, birleştirme maddesine gerek olmaması, algılama ortamına daha az ihtiyaç duyulması ve artan frekansla birlikte yüksek algılama çözünürlüğü sağlaması gibi avantajları mevcuttur, ayrıca mikrodalga görüntüsünde gösterilen çatlak bilgilerinin operatör tarafından görülebilmesi ve kolayca anlaşılabilmesidir ayrıca mevcut literatürde metal üzerinde meydana gelen korozyonun ve korozyon çatlaklarının tespitinde de mikrodalga görüntüleme kullanımı vardır (Tao vd., 2020). Mikrodalga görüntüleme sistemleri kullanılarak duvar arkasında saklı cisimlerin tespiti ve sınıflandırılması yapılabilmektedir, mikrodalga görüntüleme sistemleriyle ölçülen saçılma parametreleri sayesinde, hedeflenen alanda bulunan ve arka plandan farklı

elektiriksel özelliklere sahip cisimlerin yerini veya elektiriksel parametrelerini ortaya çıkartılır. Duvar arkasından sağlanan bu bilgi ile güvenlik ve kurtarma çalışmaları ve duvarın kendisi hakkında bilgi edinilerek de sağlamlık ve bozulum seviyesi tespiti gibi fiziksel özellikleri hakkında da çıkarımlar yapılabilmektedir (Doğu, 2023). Beton hedeften yansıma miktarı, beton içindeki dalgaların hızı ve dalga boyu ve zayıflama derecesi gibi elektromanyetik dalga saçılımının çeşitli yönleri, malzemenin özellikleriyle ilgilidir (Güneş ve Büyüköztürk, 2012).

Mikrodalga görüntüleme ile dalga ilerlediği beton korozyon demir ortamlarının fiziksel özelliklerinden etkilenir ve yansıyan dalga ile bu ortamların özellikleri hakkında bilgi edinilir. Bu çalışmada da YNR’de radar kesit alanına odaklanılmamış, çalışmanın MATLAB senaryosu kısmında saçılma parametreleri yani S parametrelerinin faz bilgisindeki değişimden hareketle korozyon tespiti incelenmiştir. Dalganın genliği bozulmaya çok açıktır, faz bozulma bakımından daha korunaklı ve etkileşimde bulunduğu ortam özelliklerine duyarlı olduğu için faz bilgisi yorumlanmıştır. Şekil 2.4’te gösterilen iki çıkışlı (ingilizce karşılığı port) devre şematığında a_1 ve a_2 gelen işareti, b_1 ve b_2 yansıyan işaretleri ifade etmektedir, iki kapılı bir devre modeli için S parametreleri Denklem (2.18) - (2.21) arasında ifade edildiği gibidir, S_{11} girişteki yani birinci çıkıştaki yansımayı, S_{22} çıkıştaki yani 2. çıkıştaki yansımayı ve S_{21} birinci porttan ikinci porta iletimi, S_{12} ikinci porttan birinci porta iletimi ifade eder, S parametreleri devrelerde vektör network analizörleri ile ölçülmektedir (Güvenli, 2022). Korozyon seviyesi tespitinde sırasıyla beton, korozyon, demire çarptıktan sonra yansıyan elektrik alanın kaynaktan gönderilen toplam elektrik alana oranlanması ile elde edilen sonuç S_{21} olarak değerlendirilmiş ve korozyon seviyesi değişikliğine göre S_{21} ’de meydana gelen faz cevabının farklılıkları yorumlanmıştır.



Şekil 2.4. İki uçlu mikrodalga devre şematığı

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.18)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.19)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.20)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.21)$$

Elde edilen bu denklemlerden saçılma matrisi ise Denklem 2.22’de verildiği gibi olur.

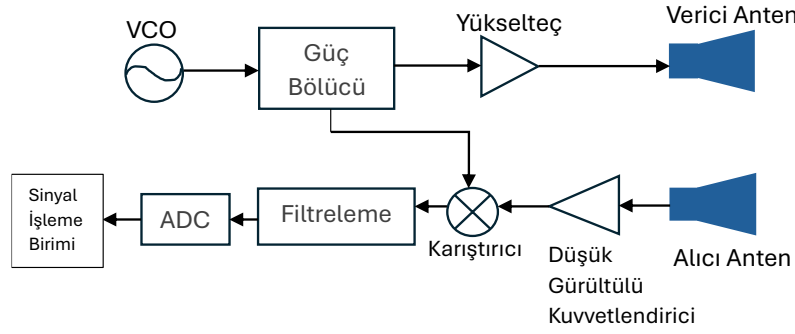
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.2.3. Frekans Modüleli Sürekli Dalga (FMSD) Biçimi

Radar sistemlerinde hedef tespiti, menzil hesaplaması elektromanyetik dalganın iletilmesi ve geri yansıyan yankı işaretinin yorumlanmasıyla gerçekleştirilir, radar sistemlerinde darbeli veya sürekli dalgayı kullanarak işaret gönderir, darbeli radarlarda iletilen işaret bir enerji patlamasıdır ve alıcı taraf iletilen işaretten sonra yankı işaretini dinler, bu yankı işaretinden hedefin tespiti ve gönderilen işaret ile alınan işaret arasındaki zaman farkından aradaki mesafe de hesaplanabilmektedir (Kurt, 2007). Sürekli dalga radar tipinde ise verici sürekli alıcıya işaret gönderir, bu radar tipinde sürekli iletim yapıldığından, iletilen elektromanyetik dalganın gidiş-dönüş süresinin, hedef menzilin belirlenmesi dalganın özelliklerini değiştirerek yani modüle edilerek (örneğin, dalganın frekansını zaman içinde değiştirerek) gerçekleştirilmelidir, bu frekans modülasyonlu, dalga üzerine bir zamanlama işareti koyar ve böylece hedef aralığının belirlenmiş olur (Richards vd., 2010).

Betonarme yapının muayenesinde gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan YNR sisteminin radar şekli FMSD radardır. İngilizcesi frequency modulated continuous wave olan bu FMSD radar ile sürekli dalgaların frekansı değiştirilerek hedeften değişken frekanslarda cevaplar alınır. FMSD radarlar genellikle yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için uzaktan algılama, görüntüleme sistemlerinde tercih edilir ve uzay araştırmaları, jeoloji, çevre izleme, askeri uygulamalarda kullanılır. DC offset, çok yollu yansıma ve menzil tespiti yapılırken çalışma ortamında bulunan tüm nesnelerden gerçekleşen yansımaları tek bir sinüzoid işaretinde toplamasından dolayı tespitin gerçekleştirilememesi sürekli dalga radarın dezavantajlarından bu olumsuz tarafları ortadan kaldırmak için FMSD radarlar tercih edilir (Şeflek ve Yıldız, 2020). FMSD radarları yüksek çözünürlüklü, düşük iletim güçlü ve daha basit yapıya, düşük hata oranına sahip olmasından dolayı kullanım alanları genişlemiştir, literatürde FMSD radarlar sivil ve askeri alanlar olmak üzere pek çok farklı uygulama alanlarında kullanıldığı görülür, bu alanlardan bazıları otoyollarda hız tespiti, araç çarpışma uyarı sistemi ve yüksek gürültüye sahip ortamlarda hedef tespitidir (Güz vd., 2021).

Bir FMSD radarın blok diyagramı Şekil 2.5’te gösterildiği gibi GDÜ (voltaj kontrollü osilatör, İngilizcesi VCO) güç bölücü, verici anten, mixer, kuvvetlendirici, filtreleme, analog işaret çevirici AİÇ (İngilizcesi ADC) ve işaret işleme kısımlarından oluşur.



Şekil 2.5. FMSD radar blok şeması

FMSD sisteminde GDÜ çıkışındaki işaret güç bölücü ile iki tarafa ayrılır, bir kısmı karıştırıcıya girer ve bir kısmı da güçlendirilerek verici anten ile hedefe gönderilir. Gönderilen işaretin matematiksel ifadesi denklem 2.23'te verildiği gibidir, hedefe ulaşp geri yansıyan işaret alıcı antene gelir, alıcı antendeki bu işaretin ifadesi Denklem 2.24'te verildiği gibi olur (Şeflek ve Yıldız, 2020).

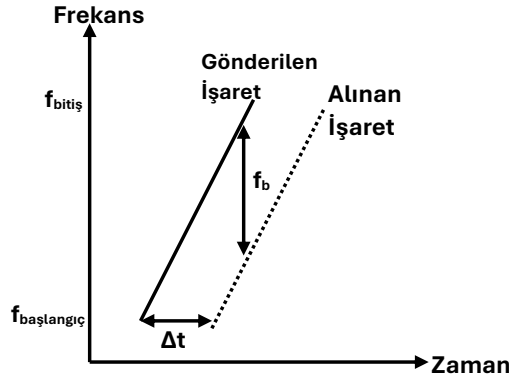
$$S_G(t) = A_G \cdot \cos \left(2\pi \cdot f_c \cdot t + \pi \cdot \frac{B}{T_c} \cdot t^2 + \phi(t) \right) \quad (2.23)$$

A_G : Gönderilen işaret genliği, f_c : Gönderilen işaretin merkez frekansı, B : işaretin bant genişliği
 T_c : Chirp işareti süresi, $\phi(t)$: Gönderilen işaretin başlangıç fazı

$$S_A(t) = A_A \cdot \cos \left(2\pi \cdot f_c \cdot (t - t_{uçuş}) + \pi \cdot \frac{B}{T_c} \cdot (t - t_{uçuş})^2 + \phi(t - t_{uçuş}) \right) \quad (2.24)$$

A_A : Alınan işaretin genliği, $t_{uçuş}$: işaretin hedefe varış- dönüş süresi, $R(t)=R_0+x(t)$ mesafesini alma süresi

FMSD radarlarda şekil 2.6'da verildiği gibi gönderilen işaret ile alınan işaret arasında Δt kadar bir zaman farkı olur, f_b frekansı da atım ya da vuruş frekansı denilmektedir. FMSD radar sisteminde antenin hedefe uzaklığı " $R(t)=R_0+x(t)$ " mesafesi olsun, gönderilen işaret hedefe çarpıp alıcı antene döndüğünde $2R$ kadar yolu $\Delta t=T=t_{uçuş}$ kadar sürede almış olur. Denklem 2.25'te verildiği gibi T süresi işaretin aldığı yolun uzunluğuna bağlıdır. İşarete Doppler kayması yoksa bu vuruş frekansı f_b , sadece hedefin mezilinin ölçüsüdür ve iletilen işaretin eğimi m_f olursa f_b Denklem 2.26'daki gibi ifade edilir (Kurt, 2007). Başka bir ifadeyle bant genişliği B olan bir chirp işaretinde T_c işaretin uygulanma süresi, darbe tekrarlama periyodu olursa m_f ifadesi denklem 2.27'deki gibi olur. Buradan yine f_b Denklem 2.28 gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.6. FMSD radarda gönderilen ve alınan işaret

$$\Delta t = T = t_{uçuş} = \frac{2R(t)}{c} \quad (2.25)$$

$$f_b = T \cdot m_f = \frac{2R}{c} \cdot m_f \quad (2.26)$$

$$m_f = \frac{B}{T_c} \quad (2.27)$$

$$f_b = \frac{B}{T_c} \cdot t_{uçuş} = \frac{2BR(t)}{cT_c} \quad (2.28)$$

Radara alıcı antenindeki Denklem 2.24'te verilen işaret kuvvetlendiriciden geçtikten sonra karıştırıcıya girer ve karıştırıcıdaki orijinal işaretle çarpılır. Bu işaretin ifadesi Denklem 2.29'da verildiği gibidir, işaret orta frekans işareti ve hedef hakkında bilgiler içeren vuruş işareti olarak isimlendirilmektedir, $\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t - t_{uçuş})$ faz gürültüsünü ifade eder, bu gürültü düşük menzil radar uygulamalarında menzil etkisinden dolayı ihmal edilebilir, vuruş işaretinin faz bilgisi bu ifadenin Denklem 2.30'daki eşitlikte görülmektedir bu eşitlikteki $\pi \frac{B}{T_c} (t_{uçuş})^2$ ifadesi sıfıra çok yakın olduğu için faz, Denklem 2.31'de verildiği gibi olur (Şeflek ve Yıldız, 2020).

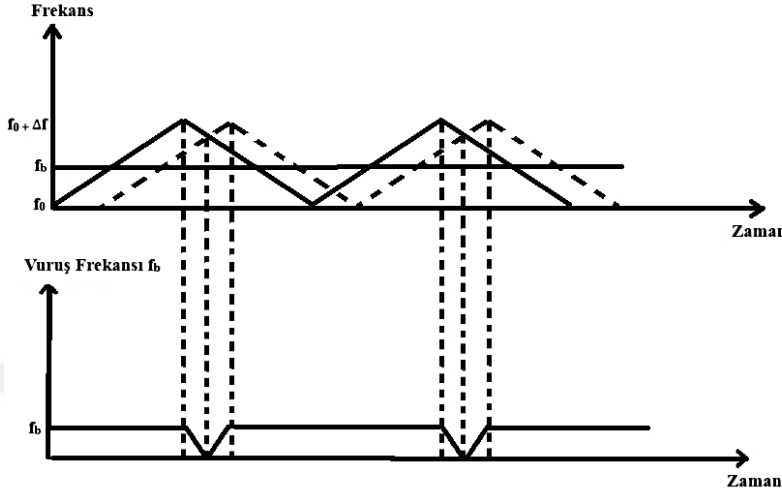
$$S_B(t) = A_B \cdot \cos \left(2\pi \cdot \left[\frac{B}{T_c} \cdot t_{uçuş} \right] t + 2\pi \cdot f_c \cdot t_{uçuş} + \pi \cdot \frac{B}{T_c} \cdot (t_{uçuş})^2 + \Delta\phi(t) \right) \quad (2.29)$$

A_B : İşaret genliği, f_b : $\frac{B}{T_c} t_{uçuş}$ vuruş işareti

$$\phi_b = 2\pi \cdot f_c \cdot t_{uçuş} + \pi \cdot \frac{B}{T_c} \cdot (t_{uçuş})^2 \quad (2.30)$$

$$\phi_b = \frac{4\pi \cdot f_c \cdot R(t)}{c} \quad (2.31)$$

FMSD radar işareti üçgen, sinüzoidal, kare ve testere dişli olmak üzere dört farklı işaret türünde modüle edilebilir (Çam ve Çankaya, 2023). Şekil 2.7’de gösterilen bir testere dişli dalgaının modüle edip vuruş işaret frekansı elde edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 2.7. FMSD radar testere dişli dalgaının atım frekansı

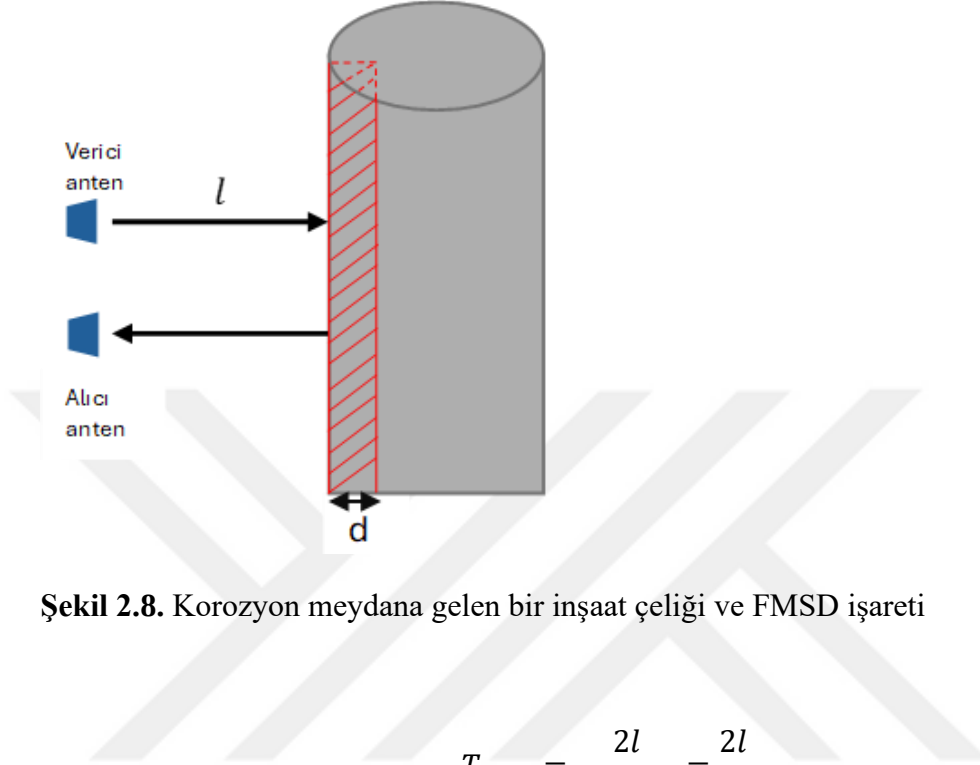
Karıştırıcı çıkışında filtrelenen işaretin atım frekansı f_b orta frekans (IF) bir işarettir. Bu atış frekansı Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi iletilen işaretin dönüş bölgeleri dışında sabit bir değere sahiptir. Eğer radar işareti f_m oranında modüle edilir ve frekanstaki sapma Δf olursa, dönüş bölgeleri dışındaki eğim ifadesi m_f Denklem 2.32’de gösterildiği gibi olur. Denklem 2.27’deki ifadede bu m_f değeri yerine koyulursa atım frekansı f_b , Denklem 2.33’te elde edildiği gibi menzile ve hedefin ilgilenen uzaklığına bağlıdır (Eren, 2023). Radarın iki hedefi birbirinden ayırt edebileceği en az mesafe menzil çözünürlüğüdür ve $\Delta R = c/2B$ şeklinde ifade edilir (Şeflek ve Yaldız, 2020).

$$m_f = \frac{\Delta f}{\frac{1}{2}f_m} = 2 \Delta f \cdot f_m \quad (2.32)$$

$$f_b = 2 \Delta f \cdot f_m \cdot t_{uçuş} = 2 \Delta f \cdot f_m \cdot \frac{2R(t)}{c} \quad (2.33)$$

Beton içerisinde bulunan demir üzerinde meydana gelen korozyon tespitinin gerçekleştirebilmek için yukarıda anlatılan FMSD radar mantığı Şekil 2.7’de gösterilen bir çelik üzerinde meydana gelen korozyon seviyesi ile faz arasındaki ilişkiye uyarlanmış, ve faz denklemleri elde edilmiştir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi bir l mesafesine yerleştirilmiş antenler, havadaki bu mesafeyi ışık hız ile kateder çünkü havanın dielektrik sabiti $\epsilon_{hava} = 1.0006$ ve bu değer de yaklaşık vakumun dielektrik sabitine eşittir, $\epsilon_{vakum} = 1$. Havada işaretin geçireceği süre T_{hava} olsun bu sürede dalga

gidiş-geliş olarak $2l$ kadar mesafeyi alır ve süre Denklem 2.34'te verildiği gibi olur, işaretin korozyon içerisinde geçirdiği süre $T_{korozyon}$ olsun bu da Denklem 2.35'teki gibi ifade edilir.



Şekil 2.8. Korozyon meydana gelen bir inşaat çeliği ve FMSD işareti

$$T_{hava} = \frac{2l}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{hava}}}} = \frac{2l}{c} \quad (2.34)$$

$$T_{korozyon} = \frac{2d}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{korozyon}}}} \quad (2.35)$$

Denklem 2.34'te verilen korozyonun dielektrik sabiti $\epsilon_{korozyon} = 8.42 - j1.03$ 'dir. Gerçek senaryoda korozyon ürününden önce de beton katmanı olacaktır ve onun da elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon_{beton} = 4.94 - j0.69$ 'dur. İşaretin havada ve korozyonlu bölgede toplam seyahat süresi T olsun, bu toplam süre $T = T_{hava} + T_{korozyon}$ olur. Denklem 2.33'teki atım frekansı tekrar yazılırsa Denklem 2.36'daki ifade elde edilir. Bu denklemden de anlaşıldığı gibi atım frekansı korozyonun elektriksel geçirgenlik değerine ve işaretin ilerlediği toplam mesafeye bağlıdır. Denklem 2.31'deki faz ifadesi tekrar korozyona göre yazılırsa denklem 2.37'deki haline gelir.

$$f_b = \left(\frac{2l}{c} + \frac{2d}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{korozyon}}}} \right) 2 \cdot f_m \cdot \Delta f \quad (2.36)$$

$$\phi_b = 2\pi \cdot f_c \cdot \left(\frac{2l}{c} + \frac{2d}{\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{korozyon}}}} \right) \quad (2.37)$$

Karıştırıcı çıkışında elde edilen düşük frekans bileşenli atım frekansı, giriş işareti ile çıkış işareti arasında kalan toplam zaman gecikmesini verir. Bu gecikme, karıştırıcının girişinde ve çıkışında işareti işlerken oluşan faz farkından kaynaklanır. Bu faz farkı, genellikle karıştırıcının frekans cevabı ve işaretin girişinden çıkışına kadar olan geçiş süresi yani işaretin aldığı yol ile ilgilidir. Bu büyüklük Denklem 2.38’de verilen kosinüs açılımından oluşur (Eren, 2023).

$$\cos(wt) * \cos\left(wt + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right) = A' \cos\left(2wt + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right) + B' \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right) \quad (2.38)$$

2.38’deki ifadede düşük frekans sahip yani AİÇ tarafından okunabilecek kısım denklemin $B' \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)$ ifadesidir. Düşük frekanslı bu ifadenin okunan fazlarının birbirine çok yakın değerler olacağı tahmin edildiğinden hassasiyeti sağlamak için denetimli faz kaydırıcılı bir senaryo düşünülmüştür. $B' \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)$ ifadesini denetimli faz kaydırıcı kullanarak tekrar yazılır ve sonucunda AİÇ’den bir değer okunursa (O.D) Denklem 2.39’da elde edilir, burada $\Delta\phi$ korozyon yokken oluşan faz farkını, $\Delta\delta$ korozyondan gelen faz farkını, $\mathcal{A}$ ise denetimli faz kaydırıcıdan gelen fazı ifade eder. Bu toplam fazların ifadesi denklem 2.40’daki gibi yazılabilir, burada $2c\Delta t$ işaretin hedefe ulaşip döndüğü toplam mesafedir. Ardından örneğin Denklem 2.41’deki gibi korozyon seviyesine bağlı zamandaki değişimi görmek ve yorumlamak için Δt elde edilebilir.

$$B' \cos(\Delta\phi + \Delta\delta + \mathcal{A}) = (O.D) \quad (2.39)$$

$$B' \cos\left(\frac{2\pi f}{V_p} \cdot 2c\Delta t\right) = (O.D) \quad (2.40)$$

$$\Delta t = \frac{V_p}{4\pi f c} \cdot \cos^{-1} \frac{O.D}{B'} \quad (2.41)$$

Karıştırıcıda elde edilen Denklem 2.39 ifadesindeki işaret AİÇ’ye gider ve burada sayısal bir ifadeye dönüştürülür. Uzunluk ve AİÇ çıkışında elde edilen veriler arasında anlamlı bir bağlantı kurabilmek için bir düzeltme matrisine (DM) ihtiyaç olmaktadır (Eren, 2023). AİÇ’den okunan $B' \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)$ toplam l uzunluğuna ve dalganın frekansına bağlıdır yani dolayısıyla $\lambda = c/f\sqrt{\varepsilon_r}$ olduğundan işaretin içinde bulunduğu ortamın elektriksel geçirgenliğinden de etklenir. Tüm bu değişkenleri kontrol altında tutup AİÇ ile okunan değeri de anlamlı seviyelere çekebilmek için referans ölçümler alınarak DM çıkartılmalıdır. DM ile mikroişlemci tarafından oluşturulan her işaret matematiksel olarak ispatlanmış ve ideal koşullarda ulaşılan

referans ölçümüne ulaşılmış olur. FMDS'nin çalışma aralığı 2.3-2.6 GHz için her adımda DM uygulanacağından Denklem 2.42'de verilen denklem matris işlemi olarak elde edilir.

$$[Anamlı\ sonuç] = [Okunan\ değer] \cdot [DM] \quad (2.42)$$

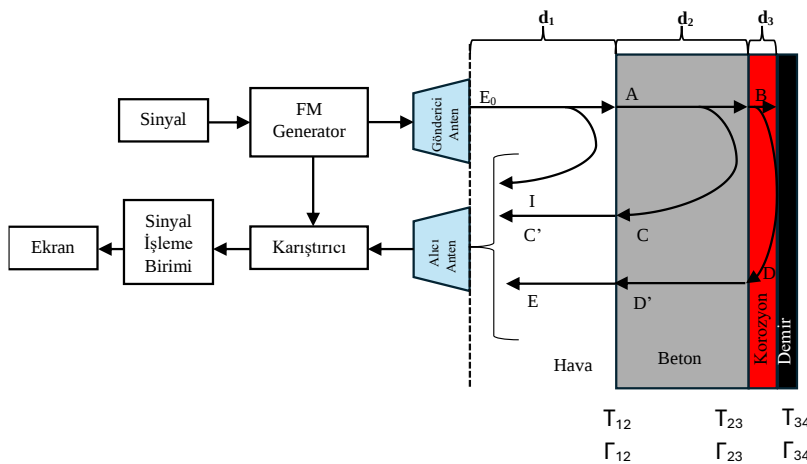
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Benzetim Çalışmaları

Gerçekleştirilen FMSD radar kullanarak demir donatılarda korozyon seviyesi tahmini çalışmasında öncelikle korozyon varlığında bir iletkenin durumu ve bu korozyonlu iletkenin elektromanyetik dalga ile etkileşimi incelenmiştir. Korozyon varlığındaki iletkende meydana gelen faz değişimi ilk olarak MATLAB'ta daraltılmış senaryo benzetimi ile gerçekleştirilmiş, daha sonra bir simülasyon ortamında aynı senaryonun faz cevabına bakılmıştır.

3.1.1. Daraltılmış Senaryo Benzetimi

Korozyona uğramış inşaat demirinin korozyon tespiti hakkında bilgi edinmek amacıyla oluşturulan daraltılmış senaryo benzetim çalışmasının temeli antenle ölçüm teorisine dayanmaktadır ve gömülü nesnelerin incelenmesine uyarlanmıştır. Antenle ölçüm teorisinde ölçüm noktasının bulunduğu yer karşısında elektromanyetik dalga ile indüklenip ışın yayan bir nesne bulunur, bu nesneden yansıyan dalgalar da tekrardan ölçüm noktasına geri döner. Ölçüm noktası bir kaynaktan beslenir ve bu noktaya doğru yansıyan nesne, üzerine gelen dalga'nın tamamını yansıtmasa da bir kaynak gibi kabul edilebilir. Şekil 3.1'de verilen FMSD ve daraltılmış MATLAB senaryosu blok diyagramında, verici antenden betona çarpan dalga'nın demir levaya doğru geçişleri, ardından katmanlardan yansıyıp alıcı antene geri dönmesi gösterilmiştir. Oluşturulan bu senaryoda Şekil 3.1'in sağında çizgi ile ayrılmış bölümde hava, beton, korozyon, demir katmanlarında dalga'nın ilerleyişi modellenerek toplam yansıyan elektrik alan hesaplanmıştır, burada gösterilen d_1 mesafesi 120 cm, d_2 mesafesi beton kalınlığı yani 2.5 cm ve d_3 ise korozyon kalınlığıdır korozyon seviyesinin 0.1-1 mm arasında değiştiği varsayılmıştır.



Şekil 3.1. FMSD ve daraltılmış MATLAB senaryosunda dalga yayılımı

Hesaplamalar sonunda korozyon seviyesine bağlı olarak faz ve faz farkı değişimlerine ulaşılmıştır. Elektromanyetik dalga farklı katmanlar boyunca ilerlerken her malzemenin içerisindeki dalganın yayılımı, hızı ve fazı etkilenir. Bu nedenle oluşturulan MATLAB programında dalganın ilerlediği tüm katmanlar yani hava, beton, korozyon, demir ortamları elektriksel değerlerine göre tanımlanır, bu elektriksel özelliklerin değişmesi yayılma katsayılarını, karakteristik empedansları ve geliş-yansıma açılarını doğrudan etkiler. Başlangıçta ortamların elektriksel özellikleri tanımlanmıştır havanın elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon=1$ 'dir. Betonun elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon=4.94-j0.69$ ve manyetik geçirgenlik değeri $\mu=1$ 'dir. Korozyon ürününün elektriksel geçirgenliği $\epsilon=8.42-j1.03$, manyetik geçirgenlik değeri $\mu=1$ 'dir. Bu değerler inşaat demiri için $\epsilon=1$ ve $\mu=100$ 'dür.

Oluşturulan MATLAB kodunda Şekil 3.1'de gösterilen ortamlara bağlı olarak yayılma sabitleri, karakteristik empedanslar, iletim ve yansıma katsayıları, iletim ve yansıma açıları, elektrik alan ve S_{21} hesaplamaları yapılmıştır. Senaryoda iletilen dalganın paralel polarize olduğu durum ve geliş açısındaki değişim dikkate alınmıştır. Şekil 3.1'de gösterilen senaryoda, E_0 büyüklüğü ve d_1 mesafesi ile paralel polarizasyonlu kaynaktan gelen dalga, önce hava ortamında yol alır ve iletim katsayısı T_{12} ile çarpılarak beton ortamına iletilir, beton ortamına geçen bu dalga A ile gösterilmiştir ve matematiksel ifadesi Denklem 3.1'de verildiği gibidir. Ayrıca Γ_{12} yansıma katsayısı ile hava ortamına yansıyan dalga Denklem 3.2'de verilen I olarak gösterilmektedir, yansıyan I dalgası alıcı antene ulaşır. Beton ortamında d_2 mesafesi kadar ilerleyen A dalgası T_{23} iletim katsayısı oranında pas ortamına iletilir. Bu dalga burada Denklem 3.3'te verildiği gibi B olarak gösterilmiştir. A dalgasının bir kısmı beton ortama yansıma katsayısı Γ_{23} ile yansır, bu dalga $2d_2$ mesafe kat eder ve Denklem 3.4'te C olarak ifade edilir. Betondaki bu C dalgası hava ortamına d_1 mesafesini alıp iletim katsayısı T_{12} ile çarpılarak iletilir ve bu dalga Denklem 3.5'te C' olarak gösterilmiştir. Alıcı anten bu C' dalgasını da alır. Son olarak pas ortamındaki B dalgası $2d_3$ mesafe kat eder ve tamamen iletken olan demire çarpar ve sonuçta demirden yansır dalga Γ_{34} 'ün yansıma katsayısı ile yansır ($\Gamma_{34} = -1$ çünkü inşaat demiri MEİ'dir). Yansıyan dalga denklem 3.6'da D olarak gösterilmiştir. Pas ortamında ilerleyecek olan D dalgası T_{23} iletim katsayısı ile çarpılarak d_2 mesafesinde ilerler ve betona iletilir, betondaki bu dalga Denklem 3.7'deki D' ile ifade edilmiştir. Beton ortamında ilerleyen dalga da hava ortamına d_1 mesafesini kat eder ve T_{12} iletim katsayısı ile iletilir, bu E dalgası Denklem 3.8'de temsil edilmiştir. E dalgası da alıcı antene ulaşır. Son durumda, yansıyan toplam elektrik alanı ifade eden I, C' ve E'nin toplamı E_r , Denklem 3.9'da verilmiştir. Katmanlar arası geçişlerde, dalgaların ilk yansıması dikkate alınır çünkü ikinci yansımalar neredeyse yok denecek kadar azdır.

$$A = E_0 \cdot e^{-i\beta_0 d_1} \cdot T_{12} \quad (3.1)$$

$$I = E_0 \cdot e^{-i\beta_0 2d_1} \cdot \Gamma_{12} \quad (3.2)$$

$$B = A \cdot e^{-i\beta_2 d_2} \cdot T_{23} \quad (3.3)$$

$$C = A \cdot e^{-i\beta_2 2d_2} \cdot \Gamma_{23} \quad (3.4)$$

$$C' = C \cdot e^{-i\beta_0 d_1} \cdot T_{12} \quad (3.5)$$

$$D = B \cdot e^{-i\beta_3 2d_3} \cdot \Gamma_{34} \quad (3.6)$$

$$D' = D \cdot e^{-i\beta_2 d_2} \cdot T_{23} \quad (3.7)$$

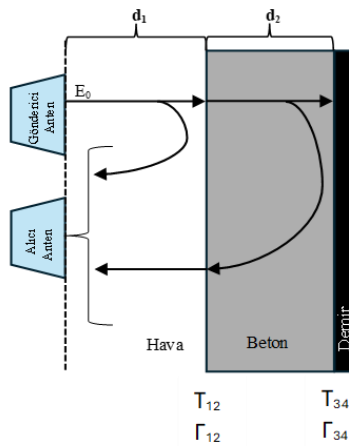
$$E = D' \cdot e^{-i\beta_0 d_1} \cdot T_{12} \quad (3.8)$$

$$E_r = I + C' + E \quad (3.9)$$

Elde edilen toplam yansıyan elektrik alan E_r ile sisteme gönderilen elektrik alan E_0 oranlanır, bu oran uygulanan metotta Denklem 3.10'da verildiği gibi S_{21} olarak değerlendirilmiştir. S_{21} cevabına ulaşıldıktan sonra bu S parametresinin sahip olduğu faz bilgisi Θ_1 elde edilmiştir.

$$S_{21} = \frac{E_r}{E_0} \quad (3.10)$$

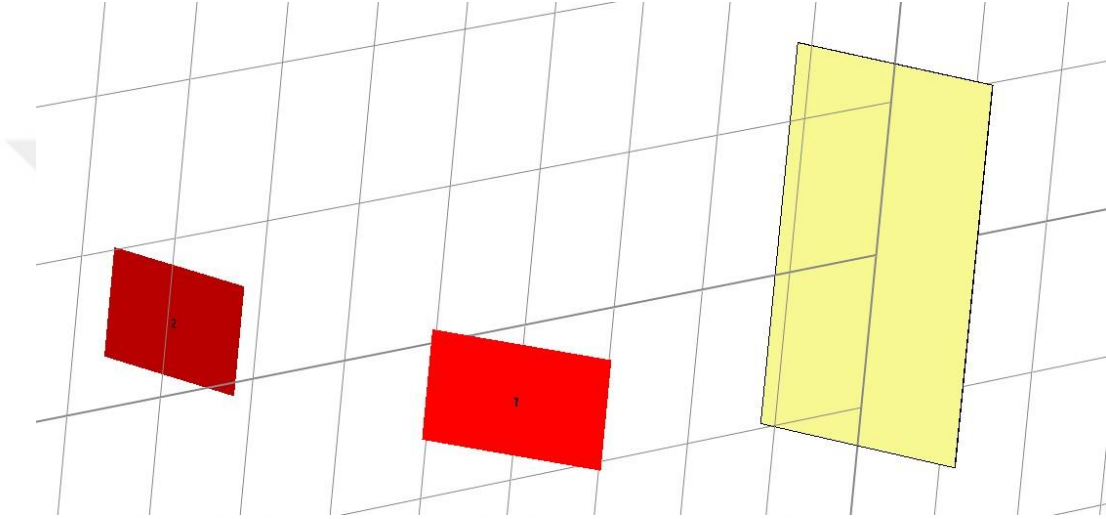
Oluşturulan senaryo için elde edilen faz cevabını değerlendirmek için referans ortamın faz cevabı hesaplamalara dahil edilmelidir. Referans ortamın faz değerine ulaşmak için Şekil 3.2'de gösterildiği gibi demir üzerinde hiç korozyon oluşmadığı durum incelenir. Yani Şekil 3.1'de verilen d_3 korozyon mesafesi 0 mm iken yani ideal durumda katmanlarda ilerleyen elektromanyetik dalgada meydana gelen faz cevabına ulaşılır. Referans ortamdan elde edilen faz cevabı Θ_2 olur ve $\Theta_1 - \Theta_2$ hesaplanarak korozyon seviyesine bağlı faz farkı değişimleri elde edilir.



Şekil 3.2. İdeal referans ortamı ve dalga yayılımı

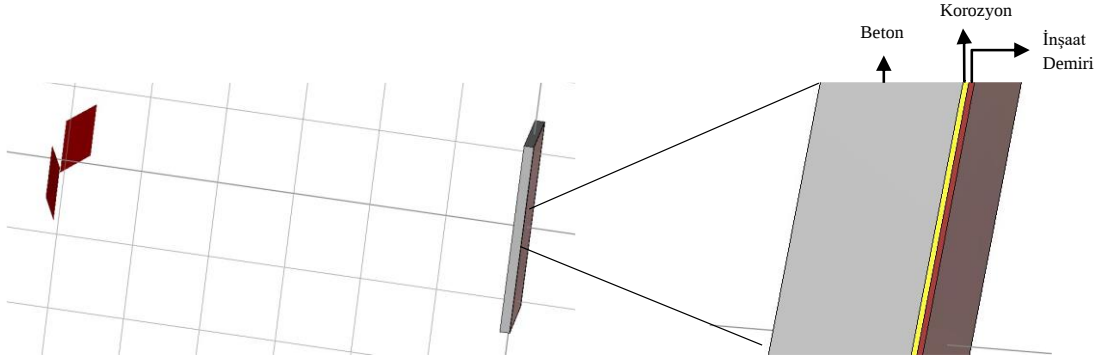
3.1.2. Evrensel Yazılımlar Kullanarak Benzetim Çalışması

Korozyon değişiminin fazı nasıl etkilediği bilgisine ulaşmak için betonsuz sadece korozyonlu levhada meydana gelen faz değişimi Şekil 3.3'te oluşturulan katmanlarda incelenmiştir. Ardından hava, beton, korozyon, demir katmanları arası elektromanyetik dalganın ilerlemesi ve demire çarpıp döndükten sonra oluşan faz değişimi simülasyon ortamında Şekil 3.4'te verildiği gibi oluşturulmuştur. Bu benzetime göre alıcı ve gönderici antenler için 2 adet çıkış tanımlanmış ve birinci çıkış gönderen anteni, ikinci çıkış alıcı anteni temsil etmektedir, böylece birinci antenden ikinci antene iletilen dalganın S_{21} değerindeki faz değişimine ulaşılmıştır.



Şekil 3.3. Benzetim ortamında korozyonlu levha

Şekil 3.4'te görülen tüm katmanlar $30 \times 50 \text{ cm}^2$ olacak şekilde ayarlanmıştır. İlk katman betondur ve kalınlığı 2.5 cm'dir (bina yönetmeliklerindeki ilk donatıya olan beton kalınlığı 2.5 cm olduğu için 2.5 cm tanımlanmıştır), ikinci katman kırmızı ile gösterilen korozyon katmanıdır ve kalınlığı 0 ile 1 mm arasında 0.1 mm adımlarla değişmektedir. 0 mm korozyon olması durumu hiç korozyon oluşmadığı durumu açıklar. En son katman olan demir de MEİ özellikleri seçilmiş ve beton ve korozyon ürününün dielektrik ve manyetik değerlerine göre malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Korozyon inşaat demiri üzerinde meydana geldiği için korozyon kalınlığı ile demir kalınlığının toplamı sabittir. Yani 0.1 mm korozyon seviyesi oluştuğunda tanımlanan MEİ kalınlığı 0.9 mm olursa 0.2 mm korozyon kalınlığı oluştuğunda MEİ kalınlığı 0.8 mm olur. Simülasyonlarda tanımlanan demirin kalınlığının önemi yoktur çünkü tamamen yansıtıcı özelliğe sahip MEİ maddesidir.



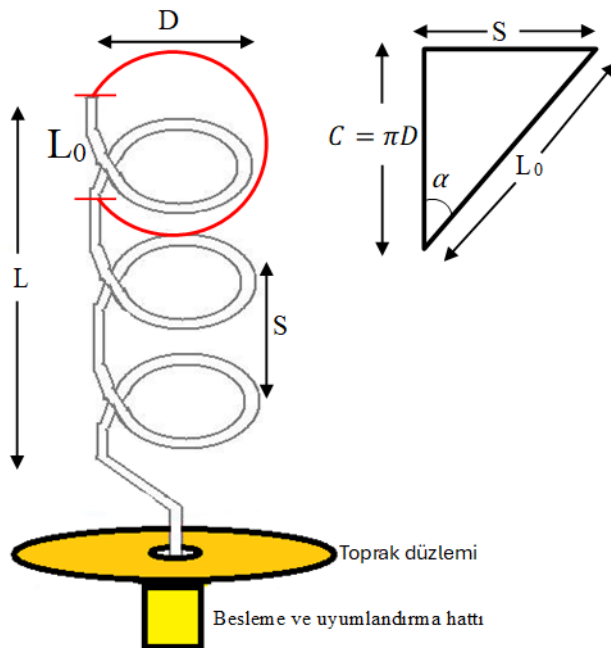
Şekil 3.4. Benzetim ortamında betonlu korozyonlu levha

3.2. Anten Tasarımı ve Ölçüm Kumpanyası

FMSD radar ile gerçek kolon ölçümlerinin alınması için dar huzmeli, yüksek kazançlı biri verici biri alıcı olarak çalışacak iki adet anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ardından bu antenler gerçek kolon ölçümleri alınması için radar düzeneğine yerleştirilmiştir.

3.2.1. Anten Tasarımı

Çalışmada kullanılan anten tipi sarmal anten olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5'te de verildiği gibi sarmal anten farklı sayıda sarımlardan oluşan spiral geometriye sahiptir, bu antenler genellikle sarmal tel, yansıtıcı toprak düzlem ve besleme noktasından oluşurlar.



Şekil 3.5. Sarmal anten geometrisi ve parametreleri

Sarmal antenler dairesel polarize olmaktadır ve bant genişliği, yüksek kazanç gibi imkanlar sunarlar. Ayrıca normal mod ve eksenel mod olarak tasarlanabilirler. Normal mod sarmal antenler daha çok düşük frekans uygulamalarda kullanılırlar ve boyutları dalga boyundan çok daha küçük olmaktadır, yaklaşık çeyrek dalga boyu gibi olabilmektedirler. Bu çalışmada kullanılan sarmal anten ise eksenel moddur, bu modda ise antenin boyutu dalga boyundan daha uzun olmaktadır, yüksek frekans için uygundur ve yüksek kazanç sunmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilen sarmal antenin geometrisi ve parametrelerinde antenin sarım sayısı N , D çapı, iki sarmal sarımı arasındaki mesafe S olarak ifade edilmiştir. Denklem 3.11'de verilen L sarmal antenin boyunu, Denklem 3.12'de verilen C sarmal antenin çevresini, Denklem 3.13'te verilen L_0 dönüş uzunluğunu, telin toplam uzunluğu Denklem 3.14'te verilen L_n ile ifade edilir. Sarımlar arasındaki açı ise eğim açısı Denklem 3.15'te verildiği gibidir.

$$L = N.S \quad (3.11)$$

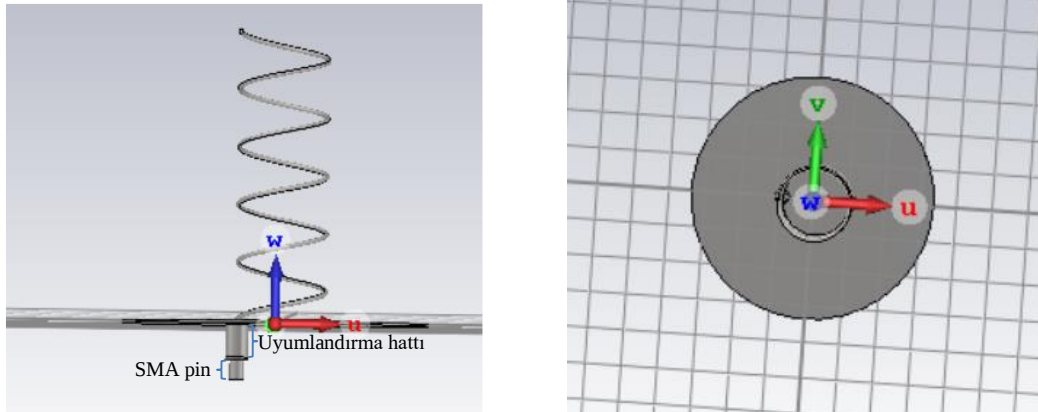
$$C = \pi.D \quad (3.12)$$

$$L_0 = \sqrt{S^2 + C^2} \quad (3.13)$$

$$L_n = N.L_0 \quad (3.14)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right) \quad (3.15)$$

Eksenel mod sarmal anten tasarımında dairesel polarizasyon için genellikle antenin çevresi $3/4 < C/\lambda_0 < 4/3$ aralığında olmalıdır, bu da yaklaşık $C/\lambda_0 = 1$ olacağı anlamına gelir. (λ_0 çalışılan frekanstaki dalga boyudur.) Sarmal anten sarımları arasındaki mesafe olan S ise $S \cong \lambda_0/4$ olmalıdır, sarımlar arasındaki açı (pitch angle) genellikle $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ aralığındadır (Balanis, 2012). Düzgün ışıma için topraklama düzleminin çapı en az $\lambda_0/2$ olmalıdır (Kraus, 1988). Tasarımı gerçekleştirilen sarmal antenin ölçüleri Çizelge 3.5'te verildiği gibidir. Bu ölçülere uygun olarak benzetim ortamında tasarlanmış antenin önden ve üstten görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Sarmal antenin benzetim ortamında önden ve üstten görünümü

Çizelge 3.1. Sarmal anten ölçüleri

Sarmal Anten Parametreleri	Büyükölük
D (Sarmal antenin çapı)	38,98 mm
C (Sarmal antenin çevresi)	122,4 mm
S (Sarımlar arası mesafe)	25 mm
Sarmal telinin çapı	2 mm
N (Sarım sayısı)	5
α (pitch angel)	11,54°
Toprak düzlemi çapı	134,69 mm
Balun Uyumlandırma hattı çapı	8 mm
Uyumlandırma hattı yükseklik	15,31 mm
HPBW (Yarı güç bant genişliğı)	49.2°
Yönlölük	7.73 dBi

Eksenel mod sarmalda antenin çalışması istenilen bant genişliğıne, kazanca, yönlölüğe ve diğler özelliklere göre uzunluklar değıştirilebilir. Sarmal antenin sonlandırma direnci genelde 100-200 Ohm arasında olmaktadır, SMA besleme hattının direnci genellikle 50 Ohm olduğı için empedans uyumsuzlukları meydana gelebilmektedir. Tamamen dirençten oluşan giriş empedansı Denklem 3.16 ile ifade edilir. Sarmal antenin yarı huzme güç genişliğı derece cinsinden Denklem 3.17 antenin yönlölüğü de Denklem 3.18 ifadesi ile bulunur.

$$R \cong 140 \left(\frac{C}{\lambda_0} \right) \quad (3.16)$$

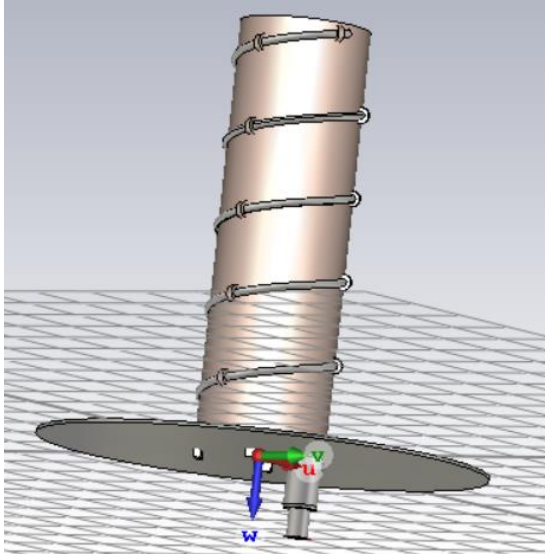
$$HPBW(degrees) \cong \frac{52 \cdot \lambda_0^{\frac{3}{2}}}{C \sqrt{NS}} \quad (3.17)$$

$$D_0(birimsiz) \cong 15N \cdot \frac{C^2 S}{\lambda_0^3} \quad (3.18)$$

Tasarlanan antenin sarmal yapısından dolayı teldeki bobin etkisi ile indüktif reaktansı oluşur bunu ortadan kaldırmak için uyumlandırma hattına ihtiyaç vardır. Empedans uyumunu sağlamak amacıyla topraklama düzlemi ile SMA beslemesi arasına $\lambda_0/8$ uzunluğunda yani yaklaşık 15.31 mm olan ve 8 mm çapında silindirik bir uyumlandırma hattı yapılmıştır. (2.45 GHz alışma frekansı seviyesinde dalga boyu λ_0 yaklaşık 122,4 mm olmaktadır.) Bu hat kapasitif etki oluşturarak indüktif etkiyi yok eder ve uyumlandırma gerçekleştirilmiş olur. Uyumlandırma hattı olmazsa sarmal anten istenildiğı gibi ışıma yapmaz ve anten özelliğı göstermez. Sarmal anten geniş bant

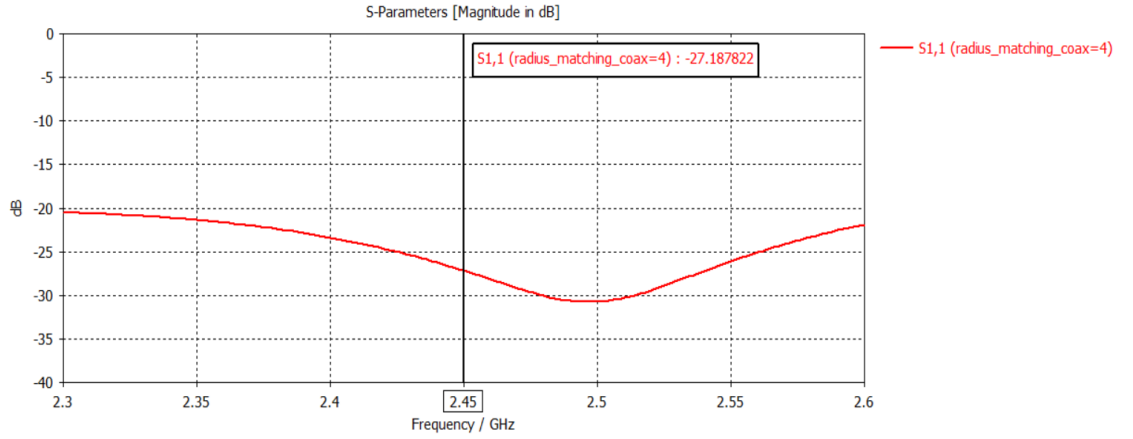
olacak şekilde 2-4 GHz aralığında tasarlanmıştır fakat FMSD radar düzeneği 2.3-2.6 GHz aralığında tarama yaptığı için antenler bu bantta kullanılmıştır.

Sarmal anten üretim aşamasında belirli bir açı ile sarılması gerektiği için ayrıca bu açıyı tüm sarımlarda el ile devam ettirmenin kolay olması açısından 3 boyutlu bir kılavuz silindir sarmal antenin ortasına tasarlanarak boyutlu yazıcıdan baskı alınmıştır. Bu kılavuz antenin çalışmasını olumsuz etkilememiştir ve FMSD düzeneğine antenler monte edilip çıkartılırken oldukça kolaylık sağlamıştır. Kılavuz Şekil 3.7’de verildiği gibidir. Sarmal teli 2 mm çapında bakır teldir ve kolaylıkla temin edilebildiği için bu tel kalınlığı tercih edilmiştir. Antenin diğer parametreleri örneğin sarım sayısındaki artış veya azalış istenilen kazanca ve yönlülüğe göre değiştirilip ayarlanmıştır. Sarmal antenin toprak levhası anten işaretlerini yönlendirici etkiye sahiptir. Elektriksel bir hat olarak düşünüldüğünde besleme hattından ilerleyen işaret antenin sarmal telinde ilerler ve havaya yayılır, hattın tamamlanması için de toprak zemin üzerine kapanır, ışıma gerçekleşmiş olur.



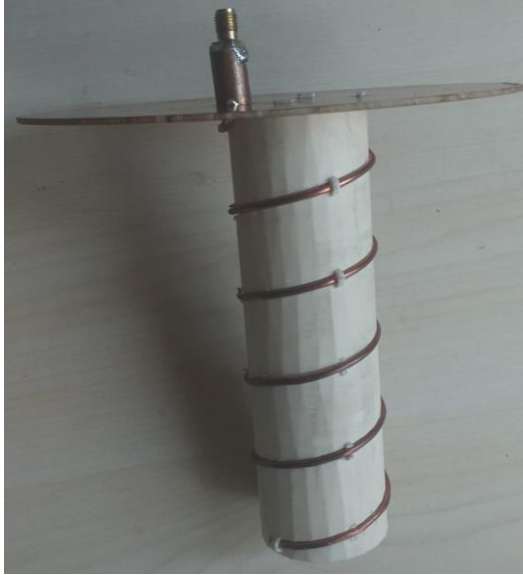
Şekil 3.7. Sarmal anten ve 3 boyutlu silindir kılavuz

Antenin benzetim ortamındaki 2.3-2.6 GHz aralığında S_{11} parametresi Şekil 3.8’deki grafiğinde verildiği gibidir. 2.3-2.6 GHz aralığında -20 dB altındadır ve antendeki geri dönüş kaybının oldukça düşük olduğu, antenin düzgün ışıdığı ve çalışabilir olduğu görülmektedir. Yine 2.45 GHz seviyelerinde antenin S_{11} değeri -27.18 dB olmaktadır. Benzetim ortamında tasarlanan helix anten geniş bantlı bir antendir ancak FMSD için 2.3-2.6 GHz aralığında düzgün çalışması yeterli olmaktadır.



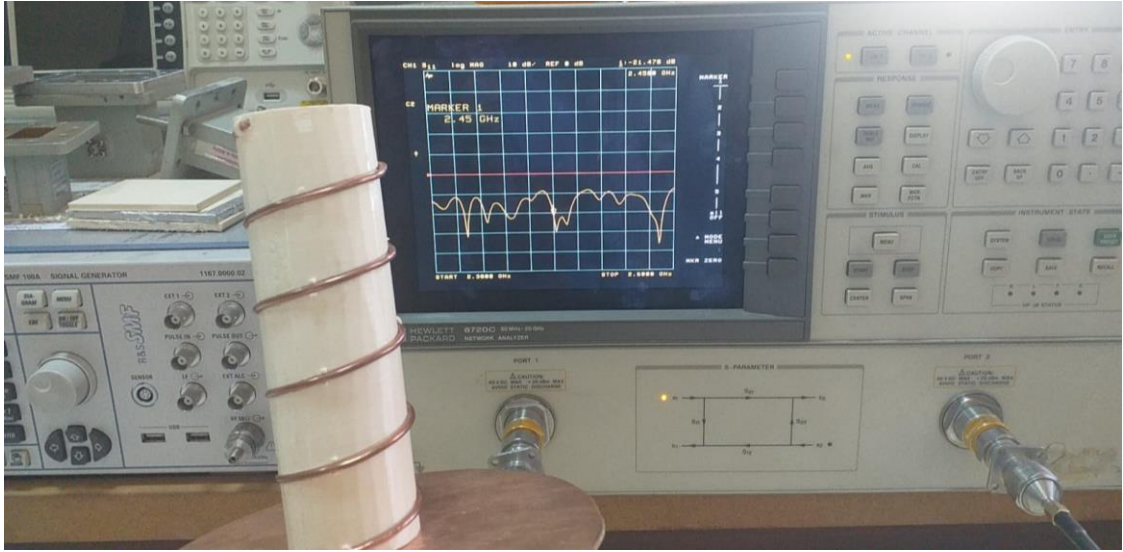
Şekil 3.8. Benzetim ortamında antenin S_{11} parametresi

Tasarımı gerçekleştirilen antenler daha sonra üretilmiştir. Üretilen anten Şekil 3.9'da verildiği gibidir. Aynı antenden 2 adet üretilip biri alıcı biri verici olarak kullanılmıştır. Antenin beslemesi SMA pin ile sağlanmış olup uyumlandırma hattı ile arasında oluşan kayıpların engellenmesi için lehimle birleştirilmiştir. Antenin içine yerleştirilen silindirik kılavuz tasarımıdaki gibi toprak plaka üzerinde delikler oluşturularak zemine birleştirilmiştir.



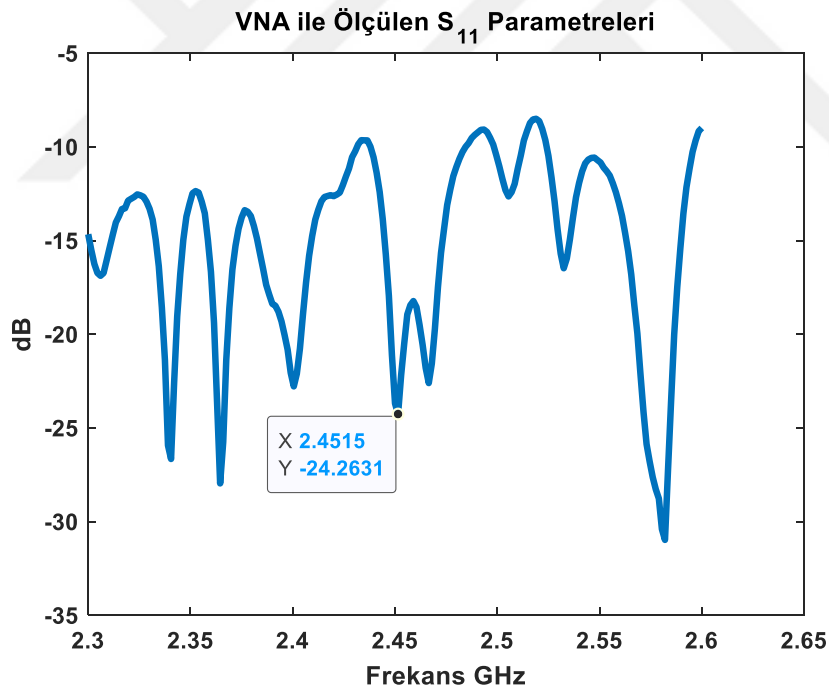
Şekil 3.9. Üretilen sarmal anten

Antenin Şekil 3.10'da gösterildiği gibi VNA kalibre edildikten sonra ölçülen S_{11} değerleri tüm bantta yani 2.3-2.6 GHz arasında Şekil 3.11'deki grafikte verildiği gibidir.



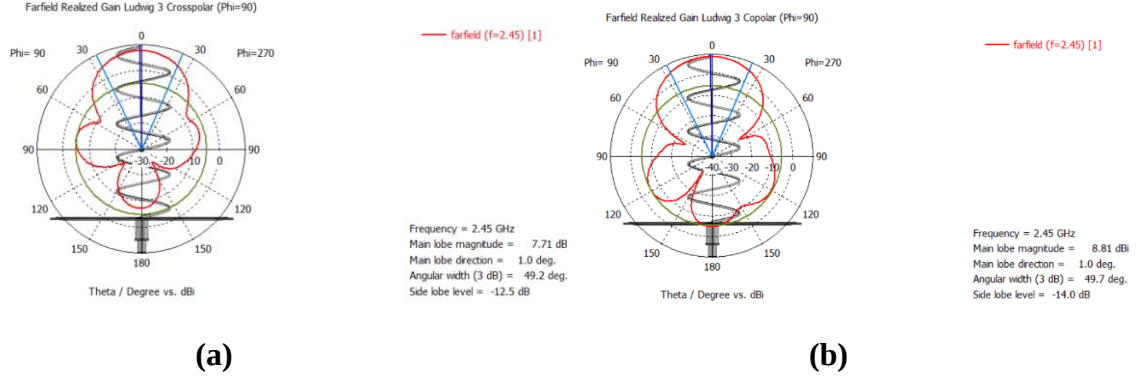
Şekil 3.10. Sarmal antenin VNA ile ölçümü

Şekil 3.10'daki grafikten de görüldüğü üzere 2.45 GHz frekansında S_{11} değeri yaklaşık -24 dB gelmiştir.



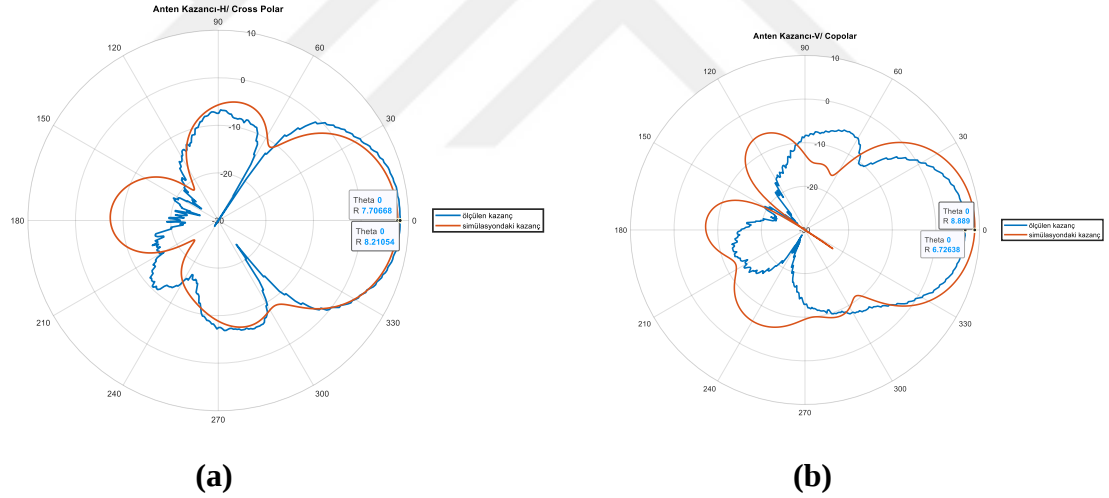
Şekil 3.11. Sarmal anten VNA ile ölçülen S_{11} grafiği

Üretilen antenin benzetim ortamındaki kazancı 2.45 GHz'de Şekil 3.11'de görüldüğü gibi crosspolar yani yatay (horizontal) iken 7.71 dBi gelmiştir ve anten copolar iken yani dikey (vertical) kazancı 8.81 dBi'dir. Antenin yarı güç bant genişliği 49.2 derece olmuştur.



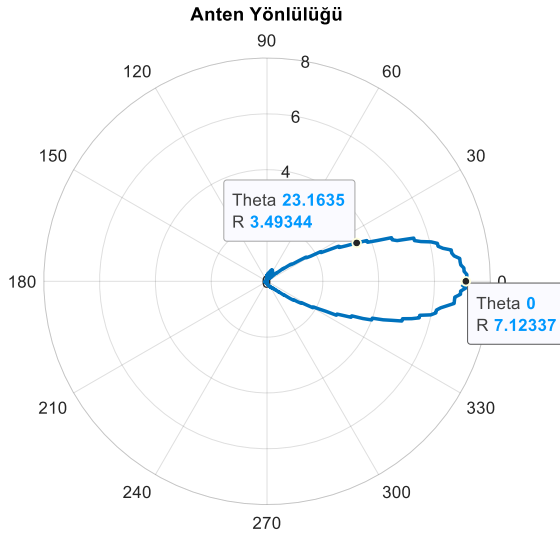
Şekil 3.12. Sarmal anten simülasyon ortamında kazancı **a)Crosspolar** kazanç; **b)Copolar** kazanç

Antenin üretildikten sonra yansısız odada ölçülen kazancı 2.45 GHz’de Şekil 3.12’de görüldüğü gibi crosspolar yani yatay (horizontal) iken 8.21 dBi gelmiştir ve anten copolar iken yani dikey (vertical) kazancı 6.7 dBi’dir. Simülasyonda elde edilen kazançlar ile antenin ölçülen kazancı karşılaştırmak için çizildiğinde Şekil 3.12’den de açıkça görülmektedir ki üretim kaynaklı ufak değişiklikler olmakla birlikte kazançlar birbirine çok yakın gelmiştir.



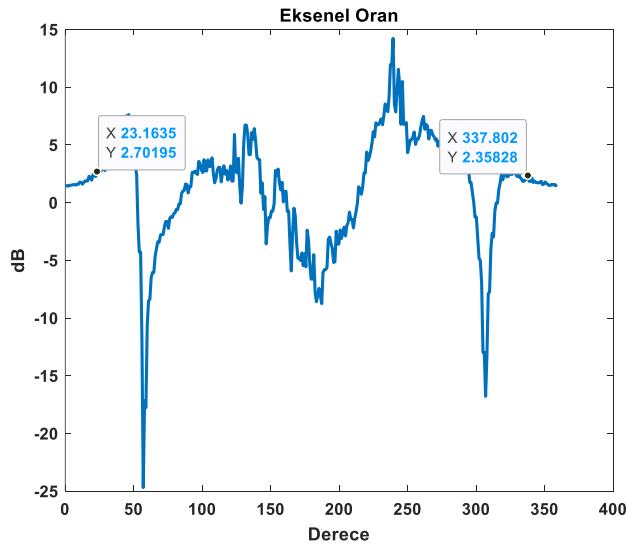
Şekil 3.13. Sarmal antenin benzetim ortamında ve üretildikten sonra kazanç karşılaştırması **a)Crosspolar** kazanç; **b)Copolar** kazanç

Sarmal antenin ölçülen yönlülüğü Şekil 3.13’te verildiği gibi gelmiştir. Bu şekilden de anlaşıldığı gibi antenin yarı güç bant genişliği yaklaşık 46.2 derece (23.16+23.16 olarak hesaplanırsa) gelmiştir. Benzetim ortamında bu değer 49.2 derecedir, bu fark üretimden aşamasındaki kayıplardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.14. Sarmal anten ölçülen yönlülük ve yarı güç bant genişliği

Sarmal anten dairesel polarizedir ve üretimden sonra işaret bozulmalarının olmaması için eksenel oran değeri 3dB'nin altında olması gerekir. Üretilen sarmal anten için yatay ve dikey kazançları oranlanarak elde edilmiş eksenel oran ve Şekil 3.15'te verildiği gibi antenin yönlü olduğu kısımlarda 3dB altında gelmiştir. Buradan da anlaşılmaktadır ki anten işaret alıp verirken dairesel polarize formunu korumaktadır ve antende bozulmalar, süreksizlikler meydana gelmemektedir.



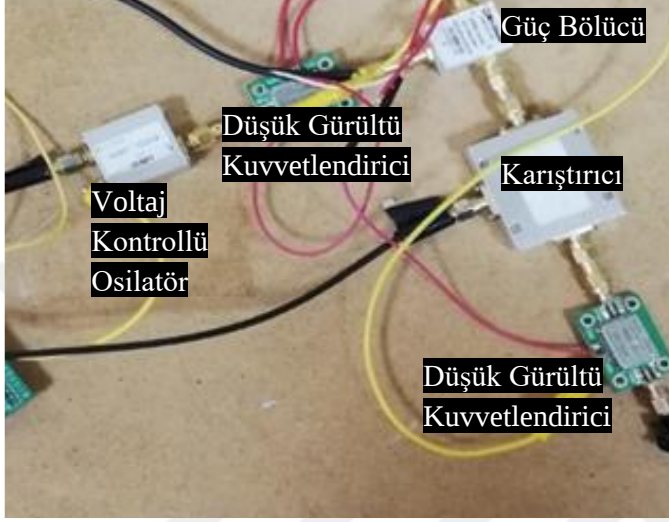
Şekil 3.15. Sarmal anten eksenel oran

3.3.2. Ölçüm Düzenegi

Ölçüm düzeneginde bulunan, Bölüm 2.2.3'te anlatılan ve Şekil 2.4'te verilen FMSD radar düzenegine ait şemada yer alan bazı elemanlar Şekil 3.16'da verilmiştir. GDÜ tarafından üretilen işaret kuvvenlendirici ile yükseltirelerek güç bölücüye gider

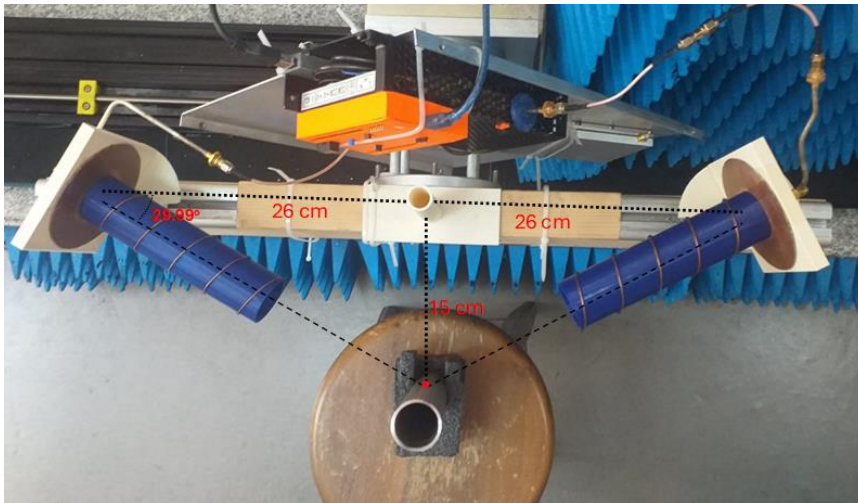
buradan işaretin bir kısmı Şekil 3.17’de de verilen verici anten ile doğrudan hedefe gönderilir. Bir kısmı da karıştırıcıya girer.

Hedekten yansıyan işaret alıcı anten ile kuvvetlendiriciye iletilir buradan karıştırıcıya gelir, karıştırıcıda orijinal işaret ile çarpılarak okunması için AİÇ birimine iletilir, buradan elde edilen ham veriler yorumlanarak hedefteki levhanın korozyonlu ve korozyonsuz hallerinin faz bilgisi çıkarılmaya çalışılır.



Şekil 3.16. FMSD radar elemanları

Faz bilgisinden hareket etmenin korozyon tespitinde ne kadar etkili olduğunu gözlemleyebilmek için temiz, orta korozyonlu (temize yakın) ve üzerinde yaklaşık 1.5 mm pas bulunan bir korozyonlu demirler Şekil 3.17’de verildiği gibi antenlere öncelikle 15 cm ve farklı uzaklıktaki mesafelere ve açılara göre FMSD radar ile tek nokta ölçümleri alınmıştır.



Şekil 3.17. Temiz, orta, korozyonlu demirler için ölçüm düzeneği

Betonlu ölçümler için Şekil 3.18’de verilen 29 cm uzunluğunda, dış çapı 7 cm olan iç çapı 4.2 cm olan silindirik bir kalıp çıkarılmıştır.



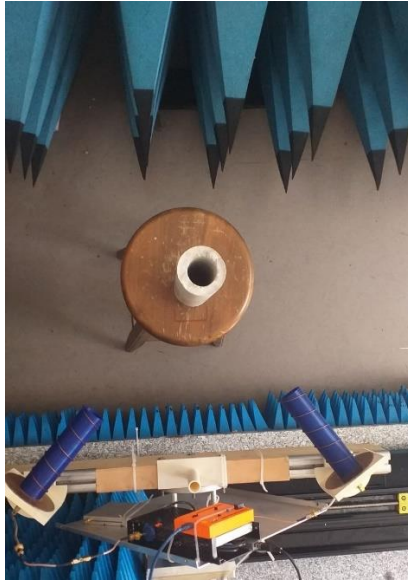
(a)



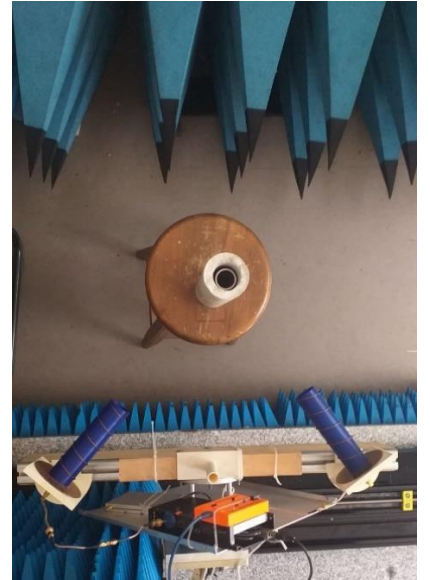
(b)

Şekil 3.18. Silindirik kalıp **a)** Yandan görünüm; **b)** İçinde ölçüm yapılacak demir ve kalıbın üstten görünümü

Temiz ve korozyonlu demir ölçümünde demirler silindirik beton kalıp içine Şekil 3.19’daki gibi yerleştirilmiş FMSD radar ile elde edilen faz değeri elde edilmiştir. Faz farkı değerleri elde edilirken ise betonun içinin boş olduğu durumdan silindirik kalıbın içinde demir olduğu durum çıkartılmıştır. Bu ölçümlerde antenlerin orta noktasının betona uzaklığı 30 cm antenlerin bakma açısı 40’ar derecedir.



(a)

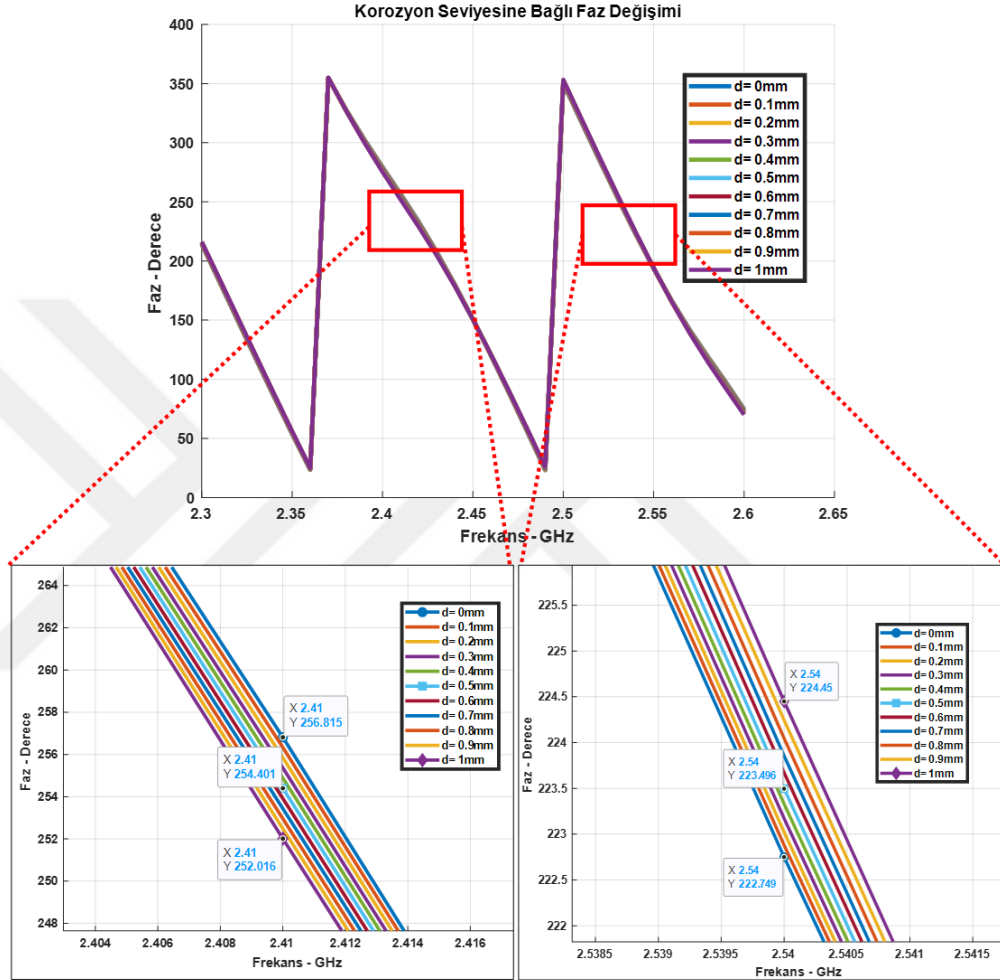


(b)

Şekil 3.19. Silindirik kalıplı FMSD radar ölçüm düzeneği **a)** Boş kalıp; **b)** İçi demirli kalıp

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bölüm 3.1.1’de bahsedilen ve Şekil 3.1’de verilen daraltılmış MATLAB senaryosu ile oluşturulmuş elektromanyetik dalganın hava, beton, korozyon ve demir katmanlarındaki ilerleyişine bağlı faz değişiklikleri, korozyon seviyesi değişimine göre 2.3-2.6 GHz aralığında Şekil 4.1’deki gibi elde edilmiştir.

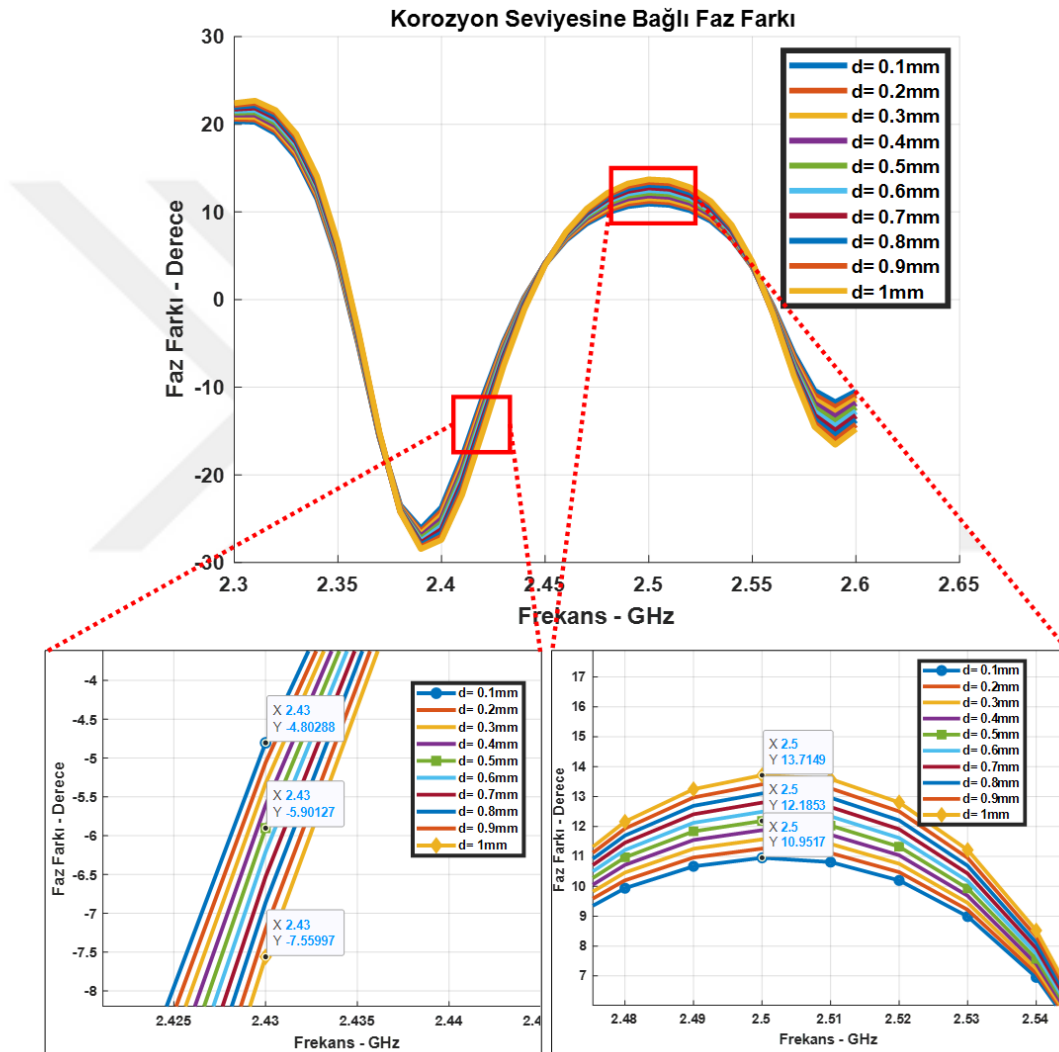


Şekil 4.1. Korozyon seviyesine bağlı faz grafiği

Şekil 4.1’de verilen korozyon seviyesine bağlı faz değişimi grafiğinde korozyon seviyesi 0-1mm aralığında 0.1 mm adımlarla değişmektedir. Verilen grafikte öncelikle 2.41 GHz seviyelerinde bakılırsa 0 mm korozyon kalınlığı olduğunda, yani korozyonsuz durumda faz değeri 256.81 derece, 0.5 mm korozyon seviyesinde faz değeri 254.40 derece ve 1 mm korozyon seviyesinde 252 derece olmaktadır. Buradan anlaşılmaktadır ki korozyon seviyesi arttıkça elde edilen dönüş fazı azalmıştır. Korozyon seviyesindeki değişim oluşan faz cevabını etkilemiştir ve en temiz durumdaki 0 mm korozyon seviyesi ile en korozyonlu durumdaki 1 mm korozyon seviyesinde yaklaşık 4 derece fark oluşmuştur. Şekil 4.1’deki elde edilen faz cevabı grafiğinde 2.54 GHz seviyesi değerlendirildiğinde 0 mm korozyon seviyesi için faz değeri 222.7 derece, 0.5 mm

korozyon seviyesi için faz değeri 223.49 derece ve 1 mm korozyon seviyesi için faz değeri 224.4 derece gelmiştir. Burada ise tam tersi durum olduğu görülmektedir, yani korozyon seviyesi arttıkça daha büyük faz cevabı elde edilmiştir. Bu durumda faz değerlendirmesi yapılırken anlamlı cevaplar oluşturulacak frekans değerleri seçilebilir, çünkü cevaplar frekanslara göre belli aralıklarda farklı değerler alabilmektedir.

Korozyon seviyesindeki değişim gerçekleştikçe faz cevabını yorumlayabilmek için elde edilen faz cevapları ideal ortam olan 0 mm referans ortamından çıkarılmıştır. Bu duruma göre Şekil 4.2'deki grafik elde edilmiştir.



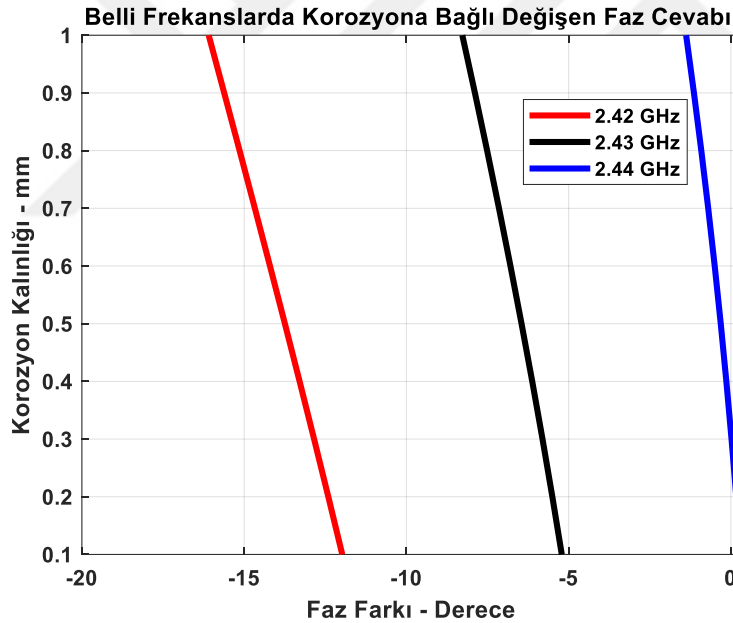
Şekil 4.2. Referans ortamı dahil edildiğinde elde edilen faz cevabı

Bu grafiğin ilk önce 2.43 GHz seviyesinde bakılırsa 0.1 mm korozyon seviyesinde elde edilen faz cevabı -4.8 derece, 0.5 mm korozyon seviyesinde elde edilen faz cevabı -5.9 derece, 1 mm korozyon için faz cevabı -7.55 derece seviyesinde gelmiştir. Faz cevabının negatif gelme nedeni matematiksel işlemde referans ortamından korozyonlu ortam çıkarıldığı içindir. Elde edilen sonuçlara göre 1 mm korozyon seviyesinde 7.55

derece ile en fazla faz farkı en korozyonlu durumda oluşmuştur. Ardından Şekil 4.2'deki grafikte 2.5 GHz seviyesine bakıldığında 0.1 mm korozyon seviyesi için faz cevabı 10.95 derece, 0.5 mm korozyon için faz cevabı 12.18 derece, 1 mm korozyon için 13.71 derece gelmiştir. Burada ise yine ilgilenilen frekans bölgesi ne ise elde edilen faz cevabının sıralanması değişkenlik göstermektedir. Grafiğe göre belirli bir frekans bölgesinde pas kalınlığı arttıkça faz farkı da artmaktadır. Frekans farklı bir aralığı kapsadığında örneğin 2.5 GHz iken pas kalınlığı arttıkça faz farkı yaklaşık 14 derece olmuştur.

Radar uygulamalarında faz cevabı ilgilenilen mesafe ile doğrudan ilgilidir, faz farkı mesafe arttıkça artmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi korozyon seviyesi arttıkça, yansıyan toplam elektrik alanının fazı azalmıştır. Örneğin 2.41 GHz'de, 1 mm'lik en kalın pas seviyesi için faz değişimi en küçüktür. Referans ortamı dahil edildiğinde Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi faz farkı en büyük olmuştur.

Şekil 4.3'te verilen grafikte ise 3 farklı frekans bölgesi 2.42 GHz, 2.43 GHz, 2.44 GHz için korozyon kalınlığına bağlı olarak değişen faz farkı grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Belli frekanslar için korozyona bağlı değişen faz cevabı

$$d_1 = -0.2183\Delta\phi_{2.42 \text{ GHz}} - 2.505 \quad (4.1)$$

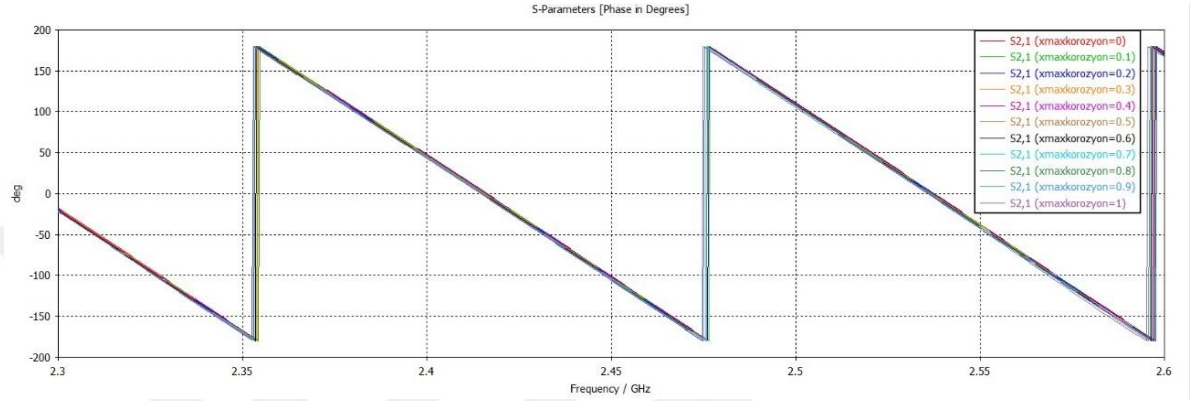
$$d_2 = -0.2928\Delta\phi_{2.43 \text{ GHz}} - 1.403 \quad (4.2)$$

$$d_3 = -0.5321\Delta\phi_{2.44 \text{ GHz}} + 0.3058 \quad (4.3)$$

Şekil 4.3'te verilen grafiğin denkleminde faz cevabı bilinen bir beton yapının korozyon kalınlığının elde edilebileceği de anlaşılmaktadır. Bu grafiğe göre elde edilen

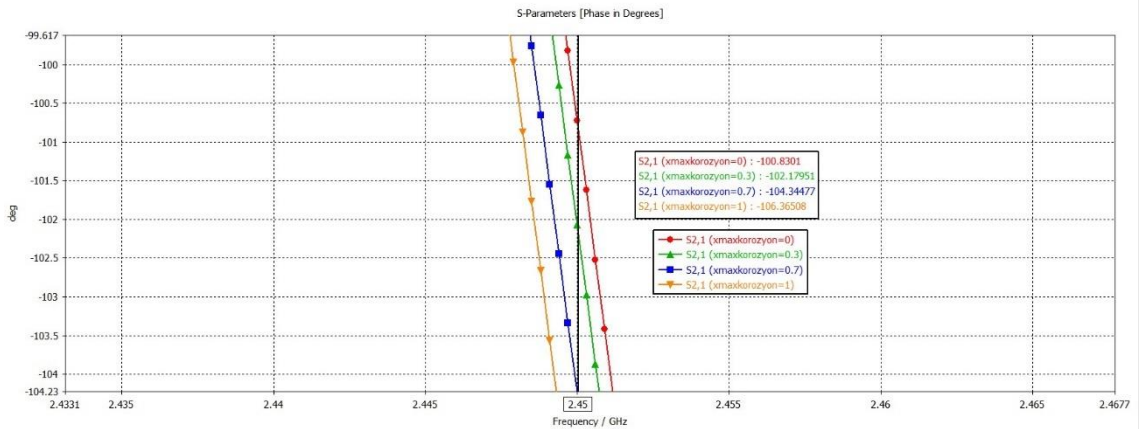
korozyon seviyesi denklemi 2.42 GHz-2.43-2.44 GHz için sırasıyla Denklem 4.1-4.3'te verilmiştir, $\Delta\phi$ faz farkı, d ise kalınlıktır.

Bölüm 3.1.2'de bahsedilen korozyonlu levha üzerinde meydana gelen faz değişiminin benzetim ortamında elde edilen sonuçları 2.3-2.6 GHz aralığında Şekil 4.4'te grafikte verildiği gibi gelmiştir. Levha üzerindeki korozyon seviyesi 0 ile 1 mm arasında değişmektedir ve bu seviyelere bağlı faz değerleri frekanslara göre elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Korozyonlu MEİ levha faz değerleri

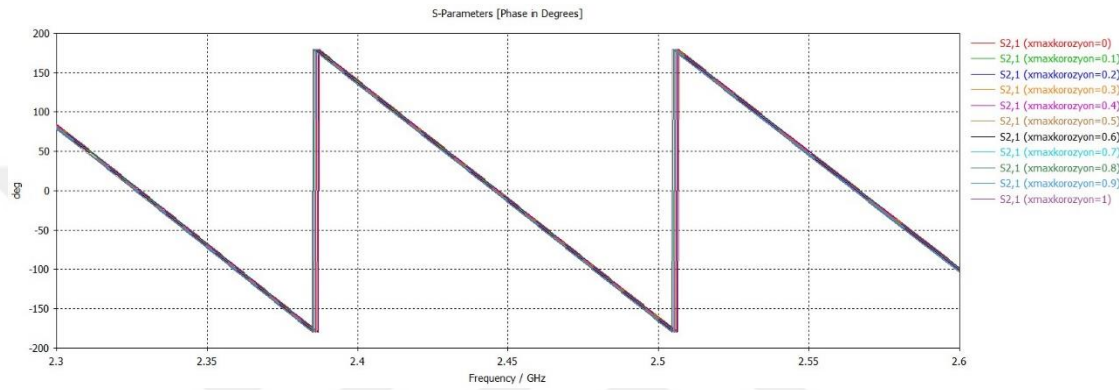
Bölüm 3.1.2'de Şekil 3.3'te benzetimi verilen korozyonlu MEİ levha için elde edilen faz cevabında frekans 2.45 GHz seviyelerindeki faz değerleri Şekil 4.5'teki verilen grafikteki gibi gelmiştir. Bu grafiğe göre 1 mm için faz cevabı -106.25 derece iken korozyon seviyesi 0 iken gelen faz cevabı -100.71 derece olmuştur.



Şekil 4.5. Korozyonlu MEİ levha frekans 2.45 GHz'de faz değerleri

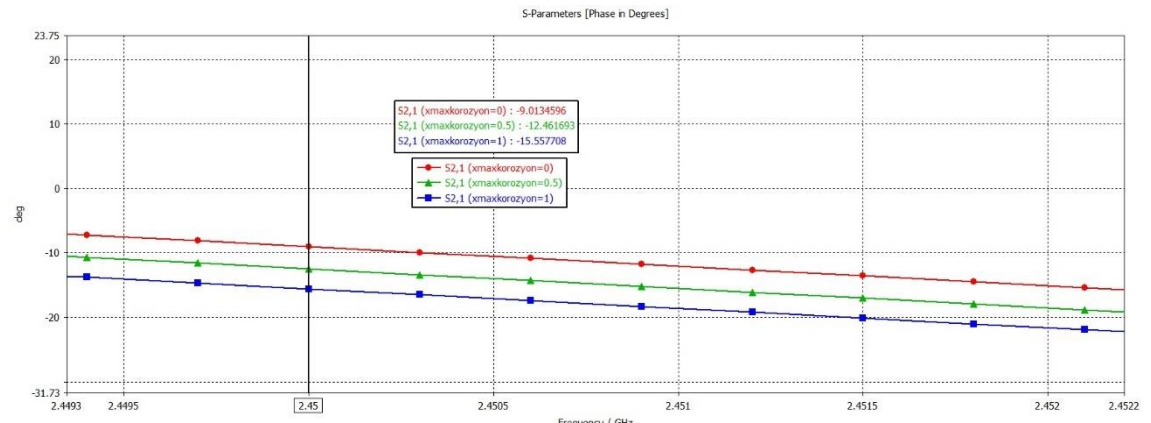
Buradan da anlaşılmaktadır ki korozyon seviyesinin MEİ levha üzerinde 1 mm olması 6 derecelik faz farkına sebep olmuştur. Korozyon seviyesi 0.7 mm iken ise 104.23 derece oluşmuş ve 0 mm referansa göre yaklaşık 4 derecelik faz farkı oluşmuştur. Elde edilen bu faz değerlerine göre korozyon seviyesi arttıkça elde edilen faz farkı artmıştır.

Bölüm 3.1.2’de Şekil 3.4’te benzetimi yapılan betonlu korozyonlu levhadan yansıyan dalgaının faz grafiği 2.3-2.6 GHz arasında Şekil 4.6’da verildiği gibidir. En yüksek korozyon seviyesindeyken yani 1 mm korozyon oluştuğunda alınan faz cevabı en düşük gelmiştir. Referans ortamı ile kıyaslama yapılırken çıkarıldığında en yüksek olmaktadır.



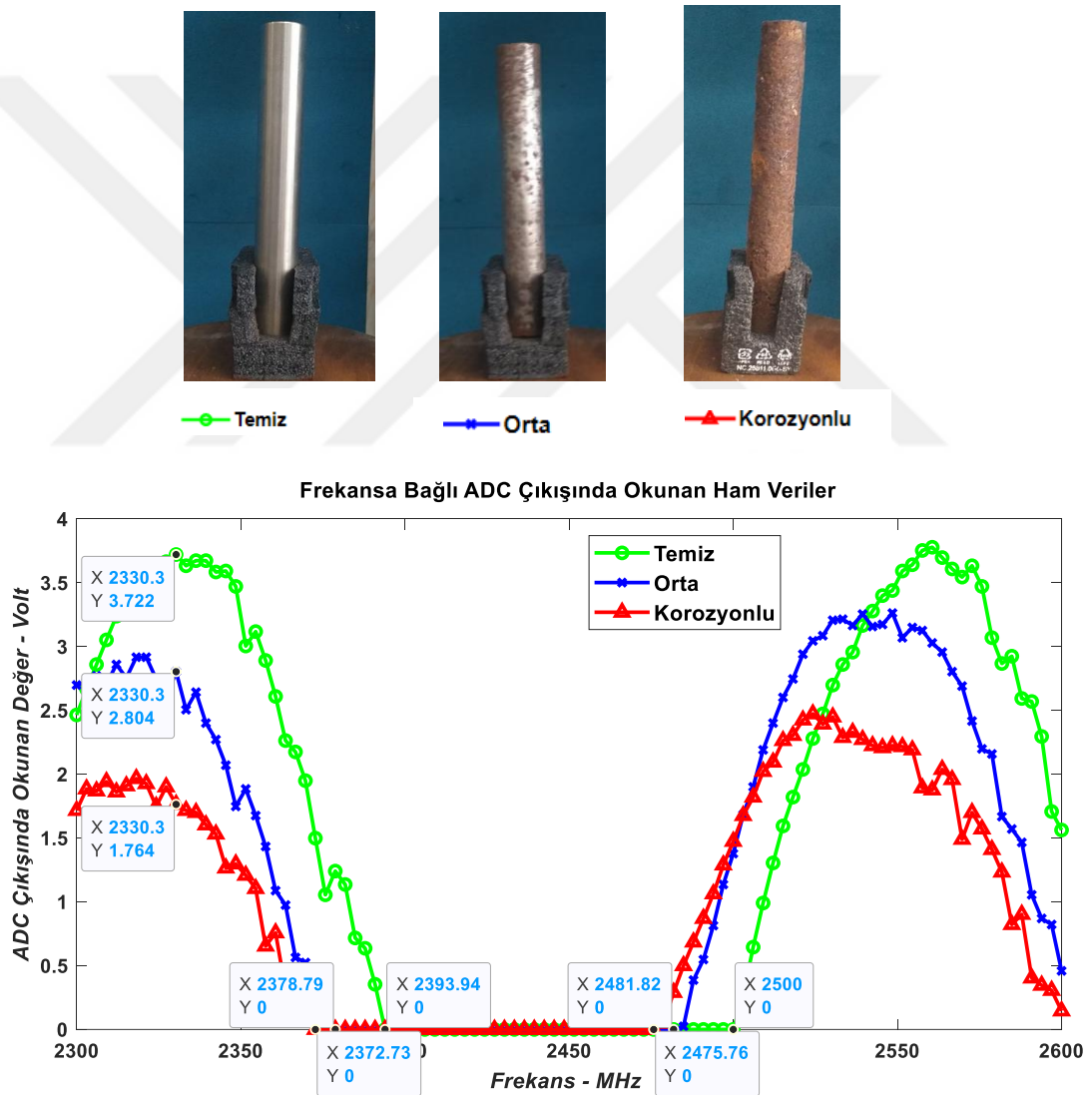
Şekil 4.6. Betonlu korozyonlu MEİ levha faz değerleri

Betonlu korozyonlu MEİ levhanın faz değerlerine Şekil 4.7’deki 2.45 GHz frekansında bakılacak olursa hiç korozyon yokken 9 derecelik bir faz değeri vardır. 1 mm korozyon olduğunda ise 15 derecelik faz değeri oluşmuştur. Tekrardan referansa göre karşılaştırma yapılırsa örneğin 0.5 mm korozyon seviyesi ile 0 mm arasında yaklaşık 3 derecelik fark varken 1 mm ile 0 mm arasında yaklaşık 6 derecelik faz farkı oluşmuştur. Elde edilen sonuçlara göre korozyon seviyesindeki artış faz farkının da artmasına sebep olmuştur.



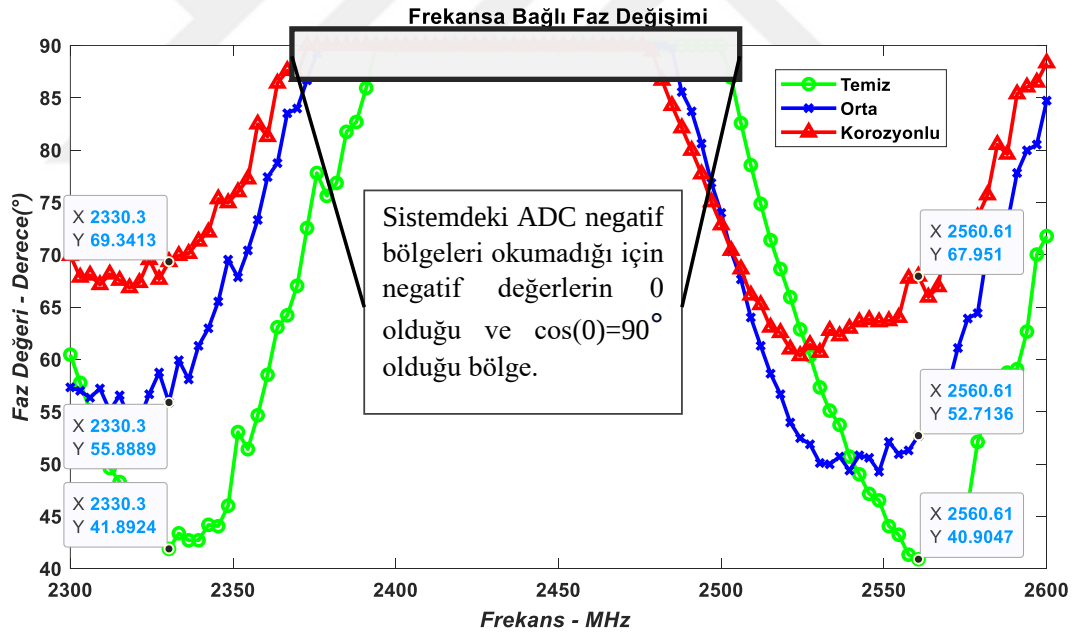
Şekil 4.7. Betonlu korozyonlu MEİ levha 2.45 GHz faz değerleri

FMSD radar ile sırayla tek nokta ölçümleri alınan temiz, orta, korozyonlu demirler ve AİÇ çıkışında okunan gerilim değerleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Grafiğin yatay eksenini 2300-2600 MHz arasında değişen frekans değerlerini, dikey eksenini ise AİÇ çıkışında görülen genlik değerini göstermektedir. Sistemde kullanılan AİÇ negatif değerleri okumadığı için elde edilen grafiklerde temiz demir için 2393-2500 MHz, orta demir için 2378-2481 MHz, korozyonlu demir için ise 2372-2475 MHz seviyesindeki değerler 0 olarak okunmuştur. Bu aralıklardan anlamlı bulgular elde edilmesi beklenmemektedir. Anlamlı farklar oluşan frekans değeri için örneğin 2330 seviyesinde temiz demir için okunan değer yaklaşık 3.72 V, orta için 2.8 V ve korozyonlu demir için okunan ise 1.7 V ile en zayıf gelmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi temiz demir ile korozyonlu demir arasında AİÇ çıkışında okunan değerler farklıdır.



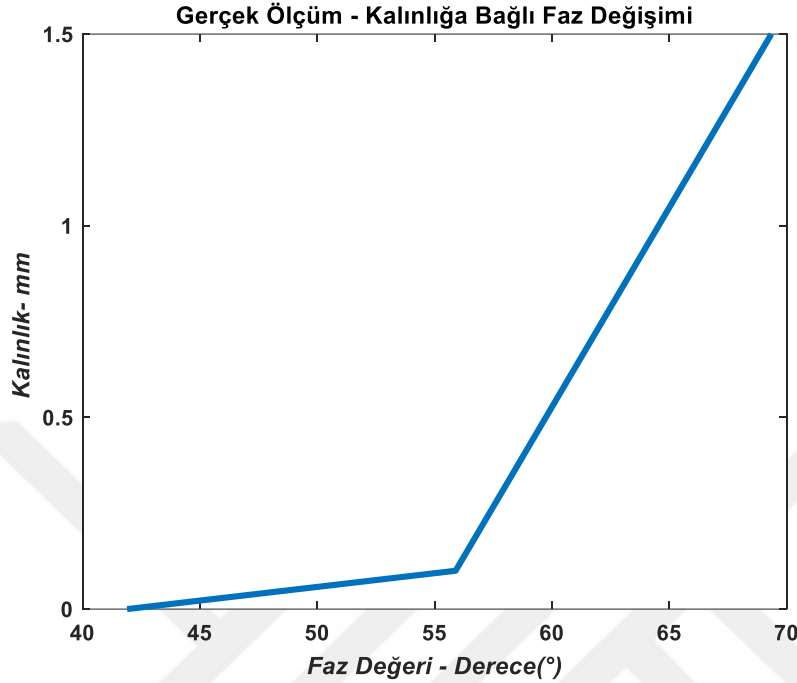
Şekil 4.8. Frekansa bağlı AİÇ çıkışında okunan gerilim değerleri değişimi

Gerçekleştirilen FMSD radar ile tek nokta temiz, orta, korozyonlu demir ölçümünün AİÇ çıkışında okunan gerilim değerlerinden faz bilgisine geçiş yapılmıştır. Burada faz bilgisine geçiş yapılırken Bölüm 2.2.3'te anlatılan ve Denklem 2.40'ta verilen okunan değer (O.D) üzerinden gidilmiştir. $B' \cos(\emptyset) = O.D$ iken $\cos^{-1} O.D = \emptyset$ olacaktır ve faz bilgisi ile korozyon varlığı hakkında yorum yapılabilir. Buradaki B' AİÇ'nin okuma aralığı olan 0-5 V ile ölçeklenir. Yani okunan değer en fazla 5 V olmaktadır. Ancak cosinüs 1 ile -1 arası değerler aldığı için bu O.D'nin ölçeklenmesi ve arccosünüsü alındığında anlamlı bölgede olması gerekir. Bunu sağlamak için de O.D değerleri 5'e bölünmüştür. $\cos^{-1} \frac{O.D}{5} = \emptyset$ yapıldığında faz bilgisi olan $\emptyset$ Şekil 4.9'da verildiği gibi elde edilmiştir. AİÇ çıkışında 0 V olan yerlerin değerleri 90° gelmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi 2330 MHz seviyesinde temiz demirin fazı yaklaşık 41° , ortanın 55° ve korozyonlunun ise 69° gelmiştir. Temiz ile orta korozyonlu arasındaki faz farkı yaklaşık 14° ve temiz ile korozyonlu arasındaki faz farkı da yaklaşık 28° gelmiştir. Korozyonlu demir ile temiz demir arasındaki faz farkı beklenildiği gibi en fazla oluşmuştur. Yine 2560 MHz frekans seviyesinde temiz demirde 40° , ortada 52° ve korozyonluda 68° faz oluşmuştur. Faz açısından anlamlı olacak frekans aralığı temiz ve korozyonlu durum tespitinde seçilebilir.



Şekil 4.9. Frekansa bağlı faz değişimi

Temiz (0mm korozyon), orta (0.1mm korozyon) ve korozyonlu (1.5 mm korozyon) seviyeleri için 2.33 GHz’de faz cevabına bağlı kalınlık grafiği Şekil 4.10’da verildiği gibidir. Korozyon kalınlığı arttıkça faz cevabı da artmıştır.



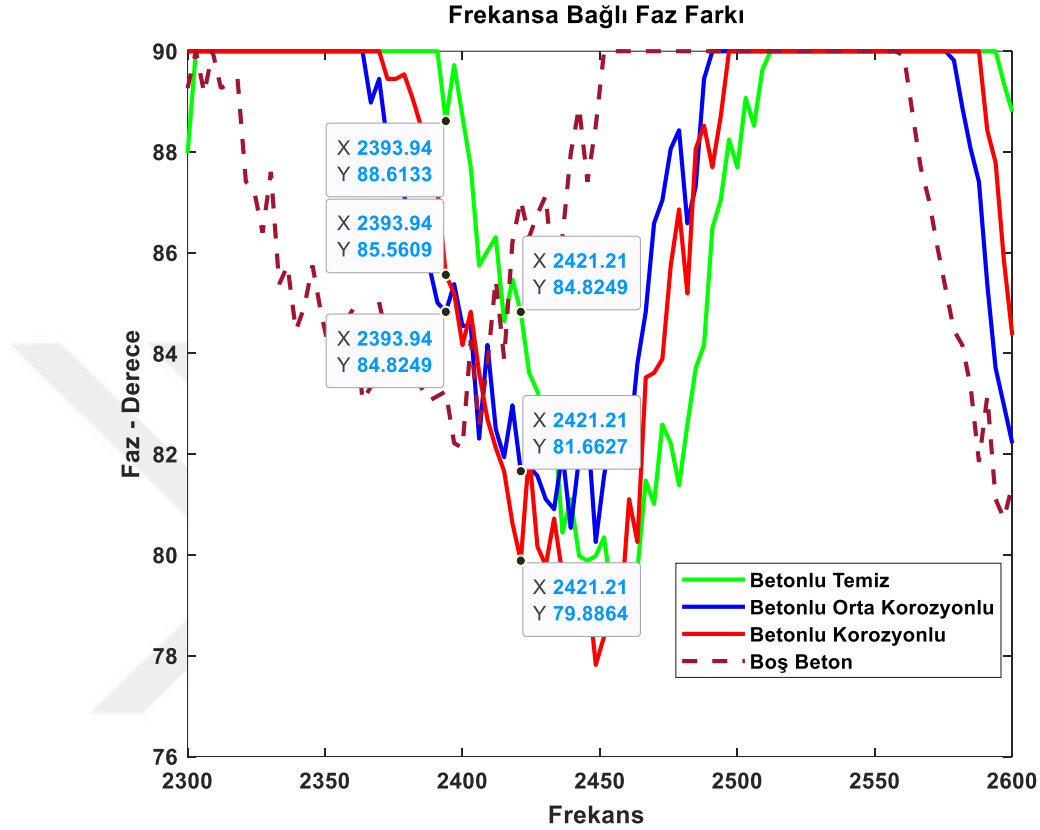
Şekil 4.10. Korozyon kalınlığı ve faz cevabının 2.33 GHz frekansta ilişkisi

Şekil 4.10’da verilen doğru denklemi Denklem 4.4’te verildiği gibi elde edilmiştir (Burada 0.1mm korozyon seviyesi olduğu tahmin edilmiştir çünkü orta seviye korozyona sahip demirin korozyon miktarı varla yok arasındadır.). Elde edilen denklemde seçilen frekansa göre faz farkı denklemde yerine yazılarak korozyonun kalınlık seviyesi belirlenebilir.

$$d(\text{kalınlık}) = 0.003531(\Delta\phi_{2.33 \text{ GHz}})^2 - 0.3381(\Delta\phi_{2.33 \text{ GHz}}) + 7.968 \quad (4.4)$$

Bölüm 3.3.2’de anlatılan ve Şekil 3.19’da verilen ölçüm düzeneğindeki boş silindirik kalıp için ve silindirik kalıbın içerisine temiz, orta, korozyonlu demirler yerleştirildiğinde elde edilen faz cevabı Şekil 4.11’deki grafikte verildiği gibi elde edilmiştir. Demirler antenlere 30 cm mesafede ve 40° açılarla bakmaktadır. Yatay eksen frekans eksenidir ve 2300-2600 MHz bandında tarama gerçekleştirilmiştir. Dikey eksen ise elde edilen faz cevabı derece cinsinden verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi boş silindirik kalıbın faz cevabı en düşük seviyede gelmiştir. Çünkü içerisinde yansıtıcı yüzeye sahip bir madde yoktur. Bu boş beton içerisinde demirler konulduğunda frekans yaklaşık 100 MHz kaydıktan sonra cevap üretmiştir. Betonlu temiz demirin faz cevabına bakılacak olursa örneğin 2393 MHz frekansta yaklaşık 88° gelmiştir. Betonlu korozyonlu demirin ise 2393 MHz seviyesinde faz cevabı yaklaşık 85° gelmiştir. Buradan da görüldüğü gibi temiz demir ile korozyonlu arasında belirli bir faz farkı (yaklaşık 3°) mevcuttur. Bir başka frekans değerinde 2421 MHz frekansında betonlu temiz demirin faz değeri yaklaşık 84°, orta korozyonlu demirin yaklaşık 81° ve

korozyonlu demirin faz cevabı yaklaşık 79° gelmiştir. Burada ise belli bir sıralama ile betonlu silindirik kalıpların içindeki temiz orta ve korozyonlu faz cevapları elde edilmiştir. Beklenen orta korozyonlu demirin temiz ile korozyonlu arasında faz değerlerine sahip gelmesidir ancak ölçüm sonuçlarına göre sadece birkaç frekansta bu şekilde gelmiştir.

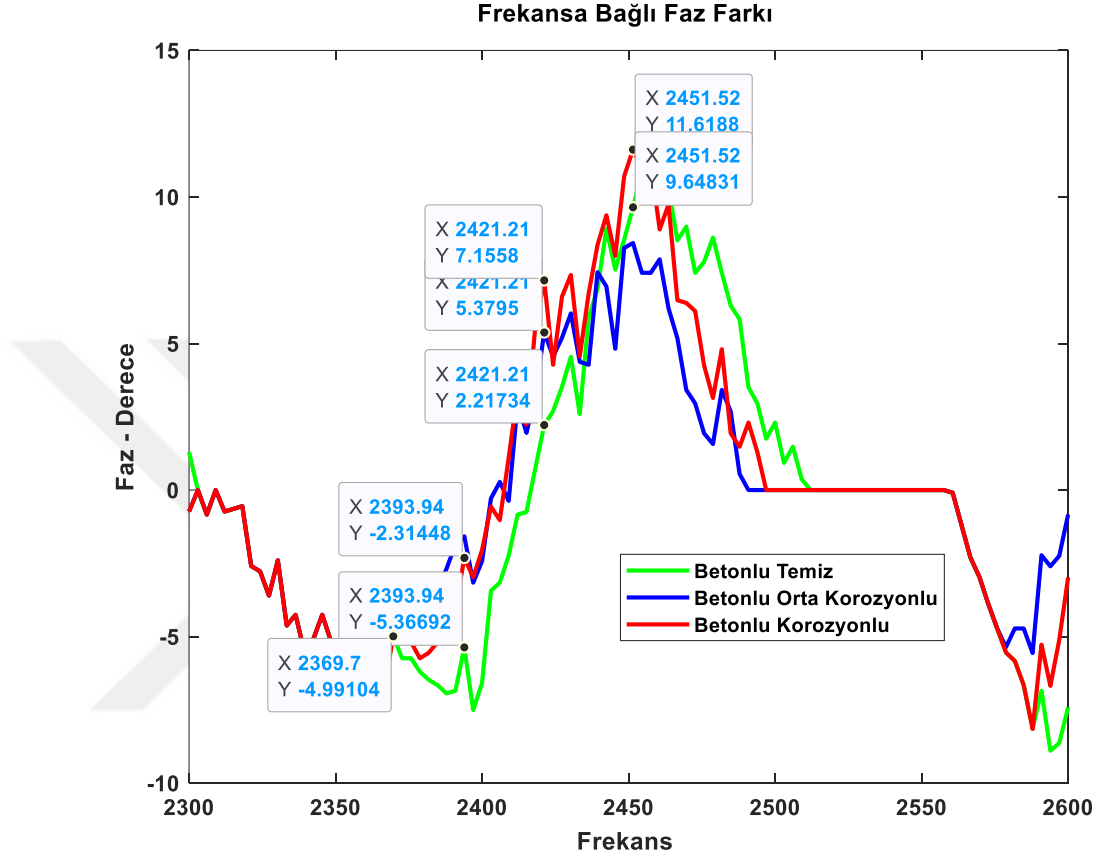


Şekil 4.11. Silindirik boş beton kalıbın ve silindirik beton kalıbın içindeki demirlerin frekansa bağlı faz cevabı

Korozyonlu ile temiz arasında kesin bir ayrım yapılabilmektedir ancak orta korozyonlu demirin cevabında tüm frekans bandında geçerli olacak mantıklı bir cevap elde edilememiştir. Grafikte 90° olarak görülen yerler yukarıda da bahsedildiği gibi AİÇ'nin negatif bölgelerde okuma yapamamasından kaynaklı gelen cevaplardır.

Boş betonun faz değeri sırayla betonlu temiz, betonlu orta ve betonlu korozyonlu demirlerin cevaplarından çıkarılarak belli bir faz farkı elde edilmiştir. Bu elde edilen faz farkına ait grafik Şekil 4.12'de görüldüğü gibidir. Bu grafikte de görüldüğü gibi yüksek seviyeli korozyona ait içinde demir bulunan betonlu silindirik kalıbın belirli bir frekans bölgesinde örneğin yaklaşık 2370 MHz ile 2451 MHz arasında yaklaşık 80 MHz frekans genişliğinde, içinde temiz demir bulunan betonlu silindirik kalıptan daha yüksek faz farkı oluşturduğu görülmüştür. Boş kalıp silindirden, içinde demirler varken çıkartılarak elde edilen bu sonuçlara göre korozyonlu demirin faz farkı korozyon seviyesinden dolayı temiz demire göre beklenildiği gibi daha fazla oluşmuştur. Bu frekans aralığında korozyonlu ile temiz demir arasında belirli bir ayrım yapılabilirken

orta korozyonlu demir için ayırım yapılamamıştır. Orta korozyonlu demir için beklenen temiz ile korozyonlu arasında elde edilecek faz cevabıdır. Ancak sadece birkaç frekans için faz farkı cevapları anlamlı şekilde sıralanmıştır. Örneğin 2421 MHz’de en yüksek seviyeli korozyonlu demir için faz farkı 7.15° , orta seviye için 5.13° ve en temiz demir için ise 2.21° gelmiştir.



Şekil 4.12. Boş beton kalıplı faz cevabından betonlu demirli faz cevabını çıkartınca elde edilen faz farkı

Hem MATLAB ve benzetim ortamında hem de FMSD ile gerçekleştirilen gerçek ölçüm senaryolarında elde edilen faz farkı bilgilerinden korozyonlu demir ile temiz demir arasında ayırım yapılabilmektedir. Korozyon kalınlığı arttıkça faz farkı da artmış olup ikisi arasında belirli bir bağlantı kurulmuştur. Betonlu ölçümlerde ise orta seviye korozyonlu derecelendirmeye ait denklemler elde edilememiş ancak yine belli bir seviyede faz cevabına ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Ülkemizde çok sayıda bulunan ve bunların acil şekilde kontrollerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir, bu amaçla yapılardaki korozyon tespitine yönelik önerilen çalışma ile yapılarda kısa sürede tahribatsız muayene gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Gerçekleştirilen FMSD radar kullanarak korozyon tespitinde, üzerinde 2.5 cm kalınlığında beton bulunan demir levha üzerinde korozyon varlığı faz değişikliğine göre elde edilmiştir. Gerçekleştirilen daraltılmış MATLAB senaryosu ile 0.1-1 mm arasında oluşturulan korozyon değişikliklerine göre elde edilen faz cevabı daha sonra ise benzetim ortamında gerçekleştirilen senaryoda faz cevabı elde edilmiştir. MATLAB sonuçlarına göre korozyonsuz ortamda elde edilen faz cevaplarına göre korozyonlu ortamda elde edilen faz cevabı arasında oluşan faz farkı 2.43 GHz frekansta 7.55° gelmiştir. 2.42-2.43-2.44 GHz seviyelerinde de faz farkı cevabı bilinen bir plakada meydana gelen korozyon kalınlığına ulaşılmıştır (Bakınız Denklem 4.1-4.2-4.3). Evrensel yazılımlar kullanılarak oluşturulan benzetime göre ise 2.45 GHz frekansta korozyonlu ile korozyonsuz durum arasında yaklaşık 6° faz farkı gözlemlenmiştir. Korozyon varlığının tespitinde FMSD radar ile alınan ölçümlerden elde edilen faz değerlerinin, anlamlı cevap üreteceği öncelikle temiz, orta ve korozyonlu demir üzerinde tek nokta FMSD ölçümleri alınarak gözlemlenmiştir. 15 cm mesafeden gerçekleştirilen demir ölçümlerinde elde edilen faz cevabına göre temiz demir ile orta korozyonlu demir arasında 2.33 GHz frekansta yaklaşık 14° , temiz demir ile korozyonlu demir arasında ise yaklaşık 28° faz farkı oluşmuştur. Burada yine korozyon seviyesi artışında faz farkının arttığı görülmektedir ve faz farkı bilinen bir demire ait korozyon denklemi Denklem 4.4'te elde edildiği gibi olmuştur. Son olarak gerçekleştirilen silindirik beton kalıp içine yerleştirilen demirlerde temiz ve korozyonlu demir arasında 2.4-2.5 GHz aralığında belirli bir faz farkı mevcuttur. Korozyonlu, temiz ayrımı net bir şekilde yapılabilmektedir ancak orta seviyeli korozyona ait demir için anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Temiz, orta, korozyonlu arasında sıralama beklenmesi gerekirken gerçek ölçüm sonuçlarında bu betonlu durumda sağlanamamıştır.

Sonuç olarak çalışmanın başında öngörülen faz farkı ile korozyon seviyesi arasındaki ilişki elde edilen FMSD radar verilerine göre de doğrulanmıştır. Mevcut veriler ile korozyon varlığı yokluğunun tespiti mümkün ama orta seviye için derecelendirme yapmak mümkün olmamıştır yan, korozyon varlığı %100 olarak belirlenmiştir ancak korozyon derecelendirmesi için elde edilen matematiksel modellerin güvenilirliğinin artırılması gerekmektedir. İleriki çalışmalar için orta seviye korozyon durumunda derecelendirme yapılması, geliş açısı değişimine göre elde edilen faz cevaplarının değişimi, polarizasyon bozulmalarından anlamlı sonuçlar elde edilip edilemeyeceği ve sistemdeki verilerin normalizasyonu için bir doğrulama matrisi geliştirilmesi gibi çalışmalar üzerine yoğunlaşılabilineceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- AFAD, 2023. 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw:7.7 – Mw: 7.6 Depremleri Raporu. 140s.
- Ağaca, M. 2019. Geçirimsizlik Sağlayan Beton katkılarının Donatı Korozyonuna Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Ahmad, S. 2003. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. *Cement and Concrete Composites*, 25, 459-471.
- Akakın, T. 2013. Betondan Karot Alınması ve Uygunluğunun Değerlendirilmesi. *İstanbul İMO Bülteni*. 112, 62-69.
- Akbay, D. ve Ekincioğlu, G. 2023. Suggesting Conversion Factor Coefficients for Estimating Different Types Of Schmidt Hammer Rebound Hardness Values. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(2), 719 – 728.
- Alshaikh, I.M.H., Zeyad, A.M. 2022. Reliability of the tests' results of Schmidt Hammer and core cutting for assessing actual compressive strength of concrete. *J Build Rehabil*, 7.
- Altın, G. 2020. GPR B Tarama Görüntülerinde Gömülü Nesnelerin Bölütlenmesi ve Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Alyamaç, K. E., Açıkgenç Ulaş, M., Taş, Y., Ghafari, E. 2018. Feasibility Analysis of NDT Methods Using to Estimate the Concrete Strength as Part of Urban Regeneration. *Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), 9-17.
- Annan, A. P. 2003. Ground Penetrating Radar Applications. Sensors & Software Inc., Mississauga, Canada.
- Arı, A.C. 2022. Kompozit Malzemelerin Tahribatsız Muayene Yöntemlerinden Olan Ultrasonik Test ile Ölçülmesi Üzerine Yapılan Çalışmaların İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 4(1-2), 1-10.
- Alvarez, J. K., Sutjipto, S., 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), pp. 1460-1465, Siem Reap, Cambodia.
- Aydın, A., Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81 (1), 1-14.
- Balanis, C. A. 1989. Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons, USA.
- Balanis, C. A. 2005. Antenna Theory Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Başaran, B., Kartal, S., Kalkan, İ. 2019. GFRP Donatı-Beton Arasındaki Aderans Gerilmesinin Sıyrılma Göçme Tipi ile Sonuçlanan Çekip Çıkarma Deneyleri ile Tespiti. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 203-216.
- Başıyigit, C., Çomak, B., Kılınçarslan Ş., Kamacı, Z. 2013. Depremde Hasar Görmüş Betonarme Yapıların Beton Kalitesini Belirlemede Yeni Yaklaşımlar: Görüntü İşleme Örneği. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27

Eylül, Hatay.

- Bingöl, A.F., Gül R., 2009. Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(6), 854–859.
- Bovio, F.L., Bovio, G.L., Brencich, A., Cassini, G., Pera, D., Riotto, G. 2014. A New Pull-Out Technique for In-Place Estimation of Concrete Compressive Strength. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014.
- Boldrin, P., Fornasari, G., & Rizzo, E. 2024. Review of Ground Penetrating Radar Applications for Bridge Infrastructures. *NDT*, 2(1), 53-75.
- Böhni, H., 2005. Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Brencich, A. 2015. A post-installed insert for pull-out tests on concrete up to 70MPa, *Construction and Building Materials*, 95, 788-801.
- Bristow, C., Jol, H. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society London Special Publications*, 211(1), 1-7.
- Cheng, D. K. 1993. Fundamentals of Engineering Electromagnetics. New York: Addison Wesley Publishing Company.
- Clifton, J. R. 1975. Nondestructive Tests to Determine Concrete Strength - A Status Report. Building Safety Section Structures, Materials and Safety Division Center for Building Technology, IAT National Bureau of Standards, Washington, D. C.
- Çam, O., & Çankaya, İ. 2023. Ambiguity Multiple Target Detection with Frequency Modulated Continuous Wave Radar System. *Journal of Optimization and Decision Making*, 2(2), 276-282.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024. Kentsel Dönüşümde 50 Soru 50 Cevap. <https://kastamonu.csb.gov.tr/kentsel-donusumde-50-soru-50-cevap-i-5086> [Son erişim tarihi: 01.03.2024].
- Doğu, S. 2023. Investigation of Detectabilities of the Dielectric Objects in a Through-the-Wall Microwave Imaging Setup. 2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1-4, 5-8 Temmuz, İstanbul, Türkiye.
- Doğan, O. ve Akgül, M. 2020. Donatı Korozyonunun Betonarmenin Durabilite ve Aderansına Etkisi. Anadolu 5. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, 26-27 Aralık, Diyarbakır.
- Engin, Y. 2012. TS EN 13791:2019 Standardı Kapsamında Beton Basınç Dayanımının Yerinde Tayini. <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/rehberler/ts-en-137912019-standardi-kapsaminda-beton-basinc-dayaniminin-yerinde-tayini/> [Son erişim tarihi: 06.03.2024].
- Eren, M. 2023. Betonarme Yapılarda Korozyon Tespiti İçin Tahribatsız Muayene Sistem Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Erdal, M., Şimşek, O., Aruntaş, H. Y. 2003. Betonun Kalite Kontrolünde İleri Teknoloji Kullanımı. 3rd International Advanced Technologies Symposium, 18-20 Ağustos, Ankara.

- Foroozan, F. and Asif, A. 2010. Time-Reversal Ground-Penetrating Radar: Range Estimation With Cramér–Rao Lower Bounds. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (10), 3698-3708 .
- Galagedara, L. W., Parkin, G. W., Redman, J. D., Bertoldi, P., Endres, A. L. 2005. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of Hydrology*, 301(1-4), 182-197.
- Gallion, J. R. 2019. Microwave detection of surface breaking cracks in metallic structures under heavy corrosion and paint. Yüksek Lisans Tezi, Missouri Üniversitesi, USA.
- Güneş, O. ve Büyüköztürk, O. 2012. Simulation-based microwave imaging of plain and reinforced concrete for nondestructive evaluation. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(3), pp. 383 – 393.
- Gürdal, O. 2020. Elektromanyetik Dalga Teorisi, 3. Baskı. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, Bursa.
- Güvenli, K. 2022. Mikrodalga Frekanslarında Kullanılacak Yüzey Tümlleşik Dalga Kılavuzu Filtrelerinin Tasarımı, Gerçeklemesi ve Optimizasyonu. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Güz, H., Cıvık, L. & Canan, S. 2021. FMCW Radar ile Endüstriyel Uygulamalarda Mesafe Ölçüm. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 30, 44-47.
- Hayt, E. H., Buck, J. A. 2001. Engineering Electromagnetics 6th Edition. McGraw-Hill Companies.
- Hong, S., Chen, D., Dong, B. 2022. Numerical simulation and mechanism analysis of GPR-based reinforcement corrosion Detection. *Construction and Building Materials*, Volume 317.
- Hui, X., Bangyu, L., Shaobo, X., Hongzhuan, F. 2008. The Measurement of Dielectric Constant of the Concrete Using Single-Frequency CW Radar. First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, pp. 588-591, Wuhan, China.
- Kara, O., Erdal, H., Çelik, H. H., 2017. Bazı Tahribatsız Test Yöntemleri: Karşılaştırmalı Bir Derleme Çalışması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 3, 82-93.
- Karaman, K. 2023. Schmidt Çekici Geri Tepme Sayılarını Etkileyen Faktörlerin Nicel Değerlendirmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 11(2), 708 – 718.
- Kaya, S. ve Ölçer, İ. 2012. Microwave wall interior imaging algorithm. 2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 18-20 Nisan, pp. 1-3, Muğla, Türkiye.
- Kraus, J. D., Carver, K. R. 1973. Electromagnetics, International Student Edition. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, Japan.
- Kraus, J. D. 1988. Antennas. McGraw-Hill, Shahdara, Delhi, India.
- Kurt, S. 2007. Range Resolution Improvement of FMCW Radars. Yüksek Lisans Tezi,

Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

- Külekçi, G., Vural, A., Aliyazicioğlu, Ş. 2022. Assessment of excavability classification in a Limestone Quarry: A case study from Bayburt, Turkey. *Iranian Journal of Earth Sciences*. 14 (4), 241-251.
- Kürklü, G. 2005. Mevcut Betonarme Yapıların Deprem Güvenliğinin İncelenmesindeki Teknikler ve Beton Dayanımının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Köseoğlu, A. 2010. Beton Karot Dayanımına Agrega Dane Çapının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- 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 (2).
- Mahmoodian, M., Li, C. Q., Mahmoodian, M., Kuchekali, A. 2012. Strength assessment of a high rise concrete building using a combined NDT and DT method. Proceedings of the 11th International Conference on Concrete Engineering and Technology (CONCET 2012), 201–208.
- Malhotra, V.M. ve Carino, N.J. 2004. Handbook On Second Edition Nondestructive Testing of Concrete (Second Edition). CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Okur, H. D., Gelişli, K., Babacan, A. E., Sesli, H. 2019. Betonarme Yapılarda Gerilmenin Neden Olduğu Deformasyonların Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması. *Yerbilimleri*, 40 (1), 92–109.
- Öcal, C. ve İnce, H. H. 2012. Türkiye’de Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm. *SDU International Technologic Science*. 4(2), 89–95.
- Özboylan, B. 2019. Binalarda Donatı Tespiti Amacıyla Yapı Jeofiziği Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Özçelik, E., ve Gelişli, K., 2018. Betonarme Yapılarda Jeofizik Yöntemlerle Beton Kalitesi ve Yapı Donatı Durumunun Araştırılması. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 17 (1), 1-11.
- Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E. 2006. 3-Boyutlu Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) C-Tarama Görüntülerinin Elde Edilmesi. *ELECO 06*, 06-10 Aralık, Bursa, 1-4.
- Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., Yılmaz, B. 2014. A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar Imaging. *Mathematical Problems in Engineering*, volume 2014, 16 pages.
- Özkan, İ. ve Kaya, M. 2020. Zayıf Kaya Malzemelerinin Yerinde Dayanımının Belirlenmesinde İndeks Deneylerin Kullanımı ile İlgili Bir Yaklaşım. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 135-150.
- Özkaya, U. 2020. Derin Öğrenme Yöntemleri ile GPR B Tarama Görüntülerinin Analizi. Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Parlar, M. 2019. Maksimum Agrega Dane Çapının Beton Karışım Tasarımına ve Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Pekgökgöz, R. K., İzol, G., Avcil, F., Gürel, M. A. 2018. Şanlıurfa Ulu Cami Minaresi

- Yapı Taşının Elastisite Modülünün Ultra-sonik Test Cihazı Kullanılarak Belirlenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(1), 35-45.
- Peng Z., Hwang, J. Park, C., Kim, B., Andriese M. and Wang X. 2012. Microwave permittivity, permeability, and absorption capability of ferric oxide. *ISIJ International*, 52, 1535- 1538.
- Pozar, D. M. 2012. Microwave Engineering 4th Edition. John Wiley & Sons, USA.
- Prasanna Chinthala, S. 2018. Study of corrosion inhibitors for reinforcement corrosion of low carbon steel in simulated pore solution. Yüksek Lisans Tezi, Akron Üniversitesi.
- Rahman, A., Siti, F., İsmail, M., Bala, M., Norhazilan, N., Hazri, B. 2011. Monitoring Corrosion Of Reinforcement Bar Using Capacitive Sensor At Different Concrete Cover Depth. *Malaysian Journal of Civil Engineering*. 23. 1-11.
- Richards, M. A., Scheer, J. A. ve Holm, W. A. 2010. Principles of Modern Radar. SciTech Publishing, Edison, NJ.
- Salik Ata, N. 2023. Kahramanmaraş Merkezli 6 Şubat Depremlerinin Kriz Yönetimi Bağlamında Değerlendirilmesi. *Meriç Uluslararası Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi*. 7, 59-77.
- Sadiku, M. N. O. 2000. Elements of Electromagnetics 3rd Edition. Oxford University Press, UK.
- Sassine, E., Laurens, S., François, R., Ringot, E. 2018. Acritical discussion on rebar electrical continuity and usual interpretation thresholds in the field of half-cell potential measurements in steel reinforced concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(4).
- Sert, H. 2011. Beton Karot Dayanımları ile Standart Silindir Dayanımları Arasındaki İlişkinin Karot Çapına Bağlı Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Skolnik, M. I. 1980. Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill, USA.
- Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023. Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu.
- Şahin, A.Y. 2023. Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan depremleri sonrası hasarlı yapıların malzeme kalitesi ve uygulama hatalarının değerlendirilmesi. In International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences, 1: 245 - 251, 4-6 Nisan, Konya.
- Şaştım, M.V. 2016. Kendiliğinden Yerleşen Harçta Öğütülmüş Pomza Kullanımının Donatı Aderansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Şeflek, İ., Yıldız, E., 2020. Frekans Modüleri Sürekli Dalga Radarıyla Simüle Edilen Hayati Sinyallerin Temassız Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı, 72-77.
- Tao, Y. H., Fitzgerald, A. J., Wallace, V. P. 2020. Non-Contact, Non-Destructive Testing in Various Industrial Sectors with Terahertz Technology. *Sensors*, 20(3), 712.
- Türk, A. S. 2004. Yere Nüfuz Eden Darbe Radarı için Geniş Bantlı Anten Tasarımları.

- URSI 2. Ulusal Kongresi, 8-10 Eylül, Ankara, Türkiye.
- Twigg, H. K., Molinari, M. 2016. Test results for a capacitance-based corrosion sensor. Test Raporu (Yayımlanmamış), Southampton Solent University, United Kingdom.
- Özer, N. 2021. Yapı Malzemelerinde Korozyon ve Korozyondan Korunma Yöntemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1159-1178.
- Öztürk, N. K., Akay, M., Gülümser, A. A., Belli, B. 2023. Ülke Planlamada Kentsel Dönüşümün Yeri: Türkiye Mekânsal Strateji Planı Örneği. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 2(4), 1-19.
- Uzun, Ö., ve Balyemez, S. 2020. İstanbul ve Antakya Şehirlerinde Deprem Risk Azaltma Çalışmaları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Değerlendirme. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*. 12(3), 229-250.
- Vallianatos, F. and Hloupis, G. 2023. A Ground Penetrating Radar (GPR) application for Depicting the Geoarchaeological pattern in Ancient Falasarna Harbour. *Earth Sciences And Human Constructions*, 3, 76-89.
- Wibowo, T. P. and Zulkifli, F. Y. 2019. Analysis of Concrete Inspection Radar Equations to Obtain Radar System Specifications, 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, pp. 1-4, 22-24 July, Padang, Indonesia
- Wilcke, M., Walther, A., Szielasko, K., Youssef, S. 2018. The MFL technique – Basic application for PT cable break detection in concrete structures. MATEC Web Conferences, 199.
- Yalın, B. 2018. Asfalt Yol Tabaka Kalınlıklarının Tespitinin 2B ZDSF Metodu ile Modellenmesi. Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Yavuz, R., Günaydın, O., Güçlüer, K. 2022. Agresif Kür Ortamının Beton-Donatı Aderansına Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 35, 349-354.
- Yazıcı, Ş., Göktepe, A. B., Altun, S., Karaman, V. 2006. Sertleşmiş Beton Basınç Dayanımının Belirlenmesinde Kullanılan TS-10465 ve TS EN 12504-1 Üzerine Bir Değerlendirme. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 119-128.
- Yiğit, E. 2007. Elektromagnetik Alan Ölçümleriyle Yeraltındaki Nesnelerin Tespit Edilmesi ve Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) Görüntülerinin Elde Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Yousef, S., Yousef, M., Abd-Elsalam, H. and Shaheen, M. 2020. Detection of the Possible Buried Archeological Targets Using the Geophysical Methods of Ground Penetrating Radar (GPR) and Self Potential (SP), Kom Ombo Temple, Aswan Governorate, Egypt. *Geomaterials*, 10, 105-117.
- Zhang, W., François, R., Wang, R., Cai, Y., Yu, L. 2020. Corrosion behavior of stirrups in corroded concrete beams exposed to chloride environment under sustained loading. *Construction and Building Materials*, vol. 274.

- Zebari, Z., Bedirhanoglu, İ., ve Aydın, E. 2017. Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 43–5



ÖZGEÇMİŞ

Güllühan Irmak

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
2016-2021	Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Eskişehir