



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YERE NÜFUZ EDEN RADAR İLE TOPRAK  
NEM HARİTALAMASI**

**ŞEYMA YALVAÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Nisan-2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Şeyma YALVAÇ tarafından hazırlanan “Yere Nüfuz Eden Radar ile Toprak Nem Haritalaması.” adlı tez çalışması 24/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Sabri KOÇER

.....

#### Üye

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Şeyma YALVAÇ

Tarih: 26.05.2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### YERE NÜFUZ EDEN RADAR İLE TOPRAK NEM HARİTALAMASI

ŞEYMA YALVAÇ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sabri KOÇER

2025, 70 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Sabri KOÇER

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN

Prof. Dr. İlhan İLHAN

Prof. Dr. Nurettin DOĞAN

Bu çalışma, kontrollü laboratuvar ortamında hazırlanmış homojen toprak bölgeleri içinde dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve hacimsel su içeriği ( $\theta$ ) dağılımının yüksek çözünürlükle yeniden yapılandırılması amacıyla, FWI yönteminin uygulanmasını sunmaktadır. Ters çözüm modeli, Sébastien Lambot tarafından geliştirilen ve anten sisteminin içsel yansıma, iletim ve geri yansıma katsayılarını dikkate alan teorik anten karakterizasyon modeline dayanmaktadır. Geniş alan uygulamalarından farklı olarak, bu çalışmada yöntem küçük ölçekli ve yüksek hassasiyetli bir ortamda, değerlendirilmiştir. Deney düzeniği, çapı 54 cm ve derinliği 8 cm olan silindirik bir kap içerisinde yer alan iki ayrı kendi içinde homojen toprak bölgesinden oluşmaktadır: (1) merkeze yerleştirilen, sadece kumdan oluşan nemli bölge (14 cm çapında), (2) çevresini saran, orta derecede nemli kumlu toprak. Ölçümler LiteVNA64 cihazına bağlı log-periyodik anten ile, toprak yüzeyinden 10 cm yüksekte gerçekleştirilmiştir. 2500–2737 MHz frekans aralığında alınan  $S_{11}$  verileri, hava ve su üzerindeki referans ölçümleri temel alınarak Lambot modeline göre karakterize edilmiştir. Zamana dönüştürülen ölçüm verileri, farklı dielektrik permitivite değerleri için önceden hesaplanmış teorik  $G_{xx}(t)$  yanıtlarını içeren Look-Up Table (LUT) ile karşılaştırılmıştır. En düşük hata (misfit) ile eşleşen değer belirlenmiş ve Topp (1980) modeli kullanılarak hacimsel su içeriğine dönüştürülmüştür. Elde edilen dielektrik permitivite ve volumetrik su içeriği haritaları Gaussian filtreleme ile yumuşatılmış ve yüzeydeki nem dağılımını yüksek çözünürlükle ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, Lambot'un teorik modeli ve LUT destekli FWI yönteminin, küçük ölçekli ve sınırlı alanlarda gerçekleştirilen toprak nemi analizlerinde etkin, hızlı ve güvenilir bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** FWI, Toprak Nemi, VNA, YNR

## ABSTRACT

### MS THESIS

## SOIL MOISTURE MAPPING USING GROUND PENETRATING RADAR

ŞEYMA YALVAÇ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Sabri KOÇER

2025, 70 Pages

Jury

Prof. Dr. Sabri KOÇER  
Doç. Dr. Barış GÖKÇE  
Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN  
Prof. Dr. İlhan İLHAN  
Prof. Dr. Nurettin DOĞAN

This study presents the application of the Full Waveform Inversion (FWI) method for high-resolution reconstruction of dielectric permittivity ( $\epsilon_r$ ) and volumetric water content ( $\theta$ ) distributions within homogeneous soil regions prepared in a controlled laboratory environment. The inversion model is based on the theoretical antenna characterization model developed by Sébastien Lambot, which accounts for internal reflection, transmission, and backscattering coefficients of the antenna system. In contrast to large-scale field applications, this study evaluates the method within a small-scale, high-precision environment.

The experimental setup consists of two distinct homogeneous soil regions contained in a cylindrical container with a diameter of 54 cm and a depth of 8 cm: (1) a moist central region composed solely of sand (14 cm diameter), and (2) a moderately moist sandy soil surrounding this central region. Measurements were performed using a log-periodic antenna connected to a LiteVNA64 device, positioned 10 cm above the soil surface.  $S_{11}$  data collected within the frequency range of 2500–2737 MHz were characterized according to Lambot's model, based on reference measurements conducted over air and water. Time-converted measurement data were compared against a Look-Up Table (LUT) containing theoretical  $G_{xx}(t)$  responses pre-calculated for varying dielectric permittivity values. The value with the lowest misfit error was selected and subsequently converted into volumetric water content using Topp's (1980) model. The resulting dielectric permittivity and volumetric water content maps were smoothed using Gaussian filtering, providing high-resolution insights into surface moisture distribution. These results demonstrate that Lambot's theoretical model and the LUT-supported FWI method offer an effective, rapid, and reliable approach for soil moisture analysis in small-scale and confined environments.

**Keywords:** FWI, GPR, Soil Moisture, VNA

## ÖNSÖZ

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi tez çalışmam esnasında tamamen çalışmalarıma odaklanmam için benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen kıymetli annem Emine ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Mühendisliği seçmemde ve nihayetinde bu çalışmayı yapmamın merkezinde olan ağabeyim Mehmet YALVAÇ'a teşekkür ederim. Hayatta ilk adımlarımı atarken elimden tutan kıymetli ağabeyim Süleyman YALVAÇ'a ise tez süresince, ilk adımlarımdaki gibi, her tükenme noktamda elimden tutup devam ettirmeme vesile olduğu için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın hazırlanmasında en büyük motivasyonum su kıtlığı yaşadığımız bu dönemde su kaynaklarının israfını önlemek olmuştur. Bu motivasyonuma inanıp benden her türlü desteğini esirgemeyen, inanan, gerekli akademik yönlendirme ve desteği esirgemeyen değerli danışmanım Prof Dr Sabri KOÇER'e teşekkür ederim. Süreç esnasında teknik destekten öte zorlu sürecimde her türlü sabrı ve yönlendirmesinden dolayı minnettarlığımı ifade edecek kelime bulamamaktayım.

Deney süresi esnacınca ölçüm alma noktasında ortam hazırlama da dostlarım Necmiye İNCE, Mesude KURU ve İbrahim FAYYAD'a teşekkür ederim.

Belçika Ghent Üniversitesi Bioscience Fakültesi'n de 3 aylık toprak bilimi adına hem stajer hem de çalışan olarak sunduğu imkanlar için teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na, Belçika'dan getirttiğim deney materyallerimin elime ulaşmasında sağladığı destek ve belgeler için teşekkürlerimi sunuyorum.

Şeyma YALVAÇ  
KONYA-2025

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRACT.....	Error! Bookmark not defined.
ÖNSÖZ .....	Error! Bookmark not defined.
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	ixi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Araştırmanın Tanımı ve Amacı .....	1
1.2. Araştırmanın Önemi .....	2
1.3. Araştırmanın Kapsamı .....	4
1.4. Araştırmanın Yapısı .....	4
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>6</b>
2.1. Zaman Donemi Yansıma Yöntemi (TDR).....	9
2.2. Yere Nüfuz Eden Radar Yöntemi .....	11
2.2.1. Zemin Temaslı (on-Ground) ve Zeminden Yüksekte (off-Ground) Ölçüm .....	13
2.3. YNR Yerine VNA Kullanımı .....	15
<b>3. KURAMSAL ÇERÇEVE.....</b>	<b>17</b>
3.1. Yere Nüfuz Eden Radar .....	17
3.2. Vektör Ağ Analizatör ve <b>S11</b> .....	20
3.2.1. Vektör Ağ Analizatör.....	20
3.2.2. <b>S11</b> Parametresi ve Dielektrik Permittivite Ölçümü .....	21
3.2.3. Toprak Nem Haritası ve <b>S11</b> Verisi İlişkisi .....	24
3.3. Full-waveform Inversion Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm (FWI).....	25
3.3.1. Full-waveform Inversion Teorisi .....	26
3.4. Topp'un Denklemi ile Dielektrik Sabitten Toprak Nemi İçeriği Hesaplama.....	27
3.4.1. Topp'un Denkleminin Kullanımı ve Geçerliliği .....	27
3.5. Greens Fonksiyonu .....	28
3.5.1. Greens Fonksiyonunun FWI ile Kullanımı.....	28
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>31</b>
4.1. Materyaller.....	31
4.1.1. LiteVNA64 .....	32
4.1.2. XR-909 Anten Analizi .....	33

4.2. Kullanılan Yöntemler .....	41
4.2.1. Lambot'un Radar Denklemi .....	43
4.1.2 Objektif Fonksiyonu .....	44
4.3. Deneş Düzenegi ve Basamakları .....	45
4.3.1. VNA Kalibrasyonu .....	45
4.5.2. Anten Karakteristiklerinin Oluşturulması .....	46
4.5.3. Veri Toplama ve İşleme.....	48
4.5.3.1 Ters Çözüm Süreci (FWI): .....	48
<b>5. SONUÇLAR TARTIŞMA VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>50</b>
5.1. Tartışma .....	50
5.2. Sonuçlar .....	51
5.3. Gelecek Çalışmalar .....	53
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$c$	Işık Hızı
$f$	Frekans
$\epsilon_r$	Dielektrik Permittivite
$g_{xx}^\dagger$	Green Fonksiyonu
$h_0$	Faz Merkezi ve Yüzey Arası Yükseklik
$\mu$	Manyetik Geçirgenlik
$\sigma$	Ortamın İletkenliği
$k$	Malzeme içindeki kompleks dalga sayısı
$k_0$	Serbest uzayın dalga sayısı
$S_{11}$	Yansıyan Sinyal
$S_{21}$	İletilen Sinyal
$Z_{in}$	Giriş Empedansı
$Z_0$	Serbest Uzayın Karakteristik Empedansı
$Z_r$	Bağıl Empedans
$\Omega$	Ohm
$\Gamma$	Yansıma Katsayısı
$V$	Sistem veya Ortamın Hacmi
1D	Bir Boyutlu
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu

### Kısaltmalar

FWI	Tam Dalga Ters Çözümü
İHA	İnsansız Hava Aracı
IoT	Internet of the Things, Nesnelerin İnterneti
LPDA	Log Periyodik Dipol Anten
LUT	Look Up Table-Arama Tablosu
RF	Radyo Frekansı
TDR	Zaman Domeni Yansıma Yöntemi
VNA	Vektör Ağ Analizatör
YNR	Yere Nüfuz Eden Radar

## ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 YNR ile Elde Edilen Toprak Nem Haritası .....	13
3.1 Temsili Tarama Geometrisi .....	18
3.2 Toprak Nem Haritalaması - Horn Antenna (Lambot, 2006).....	18
3.3 Dipole Anten Konfigürasyonu (Farahana, 2008).....	19
3.4 PCB Log Periyodik Dipole Anten (Anitha et al., 2016).....	19
4.1 Toprak Nemlendirme Aşaması .....	32
4.2 Sistem Düzeneği Diagramı .....	32
4.3 LiteVNA64 .....	33
4.4 LPDA XR-909 Model Görseli .....	34
4.5 LPDA Şematik Yapı Aktif Dipol Faz Merkezi .....	38
4.6 Alüminyum Reflektör Ölçüm Düzeneği .....	39
4.7 Sistemin Liner Blok Diyagramı (Lambot, 2014) .....	42
4.8 LiteVNA64 OPEN SHORT LOAD Kalibrasyonu .....	45
4.9 Log Periyodik Dipole Anten Su Yüzeyi Referans Ölçümleri .....	46
4.10 Log Periyodik Dipole Anten Su Yüzeyi Referans Ölçümleri Grafiği .....	46
4.11 Karakteristik Grafikleri .....	47
4.12 Deney Düzeneği.....	48
5.1 Nemli, Çok Nemli ve Su Yüzeyi Ölçüm Log Mag dB Grafiği .....	50
5.2 XR-909 LPDA Anteninde Dipol Boylarının Azalma Eğilimi .....	51
5.3 Modellenen ve Ölçülen Gxx Değerleri Karşılaştırması .....	52
5.4 Toprak Nem ve Volumetrik Miktar Haritası.....	52

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Toprak Nem Ölçümleri Karşılaştırma Çizelgesi .....	8
2.2 On-Ground Off-Ground Karşılaştırma Çizelgesi .....	12
4.1 LPDA Tasarım Parametreleri Tablosu.....	35
4.2 LPDA Aktif Dipol ve Faz Merkezi Tablosu (2.5–2.9 GHz).....	38
4.3 2738.75 MHz Frekansından Yüksekliklere göre Alınan $S_{11}$ Değerleri.....	40
4.4 Beamwidth Değerlerinden Elde Edilen Tarama Çapı ve Alan Hesaplamaları .....	40



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Araştırmanın Tanımı ve Amacı

Küresel iklim değişiklikleri ve artan nüfus, tarım sektöründe kaynakların sürdürülebilir kullanımı gerekliliğini her geçen gün daha da artırmaktadır. Tarım, dünyadaki tatlı su kaynaklarının yaklaşık %70'ini kullanarak su tüketiminde büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle suyun verimli yönetimi, israfının önlenmesi sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından hayati bir önem taşımaktadır (Akkuşcu, 2019). Suyun etkin kullanımı hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de tarımsal verimliliği artırmak adına kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, toprak nem içeriği, bitki sağlığı ve genel tarımsal verimlilik üzerinde belirleyici bir etkiye sahip temel bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Chew, 2019). Toprak neminin izlenmesi ve haritalanması, verimli sulama kararlarının alınmasına yardımcı olarak, su tasarrufunu artırabilir ve tarımsal verimliliği iyileştirdiği bilinmektedir (Bhogapurapu, et al., 2022).

Geleneksel nem ölçüm yöntemleri, tarım uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan zorlukları beraberinde getirmektedir. Örneğin, gravimetrik analiz gibi laboratuvar tabanlı ölçüm yöntemleri, yüksek doğruluk sağlamasına rağmen geniş alanlarda uygulanması oldukça zordur (Musaoğlu, 1999). Bu tür yöntemlerin doğası gereği zaman alıcı olması ve maliyetlerinin yüksekliği, tarımsal üretimdeki verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Elektriksel direnç veya kapasitans tabanlı sensörler, yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem olmasına rağmen, her bir ölçüm noktasına ayrı ayrı yerleştirilmeleri gerektiğinden ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır (Öner, 2003). Bu geleneksel yöntemler, sürekli veri güncellemesini sağlamada yetersiz kalmakta ve toprak yapısına fiziksel müdahale gerektirdikleri için toprak sağlığına zarar verme riski taşımaktadır (Hardie, 2020).

Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemler, tarımda akıllı sistemlerin entegrasyonu ile anlık veri izleme ve analiz imkanı sunarak tarımsal su yönetiminde yeni bir çığır açmıştır. IoT teknolojileri sayesinde çiftçiler, tarım arazilerindeki nem seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve gerektiğinde hızlı müdahale yapma imkanı bulur (Gücük, 2019). Ancak, geniş alanlarda kullanılan IoT sensörlerinin maliyeti, bakımı ve enerji yönetimi gibi zorluklar, bu sensörlerin etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, bu tür sistemlerin kurulumu ve yönetimi, kullanıcılar için ek zorluklar ve maliyetler doğurabilmektedir.

IoT tabanlı sistemleri destekleyen, hızlı, çevre dostu ve hassas bir alternatif ölçüm teknolojisi olarak YNR (Yere Nüfuz Eden Radar) daha kullanılabilir olması ile öne çıkmaktadır. YNR, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla toprak altındaki su içeriğini hızlı ve temas gerektirmeden ölçme kabiliyeti ile dikkat çekmektedir (Blonquist vd., 2006). Bu teknoloji, toprak nem haritalarının oluşturulmasında etkin bir çözüm sunarak, tarımsal alanlarda sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Bu çalışmada, tarımsal alanlarda YNR teknolojisi kullanılarak toprak nem haritalarının oluşturulması ve bu verilerin hassas tarım uygulamalarında değerlendirilmesi hedeflenmektedir. YNR'nin sunduğu avantajlar, özellikle geniş tarım arazilerinde nem içeriğinin detaylı bir şekilde haritalanmasını mümkün kılmakta, bu sayede su kaynaklarının korunmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Tarımsal verimliliği artırmak ve çevresel etkileri azaltmak adına bu teknolojinin entegrasyonu, sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlayacaktır (Yüksel & Aksoy, 2017).

Çalışmamızın amacı, YNR ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu mümkün olan hassas tarım uygulamalarına katkıda bulunacak güvenilir, çevre dostu ve ekonomik bir toprak nem haritalama sistemi geliştirmektir. Özellikle kuraklık riski altındaki bölgelerde su kaynaklarının korunması ve tarımsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada bu teknolojinin önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir. Böylece, hem ekonomik verimlilik sağlanacak hem de doğal kaynakların korunmasına yönelik önemli adımlar atılmış olacaktır.

## **1.2. Araştırmanın Önemi**

Hassas tarım da akıllı sistemler denilince, günümüzde IoT üzerine olan araştırma ve geliştirme projelerinde en çok karşılaşılan sorun arazinin doğru su oranını kısa zamanda, en etkili ve zahmetsizce tespit edememe üzerinedir. Yapılan bir çok çalışmada özellikle büyük ölçekli ve toprak türü değişken olan araziler için bir çok yöntem yüksek maliyetleri ile karşımıza çıkmaktadır. (Sawadogo, 2021). YNR yöntemi ile tüm arazinin nem haritasının çıkarılması üzerine ümit verici bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde tatlı su kaynaklarımızın büyük bir çoğunluğunun tarım alanında sulamada kullanılması ve bu miktarın yarısının toprak nem oranının tahmin edilememesinden dolayı, bu çalışmanın önemini arttırmıştır. Ayrıca hassas tarım alanında su stresi olarak

adlandırılan arazinin fazla ya da eksik miktarda sulanma oranının ürünlerdeki etkisi de göz ardı edilmemelidir (Yüksel & Aksoy, 2017).

Ülkemiz genelinde kullanılabilir su potansiyeli 112 milyar m<sup>3</sup> olup, 57 milyar m<sup>3</sup>'ü kullanılmaktadır. Kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1 652 m<sup>3</sup>, 2009 yılında 1 544 m<sup>3</sup>, 2020 yılında ise 1 346 m<sup>3</sup> olmuştur DSI'den aldığımız verilere göre. 1700-1000 m<sup>3</sup> arası değerler su sıkıntısı habercisiyken kişi başına kullanılabilir su potansiyeline bakıldığında, su baskısı yaşayan ülkeler arasında yer almakta olduğumuz söylenebilir (Körbalta vd., 2019). 2030 yılında nüfusun 100 milyon olacağı beklentisi düşünüldüğünde ise kişi başı yıllık su miktarı 1120 m<sup>3</sup> e düşecektir. Tatlı su kaynaklarının dünyada %70 i ülkemiz genelinde ise %74 ü tarımda kullanılmaktadır. Tarım amaçlı sulamadan kullanılan sulamalar ile su kaybı oranı ortalama %50 dir. 2050 yılında %70 artması beklenen gıda ihtiyacı talebi daha çok ekim ve daha çok tatlı su kaynaklarının kullanılması demektir (Fatih vd., t.y.). Küresel iklim değişikliği ile beraber gelen çölleşme hassasiyeti üzerine yapılan çalışmalardan birinin çıktısı olan "Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Stratejisi ve Eylem Planı 2019-2030" raporu çölleşme hassasiyeti bakımından İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerimizin riskli bölgeler olduğunu bildirmektedir (Kıcık, 2023). Her alanda artan su ihtiyacı ile tarımdaki yarı yarıya olan su israfı göz önüne alındığında ülkemizde giderek azalan temiz su kaynağı eğrilerinin yapılan araştırmalarca 2030 yılında kesişeceğini göstermektedir (Akın & Akın, 2007).

Yukarıdaki verilere ek olarak TAGEM (Tarım Araştırma ve Geliştirme Merkezi) in "Global Integration of Turkish Agriculture and Agriculture 4.0" isimli 2019 da yayınladığı raporda çocuk işçilerin en çok tarımda kullanıldığına dikkat çekerek tarımın dijital dönüşüme geçmeye başlaması ile çocuk işçi çalıştırma oranının düştüğü verilerle sunulmuştur. Genel olarak tarımdaki hizmet sektöründe de insan gücü talebini azaltmak çocuk işçiliğinin de önüne geçecektir. Endüstri 4.0'ün globalde hayata entegrasyonu ile tarımsal istihdamın oranı geçmişteki endüstri dönemlerinde zirvedeyken günümüzde uluslararası bazda bu oran tüm sektörler içinde en düşük düzeydedir (Akkuşcu, 2019).

Gelecekteki su potansiyelimiz üzerine olan eldeki verilere ve ülkemizin çölleşme hassasiyeti noktasındaki çalışmalara dayanarak yapılan tahminler bizi suyu randımanlı kullanma adına çalışmalar yapmaya teşvik etmiş bu alanda yapılan çalışmaların önemini gözler önüne sermiş olmakla beraber toprak nem ölçmede kullanılan dijital cihazlar ve doğrudan gravimetrik metotların kalibrasyonuna ihtiyaç duyması her bir ölçümün oldukça kısıtlı ve küçük bir alanda yapılmasına imkan sağlaması hayli zahmetli olduğundan Yere

Nüfüz Eden Radar Sistemi ile nem ölçümü araştırmalarına girmemizi sağlamıştır (Musaoğlu, 1999).

### 1.3. Araştırmanın Kapsamı

Bu alışmada, LiteVNA 64 cihazı kullanılarak VNA tabanlı toprak nem haritalama yöntemi uygulanacaktır. Anten olarak ise 280 MHz ile 10 GHz arasında frekans aralığına sahip log-periodic anten kullanılacaktır. Araştırmanın temel amacı, yüzeyin toprak nem içeriğini hassas bir şekilde volumetrik olarak ölçmek ve haritalamaktır. Bu amaçla, log-periodik anten ile toprak yüzeyine yakın bölgelerde yapılan ölçümler, S11 parametreleri aracılığıyla elde edilecektir. Ölçüm alanı, 54 cm çapında 8 cm derinliğinde toprak kutusunda gerçekleştirilecektir.

Araştırmada kullanılan toprak türü sandy soil (kumlu toprak) olup, bu toprak türünün dielektrik özellikleri, VNA ile yapılan ölçümlerle belirlenmeye çalışılacaktır. Toprağın yüzeyinden itibaren 12 cm derinlikteki nem içeriği, Sebastian Lambot'un elektromanyetik modeline dayalı bir yaklaşım ile değerlendirilecektir. Bu model, toprak altındaki nemin ve diğer elektromanyetik parametrelerin doğru bir biçimde tahmin edilmesinde kullanılacaktır.

Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm (FWI) yöntemi, Greens fonksiyonları aracılığıyla dalga yayılımını ve yansımalarını analiz ederek toprak neminin daha hassas bir şekilde haritalanmasına olanak sağladığı Lambot'un çalışmalarında belirtilmiştir. Bu metot ile toprak neminin yüzeydeki dağılımını ile derinliklerdeki değişimlerin doğru bir biçimde tespit edilmesini amaçlanmıştır.

### 1.4. Araştırmanın Yapısı

Bu tez, toplamda altı ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, araştırmanın amacı ve kapsamı, çalışma konusunun önemi ve kullanılan yöntemler hakkında genel bir bilgi verilmektedir. Bu bölüm, araştırmanın genel yapısını ve hedeflerini ortaya koyarak okuyucuyu çalışmanın içeriği hakkında bilgilendirmeyi amaçlamaktadır.

İkinci bölümde, mevcut literatür taraması yapılmış ve toprak nem haritalama yöntemleri, özellikle YNR ve VNA teknolojilerinin kullanımı detaylandırılmıştır. Bu bölüm, çalışmanın dayandığı kuramsal çerçeveyi ve mevcut araştırma alanındaki boşlukları ortaya koymaktadır.

Üçüncü bölümde, araştırmada kullanılan teorik çerçeve açıklanmıştır. Bu çerçeve, toprak dielektrik permitivitesinin hesaplanmasından, ileri modelleme (forward modeling) ve Sebastian Lambot'un modeline kadar olan tüm temel kavramları kapsamaktadır. Ayrıca, Green's fonksiyonu ve FWI yöntemleri bu bölümde ele alınmıştır.

Dördüncü bölüm, araştırmanın materyal ve yöntem kısmını içermektedir. Bu bölümde, toprak özellikleri, kullanılan cihazlar (LiteVNA ve log-periyodik anten) ve araştırma sürecindeki adımlar detaylandırılmıştır. Ayrıca, ileri modelleme, veri toplama ve işleme adımları ile birlikte, kullanılan kalibrasyon prosedürleri ve veri tersine çevirme yöntemleri de açıklanmıştır.

Beşinci bölüm, elde edilen bulguların sunulması ve tartışılmasını içermektedir. Bu bölümde, toprak nem haritalama sonuçları,  $S_{11}$  verisi ile yapılan nem analizi ve derin öğrenme yöntemlerinin sonuçları yer almaktadır. Ayrıca, elde edilen veriler tartışılarak, farklı yöntemler arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır.

Altıncı ve son bölümde, araştırmanın sonuçları ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Bu bölümde, araştırmanın bulguları özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yirmi yılda, toprak nemini ölçmek amacıyla çok çeşitli algılama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak yakın alan (proksimal) ve uzaktan algılama (remote sensing) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Yakın alan yöntemleri kendi içinde invaziv (girişimsel, delici) ve non-invaziv (girişimsel olmayan) olarak sınıflandırılır. TDR (Zaman Domeni Yansıma) ölçümü, FDR (Frekans Domeni Yansıma) ölçümü ve ısı darbesi problemleri gibi invaziv sensörler, doğrudan toprakla temas gerektirir; lokal, yüksek çözünürlüklü veriler sağlarlar ancak sık kalibrasyon, iş gücü ve kurulum zorlukları barındırır (Topp ve ark., 1980; Hardie, 2020). Elektromanyetik indüksiyon (EMI), RFID tabanlı sistemler ve yer seviyesinde çalışan jeoradar (YNR) gibi non-invaziv yöntemler daha az müdahaleci olup daha geniş alanları kapsayabilirler; ancak bu yöntemler genellikle derinlik çözünürlüğü ve kalibrasyon karmaşıklığı açısından sınırlamalara sahip olsa da son dönemdeki özellikle YNR alanındaki gelişmelerle bu sorunlarda aşılmış bulunmaktadır (Lambot ve ark., 2006).

Buna karşılık, kozmik ışın nötron sensörleri (CRNS), uydu mikrodalga radyometreleri ve insansız hava aracı (İHA) tabanlı sensörler gibi uzaktan algılama teknikleri, geniş alanlı izleme kabiliyeti sunar. Ancak bu sistemler, nemli topraklarda sınırlı nüfuz derinliği, düşük dikey çözünürlük ve kaba mekânsal/zamansal ölçüm aralıkları gibi zorluklarla karşılaşır. Özellikle CRNS sistemleri, yerden yalnızca 1–2 metre yükseklikte konumlandırılırsa da, yer tabanlı uzaktan algılama cihazları olarak çalışır ve yaklaşık 150–600 metrelik yarıçapta, 15–70 cm'lik bir derinlik boyunca ortalama nem koşullarını entegre ederler (Desilets ve ark., 2010).

RFID yöntemi (Radyo Frekansı ile Tanımlama), orta düzeyde güvenilirlikte ölçümler sunmasına rağmen yalnızca toprak yüzeyine ilişkin bilgi sağlar (Pichorim vd., 2018). Diğer bir yöntem olan GPS-IR (Global Positioning System Interferometric Reflectometry) ve GNSS-IR (Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry), geniş alanları tarama avantajına sahipken yalnızca yüzeysel veri elde edebilmektedir (Koch vd., 2016). Yeni prototip aşamasında olan bu yöntemler, sinyal işleme teknikleri kullanılarak veri sunmaktadır (Chang vd., 2019).

Topraktan bağımsız bir başka yöntem EMI (Electromagnetic Interference) olup, bu yöntem orta dereceli güvenilirlikte veriler sunmakta ve makine öğrenimi tabanlı analiz yöntemleri ile çalışmaktadır. Ancak, bu yöntem yalnızca küçük alanların analizinde etkilidir (Calamita vd., 2015; Martini vd., 2017). NIR (Yakın Kızılötesi Yansıtma) ve

Yakın Görünür Kızılötesi Spektroskopu (Vis–NIRS) gibi teknikler de yüzeysel ölçümler için etkili ancak oldukça maliyetli yöntemlerdir (Liang vd., 2012; Rodionov vd., t.y.; Yin vd., t.y.).

Uydu verileri ile toprak nemi tahmini ise derin öğrenme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer yöntemdir. Ancak, bu yöntem yüzeysel nem verisi vermekle beraber çiftçiler tarafından doğrudan uygulanabilir bir sürdürülebilir çözüm sunmamaktadır (Shao vd., 2019; Bhogapurapu vd., 2022; Özerdem & Acar, 2017). Mikrodalga yöntemi ise, düşük maliyetli ve çevreye zarar verme riski en az olan yöntem olarak kabul edilmektedir. Su parçacıklarının elektromanyetik dalgalar için güçlü bir zayıflatıcı özelliğe sahip olması prensibine dayanan bu yöntem, nem ölçümlerinde kullanılmaktadır (Şeker, 2006).

Tüm bu teknolojik çeşitliliğe rağmen, tarımda bu sensörlerin benimsenme oranı dünya genelinde genellikle %20'nin altındadır; Türkiye gibi ülkelerde ise bu oran daha da düşüktür. Bunun başlıca nedenleri; sensör maliyetleri, bakım zorlukları, toprak tipine özgü kalibrasyon ihtiyaçları, sınırlı alan temsili (mekânsal temsil eksikliği) ve veri yorumlama güçlükleridir (O'Shaughnessy ve ark., 2015; Hardie, 2020). Bu sorunlar, özellikle toprak yapısının heterojen olduğu büyük tarım alanlarında daha da belirgin hale gelir. Güneydoğu ve İç Anadolu gibi Türkiye'nin çölleşmeye en yatkın bölgelerinde yaygın olan bu çeşitlilik, geleneksel noktasal sensörlerin toprak nemi dinamiklerini tam anlamıyla yakalayamamasına neden olur (Kıçık, 2023). Kablosuz olarak toprağa bağlı sensörler kullanılarak bugüne dek çok sayıda toprak nemi ölçümü yapılmıştır. Ancak, birden fazla "düğüm" (node) veya uç birim sensör kullanılması, ağın sürdürülebilirliği açısından bazı dezavantajlara neden olmaktadır (Koyuncu vd., 2021). Genel olarak toprak nem haritalama sensör ve yöntemlerinin genel karşılaştırması ve Türkiye tarımı için uygunluk analizini sunan veriler Çizelge 2.1. de verilmiştir. Bu çizelge, yaygın olarak kullanılan ve gelişmekte olan toprak nemi izleme teknolojilerinin karşılaştırmalı bir özetini sunmakta olup; yöntemler yakın alan invaziv, yakın alan non-invaziv ve uzaktan algılama kategorileri altında gruplandırılmıştır. Her bir yöntem; operasyonel derinlik, ölçüm doğruluğu, maliyet, kalibrasyon gereksinimi ve Türkiye tarımı bağlamındaki uygulanabilirlik kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Kaynaklar arasında Hardie (2020), Topp ve ark. (1980), O'Shaughnessy ve ark. (2015), Desilets ve ark. (2010) ile DSİ ve TAGEM'e ait bölgesel bulgular yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Toprak Nem Ölçü Yöntemleri Karşılaştırma Çizelgesi

Sensör Teknolojisi	Ölçüm Derinliği	Ölçüm Doğruluğu	Görelî Maliyet	Kalibrasyon Gereksinimi	Kurulum Tipi	Kullanılan Yöntemler	Türkiye için Uygunluk
<b>TDR (Zaman Domeni Yansımaya)</b>	5–30 cm	Yüksek	Orta–Yüksek	Yüksek	Girişimsel / Yerleştirilm iş	Dalga biçimi analizi, yansımaya zamanı	Araştırma arazileri için iyi
<b>FDR (Frekans Domeni Yansımaya)</b>	5–30 cm	Orta	Düşük–Orta	Yüksek	Girişimsel / Yerleştirilm iş	Kapasitans tabanlı frekans tepkisi	Uygun ancak toprak bağımlı
<b>Isı Darbe Probu</b>	0–20 cm	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük	Girişimsel / Yerleştirilm iş	Isıl iletkenlik / yayılım	Kontrollü alanlarda en iyi
<b>EMI (Elektromanyetik İndüksiyon)</b>	0–150 cm	Orta	Orta	Orta–Yüksek	Girişimsel Olmayan / Yerde	Görünür iletkenlik haritalama	Tınlı / tuzlu bölgelerde haritalama için iyi
<b>RFID Tabanlı Sensörler</b>	0–10 cm	Düşük–Orta	Düşük	Yüksek	Girişimsel Olmayan / Yerde	Pasif etiketler üzerinden dielektrik rezonans	Sera kullanımı için en uygun
<b>YNR</b>	100 cm'ye kadar	Yüksek (RMSE < 0.003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Yüksek	Düşük–Orta (Lambot sonrası)	Girişimsel Olmayan / Yerde veya Monteli	FWI, Erken Varış Zamanı, CMP	Kuru tınlı topraklarda güçlü, kil/tuzlu topraklarda zayıf
<b>AHFO (Aktif Isıtılmalî Fiber Optikler)</b>	10–100 cm	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Orta	Girişimsel / Gömülü Kablo	DTS + aktif ısıtma, sıcaklık bozulma eğrileri	Yüksek değerli ürünler, bahçeler için ideal
<b>CRNS (Kozmik Işın Nötron Algılama)</b>	15–70 cm	Orta–Yüksek	Yüksek	Orta–Yüksek	Girişimsel Olmayan / Sabit İstasyon	Hızlı nötron akısı sönümlenme modelleri	Büyük kurak alanlar için uygun (ör. Anadolu)
<b>Uydu Mikrodalga (ör. SMAP)</b>	~5 cm	Orta	Düşük	Düşük	Uzaktan / Uydu Tabanlı	Parlaklık sıcaklığı modelleri (ör. tau-omega)	Ulusal düzeyde kuraklık izleme
<b>İHA Optik/Termal</b>	~5–10 cm	Orta	Orta	Orta	Uzaktan / İHA Monteli	NDVI, termal indeksler, RGB-VI	Parsel ölçüğünde esnek, İHA ile entegre edilebilir
<b>GNSS Yansımaya (GPS-IR)</b>	7 cm'ye kadar	Orta	Düşük	Düşük	Uzaktan / GNSS Alıcılı	Çok yönlü sinyal girişi analizi	Geniş araziler için uygun, düşük maliyetli

Çizelgeye göre, TDR ve FDR, yüksek doğruluğa sahip klasik invaziv yöntemler olarak önemini korumakla birlikte, mekânsal temsil açısından sınırlılıklar göstermektedir. YNR ve EMI gibi non-invaziv seçenekler, özellikle İç Anadolu gibi büyük veya heterojen tarlalarda giderek daha fazla tercih edilebilir. YNR'nin son yıllardaki kalibrasyon geliştirmeleri (Lambot ve ark., 2006), saha uygulamalarındaki başarısını artırmıştır. Teknik olarak yer tabanlı çalışan CRNS sistemleri, geniş entegrasyon alanı nedeniyle uzaktan algılama kategorisinde değerlendirilmektedir. Uydu ve İHA tabanlı sistemler, geniş alanlı izlemelerde değerli bilgiler sunsa da; çözünürlük ve bulut/hava koşullarına bağımlılık nedeniyle bazı kısıtlamalar barındırır. GNSS yansıma (GNSS-R) ve RFID tabanlı sistemler gibi daha yeni teknolojiler, Türkiye'nin topografik çeşitliliği yüksek alanlarında düşük maliyetli genişlemeye yönelik umut vaat etmektedir

Bu yöntemlerin yanı sıra, toprak nem ölçümlerinde son yıllarda özellikle hava tabanlı (toprakta bağımsız) uygulamalarda YNR etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu proksimal başlığı altında değerlendirilen TDR ile çalışmamızın odak noktası olan YNR yöntemi, bir sonraki başlıklarda detaylı bir literatür taraması ile incelenmiştir.

## 2.1. Zaman Donemi Yansıma Yöntemi (TDR)

TDR, toprak nemi algılamada en yerleşik ve bilimsel olarak en çok doğrulanmış yöntemlerden biridir. Bu yöntem ilk olarak 1980 yılında Topp ve çalışma arkadaşları tarafından tanıtılmıştır (Topp et al., 1980). Yüksek frekanslı bir elektromanyetik darbe, toprağa yerleştirilen metalik dalga kılavuzları (genellikle paslanmaz çelik çubuklar) boyunca iletilir. Darbe, bu çubuklar boyunca ilerlerken hava-toprak veya kuru-ıslak gibi malzeme sınırlarında empedans değişimleri nedeniyle kısmi yansımalar oluşturur. Darbenin gidiş-geliş süresi ölçülerek ve elektromanyetik teoriye dayalı hesaplamalarla toprağın görünür dielektrik sürekliliği ( $K_a$ ) tahmin edilir.

Toprak içerisindeki dielektrik davranış büyük ölçüde su içeriği tarafından belirlenmektedir; çünkü suyun bağıl dielektrik sabiti ( $\sim 80$ ) oldukça yüksektir. Bu nedenle,  $K_a$  değeri hacimsel su içeriğinin dolaylı ancak güvenilir bir göstergesi olarak kullanılabilir. Bu ilişki çoğunlukla klasik Topp denklemi ile ifade edilir

$$K_a = ((c \times t) / (2 \times L))^2 \quad (2.1)$$

Burada  $K_a$  görünür dielektrik sabitini,  $c$  ışık hızını ( $3 \times 10^8$  m/s),  $t$  darbenin gidiş-geliş süresini ve  $L$  çubuk uzunluğunu ifade eder.

TDR sistemleri temel olarak bir darbe üretici, dalga formu analizörü ve veri kaydediciden oluşur. Yöntemin fiziksel modelinin sadeliği, çevresel koşullardaki sağlamlığı ve sürekli veri kaydı imkânı, TDR'yi hem deneysel hem de operasyonel alanlarda bir referans yöntem hâline getirmiştir.

Son yıllarda TDR teknolojisinde dikkat çekici ilerlemeler yaşanmıştır. Öncelikle, çok derinlikli problemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. SoilVUE™10 gibi modern sistemler, farklı toprak derinliklerinden eşzamanlı nem verisi toplayarak dikey profil çözünürlüğünü önemli ölçüde artırmaktadır (Siosemarde & Siosemardeh, 2014). Bu sayede toprak neminin yüzey altındaki dağılımı daha ayrıntılı biçimde izlenebilmektedir. Buna ek olarak, TDR sistemleri için geliştirilen üç parametrelilik kalibrasyon modelleri, klasik kalibrasyon yaklaşımlarına göre daha az parametreyle çalışarak benzer veya daha yüksek doğruluk seviyeleri sunmaktadır (Yu et al., 1997). Bu gelişme, sahada kalibrasyon süreçlerini kolaylaştırmakta ve farklı toprak tiplerine uyumu artırmaktadır. TDR verilerinin frekans-domain analizlerine dayalı olarak değerlendirilmesi yönünde kaydedilen ilerlemeler, özellikle kil oranı yüksek topraklarda ölçüm doğruluğunu iyileştirmektedir. Frekans-temelli modelleme teknikleri, geleneksel zaman-dalga yorumlarının ötesine geçerek, sinyalin yayılım karakteristiklerini daha ayrıntılı şekilde ele almaktadır (Savi et al., 2011).

Bu gelişmeler, TDR yönteminin hem araştırma hem de uygulamalı tarım alanında daha esnek, güvenilir ve hassas hale gelmesini sağlamaktadır. Tüm bu avantajlarına karşın, TDR sistemleri çeşitli saha koşullarına duyarlıdır. Çubuklar etrafındaki hava boşlukları, ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip (örneğin tuzlu) topraklarda sinyal bozulmaları meydana gelebilir ve dielektrik sabitinin yorumlanmasını zorlaştırabilir. Ayrıca, özellikle kil bakımından zengin veya organik madde içeriği yüksek topraklarda saha bazlı kalibrasyonlar doğruluğu artırmak için kritik önemdedir.

Türkiye'de TDR teknolojisi özellikle Ege ve Marmara Bölgeleri'nde yer alan tınlı topraklarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak Konya Ovası gibi Vertisol türü kilce zengin topraklarda, hacim değişimlerine bağlı şişme ve çatlama dinamikleri sensör performansını olumsuz etkilemektedir. TAGEM istasyonlarında ve akademik araştırma alanlarında TDR sistemleri kullanılsa da, yüksek maliyet ve bakım ihtiyaçları nedeniyle küçük ölçekli çiftçiler arasında yaygınlığı sınırlıdır.

## 2.2. Yere Nüfuz Eden Radar Yöntemi

YNR, tarımsal uygulamalarda toprak dokusu, tuzluluk oranı ve nem içeriği gibi çeşitli ölçümler yapmaya olanak tanıyan etkili bir jeofizik tekniktir (Al & C. Müller, 2000; Benedetto & Tosti, 2013). Ölçüm hedeflerine göre farklı frekanslarda elektromanyetik dalga boyları kullanılarak uygun yöntemler belirlenmektedir. Genel olarak on-ground ve off-ground olarak iki temel başlık altında bu yöntem incelenir.

Toprak altı özelliklerin haritalanması amacıyla geliştirilen Yüzeysel Radar Sistemleri, elektromanyetik dalgaların farklı dielektrik özelliklere sahip toprak katmanlarında yansıma özelliklerini kullanarak yapıların ve nem dağılımının üç boyutlu görüntülenmesine olanak tanır. YNR sistemleri, özellikle toprak neminin yatay ve dikey dağılımını çözümlmek, sulama yönetimini optimize etmek ve heterojen toprak yapılarındaki nem varyasyonlarını izlemek açısından tarımsal uygulamalarda değerli bir araç haline gelmiştir (Riese & Keller, 2018; Aziz et al., 2023).

Temel olarak bir YNR sistemi; yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları toprak yüzeyine ileten bir verici, geri yansıyan sinyalleri toplayan bir alıcı anten ve bu sinyalleri işleyen bir analiz biriminden oluşur. Dalga toprak içerisinde yayıldıkça nem oranı, yoğunluk, dokusal geçişler gibi faktörlere bağlı olarak yansımalar meydana gelir. Bu yansımaların süresi ve genliği, ilgili bölgenin dielektrik özellikleri ile ilişkilidir. Nem içeriği yüksek alanlar, genellikle düşük frekanslı dalgaların daha fazla sönümlenmesine neden olurken, bu davranış YNR sistemleri ile nemin hem niceliksel hem niteliksel olarak analiz edilmesini mümkün kılar. YNR sistemleri kurulum ve veri toplama biçimlerine göre iki ana kategoriye ayrılabilir. Yüzeysel yerleştirilen sistemler (on-ground) yani cihazın toprak yüzeyine doğrudan temas ettiği veya yüzeye çok yakın bir seviyede konumlandırıldığı sistemlerdir. Yerden yükseltilmiş sistemler (off-ground) ise YNR anteninin toprak yüzeyinden belirli bir yükseklikte (örneğin taşınabilir platformlar, traktörler veya dronlar üzerinde) çalıştığı sistemlerdir.

Bu iki yaklaşım, uygulama ölçeği, veri kalitesi, sinyal-gürültü oranı, saha koşullarına uygunluk ve kullanım maliyetleri açısından farklı avantaj ve dezavantajlar sunar. Aşağıdaki tablo, bu iki sistem yaklaşımını temel parametreler açısından özetlemektedir .

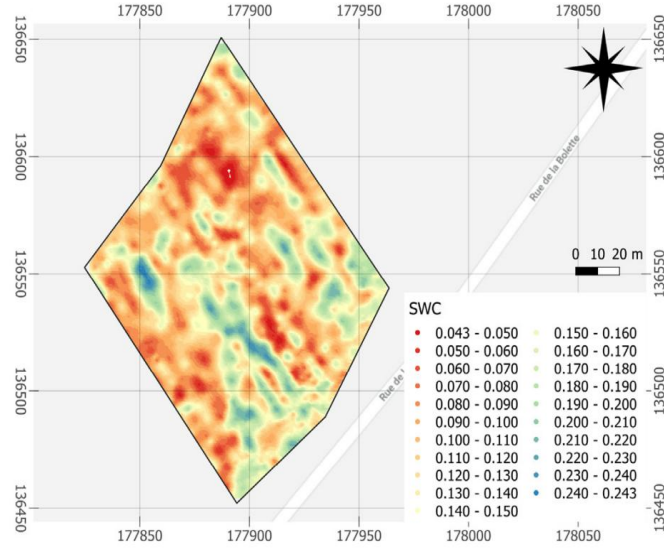
Çizelge 2.2. On-Ground Off-Ground Karşılaştırma Çizelgesi

Kriter	Yüze Yerleştirilen GPR (on-ground)	Yerden Yükseltilmiş GPR (off-ground)
Derinlik Çözünürlüğü	Yüksek	Orta / Düşük (yüksekliğe bağlı)
Tarama Alanı	Kısıtlı / Yavaş	Geniş / Hızlı
Enerji Tüketimi	Düşük – Manuel sistemlerde	Yüksek – Drone ve taşıyıcı gerektirir
Uygulama Ortamı	Küçük parseller, sera, hassas tarım	Açık alan, geniş parseller
Temassızlık	Hayır	Evet
Zemin Etkileşimi	Doğrudan	Dolaylı
Veri Kalitesi	Gürültü düşük, daha güvenilir	Gürültü yüksek, ön işleme gerekebilir

Yüze yerleştirilen sistemler (on-ground), özellikle yüze yakın kök zonlarının hassas ölçümlerini yapmak ve küçük ölçekli tarımsal alanlarda detaylı profil analizleri gerçekleştirmek için tercih edilirken; yerden yükseltilmiş sistemler (off-ground), geniş alanların kısa sürede taranmasını sağlayarak uzaktan algılamaya dayalı karar destek sistemleri için büyük ölçekli veri sağlar (Aziz et al., 2023). Ancak her iki sistemin de optimum kullanım koşulları, toprak tipi, nem düzeyi, bitki örtüsü, erişim olanakları ve ekonomik kaynaklara bağlı olarak değerlendirilmelidir.

Toprak nemi ölçümünde ise çift yönlü dalga seyahat hızı analizi, ortak orta nokta analizi (CMP), yansıma katsayısı analizi ve erken-zaman (early-time) sinyal analizleri gibi çeşitli yöntemlerle nem tespiti gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra, FWI yöntemi ve farklı dalga formu ters çözüm (waveform inversion) modellemeleri de toprak nemi haritalandırmasında başarıyla kullanılmaktadır.

FWI metodunun özellikle hassas çözünürlük gerektiren ve katmanlı yapılar gibi karmaşık yer altı hedeflerinin modellenmesinde öne çıktığı bilinmektedir. FWI metodu YNR ile entegre edildiğinde, FWI tekniği, toprağın derinlik profilleri boyunca daha ayrıntılı nem dağılımlarını elde etmeyi mümkün kılar ve tarım uygulamaları için hassas su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlar. Şekil 2.1 deki görsel, FWI metoduyla drona monteli bir YNR ile gerçekleştirilen bir çalışmadan elde edilen toprak nem haritasını göstermektedir.



**Şekil 2.1.** YNR ile Elde Edilen Toprak Nem Haritası(Wu, Rodriguez, Zajc, Jacquemin, Clément, De Coster, vd., 2019)

### 2.2.1. Zemin Temaslı (on-Ground) ve Zeminden Yüksekçe (off-Ground) Ölçüm

YNR sistemlerinin toprak neminin belirlenmesindeki etkinliği, kullanılan anten konfigürasyonuna bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, YNR sistemleri genel olarak on-ground (zemine temaslı) ve off-ground (yerden yükseltilmiş) olmak üzere iki farklı konumlandırma biçimiyle kullanılmaktadır.

Zemin Temaslı (On-ground) YNR uygulamalarında, anten doğrudan toprak yüzeyine temas ettirilerek çalıştırılır. Bu sayede, özellikle yüzey dalgalarının (ground wave) yayılımı üzerinden doğrudan nem hesaplamaları yapılabilir (Du & Rummel, 1994; Huisman et al., 2001). Ancak bu yöntemde anten-toprak teması zorunlu olduğu için tarla koşullarında uygulaması zordur; ayrıca antenin toprağa her temasında ölçüm tekrarı yapılması gerektiğinden zaman alıcıdır (Lambot et al., 2004a). Ek olarak, yüzeye yakın tabakalanmalar olduğunda, yönlendirilmiş dalgalarla yüzey dalgaları birbirine karışarak sinyal ayrıştırmasını güçleştirebilir (Huisman et al., 2003).

Buna karşılık, off-ground YNR konfigürasyonlarında anten, yer yüzeyinden belirli bir mesafede (genellikle 20–50 cm) tutulur ve sinyalin toprak yüzeyinden yansımaları esas alınır. Bu yöntem, hareketli platformlara (örneğin traktör ya da drone) entegre edilebildiği için geniş alanların hızlı ve zarar vermeden taranmasına olanak tanır (Lambot et al., 2006). Bununla birlikte, off-ground YNR uygulamalarında antenin yüksekliği, yönlülüğü ve toprakla olan elektromanyetik etkileşimi, yansıma sinyallerinin

genliği ve fazı üzerinde ciddi etkiler oluşturur. Bu durum, özellikle yzey dielektrik sabitinin tahmininde hatalara yol açabilir. Ancak bu sorun, FWI yntemleriyle önemli lde giderilebilmektedir (Lambot et al., 2004b).

Lambot ve arkadaşları tarafından geliştirilen FWI tabanlı model, frekans alanında çalışan bir stepped-frequency continuous-wave (SFCW) radar ile monostatik horn antenin birleşiminden oluşur. Bu yapı, radar-anteni ile toprak arasındaki çoklu yansımaları modelde pozitif geri besleme yoluyla dikkate alarak daha gerçekçi bir sinyal tahmini sağlar. Modelde ayrıca, antenin frekansa bağlı karakteristik katsayıları ve Green's fonksiyonları aracılığıyla elektromanyetik yayılım u boyutlu olarak tanımlanır (Lambot et al., 2004b; Lambot & Andr, 2014).

Laboratuvar ve açık saha koşullarında yapılan çalışmalarda, zeminden yzekte (off-ground) YNR sistemlerinin yzeyssel toprak neminin belirlenmesinde yzsek doğruluk sağladığı gsterilmiştir. Özellikle ince dielektrik tabakaların varlığında klasik refleksiyon katsayısı yaklaşımlarının hataya açık olduğu, ancak bu katmanların modele dahil edilmesiyle hataların önemli lde azaldığı saptanmıştır (Minet et al., 2012). Ardekani et al. (2015) tarafından geliştirilen katmanlı bitki örtüsü modeli de, tarımsal alanlarda radar sinyaline etki eden bitki kaynaklı saçılmaları hesaba katarak YNR verisinden nem tahminini daha kararlı hle getirmiştir.

Ayrıca, Minet ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan bir doğrulama çalışmasında, FWI kullanılarak elde edilen yzey nem haritalarının, çekirdek örnekleme yntemiyle (gravimetrik) karşılaştırıldığında oldukça dşuk sapma değerleriyle (RMSE < 0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) yzsek gvenilirlik sağladığı belirtilmiştir. Sinyal modellemesiyle birlikte geliştirilen anten-toprak etkileşim modelleri, özellikle mobil sistemlerle alınan YNR verilerinin doğruluğunu artırmış ve geniş alanlarda hızlı lm olanağı sunmuştur (Lambot et al., 2009).

Sonuç olarak, on-ground sistemler daha dşuk frekanslarda sınırlı derinlik için doğrudan temas yoluyla yzsek doğruluk sağlarken, off-ground sistemler geniş alanların hızlı ve hasarsız taranması açısından avantajlıdır. Ancak off-ground sistemlerde lm doğruluğunun korunabilmesi için gelişmiş modelleme ve ters özümleme stratejileri gereklidir. Bu nedenle, özellikle tarımsal uygulamalarda off-ground YNR sistemleri, FWI ile birlikte kullanıldığında toprak neminin dağılımının yzsek znrlükte ve doğrulukla haritalanmasını mümkün kılmaktadır.

### 2.3. YNR Yerine VNA Kullanımı

VNA, genellikle frekans yanıtlarını ölçen ve S-parametreleri kullanarak dielektrik özellikleri analiz eden bir araçtır. bir anten veya bileşenin yansıma özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılır (Wu et al., 2019). VNA'nın toprak analizindeki kullanımı, toprak nemi gibi dielektrik değişkenlerin hassas bir şekilde ölçülmesi için önemli avantajlar sunmaktadır. VNA kullanılarak toprak nemi ve dielektrik sabiti arasında önemli bir ilişki vardır. Özellikle, toprak neminin haritalanmasında VNA teknolojisi, düşük maliyet ve yüksek doğruluk sağlar, bu da tarım ve çevresel izleme alanlarında önemli bir avantaj sağlar (Minet et al. (2011). VNA'nın  $S_{11}$  parametresi, özellikle toprak yüzeyindeki nem değişimlerini tespit etmek için yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, YNR'ye kıyasla daha taşınabilir ve düşük maliyetli olma avantajına sahiptir.

VNA'nın tarama aralığı ve hassasiyet düzeyleri, çeşitli araştırmalarda çok sayıda uygulama için optimize edilmiştir. Toprak nem haritalaması (Soil moisture mapping), özellikle toprak neminin belirlenmesinde önemli bir alan olarak ortaya çıkmıştır (Lambot et al., 2009). Toprak nemi ile ilgili çalışmalar, toprak dielektrik özelliklerinin frekansla nasıl değiştiğini anlamaya yönelik çeşitli yöntemleri içermektedir. Bu amaçla,  $S_{11}$  parametreleri, toprak neminin doğru bir şekilde haritalanmasında kullanılan önemli bir araçtır. Bu nedenle,  $S_{11}$  değeri ve toprak nem haritaları, sürdürülebilir tarım uygulamalarını destekleyebilir ve su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır.

Lambot ve arkadaşları (2009), VNA kullanarak toprak neminin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada,  $S_{11}$  verilerini analiz ederek toprak nemi ile ilişkili dielektrik değişikliklerini ölçmüşlerdir. Bu araştırmalar, VNA'nın toprak nemi analizinde YNR (Ground Penetrating Radar) gibi diğer yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli ve taşınabilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir. VNA'nın, özellikle küçük ölçekli alanlarda kullanım kolaylığı ve düşük maliyetli olması, bu teknolojinin avantajlarını arttırmaktadır (Minet et al., 2012, Lambot et al., 2009)

Sebastian Lambot'un çalışmaları, VNA'nın toprak analizi üzerine olan etkilerini derinlemesine incelemiş ve özellikle soil moisture mapping konusundaki potansiyelini vurgulamıştır. VNA, toprak üzerindeki nem farklarını hassas bir şekilde ölçebilir ve bu ölçümler, daha doğru nem haritalarının oluşturulmasını sağlar (Lambot et al., 2009).

Toplamda,  $S_{11}$  parametreleri, toprak gibi homojen olmayan ortamların ölçümünde oldukça faydalıdır ve dielektrik sabitlerin frekansla değişimlerini analiz etmek için etkili bir araçtır. Bu teknolojinin kullanımı, özellikle sulama yönetimi, tarımsal su kullanımı ve çevresel izleme gibi uygulamalarda büyük önem taşımaktadır.



### 3. KURAMSAL ÇERÇEVE

#### 3.1. Yere Nüfuz Eden Radar

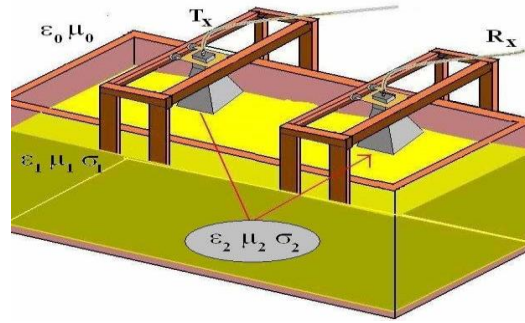
Radar terimi, "Radio Detection And Ranging" ifadesinin kısaltmasıdır. Radar sistemleri, mevcut bir radar ile hedef nesnelerin uzaklığını, yüksekliğini, hızını ve yönünü belirleme yeteneğine sahiptir. Bir radarın temel çalışma prensibi, elektromanyetik dalgalar yayarak bu dalgaların hedeften geri yansıyan sinyallerini toplayıp analiz etmeye dayanır. Radar, esasen iki ana bileşenden oluşur: verici ve alıcı. Verici kısım, elektromanyetik dalgaları yayarken; alıcı kısım, geri yansıyan bu dalgaları toplayarak sinyalleri inceler. Geri alınan dalgaların seyahat süresi üzerinden yapılan hesaplamalar, hedefin uzaklığını belirlemek için kullanılır (Ferrara vd., 2017). Radar sistemleri, jeoloji, meteoroloji, savunma ve daha birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Coşkun, 2015).

Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) ise, genellikle bir jeofizik yöntem olarak tanımlanmakta ve yer altındaki hedeflerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem, yüksek frekanslı ve yüksek ayırım gücüne sahip elektromanyetik dalgaları kullanarak, yüzeye ait özelliklerin belirlenmesine olanak tanır. YNR, elektrik alan vektörü içeren bir verici anten aracılığıyla çok yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların yer içine gönderilmesi ve bu dalgaların ara yüzeylerden yansımalarının gözlemlenmesi ilkesine dayanır (Arslan, 2016).

YNR sisteminin uygulanmasında karşılaşılan en büyük zorluk, yayılan elektromanyetik dalgaların havadan toprağa geçişi sırasında, topraktan bir kısmının geri yansımalarıdır. Bu durum, insansız hava araçlarıyla kullanılan radar sistemleri için önemli bir engel teşkil etmektedir (Šipoš & Gleich, 2020). Elektromanyetik dalgaların bir ortamdan diğerine geçişi esnasında, ortamların dielektrik (elektriksel geçirgenlik) farklılıkları nedeniyle dalgaların bir kısmı geri yansır. Toprak yüzeyi ve hava arasındaki dielektrik farkı yüksek olduğundan, yer altındaki hedeflerden alınan yansıma oldukça düşüktür. YNR sisteminde, bazı varsayımlar yapılarak bu sorun aşılabilmektedir (Yiğit, 2007).

Bu bağlamda, dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ), manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ve ortamın iletkenliği ( $\sigma$ ) gibi parametreler önem taşımaktadır. Yansıma dalgalarının enerji görüntüleri, farklı şiddetlerle algılandığından, YNR görüntülerinin elde edilmesi mümkün hale gelmektedir.

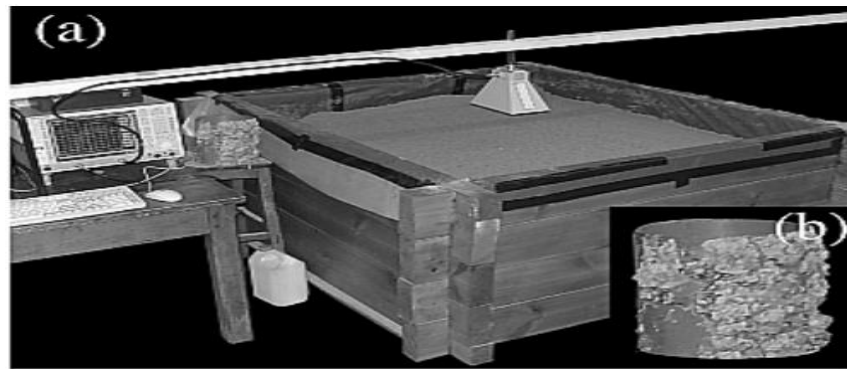
Bu süreçte yer alan verici anten (Transmitting) ve alıcı anten (Receiving) ile ortam özellikleri temsili olarak Şekil 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Temsili Tarama Geometrisi (Yiğit, 2007)

### 3.1.1. Yaygın Kullanılan Antenler

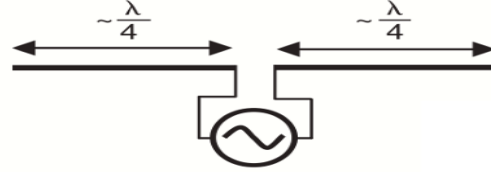
Hassas tarım uygulamalarında, toprak neminin doğru ve verimli bir şekilde haritalanması, ürün verimliliğini artırmak ve su kaynaklarını etkin kullanmak açısından büyük önem taşır. Bu amaçla, YNR sistemleri, toprağın altındaki nem dağılımını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Daniels, 2004). YNR sistemlerinin etkinliği, kullanılan antenlerin türüne ve özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu bölümde, toprak nem haritalamasında en sık tercih edilen üç anten tipi olan horn anten, dipol anten ve log-periyodik anten detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 3.2. Toprak Nem Haritalaması-Horn Antenna (Lambot,2006)

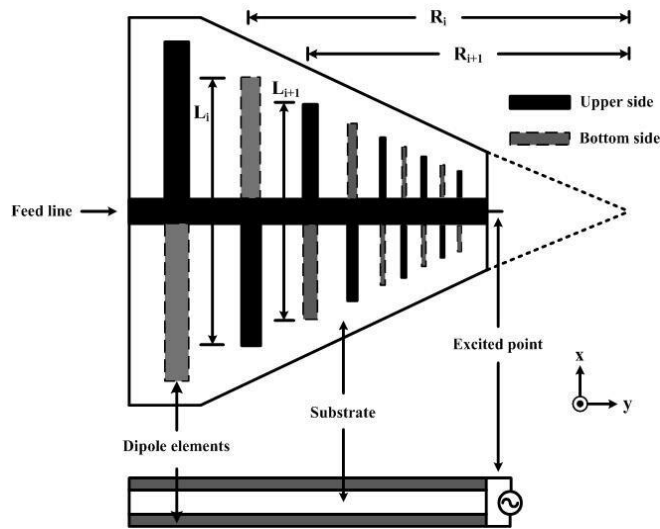
Horn antenler, yüksek kazanç ve yönlülük özellikleri sayesinde YNR uygulamalarında tercih edilen anten tiplerindedir. Geniş bant genişliği sunarak farklı frekans aralıklarında çalışabilen bu antenler, özellikle yüzeye yakın toprak nemi

ölçümlerinde etkin sonuçlar verir (Daniels, 2004). Şekil 3.2’de görüleceği üzere Horn antenlerin boyutları ve ağırlıkları, taşınabilirlik açısından bazı kısıtlamalar getirirse de, yüksek çözünürlüklü veriler elde etmek için idealdir. Örneğin, Wu ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, askıya alınmış horn anten kullanılarak yüzeye yakın toprak su içeriği dinamikleri başarıyla ölçülmüştür (Wu et al., 2022).



Şekil 3.3. Dipole Anten Konfigurasyonu (Farahana,2008)

Şekil 3.3 de görüleceği üzere Dipol antenler, basit yapıları ve geniş bant genişlikleri nedeniyle YNR sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Hafif ve kompakt yapıları sayesinde, özellikle insansız hava araçları (İHA) tabanlı YNR sistemlerinde avantaj sağlarlar. Toprak nem haritalamasında, dipol antenlerin kullanımı, yüzeyden belirli bir yükseklikte asılı kalarak sürekli ölçüm yapma olanağı sunar. Ancak, dipol antenlerin kazançları genellikle horn antenlere göre daha düşüktür, bu da derinlik penetrasyonunu sınırlayabilir (Annan, 2009). Wu ve diğerleri tarafından geliştirilen yeni bir İHA tabanlı YNR sistemi, toprak nemi haritalaması için hafif bir vektör analizörü ve hibrit horn-dipol anten kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir (Wu et al., 2019).



Şekil 3.4. PCB Log Periyodik Dipole Anten (Anitha et al., 2016)

Tasarım örneği Şekil 3.4 de yer alan Printed Log-periyodik antenler, geniş frekans aralığında çalışabilen ve frekans bağımsızlığı sağlayan antenlerdir. Bu özellikleri sayesinde, farklı derinliklerdeki toprak nemi ölçümlerinde esneklik sunarlar. Kompakt ve hafif yapılarıyla İHA tabanlı YNR sistemlerinde de kullanılmaktadırlar. Log-periyodik antenlerin tasarımı, sinyalin harmonik bileşenlerinin etkin bir şekilde alınmasına olanak tanıyarak, toprak içerisindeki nem dağılımının daha doğru modellenmesine katkıda bulunur. Burr ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, İHA tabanlı YNR sensörleri için hafif log-periyodik dipol antenlerin tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir (Burr et al., 2010)

### 3.2. Vektör Ağ Analizatör ve $S_{11}$

#### 3.2.1. Vektör Ağ Analizatör

Vektörlü Ağ Analizörü (VNA), elektromanyetik dalgaların iletimi, yansıması ve iletim özelliklerini ölçen bir test cihazıdır. Genellikle mikrodalga, RF (radyo frekansı) ve dijital sistemlerde kullanılır. VNA, bir bileşenin (örneğin bir anten, filtre, iletim hattı veya amplifikatör) elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla, bileşenden yansıyan ve iletilen sinyalleri analiz eder. Özellikle, bir cihazın s-parametrelerini (yansıma ve iletim özellikleri) ölçmek için yaygın olarak kullanılır (Pozar, 2012). Özetle temel amacı bir test bileşeninin frekansa bağlı davranışlarını sinyal göndererek doğru bir şekilde karakterize etmektir. Sinyal gönderimi; VNA den test edilen bileşene bir RF sinyali gönderilmesi ile olur. Bu sinyal, genellikle belirli bir frekans aralığında, VNA'nın ürettiği mikrodalga sinyalleri ile sağlanır (Pozar, 2012). Gönderilen sinyal, test edilen bileşenle etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda, sinyal ya yansır ya da iletilir. Yansıyan sinyal, cihazın  $S_{11}$  parametresi ile ölçülürken, iletilen sinyal  $S_{21}$  parametresi ile ölçülür. Bu veriler, bileşenin ne kadar verimli bir şekilde enerji ilettiğini ve yansıttığını gösterir (Garg et al., 2001).

VNA, bir ağın dört ana S parametresini ölçer:

$S_{11}$  : Giriş yansıma parametresi. Giriş portuna yansıyan güç oranını ifade eder.

$S_{21}$  : İletim parametresi. Giriş portundan çıkış portuna iletilen güç oranını belirtir.

$S_{12}$  : Geri iletim parametresi. Çıkış portundan giriş portuna iletilen gücü gösterir.

$S_{22}$  : Çıkış yansıma parametresi. Çıkış portuna yansıyan gücü ifade eder (Pozar, 2012).

VNA, sinyalin faz ve genlik bilgilerini ölçer ve bu verileri vektör olarak işler. Bu vektörler, test edilen bileşenin performansını daha ayrıntılı olarak anlamaya olanak tanır. Faz bilgisi, sinyalin zamanlaması ile ilgiliyken, genlik bilgisi ise sinyalin gücünü yansıtır (Garg et al., 2001). VNA, bu verileri genellikle grafiksel bir formatta sunar. Bu grafikler, bileşenin çalışma frekansı üzerindeki performansını, yansıma kayıplarını ve iletim özelliklerini incelemenizi sağlar (Sarkar, 2004).

### 3.2.2. $S_{11}$ Parametresi ve Dielektrik Permittivite Ölçümü

$S_{11}$  Parametresi, vektör ağ analizinde (VNA) yaygın olarak kullanılan bir yansıma katsayısıdır ve bir malzemenin elektromanyetik özelliklerini belirlemekte kritik bir rol oynar.  $S_{11}$ , bir cihazın portuna uygulanan elektromanyetik dalganın ne kadarının geri yansıdığını ifade eder ve "yönlü parametre" ya da "scattering parametresi" olarak bilinen S-parametrelerinden biridir. Bu parametre, malzemelerin dielektrik özelliklerinin belirlenmesinde anahtar veriler sağlar. Dielektrik permittivite ölçümünde,  $S_{11}$  parametresi, malzeme ile elektromanyetik dalgalar arasındaki etkileşimi değerlendirerek malzemenin dalgaları iletme veya zayıflatma kapasitesini ortaya koyar (Pozar, 2005).

$S_{11}$  Parametresini kullanarak dielektrik permittiviteyi belirlemek için, malzeme yüzeyine veya içine elektromanyetik bir sinyal gönderilir ve bu sinyalin geri yansıyan kısmı ölçülür. Yansıyan sinyalin faz ve genlik bilgileri, malzemenin dielektrik sabitinin yanı sıra iletkenlik özelliklerine de dair bilgi sağlar. Dielektrik permittivite  $\epsilon$  değeri, malzemenin elektromanyetik dalgalarla olan etkileşimi doğrultusunda belirlenir ve şu formülle ifade edilir:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.1)$$

Formül 1 de  $\epsilon'$ , malzemenin enerjiyi depolama kapasitesini gösterirken,  $\epsilon''$  enerjinin kaybedilme (veya absorbe edilme) oranını ifade eder.  $S_{11}$  verileri, permittivitenin her iki bileşenine dair bilgi sağlayabilir ve bu veriler, özellikle malzemenin nem içeriği ve yoğunluğunun permittiviteye etkisini analiz etmek için kullanılabilir (Nicolson & Ross, 1970).

### 3.2.2.1. Yansıma Katsayısı ve $S_{11}$ Arasındaki İlişki

$S_{11}$ , bir elektromanyetik dalganın bir malzemeye girdiğinde yüzeyinden geri yansıyan kısmının genliğini ve fazını ölçerek malzemenin yansıma özelliklerini analiz eder. Bu yansıma katsayısı, frekans, dalga boyu ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir ve malzemenin dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ile ilişkilidir.

Bir malzemenin yüzeyindeki yansıma katsayısı  $\Gamma$ , giriş empedansı  $Z_{in}$  ile serbest uzayın karakteristik empedansı ( $Z_0 \approx 377 \Omega$ ) kullanılarak şu formülle verilir:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3.2)$$

$S_{11}$  parametresi, bu yansıma katsayısını doğrudan ölçer, yani:

$$S_{11} = \Gamma \quad (3.3)$$

Bu ilişki, malzeme özelliklerine bağlı olarak  $Z_{in}$  ve dolayısıyla  $\Gamma$  değerinde değişiklikler yaratır, yansıma katsayısı üzerinden giriş empedansını ve dolayısıyla malzemenin bağıl dielektrik sabitini belirlemeye olanak sağlar. (Lambot & Slob, 2009; Minet et al., 2011).

### 3.2.2.2. Giriş Empedansı ve Dielektrik Sabiti İlişkisi

Giriş empedansı  $Z_{in}$  bir malzemenin elektromanyetik özelliklerini yansıtır ve bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$  ile ilişkilidir. Düzlem dalga varsayımı altında, giriş empedansı şu şekilde ifade edilir:

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

Formül 4 de  $\epsilon_r$  malzemenin bağıl (relative) dielektrik sabitidir. Bu formül, malzemenin giriş empedansının, serbest uzayın empedansı ( $Z_0$ ) ve bağıl dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) ile ilişkisini tanımlar. Ancak, Bu formül, homojen bir malzeme ve düzlem dalga varsayımı için geçerlidir (Wu et al., 2019). Malzemenin bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$ , elektromanyetik dalgaların malzeme içinde yayılma hızı ve yansıma özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir.

### 3.2.2.3. Yansıma Katsayısından Dielektrik Sabitin Çıkarılması

Ölçülen  $S_{11}$  (veya  $\Gamma$ ) verilerinden dielektrik sabiti  $\epsilon_r$  değerini bulmak için, önce  $Z_{in}$  hesaplanır;

$$Z_{in} = Z_0 \cdot \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \quad (3.5)$$

ardından şu denklem kullanılarak permitivite elde edilir:

$$\epsilon_r = \left(\frac{Z_{in}}{Z_0}\right)^2 = \left(\frac{Z_0(1-\Gamma)}{Z_0(1+\Gamma)}\right)^2 \quad (3.6)$$

Denklem 6 da ölçülen  $S_{11}$  değeri aracılığıyla malzemenin bağıl dielektrik sabiti hesaplanabilir. Bu formül, giriş empedansının doğrudan ölçülebildiği durumlar için geçerlidir ve NRW gibi daha kapsamlı yöntemlerle genişletilebilir.

### 3.2.3.4. Nicolson-Ross-Weir Yöntemi (Ekstra Hassasiyet İçin)

Daha karmaşık malzemelerde veya daha hassas sonuçlar için, hem  $S_{11}$  (yansıma) hem de  $S_{21}$  (iletime dayalı) parametrelerini kullanan Nicolson-Ross-Weir (NRW) yöntemi uygulanabilir. NRW yöntemi ile bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$  ve bağıl manyetik geçirgenlik  $\mu_r$  şu şekilde bulunur:

Dielektrik permitivite ( $\epsilon_r$ ) hesaplamasında, Nicolson-Ross-Weir (NRW) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  saçılma parametrelerinden yola çıkarak, malzemenin elektromanyetik özelliklerini belirlemek için güvenilir bir yaklaşım sunar (Nicolson & Ross, 1970; Weir, 1974). Bu yöntemi detaylandırırsak; malzeme yüzeyinden yansıyan dalganın genliğini ve fazını ifade eden yansıma katsayısı ( $\Gamma$ ),  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  saçılma parametreleri kullanılarak şu şekilde hesaplanır:

$$\Gamma = \frac{S_{11} + S_{21} - 1}{S_{11} + S_{21} + 1} \quad (3.7)$$

Bu denklem, malzeme ile dalga arasındaki elektromanyetik etkileşimi tanımlar.

Malzeme içindeki dalga yayılımını ve sönümünü tanımlayan kompleks dalga sayısı ( $k$ ), iletim katsayısı ( $S_{21}$ ) ve yansıma katsayısı ( $\Gamma$ ) kullanılarak hesaplanır:

$$k = -\frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{S_{21}} \cdot (1 - \Gamma^2) \right) \quad (3.8)$$

Burada  $d$ , malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

Malzemenin bağıl empedansı ( $Z_r$ ), yansıma katsayısı ( $\Gamma$ ) üzerinden hesaplanır:

$$Z_r = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (3.9)$$

Bağıl dielektrik permitivite  $\epsilon_r$  şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{Z_r} \cdot \frac{k}{k_0} \quad (3.10)$$

Burada;  $Z_r$ , malzemenin bağıl empedansını,  $k$  ise malzeme içindeki kompleks dalga sayısını ve  $k_0$  ise serbest uzayın dalga sayısı ve şu şekilde hesaplanır:

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.11)$$

Formül 3.11 de ise;  $f$ , frekans;  $c$ , ışık hızını ifade eder.

Bu yöntem,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametrelerinden yola çıkarak malzemenin elektromanyetik özelliklerini belirlemek için sistematik bir yaklaşım sağlar. Yöntem, hem laboratuvar ortamında hem de uygulamalı ölçümlerde malzemenin dielektrik permitivitesini ve geçirgenliğini hesaplamak için geniş bir uygulama alanına sahiptir.

### 3.2.3. Toprak Nem Haritası ve $S_{11}$ Verisi İlişkisi

$S_{11}$  değerinin toprak nemi ile ilişkisi, özellikle toprak nem haritalarının oluşturulmasında önemlidir.  $S_{11}$  değeri, YNR cihazları ile çeşitli derinliklerde ölçülerek, her bir nokta için toprak nem içeriği tahmin edilebilir. Bu veriler, bir toprak nem haritası oluşturulmasında kullanılır. Toprak nem haritası, farklı bölgelerdeki nem seviyelerini görsel olarak gösteren bir haritadır ve tarımda sulama yönetimi, sulama stratejilerinin optimizasyonu ve toprak neminin izlenmesi gibi birçok uygulamada kullanılır (Benedetto & Tosti, 2013).

$S_{11}$  verisinin toprak nem haritalarına dönüştürülmesi, tarımsal sulama yönetimi, toprak sağlığı izleme ve su kaynaklarının etkin kullanımı gibi uygulamalar için oldukça değerlidir. YNR cihazlarıyla elde edilen  $S_{11}$  verileri, çeşitli algoritmalar ve modelleme teknikleri kullanılarak spatial (mekansal) nem haritalarına dönüştürülebilir. Bu haritalar, farklı toprak tipleri ve iklim koşullarına göre sulama ihtiyacını optimize etmek için kullanılabilir (Topp, G. C., et al., 1980; Koch, M., et al., 2016). Bu süreç, FWI gibi gelişmiş modellerle daha hassas hale getirilebilir. FWI, YNR verilerinin tam dalga formunu kullanarak, toprak yapısının ve nem içeriğinin daha doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır (Wu, J., et al., 2019).

### 3.3. Full-waveform Inversion Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm (FWI)

Full Waveform Inversion yani Türkçe Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm yöntemi (FWI), 1980'lerin başlarında jeofizik alanında geliştirilmiş bir yöntemdir (Tarantola, 1984). Başlangıçta, deniz altı yapıları ve yer altı rezervuarlarının haritalanmasında kullanılmaya başlanmış olan bu yöntem, zamanla toprak nem ölçümleri gibi tarımsal uygulamalara adapte edilmiştir. FWI'nın gelişimi, yüksek çözünürlükte yer altı modellerinin oluşturulabilmesi için büyük miktarda veriyi işleyebilen güçlü algoritmaların gelişmesine dayanır. 2000'li yıllarda, özellikle YNR ile entegrasyonunun artmasıyla, FWI tarımsal su yönetimi uygulamalarında önemli bir araç haline gelmiştir. Bu yöntem, toprak nemini ve yapısını daha hassas bir şekilde modellemek için kullanılır ve büyük alanlarda verimli sulama stratejilerinin planlanmasına katkı sağlar (Wu et al., 2019).

FWI, jeofizik alanında kullanılan ve bir sistemin yer altı yapısını detaylı bir biçimde modellemek için tam dalga formunu kullanan güçlü bir yöntemdir. FWI, belirli bir alanda toplanan ölçüm verilerinin (örneğin, elektromanyetik dalgalar) teorik dalga formlarıyla karşılaştırılması yoluyla ortam parametrelerini iteratif olarak günceller. Bu süreç, özellikle karmaşık yer altı yapılarının daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanır (Tarantola, 1984).

FWI'nin temel prensibi, elde edilen ölçümlerin dalga formlarını kullanarak hedef alanın fiziksel özelliklerini belirlemektir. Bu bağlamda, başlangıç modelinden yola çıkarak, ölçümler ile model arasındaki farklılıklar minimize edilmeye çalışılır. Bu minimizasyon işlemi, genellikle optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilir. Böylece, FWI yöntemi, jeofiziksel verilerin tam dalga formunu dikkate alarak daha hassas ve detaylı modeller üretir.

Bu yöntem, tarım alanında özellikle yer altındaki toprak nem içeriği ve yapısının analizinde önemli bir yere sahiptir. YNR ile entegre edildiğinde, FWI, toprak nem haritalarının daha hassas bir biçimde oluşturulmasına yardımcı olur. Bu sayede, tarımsal verimliliği artırma potansiyeline sahiptir. Örneğin, FWI, farklı derinliklerdeki toprak katmanlarının nem içeriğini belirleyerek sulama stratejilerinin daha etkili bir biçimde planlanmasına katkı sağlayabilir.

FWI'nin YNR ile birlikte kullanımı, tarımda su yönetimini geliştirmek ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına destek vermek için önemli fırsatlar sunmaktadır. YNR ile elde edilen verilerin FWI yöntemiyle işlenmesi, toprak yapısını daha iyi anlamak

ve buna göre su kaynaklarını daha etkin bir biçimde yönetmek adına kritik bir adım olabilir.

FWI, jeofiziksel uygulamaların yanı sıra, son yıllarda sağlık görüntüleme ve tahribatsız testler gibi başka alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Bu güçlü yöntem, yer altı modelleri oluşturmanın ötesinde, daha hassas ve doğru veriler elde edilmesine olanak tanır. Bu da, her türlü yer altı yapısının daha etkili bir biçimde incelenmesini sağlar. FWI'nin çok disiplinli kullanım potansiyeli, gelecekte daha geniş uygulama alanları bulmasını mümkün kılmaktadır.

### 3.3.1. Full-waveform Inversion Teorisi

Tam Dalga Formu Ters Çözümü, özellikle doğrusal olmayan optimizasyonla ilgili ters problem teorisine dayanmaktadır. FWI, sismik terslemeyi kaydedilen ve sentetik sismik dalga alanları arasındaki farkı en aza indirme problemi olarak formüle eder. Bu teknik, dalga denklemi gibi kısmi diferansiyel denklemlerle yönetilen dalga yayılımı ilkelerine büyük ölçüde dayanır. Amaç, sismik dalga davranışını etkileyen hız, yoğunluk ve sönümlenme gibi yeraltının fiziksel özelliklerini geri kazanmaktır. Temel unsurlarını tam dalga yayılımı mollemesi ve amaç fonksiyonu olarak iki aşamada incelenebilir.

Dalga yayılımı modelleme; FWI, dalga denkleminin doğru sayısal çözümlerini gerektirir; bu denklem, sismik dalgaların dünya içinde nasıl yayıldığını tanımlar. Bu modelleme genellikle sonlu farklar, sonlu elemanlar veya spektral elemanlar yöntemleriyle gerçekleştirilir (Virieux ve Operto, 2009).

Amaç fonksiyonu; FWI, gözlemlenen ve simüle edilen veriler arasındaki farkı nicelendirerek bir amaç fonksiyonu tanımlar. Bu fonksiyon, model parametrelerini ayarlayarak, genellikle gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleriyle minimize edilir. Amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$F(m) = \sum |d_{\text{obs}}(f) - d_{\text{sim}}(f, m)|^2 \quad (3.12)$$

burada  $d_{\text{obs}}$  gözlemlenen verileri ve  $d_{\text{sim}}$  simüle edilen verileri,  $m$  ise model parametrelerini temsil eder (Virieux & Operto, 2009).

Gradyan ve Hessian hesaplamaları; FWI'de gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleri kritik öneme sahiptir. Bunlar, genellikle adjoint (eşlenik) durum yöntemleriyle, model parametrelerine göre amaç fonksiyonunun gradyanlarının hesaplanmasını içerir. Bazı gelişmiş FWI uygulamaları, yakınsama sürecini iyileştirmek

için Hessian matrisini yaklaşık olarak hesaplar, ancak bu daha yüksek hesaplama maliyetine yol açar (Tarantola, 1984).

Düzenleme (Regularization) ise; FWI, gürültüye olan duyarlılığı ve tekil olmayan (non-unique) çözümler üretme potansiyeli nedeniyle genellikle düzenleme tekniklerini içerir. Düzenleme, terslemeye yeraltı yapısına dair ön bilgi gibi ek kısıtlamalar getirerek işlemin kararlılığını sağlar (Tarantola, 1987).

### 3.4. Topp'un Denklemi ile Dielektrik Sabitten Toprak Nemi İçeriği Hesaplama

Toprak nem içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, Topp'un Denklemi olarak bilinen ve toprakların dielektrik sabiti ile toprak nemi arasındaki ilişkiyi belirleyen matematiksel bir modeldir. Bu denklem, özellikle Yer Nüfuz Eden Radar (YNR) gibi dielektrik sabiti ölçen cihazlarla yapılan saha çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Topp ve arkadaşları (1980), toprak nem içeriğini dielektrik sabit ölçümleriyle ilişkilendirmek için bir denklem geliştirmiştir. Bu denklem, toprak yapısına bağlı olarak dielektrik sabit ( $\epsilon_r$ ) ile toprak nem içeriği ( $\theta$ ) arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi tanımlar. Denklemin genel formu şu şekildedir:

$$\theta = a + b \cdot (\epsilon_r) + c \cdot (\epsilon_r)^2 \quad (3.13)$$

Burada  $\theta$  Toprak nem içeriğini ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  veya %),  $\epsilon_r$  ise dielektrik sabitini (toprağın dielektrik sabiti), ve  $a, b, c$  toprağa göre değişen denklemin uyarlamak için kullanılan sabitlerdir, genellikle saha verileriyle kalibre edilir (Topp et al., 1980).

#### 3.4.1. Topp'un Denkleminin Kullanımı ve Geçerliliği

Topp'un denklemi, özellikle kumlu ve kil karışımlarından oluşan topraklar üzerinde geçerlidir. Toprak neminin, toprak yapısına ve yoğunluğuna bağlı olarak dielektrik sabit ile doğrusal bir ilişki kurduğu varsayılmaktadır. Bu denklem, toprak neminin doğrudan ölçülmesi yerine, dielektrik sabit ölçümleri yaparak nem içeriği hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

1980'lerde Topp ve çalışma arkadaşları, farklı toprak tiplerinde yapılan saha testleri ile bu denklemi geliştirmiş ve toprak nemi tahminlerinin doğruluğunu artırmıştır (Topp et al., 1980). Toprak nemi içeriği, doğrudan saha ölçümleri ile elde edilebileceği

gibi, bu denklem kullanılarak dielektrik sabit ölçümlerinden de çıkarılabilir. YNR cihazları, toprağın dielektrik sabitini ölçerek, bu verileri Topp'un denklemi ile ilişkilendirir ve doğru bir toprak nemi tahmini yapar.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, YNR ve benzeri radar tabanlı teknolojilerin kullanımıyla Topp'un denklemi, tarımda ve çevre mühendisliğinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Özellikle sulama yönetimi ve toprak nem haritalama gibi uygulamalarda, bu denklem kullanılarak daha verimli sulama stratejileri geliştirilmiştir (Jung et al., 2016; Wu et al., 2019).

### 3.5. Greens Fonksiyonu

Greens fonksiyonu, bir sistemin yanıtını, birimlik bir kaynak etkisiyle tanımlar. Özellikle diferansiyel denklemlerle modellenen fiziksel problemler için kullanılır ve genellikle fiziksel olayların çözümünü bulmada kullanılır. Bu fonksiyon, fiziksel ortamın yayılım özelliğini ve sistemin yanıtını incelememizi sağlar (Tarantola, 1984).

Matematiksel olarak, bir sistemin yanıtı genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$u(x, t) = \int_V G(x, t; x', t') f(x', t') dV' \quad (3.14)$$

Burada:

$u(x, t)$  : Sistem yanıtı, ölçülen veriyi temsil eder.

$G(x, t; x', t')$  : Greens fonksiyonu, sistemin kaynaklardan gelen etkileri nasıl yaydığını gösterir.

$f(x', t')$  : Kaynak terimi, örneğin antenin yaydığı dalga.

$x, x'$  : Konum vektörleri.

$V$  : Sistem veya ortamın hacmi.

Bu formül, bir kaynaktan yayılan dalgaların bir alıcıya ulaşana kadar nasıl yayıldığını hesaplar ve bu, toprak nemi gibi parametrelerin tespiti için önemli bir araçtır (Wu et al., 2019).

#### 3.5.1. Greens Fonksiyonunun Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm (FWI) ile Kullanımı

FWI yani Tam Dalga Biçimi Ters Çözüm yöntemi, fiziksel parametreleri (örneğin toprak nemi) ters çözümlenme yöntemi ile tahmin etmek için kullanılır. Bu süreçte, Greens fonksiyonu, sistemin yanıtını modellemek ve tahmin edilen veriler ile gerçek ölçülen

veriler arasındaki farkları minimize etmek için kullanılır (Lambot & Slob, 2009). Bir, iki ve üç boyutlu çalışmalarda kullanılmaktadır.

Bir boyutlu (1D) sistemlerde, toprak altındaki nem dağılımını, belirli bir derinlik boyunca yayılacak dalgaların etkisiyle modellemek mümkündür. Bu durumda, Greens fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$G(x, t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4\sigma}} \quad (3.15)$$

Burada;  $x$  ve  $x_0$  konumlardır yani  $x_0$  başlangıç noktasını,  $x$  ise ölçüm noktasını ifade eder.  $\sigma$  yayılma parametresi, dalgaların yayılma hızını belirler.

Bu fonksiyon, 1D toprak nem haritalarını ters çözmek için kullanılır. Genellikle bu model, toprak altındaki nem seviyesinin derinlik boyunca nasıl değiştiğini gösterir (Minet et al., 2011).

İki boyutlu yani 2D sistemlerde ise, toprak nemi yatay ve dikey bileşenleriyle birlikte modellenir. Bu daha karmaşık sistemlerde, toprak neminin her iki ekseninde (yatay ve dikey) nasıl değiştiğini izleyebiliriz. 2D uzayda Greens fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$G(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{4\sigma}}}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} \quad (3.16)$$

Burada;  $x$ ,  $y$  ve  $x_0$ ,  $y_0$  konumlardır, yani ölçüm noktasının ve kaynak noktasının koordinatları.  $\sigma$  ise yayılma parametresidir.

Bu fonksiyon, 2D ortamda, örneğin belirli bir toprak türündeki nemin yatay ve dikey olarak nasıl değiştiğini modellemek için kullanılır (Lambot & Slob, 2009).

3D yani üç boyutlu uzayda ise, Greens fonksiyonu tüm üç boyutlu bileşenleri kapsar. Bu tür bir modelleme, toprak neminin daha geniş bir alanda (hem yatay hem dikey) ve farklı derinliklerde nasıl dağıldığını gösterir. 3D sistemde Greens fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir:

$$G(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}{4\sigma}}}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}} \quad (3.17)$$

Burada;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ve  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  konumları ifade eder.  $\sigma$  ise yayılma parametresini, dalgaların uzaydaki yayılma hızını belirler.

Bu fonksiyon, 3D toprak nem haritası oluşturmak için kullanılır ve toprak altındaki nem dağılımının üç boyutlu bir görünümünü sağlar (Wu et al., 2019).

Greens fonksiyonu, FWI'ye dayalı toprak nemi haritalama uygulamalarında önemli bir araçtır. Bu fonksiyon sayesinde, toprak altındaki parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi sağlanır ve gerçek ölçülen verilerle uyumlu modeller yapılabilir.



## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

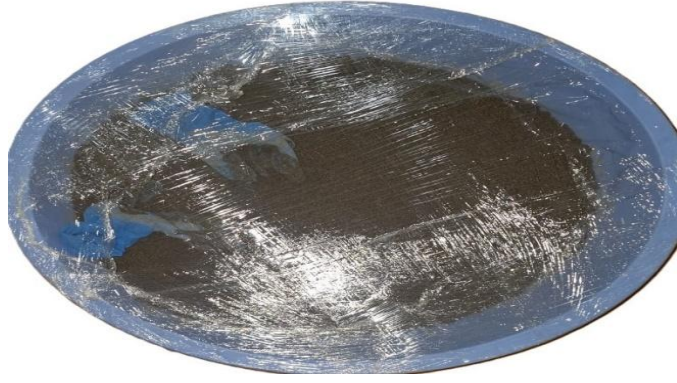
Bu Tez çalışmasında laboratuvar tabanlı düzenekte FWI, küçük ve kontrollü bir toprak örneği içerisinde toprak nem içeriğini yeniden yapılandırmak için, dielektrik modeli yinelemeli olarak iyileştirecek şekilde uyarlanmıştır. Model, çoklu frekanslardaki gözlemlenen yansıma verileriyle eşleşmeyi amaçlayarak yüksek çözünürlüklü nem haritalaması yapılmasını sağlar.

Bu çalışma kapsamında, çapı 54 cm, derinliği 8 cm olan dairesel bir leğen kullanılmıştır. Leğen içerisinde merkezde: Yarıçapı 7 cm olan homojen, çok nemli (suya doygun) kumlu bir bölge oluşturulmuştur. Çevresinde ise %70 kum içeren ve orta derecede nemli olan kumlu toprak yerleştirilmiştir. Deney düzeneği için topraklar 2.7 lt su kullanılarak hazırlanmış olup toplam hacim 18 lt olarak belirlenmiştir. Tüm toprak, musluk suyu ile nemlendirilmiş ve ağız kısmı kapatılarak su kaybı minimuma indirilmiştir. Toprakla doldurulmuş bir kutuyu içermektedir ve kontrollü bir ortamda gerçek dünya toprak koşullarını simüle etmektedir. Lambot ve arkadaşlarının daha büyük alanlardaki saha düzeneklerinden farklı olarak, bu laboratuvar deneyi ters çözüm işlemini küçük bir örnek alana sınırlandırmakta ve özellikle yakın alan yansıma ölçümleri için uyarlanmış ekipmanlar kullanmaktadır; bunlar arasında LiteVNA64 ve log-periyodik antenler yer almaktadır (Lambot ve ark., 2004; Minet ve ark., 2011). LiteVNA, toprak yüzeyine yakın bir konuma yerleştirilerek toprak nem içeriğiyle doğrudan ilişkili ayrıntılı dielektrik tepkilerin yakalanmasını sağlar.

Bu bölümde kullanılan materyaller ve metotlar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

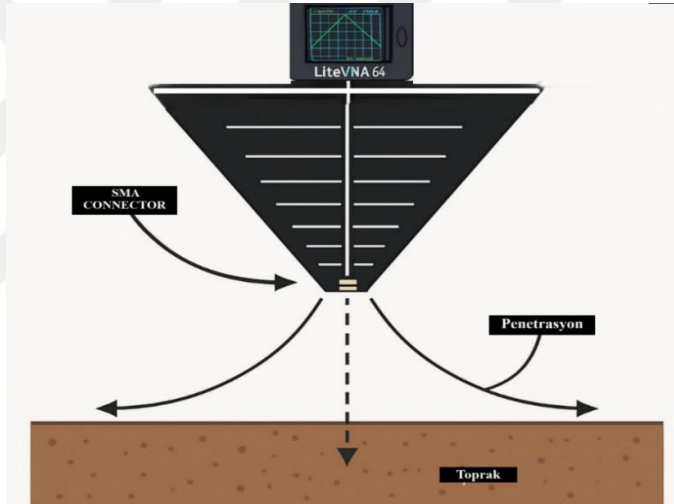
### 4.1. Materyaller

Deney Düzeneği dahilinde LiteVNA64 VNA, XR-909 PCM Log Periyodik anten ve ölçülecek olan homojen nemli kumlu topraktan oluşmaktadır. Kurutulup elenmiş %70 oranında kumlu topraklar ölçülü şekilde nemlendirilip yerleştirmek için çapı 54 cm, derinliği 8 cm olan dairesel bir leğen kullanılmıştır. Leğen içerisinde: Merkezde: Yarıçapı 7 cm olan homojen, çok ıslak (suya doygun) kumlu bir bölge oluşturulmuştur. Çevresinde: %70 kum içeren ve orta derecede nemli olan kumlu toprak yerleştirilmiştir. Tüm toprak, musluk suyu ile nemlendirilmiş ve Şekil 4.1 de görüldüğü gibi ağız kısmı kapatılarak su kaybı minimuma indirilmiştir.



Şekil 4.1. Toprak Nemlendirme Aşaması

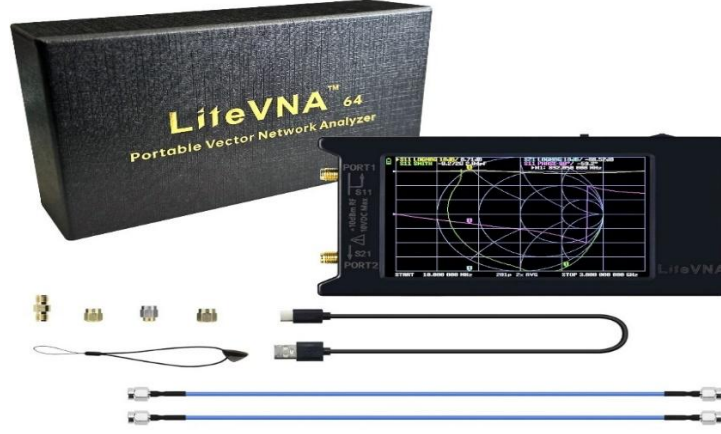
Ölçüm kabına yerleştirilmeden önce tekrar karıştırılarak homojenize hale getirilmiştir. Düzeneğin diagramı Şekil 4.2 deki gibidir.



Şekil 4.2. Sistem Düzeneği Diagramı

#### 4.1.1. LiteVNA64

LiteVNA64, elektromanyetik karakterizasyon ve vektör ağ analizi çalışmalarında kullanılan, taşınabilir ve düşük maliyetli bir vektör ağ analizörüdür. 50 kHz ila 6.3 GHz frekans aralığında çalışabilme kapasitesine sahiptir ve özellikle anten karakterizasyonu, iletim hattı analizi, empedans ölçümleri ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinde tercih edilmektedir.



Şekil 4.3. LiteVNA64

Cihaz, yansımaya katsayısı ve iletim katsayısı parametrelerini ölçebilmekte olup, elektromanyetik dalgaların hedef ortamla etkileşimini frekans bazında ayrıntılı şekilde analiz etme imkânı sunar. Bu yönüyle, toprak nemi tayini için kullanmayı hedeflediğimiz bu cihaz, dielectric permittivity ölçümleri ve malzeme testleri gibi araştırmalarda etkin şekilde kullanılmaktadır.

LiteVNA64, kompakt yapısı ve 4 inç dokunmatik ekranı sayesinde saha uygulamalarında taşınabilirlik avantajı sağlarken, USB-C bağlantısı aracılığıyla bilgisayara kolayca entegre edilebilir. Cihazın kalibrasyon işlemleri Open, Short, Load ve Thru yöntemleriyle yapılmakta olup, ölçüm doğruluğunu artırmaya yönelik kapsamlı kalibrasyon olanakları sunar.

#### 4.1.2. XR-909 Anten Analizi

Bu çalışma kapsamında, XR-909 modeli baskı devre tipi (PCB) log-periyodik dipol antenin elektromanyetik ışın yayılım özellikleri, yönlülük karakteristiği ve deneysel performansı analiz edilmiştir. Antenin üretici datasheet'i mevcut olmadığından, yapısal benzerliği esas alınarak Şekil 3.4 de görseli yer alan "Design of a Printed Log-Periodic Dipole Antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz Band Applications" başlıklı çalışmada (Anitha et al., 2016) sunulan hesaplama yöntemleri referans alınmıştır. Klasik log-periyodik anten tasarımlarından farklı olarak XR-909 anteni, kompakt PCB yapısı, dar boom uzunluğu ve değişken dipol kalınlıkları ile öne çıkmaktadır. Bu farklılıklar, antenin hem yönlülük hem de faz merkezinin frekansla olan ilişkisi açısından detaylı analiz edilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 4.4. LPDA XR-909 Model Görseli

Anten analizi kapsamında ilk olarak, fiziksel yapısal özellikleri incelenmiş ve aktif dipol elemanları belirlenmiştir. Ardından, antenin belirli bir frekansta (özellikle 2.7 GHz civarında) yönü dikkate alınarak faz merkezi konumu tespit edilmiştir. Bu belirleme, ölçüm yüksekliğinin doğruluğu ve toprak ile etkileşimli elektromanyetik çözümlerinin hassasiyeti açısından kritik öneme sahiptir. Devamında, antenin yönlülük karakteristiği (beamwidth) ve yer yüzeyinde oluşturduğu kapsama alanı (footprint) hesaplanmış, bu değerler deneysel olarak farklı yüksekliklerde alınan  $S_{11}$  yansımaya katsayısı verileri üzerinden tahmin edilmiştir.

#### 4.1.2.1. Log-Periodik Dipol Anten (LPDA) Tasarım Parametreleri

Bu bölümde, XR-909 model baskılı devre (PCB) tipi log-periyodik dipol antenin (LPDA) geometrik ve yapısal analizine yer verilmiştir. Önceden de belirtildiği gibi antene ait resmi üretici veri sayfası (datasheet) bulunamadığından, yapısal benzerlik gösteren ve literatürde geniş biçimde belgelenmiş olan 'Design of a Printed Log-Periodic Dipole Antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz Band Applications' başlıklı makaledeki yöntemler referans alınmıştır. Aynı ilkelere dayanarak XR-909 anteni, dipol uzunlukları, merkez aralıkları, ölçekleme ( $\tau$ ) ve aralık ( $\sigma$ ) faktörleri üzerinden modellenmiştir. Böylece, antenin frekansa bağlı ışınım davranışı, faz merkezi tahmini ve empedans özellikleri teorik olarak ortaya konmuştur. Klasik Teoride tasarım formülleri aşağıdaki gibidir.

$$\text{Ölçekleme Faktörü } (\tau): \quad \tau = L_{n+1} / L_n \quad (4.1)$$

$$\text{Aralık Faktörü } (\sigma) : \quad \sigma = S_n / (2 L_n) \quad (4.2)$$

Burada;  $L_n$ , n. dipol uzunluğunu (cm),  $L_{n+1}$  ise n+1. dipol uzunluğunu (cm) ve  $S_n$  ise n. ve n+1. dipol merkezleri arasındaki mesafeyi (cm) ifade etmektedir.

Ayrıca, Anitha et al. (2016) çalışmasında dipol uzunlukları doğrudan  $\lambda/2$  yerine yukarıdaki formülle hesaplanmış ve ardından CST ile optimize edilmiştir. Bu farklılık, klasik LPDA teorisinden sapmalar yaratmasının ana sebebidir ve makelesinde kullanılan anten tasarım parametreleri şu şekilde formüle edilmiştir:

$$\text{Dipol uzunlukları: } L_n = L_1 \cdot \tau^{n-1} \quad (4.3)$$

$$\text{Dipoller arası mesafe: } d_n = \sigma \cdot 2L_n \quad (4.4)$$

Burada;  $\tau$ : Ölçekleme faktörü (scaling factor),  $0 < \tau < 1$  iken  $\sigma$  ise aralık oranını (spacing factor) ifade etmektedir.

**Çizelge 4.1.** LPDA Tasarım Parametreleri Tablosu

Dipol No	$L_n$ (cm)	$L_{n+1}$ (cm)	$S_n$ (cm)	$\tau = L_{n+1} / L_n$	$\sigma = S_n / L_n$
1	9	10.5	1.5	1.16667	0.166667
2	10.5	12	1.75	1.14286	0.166667
3	12	13.5	2.2	1.125	0.183333
4	13.5	15	2.25	1.11111	0.166667
5	15	17.5	2.5	1.16667	0.166667
6	17.5	20	2.7	1.14286	0.154286
7	20	22	3	1.1	0.15
8	22	25	3.5	1.13636	0.159091
9	25	28	4	1.12	0.16
10	28	31.5	4.5	1.125	0.160714
11	31.5	43	5	1.36508	0.15873
12	43				

Bu tablo, log-periyodik antenin dipol elemanlarına ait uzunluk ( $L_n$ ), ardışık dipol uzunluğu ( $L_{n+1}$ ), dipoller arası mesafe ( $S_n$ ), aralık faktörü ( $\sigma = S_n / L_n$ ) olarak alınmış yarı kol hesabı burada tamamına uygulanmıştır ve oran faktörü  $\tau = L_{n+1} / L_n$  değerlerini içermektedir.  $\sigma$  değeri Anitha et al. (2016) makalesine uygun olarak hesaplanmıştır. Elde edilen Çizelge 4.1'deki verilere göre elde edilen ortalama değerler aşağıdaki gibidir:

Ortalama Ölçekleme Faktörü ( $\tau$ ): 1.155

Ortalama Aralık Faktörü ( $\sigma$ ): 0.163.

Elde edilen bu parametreler ve antenin geometrik özellikleri bize klasik LPDA tasarım teorisinden farklı olduğunu göstermiştir. Aslında XR-909 anteni, genel LPDA teorisiyle büyük ölçüde uyumlu olmakla birlikte, bazı yapısal ve uygulama farklılıkları nedeniyle klasik teoriden sapmalar göstermektedir. Bu farkların nedenleri şu şekilde maddelenebilir.

1. PCB tipi üretim tekniği nedeniyle dipol kolları tel yerine şerit biçimindedir; bu durum empedans ve ışın karakteristiğinde değişikliğe yol açabilir.
2. Dipol genişlikleri sabit değil, değişkendir ve en uzun dipollerde genişlik 1.5 cm'ye kadar çıkar. Bu, klasik teorideki "orantılı kalınlık" ilkesinden sapar.
3. SMA konnektörün yerleşimi gereği anten toprağa değil, havaya doğru ışın yapması gerekirken bu tasarım da teorik beam yönünü uygulamada tersine çevirir.
4. Gerçek hayattaki dielektrik kayıplar ve PCB altlık etkileri, teorik modele göre kazanç ve direktivite değerlerinde sapmalara neden olabilir.

#### 4.1.2.2. XR-909 Işıma Yönü (Radiation Direction of the Antenna)

Log-periyodik dipol antenler (LPDA), geniş bant aralığında çalışabilen ve yönlü (directional) ışına özelliğine sahip anten türlerinden biridir. Bu antenlerin ışına yönü, genellikle daha kısa dipollere doğru, yani antenin ucuna yöneliktir. Bu yönelim, antenin geometrik tasarımı ve çalışma prensibi ile ilişkilidir; çünkü yüksek frekanslarda çalışan kısa dipoller elektromanyetik enerjini daha etkin bir şekilde yayarken, uzun dipoller bu frekanslarda etkinliğini yitirerek ışımaya daha az katkıda bulunur ve bastırılır (suppressed).

Bu bastırma etkisi, özellikle aktif bölge dışındaki uzun dipollerin antenin toplam ışına paternine katkısını minimize eder. Böylece elektromanyetik enerjinin yayılım yönü, uzun dipollerden kısa dipollere doğru, yani antenin geniş ucundan dar ucuna doğru belirgin bir şekilde yönelir. Diğer bir ifadeyle, antenin ışına yönü, büyük dipollerin bulunduğu uçtan başlayarak küçük dipollerin yer aldığı uca doğru uzanır. Bu yön, aynı zamanda antenin "ön" tarafı (forward direction) olarak kabul edilir.

Işıma yönü, antenin yapısal parametreleri olan geometrik ilerleme oranı ( $\tau$ ) ve aralık oranı ( $\sigma$ ), dipoller arası mesafe, boom açısı ve kullanılan frekans bandına bağlı

olarak şekillenir. Log-periyodik antenlerde aktif bölge her frekansta farklı dipoller tarafından temsil edildiğinden, ışınım yönü frekansla birlikte küçük sapmalar gösterebilir; ancak genel eğilim sabit kalır.

Bu çalışmada kullanılan XR-909 modeli baskı devre tipi log-periyodik dipol antenin fiziksel yapısı incelendiğinde, kısa dipollerin bulunduğu uçta SMA bağlantı noktası yer almakta ve elektromanyetik enerjinin yayılımı bu doğrultudadır. Bu nedenle anten, küçük dipollerin olduğu yöne doğru ışınmakta ve yapılan yönlülük analizlerinde bu yön referans alınmıştır. Deneysel ölçümlerde anten sabit bir yükseklikte yerleştirilmiş, sadece yatay düzlemde döndürülerek farklı açılarda  $S_{11}$  yansıma katsayıları kaydedilmiştir. Bu sayede antenin ışınım yönü doğrultusunda maksimum enerji yayılımı ve beamwidth karakteristikleri gözlenmeye çalışılmıştır.

#### 4.1.2.3. Aktif Dipol ve Faz Merkezi

Log-periyodik dipol antenlerde (LPDA), belirli bir frekansta elektromanyetik ışınımı en etkin gerçekleştiren dipol elemanına aktif dipol denir. Her frekans için bu aktif dipol, o frekansta oluşan dalga boyu ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada kullanılan XR-909 baskı devre tipi antenin aktif dipol analizinde, çalışma frekansına karşılık gelen tam dipol uzunluğu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$L_{aktif} = \lambda / 2 = c / (2f) \quad (4.5)$$

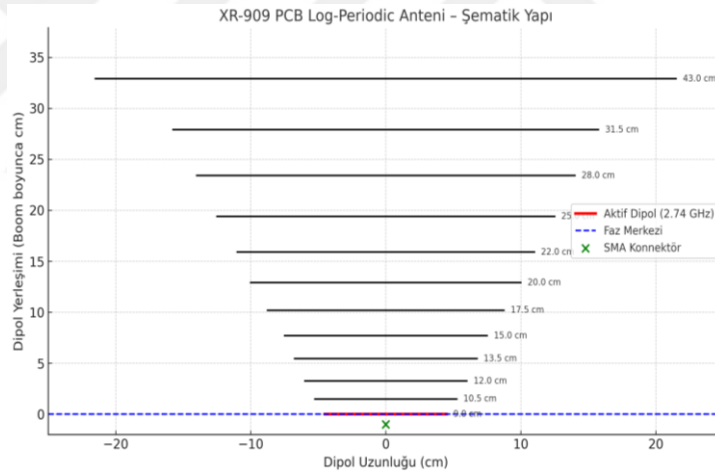
Burada;  $L_{aktif}$ , aktif dipolün tam uzunluğunu (cm),  $\lambda$  ise elektromanyetik dalga boyunu,  $c$  ise ışık hızını ( $3 \times 10^8$  m/s) ve  $f$  ise frekansı (Hz) temsil etmektedir.

Tam dipol uzunluğu kullanımının gerekçesi baskı devre tipi log-periyodik antenlerde, her dipol elemanı iki koldan oluşur ve yayılım çift yönlü olarak gerçekleşir. Bu nedenle, elektromanyetik analizlerde her iki kolun toplamı olan tam dipol uzunluğu esas alınmalıdır. Anten tasarım literatüründe de (Carrel, 1961; Balanis, 2016), log-periyodik antenlerde aktif eleman uzunluğunun  $\lambda/2$  olarak tanımlandığı vurgulanmaktadır.

Çizelge 4.2. LPDA Aktif Dipol ve Faz Merkezi Tablosu (2.5–2.9 GHz)

Frekans (GHz)	Dalga Boyu $\lambda$ (cm)	$\lambda/2$ (cm)	Aktif Dipol No	Dipol Uzunluğu (cm)	Faz Merkezi(SMA'dan itibaren, cm)
2.6	11.53	5.77	1	9.0	0.00
2.7	11.10	5.55	1	9.0	0.00
2.8	10.71	5.35	1	9.0	0.00

Yukarıdaki hesaplamalar, 2.5–2.9 GHz frekans aralığına karşılık gelen  $\lambda/2$  aktif dipol uzunluklarının 5.17–6.00 cm arasında değiştiğini göstermektedir. Bu aralık, XR-909 antenin en kısa dipol elemanının toplam uzunluğu olan 9 cm'den daha kısa kaldığından, söz konusu frekans aralığında her zaman en kısa dipol (Dipol No: 1) aktif olarak kalmaktadır. Bu dipolün SMA konnektöre doğrudan bağlı olması nedeniyle, antenin faz merkezi, SMA'nın hizasında yani dipol düzlemi ile aynı seviyede (0,00 cm) kabul edilmiştir. Işıma yönü ise bu faz merkezinden uzun dipoller yönüne doğru, yani yukarıya açılarak ilerlemektedir.



Şekil 4.5. LPDA Şematik Yapı Aktif Dipol Faz Merkezi

#### 4.1.2.3. Beamwidth (HPBW) ve Footprint Hesaplamaları

Log-periyodik antenler, geniş bantlı ve çok yönlü antenlerdir. Antenin ışınlanma yönü, aktif bölgeye bağlı olarak değişmekle birlikte, çalışılan frekans aralığına göre yön belirlenebilir.

Bu çalışmada kullanılan baskı devre tipi log-periyodik antenin yönlülük analizi, deneysel olarak ölçülen yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) verilerine dayanmaktadır. Beamwidth (ışın genişliği), bir antenin ana lobunda yayılan elektromanyetik enerjinin açılmal

dağılımını ifade eder. Teorik olarak, beamwidth değeri anten kazancının maksimum olduğu yönün  $\pm 3$  dB çevresindeki açı aralığı olarak tanımlanır. Ancak bu çalışmada doğrudan kazanç ölçülemediği için beamwidth, dönüş açısına göre alınan  $S_{11}$  (dB) değerleri üzerinden deneysel yöntemle belirlenmiştir.

Beamwidth deneysel yaklaşımla hesaplama basamaklarını aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Anten, belirli bir yükseklikten yer yüzeyine yöneltilerek konumlandırılmıştır.
2. Anten sabit tutulmuş ve yatay düzlemde belirli açılarla (ör.  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ , ...,  $180^\circ$ ) döndürülerek her açı için  $S_{11}$  yansımaya katsayısı ölçülmüştür.
3. Her bir açı  $\theta$  için  $S_{11}(\theta)$  değeri kaydedilmiştir.
4. Minimum  $S_{11}$  değeri, elektromanyetik enerjinin en etkin iletildiği yönü tanımlar:  $\theta_{min}$

5. Yarı güç genişliği (Half Power Beamwidth, HPBW), minimum  $S_{11}$  değerinin 3 dB üzerinde kalan açılar arasındaki fark olarak hesaplanır:

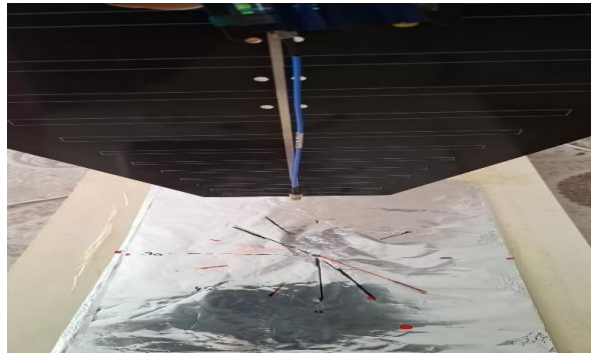
$$HPBW = \theta_2 - \theta_1$$

Burada:

- $S_{11}(\theta_{min})$ : Minimum yansımaya katsayısı (en fazla enerji iletimi)
- $\theta_1$ :  $S_{11}(\theta) = S_{11}(\theta_{min}) + 3$  dB olacak şekilde  $\theta < \theta_{min}$
- $\theta_2$ :  $S_{11}(\theta) = S_{11}(\theta_{min}) + 3$  dB olacak şekilde  $\theta > \theta_{min}$

Yani HPBW  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  arasındaki açı farkını (derece cinsinden) ifade etmektedir.

Tarama çapı ve alanı ise beamwidth ile doğrudan ilişkilidir. Beamwidth  $\theta$  (derece) ve reflector anten faz merkezi arası mesafesi  $h$  (cm) olarak alındığında tarama yarıçapı;  $r = h \cdot \tan(\theta/2)$  olur. Böylelikle; tarama çapı,  $D = 2 \cdot r$  ile elde edilirken, alan ise  $A = \pi \cdot (D/2)^2$  formülü ile hesaplanır.



Şekil 4.6. Alüminyum Reflektör Ölçüm Düzenegi

Gerekli reflector ölçümlerinin açığa bağlı ölçümlerini yapabilmek için hazırlanan düzenek Şekil 4.6 daki gibidir. Düzenekte 15 katlı toplamda yaklaşık 0.02 mm kalınlığında alüminyum folyo üst üste getirilerek tahta bir yüzeye sabitlenmiştir. XR-909 anteni yatay olarak yerleştirilmiş ve alüminyum reflektör yüzeye dik açılarda ve farklı yüksekliklerde (35 cm, 9 cm, 4 cm) konumlandırılmıştır. Her yükseklik seviyesi için  $0^\circ$  ila  $90^\circ$  ve sadece 4 cm için  $0^\circ$  ila  $180^\circ$  arasında  $22.5^\circ$  artışla anten döndürülerek toplam 9 açıdan  $S_{11}$  ölçüleri kaydedilmiştir.

En düşük frekans, her farklı yükseklik ölçümünde 2738.85 MHz de elde edildiği için sadece bu aralıktaki açısal değişime göre  $S_{11}$  değerleri Çizelge 4.2. deki gibi belirlenmiştir.

**Çizelge 4.3.** 2738.75 MHz Frekansından Yüksekliklere göre Alınan  $S_{11}$  Değerleri

Açı ( $^\circ$ )	35 cm	9 cm	4 cm
0	-17.38	-18.92	-19.33
22.5	-17.43	-19.07	-19.44
45	-17.65	-19.05	-19.47
67.5	-17.72	-18.97	-19.29
90	-17.90	-18.96	-19.10
112.5	–	–	-18.82
135	–	–	-18.62
157.5	–	–	-18.40
180	–	–	-18.27

Beamwidth tahmini için her yükseklikteki en uygun frekansta (en düşük  $S_{11}$ ) anten dönme açılarına göre ölçüler analiz edilerek aşağıdaki Çizelge 4.3 de gösterildiği gibi beamwidth, tarama çapı ve tekabül eden alan bilgileri elde edilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Beamwidth Değerlerinden Elde Edilen Tarama Çapı ve Alan Hesaplamaları

Yükseklik (cm)	Beamwidth ( $^\circ$ )	Tarama Çapı (cm)	Alan (cm <sup>2</sup> )
35	22.5	13.88	151.4
9	45	7.47	43.8
4	67.5	5.64	22.4

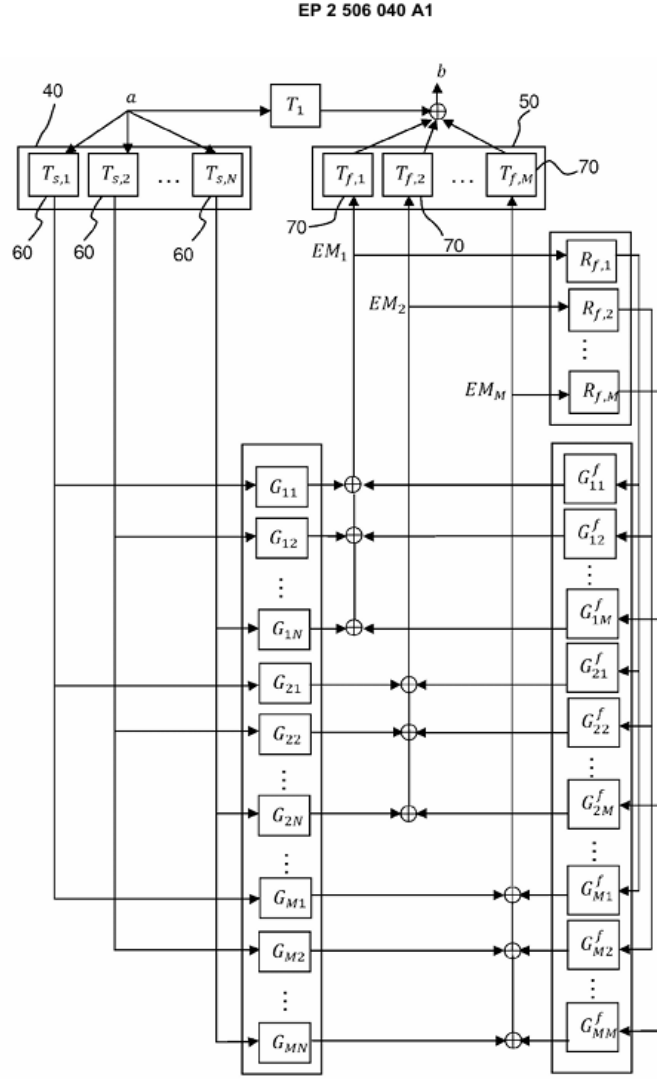
Kazanç verisi doğrudan elde edilemediğinde, antenin yönlü ışımaya karakteristiği  $S_{11}$  yansımaya katsayısı üzerinden analiz edilebilir. Yansımaya katsayısının en düşük olduğu

açı, antenin maksimum enerji yaydığı yönü tanımlar. Bu yön etrafındaki  $\pm 3$  dB bandı, beamwidth'in deneysel olarak tahmin edilmesini sağlar. Bu yöntem, özellikle yer yüzeyi etkileşimli anten uygulamalarında (örneğin toprak nemi ölçümleri) geçerli ve yaygın bir tekniktir (bkz. Lambot et al., 2004; Minet et al., 2009).

#### 4.2. Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmadaki temel amacı laboratuvar tabanlı dielektrik özelliklerin ters çözüm ile belirlenmesi, laboratuvar ortamında kontrollü bir şekilde oluşturulmuş bir toprak örneği üzerinde, tam dalga formu ters çözümleme (FWI) yöntemi kullanılarak toprak nemi dağılımı yüksek çözünürlükle haritalanmıştır. Amaç, farklı bölgelerdeki dielektrik geçirgenlik değerlerini yansıma katsayılarına dayalı olarak modelleyip, bu değerlerden hacimsel nem içeriğini hesaplamaktır. Bu çalışmada Leuven Katolik Üniversitesi akademisyenlerinden Prof. Dr. Sebastien Lambot'un (EP 2 506 040 A1) patentli olan Şekil 4.7 de diyagramı verilen yöntem kullanılmaktadır. Jeofizikte yaygın olarak kullanılan tam dalga formunu kullanarak gerçekleştirmiş olduğu modellemesi üzerinden dielektrik permitiviteyi çoklu katmanlı ortamlardan elde etmeyi başarmış bugün bu sistemin yani İHA monteli sensörün üretimini yapmaktadır.

Karmaşık bir fiziksel sistemi daha basit bloklarla gösteren Şekil 4.7 deki bu diyagram düzlemsel dalgalara ayrıştırılan alanlar üzerinden, global iletim ve yansıma katsayılarının tanımlandığı verici ve alıcı anten modelini temsil etmektedir. Radar referans düzlemi, kaynaklar ve alandan noktalar arasındaki dalga yayılımının diyagramıdır. Yani bir anten sisteminin nasıl çalıştığını şematik olarak gösteren bir blok diyagramıdır.



Şekil 4.7. Sistemin Liner Blok Diyagramı (Lambot,2014)

Düzlemsel dalgalara ayrıştırılan alanlar; elektromanyetik alanlar (örneğin, bir antenin yaydığı dalgalar), hesaplamaları kolaylaştırmak için teorik olarak düzlemsel dalgalar (plane waves) şeklinde temsil edilir. Bu, dalgaların düz çizgiler halinde yayıldığını varsaymak gibidir.

Global iletim ve yansımaya katsayıları; dalgaların ortamlardan geçerken veya bir yüzeye çarptıklarında ne kadarının iletildiğini (geçtiğini) ve ne kadarının yansıdığını gösteren matematiksel oranlardır. “Global” ifadesi, bu katsayıların sistemin tamamını kapsayan bir şekilde tanımlandığını belirtir.

Doğrusal blok diyagramı; karmaşık bir fiziksel sistemi daha basit bloklarla gösteren bir diyagramdır. Her blok sistemin bir parçasını temsil eder (örneğin anten, ortam, kaynak vb.).

Radar referans düzlemi, noktasal kaynaklar ve alan noktaları; radar referans düzlemi yani ölçümlerin veya hesaplamaların başladığı varsayımsal düzlem, noktasal kaynak yani teorik olarak sonsuz küçük bir noktadan dalga yayan kaynak (basitleştirme amaçlı) ve son olarak alan noktaları yani dalgaların ölçüldüğü veya gözlemlendiği noktalardan oluşmaktadır

#### 4.2.1. Lambot'un Radar Denklemi

Bu çalışmada, Wu ve ark. (2024) tarafından önerilen, toprak nemi haritalama için basitleştirilerek uzak alan için sadeleştirilmiş olan Lambot'un denklemi kullanılmıştır (Lambot ve ark., 2004; Lambot & André, 2014). Model, uzak alan koşullarında, tek bir kaynak ve alan noktasının ( $N = 1$ ) radar sinyalini tanımlamak için yeterli olduğu durumları içermektedir. Bu basitleştirme, ayrıntılı olarak sunulmak istenirse ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$S(\omega) = R_i(\omega) + \frac{T_{s,1}(\omega)G_{xx}(\omega)T_{i,1}(\omega)}{1-G_{xx}(\omega)R_{s,1}(\omega)} \quad (4.6)$$

Bu denklem ile radar sisteminin özelliklerini ve toprak katmanlarının elektromanyetik özelliklerini dikkate alarak, toprak nemi gibi parametrelerin hesaplanmasına olanak tanır (Lambot et al., 2004; Lambot & André, 2014)

$S(\omega)$  : VNA tarafından ölçülen  $S_{11}$  parametresi olarak bilinen radar sinyalini frekans domeninde ifade eder. Yansıyan sinyalin, gönderilen sinyale oranı olan bu parametre, her bir frekans için hesaplanır ve toprak yüzeyinin elektromanyetik özellikleri hakkında bilgi sağlar.

$R_i(\omega)$ : Antenin serbest uzaydaki yansıma katsayısıdır. Bu katsayı, antenin toprakla etkileşime girmediği, yalnızca serbest uzayda nasıl yansıttığını gösterir.

$T_s(\omega)$  ve  $T_i(\omega)$ : Bu terimler, sinyallerin anten ile toprak arasında iletimini tanımlar ve Lambot et al. (2006a) tarafından yapılan çalışmada liner olarak verilen denklemin çözülmesi ile elde edilir.  $T_i(\omega)$  sinyalin anten tarafından topraktan önceki alanlara doğru iletimini ifade eder.  $T_s(\omega)$ , sinyalin topraktan antene geri yansımasını belirtir.

$R_s(\omega)$ : Bu terim, toprağın yansımaya katsayısını ifade eder ve radar sinyalinin toprak katmanları tarafından ne kadarının geri yansındığını gösterir. Toprağın dielektrik permitivitesi, özellikle topraktaki nem içeriğiyle ilişkili olarak, bu yansımaya katsayısını doğrudan etkiler.

$G_{xx}(\omega)$ : Green's fonksiyonu, radar dalgalarının toprak içindeki yayılımını modelleyen bir fonksiyondur.

Green's fonksiyonu toprak katmanlarının elektromanyetik dalgalarla nasıl etkileşime girdiğini, yansımaya, kırılma ve saçılma gibi süreçleri hesaba katar. Ayrıca, toprak yapısının katmanlı özellikleri doğrultusunda dalga yayılımını detaylı bir şekilde tanımlar.  $T_s(\omega)$  ve  $T_i(\omega)$  in hesaplanması ile Green fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G_{xx}(\omega) = \frac{S(\omega) - R_i(\omega)}{T(\omega) + S(\omega)R_{s,1}(\omega) - R_i(\omega)R_{s,1}(\omega)} \quad (4.7)$$

Bu radar denkleminde Wu ve ark. (2024) tarafından  $T(\omega) = T_s(\omega)T_i(\omega)$  olarak tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında da aynı kabul uygulanmıştır.

#### 4.1.2 Objektif Fonksiyonu

Çalışmanın bu bölümünde de Wu ve ark. (2024) çalışmasının birebir aynı metotlar kullanılmıştır. İnce ve objektif fonksiyonu tanımlanması ve objektif fonksiyonunun minimize edilmesinde the least-squares formülü kullanılmıştır:

$$\varphi(b) = \left( g_{xx}^{\uparrow*}(t) - g_{xx}^{\uparrow}(b, t) \right)^T \left( g_{xx}^{\uparrow*}(t) - g_{xx}^{\uparrow}(b, t) \right) \quad (4.8)$$

Burada  $g_{xx}^{\uparrow*}(t)$  zaman-domainindeki ölçülen Green fonksiyonudur. Bu, radar yanıtının zamanla temsilidir ve ortamın yansımaya ve saçılma davranışını analiz etmek için kullanılır.  $g_{xx}^{\uparrow}(b, t)$  ise modellenen Green fonksiyonudur. Ölçülen Green fonksiyonu ise aşağıdaki inverse Fourier transform kullanılarak elde edilir:

$$g_{xx}^{\uparrow*}(t) = \mathcal{F}^{(-1)}\{G_{xx}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} G_{xx}(\omega) d\omega \quad (4.9)$$

Burada,  $b = [h_0, \varepsilon_r]$ , ters problemin parametre matrisidir; burada  $h_0$ , anten faz merkezi ile toprak yüzeyi arasındaki mesafeyi gösteren vektör ve  $\varepsilon_r$ , relatif dielektrik

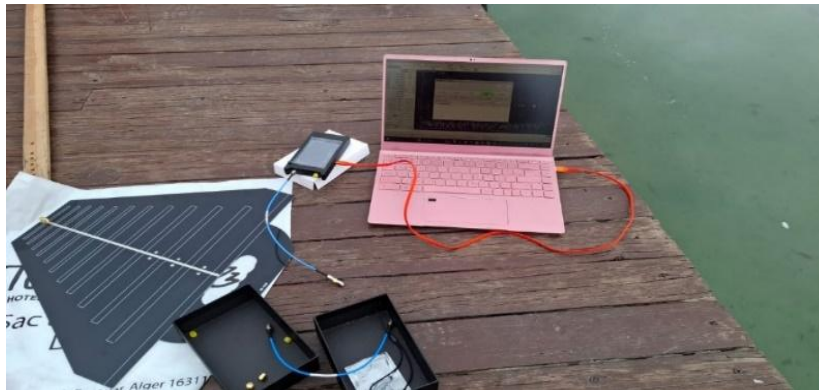
permitiviteyi gösteren vektördür. Bu nedenle, uçuş yüksekliğindeki değişiklikler sonuçları etkilemez, yalnızca sinyal-gürültü oranı, yükseklik arttıkça azalır.

### 4.3. Deney Düzeneği ve Basamakları

Bu Tez çalışmasında deney düzeneği 54 cm çapında ve 8 cm derinliğindeki %70 kumdan oluşan bir toprak su karışımından oluşmaktadır ve toplam hacim 18 000 cm<sup>3</sup> tür. Toprak karışımı 2.9 litre musluk suyu ile kontrollü olarak karıştırılmış ve birkaç gün ağzı kapalı ve hava almayacak şekilde ve ortamda bekletildi ve homojen olması için tekrar yeteri miktarda karıştırılıp ardından yerleştirildi. Düzeneğin ortasında 7 cm yarıçaplı silindirik yapıya ise sadece kum ve sudan oluşan bir yapı yerleştirildi. Her iki toprak su karışımı için toplam kullanılan su miktarı 2.9 litre olup, suların alındığı 5 lt lik şişenin ağzıda kapatılarak arta kalan su deney sonuçlarını doğrulamada kullanılmak üzere kaldırıldı.

Deney düzeneği dahilinde kumlu toprakları yerleştirmek için çapı 54 cm, derinliği 8 cm olan dairesel bir leğen kullanılmıştır. Leğen içerisinde, merkezde yarıçapı 7 cm olan homojen, çok ıslak (suya doymuş) kumlu bir bölge oluşturulmuştur. Çevresinde: %70 kum içeren ve orta derecede nemli olan kumlu toprak yerleştirilmiştir.

#### 4.3.1. VNA Kalibrasyonu



Şekil 4.8. LiteVNA64 OPEN SHORT LOAD Kalibrasyonu

VNA kalibrasyonu OPEN SHORT LOAD ile 300 Mhz ile 3000 Mhz arasında yapılmış olup, 70 cm derinliğindeki Konya da yer alan Ecdad Parkı'nın yapay gölünde ve aynı zamanda wifi erişimin olmadığı Necmettin Erbakan Üniversitesi Köyceğiz

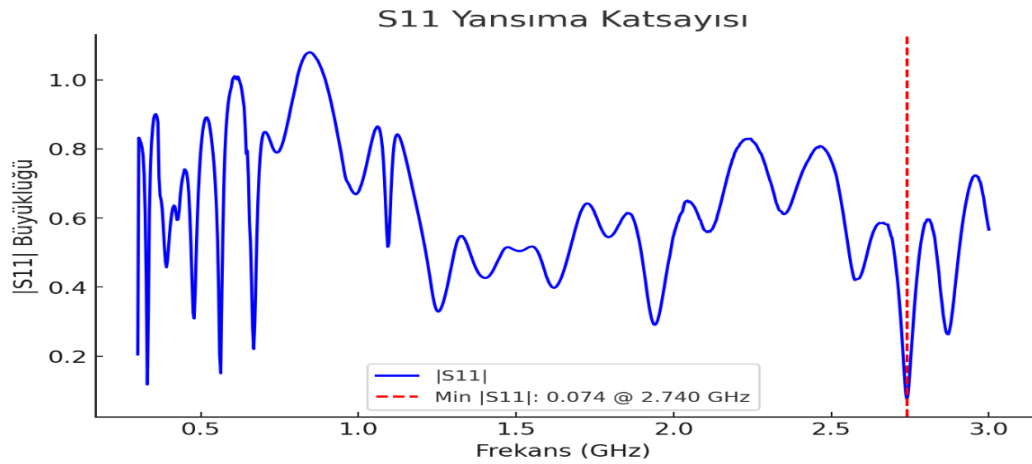
Kampüsü Öğrenci Yurtları civarında, toprak ölçümünde kullanılan aynı leğende 13 cm derinlikte farklı yüksekliklerde ve havadan anten karakteristikleri belirlemede kullanmak için  $S_{11}$  değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Log Periyodik Dipole Anten Su Yüzeyi Referans Ölçümleri

#### 4.5.2. Anten Karakteristiklerinin Oluşturulması

Su yüzeyinden ve havadan alınan ölçümlerle görülmüştür ki en düşük db ortalama 2735 Mhz de olmuştur. Bu aralık bize ölçümleri yaparken 2500 MHz ila 2737 MHz arasında karakteristikleri bulmaya yönlendirmiştir.



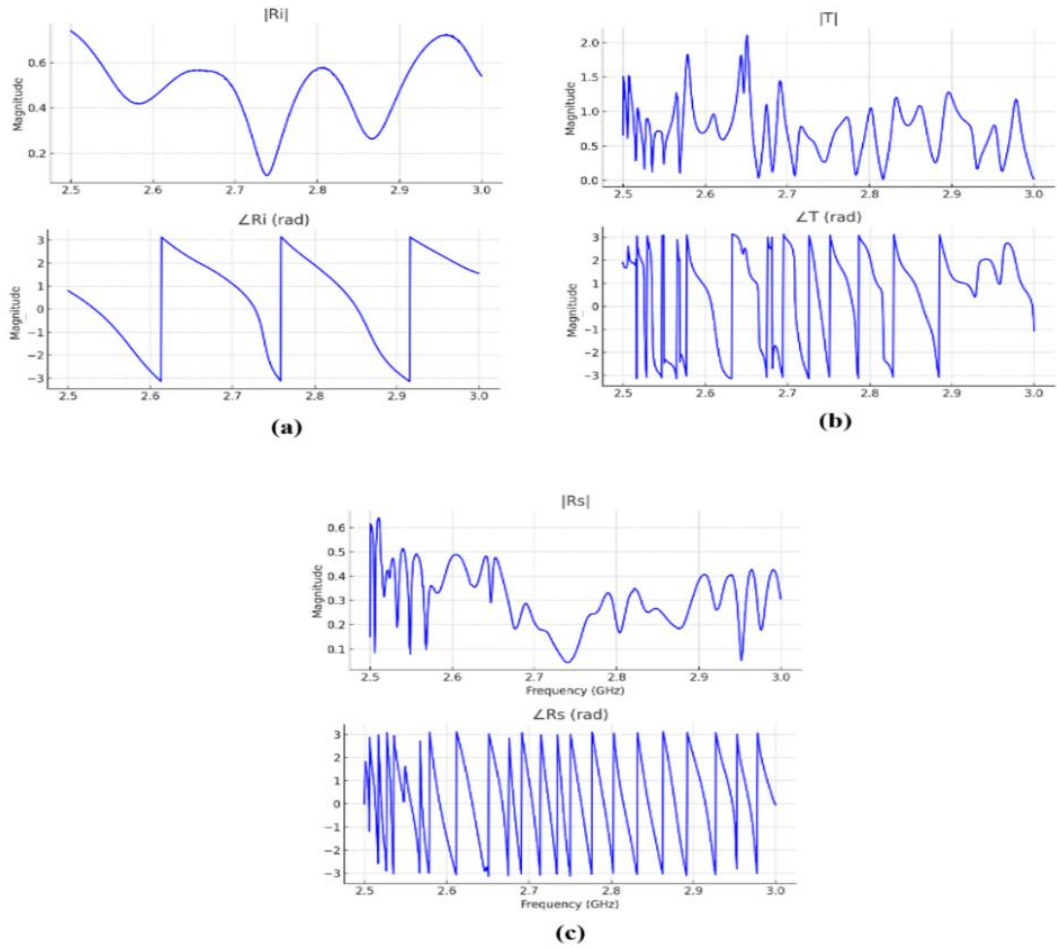
Şekil 4.10. Log Periyodik Dipole Anten Su Yüzeyi Referans Ölçümleri Grafiği

Elde edilen bu  $S_{11}$  ölçümleri ile, model üzerinden gerekli çözümler yapılarak  $R_i$ ,  $T$  ve  $R_s$  karakteristikleri elde edilmiştir.

$$S(\omega) = R_i(\omega) + \frac{T_{s,1}(\omega)G_{xx}(\omega)T_{i,1}(\omega)}{1-G_{xx}(\omega)R_{s,1}(\omega)} \quad (4.10)$$

$G_{xx}(\omega)$  Hava da dielektrik permitivitesi 1 olacağından dolayı neredeyse sıfır kabul edilir ve direkt olarak  $R_i$  bulunmuş olur.  $T$  ve  $R_s$  değerleri ise elde edilen diğer ölçümler üzerinden gerekli modelde yerine koyularak çözülür. Bu denklemlerin çözümü sonrası elde edilen grafikler Şekil 4.11'deki gibidir.

2730 MHz ila 2740 MHz frekans aralığında, geri dönüş kaybı büyüklüğü  $R_i$  en minimal değeri almıştır (VSWR < 1.6) ve buna bağlı olarak yansımaya kaybı  $R_s$  de bu aralıkta da nispeten düşüktür. Bu frekans aralığında anten, performans açısından en iyi olarak nitelendirilebilir. Gönderme-alma yanıtı olan  $T$  ise bu aralıkta göreceli olarak yüksektir sonuç olarak bu aralık en iyi anten kazancına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.11. Karakteristik Grafikleri

### 4.5.3. Veri Toplama ve İşleme

Ölçümler, 300 MHz ile 3000 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi ancak sadece 2500 MHz ile 3000 MHz aralığında anten karakteristikleri bulundu ve LiteVNA ile birlikte kullanılan log-periyodik anten (XR909) ile gerçekleştirildi. Deney düzeneği Şekil 4.12 deki gibidir. Anten, toprak yüzeyinden 10 cm yükseklikte konumlandırılarak ölçümler alındı.



Şekil 4.12. Deney Düzeneği

Veri işlemede kullanılan frekans aralığı ise 2,5 – 2,74 GHz dir. En uygun aralık, anten karakterizasyon verilerine ve paralel olarak topraktan alınan değerlere bağlı olarak belirlendi.

#### 4.5.3.1 Ters Çözüm Süreci (FWI):

Modelin temeli LUT (Look Up Table- Arama Tablosu) kullanılarak ters çözüm işlemi yapılmıştır. Tablo 3 ile 20 permitivite aralığında ve bulunan karakteristiklerin modelde yerleştirilmesi ile teorik  $G_{xx}$  zaman domeninde modelleri hazırlandı Bu sayede, her ölçümde iteratif bir şekilde yeniden çözüm yapmaya gerek kalmamaktadır, ölçümle en iyi eşleşen satır seçilerek ters çözüm çok daha hızlı hale gelir. FWI yönteminde en çok işlem yoğunluğu yaşanan iteratif sürecin önüne geçilerek işlem kolaylığı ve hızlığı sağlanmış olup gerçek zamanlı sistemler için daha idealize hale gelmiştir.

Öncelikle ölçümlerden elde edilen  $g_{xx}^{\uparrow*}(t)$  verileri toprak için alınan  $S_{11}$  verileri ile elde edildi. Ardından ölçülen  $g_{xx}^{\uparrow*}(t)$  ile model LUT karşılaştırılarak en düşük hata için  $\epsilon_r$

(dielektrik geçirgenlik) seçildi. Son olarak ise Bulunan  $\epsilon_r$  değerleri, Topp modeli (1980) ile volumetrik yani hacimsel su içeriğine dönüştürüldü.

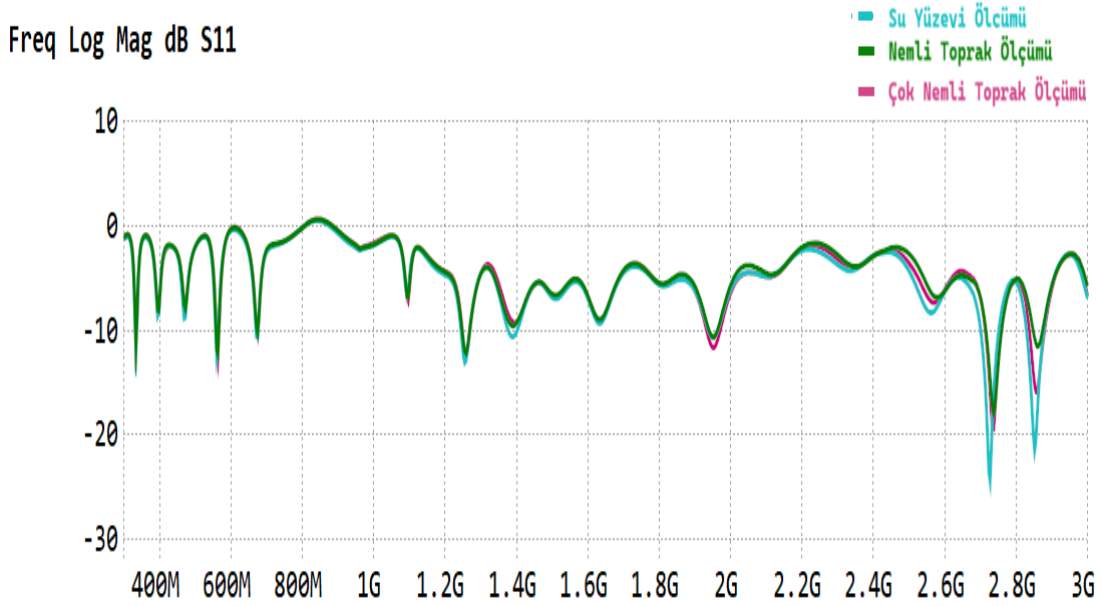
Toprak hacmi gridlere bölünerek daireden arta kalan yerlere polarizasyon ile çoğaltılarak nem haritalaması yapıldı ve yaklaşık  $\epsilon_r$  ve  $\theta$  (hacimsel su içeriği) haritaları oluşturuldu. Haritalar yumuşak geçişli (Gaussian filtreli) ve kontur destekli olarak çizildi. Toplam su içeriği hacmi ise, bölgesel ortalamalara göre hesaplandı.



## 5. SONUÇLAR TARTIŞMA VE GELECEK ÇALIŞMALAR

### 5.1. Tartışma

Bu çalışmada, tek katmanlı ve homojen kabul edilebilir bir toprak yüzeyinin, zeminden yüksekte (off-ground) anten ve düşük maliyetli bir VNA tabanlı sistemle toprak nemi haritalama yaklaşımı başarıyla test edilmiştir. Uygulanan yöntem, klasik YNR sistemlerinden farklı olarak hem taşınabilirliği artırmış hem de yüksek frekans çözünürlüğü ile belirli derinliklerde hassas ölçüm imkânı sunmuştur. Log-periyodik antenin geniş bant karakteristiği sayesinde 300 MHz ile 3000 MHz frekans aralığı tarandı. Şekil 5.2 de 2.5–3 GHz aralığında elde edilen  $S_{11}$  verileri gerekli karakteristik verilerini bulmamızı sağlayarak ölçüm alınan toprağın dielektrik permitivitenin belirlenmesinde en önemli basamağı sağlamıştır. Şekil 5.1 de ise su yüzeyi, nemli toprak ve çok nemli olan toprak bölümünden alınan veriler yer almaktadır. Dielektrik oranın değişmesine göre  $S_{11}$  değişimi açıkça gözlenmektedir.



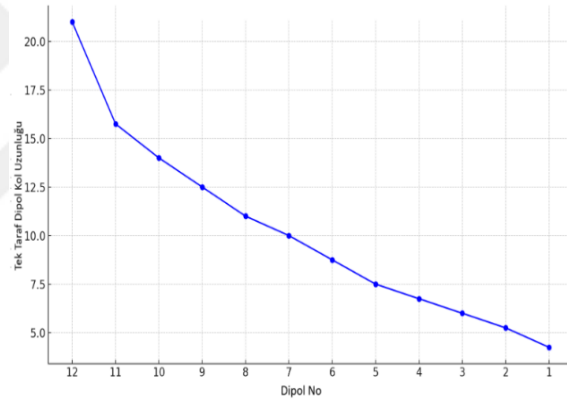
Şekil 5.1. Nemli, Çok Nemli ve Su Yüzeyi  $S_{11}$  Ölçüm Log Mag dB Grafiği

$S_{11}$  Verilerinin değerlendirilmesi sonucunda; antenin beamwidthi, faz merkezi konumu ve aktif dipol yapısı deneysel olarak ortaya konmuş, bu parametrelerin ölçüm hassasiyeti üzerindeki etkisi detaylı şekilde tartışılmıştır. Faz merkezinin doğru belirlenmesi sayesinde, antenin yerden efektif yüksekliği netleştirilmiş ve  $\epsilon_r$  tahmininde

modelleme hataları minimize edilmiştir. Beamwidth karakteristikleri, antenin hangi bölgeyi kapsadığına dair net bilgi sağlamış, footprint hesaplamalarıyla desteklenmiştir.

Lambot tarafından geliştirilen teorik model, deneysel verilerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek doğrulukla çalışmıştır. Toplam yansıma, iletim ve geri saçılma katsayılarını içeren bu model, özellikle faz merkezinin iyi tanımlanmasıyla birlikte, dielektrik geçirgenlik tahminlerinde çok düşük hata payı ile sonuç vermiştir. Elde edilen  $\epsilon_r$  değerleri, LUT kullanılarak hacimsel su içeriğine ( $\theta$ ) dönüştürülmüş ve bu değerler, Topel-Maxwell teorik modeli ile elde edilen sonuçlarla yüksek düzeyde örtüşmüştür.

Anten tasarım maksadı nedeniyle en etkili frekans aralığı noktasında bu projenin amacı ile ters düşmüştür. 280 MHz ve 10 GHz aralığında 7/11 dB kazançla çalışan bu anten modeli ultra geniş model için tasarlanmıştır. Klasik geometriden farklı olan XR-909 antenin elemanlarının azalma grafiği Şekil 5.2 de yer almaktadır.

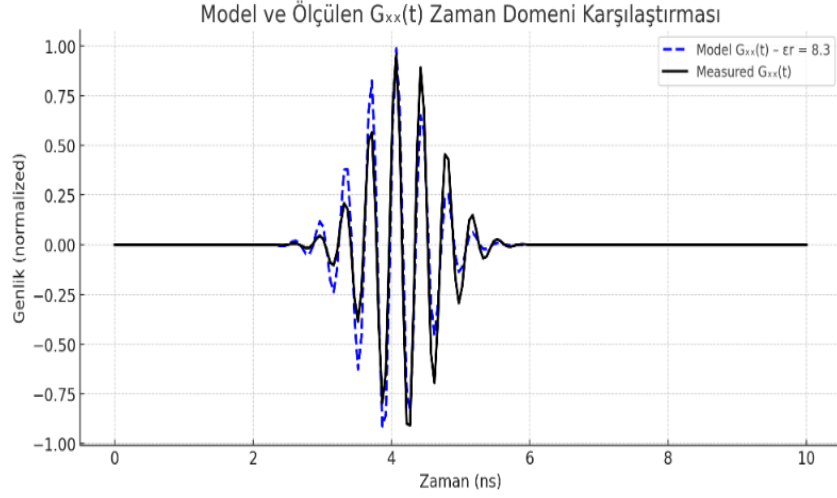


Şekil 5.2. XR-909 LPDA Anteninde Dipol Boylarının Azalma Eğilimi

Anten geometrisi yüksek frekanslarda tek taraf dipol de tam dalga gibi davranabildiğinden yaklaşık 10 GHz ye kadar desteklemektedir. Ancak bizim çalışmamızda optimize edildiği aralık (2734 MHz) derin penetrasyona izin vermemiş ve çok katmanlı ölçüm alınamamıştır.

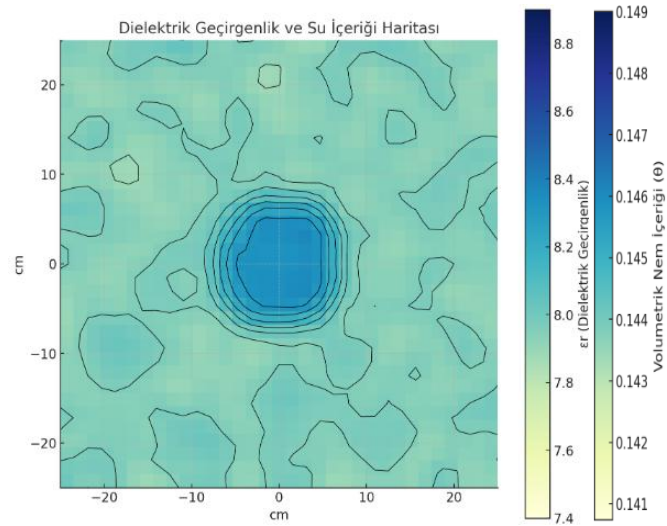
## 5.2. Sonuçlar

Deney düzeneğinden alınan ölçümler sonucu elde edilen  $G_{xx}$  ve modellenen  $G_{xx}$  grafiği karşılaştırmaları aşağıda Şekil 5.3 de verilmiştir. Bu karşılaştırma FWI sonrası elde edilen sonuçların ne kadar tutarlı olduğunu bize sunmaktadır.



**Şekil 5.3.** Modellenen ve Ölçülen  $G_{xx}$  Değerleri Karşılaştırması

Deney esnasında merkezi 14 cm çaplı nemli bölgeden alınan  $S_{11}$  ölçümlerinden birinin permivite değeri 8.206 iken Topp modele göre genelin aynısı olduğu düşünülürse Volumetrik Nem  $\theta$ : 0.152 ye eşit olur ki bu toplam hacmin %15 ine eşittir yani toplam su hacmi ( $\text{cm}^3$ ); 2735'e eşit olur. Aynı zamanda daha az nemli olan bölgeden alınan  $S_{11}$  ölçümüne invers işlem uygulandıktan sonra elde edilen permivite değeri 8.166 çıkmış olup Topp un modeline göre volümetrik yani hacimsel nem  $\theta$  miktarı 0.1511 olarak bulunur. Yani toplam hacme göre su hacmi  $2720.2 \text{ cm}^3$  çıkmaktadır.



**Şekil 5.4.** Toprak Nem ve Volumetrik Miktar Haritası

YNR kullanılarak hassas toprak nem haritalaması sonucu Şekil 5.4 de verilmiştir. Jeofizikte kullanılan tam dalga biçimi inversiyonu gibi yöntemlerin gerekli modellemeler sonrası kullanılması ile mekansal su miktarının tespitini mümkün kılmıştır. 1D Green

Fonksiyonu kullanılarak hazırlanan bu harita için, tek katmanlı olduğundan dolayı simülasyon ihtiyacı hissedilmemiştir.

### 5.3. Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında, geliştirilen sistemin performansını ve pratik uygulanabilirliğini artırmak, aynı zamanda bilimsel katkısını genişletmek amacıyla kapsamlı araştırmalar ve geliştirmeler hedeflenmektedir. Bu doğrultuda belirlenen ana hedefler aşağıda sunulmuştur:

Çok katmanlı ve heterojen zemin yapılarında performans değerlendirmesi; mevcut sistemin, doğal ortamda karşılaşılan karmaşık çok katmanlı ve heterojen zemin (toprak) yapılarındaki ölçümler alınıp gerekli analizler yapıldıktan sonra performansı detaylı olarak değerlendirilecek; sistemin bu koşullara adaptasyonu ve doğruluğu analiz edilecektir. Ayrıca, daha gerçekçi yeraltı modellerini yansıtmak amacıyla anizotropik veya viskoelastik toprak özelliklerini içeren modelleme yaklaşımları sisteme entegre edilecektir.

Kapsamlı saha uygulamaları ve geçerlilik doğrulaması; farklı iklim bölgelerinde ve çeşitli zemin tiplerinde (örn. killi, kumlu, tınlı zeminler) gerçekleştirilecek geniş ölçekli saha uygulamaları aracılığıyla sistemin genel geçerliliği ve dayanıklılığı test edilecektir. Bu uygulamalar, laboratuvar koşullarının ötesinde gerçek dünya performansı hakkında kritik veriler sağlayacaktır.

Alternatif anten konfigürasyonlarının karşılaştırmalı analizi; horn ve dipol gibi alternatif anten tiplerinin sisteme entegrasyonu ve bu konfigürasyonların ölçüm hassasiyeti, sinyal penetrasyonu ve genel sistem performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Bu, optimum anten seçimi için bilimsel bir temel oluşturacaktır.

Zaman domeni ölçümleri ile nem dinamiklerinin karakterizasyonu; uzun süreli zaman serisi ölçümleri yapılarak, zemin nemindeki mevsimsel değişimler, kısa vadeli dalgalanmalar ve diğer çevresel faktörlere bağlı dinamiklerin yüksek çözünürlüklü olarak izlenmesi ve karakterizasyonu amaçlanmaktadır.

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi ile veri yorumlama, tahmin ve sınıflandırma; elde edilen dielektrik sabit  $\epsilon_r$  ve hacimsel nem içeriği ( $\theta$ ) haritalarının otomatik sınıflandırılması, desen tanıma ve daha derinlemesine yorumlanması için yapay zekâ ve

makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu planlanmaktadır. Bu sayede, zemin özelliklerinin otomatik olarak belirlenmesi ve anomalilerin tespiti mümkün olacaktır.

Multidisipliner veri füzyonu ve çevresel parametre etkisi: Sistemden elde edilen nem verilerinin, yer radarı (YNR), elektriksel özdirenç tomografisi (ERT) veya uydu tabanlı uzaktan algılama (SAR) verileri gibi diğer jeofizik ve uzaktan algılama yöntemleriyle füzyonu araştırılacaktır. Ayrıca, toprak nem ölçümlerini etkileyebilecek sıcaklık ve tuzluluk gibi çevresel parametrelerin sisteme entegrasyonu ve bu faktörlerin er üzerindeki etkilerinin modellenmesi hedeflenmektedir.

Sistem bileşenlerinin minyatürleştirilmesi ve taşınabilirlik; Saha uygulamalarındaki pratikliği ve erişilebilirliği artırmak amacıyla, mevcut sistem bileşenlerinin minyatürleştirilerek taşınabilir ve kullanıcı dostu saha cihazlarına dönüştürülmesi üzerinde çalışılacaktır. Literatürde de çok sayıda yer alan LPDA antenlerinin daha verimli ve minyatürleşmiş tasarımları hedeflenmektedir.

Kablosuz veri aktarımı ve IoT entegrasyonu; toprak nem verilerinin uzaktan ve düşük güç tüketimiyle güvenilir bir şekilde kablosuz olarak aktarılabilmesi için sistemin LoRa (Long Range) modülü ile entegrasyonu gerçekleştirilecektir. Tarım alanlarında gerçek zamanlı izleme ve akıllı sulama yönetimi uygulamalarını desteklemek amacıyla sistemin Nesnelerin İnterneti (IoT) altyapısı ile bütünleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu entegrasyon, su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak sağlayacak karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi için temel oluşturacaktır.

Genişletilmiş uygulama alanlarının araştırılması; toprak nem verilerinin, heyelan risk analizi, sel tahmini veya kuraklık izleme gibi çevre yönetimi ve doğal afet risk azaltma senaryolarındaki potansiyel uygulanabilirliği araştırılacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Akın, M., & Akın, G. (2007). Suyun önemi, Türkiye’de su Potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 47, 105-118.
- Akkuşcu, H. İ. (2019). *Endüstri 4.0’in çalışma hayatına etkisi: Bursa örneği*. Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Al, H., & C. Müller. (2000). YNR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 48(1), 63-85. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2478.2000.00180.X>
- Anitha, R., et al. (2016). *Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz band applications*. International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET).
- Ardekani, M. R. M., Jacques, D. C., & Lambot, S. (2015). A layered vegetation model for GPR full-wave inversion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(6), 2402–2413. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2418093>
- Arslan, O. N. (2016). *Yer radarı verilerine uygulanan veri işlem basamaklarının incelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aytekin, A., Ayaz, A., & Tüminçin, F. (2019). Intelligent and natural agriculture with industry 4.0. *Bartık orman fakültesi dergisi*. <https://doi.org/10.24011/barofd.577714>
- Aziz, A., Lambot, S., Minet, J., & Slob, E. (2024). Estimating spatio-temporal soil moisture dynamics in orchards using GPR and cosmic-ray neutron sensing. *Remote Sensing of Environment*, 312, 114129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114351>
- Benedetto, F., & Tosti, F. (2013). YNR spectral analysis for clay content evaluation by the frequency shift method. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 89-96. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2013.03.012>
- Bhogapurapu, N., Dey, S., Homayouni, S., Bhattacharya, A., & Rao, Y. S. (2022). Field-scale soil moisture estimation using sentinel-1 GRD SAR data. *Advances in Space Research*, 70(12), 3845-3858. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2022.03.019>
- Blonquist, J. M., Jones, S. B., & Robinson, D. A. (2006). Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*, 84(1-2), 153-165. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2006.01.014>
- Calamita, G., Perrone, A., Brocca, L., Onorati, B., & Manfreda, S. (2015). *Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.023>

- Carrel, R. L. (1961). The Design of Log-Periodic Dipole Antennas. IRE International Convention Record, Part 1, pp. 61–75. [carrel.1961.pdf](#)
- Chang, X., Jin, T., Yu, K., Li, Y., Li, J., & Zhang, Q. (2019). Soil Moisture Estimation by GNSS Multipath Signal. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 2559, 11(21)*, 2559. <https://doi.org/10.3390/rs11212559>
- Chew, D. (2019). *The wireless internet of things* (E. Hossain, Ed.). IEEE Press.
- Coşkun, S. (2015). *Design of an experimental FMCW weather radar*. ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Constantine A. Balanis (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/enus/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>
- Fatih, S., Ayşen, A., Elif, K., Çalışkan, T., & Kozal, E. (t.y.). *Global integration of Turkish agriculture and agriculture 4.0*.
- Ferrara, V., Chizh, M., & Pietrelli, A. (2017). *Action TUI208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar Guide to building a YNR radar for educational use Sections: RF Hardware design, Firmware of microcontroller, and management software*.
- Güçük, M. (2019). *Hassas tarım uygulamalarında nesnelerin interneti teknolojilerinin kullanımı*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hardie, M. (2020). Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 20(23), 1-23. <https://doi.org/10.3390/S20236934>
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., & Annan, A. P. (2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 2(4), 476–491. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760>
- Kıcık, N. (2023). *Küresel iklim değişikliğinde tarım ve bir çözüm önerisi olarak modern tarım uygulamaları*. Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Koch, F., Schlenz, F., Prasch, M., Appel, F., Ruf, T., & Mauser, W. (2016). Soil Moisture Retrieval Based on GPS Signal Strength Attenuation. *Water 2016, Vol. 8, Page 276, 8(7)*, 276. <https://doi.org/10.3390/W8070276>
- Koyuncu, H., Gunduz, B., & Koyuncu, B. (2021). Construction of 3d soil moisture maps in agricultural fields by using wireless sensor communication. *Gazi University Journal of Science*, 34(1), 84-98. <https://doi.org/10.35378/GUJS.720778>
- Körbalta, H., Kelimeler, A., Güvenliği, S., Çatışmaları, S., Paylaşımı, S., & Tahsisi, S. (2019). *Türkiye’de yerel su güvenliği*. 55-84. <https://doi.org/10.28956/gbd.562965>

- Lambot, S., & Andre, F. (2014). Full-wave modeling of near-field radar data for planar layered media reconstruction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2295-2303. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2259243>
- Lambot, S., Antoine, M., Vanclooster, M., & Slob, E. C. (2006). Effect of soil roughness on the inversion of off-ground monostatic YNR signal for noninvasive quantification of soil properties. *Water Resources Research*, 42(3). <https://doi.org/10.1029/2005WR004416>
- Lambot, S., Slob, E. C., van den Bosch, I., Stockbroeckx, B., & Vanclooster, M. (2004a). Estimating soil electric properties from monostatic ground-penetrating radar signal inversion in the frequency domain. *Water Resources Research*, 40, W04205. <https://doi.org/10.1029/2003WR002095>
- Lambot, S., Slob, E. C., Van Bosch, I. Den, Stockbroeckx, B., & Vanclooster, M. (2004b). Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2555-2568. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.834800>
- Lambot, S., Weihermüller, L., Huisman, J. A., Vereecken, H., Vanclooster, M., & Slob, E. C. (2006). Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content. *Water Resources Research*, 42(11), W11403. <https://doi.org/10.1029/2006WR005097>
- Lambot, S., Slob, E. C., Rhebergen, J., Lopera, O., Jadoon, K. Z., & Vereecken, H. (2009). Remote estimation of the hydraulic properties of a sand using full-waveform integrated hydrogeophysical inversion of time-lapse, off-ground GPR data. *Vadose Zone Journal*, 8(3), 743–754. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0058>
- Liang, X., Li, X., & Lei, T. (2012). A new NIR technique for rapid determination of soil moisture content. *2012 International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2012*, 16-20. <https://doi.org/10.1109/ICSAI.2012.6223513>
- Liu, X., Chen, J., Cui, X., Liu, Q., Cao, X., & Chen, X. (2019). Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods. *International Journal of Digital Earth*, 12(1), 95-118. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1412520>
- Martini, E., Werban, U., Zacharias, S., Pohle, M., Dietrich, P., & Wollschläger, U. (2017). Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale: Validation with data from a wireless soil moisture monitoring network. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 495-513. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-495-2017>
- Musaoğlu, N. (1999). Elektro-optik ve mikrodalga algılayıcılardan elde edilen uydu verilerinden orman alanlarında meşçere tiplerinin ve yetişme ortamı birimlerinin belirlenme olanakları. İçinde *Musaoğlu, Nebati* . İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Öner, Ç. (2003). *Toprak-su ilişkileri ve toprak suyu ölçüm yöntemleri*. T.C.TARIM ve KÖY İŞLERİ BAKANLIĞI KÖY HİZMETLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ Eskişehir Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları.  
[https://www.researchgate.net/publication/259811554\\_Toprak-Su\\_Iliskileri\\_ve\\_Toprak\\_Suyu\\_Olcum\\_Yontemleri](https://www.researchgate.net/publication/259811554_Toprak-Su_Iliskileri_ve_Toprak_Suyu_Olcum_Yontemleri)
- Özerdem, M. S., & Acar, E. (2017). Toprak nemi tahmini için Radarsat-2 verisinden çoklu saçılma katsayılarının elde edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi mühendislik dergisi*.
- Riese, F. M., & Keller, S. (2019). Fusion of hyperspectral and ground-penetrating radar data to estimate soil moisture: A machine learning approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(6), 2239–2250. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2018.8747076>
- Pichorim, S. F., Gomes, N. J., Batchelor, J. C., Gomes@kent, N. J. A., Uk, N. J. G., Batchelor@kent, J. C. A., & Uk, J. C. B. (2018). Two Solutions of Soil Moisture Sensing with RFID for Landslide Monitoring. *Sensors 2018, Vol. 18, Page 452, 18(2), 452*. <https://doi.org/10.3390/S18020452>
- Rodionov, A., Welp, G., Damerow, L., Berg, T., Amelung, W., & Pätzold, S. (t.y.). *Towards on-the-go field assessment of soil organic carbon using Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy: Developing and testing a novel tractor-driven measuring chamber*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.007>
- Sawadogo, A. (2021). *Sulama yönteminin iyileştirilmesi için uzaktan algılama yaklaşımı ile sulama projelerinin performansının değerlendirilmesi, Burkina Faso, Kou Vadisi örneği*. Bursa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Shao, Z., Cai, J., Fu, P., Hu, L., & Liu, T. (2019). Deep learning-based fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 images for a harmonized surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111425>
- Siosemarde, M., & Siosemardeh, A. (2014). The studding of accuracy of soil moisture measurement by Time Domain Reflectometry (TDR) [Makale]. *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(2), 519–523.  
[https://www.researchgate.net/publication/286554428\\_The\\_studding\\_of\\_accuracy\\_of\\_soil\\_moisture\\_measurement\\_by\\_time\\_domain\\_reflectometry\\_TDR](https://www.researchgate.net/publication/286554428_The_studding_of_accuracy_of_soil_moisture_measurement_by_time_domain_reflectometry_TDR)
- Savi, P., Ferraris, S., & Maio, I. A. (2011). Time-domain reflectometry (TDR) technique for the estimation of soil permittivity [Kitap bölümü]. In B. E. Ozkaraova Gungor (Ed.), *Principles, Application and Assessment in Soil Science*. InTechOpen.  
[Time-Domain Reflectometry \(TDR\) Technique for the Estimation of Soil Permittivity | IntechOpen](https://www.intechopen.com/books/principles-application-and-assessment-in-soil-science/time-domain-reflectometry-tdr-technique-for-the-estimation-of-soil-permittivity)
- Šipoš, D., & Gleich, D. (2020). A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*, 20(8), 2234.  
<https://doi.org/10.3390/s20082234>

- Szyplowska, A., Lewandowski, A., Wilczek, A., Kafarski, M., Szerement, J., & Skierucha, W. (2017). *Soil dielectric-spectrum characterization based on one-port VNA measurement system*. 811. <https://doi.org/10.3390/PROCEEDINGS1080811>
- Şeker, M. (2006). *Mikrodalga tekniği ile tahribatsız nem ölçme - ProQuest Dissertations & Theses Global - ProQuest* [Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].  
<https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2606902397/998E78105E694B32PQ/1?accountid=159111>
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [Makale]. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Türk, A. S. (2004). Yere nüfuz eden darbe radarı için geniş bantlı anten tasarımları. *URSI 2. Ulusal Kongresi*.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Boga, H., Weihermüller, L., Herbst, M., Martinez, G., & Vanderborght, J. (2013). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061>
- Wu, K., Rodriguez, G. A., Zajc, M., Jacquemin, E., Clément, M., De Coster, A., & Lambot, S. (2019). A new drone-borne YNR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment*, 235. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111456>
- Wu, K., Rodriguez, G. A., Zajc, M., Jacquemin, E., Clément, M., & Lambot, S. (2019). A new drone-borne YNR for soil moisture mapping. *10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Held at Near Surface Geoscience Conference and Exhibition 2019, NSG 2019*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902587>
- Yiğit, E. (2007). *Elektromagnetik alan ölçümleriyle yeraltındaki nesnelerin tespit edilmesi ve yere nüfuz eden radar (YNR) görüntülerinin elde edilmesi*. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yin, Z., Lei, T., Yan, Q., Chen, Z., & Dong, Y. (t.y.). *A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.029>
- Yu, C., Warrick, A. W., Conklin, M. H., Young, M. H., & Zreda, M. (1997). Two- and three-parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement [Makale]. *Water Resources Research*, 33(10), 2411–2418. <https://doi.org/10.1029/97WR01699>
- Yüksel, B., & Aksoy, Ö. (2017). Su stresi koşullarında bitkilerde gözlenen değişimler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 10(2), 1–5. [428813](https://doi.org/10.28813/tbd.2017.10.2.1-5)