

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TATLI SU ORTAMLARINDA YER RADARI YÖNTEMİ UYGULAMALARI
VE KISITLAMALARIN ARAŞTIRILMASI

Bengisu TAŞKIN

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TATLI SU ORTAMLARINDA YER RADARI YÖNTEMİ UYGULAMALARI VE KISITLAMALARIN ARAŞTIRILMASI

Bengisu TAŞKIN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İrfan AKCA

EM bir yöntem olan yer radarı karada yapılan sığ araştırmalarda sıklıkla başvurulmuş bir jeofizik yöntemdir. Bu çalışmada, yer radarı yönteminin suda uygulanabilirliği ile ilgili iki farklı göl ortamında 50, 200 ve 500 MHz frekanslarındaki radar antenleri ile ölçümler yapılmıştır. İki farklı proje kapsamında yürütülen çalışmalarda kapsamlı veri kümeleri elde edilmiştir. Çalışmalar su altı arkeolojisini desteklemek üzere İznik Gölü'nde ve sediman kalınlıklarını belirlemek amacıyla Mogan Gölü'nde yürütülmüştür. Göl sularının iletkenlikleri arasındaki belirgin fark radar sinyallerinin yayılımını da belirlemiştir. Mogan Gölü'nde yüksek elektrik iletkenlik nedeni ile herhangi bir veri elde edilemezken, İznik Gölü çalışmalarında istenilen sinyal penetrasyonu sağlanabilmiş ve olası gömülü yapılara ait belirtiler ortaya konulabilmiştir.

Şubat 2024, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı, Su Altı Jeofiziği, Dielektrik Katsayı, Elektrik İletkenlik

ABSTRACT

Master Thesis

APPLICATIONS AND LIMITATIONS OF THE GPR METHOD IN FRESHWATER ENVIRONMENTS

Bengisu TAŞKIN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. İrfan AKCA

Ground penetrating radar, as an electromagnetic method, is a geophysical tool commonly utilized for shallow investigations on land. In this study, radar antennas operating at frequencies of 50 MHz, 200 MHz, and 500 MHz were employed to assess the feasibility of ground penetrating radar in two distinct lake environments. Comprehensive data sets were collected as part of two separate projects: one conducted in Lake Iznik to support underwater archaeology, and another in Lake Mogan to ascertain sediment thickness. The notable disparity in the conductivity of lake waters played a pivotal role in influencing the propagation of radar signals. While high electrical conductivity hindered data acquisition in Lake Mogan, satisfactory signal penetration was achieved in the studies conducted at Lake Iznik, where indications of potential buried structures were unveiled.

February 2024, 69 pages

Key Words: Ground Penetrating Radar, Marine geophysics, dielectric constant, electrical conductivity

TEŞEKKÜR

Bu çalışma esnasında, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimi ve önerileri ile bana her zaman yardımcı olan, zamanını harcayarak yaptığım her adımı kontrol ederek bana motivasyon veren, çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. İrfan AKCA (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi) sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu tezde verilen yer radarı yönteminin sudaki uygulamaları, TUBITAK-119Y547 ve TUBITAK-122Y040 numaralı iki proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen projelerin ilkinde bursiyer olarak aktif görev almış olduğum, TUBITAK kurumuna destek ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek olan, aynı zamanda stresli dönemlerimde beni alttan alan ve her zaman daha iyisini yapabileceğim konusunda beni cesaretlendiren aynı zamanda vereceğim kararların arkasında olacaklarını bildiğim sevgili anne, babama, tüm üniversite eğitimim boyunca beni cesaretlendiren, umutsuzluğa kapıldığımda bana motivasyon veren, hem okul hem hayat arkadaşım eşim Cemal Efehan TAŞKIN'a, yanımda olduğunu her an hissettiğim, eğitimim konusunda beni hep cesaretlendiren ve kendi tecrübeleri doğrultusunda beni yönlendiren canım ablama, en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Bengisu TAŞKIN
Ankara, Şubat 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ.....	3
2.1 Sönümlenme ve Deri Kalınlığı	6
2.2 Yansıma ve İletim İlkeleri	8
3. YER RADARI YÖNTEMİNİN SU ORTAMINDAKİ UYGULAMALARI	10
3.1 Literatürden Örnekler	11
3.1.1 Su altı arkeolojisi.....	12
3.1.2 Anten frekanslarının içme suyu rezervuarında denenmesi	14
3.1.3 Sediman araştırması	16
3.1.4 Termal tabakalanma araştırması	17
3.1.5 Mühendislik amaçlı yapılan çalışma	18
3.1.6 Kriminal amaçlı yapılan çalışma	21
3.1.7 Göl tabanı sedimanlarının araştırılması	25
3.2 Veri İşlem.....	26
4. SAHA UYGULAMALARI.....	33
4.1 İznik Gölü Radar Çalışmaları	33
4.1.1 Çalışma alanı	33
4.1.2 İznik Gölü ölçüm parametreleri	35
4.1.3 Verilerin işlenmesi.....	38
4.2 Mogan Gölü Çalışmaları	50
5. SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Soğurulma sabiti/atenüasyon
A_0	$z=0$ 'daki genlik
A	Genlik
β	Atenüasyon
ϵ	Dielektrik sabiti
μ	Manyetik geçirgenlik
Γ	Yansıma katsayısı
T	İletim katsayısı
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
ϵ_0	Serbest uzayın dielektrik geçirgenliği
σ	İletkenlik
ω	Açısal frekans

Kısaltmalar

cm	Santimetre
EM	Elektromanyetik
GPR	Ground Penetrating Radar
m	Metre
MHz	Mega Hertz
ns	Nanosaniye
f	Frekans
S	Siemens
μS	Mikrosiemens
WPR	Water Penetrating Radar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yer radarının çalışma ilkesi	4
Şekil 2.2 Yansıyan ve iletilen EM dalgaların gösterimi (Tougaw, 2018'den uyarlanmıştır)	9
Şekil 3.1 Su üzerinde yer radarı ile veri toplama (GPR kesiti Lachhab vd. 2015'den alınmıştır)	10
Şekil 3.2 Yer radarı yönteminin suda veri toplama tekniği (Ruffell ve Parker, 2021) ...	11
Şekil 3.3 Yer radarı yönteminin su ortamındaki kullanım alanları	12
Şekil 3.4 100 MHz ve 400 MHz antenle göl tabanının geneline ait ham (a, c) ve veri işlem uygulanmış radargram kesitleri (b, d) (Qin vd. 2018)	13
Şekil 3.5 Fırın anomalisinin görüntülenmesi a-100 MHz antenle toplanmış veri işlem uygulanmış hali, b-400 MHz antenle toplanmış veri işlem uygulanmış radargram kesiti (Qin vd. 2018)	13
Şekil 3.6 100 MHz, 200 MHz ve 400 MHz'lik antenlerle toplanmış işlenmiş radargramlar (Qin vd. 2017)	15
Şekil 3.7 Sığ ve derin suda 100 MHz'lik antenin test edilmesi (Qin vd. 2017)	16
Şekil 3.8 Profil 1,4,6 ve 7'ye ait işlenmiş yer radarı profilleri (Sambuelli ve Bava 2012)	17
Şekil 3.9 A- İki gün esen kuvvetli rüzgârdan sonra alınan yer radarı ölçümlerine ait işlenmiş radargram, B-Aynı gün ölçülmüş sıcaklık ve dielektrik katsayını grafiği, C- İki günlük sakın havadan sonra alınan yer radarı ölçümlerine ait işlenmiş radargram, D Aynı gün ölçülmüş sıcaklık ve dielektrik katsayını grafiği (Bradford vd 2007)	18
Şekil 3.10 14, 13, 12 ve 11. Profillere ait işlenmiş radargramlarda boru anomalisinin görüntülenmesi (Khristoforov vd. 2016)	19
Şekil 3.11 Borunun başlangıç ve bitiş derinliğinin tespit edildiği radargram (Khristoforov vd. 2016)	20
Şekil 3.12 Borunun göl içimdeki duruşunu gösteren renklendirilmiş ve yorumlanmış radargram kesiti (Khristoforov vd. 2016)	21
Şekil 3.13 50 MHz ve 100 MHz antenle toplanmış verilerin veri işlem öncesi ve sonrası görüntüleri (Ruffell 2006)	22
Şekil 3.14 A: Köprüden kaynaklı herhangi bir gürültü bulunmamaktadır, B: Ringing ya da tekrarlı yansıma, C: Jet ski koltuğu ve benzin kutusu, D: Göl tortusunda kısmen batmış belirtiler, E: Sediman ve anakaya sınırı (Ruffell 2006)	23
Şekil 3.15 C: Jet ski koltuğu ve benzin kutusu, D: Göl tortusunda kısmen batmış belirtiler, F: Köprüden kaynaklanan gürültü (Ruffell 2006)	23
Şekil 3.16 A: Köprüden kaynaklı gürültü, B: Göl-tortu arayüzü. C: Göl çökelleri-anakaya sınırı, D: Göl içindeki nesne, kaya vb. (Ruffell 2006)	24

Şekil 3.17 A: Köprüden kaynaklı gürültü, B: Göl-tortu arayüzü, C: Göl çökelleri-anakaya sınırı, D: Göl içindeki nesne, kaya vb., sarı dikdörtgen : Jet ski'nin gövdesi (Ruffell 2006).....	24
Şekil 3.18 Polevskoye Gölü'ndeki GPR profilleri .Üstte bulunan şekil: toplanan verileri, Altta bulunan şekiller: yansımaları (siyah çizgiler) ve sondajların konumu ile işlenmiş verileri göstermektedir (Ryazantsev vd. 2021).....	26
Şekil 3.19 200 MHz'lik antenle toplanmış ham veri kesiti.....	27
Şekil 3.20 Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış WPR kesiti.....	28
Şekil 3.21 Dewow işlemi öncesi ve sonrası,solda bulunan grafik (Cassidy, 2009), sağ da bulunan görsel (Baso Maruddani ve Efri Sandi, 2019).....	29
Şekil 3.22 WOW gürültüsünün kaldırılması.....	29
Şekil 3.23 Zaman ortamında medyan filtre uygulanmış WPR kesiti.....	30
Şekil 3.24 Bant geçişli süzgeç uygulanmış WPR kesiti.....	30
Şekil 3.25 Genlik kazancı yapılmış WPR kesit	31
Şekil 3.26 Arka plan gürültüleri kaldırılmış WPR kesit	32
Şekil 4.1 Çalışma alanının haritadaki yer ve ölçümlerin gerçekleştirildiği zamandaki görüntüsü.....	34
Şekil 4.2 İznik Gölü'nde radar ölçümleri yapılan hatların konumu (<i>UTM-WGS84</i>)....	37
Şekil 4.3 Ölçüm sisteminin görüntüsü	38
Şekil 4.5 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait işlenmemiş WPR kesitleri	39
Şekil 4.6 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) için başlangıç zamanı düzeltmesi yapılmış WPR kesiti.....	40
Şekil 4.7 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımına ek medyan filtre uygulanmış WPR kesitleri.....	41
Şekil 4.8 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek wow gürültüsü kaldırılmış WPR kesitleri.....	42
Şekil 4.9 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek bant geçişli işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler	43
Şekil 4.10 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek genlik kazanç işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler	44
Şekil 4.11 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek arka plan gürültülerini kaldırma işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler	45
Şekil 4.12 Veri işlem aşamaları sonrası seçilen sinyalin genlik spektrumlarının gösterilmesi	47
Şekil 4.13 5m genişliğinde bir alanda gözlenebilen ve yaklaşık 2m derinlikte bulunan ve birim sınırı olarak yorumlanan belirti.....	48

Şekil 4.14 200 MHz antenle toplanmış profil üzerinde ayırt edilen belirtiler ve bunların hava fotoğrafı üzerindeki konumları.....	49
Şekil 4.15 500 MHz işlemiş radar verilerinden oluşturulan 85cm derinlik dilimi.....	50
Şekil 4.16 Mogan Gölü çalışma alanının konumu	51
Şekil 4.17 Mogan Gölü dip çamuru temizliği çalışmaları ve göl tabanından görüntüler	52
Şekil 4.18 Mogan Gölü su tabanı derinliği haritası	53
Şekil 4.19 Ölçüm sisteminin görüntüsü	54
Şekil 4.20 Mogan Gölü 72 nolu radar profilinin konumu.....	55
Şekil 4.21 Veri işlem akış şeması	56
Şekil 4.22 Mogan Gölü 72 nolu radar profilinde elde edilen radargram ve batimetri profili.....	56
Şekil 4.23 Mogan Gölü 29 nolu radar profilinde elde edilen a. ham, b. işlenmiş radargram	57
Şekil 4.24 a) Üretilen sensörün ön, (b) arka yüzü ve (c) cam pipet içeren sensör düzeneği.	60
Şekil 4.25 Üretilen boş sensörün ölçülen iletim spektrumu ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması	60
Şekil 4.26(a) Bazı sıvıların mikroşerit sensör ile ölçülen iletim spektrumları, (b) Mogan Gölü ve saf suyun iletim spektrumlarının karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.27 Sıvıların (a) dielektrik sabitlerinin gerçel kısımlarının rezonans frekanslarıyla değişimi, (b) kayıp tanjantının rezonans genlikleri ile değişimi	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Bazı jeolojik malzemelerin ve ortamların dielektrik sabit (ϵ_r), iletkenlik (σ), hız ve soğrulma (α) değerleri, n/a bu jeolojik malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir (Wilchek, 2000; Conyers ve Goodman, 1997; Leckebush, 2003)	5
Çizelge 4.1 Farklı su kaynakları için öz direnç değişim aralıkları Telford ve Geldart, (1990)'dan alınmıştır)	36
Çizelge 4.2 İznik Gölü radar ölçümlerinde kullanılan ölçüm parametreleri.....	36
Çizelge 4.3 Ölçümlerde kullanılan parametreler	54
Çizelge 4.4 Mogan Gölü suyu yağışlı dönem elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları	58
Çizelge 4.5 Mogan Gölü suyu kurak dönem elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları.....	58

1. GİRİŞ

Jeofizik, arama ve mühendislik probleminin çözümü için vazgeçilmez bir bilim dalıdır. Jeofizik yöntemlerin kullanımı ile yer içinin, farklı fiziksel parametrelere göre görüntüleri ve modelleri elde edilebilmektedir. Yöntem, kutuplardan, maden galerileri duvarlarına kadar farklı alanlarda kullanılmaktadır. Yer radarının su ortamlarında kullanımı ise ayrı bir başlık altında değerlendirilmelidir. Bunun nedeni örtü katmanının su olmasıdır. Suyun derinliği ve elektrik özellikleri yöntemin bu alanda uygulanabilirliği konusunda son derece belirleyicidir. Bu sayede jeofizik, yeraltı suyu, maden ve endüstriyel hammadde, petrol ve enerji kaynaklarının aranması, bölgesel jeoloji ve tektonik yapı araştırmaları, arkeolojik kalıntıların tahribatsız belirlenmesi gibi çok geniş bir yelpazedeki alanlara hizmet etmektedir. Sondaj, yarma, açma gibi diğer fiziksel yöntemler ile karşılaştırıldığında maliyet, iş gücü ve zaman başlıklarında önemli kazanç ve kolaylıklar sağlamaktadır. Sismik, elektrik-EM, potansiyel alan (gravite ve manyetik) ve radyometrik uygulamalar başlıca jeofizik yöntemlerdir. Her biri farklı fiziksel süreç ve parametrelere duyarlı olan yöntemlerden bir veya birkaçı araştırma amaçlarına bağlı olarak seçilerek kullanılabilir. Yöntemlerin uygulanması ile elde edilen veriler uzamsal olarak farklı geometrilere olabilmektedir. Buna bağlı olarak bir-boyutlu (1B), iki-boyutlu (2B) ve üç-boyutlu olarak sunulabilen parametre dağılım modelleri oluşturulabilmektedir. Verilerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi bu çerçevede bütüncül bir süreç olup benzer derecede önemlidir.

Jeofizik yöntemlerde veri toplama, çöllerden kutuplara kadar uzanan koşullarda karada, yer altında açılan galeri ya da kuyularda, insanlı-insansız hava araçları ile havadan ve deniz, göl, akarsu gibi su ortamlarında gerçekleştirilebilmektedir. Ancak her çalışma koşulu beraberinde çeşitli güçlük ve kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Kimi durumlarda koşullara bağlı olarak uygulama ile ilgili çeşitli kolaylıkların ortaya çıkması da olasıdır. Ancak jeofizik yöntemlerin her biri bir fizik deneyine dayandığından hava, kara ve su ortamlarının getirdiği fiziksel koşullara bağlı olarak çeşitli tedbir ve düzenlemelerin yapılması gerekli olabilmektedir. Öte yandan kimi durumlarda tüm tedbir ve düzenlemelere karşın bazı yöntemler bazı ortamlarda kullanılabilir olmaktan çıkabilir. Yer radarı, yer içinin fiziksel özelliklerini araştırmak için kullanılan güçlü bir araçtır. Yer

radarı (GPR) yönteminde yer içine farklı frekanslarda elektromanyetik (EM) dalgalar gönderilir ve bu dalgalar yer içindeki farklı elektrik özelliklere sahip süreksizliklerden yansıyıp kırılarak geri döner. Geri dönen EM dalgalar yüzeydeki alıcılarla kaydedilir, EM dalgaların seyahat süreleri ve genlikleri ölçülerek yer içi hakkında bilgi edinilir. Bu tez çalışmasının konusu bu çerçevede tanımlanmış olup, jeofizik yöntemlerden yer radarının (yere nüfuz eden radar: **Ground Penetrating Radar**) tatlı su ortamlarındaki genel uygulamaları, kısıtları, su özelliklerine bağlı olarak nüfuz derinliğindeki değişimler ve anten frekansı seçimi gibi konular irdelenmiştir. Çalışmada, yöntemin genel tanıtımı, su ortamında farklı amaçlar ile yapılan uygulamalarından örnekler, iki farklı özellikteki göl yüzeyinde yapılan saha çalışmalarının sonuçlarına yer verilmiştir. Ülkemizde yer radarının su üzerinde kullanımına ilişkin yapılan çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Bu çalışma bundan sonra yapılacak olan su üzerindeki yer radarı çalışmalarında dikkat edilmesi gereken durumlara ışık tutmuş olacaktır. Özellikle göl ya da akarsuyun iletkenliği, dielektrik katsayısı gibi fiziksel özellik değişimlerine bağlı olarak nelerle karşılaşılacağı ve su derinliğinin etkisi farklı anten frekansları için araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında İznik Gölü (Bursa) ve Mogan Gölü'nde (Ankara) saha çalışmaları yapılmıştır. İznik Gölü'nde 100 MHz, 200 MHz ve 500 MHz antenlerle ölçümler alınırken, Mogan Gölü'nde 50 MHz ve 200 MHz frekanslarına sahip antenlerle ölçümler alınmıştır. Bu göller sırasıyla ölçüme uygun olan ve olmayan durumlar için iyi birer örnek teşkile etmiştir.

Bu tezde, yer radarı yönteminin su ortamlarında kullanımı ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yöntemin temelleri verilmiş, artık neredeyse standart hale gelen veri işlem süreçleri özetlenmiştir. Literatürde farklı amaçlar ve farklı donanımlar ile yapılan çalışmalardan örnekler derlenmiş ve araştırmacıların deneyimleri özetlenmiştir.

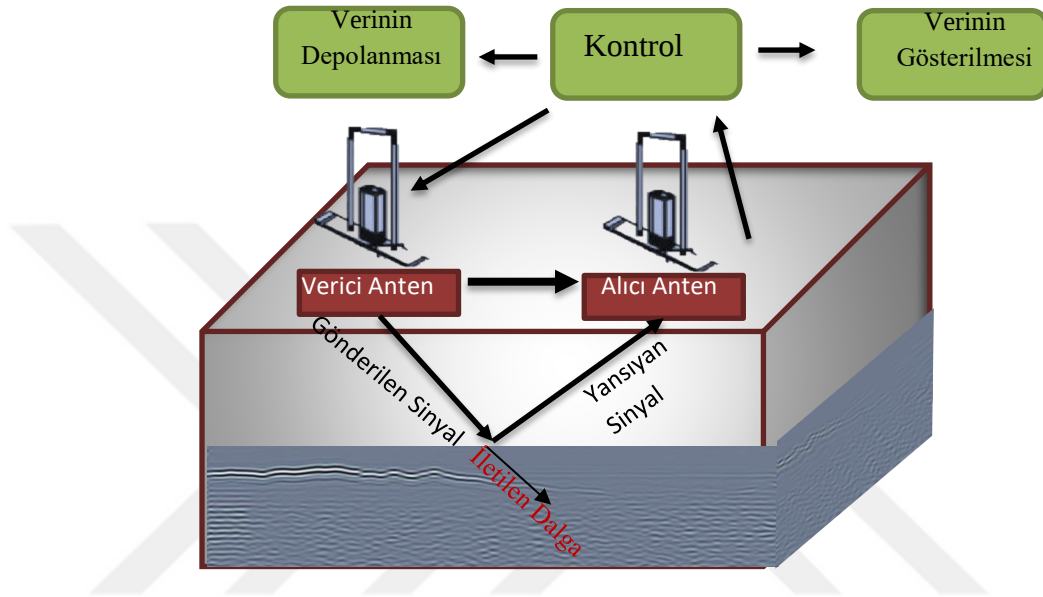
2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ

Jeofizik yöntemlerden yer radarı yöntemi özellikle arkeolojik yapı, su borusu, doğalgaz hattı, elektrik hattı aranması gibi durumlarda yapı ve oluşumların tahribatından kaçınmak için önemli bir yöntemdir. Yer radarı yöntemiyle santimetre ölçeğinden birkaç on metre ölçeğine kadar araştırma yapmak mümkündür. Araştırma derinliği, çözünürlük ilişkisi farklı anten frekansı seçimi ile ayarlanabilmektedir.

GPR yönteminin ilk uygulamaları buz kalınlığının ölçülmesi üzerinedir. Annan ve Davis (1989) buzul bölgelerdeki erimiş su üzerinde bazı öncel GPR çalışmalarında bulunmuşlardır. Su, buz, sediman ve ana kaya arasındaki bariz elektrik farklardan dolayı buzul çevresi ortamlarda GPR uygulamaları içeren pek çok çalışma mevcuttur (Wu vd. 2009; Stevans vd. 2009, Doolittle vd 1990). Literatürde sığ su ortamlarında GPR kullanımına dair pek çok çalışma bulunmaktadır. Yer radarı yönteminin su üzerinde kullanımı ile oluşan durum suya nüfuz eden radar şeklinde ifade edilmektedir (WPR, Ruffel ve Parker, 2021). Özellikle suyun elektrik iletkenliğinin düşük olduğu tatlı su ortamlarında WPR yönteminin kullanımı daha uygundur. WPR yönteminin uygulanması ile, buz ile kaplı göllerde batimetrik ölçümler ve sediman morfolojisinin belirlenmesinde (Moorman ve Michel, 1997; Schwamborn vd. 2002; Powers vd. 1999), nehir ve rezervuarlarda (Arcone vd., 1992; Best vd., 2005; Hunter vd., 2003) başarılı sonuçlar alındığı bildirilmiştir. Kurtuluş vd. (2013), Kocaeli ili İzmit ilçesinde bulunan Bıçkıdere gölü üzerinde 38 MHz anten kullanarak WPR ile taban yapısını araştırmışlardır. Bunlara ek olarak yöntemin gaz çıkışlarını belirlemede kullanımına dair örnekler de mevcuttur (Haeni vd., 2000; Melcher vd., 2002; Cheng vd., 2004; Costa vd., 2006). Göl ve nehir ortamında çökel katmanının özelliklerinin belirlenmesi amacıyla WPR çalışmaları mevcuttur (Streich vd., 2006). Yer radarı yönteminin su üzerinde kullanımına ilişkin diğer çalışmalar literatür örnekleri kısmında anlatılmıştır.

Yer radarı yönteminin veri toplama düzeneğinin basitleştirilmiş hali Şekil 2.1’de verilmiştir. GPR ölçümleri, jeofizik araştırmalarda, özellikle düşeyde yüksek çözünürlük gerektiği durumlarda, 1990’lardan beri sıklıkla kullanılmaktadır (Neal, 2004). Yöntemin

en önemli avantajlarında biri toplanan verilerin gerçek zamanlı olarak yorumlanabilmesine olanak vermesidir (Petrone vd., 2016).



Şekil 2.1 Yer radarının çalışma ilkesi

Yer radarı yönteminin iyi sonuç verebilmesi için diğer yöntemlerde olduğu gibi aranan yapı, tabaka, cisim ya da mühendislik yapısının dielektrik değerinin bulunduğu ortama göre farklı olması gerekmektedir. Yer radarı yöntemi düşük iletkenlik diğer bir deyişle yüksek öz dirençli yapı ve durumları belirlemekte başarılı bir yöntemdir.

Yöntemle bir çalışma yürütmeden önce ortam ile ilgili bu özelliklerin belirlenmesi ya da bilinmesi faydalı olacaktır. Bilgi amacıyla bazı jeolojik malzemelerin iletkenlikleri, bağlı dielektrik sabitleri ve hızları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı jeolojik malzemelerin ve ortamların dielektrik sabit (ϵ_r), iletkenlik (σ), hız ve soğrulma (α) değerleri, n/a bu jeolojik malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir (Wilchek, 2000; Conyers ve Goodman, 1997; Leckebush, 2003)

Jeolojik Malzeme	Bağıl dielektrik sabiti ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	EM Dalga Yayılım Hızı (m/ns)	İletkenlik σ (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti α
Beton	5.5	n/a	n/a	n/a
Buz	4	0.16	0.01	0.01
Doygun kum	25	n/a	n/a	n/a
Gölsel Çökel	50	0.04	n/a	n/a
Granit	4.6	0.13	0.01-1	0.01-1
Hava	1	0.3	0	0
Kireçtaşı (Islak)	8	n/a	n/a	n/a
Kum (Islak)	15-25	n/a	n/a	n/a
Kumlu toprak (Islak)	23.5	n/a	n/a	n/a
Islak toprak	6	n/a	n/a	n/a
Kil	5-40	0.06	2-1000	1-300
Kil (ıslak)	10	0.095	500	300
Killi toprak (ıslak)	19	0.07	500	200
Killi toprak (kuru)	2.5	0.19	2.7	3
Kireçtaşı	4-8	0.12	0.5-2	0.4-1
Kum(kuru)	5	0.13	0.01	0.01
Kumlu toprak (ıslak)	25	0.06	69	23
Kumlu toprak(kuru)	2.6	0.19	1.4	1
Kumtaşı	4.7-12	0.09-0.14	1×10^{-5} -0.7	5×10^{-8} -0.6
Kuru kil	4	n/a	n/a	n/a
Kuru kireçtaşı	5.5	n/a	n/a	n/a
Kuru toprak	2.5	n/a	n/a	n/a
Su (taze)	80	0.033	0.5	0.1
Su (tuzlu)	80	0.01	3000	1000
Sualtı kültürel tabaka	70	0.04	-	-
Tatlı su	80	0.033	0.5	1
Tuzlu su	81-88	0.033	3000	600
Silt	5-30	0.07	1-100	1-100

Yöntemin uygulanabilirliği ve araştırma derinliği ortamın elektrik özelliklerine ve atenüasyon koşullarına önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle bu kavramlar hakkında genel

bir bilgi vermek önemlidir. İzleyen bölümde EM yöntemlerde önemli bir başlık teşkil eden atenüasyon ve deri kalınlığı kavramı açıklanmıştır.

2.1 Sönümlenme ve Deri Kalınlığı

Sönümlenme, radar dalgalarının yeraltında iletildikçe sinyal gücündeki azalmayı ifade eder. Bu olgu, radar dalgalarının yayıldığı malzemelerin fiziksel özelliklerinden etkilenir. Zayıflamanın anlaşılması, GPR uygulamalarında önemlidir. Çünkü bu kavram nüfuz derinliğini ve toplanan verilerin kalitesini etkiler. GPR sinyallerinin sönümlenmesi:

1. EM Dalga Emilimi (Absorption): Farklı malzemeler değişen derecelerde EM dalga emilimine sahiptir. Metaller veya ıslak kil gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemeler daha fazla EM enerji emme eğilimindedir ve bu da daha hızlı zayıflamaya yol açar. Radar dalgalarının emilmesi, EM enerjinin yeraltında ısıya dönüşmesine neden olur.

2. Yeraltı Malzemelerinin İletkenliği: Yeraltı malzemelerinin elektrik iletkenliği zayıflamada önemli rol oynar. Elektrik akımlarının kolayca akmasını sağlayan iletken malzemeler GPR sinyallerini daha hızlı zayıflatma eğilimindedir. GPR sinyalleri, artan elektrik iletkenliği nedeniyle yüksek nem içeriğine sahip toprak veya kayalarda daha fazla zayıflama yaşar.

3. Frekans Bağımlılığı: Atenüasyon genellikle frekansa bağlıdır. Yüksek frekanslı radar sinyalleri, düşük frekanslı sinyallere göre zayıflamaya daha duyarlıdır. Uygulamada, GPR sistemleri çalışmanın amacına bağlı olarak bir dizi frekans kullanabilir. Daha yüksek frekanslar daha iyi çözünürlük sağlar ancak artan zayıflama nedeniyle nüfuz derinliğini sınırlar.

4. Saçılma: Saçılma, radar dalgaları küçük ölçekli düzensizliklerle veya yeraltı malzeme özelliklerinde değişikliklerle karşılaştığında meydana gelir. Bu, enerjinin çeşitli yönlerde yayılmasına yol açarak sinyal zayıflamasına katkıda bulunabilir.

5. Arayüzlerde Soğurma ve Yansıma: Radar dalgaları farklı jeolojik birim ya da yapay nesneler arasındaki arayüzlerle karşılaştığında, enerjinin bir kısmı emilebilir, bir kısmı ise yüzeye doğru geri yansıtılabilir. Bu süreçler genel sinyal zayıflamasına katkıda bulunur.

Zayıflamayı anlamak ve ölçmek, GPR verilerinin doğru şekilde yorumlanması için çok önemlidir. Araştırmacılar ve uygulayıcılar, zayıflama etkilerini hesaba katmak ve jeolojik haritalama, arkeoloji, çevresel saha değerlendirmeleri ve altyapı araştırmaları dahil olmak üzere GPR uygulamalarında yeraltı görüntülemenin güvenilirliğini artırmak için sıklıkla genlik düzeltmesi yöntemleri kullanırlar.

Sönümlenme basitçe, EM dalganın yayıldığı sırada meydana gelen genlik kaybının oranı olarak tanımlanmaktadır (Anonymous, 2023). EM dalganın atenuasyonu β olarak ifade edilmektedir. Yer içine iletilen bir düzlem dalga için sönümlenme Denklem 2.1'deki gibi ifade edilmektedir:

$$A(z) = A_0 e^{\beta z}. \quad (2.1)$$

Burada A anlık genlik değerini, A_0 ise $z=0$ m'deki genlik değerini ifade etmektedir. β ise sönüm etmeni ya da atenuasyon katsayısı olarak tanımlanır ve izleyen denklem ile verilir:

$$\beta = \omega \left(\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right)^{1/2} \geq 0. \quad (2.2)$$

Burada ω açısal frekansı, ϵ dielektrik sabiti, μ manyetik geçirgenliği, σ iletkenliği ifade etmektedir. Dalgaların zayıflamasına bağlı olarak gündeme gelen bir diğer kavram ise deri kalınlığıdır. Deri kalınlığı bir EM dalganın başlangıçtaki genliğinin 1/e katına kadar (yaklaşık %37) azalmadan önce kat etmesi gereken mesafeyi tanımlamaktadır. Deri kalınlığı kavramı, yüksek nem içeriğine sahip toprak, kaya ya da doğrudan suyun kendisi gibi elektrik iletkenliği yüksek malzemelerle çalışırken özellikle önemlidir. Bu malzemelerde, dalgaların soğurulması ve zayıflaması nedeniyle EM dalgaların nüfuz derinliği sınırlıdır. Deri kalınlığı matematiksel olarak Denklem 2.3'teki gibi ifade edilir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega^2 \mu \epsilon}} \left[\left(\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{-1/2} - 1 \right) \right]^{1/2}. \quad (2.3)$$

$$k^2 = \epsilon \mu \omega^2 + i \mu \sigma \omega. \quad (2.4)$$

$\omega=2\pi f$, f , uygulanan alternatif manyetik alanın frekansdır. Yer radarı yönteminde, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar kullanılır. Kullanılan yüksek frekans 10^7 Hz ve üzeridir. Kuramsal olarak elektromanyetik dalgalar yalıtkan ortamda (havada) da ilerleyebilir. Yalıtkan ortama örnek olarak boşluk göz önüne alınırsa dalga denkleminde iletkenlik içeren terim ihmal edilir. Bu durumda dalga sayısı,

$$k^2 = \epsilon \mu \omega^2 \quad (2.5)$$

olur (Ulugergerli ve Özürkan, 2005).

Dünyanın manyetik geçirgen olmadığını ($\mu=\mu_0$) varsayarsak, deri kalınlığı için iki uygun yaklaşım mevcuttur:

$$\delta \approx \begin{cases} 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} & \text{için } \omega \epsilon \ll \sigma \\ 0.0053 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} & \text{için } \sigma \ll \omega \epsilon \end{cases}, \quad (2.6)$$

burada f Hz cinsinden EM dalganın frekansdır. Deri kalınlığı EM dalgaların frekansının karekökü ile ters orantılıdır. Daha yüksek frekanslar daha sıkı deri kalınlıklarına neden olur, bu da daha yüksek frekanslı sinyallerin daha güçlü bir şekilde zayıflatıldığı ve yeraltına o kadar derin nüfuz etmediği anlamına gelir. Deri kalınlığı, GPR sinyallerinin etkili bir şekilde nüfuz edebileceği derinliğe ilişkin bir tahmin sağlar. Derinlik bunun ötesinde arttıkça sinyallerin genliği önemli ölçüde azalır.

2.2 Yansıma ve İletim İlkeleri

GPR sinyallerinin arayüzeylerdeki davranışları, sınır boyunca arayüzeyin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Farklı ϵ_r değerlerine sahip iki tabakanın sınırına bir EM dalga

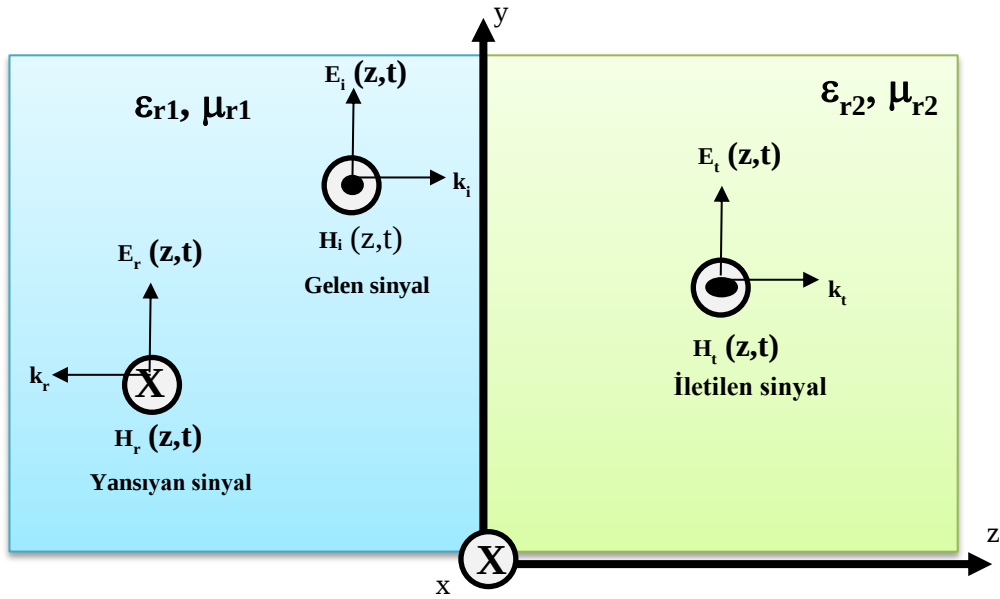
geldiğinde, yansıma ve iletim katsayılarını ya iki bölgenin karakteristik empedanslarından ya da bağıl dielektrik sabitlerinden hesaplanmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Tougaw, 2018):

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}, \quad (2.7)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}, \quad (2.8)$$

$$T = 1 + \Gamma. \quad (2.9)$$

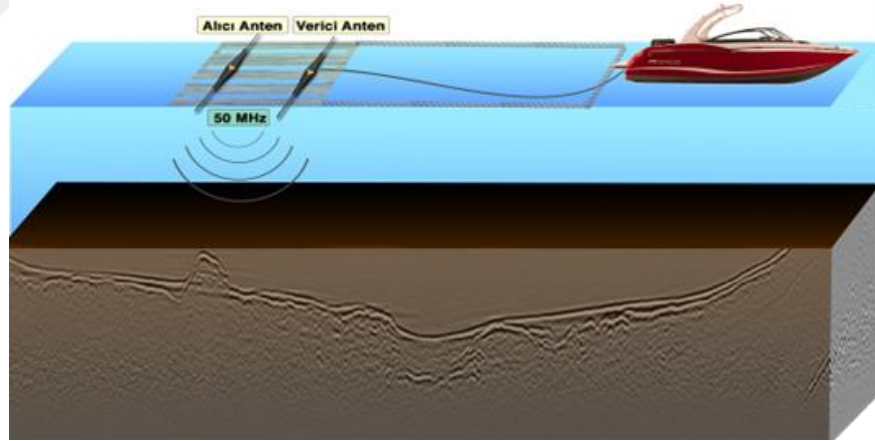
Burada Γ yansıma katsayısı, T iletim katsayısı, ϵ_r bağıl dielektrik sabitini göstermektedir. Şekil 2.2’de yansıyan ve iletilen EM dalgaların gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.2 Yansıyan ve iletilen EM dalgaların gösterimi (Tougaw, 2018’den uyarlanmıştır)

3. YER RADARI YÖNTEMİNİN SU ORTAMINDAKİ UYGULAMALARI

Yer radarı yöntemi önceki bölümde anlatılan atenüasyon ve deri kalınlığı kavramları ışığında denizel ortamlarda kullanılamaz. Ancak uygun fiziksel koşullar altında akarsu, göl, baraj gibi tatlı su ortamlarında kullanılabilir. Bu uygulamaların karada rutin olarak yapılan GPR çalışmalarından farkı örtü katmanının bir su kolonundan oluşmasıdır. Bunun anlamı, yer radarı sinyalinin karada olan örtü tabaka dışında bir de su kolonundan sönümlenmeden göl tabanı katmanlarına ulaşması gerektiğidir. Bu nedenle göl tabanının iletkenliği ya da dielektrik sabiti dışında, geçtiği su kolonunun iletkenliği ve dielektrik katsayısı da önemlidir. Böylece anten frekansının seçiminde su kolonu kalınlığı ve suyun iletkenliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Suda yer radarı ölçüm sistemi genel olarak alıcı ve verici anten, kayıtçı, kontrol sistemi ve karadakin ek olarak bir de antenlerin konumlandırılacağı bot ya da tekneden oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin genel bir görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Su üzerinde yer radarı ile veri toplama (GPR kesiti Lachhab vd. 2015’den alınmıştır)

Suda veri toplamada en yaygın kullanılan ölçüm tekniği Şekil 3.2’de gösterilen kauçuk bir bota antenlerin motordan gelecek gürültüden etkilenmeyecek şekilde yerleştirilerek çok düşük hızda botun sürülmesi ya da çekilmesi prensibine dayanmaktadır. Açık anten

ya da kapalı anten olması fark etmeksizin ölçümler için kauçuk bir bot ya da tekne kullanılabilir.



Şekil 3.2 Yer radarı yönteminin suda veri toplama tekniği (Ruffell ve Parker, 2021)

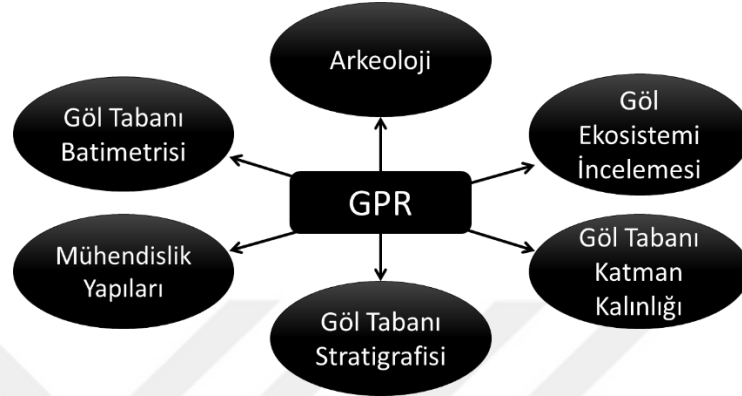
Yer radarı yöntemi uzun yıllardır karada kullanılmakla birlikte son yıllarda su üzerinde de kullanılmaktadır. Yer radarının su üzerinde kullanımı için suya nüfuz eden radar anlamına gelen WPR (Water Penetrating Radar, WPR) kısaltması kullanılabilir (Ruffell ve Parker, 2021). WPR yönteminde karadan farklı olarak sinyalin tabana ulaşabilmesi için bir de su kolonunu geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle üzerinde ölçüm alınan suyun iletkenliği ve dielektrik sabiti ölçümün sağlıklı olabilmesi için oldukça önemlidir. Ölçümü alabilmek için genellikle EM sinyali bozmayacak plastik botlar kullanılmaktadır.

Yer radarının sudaki uygulamaları ile genellikle su tabanı topoğrafyasının belirlenmesi, su altı arkeolojisi, gömülü altyapıların tespiti, göl veya nehir tabanı tortullarının incelenmesi, mühendislik çalışmaları, dolgu kalınlığının belirlenmesi, buz kalınlığının belirlenmesi amaçlarına ulaşılmaya çalışılır.

3.1 Literatürden Örnekler

Yer radarı yöntemi karada olduğu gibi su alanlarında da farklı amaçlarla kullanılabilir. Literatürde sığ su ortamlarında GPR kullanımına dair pek çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle iletkenliği düşük su ortamlarında GPR yöntemi kullanılmaya uygundur. Bu bölümde arkeolojik nesnelerin tespiti, göl ekosistemi

incelemesi, göl tabanı katman kalınlığının bulunması, göl tabanı stratigrafisinin incelenmesi, mühendislik yapılarının incelenmesi ve göl tabanı batimetrisinin bulunması konularıyla ilgili örnekler incelenmiştir. Kullanım alanlarının şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



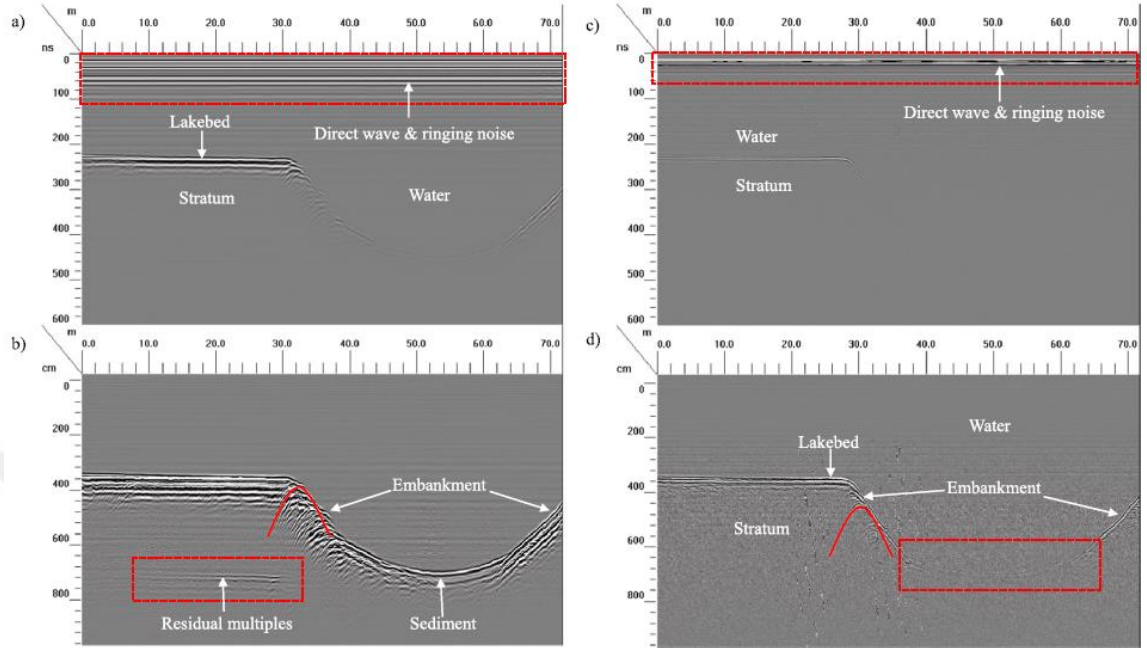
Şekil 3.3 Yer radarı yönteminin su ortamındaki kullanım alanları

Burada belirtilen alanlarla ilgili örnekler tez çalışması ile ilgili olduğundan kısaca anlatılacaktır.

3.1.1 Su altı arkeolojisi

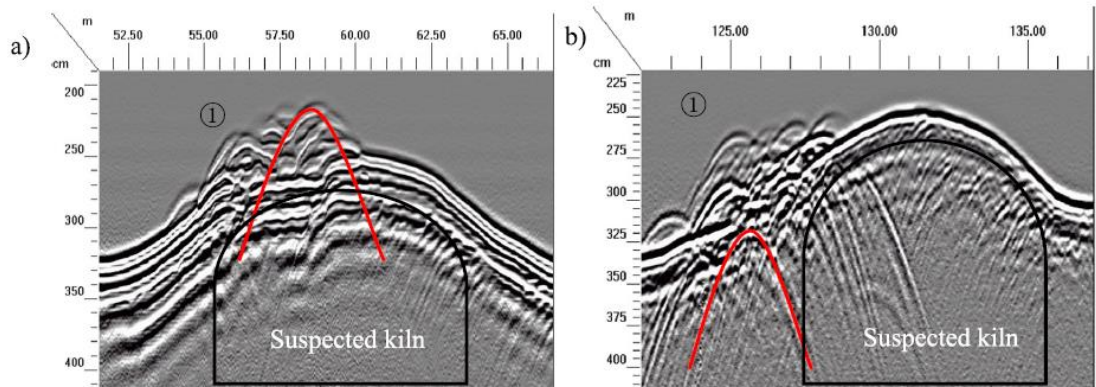
Bu çalışma Çin'de bulunan bir gölde arkeolojik Yue fırını kalıntılarını bulmak amacıyla yapılmıştır. Göl çevresinde yaklaşık 120 adet Yue fırını bulunmaktadır ve fırınlardan bazılarının göl içinde de devam ettiği düşünülmektedir (Qin vd. 2018). Yapılan bu çalışmada ölçümler plastik bir botta toplanmış ve antenleri motordan uzağa koyarak, motordan gelecek gürültünün önüne geçilmiştir. Ölçümlerde 100 MHz ve 400 MHz'lik antenler kullanılmıştır. Göl suyu iletkenliği ortalama $34\mu\text{S}/\text{cm}$ ($0.0034\text{ S}/\text{m}$)'dir. Şekil 3.4'te a ve b profilleri sırasıyla 100 MHz ve 400 MHz antenle toplanmış ham verileri göstermektedir. b ve d radargramları ise sırasıyla 100 MHz ve 400 MHz antenle toplanmış işlenmiş verilere aittir. b şekli incelenecek olursa yatayda 0-30m arasında göl tabanının düz devam ettiği görülmektedir. 30m sonrasında ise maksimum derinliği 7.2 m olan batık bir alan görülmektedir. Buradan yola çıkarak araştırmacılar su seviyesinin yaklaşık 3.7m arttığını söylemişlerdir. Oklarla gösterilen yamaçlarda daha güçlü sinyal elde edilirken

göl tabanının dip kısmında tortu ve sediman kaplanmasından dolayı daha düşük genlikli sinyal elde edilmiştir (Qin vd. 2018).



Şekil 3.4 100 MHz ve 400 MHz antenle göl tabanının geneline ait ham (a, c) ve veri işlem uygulanmış radargram kesitleri (b, d) (Qin vd. 2018)

Fırını görüntülemek adına 100 MHz antenle toplanan verinin doğrultusuna ortogonal olarak bir de 400 MHz antenle veri toplanmıştır. Şekil 3.5-a 100 MHz antenle toplanmış radargrama, Şekil 3.5-b ise 400 MHz antenle toplanmış veriye aittir. Siyah çerçeveyle gösterilen kısım fırın yapısını göstermektedir. Kırmızı hiperboller ise fırının o kısımlarında çökme meydana geldiğini göstermektedir.

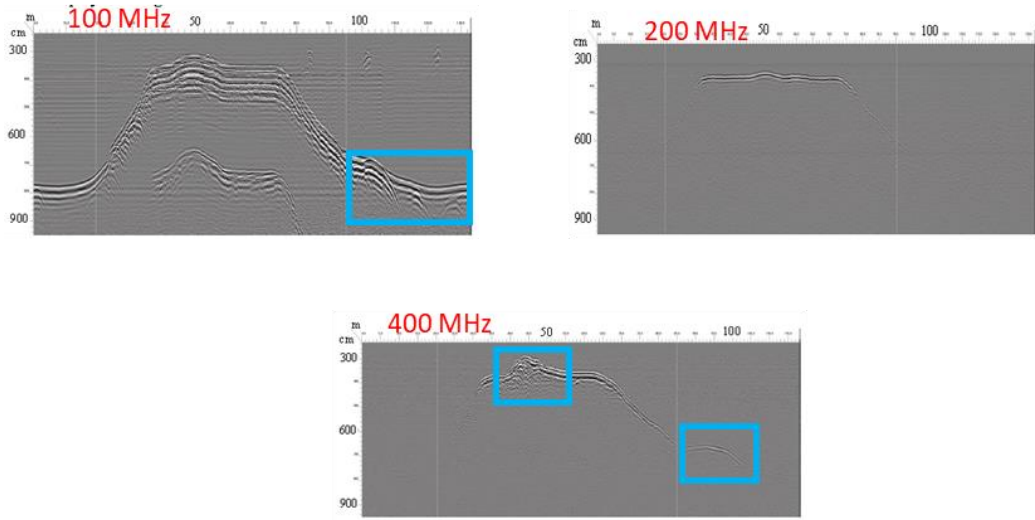


Şekil 3.5 Fırın anomalisinin görüntülenmesi a-100 MHz antenle toplanmış veri işlem uygulanmış hali, b-400 MHz antenle toplanmış veri işlem uygulanmış radargram kesiti (Qin vd. 2018)

Sonuç olarak araştırmacılar gölde sular altında kalan Yue fırını tespit etmişlerdir. Göl tabanının genel itibarıyla taranmasında göl tabanının maksimum derinliği olan 7.2 metrelerde 100 MHz anten göl tabanını görüntüleyebilirken 400 MHz olan anten bu derinliklerde yetersiz kalmıştır. Fırın kalıntılarını görüntülemeye ise her iki antende başarılı olmuştur.

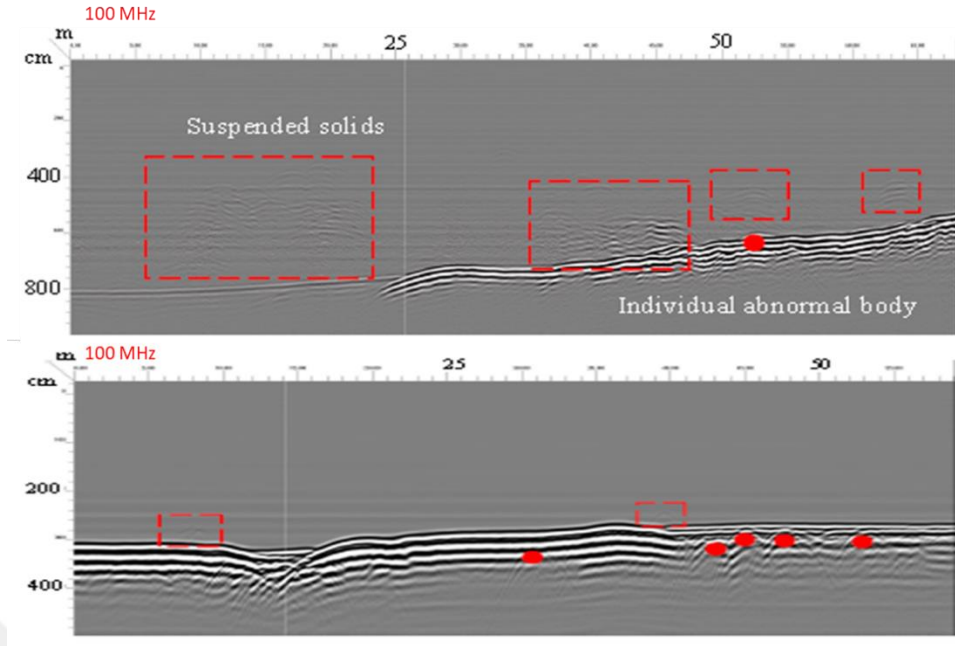
3.1.2 Anten frekanslarının içme suyu rezervuarında denenmesi

Bu çalışma Çin’de bulunan bir içme suyu rezervuarında 100 MHz, 200 MHz ve 400 MHz antenlerin deneysel olarak karşılaştırılması amacıyla yapılmıştır (Qin vd. 2017). Yer radarı ölçümleri yapılmadan önce parametre ölçer cihazıyla suyun öz direnç ve dielektrik geçirgenlik parametreleri ölçülmüştür. Dielektrik katsayısı ortalama olarak 83.1326 olarak elde edilmiştir. İletkenlik değeri ise 0.0034 S/m olarak ölçülmüştür. 100 MHz, 200 MHz ve 400 MHz antenlerle toplanmış verilerin işlenmiş halleri Şekil 3.6’te verilmektedir. 100 MHz’lik antenle toplanmış veri incelendiğinde mavi dikdörtgenle gösterilmiş alandaki anomalilerin dolgu basamağından kaynaklandığı belirtilmektedir. Burada yazarların açıklayamadığı durum ise 200 MHz’lik antenin 400 MHz’lik antenden daha kötü sonuç vermesidir. 400 MHz’lik antenle toplanmış radargramın sığ kısmında gösterilen dikdörtgen alan incelendiğinde beklendiği gibi sığ derinlikte 400 MHz antenin, 100 MHz antenden dikey çözünürlüğü göstermede daha iyi olduğu söylenebilir. Araştırmacılar gölün genel hattını görmek istediklerinden araştırmaya 100 MHz’lik antenle devam ederek derin ve sığ suda olmak üzere iki farklı profilde ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.6 100 MHz, 200 MHz ve 400 MHz’lik antenlerle toplanmış işlenmiş radargramlar (Qin vd. 2017)

Şekil 3.7’te üstteki radargram derin suda, alttaki radargram ise sığ suda toplanmıştır. Üstteki kesit incelendiğinde beyaz düz çizgi gölün en derin noktasını göstermektedir. Beyaz çizginin sol tarafı incelendiğinde sinyalin genliğinde düşüş meydana geldiği görülebilir. Bunun nedeni o alanın çamurla kaplanmasıdır. Çamur, tabanı oluşturan malzemeye göre daha iletken bir malzeme olduğundan sinyalin çabuk soğrulmasına neden olmaktadır. Bu alanda gösterilen kırmızı kesikli çizgilerin içindeki askıdaki hiperboller hayvanlardan ya da cansız nesnelerden kaynaklanmaktadır. Kırmızı nokta ile gösterilen anomali ise metal bir boru ya da nesneye aittir. Altta bulunan sığ su örneği incelendiğinde ise beyaz çizgi gölün en derin alanını temsil etmektedir. Bu noktada bir çökme meydana geldiği söylenmektedir. 5 adet kırmızı nokta ise çamur ve tabanın altında kalan kayaları temsil etmektedir.

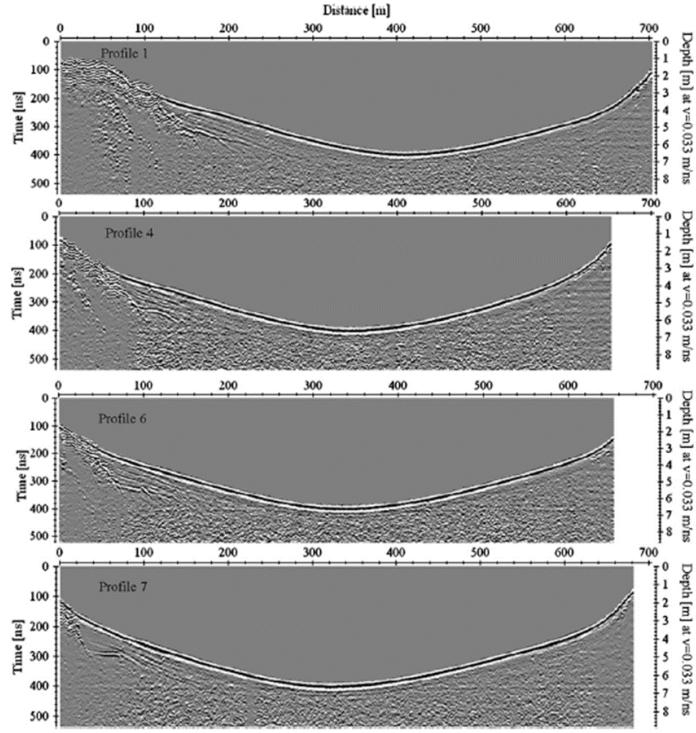


Şekil 3.7 Sığ ve derin suda 100 MHz’lik antenin test edilmesi (Qin vd. 2017)

Sonuç olarak araştırmacılar bu iletkenlik ve sönüm katsayısına sahip sular için 100 MHz’lik antenin genel araştırmada daha etkili olduğunu, sığ alanlarda çok fazla detay gerektiğinde de tercihe göre 400 MHz’lik anten kullanılabileceğini belirtmektedir.

3.1.3 Sediman araştırması

Çalışma İtalya’da bulunan Candia Gölü’nde yapılmıştır. Çalışmanın amacı gölün batimetrisinin, sediman karakteristiğinin belirlenmesi ve su hacminin hesaplanmasıdır. Ölçümlerden önce göl suyundan bir parametre ölçer cihazla iletkenlik ve sıcaklık ölçülmüştür. İletkenlik değeri ortalama $125 \mu\text{S}/\text{cm}$ ’dir. Çalışmada 89 MHz anten kullanılmış ve 50 adet profile ölçüm alınmıştır (Sambuelli ve Bava 2012). Şekil 3.8’de seçilen dört profile ait kesitler gösterilmektedir. İlk iki profilin başlangıcında göl tabanında yüksek genlikli yansımalar elde edilmiştir ve araştırmacılar göl çevresi jeolojisinden yola çıkarak bu güçlü yansımaların çakıl taşlarından kaynaklandığını bildirmiştir. Profil 6 ve 7 incelendiğinde ise bu çakılların siltle kaplandığı için düşük genlikli anomali verdiğini tespit etmişlerdir. Silt, çakıla oranla daha iletken bir malzeme olduğundan siltleşmenin görüldüğü alanda, yer radarı sinyali sönümlenerek çakıla oranla daha zayıf bir yansıma göstermektedir.

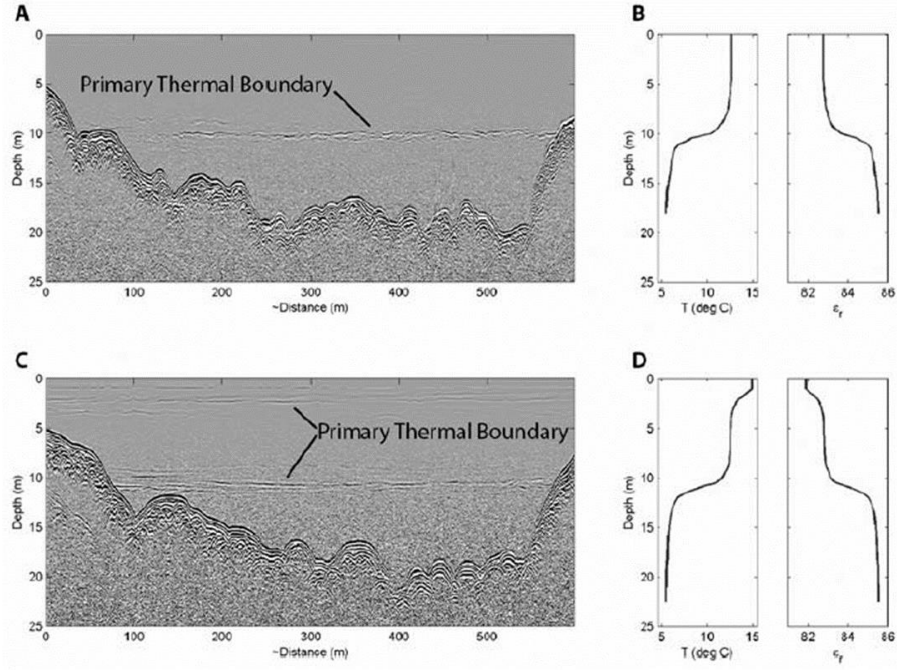


Şekil 3.8 Profil 1,4,6 ve 7'ye ait işlenmiş yer radarı profilleri (Sambuelli ve Bava 2012)

Yapılan çalışma sonucunda göl tabanının genel olarak çakıldan oluştuğunu ve bazı kısımlarda siltleşme meydana geldiğini söylemek mümkündür (Sambuelli ve Bava 2012). Sonuç olarak iletkenliği $12.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ olan bir gölde 89 MHz frekanslı antenin kullanılarak göl tabanı sediman araştırmasının yapılabilceği ortaya koyulmuştur.

3.1.4 Termal tabakalanma araştırması

Bu çalışmanın amacı Alaska'da bulunan Toolik Gölü'ndeki termal tabakanın tespit edilmesidir. Araştırmacılar bu tabakalanmayı yer radarı (GPR) yöntemiyle tespit etmeyi hedeflemiştir. Ölçüm alabilmek için plastik bir sal kullanılmıştır. Kullanılan antenin frekansı 50 MHz'dir. Suyun sıcaklık ve dielektrik katsayısı bir parametre ölçer kullanarak ölçülmüştür (Bradford vd 2007). İlk ölçümler iki gün esen kuvvetli rüzgârdan sonra alınmıştır (Şekil 3.9-a). Daha sonra iki günlük sakin havanın ardından tekrar yer radarı ile ölçüm alınmıştır (Şekil 3.9-c). Şekil 3.17'de bu iki farklı hava koşulunda alınmış yer radarı profillerinin işlenmiş hali ve parametre ölçer ile ölçülen sıcaklık ve dielektrik katsayılarının derinlikle değişiminin grafiği verilmiştir (Bradford vd 2007).



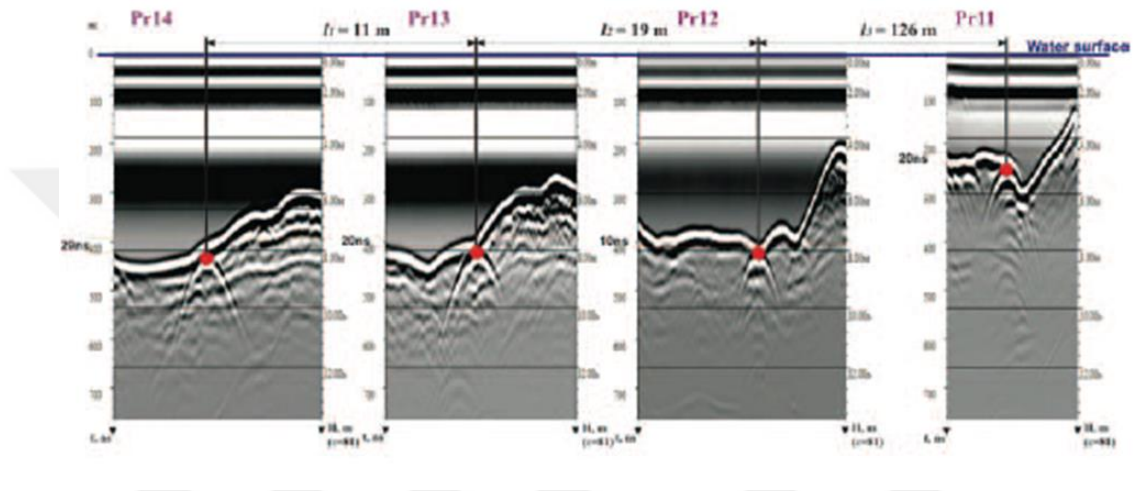
Şekil 3.9 A- İki gün esen kuvvetli rüzgârdan sonra alınan yer radarı ölçümlerine ait işlenmiş radargram, B-Aynı gün ölçülmüş sıcaklık ve dielektrik katsayını grafiği, C- İki günlük sakin havadan sonra alınan yer radarı ölçümlerine ait işlenmiş radargram, D Aynı gün ölçülmüş sıcaklık ve dielektrik katsayını grafiği (Bradford vd 2007)

İşlenmiş radargram incelendiğinde göl içinde bir adet termal tabaka olduğu bulunmuştur (Şekil 3.9-A). Termal tabakanın derinliğinin yaklaşık 10 metre olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık ve dielektrik sabitinin karşılaştırıldığı grafik göz önünde bulundurulduğunda yer radarı ile bulunan tabaka derinliğinin, sıcaklık değişimiyle uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 3.9-C’de ise iki adet termal tabakalanma elde edilmiştir ve sıcaklık ve dielektrik değişimi grafikleriyle de bulunan sonuç uyumludur (Bradford vd 2007). Sonuç olarak araştırmacılar yaptıkları çalışmada termal tabakalanmanın yer radarı ölçümleriyle tespit edilebileceğini ortaya koymuştur.

3.1.5 Mühendislik amaçlı yapılan çalışma

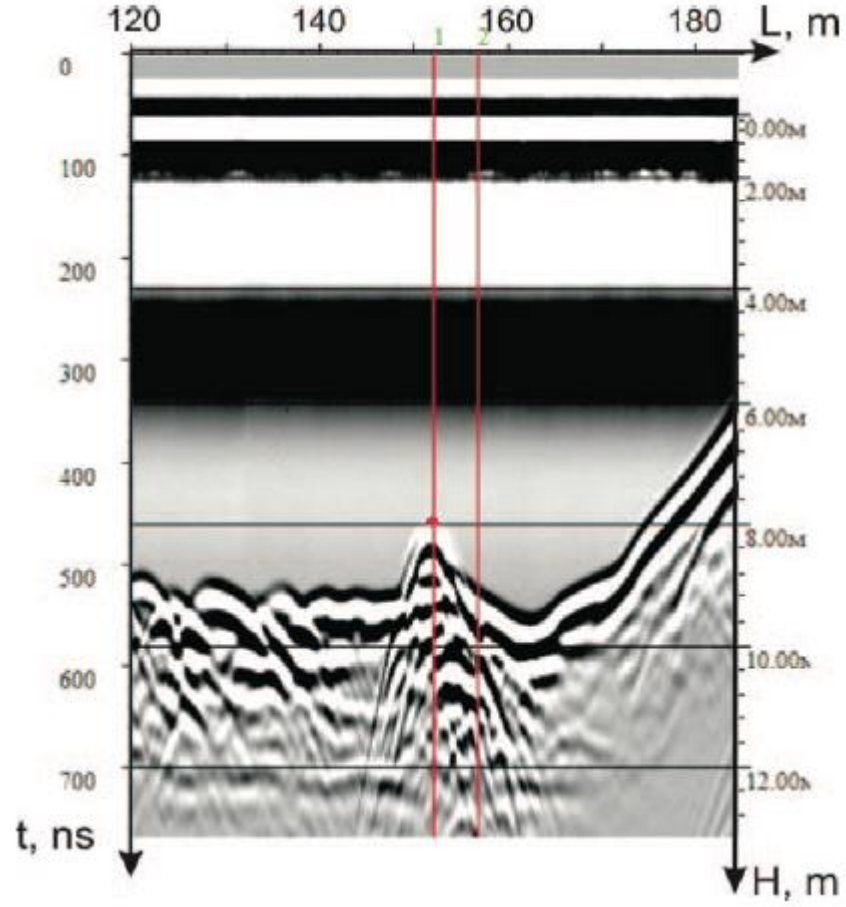
Yapılan bu çalışmanın amacı Lena Nehri’nde bulunan bir doğal gaz borusunda herhangi bir olumsuz durum olup olmadığının kontrol edilmesidir (Khristoforov vd. 2016). Yer radarı yöntemiyle metal malzemeden yapılan bir nesneyi tespit etmek kolay olduğundan,

Çalışma kapsamında yer radarı yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada 50 MHz su geçirmez anten kullanılmıştır. Antenler suyun 0.5m altına daldırılmıştır ve bunun için ahşap bir düzenek kullanılmıştır. Ölçümler kauçuk bir botla toplanmıştır. Toplamda 16 profil veri toplanmıştır. şekil 3.10'da kırmızı nokta ile gösterilen hiperboller borunun başlangıcına ait anomalilerdir. şekil incelendiğinde profillerin küçülme yönünde borunun eğim yukarı konumlandığı görülmektedir. Maksimum llen derinlik yaklaşık 13 metredir (Khristoforov vd. 2016).



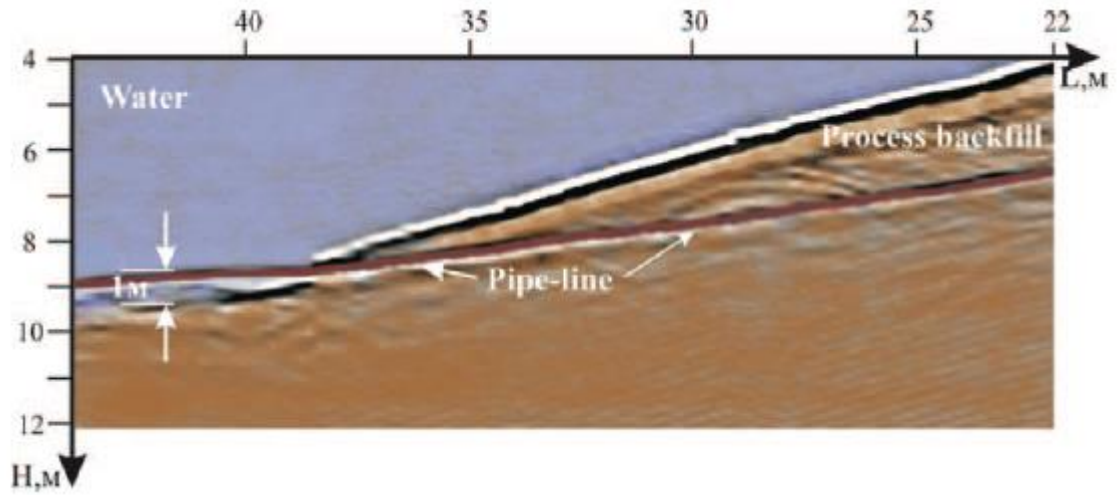
şekil 3.10 14, 13, 12 ve 11. Profillere ait işlenmiş radargramlarda boru anomalisinin görüntülenmesi (Khristoforov vd. 2016)

Boru hattının başlangıç ve bitişini belirleyerek hem kaç metre derinlikte olduğunu hem de borunun yaklaşık çapının kaç olduğunun bulunması hedeflenmiştir. şekil 3.11'da kırmızı nokta hiperbolün tepesini ve borunun başlangıcını vermektedir. Boru başlangıcı yaklaşık 8m'de tespit edilmiştir. Borunun bitişinin ise faz farkı ve ters hiperbolden yola çıkararak yaklaşık 9m'de olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 3.11 Borunun başlangıç ve bitiş derinliğinin tespit edildiği radargram (Khristoforov vd. 2016)

Buradan yola çıkarak borunun çapının 1 metre olduğunu bulmuşlardır. Fakat boru çapının 0.55 metre olduğu bilindiğinden aradaki 0.45 metre farkın ne olduğunu bulmak için Şekil 3.12'deki kesitten yararlanmışlardır. Kesit incelendiğinde borunun kaydığını ve bu nedenle profilin sonlarına doğru borunun alt tarafında bir boşluk olduğunu tespit etmişlerdir.



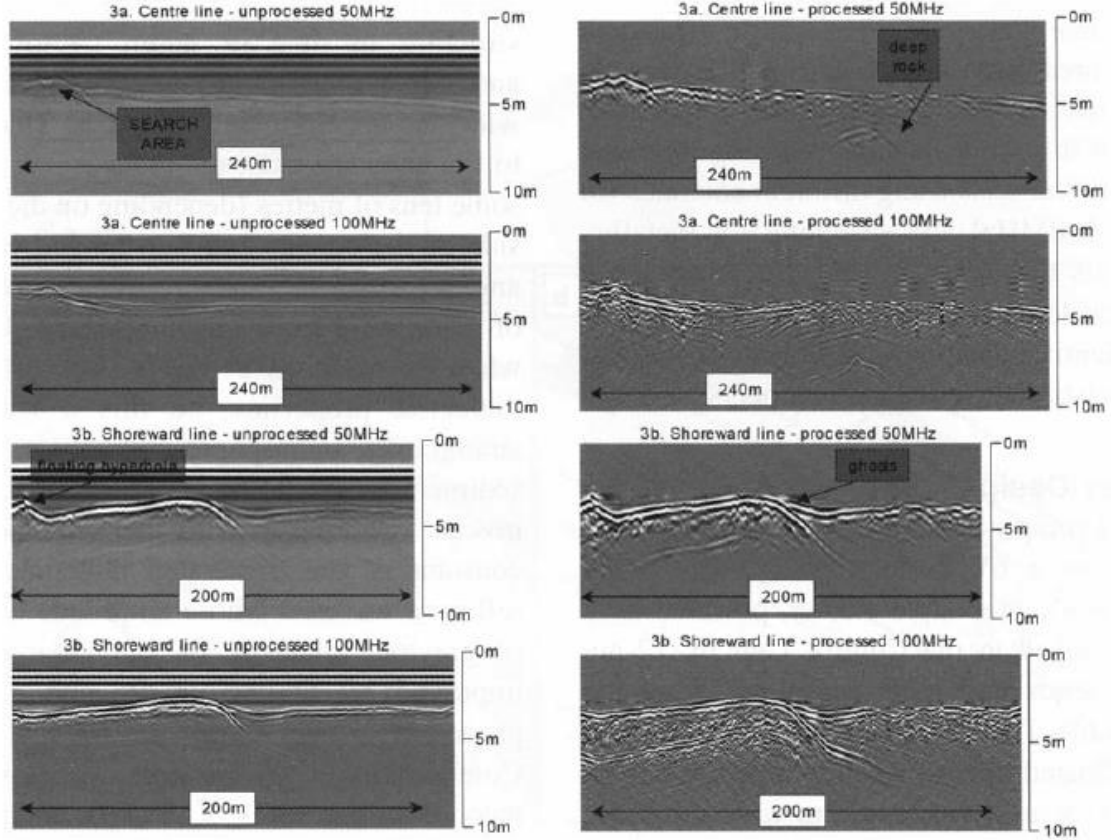
Şekil 3.12 Borunun göl içimdeki duruşunu gösteren renklendirilmiş ve yorumlanmış radargram kesiti (Khristoforov vd. 2016)

Bu boşluğa zamanla tortu malzeme dolduğundan dolayı boru bitişi olması gerektiğinden daha derinde tespit edilmiştir. Araştırmacılar sonuç olarak borunun kaydığını bu nedenle yapının güvende olmadığını söyleyerek profil sonunda bulunan borunun suda asılı kalan kısmına dolgu yapılması gerektiğini önermiştir (Khristoforov vd. 2016).

3.1.6 Kriminal amaçlı yapılan çalışma

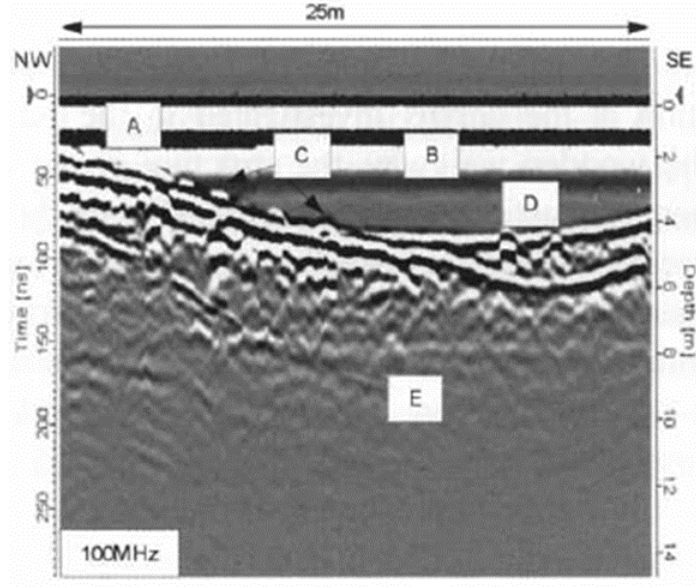
Bu çalışmanın amacı Kuzey İrlanda’da bulunan bir gölde meydana gelen kazada, batan jet skinin ve sürücüsünün kopan bacağının aranmasıdır. İlk olarak olay yeri dalgıçlar tarafından aranmıştır ve herhangi bir ize rastlanamamıştır. Olay anından itibaren 10 saat geçtikten sonra ise tıbbi açıdan bacağın ameliyatla kazazedeye takılması mümkün olmadığından çalışmaya ara verilmiştir. Sonrasında kazazede meydana gelen bir psikolojik rahatsızlıkla birlikte kazazede bacağının olmayışını kabullenemediğinden, doktorları tarafından kayıp uzvun bulunması ve kazazedeye gösterilmesi gerektiği söylenmiştir. Bununla birlikte gölde 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz ve 400 MHz’lik antenlerle yer radarı ölçümleri alınmıştır (Ruffell 2006). Yapılan çalışmada ilk olarak göl tabanının genel görünümüne bakmak için 50 MHz ve 100 MHz’lik antenler kullanılarak ölçüm alınmıştır. Şekil 3.13’te ilk sütun veri işlem öncesi 50 MHz ve 100 MHz’lik antenlerle toplanmış veriyi, ikinci sütun ise yine aynı antenlerin veri işlem adımları

uygulanmış halini göstermektedir. Radargramlar incelendiğinde 100 MHz'lik antenle toplanmış verinin, 50 MHz'lik antene oranla ayrıntıları daha iyi gösterdiği tespit edilmiştir.



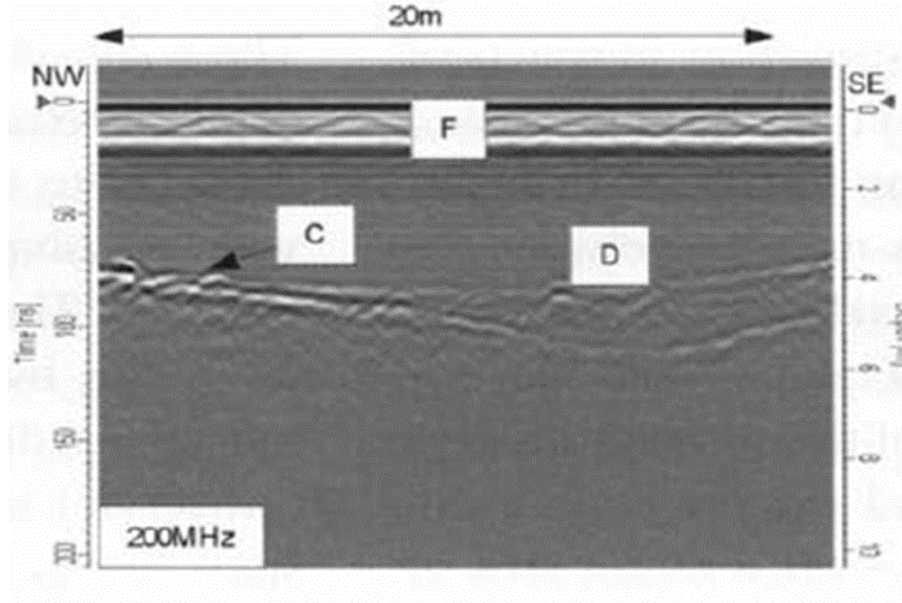
Şekil 3.13 50 MHz ve 100 MHz antenle toplanmış verilerin veri işlem öncesi ve sonrası görüntüleri (Ruffell 2006)

100 MHz ve 200 MHz antenlerle toplanan ve işlenen verilerde jet skiye ait koltuk ve benzin kutusu tespit edilmiştir (Şekil 3.14-3.15 C anomalisi). Bunun dışında E ile gösterilen anomali ise anakaya ve sediman sınırını ifade etmektedir.

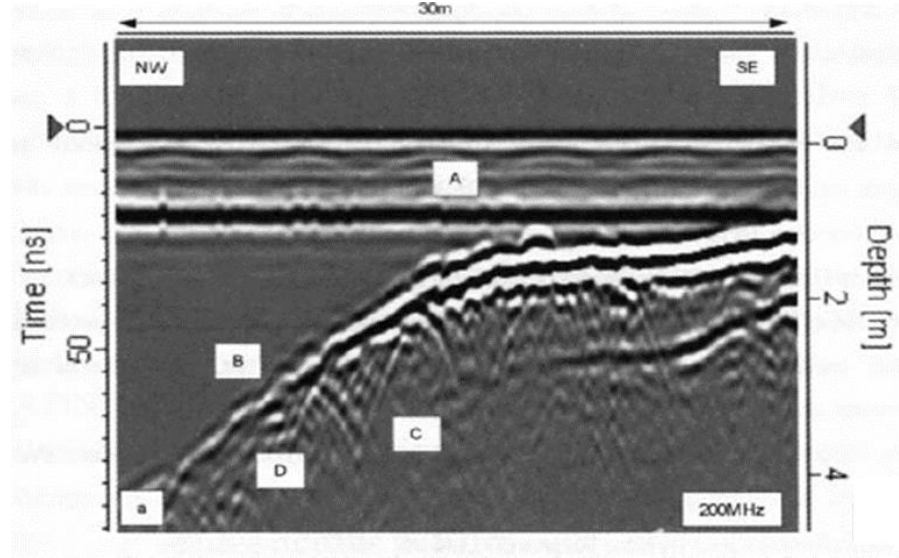


Şekil 3.14 A: Köprüden kaynaklı herhangi bir gürültü bulunmamaktadır, B: Ringing ya da tekrarlı yansıma, C: Jet ski koltuğu ve benzin kutusu, D: Göl tortusunda kısmen batmış belirtiler, E: Sediman ve anakaya sınırı (Ruffell 2006)

200 MHz ve 400 MHz antenle toplanmış veri, ahşap köprü'nün çok yakınında alındığından F ile gösterilen gürültü meydana gelmiştir (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16).

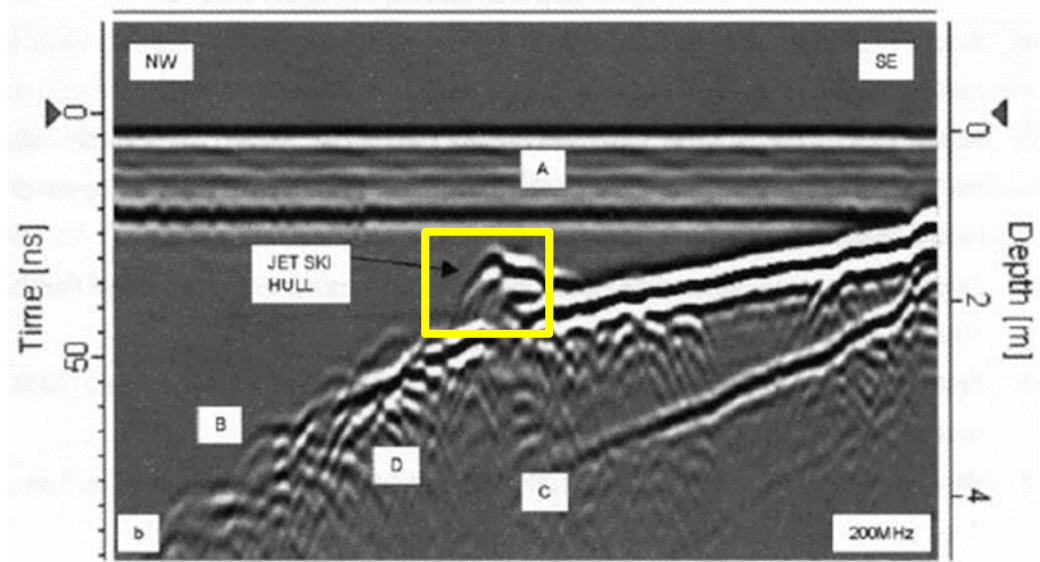


Şekil 3.15 C: Jet ski koltuğu ve benzin kutusu, D: Göl tortusunda kısmen batmış belirtiler, F: Köprüden kaynaklanan gürültü (Ruffell 2006)



Şekil 3.16 A: Köprüden kaynaklı gürültü, B: Göl-tortu arayüzü. C: Göl çökelleri-anakaya sınırı, D: Göl içindeki nesne, kaya vb. (Ruffell 2006)

Son olarak daha sık suda 200 MHz antenle toplanmış verilerin işlenmiş halleri incelendiğinde Şekil 3.17’de sarı dikdörtgenle gösterilen anomalinin jet ski gövdesine ait olduğu saptanmıştır.



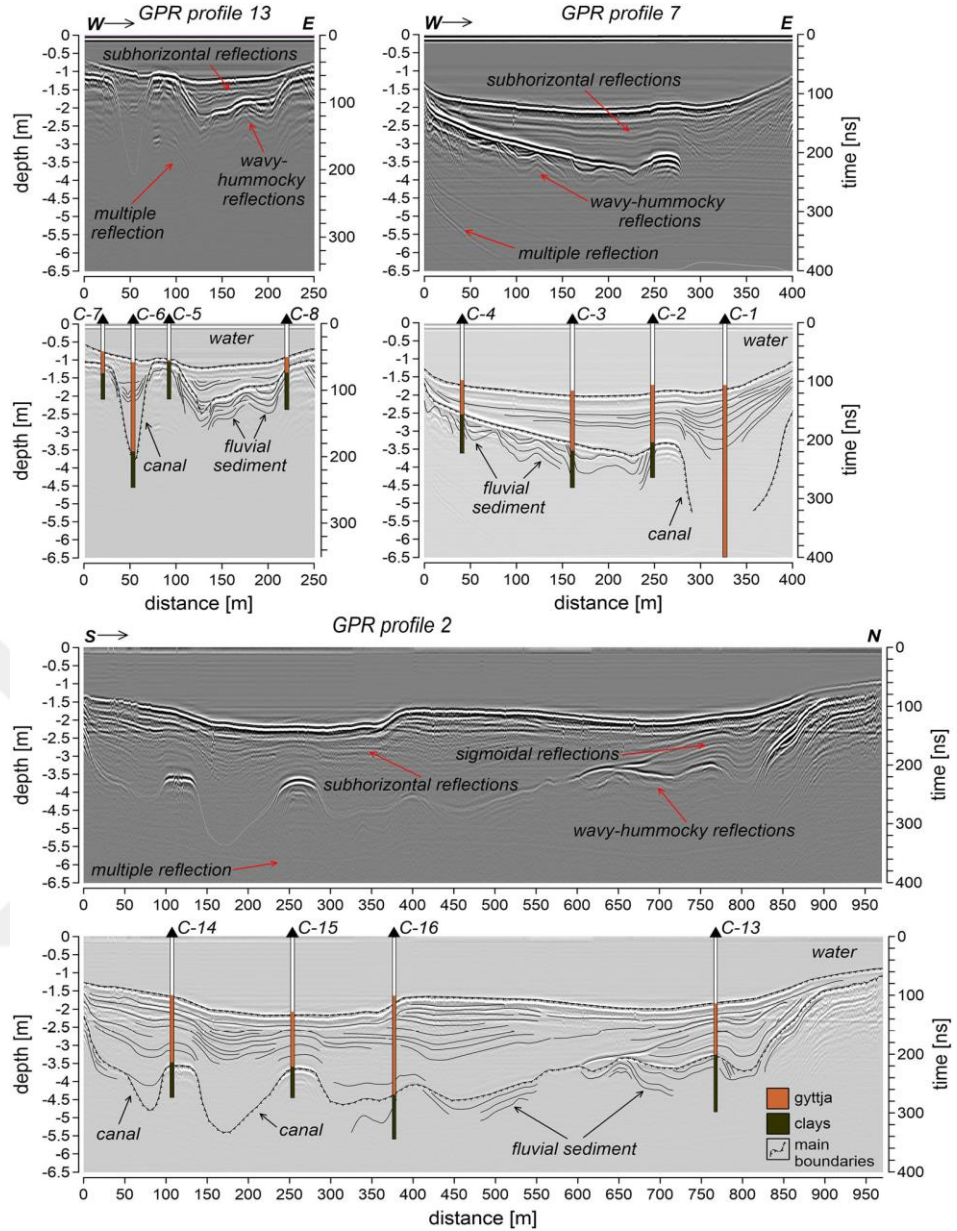
Şekil 3.17 A: Köprüden kaynaklı gürültü, B: Göl-tortu arayüzü, C: Göl çökelleri-anakaya sınırı, D: Göl içindeki nesne, kaya vb., sarı dikdörtgen : Jet ski’nin gövdesi (Ruffell 2006)

Sonuç olarak öncelikle jet ski koltuğu ve benzin kutusu bulunmuş ve sonrasında da jet skinin gövdesi tespit edilmiştir. Jet ski gövdesinin hemen altında ise kazazedenin kayıp olan bacağı bulunmuştur. Fakat burada unutulmaması gereken olgu, yer radarı yönteminin doğrudan bacağı bulmadığını, jet ski gövdesinin bulunduğudur.

3.1.7 Göl tabanı sedimanlarının araştırılması

Bu çalışma, Rusya’da bulunan Polevskoye Gölü’nün dibindeki stratigrafik sınırların ve türbidit sedimanlarının GPR yöntemi kullanılarak haritalanması amacıyla yapılmıştır. Göl tabanı morfolojisi ve altındaki stratigrafik sınırlar, 150 MHz anten kullanılarak 13 profille ölçüm yapılmış ve ardından GPR yorumlarını doğrulamak için sondajlar yapılmıştır. Gölün su kolonu kalınlığı 3.2 metre, iletkenliği ise $6.7 \times 10^{-3} \text{ S m}^{-1}$ olarak ölçülmüştür (Ryazantsev vd. 2021). GPR ölçümlerinin sonuçları Polevskoye Gölü’nün farklı kısımlarından alınan üç profil üzerinde gösterilmektedir (Şekil 3.18).

Polevskoye Gölü’ndeki taban sedimanına ilişkin GPR araştırmasının sonuçları, taban çökeltilerinin genel yapısını ortaya koymuştur ve gyttja-kil sınırında yer alan kumlu oluşumların türbiditlerle (akıntılarla) ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir (Ryazantsev vd. 2021). Türbiditler ile orijinal gölsel silt ve kil arasındaki yapı ve tane boyutu farkı sayesinde bu alanlarda anomali oluşmuştur. Kum katmanlarının düşük kalınlığına (birkaç santimetre) rağmen, türbidit yataklarının tamamı belirli GPR anomalileri oluşturmuştur. GPR ve sondaj verilerinin ortak analizi, GPR tabanlı stratigrafik sınırların ve sedimantasyon yüzeyi şekillerinin doğruluğunu ortaya koymuştur.

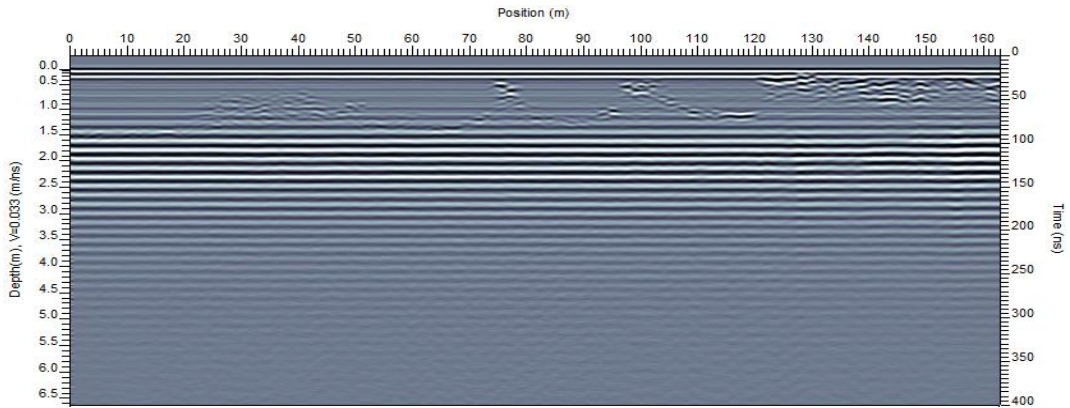


Şekil 3.18 Polevskoye Gölü'ndeki GPR profilleri .Üstte bulunan şekil: toplanan verileri, Altta bulunan şekiller: yansımaları (siyah çizgiler) ve sondajların konumu ile işlenmiş verileri göstermektedir (Ryazantsev vd. 2021)

3.2 Veri İşlem

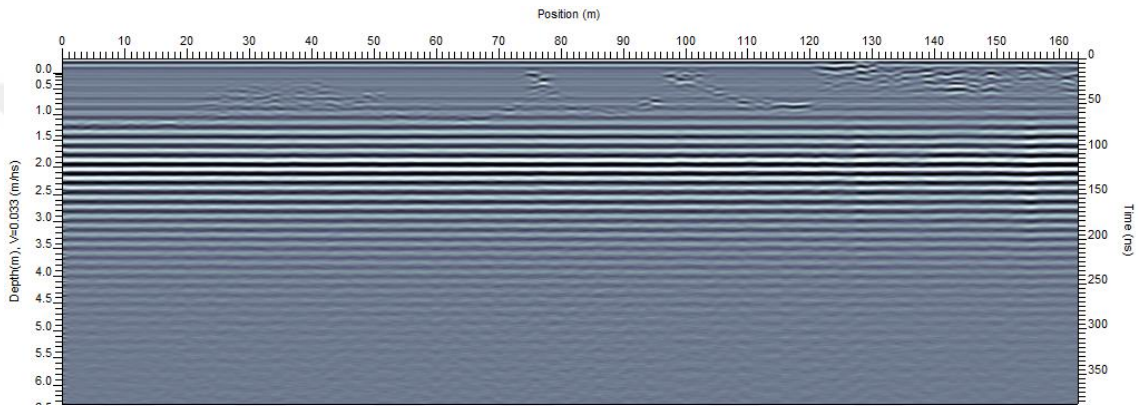
Uygulamalı jeofizikte, arazide verilerin düzgün toplanması ne kadar önemliyse toplanan ve elde edilen verilerin doğru işlenmesi de o kadar önem arz etmektedir. Bunun en önemli nedeni düzgün toplanan ve işlenen verinin doğruluğuna bağlı olarak yapılacak yorumun ve gidilecek çözümün daha sağlıklı olmasıdır. Su ortamında uygulanan yer radarı yöntemi

ile elde edilen verilerin işlenmesi, toplanan verilerin kalitesini artırmak ve yorumlanabilirliğini sağlamak için çeşitli adımları içerir. Bunlar karadaki uygulamalardan çok farklı değildir. Bir su taşıtı içinde çekilen radar antenleri ile ölçülen verilere uygulanacak veri işlem adımları bu çalışmada sırasıyla şu şekilde uygulanmıştır: Başlangıç Zamanı Düzeltmesi → WOW etkisinin giderilmesi (dewow) → DC kayma etkisinin giderilmesi → Zamanda medyan süzgeç → Bant geçişli süzgeç → Genlik kazanç düzeltmesi → Ortak arka plan genliğinin giderilmesi. Bu veri işlem adımlarının sırası ya da hangilerinin kullanılacağı veri işlemcinin tecrübesine ve veride araştırılan belirtinin ne olduğuna göre değişiklik göstermektedir. Veri işlem yapma aşamasında veri işlem adımlarının sıraları değiştirilerek yorumlanabilir ve çözünürlüğü yüksek bir radargram kesiti elde etmek hedeflenmiştir. İznik Gölü veri işlemi sırasında dewow işleminden sonrasında ortak arka plan giderilmesi yapıldığında sinyal önemli oranda veriden atılmıştır. Genlik kazanç işlemi öncesinde uygulanarak denendiğinde ise genlik kazanç işleminden kaynaklanan bazı abartılı genlikler verinin yorumlanmasını zorlaştırmış bu nedenle ortak genlik bilgisi veriden son adımda atılmıştır. Bant geçişli süzgeç yapılmadan genlik kazancı işlemi yapıldığında ise veride bulunan istenmeyen sinyallerinde genlik bilgisi arttırıldığından yorumlanabilirlik açısından verimli bulunmamıştır. Böylece optimum veri işlem adımları aşağıda anlatılan veri işlem adımları olmuştur. Yukarıda sıralanan işlem adımlarının etkisi İznik Gölü'nde 200 MHz frekansında bir anten ile toplanan radar verisi üzerinde uygulamalı olarak gösterilmiştir. Ham veri Şekil 3.19'da sunulmuştur. Veri işlem uygulamasında Ekko_Project yazılımı kullanılmıştır (Sensors & Software, 2017).



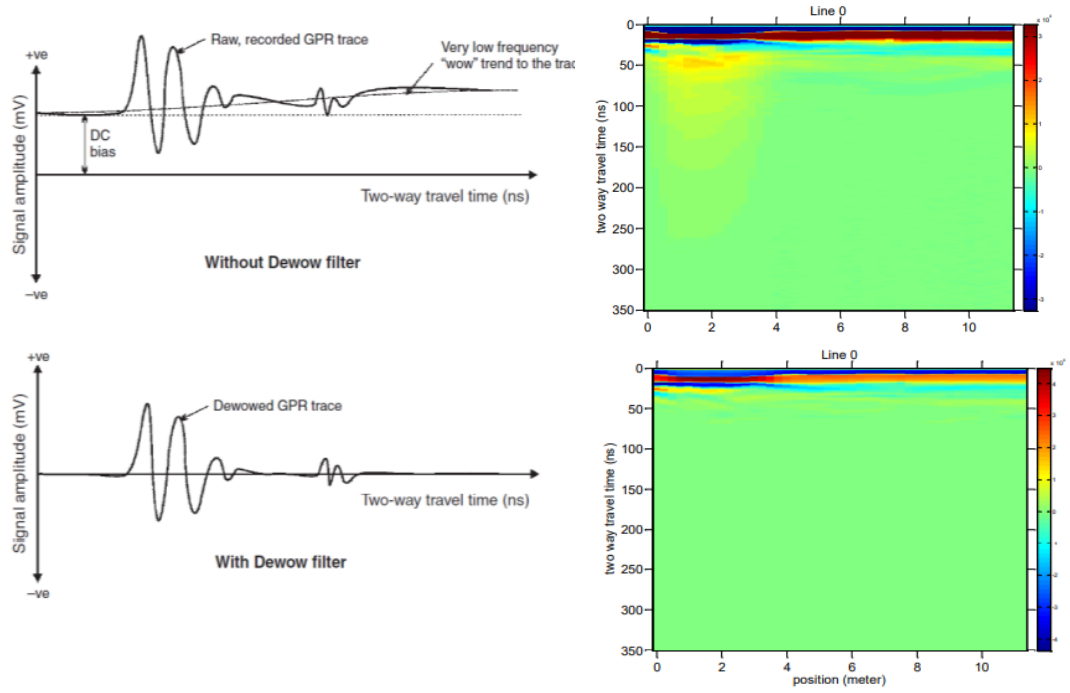
Şekil 3.19 200 MHz'lik antenle toplanmış ham veri kesiti

Başlangıç zamanı düzeltmesi: Yer radarı yönteminde yer içine gönderilen EM sinyal, yer içindeki seyahatinden sonra alıcılara gelirken belirli bir süre geçmektedir. Bu süre yer radarı kesitlerinde zamanda ötelenme olarak görünmektedir. Bu ötelenmenin kaldırılması olası cisim ya da yapının derinlik tespitinin doğru yapılabilmesi adına önemlidir. Bu nedenle veri barındırmayan bu süre doğru şekilde tespit edilerek verinin zamanda ötelenmesi ve başlangıç zamanının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.20’te başlangıç zaman düzeltmesi yapılmış WPR kesiti gösterilmektedir. Burada kesit incelendiğinde verinin zamanda ötelendiği (16ns) görülmektedir.



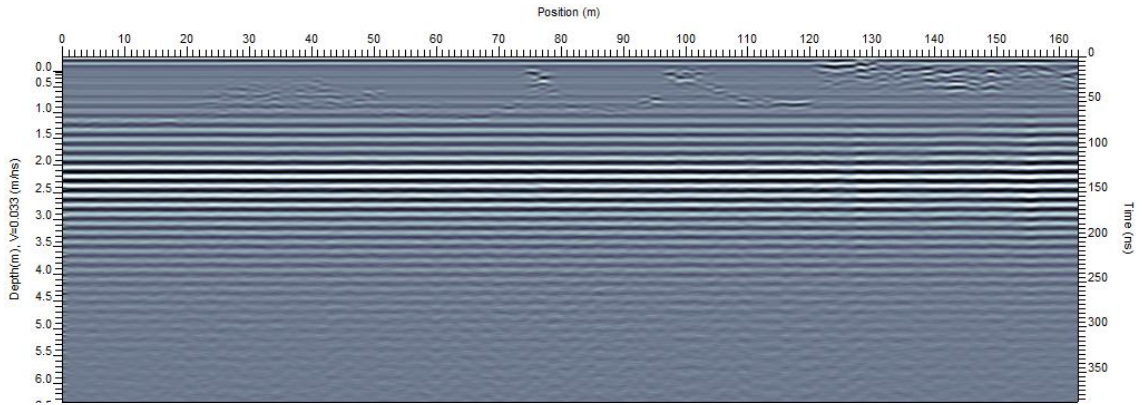
Şekil 3.20 Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış WPR kesiti

WOW etkisinin giderilmesi: Yer altındaki yapıların iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik özelliklerine ve verici-alıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak, asıl sinyali maskeleyen düşük frekanslı WOW etkisini ortadan kaldırmak gerekmektedir. WOW gürültüsü sinyali örtterek olası yapıların, tabakaların üzerini kapatmaktadır. Bu nedenle genellikle “dewow” adı verilen, düşük frekanslı bu gürültüyü ortadan kaldıran, veri işlem adımı sinyalin çözünürlüğünün artırılması için önemli bir adımdır. Şekil 3.21’te bulunan şekilde solda wow gürültüsü kaldırılmadan önce ve sonra verinin genlik izgesi gösterilmektedir. Sinyal incelendiğinde wow gürültüsünün sinyalin genel trendinde de bir kaymaya neden olduğu görülmektedir. Wow gürültüsü kaldırıldıktan sonra ise sinyalde meydana gelen sapmanın ortadan kaybolduğu ve sinyalin genel trendinin olması gerektiği gibi olduğu görülmektedir. Şekildeki radargramlar incelendiğinde ise ikinci radargramda wow gürültüsü kaldırıldıktan sonra çok düşük frekanslı etkilerin ortadan kalktığı görülmektedir.



Şekil 3.21 Dewow işlemi öncesi ve sonrası, solda bulunan grafik (Cassidy, 2009), sağ da bulunan görsel (Baso Maruddani ve Efri Sandi, 2019)

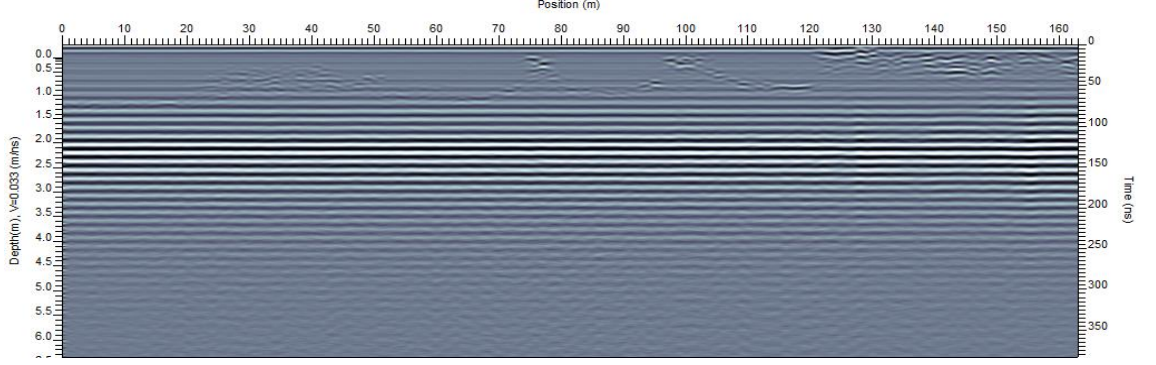
“WOW” gürültüsünün kaldırıldıktan sonra elde edilen WPR kesiti Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22 WOW gürültüsünün kaldırılması

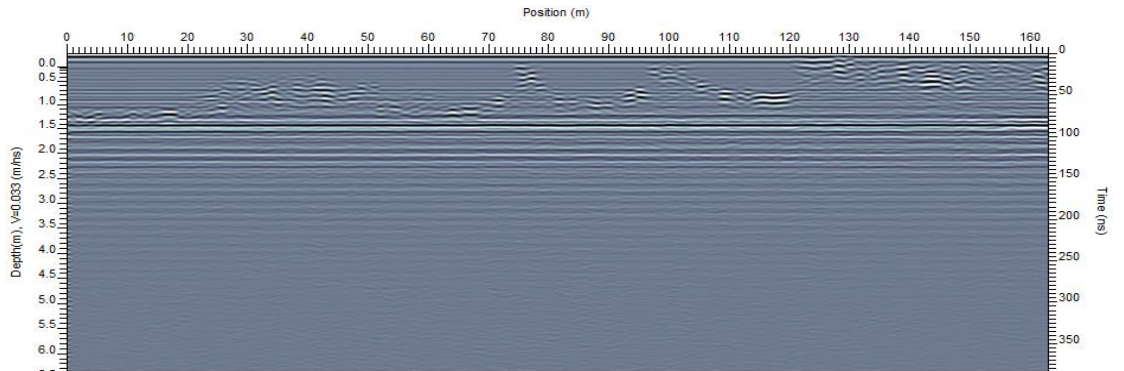
Zamanda Medyan Süzgeç: Medyan filtre ölçümden kaynaklı zamanda meydana gelen ani genlik artışlarından kaynaklanan iğneciklerin giderilmesi amacıyla yapılmakta olan

bir işlemdir. Şekil 3.23'te zaman ortamında medyan filtre uygulanmış WPR kesitini göstermektedir.



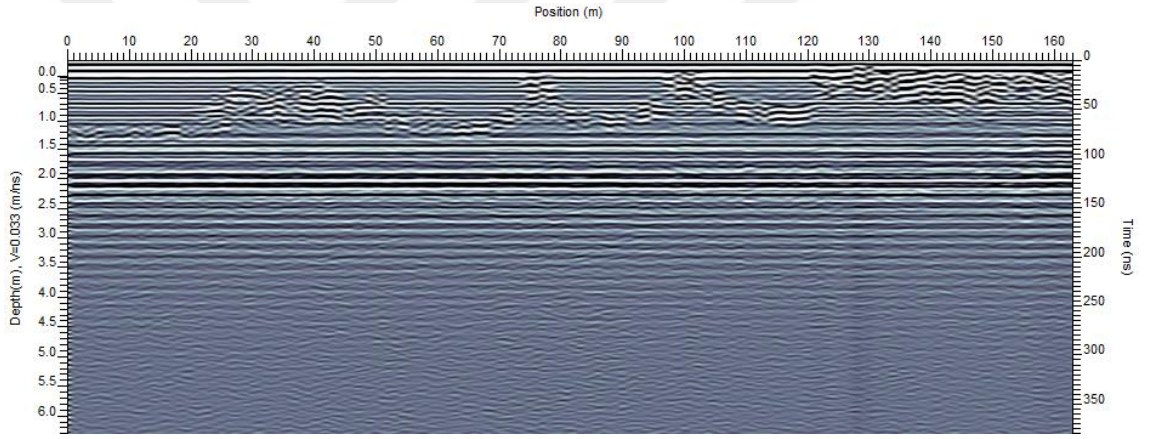
Şekil 3.23 Zaman ortamında medyan filtre uygulanmış WPR kesiti

Bant Geçişli Süzgeç: Bant geçişli filtreler yer radarı veri işleminde sıklıkla kullanılmaktadır. Seçilen frekans aralıklarındaki olayları geçirip tanımlanan bandın dışında kalan olayları veriden atmaktadır. Bant geçişli süzgeçte frekans aralıkları kullanılan anten frekansına göre özenle seçilmelidir. Bu çalışma kapsamında 200 MHz anten için bant geçişli süzgecin alçak ve yüksek kesme frekansları 80 MHz ve 320 MHz olarak alınmıştır. 100 MHz anten için bant geçişli süzgecin alçak ve yüksek kesme frekansları 40 MHz ve 160 MHz, 50 MHz anten için bant geçişli süzgecin alçak ve yüksek kesme frekansları 20 MHz ve 110 MHz olarak seçilmiştir. Şekil 3.24'te bant geçişli filtre uygulanmış WPR kesiti gösterilmektedir. Bant geçişli filtre uygulandıktan sonra kesitin çözünürlüğünün arttığı ve gürültülerin ilgili kısmının kaybolduğu görülmektedir.



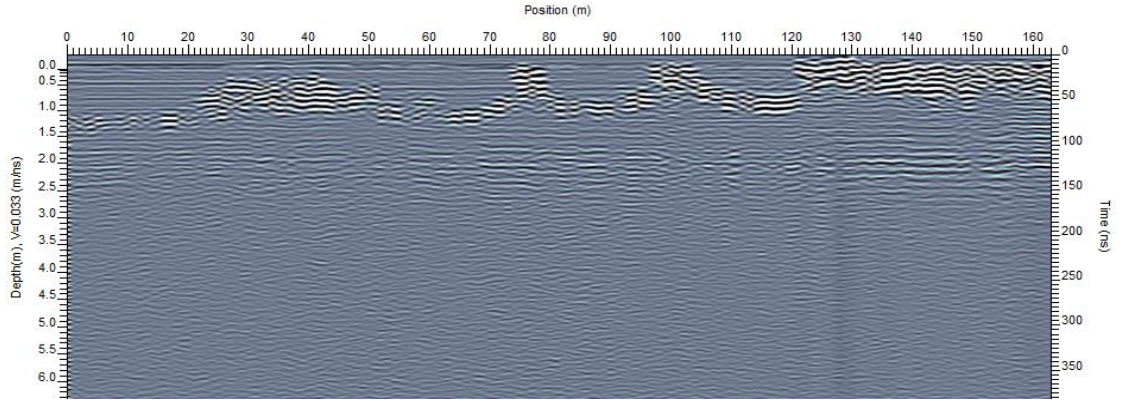
Şekil 3.24 Bant geçişli süzgeç uygulanmış WPR kesiti

Genlik Kazanç İşlemi: EM dalga yer içinde derinlere iletildikçe yer içinin elektrik özelliklerine bağlı olarak git gide sönümlenmektedir. Bu nedenle yer radarı kesitlerinde ham veriye bakıldığından sinyalin genliğinin kayıt süresiyle doğru orantılı olarak azaldığını görmek mümkündür. Verinin genliğinin artırılması işlemi olası yapı ve duvarları daha iyi ortaya koyacağından önemli bir işlemdir. Bu çalışma kapsamında sinyal genliğini arttırmak için otomatik genlik kontrolü adı verilen işlem uygulanmıştır. Bu genlik arttıran işlemin çalışma prensibi, sinyal gücüne ters orantılı olan bir kazanç fonksiyonu uygulamaktır. Böylece sinyalin başlangıcında yani sinyal genliğinin yüksek olduğu yerde daha az kazanç işlemi yaparken, sinyalin orta ve sonlarına doğru genliği daha fazla arttırmaktadır. Şekil 3.25'te AGC (otomatik genlik kazancı) işlemi yapılmış WPR kesiti gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Genlik kazancı yapılmış WPR kesiti

Arka plan Gürültülerini Kaldırma İşlemi: Bu veri işlem adımı, verici antenden alıcı antene doğrudan gelen dalgayı ve aynı zamanda izlerde bulunan ortak genlik bilgisini atmaktadır. Böylelikle yapıdan kaynaklanan genlik bilgileri görünür hale gelmektedir. Şekil 3.26'da arka plan gürültülerini kaldırma işlemi yapılmış WPR kesiti bulunmaktadır.



Şekil 3.26 Arka plan gürültüleri kaldırılmış WPR kesit



4. SAHA UYGULAMALARI

Bu tez kapsamında uygulama olarak iki ayrı gölde su yüzeyinden yer radarı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanlarının seçiminde farklı su iletkenliğine sahip olan göllerde yer radarının uygulanabilirliğinin araştırılmasına yönelik bulgular elde edilmesi önceliklendirilmiştir. Çalışmalar Bursa ilinde yer alan İznik Gölü ve Ankara’da bulunan Mogan Gölünde yürütülmüştür. Bu iki göl sularının elektrik özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle yöntemin su ortamında uygulanabilirliğinin denenmesi için uygun iki ortamdır. İlk olarak İznik Gölü’nde su yüzeyinin hemen altında kalmış ve kısmen gömülü arkeolojik kalıntıların araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmalar TUBITAK 1002 programı ile desteklenen 122Y040 numaralı proje kapsamında yürütülmüştür. İznik Gölü’nün su özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalardan derlendiğine göre elektrik olarak tatlı su özelliğine yakındır. Bu nedenle gerek dielektrik özellikleri gerekse elektrik iletkenliği açısından radar yönteminin karadakinine benzer bir sonuç üretmesi beklenmektedir. İkinci örnek ise Ankara ile Gölbaşı ilçe sınırları içinde yer alan Mogan Gölü’dür. Mogan Gölü son dönemde yaşanan iklim değişiklikleri ve insan etkinlikleri nedeni ile kuraklık ve kirlilik tehditleri ile karşı karşıyadır. Bu nedenle bir iç su ve tatlı su ortamı olmasına karşın suyun kimyası ve elektrik özellikleri açısından elektrik ve EM yöntemlerin uygulanabilirliği ile ilgili kısıtlamalar ortaya koymaktadır. Bu çalışma alanında da yürütülen bir TUBITAK 1001 projesi çerçevesinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. EM dalgaların yayılımı açısından uygun bir ortam sağlamayan bu göl de ikinci bir örnek uygulama alanı olarak belirlenmiştir. İzleyen bölümde her iki gölde yürütülen çalışmalar ile ilgili kapsam, ölçüm ayarları, penetrasyon ve sonuçlar ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir.

4.1 İznik Gölü Radar Çalışmaları

4.1.1 Çalışma alanı

İznik Hristiyanlık için önemli bir kent olup bugün modern ilçe sınırlarında yer alan güncel yerleşmenin altında çok sayıda antik yapı bulunmaktadır. Bu yapılar ile ilgili kazı ve araştırma çalışmaları kentin birçok yerinde sürdürülmektedir. Kent önemli tatlı su

kaynaklarından biri olan İznik Gölü'ne sınırdır. Göl içerisinde 2014 yılında azalan su seviyesi ile kıyıdan yaklaşık 50m açıktaki bir bazilikal yapı keşfedilmiştir. Bu yapının su altında kalma hikayesi, yapının tarihi, kullanım amacı gibi bilgiler arkeologlar tarafından araştırılmaktadır. Çalışma alanının Türkiye haritası üzerindeki konumu ve güncel bir hava fotoğrafı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çalışma alanının haritadaki yer ve ölçümlerin gerçekleştirildiği zamandaki görüntüsü

Jeofizik yöntemler karada olduğu gibi su ortamlarında da gömülü ve batık arkeolojik kalıntıların aranmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla ilgili örnekler daha önce verilmiştir. Bu nedenle yer radarı yöntemi ile İznik Gölü'nde 2014 yılında belirlenen bazilika yapısı ve çevresi araştırılmıştır. Bazilika'nın su yüzeyine çıkarak görünür hale gelmesinden sonra yapılan bilimsel araştırmalarda yapının birden fazla evreye sahip olduğu anlaşılmıştır. Nikaia'nın (İznik) Hristiyanlaştırılmasında önemli rol oynadığı ve MS. 325 yılındaki I. İznik Konsili'nin toplandığı yapı olma olasılığının bulunduğu değerlendirilmektedir (Şahin, 2020). Ayrıca, erken Hristiyanlık dönemine ait bilinen az sayıdaki kiliseden birisi olması buradaki bazilikanın önemini daha da artırmaktadır. Öte yandan belirlenen bazilika yapısından başka İznik Gölü'nde sualtında kalmış başka yapılar da olabileceği yöre halkından, antik kaynaklardan ve yapılan araştırmalardan ortaya çıkmıştır (Şahin, 2020). Uygulanan jeofizik yöntem ile ortaya konulabilecek bilgiler ile İznik Gölü Sualtı Bazilikal Kilisesi'yle bağlantı kurulabilecek başka yapılar olup olmadığı ve işlevleri hakkında inceleme, araştırma ve yeni kazı çalışmaları yapılabilecektir. Çalışma alanında beklenen yapıların su altı kazıları ile araştırılması onlarca yıl sürebilecek iken bütünsel jeofizik araştırmalar ile yapıların belirlenmesi bir kısa sürede tamamlanabilecektir.

4.1.2 İznik Gölü ölçüm parametreleri

Bir su ortamında EM dalga yayılımını belirleyen başlıca fiziksel özellikler suyun ya da ortamın dielektrik katsayısı ve iletkenliğidir. Bu sebeple yer radarı çalışmaları başlatılmadan önce İznik Gölü'nde suyun iletkenliği ölçülmüştür. Su örneği üzerinde doğrudan yapılan ölçüm sonucunda iletkenliğinin 1068 $\mu\text{S}/\text{cm}$ yani yaklaşık 9.36 Ωm olduğu tespit edilmiştir. Bu değer tatlı su için belirlenen öz direnç aralığının alt sınırında yer almaktadır. Yer yüzü ve yer altında bulunan çeşitli su kaynakları için verilen öz direnç aralıkları için Çizelge 4.1'e bakılabilir. Saf su elektrik özelliği olarak görece yalıtkan olsa da içerisinde çözünmüş madde miktarına bağlı olarak iletkenliği artmaktadır. Bu nedenle yüzey suları ve akifer içerisindeki suların iletkenliği de içinde yer aldıkları akiferin özelliklerinden etkilenecektir. Bu nedenle kısmen geniş bir aralıkta değişen öz dirençler gözlemlenebilmektedir. Göl ve akarsularda ise beslenme havzasında yer alan kayac

özellikleri ile tarım ve endüstriyel etkinlikler nedeni ile oluşan kirlenme iletkenlik değişimlerinde önemlidir.

Çizelge 4.1 Farklı su kaynakları için öz direnç değişim aralıkları Telford ve Geldart, (1990)’dan alınmıştır)

Su türü	Özdirenç (Ωm)	
	En Düşük	En Yüksek
Meteorik Sular	30	1000
Yüzey suları	10	100
Doğal yeraltı suyu	1	100
Deniz suyu	0.2	0.2
Tuzlu su %3	0.15	0.15
Tuzlu su %20	0.05	0.05

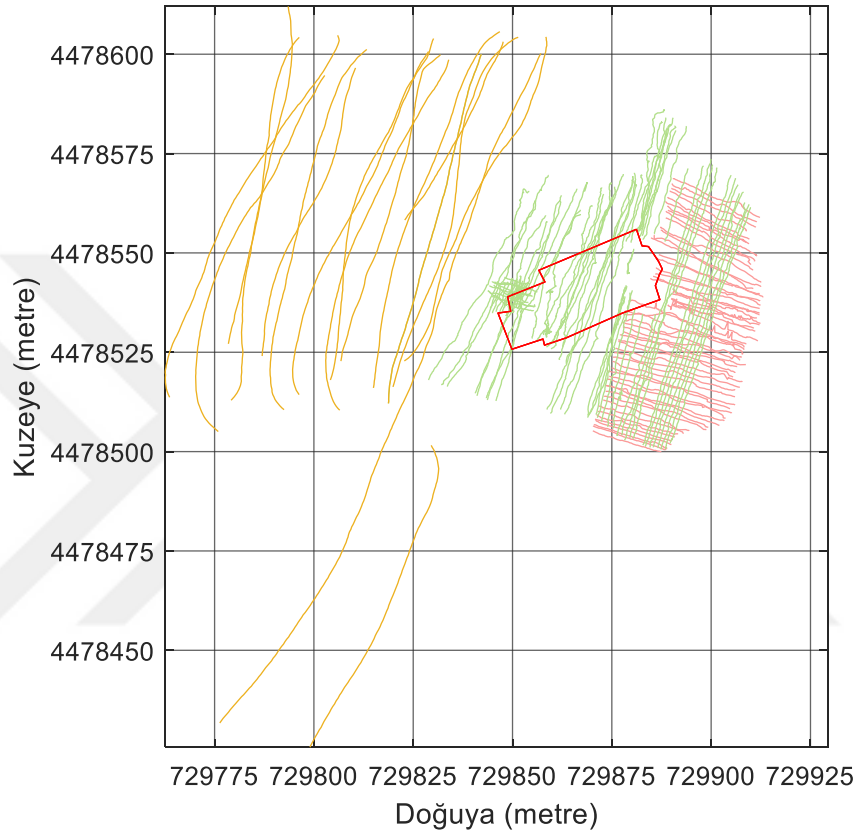
Yer radarı yüksek frekanslı bir EM yöntemidir. Dolayısı ile dalga yayılımında ortamın özellikleri kadar kullanılan antenin frekansı da belirleyicidir. Dalga yayılım hızı ve penetrasyon derinliği de frekansa bağlıdır. İznik Gölü’nde yapılan çalışmada üç farklı merkez frekansında anten kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla 50, 200 ve 500 MHz frekanslarında çalışmaktadır. Her üç anten için belirlenen ölçüm parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 İznik Gölü radar ölçümlerinde kullanılan ölçüm parametreleri

Anten Frekansı	100 MHz	200 MHz	500 MHz
Yığılma Sayısı	128	128	128
İz Başına Düşen Örnek Sayısı	463	1024	922
Zaman Örnekleme Aralığı	2.7 ns	0.60 ns	0.180 ns
Toplam Kayıt Zamanı	425 ns	400 ns	190 ns

Belirlenen ölçüm parametreleri ile çok sayıda hat üzerinde ölçüm yapılmıştır. Su yüzeyinde ölçümleri konumlandırmak oldukça zordur. Bu nedenle sisteme yüksek doğrulukta konum bilgisi okuyabilen bir GPS/GNSS alıcısı entegre edilmiştir. Alıcı bir saniye aralıklarla konum bilgisi olarak seri port aracılığı ile kayıt birimine iletmektedir. Böylece oldukça sık bir örnekleme ile izlerin konumları coğrafi koordinatlar cinsinden kaydedilmekte, profil bazlı ayrıca bir konum ölçümüne gerek kalmamaktadır. Bu şekilde kaydedilmiş olan konum bilgileri yani, radar ölçümlerinin yürütüldüğü hatların konumları

Şekil 4.2’de verilmiştir. Kırmızı çizgiler bazilika sınırlarını göstermektedir. Pembe profiller 500 MHz antenle, yeşil çizgiler 200 MHz antenle ve son olarak turuncu profiller 100 MHz antenle toplanmış verilere ait profil konumlarını ifade etmektedir.



Şekil 4.2 İznik Gölü’nde radar ölçümleri yapılan hatların konumu (UTM-WGS84)

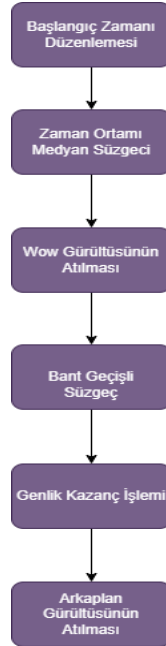
Ölçümler sırasında gürültüleri en aza indirmek ve radar sinyalinin su içine nüfuzunu en üst seviyeye çıkarmak için metalik bir aksamı olmayan plastik şişme bir bot kullanılmıştır. Radar antenlerinin bot içerisindeki yerleşimleri Şekil 4.3’te verilmiştir. Şekilde görülen anten 200 MHz frekansında çalışmaktadır. Antenden hariç olarak ölçüm konumlarının gerçek zamanlı kaydedilmesi için GPS sistemi de kullanılmıştır. Bot elle kontrol edilerek ileri yönlü hareket ettirilmiş ve zig-zag düzeninde ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3 Ölçüm sisteminin görüntüsü

4.1.3 Verilerin işlenmesi

İznik Gölü’nde yapılan ölçümlerden elde edilen verilere sırasıyla başlangıç zamanı düzeltilmesi, “WOW” gürültüsünün giderilmesi, zaman ortamı medyan filtre, bant geçişli süzgeç, genlik kazancı, arka plan kaldırma işlemleri uygulanmıştır (Şekil 4.4).



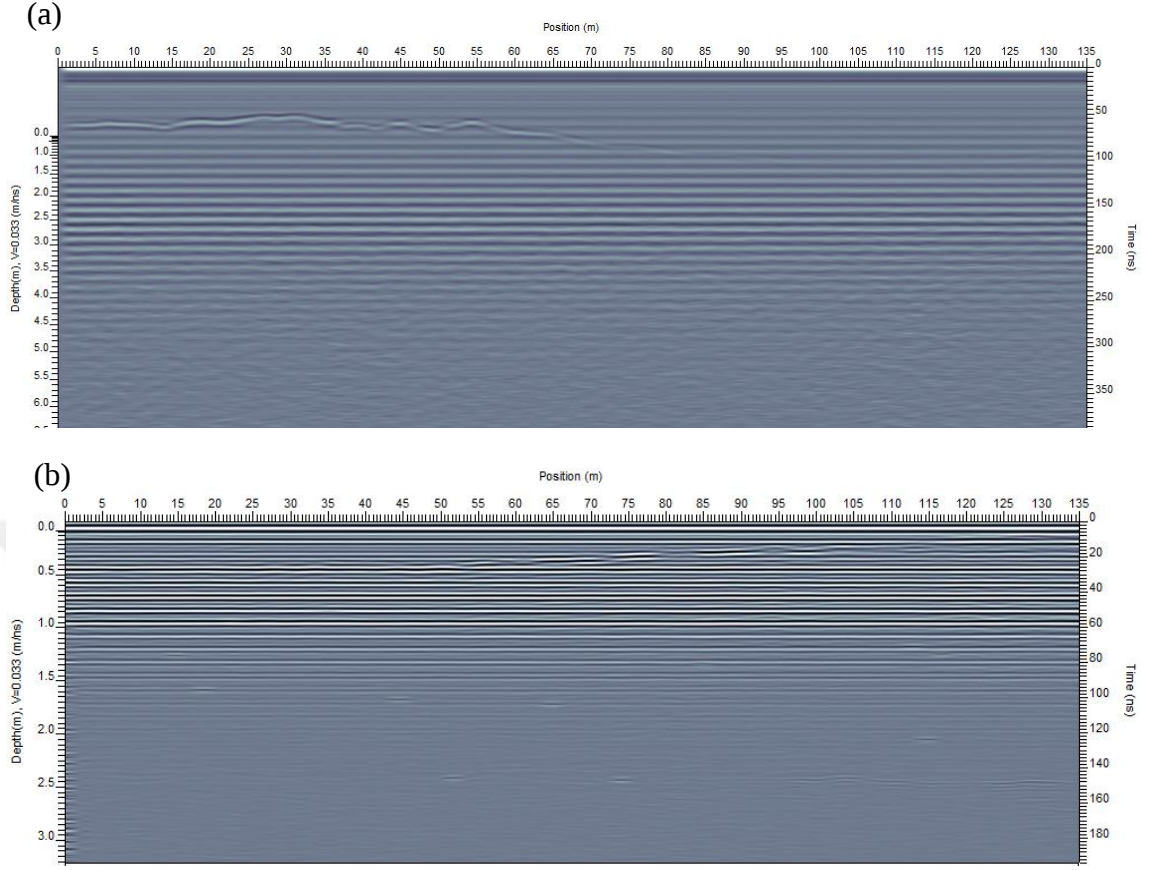
Şekil 4.4 Veri işlem akış şeması

200 MHz'lik antenle yapılan ölçümlerinin veri işleme ile ilgili bilgiler Bölüm 2.4'te örnek üzerinde verilmiştir. Bu nedenle bu bölümde yalnızca 100 MHz ve 500 MHz'lik antenlerle toplanan verilere uygulanan veri işlem adımları örnek birer profil üzerinde anlatılacaktır. Şekil 4.5'te sırasıyla 100 MHz ve 500 MHz'lik antenlerle toplanmış ham radar kesitleri yer almaktadır.



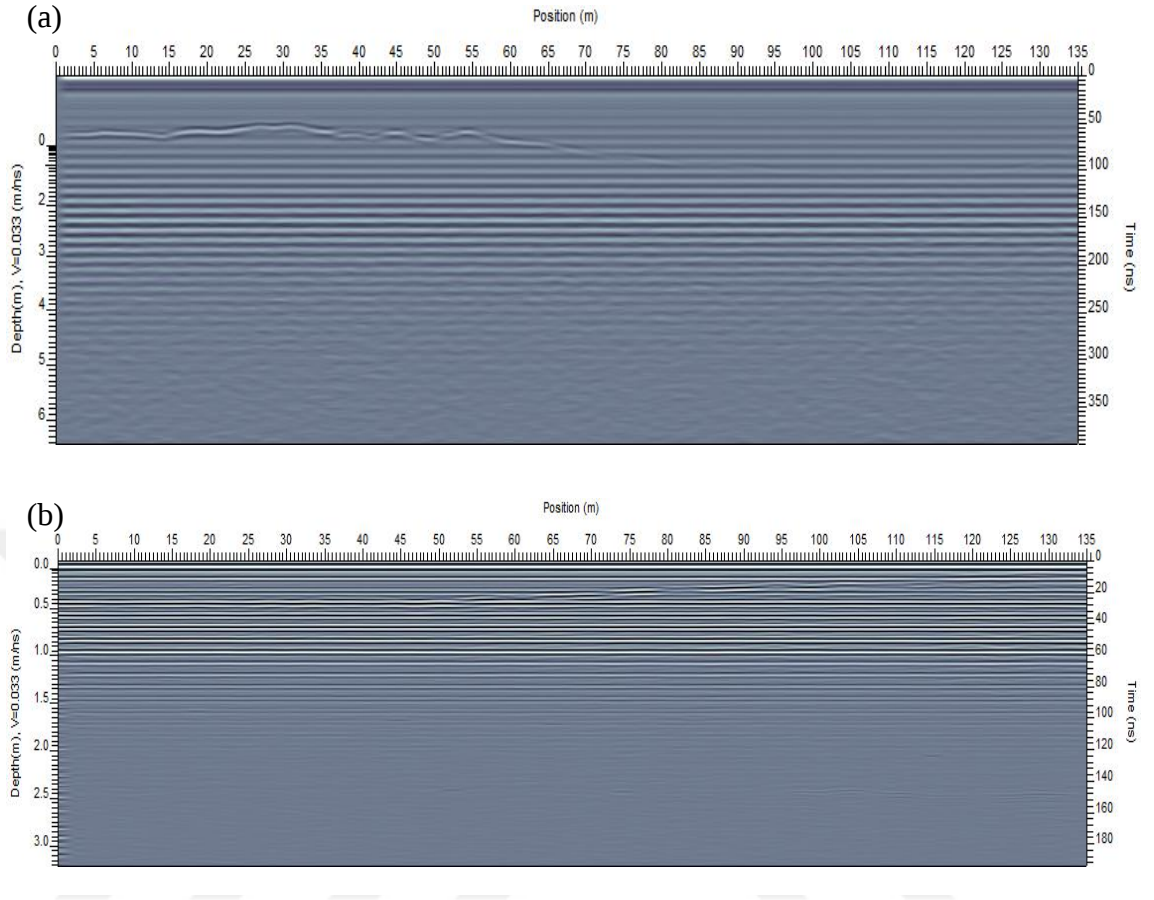
Şekil 4.5 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait işlenmemiş WPR kesitleri

Şekil 4.6'da 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) için başlangıç zamanı düzeltmesi yapılmış WPR kesiti gösterilmektedir. Şekil 4.5'te kıyaslandığında verinin zamanda ötelendiğini görülmektedir. Böylece sinyalin vericiden alıcıya gelene kadar geçen ölü zaman atılmış olmaktadır.



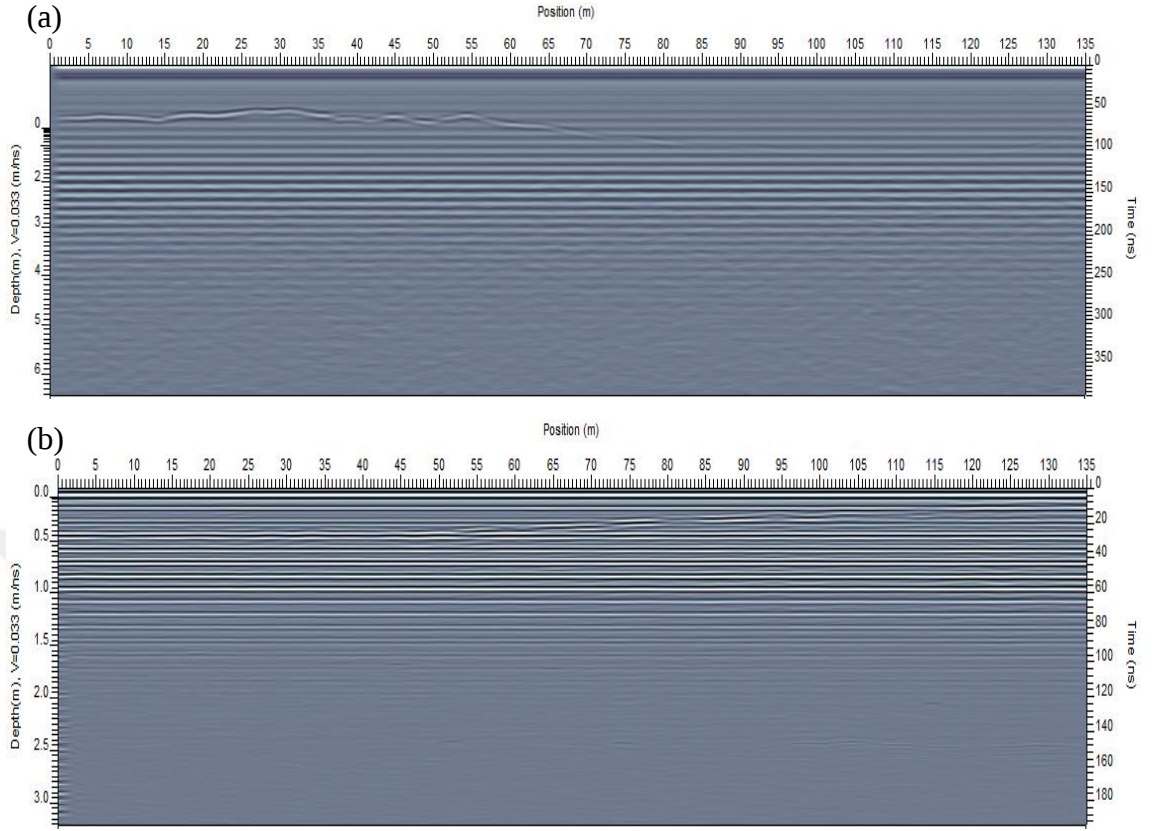
Şekil 4.6 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) için başlangıç zamanı düzeltilmesi yapılmış WPR kesiti

Şekil 4.7’de 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait medyan filtre uygulanmış WPR kesitleri gösterilmektedir. Bu işlem verideki ani genlik artışı şeklinde oluşan saçılmış noktaların veriden atılması amacıyla yapılmıştır.



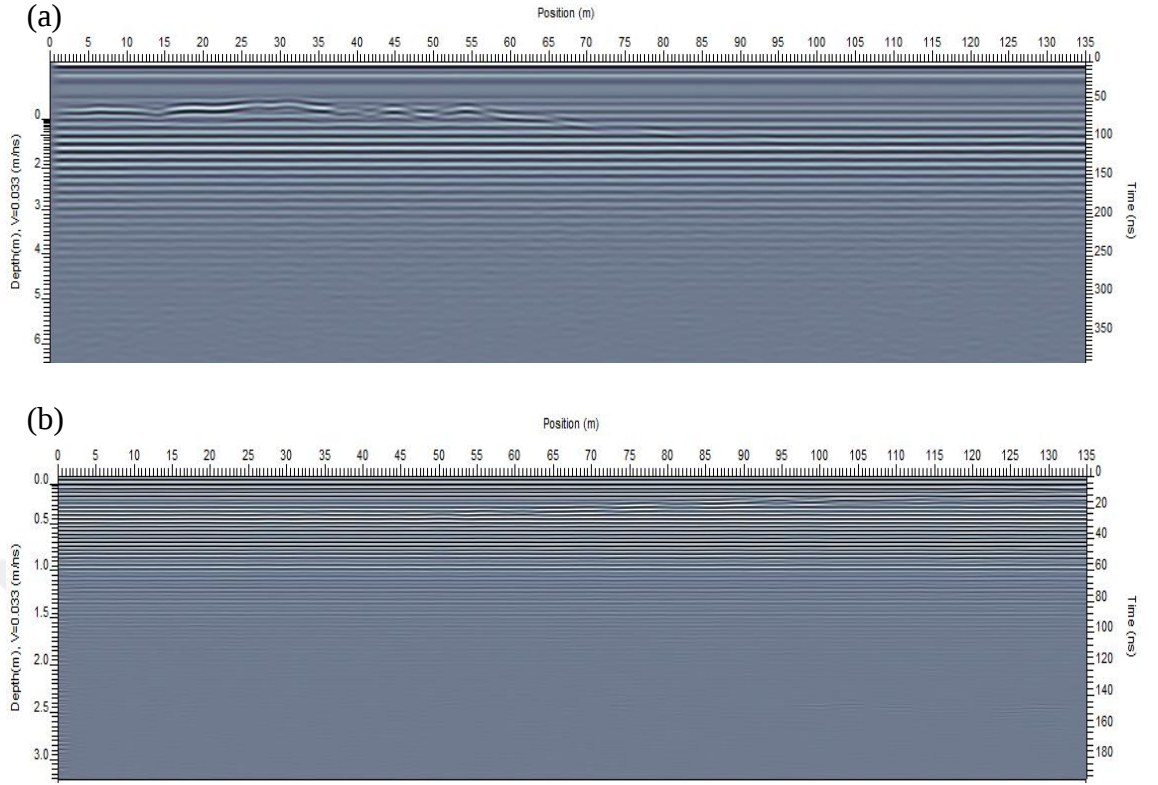
Şekil 4.7 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımına ek medyan filtre uygulanmış WPR kesitleri

Şekil 4.8 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait wow gürültüsü kaldırılmış WPR kesitleri gösterilmektedir. Veri işlemin anlatıldığı ilgili bölümde de anlatıldığı gibi işlem öncesi ve sonrası incelendiğinde çok düşük frekans etkisinin veriden atıldığı görülmektedir. Ayrıca wow gürültüsü sinyalin trendinde bir sapma meydana getirdiğini de Şekil 4.12-d 'de c şekline göre veri trendinin düzeldiği ve düşük frekanslı olayların veriden atıldığını gösterilen genlik spektrumlarıyla ortaya koyulmuştur.



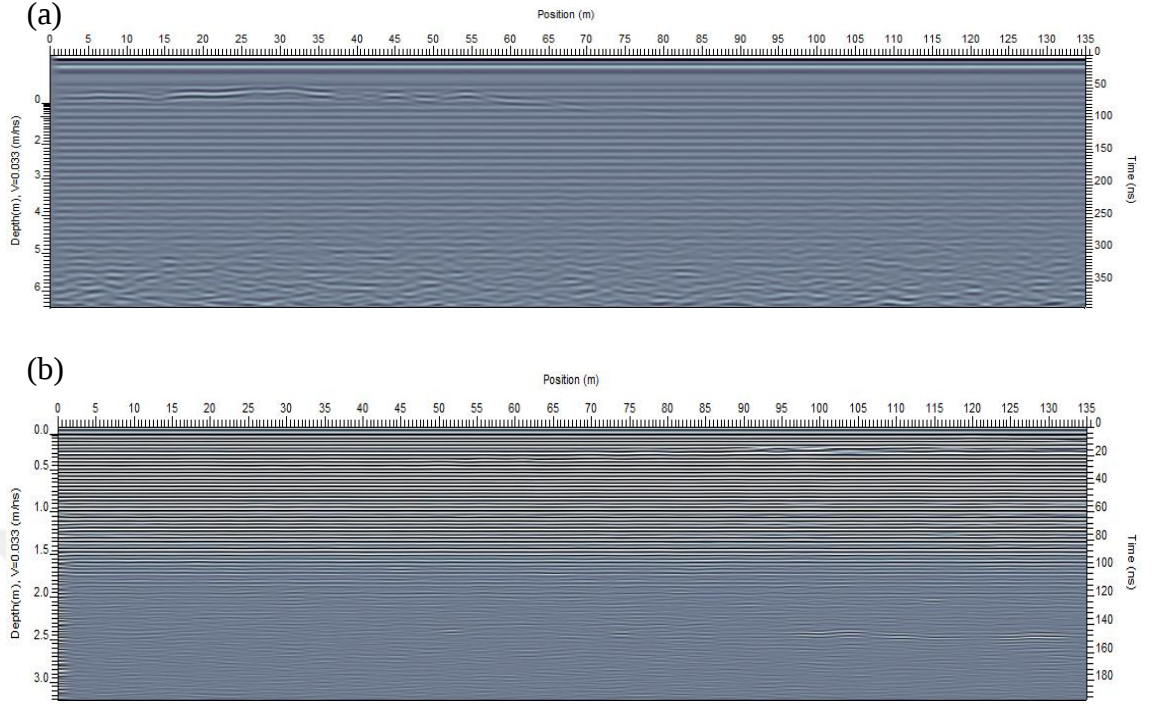
Şekil 4.8 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek wow gürültüsü kaldırılmış WPR kesitleri

Şekil 4.9 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait bant geçişli işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitleri gösterilmektedir. Bant geçişli süzgeç veri işlem adımlarından en dikkatli yapılması gereken işlemlerden birisidir. Bunun nedeni kesme ve geçirme frekanslarının doğru belirlenmediği durumda veriden yalnızca istenmeyen gürültüleri değil verinin kendisinin de atılmış olabileme durumundan dolayıdır. Bu frekans aralıkları veri toplanırken kullanılan antenin merkez frekansına göre seçilmelidir.



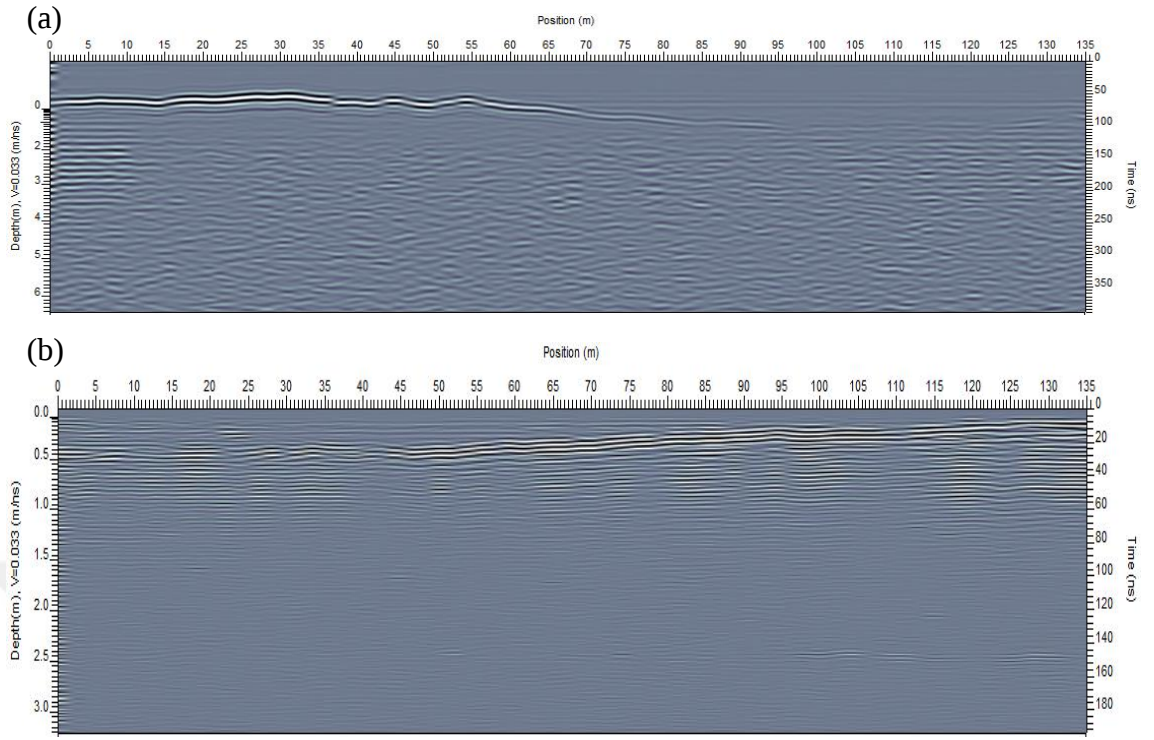
Şekil 4.9 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek bant geçişli işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler

Şekil 4.10 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait genlik kazanç işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitleri gösterilmiştir. Genlik kazanç işlemi sinyalin yer içine iletildikçe, derinliğin artışına bağlı olarak sinyalin genliğinin sönümlenmesi söz konusu olduğundan bu genlik sönümünün iyileştirilmesine yönelik yapılan bir işlemdir. Özellikle suda yapılan yer radarı çalışmalarında karadan farklı olarak sinyalin su kolonunu da geçmesi gerektiğinden genliklerde ciddi kayıplar olabilmektedir. Bu nedenle özellikle WPR metodunda doğru şekilde ve dengeli olarak genlik kazanç yapmak oldukça önemlidir.



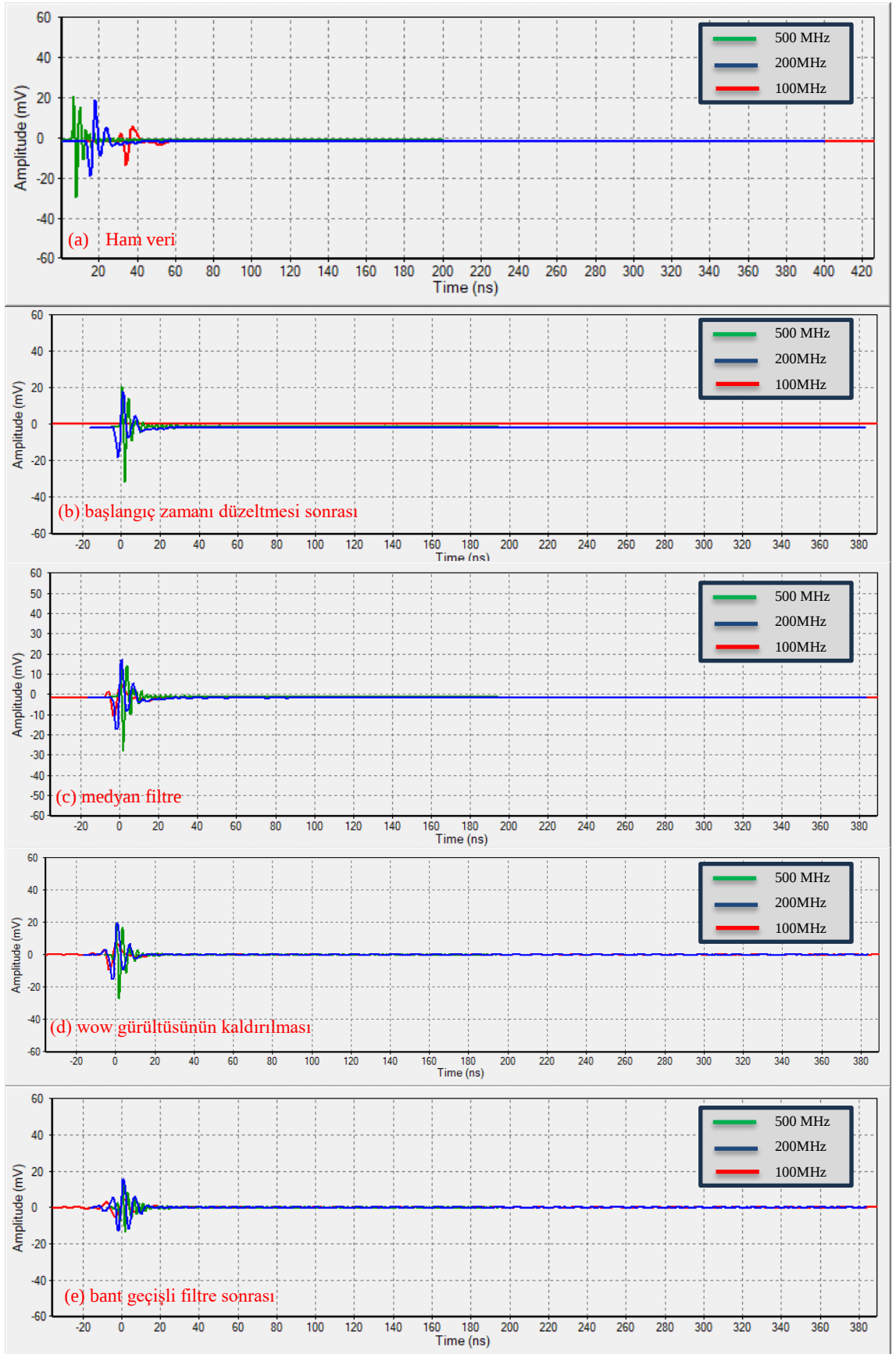
Şekil 4.10 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek genlik kazanç işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler

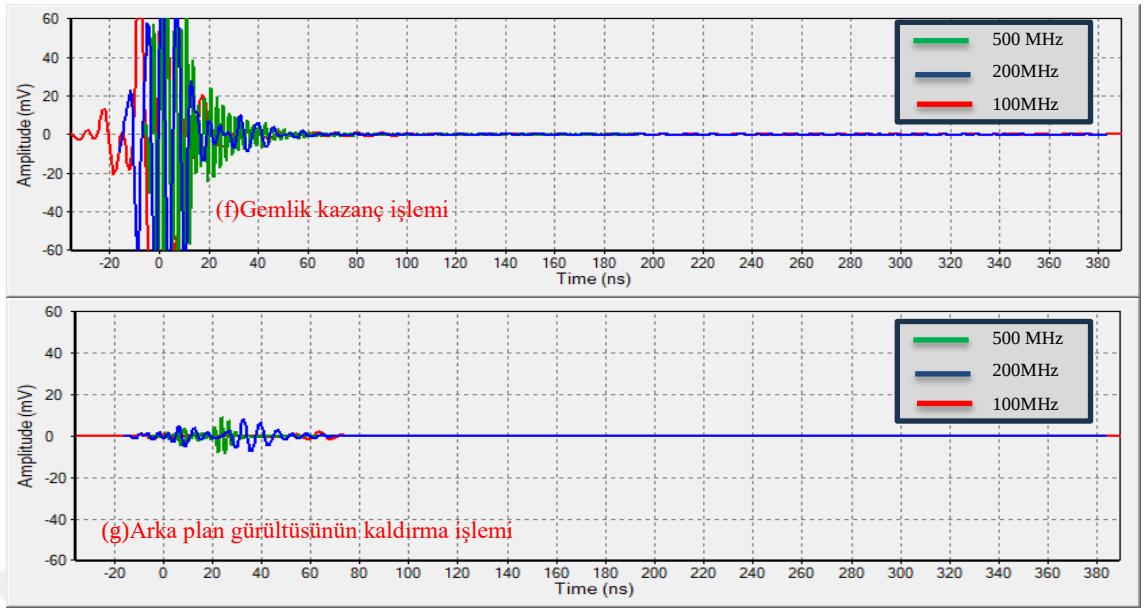
Şekil 4.11 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) antenlerle yapılan ölçümlere ait arka plan gürültülerini kaldırma işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitlerinin gösterilmesi. Bu noktaya kadar uygulanan veri işlem adımlarında özellikle de 500 MHz anten kullanılarak toplanan veriden elde edilen WPR kesitinde (Şekil 4.10b) hala bir miktar gürültü olduğu görülmektedir. Fakat arka planı kaldırma işlemi sonrası (b) kesitindeki gürültülerin giderildiği görülmektedir. Arka plan kaldırma işlemi, veride bulunan sinyallerin tamamını toplayıp iz sayısı ile normalize edilerek ortak genlik bilgisinin veriden atılması işlemini içermektedir. Bu ortak genlik bilgisi tüm sinyaller boyunca olduğundan tabakaları, blokları ya da olası yapıların görünürliğini maskeleymektedir. Diğer bir deyişle yatay kendini tekrar eden ve tüm profil boyunca ortak olan ortalama genlik veriden çıkarılmaktadır. Su ortamında bu izlerin bir tür çınlama etkisine karşılık geldiği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.11 100 MHz (a) ve 500 MHz (b) önceki veri işlem adımlarına ek arka plan gürültülerini kaldırma işlemin uygulanması sonrası elde edilen WPR kesitler

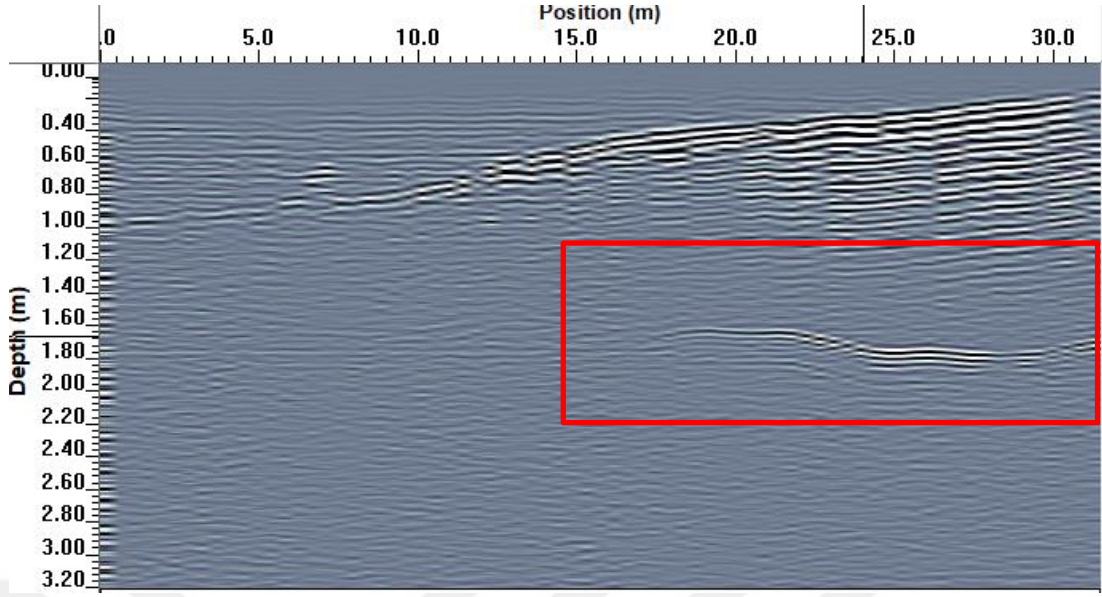
Şekil 4.12’de veri işlem aşamaları uygulanmış veriden seçilen bir iz için, tüm veri işlem aşamaları sonrasında izdeki genlik değişimi yer almaktadır. Veri işlem adımlarının bir radar izinde yaptığı değişiklik tekil izler üzerinde daha iyi anlaşılmaktadır. Zaman serileri incelendiğinde uygulanan veri işlem adımları sonrasında genliklerde meydana gelen değişiklikler görülmektedir. Yapılan veri işlem adımlarıyla düşük ve yüksek frekansta istenmeyen olaylar atılarak veri yorumlanabilir hale gelmiştir.





Şekil 4.12 Veri işlem aşamaları sonrası seçilen sinyalin genlik spektrumlarının gösterilmesi

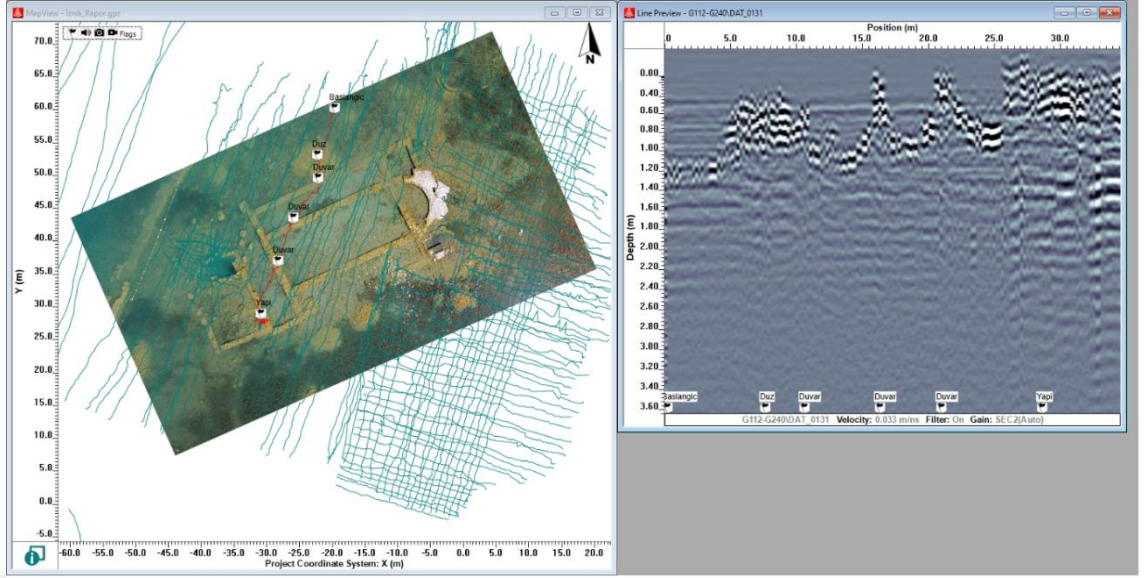
Genel bir değerlendirme ile İznik Gölü suyunun elektrik özelliklerinin radar ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için uygun olduğu, 100 MHz, 200 MHz ve 500 MHz'lik antenler kullanılarak toplanan verilerde yorumlanabilir bilgiler elde edilebildiği görülmüştür. Özellikle 200 MHz ve 100 MHz ile elde edilen radar kesitlerinde göl tabanında jeolojik birimler tespit edilmiştir. 100 MHz ile toplanan profil Bazilika yapısının batısında kalan bir alanda yapılmıştır ve su derinliği profil yönünde artmaktadır. Şekil 4.11a incelenecek olursa göl tabanında bulunan jeolojik birimin derinliğinin profil yönü boyu boyunca kısmen arttığı görülmektedir. 500 MHz antenler su tabanını takip edebilmek adına kıyıya dik yönde gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile su tabanından gelen yansımalar ile su derinliği takip edilebilmektedir. Şekil 4.11.b'de verilen kesitte su derinliğinin 60cm'den 20cm'ye kadar değiştiği görülebilmektedir. 500 MHz'e ait bir başka profil Şekil 4.13'de verilmiştir. Radar kesitleri zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmiş izlerden oluşmaktadır. Bu kesitlerin düşey eksenini zamandan derinliğe çevirmek için EM dalgaların hızına gereksinim vardır. Ortamın hızı kesitler üzerinde hiperbol çakıştırma yolu ile 0.033 m/ns olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13 5m genişliğinde bir alanda gözlenebilen ve yaklaşık 2m derinlikte bulunan ve birim sınırı olarak yorumlanan belirti

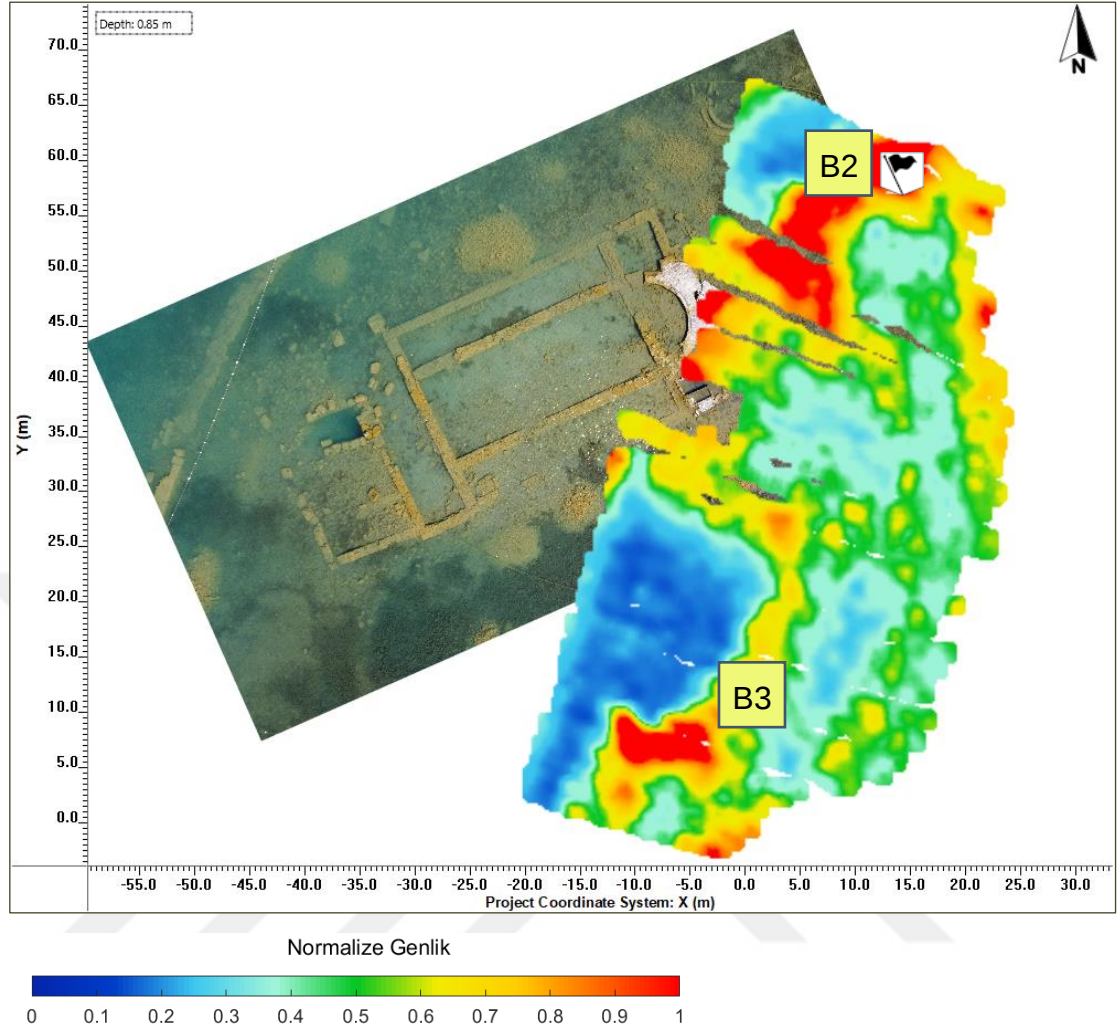
Su yüzeyinden 1m ve daha derinleri gösteren derinlik dilimlerinde süreklilik gösteren başka bir belirti bulunmamaktadır. Ancak derinlik dilimlerinde görülmemekle birlikte birbirine paralel birkaç profile gözlenen bir belirti ayırt edilmiştir. Şekil 4.13'te işaretlenen belirtinin bir jeolojik birim arayüzeyi olduğu değerlendirilmiştir

Şekil 4.14'te 200 MHz antenle toplanmış WPR kesiti, profil konumları ve hava fotoğrafı bulunmaktadır. Bu veri kümesine de önceki bölümde özetlenen tüm veri işlem adımları uygulanmıştır. Elde edilen radar kesiti Şekil 4.14'te sağ bölümde verilmiştir. Kesit üzerinde belirti olarak değerlendirilen noktalar işaretlenmiştir. Bu işaretler sahada güncel olarak çekilen hava fotoğrafı üzerinde konumlandırılmıştır. Yapılan görsel değerlendirme ile işaretli tüm belirtilerin gözle seçilebilen duvar ve yapı sınırlarına karşılık geldiği görülebilmektedir. Kesit üzerinde işaretlenenlerden daha derinde bir yapıdan kaynaklanabilecek başka bir belirtinin bulunmadığı söylenebilir.



Şekil 4.14 200 MHz antenle toplanmış profil üzerinde ayırt edilen belirtiler ve bunların hava fotoğrafı üzerindeki konumları

Şekil 4.15'te 500 MHz anten kullanılarak elde edilen verilerden oluşturulan bir derinlik dilimi verilmiştir. Su yüzeyinden 85cm derinliğe ait olan radar derinlik diliminde yansıma genlikleri normalize edilerek 0-1 aralığında sunulmuştur. Derinlik dilimi incelendiğinde belirti olarak değerlendirilebilecek iki alan bulunduğu düşünülmektedir. Derinlik dilimi üzerinde B2 ve B3 şeklinde işaretlenen konumlardan B2 bazilika apsisinden başlayarak kıyıya doğru ilerlemektedir. B3 belirtisi KD-GB yönünde devamlılık göstermekte ve bir yay çizerek ilerlemektedir. Bu belirtinin doğrudan çalışma alanındaki bazilika yapısı ile ilişkili olup olmadığını belirlemek güçtür. Sadece gözle görülen mimari yapılar ile uyumlu bir uzanımı olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.15 500 MHz işlemiş radar verilerinden oluşturulan 85cm derinlik dilimi

4.2 Mogan Gölü Çalışmaları

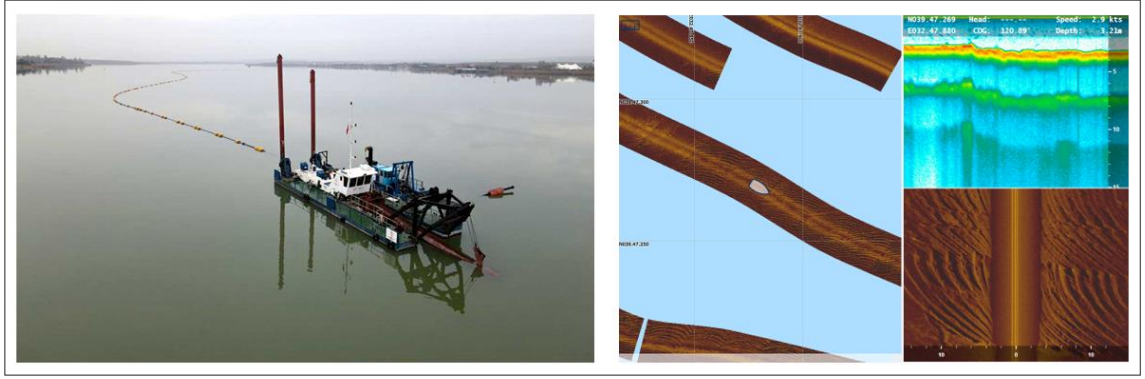
Mogan Gölü Ankara ili Gölbaşı ilçesi sınırları içerisinde yer almakta olup KG yönünde yaklaşık 5km, DB yönünde ise yaklaşık 1km boyutlarındadır. Çalışma alanının Türkiye haritasındaki konumu ve havadan görüntüsü Şekil 4.16 'de gösterilmiştir. Mogan Gölü ve komşuluğunda yer alan Eymir Gölü ile ilgili çok farklı disiplinlerden çalışmalar yürütülmüş ve halen yürütülmektedir (DSİ, 1994; ODTÜ, 1995; Ocakoğlu ve diğ., 2018; Özaydın, 2002; Yağbasan, 2007; Beklioğlu ve diğ., 2000). Bilimsel ve teknik çalışmalar için bu ölçüde ilgi odağı olmasının önemli nedenlerinden biri Mogan Gölü'nün ekolojik

anlamda çok önemli olmasına karşı giderek artan insan popülasyonu dolayısıyla tehdit altında olmasıdır.



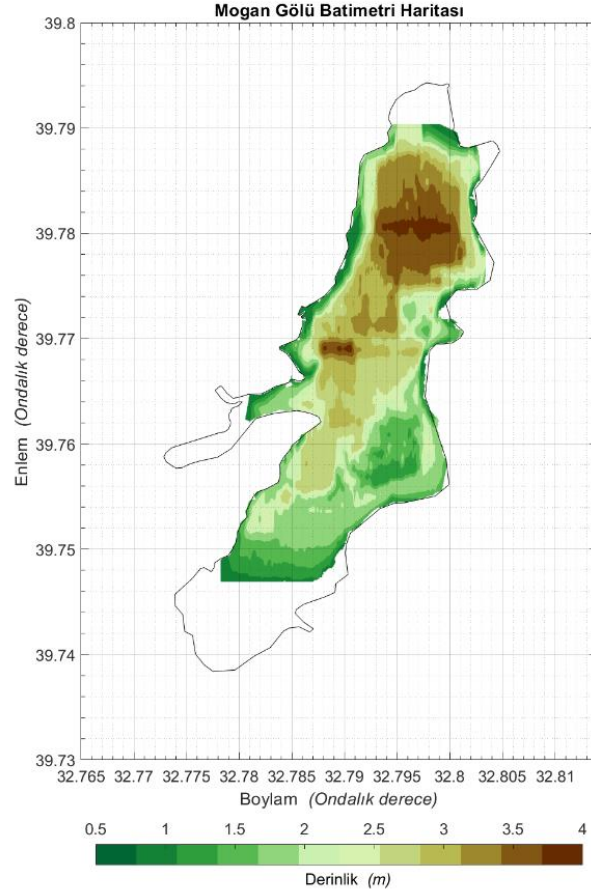
Şekil 4.16 Mogan Gölü çalışma alanının konumu

Göl ile ilgili yaklaşık 20 yıl önce yapılan çalışmalarda (Beklioglu, 2000) göl suyunun berrak, bitki ve hayvan canlılığı yoğun ve zengin tür çeşitliliğine sahip şeklinde nitelendirilmektedir. Ancak günümüzde bu özelliklerini koruduğunu söylemek güçtür. Bu nedenle bölge 22.10.1990 tarih ve 90/1117 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile “Gölbaşı Özel Çevre Koruma Bölgesi” olarak tespit ve ilan edilmiştir ve koruma altına alınmıştır. Göldeki önemli sorunlardan birinin su tabanında biriken güncel sedimanların (çamur) geçirimsiz bir katman oluşturarak su filtrasyonunu kısıtladığı, göle su girişlerindeki azalma ile sudaki kirleticilerin konsantrasyonun arttığı öne sürülmüştür. Bu çerçevede gölde kapsamlı bir dip çamuru temizliği projesi başlatılmış ve iki etaplı bir çalışma ile 2.699.00m³ çamur taraması yapılmıştır. Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalar sırasında dip çamuru temizliği kısmen tamamlanmış durumda idi. Çalışmalardan bir görüntü ve 119Y547 nolu TUBITAK projesi kapsamında gerçekleştirilen SONAR ölçümleri ile dipteki tarama izlerine ait görüntü Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17 Mogan Gölü dip çamuru temizliği çalışmaları ve göl tabanından görüntüler

Mogan Gölü'nün ortalama derinliği 2.8m'dir. Gölün en derin noktası kurak dönemde 4.5m, yağışlı dönemde ise yaklaşık 5-5.5m aralığında olduğu bildirilmektedir. Su derinliği göl yüzeyinde yürütülen jeofizik çalışmalar için önemli olduğundan önceden bilinmesi önemlidir. Bu çerçevede gölde yürütülen ve bu tez yazarının da bursiyer olarak yer aldığı 119Y547 nolu proje kapsamında batimetri ölçümleri de yapılmıştır. Kurak döneme karşılık gelen bir zaman diliminde yapılan çalışmalarda gölün en derin noktası kuzey sınırına yakın olup 4.7 m olarak belirlenmiştir. Gölün taban topoğrafyası hakkında fikir vermesi açısından batimetri haritası Şekil 4.18'de verilmiştir. Batimetri haritası incelendiğinde göl tabanının genel olarak düz olduğu, kıyı çizgisi boyunca ve güneydoğu sahilinde sığ olduğu görülmektedir. Bu hali ile bir çanak yapısına benzetilebilir.



Şekil 4.18 Mogan Gölü su tabanı derinliği haritası

Daha önce belirtildiği gibi yer radarı yönteminin sudaki uygulamasında EM dalganın ilk karşılaştığı ve içinde bir süre seyahat ettiği ortam sudur. Bu nedenle suyun elektrik özellikleri yöntemin bu alandaki verimliliğinde son derece önemlidir. Mogan Gölü suyunun daha önce rapor edilen çalışmalar çerçevesinde tatlı su özelliklerinde olduğu, verilen su derinlikleri de göz önüne alındığında radar yönteminin uygulanabilir olduğu, 500 MHz değilse de 200 ve 50 MHz antenler ile su tabanının ve tabanın hemen altındaki sedimanların görüntülenebileceği değerlendirilmiştir. Yüksek frekanslı radar sinyallerinin sudaki yayılma hızları 0.033m/ns dolayında ve atenuasyonun (sönümlenme) karasal ortamdakine göre oldukça fazla olduğundan 500 MHz anten ile üretilen radar sinyalinin tabana ulaşması ve yansıma alınması beklenmemiştir. Yer radarı ölçümleri de bu çerçevede planlanmıştır. Ölçümler fiber özellikli bir tekne kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan tekne ve radar sisteminin yerleşimi Şekil

4.19’de verilmiştir. Şekilde görülen anten sisteminin çalışma frekansı 50 MHz olup alıcı ve verici antenler 2m uzunluğundadır.



Şekil 4.19 Ölçüm sisteminin görüntüsü

Ölçüm parametreleri 50 MHz ve 200 MHz merkez frekansına sahip antenler için çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Ölçümlerde kullanılan parametreler

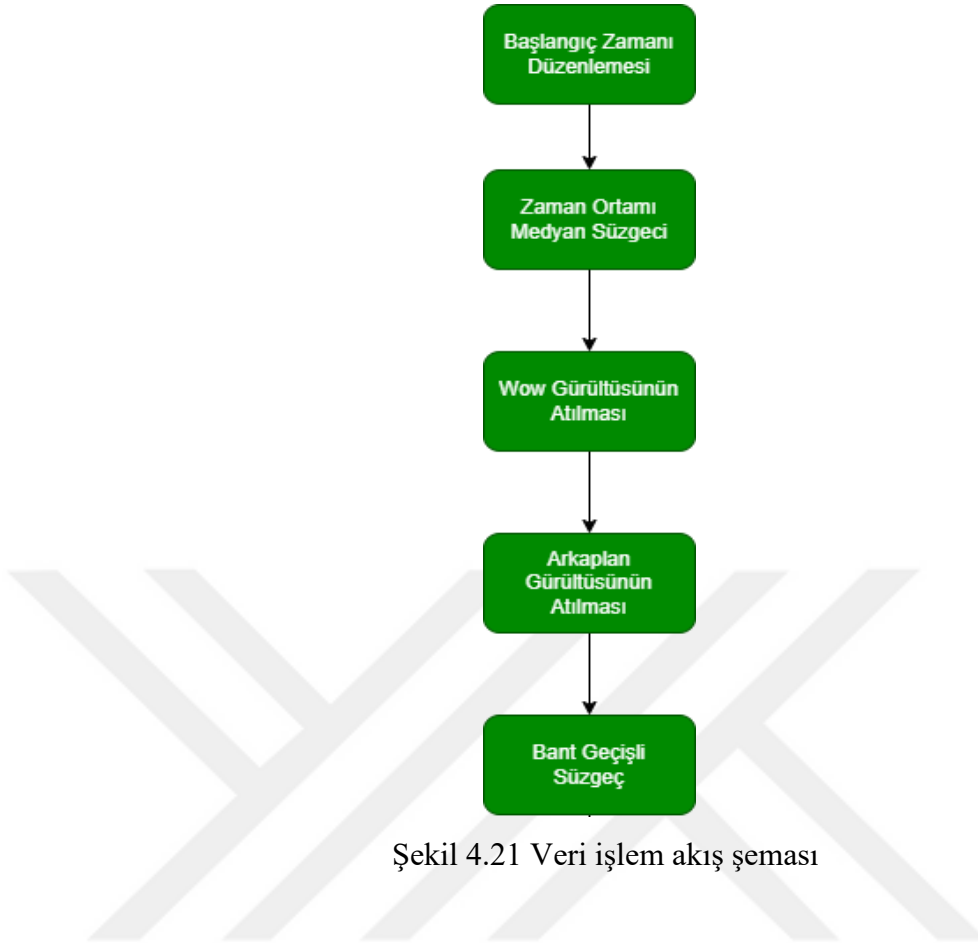
Anten Frekansı	50 MHz	200 MHz
Yığma Sayısı	128	128
İz Başına Düşen Örnek Sayısı	1024	1024
Zaman Örnekleme Aralığı	1.6 ns	0.4ns
Toplam Kayıt Zamanı	1638 ns	413ns

Yukarıda verilen ölçüm ayarları ve tekne yerleşimi dışında çalışma alanında çok farklı ayar ve düzenlemeler ile ölçümler yapılmıştır. Ancak iki farklı cihaz (MALA, Sensors & Software), üç farklı anten frekansı (500, 200 ve 50 Mhz), plastik bot, fiber tekne gibi farklı araçlar kullanılmış olsa da Mogan Gölü'nde radar sistemi ile istenilen ölçüm sonuçları elde edilememiştir. Burada beklenen sonuç en azından su tabanından bir yansıma alınması yönünde iken doğrudan gelen dalga dışında neredeyse sinyal alınamamıştır. Sistemlerin kalibrasyonu kara ölçümleri ile kontrol edilmiş ve çalışır durumda oldukları ve birbirleri ile benzer kayıtlar aldıkları teyit edilmiştir. Sinyal penetrasyonunun kullanılan su taşıtı nedeni ile zayıflıyor olabileceği düşüncesi ile farklı malzemelerden üretilmiş düz tabanlı tekneler kullanılmıştır. Örnekleme sıklığı, sinyal boyu gibi ayarlar denenmiş ancak sonuç değişmemiştir. Ölçülen verilerin bu durumuna ait bir örnek olarak gölü DB yönünde kesen ve P72 şeklinde numaralandırılan bir profil verisi kullanılmıştır. Şekil 4.20'de göl üzerinde konumu verilen profilin uzunluğu 708m'dir.



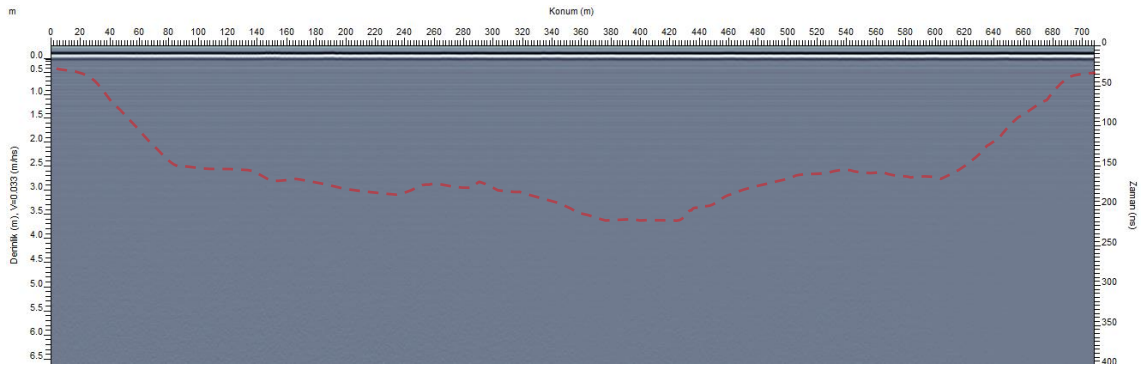
Şekil 4.20 Mogan Gölü 72 nolu radar profilinin konumu

Mogan Gölü'nde toplanan verilere uygulanan veri işlem adımları şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 Veri işlem akış şeması

Örnek olarak seçilen P72 numaralı profilde seçilen ölçüm ayarları Çizelge 5.2’deki gibi olup profile ait radargram Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 Mogan Gölü 72 nolu radar profilinde elde edilen radargram ve batimetri profili

Görüldüğü gibi doğrudan gelen dalga dışında herhangi bir genlik bilgisi bulunmamaktadır. Bu durum ölçüm sırasında profil başlangıcından itibaren anlaşılmış olsa da özellikle kıyılara yaklaşıldığında, suyun sığlaşacak olması ya da su özelliklerinde meydana gelebilecek olası değişiklikler nedeni ile ölçüm sürdürülmüştür. Buna karşın

herhangi bir yansıma izi alınamamıştır. Benzer bir durum 50 MHz anten için de söz konusudur. P29 numaralı 560 metre uzunluğundaki profile ait radargram Şekil 4.23-a'da verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere ortalama 3m civarındaki su tabanına ait herhangi bir yansıma bulunmayıp doğrudan gelen sinyaller göze çarpmaktadır. Veri işlem uygulandığında yatay seyreden sinyaller de veriden atılmakta ve elde herhangi bir genlik barındırmayan bir kesit kalmaktadır Şekil 4.23-b.

Ölçümler gölün farklı konumlarında, farklı fiziksel koşullara ulaşılabilir düşüncesi ile tekrarlanmış ancak elde edilen kesitler yukarıda özetlenen içerikte olmuştur. Bu nedenle durumun ölçme sistemi, bot/tekne ya da ölçüm ayarlarından kaynaklanmadığına kesin olarak kanaat getirilmiştir. Bu noktadan sonra radar yöntemi ile veri ölçülemiyor olmasının göl suyunun elektrik özelliklerinden kaynaklanması olası diğer seçenektir. Dolayısı ile su örnekleri üzerinde bu özelliklerin araştırılması yoluna gidilmiştir. Su örneklerinin EM sinyallerin yayılımı ile ilişkilendirilebilecek iki fiziksel özelliği bulunmaktadır. Bunlar elektrik iletkenlik ve dielektrik özellikleridir.



Şekil 4.23 Mogan Gölü 29 nolu radar profilinde elde edilen a. ham, b. işlenmiş radargram

Su örneklerinin iletkenliğinin doğrudan ölçülmesi olanaklıdır. Bu amaçla Mogan Gölü suyundan örnek alınarak yerinde ölçümler yapılmıştır. İletkenlik ölçümünde HQ40d Multi Analizer cihazı kullanılmıştır. Göl yüzeyinde farklı 8 noktadan yapılan örnekleme ile iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 4.4 de yağışlı dönem sonrasında, Çizelge 4.5 de ise kurak dönem sonrası ölçümlerine ait sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.4 Mogan Gölü suyu yağışlı dönem elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

Nokta	Tarih	X	Y	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ (ohm.m)
Göl-1	6.07.2021	481482	4399653	3850	2.597402597
Göl-2	6.07.2021	481722	4400564	3860	2.590673575
Göl-3	6.07.2021	481857	4401152	3850	2.597402597
Göl-4	6.07.2021	482020	4401790	3840	2.604166667
Göl-5	6.07.2021	482212	4402464	3820	2.617801047
Göl-6	6.07.2021	482415	4403123	3820	2.617801047
Göl-7	6.07.2021	482601	4403620	3720	2.688172043
Göl-8	6.07.2021	482924	4404303	3870	2.583979328

Çizelge 4.5 Mogan Gölü suyu kurak dönem elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

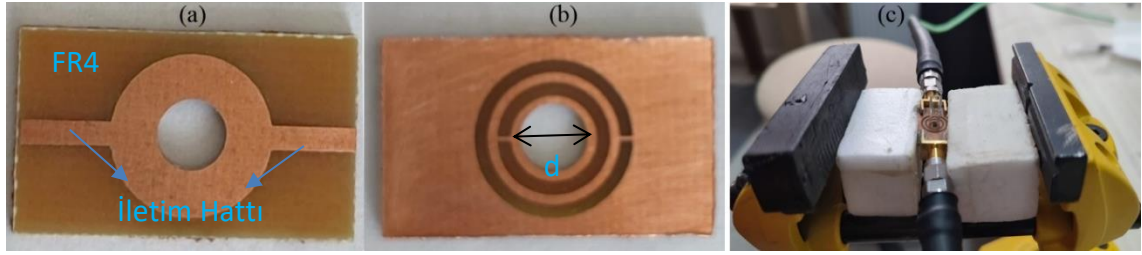
Nokta	Tarih	X	Y	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ (ohm.m)
Göl-1	11/22/2021	481482	4399653	4760	2.100840
Göl-2	11/22/2021	481722	4400565	4360	2.293578
Göl-3	11/22/2021	481858	4401153	4410	2.267574
Göl-4	11/22/2021	482020	4401791	4410	2.267574
Göl-5	11/22/2021	482213	4402465	4390	2.277904
Göl-6	11/22/2021	482415	4403123	4420	2.262443
Göl-7	11/22/2021	482601	4403621	4400	2.272727
Göl-8	11/22/2021	482924	4404303	4410	2.267574

İletkenlik ölçümleri incelendiğinde göl suyunun ortalama iletkenliğinin $4100 \mu\text{S}/\text{cm}$ olduğu görülmektedir. Genel değerlendirmede öz direnç kavramı daha sık kullanıldığından birim dönüşümü ile öz direnç 2.44 ohm.m olarak hesaplanabilir. Çizelge 4.1’de verilen öz direnç değerleri ile karşılaştırıldığında göl suyu öz direncinin yüzey suları ve meteorolojik sular için verilen aralığın oldukça altında olduğu görülmektedir. Bu yönü ile tatlı su olduğunu söylemek olanaklı değildir. İletkenlik değerleri mevsimsel olarak incelendiğinde kurak dönem sonrasında bir miktar daha yüksek olduğu görülebilir. Bu da göle yeni su girişinin azaldığı bir dönem için olağandır. Ancak yağışlı dönem

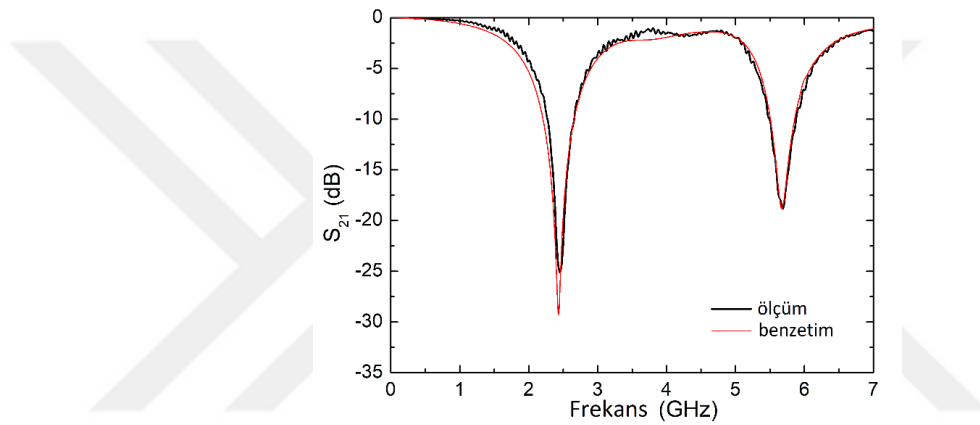
sonrasında bile en yüksek özdirenç değeri 2.68 ohm.m düzeyindedir. Beklenilenden oldukça düşük olan bu özdirenç değeri radar sinyallerinin su tabanına ulaşamaması ve bir yansıma kaydedilmemesinde önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

EM sinyallerin bir ortamdaki yayılımını belirleyen önemli bir parametre de dielektrik katsayısıdır. Bu katsayının değerinin artıyor olması ile atenüasyon doğru orantılıdır. Diğer bir deyişle yüksek dielektrik katsayısı olan ortamlarda EM dalga hızla sönümlenecektir. Dielektrik katsayısının doğrudan ölçümüne yönelik bir yöntem ya da cihaz bulunmamaktadır. Ancak göl suyu ile ilgili bu parametrenin de bilinmesi genel durumu ortaya koyması adına önemli bulunmuştur. Bu çerçevede Mogan Gölünün dielektrik sabitinin ölçülmesiyle ilgili bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma için Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nden Doç. Dr. Fulya Bağcı'dan destek alınmıştır. Ölçümlerde mikrodalga frekanslarda rezonans teknik kullanılarak Mogan Gölü suyunun dielektrik özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Khanna vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan esinlenip geometrik parametreleri değiştirilerek Şekil 4.24'de verilen mikroşerit tabanlı bir sensör yapısı tasarlanmıştır. Mikroşerit tabanlı sensörün ön yüzünde orta kısmında dairesel bir yama olan bir iletim hattı, arka düzleminde ise toprak zeminden aşındırılarak elde edilen bir tamamlayıcı ayırık halka rezonatörü bulunmaktadır. Sensör düzlemine diklemesine bir cam kılcal boru yerleştirilmiştir. Bu amaçla dairesel yamanın merkezinden tamamlayıcı ayırık halka rezonatörün merkezine $d=4,0$ mm çapta dairesel bir delik açılmıştır. Altlık olarak 1.0 mm kalınlıkta FR4 malzeme kullanılmıştır. Ön yüzdeki iletim hattı ve arka yüz 35 μ m kalınlıktaki bakırdır. EM benzetim programında bu yapının iletim hattının giriş ucundan RF/mikrodalga frekanslarda sinyal verilerek yansıyan ve geçen sinyaller hesaplanmış, rezonans frekanslar belirlenmiştir. Boş sensörün iletim spektrumundan 2.43 GHz frekansta -29.30 dB genlikte ve 5.67 GHz frekansta -18.83 dB genlikte iki rezonansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Üretilen sensör yapısının iletim ve yansıma spektrumları Fakültemizde bulunan Mikrodalga Araştırma Laboratuvarı'nda vektör ağ analizörü (Rohde&Schwarz ZVL13) aracılığıyla ölçülmüştür. Boş sensörün ölçülen yansıma spektrumu benzetim sonuçları ile birlikte Şekil 4.25'te sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre 2.45 GHz frekansta -25.08 dB genlikte ve 5.67 GHz frekansta -18.13 dB genlikte iki iletim rezonansı elde edilmiştir. Ölçüm spektrumu benzetimlerden hesaplanan spektruma

oldukça yakın bulunmuştur. Bu durum sensörün doğru biçimde üretildiğini ve vektör ağ analizörünün doğru biçimde kalibre edildiğini göstermektedir.



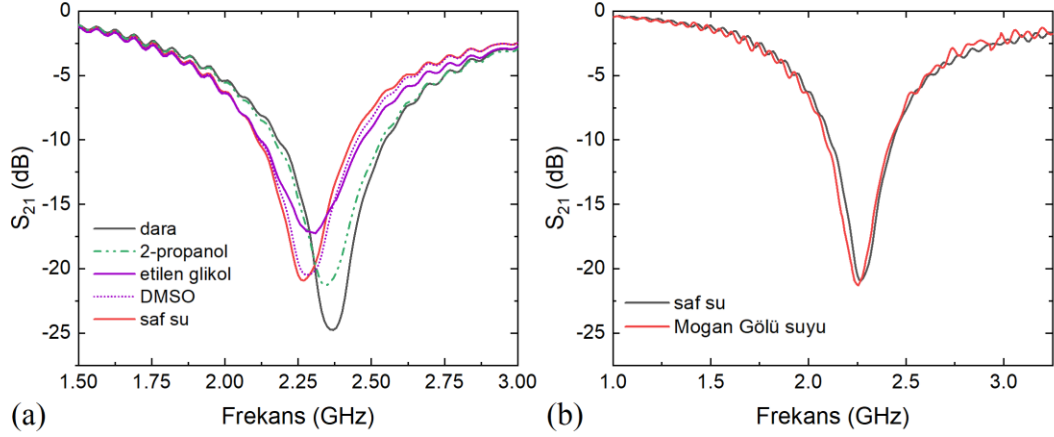
Şekil 4.24 a) Üretilen sensörün ön, (b) arka yüzü ve (c) cam pipet içeren sensör düzeneği



Şekil 4.25 Üretilen boş sensörün ölçülen iletim spektrumu ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması

Etilen glükol, DMSO, 2-propanol (izopropil alkol), saf su ve Mogan Gölü suyu şırınga ile 1.5 ml kadar çekilerek cam kılcal boru içerisinden geçirilip S-parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sıvıların her biri için ilk rezonansın rezonans frekansı ve genlik değerleri not edilmiştir. Bu sıvıların bazılarının iletim spektrumları, boş kılcal borulu sensörün (daranın) iletim spektrumu ile birlikte Şekil 4.26(a)'da gösterilmiştir. Mogan Gölü suyunun iletim spektrumu ise saf su ile beraber karşılaştırmalı olarak Şekil 4.26(b)'de verilmiştir. Bu sıvıların dielektrik sabitlerinin rezonans frekansla değişiminin parabolik olduğu bilinmektedir (Lee vd., 2019). Ayrıca kayıp tanjantının rezonans genliği ile ilişkisi hakkında da literatürde bilgi bulunmaktadır (Lee vd., 2019). Bu bilgiler kullanılarak mikroşerit sensör ile Mogan Gölü'nün S_{21} rezonans frekansı ve genliği

ölçülerek dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının hesaplanması gerçekleştirilmiştir.



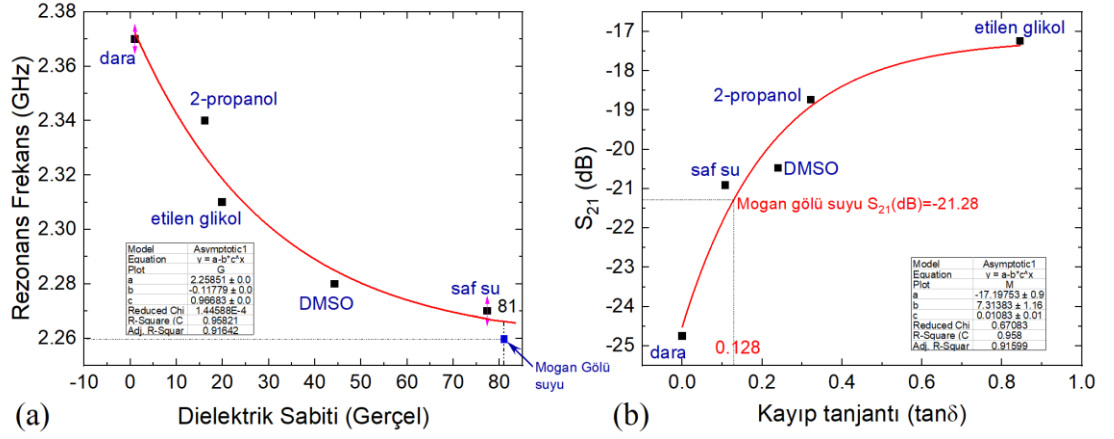
Şekil 4.26(a) Bazı sıvıların mikroşerit sensör ile ölçülen iletim spektrumları, (b) Mogan Gölü ve saf suyun iletim spektrumlarının karşılaştırılması

Kılcal cam boru boşken ve 2-propanol, etilen glikol, DMSO, saf su, Mogan Gölü suyu ile dolu iken rezonans frekansın dielektrik sabitinin gerçel kısmına bağlı grafiği Şekil 4.27(a)'da sunulmuştur. Dielektrik sabitleri gerçel ve sanal kısımları ile birlikte etilen glikol için Sengwa (2003) makalesinden, DMSO için Lu vd. (2009) makalesinden, 2-propanol ve saf su için Rotava vd. (2020) makalesinden alınmıştır. Rezonans frekansın dielektrik sabitinin gerçel kısmı ile değişimi matematiksel asimptotik olarak fit edilerek Şekil 4.27(a)'da kırmızı renkte gösterilen eğri oluşturulmuştur. Mogan Gölü suyunun rezonans frekansı 2.26 GHz olarak ölçülmüştür. Buradan Mogan Gölü suyunun dielektrik sabitinin gerçel kısmı 81.0 olarak elde edilmiştir. Kılcal cam boru boşken ve 2-propanol, etilen glikol, DMSO, saf su, Mogan Gölü suyu ile dolu iken rezonans frekansın sıvıların kayıp tanjantına bağlı grafiği Şekil 4.27(b)'da sunulmuştur. Sıvıların kayıp tanjantlarının rezonans genliğine göre değişimi de asimptotik fonksiyona fit edilerek Şekil 4.27(b)'de gösterilen kırmızı renkli eğri elde edilmiştir. Mogan Gölü sıvısının iletim rezonansı genliği -21.28 dB olarak ölçüldüğünden kayıp tanjantı 0.128 olarak elde edilmiştir. Kayıp tanjantı dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçel kısmına oranıdır. Buradan aşağıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi dielektrik sabitinin sanal kısmı 10.37 bulunmuştur.

$$\tan\delta = 0,128 = \varepsilon_r''/\varepsilon_r'$$

$$0,128 = \varepsilon_r''/81$$

$$\varepsilon_r'' = 10,37$$



Şekil 4.27 Sıvıların (a) dielektrik sabitlerinin gerçel kısımlarının rezonans frekanslarıyla değişimi, (b) kayıp tanjantının rezonans genlikleri ile değişimi

5. SONUÇLAR

Su ortamında yürütülen radar çalışmalarından ilki Bursa ilinde yer alan İznik Gölü'nde gerçekleştirilmiş ve yakın zamanda su seviyesindeki azalma ile görünür hale gelen yapılan araştırılmasını konu edinmiştir. Çalışmada sığ sayılabilecek bir derinlikteki olası yapıların araştırılması amacıyla farklı frekanslardaki antenler ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde jeolojik birim sınırları ve olası gömülü batık yapılara ait olabilecek izler ortaya konulabilmektedir. Bu çerçevede göl suyunun 10ohm.m civarındaki öz direnci tüm frekanslardaki antenler ile yapılan ölçümlerden beklenen sinyallerin ölçülebilmesini olanaklı kılmıştır. Yapılan veri işlem sonrasında derinlik haritaları hazırlanarak sunulmuş ve belirtiler mevcut yapılar ile değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

İkinci saha uygulaması ise Ankara ili Gölbaşı ilçesinde yer alan Mogan Gölü'nde gerçekleştirilmiştir. Bu alanda araştırma hedefi su tabanının haritasının oluşturulması ve tabanın altındaki sedimanların kalınlığının belirlenmesidir. Ancak bu çalışmada çok farklı donanımlar, anten frekansları, taşıyıcı tekne, ölçüm parametreleri ayarları ile yapılan denemelerde göl tabanından ya da taban altı sedimalardan yansıyan herhangi bir iz kaydı elde edilememiştir. Bu noktada yöntem ile sonuç alınamamasının nedeni suyun elektrik özellikleri olduğu kanaatine varılmıştır. Bunun teyit edilmesi için su örnekleri üzerinde iletkenlik ve dielektrik katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde su iletkenliğinin yüzey suları için literatürde verilen sınırların oldukça altında olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda dielektrik sabiti 80-83 arasında değişmektedir, moganın dielektrik sabiti ise bu değerler arasında yer almaktadır. Buradan yola çıkarak yer radarı yönteminin başarılı sonuç vermesi için yalnızca dielektrik sabitinin yeterli olmadığı, iletkenlik değerinin de yöntemin çalışmasında etkisi olduğu düşünülmüştür. Bu durumda sinyalin aşırı sönümlenmesine neden olan parametre suyun görece yüksek iletkenliği olarak ortaya çıkmıştır.

Özetle, İznik Gölü uygulamasında 500 MHz anten ile ölçülen veriler görece daha yüksek çözünürlükte olmakla birlikte beklendiği gibi araştırma derinliği düşüktür. 1m ve daha derin su seviyelerinde sinyal genliği azalmış ve veri alınamamıştır. Bu nedenle çalışma

alanının kıyıya yakın bölümlerinde uygulanmıştır. 200 MHz anten ise görece daha fazla araştırma derinliği sağlamıştır. Bu nedenle 2m ye yaklaşan su derinliklerinden sinyal alınabilmektedir. 50 MHz anten suyun daha derin olduğu noktalarda kullanılmış ve göl tabanı profil başlangıcında kısmen oraya koyulmuştur. Mogan Gölü'nde kıyıdan açığa doğru yapılan ölçümlerde su tabanından bir yansıma alınması beklenmiş ancak doğrudan gelen dalgalar dışında herhangi bir belirti elde edilememiştir. Profilin yalnızca başlangıç kısmında kıyıya çok yakın bölümde bir belirti elde edilmiş, suyun derinleşmesi ile sinyal tamamen sönümlenerek beyaz gürültü şeklinde tarif edilebilecek sinyaller kaydedilmiştir. Bu nedenlerden WPR yöntemi Mogan Gölü gibi yüksek su iletkenliğine sahip bir göl için başarılı olamamıştır.



KAYNAKLAR

- Anonymous. (2023, 9 13). Web sitesi:
https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/harmonic_planewaves_homogeneous/skindepth.html adresinden alındı
- Arcone, S. A., Chacho Jr, E. F., & Delaney, A. J. (1992). Short-pulse radar detection of groundwater in the Sagavanirktok River floodplain in early spring. *Water Resources Research*, 28(11), 2925-2936.
- Bekliöglü, M., Burnak, S. L. and İnce, Ö. (2000). "Benthi-planktivorous Fish-Induced Low Water Quality of Lake Eymir Before Biomanipulation. *Turkish Journal of Zoology*, Vol. 24:(No. 3, Article 11.).
- Best, H., McNamara, J. P., & Liberty, L. (2005). Association of ice and river channel morphology determined using ground-penetrating radar in the Kuparuk River, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 157-162.
- Bradford, J. H., Johnson, C. R., Brosten, T., McNamara, J. P., & Gooseff, M. N. (2007). Imaging thermal stratigraphy in freshwater lakes using georadar. *Geophysical Research Letters*, 34(24).
- Cassidy, N. J. (2009). Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. M. J. Harry içinde, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (s. 141-176).
- Cheng, R. T., Gartner, J. W., Mason Jr, R. R., Costa, J. E., Plant, W. J., Spicer, K. R., ... & Hayes, K. (2004). Evaluating a radar-based, non contact streamflow measurement system in the San Joaquin River at Vernalis, California. *U.S.G.S.*
- Conyers, L. B., ve Goodman, D., (1997). Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists.
- Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., ... & Barrick, D. (2006). Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42(7).
- Davis J.L., A. A. (1989). Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*(37), 531-551.
- Doolittle, J. A. (1990). A groundpenetrating radar study of the active layer thickness in areas of moist sedge and wet sedge tundra near Bethel, Alaska, U.S.A. *Arctic Alpine Res.*(22), 175–182. .
- DSİ. (1994). “*Mogan Gölü Kurtarma Projesi Planlama Raporu*”. Ankara: DSİ 5. Bölge Müdürlüğü.
- Haeni, F. P., Buursink, M. L., Costa, J. E., Melcher, N. B., Cheng, R. T., & Plant, W. J. (2000). round penetrating radar methods used in surface-water discharge

- measurements. In *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Vol. 4084, s. 494-500. International Society for Optics and Photonics.
- Hunter, L. E., Ferrick, M. G., & Collins, C. M. (2003). Monitoring sediment infilling at the ship creek reservoir, fort richardson, alaska, using gpr. *Geological Society, London, Special Publications*, 211(1), 199-206.
- Ida, N. (2015). *Engineering Electromagnetics* (3. b.). Akron: Springer.
- Khanna Y., Awasthi Y.K.,. (2020). Dual-band microwave sensor for investigation of liquid impurity concentration using a metamaterial complementary split-ring resonator. *Journal of Electronic Materials*(49(1)), 385-394.
- Khrstoforov, I. I., Omelyanenko, P. A., Omelyanenko, A. V., & Danilov, K. P. (2016). Methodology for study of river crossing of lineal engineering constructions by submersible GPR. In *2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (s. (pp. 1-4)). IEEE.
- Kurtulus, C., Kaplanvural, I., Çiçek, S., Özatici, S., & Erdem, G. E. (2013). Bıçkıdere (Gölkay Park) Taban Yapısının Yer Radarı (GPR) İle Araştırılması. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 12(1), 38-43.
- Lachhab, A., Booterbaugh, A., and Beren , M.,. (2015). Bathymetry and Sediment Accumulation of Walker Lake, PA Using Two GPR Antennas in a New Integrated Method. *JEEG*, 245-255.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-Penetrating Radar: A Modern Three-Dimensional Prospection. *Archaeological Prospection*(10), 213-240.
- Lee C.-S., Bai B., Song Q.-R., Wang Z.-Q., Li G.-F.,. (2019). Open complementary split-ring resonator sensor for dropping-based liquid dielectric characterization. *IEEE Sensors Journal*(19(24)), 11880-11890.
- Lu Z., Manias E., Macdonald D.D., Lanagan M.,. (2009). Dielectric relaxation in dimethyl sulfoxide/water mixtures studied by microwave dielectric relaxation spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry A* 113, 12207–12214.
- Maruddani, B., Sandi, E.,. (2019). The Development of Ground Penetrating Radar (GPR). *International Journal of Machine Learning and Computing*(9), 768-773.
- Melcher, N. B., Costa, J. E., Haeni, F. P., Cheng, R. T., Thurman, E. M., Buursink, M., ... & Hayes, K. (2002). River discharge measurements by using helicopter-mounted radar. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 41-1.
- Moorman, B. J., & Michel, F. A. (1997). Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar. *Journal of Paleolimnology*, 18(1), 61-73.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, 66(3-4), 261-330.

- Ocakoğlu, F., Dönmez, E.O., Tunçoğlu, C., Akbulut, A., Apaydın, A., Tün, M., Görüm, T., Tuncer A. (2018). *Mogan ve Eymir Göllerinin (Ankara) Paleoklimatolojik ve Kökensele İncelemesi. TÜBİTAK ÇAYDAG 114Y557 No'lu proje sonuç raporu.* Ankara: .
- ODTÜ. (1995). "Gölbaşı Mogan-Eymir Gölleri İçin Su Kaynakları ve Çevre Yönetim Planı Projesi, Kesin Rapor-Cilt 1, Cilt 2 (Ekler)". *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ASKİ Genel Müdürlüğü*, No: 93- 03-03-04-01.
- Özaydın, V. (2002). Su bütçesi elemanlarının bulunmasında izotop yöntemi. *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu*, (s. 115-125).
- Petrone, J., Sohlenius, G., Johansson, E., Lindborg, T., Näslund, J. O., Strömberg, M., & Brydsten, L. (2016). Using ground-penetrating radar, topography and classification of vegetation to model the sediment and active layer thickness in a periglacial lake catchment, western Greenland. *Earth System Science Data*, 8(2), 663-677.
- Powers, C. J., Haeni, F. P., & Smith, S. (1999). Integrated use of continuous seismic-reflection profiling and ground-penetrating radar methods at John's Pond, Cape Cod, Massachusetts. *In 12th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. cp-202.
- Qin, T., Zhao, Y., Hu, S., An, C., Rao, C., & Geng, D. (2017). Profiling experiment of a lake using ground penetrating radar. *In 2017 9th International workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR)* (s. (pp. 1-5)). IEEE.
- Qin, T., Zhao, Y., Lin, G., Hu, S., An, C., Geng, D., & Rao, C. (2018). Underwater archaeological investigation using ground penetrating radar: A case analysis of Shanglinhu Yue Kiln sites (China). *Journal of Applied Geophysics*, 154, 11-19.
- RJ, S. (2003). A comparative dielectric study of ethylene glycol and propylene glycol at different temperatures. *Journal of Molecular Liquids* 108, 47-60.
- Rotava A., Silva R.A.O., Dias M.H.C., Santos J.C.A.,. (2020). An analytical model for permittivity measurement of liquid dielectrics with a tubular sample holder. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1-6.
- Ruffell, A. (2006). Under-water scene investigation using ground penetrating radar (GPR) in the search for a sunken jet ski, Northern Ireland. *Science and Justice*, 46(4), 221-230.
- Ruffell, A., & Parker, R. (2021). Water penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 597, 126300.
- Ryazantsev, P., Rodionov, A., & Subetto, D. (2021). Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia. *Journal of Paleolimnology*(66), 261-277.

- Sambuelli, L., & Bava, S. (2012). Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 48-56.
- Schwamborn, G. J., Dix, J. K., Bull, J. M., & Rachold, V. (2002). High-resolution seismic and ground penetrating radar–geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(4), 259-269.
- Stevens, C. W. (2009). Mapping subsurface conditions within the near-shore zone of arctic delta using ground penetrating radar. *Cold Reg. Sci. Technol.*(56), 30–38.
- Streich, R., van der Kruk, J., & Green, A. G. (2006). Three-dimensional multicomponent georadar imaging of sedimentary structures. *Near Surface Geophysics*, 4(1), 39-48.
- Şahin M. (2020). Neue Forschungen und Ausgrabungen in der Basilika des İznik Sees. *Asia Minor Studien*(96), 93-106.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics. 2nd Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tougaw, D. (2018). *Applied Electromagnetic Field Theory*. içinde Valparaiso University.
- Uluggerli, E., Özürlan, G. (2005). *Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler*. Birsen Yayınevi.
- Wilchek, L. (2000). Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Stucture. M.S. Thesis. *Alberta University*.
- Wu, T. W. (2009). Profiling experiment of a lake using Ground Penetrating RadarMapping vertical profile of discontinuous permafrost with ground penetrating radar at Nalaikh depression. *Mongolia, Environ. Geol.*(56), 1577–1583.
- Yağbasan, Ö. (2007). *Modeling of Mogan and Eymir lakes aquifer system. PhD Thesis*. Ankara: Middle East Technical University.