

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ AVRASYA YER BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

YER RADARI İLE KARSTİK BOŞLUK ARAŞTIRMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet TUZER

Katı Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Yer Sistemi Bilimleri Programı

EKİM 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ AVRASYA YER BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

YER RADARI İLE KARSTİK BOŞLUK ARAŞTIRMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet TUZER
601121002

Katı Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Yer Sistemi Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ziyadin ÇAKIR

EKİM 2015

İTÜ, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü'nün 601121002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Tuzer, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Yer Radarı ile Karstik Boşluk Araştırmaları” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ziyadin ÇAKIR**
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Okan TÜYSÜZ**
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Caner İMREN
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Ekim 2015**
Savunma Tarihi : **20 Ekim 2015**

Babam ve anneme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince gerekli olan tüm morali bana sağlayan ailem, arkadaşlarım ve Hazal Akçam'a, tez yazım sürecinde desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Ziyadin Çakır'a, görüş, öneri ve teknik destekleri nedeniyle Prof. Dr. Gülçin Özürkan Ağaçgözü ve Yrd. Doç. Dr. Caner İmren'e ve de verilerin toplanmasına katkı sağlayan Emre Evren, Burak Yemişçi ve Ümit Kartal'a teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2015

Mehmet Tuzer

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Alanı.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı.....	2
1.3 Çalışma Yöntemi.....	5
2. YER RADARI YÖNTEMİNİN TEMEL PRENSİPLERİ	9
2.1 Maxwell Denklemleri.....	9
2.2 Temel Denklemler	9
2.3 EM Alanların Dalga Yapısı.....	10
2.4 Materyal Özellikleri	12
2.5 Dalga Özellikleri	13
2.6 Arayüzeylerde Yer Radarı	16
2.7 Yer Radarı Ölçüm Parametreleri.....	21
2.8 Veri İşlem Aşamaları	25
2.8.1 Statik düzeltme	26
2.8.2 Zaman ekseninde ortalama çıkarma.....	27
2.8.3 Genlik kazanımı	28
2.8.4 Bant geçiren filtre.....	29
2.8.5 Ortalama değer filtresi	31
2.8.6 Arka plan gürültüsü çıkarma	31
2.8.7 Zarf işlemi	31
2.8.8 Topoğrafya düzeltmesi	33
3.YER RADARI İLE KARSTİK ARAŞTIRMALAR	35
3.1 Karst Oluşumu ve Özellikleri	35
3.2 Yer radarı ile karstik araştırma örnekleri	37
4. KONYA-ILGIN BÖLGESİNDE YER RADARI ARAŞTIRMALARI	41
4.1 Araştırma Bölgesinin Jeolojisi	41
4.2 Yer Radarı Araştırma Sonuçları	45
4.3 Modelleme Çalışmaları	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

B: Manyetik akı yoğunluğu vektörü
c: Işığın havadaki hızı
cm: Santimetre
d: Derinlik
D: Elektrik yer değiştirme
E: Elektrik alan
EM: Elektromanyetik
f: Frekans
GPR: Ground penetrating radar
GPS: Global positioning system
H: Manyetik alan yoğunluğu
Hz: Hertz
J: Elektrik akımı yoğunluk vektörü
k: Dielektrik sabiti
m: Metre
MHz: Megahertz
ns: Nanosaniye
q: Elektrik yük yoğunluğu
R: Yansıma katsayısı
Rx: Alıcı anten
S: Anten aralığı
S: Siemens
t: Zaman
Tw: Time window
Tx: Verici anten
v: Hız
w: Açısal hız
W: Zaman penceresi
x: Mesafe
Z: Empedans
 ΔL : Ortalama heterojenlik
 Δx : İstasyon aralığı
 Δz : Çözünürlük
 ϵ : Manyetik geçirgenlik
 μ : Manyetik geçirimsizlik
 σ : Elektrik iletkenlik
 α : Atenüasyon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Bazı jeolojik malzemelerin dielektrik sabitleri, elektrik iletkenlikleri, hızları ve atenüasyonları.....	15
Çizelge 2.2 : Yansıma karakterinin anlaşılabilmesi için oluşturulan basit model parametreleri.....	17
Çizelge 2.3 : Sık karşılaşılan jeolojik arayüzlerin bağıl dielektrik sabitleri, empedansları ve yansıma katsayıları.....	19
Çizelge 2.4 : Araştırma derinliği ve merkez frekans arasındaki ilişki.....	23
Çizelge 2.5 : Çeşitli jeolojik malzemeler için nanosaniye cinsinden zaman penceresi değerleri.....	24
Çizelge 2.6 : Merkez frekans-örnekleme aralığı ilişkisi.....	25
Çizelge 4.1 : Araştırma için alınan profillerin uzunlukları.....	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çalışma bölgesinin gölgelendirilmiş topoğrafya altlıklı haritası..	1
Şekil 1.2 : İlgin ve çevresinin topoğrafik haritası.....	2
Şekil 1.3 : Akviran Obruğu.....	3
Şekil 1.4 : Örnek yer radarı ölçüm düzeneği.....	6
Şekil 1.5 : Tarihi bir yapı araştırmasında alınan yer radarı profili.	7
Şekil 2.1 : Dalga denklemlerinin ifade ettiği alan döngüsü.....	11
Şekil 2.2 : $f(\beta \pm vt)$ formunda bir fonksiyon.....	12
Şekil 2.3 : Basit ve saçılma içermeyen bir ortam içerisinde frekans ve atenüasyon değişimi.	14
Şekil 2.4 : Alıcı-verici anten çifti arasında sinyalin izlediği yollar..	16
Şekil 2.5 : Model üzerinde kaynak, yansıyan ve iletilen dalgaların gösterimi.....	17
Şekil 2.6 : 100 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu. ..	18
Şekil 2.7 : 300 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu. ..	18
Şekil 2.8 : 500 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu. ..	18
Şekil 2.9 : 750 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu. ..	19
Şekil 2.10 : Normal ve ters polaritenin gösterimi.....	20
Şekil 2.11 : Normal polarizasyona sahip boşluk yansıması ve ters polarizasyona sahip metal yansıması.....	21
Şekil 2.12 : Aynı lokasyonda alınmış radar ölçümleri.	23
Şekil 2.13 : Ham veri ve statik düzeltme uygulanmış veri.....	27
Şekil 2.14 : Dewow işlemi uygulanmadan önceki ve sonraki veri.....	27
Şekil 2.15 : Genlik kazanımı işlemi.....	28
Şekil 2.16: Genlik kazanım uygulamasından önce ve sonraki veri.	29
Şekil 2.17: Veri işlemde kullanılan radargramın genlik spektrumu ve bant geçiren filtre sınırları.....	30
Şekil 2.18 : Bant geçiren filtre uygulanmamış ve uygulanmış veri.....	30
Şekil 2.19 : Bant geçiren filtre sonrası genlik spektrumu.....	30
Şekil 2.20 : a) Ortalama değer ve arka plan gürültüsü çıkarma işlemi uygulanmamış veri. b) Ortalama değer işlemi uygulanmış veri. c) Arka plan gürültüsü çıkarma işlemi uygulanmış veri..	32
Şekil 2.21 : Zarflama işlemi uygulanmamış ve uygulanmış veri	32
Şekil 2.22 : Topoğrafya düzeltmesi uygulanmamış ve uygulanmış veri.....	33
Şekil 2.23 : Hiperboller kullanılarak hız analizi.....	34
Şekil 2.24 : Örnek bir hiperbol ile hız modelleme.....	34
Şekil 3.1 : Karstik yapıların görünümü.....	36
Şekil 3.2 : İşlenmiş radar profilleri.....	38
Şekil 3.3 : Araştırmada alınan F19 ve F79 profilleri.....	39
Şekil 3.4 : Florida’da alınan temsili bir profil... ..	40
Şekil 4.1 : İlgin bölgesinin jeolojisi ve çalışma alanı... ..	41
Şekil 4.2 : Alınan yer radarı profilleri... ..	42

Şekil 4.3 : Konya Ilgın'ın genelleştirilmiş dikine jeolojik kesiti.....	43
Şekil 4.4 : A-A' hattının sondaj korelasyonu.	44
Şekil 4.5 : Tez kapsamında incelenen profiller.....	45
Şekil 4.6 : Araştırma alanındaki 3 numaralı profil.	47
Şekil 4.7 : Araştırma alanındaki 4 numaralı profil.	48
Şekil 4.8 : Araştırma alanındaki 27 numaralı profil.	49
Şekil 4.9 : Araştırma alanındaki 23 numaralı profil.	50
Şekil 4.10 : Yer radarı boşluk parametre modellemesi.....	50
Şekil 4.11 : 3 numaralı profilin modellenmesi.	51
Şekil 4.12 : 3 numaralı profilin modellenmesi sonucu radargram.....	52
Şekil 4.13 : 4 numaralı profilin modellenmesi.	53
Şekil 4.14 : 23 numaralı profilin modellenmesi.	54
Şekil 4.15 : 23 numaralı profil için farklı bir modelleme.	55
Şekil A.1 : 3 numaralı ölçüm için temel modelleme.	62
Şekil A.2 : 4 numaralı ölçüm için temel modelleme	62
Şekil A.3 : 23 numaralı ölçüm için temel modelleme.	63
Şekil A.4 : 23 numaralı ölçüm için ikinci modelleme.	63
Şekil B.1 : Sondaj kesitleri	64
Şekil C.1 : 3 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.	65
Şekil C.2 : 4 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.	65
Şekil C.3 : 23 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.	65
Şekil C.4 : 27 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.	65
Şekil D.1 : Bölgedeki fayların konumu.	66

YER RADARI İLE KARSTİK BOŞLUK ARAŞTIRMALARI

ÖZET

Bu çalışmada karbonatlı kayaçların hakim olduğu Konya ilinin Ilgın ilçesinde karstik boşlukların araştırılmasına yönelik yer radarı ölçümleri yapılmıştır. Yer radarı yöntemi, yüksek frekanslı elektromanyetik prensip ile çalışan sığ jeofizik araştırma yöntemlerinden biridir. Teknolojik gelişmelerle birlikte kullanım alanı da genişleyen yer radarı, jeolojik, arkeolojik ve diğer birçok araştırma alanında kullanılmaya başlanmıştır. Karstik bölgelerde insan sağlığı ve jeoteknik açıdan tehlike barındıran bu boşlukların tespiti ile söz konusu alanlara yapılacak mühendislik yapılarının planlaması daha doğru olarak yapılabilmektedir. Bu alanlarda oluşturulacak yapılar yer altında bulunan boşluklarda gerçekleşebilecek çökmeler neticesinde ciddi hasar alma ihtimaline sahiptir. Bu nedenle karstik boşlukların oluşum şekillerinin ve yer altındaki uzanımlarının dikkatle araştırılması gerekmektedir. Yer radarının kolay uygulanabilen bir yöntem olması ve kısa zamanda geniş alanlar tarayabilmesi, bu gibi araştırmalarda yoğun olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Çalışma sahasında 100 MHz'lik merkez frekansa sahip anten kullanarak toplamda uzunluğu 7.3 km'yi derinliği 5 m'yi bulan profil verisi elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalar dikkate alınarak, çeşitli aşamalardan oluşan veri işlem sonuçları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilerek en uygun veri işlem yöntemi belirlenmiştir. Elde edilen radargramlardan toplam uzunluğu 350 metreyi bulan dört tanesi seçilerek yorumlanmış ve boşluklu, çatlaklı ve deformasyonlu bölgeler belirlenmiştir. Yorumlanan verilerde detaylı olarak polarizasyon analizi ve genlik analizi yapılmıştır. Boşluk olan yapılar belirlenerek empedans değerleri üzerinden birbirleriyle olan ilişkileri ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçlar bölgede mevcut sondaj ve jeoloji verilerinin ışığı altında değerlendirilerek karstik yapıların modellenmesi yapılmıştır. Radargramlarda yorumlanan anomalilerin parametreleri hesaplanarak önce basit modelleme ardından da karmaşık modelleme yapılmıştır. Modelleme sonuçları da radargramlarda yapılan analizleri desteklemektedir.

Bu tez çalışması ile karstik bölgelerde yer radarı verilerinin işlenmesinde izlenilecek yaklaşımların belirlenmesi, elde edilen radargramların yorumlanması ve modellenmesi konusunda bilgiler sunan bir kaynak ortaya konulmuştur.

KARSTIC CAVITY INVESTIGATIONS WITH GROUND PENETRATING RADAR

SUMMARY

In this study, Ground Penetrating Radar measurements has been made to investigate the karstic cavities in Konya, Ilgın which has limestone geological structure densely. The aim of this thesis is to find optimum ways to process and model ground penetrating radar which is widely used in finding, locating and characterizing karstic structures. Karstic structures are important features in perspective of geology and buildings. The chosen survey location has a potential of being a foundation of a new building.

Ground Penetrating Radar (GPR) is one of geophysical methods used in near surface investigations which is based on electromagnetic principles. Radar technology has existed for many decades, but only for last years it has been used for near surface ground investigations. GPR is one of the main near surface investigation methods for subjects such as geology, archeology and civil engineering.

Since GPR can be easily applied and can cover large areas quick and efficiently, it is a method used widespread. GPR generally consists of transmitter and receiver antenna, control unit and a recorder. With the help of latest technologies, various designs from different companies are available. There are models with a measurement wheel, special designs for railroads and walls and which the antenna doesn't need to be in contact with the ground.

Karst is a term used for specific type of landscape which develops from the dissolving action of water on soluble bedrock. Generally this kind of structures develop in limestone, marble, dolostone, gypsum and halite. They are characterized by cavities and waterways in different sizes and shapes. This landscapes develop in long time scales which can be up to thousands of years. Primarily, this three dimensional distinctive type of landscape develops as a result of surface water traveling into the underground. As a result of this movement, soluble bedrock becomes dissolved and karstic landscapes are formed.

Most used geophysical methods for karstic investigations are gravity method, electric resistivity method, seismic method and GPR. With the help of these detecting methods for karstic cavities, it is possible to plan and avoid any hazards which are highly possible in such areas.

Karstic cavities develop in such a way that it may not be possible to see any surface indications. However, even a small change in the surface mass can cause a destructive hazard since the caves and openings beneath the surface are highly possible to collapse. Not only it can play a vital role in constructional subjects, it is also very important to understand these underground drainage systems in scope of geothermal and environmental points. Because of these reasons it is very important to investigate the development of karstic landscapes and it's effects under the ground.

Taking into consideration that karstic cavities can be fast and efficiently be detected by GPR, measurements were made in Ilgın, Konya, TURKEY. As a first step, the method and the depth have been decided. Investigation was made by a 100 MHz central frequency shielded GPR antenna. Since the topography was not smooth, it has been decided to use a GPS system in order to get coordinates and make needed corrections to the data. Measurements took 4 days and as a result 32 measurements were made.

A total of 7290 meters of GPR measurements were recorded. In order to investigate the cavities, it was planned to take the profiles in parallel and perpendicular geometries. However, in several places the measurement geometry had to be changed due to the topographic conditions. In addition, a building was present in measurement site. In order to avoid any noise caused by a construction, measurements near building was not taken into account. Also, profiles which had low quality GPS data were eliminated. After filtering all data available, it was decided to use 3, 4, 23, 27 numbered profiles for interpretation.

As a first step in data processing, the data was checked in scope of GPS coordinates and smoothed especially in elevation. After this point the data was prepared for filtering operations.

Data processing consists of moving start time, subtracting mean (dewow), gain recovery, band pass filter, running average, background removal, enveloping and topographic correction. As a result, processed radargrams were created and prepared for interpretation.

Karstic cavities are explained. In order to make a proper interpretation it is important to understand how to characterize the karstic landscapes. The geology and drilling logs of the field were examined. It has been seen that there are typically 2 layers beneath the surface which can vary in depth. With the help of drilling logs it has been seen that there could be cavities and deformation zones under the 0,3 m level.

As a next step filtered radargrams are interpreted and correlated with their enveloped forms. Enveloping gave good results due to the fact that there should be high scattering values since the subsurface is karstic. Profile 3 and profile 23 has anomalies interpreted as collapsed limestone. This collapsing movement is starting from 1 meter and going deep until 3 as a total of 2 meter. Since this collapse is right on the limestone it is interpreted that this anomaly can be a form of solution in the karstic section of the subsurface.

Also in profile 3 and 4 air filled cavities have been detected. This analysis was made by the anomalies' polarization. It has been showed that if the anomaly has the same polarization as the direct wave from the air, then it can be said that the target has a lower dielectric value than the media. On the other hand a water filled cavity has been interpreted on profile 23. This analysis was made by a reverse polarized anomaly.

After this stage, several modeling attempts have been made. First, 2-3 layered simple models have been calculated to understand the subsurface. Then, more complex structured models were calculated to support the interpretations of the radargrams.

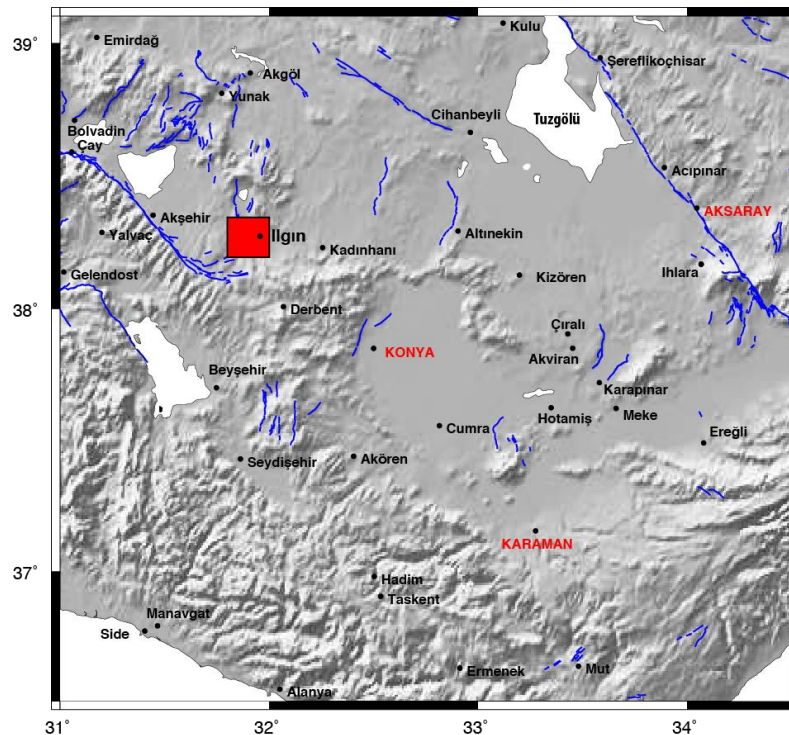
In this stage profile 3, 4 and 23 chosen since they have the most obvious anomalies to model. In the modeled Profile 3 the collision zone at the 25 m distance was successfully modeled.

For Profile 4 the modeling process consists of a cavity structure. In the comparison of modeled and collected data it has been seen that the polarization approach has been justified and an air filled cavity created a normal polarized anomaly. Profile 23 has been modeled in two sections. In the first section, a similar approach as used in Profile 3 was implemented and the deformation zone has been successfully modeled. In the second section, a water filled cavity has been modeled with the dielectric value of 81. This value created a reverse polarized anomaly.

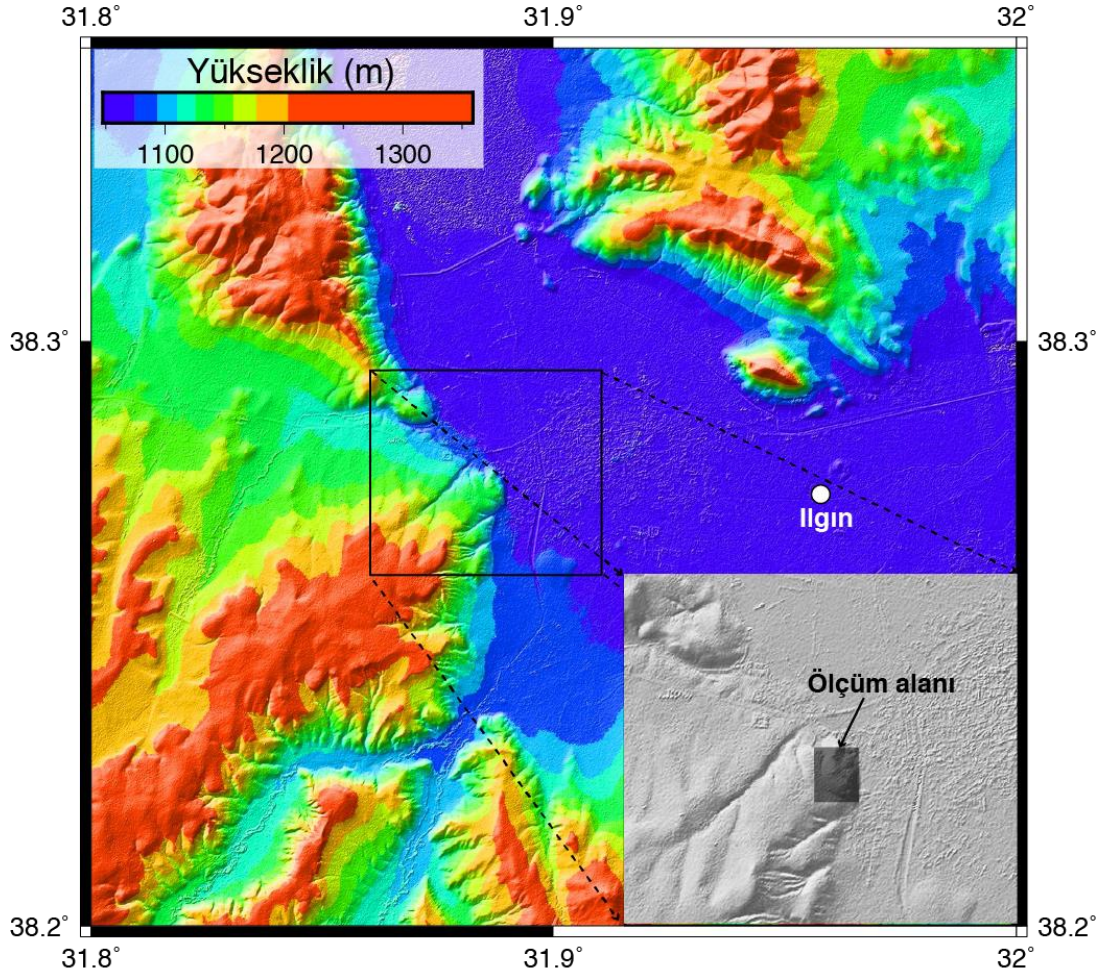
1. GİRİŞ

1.1 Çalışma alanı

Çalışma sahası Konya il sınırları içinde kalan Ilgın bölgesindedir. Bu bölge jeotermal su kaynaklarına bağlı olarak inşa edilen otel, kaplıca, sağlık merkezi ve benzeri yapıların sıklıkla görüldüğü bir yerleşim yeridir (Şekil 1.1). Son yıllarda bu tip yapılar bölgede hızla artmaktadır. Ancak bölgenin karstik yapısı çeşitli mühendislik yapıları için bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle yer altındaki karstik boşluk veya zayıf zonların çökmesi sonucu oluşabilecek potansiyel can ve mal kayıplarını önleme amaçlı olarak bölgede çeşitli jeofizik çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan yer radarı (Ground Penetrating Radar- GPR) bu amaçla kullanılan en yaygın yöntemlerden bir tanesidir. Gerçekleştirilen yer radarı ölçümlerinin yapıldığı alan Ilgın'ın yaklaşık 2 km batısında bulunmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.1: Çalışma bölgesinin gölgelendirilmiş topoğrafya (SRTM, 30) altlıklı haritası. Mavi çizgiler aktif fayları göstermektedir (Emre ve diğ., 2013). Kırmızı kutu Şekil 1.2’deki haritanın yerini göstermektedir.



Şekil 1.2: Iğın ve çevresinin topoğrafik haritası. Sağ alt köşedeki harita içerisindeki gri kutu Şekil 4.2’de gösterilen yer radarı ölçüm alanının yeridir.

1.2 Çalışmanın amacı

Konya bölgesi son yıllarda artan obruk oluşumlarıyla dikkat çekmektedir. Obrukların oluşmasında Pliyosen yaşlı göl çökelleri içinde önemli bir kalınlık sunan kireçtaşlarının varlığının etkili olduğu düşünülmektedir. Karapınar – Hotamış arasından kuzeye doğru hareket eden yer altı suları, yöredeki volkanizmanın halen çıkarmaya devam ettiği CO₂ ile karbonik asit oluşturmakta ve bu da gölsel kireçtaşını eritmektedir. Eritme, kuzeydeki Tuz gölü güneyinden boşalan kaynaklara kadar sürmektedir. Konya ovasında yer alan obrukların oluşumunda etkili süreçler morfolojik, jeolojik, hidrojeolojik, batimetrik ve yer altı suyunun kimyasal-izotopik verileri aracılığıyla incelenmiştir. Yer altı suyunun izotopik ve kimyasal bileşimini inceleyerek sulu obruklarda yüzeylenen suyun ana beslenme alanının Toroslar olduğu, yer altı suyu yaşının güneyden kuzeye doğru binlerce yıldan on binlerce yıla doğru arttığı tespit edilmiştir (Ceyhan ve Akıllı, 2009).

Konya Havzası'ndaki bu durum havzanın sahip olduğu jeolojik yapı, yer altı suları, tektonizmanın etkisiyle oluşmuştur. Ancak günümüzde obruk sayısının artmasında bölgede kurak ve yarı kurak iklim koşullarının yaşanmasının yanı sıra beşeri faktörlerin de etkileri görülmektedir. Konya ilinde 2015 yılında yapılan araştırmalar ile 104 obruk tespit edilmiştir. Bölgedeki en derin obruk 80 metre derinlikte olan ve Karapınar'ın 25.6 km kuzeybatısında yer alan Şekil 1.3'te de görülebilen Akviran Obruğu'dur. Akviran Yaylası'nın kuzeyinde yer alır (Şekil 1.1). Obruk Üst Miyosen-Pliyosen formasyonları içinde 1977 yılında oluşmuştur (Tapur ve Bozyiğit, 2015).



Şekil 1.3: Akviran Obruğu (Tapur ve Bozyiğit, 2015).

Deniz seviyesine göre üst yüksekliği 1046 m, derinliği 80 m, çevresi 82 m çapı da 24 m'dir. Obruğun kalkerli tabakalarında, yer altı sularının oluşturduğu çözünme boşlukları bulunur. Obruk üst yüzeyi ile su seviyesi arasında 56 m'lik yükselti farkı vardır. Buradaki suyun yaklaşık 24 metre olduğu düşünülmektedir. Obruğun ağız kısmı dar, tabanı geniştir. Bu obruğun güneyinde 2007 yılında 2 m çapında ve 0.5 m derinliğinde obruk görüntüsü veren bir çökme meydana gelmiştir (Tapur ve Bozyiğit, 2015).

Obruk oluşum sıklığının son dönem içerisinde artmasında insanların yer altı suyunu aşırı kullanması ve yanlış arazi kullanımı etkilidir. Yer altı su seviyelerindeki düşüş Akgöl, Acıgöl, Meke Gölü, Timraş, Kızören, Çıralı gibi obruk göllerinden anlaşılmaktadır. Mevcut arazi ve yer altı suyu kullanımı sürdürüldüğü taktirde yeni obruk oluşumları da beklenmektedir. Konya Ovası ve çevresindeki obrukların oluşumunda yer altındaki mağara gibi yer altı boşluklarının tavanlarının çökmesi etkili olmuştur. Plüviyal dönemden bu yana Tuz Gölü çekilme safhalarının Konya

Gölü'ndeki çekilme safhaları ile bir uygunluk arz ettiği tespit edilmiştir. Günümüzdeki obruk oluşumlarında yapılan gözlemlerde, yer altı su seviyesinde değişimler, yer altı sularının kimyasal özellikleri, litolojik yapı ve iklim özellikleri etkili olmaktadır. Karstlaşma sonucu oluşan mağara galeri gibi yer altı boşlukları üzerindeki formasyonlar iklim koşullarına bağlı olarak ağırlaşmakta ve çökmektedir (Tapur ve Bozyiğit, 2009).

Son 33 yılda Obruk Platosu ve Karapınar-Hotamış bölgesinde on dokuz obruk oluşmuştur (Şekil 1.1). Bu oluşum doğal süreçlerin yanı sıra insan kaynaklı etkilerle de ortaya çıkmıştır. Son yirmi dört yıl içerisinde yaklaşık yirmi altı metre düşen yer altı su seviyesinin bu süreçte etkili olduğu düşünülmektedir. Obruklardan en derini 80 metre derinliğe kadar ilerlemekte olup (Şekil 1.3), obruklardan bazılarının çapı 50 metreyi bulmaktadır. Bu obruklardan on üç tanesi son dört yılda oluşmuştur. Obruk oluşumu riski taşıyan yörelerde insanlar çevre il ve ilçe merkezlerine göç etmek zorunda kalmaktadır. Bazı obruklar ise tarla sahipleri tarafından doldurulmaktadır. Ancak bu durum gelecekte can ve mal kaybı riskini doğurmaktadır. Dolayısıyla, bu şekilde yer altı suyu dengesini bozacak yoğunlukta su kullanılan bölgelerde jeofizik ölçümler yapılarak oluşabilecek muhtemel can ve mal kayıpları önlenebilir (Doğan ve Yılmaz, 2010).

Tezin 3. bölümünde gösterildiği üzere, yer altındaki karstik yapıların ortaya çıkartılmasına yurt dışı kaynaklı bazı yer radarı çalışmaları bulunmakla birlikte Türkiye'de yapılmış detaylı bir akademik veya teknik çalışmanın örneğine rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışmasının ana amacı jeoteknik, jeolojik ve benzeri birçok konuda öneme sahip olan, mühendislik yapıları ve insan yaşamı için risk oluşturan karstik yapıların yer radarı ile elde edilen verilerinin işlenmesinde izlenilecek yaklaşımların belirlenmesi, elde edilen radargramların yorumlanması ve modellenmesi konularında bilgiler sunan ve örnek teşkil edilebilecek bir kaynak ortaya koymaktır. Bu amaçla çeşitli mühendislik yapılarının potansiyel olarak inşa edilebileceği Ilgın jeotermal sahasının bir bölümünde yer radarı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Toplanan 32 profilden 4 tanesi bu tez kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. Alınan ölçümlere bir veri işlem aşaması uygulanarak optimum görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler yorumlanarak okuyucuya sunulmuştur. Son bölümde ise karstik yer radarı araştırmalarında sıklıkla görülen kırıklı kireçtaşı çökme, su ve hava dolu boşluk modellemeleri yapılmıştır.

1.3 Çalışma Yöntemi

Bu tez çalışmasında yer altı boşluk ve çöküntüleri gibi karstik yapıların ortaya çıkartılması için yer radarı yöntemi kullanılmıştır. Yer radarı yöntemi, yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) prensip ile çalışan yakın yüzey jeofizik araştırmalarında kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Yöntem, yer içerisine gönderilen radyo dalgalarını kullanmaktadır. GPR ilk dönemlerinde genellikle doğal jeolojik malzemeler üzerinde kullanılırken, son dönemde beton ve asfalt gibi yapılar üzerinde de sıklıkla uygulanmaktadır. Birçok malzemenin dielektrik özelliğe sahip olması ve yöntemin geniş radyo frekans bandı sayesinde yer radarı yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı yöntem buz araştırmalarından hasarsız beton kalitesi testlerine ve santimetre ölçeğinden kilometre ölçeğine kadar uygulamalarda kullanılabilir. Şekil 1.4'te Mala markasına ait Proex serisi 500 MHz merkez frekansa sahip bir yer radarı ölçüm düzeneği görülebilmektedir.

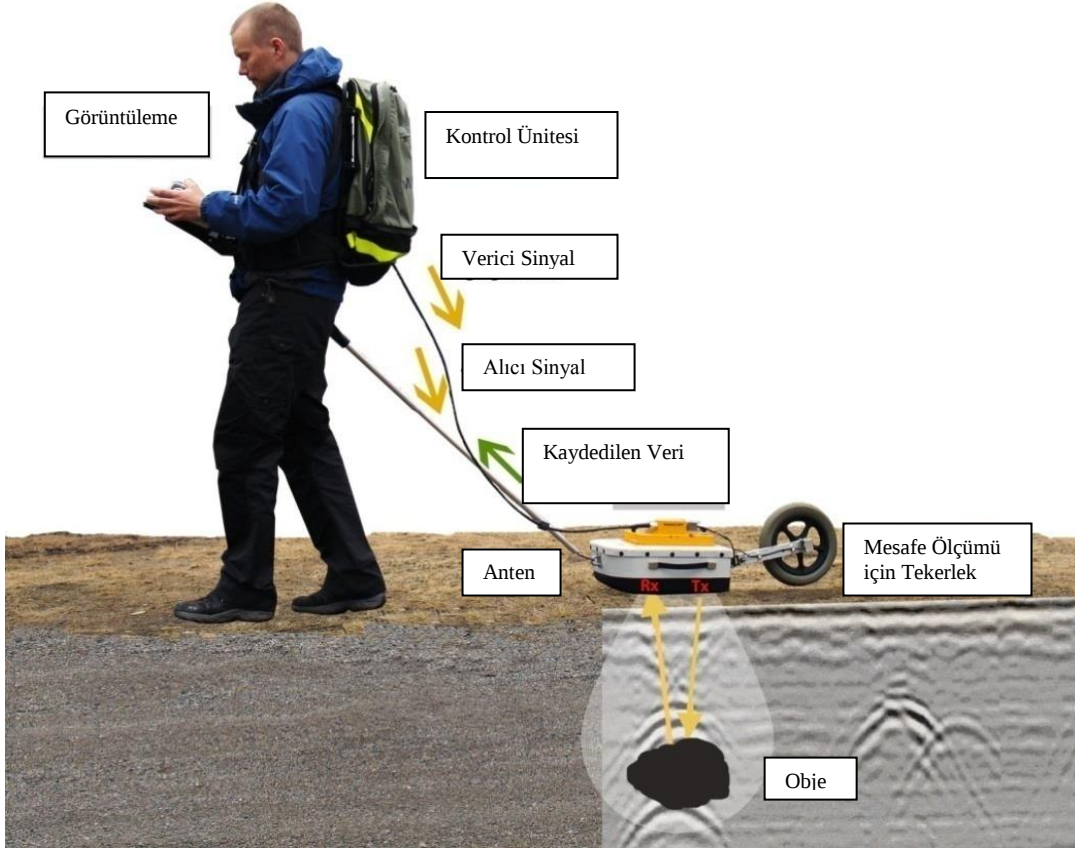
Şekilde görülen görüntüleme birimi genellikle taşınabilir bir bilgisayardır. Üreticiler tarafından geliştirilen çeşitli yazılımlar sayesinde belirlenen sinyal parametreleri kontrol ünitesi aracılığıyla verici antene iletilir. Verici anten aracılığıyla yer içerisine gönderilen sinyal, karşılaştığı farklı elektromanyetik özellikler sebebiyle yansıma ve saçılmalara uğrar. Oluşan bu yansımalar alıcı anten ile ölçülerek görüntüleme yapılabilmesi için tekrar bilgisayara gönderilir. Yansımaların şekilleri ve genlikleri aracılığıyla oluşturulan görseller sayesinde alınan ölçümler yorumlanabilir hale gelmektedir.

En yaygın şekilde kullanılan yer radarı ölçümü; sabit geometriye sahip bir adet alıcı ve verici anten çiftiyle yer altındaki yapılardan gelen yansımaların tespit edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Ölçüm doğrultusunda bulunan alıcı-verici anten çifti bu doğrultuda ilerletilerek yer altı görüntülemesi yapılmaktadır.

Yer radarı yönteminin kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Arkeolojik araştırmalar
- Buz ve kar kalınlıkları
- Jeolojik araştırmalar
- Köprü ayakları araştırmaları
- Kirlilik alanları tespiti

- Aktif tektonik araştırmalar
- Mayın aramaları
- Beton güçlendirme
- Tünel kaplamaları
- Yol alışmaları
- Kablo ve boru tespiti

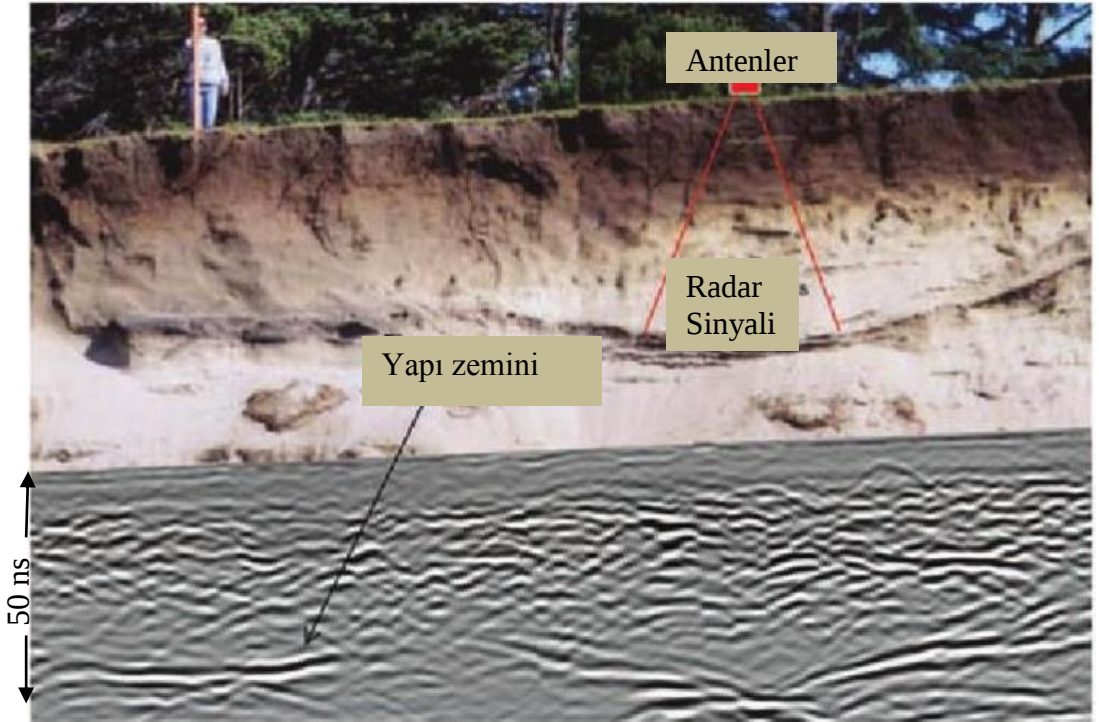


Şekil 1.4: Örnek yer radarı ölçüm düzeneği (www.malags.com).

Bu ölçümler sonucunda elde edilen yatay ekseninde mesafe ve dişey ekseninde zaman bulunan görüntülere radargram adı verilmektedir. Şekil 1.5'te 400 MHz merkez frekanslı anten ile elde edilen örnek bir radargram görülmektedir. Yansıma genliklerinin büyüklüklerine göre çizilen bu görseller veri işlem aşamalarından geçirilerek yorumlanmaya hazır hale getirilmektedir.

Yer içerisine gönderilen sinyal farklı frekans ve dalga boyu bileşenlerinden oluşmaktadır.

Yer radarı navigasyon amacıyla kullanılan radar sistemlerine benzer şekilde işlemektedir. Fakat bu yöntemde radar sinyalleri yer içersine gönderilen EM dalgalar aracılığıyla yer altı yapılarının şekil, büyüklük ve lokasyonlarını bulmak için kullanılmaktadır. Gönderilen EM dalga yer altındaki farklı özellikler ile karşılaştığında, dalganın karakteristiği de değişir ve dalganın bir kısmı yer yüzeyine yansır. Bu dalganın genliği, dalga boyu ve ulaşma süresi kaydedilerek analiz için depolanır. Genlikler kontrol ünitesi tarafından her nokta için ayrı ayrı ölçülmektedir (Bostanudin, 2013, s. 15-18).



Şekil 1.5: Tarihi bir yapı araştırmasında alınan yer radarı profili. Ölçümler 400 MHz merkez frekanslı antenlerle alınmıştır (Conyers, 2012).

Genlik, faz bilgileri, saçılma özellikleri, varış zamanları ile objenin derinliği ve şekli hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Sonuç olarak oluşan veri matrisi içerisinde yansıma sinyallerinin belirli zamanlardaki ulaşım zamanları bulunmaktadır. Yer radarının performansı yer yüzü, yer altı özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Performans içeriği ise yansıma kalitesi, araştırma derinliği ve çözünürlük ile ifade edilebilir.

Cisimler yer yüzeyine çok yakın olduklarında, çok küçük olduklarında yada çevre ortamla dielektrik farkı düşük olduğunda tespit etmek zorlaşmaktadır. Yer radarı ölçümlerinde alıcı anten tarafından alınan sinyaller temel olarak:

- Alıcı ve verici anten arasındaki etkileşim,
- Yer yüzeyinden gelen yansıma,
- Yer radarı sisteminin kendisiyle yada çevresiyle olan etkileşimi,
- Yer altından gelen yansımalarından oluşmaktadır.

Yer radarının yer altı araştırmalarında kullanılmasının başlıca avantajları şunlardır (Bostanudin, 2013, s. 21):

- Hasarsız bir yöntemdir,
- Araştırma etkinliğini artırır ve maliyetleri düşürür,
- Büyük alanları kısa zamanda tarayabilir,
- Metalik ve metal olmayan cisimleri tespit edebilir.

Yer radarı tüm bu özellikleri sebebiyle karstik araştırmalarda da kullanılmaktadır. Karstik jeolojiye sahip bölgelerde inşa edilecek yapılar için öncelikle detaylı bir zemin incelemesi gerekmektedir. Bu tip kayaçlarda yağmur suları ve yer altı suları sebebiyle oluşması muhtemel kırık ve çatlaklar zaman içerisinde daha büyük boşluklara ve obruklara dönüşebilmektedir. Ayrıca bu bölgelerdeki yüksek su akış hızı sebebiyle kirlenici etkiler hızla yayılabilmektedir. İçme suyu kaynağı olarak bu bölgelerden yararlanan insanlar risk altında kalabilmektedir. Birçok obruk oluşumu öncesi herhangi bir uyarıcı işaret görülememesine rağmen, toprak, asfalt, kaldırım ve zeminde dairesel veya doğrusal kırıklar, toprak ve kaldırımda sıkışmalar, su birikintileri, ağaçların, yolların, rayların, çitlerin, boruların eğilmesi, kayması, duvarlarda oluşan çatlaklar, yerde oluşan konik boşluklar, temiz su çeken bir kuyunun aniden çamurlu su çekmesi yada aniden kuruması sıklıkla karşılaşılabilen obruk oluşumu öncesi uyarılarıdır.

2. YER RADARI YÖNTEMİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

Yer radarının temelleri elektromanyetik (EM) teoride bulunmaktadır. Maxwell denklemleri elektromanyetik dalga fiziğini matematiksel olarak açıklamaktadır. Maxwell ve temel (constitutive) denklemler birleştirildiğinde yer radarı sinyallerini tanımlamak için gerekli temel oluşmaktadır.

2.1 Maxwell Denklemleri

James Clerk Maxwell 1865 yılında daha önce bu alanda yapılmış çalışmaları bir araya getirerek dört temel denklem ortaya koymuştur (Maxwell, 1865). Matematiksel olarak EM alan ilişkileri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir:

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

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.3)$$

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

Denklemlerde $\vec{E}$ elektrik alan kuvvet vektörü (V/m); q elektrik yük yoğunluğu (C/m^3); $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğu vektörü (T); $\vec{J}$ elektrik akımı yoğunluk vektörü (A/m^2); $\vec{D}$ elektrik yer değiştirme vektörü (C/m^2); t zaman (s) ve $\vec{H}$ manyetik alan yoğunluğudur (A/m). Maxwell farklı araştırmacıların elde ettiği sonuçları bu dört denklem ile özetlemiştir. Bu denklemler sayesinde tüm klasik elektromanyetik oluşumlar (indüksiyon, radyo dalgaları, resistivite, devre teorisi vb.) malzemelerin elektrik özelliklerini karakterize etmek için türetilabilmektedir (Jol, 2009, s. 6).

2.2 Temel Denklemler

Temel denklemler malzemelerin EM alanlara olan tepkilerini açıklamaktadır. Yer radarı için, elektrik ve manyetik özellikler göz önüne alınmaktadır. Materyal

denklemleri, makro ölçekte elektronların, atomların ve moleküllerin EM dalgaları uygulandığında toplu halde nasıl tepkiler verdiklerini açıklamaktadır.

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (2.5)$$

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon} \bar{E} \quad (2.6)$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad (2.7)$$

$\tilde{\sigma}$ elektrik iletkenliktir ve elektrik alan oluştuğunda serbest yük hareketini karakterize etmektedir. Yük akısına karşı oluşan direnç enerji yitimine sebep olmaktadır. Dielektrik geçirimsizlik $\tilde{\epsilon}$ elektrik alan uygulandığında bir malzemenin içerisindeki yüklerin yer değiştirmesini tanımlamaktadır. Malzeme içerisindeki yük değişimi, enerji depolanmasına yol açmaktadır. Manyetik geçirgenlik $\tilde{\mu}$ manyetik bir alana karşı atom ve molekül momentlerinin ne kadar içsel olduğunu tanımlar. Basit yapıli materyaller için bozucu içsel momentler malzeme içerisinde enerji depolamaktadır.

$\tilde{\sigma}$, $\tilde{\epsilon}$, $\tilde{\mu}$ tensör yapısındadır ve ayrıca doğrusal olmayabilirler (örn $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(E)$). Tüm GPR uygulamalarında bu parametreler alan bağımlı olarak incelenmektedir. Diğer bir deyişle, oluşan alan ve yanıtı aynı yönlü fakat alanın gücünden bağımsızdır.

Genellikle yer radarı uygulamalarında ϵ , σ , μ pozisyon bağımlı skalar değerler olarak alınmaktadır ve ϵ , σ en önemli parametrelerdir. Pratik uygulamalarda “bağıl geçirimsizlik” yada “dielektrik sabiti” kullanılmaktadır.

Dielektrik sabiti:

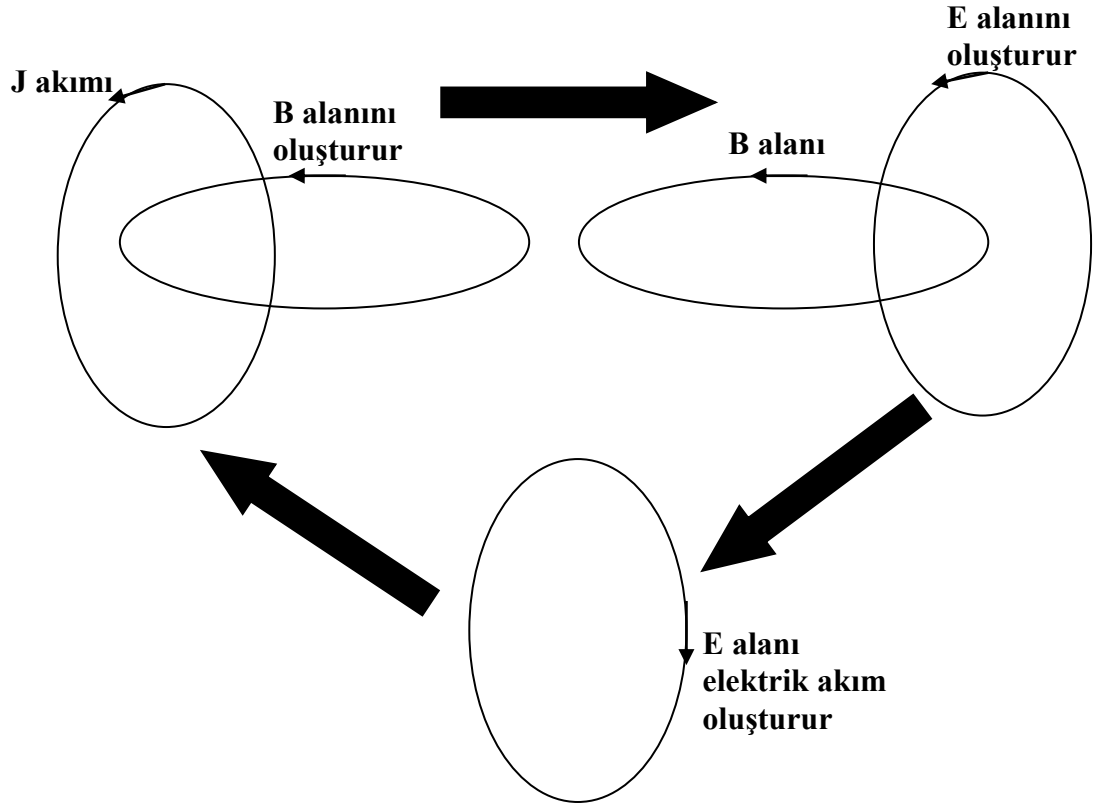
$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada ϵ_0 havanın geçirimsizliğini ifade etmektedir ve değeri 8.89×10^{-12} F/m’dir (Annan, 2003, s. 12).

2.3 EM Alanların Dalga Yapısı

Bu bölümde ele alınan ortam basit ve homojen yapıdadır. Malzeme özellikleri ise, yön bağımsız, frekans bağımsız ve doğrusaldır. Maxwell denklemlerinden 2.1 ve 2.4 ile gösterilenler, ortamda zamanla değişen alan olduğunda bağıli (coupled) bir elektrik ve manyetik alan oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, değişen elektrik alanlar

manyetik alanları oluştururken, burada oluşan manyetik alanlar da elektrik alan oluşturmaktadır. Şekil 2.1’de gösterilen alanların birbirini indüklemesi sonucu söz konusu alanların ortam içerisinde ilerleyişi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.1: Dalga denklemlerinin ifade ettiği alan döngüsü (Annan, 2003).

Elektrik alan, manyetik alan cinsinden bulunarak eşitlik 2.1 ve 2.2’de yerlerine yazıldığında ve temel denklemler de kullanıldığında eşitlik 2.9 elde edilmektedir.

$$\begin{array}{ccc} \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \end{array} \quad (2.9)$$

Söz konusu manyetik alanları oluşturan ve B-C ile ifade edilen, zamanla değişen akımların A ile ifade edilen bir elektrik alan oluşturduğu görülebilmektedir. Tüm alanların denge içerisinde olması gerekmektedir. Bu denklemdeki $\vec{E}$ denklem 2.10’daki gibi tanımlanmaktadır:

$$\vec{E} = f(\vec{r}, \vec{k}, t) \hat{u} \quad (2.10)$$

Burada $\hat{u}$ ve $\vec{k}$ ortogonal birim vektörler ve $\beta = (\vec{r} \cdot \vec{k})$ olarak seçilmiştir. $\vec{r} \cdot \vec{k}$ alanın değiştiği doğrultuda skalar uzaklık olarak tanımlanmıştır.

$$\nabla X \nabla X \bar{E} = \hat{k}x(\hat{k}x\hat{u}).\frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} = -\hat{u}\frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} \quad (2.11)$$

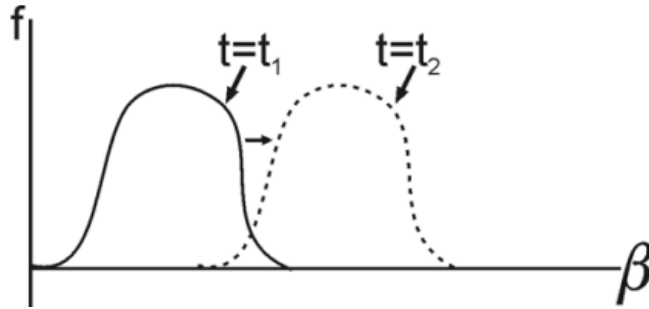
Eşitlik 2.11’de ise elektrik alan makaslamasının ortogonal bir manyetik alan oluşturması ve bunun sonucunda orjinal elektrik alanın tersi yönünde bir elektrik alan oluşması belirtilmiştir. Tüm bu çıkarımlar sonucu oluşan dalga denklemi ($\sigma = 0$ varsayımı ile):

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) = \mu\epsilon \frac{\partial^2 f(\beta, t)}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

ile ifade edilmektedir ve 2.13 eşitliğindeki formunda bir çözüme sahiptir.

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (2.13)$$

Burada $\mathbf{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ ile ifade edilir ve dalga hızıdır. Şekil 2.2’de görülen fonksiyon skalar bir dalga denklemi çözümüdür. Konumsal olarak v hızıyla ilerlemektedir (Annan, 2003, s. 13-16).



Şekil 2.2: $f(\beta \pm vt)$ formunda bir fonksiyon.

2.4 Materyal Özellikleri

ϵ , σ , μ ile tanımlanan elektrik özellikler geniş bir araştırma alanını kapsamaktadır. Yer radarı çalışmalarında önemli olan parametreler genellikle ϵ , σ ’dır. μ etkisi ise birçok çalışmada yok sayılmaktadır. Yer radarının en iyi çalıştığı alanlar düşük elektrik kayıplı malzemelerden oluşmaktadır. Eğer $\sigma=0$ ise, yer radarı daha derine nüfuz edebilmektedir. Pratikte düşük elektrik kayıplı malzemeler her durumda

geçerli değildir. Yoğun kil içerikli malzemeler ve iyon içerikli su yer radarı sinyallerinin nüfuz derinliğini sınırlayabilmektedir.

Yer içerisindeki materyaller farklı birçok içerikten oluşabilmektedir. Su ve buz, tek bir bileşenin olduğu ender durumlardandır. Basit bir deniz kumu; toprak partikülleri, hava, su ve suda çözülmüş iyonlardan oluşmaktadır. Toprak partikülleri genellikle hacmin 60-80%'ini kapsamaktadır. Sonuç olarak, yer radarını anlamak için karışımların fiziksel özelliklerini anlamak oldukça önemlidir.

Malzemelerin karışımları genellikle bileşenlerin doğrudan hacmi oranında elektrik özellikler taşımamaktadır. Bu sebeple çeşitli yer radarı analizlerinin yapılması gerekir.

Karışımların anlaşılması kompleks bir konu olmasına karşın yer radarı perspektifinden bakmak daha basittir. 10-1000 MHz frekans aralığında, su bulunması veya bulunmamasının temel faktör olduğu yer radarı ölçümlerinde:

- Karışımlar içerisindeki mineral ve türevleri genellikle iyi dielektrik malzemelerdir. Genellikle 3-8 dielektrik katsayısına (mineroloji ve sıkışma oranlarına bağlı olarak) ve yaklaşık olarak 0 iletkenliğine sahiptir.
- Toprak, kayalar, yapı malzemeleri gibi materyaller genellikle boşluklar içermektedir ve bu boşluklar su, hava yada başka bir malzemeyle dolu olabilmektedir.
- Su, geçirimsizliği en yüksek doğal malzemelerden biri olarak yaklaşık 80 değerine sahiptir.
- Boşluklu yapılarda yer alan su genellikle iyonlar içermektedir. Malzemelerin iletkenliğine karar verilirken bu durum göz önüne alınmaktadır. Genel olarak toprak ve kayaların iletkenlik değerleri 1-1000 mS/m aralığındadır.
- Su birçok doğal boşluklu yapının içerisinde bulunmakta olduğundan, elektrik özellikler üzerinde baskın bir etkiye sahiptir (Jol, 2009, s. 7-8).

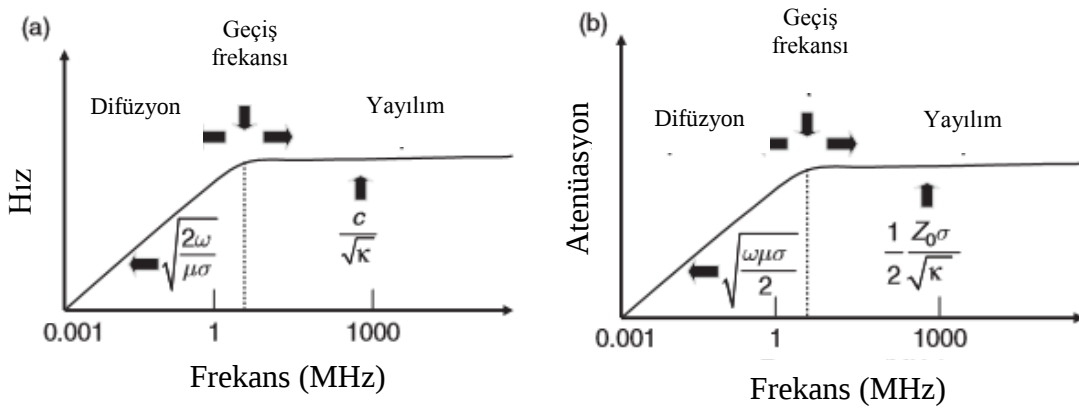
2.5 Dalga Özellikleri

Elektromanyetik dalga alanı için ana parametreler hız, v , atenuasyon, α ve Z , EM empedanstır. Dalgalar düşük frekanslarda difüzyon ve saçılım etkisine maruz kalırken, geçiş frekansı ile tanımlanan bir değerden yüksek olan frekanslarda ise frekanstan bağımsız davranış sergilemektedir (Şekil 2.3). Bu durum ϵ , μ , σ

değerlerinin frekanstan bağımsız olduğu durumda gerçekleşmektedir. Yer radarının ilgi alanına giren bölüm burada söz edilen yüksek frekans davranışdır.

Difüzyon davranışından yayılım davranışına geçiş sırasında elektrik akımları serbest yüklü iletkenlikten yer değiştirme özelliğine geçiş yapmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların değişen frekansa karşı sabit hız ve atenuasyon değerleri aldıkları frekans bandına yer radarı platosu adı verilmektedir. Pratikte birçok malzeme yer radarı platosundaki sinyal frekansları değiştikçe düşük seviyelerde hız ve atenuasyon değişimleri yaratmaktadır. Bu durumun en önemli sebeplerinden biri sudur.



Şekil 2.3: Basit ve saçılma içermeyen bir ortam içerisinde frekans ve atenuasyon değişimi. c , Z_0 , ω sırasıyla boşluğun hızı, empedansı ve açısal hızdır. (Annan, 2003).

Şekil 2.3'te görülen geçiş frekansı:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (2.14)$$

ile ifade edilmektedir. f_t seviyesinden yüksek olan frekans değerlerinde, tüm frekans bileşenleri aynı hızda hareket etmekte ve aynı atenuasyona maruz kalmaktadır. Bu durumda:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2.15)$$

$$\alpha = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{k}} \quad (2.16)$$

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad (2.17)$$

olarak ifade edilebilir (Annan, 2003, s. 56). Burada manyetik özellik varyasyonlarının yok sayılabilir olduğu varsayılmıştır ve $\mu = \mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} H/m$

değeri kabul edilmiştir. μ_0 boşluğun manyetik geçirirliliğidir. Ayrıca Z_0 boşluğun empedansdır ve eşitlik 2.18’de açıklandığı gibi hesaplanmaktadır.

$$Z_0(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.18’deki boşluğun empedans değeri, 2.17 eşitliği ve Çizelge 2.1’de görülen dielektrik sabiti değerleri kullanılarak bir malzemenin empedans değerine ulaşılabilir. Empedans değerleri yer radarı sinyallerinin yansıma ve iletiminde en önemli parametrelerden biridir.

Çizelge 2.1: Bazı jeolojik malzemelerin dielektrik sabitleri, elektrik iletkenlikleri, hızları ve atenüasyonları (Annan, 2003).

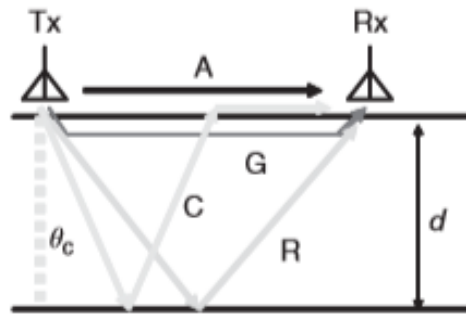
Malzeme	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Hava	1	0	0.3	0
Tatlı Su	80	0.01	0.033	0.002
Deniz Suyu	80	0.5	0.033	0.1
Kuru Kum	3-5	0.01	0.15	0.01
Doymuş Kum	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Kireçtaşı	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Şeyl	5-15	1-100	0.09	1-100
Silt	5-30	1-100	0.07	1-100
Kil	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Kuru Tuz	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Buz	3-4	0.01	0.16	0.01

Çizelge 2.1 incelendiğinde jeolojik malzemeler için v , genellikle 0.07-0.15 m/ns aralığındaki değerleri almaktadır. Elektromanyetik dalgaların havada ilerlemesi

sonucu oluşan dalgalarda ise 0.3 m/ns değeri görülmektedir. Yer radarı çalışmalarında atenuasyon değerleri genellikle 1 dB/m ile ifade edilmektedir. Ayrıca empedans değerleri 100-150 Ω aralığında gözlenmektedir (Annan, 2003, s.47).

2.6 Arayüzeylerde Yer Radarı

Yer radarı araştırmaları genellikle yer üzerinde bulunan bir kaynak ile gerçekleştirilmektedir. Kaynaktan yayılan dalga üç boyutlu olarak tüm yönlerle ilerlemektedir. Sinyal, Şekil 2.4'te görülebildiği gibi hava-yer yüzeyi sınırıyla karşılaştığında farklı geometrilerde yansıyarak alıcıya ulaşmaktadır.



Şekil 2.4: Alıcı-verici anten çifti arasında sinyalin izlediği yollar. Burada A doğrudan gelen hava dalgasını, G doğrudan gelen yer dalgasını, R yansıyan dalgayı ve C kritik açıyla yansıyan dalgayı göstermektedir (Conyers, 2012).

Düşük hızlı bir tabaka ile yüksek hızlı bir tabaka bir süreksizlik oluşturduğunda düşük hızlı tabaka içerisindeki sinyal belirli bir sınır değerinden yüksek olan açılarda 2. ortama geçemez. Gelen ve yansıyan dalgalar arasındaki ilişkiyi açıklayan 2.19 denklemi Snell Yasası olarak bilinmektedir.

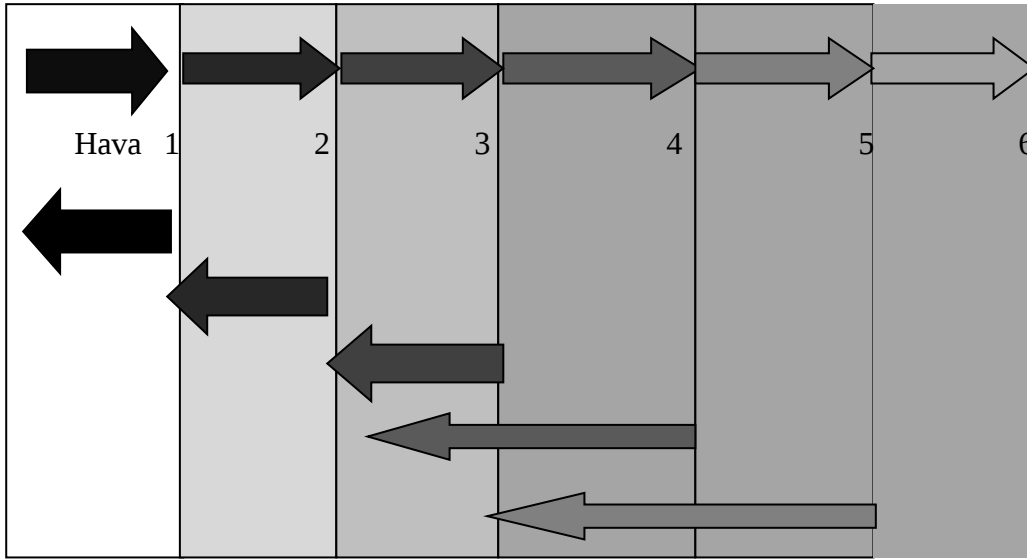
$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \quad (2.19)$$

2.19 denkleminde ortaya çıkan sonuç; gelen dalga'nın geliş açısının sinüsü ile hızı oranı, yansıyan dalga'nın geliş açısı ve hızının oranına eşittir. $\theta_2 = 90^\circ$ alınarak bulunan θ_1 değeri kritik açıdır. 90° ile ifade edilen değer, gelen dalga'nın ara yüzey normaliyle yaptığı açıdır. Dolayısıyla arayüzde yatay olarak hareket eden bir dalga söz konusudur. Bu dalga Şekil 2.4'te C harfiyle gösterilmiştir.

Yer içerisindeki yansıma ve iletimi daha iyi açıklayabilmek için 6 tabakalı bir model oluşturulmuştur. Model parametreleri Çizelge 2.2'de görülebilmektedir (Daniels, 2004, s. 41-44).

Çizelge 2.2: Yansıma karakterinin anlaşılabilmesi için oluşturulan basit model parametreleri.

Tabaka	Derinlik	K	Materyal
1	0	1	Hava
2	0.3	6	Toprak
3	0.6	1	Hava Boşluğu
4	0.85	9	Kuru Kayaç
5	1	16	Doygun Kayaç
6	Sonsuz	25	Doygun Anakaya



Şekil 2.5: Model üzerinde kaynak, yansıyan ve iletilen dalgaların gösterimi (Daniels, 2004).

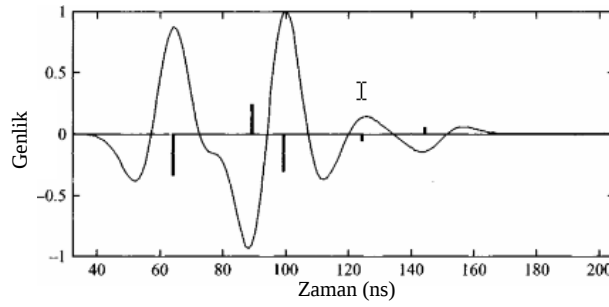
Radar sinyali yer içerisinde bir tabaka arayüzüyle karşılaştığında, yansıyan dalga özellikleri bu arayüzdeki empedans değişimleri tarafından belirlenmektedir. Polarizasyon ve yansıma genlikleri, yansıma katsayısı adı verilen bir parametre ile hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.20)$$

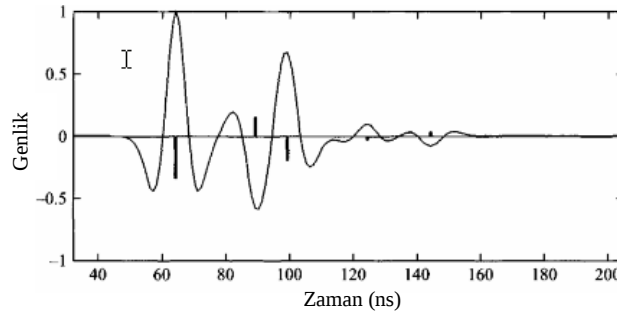
Burada R yansıma katsayısını, Z_1 sinyalin bulunduğu ortamın empedansını, Z_2 sinyalin yayılacağı ortamın empedansını ifade etmektedir. Empedans ifadesi eşitlik 2.17’de incelendiğinde Z_0 bir sabit olduğundan, bağıl dielektrik sabit değerinin köküyle ters orantılıdır. İki ortam arasındaki empedans farkı arttıkça R değerinin mutlak değeri de artmaktadır. Böylece, yüksek dielektrik sabiti farkları güçlü

yansımalar oluşturur denilebilir. Denklem 2.20 ve Çizelge 2.1 incelendiğinde R değerinin negatif olabileceği görülmektedir. R değerinin negatif olması radar sinyali polarizasyonunun terslenmesi olarak sonuçlanmaktadır. Polarizasyon kavramı detaylı olarak sonraki bölümlerde incelenmektedir.

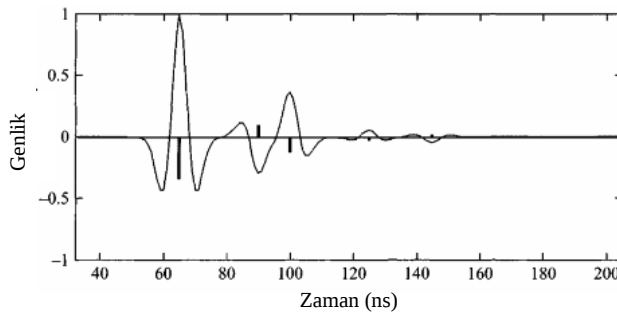
Şekil 2.6-2.9 incelendiğinde yer radarı sinyalinin arayüzeylerdeki davranışı görülmektedir. Zamanla dalga yer içerisinde sönmüldüğü için daha geç zamanlardaki yansımalar düşük genliklere sahiptir. Yansıma genliğini etkileyen ikinci parametre ise empedans farklarıdır. Ayrıca düşük frekanslı antenlerin çözünürlüklerinin daha düşük olduğu da görülebilmektedir. Yüksek frekanslı antenlerle daha dar olan dalga boyları sayesinde daha yüksek çözünürlüğe ulaşılabilmektedir. Fakat yüksek frekanslı sinyaller daha çabuk sönmüldüğünden, düşük frekanslı modellemelerde sinyallerin daha geç zaman dilimlerinden de alınabildiği görülmektedir.



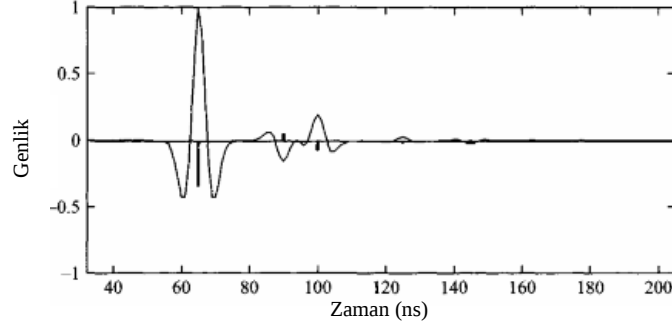
Şekil 2.6: 100 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu (Daniels,2004).



Şekil 2.7: 300 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu (Daniels,2004).



Şekil 2.8: 500 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu (Daniels,2004).



Şekil 2.9: 750 MHz merkez frekanslı sinyal ile 6 tabakalı yansıma simülasyonu (Daniels,2004).

Şekil 2.6-2.9’da da görülebildiği gibi sinyal genliği farklı tabakalarda negatif veya pozitif olabilmektedir. Sinyal her tabakadan yansıdığı anda 3 bantlı olarak geri yansımaktadır. Bu üç bant sinyalin polarizasyonu olarak tanımlanmaktadır.

Modellemede görülmekte olan sonuçlar tek bir sinyal genliğinin zamana karşı çizdirilmesi ile gösterilmiştir. Yer radarı ölçümlerinde de her istasyon noktasında bu şekilde bir sinyal ölçülmektedir. Yer radarı ölçümlerinin bu şekilde zamana karşı genlik şeklinde gösterimine iz adı verilmektedir. Her bir iz yan yana getirilerek genliklerinin seçilen renk skalasından belirlenmesiyle daha önce söz edilen radargramlar oluşturulmaktadır.

Bu noktadan hareketle, bazı malzemelerin arayüzelerindeki yansıma katsayıları Çizelge 2.3’te verilmiştir. Çizelgede de görülebildiği gibi yansıma katsayısının değeri bazı malzemeler için oldukça karakteristiktir.

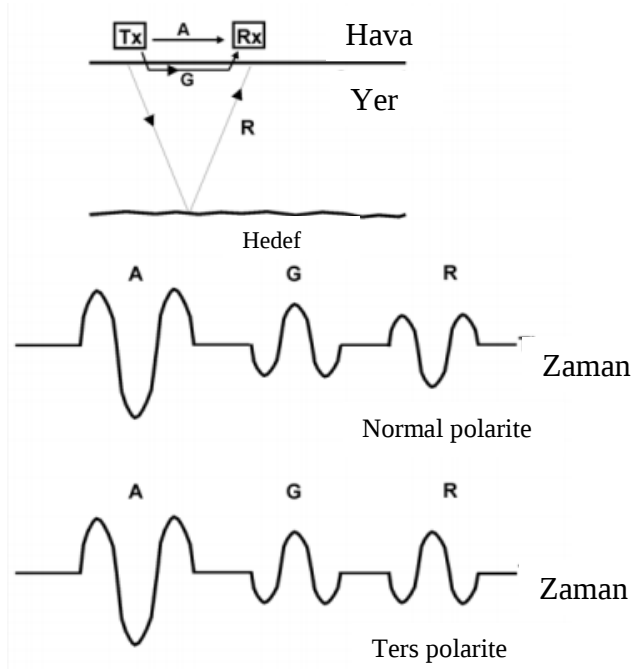
Çizelge 2.3: Sık karşılaşılan jeolojik arayüzlerin bağıl dielektrik sabitleri, empedansları ve yansıma katsayıları (Annan, 2003).

Sınır	K_1	K_2	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	R
Hava-kuru toprak	1	4	377	188	-0.05
Hava-doymuş toprak	1	25	377	75	-0.67
Kuru toprak-doymuş toprak	4	25	188	75	-0.43
Kuru toprak-kaya	4	6	188	154	-0.01
Doymuş toprak- kaya	25	6	75	154	0.34
Buz-su	3.2	81	210	42	-0.67
Nemli toprak-su	9	81	126	42	-0.5
Nemli toprak-hava	9	1	126	377	0.5
Toprak-metal	9	∞	126	0	-1

Daha önce bahsedilen üç bantlı polarizasyon kavramı negatif ve pozitif genlik değerleri incelenerek belirlenmektedir. Şekil 2.10’da normal ve ters polarite ifadeleri

görsel olarak verilmiştir. Alıcı ve verici anten çifti arasındaki doğrudan gelen hava dalgası A, yer dalgası G, hedef düzlemden yansıyan dalga ise R ile gösterilmiştir.

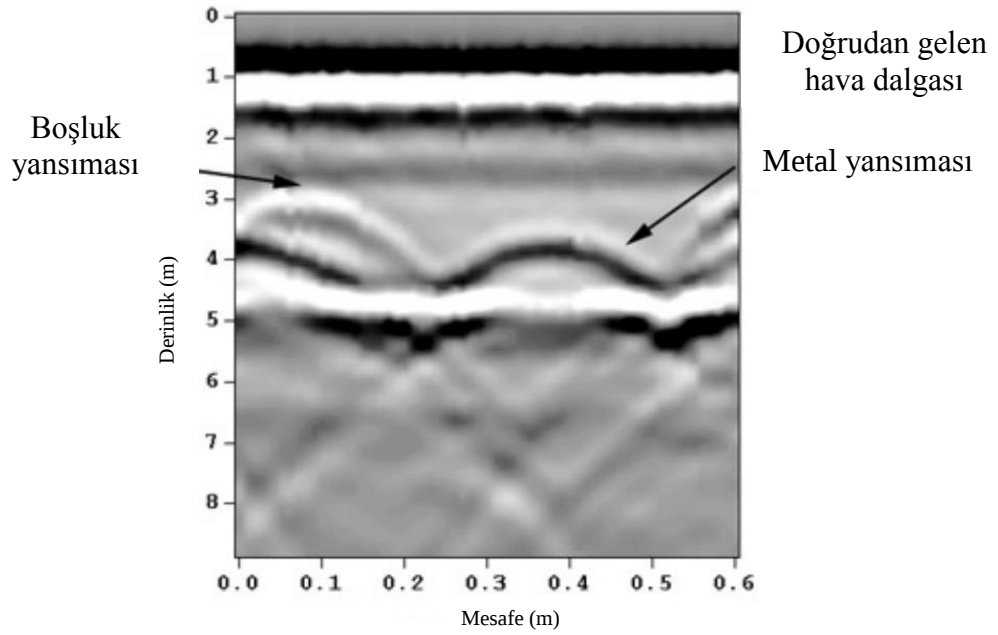
Yer radarı cihazlarında standart bir polarizasyon bulunmamaktadır. Bu sebeple radargramda ilk kaydedilen doğrudan gelen dalgaya bakılarak normal polarizasyon belirlenebilir. Bu aşamadan sonra ters polarizasyona sahip yansımalar tespit edilebilmektedir.



Şekil 2.10: Normal ve ters polaritenin gösterimi (Annan,2003).

Çizelge 2.3 incelendiğinde metal empedansının çok düşük olduğu farkedilebilmektedir. Bu da negatif bir yansıma katsayısı oluşturmaktadır. Bu sebeple, radar çalışmalarında metalin ters polarizasyon vermesi beklenmektedir. Bununla birlikte toprak yada kayaç içerisindeki bir boşluk yüksek empedans değerine sahiptir ve normal polarizasyon vermesi beklenmektedir. Farklı veri işlem programlarında farklı renk seçenekleri yer almasına rağmen genellikle pozitif genlikler beyaz renkle, negatif genlikler siyah renkle gösterilmektedir. Gri alanlar ise güçlü yansıma alınamayan alanları ifade etmektedir.

Şekil 2.11’de görülen doğrudan gelen hava dalgası siyah-beyaz-siyah formunda bir polarizasyona sahiptir. Boşluk yansımasında aynı şekilde beyaz genlikli alan ortada görülmekteyken diğer tarafta metal yansımasında siyah bant ortada gözlemlenmektedir.



Şekil 2.11: Normal polarizasyona sahip boşluk yansıması ve ters polarizasyona sahip metal yansıması (Annan, 2003).

Bu durumda metal yansıması doğrudan gelen dalga ile farklı polarizasyona sahip olduğu için metalin ters polarizasyona sahip olduğu söylenebilir (Annan, 2003, s. 183-185).

2.7 Yer Radarı Ölçüm Parametreleri

Yer radarı yönteminde birçok farklı ölçüm dizaynı bulunmasına rağmen bunlardan en çok kullanılanı sabit bir geometriye sahip antenlerin araştırma hattı boyunca taşınması ile gerçekleştirilmektedir. Bu tip ölçümlerde frekans, zaman penceresi, örnekleme aralığı, istasyon aralığı, antenler arası mesafe, anten yönelimi olmak üzere altı temel parametrenin belirlenmesi gerekmektedir.

Öncelikle kullanılacak antenin merkez frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametre belirlenirken çözünürlük, gürültü ve araştırma derinliği göz önünde bulundurulmalıdır. Tüm bu etkenlerin ifade ettiği bir merkez frekans bulunmaktadır. Çözünürlük göz önüne alındığında:

$$f_c^R > \frac{75}{\Delta z \sqrt{K}} \text{ MHz} \quad (2.21)$$

merkez frekansı değeri bulunmaktadır.

Burada Δz çözünürlüğün metre cinsinden değerini ifade etmektedir. K dielektrik sabitidir. 2.21 denkleminde de anlaşılaçağı gibi çözünürlük, radar frekansı için bir alt sınır belirlemektedir.

Merkez frekans seçiminde diğeri bir önemli parametre ise toprak ve kayaç içerisindeki heterojenliklerden gelen yansımalar ile ilgilidir. Yer radarı sinyali yer içerisinde ilerlerken karşılaştığı küçük taneli kayaçlardan, jeolojik malzeme içerisindeki küçük boşluklardan gelen yansımalar yüksek gürültü oranlarına sebep olmaktadır. Bu sebeple yer radarı ile derin araştırmalar yapabilmek için bu gürültünün minimize edilmesi gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için sinyal dalga boyunun yer içerisindeki heterojenlik ölçeğinden çok daha büyük olması gerekmektedir. 10 oranında bir faktör kullanılarak gerçekleştirilen frekans hesabı:

$$f_c^c < \frac{30}{\Delta L \sqrt{K}} \text{ MHz} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada ΔL ortalama heterojenliğin metre cinsinden değeridir. Gürültü (clutter) konseptinin ölçümler üzerindeki etkisi Şekil 2.12’de görülebilmektedir. Kayaçların yapısı yaklaşık 30 cm’lik tane boyutundan oluşmaktadır. 100 MHz ile alınan ölçümlerde tüm bu tane arayüzlerinden gelen gürültü görülebilirken, 50 MHz ile alınan ölçümlerde gürültü yüksek oranda bastırılabilmiştir.

Merkez frekans seçiminde son parametre ise araştırma derinliğidir. Genellikle yer radarı araştırmalarında kullanılabilecek olan araştırma derinliği-merkez frekans ilişkisi:

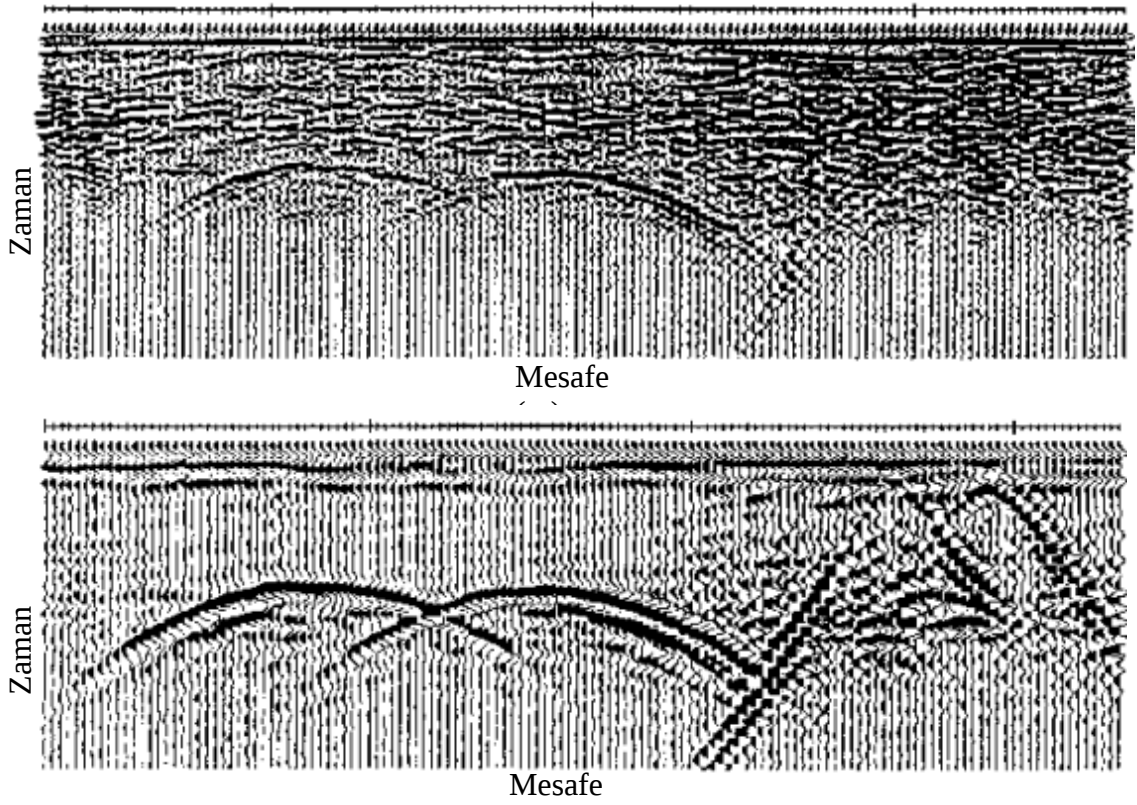
$$f_c^D < \frac{1200\sqrt{K-1}}{D} \text{ MHz} \quad (2.23)$$

ile verilmektedir. Burada D araştırma derinliğinin metre cinsinden değeridir.

Bu üç merkez frekans değeri:

$$f_c^R < f_c < \min(f_c^D, f_c^C) \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada f_c araştırmada kullanılacak merkez frekans için bir aralık belirlemektedir. Araştırma derinliğinin %25’i oranında çözünürlük gerekmesi varsayımıyla Çizelge 2.4 ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.12: Aynı lokasyonda 100 MHz (üstte) ve 50 MHz (altta) alınmış radar ölçümleri. Toplam mesafe 100 metre, zaman ise 500 nanosaniyedir (Annan, 2003).

Çizelge 2.4: Araştırma derinliği ve merkez frekans arasındaki ilişki (Annan, 2003).

Derinlik (m)	Merkez Frekans (MHz)
0.5	1000
1	500
2	200
7	100
10	50
30	25
50	10

Yer radarı ölçüm parametrelerinden biri de zaman penceresidir. Zaman penceresini hesaplamak için yer içerisindeki belirsizlikler göz önüne alınarak bir faktör ortaya konur. Genellikle %30 olarak alınan faktör ile hesaplandığında:

$$W = 1.3 \frac{2xD}{v} \quad (2.25)$$

ifadesine ulaşılmaktadır. Elektrik özellikler bilinmiyorsa Çizelge 2.5 kullanılabilir.

Çizelge 2.5: Çeşitli jeolojik malzemeler için nanosaniye cinsinden zaman penceresi değerleri (Annan, 2003)

Derinlik (m)	Kaya	Doygun Toprak	Kuru Toprak
0.5	12	24	10
1	25	50	20
2	50	100	40
5	120	250	100
10	250	500	200
20	500	1000	400
50	1250	2500	1000
100	2500	5000	2000

Radar ölçümleri dizaynı yapılırken belirlenmesi gereken bir diğer parametre zaman ortamında örnekleme aralığıdır. Örnekleme aralığı Nyquist örnekleme tarafından belirlenir ve maksimum değeri sinyal içerisindeki en yüksek frekans periyodunun yarısı olmalıdır. Yer radarı sinyali içerisinde frekanslar genellikle merkez frekansın 0,5 ve 1,5 katı aralığındadır. Buradan hareketle, ölçümdeki en yüksek frekansın merkez frekansın 1,5 katı olması beklenmektedir.

En yüksek frekans için yapılan bu varsayıma dayanarak verinin zaman ortamında bu değerin iki katı seviyesinde örneklenmesi gerekmektedir. Yer radarı ölçümlerinde belirsizliklerin olabileceği düşünülerek 2 faktörü hesaplamalara katıldığında:

$$t = \frac{1000}{6f_c} \quad (2.26)$$

ile örnekleme aralığı hesaplanabilmektedir. Burada f_c merkez frekansın MHz cinsinden değeri ve t örnekleme aralığının nanosaniye cinsinden değeridir. 2.26 denkleminde yola çıkarak Çizelge 2.6 elde edilmektedir.

Bir diğer ölçüm parametresi olan istasyon aralığı ise doğrudan frekans ve dielektrik sabiti ile ilgilidir. Nyquist örnekleme aralığı kullanılarak hesaplanan formül:

$$\Delta x = \frac{75}{f_c \sqrt{K}} \quad (2.27)$$

olarak bulunabilir.

Formül 2.27’de Δx istasyon aralığının metre cinsinden değeri, f_c ise merkez frekansın MHz cinsinden değeridir. Bu parametre Nyquist örnekleme aralığından büyük olduğunda eğimli olan yapılar ve saçılma karakterleri tam olarak görüntülenemez. Eğer tam olarak yatay tabakalı bir ortamdan söz ediliyorsa bu parametrenin önemi azalmaktadır.

Çizelge 2.6: Merkez frekans-örnekleme aralığı ilişkisi (Annan, 2003).

Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Örnekleme Aralığı (ns)
10	16.7
20	8.3
50	3.3
100	1.67
200	0.83
500	0.33
1000	0.17

Anten aralığı ise yer radarı araştırmalarında kullanılan parametrelerden bir diğeridir. Bu sayede araştırılan hedefin ve yer parametrelerinin bulunması sağlanabilir.

$$S = \frac{2xD}{\sqrt{K-1}} \quad (2.28)$$

2.28’de optimum anten aralığının hesaplanması gösterilmektedir. Anten açıklığı arttıkça derinlik yönünde çözünürlük azalmaktadır. Bu tez kapsamında kullanılan anten sabit 0.5 metre anten açıklığına sahiptir.

Son parametre ise anten yönelimidir. Bu faktör genellikle cihaz üreticileri tarafından belirlenmektedir. Antenlerin ölçüm düzlemine göre nasıl konumlandırıldıklarıyla ilgilidir (Annan, 2003, s. 145-153). Bu tez kapsamında kullanılan anten önde alıcı arkada verici anten olmak üzere ölçüm doğrultusuyla aynı yöndedir.

2.8 Veri İşlem Aşamaları

Yer radarı, ortamın EM karakteristiklerindeki değişimlere karşı çok duyarlı olduğundan metal ve metal olmayan hedefleri algılama konusunda uygulanabilir bir yöntemdir. Fakat genellikle hedeften gelen yansımalar oldukça zayıftır ve hedef yansıma karakteristiğiyle örtüşmeyen ancak aynı frekans bandına sahip olan sinyaller

ile akışırılar (Daniels, 1996, s. 165-182). Sonuç olarak hedef yansımalar bu tip gürültüler ile yorumlanamaz hale gelmektedir. Bu durum, gerekli veri işlem adımları uygulanmadan hedef sinyalin gürültüden ayrılması işini zorlaştırmaktadır. Gürültüler genel olarak üç ana maddede toplanabilirler (Brooks, 2000, s. 127):

- Alıcı ve verici anten arasındaki etkileşim,
- Hava, yer yüzeyi arasındaki yansıma,
- Yer içerisindeki diğr objelerden gelen yansımalar.

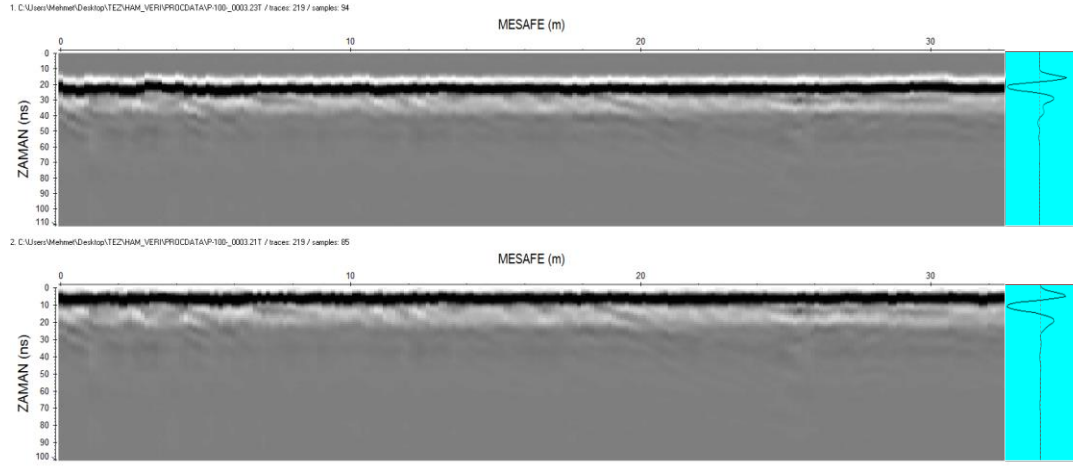
Verilerde en belirgin gürültü doğrudan gelen dalga olarak göze çarpmaktadır. Yer yüzeyinden olan yansıma sinyal gürültüsü genellikle çok güçlüdür ve yer radarı veri işlem çalışmalarında önemli bir problem teşkil etmektedir. Yer içerisindeki diğr nesnelerden saçılan sinyalleri veriden ayırma işlemi de oldukça güçtür.

zet olarak, yer radarı verisi toplandıktan sonra elde edilen veri genellikle gürültülüdür. Veri işlem aşamaları ise bu noktada oldukça önemli bir süreç olarak ortaya çıkmaktadır. Veri işlem için çeşitli geliştiriciler tarafından sunulan veri işlem paketleri kullanılmaktadır. Veri işlem aşamaları Sandmeier Reflexw (2012) programıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle veri incelenerek yansımaların henüz snmlenmediğ 110 nanosaniyeden kesilmiştir. Bu bölümde yalnızca tez kapsamında kullanılan veri işlem aşamaları açıklanmaktadır. Veri işlem aşamalarıyla ilgili detaylı bilgi Annan (2003), Conyers (2012), Jol (2009) ve Daniels (2004)'ta bulunabilir.

2.8.1 Statik düzeltme

Bu düzeltme yer radarının dizaynından ileri gelmektedir. Alıcı ve verici antenler arasında bulunan boşluk sebebiyle alıcı anten ölçüme başladığı andan doğrudan gelen dalga alıcıya ulaşana kadar bir zaman geçmektedir. Bu sebeple radargramlarda anten ve yer yüzeyi arasında veri bulunmayan bir bölüm bulunmaktadır. Bu durumda veri negatif zaman kadar ötelenerek gürültü giderilebilir.

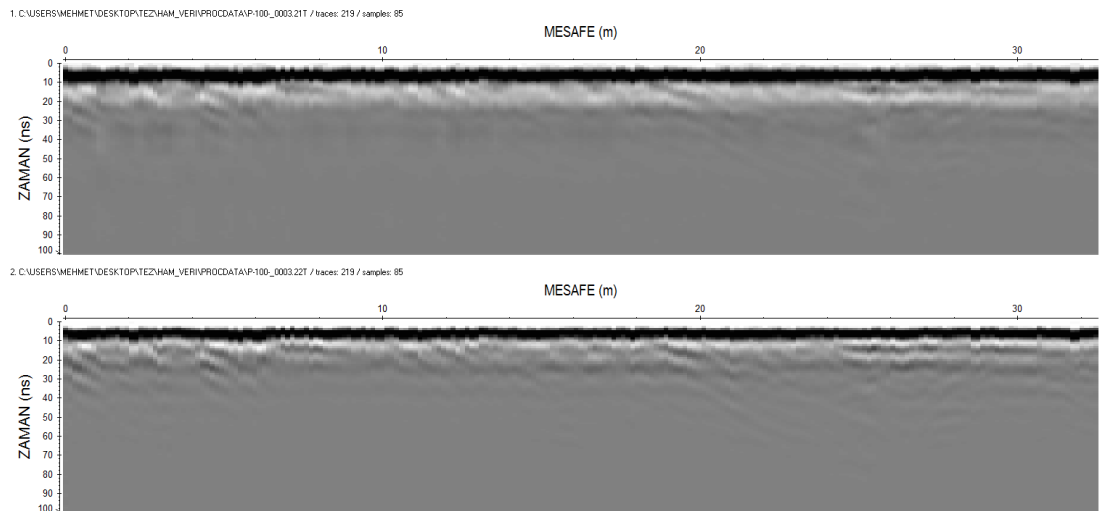
şekil 2.13'te yaklaşık 10 nanosaniye kadar bir veri boşluğ bulunmaktadır. Bu durumu düzeltmek için izlerdeki doğrudan gelen dalganın geliş zamanı işaretlenerek verinin seçilen zamanlar kadar negatif zaman yönünde ötelenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. rnek olarak verilen izlerde de veri işlem takip edilebilir (Sandmeier, 2012, s. 282).



Şekil 2.13: Ham veri (üstte) ve statik düzeltme uygulanmış veri. Her iki radargramın da sağ tarafına 20. metrede bulunan iz konulmuştur.

2.8.2 Zaman ekseninde ortalama çıkarma

Bu veri işlem aşaması veride kendisini çok düşük frekanslı gürültü olarak gösteren “wow” etkisini gidermekte kullanılır. Yer radarı verisinde çok düşük frekanslı gürültüler gerçek yansımaları örtmektedir. Bu işlem genellikle veri işlem paketlerinde dewow olarak isimlendirilmektedir. Çok düşük frekanslı gürültüler genellikle indüklenme sebebiyle yada cihaz tasarımıyla ilgilidir. Filtreleme işlemi sırasında programa bir zaman penceresi değeri girilmektedir. Zaman penceresi içerisinde bir ortalama hesaplanarak, pencerenin ortasında bulunan değerden çıkarılır (Sandmeier, 2012, s. 265). Tez kapsamında alınan zaman penceresi 10 nanosaniyedir. Dewow işlemi bazı yer radarı cihazları içerisinde gerçekleştirilebilmesine rağmen genellikle sonradan uygulanan bir filtredir. Şekil 2.14’te görülebileceği gibi, derinlik ekseninde çözünürlük artışı gözlemlenmiştir.

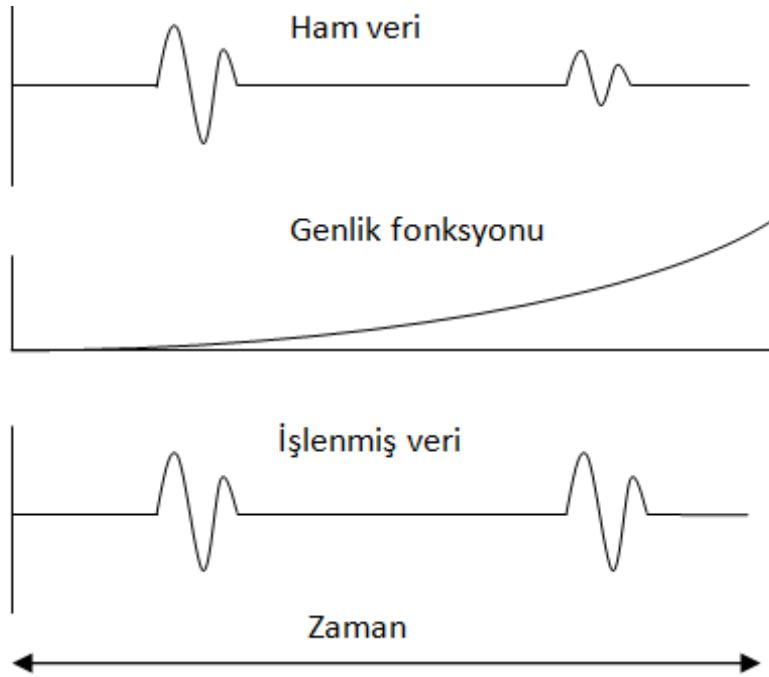


Şekil 2.14: Dewow işlemi uygulanmadan önceki (üstte) ve sonraki veri.

2.8.3 Genlik kazanımı

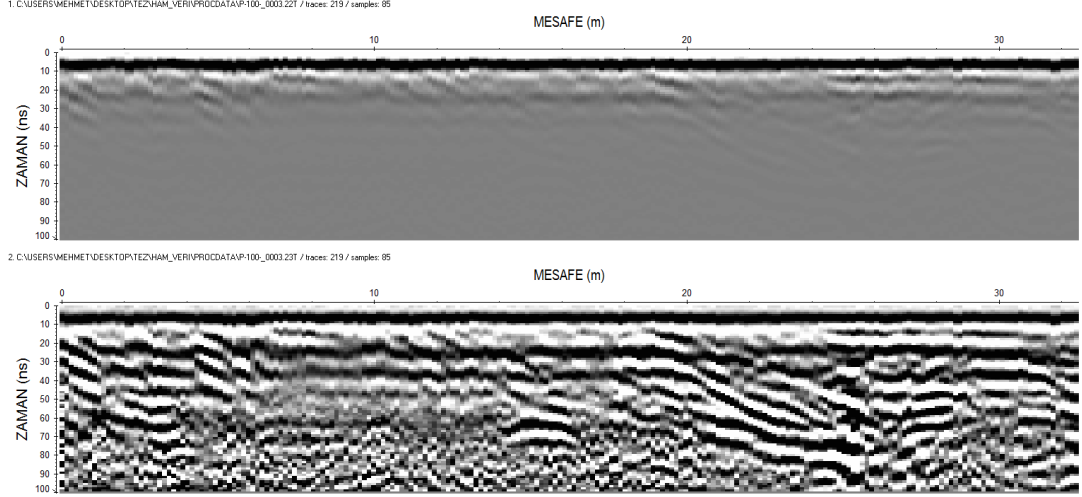
Radar sinyali yer içerisinde ilerlerken enerjisini derinlikle birlikte kaybetmektedir. Enerjinin bir kısmı ısıya dönüşürken bir kısmı da yansıma ve saçılmalar sonucunda kayıplara uğramaktadır. Sonuç olarak sığ derinliklerden gelen güçlü yansımaların ve derinlerden gelen düşük genlikli yansımaların aynı radargram üzerinde gösterilmesi zorlaşmaktadır. Bunun sebebi genlikler arasında büyük bir fark bulunmasıdır. Uygun genlik kazanımı ardından en derinlerdeki yansımalar da radargram üzerinde görülebilmektedir.

Şekil 2.15'te basit haliyle anlatılan işlemin birçok farklı türü bulunmaktadır. Bu tez kapsamında kullanılan veri genlik kazanımı uygulamasında öncelikle tüm radargramdan ortalama bir genlik kazanımı hesaplanmaktadır. Ardından bu genlik fonksiyonuna bir medyan filtre uygulanmaktadır. Son olarak da ayrı ayrı izlerdeki tüm değerler bu genlik fonksiyonundaki değerler ile çarpılır (Sandmeier, 2012, s. 272).



Şekil 2.15: Genlik kazanımı işlemi.

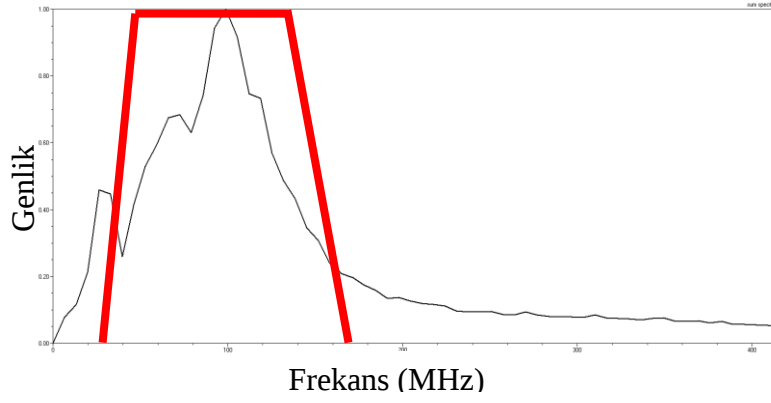
Şekil 2.16 incelendiğinde derinlerdeki yansımaların genlik kazanımı sonrası ortaya çıktığı görülebilmektedir. Bununla birlikte verinin içindeki gürültüler de daha belirgin hale gelmiştir.



Şekil 2.16: Genlik kazanım uygulamasından önce (üstte) ve sonraki (altta) veri.

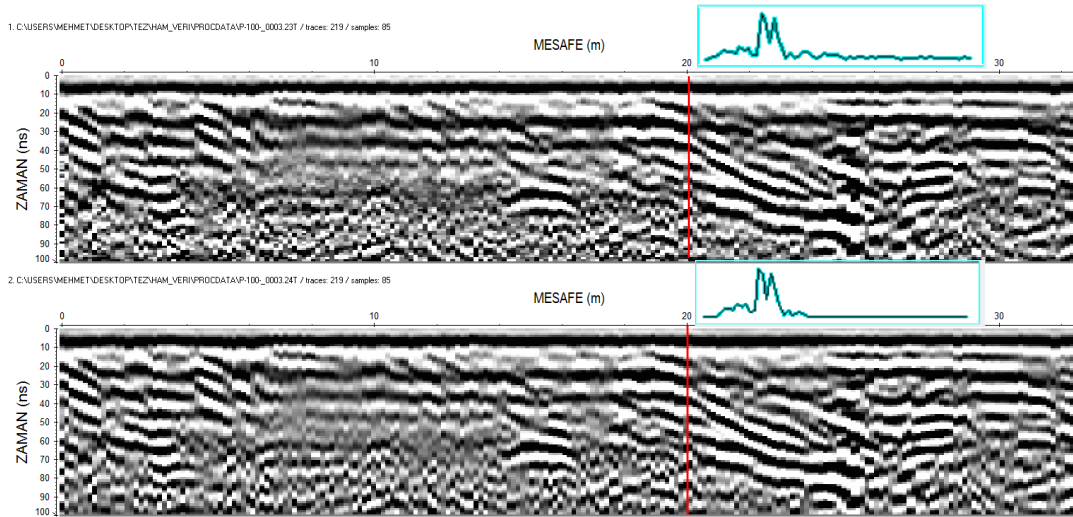
2.8.4 Bant geçiren filtre

Bant geçiren filtre aşamasında öncelikle verideki tüm izlerin Fourier Transformu ile genlik spektrumu hesaplanmaktadır. Ayrı ayrı izlerin genlik spektrumunun ortalaması alınarak tüm radargramın spektrumu elde edilmektedir. Spektrum ve antenin merkez frekans bilgisi kullanılarak veriden gürültü olduğu düşünülen frekanslar atılabilmektedir (Sandmeier, 2012, s. 258). İşlemi gerçekleştirmek için Şekil 2.17’de verilen genlik spektrumu incelenmiştir. Ölçüm için kullanılan antenin merkez frekansı 100 MHz olduğu için bu değerde yoğun olarak sinyal bulunmaktadır. Bununla birlikte radargram içerisinde 400 MHz ve daha yüksek frekanslarda da sinyaller bulunmaktadır. Kullanılan antenin bu kadar yüksek frekanslı sinyaller üretmediği bilindiğinden, bant geçiren bir filtreyle yalnızca istenen frekans aralığındaki veriyi korumak gerekmektedir. Bu noktada yer içerisindeki belirsizlikler göz önünde bulundurularak bant geçiş değerleri 30-40-150-175 MHz seçilmiştir. Şekil 2.17’de bant geçiren filtrenin sınırları yaklaşık olarak gösterilmiştir. Şekil 2.17’de kırmızı çizgi ile belirtilen bant dışındaki frekanslara sahip olan veri sıfıra yakın değerlerle çarpılmakta ve içerisindeki frekanslarda ise pencere fonksiyonuna denk gelen genlik değeriyle çarpılmaktadır. Örneğin 40-150 MHz aralığındaki tüm veri aynen korunurken 30-40 ve 150-175 MHz frekansa sahip değerler bastırılmıştır.

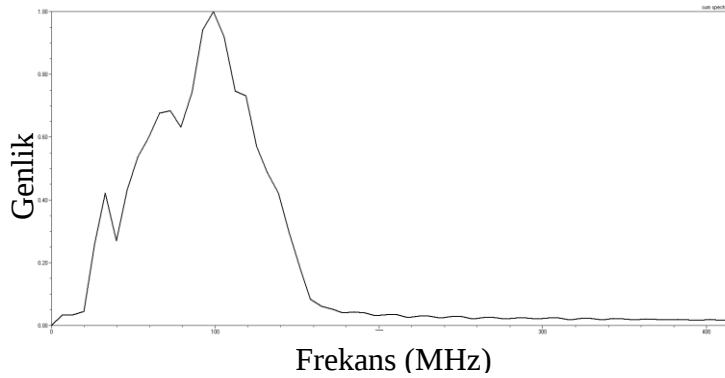


Şekil 2.17: Veri işleminde kullanılan radargramın genlik spektrumu ve bant geçiren filtre sınırları.

Şekil 2.18 incelendiğinde veri işlem sonrası yüksek frekanslı gürültünün bastırıldığı görülebilmektedir. Örnek izin spektrumu incelendiğinde 175 MHz frekans değerinden daha yüksek frekanslı verinin atıldığı görülebilmektedir. Bu durum Şekil 2.17’deki veri işlem öncesi toplam spektrum ile Şekil 2.19’daki veri işlem sonrası spektrum karşılaştırılarak da görülebilmektedir.



Şekil 2.18: Bant geçiren filtre uygulanmamış (üstte) ve uygulanmış veri (altta). Profillerdeki 135. ize ilişkin 0-400 MHz aralığındaki genlik spektrumu üzerlerinde verilmiştir.



Şekil 2.19: Bant geçiren filtre sonrası genlik spektrumu.

2.8.5 Ortalama değer filtresi

Ortalama değer filtresi seçilen pencere içerisinde çalışmaktadır. İz sayısı ve başlangıç-bitiş zamanı parametreleri programa girilmektedir. Örneğin; 5 iz ile gerçekleştirildiğinde yatayda sağa doğru iki örne ve sola doğru iki örne alınarak ortalaması hesaplanır. Hesaplanan ortalama, ortadaki değere atanarak filtre işlemi gerçekleştirilir (Sandmeier, 2012, s. 332). Tez kapsamında söz konusu filtre 3 iz üzerinden tüm ölçüm üzerine uygulanmıştır. şekil 2.20 b'deki sonuç radargrama bakıldığında verideki düzensiz gürültünün azaldığı görölmektedir. Özellikle derinlerde sinyal atenüasyonunun artmasına bağlı olarak oluşan düzensizlikler ve ilişkisiz gürültü bu sayede bastırılabilmiştir.

2.8.6 Arka plan gürültüsü çıkarma

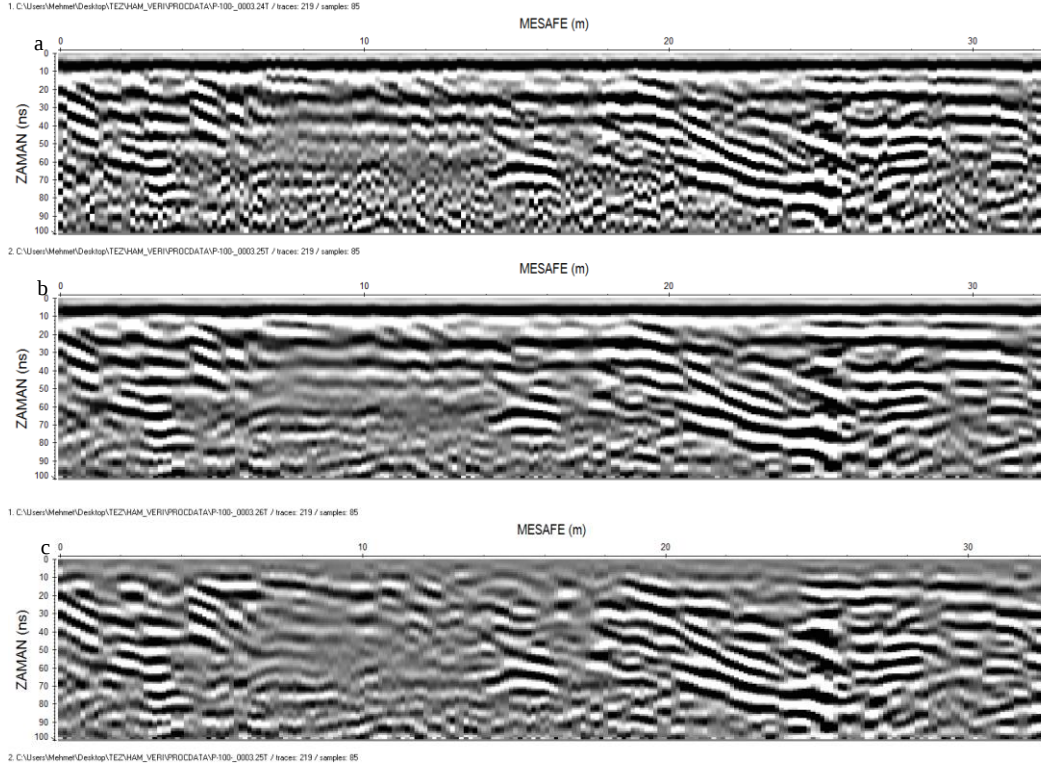
Bu veri işlem aşaması en sık kullanılan filtrelerden biridir. Diğer bir adı ortalama iz çıkarmadır. Program seçilen iz sayısı ve zaman penceresi içerisinde ortalama bir iz hesaplamaktadır. Bu iz pencere içerisindeki tüm izlerden çıkarılarak filtre işlemi gerçekleştirilmektedir. Tez kapsamında ortalama iz, tüm veri üzerinde hesaplanmıştır. Dolayısıyla tüm veriden elde edilen ortalama bir iz, ayrı ayrı tüm izlerden çıkarılmıştır (Sandmeier, 2012, s. 333).

şekil 2.20 a ve 2.20 b incelendiğinde özellikle 70 ns ve daha derinlerdeki gürültüleri ortalama değer filtresi ile giderildiği görölebilmektedir. şekil 2.20 c'de ise zaman ekseninde düzenli gürültüler bastırılmıştır. Örneğin; ölçümün 0-20 ns aralığında yer alan doğrudan gelen dalga bu sayede giderilmiş ve yer yüzeyi yansıması ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Arka plan gürültüsü çıkarma işlemi verideki düzgün yatay tabakaları da bastırabileceğinden dikkatli olunarak kullanılması gerekmektedir. Tez kapsamında yalnızca belli profillere uygulanmıştır.

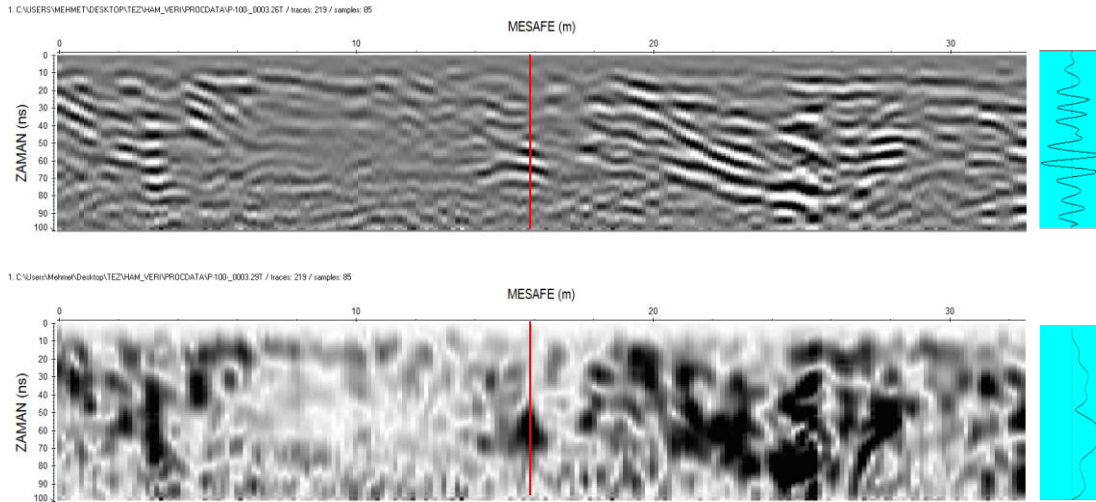
2.8.7 Zarf işlemi

Veri işlem aşamalarından bir diğeri ise zarf filtresidir. Filtre hesaplaması için Hilbert Transformu alınmaktadır. Radar sinyalinin zarfı alınırken öncelikle Fourier Transformu alınır ve negatif genlikler 90° ötelenerek yalnızca pozitif genlikler elde edilmesi sağlanır. Pozitif genliklerin uç noktaları birleştirilerek güçlü yansımaların göröntülenmesi sağlanmaktadır (Sandmeier, 2012, s. 300). şekil 2.21 incelendiğinde güçlü yansıma ve saçılma bulunan bölgelerin daha belirgin hale geldiği ve

yorumlamak için genelleştirilmiş görseller elde edildiğini görülebilmektedir. Tez kapsamında kullanılan renk skalasında koyu renkler güçlü yansımaları belirtmektedir. Ayrıca profillerin ilişkili örnek izleri incelenerek zarf işlemi daha net anlaşılabilir.



Şekil 2.20: a) Ortalama değer ve arka plan gürültüsü çıkarma işlemi uygulanmamış veri. b) Ortalama değer işlemi uygulanmış veri. c) Arka plan gürültüsü çıkarma işlemi uygulanmış veri.

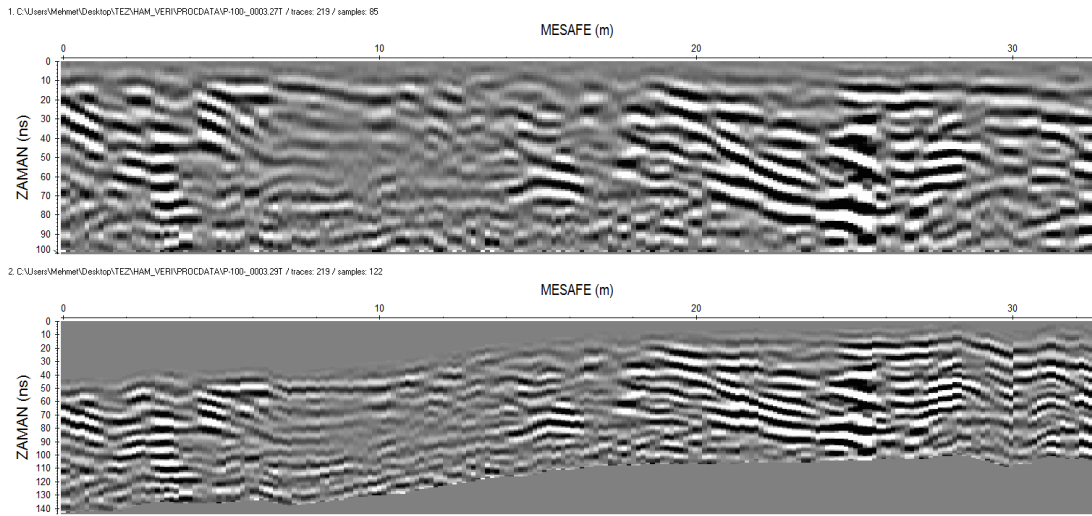


Şekil 2.21: Zarflama işlemi uygulanmamış (üstte) ve uygulanmış veri. Radargramlara ilişkin 107 numaralı iz.

2.8.8 Topoğrafya düzeltmesi

Programda her bir iz için girilen yükseklik değerleri ve hız değeri kullanılarak radargramların başlangıç noktalarının doğru yüksekliğe (yada derinliğe) taşınması işlemidir (Sandmeier, 2012, s. 292).

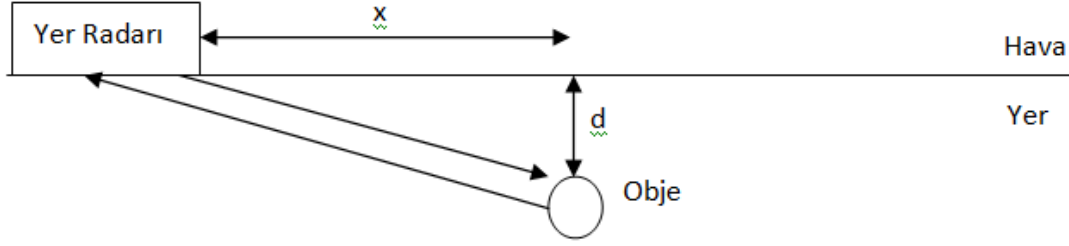
Yer radarı yönteminde hız bulma işlemi bir kaç şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, arazide antenler arası mesafe arttırılarak yatay tabaka eğimlerinden hız hesaplaması yapmaktır. Tez kapsamında uygulanan ikinci yöntemde ise, radargramlarda görülen hiperboller kullanılmaktadır.



Şekil 2.22: Topoğrafya düzeltmesi uygulanmamış (üstte) ve uygulanmış veri.

Bu bölüme kadar çizdirilen radargramlar mesafe – zaman formundadır. Ancak radar sinyalinin hız değerlerine ulaşıldığında derinlik ve kalınlık bilgilerine ulaşmak mümkündür. Eşitlik 2.15 incelendiğinde hız değerinin dielektrik katsayısı ve radar sinyalinin boşlukta yayılma hızından hesaplanabildiği görülmektedir. Pratikte ise birçok uygulamada yer içerisindeki dielektrik katsayısı bilinmemektedir. Hız ölçümleri daha önce belirtilen iki şekilde arazide yapılmaktadır.

Yer radarı teorisinde kablo, boru, metal yapı, büyük kaya ve düzgün boşluklar gibi yapılar hiperbolik şekilli yansımalar vermektedir. Eğer yer radarı bu yapılara dik olarak hareket ettirilirse değişen mesafe sebebiyle yansıyan dalgalar hız hesaplaması yapılabilir hiperboller halinde yansımaktadır. Şekil 2.23'te bu durum sadeleştirilmiş haliyle gösterilmektedir.



Şekil 2.23: Hiperboller kullanılarak hız analizi (Annan 2003).

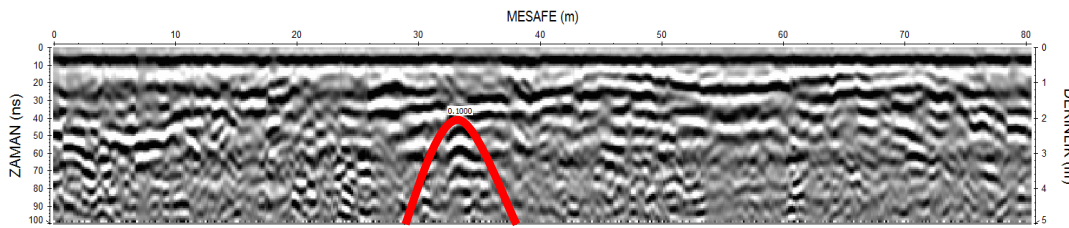
$$t = \frac{2(x^2 + d^2)^{1/2}}{v} \quad (2.29)$$

$$t = \left(\frac{4x^2}{v^2} + t_0^2\right)^{1/2} \quad (2.30)$$

$$t_0 = \frac{2d}{v} \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.29, 2.30 ve 2.31’de hiperbol yansımaları ile hız tespiti fiziksel temellerini vermektedir (Annan, 2003, s. 181).

Burada t_0 yer radarı tam cismin üzerindeki elde edilen zaman değeridir. Bu yöntemde genellikle model bir objenin farklı boyut ve hızlarda yansıma hiperbollerini hesaplanarak, radargramdaki yansıma ile ilişkilendirilir. Böylece hız değerine ulaşılmış olur. Söz edilen varsayımlardan ötürü hiperbol yansımalarından hız analizi yapılırken, farklı radargramlar ve farklı hiperboller kullanılarak ortalama hız değerleri elde edilmesi gerekmektedir. Yapılan hız analizi sonucu $v = 0.1$ m/ns ortalama hız değeri elde edilmiştir.



Şekil 2.24: Örnek bir hiperbol modelleme uygulaması.

$v = 0.1$ m/ns hız değerleri kullanılarak GPS ile kayıt edilmiş olan yükseklik değerleri radargrama uygulanmış ve derinlik görünümüne geçiş yapılabilmektedir. Yükseklik düzeltmesi yapılmış veriler yorumlama sırasında yansımaların kontrolü için kullanılmıştır. Yükseklik düzeltmesi yapılmış profiller EKLER bölümünde verilmiştir.

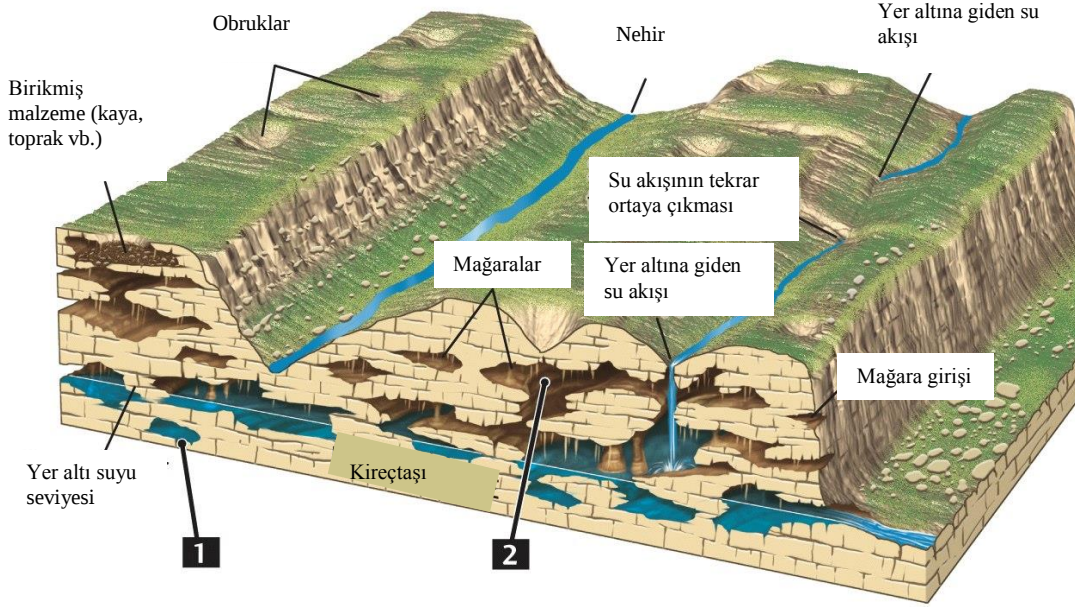
3. YER RADARI İLE KARSTİK ARAŞTIRMALAR

3.1 Karst Oluşumu ve Özellikleri

Karst su ile çözünebilen bir kayanın bozunması sonucu oluşan yer şekillerine verilen isimdir. Ağırlıklı olarak kireçtaşı ve mermer ile ilişkilidir. Fakat dolotaşı, jips ve halit gibi jeolojik birimler de karst konusu dahilinde değerlendirilmektedir. Karstik yer şekilleri oluklu ve boşluklu kaya yüzeyleri, gövdeleri, obruklar, yer içerisine akan akarsular, su kaynakları, yer altı direnaj sistemleri ve mağaralar olarak karakterize edilmektedir. Bu yer şekillerinin oluşabilmesi için anakaya içerisinde suyun ilerlediği ve su akışı sebebiyle genişleyen kanallar gerekmektedir. Bununla birlikte çözünebilen anakayanın üzerinde ve altında da yapılar oluşabilmektedir. Bu tip yapılar genellikle çözünme süreçlerine ek olarak bir veya daha fazla erozyon sürecinin dahil olmasıyla oluşmaktadır. Karstik yapıların bu özgün nitelikleri ve üç boyutlu doğası jeoloji, iklim, topoğrafya, hidroloji ve biyolojik faktörlerin uzun zaman süreçleri boyunca karşılıklı etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Karst bölgelerinde asidikleşen yağmur suyu hızlı bir şekilde yer içerisine süzülerek, ulaştığı kırıklar, bölünmeler ve mağaralar ile hareket ederken, kaynak ve kuyu gibi yapılarla yer yüzeyine çıkmaktadır. Yağmur suyunun asidikleşme sürecinde, yağmur atmosferden inerken CO₂'i yakalar ve bu moleküller yağmur damlaları içinde çözünmektedir. Yağmur yer yüzeyine ulaştığında ve yer altına sızdığında, toprak içerisinde süzülerek daha fazla CO₂ yakalar ve zayıf bir karbonik asit solüsyonu oluşturur ($H_2O + CO_2 = H_2CO_3$). Bahsedilen düşük asit seviyeli su, kayacı çözünmeye uğratarak, kayaç içerisindeki çatlak ve kırıkları daha büyük açıklık ve kanallar haline getirmektedir. Binlerce yıl boyunca devam eden bu süreç yer altı direnaj sistemlerini ve mağaraları oluşturmaktadır. Yer altı kanalları yeterli seviyeye ulaştığında akarsuların aşındırıcı mekanik süreçleri de devreye girmektedir (Pike ve diğ., 2010, s.174).

Şekil 3.1'de genelleştirilmiş bir karst jeolojisi görülebilmektedir. 1 ile işaretlenen bölüm yer altı suyu seviyesi altında kalmış içi su dolu bir boşluğu göstermektedir. 2 ile işaretlenen bölümde ise boşluğun içerisi hava doludur. Tez kapsamında

incelenen profillerde de bu ve benzeri yapılar aranmaktadır. Yer altı suyu seviyesinin üzerinde de içi su dolu yada suya doymun malzeme içeren boşluklar bulunabilmektedir.



Şekil 3.1: Karstik yapıların görünümü (www.osmaralmeidajr.files.wordpress.com/2013/01/para-entender-a-terra-cap-13.pdf’ten alınmıştır).

Karst oluşumu kayaç tipi, saflığı, fizyografik lokasyonu ve biyogeoiklimsel ortama bağlıdır. Kayaç saflığı karst oluşumunu etkileyen en önemli özelliklerden biri olarak dikkat çekmektedir. Daha saf bir kireçtaşının karst oluşturma olasılığı daha yüksek olmaktadır. Karst oluşumu için karbonatlı kayaçların içerisindeki kalsiyum karbonat oranının (CaCO_3) %70 veya daha fazla olması beklenmektedir (Pike ve diğ., 2010, s.174).

Yer içerisinde suyun ilerleyebilmesi ile ilgili iki önemli parametre porozite ve geçirimsiliktir. Örneğin %20 poroziteye sahip bir kayaç denildiğinde %80’i katı maddeden oluşan ve %20’si boşluk olan bir kayaç anlamına gelmektedir. Bu açıklıklar yer altı suyunun depolanabildiği bölümlerdir. Bununla birlikte bu açıklıklar bağlantılı olduğunda yer altı suyu iletimi için kanallar oluşturmaktadır. Geçirimsilik ise yer altı suyunun akifer içerisinde ne kadar iyi ilerlediğinin bir ölçüsüdür. Bir kayacın porozitesi yüksek olabilir ancak eğer bu kanallar bağlı değilse kayacın geçirimsiliği düşük olacaktır. Genellikle karst alanlarında geçirimsilik oldukça yüksektir (Veni ve diğ, 2001, s.15).

Karst alanlarında yağmur suları bir yüzey suyuna katılmak yerine genellikle yer altına iletilmektedir. Obruklar ve mağara girişleri bu sistem içerisinde direnaj noktaları olarak görev yapmaktadır. Doğal olarak oluşmuş ve dışarıdan etkilere çok fazla maruz kalmamış karst alanlarındaki bir obruk sistemi bölgedeki iklim şartlarıyla denge içerisinde ve fırtınalar tarafından oluşturulan suyun direnajını üstlenebilmektedir. Yalnızca çok güçlü fırtınalar sırasında yağın yağmurun çok fazla olması sebebiyle su tekrar yer yüzüne çıkmaktadır.

Yer şekilleri, şehirleşme yapıları sebebiyle değiştirildiğinde problemler ortaya çıkmaktadır. Erozyon yapılaşmanın sık görülen yan etkilerinden biridir ve taşınım materyallerini obrukların en derin noktası olan ve suyun yer içerisine girdiği bölüm olan noktalara taşımaktadır. Bu alanların tıkanması direnaj sistemlerinin doğal şekilde çalışmasını engellemekte ve düşük yağışlarda bile bölgede sel felaketlerinin görülmesine sebep olabilmektedir. Geçirimsiz olan yollar, park alanları, binalar bahsedilen direnaj sistemini doğrudan etkileyerek sel felaketlerine sebep olabilmektedir.

Karst alanlarında oluşabilecek bir diğer problem ise yer altı suyu kirliliğidir. Özellikle yoğun kentleşmeye sahip alanlarda sıklıkla karşılaşılmaktadır. Karst alanlarındaki yüksek dereceli su akışı ve kirli suyun akifere kolayca girebilmesi gibi özellikler bu bölgelerin yer altı suyu kirliliğinden etkilenmesine sebep olmaktadır.

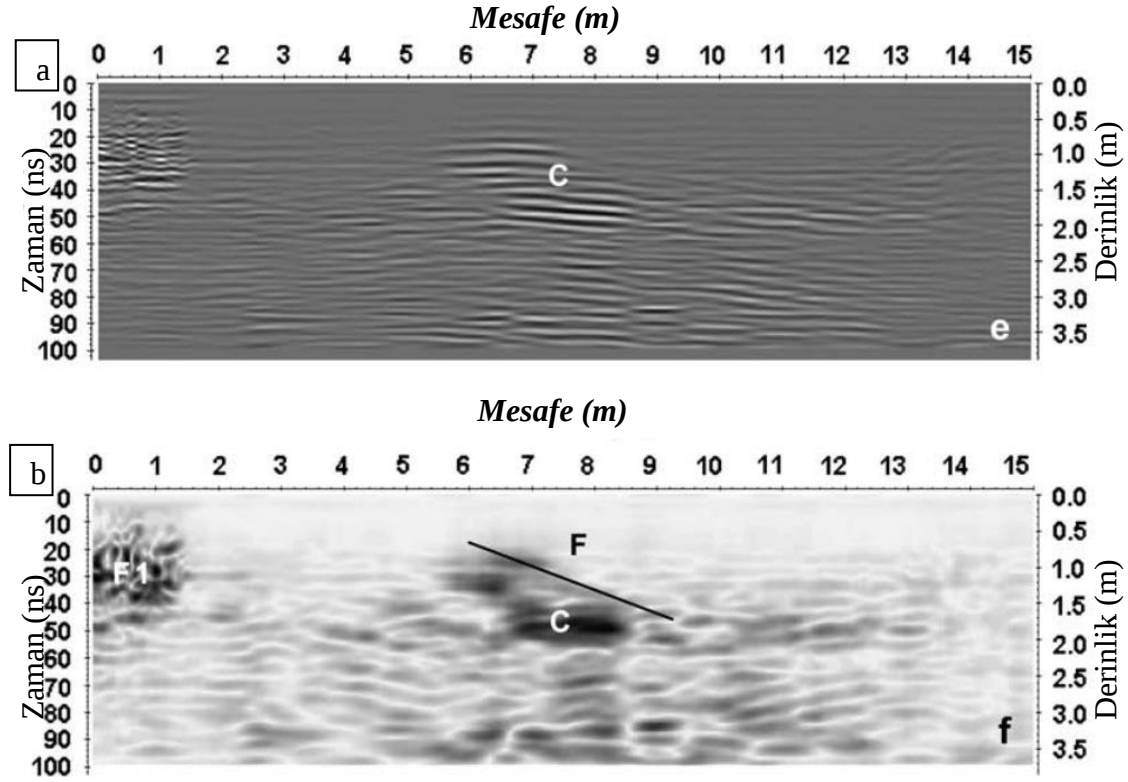
Çeşitli kazalar sonucu yada bilinçli olarak bırakılan atıklar karst akiferlerini ve anakayayı hızlı bir şekilde kirliliğe maruz bırakmaktadır. Yol kenarları, demiryolu çevresi gibi alanlardaki yer altına akışlar, boru hatlarındaki sızıntılar birçok karst akiferini kirletmiştir.

Bu açıklamalar doğrultusunda araştırma sahasında bulunan kireçtaşı içerisinde açıklık ve kanallar halinde yapıların bulunması beklenmektedir. Boşlukların haritalanması ile birlikte yer altı direnaj sistemi hakkında fikir edinilebilmektedir (Veni ve diğ, 2001, s.25-33).

3.2 Yer radarı ile karstik araştırma örnekleri

Bir önceki bölümde ele alınan karstik yapıların oluşturabileceği problemler sebebiyle, bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmalardan yer radarı yöntemi uygulananların bazıları bu bölümde verilmiştir.

Bunlardan ilki İtalya, Lecce’de gerçekleştirilen bir araştırmadır (Leuicci, 2006). Bölgede bulunan tarihi bir kilisenin zeminindeki güçsüzleşme sebebiyle 400 MHz merkez frekanslı antenlerle yer radarı araştırması ve elektrik rezistivite araştırması yapılmıştır. Araştırmanın yer radarı bölümünde karstik yapıların içlerinde bulunan kil, su yada boşlukların yüksek yansımaya sebep olabileceği bilgisi verilmektedir. Şekil 3.2’de Lettucci (2006)’den alınan R2 profili görülmektedir.

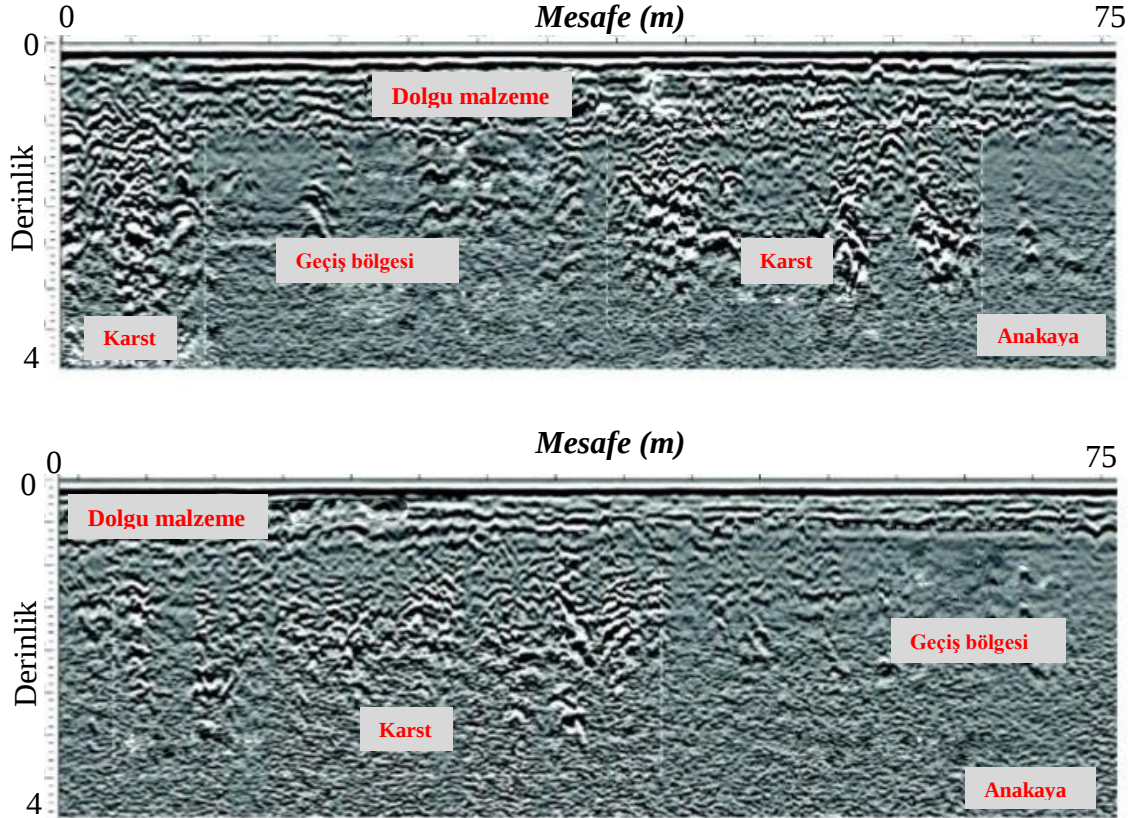


Şekil 3.2: İşlenmiş radar profilleri. a) R2 profili, b) R2 profiline zarf işlemi uygulanması (Leuicci, 2006).

Belirtilen profilin altında zarf işlemi uygulanmış hali de yer almaktadır. Araştırmada yer alan zarf işlemi uygulanmış radargramlardaki süreksizliklerin kırıklara, saçılmış radar enerjisine, boşluklara yada tekrar kristalize olmuş alanlara işaret ettiği açıklanmaktadır. Bu doğrultuda, radargramda F1 ile işaretlenen bölümün kırıklı bir karbonat kayacına işaret ettiği bilgisi verilmektedir. Ek olarak, C ile yaklaşık 40 ns civarında işaretlenen kuvvetli yansımanın muhtemelen bir boşluğun üst seviyesinden geldiği düşünülmektedir. Bununla birlikte boşluğun alt seviyesi görülememektedir.

İkinci bir araştırma örneği olarak Meksika, Merida bölgesinde yapılan bir çalışma verilecektir (Barba ve diğ., 2009).

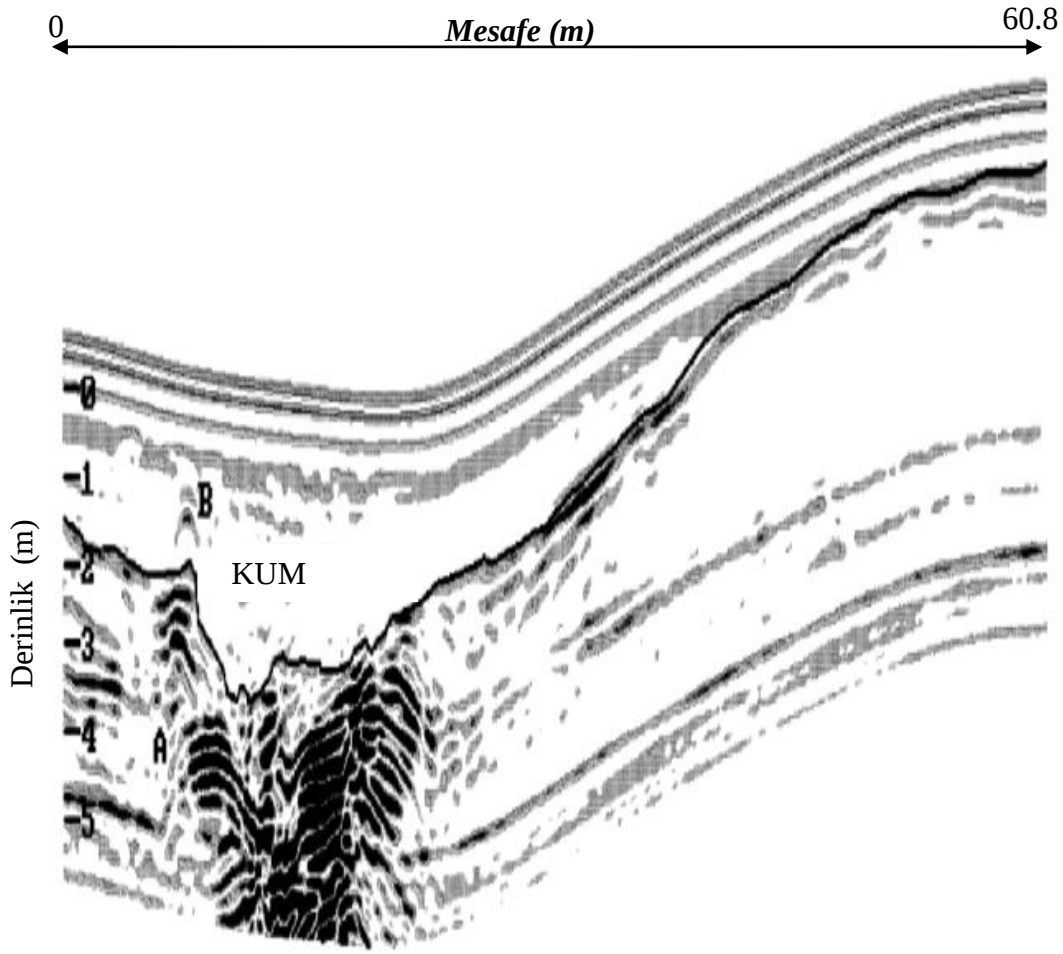
Merida bölgesinin tarihi merkezi altında bulunan karstik boşluklar, bölge yapılarını tehdit etmektedir. Bölgede yapılan 200 ve 400 MHz merkez frekanslı yer radarı araştırmaları ile boşlukların tespit edilmesi ve yapıların göreceği zararların önceden tespit edilerek önlenmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte bölgede bulunduğu düşünülen gömülü tarihi yapıların da görüntülenmesi yapılmıştır. Şekil 3.3'te görülen profillerin yoğun olarak kireçtaşıdan oluştuğu ortaya konmaktadır.



Şekil 3.3: Araştırmada alınan F19 ve F79 profilleri (Barba ve diğ., 2009).

Yüzeye yakın derinliklerde bulunan yaklaşık 1.5-2 metre derinliğe kadar ilerleyen dolgu malzemenin altında çözünmeye uğramış kireçtaşı bulunmaktadır. Ölçümlerin bazı bölümlerinde sığ derinliklerde bulunan kil sebebiyle sinyal atenüasyona uğramıştır. Toprak - anakaya arayüzeyi seviyesinin altında anomali veren yansıtıcı bölümler tespit edilmiştir. Bu bölümlerin karstik yapılar olan kırıklar ve süreksizlikler olduğu yorumu yapılmıştır (Barba ve diğ., 2009).

Son literatür örneği olarak ise Amerika Birleşik Devletleri, Florida ve Pensilvanya'da yapılan bir çalışma verilecektir (Doolittle ve Collins, 1998). Bu çalışmada alınan örnek ölçümlerden biri Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Florida’da alınan temsili bir profil. A ile gösterilen bölge anakaya içerisindeki çökme yada çözünmeyi ifade etmektedir. B ile gösterilen yansıma kireçtaşı parçasını yada büyük bir taşı ifade etmektedir (Doolittle ve Collins, 1998).

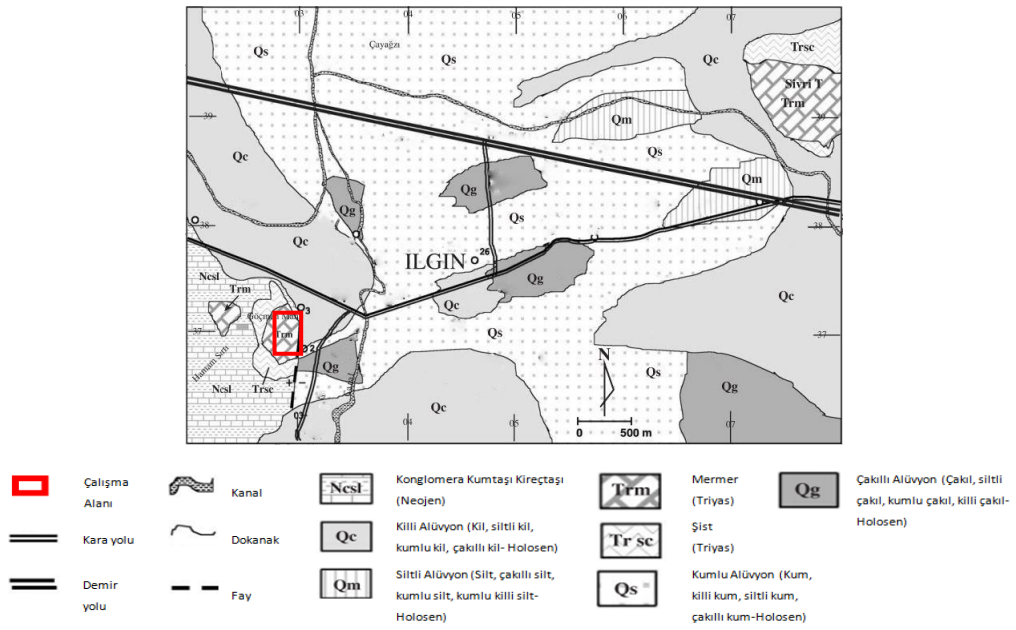
Bu çalışmada karstik yapılarla ilişkili olan yer altı suyu kirliliği, çökme gibi durumların yer radarı ve EM indüksiyon yöntemi ile tespit edilmesi gerçekleştirilmiştir. Yer radarı ölçümleri 120 MHz merkez frekanslı antenlerle yapılmıştır.

Yaklaşık 1-2 metre derinlikte işaretlenen seviye kum seviyesi ve kireçtaşı arayüzünü ifade etmektedir. Bu profilde güçlü yansıma alınamayan bölümlerde geniş çözünmelerin bulunmadığı yorumlanmaktadır. A ile ifade edilen bölgenin anakaya içerisindeki çözünme ve çökmeleri ifade ettiği belirtilmektedir. B ile gösterilen yansımanın ise kireçtaşı parçası yada büyük bir kaya parçasını göstermektedir. Araştırmanın devamında elektromanyetik indüksiyon yöntemi de uygulanmıştır.

4. KONYA-ILGIN BÖLGESİNDE YER RADARI ARAŞTIRMALARI

4.1 Araştırma Bölgesinin Jeolojisi

Bölgenin 1:25.000 ölçekli olarak hazırlanan jeoloji haritası Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu haritadan ve de Şekil 4.3’te gösterilen genelleştirilmiş dikine kesitinden de anlaşılacağı üzere bölgede mermer ve metamorfik şistlerden oluşan temel üzerinde yaklaşık 800 metre kalınlığında kireçtaşı, marn ve kırıntılardan oluşan bir Neojen örtü bulunmaktadır. En üstte ise Kuvaterner yaşlı alüvyon yine açısal uyumsuz olarak yer almaktadır (Özdemir ve İnce, 2005).

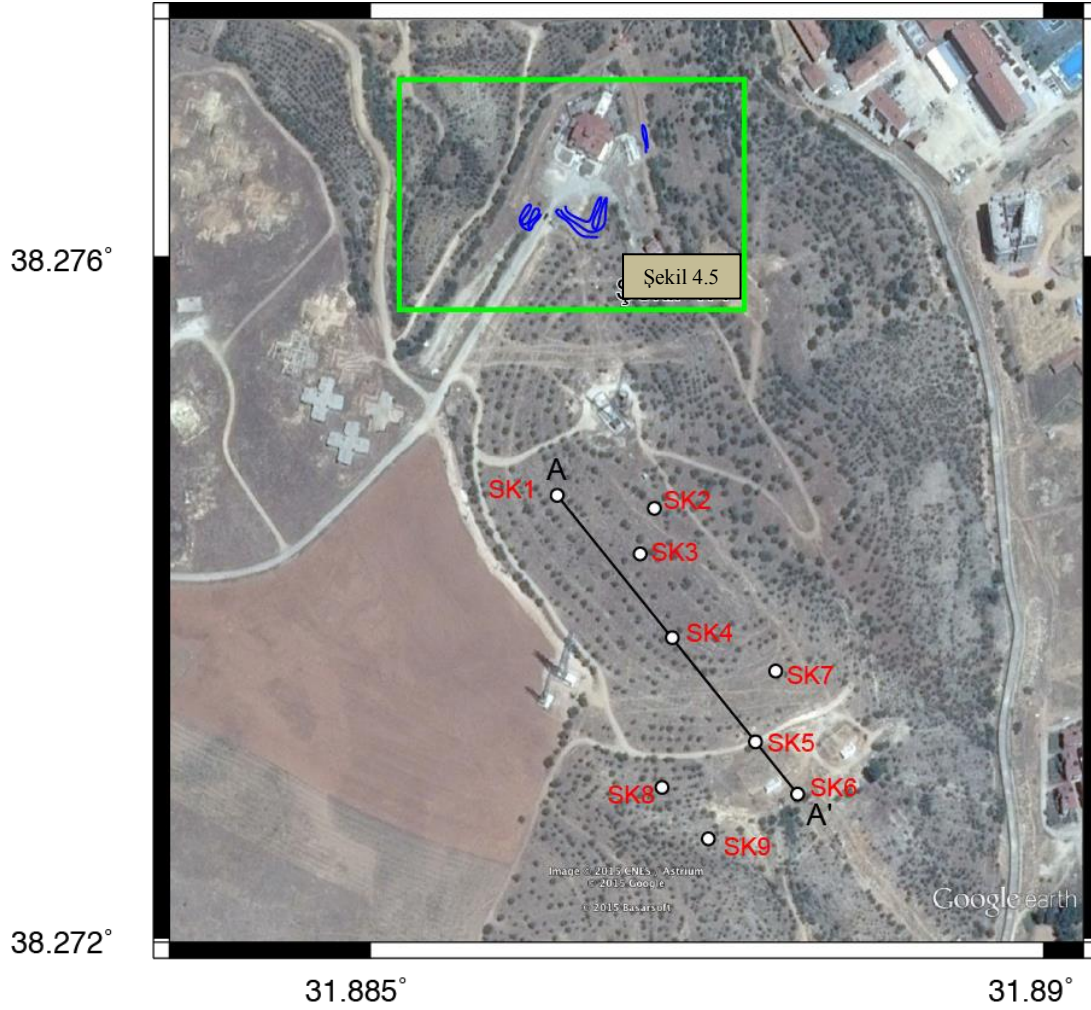


Şekil 4.1: Ilgın bölgesinin jeolojisi (Özdemir ve İnce, 2005’ten değiştirilerek).

Şekil 4.2’de gösterilen çalışma alanının yaklaşık yeri kırmızı kutu ile gösterilmektedir.

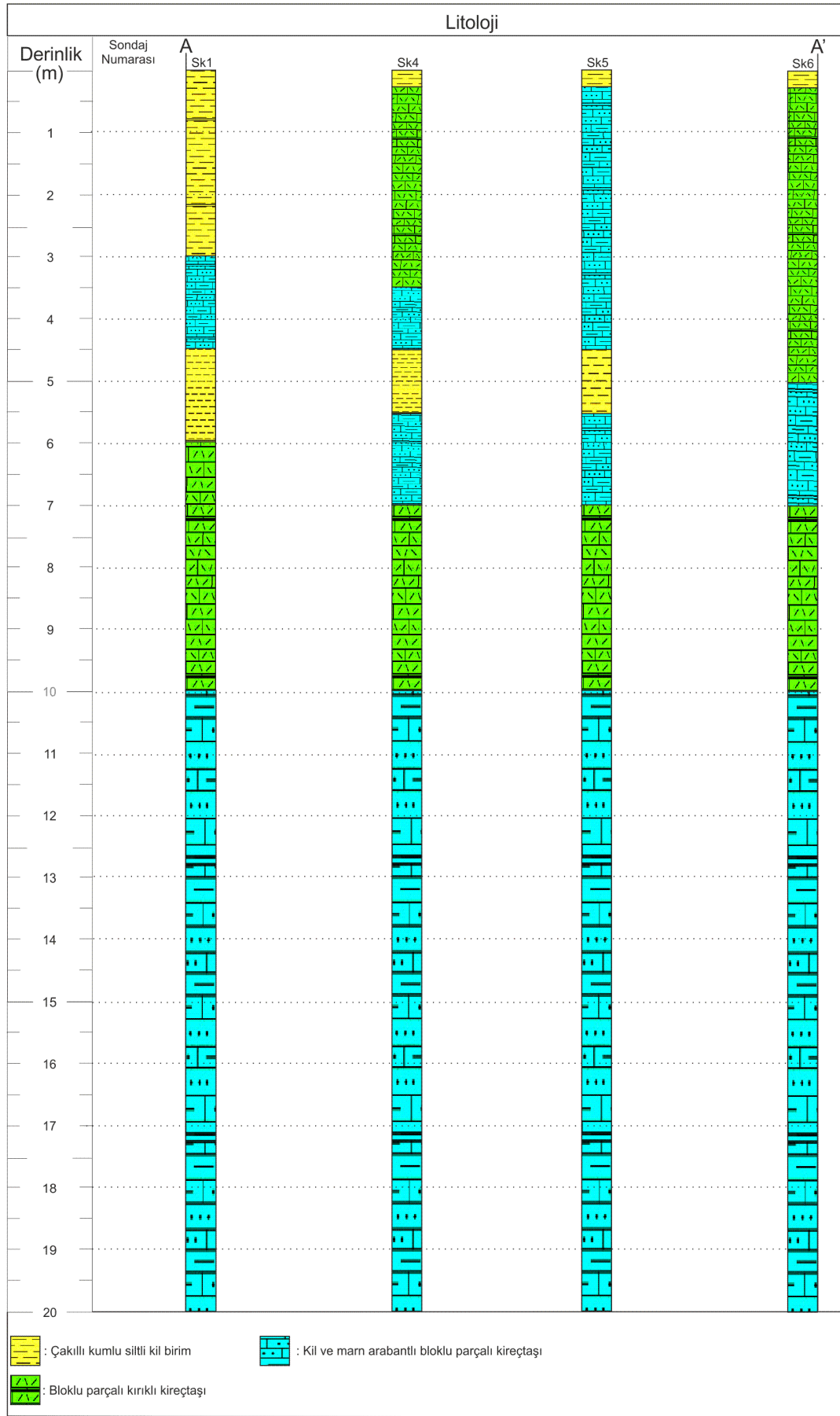
Çalışma alanının yaklaşık 100 metre güney doğusunda sondaj çalışması kapsamında 9 adet olan sondaj bulunmaktadır. SK1, SK4, SK5 ve SK6 kullanılarak A-A’ hattının sondaj korelasyonu elde edilmiştir (Şekil 4.4). Diğer kuyu verileri EKLER kısmında verilmiştir. Her ne kadar jeoloji haritasında yer radarı çalışmalarının

yapıldığı alan mermer olarak gözükse de sondaj çalışmaları litolojinin kireçtaşı olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.4'teki sondaj verileri incelendiğinde genellikle 30 cm derinliğe kadar ilerleyen çakıllı kumlu siltli kil birim hemen altında bloklu, parçalı ve kırıklı kireçtaşı görülebilmektedir. Kireçtaşı tabakasında yer yer kil ve marn ara bantları görülmektedir. Ayrıca bazı sondajlarda yaklaşık 4 metre derinlikte çakıllı kumlu siltli kil birim tekrar görülmektedir. Tez kapsamında söz konusu kireçtaşının içerisindeki kırıklar, çatlaklar, kanallar ve boşluklar incelenmektedir. Dolayısıyla yaklaşık 30 cm derinlikten itibaren kırıklı ve parçalı düzensizliklerin tespit edilmesi beklenmektedir. Buna ek olarak bölgede kil içeriğinin fazla olduğu lokasyonlarda iletkenliğin artarak yer radarı sinyalinin soğurulmasına sebep olması beklenmektedir. Kilin bahsedilen özellikleri sebebiyle araştırma derinliğini de olumsuz yönde etkilemesi olasıdır.

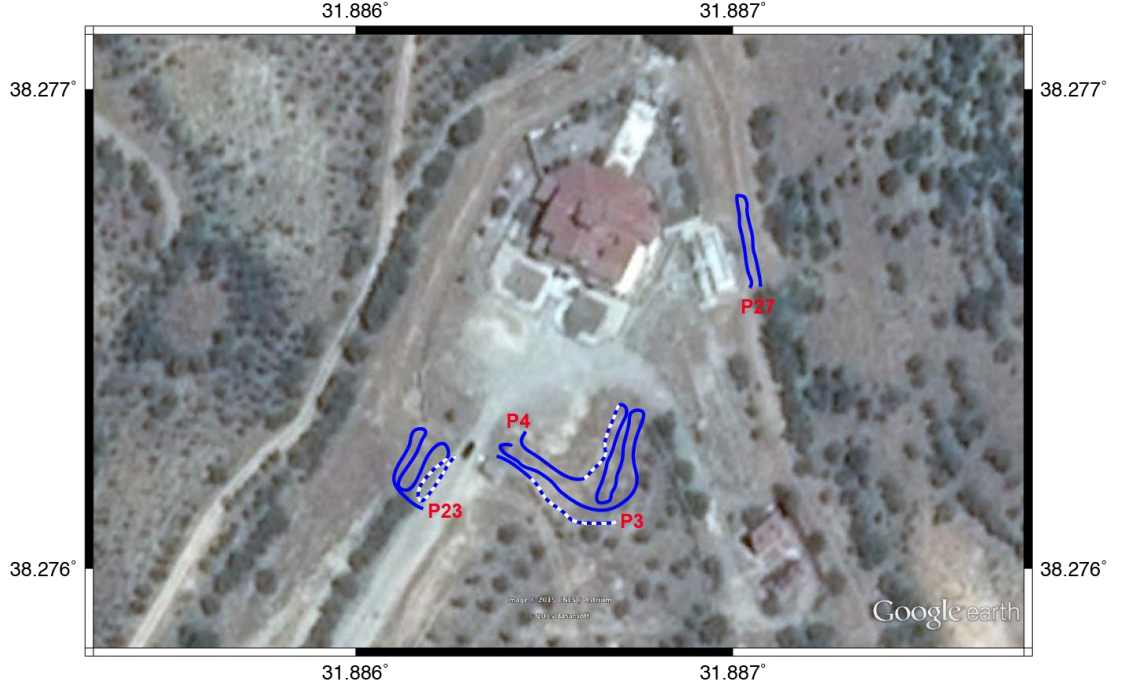
[illegible]



Şekil 4.4: A-A' hattının sondaj korelasyonu.

4.2 Yer Radarı Araştırma Sonuçları

Bu çalışmada yer radarı ölçümleri 100 MHz merkez frekanslı antenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında profillerin mümkün olduğunca paralel hatlar halinde olmasına çalışılmıştır. Böylece devam eden boşluk yapılarının izlenebilmesi hedeflenmiştir. Araştırma için toplam 32 profil alınmıştır. Tez kapsamında incelenen profillerin uzunlukları Çizelge 4.1’de ve yerleri Şekil 4.5’te görülebilmektedir.



Şekil 4.5: Tez kapsamında incelenen profiller. Modellemede kullanılan kısımlar kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Araştırma için alınan profillerin uzunlukları.

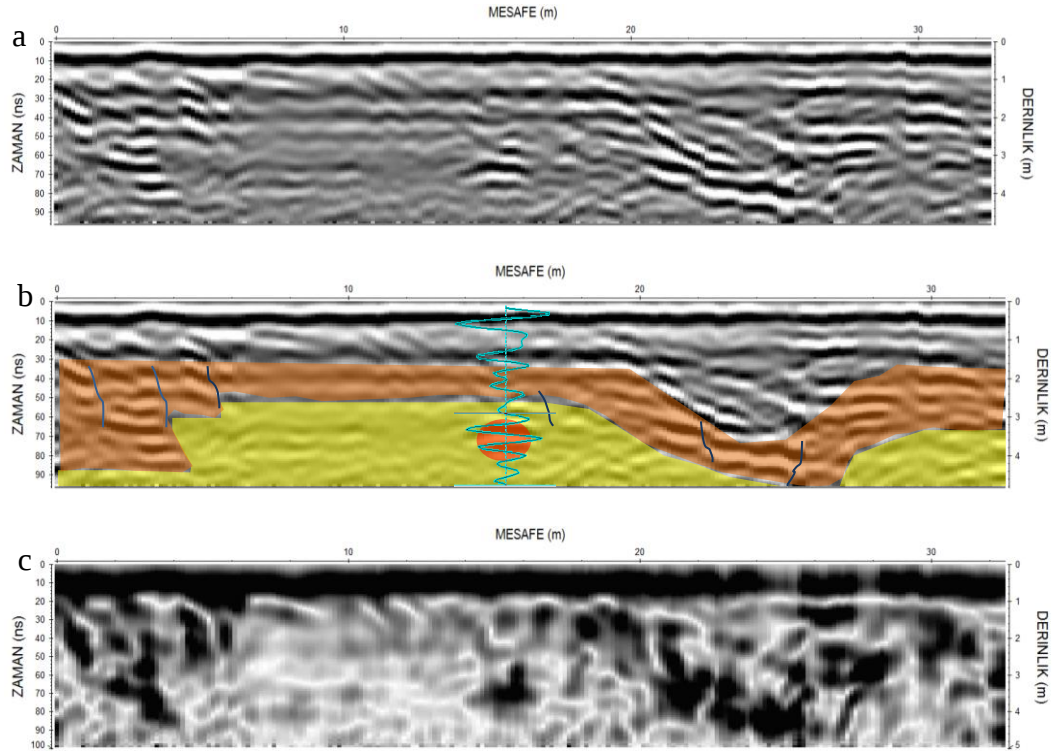
PROFİL NUMARASI	MESAFE(m)
P_0003	32,48
P_0004	144,58
P_0023	80,37
P_0027	62,13

Yorumlama sırasında topoğrafyanın düz olmaması, yoğun kil içeriği gibi sebeplerle bazı profillerde veri kalitesinin düşük olduğu görülmüştür. Çizelgede görülmekte olan profiller modelleme açısından daha uygun anomaliler içermektedir. Ayrıca ölçüm alanında bulunan farklı zemin yapıları ve daha önceden aktif olarak kullanılan bir yapı olduğundan, yalnızca belirli profiller değerlendirmeye alınarak bu gibi etkilerden kaçınılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.5’te görülen profiller öncelikle iki boyutlu olarak incelenmiş, yapılan yorumlar modelleme çalışmalarıyla

desteklenmiştir. Zaman penceresi 600 nanosaniye seçilmiştir ancak nüfuz derinliği düşük olduğundan tüm veriler 110 nanosaniye seviyesinden kesilmiştir. İzler 512 örnekten oluşmaktadır. Bir diğer deyişle örnekleme aralığı 1.6 nanosaniyedir. İstasyon aralığı olarak 14 cm seçilmiştir. Anten aralığı sabit ve 50 cm'dir.

Şekil 4.6'da 3 numaralı profilin veri işlem uygulanmış hali görülebilmektedir. 0-10 nanosaniye aralığında görülen kuvvetli yansıma alıcı antene doğrudan gelen dalgadır ve gürültüdür. Bu tabaka arka plan çıkarma filtresiyle giderilebilmektedir. Ancak bu filtre yatay tabakaların da bastırılmasına sebep olduğundan bazı profillerde uygulanmamıştır. Doğrudan gelen dalgaın ardından yaklaşık 1 metre derinlikte turuncuyla işaretlenen ve güçlü yansımalar veren bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka 20-30 metre mesafede 3.5 metre derinliğe doğru ilerlemekte ve ardından tekrar 1 metre seviyelerinde görülebilmektedir. Sondaj verileri incelendiğinde bu tabakanın kırıklı, çatlaklı kireçtaşı olduğu düşünülmektedir. 20 metre mesafesinde başlayan oluşumun, kireçtaşında oluşan çözünmeye bağlı bir çökme olduğu düşünülmektedir. Bu tabakanın içerisindeki kırık olduğu düşünülen bölümler de işaretlenmiştir.

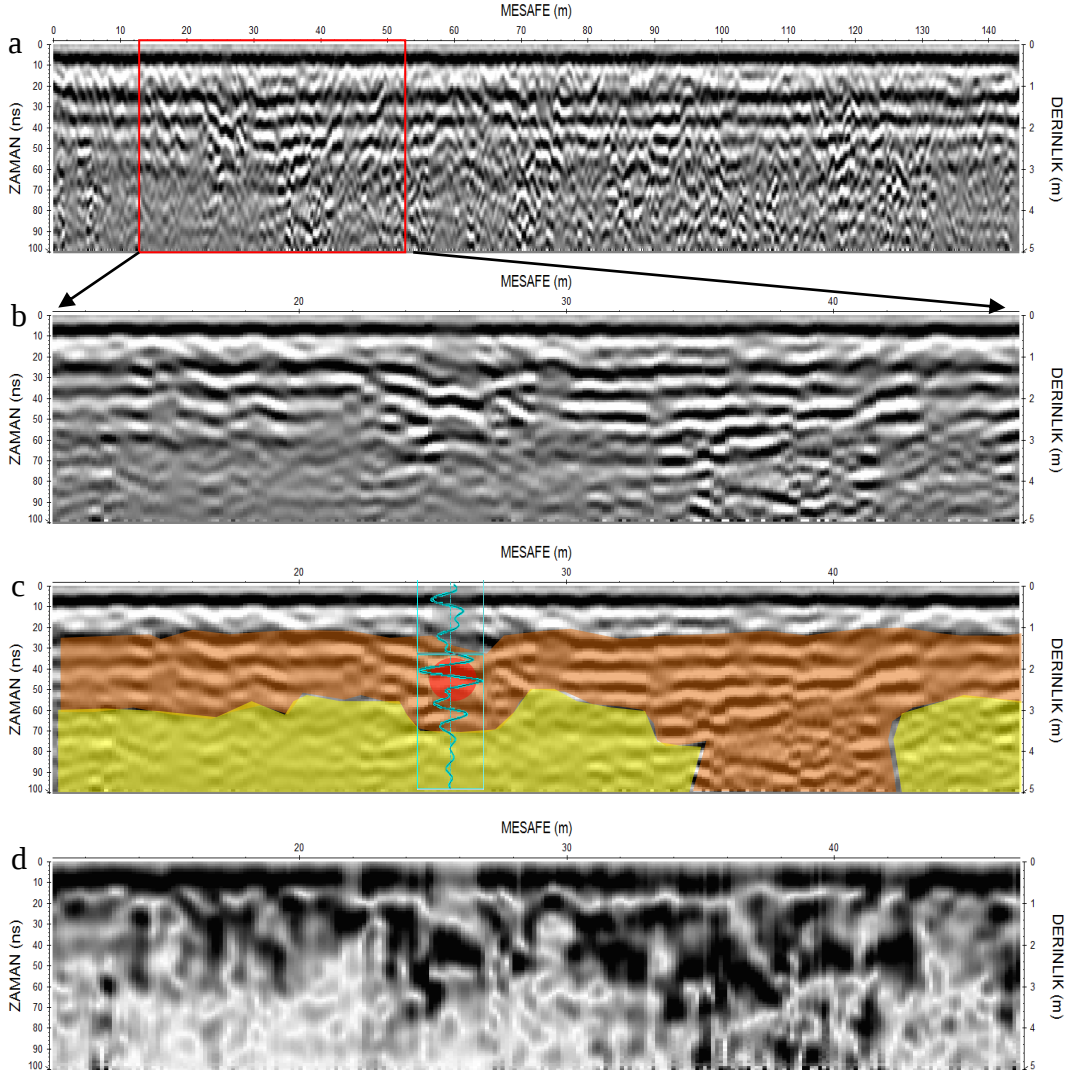
Ayrıca içi hava dolu bir boşluk olduğu düşünülen yaklaşık 15 metre mesafede ve 3.5 metre derinlikte hiperbolik bir yansıma bulunmaktadır. Şekil 4.6 b'de bu anomalinin bulunduğu bir izin görünümü de verilmiştir. Genlikler sağ tarafta olduğunda pozitif, sol tarafta olduğunda negatiftir. Ham veride doğrudan gelen dalga polarizasyonunun pozitif-negatif-pozitif (radargram renk skalasında beyaz-siyah-beyaz) olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu anomalinin de aynı polarizasyona yani normal polarizasyona sahip olduğu söylenebilir. Bu iz ve ham verideki doğrudan gelen dalga polarizasyonu kullanılarak anomaliyi oluşturan yapının yer içerisinde daha düşük dielektrik katsayısına sahip olduğu söylenebilir. Havanın dielektrik katsayısının $\epsilon_r = 1$ ve kireçtaşı dielektrik katsayısının $\epsilon_r \cong 4 - 8$ olduğu düşünülerek bu yaklaşım doğrulanabilir. Dolayısıyla kireçtaşı-boşluk arayüzeyi normal polarizasyona sebep olan pozitif bir yansıma katsayısı vermektedir. Yorumlanmış radargramda sarı ile gösterilen bölümden kil içeriği fazla olması sebebiyle yada homojen bir tabaka olması sebebiyle güçlü yansımalar alınamamıştır. Sondaj verileriyle birlikte düşünüldüğünde bu bölümde kil içeriğinin fazla olması olasılığı daha yüksektir.



Şekil 4.6: Araştırma alanındaki 3 numaralı profil. a) İşlenmiş veri, b) yorumlanmış veri, c) zarflanmış veri.

Şekil 4.7’de 4 numaralı profilin veri işlem uygulanmış hali görülebilmektedir. Doğrudan gelen dalga 3 numaralı profilde olduğu gibi 10 nanosaniye civarında yer almaktadır. Yine daha önce de değinildiği gibi 1 metrede bulunmakta olan kireçtaşı turuncuyla işaretlenmiştir. Zarflanmış veri incelendiğinde 30-40 metre mesafe aralığında kırıklı kireçtaşının derinlere doğru ilerleyişi görülebilmektedir. Bu aralıkta yansımaların özellikle daha derinlerde süreksizlikler şeklinde olduğu dikkat çekmektedir. Bu tip yansımaların kireçtaşı içerisindeki kırıklı yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Profilin yaklaşık 25. metresinde ve yaklaşık 2 metre derinlikte hiperbolik bir anomali bulunmaktadır.

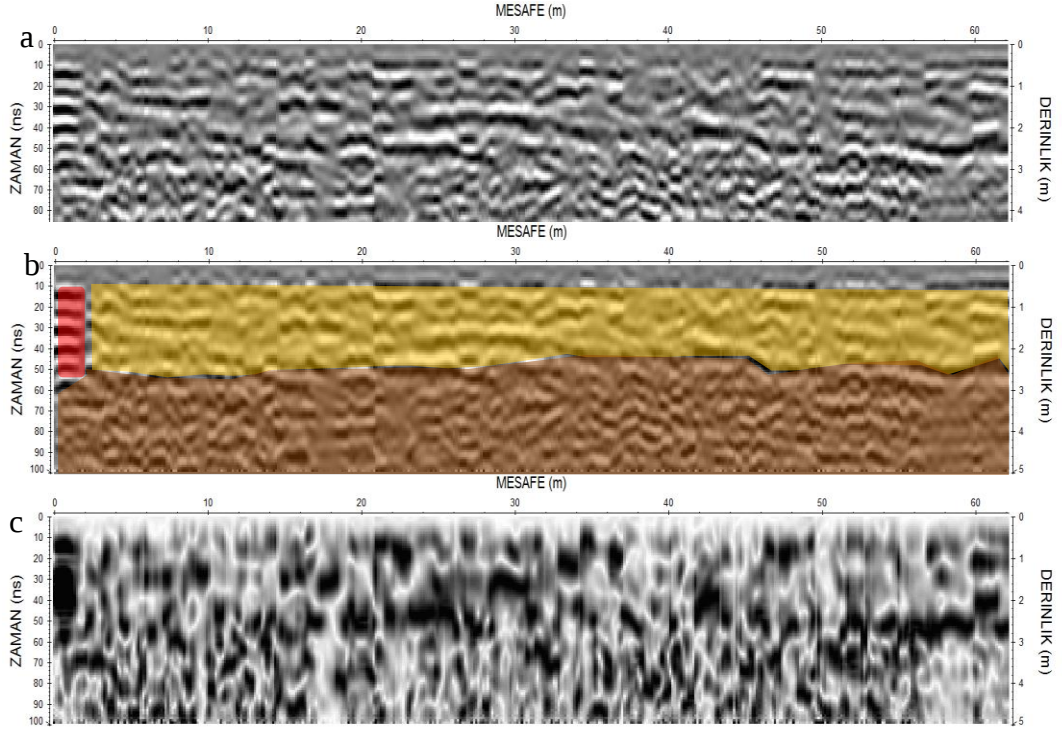
Anomalinin bir önceki profilde söz edilen polarizasyon analizi yapılarak normal (pozitif – negatif - pozitif) polarizasyona sahip olduğu belirlenmiştir. 4 numaralı profilde boşluk olduğu düşünülen yapının alt sınırı da görüntülenebilmiştir. Bu profilde radar sinyalinin kireçtaşından içi hava dolu bir boşluğa ilerlerken normal polarizasyonda yansımasının yanı sıra boşluğun alt sınırından tekrar kireçtaşına geçiş arayüzeyinde ters (negatif - pozitif - negatif) polarizasyonda yansıması da görülebilmektedir. Dolayısıyla boşluk - kireçtaşı arayüzeyi ters polarizasyona sebep olan negatif bir yansıma katsayısı vermektedir.



Şekil 4.7: a) Araştırma alanındaki 4 numaralı profil. b)İncelenen aralık. c)Yorumlanmış veri. d)Zarflanmış veri.

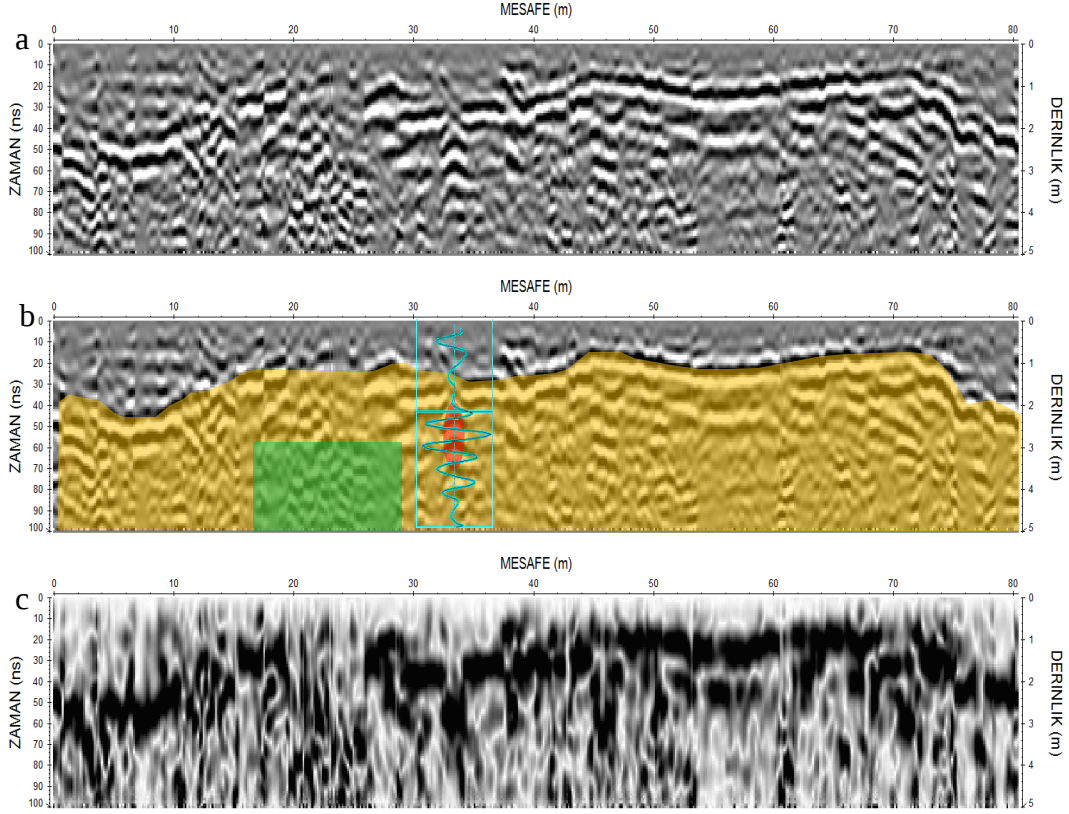
Yorumlanmış radargramda sarı ile gösterilen bölümden kil içeriği fazla olması sebebiyle yada homojen bir tabaka olması sebebiyle güçlü yansımalar alınamamıştır.

Şekil 4.8’de 27 numaralı profilin veri işlem uygulanmış hali görülebilmektedir. Önceki iki profilin aksine, arka plan çıkarma işlemi uygulanmıştır. Bu sayede doğrudan gelen dalganın veriden atılması sağlanmıştır. Yaklaşık 50 cm – 2 m derinliklerinde görece olarak az kırıklı kireçtaşı görülebilmektedir. Zarflanmış veri incelendiğinde bu tabakanın hemen altında daha yoğun süreksizliklere sahip bir tabaka görülebilmektedir. Kırıklı tabaka içerisinde boşluklar net olarak görülememektedir. Bunun sebebinin boşluk ve kırık yapılarının anten çözünürlüğünden daha küçük olması olduğu düşünülmektedir. Ayrıca profilin başlangıcında yer yüzeyinden gelen kuvvetli bir yansıma görülebilmektedir.



Şekil 4.8: a) Araştırma alanındaki 27 numaralı profil. b) Yorumlanmış veri. c) Zarflanmış veri.

Şekil 4.9’da 23 numaralı profilin veri işlem uygulanmış hali görülebilmektedir. Doğrudan gelen yansıma arka plan çıkarma işlemi kullanılarak bastırılmıştır. Yaklaşık 1 metre derinlikte bulunmakta olan kireçtaşı sarıyla işaretlenmiştir. Bu tabakanın 0-10 metre mesafe aralığında yaklaşık 1 metre çöktüğü gözlenmiştir. Diğer profillerde görülen boşluk yapılarının aksine buradaki boşluk yapısı ters (negatif – pozitif – negatif) polariteye sahiptir. Bu da boşluk içerisindeki dielektrik katsayısının ortamdan daha yüksek olduğunu belirtmektedir. Dielektrik katsayısı yüksek olan malzemeler göz önüne alındığında boşluğun içerisinde kil yada su bulunduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu yapının metal bir boru olma ihtimali de bulunmaktadır. Fakat diğer profiller incelendiğinde bu anomali ile ilişkili sürekli bir yapıya rastlanmadığından boşluk olduğu yorumu yapılmıştır. Boşluk yapısı kırmızı ile işaretlenmiştir. Ek olarak yoğun çözünmeye uğrayan bölüm yorumlanmış veride yeşil renk ile ifade edilmiştir. Zarflanmış veri incelendiğinde de çökmeye uğrayan tabakanın sürekliliği görülebilmektedir. Diğer yandan çözünmeye uğrayan alanın yoğun süreksizlikler içerdiği dikkat çekmektedir. Boşluk anomalisi de zarflanmış veride net olarak görülebilmektedir.

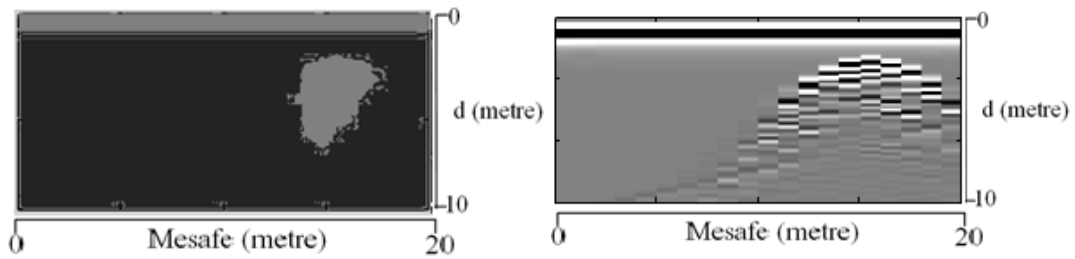


Şekil 4.9: a) Araştırma alanındaki 23 numaralı profil. b) Yorumlanmış veri. c) Zarflanmış veri.

4.3 Modelleme Çalışmaları

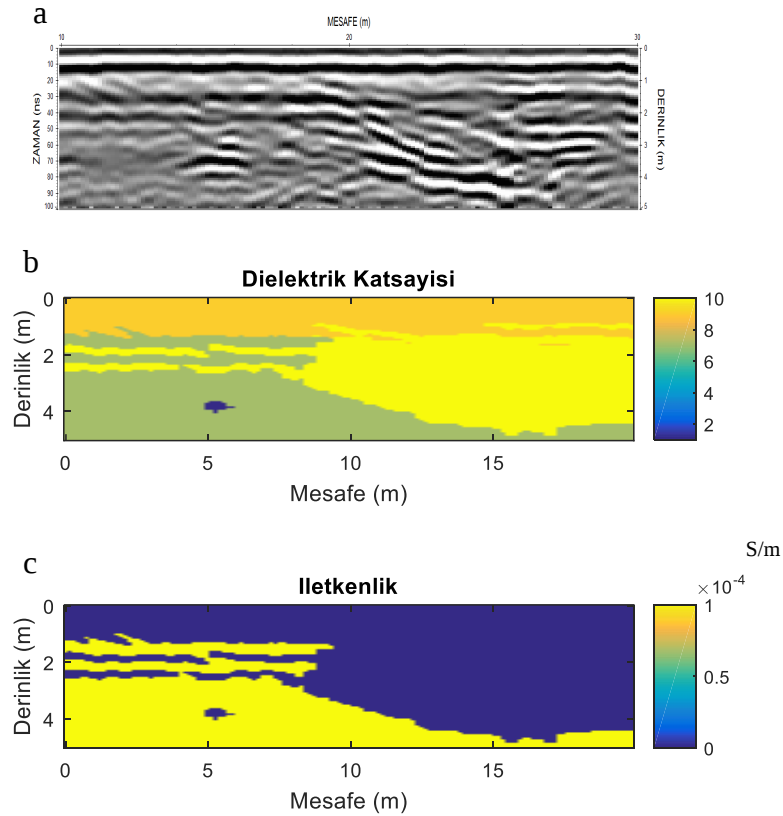
İşlenmiş verilere yapılan yorumların ardından bu verilerdeki yansımaların daha iyi anlaşılabilmesi için Irving ve Knight (2006) makalesinde önerilen yöntemle modelleme yoluna gidilmiştir.

Şekil 4.10'da bu yöntemle daha önce yapılmış bir boşluk modellemesi görülebilmektedir. Boşluğun dielektrik katsayısı olan 1 ve iletkenlik değeri olan 0 kullanıldığında şekilde görülen radargram elde edilmiştir. Ortam ise 9 dielektrik katsayısına ve 0,001 S/m iletkenlik değerine sahiptir.



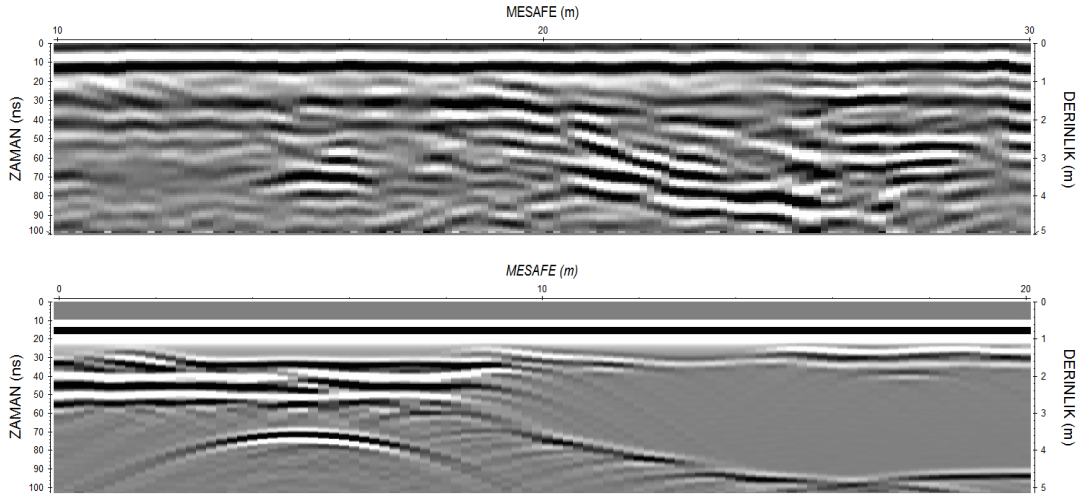
Şekil 4.10: Yer radarı boşluk parametre modellemesi (solda) ve sonuç radargram (sağda) (Tuzer, 2012).

Bu tez kapsamında da 3, 4 ve 23 numaralı profillere modelleme çalışması uygulanmıştır. Böylece teorik olarak yansımaların şekillerinin ve polarizasyonlarının araştırılması amaçlanmıştır. Öncelikle 2-3 tabakalı basit anomaliler içeren modeller hesaplanarak daha karmaşık ve yer içerisini en iyi temsil eden modellerin oluşturulmasına çalışılmıştır. Bu bölümde yalnızca sonuç modeller verilecektir. İletkenliğin çok düşük ve sabit kabul edildiği basit modelleme çalışmalarının sonuçları da EKLER bölümünde bulunmaktadır. Modelleme çalışmaları sırasında genellikle dielektrik katsayısındaki değişimler incelenmiştir. Profillerin 20 metrelik kısımları modellenerek hesaplama süresinin azaltılması ve detaylı bir model elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.11’de 3 numaralı profilin 10-30 metre mesafe aralığının modellenmesi görülmektedir.



Şekil 4.11: a) 3 numaralı profilde modellenen aralık, b) model girdisi olarak dielektrik katsayısı, c) model girdisi olarak iletkenlik.

Yorumlanan verideki yapılar dielektrik ve iletkenlik modeli olarak oluşturulmuştur. 4.11’de üst bölümde $\epsilon_r = 9$ olarak seçilen ve düşük iletkenlikli ($\sigma = 0.000001 S/m$) örtü tabakası modellenmiştir. Bu tabakanın altında $\epsilon_r = 7 - 10$ değerlerine sahip ve daha yüksek iletkenliğe sahip ($\sigma = 0.0001 - 0.0002 S/m$) kireçtaşı tabakası modellenmiştir. Hesaplanan model Şekil 4.12’de görülmektedir.

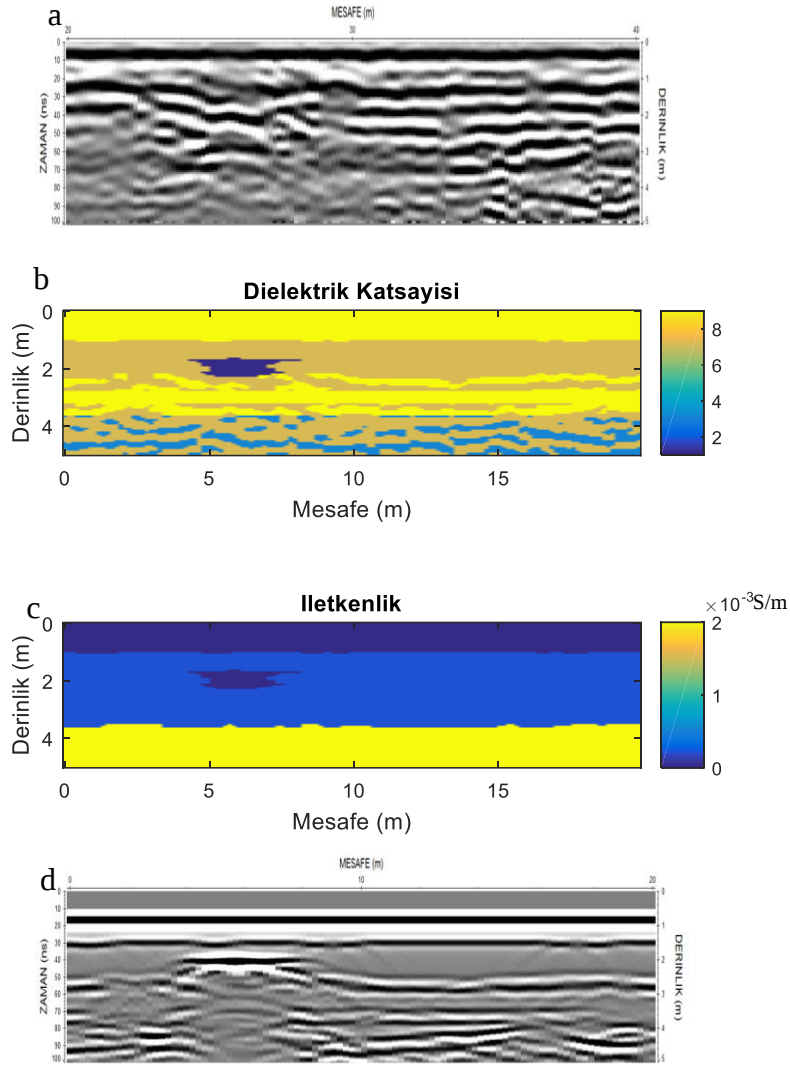


Şekil 4.12: 3. profilin modellenen bölümü (üstte) ve model sonucu radargram (altta).

Çökme olan bölüm radargram ile ilişkilendirilerek tabakalar konumlandırılmıştır. Ayrıca boşluk olduğu düşünülen bölüme $\epsilon_r = 1$ dielektrik katsayısı değeri verilmiştir.

Hesaplanan model incelendiğinde ölçülen radargramın yaklaşık 25. metresinde oluşan çökme yapısı net olarak görülebilmektedir. Ayrıca yüksek atenuasyon değerleri ve kireçtaşı içerisindeki süreksizlikler başarıyla modellenmiştir. Boşluk yapısı da radargramda hiperbol olarak görülebilmektedir. Ancak ölçülen radargramda hiperbol kollarının bastırılmış olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak yer içerisindeki süreksizlikler ve veri işlem aşamaları gösterilmektedir.

Şekil 4.13'te 4 numaralı profilin 20-40 metre mesafe aralığının modellenmesi görülmektedir. Yorumlanan verideki yapılar dielektrik ve iletkenlik modeli olarak oluşturulmuştur. 4.13'te üst bölümde $\epsilon_r = 9$ olarak seçilen ve düşük iletkenlikli ($\sigma = 0.000001S/m$) örtü tabakası modellenmiştir. Bu tabakanın altında $\epsilon_r = 7$ değerine sahip ve daha yüksek iletkenliğe sahip ($\sigma = 0.0002S/m$) kireçtaşı tabakası modellenmiştir. İçerisinde hava bulunan boşluk olduğu düşünülen bölüm $\epsilon_r = 1$ ve $\sigma = 0 S/m$ seçilerek radargram ile ilişkilendirilerek konumlandırılmıştır. Ayrıca derinlerde kireçtaşının düzensiz karaktere sahip olduğu düşünüldüğünden bu bölüme daha $\epsilon_r = 6$ ve $\epsilon_r = 3$ dielektrik katsayısına sahip düzensizlikler yerleştirilmiştir. En alttaki tabakanın su içeriği sebebiyle daha iletken olduğu düşünülerek ($\sigma = 0.002S/m$) değeri belirlenmiştir.

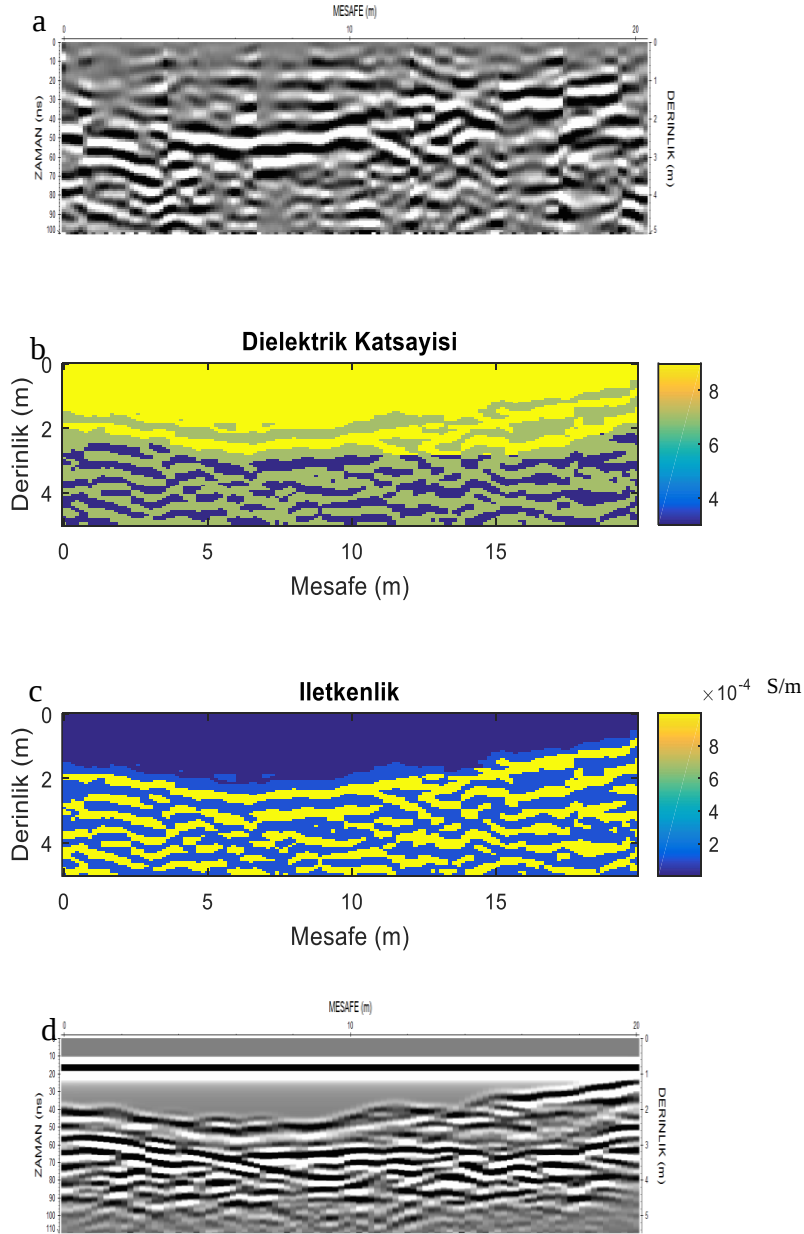


Şekil 4.13: a) 4 numaralı profilde modellenen aralık, b) model girdisi olarak dielektrik katsayısı, c) model girdisi olarak iletkenlik, d) sonuç radargram.

Hesaplanan model incelendiğinde ölçülen radargramın yaklaşık 25. metresinde bulunan boşluk yapısı net olarak görülebilmektedir. Ayrıca modelin üst kısmında bulunan doğrudan gelen dalganın ve boşluktan yansıyan dalganın aynı polarizasyona sahip olması sebebiyle yapılan polarizasyon analizinin doğru olduğu hesaplanan radargramda da görülebilmektedir. Ek olarak derinlerde bulunan süreksizlikler de başarıyla modellenebilmiştir.

Şekil 4.14'te 23 numaralı profilin 0-20 metre mesafe aralığının modellenmesi görülmektedir. 4.14'te üst bölümde $\epsilon_r = 9$ olarak seçilen ve düşük iletkenlikli örtü tabakası modellenmiştir. Bu tabakanın altında $\epsilon_r = 7$ değerine sahip ve daha yüksek iletkenliğe sahip kireçtaşı tabakası modellenmiştir. Kireçtaşı üzerinde çökmenin olduğu bölüm radargram ile ilişkilendirilerek konumlandırılmıştır. Ayrıca derinlerde kireçtaşının düzensiz karaktere sahip olduğu düşünüldüğünden bu bölüme

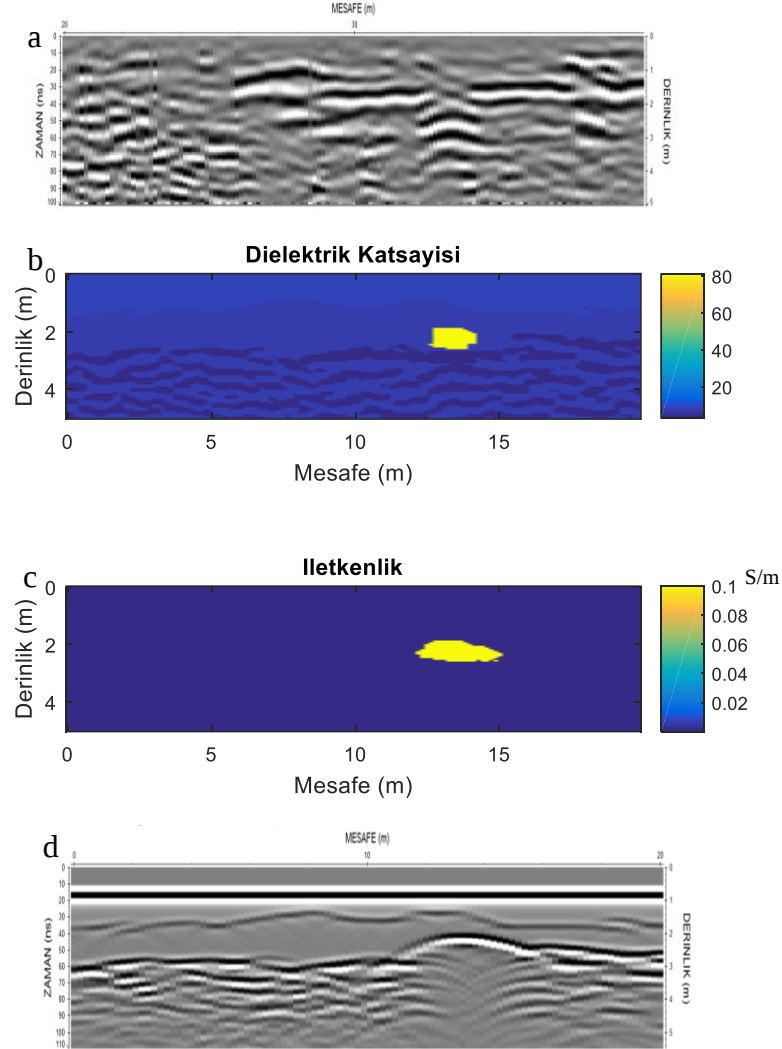
daha $\varepsilon_r = 6$ ve $\varepsilon_r = 3$ dielektrik katsayısına sahip düzensizlikler yerleştirilmiştir. Hesaplanan model incelendiğinde çökme yapısı net olarak görülebilmektedir. Ölçülen radargram ve model sonucunda kireçtaşı tabakasının yaklaşık 40 nanosaniyede olması modelde hesaplanan hızların doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 4.14: a) 23 numaralı profilde modellenen aralık, b) model girdisi olarak dielektrik katsayısı, c) model girdisi olarak iletkenlik, d) sonuç radargram.

Şekil 4.15'te 23 numaralı profilin 20-40 metre mesafe aralığının modellenmesi görülmektedir. Yorumlanan verideki yapılar dielektrik ve iletkenlik modeli olarak oluşturulmuştur. Şekil 4.15'te üst bölümde $\varepsilon_r = 9$ olarak seçilen ve düşük iletkenlikli örtü tabakası modellenmiştir. Bu tabakanın altında $\varepsilon_r = 7$ değerine sahip ve daha yüksek iletkenliğe sahip kireçtaşı tabakası modellenmiştir. İçi su dolu olduğu

düşünülen yapı konumlandırılarak $\epsilon_r = 81$ ve $\sigma = 0.1 S/m$ değeri verilmiştir. Boşluk iletkenlik matrisinde daha geniş tutularak nemli bir bölge yaratılmıştır. Ayrıca derinlerde kireçtaşının düzensiz karaktere sahip olduğu düşünüldüğünden bu bölüme $\epsilon_r = 3$ dielektrik katsayısına sahip düzensizlikler yerleştirilmiştir.



Şekil 4.15: a) 23 numaralı profile modellenen aralık, b) model girdisi olarak dielektrik katsayısı, c) model girdisi olarak iletkenlik, d) sonuç radargram.

Model sonucu oluşan radargram incelendiğinde içi su dolu boşluk yapısı net olarak görülebilmektedir. Hava boşluğu için yapılan polarizasyon analizi bu anomaliye de uygulandığında ters (negatif-pozitif-negatif) polarizasyon sonucuna ulaşılabilir. Polarizasyonun terslenmesi sonucu ölçüm alanındaki bu noktada anomaliye sebep olan yapının ortamdan daha yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu söylenebilir. Bu durumda $\epsilon_r = 81$ değeri uygun bir değerdir.

Modelleme çalışmaları teorik yansımaların ne şekilde olacağı ile ilgili bilgi vermektedir. Bu bölümde yapılan modellemeler sonucunda yer içerisinde yüksek

oranda düzensizlik bulunduğundan modelleme yapılmasının oldukça zor olduğu anlaşılmıştır. Boşluk şekillerinin düzensiz olması sebebiyle ölçülen ve hesaplanan veri arasında bir takım farklar bulunmaktadır.

Bununla birlikte radar sinyalinin noktasal hedeflerden yansıdığına hiperbolik yansımalar olarak kaydedildiği görülmektedir. Bu durum modelleme çalışmalarında sorun yaratmaktadır. Bunun sebebi yer altındaki dielektrik katsayısı ve iletkenlik gibi parametre geçişlerinin çok daha hassas olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak modelleme çalışmasında yalnızca belirli sayıda veri matrisi oluşturulabilmektedir. Veri matrisleri arasındaki farklar da nokta anomaliler olarak algılanarak hiperboller şeklinde yansımaktadır. Özellikle çökme modellemelerinde söz konusu hiperboller gürültüye sebep olmuştur. Bu tip yansımaların bir kısmından model radargramlara ortalama değer filtresi uygulanarak kurtulunabilmektedir.

İkinci bir çıkarım olarak ise, eğer hedef malzeme ortamdan daha yüksek bir dielektrik katsayısına sahipse yansıma negatif polariteye sahip olmakta, daha düşük bir dielektrik katsayısına sahipse pozitif polariteye sahip olmaktadır. Bu analiz iki boyutlu radargramların yorumlanması sırasında yapılan yorumların doğruluğunu göstermektedir. İçi hava dolu olan boşluğun üst sınırı normal polarizasyon verirken, alt sınırı ters polarizasyon vermektedir. İkinci bir durumda ise, içi su dolu olan boşluktan yansıyan dalga ters polarizasyon olarak görüntülenmektedir.

Üçüncü çıkarım ise özellikle karstik alanlarda hız tespitinin zor olduğudur. Yer içerisindeki su ve kil içeriği bilinmediğinden, dielektrik katsayısı benzeşimi uygun olarak yapılsa dahi, iletkenlik parametresindeki belirsizlikler sebebiyle hız tayini zorlaşmaktadır.

Modele dahil edilen dielektrik katsayılarının birbirine yakın seçilmesi programlama süresini kısaltmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı jeolojik ve mühendislik yapıları için önemli bir araştırma konusu olan karstik yapıların bulunması, yerlerinin belirlenmesi, karakteristik özelliklerinin anlaşılabilmesinde yüksek çözünürlüklü ve uygulaması kolay olan yer radarı yönteminin ölçüm tasarımı, veri işlem aşaması ve yorumlanması için uygun yöntemler bulunarak modellenmesidir. Bu amaçla ağırlıklı olarak karstik yapıların yaygın olduğu Konya Ilgın bölgesi yer radarı çalışmaları için seçilmiştir. Seçilen alan üzerine bir mühendislik yapısının inşa edilebileceği potansiyel bir alandır.

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesinde uygulanacak filtre operasyonları sırasında veri işlem sırasının sonuç radargramı oldukça değiştirebileceği gözlemlenmiştir. Uygulanan veri işlem aşaması kullanılırken sırasına göre ilgilenilen anomalileri bastırabilmektedir. Uygun veri işlem sırasının araştırılan derinlik, obje ve saha şartları göz önüne alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Tez kapsamında alınan veri seti için statik düzeltme, zaman ekseninde ortalama çıkarma, genlik kazanımı, bant geçiren filtre, ortalama değer filtresi, arka plan gürültüsü çıkarma ve zarf işlemi filtre sırası en iyi sonuçları vermiştir.

Uygun veri işlem sürecinin ardından oluşan radargramlar incelenerek boşluk anomalilerinin karakteristiklerinin anlaşılması ve boşluk olabilecek alanların belirlenmesi sağlanmıştır. Bu aşamada bölgenin jeolojik yapısı ve sondaj verileri de göz önüne alınarak 0.3 metre ve daha derinde bulunan kireçtaşlarında boşluk, kırık, çökme gibi yapılar olabileceği düşünülmüştür. Bu doğrultuda 3, 4, 23 ve 27 numaralı profillerde karstik yapılar radargramlar üzerinde işaretlenerek okuyucuya verilmiştir. Yaklaşık 1 metre seviyesinde net olarak görülebilen kireçtaşı yansıması işaretlenmiştir. Kireçtaşı tabakasında 3 ve 23 numaralı profillerde çökme olarak yorumlanan bölümler işaretlenmiştir. Ayrıca polarizasyon analizleri yapılarak 3 ve 4 numaralı profillerde içi hava dolu boşluklar olduğu yorumu yapılmıştır. Son olarak 23 numaralı profilde içi su dolu bir boşluk olduğu yorumlanmıştır. Tüm bu profillerde yaklaşık 3 metre seviyesinden itibaren yoğun olarak süreksizlikler görülmüştür. Bu süreksizliklerin kireçtaşındaki çözülme ile ilgili olduğu yorumu

yapılmıştır. Birçok profilde ise 3 metre seviyesinin altındaki yansımalar sönümlenmiştir. Bunun sebebi olarak yüksek kil içeriği gösterilmiştir.

Karstik yapıların işaretlenmesinin ardından iki boyutlu modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu aşamada modellemeye en uygun anomalilerin 3, 4 ve 23 numaralı profillerde yer aldığı görülmüştür. Modeller oluşturulurken öncelikle basit modeller oluşturulmuş, ardından daha karmaşık yapıların modellemesi yapılmıştır. 3 numaralı profil için hesaplanan model incelendiğinde arazide ölçülen radargramın yaklaşık 25. metresinde oluşan çökme yapısı net olarak görülebilmektedir. 4 numaralı profil için hesaplanan model incelendiğinde arazide ölçülen radargramın yaklaşık 25. metresinde bulunan boşluk yapısı dikkat çekmektedir. Radargram ve modeldeki polarizasyonlar karşılaştırılarak empedans değerlerinin doğru modellendiği ve normal polarizasyona sahip anomalinin içi hava dolu bir boşluk olabileceği sonucuna varılmıştır. 23 numaralı profil için iki model hesaplanmıştır. Bunlardan ilki üç numaralı profil için uygulanan modele benzer bir çökme modellemesidir. Modelleme sonucu radargram incelendiğinde çökmenin başarıyla modellendiği görülmektedir. İkinci modelde ise daha önce incelenen boşluk yapısından farklı olarak içi su dolu olduğu düşünülen ters polariteye sahip bir anomali incelenmiştir. Dielektrik katsayısı 81 seçilerek hesaplanan bu radargramda polarizasyon analizinin doğru yorumlandığı görülmektedir. Modellemeler sırasında yer içerisindeki belirsizlikler fazla olduğundan hız tayini zor bir aşama olarak göze çarpmaktadır.

Modellemeler sırasında hiperbol kollarının radargramlardan daha belirgin olduğu görülmektedir. Buna yer içerisindeki yüksek atenüasyonun sebep olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışması yer içerisinde bulunan karstik çöküntü, deformasyon ve boşlukların yer radarı ile tespit edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak literatür araştırmaları ve bu tez göz önüne alındığında yer radarı ile yapılan araştırma sonucunda elde edilen verilerin bölgede diğer jeofizik yöntemlerle de test edilmesi gerekmektedir. Böylece yer içerisindeki anomalilerin farklı parametreleri incelenebilir ve daha sağlıklı yorumlar yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yöntemle karstik yapıların 3 boyutlu yapısı çıkartılabilir. Ancak bunun için sık ve düzenli bir grid oluşturacak şekilde veri toplaması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Annan A.P.** (2003). *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*, Subsurface Imaging Solutions, Sensors & Software Inc., Mississauga, Kanada.
- Barba, L., Blancas, J., Ortiz, A., Ligorred, J.** (2009). GPR Detection of Karst and Archaeological Targets Below the Historical Centre of Merida, Yucatán, Mexico, *Geologia*, Cilt 54(2), s. 27 – 31.
- Bostanudin, Nurul J.** (2013). *Computational Methods for Processing Ground Penetrating Radar Data*, School of Engineering, University of Portsmouth.
- Brooks, J.W.** (2000). *The Detection of Buried Non-Metallic Anti-Personnel Land Mines*, in Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alabama: Huntsville.
- Ceyhan, S., Akıllı, H.** (2009). Karapınar’da Neler Oluyor? *Mavi Gezegen*, Sayı 14.
- Conyers, Lawrence B.** (2012). *Interpreting Ground Penetrating Radar for Archaeology*, Left Coast Press.
- Daniels, J.** (1996). Surface-Penetrating Radar, *Electronics & Communication Engineering Journal*, Cilt 8(4), s. 165-182.
- Daniels, J.** (2004). *Ground Penetrating Radar - 2nd Edition*, The Institution of Electrical Engineers, Londra, Birleşik Krallık.
- Dogan, U., Yılmaz, M.** (2011). Natural and Induced Sinkholes of the Obruk Plateau and Karapınar-Hotamış Plain, Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, Cilt 40, s. 496–508.
- Doolittle, A., Collins, E.** (1998). A Comparison of EM Induction and GPR Methods in Areas of Karst, *Geoderma*, Cilt 85, Nüsha 1, s. 83–102.
- Emre, Ö., Duman.T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F.** (2013). Türkiye Diri Fay Haritası, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30*. Ankara-Türkiye.
- Hüseyinca, M.** (2005). *İlgın (Konya) Kuzeyinin Stratigrafisi ve Yapısal Özellikleri Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hüseyinca, M., Eren, M.** (2007). İlgın (Konya) Kuzeyinin Stratigrafisi ve Tektonik Evrimi, Selçuk Üniversitesi, *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, Cilt 22, s.1-2.
- Irving, J., Knight, R.** (2006). Numerical Modeling of Ground-Penetrating Radar in 2-D using MATLAB, *Computers&Geosciences*, Cilt 32, Nüsha 9, s. 1247–1258.
- Jol, Harry M.** (2009). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier Press.

- Leucci, G.** (2006). Contribution of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to Identify the Cavity and Fractures Under the Main Church in Botrugno (Lecce, Italy), *Journal of Archaeological Science*, Cilt 33, Nüsha 9, s. 1194–1204.
- Maxwell, James C.** (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459–512.
- Özdemir, A., İnce, İ.** (2005). Geology Seismotectonics and Soil Liquefaction Susceptibility of Ilgın (West-Central Part of Turkey) Residential Area, *Engineering Geology* Cilt 77, Nüsha 1–2, s. 169–188.
- Pike, G., Redding, E., Moore, D., Winkler, D., Bladon D.** (2010). *Karst Geomorphology, Hydrology and Management, Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia*, Cilt 1, Ministry of Forests and Range Forest Science Program.
- Sandmeier, K.J.** (2014). *ReflexW Version 7.5 Manual*, Sandmeier Scientific Software: Karlsruhe, Almanya.
- Tapur, T., Bozyiğit, R.** (2009). Konya Ovası ve Çevresinde Yer altı Sularının Obruk Oluşumlarına Etkisi, *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, Sayı 21, s. 138-155.
- Tapur, T., Bozyiğit, R.** (2015). Konya İlinde Güncel Obruk Oluşumları, *Marmara Coğrafya Dergisi* Sayı 31, s. 415-446.
- Tuzer M.** (2012). *Yer Radarı Verilerini İki Boyutlu Modelleme Çalışmaları Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisans Tez Arşivi.
- Url<1>**www.malags.com, Erişim tarihi 12.03.2015.
- Url<2>**www.osmaralmeidajr.files.wordpress.com/2013/01/para-entender-a-terra-cap-13.pdf, Erişim tarihi 12.03.2015.
- Url<3>**www.sandmeier-geo.de/reflexw.html, Sandmeier, K.J., 2009, Sandmeier Scientific Software.
- Url<4>**www.mathworks.com/, MathworksInc., 2014.
- Veni G., Du Chene H., Crawford N., Groves C., Huppert G., Kastning E., Olson R., Wheeler B.** (2001). *Living With Karst a Fragile Foundation*, American Geological Institute (AGI), Environmental Awareness Series, Cilt 4.

EKLER

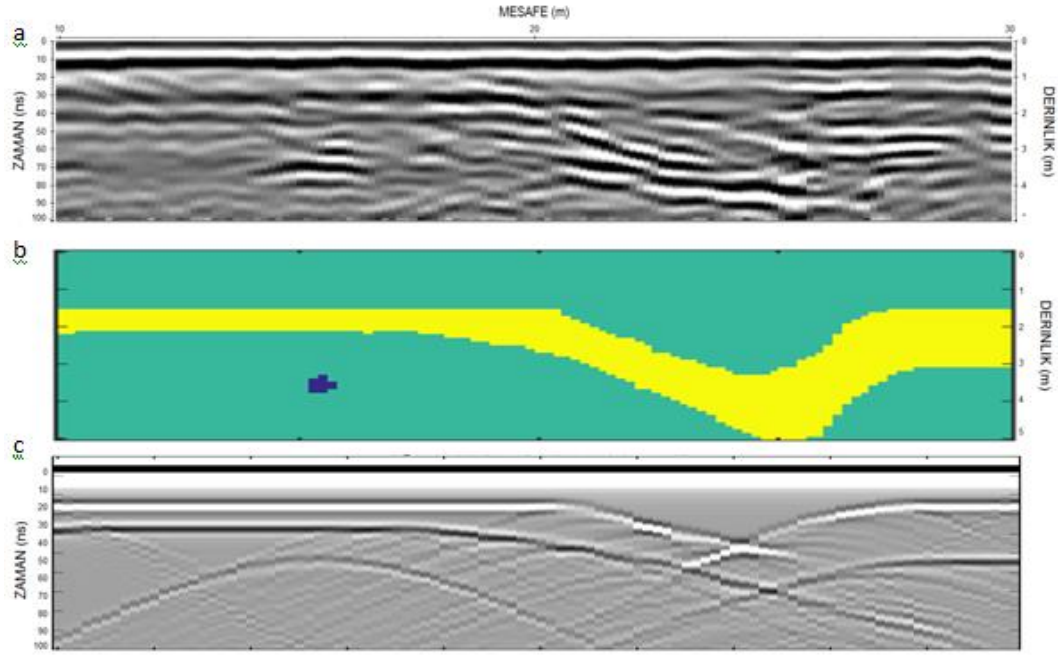
EK A: Temel Modelleme Sonuçları

EK B: Sondaj Kesitleri

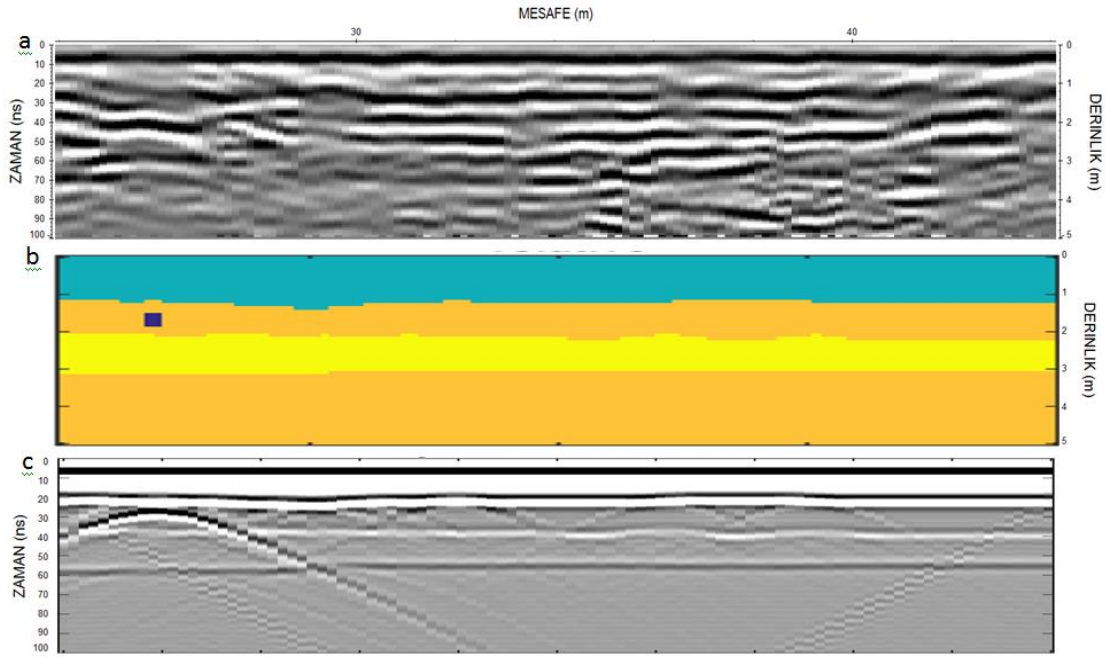
EK C: Yükseklik düzeltmesi uygulanmış radargramlar

EK D: Bölgedeki fay yapıları

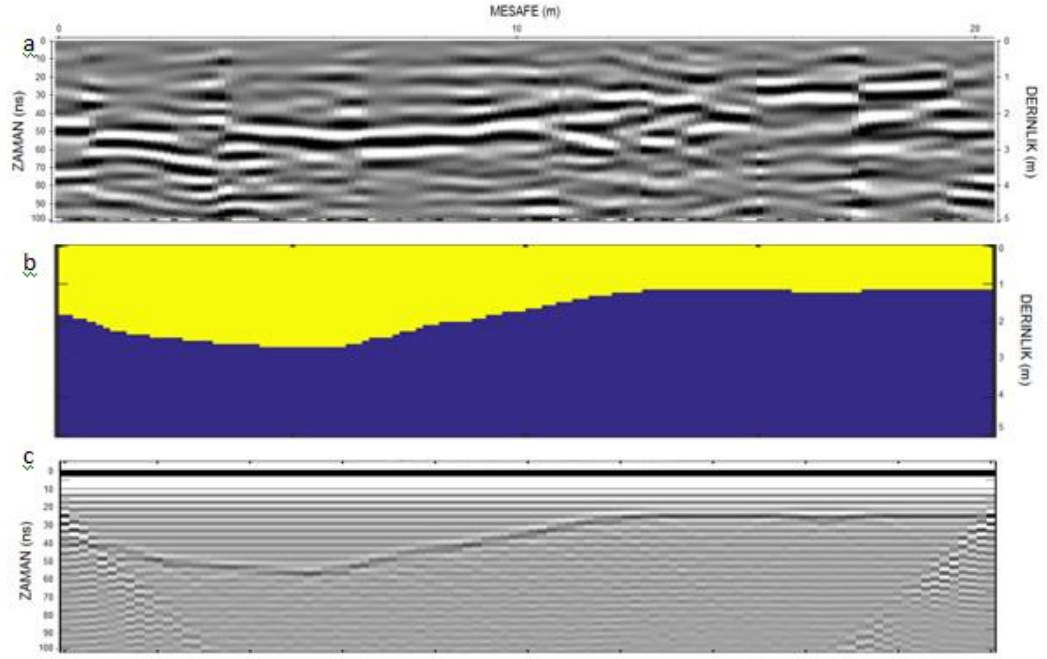
EK A Temel Modelleme Sonuçları



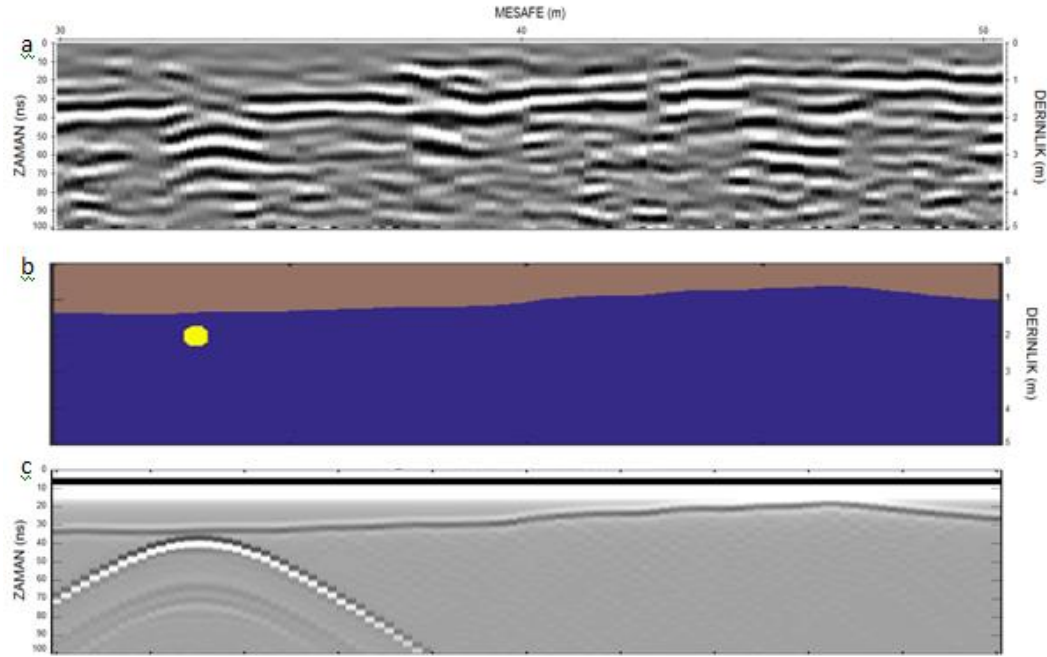
Şekil A.1: a) 3 numaralı ölçümün modellenen kısmı, b) genelleştirilmiş dielektrik modeli, c) temel modelleme sonuçları. Dielektrik katsayıları yeşil bölümde 9, sarı bölümde 7, mavi bölümde 1'dir.



Şekil A.2: a) 4 numaralı ölçümün modellenen kısmı, b) genelleştirilmiş dielektrik modeli, c) temel modelleme sonuçları. Dielektrik katsayıları yeşil bölümde 9, sarı bölümde 7, turuncu bölümde 6 mavi bölümde 1'dir.

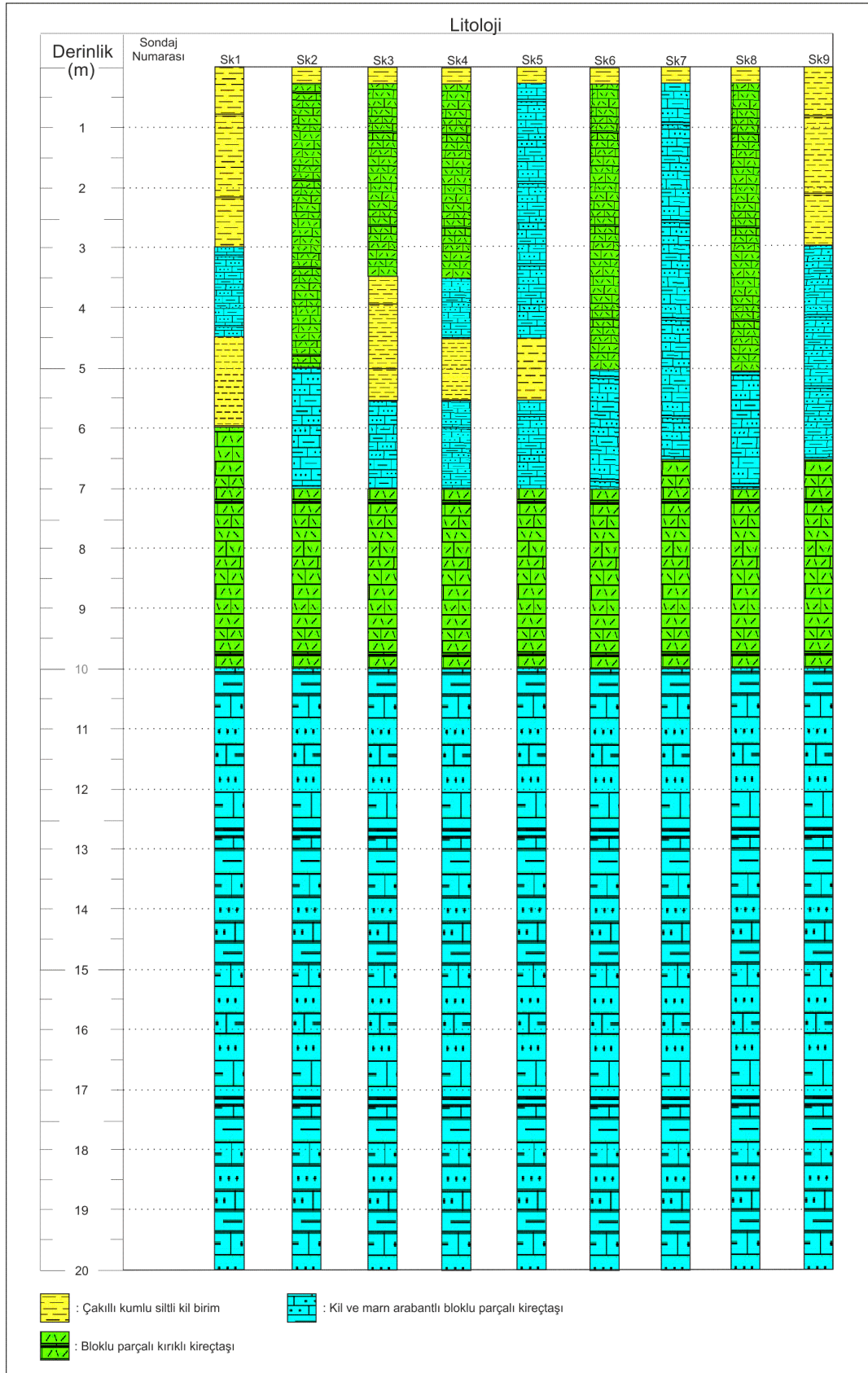


Şekil A.3: a)23 numaralı ölçümün modellenen kısmı, b) geliştirilmiş dielektrik modeli, c) temel modelleme sonuçları. Dielektrik katsayıları sarı bölümde 9, mavi bölümde 7'dir.



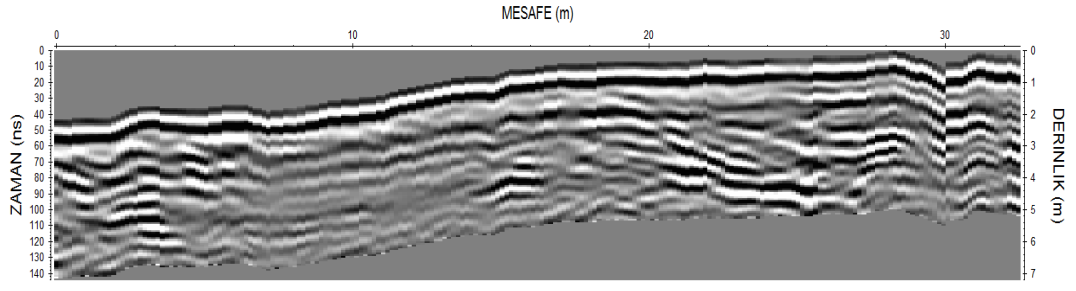
Şekil A.4: a)23 numaralı ölçümün modellenen kısmı, b) geliştirilmiş dielektrik modeli, c) temel modelleme sonuçları. Dielektrik katsayıları gri bölümde 9, sarı bölümde 81, mavi bölümde 7'dir.

EK B Sondaj Kesitleri

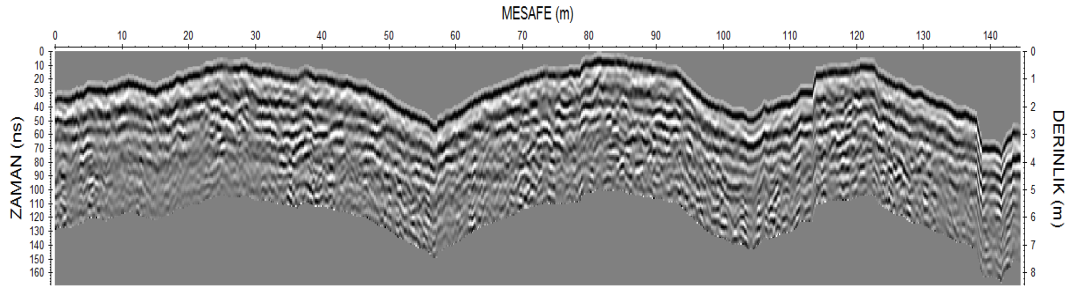


Şekil B.1: Bölgede yapılan sondaj çalışması sonuçları.

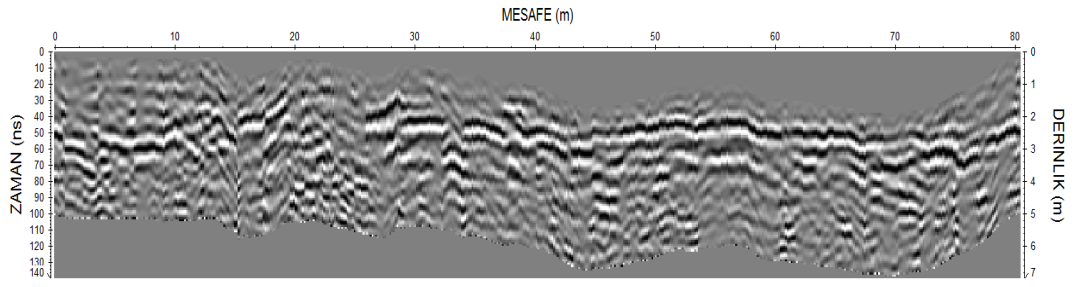
EK C: Yükseklik düzeltmesi uygulanmış radargramlar.



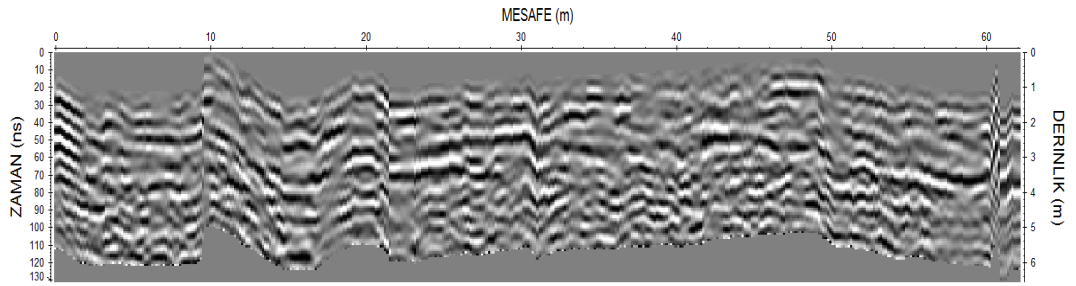
Şekil C.1: 3 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.



Şekil C.2: 4 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.

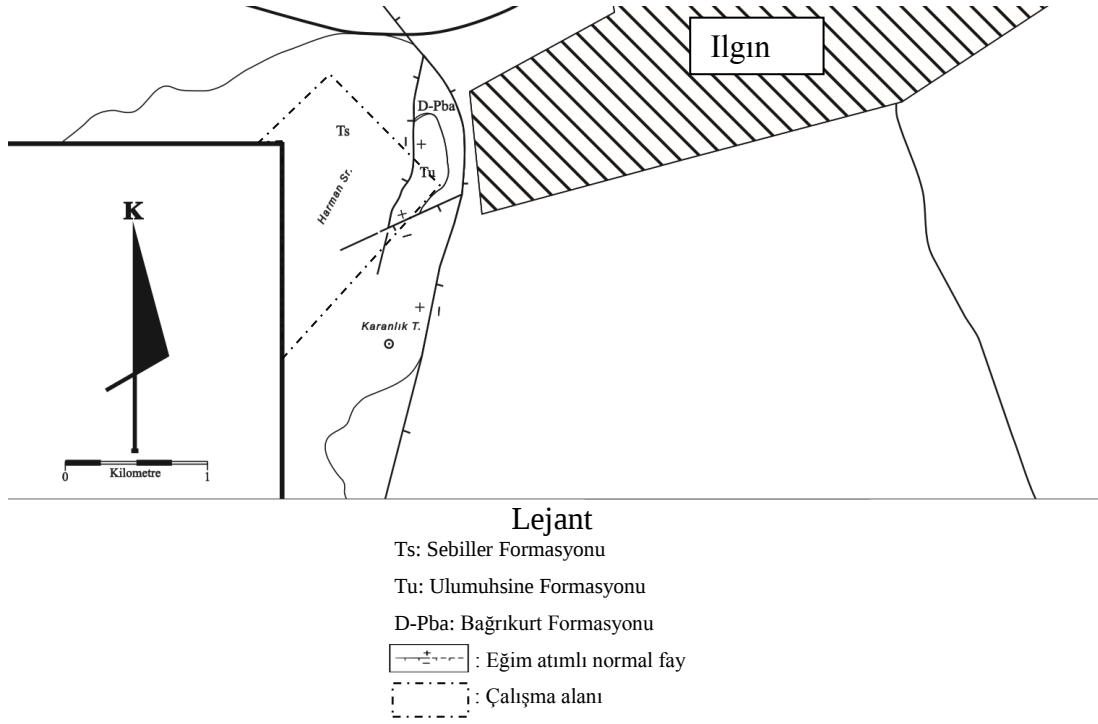


Şekil C.3: 23 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.



Şekil C.4: 27 numaralı profilin yükseklik düzeltmesi uygulanmış hali.

EK D: Bölgedeki fay yapıları



Şekil D.1: Bölgedeki fayların konumu (Hüseyinca, 2005). Çalışma alanının yaklaşık konumu kırmızı ile işaretlenmiştir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Tuzer
Doğum Yeri ve Tarihi: 12.08.1989 - Bakırköy
E-Posta: tuzermehmet@hotmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi-Jeofizik Mühendisliği
Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi-Yer Sistemi Bilimleri

Bu çalışmanın sahibi 1989 yılında İstanbul'da doğdu. Yüksek öğrenimine 2007'de İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde başladı ve 2012 yılında tamamladı. Bu yıldan itibaren başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü Yer Sistemi Bilimleri yüksek lisans programını 2015 yılında tamamladı.