

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TÜNELLERDEKİ (ZİGANA, TORUL) BETON KALİTESİ VE
BOZULMALARIN YER RADARI YÖNTEMİ İLE GÖRÜNTÜLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeofizik Müh. Işıl SARIÇİÇEK

OCAK 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TÜNELLERDEKİ (ZİGANA, TORUL) BETON KALİTESİ VE
BOZULMALARIN YER RADARI YÖNTEMİ İLE GÖRÜNTÜLENMESİ**

Jeofizik Müh. Işıl SARIÇİÇEK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“JEOFİZİK YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.12.2013
Tezin Savunma Tarihi : 08.01.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aysel ŞEREN

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında

Işıl SARIÇİÇEK tarafından hazırlanan

**TÜNELLERDEKİ (ZİGANA, TORUL) BETON KALİTESİ VE
BOZULMALARIN YER RADARI YÖNTEMİ İLE GÖRÜNTÜLENMESİ**

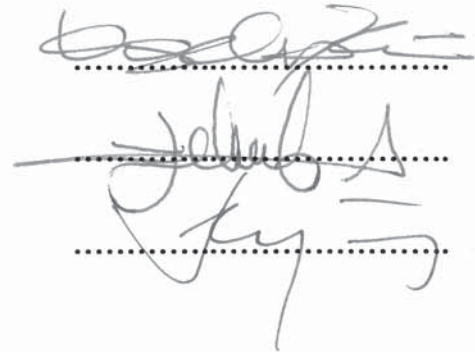
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/12/2014 gün ve 1534 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Kenan GELİŞLİ

Üye : Doç. Dr. Aysel ŞEREN

Üye : Doç. Dr. Selim PUL



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada; su sızdırma riskli alanların varlığı ve yapı duraylılığını değerlendirmek için, Trabzon-Gümüşhane yolu Zigana tüneline ve yeni inşa edilen Torul tüneline Yer Radarı yöntemi kullanılmıştır.

Yüksek lisans çalışmam süresince benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgileri ve önerileri ile beni yönlendiren, çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Aysel ŞEREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni yüreklendirerek akademik çalışma hayatım boyunca manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme; bu zor ve uzun dönemde, şikâyet etmeden, her zaman yanımda olduğu ve gösterdiği içten sevgi, sabır ve desteği için eşim Samet SARIÇİÇEK'e minnettarım.

Arazi çalışmam sırasında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği öğrencilerine, tez çalışmasında bana yardımcı olan Zeynep ÖĞRETMEN'e ve ayrıca çalışma alanının jeolojisinin derlenmesindeki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hakan ERSOY'a çok teşekkür ederim.

Işıl SARIÇİÇEK
Trabzon, 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tünellerdeki (Zigana, Torul) Beton Kalitesi ve Bozulmaların Yer Radarı Yöntemi ile Görüntülenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aysel ŞEREN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08/01/2014

Işıl SARIÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	IV
TEZ BEYANNAMESİ	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
1.3. Yer Radarı Yöntemi	2
1.3.1. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi	6
1.3.2. Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	7
1.3.3. Yer Radarının Yönteminin Kullanıldığı Alanlar	8
1.3.4. Yer Radarının Dayandığı Temel Elektromanyetik Alan Yayılım Teorisi.....	9
1.3.5. Elektromanyetik Dalgaların Yayınımını Etkileyen Fiziksel Özellikler	10
1.3.5.1. Dielektrik Geçirgenlik	11
1.3.5.2. Elektrik İletkenlik.....	12
1.3.5.2.1. İletim Akımları.....	12
1.3.5.2.2. Yer Değiştirme (Kutuplanma) Akımları	14
1.3.5.3. Toplam Akım Dolaşımı	16
1.3.5.4. Bağıl Manyetik Geçirgenlik	18
1.3.6. Elektromanyetik Empedans	20
1.3.7. Kutuplanma.....	21
1.3.8. Elektromanyetik Dalga Özellikleri	24
1.4. Yer Radarı Kuramı	27
1.4.1. Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı	27
1.4.2. Yer Radarı Sinyallerinin Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi	30

1.4.3.	Sinyal Hızı ve Derinlik Belirlenmesi	34
1.4.4.	Nüfuz Derinliği	36
1.4.5.	Radar Anten Frekansının Seçimi	37
1.5.	Yer Radarı Veri Toplama Yöntemleri.....	42
1.5.1.	Yansımaya Profili (Ortak Ofset).....	42
1.5.2.	Çoklu Ofset Sistemleri	43
1.5.2.1.	Geniş Açılı Yansımaya ve Kırılma Ölçümleri (GAYK).....	43
1.5.2.2.	Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri.....	44
1.5.3.	Tomografi Ölçümleri.....	45
1.6.	Yer Radarı Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları	46
1.6.1.	Temel Veri İşlem Adımları.....	47
1.6.1.1.	Dewow (Düşük Frekanslı Olayların Giderilmesi)	47
1.6.1.2.	Genlik Kazancı.....	50
1.6.1.3.	Background Removal	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	54
2.1.	Tüneller Hakkında Genel Bilgiler	54
2.1.1.	Karayolu Tünelleri	54
2.1.2.	Tünel Projesi İçin Yapılması Gerekenler	54
2.1.3.	Tünel Duraylılığını Etkileyen Faktörler	55
2.1.4.	Zigana Tüneli'ndeki Sızıntı Suyu Etkileri ve Alınması Gereken Önlemler	56
2.1.5.	Beton Durumunu Belirlemede Tahribatsız ve Tahribatlı Yöntemler.....	57
2.1.5.1.	Betonarme Yapıların Tahribatsız Deneyleri İçin Temel Yöntemler.....	58
2.1.5.2.	Tahribatlı Test Yöntemleri	58
2.2.	Zigana ve Torul Tünellerinin Yer Radarı Yöntemi ile Görüntülenmesi.....	58
2.2.1.	Coğrafik Konum	58
2.2.2.	Zigana Tünelinin Tarihçesi.....	60
2.2.3.	Tünel Hattının Jeolojisi	61
2.2.3.1.	Zigana Tünelinin Jeolojisi	61
2.2.3.2.	Torul Tünelinin Jeolojisi	63
2.2.4.	Verilerin Toplanması.....	63
2.2.5.	Çalışma Sahaları	63
2.2.5.1.	Çalışma Sahası 1 (Zigana Tüneli)	63
2.2.5.2.	Çalışma Sahası 2 (Torul Tüneli)	65

2.2.6.	Verilerin Değerlendirilmesi	66
2.3.	Yer Radarı Modellemesi.....	67
2.3.1.	Kartezyen Koordinatlarda TE ve TM-Modunda İki Boyutlu Maxwell Denklemleri.....	68
2.3.1.1.	TM-Modunda Maxwell Denklemleri	68
2.3.1.2.	TE-Modunda Maxwell Denklemleri	70
2.3.2.	Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Tanımlanması	71
2.3.2.1.	Sonlu Farklar Yaklaşımı.....	71
2.3.2.2.	Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Uyarlanması	74
2.3.2.2.1.	Bir Boyutlu (1B) Durum	74
2.3.2.2.2.	İki Boyutlu (2B) Durum	77
2.3.2.2.2.1.	TM-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması	77
2.3.2.2.2.2.	TE-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması.....	78
2.3.3.	FDTD Algoritması ve Akış Şeması	79
2.3.4.	ReflexW Programı ile Modelleme	80
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	84
3.1.	Zigana Tüneli'nden Elde Edilen Radargramlar	84
3.1.1.	Zigana Tüneli Trabzon Girişi	84
3.1.2.	Zigana Tüneli Gümüşhane Girişi	87
3.2.	Torul Tüneli'nden Elde Edilen Radargramlar	91
3.2.1.	Torul Tüneli Trabzon Girişi.....	91
3.2.2.	Torul Tüneli Gümüşhane Girişi	95
3.3.	Toplanan GPR Verilerinin 3 Boyutlu Gösterimi	100
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	155
5.	KAYNAKLAR	157

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TÜNELLERDEKİ (ZİGANA, TORUL) BETON KALİTESİ VE BOZULMALARIN YER
RADARI YÖNTEMİ İLE GÖRÜNTÜLENMESİ

Işıl SARIÇİÇEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aysel ŞEREN
2013, 162 Sayfa

Bu tez çalışmasında; su sızdırma riskli alanların varlığı ve yapı içeriğini değerlendirmek için, Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde Trabzon'dan 58 km mesafedeki Zigana tünel duvarlarının kırık-çatlak sistemleri, stratigrafi ve bozulmaların incelenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca yeni inşa edilen Torul tünelinin beton yapısı da incelenmiştir. İncelemelerde, Jeofizik yöntemlerden yaygın olarak kullanılan yüksek çözünürlüklü görüntü veren ve çalışılan yüzeye herhangi bir hasar vermeyen yer radarı (GPR) yöntemi kullanılmıştır. Ölçüler, incelenen tünellerin giriş kısımlarının her iki duvarı boyunca 20 profilde 500 ve 800 MHz'lik korumalı antenler kullanılarak toplanmıştır. Toplanan verilere gerekli veri işlem aşamaları uygulandıktan sonra 2 ve 3 boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerden incelenen ortamların kırık-çatlak durumu, boşluk ve çeşitli sebeplerle oluşmuş olan bozulmalar belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, yeni yapılmış olan Torul tünelinin beton içeriğindeki değişimler ve üzerindeki beton bloklarının bağlantı noktaları radargramlarda görüntülenmektedir.. Ayrıca Zigana tünelinin yan duvarlarındaki kırık-çatlaklar ve su sızıntılarının olduğu alanlardaki zayıf genlikli yansımalar radargramlarda belirlenmiştir. Bunların bazılarının karayolu trafiği açısından tehlikeli olabileceği düşünülmektedir. Bu tür sorunlu kısımları gidermek için, iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı, Zigana ve Torul Tünelleri, Beton Yapısı.

Master Thesis

SUMMARY

IMAGING OF THE CONCRETE QUALITY OF THE TUNNELS (ZİGANA, TORUL)
AND DETERIORATIONS WITH GROUND PENETRATING RADAR

Işıl SARIÇİÇEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Doç. Dr. Aysel ŞEREN
2013, 162 Pages

In this study, it is aim to investigate the fracture-crack system, the stratigraphy and the deterioration of the walls of Zigana Tunnel which is located at the fifty eighth kilometers of the way Trabzon-Gümüşhane in order to evaluate the existence of risk area leaking water out and structure contents. Furthermore, the concrete quality of the Torul tunnel which has built recently was investigated. In the researches, Ground Penetrating Radar, which gives high definition solution, which is used commonly and which does not damage the worked surface, was used. GPR data are collected along totally 40 profiles at the entrance of the both sides of tunnels by using 500 MHz and 800 MHz shielded antenna. After applying the needed data processing stages to the collected data, 2D and 3D images were acquired. It is tried to be specified the fracture-crack state of the inspected area, cavity and deteriorations which formed various reasons from these images.

Consequently; the change of the concrete contents and the connection points of concrete blocks on it of Torul Tunnel are displayed at radargram. Also; the water leak and fracture at the sidewall of Zigana Tunnel are monitored at radargram. Some of them are thought to be dangerous for the highway traffic. In order to prevent these problematic parts, the restoration works should be done.

Key Words: Georadar, Zigana and Torul Tunnels, Structure of Concrete.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. a) Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi b) Radargram	3
Şekil 1.2. Elektromanyetik dalga yayılımı	3
Şekil 1.3. Maxwell denklemlerinin fiziksel ifadelerinin şematik gösterimi	10
Şekil 1.4. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi.....	13
Şekil 1.5. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi	15
Şekil 1.6. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı.....	15
Şekil 1.7. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi	17
Şekil 1.8. Yayınım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir	21
Şekil 1.9. Toplam elektrik alan \vec{E} , \vec{E}_a ve \vec{E}_b elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü \vec{E} yönündedir	22
Şekil 1.10. Elektrik alan bileşenleri aynı fazda ise elektrik alan sabit bir yönde, doğrusal şekilde kutuplanmıştır	23
Şekil 1.11. Sinüzoidal dalgalar için alanlar doğrusal, dairesel ve eliptik biçimde kutuplanabilir	23
Şekil 1.12. (a) Hız ve (b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi	26
Şekil 1.13. Yer radarı anteninden yeraltına gönderilen yayınım örneği	27
Şekil 1.14. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip bir ortamda 300 MHz merkez-frekanslı bir anten kullanılarak elde edilecek yatay çözünürlük büyüklükleri.....	29
Şekil 1.15. Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri	29
Şekil 1.16. Ara yüzeye gelen dalganın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması.....	31
Şekil 1.17. TE ve TM bileşenlerinin ara yüzeyde yansıması ve iletimi (E:Elektrik alan vektörü, H:Manyetik alan vektörü).....	32
Şekil 1.18. Anten durumlarına göre TE ve TM modları.....	33
Şekil 1.19. Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi	37
Şekil 1.20. Aynı hat boyunca 80 MHz ve 300 MHz frekanslı antenler kullanılarak elde edilen gömülü düzlem yüzeyin görüntüsü, El Salvador	41

Şekil 1.21.	Yer radarı anten dizilimleri.....	42
Şekil 1.22.	Yansıma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi.....	43
Şekil 1.23.	GAYK yönteminin şematik gösterimi.....	44
Şekil 1.24.	ODN yönteminin şematik gösterimi	45
Şekil 1.25.	Karşılıklı kuyular arası radar tomografi ölçümlerinin şematik gösterimi a) sıfır ofset profil ve b) çoklu ofset profil.....	46
Şekil 1.26.	Ham yer radarı veri örneği.....	46
Şekil 1.27.	Yer radarı verisi akış şeması.....	47
Şekil 1.28.	a) Ham yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki görünümü b) Ham verinin genlik spektrumu	48
Şekil 1.29.	a) Dewow uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki görünümü b) (a)'da gösterilen izin genlik spektrumu	49
Şekil 1.30.	Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti	50
Şekil 1.31.	Zigana tüneline alınmış bir profile genlik kazanç işlemi (enerji azalımı) uygulandıktan sonraki radargram	51
Şekil 1.32.	a) Kazanç işlemi uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki gösterimi b) frekans ortamındaki gösterimi.....	51
Şekil 1.33.	Zigana Tüneli'nden alınmış bir profile background removal uygulandıktan sonraki radargram.....	52
Şekil 1.34.	a) Background Removal uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki gösterimi b) frekans ortamındaki gösterimi	53
Şekil 2.1.	Karayolu tüneline genel bir görünüm.....	54
Şekil 2.2.	Tünel yan duvarlarından su sızıntısı ve bozulmalardan görünümler	56
Şekil 2.3.	a) Çalışma alanının yer bulduru haritası b) Zigana tüneline yeri c) Torul tüneline yeri	59
Şekil 2.4.	a) Çalışma sahası 1'den (Zigana Tüneli girişi) ve b) Çalışma sahası 2'den (Torul Tüneli girişi) genel görünüm.....	60
Şekil 2.5.	Çalışma alanı ve çevresine ait jeoloji haritası.....	61
Şekil 2.6.	Cevherli dasitik kayalarda gözlenen yoğun kırıklar ve alterasyonlar	62
Şekil 2.7.	Zigana tünel içi profil yönleri	64
Şekil 2.8.	Çalışma sahası 1 için GPR ölçü profilleri (Trabzon girişi)	64
Şekil 2.9.	Çalışma sahası 1 için GPR ölçü profilleri (Gümüşhane girişi).....	65
Şekil 2.10.	Torul tünel içi profil yönleri	65
Şekil 2.11.	Çalışma sahası 2 için GPR ölçü profilleri (Trabzon girişi)	66
Şekil 2.12.	Çalışma sahası 2 için GPR ölçü profilleri (Gümüşhane girişi).....	66

Şekil 2.13.	2B model.....	68
Şekil 2.14.	TM-modu.....	69
Şekil 2.15.	TE-modu.....	70
Şekil 2.16.	$O(\Delta x^2)$ mertebesinde merkezi farklar	72
Şekil 2.17.	$O(\Delta x^4)$ mertebesinde merkezi farklar	73
Şekil 2.18.	1B ortamda: a. Elektrik alanın hesabı, b. Manyetik alanın hesabı.....	76
Şekil 2.19.	TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi	77
Şekil 2.20.	TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi	79
Şekil 2.21.	Kırıklı kaya modeli	81
Şekil 2.22.	Fiziksel modellerden 500 MHz ile elde edilen GPR yansıma kayıtları a)hava dolu kırık, b) hidrokarbon dolu kırık ve c) su dolu kırık	81
Şekil 2.23.	Yer radarı modellemesi için seçilen model geometri.....	83
Şekil 2.24.	500 MHz kullanılarak yer radarı modellemesi sonucu elde edilen yapay radargram.....	83
Şekil 3.1.	a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti	85
Şekil 3.2.	a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti	85
Şekil 3.3.	Zigana tüneli Trabzon girişindeki su sızıntısının görünüm	86
Şekil 3.4.	a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti	86
Şekil 3.5.	a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti	87
Şekil 3.6.	a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti	88
Şekil 3.7.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde su sızıntıları ve kırıklı-çatlaklı yapılardan görünüm.....	88
Şekil 3.8.	a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti	89
Şekil 3.9.	a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti	90
Şekil 3.10.	a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti	90
Şekil 3.11.	a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti	91

Şekil 3.12.	a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti	92
Şekil 3.13.	a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti	92
Şekil 3.14.	a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti	93
Şekil 3.15.	a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti	93
Şekil 3.16.	a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti	94
Şekil 3.17.	a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti	94
Şekil 3.18.	Torul tüneli Trabzon girişindeki tünel dışı boşluğun görünümü	95
Şekil 3.19.	a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti	96
Şekil 3.20.	a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti	96
Şekil 3.21.	a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti	97
Şekil 3.22.	a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti	97
Şekil 3.23.	a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti	98
Şekil 3.24.	Torul tüneli beton bloklarının bağlantı yerleri.....	98
Şekil 3.25.	800 MHz antenle a) Zigana ve b) Torul tünel duvarından toplanan verilerin ilk 1.5 m derinliğe ait detaylandırılmış görünümleri.....	99
Şekil 3.26.	a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8.5 m'deki 3B görünümü. b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları (X: uzaklık (m), Y: Profiller arası uzaklık (m), Z: Derinlik (m))	101
Şekil 3.27.	Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları	103
Şekil 3.28.	a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-14 m deki 3B görünümü b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları	104
Şekil 3.29.	Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-14m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları	106
Şekil 3.30.	a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-6.2 m deki 3B görünümü b) 0.2 m derinlikteki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	107

Şekil 3.31.	Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları	109
Şekil 3.32.	a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 6.2-14 m deki 3B görünümü b) 0.2 m derinlikteki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	109
Şekil 3.33.	Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 6-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	111
Şekil 3.34.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları.....	112
Şekil 3.35.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	115
Şekil 3.36.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.6-12.6 m deki 3B görünümü b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları	116
Şekil 3.37.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.6-15 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	118
Şekil 3.38.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 12.6-19.7 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları	119
Şekil 3.39.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-20 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	121
Şekil 3.40.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	122
Şekil 3.41.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	124
Şekil 3.42.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7-13 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	125
Şekil 3.43.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	127
Şekil 3.44.	a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-19.2 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	128

Şekil 3.45.	Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-20 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	130
Şekil 3.46.	a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-5.2 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	131
Şekil 3.47.	Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-5.2 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	133
Şekil 3.48.	a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-13 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	134
Şekil 3.49.	a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.1 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	136
Şekil 3.50.	Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.1 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	138
Şekil 3.51.	a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.1-14 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	139
Şekil 3.52.	Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.1-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	141
Şekil 3.53.	a) Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları	142
Şekil 3.54.	Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	144
Şekil 3.55.	a) Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 9-16.6 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	145
Şekil 3.56.	Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 9-16.6 m'deki 0.2, 0.6 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	147
Şekil 3.57.	a) Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	148
Şekil 3.58.	Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m'deki 0.2, 0.6 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları	150

Şekil 3.59.	a) Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 12-19 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları	151
Şekil 3.60.	Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 12-19 m'deki 0.2, 0.6 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları.....	153

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Farklı anten frekansları için yaklaşık derinlik aralıkları	4
Tablo 1.2. Genel jeolojik malzemelerin dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri. n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir	5
Tablo 1.3. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ_r , hız V , elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α degerleri	35
Tablo 1.4. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi.....	38

SEMBOLLER DİZİNİ

<i>A</i>	: Fresnel bölgesinin uzun ekseninin yarıçapı
<i>A</i>	: Akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı
<i>B</i>	: Manyetik akı yoğunluğu
<i>c</i>	: Işık hızı
\vec{D}	: Elektrik yer değiştirme
<i>D</i>	: Derinlik
<i>E</i>	: Elektrik alan şiddeti
<i>E_a</i>	: Elektrik alan bileşenlerinin genliği
<i>E_b</i>	: Elektrik alan bileşenlerinin genliği
<i>f_t</i>	: Geçiş frekansı
<i>H</i>	: Manyetik alan şiddeti
<i>I</i>	: Dalganın genliği
<i>I</i>	: Elektrik akımı
<i>i₁</i>	: Yansıma açısı
<i>i₂</i>	: Kırılma açısı
<i>J</i>	: Akım yoğunluğu
<i>J_D</i>	: Yer değiştirme akımı
<i>J_C</i>	: İletim akımları
<i>K_m</i>	: Bağlı manyetik geçirgenlik
<i>k</i>	: Manyetik duyarlılık
<i>K'</i>	: Ortalama bağlı dielektrik katsayısı
\vec{m}	: İndüklenen manyetik moment miktarı
\vec{M}	: Manyetik dipol momenti
\hat{n}	: Normal vektörü
ODN	: Ortak derinlik noktası
<i>R</i>	: Yansıma katsayıları
<i>RI</i>	: Yansıyan dalga
<i>T</i>	: İletim katsayıları
<i>TI</i>	: İletilen dalga

TE	: Enine elektrik alan
TM	: Enine manyetik alan
t_0	: Ofsetdeki tek yönlü seyahat süresi
$\tan\delta$: Kayıp tanjantı
V	: Hız
ω	: Açısal frekans
w_t	: Geçiş frekansı
WARR	: Geniş açılı yansıma ve kırılma
x	: Hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafe
Z	: Elektromanyetik empedans
Z_0	: Boşluğun empedansı
q	: Yük yoğunluğu
ϵ	: Dielektrik geçirgenlik
ϵ_r	: Bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısı
σ	: Elektrik iletkenlik
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	: Maddenin bağlı manyetik geçirgenliği
θ	: Mineralin hacimsel miktarı
ϕ_a	: Faz açısı
ϕ_b	: Faz açısı
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
α	: Sönümlenme
λ	: Dalga boyu
ϵ_{r1}	: Birinci tabakadaki dielektrik permittivite
ϵ_{r2}	: İkinci tabakadaki dielektrik permittivite

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1863'lü yıllarda yapılmaya başlayan tüneller; karayolları, su kanalları ve demir yollarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Karayollarında ulaşımı kolaylaştıran tünellerde görülen bozuklukları incelerken tünelin bulunduğu hattın jeolojik yapısı, tünel yapımı sırasında kullanılan betonun kalitesi, betonda bulunan kırıklı-çatlaklı yapılar, beton içerisinde su sızıntısı sebebiyle oluşmuş boşluklar dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır. Ayrıca tünellerde genelde yaşlanma, donma-çözülme, karbonatlaşma ve kusurlu inşaat gibi birçok etken yıkıcı hasarlara neden olmaktadır. Bu tür problemleri incelemek için sığ zemin koşullarını yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen Yer Radarı yöntemi tünel birimlerinin ve kalitesinin kontrol edilmesinde kullanılan başarılı bir yöntemdir. Yöntem, tünel iyileştirme çalışmalarında, hasarların belirlenmesine ve çözümüne yönelik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Locatelli vd., 2001; Carderelli vd., 2003, Xie vd., 2004). Bu konuda yapılan bazı çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Grodner (2001); temsili bir kaya patlaması olan alanda tünel yan duvarlarındaki kırıkların yapısı ve konumunu belirlemek amacıyla yer radarı yöntemini başarılı bir şekilde kullandığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, radar görüntülerinde maden odaklı kırıkların yansımaları tarafından gösterildiği gibi; tünel yapımı sırasında şekillenen maden odaklı kırıklar, temsili bir kaya patlaması tarafından tekrar aktif edildi.

Xiang vd.,(2013); yer radarı yöntemi ile Damaoshan karayolu tünelindeki betonarme demirinin konumunu belirlemek, kaplamanın kalınlığını tahmin etmek ve yıllık denetlemede her bir zararın varlığı ve uzanımını belirlemek için yapılmıştır. Hem ölçülmüş hem de temsili veri üzerine odaklanan yorumlanmış sonuçlar; FDTD ve GPR tekniklerinin birleşiminin, tünel değerlendirme için çabuk ve etkili bir araştırma yöntemi olduğunu gösterir.

Parkinson, (2008); sürekli ve yıkıcı olmayan bir durumda beton bozulmalarının ve boşluklarının yerini belirlemek ve tünel kaplama konumunu haritalamak için yer radarı yöntemini kullanmıştır.

Gracia vd., (2008); yüzeyde gözlenen zararların derinliğini değerlendirmek ve gelecekte su sızdırma durumunun olup olmadığı temeli belirlemek için yer radarı yöntemi kullanılmıştır.

Cardarelli vd., (2002); üç jeofiziksel yöntem olan sismik kırılma, sismik tomografi ve yer radarı (GPR) yöntemini kullanarak tünel sağlamlılığını araştırmıştır. 200 MHz GPR anteni ve sismik tomografiden birleştirilmiş verilerin yorumu, kayadaki süreksizliklerin belirlenmesi ve elastik özelliklerin bazılarının değerlendirilmesi ile sonuçlanmıştır.

1.2. Amaç ve Kapsam

Su sızdırma riskli alanların varlığı ve yapı durumunu değerlendirmek için, Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde Trabzon'dan 58 km mesafedeki Zigana tünel duvarlarının kırık-çatlak sistemleri, stratigrafi ve bozulma durumunun ve ayrıca yeni inşa edilen Torul tünelinin beton kalitesinin Yer Radarı yöntemi ile görüntülenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

Zigana ve Torul tünelinin her iki girişinden alınan ölçümlerde 500 ve 800 MHz korumalı antenler kullanılarak, 30 cm profil aralıkları ile 20 profilde yer radarı verileri toplanmıştır. Bu veriler ReflexW programı ile değerlendirilmiş olup Easy3D programı ile üç boyutlu (3B) görüntüler elde edilmiştir.

1.3. Yer Radarı Yöntemi

Yer Radarı (GPR); araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyen elektromanyetik bir yöntemdir. Bu yöntemde bir kaynak tarafından araştırılan ortama gönderilen ve zaman içinde değişen yüksek frekanslı elektromanyetik alanlar kullanılarak incelemeler yapılmaktadır (Şekil 1.1). Değişken zamanlı elektromanyetik alanlar, elektrik ve magnetik alanların bileşeninden oluşmaktadır (Şekil 1.2). Bu iki alan, yeraltında bulunan malzemelerin etkisi altında değişmekte ve yer altındaki yapıların elektriksel özelliklerinin değişiminin gözlenmesine izin vermektedir (Daniels,1996; Annan, 2003). Bir verici antenle yeraltına gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların bir kısmı, yeraltında farklı dielektrik özelliklere (ϵ ; permitivite, σ ; iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) sahip yüzeylerden yansırken, diğer kısmı da daha

alıcı antene karşılık gelmektedir. Genel olarak bu iki yöntem yayılan enerjinin türü bakımından birbirinden ayrılır. Sismik yöntemde yayılan akustik dalgaya karşılık yer radarı yönteminde elektromanyetik dalga yayılımı söz konusudur.

Yer radarı (GPR) yönteminde elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak yer altındaki yapıların derinlikleri ve geometrisini santimetre düzeyinde hassas bir şekilde belirlenebilir. Bu avantajı yer radarı yöntemini son yıllarda sığ çalışmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden birisi yapmıştır.

GPR sinyalleri kuru kum, granit ya da mermer gibi iletkenliği düşük malzemelerde veya ortamlarda yaklaşık 50-60 m derinliklere kadar ulaşabilmektedir (Tablo 1.1). Islak kil, şeyl ve diğer yüksek iletkenlikli malzemeler GPR sinyallerini soğurmakta ve dolayısıyla bu sinyalin ulaşabileceği derinliği (nüfuz derinliği) 1 m ya da daha az olarak sınırlandırmaktadır. Ayrıca nüfuz derinliği, kullanılan antenin frekansına da bağlıdır. 25-200 MHz'lik düşük frekanslı antenler yeraltında daha derinden yansımalar alırken elde edilen radargramların çözünürlüğü düşük olmaktadır. Yüksek frekanslı antenlerde çözünürlük artarken araştırma derinliği azalmaktadır (Davis ve Annan, 1989; Daniels, 1996; Annan, 2003).

Tablo 1.1. Farklı anten frekansları için yaklaşık derinlik aralıkları (Ramac/GPR CU II Hardware Manual).

Anten frekansı (MHz)	Hedef nesne boyutunun alt limiti (m)	Yaklaşık derinlik aralığı* (m)	Yaklaşık maximum nüfuz derinliği (m)
25	1	5-30	35-60
50	0.5	5-20	20-30
100	0.1-1	2-15	15-25
250	0.005-0.01	1-10	5-15
500	0.04	1-5	3-10
800	0.02	0.4-2	1-6
1000	Cm	0.05-2	0.5-4

* Düşük rezistiviteli materyallerin olmadığı normal jeolojik çevresel koşullarda

Yer Radarı araştırmalarında en önemli iki faktör olan zemin iletkenliği ve dielektrik sabit, yüzeysel özelliklerin bulunmasını etkilemektedir (Ulriksen,1982). Bu iki parametre sudan önemli bir şekilde etkilenmektedir, bundan dolayı su GPR'ın çalışma performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir (Griffin ve Pippet, 2002). Tablo 1.2'de bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik sabit, iletkenlik, yayılma hızı ve soğrulma değerleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Genel jeolojik malzemelerin dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri. n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir (Wilchek, 2000).

Malzeme	Bağıl dielektrik, Sabit, ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	İletkenlik, σ , (mS/m)	Yayılm hızı, V, (m/nsn)	Soğrulma, Soğrulma sabiti, α
Hava	1	0	0.3	0
Buz	3-4	0.01	0.16	0.01
Su (taze)	80	0.5	0.033	0.1
Su (tuzlu)	80	3000	0.01	1000
Topraklar				
Kil	5-40	2-1000	0.06	1-300
Toprak (kuru)	3-5	0.01	0.15	0.01
Toprak (doygun)	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Silt	5-30	1-100	0.07	1-100
Mineraller				
Kalsit	7.8-8.5	$5 * 10^{-10}$	0.11	$3 * 10^{-10}$
Kuvars	4.2-5	$3 * 10^{-4}$ - $5 * 10^{-12}$	0.13-0.15	$2 * 10^{-8}$ - $4 * 10^{-12}$
Tortul kayalar				
Kireçtaşı	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1.0
Tuz (kuru)	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Kumtaşı	4.7-12	$1 * 10^{-5}$ -0.7	0.09-0.14	$5 * 10^{-8}$ -0.6
Şeyl	5-15	1-100	0.09	1-100
Magmatik kayalar				
Bazalt	12	$8 * 10^{-6}$ -0.025	0.09	$4 * 10^{-6}$ -0.01
Dasit	6.8-8,2	0.05	0.12	0.03
Diyabaz	10.5-34.5	$2 * 10^{-5}$ -50	0.05-0.09	$1 * 10^{-2}$ -26
Diorit	6	0.0002-0.002	0.12	0.0001-0.001
Gabro	8.5-40	0.001-1	0.05-0.10	$3 * 10^{-4}$ -0.6
Granit	4.6	0.01-1	0.13	0.01-1
Norit	61	0.02-1	0.04	0.004-0.2
Obsidiyen	5.8-10.4	n/a	0.11	n/a
Peridotit	8.6	0.15-0.33	0.10	n/a
Metamorfik kayalar				
Gnays	8.5	0.0003-0.02	0.10	n/a
Arjilit	n/a	1-100	n/a	n/a
Kuvarsit	n/a	$5 * 10^{-6}$ -100	n/a	n/a

Yüksek iletkenlik radar çalışmalarını sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Yüksek iletkenli zemin (yüksek kil içerikli zemin) düşük iletkenli zeminden (kuru kum) daha fazla enerji soğurur (Griffin vd., 2002). Yüksek iletkenli ortamlar, iletilen sinyalin soğurulmasına ve derinliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yer radarı çalışmalarında çalışılan ortamın iletkenliğinin düşük olması istenir. Zemin dokusu, zemin

yoğunluğu, zemin hacimsel su içeriği ve zemin tuz miktarı içindeki değişiklikler GPR sinyallerini etkilemektedir (Bristow ve Jol, 2003).

Ortamın dielektrik sabiti elektromagnetik dalganın yayılma hızını belirlemektedir. Yayılma hızı ile dielektrik sabit arasında ters orantı vardır. Yeraltına gönderilen elektromagnetik dalgaların hızı, ani bir dielektrik sabit düşmesi sonucunda artmaktadır. Bu ortam değişikliği sınırı bir yansıma yüzeyi oluşturduğundan ilerleyen dalganın bir kısmı geri dönmekte ve alıcı antene ulaşmaktadır. Dielektrik sabitin arttığı ortamlarda (Kil gibi su içeriğinin yüksek olduğu ortamlar), dalga hızı azalmakta ve enerji kaybına uğramaktadır. Bu nedenle bu tür ortamlarda GPR ile çalışmak oldukça zordur (Weeds, 1994).

1.3.1. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi

Yeraltı Radarı ya da genel adıyla GPR (Ground Penetrating Radar), yeraltının sığ tabakalarının (ilk 0-40 metre) araştırılmasında kullanılan yöntemdir. Son otuz yıl içerisinde elektronik endüstrisinde yaşanan olağanüstü gelişmeler, bir zamanlar zahmetli ve pahalı bir iş olan ışık hızı ölçümlerini son derece ucuz, kolay ve duyarlı bir şekle dönüştürmüştür. 1970'li yıllarda milisaniye (10^{-3} s) duyarlılıkla yapılan zaman ölçümleri, 1980'li yıllarda mikro saniye (10^{-6} s), 1990'lı yıllarda ise nanosaniyeye (10^{-9} s) duyarlılığa kadar inmiştir. Elektronikteki bu gelişmelere paralel olarak, yeraltında ışık hızına yakın bir süratle hareket eden elektromanyetik dalgaların yolculuk sürelerinin nanosaniye mertebesinde ölçülebilmesi, sığ jeofizik görüntüleme yöntemlerine önemli katkılarda bulunmuştur. Yer radarı yukarıda söz edilen bu gelişmelerin somut bir sonucudur (URL-1).

1865 yılında İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell elektromanyetik dalgaları ve bunların yayılmasını açıklayan elektromanyetik ışık kuramını ortaya attı ve 1886'da Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz elektromanyetik dalgaları keşfetti ve Maxwell'in kuramını kanıtladı.

1904 yılında Alman yüksek frekans teknisyeni Christian Hülsmeier su üzerindeki trafiği denetlemek için telemobiloskopu icat etti. Bu alet metal bir nesneden çarparak dönen elektromanyetik dalgaların süresini ölçüyor ve böylece menzil hesaplanabiliyordu. Bu ilk pratik radar denemesi için Hülsmeier patent başvurusunda bulundu. 1921'de Albert Wallace Hull tarafından güçlü gönderici tüpü magnetron icat edildi. 1922'de ABD

Donanma Araştırma Laboratuvarından A. H. Taylor ve L.C.Young ilk kez bir tahtadan gemiyi algılamayı başardılar.

1930 yılında yine ABD Donanma Laboratuvarından L. A. Hyland bir uçağı algıladı. 1931'de bir gemiye radar takıldı. Alıcı ve verici anteni olarak boynuz ışın yayıcı bulunan parabolik anten kullanıldı. 1936 yılında Metcalf ve Hahn tarafından yükselteç veya osilatör olarak kullanılan klistron bulundu.

1939 yılında İngiltere Birmingham Üniversitesinden John Randall ve Henry Boot adlı iki fizikçi hafif fakat güçlü mikrodalga radarını geliştirdiler ve bu radar B-17 bombardıman uçaklarına takıldı. Bu denizaltı savaşlarında bir dönüm noktası oldu. 1940 yılında ABD, Rusya, Almanya ve Japonya'da muhtelif radar tesisleri geliştirildi.

2. Dünya Savaşı sırasında silah sistemlerinin gelişmesi radar teknolojisinde olağanüstü gelişmelere yol açtı ve özellikle buna bağlı olarak hava savunma sistemleri kurulmaya başlandı. Savaş sonrasında NATO ve Varşova Paktı üyesi ülkelerin ortak sınırlarında birçok radar sistemi yerleştirildi.

İkinci Dünya Savaşından sonra radar yöntemi “barışçıl kullanım” olarak adlandırılan bir yönde kullanılmaya başlandı. Günümüzde radar çok sık kullanılmaktadır (URL-2). Madencilik ve jeolojik çalışmalarda 1970’li yıllarda kullanılmaya başlanan yer radarı, 1980’li yıllarda iyi ayrımlılık veren 500 MHz -1 GHz antenlerle doğal soğurmanın daha az olduğu sığ incelemeler için kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar içerisinde arkeolojik çalışmaları da bulmak mümkündür. 1990’larda ise düşük (10, 20 ve 50 MHz) ve yüksek (2.5-3 GHz) merkez frekanslı antenler kullanılmıştır. Daha sonra yer radarı, maden arama, stratigrafi, yol kaplama denetlemesi, yapı, inşaat, su arama vs. gibi alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır (Alp vd.,2003).

1.3.2. Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yer radarı yönteminin günümüzde çeşitli problemlere karşı tercih edilen bir yöntem haline gelmesinde etkili olan birçok özelliği vardır. Bunlar;

- Yüksek frekanslı kaynak kullanılması ve yığıma yapılabilmesi sebebi ile elde edilen çözünürlük yüksektir.
- Hedef yapı veya objenin yeri ve derinliği hassas bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Arazide uygulanma bakımından kullanılan aygıt ve çalışma ortamına bağlı olarak genelde kolaydır.

- İnsan kaynaklı gürültüler genelde veri işlem yöntemleri ile veriden atılabilir.
- Diğer yöntemlerin aksine kullanıldığı araştırma sahasına hasar vermeden uygulanmaktadır. Bu özelliği ile arkeometri çalışmalarında tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir.

Yer radarı yönteminin dezavantajları;

- Çalışma alanındaki jeolojik unsurların etkisi sinyallerin yeraltına nüfuz etmesini engelleyebilir.
- Çevredeki radyo vericileri, önemli bir gürültü kaynağıdır ve ölçülen sinyaller kayıt aygıtının dışına taşabilirler.
- Kayıtlara çevredeki yapılardan gelen yansımalar karışabilir. Yansımalar sismik yöntemde olduğu gibi yanlardan gelebilir ve yansıtıcı metalik nesne ise çok keskin olabilir.
- Eğer yer iletkenliği çok yüksek ise yer-hava ara yüzeylerinde enerji yayılımında keskin yansıma sinyali yaratabilir ve iletken birimler üzerinde bilgi alınması zor olmaktadır.

1.3.3. Yer Radarının Yönteminin Kullanıldığı Alanlar

GPR, kullanımının çok kolay olması, hızlı, ekonomik ve kesin olarak sonuç vermesi nedeniyle mühendislik çalışmalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

- Buz kalınlığının araştırılmasında
- Arkeoloji ve antik kalıntılarda
- Biyoloji ve biyofizik alanlarda
- Köprü çözümlerinin belirlenmesinde
- İnşaatlarda
- Kara mayınları araştırılmasında
- Çevresel etkilerde ve çevresel görüntülemelerde
- Adli tıpta
- Jeoteknik araştırmalarda
- Mezar yeri araştırmalarında
- Yer altı suyu araştırmalarında
- Alt yapı incelemelerinde

- Karstik yapıların bulunmasında
- Atık borularının konumları ve geçtikleri yerlerin tespitinde
- Maden aramalarında
- Göl ve nehirlerin don kırıklarının araştırılmasında
- Karayolları, havaalanları, demiryolları ve kaldırımlarda
- Sedimantolojik yapıların incelenmesinde
- Yer altı boşluklarının taranmasında
- Volkanik hareketlerin araştırılmasında
- Tarım alanında
- Mermer ocaklarındaki kırık-çatlak sistemlerinin araştırılmasında
- Tünel incelemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.3.4. Yer Radarının Dayandığı Temel Elektromanyetik Alan Yayılım Teorisi

Bir ortamda yayınan elektromanyetik dalgalar ve oluşan alanlar arasındaki ilişkiler Maxwell denklemleriyle tanımlanabilir. Bu denklemler, elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu, elektrik yüklemeye yoğunluğu ve elektrik akım yoğunluğu gibi alan ve kaynak büyüklüklerini birbirine bağlayan denklemlerdir. Elektromanyetik kuram, Ampere, Faraday ve Coulomb gibi araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalarla bulunan ve Maxwell tarafından bir araya getirilerek yayınlanan denklemlere dayanmaktadır. Jeofizik mühendisliğinde kullanılan denklemlerle ilgili ayrıntı çalışmalar için Stratton'a (1941) bakılabilir. Elektromanyetik kuramı oluşturan denklemlerin zaman ortamındaki türev biçimi:

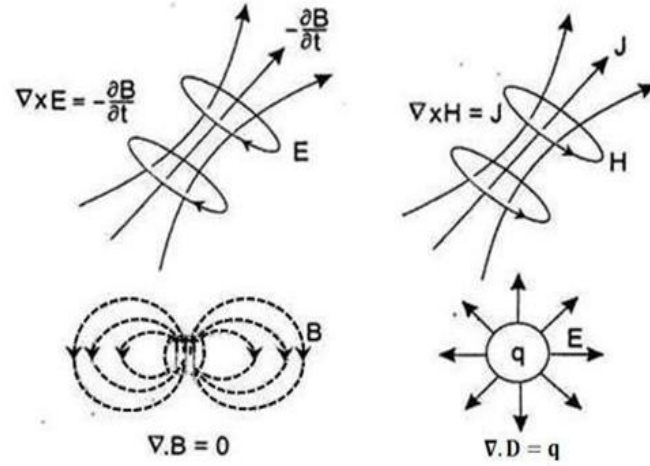
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

bağıntıları ile verilir. Burada kullanılan fiziksel büyüklerin isimleri ve MKSA sistemindeki birimleri şu şekilde verilmektedir: elektrik alan şiddeti; E (Amper/ m^2), manyetik alan şiddeti; H (Amper-sarım/m), manyetik akı yoğunluğu; B (Weber/ m^2), akım yoğunluğu; j (Amper/ m^2), elektrik yer değiştirme; D (Coulomb/ m^2), yük yoğunluğu q (Coulomb/ m^3) dür. Maxwell denklemlerindeki büyüklüklerin davranışları ve birbirleriyle olan ilişkileri Şekil 3’de gösterilmektedir. Maxwell denklemlerinin birinci bağıntısı, (1.1); zamanla değişen akı yoğunluğu ile uyartılan elektrik alanın ilişkisini gösteren Faraday yasasının matematiksel karşılığıdır. (1.2) bağıntısı ile gösterilen Ampere yasası, akım ile manyetik alan arasındaki bağıntıyı tanımlar; yani bir manyetik alan, boşlukta akım akışıyla meydana getirilebilir ve bu alan ortamdaki toplam akım (iletim akımı ve değiştirme akımları) ile orantılıdır. (1.3) bağıntısı, manyetik akı yoğunluğunun kaynaksız olduğunu ve alan çizgilerinin kapalı olduğunu göstermektedir; herhangi bir kapalı yüzeyden çıkan toplam manyetik akı sıfırdır. Buna rağmen, (1.4) bağıntısı ile elektrik yüklerden, kaynak olarak elektrik alan çizgileri çıktığı tanımlanmaktadır.



Şekil 1.3. Maxwell denklemlerinin fiziksel ifadelerinin şematik gösterimi

1.3.5. Elektromanyetik Dalgaların Yayınımını Etkileyen Fiziksel Özellikler

Daha önce bahsedildiği gibi elektromanyetik alanlar zamanla değişen elektrik (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerinden oluşmaktadır ve bu bileşenler içinden geçtikleri ortamların farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Bu değişim, bu alanların ortamda

yayınım ve sönümlenmelerini etkilemenin yanında, farklı karakterlerde yansımalar elde edilmesine de neden olur.

Birçok yer radarı uygulamasında, yerin dielektrik özellikleri (elektrik iletkenlik, dielektrik geçirgenlik, bağıl manyetik geçirgenlik) kayıt edilen verileri etkileyen faktörlerdendir. Dielektrik özelliklerdeki değişimler kıyaslandığında, manyetik değişim, diğerlerine oranla daha zayıf kalmaktadır.

1.3.5.1. Dielektrik Geçirgenlik

Dielektrik (ϵ) ifadesi elektriksel yalıtkanlıkla eş anlamlıdır ve dielektrik bir madde, elektrik akımına yüksek derecede direnç gösteren madde olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik ortamlar, elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmının saçılmadan geçişine izin verir. Dielektrik bir ortamda bir elektromanyetik alan söz konusu olduğunda, elektrik alan tarafından zorlanan yükler bu zorlamaya bir yer değiştirme hareketiyle yanıt verirler. Birim elektrik alan başına düşen elektriksel yer değiştirme miktarının ölçüsü dielektrik geçirgenlik olarak tanımlanır. Dielektrik geçirgenlik,

$$\epsilon = \frac{\bar{D}}{\bar{E}} \quad (1.5)$$

şeklinde verilir.

Birimi Farad/metre ya da Coulomb/voltmetredir. Dielektrik bir ortamda elektrik alan şiddeti arttığında, elektrik yer değiştirme hareketi bu ortamda depolanır. Daha sonra elektrik alan azaldığında, ortam depoladığı enerjiyi bırakır ve yer değiştirme akımlarını oluşturur. Bir maddenin bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r), o madde elektromanyetik enerjiyle yüklendiğinde, enerjiyi depolama ve daha sonra elektromanyetik enerjinin geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanır (von Hippel, 1954).

Olhoeft (1981) ise aynı parametreyi bir maddede mevcut elektromanyetik alan etkisiyle oluşan kutuplanma ve bu sebeple, yayıman elektromanyetik dalgalara yanıt verme yeteneğinin bir ölçüsü olarak tanımlamıştır. Bu kutuplanma elektronik, iyonik ya da moleküler olabilir. Moleküler kutuplanma tüm yalıtkanların genel özelliğidir. İyonik yer değiştirme doğada kayaçları şekillendiren minerallerde oluşurken; su ve hidrokarbonlar

moleküler kutuplanma gösteren nadir yapılar olmalarının yanı sıra, elektromanyetik alanla kutuplanmanın en büyük etkisine sahip olanlardır (Telford vd., 1976).

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), bir maddenin elektrik geçirgenliğinin boşluğun elektrik geçirgenliğine oranı ile hesaplanabilir. Ortamların dielektrik geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır (Olhoeft, 1981).

Bir ortam içerisinde belirli bir v hızında ilerleyen elektromanyetik dalgalar için o ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri izleyen bağıntıyla hesaplanabilir. Bağıl dielektrik geçirgenlik değeri,

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{v} \quad (1.6)$$

denklemiyle ifade edilir. Buradaki c ışık hızını göstermektedir ve yaklaşık değeri 0.3 m/ns'dir.

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısını arazide hesaplamak oldukça zordur. Bunun kestirimi arazide kullanılan bazı hız analizi teknikleri yardımıyla yapılabilir. Bunun yanı sıra, toprak ve çökel örnekleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılarak da dielektrik geçirgenlik ölçülebilir.

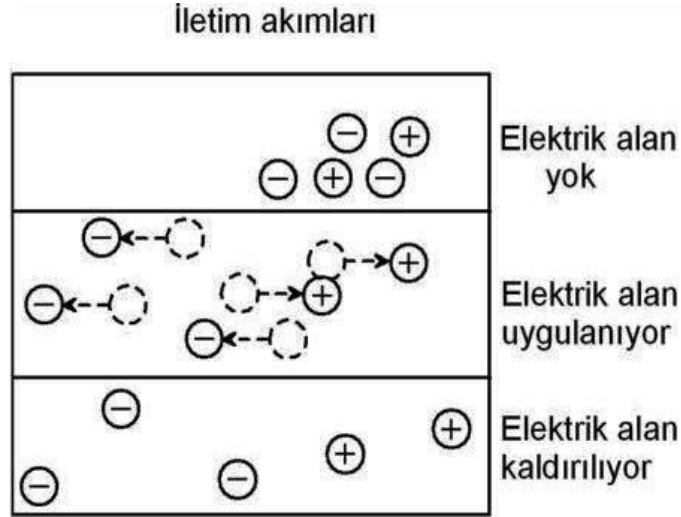
1.3.5.2. Elektrik İletkenlik

Bir ortamda bulunan elektrik yükleri o ortamda bir elektrik alan (E) ortaya çıkmasına neden olur. Elektrik alan vektörel bir büyüklüktür ve ortamın doğasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşabilir. Yükler, bir maddede bağlı ve serbest olmak üzere iki türde bulunabilir. Bunlar sırasıyla yer değiştirme akımları ve iletim akımları olarak adlandırılan akım dolaşımına neden olurlar.

1.3.5.2.1. İletim Akımları

Bilindiği gibi elektrik iletkenliğe sahip ortamlarda, serbest (bağımsız) elektrik yükler bulunmaktadır. Bu yüklerin bulunduğu ortamlara bir elektrik alan uygulandığında, bu alanın etkisiyle yükler ani bir şekilde hızlanmaya başlar ve bir uç hıza ulaşırlar ve yüklerin

doğası gereği ortamda bir elektrik akımı oluşur. Bu elektrik alan uygulanmaya devam ettiği sürece yüklerin hareketi devam eder ve bu esnada yükler buldukları ortama, elektrik alan etkisiyle aldıkları enerjiyi ısı enerjisi olarak transfer ederler. Bu hareketli yükler, ortamda bulunan hareketsiz nesnelere karşılaştıklarında, ısı enerjisi olarak ortaya çıkan enerji, hareketsiz yükleri hareketlendirecek biçimde mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik alan uygulandığı sürece bu yükler hareketlerine ve dolayısıyla, elektrik enerjisi önce ısı ve daha sonra da mekanik enerjiye dönüşmeye devam eder. Elektrik alan kalktığında, bu hareketlenen yükler yavaşlar ve anlık bir sürede dururlar. Burada unutulmaması gereken, bu enerji dönüşümünün tek taraflı olduğu yani elektrik enerjisinin önce ısıya ardından mekanik enerjiye bir daha geri dönülmez şekilde dönüştüğüdür. Metal bir telde dolaşan elektronlar iletim akımlarına örnek olarak verilebilir. Metallerde, elektronlar yüklerini bir noktadan diğerine aktarmak için yapının metalik bağları içinde hareket ederler. Sulu çözeltilerde oluşan iyon hareketleri de yaygın bir iletim mekanizmasıdır ve birçok yer radarı uygulamasında en önemli iletim şeklidir (Annan, 2001). Şekil 1.4 iletim akımları için elektrik yüklerinin hareketini göstermektedir.



Şekil 1.4. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi (Annan, 2001).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.7)$$

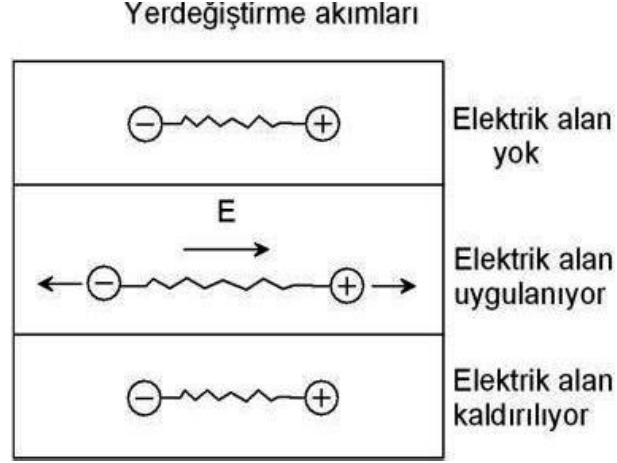
Bu bağıntı, iletim akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir ve bir elektrik alan var olduğunda, serbest yüklerin elektrik akımı oluşturabilmeleri için hareketlerini tanımlar. Burada σ , elektrik iletkenliktir.

Matematiksel olarak çözümü basite indirmek için, ortamın elektrik iletkenlik açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekanstan bağımsız olduğu düşünülür. Bu durumda, ortamdaki elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki ilişki doğrusaldır ve aralarındaki oransallık katsayısı elektrik iletkenlik değerini verir. Gerçekte iletkenlik, elektrik alandaki değişim oranı kadar sıcaklık, basınç ve diğer faktörlerin de bir fonksiyonu olabilir. Ancak bunlar yer radarından elde edilen yanıtlarda çoğunlukla ikinci derecede önem taşır.

Elektrik iletkenliğe sahip ortamların içerisine giren elektromanyetik enerji, elektromanyetik alanın elektrik alan bileşeninin bu ortam içerisinde manyetik alan bileşeninden ayrılarak enerji dönüşümüne uğraması nedeniyle, saçılıp çok çabuk şekilde sönmülmektedir. Yani diğer bir ifadeyle, bir enerji yitimi söz konusudur ve bu ortamlarda radar dalgalarının ilerleyemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, maksimum elektromanyetik enerji iletimi (nüfuzu) için ortam düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek derecede dielektrik özelliklere sahip olmalıdır.

1.3.5.2.2. Yer Değiştirme (Kutuplanma) Akımları

Yer değiştirme akımları maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisiyle harekete zorlanması sonucu oluşur. Bağlı yüklere atomun çekirdeği çevresindeki elektron bulutu örnek verilebilir. Başlangıçta durağan olan bağlı yükler elektrik alan uygulandığında, bağlarının izin verdiği miktarda diğer bir durağan konuma hareket ederler. Yer değiştirme hareketinin tamamlanmasının hemen ardından, elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama aktarılır ve ortamda depolanır. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında, yük başlangıçtaki denge konumuna geri döner ve bu sırada depolanan enerji geri bırakılır (Şekil 1.5). Bu davranışa en temel örnek, kapalı bir elektrik devresindeki kondansatör verilebilir. Devrede enerji, yüklerin kondansatörde toplanması ile biriktirilir ve sonrasında yüklerin boşalmasıyla tekrar devreye aktarılır.

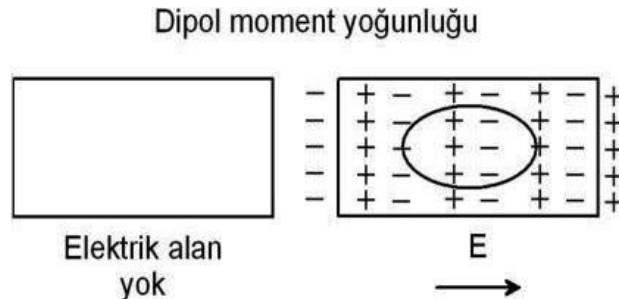


Şekil 1.5. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001).

Bir elektrik alan uygulandığında, hacimsel bir maddede yük hareketi o maddede dipol moment dağılımı şeklinde bir yük dağılımına neden olur (Şekil 1.6). Bu dipol moment dağılımının oluşumu, bağlı yük hareketleri (diğer bir deyişle yer değiştirme akımları) ile ilgilidir. Bu yük dağılımı dipol moment yoğunluğu (\vec{D}) ile tanımlanır. Dipol moment dağılımı literatürde elektrik yer değiştirme olarak da adlandırılır. Dipol moment yoğunluğunun zamanla değişimi yer değiştirme akımını (J_D) matematiksel olarak tanımlar. Yer değiştirme akımı,

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.8)$$

denklemleriyle ifade edilir.



Şekil 1.6. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı (Annan, 2001).

Yer değiştirme akımının bağıntısı, yer değiştirme akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi tanımlar. Aynı iletim akımlarında olduğu gibi, çözümleri basite indirgemek için, ortamın yer değiştirme akımları açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekanstan bağımsız olduğu düşünölmektedir. Bu durumda ortamdaki indüklenmiş dipol moment yoğunluğu, uygulanan elektrik alan ve oransallık sabiti olarak adlandırılan dielektrik geçirgenlik ile doğru orantılıdır.

1.3.5.3. Toplam Akım Dolaşımı

Herhangi bir maddede, bir elektrik alan uygulanması sonucu ortaya çıkan elektrik akımı, iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamından oluşur. Elektrik alandaki değişime bağlı olarak, bu iki farklı türdeki akımdan biri diğerine baskın olabilir. Toplam akım, ortamın elektriksel özellikleriyle birlikte, elektrik alanın kendisinden ve elektrik alanın zamanla değişiminden oluşur. Bu kavram, sinüzoidal şekilde zamanla değişen alanlar için matematiksel olarak;

$$J = J_C + J_D \quad (1.9)$$

$$J = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$J = (\sigma + i\omega\epsilon)E \quad (1.11)$$

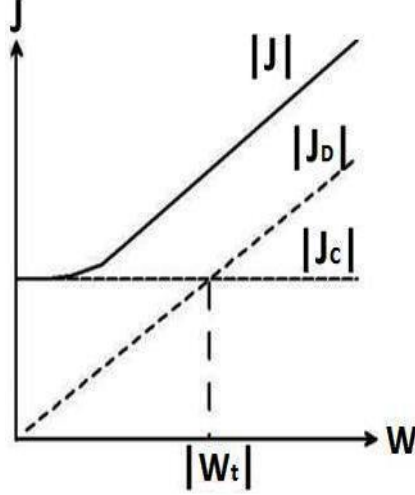
(1.9), (1.10) ve (1.11) bağıntılarında gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

Bu bağıntılardan ω , açısal frekansı ile yer değiştirme akımlarının açısal frekansının orantılı olduğu anlaşılmaktadır.

Yer değiştirme akımları ile iletim akımları arasında 90° faz farkı vardır ve yer değiştirme akımı sanal bileşeni oluşturur. Akımlar arasındaki bu faz farkı, yer değiştirme akımının elektromanyetik alanlar için enerji toplayıcı bir mekanizma olduğunu gösterirken, iletim akımının ise enerji dağıtıcı bir mekanizma olduğunu göstermektedir (Annan, 2001).

şekil 1.7'de toplam elektrik akımının frekansa göre değişimi görölmektedir. Yer radarı için tanımlanan basit ortamlarda, elektrik iletkenlik ve dielektrik geğirgenliğinin sabit, yer değiştirme ve iletim akımlarının eşit olduğu bir geçiş frekansı (ω_t) vardır.

Genelde ortamlarda, yer değiştirme akımları iletim akımlarının bir miktar üzerinde olma eğilimindedir. Geçiş frekansı değerinin üzerinde yer değiştirme akımları baskın iken, bu frekans değerinin altında iletim akımları baskındır (Annan, 2001).



şekil 1.7. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi (Annan, 2001).

Geçiş frekansı açısal frekans olarak ifade edilip

$$\omega_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.12)$$

şekilde ifade edilmektedir.

Geçiş frekansı yer radarında düşük-kayıplı ortamların tanımlanmasında önem taşır. (1.13) bağıntısı, kayıp tanjantı olarak adlandırılır ve bir maddedeki iletim akımlarının yer değiştirme akımlarına oranını verir. Kayıp tanjantı,

$$\tan\delta = \frac{|J_C|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilir.

1.3.5.4. Bağıl Manyetik Geçirgenlik

Manyetik özellikler esasen kapalı bir yol etrafında hareketli olan bir elektrik yükten kaynaklanır (von Hippel, 1954). Atomların yapı taşları spin denen yörüngesel bir dönüşe sahiptir ve bu hareket, maddenin atomlarında ve moleküllerinde oluştuğunda, yükün dönüşü sonucunda dairesel bir akım döngüsü ortaya çıkar ve bu manyetik dipol momentine neden olur. Örneğin bir elektron atomik bir çekirdek etrafında hareket ettiğinde, bu yük hareketi bir manyetik moment yaratabilir (Annan, 2001).

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik dipol moment yoğunluğu ile ölçülür. Atom ve moleküllerin manyetik dipol momentlerinin dizilebilme ya da dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın yönleniminden farklı şekilde hareket etme seviyesinin ölçüsü manyetik geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır. Dizilim içerisine girebilecek ilgili momentlerin artışı, maddenin manyetik olarak daha fazla kutuplanması anlamına gelir. Ortamda bulunan bir manyetik alan, manyetik dipol momentini dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler.

Genelde manyetik alana verilen bu yanıtlar zayıftır ve manyetik geçirgenlikte çok önemli değişikliklere yol açmazlar. Bu yüzden radar uygulamalarında elektriksel özelliklere göre daha az etkiye sahiptirler.

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik dipol moment yoğunluğu ile ölçülür. Bir elektrik akım kapalı bir döngüde dolaştığında manyetik moment;

$$\vec{M} = IA\hat{n} \quad (1.14)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Burada \vec{M} manyetik dipol momentini, I elektrik akımını, A akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı ve \hat{n} normal vektörünü göstermektedir. Hacimsel ortamlar için, ortamın moment yoğunluğu,

$$\vec{m} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (1.15)$$

bağıntısıyla tanımlanır ve birimi A/m 'dir.

k , boyutsuz bir nicelik olan manyetik duyarlılığı gösterirken, (H) manyetik alanı tarafından indüklenen manyetik moment miktarı ise;

$$\vec{m} = k\vec{H} \quad (1.16)$$

bağıntısıyla tanımlanır.

Yer değiştirme akımı indüklenmiş elektrik dipol momenti ile indüklenmiş manyetik moment arasında önemli bir benzerlik vardır. Maddedeki manyetik akı;

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.17)$$

olarak tanımlanır. Manyetik geçirgenlik ise

$$\mu = \mu_0(1 + k) \quad (1.18)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini gösterir ve $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ 'dir .

Maddenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenlik (K_m) kavramını vermektedir. Manyetik geçirgenlik kavramı

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + k) \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k; suseptibilitiyi temsil etmektedir.

Ortamda bulunan bir manyetik alan manyetik dipol momenti, dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler. Bazı maddelerde dizilim uygulanan alanla aynı yönde olmasına rağmen, diğer maddelerde dizilim uygulanan manyetik alana paralel olmayan şekilde gerçekleşebilir. Bu iki davranışa sırasıyla, paramanyetizma ve diamanyetizma denir. Genelde manyetik alana verilen bu cevaplar zayıftır ve manyetik geçirgenlikte çok önemli değişikliklere yol açmazlar. Manyetik duyarlılığın ortalama değerleri 10^{-5} 'den küçüktür (Annan, 2001).

Yine de bazı durumlarda, manyetik momentler domen olarak adlandırılan maddenin kristal yapısının büyük kısımlarında sıralanabilir. Domenlerin momenti, uygulanan alanla aynı yönde bulunan kristal yapıdaki moleküller ile değişebilir ve bir domenden diğerine hareket edebilir. Bu tür maddelere ferromanyetik maddeler adı verilir. Ferromanyetik maddelerde, kutuplanma çok büyük olabilir ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri çok

yüksek olabilir. Demir, kobalt ve nikel gibi maddelerde bağıl manyetik geçirgenlik değeri yüzler mertebesinde olabilir. Ferromanyetik maddelerde manyetik dipol momentleri kalıcı olarak sıralanabilir ve bu tür mıknatıslanma kalıcı mıknatıslanma olarak bilinir. Bu tür ortamlarda manyetik geçirgenlik oldukça yüksektir ve maddenin dinamik davranışı karışıktır. Bu tür maddeler nadiren toprakta ya da kayaçların içerisinde büyük miktarlarda bulunabilmesine rağmen, bunların ortamdaki az miktardaki varlıkları bile geçirgenlik üzerinde çok büyük etkiye sahiptir (Annan, 2001).

Dipol moment yoğunluğunun davranışı çok karmaşık olabilir ve domenlerin nasıl hareket ettiği, geliştiği ve alan, frekans ile sıcaklığa bağımlı olabilen yönelim değişimi ile kontrol edilir. Çeşitli toprak ve kayaç gruplarında, manyetik davranış magnetit, maghemit ve ilmenit gibi yüksek manyetik özelliklere sahip mineral miktarı ile belirlenir. Ortamların manyetik minerallerindeki hacimsel artış manyetik duyarlılığı arttırır. Bunun yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için (1.20) ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada θ madde içerisindeki manyetik özelliklere sahip mineralin hacimsel miktarını vermektedir.

$$k = 3.8\theta \quad (1.20)$$

1.3.6. Elektromanyetik Empedans

Elektromanyetik alanların bileşenleri olan elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik yönlerde oluşur ve her iki alana dik yöndeki doğrultu boyunca hareket ederler. Oluşacak manyetik alanın genliği, uygulanan elektrik alanın genliğine bağlıdır. Bu durumun tam tersi, alan bağlaşımı yani bir alanın diğer alan üzerindeki etkisi nedeniyle ortaya çıkabilir. Bu olgu elektromanyetik empedans kavramı ile açıklanabilir. Elektromanyetik empedans (Z),

$$Z = \frac{E}{H} \quad (1.21)$$

şeklinde ifade edilir.

Elektromanyetik dalgaların hareket ettikleri ortamların iletkenlik özelliklerinin önemli olduğu durumlarda çözümü kolaylaştırmak amacıyla, ortamdaki yayının sinüzoidal biçimli bir dalga olduğu düşünülebilir. Düşük kayıplı ortamlarda ise elektromanyetik empedans kavramı,

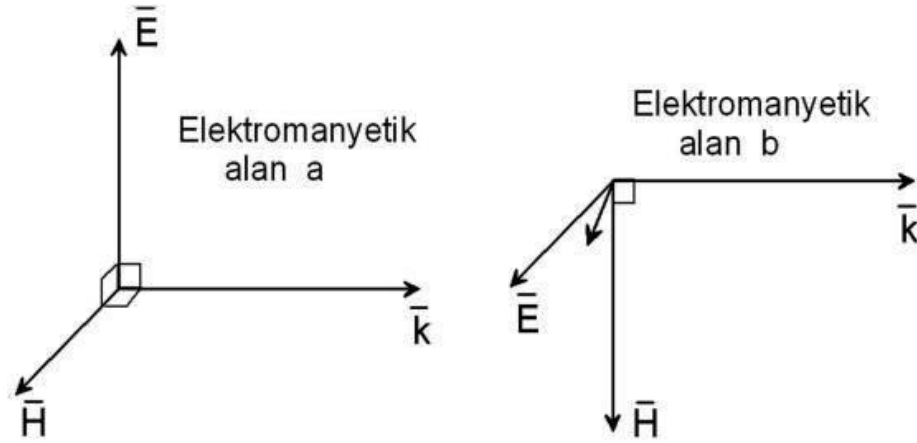
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (1.22)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - i\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon}\right) \quad (1.23)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

1.3.7. Kutuplanma

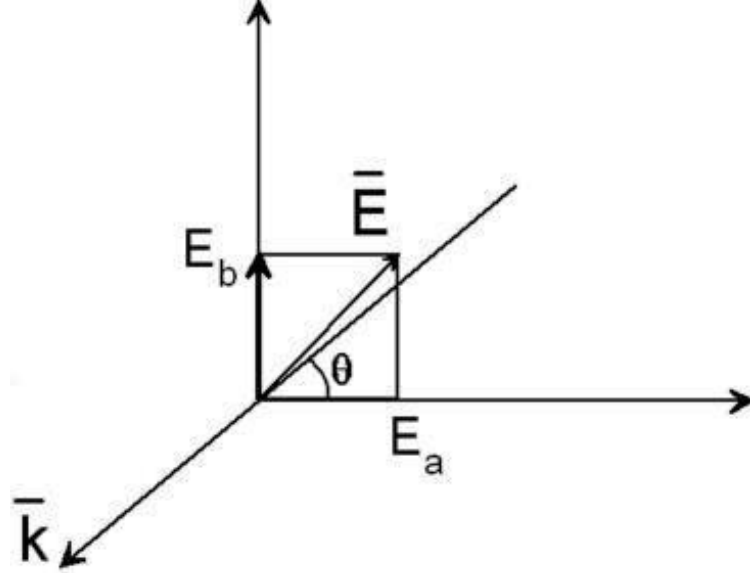
Elektromanyetik alanların yayılım yönünü belirlemede kullanılan sağ el kuralına göre, yayılım yönüne dik olarak, Şekil 1.8'de görülen farklı iki elektromanyetik alan oluşabilir. Genelde, elektromanyetik alan çözümlerinde elektromanyetik alanın yönü için elektrik alan vektörünün yönü seçilir.



Şekil 1.8. Yayılım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir (Annan, 2001).

Elektromanyetik alanın yayılım yönündeki birim vektöre (\hat{k}) dik bir düzlemde oluşan elektrik alan Şekil 1.9'da görülmektedir. Şekilde görülen elektrik alan \vec{E} , \vec{E}_a ve \vec{E}_b elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü gösterildiği şekildedir. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin zamanla değişimi sinüzoidal olduğunda, doğrusal,

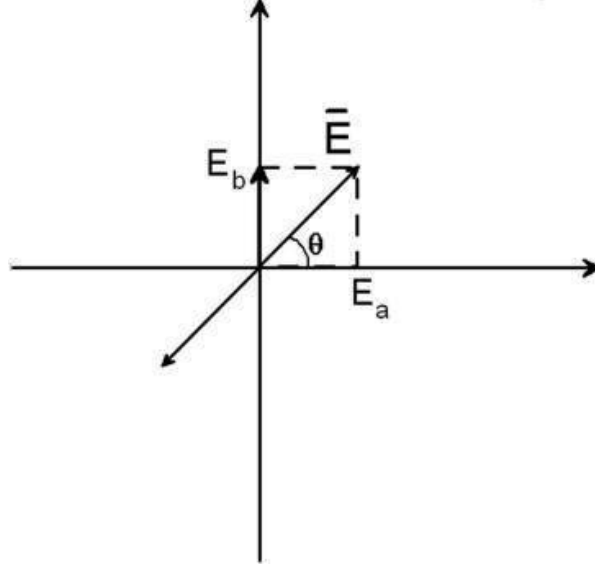
döngüsel ve eliptik kutuplanma kavramlarından söz edebilir. Bu durumda elektrik alan vektörü;



Şekil 1.9. Toplam elektrik alan \vec{E} , \vec{E}_a ve \vec{E}_b elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü \vec{E} yönündedir (Annan, 2001).

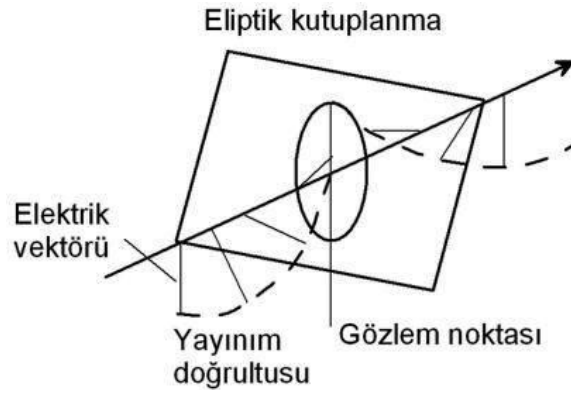
$$\vec{E} = E_a e^{i\phi_a} e^{i\omega t} \hat{a} + E_b e^{i\phi_b} e^{i\omega t} \hat{b} \quad (1.24)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Burada E_a ve E_b elektrik alan bileşenlerinin genlikleridir ve skalar büyüklüklerdir. ϕ_a ve ϕ_b birbirine dik \hat{a} ve \hat{b} birim vektörlerine göre elektrik alan bileşenlerinin faz açılarını göstermektedir. Eğer $\phi_a = \phi_b$ ise elektrik alan doğrusal biçimde kutuplandığı söylenir. Elektrik alan vektörü sabit yönlüdür ($\phi = \text{sabit}$) ve genliği Şekil 1.10'da gösterildiği gibi sinüzoidal olarak değişir.



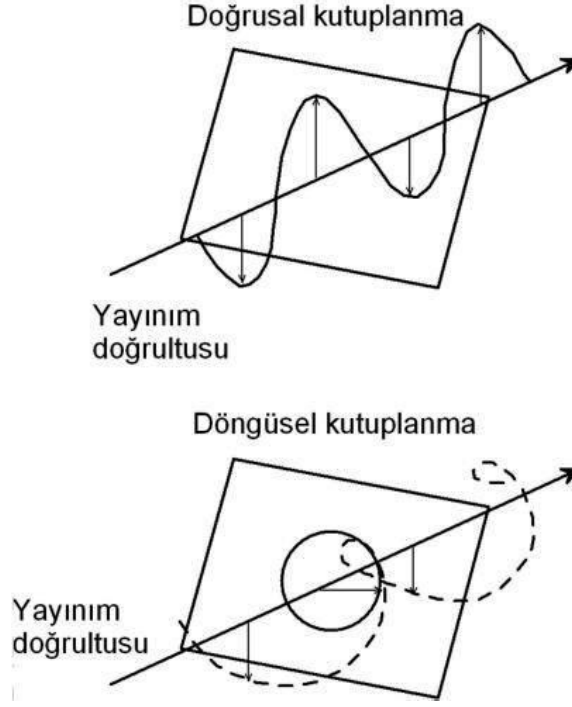
Şekil 1.10. Elektrik alan bileşenleri aynı fazda ise elektrik alan sabit bir yönde, doğrusal şekilde kutuplanmıştır (Annan, 2001).

Eliptik biçimdeki kutuplanma durumunda, genlik ve alan yönü zamanla alan düzleminde bir elips çizen şekilde ortaya çıkar ve uzayda elipsler çizerek ilerler (Şekil 1.11). Genelde doğada alan vektörü sinüzoidal şekilde kısa sürelerde ilerleyebilir. Hareket daha çok düzensiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu yüzden doğrusal, dögüsel ve eliptik kutuplanma geçici (transient) alanlar için geçerlidir.



Şekil 1.11. Sinüzoidal dalgalar için alanlar doğrusal, dairesel ve eliptik biçimde kutuplanabilir (Annan, 2001).

Şekil 1.11'in devamı



1.3.8. Elektromanyetik Dalga Özellikleri

Elektromanyetik dalgalar, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmaktadırlar. Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1885)'un yapmış olduğu çalışmalar ışığın elektromanyetik dalga olduğunu ve boşlukta 0.3 m/ns hızıyla yayıldığını ortaya koymaktadır (Sears vd., 1982). Işık hızı;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1.25)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olup $c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ olarak hesaplanır. Elektromanyetik dalga madde içinde yayılırsa hız;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (1.26)$$

olarak verilir. Burada ϵ , maddenin dielektrik sabitini, μ manyetik geçirgenliği göstermektedir. Maddenin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ve maddenin bağıl manyetik geçirgenliği μ_r olarak tanımlanırsa,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.27)$$

ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.28)$$

bağıntıları ile hız bağıntısı tekrar yazılırsa malzemenin içinde seyahat eden elektromanyetik dalga hızı;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1.29)$$

olarak ifade edilebilir. (1.29) bağıntısında belirtildiği üzere elektromanyetik dalga hızı (v), bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenliğin bir fonksiyonudur.

Elektromanyetik dalganın genliğini etkileyen faktörlerinden biri de sönümlenme ve empedanstır. Elektromanyetik dalga için sönümlenme ve empedans bağıntıları ise

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.30)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.31)$$

şeklinde ifade edilir (Annan, 2004).

Boşluğun empedansı;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (1.32)$$

olarak ifade edilir.

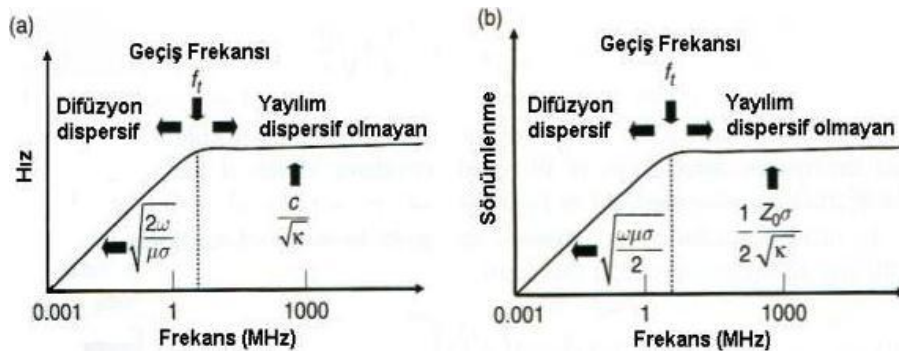
(1.29) ve (1.30) bağıntıları; dielektrik sabitteki değişimin hız değişimini etkilediğini, iletkenlikteki değişiminin ise sönümlenme üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenden dolayı, yer radarı yöntemi bağıl olarak direnç gösterme eğilimde olan malzeme içeren bölgelerde iyi sonuçlar vermektedir. Bunun tersi durumda, elektriksel olarak iletken kil malzemesinin olduğu bölgelerde yer radarının kullanımı sınırlı olmaktadır. %5 - %10 oranında kil içeren malzemedeki yer radarının nüfuz derinliğini 1 metreden daha aza düşürebilir (Walther vd., 1986; Knight, 2001).

Dielektrik sabiti, iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip herhangi bir ortam için elektromanyetik dalga hızı (v) ve sönümlenme (α) frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Düşük frekanslarda dalga özellikleri açısal frekansa bağlıdır. Elektromanyetik dalga düşük frekanslarda dispersif yayılım göstererek difüzyon hareketi ile ilerler. Yüksek frekanslarda ise dalga özellikleri frekansa bağlıdır ve dispersif olmayan yayılım gösterir. Yüksek frekans davranışı yer radarı yöntemi için en önemli özelliktir (Şekil 1.12).

Dispersif dalga hareketinden dispersif olmayan dalga hareketine geçiş galvanik iletimin baskın olduğu durumdan yer değiştirme akımları ile iletimin baskın olduğu duruma geçtiği frekansta gerçekleşir. Bu frekansa geçiş frekansı f_t denir. Geçiş frekansı,

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (1.33)$$

bağıntısıyla tanımlanır.



Şekil 1.12. (a) Hız ve (b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi (Annan, 2009).

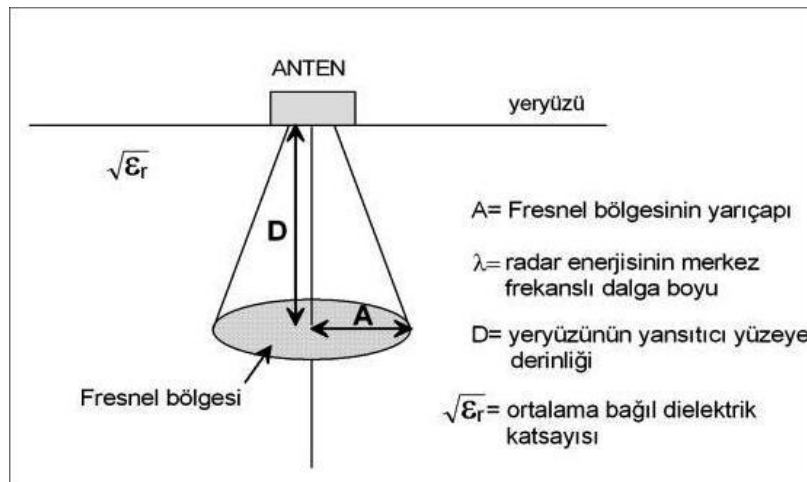
1.4. Yer Radarı Kuramı

1.4.1. Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı

Mevcut yer radarı sistemlerinde dipol antenler kullanılır. Dipol antenler genellikle nikel kaplı alüminyum metal çubuk şeklindedir ve çapları birkaç milimetreden 20 mm'ye kadar değişir. Anten uzunluğu, antenden çıkan darbenin genişliğine bağlıdır. 8 ile 12 ns arasında değişen darbe genişliği için gereken anten boyu 0.9 ile 1.2 m arasında iken, 1-2 ns'lik daha ince darbeler için dipol antenin boyu 0.15 ile 0.4 m arasında değişmektedir. Bu yüzden, darbe genişliğini arttırmak için daha uzun anten gereklidir (Parasnis, 1997).

Bir yer radarı anteni sadece tek bir darbe değil, her biri aynı şekle ve süreye sahip, genellikle 2 den 50 μ s'ye kadar değişen belirli aralıklarda ilerleyen darbeler dizisi oluşturur. Bu darbeler dizisinde arka arkaya gelen iki darbe arasındaki aralığın tersi tekrarlanma frekansı (f_r) olarak adlandırılır. Tipik tekrarlanma frekansı 20-500 kHz aralığındadır. Tek bir darbenin süresi genelde 1 ile 100 ns arasında değişir (Parasnis, 1997).

Yer radarı sistemleri yeraltına Şekil 1.13'de görülen elips şeklinde bir koni biçiminde yayınan radar ışınları göndermektedirler ve bu yayınım doğrusal bir hat değildir (Annan ve Cosway, 1992, 1994; Arcone, 1995; Davis ve Annan, 1989). Elips şeklindeki iletim konisi genellikle ilerleme doğrultusuna ya da antenin uzun eksenine paralel doğrultuda uzanmaktadır.



Şekil 1.13. Yer radarı anteninden yeraltına gönderilen yayınım örneği (Conyers ve Goodman, 1997).

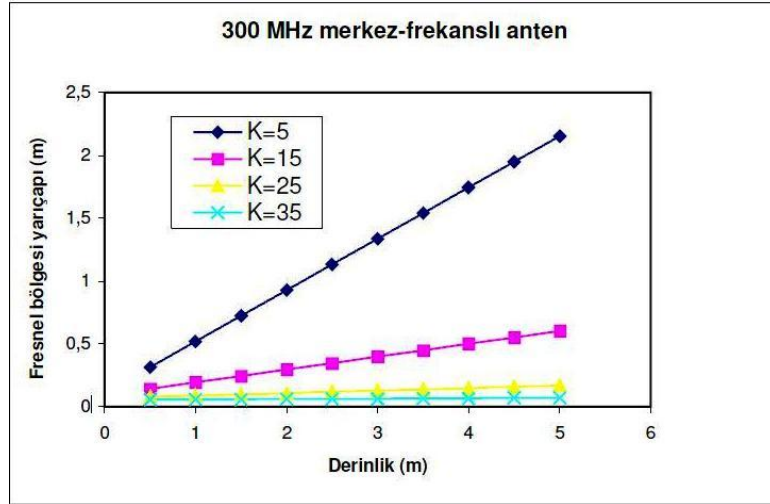
Yer radarı çalışmalarında Fresnel bölgesi, radar dalgasının yansıdığı alanı tanımlar ve yatay çözünürlük olarak da ifade edilir. Yatay çözünürlük, Fresnel bölgesi bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Fresnel bölgesinin boyutu; dalga boyu ve derinlik tarafından belirlenir. Conyers ve Goodman (1997) Şekil 1.13'de gösterilen yayınım konisinin çeşitli derinliklerdeki genişliğini hesaplamak için (1.34), Annan (1992) ise (1.35) eşitliğini kullanmıştır.

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (1.34)$$

$$A = \frac{\lambda}{2} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (1.35)$$

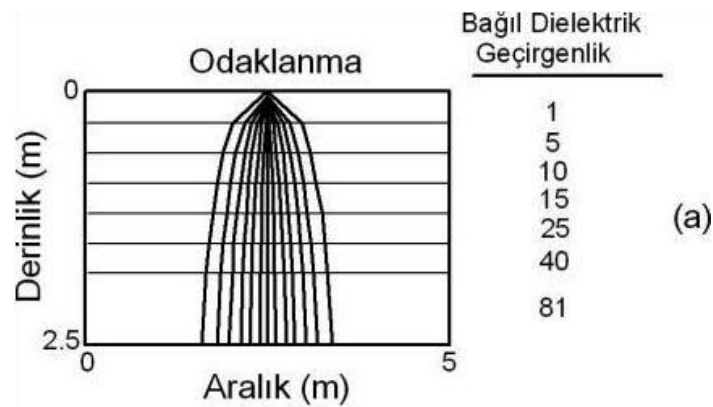
Burada A , oval Fresnel bölgesinin uzun ekseninin yarıçapını, D derinlik değerini ve ϵ_r ise ortamın dielektrik katsayısını göstermektedir. Oval Fresnel bölgesinin kısa eksenini, kabaca uzun eksen boyunun yarısı olarak verilmektedir. Ancak burada unutulmaması gereken, her iki eşitlikte de radar dalgalarının geçtiği ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerinin sabit ve tek değer alması nedeniyle, gerçek yer koşullarına sadece kaba bir yaklaşım vardır. Bu durum ancak kontrol edilebilen laboratuvar koşullarında geçerli olabilir.

Şekil 1.14, 300 MHz merkez-frekanslı bir antenden yayınan radar dalgalarının farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda oluşan çözünürlüklerini göstermektedir. Elde edilen bu grafikten yararlanarak, artan derinlikle iletim konisinin, dolayısıyla Fresnel bölgesinin genişlediği görülmektedir. Ayrıca radar ışınlarının yüksek dielektrik geçirgenlikli bir ortamdan daha düşük bağıl dielektrik geçirgenliğe sahip bir ortama geçmesiyle de, Fresnel bölgesinin büyüyeceği görülmektedir.



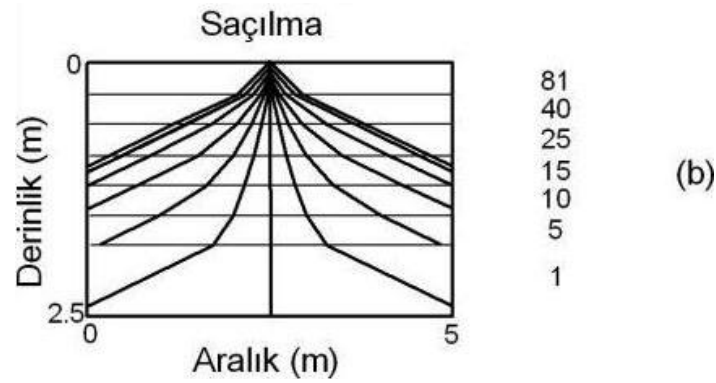
Şekil 1.14. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip bir ortamda 300 MHz merkez-frekanslı bir anten kullanılarak elde edilecek yatay çözünürlük büyüklükleri (Conyers ve Goodman, 1997).

Yeraltının dielektrik özelliğindeki değişimler, radar dalgalarının ara yüzeylerde farklı açılarda kırılmasına neden olmaktadır ve bu durum yansıyan radar dalgalarını etkilemektedir. Yeryüzünden yeraltına doğru bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısının artışı, radar dalgalarının ara yüzeylerde daha dar bir açıyla kırılmasına (Şekil 1.15a) ve konik radar dalgalarının yer içine daha fazla odaklanmasına yol açar (Goodman, 1994). Eğer radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlikli ortamlara doğru hareket ediyorsa, bu odaklanma etkisi artan bir biçimde oluşmaya devam eder (Şekil 1.15b).



Şekil 1.15. Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman, 1997).

Şekil 1.15'in devamı



Derinlikle oluşan kırılma ve bunun sonucu olarak odaklanma miktarı Snell Yasası ile açıklanabilir (Sheriff, 1984). Snell Yasasında, iki ortam arasındaki sınırdaki meydana gelecek yansıma ya da kırılma miktarı, radar dalgasının bu ara yüzeye geliş açısına ve hızına bağlıdır. Artan derinlikle bağlı dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ortamda ilerleme hızının azalmasına ve geliş açısının küçülerek, iletim konisinin daha fazla odaklanmasına neden olur. Radar dalgaları yeraltına artan derinlikle ilerlerken, yeraltının bağlı dielektrik geçirgenlik değeri yavaş yavaş azalıyor, iletim konisi her ara yüzeyde daha geniş açıda kırılarak, genişler ve saçılır (Şekil 1.15b).

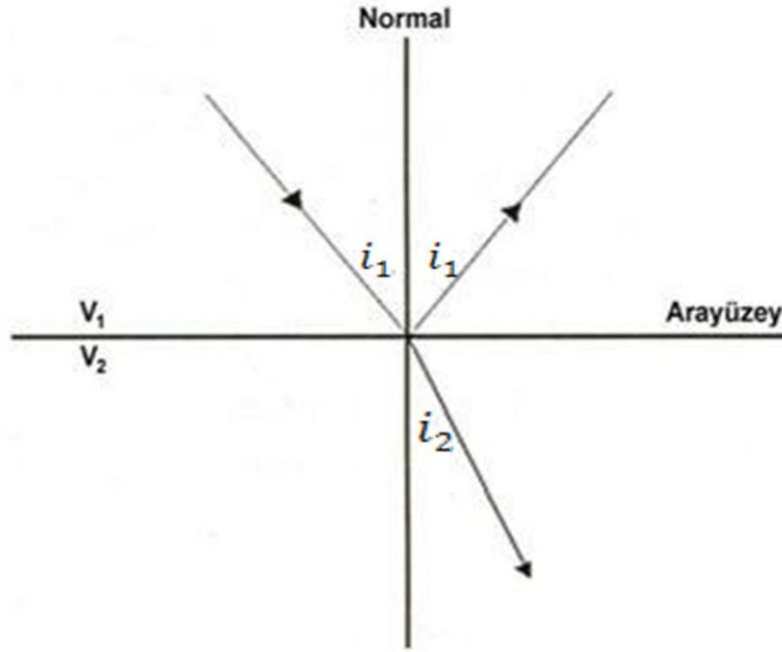
Yeraltının bağlı dielektrik geçirgenlik değeri artma eğilimi gösteriyorsa, radar ışınları odaklanma eğilimi gösterir. Bu nedenle, yüksek bağlı dielektrik geçirgenlik değerine sahip alanlarda çalışma yapılırken, arandığı tüm yer altı yapılarının belirlenebilmesi için radar profillerinin aralığı sıklaştırılmalıdır.

1.4.2. Yer Radarı Sinyallerinin Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi

Elektromanyetik dalgaların herhangi bir ara yüzdeki davranışı “Snell Kanunu” ile açıklanır. Snell kanununa göre eğer bir dalga iki ortamı ayıran bir sınırdan geçerse yansıyan ve kırılan dalgalar ortaya çıkar. Bu kanun yansıyan ve kırılan ışınların genliği konusunda bilgi vermez fakat yansıyan ve kırılan ışınların normalle olan doğrultularını gösterir. Bu kanun genellikle;

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \quad (1.36)$$

olarak verilir.



Şekil 1.16. Ara yüzeye gelen dalganın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması (Annan, 2005).

Yansıma ve iletim katsayıları ile elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir ara yüzeyde nasıl değiştiği açıklanabilir (Şekil 1.16). Tabakalı bir ortamda, radar enerjisi zemin içine verici bir anten ile gönderilmektedir. Gönderilen bu sinyal yer altında farklı dielektrik özelliğe yada farklı yayılım hızlarına sahip ortama ulaşana kadar devam eder. Sinyal bu sınıra ulaştığında, sinyalin bir kısmı geliş açısına eşit bir açıyla geriye yansırken, geri kalan enerji diğer ortama iletilir. Bu sınır ötesinde iletilen enerjinin genliği azalır. Ancak, bu iletilen enerji daha derinlerdeki uygun ara yüzeylerde de yansıma olasılığına sahiptir (Wilchek, 2000). Burada sınıra gelen dalganın genliği I , yansıyan dalga RI , iletilen dalga TI , R ve T yansıma ve kırılma katsayıları olarak ifade edilir. İletim ve yansıma katsayıları ortamın dielektrik özelliklerine bağlı olmaktadır. Yansıma katsayısı, yansıyan dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranıdır. İletim katsayısı da, iletilen dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranı olarak tanımlanır. Bu iki katsayı, ara yüzeyin üstünde ve altındaki zeminin dielektrik sabiti kullanılarak hesaplanmaktadır (Wilchek, 2000). Bu noktada elektromanyetik dalganın doğası hakkında daha ayrıntılı düşünüldüğünde yayılma doğrultusunda birbirinden bağımsız iki ayrı bileşen vardır (Annan, 2005).

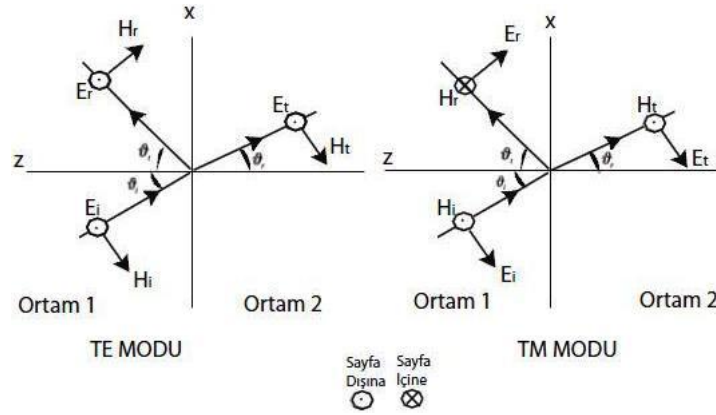
Eğer, ϵ_{r1} birinci ortamın permittivitesi, ϵ_{r2} ise ikinci ortamın dielektrik permittivitesini gösterirse, iletim ve yansıma katsayıları;

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.37)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.38)$$

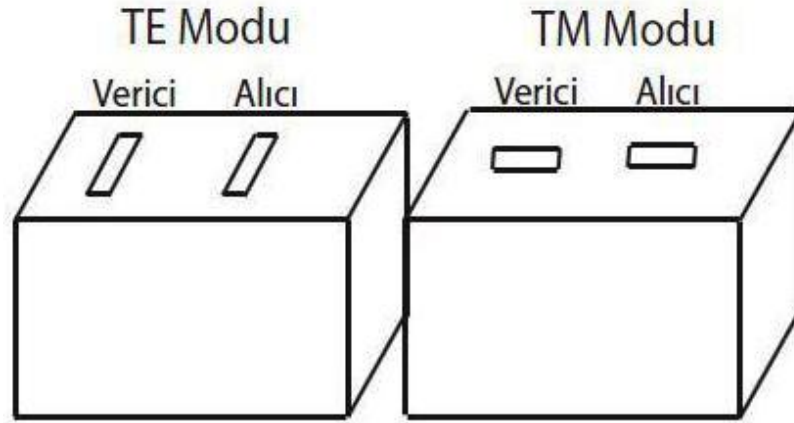
bağıntılarıyla ifade edilir.

İki boyutlu ortamda düzlemsel bir ara yüzey olduğunda elektromanyetik dalga alanı iki moda ayrılmaktadır. Bu dalga modları TE (Enine elektrik alan) ve TM (Enine manyetik alan) olarak adlandırılır (Şekil 1.17). TE modunun elektrik alan bileşeni ara yüzeye paralel iken ve TM modunun manyetik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir.



Şekil 1.17. TE ve TM bileşenlerinin ara yüzeyde yansıması ve iletimi (E:Elektrik alan vektörü, H:Manyetik alan vektörü) (Balanis, 1989).

Elektromanyetik dalga alanının TE ve TM olarak iki moda ayrılarak incelenmesi tamamen anten geometrisinden kaynaklanmaktadır. Eğer alıcı ve verici antenlerin yönü profil doğrultusu ile aynı ise TM modu, profil yönüne dik ise TE modu söz konusudur (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. Anten durumlarına göre TE ve TM modları (van der Kruk vd., 2006).

Elektromanyetik alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları TE modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_i - Z_1 \cos \vartheta_t}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.39)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.40)$$

$$1 + T = R$$

TM modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_t - Z_1 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_t + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (1.41)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (1.42)$$

$$1 + T = R \frac{\cos \vartheta_t}{\cos \vartheta_i} \quad (1.43)$$

olarak verilir (Balanis, 1989). Burada Z_i i'nci tabaka için elektromanyetik empedansları ifade etmektedir. Bu duruma göre yansıma katsayılarının değeri negatif veya pozitif

olabilir. Burada enerjinin korunumu sağlanmıyormuş gibi görünse de aslında enerji korunur (Sadiku, 1995).

1.4.3. Sinyal Hızı ve Derinlik Belirlenmesi

Yeraltında seyahat eden radar dalgalarının hızlarının belirlenmesi, araştırılan yapıların derinliklerinin hesaplanabilmesi açısından en önemli parametredir. Eğer hız belirlenebilirse, elde edilen radargrama ait bir derinlik eksenini oluşturulabilir.

Boşlukta ya da hava içinde elektromanyetik enerji ışık hızında (yaklaşık 0.3 m/ns) hareket eder. Hava içinde ışık hızında yayılan enerjinin bir kısmı kırılarak yer içinde genelde 0.01-0.16 m/ns arasında değişen hızlarda hareket etmektedir. Hem dielektrik katsayı hem de elektrik iletkenlik bu ortamlarda yayılan radar dalgalarının hızlarını büyük oranda etkiler (Moorman, 2001). Radar dalgalarının hızları,

$$v = \frac{c}{(K'(\sqrt{1+\tan^2\delta}+1))/2} \quad (1.44)$$

$$v = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/ns)} \quad (1.45)$$

denklemleriyle verilir. Burada c ; ışık hızı, K' ; ortalama bağıl dielektrik katsayısı, $\tan \delta$ ise (1.13) eşitliği ile verilen kayıp tanjantını ifade etmektedir.

Çeşitli ortamlardaki radar enerjisinin tipik yayılım hızları Tablo 1.3'de verilmiştir. Su içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayılım hızı çoğunlukla sabit olarak kabul edilmektedir ve tabloda görülen fiziksel parametreler kullanılarak, özellikle gölsel alanlardaki çalışmalarda suyun derinliği hesaplanabilir. Ancak özellikle yeraltında tortul tabakalar gibi farklı gözeneklilik ve su içeriğine sahip ortamların yayılım hızları çok çeşitlilik gösterir ve bu tür ortamların kalınlığının ölçülmesinde hızın belirlenmesi büyük önem taşır. Eğer sondaj açma olanağı varsa, yayılım hızı doğrudan arazide yapılan derinlik ölçümleri ile belirlenebilir. Eğer böyle bir imkân yoksa hız değeri gelen varışlar ve yatay ara yüzeylerden oluşan yansımaların kullanıldığı ODN ölçüm tekniği kullanılarak ya da sabit ofsetli ölçümler yapılarak elde edilmiş radargramlardan nokta kaynakların yansımalarının analiz edilmesiyle belirlenebilir. İkinci ve üçüncü yöntemler nispeten güçlü

ve basit yansımali ortamlardaki üst tabakaların hızlarının belirlenmesi için daha uygundur (Moorman, 2001).

Tablo 1.3. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ_r , hız V , elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α degerleri (Leckebush, 2003).

Madde	ϵ_r	V(m/ns)	σ (mS/m)	α (dB/m)
Hava	1	0.3	0	0
Tuzlu su	81-88	0.033	3000	600
Tatlı su	80	0.033	0.5	0.1
Granit (kuru)	5	0.13	0.01	0.01
Kum (kuru)	5	0.13	0.01	0.01
Kil (ıslak)	10	0.095	500	300
Kumlu toprak (kuru)	2.6	0.19	1.4	1
Kumlu toprak (ıslak)	25	0.06	69	23
Killi toprak (kuru)	2.5	0.19	2.7	3
Killi toprak (ıslak)	19	0.07	500	200
Gösel Çökel	50	0.04	-	-

Sabit ofsetli radargramlardan yapılan hız hesaplama çalışmalarında, radargramdaki nokta-kaynak yansıtıcı veya yatay ara yüzey için aynı bağıntı uygulanır. Bu durumda seyahat zamanı için

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (1.46)$$

bağıntısı yazılabilir.

Burada x hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafe ya da bir profildeki nokta-kaynak yansıtıcıya olan yanal ofset uzaklığını, v yayının hızını ve t_0 ofsetdeki tek yönlü seyahat süresini göstermektedir (Telford vd., 1976). Hızı hesaplamak için (1.46) bağıntısı tekrar düzenlenecek olursa,

$$v = \frac{x}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (1.47)$$

bağıntısı elde edilir.

Hız hesaplamalarında unutulmaması gereken husus, radar dalgasının seyahat zamanı ve kesin derinlik degerleri, o derinliğe kadar olan tabakaların hepsinin hızına bağlıdır. Bu

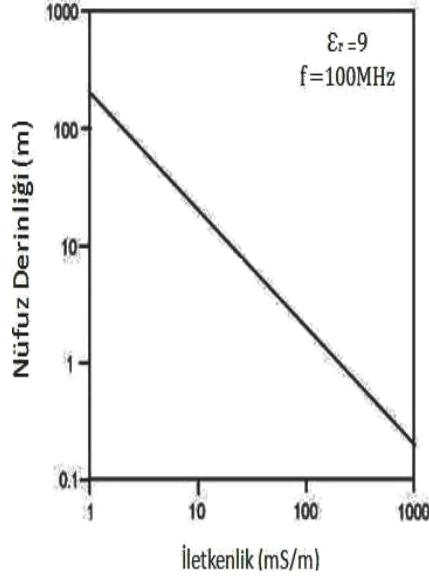
yüzden radargramlardaki yansımaların şekli yorumlanırken bu etki mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

1.4.4. Nüfuz Derinliği

Radar yansımalarını oluşturan ara yüzeylerin sayısı ve her ara yüzeydeki dielektrik zıtlık; yer içinde seyahat eden sinyalin sönümlenme oranını, kullanılan antenin merkez frekansını ve yer radarının yeraltını görüntüleyebilme yeteneğini etkiler. Aynı zamanda yer içinde ilerleyen radar dalgalarının nüfuz derinliği üzerinde de etkiye sahiptir.

Radar dalgaları her bir ara yüzeye ulaştığında, dalgaların bir kısmı yüzeye geri dönerken, geri kalan kısım daha derindeki katman ya da katmanların içlerine doğru ilerlemeye devam edebilir. Ara yüzeylerin sayısı arttıkça, derinlere doğru yayılım gösteren enerji miktarında azalma meydana gelir. Özellikle çökel tabakalardaki bölgesel dielektrik farklılıklar, karmaşık yansımalar oluşturulabilir. İlgilenilen yansımalar bu karmaşık yapı nedeniyle maskelenebilir ve bunun sonucunda araştırma derinliği azalabilir (Moorman, 2001).

Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği arttığında, enerji çok hızlı şekilde sönümlenir ve bu nedenle elektromanyetik enerjinin nüfuz derinliği azalır. Bu nedenle, yer radarı sinyalinin içerisinden geçtiği maddenin iletkenliği sinyalin nüfuz edeceği derinlik üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Enerji nüfuz ile elektrik iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 1.19'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, ortamın iletkenliğinin artması radar dalgalarının nüfuz derinliğini çok hızlı bir biçimde azaltmaktadır.



Şekil 1.19. Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi (Moorman, 2001).

Ayrıca kullanılan antenin frekansı da, nüfuz derinliğini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Düşük merkez-frekanslı antenler daha uzun dalga boylu sinyaller üretir. Bunun sonucu olarak iletkenlik kayıpları ve ortamda bulunan küçük boyutlu yapılardan kaynaklanan saçılmanın azalması nedeniyle, daha az sönümlenme gerçekleşir. Bundan dolayı, radar dalgaları yerin daha derin kısımlarına ulaşabilir. Ancak düşük frekanslı dalga boyları kullanmanın en büyük dezavantajları, yeraltındaki küçük nesnelere belirlenememesi ve ince tabaka kalınlıklarının ölçülememesidir. Bu durum, yeraltının çözünürlüğünü azaltır (Conyers ve Goodman, 1997).

1.4.5. Radar Anten Frekansının Seçimi

Yer radarı çalışmalarında doğru anten frekansının seçimi, ilgilenilen yapıların çözünürlüğü ve araştırma derinliğinin belirlenebilmesi için verilmesi gereken en önemli karardır (Huggenberger vd., 1994; Smith ve Jol, 1995). Dalga boyu sistemin çözünürlüğünü için önemli bir parametredir ve dalga boyundaki artış, diğer bir ifadeyle anten frekansı değerinin düşmesi, yeraltı çözünürlüğünü azaltırken, gerekli araştırma derinliğinin artmasını sağlar.

Kullanılan antenin merkez frekansı (f), yeraltında yayılan sinyalin baskın dalga boyunu (λ) belirler. Ancak bu kavram, yerin etkisiyle geriye dönen sinyalin merkez frekansı ile karıştırılmamalıdır. Yeraltındaki yayının frekansı, yayının hızı ve yere yayılan enerji miktarının yanı sıra çökel ve toprak özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir. Bu frekans değerinin yeraltında ne olacağını tahmin etmek oldukça güçtür (Leckebush, 2003).

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.48)$$

Nüfuz derinliği ile yeraltı çözünürlüğü arasında karşılıklı bir değişim söz konusudur. Farklı-merkez frekans değerine sahip antenler için baskın dalga boyu ve bu antenlerin farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip ortamlar içerisindeki dalga boylarındaki değişimler Tablo 1.4'te görülmektedir. Nüfuz derinliği ve yeraltı çözünürlüğü aslında yeraltında sıkça değişim gösterir ve ortamın nem içeriği, gözeneklilik ve farklı gömülü yapı bileşimleri bu değişimi etkiler. Bu yüzden Tablo 1.4 ile verilen değerler sadece genel bir değerlendirmeyi kapsar (Conyers ve Goodman, 1997).

Seçilecek anten frekansının, derinliği ve boyutları bilinen veya tahmin edilen yapıları belirleyip belirleyemedikleri (1.34) ve (1.35) bağıntıları kullanılarak incelenebilir. Temel olarak, aranılacak yapının kesit alanı hedef derinliğindeki Fresnel bölgesine yaklaşmalıdır. Ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri biliniyorsa, bu eşitlik kullanılarak hedeflenen derinlikteki Fresnel bölgesi hesaplanabilir.

Tablo 1.4. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997).

Anten Merkez Frekansı (MHz)	Merkez frekansın dalga boyu			
	$\epsilon_r = 1$ (Hava içinde)	$\epsilon_r = 5$	$\epsilon_r = 15$	$\epsilon_r = 25$
	Metre			
1000	0.30	0.13	0.08	0.06
900	0.33	0.15	0.09	0.07
500	0.60	0.27	0.15	0.12
300	1.00	0.45	0.26	0.20
120	2.50	1.12	0.65	0.50
100	3.00	1.34	0.77	0.60

Tablo 1.4'ün devamı

80	3.75	1.68	0.97	0.75
40	7.50	3.35	1.94	1.50
32	9.38	4.19	2.42	1.88
20	15.0	6.71	3.87	3.00
10	30.0	13.42	7.75	6.00

Eğer aranılan yapı, Fresnel bölgesinden çok küçük ise gömülü yapıdan yüzeyde bulunan alıcıya sadece yansıyan enerjinin küçük bir kısmı iletilecektir. Bu durumda gömülü yapıdan oluşan yansımalar ortamda bulunan diğer istenmeyen yansımaların maskeleymesi nedeniyle fark edilemeyip yansıma kayıtlarında görünemeyebilir. Bu tür küçük yapılar, ancak elde edilen radargramlara genlik kuvvetlendirme gibi veri-işlem aşamalarının uygulanıp, genlik-dilim haritalarının kullanılmasıyla ortaya çıkartılabilir.

Yeraltında aranan yapılar genelde stratigrafik tabakalar veya maden ocaklarının tabanları gibi büyük arkeolojik yapılardan oluşan düzlemsel yüzeyler olabileceği gibi tüneller, yeraltı boşlukları, insan eliyle yapılmış depolama alanları gibi noktasal hedefler de olabilir (Conyers ve Goodman, 1997) .

Düzlemsel yapılar ortam koşullarından kaynaklanan sınırlamaların dışında, düzlemsel yapının kalınlığı, yönlenimi ve gömülü bulunduğu derinliğe bağlı olarak seçilecek herhangi frekans değerine sahip bir antenle görüntülendirilebilir. Düzlem yansıtıcıların tersine, nokta kaynakların daha küçük yüzeylere sahip olmaları nedeniyle bu yüzeylerden yansıyan radar enerjisi daha azdır ve bu tür yapıları düşük frekanslı antenlerle belirleyebilmek daha zordur. Bu yüzden düşük çözünürlüğe sahip sistemlerle bu yapılar kendilerini çevreleyen ortamlardan ayırt edilemezler. Bu tür yapılar çok derinde gömülü olmadıkları sürece, ancak yüksek frekanslı antenler kullanılarak belirlenebilir (Conyers ve Goodman, 1997).

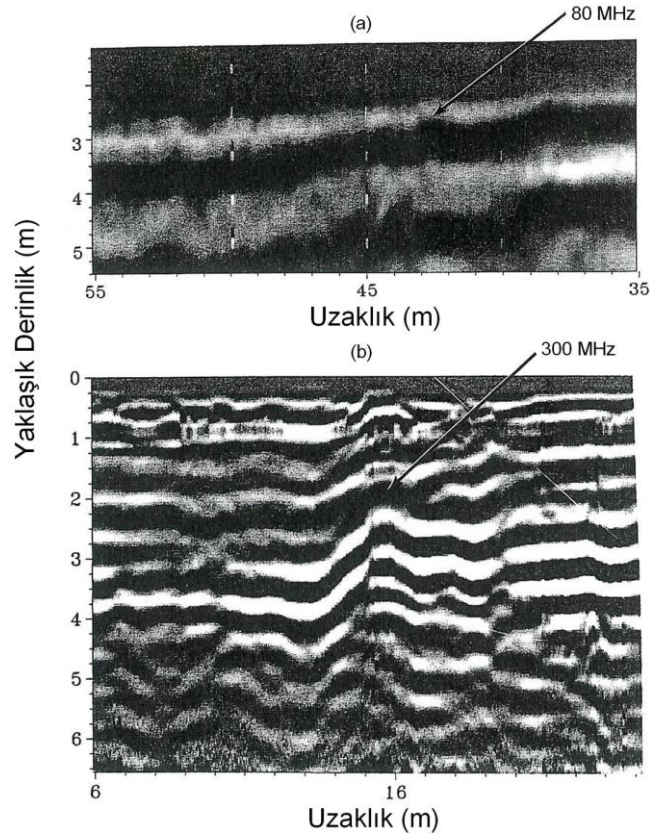
Çözünürlük için gereken dalga boyu, üç-boyutlu bir nesne ya da ondülasyonlu (kırımlı) yüzeye sahip bir yapı gibi farklı özelliklere göre değişiklik gösterir. Üç-boyutlu nesnelere çözümleyebilmek için birbirinden ayrılmış iki ara yüzeye ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, gömülü tek bir düzlemsel yüzeyin belirlenebilmesi için sadece tek bir ara yüzey ve bundan oluşacak yansımalar yeterlidir ve bu durumda dalga boyu da üç-boyutlu yapıda olduğu kadar önemli değildir (Conyers ve Goodman, 1997).

Gömülü bir yapının iki farklı paralel düzlemden oluşan yansımaların ayırt edilebilmesi için bu ara yüzeyler arasındaki uzaklık, ara yüzeylerin arasından geçen radar

enerjisinin en az bir dalga boyu kadar olmalıdır (Davis ve Annan, 1989). Eğer bu iki ara yüzey birbirine radar dalga boyundan daha yakın mesafede ise, üst ve alt yüzeylerden oluşan yansımaların girişimi nedeniyle ya yok olacaklar ya da fark edilemeyeceklerdir. Tam tersi durumunda, bu iki ara yüzeyden iki ayrı yansıma elde edilir ve aranılan yapı belirlenebilir.

Eğer sadece bir gömülü yüzey haritalanıyorsa ve bu yüzey ortamda bulunan diğer yapılarla karıştırılmayacak şekilde bir yansıma üretiyorsa, o yüzeyden oluşan yansıma dalgaları, ortam içerisine giren radar dalga boyu ne olursa olsun görülebilir. Ancak, bu yüzey, düzensiz ya da ondülasyonlu bir yüzey ise, doğru biçimde görüntülenebilmesi için daha yüksek yeraltı çözünürlüğü gerekmektedir.

Standart bir radar profili söz konusu olduğunda aynı gömülü ara yüzeyden daha düşük frekanslı antenler kullanılarak elde edilen yansımaların görüntüsü daha yüksek frekanslı antenlerin görüntüsüne göre daha yuvarlak diğer bir ifadeyle, keskin olmama eğilimindedir (Şekil 1.20). Bu durum, düşük frekanslı antenin Fresnel bölgesinin, daha yüksek frekanslı antenin Fresnel bölgesinden daha geniş olmasından kaynaklanır ve gömülü ara yüzeydeki küçük düzensizliklerden daha az etkilenir (Annan ve Cosway, 1992).



Şekil 1.20. Aynı hat boyunca 80 MHz ve 300 MHz frekanslı antenler kullanılarak elde edilen gömülü düzlem yüzeyin görüntüsü, El Salvador (Conyers ve Goodman,1997).

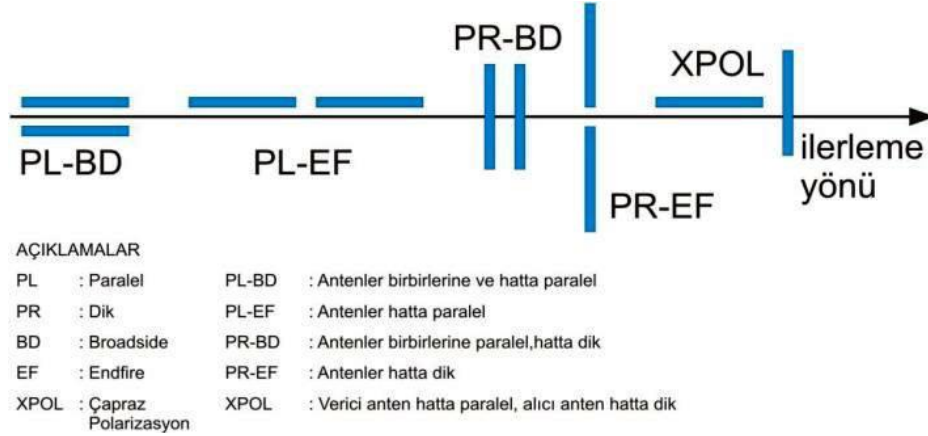
Düşük frekanslı antenler (10-120 MHz) belirli koşullar altında 50 metreye kadar ulaşabilen uzun dalga boyuna sahip radar enerjisi üretebilir. Ancak bu antenler sadece çok büyük yeraltı özelliklerini çözebilme yeteneğine sahiptirler. Buzun kristal yapısının elektromanyetik enerjinin geçişine izin vermesi nedeniyle, saf buzda düşük frekanslı antenlerin radar enerjisini kilometrelerce derine iletebildikleri bilinmektedir (Olhoeft, 1998). Yüksek frekanslı antenler söz konusu olduğunda ise maksimum nüfuz derinliği, topraktan buza kadar çeşitlilik gösteren ortamlarda, birkaç metreyi geçemez ve ürettikleri yansımalar ancak birkaç cm derinlikte bulunan yapılardan elde edilebilir.

Radar dalgaları yer içine hareket ettikleri zaman, özellikle yüksek frekanslı sinyaller daha fazla sönümlenir. Bu nedenle, spektrum daima daha düşük frekansa doğru kayar ve sinyalin bant genişliği azalır (Engheta vd., 1982). Bunun yanında, özellikle 1.5 GHz'den daha yüksek frekanslarda, su içeren bazı jeolojik ortamlar moleküler gevşemeden oluşan enerji kayıpları nedeniyle yüksek oranda sinyal sönümlenmesi gösterirler (Annan ve Consway, 1994; Olhoeft, 1994).

Sonuç olarak; kullanılacak antenin frekansı, çözümlenecek yapıların boyutları ve yapıları çevreleyen ortamın fiziksel ve kimyasal bileşimi tarafından belirlenir. Çoğu zaman, eğer hedef yapı büyük, geniş düzlemsel bir yüzeye sahip değilse, ve ortamda mevcut bir bozucu etki varsa, aranılan yapının belirlenebilmesi için iletilen radar enerjisinin dalga boyu bozucu etkiye sahip yapının maksimum boyutundan daha büyük olmalıdır. Aynı zamanda, aranılan noktasal kaynak ya da düzlemsel yapılar eğer çok küçük boyutlara sahip ve derine gömülmüşlerse belirlenmesi imkansızdır.

1.5. Yer Radarı Veri Toplama Yöntemleri

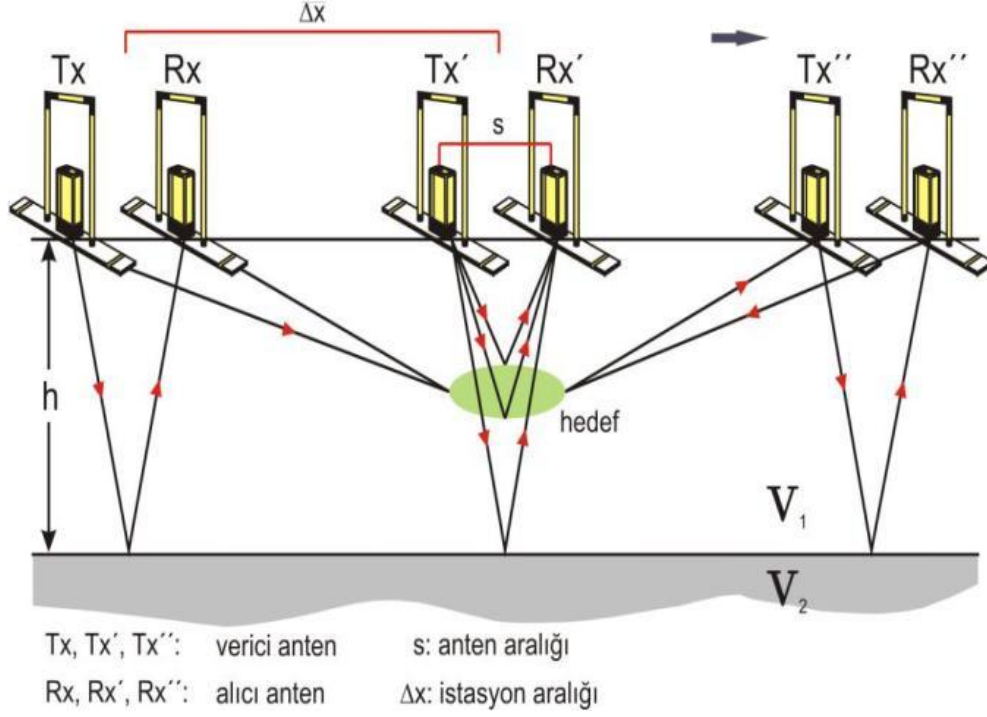
Yer radarı çalışmalarında veri toplama; yansıma profili/ortak ofset, geniş açılı yansıma ve kırılma (GAYK) veya ortak derinlik noktası, (ODN) yöntemini içeren çoklu ofset sistemleri ve radar tomografi ölçümleri olarak üç şekilde gerçekleştirilebilir (Reynolds, 1997). İlk iki yöntem ile veri toplama aşamasında, verici ve alıcı antenler, birbirlerine ve ilerleme yönüne göre farklı konumlarda olabilirler (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Yer radarı anten dizilimleri (Reppert vd., 2000).

1.5.1. Yansıma Profili (Ortak Ofset)

Tek bir anten kullanılarak sıfır ofsetli veri elde edilir. İki anten kullanılması durumunda (Şekil 1.22), antenler arasındaki mesafe, korumasız antenler için bir dalga boyu, korumalı antenler için ise dalga boyunun yarısı kadar olmalıdır (Blindow, 2006).



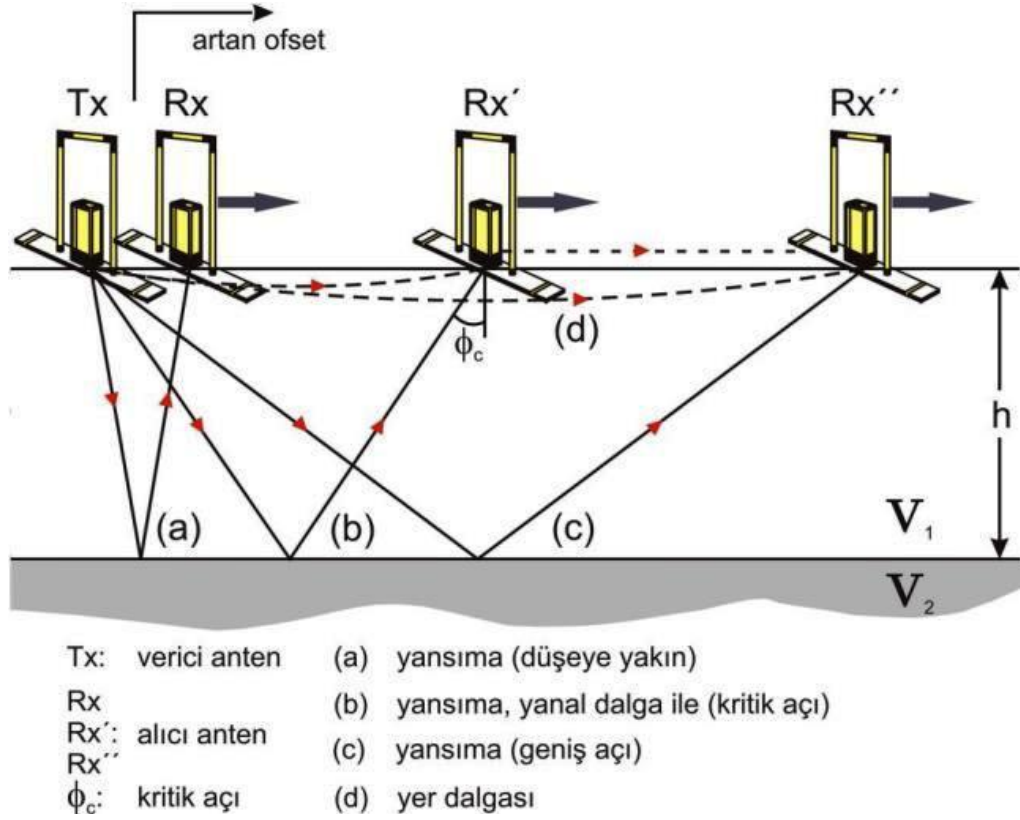
Şekil 1.22. Yansıma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi (Annan 2005).

1.5.2. Çoklu Ofset Sistemleri

Çoklu ofset sistemleri ile veri toplama iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla, ortak derinlik noktası (ODN) ve geniş açılı yansıma ve kırılma yöntemleridir (GAYK). Bu yöntemler, ortak ofset yöntemi ile karşılaştırıldığında zaman zaman zaman alması ve değerlendirmesinin basit olmaması nedeni ile çok sık kullanılmamaktadır (Annan, 2005).

1.5.2.1. Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK)

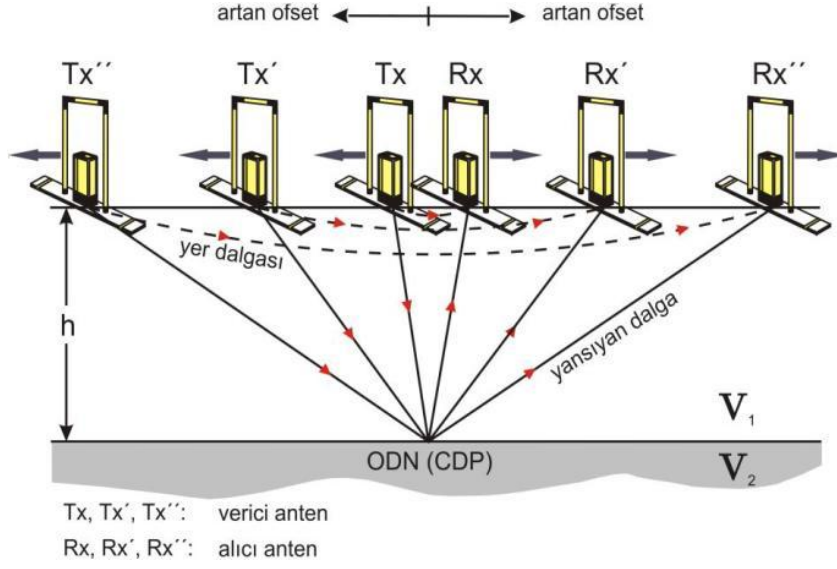
GAYK ölçümlerinde verici anten, başlangıç noktasında sabit kalırken, alıcı anten, ofsetin artırılmasıyla doğrultu boyunca ilerler (Şekil 1.23). Bu yöntemin uygulanabilmesi için, araştırma alanındaki temel yansıtıcı yüzeyin yatay veya eğiminin çok az olması gerekmektedir (Reynolds, 1997).



Şekil 1.23. GAYK yönteminin şematik gösterimi (Reynolds, 1997).

1.5.2.2. Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri

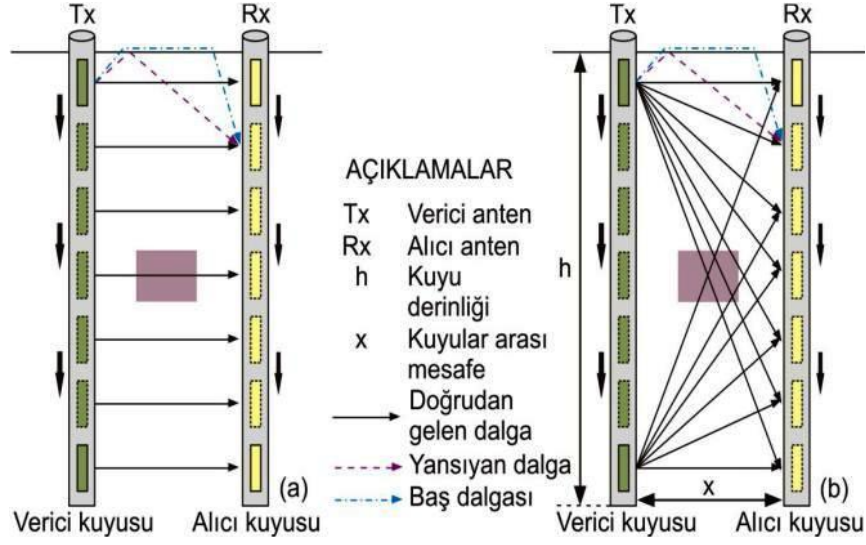
Çoklu ofset ölçümleri için tercih edilen yöntem ODN ölçümleridir. Burada, verici ve alıcı antenler, bir doğrultu boyunca, ortak bir ortak noktadan, eş zamanlı ve eş adım aralıklarında zıt yönlerde hareket ederler (Şekil 1.24) (Blindow, 2006).



Şekil 1.24. ODN yönteminin şematik gösterimi (Reynolds, 1997).

1.5.3. Tomografi Ölçümleri

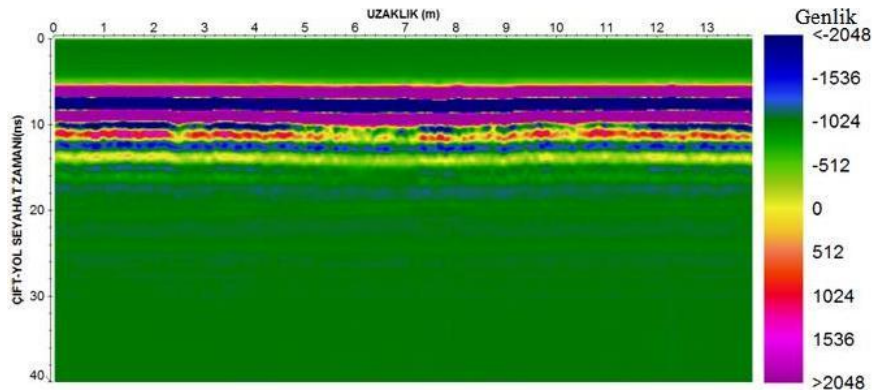
Yer radarı tomografi ölçümleri, karşılıklı kuyular arasında gerçekleştirilmektedir. Karşılıklı kuyular arasındaki veri toplama, sıfır ofset profil ve çoklu ofset profil gibi değişik düzenler ile gerçekleştirilebilir (Binley vd., 2001, Rucker ve Ferré, 2004). Bunlardan ilkinde, alıcı ve verici bir istasyondan diğerine eşzamanlı olarak hareket eder (Şekil 1.25a). İkinci düzende ise verici anten, verici kuyusunda bir istasyonda sabit kalırken alıcı kuyusundaki alıcı anten sabit istasyon aralıkları ile kuyu içinde ilerler. Daha sonra, verici anten kuyu boyunca bir sonraki istasyona ilerlerken, alıcı anten ilk istasyondan itibaren aynı adımları tekrarlar (Şekil 1.25b). Her iki teknik avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Binley vd., 2001; Rucker ve Ferré, 2004; Cassiani vd., 2006).



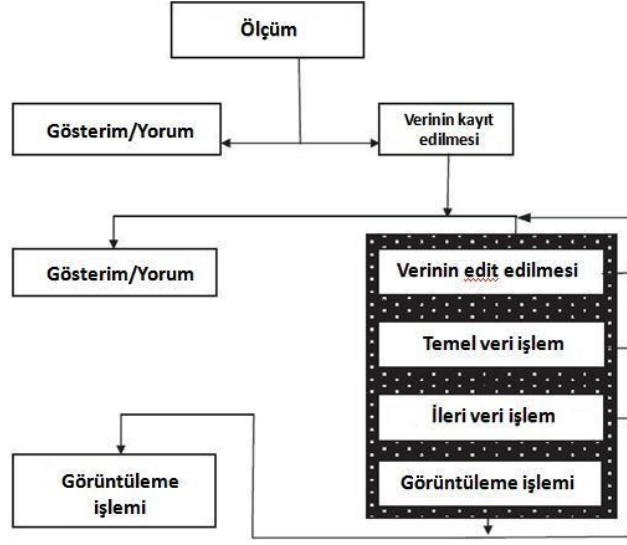
Şekil 1.25. Karşılıklı kuyular arası radar tomografi ölçümlerinin şematik gösterimi a) sıfır ofset profil ve b) çoklu ofset profil (Annan, 2009; Kayen vd., 2002).

1.6. Yer Radarı Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları

Yer radarı yöntem gereği; ölçülen ham verilerinden araştırılan ortamın yapısal durumunu incelemek ve yorumlamak zordur. Ham yer radarı veri örneği Şekil 1.26 görülmektedir. Bundan dolayı, elde edilen bu verileri yorumlayabilmek için bazı veri işlem aşamalarının uygulanması gereklidir. Toplanan verilere uygulanması gerekli işlemlerin akış şeması Şekil 1.27’de verilmektedir. Bu şemada görüldüğü üzere söz konusu veri işlem adımları, uygulanma amacına göre temel ve ileri veri işlem aşamaları olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1.26. Ham yer radarı veri örneği



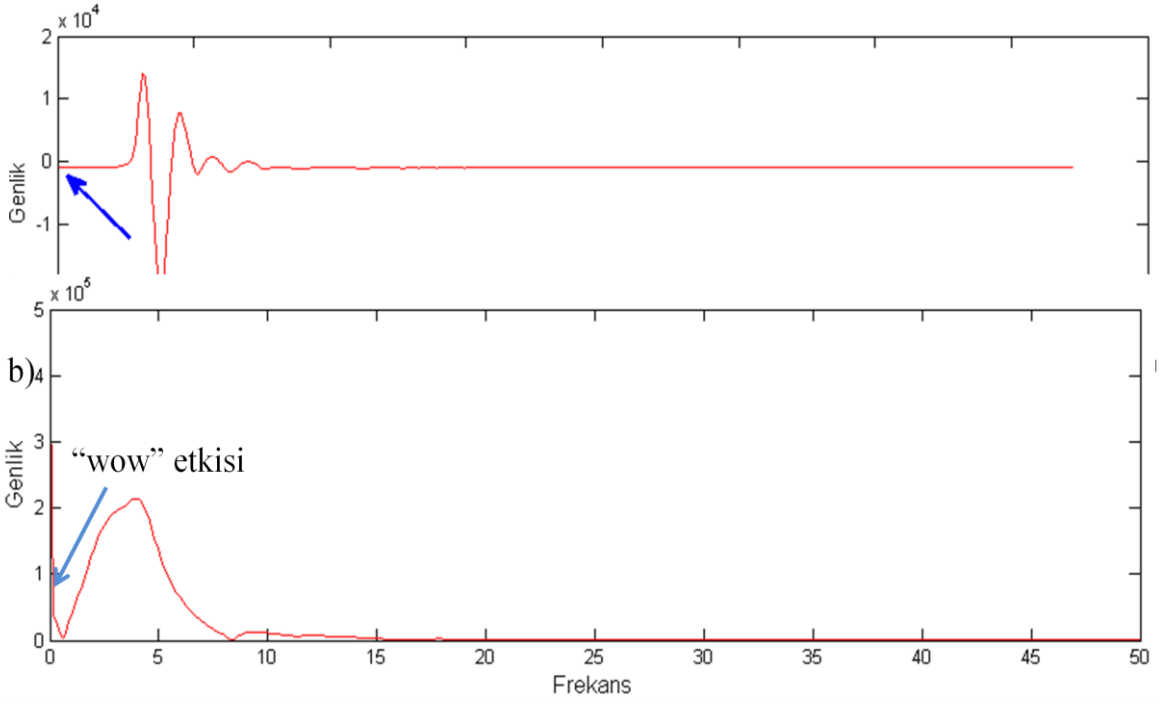
Şekil 1.27. Yer radarı verisi akış şeması (Annan, 2001).

1.6.1. Temel Veri İşlem Adımları

1.6.1.1. Dewow (Düşük Frekanslı Olayların Giderilmesi)

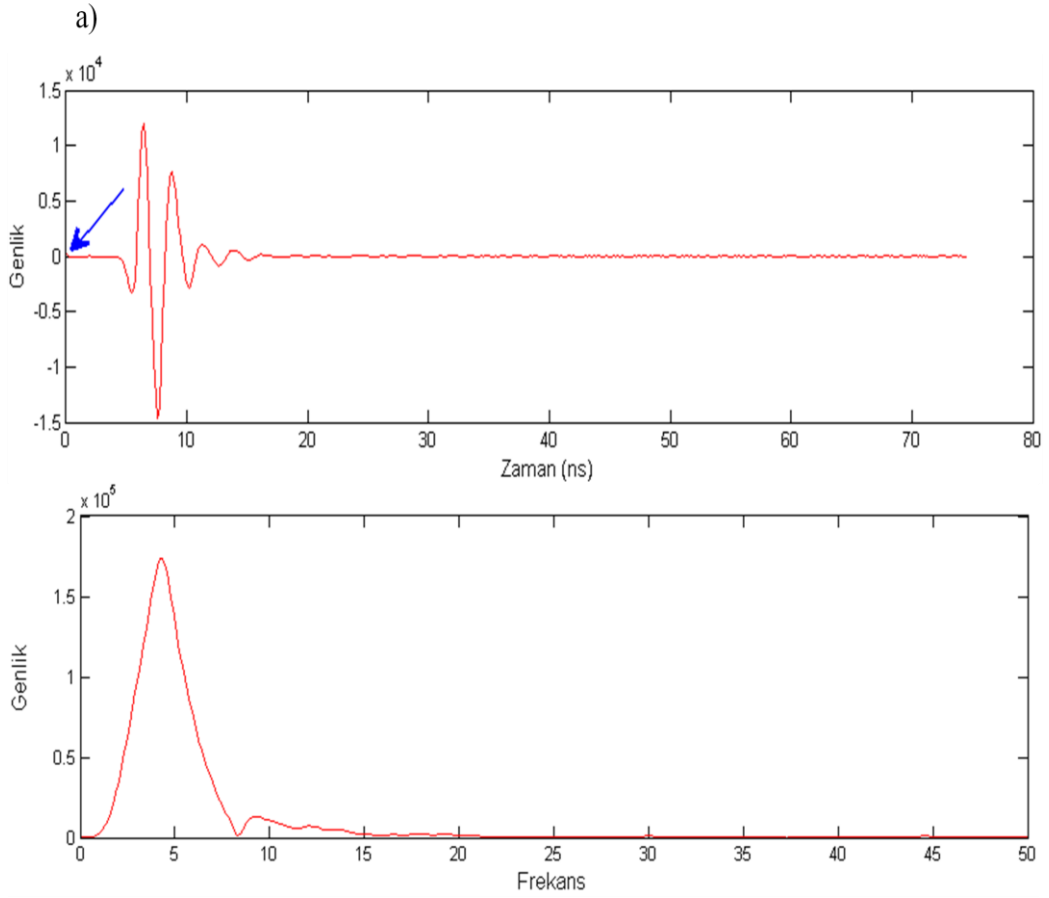
Yer radarı verilerinde çok düşük frekanslı gürültüler verinin görüntülenmesini engellemektedir(Şekil1.26). Verilerin çok düşük frekanslarında oluşan ve ilerleyen frekanslardaki genlikleri bastıran bileşenine “wow” etkisi denir. Bu etkinin giderilmesi işlemine “dewow” denir. Dewow veriyi ortalama-sıfır seviyesine indirgemedi önemli bir adımdır.Ham yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan bir yer radarı izinin zaman (Şekil 1.28a) ve frekans ortamındaki görünümü (Şekil 1.28b), Şekil 1.28’de gösterilmektedir.

a)



Şekil 1.28. a) Ham yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki görünümü b) Ham verinin genlik spektrumu

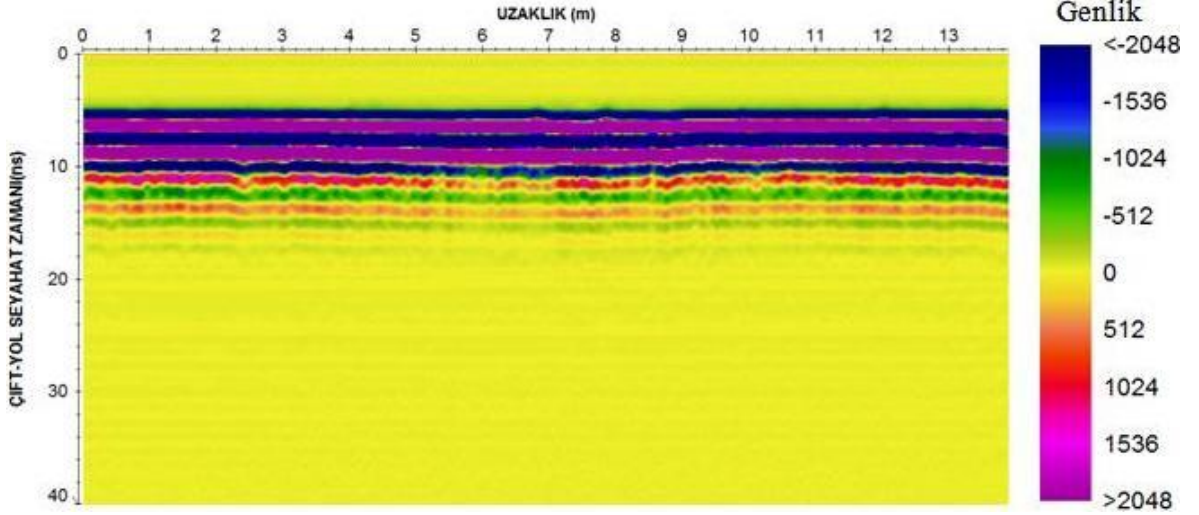
Dewow uygulanmış yer radarı kesitinden aynı uzaklıktaki yer radarı izinin zaman ve frekans ortamındaki gösterimi ise Şekil 1.29 a ve b'deki gibidir.



Şekil 1.29. a) Dewow uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki görünümü b) (a)'da gösterilen izin genlik spektrumu

Şekil 1.28b ve Şekil 1.29b karşılaştırıldığında, “wow” bileşeninin atılıp ilerleyen frekans içeriğindeki genlik artışı sağlanmıştır.

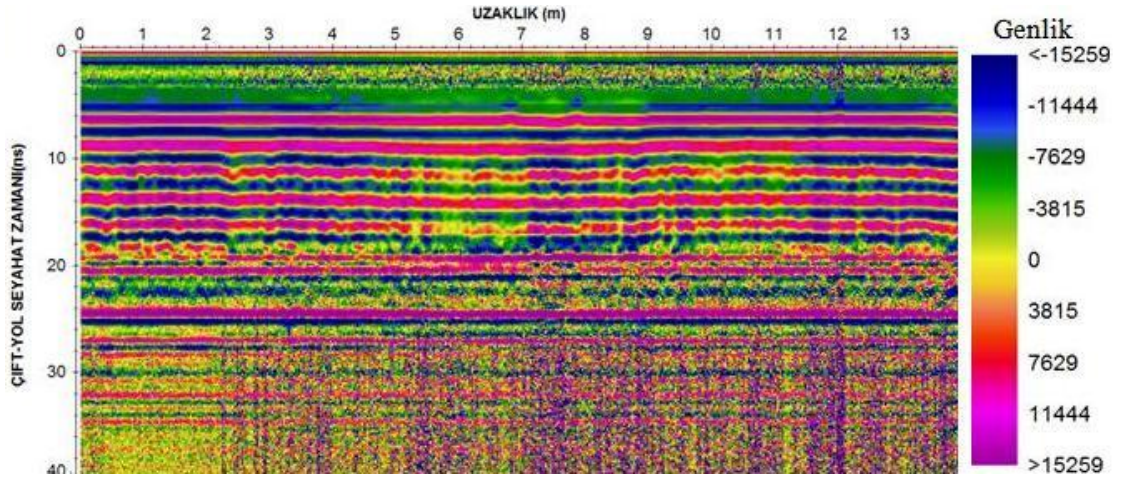
Şekil 1.26'da verilen ham veriye dewow işlemi uygulandıktan sonra elde edilen yer radarı kesiti Şekil 1.30'da verilmiştir.



Şekil 1.30. Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti

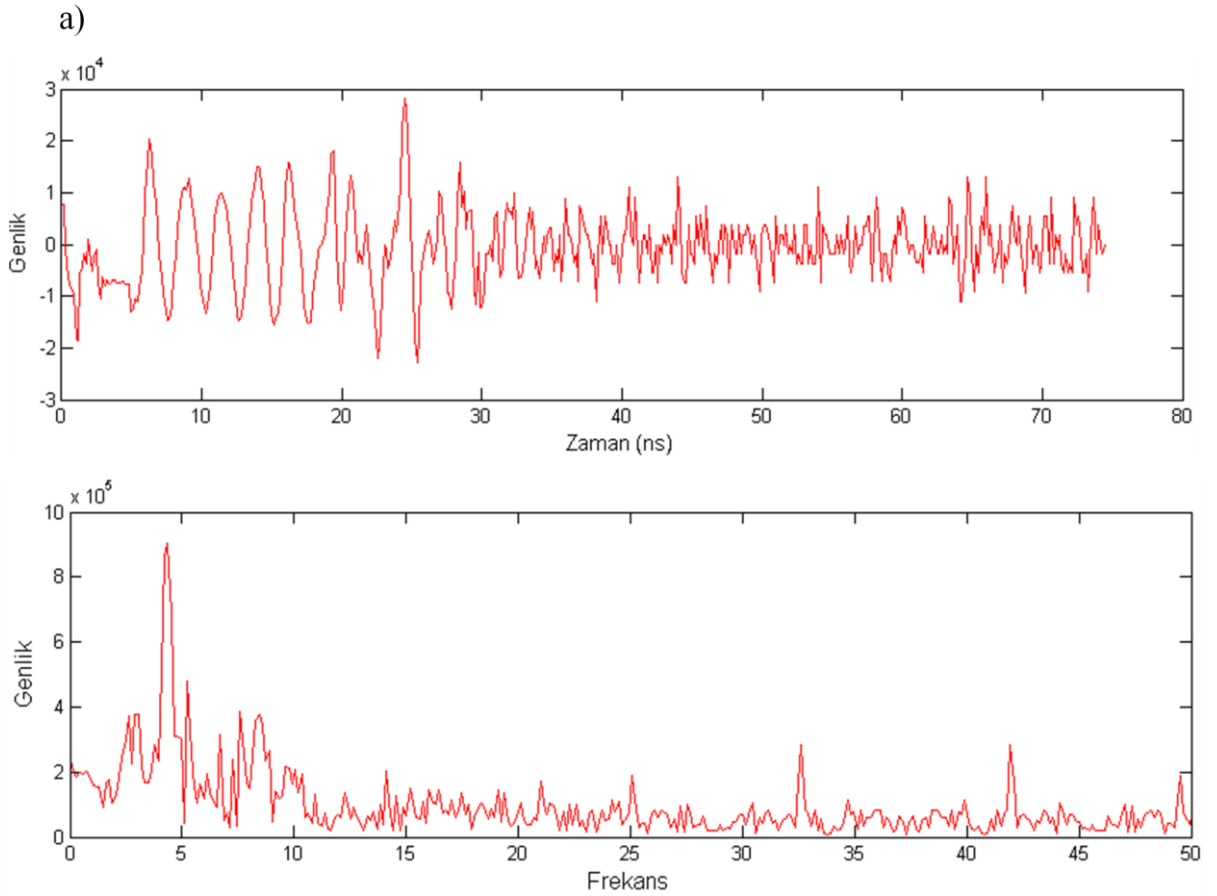
1.6.1.2. Genlik Kazancı

Yer radarı verilerine uygulanan bir diğer veri işlem adımı olan genlik kazancı; geometrik açılım ve sinyal soğrulmasının etkisine bağlı olarak sonraki varışların görünümünün kuvvetlendirilmesi işlemidir. Sabit kazanç, üstel kazanç vb. farklı tipleri vardır. Bütün kazanç fonksiyonları, zaman ortamında izin ardı sıra izleyen bölümlerine bazı çarpım faktörleri uygulanarak yapılır. Bu çalışmada ReflexW programı genlik kazanç yaklaşımı olan “energy decay” kullanılmıştır. Bu yaklaşımda; otomatik olarak sinyal genliğini, yayılan dalga cephesinin geometrik açılım eğrisine bağlı olarak düzenlenmesi yapılır. İlk olarak tüm var olan izlerden ortalama bir azalım eğrisi belirlenir. Bu eğri üzerinde bir medyan süzgecinin uygulanmasından sonra, her bir izin her veri noktası azalım eğrisi değerlerine bölünür. Kazanç işlemi uygulanmış bir veri Şekil 1.31’de gösterilmiştir.



Şekil 1.31. Zigana tüneline alınmış bir profile genlik kazanç işlemi (enerji azaltımı) uygulandıktan sonraki radargram

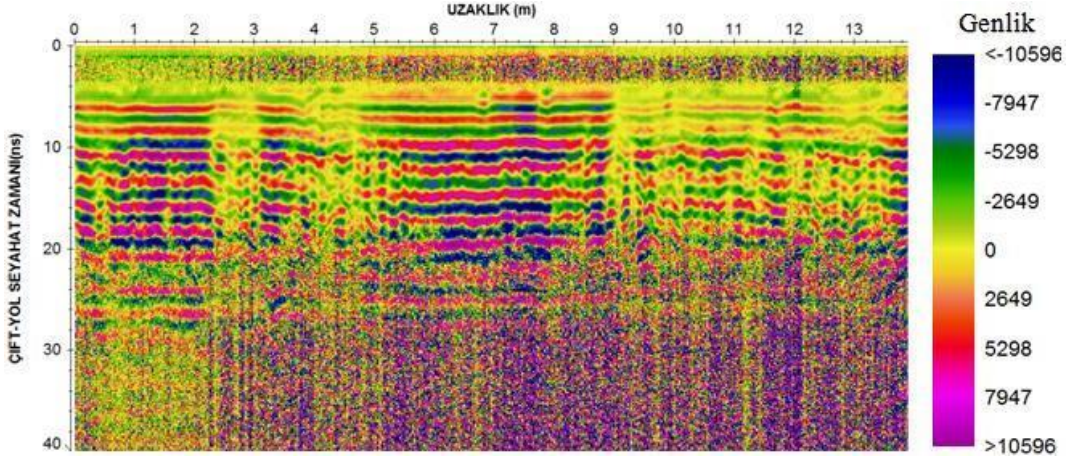
Şekil 1.29a'da "dewow" uygulanmış yer radarı izine genlik kazancı uygulanmış yer radarı izi Şekil 1.32a'da, bu izin genlik spektrumu ise Şekil 1.32b'de verilmiştir.



Şekil 1.32. a) Kazanç işlemi uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki gösterimi b) frekans ortamındaki gösterimi

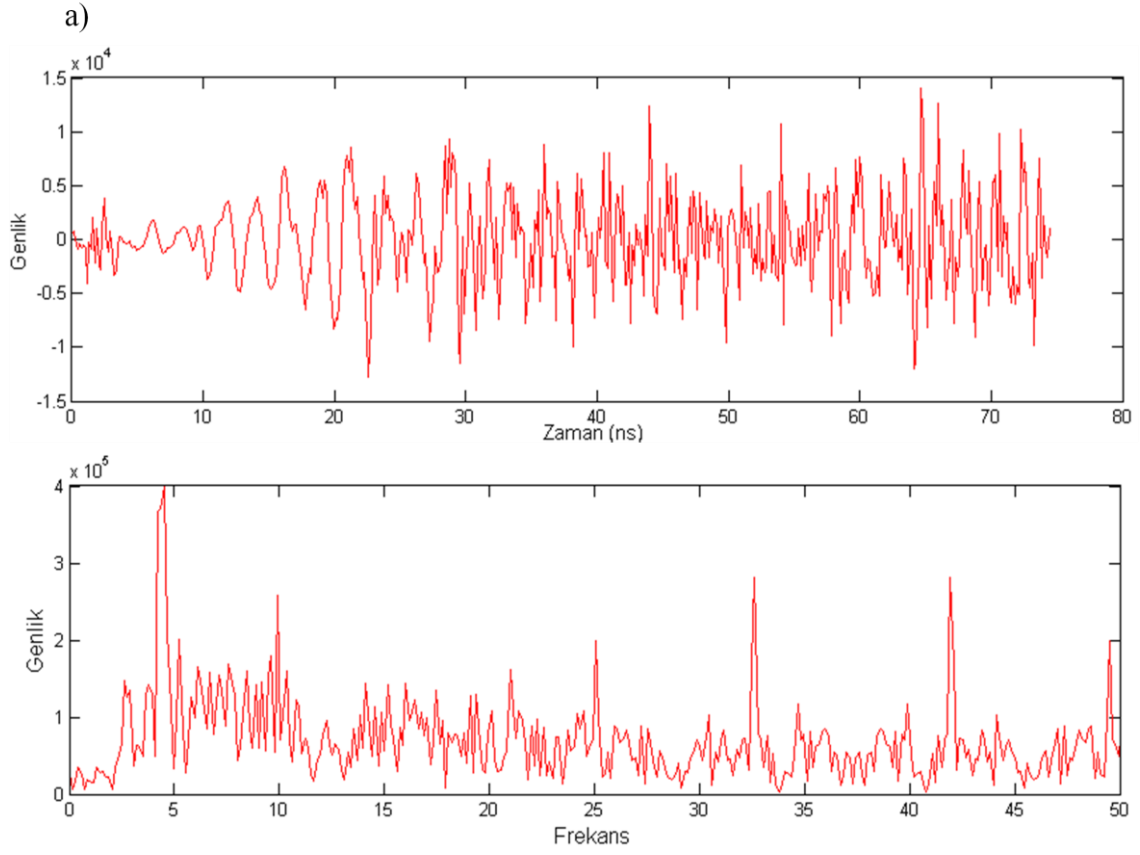
1.6.1.3. Background Removal

GPR verileri için veri-işlem tekniklerinin önemli bir adımudur. GPR verilerinde genellikle uyumlu gürültünün genel bir türü olan “ringing etkisi” görülmekte ve radargramlardaki sinyaller olumsuz olarak etkilenmektedir. Ayrıca, uyumsuz gürültünün bu türü izlerde kuvvetli olduğu zaman giderilemeyebilir ve bu durumda daha derin yapıları tamamen maskeleyebilir. Bundan dolayı kesitlerde yatay ve periyodik olaylar (Şekil 1.31’de görüldüğü gibi) olarak görülen ringing; veri işleme kaldırılması gereken en önemli olaylardan birisidir. Yansıma olayları; daha rastgele olduğunda, ringing etkisinin tüm GPR kesiti boyunca hemen hemen uyumlu olduğu kabul edilerek, sadece ringing gürültüsünü içeren bir iz için tüm kesitin ortalama bir izi dikkate alınmaktadır. Yapılan kabul ışığında, bu ortalama izin basit bir şekilde çıkarılmasıyla radargramda ringing’in yatay görünümü giderilmiş olur (Kim vd., 2007). Şekil 1.30 ve Şekil 1.31’de dewow ve kazanç işleminden sonra elde edilen radargram üzerinde izlenen yatay ve periyodik olayların atılması sonucunu belirlenen yer radarı kesiti Şekil 1.33’de görülmektedir.



Şekil 1.33. Zigana Tüneli'nden alınmış bir profile background removal uygulandıktan sonraki radargram

Dewow, genlik kazancı uygulanmış yer radarı izine Background removal veri işlem adımı uygulandıktan sonra elde edilen radargramın 3. m sindeki yer radarı izi Şekil 1.34a’da bu izin genlik spektrumu ise Şekil 1.34b’de verilmiştir.



Şekil 1.34. a) Background Removal uygulanmış yer radarı kesitinden 3 m uzaklıkta alınan yer radarı izinin zaman ortamındaki gösterimi b) frekans ortamındaki gösterimi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Tüneller Hakkında Genel Bilgiler

2.1.1. Karayolu Tünelleri

Genel anlamı ile ulaşım tüneli; belirlenen geometrik standartlar ve güvenlik şartnamelerine bağlı olarak, karayolu, demiryolu, vb. ulaşımın sağlanması amaçları ile yeraltında kazı yapılarak oluşturulan geçitler olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.1. Karayolu tüneline genel bir görünüm

2.1.2. Tünel Projesi İçin Yapılması Gerekenler

Zamanla ve dış etkenlere bağlı olarak tünel yapılarında; kaya ayrışması, yer altı suyu, donma-çözülme, karbonatlaşma vb. birçok sorunlar ile karşılaşılır. Bu nedenle daha başarılı bir tünel projesi için aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır.

- ✓ Projenin ortaya koyduğu doğal ve geometrik verilere (kesit alanı, uzunluk, yol eğimi) uygun kazı yönteminin seçilmesi gerekir.
- ✓ Projenin doğal risklerinin (jeolojik, hidrojeolojik, sismik, jeoteknik özelliklerinin değişkenlik sergilemesi) üst düzeydedir. Bu risklerin en aza indirilmesi açısından çok özenle yapılmış ve yorumlanmış mühendislik jeolojisi/jeofizik/geoteknik araştırmalara gereksinim vardır.

- ✓ Aktif fayların yakınından (5-20 km) geçirilen tünellerde özellikle sığ zemin tünellerde deprem riski önemlidir. Buna karşın yaklaşık 30-40 m'den daha derin kaya kütlesi içinde açılan tünellerde deprem riski büyük ölçüde azalmaktadır. Bu durum dikkate alınarak tünel açılmalıdır.
- ✓ Tarihi kalıntıların bulunma olasılığı yüksek bölgelerde yapılacak tünel kazıları da projede dikkat edilmesi gereken önemli konulardan biridir.
- ✓ Projede sıfır can kaybı esas alınmalıdır.

2.1.3. Tünel Duraylılığını Etkileyen Faktörler

Bazı tünellerde olduğu gibi, Trabzon-Gümüşhane Devlet yolu üzerinde bulunan Zigana tüneli 1990 yılında inşa edilmiş olup, sızdırmazlığı sağlayan su yalıtımı yapılmadığından tünelin bulunduğu yükseklik itibarıyla kış aylarında don etkisiyle trafiği tehdit edici sarkıt ve dikitler oluşmaktadır.

Karayollarında ulaşımı kolaylaştıran tünellerde görülen bozuklukları incelerken tünelin bulunduğu hattın jeolojik yapısı, tünel yapımı sırasında kullanılan betonun kalitesi, betonda bulunan kırıklı-çatlaklı yapılar, beton içerisinde su sızıntısı sebebiyle oluşmuş boşluklar dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır. Buna ek olarak tünellerde genelde yaşlanma, donma-çözülme, karbonatlaşma ve kusurlu inşaat gibi birçok etken yıkıcı hasarlara neden olmaktadır.

Tünel yapımında kullanılan malzemenin kalitesi ve yapım sırasında inşaat yönteminden kaynaklanan kusurlar, tünellerin iç kaplama kısımlarında gözlenebilir. Bunun yanında tünel civarının jeolojik problemleri dikkatle incelenmelidir. Zamanla ve dış etkenlere bağlı olarak tünel yapılarında sıklıkla karşılaşılan, tünel duraylılığını bozan durumlar aşağıda mevcuttur;

- Çatlaklardan su sızıntısı,
- Tünel içerisindeki boşluklar,
- Çatlaklar ve yarıklar,
- Tünel üzerine gelen yüke bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonlar ve basınç etkisi,
- Tünelin geçtiği güzergâhın jeolojik durumu,
- Kötü beton kalitesi,
- Su, sıcaklık ve zamanın etkileri.

Eğer iyileştirme yapılacak olursa her soruna önem verilmesi gerekir. Her bir problem dikkatle incelenmesi gerekir.

2.1.4. Zigana Tüneli'ndeki Sızıntı Suyu Etkileri ve Alınması Gereken Önlemler

Zigana tünelinin yapımında su yalıtımına yönelik olarak alt yarı kaplama betonu arkasına drenaj borusu yerleştirilmesi dışında bir uygulama yapılmamıştır. Beton dökümünde segregasyon, soğuk derz, çalışma derzi, ve zaman içinde çatlakların oluşması yeraltı suyunun drenaj borularına ulaşmadan tünel içine akmasına sebep olmaktadır. Tünel boyunca meydana gelen su sızıntıları, kaplama taşlarının ve dolgu malzemelerinin büyük oranda bozunmasına ve ayrışmasına neden olmaktadır.

Tünelin yüksek rakımda bulunması, kış şartlarının ağır olması ve tünel içinde hava akımının olması tünel içine akan suyun donmasına sebep olmaktadır. Bu da trafik güvenliğini tehlikeye sokmaktadır.



Şekil 2.2. Tünel yan duvarlarından su sızıntısı ve bozulmalardan görünüm

Tünellerde meydana gelen sızıntı suyunun oluşumunu önlemek için;

1. Tünel çevresindeki jeolojik yapıdan kaynaklı sızıntı suyun çimento enjeksiyonu ile önlenmesi,

2. Tünel gövdesine girecek yağış kaynaklı yüzey sularının yeraltına sızmasının önlenmesi,
3. Tünel üzerinde yer alan yapılardan (bina vb.) kaynaklanabilecek kanalizasyon ve fosseptik suları için gerekli tedbirlerin alınarak tünele sızarak zarar vermesinin önlenmesi,
4. Tünel içine sızan temiz ve/veya kirli suların tünele zarar vermeden toplanarak deşarjının yapılması,
5. Toplanan sızıntı sularının kontrollü deşarjının sağlanması,

gerekli görülmektedir (Sezer, 2010).

Sonuç olarak; tünel planlama, tasarım, yapım, işletme ve rehabilitasyon çalışmaları genel olarak zorlu, uzun ve maliyetli bir süreç içermektedir. Bu anlamda, önemli kararların alınması gereken bu sürecin farklı disiplinlerin ve ekiplerin ortak çalışması ile aşılması mümkün görülmektedir. Tünelcilik ve benzeri yeraltı kazılarında temel olarak belirsizliklerin fazla olması nedeni ile, tünel yapım çalışmalarının uzman mühendis gözetiminde gerçekleştirilmesi ve gerekli önlemlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Zigana tüneline zamana bağlı olarak meydana gelen kırık-çatlaklı yapılar, su sızıntısı ve yüzeyden gözlenemeyen boşluklar oluşmaktadır. Bu sorunların çözümüne yönelik olarak beton durumunu belirlemede tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılmaktadır.

2.1.5. Beton Durumunu Belirlemede Tahribatsız ve Tahribatlı Yöntemler

İncelenen malzemelere herhangi bir zarar vermeden muayene etmeye dayalı dinamik ve statik yapılar hakkında bilgi edinme amaçlı kullanılan yöntemlerinin tümünü tahribatsız inceleme yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Tahribatsız inceleme yöntemi ile, malzemelerin imalat esnasında veya belli bir süre kullanıldıktan sonraki (korozyon veya aşınma gibi nedenlerden dolayı oluşan çatlak, iç yapıda meydana gelen boşluk, kesit azalması vb.) hatalarının tespiti gerçekleştirilir (Özçep vd.,2012). Betonarme yapıların tespiti tahribatlı ve tahribatsız yöntemler olmak üzere iki şekilde incelenmektedir.

2.1.5.1. Betonarme Yapıların Tahribatsız Deneyleri İçin Temel Yöntemler

Betonun tahribatsız yöntemlerle testi için;

- ✓ Görsel gözlem,
- ✓ Beton içindeki demirlerin potansiyel korozyonunun belirlenmesi için kullanılan elektrik potansiyel yöntemi,
- ✓ Betonun yüzeysel sertliğinin değerlendirilmesi amacıyla Schmidt Çekici Testi,
- ✓ Beton içinde suyun akışını ölçmek için kullanılan Permeabilite Testi,
- ✓ Betonun içindeki demirlerin yerlerinin belirlenmesi için Covermeter Testi,
- ✓ Radyografik Test,
- ✓ Betonun basınç mukavemetini test etmek amacıyla betonun ses hızının ölçümüne dayanan Ultrasonik puls hızı ölçümleri,
- ✓ **Yer radarı ölçümleri,**
- ✓ Infrared Termografi ölçümleri

gibi bazı tipik uygulama yöntemleri kullanılmaktadır.

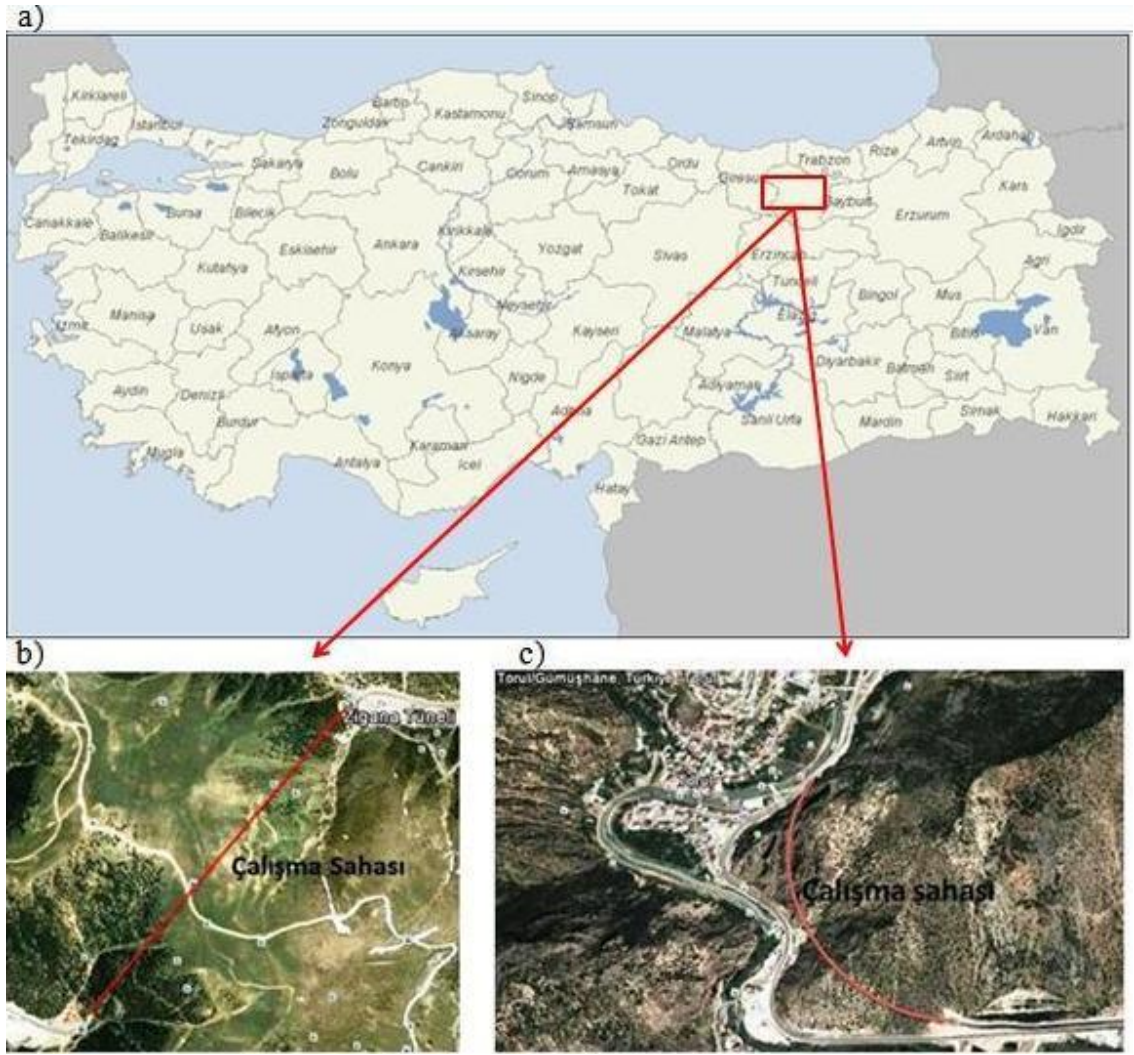
2.1.5.2. Tahribatlı Test Yöntemleri

Tahribatlı yöntemler uygulandığı yapı kısmında tamir edilmesi gereken tahribatlar oluşturan testlerdir. Bu yöntem ile beton basınç dayanımını doğrudan elde etmek ve çeşitli parametreler dikkate alınarak standart numune dayanımına çevirmek mümkündür. Tahribatlı deneyler doğru uygulanmadığında yapı taşıyıcısını ciddi anlamda tehlikeye sokabilirler. Bu yöntemler içinde yer alan deneyler; gömülü numune kullanma deneyi ve karot alma deneyleridir (Ergün ve Kürklü, 2005).

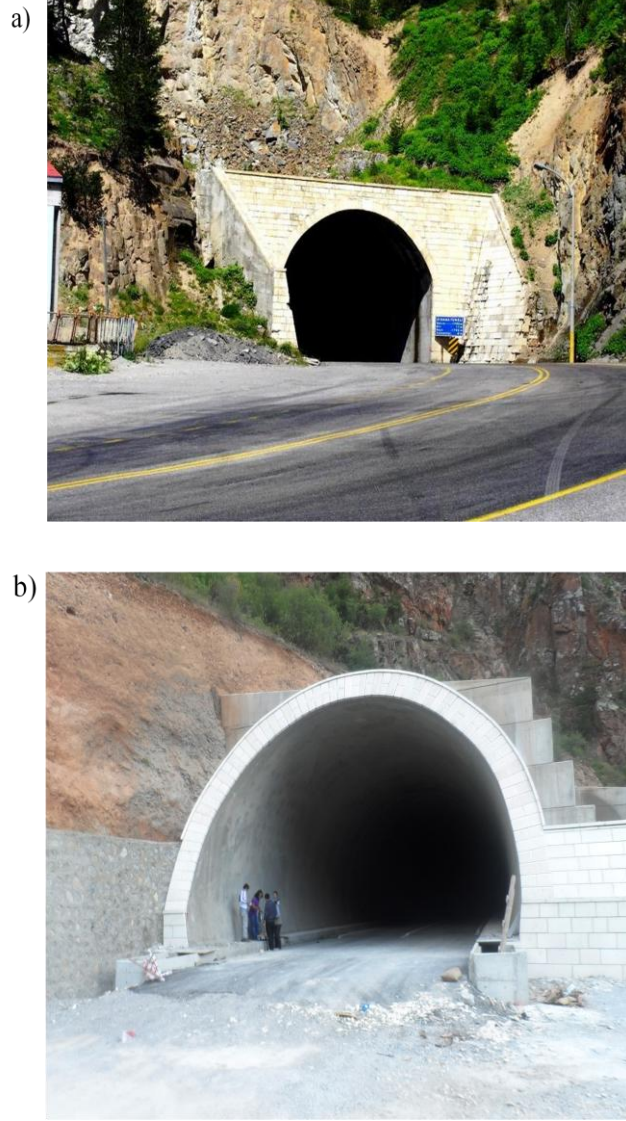
2.2. Zigana ve Torul Tünellerinin Yer Radarı Yöntemi ile Görüntülenmesi

2.2.1. Coğrafik Konum

Çalışma sahasının ilki, Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde Trabzon'dan 58 km uzaklıkta olan Zigana tüneldir (Şekil 2.1b). Diğeri çalışma sahası ise, Torul tüneldir (Şekil 2.1c).



Şekil 2.3. a) Çalışma alanının yer bulduru haritası b) Zigana tünelinin yeri c) Torul tünelinin yeri



Şekil 2.4. a) Çalışma sahası 1'den (Zigana Tüneli girişi) ve b) Çalışma sahası 2'den (Torul Tüneli girişi) genel görünüm

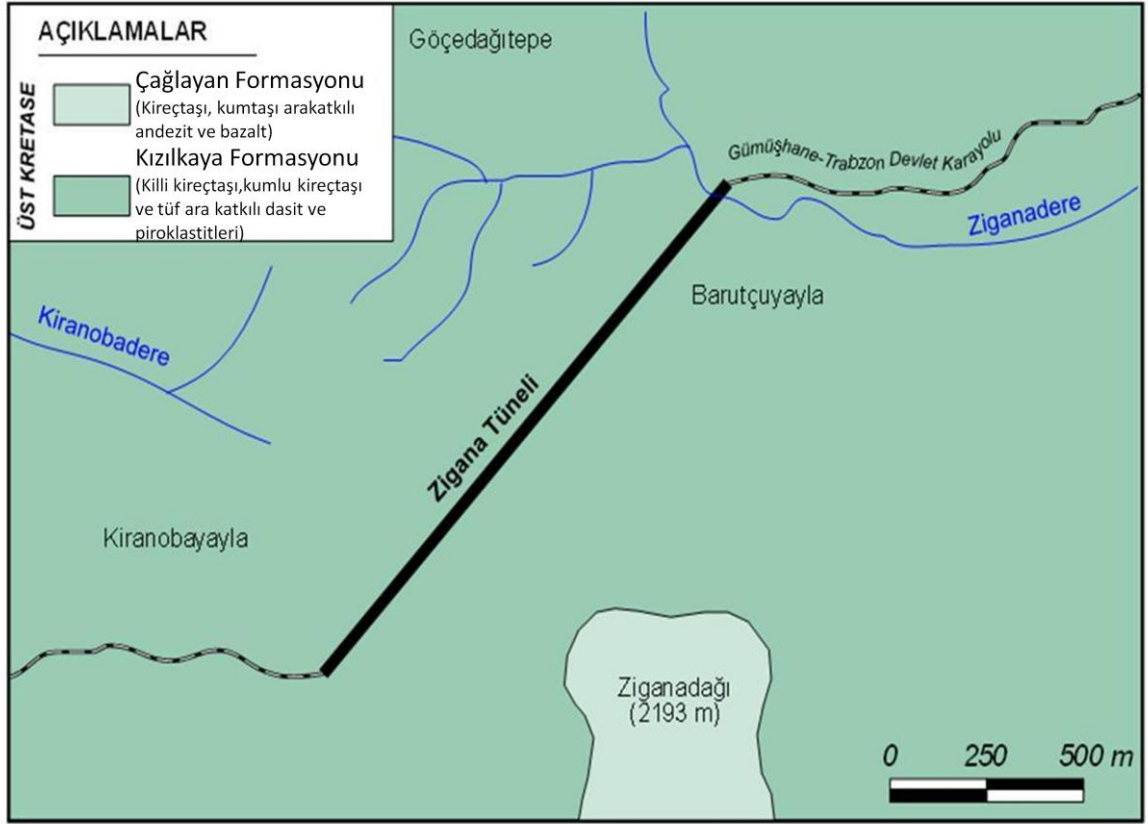
2.2.2. Zigana Tünelinin Tarihçesi

Zigana Geçidi, Kuzey Anadolu Dağları'nda, Gümüşhane ili sınırları içerisindeki bir geçittir. Rakımı 2032 metredir. Geçit Doğu Karadeniz coğrafi yapısı ile Orta Anadolu yaylaları arasındaki geçiş noktasında bulunur. Zigana Geçidi yılın beş ayı karla kaplıdır (URL-3). Bu geçitte var olan ulaşımdaki zorluklar nedeniyle Zigana dağlarından geçiş kolaylığı sağlamak üzere açılan tünel Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde, Trabzon'dan 58 km mesafede, yapımına 1975'te başlanan ve 1990'da hizmete giren tünelin uzunluğu 1702 m., yüksekliği 8.5 m., genişliği 11.2 m.'dir.

2.2.3. Tünel Hattının Jeolojisi

2.2.3.1. Zigana Tünelinin Jeolojisi

İnceleme alanının jeolojisi killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ve dasitten oluşmaktadır. İnceleme alanı ve civarında yapılan daha önceki tezlerden yararlanılarak elde edilen jeoloji haritası Şekil 2.4'deki gibidir.



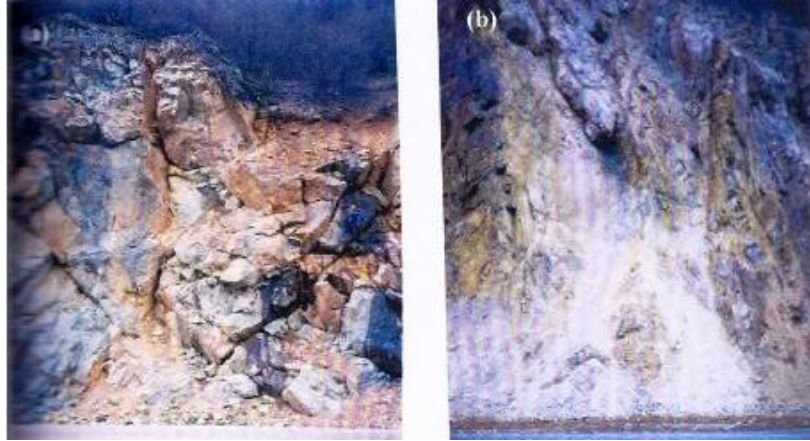
Şekil 2.5. Çalışma alanı ve çevresine ait jeoloji haritası (Güven, 1993).

Haritada yüzeylenen litostratigrafi birimleri; en alttan üstte doğru Turoniyen-Santoniyen yaşlı Çatak Formasyonu, Turoniyen- Santoniyen yaşlı Kızılkaya Formasyonu ve Kampaniyen-Maastrichtiye yaşlı Çağlayan Formasyonu'dur. Zigana tünel hattının bulunduğu yerin jeolojisi Kızılkaya Formasyonu olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.4).

Kızılkaya Formasyonu; inceleme alanını içine alan Doğu Karadeniz Bölümü'nde yüzeylenen ve önemli cevherleşmeler (volkanojen polimetalik masif sülfid yatakları) içeren Genç Kretase yaşlı, tortul ara katmanlı dasitik volkanitleri farklı araştırmacılar farklı

isimlerle adlandırmışlardır. Sözü edilen dasitlerin yoğun cevherleşme içerenleri “Cevherli dasit” olarak, cevher içermeyen dasitler “Mor dasit” olarak adlandırılmıştır (Alpan, 1971; Aslaner, 1977; Pelin vd.,1982; Yalçınalp, 1992). Espiye (Giresun) güneyinde Kızılkaya mevkiinde yüzeylenen riyodasit-dasit ve piroklastiklerden oluşan birim, ilk olarak Güven (1993) tarafından Kızılkaya Formasyonu olarak adlandırılmıştır. İnceleme alanında yüzeylenme veren ve yer yer tortul ara katmanlar içeren Genç Kretase yaşlı dasit ve piroklastitleri için Güven (1993) tarafından tanımlanan söz konusu formasyonla aynı litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olduğundan, “Kızılkaya Formasyonu” adı kullanılmıştır (Ceryan, 2004).

Kızılkaya Formasyonu, killi kireçtaşı ve tüffit ara katkılı dasit ve piroklastlarından oluşmaktadır. Sözü edilen formasyonda var olan iki farklı dasit ve piroklastit; arazideki görünüşleri, makroskobik ve mikroskobik özellikleri bakımından birbirinden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Kızılkaya Formasyonu’ndaki dasitik volkanitlerden ilki içerdiği cevherleşmeler nedeniyle “Cevherli Dasit” olarak adlandırılmaktadır (Alpan,1971; Aslaner, 1977; Pelin vd., 1982; Yalçınalp, 1992). İkincisi cevher minerali içermeyen, cevherli dasitlere göre çok daha az ayrılmış ve renginden dolayı “Mor Dasit” olarak adlandırılmıştır (Taşlı, 1984; Yalçınalp, 1992) (Şekil 2.5 a-b).



Şekil 2.6. Cevherli dasitik kayalarda gözlenen yoğun kırıklar ve alterasyonlar

2.2.3.2. Torul Tünelini Jeolojisi

Torul Tüneli'nin yapımı için oyulan Çatak formasyonu, ilk defa Güven (1993) tarafından tanımlanmış olup, koyu gri-yeşil renkli andezit-bazalt ve piroklastitlerinden oluşur. Ara katkılı olarak kıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, tüfit seviyelerine rastlanır. Genellikle gri-yeşil renklidir. Doğu Pontidler'in kuzey zonunda Üst Kretase dönemi başlarında oluşan toleyitik ve kalkalkalen nitelikli volkanitler derin denizel bir ortamda yayılarak tortullarla birlikte volkano-tortul bir istif meydana getirmişlerdir. Berdiga formasyonu (Pelin, 1977) üzerine uyumlu olarak gelen formasyonun yaşı Üst Kretase'dir (Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen).

2.2.4. Verilerin Toplanması

Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan Zigana Tüneli'nin uzunluğu 1702 m'dir. Tünel boyunca her iki giriş ağzından itibaren belli metrelerde su sızıntıları ve bu sızıntılardan kaynaklanan kaplama betonunda zamanla kırık ve çatlaklar ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca yeni yapılan Torul tünelinin beton kalitesini değerlendirmek üzere veriler Yer Radarı yöntemi ile iki farklı alanda toplanmıştır. Veriler, yaklaşık olarak D-B doğrultulu olarak 30 cm profil aralıklarında 20 profilde 500 ve 800 MHz korumalı antenler kullanılarak alınmıştır.

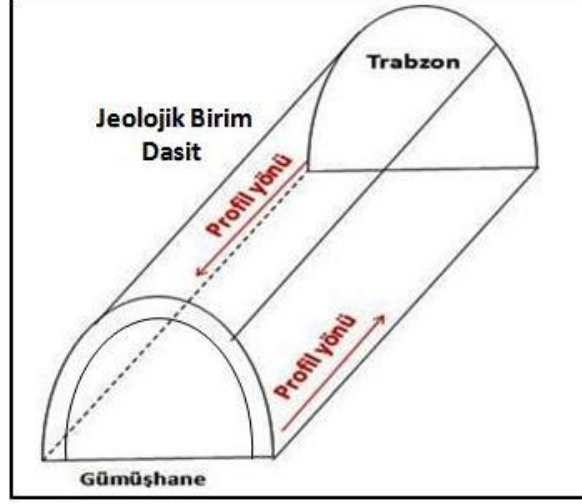
Yer Radarı yöntemi ile toplanan veriler için veri işlem adımları ReflexW programı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan veri işlem adımları sırasıyla Dewow (düşük frekansların atılması), Genlik kazancı (enerji azalımı) ve Background Removal (uyumlu gürültülerin kaldırılması) adımlarından oluşmaktadır.

2.2.5. Çalışma Sahaları

2.2.5.1. Çalışma Sahası 1 (Zigana Tüneli)

İlk çalışma sahası olan Zigana tüneline, tünelin Trabzon ve Gümüşhane girişinde olmak üzere 10 profilde ölçüm alınmıştır. Trabzon tarafından Zigana tüneline sağdan girişte 10-24 m arasında çalışılmıştır (Şekil 2.7). Yer radarı ölçümleri; 500 ve 800 MHz

antenlerle 5 profilde toplam 10 hatta alınmıştır. Bu çalışma alanındaki ölçü yönleri şekil 2.6'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Zigana tünel içi profil yönleri



Şekil 2.8. Çalışma sahası 1 için GPR ölçü profilleri (Trabzon girişi)

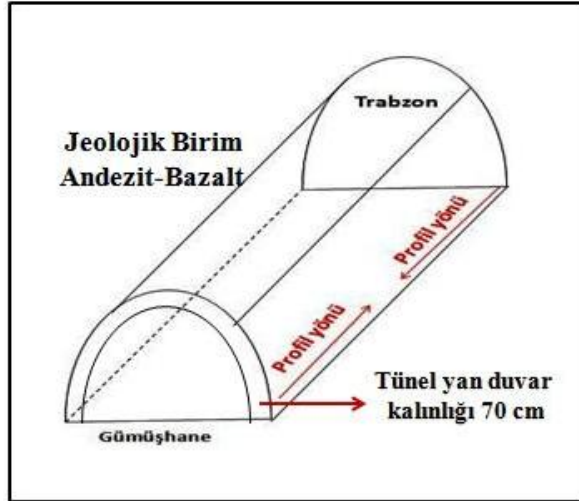
Gümüşhane tarafından tünele sağdan girişte ise kullanılan antenler ile 30 cm profil aralıkları ile 5 profilde ölçüm alınmıştır (Şekil 2.8).



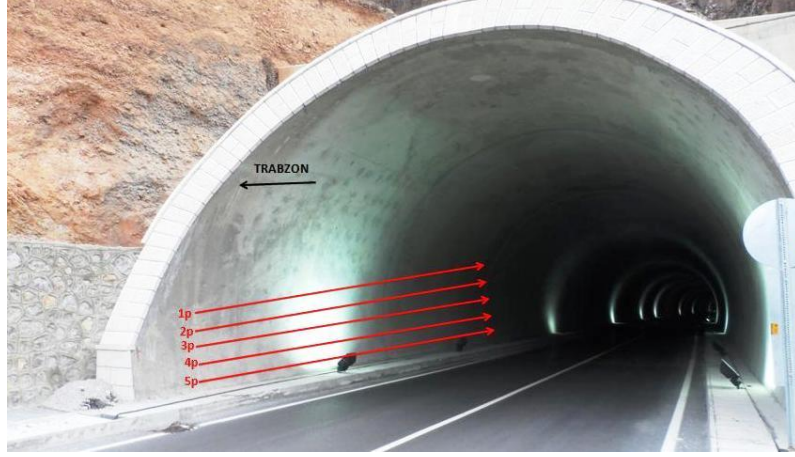
Şekil 2.9. Çalışma sahası 1 için GPR ölçü profilleri (Gümüşhane girişi)

2.2.5.2. Çalışma Sahası 2 (Torul Tüneli)

İkinci çalışma sahası olarak ölçüm alınan Torul tüneline de Zigana tüneline olduğu gibi hem Trabzon hem de Gümüşhane tarafı girişinde aynı antenlerle (500 ve 800MHz) her bir profil aralığı 30 cm olmak üzere 10 profile ölçüm alınmıştır (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11). Torul tüneline ölçü yönleri ise Şekil 2.9’da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.10. Torul tünel içi profil yönleri



Şekil 2.11. Çalışma sahası 2 için GPR ölçü profilleri (Trabzon girişi)



Şekil 2.12. Çalışma sahası 2 için GPR ölçü profilleri (Gümüşhane girişi)

2.2.6. Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırılan yüzeyin yapısal durumu hakkında yorum yapabilmek için verilere gerekli veri işlem adımları uygulanmalıdır. Bu çalışma kapsamında toplanan yer radarı verilerine uygulanan veri işlem adımları; dewow, energy decay, background removal' dır. Yer radarı kesitlerinde derinlik belirlemek için elektromanyetik dalga hız bilgisi kullanılması gerekir. Çalışılan alanın jeolojisinden beton ve hakim kayaç olan dasitin elektromanyetik dalga hız değerlerinden dolayı derinlik belirlemek için hız değeri 0.12 m/ns olarak kabul edilmiştir. Zigana ve Torul tüneline yapılan çalışmalarda tünellerin tüm uzunluğu boyunca veri toplanmamıştır. Elde edilen veriler, sadece her iki tünel için tünellerin giriş-çıkış kısımlarında belli mesafelerden toplanmıştır.

2.3. Yer Radarı Modellemesi

Sığ aramacılıkta kullanılan yer radarı uygulamalarında sıklıkla rastlanan en önemli problemlerden biri, elde edilen radargramların karmaşıklığı ve yapı-ortam özelliklerini her zaman doğru biçimde yansıtamamasıdır. Bu problemi çözümlerin yollarından biri radar modellemesidir. Bu amaçlar doğrultusunda yapılacak yapay modelleme çalışmalarıyla, tahmini gömülü yapı ve farklı stratigrafik özellikler içeren ortamların bilgisayar ortamında modellemesinin yapılması mümkündür. Son yıllarda yaygın kullanımı bulunan bu tür çalışmalar daha etkili radar yorumlarının yapılmasına imkân tanımaktadır (Kurtulmuş, 2007).

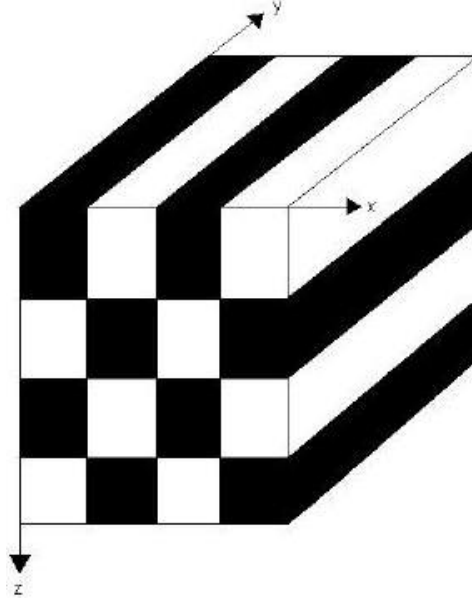
Yer radarı modellemesi, gerçek yeraltı koşullarına yakın özelliklerde oluşturulan yapay modeller yoluyla radargramlarda ne tür yansımaların elde edilebileceğini anlamamıza yardımcı olur. Ayrıca, aranılan yapı veya yapılar ile onları çevreleyen ortam hakkında da araziye çıkılmadan önce gerekli ön bilgilerin elde edilmesine imkân sağlar. Ayrıca farklı frekans değerleri için oluşturulan yapay radargramlar yardımıyla da, araştırmaya uygun anten seçilebilir (Annan ve Chua, 1992; Cai ve McMahan, 1994; Conyers ve Goodman, 1997; Goodman, 1994; Goodman ve Nishimura, 1993).

Yer radarı modellemesinde zaman ortamında sonlu farklar yöntemi (FDTD) ile yer radarında iki boyutlu (2B) modelleme birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Yee 1966, Lee and Teixeira 2006, Wang and Tripp 1996, Bourgeois and Smith 1996, Bergmann *et al.* 1996, Teixeira *et al.* 1998, Holliger and Bergmann 2002, Carcione 1998, Irving 2006). Yöntem Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda tekrarlı olarak ayrıştırılıp çözümlenmesine dayanmaktadır. FDTD yöntemi, sonlu farklar yönteminin geliştirilmesi, denklemlerin elektromanyetik (EM) dalga denklemlerinin zaman bölgesi için yazılmasıyla ortaya çıkarılmıştır (Yee 1966). Modelin içerdiği 2B geometri, dalga boyundan çok daha küçük boydaki hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulur. Sonlu farklar ağı geometrinin ve anten merkez frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabilir. Oluşturulan sonlu farklar ağının her bir hücresine ortamın parametre (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik, iletkenlik) değerleri atanarak manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında ardışık zaman adımlarında hesaplanırlar (Gürel and Oğuz 2000, Sevgi 1999). Yöntemde, 3B modellemede manyetik ve elektrik alanın üç yöndeki bileşenleri (x,y,z) hesaplanırken, 2B modellemede sadece iki yönde bileşenler hesaplanır. 2B modellemede, hangi bileşenlerin

hesaplanacağı seçilen EM moda göre farklılık gösterir. Kullanılan moda enine elektrik alan (Transverse Electric, TE) veya enine manyetik alan (Transverse Manyetic, TM) olabilir (Irving and Knight 2006, Irving 2006).

2.3.1. Kartezyen Koordinatlarda TE ve TM-Modunda İki Boyutlu Maxwell Denklemleri

2B ortamda y-yönünde, dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değişiminin olmadığını varsayılır (Şekil 2.13).

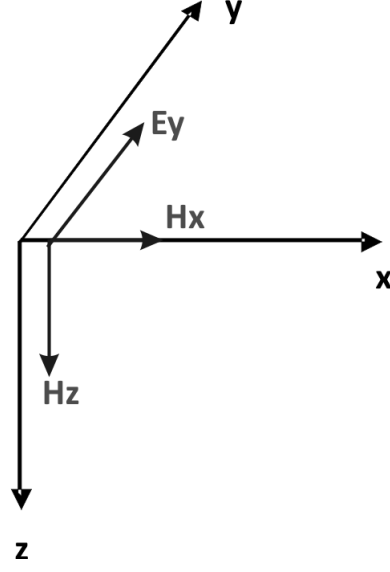


Şekil 2.13. 2B model (Candansayar 1997).

Maxwell denklemleri 2B yer radarı modellemesinde TM ve TE-modu durumlarına ayrılır.

2.3.1.1. TM-Modunda Maxwell Denklemleri

TM-modunda y-yönünde modele ait fiziksel parametrelerde (μ , σ , ϵ) ve hesaplanması gerekli elektrik ve manyetik alan bileşenlerinde herhangi bir farklılık olmadığı kabulü ile, x ve z yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak değişen elektrik alan vardır (Şekil 2.14) (Kurt,2009).



Şekil 2.14. TM-modu

Buna göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad (2.1)$$

ve

$$H_y = E_x = E_z = 0 \quad (2.2)$$

olur (Irving and Knight 2006).

Bu durumda elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.4)$$

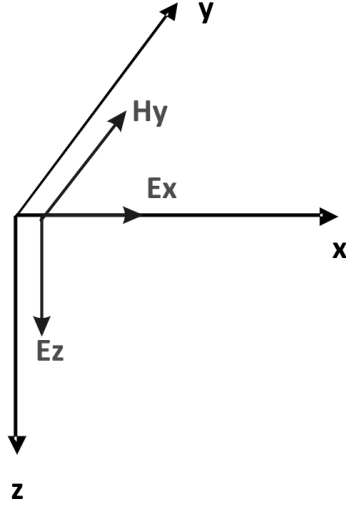
ve manyetik alan denklemi;

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılır.

2.3.1.2. TE-Modunda Maxwell Denklemleri

TE-modunda y-yönünde modele ait fiziksel parametrelerde (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik, iletkenlik) ve hesaplanması gerekli elektrik ve manyetik alan bileşenlerinde herhangi bir değişimin olmadığı kabulü ile, x ve z yönünde zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağımlı olarak değişen manyetik alan vardır (Şekil 2.15) (Kurt, 2009).



Şekil 2.15. TE-modu

Yukarıdaki şekil TE-modu için gösterilmektedir (Şekil 2.15). Buna göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad (2.6)$$

ve

$$H_x = H_z = E_y = 0 \quad (2.7)$$

olur.

Manyetik ve elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (2.9)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.10)$$

şeklinde yazılır.

2.3.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Tanımlanması

Sonlu Farklar (FD) yöntemi, zaman bölgesinde Maxwell denklemleri için kullanımı ilk kez Kano Yee (1966) tarafından ortaya atılmıştır. Bunun sonucunda, EM dalga yayılımını modelleyen Maxwell denklemlerinin sonlu farklar ile yazılması ve zamana göre türevlerin de sayısallaştırılarak genelleştirilmesi yöntemi zaman ortamında sonlu farklar olarak adlandırılmıştır.

FDTD yöntemi Maxwell denklemlerindeki diferansiyel yaklaşımlarının zamanda ve konumda ayrıklaştırılmasına dayanır.

2.3.2.1. Sonlu Farklar Yaklaşımı

Sonlu farklar yaklaşımı sayısal türev alma işlemine dayanmaktadır. Tüm fark yaklaşımları;

$$f(y) = f(x) + (y - x)f'(x) + \frac{1}{2!}(y - x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!}(y - x)^3 f'''(x) + 0(y - x)^4 \quad (2.11)$$

ile tanımlanan Taylor açılımı yardımı ile elde edilir. Burada (5.1.1) denklemindeki y yerine x_{i+1} yazıldığında;

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + (\Delta x)f'(x_i) + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) + \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) + 0((\Delta x)^4) \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu denklemin birinci türevi içeren terimi ele alındığında;

$$(\Delta x)f'(x_i) = f(x_{i+1}) - f(x_i) - \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) - 0((\Delta x)^4) \quad (2.13)$$

elde edilir. (2.13) ifadesi düzenlendiğinde;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1})-f(x_i)}{(\Delta x)} - \frac{1}{2}(\Delta x)f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) - 0((\Delta x)^3) \quad (2.14)$$

sonlu farklar yaklaşımı ile türevi tanımlayan ileri farklar denklemi elde edilmiş olur. Burada $O(\Delta x^3)$ hatanın mertebesini ifade etmektedir.

(2.11) denklemdeki y yerine x_{i-1} yazıldığında;

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) - (\Delta x)f'(x_i) + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)^3 f'''(x_i) + 0((\Delta x)^4) \quad (2.15)$$

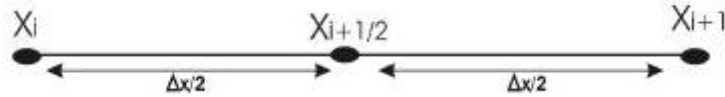
elde edilir. Denklem birinci türevi içeren terimi bir tarafta diğerler terimleri bir tarafta toplanıp, $f'(x_i)$ yalnız bırakılıp denklem yazıldığında;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i)-f(x_{i-1})}{(\Delta x)} + \frac{1}{2}(\Delta x)f''(x_i) - \frac{1}{6}(\Delta x)f'''(x_i) + 0((\Delta x)^3) \quad (2.16)$$

ile tanımlanan geri farklar denklemi elde edilir.

Maxwell denklemlerine merkezi farklar yaklaşımı uygulanırken, zaman türevleri ($X_{i+\frac{1}{2}}$ deki türev değeri), hata mertebesi $O(\Delta x^2)$ iken, konum türevleri ($X_{i+\frac{1}{2}}$ deki türev değeri), hata mertebesi $O(\Delta x^4)$ iken hesaplanmıştır.

$O(\Delta x^2)$ mertebesi için (Şekil 2.16);



Şekil 2.16. $O(\Delta x^2)$ mertebesinde merkezi farklar

$$f(x_i) = f\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) + \left(\frac{\Delta x}{2}\right)f'\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) + O(\Delta x^2) \quad (2.17)$$

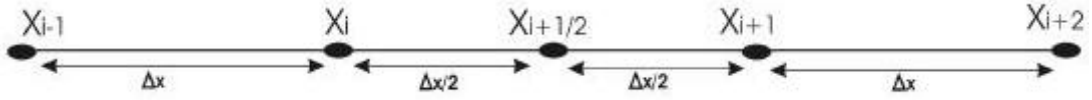
$$f(x_{i+1}) = f\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) - \left(\frac{\Delta x}{2}\right)f'\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) + O(\Delta x^2) \quad (2.18)$$

ileri ve geri farklar yaklaşımları yazılır. (2.18) eşitliği (-1) ile çarpılıp iki eşitlik alt alta toplandığında;

$$f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) = \frac{f(x_i) - f(x_{i+1})}{\Delta x} \quad (2.19)$$

elde edilir.

$0(\Delta x^4)$ mertebesi için (Şekil 2.17);



Şekil 2.17. $0(\Delta x^4)$ mertebesinde merkezi farklar

$$f(x_{i+2}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + (\Delta x) f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.20)$$

$$f(x_{i+1}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + (\Delta x) f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.21)$$

$$f(x_i) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + (\Delta x) f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.22)$$

$$f(x_{i-1}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + (\Delta x) f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.23)$$

eşitlikleri yazılır. Eşitliklerde Δx yerine yazıldığında;

$$f(x_{i+2}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{3\Delta x}{2} f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{9\Delta x^2}{8} f''(x) + \frac{27\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.24)$$

$$f(x_{i+1}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta x}{2} f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x) + \frac{\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.25)$$

$$f(x_i) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta x}{2} f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x) - \frac{\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.26)$$

$$f(x_{i-1}) = f \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) - \frac{3\Delta x}{2} f' \left(x_{i+\frac{1}{2}} \right) + \frac{9\Delta x^2}{8} f''(x) - \frac{27\Delta x^3}{48} f'''(x) + 0(\Delta x^4) \quad (2.27)$$

elde edilir. Eşitliklerde, 2. ve 3. türevler yok edilip, 1.türev elde edilmeye çalışılır. Bunun için 1.denklem (1) ile 2.denklem (-27) ile 3.denklem (27) ile 4.denklem (-1) ile çarpılıp 4 denklem alt alta toplanır. Sonuç olarak;

$$f\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) = \frac{-f(x_{i+2})+27f(x_{i+1})-27f(x_i)+f(x_{i-1}))}{24\Delta x} \quad (2.28)$$

elde edilir.

2.3.2.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklarla Uyarlanması

2.3.2.2.1. Bir Boyutlu (1B) Durum

Maxwell denklemlerinin 1B durumunda x ve y yönünde elektrik ve manyetik alan değişiminin olmadığı kabul edilmektedir. Buna göre elektrik alanın bilinen zaman değerinden bir sonraki zaman adımındaki değerini Maxwell denklemlerinin sonlu farklar yaklaşımı ile elde edilmesi işlemi aşağıda tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma E_x \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial H_y^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial z} = -\varepsilon(k) \frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial t} - \sigma(k) E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) \quad (2.30)$$

Burada $E_x^n(k)$ ve $H_y^n(k)$ sırasıyla elektrik ve manyetik alanı ve n zamanı k ise konumu ifade etmektedir.

(5.2.1.2) denklemi üzerinde elektrik alan ve manyetik alan üzerinde 2. dereceden merkezi farklar yaklaşımı (5.1.9) kullanılarak işlem yapıldığında;

$$\frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)] \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial H_y^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} \left[H_y^{n+1/2}(k + 1/2) - H_y^{n+1/2}(k - 1/2) \right] \quad (2.32)$$

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) = \left[\frac{E_x^{n+1}(k) + E_x^n(k)}{2} \right] \quad (2.33)$$

(2.31), (2.32) ve (2.33) denklemleri elde edilir. Eşitlikler (2.30) denkleminde yerlerine yazıldığında;

$$E_x^{n+1}(k) = \frac{2\varepsilon(k)-\sigma(k)\Delta t}{2\varepsilon(k)+\sigma(k)\Delta t} E_x^n(k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(k)+\sigma(k)\Delta t)\Delta z} \left[H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2) \right] \quad (2.34)$$

elde edilir (Lee and Teixeira 2006).

Eşitlik (2.34) de görüldüğü gibi, $E_x^{n+1}(k)$ elektrik alan değerini hesaplayabilmek için kendinden bir zaman önceki $E_x^n(k)$ elektrik alan değeri, $k + \frac{1}{2}$ ve $k - 1/2$ konumlarındaki manyetik alan değeri gereklidir. Manyetik alanın bilinen zaman değerlerinden bir adım zaman sonraki değerinin hesaplanması için yine Maxwell denklemi;

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = -\mu(k+1/2) \frac{\partial H_y^n(k+1/2)}{\partial t} \quad (2.36)$$

(2.36) denklemi üzerinde elektrik alan ve manyetik alan üzerinde 2. dereceden merkezi farklar yaklaşımı (5.1.9) kullanılarak işlem yapılırsa;

$$\frac{\partial H_y^n(k+1/2)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left[H_y^{n+1/2} \left(k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-1/2} \left(k + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial E_x^n(k+1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (2.38)$$

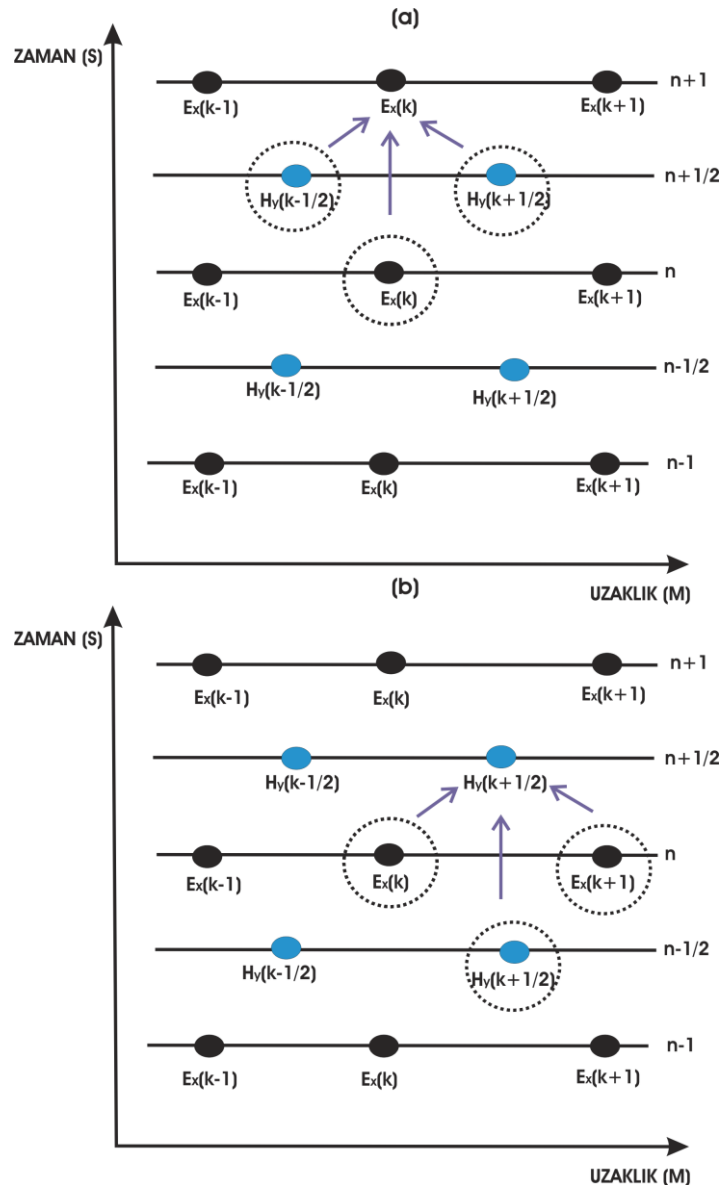
(2.37) ve (2.38) denklemleri elde edilir. Eşitlikler (2.36) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$H_y^{n+1/2} \left(k + \frac{1}{2} \right) = H_y^{n-1/2} \left(k + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu(k)\Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)] \quad (2.39)$$

zaman ortamında hesaplanması gereken manyetik alan bileşeni bulunmuş olur (Lee and Teixeira 2006).

Eşitlik (2.39) de görüldüğü gibi, $H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(k+\frac{1}{2}\right)$ manyetik alan değerini hesaplayabilmek için kendinden bir zaman önceki $H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(k+\frac{1}{2}\right)$ manyetik alan değeri, $k+1$ ve k konumlarındaki elektrik alan değeri gereklidir.

Manyetik ve elektrik alan denklemlerinden görüldüğü gibi, zamanın tam katlarında elektrik alan, zamanın kesirli katlarında ise manyetik alan değeri hesaplanır. Manyetik ve elektrik alan bileşeni arasında $\Delta t/2$ 'lik bir fark vardır. Yani hem farklı konumlarda hem de farklı zamanlarda hesaplanırlar (Şekil 2.18). Şekil 2.18'e göre; $t=0, \Delta t, 3\Delta t, \dots$ zamanlarında elektrik alan, $t=\Delta t/2, 3\Delta t/2, \dots$ zamanlarında manyetik alan hesaplanır.



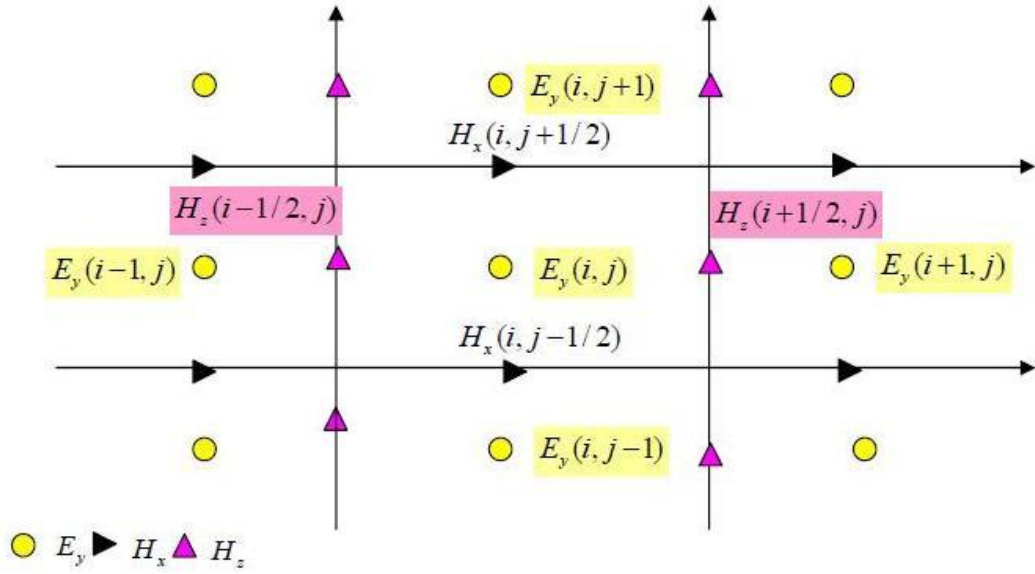
Şekil 2.18. 1B ortamda: a. Elektrik alanın hesabı, b. Manyetik alanın hesabı

2.3.2.2.2. İki Boyutlu (2B) Durum

Daha önceki bölümlerde ortamın 2B olması durumunda Maxwell denklemlerinden ve TE, TM-modlarından söz edilmiştir. Bu bölümde denklemlerin sonlu farklar yaklaşımına uyarlanması her mod için ayrı ayrı yapılacaktır.

2.3.2.2.2.1. TM-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması

2B model için y yönünde bir değişim olmadığı kabul edilerek manyetik alanın H_x ve H_z bileşeni, elektrik alanın E_y bileşeni sonlu farklar ağı içinde bulunan her bir hücre içine yerleştirilecektir. Yani bir hücrede H_x , H_z ve E_y hesaplanır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006).

Elektrik alanının (E_y) 'x' yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemi elde edilir. (2.3) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i+\frac{1}{2}, j)}{\partial x} = \mu(i+\frac{1}{2}, j) \frac{\partial H_z^n(i+\frac{1}{2}, j)}{\partial t} \quad (2.40)$$

denklemleri elde edilir. Denklemde elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler, zamana ve konuma göre türevleri 2. dereceden merkezi farklara göre açılırsa;

$$\frac{\partial E_y^n(i+\frac{1}{2},j)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [E_y^n(i+1,j) - E_y^n(i,j)] \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial H_z^{n+1/2}(i+\frac{1}{2},j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2,j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2,j)] \quad (2.42)$$

denklemleri elde edilir. (2.41) ve (2.42) denklemleri (2.40) denkleminde yerlerine yazılıp manyetik alan yalnız bırakıldığında;

$$\frac{[E_y^n(i+1,j) - E_y^n(i,j)]}{\Delta x} = \frac{\mu(i+\frac{1}{2},j)}{\Delta t} [H_z^{n+1/2}(i+1/2,j) - H_z^{n-1/2}(i+1/2,j)] \quad (2.43)$$

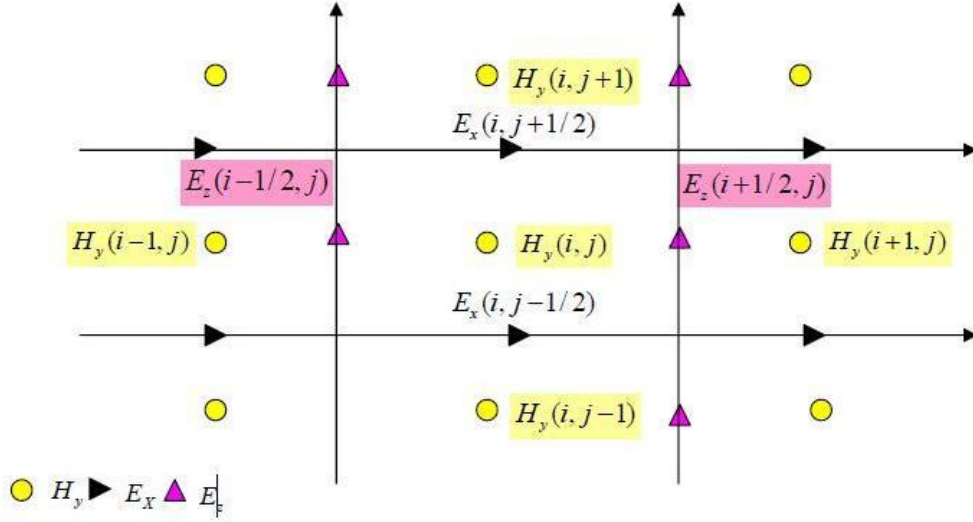
ve

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2,j) = H_z^{n-1/2}(i+1/2,j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+\frac{1}{2},j) - E_y^n(i,j)} \quad (2.44)$$

elde edilir (Lee and Teixeira 2006).

2.3.2.2.2. TE-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması

Elektrik alanın x ve z bileşeni, manyetik alanın y bileşeni hücre içerisinde yerleştirilecektir. Yani bir hücrede E_x , E_z ve H_y hesaplanır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee and Teixeira 2006)

Benzer şekilde eşitlik çıkarılır (Lee and Teixeira 2006).

$$H_y^{n+1}(i, j) = H_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j)} \left\{ \frac{[E_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j)]}{\Delta x} + \frac{[E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+1/2) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1/2)]}{\Delta z} \right\} \quad (2.45)$$

2.3.3. FDTD Algoritması ve Akış Şeması

- ✓ FDTD algoritması, model dosyalarının okunmasıyla başlar. Model dosyasında yer altına ait fiziksel parametreler (dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerleri) yer alır.
- ✓ İkinci adım olarak gömülü yapının derinliğine ve yaklaşık hesaplama derinliğine göre anten frekansı seçilir.
- ✓ Kararlılık koşulu ve sayısal dispersiyon göz önünde bulundurularak, grid aralıkları ($\Delta x, \Delta z$) ve zaman adım aralığı (Δt) hesaplanır.
- ✓ Hesaplanan grid aralıklarına göre sonlu farklar ağı oluşturulur.
- ✓ Anten frekansına uygun kaynak oluşturulur.
- ✓ Sonlu farklar ağının etrafına sanal sınır bölgesi (CPML) eklenir.
- ✓ Kullanılan anten frekansı ve gömülü cismin boyutları dikkate alınarak antenler arası mesafe seçilir. Verici ve alıcı anten koordinatları belirlenir.

- ✓ Kayıt zamanı belirlenir.
- ✓ Verici antenin ilk konumu için tüm zamanlarda manyetik ve elektrik alan hesabı yapılır. Hesaplamalarda öncelikle manyetik alan bileşenleri sonra elektrik alan bileşeni hesaplanır. Her zaman döngüsünden sonra kaynak terimi elektrik alan bileşenine eklenir. FDTD algoritmasındaki döngü, verici antenin son koordinatına kadar devam eder.
- ✓ Alıcı koordinatlarında elektrik alanı bileşeni depolanır.

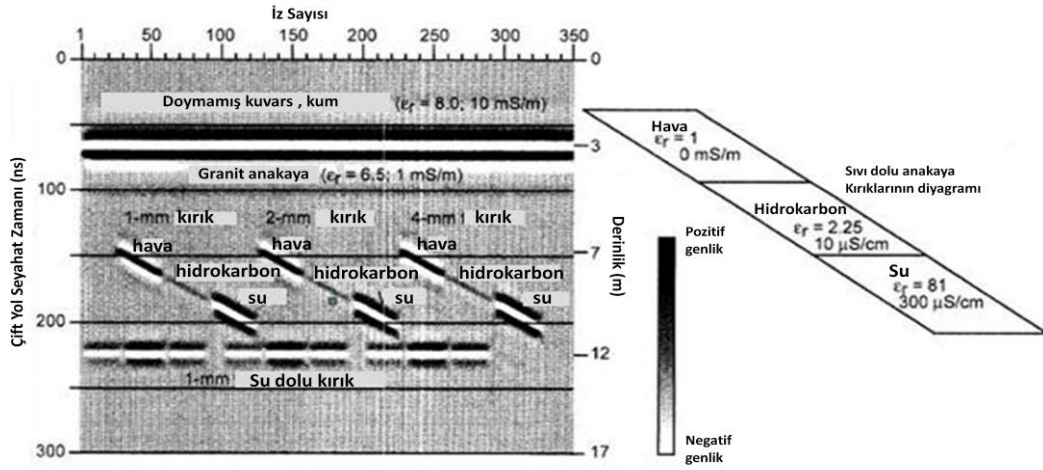
2.3.4. ReflexW Programı ile Modelleme

Bu çalışma kapsamında, iki-boyutlu yeraltı yapıları için sonlu farklar yöntemi ile elektromanyetik dalga yayılımının modellenmesi oluşturulmuştur. Bu amaçla, ikiboyutlu tabakalı yeraltı yapıları için elektromanyetik ve sismik dalga yayılımının modellenmesini yapan REFLEXW (ver.7.0) programı kullanılmıştır. Elektromanyetik dalga eşitliklerinin modellenmesi, Maxwell eşitliklerinin sonlu farklar yöntemiyle çözümüne dayanır.

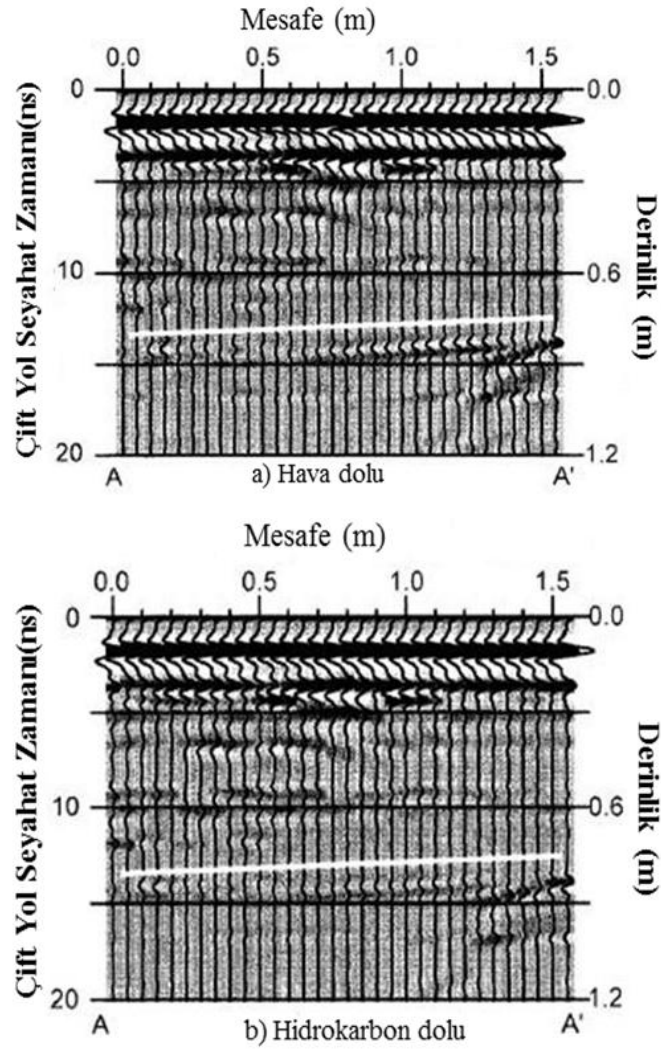
Literatürde yer alan modelleme çalışması;

Model 1

Yer radarı modelleme çalışmasında; 20° açıyla dalan 1, 2 ve 4 mm açıklık ile hava, hidrokarbon ve su ile dolu olan granit ana kayadan 4 m aşağıda üç kırık vardır. Bu modelde granit ana kaya üzerinde 3 m'de doymamış kuvars kumu vardır. Bu üç kırık altında 1 mm açıklığa sahip yatay su dolu olan kırık görülmektedir. Bu kırıkların dielektrik permitivite, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri şekil diyagramında görülmektedir (Şekil 2.21).

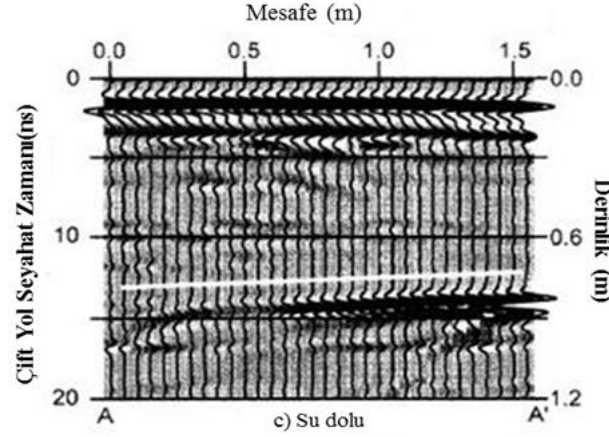


Şekil 2.21. Kırıklı kaya modeli (Lane vd., 2000).



Şekil 2.22. Fiziksel modellerden 500 MHz ile elde edilen GPR yansıma kayıtları a) hava dolu kırık, b) hidrokarbon dolu kırık ve c) su dolu kırık

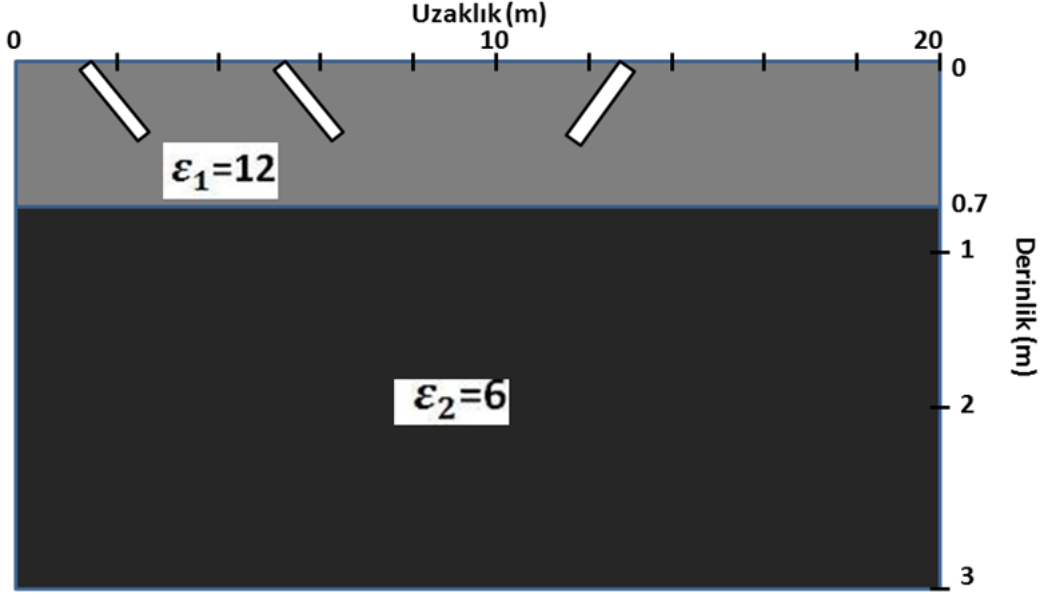
Şekil 2.22'nin devamı



Yer radarı modellemesinden elde edilen radargramlar incelendiğinde; hava-hidrokarbon dolu olan kırık yansımalarından su dolu kırık yansımalarını ayırt etmek mümkündür. Ayrıca su dolu olan kırıklar; hava ve hidrokarbon dolu olan kırıklardan olan yansımaların tersi bir polariteye ve bunlardan daha büyük bir genlik ile yansımalar üretir.

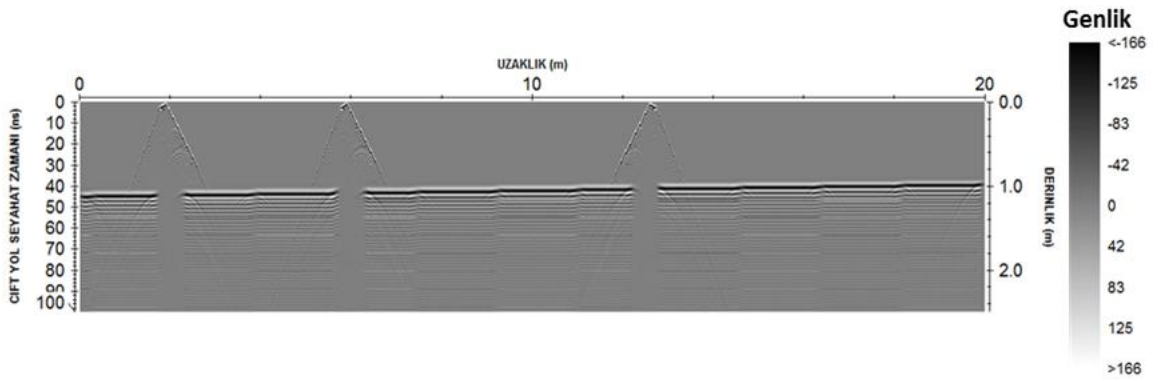
Model 2

ReflexW programı ile yapılan yer radarı modelleme çalışmasında, seçilen model geometrinin beton kısmında farklı uzaklıklarda 3 kırık seçilmiştir. Bu kırıkların birincisi 2 m, ikincisi 6 m ve diğeri ise 12.5 m'de konumlandırılmıştır. Farklı uzaklıklarda seçilen kırıkların içi, su ile dolu olup, dielektrik geçirgenlik (ϵ) değeri 80 (Farad/m), manyetik geçirgenlik (μ) değeri 1 (Henry/m) ve elektrik iletkenlik (σ) değeri ise 0.0005 (Simens/m) olarak alınmıştır. Ayrıca seçilen model geometri, tünel duvar içyapısını yansıtacak bir ortamı temsil edecek şekilde, beton-dasit ara yüzeyinden oluşmakta olup, beton kalınlığı 70 cm olarak seçilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Yer radarı modellemesi için seçilen model geometri

Seçilen model geometrinin yapay radargramını hesaplamak için çalışma kullanılan anten merkez frekanslarından 500 MHz alınmıştır. Bu modele ait yapay radargram Şekil 2.24 görüldüğü gibidir. Elde edilen radargram incelendiğinde, model geometrideki kırıkların yeri ve uzanımları belirgin bir şekilde izlenmektedir. Bu tür yapılan modelleme sonuçlarından elde edilen bilgiler, çalışılan gerçek yer radarı kesitlerinin yorumlanmasında faydalı olmaktadır.



Şekil 2.24. 500 MHz kullanılarak yer radarı modellemesi sonucu elde edilen yapay radargram

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Zigana Tüneli'nden Elde Edilen Radargramlar

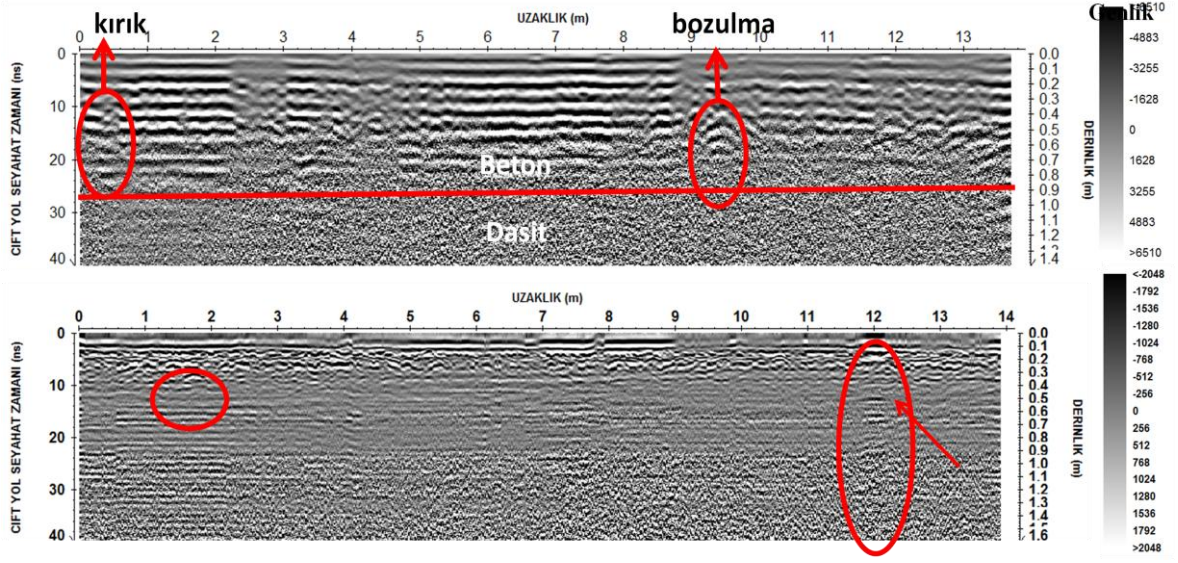
3.1.1. Zigana Tüneli Trabzon Girişi

Trabzon-Gümüşhane yönünde Zigana tüneline sağ taraftan girişte 10 m'den (elektrik kablosunun başlangıcından) 24 m'ye (telefon kulübesi) kadar, profil aralığı 30 cm olan 5 hattan oluşan bir çalışma sahası seçilmiştir (Şekil 2.7).

Zigana tüneline en önemli sorun olan kırık-çatlak durumunu değerlendirmek amacıyla veri alınmıştır. Verilerin yorumunun yapılabilmesi için gerekli veri işlem adımları uygulanmıştır.

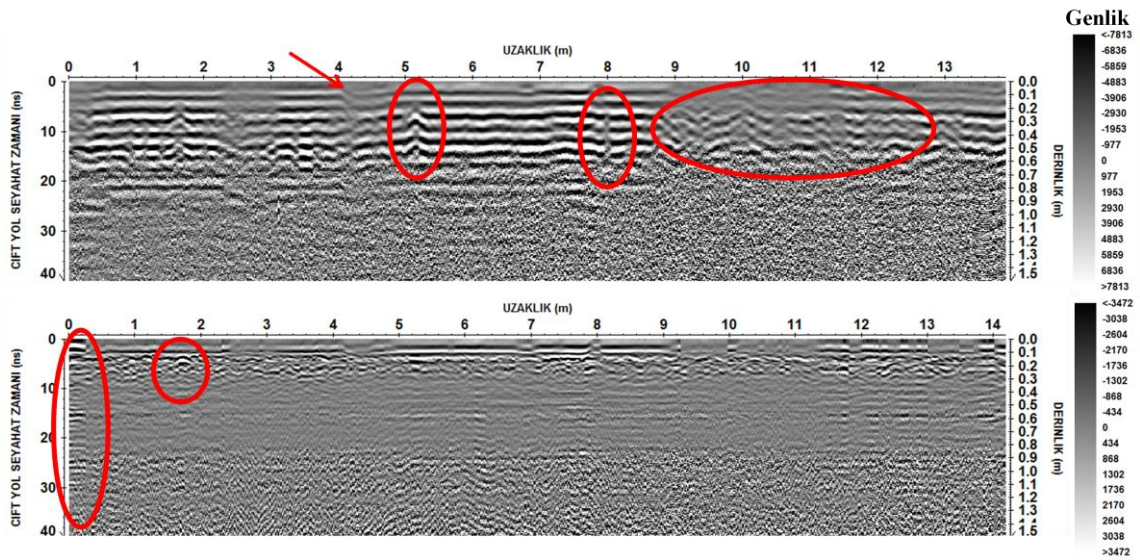
Beş profilde 500 ve 800 MHz korumalı antenlerle toplanan yer radarı kesitlerinin gerekli veri işlem aşamalarından sonra elde edilen görüntülerinden 1.profildeki radargramlar Şekil 3.1 a ve b'deki gibidir. Bu radargramın uzaklık eksenini, tünel duvarı boyunca olan uzaklıktır. Radargramların sağ tarafındaki derinlik eksenini ise tünel duvarına dik eksen boyunca derinliğe karşılık gelmektedir.

Profil 1'e ait 500 MHz anten ile elde edilen radargramda uzaklık ekseninde yaklaşık 30 cm mesafede bozulma görülmektedir (Şekil 3.1a). Aynı profilde 800 MHz antenle toplanan kesitte yaklaşık 1.8 m uzaklıkta bir anomali ve yaklaşık 12.2 m'de bir bozulmanın varlığı söz konusudur (Şekil 3.1b). Ayrıca veri toplama sırasında 70 cm olarak ölçülen tünel duvar kalınlığı veri işlem sonucu elde edilen radargramlarda gözlenmiştir.



Şekil 3.1. a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti

Zigana tünelinin Trabzon tarafından girişte alınan 2.profile ait işlenmiş yer radarı kesitleri şekil 3.2a (500 MHz) ve şekil 3.2b (800 MHz) görülmektedir. Bu çalışma alanının 2.profiline ait radargram (Şekil 3.2a) incelendiğinde yaklaşık 4 m.de kayma görülmektedir. Bu kaymanın sebebi çatlak olarak düşünülmüştür. Aynı profilde yaklaşık 9-11.5 m arasında elektromanyetik dalgada bir zayıflama görülmektedir. Bu durum yüzeyden gözlenebilen duvardaki su sızıntısına (Şekil 3.3) karşılık geldiği düşünülmektedir.

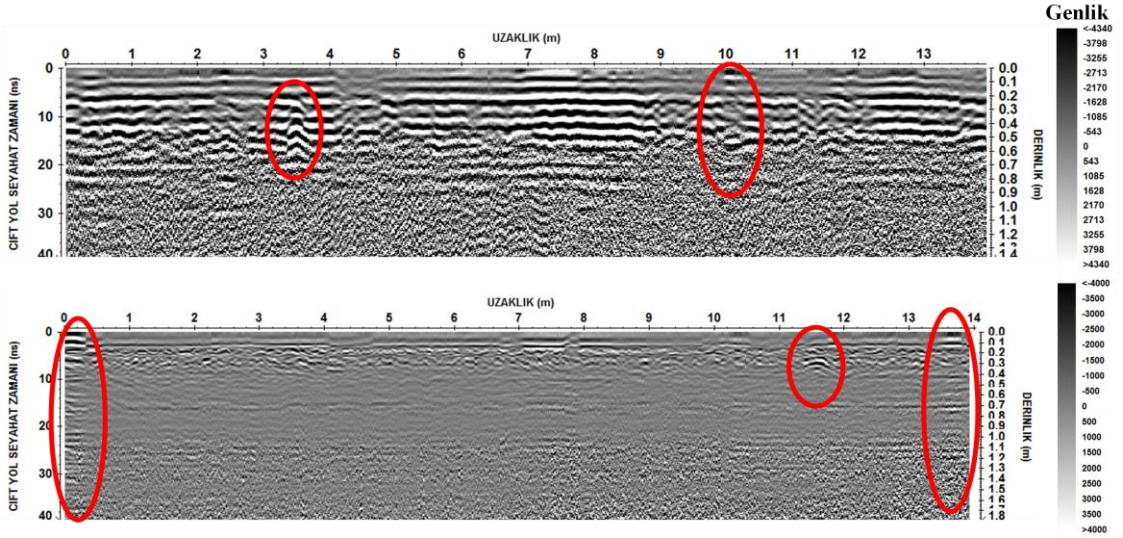


Şekil 3.2. a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti



Şekil 3.3. Zigana tüneli Trabzon girişindeki su sızıntısının görünüm

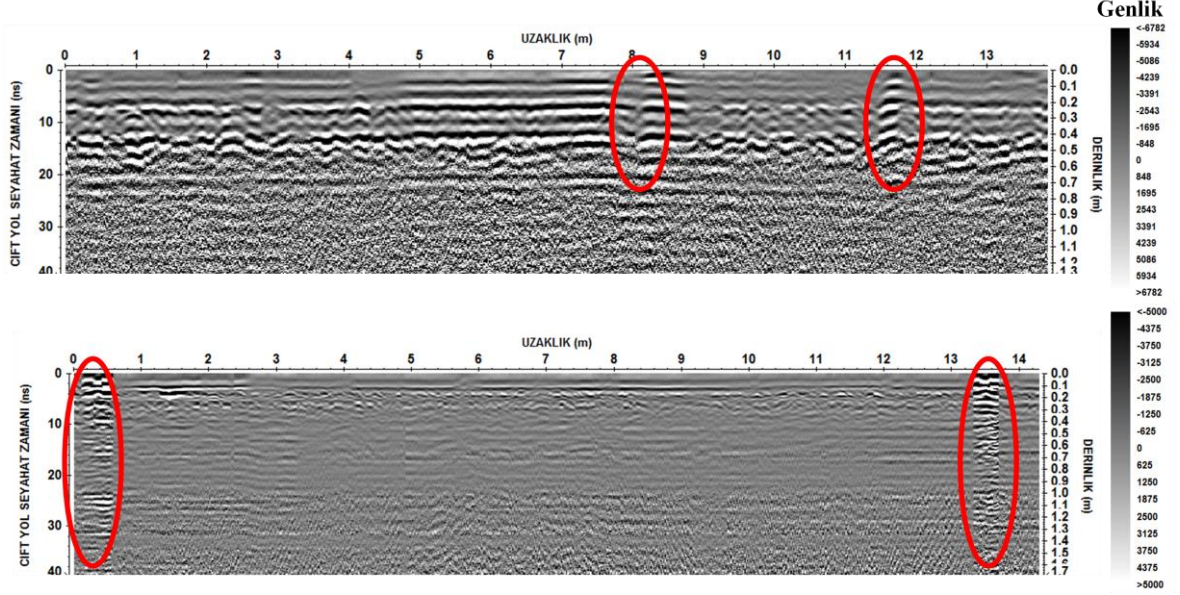
Bu çalışma alanında 3. profile ait yer radarı ölçülerinde 500 MHz ile toplanıp işlenen radargram Şekil 3.4a'da, 800 MHz ile toplanan ise Şekil 3.4b'de verilmiştir. 3. profile başlangıçtan yaklaşık 3.6 m mesafede duvar içerisinde bir boşluk olabilir (Şekil 3.4a). Yaklaşık 11.6 m de bir anomali görülmektedir (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4. a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti

Profil 5'e ait olan 500 ve 800 MHz antenlerle toplanmış ve işlenmiş yer radarı kesitleri sırasıyla Şekil 3.5 a ve b'de görülmektedir. Profil 5'te 500 MHz antenle elde edilen radargramda yaklaşık 8 m.de bir kırılmanın olduğu düşünülmüştür. 800 MHz

antenle elde edilen radargramda yaklaşık 0-64 cm ve 13.2-13.8 m aralıklarındaki bozulmalar dikkat çekmektedir (Şekil 3.5b).

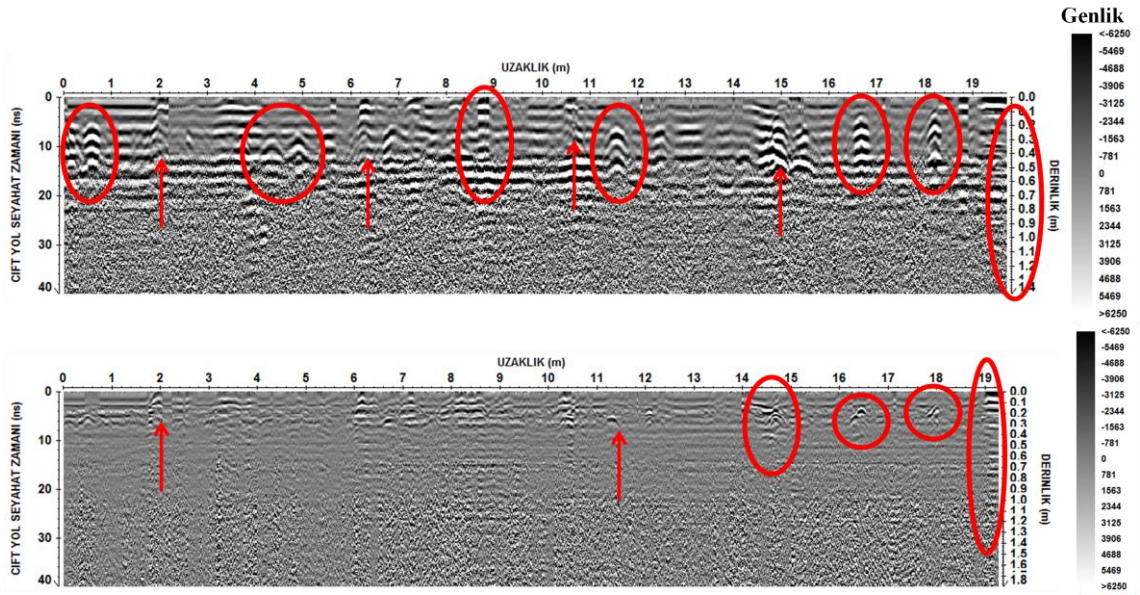


Şekil 3.5. a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti

3.1.2. Zigana Tüneli Gümüşhane Girişi

Gümüşhane-Trabzon yönünde Zigana tüneline sağ taraftan girişte 0-20 m arasındaki alan çalışma sahası olarak seçilmiştir. Bu alanın seçilmesindeki amaç; duvarda yoğun bir şekilde var olan su sızıntısı ve kırıklı-çatlaklı yapıların varlığıdır.

500 ve 800 MHz antenler ile toplanmış ve veri işlem yapılmış yer radarı kesitleri Şekil 3.6 a ve b'deki gibidir. 500 MHz anten ile elde edilen radargramda yaklaşık 2 m, 6.5 m, 10.8 m ve 15 m.de kırıkların olduğu düşünülmüştür ve arazide gözlenmiştir (Şekil 3.6). Yaklaşık 60 cm, 4.6 m, 11.6 m, 16.5 m ve 18.2 m'de belirgin anomaliler gözlenmektedir (Şekil 3.6a). 500 MHz ile elde edilen radargramda kırık olarak tanımlanan yapılar 800 MHz anten ile elde edilen radargramda da yaklaşık aynı mesafede görülmektedir.



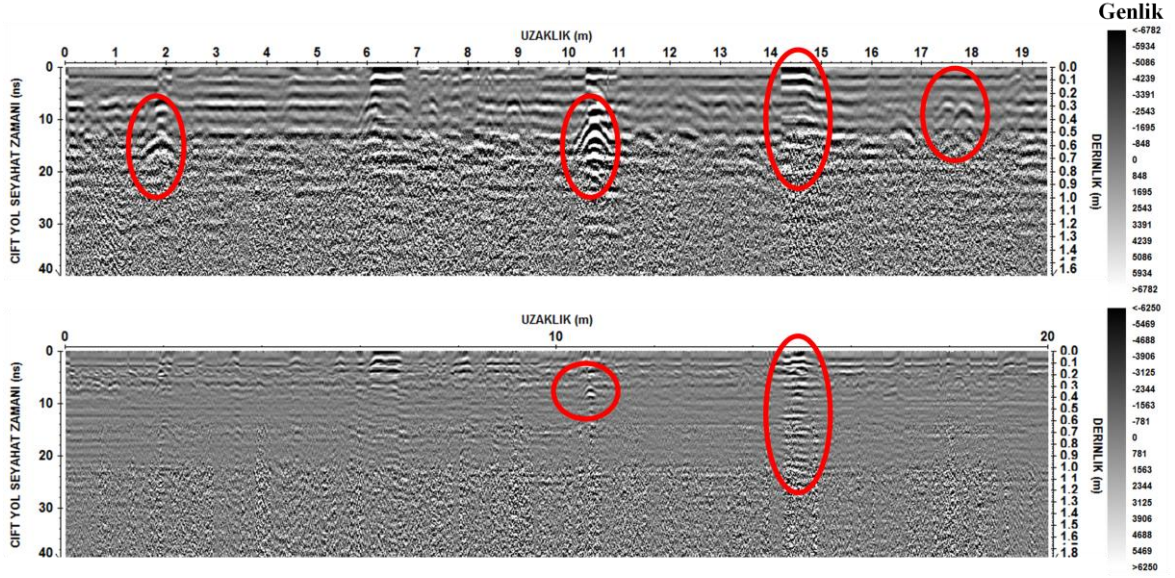
Şekil 3.6. a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti

Zigana tüneli Gümüşhane girişinden elde edilen radargramlar incelendiğinde kırıklı-çatlaklı yapılar ve su sızıntıları temsil eden tünel duvarından genel bir görünüm Şekil 3.7’de görülmektedir.



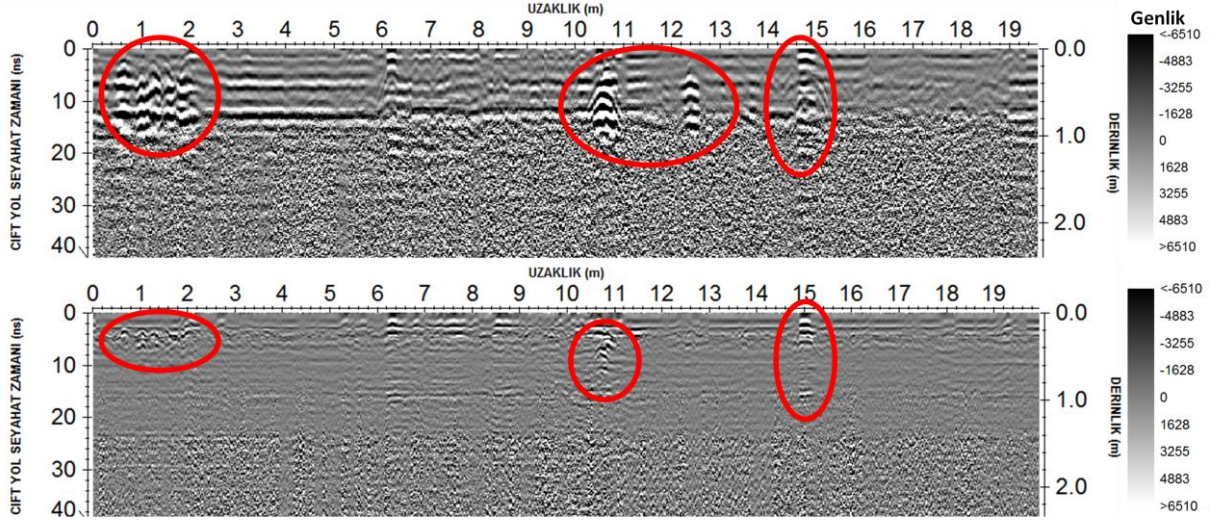
Şekil 3.7. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde su sızıntıları ve kırıklı-çatlaklı yapılardan görünüm

Bu çalışmada, 2. profile ait 500 MHz antenle toplanmış ve işlenmiş veri Şekil 3.8a'da, 800 MHz antenle toplanmış ve işlenmiş veri Şekil 3.8b'de gösterilmektedir. Profil 1'e ait radargramda var olan kırıklı yapılar profil 2'de ise 2 m, 6.2 m, 10.4 m ve 14.6 m.de ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 3.8a).



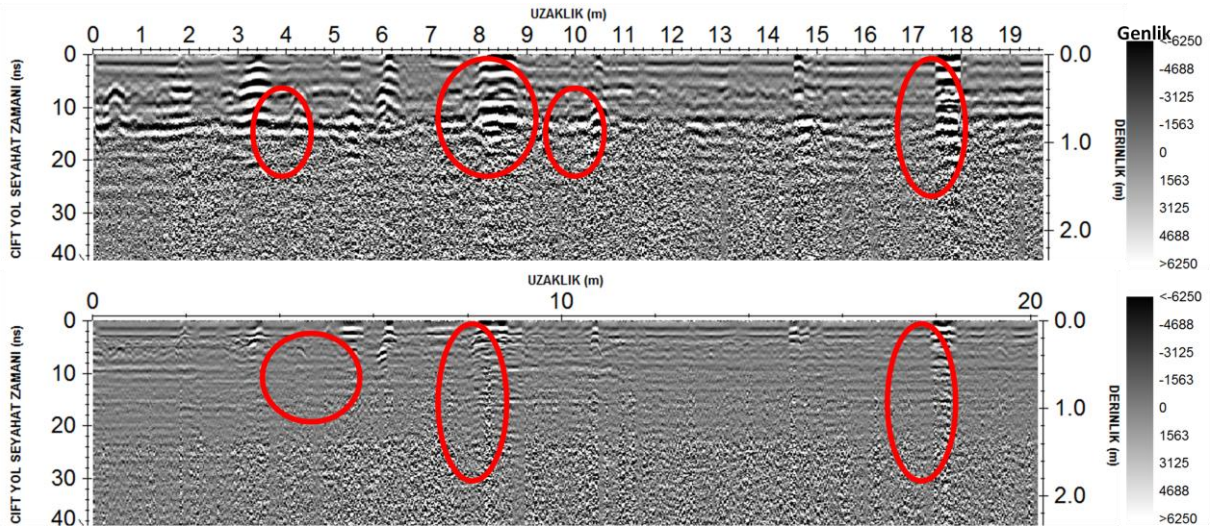
Şekil 3.8. a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti

Zigana tünelinin Gümüşhane tarafından girişte alınan 3. profile ait işlenmiş yer radarı kesitleri Şekil 3.9a (500 MHz) ve şekil 3.9b (800 MHz) görülmektedir. 3. profile bakıldığında profil 1 ve 2'deki kırıklı yapı yaklaşık 14.7 m görülmüştür (Şekil 3.9a). Yaklaşık 16-19 m elektromanyetik dalganın genliğinde bir zayıflama görülmektedir (Şekil 3.9a).



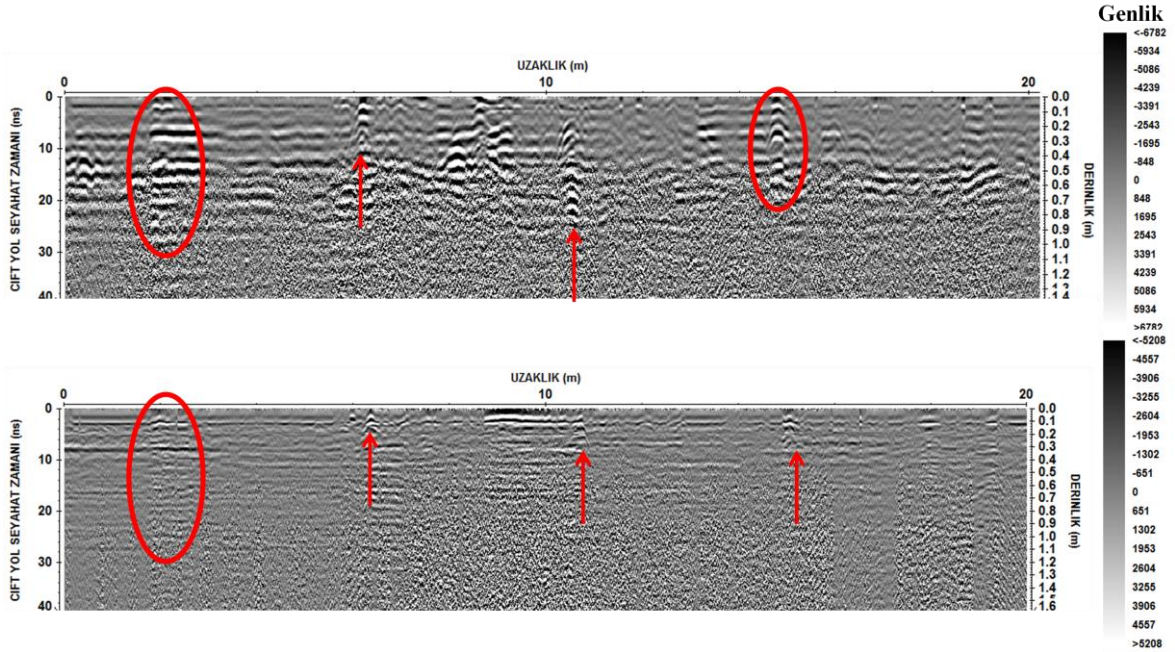
Şekil 3.9. a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti

500 ve 800 MHz korumalı antenlerle toplanan yer radarı kesitlerinin gerekli veri işlem aşamalarından geçirilmesinden sonra elde edilen görünümlelerinden 4. profildeki radargramlar Şekil 3.10 a ve b'deki gibidir. Profil 4'den elde edilen radargrama bakıldığında farklı uzaklıklarda anomaliler ve kırıklar ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 3.10a-b).



Şekil 3.10. a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti

Profil 5'e ait olan ve 500 ve 800MHz antenler kullanılıp toplanmış ve veri işlem adımları uygulanmış yer radarı kesitleri Şekil 3.11 a ve b'deki görülmektedir.

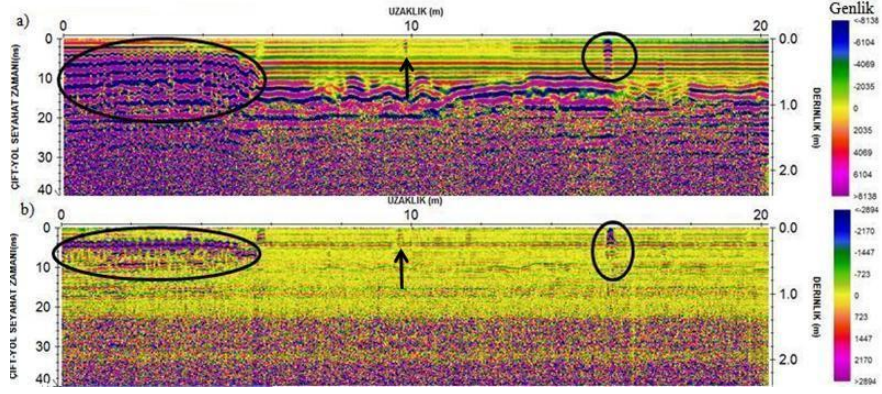


Şekil 3.11. a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti

3.2. Torul Tüneli'nden Elde Edilen Radargramlar

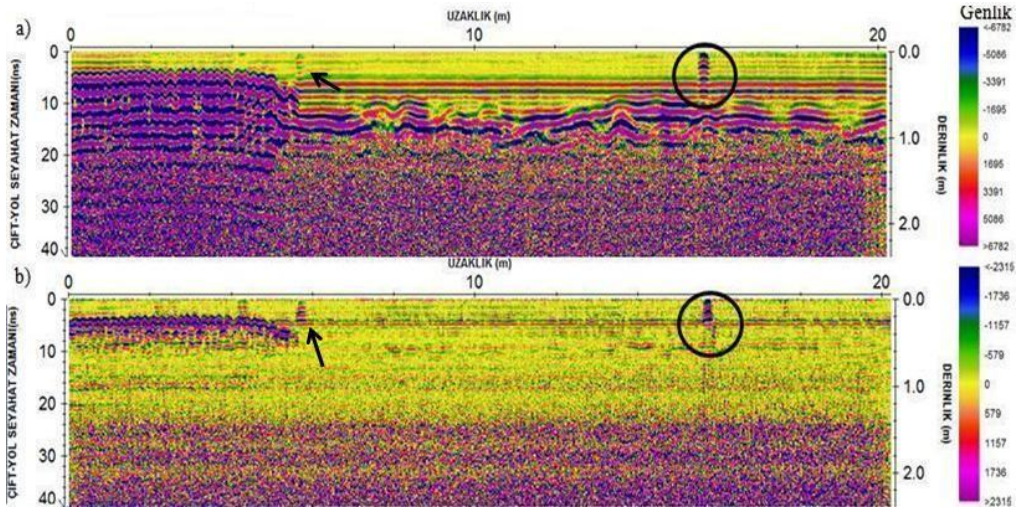
3.2.1. Torul Tüneli Trabzon Girişi

Trabzon-Gümüşhane yönünde Torul tüneline sol taraftan girişte başlangıçtan 20 m ye kadar profil aralığı 30 cm olan 5 hattan oluşan bir çalışma sahası değerlendirilmiştir. Bu beş hattın 500 ve 800 MHz antenlerle toplanan yer radarı kesitlerinin gerekli veri işlem aşamalarından geçirilmesinden sonra elde edilen görünümünden 1. profildeki radargramlar Şekil 3.12 a ve b'deki gibidir.



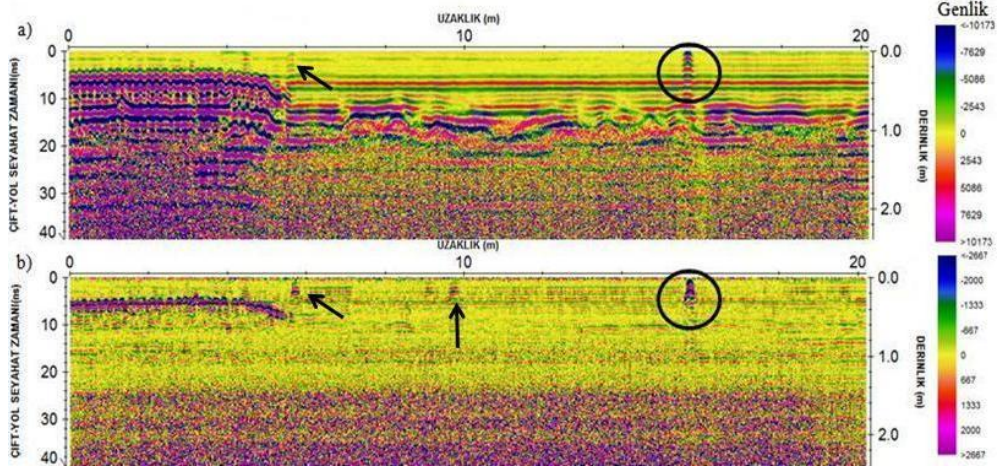
Şekil 3.12. a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti

Profil 2'ye ait olan, aynı antenler kullanılarak toplanıp ve veri işlem uygulanan yer radarı kesitleri Şekil 3.13 a ve b'de görülmektedir.



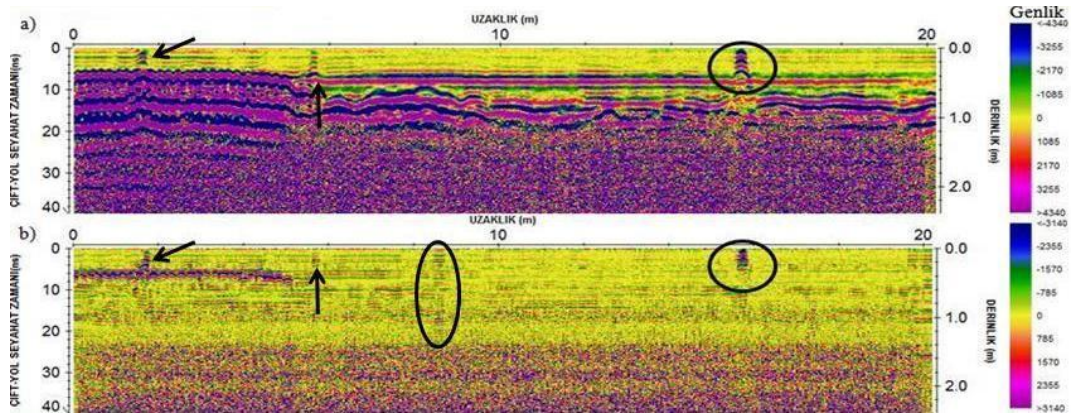
Şekil 3.13. a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti

Bu çalışma kapsamında 3.profilinden toplanmış ve veri işlem uygulanmış yer radarı kesitleri Şekil 3.14 a ve b'de gösterilmektedir.



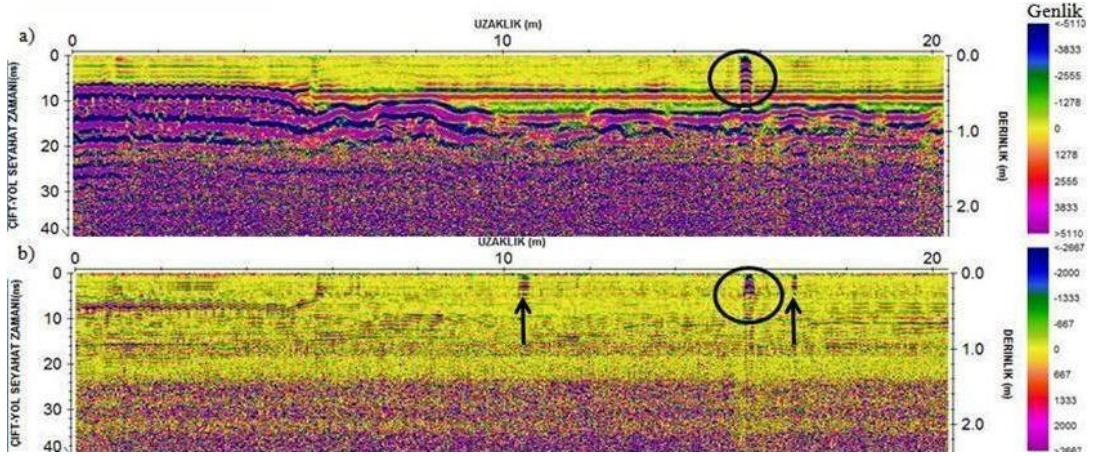
Şekil 3.14. a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti

4. profilden bilgi almak için 500 MHz korumalı anten ile toplanmış ve veri işlem uygulanmış yer radarı kesiti Şekil 3.15a'da, 800 MHz ile elde edilen ise Şekil 3.15b'de gösterilmiştir.



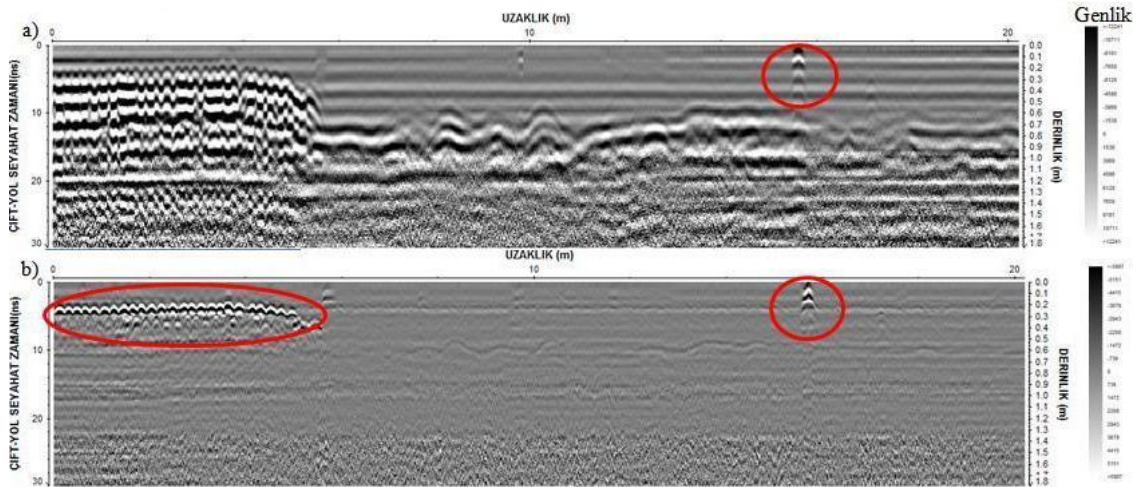
Şekil 3.15. a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti

Torul tünelinin Trabzon tarafından girişte alınan 5. profile ait işlenmiş yer radarı kesitleri Şekil 3.16a (500 MHz) ve Şekil 3.16b (800 MHz) görülmektedir.



Şekil 3.16. a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti

Torul tünelinin Trabzon tarafından girişte alınan 1. profile ait işlenmiş yer radarı kesitleri Şekil 3.17a (500 MHz) ve Şekil 3.17b (800 MHz) görülmektedir. Bu radargram için değişik renk görünümü elde etmek amacıyla farklı renkli radargram kullanılmıştır.



Şekil 3.17. a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti

Şekil 3.12-3.17 arasındaki radargramlar incelendiğinde; 0-4.6 m uzaklıklar arasında gözlenen yüksek genlikli küçük birbirine bitişik hiperbolik yansımaların, tünel girişlerinin ana kaya ile tünel ağzı arasındaki boşluklu kısma döşenmiş beton donatı demirlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Şekil 3.18) ve bu yapı 800 MHz antenle elde edilen radargramda daha net bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda bu radargramlarda yaklaşık

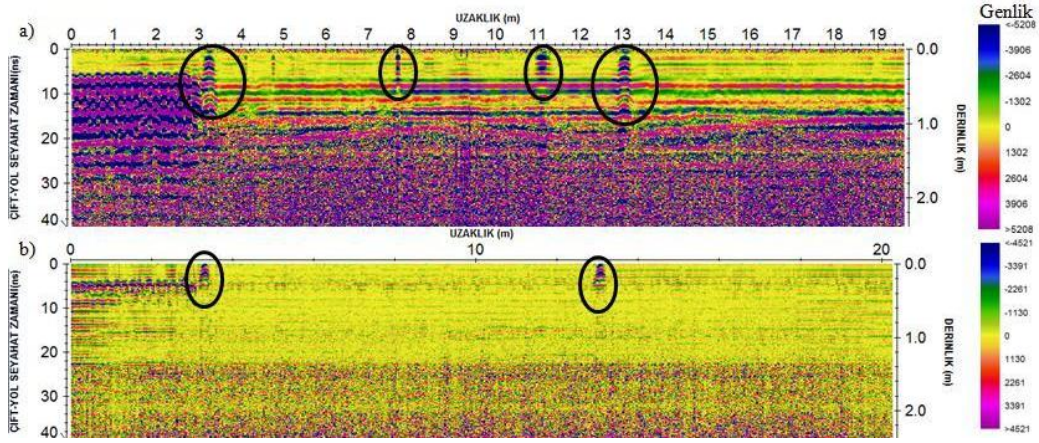
2, 9.5 ve 16 m.deki anomalilerin arazide gözlenen beton bloklarının bağlantı yerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.18. Torul tüneli Trabzon girişindeki tünel dışı boşluğun görünümü

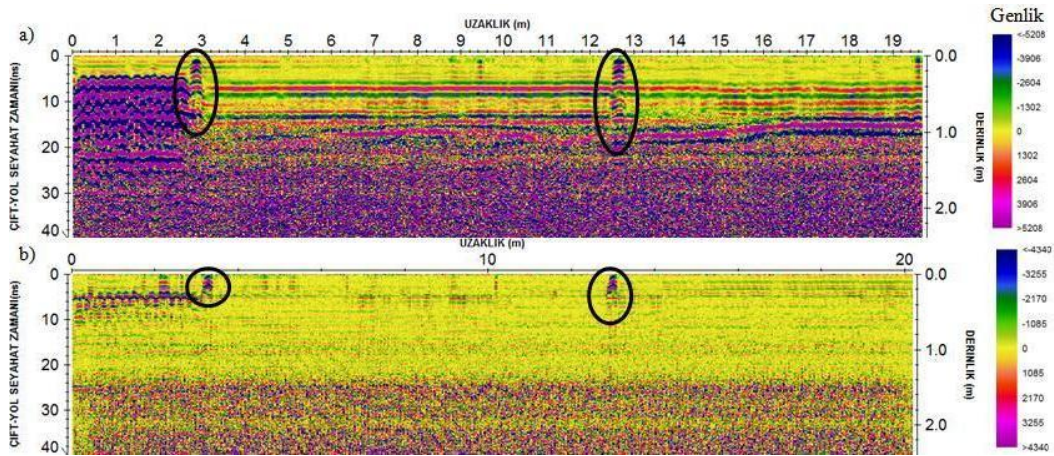
3.2.2. Torul Tüneli Gümüşhane Girişi

Gümüşhane-Trabzon yönünde Torul tüneline sağdan girişte başlangıçtan 20. m ye kadar ve 30 cm profil aralığı olan 5 hattan oluşan alan çalışma sahası olarak seçilmiştir. Bu çalışma sahasındaki amaç tünel duvarının beton kalitesini incelemektir. Bu amaçla yapılan çalışmada 1. profilden elde edilen, veri işlem uygulanmış yer radarı kesitleri Şekil 3.19a (500 MHz) ve Şekil 3.19b (800 MHz)'deki gibidir.



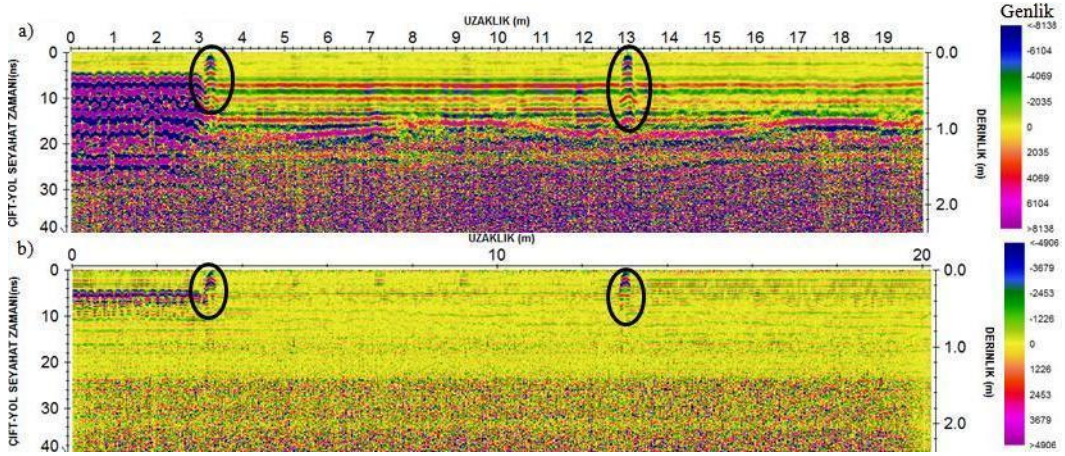
Şekil 3.19. a) 500 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 1. profil için yer radarı kesiti

Profil 2'den elde edilen yer radarı kesitlerinden 500 MHz korumalı anten ile alınan Şekil 3.20a ve 800 MHz korumalı anten ile alınan ise Şekil 3.20b'de gösterilmektedir.



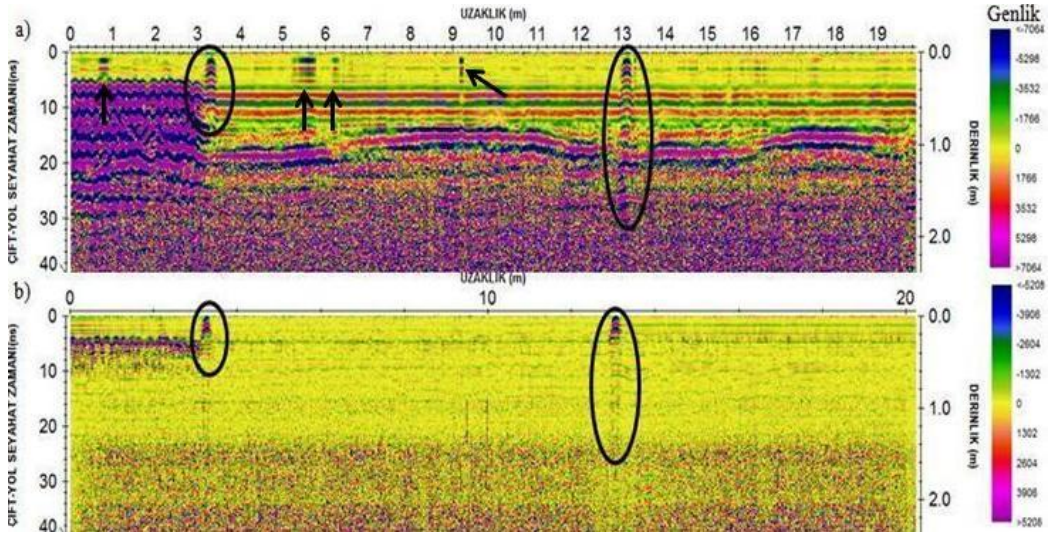
Şekil 3.20. a) 500 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 2. profil için yer radarı kesiti

Torul tünelinin Gümüşhane tarafından girişte alınan 3. profile ait işlenmiş yer radarı kesitleri Şekil 3.21a (500 MHz) ve Şekil 3.21b (800 MHz) görülmektedir.



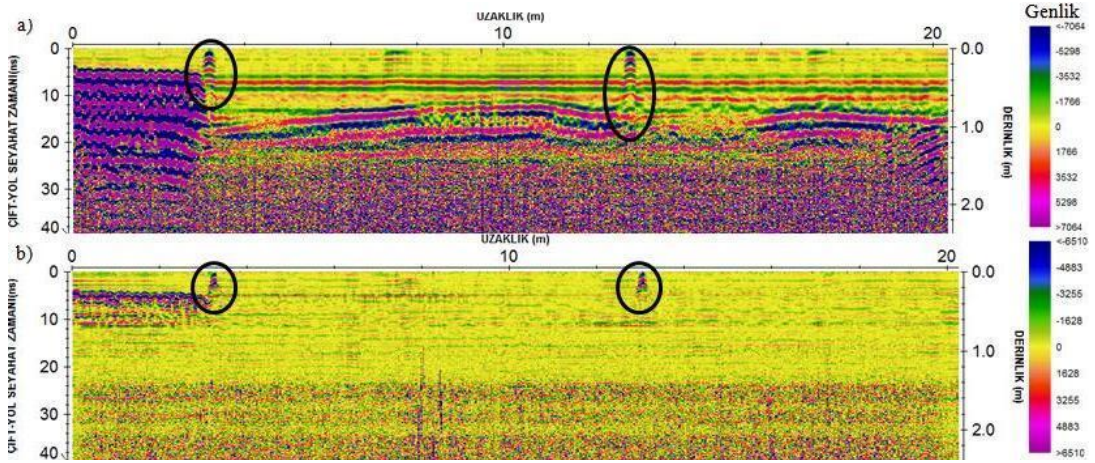
Şekil 3.21. a) 500 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 3. profil için yer radarı kesiti

Bu çalışmada, 4. profile ait 500 MHz antenle toplanmış ve işlenmiş veri Şekil 3.22a'da, 800 MHz antenle toplanmış veri ise Şekil 3.22b'de gösterilmektedir.



Şekil 3.22. a) 500 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 4. profil için yer radarı kesiti

5. profile ait yer radarı kesitlerinden Şekil 3.23a 500 MHz korumalı anten ile alınmış olup, Şekil 3.23b 800 MHz korumalı anten ile alınmıştır.



Şekil 3.23. a) 500 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti b) 800 MHz ile 5. profil için yer radarı kesiti

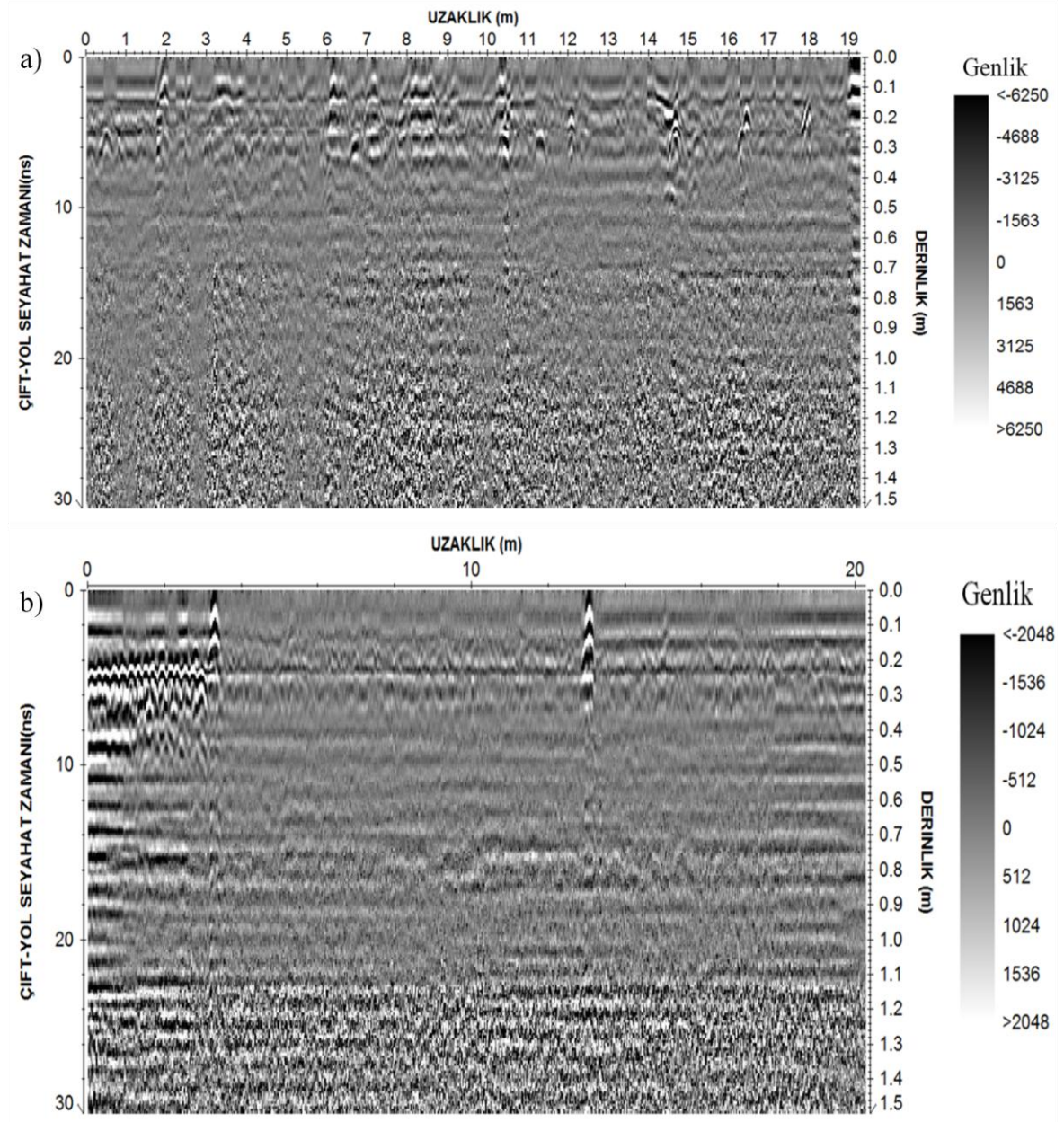
Şekil 3.19-3.23 arasındaki radargramlar incelendiğinde; 0-3 m uzaklıklar arasında ve yaklaşık 40 cm derinliğinde yan yana küçük çaplı hiperbolik yansımalar görülmektedir. Bu yansımalarında yine tünel dışındaki boşluklu kısımları tünel duvarına sağlamlaştırmak amacıyla beton içerisine yerleştirilmiş donatı demirlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.24. Torul tüneli beton bloklarının bağlantı yerleri

Tüm radargramların genel değerlendirilmesinde sonra, örnek teşkil etmesi açısından bu tezde kullanılan antenlerden yüksek çözünürlüğe sahip olan 800 MHz antenle toplanan radar kesitlerinin ilk 1.5 m derinliğe kadar olan kısmın görüntüsü Şekil 3.25a ve b'de

verilmektedir. Bu şeklin üst kısmındaki 25 yıllık kullanımda olan Zigana tünel duvarına diğeri ise yeni inşa edilmiş olan Torul tünelinin duvarından alınmış radargramlardır.



Şekil 3.25. 800 MHz antenle a) Zigana ve b) Torul tünel duvarından toplanan verilerin ilk 1.5 m derinliğe ait detaylandırılmış görüntüleri

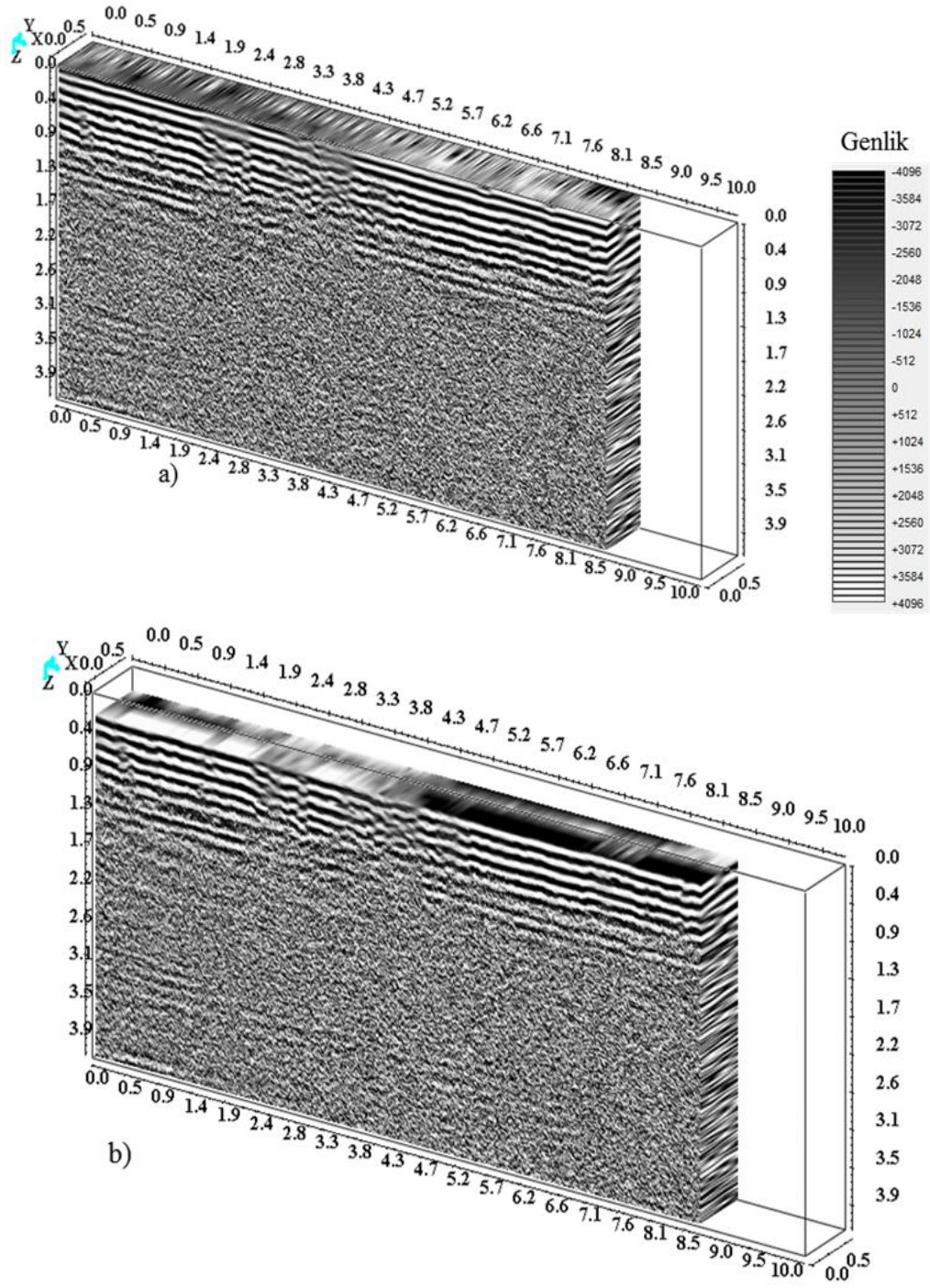
Zigana tünel duvarından 1.5 m derinliğe kadar olan kısmın radargram üzerindeki görünümünden (Şekil 3.25) beton kalitesinin oldukça bozuk ve sıklıkla kırık-çatlaklar içerdiği gözlenmektedir. Yeni kullanıma açılmış olan Torul tünel duvarından 800 MHz antenle toplanmış radar kesitinde, beton bağlantı noktaları ve donatı demirlerinin dışında

yüksek genlikli bozucu yansımaların olmayışı betonun sağlam olduğu izlenmektedir. Ayrıca her iki kesitte tünel duvarı ile oyuldukları ana kaya sınırları belirgin bir şekilde ayırt edilmektedir.

3.3. Toplanan GPR Verilerinin 3 Boyutlu Gösterimi

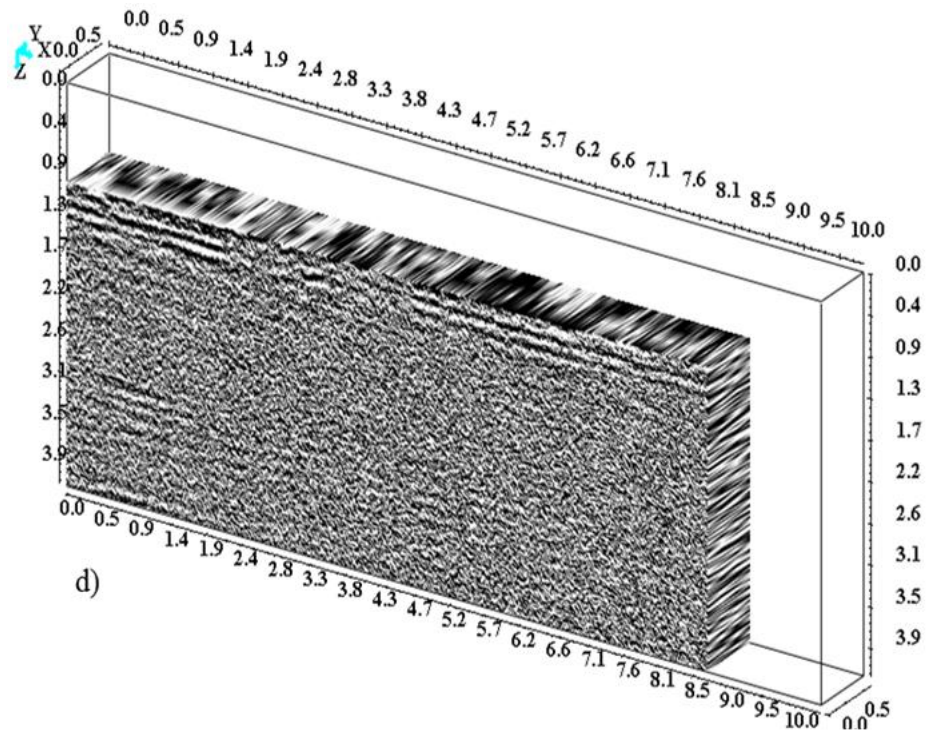
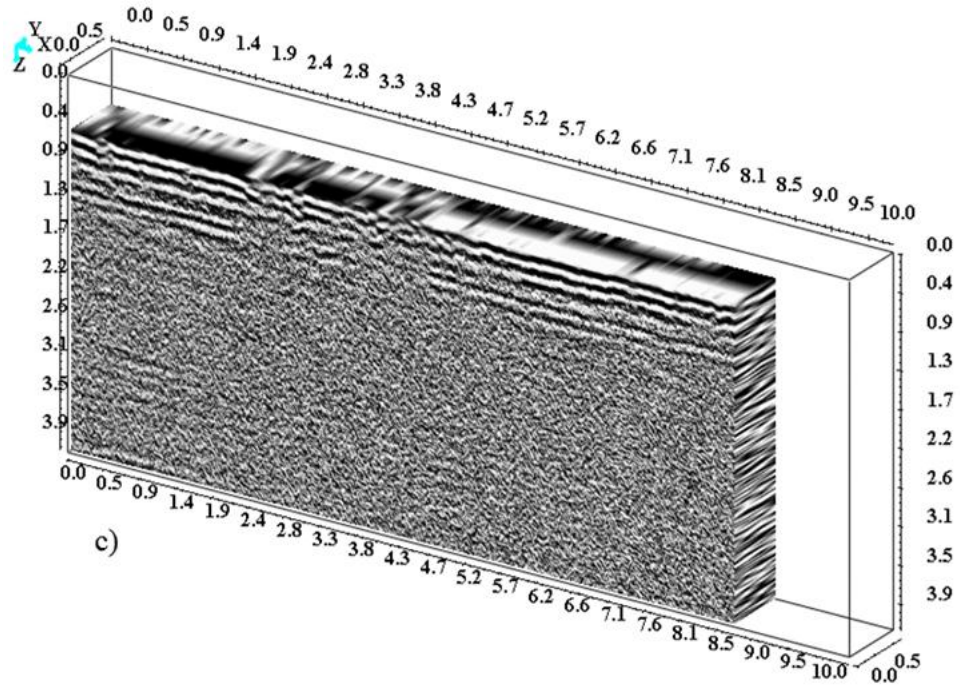
Çalışma alanlarında birbirine paralel profillerde toplanan yer radarı verilerinde gözlenen anomalilerin yanıl ve düşey yöndeki değışimlerinin izlenebilmesi için 3B'lu görüntüler; Easy3D (Mala GeoScience) programı ile oluşturulmuştur. Bu programın görüntülemesi gereği, ölçü profil uzunluğuna göre 3B'lu görüntüler belli uzaklıklara göre bölünmüştür. Elde edilen 3B görünümünden istenilen derinlik seviyeleri için genlik-dilim haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, tünel duvarlarında gözlenen bozulmaların derinliğe bağlı olarak yanıl yönde değışimlerini ortaya koymaktadır. Böylelikle genlik-dilim haritaları yardımıyla iyileştirme yapılması gerekli olan yerler tespit edilebilmektedir.

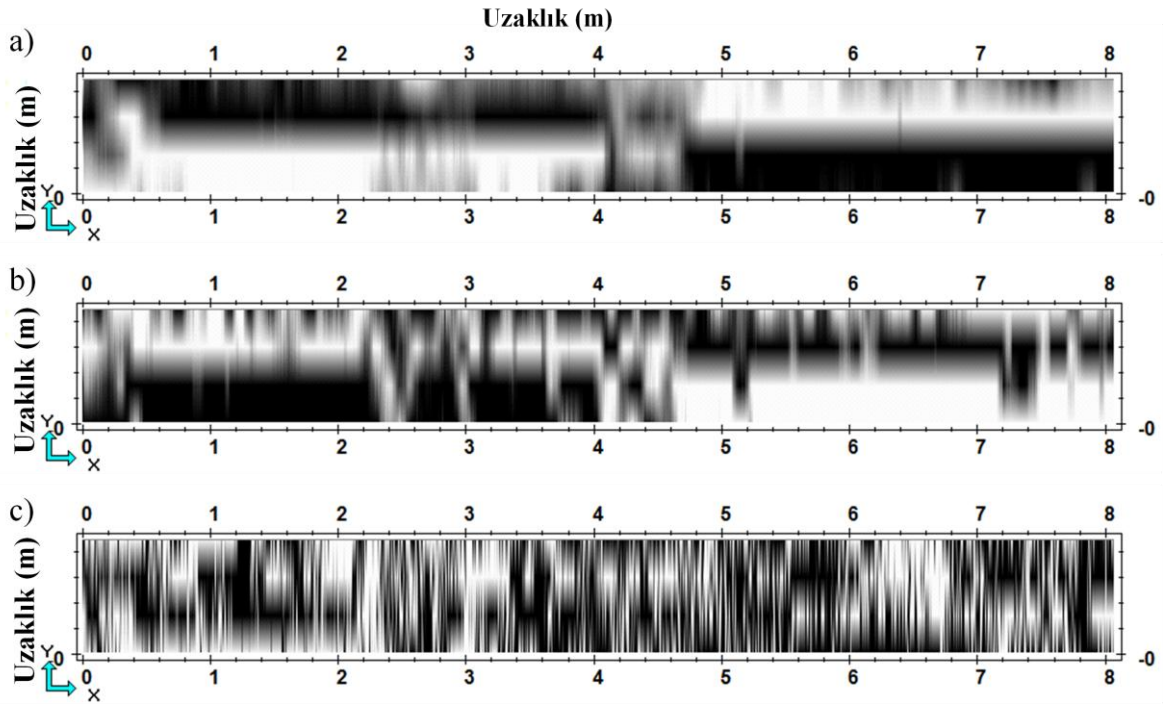
Şekil 3.26a'da Zigana Tüneli'nin Trabzon tarafından girişinde 500 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-8.5 m aralığındaki 3B görünümleri verilmektedir. Bu şeklin b'sinde 0.4 m derinliğindeki, c'de 0.8 m derinliğindeki ve d'de 1.2 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.26. a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8.5 m'deki 3B görünümü. b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları (X: uzaklık (m), Y: Profiller arası uzaklık (m), Z: Derinlik (m))

Şekil 3.26'nın devamı

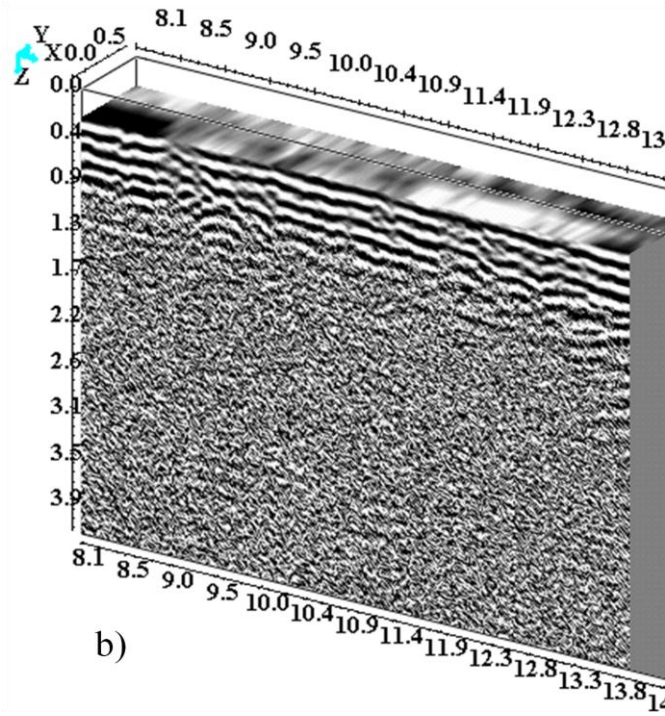
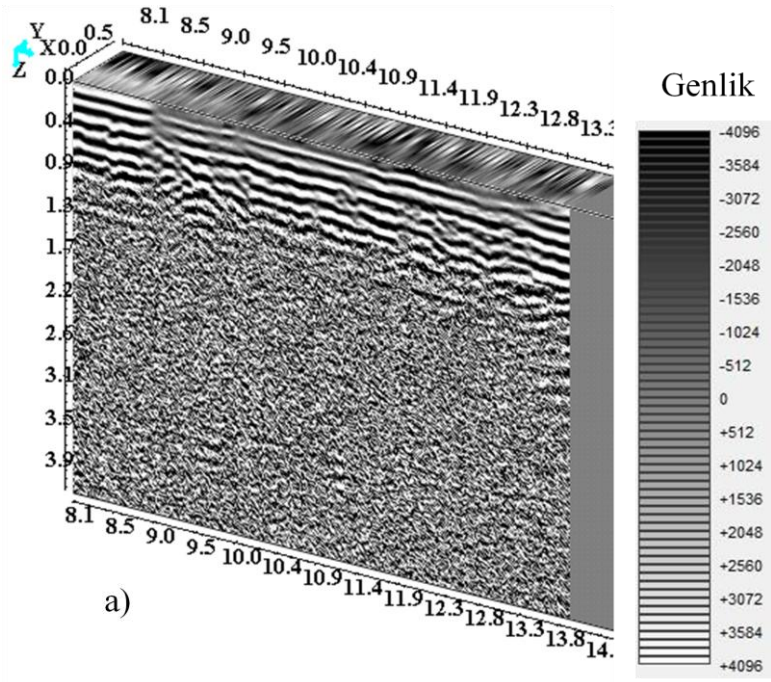




Şekil 3.27. Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

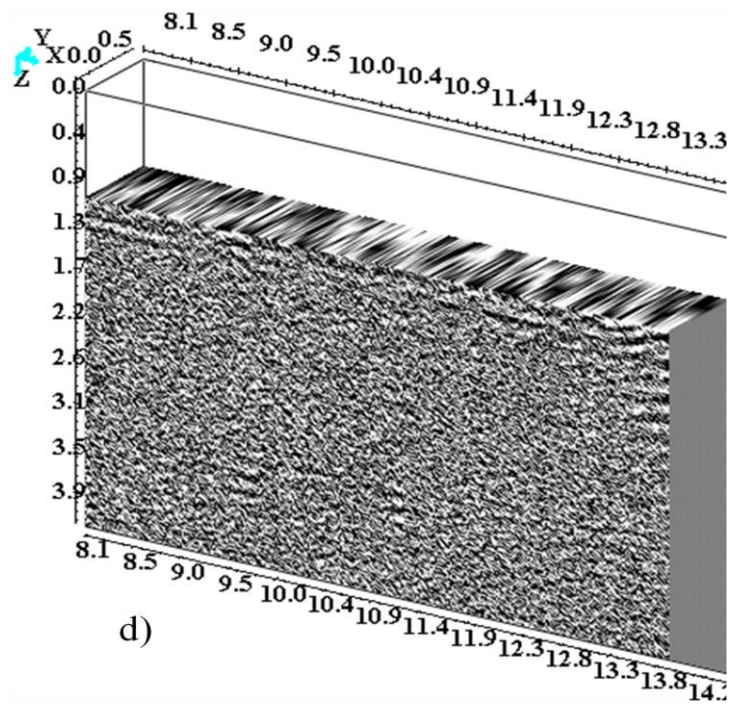
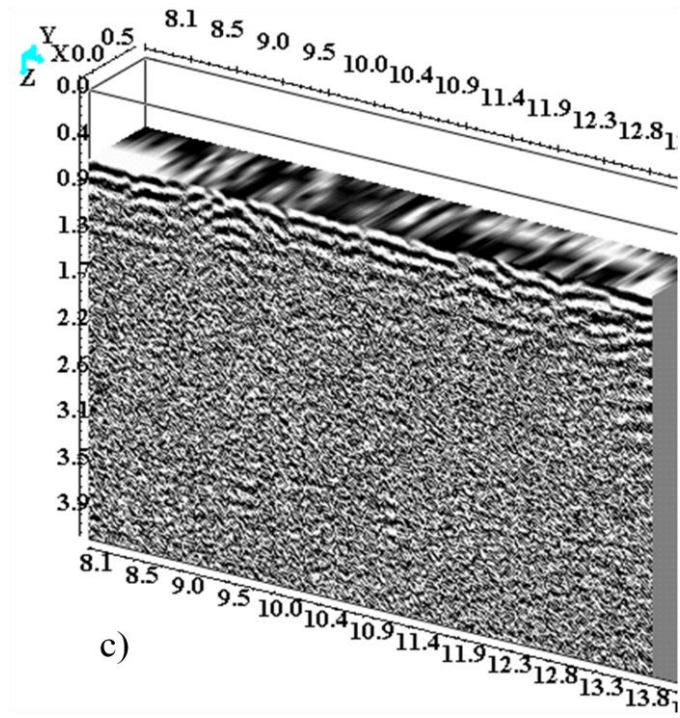
Zigana tüneli Trabzon girişinden 500 MHz ile elde edilen genlik-dilim haritalarından 0-8.5 m arasında yaklaşık 30 cm'deki bozulma (Şekil 3.26c), Şekil 3.27'de 0.8 m derinlikteki genlik-dilim haritasında görülmektedir.

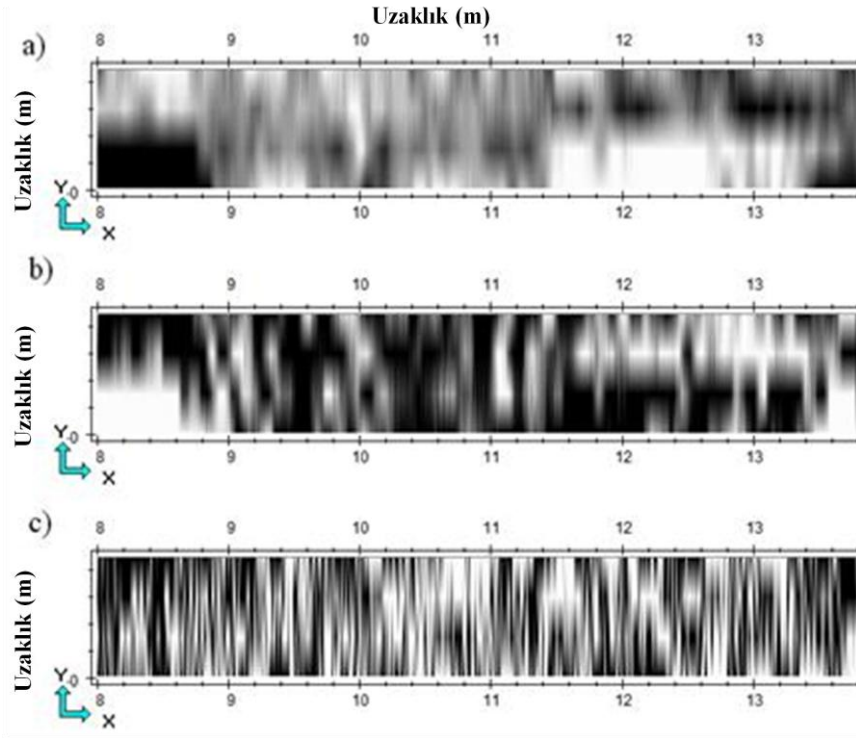
Zigana Tüneli'nin Trabzon tarafından girişinde 500 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 8-14 m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.28a'da görüldüğü gibidir. Şekil 3.28 b'de 0.4 m derinliğindeki, c'de 0.8 m derinliğindeki ve d'de 1.2 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.28. a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-14 m deki 3B görünümü b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.28'in devamı

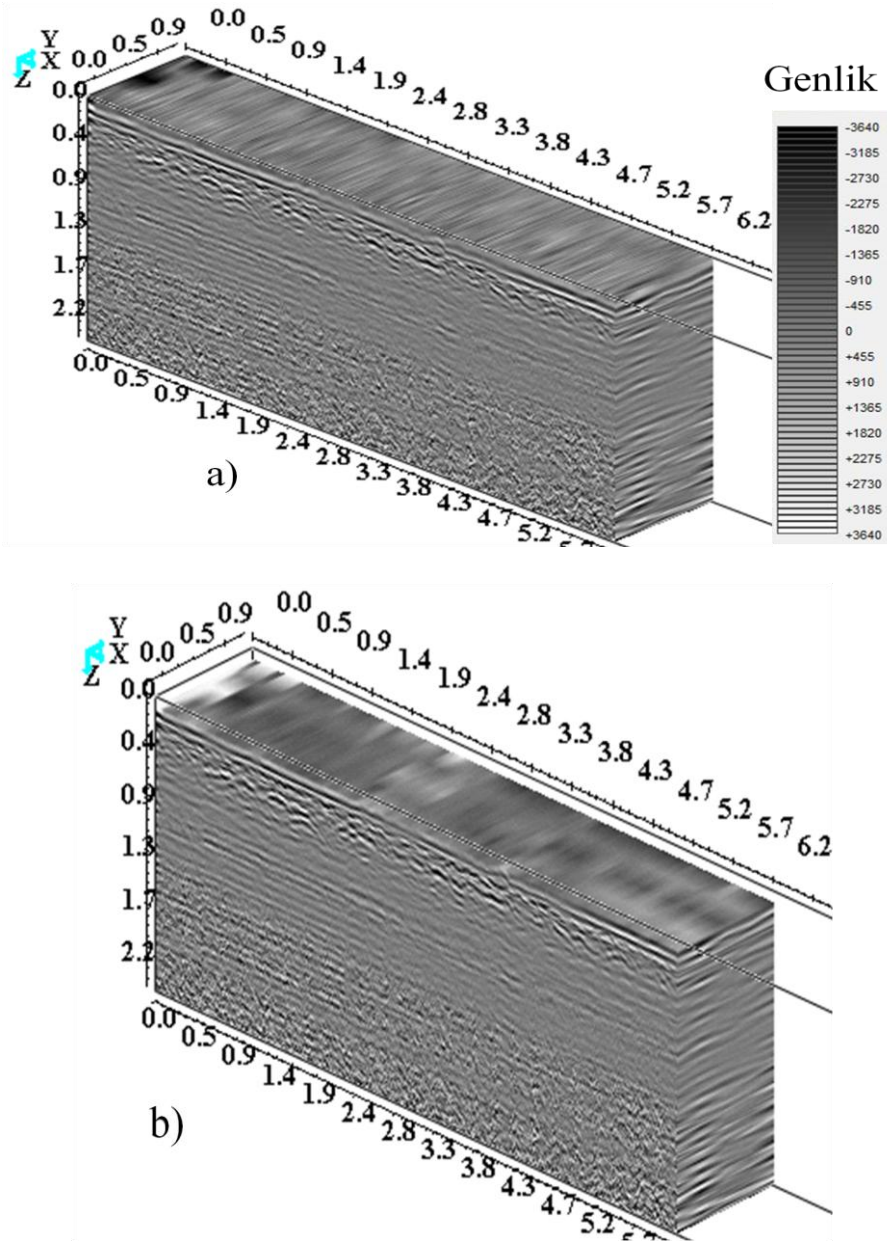




Şekil 3.29. Zigana tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-14m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

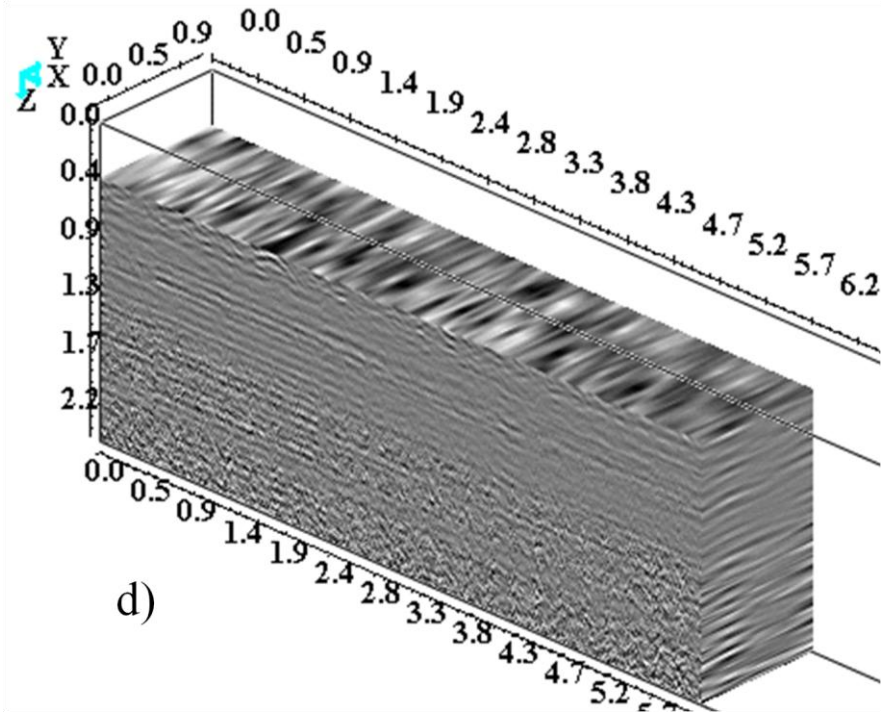
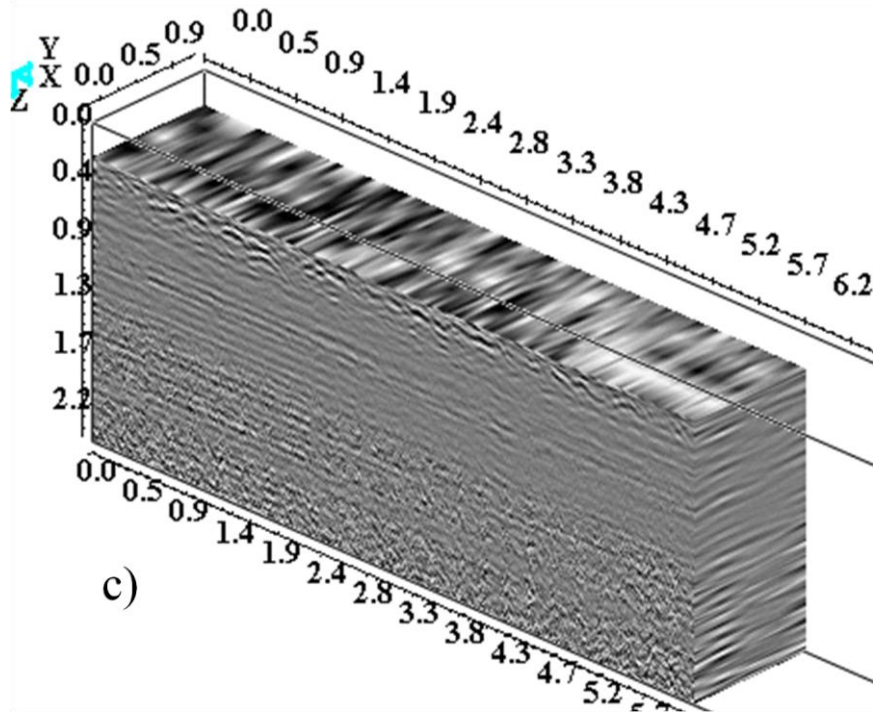
Zigana tüneli Trabzon girişinden 500 MHz ile elde edilen genlik-dilim haritalarından 8-13 arasında elektromanyetik dalganın zayıfladığı kısımlar (Şekil 3.28a), şekil 3.29'da 0.4 m derinliğe ait genlik-dilim haritasında açık bir şekilde görülmektedir.

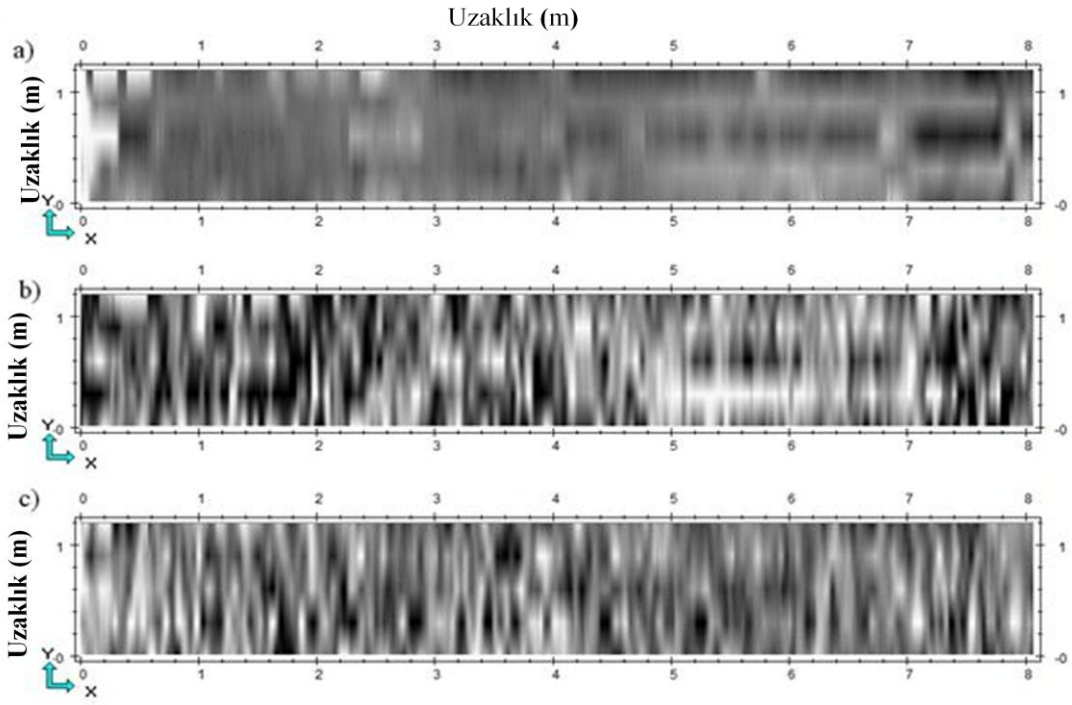
Zigana Tüneli'nin Trabzon tarafından girişinde 800 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-6.2 m aralığındaki 3B görünümü, Şekil 3.30a'da görüldüğü gibidir. Şekil 3.30 b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.30. a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-6.2 m deki 3B görünümü b) 0.2 m derinlikteki c) 0.4 m' deki d) 0.6 m' deki genlik-dilim haritaları

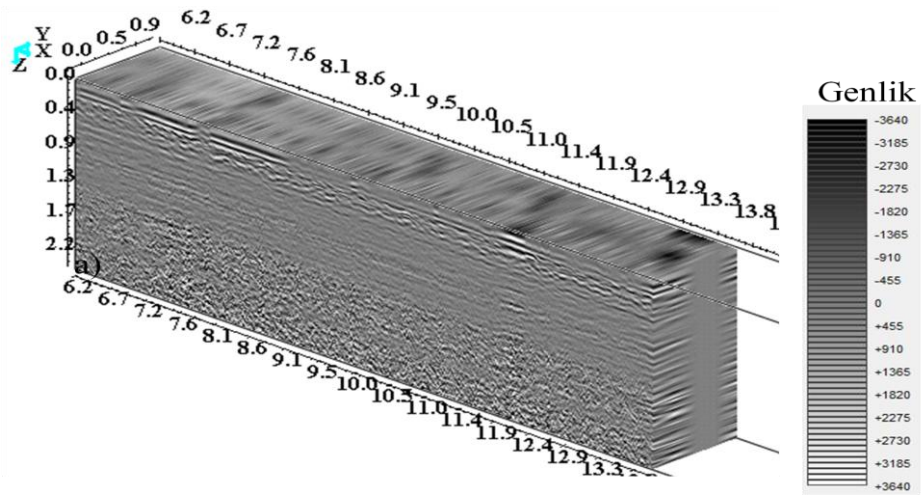
Şekil 3.30'un devamı





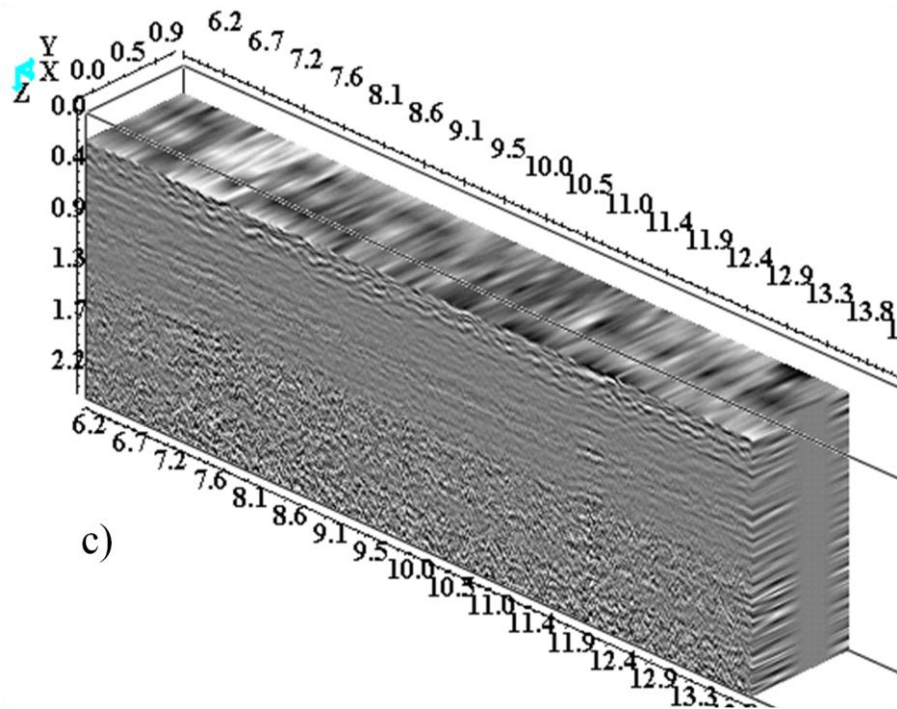
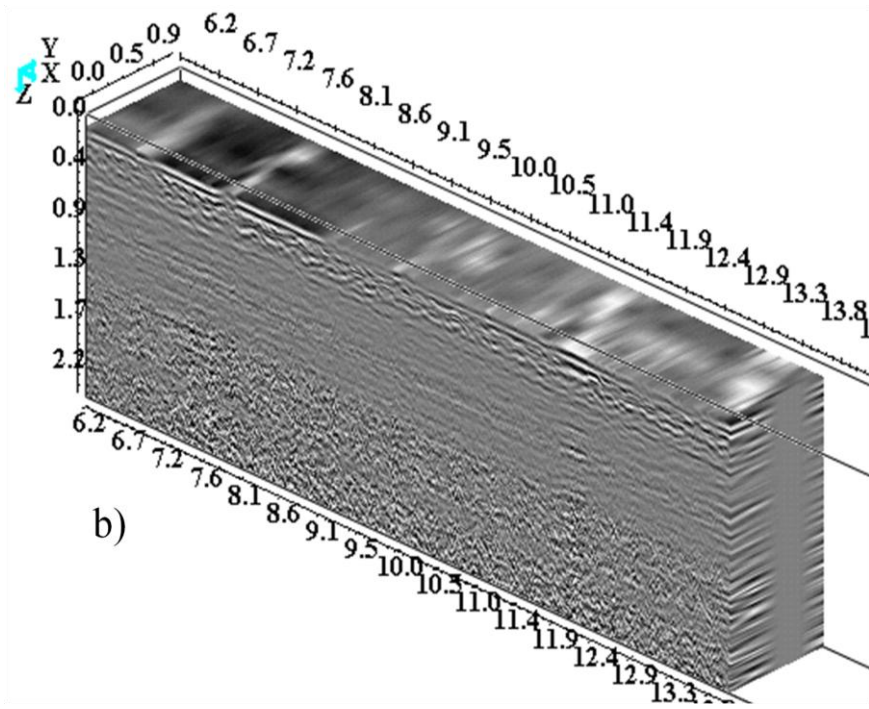
Şekil 3.31. Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-8m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.32a'da Zigana Tüneli'nin Trabzon tarafından girişinde 800 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 6.2-14 m aralığındaki 3B görüntüleri verilmektedir. Bu şekilde b 0.2 m derinliğin, c 0.4 m derinliğin ve d'de 0.6 m derinliğin genlik-dilim haritalarını göstermektedir.

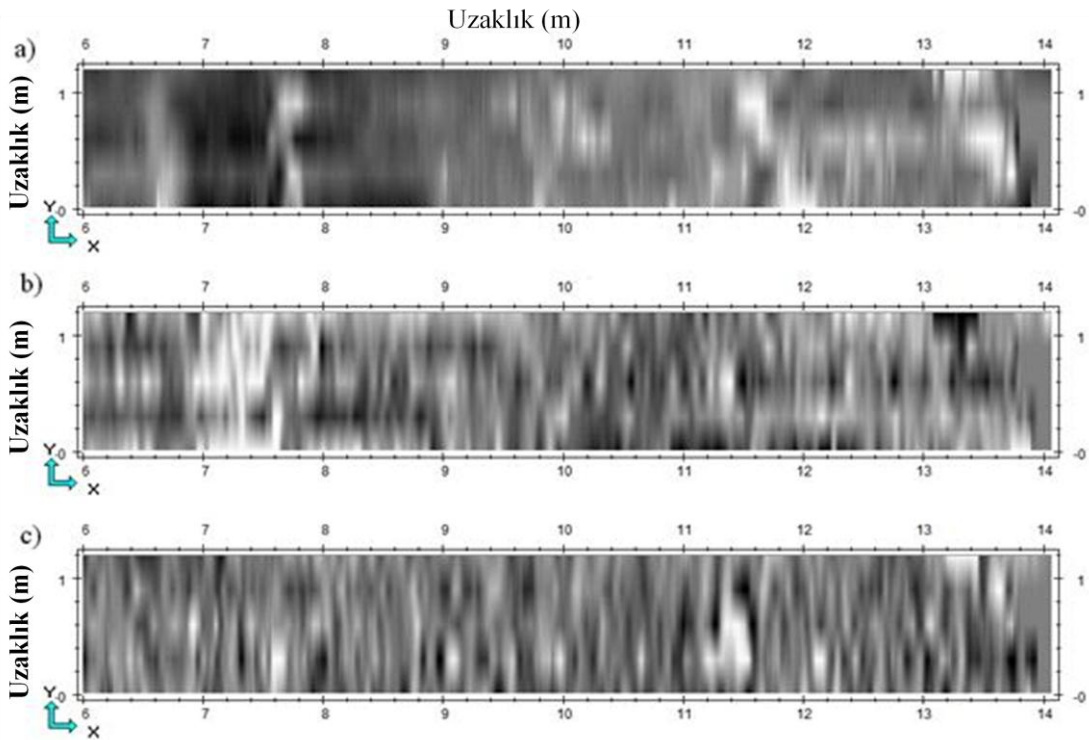
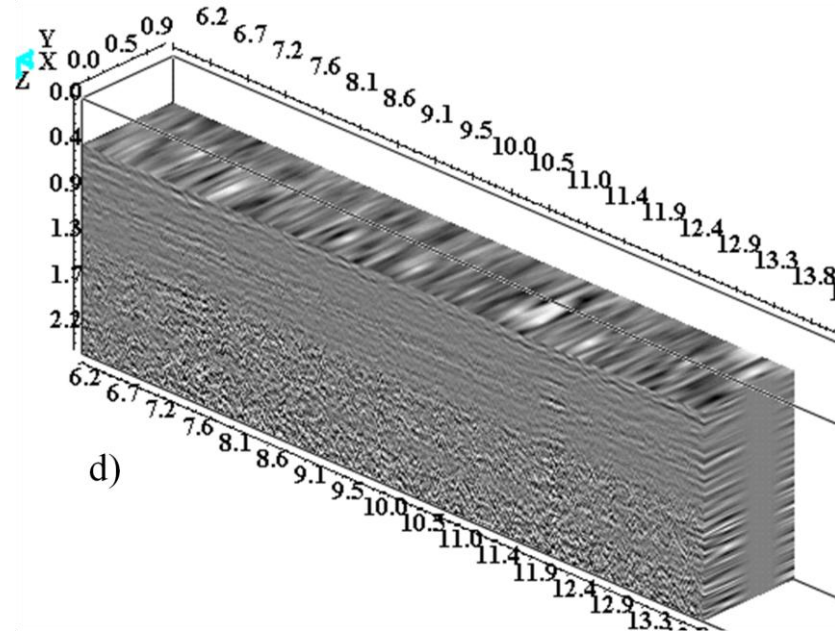


Şekil 3.32. a) Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 6.2-14 m deki 3B görünümü b) 0.2 m derinlikteki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.32'nin devamı



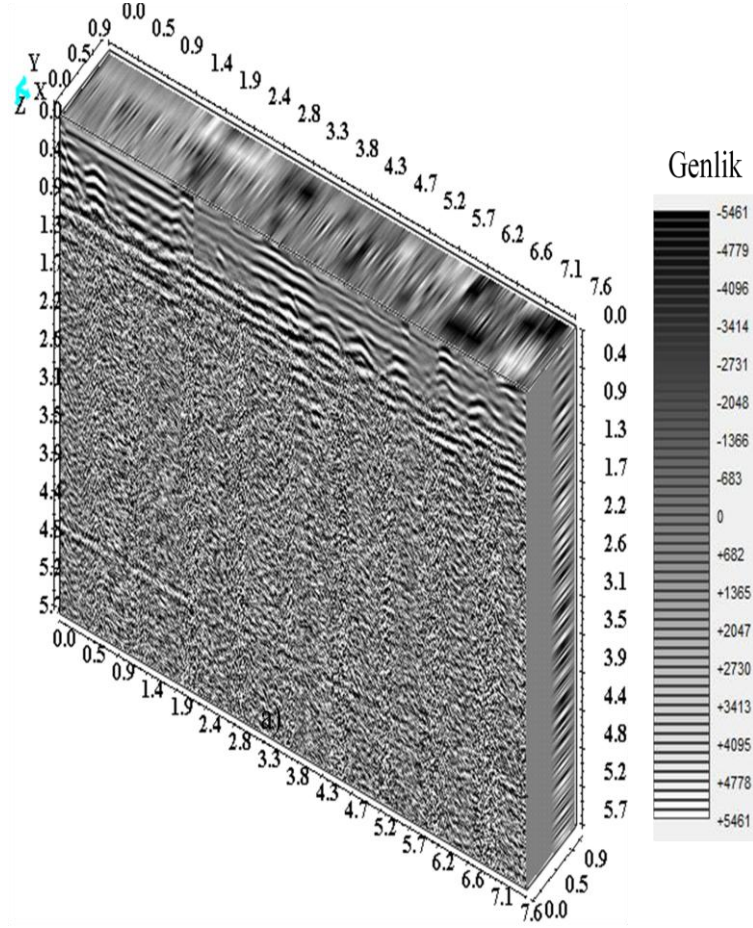
Şekil 3.32'nin devamı



Şekil 3.33. Zigana tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 6-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

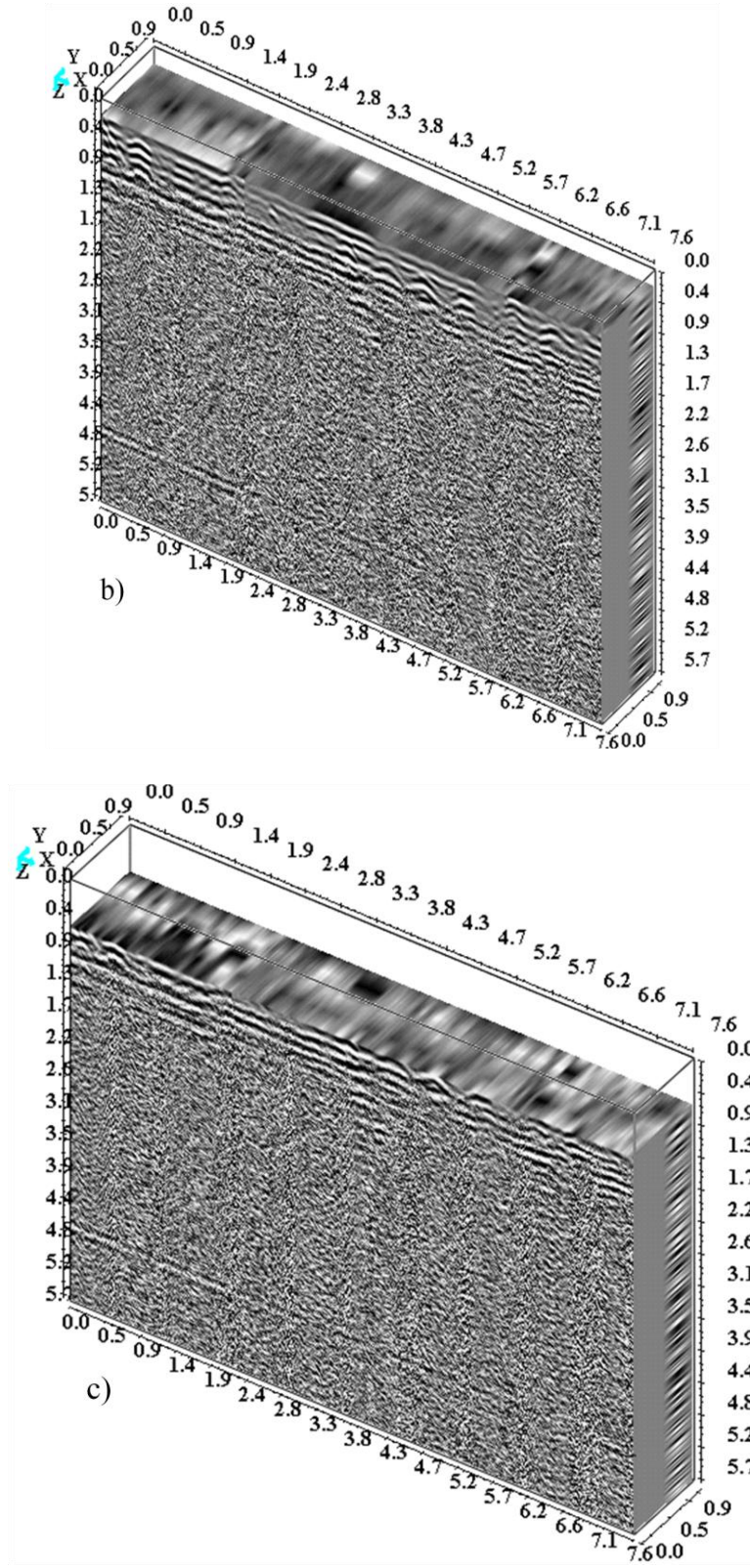
Şekil 3.34a, Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz kullanılarak elde edilen verilerin, profil uzunluğu 0-7.6 m aralığındaki 3B görünümünü göstermektedir. Bu şekil

b'de 0.4 m derinliğinin, c'de 0.8 m derinliğinin ve d'de 1.2 m derinliğinin genlik-dilim haritalarını göstermektedir.

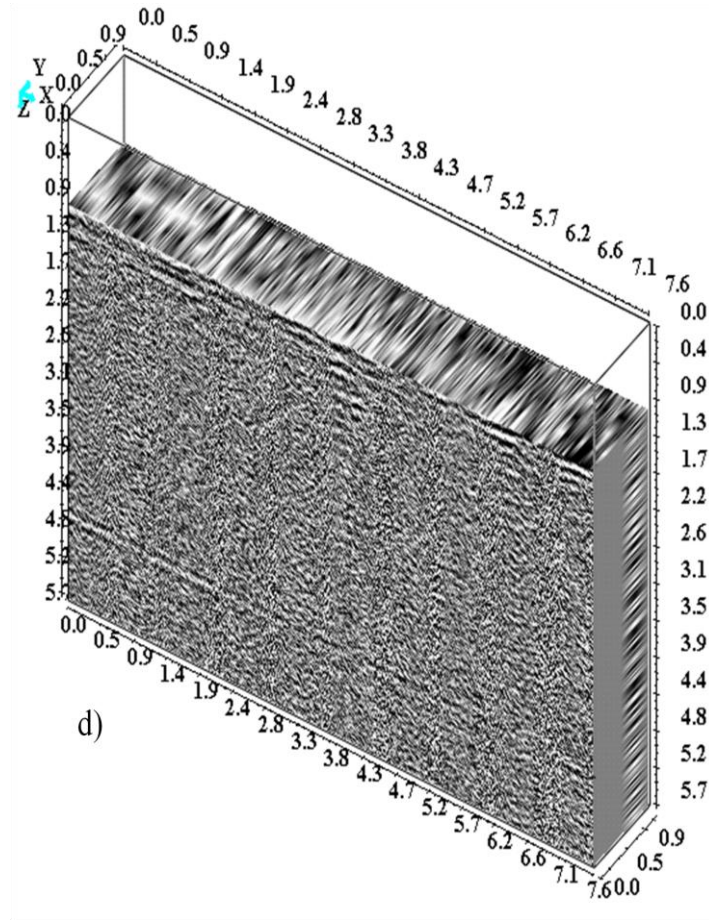


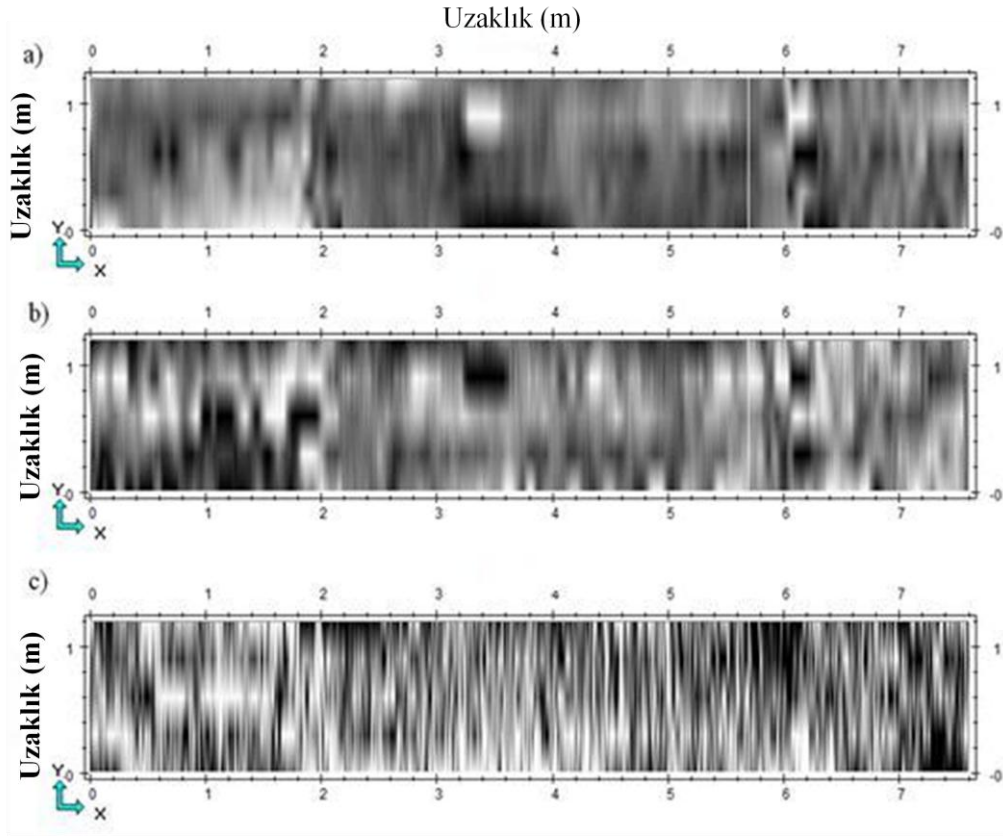
Şekil 3.34. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.34'ün devamı



Şekil 3.34'ün devamı

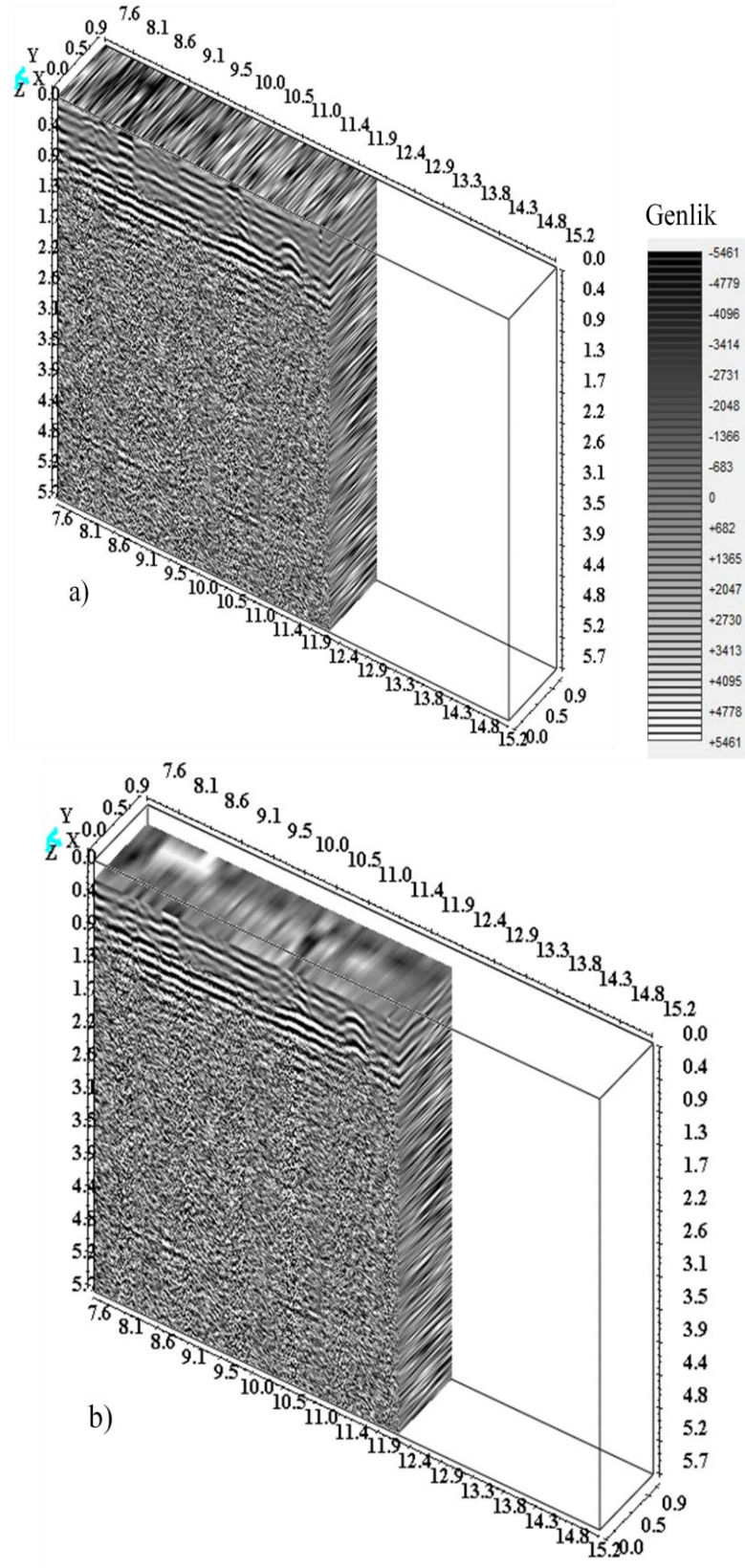




Şekil 3.35. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

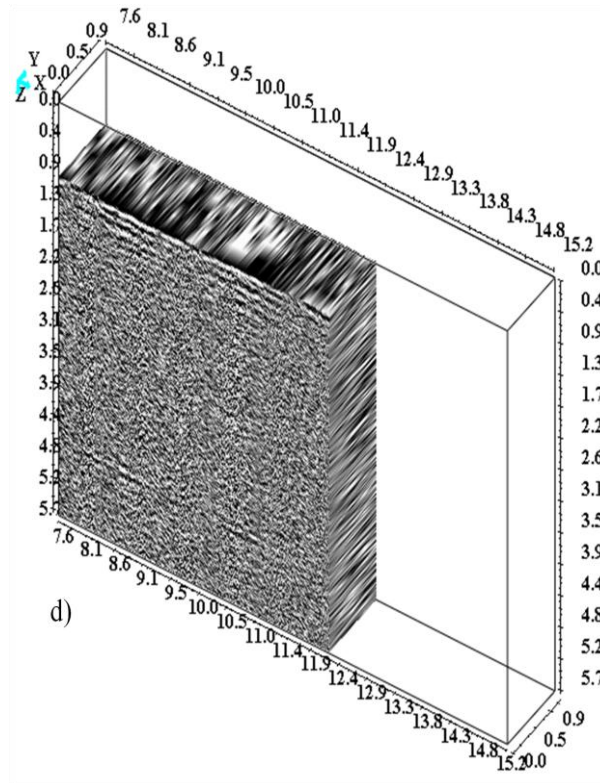
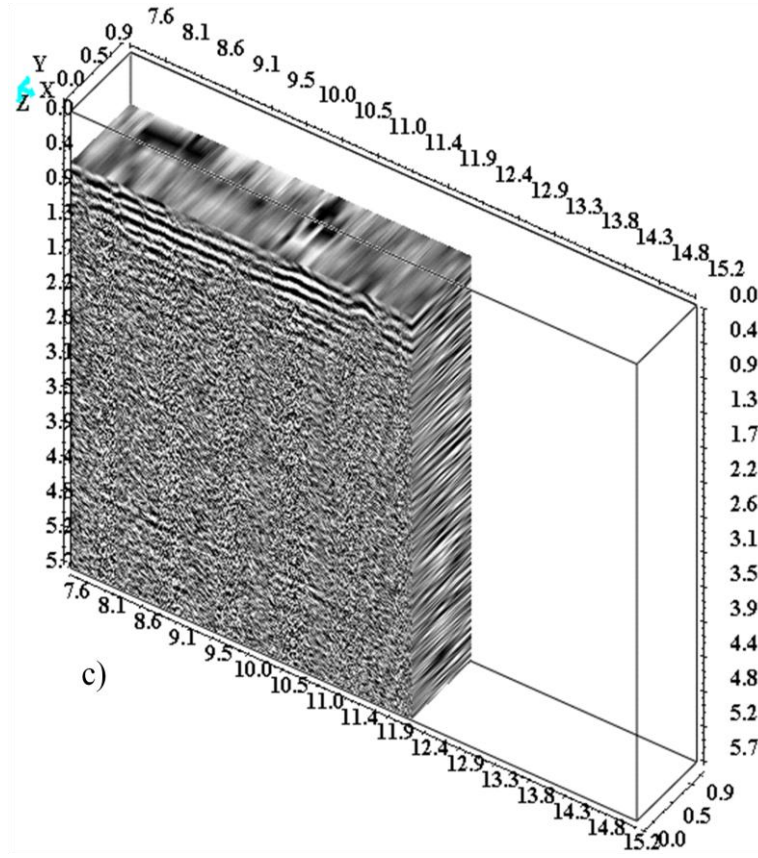
Zigana tüneli Gümüşhane girişinden 500 MHz ile elde edilen 0-7.6 m arasındaki genlik-dilim haritalarındaki yaklaşık 2 m'deki kırık (Şekil 3.34c), Şekil 3.35'de 0.4 m derinlikte görülmektedir.

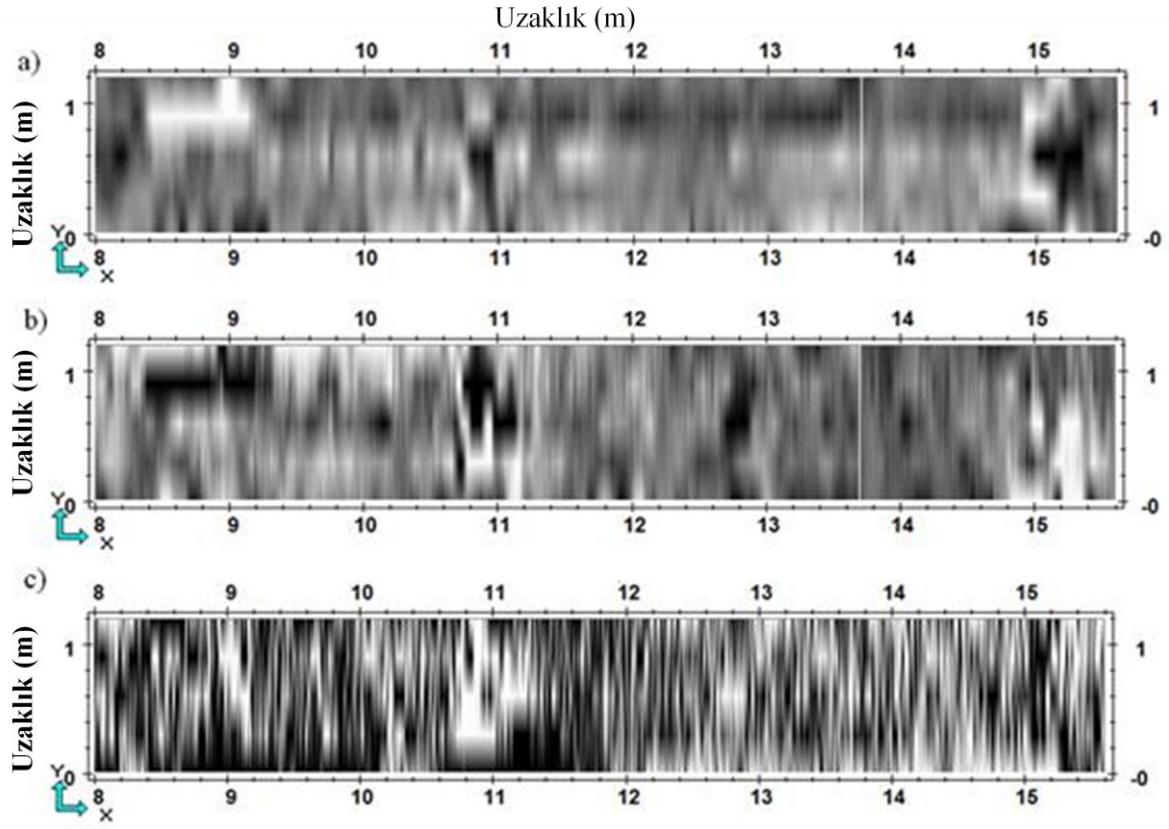
Şekil 3.36a, Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz kullanılarak elde edilen verilerin, profil uzunluğu 7.6-12.6 m aralığındaki 3B görünümünü göstermektedir. Bu şekil b'de 0.4 m derinliğinin, c'de 0.8 m derinliğinin ve d'de 1.2 m derinliğinin genlik-dilim haritalarını göstermektedir.



Şekil 3.36. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.6-12.6 m'deki 3B görünümü b) 0.4 m derinlikteki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.36'nın devamı

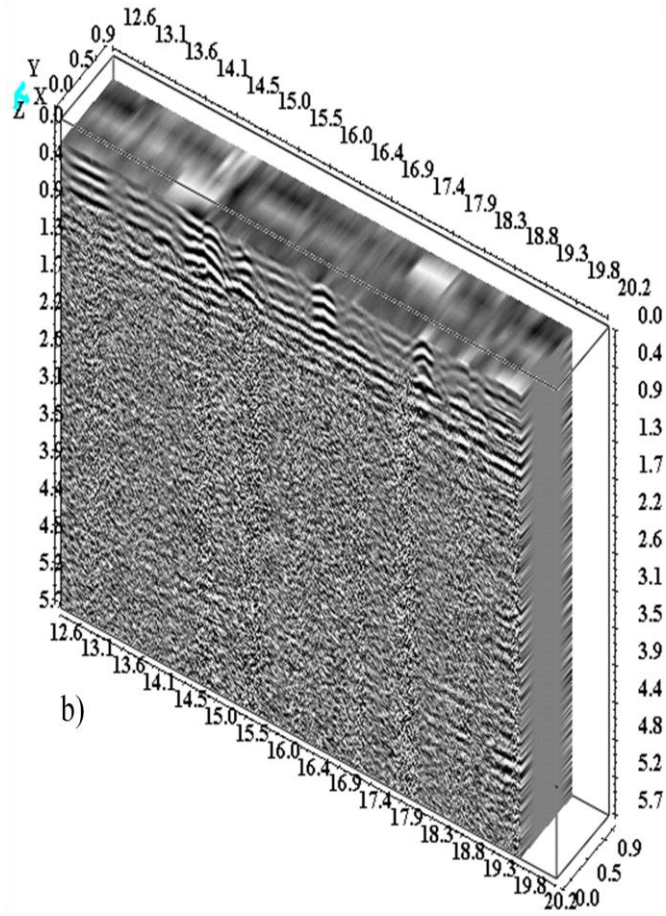
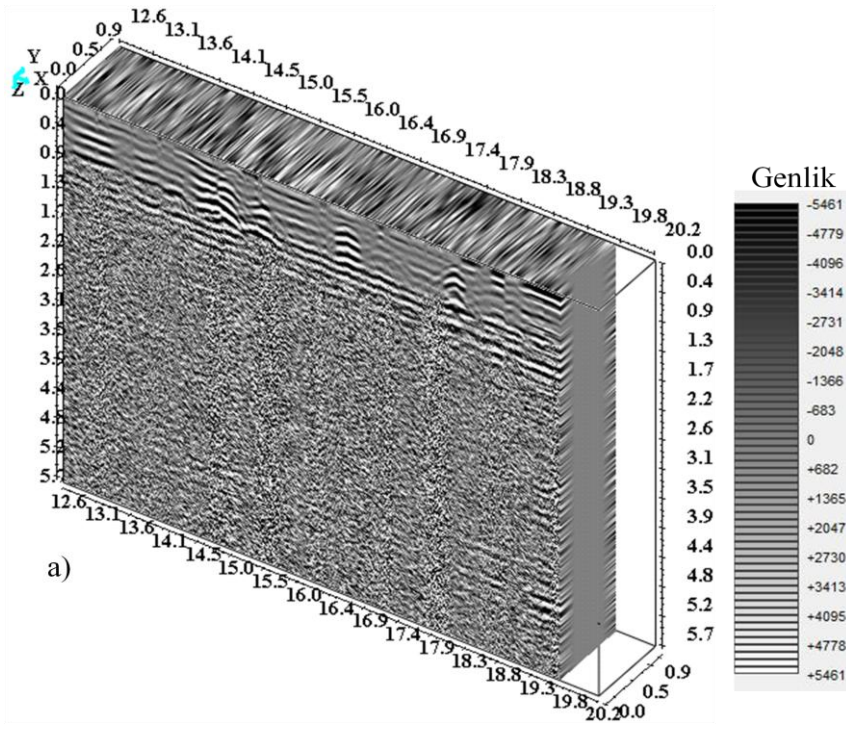




Şekil 3.37. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.6-15 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

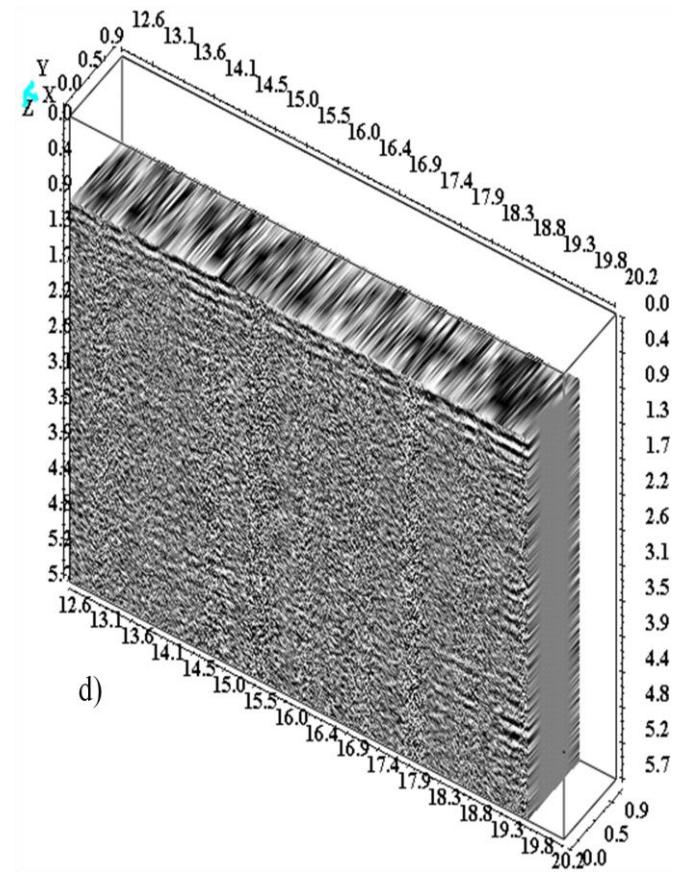
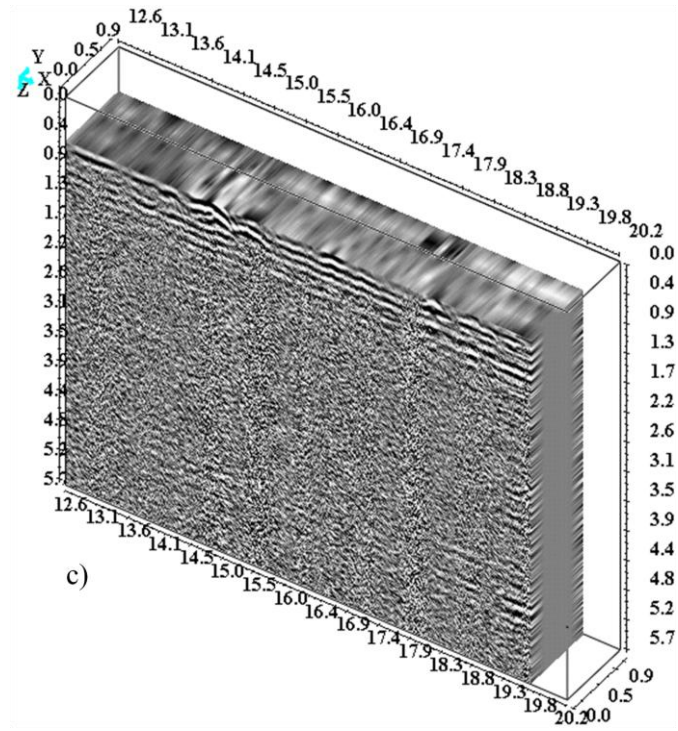
Zigana tüneli Gümüşhane girişinden 500 MHz ile elde edilen 7.6-15 m arasındaki genlik-dilim haritalarındaki yaklaşık 10.5 m'deki kırık (Şekil 3.36c), Şekil 3.37'de 0.8 m derinlikte görülmektedir.

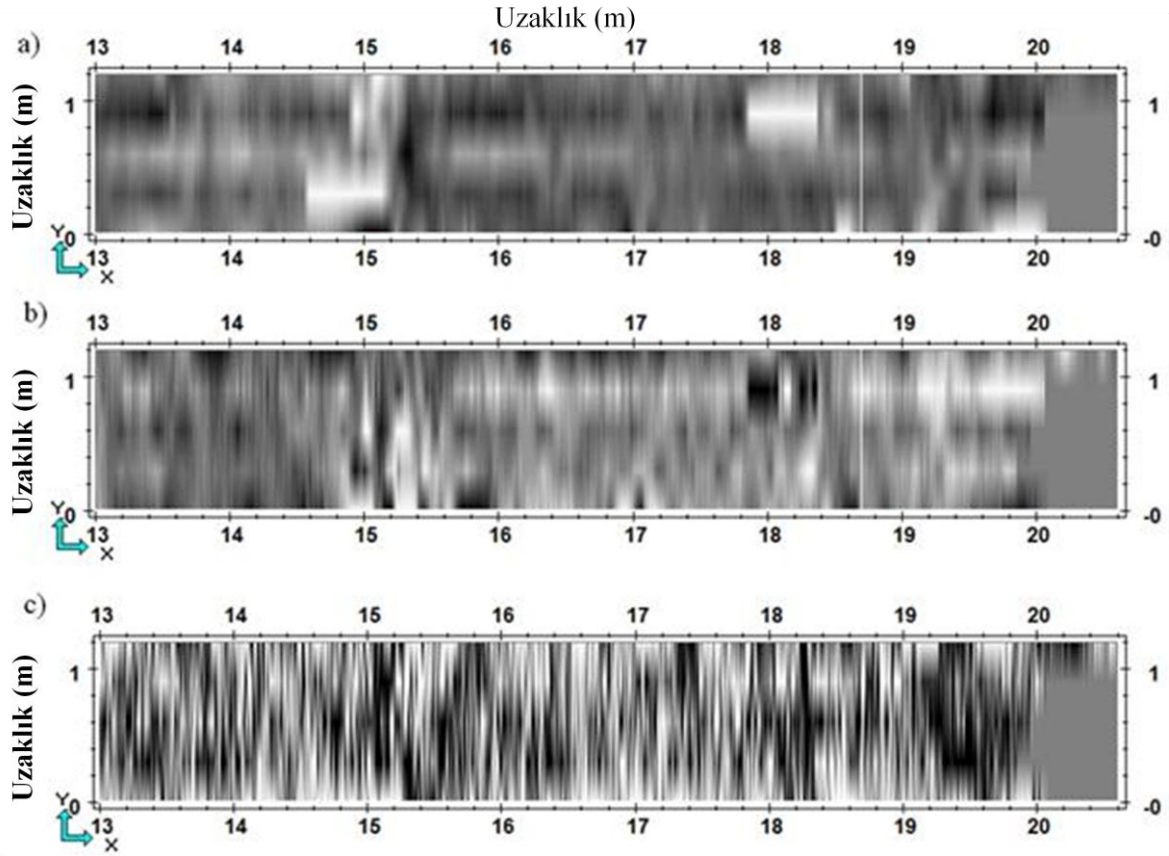
Zigana Tüneli'nin Gümüşhane tarafından girişinde 500 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 12.6-19.7 m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.38a'da görüldüğü gibidir. Şekil 3.38 b'de 0.4 m derinliğindeki, c'de 0.8 m derinliğindeki ve d'de 1.2 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.38. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 12.6-19.7 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.38'in devamı

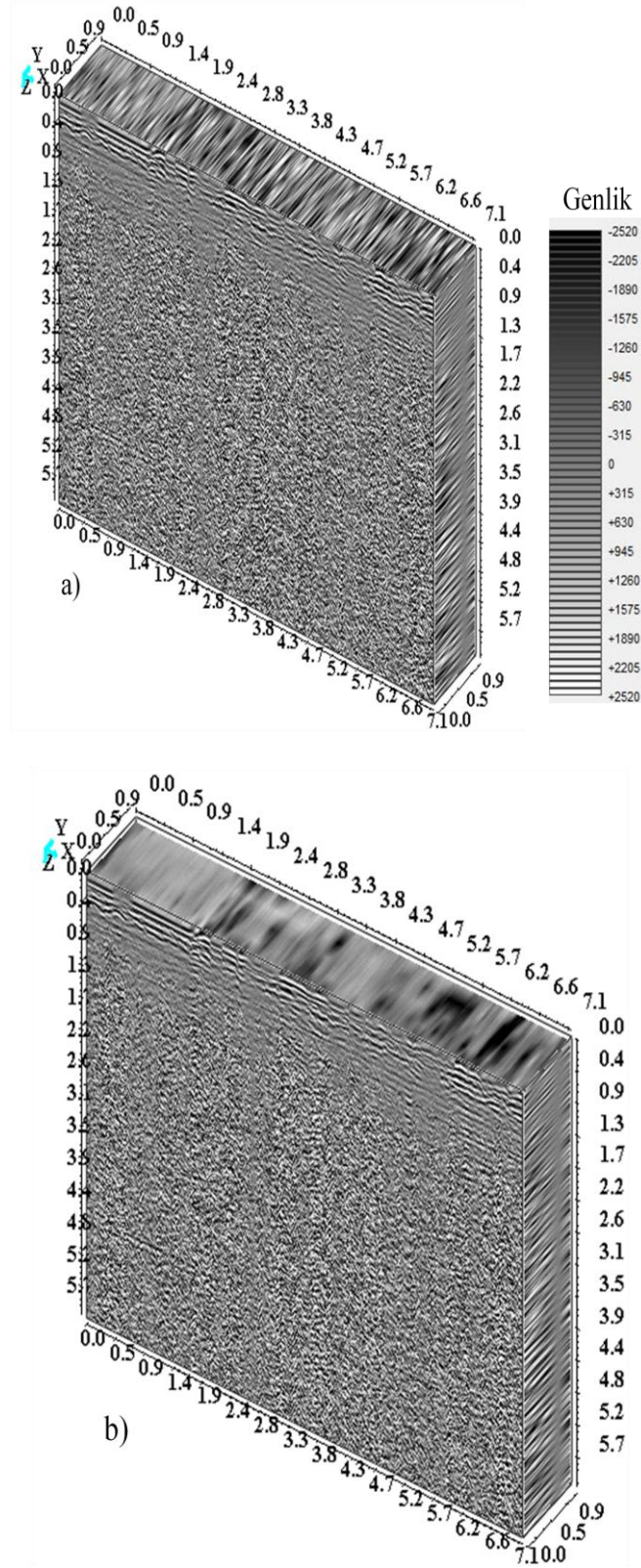




Şekil 3.39. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-20 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

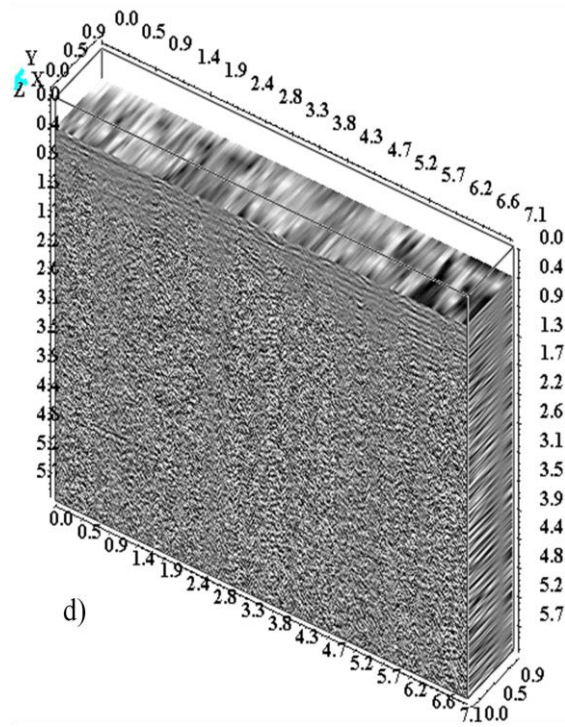
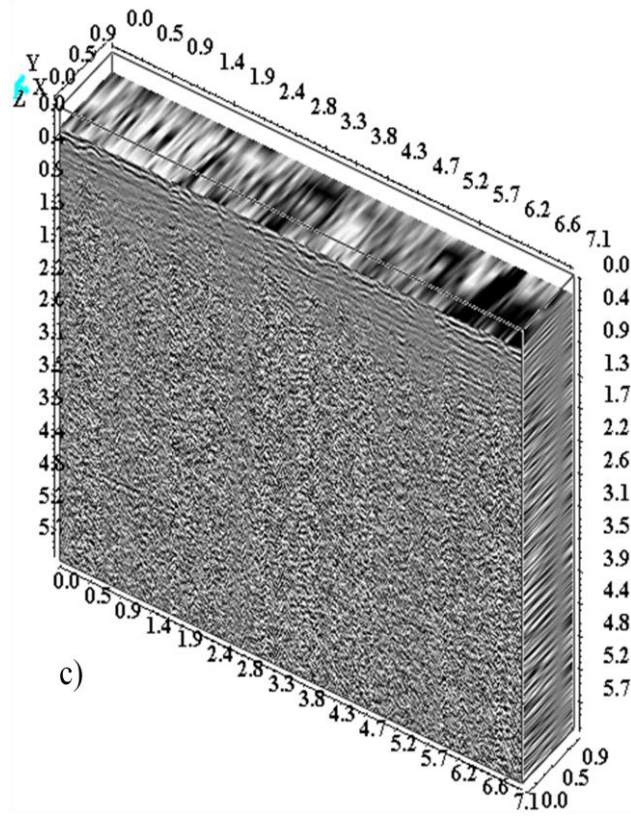
Zigana tüneli Gümüşhane girişinden 500 MHz ile elde edilen 12.6-19.7 m arasındaki genlik-dilim haritalarında yaklaşık 16.5 ve 18.1 m'deki anomaliler (Şekil 3.38c), şekil 3.39'da 0.4 m derinlikte görülmektedir.

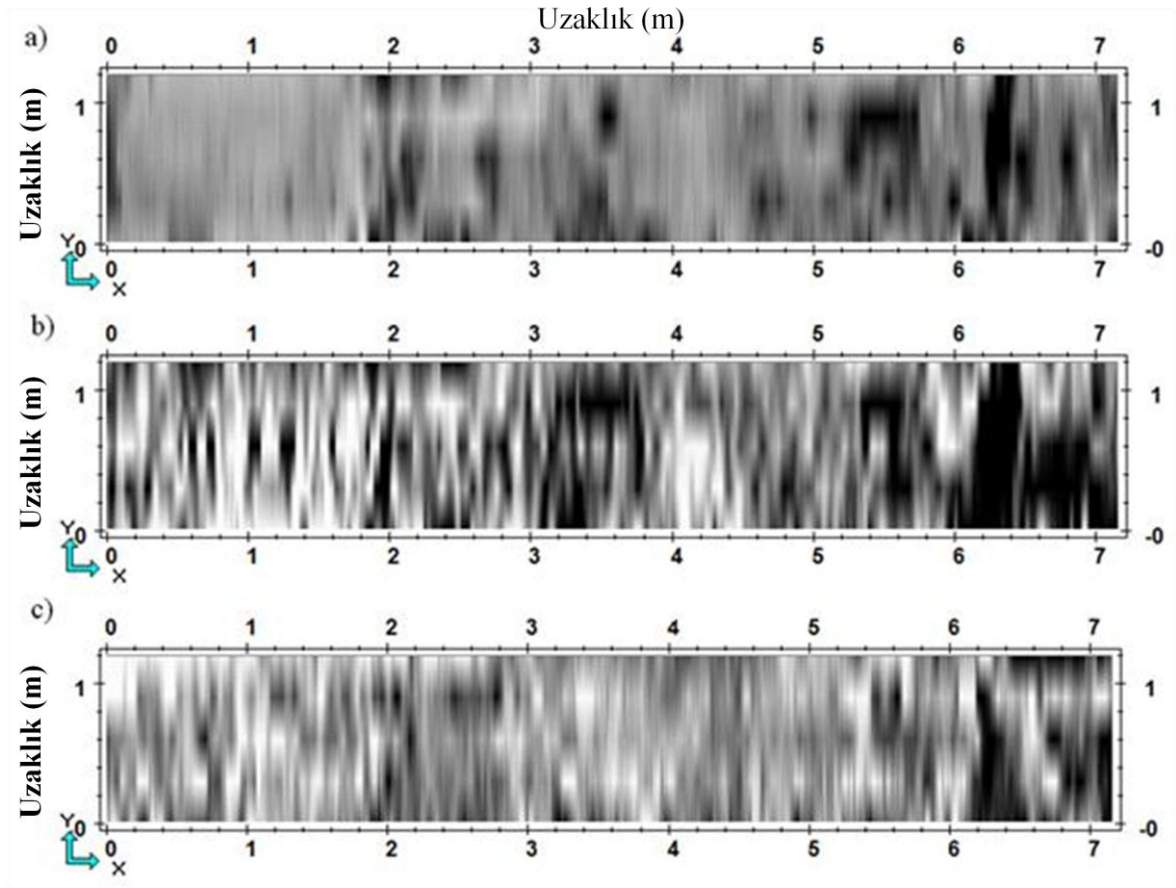
Zigana Tüneli'nin Gümüşhane tarafından girişinde 800 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-7m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.40a'da görülmektedir. Şekil 3.40b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.40. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.40'in devamı

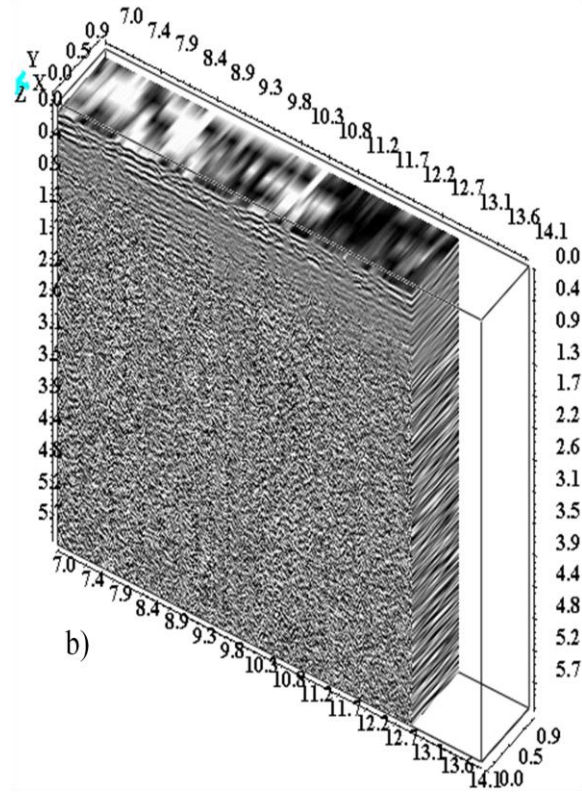
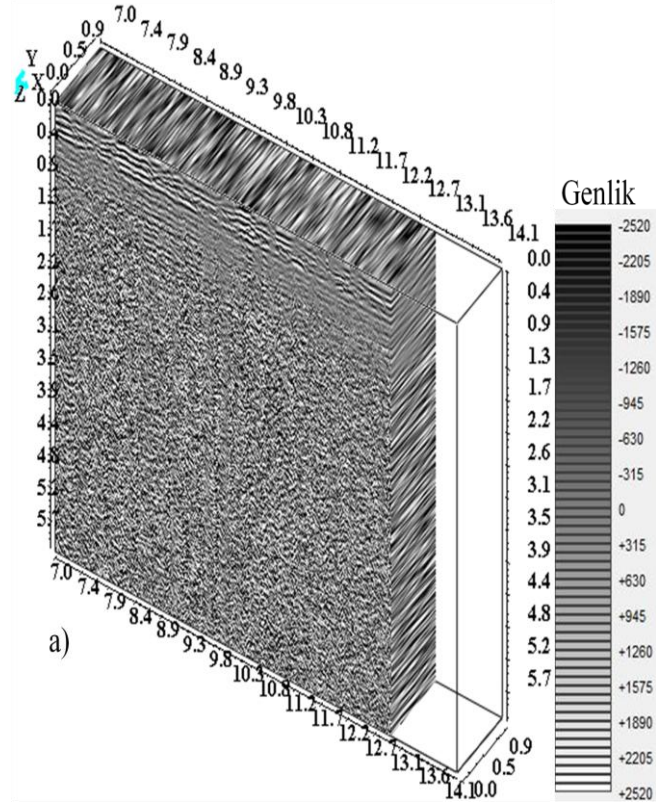




Şekil 3.41. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları

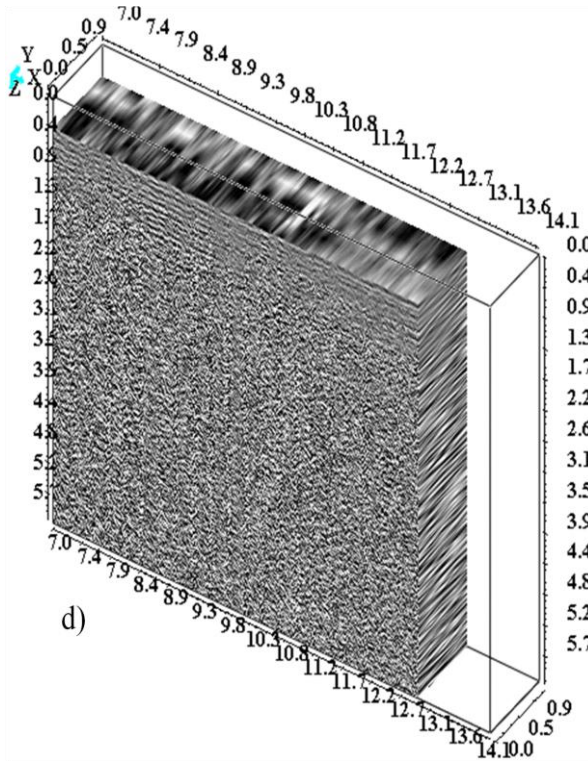
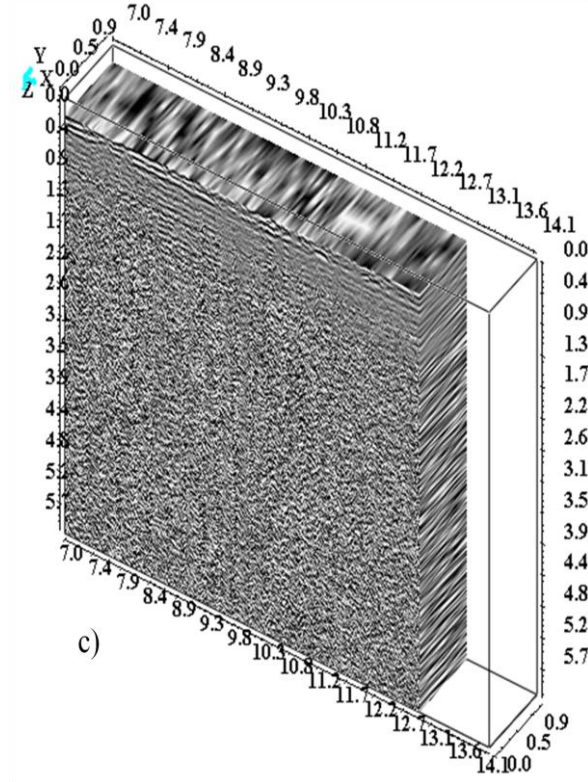
Şekil 3.40 farklı derinliklerdeki genlik-dilim haritalarında; farklı özelliklerdeki yapılar tünel duvarının beton kalitesindeki değişimi göstermektedir.

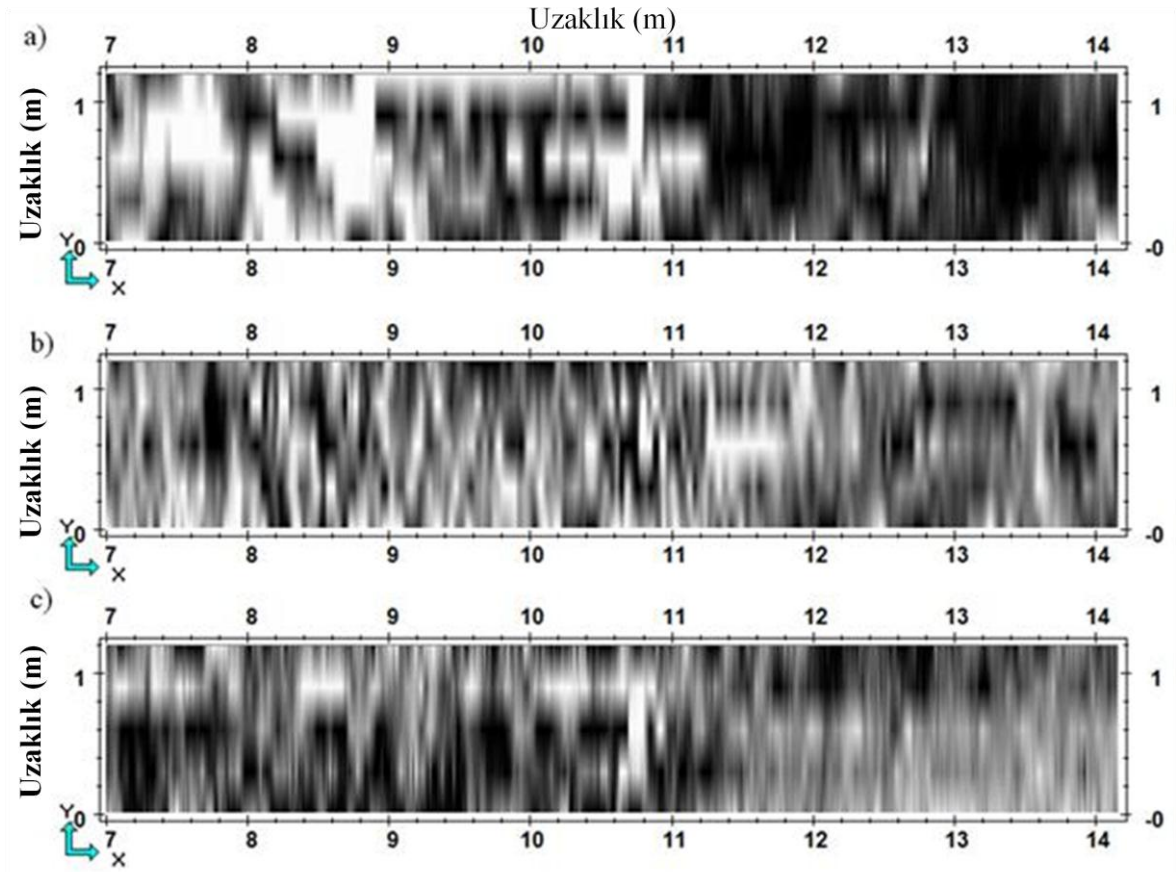
Zigana Tüneli'nin Gümüşhane tarafından girişinde 800 MHz antenle 5 profilde toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 7.2-13 m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.42a'da görülmektedir. Şekil 3.42b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.42. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7-13 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

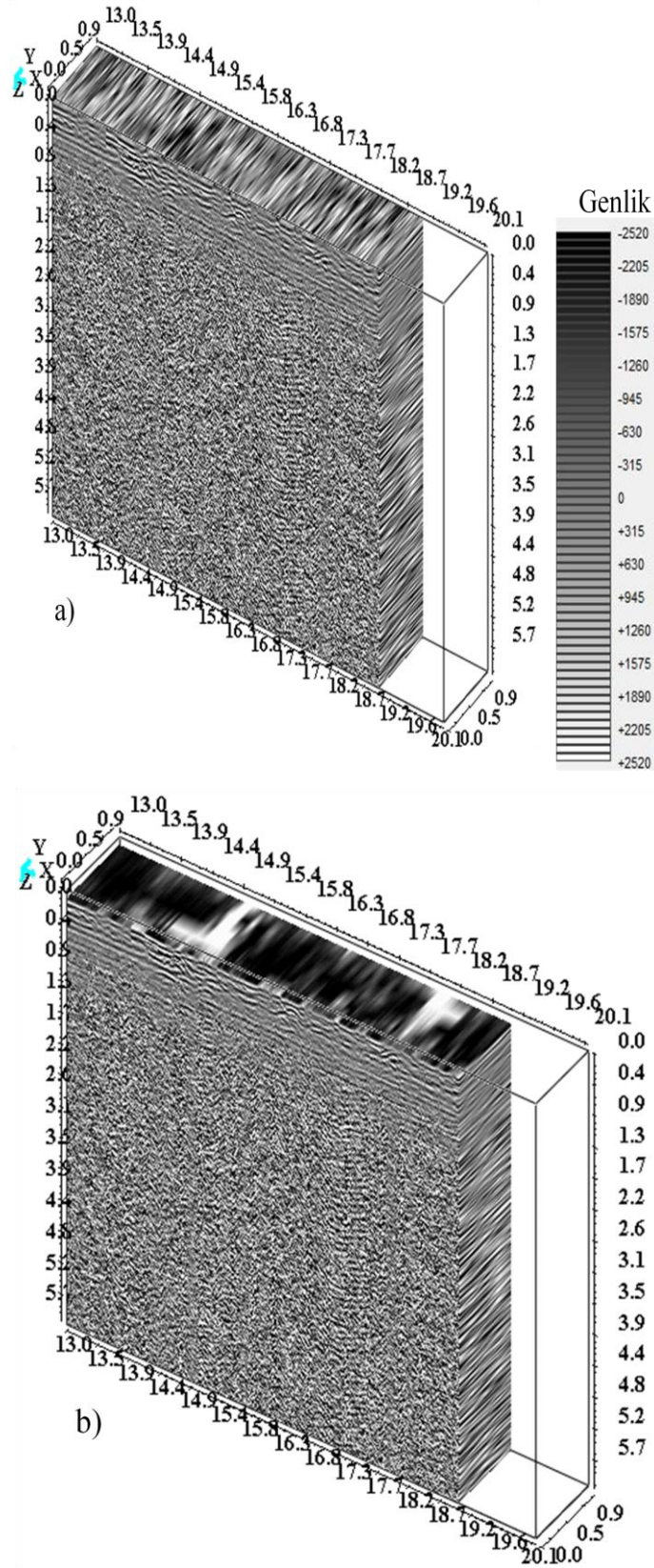
Şekil 3.42'nin devamı





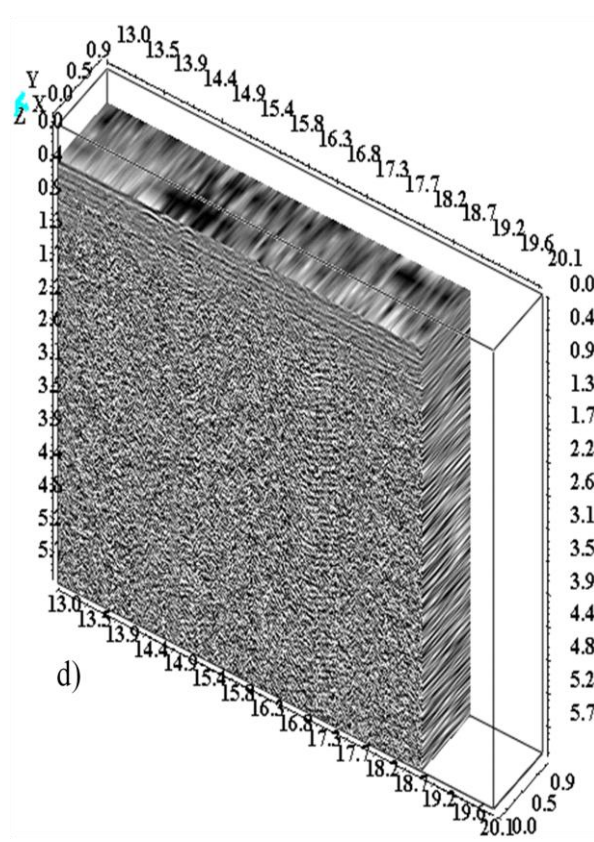
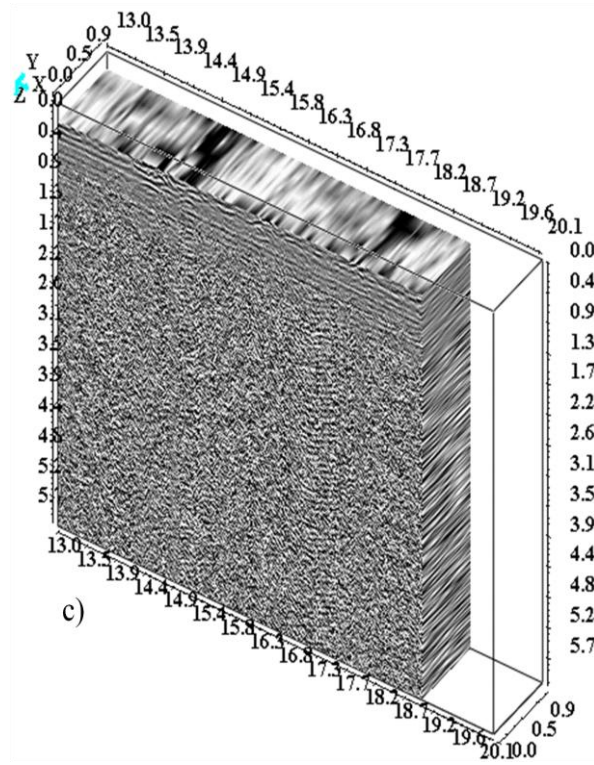
Şekil 3.43. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

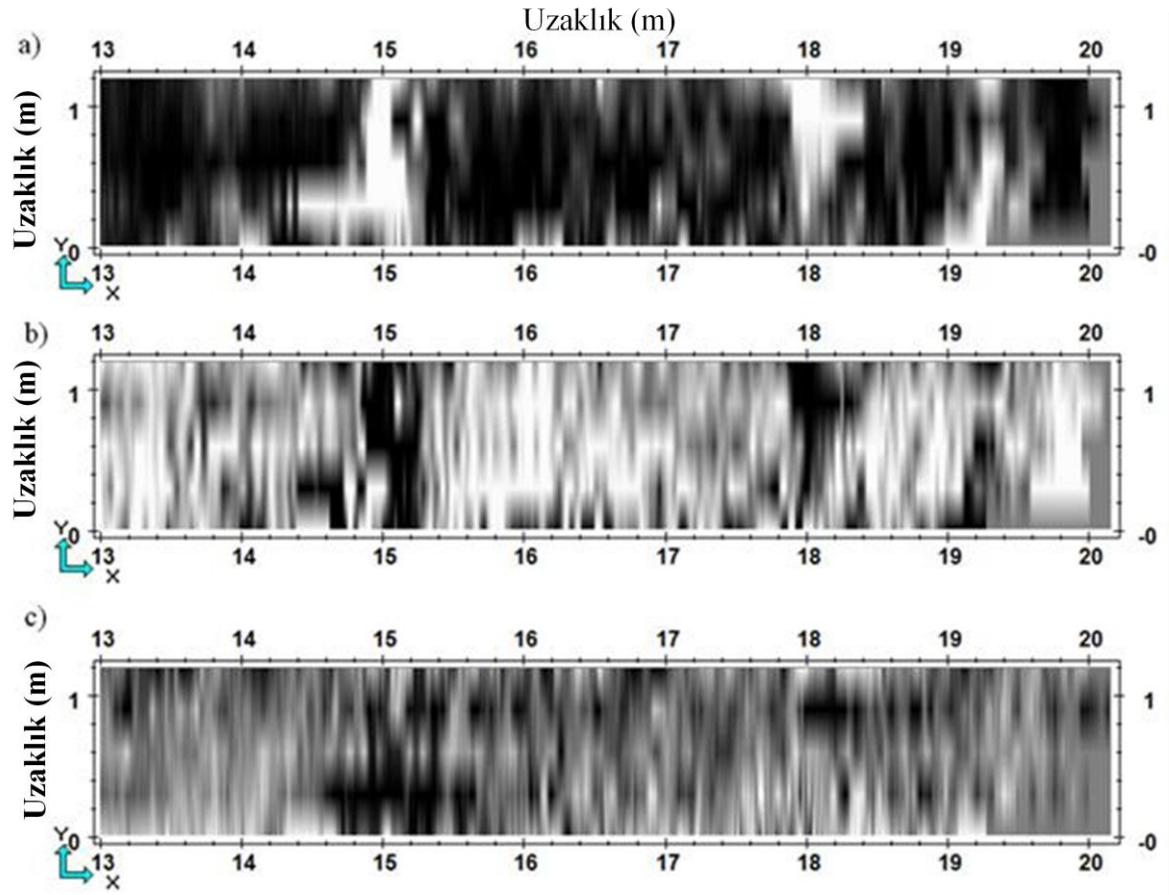
Zigana Tüneli'nin Gümüşhane tarafından girişinde 800 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 13-19.2 m aralığındaki 3B görüntüleri, Şekil 3.44a'da görülmektedir. Şekil 3.44b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.44. a) Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-19.2 m'deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

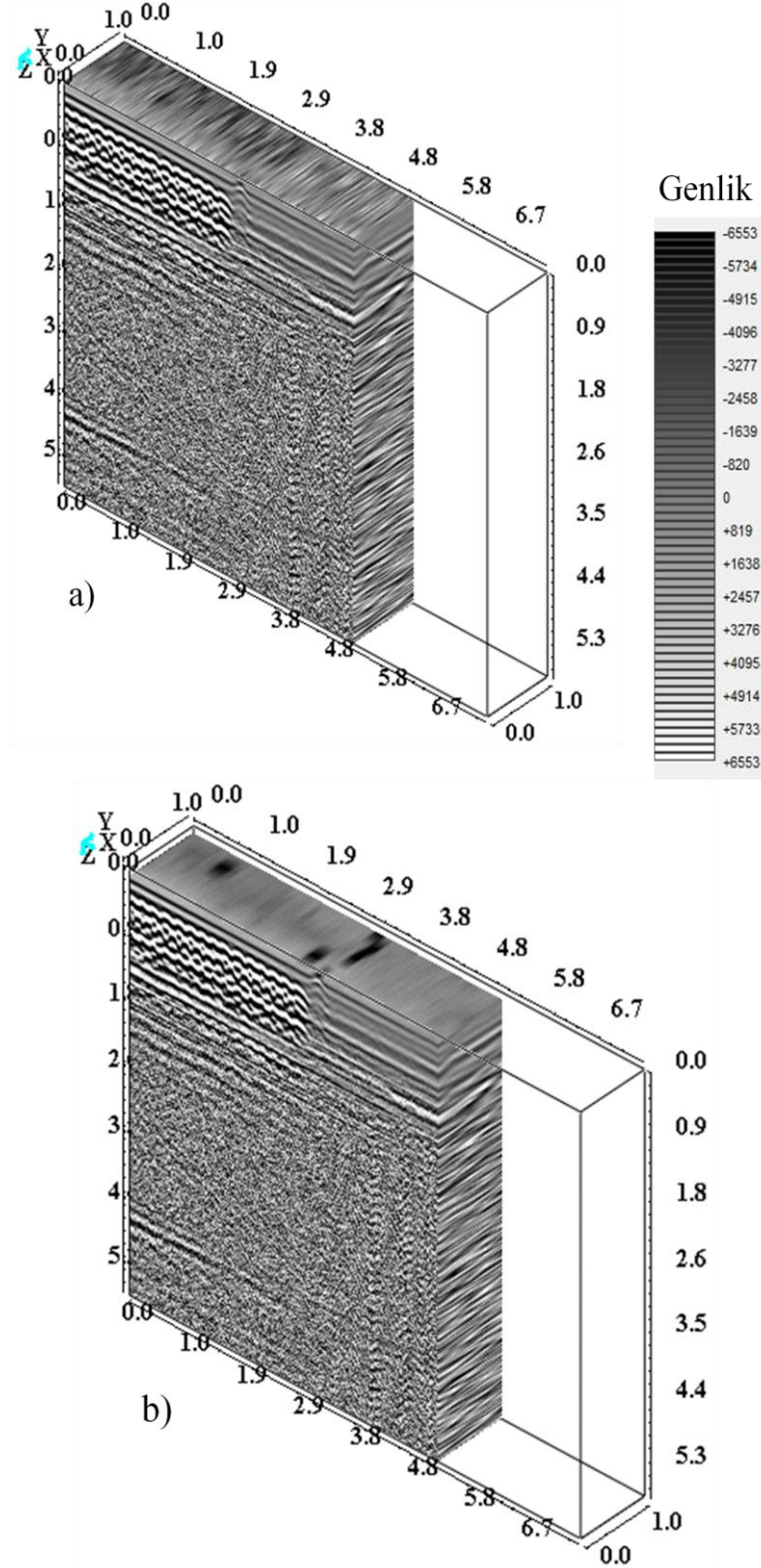
Şekil 3.44'ün devamı





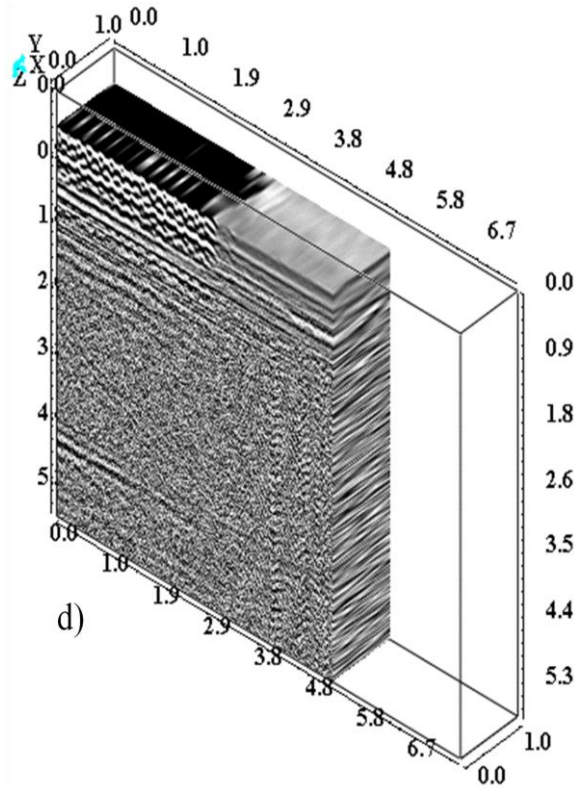
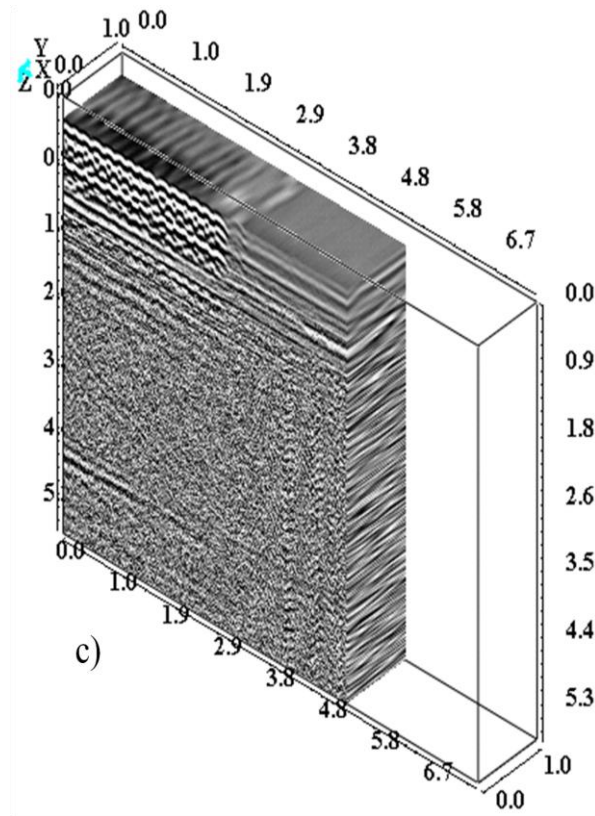
Şekil 3.45. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 13-20 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

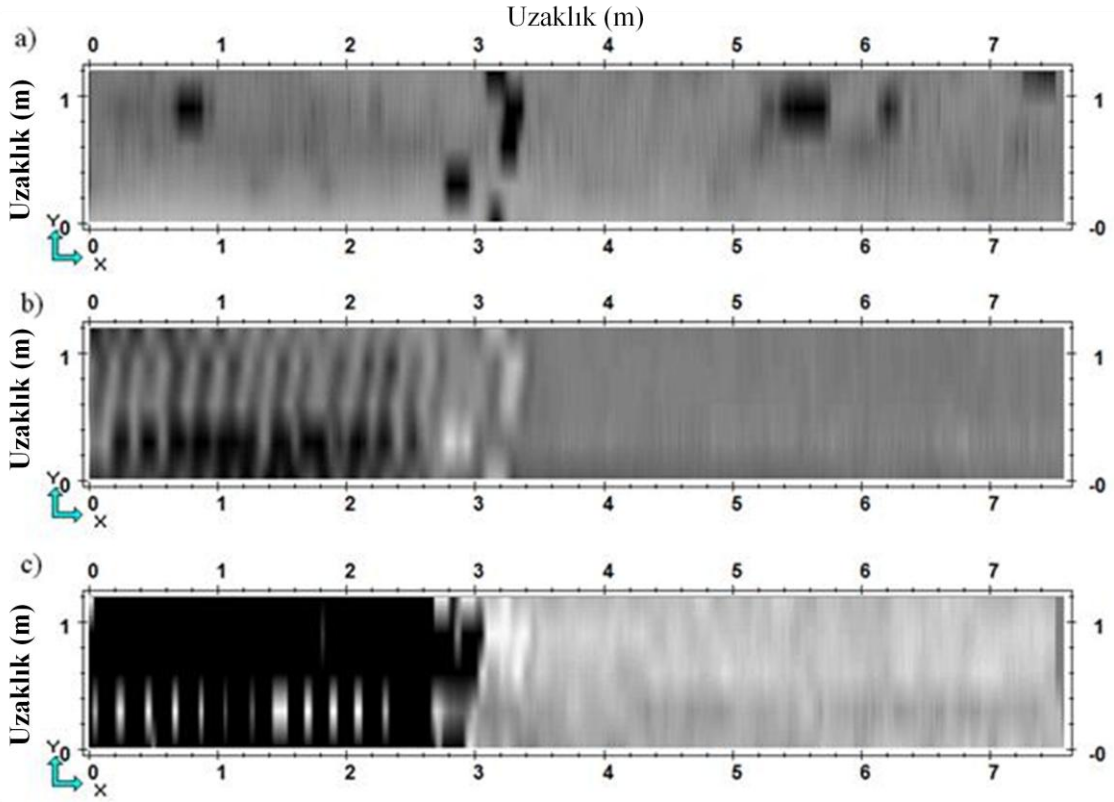
Torul tünelinin Gümüşhane tarafından girişinde 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-5.2 m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.46a'da görülmektedir. Şekil 3.46b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.46. a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-5.2 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

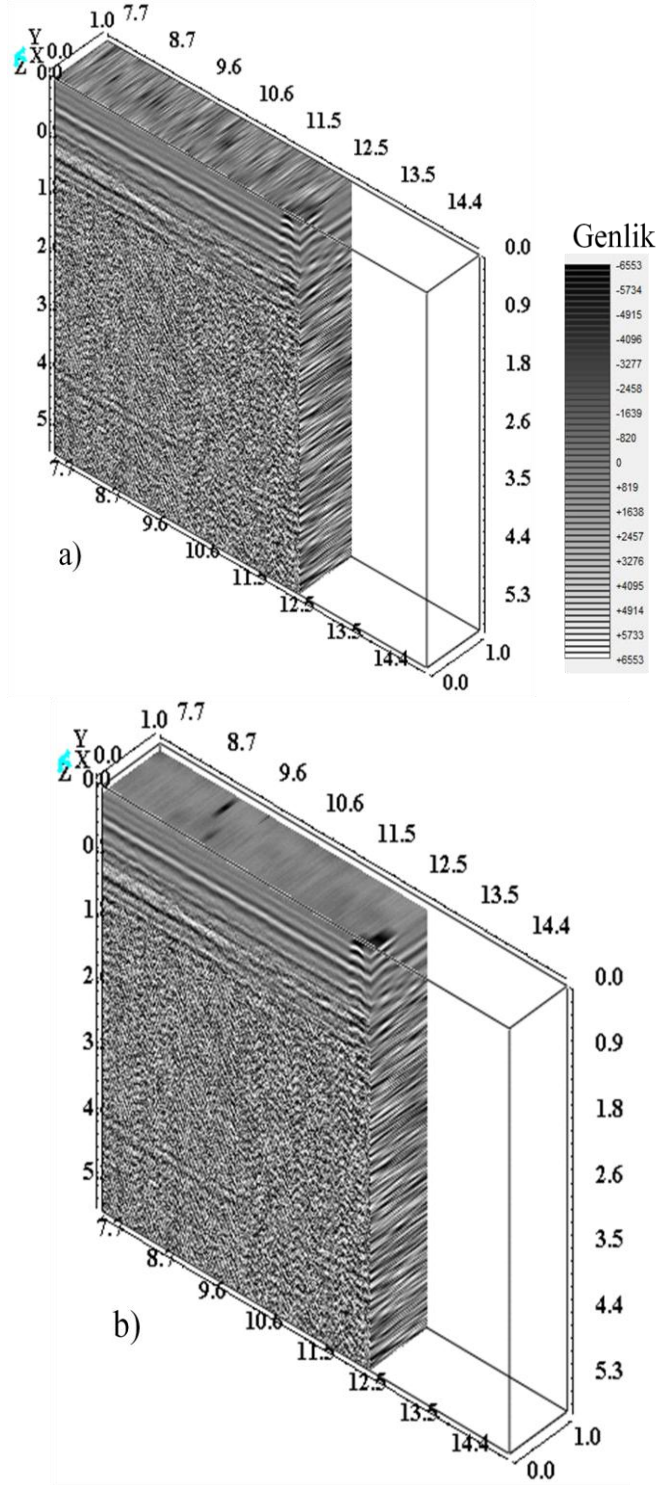
Şekil 3.46'nın devamı





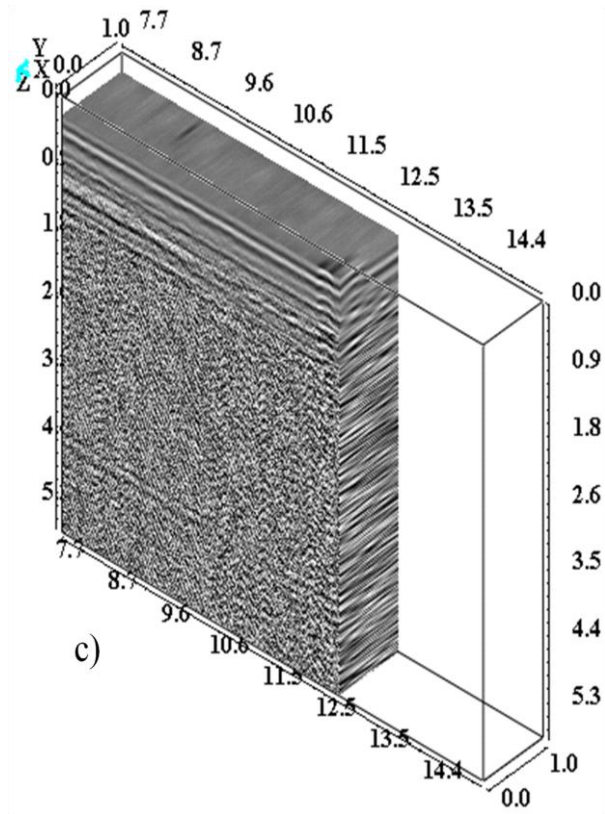
Şekil 3.47. Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-5.2 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları

Torul tünelinin Gümüşhane tarafından girişinde 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 8-13 m aralığındaki 3B görüntüleri, Şekil 3.48a'da görülmektedir. Şekil 3.48 b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.

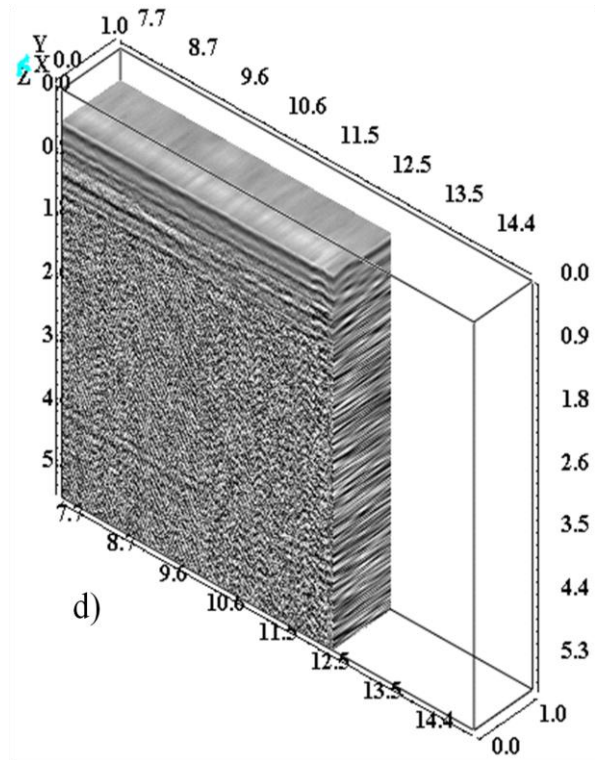


Şekil 3.48. a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 8-13 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.48'in devamı

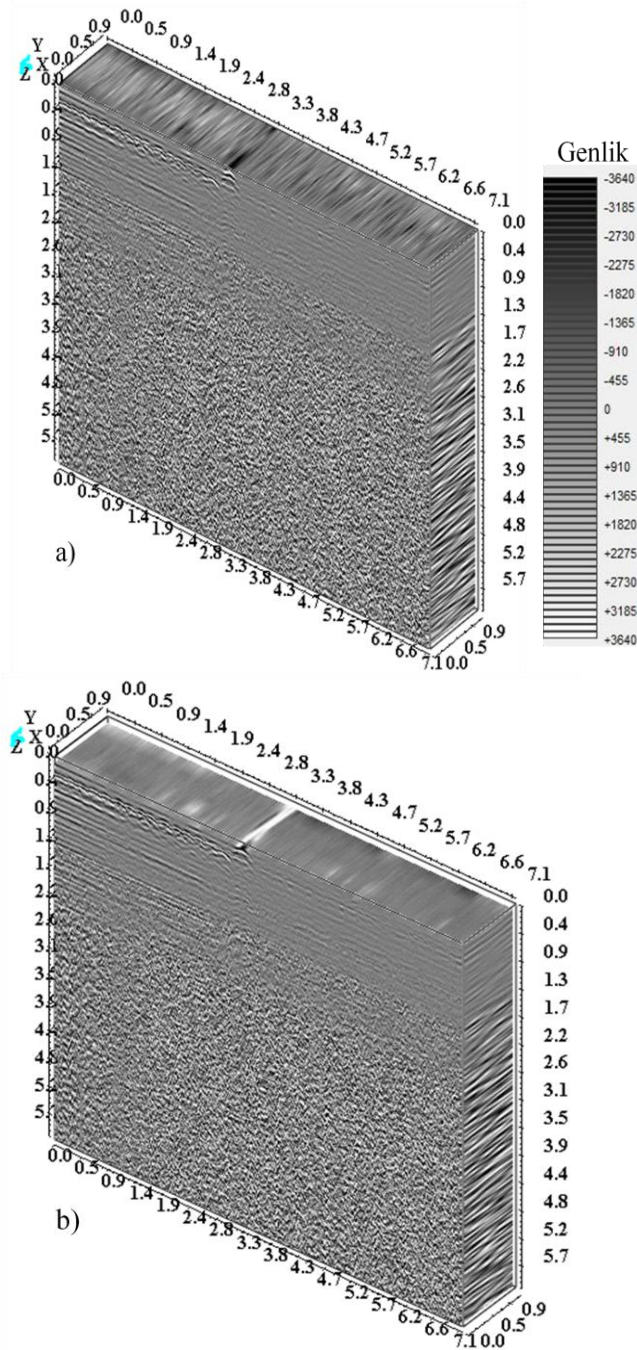


c)



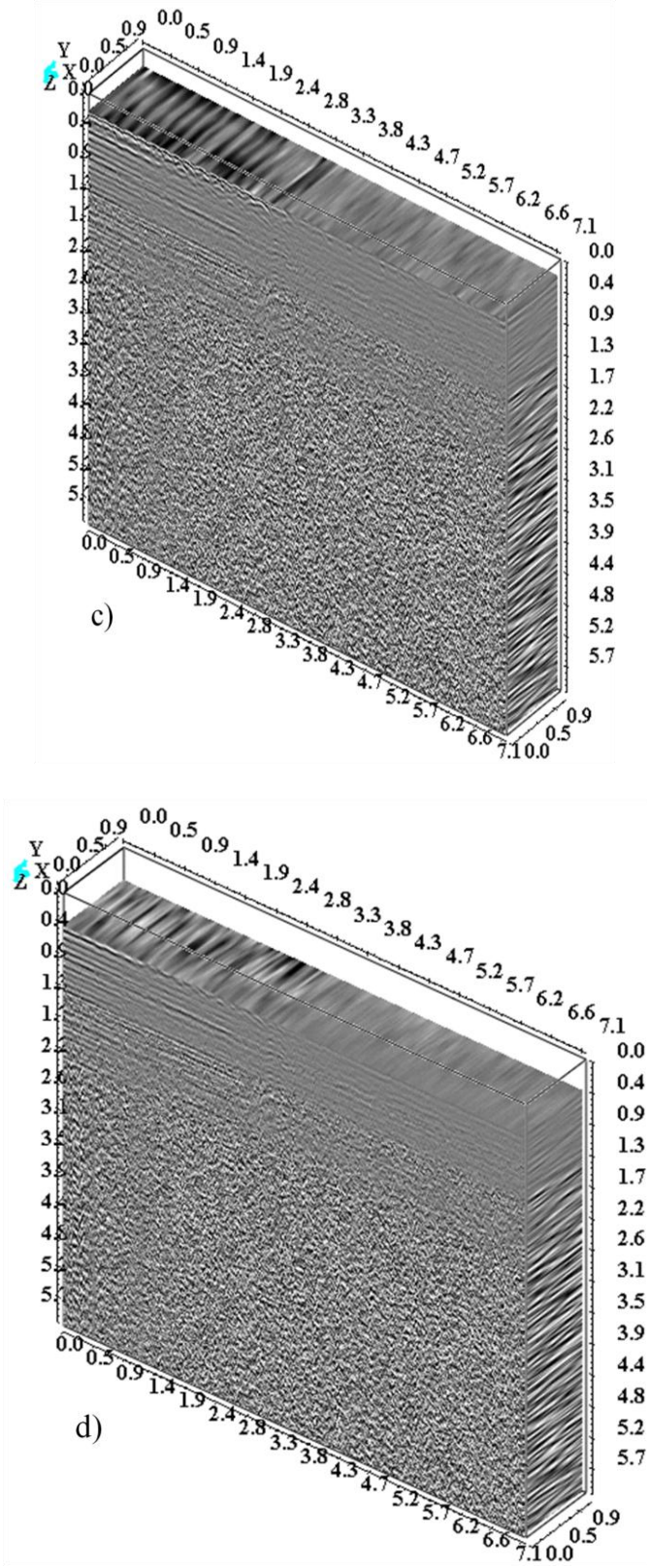
d)

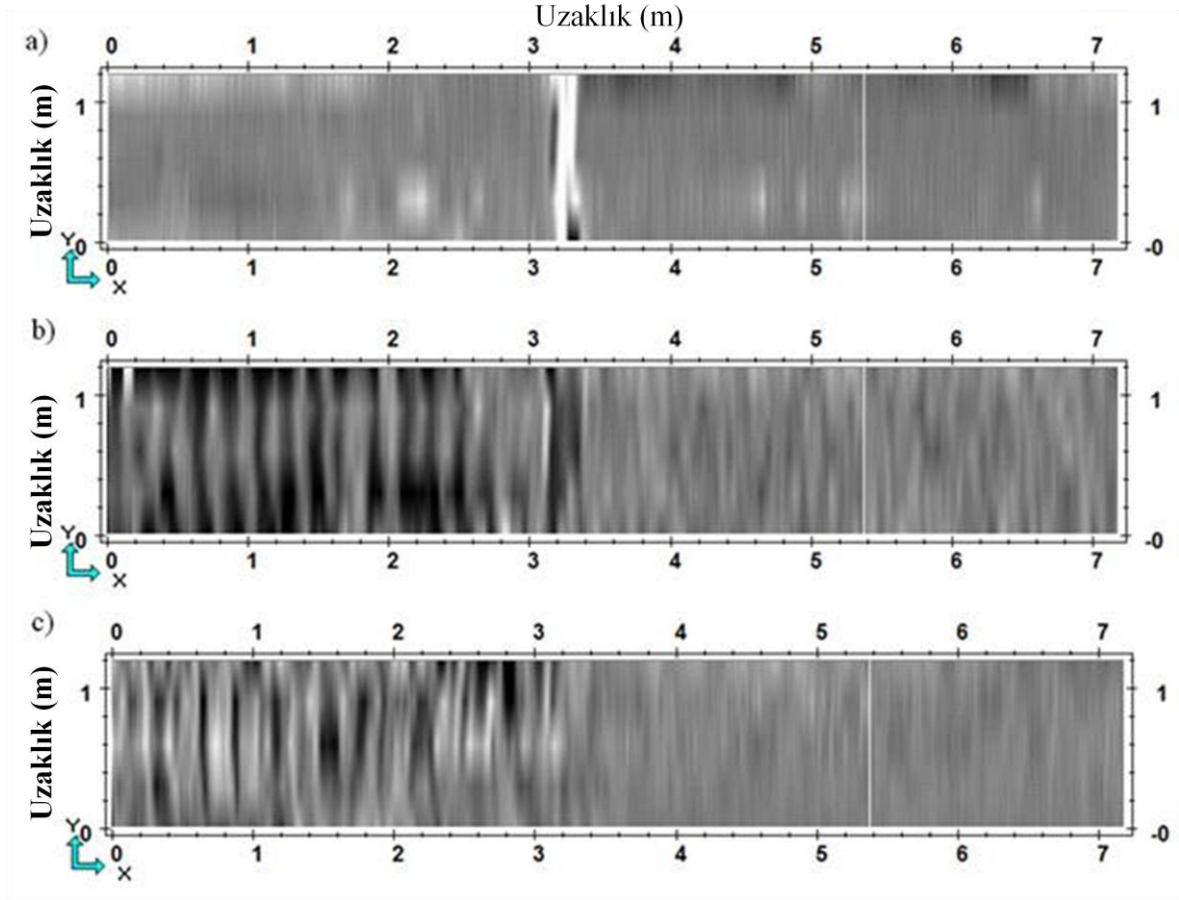
Torul tünelinin Gümüşhane tarafından girişinde 800 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-7.1 m aralığındaki 3B görünümü, Şekil 3.49a'da gösterilmektedir. Şekil 3.49b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları gösterilmektedir.



Şekil 3.49. a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.1 m deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

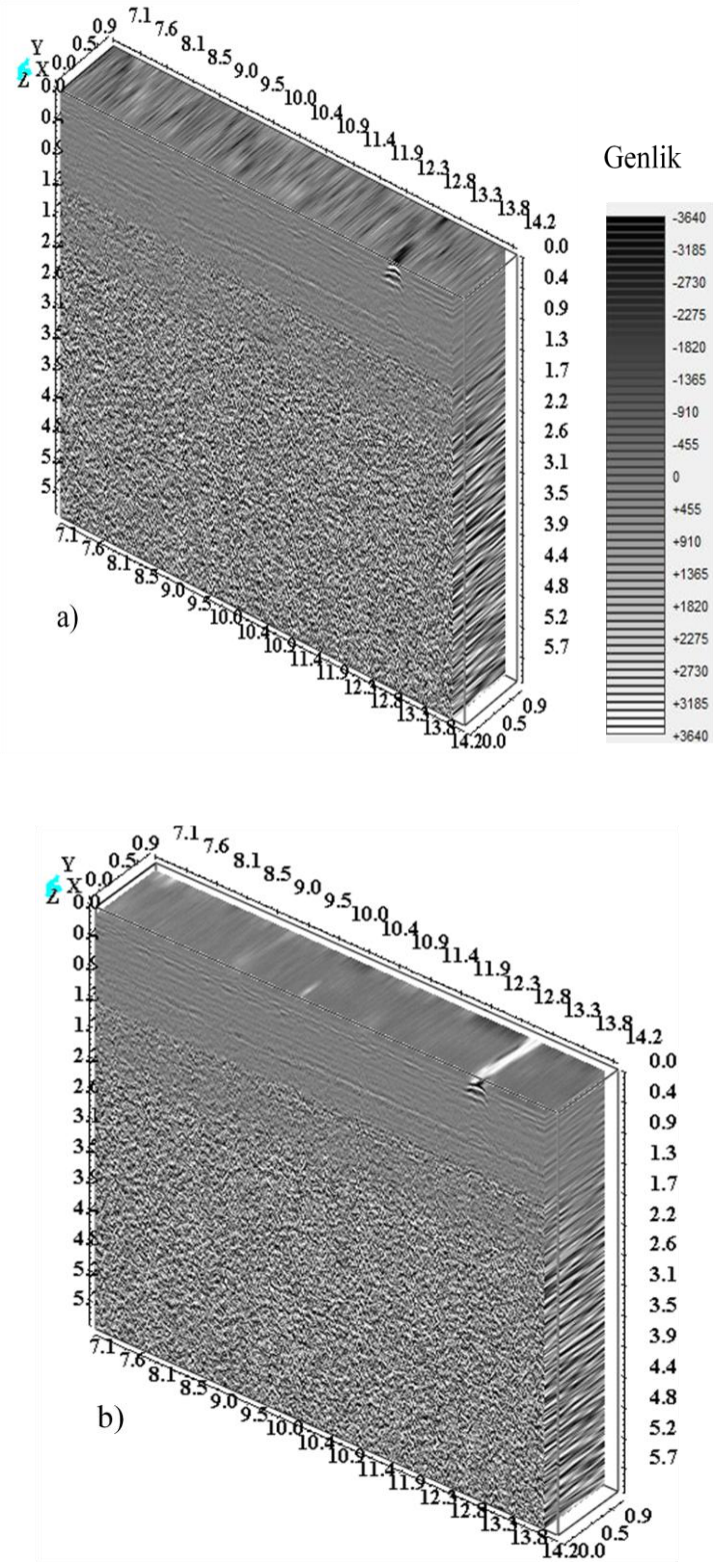
Şekil 3.49'un devamı





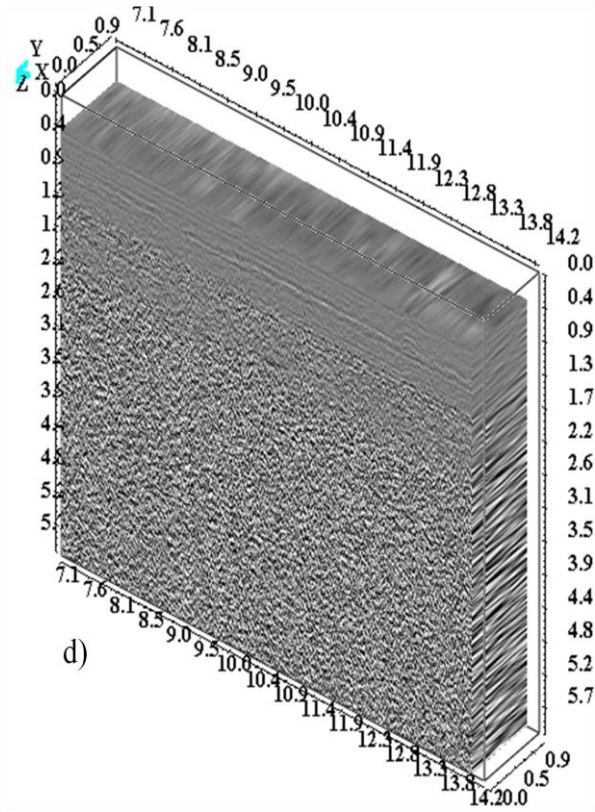
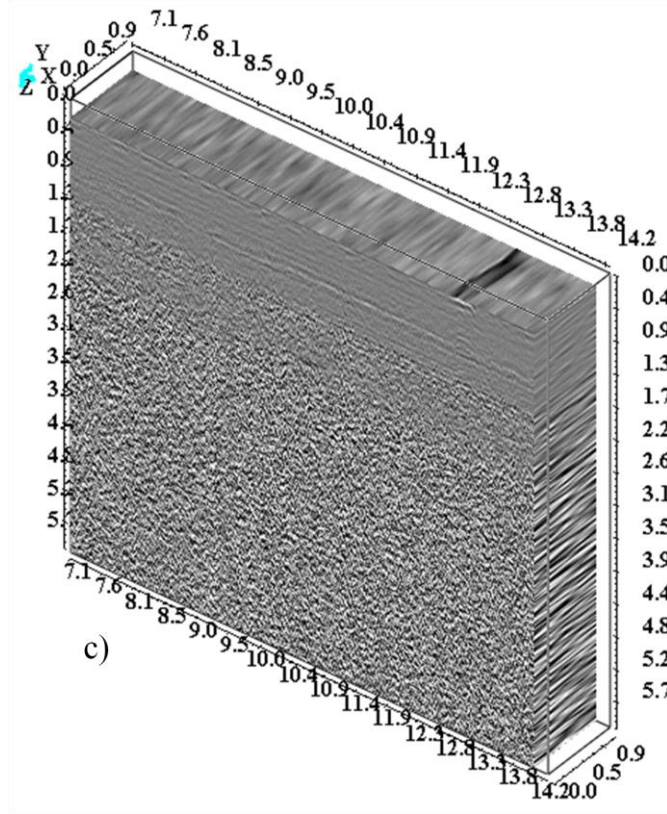
Şekil 3.50. Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.1 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

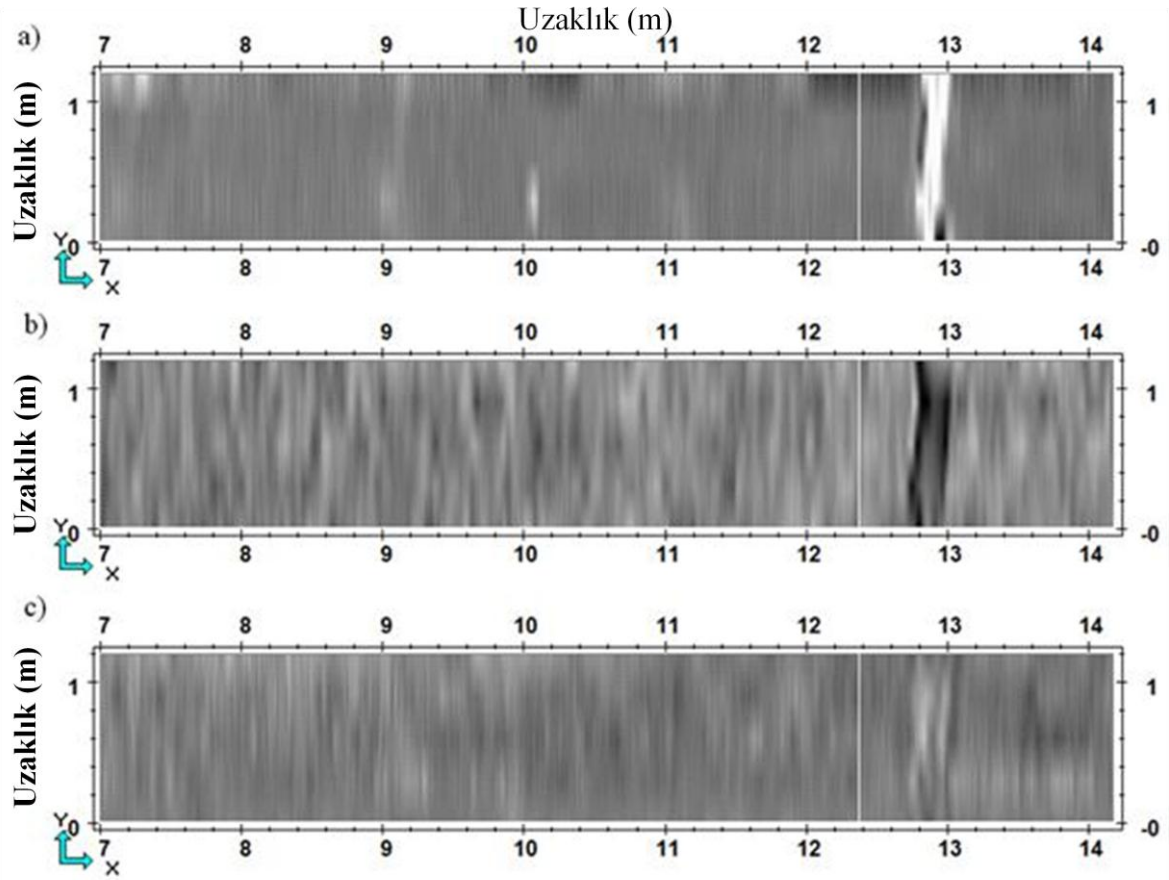
Torul tünelinin Gümüşhane tarafından girişinde 800 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 7.1-14m aralığındaki 3B görüntüleri, Şekil 3.51a'da gösterilmektedir. Şekil 3.51b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları gösterilmektedir.



Şekil 3.51. a) Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.1-14 m'deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.51'in devamı

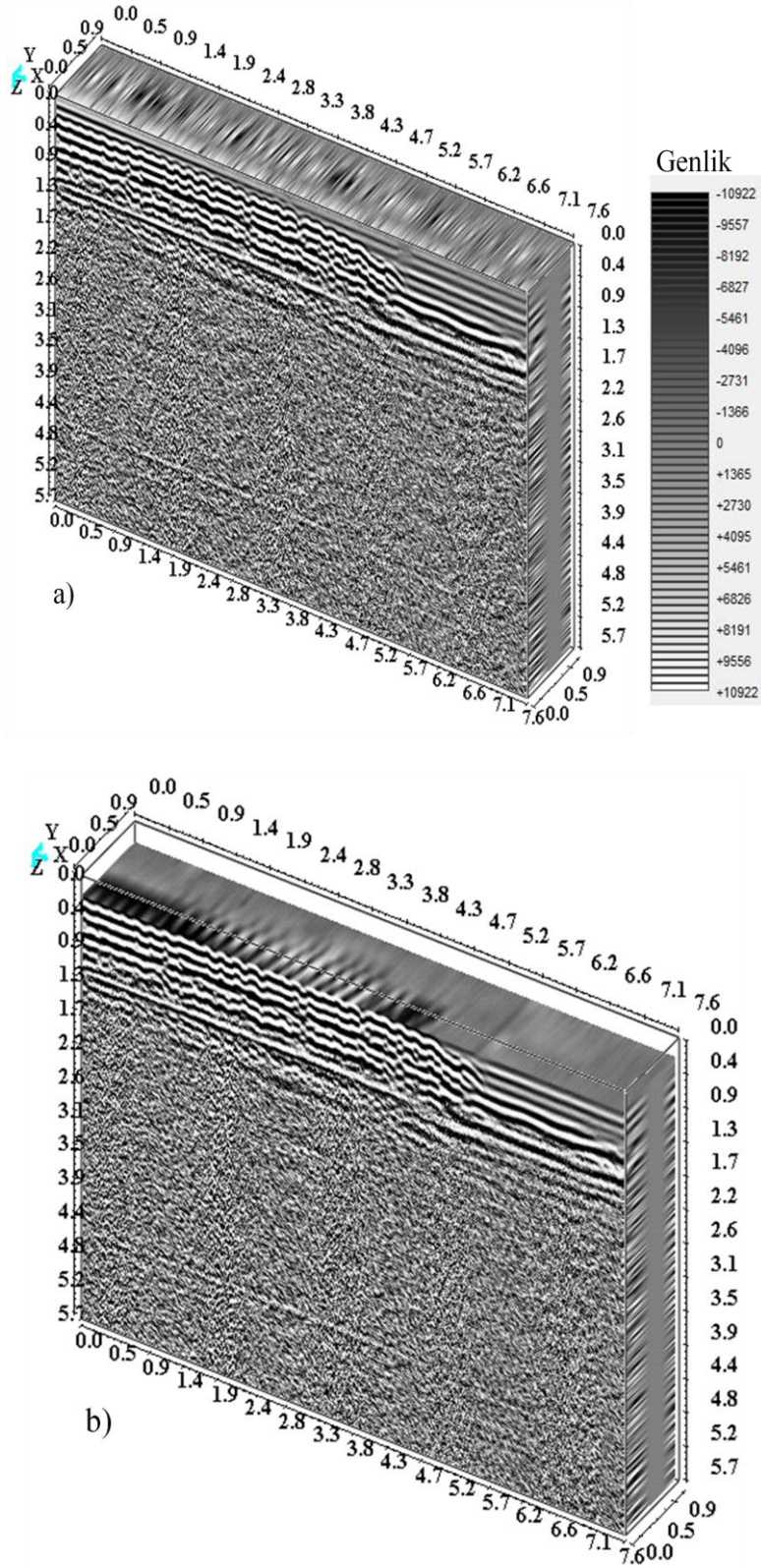




Şekil 3.52. Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 7.1-14 m'deki 0.2, 0.4 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları

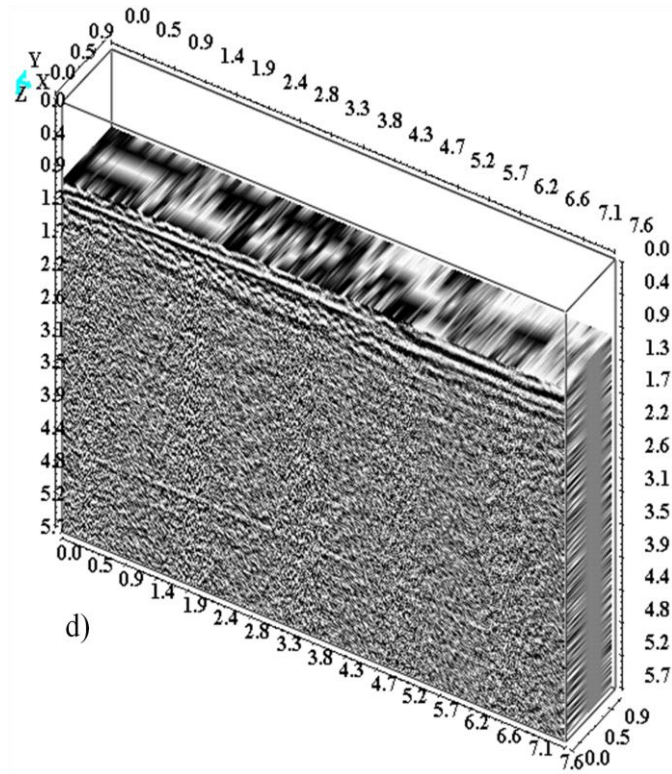
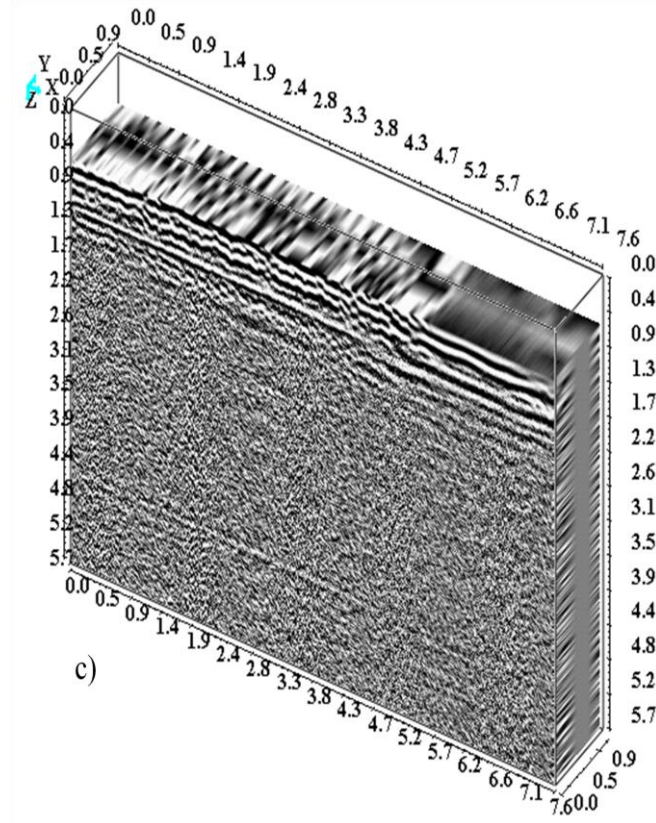
Torul tüneli Gümüşhane girişinden 500 ve 800 MHz ile elde edilen genlik-dilim haritalarında yaklaşık 2.8 ve 12.8 m uzaklığındaki bağlantı noktaları (Şekil 3.46-3.51), farklı derinliklere ait genlik-dilim haritalarında (Şekil 3.47-3.52) yüksek genlikli yansıma vermiştir ve ayrıca birbirine bitişik küçük hiperbolik yansılardan kaynaklanan yüksek genlikli yansılarda net bir şekilde görülmektedir.

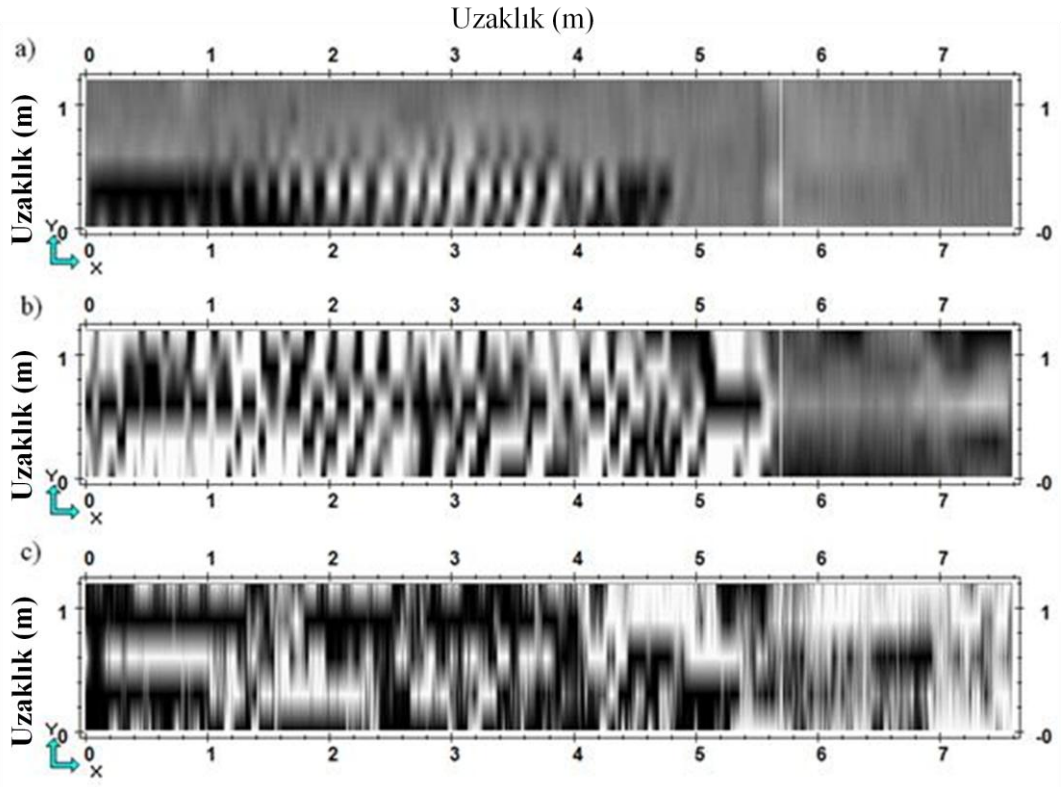
Torul tünelinin Trabzon tarafından girişinde 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-7.6 m aralığındaki 3B görünümü, Şekil 3.53a'da gösterilmektedir. Şekil 3.53b'de 0.4 m derinliğindeki, c'de 0.8 m derinliğindeki ve d'de 1.2 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları gösterilmektedir.



Şekil 3.53. a) Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m deki 3B görünümü b) 0.4 m'deki c) 0.8 m'deki d) 1.2 m'deki genlik-dilim haritaları

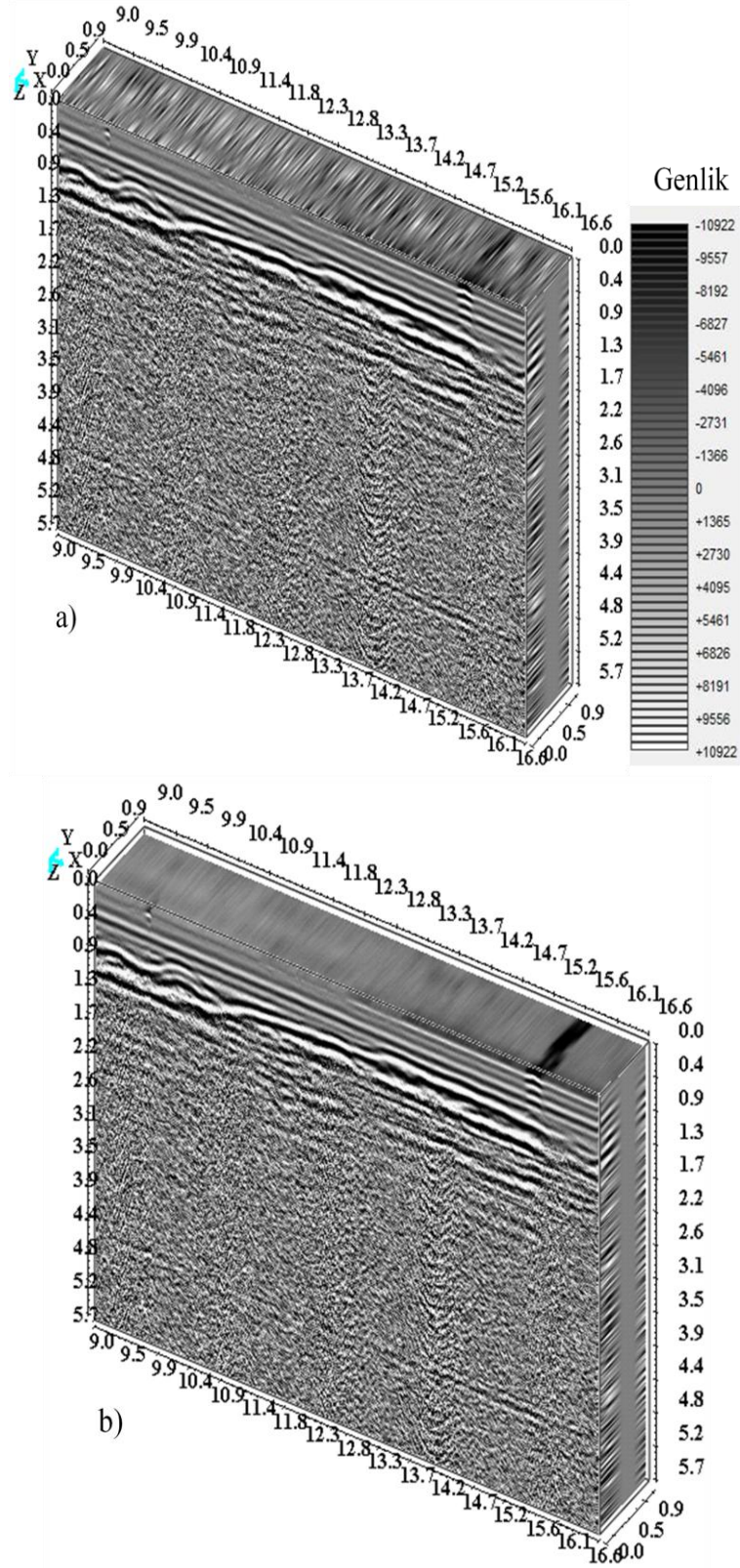
Şekil 3.53'ün devamı





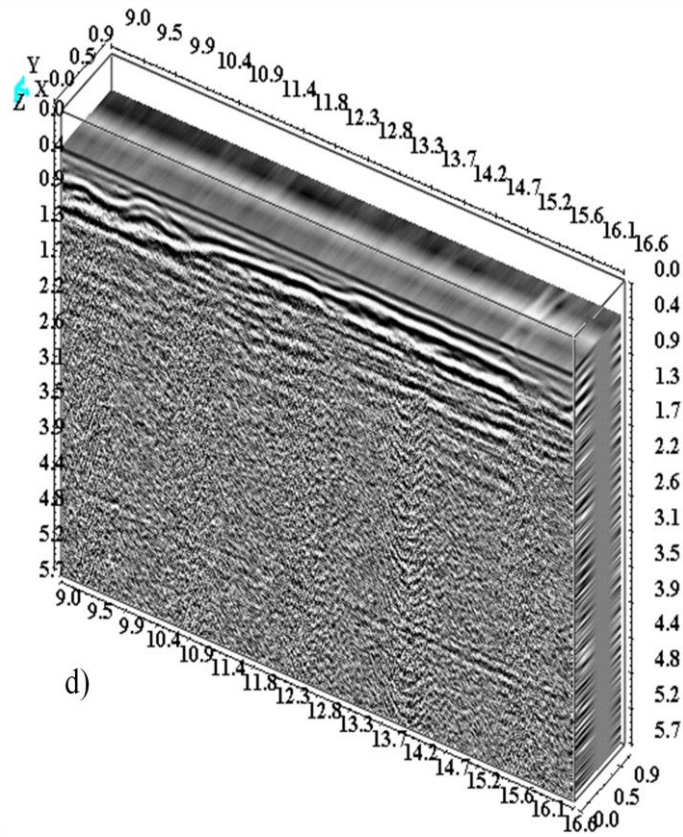
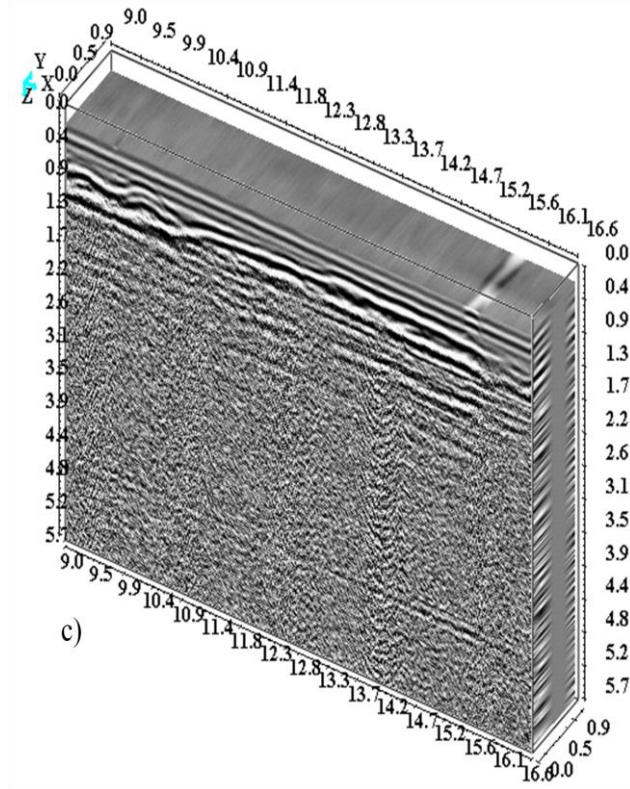
Şekil 3.54. Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m'deki 0.4, 0.8 ve 1.2 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

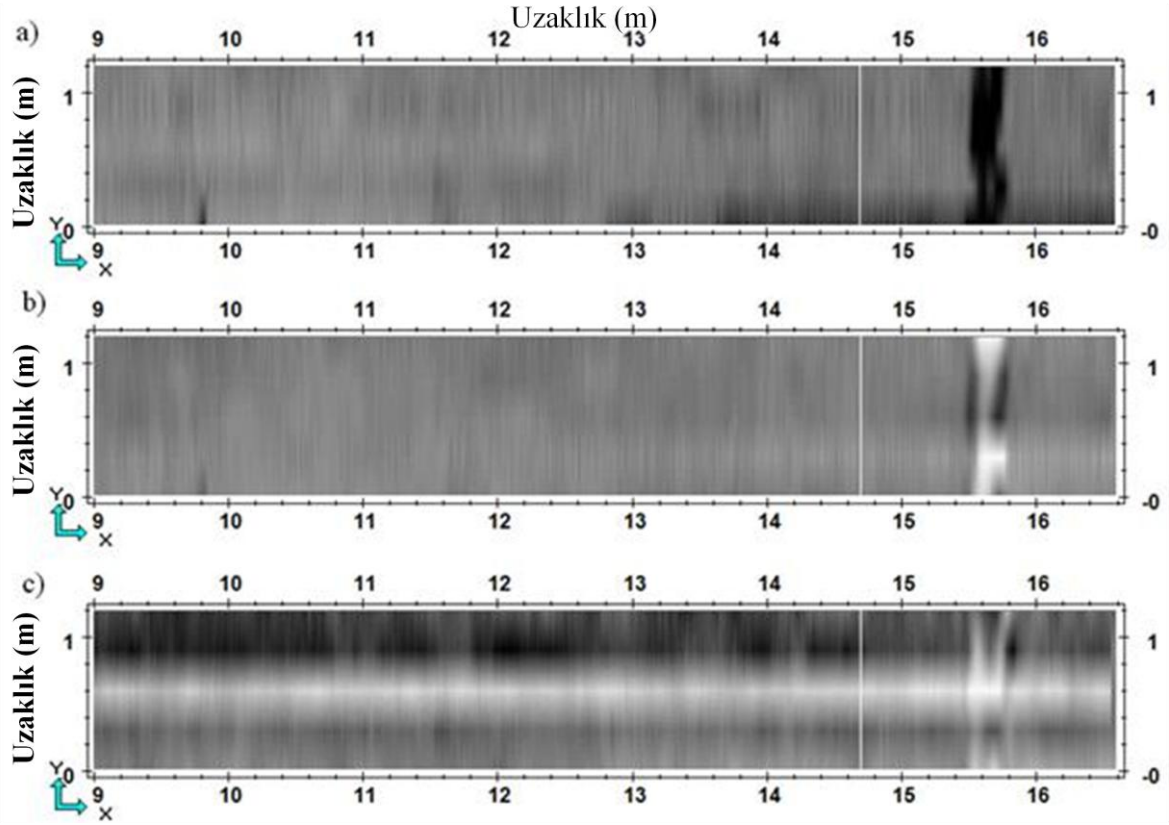
Torul tünelinin Trabzon tarafından girişinde 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 9-16.6 m aralığındaki 3B görünümüleri, Şekil 3.55a'da gösterilmektedir. Şekil 3.55b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları gösterilmektedir.



Şekil 3.55. a) Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 9-16.6 m'deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

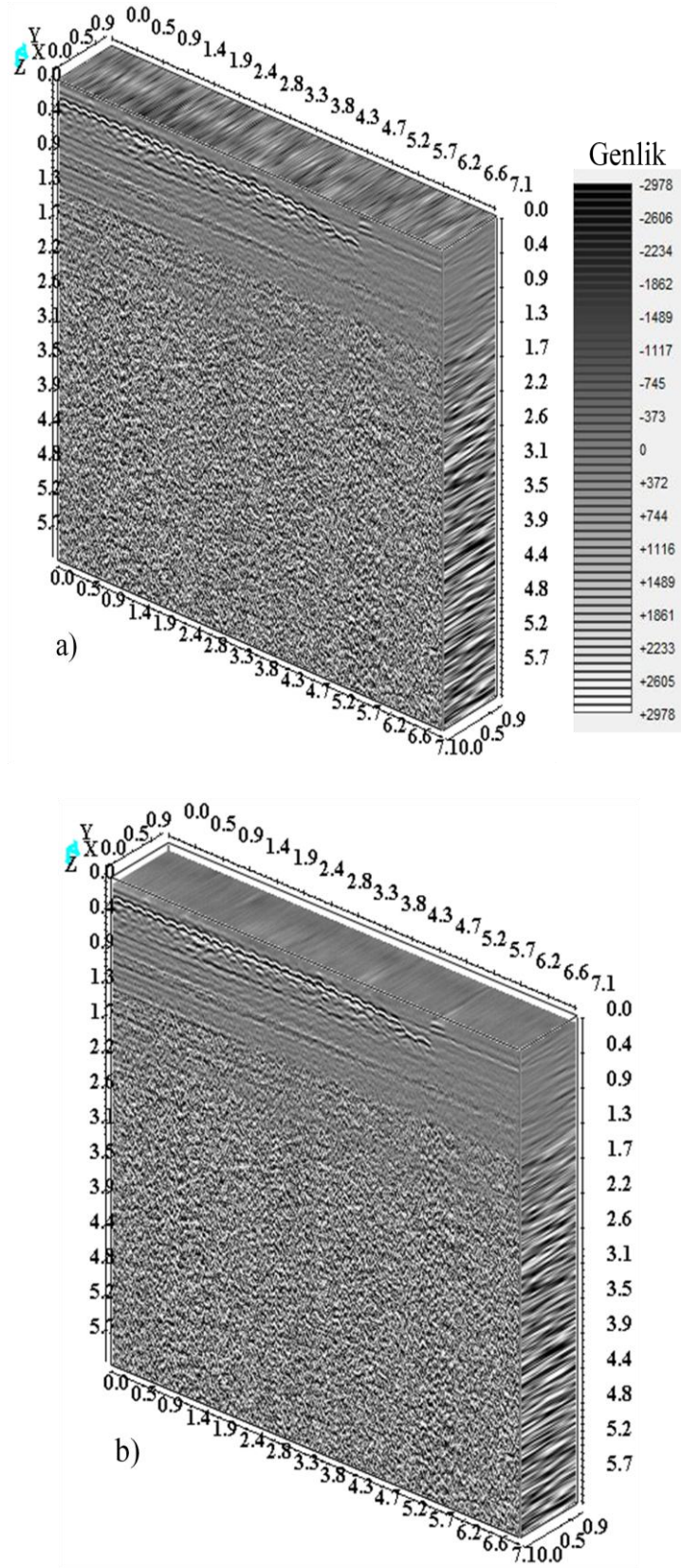
Şekil 3.55'in devamı





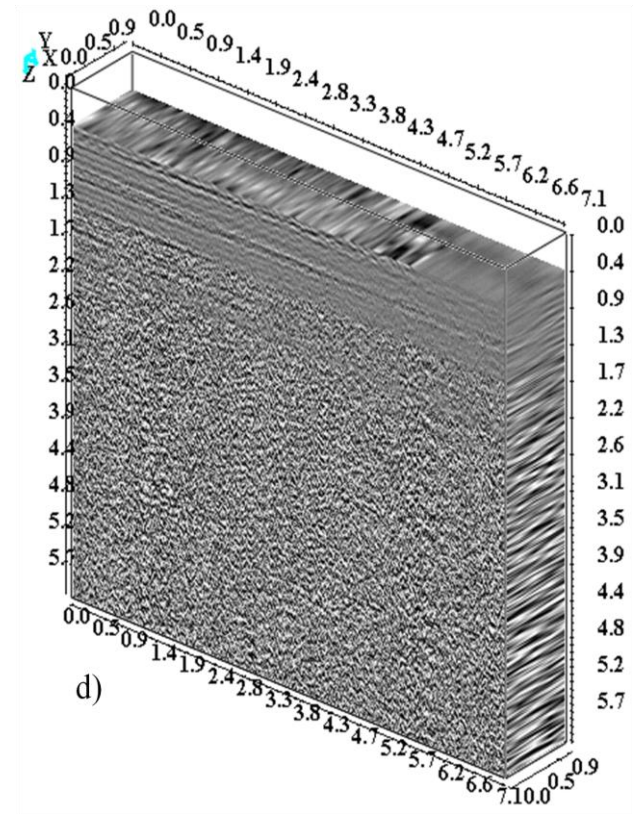
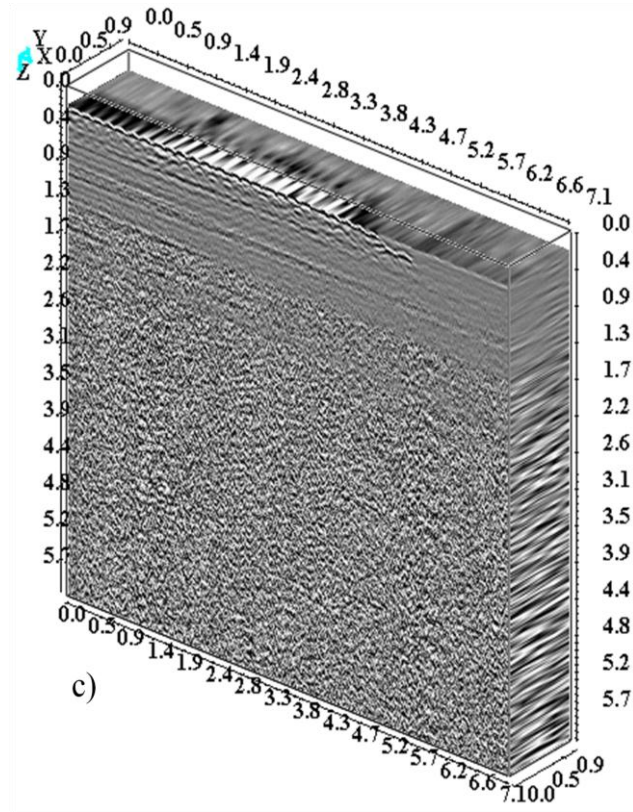
Şekil 3.56. Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 9-16.6 m'deki 0.2, 0.6 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları

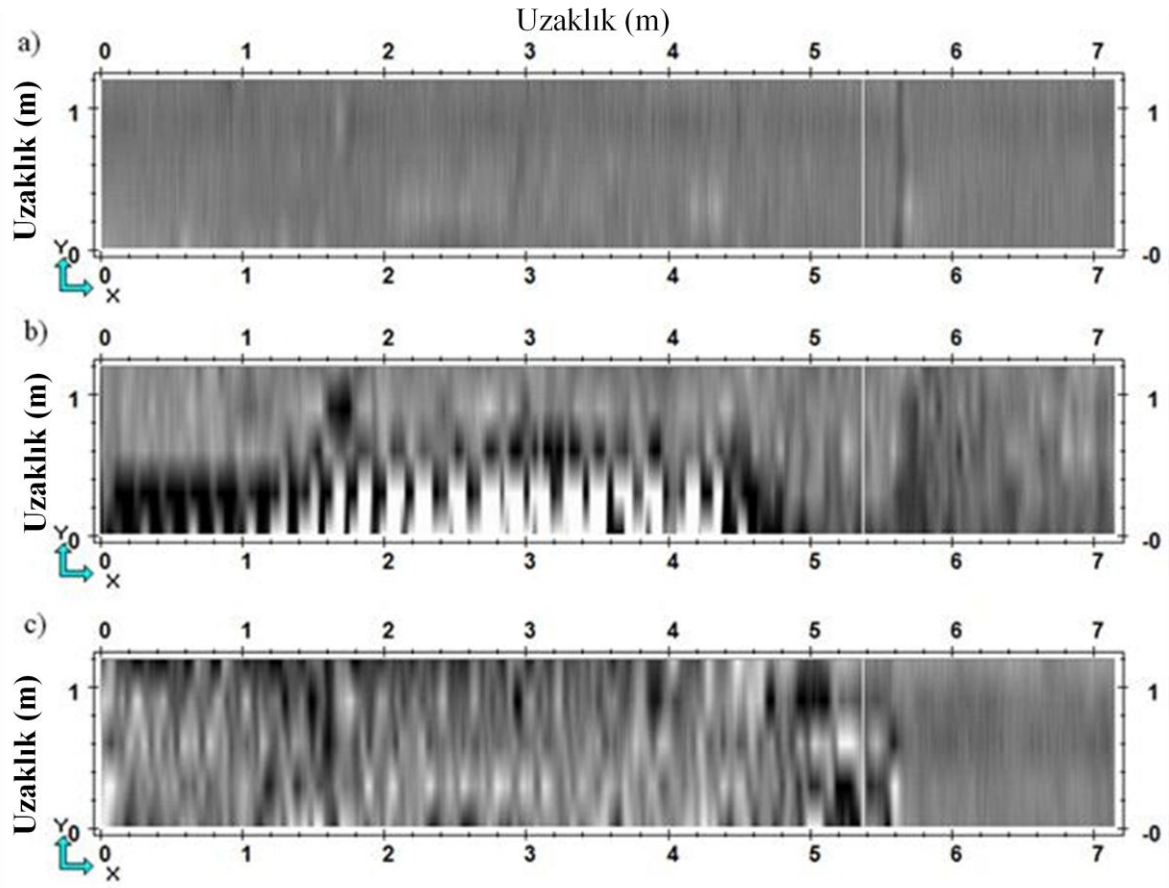
Torul tünelinin Trabzon tarafından girişinde 800 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 0-7 m aralığındaki 3B görüntüleri, Şekil 3.57a'da görülmektedir. Şekil 3.57b'de 0.2 m derinliğindeki, c'de 0.4 m derinliğindeki ve d'de 0.6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları görülmektedir.



Şekil 3.57. a) Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m'deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

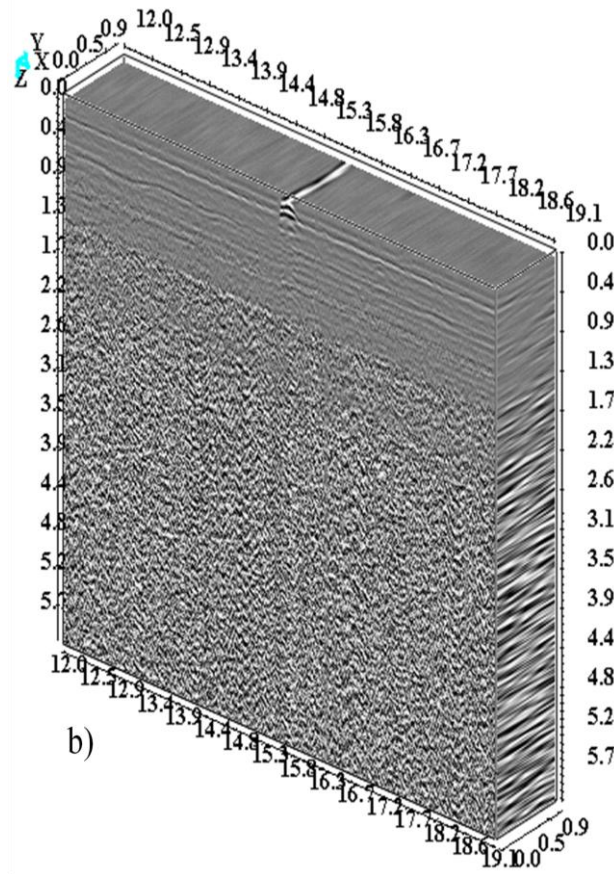
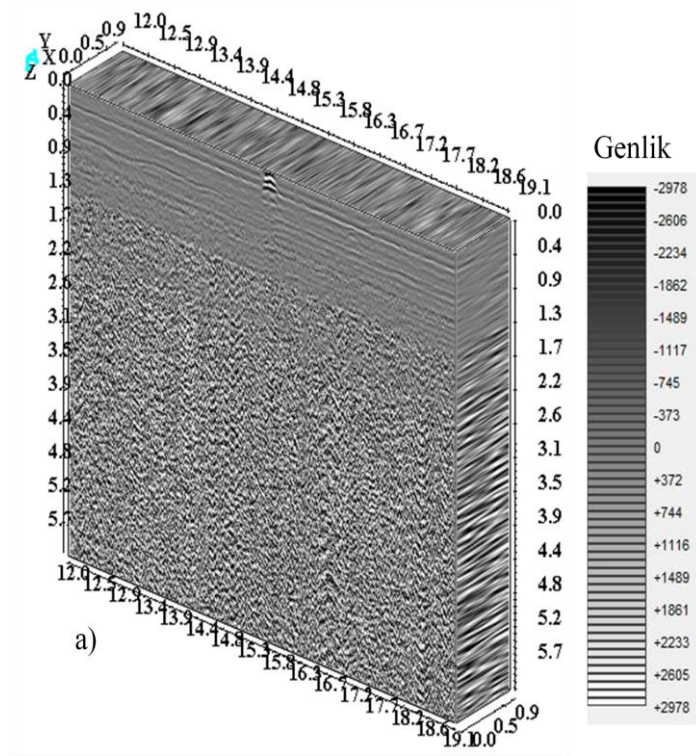
Şekil 3.57'nin devamı





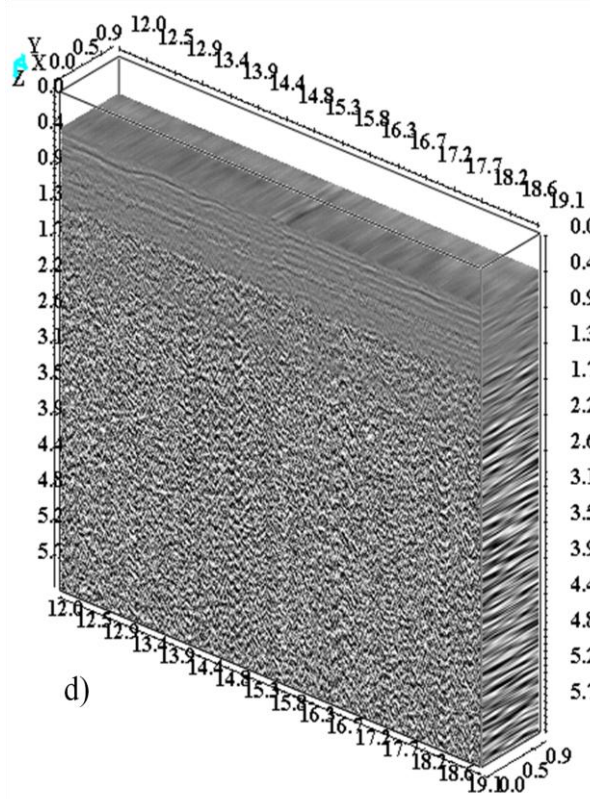
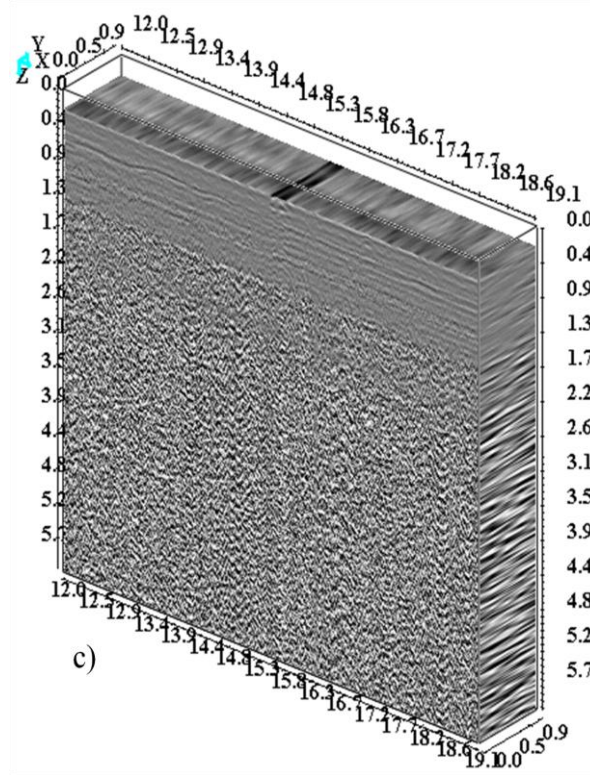
Şekil 3.58. Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7 m'deki 0,2, 0,6 ve 0,6 m derinliklerdeki genlik-dilim haritaları

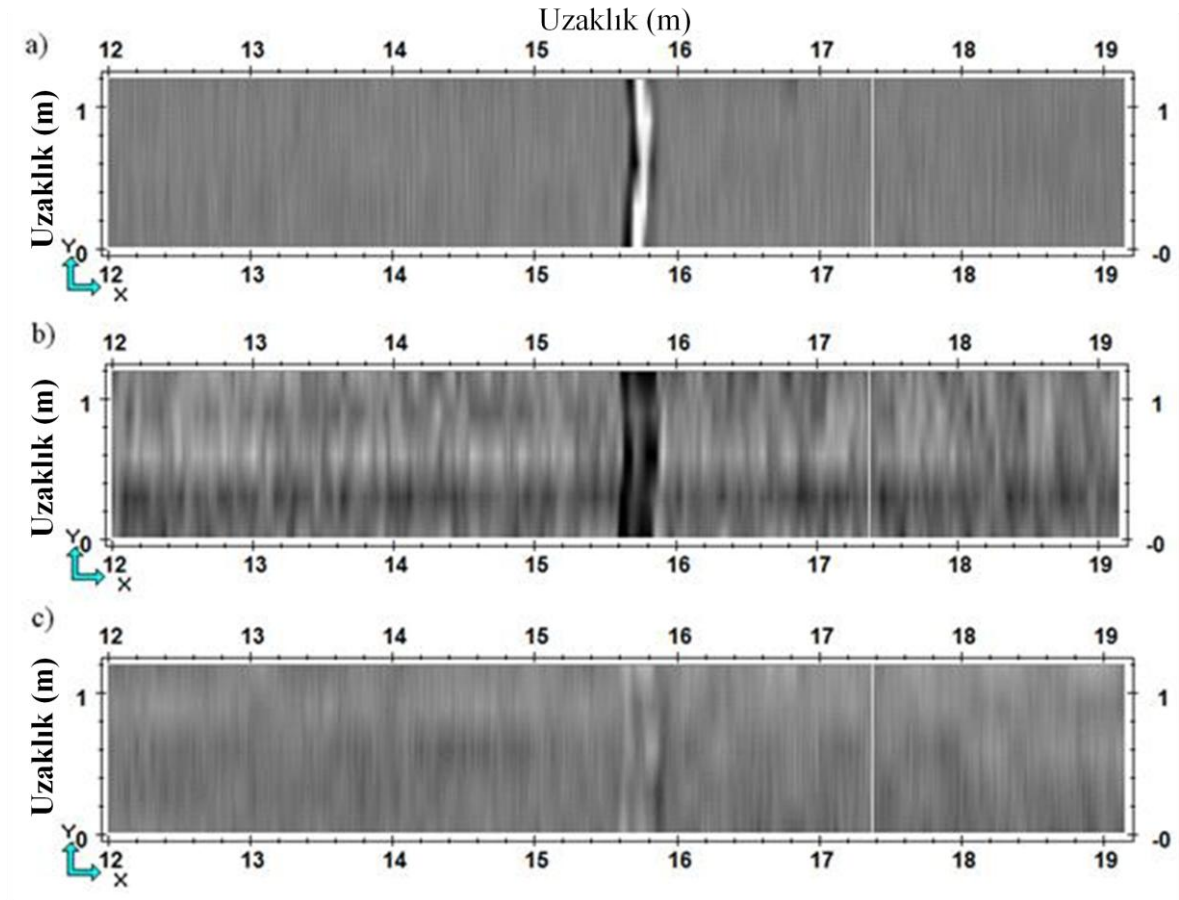
Torul tünelinin Trabzon tarafından girişinde 800 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinin, profil uzunluğu 12-19 m aralığındaki 3B görüntüleri, Şekil 3.59a'da gösterilmektedir. Şekil 3.59b'de 0,2 m derinliğindeki, c'de 0,4 m derinliğindeki ve d'de 0,6 m derinliğindeki genlik-dilim haritaları gösterilmektedir.



Şekil 3.59. a) Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 12-19 m'deki 3B görünümü b) 0.2 m'deki c) 0.4 m'deki d) 0.6 m'deki genlik-dilim haritaları

Şekil 3.59'un devamı





Şekil 3.60. Torul tüneli Trabzon girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 12-19 m'deki 0.2, 0.6 ve 0.6 m derinliklerindeki genlik-dilim haritaları

Genlik-dilim haritaları tünel duvarlarında gözlenen bozulmaların derinliğe bağlı olarak yanal yönde değişimlerini ortaya koyar. Bu haritalarda görülen genlik değerlerindeki siyah ve beyaz olarak görünen kısımlar mutlak değer olarak yüksek genlikli kısımları ifade etmektedir. Bunlar ortam içerisindeki yansıtıcı sınırlara denk gelmektedir. Homojen ortamlarda yansıma olmazken, homojenliğin bozulduğu herhangi bir yansıtıcı (kırık, çatlak, beton kalitesinin değiştiği sınırları vb.) sınırdan elektromanyetik dalganın geri dönerek alıcı antende ayırt edilir. Bundan dolayı elde edilen genlik-dilim haritalarındaki renk değişimleri ortamın bozukluklarını yansıtmaktadır.

Zigana tüneli Trabzon girişindeki yer radarı verilerinden elde edilen 3B görüntüleri; Şekil 3.26-3.33 gösterilmektedir. Bu şekillerin a'sında tüm 3B görüntüleri; b, c ve d kısımlarında ise farklı üç derinlik seviyelerindeki genlik-dilim haritaları verilmiştir. Şekil 3.28'de yaklaşık 12 m'deki bir anomali ve 800 MHz ile elde edilen kesit Şekil 3.32'da yaklaşık 12 m'de farklı derinliğe ait genlik-dilim haritalarında da görülmektedir.

Şekil 3.46-3.52 arasındaki şekiller Torul tüneli Gümüşhane girişini temsil etmektedir. Şekil 3.46’de yüksek genlikli birbirine bitişik küçük hiperbolik yansımalar görülmektedir. Şekil 3.50’da, beton bloklarının bağlantı yerlerinden kaynaklanan yaklaşık 3 m.de yüksek genlikli durum söz konusudur. Diğer beton bloklarının bağlantı yerleri ise genlik-dilim haritalarında belirgin olarak görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan Zigana tüneli ve Gümüşhane ili Torul ilçesinde yeni inşa edilmiş olan Torul tüneline yer radarı yöntemi ile alınan veriler kullanılarak beton kalitesi, kırık-çatlak sistemleri ve çeşitli bozulmalar değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerindeki Zigana tünelinin tünel duraylılığını kontrol etme amacıyla öncelikle jeolojisi araştırılmış olup, tünelin Kızılkaya Formasyonu olarak adlandırılan killi kireçtaşı ve tüffit ara katkılı dasitten oluştuğu kaynaklardan bulunmuştur. Tünel hattının geçtiği bu jeolojik birimin yoğun kırıklar ve alterasyonlar içerdiği bilinmektedir (Şekil 2.6).

Genel jeolojik gözlemlerden elde edilen sonuçlar;

1. Tünel içerisinde tünel kaplama malzemelerinde kırık ve çatlaklar oluştuğu ve bu kırık-çatlaklardan sızıntı sularının geldiği,
2. Kırık-çatlaklardan sızan suların büyük çoğunluğunun tünel kenar duvarlarından geldiği,
3. Tünel duvarlarından sızan suların tek bir kısımdan değil, farklı noktalarda tünel içerisine sızdığı gözlenmiştir.

Daha sonra Tünel içinde belirlenen problemlerin araştırılması ve tünel yapı durumunu tehlikeye sokabilecek nedenlerin belirlenebilmesi amacıyla yer radarı yöntemi ile veri toplanmıştır. Farklı penetrasyon ve çözünürlük elde etmek için 500 ve 800 MHz'lik antenler kullanılmıştır. Toplanan veriler ReflexW programı ile işlenmiş, görüntüleme için Easy3D programı kullanılmıştır. Elde edilen radargramlar 2 ve 3 boyutlu (2B ve 3B) gösterilerek yorumlanmıştır.

Yorum aşamasında eski tünellerde en önemli sorunlar olan tünel içine su akışı, su akışına bağlı kaplamada hasarlar, kaplama ile arkasındaki zemin arasında oluşan boşluklar, çevre zeminde zamanla bozmuş gevşemiş zeminlerin oluşması, kaplamaya kapasitesinin üzerinde yük gelmeye başlaması nedeniyle oluşan bozulmaların radargramlar üzerindeki görünümleri izlenmeye çalışılmaktadır.

Tünel içinde tünel yan duvarlarından toplanan yer radarı verilerine ait kesitler genel olarak değerlendirildiğinde;

1. İlk çalışma alanı olan Zigana tüneline; kesitlerin bazı uzaklıklarında su sızıntısından kaynaklanan elektromanyetik dalganın sönümlendiği yerler (şekil 3.1,şekil 3.2),
2. Kırıklı-çatlaklı ve bozunmuş yapıların yüksek genlikli anomaliler verdiği kısımlar (şekil 3.1-şekil 3.11) gözlenmiştir.
3. İkinci çalışma alanı olarak değerlendirilen Torul tüneline ise 0-3 m ve 0-4.5 m uzaklıklar arasındaki yüksek genlikli küçük birbirine bitişik hiperbolik yansımaların (şekil 3.12-3.23), tünel girişlerinin ana kaya ile tünel ağzı arasındaki boşluklu kısma döşenmiş beton donatı demirlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür.
4. Zigana tüneline ait radargramlarda tünel duvarı ile oyulduğu ana kaya sınırı yaklaşık olarak 75 cm, Torul tüneli için ise bu sınır 70 cm olarak gözlenmektedir.
5. Ayrıca ölçüm alım sırasında tünel bağlantı noktalarının üzerinden geçildiği yerler radargramlarda gözlenmiştir.
6. Zigana tünel duvarından 1.5 m derinliğe kadar olan kısmın radargram üzerindeki görünümünden beton kalitesinin oldukça bozunmuş ve kırık-çatlakların yoğun olduğu gözlenmektedir. Yeni kullanıma açılmış olan Torul tünel duvarından aynı derinliğe kadar olan radar kesitinde, beton bağlantı noktaları ve donatı demirlerinin dışında yüksek genlikli bozucu yansımaların olmayışı betonun sağlamlığını göstermektedir. Ayrıca bu kesitlerde daha net bir şekilde tünel duvarı ile oyuldukları ana kaya sınırları belirgin bir şekilde ayırt edilmektedir.
7. Her iki tünel için elde 3B görünümünden seçilen genlik-dilim haritaları tünel duvarlarında gözlenen bozulmaların derinliğe bağlı olarak yanal yönde değişimlerini ortaya koymuştur. Bu haritalarda gösterilen genlik değerlerindeki siyah ve beyaz olan görünüm mutlak değer olarak yüksek genlikli kısımları ifade etmekte olup farklı fiziksel ortamları belirtmektedir.
8. Tünel duvar çalışmalarında; beton hattının kalınlığı ve bu kalınlıktaki değişimler, beton hattındaki kusurlu zonların (boşluk, su sızıntısı, kırıklı zonlar) yerleri, çelik desteklerin (kaya civatası, çelik çubuklar) yeri ve bunların bozuklukları, sağlamlaştırma çeliklerinin derinliği, aralığı ve bunların kusurları, beton hattı ve kaya kütlesi arasındaki ara yüzey, betonun homojenliğinin görüntülenmesi konularında tahribatsız yer radarı yöntemi kullanılmalıdır.
9. Kırık-çatlak ve bozulmaların oluştuğu Zigana tüneli gibi tünellerde mutlaka hasarsız test yapan yer radarı yönteminin kullanılarak, bu türlü bozulmaların yanal ve düşey durumları belirlenip iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- Alp, İ. Gelişli, K. Yılmaz, A.O. Kaya, R. ve Çavuşoğlu, İ. 2003. Mermer İşletmeciliğinde Yer Radarı Uygulamaları.
- Alpan, T., 1971. Of-Trabzon Arasının Jeolojik Etüdü, M.T.A Rap. No: 1177, Ankara. (yayınlanmamış)
- Annan, A.P. ve Cosway, S.W. 1992. Simplified GPR beam model for survey design. 62nd Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract.
- Annan, A.P. ve Cosway, S.W. 1994. GPR frequency selection. Fifth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Proceedings, 747-760.
- Annan, A.P. 1992. Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc.
- Annan, A.P. 2001. Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc.
- Annan, A.P., 2003. Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensors Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada.
- Annan, A.P., 2004. "Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications" Sensors and Softwares Inc.
- Annan, A.P., 2005. "Ground Penetrating Radar", Near Surface Geophysics Part 1: Concept and Fundamentals, Butler, D.K.(Ed.), Investigations in Geophysics No.13, SEG Foundation.
- Annan, A. P., 2005. GPR methods for hydrogeological studies. In Y. Rubin, & S. S. Hubbard (Eds.). Hydrogeophysics (185-213). The Netherlands: Springer.
- Annan, A.P., 2009. "Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar", In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications", Jol, H.M.(Ed.), Elsevier.
- Annan, A.P. ve Chua, L.T. 1992. Ground penetrating radar performance predictions. *The Geological Survey of Canada*. 90, 4, 5-13.
- Arcone, S.A., 1995. Numerical studies of the radiation patterns of resistively loaded dipoles. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 39-52.
- Aslaner, M., 1977. Türkiye Bakır, Kurgun, Çinko Yataklarının Jeolojik ve Bölgesel Sınıflamasıyla Plaka Tektoniği Yönünden İncelenmesi, K.T.Ü., Yayın No: 85.

- Balanis, C.A., 1989. "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley&Sons.
- Bergmann, T. Blanch, J.O. ve Robertsson, J.O.A. 1996. A simplified Lax-Wendroff correction for staggered-grid FDTD modeling of electromagnetic wave propagation in frequency-dependent media. *Geophysics*, Vol.64, No.5, P.1369-1377.
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., ve Winship, P. 2002. Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 267, 147-159.
- Blindow, N., 2006. Ground penetrating radar. In R. Kirsch (Ed). *Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology* (227-252). Berlin: Springer.
- Bourgeois, J.M. and Smith G.S. 1996. A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol.34, No.1.
- Bristow, C.S ve Jol, H.M. (Ed.). 2003. *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society Special Publications, London, 211, 191-198.
- Cai, J., ve McMechan, G. A. 1994. Ray-based synthesis of bistatic groundpenetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 87-96.
- Candansayar, M.E., 1997. Doğru akım öz direnç yönteminde modelleme ve iki-boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrot dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması.
- Carcione, J.M., 1998. Radiation patterns for 2-D GPR forward modelling. *Geophysics*, Vol 63, No 2, P 424-430.
- Cardelli, E. Marrone, C. ve Orlando, L. 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods, *Journal of Applied Geophysics*, 52, 93-102.
- Cassiani, G. Binley, A. ve Ferré, T.P.A. 2006. Unsaturated zone processes. In H. Vereecken, A. Binley, G. Cassiani, A. Revil, & K. Titov (Eds). *Applied Geophysics* (75-116). New York: Springer-Verlag.
- Ceryan, N., 2004. Kaya kütle sınıflandırma sistemlerinin ve SSPC yönteminin Bekçiler (Maçka-Trabzon)-Torul (Gümüşhane) arasında seçilen kazı şevlerine uygulanışı.
- Conyers, L.B. ve Goodman, D. 1997. *Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists*. California: Altamira Press.
- Conyers, L.B., 2004. *Ground Penetrating Radar for Archaeology*, Altamira Press, California,USA, 24-26.
- Davis J.L. ve Annan A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.

- Dondurur, D., 2009. "Deniz Sismiğinde Veri İşlem", TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları No:11.
- Ergün A. ve Kürklü G., 2005. Mevcut Betonarme Yapılarda Beton Dayanımının Belirlenmesi. *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005*, 817-826.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.
- Goodman, D. ve Nishimura, Y., 1993. A ground radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349-354.
- Grégoire, C. Halleux, L. ve Vervoort, A. 2003. Application of ground penetrating radar in a mining environment. In *Mining and Mineral Processing*, Sofia, p. 179- 183.
- Griffin, S. ve Pipet, T. 2002. Ground Penetrating Radar. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, 144, 80-89
- Grodner, M., 2001. Using ground penetrating radar to quantify changes in the fracture pattern associated with a simulated rockburst experiment.
- Gürel, L. ve Oğuz, U. 2000. Three- dimensional FDTD modelling of a Ground-Penetrating Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 38., No.4.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara.
- Holliger, K. ve Bergmann, T., 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics*, Vol.67, No.4, P.1249-1257.
- Huggenberger, P. Meier, E. ve Beres, M. 1994. Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflection patterns: A comparison of results of three different antenna frequencies. 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (Proceedings), Waterloo Centre for Groundwater Research, 3,805-815.
- Irving, J., 2006. Improving tomographic estimates of subsurface electromagnetic wave velocity obtained from ground-penetrating radar data. Doctor of Philosophy, Stanford University.
- Irving, J. ve Knight, R. 2006. Numerical modelling of ground-penetrating radar in 2D using MATLAB, *Computer and Geosciences*, 35, 1247-1258.
- Kadıoğlu, S. 2004. Yer Radarı (GPR) Yöntemi Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Ders Notları.
- Kayen, R.E. Barnhardt, W.A. Ashford, S. Rollins, K. Minasian, D.L. ve Carkin, B.A. 2002. In T. Parsons (Ed.). High-resolution crosshole radar tomography: Application to liquefaction-induced changes in soil on Treasure Island. *Crustal Structure of the*

- Coastal and Marine San Francisco Bay Region, California (3- 10). Washington: USGS Professional Paper 1658, U.S. Geological Survey.
- Kim, J.H. Cho, S.J ve Yi, M.J. 2007. Removal of Ringing Noise in GPR Data by Signal Processing, *Geosciences Journal*, 11, 1, 75 – 81.
- Knight, R., 2001. “Ground Penetrating Radar For Environmental Applications”, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*
- Kurt, B.B., 2009. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi ile İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi, K.T.Ü.
- Kurtulmuş, T.Ö., 2007. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sığ Jeofizik Aramacılıkta Yer Rradarı Modellemesi.
- Kurtuluş, C., 2002 “Sismik Arama Ders Kitabı”, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, Yayın No:5.
- Lane, J.W. vd., 2000. Evaluation of Ground Penetrating Radar to Detect Free-Phase Hydrocarbons in Fractured Rocks – Results of Numerical Modelling and Pyhsical Experiments.
- Leckebusch, J., 2003. Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240.
- Lee, R. ve Teixeira, F.L. 2006. Finite difference time domain modelling for GPR applications. GPR 2006 conference short course notes.
- Locatelli, L. Di Marco, G. Zonichelli, C. ve Jarre P. 2001. Rehabilitation of Highway Tunnels – Techniques and Procedures. A.I.T.E.S.-ITA 2001 World Tunnel Congress. Progress in Tunneling After 2000- Milano.
- Mala Geosicence, 2003. Ramac/GPR CU II Hardware Manual, version 2.0, s.8
- Moorman, B.J., 2001. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. In W. M. Last and J. P. Smol, (Ed.). *Tracking environmental change using lake sediments: Physical and chemical techniques (23-47)*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Olhoeft, G.R., 1981. Electrical properties of rocks. in Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, (Ed.). *Physical properties of rocks and minerals (257-330)*. NY: McGraw-Hill.
- Özçep F. Karabulut S. Özgüven B. ve Sanlı O. 2012. Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri. *Jeofizik Bülten*, Kasım 2012, 11-24.
- Parasnis, D. S., 1997. *Principles of applied geophysics (5th ed.)*. Chapman and Hall.
- Parkinson, G., 2008. Ground Penetrating Radar Evaluation of Concrete Tunnel Linings.

- Pérez-Gracia V. García García F. ve Rodríguez Abad I. 2008. GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study.
- Pelin, S., 1977. Alucra (Giresun) güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından incelenmesi, Doçentlik Tezi, KTÜ, Yayın No:87, Trabzon, (yayımlanmamış).
- Pelin, S. Özsayar, T. Gedikoğlu, A. ve Tülümen, E. 1982. Doğu Pontidlerd Üst Kretase Yaşlı Biyomikritlerin Oluşumu, K.T.Ü Jeoloji Dergisi. 2, 1-2, 69-81.
- Reppert, M. Morgan, F. D. ve Toksöz, M.N. 2000. Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 189-197.
- Reynolds, J.M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Rucker, D.F. ve Ferré, T.P.A. 2004. Correcting water content measurement errors associated with critically refracted first arrivals on zero offset profiling borehole ground penetrating radar profiles. *Vadose Zone Journal*, 3, 278-287.
- Sadiku, M.N.O., 1995. "Elements of Electromagnetics", Oxford Series in Electrical and Computer Engineering.
- Sears, F.W., 1982. Zemansky, M.W. ve Young H.D., "University Physics" 6th. Edition Addison-Westley Publishing Company.
- Sevgi, L., 1999. Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler, Canada.
- Sezer, H., 2010. Yer Radarı Yöntemi İle Zonguldak Demiryolu Tünelinin Duraylılığının ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması
- Sheriff, R.E., 1984. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (2nd ed.). Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysics.
- Smith, D.G. ve Jol, H. M. 1995. Ground penetrating radar: Antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100.
- Taşlı, K., 1984. İkisü (Gümüşhane) ile Hamsiköy (Trabzon) Yörelerinin Jeolojisi ve Berdiga Formasyonunun Biyo-stratigrafik Denettirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.223 s.
- Teixeira, F.L. Chew, W.C. Straka, M. Oristaglio, M.L. ve Wang, T. 1998. Finite Difference Time Domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol: 36, No: 6.

- Telford, W.M. Geldart, L.P. Sheriff, R.E. ve Keys, D.A. 1976. Applied geophysics. NY: Cambridge University Press.
- Ulriksen, C.P.F., 1982. Application of İmpulse Radar to Civil Engineering, Ph.D. Thesis, University Technology, Lund, Sweden.
- von Hippel, A.R., 1954. Dielectric materials and applications. NY: John Wiley and Sons.
- Van der Kruk, J. Streich, R. ve Green, A.G. 2006. "Properties of surface waveguides derived from separate and joint inversion of dispersive TE and TM GPR data", Geophysics, Vol. 71, No.1.
- Walther, E.G. Pitchford A.M. ve Olhoeft G.R. 1986. "A strategy for detecting subsurface organic contaminants" Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb. Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston, Nov. 12–14,pp. 357–81. Dublin, OH: Natl. Water Well Assoc.
- Wang, T. ve Tripp, A.C. 1996. FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media. Geophysics, Vol:61, No:1, P 110-120.
- Weeds, R.D., 1994. Geophysical Characterization of Sites. Rotterdam: AA. Balkema, p.69-79.
- Wilchek, L., 2000. Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Stucture. M.S. Thesis, Alberta University, Canada.
- Yalçınalp, B., 1992. Güzelyayla (Maçka-Trabzon) Porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin Jeolojik Yerleşimi ve Jeokimyasi, KTÜ, Trabzon.
- Yee, K.S., 1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Ant. Prop., Ap-14, P 302-309.
- Xiang L. Zhou H. Shu Z., Tan S., Liang G. ve Zhu J., (2013). GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study (68–76).
- Xie, X., Liu, Y. Huang, H. ve Shao, J. 2004. Research of GPR Non-Damaged Test of Grouting behind Lining of Shield Tunnel.
- URL-1 <http://tr.wikipedia.org/wiki/GPR>. Şubat 2012.
- URL-2 <http://www.radartutorial.eu/04.history/hi04.tr.html>. Nisan 2010.
- URL-3 http://tr.wikipedia.org/wiki/Zigana_Ge%C3%A7idi. 8 Kasım 2013.

ÖZGEÇMİŞ

26.04.1988'de Trabzon'da doğdu. İlköğretimini Dumlupınar İlköğretim okulunda ve Cumhuriyet İlköğretim okulunda, liseyi Yunus Emre lisesinde bitirdi. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazandı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nü bitirdikten sonra aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Ağustos 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yer Fiziği Anabilim dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. Evli olup, İngilizce bilmektedir.