



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TÜNEL İMALATINDA YER RADARI YÖNTEMİYLE
TAHRİBATSIZ TEST UYGULAMASI**

Kübra ERGÜVEN

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Fethi Ahmet YÜKSEL

Mayıs, 2015

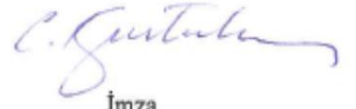
İSTANBUL

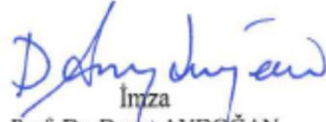
Bu çalışma/....../ 20 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Anabilim Dalı programında Doktora / Yüksek Lisans Tezi olarak
kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:


İmza
Yrd. Doç. Dr. Fethi Ahmet YÜKSEL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


İmza
Prof. Dr. İbrahim KARA
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


İmza
Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ
Kocaeli Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


İmza
Prof. Dr. Davut AYDOĞAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


İmza
Yrd. Doç. Dr. Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma sırasında bilgi ve deneyimini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Fethi Ahmet YÜKSEL' e sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmada, PM Prestij Mühendislik Müşavirlik ve Yeraltı Araştırmaları firmasının lisanslı “Voxler 3 ve Prism 2.5” programı ve T. C. İstanbul Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen “Van-Yoncatepe ve Anzaf Kaleleri Arkeolojik Kazı Çalışmalarının Arkeojeofizik Yöntemler (Ground Penetrating Radar-GPR) kullanılarak planlanması” 74/15052003 No’lu Projede edinilen “Reflex 2D” yazılımları kullanılmıştır.

İstanbul Marmaray projesi Yedikule-Yenikapı ikiz tünellerden tamamlanan T2 tünel hattında GPR test çalışmalarını uygulama imkânını sağlayan Gama-Nurol Adi Ortaklığı Proje Müdürü Nurettin Demir’e verileri kullanmama izin verdikleri için teşekkürlerimi sunarım. GPR test ölçümlerinin yapımını üstlenen, arazi verilerini ve programların kullanılmasına olanak sağlayan PM Prestij Mühendislik Müşavirlik ve Yeraltı Araştırmaları firmasının sahibi Jeofizik Mühendisi Mehmet Şafî YILDIZ ve çalışanlarına ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında her türlü yardımı yapan arkadaşlarım Jeofizik Mühendisi Hazel DENİZ, Rıza Çetin TÜRKMEN, Ufuk AKÇAY ve Enver YENİCİLER’e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem, babam kız kardeşlerime, manevi kardeşim Kübra ÖZCAN, Ayşe ERIŞİK ve kuzenim Merve ALPAY’a şükranlarımı sunarım.

Mayıs, 2015

Kübra ERGÜVEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. TÜNEL YAPI TASARIM ÇALIŞMALARI.....	6
2.1.1. Yapı İnşa Öncesi Çalışmalar.....	7
2.1.2. Yapı İnşa Sırasında Çalışmalar	7
2.1.3. Yapı İnşa Sonrası Çalışmalar.....	8
2.2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ	8
2.2.1. Yumuşak Zeminde Tünelcilik.....	8
2.2.2. Kayada Tünelcilik	9
2.3. TÜNEL İNŞA YÖNTEMLER	10
2.3.1. Aç-Kapa Yöntemi	10
2.3.2. Delme-Patlatma Yöntemi.....	11
2.3.3. Makine İle Tünel Açma	12
2.3.3.1. Tam Kesit Tünel Açma Makineleri (TBM)	12
2.3.3.2. Yarım Kesit Tünel Açma Makineleri (Kollu Makineler)	16
2.3.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM).....	17
2.3.4.1. Çelik Hasır	18
2.3.4.2. İksa Montajı.....	18
2.3.4.3. Püskürtme Beton (Shotcrete).....	19
2.3.4.4. Kaya Bulonu	19
2.3.4.5. Boru Şemsiye Yöntemi	20

2.3.4.6. Zemin Çivisi.....	20
2.4. TÜNELDE ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	22
2.4.1. Kontak (Dolgu) Enjeksiyonu	23
2.4.1.1. Çimento Enjeksiyonu.....	24
2.4.1.2. Kimyasal Madde Enjeksiyonu	25
2.4.2. Jet Enjeksiyonu	25
2.4.3. Yeraltısu Seviyesinin Düşürülmesi.....	26
2.4.4. Zeminin Dondurulması	26
2.4.5. Basınçlı Hava	27
2.5. TÜNEL PROJELERİNDE YAŞANAN JEOLJİK VE ÇEVRESEL SORUNLAR	28
2.5.1. Deprem Etkisi	28
2.5.5.1. Faylanma.....	28
2.5.5.2. Arazi Yenilmesi.....	29
2.5.5.3. Sarsıntı	30
2.5.2. Kıvrımların Etkisi	31
2.5.3. Yeraltısularının Oluşturduğu Tehlikeler Ve Alınması Gereken Önlemler	32
2.5.4. Topoğrafya Ve Tabakaların Etkisi.....	34
2.5.5. Kemerlenme	35
2.5.6. Aşırı Sökülme	36
2.5.7. Kaya Patlatmaları	36
2.5.8. Isı Sorunu	36
2.5.9. Gaz Sorunu.....	36
2.5.10. Gürültü Sorunu.....	37
2.5.11. Beton Kalitesi.....	37
2.6. GPR YÖNTEMİ İLE TÜNEL PROBLEMLERİ ÇÖZÜMLENDİRİLMİŞ ÖRNEK ÇALIŞMALAR.....	38
2.6.1. Zemin/Kaya Ortamının Tanımlanması	40
2.6.2. Fay Yerlerinin Belirlenmesi.....	41
2.6.3. Su Tablasının Belirlenmesi	43
2.6.4. Gömülü Yapıların Belirlenmesi	44
2.6.5. Boşlukların Saptanması	45
2.6.6. Tünel Patlatma Tasarımının İyileştirilmesi.....	47
3. MALZEME VE YÖNTEM	48
3.1. MALZEME.....	48

3.2. GPR YÖNTEMİ	48
3.2.1. GPR Yöntemi Çalışma Prensipleri.....	48
3.2.2. GPR Teorisi	50
3.2.2.1. GPR Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı.....	50
3.2.2.2. Enerji Kaybı ve Sinyalin Sönümlenmesi.....	51
3.2.2.3. GPR Sinyallerinin Yansıması	56
3.2.2.4. Sinyal Hızı ve Derinliğin Belirlenmesi.....	57
3.2.2.5. Penetrasyon Derinliği	59
3.2.2.6. Yapı Özelliklerinin Belirlenebilirliği ve Çözünürlük	62
3.3. GPR VERİLERİNE UYGULANAN TEMEL VERİ İŞLEMLER	65
3.3.1. Süzgeçleme	65
3.3.2. Sıfır Zaman Düzeltmesi	68
3.3.3. Background Removal.....	68
3.3.4. Genlik Kazanç Uygulaması	69
3.3.5. Genlik Renk Fonksiyonunun Düzenlenmesi	70
3.3.6. Hız Analizi	70
3.4. TÜNEL İÇİ KAPLAMA DURAYLILIĞININ ARAŞTIRILMASINDA GPR YÖNTEMİ İLE TAHRİBATSIZ TEST UYGULAMASI (NON- DESTRUCTİVE TESTING/NDT).....	71
3.4.1. Tünellerde İç Kaplama Duraylılık Problemlerin Tanımlanması.....	71
4. BULGULAR	74
4.1. VERİ TOPLAMA.....	74
4.1.1. Tüneli Oluşturan Segmentlerin Arkasına Uygulanan Enjeksiyon İşlemlerin Jeoradar Yöntemi ile Test Edilmesi	75
4.1.1.1. Tünel Hattı Kazı Çalışmaları Hakkında Genel Bilgi	75
4.1.1.2. Tünel Hattında GPR Test Ölçümleri	78
4.1.2. Tünel Hattı Ray Altına Yerleştirilen Prekast Beton İle Dolgu Beton Arasında Kalan Boşlukların Jeoradar Yöntemi İle Belirlenmesi	80
4.1.2.1. Tünel Hattı Kazı Çalışmaları Hakkında Genel Bilgi	80
4.1.2.2. Tünel Hattında GPR Test Ölçümleri	81
4.2. VERİ İŞLEM AŞAMALARI	82
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	84
5.1. DEĞERLENDİRME	84
5.1.1. Tüneli Oluşturan Segmentlerin Arkasına Uygulanan Enjeksiyon İşlemlerin Jeoradar Yöntemi ile Test Edilme İşlemlerinin Değerlendirilmesi.....	84

5.1.2. Tünel Hattı Ray Altına Yerleştirilen Prekast Beton İle Dolgu Beton Arasında Kalan Boşlukların Jeoradar Yöntemi İle Belirlenmesi	89
5.2. SONUÇLAR.....	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	119

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: GPR’ın çalışma prensibi (Hong, 2015).	2
Şekil 1.2: (a) ve (b) Siyah şerit tünel kaplama yansımaları temsil eder ve koyu- gri şerit grout harcı yansımaları temsil eder (Xie ve diğ., 2007).	3
Şekil 1.3: Tünel çalışmasına örnek bir çalışma (Morishima ve diğ., t.y.).	4
Şekil 1.4: Tünelde GPR çalışması ile hasarlı alanların belirlenmesi (Xiang ve diğ., 2013).	4
Şekil 2.1: Tünelde boyuna ve eğilme birim kısalmasına yol açan deprem dalgaları (P, S, R, ϕ açısı deprem dalgalarının tünel eksenine ile yaptığı açıdır) (Arıoğlu ve diğ., 2006).	7
Şekil 2.2: Üsküdar İstasyonu Aç-Kapa Tüneli (www.marmaray.com.tr).	11
Şekil 2.3: Deliklere patlayıcı yerleştirilmesi (http://delmepatlatma.org/tunel-acma-syfdty-97.html).	12
Şekil 2.4: Şiltsiz TBM (Sert Zemin Tünel Açma Makinesi) (https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/single-shield-tbm.html).	13
Şekil 2.5: Marmaray projesinde kullanılan 1. Çamur Şildi (Slurry TBM) (www.marmaray.com.tr).	13
Şekil 2.6: Marmaray projesinde kullanılan EPB-TBM (Öztürk ve Durmuş,2008).	15
Şekil 2.7: Marmaray BC1 projesi tünellerinin yapımı için kullanılacak TBM planı (Lovat,2005).	15
Şekil 2.8: Bir gripper TBM ile birlikte sismik veri toplama gösterilmiştir. ISIS: Birleşmiş Sismik Görüntüleme Sistemi GFZ- Postdam tarafından geliştirilmiştir (Kneb, Kassel ve Lorenz, 2000).	16
Şekil 2.9: Kazı yapan kollu tünel açma makinesinden bir görünüm (Şahkulubey, 2008).	17
Şekil 2.10: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Çelik hasır (Ergüven, 2011).	18
Şekil 2.11: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Çelik iksa montajı (Ergüven, 2011).	19
Şekil 2.12: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Şemsiye Boruları ve Ayna Çivileri (Ergüven, 2011).	21
Şekil 2.13: Şemsiye Boruları (Ergüven, 2011).	21
Şekil 2.14: Marmaray projesi-Yenikapı Turnback Tüneli- “Auger” vasıtasıyla Umbrella Delgisinin yapılması (Ergüven, 2011).	22

Şekil 2.15: Dolgu Enjeksiyonu (Özkan, 2006).....	24
Şekil 2.16: Zemin dondurma (freezing) örnekleri (Harris,1983).....	27
Şekil 2.17: Deprem sırasında bir yeraltı açıklığında gözlenen şekil değiştirme türleri (John ve Zahrah, 1987; Arioğlu ve diğ., 2006).....	30
Şekil 2.18: Antiklinal ve Senklinal eksenini dik olarak kesen bir tünel boy kesiti (Szechy,1970).	31
Şekil 2.19: Antiklinal ve Senklinal eksenini boyunca açılan tünel enkesiti örneği (Szechy, 1970).....	32
Şekil 2.20: Yamaç eğimini zemin tabakalanmasıyla aynı doğrultuda olduğu (a), kıvrımlı tabakalanma (b) ve çatlaklı zemin örtüsü (c) durumlarında yamaç stabilitesinin bozulmasına ilişkin şematik örnekler (Genç, 1983).	34
Şekil 2.21: Zemin basıncın tünel yan duvarlarında (Şekil 2.21 a, b) ve tünel tavanında (Şekil 2.21 c) yoğunlaştığı zemine ilişkin tabakalanma durumları (Genç, 1983).	35
Şekil 2.22: Tabakalı kayalarda düşey gerilme (Canik, 1997).	35
Şekil 2.23: a ve b de GPR uygulama teknikleri kullanılarak Yeraltısı seviyesi, kum/çakıl-anakaya arayüzeylerin haritalanması (Scaife ve Annan, 1991).	41
Şekil 2.24: Nesher Ramle taşocağının görüntüsündeki stratigrafik birimlerin, yapıların ve fayların gösterimi ve GPR görüntüsünün yorumlanması (Davis ve Annan, 1989).	42
Şekil 2.25: Kumlu bir alanda su tablasının GPR kesitindeki görünümü (Stickley ve diğ., 2000).....	43
Şekil 2.26: Kapiler zonun kalınlığı (d),dielektrik sabiti (ϵ_r),yansıma katsayısı genliği (R), (Reynolds, 1997'den düzenlenmiştir).	44
Şekil 2.27: Karayolu üzerindeki kaldırımlar arasında 200 MHz anten kullanılarak GPR çalışmaları ile alt yapı tesisatının belirlenmesi (Porsani vd., 2012).	45
Şekil 2.28: Boşlukların oluşturduğu belirgin yansımalar (http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/RoadwaySubsidence/512GroundPenetratRaadar.cfm).	46
Şekil 3.1: Sinyal ilerlemesi sırasında sinyal gücünü azaltan faktörler (Reynolds, 1997'den düzenlenmiştir).	52
Şekil 3.2: 100 MHz. antenle alüvyal bir ortamda yapılmış bir çalışma (Weeds, 1994).	54
Şekil 3.3: Elektrik iletkenlik ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişkisi (Moorman, 2001).	60
Şekil 3.4: Frekans, ayrırlılık ve derinlik arasındaki ilişki (Moorman, 2001).....	61
Şekil 3.5: Fresnel zonu ve yatay ayrırlılık (Mala Geoscience, 2003'ten düzenlenmiştir).	64
Şekil 3.6: Frekans ortamında basit bant geçişli filtre prensibi ve iki yaygın filtre fonksiyonu: Notch filtre (Sadece tek bir frekansı durduran süzgeçler) ve Butterworth filtre (Cassidy,2009'den düzenlenmiştir).	66

Şekil 3.7: a) Bir GPR izinin ham sinyali, b) “Dewow” süzgeci uygulanmış GPR izi (Cassidy, 2009’dan düzenlenmiştir).	67
Şekil 3.8: 450 MHz GPR kesitindeki sıfır zaman değişim örneği (Cassidy,2009’dan düzenlenmiştir).	68
Şekil 3.9: a) Ham radar profili, b) radar profiline background removal (temel gürültülerin kaldırılması) süzgeç uygulandıktan sonraki görünümü (Prism kullanım kılavuzundan alınmıştır).	69
Şekil 3.10: Arkeolojik bir mezar bölgesi üzerinde toplanan 450-MHz Yer Radarı (GPR) bölümüne uygulanan farklı kazanç fonksiyon örnekleri (AGC, SEC) (Cassidy, 2009’dan düzenlenmiştir).	70
Şekil 3.11: Hiperbol çakıştırma ile hız belirleme (Cassidy, 2009’dan düzenlenmiştir).	71
Şekil 3.12: Tünel/Galeri içinde GPR ölçümlerin konumlandırılması (Takahaski, 2004’ten düzenlenmiştir.)	72
Şekil 4.1: Saha ölçümlerinde kullanılan Yapı Radarı ekipmanı ve özellikleri (http://www.radsys.lv/en/products-soft/products/prod/9).....	74
Şekil 4.2: TBM Tünellerine Genel Bakış.	75
Şekil 4.3: Hidrolik erektör yardımıyla tüneli oluşturan segmentlerin dizimi.	77
Şekil 4.4: Segmentlerin kenarlarına yapılan contalama işlemi.	77
Şekil 4.5: Enjeksiyon Pompaları.	78
Şekil 4.6: Segment taşlarından açığa çıkan su sızıntısı.	79
Şekil 4.7: Tünel içi Yapı Radarı(GPR) yöntemiyle veri toplama çalışmalarına hazırlık.	79
Şekil 4.8: Tünel içi Yapı Radarı (GPR) yöntemiyle veri toplama çalışmaları.	80
Şekil 4.9: Tünel içerisinde prekast elemanların montajı.	80
Şekil 4.10: Tünel içi GPR yöntemiyle veri toplama çalışmaları.	81
Şekil 4.11: Tünel içi Reflex 2D programı ile örnek çalışma; (a) ham veri b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	83
Şekil 5.1: Tünel içi 203 no’lu ringte sol 45° alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı85	85
Şekil 5.2: Tünel içi 203 no’lu ringte sağ 45° alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.86	86
Şekil 5.3: Tünel içi 134 no’lu ringte taç kısmında alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.87	87

Şekil 5.4: (a) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı, (b) -0.39 m derinlik kesitinde yatay yöndeki genlik zarf değerlerindeki değişimi, (c) yatay yöndeki genlik zarf değerlerindeki değişimi	88
Şekil 5.5: Tünel içi 459 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	90
Şekil 5.6: Tünel içi 460 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	91
Şekil 5.7: Tünel içi 461 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	92
Şekil 5.8: Tünel içi 462 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	93
Şekil 5.9: Tünel içi 463 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	94
Şekil 5.10: Tünel içi 464 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	95
Şekil 5.11: Tünel içi 465 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	96
Şekil 5.12: Tünel içi 466 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	97
Şekil 5.13: Tünel içi 467 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	98
Şekil 5.14: Tünel içi 468 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.	99
Şekil 5.15: Tünel içi 459- 468 arası no'lu verilerinin üç boyutlu 2D Radargram görüntüleri. .	100
Şekil 5.16 (devam) : Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi.	101
Şekil 5.16 (devam) : Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi.	102

Şekil 5.16: Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi..103

Şekil 5.17: Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak dolgu beton içerisindeki boşluklu (sarı renkli) alanların görüntülenmesi.....104

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Jeofizik testleri gerçekleştirmek için kullanılan prosedürler	38
Tablo 2.1 (devam): Jeofizik testleri gerçekleştirmek için kullanılan prosedürler	39
Tablo 3.1: GPR yönteminin kullanım alanları.	49
Tablo 3.2: Bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri, n\ bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade eder (Wilchek, 2000).	55
Tablo 3.3: Frekans, ayrırlılık ve derinlik arasındaki ilişki (Mala Geoscience, 2003).	61
Tablo 3.4: Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki (Sensors and Softwares, 1999).	62
Tablo 3.5: GPR parametreleri (dielektrik sabit, elektrik iletkenliği ve anten frekansı) arasındaki ilişki (Takahashi, 2004).	62
Tablo 3.6: Frekans oranına göre bant genişliğine sahip 100 MHz ve 50 MHz GPR antenlerin teorik çözünürlüğü ve darbe genişliği (Annan, 1992; Davis ve Anan, 1989; Ulriksen, 1982'den uyarlanmıştır).	63
Tablo 4.1: Saha ölçümlerinde kullanılan GPR Radar Ekipmanın Özellikleri.....	75
Tablo 5.1: TBM Tüneli Boşluk Enjeksiyonu Kalınlık Ölçümleri.	84

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
σ_v	: Düşey Gerilme
σ_h	: Yatay Gerilme
γ	: Zeminin Birim Ağırlığı
ν	: Poisson Oranı
γ_s	: Suyun Birim Hacim Ağırlığı
u	: Boşluk Suyu Basıncı
z	: Düşey Derinlik
ω	: Açısal Frekans ($2\pi f$)
μ_0	: Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
ϵ_0	: Boşluğun Elektirik Geçirgenliği
μ	: Ortamın Manyetik Geçirgenliği
ϵ	: Ortamın Elektirik Geçirgenliği
K	: Elektromanyetik Dalga Yayınım Sabiti
σ	: Elektrik İletkenliği
σ_{DC}	: Doğru Akım Elektrik İletkenliği
α	: Sönüm Katsayısı
c	: Işık Hızı
R	: Genlik Yansıma Katsayısı
V	: Hız
V_m	: Radyo Dalga Hızı
ϵ_r	: Bağıl Dielektrik Sabiti
μ	: Bağıl Manyetik Geçirgenliği
P	: Kayıp Faktörü
f	: Frekans
λ	: Dalga Boyu
$\sigma_{mak,s}$	: Statik Yüklemeden Kaynaklanan Gerilme
$\sigma_{mak,d}$	: Dinamik Yüklemeden Kaynaklanan Gerilme
σ_{em}	: Beton Emniyetli Dayanımı

Kısaltmalar	Açıklama
GPR	: Groun Penetrating Radar
cm.	: Santimetre
m.	: Metre
km.	: Kilometre
ns.	: Nanosaniye
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
MHz.	: Megahertz
m²	: Metrekare

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

TÜNEL İMALATINDA YER RADARI YÖNTEMİYLE TAHRİBATSIZ TEST UYGULAMASI

Kübra ERGÜVEN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fethi Ahmet YÜKSEL

Yerüstü ve yeraltı betonarme yapılarına zarar vermeden depreme dayanıklılık çalışmalarının tahribatsız test yöntemleri (non-destructive testing) ile uygulanması hem yapının bütünlüğünü korunması hem de hızlı ve ekonomik çözümler sunması açısından tahribatlı yöntemlere göre daha avantajlıdır. Özellikle laboratuvar deneyleri için betonarme yapılarından karot alımı, yapı içerisinde tahribata neden olduğu gibi yalnızca alındığı yeri temsil ettiğinden beton kalitesinin belirlenmesinde yeterli kalmamaktadır.

Tahribatsız test yöntemi olan Jeofizik yöntemler özellikle tünel projelerinin her aşamasında uygulanabilir. Son yıllarda jeofizik uygulamalarından biri olan GPR yöntemi yüksek hassasiyet, yüksek ayırım oranı ve sığ algılama özelliği ile tünel ayna gerisindeki problemli yerlerin belirlenmesinde, tünel kaplama betonu ve iç donatı kalitesinin ölçülmesinde, dolgu işlemlerinin test edilmesinde, yer altı suyu sızıntısını, duvarlar arkası boşluk ve jeolojik sınırların tespit edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma, iki farklı tünel projesi içerisinde tünel imalatında kalite kontrolü için jeofizik yöntemlerden Jeoradar(GPR) kullanılarak gerçekleştirilen test ölçümlerinin değerlendirmesini içermektedir.

İlk tünel projesinde, tünel duvarlarında kullanılan beton kaplama işlemi sonrasında uygulanan enjeksiyon işlemleri test edilmiştir. Tünel yapısında kalıcı destek sistemi olarak kullanılan beton kaplama (segment) ile zemin arasındaki boşluğa uygulanan enjeksiyon malzemesi, zeminde oluşabilecek hareketin önüne geçmekte böylece kazının güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Enjeksiyonun, kaplama ile zemin arasındaki kontağı sağlamada yetersiz kaldığı durumlarda, geçirimsizlik sağlanamayarak su sızıntı problemleri oluşabilir, buna bağlı olarak beton kaplamalarında bozulmalar ve kabarmalar ortaya çıkar. Diğer bir yandan destek sistemine beklenenden daha fazla yük etki ederek gerilmelere neden olacaktır. Bu gerilmeler elastik sınırlar içerisinde kalmayarak tünel kaplamasında şekil değiştirmelere ve deformasyona neden olabilir. Test lmleri sonucunda segmentlerde gelişi güzel enjeksiyon dalgileri yapılmadan, segment arkasındaki enjeksiyon yayılımı, kalınlığı ve içinde boşluk kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir.

İkinci tünel projesinde ise, tünel hattında ray altına yerleştirilen prekast beton elemanlar ile yerinde dökülen dolgu beton arasında boşlukların kalıp kalmadığı incelenmiştir. Tünel yapısında tünel tabanları prekast beton elemanlar ile ideal bir alt konstrüksiyon teşkil eder. Prekast beton fabrikada imal edilmiştir. Prekast beton yerine monte edilirken, hem prekast betonun sağ ve sol kenarından hem de prekast beton içine bırakılan iki adet delikten beton dolgusu yapılmıştır. İleriki süreçte tünel içinde çalışma koşullarından dolayı, yeterli vibrasyon ve basıncın beton dökümü esnasında uygulanamamasından kaynaklanan problemler ortaya çıkabilir. Jeoradar (GPR) test ölçümleri sonucunda gerek beton dolgu içinde gerekse beton dolgu ile prekast beton arasında boşlukların kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir.

Mayıs 2015, 136 Sayfa.

Anahtar kelimeler: Yapı radarı, Jeofizik, Tünel, Yapı Jeofiziği, Tahribatsız Test Yöntemi

SUMMARY

M.Sc. THESIS

APPLICATION OF NON -DESTRUCTIVE TESTING WITH GROUND PENETRATING RADAR METHOD IN THE CONSTRUCTION TUNNEL

Kübra ERGÜVEN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Fethi Ahmet YÜKSEL

The application of the earthquake - resistance studies with non-destructive testing without causing any damages to surface and underground concrete structures more advantageous compared to destructive methods in terms of the protection of the integrity of the structure and quick-economic solutions. Exclusively, coring process from reinforced concrete structures for laboratory tests as causing damage in the structure, it can not be sufficient in determination of the concrete quality since it only represents the point where the coring has been taken.

Geophysical methods of non-destructive testing method can be applied in every stage of the tunnel projects in particular. In recent years, GPR method of geophysical applications with high precision, high separation rate and shallow detection feature is widely used used to determine problematic places behind the tunnel face, to measure the tunnel concrete lining and interior reinforcement quality, to test the filling process, to detect the groundwater leak and to avoid behind the wall and geological boundaries.

This study conducted in two different tunnel projects that test measurements performed for quality control of tunnel construction using GPR method. Using GPR is one of the geophysical method for quality control in the manufacture of tunnel.

In the first tunnel project, after the concrete pavement work on the tunnel walls has been completed. In the tunnel structure, injections material applied into the voids between the ground with concrete lining (segment) as using the permanent support system, prevent movement that may occur in the ground, and thus provide a secure progress of the excavation. In cases where the injection is not adequate to provide contact between ground and walls water leakage problems may occur because of the failure to provide the impermeability, and due to this, distirtion and blistering can be occures. On the other hand, an overload beyond expected on support system will be applied and cause stresses. This stresses may cause strain and deformation on tunnel linning by not staying within the elastic limit. Result of test measurements processing without making arbitrary injection drilling in on segment, It has been shown will be determined that injection spread, thickness and whether remain voids behind the segment.

It has been examined that if any voids remained between the precast concrete and filling concrete poured on the ground along the tunnel line. The floor of tunnel constitutes an ideal sub-construction with precast concrete elements in the tunnel structure. Precast concrete was produced in the factory. While precast concrete is mounted instead the concrete filling is made both precast concrete edge of the right and left and existing from two holes in precast concrete. It can pose problems in subsequent process which adequate vibration and pressure can not be applied during concrete pouring due to the working conditions in the tunnel. Consequently it is shown that whether voids remained both inside concrete filling and between this filling and precast concrete as a result of GPR test mesurements.

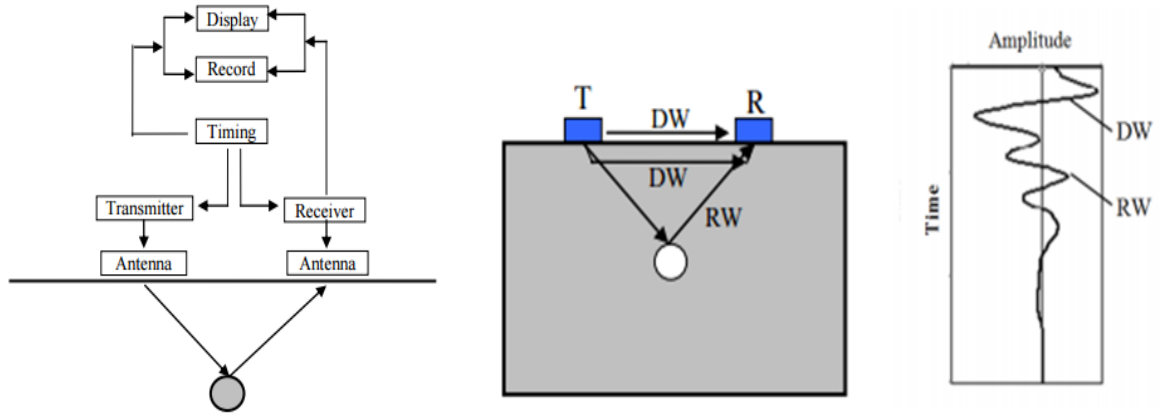
May 2015, 136 Page.

Keywords: Construction Radar, Geophysics, Tunnel, Construction Geophysics, Non-Destructive Testing Method

1. GİRİŞ

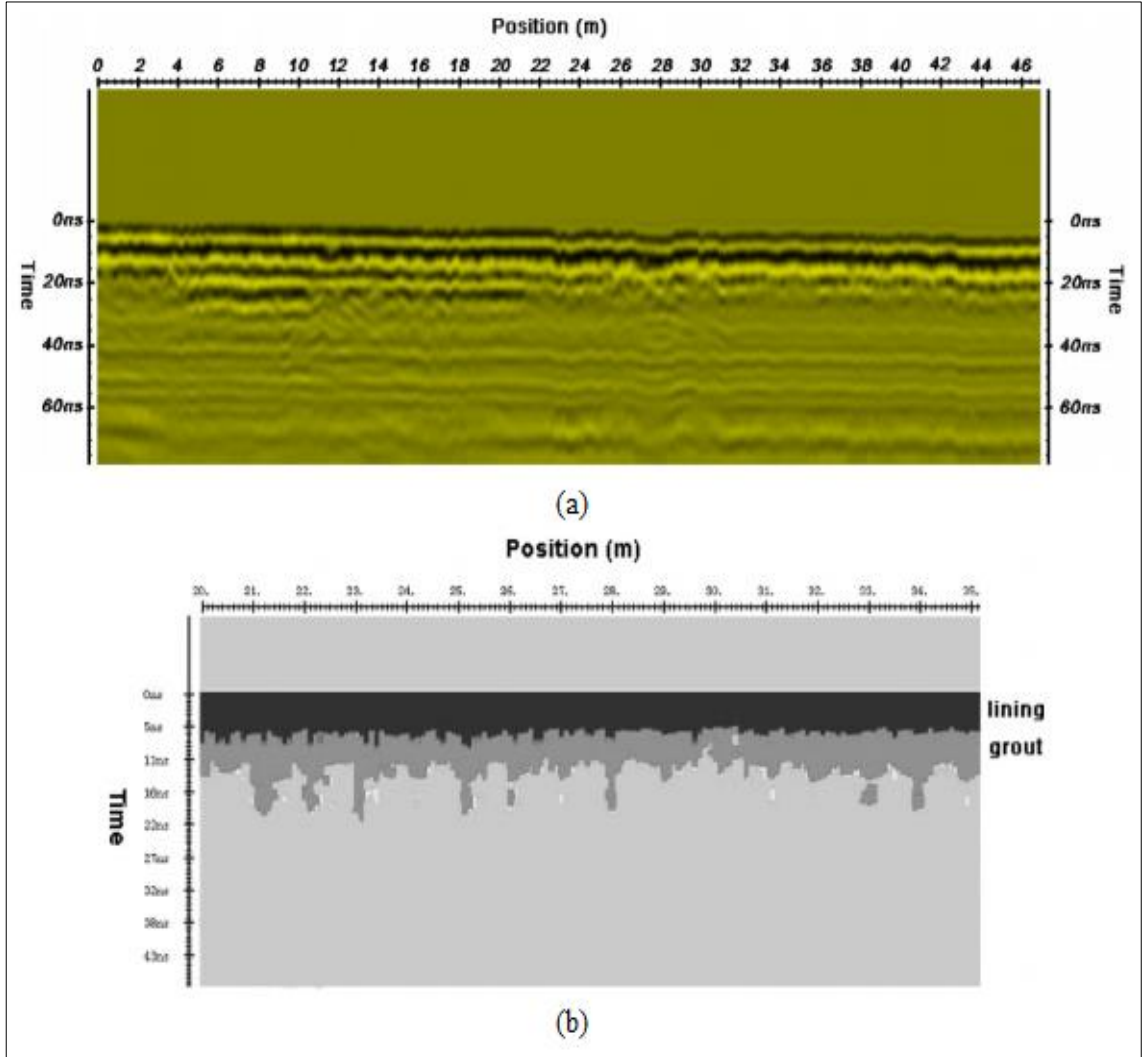
Yaşlanma, çevresel faktörler, artan yük, kullanım değişikliği, insan/doğal faktörlerinden meydana gelen zararlar, yetersiz veya kötü bakım ve ertelenmiş onarımlardan dolayı işlevsel olan bir tünel yapısının hala güvenilir olup olmadığını anlamak için yapı ya da elemanlara herhangi bir negatif etki yaratmadan tahribatsız yöntemler, yıkıcı metotlara göre daha çok arzu edilir. Tahribatsız muayene yöntemleri yapılar içinde görsel, güç tabanlı metotlar, sonik ve ultrasonik, manyetik, elektrik, termografi, GPR-radar, radyografi ve endoskopi yöntemler olarak ayrılabilir. Güç tabanlı yöntemlerden olan geri tepme (Schmidt Hammer) ve penetrasyon (the Windsor Probe) testleri ile malzemelerin yüzey sertliğini ölçmek, yüzey basınç dayanımını hesaplamak ve yapı kalitesinin kontrolünü sağlamak için ölçüm yapılır (Balaguer ve diğ., 2014; Basu ve diğ., 2004, Malhotra, 1974). Yine birçok araştırmacı Sonik metotta çekiç darbeleriyle oluşturulan sonik dalgaların seyahat zamanından ve Ultrasonik puls hızı tekniğini kullanarak P dalgalarının hızından beton kalitesini belirlemiştir (Xia, 2007; Sansalone, 1997; Carino, 2001; Balaguer ve diğ., 2014; Basu ve diğ., 2004; Malhotra, 1974, Toutanji, 2000). Manyetik metotlar, donatıların konumunu belirlemek için kullanılır. Ayrıca demir donatılarının konumlandırılması için korozyon kontrolünde önemli bir metot olduğunu gösterir (Makar ve diğ., 2001; Sawade ve diğ., 2007; Balaguer ve diğ., 2014). Elektrik metotları tünel parçalarının denetimi için direnç ve potansiyel ölçümlerini içerir. Elektrik direnci, donatı korozyonlarının neden olduğu elektrik potansiyel farklılıklarına göre donatı demiri ve yüzey arasındaki direnç ölçümlerini içerir (Polder, 2001; Balaguer ve diğ., 2014; Lataste, 2003; McCarter, 2004; Nakamura, 2008). Kızılötesi Termografi ölçümlerinde kızılötesi kayıt teknikleri ile yüzeyde sıcaklık dağılımının görsel sunumunu sağlar. Yüzeydeki sıcaklık yüzey boyunca ısı akışı temsil eder, sırayla yapının mekanik ve hidrolik süreksizliklerinden etkilenmektedir. Sonuç olarak, yüzeydeki termal süreksizlikler alttaki yapının içindeki anormallikleri yansıtır (Richards, 1998; Wu ve diğ., 1998; Avdelidis, 2004; Balaguer ve diğ., 2014).

Jeofizik uygulamalardan biri olan GPR yöntemi güvenli ve hızlı bir tahribatsız muayene yöntemidir. GPR yöntemi, yakın yüzey araştırmaları için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik, jeofizik yöntemidir. Bir yer radarı verici anten, alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçıdan oluşmaktadır. Bir vericiden 10 MHz ile 1000 MHz frekansları aralığında herhangi bir frekansta sağlanan elektromanyetik enerji bir anten yardımıyla yer içine doğru gönderildiğinde yerin dielektrik özelliğinin değiştiği ara yüzeylerde yansımaya uğrar ve bir dalga cephesi oluşturur. Verici antenin gönderdiği yansımaya uğraya bu enerjinin bir alıcı anten yardımıyla algılanması sonucunda gecikme zamanı belirlenir. Bu işlem bir profil boyunca yinelenerek yerin derinlemesine kesiti çıkarılır.



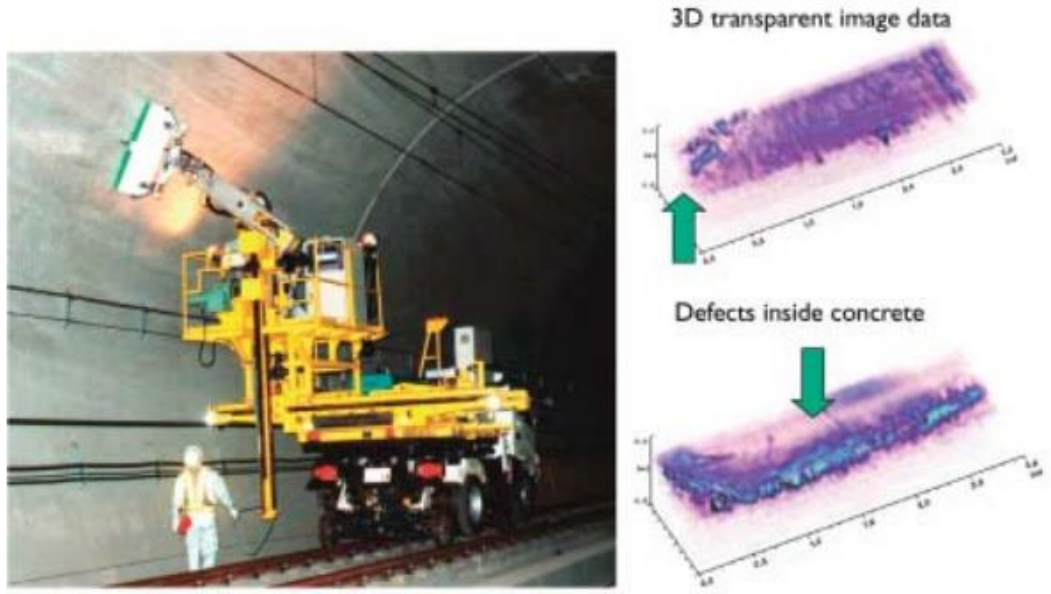
Şekil 1.1: GPR'in çalışma prensibi (Hong, 2015).

Betonarme yapılarda kullanılan yapı radarı donatılarının sayılarını, yerlerini, bağlantılarını, süreklilikleri, aralıkları ve çaplarını bulmak, sıva payını belirlemek için kullanılır (Ercan, 2003). GPR yöntemi kayalık alanlarda tünel yapılarını kontrol etmede başarıyla kullanılmaktadır (Benson, 1995; Grodner, 2001; Zhong ve diğ., 2002; Sakurada ve diğ., 2002; Cardarelli ve diğ., 2003). Bununla birlikte yumuşak zeminlerde tünel kaplamaların arkasındaki enjeksiyon yayılımını test etmek için de kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de Shanghai Metro hattında GPR ile tahribatsız test standardı ortaya konmuştur (Xie ve diğ., 2007).

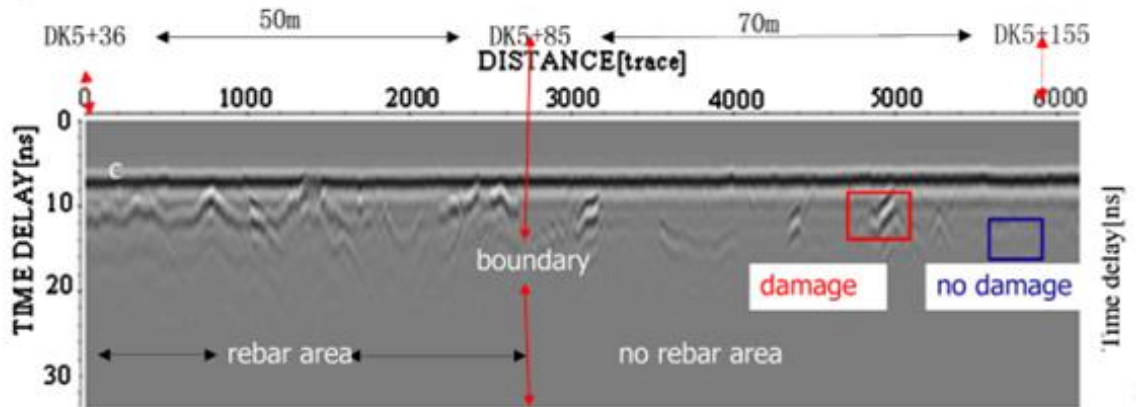


Şekil 1.2: (a) ve (b) Siyah şerit tünel kaplama yansımalarını temsil eder ve koyu- gri şerit grout harcı yansımalarını temsil eder (Xie ve diğ., 2007).

GPR ile aynı zamanda kalite kontrol oluşturmada örneğin (Şekil 1.2)'de görüldüğü gibi kaplama beton kalınlığı, betondaki mevcut çatlaklar, boşluklar ve yer altı suyu sızıntısını belirleme için de kullanılır (Wang ve diğ., 2007). Tünel imalatı sırasında GPR kullanılarak tünel içi imalat kalitesini ve statik-dinamik yükler etkisi altında gerilmeler sonucu oluşan deformasyonların yarattığı sorunların belirlenmesini sağlar (Şekil 1.4) (Xiang ve diğ., 2013).



Şekil 1.3: Tünel çalışmasına örnek bir çalışma (Morishima ve diğ., t.y.).



Şekil 1.4: Tünelde GPR çalışması ile hasarlı alanların belirlenmesi (Xiang ve diğ., 2013).

İtalya merkezde bir içme suyu kaynağının toplama tüneller içinde toplama havzasındaki toplanan GPR, sismik kırılma ve sismik tomografi' den gelen verilerle bütünleşik bir değerlendirme ve yorumlama yapılmıştır. Kaya kırılması ve tünel beton kaplamanın eskimesiyle toplama havzası şeklindeki yapılarda yapısal kararsızlığa neden olarak heyelana yol açtı. Heyelana yakın kayanın kararlılığını değerlendirmek için jeofizik araştırmalar, su kirliliği ve daha fazla heyelan riskini önlemek için sondaj kuyuları ve geoteknik testler tercih edilmiştir. Sismik tomografi ve 200 MHz antenlik GPR verilerinin bütünleşik olarak yorumlanması bazı elastik karakteristiklerin

değerlendirilmesi ve kayadaki devamsızlıkların belirlenmesi ile sonuçlanmıştır. Sismik kırılma veri ve 450 MHz anten verilerinin bütünleşip tanımlayarak, tüneli çevresindeki gevşemiş alanı ve göçük içindeki kütlenin tespiti ve 225 MHz GPR verisi ile de masif kayanın ve beton kaplama arasındaki kontağın kalitesini değerlendirilmek için kullanılmıştır. Araştırılan bölgede radar verileri süreksizliklerin yerleri ve sayıları hakkında bilgi verirken, sismik yöntemler ise ortalama elastik özelliklerin dağılımı ile ilgili tahminler sağlar. Sismik yöntemlerden elde edilen P dalga hızları ile birlikte GPR’ dan belirlenen yansıma geometrilerinin kombinasyonu ile yorumlanması belirsizlikleri en aza indirmiştir. Böylece jeofizik verileri birbirleri ile korelasyonu elde edilerek yapılan yorumlamalarda birbirlerini destekleyen anlamlı ilişkiler ortaya çıkar (Cardarelli, 2003).

Test amaçlı gerçekleştirilen bu çalışmada imalatı tamamlanmış tünel hattında oluşabilecek problemlerin önüne geçmek amacıyla jeofizik yöntemlerden biri olan GPR yöntemi uygulanmıştır. Tez kapsamında GPR yönteminin özellikleri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Çalışma alanda Zond 12e markalı korumalı (shielded) olan 1500 MHz’lik anten kullanılmıştır. Ölçüm sonucunda elde edilen verileri belirginleştirmek ve yorumlanmalarında kolaylık sağlamak amacıyla yapılan veri işlem aşamaları açıklanmıştır. Bu yöntem ile yapılan ölçümler sonucunda çalışma alanından elde edilen veriler toplanmış, veri işlem aşamaları ile gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra yoruma hazır hale getirilmiştir. Son olarak bu çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

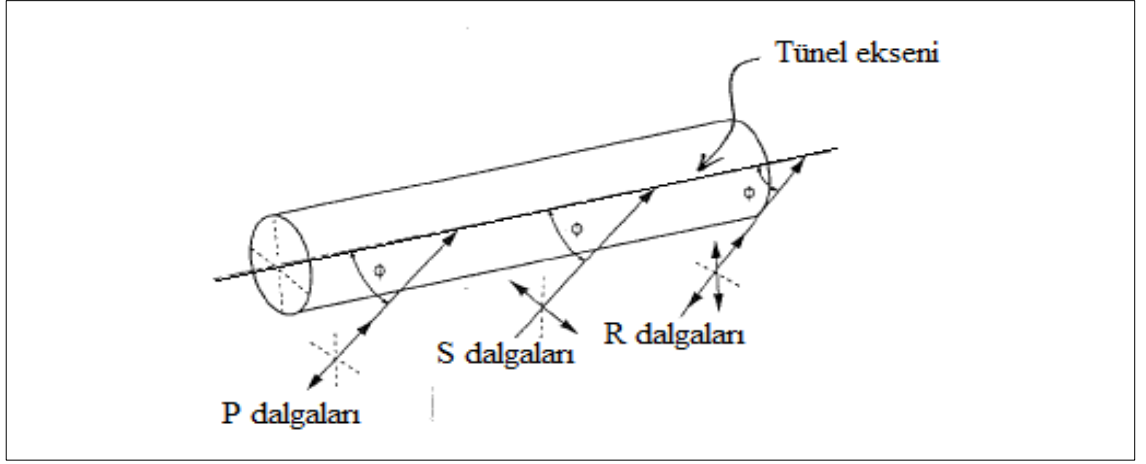
2. GENEL KISIMLAR

2.1. TÜNEL YAPI TASARIM ÇALIŞMALARI

Yer altı yapılarında (metro, tren, karayolları tünelleri) kazıya başlanmasıyla zemin/kaya ortamının doğal dengesi bozulmakta, ortamın jeolojik geçmişine, geoteknik özelliklerine bağlı olarak deplasmanlar meydana gelmekte ve bu durum neticesinde de mühendislik müdahaleleri gerektirmektedir. Yeraltı yapılarının statik ve dinamik (deprem) yükler altında en düşük risk oluşturacak şekilde tasarlanması için jeofizik çalışmaları oldukça önemli bir yere sahiptir. Şev stabilitesi, oturma, taşıma gücü problemleri statik yükler nedeniyle oluşmakta, yamaç stabilitesi, zemin büyütmesi, sıvılaşma ise dinamik yüklerin oluşturduğu problemlerdendir.

Tünel tasarımında statik yüklere göre projelendirilmiş ve uygulanmış yer altı betonarme yapıları özellikle depremin meydana getirdiği ilave dinamik yükleri ve buna bağlı olarak oluşan şekil değiştirmeleri elastik sınırlar içerisinde kalmalıdır. Çünkü deprem sırasında metro veya tünel gibi sık ve uzun yeraltı yapıları zemin ile birlikte deforme olduklarından, zeminin kendi içindeki farklı deformasyonlar doğrudan yeraltı yapısına deformasyon olarak iletilmektedir. Bu durum yeraltı yapısı üzerinde önemli kuvvetler oluşturabilmektedir (Aykaç, 2005). Deprem projelendirme çalışmaları yeni açılacak tünellerde uygulanmalı ve mevcut tünellerin güvenliği açısından belirli periyotlarda özellikle bir büyük deprem sonrasında deforme olan lokasyonları belirlemek jeofizik yöntemlerle yapıya hasar vermeden yerinde hızlı ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

Deprem dalgaları Şekil 2.1’de görüldüğü gibi tünel eksenine göre açıya göre tünele etkir (Power ve diğ., 1996’dan alıntılan Hashash ve diğ., 2001). Şöyle ki P dalgası söz gelimi $\phi=90^\circ$ ise daha açık deyişle “fay-enerji boşalımı” tünel eksenine dik konumda ise tünelde boyuna deformasyon oluşturmazdır (Aktaş, 2009).



Şekil 2.1: Tünelde boyuna ve eğilme birim kısalmasına yol açan deprem dalgaları (P, S, R, ϕ açısı deprem dalgalarının tünel eksenine yaptığı açıdır) (Arioğlu ve diğ., 2006).

2.1.1. Yapı İnşa Öncesi Çalışmalar

Tünel çalışmalarına başlamadan önce yüzey jeolojisi incelemeleri, jeofizik araştırmalar, yerinde deneyler ve laboratuvar çalışmaları yapılır. Bu çalışmalarda amaç;

- Tünel güzergâh yolunu, kazının derinliğini ve yer altı tesisat ağının yerlerini belirlemek;
- Tünel duraylılığını etkileyecek jeolojik problemlerin (fay zonları, boşlukları, litolojik farklılaşmayı, zemin/kayaç sınırı, yer altı su seviyesi, düşey/yatay süreksizlikleri vb.) tespit edilmesini sağlamak,
- Zemin/kaya ortamında açılacak tünel yapısının statik ve dinamik (deprem) yükler altında göstereceği davranışların belirlenmesi için sismik risk analiz harita projelerini oluşturmak,
- Uygun kazı yöntemini, çalışma alanında zemin/kaya yapısına göre kullanılacak makine seçimini ve uygulanacak iksa yöntemini belirlemek.

2.1.2. Yapı İnşa Sırasında Çalışmalar

Tünel yapım çalışmaları sırasında yapının duraylılığına etkileyecek problemlerin belirlenmesi için sondaj çalışmaları, yüzey ve tünel içi jeofizik araştırmaları, laboratuvar çalışmaları için örnekler alınabilmektedir. Bu çalışmalar ile güvenli kazı ve sürekliliği sağlamak için tünel ayna gerisindeki;

- Kırıklı, bozuşmuş zonları ve boşlukları,
- Zemin/kaya geçişlerini,
- Tünel hattındaki genişleme ve daralmaları,
- Ani su baskınlarını,
- Kazıdan etkilenebilecek yapılarda meydana gelen oturmaları,

belirleyerek gerekli önlemlerin (zemin iyileştirmesi, uygun kazı makinesi) alınması sağlanır.

2.1.3. Yapı İnşa Sonrası Çalışmalar

Tamamlanmış tünel çalışmalarının zamana bağlı olarak kullanım sıklığı, mevsimsel değişimler ve depremin oluşturduğu ilave dinamik yükler altında meydana gelen deformasyonlar hem tünel yapısını hem de tünel çevresinin güvenliğini tehdit eder. Jeolojik-jeofizik araştırmalar ve laboratuvar çalışmaları ile tünel kalitesinin araştırılması ve güvenliğin sağlanması için problemli yerler belirlenerek gerekli iyileştirmelerin yapılması sağlanır.

2.2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Zeminlerin içerdikleri su miktarına, litolojiye bağlı olarak yumuşak/gevşek zemin ve sağlam zemin olarak ikiye ayrılır (Canik, 1997).

2.2.1. Yumuşak Zeminde Tünelcilik

Yumuşak zeminler; hareketli zemin, akan zemin, çok hızlı akan zemin, sıkışan zemin ve şişen zemin olarak sınıflandırılabilir.

“ Canik (1997) yumuşak zeminlerde tünel açılmaya başlanınca tavan ve yan duvarlar kendi kendilerini tutamazlar. Tabanda da kabarmalar ve çukurlaşmalar oluşur. Tünelde tavan ve yanların desteksiz durabilme kabiliyetine kemerlenme özelliği denir. Bu, tavandaki birimlerin litolojisine, yapısal durumuna, içindeki gerilme ve makaslama kuvvetlerine, büyüklüğüne ve basınç dirençlerine bağlıdır.”

Yumuşak zeminler düşük taşıma gücüne sahip olup genellikle suya doygun zeminlerdir. Bu tür zeminlerde tünel açılırken veya tünel imalatı tamamlandıktan sonra da yer altı suyu problemleri yaşanmaktadır. Yer altı suyu doygun zeminlerin şişmesine

ve ayrıca zemin segment arasındaki boşluğu dolduran dolgu malzemesi şişme eğiliminde ise meydana gelecek basınç ile kaplamaya zarar verir ve tünel stabilitesine etki edecek daha büyük problemlere yol açar. Su drenaj yöntemiyle veya açılan sondaj kuyuları ile su seviyesi düşürülmeli ve suyun gelişini önlemek için gerekli enjeksiyon çalışmaları yapılmalıdır.

Ankara’da yer altı su seviyesi yüksek killi ve allüvial birikintisi olan bir ortamda klasik yöntemlerle Kızılay Metro Tüneli açılmaya çalışılmıştır. Tünel çalışmasında benimsenen (Tabak ve diğ., 1994) geçirimsiz beton perde ile yüzeyden başlatılan inşaat yöntemi nedeniyle yer altı su seviyesi -7,80 m den -2,65 m’ye yükseltilmiş ve doğal mecrasından akan su yönlendirilmeden önü kesilmiştir. Beton perde ile önü kesilen su zemin ortamındaki mevcut kum bantları şişmiş ve çok sayıda yer altı su cephelerinin oluşmasına yol açmıştır. Bu da ortamın boşluk suyu basıncının artmasına neden olmuştur. En önemli hata geçirimsiz perde arkasında biriken su boşaltılmayıp artan basınçla birlikte beton perde ani olarak yıkılmıştır (Özaydın, 2007).

2.2.2. Kayada Tünelcilik

Kaya içerisindeki gerilmeler zemine göre daha fazladır. Derinlerdeki kayalar, üzerlerindeki örtü tabakasının ağırlıklarından kaynaklanan gerilmelere ve tektonik kökenli (fay vb.) diğer gerilmelerin etkisi altındadır. Bu gerilmeler hem düşey hem de yatay olarak tünel yapısına etki etmektedir. Düşey gerilmeler taban ve tavan boyunca, artan yanal gerilmeler ise yan duvarlar boyunca etkiyerek istenmeyen deformasyon olaylarına neden olacaktır. Bunlar birincil gerilmeler olarak adlandırılır. İlk olarak düşey gerilme örtü kalınlığına eşittir, derinliğe bağlı olarak da artmaktadır. Düşey ve yatay gerilmeler (Akyol, 2002; Karpuz, 2008; Arıoğlu ve diğ., 2004);

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (2.1)$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (2.2)$$

$$k = \nu / (1 - \nu) \quad (2.3)$$

formülleri ile hesaplanırlar.

Burada;

σ_v = Düşey gerilme (İncelenen noktadaki jeolojik basınç),

γ_s = Örtü tabakasının toplam birim hacim ağırlığı,

z = Düşey derinlik,

σ_h = Yatay gerilme,

ν =Poisson oranı,

olarak ifade edilir.

Poisson oranının genel olarak 0.15 ile 0.35 arasında değiştiği ve kayalar için ortalama 0.25 olduğu kabul edilirse: yatay gerilme düşey gerilmenin 1/3 ü kadar olup (Akyol, 2002);

$$\sigma_h = \frac{1}{3} \cdot \sigma_v \quad (2.4)$$

şeklinde gösterilebilir.

Kaya içinde yapılan kazıda, ortamda oluşan ikincil gerilmelerin ve yerçekimi etkisiyle, tavanda ve yan duvarlardaki kayalar açılan boşluğa doğru hareket etmek isterler ama kayalar birbirlerine dayanarak belli bir zamana kadar desteksiz durabilme özelliğine sahiptir. Bu olaya kemerlenme denir. Desteksiz durabilme zamanı jeolojik süreksizliklere, örtü kalınlığına ve kazılan açıklığın uzunluğuna bağlıdır. Bu koşullar altındaki kayanın duyarlılığını sağlayacak tahkimat tasarımları yapılmalıdır.

2.3. TÜNEL İNŞA YÖNTEMLERİ

2.3.1. Aç-Kapa Yöntemi

Aç kapa yöntemi, (Şekil 2.2), genellikle sıkı tünel inşasında (metro istasyonları, demiryolları vb) kullanılmaktadır. Aç kapa yönteminin uygulanacağı alanda öncelikle yeraltında bütün altyapılar (su, elektrik vb.) inşaat alanından uzaklaştırılmalıdır. Yer altı suları varsa su seviyesi düşürülmeli veya su derin kuyulara drene edilmelidir. Bu

yöntemde yer altı kazı boşluğunun yanları, betonarme kazık veya beton duvar perdesi (diyafram duvar vb.) ile desteklenir. İki diyafram duvarı birbirine paralel olarak yerleştirilir ve yandan etkileyen toprak basıncı dengelenmeye çalışılır. Duvarların arasındaki alan kazılarak tünel inşa edilir ve en son olarak tünelin kaplaması yapıldıktan sonra üzeri tekrar hafriyat malzemesi ile örtülür.



Şekil 2.2: Üsküdar İstasyonu Aç-Kapa Tüneli (www.marmaray.com.tr).

2.3.2. Delme-Patlatma Yöntemi

Sağlam kayalarda açılacak tünel inşa faaliyetlerinde delme-patlatma yöntemi uzun yıllardır kullanılmaktadır. Delme-patlatmadaki amaç, çalışılan tünel aynasındaki kaya kütlelerini kontrollü bir şekilde parçalayarak yeraltında ilerlemeyi sağlamaktır (Şekil 2.3). Tünel patlatmalarında her ilerleme için, delme, şarj, patlatma, havalandırma, tarama, tahkimat (bulon, süren, hasır, iksa), yükleme, taşıma ve yeni atım için hazırlık yapılarak kısa zamanlı-planlamalı bir döngü oluşturulur. İyi bir patlatma tasarımı tünel çevresi zarar görmeyecek şekilde olmalıdır. Bunun için patlatma yapılacak kayacın yapısal jeolojik/jeofizik özelliklerine uygun bir patlatma tasarımı yani delgi aygıtı, patlayıcı maddenin cinsi ve miktarı, delik dizaynı planlanmalıdır.

Delme teknikleri pnömatik delmeden, elektrikli-hidrolik jumbolara doğru çok yüksek kapasitelerde delik açacak şekilde geliştirilmiştir. Patlayıcılarda Emulite ve Dynamex M gibi modern patlayıcılar sayesinde minimum zehirli gazlarla iyi bir oksijen balansı

sağlanmıştır. NONEL gibi elektriksiz ateşleme sistemleri şarj zamanını kısaltmış ve çalışma sırasında elektrik tehlikesine karşı duyarsız olduğundan patlatma faaliyetlerine daha fazla emniyet getirmiştir (Çeçen, 2007; Karpuz ve Hindistan, 2008).

Bu yöntemle tünel aynasına önceden belirlenmiş patlayıcıların yerleştirileceği delikler açılmaktadır. Açılan deliklere önceden hesaplanmış miktarda patlayıcılar yerleştirilir (Şekil 2.3). Deliklerde bulunan patlayıcılar ateşlenmekte ve patlatmadan meydana gelen gazların giderilmesi için havalandırma yapılmaktadır. Düşme ihtimali olan kayaç parçaları düşürülmekte, gerekli durumlarda yeni açılan kısma iksa yapıldıktan sonra çıkan kazı malzemesi taşınmaktadır (Kaya, 1983).



Şekil 2.3: Deliklere patlayıcı yerleştirilmesi (<http://delmepatlatma.org/tunel-acma-syfdty-97.html>).

2.3.3. Makine İle Tünel Açma

- Tam Kesit Tünel Açma Makineleri (TBM)
- Yarım Kesit Tünel Açma Makineleri (Kollu Makineler)

2.3.3.1. Tam Kesit Tünel Açma Makineleri (TBM)

TBM makinelerinin tasarımı, tünel iç kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir ve çalıştıkları formasyonlara göre sınıflandırılır (Şekil 2.4 ve Şekil

2.5). Her türlü zemin ortamına uyum sağlar ve hem sert kaya hem de yumuşak zemin ortamlarında kullanılır



Şekil 2.4: Şiltsiz TBM (Sert Zemin Tünel Açma Makinesi) (<https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/single-shield-tbm.html>).



Şekil 2.5: Marmaray projesinde kullanılan 1. Çamur Şildi (Slurry TBM) (www.marmaray.com.tr).

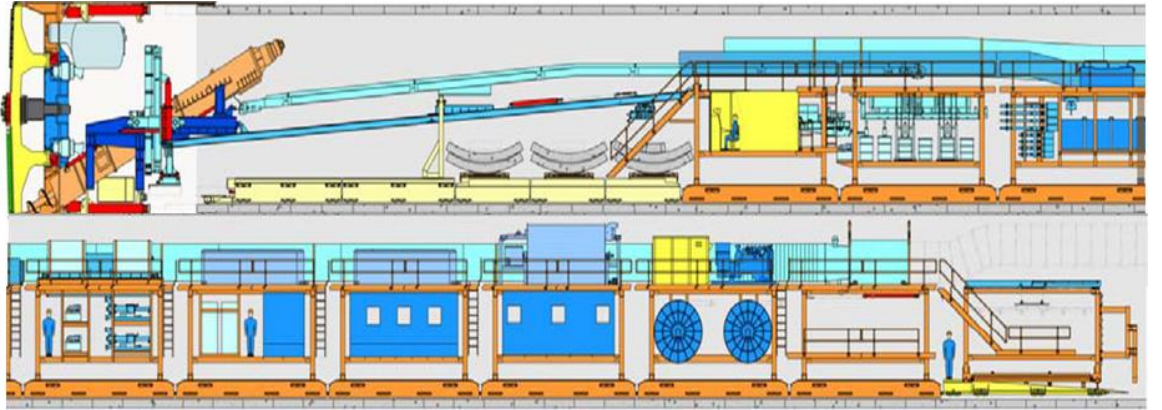
2.3.3.1.1. Toprak Basıncı Dengeleme Makinesi (EPB)

Arazi basınçlarını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya’da 1960-70’li yıllarda görülmeye başlamıştır. (Maidle, 1996). Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır.

Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, “bizzat arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi” diye tanımlanabilir (Fiarant, 1994). Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 10 bara (1MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde yapılabirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının %10-15 veya daha az olduğu durumlardır. EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem keskili) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerinin (slurry machines) yerlerinin almaktadırlar (Çınar ve diğ.).



Şekil 2.6: Marmaray projesinde kullanılan EPB-TBM (Öztürk ve Durmuş,2008).



Şekil 2.7: Marmaray BC1 projesi tünellerinin yapımı için kullanılacak TBM planı (Lovat,2005).

TBM makinesi üç kısımdan oluşur;

- Baş (0-10 m)
- Gövde (10-20 m)
- Kuyruk (20-110 m)

Baş; kesici kafa ve kesikilerin bulunduğu bölümdür. Gövde; helezoni konveyör, pistonların, motorların, enjeksiyon sistemi, köpük sistem bileşenlerinin yer aldığı ve betonarme segmentlerin yerleştirildiği bölümdür. Kuyruk; bu bölge TBM'in lojistik,

elektronik ve havalandırma sistemlerinin bulunduğu bölüm olup TBM kalkanının gerisinde kalan betonarme tünelin üzerinde yer alır. TBM'in tüm kontrollerinde izlendiği operatör kabini de bu bölümde yer almaktadır.



Şekil 2.8: Bir gripper TBM ile birlikte sismik veri toplama gösterilmiştir. ISIS: Birleşmiş Sismik Görüntüleme Sistemi GFZ- Postdam tarafından geliştirilmiştir (Kneb, Kassel ve Lorenz, 2000).

Tünel ayna kazısı ilerisindeki değişik zemin koşulları hakkında bilgi edinmeyi sağlayacak tünel içi “sismik çalışmaları” yapılmaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere TBM makinesine monte edilen sismik alıcılarla tünelin devamında ve çevresinde yayılacak cisim ve yüzey dalgalarının oluşturularak ortam içinde yansıyan dalgalar kayıt edilir ve depolama işlemi için bilgisayara aktarılır. Böylece yüzeyden ölçüm imkanı bulunmayan projelerde tünel hızını etkilemeyecek ve tünel kazı çalışmalarıyla beraber yürütülerek, kayaçlardaki bozulma zonları, kalınlık ve derinlikleri, kırıklı ve boşluklu kısımları, ani su baskınları, ilerleme yönündeki genişleme ve daralmaları, toprak/kaya geçişleri, sökülebilirlik derecelerini, kaya kalitesindeki değişimleri ve farklı özelliklere sahip zonların (fay zonu) yerlerini tespit etmek mümkündür.

2.3.3.2. Yarım Kesit Tünel Açma Makineleri (Kollu Makineler)

Kollu makineler tam kesit tünel açma makinelerinden farkı;

- Dairesel olmayan kesitlerde kullanılır,
- Aynayı parçalı bir şekilde kazar,
- Manevra kabiliyetleri yüksek olduğunda istenildiği gibi yönlendirilebilir,
- Daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar,
- Farklı kazı koşullarında kullanılabilirliği,

- Bu makineler tek bir parça değil, birçok parçadan oluşmaktadır. Bu avantajı ile hem istenilen yere nakliyesi kolay olur hem de değişen formasyon şartlarına uyum sağlar.



Şekil 2.9: Kazı yapan kollu tünel açma makinesinden bir görünüm (Şahkulubey, 2008)

2.3.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönetimi'nde kazı sonrası oluşan ikincil gerimler deformasyona neden olacaktır ve oluşan deformasyonun bir kısmının kaya/zemin ortamına, bir kısmını ise destek elemanlarına taşıttırılması esasına dayanmaktadır.

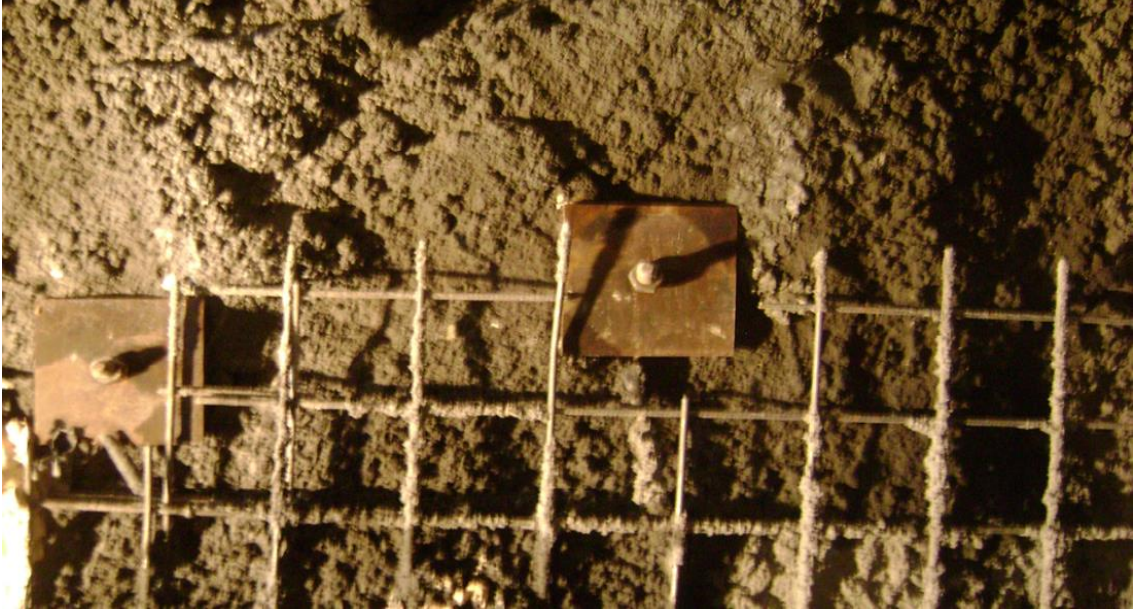
Kazı aşamaları sırasıyla; üst yarı, alt yarı ve taban (invert) aşamalarından oluşur. Kazılarda genellikle roadheader, beko, jumbo vb. tipi kazıcılar kullanılmaktadır. Kazı sonrası ilk destek oluşturulana kadar zeminin kendi kendini taşıyabilmesini ve bu süreçte bir miktar deformasyon yapabilmesine müsaade edilir. İlk destek elemanının yerleştirilme zamanı ise çok önemlidir. Bu durum kaya ortamlarında gerçekleştirilen kazıda doğal kemerlenme ile kaya kendi kendini daha uzun süre taşır.

NATM ile açılan tünellerde zeminin durumuna göre kazı aşamaları belirlenir ve tünel üzerine gelen arazi yüklerini zemini çevreleyen bir kemer oluşturacak şekilde taşıyabilecek tünel destek tasarımı oluşturulmalıdır.

NATM yönteminde kullanılan destek sistemleri;

2.3.4.1. Çelik Hasır

Çelik hasırlar hem kaya hem de zemin destekleme uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle zayıf zeminlerde kazı yapıldıktan hemen sonra çökme olayının meydana gelmemesi için çelik hasır bağlanmasına geçilir. Kazı sisteminin desteklenmesi için serilir ve bir nevi donatı görevi yapar. Eklemlerin sık ve bulon aralıklarının fazla olduğu kaya ortamlarında bulonlar arasında kalan blokların desteklenmesi ve püskürtme betonun mukavemetinin artırılmasını sağlar.



Şekil 2.10: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Çelik hasır (Ergüven, 2011).

2.3.4.2. İksa Montajı

Tünel içerisine hazır imalat olarak, iki parça halinde gelen kafes iksanın, flanşları üzerinde açılan dört yuva içinden civata+somun marifetiyle birbirlerine bağlanması şeklinde yapılır. İksa montajında dikkat edilecek en önemli hususlar:

- a) İksa papuçlarının her iki yanda sağlam zemine basmasının sağlanması,
- b) Her iksa da mutlaka topoğrafik ölçüm yapılmasıdır,

İksa montajı hemen sonrasında yük alarak kazı sırasında örselenen zeminin hareketlerine hızlı cevap vermesi özelliği ile öne çıkmaktadır (http://www.anadoluissagligi.com/img/file_867.pdf).



Şekil 2.11: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Çelik iksa montajı (Ergüven, 2011)

2.3.4.3. Püskürtme Beton (Shotcrete)

Geçici tahkimatın en önemli elemanıdır. Porland çimentosu ve su karışımından oluşur. İçerisindeki kimyasal maddeler sayesinde çabuk priz alması sağlanır. Etkili olabilmesi için püskürtme beton uygulanacak yüzey arasında 1,5~2m mesafe olması gerekir.

- Kazı yapılan yüzeydeki zemin gevşemesini önlemek,
- Temiz bir kazı yüzeyi sağlamak,
- Kazı yüzeyindeki çatlakları ve donatılar etrafındaki kalan boşlukları doldurmak,
- Destek elemanların (çelik hasır) yüzeye sıkıca sabitlenmesi sağlayarak esneme yapmasını engellemek,

2.3.4.4. Kaya Bulonu

“Kaya bulonları, kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak ve çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak

veya kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için yerkabuğu içine bağlanan çubuklardır (Şekercioğlu, 2002).”

2.3.4.5. Boru Şemsiye Yöntemi

“Şemsiye borularının iki önemli görevi vardır. Birincisi kazı ile tahkimat arasında geçen sürede bir ucu konsolide edilmiş aynaya, bir ucu iksaya basan kiriş olarak çalışıp üzerine gelen yüklere deformasyona imkan vermeden mukavemet etmesidir. İkinci önemli görevi ise tahkimatı bitmiş olan bölgede gelen yükleri tahkimat kabuğuna homojen şekilde yaymaktır (Özçelik, 2006).”

Boru şemsiye metodunda kullanılan iki eleman vardır:

1. Zemin Çivileri (Şekil 2.12)
2. Umbrella Arch boruları (Şekil 2.13)

Bunlardan birincisi kazı öncesi yüzey oturmalarını ikincisi ise tünel içi deformasyonunu ve nihai yüzey oturmalarını denetleyen elemanlarıdır (Kurt vd.).

2.3.4.6. Zemin Çivisi

Zemin stabilizasyonu için kullanılan bir yapı elemanıdır. Zemin çivileri, tünel inşaatlarında enkesit stabilitesini arttırma amacıyla kaya ortamlarda kullanılan kaya bulonları gibi enkesite paralel olarak yerleştirilir. Donatı için açılan delik ile donatı arasında kalan boşluk enjeksiyonla doldurulabilir. Ayna stabilitesi amacıyla kullanılan zemin çivileri ise tünel güzergâhına paralel olarak ayna içinden zemine doğru sokulurlar.



Şekil 2.12: Marmaray Projesi-Yenikapı Turnback Tüneli-Şemsiye Boruları ve Ayna Çivileri (Ergüven, 2011).



Şekil 2.13: Şemsiye Boruları (Ergüven, 2011).



Şekil 2.14: Marmaray projesi-Yenikapı Turnback Tüneli- “Auger” vasıtasıyla Umbrella Delgisinin yapılması (Ergüven, 2011).

2.4. TÜNELDE ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Güvenli çalışma ortamında tünel kazı çalışmalarına devam edebilmek, özellikle zayıf zeminlerin tünel inşa öncesi koşulların iyileştirilmesi ve çıkan problemlerin çözümünde zemin iyileştirmeleri yapılmaktadır.

Tünel projelerinde kazı çalışmasına başlanmadan önce ön iyileştirme yapılacak yerlerin belirlenmesi için jeoloji, jeoteknik, jeofizik etütler yapılır. Zemin iyileştirmedeki amaç; depremsellik durumu ve statik yükleri altında istenen performansı gösteremeyeceği anlaşılan zemin koşullarını uygun ve yeterli koşulları sağlayacak özelliklere ulaştırmaktır (Altun, 2010).

Jeofizik yöntemlerle ana kaya derinliği, zemin büyütmesi, taşıma gücü ve yapılaşma kriterleri belirlenmeli, sıvılaşma riski ile oturma analizleri yapılmalı ve bunları önlemeye yönelik uygun zemin iyileştirme yöntemleri belirlenmelidir.

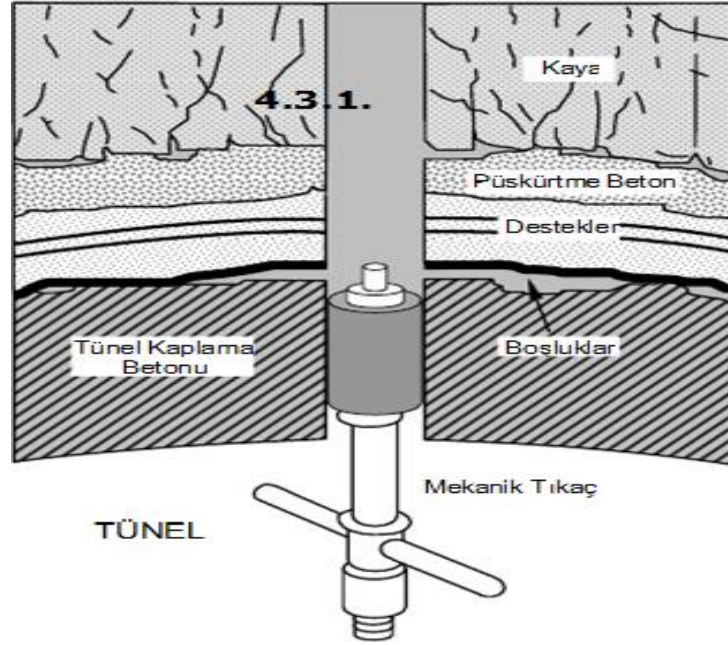
“Şeflek ve diğ. (2012) zeminin iyileştirilmesi ile mevcut zeminin,

- Kayma dayanımı artar,
- Gerilme-deformasyon modülü artar,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınır,
- Geçirimsizliği azalır,
- Çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimleri önlenir,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.”

2.4.1. Kontak (Dolgu) Enjeksiyonu

“ Özkan (2006), tünel açıldıktan ve kaplama betonları tamamlandıktan sonra tünelde ilk olarak yapılan işlemin dolgu enjeksiyonları olduğunu vurgulamıştır. Tünel beton çalışmaları sırasında gerek yerçekimi etkisi ve gerekse demir donatılarının etkisi ile beton ve zemin arasında boşluklar kalabilir. Beton ile zeminin kaynaşması için bu boşlukların doldurulması gereklidir.

Tünellerde ve diğer yapılarda beton ile ana kayayı birbirine bağlamak için yapılan bu enjeksiyonda, enjeksiyon kuyusu basıncı düşük, derinliği ise ana kayada birkaç metredir. Kontak enjeksiyonda kuyular düşey, çoğunlukla da açılı olarak açılmakta; hatta dikey olarak açılması gereken kuyularda olabilmektedir. Kontak enjeksiyonda en düşük kottan başlanmalıdır. Kontak enjeksiyonlarında uygulanan basınçlar, projeye ve tünel yüksekliğine göre değişkenlik göstereceğini söylemiştir.”



Şekil 2.15: Dolgu Enjeksiyonu (Özkan, 2006)

2.4.1.1. Çimento Enjeksiyonu

“Aktaş (2009)’a göre geniş bir kullanım alanı olan portland çimentosu enjeksiyonda kullanılan maddelerin en önemlisi olduğunu söylemiştir. Çimentonun kum ve su ile karışımı, ayrık ya da çatlaklı kayaç içine basıldığında boşlukları ve/veya çatlakları doldurur, sertleştğinde tanecik ve kayaç parçalarını birbirine yapıştırarak ortamı monolitleştirir. Böylece başta kohezyon olmak üzere, ortamın içsel parametreleri artar ve mekanik davranışı homojenleşir.”

“Aktaş, (2009)’a göre çimento enjeksiyonu sırasında çeşitli amaçlarla karışıma eklenen katkı maddeleri ile bu maddelerin işlevleri aşağıda verilmektedir:

1. Prizi çabuklaştıran maddeler: Sodyum klorür, kalsiyum klorür, sodyum silikat.

2. Prizi geciktiren maddeler: Doygun tuzlu su, selüloz bileşimleri odun özü, şeker, alçıtaşı.

3. Yoğunluğu artırıcı maddeler: Barit, ilmenit.

4. Yoğunluğu azaltıcı maddeler: Su, bentonit ”

2.4.1.2. Kimyasal Madde Enjeksiyonu

“ Aktaş (2009)’a göre kimyasal maddelerle yapılan enjeksiyon zeminlerin iyileştirilmesinde oldukça başarılı olmakla birlikte pahalı bir yöntem olduğundan ancak zorunlu hallerde kullanılır. Kimyasal enjeksiyon şerbetinin tanecik ihtiva etmemesi, düşük viskozitede olması ve sertleşme zamanının kontrol edilebilmesi gibi avantajları vardır. Kimyasal enjeksiyonda reaksiyon, kullanılan farklı maddelerin bir araya gelmesiyle oluşur. Karışım formasyona girmeden önce bir araya gelebileceği gibi formasyon içinde de karışabilir. Kullanılan başlıca kimyasal enjeksiyon maddeleri silikatlar, ligninler ve reçinelerdir.”

2.4.2. Jet Enjeksiyonu

Jet enjeksiyonu, açılan kuyuya indirilen ve döndürülerek geri çekilen bir tij takımı içinden çok yüksek basınçta karışım basarak örtü tabakasında enjeksiyon yapmayı sağlayan bir tekniktir.

Tij takımının etrafındaki malzeme enjeksiyon karışımı ile karışarak istenilen çapta bir sütun oluşturur. Deliklerin yerleştirilmesine bağlı olarak bir barajın sızdırmazlığı, bir alanın mukavemetinin artırılması veya zeminin taşıma kapasitesinin geliştirilmesi sağlanabilir.

Genellikle taşıma gücü düşük olan zeminlerde uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Çimento şerbetinin yüksek basınç altında basılması suretiyle zemin içinde enjeksiyon kolonları oluşturulur. Bu enjeksiyon kolonları projeye göre farklı çap (Ø60-Ø200 cm) ve derinliklerde olabilmektedir.

Herhangi bir zeminin jet grout uygulaması sonucu hızlı ve pratik şekilde taşıma gücü artırılabilir. Bunun dışında yer altı suyu izolasyonu ve geçirimsizlik perdesi istenen projelerde yapılan jet grout uygulamaları, kesişen kazık ve diyafram duvar sistemlerine de iyi bir seçenek oluşturur (Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Jeolojisi Ders Notları, t.y.).

2.4.3. Yeraltısı Seviyesinin Düşürülmesi

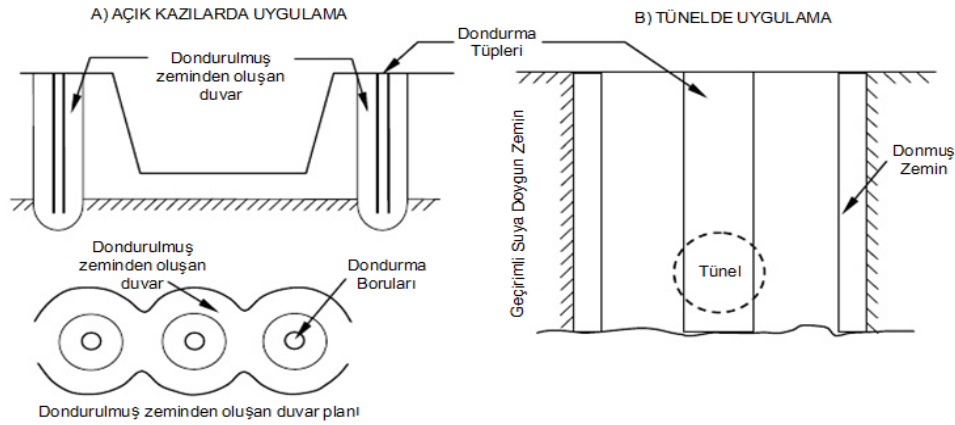
Tünel açımı esnasında yer altı su seviyesinde bir hareketlilik başlar. Yer altı suyu akımı boşluğa doğru yönelir. Tünel bir drenaj galerisi gibi çalışmaya başlar. Tünellerde yer altı suyu süreksizlikler, boşluklar ve damarlar boyunca gelir. Tünel açılmadan önce sondajlarla yer altı suyunun varlığı araştırılır. Şayet yer altı suyuna rastlanmış ise sondajlarda yapılacak pompaj çalışmaları ile su seviyesi düşürülür ve açılacak yan galeriler ve kanallar ile su dışarı atılır (Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Jeolojisi Ders Notları, t.y.).

2.4.4. Zeminin Dondurulması

“Özkan (2006)’ya göre suya doymuş zayıf zeminlerde tünel ve diğer yer altı kazılarında ön destekleme sistemi olarak zemin dondurma sisteminin kullanılması çözüm yollarından birisidir. Bu sistemde kazının yer aldığı zemin içindeki su dondurularak, kazı alanına su akışının önüne geçilmiş ve zayıf zeminin dayanım özellikleri artırılmış olur. Ancak bu sistemde kullanılan teknik pahalı ve uygulaması yavaştır. Sistemin temeli, amacına uygun derinlikte suya doymuş zemin içinde açılmış olan sondaj kuyusuna indirilen soğutucu sıvı dolaşımli boru sistemi yardımıyla, zeminin delgi boyunca ısıısının alınarak, sonucunda zemin içinde bulunan suyun dondurulmasına dayanır. Bu şekilde zemin içinde Şekil 2.16’da ki planda verildiği üzere, donmuş zeminden oluşan sütunlar oluşturulur. Bu sütunlar zeminin taşıma gücünü artırdığı gibi daha sonra yapılacak kazı alanına yeraltı suyunun gelmesi önleyerek duraylılığın artmasına yardımcı olur. Zemin dondurma sisteminde 2 yöntem uygulanır. Bunlar, tek aşamalı sistem ve iki aşamalı sistemdir ”

Tek aşamalı zemin dondurma sistemi: Bu sistemde kaynama noktası (-196)°C olan nitrojen gazı kullanılır. Dondurma borusundan nitrojen geçirilir ve dondurma borusu boyunca bir süre sonunda zemin dondurularak, sonuç elde edilir. Dondurma borusundan geri dönen nitrojen buharlaşarak atmosfere katılır. Tuzlu su kullanılan iki aşamalı sisteme göre yaklaşık %50 daha pahalı olan sistemde sonuç çabuk alındığı için kullanım alanı bulunmaktadır. Ayrıca bu sistem ile oluşturulan dondurulmuş zemin sütununun yaklaşık 1 hafta boyunca etkisini koruduğu gözlenmiştir (Harris, 1983).

İki aşamalı zemin dondurma sistemi: Bu sistemde, dondurma işlemini sağlayan glikol veya kalsiyum klorit tuzları içeren su karışımı ve bu karışımı soğutan freon, amonyak veya metanol gazlarının kullanıldığı soğutucu sistem bulunmaktadır. İç içe geçmiş boru sistemi ile kuyuya 3.5 m/s hızla tuzlu su karışımı pompalanır. Kuyudan geri dönen tuzlu sıvı soğutularak, tuzlu su kayıpları olmadan kuyuya yeniden pompalanır. Dondurulmuş zeminde istenilen dayanım değerlerine ulaşabilmek için ve zemin türüne göre, tuzlu su (-40°C 'nin altında soğutularak 3 – 10 hafta boyunca uygulanır (Harris,1983). Uygulamada delik aralıkları 0.50 – 1.5 m arasında değişir (Lenzini ve Bruss, 1975).



Şekil 2.16: Zemin dondurma (freezing) örnekleri (Harris,1983).

2.4.5. Basıncılı Hava

Tünele basınçlı hava pompalanarak yapılan ilerlemeye basınçlı hava yöntemi denir. Burada amaç tünel içindeki hidrostatik basıncı dengeleyerek su, kum, çakıl ve yumuşak malzemenin hareketini önlemektir. Bu yöntem:

- Zemin yer altı suyunun atılması sırasında önemli ölçüde deformasyona uğruyorsa, (aşırı yüzey oturmaları oluşuyorsa),
- Su atımında kullanılacak olan kuyuların açımı, yüzeydeki yapılar veya diğer nedenlerle zor ise,
- Su taşıyan tabakaların hacim ve geçirgenlikleri pompaj işlemi için fazla ise,
- Zemin aynada kendini tutamıyor ise
- Akıcı zemin davranışları-sıvılaşıma bekleniyorsa

- Göl ve akarsu tabanı çökelleri içinden geçiliyorsa kullanılmaktadır.

Bu sistemde tünel en kesiti bir basınç duvarı ile kapatılır. Tünel kazısının yapıldığı kısma havanın geri kaçmasını önlemek için bölme ve basınç odası yerleştirilir. Basınç odası her iki tarafında hava sızdırmaz kapı olan bir hücreden oluşur. Kapatılan bu kısma yeryüzündeki bir kompresör istasyonundan basınçlı hava pompalanır. Kullanılan havanın basıncı zemin suyu basıncına eşit olmalıdır. Bu yöntemde ilerleme yönünde sadece elektrikle çalışan makineler kullanılır. Kazılan toprak ve taşlar basınç duvarına bağlantısı olan ulaşım galerisinden geçilerek nakliye edilir. Eğer kazı esnasında zemin içinden hava kaybı meydana geliyorsa hava basıncını düşürerek ilerlemek veya yüzeyden, tünelden ya da bir kuyudan enjeksiyon yaparak zemin içinden hava kaybını önlemek mümkündür (Genç,1983; Kılıç,1997; Tabak ve diğ.,1994).

2.5. TÜNEL PROJELERİNDE YAŞANAN JEOLÖJİK VE ÇEVRESEL SORUNLAR

Bölgede jeolojik geçmişe bağlı olarak tektonik faaliyetler sonucu oluşan büyük süreksizlikler (fay, kıvrımlar) yer altı kazılarında büyük problemlere neden olur. Gerilmeler sonucu oluşan süreksizlik yapılarının tünelde yaratacağı hasarları önceden kestirmek gereklidir.

2.5.1. Deprem Etkisi

Kaya mekaniği literatüründe yer altı açıklıklarında depremden kaynaklanan hasarlar üç ana başlık altında; faylanma, kaya/zemin kütlelerinin yenilmesi ve sarsıntı (Dowding ve Rozen,1978; Ansal,1986; Brody ve Brown,1993; Erlingson,1997; Geniş ve Gerçe,2000) şeklinde toparlanabilir.

2.5.5.1. Faylanma

Depremler, patlatma faaliyetleri, tünel açıldıktan sonra açıklık etrafında oluşacak ikincil gerilmelerin etkisi aktif fayların yer değiştirmesine yol açan etmenlerdir.

Faylar hidrojeolojik sınırları oluşturarak su etkisinin yaratacağı farklı hidrostatik basınçları meydana getirebilirler ve kayanın dayanma mukavemetini düşürürler. Yer

altı suyunun serbest hareketini sağlayan faylar, ek dinamik yükler altında suyu tünel içine boşaltmaktadır. Ayrıca yer altı suyu faylı bölgelerde açılan tünellerde, fay zonunu killi birimler çevreliyorsa şişme ve kabarma sorunları, eğer geçirimsizliği yüksek kumlu birimler çevreliyorsa su hidrolik basınç altında fay açıklarından tünel içine sızacaktır.

“Faylar volkanik kayalar içinde (dasit, andezit) meydana geldiği takdirde çatlaklardan korozyon etkisi oldukça yüksek (sülfat miktarı fazla) suları da beraberinde getirirler. Bu sular tünel içine girdikleri takdirde beton kaplamaya veya çelik iksaya önemli derecede aşındırıcı etkilerini yaparak mühendislik yapının kullanılma sürelerini azaltabilirler (Kadıoğlu, 2004).”

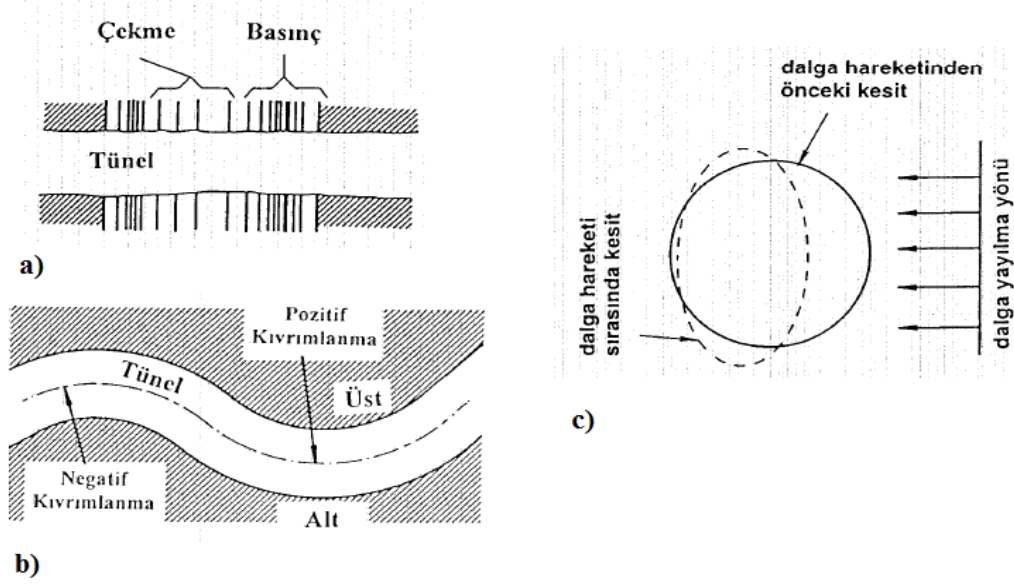
Fay düzlemlerinin tünel içinde eğim derecelerinin yüksek olması ve fayı çevreleyen zayıf, ayrışmış, ezilmiş dolgu birimleri mevcutsa askıda kalan malzeme yer çekimi etkisi ile tünel içine doğru kaya boşalmalarına neden olacaktır.

“Yıkıcı depremlerde deprem kırığının atımı yaklaşık 4-5 metre olabilmektedir. Böyle bir atımda tünel kesitinin tolere etmesi mümkün değildir. Yırtılan fayın uzunluğu arttıkça fayın yer değiştirme miktarı-atımı artmaktadır. Eğer aktif fay tünel geçkisine paralel ve çok yakınında bulunuyorsa yer değiştirmeden kaynaklanacak hasarın boyutu çok “tahripkâr”dır. Tünel kesitinin fay yırtığı boyunca kapanması söz konusudur. Dik konumda ise tünel geçkisinin fayı kestiği zon ve etki alanını kuşatan tünel bölümü çok ağır/ağır hasarlarla karşı karşıyadır (Arıoğlu ve diğ., 2006).”

2.5.5.2. Arazi Yenilmesi

Arazi yenilmesinin sebep olduğu hasarlar; kaya / zemin kaymaları, zeminlerde sıvılaşma, arazi hareketlerine bağlı çökmeler ve diğer etkiler ile ilintilidir. Bu tür hasarlar, tünellerin giriş-çıkış ağzlarının çevresinde ve diğer sığ açıklık alanlarında yapılacak dikkatli arazi araştırmalarıyla azaltılabilir (Adhya, 1989).

2.5.5.3. Sarsıntı



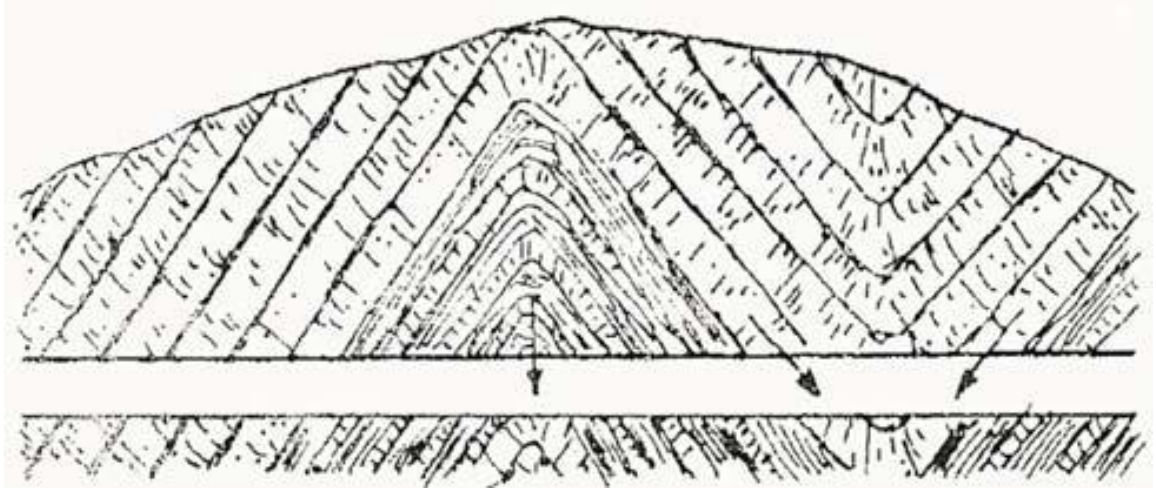
Şekil 2.17: Deprem sırasında bir yeraltı açıklığında gözlenen şekil değiştirme türleri (John ve Zahrah, 1987; Arioğlu ve diğ., 2006).

Eksenel şekil değiştirme (Şekil a) : Tünel/galeri eksenine paralel doğrultudaki dalga yayılımlarının yol açtığı şekil değiştirmelerdir. Bunlar kaya kütlelerinin kışalmasına(basınç), uzamasına(çekme) neden olur. Kaya kütlelerinin özellikle çekme gerilmesi altındaki dayanımının çok düşük olduğu dikkate alınırsa, sarsıntı tünel cidarında kaya parçalarının dökülmesine yol açarlar. Şiddetli ve uzun süren sarsıntı durumunda cidarlardaki süreksizliklerin –çekme gerilmesi altında açılmaları beklenmelidir.

Tünel ekseninin kıvrılması (Şekil b): Tünel/galeri eksenine paralel ilerleyen dalgaların tünel eksenini kıvrımlanmaya zorlamasıdır. Şekilden görüleceği üzere negatif kıvrımlanmaya maruz kalan bölgede tünelin üst kısmı çekme gerilmesine çalışırken alt kısmı basınç gerilmesine maruzdur. Özellikle çekme gerilmesine maruz zonlarda kırılmalar-yenilmeler gözlenir. Basınç gerilmesine maruz kalan zonlarda ise aşırı ölçüde basınç gerilmesi yoğunluğu söz konusudur. Gerilme yoğunluğu düzeyine ve çatlaklılık parametrelerine bağlı olarak kaya kütlelerinde ve tahkimat sistemlerinde yenilmeler beklenir.

Tünel eksenine dik doğrultudaki dalga yayılımının neden olduğu tünel kesitindeki şekil değişikliği (Şekil c): Tünel eksenine dik doğrultudaki dalga yayılımının tünel kesiti geometrisinde oluşturduğu şekil değişikliğidir.

2.5.2. Kıvrımların Etkisi

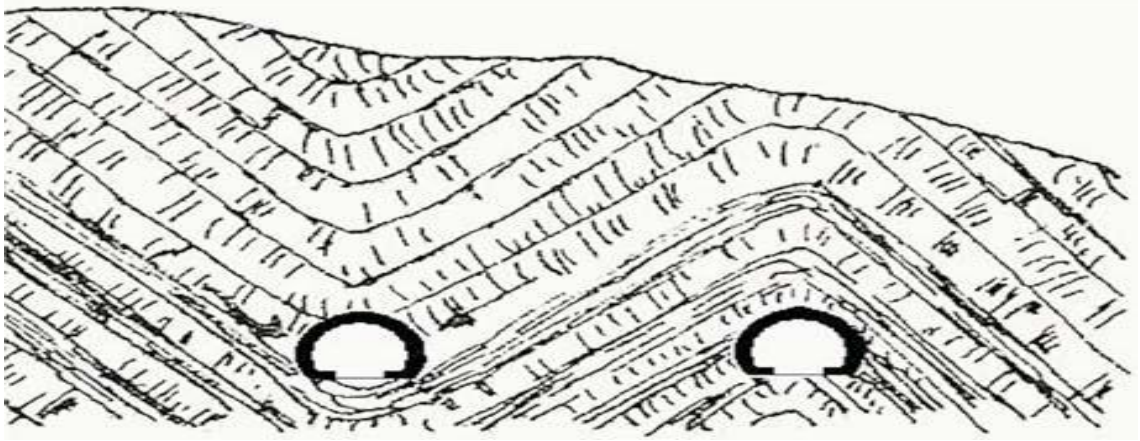


Şekil 2.18: Antiklinal ve Senklinal eksenini dik olarak kesen bir tünel boy kesiti (Szechy,1970).

“Antiklinal yapısı içerisinde yer alan tünelin, antiklinal eksenini doğrultusunda dik geçiyorsa tünelin kıvrıma giriş ve çıkışlarında yüksek gerilme ve su geliri, orta kısımlarında ise düşük gerilme ve su geliri beklenir. Çünkü antiklinalin kubbemsi yapısından dolayı gerilmeler tabakalar boyunca aşağıya doğru taşınacak ve antiklinalin tam ekseninde gerilme fazla olmayacaktır. Benzer şekilde yine tabakaların konumundan dolayı, eğer su varsa su aşağıya doğru akacak ve kazı sırasında sorun yaşanacaktır. Senklinalde ise tünelin giriş ve çıkışlarında düşük gerilme ve su değerleri, orta kısımda (senklinalin merkezi) yüksek gerilme ve su etkili olacaktır (Buket, 2011).”

“Tünelin antiklinal eksenine dik kestiği yerde üzerine gelen düşey basınç daha az, buna karşılık tünel giriş ve çıkışlarında yatay basınç daha fazla olmaktadır. Diğer önemli bir sorunda, antiklinalin ekseninde tabakaların aşağıya doğru genişleyen yukarı doğru daralan kamalanmaları aşırı sökülmele ya da kaya blokların düşmesine neden olması ve böylece kazıyı engellemesidir. Bu tür kaya düşmelerinin kayada mevcut kaya

yoğunluğuna bağlı olarak artacağı açıktır. Senklinal eksenine dik doğrultuda kesen bir tünel durumunda ise tam tersi durumlar söz konusudur (Öztürk ve Durmuş, 2009).”



Şekil 2.19: Antiklinal ve Senklinal eksenini boyunca açılan tünel enkesiti örneği (Szechy, 1970).

“Tünel kıvrımları doğrultusuna paralel sürülmesi halinde; antiklinalda tünelin bütünü boyunca düşük gerilme ve su geliri, senklinalde ise tünelin bütünü boyunca yüksek gerilme ve su geliri olacaktır (Buket, 2011).”

“Tünelin antiklinal eksenine paralel olması durumunda kemerleşmeden dolayı, hafif eğimli tabakalar kaya basıncını azaltmakla birlikte bu durumda kazının yapılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Tünelin senklinal eksenini boyunca açılması durumunda blokların tabaka düzlemleri boyunca tünel içine kaymaları, yer altı suların ise tünel içine toplanma ihtimalini artırmaktadır (Öztürk ve diğ., 2009).”

2.5.3. Yeraltısularının Oluşturduğu Tehlikeler Ve Alınması Gereken Önlemler

Yeraltısuları ya doğal yollarla tehlike oluşturmakta ya da insan faaliyetleri sonucu (yapı inşa vb.) tabiat dengelerinin bozulması ile tehlike oluşturmaktadır. Yer altı suyu zemin direncini azaltır ve hatta eğimli alanlarda kaymalara, çökmelere neden olabilir.

- ✓ Tünel yeraltı suyu seviyesinin üstünde ise tünel yüzeyine etki eden “su basıncı” oluşmayacaktır.
- ✓ Tünel yer altı su seviyesinin altında açılmış ise “su basıncı” oluşacak ve derinliğe bağlı olarak su basıncı artacaktır.

Boşluk suyu basıncı formülü (Hacettepe Üniversitesi, 2012);

$$u = \gamma_w \cdot h \quad (2.5)$$

u = Boşluk suyu basıncı

γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı

h = Düşey derinlik

olarak ifade edilir.

Açılan tünel yeryüzüne yakın, dayanımı düşük ve bozuşmuş zon içerisinde yer alıyorsa yağmur suların etkisi altında kalacaktır.

- ✓ Açılan tünel boyunca jeolojik süreksizlikler (fay vb.) mevcutsa bu süreksizlikler boyunca derinliğe bağlı oluşan hidrolik basınç altında sızan su tünel içini dolduracaktır.

Su tünel yapısından uzaklaştırılmazsa zeminde hacimsel deformasyon oluşacaktır. Tünelde mevcut veya sızan yeraltı suyundan numuneler alarak yüksek asitlik veya sülfat muhtevası olup olmadığı araştırılmalıdır. Bilindiği gibi asitliği yüksek olan ve sülfat ihtiva eden sular betona ve metallere zararlıdır.

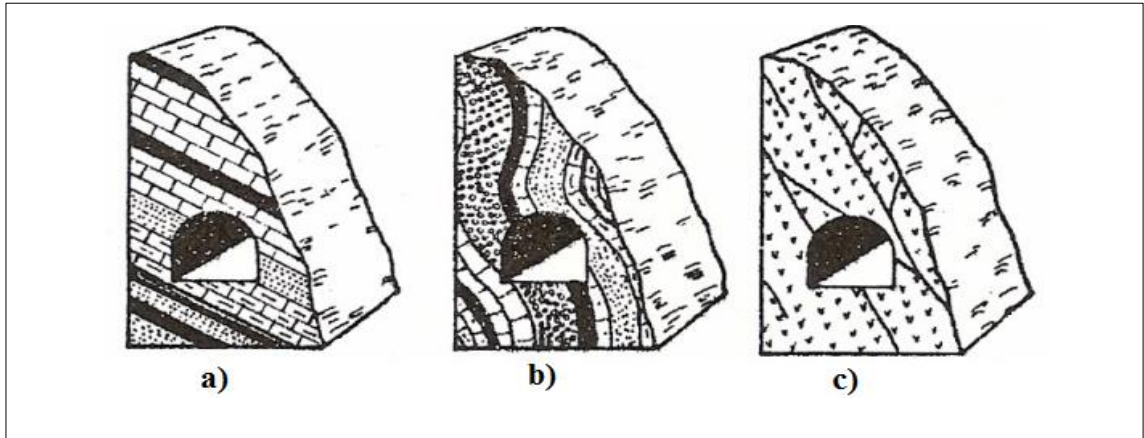
Tünellerdeki su durumunu çözmek için öncelikle ilk incelemelerde gözlem kuyuları yapılarak tünel güzergâhının yer altı su durumu öğrenilir. Tünelin yer altı su seviyesi üzerinde kalmasına dikkat edilmelidir. Bu mümkün değilse, su seviyesi, açılacak pompaj kuyularında yapılacak pompalama ile tünel tabanına kadar düşürülür. Yani tünel tabanına kadar tüm su drene edilir. Yer altı su seviyesi yan galeriler, kanallar vb. ile dışarıya atılarak da düşürülebilir. Gerekirse tünel içinde özel yerlerde toplanarak dışarıya pompalanır (Canik, 1997).

Yumuşak zeminde stabilizeyi sağlamak ve suyu önlemek için enjeksiyon, zemini dondurma, denetimli drenajla zemin suyu seviyesinin düşürülmesi ve basınçlı hava

yardımıyla suyun denetim altına alınması gibi işlemler yapılmaktadır (West ve O'Reilly, 1978; Öztürk ve Durmuş,2008).

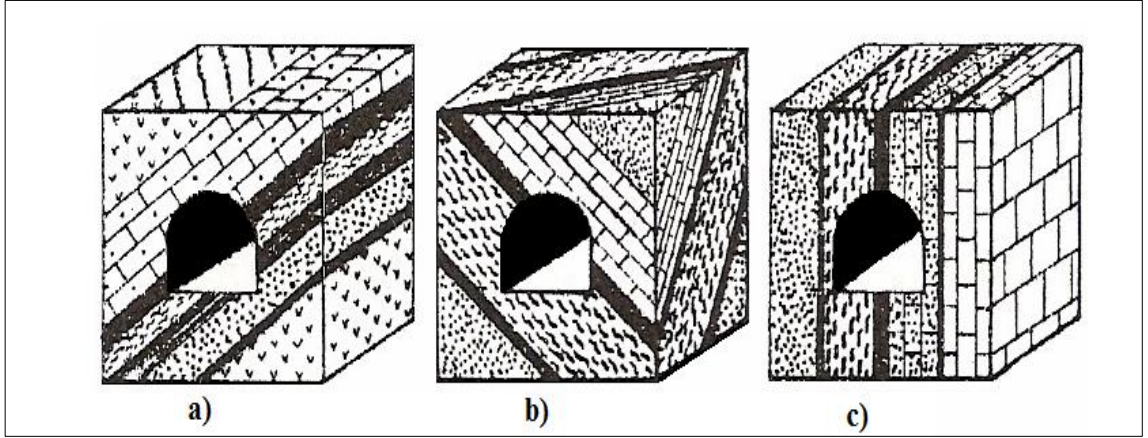
2.5.4. Topoğrafya Ve Tabakaların Etkisi

Tünel hattının oluşturulmasında yer seçimini etkileyecek en önemli parametrelerden biri topoğrafya 'dır. Topoğrafya tünel hattının geçtiği güzergâhın eğim durumunu ortaya koyar. “Yeryüzünün az veya çok eğimli kısımları, doğal olarak meydana gelmişse **yamaç**, insanlar tarafından kazılar yapılmak suretiyle oluşturulmuşsa **şev** denir (Kurt ve diğ., 2010).” Yamaç ve şev duyarlılığının bozulması yer kayması, heyelan gibi jeolojik süreçlerin oluşumunu tetikler. Yamaç ve şev topuğunda yol, tünel, baraj yapımı nedeniyle yapılan kazılar sonucunda kütle boşlukta kalmakta ve denge bozulmakta ve heyelan oluşumunu kolaylaştırmaktadır.



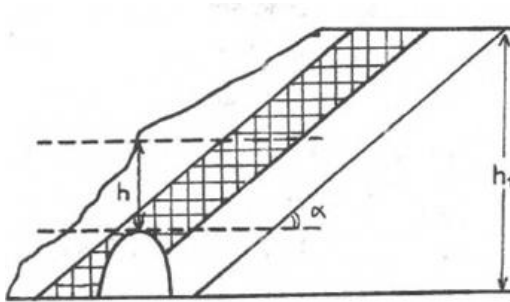
Şekil 2.20: Yamaç eğimini zemin tabakalanmasıyla aynı doğrultuda olduğu (a), kıvrımlı tabakalanma (b) ve çatlaklı zemin örtüsü (c) durumlarında yamaç stabilitesinin bozulmasına ilişkin şematik örnekler (Genç, 1983).

Tabaka doğrultusu, yamaç eğimiyle aynı olması durumunda yamaç stabilitesinin tehlikeye düşer (Şekil 2.20 a). Tabakalarda kıvrımlarının bulunuyorsa kayma dayanımının artması doğaldır (Şekil 2.20 b). Yamaçtaki zemin örtüsünün çatlaklı ve kırıklı olması durumunda boşluk suyu basıncının üzerindeki örtüyü kaldırarak bu sebeple boşalmaya çalışmaktadır (Şekil 2.20 c) (Genç, 1983).



Şekil 2.21: Zemin basıncın tünel yan duvarlarında (Şekil 2.21 a, b) ve tünel tavanında (Şekil 2.21 c) yoğunlaştığı zemine ilişkin tabakalanma durumları (Genç, 1983).

Tünel inşasının gerçekleştirileceği ortamın tabakalanma şekli tünel kaplaması üzerine gelecek basınç dağılımını etkilemektedir ve tabakalı kayalarda düşey gerilme daha fazla artar (Canik, 1997).



$$\sigma_v = \gamma \frac{h}{\sin \alpha} \quad (2.6)$$

Şekil 2.22: Tabakalı kayalarda düşey gerilme (Canik, 1997).

Tünel güzergah zemindeki tabakalanma (Şekil 2.21 a) ve (Şekil 2.21 b) gibi ise zemin basıncı tünel yan duvarlarında (Şekil 2.21 c) gibi ise gerilmeler tünel tavanında yoğunlaşmaktadır.

2.5.5. Kemerlenme

Kaya ortamında gerçekleştirilen kazılarda, ikincil gerilmelerin ve yerçekimi etkisiyle, tavan, yan duvarlardaki kayalar açılan boşluğa doğru hareket etmek isterler. Bu hareket belli bir süre kayaların birbirlerine dayanarak desteksiz durabilme özelliğine sahiptir.

Bu olaya kemerlenme denir. Desteksiz durabilme zamanı ortamın jeolojisine, jeolojik süreksizliklere, örtü kalınlığına, tünelin çapına ve uzunluğuna bağlıdır.

2.5.6. Aşırı Sökülme

Aşırı sökülme; zemin/kaya ortamına, jeolojik süreksizliklere, tabakalanma, ayrışma derecesine, tünel çapına ve uzunluğuna, patlayıcı türüne ve miktarına, iksa türüne, tünel açma yöntemine vb. bağlıdır.

2.5.7. Kaya Patlatmaları

Kaya patlatmaları tünel projelerin her aşamasında kullanılabilir. Kaya patlatma sürecinde yersarsıntısı kaçınılmaz bir olaydır. Patlatma sonucu oluşan dalga hareketi, kaynaktan uzaklaştıkça taşıdığı enerjiyi hızla boşaltarak sismik dalgaya dönüştürür ve sönümlenir. Patlatmadaki amaç kayayı kırarak gevşetmek ve ötelemektir. Yanlış bir patlatma tasarımı sonucunda açılan tünellerde karşılaşılabilecek problemler kayacın yapısına ve jeolojik etkenlere bağlıdır ve sonuçta farklı dirençteki kayalar bir arada bulunmaktadır. Bu etkilerin sonucunda aşırı sökümler, göçme, toz problemi, süreksizliklerin açılmaları, su baskınları, çevresel problemler (yer sarsıntısı ve hava şoku) meydana gelebilir (Kahrıman, t.y., syf.72-93).

2.5.8. Isı Sorunu

Tüneller de ısı sorunu jeotermal gradyana bağlıdır. Özellikle derinlerde açılan tünellerde jeotermal gradyana bağlı olarak ısı artmaktadır. Jeotermal gradyan; derinlere doğru gidildikçe her 33 metrede bir ısıнын 1°C e artmasıdır. Isı artışı, topoğrafyaya, tabakaların eğimine yeraltı suyuna, kayaçların iletkenliğine, tünel uzunluğuna ve de iklim koşullarına bağlıdır. İyi bir havalandırma yöntemiyle koşullar iyileştirilebilmektedir.

2.5.9. Gaz Sorunu

Tünel çalışmaları sırasında karbondioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), metan (CH₄), hidrojen Sülfür (H₂S), kükürt dioksit (SO₂), su buharı (H₂O) ve hidrojen (H) gibi çeşitli gazlarla karşılaşılabılır. Mesafenin kısa olduğu tünellerde hava dolaşımı kendiliğinden sağlanır. Mesafenin uzun olduğu tünellerde hem çalışma koşullarını iyileştirmek hem de herhangi bir tehlike durumuyla karşılaşmamak için tünel içi gaz ölçümlerinin belli periyodik aralıklarla tekrarlanması gerekir. Ayrıca tünel içerisinde en önemli

sorunlardan biri de çok fazla nemin bulunmasıdır. Nem zamanla tünel yüzey kaplamalarında bozulmalar neden olur.

2.5.10. Gürültü Sorunu

Tünel inşası aşamasında kullanılan makineler, hafriyat ve tünel malzemelerini taşıyan araçlar ve tünel ilerlemesi için kullanılan patlayıcı maddelerden kaynaklanan gürültüler çevreyi olumsuz etkilemektedir.

2.5.11. Beton Kalitesi

Beton malzemesi zamanla çevresel koşullardan (iklim, trafik vb.) ve içerdiği malzemelerin özelliklerinden etkilenerek çeşitli sorunlar oluşturabilir. Beton ürünü şantiye ortamına uygun koşullarda getirilmeli ve yerleştirilmelidir. Betonun yerleştirilmesi esnasında beton içerisinde istenmeyen bir hava boşluğu oluşmaktadır. Beton dayanımının artırılması amacıyla bu hava boşluğunun dışarı çıkartılması için vibratörle sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Betonun periyodik bakımı yapılmalı ve özellikle betonun suya doygun olduğu durumlarda tekrarlı donma-çözülme altında beton malzemesi dağılabilir. Tekrarlı donma-çözülme işlemleri sırasında gözeneklerde ve kılcal boşluklarda bulunan su da donduğunda genişleyerek bu boşlukların ve gözeneklerin duvarlarına gerilmeler uygular ve mikro çatlaklar oluşmasına neden olur. Çeşitli araçlardan çıkan karbondioksit betonda karbonatlaşmaya neden olur, bu da yüzey dayanım ve dayanıklılığını düşürür. Kaplamadaki büyük gerilmeler, yanlış işçilik, tuzlama, betonun hava içeriğinin çok düşük olması, yüksek su/çimento oranı beton yüzeyinde dökülmelere sebep olur (Engin ve diğ., 2010).

2.6. GPR YÖNTEMİ İLE TÜNEL PROBLEMLERİ ÇÖZÜMLENDİRİLMİŞ ÖRNEK ÇALIŞMALAR

Jeofizik çalışmaları tünel projelerin her aşamasında kullanılır. Jeofizik yöntemler kullanım alanına göre çeşitlilik göstermektedir (Tablo 2.1). Tünel öncesinde, açma aşamalarında ve tünel yapısı tamamlandıktan sonra tünel çalışmalarını, tünel yapısını ve çevresini etkileyecek problemleri belirlemeyi sağlar. Tünel güzergâh ortamını tanımlamak ilk aşamadır. Tünel güzergâhı boyunca kazı devam ederken oluşan boşluk nedeniyle tünel kesitine bir takım kuvvetler etkir. Bu kuvvetler arazinin yükü ve iç kaplamalar nedeniyle oluşan sistemin kendi ağırlığıdır. Yine tünel kesitinde jeolojik yapının değişmesinden dolayı nadiren de olsa tünel tabanında kabarma veya çökme de olabilir (Doğruoğlu, 2009).

Tünel inşaatında tasarım ve uygulama iç içedir. İyi bir projelendirme için tünelin açılacağı zemin/kaya ortamının iyi tanınması gerekir. Tünel açılacak ortamın güzergâhı, kazı derinliği ve her türlü koşullarda (deprem, jeolojik problemler) üretimi hakkında bilgi sahibi olmak, kazı sırasında problem oluşturacak yer altındaki karstik boşlukları, jeolojik sınırları, bozuşmuş tabakaları, kırık zonları, fayları, yer altı su seviyesi, toprak/kaya geçişleri, yeraltına gömülü arkeolojik ve mezar buluntuları, kuyu/mağara yapıları, yer altı tesisat yerleri belirlenmelidir. Bu problemler kazı sırasındaki hacim kaybının oluşabilecek yüzey deformasyonlarıyla ilişkilidir.

Tablo 2.1: Jeofizik testleri gerçekleştirmek için kullanılan prosedürler

Yöntem	Uygulaması
Sismik Kırılma ve Yansıma	Sismik kırılma yönteminde arazi işleri uygun bir biçimde patlayıcı madde patlatmak ya da bir cismi yere düşürerek sarsıntı elde edilmesi için gerekli hazırlıkları yapmak, jeofonları önceden belirlenen noktalara yerleştirmek ve kayıt aletleri ile kayıt almaktan ibarettir. İki boyutlu sismik yansıma, bir hat boyunca yerleştirilen bir kabloya bağlı alıcılar (jeofonlar) yoluyla gerçekleştirilir. Bir enerji kaynağının (dinamit vs.) oluşturduğu sismik dalgalar yansıma yüzeyinden yansıyarak alıcılara gelirler. Alıcılar da gelen sinyalleri sismik kayıt cihazına iletirler. Ayrıca su yüzeyinde bir enerji kaynağı ve alıcıyı (hidrofon) kullanarak bir tekeden deniz uygulamaları için gerçekleştirilir. Alıcıya ulaşmak için sismik dalga için seyahat süresi kaydedilir ve analiz edilir.

Tablo 2.2 (devam): Jeofizik testleri gerçekleştirmek için kullanılan prosedürler

Yöntem	Uygulaması
Elektrik Rezistivite/İletkenlik	Yapay bir enerji kaynağı kullanılır. Yere verilen yapay bir akımla yeraltının görünür öz direnci hesaplanır. Elektrik öz direnç yöntemleri yere çakılan 4 adet elektrod ile yapılır. Ölçüm derinliği elektrod aralığına bağlıdır.
Cross-Hole	En az 2 adet sondaj gereklidir: sismik darbe kuyu içerisindeki kaynaktan elde edilir ve sıkışma ve kayma dalgalarından oluşan jeofon kayıtları diğer kuyu içerisindeki alıcıya ulaşır.
Up-Hole ya da Down-Hole	Tek bir sondaj yapılmalıdır. Up-hole yöntemi bir sensör yeryüzüne yerleştirilir kayma dalgası sondaj kuyusu içerisinde farklı derinliklerden elde edilir. Down-hole yöntem sismik dalga yüzeyde oluşturulur bir veya daha fazla sensör kuyu içerisinde farklı derinliklerde yerleştirilir.
GPR	Tekrarlanan elektromanyetik darbeler zemin yüzeyinde oluşturulur ve vericiye geri dönen yansıyan darbelerin seyahat zamanı kayıt edilir.
Gravite	Bir hassas gravimetre zeminde lokal yerçekimi alanı içerisindeki malzeme yoğunluğu ve boşlukların neden olduğu değişimleri ölçmek için zemin yüzeyinde kullanılır
Manyetik	Manyetik araştırmalar hem zemin tabanlı hem de havadan manyetometreler kullanılarak gerçekleştirilir. Yer ekipmanları ile birlikte oluşturulmuş araştırma hattı boyunca alınan yerin manyetik alanının değişimleri ölçülür.

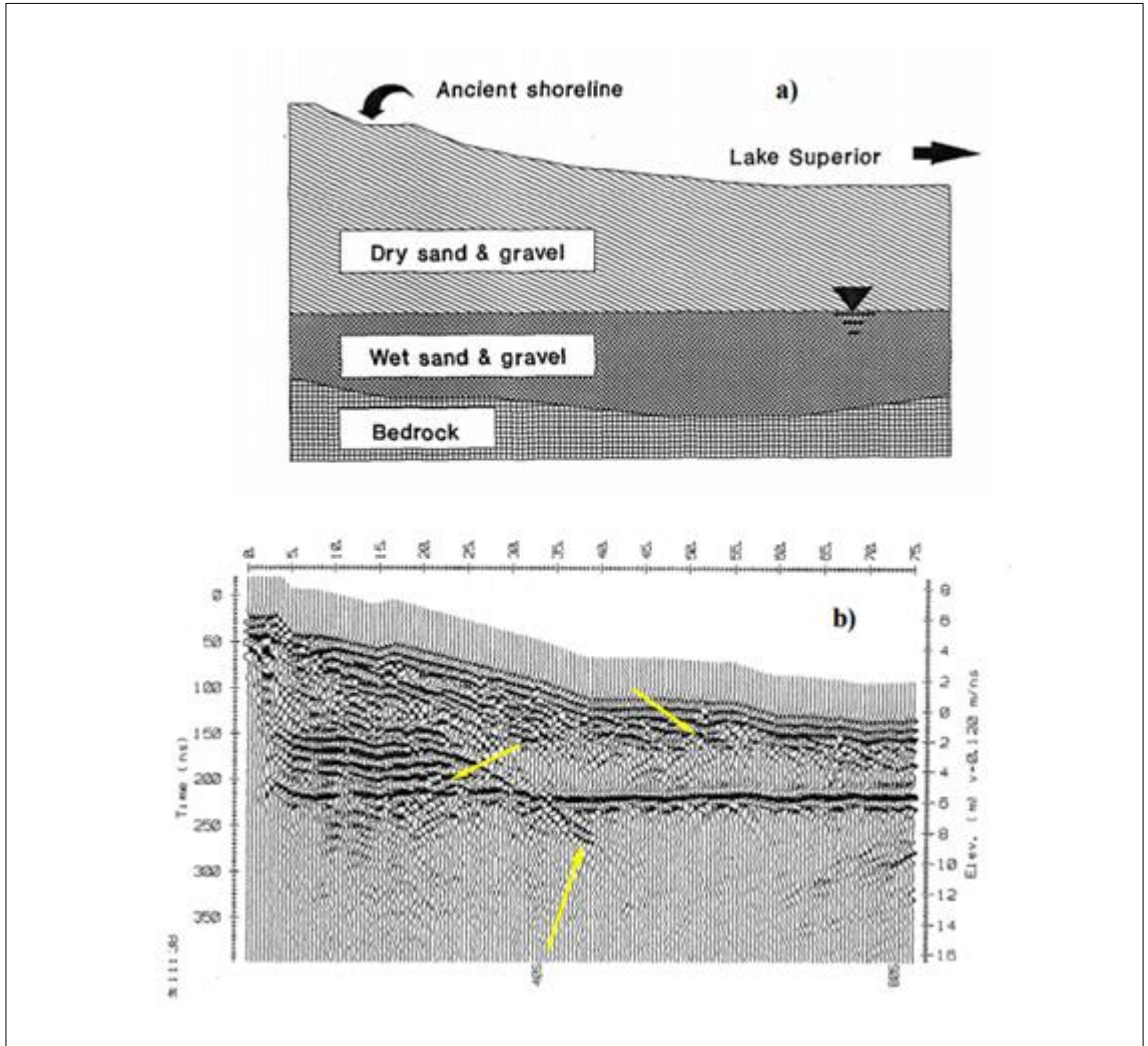
NDT (Non-Destructive Testing) yöntemlerinden biri olan GPR yöntemi hasarsız / tahribatsız olarak tünel duraylılığını bozan etkenlerin araştırılması için yerin farklı (ϵ ; permitivite, σ ; iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) özelliklerinden yararlanır. GPR yöntemi statik ve depremsellik açısından en az risk taşıyan temel derinliği ve güzergâh yolunu belirlemek için yüksek ayırım duyarlılığı ile sığ derinlikteki tabakalanmalar, süreksizlikler, faylanmalar, boşluklar, su tablası seviyesi, gevşek birimleri ve çok ince ayrışım zonlarının konumları, derinliklerinin belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir.

2.6.1. Zemin/Kaya Ortamının Tanımlanması

Zemin, kaya farklı elektrik özellikler (dielektrik sabiti ve iletkenlik) taşıdığından radar sinyal hızı, yansıma ve sönüm değerlerini ara yüzeylerde değişmesine yol açacaktır. Hem dielektrik sabiti hem de iletkenlik büyük ölçüde sudan etkilenir (toprağın nem içeriği), dolayısıyla suyun genel olarak GPR performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Zemin iletkenliği enerji emilim hızını etkilediğinden maksimum nüfuz derinliği enerjisini de sınırlar. Daha iletken zemin (nemli ya da yüksek kil içeriği) , örneğin kuru kum gibi iletkenliği düşük zeminden çok daha büyük oranda enerjisi soğrulmaktadır. Kuru killi zeminlerin penetrasyon derinliği genelde bir ya da iki metre aralığında ve ıslak kil 1 metre ya da daha az nüfuz derinliğini sınırlandırmaktadır, oysa kuru kumlu zeminlerde 10 metreden daha fazla derinliklere kadar ulaşabilmektedir. İletkenliği düşük olan kaya çeşitleri kireçtaşı, kömür, granit ve diğer kristal kayalar içerirken, daha iletken olan kaya türleri ise bazalt, şeyl ve çamurtaşı ya da oldukça yüksek poroziteli ayrılmış zemin içerir (Griffin ve diğ., 2002).

Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu (Şekil 2.23), özellikle genç çökellerden oluşan gevşek zeminlerin özellikleri, derinlikleri ve kalınlıkların belirlenmesinde GPR yöntemi ile tabakalar arasındaki sınırların elektriksel özelliklerinden yararlanılarak cm kalınlığındaki ince tabakaları yüksek ayrımlı görüntülerinin elde edilmesini sağlar.

Genelde yüzeydeki gevşek zon alttaki nispeten pekişmiş zon ile iyi bir dielektrik sabit farkı oluşturmaktadır. GPR uygulamalarında kullanılan elektromanyetik dalgalar için iyi bir kontrast oluşturan bu sınır kayıtlarda kolaylıkla gözlenebilmektedir (Daniels, 1989).



Şekil 2.23: a ve b de GPR uygulama teknikleri kullanılarak Yeraltısı seviyesi, kum/çakıl-anakaya arayüzeylerin haritalanması (Scaife ve Annan, 1991).

2.6.2. Fay Yerlerinin Belirlenmesi

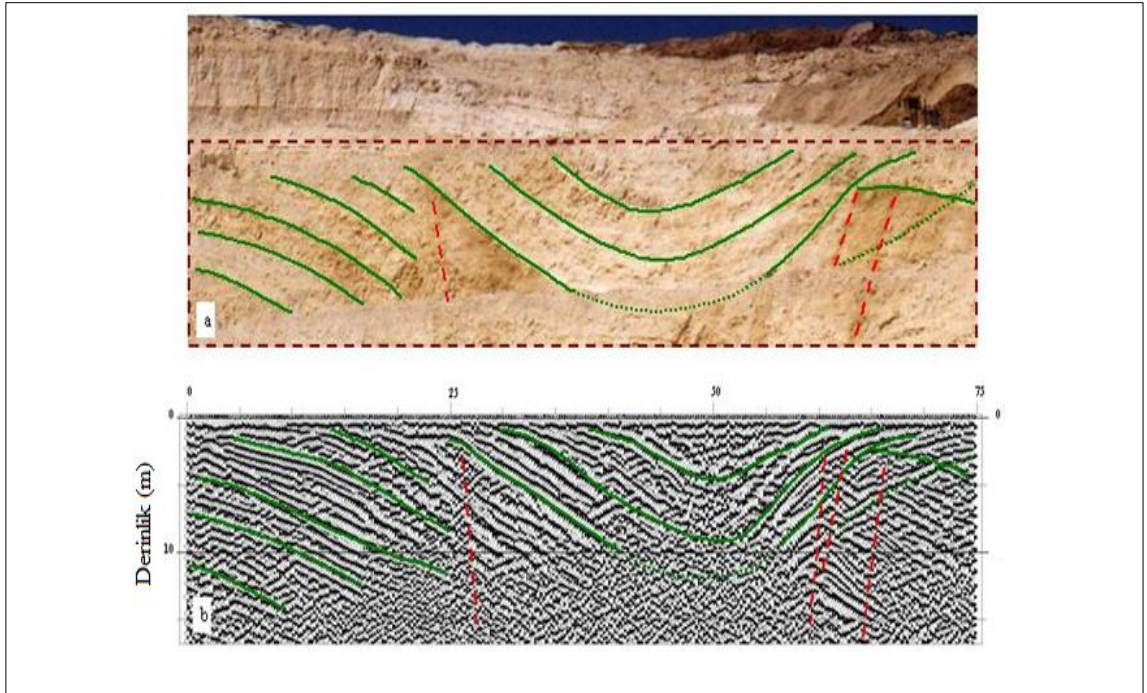
Tünel yapısına etki edecek deprem etkinliğinin tam olarak ortaya koyulabilmesi için hem güncel verileri hem de tarihsel depremlerin bilgilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.24'te Nesher Ramle taşocağının görüntüsündeki stratigrafik birimlerin, yapıların ve fayların gösterimi GPR yöntemi uygulanarak belirlenmiştir (Davis ve Annan, 1989). GPR yöntemi kullanılarak;

- Paleosismolojik çalışmaların yürütülebilmesinde,
- Tektonik deformasyonların belirlenmesinde,
- Aktif fay zonlarındaki yüzeye yakın kırık ve çatlak yapıların belirlenmesinde,

- Sedimentoloji (çökel örtülerin) modelinin oluşturulmasında, yüksek ayrımlı görüntülerin elde etmekte önemli ve etkili bir yöntemdir.

Paleosismolojik, hendek çalışması ile bir fay üzerinde oluşmuş eski deprem izlerini (yüzey kırığının yeri, depremin büyüklüğü, atım miktarı, büyük depremlerin tekrarlanma aralığı vb) belirler. Hendek çalışmasını kolaylaştırmak, açılan hendeğin boyunu daha kısa tutabilmek ve fayın genç birimler içerisindeki konumu tespit etmek amacıyla süreksizlik düzlemlerinin yerlerini GPR yöntemi ile belirlenir (Yalçiner ve diğ., 2007; Yönlü, Ö.,2008).

Hatay ve çevresindeki aktif fayların GPR metodu kullanılarak incelenip bölgenin aktif tektoniği araştırılmıştır. Bölge içinde yüzey kırığı oluşturmuş veya ötelenmeye neden olmuş fayların güncel birimler ile üzerlenip örtülmesi sonucu takibi güçleşmektedir. Özellikle alüvyon birimlerin altında devam ettiği düşünülen fayların geometrilerinin incelenmesi fayların genç birimler ile örtüldüğü alanlarda söz konusu fayların uzanımı, dalımı hakkında bilgi sahibi olmak için ölçümler alınmıştır (Lom, 2011).

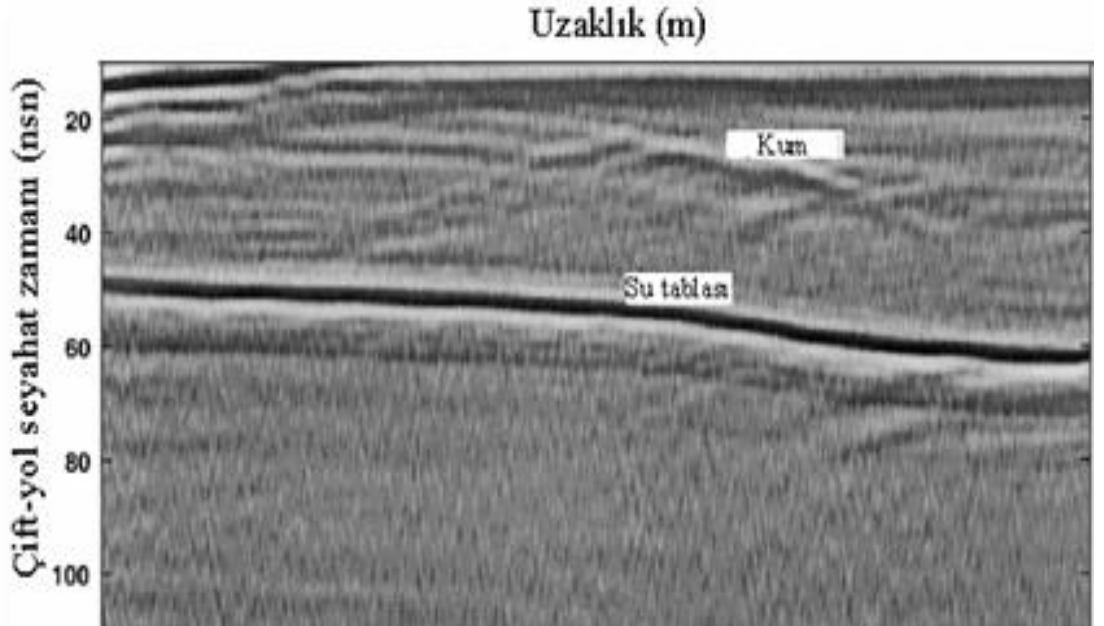


Şekil 2.24: Nesher Ramle taşocağının görüntüsündeki stratigrafik birimlerin, yapıların ve fayların gösterimi ve GPR görüntüsünün yorumlanması (Davis ve Annan, 1989).

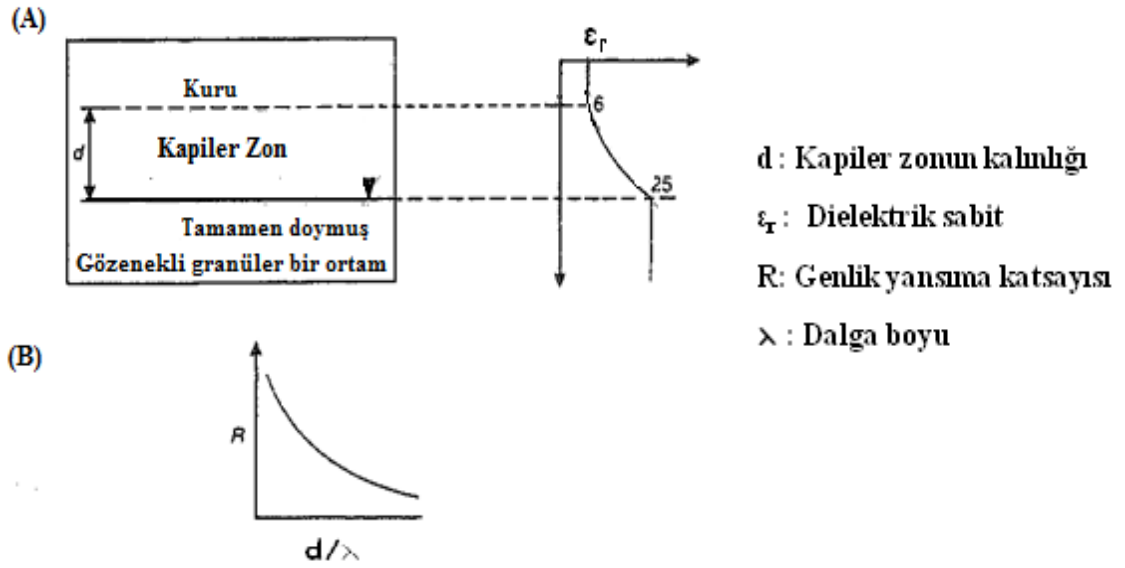
2.6.3. Su Tablasının Belirlenmesi

Tünel açılacak ortamlarda yer altı suyu istenmeyen sorunlardan biridir. Su tablası altında yer alan tünellere jeolojik yüklerin yanı sıra su basıncı da etki edecek ve derinlik arttıkça da bu su basıncı artacaktır. Deprem yüklerine maruz kalan tünel yapısı, etrafı gevşek -orta sıkılıkta kohezyonsuz zemin (kum, silt, çakıl) olması durumunda sıvılaşma meydana gelebilir. Tünel etrafı şişme potansiyeli olan killi zeminlerle çevrili ise su alımıyla oluşacak hacim artışı tünel kaplamalarına basınç oluşturacak ve kırılmalara, çatlamalara, hatta daha büyük hasarlara neden olacaktır.

Su sahip olduğu yüksek polarizetibilite nedeniyle en yüksek dielektrik sabite sahiptir. Bu nedenle elektromagnetik dalgaların bu direnç karşısında ilerlemesi oldukça zordur. Diğer yandan, su tablası sınırı, GPR çalışmalarında elektromagnetik dalgalar için iyi bir yansımaya yüzeyi oluşturmaktadır ve Şekil 2.25'te görüldüğü üzere bu sınır kolay bir şekilde tespit edilebilmektedir (Bozkurt ve Kurtuluş, 2007)



Şekil 2.25: Kumlu bir alanda su tablasının GPR kesitindeki görünümü (Stickley ve diğ., 2000).



Şekil 2.26: Kapiler zonun kalınlığı (d), dielektrik sabiti (ϵ_r), yansımaya katsayısı genliği (R), (Reynolds, 1997’den düzenlenmiştir).

Suyun dielektrik sabiti yüksektir ve dielektrik sabitinin arttığı ortamlarda dalga hızı azalmakta ve enerji kaybına uğramaktadır (Şekil 2.26).

2.6.4. Gömülü Yapıların Belirlenmesi

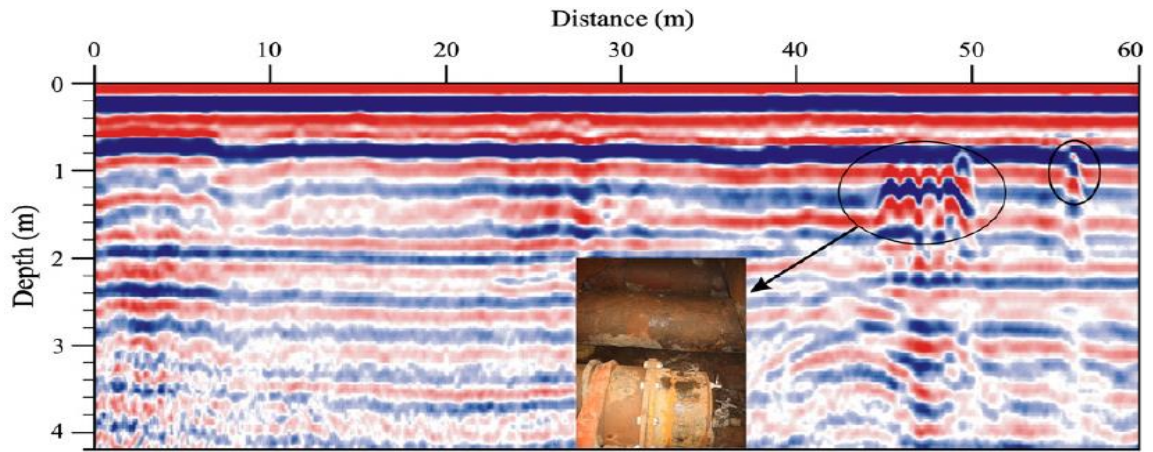
Tünel çalışmalarında herhangi bir problemle karşılaşmamak ve zarar verilemeden kazı işleminin güvenli bir şekilde yapılması için özellikle yerleşim alanlarında birbirlerine yakın döşenmiş altyapı tesisatlarının, eski su kuyuların veya gömülü arkeolojik yapılar mevcut ise yerlerinin belirlenmesinde GPR yöntemleri yüksek çözüm gücü olanağına sahiptir.

Marmaray tüp geçitinin ana istasyon yeri olan Yenikapı’da açılacak tünel çalışmaları için vurulan kazılar sonucu çok sayıda arkeolojik kalıntılar ortaya çıkmıştır, olası mevcut kalıntılara zarar verilmeyecek şekilde yerlerinin belirlenmesi için tahribatsız, hızlı ve ekonomik yöntem olan Yer Radarı çalışmaları uygulanmıştır.

GPR özellikle gömülü hedefleri bulmakta etkilidir. Örneğin; çelik ve plastik boruları, su ve gaz boruları, beton borular, kablolar (elektrik, telefon, fiberoptik), kanalizasyon, yanısıra çelik ve plastik variller (Beliss et al., 2008; Grandjean et al., 2000; Liu et al.,

2007; Porsani and Sauck, 2007; Porsani et al., 2006, 2010,2012; Rodrigues and Porsani, 2006; Santos et al., 2010; Zeng and McMechan, 1997).

Yeraltına gömülü elektrik ve telefon kabloları, su ve gaz boruları, yağmur kanalizasyonu gibi alt yapı tesisatları tünel/metro inşaatları sırasında problem oluşturur. Brezilya, São Paulo metro inşaat çalışmasının yönünü belirlemek amaçlı mevcut alt yapı hakkında bilgi almak için 200 MHz anten kullanılarak yüzeyden GPR çalışmaları yapılmıştır (Şekil 2.27). Yeraltının 2 m derinliğindeki su boruları, gömülü altyapı ağları, ve beton temel sütunları ya da kazıkların yerleri tespit edilmiştir. (Porsani vd., 2012)



Şekil 2.27: Karayolu üzerindeki kaldırımlar arasında 200 MHz anten kullanılarak GPR çalışmaları ile alt yapı tesisatının belirlenmesi (Porsani vd., 2012).

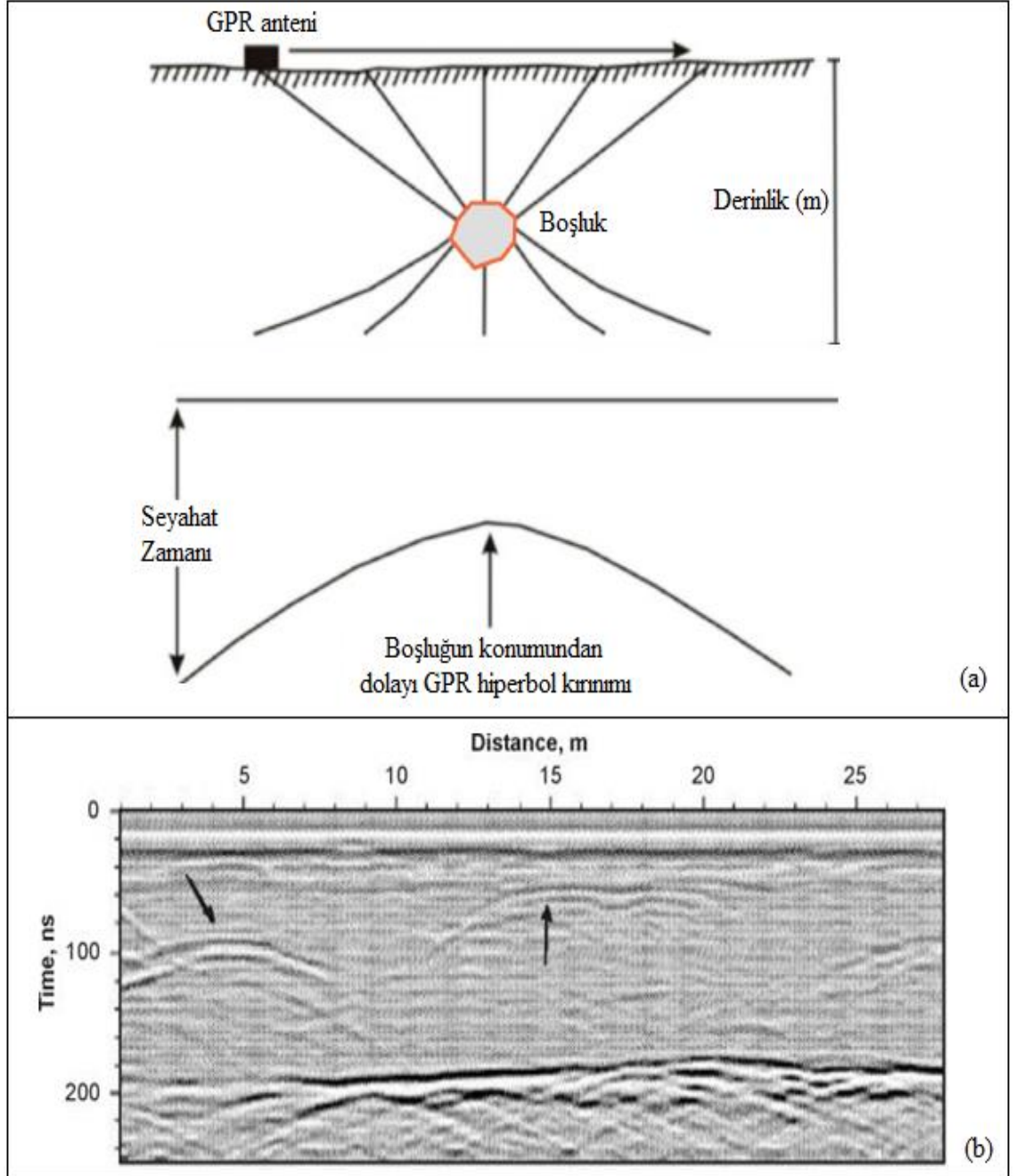
2.6.5. Boşlukların Saptanması

Yer altındaki oda-mezar, mahsen, tünel, kuyu, mağara veya benzer boşlukları ve özellikle karstik sahalardaki hava boşlukları gizli tehlikeleri önlemek ve tünel yapısının, çevresinin emniyetini sağlamak için GPR etkili bir yöntemdir.

GPR yöntemi, kentsel yeraltı boşluklarının konumu ve geometrisini algılamada ve kentsel olmayan alanlardaki farklı jeolojik yerleri tanımlamada çok kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır (Ulugergerli and Akca, 2006; Mochales et al.,2008;Wadhwa et al., 2008).

Hava, elektromanyetik dalganın yayılması için ideal bir ortamdır. Bir hava boşluğu ile karşılaşan elektromanyetik dalgalar aniden hızlanmakta ve bu yeni ortamın ara

yüzeyinden kuvvetli yansımalar göndermektedir (Şekil 2.28). Bu nedenle hava boşluklarının GPR yöntemi ile saptanması mümkündür (Koçaslan, 2008).



Şekil 2.28: Boşlukların oluşturduğu belirgin yansımalar (<http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/RoadwaySubsidence/512GroundPenetratRaadar.cfm>).

2.6.6. Tünel Patlatma Tasarımının İyileştirilmesi

GPR yöntemi sağlam kaya ortamlarında açılan tünellerde kullanılan patlatma çalışmalarının kontrollü bir şekilde hem tünel yapısına hem de tünel çevresine zarar vermeden uygulanabilmesini sağlar. Uygun bir patlatma tasarımı (delgi aygıtı, patlayıcı maddenin cinsi ve miktarı, delik dizaynı) için kayacın değişken yapısal jeolojik süreksizlikleri GPR yöntemi ile yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlayarak hem ekonomik verim hem de istenilen parçalama verimi sağlanmış olur.

Ankara yakınlarında bir taş ocağında GPR yöntemi ile uygun patlatma tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, patlatmanın var olan süreksizliklerden daha az etkilenmesi sağlamak amaçlı ocaktaki süreksizliklerin yeraltındaki uzanımlarının GPR ile belirlenmesi ve bu süreksizliklerin konumları dikkate alınarak patlatma tasarımlarında değişiklikler yapılabileceğinin gösterilmesidir. GPR profilleri, çalışma alanında gözlenen kırığa dik olacak şekilde oluşturulmuştur. Pulse EKKO100A radar sistemi (Sensor & Software) ve merkez frekansı 25 MHz olan açık sistem anten kullanılarak çalışma alanında 44-46 m derinliklere ulaşılmış ve zayıf, kırıklı ve sağlam bölgeler belirlenmiştir. Basamak yüksekliği, patlayıcı deliklerin konumları, dilim kalınlığı/delikler arası mesafe oranının, kullanılacak patlayıcı miktarı belirlenerek parça boyutunda iyileşme olduğu görülmüştür (Kadioğlu, 2004).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MALZEME

Bu çalışma, iki farklı tünel projesi içerisinde tünel imalatının kalite kontrolünde jeofizik yöntemlerinden biri olan Jeoradar (GPR) kullanılarak gerçekleştirilen test ölçümlerinin değerlendirmesini içermektedir.

Tünel içerisinde Zond 12e marka Jeoradar Kontrol ünitesi, HP laptop, alıcı verici antenler ve enerji kaynağı olarak Akü Kullanılmıştır. Sahada korumalı (shielded) olan 1500 MHz'lik anten kullanılmıştır.

Elde edilen 2D veriler Prism2.5 ve Reflex 2D programı yardımıyla veri işlem aşamalarından geçirilmiştir. Veri işlem aşamalarında geçirilen 2D veriler daha sonra, Voxler programında üç boyutlu grafik yazılımları kullanılıp bir araya getirilerek, GPR verileri (radargramlar) yorumlanmıştır.

3.2. GPR YÖNTEMİ

3.2.1. GPR Yöntemi Çalışma Prensipleri

GPR yöntemi yeraltının sığ tabakalarının (ilk 0-40 metre) araştırılmasında kullanılan mühendislik problemlerini yüksek çözünürlüklü, hızlı ve tahribatsız test ve tespit edilebilme özelliği ile kullanım alanları oldukça geniş, sıklıkla başvurulmuş en önemli jeofizik yöntemlerden biridir. Yöntemde kaynak olarak yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır.

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 derin ortamlara ilerleyebilmektedir. Alıcı bir anten ise yansıyan sinyalleri almaktadır. Alınan sinyaller kontrol biriminde biriktirilmekte ve çift yol seyahat zamanı nano saniye cinsinden kaydedilmektedir (Davis ve Annan, 1989). Sinyalin gönderilip ve alınması arasında

geçen süre derinliği belirler. Dalganın ulaşabildiği maksimum derinlik, anten frekansına ve ortamın dielektrik özelliğine bağlıdır.

Tablo 3.1: GPR yönteminin kullanım alanları.

Kullanım Alanları	Etütlerin Uygulama Alanları
Jeolojik Etütler	Doğal boşlukların ve çatlakların bulunması, yüzeysel alüvyon haritalaması, stratigrafik haritalama, buzul jeolojik araştırmaları, tuz domu bulunması, fay, dayk, damar bulması, akarsu yatağı depozitlerini haritalama
Zemin Etütleri	Yol, havaalanı, baraj, su kanalı, santral, yerleşim alanı zeminlerin etütleri, sağlam zemin ve temel kaya derinliğinin belirlenmesi
Tünel Etütleri	Demiryolu, karayolu, su tünelleri, tüp geçitler, maden galerisi etütleri
Yapı Etütleri	Tavan, taban ve duvarların incelenmesi, restorasyon amaçlı etütler
Arkeojeofizik Etütler	Antik şehir, tapınak, mezar, duvar, temel, dehliz ve benzeri tarihi kalıntıların bulunması
Çevresel Etütler	Eski ve kaydı bulunmayan endüstriyel atık alanların tesbiti, fabrika, akaryakıt istasyonu, su yolu vb. kaçak ve sızıntıların belirlenmesi, çöp boşaltım alanlarının zemin etütleri, gömülü tankları ve petrol bidonlarının bulunması, gaz kaçaklarının lokasyon tesbitinde
Altyapı Etütleri	Eski kanalizasyon, su yolu, kanal, boru, sığınak, elektrik ve telefon hatlarının tesbiti
Adli ve Adli Tıp	Cezaevi firar tünellerinin tesbiti, ceset ve toplu mezar yerlerinin bulunması, özel koşullarda saklanmış olan para, silah ve uyuşturucu yerlerin belirlenmesi
Maden Etütleri	Yüzeye yakın madenlerin aranması ve rezerv geliştirme, galeri sürülerek yapılan maden (kömür) etütleri, turba kalınlığı haritalama ve kaynak değerlendirmesi, göçük ve maden kazalarında ilk yardım amaçlı çalışmalar

3.2.2. GPR Teorisi

3.2.2.1. GPR Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı

Jeolojik malzemelerin (su içeren) ve onların elektromanyetik özelliklerin fiziksel özellikleri arasındaki güçlü bir ilişki elektrik yöntemleri kullanarak yeraltının fiziksel yapıların tanımlanmasını sağlar. (Davis & Annan, 1989; Dallimore & Davis, 1987; Delaney & Arcone, 1982; Scott et al., 1978).

Çoğu jeolojik malzemeler yarı iletkenler veya dielektrik olarak kabul edilir, böylece üç elektromanyetik özellikler karakterize edilir; elektriksel iletkenlik, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik. Malzemenin elektrik iletkenliği, doğru akım iletim yeteneğinin bir ölçüsüdür ve belirli bir doğru akım için belirli bir mesafe boyunca yaşanan gerilim düşümü ile ters orantılıdır. Manyetik geçirgenlik mıknatıslanma kuvveti ile manyetik akı indüksiyon oranı olarak tanımlanır. Bir malzemenin manyetik süsebtibilitesi geçirgenliğin bir fonksiyonudur. Elektrik geçirgenliği boşaltılmış benzer kondansatörlerin kapasitansı dielektrikle birlikte doldurulmuş elektrik kondansatörün kapasitansı oranıdır.

Yeraltındaki elektromanyetik enerjinin hareketi seyahat boyunca malzemenin/ortamın yayılım sabitine bağlıdır. Boşlukta elektromanyetik dalgaların temel yayılım sabiti (K_0) tanımı;

$$K_0 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{0.5} \quad (3.1)$$

denklemleri ile verilir.

Denklemlerde ω radyan cinsinden frekansı, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini ve ϵ_0 boşluğun elektrik geçirgenliğini ifade etmektedir. Yer içindeki, elektromanyetik yayılım, seyahat boyunca malzemenin elektrik iletkenliği tarafından anlaşılması zordur. Yayılım sabitinin hesabı;

$$K = (\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma_{DC})^{0.5} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği, ε ortamın elektrik geçirgenliği ve σ_{DC} doğru akım elektrik iletkenliği ve $i = (-1)^{0.5}$ dir. Çoğu sediman ve suyun manyetik geçirgenliği olarak GPR uygulamalarında küçük bir sonuç olup (Telford ve diğ., 1976), boşluğun değerini, $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$, genellikle kullanır. Elektrik geçirgenlik GPR uygulamalarında büyük önem taşımaktadır ve genellikle bağıl dielektrik ya da dielektrik katsayısı;

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = K^* = K'\varepsilon_0 + iK''\varepsilon_0 \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Denklemdaki K^* kompleks dielektrik katsayısı, K' dielektrik katsayısı ve K'' kayıp faktörü olarak adlandırılır. Buradan yeraltındaki elektromanyetik dalganın yayılım faktörü;

$$K = [\omega\mu_0\varepsilon_0(\omega K' + i\omega K'' + i\sigma_{DC})]^{0.5} \quad (3.4)$$

olarak verilir.

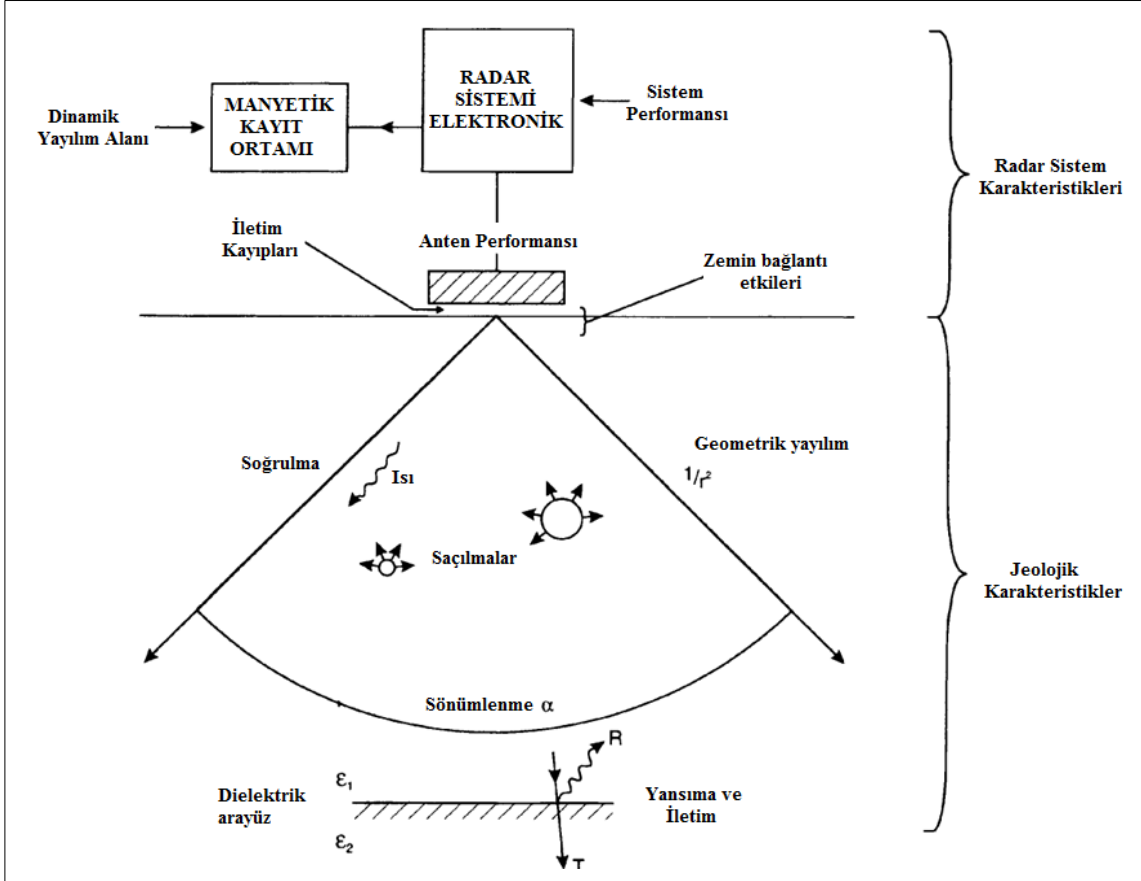
Denklemda $\omega K'$ dielektrik katsayısı faktörünü, $i\omega K''$ dielektrik kayıp faktörünü ve $i\sigma_{DC}$ DC iletkenlik kayıp faktörünü ifade etmektedir. Bu denklem, DC iletkenlik ve kompleks dielektrik katsayısının her ikisinin de madde içerisinde yayılan enerji miktarını belirlemede önemli olduğunu gösterir (Moorman, 2001).

3.2.2.2. Enerji Kaybı ve Sinyalin Sönümlenmesi

Radio dalgaları yer içerisinde hareket ederken, sinyal enerjisini azaltan yollar vardır (Şekil 3.1) . Radar dalgası her ara yüzey ile karşılaşırken bir kısmı yansır, kalan kısmı diğer ortama iletilir. Bu olaylar her defasında bir enerji kaybı meydana getirir. Buna ek olarak; ortamda radar sinyalinin dalga boyuna eşit boyutlarda nesneler varsa bu nesnelerden rastgele bir enerji saçılması olur. Bu olaya “mie saçılması” adı verilir (Reynolds, 1997).

Vericiden çıkıp seyahat eden EM dalga bir miktar ısı enerjisine dönüşerek kaybolur. Radar sinyali, 90 derece açıyla koni şeklinde yayılım gösterir. Vericiden yayılan

dalgaların enerjileri seyahat süresi boyunca; r uzaklıklı birim alanda ($1/r^2$) lik azalışa uğrar. Homojen olmayan düzensizliklerde saçılmalara neden olur (Doolittle ve diğ., 1995). Elektromanyetik dalgaların saçılımı, su içeren gözenek hacminin geometrik şekline bağlıdır (Shen ve diğ., 1985).



Şekil 3.1: Sinyal ilerlemesi sırasında sinyal gücünü azaltan faktörler (Reynolds, 1997'den düzenlenmiştir.).

Enerji kaybının temel ana nedeni sönümlenme olayıdır. Ortam içerisinde ilerleyen dalganın sönümlenmesinin ana nedenleri; dalganın içerisinde geçtiği ortamın elektrik ve dielektrik özellikleridir. Sönüm Faktörü (α), sinyalin kendi frekansına ($2\pi f$) bağımlı olduğu kadar ortamın elektrik (σ), manyetik (μ) ve dielektrik (ϵ) özelliklerine de bağlıdır. Bir materyalin toplam davranışı onu oluşturan bileşenlerinin fiziksel özelliklerine bağlı olup,

$$\alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu\varepsilon}{2}\right) \left[\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}\right) - 1\right]} \quad (3.5)$$

şeklinde gösterilir.

Formül sadece manyetik olmayan malzemeler için geçerlidir. Düşük kayıplı ortamda, sönümlenme (dB/m) (Davis ve Annan, 1989);

$$\alpha = \frac{(1.69 \cdot 10^3) \cdot \sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.6)$$

bağıntısından hesaplanır.

“ σ ” hem doğru akım iletkenlik hem de dielektrik kayıpları birleştirir .

Elektromanyetik enerjinin dağılım oranı sönümlenme katsayısı (α) ile ölçülür ve Moorman (2001)’e;

$$\alpha = \omega c^{-1} \{ [K'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)] / 2 \}^{0.5} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.

Denklemden $\tan^2 \delta = \sigma_{DC}(\omega K' \varepsilon_0)^{-1}$ ve boşluktaki ışık hızı $c = 2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ’dir. Elektrik iletkenlik ve dielektrik etkisi baskın olan bir ortamdaki sönümlenme katsayısı A-CUBED (1983) sönümlenme tahminini aşağıdaki bağlantıları kullanarak vermiştir;

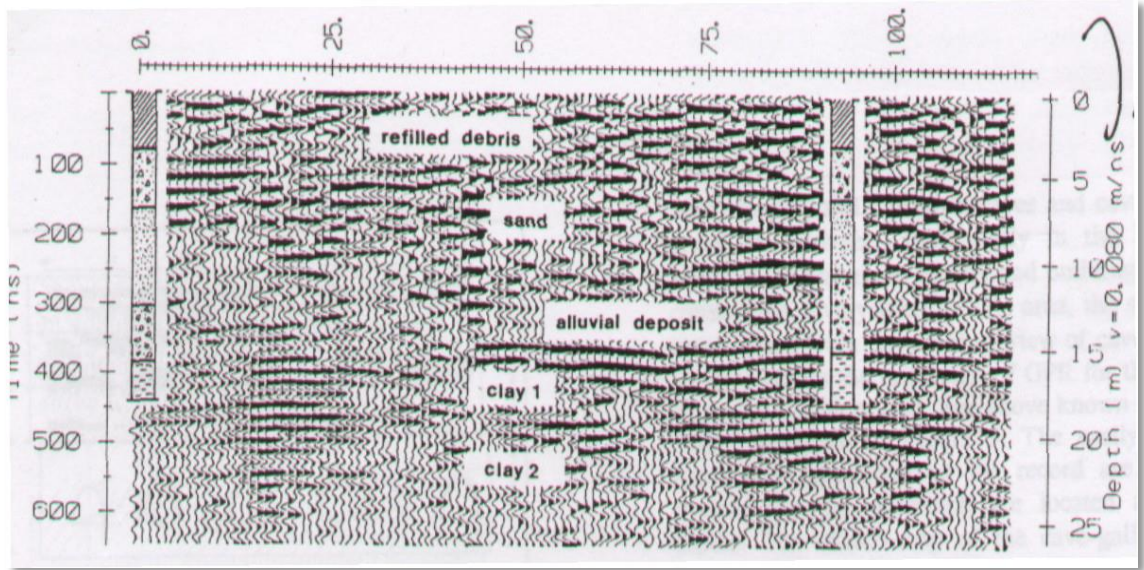
$$\alpha \approx (60\pi\sigma_{DC})/(k')^{0.5} \quad (m^{-1}) \quad (3.8)$$

veya

$$\alpha = 1.64\delta/(k')^{0.5} \quad (dBm^{-1}) \quad (3.9)$$

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 ve diğ., 2002). Yüksek iletkenli ortamlar, iletilen sinyalin soğurulmasına ve derinliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle GPR 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 diğ., 2003)



Şekil 3.2: 100 MHz. antenle alüvyal bir ortamda yapılmış bir çalışma (Weeds, 1994).

Alüvyal bir zeminde yapılmış olan bir çalışmaya ait GPR görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.2). Bölgede yaklaşık 100 metre aralıkta açılan iki sondaj arasındaki zemin değişimine bağlı olarak GPR sinyallerinin değişimi, özellikle killi seviyelerde GPR sinyallerinin yüksek iletkenlikten dolayı soğrulmaya uğradığı net bir şekilde görülmektedir.

Diğer elektromanyetik dalgalarda olduğu gibi, elektromanyetik dalganın $1/e$ (%37) kadar soğurulduğu derinliğe “**skin depth (δ)**” denir ve sönümlenme faktörü ile ters orantılıdır ($\delta=1/\alpha$). Skin depth, radarın penetrasyon derinliğine eşit değildir. Gerçek radar aralığını belirlemek için, elektromanyetik dalgaların yayıldığı ortamın özelliklerine ve araştırılması istenen hedefin etkili parametreleri (uzunluk, derinlik, eğim) dikkate alınmalıdır.

Radar uzaklığı aletsel faktörlere hem de radar dalgalarının içinde seyahat ettiği ortama ve ara yüzeye bağlıdır ve yol boyunca beş faktör enerji kaybına neden olur;

- Anten kayıpları,
- Hava ve yer arasındaki iletim kayıpları,
- Radar ışınının geometrik saçılmalarından doğan kayıplar,
- Malzeme özelliklerinin bir fonksiyonu olan zemin içinde sönümlenme,
- Radar sinyalinin saçılması nedeniyle kayıplar

Tablo 3.2: Bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri, n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade eder (Wilchek, 2000).

Malzeme	Bağıl Dielektrik, Sabit, $\epsilon_r (\epsilon/\epsilon_0)$	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 (doygün)	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Silt	5-30	1-100	0,07	1-100
Mineraller				
Kalsit	7,8-8,5	$5 \cdot 10^{-10}$	0,11	$3 \cdot 10^{-10}$
Kuvars	4,2-5	$3 \cdot 10^{-14}$ - $5 \cdot 10^{-12}$	0,13-0,15	$2 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-12}$
Tortul Kayalar				
Kireçtaşı	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Tuz (kuru)	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Kumtaşı	4,7-12	$1 \cdot 10^{-3}$ -0,7	0,09-0,14	$5 \cdot 10^{-8}$ -0,6
Şeyl	5-15	1-100	0,09	1-100
Magmatik Kayalar				
Bazalt	12	$8 \cdot 10^{-6}$ -0,025	0,09	$4 \cdot 10^{-6}$ -0,01
Dasit	6,8-8,2	0,05	0,12	0,03
Diyabaz	10,5-34,5	$2 \cdot 10^{-5}$ -50	0,05-0,09	$1 \cdot 10^{-2}$ -26
Diyorit	6	0,0002-0,002	0,12	0,0001-0,001
Gabro	8,5-40	0,001-1	0,05-0,10	$3 \cdot 10^{-4}$ -0,06
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	$5 \cdot 10^{-6}$ -100	n/a	n/a

3.2.2.3. GPR Sinyallerinin Yansıması

Yeryüzünde bulunan alıcıya ilk ulaşan doğrudan gelen hava dalgasıdır. Çünkü radar dalgalarının hava içinde ışık hızına yakın hızlarda seyahat etmesidir. Doğrudan gelen hava dalgasının seyahat süresi kolayca hesaplanabilir ve nispeten sabit bir değerdedir, varış zamanları sık sık statik düzeltme için işaretleyici olarak kullanılır.

Bir sonraki geri dönüş doğrudan gelen yer dalgasıdır. Bu tür radar dalgaları yeraltının üst yüzeyi boyunca seyahat ederler. Daha sonraki geri dönüşler dielektrik ara yüzeylerden geriye dönen yansımalarlardır. Bu yansımalar yüzeydeki alıcıya yansydıkları ara yüzeylerin yeraltında bulundukları derinlik sırasına göre ulaşırlar. Radar dalgaları ara yüzeylerden yansıyabileceği gibi kırılabilir. Kırılan radar dalgaları oldukça karmaşık görüntüler oluşturduğundan, sismik kırılmalarda olduğu gibi bunlar henüz ayrıntılı bir biçimde analiz edilememektedirler.

Radar kesitlerinde geri dönüşlerin şiddeti ve varış zamanlarını etkileyen üç değişken vardır: yansımaların gücü, radar dalgaların yayınma hızı ve sinyal sönümlenme oranı'dır. Işığın farklı kırılma indeksleri ile farklı iki madde arasındaki bir ara yüzeyden yansıması gibi, yeraltına gönderilen radar enerjisinin bir kısmı da farklı dielektrik özelliklere sahip iki ortam arasındaki ara yüzeyden yansır (Moorman, 2001).

GPR yönteminin başarısı, radyo dalgalarının yer içerisindeki iletimine bağlıdır ve komşu katmanlar arasındaki bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) elektromanyetik yayının yansımasına yol açar (Reynolds, 1997). En büyük yer altı malzemeleri arasındaki “ ϵ_r ” fark, büyük genlikli yansıma oluşturur; bu genlik yansıma katsayısı (R) kullanılarak belirlenebilir (Conyers ve Goodman, 1997): V_1 ve V_2 farklı katmanların radar hızları, ϵ_1 ve ϵ_2 farklı katmanların dielektrik katsayılarıdır.

$$R = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3.10)$$

Tüm durumlarda R'nin büyüklüğü , ± 1 aralığında değişmektedir. İletilen enerji yayılımı “1-R” ye eşittir. Bu denklem diğer sinyal kayıplarını üstlenmez. Verilen eşitliklerde diğer sinyal kayıplarını varsaymazsak düzlemsel bir yüzeye gelen dalgaın dik olması

durumu için geçerlidir ve sinyalin genliği ile ilgilidir. Güç yansıma katsayısı R^2 ye eşittir. (Reynolds, 1997).

3.2.2.4. Sinyal Hızı ve Derinliğin Belirlenmesi

GPR yayılımı, elektromanyetik yayılımdır ve Maxwell denklemleri tarafından açıklanmıştır (Reynolds, 1997). Bunlar Carcione (1996) ve Greaves vd. (1996) tarafından GPR çalışmaları kapsamında detaylı olarak ele alınır. Hız ve sönümlenme yerin yüksek frekanslı radyo dalgalarının yayılmasını tanımlayan faktörlerdir (Davis ve Annan, 1989).

Yeraltında seyahat eden radar dalgalarının hızlarının belirlenmesi, yansıtıcıların derinliğinin hesaplanmasında önemlidir. Ortamın dielektrik sabiti elektromagnetik dalga 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 dalga 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) .

Jeolojik malzemelerin elektromanyetik özellikleri, onların bileşimleri ve su içeriği ile ilişkilidir, elektromanyetik dalgalarının yayılım hızlarını ve sönümlenmesini bu iki parametre belirler. Herhangi bir ortamdaki radyo dalgalarının hızı (V_m) serbest ortamdaki ışığın hızına ($c=0.3 \text{ mns}^{-1}$), bağıl dielektrik sabitine (ϵ_r) ve bağıl manyetik geçirgenliğe (manyetik olmayan malzemeler için $\mu_r=1$) bağlı olup (Reynolds,1997):

$$V_m = c / \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right) [(1 + P^2) + 1]} \quad (3.11)$$

$$P = \sigma / \omega \epsilon \quad (3.12)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.13)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (3.14)$$

şeklinde gösterilir.

Burada;

P =Kayıp faktörü

σ = İletkenlik (S/m)

f = Frekans (Hz)

ε =Elektiriksel geçirgenlik

ε_0 = Serbest havanın elektiriksel geçirgenliği ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

olarak ifade edilir.

Radar sinyal hızı, radar dalgaları yayınım açısından uygun düşük -kayıplı jeolojik malzemelerde ($P \approx 0$) ε_r ile ilişkili olup (Davis ve Annan, 1989):

$$V_m = \frac{c}{\varepsilon_r} \quad (3.15)$$

denklemini ile verilir.

Moorman (2001)'e göre hem dielektrik katsayısı hem de DC iletkenlik bu ortamlarda yayılan radar dalgalarının hızlarını büyük oranda etkiler, yayınım hızı;

$$v = c\{(K'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)/2)\}^{-1} \quad (3.16)$$

ve

A-Cubed (1983)'e göre yayılım hızının tahmini;

$$v = 0.3(K')^{-0.5} \quad (m \, ns^{-1}) \quad (3.17)$$

şeklinde gösterilmiştir.

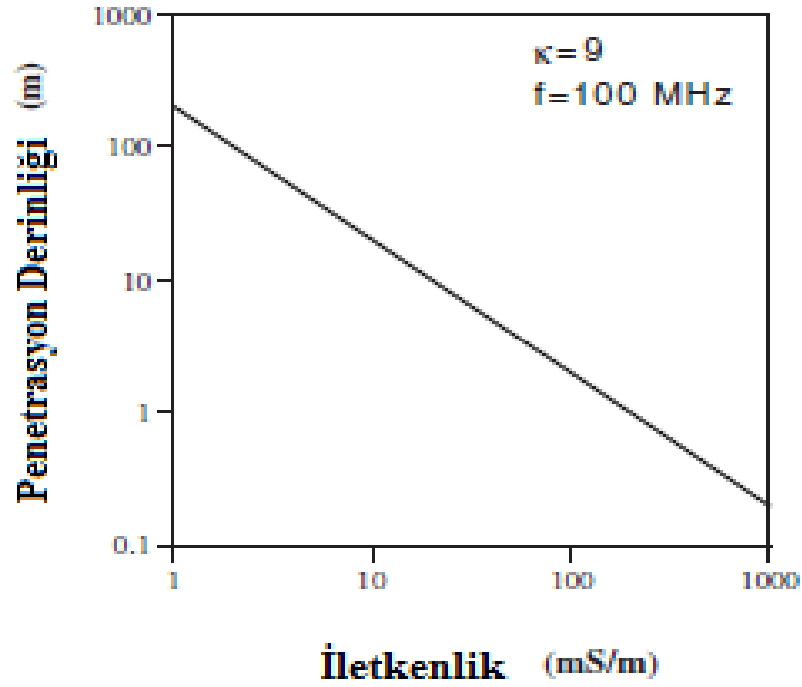
3.2.2.5. Penetrasyon Derinliği

Radar penetrasyon derinliği üç ana faktöre bağlıdır;

1. Radar yansımalarını oluşturan ara yüzeylerin sayısına ve her ara yüzeylerdeki farklı dielektrik sabitine,
2. Yeraltında seyahat eden sinyalin sönümlenme hızına,
3. Antenlerin merkez frekansına

Radar dalgaları her bir ara yüzeye ulaştığında, dalgaların bir kısmı yüzeye geri döner ve geri kalanı ise sonraki katmanların içlerine doğru ilerlemeye devam eder. Ara yüzeylerin sayısı arttıkça, derinlere doğru yayılan enerji miktarı azalır. Buna ek olarak, enerji miktarı her ara yüzeyde yüzeye geri yansıtılır, daha az enerji ile yerin daha derine yayılması için kullanılır. İstiflenmiş çökel tabakalardaki dielektrik farklılıklar karmaşık yansımalar oluşturur ve bu karmaşa ilgilenilen yansımaları maskeler ve araştırma derinliğini sınırlar.

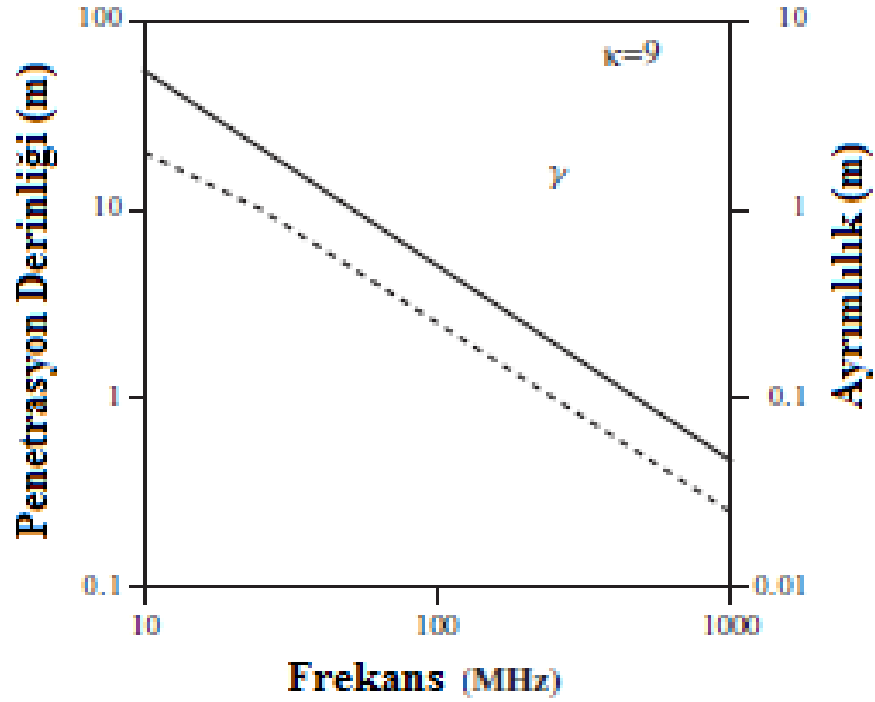
Malzemenin iletkenliği, GPR sinyalinin nüfuz edeceği derinlik üzerinde büyük bir etkisi vardır. İletkenlik arttıkça, malzeme daha bir iletken daha bir yarı-iletken gibi davranır. İletken akımları malzeme içinde EM alan için enerji yutucu bir mekanizmadır. Bu durumda, enerji geri dönüşü olamayan şekilde EM alandan elde edilir ve içinde olduğu ortama aktarılır (Moorman, 2001).



Şekil 3.3: Elektrik iletkenlik ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişkisi (Moorman, 2001).

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi yüksek iletkenli ortamlar radar dalgalarının penetrasyon derinliğini sınırlar.

GPR çalışma performansına etki eden diğer bir faktörde kullanılan anten frekansıdır. Uygulamalarda kullanılan anten frekansları 25 MHz ile 1000 MHz arasında değişmektedir. Bu frekans uygulama derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Antenin fiziksel boyutu iletilen dalgaların frekansını etkiler (Griffin ve diğ., 2002). GPR dalgalarının derinliği ve çözünürlüğü kullanılan anten frekansına bağlıdır (Takahashi, 2004). Yüksek frekanslı elektromagnetik dalgalar düşük frekanslı elektromagnetik dalgalara göre daha fazla detay ve yüksek ayrımlılık elde edilmesine imkân sağlar, fakat yüksek frekanslar çok hızlı emildiği için penetrasyon derinlikleri düşük frekanslar kadar mükemmel değildir (Griffin ve Pipet 2002).



Şekil 3.4: Frekans, ayrırlılık ve derinlik arasındaki ilişki (Moorman, 2001).

Frekans artıkça dalganın soğrulma miktarı artmaktadır (Şekil 3.4). Bu nedenle maksimum penetrasyon derinliği frekans ile ters orantılıdır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Frekans, ayrırlılık ve derinlik arasındaki ilişki (Mala Geoscience, 2003).

Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Penetrasyon (m)	Düşey Ayrırlılık (m)
10	60	2
25	50	1,0
50	40	0,5
100	25	0,25
200	12	0,125
500	6	0,05
800	2,5	0,03
1000	1,5	0,025

Örnekleme aralığı araştırmanın amacına göre belirlenir (Tablo 3.4). Örnekleme aralığı büyük alınırsa radar kesintilerinde yeterince ayrırlılığa sahip olmayan görüntüler elde edilecektir. Örnekleme aralığının sık olması ise yapının yerinin belirlenmesinde önemli bir etkindir.

Tablo 3.4: Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki (Sensors and Softwares, 1999).

Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Örnekleme Aralığı (m)
10	16,7
20	8,3
50	3,3
100	1,67
200	0,83
500	0,33
1000	0,17

Tablo 3.5: GPR parametreleri (dielektrik sabit, elektrik iletkenliği ve anten frekansı) arasındaki ilişki (Takahashi, 2004).

GPR Parametreleri	Dielektrik Sabit		Elektrik İletkenlik		Anten Frekansı	
	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
Yayılma Hızı	Yüksek	Düşük				
Penetrasyon	Kısa	Uzun	Uzun	Kısa	Uzun	Kısa
Dalga Boyu	Uzun	Kısa			Uzun	Kısa
Çözünürlük	Düşük	Yüksek			Düşük	Yüksek

3.2.2.6. Yapı Özelliklerinin Belirlenebilirliği ve Çözünürlük

Nesnenin boyutu ya da tabakanın kalınlığı, GPR sisteminin frekansı ve ortamın yayılım hızı ile ortamın en ince tabakaları ve nesnelerin yerlerini belirlemede önem taşıyan üç ana faktördür. Yüksek frekanslı antenler daha kısa dalga boylu radar dalgaları üretir ve böylece daha hassas çözünürlük elde edilerek daha küçük nesneler algılanabilir. Ortamın yayılım hızı önemlidir çünkü yer altı içinde oluşturulan dalgacık boyutunun belirlenmesinde sadece anten frekansı etkili değil yer altı boyunca yayılan hız da etkilidir. Eğer bir darbe daha düşük yayılım hızına sahip bir ortamda (örneğin suya

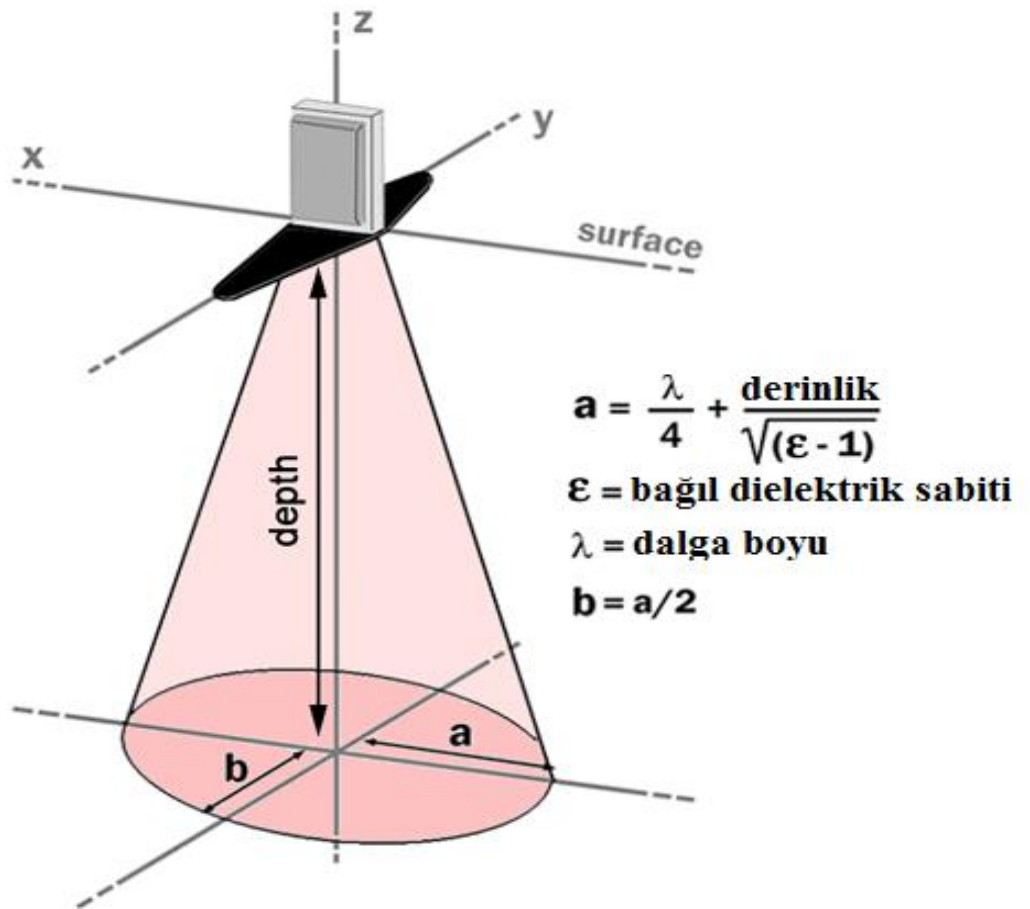
doygun bir ortam) ilerliyorsa, bu darbe ortam tarafından daha düşük hızı barındırmaya zorlanır.

Kesin düşey çözünürlük az bir açıda kesişen iki yansıtıcının araştırılması ile belirlenir (Sheriff, 1985). Bununla birlikte dalga teorisi, belirlenebilecek en büyük düşey çözünürlüğün bir dalgacığın boyutunun $\frac{1}{4}$ olduğunu ifade eder (Sheriff ve Geldart, 1982). GPR profilinde kaydedilen dalgacıkların boyutları yeraltına iletilen orijinal darbenin genişliğinin bir fonksiyonudur. 100 MHz ve 50 MHz antenler tarafından üretilen darbe genişliği ve bunun sonucunda çeşitli jeolojik ortamlarda ortaya çıkan maksimum teorik çözünürlük değerler Tablo 3.6 'da görülmektedir.

Tablo 3.6: Frekans oranına göre bant genişliğine sahip 100 MHz ve 50 MHz GPR antenlerin teorik çözünürlüğü ve darbe genişliği (Annan, 1992; Davis ve Anan, 1989; Ulriksen, 1982'den uyarlanmıştır).

Madde	100 MHz		50 MHz	
	Darbe Genişliği (m)	Teorik çözünürlük (m)	Darbe Genişliği (m)	Teorik çözünürlük (m)
Su	0.33	0.08	0.66	0.16
Buz	1.6	0.4	3.2	0.8
Doygun Kum	0.6	0.15	1.2	0.3
Doygun Kil	1.0	0.25	2.0	0.5
Kireçtaşı	1.2	0.3	2.4	0.6
Şeyl	1.0	0.25	2.0	0.5
Granit	1.3	0.33	2.6	0.66

Yatay ayrırlılık izler arasındaki uzaklıkla ve Fresnel zonu büyüklüğü ile kontrol edilir (Şekil 3.5). Geniş Fresnel zonu düşük yatay ayrırlılık demektir. Birbirine yakın iki yansıtıcı arasındaki minimum ayrırlılık çeyrek dalga boyu olarak alınır. Dalga boyu antenin merkez frekansından ve ortamın hızından yararlanılarak bulunur. Ancak pratikte yer ve anten etkileşmesinden dolayı dalga üç veya daha fazla devir yapmaktadır (Kadıoğlu, 2004).



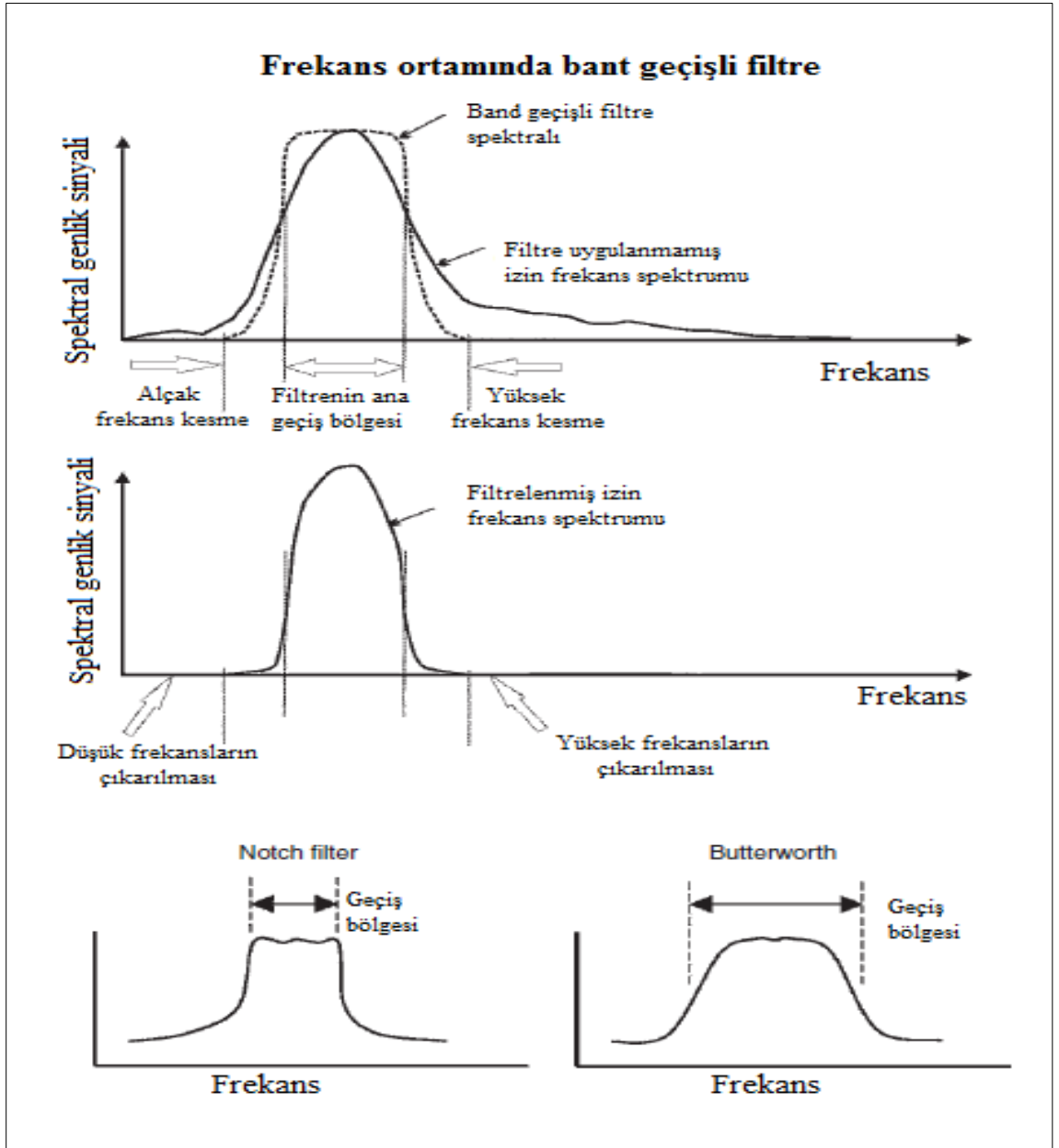
Şekil 3.5: Fresnel zonu ve yatay ayrırlılık (Mala Geoscience, 2003'ten düzenlenmiştir).

3.3. GPR VERİLERİNE UYGULANAN TEMEL VERİ İŞLEMLER

GPR antenleri, elektromanyetik radyo gürültüsü için özellikle yüksek frekans spektrumlarında hassastır. Tünel ortamında anakaya, radyo gürültülerini filtreler ve verilerde tespit edilemez. Tünel duvarı yansımalarında, havalandırma boruları ve elektrik tesislerinden gelen yansımalarla, gürültü kaynakları izole edilmiştir, muhtemelen belirli bir frekans bandına sahip ya da frekans ve zaman içinde değişen belirli bir zaman penceresi içerisinde verilerde anomalilere neden olur. Bunların gürültü kaynakları tespit edilip verilerden filtrelenmelidir (Saksa ve diğ., 2005).

3.3.1. Süzgeçleme

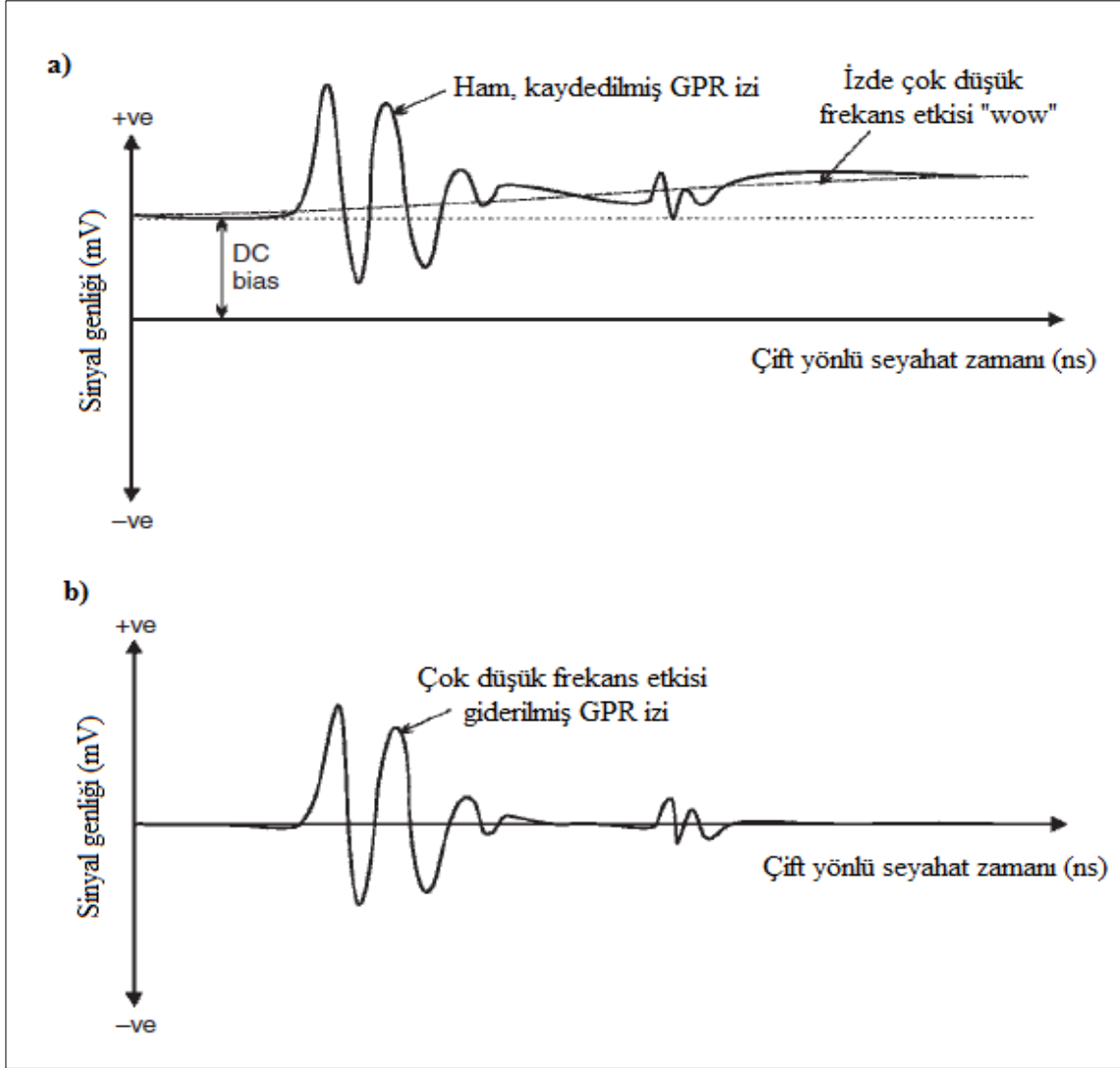
Süzgeçleme, çevresel (örneğin insan kaynaklı) ve sistemden kaynaklanan gürültüleri çıkarmak ve verilerin görsel kalitesini artırmak için verilere uygulanır. (Olhoeft, 2000; Lehmann ve diğ., 1996). Süzgeçleme işlemini gerçekleştirmek amacıyla kullanılan birçok farklı süzgeç tasarımı mevcuttur. Temel olarak, kullanılan süzgeçler alçak geçişli, yüksek geçişli, bant geçişli ve bant durdurucu süzgeçlerdir. **Alçak geçişli süzgeçleme**, belli bir frekanstan daha alçak frekanslı değişimleri geçirir, diğer frekanslı değişimleri süzer. Gürültüleri süzmede ve derin etkileri ortaya çıkarmada idealdir. **Yüksek geçişli süzgeçleme**, belli bir frekanstan daha yüksek değişimleri geçirir, diğer frekanslı değişimleri süzer. Sinyal sapması ve düşük frekansları kaldırmak için idealdir. **Band geçişli süzgeçleme**, hem yüksek hem de alçak geçişli filtre kombinasyonudur ve bu süzgeçleme işlemi bir "geçiş bölgesi" tanımlayarak belli iki frekans arasındaki değişimleri geçirir bunun dışındakilerini süzen süzgeçtir (Şekil 3.6). **Bant durdurucu süzgeçler**, belli iki frekans arasındaki süzgeçleri geçirir, diğer frekanslı değişimleri süzen süzgeçlerdir.



Şekil 3.6: Frekans ortamında basit bant geçişli filtre prensibi ve iki yaygın filtre fonksiyonu: Notch filtre (Sadece tek bir frekansı durduran süzgeçler) ve Butterworth filtre (Cassidy,2009'den düzenlenmiştir).

Dewow süzgeçleme, GPR verilerinde öncelikle sorun olan DC sinyal bileşeni ve çok düşük frekanslı sinyaller (wow) ortadan kaldırılmalıdır (Dougherty ve diğ., 1994). GPR ölçümleri sırasında“wow” olayı, erken gelen sinyaller yer/hava dalgası (Annan, 1993) ve verici anten ile alıcı anten arasında oluşan özellikle yüksek akım şiddetlerinden meydana gelen endüktif kuplaj etkisi ile oluşmaktadır ve bu etkileşimden doğan çok düşük frekanslı gürültüler istenilen sinyalleri örtmektedir. Bu etkiyi gidermek için

Şekilde 3.7’de görüldüğü üzere “dewow” filtreleme işlemi uygulayarak istenmeyen olaylar ortadan kaldırılır.



Şekil 3.7: a) Bir GPR izinin ham sinyali, b) “Dewow” süzgeci uygulanmış GPR izi (Cassidy, 2009’dan düzenlenmiştir).

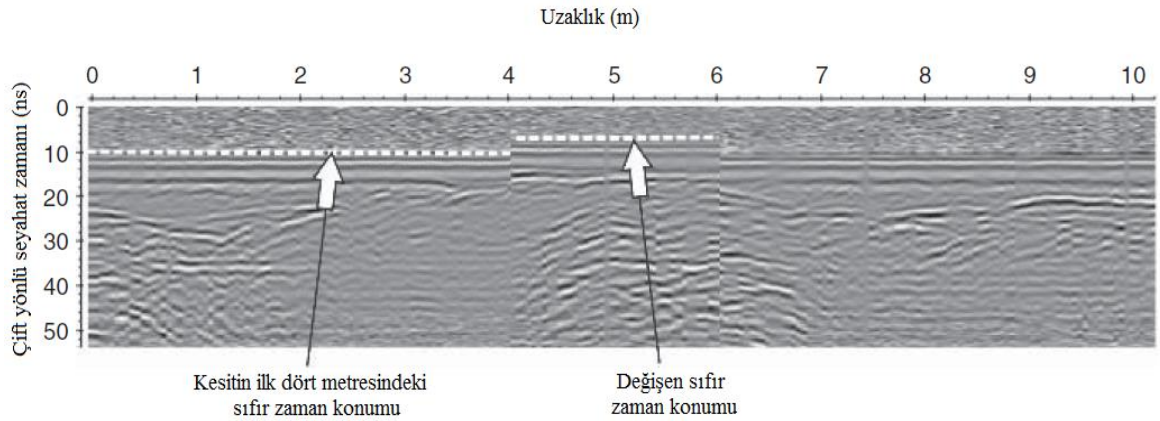
Dewow filtreleme işlemi her sinyal üzerinde farklı noktalarda ortalama genlik değeri hesaplayarak her veri setinden bunu çıkartır ve geriye kalan sinyalin “0 eksen”i etrafında yeniden düzenlenmesini sağlar.

Pratikte, bu zamansal süzgeçler yalnızca GPR sinyal bant genişliğinden daha yüksek ya da daha düşük frekansların kaldırılması için idealdir, sonuçta GPR verisinin görsel kalitesini artırmak için yapılan “temizleme” süzgeçleridir. İyi bir “temel kural” bant

genişliği ile tepe sinyali frekansı etrafında simetrik geçiş bölgesi ayarlanmalıdır ki bu frekans değerinin 1.5 katı değerine eşittir (Örneğin, 400 MHz lik bir tepe frekans için, geçiş bölgesinde en azından 100-700 MHz olmalıdır) (Cassidy, 2009).

3.3.2. Sıfır Zaman Düzeltmesi

Termal değişimler, elektronik duraysızlık, kablo uzunluğu farklılıkları ve antendeki değişimler, hava aralığı, hava/yer dalgacık ilk varış zamanında sıçramalara neden olur. şekil 3.8’de görüldüğü üzere genellikle zaman-sıfır noktası olarak adlandırılır (Olhoeft, 2000; Nobes, 1999; Young ve diğ., 1995).

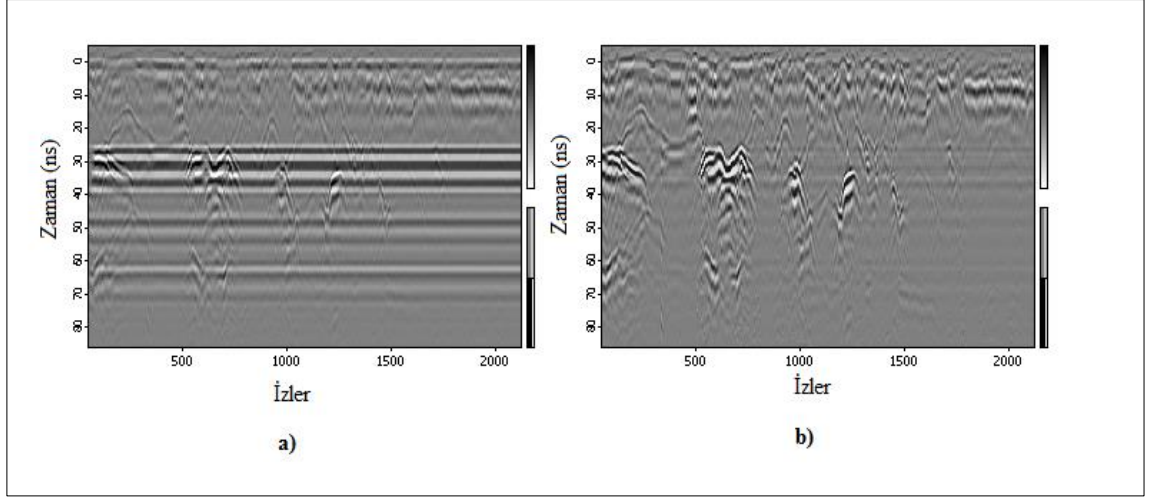


şekil 3.8: 450 MHz GPR kesitindeki sıfır zaman değişim örneği (Cassidy,2009’dan düzenlenmiştir).

Veri işlem metodu uygulamadan önce izler ortak sıfır zaman konumuna ayarlanması gerekir. Bu genellikle bazı özel kriterler kullanarak (örneğin hava dalgası ilk kırılma noktası ya da ilk izin negatif tepe noktası) veya çoğu kez işlem yazılımlarında otomatik olarak yapılarak elde edilir. Bu bölüm veriden atılarak başlangıç zamanı zaman ekseninin başlangıcına taşınır.

3.3.3. Background Removal

Radar verilerinin içerisinde yer alan gerçek sinyalleri önemli ölçüde maskelenmesine yol açabilen yatay gürültü (ringing) olarak adlandırılan bozucu sinyallerdir (şekil 3.9). Kesitteki tüm izlerin ortalaması alınır ve her izden alınan ortalama iz çıkarılır ve böylece arka plan gürültüsünü ortadan kaldırır.



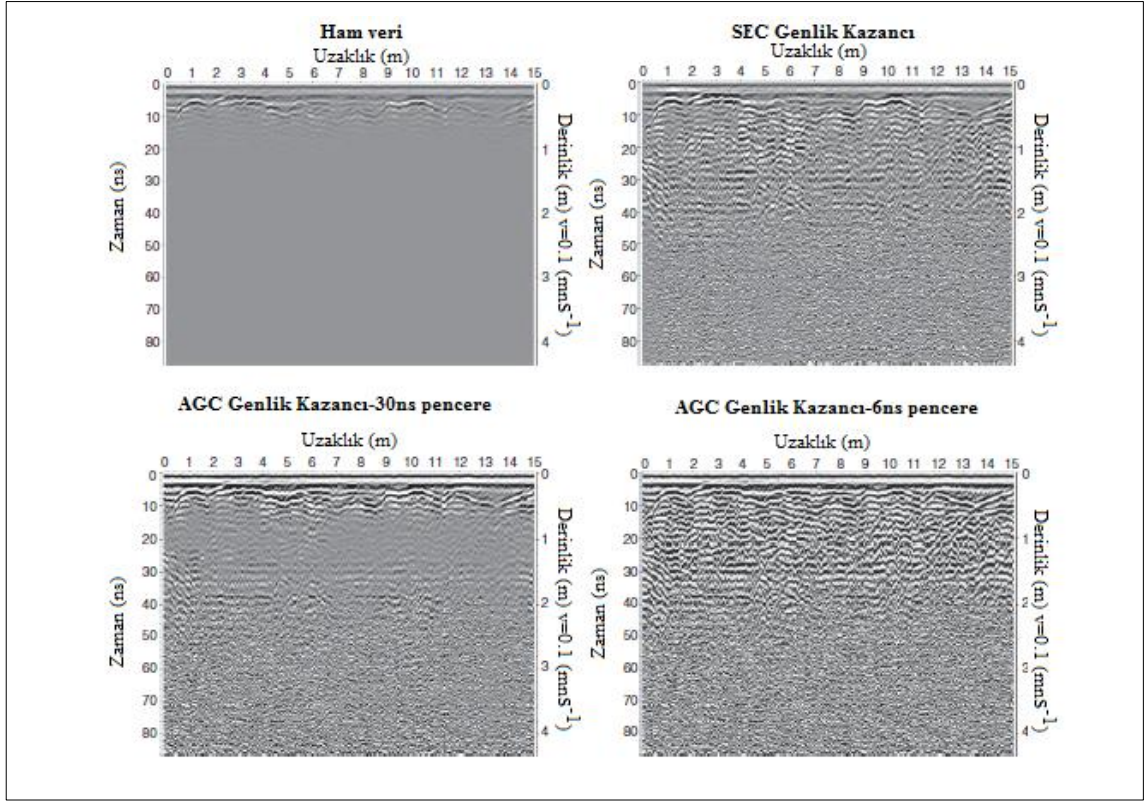
Şekil 3.9: a) Ham radar profili, b) radar profiline background removal (temel gürültülerin kaldırılması) süzgeç uygulandıktan sonraki görünümü (Prism kullanım kılavuzundan alınmıştır).

3.3.4. Genlik Kazanç Uygulaması

Radar verisi zamanla çok hızlı sönümlendiği için, derinlerden gelen genlik bilgisi yüzeye yakın bölgelere göre daha zayıf olmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla veriye genlik kazanç düzeltmesi uygulanır (Kadioğlu, 2004). Zamansal kazançlar sinyal zayıflaması ve geometrik yayılma kayıpları etkisi nedeniyle sonradan gelenler görünümünü güçlendirmek için gereklidir. Farklı türleri, örneğin, sabit kazanç, üstel kazanç, SEC, AGC, her biri farklı özellikleri vardır (Şekil 3.10) (Cassidy, 2009).

Küresel ve Üstel Düzeltme (SEC), Otomatik olarak yayılan bir dalga cephesinin geometrik yayılma etkisine bağlı enerji kaybı için sinyal genliğini düzeltir (yaklaşık, $1/r^2$). Kısacası küresel açılmayı ve enerjinin üstel sönümlenmesini geri kazanmaya çalışır.

Otomatik Genlik Düzeltmesi (AGC), Otomatik kazanç işlevi, genel olarak belli bir zaman penceresi içinde ortalama sinyal genliği ve izin maksimum genliği arasındaki farklılıklara dayalı her bir iz için uygulanır. Amaç iz içerisindeki tüm sinyalleri aynı seviyeye getirmektir.



Şekil 3.10: Arkeolojik bir mezar bölgesi üzerinde toplanan 450-MHz Yer Radarı (GPR) bölümüne uygulanan farklı kazanç fonksiyon örnekleri (AGC, SEC) (Cassidy, 2009'den düzenlenmiştir).

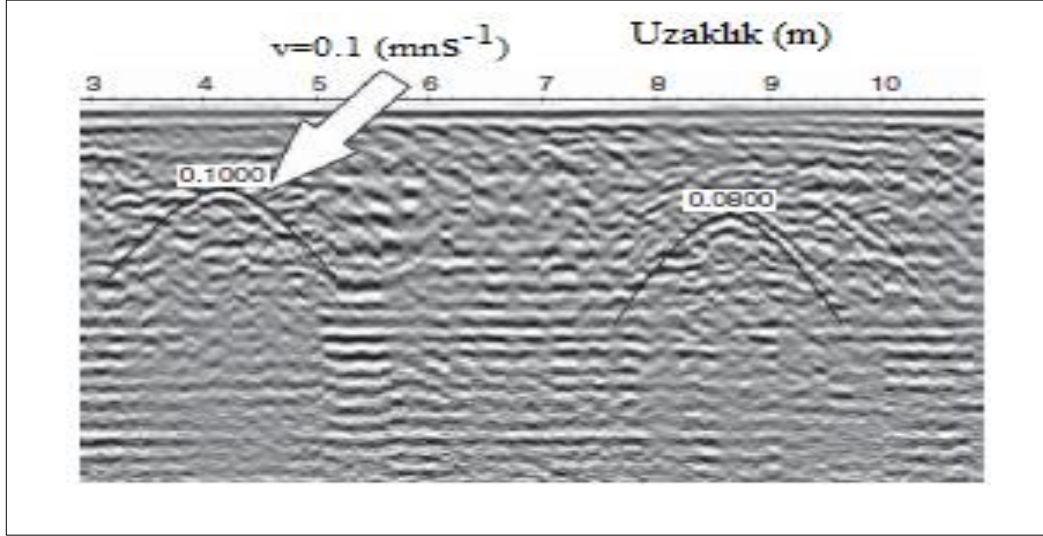
3.3.5. Genlik Renk Fonksiyonunun Düzenlenmesi

İlerleyen elektromanyetik dalga yansıma veya saçılmaya neden olan bir nesne veya bir arayüzeye çarptığında genlik bilgisi o nesnenin özelliğini taşıyan yansıma katsayısı ile ölçeklenir. Bu durum radargram üzerinde olayın veya nesnenin tanımlanmasına yardımcı olmaktadır. Bir olayı görüntüleme ve baskın hale getirebilme amacıyla genlik-renk görüntüleme fonksiyonu düzenlenir. Bu tamamen yorumcunun düzenlediği bir fonksiyondur. Süzgeçleme ve genlik kazanç uygulamasından sonra doğru yorum için en etkin olan genlik-renk görüntüleme fonksiyonudur (Kadıoğlu, 2004).

3.3.6. Hız Analizi

Saçılmayı meydana getiren nesnenin yarattığı hiperbol, ortamın hızı hakkında bilgi verir ve ortamın hızı GPR verileri üzerindeki hiperbollerden yararlanarak hiperbol çakıştırma işlemi ile hesaplanır (Şekil 3.11). Radargramlar üzerindeki bir hiperbolün tepe noktası

ve yan açılımı üzerindeki bir noktanın işaretlenmesi suretiyle belirtilen hiperbole neden olan olaya ait hız belirlenmektedir (Kadıoğlu, 2003).



Şekil 3.11: Hiperbol çakıştırma ile hız belirleme (Cassidy, 2009'den düzenlenmiştir).

3.4. TÜNEL İÇİ KAPLAMA DURAYLILIĞININ ARAŞTIRILMASINDA GPR YÖNTEMİ İLE TAHRİBATSIZ TEST UYGULAMASI (NON-DESTRUCTIVE TESTING/NDT)

3.4.1. Tünellerde İç Kaplama Duraylılık Problemlerin Tanımlanması

Metro, demiryolu, karayolu, atık su, tünel güzergâh araştırmalarında (fizibilite), imalat projelerinde, tünel öncesi ve sonrasında, tünel duvarlarının kaplanması sonrası uygulanan dolgu işlemlerin test edilmesinde, tünel duvarları beton ve iç donatı kalitesinin ölçülmesi söz konusu olduğunda tahribatsız test yöntemlerinden (NDT) olan jeofizik uygulamalar son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tünel kaplaması hem statik hem de dinamik yüklemeye maruz kalacağından tasarımda dikkate alınacak toplam gerilme büyüklüğü aşağıdaki gibi verilir;

$$\sum \sigma = \sigma_{mak,s} + \sigma_{mak,d} \leq \sigma_{em}$$

$\sigma_{mak,s}$ = Statik yüklemekten kaynaklanan gerilme

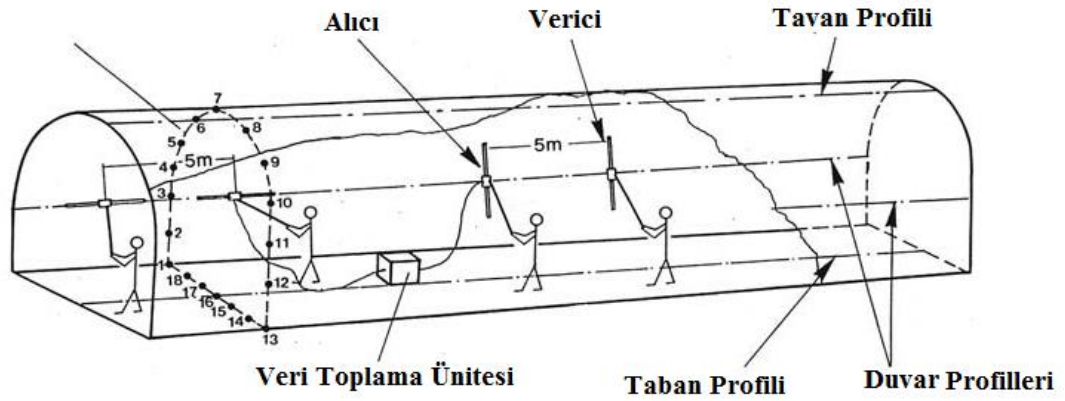
$\sigma_{mak,d}$ = Dinamik yüklemeden kaynaklanan gerilme

σ_{em} = Beton emniyetli dayanımı

olmalıdır (Arıoğlu ve diğ.,2006).

Tünel güzergâhının yer altı yapısını aydınlatılmasında yüzey jeofizik yöntemleri bazen uygulama imkânı sağlayamayabilir. Çünkü güzergâh, yerleşim alanlarının, nehirlerin ya da dağlık arazilerin altından geçiyor olabilir. Bu durumda tünel çalışma hızını etkilemeyecek ve tünel kazı çalışmalarıyla beraber yürütülecek jeofizik yöntemler kullanılır.

Enine kesit boyunca ölçümler



Şekil 3.12: Tünel/Galeri içinde GPR ölçümlerin konumlandırılması (Takahaski, 2004'ten düzenlenmiştir.)

Tünel kalıplarında (segment, shotcrete vb) hem beton hem de iç dolgu kalite kontrolü sağlamak için alınan karot örnekleri hasarlı tespit yöntemlerindendir. Açılan boşluk taşıyıcı kalıp sistemine binen yükün dağılımını etkilemekte ve sadece karot numuneleri alındığı yeri temsil ettiğinden diğer koruyucu kalıp sistemlerinin kalitesi hakkında ve kalıp-zemin arasındaki sorunların (su problemleri, enjeksiyon dağılımı, kırık-çatlaklar) belirlenmesinde yeterli kalmamaktadır. “GPR” yöntemiyle hem tünel duyarlılığına zarar vermeden ölçüm alınır hem de tüm tüneli 360° tarayabilme imkânı sağlayarak tünel yapısının tomografi görüntüsünü elde etmiş oluruz.

Zayıf zemin alanlarında kalkan tünel kaplamaların arkasındaki dolgu şekillerini ortaya koyma ve dolgu kalınlığının da kalitesinin belirlenmesinde tünel güvenliği ve çevresindeki yerleşim yerlerinin güvenliği için önemlidir. Şangay metro tünellerindeki dolgu malzemelerini zarar vermeden test etme olanağı sağlayan (GPR) yöntemi ile veri toplamada 200 MHz lik anten kullanılmıştır. Tünel kaplamada kullanılacak segmentler yerleştirildikten sonra, kalkan tünel yapım sürecinde dolgu enjeksiyon harcı, beton tünel kaplama segmentleri arasındaki boşluğa ve tünel kaplama blokları içindeki delikler aracılığıyla zemine enjekte edilir. İlk olarak ideal GPR parametrelerini elde etmek için kalkan tünel kaplamasının arkasındaki enjeksiyon (dolgu) malzemesinin dielektrik geçirgenliği laboratuvarda ölçülmüştür. İkinci olarak dolgu içindeki elektromanyetik dalga hızı CMP analizi ile tespit edilmiş ve elektromanyetik hızı 0.1 m ns^{-1} olarak belirlenmiştir. Üçüncü olarak GPR görüntülerini iyileştirmek için dalga dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Geleneksel filtreleme yöntemi GPR dalgasının sinyal sesinin iyileştirmekte etkili olduğunu, ancak farklı katmanları ayırmada yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu çalışmada sunulan dalga dönüşüm yöntemi dolgu sınırlarını belirlemede daha iyi görsellik sunar. Yöntemin süreçleri zaman ve uzay filtreleme, tanımlanmış genlik, mutlak hesaplamalar ve düşük geçirgenlikli filtre vb. içerir. GPR ile elde edilen veriler kullanılarak deneyimler göz önünde bulundurularak, Şangay Metro hattı için bir GPR ile tahribatsız test standardı ortaya konmuştur (Xie ve diğ., 2007).

Tünel, kalıcı bir yapıdır ve kaplama tünel yapısının önemli bir parçasıdır ve kaplama kalitesi aynı zamanda trafik güvenliğini de sağlamalıdır. GPR aleti tahribatsız tekniklerden biridir (Jing ve diğ., 2007). Cihazın özellikleri yüksek verimlilik, yüksek hassasiyet, yüksek ayırım oranı ve sığ algılama özelliği içerir. GPR tünel inşasının her aşamasında kullanılabilir (You ve diğ., 2007). Çalışmada, NATM yöntemi kullanılan tünel inşaatında ilk kaplama ve onu çevreleyen kaya ya da ikincil kaplama arasındaki mevcut boşlukların yerlerini belirlemek amacıyla, tünel bakımı için GPR tahribatsız test teknolojisi ve polimer enjeksiyon teknolojisi sunulmuştur. İlk olarak GPR ile tüm yapı kalitesini, tehlike oluşturacak yerleri ve mevcut boşluklar araştırılmıştır. Ardından GPR ile tespit edilen boşluklu bölgeler polimer enjeksiyon ile onarılmıştır (Jianguo, 2009).

4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında iki farklı tünelde Jeoradar (GPR) test ölçümleri uygulanmıştır. Jeoradar (GPR) çalışmalarında Zond 12e markalı korumalı (shielded) olan 1500 MHz'lik anten (Şekil 4.1) kullanılarak hem tüneli oluşturan tünel duvarlarında kullanılan beton kaplaması sonrasında uygulanan enjeksiyon işlemleri test edilmiş olup hem de tünel hattında ray altına yerleştirilen prekast beton elemanlar ile yerinde dökülen dolgu beton arasında boşlukların kalıp kalmadığının tünel imalatına zarar vermeden, hızlı ve ekonomik bir çözüm sunarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda GPR verileri (radargramlar), Prism2.5 ve üç boyutlu grafik yazılımları (Voxler3) kullanılarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.1: Saha ölçümlerinde kullanılan Yapı Radarı ekipmanı ve özellikleri (<http://www.radsys.lv/en/products-soft/products/prod/9>)

4.1. VERİ TOPLAMA

Bu çalışma, iki farklı tünel projesi içerisinde tünel imalatın kalite kontrolünde jeofizik yöntemlerinden Jeoradar (GPR) kullanılarak gerçekleştirilen test ölçümlerinin değerlendirmesini içermektedir. Her iki tünel hattı kazı çalışmalarında toprak basıncı dengeli EPB -TBM tekniği uygulanmıştır.

Tablo 4.1: Saha ölçümlerinde kullanılan GPR Radar Ekipmanının Özellikleri

Sistem	Anten Tipi	Anten Frekansı
Zond 12e	Shielded	1500 MHz

4.1.1. Tüneli Oluşturan Segmentlerin Arkasına Uygulanan Enjeksiyon İşlemlerin Jeoradar Yöntemi ile Test Edilmesi

4.1.1.1. Tünel Hattı Kazı Çalışmaları Hakkında Genel Bilgi

**Şekil 4.2:** TBM Tünellerine Genel Bakış.

Arazi basıncı dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri arazi akmasını ve su getirisini engellemek amacıyla kendini kısa süreli tutamayan kayaçların kazısında kullanılır. Başarılı bir kazının gerçekleşmesi için zemin özelliği genelinde killi malzeme olduğundan dolayı aşındırmayı kolaylaştıran, içsel sürtünmeyi azaltan ve düşük geçirgenliği sağlayan “köpük polimeri+su+hava”, zemini sıvılaştırarak kazıcı kafanın daha kolay dönmesini sağlar ve kazılan hafriyat vagonlar yardımıyla uzaklaştırılıp kazılan bölgeye yerleştirilen kilit taşı ile birlikte segment taşlarıyla 1 ring tamamlanarak

segmentler arasındaki boşluğu doldurmak ve segment-zemin arasındaki kontağı sağlamak amacıyla enjeksiyon (kum+kül+çimento+bentonit+su) verilerek zemin dengelenmesi sağlanır.

Enjeksiyon işlemi ile zemindeki boşluklara bir çözelti verilmek suretiyle zeminin mevcut geçirimsizliği, dayanımı ve stabilitesini iyileştirilmektir. Enjeksiyon karışımında akıcılığı sağlamak için bentonit, bağlayıcı ekonomisi için uçucu kül kullanılmıştır. Su geçirimsizliğin sağlanması ve zemin hareketleri sırasında segmentlerin birbirine zarar vermemesi için segment taşının etrafına contalama işlemi yapılmıştır (Şekil 4.4).

Tünel içi elemanlardan biri olan segmentler TBM makinasının gövde kısmında yer almaktadır. Segmentler beton (agrega+çimento+su) kalıplarla hazırlanmaktadır. Tüneli oluşturan betonarme segmentler lokomotif aracılığıyla makinenin gövde bölümüne yerleştirilir. TBM makinesi kazı işlemini tamamladıktan sonra gövde bölümünde yer alan hidrolik erektör sistemi tarafından lokumlanarak yerlerine yerleştirilen segmentler TBM tünelinin bir halkasını meydana getirir. TBM makinesi gövde kısmında yer alan pistonlar yardımıyla önceden döşenmiş diğer halkalara baskı yaparak öne doğru ilerletilir ve kazı bittikten sonra bu pistonlar makineye doğru geri çekilir ve açılan boş yere tekrardan bir ring oluşturacak şekilde ilk olarak alt segment daha sonra sağ ve sol segmentler yerleştiriliyor ve en son olarak kilit taşı ekleniyor. Deprem sırasındaki hasarı azaltmak için segmentler şaşırtmacılı olarak yerleştirilir ve normalde aynı hizaya döşenebilecek olan kilit taşları da sürekli değişen bir sıralamayı takip eder.



Şekil 4.3: Hidrolik erektör yardımıyla tüneli oluşturan segmentlerin dizimi.



Şekil 4.4: Segmentlerin kenarlarına yapılan contalama işlemi.



Şekil 4.5: Enjeksiyon Pompaları.

Enjeksiyon sistemi TBM makinasının gövde kısmında yer almaktadır (Şekil 4.5). Enjeksiyondaki amaç segment ve zemin arasındaki contağı sağlayarak su kaçakları ve vibrasyonları önlemektir. Enjeksiyon malzemesi, pompalar yardımıyla $\approx 1-2$ bar basınçla enjekte edilerek zemin ve segment arasındaki boşlukları doldurur ve TBM makinasının güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlar.

4.1.1.2. Tünel Hattında GPR Test Ölçümleri

Tünel içerisinde tüneli oluşturan segmentlerden su sızıntıları açığa çıkmıştır (Şekil 4.6). Problemlerin çözümü için ilk olarak deneme amaçlı enjeksiyon çalışmaları yapılmıştır ve sorunlu bölgelerde poliüretan enjeksiyonu ile sızdırmazlık oluşturulmaya çalışılmıştır (Şekil 4.6). Sonuç alınamayınca hasarsız GPR yöntemi ile segmentlerde geliş güzel enjeksiyon dalgileri yapılmadan, segment arkasındaki enjeksiyon yayılımı, kalınlığı ve içinde boşluk kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Segment taşlarından açığa çıkan su sızıntısı.

Tünel içinde veri toplama çalışmasında tavan boyunca taşınabilecek çift kanallı Zond 12e marka Jeoradar Kontrol ünitesi, alıcı verici antenler ve enerji kaynağı olarak akü kullanılmıştır. Anten frekansı 1500 MHz 'dir. Test çalışması olarak iki ringte yapılan ölçümlerde toplam 3 lokasyonda ölçümler alınmıştır (Şekil 4.8)



Şekil 4.7: Tünel içi Yapı Radarı(GPR) yöntemiyle veri toplama çalışmalarına hazırlık.



Şekil 4.8: Tünel içi Yapı Radarı (GPR) yöntemiyle veri toplama çalışmaları.

4.1.2. Tünel Hattı Ray Altına Yerleştirilen Prekast Beton İle Dolgu Beton Arasında Kalan Boşlukların Jeoradar Yöntemi İle Belirlenmesi

4.1.2.1. Tünel Hattı Kazı Çalışmaları Hakkında Genel Bilgi



Şekil 4.9: Tünel içerisinde prekast elemanların montajı.

Tünel hattında, ray altına prekast beton elemanlar kullanılmıştır. Prekast beton fabrikada imal edilmiş yerine monte edilirken, prekast betonun sağ ve sol kenarından ve prekast beton içinde bırakılan iki adet delikten beton dolgusu yapılmıştır.

4.1.2.2. Tünel Hattında GPR Test Ölçümleri

Tünel yapısında tünel tabanları prekast beton elemanlarla ideal bir alt konstrüksiyon teşkil eder. İleriki süreçte tünel içinde çalışma koşullarından dolayı, yeterli vibrasyon ve basıncın beton dökümü esnasında uygulanamamasından kaynaklanan problemler teşkil edebilir. Jeoradar (GPR) test ölçümleri sonucunda gerek beton dolgu içinde gerekse beton dolgu ile prekast beton içinde boşlukların kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir.

Tünel içinde veri toplama çalışmasında çift kanallı Zond 12e marka Jeoradar Kontrol ünitesi, alıcı verici antenler ve enerji kaynağı olarak akü kullanılmıştır. Anten frekansı 1500 MHz 'dır. Test çalışması olarak iki ray arasında 8 Profil, ray dışında da 1'er profil olmak üzere toplam 10 profil boyunca belli aralıkla seçilen anolarda ölçümler alınmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Tünel içi GPR yöntemiyle veri toplama çalışmaları.

4.2. VERİ İŞLEM AŞAMALARI

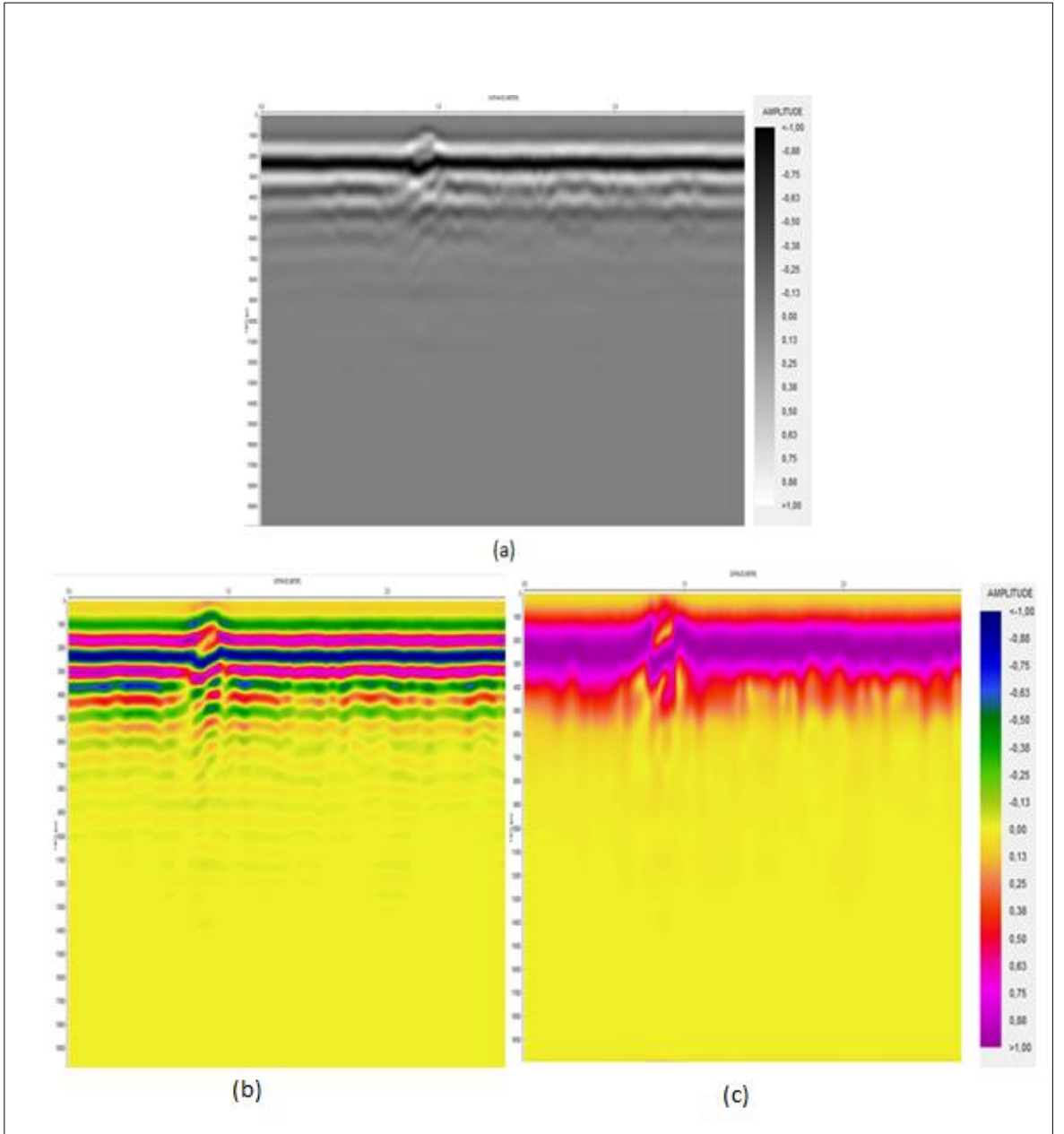
Bu tez çalışmasında tünel içinde toplanan verilerin işlenmesi ve yorumlanması amacıyla Prism2 v.2.5 paket programı kullanılmıştır.

Tünel içi ölçümler kontrol edilerek alındıktan sonra kaydedilen ham verilere **background removal** filtresi uygulanmıştır. Bu filtre ile yatayda etkili olan birbiriyle uyumlu olarak beliren gürültüleri (elektrik hatları, direkleri) bastırarak sinyali ortaya çıkarır ve tekrarlı yansımalar elimine edilmiştir. Kesitteki tüm izlerin ortalaması alınır ve her izden alınan ortalama iz çıkarılır ve böylece arka plan gürültüsünü ortadan kaldırır.

Daha sonra verilerden çok düşük ve çok yüksek frekansları elime etmek için **ombasy bant pas filtresi** uygulanmıştır. Bu filtre düşük frekanslı girişimin ve sinyalin yüksek frekanslı bileşenlerinin bastırılması amacı ile tasarlanmıştır. En son zayıf sinyalleri belirginleştirmek için genlik fonksiyonu ile kazanç sağlanmıştır. Genlik kazanç sinyal zayıflaması, geometrik yayılma ve saçılma kayıpları veya güçlü sinyal tarafından örtülenme sonucu gücünü yitiren dalganın genliğini artırmak için kullanılır.

Genlik bilgisini artırmak için amaçlanan **AGC (Otomatik Kazanım Kontrolü)**, genel olarak belli bir zaman penceresi genişliği içerisindeki ortalama sinyal genliği ve izin maksimum genliği arasındaki farklılıklara dayalı her bir iz için uygulanır. Amaç iz içerisindeki tüm sinyalleri aynı seviyeye getirmektir.

Hilbert Trasformasyonu uygulaması ise yansıma genlikleri ve geometri, GPR veri yorumlarına ulaşmak için kullanılan ilk bilgidir. Zaman alanındaki radar verileri, yansıma darbelerinin genliği ve zamanı olarak tanımlanır. Verileri tanımlamada diğer bir yol, zaman alanındaki sinyalleri frekans ve faz bilgilerine dönüştürmektir. Faz bilgisi bazen yer altı değişikliklere (dielektrik) genlik ve geometrik ayarlardan daha duyarlıdır. Hilbert dönüşümü; zaman dizisinin büyüklüğü içerisinde, anlık faz, veya anlık frekans bileşenleriyle temsil edilen radar sinyallerini ayrıştıracaktır. Hilbert dönüşümü, bir sinyalin büyüklüğü ve faz arasındaki ilişkiyi ifade eder, başka bir deyişle, gerçel ve sanal bölümleri birbirinde ayırır. Bir sinyalin fazının genliğini yeniden elde edilmesini sağlar (GSSI,2000).



Şekil 4.11: Tünel içi Reflex 2D programı ile örnek çalışma; (a) ham veri b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. DEĞERLENDİRME

5.1.1. Tüneli Oluşturan Segmentlerin Arkasına Uygulanan Enjeksiyon İşlemlerin Jeoradar Yöntemi ile Test Edilme İşlemlerinin Değerlendirilmesi

Ölçümler neticesinde çalışma alanında iki ringte toplam 3 lokasyonda alınan GPR verileri (radargramlar), Prisim2.5 programı ile değerlendirilmiştir.

GPR yönteminin yüksek çözünürlüklü özelliğini kullanarak tünel kaplama malzemesine zarar vermeden segmentlerin arkasındaki enjeksiyon yayılımı, kalınlığı ve içinde boşluk kalıp kalmadığı belirlemeye çalışılmıştır.

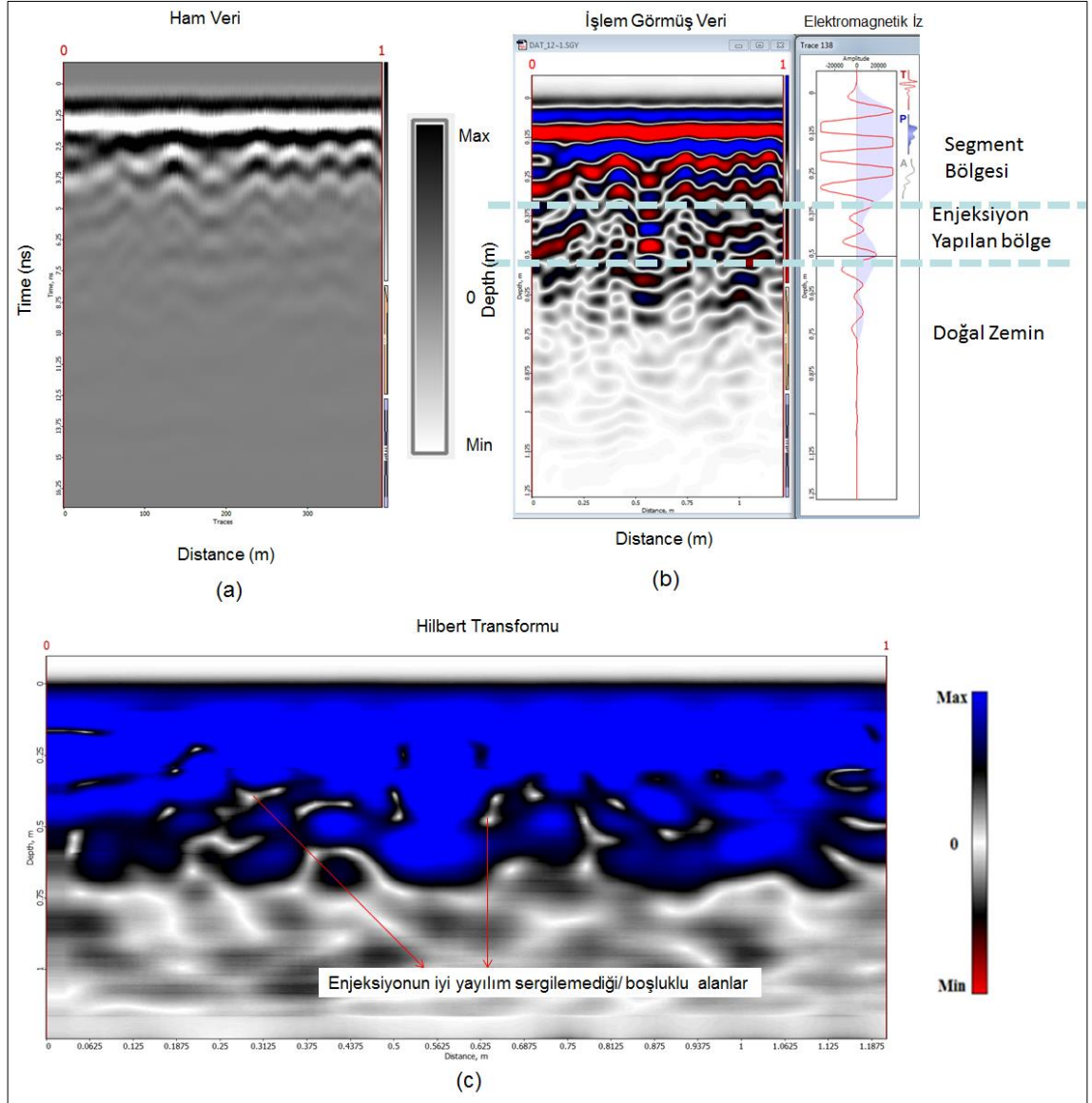
Tünel içi ölçümlerin değerlendirilmeleri sonucunda Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü üzere 32 cm kalınlığındaki 203 nolu ringin segment gerisindeki enjeksiyon kalınlığı sağa doğru 14-15 cm, sola doğru 16-18 cm kalınlığında olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.3’te görüldüğü üzere, 134 nolu ringin segment gerisindeki enjeksiyon kalınlığı profilin başlangıcında 24 cm, profilin sonuna doğru ise 16-18 cm kalınlığında olduğu belirlenmiştir.

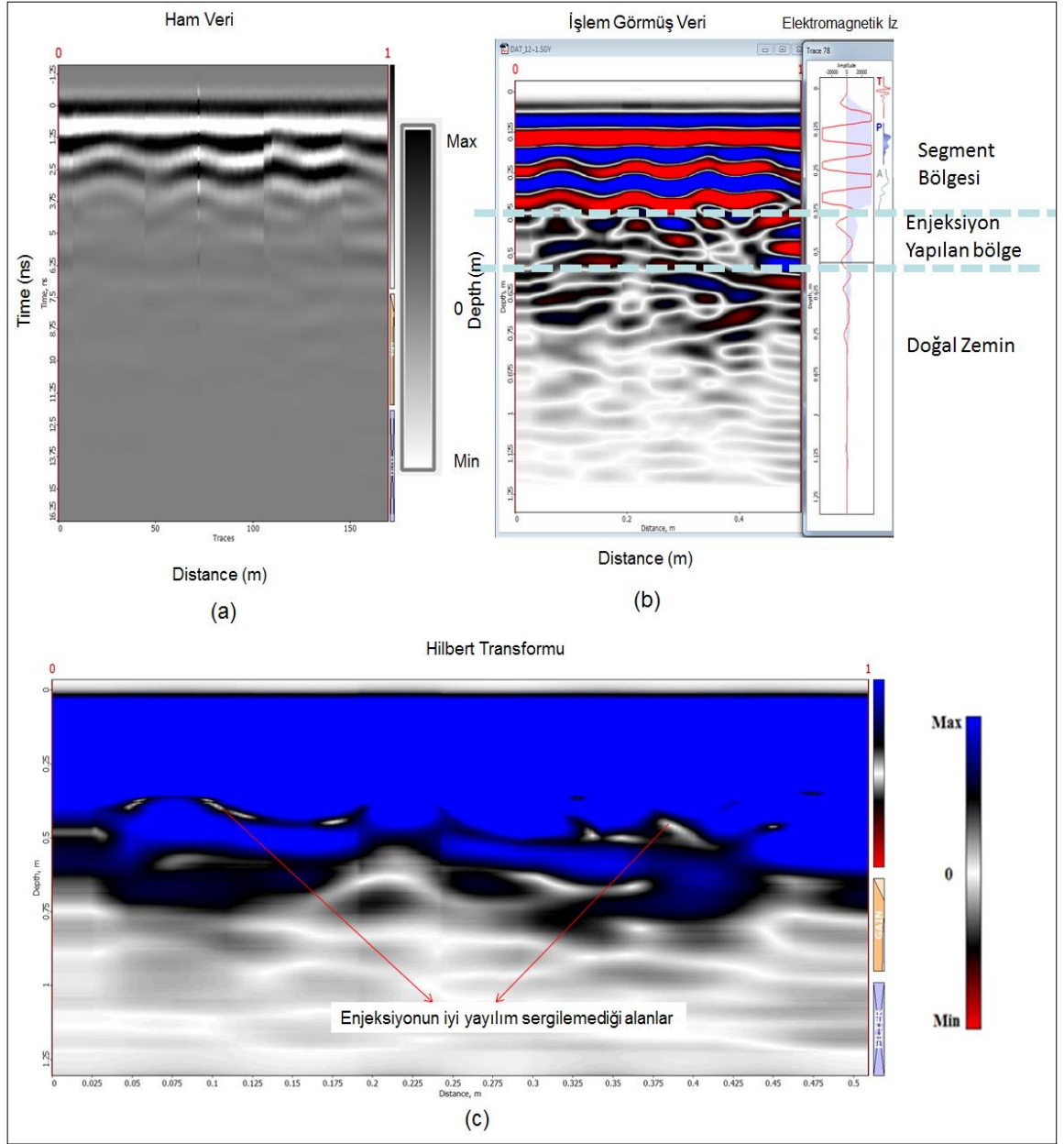
Tablo 5.1: TBM Tüneli Boşluk Enjeksiyonu Kalınlık Ölçümleri.

Ring No	Ring Kalınlığı (cm)	Grout Kalınlığı (cm)		
		Taç	Sol 45°	Sağ 45°
134	32	16-24 cm	-	-
203	32	-	16-18 cm	14-15 cm

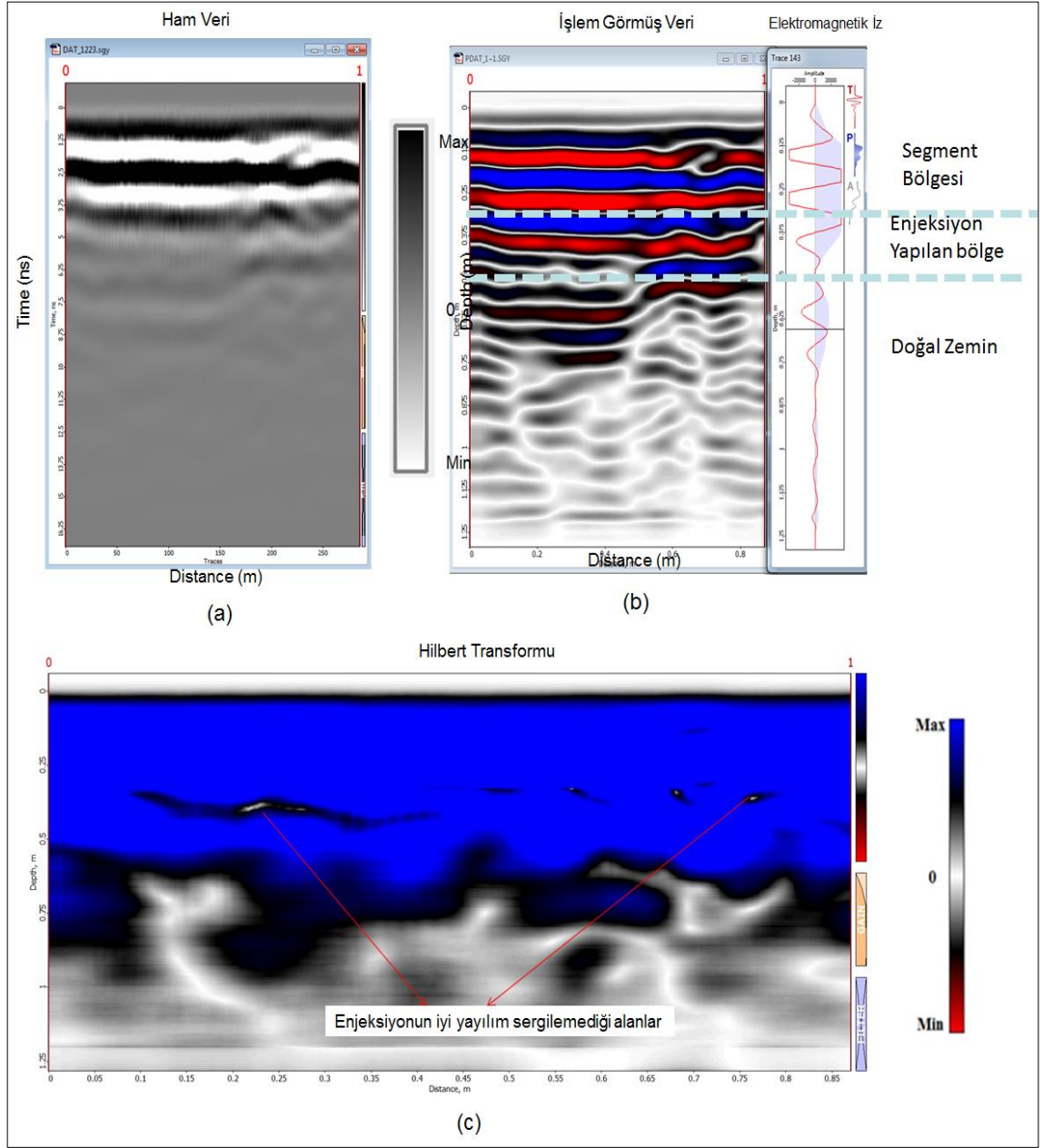
2D Radargram Kesitleri -Veri İşlemler ve Yorumlar



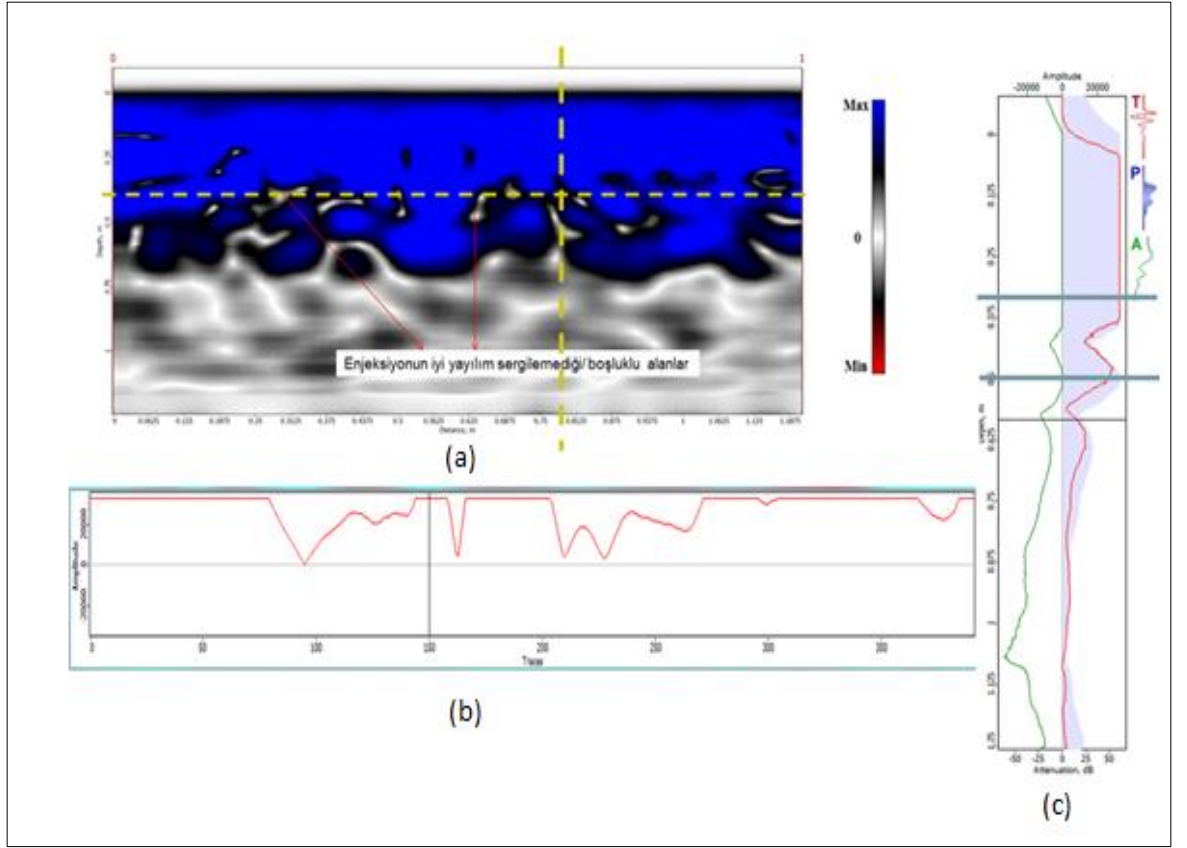
Şekil 5.1: Tünel içi 203 no'lu ringte sol 45° alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı



Şekil 5.2: Tünel içi 203 no’lu ringte sağ 45° alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



Şekil 5.3: Tünel içi 134 no'lu ringte taç kısmında alınan; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



Şekil 5.4: (a) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı, (b) -0.39 m derinlik kesitinde yatay yöndeki genlik zarf değerlerindeki değişimi, (c) yatay yöndeki genlik zarf değerlerindeki değişimi

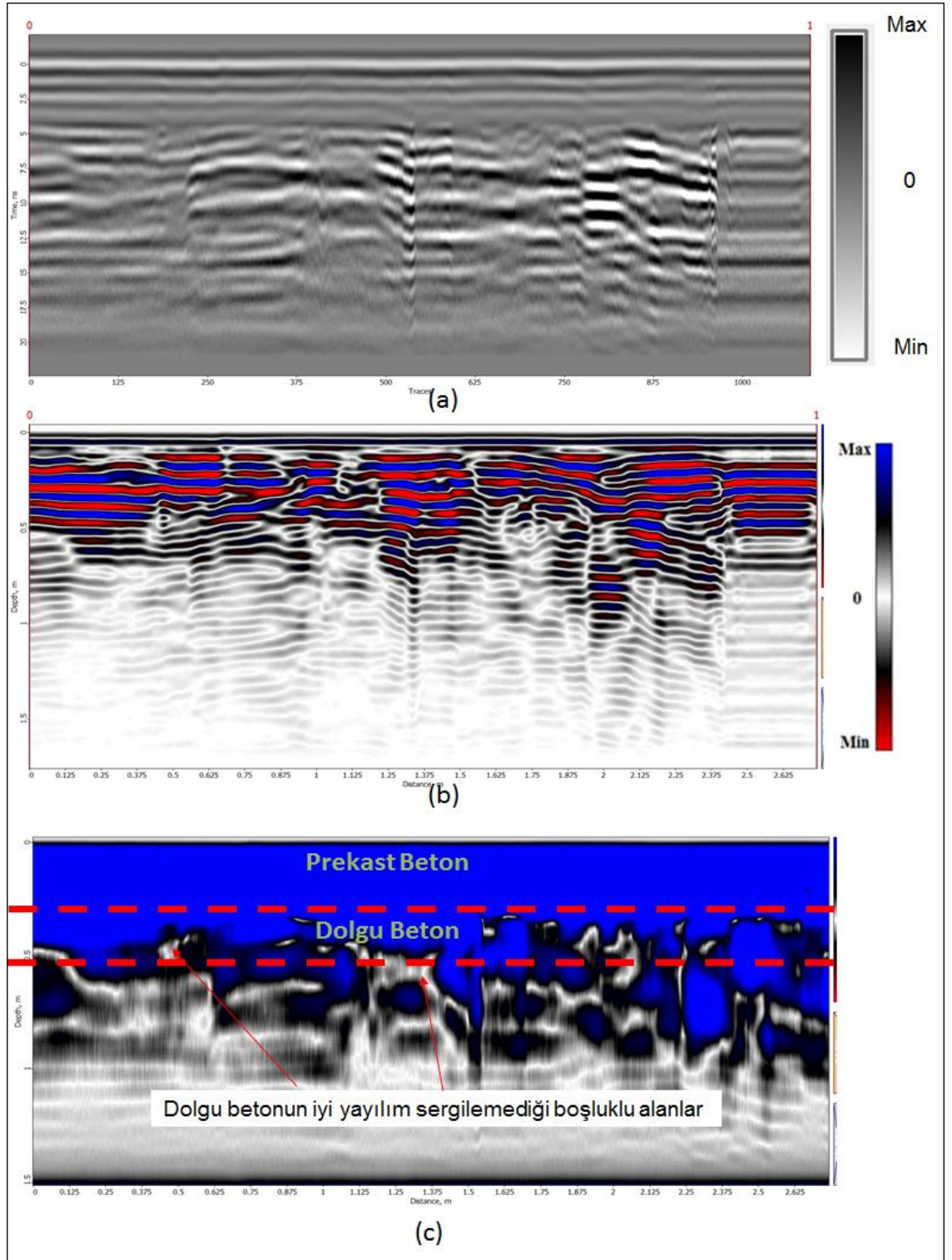
Hilbert Transformu fonksiyonu ile eş frekans dağılımı zaman domeninde gösterilmiştir. Bu şekilde özellikle homojen ortamda farklılıklar güçlü yansıma alanları görselleştirmede daha net görülmektedir. Hilbert Transformu Dönüşümü İle İz Boyunca Elde Edilen Sinyal Zarfı ile enjeksiyonun iyi yayılım sergilemediği boşluklar daha net olarak görüntülenmiştir.

5.1.2. Tünel Hattı Ray Altına Yerleştirilen Prekast Beton İle Dolgu Beton Arasında Kalan Boşlukların Jeoradar Yöntemi İle Belirlenmesi

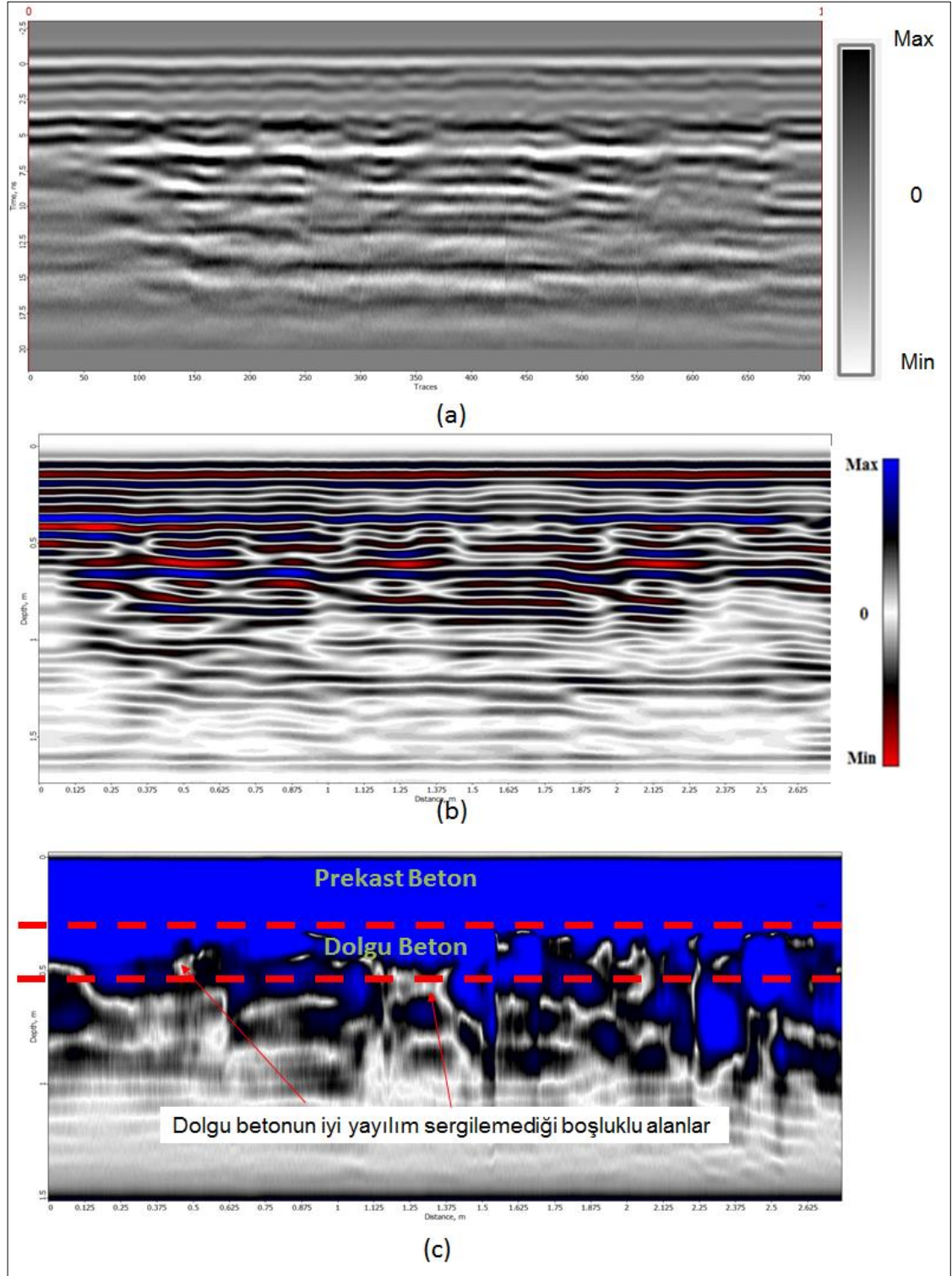
Ölçümler neticesinde iki ray arasında 8 Profil, ray dışında da 1'er profil olmak üzere toplam 10 profil boyunca belli aralıkla seçilen anolarda ölçümler alınmıştır. GPR verileri (radargramlar), Prisim2.5 programı ile değerlendirilmiştir ve üç boyutlu grafik yazılımları (Voxler3) kullanılarak yorumlanmıştır.

Tünel hattında ray altına yerleştirilen prekast beton elemanlar ile yerinde dökülen dolgu beton arasında boşlukların kalıp kalmadığı incelenmiştir. Tünel yapısında tünel tabanları prekast beton elemanlarla ideal bir alt konstrüksiyon teşkil eder. Prekast beton fabrikada imal edilmiş olup yerine monte edilirken, prekast betonun sağ ve sol kenarından ve prekast beton içine bırakılan iki adet delikten beton dolgusu yapılmıştır. İleriki süreçte tünel içinde çalışma koşullarından dolayı, yeterli vibrasyon ve basıncın beton dökümü esnasında uygulanamamasından kaynaklanan problemler ortaya çıkabilir. Jeoradar (GPR) test ölçümleri sonucunda gerek beton dolgu içinde gerekse beton dolgu ile prekast beton içinde boşlukların kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir.

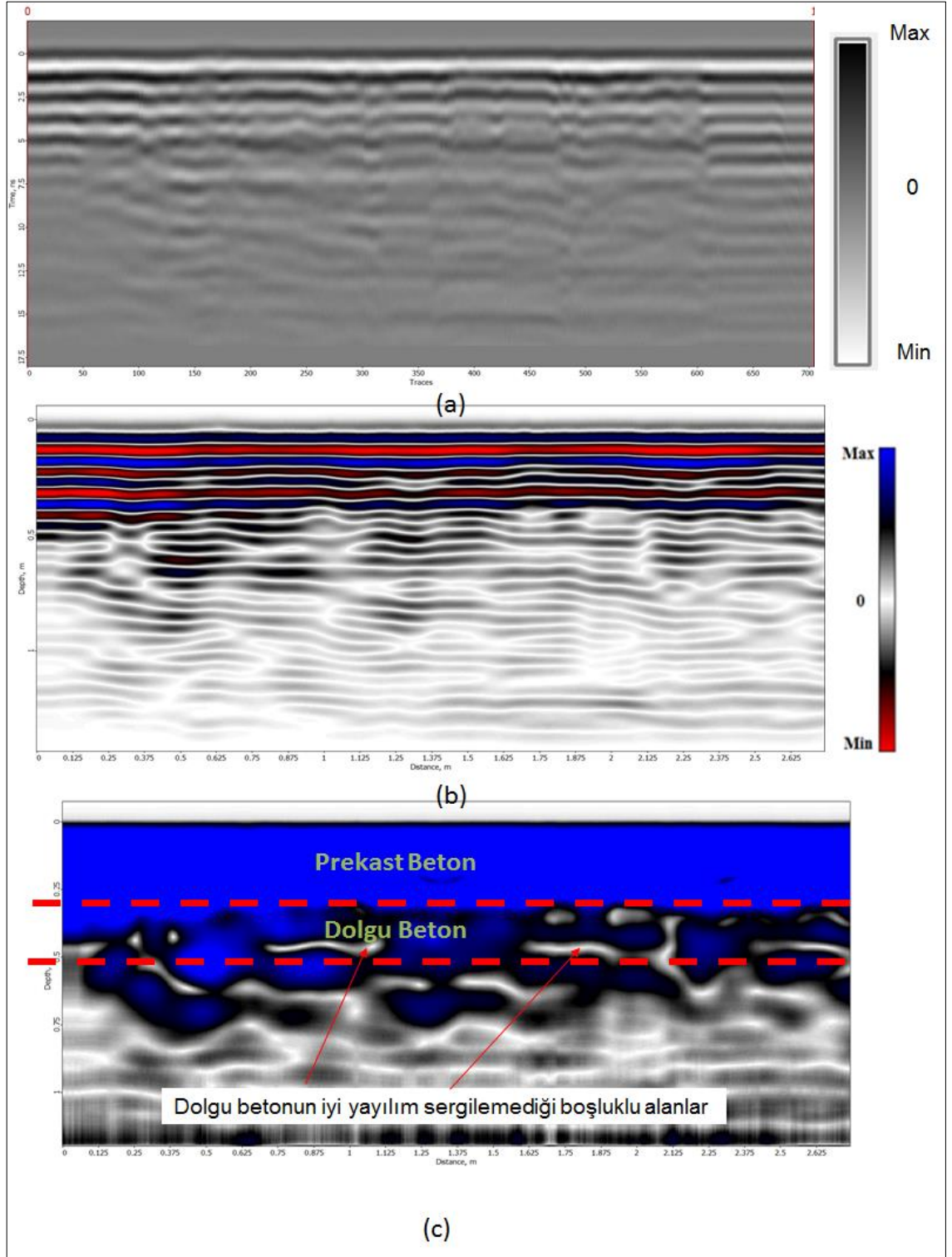
GPR verileri 2D kesitler olarak tek tek değerlendirilmiştir (Şekil 5.5- Şekil 5.14). Tüm profiller bir arada görüntülenmiş olup değerlendirmelerde hem yatay hem de düşey yöndeki amplitüd değişimleri dikkate alınarak oluşturulan 3D kesitlerde yüksek genlik değeri veren ve boşluklu alan olarak değerlendirilen bölgeler (Şekil 5.16- Şekil 5.17)'de görülmektedir.



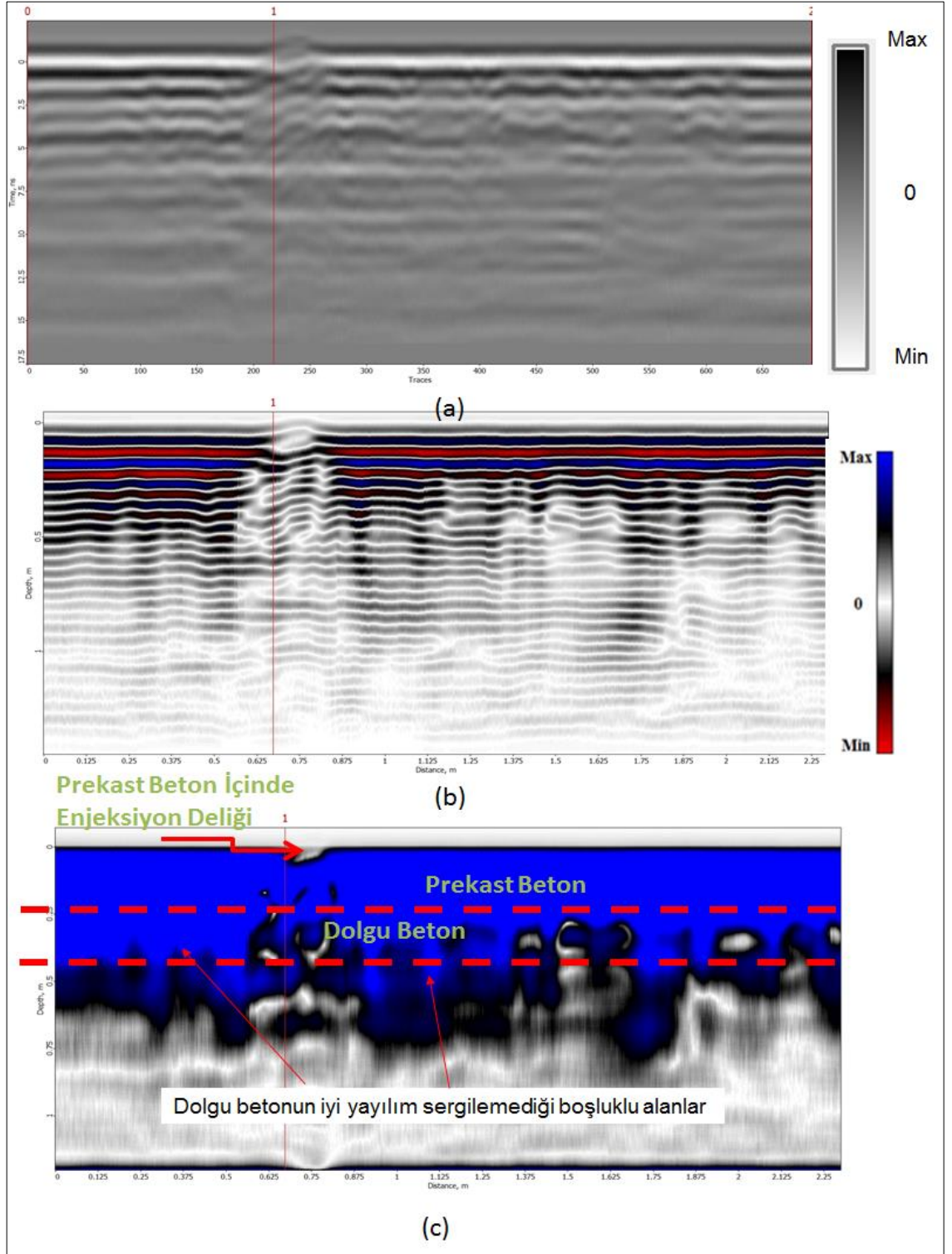
Şekil 5.5: Tünel içi 459 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



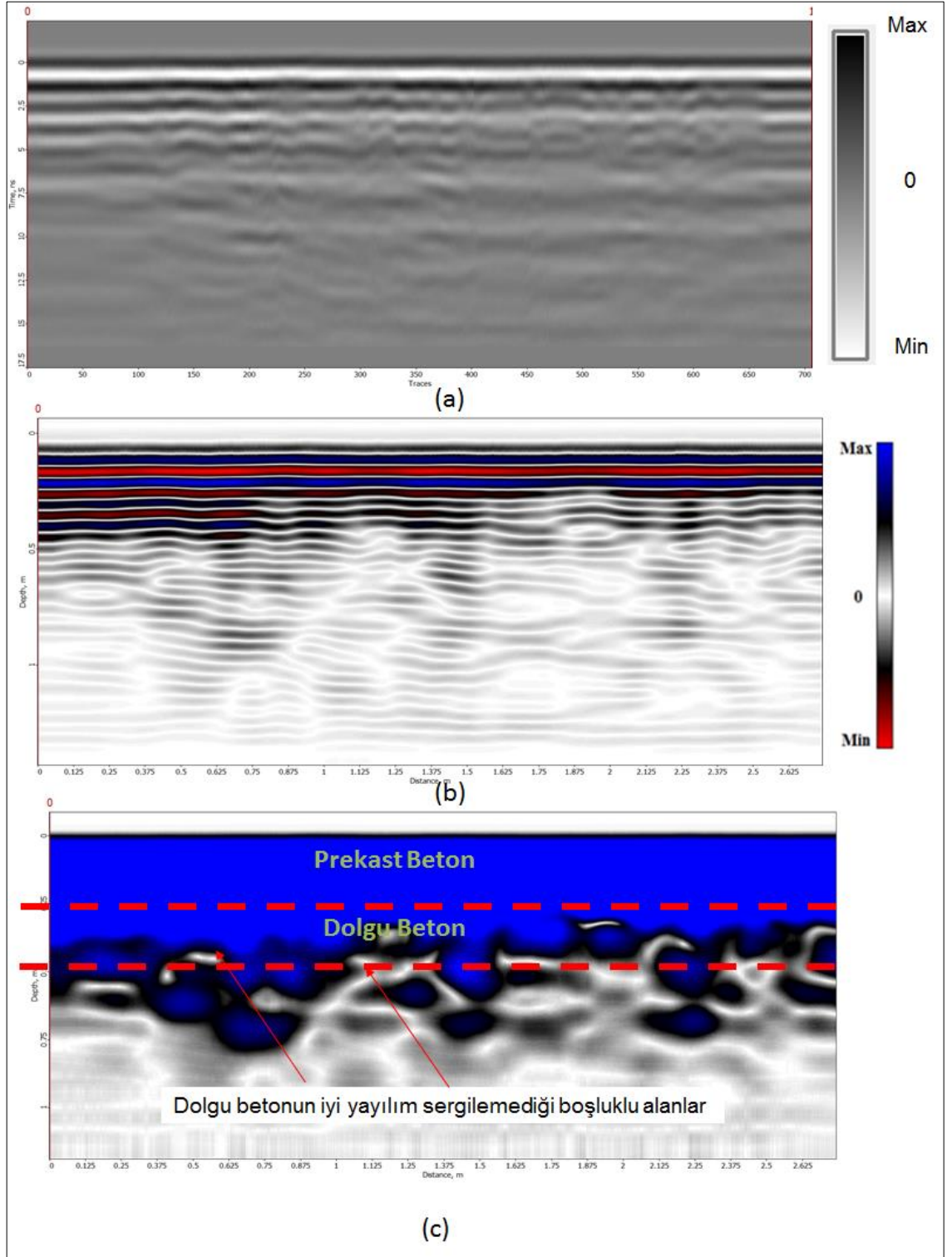
Şekil 5.6: Tünel içi 460 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



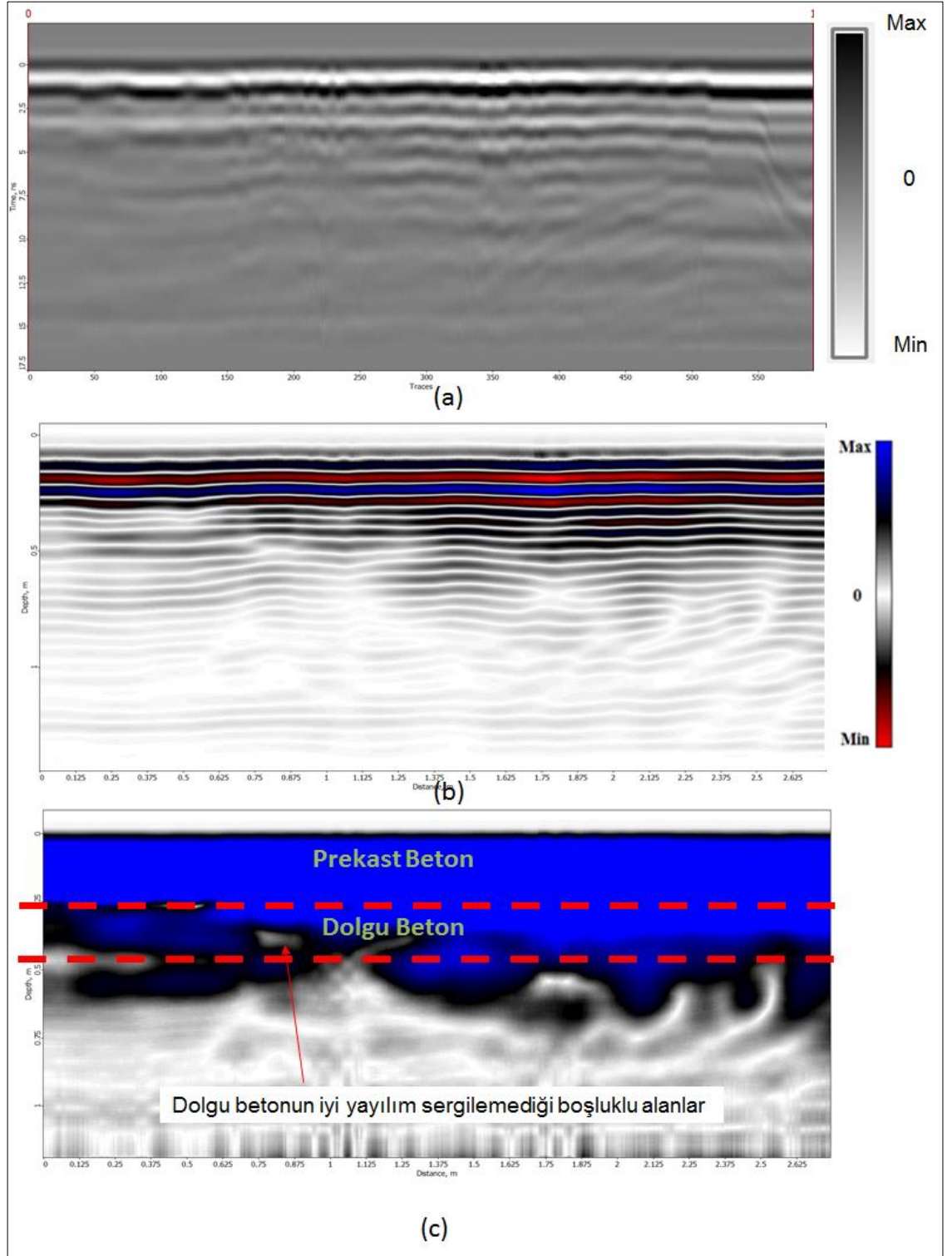
Şekil 5.7: Tünel içi 461 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformatu ile elde edilen sinyal zarfı.



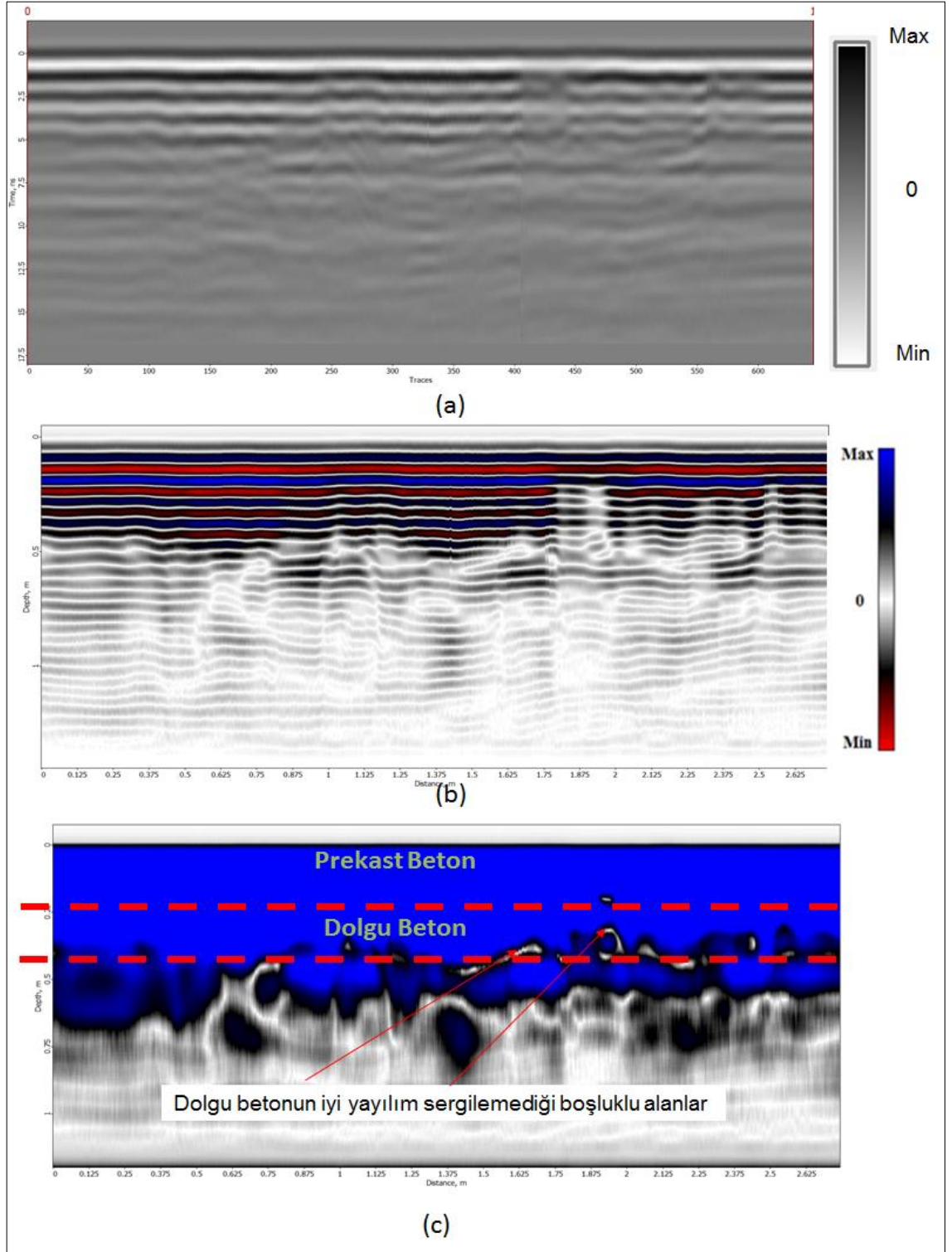
Şekil 5.8: Tünel içi 462 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



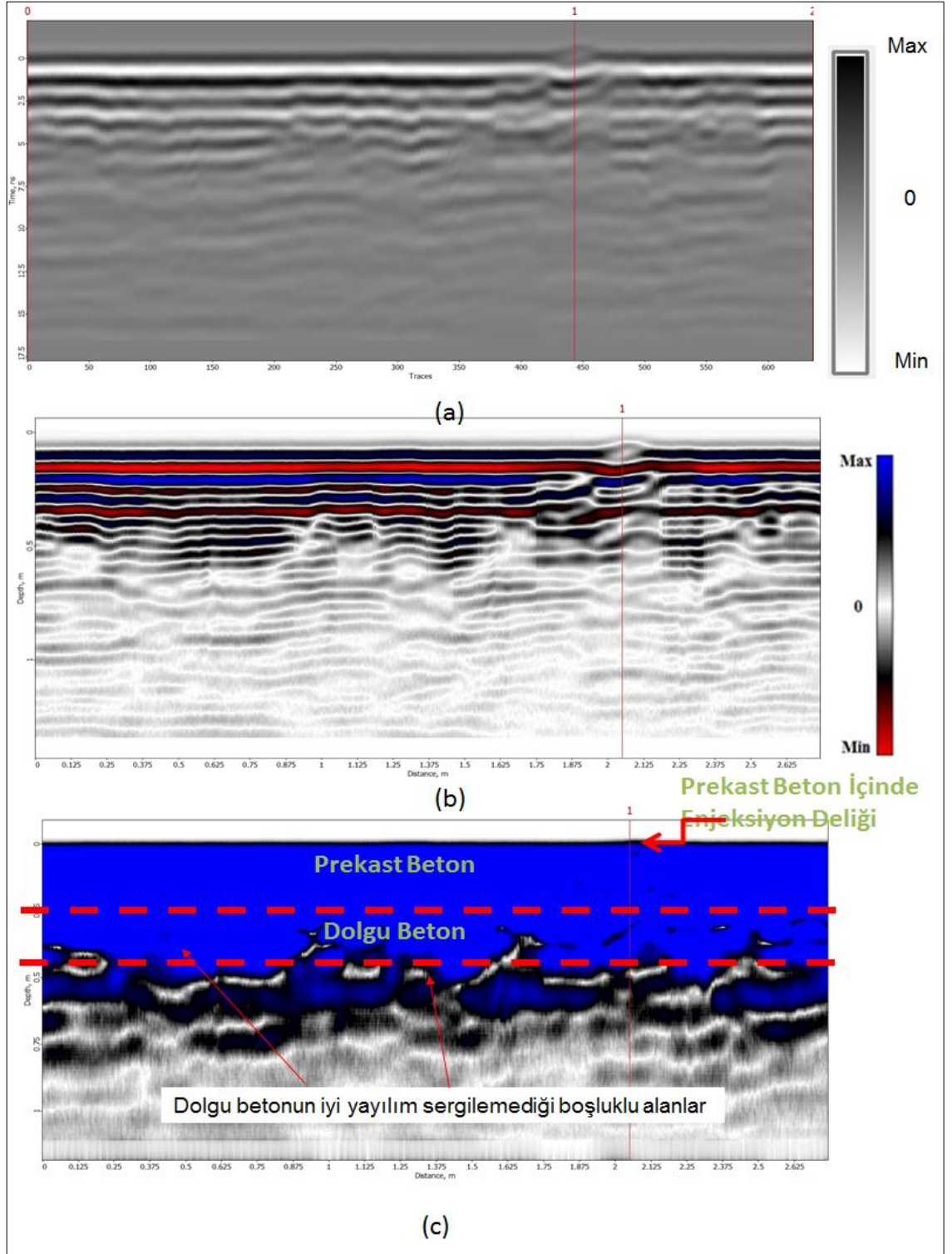
Şekil 5.9: Tünel içi 463 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyâl zarfı.



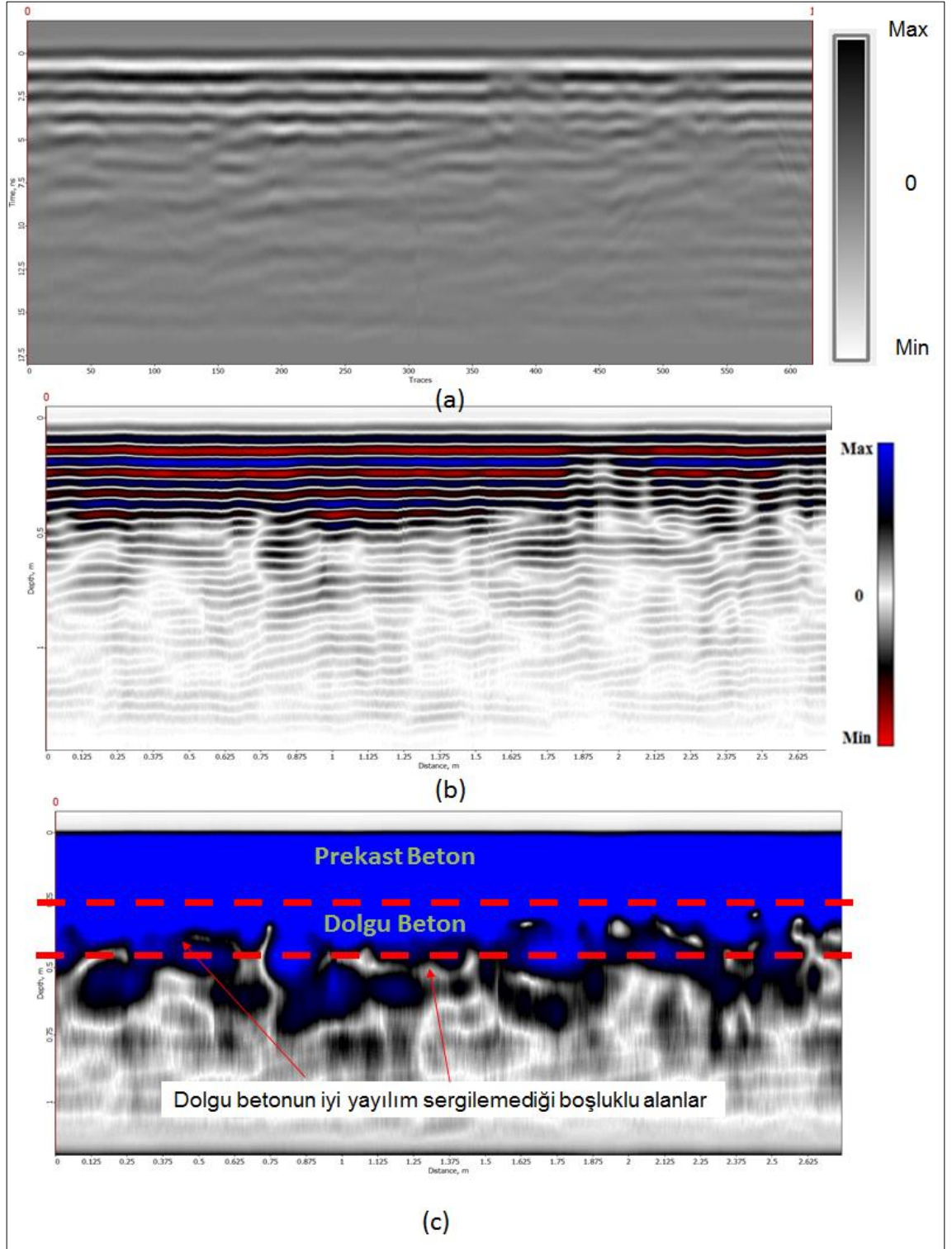
Şekil 5.10: Tünel içi 464 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



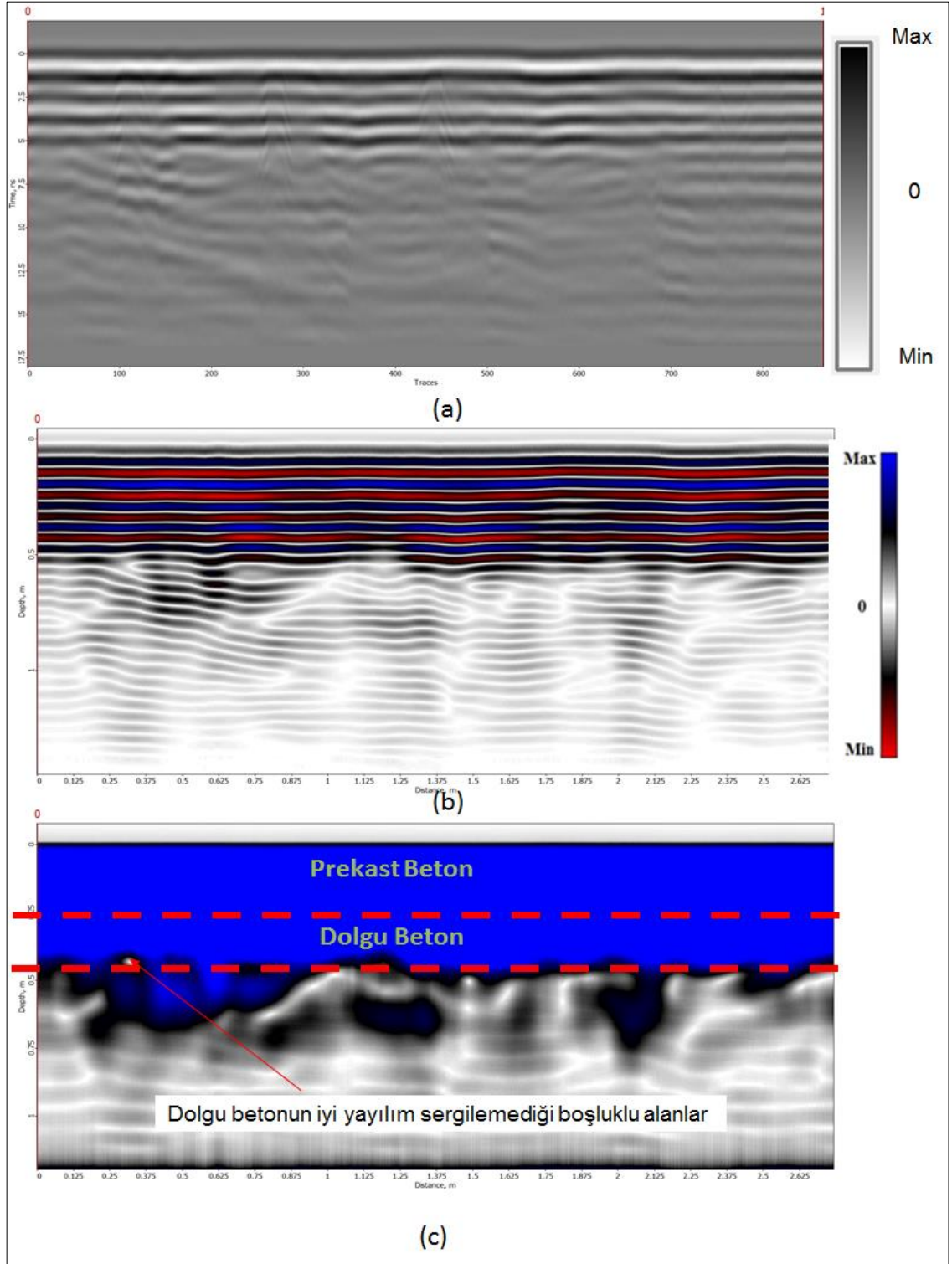
Şekil 5.11: Tünel içi 465 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



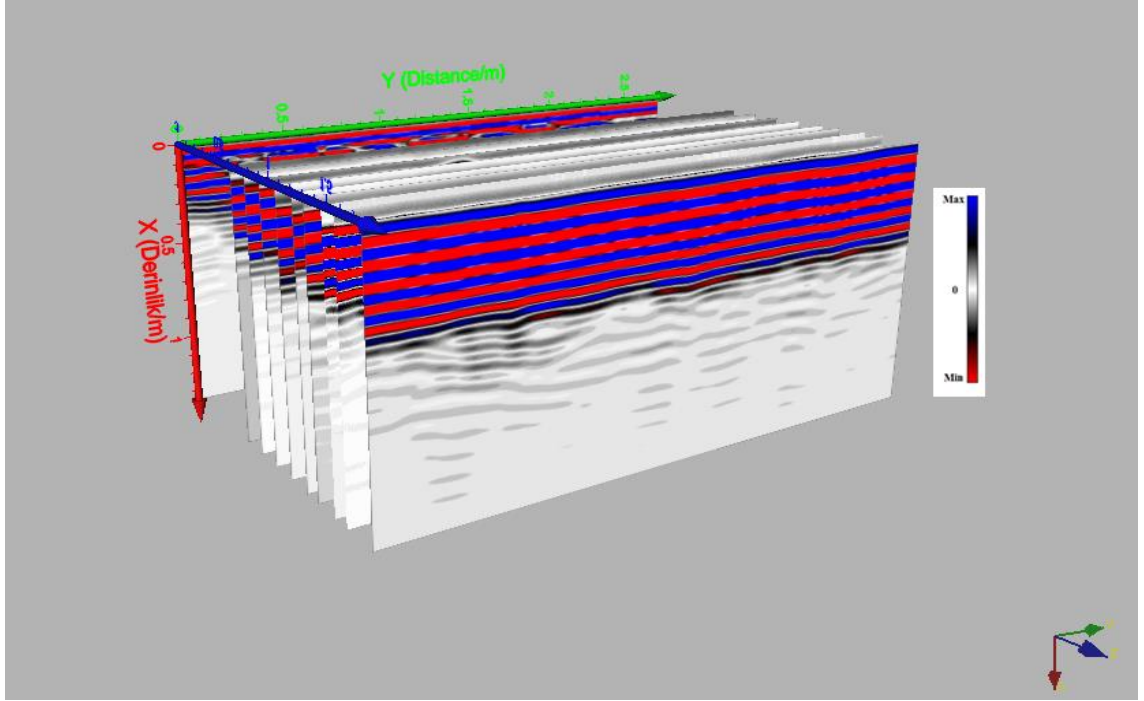
Şekil 5.12: Tünel içi 466 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



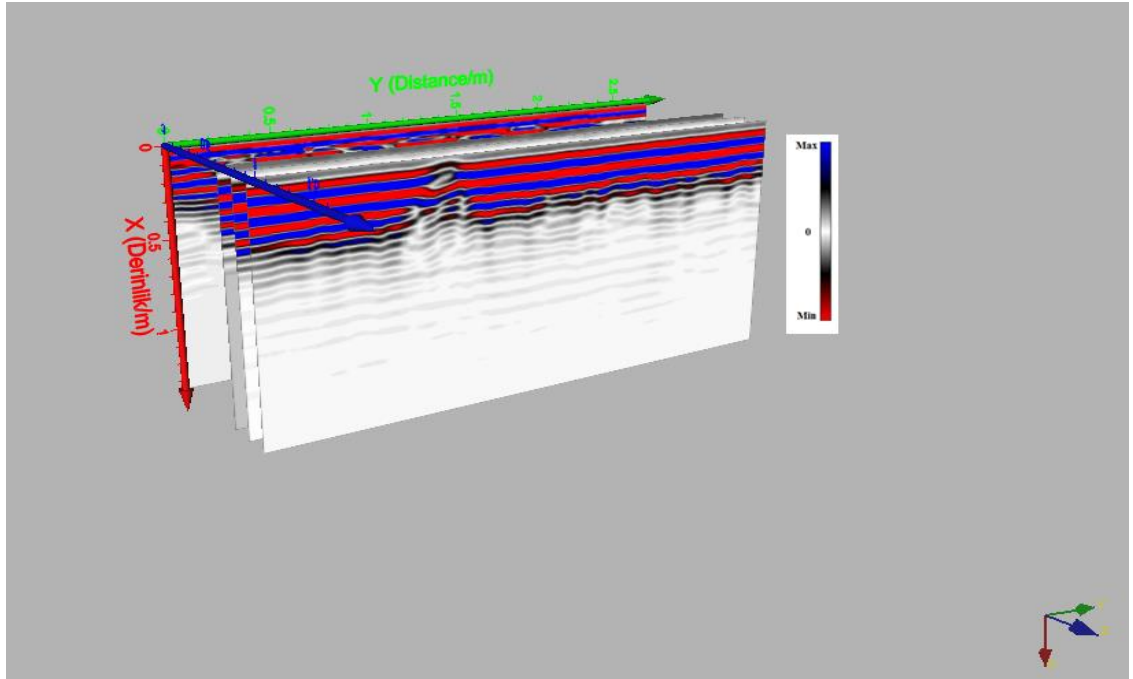
Şekil 5.13: Tünel içi 467 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.



Şekil 5.14: Tünel içi 468 no'lu verinin; (a) ham veri, (b) aynı verinin veri işlem aşamalarından geçmiş hali (segment-enjeksiyon-doğal zemin ara yüzeylerin radargram üzerinde yorumlanmış hali), (c) Hilbert Transformu ile elde edilen sinyal zarfı.

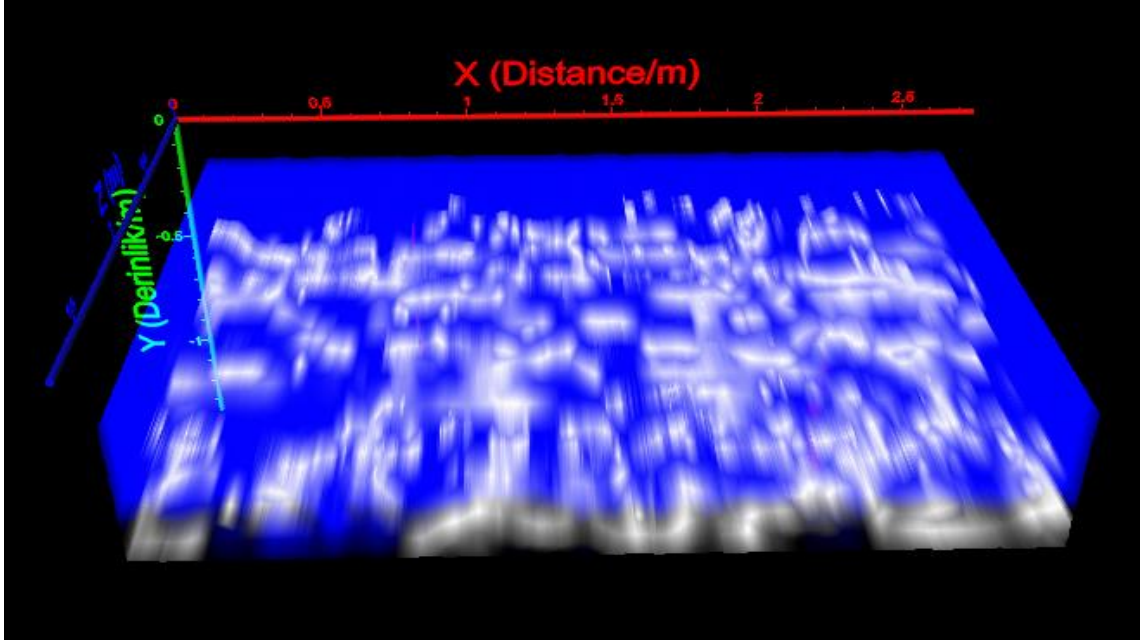


a)

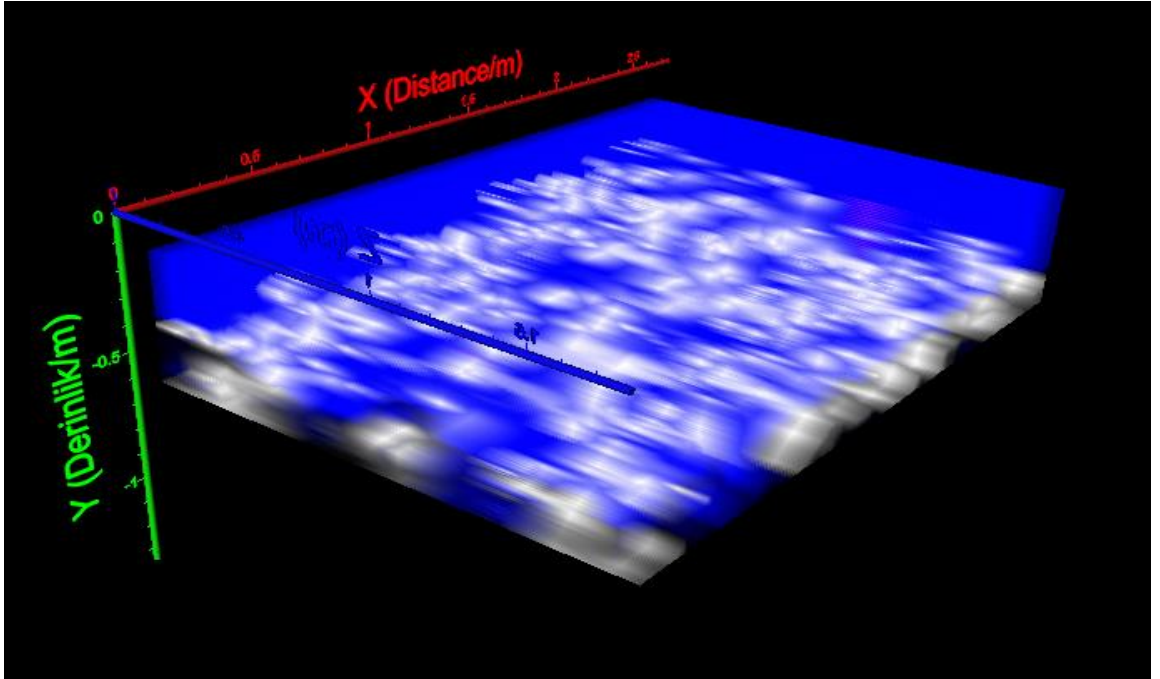


b)

Şekil 5.15: Tünel içi 459- 468 arası no'lu verilerinin üç boyutlu 2D Radargram görüntüleri.

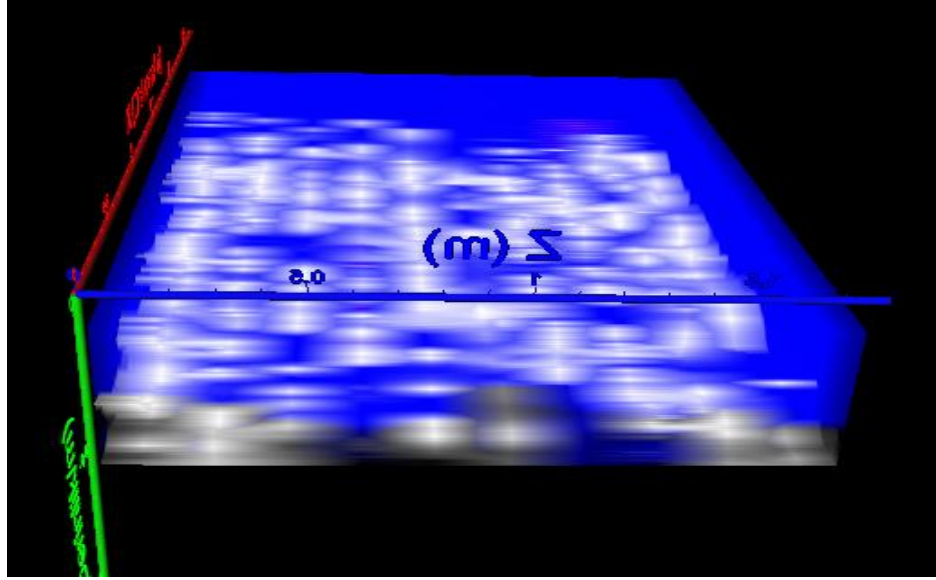


a)

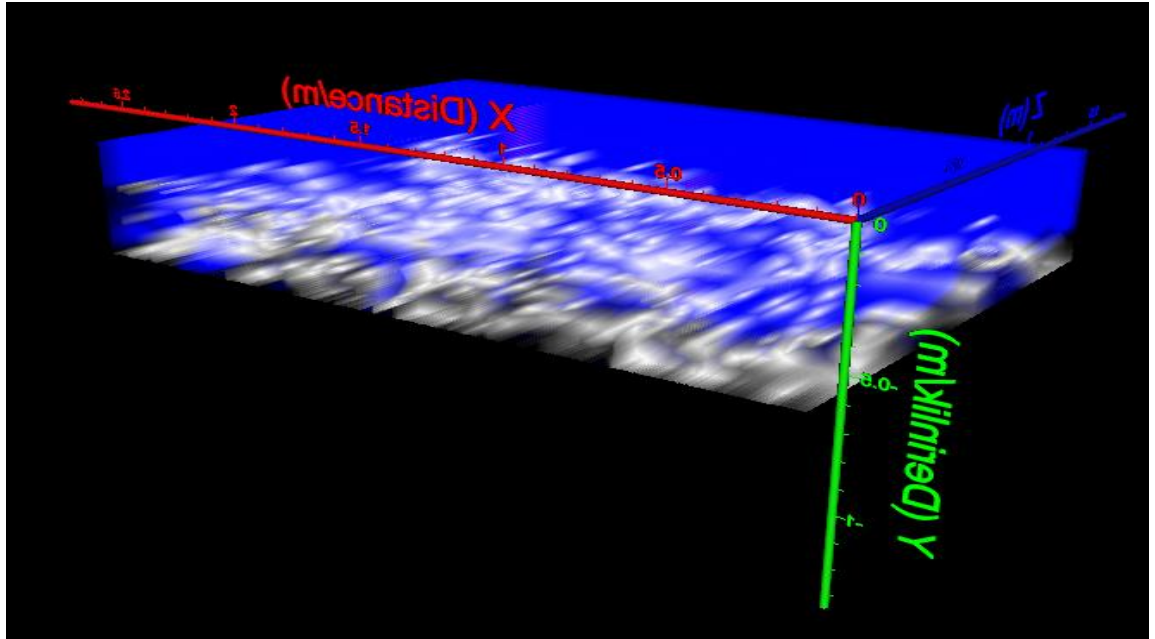


b)

Şekil 5.16 (devam) : Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi.

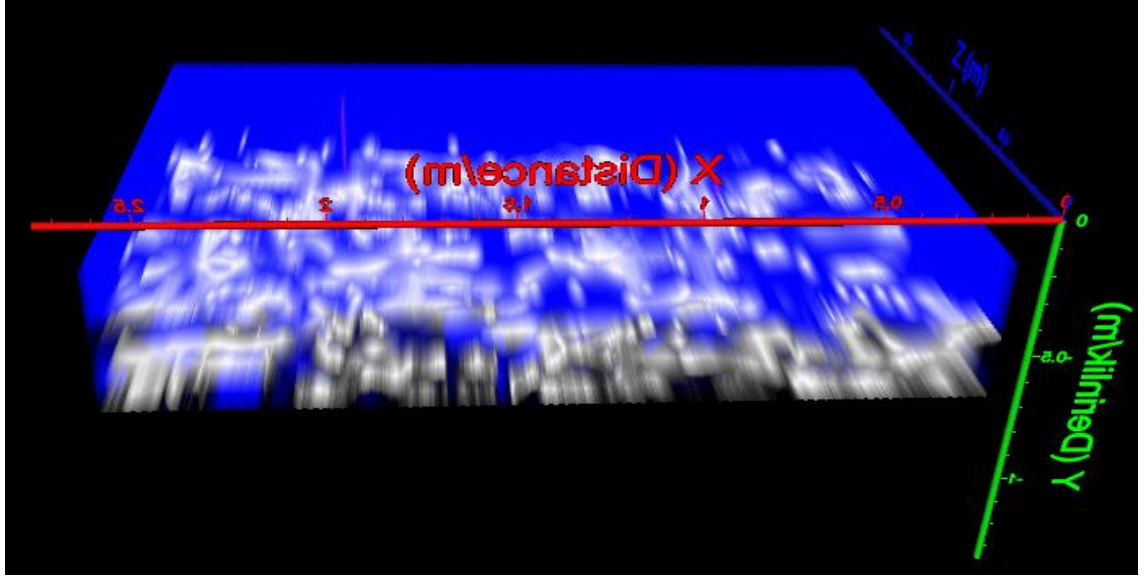


c)

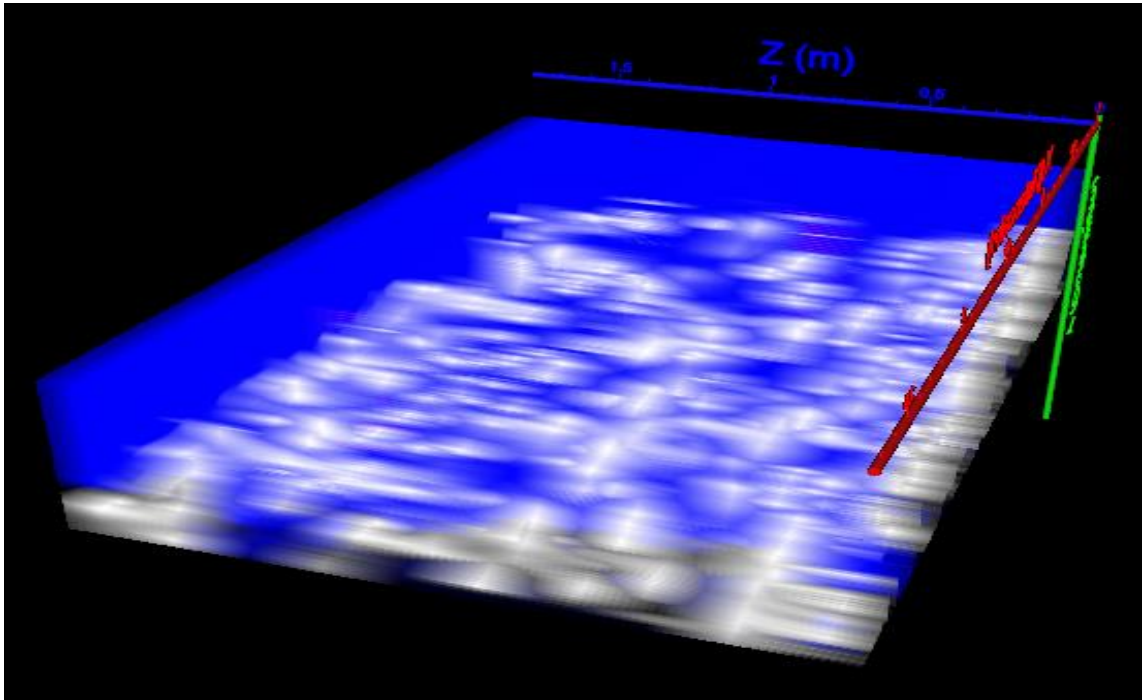


d)

Şekil 5.17 (devam) : Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi.

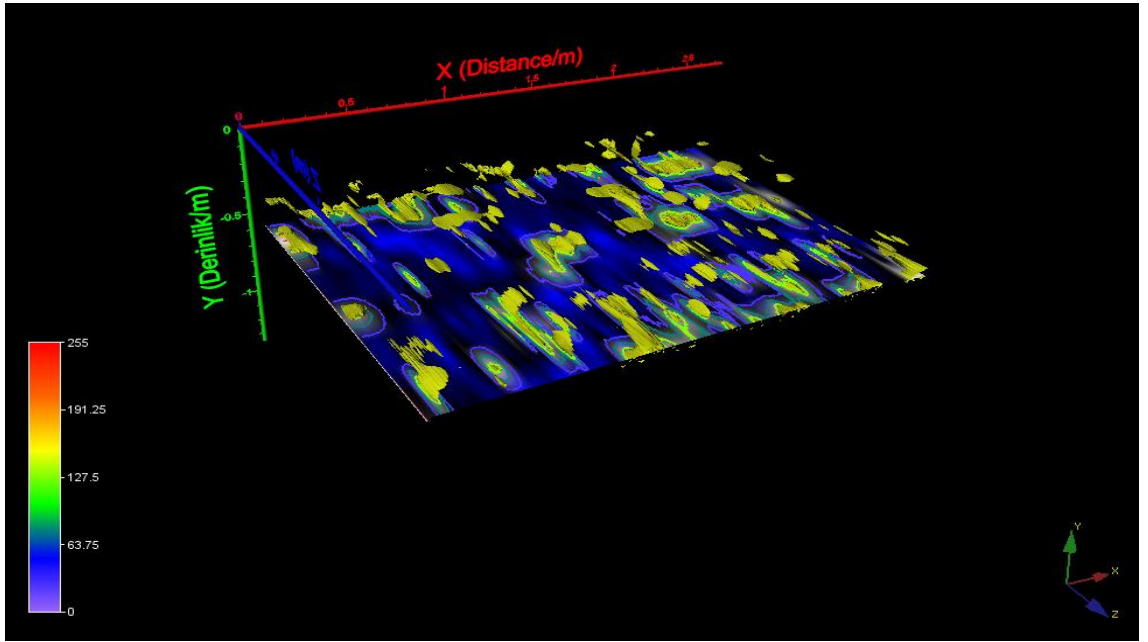


e)

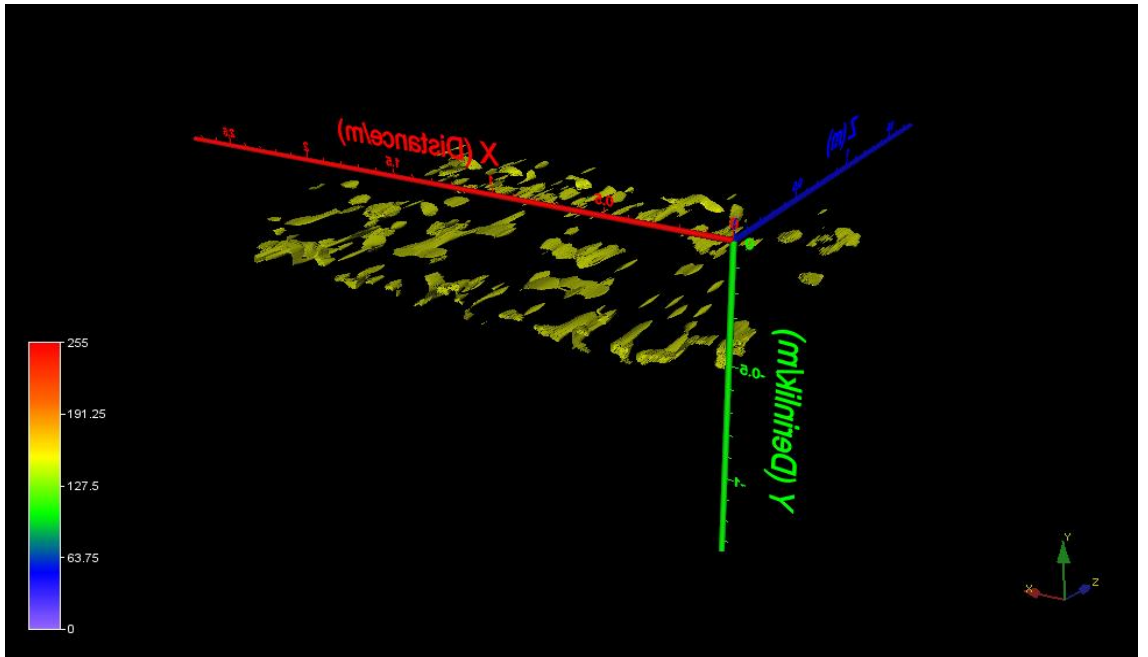


f)

Şekil 5.18: Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak prekast beton ve dolgu beton arasındaki boşluklu (beyaz-gri renkli) alanların görüntülenmesi.



a)



b)

Şekil 5.19: Tünel içi 459-468 arası no'lu verilerin farklı açılardan üç boyutlu olarak dolgu beton içerisindeki boşluklu (sarı renkli) alanların görüntülenmesi.

5.2. SONUÇLAR

Tez çalışması iki farklı tünel projesinde tünel imalatının kalite kontrolünde jeofizik yöntemlerinden Jeoradar (GPR) kullanılarak gerçekleştirilen test ölçümlerinin değerlendirmesini içermektedir. Elde edilen GPR radargramlarının veri işlem aşamalarından sonra iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) yer altı jeoradar görüntüleri elde edilmiştir. Çalışmada; Zond 12e marka GPR ölçüm cihazı ve ekipmanları (ProEx ünite, 1500 MHz anten, notebook) kullanılmıştır. GPR verileri (radargramlar), Prism2.5 ve üç boyutlu grafik yazılımları (Voxler3) kullanılarak yorumlanmıştır.

İlk test çalışmasında tüneli oluşturan segmentlerin arkasına uygulanan enjeksiyon işlemleri jeoradar yöntemi ile test edilmiştir. Değerlendirmeler neticesinde segment arkasında yapılan enjeksiyonların yayılımı ve kalınlığı belirlenmiştir (Tablo 5.1 ve Şekil 5.1 - Şekil 5.3). Hilbert Transformu fonksiyonu ile eş frekans dağılımı zaman domeninde gösterilmiştir. Bu şekilde özellikle homojen ortamda farklılıklar güçlü yansıma alanlarını görselleştirmede daha net görülmektedir. Hilbert Transformu Dönüşümü ile iz boyunca elde edilen sinyal zarfı ile enjeksiyonun iyi yayılım sergilemediği boşluklar daha net olarak görüntülenmiştir (Şekil 5.4).

İkinci test çalışmasında tünel içine yerleştirilen prekast beton elamanı ile yerinde dökülen dolgu beton arasında boşlukların kalıp kalmadığı incelenmiştir. Gerek tünel içerisindeki çalışma koşullarından dolayı yeteri kadar basınç ve vibrasyon uygulanamaması, gerekse dolgu betonun akışkanlık ve agrega özelliğine bağlı olarak birtakım boşlukların oluşacağı düşünülmüştür. Jeoradar (GPR) test ölçümleri sonucunda gerek beton dolgu içinde gerekse beton dolgu ile prekast beton içinde hem yatay hem de düşey yöndeki amplitüd değişimleri dikkate alınarak boşlukların kalıp kalmadığının belirlenebileceği gösterilmiştir (Şekil 5.5 – Şekil 5.14). Elde edilen 2D kesitler tek tek değerlendirilmiştir. Tüm profiller bir arada görüntülenmiş ve değişik derinlik ve açılarda 3D kesitler elde edilmiştir. 3D görüntülerde opaklık fonksiyonu kullanılarak max. genlik değişimine sahip olan alanlar izlenmiştir (Şekil 5.15 – Şekil 5.17).

Bu çalışma tünelde karşılaşılan ve karşılaşılabilecek sorunların belirlenebilmesi, iyileştirme çalışmalarının başlayabilmesi için atılacak önemli bir adımdır. Çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere, tünel yapısını oluşturan beton elemanlarında geliş güzel enjeksiyon delgileri yapılmadan jeoradar ile kısa zamanda tünel yapısına zarar vermeden ölçüm alınması mümkündür. Tünel hasarsız kontrol yöntemi olan GPR ile taranarak sorunlu bölgeler tespit edilip, bu yerlerden test amaçlı sınırlı karot numuneleri alınarak hızlı, ekonomik ve güvenli bir kontrol yapılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahunbay, Z., 2009, *Tarihi Çevre Koruma Ve Restorasyon*, Yem Yayınları, İstanbul, 7.Basım, ISBN: 9757438383.
- A-CUBED, 1983. *General State of the Art Review of Ground Probing Radar*, ACUBED, Mississauga, Ontario, 89 pp.
- Aktaş, S.Ş., 2009, *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi İle İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akyol, E., 2002, *Kaya Mekaniği-I Ders Notları*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli.
- Aldaş, G.G.U., Kadioğlu, S., Uluggerli, E.U., 2004, Yer Radarı (GPR) Yöntemi ile Patlatma Tasarımlarının İyileştirilmesi, *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 21-22 Ekim ve Sivas, Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, s.331-337
- Altun, S., 2010, *Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri*, http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0065ed90be0fa16_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16, [Ziyaret Tarihi ve Saati: 08.05.2013-10:10].
- Ansal, A., 1994, Effects of Geotechnical Factors and Behaviour of Soil Layers During Earthquakes, *Proc. Of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Cilt 1, 467-476.
- Arioğlu, E. ve Yılmaz, A.O., 2006, *Çözümlü Problemlerle Tünel/Galerilerinin –Sismik Analizi*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, ISBN: 9944-89-103-7.
- Avdelidis, N.P. ve Moropoulou, A., 2004, Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *Journal of Cultural Heritage*, 5 (1), p. 119–127
- Aykaç, S., 2005, Depremin zemin içi yapılarına etkisi, <http://www.mtbilimsel.com/dosyalar/edergi-1376392606.pdf>, [Ziyaret Tarihi ve Saati: 12.05.2013-15:30].
- Basu, A. ve Aydın, A., 2004, A method for normalization of Schmidt hammer rebound values, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (7), 1211–1214.

- Beliss, K., Fascetti, S.W., Rappaport, C., 2008, Model Based Evaluation of Bridge Decks Using Ground Penetrating radar, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23, 3–16.
- Bevan, B. ve Kenyon J., 1975, Ground-penetrating Radar for Historical Archaeology. *MASCA Newsletter*, 11(2), 2-7.
- Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H., Richter, T., t.y., Ground Penetrating Radar, *Environmental Geology*, 4 *Geophysics*, 283-335.
- Blitz, J., Simpson, G., 1996, Ultrasonic methods of non-destructive testing, *Springer*.
- Bozkurt A., Kurtuluş C., 2007, *Jeofizik Yöntemlerle Yer ve Yapı İncelemeleri*, ABM Mühendislik Yayını.
- Bristow, C.S ve Jol, H.M. (Ed.), 2003, Ground Penetrating Radar in Sediments, *Geological Society Special Publications*, London, 211, 191-198.
- Buket, Z., 2011, *Marmaray Project*, Civil Engineer, PhD.Avrasyaconsult ve DLH,
- Canik, B., 1997, *Mühendislik Jeolojisi Ders Notları*, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Carcione, J.M., 1996, Ground-Penetrating Radar: Wave Theory and Numerical Simulation in Lossy Anisotropic Media, *Geophysics*, 61 (6), 1664-1677.
- Cardarelli, E. Marrone, C. and Orlando, L., 2003, Evaluation of Tunnel Stability Using Integrated Geophysical Methods, *Journal of Applied Geophysics*, 52, 93-102.
- Carino, N., 2001, The impact-echo method: an overview, *In: Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, Washington, DC, American Society of Civil Engineers, 18.
- Cassidy, N.J., 2009, Ground Penetrating Radar Theory and Applications by editor Jol, H.M, 146-172, *Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis*.
- Charlton, B. M., 2008, Principles of Ground-Penetrating Radar for Soil Moisture Assessment, *MBCharlton.com Research Notes*, 1-31.
- John C., 1960, Proposed monocyte-pulse, VHF radar for airborne ice and snow measurements, *AIEE Trans. Commun. And Electron.*, 79(2), 588-594.
- Çınar, M., Feridunoğlu, C., Tünel Açma Makineleri (TBM), http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2015-09:00]
- Conyers, L.B. and Goodman, D., 1997, *Ground Penetrating Radar, An Introduction for Archaeologists*, London: Altamira Press.

- Cosma, C., Enescu, N., Ahokas, T., Heikkinen, E., 2009, High Resolution Seismic Profiling for Tunnel Engineering at Olkiluoto, Finland, Near Surface, *15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* Dublin, Ireland.
- Çeçen, E. E., 2007, *Kent İçi Tünellerinde Uygulanan Şemsiye-Kemer ve Ayna Donatılama Tekniklerinin Gerilme Deformasyon Üzerinde Etkilerinin Sayısal Analizi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul.
- Çınar, M. ve Feridunoğlu, C., Tünel Açma Makinaları (TBM), http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2015-10:00]
- Daniels, J.J., 1989, Fundamentals of Ground Penetrating Radar, Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, *Proceedings of the Environmental and Engineering Geophysical Society*, Englewood, Colorado, 62-142.
- Davis, J.L. and Annan, A.P., 1989, Ground-Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- Denek H., Özçelik, Y., 2006, Dalaman - Göcek Karayolu Tünelinde Boru Kemer Yöntemi Uygulamaları ve Sonuçları, *Tünelcilik ve Yeraltı Teknolojileri Dergisi*.
- Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Jeolojisi Ders Notları, https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwebb.deu.edu.tr%2Fjeoloji%2Fpdf%2Fmuhendislik_jeoloji_ders_notlari.pdf&ei=lfpSVZ-bDYTJsQHqxoDICA&usq=AFQjCNGuc9Jt9PzXPnaTBYJrW8Tx5pX54Q, sayfa 65, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2015, 07:00]
- Doolittle, J.A. ve Collins. M.E., 1995, Use of Soil Information to Determine Application of Ground Penetrating Radar, *Journal of Applied Geophysics*, 33, 101-108.
- Doğruoğlu, T., 2009, *TBM Metodu ile Açılan İkizi Tünellerde Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu ve Numerik Hesaplarla Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, *Mühendislik Jeofiziğinde Tünel ve Metro Güzergâhı Araştırmaları*, EİE069, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Ankara.
- Elmasdere, E., 2008, Isparta Mavikent Yerleşim Bölgesinin Sismik Mikrobölgelemesi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 11.

- Engin, Y., Akakin, T., 2010, Beton Dökümünde ve Sonrasında Yaşanan Problemler ve Çözümler, http://imoistanbul.org/imoarsiv/seminer2010-not/tumer_akakin.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 22.05.2015-24:00].
- Emiroğlu, A., 2010, *İstanbul (4.Levent-Hacıosman Arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Ercan, A., 2003, *Yapı İnceleme Yöntemleri*, Mühendislik Jeofiziği –II, Birsan Yayıncılık, İstanbul, 129.
- Ergüven, K., 2011, *İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Yayınlanmamış Staj Defteri*.
- Evans, S., 1965, The Dielectric Properties of Ice and Snow, A Review, *Journal of Glaciology*, 5, 773-792.
- Galera, J. M., Pescador, S., Rodriguez, A., Torres, M., 2007, Prediction of The Ground Conditions Ahead The TBM Face in The Tunnels of Guadarrama, *Using Geophysical Methods and In Situ Testing*, Taylor&Francis Group, London, 203-213.
- Genç, D., 1983, Tünel Açımı Esnasında Karşılaşılan Jeolojik Sorunlar, *Tünelcilik Semineri*, Ankara, Bildiriler Kitabı, 143-163.
- Geniş, M. ve Gerçek, H., 2000, *Yeraltı Açıklıklarının Dinamik Tasarımı*, V.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 67.
- Gizzi, F.T., Loperte, A., Satriani, A., Lapenna, V., Masini, N., Proto, M., 2010, Georadar Investigations to Detect Cavities in A Historical Town Damaged by an Earthquake of the Past, *Adv., Geoscience*, 24, 15–21
- Grandjean, G., Gourry, J.C., Bitri, A., 2000, Evaluation of GPR Techniques for Civil Engineering Applications: Study on A Test Site, *Journal of Applied Geophysics*, 45, 141–156.
- Griffin, S. ve Pippett, T., 2002, Ground Penetrating Radar, In Papp, E. (Editor), 2002, *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, CRCLEME Open File Report, 144, 80-89.
- Greaves, R.J., Lesmes, D.P., Lee, J.M. and Toksöz, M.N., 1996, Velocity Variations and Water Content Estimated from Multi-Offset, Ground Penetrating Radar, *Geophysics*, 61 (3), 683-695.
- Griffin, S. ve Pipet, T., 2002, *Ground Penetrating Radar: Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, 144, 80-89

- Hacettepe Üniversitesi Ders Notları, 2012, *Toplam ve etkin Gerilme Kavramları*, <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~murate/week6.pdf>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 13.05.2015-23:00].
- Harris, F.C., 1983, *Ground Engineering Equipment and Methods*, Granada Technical Books, Granada Publishing Ltd., London.
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J., 2001, Seismic Design Analysis of Underground Structures, *Tunnelling and Underground space Technology*, 16, 247-293.
- Hoek, E., Karakuş M., ve BAŞARIR, H., 2006, *Kaya Mühendisliği*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Hong, S., 2015, *GPR-Based Periodic Monitoring of Reinforcement Corrosion in Chloride Contaminated Concrete*, Master, in Quanzhou, Fujian, China.
- Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, 2002, International Atomic Energy Agency, Vienna, 17 (13), 137-147.
- Jing, X. L. ve Zhang, L., 2007, Application of GPR Technology in the Quality Detection of Railway Tunnel Liner, *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 4 (4), 345-349.
- John, C.M. ve Zahrah, T.F., 1987, Aseismic design of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Pergamon Press, Oxford, 2 (2).
- Johansen J., 1990, *Modern Trends in Tunnelling and Blast Desing*, <http://delmepatlatma.org/tunel-acma-syfdty-97.html>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2013-19:10].
- Kadioğlu, S., Kadioğlu, Y. K., Ulugerli, E., 2008, *Mermer Bloklarının Alımı ve İşlenmesinde Süreksizliklerin Belirlenmesi*, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Ankara.
- Kadioğlu, S., 2004, *GPR Yöntemi Ders Notu*, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Kadioğlu, S., 2003, 3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation, *14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey*, May, 12-14, Ankara-TURKEY, Proceedings, 485-486.
- Kahriman, A., t.y., *Maden ve Taş Ocaklarında Kaya Patlatma Tekniği Seminer Notu* 72-93.
- Karpuz, C. ve Hindistan, M., 2008, *Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

- Kaya, H., 1983, Patlayıcı Maddelerin Tanımlanması Ve Tünellerde Patlayıcı Maddelerin Optimumda Kullanılması, *Tünelcilik Semineri Bildiriler Kitabı*, Ankara, 85-142.
- Kılıç A., 1997, *Tarsus Ayrımı-Adana-Gaziantep (TAG) Otoyolu Bahçe Yöresindeki Tünellerin Kaya Sınıflamaları ve Kaya Bulonlarıyla Desteklenmesi*, Doktora Tezi, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kneb, G., Kassel, A., Lorenz, K., 2000, Automatic Seismic Prediction Ahead of the Tunnel Boring Machine, *First Break Technical Article*, 295-302.
- Koçaslan, A., 2008, *Sonlu Farklar Yöntemi İle Çok Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Dalga Alanı Hesabı*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi.
- Kuran, U., t.y., *Kaya Mekaniği ile Jeofizik Yöntemler Arasındaki Önemli İlişkiler ve Bunlar Işığında Temel Kaya İçinde Yer Alan Fay Zonlarının Yüzeyden Derin Elektrik Sondajlarla Bulunması*, <http://www.pmprestij.com/Makaleler/c1.pdf>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 01.02.2015-23:20]
- Kurt, C., Yılmaz, Ö., Şimşek, S., t.y., *İstanbul Metrosu Tünellerinde Boru Şemsiye Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları.*, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/c9e62695def29cc_ek.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.07.2014-21:10].
- Kurt, H., Arık, F., 2010, *Şehir ve Çevre Jeolojisi*, Aybil Yayıncılık, Konya, 173.
- Lataste, J.F. ve diğ., 2003, Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering, *NDT & E International*, 36 (6), 383–394.
- Liu, L.B., He, K., Xie, X.Y., Du, J., 2007, Image Enhancement with Wave- Equation Redatuming: Application to GPR Data Collected at Public Transportation Sites, *Journal of Geophysics and Engineering*, 4, 139–147.
- Liu, Z. Y., and Wang, F. M., 2007, Application Research for Uretex Technology in Maintaining Pavement, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 24 (11), 46-48.
- Lom, N., 2011, *Antakya ve Çevresindeki Aktif Fayların Araştırılması ve Haritalanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü.
- Makar, J., Desnoyers, R., 2001, Magnetic field techniques for the inspection of steel under concrete cover, *NDT & E International*, 34 (7), 445–456.
- Malhotra, V.M., 1974, Evaluation of the Windsor probe test for estimating compressive strength of concrete, *Matériaux et Construction*, 7 (1), p. 3–15.
- Mala Geoscience, 2003, Basic Radar Theory, Fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD), Sweden.

- Mccalpin, J.P., 1996, Paleoseismology, *Academic Press*, 588.
- McCarter, W.J., Vennesland, Ø., 2004, Sensor systems for use in reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, 18 (6), 351–358.
- Mochales, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Pueyo, O., Rom'an, M. T., Pocov'1, A., Soriano, M. A., ANS'ON, D., 2008, Detection of Underground Cavities by Combining Gravity, Magnetic and Ground Penetrating Radar Surveys: a Case Study from the Zaragoza Area, *Env. Geol.*, NE Spain, 53, 1067–1077.
- 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*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Morishima, H. ve Odaka, T., t.y., Concrete Structures and Nondestructive Testing, *Interpretive Article*, JR EAST Technical Review-No.2, 14-21
- Nakamura, E. ve diğ., 2008, Half-Cell Potential Measurements to Assess Corrosion Risk of Reinforcement Steels in a PC Bridge, *In: RILEM Symposium on On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures – SACoMaTiS*, Como Lake - Italy, 109–117.
- Olofsson, O. S., 1990, *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*, APPLEP, ISBN: 9179706347- 9789179706340
- Özaydın K., 2007, Zeminlerin İyileştirilmesi Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Anabilim Dalı, <http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/berilgen-Dersler-1683>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 05.03.2014-11:30]
- Yaşar, E., 1988, Tüneller, Tünel Açım Teknikleri, Tünel Açımında Kullanılan Makineler, Kullanıldığı Yerler, *Sanat Yapıları Dönem Ödevi*.
- Özdemir,A., Özdemir,M., 2006, Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Uygulanan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri, *Sondaj Dünyası*, 3, 34-38.
- Özkan,H., 2006, Enjeksiyon Yöntemleri ve Uygulamaları, <http://tr.scribd.com/doc/49539447/ENJ-KITAP#scribd>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.07.2013-21:10].
- Öztürk, H., Durmuş, A., 2008, Tünellerle Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye için Önemi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı*, 6, 11-17.
- Öztürk, T. H., Durmuş, A., Durmuş, A., 2009, Tünel İnşaatında Karşılaşılan Bazı Sorunlar, *İstanbul Bülten Dergisi*, 102, 14-17.
- Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J.Y., 1998, Seismic Vulnerability of Tunnels and Underground Structures Revisited, *North American Tunneling 98* Özdemir (ed.), Balkema Rotterdam, 243-250.

- Porsani, J.L., Sauck, W.A., 2007, Ground-Penetrating Radar Profiles Over Multiple Steel Tanks: Artifact Removal Through Effective Data Processing, *Geophysics*, 72, J77–J83.
- Porsani, J.L., Borges, W.R., Rodrigues, S.I., Hiodo, F.Y., 2006, O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D, *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, 49–61.
- Porsani, J.L., Ruy, Y.B., Ramos, F.P., Yamanouth, G.R.B., 2012, GPR Applied to Mapping Utilities Along the Route of The Line 4 (yellow) Subway Tunnel Construction in São Paulo City, *Journal of Applied Geophysics*, 80, 25–31.
- Polder, R., 2001, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and building materials*, 15 (2), p. 125–131.
- Püsküloğlu, A., 2010, *Ceyhan Hidroelektrik Santrali Projesi (Cevdetiye- Osmaniye) Regülatör Yapılarındaki Geçirimsizleştirme Yöntemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Reynolds, M. J., 1997, *An Introduction of Applied and Environmental Geophysics*, Wiley, ISBN: 978-0-471-48535-3
- Richards, J., 1998, Inspection, maintenance and repair of tunnels: international lessons and practice, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13 (4), 369–375.
- Rodrigues, S.I., Porsani, J.L., 2006, Utilização do GPR Para Caracterizar Tambores Plásticos Enterrados No Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP, *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, 157–168.
- Sansalone, M.J., Streett, W.B., 1997, Nondestructive evaluation of concrete and masonry, *Impact-echo*, 332.
- Sansalone, M., Carino, N.J., 1989, Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo Method, *ACI Materials Journal*, 86 (2), 175–184.
- Santos, V.R.N., Porsani, J.L., Hirata, N.S.T., 2010, Automatic Classification of Metallic Targets Using Pattern Recognition of GPR Reflection: A Study in the IAG-USP Test Site, *XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*, 1-4.
- Sawade, G., Krause, H. J., 2007, Inspection of Prestressed Concrete Members using the Magnetic Leakage Flux Measurement Method — Estimation of Detection Limit. In: *Advances in Construction Materials* (Editor: C. Grosse), Springer Berlin Heidelberg, 639–649.
- Scaife, J.E. ve Annan, A.P., 1991, Ground-Penetrating Radar for hig-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospectin* 37, 531-551.

- Şeflek, N., Çetin, H., 2012, Ceyhunkent Toplu Konutları (Ceyhan/ Adana) İnşa Sahasının Jet Grout Yöntemi İle Islah, *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27 (2).
- Shen, L.C., Savre, W.C., Price, J.M. and Athayale, K., 1985, Dielectric Properties of Reservoir Rocks at Ultra-High Frequencies, *Geophysics*, 50 (4), 692-704.
- Sonuç, M., Giray, K., Atik, İ., Küçük, S., t.y., İstanbul Metrosunda Uygulanan Yapım Çalışmaları, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41ff84e7cbd1293_ek.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.05.2013-07:15]
- Stickley, G. F., Noon, D.A. Cherniakoy, M., Longstaff, I. D., 2000, Gated Stepped-Frequency Ground Penetrating Radar, *Journal Applied Geophysics*, 43, 259-269.
- Sümer, T., 1995, Su İçeren Yumuşak Zemin Ortamında Konvansiyonel Yöntemle Açılan Metro Tünellerinde Karşılaşılan Problemler ve Çözümleri, *Türkiye İnşaat Mühendisliği 13. Teknik Kongresi*, Ankara, 689 – 704.
- Süzen, E., 2009, 4.Levent-Ayazağa (İstanbul) Metrosu Tünelindeki Kazı ve Sağlama Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Szechy, K., 1970, The Art of Tunelling, *Akademiai Kiado*, Budapest, 891.
- Şekercioğlu, E., 2002, *Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 18-21s.
- Şahkulubey, L., 2008, *İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Yayınlanmamış Staj Defteri*.
- Tabak, H. ve Kemal, N., 1994, Ankara Metro İstasyonlarının Analiz ve Tasarımı, *Türk-İnşa* sayısı 151, 18-22.
- Takahaski, T., 2004, Suggested Methods for Land Geophysics in Rock Engineering, *Rock Mechanics and Mining Science*, 41, 885-914.
- Timur, E., t.y., *Tünel Mühendisliğinde Jeoteknik Etüt Ve Uygulamada Karşılaşılan Bazı Problemleri*, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/0106888f8977b71_ek.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2015-14:00]
- Toutanji, H., 2000, Ultrasonic wave velocity signal interpretation of simulated concrete bridge decks, *Materials and Structures*, 33 (3), 207–215.
- Toğrol, E., t.y., *Yumuşak Zeminlerde Tünel Açılması*, <http://www.zmgm.org.tr/>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 08.03.2013-17:00]
- Tzavaras, J., Buske, S., Grob, K., Shapiro, S., 2012, ThreeDimensional Seismic İmaging of Tunnels, *International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences*, 49, 12-20.

- Ulugergerli, E. U. ve Akca, I., 2006, Detection of Cavities in Gypsum, *The Journal of the Balkan Geophysical Society*, 9 (1), 8–19.
- Uluğ, A., Özel, E., Çiftçi, G., 1987, İstanbul Boğazı'nda Sismik Çalışmalar, *Jeofizik 1*, 130-144.
- URL 1., <http://tbm.cat.com/> , [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.01.2013-05:12]
- URL 2., [http:// delmepatlatma .org/tunel-acma- syfdty-97.html](http://delmepatlatma.org/tunel-acma-syfdty-97.html), [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.01.2013-07:15]
- URL 3., <http://www.miningandconstruction.sandvik.com>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 22.01.2013-08:00] ,
- URL 4., [http:// www. mta. gov. tr/v2.0/daire-baskanliklari/jeof/images/sismik/ yerradari. pdf](http://www.mta.gov.tr/v2.0/daire-baskanliklari/jeof/images/sismik/yerradari.pdf) , [Ziyaret Tarihi ve Saati, 01.02.2013-13:07].
- URL 5., <http://members.comu.edu.tr/yalciner/GPR.html> , [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.02.2013-06:05].
- URL, 6., [http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/RoadwaySubsidence/ 512 GroundPenetratRaadar.cfm](http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/RoadwaySubsidence/512GroundPenetratRaadar.cfm) , [Ziyaret Tarihi ve Saati, 28.02.2013-23:01].
- URL, 7., [https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/single-shield -tbm.html](https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/single-shield-tbm.html), [Ziyaret Tarihi ve Saati, 21.02.2013-21:12].
- URL, 8., http://www.anadoluissagligi.com/img/file_867.pdf, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 12.05.2013-19:00]
- URL 9., <http://www.radsys.lv/en/products-soft/products/prod/9>, [Ziyaret Tarihi ve Saati, 16.06.2015-21:00]
- Vardar M., 1994, Metro Tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması, Sağlama-İyileştirme, *Ulaşım Yolları Sempozyumu, Maden Mühendisleri Odası*, İstanbul, 41-51.
- Wadhwa, R. S., Ghosh, N., Chandrasekhar V., SĪNHARAY, R. K., 2008, Delineation of Cavities in a Canal by Geophysical Survey in Navargaon Project Area, *Journal of Indian Geophysical Union*, Maharashtra, 12(1), 55–62.
- Wang, D. X., 2007, Application of High Polymer Grouting in Rebuilding Old PCC Pavement, *Science & Technology Information*, 23 (5), 393-394.
- Wang, X. W. ve Li, J. H, 2007, The Application of Surveying Radar Technology in the Quality Detection of Tunnel Lining, *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 34 (3), 354-358.

- Weeds, R. D. (Ed.), 1994, *Geophysical Characterization of Sites*, Rotterdam: AA. Balkema, 69-79.
- West. G. ve O'reilly, P., 1978, *Methods of Treating the Ground, Tunnels and Tunneling*, 10,7,25-29.
- Wilchek, L. A., 2000, *Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Structure*, M.S. Thesis, Masters, Alberta University, Canada.
- Wu, D., Busse, G., 1998, Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials, *Revue Générale de Thermique*, 37 (8), 693–703.
- Xia, C. ve Yan, Z.J., 2007, Analysis on The Causation and Classification of Common Damages of Highway Tunnel, In: *ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, 18-19 Ekim Shanghai, 197–204.
- Xiang, L., Zhou, H., Shu, Z., Tan, S., Liang, G., Zhu, J., 2013, GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study, *NDT&E International*, 59, 68–76.
- Xie, X., Liu, Y., Huang, H., Du, J., Zhang, F., Liu, L., 2007, Evaluation of Grout Behind the Lining of Shield Tunnels Using Ground Penetrating Radar in The Shanghai Metro Line, China, *Journal of Geophysics and Engineering*, 253–261.
- Xu, J., Wang,F., Wang,B., 2009, Quick Maintenance for Tunnel Lining Voids with Polymer Grouting Technology, *Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management*, 136-141.
- Yalçın, C.Ç., Altunel, E., Karabacak V., Akyüz S., Yönlü, Ö., Meghraoui, M., Bano, M., 2007, Paleosismoloji Çalışmalarında GPR Yönteminin Önemi: Atça (Büyük Menderes) Hendeğinde Örnek Bir Uygulama, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 11. Çalıştayı*, 08-09 Kasım 2007 Kocaeli, TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldız, M. Ş., Yüksel, F.A., Hoşkan, N., 2010, *Metro Tünellerinde Prekast Beton ile Dolgu Beton Arasında ve İçinde Kalan Boşlukların GPR Yöntemi İle Belirlenmesi*, Türkiye 19.Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi.
- Yıldız M.,Ş., Yüksel A.F., Gülerdoğan E., 2009, Mermer sahalarında Boşluk ve Çatlakların Belirlenmesi ve Blok Veriminin Araştırılması için Jeofizik Yöntemlerin Kullanılması, *21. Uluslararası Maden Kongresi*, 6-8 Mayıs 2009 Antalya.
- You, G. M. ve Liu, X. Z., 2007, Application of Ground Penetrating Radar to Geological Forecast for Expressway Tunnel Construction, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 24 (8) , 92-95.
- Yönlü, Ö., 2008, *Büyük Menderes Grabeninin Batı Kesimimin Morfotektonik Özellikleri ve Tarihsel Deprem Aktivitesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Estitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

- Yüksel A.F. ve Yıldız M.Ş., 2011, Amasya - Terziköy Kaplıcaları Mevkiinde Antik Roma Hamamı Kalıntılarının Arkeojeofizik (GPR -Jeoradar Yöntemi İle) Etüdü, 27. *Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 23-28 Mayıs 2011 Malatya, Ankara, İsmail Aygöl Ofset Matbaacılık, 121-138.
- Zeng, X., Mcmechan, G.A., 1997, GPR: Characterization of Buried Tanks and Pipes, *Geophysics*, 62 (3), 797–806.
- Zhang, C., Song, M., Wang, L., 2012, Application of GPR in Hole Survey of the Subway Project in Beijing, *Energy Procedia*, 16 (B), 702-706.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Kübra ERGÜVEN
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	13/02/1989, İstanbul
Telefon	0505 671 34 63
E-mail	kubraerguven@hotmail.com

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Jeofizik Mühendisliği	2015
Lisans	İstanbul Üniversitesi/Jeofizik Mühendisliği-Yandal Maden Müh.	2010
Lise	Güner Akın Lisesi	2005

Makaleler/Bildiriler

- Hoşkan N.**, Yüksel F.A., Avcı K., Ergüven K., Korkut T., "Tlos Antik Kenti Stadion Alanında Jeoradar (Gpr) Çalışmalar", *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-18 Nisan 2014, ss.432-435.
- Sakar S.**, Yüksel F.A., Hoşkan N., Avcı E., Avcı K., Ergüven K., "The Gpr Measurements On Hagia Sophia'S Surfaces Facing The Naos", *Symposium On The Application Of Geophysics To Engineering And Environmental Problems 2014*, Boston, ABD, 16-20 Mart 2014, pp.558-558.
- Ergüven K.**, Yüksel F.A., Hoşkan N., Avcı K., Yıldırım Ş., "Kastamonu İli, Daday İlçesi-Elmayazi Köyü, Kadir Onbaşı Tepesi Tümülsü Jeoradar Çalışmaları", *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-18 Nisan 2014, ss.428-429.
- Avcı K.**, Yüksel F.A., Bayrakdar C. , Hoşkan N., Ergüven K., "Antalya İli, Kaş İlçesi, Akdağ Kütlesinin Güney Yamacındaki Heyelanda Jeofizik Araştırmalar", *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-18 Nisan 2014, ss.198-201.
- Hoşkan N.**, Yüksel F.A., Avcı K., Ergüder İ., Babayiğit E., Atik Korlmaz S., "Ground Penetrating Radar (Gpr) Studies At Letoon At Kumluova-Fethiye-Mugla-Turkey", *Symposium On The Application Of Geophysics To Engineering And Environmental Problems 2014*, Boston, ABD, 16-20 Mart 2014, pp.553-553.
- Yüksel F.A.**, Avcı K., Ergüven K., Karakaya H. , İnci H., Özgüven B., "Edirne Kalesi Sur Temellerinin Jeoradar İle (Gpr) Yöntemiyle Araştırılması", *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-18 Nisan 2014, ss.430-431.
- Yüksel F.A.**, Avcı K., Ergüven K., "Edirne Castle, Georadar Investigation", *İN: Change and Transformation in Edirne Kaleiçi*, Özgüven, B., Eds., EGIAD, Edirne, pp.5-16-, 2013.
- Özcan, K.**, Yüksel, F. A., Hoşkan, N. ve Ergüven, K., "Ergene Havzası Çökellerinde Stratigrafik Kapanların Jeoelektrik Yöntemle Üç Boyutlu Görüntülenmesi", *63. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye.
- Ergüven, K.**, Yüksel, F. A., Hoşkan, N. ve Özcan, K Çorlu Formasyonun Batı Kenarının Akifer Özelliklerinin Jeoelektrik Yöntemle Modellenmesi, 2010, *63. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye.
- Ergüven, K.**, Yüksel, F. A., Hoşkan, N. ve Özcan, K Büyükçekmece-Yakuplu Heyelan Bölgesinin Üç Boyutlu Jeolojik Modellenmesi, 2011, *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye.