

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARHUNEN-LOÈVE DÖNÜŞÜMÜ İLE YER RADARI VERİ GÖRÜNTÜLEME
KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

YAĞMUR ATILGAN

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARHUNEN-LOÈVE DÖNÜŞÜMÜ İLE YER RADARI VERİ GÖRÜNTÜLEME KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Yağmur ATILGAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Yer radarı yönteminde engebeli ve sert yüzey etkisi (clutter effect) ve çınlama (ringing) adı verilen tekrarlı yansımalar en çok karşılaşılan yatay düzenli gürültülerdir. Bozuk ve sert yüzeylerde antenler arasındaki tekrarlı etkileşim antenler arası doğrudan gelen dalgaların tekrarlarını oluşturmaktadır. Çınlama adı verilen tekrarlı yansımalar, ilerleyen elektromanyetik (EM) dalganın dalga boyu ile örtülü yapının kalınlığının aynı olması durumunda dalga rezonansa girerek oluşturmaktadır. Tekrarlar aranan örtülü yapıları maskeleymektedirler. Bu nedenle radargramdan atılması hedeflenmektedir. Tezin başlıca amacı, dalgacık ayırıklaştırma kuramına dayalı Karhunen-Loève dönüşümü (KLD) ile radargramlardaki yatay ilişkili gürültülerin ortadan kaldırılmasıdır. Bu amaçla KLD ile yatay ve eğimli olayları birbirinden ayıran MATLAB programlama dilinde bir kod geliştirilmiştir. İlk olarak radargrama ait özdeğerler spektrumu elde edilmiştir. Bu spektrumda enerjisi yüksek olan ve yatay olayları içine alan öz değer sayısı belirlendikten sonra KLD ile süzgeç radargramı oluşturulmuştur. Son olarak başlangıçtaki radargramdan süzgeç radargramı çıkartılarak süzgeçlenmiş radargram elde edilmiştir. Yatay ve eğimli olayları atma testleri zaman ortamı sonlu farklar (FDTD) modelleme ile elde edilmiş, test sahasında toplanmış ve arazi uygulaması ile toplanmış gerçek verilere ait radargramlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç radargramlar görüntülenmiştir. KLD ile süzgeçlenmiş radargramlarda tekrarlı yatay gürültüleri kaldırılabilirdiği gösterilmiştir. Ayrıca, süzgeçlenmiş radargramlarda Sinyal /Gürültü (S/G) oranının arttığı görülmüştür.

Mayıs 2021, 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Karhunen-Loève Dönüşümü (KLD), Yer Radarı (GPR), Radargram, Yatay Gürültü , Sinyal/Gürültü (S/G) Oranı

ABSTRACT

Master Thesis

IMPROVING THE QUALITY OF GROUND PENETRATING RADAR DATA IMAGING WITH THE KARHUNEN-LOÈVE TRANSFORMATION

Yağmur ATILGAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

In the ground penetrating radar (GPR) method, multiple reflections called as rough and hard surface effect (clutter effect) and ringing are the most common regular noises. The repetitive interaction between antennas on rough and hard surfaces creates multiple reflections of direct incoming waves between antennas. Multiple reflections, called ringing, occur when the wavelength of the advancing electromagnetic (EM) wave and the thickness of the covered structure are the same, by entering into wave resonance. Multiples mask the implicit structures sought. For this reason, it is aimed to be removed from the radargram. The main purpose of the thesis is to eliminate horizontal coherent noises on radargrams with the Karhunen-Loève transform (KLT) based on the wavelet discretization theory. For this purpose, a code has been developed in MATLAB programming language, separating horizontal and dipping events from each other on the radargram operated by KLT. Firstly, the eigenvalues spectrum of the initial radargram has been obtained, then an eigenvalue number, including coherent horizontal noises of high energy of the spectrum, has been decided from this spectrum. Secondly, a filtering radargram has been obtained by KLT. Finally, the filtering radargram has been subtracted from the initial radargram and final filtered radargram has been obtained. The tests of removing of coherent noises have been realized on the radargrams obtained by finite difference time domain (FDTD) modeling, collected on the test field, and real data collected on field. The resulting radargrams have been displayed. The results have been showed that horizontal coherent noises filtered on the radargrams with KLT successfully. In addition, it has seen signal/noise (S/N) ratio has been increased on the filtered radargrams.

May 2021, 65 Pages

Key Words: Karhunen-Loève Transform (KLT), Ground Penetrating Radar (GPR), Radargram, Coherent Noise, Signal/Noise (S/N) ratio

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın başından sonuna kadar bana yardımcı olan, bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirgemeyen, tezin oluşumunda önemli katkılarda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Selma KADIOğLU'na (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi), sismik veri işlemi bana en iyi şekilde öğreten Emekli Mühendis Ali MERAL'e (TPAO) teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında desteğini hiç eksik etmeyen, tezime önemli katkılar sağlayan, arkadaşlarım Jeofizik Yüksek Mühendisi Erhan ERęÜN'e, Jeofizik Mühendisi Seçkin Sertaç LALLI'ya, Jeofizik Mühendisi Metehan TEBER'e, Jeofizik Mühendisi İrem BAYSAL'a, Jeofizik Mühendisi Merve ŐEKER'e, Jeofizik Mühendisi Esra ÇORUMLUOğLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca, tüm bu süre içerisinde beni destekleyen, çalıştığım kurumdaki müdürüm Recep TEZEL'e ve daima yanımda olarak başarıya ulaşmamı sağlayan sevgili aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Yağmur ATILGAN

Ankara, Mayıs 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. YER RADARI YÖNTEMİ	5
2.1 Yer Radarı Yönteminin Tanımı.....	5
2.2 Tarihsel Gelişim	6
2.3 Yöntemin Çalışma İlkesi.....	7
2.4 Yanal ve Düşey Ayrımlılık.....	16
2.5 Yer Radarının Kullanım Alanları.....	18
2.6 Yöntemin Üstün ve Zayıf Yönleri.....	18
2.7 Yer Radarında Veri İşlem	19
3. KARHUNEN – LOÈVE DÖNÜŞÜMÜ (KLD)	23
3.1 KLD Tanımı.....	24
3.2 KLD’nde Özdeğer ve Özvektör	24
4. YER RADARI VERİ İŞLEMİNDE KLD UYGULAMALARI	30
4.1 Uygulama 1: Yer altı Modeline ait Sentetik Radargram Üzerinde KLD Uygulamaları....	31
4.2 Uygulama 2: Parametreleri Bilinen Kireçtaşı Formasyonu Üzerinde Ölçülen Yer Radarı Verilerine Uygulanan KLD.....	39
4.3 Uygulama 3: Afşin-Elbistan Kömür Sahasına ait Yer Radarı Profil Verisinde KLD ile Yatay Gürültülerin Kaldırılması.....	47
5. SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ	Elektrik iletkenlik
ε	Dielektrik geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
f	Uygulanan alternatif manyetik alanın frekansı
α	Yer değiştirme akımı
k	Dalga sayısı
v_1	Üst malzeme boyunca dalganın yayılma hızı
v_2	Alt malzeme boyunca dalganın yayılma hızı
\emptyset_1	Dalğanın geliş açısı
\emptyset_2	Dalğanın yansıma açısı
ε_1	Birinci ortamın dielektrik sabiti
ε_2	İkinci ortamın dielektrik sabiti
R	Kırılma katsayısı
T	Yansıma katsayısı
h	Anten ve yeraltındaki yansıma yüzeyi arasındaki uzaklık yani derinlik
t	Dalğanın geliş-gidiş zamanı
d	Yer radarı nüfuz derinliği
x_d	Doğrudan gelen dalga
x_r	Yansıyan dalga
x_{dif}	Saçılan dalga
n	Gürültü

Kısaltmalar

Hz: Hertz

ns: nanosaniye

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yer radarının çalışma prensipleri.....	5
Şekil 2.2 Arayüzeğe gelen dalga I'ın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması	10
Şekil 2.3 TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansıması ve iletimi.....	11
Şekil 2.4 Profil yönü boyunca anten konumlandırmaya göre TE ve TM modları.....	12
Şekil 2.5 Yer radarı yönteminde genel dalga fazları veya yansıyan dalga fazları için gidiş dönüş yoluna ait seyahat zamanı çalışma düzeneği.....	13
Şekil 2.6 Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200MHz	17
Şekil 2.7 Radargramlara uygulanan veri işlem adımları.....	20
Şekil 4.1 MATGPR açık kaynak programı kullanılarak üretilmiş 2B yer modeli.....	32
Şekil 4.2 Sentetik yer radarı verisine ait radargram.....	33
Şekil 4.3 Şekil 4.2'deki radargrama yatay tekrarlı olayların eklendiği radargram	33
Şekil 4.4 Sentetik veriye ait özdeğer spektrum grafiği	34
Şekil 4.5 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 2 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram	35
Şekil 4.6 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 5 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram	36
Şekil 4.7 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 20 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD Sonrası süzgeçlenmiş radargram.....	37
Şekil 4.8 Şekil 4.3 ile verilen yatay tekrarları içeren gürültülü radargrama ait a) KLD uygulamadan önceki bir radar izi b) KLD uyguladıktan sonraki aynı radar izi c) KLD uygulamadan önce ve KLD uyguladıktan sonra radar izlerinin karşılaştırılması.	38
Şekil 4.9 Gerçek durumda kullanılan test sahası modelinin geometrisi	39
Şekil 4.10 Şekil 4.9 ile verilen test saha modeline ait a) işlenmemiş radargram, b) Veri-ışlemi yapılmış radargram.....	41

Şekil 4.11 Şekil 4.10a' daki radargrama uygulanan veri işlem adımları	42
Şekil 4.12 Şekil 4.10b' deki radargrama ait özdeğer spektrum grafiği.....	42
Şekil 4.13 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 2 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram	44
Şekil 4.14 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram, b) KLD ile özdeğer sayısı 5 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram	45
Şekil 4.15 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram, b) KLD ile özdeğer sayısı 10 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram	46
Şekil 4.16 Afşin-Elbistan profil verisine uygulanan veri işlem adımları.....	48
Şekil 4.17 Afşin-Elbistan kömür sahasına ait profil verisine ait işlenmiş radargram....	49
Şekil 4.18 Afşin-Elbistan kömür sahasında toplanan yer radarı profil verisinin işlenmiş radargramına ait özdeğer spektrumu.....	49
Şekil 4.19 Özdeğer sayıları sırasıyla a) 5, b) 10, c) 20, d) 35 ve e) 100 verilerek KLD ile oluşturulmuş radargramlar	51
Şekil 4.20 Şekil 4.18' de süzgeçleme amaçlı KLD ile elde edilen radargramlar kullanılarak sırasıyla özdeğer sayıları a) 5, b) 10, c) 20, d) 35 ve e) 100 verilerek gerçekleştirilen süzgeçleme sonrası elde edilen radargramlar.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Çeşitli malzemeler için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri.....	14
Çizelge 2.2 Bazı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri.	15
Çizelge 4.1 Tasarlanan Yer altı Modeline ait Zaman Ortamı Sonlu Farklar (FDTD) Algoritmasında Kullanılan Parametreler.....	32
Çizelge 4.2 Yer radarı verilerinden kaydedilen ve test sahasının hedeflerini çevreleyen malzemeler	40



1. GİRİŞ

Yer radarı (GPR) yöntemi yakın yüzey sığ araştırmalar için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) bir yöntemdir. Yöntemin kullanımının kolay olması ve çok hızlı veri toplanabilmesi, veri toplama sırasında çalışma alanında herhangi bir tahribat oluşturmaması (non-invasive), santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yeraltı görüntülemenin yapılabilmesi en önemli üstünlükleridir.

Bir yer radarı sistemi, verici ve alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçıdan oluşmaktadır. Verici anten bir kaç nanosaniye uzunluğunda (ns) EM dalga üretir. Yer içinde ilerleyen dalgalar herhangi bir cisim veya süreksizlik ile karşılaştıklarında yansıma ve/veya saçılmaya uğrarlar. Aynı veya farklı zamanlarda yukarı doğru ilerleyen yansımış/saçılmış dalgalar yüzeydeki alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçı yardımı ile zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilirler. Buna “radar izi” veya yer radarında “EM dalga alanı” adı verilir ve zaman birimi nanosaniyedir. Veri toplama işlemi bir profil üzerinde belirli ölçüm aralıkları ile gerçekleştirilir. Her ölçüm noktasındaki izler yan yana getirilerek “radargram” adı verilen iki boyutlu (2B) radar kesitleri elde edilir (Annan 2000, Daniels 1989, Kadioğlu ve Kadioğlu 2006). GPR yöntemi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Başlıca yüzeye yakın stratigrafik istifin ortaya çıkarılmasında (Davis ve Annan 1989), yüzeye yakın jeolojik birimlerin belirlenmesinde (Koralay vd. 2007), fay ve kırık gibi süreksizliklerin haritalanmasında (Grandjean ve Gaury 1999, Green vd. 2003, Kadioğlu 2008), karstik boşluklarının aranmasında (Kadioğlu ve Uluggerli 2012), yeraltısuyu seviyesinin belirlenmesinde (Harrari 1996, Dannowski ve Yaramancı 1999, Aspron ve Aigner 1999), yüzeye yakın sıvı hidrokarbon aramalarında (Changryol vd. 2000) kullanılmaktadır. Bununla birlikte, arkeolojik çalışmalarda tapınak, mezar, duvar, temel ve benzeri tarihi kalıntıların bulunmasında (Sambuelli vd. 1999, Daniels 2000, Kadioğlu vd. 2008, Kadioğlu vd. 2011, 2013), metalik cisim arama çalışmalarında, yeraltında gömülü boru, boru hattı, su veya akaryakıt tankı ve eski endüstriyel atık alanlarının belirlenmesinde (Kadioğlu ve Daniels 2008, Kurt vd. 2008), zemin ve tünel araştırmalarında karayolu, demiryolu, su tünelleri, tüp geçitler, maden galerileri içinde duvar cephelerinin sağlamlıklarının belirlenmesinde, (Kadioğlu 2018), mayın araştırmalarında (Kadioğlu ve Kadioğlu 2016) galeri içinde bozunmuş bölge ve çevre

aramalarında, galeri ilerleme yönü belirlemelerinde (Cardelli vd. 2003) ve yeraltındaki insan kalıntılarını aramada (Hammon vd. 2000) kullanılmaktadır.

GPR yöntemi verici anten (transmitter) aracılığı ile yer içine yollanan yüksek frekanslı EM dalganın yer içinde ilerlemesi, yansınması, kırılması, saçılması sonucu tekrar yüzeydeki alıcı antene (receiver) ulaşarak nanosaniye (ns) mertebesinde zamanın fonksiyonu olarak elektrik alan yerdeğiştirme değerlerinin kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır (Kadioğlu 2004). Bir ölçüm noktasında gidiş-dönüş seyahat zamanının fonksiyonu olarak kaydedilen ize EM dalga alanı adı da verilmektedir (Kurt vd. 2008). Bir profil boyunca tüm ölçüm noktalarındaki radar izleri profil üzerindeki konumları ile sıralandıklarında yatay eksen (x doğrultusu) profil başlangıç noktasına göre uzaklık, düşey eksen ns mertebesinde kayıt zamanı (z doğrultusu) olan 2B radar kesitini oluştururlar. Bu kesit daha çok “radargram” adı ile tanımlanır.

Radargramların veri-işlem uygulamalarındaki başlıca hedef veri olarak kabul edilen, yansıma ve saçılma dalga fazlarını olması arzu edilmeyen düzenli ve rastgele gürültülerden arındırmak, sinyal/gürültü (S/G) oranını artırmaktır. Bir profil boyunca toplanan GPR verilerinde yüzey topoğrafyasının eğimli ve düzgün olmaması, irili ufaklı taşların yoğun olması veya sert yüzeylerden dolayı hava-yer yüzeyinden gelen ve antenler arasındaki etkileşimden (coupling) oluşan kuvvetli yansımalar (clutter effect) ve bunların rezonansa girerek tekrarlanması aranan yer içi yapılarına ait anomalileri (yansıma, saçılma dalga fazlarını) maskeleyebilir. Benzer şekilde yer içindeki hedef nesnenin boyu EM dalganın bir dalga boyu ile eşleşirse rezonansa girerek yansıyan/saçılan dalganın kendisini tekrarlamasına (çınlama, ringing) neden olmaktadır. Bu olaylar radargramlarda yer içindeki aranan hedef yapılardan gelen yansımış/saçılmış dalgaların görüntülenmesini engelleyen düzenli hem yatay hem de düşey bileşenli gürültülerdir ve radargramlarda düşey ve yatay ayırım gücünü azaltmaktadırlar. Yatay yönde yapıların sınırlarının belirlenmesinde ayrımlılığı artırmak için yatay gürültüleri ortadan kaldırmak amaçlı genellikle tüm izlerde aynı zamandaki ortalama genlik değerini kaldırma (background removal) veya seçilmiş iz sayısı ile ortalama genlik değerini kaldırma (average filtering) işlemleri yapılmaktadır. Bu işlemler yatay gürültüleri ya tam olarak kaldıramamakta ya da aranan yapıya ait anomalilerin kaldırılmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle radargramlar üzerinde bu tür gürültüler gerçekte olmayan bir yapı veya olay gibi görüntü sunabilmektedirler. Bazen de bu yapı ve olayları içine alarak görüntülenmemelerine neden olmaktadır. Bu nedenle yatay gürültülerin kaldırılması için yine sismik yansıma yönteminde kullanılan ancak GPR yönteminde radar izlerine uygulanmasında dalgacık ayırıklaştırma ile yatay ve eğimli olayların ayırıklaştırılarak iki ayrı radargramın elde edilmesi ve seçime göre yatay olayları içeren radargramın işlenmiş bileşke radargramdan çıkarılması ile yatay gürültülerden arındırılmış kesitin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Karhunen- Loève dönüşümü (KLD) iki boyutlu (2B) dalgacık ayırıklaştırma yöntemlerinden en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Jones ve Levy 1987, Al Yahya 1991, Dony 2001, Montagne ve Vasconcelos 2006, Wang, Zeng ve Xu, 2005).

Jones Ve Levy (1987), KLD yöntemini sismik verilerde sinyal/gürültü oranını artırmak için kullanmıştır. Yedlin vd. (1987), yapay sismik veriler üzerinde yansımaları kırılan dalgalardan ayırmak için KLD uygulamıştır. Al Yahya (1991), KLD yöntemini sismik yansıma verilerinde gelişigüzel (rastgele) gürültülerin bastırılmasında kullanmıştır. Londono vd. (2005), KLD yöntemini sismik yansıma verilerinde yansıma sinyallerine zarar vermeden yüzey dalgası (ground roll) gürültülerinin giderilmesinde kullanmıştır. Montagne vd. (2006), sismik yansıma verilerindeki yatay (coherent) gürültülerin süzgeçlenmesinde kullanmıştır. Kasina (2010), sismik yansıma verilerinde tekrarlı yansımaların ve rastgele gürültülerin giderilmesinde KLD kullanarak sinyal/gürültü oranını artırmışlardır. Zhao vd. (2005) ve Khan ve Al Nuaimy (2009), sentetik ve arazi radargramlarına KLD uygulayarak ortalama genlik bilgisini kaldırmışlar ve sinyal/gürültü oranını artırmışlardır. Zhihua ve Minghui (2007), doğrudan gelen dalgaları kaldırmada KLD uygulamıştır. Yine Rradargram üzerinde çınlama (ringing) yatay gürültülerini süzgeçlemede KLD kullanılmıştır (Khan ve Al Nuaimy 2009, Kim vd. 2007).

Çalışmanın ilk aşamasında radargramları yatay gürültülerden arındırma amaçlı KLD uygulayan MATLAB programlama dilinde yazılım geliştirilmiştir. Daha sonra MATGPR(Tzanis 2004) yazılımı kullanılarak bir yeraltı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan modeldeki parametreler kullanılarak MATGPR ortamında zaman ortamı

sonlu farklar (FDTD) algoritması ile sentetik yer radarı verisi üretilmiştir. Buna göre, oluşturulan sentetik yer radarı verisine doğrudan gelen dalga MATLAB yazılımında geliştirilen kod ile çoğaltılarak tekrarlı yansıma gibi veriye yatay gürültü olarak eklenmiştir. Elde edilen gürültülü radargrama geliştirilen kod ile KLD uygulanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında kireçtaşları, boşluklu kum ve boruların mevcut olduğu bilinen bir test sahasında yüksek frekanslı (900 MHz) yer radarı verileri toplanmıştır (Bitri ve Grandjen 1998). Bu test sahasından toplanan yer radarı verileri üzerinde önce genel veri işlem adımları uygulandıktan sonra KLD uygulanmış ve veride bulunan yer radarı izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay olayların etkisi giderilerek sonuçları görüntülenmiştir.

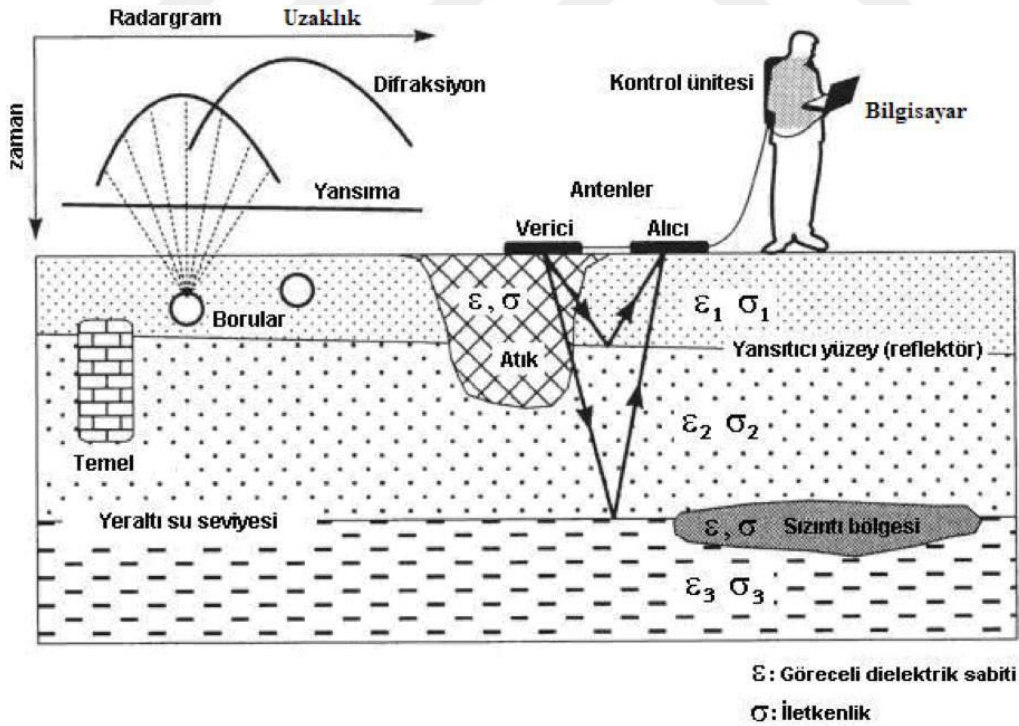
Çalışmanın üçüncü aşamasında, Afşin Elbistan kömür sahasında toplanan arazi verisine genel veri işlem adımları uygulandıktan sonra, KLD uygulanmış bunun sonucunda veride bulunan radar izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay olaylar veriden kaldırılarak kırıklı yapıların daha belirgin bir şekilde görüntülenmesi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında genel anlamda KLD yer radarı veri işlem aşamalarındaki uygulanabilirliği ile beraber, yer radarı verileri üzerindeki etkisi konu alınmış, literatür ve uygulama örnekleri ile yöntemin başarısı tartışılmıştır.

2. YER RADARI YÖNTEMİ

2.1 Yer Radarı Yönteminin Tanımı

Yer radarı yöntemi bir verici anten yardımıyla yer içine gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların yer altındaki farklı elektriksel özelliklere sahip yapılardan yansırarak alıcı anten tarafından kaydedilmesi ilkesine dayanır (Şekil 2.1). Yeraltında her iki tarafı farklı dielektrik özellikte yapılardan oluşan bir ara yüzey varsa, elektromanyetik dalga bu ara yüzeyde yansıma ve/veya iletme uğrayacaktır. Yüksek çözünürlüklü bir yöntem olan yer radarı yöntemi yer altının sığ kesimlerinin araştırılmasında en çok tercih edilen yöntemdir. Şekil 2.1’de yer radarı ile incelenebilecek problemler, ölçü alımının basitçe gösterimi ve yer radarı kaydının muhtemel şekli gösterilmektedir.



2.2 Tarihsel Gelişim

Yer radarı yönteminin tarihçesine genel bir bakış atıldığında; elektromanyetik dalgaları kullanarak metalik bir nesnenin tespit edilebileceği ilk olarak Hertz tarafından 1886 yılında deneysel olarak ispatlanmıştır (Skolnik 1981). Daha sonra, elektromanyetik sinyaller 1904 yılında Alman mühendis (Hulsmeyer 1904) tarafından metal objeleri sahada tespit etmek amacıyla kullanılmıştır; ancak elektromanyetik dalgaları kullanarak gömülü nesnelere bulmak için ilk patent (Lowy 1911) tarafından alınmıştır. Hulsbeck 1926 yılındaki çalışması ile gömülü objelerin yapısının belirlenmesinde darbeli tekniklerin ilk kullanımını gerçekleştirmiştir (Daniels 2004). Yirmili ve otuzlu yıllar boyunca radar tekniği sürekli bir gelişim içerisinde olup, ikinci dünya savaşıyla birlikte gerçek anlamda sahada kullanılmaya başlanmıştır (Diamanti 2008). Savaş yıllarında askeri amaçlı olarak kullanılan yöntem daha sonraları jeolojik araştırmalar amacıyla tercih edilmiştir. Buz (Stenson 1951), (Evans 1963) su-tuz çözeltileri (Unterberger 1979), çöl kumları ve kayaç tiplerini (Morey 1974) incelemek amacıyla kullanılmıştır. Kömür aramaları için kullanımı ise (Cook 1974) ve (Roe ve Ellerbruch 1979) tarafından gerçekleştirilmiştir (Daniels 2004). 1980 itibarıyla özellikle mühendislik ve arkeoloji alanlarında tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Gelişen teknoloji ve bilgisayarların artan gücü ile popülerliğini her geçen gün arttıran yer radarı yöntemi uygulama alanlarını da genişletmiştir. Günümüzde ise yer radarı yöntemi artık çok daha spesifik konularda başarıyla uygulanmaktadır. Bu araştırma alanlarına örnek olarak; jeolojik ve hidrojeolojik uygulamalar (Leandro vd. 2019), buz kalınlığı araştırmaları (Brandt vd. 2009), yeraltı kirliliği çalışmaları (Brewster vd. 1995), (Orlando ve Renzi 2015), arkeoloji (Kadioglu vd. 2013), (Rabbel vd. 2015), otoyol-demiryolu araştırmaları (Bianchini vd. 2019), beton analizleri (Kaplanvural vd. 2018), su-doğalgaz-elektrik tesisatlarının tespiti (Zeng ve McMechan 1997), yapı-donatı araştırmaları (Rathod vd. 2019), adli araştırmalar (Schotsmans vd. 2014), kara mayınlarının tespiti (Giannakis vd. 2016), patlamamış askeri mühimmatların (UXO) tespiti (Núñez-Nieto vd. 2014), Ay yüzeyi (Feng vd. 2019) ve daha güncel konulardan biri olan Mars araştırmaları (Hamran vd. 2015) örnek olarak sayılabilir.

2.3 Yöntemin Çalışma İlkesi

Yer radarı yönteminin temeli elektromanyetik teoriye dayanır. Bu bölümde elektromanyetik teorinin temeli olan Maxwell denklemleri ile ilgili bilgiler verilecektir. Maxwell denklemleri, elektromanyetiğin fiziksel temeli ile malzemelerin özelliklerini birleştirerek yer radarı sinyalinin karakterini tanımlar. Klasik Maxwell denklemleri aşağıdaki dört temel denklem olarak bilinir. Amper yasasına göre bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur.

Maxwell denklemleri, matematiksel olarak elektromanyetiğin fiziğini tanımlamakta ve aynı zamanda bir EM dalgalar için temel oluşturmaktadır (Nabighan 1998, Annan 2004). Buna göre birinci Maxwell denklemi,

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

\vec{E} = Elektrik alan (v/m)

\vec{B} = Manyetik akı yoğunluğu (Weber/m² = Tesla)

ile ifade edilir ve Faraday Kanunu olarak tanımlanır. Zamanla değişen bir manyetik alan ortamdaki elektrik yüklerin hareket etmesine ve bu yük hareketiyle, kapalı döngüsel bir elektrik alan oluşmasına neden olur. Elektrik alan, indüklenen elektromanyetik alanın manyetik akı değişiminin negatif işaretlisidir ve vektörel bir büyüklüktür.

İkinci Maxwell denklemi olarak bilinen Amper kanunu; bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluştuğunu açıklamaktadır. Matematiksel ifadesi

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

\vec{H} = Manyetik alan (A/m)

\vec{J} = Elektrik akımın yoğunluğu (A/m²)

\vec{D} = Yer değiştirme akımları (Coulomb/m²)

ile verilir. Üçüncü Maxwell denklemi olan Gauss kanunu; elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmektedir (2.3) denklemi ile tanımlıdır.

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

\vec{D} = Yer değiştirme akımları (Coulomb/m²)

\vec{q} = Hacim başına düşen birim yük yoğunluğu $\left(\frac{C}{m^3}\right)$

Manyetik alan için Gauss kanunu; manyetik alanın skaler kaynağının olmadığı anlamına gelir. Herhangi bir kapalı yüzeydeki manyetik alanın akısı sıfırdır ve

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

şeklinde ifade edilir. Maxwell denklemleri frekans ortamına aktarıldığında

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (2.6)$$

$$k^2 = (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega) \quad (2.7)$$

elde edilir (Kurt 2009). Burada k dalga sayısıdır ve k'nın frekansa göre değişimi EM yöntemlerin temelidir. σ elektrik iletkenlik (S/m), ϵ : dielektrik geçirgenlik (F/m), μ : manyetik geçirgenlik (H/m), $\omega=2\pi f$, f anten merkezi frekansıdır. Dalga sayısı k karmaşık (kompleks) sayıdır ve birinci ve ikinci terimleri

$$k^2 = \epsilon\mu\omega^2 - i\mu\sigma\omega = \alpha + i\beta \quad (2.8)$$

şeklinde kısaltılabilir. Burada α yer değiştirme akımı ile iç iletkenlik akımı ile ilgili değişkenlerdir. Bunlara ek olarak ortam ve alanlarla ilgili üç yardımcı denklem

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.10)$$

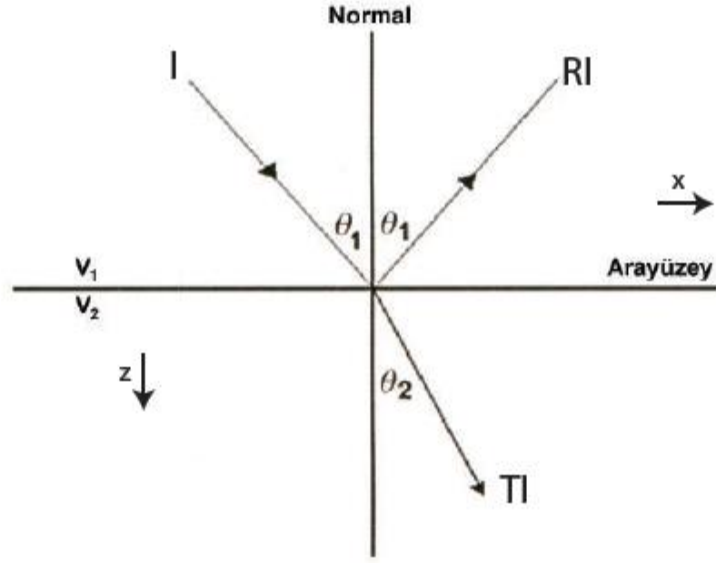
$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (2.11)$$

ile verilmektedir. Yer içine gönderilen EM dalganın bir ara yüzey veya nesne ile karşılaşması sonucu EM dalga yansımaya veya saçılmaya uğrar. Bu nedenle, dalganın yansıması ve saçılması sismik yöntemde olduğu gibi Snell Kanunu'na göre,

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2} \quad (2.12)$$

ile verilir (Annan 2004). ϕ_1 ve ϕ_2 sırasıyla dalganın geliş açısı ve yansıma açısını temsil etmektedir.

Fresnel yansıma ve iletim katsayıları ile elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir ara yüzeyde nasıl değiştiği açıklanabilir (Şekil 2.2). Bir elektromanyetik dalga sımra çarptığında kısmen iletilir kısmen ise yansır. Burada sımra gelen dalganın genliği I, yansıyan dalga RI, iletilen dalga TI, R ve T yansıma ve kırılma katsayıları olarak ifade edilir. Bu noktada elektromanyetik dalganın doğası hakkında daha ayrıntılı düşünöldüğünde yayılma doğrultusunda birbirinden bağımsız iki ayrı bileşen vardır (Annan 2005, Özkap, 2018).



Şekil 2.2 Arayüzeğe gelen dalga I' nın sınıra çarptıktan sonra enerjisinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması (Annan 2003' den düzenlenmiştir)

(2.13) bağıntısında belirtildiği üzere elektromanyetik dalga hızı (V), göreceli dielektrik sabiti (ϵ_r) ve göreceli manyetik geçirgenliğin (μ_r) bir fonksiyonudur. C elektromanyetik dalganın boşluktaki hızı olarak adlandırılır.

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.13)$$

Yer radarı yönteminde yansıma katsayıları,

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (2.14)$$

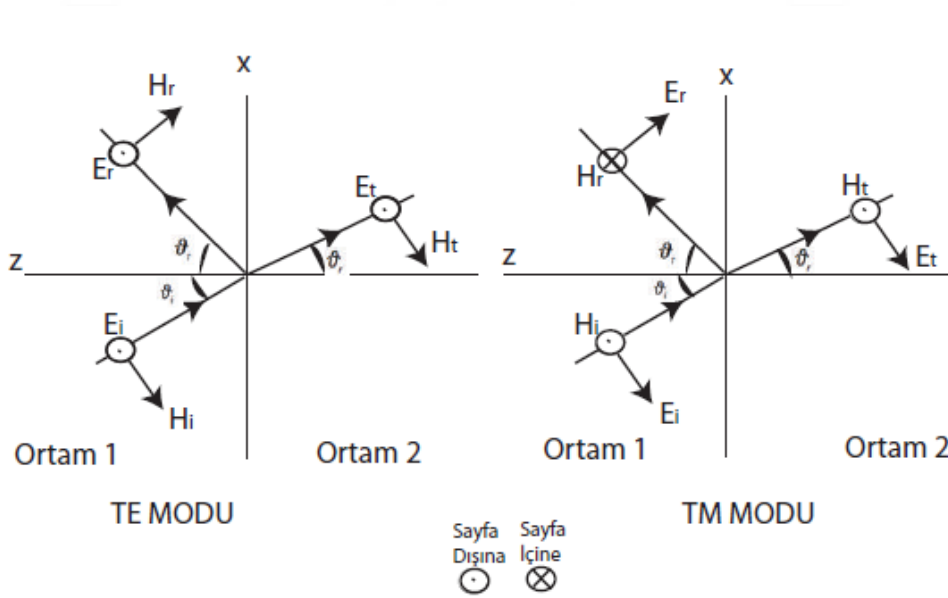
ile verilir. R yansıma katsayısıdır.

ϵ_1 ve ϵ_2 birinci ve ikinci ortamın dielektrik sabitleri, v_1 ve v_2 yüksek frekans EM hızlarıdır. İletim (kırılma) katsayısı,

$$T = 1 - R \quad (2.15)$$

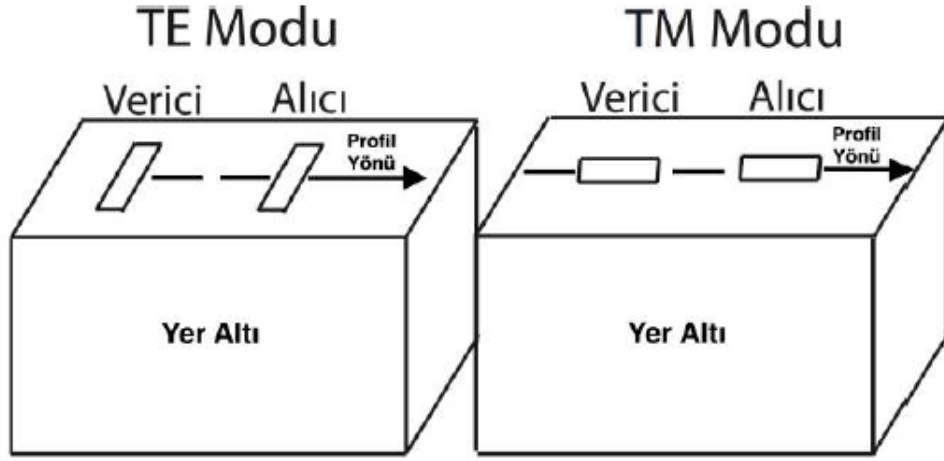
ile verilir.

İki boyutlu ortamda düzlemsel bir ara yüzey olduğunda EM dalga alanı iki moda ayrılmaktadır. Bu dalga modları TE (Enine elektrik alan) ve TM (Enine manyetik alan) olarak adlandırılır (Şekil 2.4). TE modunun elektrik alan bileşeni ara yüzeye paralel iken ve TM modunun manyetik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir (Nabighan 1998, Kaplanvural 2018).



Şekil 2.3 TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansıması ve iletimi (E:Elektrik alan vektörü, H:Manyetik alan vektörü) (Kaplanvural 2018).

Elektromanyetik dalga alanının TE ve TM olarak iki moda ayrılarak incelenmesi tamamen anten geometrisinden kaynaklanmaktadır. Eğer alıcı ve verici antenlerin yönü profil doğrultusu ile aynı ise TM modu, profil yönüne dik ise TE modu söz konusudur (Van der Kruk vd. 2006, Kaplanvural 2018). Şekil 2.4 profil üzerinde anten konumlamasına göre TE ve TM modlarını temsil etmektedir.



Şekil 2.4 Profil yönü boyunca anten konumlandırılmaya göre TE ve TM modları (Van der Kruk vd. 2006'dan düzenlenmiştir)

Yer radarı verilerini temsil eden radargramlarda hız analizi ile belirlenen yerin ortalama hızı kullanılarak zaman ekseninden derinlik eksenine dönüşümün

$$h = \frac{vt}{2} \quad (2.16)$$

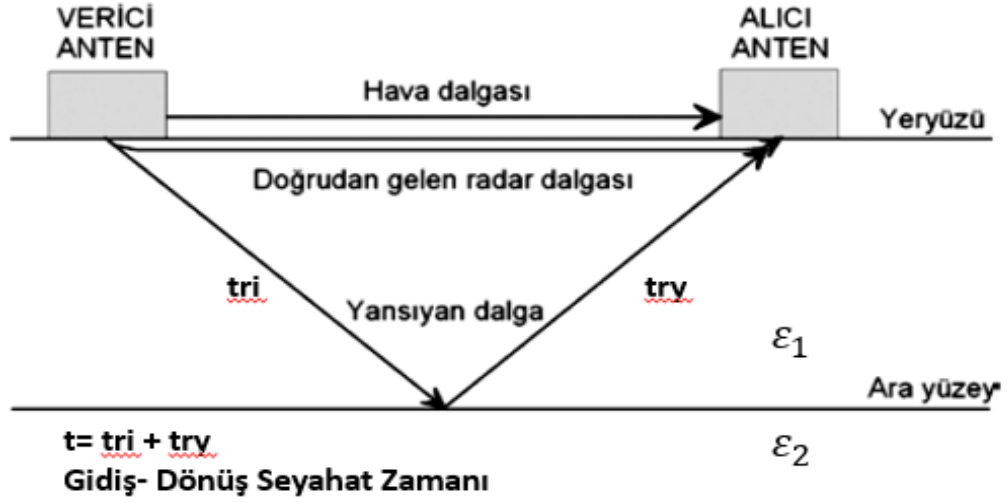
ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte h derinlik ve t , dalganın gidiş-dönüş seyahat zamanını (ns) ifade etmektedir (Şekil 2.5).

Yer radarı yönteminde veriler daha önceden çalışma alanının amacına uygun olarak belirlenen profil düzenekleri üzerinde toplanırlar.

Bir yer radarı verisi,

$$x(t) = x_d(t) + x_r(t) + x_{dir}(t) + n(t) \quad (2.17)$$

gösterilir.



Şekil 2.5 Yer radarı yönteminde genel dalga fazları veya yansıyan dalga fazları için gidiş dönüş yoluna ait seyahat zamanı çalışma düzeneği (Sezer 2010)

Bu eşitlikte, $x(t)$ radar izi olmak üzere, $x_d(t)$ doğrudan gelen dalga, $x_r(t)$ yansıyan dalga, $x_{dif}(t)$ saçılan dalga ve $n(t)$ gürültü olarak ifade edilmektedir. Gürültüler, özellikle yüzeye yakın küçük hedeflerin, kırıkların ve eğimli olayların belirlenmesinde sorun teşkil etmektedir. Yer radarı yönteminde, kullanılan frekans 10 MHz ve üzeridir. Yer radarı ölçümleri, bir profil üzerinde, araştırma amacına yönelik, önceden belirlenmiş ölçüm noktalarında alınır. Her bir ölçüm noktasındaki izler bir araya getirilerek iki boyutlu (2B) radargramlar elde edilir. Eğer bir alan üzerinde çalışılırsa, sahada paralel profiller üzerinden ölçümler alınır (Kurt 2009).

Elektromanyetik sinyallerde güçlü yansımalar oluşabilmesi için yansıtıcının alanı ve yüzeyi belirleyici unsurlardır. Güçlü yansımalar düzgün ve geniş yüzeylerden elde edilir, yüzey bozukluğu elektromanyetik sinyallerin saçılmasına neden olmaktadır. Doğada karşılaşılan çeşitli malzemelere ait göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri Çizelge 2.1' de, aynı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri ise Çizelge 2.2' de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Çeşitli malzemeler için göreceli dielektriksel geçirgenlik değerleri (Daniels 2004), (Jol 2009) ve (Reynolds 2011)' den düzenlenmiştir (Özkap 2019).

Göreceli dielektriksel geçirgenlik (ϵ_r)			
Malzeme	Daniels(2004)	Jol(2009)	Reynolds(2011)
Hava	1	1	1
Su	81	78(25 C ⁰)-88	81
Deniz Suyu	81	81-88	81-88
Buz	4	3	3.2
Kum (k)	2-6	3-6	3-6
Kum (sd)	10-30	10-30	10-32
Kumtaşı (k)	2-5	4-7	4-7
Kumtaşı (sd)	5-10	5-15	6
Kil (k)	2-6	2-20	2-5
Kil (sd)	5-40	15-40	8-40
Kireçtaşı (k)	7	4-8	4-8
Kireçtaşı (sd)	8	6-15	6-15
Kumlu toprak (k)	4-10	4-6	-
Kumlu toprak (sd)	10-30	15-30	-
Balçıklı toprak (k)	4-10	4-6	-
Balçıklı toprak (sd)	10-30	10-20	-
Killi toprak (k)	4-10	4-6	-
Killi toprak (sd)	10-30	10-15	-
Toprak (ortalama)	-	16	16
Toprak (donmuş)	4-8	2-8	2-8
Çakıl	-	-	5
Kömür	3.5	-	4-5
Dolomit	-	-	6.8-8
Granit	5	5-8	5-8
Bazalt (sd)	-	-	8
Kuartz	-	-	4.3
Asfalt	2-4	-	3-5
Beton	4-10	4-10	4-30

*k:kuru, sd:suya doymuş

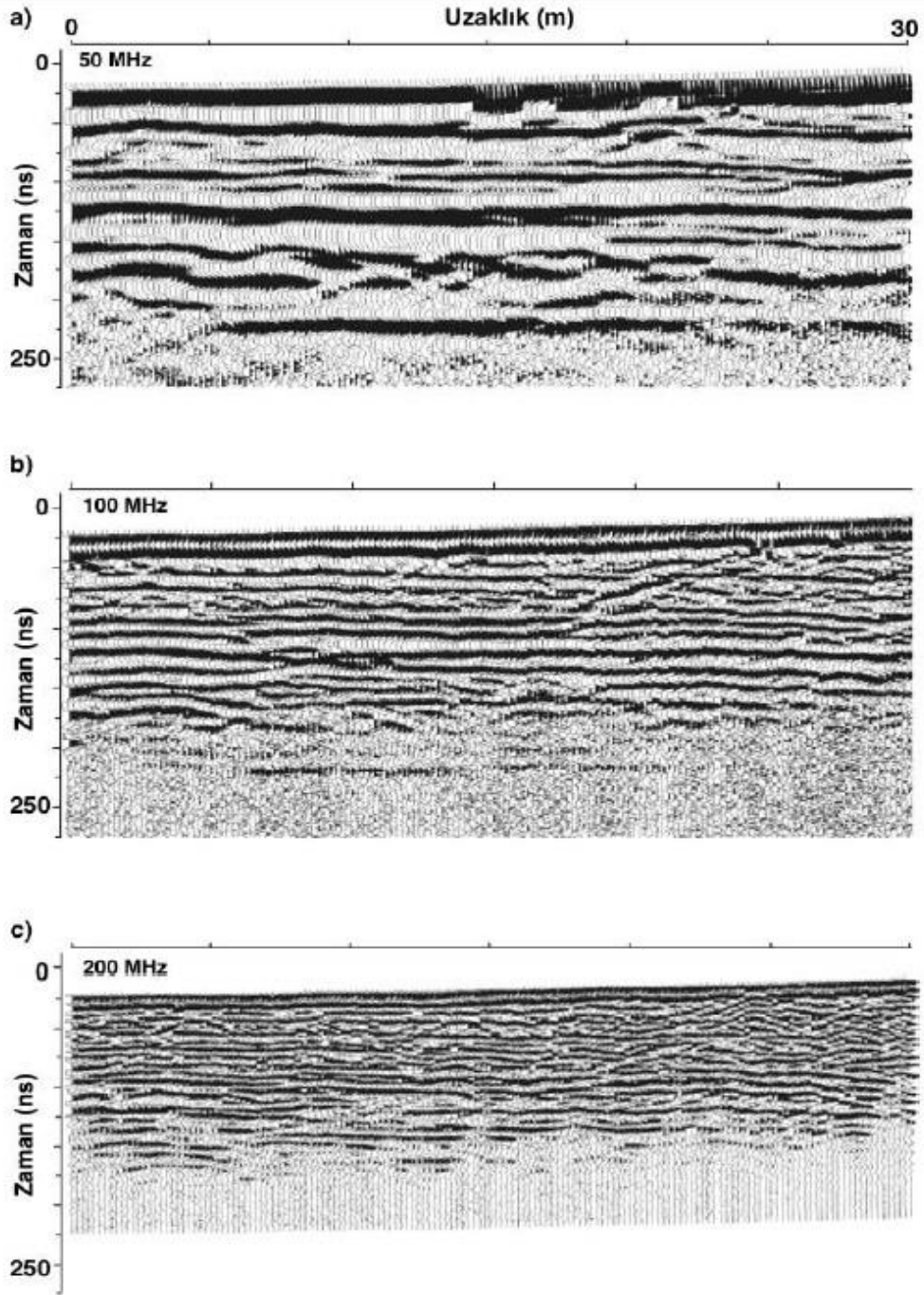
Çizelge 2.2 Bazı malzemeler için elektriksel iletkenlik ve sönümlenme değerleri (Daniels 2004)'den düzenlenmiştir (Özkap 2019).

Malzeme	İletkenlik (σ) (S/m)	Sönümlenme (α) (Db/m)
Hava	0	0
Su	10^{-6} - 10^{-2}	0,01
Deniz Suyu	10^2	100
Buz	10^{-4} - 10^{-3}	0,1-2
Kum (k)	10^{-7} - 10^{-3}	0,01-1
Kum (sd)	10^{-3} - 10^{-2}	0,5-5
Kum Taşı (k)	10^{-6} - 10^{-5}	2-10
Kum Taşı (sd)	10^{-4} - 10^{-2}	4-20
Kil (k)	10^{-1}	10-50
Kil (sd)	10^{-1}	20-100
Kireçtaşı (k)	10^{-8} - 10^{-6}	0,5-10
Kireçtaşı (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-20
Kumlu toprak (k)	10^{-4} - 10^{-2}	0,1-2
Kumlu toprak (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-5
Balçıklı toprak (k)	10^{-4} - 10^{-3}	0,5-3
Balçıklı toprak (sd)	10^{-2} - 10^{-1}	1-6
Killi toprak (k)	10^{-2} - 10^{-1}	0,3-3
Killi toprak (sd)	10^{-3} - 10^{-0}	5-50
Toprak (ortalama)	-	-
Toprak (donmuş)	10^{-5} - 10^{-2}	0,1-5
Çakıl	-	-
Kömür	10^{-3} - 10^{-2}	1-10
Dolomit	-	-
Granit	10^{-8} - 10^{-6}	0,5-3
Bazalt (sd)	-	-
Kuartz	-	-
Asfalt	10^{-2} - 10^{-1}	2-15
Beton	10^{-3} - 10^{-2}	2-12

*k:kuru,sd:suya doymuş

2. 4 Yanal ve Düşey Ayrırlılık

Düşey ayrırlılık değeri genel olarak dalga boyunun dörtte biri olarak kabul edilir. Dalga boyu antenin merkez frekansından ve ortamın hızından yararlanılarak bulunur. Düşük frekanslı antenlerin yaydıkları sinyal geniş dalga boyludur. Verici antenin merkez frekansı azaldıkça düşey ayrırlılık azalmaktadır. Fakat nüfuz derinliği artmaktadır. Düşük frekanslı anten ile yapılan çalışmalarda ince tabakalar radargramlarda görünmeyebilir. Düşük frekanslı anten ile elde edilen radargram ile daha derinden bilgi alınmasına rağmen ayrırlılık düştüğünden yuvarlatma etkisi açıkça görülebilmektedir (Şekil 2.6). İkinci radargramda ise çözünürlük ilk radargrama göre artmaktadır. Fakat derinden gelen yansımaların enerjilerini kaybettiği görülür. Kullanılan yüksek frekanslı anten ile üçüncü radargramda yüzeye yakın saçılmalar daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir (Kaplanvural 2018).



Şekil 2.6 Frekans ile düşey ayrırlılık arasındaki ilişki a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200MHz (Neal 2004)

Yatay ayrırlılık değeri ise izler arasındaki mesafe ve Fresnel zonu büyüklüğü ile kontrol edilir. Geniş Fresnel zonu düşük yatay ayrırlılık demektir. Buna göre bir olayın en az iki noktada örneklenmesi gerektiği dikkate alındığında, profil üzerinde ölçüm alınırken seçilen ölçüm aralığı dalga boyunun

yarısından daha küçük olmalıdır. İdeal olarak ölçüm aralığı dalga boyunun dörtte biri kadar olmalıdır (Kaplanvural 2018).

2.5 Yer Radarının Kullanım Alanları

- Yapısal araştırmalarda, toprak stratigrafisinin ortaya çıkarılmasında (Davis ve Annan 1989),
- Yeraltı madenlerindeki ana kayanın haritalanması (Cook 1973, 1975, 1977, Dellwig ve Bare 1978),
- Yüzeğe yakın jeolojik birimlerin tespitinde (Koralay vd. 2007),
- Fay, kırık ve çatlakların haritalanmasında (Grandjean ve Gaury 1999, Green vd. 2003, Kadioğlu 2008),
- Yeraltı karstik boşlukların ve mağraların aranmasında (Kadioğlu vd. 2006),
- Yeraltı su seviyesinin tespitinde (Harrari 1996, Dannowski ve Yaramancı 1999, Aspiro ve Aigner 1999),
- Yüzeğe yakın sıvı hidrokarbon aramalarında (Changryol vd. 2000)
- Arkeolojik çalışmalarda tapınak, mezar, duvar, temel ve benzeri tarihi kalıntıların bulunmasında (Sambuelli vd. 1999, Kadioğlu vd. 2008, Kadioğlu vd. 2013, Kadioglu 2010),
- Metalik cisim arama çalışmalarında yeraltında gömülü boru, boru hattı, su veya akaryakıt tankı ve eski endüstriyel atık alanlarının tespitlerinde (Kadioğlu ve Daniels 2008, Kurt vd. 2009, Carcione 1996) şeklinde sıralanabilir.

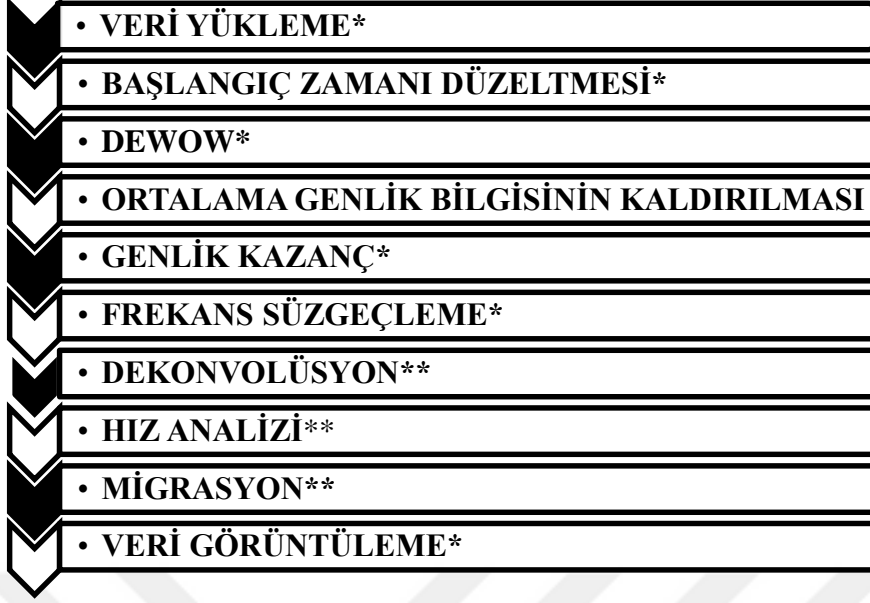
2.6 Yöntemin Üstün ve Zayıf Yönleri

Yer radarı yönteminin önemli üstünlükleri olmakla beraber, zayıflıkları da bulunmaktadır. Yöntemde yüksek frekanslı kaynak kullanıldığından yüksek çözünürlüğe sahiptir. Ölçü alımı ve kullanılan ekipmanlar bakımından uygulaması kolay ve hızlıdır. Yüzeğe yakın araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hedefin derinliği duyarlı bir şekilde belirlense de yorumlama işlemi basit değildir. Araştırma derinliğinin yüksek olması talebi doğrultusunda, ortamın olabildiğince kuru olması gerekmektedir (Kadioğlu 2004).

Diğer bir yandan, yüksek frekans kullanımı araştırma derinliğini düşürmektedir. Nemli ortamlarda istenilen verim alınmamaktadır. Ölçü alınan bölgede bulunan metalik nesnelere radarogramlarda keskin yansımalar, bu nedenle yorumda yanlışlıklara neden olmaktadır. Ölçümlerin etkilendiği gürültü kaynakları çeşitli ve fazla olmakla beraber ölçü alınan bölgenin etrafında bulunan radyo vericileri yüksek gürültü yaratırlar ve ölçülen sinyallerin bozulmasına sebep olurlar. Yer radarı yöntemi nemli ortamlarda istenilen performansı sağlamamaktadır, çünkü iletkenlik arttıkça elektromanyetik dalgaların nüfuz derinliği azalmaktadır (Kadıoğlu 2004).

2.7 Yer Radarında Veri İşlem

Bir profil boyunca toplanan yer radarı verilerine ait radarogramlarda (2.11) denkleminde tanımlandığı gibi yansıyan ve saçılan EM dalga alanı fazları istenen veri olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanında radarogramlarda gürültü olarak kabul edilen rastgele ve düzenli gürültüler yer almaktadır. Ayrıca radar izlerinde zamanla hızlı bir soğrulma olayı olduğundan genlik görüntüleme kalitesi oldukça zayıftır. Bu nedenle radarogramları gürültülerden arındırmak ve genlik görüntüleme kalitesini artırmak amaçlı veri-işlem uygulamaları gerekmektedir. Uygulanacak veri işlem adımları Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.7 Radargramlara uygulanan veri işlem adımları (* genel veri-işlem adımları, ** tercihi işlem adımları)

Başlangıç Zamanı Düzeltmesi (Move Start Time) : Verici antenden alıcı antene doğrudan gelen dalga fazı zamanı değeri radargram üzerinde başlangıç zamanı gecikmesi veya zamanda kayma olarak tanımlanmaktadır. Özellikle düşük frekanslı antenler kullanıldığında kayma zamanı artmaktadır. Kayma zamanı miktarı kadar değer radargram üzerindeki her izden çıkartılarak $t=0$ başlangıç zamanı, zaman ekseninin ilk değeri haline getirilir. Bu işlem başlangıç zamanı düzeltmesi olarak adlandırılır (Kadioğlu 2004). Bu düzeltme ile aslında $z=0$ derinlik eksenini başlangıcı belirlenmiş olunur.

Dewow Düzeltmesi : Radargramlarda “wow” etkisi adı verilen çok düşük frekanslı gürültüler bulunmaktadır. Bu gürültüler gerçek olayları bastırmaktadır. Bunlar “dewow” adı verilen frekans süzgeçleme işlemi ile giderilir (Jol 2009).

Ortalama Genlik Bilgisinin Kaldırılması (Background Removal): Radargramlarda yanyana sıralanmış tüm izlerin herbir zaman adımındaki genliklerin ortalamasının her bir izden çıkarılması işlemidir. Bu işlem doğrudan gelen dalgalar ve bunun gibi yatay gürültüleri ortadan kaldırmak amacıyla uygulanır. Ancak özellikle çınlama (ringing)

etkisi gibi yüksek genlikli gürültüler bazen bu işlem ile tamamen giderilememektedir. Ortak genlik bilgisinin kaldırılması için “average subtracting” adı verilen seçilmiş iz sayısı ile ortak genlik bilgisi giderme işlemi de uygulanabilmektedir. Bu işlemde iz sayısını belirleme sonuçları oldukça değiştirmektedir (Kadıoğlu 2004, Jol 2009).

Genlik Kazanç Uygulaması : Yayılan EM dalga alanının geometrik yayılım etkisi ve genliğin frekans ile exponansiyel (üstel) azalım etkisi ile dalganın genliği çok hızlı bir şekilde sönümlenmektedir. Dalga genliğini korumak ve görüntü kalitesini artırmak amaçlı genlik kazanç işlemi uygulanmaktadır. Genlik kazanç işlemi küresel yayılım etkisini içine alan exponansiyel genlik kazanç sabiti ile çarpılarak yapılabilir veya doğrusal bir fonksiyon oluşturarak yapılabilir (Kadıoğlu 2006, Renold 2011).

Frekans Süzgeçleme İşlemi: Bu işlem ile radargramlarda görülen ve gürültü kabul edilen düşük ve yüksek frekanslı olaylar seçilmiş bir bant geçişli süzgeç ile veriden atılır. Süzgeçleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan çeşitli süzgeçler bulunmaktadır. Bunların en temel ve basit olanları, alçak geçişli, yüksek geçişli, bant geçişli süzgeçlerdir. Bu süzgeçlerle süzgeçleme işlemleri insan kaynaklı çevresel gürültüleri veya sistemden kaynaklanan bozucu etkileri veriden atarak, verilerin görsel kalitesini artırmaktadır (Kadıoğlu 2004, Sezer 2010).

Dekonvolüsyon İşlemi: GPR profil kesitlerinde (radagramlarda) zaman ekseninde düşey ayrımlılığı artırmak ve özellikle sert toprak yüzeylerde oluşan kaynak dalgacığının tekrarlarını kaldırmak, yine örtülü yapı ile kaynak dalgacığı dalga boyu kaynaklı rezonans oluşumu ile çınlama (ringing) gürültülerini kaldırmak ve dalgacığı sıkıştırmak amacıyla sismik yansıma yönteminde uygulanmasına benzer olarak önkestirimli dekonvolüsyon (predictive deconvolution) işlemi uygulanacaktır. Önkestirimli dekonvolüsyon, sismik yansıma yönteminde rutin uygulanan bir veri-işlem adımı olmakla birlikte GPR yönteminde kaynak dalgacığı yüksek frekanslı olduğundan ve sismik yonteme göre örtülü yapı derinliği çok çok daha az olduğundan önkestirim parametreleri olan kestirim uzaklığı adı verilen zaman değeri ile kaynak dalgacığı boyunu doğru belirlemek çok daha zor ve önemli bir aşamadır. Ayrıca dekonvolüsyon

işlemi dalgacığı sıkıştırmakla birlikte frekans bandının genişlemesini sağlamakta ve bununla birlikte yüksek frekanslı gürültü kabul edilen olayları ortaya çıkarmaktadır (Yılmaz 2001, Economou vd. 2012, Kadioğlu 2018).

Hız Analizi : Düşey zaman eksenini derinlik eksenine dönüştürmek için ortamın EM dalga hızının belirlenmesi işlemidir. Bu amaçla radargramlar üzerindeki hiperbollerden yararlanılmaktadır. Saçılma hiperbolleri varış zaman denklemindeki hız değerine hız atamaları yapılarak hiperbol çakıştırma işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Doğru hız bulunduğu oluşturulmuş olan yapay hiperbol ile radargram üzerindeki hiperbol çakışmış olur (Kadioğlu 2006, Koralay vd. 2007).

Migrasyon İşlemi: Sismik yöntemde migrasyon (göç) işlemi izlerin konum ve zamanda gerçek yerlerine taşıma işlemidir (Yılmaz 2001). Bir çok uygulama yöntemi vardır. Yer radarı yönteminde sismik yönteme benzer şekilde yığma sonrası uygulanan migrasyon türleri geçerlidir (Kadioğlu 2008, Kadioğlu ve Kadioğlu 2016). Yer radarı yönteminde ortam içinde örtülü bir çok nesne olduğu durumlarda migrasyon uygulaması için gerekli olan iz sayısını belirleme işlemi başarısında etkili olmaktadır. Çok fazla iz sayısı seçildiğinde süreklilik artmakla birlikte yanal ayırım gücü azalmaktadır. Çok az seçildiğinde ise saçılmış olaylar yeterince toplanamamaktadır. Bu nedenle bazen sadece az iz sayısı ile S/G oranını artırmak amaçlı uygulanabilmektedir. Ortam homojen ve aranan nesne sayısı bir veya iki ise bu durumda fazla iz sayısı ile nesnelere gelen saçılma hiperbollerinin toplanması sağlanabilmektedir (Kadioğlu ve Kadioğlu 2016).

3. KARHUNEN – LOÈVE DÖNÜŞÜMÜ (KLD)

Radargramların yatay eksenini, profil yönü olarak tanımlı, profil başlangıç noktasına göre x uzaklık yönünü tanımlamaktadır. Yatay eksen boyunca duyarlılığı artırmak yani yatay yönde yapıların sınırlarının belirlenmesinde ayrımlılığı artırmak için tekrarlı yansımalar gibi düzenli yatay gürültülerin ortadan kaldırılması hedeflenir. Bu amaçla tüm izlerde aynı zamandaki ortalama genlik değerini kaldırma (background removal) veya seçilmiş iz sayısı ile ortalama genlik değerini kaldırma (average subtracting) işlemleri çoğu zaman yatay gürültüleri tam olarak kaldıramamakta veya gerçek verinin de kaldırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu tür gürültüler gerçekte olmayan bir yapı gibi görüntü sunabilmektedirler. Bazen de yapıları içine alarak görüntülenememelerine neden olmaktadır. Bu nedenle yatay gürültülerin kaldırılması için yine sismik yansıma yönteminde kullanılan ancak yer radarı yönteminde radar izlerine uygulanmasında literatürde oldukça az sayıda örneğine rastlanılan dalgacık ayırıştırma ile izlerin öz değerlerinin belirlenmesi ile yatay ve eğimli olayların ayırıştırılması, iki ayrı kesitin elde edilmesi ve seçime göre yatay olayları içeren kesitin işlenmiş radargramlardan çıkarılması ile yatay gürültülerden arındırılmış kesitin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Karhunen- Loève dönüşümü (KLD) iki boyutlu (2B) dalgacık ayırıştırma yöntemlerinden en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Jones ve Levy 1987, Al-Yahya 1991, Dony 2001, Montagne ve Vasconcelos 2006, Wang, Zeng ve Xu, 2005).

KLD adı, Kari Karhunen ve Michel Loève'dan gelmektedir. KLD'nin temeli özdeğer analizine dayanmaktadır. Sismik yöntem ve yer radarı yöntemlerinde sinyal/gürültü (S/G) oranını ve yanal ayrımlılığı artırmak amaçlı yaygın olarak kullanılmıştır. (Jorgensen 2007). KLD'nin genel özellikleri ve genel kullanım amaçları

- Görüntü işleme (netleştirme, sıkıştırma),
- Rastgele gürültüleri süzgeçleme,
- Veriyi yeniden yapılandırma,
- Yanal ve eğimli olayları birbirinden ayırma,

şeklinde sıralanabilir. Sismik veri-işlem uygulamalarında yanal yöndeki ilişkili gürültüleri kaldırmak ve yanal ayırım gücünü artırmak (Hemon ve Mace 1978 , Levy ve Linderbaurn 1998), doğrusal ve eğimli olayların çözüm gücünü artırmada (Jones ve

Levy 1987), ground roll (yüzey dalgası) gürültüsünü kaldırmada(Liu 1999, Londono vd. 2005, Montagne ve Vasconcelos 2006) kullanılmıştır.

3.1 KLD Tanımı

KLD ortogonal (dik) fonksiyonların sonsuz doğrusal kombinasyonu olan istatistiksel bir işlemi gerçekleştirir. Sınırlı bir aralıkta bir fonksiyonun Fourier serilerine benzerdir. Ancak Fourier katsayıları rastgele değişkenlerdir. KLD 'de kullanılan ortogonal temel fonksiyonlar işlemin kovaryans fonksiyonu ile belirlenir (Karlı 2017). KLD ile süzgeçleme yapılırken kullanılan temel parametre özdeğer aralığıdır. Bu parametrenin doğru seçilmesi süzgeçleme sonuçlarının yinelenmeli (interaktif) değerlendirilmesi ile mümkündür. Çalışılan verinin türüne ve gürültü içeriğine göre KLD, diğer süzgeçleme yöntemleriyle birlikte veya onlara alternatif olarak kullanılabilir (Jones ve Levy 1987).

3.2 KLD'nde Özdeğer ve Özvektör

Matematikte, özdeğer ve özvektör doğrusal bir cebir alanında birbirleri ile ilişkili kavramlardır. Doğrusal cebir ,vektör veya yöney üzerine uygulanan matrisler şeklinde temsil edilen doğrusal dönüşümleri araştırır. Özdeğerler ve özvektörler bir matrisin özellikleridir ve matris hakkında önemli bilgiler verir. Matrislerin çarpanlarına ayrılmasında kullanılabilirler. Genel olarak, bir vektör üzerine uygulanan matris o vektörün hem büyüklüğünü hem de yönünü değiştirir. Buna rağmen bir matris bazı belirli vektörler üzerine etkideğinde onların sadece büyüklüğünü değiştirir, doğrultularını değiştirmez. Doğrultusunu değiştirmeyen bu vektörler söz konusu bu matrisin özvektörleri olarak adlandırılır. Bir matris, bir özvektör üzerine etkideğinde onun büyüklüğünü bir çarpan kadar katlar.

Bu çarpan pozitif ise vektörün yönü değişmeden kalır. Negatif ise vektörün yönü tersine döner. Her iki durumda da vektörün doğrultusu değişmez. Bu çarpana, söz konusu özvektöre ilişkin özdeğer denir (Andrew vd.1993, Başokur 2015, Karlı 2017) Bu tanımlar matematiksel olarak

$$A\vec{x} = \lambda\vec{x} \quad (3.1)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede A matrisi bir kare matristir, x özvektör ve λ özdeğerleri temsil etmektedir. Özdeğerler ilgili matrisin determinantını sıfır yapan gerçel değerlerdir. Özdeğer sıfır değerini alabilir. Yani matrise eş değer karakteristik polinomun kökleridir.

Eğer A birim matris ise,

$$I\mathbf{x} = \vec{x} \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanabilmelidir. Bu durumda $n \times 1$ boyutlu tüm vektörler özvektördür ve A matrisinin tüm özdeğerleri $\lambda=1$ 'dir. Özdeğer λ , sıfır değerini alabilirken, özvektör asla sıfır vektörü olamaz.

A matrisinin özdeğerleri

$$(A - \lambda I) \vec{x} = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

$$\det(A - \lambda I) = |A - \lambda I| = 0 \quad (3.4)$$

ile verilen karakteristik polinom denkleminde hesaplanabilir. Burada $\det(A - \lambda I) = 0$ için polinomun kökleri bulunur. Yine A matrisinin determinantı özdeğerlerin çarpımına eşittir.

$$\det(A) = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \lambda_n \quad (3.5)$$

ile tanımlanır. Bulunan n adet kök, A matrisinin n adet özdeğerini tanımlar.

Sismik yansıma kesitleri ve yer radarı radargramları iki boyutlu (2B) olması sebebi ile (N×M) boyutlu matrisler ile tanımlanmaktadır. Bu matrislerin satırları izlerin zamana göre genlik değerlerini, sütunları ise iz sayısını temsil etmektedir.

A matrisi özel koşulları:

-Kare Matris Olmama Durumu: Genellikle sismik ve yer radarı kesitleri kare matris oluşturamazlar. Çünkü çoğunlukla zamandaki örnek sayısı iz sayısından fazladır. Bu durumda radargramı veya sismik kesiti temsil eden A matrisine ait kovaryans (özellik) matrisi hesaplanır. Kovaryans matrisi kare matristir. Burada R matrisi ile temsil edilmektedir.

$$R_{m,m} = A_{n,m}^T A_{n,m} \quad m > n \quad R_{n,n} = A_{n,m} A_{n,m}^T \quad n > m \quad (3.6)$$

-Simetrik Matris Olma Durumu: Simetrik matrisler gerçel özdeğerlere sahiptirler ve onların özvektörleri birbirlerine diktir. Eğer özdeğerlerin hepsi pozitif ise bu matrisler pozitif tanımlı simetrik matrislerdir. Eğer özdeğerlerin bazıları sıfır (negatif değil) ise bu matrisler pozitif yarı tanımlı simetrik matrislerdir.

$$A = A^T \quad (3.7)$$

-Dik (ortogonal) Matris Olma Durumu: Kolonları A matrisinin özvektörleri olan V matrisi ortogondur. Çünkü V'nin her bir sütunu oluşturan özvektörler birbirine diktir. Yani iç çarpımları (nokta çarpım) sıfırdır.

$$V^T V = V V^T = I \quad (3.8)$$

3.3 Karhunen - Loève Dönüşümünün Matematiksel İfadesi

KLD'nin temeli bir verinin kovaryans matrisinin özdeğer ve özvektörlerinin analizine dayanır. $M \times N$ boyutlarındaki A matrisi ile tanımlı radargramın iz sayısı ,

$$c_i, i = 1, 2, \dots, M$$

Sütun vektörleri dizisi ile, bir izdeki zaman örnekleme sayısı,

$$r_i, i = 1, 2, \dots, N$$

Satır vektörleriyle gösterilsin. Satır vektörleri $1 \times N$, sütun vektörleri $M \times 1$ boyutlu olacaktır. Satırlar ve sütunlar için ayrı ayrı kovaryans matrisleri hesaplanıp ortalaması alındığında radargram izleri için satır ve sütun kovaryans matrisleri hesaplanmış olur. (Doğan 2010). Buna göre radargramın satırları için kovaryans matrisi,

$$R_r = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i^T r_i \quad (3.9)$$

ile ifade edilir. Sütunları için kovaryans matrisi ise

$$R_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i c_i^T \quad (3.10)$$

şeklinde hesaplanır. $N \times N$ boyutlu R_r ve $M \times M$ boyutlu matrislerinin özdeğerleri ve özvektörleri hesaplanıp özvektörler özdeğerlere göre büyükten küçüğe sıralandığında elde edilen KL matrisleri sırasıyla T_r ve T_c olsun. Satır dönüşüm matrisinin transpozesi (devriği) soldan, sütun dönüşüm matrisi sağdan veriye uygulandığında aynı boyutta olan bir dönüşüm elde edilir,

$$B = T_r^T A T_c \quad (3.11)$$

T_r ve T_c dönüşümleri A veri matrisinin satırları ve sütunları üzerinde birer köşegenleme işlemi yaptıklarından B matrisinin köşegenleri dışında kalan elemanları sıfır olacaktır. Satır ve sütun dönüşümlerinde özdeğerler büyükten küçüğe sıralandığından, B matrisinin köşegendeki elemanları da mutlak değer bakımından büyükten küçüğe sıralanmış olacaktır (Doğan 2010).

B dönüşümünden orijinal iki boyutlu verinin elde edilmesi için satır ve sütun dönüşüm matrislerinin tekilliği kullanılabilir. Böylece orijinal iki boyutlu veri,

$$A = T_r B T_c^T \quad (3.12)$$

ile geri hesaplanabilir.

B matrisinin elemanları B_{ij} , T_r ve T_c matrislerinin sütunları sırasıyla $t_r^i, i = 1, 2, \dots, M$ ve $t_c^i, i = 1, 2, \dots, N$ olmak üzere (3.12)'te verilen matris çarpımı şu şekilde de yazılabilir,

$$A = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N B_{ij} (t_r^i) (t_c^j)^T \quad (3.13)$$

B matrisi köşegen bir matris olduğundan (3.13)'teki toplam sadece köşegen elemanları üzerinden alınabilir,

$$A = \sum_{i=1}^N B_{ii} (t_r^i) (t_c^i)^T \quad (3.14)$$

ile ifade edilir.

Burada her B_{ii} katsayısının $(t_r^i)(t_c^i)^T$ matrisleriyle çarpılıp toplandığı görülmektedir. Yani satırlardan elde edilen T_r matrisinin i 'inci satırı ile sütunlardan elde edilen T_c matrisinin i 'inci satırının transpozisinin çarpılması sonunda elde edilen değerler, bu değerlere karşılık gelen katsayılarla çarpılıp toplanmaktadır (Doğan 2010).

B matrisinin köşegenlerindeki elemanların mutlak değerleri sürekli azaldığından, veri içerisindeki bilginin büyük çoğunluğunun ilk taban vektörlerinde tutulduğu söylenebilir. O halde dönüşüm katsayılarının hepsi yerine baştaki belirli bir kısmının kullanılmasıyla orijinal verinin bir yaklaşımı elde edilebilir. İlk kaç katsayının kullanılacağına karar vermek için, yaklaşımla orijinal veri arasındaki ortalama kare hata kullanılabilir (Doğan 2010). Denklem (3.15)'e göre bu hata miktarı, kullanılmayan katsayıların mutlak değerlerinin toplamı kadar olacaktır.

$$e = \sum_{i=m+1}^n \lambda_i \quad (3.15)$$

SVD (Tekil Değer Ayrışım) yöntemi, verilen bir dikdörtgen dizeyi, üç dizeyin çarpımı şeklinde ifade eder ve bu dizeler üzerinde yapılan işlemler ile dizey tersleme gerçekleştirilir. Sayısal doğruluğu sağlamak için bilgisayar programlarının birçoğunda SVD algoritması kullanılmaktadır. Ancak, parametre sayısının on binlere ulaştığı iki veya üç boyutlu modeller kullanan problemlerde, SVD yöntemi hesaplama zamanını oldukça artırdığı için geleneksel tekniklerin kullanımı sürdürülmektedir. SVD yönteminin diğer bir özelliği de, ele alınan problemin doğası ve çözülen parametrelerin ayrımlılığı hakkında doğrudan bilgi vermesidir (Başokur 2015). KLD ve SVD arasındaki fark da buradan gelmektedir. SVD'de kovaryans matrisi normalize edilmemişken, KLD'den sonra +1 ile -1 arasında normalize edilir. Yatay olayların devamlılığının olup olmadığına bakılır ve izler arasında devamlılığı varsa korelasyon +1 değeri alır yani yüksektir, ters korelasyon varsa -1 değeri alır ve düşüktür (Başokur 2015).

4. YER RADARI VERİ İŞLEMİNDE KLD UYGULAMALARI

Tez kapsamında bir önceki bölümde teorisi verilen KLD teorik yaklaşımı kullanılarak MATLAB yazılımı ile bir program geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında öncelikle açık kaynaklı MATGPR (Tzaniş 2004) yazılımı kullanılarak bir yeraltı modeli tasarlanmıştır (Şekil 4.1). Tasarlanan modeldeki parametreler kullanılarak MATGPR ortamında zaman ortamı sonlu farklar (FDTD) algoritması ile sentetik radargram (yüksek frekanslı EM dalga alanı kesiti) üretilmiştir (Şekil 4.2). Buna göre, oluşturulan sentetik radargrama doğrudan gelen dalga MATLAB yazılımında geliştirilen kod ile çoğaltılarak tekrarlı yansıma gibi veriye yatay gürültü olarak eklenmiştir (Şekil 4.3). Yatay gürültü içeren radargrama geliştirilen kod ile KLD uygulanmıştır (Şekil 4.5, 4.6, 4.7). Bunun sonucunda KLD yatay olayları veriden süzgeçlemedeki ve görüntü kalitesini artırmadaki başarısı ortaya konulmuştur. Buna ek olarak KLD uygulamadan önceki bir ize ait genlik değerleri ile KLD uygulandıktan sonra genlik değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8). KLD radargramlardaki izlerin genlik değerlerini neredeyse hiç değiştirmeden süzgeçlemedeki başarısını göstermiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında geliştirilen kod ile literatürden, bilinen bir test sahasındaki modele gerçek radargram indirilmiş ve farklı özdeğerler seçilerek radar izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay olayları süzgeçleme işlemi yapılmıştır (Şekil 4.13, 4.14, 4.15).

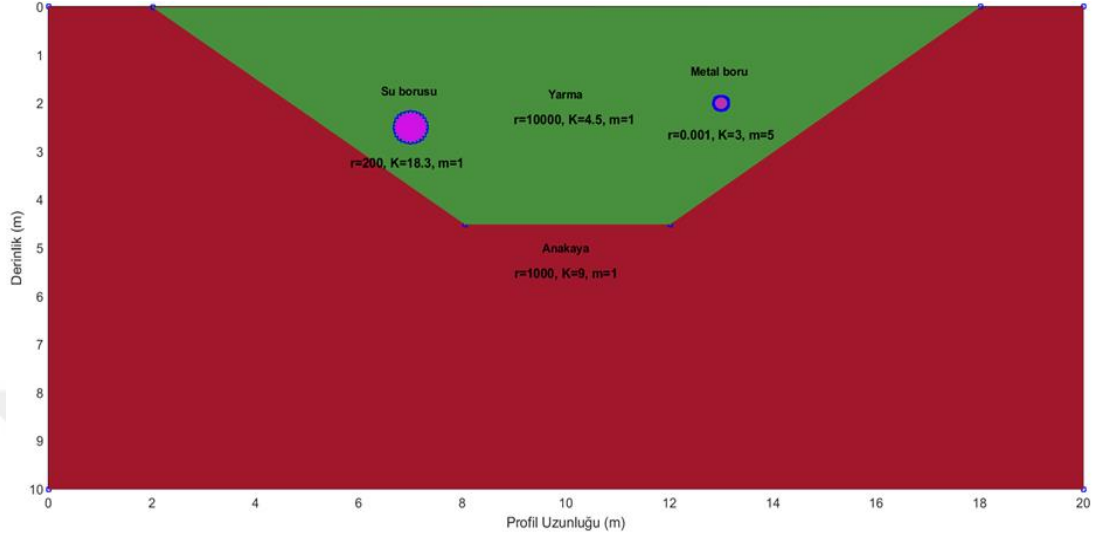
Çalışmanın son aşamasında ise Afşin-Elbistan kömür havzasında toplanan ve işlenen yer radarı verisinde radar izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay olayların veriden kaldırılarak kırıklı yapıların ortaya çıkarılması amacı ile farklı özdeğerler seçilerek KLD uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir (Şekil 4.18, 4.19).

4.1 Uygulama 1: Yer altı Modeline ait Sentetik Radargram Üzerinde KLD Uygulamaları

Tez kapsamında oluşturulmuş yer modeli için FDTD yaklaşımı ile radargram hesaplama ve bu radargrama yatay tekrarlı olayları gürültü olarak ekleyerek KLD ile bu gürültüleri süzgeçlemek uygulamanın başlıca amacıdır. Bu amaçla öncelikle MATGPR yazılımı kullanılarak bir yeraltı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan model Şekil 4.1’de verilmiştir. Ayrıca modele ait parametreler Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Çizelge 4.1’de belirtilen parametreler kullanılarak MATGPR ile zaman ortamı sonlu farklar (FDTD) algoritması ile sentetik radargram veya diğer adıyla yüksek frekanslı EM dalga alanı kesiti hesaplanmıştır. Buna göre Şekil 4.2’ de elde edilen radargramı temsil etmektedir. Geliştirdiğimiz MATLAB kodu hesaplanan radargram üzerine, vericiden alıcı antene doğrudan gelen dalga alanı kullanılarak, tekrarlı yansıma gibi veriye yatay gürültü olarak eklenmiştir (Şekil 4.3). Daha sonra yine geliştirdiğimiz kod ile yatay gürültülü radargrama KLD uygulanmıştır ve özdeğerler spektrumu elde edilmiştir (Şekil 4.4). Özdeğerler spektrumunda özdeğer sayısı 2 seçilerek yatay olayları içeren radargram elde edilmiştir (Şekil 4.5b). Daha sonra Şekil 4.5b’deki FDTD ile hesaplanmış radargram Şekil 4.5a’daki radargramdan çıkarılarak Şekil 4.5c’deki yatay olaylardan arındırılmış radargram elde edilmiştir.

Oluşturulan yer altı modeline ait FDTD ile hesaplanmış radargramın KLD ile hesaplanan özdeğer spektrum grafiğinde enerjinin çok yüksek olduğu özdeğer sayısı 2 seçildikten sonra KLD ile elde edilen radargramın yatay olayları içerdiği görülmüştür (Şekil 4.5b). Bu bulgulara dayanarak iki radargramın farkı alınarak yatay olayların süzgeçlendiği sonuç radargram başarı ile elde edilmiştir. Benzer şekilde yine Şekil 4.5b’de verilen hesaplanmış radargramın KLD ile özdeğer sayısı 5 seçilerek elde edilmiş radargram (Şekil 4.6b) ve iki radargram farkı alınarak yatay olaylardan süzgeçlenmiş radargram elde edilmiştir (Şekil 4.6c). Buna göre özdeğer sayısı 5 ile hesaplanan radargramda hala büyük çoğunlukla yatay olayların olduğu görülmüştür. Son olarak özdeğer sayısı 20 seçilerek elde edilmiş radargram (Şekil 4.7b) ve iki radargram farkı alınarak yatay olaylardan süzgeçlenmiş radargram elde edilmiştir (Şekil 4.7c).

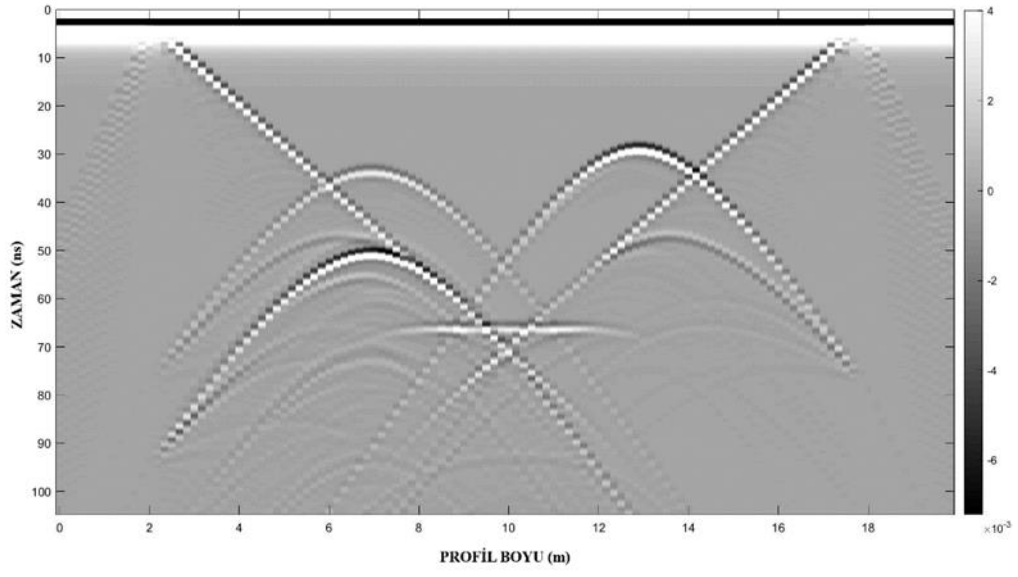
Süzgeçlenmiş radargramda genlik değişiminin olup olmadığını araştırmak amaçlı seçilmiş bir iz ile karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 4.8).



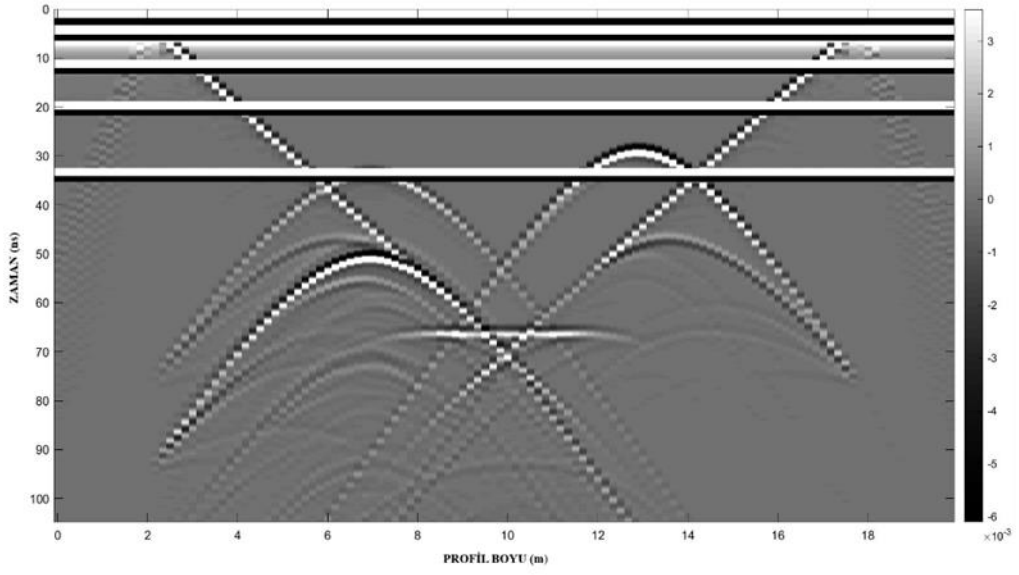
Şekil 4.1 MATGPR açık kaynak programı kullanılarak üretilmiş 2B yer modeli

Çizelge 4.1 Tasarlanan Yer altı Modeline ait Zaman Ortamı Sonlu Farklar (FDTD) Algoritmasında Kullanılan Parametreler

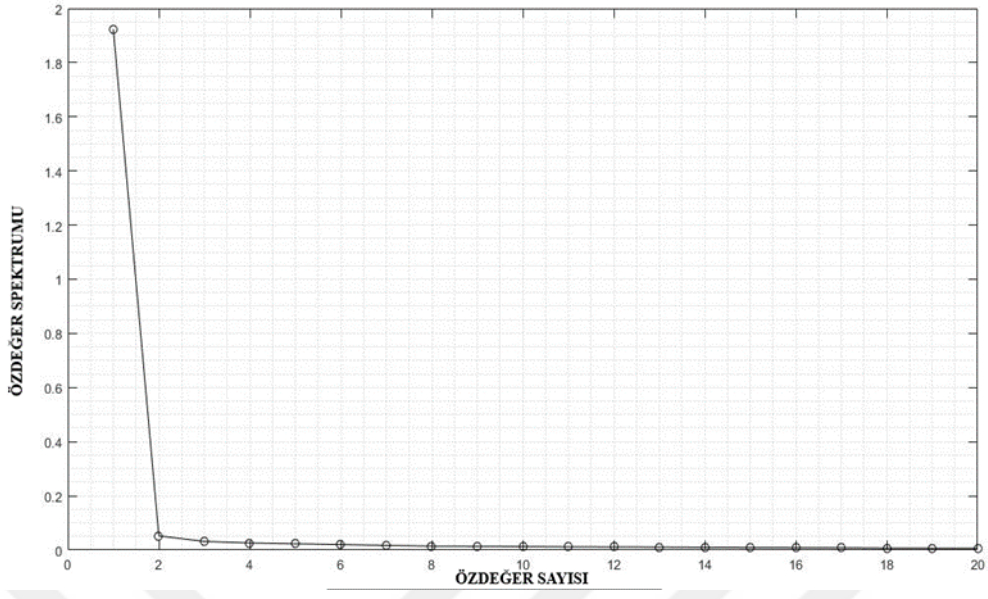
MODEL PARAMATRELERİ	SAYISAL DEĞERLER
Anten Frekansı	250 MHz
Profil Boyu	20 m
İz sayısı	6170
dt	0.017 ns
dx	0.1667 m
dz	0.004 m
Tmax (2way-traveltime)	109.77 ns



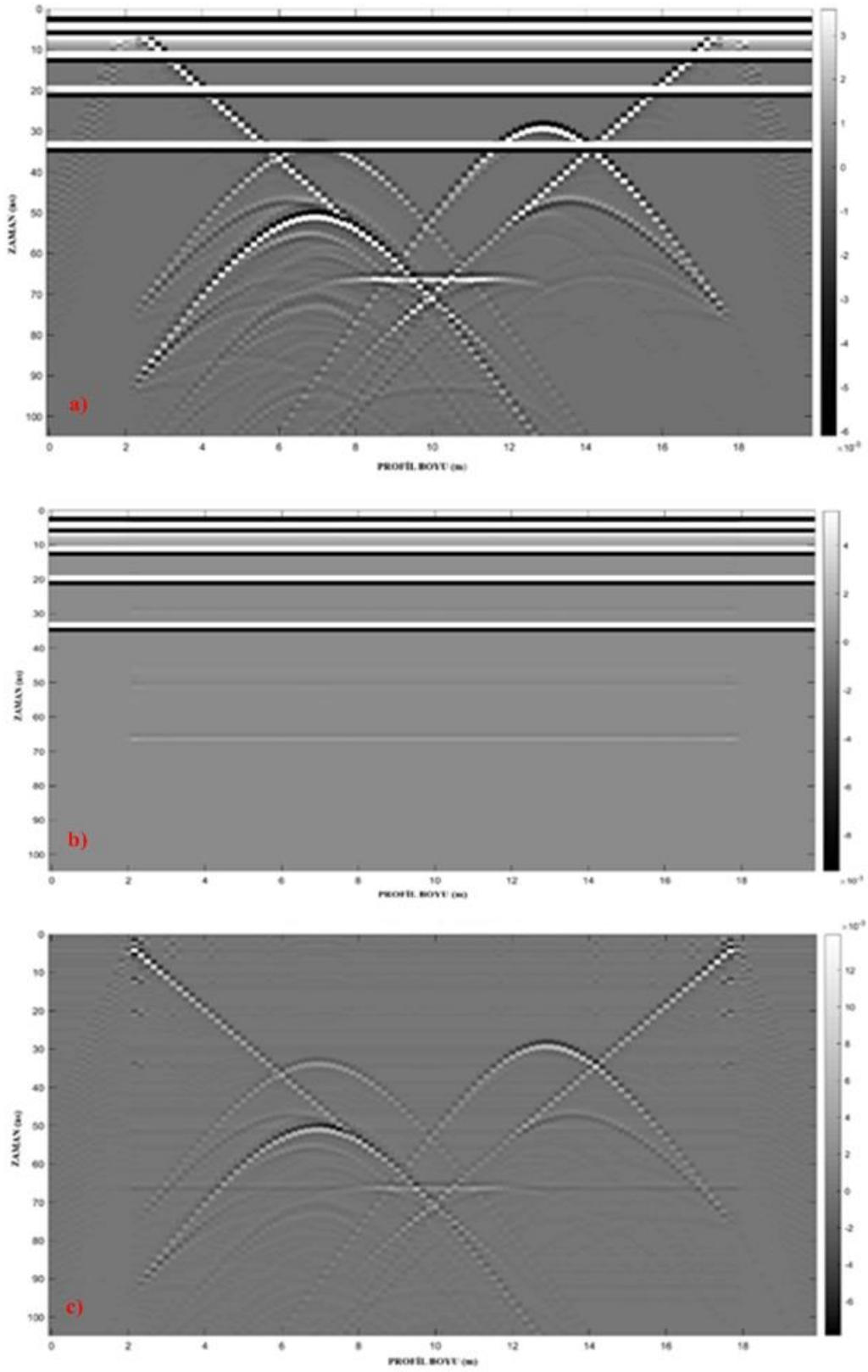
Şekil 4.2 Sentetik yer radarı verisine ait radargram



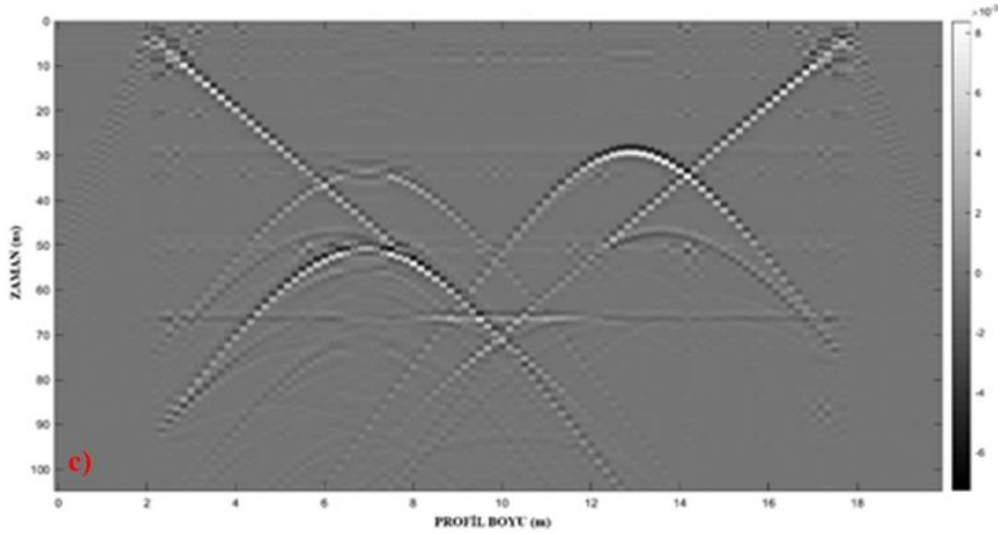
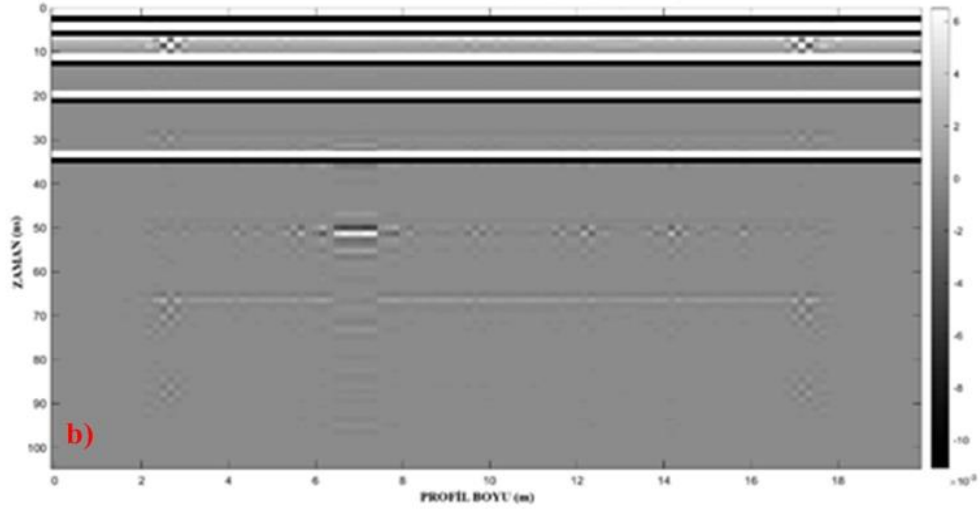
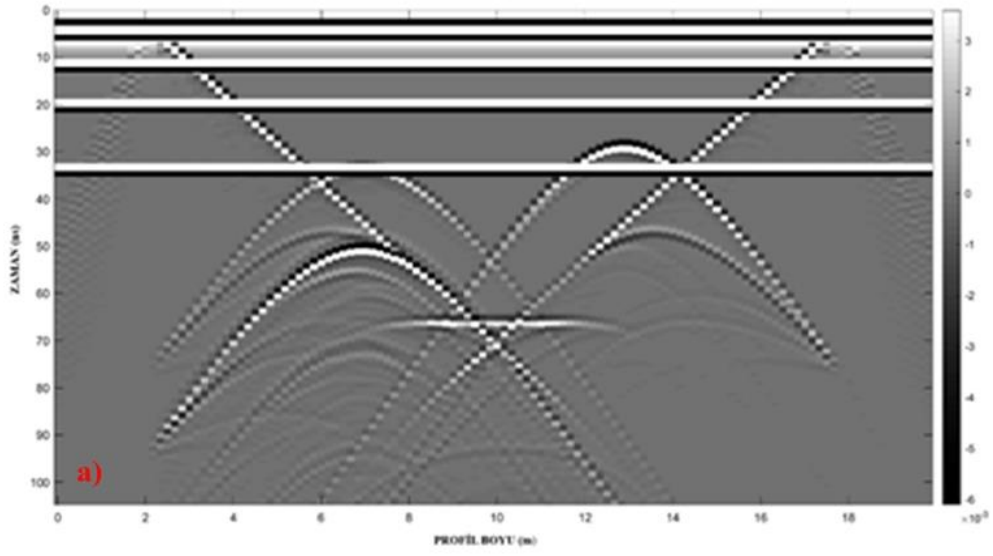
Şekil 4.3 Şekil 4.2'deki radargrama yatay tekrarlı olayların eklendiği radargram



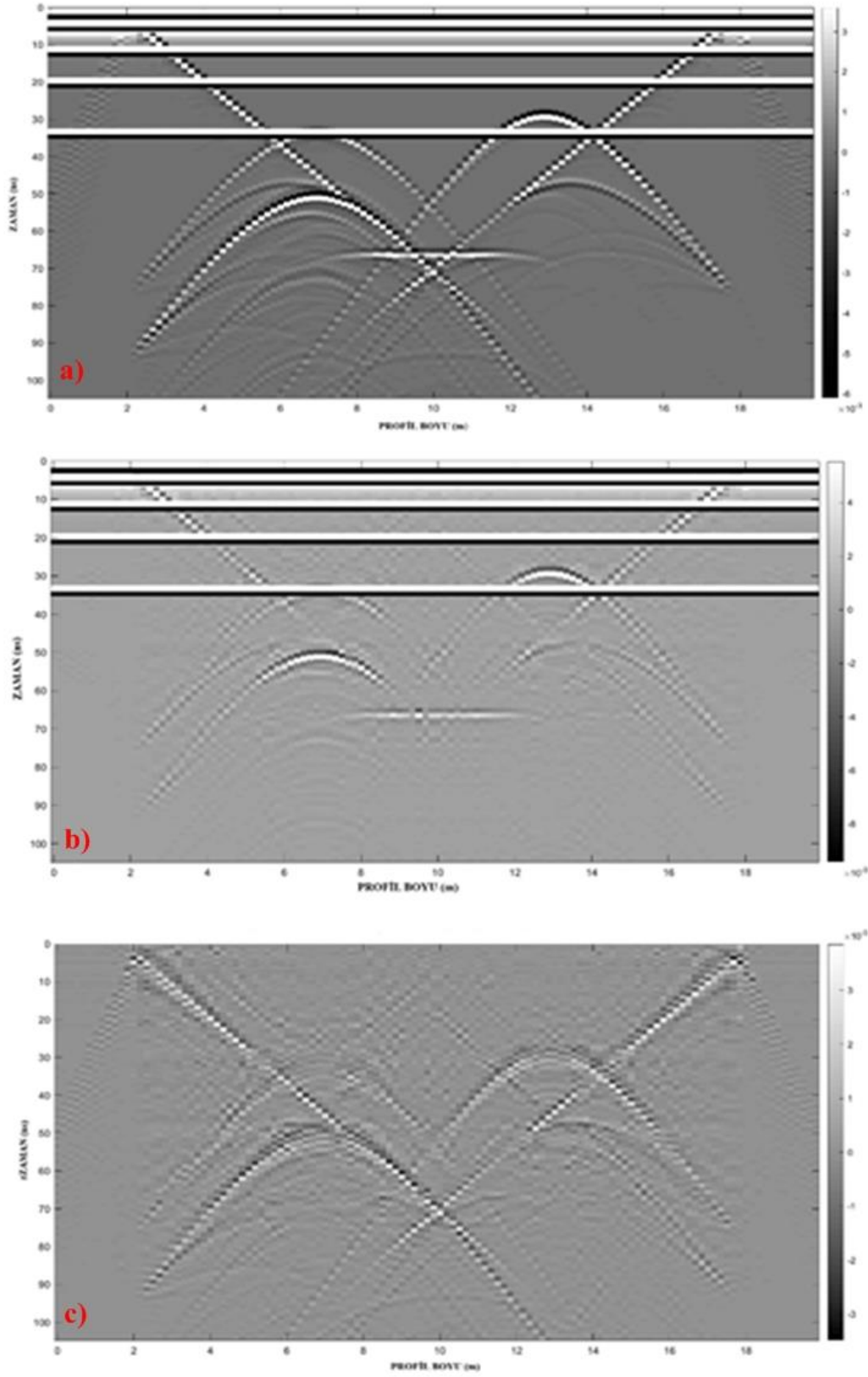
Şekil 4.4 Sentetik veriye ait özdeğer spektrum grafiği



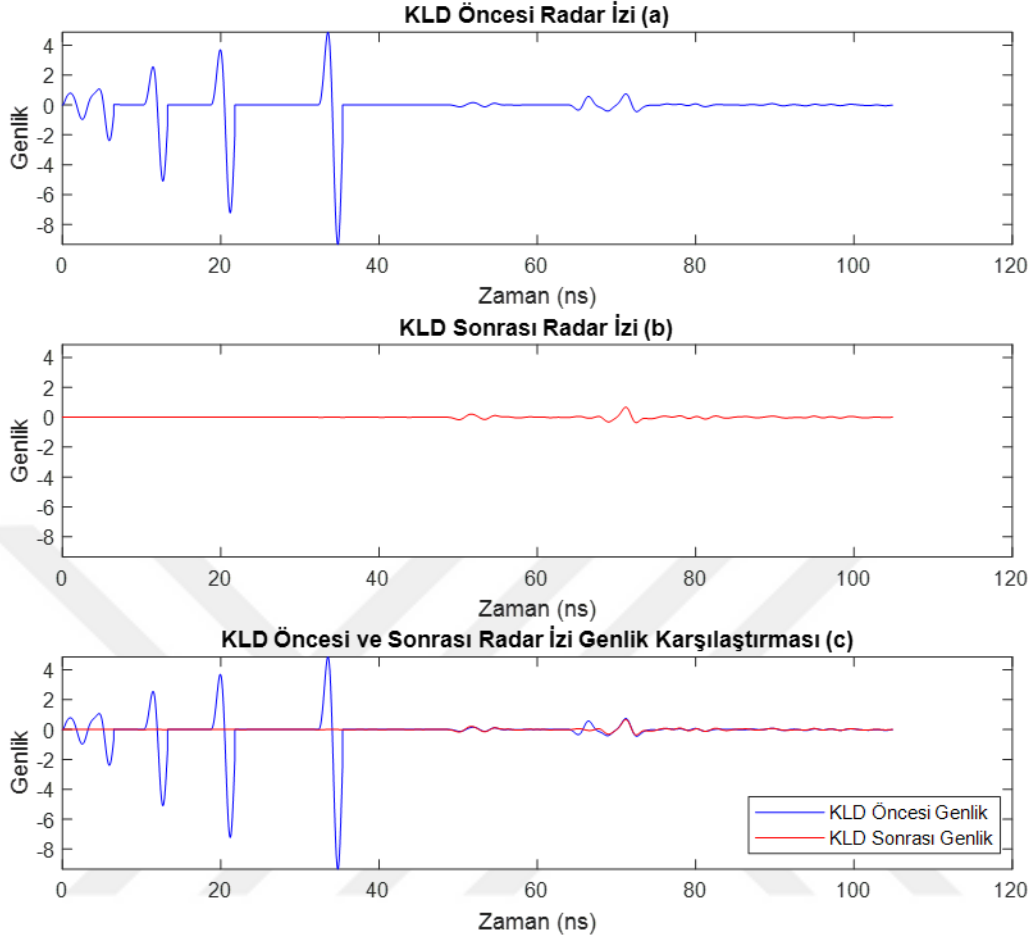
Şekil 4.5 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer 2 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD Sonrası süzgeçlenmiş radargram



Şekil 4.6 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 5 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD Sonrası süzgeçlenmiş radargram



Şekil 4.7 a) Sentetik yer radarı verisine yatay gürültü eklenmiş veriye ait radargram b) KLD ile özdeğer sayısı 20 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD Sonrası süzgeçlenmiş radargram



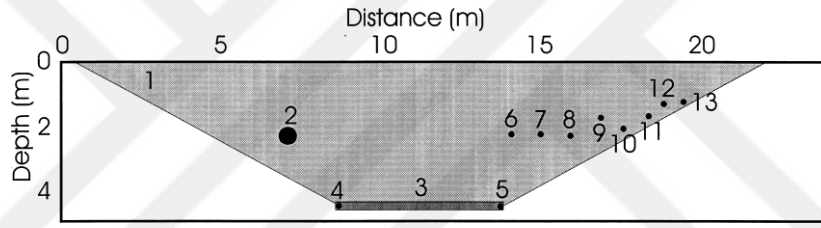
Şekil 4.8 Şekil 4.3 ile verilen yatay tekrarları içeren gürültülü radargrama ait a) KLD uygulamadan önceki bir radar izi b) KLD uyguladıktan sonraki aynı radar izi c) KLD uygulamadan önce ve KLD uyguladıktan sonra radar izlerinin karşılaştırılması

Bu uygulama ile yer radarı verisinde izler arasında korelasyonu yüksek olan yatay olaylar ve aranan anomaliyi maskeleyen diğer gürültüleri de KLD ile süzgeçleme yaparak ortadan kaldırılabildiği ve görüntü kalitesinin artırıldığı ortaya konulmuştur. Ayrıca süzgeçleme işleminin izlerdeki aranan olayların genlik bilgisini değiştirmedeği gösterilmiştir. Sonuç olarak yatay gürültüleri kaldırma amaçlı uygulanan FK süzgeçleme, önkestirimli dekonvolüsyon gibi veri işlem adımları verinin frekans içeriğini değiştirmesine rağmen KLD ile yatay gürültüleri süzgeçleme işleminde verinin frekans içeriği değişmemektedir.

4.2 Uygulama 2: Parametreleri Bilinen Kireçtaşı Formasyonu Üzerinde Ölçülen Yer Radarı Verilerine Uygulanan KLD

Bu uygulama ile Bitri ve Grandjen (1998) tarafından bir test sahası üzerinde toplanmış yer radarı verilerine ait radargram kullanılarak geliştirdiğimiz MATLAB yazılımı ile KLD uygulanarak yatay gürültüleri kaldırılması hedeflenmiştir.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC), Nantes, Fransa’da bulunan bir test sahası üzerindeki Çizelge 4.2 ile parametreleri tanımlı ve geometrik dizilimleri Şekil 4.9 ile verilen düzeneğe göre GSSI SIR 10A sistem ile 900 MHz anten kullanarak yer radarı profil verisi toplanmıştır (Bitri ve Grandjen 1998).



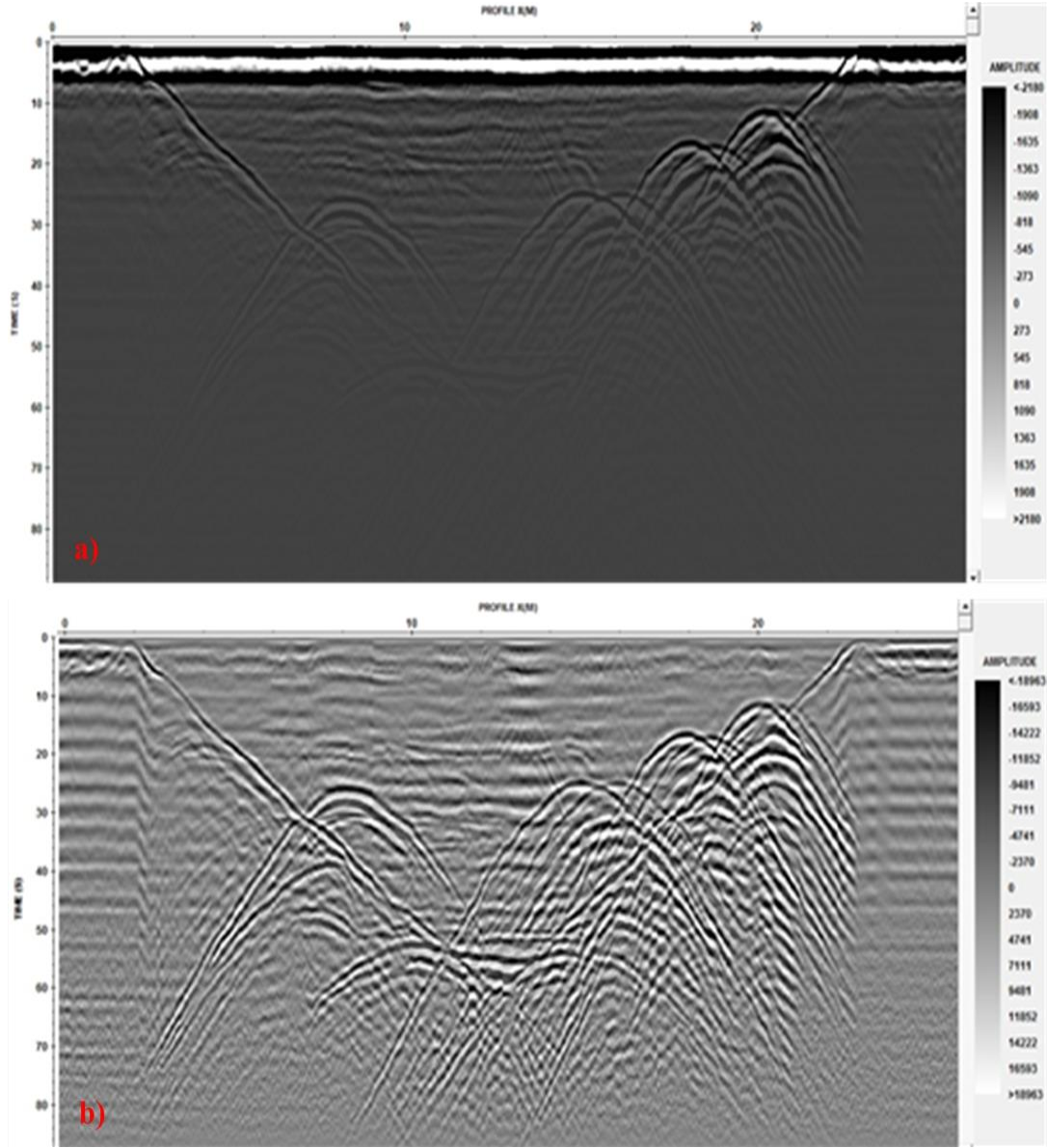
Şekil 4.9 Gerçek durumda kullanılan test sahası modelinin geometrisi (Bitri ve Grandjen 1998).

Birinci üst tabaka olarak tanımlı çukur şekline benzer yan bölgeleri eğimli, tabanı dar düz sınırlı kireçtaşı kum dolgu içinde (No.1) Çizelge 4.2 ile tanımlandığı gibi içi hava, kum ve su dolu toplam 12 boru (No.2–13) Şekil 4.9’deki gibi yerleştirilmiştir. Alt katman gnays kumu olarak tasarlanmıştır (Bitri ve Grandjen 1998).

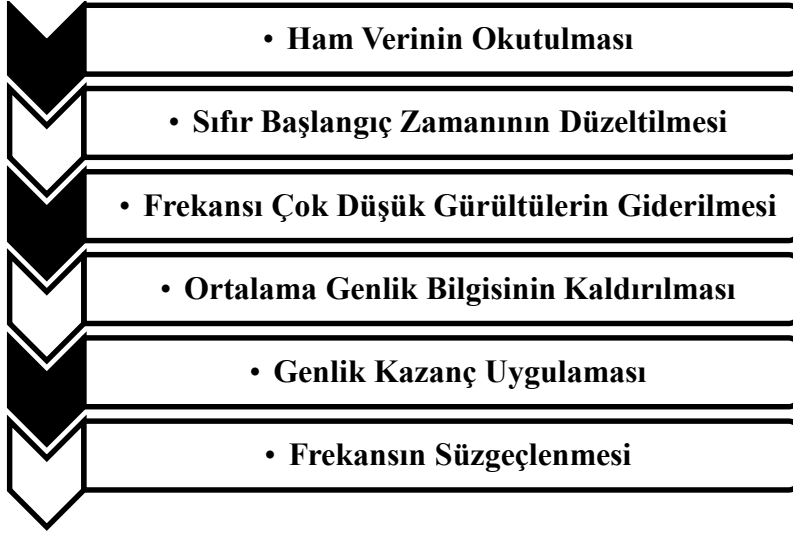
Çizelge 4.2 Yer radarı verilerinden kaydedilen ve test sahasının hedeflerini çevreleyen malzemeler (Bitri ve Grandjen 1998).

Nu mar a	Hedef	Dolgu Malzemesi	<i>K</i>	<i>Q</i>
1	Ana Delik	Kireçtaşı Kumu	3.3	30
2	Büyük Boru 50 cm	Hava	1	1000
3	Alt Katman	Gnays Kumu	6	30
4	PVC Boru 5 cm	Hava	1	1000
5	PVC Boru 5 cm	Hava	1	1000
6	Demir Boru 2 cm	Hava	1	1
7	PVC Boru 4 cm	Su	80	1000
8	PVC Boru 4 cm	Hava	1	1000
9	Demir Boru 2 cm	Hava	1	1
10	PVC Boru 4 cm	Su	80	1000
11	PVC Boru 4 cm	Hava	1	1000
12	Demir Boru 2 cm	Hava	1	1
13	PVC Boru 4 cm	Su	80	1000

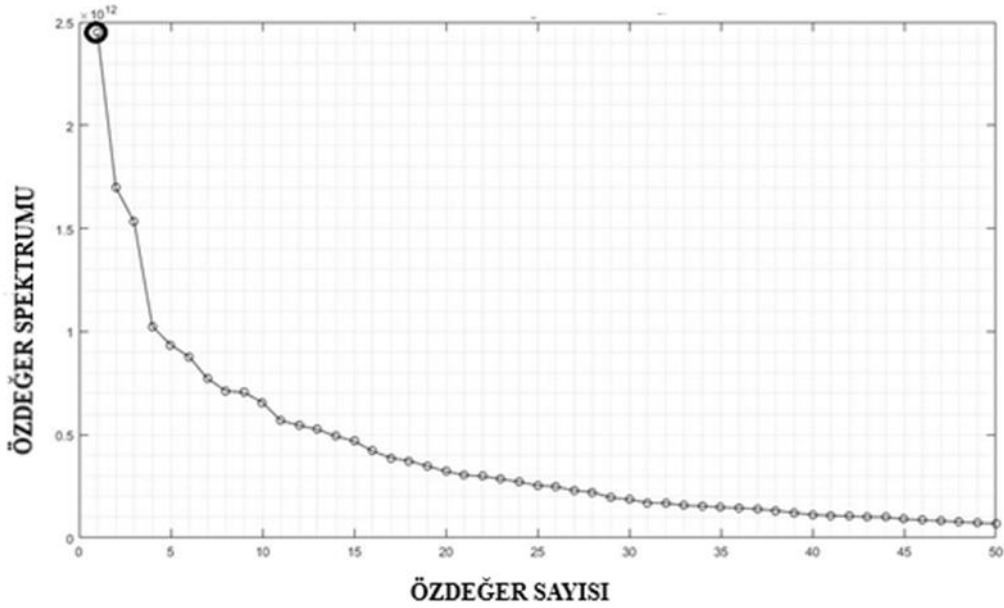
Şekil 4.10a ile verilen test sahasının üzerinde GSSI SIR 10A sistem ile 900 MHz anten kullanarak 918 iz sayılı yer radarı verisi MATGPR yazılımı ile Şekil 4.11 ile verilen veri-işlem adımları uygulanarak işlenmiştir (Şekil 4.10b). Geliştirilen MATLAB koduna aktarılarak işlenmiş radargrama ait elde edilen özdeğer spektrumundan (Şekil 4.12) belirli özdeğerler seçilerek (özdeğerler 2, 5 ve 10) KLD uygulanmıştır (Şekil 4.13b-15b). Elde edilen radargramlar işlenmiş radargramdan çıkartılarak süzgeçleme yapılmıştır. Süzgeçleme sonrası elde edilen radargramlar Şekiller 4.13c-15c ile sunulmuştur.



Şekil 4.10 Şekil 4.9 ile verilen test saha modeline ait a) işlenmemiş radargram, b) Veri-
işlemi yapılmış radargram



Şekil 4.11 Şekil 4.10 a' daki radargrama uygulanan veri işlem adımları



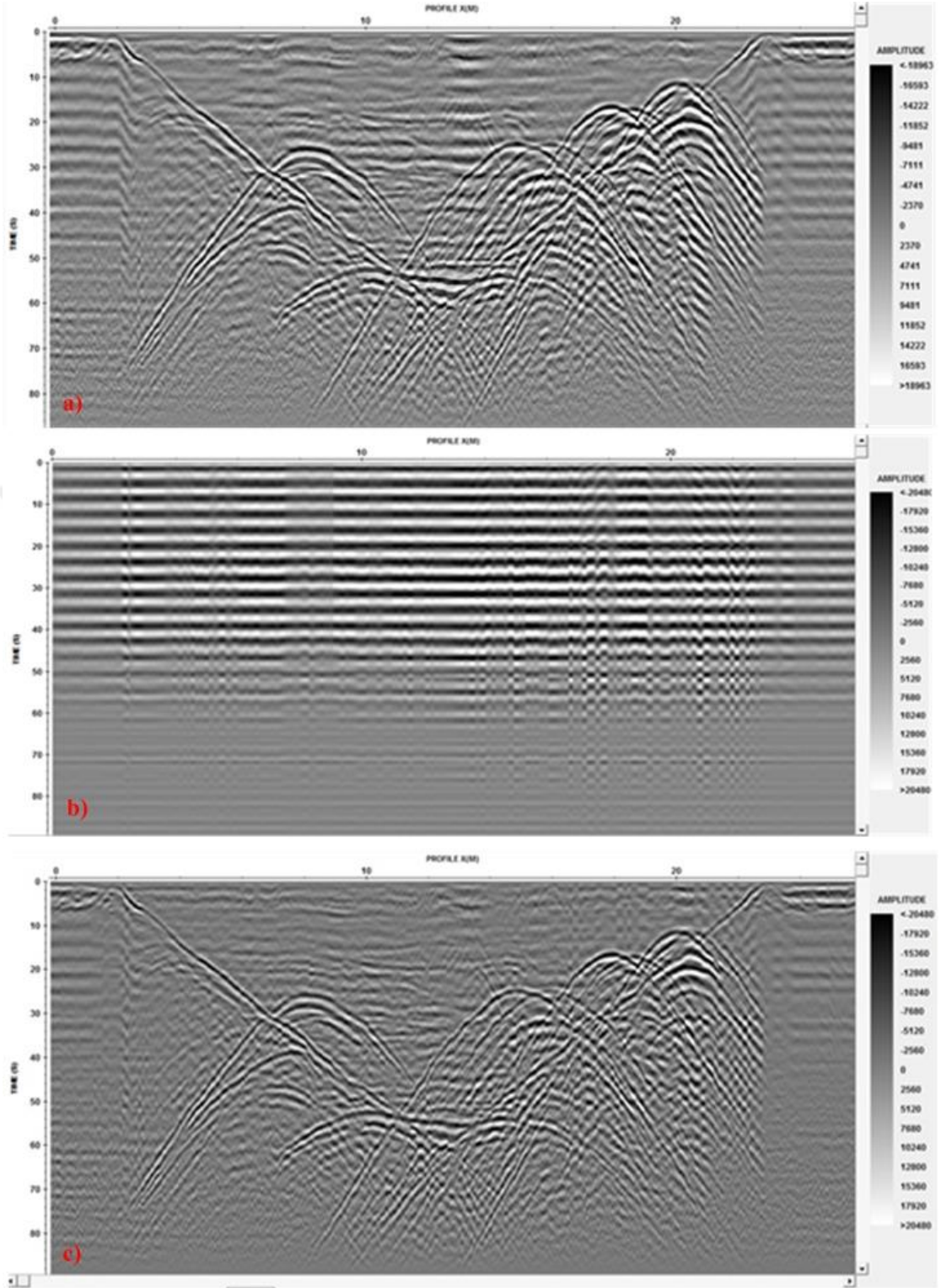
Şekil 4.12 Şekil 4.10b' deki radargrama ait özdeğer spektrum grafiği

Özdeğer spektrum grafiği incelendiğinde verinin enerjisi en yüksek ilk 5 özdeğerdedir. Genellikle yüksek enerji bölgeleri radargramın ana yapısını oluşturmaktadırlar. Grafikte yüksek özdeğerli bölge izlerin birbiri ile korelasyonun yüksek olduğu bölgedir. Grafiğin eğimi sıfıra yakınsadıkça izlerin birbiri ile korelasyonu da düşmektedir. Yatay olaylar korelasyonu yüksek bölge içinde olmasına rağmen eğimli olaylar spektrum azalma eğrisinin tamamlandığı yere kadar devam etmektedir.

Ayrıca bu durumu kullanarak yatay olayları eğimli olaylardan ayıran özdeğer sayısını azlama trendi içinden hassas bir şekilde belirlemek ve farklılıkları göstermek için özdeğer sayısı 2, 5 ve 10 seçilmiştir (Şekil 4.12).

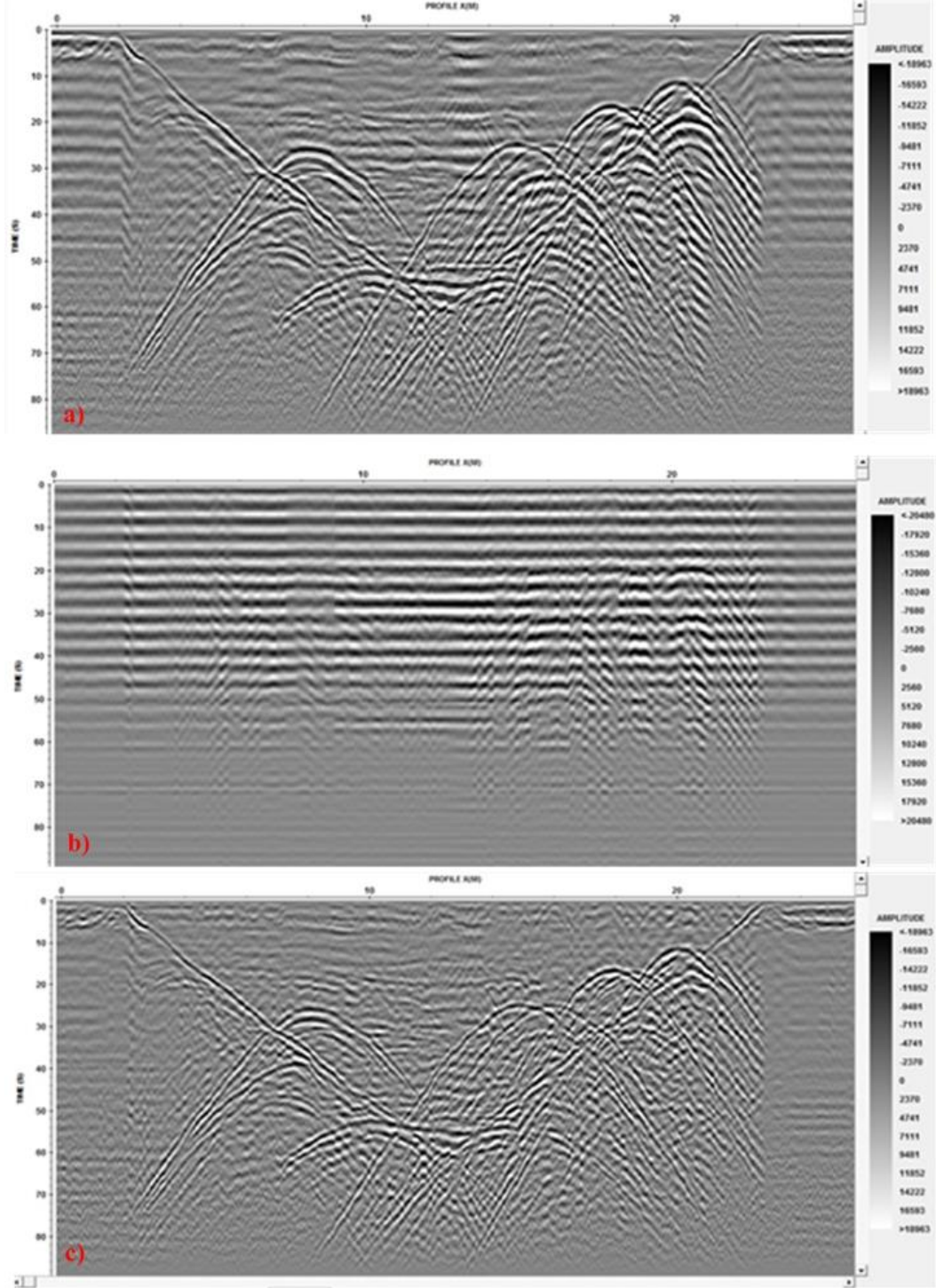
Verilen özdeğer spektrumu grafiğinde enerjisi en yüksek spektrumun birinci özdeğerde olduğu görülmektedir. Radar izleri arasındaki korelasyonu düşük olan olayları veriden atıp veriyi yeniden oluşturmak için özdeğer sayısının yüksek seçilmesi gerekmektedir. Şekil 4.13 sırasıyla işlenmiş radargramı, özdeğer 2 seçilmesi durumunda KLD ile elde edilmiş radargramı ve süzgeçlenmiş radargramı göstermektedir.





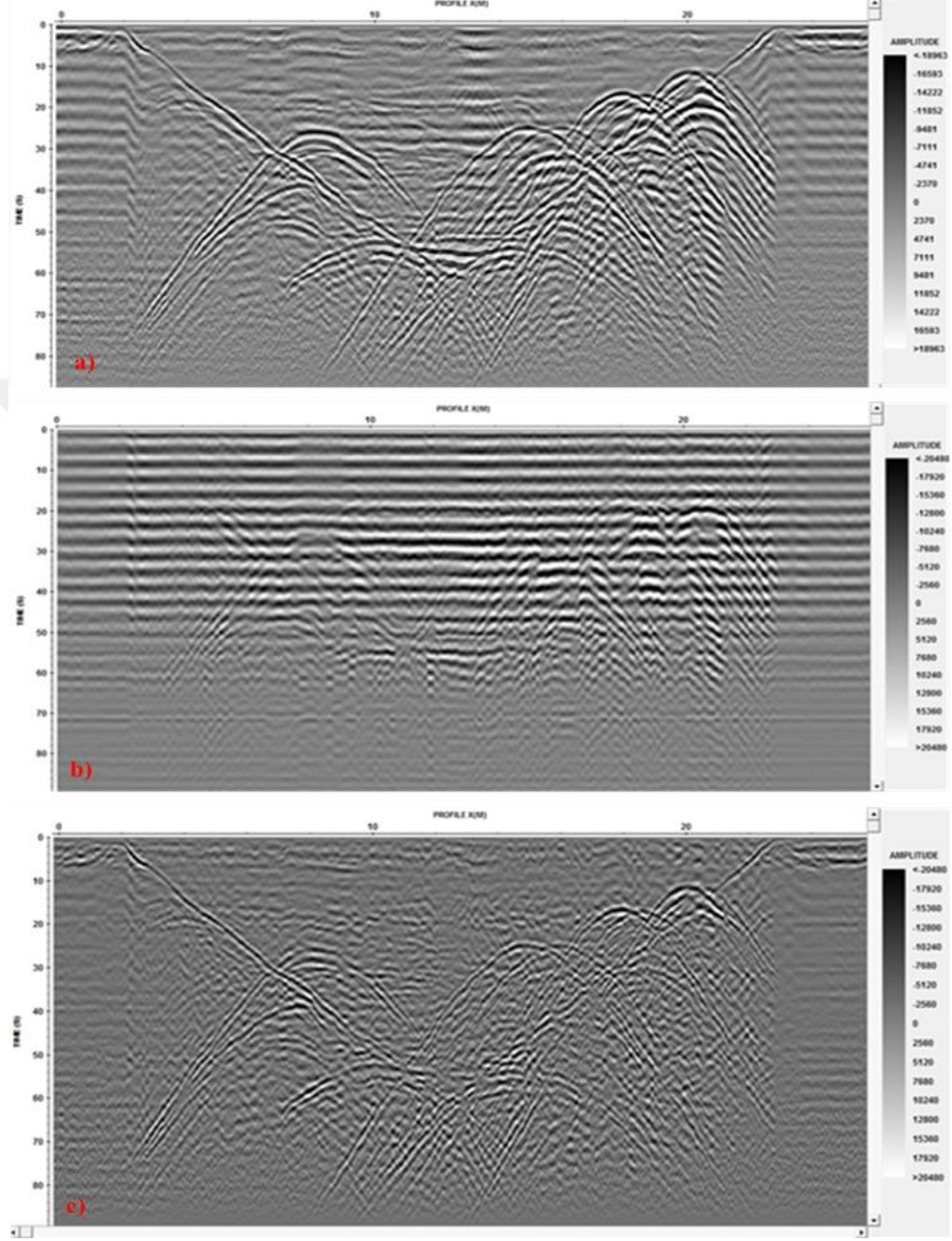
Şekil 4.13 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram, b) KLD ile özdeğer sayısı 2 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram

Şekil 4.14 sırasıyla işlenmiş radargramı, özdeğer 5 seçilmesi durumunda KLD ile elde edilmiş radargramı ve süzgeçlenmiş radargramı göstermektedir.



Şekil 4.14 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram, b) KLD ile özdeğer sayısı 5 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram

Şekil 4.15 sırasıyla işlenmiş radargramı, özdeğer 10 seçilmesi durumunda KLD ile elde edilmiş radargramı ve süzgeçlenmiş radargramı göstermektedir.



Şekil 4.15 a) Şekil 4.9 test modeline ait veri-işlemi yapılmış radargram, b) KLD ile özdeğer sayısı 10 değeri için elde edilmiş süzgeçlenmesi hedeflenen radargram c) KLD sonrası süzgeçlenmiş radargram

Uygulama 2' de Bitri ve Grandjen (1998) tarafından test sahasına ait toplanmış veri işlendikten sonra radargramda yatay gürültü olarak yüzeyin etkisi ile oluşan "clutter effect" olarak tanımlanan tekrarlı yansımaların yatay olayları süzgeçleme amaçlı kullanılan "background removal" olarak tanımlı ortak genlik bilgisinin kaldırılması işlemi ile tamamen kaldırılamadığı belirlenmiştir (Şekil 4. 10). Tez kapsamında bu yatay gürültülerin etkisini ve kaldırılmasını ortaya koymak amaçlı özdeğerler spektrumu grafiği üzerinde korelasyonu yüksek olan özdeğerler verilerek yatay gürültüleri içeren radargramlar elde edilmiştir (Şekiller 4. 13b-4. 15b). Bu şekiller karşılaştırıldığında özdeğer 2 ile elde edilen radargramın yatay olayları çok büyük oranda kapsadığı görülmektedir. Elde edilen süzgeçlenmiş radargramda da yatay olaylar büyük oranda kaldırılmıştır (Şekil 4.13c). Buna rağmen daha yüksek özdeğer sayıları ile eğimli olayların etkisinin başladığı radargramları elde ederek özdeğer sayısı limit aralığı ortaya konulmaya çalışılmış ve özdeğer sayısı 5 verildiğinde çok az da olsa hiperbollerin eteklerine ait saçılma dalga alanlarının KLD ile elde edilen radargramlarda varlığı görüntülenmiştir (Şekiller 4. 14b ve 4. 15b). Buradan bu veri için yatay tekrarları kaldırma amaçlı özdeğer sayısının 5'ten daha fazla seçilmesi durumunda eğimli olayların da süzgeçlenebileceği ortaya konulmuştur.

4.3 Uygulama 3: Afşin-Elbistan Kömür Sahasına ait Yer Radarı Profil Verisinde KLD ile Yatay Gürültülerin Kaldırılması

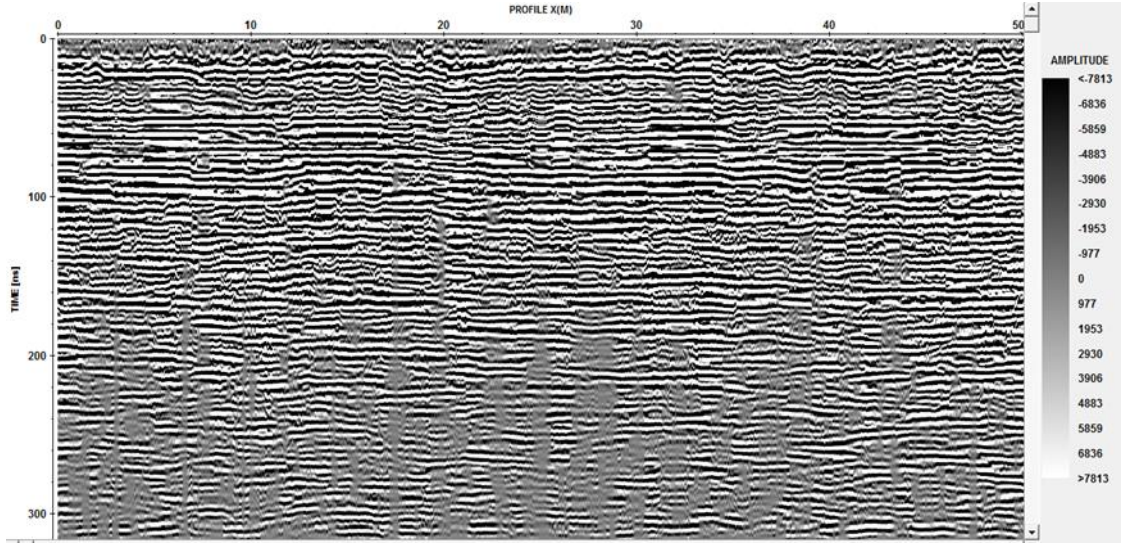
Tez kapsamında gerçekleştirilen üçüncü uygulamanın amacı yatay ince tabakalaşmanın hakim olduğu kömür havzasında toplanan profil verisine ait radargramın genel veri-işlem sonrası veride görülen yatay olayların kaldırılarak düşey ve/veya eğimli kırıkların daha belirgin olarak görüntülenmesini sağlamaktır.

Afşin -Elbistan kömür sahasında toplanan profil veri parametreleri sırasıyla 250 MHz kapalı anten, iz yığına sayısı 16 ve maksimum kayıt zamanı 335 ns' dir. Profil verisine ait radargrama Şekil 4.16 ile verilen veri-işlem adımları sırasıyla uygulanmıştır. Kömür sahasında kırıkları tespit etmek amaçlı toplanan veride izler arasında korelasyonu çok

yüksek olan kömür-gidya ardalımalı yatay ara yüzeylerin tabaka içilerindeki kırıkların varlığını, konum ve değişimlerini uygulanan veri işlem adımlarından sonra net olarak görüntülenemediği görülmüştür (Şekil 4.17). Bu nedenle geliştirilen MATLAB kodu ile radargrama ait özdeğerler spektrum grafiği üzerinde korelasyonu yüksek ve düşük olan özdeğer sayıları seçilerek KLD uygulanmıştır. Özdeğer sayıları sırasıyla 5, 10, 20, 35 ve 100 kullanılarak uygulanan KLD ile elde edilen radargramlar Şekil 4.18’ de sunulmuştur.

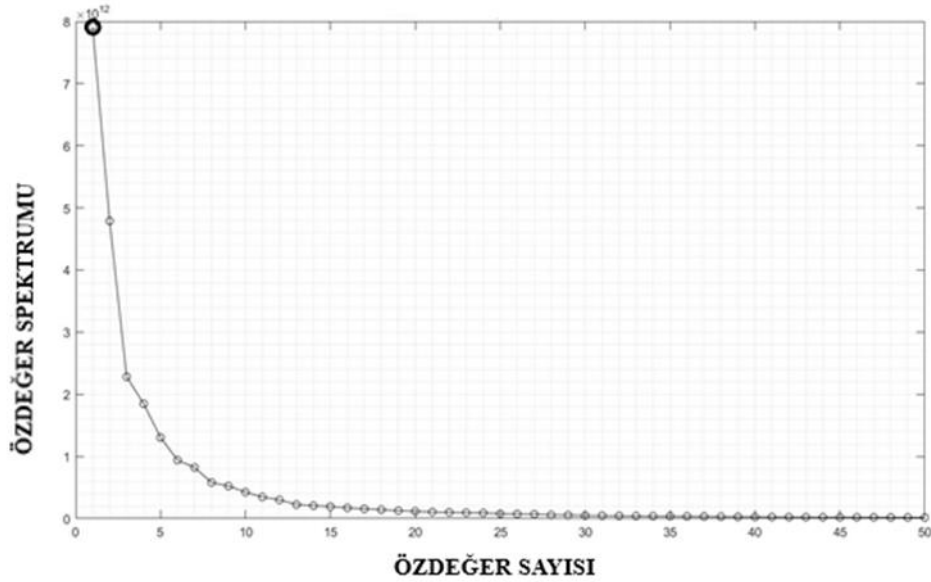


Şekil 4.16 Afşin-Elbistan profil verisine uygulanan veri işlem adımları



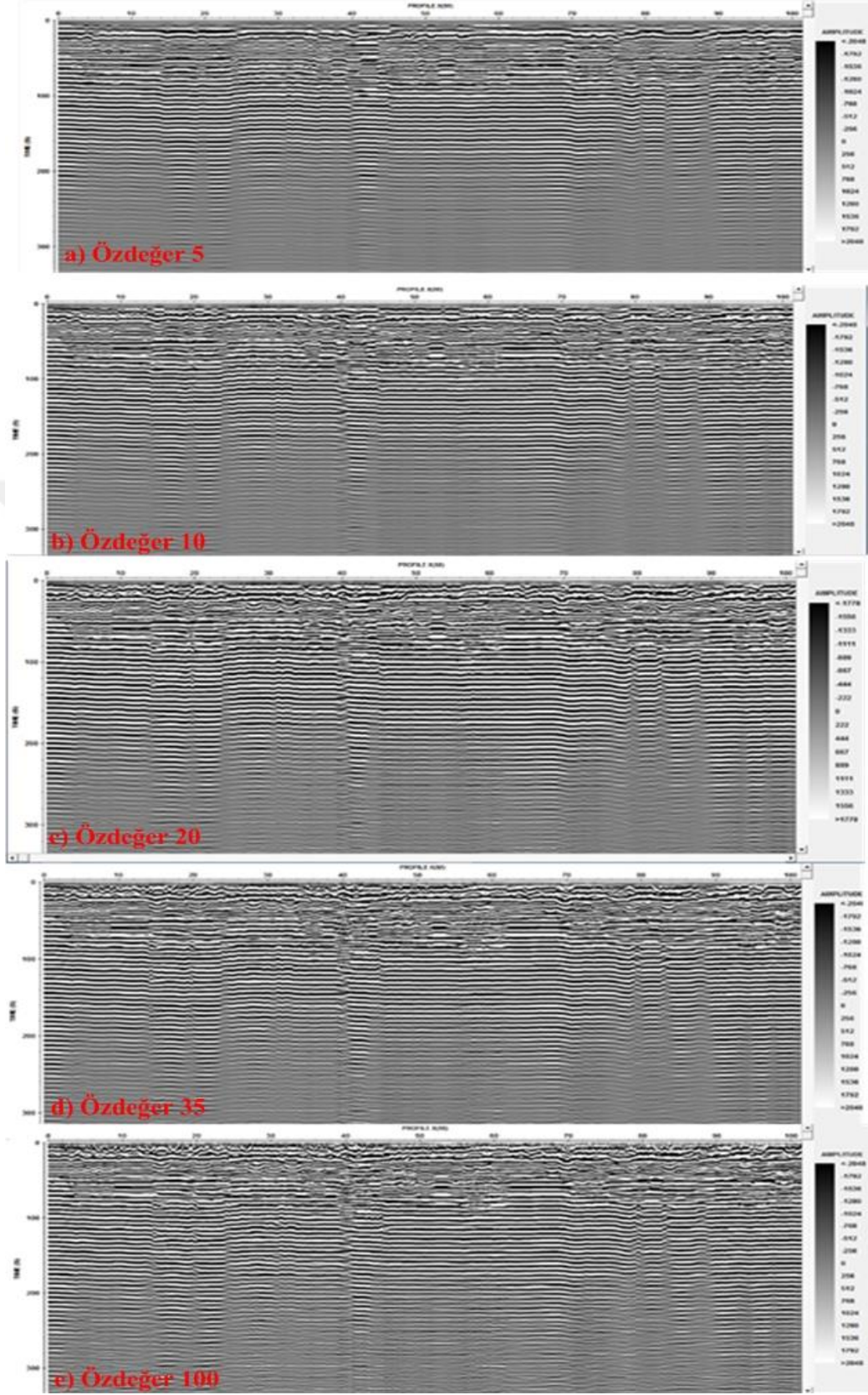
Şekil 4.17 Afşin-Elbistan kömür sahasına ait profil verisine ait işlenmiş radargram

Şekil 4.18 ve Şekil 4.17'de verilen radargrama ait özdeğer spektrum grafiğini göstermektedir. İlgili grafik izler arasındaki korelasyonu en yüksek ve en düşük özdeğer sayısı belirlemede etkin rol oynamaktadır.

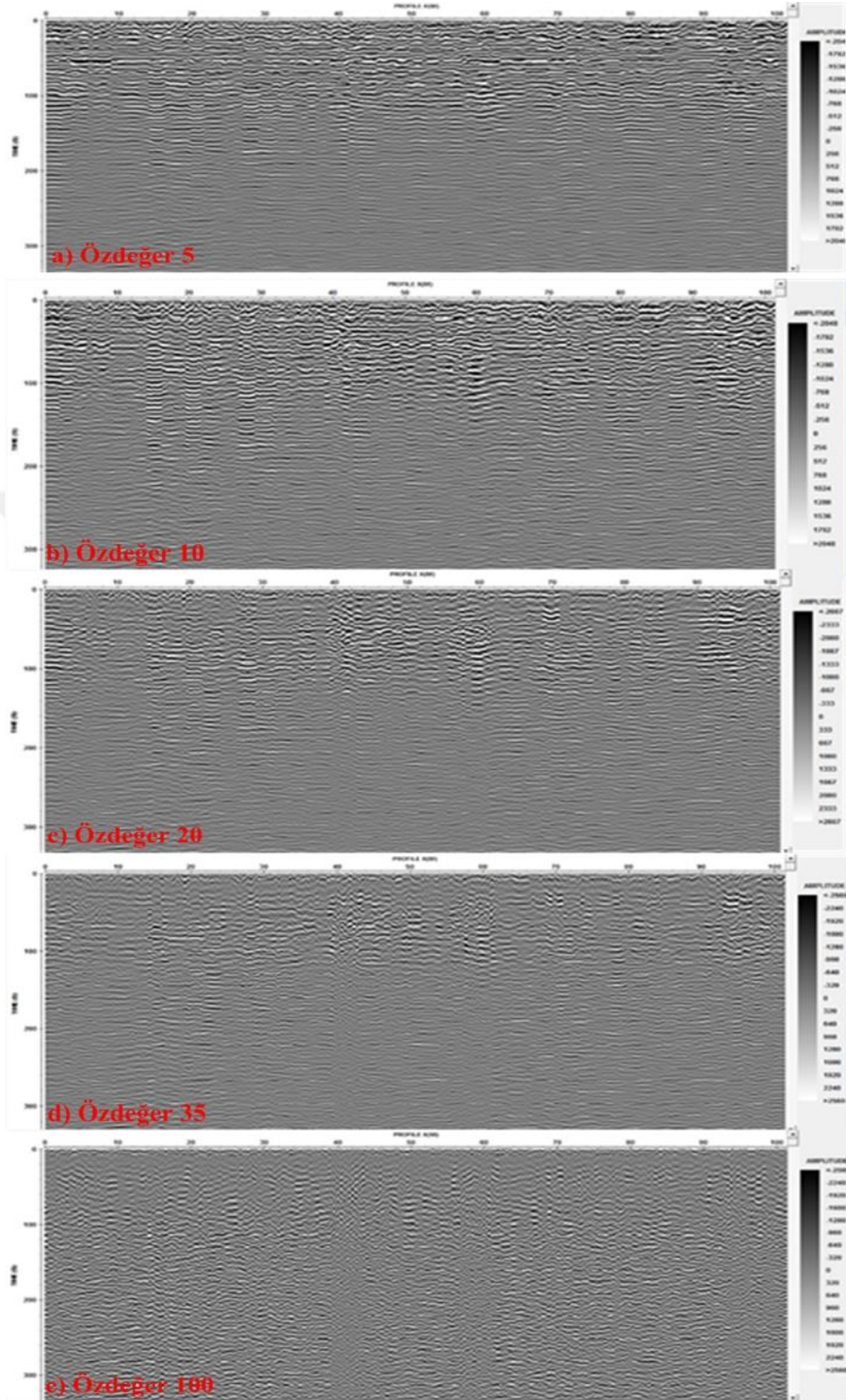


Şekil 4.18 Afşin-Elbistan kömür sahasında toplanan yer radarı profil verisinin işlenmiş radargramına ait özdeğer spektrumu

Özdeğer spektrumu grafiğinde eğri sifira yakınsadıkça izlerin birbiri ile korelasyonu düşmektedir. İzler arasında korelasyonu yüksek olan olayları veriden atıp veriyi yeniden oluşturmak için özdeğer sayısının düşük seçilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde eğimli olayların korelasyonu daha düşük olduğu için yüksek özdeğer sayıları seçilerek görüntülenebilir. İlk özdeğer 5, grafiğin eğiminin daha azaldığı yerden özdeğer sayısı 10, grafiğinin eğiminin artık sabit kalmaya başladığı yerden özdeğer sayısı 20, sifira yakınsadığı yerden özdeğer sayısı 35 ve son olarak çok daha yüksek özdeğer sayısı 100 seçilerek, KLD ile oluşturulan radargramlar sunulmuştur. Şekil 4.18' deki seçilmiş özdeğer sayıları kullanılarak KLD ile oluşturulmuş radargramlar karşılaştırıldığında özdeğer sayısı 5 ve 10 olan radargramlarda yatay olayların görüntülenebildiği, özdeğer sayısı 20 olan radargramda yüzeye yakın kırıkların da radargramda görülmeye başladığı, özdeğer sayısının 35 ve 100 olduğu radargramların işlenmiş radargrama çok çok yakın sonuç verdiği görülmüştür. Yatay olayları kaldırma amaçlı süzgeçleme işlemi işlenmiş radargramdan Şekil 4.18'deki radargramların çıkarılması ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19 sırasıyla özdeğer sayısı 5, 10, 20, 35 ve 100 için süzgeçlenmiş radargramları göstermektedir. Şekil 4.19' a göre yatay olayları azami kaldırarak kırıkların durum ve konumlarını işlenmiş veriye göre daha etkin görüntüleme özdeğer sayısı 10 ve 20 seçilerek yapılmış KLD süzgeçleme sonucu elde edilen radargramlarda sağlanmıştır. Özdeğer sayısı 5 için elde edilen süzgeçlenmiş sonuç radargramda hala yatay olayların etkisi görülürken, özdeğer sayıları 35 ve 100 olan süzgeçlenmiş sonuç radargramlarda kırıkların bir bölümünün de süzgeçlendiği, sadece çok düşük korelasyona sahip ince kırıkların ve hatta özdeğer sayısı 100 ile süzgeçlenmiş radargramda bilgi olarak amacına ulaşmayan kalıntı olaylar görüntülenmiştir.



Şekil 4.19 Özdeğer sayıları sırasıyla a) 5, b) 10, c) 20, d) 35 ve e) 100 verilerek KLD ile oluşturulmuş radargramlar



Şekil 4.20 Şekil 4.18’ de süzgeçleme amaçlı KLD ile elde edilen radargramlar kullanılarak sırasıyla özdeğer sayıları a) 5, b) 10, c) 20, d) 35 ve e) 100 verilerek gerçekleştirilen süzgeçleme sonrası elde edilen radargramlar

5. SONUÇLAR

Yer radarı profil verilerine ait radargramların S/G oranını artırmak ve gürültü kabul edilen olayları kaldırmak amaçlı bir dizi veri-işlem adımları uygulanmaktadır. Bu gürültülerden en önemlisi aranan küçük, ince yapı veya süreksizliklere ait olayları örten yatay gürültülerdir. Bu gürültüler tez içeriğinde daha önce tanımlandığı gibi sert zemin ve düzgün olmayan yüzeylerin etkisiyle oluşan antenler arası etkileşimden meydana gelen “clutter effect” adı verilen verici antenden alıcı antene doğrudan havadan gelen dalga kaynak dalgacığının tekrarlı yansımalarıdır. Genlikleri oldukça yüksek olmaları nedeniyle özellikle yüzeye yakın olayları örtmesi nedeniyle doğrudan gelen dalgalar gibi stenmeyen olaylardır. Benzer şekilde yer içindeki hedef nesnenin boyu EM dalganın bir dalga boyu ile eşleşirse rezonansa girerek yansıyan/saçılan dalganın kendisini tekrarlamasına (çınlama, ringing) neden olmaktadır. Yatay konumlu nesnenin çınlama etkisi de clutter effect gibi tekrarlı yansımalara neden olmaktadır. Bu olaylar radargramlarda yer içi aranan hedef yapılardan gelen yansımış/saçılmış dalgaların görüntülenmesini engelleyen düzenli hem yatay hem de düşey bileşenli gürültülerdir ve radargramlarda düşey ve yatay ayırım gücünü azaltmaktadırlar.

Tez çalışması kapsamında radargramlarda görülen yatay gürültüleri kaldırma, aranan nesnelere veya süreksizliklere ait yansıma/saçılma dalga fazlarını daha iyi görüntüleyebilme amaçlı KLD uygulanmıştır. KLD için MATLAB programlama dili kullanılarak bir kod geliştirilmiştir. Öncelikle KLD'nin veri-işlemi uygulanmış ancak hala giderilememiş yatay gürültüleri kaldırmak amaçlı uygulanabilirliğini göstermek tezin başlıca amacı olmuştur. Bu amaçla tez kapsamında öncelikle MATGPR yazılımı kullanılarak bir yeraltı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan modeldeki parametreler kullanılarak MATGPR ortamında zaman ortamı sonlu farklar (FDTD) algoritması ile modele ait radargram elde edilmiştir. Daha sonra radargrama MATLAB yazılımında geliştirilen kod ile doğrudan gelen dalgayı çoğaltarak tekrarlı yansıma gibi veriye yatay gürültü olarak eklenmiştir. Sonra geliştirilen kod ile seçilmiş özdeğer sayıları kullanılarak KLD uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar KLD ile yatay gürültülerin veriden başarı ile süzgeçlenebildiği gösterilmiştir. Buna ek olarak KLD uygulamadan önceki radar izi genlik değerleri ile KLD uygulandıktan sonra radar izi genlik değerleri

karşılaştırılmıştır.

KLD'nin sentetik yer radarı izine ait aranan yapılardan gelen yansıma/saçılma dalga fazlarının genlik değerlerini neredeyse hiç değiştirmedeği gösterilmiştir.

İkinci olarak Bitri ve Grandjen (1998) tarafından sunulan test sahası olarak oluşturulmuş, parametreleri bilinen gerçek model için toplanan yer radarı profil verisine ait radargrama öncelikle gerekli veri işlem adımları uygulanmıştır. Elde edilen radargramda “clutter effect” olarak tanımlanan tekrarlı yansımaların tamamen kaldırılamadığı sonucu elde edilmiştir. Sonra işlenmiş radargrama ait özdeğer spektrum eğrisi değerlendirilerek farklı özdeğer sayıları ile KLD uygulanmıştır. Radar izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay gürültüler süzgeçlenerek sonuçları görüntülenmiştir.

Son olarak, Afşin-Elbistan kömür sahasında toplanan bir yer radarı profil verisine ait radargrama veri-işlem uygulandıktan sonra küçükten büyüğe farklı özdeğer sayıları seçilerek KLD uygulanmış ve radargramlar elde edilmiştir. Radar izleri arasında korelasyonu yüksek olan yatay olaylar veriden kaldırılarak tabakalar içindeki kırıkların konum ve değişimlerinin daha belirgin bir şekilde görüntülenmesi sağlanmıştır.

Uygulamalarla elde edilen genel sonuç; KLD ile süzgeçleme işlemi yaparken temel parametre, işlenmiş radargramın yeniden elde edilmesi amaçlı, radargrama ait kullanılan özdeğer aralığıdır. Bu parametrenin doğru seçilmesi süzgeçleme sonuçlarının interaktif değerlendirilmesi ile mümkündür. Ancak gerçekleştirilen üç uygulama sonuçlarına göre yatay olayların özdeğerler spektrum grafiğinde yüksek enerjili özdeğerler (düşük özdeğer sayı aralığı) kullanılarak KLD ile elde edilen radargramlarda büyük ölçüde yer aldığı belirlenmiştir. Özdeğer sayısı arttırıldıkça giriş olarak kullanılan radargrama yaklaşım sağlandığı için eğimli olayların da süzgeçlendiği, bu nedenle kullanılan özdeğer sayısının yüksek enerjili özdeğerleri kapsamaması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar, F-K dönüşümü ile veya ön kestirimli dekonvolüsyonun parametre seçimleri sonucu ortaya konulmaya çalışılan yapılara ait bilgileri de kaldırma riskinin daha az olduğu bir dönüşümü kullanarak yatay gürültülerin kaldırılabilceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Yahya, K. M. 1991. Application of the partial Karhunen- Loève transform to suppress random noise in seismic sections: *Geophys. Prosp.* 39, 77–93.
- Andrew, A.L., Eric Chu, K. W. and Lancaster, P. 1993. Derivatives of Eigenvalues and Eigenvectors of Matrix Functions. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, Vol. 14, No. 4: pp. 903-926.
- Annan, A. P. 2000. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software Inc., Canada. Aspron, U., and Aigner, T., 1999. Towards realistic aquifer models: Three dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany). *Sedimentary Geology*, 129, 281-297.
- Annan, A. P. 2004. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. Mississauga, On, Canada: Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P. 2003. Ground penetrating radar principles and applications. Sensors and Software. Cited by 413.
- Annan A. P. 2005. Gpr Methods For Hydrogeological Studies. Sensors & Software Inc., 1040 Stacey Court, Mississauga, ON L4W 2X8 Canada.
- Aspron, U. and Aigner, T. 1999. Towards realistic aquifer models: Three dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany). *Sedimentary Geology*, 129, 281-297.
- Başokur, A. T. 2015. Türev tabanlı parametre kestirim yöntemleri.
- Bianchini, L., Tosti, F., Economou, N. and Benedetto, F. 2019. Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. *Geosciences* 9(2): 96.
- Bitri, A. and Grandjen, G. 1998. Frequency-Wavenumber Modelling and Migration of 2D GPR data in Moderately Heterogeneous Dispersive Media. *Geophysical Prospecting* (46), 287-301.
- Brandt, O., Taurisano, A., Giannopoulos, A. and Kohler, J. 2009. What can GPR tell us about cryoconite holes? 3D FDTD modeling, excavation and field GPR data. *Cold Regions Science and Technology* 55(1): 111-119.
- Brewster, M., Annan, A., Greenhouse, J., Kueper, B., Olhoeft, G., Redman, J. And Sander, K. 1995. "Observed migration of a controlled DNAPL release by geophysical methods." *Groundwater* 33(6): 977-987.
- Carcione, J. M. 1996. Ground radar numerical modelling applied to engineering problems. *Evr. J. Environ. Eng. Geophys.*1, 65-81.

- Cardelli, E., Marrone, C. and Orlando, L. 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 93-102.
- Cary, P. Zhang, Z. 2009. Ground Roll Attenuation via SVD and Adaptive Subtraction. *Frontiers + Innovation –CSPG CSEG CWLS Convention*. Sensor Geophysical Ltd., Calgary AB, Canada.
- Changryol, K., Daniels, J. J., Guy, E., Radzevicius, S. J. and Holt, J. 2000. Residual hydrocarbons in a water-saturated medium: A detection strategy using ground penetrating radar. *Environmental Geosciences*, 7, 4, 169-176.
- Chen, J., Benesty, J. and Huang, Y. Study of the Noise-Reduction Problem in the Karhunen–Loève Expansion Domain. *Ieee Transactions On Audio, Speech, And Language Processing*, Vol. 17, No. 4. 1558-7916.
- Cook, J. C. 1973. Radar exploration through rock in advance of mining. *Transactions of the Society of Mineral Engineering AIME*. 254,140-146.
- Cook, J. C. 1974. Status of ground-probing radar and some recent experience. *Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, ASCE.
- Cook, J. C. 1975. Radar transparencies of mines and tunnel rocks. *Geophysics*. 40, 865-885.
- Cook, J. C. 1977. Borehole-radar exploration in a coal seam. *Geophysics*. 42, 1254-1257.
- Daniels, D. J. 2004. *Ground Penetrating Radar 2nd edition: The Institution of Electrical Engineers*. London, England.
- Daniels, D. J. Gunton, D. J. and Scott, H. F. 1988. Introduction to subsurface radar. *IEEE Proceedings-F, Communications, Radar & Signal Proceedings*, 135, 278- 320.
- Daniels, D. J. 1996. *Surface-Penetrating Radar, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics*, 6, London.
- Daniels, J. J. 1989. Fundamentals of ground penetrating radar. *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP'89)*, Proceedings of the Environmental and Engineering Geophysical Society, Englewood, Colorado, pp.62-142.
- Daniels, J. J. 2000. Ground penetrating radar for imaging archeological objects in the subsurface. *Proceedings of the New Millennium International Forum on Consideration of Cultural Property*, Kongju, Korea, pp.247-265.
- Dannowski, G. and Yaramanci, U. 1999. Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectric measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 71-85.

- 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.
- Dellwig, L. F. and Bare, J. E. 1978. A radar investigation of North Louisiana salt domes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 1411-1419.
- Diamanti, N. 2008. An efficient ground penetrating radar finite-difference time-domain subgridding scheme and its application to the non-destructive testing of masonry arch bridges, The University of Edinburgh. Doctor of Philosophy: 252.
- Ding, Y., Chung, Y. and Simonetti, O. P. 2007. Karhunen-Loève Transform Filter To Improve Signal To Noise Ratio in Dynamic Cardiac Imaging. *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.* 15.
- Doğan, M. 2010. Tekil Dönüşüm Matrisleri Üreten Blok Dalgacık Süzgeç Tasarımı. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir.
- Dony, R.D., 2001. Karhunen-Loève transform. *The Transform and Data Compression Handbook*. Ed. K. R. Rao and P.C. Yip. Boca Raton, CRC Press LLC.
- Dutta, P., Halder, A. and Bhattacharya, R. 2012. Uncertainty Quantification for Stochastic Nonlinear Systems using Perron-Frobenius Operator and Karhunen-Loève Expansion. *CCA – IEEE International Conference on Control and Applications*, IEEE Control Systems Society. Croatia. pp.1449-1454.
- Economou, N., Vafidis, A., Kritikakis, H. G., Androkidis, N. and Dimitriadis, K. 2012. Time-varying deconvolution of GPR data in civil engineering, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27:3, 285-292, DOI: 10.1080/10589759.2012.695787. 2012.
- Evans, S. 1963. Radio techniques for the measurement of ice thickness. *Polar Record* 11(73): 406-410.
- Feng, J., Su, Y., Li, C., Dai, S., Xing, S. and Xiao, Y. 2019. An imaging method for Chang'e-5 Lunar Regolith Penetrating Radar. *Planetary and Space Science* 167:9-16.
- Ghanem, G. R. 1991. *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*.
- Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C. 2016. A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(1): 37-51.
- Grandjean, G. and Gourry, J.C. 1999. GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece). *Journal of Applied Geophysics* 36, 19–30.

- Green, A., Gross, R., Holliger, K., Horstmeyer, H. and Baldwin, J. 2003. Results of 3D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit. *Tectonophysics*, 368, 7–23.
- Grégoire, C., Halleux, L. and Vervoort, A. 2003. Application Of Ground Penetrating Radar in A Mining Environment. in *Mining and Mineral Processing*, Sofia, p. 179-183.
- Habets, E. A. P., Chen, J. and Benesty J. 2014. Multichannel Noise Reduction in the Karhunen-Loève Expansion Domain. *Ieee/Acm Transactions On Audio, Speech, And Language Processing*, Vol. 22, No. 5.
- Hammon III, W. S., McMechan, G. A. and Zeng, X. 2000. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 171-186.
- Hamran, S.-E., Berger, T., Brovoll, S., Damsgård, L., Hellenen, Ø., Øyan, M. J., Amundsen, H. E., Carter, L., Ghent, R. and Kohler, J. 2015. RIMFAX: A GPR for the Mars 2020 rover mission. 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), IEEE.
- Harrari, Z. 1996. Ground penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 43-52.
- Hemon, C. H. and Mace, D. 1978. The use of the Karhunen-Loève transformation in seismic data processing: *Geophys. Prosp.*, 26, 600–626.
- Hua, Y. and Liu W. 1998. Generalized Karhunen–Loève Transform. *Ieee Signal Processing Letters*, Vol. 5, No. 6. 1070–9908.
- Hulsbeck 1926. German Pat. No. 489434.
- Hulsmeyer, C. 1904. German Patent Number 165546.
- Hülscnbek, P. V. 1926. German Patent Number 489434.
- Jol, H. M. 2009. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Amsterdam. London. Elsevier Science.
- Jones, I. F. and Levy, S. 1987. Signal-to-Noise Ratio Enhancement in Multichannel Seismic Data Via The Karhunen-Loeve Transform. *Geophysical Prospecting*, Volume 35, 12-32.
- Jorgensen, P. 2007. Hilbert Uzayı ve Karhunen – Loève Dönüşümleri Karhunen-Loève Teoremi. *Matematiksel Fizik Dergisi*.

- Kadıoğlu, S. ve Kadıoğlu, Y. K. 2006. Yer radarı yöntemi ile bir mermer sahasındaki kırıkların, sağlam ve bozuk alanların belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1-2), 127-135.
- Kadıoğlu, S. 2004. Yer radarı (GPR) yöntemi . Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Ders Notları.
- Kadıoğlu, S. 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization. Journal of Applied Geophysics, (64), 109-114.
- Kadıoğlu, S. 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D Yer Radarı visualisation. Journal of Applied Geophysics.
- Kadıoğlu, S. and Daniels, J. J. 2008. 3D visualization of integrated ground penetrating radar data and EM-61 data to determine buried objects and their characteristics, Journal of Geophysics and Engineering, 5, 448-456.
- Kadıoğlu, S., Kadıoğlu, Y.K. and Akyol, A.A. 2008. Geoarcheological research of the mid-Age Ilyasbey Complex buildings with ground penetrating radar in Miletus, Aydin, Western Anotolia, Turkey, Donald Harrington Symposium on the Geology of the Aegean, 28–30 April 2008, University of Texas at Austin, Jackson School of Geosciences, USA, B C Burchfiel 2008 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2, published online.
- Kadıoğlu, S., Ulugergerli, E. U. and Daniels, J.J. 2006. 3D visualization to map cavities by GPR method: Dalaman Akkopru dam reservoir area, Muğla, Southwest Turkey. Proceedings of the 11 th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus- Ohio, USA, CD paper No.156_dnj.
- Kadıoğlu, S. ve Demirci, B. 2012. Yapı Denetim Sektöründe Yer Radarı Yöntemi. Jeofizik Bülteni, 31-40.
- Kadıoğlu, S., ve Çorumluoğlu, E. 2019. Yer Radarı Yöntemi ile kuru kum ortamında gömülü ince hava - yağ ve su tabakalarının belirlenmesi: laboratuvar testi. VI. International Earthquake Symposium. Kocaeli.
- Kadıoğlu, S. 2010. Definition of buried archaeological remains with a new 3D visualization technique of a ground-penetrating radar data set in Temple Augustus in Ankara, Turkey, Near Surface Geophysics, 2010, 8, 397-406.
- Kadıoğlu, S. 2018. "GPR data visualization enhancement by deconvolution and some image attributes". 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), IEEE Xplore. DOI: 10.1109/TSP.2018.8441427, INSPEC Accession Number: 18055027, 23 August 2018.
- Kadıoğlu, S. 2018. Research of the sea-filled airport OGU in the Black Sea, Turkey, using ground penetrating radar method, Construction and Building Materials, Special

Issue on Ground-Penetrating Radar and Complementary Non-Destructive Testing Techniques in Civil Engineering, Vol 158. 1123-1133. Ocak 2018.

Kadioglu, S., Kadioglu, M., Kadioglu, Y. K. 2013. Identifying of buried archaeological remains with ground penetrating radar, polarized microscope and confocal Raman spectroscopy methods in ancient city of Nysa, Aydin - Turkey, Journal of Archaeological Science, 40, 3569-3583.

Kadioglu, S., Kadioglu, Y.K. 2016. Visualization of Buried Anti-Tank Landmines and Soil Pollution: Analyses using Ground Penetrating Radar Method with Attributes and Petrographical Methods, Near Surface Geophysics, Special Issue on Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, DOI: 10.3997/1873-0604.2016010, Vol 14, No 2, April 2016, 183 – 195.

Kadioglu, S., Kadioglu, Y.K. and Akyol, A.A., 2011. Monitoring Buried Remains with Transparent 3D Half Bird's Eye View of Ground Penetrating Radar Data in the Zeynel Bey Tomb in the Ancient City of Hasankeyf - Turkey, Journal of Geophysics and Engineering, Special Issue on Cultural Heritage, Vol. 8, S61-S75.

Kadioglu, S., Kadioglu, Y. K., Catapano, I. and Soldovieri, F. (2013). Ground penetrating radar and microwave tomography for the safety management of a cultural heritage site: Miletos Ilyas Bey Mosque (Turkey). Journal of Geophysics and Engineering 10(6): 11.

Kaplanvural, İ. 2018. Yer Radarı Verilerinin Ters Çözümü ile Gömülü Boru Özelliklerinin Belirlenmesi. Kocaeli. Kocaeli Üniversitesi. Doktora.
Kaplanvural, İ., Pekşen, E. and Özkap, K. 2018. Volumetric water content estimation of C-30 concrete using GPR. Construction and Building Materials 166:141-146.

Kaplanvural, İ. 2018. Yer Radarı Verilerinin Ters Çözümü ile Gömülü Boru Özelliklerinin Belirlenmesi. Kocaeli, Kocaeli Üniversitesi. Doktora.

Karlı, H. 2007. Yerel Dalga Alanı Ayırıştırma Sayesinde Ground Roll Gürültüsünün Süzülmesi. International Earthquake Symposium. Kocaeli.

Karlı, H. 2017. Öz değer analizi ve Karhunen-Loève (K-L) dönüşümü (eigenvalue analysis and Karhunen-Loève transform).

Kasina, Z. 2010. The Analysis Of The Effectiveness Of The Seismic Noise Attenuation By Means Of Karhunen–Loève (K-L) Transform. Geologia. 203–221.

Khan, U. S., Al-Nuaimy, W. 2009. Background Removal from GPR Data Using Eigenvalues. Department of Electrical Engineering and Electronics University of Liverpool. IEEE. 978-1-4244-4605-6.

- Kim, J. H., Cho, S. J., Yi, M. J. 2007. Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. Engineering Geophysics Group, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Geosciences Journal. Vol. 11, No. 1, p. 75 – 81.
- Knödel, E., Krummel, M. and Lanke, J. 1997. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altasten/BGR Bd.3 Geophysik Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Koçaslan, A. 2008. Sonlu farklar yöntemi ile çok yüksek frekanslı em dalga alanı hesabı. Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği.
- Koralay, T., Kadioğlu, S. and Kadioğlu, Y. K. 2007. A New Approximation in determination of zonation boundaries of ignimbrite by ground penetrating radar: Kayseri, Central Anatolia, Turkey. Environmental Geology, 52(7), 1387-1397.
- Kurt, B. B. 2009. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi İle İki Boyutlu Yer Radarı. Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Kurt, B. B., Kadioğlu, S., Ekincioğlu, E. E. 2008. Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, büyüklük ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi. Yerbilimleri, 30 (1), 45–57.
- Kurt, B.B., Kadioğlu, S., Ekincioğlu, E. E. 2009. Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, büyüklük ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi. 30 (1), 45–57.
- Leandro, C. G., Barboza, E. G., Caron, F. and de Jesus, F. A. 2019. GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. Journal of Applied Geophysics 162: 1-12.
- Lerner, R. M. 1974. Ground radar system. Massachusetts Institute of Technology, United States Patent Number 3831173.
- Levy, A. and Lindenbaum, M., 1998. Sequential Karhunen-Loève basis extraction and its application to images. IEEE, 456-460.
- Liu, X. 1999. Ground roll suppression using the Karhunen-Loève transform, Geophysics. 64, 564.
- Londoño, E. G. López, L. C. And Kazmierczak, T. S. 2005. Using The Karhunen-Loève Transform To Suppress Ground Roll In Seismic Data. Earth Sciences Research Journal. Vol. 9, No. 2. 139-147.
- Lowy, H. 1911. German Patent Number 254517.
- Math Works, I. 1992. MATLAB reference guide, Math Works, Incorporated.

- Mellet, J. S. 1995. Ground penetrating radar applications in engineering.
- Montagne, R. and Giovani L. Vasconcelos, 2006. Optimized suppression of coherent noise from seismic data using the Karhunen-Loève transform. PS/0507022.
- Moorman, B. J. 2001. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. In W. M. Last & J. P. Smol, (Eds.). Tracking environmental change using lake sediments 23-47. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Morey, R. M. 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar. Proc. Engineering Foundation Conf.
- Nabighan, M.N. 1998. Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. 1, Theory, Tulsa.
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, Earth Science, 66, 261-330, 2004.
- Núñez-Nieto, X., Solla, M., Gómez-Pérez, P. and Lorenzo, H. 2014. GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques. Remote sensing 6(10): 9729-9748.
- Orlando, L. and Renzi, B. 2013. Time-lapse monitoring of DNAPL in a controlled cell. Near Surface Geophysics 11(2): 129-142.
- Özkap, K. 2019. 3B Yer Radarı Modellemesi ve Veri Yorumu. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Kocaeli.
- Rabbal, W., Erkul, E., Stumpel, H., Wunderlich, T., Pasteka, R., Papco, J., Niewohner, P., Baris, S., Cakin, O. and Peksen, E. 2015. Discovery of a Byzantine Church in Iznik/Nicaea, Turkey: an Educational Case History of Geophysical Prospecting with Combined Methods in Urban Areas. Archaeological Prospection 22(1): 1-20.
- Rathod, H., Debeck, S., Gupta, R. and Chow, B. 2019. Applicability of GPR and a rebar detector to obtain rebar information of existing concrete structures. Case Studies in Construction Materials 11.
- Reflexw. 1996. Reflexw reference guide.
- Reynolds, J. M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Roe, K. and Ellerbruch, D. 1979. Development and testing of a microwave system to measure coal layer thickness up to 25 cm, National Bureau of Standards, Boulder, CO (USA). Electromagnetic Fields Div.

- Sambuelli, L., Socco, L.V. and Brecciaroli, L. 1999. Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella). *Journal Applied Geophysics* 41,189–204.
- Sandmeier, K. 2014. *Software For The Processing Of Seismic Acoustic Or Electromagnetic Reflection,Refraction And Transmission Data*.
- Sandmeier, K.J. 2005. *ReflexW Manual ver. 3.5*. Sandmeier Scientific Software. Karlsruhe. Germany.
- Schotsmans, E. M. J., Fletcher, J. N., Denton, J., Janaway, R. C. and Wilson, A. S. 2014. Long-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Field experiments. *Forensic Science International* 238: 13.
- Sezer, H. 2010. *Yer Radarı Yöntemi ile Zonguldak Demiryolu Tünelinin Duraylılığının Ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Skolnik, M. I. 1981. *Introduction to radar systems*. New York., McGraw-Hill.
- Stenson, B. O. 1951. *Radar methods for the exploration of glaciers*, Pasadena, California. Pasadena, California: California Institute of Technology.
- Stenson, B. O. 1951. *Radar methods for the exploration of glaciers*, California Institute of Technology.
- Stern, W. 1930. Principles, methods and results of electrodynamic thickness measurement of glacier ice. *Zeitschrift fur Gletscherkunde*, 18-24.
- Taflove, A., and Hagness, S. C. 2005. *Computational electrodynamics: the finitedifference time-domain method (3rd ed.)*. London: Artech House Publishers.
- Theirbach, R. 1973. Electromagnetic Reflections in Salt Deposits. *Journal of Geophysics*, 40, 633-637.
- Tzanis, A. and Kafetsis, G., 2004. A freeware package for the analysis and interpretation of common-offset Ground Probing Radar data, based on general purpose computing engines, *Bulletin Geol. Soc. Greece*, vol. 36, No 3, 1347-1354. Get online reprint.
- Tzanis, A., 2006. MATGPR: A freeware MATLAB package for the analysis of common-offset GPR data, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 09488, 2006. View online abstract.

- Tzanis, A., 2010. matGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data, *FastTimes*, 15 (1), 17 – 43.
- Unterberger, R. 1979. Radar and sonar probing of salt. The Northern Geological Society.
- Van Der Kruk, J. 2006. Three-Dimensional Imaging of Multi-Component Ground Penetrating Radar Data. Elektrotechnisch Ingenieur Geboren te Monster.
- Wang, Z., Zeng, Z., Xu, E J. 2005. The Application of KL Transform to Remove Horizontal Coherent Noise in GPR. *Record. Journal of JiLin University*, 35, 124-128.
- Weeds, R.D. (Ed.), 1994. Geophysical Characterization of Sites. Rotterdam, A.A. Balkema, 69-79.
- Works, M. 2018. MATLAB reference guide. Incorporated.
- Xie, X., Zeng, C. and Wang Z. 2013. GPR signal enhancement using band-pass and K–L filtering: a case study for the evaluation of grout in a shielded tunnel. *Journal Of Geophysics And Engineering*. Sinopec Geophysical Research Institute. 1742-2132.
- Yedlin, M. J., Jones, I. F. And Narod, B. B. 1987. Application of the Karhunen- Loève Transform to Diffraction Separation. *Ieee Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing*, Vol. Assp-35, No. 1.
- Yee, K. S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 43, 1460-1463.
- Yılmaz, O. 2001. Seismic Data Analysis, “Investigations in Geophysics, SEG, Volume 1, 159-270. www.xsgeo.com/course/decon.htmB.
- Zeng, X. and McMechan, G. A. 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics* 62(3): 797-806.
- Zhao, A., Jiang, Y. And Wang, W. 2005. Signal-to-noise Ratio Enhancement in Multichannel GPR Data via the Karhunen- Loève Transform. *Progress In Electromagnetics Research Symposium*. China, August 22-26.
- Zhihua, H. and Minghui, W. 2007. The Application of KL Transform to Remove Direct Wave in Ground Penetrating Radar Records. *Fourth International Conference on Image and Graphics*. IEEE. 0-7695-2929-1/07.