KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

YERALTINDA GÖMÜLÜ CİSİMLERİN FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADARI TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

EBRU EFEOĞLU

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

YERALTINDA GÖMÜLÜ CİSİMLERİN FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADARI TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

EBRU EFEOĞLU

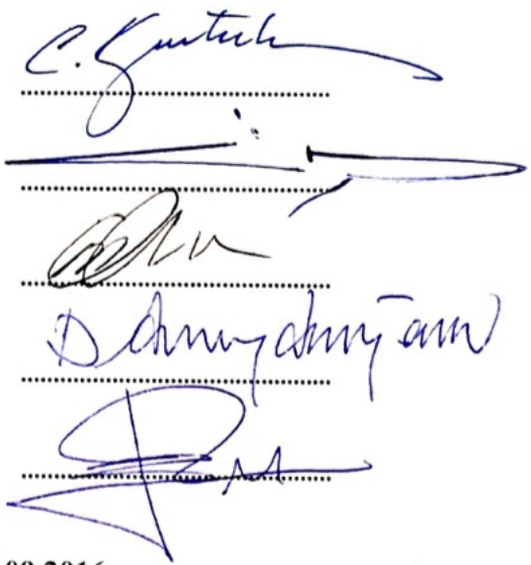
Prof.Dr. Cengiz KURTULUŞ
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Ömer Feyzi GÜRER
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Mehtap Mücella CANBAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Davut AYDOĞAN
Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.

Doç.Dr. Hüseyin TUR
Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 29.09.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamdaki araştırmalarımda bana her türlü olanağı sağlayan, bilgi ve önerileri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ' a, görüş ve önerileri ile tezin son şeklini almasını sağlayan değerli tez jüri üyelerim Prof. Dr. Davut Aydoğan'a, Prof. Dr. Feyzi Gürer'e Doç. Dr. Hüseyin Tur'a ve Doç Dr. M. Mücella Canbay'a teşekkür ederim.

Bu konuda çalışmam için beni bilgilendirip yönlendiren ve destekleyen hocam Prof. Dr. Bahattin TÜRETKEN'e, tez çalışmam sırasında benden yardımlarını esirgemeyen, bilgilerini benimle paylaşan, bana yol gösteren ve laboratuvarda çalışma imkanı sunan değerli hocam TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Milimetre Dalga ve Terahertz Teknolojileri Laboratuarları (MİLTAL) yöneticisi Baş uzman Araştırmacı Dr. İlhami ÜNAL' a, ölçüm sisteminin kurulması, verilerin toplanması, işlenmesi ve değerlendirilmesi konusunda yardımları için değerli arkadaşım Mustafa TEKBAŞ ve Ahmet KIZILHAN' a, deney setinin montajı ve deney çalışmalarının yapılabilmesi için gerekli malzeme temini için teknisyen Sertan SUVARİ ve Mustafa KILIÇ'a ve tezin bitmesi için beni teşvik eden tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, deney çalışmalarının yapıldığı TÜBİTAK MALZEME ENSTİTÜSÜ MİLTAL Laboratuvarına ve bu tez çalışmasını 2015/019 proje koduyla destekleyen Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme (BAP) birimine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ekim – 2016 Ebru EFEOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ v
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. ELEKTROMANYETİK VE FOURİER TRASNFORM KAVRAMLARI 6
1.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar 6
1.1.1. Maxwell denklemleri 7
1.1.2. Elektromanyetik dalgalar 9
1.1.3. Dalga denklemi 10
1.1.4. Genel düzlemsel dalga 12
1.2. Fourier Dönüşümü 13
1.2.1. Sürekli Fourier dönüşümü 13
1.2.2. Ayrık Fourier dönüşümü 13
1.2.3. DFT parametrelerinin hesaplanması 14
2. FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADAR (FASDR) ALGORİTMALARI 15
2.1. Frekans Adımlı Sürekli Dalga Radar (FASDR) Kullanarak AFD ve TAFD Gerçekleştirme 17
2.2. Radar Derinlik Profili 18
2.2.1. Bir boyutlu derinlik profili 18
2.2.2. İki boyutlu radargramlarda derinlik profili ve hiperbollar 19
3. MATERYAL VE METOT 21
3.1. Kullanılan Materyal 21
3.1.1. Vektör network alizör (VNA) ve s parametresi 22
3.1.2. Kullanılan antenler 25
2.1.3. Düzlemsel tarayıcı 27
2.1.4. Bilgisayar 27
2.1.5. Kum havuzu 27
2.1.6. Kullanılan (Gömülen) malzemeler 28
2.1.7. Kullanılan yazılımlar 28
3.2. Kullanılan Metot 29
3.2.1. Radargram oluşturma algoritması 29
3.2.2. Yapay açıklıklı radar bazlı göç (odaklama) algoritması 31
3.2.3. Kullanılan algoritmaların test edilmesi ve diğer algoritmalar ile karşılaştırılması 36
4. DENEY ÇALIŞMALARI 37
4.1. Ölçüm Parametrelerinin Belirlenmesi 37
4.1.1. Frekans ve bant genişliği seçimi 37
4.1.2. Frekans adım sayısının belirlenmesi 43

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 74
KAYNAKLAR 77
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 78
ÖZGEÇMİŞ 80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik dalganın E ve H bileşenleri 7
Şekil 1.2. Frekans ve dalga boyu arasındaki ilişki 7
Şekil 1.3. Frekans Spektrumu 8
Şekil 2.1. FASDR daki frekans adımlarının temsili gösterimi 13
Şekil 2.2. Profil ölçüsü geometrisi ve 2B radargram görüntüsü 16
Şekil 3.1. Deney düzeneği 18
Şekil 3.2. Ölçümlerde kullanılan Vektör Network Analizör (VNA) 19
Şekil 3.3. İki portlu bir devrenin s-parametrelerinin belirlenmesi 19
Şekil 3.4. İki portlu bir lineer derecede gelen ve yansıyan dalgalar ile S parametreleri 21
Şekil 3.5. S-Parametrelerinin farklı tanımları 22
Şekil 3.6. Ölçümlerde kullanılan a) Alıcı anten b) Verici anten 23
Şekil 3.7. a) Kum içine batırılan proplar b) Kapasitans ölçer 25
Şekil 3.8. a) Kullanılan CST programı ile oluşturulan yeraltı modeli
Şekil 3.9. Profil ölçüm geometrisi 27
Şekil 3.10. a) Yeraltında bulunan 2 adet noktasal hedef b) 1-B FT sonrası elde edilen radargram görüntüsü 28
Şekil 3.11. a) CST programı ile elde edilen derinlik kesiti b) CST programından elde edilen kesite göç uygulanmış görüntüsü 32
Şekil 3.12. a)Yapay veri b)YAR bazlı göç algoritması b)F-K c) K-M
Şekil 4.1. Gömülü cisimlerin a) b) Kum havuzundaki şematik görüntüsü 35
Şekil 4.2. Bant genişliği 1Ghz a) 2-3Ghz b) 3-4Ghzc) 4-5Ghz d) 5-6Ghz e) 6-7Ghz 36
Şekil 4.3. Bant genişliği 2Ghz a)2-4Ghz b)3-5Ghzc)4-6Ghz d)5-7Ghz 37
Şekil 4.4. Bant genişliği 3Ghz a) 2-5Ghz b) 3-6Ghzc) 4-7Ghz 37
Şekil 4.5. Bant genişliği 4Ghz a) 2-6Ghz b) 3-7Ghz 37
Şekil 4.6. Bant genişliği 5Ghz frekans : 2-7Ghz 37
Şekil 4.7. a) Gömülü mermer b) Kum havuzundaki şematik görüntüsü 38
Şekil 4.8. Bant genişliği 1Ghz a) 2-3Ghz b) 3-4Ghzc) 4-5Ghz d) 5-6Ghz e) 6-7Ghz 38
Şekil 4.9. Bant genişliği 2Ghz a) 2-4Ghz b) 3-5Ghzc) 4-6Ghz d) 5-7Ghz 39
Şekil 4.10. Bant genişliği 3Ghz a) 2-5Ghz b) 3-6Ghzc) 4-7Ghz 39
Şekil 4.11. Bant genişliği 4Ghz a) 2-6Ghz b) 3-7Ghz 40
Şekil 4.12. Bant genişliği 5Ghz frekans : 2-7Ghz 40
Şekil 4.13. Mermerin şekli b) Havuzdaki şematik görüntüsü c) 2-7 GHZ frekans bandındaki kesiti d) 34 adım 41
Şekil 4.14. a) Metal daire (çap: 5) b) Metal dairenin kum havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 42
Şekil 4.15. a) Gömülü metal cisimlerin b) Metal cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 43
Şekil 4.16. a) Gömülü metal kupa(eni: 10cm) b) Metal kupanın kum

Havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 43
Şekil 4.17. a) Metal borunun (çap:7cm) b) Metal borunun havuzdaki
Konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 44
Şekil 4.18. a) Metal borunun (çap: 5cm) b) Metal borunun havuzdaki
konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik
kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 45
Şekil 4.19. a) İkili metal boruların (çaplar:7cm ve 5cm) b) Metal borunun
havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 46
Şekil 4.20. a)Üçlü metal boruların (çaplar:7,5,4.5) b)Metal boruların
havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c)Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 47
Şekil 4.21. a) Su damacanası b) Su damacanasının kum havuzundaki
konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d)Derinlik
kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 48
Şekil 4.22. a) Su dolu pet şişelerin b) Su dolu pet şişelerin havuzdaki
konumlarının şematik görüntüsü c)Derinlik kesiti d)Derinlik
kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 49
Şekil 4.23. a)Plastik boru (çap:4,5) b) Plastik borunun havuzdaki
konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 50
Şekil 4.24. a) Üçlü plastik boruların (çaplar:7, 4, 4.5cm) b)Üçlü plastik
boruların havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü
c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki
görüntüsü..... 51
Şekil 4.25. a) Metal ve plastik borunun (çap:5,4.5cm) b) Metal ve plastik
borunun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü
c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç sonrasındaki görüntüsü 52
Şekil 4.26. a) Kablo(kalınlı b) Kablonun havuzdaki konumlarının şematik
görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden
sonraki görüntüsü..... 53
Şekil 4.27. a) Pillerin b) Pillerin borunun havuzdaki konumlarının
şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d)Derinlik kesitinin
göç işleminden sonraki görüntüsü..... 54
Şekil 4.28. a)Çökel modeli (ıslak kum) b) ıslak kumun havuzdaki
konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 55
Şekil 4.29. a)Mermer b)Mermerin havuzdaki konumlarının şematik
görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç
işleminden sonraki görüntüsü 56
Şekil 4.30. a) Fay modeli (mermer) b) Mermerlerin havuzdaki
konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 57
Şekil 4.31. a) Kolon kiriş modeli (mermer) b) Kolon kiriş modeli (mermer)
havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 58
Şekil 4.32. a) Sütun modeli (mermer) b) Mermerlerin havuzdaki

konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 59
Şekil 4.33. a) Mezar odası modeli (mermer) b) Mezar odasının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 60
Şekil 4.34. a) Gömülen farklı cisimlerin b) Cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntü..... 61
Şekil 4.35. a) Kalın seramik yapı (kalınlık:16cm) b)Seramiğin havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 62
Şekil 4.36. a) Üçlü seramik yapı (kalınlıklar:1,6cm) b) Seramiklerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 63
Şekil 4.37. a)Yüzey alanı azaltılmış üçlü seramik yapı (kalınlıklar: 3cm) b) Seramiğin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü
c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 64
Şekil 4.38. a) Seramik bardak (çapcm) 7 b) Bardağın havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 65
Şekil 4.39. a) Karmaşık yeraltı modeli (mermer+seramik) b) Cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü b) Cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti
d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 66
Şekil 4.40. a) Çini b) Çininin havuzdaki konumunun şematik görüntüsü
c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 67
Şekil 4.41. a) Çömlek kapağı b) Çömlek kapağının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü 68
Şekil 4.42. a) Ateş tuğlası b) Ateş tuğlasının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 69
Şekil 4.43. a) Kaldırım taşı b) Kaldırım taşının havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü..... 70
Şekil 4.44. a)U şeklindeki yapının b) Yapının havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) P1 profilinden elde edilen derinlik kesiti
d) P1profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali e) P2 profilinden elde edilen derinlik kesiti f) P2profil kesitine göç işlemi uygulanmış görüntüsü 71
Şekil 4.45. a)Yapı modeli b) Şematik çizimi c) P1 profilinden elde edilen Derinlik kesiti d)P1profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali
e) P2 profilinden elde edilen derinlik kesiti f) P2profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali g) P3 profilinden elde edilen derinlik kesiti h) P3profil kesitine göç işlemi uygulanmış görüntüsü..... 72

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Teorik eğri üretilirken kullanılan parametreler 33
Tablo 3.2. Göç algoritmalarının karşılaştırılması 33
Tablo 4.1. Ölçüm Parametreleri 41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	:	Manyetik akı yoğunluğu
D	:	Elektrik akı yoğunluğu (C/m^2)
E	:	Elektrik alan şiddeti (V/m)
f_0	:	Başlangıç frekansı frekansı, (GHz)
H	:	Manyetik Alan Şiddeti (A/m)
J	:	Elektrik Akım Yoğunluğu (A/m^2)
k	:	Dalga numarası
ε	:	Dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik (F/m)
ρ	:	Elektrik yük yoğunluğu (C/m^3)
μ	:	Manyetik geçirgenlik (H/m)
σ	:	Ortamın iletkenliği (S/m)

Kısaltmalar

AFD	:	Ayrık Fourier Dönüşümü
FASDR	:	Frekans Adımlı Sürekli Dalga Radar
FD	:	Fourier Dönüşümü
TAFD	:	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
TFD	:	Ters Fourier Dönüşümü
VNA	:	Vektör Network Analizör
YAR	:	Yapay Açıklıklı Radar

YERALTINDA GÖMÜLÜ CİSİMLERİN FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADARI TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Yer içine gönderilen elektromanyetik dalgalar yeraltındaki gömülü cisimlerden yansırlar. Yansıyan dalgalar çeşitli algoritmaların kullanımı ile analiz edilmektedir. Uygulanan bu algoritmalar neticesinde cisimlerin konum ve derinlik bilgisine ulaşılabilir. Bu çalışmada Frekans Adımlı Sürekli Dalga Tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte hasarsız bir şekilde geniş frekans bandında elektromanyetik dalgalar yere verilir ve yeraltından yansıyan sinyaller algılanır. Çalışmanın amacı; Frekans Adımlı Sürekli Dalga tekniğinin sığ jeofizik araştırmalarda kullanılabilirliğini test etmek ve yüksek çözünürlükte radargram görüntüleri elde etmektir. Çalışmada öncelikle uygun frekans anten seçimi, bant genişliği, frekans adım sayısı gibi ölçüm parametreleri belirlenmiş ve daha sonra deney çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde kum havuzuna çeşitli derinliklerde nesneler gömülmüş ve Frekans Adımlı Sürekli Dalga Tekniği kullanılarak ölçümler alınmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarından 2 boyutlu radargram görüntüleri oluşturulmuş ve radargramlara uygulanan göç algoritması ile de gömülü cisimlerin gerçek konumları belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucundan bu tekniğin uygun frekans band aralığı ve uygun anten türünün seçilmesi durumunda sığ jeofizik araştırmalarda başarılı bir şekilde kullanılacağı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik, Frekans Adımlı Sürekli Dalga Radar, Göç

BURIED OBJECT INVESTIGATION WITH STEPPED FREQUENCY CONTINIOUS WAVE RADAR

ABSTRACT

Electromagnetic waves which are sent through underground are reflected by buried objects. The reflected waves can be analyzed by using some mathematical computations based on various algorithms. The position and depth information can be obtained by using these algorithms. The Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) technique was used in this study. This method is a nondestructive measurement technique which emits electromagnetic (EM) waves through a wideband antenna and collects signals reflected from a buried object or earth material. The aim of the study is to test the usefulness of the method at shallow geophysical survey and is to obtain high-resolution radargram. At first, frequency bandwidth and antenna type, frequency step interval were selected in the study after that the experiment were performed. Various objects were buried inside the sand pool and data were collected using SFCW technique at experiments. 2D dimensions of radargram images were performed from the results of measurements and the real positions of the buried objects were determined by using migration algorithm applied for radargrams. This method has been given very goog solutions in geophysical explorations in case of selecting suitable frequency band interval and type of antennas.

Key words: Electomagnetic, Stepped Fequency Continous Wave Radar, Migration.

GİRİŞ

Gerek geçmişte yaşamış uygarlıklara duyulan merak nedeniyle bu uygarlıkların arkalarında bıraktıkları mezarlar yollar gibi yapıları tespit ederek o zamanda yaşayan toplumların yaşayış şekilleri inançları hakkında bilgi toplamak, gerekse günümüz koşulları nedeniyle şehir alt yapı planlamasında gömülü cisimlerin ve yeraltı yapılarının araştırılmasına her zaman ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla günümüze kadar birçok jeofizik arama yöntemi geliştirilmiştir. Toprağın altındaki metal cisimlerin belirlenmesinde elektromanyetik sinyallerin kullanılması ilk olarak (Hülsmeyer1904) tarafından yapılmıştır. Fakat gömülü cisimlerin yerini belirlemek için yapılan ilk tanımlama (Löwy 1911) tarafından yazılan bir Alman patentte görülmüştür. Çalışmada kullanılan teknik, dikey olarak toprağa gömülmüş iki boru üzerinde dizi şeklinde açılmış deliklere yerleştirilmiş dipol antenler ve bunların verici ve alıcı olarak kullanılmasıyla alınan sinyalin büyüklüğünün karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yolla iki dizi arasında kalan ve iletkenliği onu çevreleyen ortamın iletkenliğinden daha yüksek olan her hangi bir bölgenin işlenmemiş görüntüsü oluşturulabilmiştir. Bu çalışmayla iletkenlikle ilişkili olmaksızın dielektrik süreksizliklerin de yansıma yarattığı ortaya konmuştur.

Gömülü cisimlerin yapısını belirlemek için darbe tekniğinin kullanımı ilk kez (Hülsenbeck 1926) tarafından da yazılan bir patentte ortaya konmuştur. Bu çalışmayla iletkenlikle ilişkili olmaksızın dielektrik süreksizliklerin de yansıma yarattığı ortaya konmuş böylece sismik yöntemlere göre avantajlarının olduğu belirtilmiştir. 1930 ‘lar dan sonra buz içinde, saf suda, tuz yataklarında, çöl kumunda vb. birçok ortamda darbe tekniği GPR’la uygulanmıştır. Son yıllarda darbe tekniği radar 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; Kadıoğlu, 2008), karstik boşluklarının aranmasında (Kadıoğlu vd., 2006)

(Changryol vd., 2000) kullanılmaktadır. Bununla birlikte, arkeolojik çalışmalarda tapınak, mezar, duvar, temel ve benzeri tarihi kalıntıların bulunmasında (Sambuelli, vd., 1999; Daniels, 2000; Kadıoğlu vd., 2008), metalik cisim arama çalışmalarında, yeraltında gömülü boru, boru hattı, su veya akaryakıt tankı ve eski endüstriyel atık alanlarının belirlenmesinde (Kadıoğlu ve Daniels, 2008), zemin ve tünel araştırmalarında karayolu, demiryolu, su tünelleri, tüp geçitler, maden galerileri içinde duvar cephelerinin sağlamlıklarının belirlenmesinde, galeri içinde bozunmuş bölge ve cevher aramalarında, galeri ilerleme yönü belirlemelerinde (Cardelli vd., 2003) ve yeraltındaki insan kalıntılarını aramada (Hammon III vd., 2000) kullanılmaktadır. Frekans adımlı sürekli dalga radar, temel olarak yüzey altı nesnelerini algılamada ve görüntülemede kullanılan önemli bir uzaktan algılama teknolojisi olarak açıklanabilir (Peters, 1994; Daniels, 2004). Tipik bir radar sisteminde; radar anteni yer yüzeyi üzerinde toprağa doğru bakar ve bir profil boyunca hareket ettirilerek, yerin ve yeraltındaki nesnelerden yansıyan elektromagnetik (EM) sinyalleri toplar (Vıtebskıy, 1997; Chen, 2005). Oluşturulan radargram görüntüsü, gömülü nesnenin uzamsal pozisyonu ve EM yansıtırlığı bilgisini içerir. Verici anten sinyal verip alıcı antenin sinyali aldığı sistemde, radar bir profil boyunca hareket ederken tek bir noktasal saçıcı, uzay-zaman radargram görüntüsünde bir hiperbol olarak gözlenir. Jeofizik araştırmalarda amaç sadece nesneyi algılamak değildir. Gömülü cismin gerçek konumu uzanımı hakkında bilgi edinilmesi gerekir. Bu parametrelerin kazı öncesinden bilinmesi ile kazı maliyetinin düşürülmesi, bilinçsiz kazı sonucu oluşacak zaman kaybının önüne geçilmesi ve kazı sırasında gömülü cismin görebileceği olası hasarların da en aza indirilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle bu tip bir görüntü oluşumu yeterli olmayacaktır. Bu durumda, uzay-zaman radar görüntüsündeki hiperbolik karakteristiğin, nesnenin yansıtırlığı ile birlikte gerçek konumunu veren bir görüntüye ulaşılması gerekmektedir. Uzay-zaman radar görüntüsündeki hiperbolik etkiyi gidermek ve cisimlerin gerçek konum bilgisine ulaşılması için birçok göç ettirme algoritmaları çalışılmıştır. Claerbout (Claerbout, 1972), skaler dalga-denkleminin sonlu-farklar çözümünü kullanarak bir sonlu-farklar göç ettirme tekniği geliştirmiştir. Gazdag (Gazdag, 1978), sismik / radar görüntülerini iteratif olarak odaklamak üzere dalga sayısı göç ettirmeye dayalı bir faz-kayması göç ettirme tekniği uygulamıştır. Stolt (Stolt, 1978), dalga denkleminin Fourier dönüşümlerini kullanarak daha farklı bir göç ettirme tekniği

geliştirmiştir. Leuschen (Leuschen, 2001) ise, bu probleminin çözümünde, sonlu-farklar zaman-düzlemi (FDTD) ters-zaman göç ettirme algoritmalarına dayanan geri-yayılım teknikleri gerçekleştirmiştir. Bütün bu teknikler, yüksek çözünürlüklü radargram görüntüleri elde etmede başarı gösterseler de, yineleyici özelliklerinden kaynaklanan ağır hesaplama yüklerine sahiptirler. Bu metotların çoğunda, görüntü kalitesi açısından iyi bir derinlik çözünürlüğü sağlanabilirken, iyi bir yatay çözünürlük sağlanamamaktadır (Zoubır, 2002; Bradley, 2000)., Radar antenlerinin yüzey üzerinde tarama yaparken, antenler ve nesne arasındaki uzaklığın sürekli değişmesi yatay eksende hiperbolik bozulma oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum radargram görüntülerinin yatay çözünürlük azlığına neden olmaktadır. (Kepmen, 2001; Kolba, 2003). Son yıllarda Radar araştırmalarında elde edilen gelişmeler bu yeni teknolojinin daha iyi çözünürlükte radargram görüntüleri sağlayabileceğini göstermiştir. Örneğin, Halman (Halman, 1998) zaman-domeninde dalga formları kullanarak geliştirmiş olduğu görüntüleme tekniğinde, yeraltına gömülü olan patlamamış askeri mühimmatları görüntülemeye çalışmıştır. Benzer olarak Sullivan (Sullıvan, 2000) ve (Vitebskıy, 1997) kısa-süreli zaman sinyalleri ile UXO'ların ultra-geniş bant yapay açıklıklı radar görüntülerini elde etmişlerdir. Tüm bu çalışmalardaki radargram görüntülerinde, geniş bir frekans bant genişliği kullanılarak iyi bir derinlik çözünürlüğü elde edilmesine rağmen aynı kalitede yatay çözünürlük elde edilememiştir. Yatay çözünürlükte ortaya çıkan bu eksiklik, Hough Dönüşümünden (Fisher, 1992), geri-yayılım tekniğine (Fisher, 1992, Leuschen, 2001) kadar diğer radargram görüntüleme algoritmaları uygulayan farklı çalışmalarda da görülmüştür. Ayrıca, şu ana kadar kullanılan metotların hepsinin ortak diğer bir özelliği ise nümerik, iteratif yaklaşımları kullanmalarıdır. Bu yöntemlerin iteratif olmaları hız ve hafıza açısından yüksek seviyede bilgisayar kullanımı gerektirmektedir. Bu tezde kullanılan yüksek yatay çözünürlük sağlayan yapay açıklıklı radar bazlı radargram (YAR) oluşturma algoritması, iteratif olmadığından dolayı oldukça hızlı çalışmaktadır. Yüzey altında bulunan nesnelerin görüntülenmesi için deneysel uygulamaları Tübitak Malzeme Enstitüsü MİLTAL Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tezde önerilen radargram görüntüleme algoritmaları, sağladığı yüksek sinyal-gürültü-oranı sayesinde; sadece metal ve su ihtiva eden cisimleri değil, aynı zamanda dielektrik nesnelerinde iyi bir şekilde görüntülenmesini sağlamaktadır.

1.ELEKTROMANYETİK VE FOURİER TRASNFORM KAVRAMLARI

1.1.Temel Elektromanyetik Kavramlar

1.1.1. Maxwell denklemleri

Maxwell denklemleri uzayın herhangi bir noktasında ve zamanın herhangi bir anında elektrik ve manyetik alan değerlerini birbirine bağlar. Bu nedenle elektromanyetik dalgalar Maxwell denklemleriyle tanımlanırlar.

Faraday kanunu; Manyetik akının zamanla değişimi (ters yönde) elektrik alan oluşturur.

$$(\vec{\nabla}\mathrm{x}\vec{\mathrm{E}})(\mathrm{r},\mathrm{t}) = -\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\vec{\mathrm{B}}(\mathrm{r},\mathrm{t}) \tag{1.1}$$

Amper kanunu; Bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur ifadesini açıklar.

$$(\vec{\nabla}\mathrm{x}\,\vec{\mathrm{H}})(\mathrm{r},\mathrm{t}) = \vec{\mathrm{J}}(\mathrm{r},\mathrm{t}) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\vec{\mathrm{D}}(\mathrm{r},\mathrm{t}) \tag{1.2}$$

Gauss kanunu; Elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmektedir.

$$\overrightarrow{(\nabla.\vec{\mathrm{D}})}(\mathrm{r},\mathrm{t}) = \rho(\mathrm{r},\mathrm{t}) \tag{1.3}$$

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

$$(\vec{\nabla}.\vec{\mathrm{D}})(\mathrm{r},\mathrm{t}) = 0 \tag{1.4}$$

şeklinde verilir. Bu denklemlerde;

E; elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), H; manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), D; elektrik akı yoğunluğu vektörü (Coulomb/m2), B; manyetik akı yoğunluğu vektörü (Weber/m2=Tesla), J; akım yoğunluğu vektörü (A/m2), ρ; ise elektrik yük yoğunluğudur (A/m2) (Coul / m^3). Yukarıdaki denklemler yardımıyla süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilebilir,

$$(\vec{\nabla}.\vec{J})(r,t) = -\frac{\partial}{\partial t}\rho(r,t) \tag{1.5}$$

Ayrıca doğrusal bir ortamda, alan yoğunluğu akı yoğunlukları ile ilişkilendirilebilir.

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \tag{1.6}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \tag{1.7}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{1.8}$$

Burada ε dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik, μ manyetik geçirgenlik, σ ortamın iletkenliğidir. Hepsi birlikte bu 3 parametre μ, ε ve σ , ortamın elektromanyetik alana nasıl tepki vereceğini saptamaktadır. Eğer zaman-harmonik bağımlılığı varsayılırsa (e^{jwt}) Maxwell denklemleri, zaman harmonikleri cinsinden yazılabilir;

$$(\vec{\nabla}x\vec{E})(\vec{r},w) = -jw\vec{B}(r,w) \tag{1.9}$$

$$\nabla x\vec{H}(r,w) = \vec{J}(\vec{r},w) + jw\vec{D}(r,w) \tag{1.10}$$

$$\nabla.\vec{B}(\vec{r},w) = 0 \tag{1.11}$$

$$\nabla.\vec{D}\,(\vec{r},w) = \rho(\vec{r},w) \tag{1.12}$$

Süreklilik eşitliği de

$$\nabla.\vec{J}(r,w) = -jw\rho(\vec{r},w) \tag{1.13}$$

şeklinde yazılır. Eğer ortamın admittivitysi (Harrington, Roger F.,2001)

$$y = \sigma + jw\varepsilon \tag{1.14}$$

şeklinde ve impedivity si de

$$z = jw\mu \tag{1.15}$$

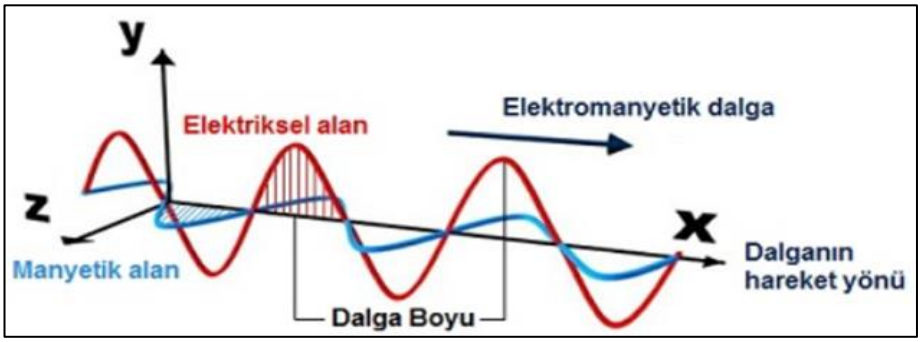
şeklinde tanımlanırsa, dalga numarası Denklem (1.16) da verildiği gibi olacaktır.

$$k = \sqrt{-zy} \tag{1.16}$$

Kayıplı ortamda dalga numarasının gerçek değeri olmasına karşın kayıpsız ortamda sadece karmaşık değeri vardır.

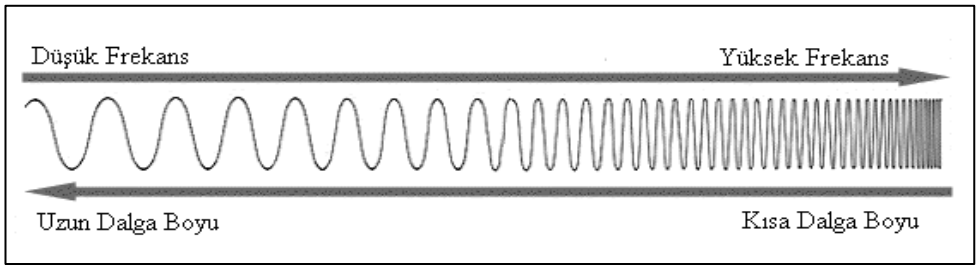
1.1.2. Elektromanyetik dalgalar

Durgun bir yük sadece E elektrik alanı oluştururken, hareketli bir yük elektrik alana ek olarak bir de manyetik alan oluşturur. Eğer zamanla değişim yok ise, elektrik alan ve manyetik alan birbirlerinden bağımsız olarak bulunabilirler. Yani durgun bir yük veya düzgün doğrusal hareket yapan bir yük, elektromanyetik dalga yayınlamaz. Elektromanyetik dalga oluşması için yükün ivmelenmesi gerekir. Elektrik alan değişimi manyetik alan oluşturur, manyetik alan değişimi de elektrik alan oluşturur. Değişken bir elektrik alanına her zaman bir manyetik alan, değişken bir manyetik alana da her zaman bir elektrik alan eşlik eder. Boşlukta bu iki alan birbirine diktir ve elektromanyetik dalga, doğrultusu her iki alana da dik olacak şekilde yayılır. (Şekil 1.1)



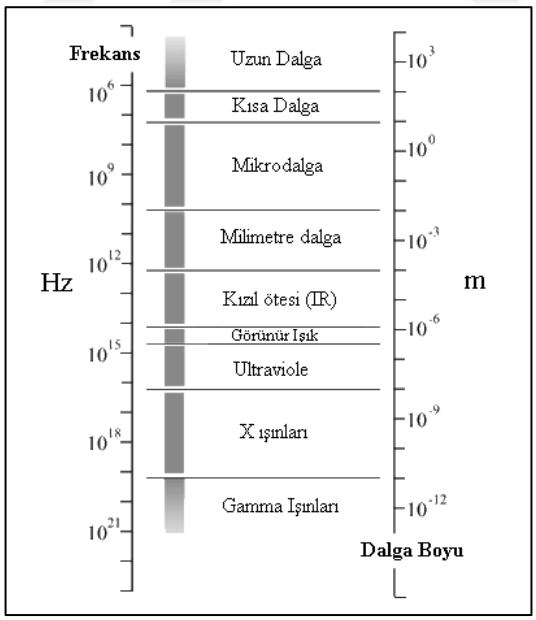
Şekil 1.1. Elektromanyetik dalganın E ve H bileşenleri.

Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızıyla yayılır ve Maxwell denklemleriyle tanımlanır. Elektromanyetik dalgaların farklılığı dalga boylarının farklı olmasından kaynaklanır. Frekans arttıkça dalga boyu küçülür, frekans azaldıkça dalga boyu büyür. (Şekil 1.2)



Şekil 1.2. Frekans ve dalga boyu arasındaki ilişki

Elektromanyetik spektrum geniş bir frekans aralığını kapsar.(Şekil 1.3) Bütün elektromanyetik dalgalar, spektrumun hangi bölgesinde olursa olsun daima ışık hızında hareket eder. Gama ışınları, X ışınları, morötesi ışınlar, mikrodalga, radyo dalgaları, televizyon ve radar dalgaları gibi çeşitleri vardır. Bu da 100 Hz ile 10^{22} Hz arasında geniş bir frekans bandı demektir.



Şekil 1.3. Frekans Spektrumu

1.1.3. Dalga denklemi

Uzayda kaynaksız, doğrusal, izotropik ve homojen ortam için, frekans bölgesi için (1.9) ve (1.10) Maxwell denklemleri,

$$(\vec{\nabla}x\vec{E}) = -z\vec{H} \tag{1.17}$$

$$\vec{\nabla}x\vec{H} = y\vec{E} \tag{1.18}$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerden Denklem (1.19) a ulaşılır.

$$\nabla x\nabla x\vec{E} - k^2\vec{E} \tag{1.19}$$

Ulaşılan bu denklem kompleks vektör dalga denklemidir. Aynı denklem manyetik alan için yazıldığında Denklem (1.20) elde edilir.

$$\nabla x\nabla x\vec{H} - k^2\vec{H} = 0 \tag{1.20}$$

Laplaz operatörünün tanımını ile,

$$\nabla^2\vec{A} = \nabla\left(\nabla.\vec{A}\right) - \nabla x\nabla x\vec{A} \tag{1.21}$$

E ve H'nin diverjansının sıfır olması gerekliliği kullanılarak vektör dalga denklemine ulaşılır.

$$\nabla^2\vec{E} + k^2\vec{E} = 0 \tag{1.22}$$

$$\nabla^2\vec{H} + k^2\vec{H} = 0 \tag{1.23}$$

E ve H nin her bir dörtgensel bileşeni Helmoltz denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla^2\Psi + k^2\Psi = 0 \tag{1.24}$$

Burada ψ yerine E_x,E_y,E_z veya H_x, H_y, H_z bileşenlerinden her biri konulabilir.

$$\nabla^2\Psi - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} - \mu\sigma\frac{\partial\Psi}{\partial t} = 0 \tag{1.25}$$

1.1.4. Genel düzlemsel dalga

Yayılan dalganın normali,

$$n = n_x\hat{a}_x + n_y\hat{a}_y + n_z\hat{a}_z \tag{1.26}$$

orijinden uzaklığı h,

$$h = \vec{n}.\vec{R} = n_x x + n_y y + n_z\hat{a}_z \tag{1.27}$$

Denklemiyle gösterilirse, düzlemsel dalga Denklem (1.28) ile ifade edilebilir.

$$\Psi = e^{-jkh+jwt} \tag{1.28}$$

Vektör dalga numarası şu şekilde tanımlanabilir.

$$k\vec{n} = kn_x\hat{a}_x + kn_y\hat{a}_y + kn_z\hat{a}_z = k_x\hat{a}_x + k_y\hat{a}_y + k_z\hat{a}_z \tag{1.29}$$

Böylece temel dalga fonksiyonu Denklem (1.30) daki halini alır.

$$\Psi = e^{-jk.R+jwt} \tag{1.30}$$

Bu fonksiyonun ψ fazör formda da yazılması mümkündür. Fonksiyonun fazör formdaki yazılışı Denklem (1.31)'de verilmiştir.

$$\Psi = e^{-jk.R} \tag{1.31}$$

Zaman bölgesi skaler dalga Denkleminde (1.25), fazör olmayan dalga fonksiyon formu tanıtıldığında, ayrılma denklemine ulaşılmaktadır.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \mu\varepsilon w^2 - j\mu\sigma w = k^2 \tag{1.32}$$

Böylece üç, k_x, k_y, k_z ve w dan herhangi biri hesaplanırsa, dördüncü, ayrılma Denklemiyle (1.32) bulunabilir. İki boyutlu bir problemde (uzamsal değişkenler x ve z), denklem aşağıdaki gibi olur.

$$k_x^2 + k_z^2 = k^2 \tag{1.33}$$

1.2. Fourier Dönüşümü

1.2.1. Sürekli Fourier dönüşümü

f(u) sinyalinin ileri Fourier dönüşümü Denklem (1.34) de verilmiştir.

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-jk_u u}\, du \tag{1.34}$$

Ters Fourier dönüşümü de ise,

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_u) e^{jk_u u}\, dk_u \tag{1.35}$$

şeklindedir. Burada u zamanı k_u Fourier bölgesi değişkenini temsil edecek olursa w genel frekans bölgesi Fourier değişkenidir. x gibi uzamsal bir değişken için, u=x ve $k_u = k_x$ kullanılacaktır. İleri Fourier dönüşümü için exponansiyel denklem olarak pozitif ve geri dönüşüm için negatif exponansiyel terimi kullanılacaktır.

1.2.2. Ayrık Fourier dönüşümü

Ayrık zaman Fourier dönüşümü (AFD), sürekli Fourier dönüşümünün ayrık olarak örneklenmesi sonucu elde edilir. Eğer u bölgesi sinyalini toplam N ayrık noktada, örnekleme periyodu Δu olmak üzere ayrık hale getirilirse;

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{N\Delta u} f(u) e^{-jk_u u}\, du \tag{1.36}$$

Şeklindedir. Denklemin örneklenmiş hali ise Denklem (1.37) deki gibi olur

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-jk_u n\Delta u} \Delta u \tag{1.37}$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta k_u nun hala sürekli değişken olmasıdır. k_u Tekrar ayrık noktalar kümesi olarak örneklenirse;

$$k_u^m = 2\pi m/(N-1)\Delta u \tag{1.38}$$

$$m = 0,1,2 \dots N-1 \tag{1.39}$$

olur ve dönüşüm $\frac{\sqrt{2\pi}}{\Delta u}.k_u$ ile çarpılır ki u değer $-k_{max}$ dan $-k_{max}$ a kadar olan aralıktaki noktalar kümesidir. AFD Denklem (1.40) taki gibi tanımlanırsa

$$F(k_n^m) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-j2\pi m \frac{n}{N}} \tag{1.40}$$

Ters AFD (TAFD) ise şöyle tanımlanabilir

$$F(n\Delta u) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} f(k_u^m) e^{j2\pi m \frac{n}{N}} \tag{1.41}$$

1.2.3. AFD parametrelerinin hesaplanması

N tek sayı olmak üzere, bir u bölgesinde, x=0 dan $x=x_{max}$ a kadar N kez örneklenmiş (örnekleme arasındaki ayrılık Δx dir) bir sinyal düşünülsün. Böyle bir sinyalin AFD' ü frekans bölgesinde $-k_{xmax}$ dan k_{xmax} a giden N adet noktasal sinyal olarak kendini göstermektedir. Frekans bölgesindeki örnekler arasındaki ayrım, Δk_x dir. N-1 aralık içeren N örneklenmiş nokta düşünüldüğünde,

$$X_{max} = (N-1)\Delta x \text{ ve } 2k_{xmax} = (N-1)\Delta k_x \tag{1.42}$$

şeklinde olacaktır. Örnekleme frekansı F_{ornek} şu şekilde yazılabilir,

$$F_{ornek} = \frac{1}{\Delta x} \tag{1.43}$$

Nyquist örnekleme teoremine göre, k vektör dalga numarasının maksimum değeri,

$$k_{xmax} = \frac{2\pi F_{max}}{2} = \frac{\pi}{\Delta x} \tag{1.44}$$

denklemiyle verilir. k_{xmax} ve Δx ile ilişki için gerekli denklemlerin bulunmasıyla Δk_x ve X_{max} denklem 1.42 kullanılarak tanımlanabilir.

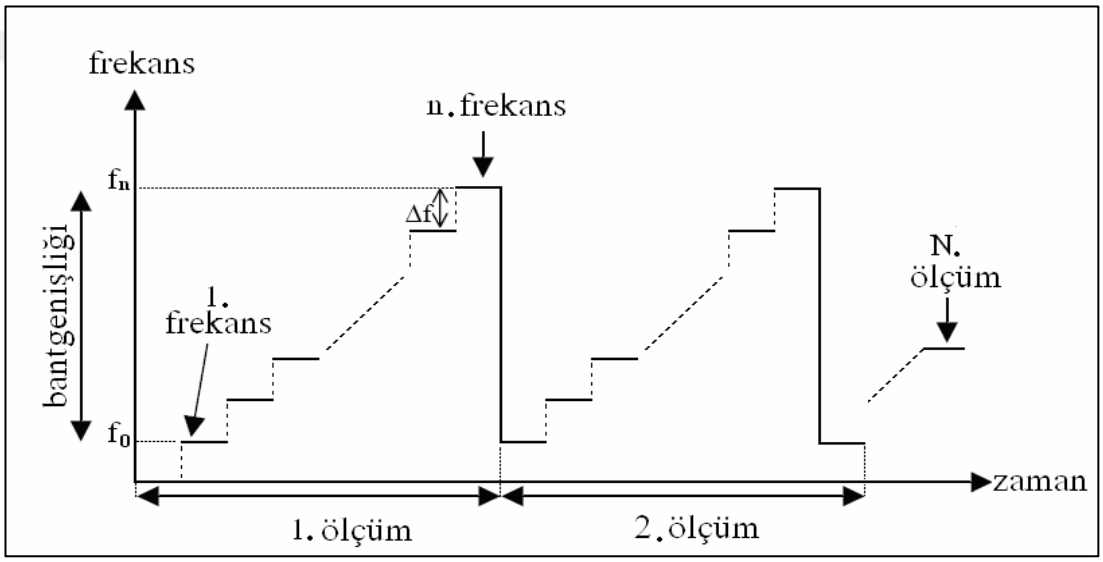
$$\Delta k_x = \frac{2k_{xmax}}{N-1} = \frac{2\pi}{(N-1)\Delta x} = \frac{2\pi}{X_{max}} \tag{1.45}$$

$$X_{max} = (N-1)\Delta x = \frac{\pi(N-1)}{k_{xmax}} = \frac{2\pi}{\Delta k_x} \tag{1.46}$$

1.45 ve 1.46 denklem kümelerini kullanarak, her bir ayrık ters Fourier dönüşümü gibi ileri ve geri ayrık Fourier dönüşümü için, birbiri arasında istenilen bütün denklemler ilişkilendirilebilir.

2. FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADAR (FASDR)

Frekans adımlı sürekli dalga tekniği kullanan radarlarda, iletilen sinyal, yükselen adım frekanslarının miktarından oluşur. Bu tür radarların Frekans Adımlarının temsili gösterimi Şekil.2.1 de verilmiştir. FASDR da her bir adım frekans sinyaline göre alınan sinyalin faz ve genlik bilgisi ölçülür. Elde edile bu ölçümdeki, karmaşık diziyi içeren faz bilgisi, nesnenin konum bilgisini vermektedir.



Şekil 2.1. FASDR daki frekans adımlarının temsili gösterimi

FASDR da başlangıç frekansı F_0 sabit yükselme frekansı Δf olarak alındığında dizideki n' inci örneğin frekansı,

$$F_n = F_0 + \Delta f \qquad n = 0, \ldots . M - 1 \tag{2.1}$$

şeklinde olacaktır. Nesnenin yansıtırlılığı "ρ" ortamdaki dalga hızı v olarak alınırsa Homojen ve kayıpsız bir ortamda hız;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.2}$$

Şeklindedir. Serbest bir uzayda, orijinden R mesafe uzaklıktaki bir noktasal saçıcının frekans bölgesinde yansıyan elektrik alan sinyali frekans bölgesinde şu şekilde ifade edilir.

$$E_s(n) = \rho e^{-j4\pi\frac{f_n}{v}d} \qquad n = 0, \dots M-1 \tag{2.3}$$

Şeklinde olacaktır. Bu sinyal dalga numarası k cinsinden ifadesi,

$$E_s(k) = \rho e^{-jk(2d)} \tag{2.4}$$

Şeklindedir. Burada; "k" vektör dalga numarası; $k = 2\pi F_n/v$ şeklinde verilir. Radargramda bir noktadaki ölçüme tek nokta ölçüm denir. Ve 2 boyutlu radargram görüntüleri, bir yatay profil boyunca, tek nokta ölçüm verilerinin toplamasıyla elde edilir. Bir profil uzunluğu boyunca N ayrık nokta için, (x_0, z_0) da konuşlanmış bir nesneden yansıma sinyali toplandığında, radar nesne uzaklığı "d" aşağıdaki formülle verilebilir.

$$d = \sqrt{z_0^2 + (X - x_0)^2} \qquad X = 1, \dots \dots N \tag{2.5}$$

Böylece 2-B bir uzayda, radar anteni x profil uzunluğu boyunca hareket ederken, elektromanyetik (EM) saçılmalar, her bir ayrık nokta için toplanır. (x_i, z_i) de konuşlandırılmış ve ρ_i yansıtırlığına sahip S adet noktasal hedef için alınan $E_s(x, k)$ sinyali aşağıdaki şeklide yazılabilir.

$$E_s(x,k) = \sum_{i=1}^{S} \rho_i . \exp(-jk(2\sqrt{z_i^2 + (x - x_i)^2})) \tag{2.6}$$

2.1.Frekans Adımlı Sürekli Dalga Radar (FASDR) Kullanarak AFD ve TAFD Gerçekleştirme

FASDR, AFD ve TAFD gerçekleştirilirken veri başlangıç ve bitiş frekansına kadar toplandığı için sonlu bant genişlikli veri problemiyle karşılaşılmaktadır. 1.45 ve 1.46 denklemlerinin uygulanabilmesi için, eldeki verinin tam bir bant genişliğine sahip olması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için veriye sıfır ekleme uygulaması yapılır. Bu adım algoritmaya zaman kaybı olarak eklenir.

2.2. Radar Derinlik Profili

2.2.1 Bir boyutlu derinlik profili

Bu tezde verilen görüntüleme algoritmasının iyi anlaşılabilmesi için, öncelikle 1-B görüntülemenin iyi anlaşılması gerekir. Noktasal bir cisme çarpan düzlemsel dalga için, dönen sinyal $E_s(k)$ şu şekilde ifade edilir;

$$E_s(k) = \rho A e^{-j2\frac{w}{c}D} \tag{2.7}$$

Burada; "D" verici anten ile noktasal cisim arasındaki mesafe, "A" aydınlatan düzlemsel dalganın genliği olup frekanstan bağımsızdır. "D" vericiyle iletken hedef arasındaki mesafe ve "c" ise çevrelenen ortamdaki ışığın hızıdır. $E_S(w)$ sinyalinin ters Fourier dönüşümü alındığında zaman-bölgesi sonucu şu şekilde olacaktır.

$$E_s(t) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}}\delta(t - 2\frac{D}{c}) \tag{2.8}$$

Bu denklem birim impuls fonksiyonudur ve sadece faz bilgisi kullanmaktadır. Bu veriyi uzamsal düzleme aktarmak için, 2. 9 Denklemiyle basitçe zaman ekseni ölçeklendirilebilir.

$$z = c\frac{t}{2} \tag{2.9}$$

Zamana bağlı 2. 8 verisi, uzamsal bölgeye aktarılırsa 2. 8 Denklemi,

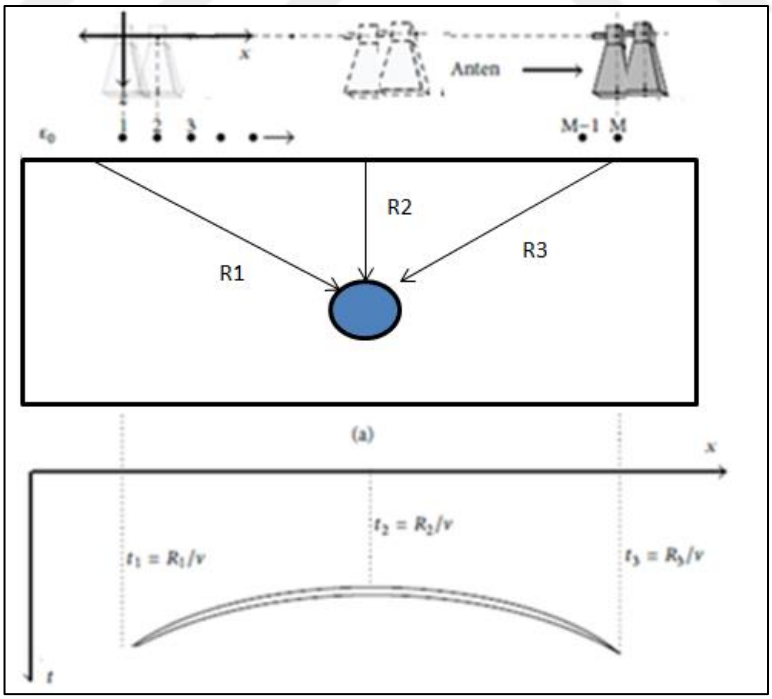
$$E_s(z) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(\frac{2}{c}(z - D)\right) \quad (2.10)$$

Şeklinde olur Burada δ, birim darbe fonksiyonudur. Elde edilen bu veri, derinlik profili olarak da adlandırılmaktadır. Denklem (2.10) de verilen sonuç, frekans verisinin tüm frekans bandında toplanmasıyla elde edilecektir. Ancak, pratikte söz konusu geri saçılma verisi ancak sınırlı bir bant genişliğinde toplanabileceğinden Fourier kuramına göre yukarıdaki birim darbe fonksiyonu, z_o etrafında sinc fonksiyonuna dönüşecektir.

2.2.3. İki boyutlu radargramlarda derinlik profili ve hiperbollar

Bu bölümde de, antenden R uzaklıkta bulunan bir cisim için, bir hat boyunca her bir noktadaki derinlik profillerinin ardı ardına toplanması incelenmiştir.

Radar sisteminde, radar yer yüzeyinde belirli bir profil doğrultusu boyunca hareket ettirilerek verici antenden gönderilen sinyaller alıcı anten tarafından toplanır. (Şekil 2.2)



Şekil 2.2. Profil ölçüsü geometrisi ve 2B radargram görüntüsü

Geri saçılan sinyal, radar bir doğru boyunca hareket ettiğinden, her bir yatay aralıkta farklı gidiş – geliş mesafeleri kat eder. Radarın hareket güzergâhındaki her bir yapay aralık boyunca, her bir noktadaki geri saçılan sinyal, belirli bir frekans bant aralığında toplanır. Her bir noktadaki toplanan geri saçılım sinyalinin Ters Fourier Dönüşümü (TFD) alınarak, her bir noktada tek boyutlu (1-B) derinlik profili çıkarılabilir. Her bir noktadaki derinlik profilleri yan yana toplandığında iki-boyutlu (2-B) radargram görüntüsü oluşturulur. Radargramdaki noktasal bir hedefin derinlik bilgisi;

$$z = v.t/2 \tag{2.11}$$

Formülü ile elde edilir. Burada, v, dalga hızını; *t,* EM dalganın yolculuk zamanını göstermektedir. Yatayda X_0 ve düşeyde z_0 noktasında bulunan noktasal bir cisim için, taramanın her bir *i* adımında EM dalganın aldığı mesafe

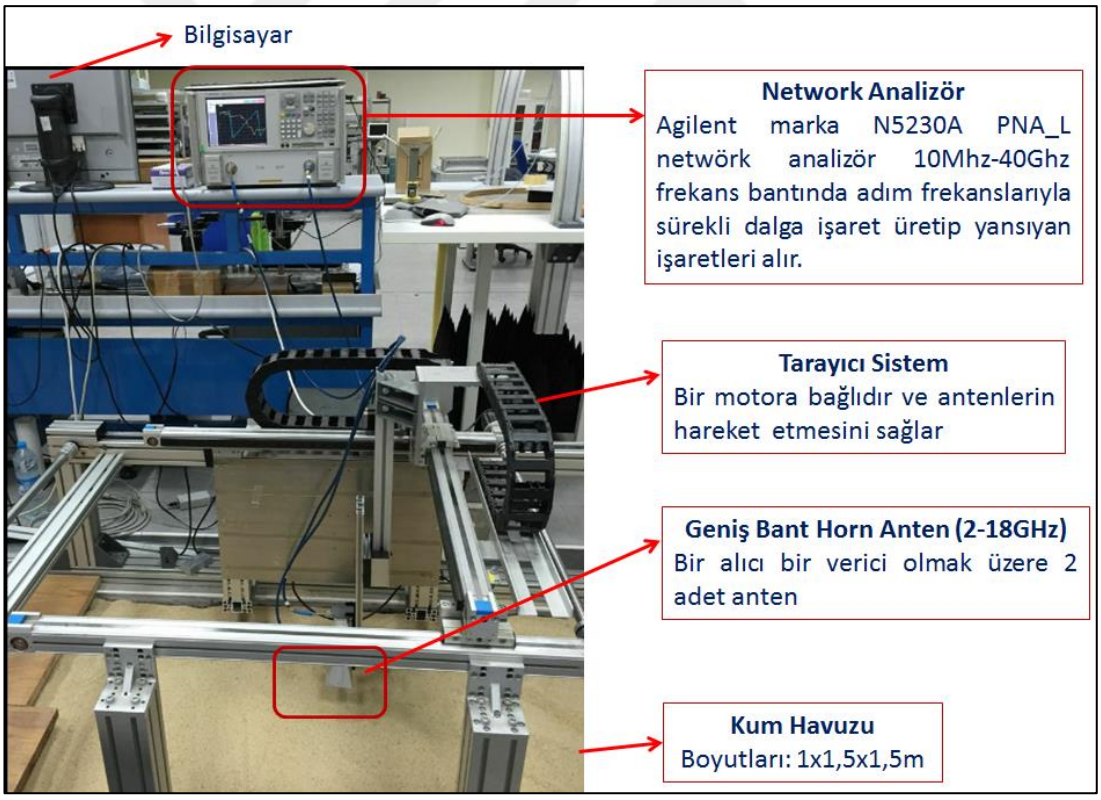
$$Z_i = \sqrt{(X_i_X_0)^2 + Z_0^2} \qquad i = 0,1,2,\dots N \tag{2.12}$$

şeklinde olur. Dolayısıyla noktasal bir cisim, bu (2-B) radargram görüntüsünde hiperbol olarak görünür. Bu hiperbolün biçimi, gömülü nesnenin derinliğine, radar anteninin demet genişliğine ve ortamın dielektrik sabitine bağımlıdır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Materyal

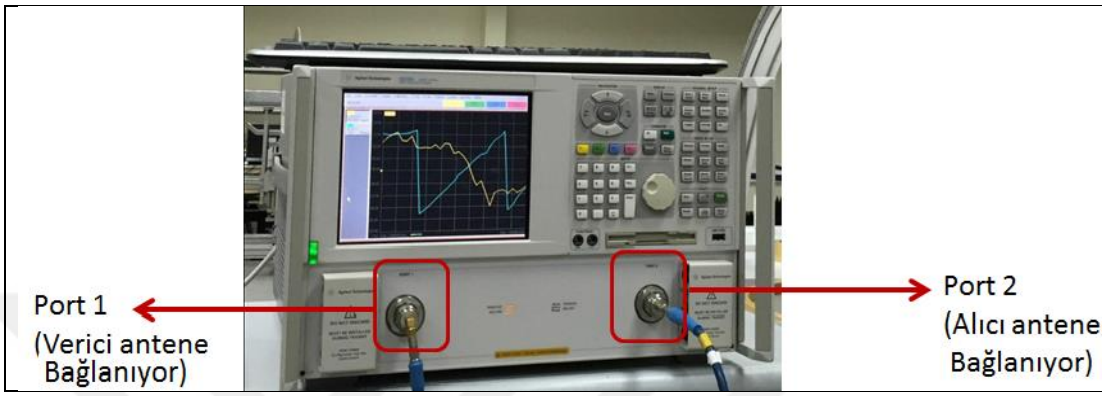
Yeraltı görüntüleme uygulamalarında kullanılan algoritmanın etkinliği CST programıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında test edildikten sonra deney verilerine uygulanmıştır. Bu deneylerin gerçekleştirilmesi için TÜBİTAK Malzeme Enstitüsü MİLTAL laboratuvarındaki deneysel düzenek kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneğinin şekli Şekil 3.1 de verilmiştir. Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme (BAP) tarafından, 2015/019 proje koduyla desteklenmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

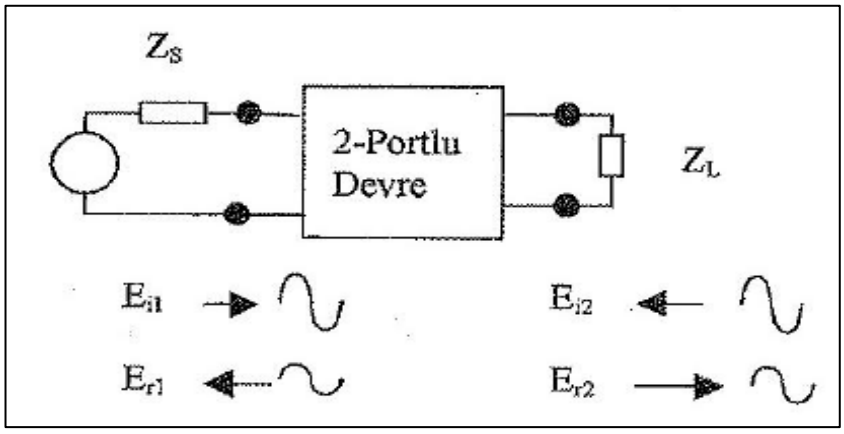
3.1.1. Vektör network bnalizör (VNA) ve s parametresi

Yüksek çözünürlük sağlayan ve geniş bir frekans bandında (10Mhz-40Ghz) adım frekanslarıyla sürekli dalga işaret üretip yansıyan işaretleri alan Vektör Network Analizör (VNA) cihazı Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Ölçümlerde kullanılan Vektör Network Analizör (VNA)

S parametreleri akım ve güç değerleri yerine gelen ve giden dalga değerlerini kullanması nedeniyle özellikle mikrodalga devrelerinde kullanışlıdır. Dalga klavuzlarında akım ve gerilim ölçümleri yapılamayacağından s-parametrelerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir. İki portlu lineer bir devre, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bir iletim hattına yerleştirilerek bu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir yük ile sonlandırıldığında, s parametreleri hesaplanabilmektedir (Yaran ve diğ.1999).



Şekil 3.3. İki portlu bir devrenin s-parametrelerinin belirlenmesi

Kaynaktan gelen sinyal devreyi uyaran sinyaldir. Tepki sinyali ise yansıyan ile devre çıkışından transfer sinyalinden oluşmaktadır. Şekil 3.3' deki gelen ve giden sinyalin gerilim değerleri, Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_{1r} = S_{11}E_{1i} + S_{12} + E_{2i} \tag{3.1}$$

$$E_{2r} = S_{21}E_{1i} + S_{22} + E_{2i} \tag{3.2}$$

E_{1i} ve E_{2i} devreye uygulanan gerilimler, E_{r1} ve E_{r2} yansıyan gerilimlerdir. Denklemlerin her iki tarafındaki gerilim değerleri iletim hattının karakteristik empedansının kareköküne bölünerek normalize edildiğinde eşitlik bozulmaz Denklem (3.3)ve (3.4) ve elde edilen oranların karesi, gücü ifade eder. Ve Denklem (3.1), (3.2), bu doğrultuda yeniden düzenlendiğinde Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) elde edilir.

$$b_N = \frac{E_{Nr}}{\sqrt{Z_0}} \tag{3.3}$$

$$a_N = \frac{E_{Ni}}{\sqrt{Z_0}} \tag{3.4}$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \tag{3.5}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \tag{3.6}$$

Şekil 3.4'te iki portlu bir lineer devrenin s parametreleri ile gelen ve yansıyan dalgaları gösterilmektedir. İkinci porta iletim hattının empedansına eşdeğer bir empedans bağlandığında, empedansın üzerine uygulanan sinyal tamamen harcanır. Geriye yansıyan sinyal olmayacağından, $a_2 = 0$ olur. Denklem (3.5) ve (3.6)'da verilen değişken sayısı bire iner ve S_{11} ile S_{21} kolaylıkla hesaplanır. Denklem (3.7) ve (3.8).

$a_2 = 0$ ise;

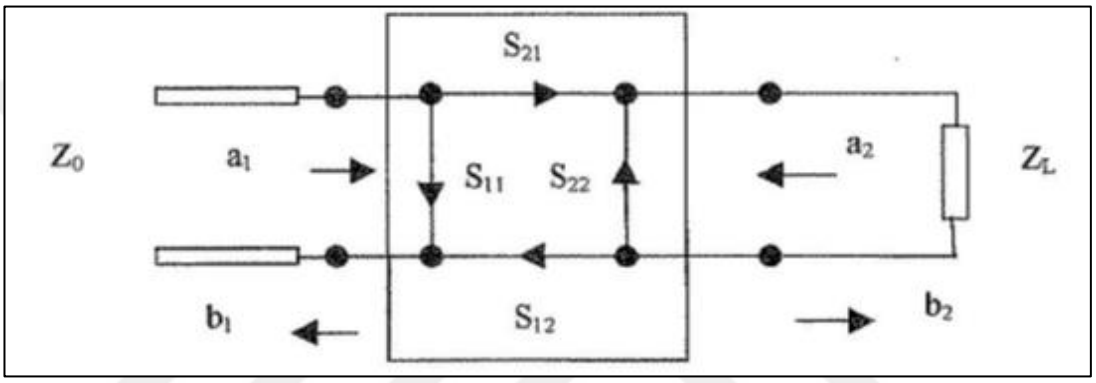
$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \tag{3.7}$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \tag{3.8}$$

Aynı empedans birinci porta bağlanarak bu işlemler tekrarlandığında ise $a_1 = 0$ olur ve S_{22} ile S_{12} hesaplanır.$a_i = 0$ ise;

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \tag{3.9}$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \tag{3.10}$$

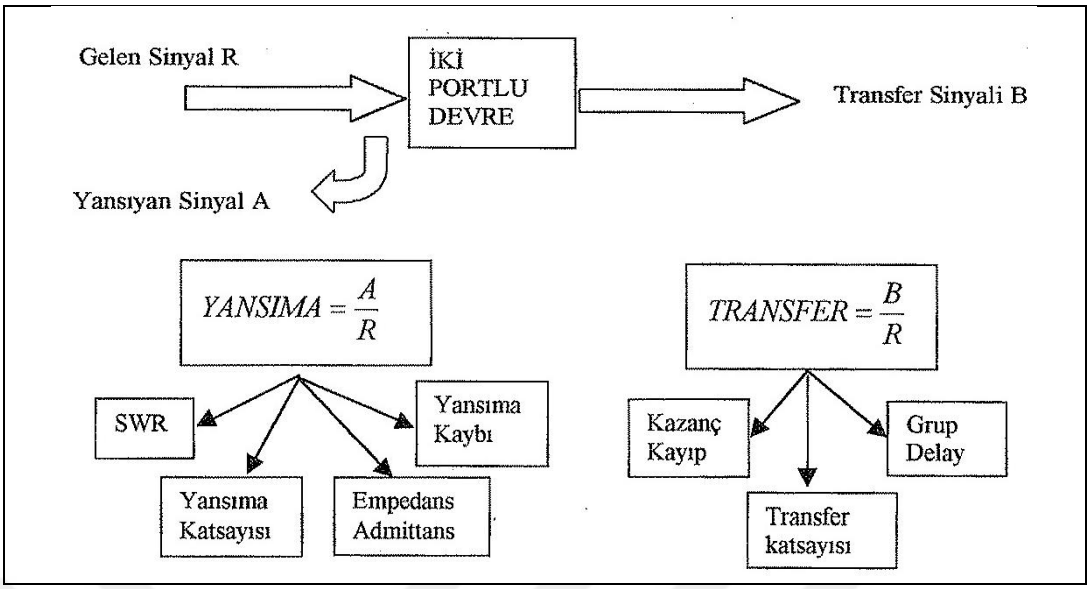


Şekil 3.4. İki portlu bir lineer derecede gelen ve yansıyan dalgalar ile s-parametreleri

S parametre ölçümleri için genellikle vektör network analizörler (VNA) kullanılmaktadır. VNA, yansıyan ve transfer sinyallerin genlik ve fazlarını ölçer

S parametreleri, değişik formlarda kullanıldığında farklı tanımları vardır ve devre özellikleri bu tanımlara göre yapılmaktadır. S parametrelerinin söz konusu tanımları Şekil 3.5 te gösterilmiş olup aşağıdaki Denklemler ile de matematiksel olarak ifade edilmişlerdir.

Şekil 3.5'e bakıldığında yansıma katsayısı yansıyan sinyalin gelen sinyale oranı olarak verildiği görülmektedir. Bağıntısı ise Denklem (3.11) de görülmektedir. Aynı şekilde transfer katsayısı transfer sinyalinin gelen sinyale oranıdır.



Şekil 3.5. S-Parametrelerinin Farklı Tanımları

Burada yansıma katsayısı Γ

$$\Gamma = \frac{A}{R} \tag{3.11}$$

bağıntısıyla verilir. R, Gelen sinyal, A yansıyan sinyal, B transfer sinyaldir.

Yansıma kaybı ise $-20\log_{(\rho)}$ dır.

$$SWR = \frac{1+\rho}{1-\rho} \tag{3.12}$$

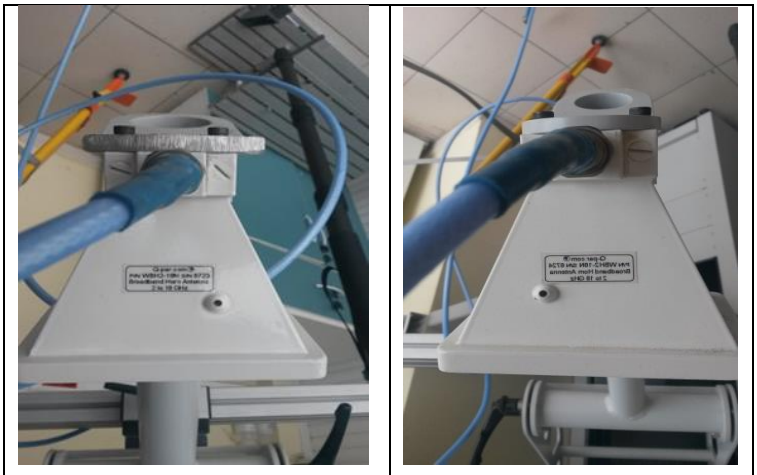
SWR oranıdır. Transfer Katsayısı 3.13 bağıntısıyla verilmiştir.

$$T = \frac{B}{R} \tag{3.13}$$

Kayıp $= -20\log_{\tau}$ ve Kazanç $= 20\log_{\tau}$'dir.

3.1.2. Kullanılan antenler

Ölçümlerde 2-18 GHz frekans bant genişliğine sahip geniş bant horn anten kullanılmıştır (Şekil 3.6).



(a) (b)

Şekil 3.6. Kullanılan a) Alıcı anten b) Verici anten

Anten tipi seçilirken antenin kazancına polarizasyonuna ve alıcı anten ile verici anten arasındaki kuplaja dikkat edilmesi gerekir. Verici antenin dalga şekli ve bant genişliğinin seçimi, sinyalin tekrarlama oranına ve ortalama güç kaybına ve hedefin boyutlarına bağlıdır. Verici ve alıcı antenler özdeş ve kaynağın dalga şekline uygun seçilmelidir.

Radar sisteminde vericinin gücü, alınan güç ve maximum nüfuz etme derinliği

arasındaki ilişki standart radar denklemi yardımıyla bulunur.

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma e^{-4\alpha R}}{(4\pi^3) R^4} \tag{3.14}$$

Burada P_R : Alıcıdan algılanan güç

P_T : Verici gücü

G_T : Verici Anten kazancı

G_R :Alıcı anten kazancı

λ :Dalganın ilerlediği ortamın dalga boyu

σ :Hedefin radar kesit alanı

α : Toprağın zayıflatması

R: Saçılım yapan cismin derinliği

Elektromanyetik dalgaların toprağa nüfuz derinliğini sınırlayan kayıplar $Q = e^{\alpha z}$ şeklinde bir sönümleme katsayısı olarak modellenebilir. Zayıflama katsayısı α ise dalganın frekansı, toprağın iletkenlik ve dielektrik sabitine bağlıdır. Ölçümler alıcı anten ile verici antenin aynı olduğu yani tek anten kullanılarak yada bir alıcı bir verici anten kullanılarak yapılabilir. Tek anten kullanılarak hazırlanan düzenekte yüzeyden alınan şiddetli yansıma görüntü verisinde kendini gösterdiğinden diğer hedeflerden alınan yansımalar sönük kalmaktadır. İki anten kullanılan düzenekte yüzeyden gelen şiddetli yansımanın etkisi, görüntü verisinde görülmeyeceğinden diğer hedeflerden alınan geri yansıma sinyalleri bastırılmayacaktır bunun sonucunda yüzey altı görüntüsü daha şiddetli ve net olarak kendisini gösterecektir. Bu nedenle deney çalışmalarımızda bir alıcı bir verici anten olmak üzere iki anten kullanılmıştır.

3.1.3. Düzlemsel tarayıcı

Deney düzeneğindeki antenleri farklı konumlara hareket etmek için kullanılmaktadır.

3.1.4. Bilgisayar

İki boyutlu düzlemsel tarayıcıyı ve bunları kontrol edip elde edilen verileri kaydetmek için gereklidir.

3.1.5. Kum havuzu

İçine farklı cisimler gömülerek üzerinden ölçüm yapılan 1x2x1.5m boyutlarında içi kum dolu bir havuzdur. Kumun dielektrik sabiti tane boyuna ve neme bağlı olarak değişkenlik gösterdiği için kumun dielektrik sabiti Şekil 3.7’ de gösterilen problar ve kapasitans ölçer kullanılarak kumun kapasitansı ölçülmüş daha sonra denklem 3.15’ de verilen bağıntı yardımıyla dielektrik sabiti hesaplanmıştır. Yapılan ölçüm sonucunda kumun dielektrik değeri 1 MHz frekansında 2.4 olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.7. a) Kum içine batırılan proplar b) Kapasitans ölçer

$$\frac{\pi\varepsilon l}{\operatorname{arcosh}(\frac{d}{2a})} = \frac{\pi\varepsilon l}{lu(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1})} \tag{3.15}$$

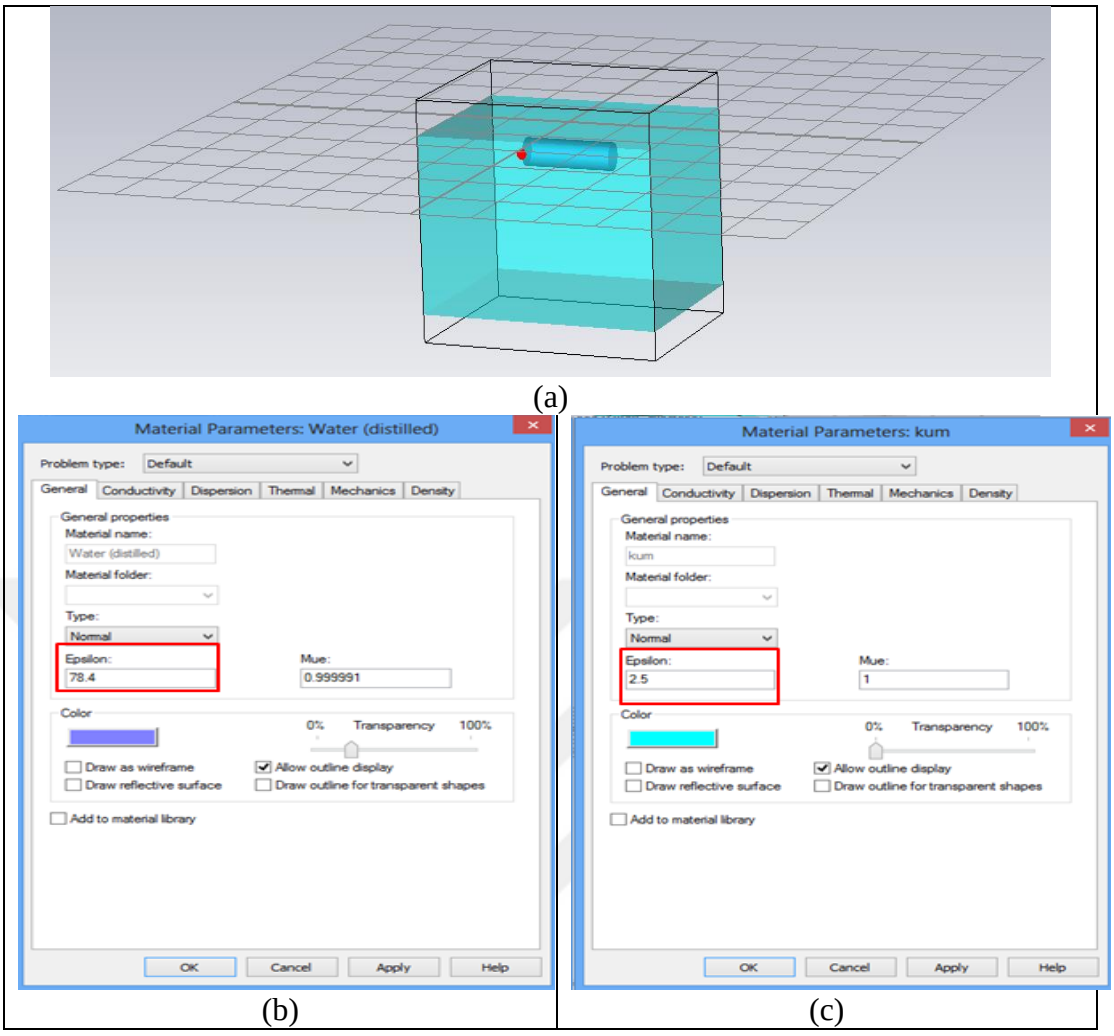
Burada lu; kapasitaz değeri, d; proplar arası mesafe, l; propun uzunluğu a ise propun yarı çapıdır.

3.1.6. Kullanılan (Gömülen) malzemeler

Yapılan ölçümlerde Metalik nesneler (boru, kupa vb.), Plastik boru, Kablo, Pil, Islak kum, Su, Mermer, Seramik, Çömlek, Çini, Ateş tuğlası kullanılmıştır.

3.1.7. Kullanılan yazılımlar

Önerilen algoritmalar öncelikle benzetim verilerine uygulanarak doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla gerçeğe yakın olarak benzetimini yapmak için CST microwave studio (cst mws) programı kullanılmıştır. CST microwave studio (cst mws), yüksek frekans bileşenlerinin elektromanyetik simülasyonu için hazırlanmış özel bir yazılım aracıdır. Bu yazılım aracı kendini oldukça kanıtlamış ve çoğu firmanın ar-ge bölümlerinde ilk sırada tercih edilen yazılım olmuştur. CST mws programı kullanılarak zaman domeni çözücüsü, frekansa domeni çözücüsü ile analiz yapılabilir. Bu tez çalışmasında zaman domeni çözücüsü kullanılmıştır. CST programı ile yapılan simülasyon yeraltı modeli ve parametre değerleri Şekil 3.8 de verilmiştir.



Şekil 3.8. a)Kullanılan CST programı ile oluşturulan yeraltı modeli b)Gömülü cismin ve kum havuzunun özellikleri özellikleri

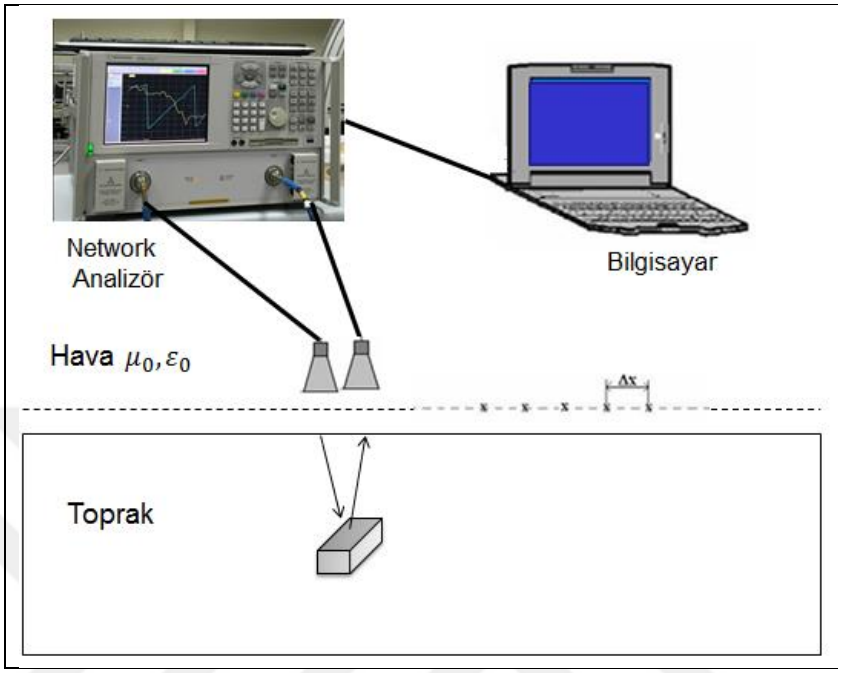
3.1.7.2. Matlab

Tez çalışmasında, tüm hesaplamalar, algoritmalar, veri analizleri ve grafikler birçok teknik hesaplama problemlerini, özellikle matris ve vektör formüllü olanları çok az bir zamanda çözmeyi sağlayan MATLAB yazılım paketi kullanılmıştır.

3.2.1. Radargram oluşturma algoritması

Geometrisi Şekil 3.9' den görüleceği üzere, radar anteni yüzey ekseni boyunca hareket ettirilmekte ve her Δx mesafesinde geri saçılma; S_{11} verisi toplamaktadır. Böylece toplam N tane "Yapay" dizi antenin toplayacağı kadar geri-saçılma bilgisi sadece bir anten kullanılarak elde edilmektedir. Her mekansal veri toplanması

sırasında; orta frekans; f_c civarında M adet değişik frekans çeşitliliğinde verinin kaydedilmesiyle 2-B mekan-frekans saçılma elektrik alanı; $E_s(x,f)$ elde edilmektedir.

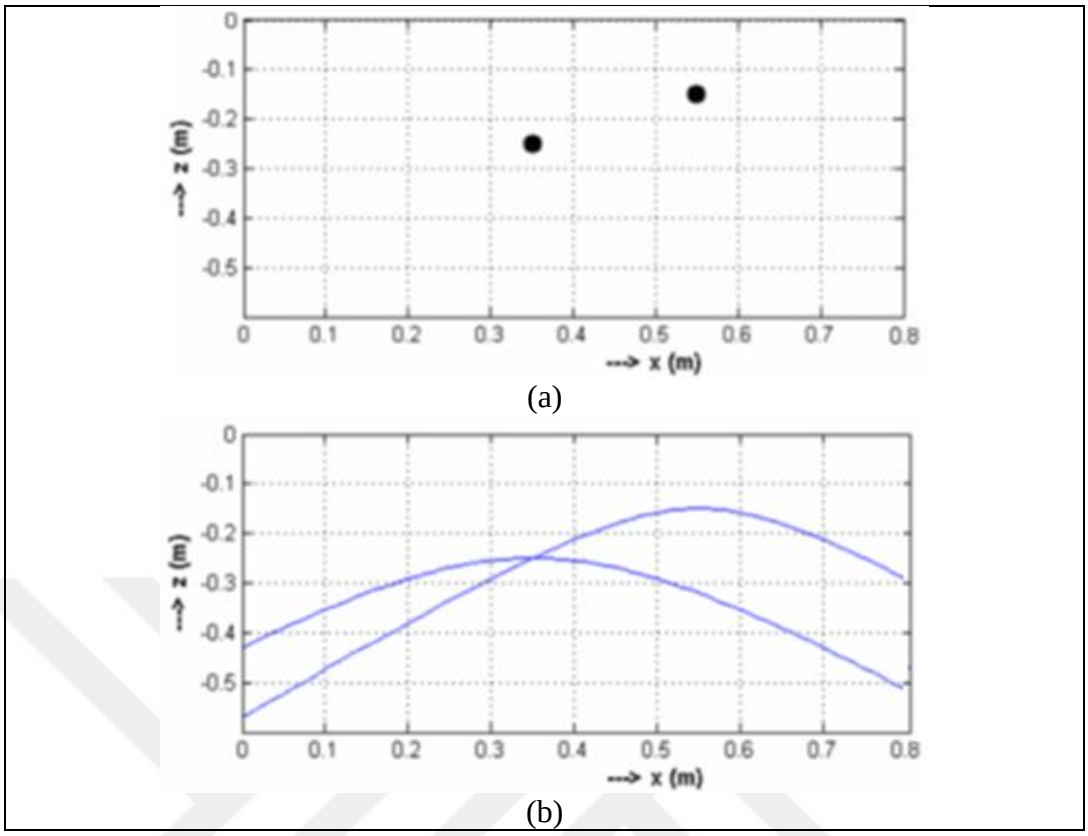


Şekil 3.9. Profil ölçüm geometrisi

Elde edilen saçılan alanın bir boyutlu (1-B) Ters Fourier Dönüşümü, frekans boyutunda uygulandığında, veriyi mekan-mekan düzlemine taşımak mümkündür:

$$E_s(x,z) = \text{TFD}\{E_s(x,f)\} \tag{3.16}$$

Burada z-ekseni derinlik bilgisini verir; derinlik çözünürlüğü; Δz, frekans bant genişliği ile ters orantılıdır. Ancak, elde edilen bu mekan-mekan verisi hedefin gerçek görüntüsünü göstermemektedir. Çünkü, yapay olarak kayan radar anteninin x-ekseni boyunca hareket etmesinden dolayı, her bir noktasal saçıcı için tipi Şekil 3.3.'de verilen parabolik bir görüntü oluşmaktadır. Şekil 3.10.(a)'da değişik derinlikte ve uzaysal noktalarda bulunan iki adet noktasal örnek olarak gösterilmiştir. Yukarıda (3.1)'denklemiyle verilen dönüşüm uygulandığında; Şekil 3.10.(b)'de gösterilen parabolik eğriler oluşmaktadır. Bu noktadan sonra, asıl görüntüyü elde etmek için farklı göç ettirme algoritmaları kullanılabilir. Bu algoritmalar ayrıntılarıyla aşağıda verilmiştir



Şekil 3.10. a) Yeraltında bulunan 2 adet noktasal hedef b) 1-B FD sonrası elde edilen radargram görüntüsü

3.2.2. Yapay açıklıklı radar bazlı göç ettirme (odaklama) algoritması

İki boyutlu taramada, radar anteni *x* eksenindeki her bir yapay açıklık boyunca hareket ettirilirken, toprak altındaki farklı konumlardaki *N* adet noktasal saçıcıdan oluşan Elektromanyetik (EM) saçılmayı toplamaktadır. Vericiden gönderilen bir X(t) darbesinin (x_i, z_i) de konuşlandırılmış i.inci hedeften yansıyan EM saçılması; ρ_i ise; tüm saçıcılardan toplanan EM sinyali $e(x,t)$ aşağıdaki gibi verilebilir:

$$e(x,t) = \sum_{i=1}^{N} \rho_i X\left[t - \frac{2\sqrt{z_i^2 + (x_i - x)^2}}{c_m}\right] \tag{3.17}$$

Burada c_m ortamdaki ışık hızı, t ise zaman değişkenidir. Denklem (3.17)'in zaman bölgesi Fourier Dönüşümü alındığında

$$e(x,w) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} X(w) \sum_{i=1}^{N} \rho_i e^{-j2k\sqrt{z_i^2+(x_i-x)^2}} \tag{3.18}$$

elde edilecektir. Burada,

$$k = \frac{w}{c_m} \tag{3.19}$$

dalganın bulunduğu ortam için dalga sayısıdır. X(w) darbe sinyalinin Fourier dönüşümüdür. Uygulamalarımızda gönderdiğimiz sinyal birim darbe sinyali olduğundan Fourier dönüşümü 1 çıkmaktadır. Bu yüzden Algoritma uygulanırken X(w)=1 alınmıştır. Denklem (3.18)'nin uzay bölgesindeki (k_x) Fourier dönüşümü alındığında,

$$E(k_x,w) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) X(w) \frac{e^{-j\left(\frac{\pi}{4}\right)}}{\sqrt{4k^2-k_x^2}} \sum_{i=1}^{N} \rho_i e^{-j\sqrt{4k^2-k_x^2}\, z_i - jk_x.x_i} \tag{3.20}$$

denklemi elde edilir. Hedeflerin konum bilgileri, frekans bölgesinde gönderilen sinyalin fazında gizlidir. $E(k_x,w)$ denkleminde

$$\frac{e^{-j(\frac{\pi}{4})}}{\sqrt{4k^2-k_x^2}} \tag{3.21}$$

genlik terimi, ifadenin fazını etkilemediğinden ihmal edilebilir. Bu durumda yeni denklem,

$$E(k_x,w) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) X(w) \sum_{i=1}^{N} \rho_i e^{-j\sqrt{4k^2-k_x^2}\, z_i - jk_x.x_i} \tag{3.22}$$

şeklinde olacaktır. Denklem (3.22) deki uzamsal frekans denklemi denir ve taranan mesafe boyunca bütün uzamsal konum bilgisini içermektedir. Fakat hedeflerin açık olarak elde edilebilmesi için ideal bir görüntü sinyali, Denklem (3.22) haliyle bağdaştırılması gerekmektedir. 2-B bir uzayda, yatayda x_i ve düşeyde z_i noktasına yerleştirilen noktasal bir hedef için ideal bir görüntü denklemi,

$$g_0(x_0, z_0) = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \delta(x_0 - x_i, z_0 - z_i) \tag{3.23}$$

şeklindedir. Burada $\delta(x_0 - x_i - x_0 - x_i)$, 2-B birim-darbe fonksiyonudur. Böyle bir görüntünün x_0- ve z_0- yönlerinde 2-B uzamsal Fourier dönüşümü alındığında

$$G_0(k_{x_0}, k_{z_0}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \sum_{i=1}^{N} \rho_i e^{-jkx_0x_i - jkz_0z_i} \tag{3.24}$$

elde edilir. Elde edilen ideal görüntü sinyalinin Denklem (3.22) deki haliyle bağdaştırılması için karşılaştırıldığında;

$$k_{x_0} = k_x \text{ ve } k_{z_0} = \sqrt{4k^2 - k_x^2} \tag{3.25}$$

olduğu görülmektedir.

$$k_{z_0} = \sqrt{\frac{4w^2}{c_m^2} - k_x^2} \tag{3.26}$$

3.26 deki uzamsal frekans aktarımıyla aşağıda verilen özdeşliğe ulaşılabilir.

$$G_0(k_{x_0}, k_{z_0}) = \frac{E(k_x, w)}{X(w)} \tag{3.27}$$

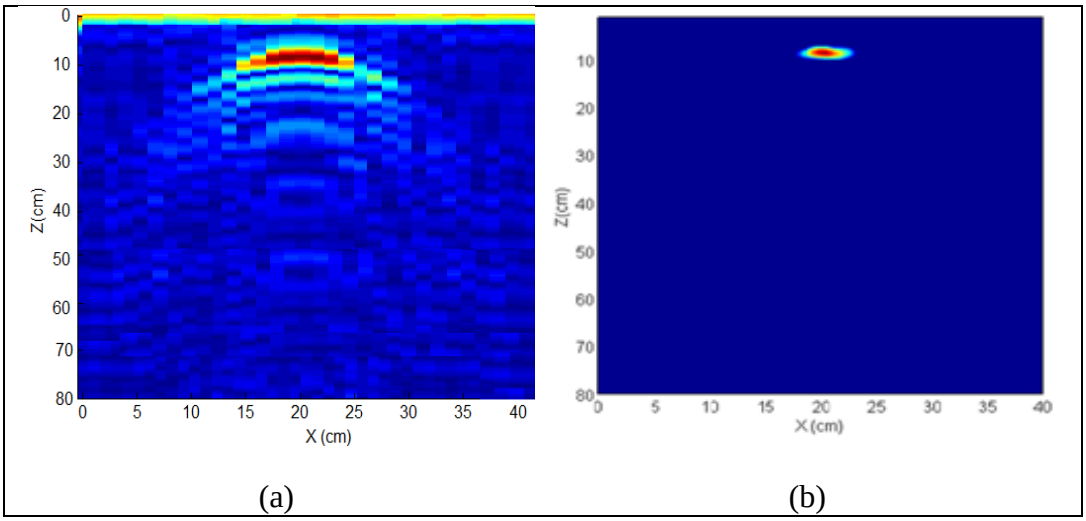
3.27 elde edilirken kullanılan frekans aktarımında yer alan $k_{x_0} = k_x$ eşitliği doğrusal iken $k_{z_0} = \sqrt{4k^2 - k_x^2}$ eşitliği doğrusal değildir. $E(k_x, w)$ bölgesindeki veriler $E(k_x, k_z)$ bölgesine aktarılırken w bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktalar k_z bölgesinde eşit olmayarak ayrılmış noktalar şeklinde olacaktır. $G_0(k_{x_0}, k_{z_0})$ nin ters HFD alınabilmesi için k_z bölgesindeki noktaların eşit olarak ayrılmış olması gereklidir. Bu amaçla bir çeşit interpolasyon kullanılması gerekmektedir. Burada k_{x_0} ve k_{z_0} gerçek uzamsal frekanslar olduğundan, Denklem (3.27)'nin 2-B ters Fourier dönüşümü (TFD) alındığında hedeflerin gerçek konumları odaklanmış olarak aşağıdaki denklem ile elde edilecektir.

$$\mathrm{Radar}_{\mathrm{YAR}}\ (x,z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{E(k_x,k_z}{X(w)}e^{j(k_x+k_z z)}\,dk_x dk_z \tag{3.28}$$

Burada (3.28) Denklemindeki $E(k_x,k_z)$ ifadesindeki k_z değeri, (3.26) eşitliğinden sonra elde edilen k_{z_0} ifadesidir. Algoritma uygulanırken, t bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktalar kümesi, w bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktalar kümesine birikirken, aynı zamanda sentetik aralık bölgemiz olan x bölgesindeki eşit olarak ayrılmış noktalar kümesindeki veriler x=n.Δx için k_x in eşit olarak ayrılmış ayrık değerlerinin kümesinde birikmektedir. Fakat görüntüleme Denklemi (3.28) i değerlendirmek için, verinin k_x ve k_z bölgesinde biriktirilmesi ve $E(k_x,k_z)$ verisinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla veriyi (k_x w) bölgesinden (k_x, k_z) bölgesine aktarmak için, Uzamsal frekans aktarma Denklemi (3.26) kullanılmalıdır. Ancak (3.26) Denklemi kullanılarak, (k_x, w) bölgesinden (k_x, k_z) bölgesine 2B aktarımının doğasının doğrusal olmamasından dolayı, w bölgesindeki eşit olarak ayrılmış noktalar, k_z bölgesinde eşit olmayarak ayrılmış noktalar kümesi halini alacaktır. 2B HFD kullanan (3.26) in verimli değerlendirilmesinin şartı hem k_z hem de k_x bölgesindeki verilerin eşit olarak ayrılmış olmasıdır. Bu sebepten dolayı k_z bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktaları elde etmek için, sinc interpolasyon tekniği kullanılmıştır.

3.2.3. Kullanılan algoritmaların test edilmesi ve diğer algoritmalar ile karşılaştırılması

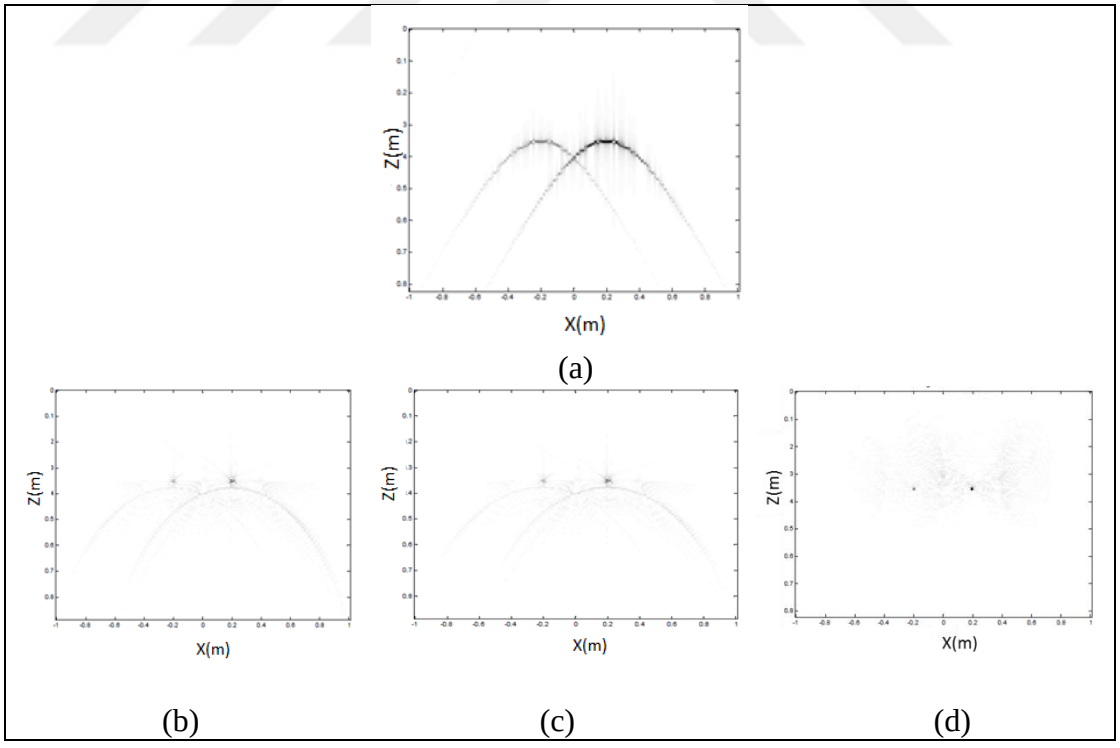
Kullanılan algoritma önce CST programı ile test edilmiş daha sonra deney verisine uygulanmıştır (Şekil 3.10).



(a) (b)

Şekil 3.11. a) CST programı ile elde edilen derinlik kesiti b) CST programından elde edilen kesite göç işlemi uygulanmış görüntüsü

Tezde kullanılan yapay açıklıklı radar bazlı göç algoritması jeofizikte GPR ve sismikte kullanılan algoritmalar ile karşılaştırılması yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Şekil 4.47 'da Tablo 3.1'de verilen parametreler kullanılarak teorik eğriler üretilmiştir. Üretilen bu eğrilere farklı göç algoritmaları uygulanmıştır.



Şekil 3.12. a) Yapay veri b)YAR bazlı göç algoritması b)F-K c) K-M

Tablo 3.1. Teorik eğri üretilirken kullanılan parametreler

Dielektrik Sabiti	2,2	Frekans Aralığı	1-12,4 GHz
Manyetik geçirgenlik	1	Cismin Konumu $(X_1 Z_1)$	(–0,2m, 0.35m)
Elektriksel iletkenlik	0	Cismin Konumu $(X_2 Z_2)$	(0,2m, 0.35m)

Üretilen teorik eğrilere uygulanan göç algoritmalarını karşılaştırılmasında RMS hata değeri ve işlem süreleri baz alınmıştır. RMS hata değeri Denklem (3.29)'de verilmiştir

$$E_{RMS} = \sqrt{\sum_{a=0}^{A-1}\sum_{b=0}^{j-1}(F_{ideal}(x_a, z_b) - F_{goc}(x_a, z_b))^2} \tag{3.29}$$

Göç algoritmalarının RMS hata değeri ile işlem süreleri Tablo 3.2' de verilmiştir. Tabloya bakıldığında bu algoritmalardan en iyi sonucu 2,45 hata değeri ile Kirchhoff Algoritması (K-M) vermektedir. Fakat işlem yükünün ağır olası nedeniyle işlem süresi en uzun olan algoritmadır. İşlem süreleri bakımından YAR algoritması ile Frekans Dalga Göç Algoritması (F-K) aynı olmasına karşın YAR algoritmasının RMS hata değeri dah düşük olduğu yani daha iyi sonuç verdiği gözlenmektedir.

Tablo 3.2. Göç algoritmalarının karşılaşması

Göç Algoritmaları	İşlem Süresi(sn)	RMS Hata
YAR Algoritması	1	2,72
Frekans Dalga Göç Algoritması (F-K)	1	2,69
Kirchhoff Algoritması (K-M)	546	2,45

4. DENEY ÇALIŞMALARI

4.1. Ölçüm Parametrelerinin Belirlenmesi

4.1.1. Frekans ve bant genişliği seçimi

İletilen dalga toprağın içinde hedefin bulunduğu derinliğe kadar nüfus edebilmelidir. İstenilen çözünürlüğü sağlamak için uygun bant genişliği seçilmelidir. Yatay çözünürlük yan yana aynı derinlikte bulunan iki cismi birbirinden ayırt etmek için önemlidir. Yatay çözünürlüğü etkileyen koşullardan biri ortamın dalga zayıflamasıdır. Alıcı ve vericiyi farklı konumlara yerleştirmek çözünürlüğü arttırmada etkili olacaktır. Toprağın homojen olduğu ve ε_r dielektrik sabitine sahip olduğu kabul edilirse dikey çözünürlük sınırı ΔR , radar için darbe genişliği ile doğru veye bant genişliği ile ters orantılıdır. Δf, bant genişliği, ε_r dalganın ilerlediği ortamın dielektrik sabiti ve c dalganın boşlukta yayılma hızı olmak üzere dikey çözünürlük,

$$\Delta \mathrm{R} = \frac{\mathrm{v}}{2.\Delta \mathrm{f}} \tag{4.1}$$

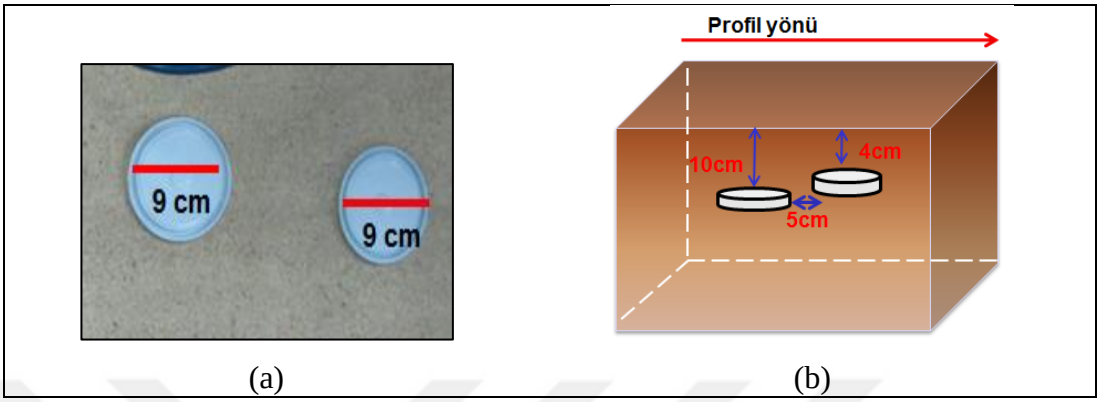
olarak verilir.

$$\mathrm{v} = \frac{\mathrm{c}}{\sqrt{\varepsilon_\mathrm{r}}} \tag{4.2}$$

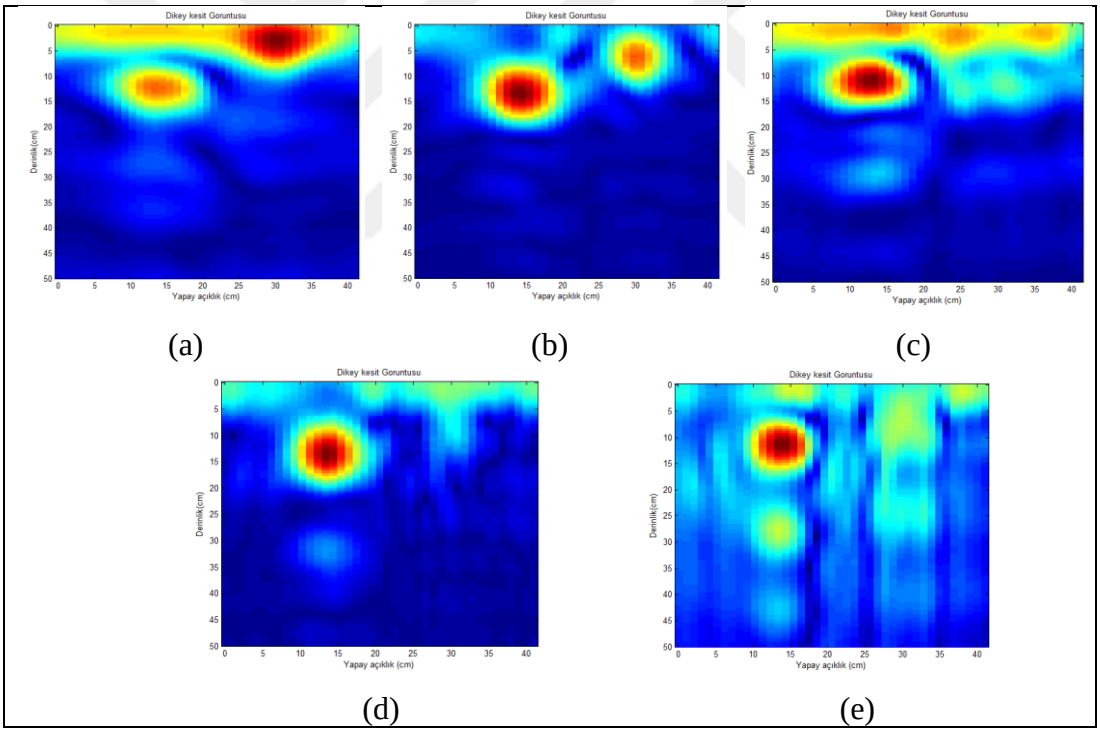
Elektromanyetik dalganın topraktaki hızıdır.

Deneylerde kullanacağımız frekans bant genişliğinin belirlemek amacıyla kum yüzeyinden 10cm ve 4cm olan derinlikte çapları 9cm olan ince iki metal nesne kum havuzuna gömülmüştür. Farklı frekans bant aralıklarında 64 adım frekansında

ölçümler alınmıştır. Şekil 4.1'de gömülen cisimlerin kum havuzundaki şematik görüntüsü verilmiştir. İlk ölçümde bant genişliği 1Ghz olarak ayarlanıp 2Ghz ile 7Ghz frekans aralığı arasında ölçüm alınmıştır(Şekil 4.2).

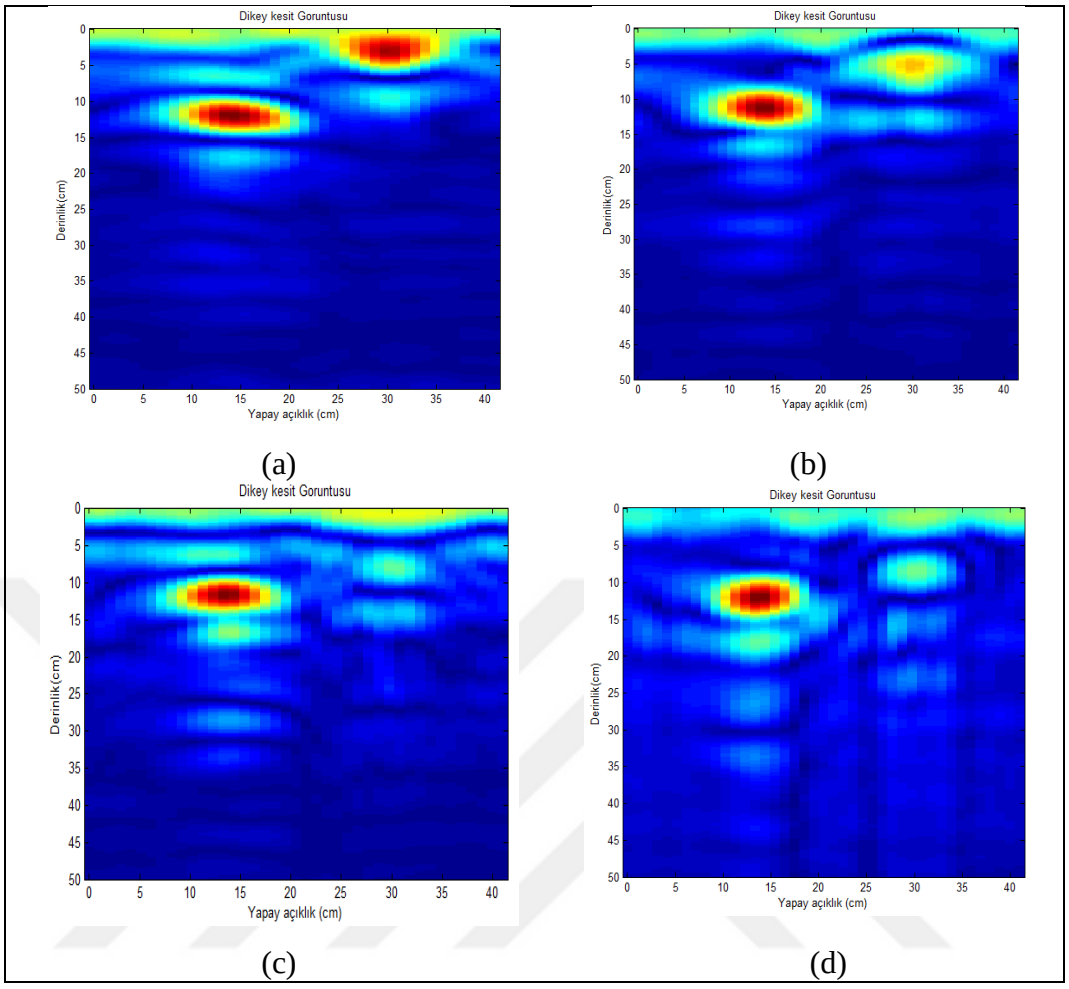


Şekil 4.1. Gömülü cisimlerin a) b) Kum havuzundaki şematik görüntüsü



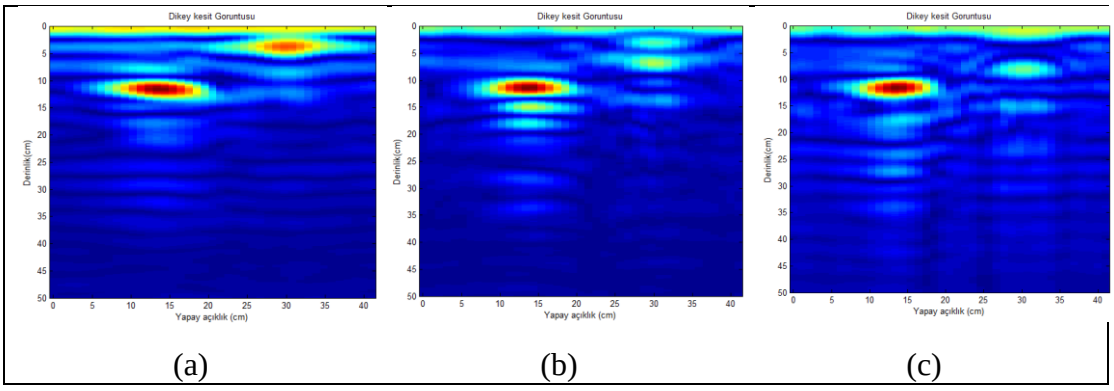
Şekil 4.2**.** Bant genişliği 1Ghz a) 2-3Ghz b) 3-4Ghzc) 4-5Ghz d) 5-6Ghz e) 6-7Ghz

Yapılan birinci ölçüm sonuçlarından cisimlerin kalınlıklarının olduklarından daha fazla göründükleri dikkat çekmiştir. Bant genişliği 2Ghz olarak değiştirilerek ölçümler tekrar edilmiş ve kesit görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekildeki görüntülerden cismin kalınlığının nisbeten azaldığı gözlenmiştir.



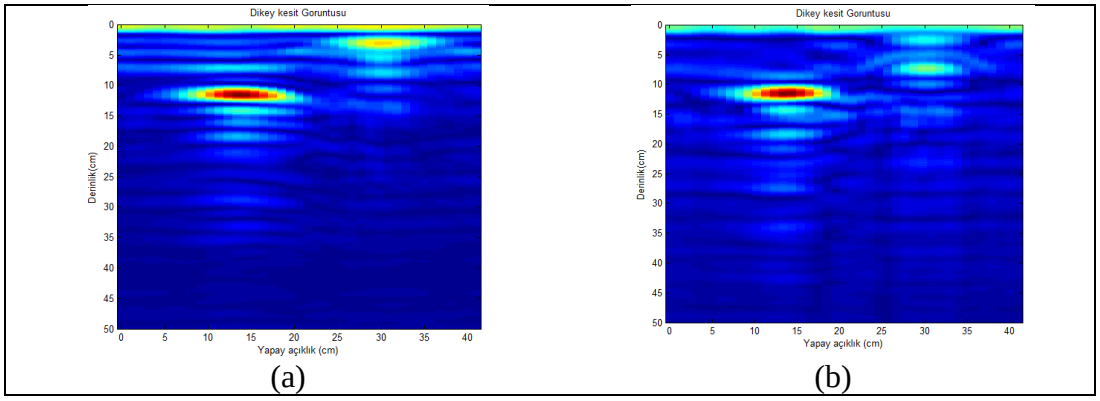
Şekil 4.3**.** Bant genişliği 2Ghz a) 2-4Ghz b) 3-5Ghzc) 4-6Ghz d) 5-7Ghz

Bant genişliği 3 Ghz olarak alınan ölçüm sonuçlarınan elde edilen görüntülerde cisim kalınlıklarının gerçeğe bir adım daha yaklaştığını fakat yüzeye yakın olan cismin görüntüde belirginliğinin azaldığını görüyoruz.



Şekil 4.4. Bant genişliği 3Ghz a) 2-5Ghz b) 3-6Ghzc) 4-7Ghz

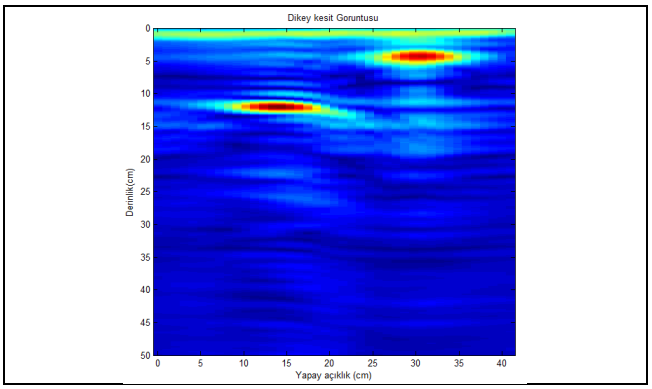
Şekil 4.4’ e baktığımızda yüzeye yakın cismin belirlenmesinde güçlük yaşandığı görülmüştür.



(a) (b)

Şekil 4.5**.** Bant genişliği 4Ghz a) 2-6Ghz b) 3-7Ghz

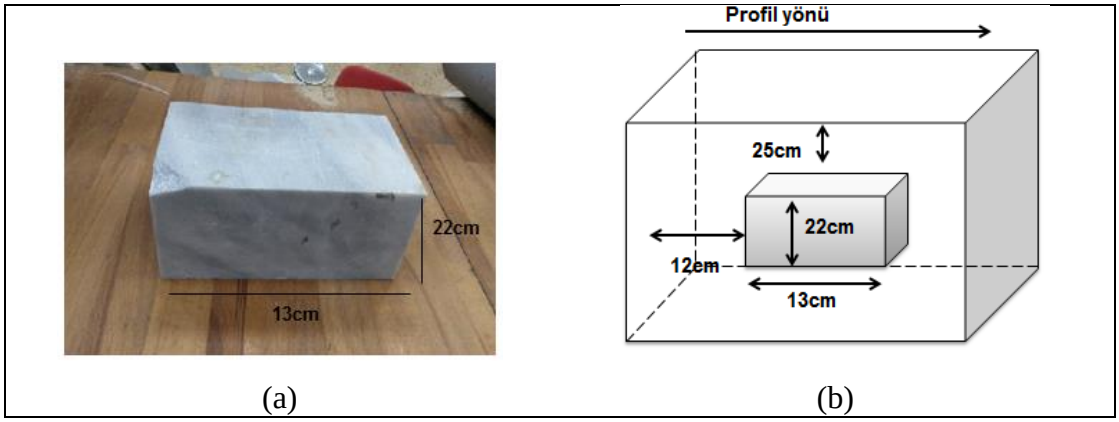
Yapılan ölçüm görüntülerinin değerlendirilmesi sonucunca bant genişliğinin artmasıyla dikey çözünürlüğün arttığı iki cisim arasındaki mesafenin arttığını görüyoruz cisimlerin dikey yönde birbirine daha yakın gömülmesi durumunda iki cismin ayırt edilmesi güçleşecek cisimler tek cisim gibi görülecektir. Şekil 4.6’daki ölçüm görüntüsünden bizim deneylerimiz için en uygun bant genişliğinin 5Ghz olduğu ve ölçümlerin bu bant genişliğinde 2-7 Ghz arasında yapılması gerektiğini düşündürmüştür. Fakat deneylerde dielektrik malzemelerde kullanılacağı için bant genişliği belirlenmeden önce aynı ölçümler dielektrik malzemeler kullanılarak tekrar edilmiştir.



Şekil 4.6**.** Bant genişliği 5Ghz frekans : 2-7Ghz

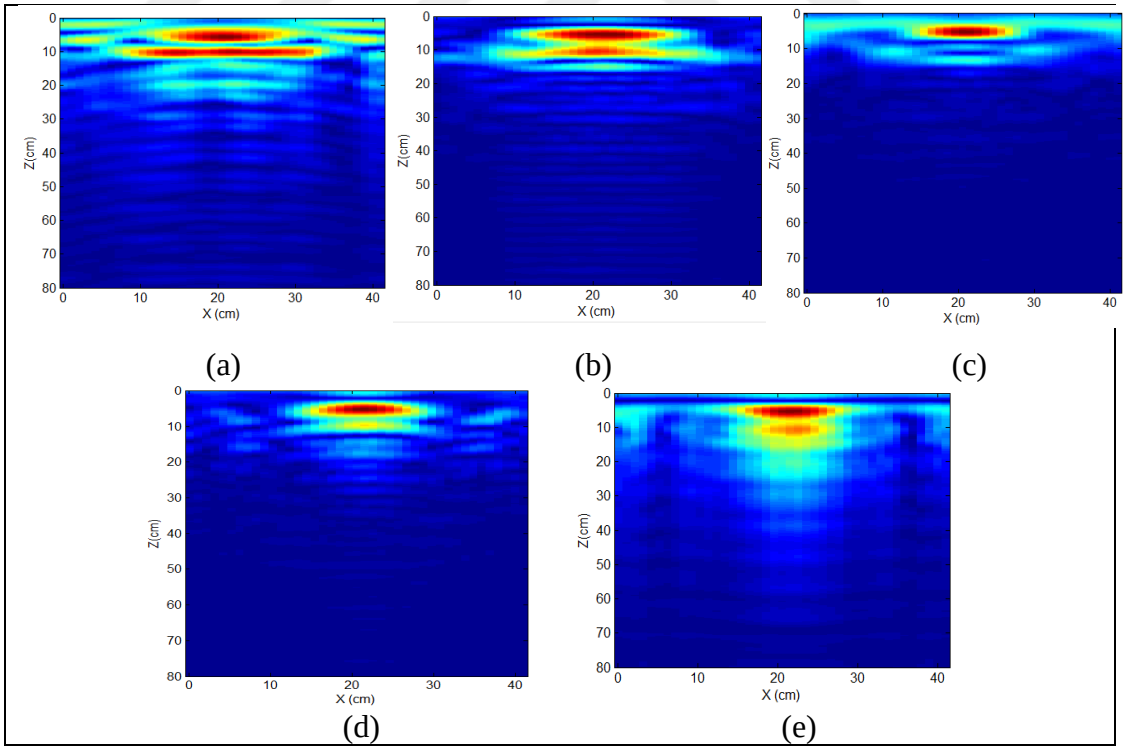
Yeraltı araştırmalarında gömülü yapı sınırının derinliğinin yanısıra bu yapının hangi derinliğe kadar uzandığı yani yapının kalılığı bizim için önem teşkil etmektedir. Bu

nedenle Şekil 4.7'de fotoğrafı ve kum havuzundaki şematik görüntüsü verilen mermer için ölçümler yapılmıştır.



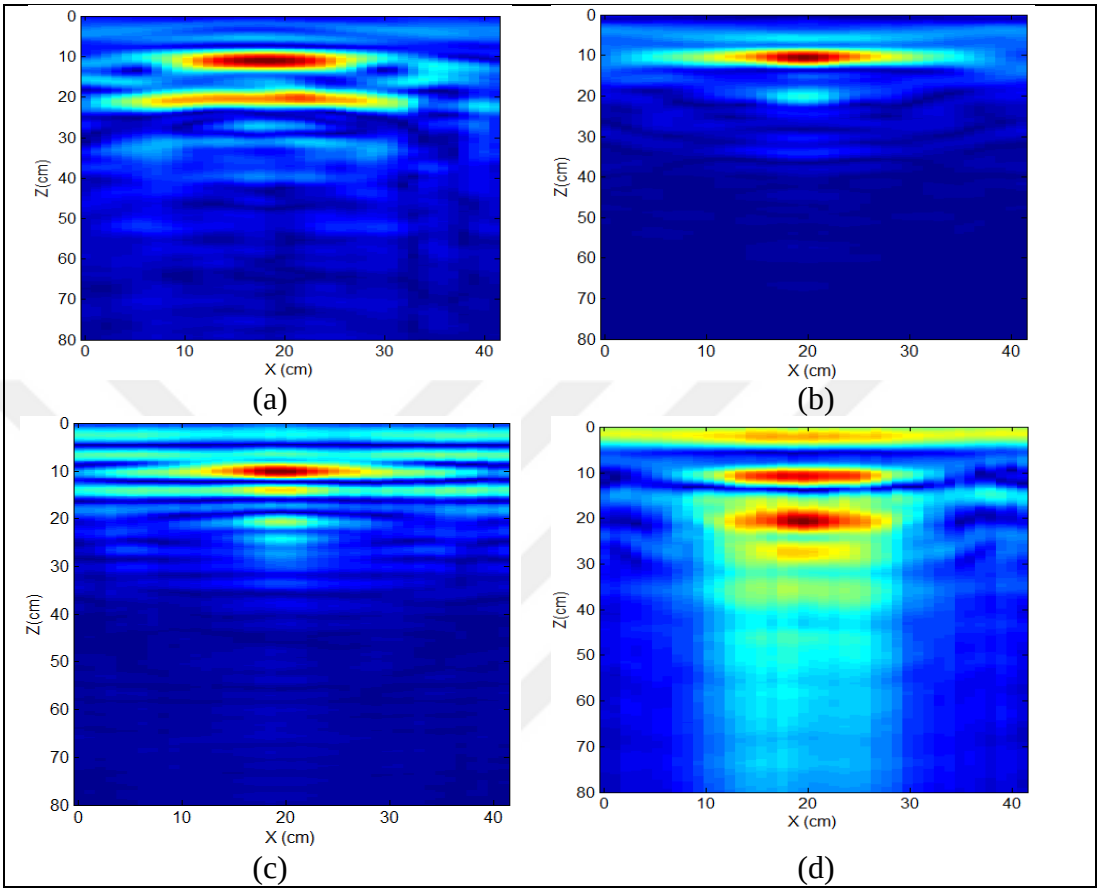
Şekil 4.7. a) Gömülü mermer cisim b) Kum havuzundaki şematik görüntüsü

Bant genişliği 1 Ghz olarak yapılan çoğu ölçümlerde (Şekil 4.8) alt sınırın görülmediği yada olduğundan daha yüzeyde görüldüğü gözlenmiştir. Ayrıca gömülü cisim kum yüzeyine gerçekten daha yakın görülmektedir.



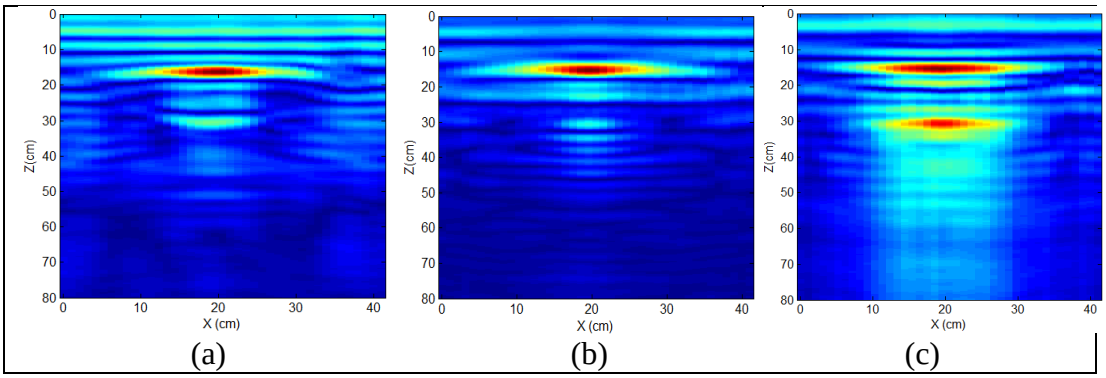
Şekil 4.8. Bant genişliği 1Ghz a) 2-3Ghz b) 3-4Ghzc) 4-5Ghz d) 5-6Ghz e) 6-7Ghz

Şekil 4.9'da Bant genişliği 2 Ghz olarak ayarlanıp alınan ölçümlerin kesit görüntülerinde de aynı sorun devam etmektedir. 2-4Ghz ile alınan ölçümde yapının genişliği 23cm görülürken diğer ölçümlerde 10cm'ye kadar düşmektedir.



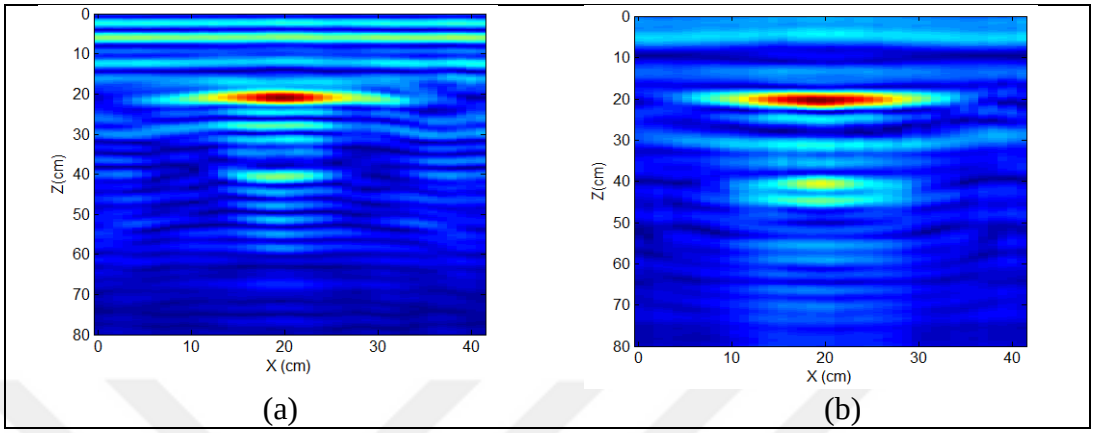
Şekil 4.9. Bant genişliği 2Ghz a) 2-4Ghz b) 3-5Ghzc) 4-6Ghz d) 5-7Ghz

Bant genişliği 3Ghz olan ölçümde (Şekil 4.10) yapının gerçek derinlik ve kalınlığına nispeten yaklaşıldığı fakat yine de doğru sonuç vermediği görülmüştür.



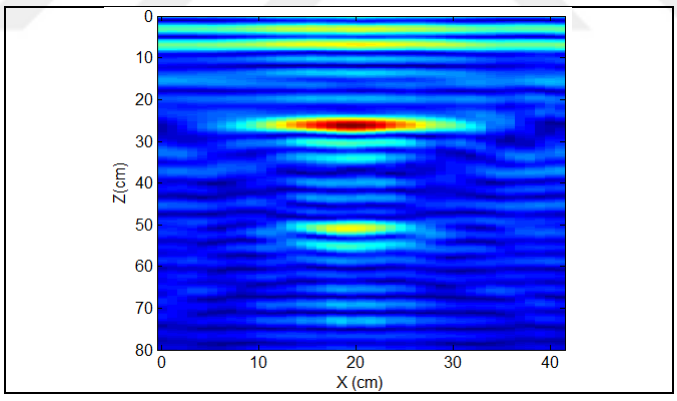
Şekil 4.10**.** Bant genişliği 3Ghz a) 2-5Ghz b) 3-6Ghzc) 4-7Ghz

Şekil 4.11'de kesitleri görülen bant genişliği 4Ghz olarak belirlenip alınan ölçümlerden mermerin kum yüzeyinden 20cm derinde mermer kalınlığı ise 20cm imiş gibi görülmektedir.



Şekil 4.11**.** Bant genişliği 4Ghz a) 2-6Ghz b) 3-7Ghz

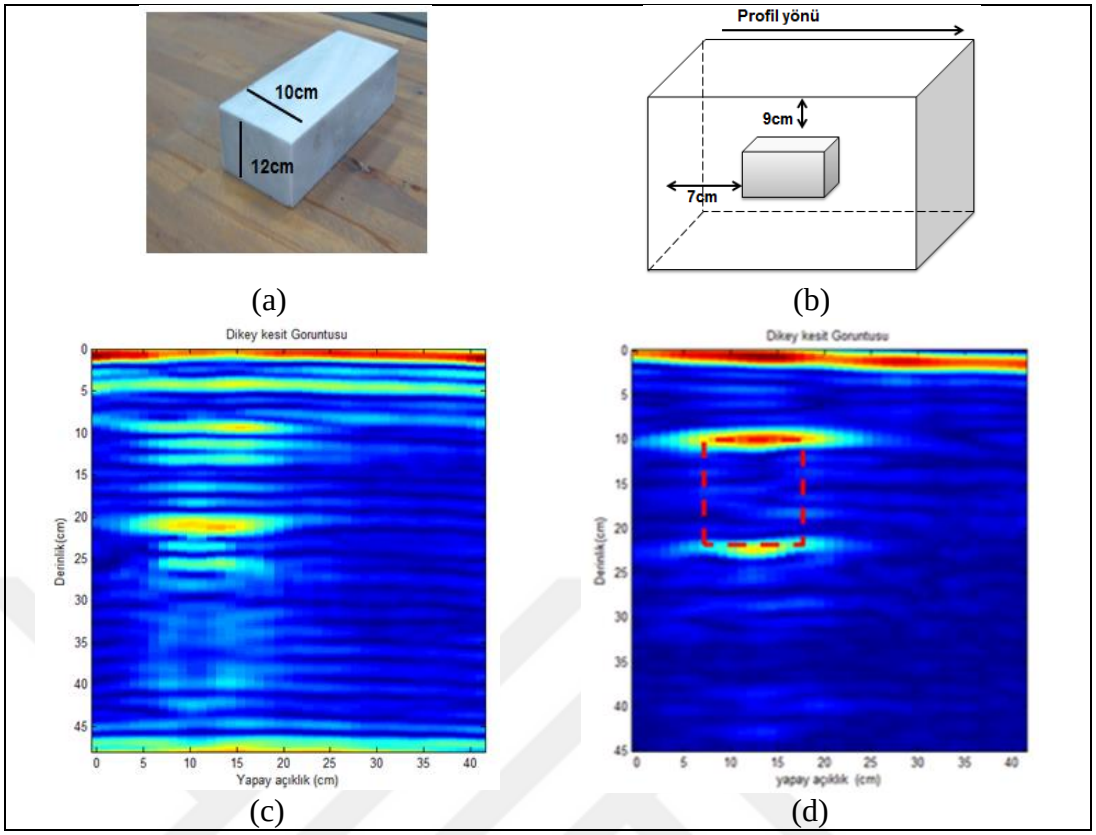
Bant genişliği 5Ghz frekans 2-7Ghz arasında yapılan ölçümlerden elde edilen derinlik kesitlerinden yapının yüzeyden gerçek derinliğine ve kalınlığına ulaşılmıştır(Şekil 4.12).



Şekil 4.12**.** Bant genişliği 5Ghz frekans : 2-7Ghz

4.1.2.Frekans adım sayısının belirlenmesi

En uygun frekans adım sayısını belirlemek için Şekil 4.13'te fotoğrafı verilen 12x10x20cm dikdörtgen prizması şeklindeki mermer 9 cm derinliğe gömülerek 34 adım frekansında ve 64 adım frekansında ölçüm alınmış ve derinlik kesitleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Kesitlerin karşılaştırılması sonucunda 64 frekans adımı kullanılarak alınan ölçümünün çözünürlük açısından daha iyi olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.13. a) Gömülü mermerin b) Mermerin kum havuzundaki şematik görüntüsü c) 2-7 GHZ frekans bantında alınan deney sonuç görüntüsü d) 34 adım frekansı b) 64adım frekansı

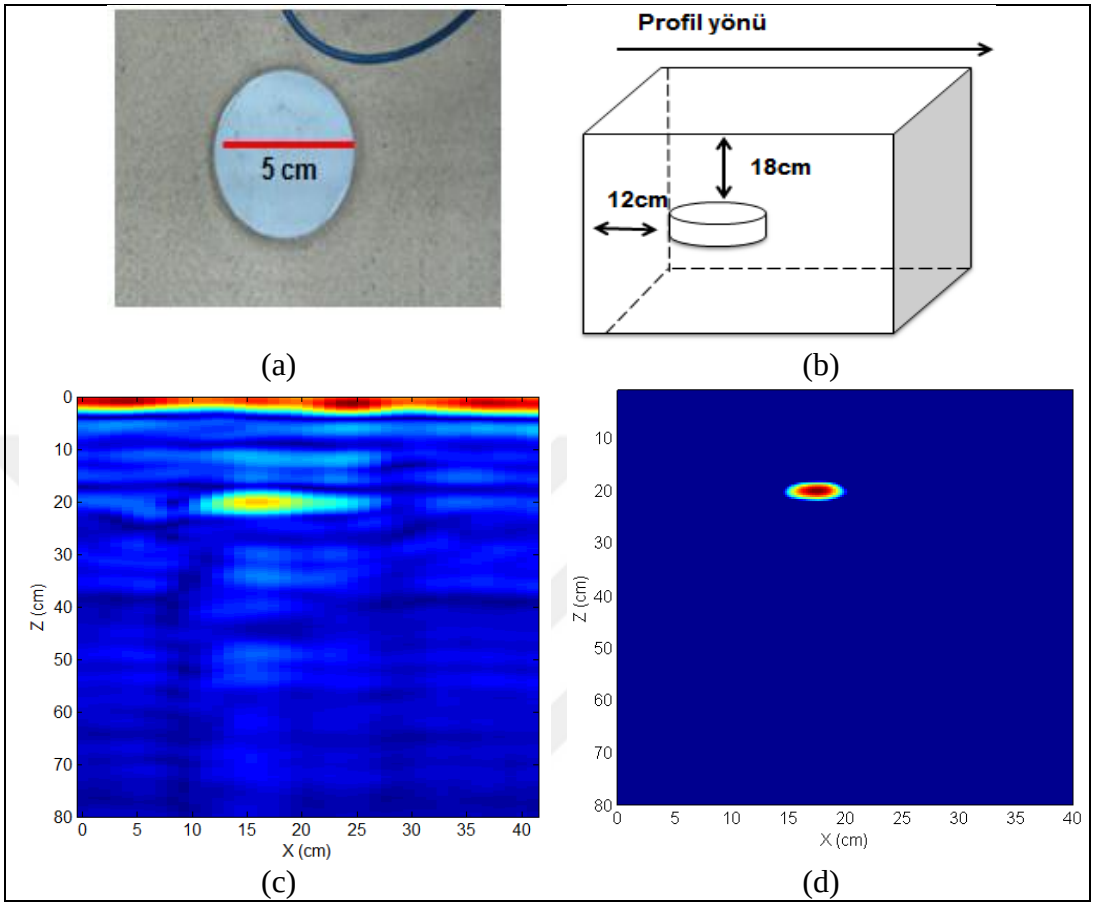
Parametre belirleme çalışmalarından sonra Tablo (4.1)'de verilen parametreler kullanılarak deneysel çalışmalara başlanmıştır.

Tablo 4.1. Ölçüm Parametreleri

Ölçüm Parametreleri			
Frekans aralığı	2-7 GHz	Profil Uzunluğu	40cm
Bant Genişliği	5 GHz	Ölçüm Nokta Sayısı	41
Frekans Adım Sayısı	64		

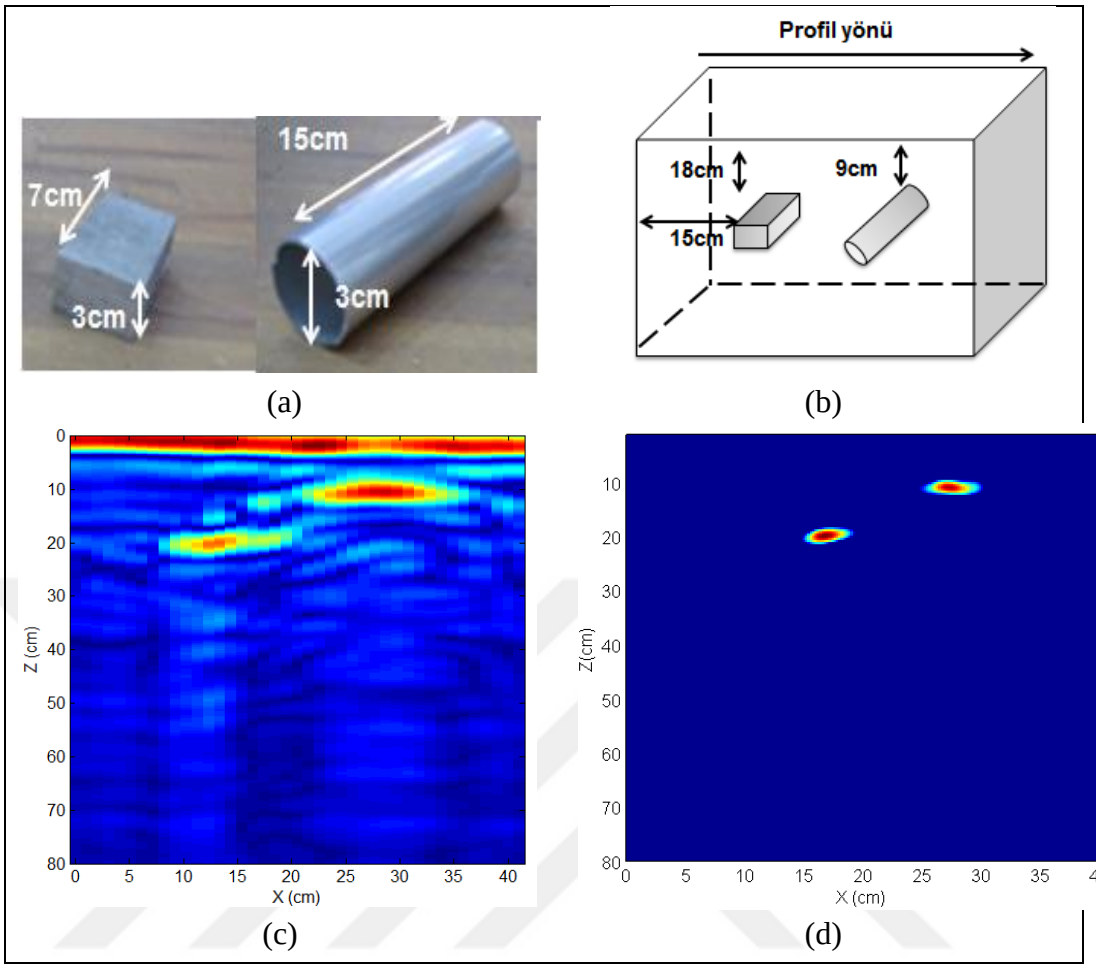
Metal nesnelerin yansıtıcılığının dielektrik malzemelerden yüksek olduğu için ölçümlere metal malzemelerden başlanması uygun görülmüştür. Ölçüm için metal bir arkeolojik eser olan eski zamanlardan kalma sikkeleri temsilen daire seklinde çapı 5 cm olan ince metal cisim kum yüzeyinde 18cm derine gömülmüş ve ölçüm alınmıştır. Gömülü cismin fotoğrafı kum havuzundaki konumunu belirleyen kum

havuzu şematik çizimi ve alınan ölçüm verilerinden elde edilen derinlik kesitleri Şekil 4.14'de verilmiştir.



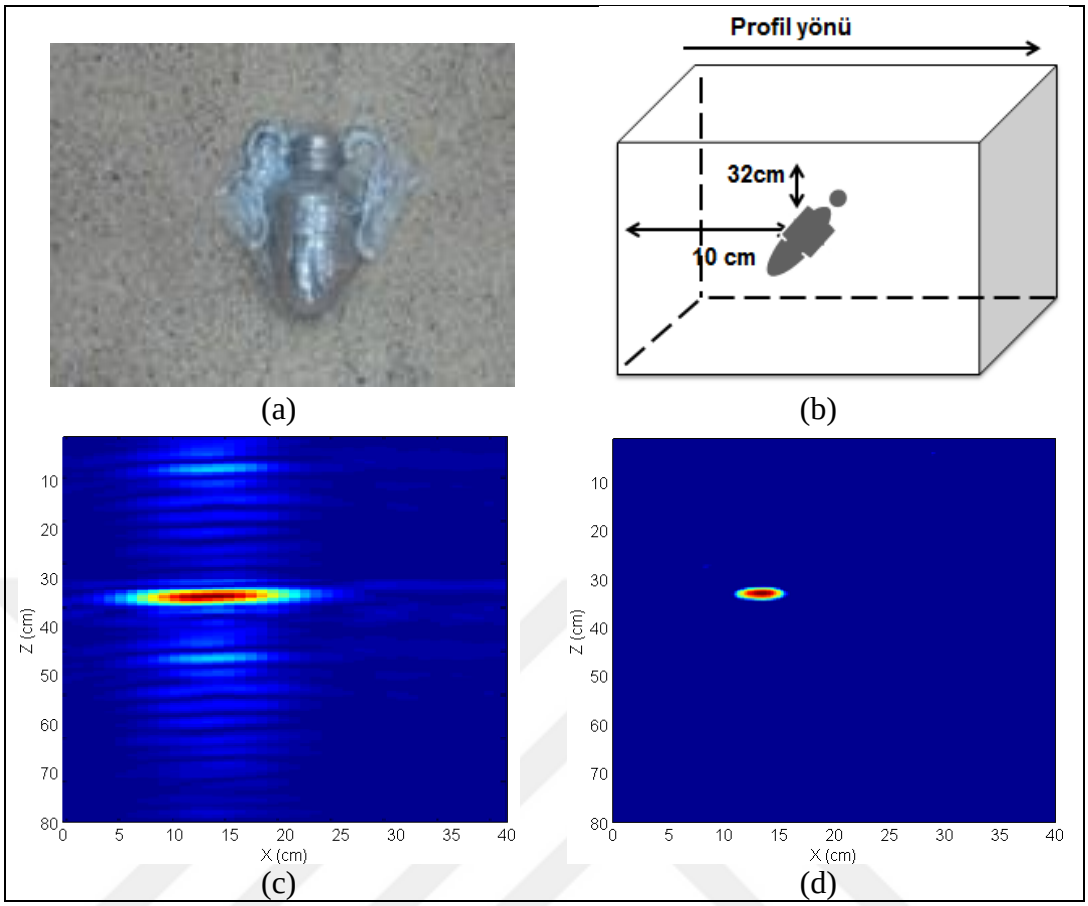
Şekil 4.14.a) Metal daire (çap: 5) b) Metal dairenin kum havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Daire şeklinde ve yüzeyi düzlemsel yapıda olan metalin kum havuzundaki konumu belirlendikten sonra Gömülü cisimlerin şeklinin belirlenebilirliğini araştırmak en azından silindirik mi yoksa düzlemsel bir yapıda mı olduklarını anlamak için biri düzlemsel yapıda diğeri silindirik yapıda aynı genişlik ve çapta (3cm) iki metal cisim kullanılmıştır. Düzlemsel bir yapıya sahip olan cisim yüzeyden 18cm derine silindirik boru şeklindeki cisim ise yüzeyden 9cm derine gömülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde silindirik borunun hiperbol şeklinde görüldüğü düzlemsel Şekilli cisimde bir hiperbol görülmediği gözlemlenmiştir(Şekil 4.15). Bu sonuç azda olsa cismin şekliyle ilgili bize yorum yapma olanağını sağlamıştır.



Şekil 4.15.a) Gömülü metal cisimlerin b) Metal cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

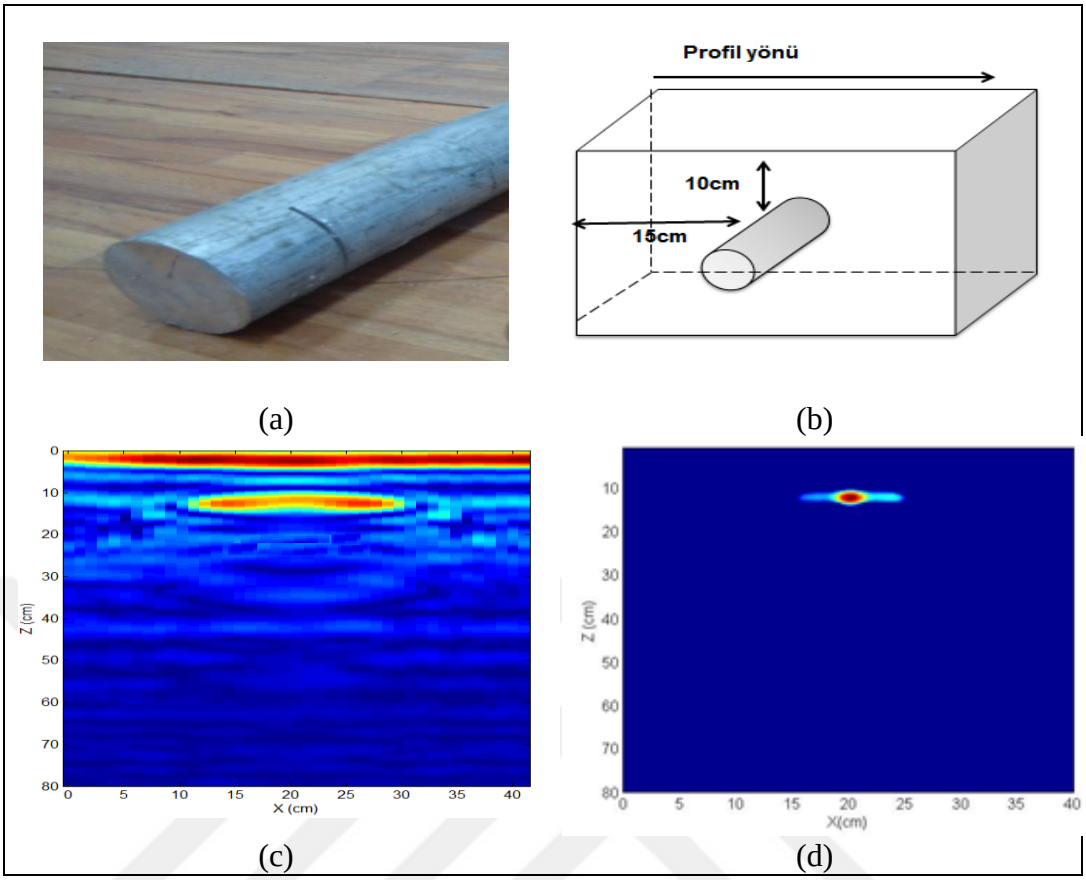
Yine metal arkeolojik eseri temsilen bir kupa kum havuzuna gömülmüştür. Ölçümde kullanılan kupanın boyutları genişlik 5cm boyu ise 15cm dir. Tezde açıklanan derinlik kesiti oluşturma algoritmasıyla oluşturulan dikey kesit Şekil 4.16 görüntüsüne bakıldığında kupa silindirik yapıda olmasına karşın kesitte hiperbol gözlenmemiştir. Bunun nedeni kupanın kulplarının olduğu düşünülmektedir. Göç işlemi uygulanmış kesit görüntüsüne bakıldığında dikey kesit görüntüsündeki saçılmalar ve gürültülerin giderildiği gözlemlenmiştir. Kesitlerden gömülen cisim derinliği kum yüzeyinden 33cm derinde profil başlangıç noktasından 12cm uzaklıkta olduğu anlaşılmaktadır. Cismin belirlenen konumu gerçek konumunu ile uyum içindedir.



Şekil 4.16.a) Gömülü metal kupa(eni: 10cm) b) Metal kupanın kum havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Önerilen tekniğin şehir alt yapı planlamasında kullanılabilirliğini araştırmak maksadıyla metal ve metal olmayan borular ile deney çalışmaları yapılmıştır.

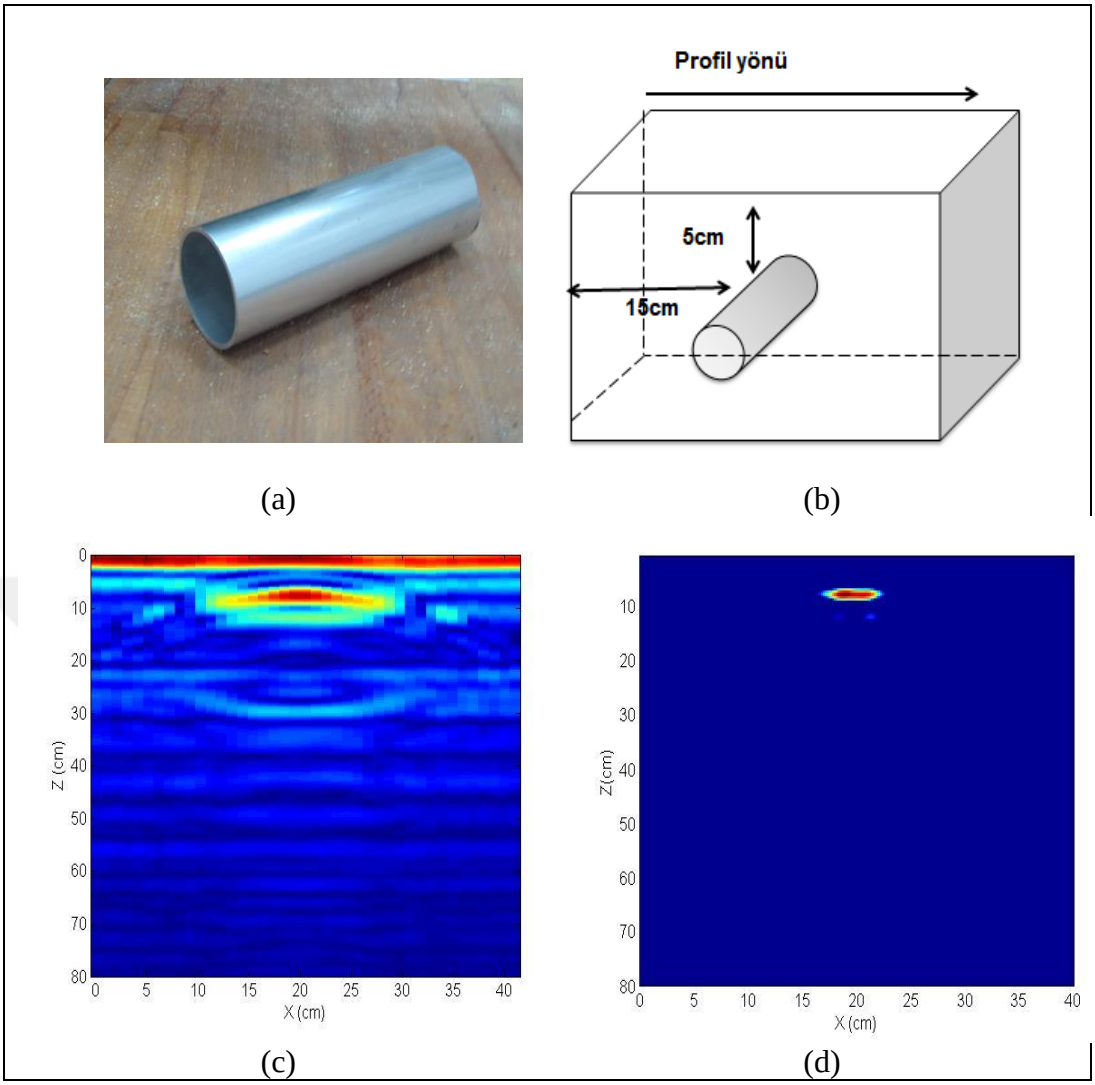
Yapılan ölçümde çapı 7cm olan metalden yapılmış silindir şeklindeki boru kum havuzunun yüzeyinden 10cm derine gömülmüş ve borunun uzanımına dik yönde profil ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen veri görüntü oluşturma algoritmasına sokularak dikey kesit görüntüsü elde edilmiştir. Daha sonra kesit görüntüsüne göç işlemi algoritması uygulanması ile borunun havuzdaki konumu belirlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17.a) Metal borunun (çap:7cm) b) Metal borunun havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

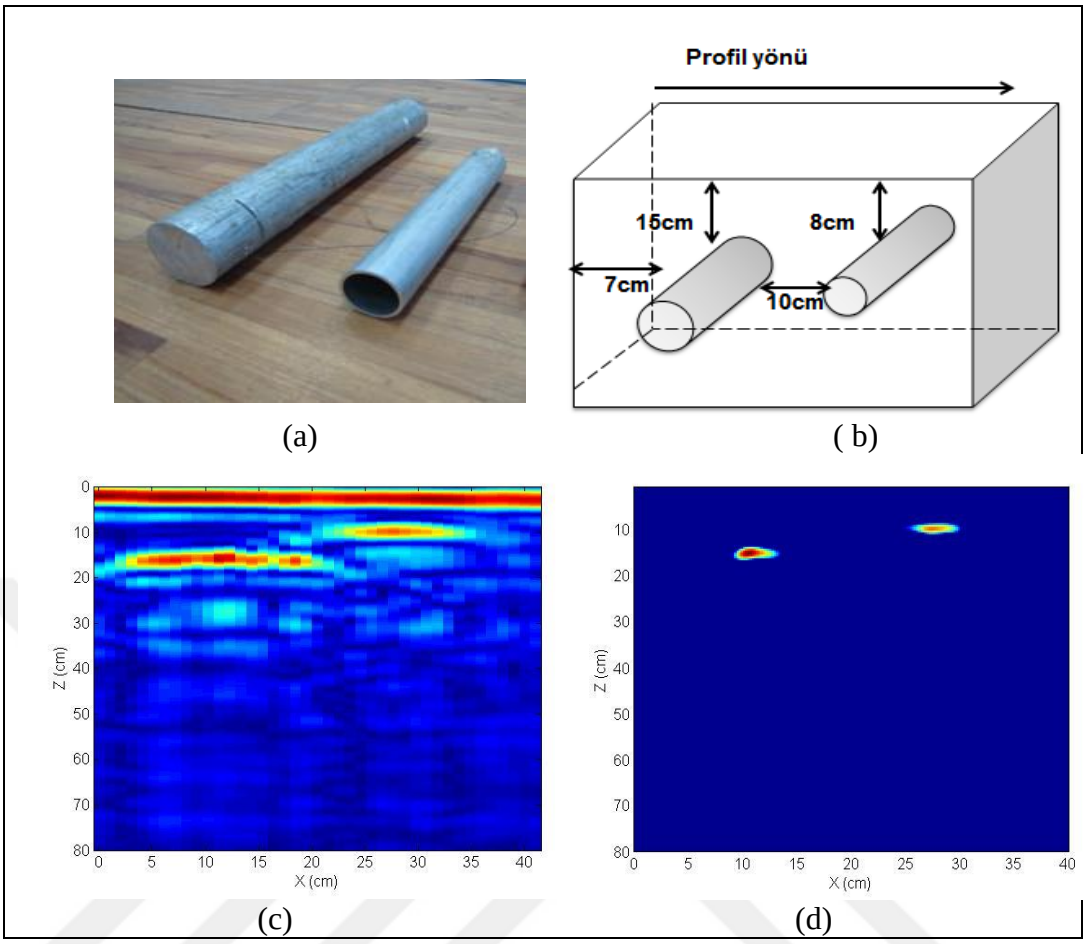
Şekil 4.17.c 'deki kesite bakıldığında kesitte hiperbolik bir görünüm varken göç işlemi ile bu görünüm yerini borunun gerçek konumuna bırakmıştır.

Daha küçük çapa (çap:5) sahip silindir şeklindeki boru kum yüzeyinden 5cm derine gömülmüş ve yine aynı ölçüm parametreleri kullanılarak ölçüm alınmıştır. Ölçümde kullanılan metal borunun fotoğraf görüntüsü, havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü ve derinlik kesitleri Şekil 4.18 da verilmiştir. Kesitten silindirin yataydaki konumunun profil başlangıcından 15cm, kum yüzeyinden ise 5 cm uzaklıkta olduğu anlaşılmıştır.



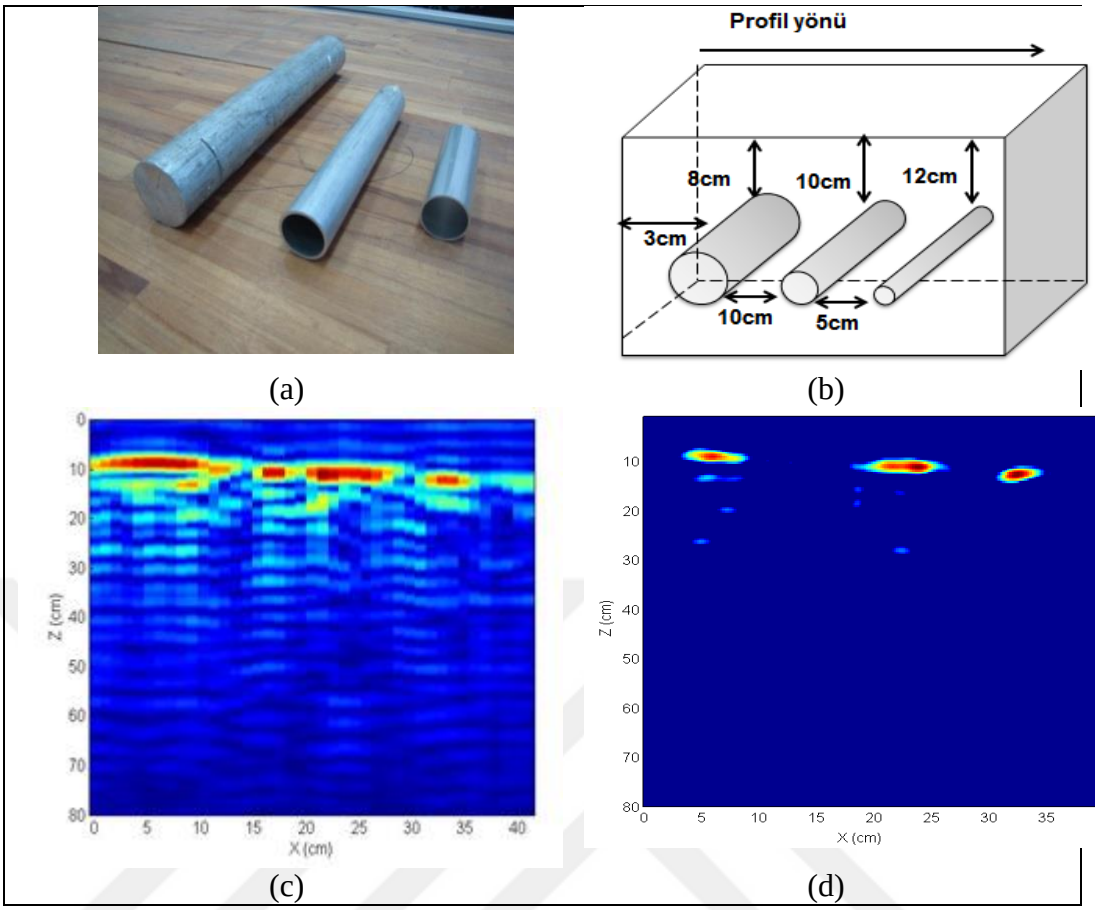
Şekil 4.18.a) Metal borunun (çap: 5cm) b) Metal borunun havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Tek silindirik metal borunun konumunun başarıyla belirlenmesinden sonra farklı çaplara sahip iki metal boru çapı büyük olan boru daha derinde olacak şekilde aralarında 10cm yatay mesafe bırakılarak kum yüzeyinden 15 ve 8cm derine gömülmüş ve ölçüm yapılmıştır. Ölçüme ait görüntüler Şekil 4.19 de verilmiştir. Kesitlere bakıldığında boruların konumlarının belirgin bir şekilde ortaya konulduğu görülmektedir.



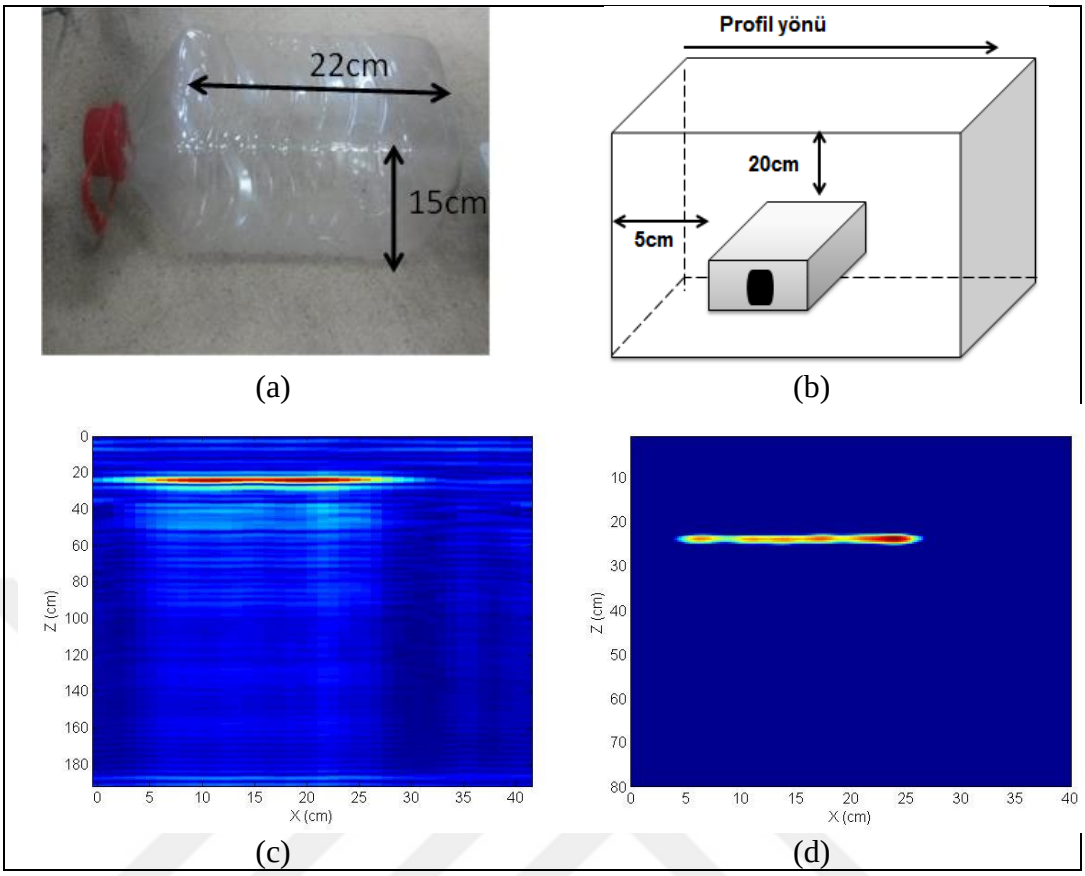
Şekil 4.19. a) İkili metal boruların (çaplar:7cm ve 5cm) b) Metal borunun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Metal borular arasındaki mesafe azaltılarak yani borular birbirlerine yaklaştırılarak 3 farklı çapa sahip (çaplar:7,5 ve 4,5) metal boru hemen hemen aynı derinliğe gömülmüş ve ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonucuna bakıldığında Şekil 4.20'de borular birbirine çok yakın olmasına rağmen kesitten 3 adet boru olduğu anlaşılmaktadır fakat boruların konumları tam belirlenememektedir. Radar dikey kesitine göç ettirme işleminden sonra boruların konumları net bir şekilde ortaya konmuştur.



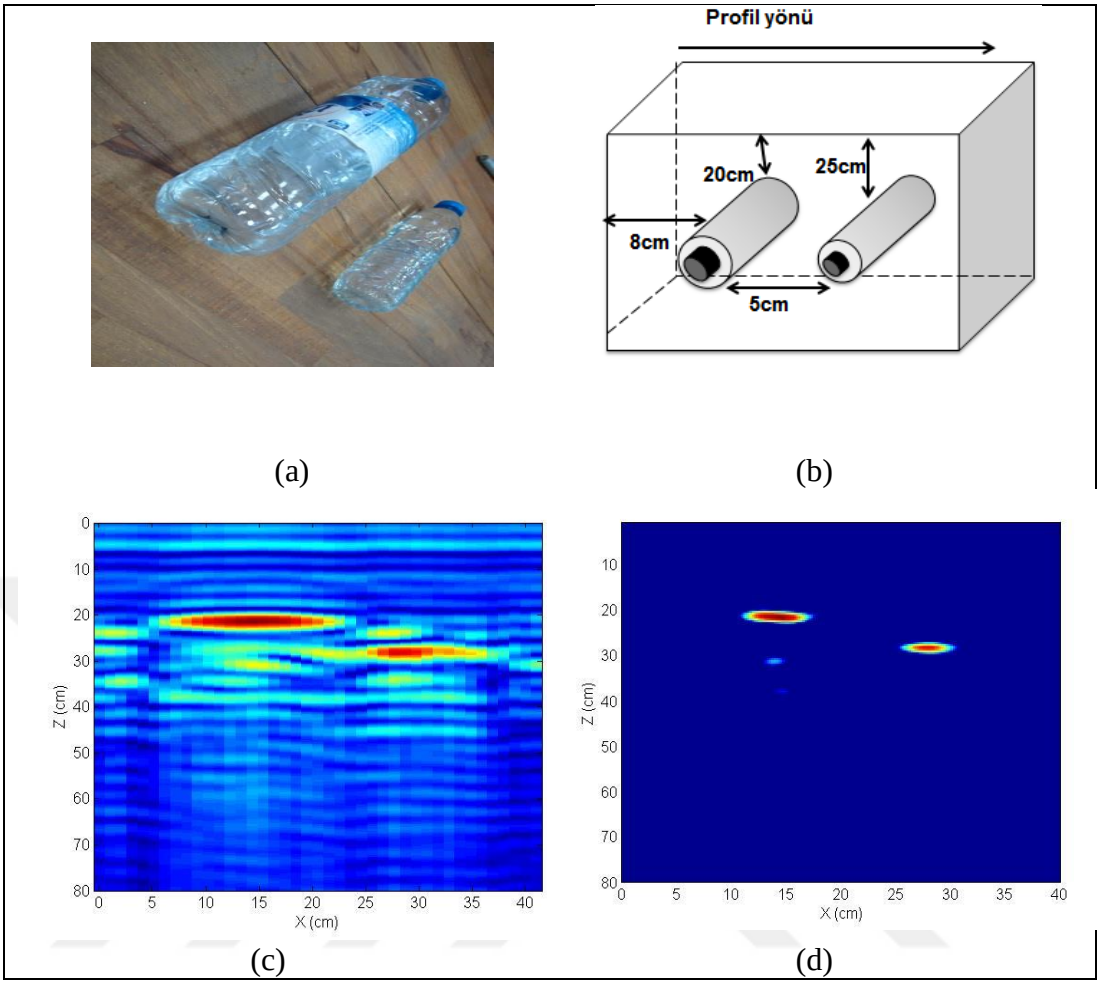
Şekil 4.20.a) Üçlü metal boruların (çaplar:7cm,5cm ve 4,5) b) Metal boruların havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Metal cisimlerin tespit edilme çalışmalarından sonra dielektrik malzemelerin tespit çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Bunun için ilk olarak dielektrik sabiti yüksek olan bir malzeme (su) tercih edilmiştir. Boyutları 20x20x35 olan dikdörtgenler prizması şeklindeki bir damacana saf su ile doldurulup kum yüzeyinden 23cm derine gömülmüştür. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde Şekil 4.21'de görüldüğü gibi damacananın yüzeye olan mesafesi 23cm profil başlangıcına olan mesafesi ise 4cm dir. Damacananın yüzeyinin düz olması nedeniyle yüzey boyunca yansıma verisi toplandığından damacananın eninin 20cm olduğu da kesitten anlaşılmaktadır.



Şekil 4.21.a) Su damacanası b) Su damacanasının kum havuzundaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

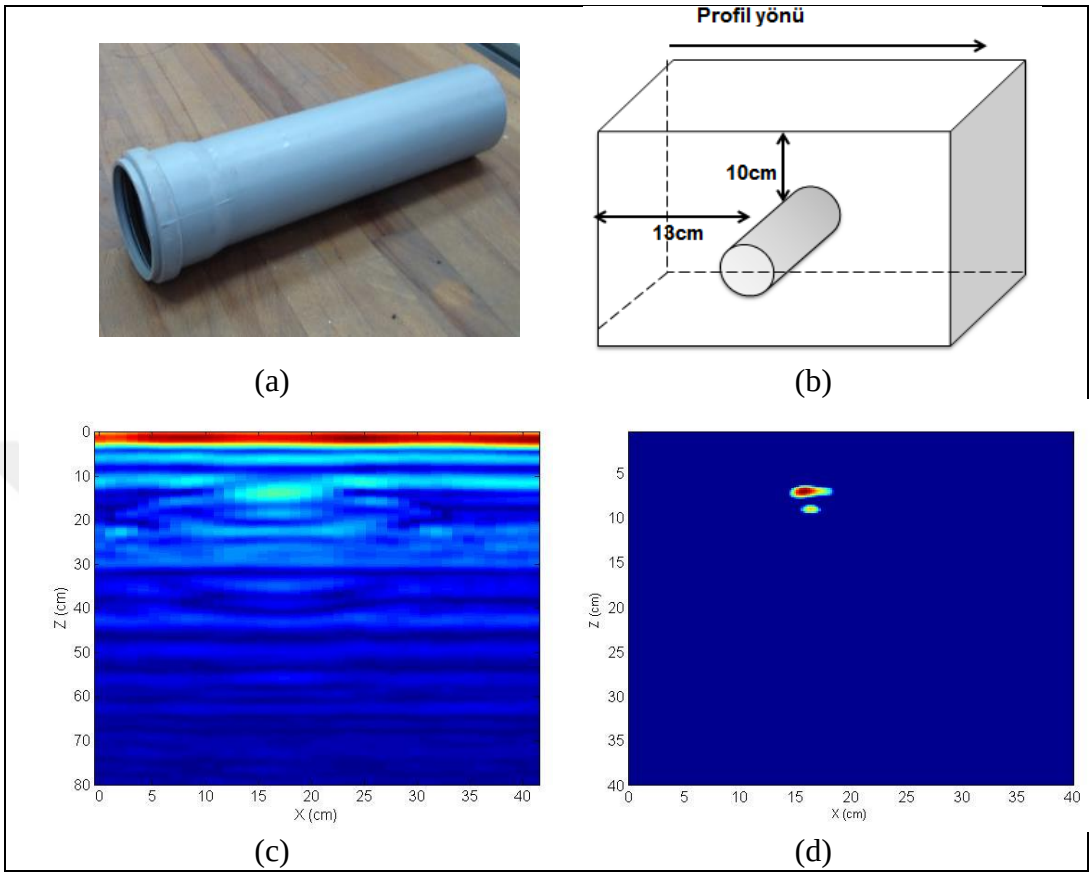
Daha küçük ve silindirik yapıda olan iki su dolu pet şişe ile deney tekrar edilmiştir. Deneyde kullanılan farklı çaplara ait iki adet pet şişe kullanılmıştır. Çapı büyük olan şişe kum yüzeyinden 20cm derine, çapı küçük olan şişe ise kum yüzeyinden 25 derine gömülerek ölçüm alınmıştır. Şekil 4.22'te verilen derinlik kesitleri bu bilgileri destekler niteliktedir. Çapı büyük olan şişe çapı küçük olan şişeden yüzeye daha yakın gömülmesine ve aralarında çok az bir mesafe olmasına rağmen küçük şişenin görünmesini engellememiştir.



Şekil 4.22.a) Su dolu pet şişelerin b) Su dolu pet şişelerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

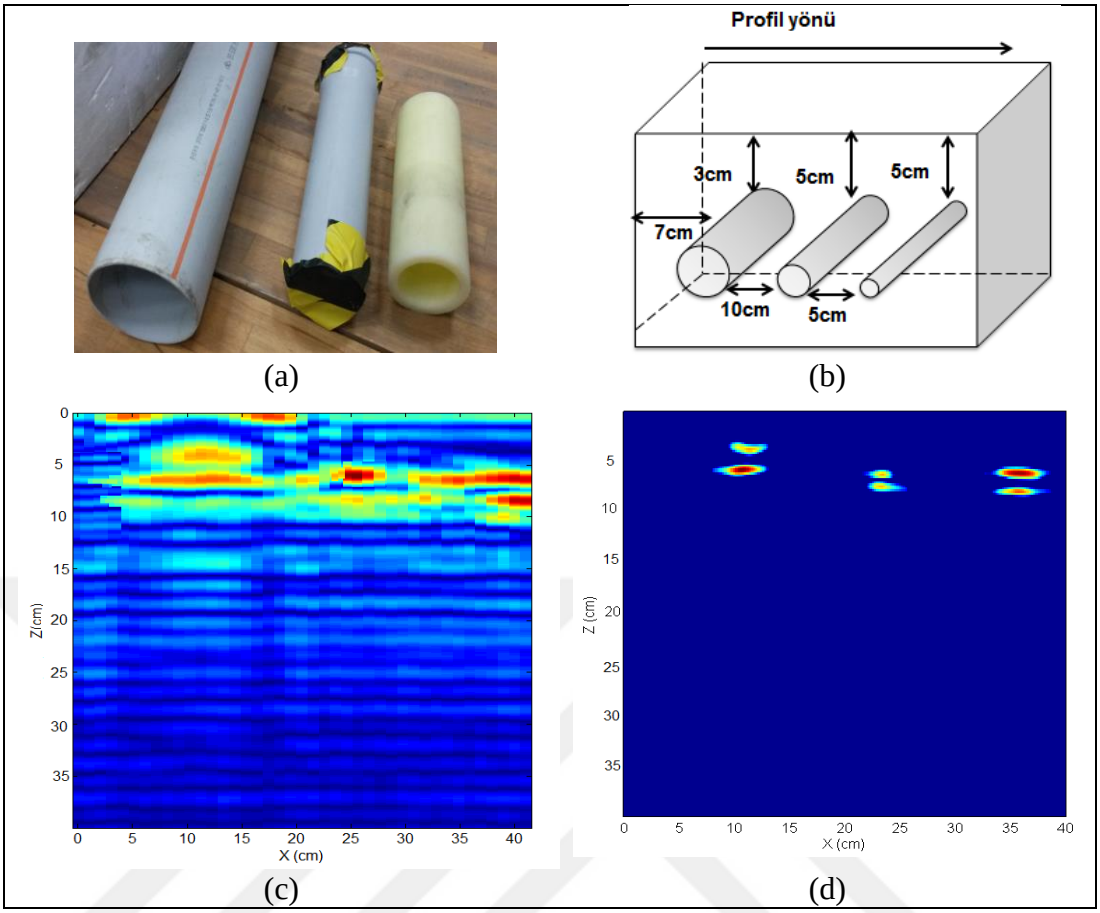
Algoritmanın metal borularla ve su şişeleriyle yapılan deney sonuçlarında gösterdiği başarıyı dielektrik değeri kuma çok yakın bir malzeme olan plastik borular ile yapılan deney ölçümlerinde gösterip gösteremeyeceğinin araştırılması amacıyla plastik borular ile aynı ölçüm parametreleri kullanılarak ölçümler yapılmıştır ilk deney ölçümünde çapı 4,5cm olan bir plastik boru kum havuzundan 10cm derine gömülmüştür. Ölçüm sonuçlarından elde edilen derinlik kesitinde plastik borunun meydana getirdiği hiperbol metal boru kullanılarak meydana gelen hiperbolden daha belirsiz olduğu gözlenmiştir. Kesit görüntüsüne göç ettirme işlemi uygulanmasından sonra ile borunun konumu belirgin hale gelmiştir(Şekil 4.23). Göç ettirme işlemi yapılan kesitte metal borularda gözlenenden farklı olarak borunun alt kısmında da

yansıma verdiği görülmüştür. Oluşturulan kesitler bize ayrıca borunun cinsi (plastik yada metal boru) hakkında bilgi vermektedir.



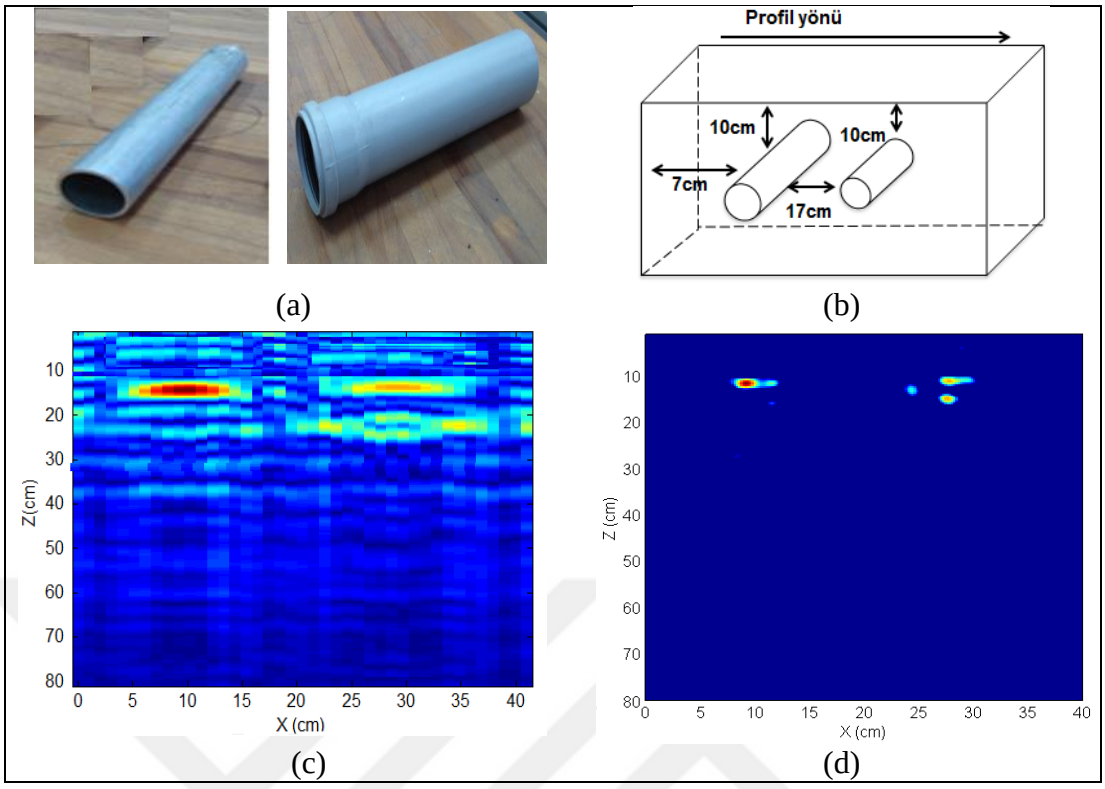
Şekil 4.23. a)Plastik boru (çap:4,5) b) Plastik borunun havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Birbirine çok yakın mesafede bulunan çapları 7cm, 4cm ve 4,5cm olan 3 adet plastik borulardan büyük çapa sahip olan boru 3 cm diğer borular ise kum yüzeyinden 5cm derine gömülerek ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında derinlik kesitinde 3 ayrı boru için borunun alt ve üst sınırında hiperbol oluşması görüntünün yorumlanmasını zorlaştırmıştır. Göç ettirme uygulaması ile bu sorun ortadan kalkmış ve boru konumları rahatlıkla görülebilir bir hal almıştır (Şekil 4.24).



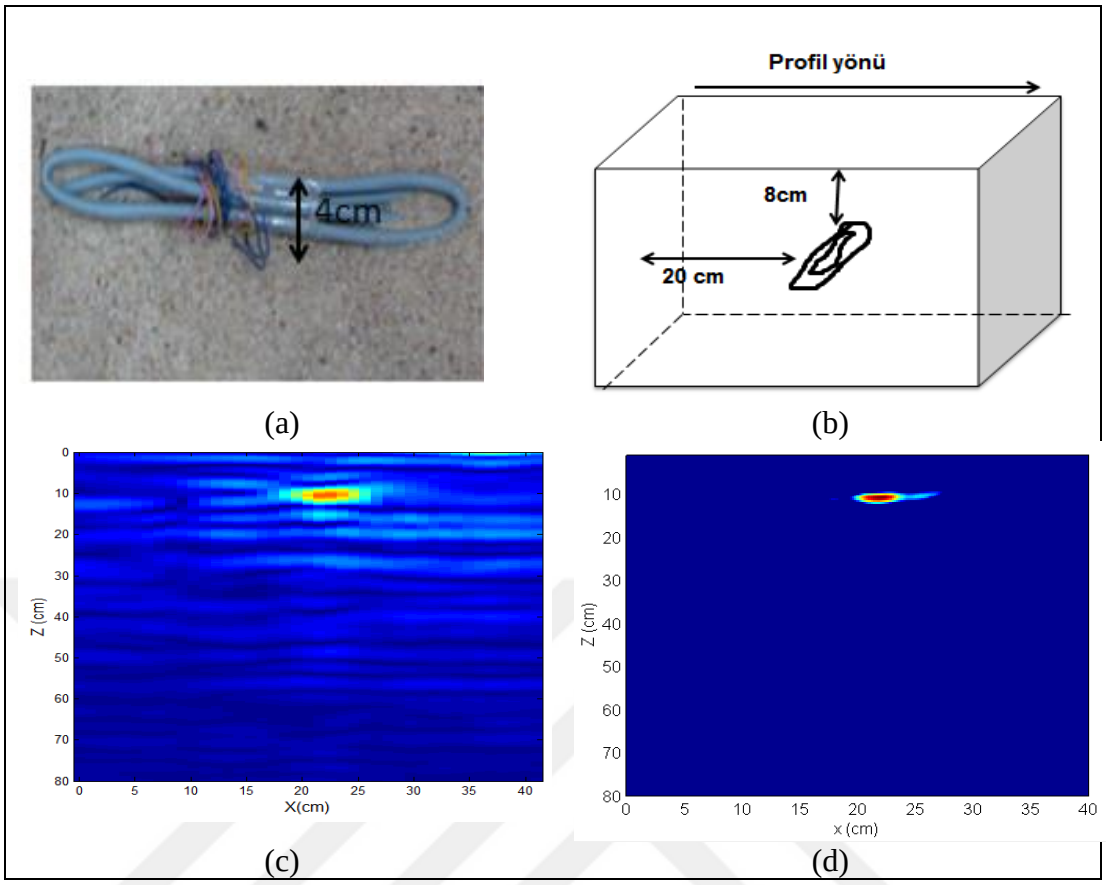
Şekil 4.24.a) Üçlü plastik boruların (çaplar:7cm, 4cm ve 4,5cm) b) Üçlü plastik boruların havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Bir sonraki ölçümde metal bir nesnenin yanında plastik gibi düşük dielektrik sabitine sahip olan bir malzemenin görüntülenip görüntülenemiyeceğini araştırmak amacıyla çapı 7cm olan bir plastik boru ve çapı 4,5 cm olan bir metal boru kullanılmıştır. Borular kum yüzeyinden aynı derinlikte bulunmaktadırlar. Ölçüm sonuçlarına bakıldığılda metalin plastik boruyu gölgelemediği ve plastik borunun başarılı bir şekilde tespit edildiği görülmüştür. Kesitlerde metal borunun sadece borunun üst sınırında yansıma verdiği fakat plastik borunun ise borunun alt ve üst sınırda yansıma vermesi yine boruların türlerini ayırt etmemizde bize yardımcı olmaktadır(Şekil 4.25).



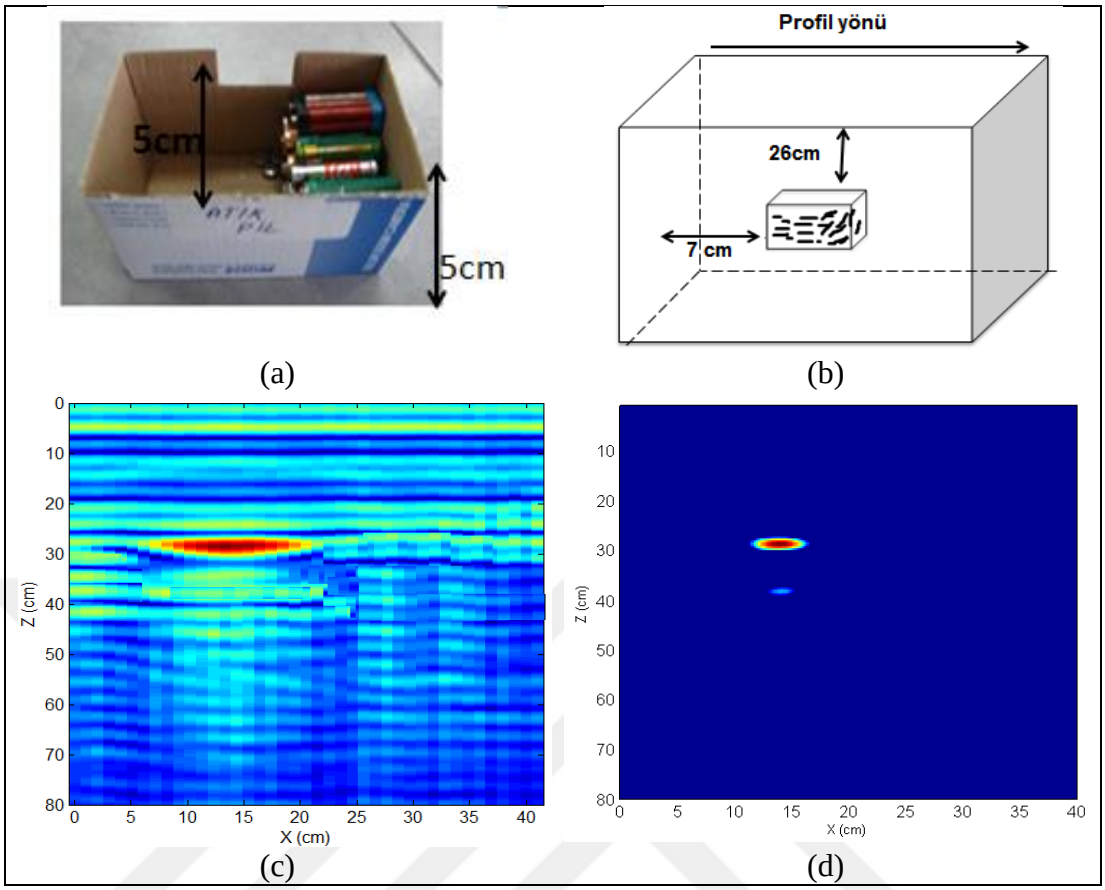
Şekil 4.25.a) Metal ve plastik boru (çaplar:5cm ve 4,5cm) b) Metal ve plastik borunun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Şehir alt yapı ve çevre jeofiziği çalışmaları için yapılan boru deneylerinden sonra şehir alt yapı planlamasında karşılaşılan bir diğer problemde yeraltı kablo lokasyonlarıdır. Ölçüm için 0,5 çapında bir kaplo katlanıp bantlaranak kum havuzuna derinliği 8cm olacak şekilde gömülmüştür. Profil başlangıç noktasına olan mesafe 20cm gelecek şekilde konumlandırılan kablo ölçüm sonucunda elde edilen kesitlerde aynı konumda bulunmuştur(Şekil 4.26).



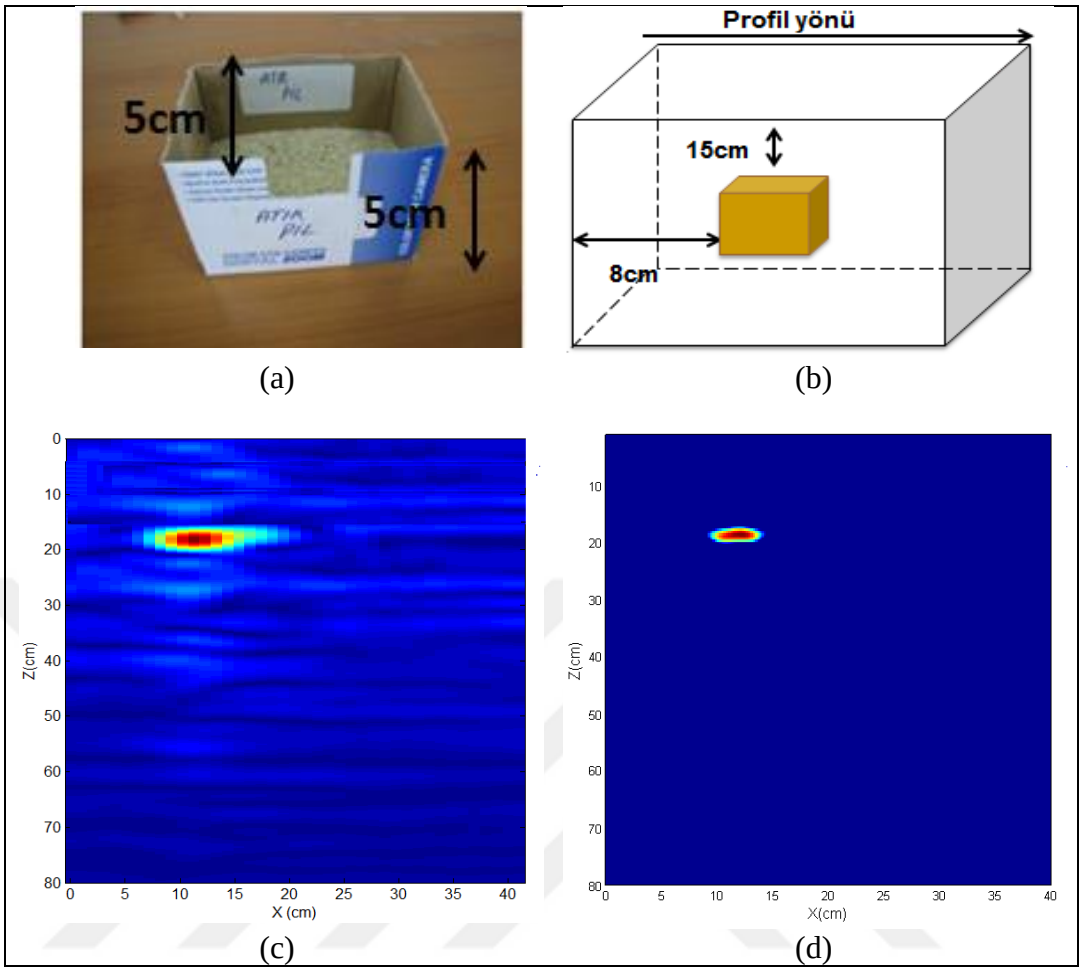
Şekil 4.16.a) Kablo(kalınlı b) Kablonun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Fabrika etrafında özellikle sıklıkla rastlanan endüstriyel atıkları tespit çalışmaları için bir deney çalışması yapılmıştır. Bu deneyde atık madde olarak pil kullanılmıştır bir karton kutu içine Şekil 4.27.a'daki gibi yerleştirilen pillerin kutusu kapatılarak kum havuzunun yüzeyinden 26cm derine gömülmüştür. Alınan profil ölçümünden elde edilen kesit görüntülerinden bu derinliğin doğru tespit edildiği anlaşılmıştır. Yine pil kutusunun yataydaki yani profil başlangıç noktasına olan mesafesi şekil 4.27.b' de gösterilen pillerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsünde belirtilen mesafe ile aynıdır.



Şekil 4. 27.a) Pillerin b) Pillerin borunun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

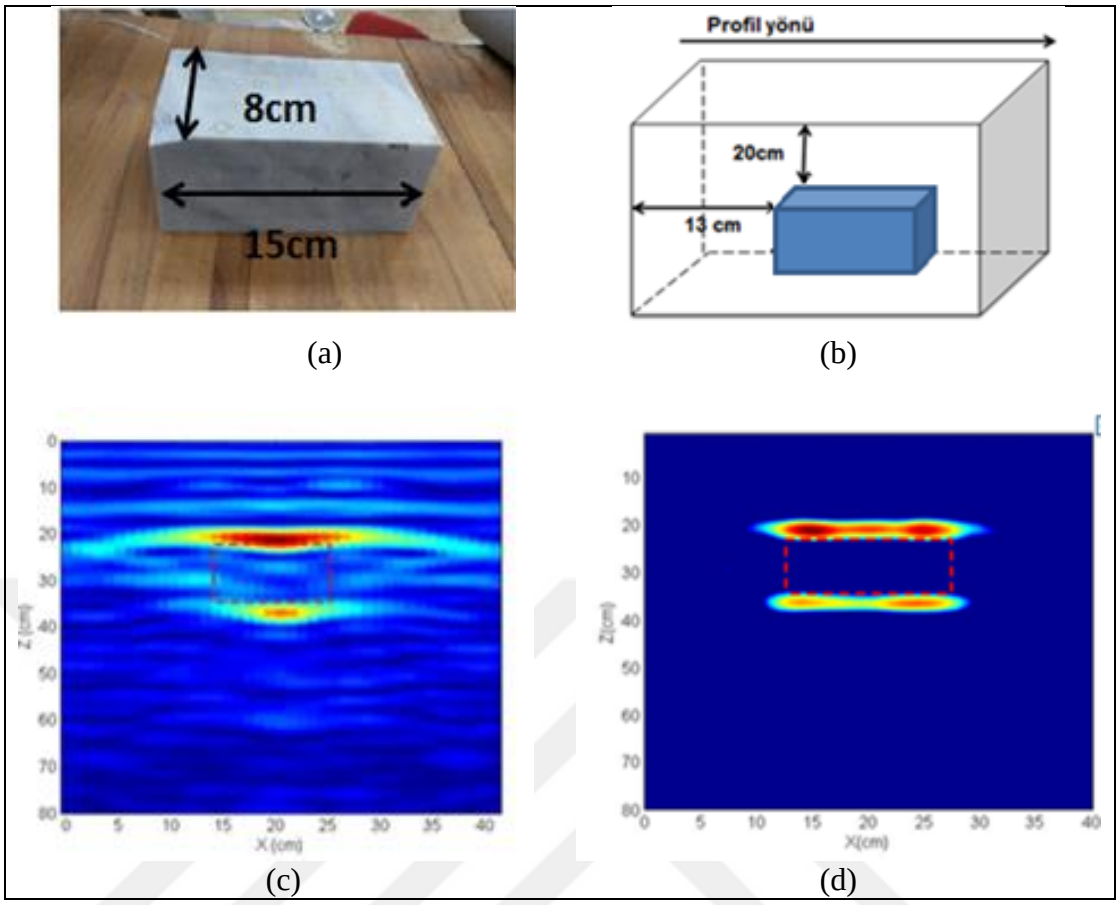
Su kaçağı bulunan yeraltı su borularına yakın yerlerde görülen sızmaların belirlenmesi bu bölgelere yakın yerlerde ölçümlerin alınması bize su borularının yerlerini bulmamıza yardımcı olacaktır. Bu nedenle bir sonraki deneyde çökel tabaka ya da yeraltı su sızmaları tespiti amacıyla 5x10x8cm boyutlarında karton bir kutuya doldurulan kum hafifçe ıslatılarak gömülmüştür. Ölçüm sonuçları fotoğraf ve kesit görüntülerinin birlikte verildiği Şekil 4.28'a bakıldığında ıslak kum bulunan kutunun konumunun doğru bir şekilde belirlendiği ve görüntülendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.28. a) Çökel modeli (ıslak kum) b) ıslak kumun havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

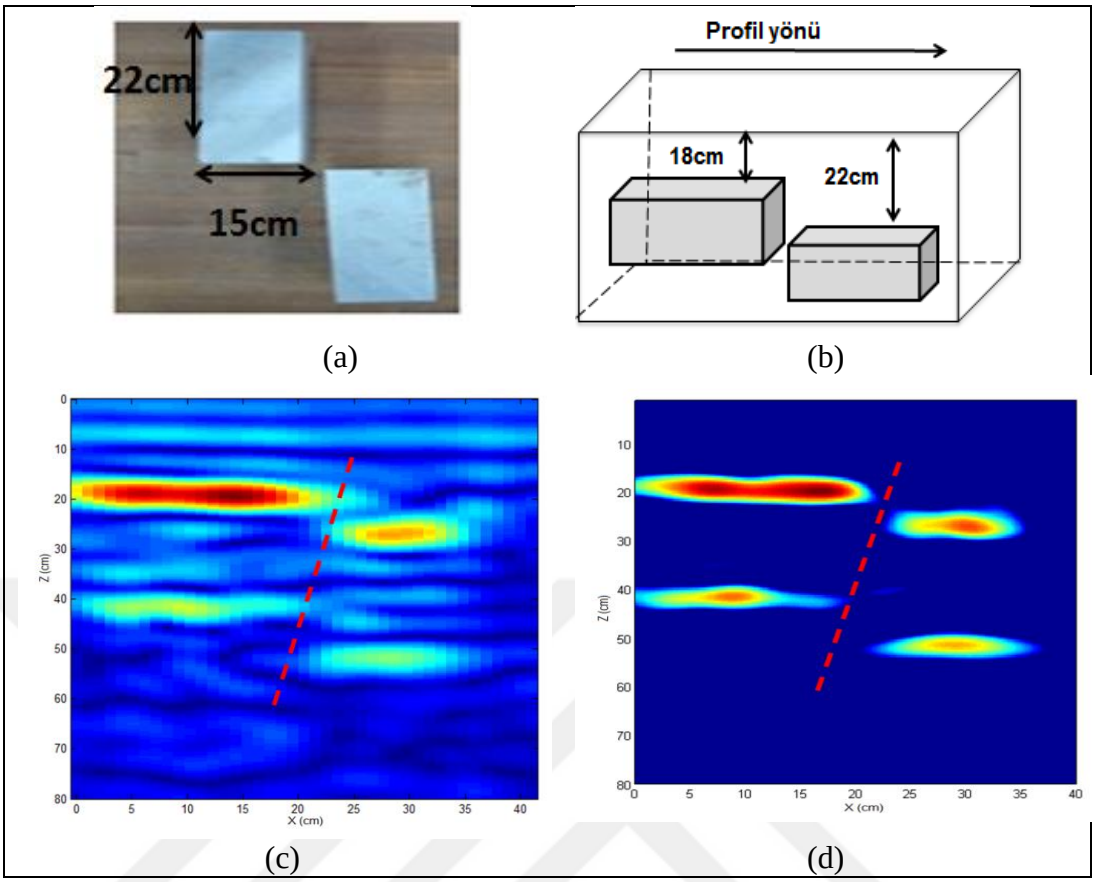
Mermerden yapılmış duvar hamam ve lahitler, seramik parçaları fırın ve ocak kalıntıları, pişirilmiş kilden yapılmış çömlekler yine arkeolojik alanlarda sık sık karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle deneylerde dielektrik malzeme olarak bunlar tercih edilmiştir.

Boyları 8x15x15cm olan dikdörtgenler prizması şeklindeki bir mermer kum yüzeyinden 20cm derinliğe gömülmüştür. Yapılan deneyde kullanılan mermerin gerçek genişliği ve gömülen derinliği ile mermerin kesit görüntüsünden elde edilen derinlik ve genişlik bilgisinin aynı olduğu gözlenmiştir.



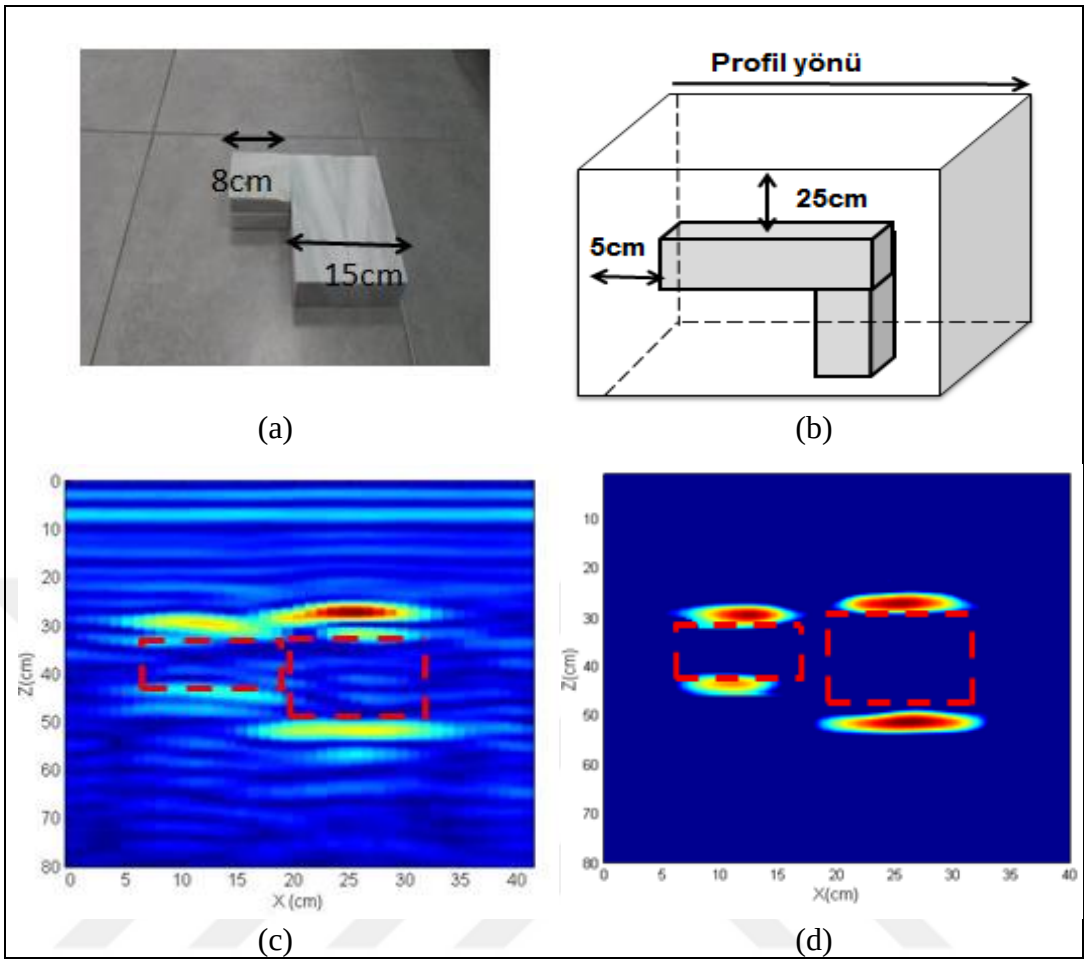
Şekil 29.a)Mermer b)Mermerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Bir sonraki deneyde yüzeye yakın yerlerde bulunan süreksizlik ve fay modelini temsilen boyutları 15x20x15 olan dikdörtgen prizma seklindeki iki mermer parçası kullanılmıştır. Mermerler aynı derinliğe gömülmemiş biri diğerinden daha derine gömülmüştür. Bir önceki ölçüm ile aynı parametrelerle 40cm profil uzunluğunda ölçüm alınmıştır. Ölçüme ait fotoğraf ve şematik çizim ve derinlik kesitleri Şekil 4.30'de verilmiştir. Derinlik kesitlerine bakıldığında mermer yapı sınırlarının belirgin bir halde ortaya çıkması bloklar arasındaki kaymayı ortaya çıkarmakta ve bize burada bir süreksizlik olduğu yorumunu yaptırmaktadır.



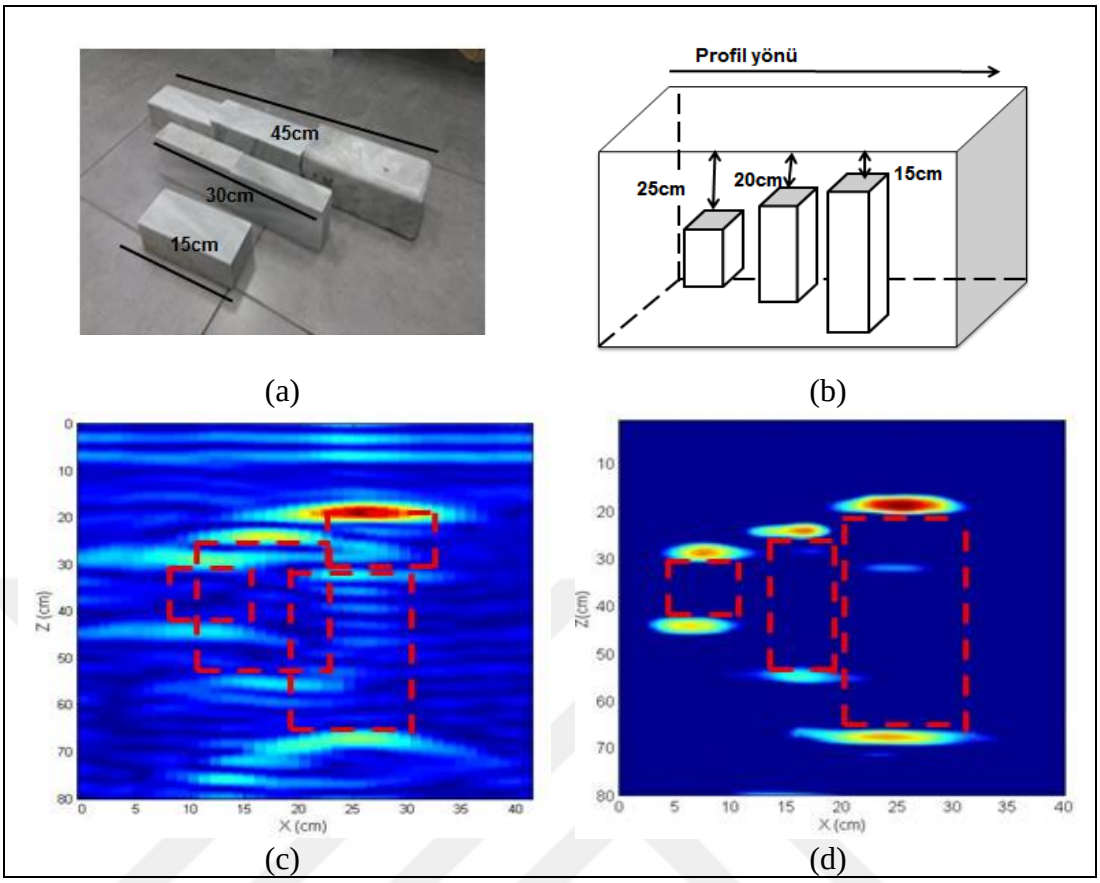
Şekil 4.30.a) Fay modeli (mermer) b) Mermerlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Kolon kiriş yapısını temsilen farklı genişliklere ait mermerler L şeklinde kum yüzeyinden 25 cm derinde gömülmüşlerdir. Gömülen mermerlerin kum havuzundaki gerçek konumlarını gösteren şematik kum havuzu görüntüsü ve ölçüm verilerinin işlenmesi ile elde edilen dikey derinlik kesitleri Şekil 4.31'te verilmiştir. Bu kesitlere bakıldığında mermerlerin yapı sınırları, profil başlangıç noktasına olan mesafesi ve kum yüzeyinden derinliği şematik gösterimde belirtilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir.



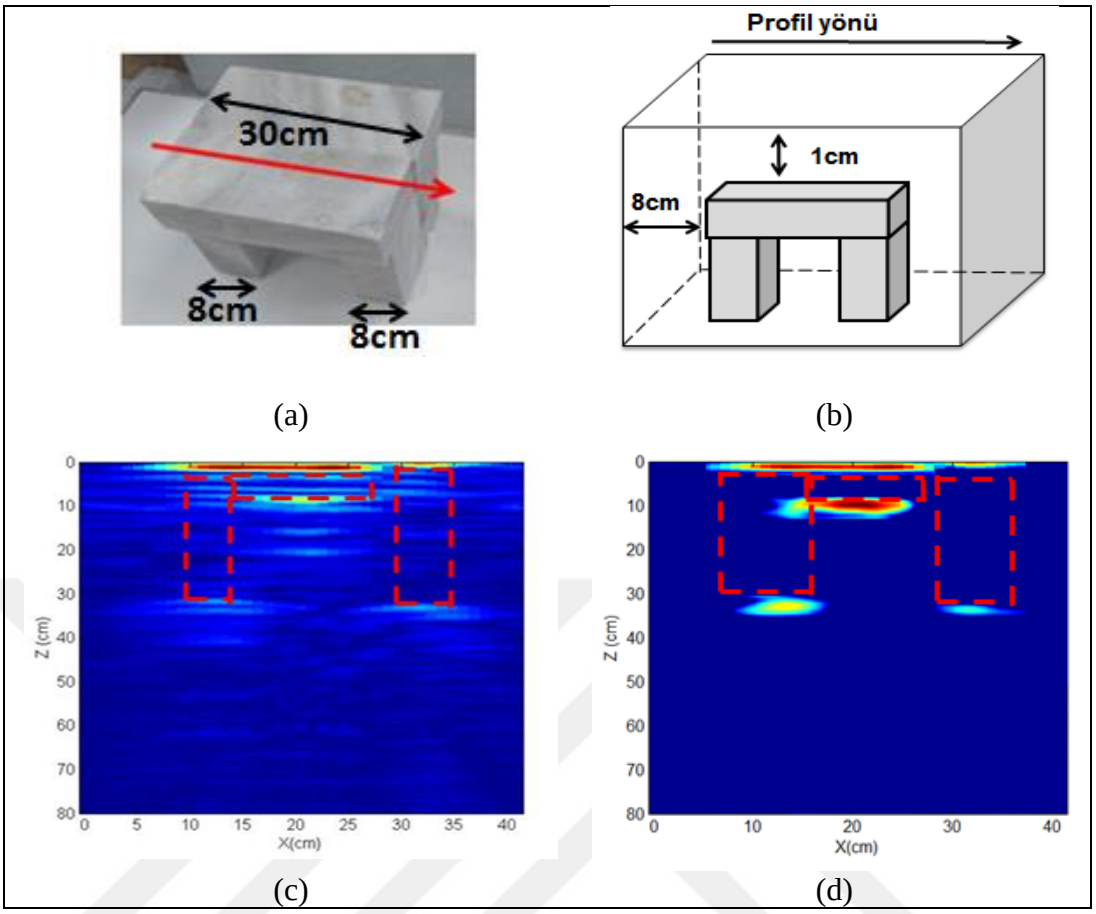
Şekil4.31.a) Kolon kiriş modeli (mermer) b)) Kolon kiriş modeli (mermer) havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Mermerden yapılmış bir sütün modeli oluşturulmuştur. Bu model için birkaç mermer üst üste konulmuş ve boyutları Şekil 4.32'deki kum havuzu şematik çiziminde gösterildiği değerlere sahip zamanla aşınmış bir merdiven oluşturulmuştur. Profil ölçümü sonucundan elde edilen derinlik kesitine bakıldığında göç işlemi uygulanmasından önce kesitte mermer yapı sınırları iç içe girmiş ve model tam olarak belirgin halde görülmemiştir. Göç işlemi uygulanmasıyla ise merdiven modeli tam olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.32.a) Sütun modeli (mermer) b) Mermerlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d)Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

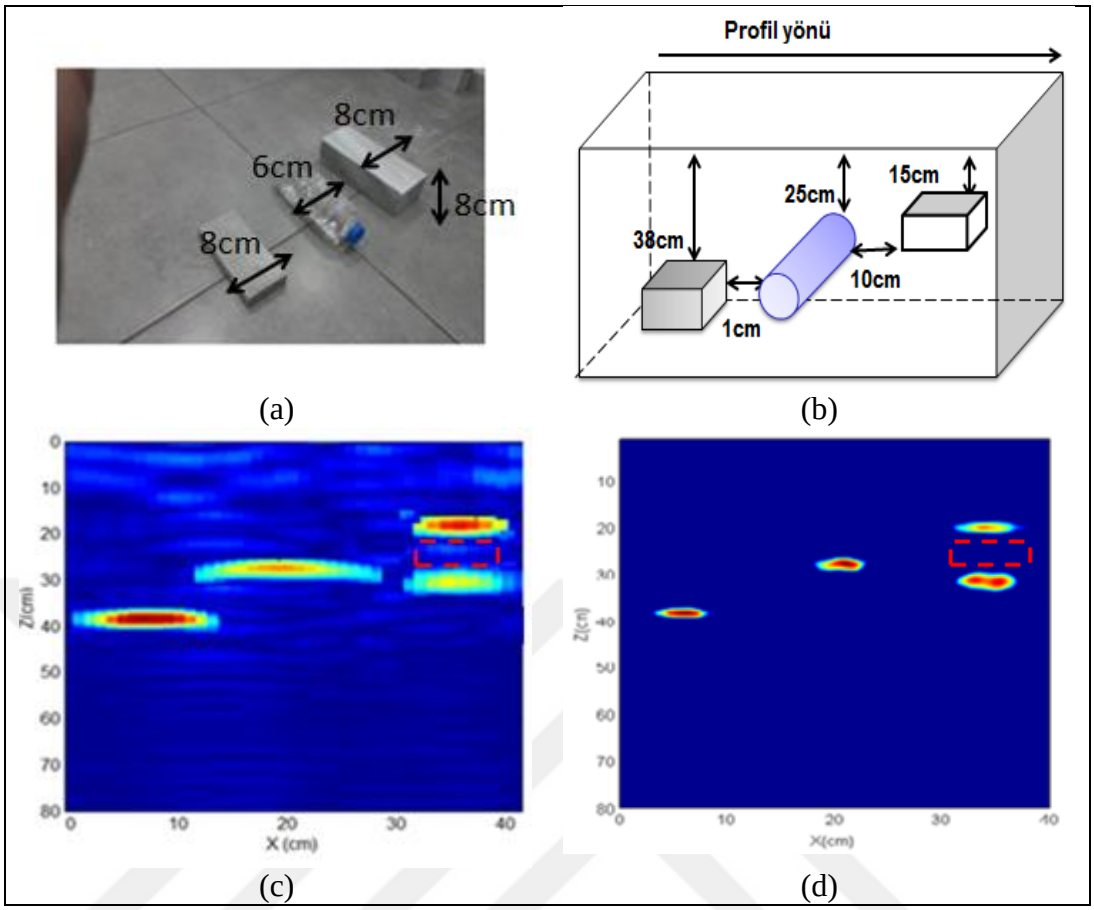
Mermer parçalarından Şekil 4.33'te görüldüğü gibi mezar odası modeli oluşturulup ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen kesit görüntülerine bakıldığında odanın duvarlarını oluşturan mermerlerin boylarının fazla olmamasına rağmen net belirlenemediği görülmüştür. Bunun nedeninin anten açıklığının mermerin alt sınırını görememesi ve oradan yansıma alamaması olduğu düşünülmektedir. Boyları uzun ve aralarında boşluk bırakılarak üst yüzeyi açık bulunan mermer modelindeki ölçüm sonuçları bu düşünceyi destekler niteliktedir. Mezar odasının duvarlarını oluşturan mermerlerin alt sınırları kesit görüntüsüne Göç işlemi uygulaması ile belirlenmiştir.



Şekil 4.33.a) Mezar odası modeli (mermer) b) Mezar odasının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

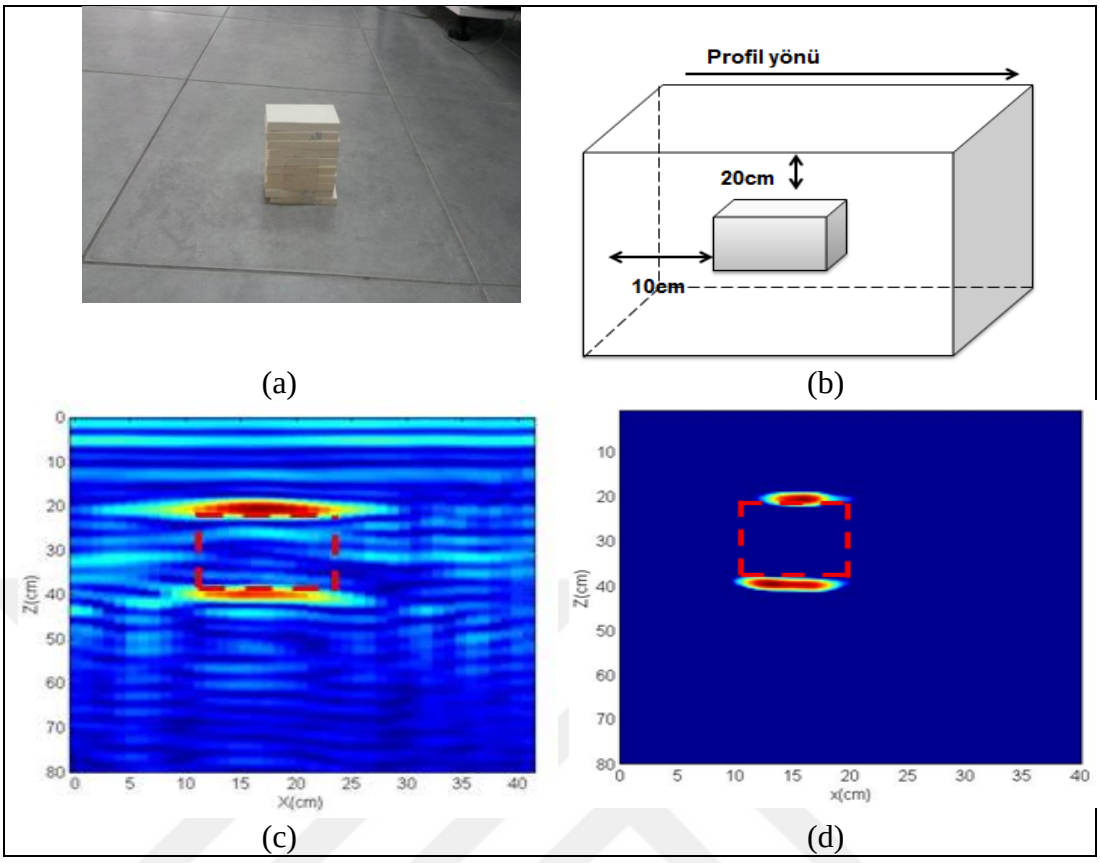
Farklı türdeki cisimlerin yan yana bulunmaları halinde bunların konumlarını bulmak amacıyla 3 farklı cisim (metal, su ve mermer) yan yana en altta metal sonra su ve yüzeye en yakın mermer olacak şekilde kum havuzuna gömülmüşlerdir. Alınan ölçüm neticesinde Şekil 4.34'da verilen kesitlerde su gibi göreceli elektrik geçirgenliği yüksek olan nesneler ve nispeten daha düşük dielektrik sabitine sahip olan mermerde metalin yanında kolaylıkla algılanabilmiştir.

Şekillerden anlaşılacağı gibi metal düzlemsel (dikdörtgen şeklinde) olduğu için metalin eni boyunca yansıma almış silindirik yapıda bulunan su şişesi hafif hiperbolik bir görüntü vermiştir. Dielektrik bir malzeme olan mermer ise alt ve üst sınırında yansıma vererek dikey kesitte kendini göstermiştir.



Şekil 4.34.a) Gömülen farklı cisimlerin b) Cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

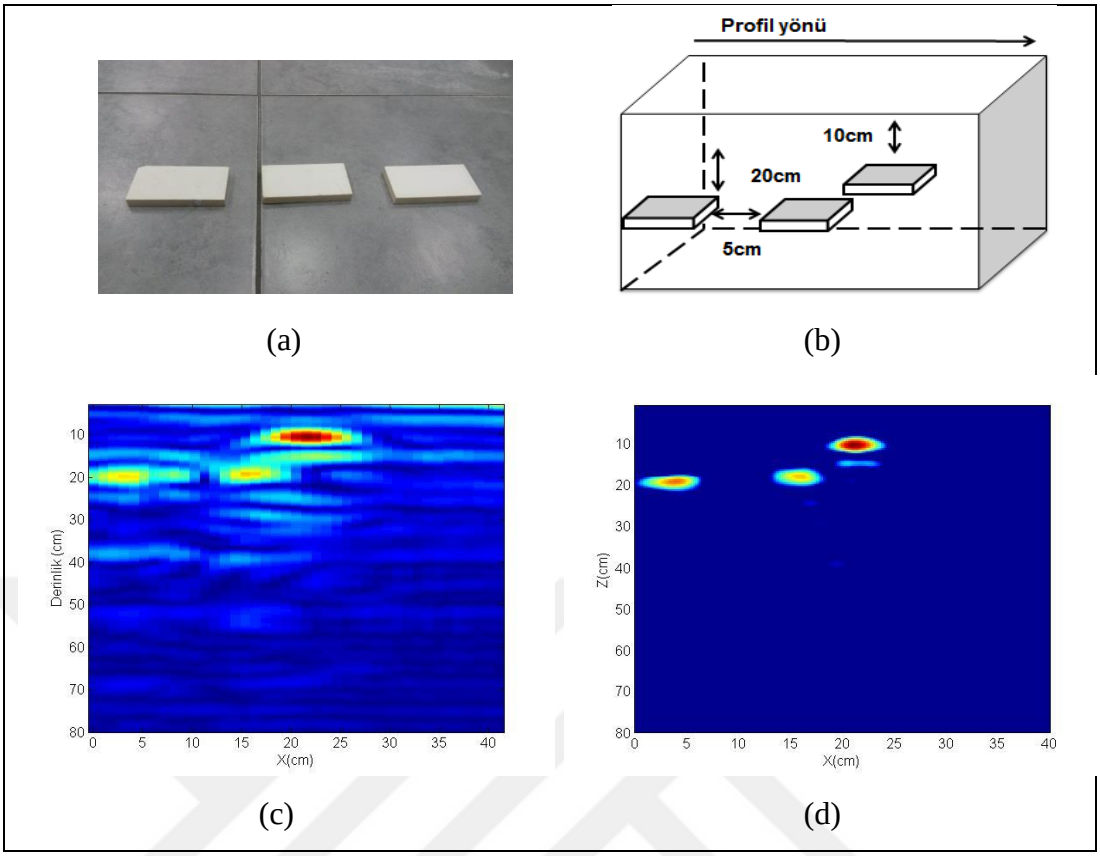
Arkeolojik alanlarda sıklıkla rastlanılan bir diğer malzemede seramik parçalarıdır. Üst üste konularak 20cm kalınlığına getirilip birbirine bantlanan seramikler kum yüzeyinden 20cm derine gömülmüştür. Seramiğin havuz içindeki konumunu gösteren şematik çizim ve dikey kesit görüntüleri Şekil 4.35'de verilmiştir. Kesit görüntüleri ile şematik çizim birbiriyle uyum içindedir.



Şekil 4.35.a) Kalın seramik yapı (kalınlık:16cm)b) Seramiğin havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

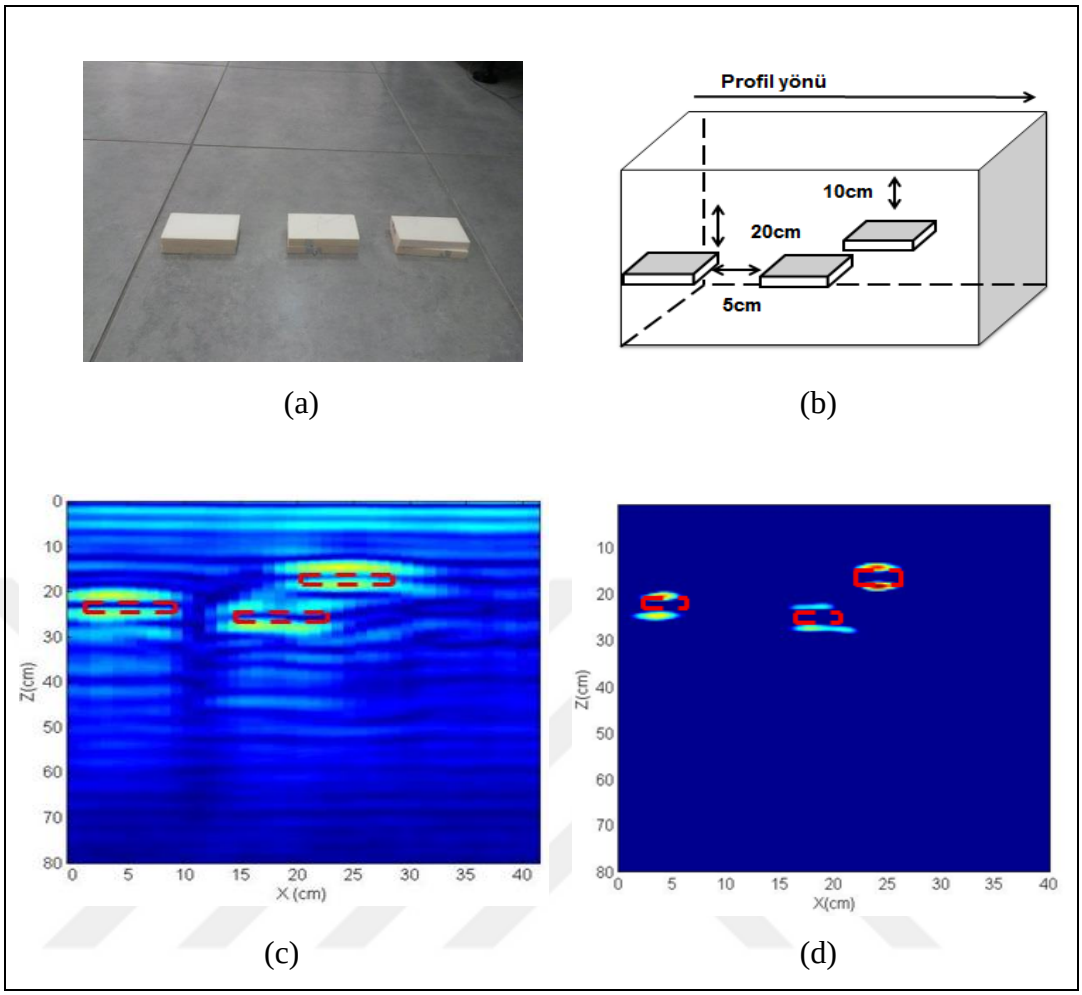
Deney sonucunda üst üste yığılan seramiklerin ara yüzeylerinin düz olası nedeniyle ara sınır yansımaları alınamamış seramik parçaları tek parça şeklinde algılanmış alt ve üst sınırda yansıma vermiştir. Derinlik kesitlerine bakıldığında seramik parçasının kalınlığı 16cm olarak bulunmaktadır.

Kalın seramik kullanılarak yapılan ölçümden sonra ölçümlerde ince seramikler kullanılarak konum belirleme çalışması yapılmıştır. Bunun için 3 tane aynı kalınlıkta seramik parçası Şekil 4.36'de görüldüğü gibi konumlanmıştır. 1,6cm kalınlığındaki seramiklerin çok ince olmaları nedeniyle ölçüm sonucundan elde edilen radargram kesitine bakıldığında alt sınırda yansıma vermedikleri gözlenmiştir.



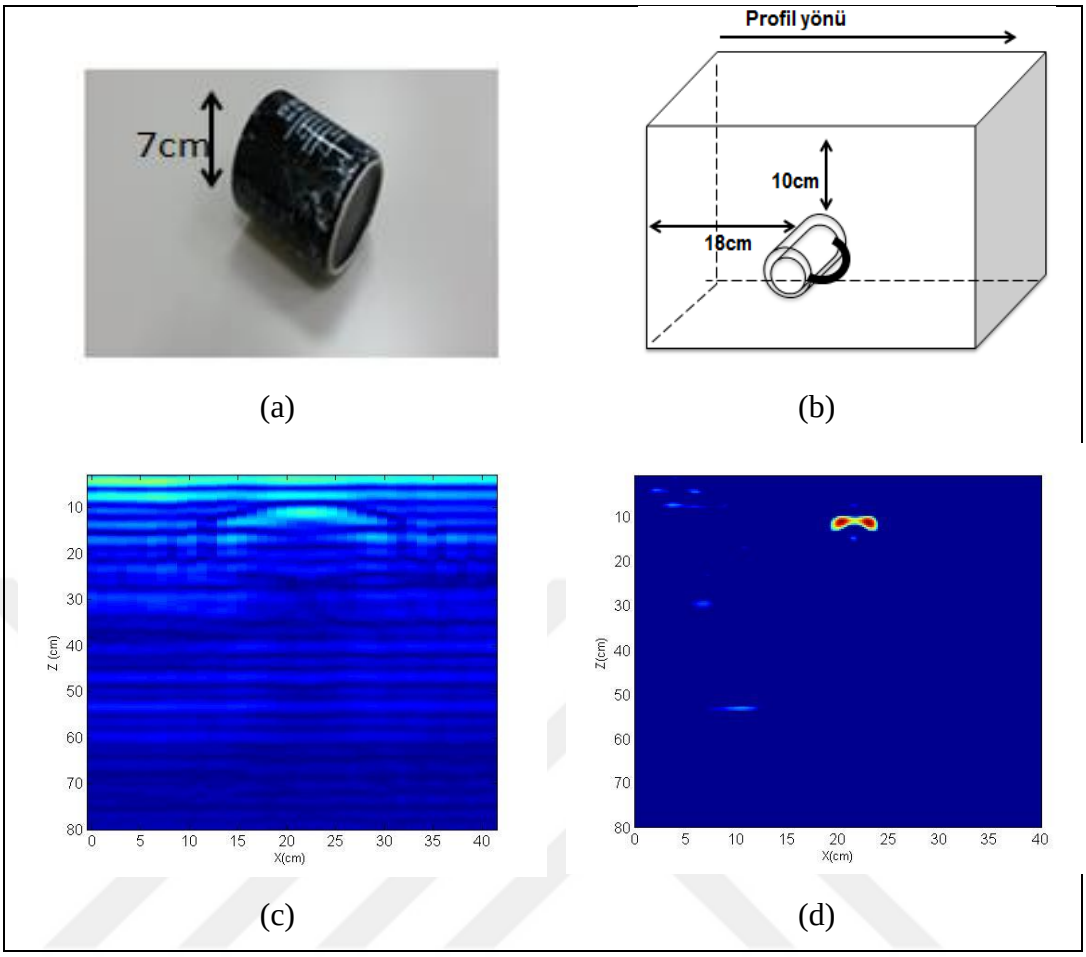
Şekil 4.36.a) Üçlü seramik yapı (kalınlıklar:1,6cm) b) Seramiklerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

İnce seramik kullanılarak yapılan ölçüm sonucunda seramiklerin konumlarının belirlenmesine karşın seramik kalınlıklarının belirlenemediği gözlenmiştir. Seramik kalınlıklarının belirlenememesinin nedeninin seramik kalınlığının çok ince olmasından kaynaklandığı düşünülerek seramik parçaları aynı derinliklere kalınlıkları arttırılarak tekrar gömülmüş ve ölçüm alınmıştır. Şekil 4.37'da verilen kesit görüntülerine bakıldığında bu düşüncenin doğru olduğu anlaşılmıştır.Kesitlerde seramik parçalarının alt sınır yansımaları aldığı görülmüş ve bu da seramik kalınlıklarına erişmemizi sağlamıştır.



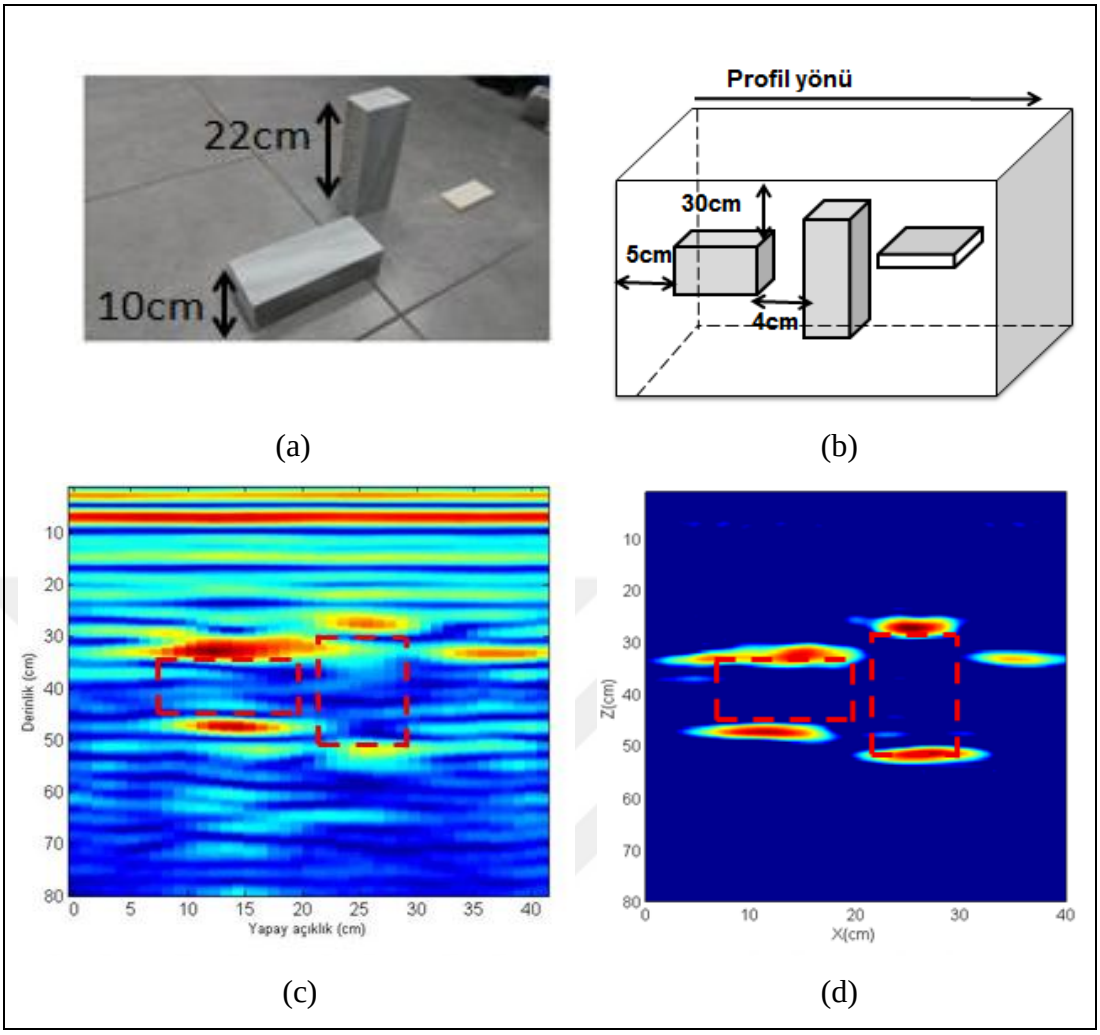
Şekil 4.37.a) Yüzey alanı azaltılmış üçlü seramik yapı (kalınlıklar: 3cm) b) Seramiğin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Yüzeylerinin düz olan cisimlerin algılanmalarının kolay olmasına karşın saçılmalara neden olan silindirik cisimlerin algılanması daha zordur. Bu nedenle silindir şeklindeki seramikten yapılmış bir bardağın algılanabilirliğini test etmek amacıyla, kum yüzeyinden 10cm derine seramik bardak gömülmüş ve bardaktan 18cm yatay mesafeden ölçüm alınmaya başlanmıştır. Ölçümde kullanılan bardağın fotoğrafı, kum havuzundaki bardağın gerçek konumunu bildiren çizim ve ölçüm verilerinin işlenmesi ile elde edilen derinlik kesitleri Şekil 4.38'ta verilmiştir. Kesit görüntülerinden bardağın çok ince olmasından dolayı az yansıma aldığı göç işlemi ile konumunun daha belirgin hale geldiği söylenebilmektedir.



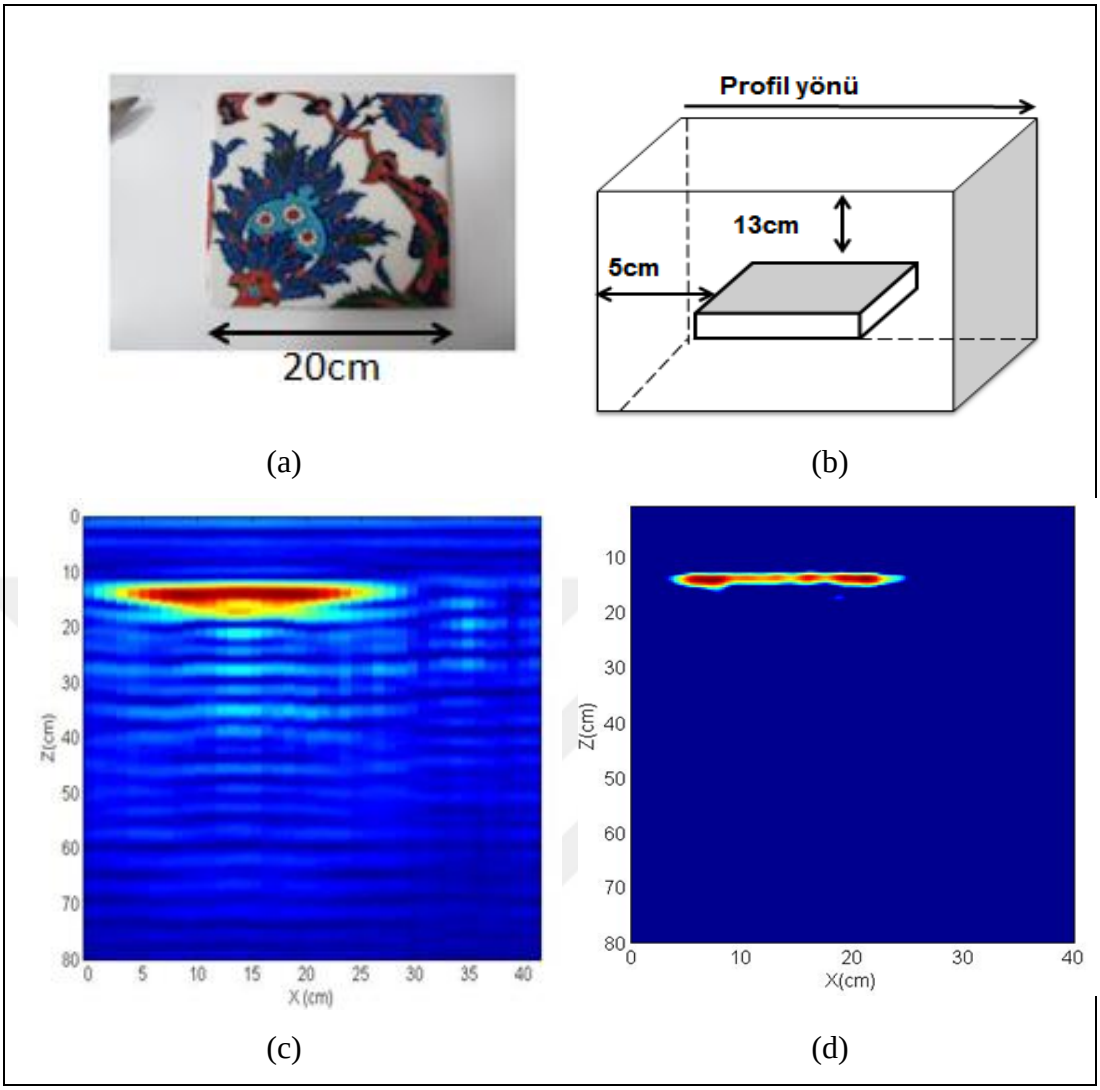
Şekil 4.38.a) Seramik bardak (çap 7cm) b) Bardağın havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Kalınlığı fazla olan kayaçların yanında küçük yada ince cisimlerin belirlenip belirlenemeyeceğini araştırmak amacıyla farklı kalınlıklarda ve farklı malzemeler gömülerek ölçüm alınmıştır. Kalınlıkları 10cm ve 20 cm olan iki mermer aralarında 4cm boşluk bırakılarak 30 ve 35cm derine gömülmüştür 1cm kalınlığındaki seramik parçası da 30 cm derine ve mermer ile arasında yaklaşık 5cm mesafe kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 4.39'de görülen ölçüm sonuçlarından büyük cisimlerin küçük cisimlerin belirlenmesini engelleme gibi bir durumun söz konusu olmadığı sonucuna varılmıştır.



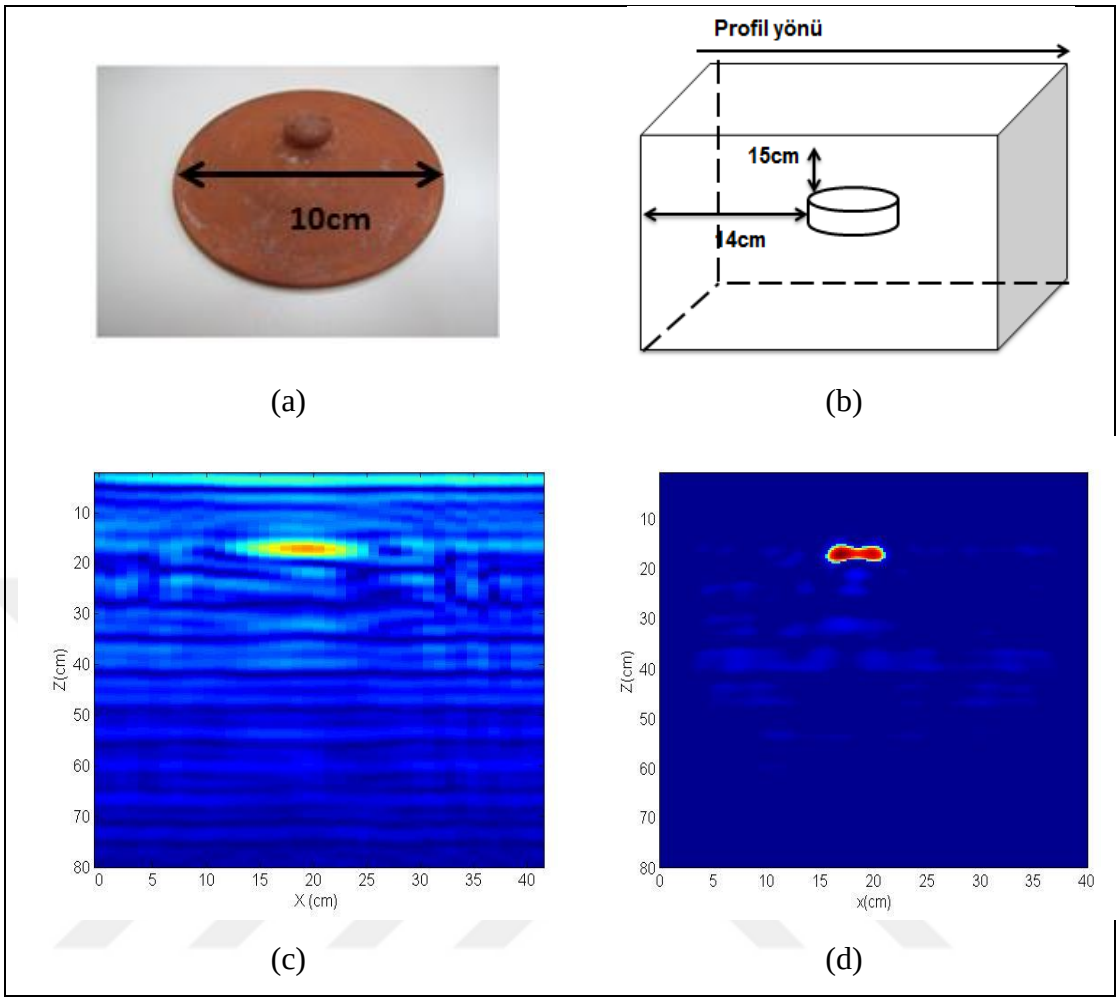
Şekil 4.39.a) Karmaşık yeraltı modeli (mermer+seramik) b) Cisimlerin havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Yansıma yüzeyi geniş fakat kalınlığı ince olan bir çini kum yüzeyinden 13 cm derine gömülüp yatayda 5cm ötesinden ölçüm alınmaya başlanmıştır. Gömülen çininin boyutları 20x20cm dir. Ölçüm sonucu elde edilen başarılı sonuç görüntüleri Şekil 4.40'de ölçümde kullanılan çininin fotoğrafı ve kum havuzundaki gerçek konumunu temsil eden şematik görüntüsüyle birlikte verilmiştir.



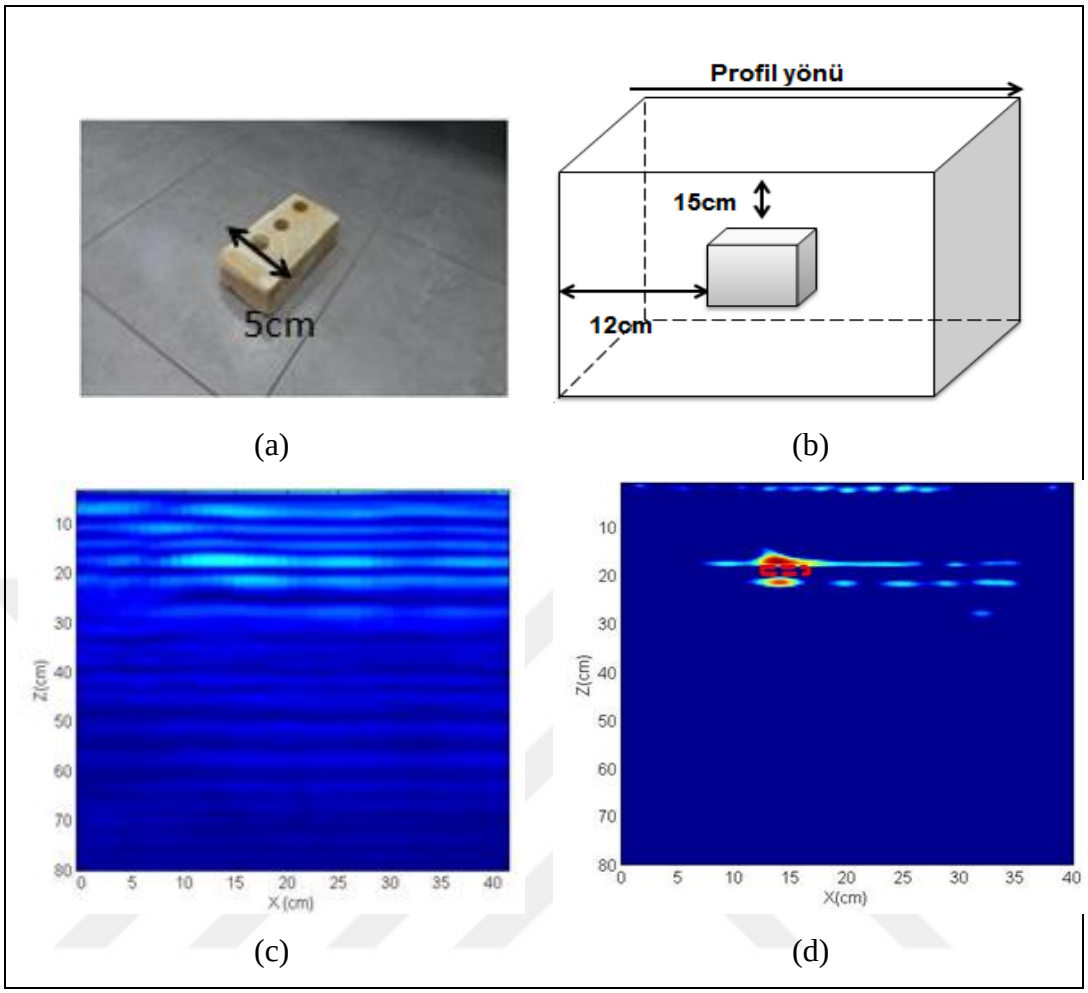
Şekil 4.40.a) Çini b) Çininin havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Pişirilmiş kilden oluşmuş bir çömlek kapağı ölçüm için kullanılmıştır. Daire şeklindeki çömlek kapağının çapı 13cm dir. Kum havuzuna yüzeyden 15cm ve yataydan 14cm mesafede gömülmüştür. Çömleğin fotoğrafı kum havuzundaki konumu Şekil 4.41'deki gibidir. Ölçüm sonuçlarından elde edilen derinlik kesitlerinden cismin derindeki ve yataydaki yeri belirlenmiştir.



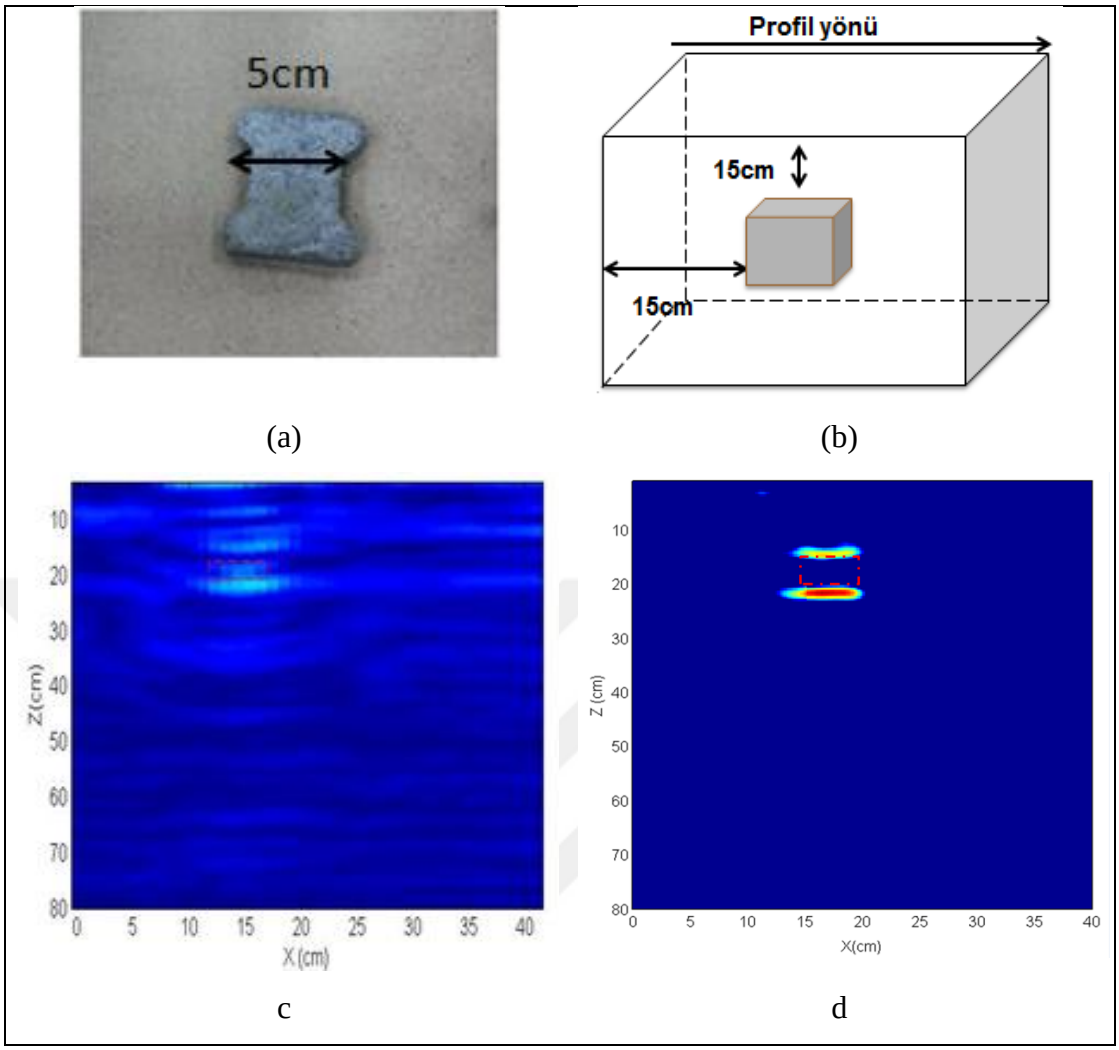
Şekil 4.41.a) Çömlek kapağı b) Çömlek kapağının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Yüksek oranda ateşe dayanıklı ocak, fırın gibi yapılarda kullanılan ateş tuğlası antik bir fırın ya da ocağı temsil edebileceği düşüncesiyle ölçümde kullanılması uygun görülmüş bu teknik ile bu tür kayaçların belirlenebilirliği araştırılmaktadır. Boyutları 5x10x15cm olan ateş tuğlası ölçüm için kum havuzuna yüzeyden 15cm derine gömülmüş ve ölçüm alınmıştır. Ölçüm verilerinden oluşturulan derinlik kesitinde az yansıma alarak belli belirsiz görülen ateş tuğlası göç ettirme işleminin kullanılmasıyla alt ve üst sınırları belirgin bir yapı olarak kendini derinlik kesitinde göstermektedir. Derinlik kesitleriyle birlikte ölçümde kullanılan ateş tuğlasının ile havuzdaki lokasyonunu gösteren şematik çizim görüntüsü Şekil 4.42'de verilmiştir.



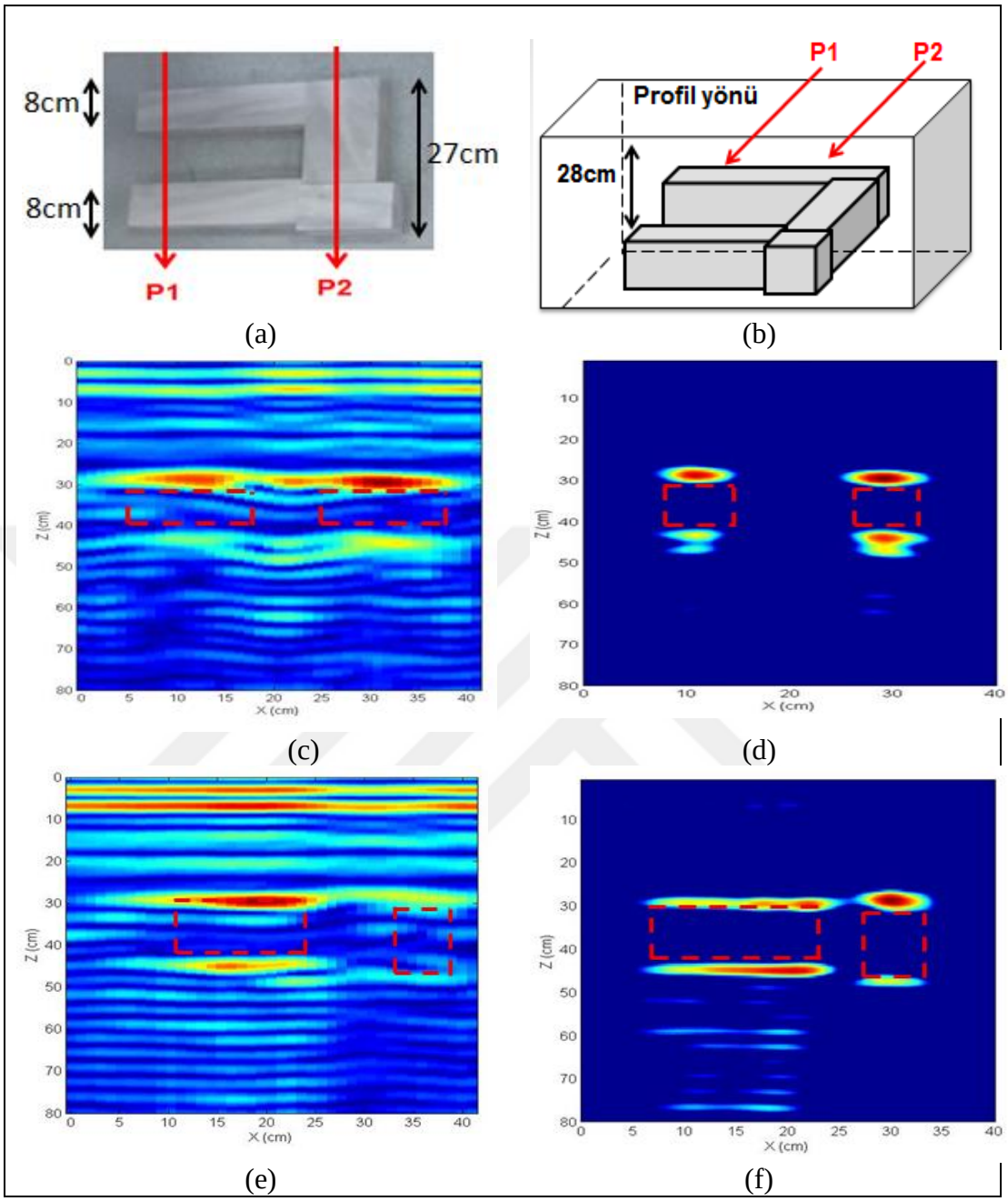
Şekil 4.42.a) Ateş tuğlası b) Ateş tuğlasının havuzdaki konumunun şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d) Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Boyutları 7cm olan kaldırım parke taşı kullanılarak ölçüm alınmıştır. Ölçüm için parke taşı kum yüzeyinden yaklaşık 10 cm derine gömülmüştür. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler işlenerek dikey kesit görüntüleri elde edilmiştir. Kesit görüntüsünde dielektrik sabiti kumun dielektrik sabitine çok yakın ve düşük değere sahip olan parke taşı çok net bir şekilde görüntülenememiştir. Verilere göç ettirme işlemi uygulanılmasıyla taşın alt ve üst sınırları derinliği ve profil başlangıç noktasından olan uzaklığı belirlenmiştir. Göç ettirme işlemi uygulandığı kesit görüntüsü Şekil 4.43'de göç işlemi uygulanmamış kesit görüntüsü taşın fotoğrafı ve kum havuzunun şematik gösteriminin bulunduğu şekilde verilmiştir.



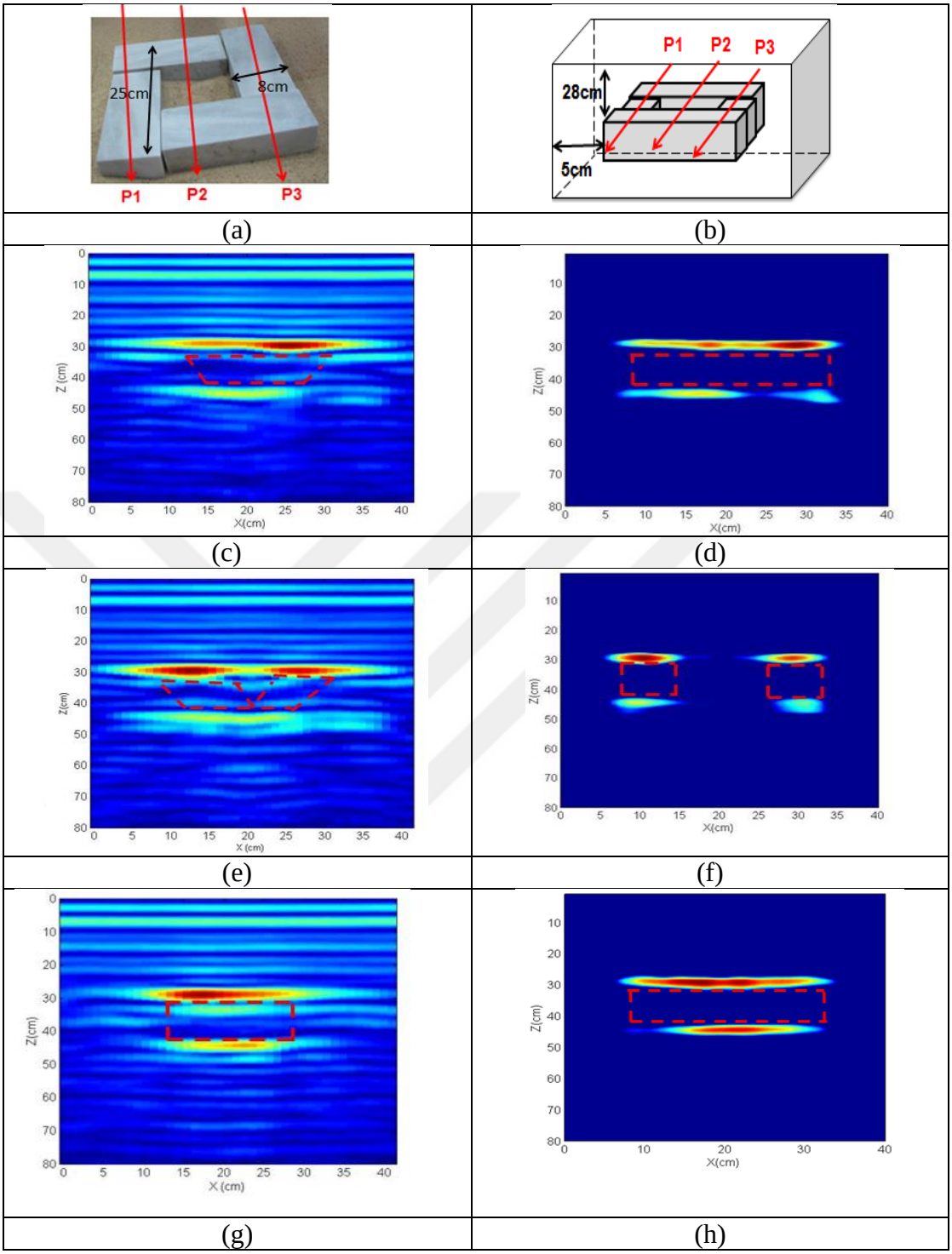
Şekil 4.43.a) Kaldırım taşı b) Kaldırım taşının havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) Derinlik kesiti d Derinlik kesitinin göç işleminden sonraki görüntüsü

Mermer parçaları kullanılarak biraz daha karmaşık yeraltı arkeolojik yapı modelleri uygulanmış ve birden fazla profil ölçümü alınarak yapı ortaya konulmaya çalışılmıştır. U şeklinde oluşturulmuş yapı kum yüzeyinden yaklaşık 28cm derine gömülmüştür. Şekil 4.44'da verilen yapı modelinin fotoğraf görüntüsünde kırmızı oklarla p1 ve p2 ile gösterilen profil doğrultularıdır. Bu yapı modeli üzerinde 2 adet profil ölçümü alınmıştır. Ölçüm verilerinin işlenmesi ile elde edilen dikey derinlik kesitlerinden yapı modeli ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 4.44. a)U şeklindeki yapının b) Yapının havuzdaki konumlarının şematik görüntüsü c) P1 profilinden elde edilen derinlik kesiti d) P1profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali e) P2 profilinden elde edilen derinlik kesiti f) P2profil kesitine göç işlemi uygulanmış görüntüsü

Arkeolojik bir mezar ya da oda modeli olarak mermerler kare şeklinde konumlandırılarak yüzeyden 28cm derine gömülmüştür. Bu modelin ortaya çıkarılması için ise 3 adet profil ölçümü yapılmıştır. Kullanılan yapı modelleri ve kesit görüntüleri Şekil 4.45' de verilmiştir.



Şekil 4.45. a)Yapı modeli b) Şematik çizimi c) P1 profilinden elde edilen derinlik kesiti d)P1profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali e) P2 profilinden elde edilen derinlik kesiti f) P2profil kesitine göç işlemi uygulanmış hali g) P3 profilinden elde edilen derinlik kesiti h) P3profil kesitine göç işlemi uygulanmış görüntüsü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde temel elektromanyetik teori bilgisi verildikten sonra toprakaltına gömülü nesnelerinin görüntülenmesi için kullanılan Frekans Adımlı Sürekli Dalga tekniğinin teorisi anlatılmıştır. Tahribatsız ve kolay kullanım ile veri toplanan bu teknik ile elde edilen bu verilerden iki boyutlu radargram oluşturma ve gömülü cisimlerin gerçek konumlarının belirlenmesi için radargramlara uygulanan göç algoritmasının teorisi ayrıntılı olarak verilmiştir.

Teorileri verilen görüntüleme ve göç algoritmalarının uygulanabilirliği test etmek için ilk olarak, CST programı kullanılmıştır. Elde edilen başarılı sonuçlardan sonra algoritmalar, kurulan deneysel düzenekle alınan ölçüm verilerine uygulanmıştır. Deney çalışmalarında uygun frekans anten seçimi, bant genişliği, frekans adım sayısı gibi ölçüm parametreleri belirlenmiş ve daha sonra farklı nesneler farklı derinliklere gömülerek ölçümler alınmıştır.

Tübitak Malzeme Enstitüsü MİLTAL Laboratuvarındaki deneysel düzenek kullanılarak alınan ölçüm verilerinden oluşturulmuş radargram görüntüleri incelendiğinde, gömülü cisimlerin konumlarının doğru bir şekilde belirlendiği görülmüştür. Ölçümlerin tek bir frekansta toplanmayıp geniş bir frekans bandında toplanmış olması radargram görüntülerindeki çözünürlüğü arttırdığından bize yorum kolaylığı sağlamış ve küçük nesneleri bile bulma olanağı tanımıştır. Ayrıca kullanılan teknik bize gömülü cisimlerin metal ya da dielektrik olduğu hakkında bir öngörüde bulunma imkanı sağlamıştır. Kullanılan radargram oluşturma ve göç ettirme algoritmaları diğer algoritmalarla kıyaslandığında, radargram oluşturma algoritmasının daha iyi yatay çözünürlük verdiği, işlem yükünün az olması nedeniylede göç algoritmasının daha hızlı olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler sonuclarından bu tekniğin uygun frekans band aralığı ve uygun anten türünün seçilmesi durumunda sığ jeofizik araştırmalarda başarılı bir şekilde kullanılacağı gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Aspiron U., and Aigner T., Towards Realistic Aquifer Models: Three Dimensional Georadar Surveys of Quaternary Gravel Deltas (Singen Basin, SW Germany). *Sedimantery Geology*, 1999, **129**, 281-297.

Bradley M., Witten T., McCummins R., Duncan M., Crowe M. and Stewart S., Mine Detection with a Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar, *Proc. of SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Target*, 2000, **4038**, 1001-1007.

Cardelli E., Marrone C., and Orlando L., Evaluation of Tunnel Stability Using Integrated Geophysical Methods. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, **102**, 52, 9.

Changryol K., Daniels J. J., Guy E., Radzevicius S. J., and Holt J., Residual Hydrocarbons in a Water-Saturated Medium: A Detection Strategy Using Ground Penetrating Radar. *Environmental Geosciences*, 2000, **169,** 7-4.

Chen V. C., Radar Imaging, *Encyclop of RF and Microw Engineering*,2005,**169,** 7-9

Claerbout J. F., Doherty S. M., Downward Continuation of Moveout-Corrected Seismograms, *Geophysics*, 1972, **37**, 741-768.

Daniels D. J., *Surface-Penetrating Radar*, 2nd Edition, IEE Press, London- U.K., 111-151,.2004.

Daniels, J.J.,. 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. 5-7 April. 2000.

Dannowski G., and Yaramancı U., Estimation of Water Content and Porosity Using Combined Radar and Geoelectric Measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2006, **19**, 71-85.

Davis J. L., ve Annan A. P., Ground-Penetrating Radar For High-Resolution Mapping Of Soil And Rock Stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 1989, **37,** 531-551.

Fisher E., McMechan G.A., Annan A. P., Cosway S.W., Examples of Reverse-Time Migration of Single-Channel Ground-Penetrating Radar Profiles, *Geophysics*, 1992, **57**, 577-586,.

Gazdag J., Wave Equation Migration with the Phase-Shift Method, *Geophysics*, 1978, **43**, 1342-1351.

Grandjean G., and Gourry J.C.,. GPR Data Processing for 3D Fracturemapping in a Marble quarry (Thassos, Greece). *Journal of Applied Geophysics*, 1999, **36**, 19– 30.

Green A., Gross R., Holliger K., Horstmeyer H., and Baldwin J.,. Results of 3-D Georadar Surveying and Trenching the San Andreas Fault Near Its Northern Landward Limit, *Tectonophysics*, 2003, **368**,7–23..

Halman J. I., Shubert K.A., Ruck G.T., SAR Processing of Ground-Penetrating Radar Data for Buried UXO Detection: Results From A Surface-Based System, *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1998, **46**, 1023-1027.

Hammon III, W. S., McMechan, G. A., and Zeng, X.,. Forensic GPR: Finite-Difference Simulations Of Responses From Buried Human Remains, *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **45**, 171-186.

Harrari, Z.,. Ground Penetrating Radar (GPR) For Imaging Stratigrafic Features and Groundwater in Sand Dunes, *Journal of Applied Geophysics*, 1996, **36**, 43-52.

Harrington, Roger F., Time-Harmonic Electromagnetic Fields, *IEEE Press*, United States, 2001, **473,** 43-52.

Hülsmeyer, C., *German Patent Number* , 1904, **123**, 535-540.

Hülsenbeck, *German Patent No.*, 1926, **123**, 429-434.

Kadıoğlu, S., Photographing Layer Thicknesses and Discontinuities in A Marble Quarry With 3D GPR Visualization, *Journal of Applied Geophysics*, 2008, **64**, 109-114..

Kadıoğlu, S. ve Kadıoğlu, Y. K.,. Yer Radarı Yöntemi ile Bir Mermer Sahasındaki Kırıkların, Sağlam ve Bozuk Alanların Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2006, **21**, 127-135.

Kepmen V. L., Sahli H., Signal Processing Techniques for Clutter Parameters Estimation and Clutter Removal in GPR Data for Landmine Detection, Statistical Signal Processing, *2001. Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop*, Singapore, 23-25. 2001.

Kolba M. P., Jouny I. I., Clutter Suppression and Feature Extraction for Land Mine Detection Using Ground Penetrating Radar, Antennas and Propagation *2003 IEEE Society International Conference*, Columbus-USA, 2003, vol. 2 pp: 203-206.

Koralay T., Kadıoğlu S., and Kadıoğlu Y. K.,. A New Approximation in Determination of Zonation Boundaries of Ignimbrite by Ground Penetrating Radar: Kayseri, *Central Anotalia*, Turkey. 2007.

Leuschen C. J., Plumb R.G., A Matched-Filter-Based Reverse-Time Migration Algorithm for Ground-Penetrating Radar Data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39**, 929-936.

Löwy, H., German Patent Number 245517, 1911.

Peters L., Daniels J.J., Young J.D., Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool, *Proc. IEEE,* 1994, **82**, 1802–1822.

Sambuelli L., Socco L.V., and Brecciaroli L., Acquisition and Processing Of Electric, Magnetic And GPR Data on a Roman Site (Victimulae, Salussola, Biella), *Journal Applied Geophysics,* 1999, **41**,189–204.

Stolt R. H., Migration by Fourier Transform, *Geophysics*, 1978, **43**, 23-48.

Sullivan A., Damarla R., Geng N., Dong Y., Carin L., Ultra Wide-Band Synthetic Aperture Radar for Detection of Unexploded Ordnance: Modeling and Measurements, *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2000, **48**, 1306–1315.

Vitebskiy S., Carin L., Ressler M., Le F., Ultrawide-Band, Short-Pulse Ground-Penetrating Radar: Simulation and Measurement, *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, **35**, 762-772.

Yaran S., Altınsoy. İ., Celep M., Hayırlı C., S parametre Ölçümleri, *3. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Eskisehir, 7-8 Ekim 1999.

Zoubir A. M., Chant I. J., Brown C. L., Signal Processing Techniques for Landmine Detection Using Impulse Ground Penetrating Radar, *IEEE Sensors Journal*,2000, **20**, 41-45,

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Efeoğlu E., Tekbaş M., Ünal İ., Determining Archaeological Remains By Stepped Frequency Contınıous Wave Technıque, *5. International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Turkey, 10- 12 June 2015.

Efeoğlu E., Tekbaş M., Ünal İ.,, Reinforcement of The Concrete Structures Investıgatıon by Stepped Frequency Contınıous Wave Technıque, *5. International Earthquake Symposium*, Turkey, Kocaeli, 10- 12 June 2015.

Efeoğlu E., Türetken B., Tekbaş M.,Determining the Location and Depth of Bruied Pipes by Stepped Frequency Continious Wave Technique: Sand Pool Example, *The International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, Rixos Lares Hotel Turkey, Antalya, 25-27 November 2013.

Efeoğlu E., Tekbaş M., Türetken B., Frekans Adımlı Yere Nüfuz Eden Radar (SFGPR) verilerinin Görüntü İşleme Teknikleriyle İyileştirilmesi, *5.Yer Elektrik Çalıştayı*, Enez, 26-28 Mayıs 2014.

Efeoğlu E., Damage Assessment in Concrete Structures With Ant Colony Optimization, *5. International Earthquake Symposium*, Turkey, Kocaeli, 10- 12 June 2015.

Efeoğlu E., The Improvement of Stone Inscriptions Images Using Image Processing Techniques, *5. International Earthquake Symposium*, Turkey, Kocaeli,10- 12 June 2015.

Efeoğlu E., Aşçı,M., Deducing The Geometry Of Strike-Slip Faultıng by Resistivity Method, *International Earthquake Symposium*, Prof. Dr. Baki Komsuoğlu Congress Center Umuttepe, Turkey, Kocaeli, 17-19 August 2009.

Efeoğlu E., Microzonation Studies by Using Shear Wave Velocity : Gebze (Kocaeli) Region, International Earthquake Symposium, Prof. Dr. Baki Komsuoğlu Congress Center Umuttepe, Turkey, Kocaeli, 17-19 August 2009.

Efeoğlu E., Determining Of Subsurface Structures By Resistivity Method, *International Earthquake Symposium*, Prof. Dr. Baki Komsuoğlu Congress Center Umuttepe Turkey Kocaeli, 17-19 August 2009.

Efeoğlu E., Farklı Elektrot Dizilimleri Kullanılarak Görünür Özdirenç Verilerinin Modellemesi ve Fay Belirtilerine Etki Eden Parametre Tayini, *Yer Bilimleri Sempozyumu*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta,18-20 Ekim 2012.

Efeoğlu E., Görünür Özdirenç Verilerinin Farklı Tekniklerle Modellenmesi, *3. Yer Elektrik Çalıştayı*, Ankara Üniversitesi Örsem Tesisleri Ilgaz, Kastamonu, 24-26 Mayıs 2010

Efeoğlu E., Süreksizliklerin Meydana Getirdiği Yapıların Modellenmesi ve Jeotermal Aramalardaki Önemi, *TMMOB Jeotermal Kongresi*, MTA Kültür Merkezi, Ankara, 23-25 Aralık 2009.

Efeoğlu E., Yapısal Jeolojinin ve Jeotermal Sistemlerin Belirlenmesi İçin Kullanılan Jeofizik Özdirenç Çalışmaları ve Uygulamalar, *Türkiye'nin Jeotermal Potansiyeli ve Arama Yöntemleri Sempozyumu*, İstanbul Üniversitesi, 22-23 Ekim 2009.

Aşçı M. Özçep F., Çetinol T., Alpaslan N., Irmak T.,S. İ. Güven, T. Ulutaş E., Tunç B., Çaka D., Yas T., **Efeoğlu E**., Tunç S., Barış Ş., Özer M. F., Zemin Sıvılaşması İle Mikrotremor Çözümleme Sonuçlarının Karşılaştırılması, *Deprem Sempozyumu,* Kocaeli, 23-25 Mart 2005.

Efeoğlu,**E**., Sıvılaşma Analiz Yöntemleri Fortran Programının Oluşturulması ve Kocaeli Saraybahçe Uygulaması, *Jeofizik Mühendisliği 3. Öğrenci Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 20-21 Ekim 2005.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini birincilikle bitirdi. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesinde 1 yıl ingilizce hazırlık sınıfı okudu. 2001 yılında öğrenime başladığı Jeofizik Mühendisliği bölümünden birincilikle mezun oldu. 2009 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini, 2016 yılında da doktora öğrenimini tamamladı.