

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARKEOJEOFİZİK ÇALIŞMALARDA GPR VERİLERİNE
GÜNCEL VERİ-İŞLEM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS

Jeofizik Müh. Kerem ÖZKAP

Anabilim Dalı: Jeofizik Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Mithat Fırat ÖZER

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARKEOJEOFİZİK ÇALIŞMALARDA GPR VERİLERİNE
GÜNCEL VERİ-İŞLEM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI**

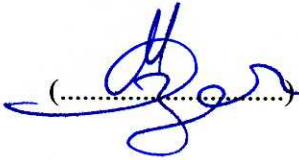
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Jeofizik Müh. Kerem ÖZKAP**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 16 Haziran 2008

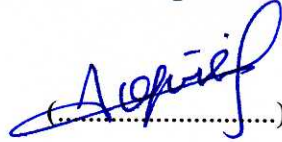
Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mithat Fırat ÖZER


(.....)


Üye

Doç. Dr. Oğuz ÖZEL


(.....)

Üye

Doç. Dr. Oya ÇAKIN


(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Arkeolojik araştırmalar ile gömülü halde bulunan yapıların gün yüzüne çıkartılması hedeflenmektedir. Bu araştırmalar çoğu zaman masraflı olup önemli zaman kayıplarına neden olmaktadır. Arkeolojik kazıları en kısa zamanda en az masrafla başarıya ulaştırabilmek için jeofizik yöntemlere başvurulmaktadır. Arkeolojik dokuya zarar vermeden yapılan bu ölçümler kazıların gidişatını belirlemektedir.

Mısır sınırları içerisinde bulunan antik Hermopolis kentinin nekropolü olan Tuna el-Gebel arkeolojik alanı jeofizik yöntemlerle incelenmiştir. Arkeojeofizik ölçümlerde sıkça kullanılan yer manyetiği ve yer radarı yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen verilere çeşitli veri-işlem aşamaları uygulanarak en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan bu ölçümler sonucunda gelecekte yapılacak olan kazılara kolaylık sağlayacak sonuçlar elde edilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgileri ve önerileri ile beni yönlendiren, danışman hocam Prof. Dr. Mithat Fırat ÖZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Başta Prof. Dr. Wolfgang RABEL ve Dr. Harald STUMPEL olmak üzere, verilerin sağlanması ve değerlendirilmesi konusunda gösterdikleri ilgiden dolayı Christian Albrechts Üniversitesi (Kiel), Jeofizik Mühendisliği Bölümü araştırmacılarına teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgileriyle bana destek olan, verilerin değerlendirilmesinde yol gösteren, maddi ve manevi hiçbir destekten kaçınmayan değerli hocam Yüksek Müh. Ercan ERKUL'a teşekkürü bir borç bilirim. Tezimin derlenmesi sırasında her türlü desteğini gördüğüm Arş. Gör. Deniz ÇAKA'ya tezime değerli görüşlerini yansıtan Arş. Gör. Berna TUNÇ'a ve Arş. Gör. Nur DEMİR'e, iş yükümü hafifleterek bana daha çok çalışma fırsatı sağlayan Arş. Gör. Türker YAS'a teşekkür ederim.

Christian Albrechts Üniversitesi (Kiel)'den değerli arkadaşlarım Yüksek Müh. Christina KLEIN'a, Tina WUNDERLICH'e, Falko OESTMAN'a ve Ali ISMAEL'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bize her türlü çalışma imkanını sağlayarak destek ve yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Şerif BARIŞ'a ve bilgileriyle her zaman bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Özer KENAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR..... | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | iii |
| TABLolar DİZİNİ | v |
| SİMGELER..... | vi |
| ÖZET | vii |
| İNGİLİZCE ÖZET..... | viii |
| BÖLÜM 1. GİRİŞ..... | 1 |
| BÖLÜM 2. ÇALIŞMADA UYGULANAN JEOfİZİK YÖNTEMLER | 4 |
| 2.1 Yer Radarı (GPR)..... | 4 |
| 2.1.1. Yer radarı yönteminin üstün ve zayıf noktaları..... | 5 |
| 2.1.2. Yer radarı (GPR) kuramı | 6 |
| 2.1.2.1 Ortamın özdirenci ve öziletkenliği..... | 8 |
| 2.1.2.2 Ortamın dielektrik sabiti | 8 |
| 2.1.2.3 Ortamın manyetik geçirgenliği | 8 |
| 2.1.3 Radar dalgalarının yayılma hızı ve yansıma özellikleri..... | 9 |
| 2.1.4 Düşey ve yatay ayrımlılık | 12 |
| 2.1.5 Radar dalgasının yayını ve yayını etkileyen faktörler | 14 |
| 2.1.6 Uygun anten seçimi ve veri toplama | 20 |
| 2.1.7 Ölçüm açılım örnekleri | 25 |
| 2.2 Yer Manyetiği | 27 |
| BÖLÜM 3. UYGULANAN VERİ-İŞLEM AŞAMALARI | 30 |
| 3.1 F-K Filtresi..... | 32 |
| 3.2 Ters Evrişim (Dekonvolüsyon)..... | 33 |
| 3.3 Göç (Migrasyon)..... | 35 |
| 3.4 Frekans Süzgeçleri | 38 |
| 3.5 Topoğrafya Düzeltmesi..... | 39 |
| BÖLÜM 4. ARAZİ UYGULAMALARI | 40 |
| 4.1 Araştırma Alanının Yeri..... | 40 |
| 4.2 Araştırma Alanının Tarihçesi..... | 41 |
| 4.3 Kullanılan Aletler ve Ölçüm Şekli..... | 43 |
| 4.3.1. Araştırma sahasında yapılan yer manyetiği çalışması | 43 |
| 4.3.1.1. DGPS ile pozisyon belirlenmesi | 43 |
| 4.3.2. Araştırma sahasında yapılan yer radarı çalışması | 47 |
| BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 59 |
| KAYNAKLAR | 63 |
| ÖZGEÇMİŞ | 66 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Yer radarı yönteminin çalışma prensipleri..... | 4 |
| Şekil 2.2. Freznel zonu ve yanıl ayrımrlılık | 13 |
| Şekil 2.3. Frekans ile düşey ayrımrlılık arasındaki ilişki | 13 |
| Şekil 2.4. (a) Derinliğe bağılı olarak dielektrik geçirgenlik katsayılarının yüzeyden başlayarak artışı. (b) Azalış için dalga kırılma etkileri..... | 17 |
| Şekil 2.5. Yüzey altında farklı yansıtıcılar için anten konumlarına bağılı olarak radar dalğalarının saçılma ve odaklanması. (a) Küçük saçılma, (b) büyük saçılma,(c) odaklanma durumları | 19 |
| Şekil 2.6. Aynı hat üzerinde farklı merkez frekansına sahip antenler ile alınmış ölçüler sonucu elde edilen radargramlar. (a) 50MHz, (b) 100MHz, (c) 200MHz | 22 |
| Şekil 2.7. Örnekleme etkisini göstermek amacıyla sentetik yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yapıya ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radargramlar (a) 25.6cm, (b) 51.2cm, (c) 102.4cm..... | 24 |
| Şekil 2.8. Radar ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten kombinasyonları. (a) Sabit açılım, (b) ortak derinlik noktası, (c) sabit kaynak, (d) sabit alıcı..... | 26 |
| Şekil 2.9. Fluxgate magnetometresinin şematik gösterimi | 28 |
| Şekil 2.10. Yeraltı su borularının manyetik anomali haritasında gösterimi..... | 29 |
| Şekil 3.1. Yer radarı verisine uygulanan veri-işlem akış şeması | 31 |
| Şekil 3.2. Sinyallerin frekans ve eğimin fonksiyonu şeklinde gösterimi..... | 32 |
| Şekil 3.3. Yer altı ara kesitlerinden yansımaların, kesitler üzerinde oluşturduğu olaylar | 33 |
| Şekil 3.4. İdeal bir kesit ve onun üzerindeki olaylara karşılık gelen ara kesitler...34 | |
| Şekil 3.5. Ardışık yansıma olayının ana yansımayı kuvvetlendirmesi | 34 |
| Şekil 3.6. Düz çizgilerle gösterilen ardışık yansıma yanlışıklıkla kesik çizgilerle gösterilen ana yansıma gibi kabul edilebilir. | 35 |
| Şekil 3.7. (a) Yatay yansıtıcı yüzeyde düşey yansıma. (b) Yansıma kesiti | 36 |
| Şekil 3.8. (a) Eğimli yansıtıcı yüzeyde yansıma.(b) Yansıma kesiti | 36 |
| Şekil 3.9. Orijinal pozisyondaki olayın göç ettirilmiş yeri. | 36 |
| Şekil 3.10. (a) Jeolojik yapı,(b) migrasyon işlemi yapılmamış kesit, (c) migrasyon yapılmış kesit | 37 |
| Şekil 3.11. Farklı aralıklarda filtre uygulanmış yer radarı kesiti. | 38 |
| Şekil 3.12. Ölçüm noktalarının üstüne teğet geçen referans düzlemine taşınarak yapılan yükseklik düzeltmesi | 39 |
| Şekil 3.13. Referans düzleminin atış noktasının altında seçilmesi durumu. | 39 |
| Şekil 4.1. Araştırma alanı..... | 40 |
| Şekil 4.2. Petosiris tapınağı..... | 41 |
| Şekil 4.3. (a) Manyetik ölçüm aracı ve mobil GPS istasyonu, (b) GPS baz istasyonu | 44 |
| Şekil 4.4. Araştırma sahasına ait hava fotoğrafı. | 45 |
| Şekil 4.5. Çalışma sahasına ait yer manyetiği sonuçları | 46 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.6. (a) SIRveyor 20 model data kayıtcısı, (b) 400MHz'lik GPR anteni..... | 47 |
| Şekil 4.7. Yer radarı uygulaması için belirlenmiş üç alan. Birinci alan A, ikinci alan B, üçüncü alan C..... | 48 |
| Şekil 4.8. Yer manyetiği ölçümleri sırasında yüzeyde görülen seramik parçaları..... | 49 |
| Şekil 4.9 Rutin veri-işlem aşamalarından sonra elde edilen örnek radargram.... | 51 |
| Şekil 4.10. FK filtresi uygulanmış kesit..... | 51 |
| Şekil 4.11. FK filtresi ile veriden atılmış olan yansımalar..... | 52 |
| Şekil 4.12. (a) Filtrelemeden önce FK spektrumu, (b) filtrelemeden sonra FK spektrumu | 52 |
| Şekil 4.13. Dekonvolüsyon uygulanmış kesit..... | 53 |
| Şekil.4.14. Migrasyon uygulanmış kesit..... | 53 |
| Şekil 4.15. Genlik spektrumu.(a) Filtrelemeden önce, (b) filtrelemeden sonra.... | 54 |
| Şekil 4.16. Band geçişli filtre uygulanmış kesit..... | 54 |
| Şekil 4.17. Topoğrafya düzeltmesi yapılmış kesit..... | 55 |
| Şekil 4.18. A sahasına ait zaman kesitleri (koyu gri: yüksek refleksiyon.) | 56 |
| Şekil 4.19. B sahasına ait zaman kesitleri (koyu gri: yüksek refleksiyon.) | 57 |
| Şekil 4.20. C sahasına ait zaman kesitleri (koyu gri: yüksek refleksiyon.) | 58 |
| Şekil 5.1. A bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)...60 | |
| Şekil 5.2. B bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)...61 | |
| Şekil 5.3. C bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)...62 | |

TABLULAR DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1. Yer radarı yönteminin kullanım alanları..... | 5 |
| Tablo 2.2. Çeşitli ortamlar için göreceli manyetik geçirgenlik değerleri | 9 |
| Tablo 2.3. Çeşitli ortamlarda elektromanyetik dalga hızı, dielektrik sabiti ve öziletkenlik değerleri..... | 12 |
| Tablo 2.4. Farklı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi | 21 |

SEMBOLLER

| | |
|------------|--|
| E | : elektrik alan şiddeti (V/m) |
| D | : elektrik akı yoğunluğu (C/m^2) |
| H | : manyetik akı şiddeti (A/m) |
| B | : manyetik akı yoğunluğu (W/m^2) |
| J | : iletkenlik, akım yoğunluğu (A/m^2) |
| ρ | : serbest elektrik yük yoğunluğu (C/m^3) |
| σ | : öziletkenlik (<i>Siemens/m</i>) |
| ϵ | : dielektrik sabiti |
| μ | : manyetik geçirgenlik |
| v | : elektromanyetik dalga hızı (m/ns) |
| c | : ışığın boşluktaki yayılma hızı (m/ns) |
| λ | : elektromanyetik dalga boyu |
| f | : frekans |
| k | : dalga sayısı |
| X | : duyarlılık |
| R | : yansımaya katsayısı |
| T | : iletim katsayısı |

Alt indisler

| | |
|---|------------|
| s | :statik |
| o | : boşluk |
| r | : göreceli |
| e | : elektrik |
| m | : manyetik |

Kısaltmalar

| | |
|------|-------------------------------------|
| GPR | : Ground Penetrating Radar |
| GPS | : Global Positioning System |
| DGPS | : Digital Global Positioning System |
| CO | : Common Offset |
| CMP | : Common Mid Point |
| CS | : Common Source |
| CR | : Common Receiver |

ARKEOJEOFİZİK ÇALIŞMALARDA GPR VERİLERİNE GÜNCEL VERİ-İŞLEM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

Kerem ÖZKAP

Anahtar Kelimeler: Jeofizik, Arkeojeofizik, Yer radarı, Yer manyetiği, Tuna El-Gebel (Mısır)

Özet: Arkeojeofizik çalışmalarda sıkça kullanılan yer radarı yöntemi ile gömülü yapıların derinliklerinin ve pozisyonlarının saptanması amaçlanmaktadır. Yer radarı ölçümleri sonucunda elde edilen profiller kullanılarak araştırma sahasına ait zaman kesitleri oluşturulur. Zaman kesitlerinin hazırlanmasında format dönüşümü, koordinat kombinasyonları, yön düzeltmeleri ve çeşitli filtrelemeler gibi veri-işlem aşamaları uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise rutin veri-işlem aşamalarının yanı sıra FK filtresi, dekonvolüsyon, migrasyon, band geçişli filtre ve topoğrafya düzeltmesi gibi ileri-veri işlem teknikleri uygulanarak veri kalitesinin artırılması hedeflenmiştir.

Araştırma sahası olarak belirlenen Tuna el-Gebel (Mısır) arkeolojik alanında yapılmış yer manyetiği ölçümlerine ait sonuçlar göz önünde bulundurularak üç farklı alan yer radarı yöntemi için uygulama alanı olarak seçilmiştir. Yer radarı çalışmasında 400MHz merkez frekansına sahip radar anteni ile çalışılmıştır. Çalışma sahasının kuru kum ile kaplı olmasından dolayı yüksek elektromanyetik hızlar elde edilmiştir. Elde edilen verilere rutin veri işlem aşamaları sonrasında belirtilen ileri veri-işlem teknikleri uygulanarak veri kalitesi artırılmıştır.

Veri kalitesi artırılmış olan bu kesitler incelendiğinde gömülü halde bulunan arkeolojik yapılar ayrıntılı bir şekilde görüntülenebilmiştir. Belirlenen yapıların derinliklerin ve pozisyonlarının sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için yer radarı ve yer manyetiği yöntemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

APPLICATION OF ADVANCE DATA PROCESSING TECHNIQUES TO GPR DATA IN ARCHAEOGEOPHYSICS

Kerem ÖZKAP

Key Words: Geophysics, Archaeogeophysics, Ground Penetrating Radar, Geomagnetic, Tuna el-Gebel (Egypt).

Abstract: Ground penetrating radar is one of the well-known and useful method which is preferred by both geophysicists and archaeologists in archaeological surveys in order to determine the depth and position of archaeological structures. The first step in the process is to acquire time sections by using the data collected with GPR along the survey profiles. To obtain time sections, one can use several data processing steps such as format transformations, combinations of coordinates, direction corrections, and various filters. In this study, in addition to conventional data processing steps, some of advanced data processing methods were applied such as FK filter, deconvolution, migration, band pass filter, and topography correction in order to improve the quality of data.

According to the result of the magnetic survey in Tuna el-Gebel (Egypt) archaeological site, three different areas were determined as targets in this study. Throughout the field survey, 400 MHz antenna was used to collect data. Since the research area is covered by dry sands, high electromagnetic velocities have been obtained as a result. In addition to conventional data processing, advanced data processing techniques were carried out to increase the data quality.

Archaeological structures can be clearly identified after the final data processing. To increase the trustworthy of this study, ground penetrating radar data and magnetic data were compared with each other. As a result, depths and locations of archaeological structures have been successfully delineated in Tuna el-Gebel archaeological site.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Arkeojeofizik ya da arkeoloji jeofiziği, yüzeyden uygulanan jeofizik yöntemlerle, araştırılan arkeolojik yapı kalıntılarına herhangi bir hasar vermeden ve olabilecek en kısa zamanda arkeolojik yapı kalıntısının yeri, derinliği ve durumunu belirleyerek arkeolojik kazının planlanmasına yön veren ve arkeolojik kazıya kazanç sağlayan jeofizik dalıdır.

Gömülü durumdaki arkeolojik yapı kalıntılarının belirlenerek arkeoloji bilimine kazı açısından yön verilmesine yönelik uygulamalı jeofizik çalışmaları 1946 yılında başlamış ve 1990'lı yıllardan sonra artarak devam etmiştir. Arkeoloji jeofiziği çalışmaları, jeofizik bilimsel toplantılarında haklı olarak, ayrı bir bölüm durumuna gelmiştir.(Kaya ve diğ., 1996).

Konumuzu oluşturan jeofizik yöntemlerin arkeolojik yapı kalıntılarının aranmasına yönelik uygulamaları tüm dünyada “Archaeogeophysics”, (Ateş, 2002) ya da “Archaeological Geophysics”, (Cott, 2003) gibi isimlerin yanı sıra “Geophysical Survey” (Matias ve Almeida, 1996) veya “Geophysical Prospection”, (Wynn, 1986) olarak isimlendirilmektedir.

Arkeolojik araştırmalarda gömülü arkeolojik yapı kalıntılarının yerlerinin ve derinliklerinin belirlenmesi bu yapıları ortaya çıkarmak için uğraş veren arkeologların en önemli sorunlarından birisidir. Hem masraflı ve kaynak bulma sorunu çekilen kazılarda gereksiz kazıdan kaynaklanan ekonomik sorunları en aza indirmek, hem de son derece duyarlı ve hasarsız kazı gerektiren kısaca uzun zaman alan kazıların zaman kayıplarını önlemek için bu sorunların aşılması gerekmektedir.

Bu sorunları aşmada arkeoloji bilimine yüzeyden yürütülen ve antik yapı kalıntılarına hasar vermeyen ve onların yerlerini, derinliğini ve durumlarını doğruya en yakın olarak belirleyebilmek için jeofizik bilimi katkı koymaktadır (Kaya, 2007).

Bu jeofizik yöntemlerden biri olan, yer radarı yöntemi ise sığ jeofiziksel aramalarda 1980'li yıllardan bu yana yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle arkeolojik prospeksiyon çalışmalarında uygulanan temel jeofizik yöntemlerden biridir. İkinci dünya savaşı sırasında savunma amaçlı uygulamaları yaygın olan radar sistemleri, 1970'li yıllarla birlikte yeraltının fiziksel özelliklerinin araştırılması amacıyla etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır (Drahor, 1998).

Yeraltında ki gömülü nesnelere belirleme amaçlı bilinen ilk radar çalışması Hulsmeier (1904) tarafından gömülü bir metal nesneyi bulma amacıyla yapılmıştır. Bunu 1911 yılında Lowy tarafından geliştirilen yeraltı ara yüzeylerinin derinliğini saptayan teknik ve jeolojik ortamların haritalanmasında Stern (1930) tarafından uygulanan çalışmalar izlemiştir. 1950'li yıllardan sonra buzul kalınlığının ölçülmesi, madenlerde ana kaya haritalaması, gömülü boru, kablo ve benzeri nesnelere aranması, sığ sularda derinlik ölçümleri gibi çalışmalarda kullanılan yer radarı yöntemi analog yer radarı sistemlerinin gelişimiyle birlikte uygulama alanlarını arttırmıştır. Yer radarı sistemlerinin uygulamadaki yaygınlığı sayısal yer radarı aletlerinin ortaya çıkışıyla başlamıştır. Bu sistemlerde veri sayısal formatta elde edildiğinden, veri değerlendirme ve yorumlama aşamaları da bu sistemlerin ortaya çıkışından sonra gelişmeye başlamıştır. 1980'li yıllarda arkeolojik çalışmalarda uygulama alanı genişleten yer radarı 1990'lı yıllardan sonra arkeolojik araştırmalarda önemli bir araştırma yöntemi durumuna gelmiştir. Arkeolojinin dışında jeoloji, jeoteknik ve çevresel alanlarda da yaygın kullanımına rastlanan yer radarı, son yıllarda tomografik anlamda çözümlene tekniklerinin gelişimiyle de sığ jeofizik araştırmalardaki önemini daha da arttırmaktadır.

Yer radarı yöntemi, hızlı bir yöntem olmasıyla birlikte çalışma alanında tahribata neden olmamasından dolayı arkeolojik alan aramalarında tercih edilmesinde önemli bir etken olmaktadır. Yöntemin uygulanmasında, uygun koşullarda ve gerekli taşıma gereçleri

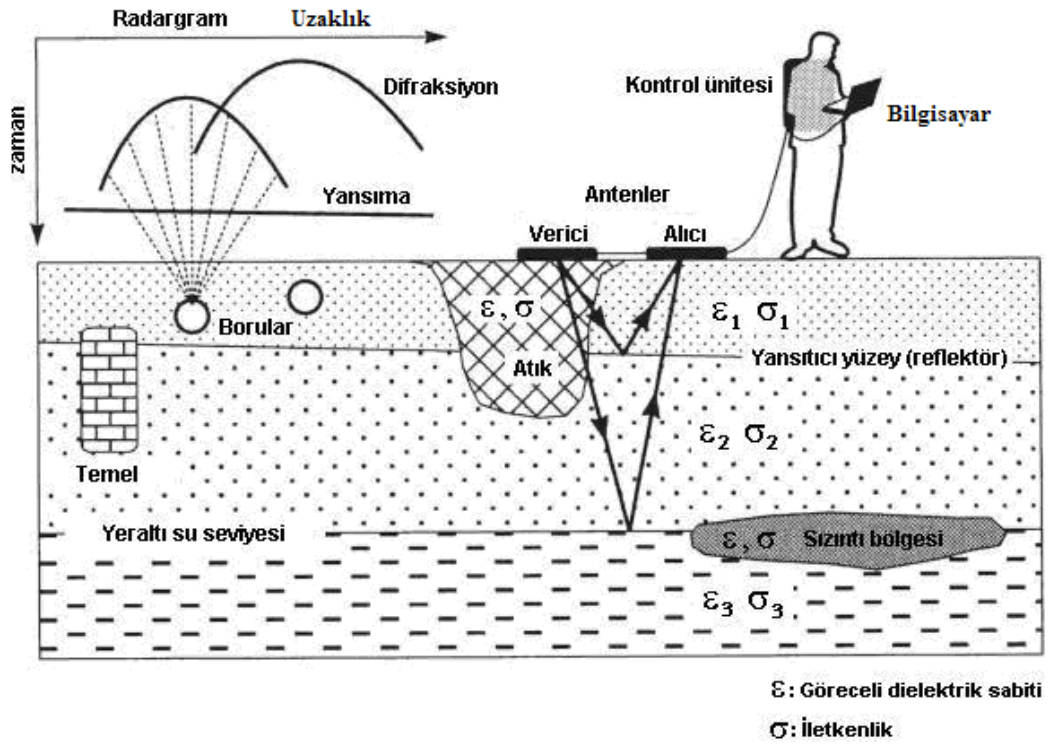
kullanılarak, bir gün içinde birkaç hektarlık alanı ölçme olanağı vardır. Doğal olarak böylesi bir çalışma için alanın düz olması, çalışmayı engelleyecek bitki örtüsü, maki ve benzeri bitki örtüsünün olmamasının yanı sıra hızlı ölçüm almaya yarayan taşıyıcı gereçlerinde bulunması gerekmektedir. Hızlı ölçüm yeteneği, kuru ortamlarda yüksek zıtlığa sahip ayrımlı radar kayıtları vermesi, gömülü yapı derinliğini yaklaşık olarak cm düzeyinde vermesi nedeniyle arkeolojik alan araştırmalarında oldukça fazla yeğlenen bir yöntem olmuştur. Yöntemin en büyük yararlarından bir tanesi olarak arkeolojik yapıları üçboyutlu görüntülemeye olanak sağlamasını gösterebiliriz. Böylece gömülü yapılar ve arkeolojik nesnelere üç boyut içinde irdelenerek, oldukça etkili bir kazı yapma olanağı ortaya çıkarabilmektedir. Bu durum arkeolojik yorumlamanın gelişmesini de sağlamaktadır. Son yıllarda yöntemin tomografik olarak kullanılması ile de daha gerçekçi yeraltı görüntülerine erişme olanağı ortaya çıkmış durumdadır (Drahor, 1999).

Bu çalışmada Tuna el Gebel (Mısır) nekropol alanında antik dokuyu ortaya çıkarmak amacıyla yürütülecek olan kazılara kolaylık sağlaması için arkeojeofizik ölçümler yapılmıştır. Çalışmada manyetik yöntem GPS sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Yer radarı ölçümleri ve toplanan radar verilerine uygulanan veri-işlem aşamaları bu tez çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Elde edilen yer manyetiği sonuçları ışığında belirlenen üç farklı alanda yer radarı yöntemi uygulanmıştır. Yer radarı verilerine, sismik yansıma çalışmalarında sıkça kullanılan veri-işlem teknikleri uygulanarak zaman kesitleri elde edilmiş ve yeraltındaki yapının fiziksel özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 2. ÇALIŞMADA UYGULANAN JEOFİZİK YÖNTEMLER

2.1. Yer Radarı (GPR)

Yöntem, yatay doğrultuda elektrik alan vektörü olan bir verici anten aracılığı ile yer içine gönderilen çok yüksek frekanslı EM dalgalarının (radyo dalgaların) ara yüzeylerden yansımalarının (echoes) gözlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Yeraltında, her iki tarafı farklı dielektrik özellikte kayalardan oluşan bir arayüzey varsa, elektromanyetik dalga bu ara yüzeyde yansıma ve iletme uğrayacaktır (Şekil 2.1.). Dalga sürekli veya aralıklı olarak birkaç nanosaniye süreli sinyaller şeklinde kullanılır.



Şekil 2.1. Yer radarı yönteminin çalışma prensipleri (Knödel ve diğ.,1997).

Yer radarı ilk önce buzul kalınlığının ölçülmesi için geliştirilmiştir. Normal yer ortamında yapılan çalışmalarda elde edilen verilerin sismik yöntemlerde kullanılan veri işlem teknikleri ile işlenmesi sonucu tatmin edici araştırma derinliklerine ulaşıldığı görülmüştür. Günümüzde ise yer radarı yöntemi sığ yer araştırmaları ile arkeometri çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yer radarı yöntemi son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte birçok mühendislik problemine çözüm olması amacıyla farklı kullanım alanlarında uygulanmaya başlanmıştır (Tablo 2.1.).

Tablo 2.1: Yer radarı yönteminin kullanım alanları.

| Araştırma Alanı | Hedeflenen örnek yapılar |
|--------------------------------|--|
| Zemin Araştırmaları | Yol, hava alanı, baraj, su kanalı çalışmaları, yer altı boşluk araması |
| Yapı Araştırmaları | Tavan, taban, duvar incelemeleri, restorasyon çalışmaları |
| Arkeolojik Araştırmalar | Antik şehir, tapınak, mezar, duvar, temel, dehliz aramaları |
| Altyapı Çalışmaları | Eski kanalizasyon, su boruları, sığınak, elektrik ve telefon hatlarının yerlerinin belirlenmesi |
| Çevresel Araştırmalar | Endüstriyel atık ve çöp boşaltım alanlarının belirlenmesi, kaçak ve sızıntı alanlarının tespiti |
| Adli ve Adli Tıp Araştırmaları | Cezaevi firar tünellerinin belirlenmesi, ceset ve toplu mezarların bulunması, kasa, silah ve benzeri objelerin tespiti |
| Maden Araştırmaları | Yüzeye yakın (40 metreye kadar) madenlerin aranması ve rezerv belirleme |

2.1.1 Yer radarı yönteminin üstün ve zayıf noktaları

Yer radarı yönteminin günümüzde birçok probleme karşı tercih edilen bir yöntem haline gelmesinde etkili olan birçok özelliği bulunmaktadır. Bunlar;

- Yüksek frekanslı kaynak kullanılması ve yığılma yapılabilmesi nedeni ile elde edilen çözünürlük yüksektir.
- Hedef yapı veya objenin yeri ve derinliği duyarlı bir şekilde belirlenebilmektedir.

- Arazide uygulanış bakımından kullanılan aygıta ve çalışma ortamına bağlı olmakla birlikte genelde kolaydır.
- İnsan kaynaklı gürültüler genelde veriden elemine edilebilir.
- Klasik yöntemlerin aksine kullanıldığı araştırma sahasına hasar vermeden uygulanmaktadır. Bu özelliği ile arkeometri çalışmalarında tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir.

Ancak, arazi çalışmalarında elde edilen kayıtlarda sinyal-gürültü oranları koşulların ve seçilen ölçüm değiştirgenlerinin uygun olması durumlarında bile yeterli düzeyde olmayabilir.

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

2.1.2 Yer radarı (GPR) kuramı

Bu bölümde jeofizikte elektromanyetik yöntemlerin temel teorisi olan Maxwell denklemlerine dair kısa bir hatırlatma yapılacaktır. Klasik Maxwell denklemleri aşağıdaki dört temel denklem olarak bilinir.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

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

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

Bunlardan başka ortam ve alanlarla ilgili üç bağıntı aşağıdaki şekilde verilir;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Burada,

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| E elektrik alan şiddeti | (V/m) |
| D elektrik akı yoğunluğu | (C/m^2) |
| H manyetik alan şiddeti | (A/m) |
| B manyetik akı yoğunluğu | (W/m^2) |
| J iletkenlik, akım yoğunluğu | (A/m^2) |
| ρ serbest elektrik yük yoğunluğu | (C/m^3) |
| σ öziletkenlik | $(Siemens/m)$ |
| ϵ ortamın dielektrik sabiti | birimsiz |
| μ ortamın manyetik geçirgenliği | birimsiz |

Burada $\nabla \times$ ya da curl vektörel çarpımı, $\nabla \cdot$ ya da diverjansı göstermektedir. (2.5) ve (2.6) denklemlerinde B ve E ölçülen fiziksel büyüklüklerdir. Bu ölçülen büyüklükler ortamın fiziksel özellikleri ile birlikte D ve H kullanılarak (2.5) ve (2.6) da olduğu gibi geleneksel biçimde gösterilir. Yer bilimciler için (2.5), (2.6) ve (2.7) bağıntılarında malzemenin fiziksel özellikleriyle ilgili parametreler olan σ , ϵ ve μ önemlidir.

2.1.2.1 Ortamın özdirenci ve iletkenliği

Doğada bulunan malzemeler elektrik akımına (elektronların hareketine) karşı koyarlar. Her malzemenin bu karşı koyma direncine özdirenç denir. Kayaçlar ve maddeler için özdirenç değerleri farklılık gösterirler. Aynı kayaçlar farklı fiziksel koşullarda, farklı özdirenç değerleri verirler. Bunun nedeni ortamın özdirenç değerinin; formasyon faktörüne (formasyonun çimentolanma ve derecelenme özelliklerine), su doygunluğuna, porozitesine, mineral içeriğine, sıcaklığına bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. İletkenlik ise bir voltaj uygulandığı zaman bir materyalin elektriği geçirme yeteneğine denir. İletkenlik özdirencin tersi ile gösterilir (Öztürk, 1995).

2.1.2.2 Ortamın dielektrik sabiti

Bu bağıntılardaki ϵ ortamın elektrik özelliğine bağlı bir katsayı olup

$$\epsilon_s = \epsilon_0(1 + \chi_e) \quad (2.8)$$

ile verilir. ϵ_0 boşluğun geçirgenliği olup, değeri $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m dir. χ_e ise ortamın elektrik duyarlılığıdır. Boşluk için χ_e sıfırdır. (2.8) bağıntısı boşluğun geçirgenliği ile bölünürse, göreceli elektrik geçirgenlik katsayısı;

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir.

2.1.2.3 Ortamın manyetik geçirgenliği

Ortamın manyetik geçirgenliği olarak tanımlanan μ değeri demir içeren malzemeler dışında jeolojik birimlerle çok fazla değişim göstermeyen bir parametredir. Manyetik yöntemin temel parametresidir. Özellikle demir madeni araştırmalarında çok önemli bir

parametredir. Ortamın manyetik geçirgenliği, ortamın dielektrik sabitine benzer şekilde formüller ile açıklanabilir. Statik manyetik geçirgenlik;

$$\mu_s = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (2.10)$$

bağıntısı ile verilir. Burada μ_0 boşluk için manyetik geçirgenlik olup değeri $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ H/m dir. χ_m ortamın manyetik duyarlılığını göstermektedir. Göreceli manyetik geçirgenlik;

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (2.11)$$

bağıntısı ile verilir. Bazı malzemeler için göreceli manyetik geçirgenlik değerleri Tablo (2.2.) de verilmektedir.

Tablo2.2: Çeşitli ortamlar için göreceli manyetik geçirgenlik değerleri (Balanis, 1989)

| Malzeme | Göreceli manyetik geçirgenlik (μ_r) |
|---------|---|
| Su | 0.9 |
| Boşluk | 1.0 |
| Hava | 1.0000004 |
| Kobalt | 250 |
| Nikel | 600 |
| Demir | 5000 |

2.1.3 Radar dalgalarının yayılma hızı ve yansıma özellikleri

Elektromanyetik dalgalar, ortamın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmaktadırlar. Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1855)'un yapmış oldukları çalışmalar, ışığın elektromanyetik dalga olduğunu ve boşlukta c hızıyla yayıldığını ortaya koymuştur (Sears ve diğ., 1982).

$$c = 1/(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} \quad (2.12)$$

ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, μ_0 ise boşluğun manyetik geçirgenliği olup $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s bulunur. Elektromanyetik dalganın madde içinde yayılması halinde hız;

$$v = 1/(\epsilon \mu)^{1/2} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϵ maddenin dielektrik sabitini, μ ise maddenin manyetik geçirgenliğini göstermektedir. Maddenin göreceli dielektrik sabiti ϵ_r , göreceli manyetik geçirgenliği μ_r olarak tanımlanırsa,

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.14)$$

ve

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.15)$$

ise son bağıntılar hız bağıntısına yerleştirilirse;

$$v = c / (\epsilon_r \mu_r)^{1/2} \quad (2.16)$$

elde edilir. Bu durumda elektromanyetik dalga hızı (v), malzemenin göreceli dielektrik sabitinin (ϵ_r) ve göreceli manyetik geçirgenliğinin (μ_r) bir fonksiyonudur.

Verilen bir f frekansı için elektromanyetik dalga boyu;

$$\lambda = v / f \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir Bu aşamada elektromanyetik dalgaların yansıma ve iletim esasları incelenebilir. λ_1 elektromanyetik dalganın halen içinde ilerlemekte olduğu ortamdaki boyu, λ_2 ise elektromanyetik dalganın içerisine gireceği ortamdaki boyu olsun, bu durumda yansıma katsayısı R ;

$$R = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (2.18)$$

şeklinde belirtilir. İletim katsayısı T ise;

$$T = 1 - R \quad (2.19)$$

şeklinde tanımlanır. Dalga hızı ve dalga boyu bağıntılarından yararlanarak R ve T için aşağıdaki bağıntılar elde edilir (Annan ve diğ., 1975; Hollender ve Tillard, 1998).

Yansıma katsayıları;

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.20)$$

ve

$$T = \frac{2\epsilon_{r2}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.21)$$

olarak ifade edilir.

Jeolojik yapılardaki elektromanyetik dalga davranışlarının tamamına yakını, ortamda bulunan su değişimi belirler. Metalik minerallerin söz konusu olduğu durumlarda ise iletkenlik baskın hale gelir. Yansımanın gücü yansıtıcının alanı ve yüzey ile ilgilidir. En güçlü yansımalar düzgün yüzeylerden gelir. Engebeli yüzeyler dalganın dağılmasına neden olurlar. Bu durumda yansıma dalgalarının genliklerini azalır. Bazı malzemelere ait göreceli dielektrik sabiti (ϵ_r), iletkenlik (σ) ve elektromanyetik dalga hızı (v) değişimleri Tablo 2.3'de verilmektedir.

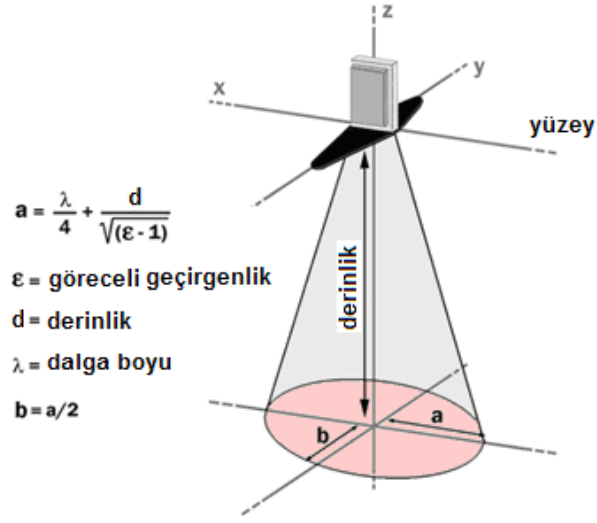
Tablo 2.3: Çeşitli ortamlarda elektromanyetik dalga hızı, dielektrik sabiti ve öziletkenlik değerleri (Schön, 1998; Daniels, 1996)

| Malzeme | Dielektrik Sabiti | Elektriksel İletkenlik (mS/m) | Hız (m/ns) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|------------|
| Hava | 1 | 0 | 0.2998 |
| Saf su | 80 | 0.01 | 0.033 |
| Deniz suyu | 80 | 30000 | 0.01 |
| Kuru kum | 3-5 | 0.01 | 0.15 |
| Suya doymuş kum | 20-30 | 0.1-1.0 | 0.06 |
| Kireçtaşı | 4-8 | 0.5-2 | 0.12 |
| Kil taşı | 5-15 | 1-100 | 0.09 |
| Silt | 5-30 | 1-100 | 0.07 |
| Kil | 5-40 | 2-1000 | 0.06 |
| Granit | 4-6 | 0.01-1 | 0.1 |
| Kuru tuz | 5-6 | 0.01-1 | 0.13 |
| Buz | 3-4 | 0.01 | 0.16 |

2.1.4 Düşey ve yatay ayrımlılık

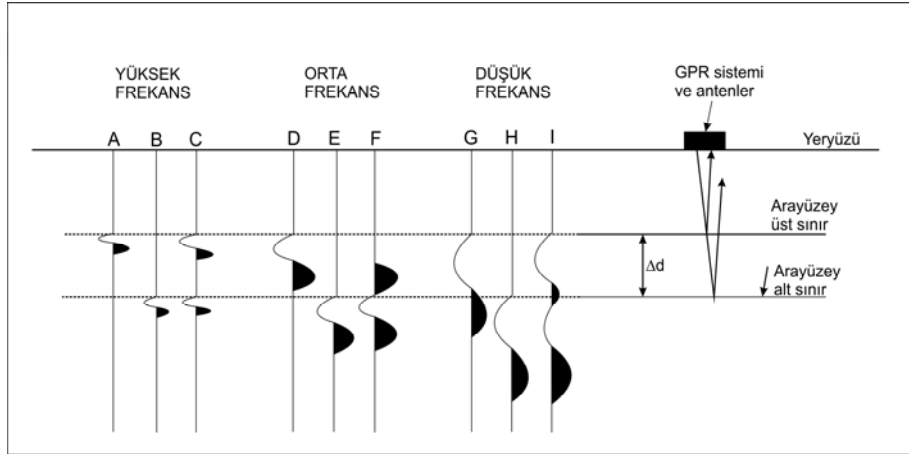
Birbirine yakın iki yansıtıcı arasındaki minimum ayrımlılık çeyrek dalga boyu olarak alınır. Dalga boyu antenin merkez frekansından ve ortamın hızından yararlanılarak bulunur. Ancak pratikte yer ve anten etkileşmesinden dolayı dalga üç veya daha fazla devir yapmaktadır.

Yatay ayrımlılık izler arasındaki uzaklıkla ve Freznel zonu büyüklüğü ile kontrol edilir (Şekil 2.2.). Geniş Freznel zonu düşük yatay ayrımlılık demektir. Buna göre bir olayın en az iki noktada örneklenmesi gerekliliği dikkate alındığında, bir profil üzerinde ölçüm alınırken seçilen ölçüm aralığı dalga boyunun yarısından daha büyük olmamalıdır. İdeali ölçüm aralığı dalga boyunun dörtte biri kadar olmalıdır.



Şekil 2.2: Freznel zonu ve yanıl ayrımlılık (Mala Geoscience, 2003)

Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki dikkate alındığında frekans arttıkça düşey ayrımlılık artmaktadır. Yatay ayrımlılıkta olduğu gibi düşey ayrımlılıkta da dalga boyu önemli bir faktördür. Dalga boyunun yarısından daha ince bir olayın veya tabakanın belirlenmesi teorik olarak zordur. Dalga boyu ise frekans ile ters orantılıdır. Bu nedenle frekans arttıkça dalga boyu küçüleceğinden düşey ayrımlılık gücü artmaktadır (Şekil 2.3.)



Şekil 2.3: Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki (Kadioğlu, 2006).

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi ince bir tabakanın varlığına rağmen bu tabakanın kalınlığı yüksek frekanslı dalganın dalga boyundan geniş olduğu için radar kesitinde görülebilecektir. Orta frekanslı dalganın dalga boyu ince tabakanın kalınlığı ile aynı olduğundan radar kesitinde sadece bir iz olarak görüleceğinden bir tabaka olarak değil ortam içinde yatay bir kırık gibi görünecektir. Düşük frekanslı dalga ile ise hiçbir belirti görülmeyecektir (Kadioğlu, 2006).

2.1.5 Radar dalgasının yayını ve yayını etkileyen faktörler

Elektromanyetik bir dalga olan radar dalgası, elektromanyetik dalganın ortam yayını özelliklerine bağlı olarak değişik düzeylerde birçok parametreden etkilenmektedir. Bunlar genel anlamda ortamın dielektrik geçirgenliği, elektrik iletkenliği, manyetik geçirgenlik, derinlik ve hedef yapının boyutlarıdır. Bunların içinde en önemli parametre ortamın bağıl dielektrik geçirgenliğidir. Bilindiği gibi bir dielektrik madde elektrik akımına karşı yüksek derecede bir direnç gösterir. Böylece dielektrik ortamlarda elektromanyetik enerjinin önemli bir bölümü saçılmadan diğer ortama aktarılır. Bir dielektrik ortamda eğer elektrik alan şiddeti artarsa, elektrik yer değiştirme nedeniyle ortamda enerji depolanır ve depolanan bu enerji elektrik alanının azalması ile birlikte yer değiştirme akımlarına neden olur (Von Hippel, 1954). Bağıl dielektrik geçirgenlik ortamın enerjini depolama ve daha sonra ortamın elektromanyetik enerji geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanmıştır. Bu parametre ortamda elektromanyetik alan etkisiyle oluşan bir kutuplanma olgusuyla açıklanmış ve bu kutuplanmanın elektronik, iyonik ya da moleküler biçimde olabileceğini gösterilmiştir. Bağıl dielektrik geçirgenlik bir maddenin elektrik geçirgenliğinin boşluğun elektrik geçirgenliğine oranıdır ve ortamın nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözenekliliği, sıcaklığı ve fiziksel yapısına bağlıdır. Dielektrik geçirgenlik katsayılarının bilinmesi yorumlama açısından çok önemlidir ve bu katsayılar alandan toplanan örneklerin laboratuvar ortamında ölçümleri yapılarak elde edilebilir.

Radar dalgasını etkileyen bir diğer etkende ortamın elektrik iletkenliğidir. Bir ortamda elektrik yükünün bulunması o ortamda bir elektrik alanının var olmasına ve böylece bir

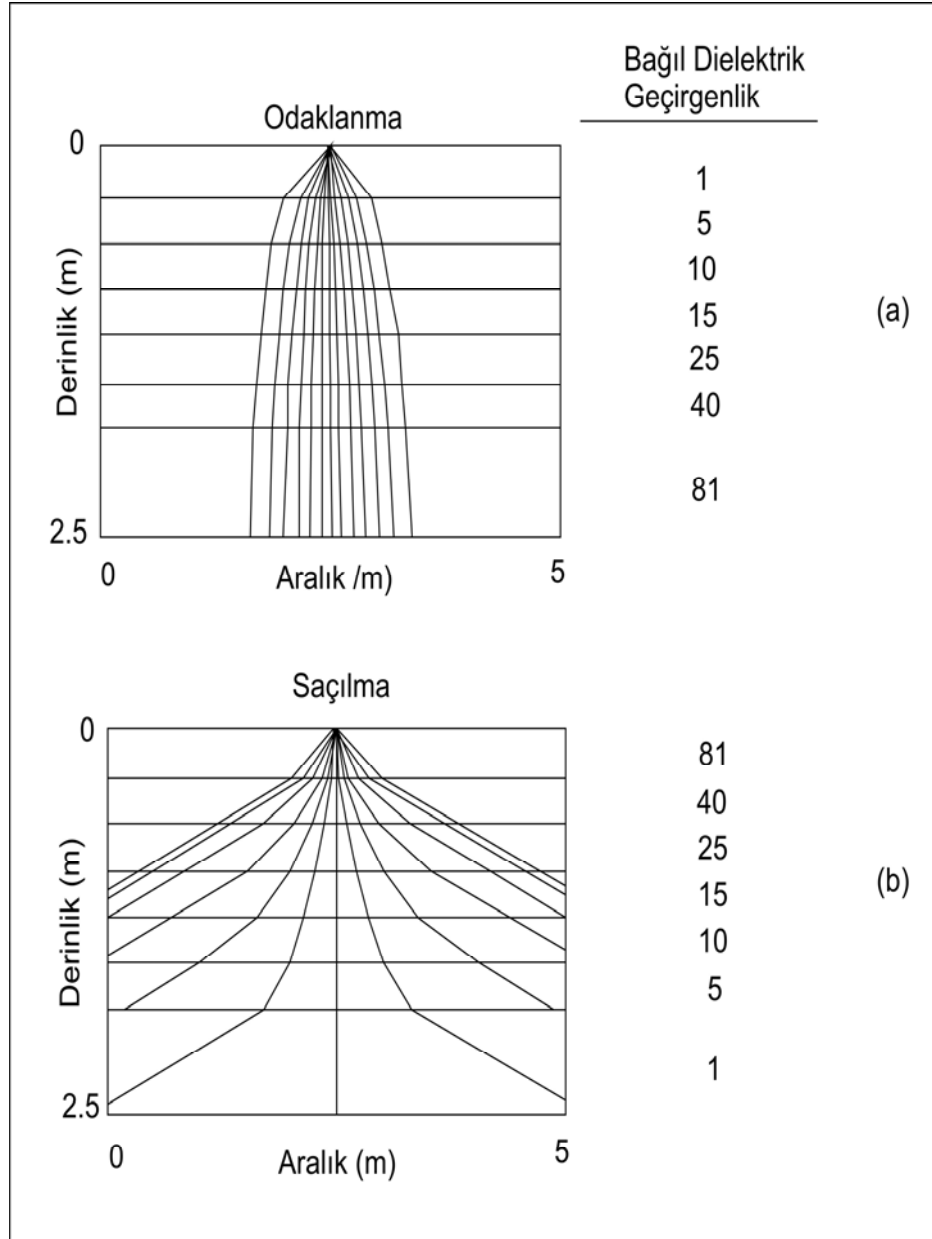
elektrik akımının oluşmasına neden olur. Ortamdaki akım akışı iki türdür; bunlar iletim ve yer değiştirme akımları olarak adlandırılır. İletim akımları bir ortama elektrik alan uygulandığında yüklerin harekete geçerek belirli bir uç hıza ulaşması ve alan varlığını korudukça yük hareketinin devam etmesiyle oluşur. Bu sırada yükler elektrik alan etkisiyle kazandıkları enerjisi ortama ısı enerjisi olarak transfer ederler. Böylece, hareketli yükler ortamda hareketsiz yüklerle karşılaştığı zaman ısı enerjisi olarak ortaya çıkan enerji nedeniyle hareketsiz yükleri hareketlendirerek mekanik bir enerjiye dönüştürür. Eğer elektrik alan ortadan kaldırılırsa, hareketlenen yükler önce yavaşlar ve sonra dururlar. Bu iletim biçimi birçok yer radarı uygulamasında karşımıza çıkar. Metallerdeki metalik bağların hareketi ve sulu çözeltilerdeki iyon devingenliği de yaygın bir iletim mekanizmasıdır. İletkenlik elektrik alanın değişim oranı kadar ortamın sıcaklık, basınç ve diğer bazı etkenlerine de bağlıdır. Ancak sığ bir araştırma olması nedeniyle yer radarı çalışmalarında bunlar genelde ikinci derecede önem taşırlar. Yer değiştirme akımları ise, bir maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin dışarıdan uygulanan bir elektrik alana maruz kaldığı anda harekete zorlanmasıyla ve bağlarının olanak verdiği oranda da bir yer değiştirmeye uğramalarıyla oluşur. Bu hareketin tamamlanmasıyla elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama aktarılır ve ortamda depolanır. Eğer uygulanan elektrik alan kalkarsa, yükler başlangıçtaki denge konumlarına yeniden dönerler ve topladıkları enerjisi ortama geri verirler. Elektrik iletkenliğe sahip yeraltı koşullarında bu ortama giren elektromanyetik enerji, elektromanyetik alanın elektrik bileşeninin ortam içinde manyetik alan bileşeninden ayrılması ve enerji sönmülmesine uğraması nedeniyle, saçılır ve çabuk sönmülmemeye uğrar. Böylece bu tür ortamlarda bir enerji yitimi söz konusu olduğundan, radar dalgaları ortam içinde yeterince enerjisini iletmez ve ortam içinde bir penetrasyon yitimi söz konusudur. Bu nedenle ortamda yüksek oranda bir penetrasyon elde edebilmek için ortamın iletkenliğinin düşük ve dielektrik özelliğinin de yüksek olması gerekmektedir.

Ortamda ki radar enerjisini etkileyen bir diğer etkende manyetik geçirgenliktir. Bu etki, bir maddenin atom ve moleküllerinin manyetik dipol momentlerinin dizilme ya da uygulanan bir dış manyetik alan etkisiyle yönelimlerinden farklı hareket etme seviyelerinin bir ölçüsü olarak tanımlanır ve maddenin manyetik özellik kazanma

özelliklerine (paramanyetizma, diyamanyetizma, ferromanyetizma gibi) göre değişiklik gösterir. Böylece manyetik geçirgenliği, elektromanyetik bir alanla yüklenmiş bir ortamın manyetize olma yeteneğinin bir ölçüsü olarak tanımlayabiliriz. Birçok toprak türü ve çökel birimler düşük manyetik özelliğe sahiptir ve böylece düşük manyetik geçirgenliğe sahip olurlar. Ancak manyetit minerali, demir oksitli çimento ya da demir içeriği zengin topraklar yüksek manyetik geçirgenliğe sahiptirler ve manyetik geçirgenliğin yüksek olması ortamda elektromanyetik enerjinin geçişini sönümlendireceğinden, bu tür ortamlarda radar enerjisi zayıflayacaktır.

Radar dalgalarını etkileyen yeraltının dielektrik özelliklerindeki değişimler, bu dalgaların ara yüzeylerde farklı açılarda kırılmasına neden olmaktadır. Eğer bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısı yeryüzünden yeraltına doğru bir artış gösterirse, radar dalgaları konik bir odaklanma etkisi gösterir ve yeraltında dar bir alanda nüfuz eder (Şekil 2.4a). Bu nedenle bu tür alanlarda yapılan araştırmalarda ölçüm aralıklarının sık olmasına özen göstermek gerekmektedir. Radar dalgalarını yeraltında belirli bir derinlik artışı ile ilerlemesi sırasında bağlı dielektrik geçirgenlik değerleri yavaş yavaş azalıyorsa, iletim konisi her ara yüzeyde daha geniş bir açı ile kırıldığından dolayı, genişler ve saçılma özelliği gösterir (Şekil 2.4b). Radar dalgaları yer içindeki hareketleri sırasında buldukları ortamın dielektrik geçirgenlik, iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine bağlı olarak ortam içinde derine doğru nüfuz edebilirler. Bu durumda yer içine nüfuz eden dalgalar ortam içindeki küresel yayınımları sırasında uzaklıkla ters orantılı bir azalma göstermektedir ve bu olgu derinlikle birlikte enerjinin sönümlenmesi olarak açıklanır.

Sönümlenme elektromanyetik enerjinin derinlik artışına bağlı olarak daha büyük bir yüzey alanı üzerinde yayılması ve yer içindeki iletkenlik kayıpları nedeniyle de enerjinin soğrulmasıyla ortaya çıkmaktadır. Böylece düşük elektrik iletkenlik ve bağlı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlar enerjinin ortamda daha fazla yayınımlarına olanak verirler.



Şekil 2.4: (a) Derinliğe bağlı olarak dielektrik geçirgenlik katsayılarının yüzeyden başlayarak artışı. (b) Azalış için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman, 1997).

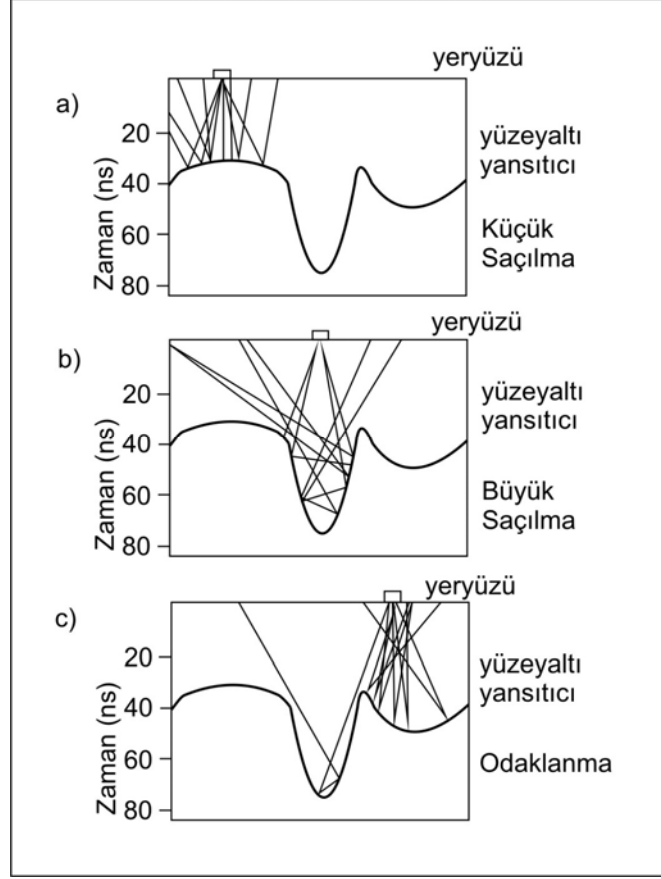
Tersi durumlarda ise radar enerjisi hızlı biçimde sönmülenir ve özellikle çok iletken ve yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda kullanılan antenin frekansı ne olursa olsun, penetrasyon bir metreyi geçmez. Görüldüğü gibi soğurulma kayıplarını oluşturan ortam iletkenliğindeki temel etkenler; toprağın sıvı içeriğindeki

artış, ortamdaki tuz miktarı ve ortama nüfuz etmiş tuz türleri ile toprak katmanı içinde yüksek oranda bulunan çözünmemiş karbonat yoğunluğudur.

Yeraltına gönderilen bir radar dalgasından yeryüzündeki alıcıya ilk ulaşan doğrudan gelen hava dalgasıdır. Bunu doğrudan gelen yer dalgası izler. Bu dalgalar yeryüzünün üst yüzeyinde seyahat ederler. En sonra gelenler dielektrik ara yüzeylerden yansiyarak geri dönenlerdir. Bunlar sırayla buldukları derinliklere göre alıcıya ulaşmaktadır ve en geç ulaşanlar derindeki dielektrik ortamlardan yansıyan dalgalardır. Radar dalgaları ara yüzeylerde yansydıkları gibi kırılmaya da uğrarlar. Kırılmaya uğrayan radar dalgaları radargramlarda oldukça karmaşık görüntüler verir ve bunların ayrıntılı analizleri yeterinde yapılamamaktadır. Radargramlarda bir yansımanın izlenebilmesi için, iki ortam arasındaki ara yüzey çok kalın olmamalı ve ortamlar arasında yüksek dielektrik zıtlık bulunmalıdır. Yeraltında seyahat eden dalgaların hızlarının saptanması araştırılan ortamın ya da hedefin derinliğinin saptanmasında önemli bir olgudur. Böylece hız belirlenerek, radargram için bir derinlik ölçütü ortaya çıkar.

Radar enerjisi yeraltında yansıtıcıların sahip olduğu geometri nedeniyle odaklanabilir ya da saçılım özelliği gösterebilir. Bunun tipik bir örneği Şekil 2.5’de verilmektedir. Yüzey altında bulunan hafif eğimli bir yansıtıcı küçük saçılmalar yaratırken (Şekil 2.5a), derin ve dar bir yansıtıcı yüzeyin olduğu durumda büyük saçılmaların ortaya çıktığı ve alıcı antene yeterince yansımanın ulaşmadığı izlenmektedir (Şekil 2.5b). Oysa yansıtıcının içbükey bir konumda olması durumunda odaklanma türü bir yansıma elde edilmekte ve sinyallerin büyük bölümü alıcıya ulaşmaktadır (Şekil 2.5c).

Daha büyük saçılmalara neden olabilecek (b)’de verilen derin bir çukurluk durumunda ise, yansıyan dalgalar alıcı antenden uzaklaşacağından, yansıma kayıtlarında herhangi bir hendek yapısı görülmeyecektir. Oysa içbükey bir yansıtıcı ara yüzey (c) bulunması durumunda odaklanma etkisi nedeniyle yüksek genlikli yansımalar elde edilecek ve yansımalar radargramda açık bir biçimde seçilebilecektir (Conyers ve Goodman, 1997).



Şekil 2.5: Yüzey altında farklı yansıtıcılar için anten konumlarına bağlı olarak radar dalgalarının saçılma ve odaklanması. (a) Küçük saçılma, (b) büyük saçılma ve (c) odaklanma durumları (Conyers ve Goodman ,1997).

Diğer önemli bir etki de yakın alan etkisi olarak adlandırılan etkidir. Bu durum bir verici antenden yayılan enerjinin antenin merkez frekansının 1.5 katı dalga boylu bir yarıçap içinde anten çevresinde bir elektromanyetik alan üretmesidir. Bu etki 10, 100 ve 1000 MHz'lik merkez frekansına sahip antenler için sırasıyla 30m, 3m, 30cm'dir. Böylece verici antene yakın bölgeler sanki antenin bir parçasıymış gibi davranır ve bu etki içindeki alanda ışınım ya çok az gerçekleşir ya da gerçekleşmez ve teknik açıdan bu bölümün herhangi bir radar yayınının olmadığı yer olarak düşünülmektedir. Bu etki genellikle yer radarı kesitlerinde yüzeyden itibaren yansımanın olmaması ya da çok az olması biçiminde görülmektedir.

Düşük frekanslı antenler kullanıldığında yeryüzünün 2.5m ile 5m arasındaki bölümünden yansımanın alınmadığı bir yakın alan zonu oluşabilir. Eğer bu alan içinde ilgilenilen hedefler bulunuyorsa, mutlaka yüksek frekanslı anten kullanarak bu hedefler belirlenmelidir (Conyers ve Goodman, 1997).

2.1.6 Uygun anten seçimi ve veri toplama

Yer radarı uygulamalarında doğru sonuca ulaşabilmede en önemli öğelerden biri sorunun çözümüne uygun anten kullanmaktır. Bu nedenle ilgilenilen yapının çözünürlüğü ve araştırılması hedeflenen derinlik göz önüne alınarak anten frekansının seçimine özen göstermek gerekmektedir. Yer radarı verisinde çözünürlüğü denetleyen parametre dalga boyudur ve dalga boyundaki artış frekans değerini düşürürken çözünürlüğünde azalmasına neden olur. Ancak, bu kez araştırma derinliği artmaktadır. Buradan da görüldüğü gibi, araştırılan hedefin araştırma derinliği ve istenilen ayrımlılık düzeyi önem taşıyan olgulardır. Yeraltına gönderilen dalganın yayılım frekansı ortamın toprak ve çökel özelliklerine bağlı olarak da değişim göstereceğinden frekans değerinin yeraltındaki değerini tahmin etmek kolay değildir. Bu nedenle ortamın nem içeriği, gözenekliliği ve ortamda farklı derinliklerde gömülü yapıların bulunması da bu değişimi etkileyecektir. Yüksek dielektrik ve iletkenlik özelliği taşıyan ortamlarda hız değerleri önemli oranlarda düşmekte ve sönümlenme değerleri de artmaktadır.

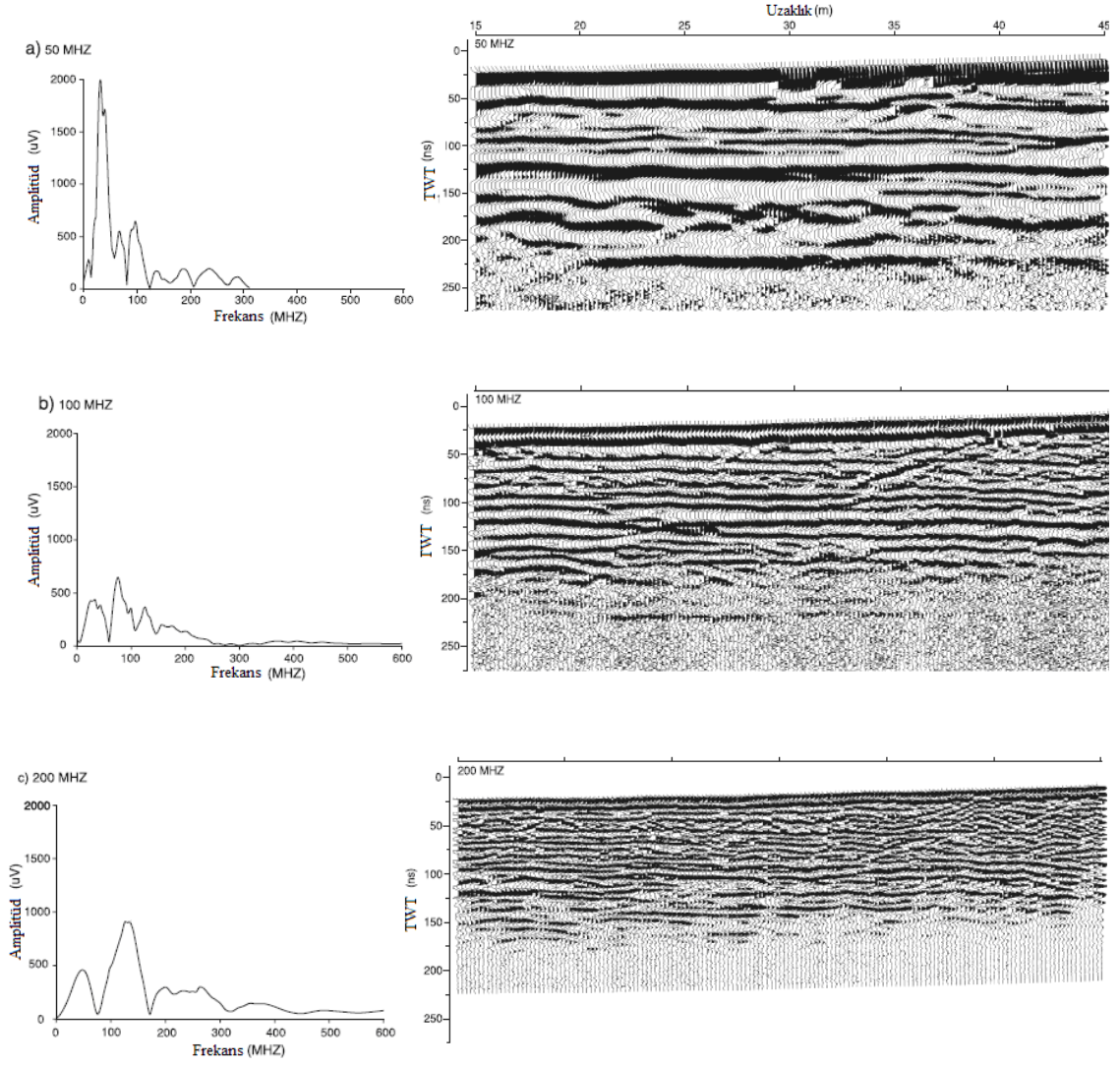
Radar dalgalarının ortam içindeki yayılımında önemli bir diğer etkende farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri için anten frekanslarına bağlı olarak radar dalga boylarındaki değişimdir. Bu değişim farklı merkez frekanslarına bağlı olarak dalga boyundaki farklılıklar Tablo 2.4'de verilmektedir. Görüldüğü gibi, ortamın dielektrik özelliği dalga boylarını önemli ölçüde derecede etkilemektedir ve ortamda dielektrik artışla birlikte dalga boylarında hızlı bir düşüş ortaya çıkmaktadır (Conyers ve Goodman, 1997).

Tablo 2.4: Farklı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997).

| Anten Merkez Frekansı | Merkez frekansın dalga boyu | | | |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | ϵ_r (Hava içinde) | ϵ_r (5) | ϵ_r (15) | ϵ_r (25) |
| (MHz) | (m) | (m) | (m) | (m) |
| 1000 | 0,33 | 0,13 | 0,08 | 0,06 |
| 900 | 0,33 | 0,15 | 0,09 | 0,07 |
| 500 | 0,60 | 0,27 | 0,15 | 0,12 |
| 300 | 1,00 | 0,45 | 0,26 | 0,20 |
| 120 | 2,50 | 1,12 | 0,65 | 0,50 |
| 100 | 3,00 | 1,34 | 0,77 | 0,60 |
| 80 | 3,75 | 1,68 | 0,97 | 0,75 |
| 40 | 7,50 | 3,35 | 1,94 | 1,50 |
| 32 | 9,38 | 4,19 | 2,42 | 1,88 |

Kullanılan anten frekansı da elektromanyetik dalganın penetrasyonunu etkileyen önemli bir etkidir. Düşük merkez frekanslı antenler uzun dalga boylu sinyaller üreterek, ortamdaki iletkenlik kayıpları ve diğer küçük boyutlu yapı saçılmalarından daha az etkilenirler ve böylece daha az sönümlenmeyle daha derine nüfuz edebilirler. Ancak bu kez ortam çözünürlüğünde önemli kayıplar ortaya çıkmakta ve ortamdaki küçük nesnelere belirlenemediği gibi, ince tabaka kalınlıkları da ölçülememektedir. Ayrıca büyüyen anten boyutları da araştırmacı açısından ölçüm zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Yüksek frekanslı antenler kısa dalga boylu dalgalar ürettiğinden, bu antenler yardımıyla yüksek çözünürlüklü sonuçlar elde edilebilmektedir. Böylece küçük boyutlu nesnelere ile aranılan ortamdaki çizgisel özellikler belirlenebilmektedir. Bu nedenle araştırmanın amacına uygun merkez frekansta bir anten seçilmelidir.

Şekil 2.6'da aynı hat üzerinde farklı merkez frekansa sahip antenler kullanılarak elde edilmiş radargramlar gösterilmektedir.

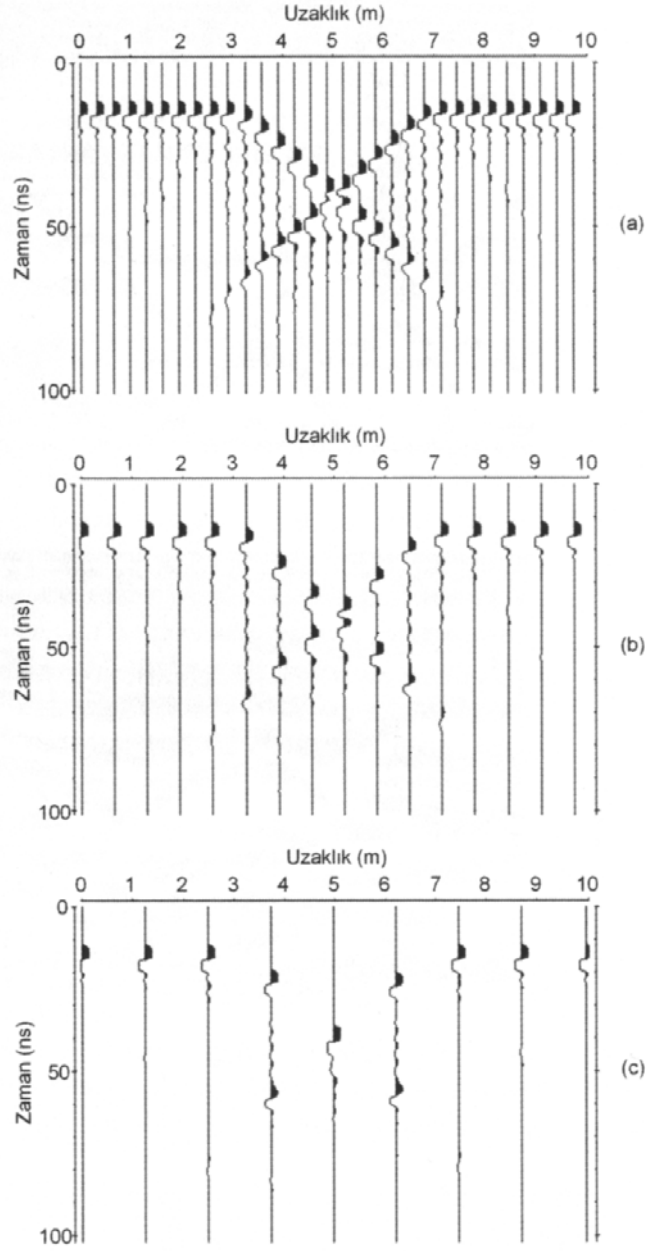


Şekil 2.6: Aynı hat üzerinde farklı merkez frekansına sahip antenler ile alınmış ölçüler sonucu elde edilen radargramlar. a)50 MHz, b)100 MHz, c)200 MHz (Neal, 2004)

Alçak frekanslı anten yoluyla elde edilen kayıta daha derinlerden bilgi alınmasına karşın, ayrımlılık oldukça düştüğünden, radargramda yüzeye yakın sinyallerde bir bozulma ve yuvarlatma etkisi açıkça görülebilmektedir. İkinci radargramda ise çözünürlüğün ilk radargrama göre arttığı ancak derinlerden gelen yansımaların enerjilerini kaybetmeye başladığı görülmektedir. Aynı hattın yüksek frekanslı anten kullanılarak elde edilen kaydında ise aynı derinlikteki izler daha ayrımlı bir biçimde seçilebilmekte, hatta yüzeye yakın yapılardan kaynaklanan bazı hiperboller açık bir

şekilde görülmektedir. Buradan da görülebildiği gibi, anten seçiminde temel etken aranılan yapının derinliği ve arzulanan ayrımlılık olmalıdır.

Arkeolojik alanlarda radar verileri gridler içindeki hatların ölçülmesi yoluyla yapılır. Burada hat aralıklarının belirlenmesi genellikle aranılan arkeolojik yapı ile ilintili olmakla birlikte orta sıklıkta bir aralıkta (0.5m) yapılacak ölçümlerle birçok yapıyı belirlemek olasıdır. Eğer boyutların küçük olduğu düşünülen yapılar mevcutsa, aralıkları sıklaştırmak başarı şansını daha da artıracaktır. Eğer yeterince sıklığa sahip olmayan hatlardan veri toplanırsa, zaman kesitlerinde yeterince ayrımlığa sahip olmayan ve yuvarlatılmış görüntüler elde edilecektir. Örnekleme aralıkları yani ölçüm aralıklarının sık olması da yapı belirlenebilirliğinde önemli bir etkendir. Şekil 2.7’de sentetik yolla oluşturulmuş hendek biçimli bir yapıya ilişkin farklı örnekleme değerlerine sahip üç ayrı radargram verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi örnekleme aralıkları çok geniş tutulduğunda düşük ayrımlığa sahip yansıma kayıtları elde edilirken (b ve c), aralıklar yeterli sıklığa sahip olduğunda yoruma elverişli bir kayıt elde edilebilmektedir (a). Ancak normalin üstünde bir veri sıklığı da veri işlemeyi önemli ölçüde arttıracığından bu kez veri-işlem sırasında önemli zaman yitimleri oluşacaktır. Bu nedenle uygun bir aralığın seçilmesi önem taşıyacaktır. Bunlar uygulamada amaca bağlı olarak 1 ile 10 cm arasında olacak şekilde seçilmektedir. Veriler alandaki hatlar üzerinde belirli bir doğrultu boyunca ya da zigzag olarak adlandırılan geliş-gidişler biçiminde toplanabilir. Ancak zigzag veri toplamalarda ölçüm başlangıç noktaları iyi belirlenmeli ve herhangi bir nokta kaymasına olanak verilmemelidir. Aksi halde veriler düzgün bir gridleme içinde toplanmamış olacak ve bu durum değerlendirmede ve yorumlamada sorunlar oluşturacaktır. Tüm gridler üzerindeki hatlardan toplanan verilerin birleştirilmesi ile ortamın üç boyutlu görüntülerini elde etmek olasıdır. Bu durum yeraltının zaman kesitleri yardımıyla yorumlanmasına da olanak verecektir. (Drahor, 2007).

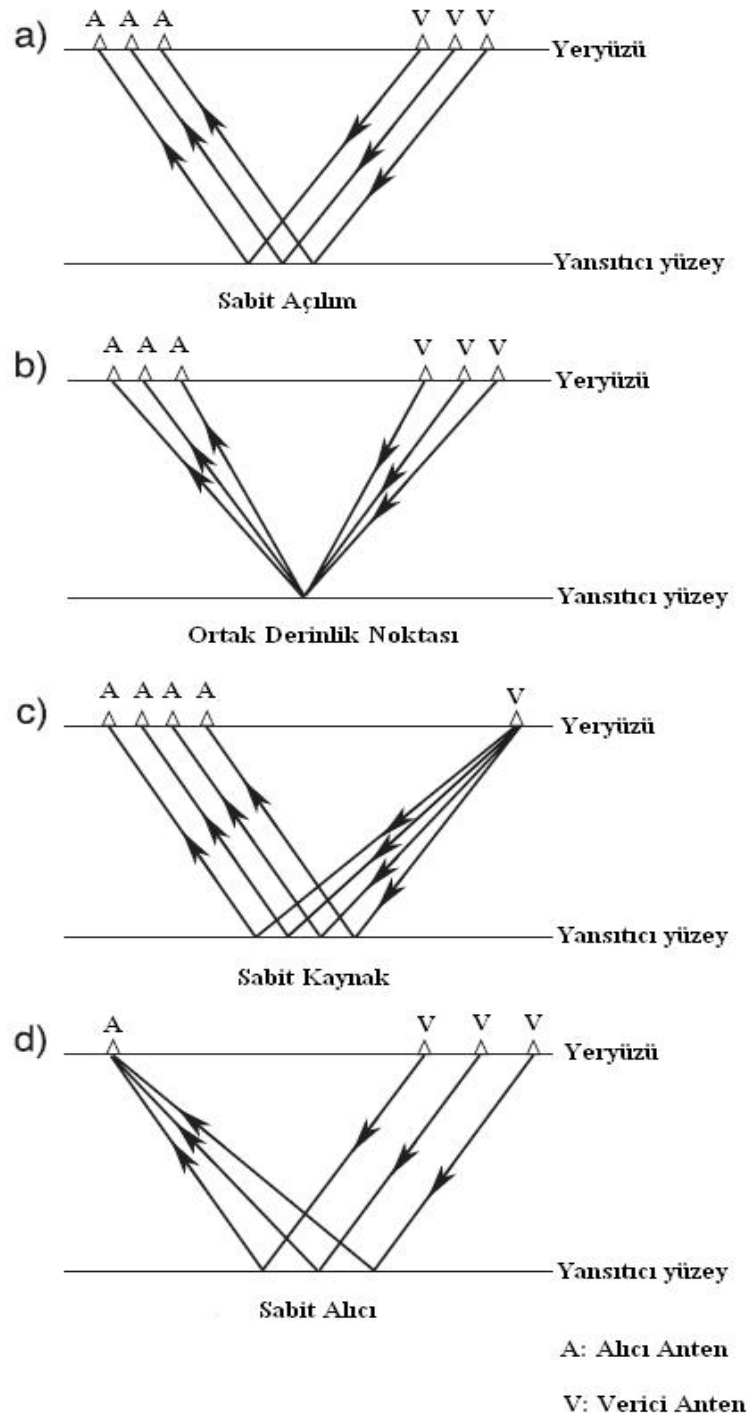


Şekil 2.7: Örnekleme etkisini göstermek amacıyla sentetik yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yapıya ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radargramlar. (a) 25.6cm, (b) 51.2cm, (c) 102.4cm (Drahor, 2007).

2.1.7 Ölçüm açılım örnekleri

Yer radarı yönteminde farklı uygulamalar için çeşitli anten kombinasyonları kullanılmaktadır. Birbirlerinde belirli bir uzaklıkta tutulan alıcı ve verici antenler araştırma doğrultusu üzerinde ilerletilir. Çoğu zaman Yer radarı çalışmalarında sabit anten aralığı kullanılır ve sabit açılım (CO, Common Offset) olarak adlandırılır. Bunun yanı sıra sıkça kullanılan bir diğer açılım ise genellikle hız ölçümleri için tercih edilen çoklu katlama (CMP, Common Mid Point) açılımıdır. Verici antenin sabit, alıcı antenin ise kaydırıldığı sabit kaynak (CS, Common Source) açılımıyla birlikte alıcı antenin sabit tutulup verici antenin hareket ettirildiği sabit alıcı (CR, Common Receiver) açılımları nadiren kullanılan anten kombinasyonlarıdır (Şekil 2.8).

CMP çalışmalarında, sismik yöntemle benzer biçimde, açılıma bağlı olarak oluşan yansımalarından elde edilen değişimler kullanılarak hızlar belirlenmektedir. Bu yöntem uygulanması zor olduğunda çalışmalarda sadece hız tespiti amaçlı uygulanmaktadır. Hız ölçümlerini mümkün olduğunca doğru yapabilmek için ölçümler, arazinin bir noktası yerine birkaç farklı noktada yapılmalıdır. Bu çalışmalar sonucunda araştırılan tabaka, yapı veya objenin derinliği tespit edilebilmektedir. Ancak, bu yapıların konumları gerçek anlamda sondaj ve kazı çalışmalarıyla belirlenebilmektedir.



Şekil 2.8: Radar ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten kombinasyonları. a) Sabit açılım, b) ortak derinlik noktası, c) sabit kaynak, d) sabit alıcı (Daniels, 1996).

2.2 Yer Manyetiği

Manyetik (Magnetic) yöntem arkeoloji jeofiziği araştırmalarında en yaygın kullanılan jeofizik yöntemidir. Yeraltındaki birimlerin farklı mıknatıslanma duyarlılığına (suseptibilite) sahip olmaları özelliğinden yararlanarak yeraltı yapısını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Eğer kayaçlar arasında bir mıknatıslanma duyarlılığı ve Şekil farklılığı var ise bunların yeryüzünde oluşturacağı manyetik etki farklı olacak ve bu farklılık manyetik ölçülerde bir belirti Şeklinde ortaya çıkacaktır.

Manyetik yöntemde Coulomb yasasından hareketle manyetik alan Şiddeti tanımlanmaktadır ve birim kutba etkiyen kuvvettir. Birimi Oersted'tir (cgs). SI birim sisteminde is nanotesla (nT) olup yaygın kullanılan birimdir.

Yer manyetik alanı zamana ve yere bağlı olarak değişmektedir. Zamana bağlı değişim ölçü alımını ve çalışmayı doğrudan etkilemektedir. Değişim, biri ölçü alanında diğer de baz noktasında sürekli ölçü almak üzere çift manyetometre kullanılarak ya da tek manyetometre kullanılarak ancak çok kısa zaman aralıklarında seçilen baz noktasına dönülerek yapılmaktadır. Bir diğer seçenek arkeoloji jeofiziği araştırmalarda olduğu gibi, çift algılayıcı (sensor) kullanılarak gerçekteştirilen gradient çalışmasıdır.

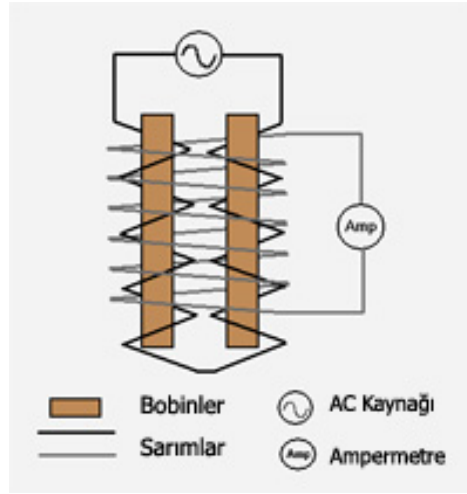
Yer manyetiği çalışmalarında kullanılan modern ölçüm aletleri üçe ayrılabilir. Bunlar;

- a) Fluxgate Manyetometresi
- b) Proton Prosesyon Manyetometresi
- c) Absorbsiyon Hücreleri Manyetometresi

Bu çalışmada belirtilen manyetometre çeşitlerinden Fluxgate manyetometresi ile çalışılmıştır. Fluxgate manyetometresi; elektromanyetik sonda adı da verilen bu alet, manyetik geçirgenliği çok yüksek olan n metalden yapılmış ve birbirinin aynı olan iki

çekirdekten oluşmuştur. Çekirdeklerin birbirinin aynısı olmasına karşın, çekirdekler üzerindeki bobinler birbirlerine göre ters yönde sarılmışlardır (Şekil 2.9.).

Alternatif akım kaynağı [A.C] den bobinlere akım gönderildiğinde çekirdekler birbirlerine ters yönde mıknatıslanma kazanırlar. Ancak kazanılan bu mıknatıslanmalar tam olarak doyma noktalarında değildirler. Bu durumda, ortamda bulunan magnetik alan kendi doğrultusunda olan çekirdeği mıknatıslanma noktasına getirirken ona ters yönde olan çekirdeğin mıknatıslanmasına hiçbir etki yapmayacaktır. Diğer bir deyişle, çekirdekler etrafındaki bobinlerden birisine daha çok diğerine daha az magnetik akı gönderilmiş olacaktır. Böylece bobinler arasındaki bu akı farklılığı bir indüksiyon elektromotor kuvveti oluşturacaktır. Oluşan bu değer, yer manyetik alanının değerine bağlı olacaktır.

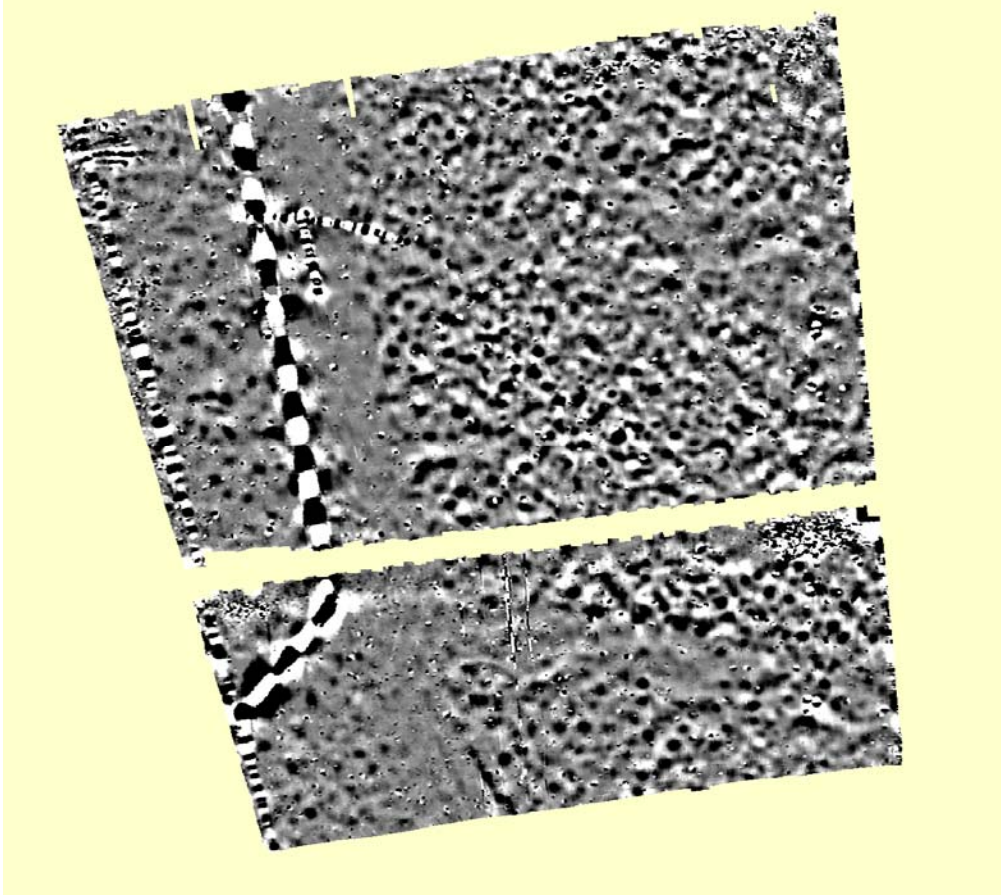


Şekil 2.9: Fluxgate manyetometresinin şematik gösterimi.

Manyetik yöntemde, ölçülen yer manyetik alan değerlerinden yeraltındaki yapı küre, silindir gibi geometrik şekillere benzetilerek konumu, derinliği gibi parametreler elde edilemeye çalışılmaktadır. Yöntem öncelikle maden jeofizikinde uygulanmıştır. Jeolojik süreksizlikleri veya yapısal farklılıkları belirlemek amacıyla da manyetik yöntem uygulanmaktadır. Yeraltındaki metal borular, tanklar, yapay malzemeler ile heyelan sonucu toprak altında kalan metal nesnelere manyetik yöntem uygulaması ile kolaylıkla

belirlenebilmektedir (Şekil 2.10). Bu da çevre jeofiziği amaçlı araştırmalara katkı sağlamaktadır.

Arkeolojik alanlarda bulunan demirden yapılmış her türlü malzeme ile pişmiş kil, bunların ocak veya fırınları gibi yapıları da sahip oldukları ısıl kalıntı mıknatıslanma nedeniyle manyetik çalışmalarda çok iyi belirti vermektedir. Bu ve benzeri malzemelerin insanlık tarihi boyunca, farklı amaçlarla kullanıldığı bilindiğine göre herhangi bir arkeolojik alanda bulunma olasılığı da yüksektir. Bu da manyetik yöntemi, arkeolojik alanlarda en çok uygulanan yöntem durumuna getirmiştir.



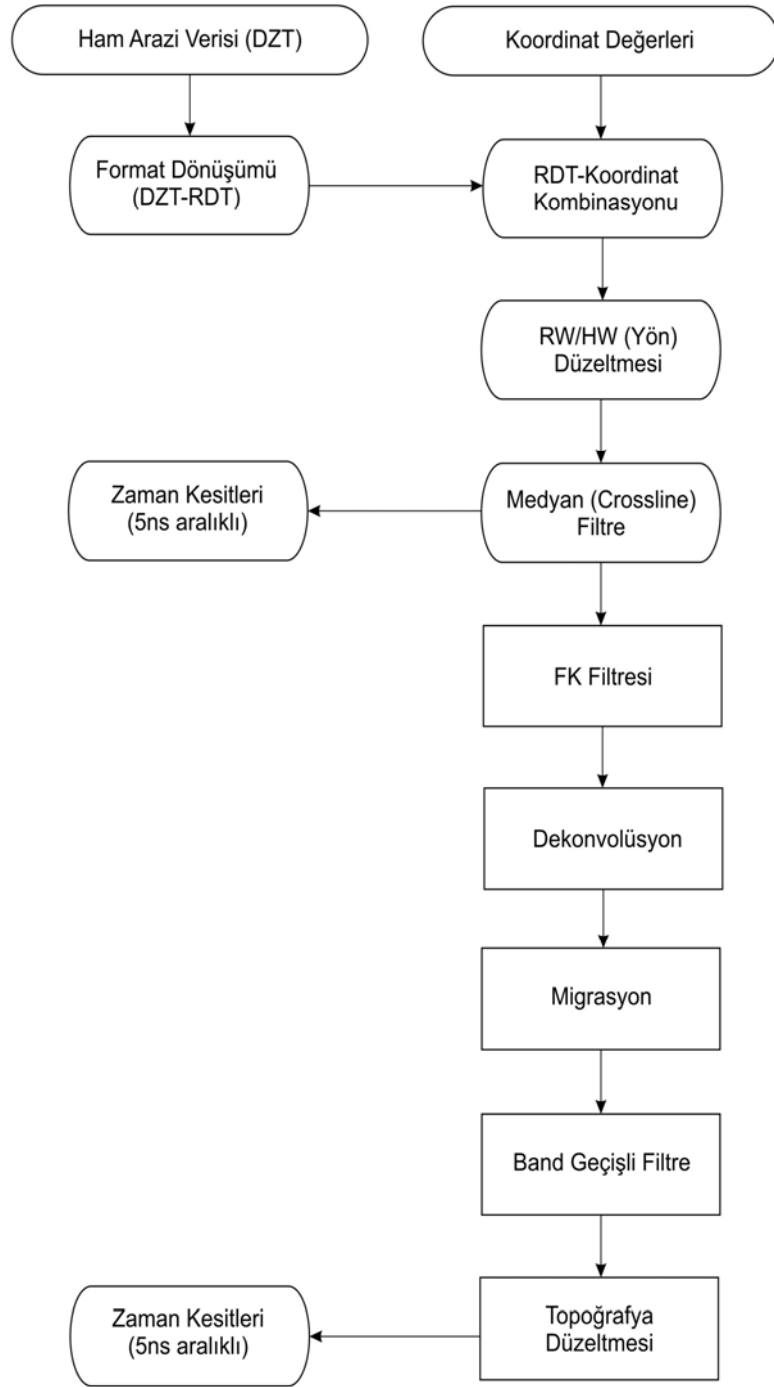
Şekil 2.10: Yer altı su borularının manyetik anomali haritasında gösterimi.

BÖLÜM 3. UYGULANAN VERİ-İŞLEM AŞAMALARI

Ölçümlerden elde edilen radar verileri sinyal-gürültü oranının ve veri kalitesinin artırılması amacıyla değişik sinyal analiz işlemlerinden geçirilerek, daha seçilebilir ve kaliteli radargramlar ile zaman kesitleri haline getirilir. Bu işlemler sırasında birçok sinyal analiz tekniği kullanılmaktadır. Yaygın olarak, temel etkiyi kaldırıcı süzgeçler, F-K süzgeçleri, ters-evrişim (dekonvolüsyon), göç (migrasyon), kazanç (gain), statik düzeltme ve hız analizi gibi yöntemler uygulanmaktadır. Amaca uygun biçimde bu işlemlerden geçirilen verilerin kayıtlarında aranan hedefleri daha etkili olarak izlemek mümkün olacaktır.

Arkeojeofizik çalışmalarda nitelikli bir arkeolojik yoruma ulaşmanın yolu da, belirli zaman aralıklarında zaman kesitlerinin elde edilmesi ve bu zaman kesitlerinden yararlanarak üç boyutlu radar görüntülerine ulaşılmasıdır. Bu işlemin ilk aşamasını değişik zaman kesitlerinin iki boyutlu olarak çizilmesi ve bunların birbirleri ile karşılaştırılması ve böylece bir anlamda yeraltının zaman dilimlerine ayrılarak bu zaman dilimleri içindeki ortamsal değişimlerin izlenmesini oluşturmaktadır, böylece yüzeyden başlayarak belirli bir zaman penceresi içinde tüm zamanlar istenilen zaman kesitlerinin elde edilmesi yoluyla izlenebilmekte ve aranılan arkeolojik hedeflerin hangi zaman kesitlerinde görüldükleri belirlenebilmektedir. Daha sonra yapılacak hız analizleri ve bunlardan elde edilecek hız değerleri yardımıyla da ortamların derinlik kesitlerini oluşturmak mümkün olacaktır. Burada en önemli olgu doğru hız değerlerine ulaşmadır. Aksi durumlarda aranılan hedefler yanlış derinliklerde tanımlanabilir (Drahor, 2007).

Bu çalışmada yer radarı verilerine Şekil 3.1'de gösterilmiş olan veri-işlem aşamaları belirtilen sırayla uygulanmıştır.



Şekil 3.1: Yer radarı verisine uygulanan veri-işlem akış şeması.

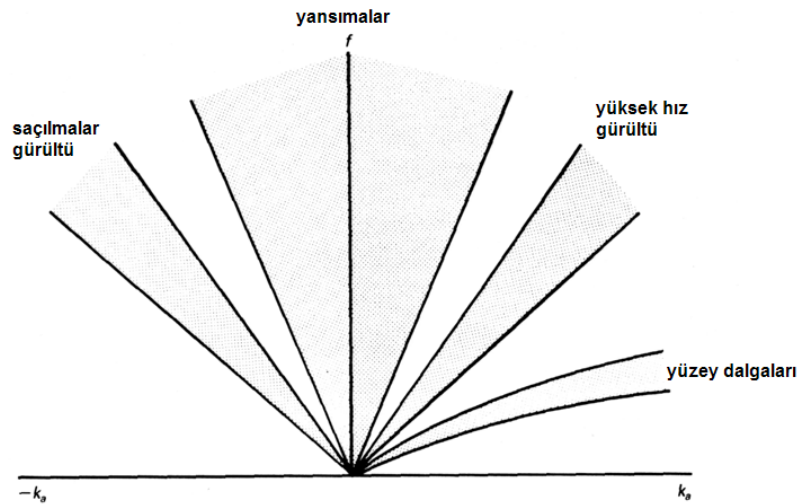
Bu çalışmada verilere öncelikle format dönüşümü yapıldıktan sonra koordinat bilgileri akış şemasında gösterildiği gibi eklenmekte olup, her bir profil için yön

düzeltilmesi yapılmakta ve medyan filtre uygulanmaktadır. Daha sonra sinyal kalitesini artırmak ve yorumu kolaylaştırmak amacıyla F-K filtresi, dekonvolüsyon, migrasyon, band geçişli filtre ve topoğrafya düzeltilmesi yapılmaktadır.

3.1 F-K Filtresi

Çoğu zaman yansıma çalışmalarında kayıtlarından sinyal ve gürültüleri ayırmak karşılaşılan önemli zorluklardan birini oluşturmaktadır. Bu ayırımı zaman-uzay ortamında yapmak çok kolay bir işlem değildir. Bu nedenle bu ayırımı daha kolay yapabilmek için farklı ortamlara dönüştürmeler yapılmaktadır.

F-K dönüşümleri prensip olarak iki boyutlu Fourier dönüşümleridir. F-K dönüşümleri sonrasında zaman eksenini frekans eksenine, uzaklık eksenini ise dalga sayısına dönüştürmektedir. Frekans (f), bir olayın birim zaman içerisinde hangi sıklıkta yani kaç defa tekrarlandığının ölçümüdür. Dalga sayısı (k) ise kısaca, yatay eksen boyunca metre başına karşılık gelen dalga sayısı olarak ifade edilmektedir. Data setinin F-K ortamında çizilmesi sonucunda F-K spektrumunu oluşturulur. Sinyaller frekans ve eğimin fonksiyonu olacak şekilde ayrılır ve çizdirilebilir (Şekil 3.2).



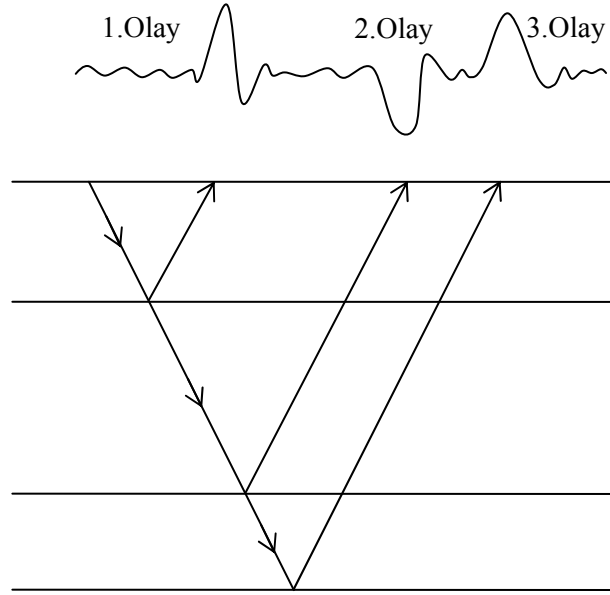
Şekil 3.2: Sinyallerin frekans ve eğimin fonksiyonu şeklinde gösterimi.

F-K dönüşümleri genel itibariyle yüzey dalgalarının kayıtlardan çıkartılması için kullanılır. Bununla birlikte çalışma alanının yakınında bulunan ağaç, duvar, radyo

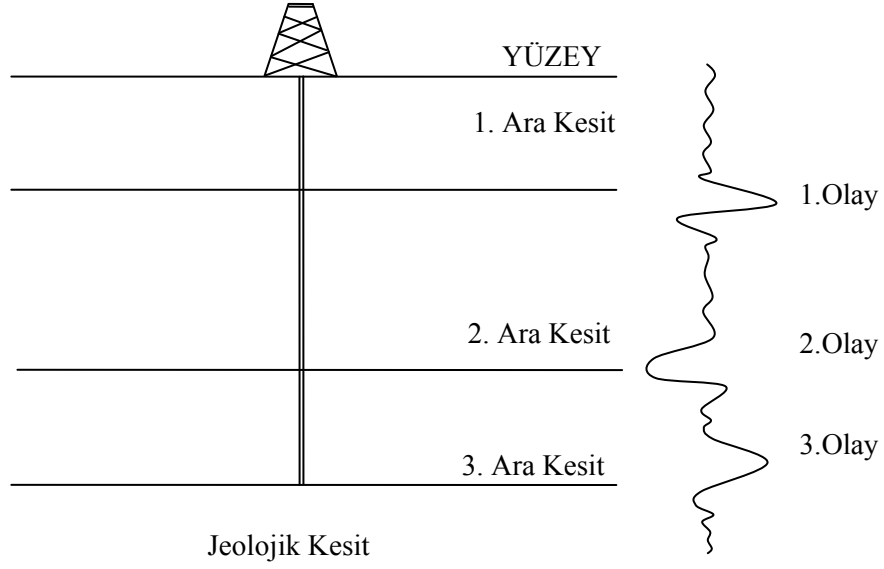
vericisi gibi veriye istenmeyen etkilerde bulunan yapılardan gelen yansımaların veriden elemine edilmesi için tercih edilir. Yapılan uygulamalardan sonra data tekrar zaman-uzay ortamına dönüştürüldüğünde istenmeyen bu etkilerin kayıtlardan atıldığı görülmektedir.

3.2 Ters Evrişim (Dekonvolüsyon)

Yansıma çalışmalarında yeraltına gönderilen bir dalga yeraltında bulunan tabakaların arakesitlerine çarptığı zaman enerjisinin bir kısmı yansır ve geri kalan kısmıysa ikinci ortama geçer. Yansıyan enerjinin büyüklüğü arakesitin yansıma katsayısına bağlıdır. Yansıma katsayıları kesitler hakkında bilgi verir. Yer yüzeyinde ölçülen yansıyan enerji, yansıma kesitlerini oluşturur. Şekil 3.3'de üç arakesitli bir ortam gösterilmektedir. Şekildeki üç arakesit yansıma kesitinde üç olay oluşturur. Bu olaylardan Şekil 3.4'de görüldüğü gibi jeolojik yapı ortaya çıkartılır.

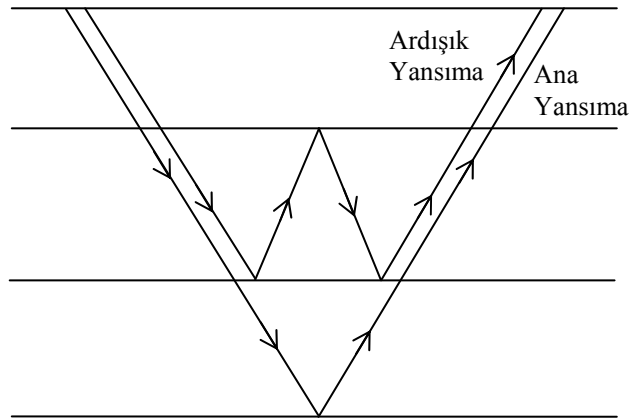


Şekil 3.3: Yeraltı arakesitlerinden yansımaların kesitler üzerinde oluşturduğu olaylar (Kurtuluş, 2002).



Şekil 3.4: İdeal bir kesit ve onun üzerindeki olaylara karşılık gelen arakesitler (Kurtuluş, 2002).

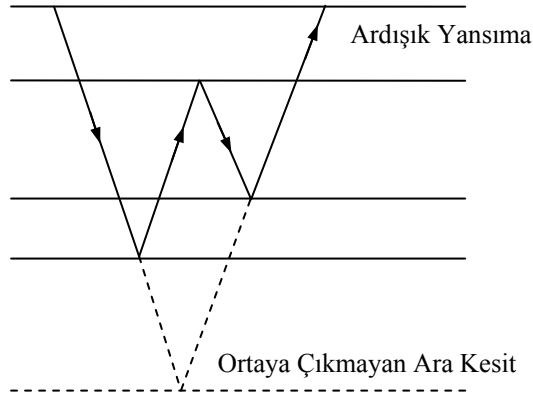
Bu çalışmalarda ana yansıma olaylarının yanında bir çok ardışık yansıma olayları da ortaya çıkar. Şekil 3.5’de bir ana yansımanın yanında bir ardışık yansıma da gösterilmekte ve bu iki yansıma alıcıya aynı zamanda gelmektedir. Bu durumda her iki yansımanın enerjisi birleşerek kesit üzerinde kuvvetli bir yansıma olayının oluşmasına neden olur.



Şekil 3.5: Ardışık yansıma olayının ana yansımayı kuvvetlendirmesi (Kurtuluş, 2002).

Ardışık yansımanın bu olumlu etkisi yanında olumsuz etkisi de vardır. Eğer ardışık yansıma ile ana yansıma aynı anda alıcıya gelmezse veya ana yansımanın olmadığı durumda ardışık yansıma olayı oluşursa bu durumda oluşan kesit yanlış yorumlamalara yol açabilir. Şekil 3.6’da oluşan bir ardışık yansıma gösterilmektedir.

Böyle bir olay görüldüğü zaman yanlışlıkla ana yansıma gibi yorumlanabilir ve büyük hatalara neden olur. Böyle ardışık yansımalara ana yansımalar karışarak onları maskeleyebilir ve onları seçilemez hale koyabilir. Bu nedenle ardışık yansımalar sismik verileri yorumlarken çok çeşitli problemlere neden olur. Bunların varlığı kayıtlarda istenmez.



Şekil 3.6: Düz çizgilerle gösterilen ardışık yansıma yanlışlıkla kesik çizgilerle gösterilen ana yansıma gibi kabul edilebilir (Kurtuluş, 2002).

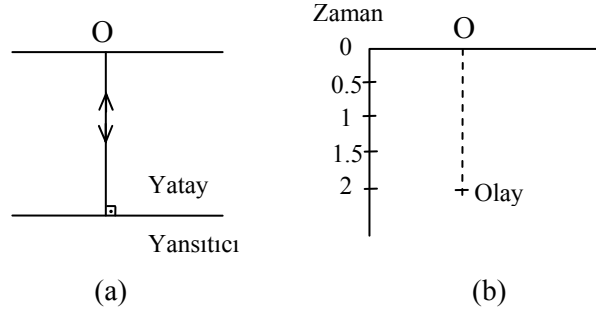
Yansıma işleminde ardışık yansımaların etkileri iki yöntem kullanılarak giderilebilir. Bunlar yığma ve dekonvolüsyon yöntemleridir. Yığma ve dekonvolüsyon işlemlerinde ana yansımalar kuvvetlendirilir ve ardışık yansımalar sönümlenir.

Dekonvolüsyonun amacı, bir sinyal yer içinden geçerken yer ve kaydedici sistem tarafından kendisine uygulanan filtreyi belirlemek ve sonrada uygulanan bu filtrenin etkisini giderecek ters bir filtre elde etmektir. Elde edilen bu filtre fazı geri sıfıra getirecek tesire sahip olmalı ve genlik spektrumunu düz yapmalıdır. Genlik spektrumu tüm genliklerin terslenmiş halleriyle çarpılarak düzleştirilir (Kurtuluş, 2002).

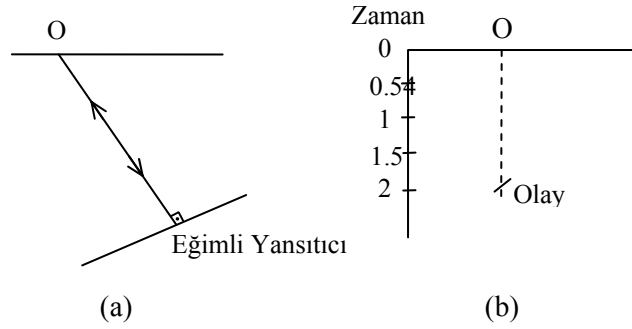
3.3 Göç (Migrasyon)

Gözlem noktalarına göre kaydedilen bir verinin yansıma noktalarına göre yeniden düzenlenmesine göç işlemi denir. Yığma kesitinde görülen yansıma olayları dalga yol alıyormuş gibi çizilir. Bu varsayım ancak yatay yansıtıcı yüzeylerin olması durumunda doğrudur (Şekil 3.7.). Fakat yansıtıcıların eğimli olması durumunda bu varsayım doğru değildir (Şekil 3.8.). Bunun düzeltilmesi için yansıma noktalarının

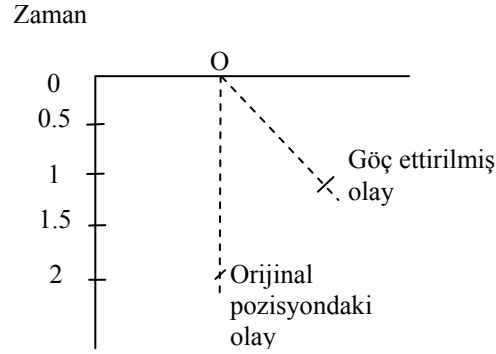
gerçek yerlerine taşınması yani göç ettirilmesi gerekir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.7: (a) Yatay yansıtıcı yüzeyde düşey yansıma. (b) Yansıma kesiti.

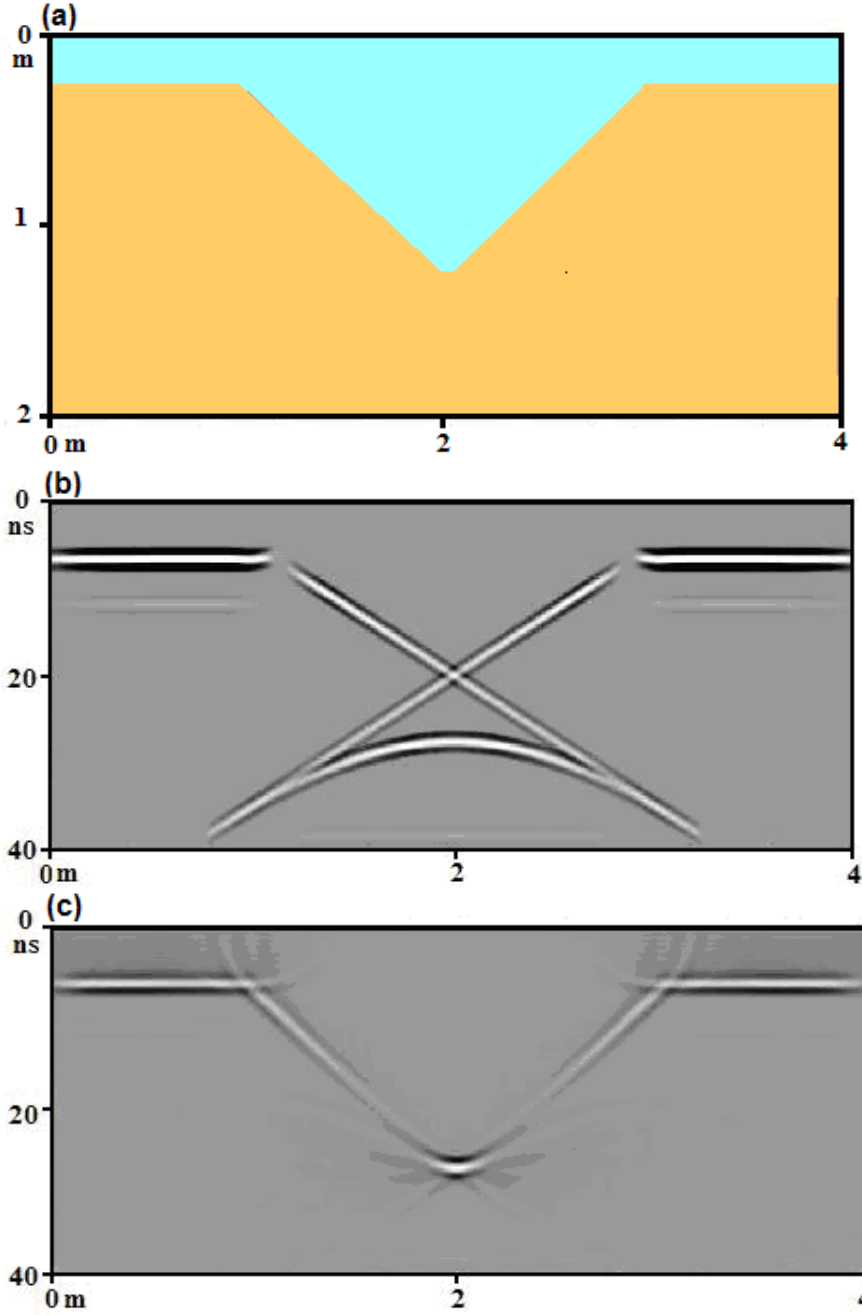


Şekil 3.8: (a) Eğimli yansıtıcı yüzeyde yansıma. (b) Yansıma kesiti.



Şekil 3.9: Orijinal pozisyondaki olayın göç ettirilmiş yeri.

Özellikle tabaka eğimlerinin artmasıyla çeşitli yansıma noktalarından gelen sinyaller olması gerekenden farklı yerlerde görülmektedir. Kısacası kesit bütünüyle jeolojik yapıyı temsil etmez. Bu nedenle kesit yüzeylerini yansıma yüzeyleri koordinatlarına taşıma işlemi migrasyonla yapılır (Kurtuluş, 2002). Şekil 3.10'da sentetik yolla elde edilmiş bir yer radarı verisine migrasyon işleminin uygulanması gösterilmektedir.



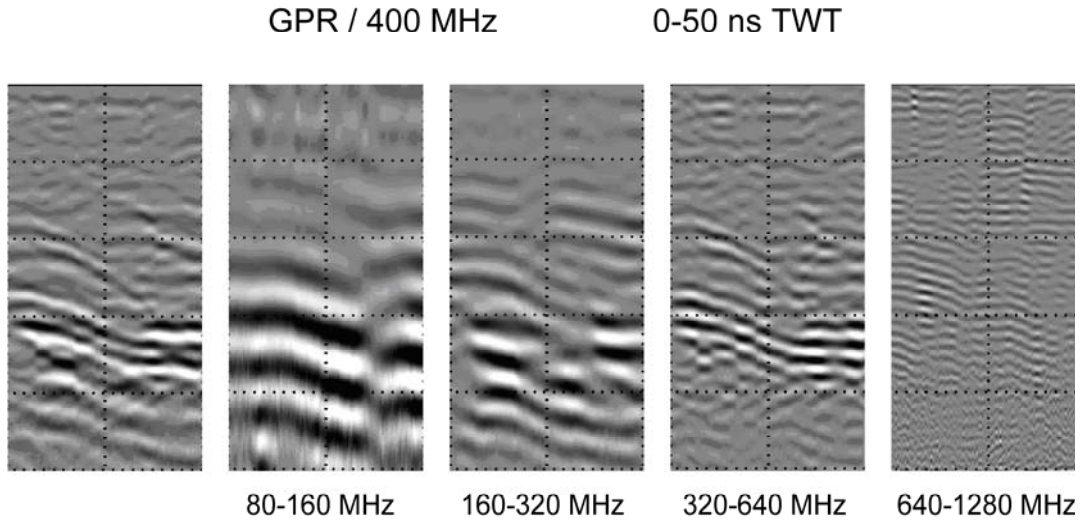
Şekil 3.10: (a) Jeolojik yapı, (b) migrasyon işlemi yapılmamış kesit, (c) migrasyon işlemi yapılmış kesit.

Migrasyon işlemi kesit yüzeylerinin noktalarını, yansıma yüzeyindeki yerlerine taşırken difraksiyon sinyallerini de tek noktada toplar. Migrasyon öncesi ve sonrası kesitler karşılaştırıldığında migrasyonla yükselimlerin daraldığı, alçalımların genişlediği difraksiyonların söndürüldüğü ve sonuçta daha anlamlı geometrik şekillerin ortaya çıktığı görülmektedir.

3.4 Frekans Süzgeçleri

Yer radarı verilerinde araştırma amacına göre en basit olarak alçak geçişli, yüksek geçişli veya band geçişli süzgeçleme yapılabilir.

Alçak geçişli süzgeçleme uzun dalga boylu olayları veride tutmak amacıyla yapılır. Genellikle yatay uzanan olayları baskın hale getirmek amacıyla uygulanırlar. Yüksek geçişli süzgeçleme kısa dalga boylu olayları baskın hale getirmek amacıyla uygulanırlar. Yüksek geçişli süzgeçleme kısa dalga boylu olayları baskın hale getirmek amacıyla yapılır. Genellikle saçılma verilerini düzgün ve yavaşça değişen olaylar üzerinde belirginleştirmek amacıyla uygulanır. Band geçişli süzgeçleme olayda baskın olan belli bir frekans aralığının veride korunması, çok düşük ve çok yüksek frekanslı olayların atılması amacıyla uygulanır. Şekil 3.11’de bir yer radarı verisine farklı band aralıklarında filtre uygulanması sonucu elde edilen kesitler görülmektedir.



Şekil 3.11: Farklı aralıklarda filtre uygulanmış yer radarı kesitli.

Veri içinde havadan gelen EM dalgasını da içinde bulunduran yatay gürültü olarak tanımlanan olayların bazen veri üzerinde yoğun olarak görüldüğü ve veriyi bozduğu görülür. Bu tür gürültüyü kaldırmak için “background removal” adı verilen süzgeçleme yapılması gerekebilir. Ancak bu süzgeçleme işlemini dikkatli uygulamak gerekir. Veri içinde gördüğümüz yatay gerçek olayları korumak istediğinizde bu süzgeçlemenin uygulanmaması daha uygundur (Kadıoğlu, 2006).

BÖLÜM 4. ARAZİ UYGULAMALARI

4.1 Araştırma Alanının Yeri

Araştırma sahası Mısır'ın orta kesimlerinde başkent Kahire'ye yaklaşık 650km uzaklıkta olup El Minya kentinin 65km güneyinde Nil nehri kıyısında bulunmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Araştırma alanı.

4.2. Araştırma Alanının Tarihçesi

Tuna el Gebel antik alanı, tarihi Hermopolis şehrinin nekropolünü oluşturmaktadır. Bu nekropol M.Ö 3. yüzyıl ve geç antik devir arasında aktif olarak kullanılmış, büyük taştan mezar tapınaklar, dışları ve içleri çeşitli motiflerle bezenmiş ve boyanmış tuğladan evler ve dönemin mimarisini yansıtan yapılardan oluşmaktadır.

Tuna el Gebel nekropol alanında yapılmış çalışmaların çok azı kayıtlara geçmiş olup alanda yapılan ilk kazılar 1913 yılında W. Honoroth tarafından on gün boyunca yapılmış olan kazılardır. Tuna el Gebel'de geniş çaplı kazıların başlangıcı Petosiris tapınağının 1920 yılındaki kazı sonucunda bulunmasıdır (Şekil 4.2). Kazılar sonucunda taş yapılar, mezarlar, tapınaklar ve oldukça dallanmış bir sokak sistemi ortaya çıkmıştır. Bu sokakların kenarlarında tuğladan yapılmış yapılar görülmüştür. Bu yapıların birçoğu birden fazla kata sahip olup, özel mimarileriyle ve duvar resimleriyle dikkat çekmektedirler.



Şekil 4.2: Petosiris tapınağı.

1931 ve 1952 yılları arasında yapılan kazılarda, kireçtaşından yapılmış 17 kabir ve 24 tane tuğladan yapılmış mezar ev bulunmuştur. Tuğladan yapılmış olan yapıların şimdiye dek düşünülenin aksine Roma dönemi öncesi zamanda yapıldığı

düşünülmektedir. Bu yapıların çoğunu iki odalı ve birden çok aile ferdinin gömüldüğü mezar evler oluşturmaktadır. Bu evlere zaman zaman katlar eklendiği tahmin edilmekte olup, W.Honoroth tarafından gerçekleştirilen kazılarda 3 katlı 6 metreye varan mezar evlere rastlanmıştır. Bugünkü bilgilere göre ilk yapıların bir ana cadde etrafında bulunduğu ve tanrı Thot için yapılmış olan tapınağa bağlandığı ve bu bağlantı yollarının sonunda yeraltı galerilerinin bulunduğu düşünülmektedir. Sonraki dönemlerde bu mezarlık bir şehre benzer şekilde doğu-batı yönde geniş caddeler ve kuzey-güney yönlü dar sokaklar şeklinde genişlemeye başlamıştır. Yolların kenarları mezar tapınakları, evler ve heykeller ile süslenmiştir. Mezar tapınakların yapımında lokal alanda bulunan kireçtaşı kullanılmıştır. Mezar evlerin yapımında ise hemen hemen tümü pişmemiş Nil nehri çamuru kullanılarak kerpiçten yapılmıştır. Ancak yapıların fazla yük taşıyan kısımlarında ise örneğin; sütunlarda, taşıyıcı duvarlarda ve merdiven altlarında pişmiş tuğlaların kullanılmış olduğu görülmüştür. Bugüne kadar savunulan tez, taş mimarisinin tuğla yapılardan daha eski olduğu düşüncesiydi, fakat bu alanda elde edinilen izlenimler sonucu yapıların aynı zamanda yapılmış olduğunu düşündürmektedir.

Mezarlar ard arda bulunan iki yapıdan ve birkaç kattan oluşmaktadır. Mezarların içerisinde ayrıca ölen kişiye ait eşyaların bulunduğu bir kısım ve bir ocak bulunmaktadır. Bu ocaklar genellikle merdiven altlarına veya avlu duvarlarına yakın yerlere yapılmakta ve mezarların ön odaları ziyaretçiler için dinlenme ya da dua alanı olarak kullanılmakta olduğu düşünülmektedir.

Hermopolis antik şehrinin nekropolü olan Tuna el Gebel'in, yaşanılan dönem ve coğrafya içerisinde her yönüyle bilimsel olarak irdelenmesine çalışılmaktadır. Bunu yaparken benzer dönemde Mısır'da kurulmuş olan diğer antik kentlerde göz önünde tutulmaktadır. Şimdiye kadar bu nekropolde kapsamlı çalışmalar yapılmadığı için araştırmalar interdisipliner bir şekilde sürdürülmektedir. Bu disiplinlerden bir tanesi olan jeofizik araştırmaları ise bu nekropolün tarihi dokusuna zarar vermeden zamandan tasarruf ederek, kentin gün yüzüne çıkarılması yolunda arkeologlara çok büyük kazanımlar getirmektedir.

4.3 Kullanılan Aletler ve Ölçüm Şekli

4.3.1 Araştırma sahasında yapılan yer manyetiği çalışması

Bu yöntem yer manyetik alanının hassas değişimlerinin gözlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu değişimlerin sebeplerinden biride güçlü veya zayıf manyetize olmuş arkeolojik objelerin yeraltında bulunmasından kaynaklanıyor olmasıdır. Bu çalışmada kullanılan yer manyetiği ölçüm aletleri iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi olan kayıt aleti Heslab firması tarafından üretilmiş HESLOG08 model data kayıtcısıdır. İkinci parça ise, Foerster firması tarafında üretilmiş olan 6 adet Fluxgate gradient sondasıdır. Her bir sonda içerisinde iki adet sensör bulunmaktadır ve bu sensörler arası 65cm dir. Bu iki ana parça, çok kanallı yer manyetiği ölçümü yapmak için geliştirilmiş olan bir taşıyıcı araç üzerine oturtulmuştur. Kayıtcı, aracın arka kısmındaki panele yerleştirilirken, sondalar ise aralarında 50cm bulunacak ve yere dik konumda olacak şekilde taşıyıcı araç üzerine yerleştirilmiştir. Bu altı adet sonda sayesinde bir seferde 3m'lik bir hat taranabilmektedir.

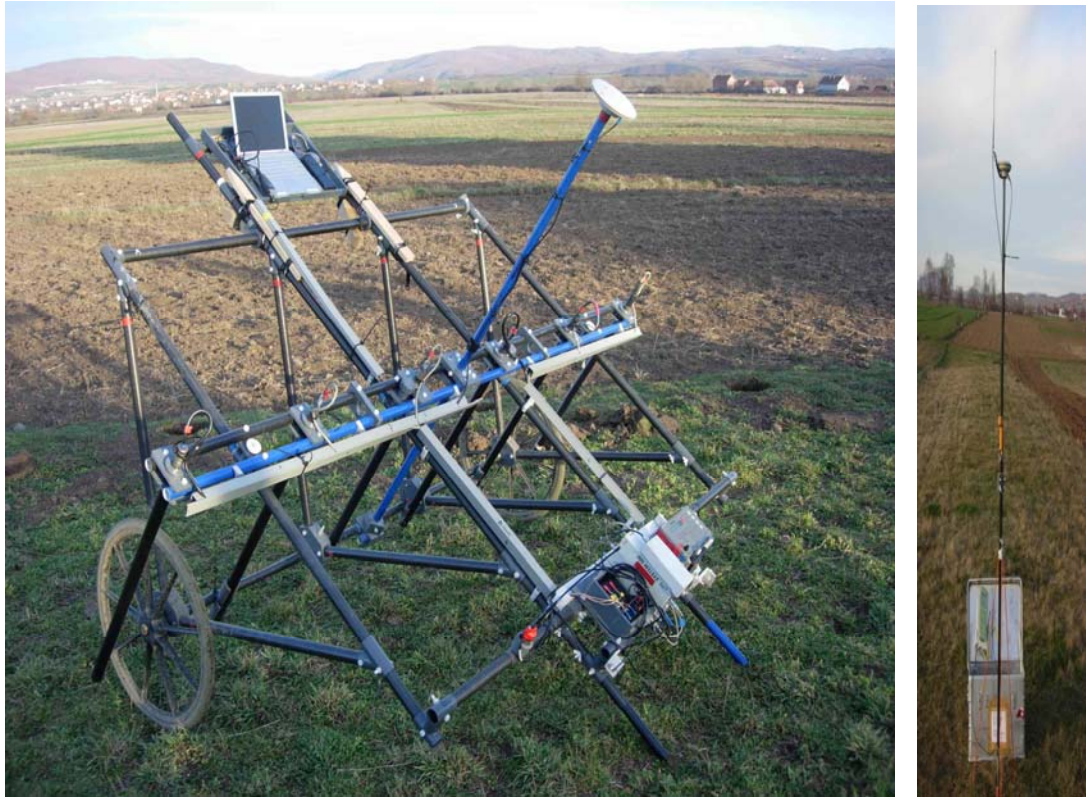
Bu çalışmada 10 gün süren ölçümler boyunca yer manyetiği ölçümleri yapılmıştır. Çalışmalar süresince manyetik ölçümler, DGPS (Digital Global Positioning Systems) sistemi ile ölçümler sırasında pozisyonu belirlemeye yarayan bir navigasyon programı kullanılmıştır. Ölçümlerde DGPS sistemi ile navigasyon programı yardımı ile çalışma alanının karelejlanmasına gereksinim duyulmadan çalışılmıştır.

4.3.1.1 DGPS ile pozisyon belirlenmesi

Ölçümler sırasında pozisyon belirlenmesi için Leica firmasının System 500 ve System 1200 model GPS aletleri kullanılmıştır. Çalışma alanı içerisinde bulunan nirengi noktaları WGS-84 koordinat sisteminde ölçülmekte ve bu nirengi noktalarının lokal koordinat değerleri de bilindiği için ölçülen tüm koordinat değerleri lokal koordinat değerlerine dönüştürülmüştür.. Bu aşamalardan sonra GPS aletleri baz ve hareketli istasyon olarak hazırlanmıştır.

Mobil istasyon olarak kurulan GPS sistemi, ölçüm aracının üzerine yerleştirilmektedir. GPS anteni, baz istasyonu ile sürekli haberleşme halinde olup baz istasyonun gönderdiği düzeltmeleri algılayarak pozisyonunu ona göre belirlemektedir. Bu sistem sayesinde ölçümler ± 2 cm hata payıyla yapılabilmektedir (Şekil 4.3a).

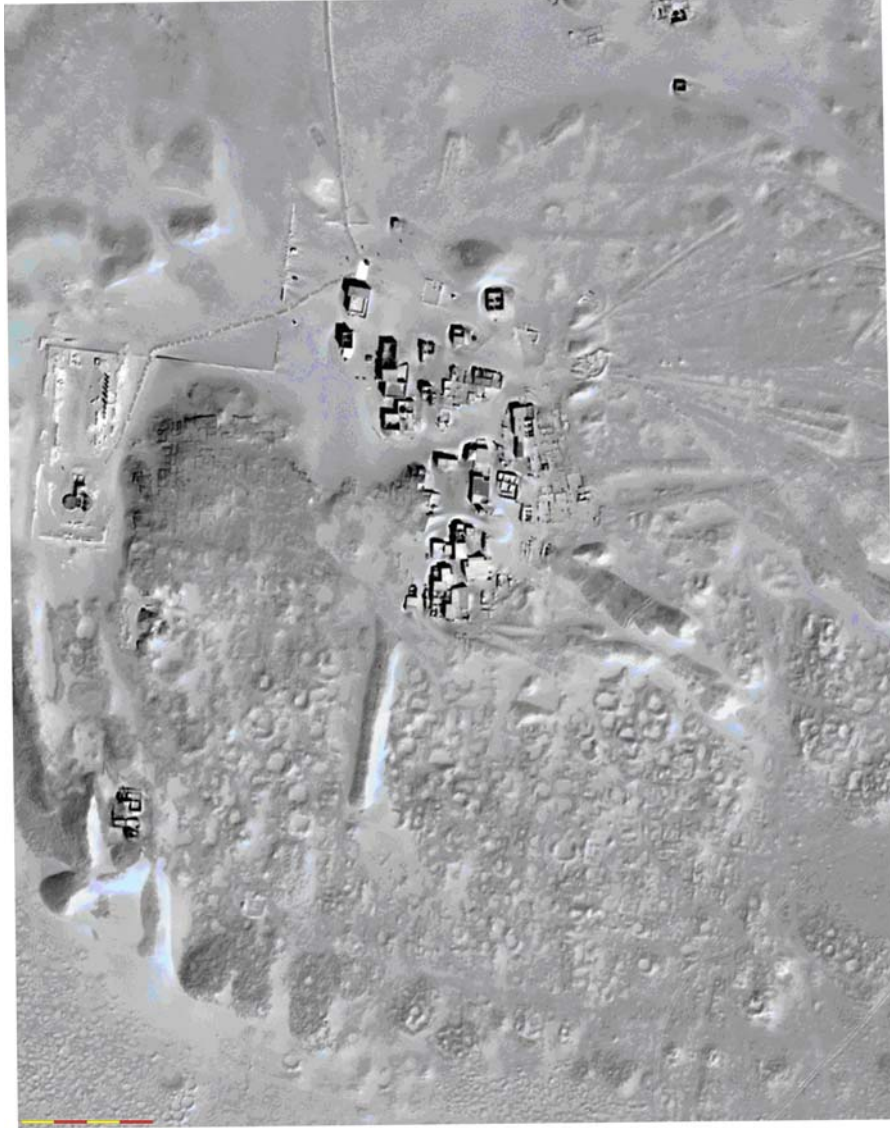
Baz istasyonu olarak kurulan GPS istasyonu ise, ölçüm alanı civarında 4 km² lik bir alana sinyal gönderebilen bir istasyon olarak kurulmaktadır. Bu baz istasyonu, kurulduğu sabit nokta üzerinde pozisyonunu belirlemekte ve daha sonra meydana gelen pozisyon değişimlerini UKW frekansından düzeltme sinyali şeklinde yayınlamaktadır (Şekil4.3b).



Şekil 4.3: (a) Manyetik ölçüm aracı ve mobil GPS istasyonu, (b) baz GPS istasyonu.

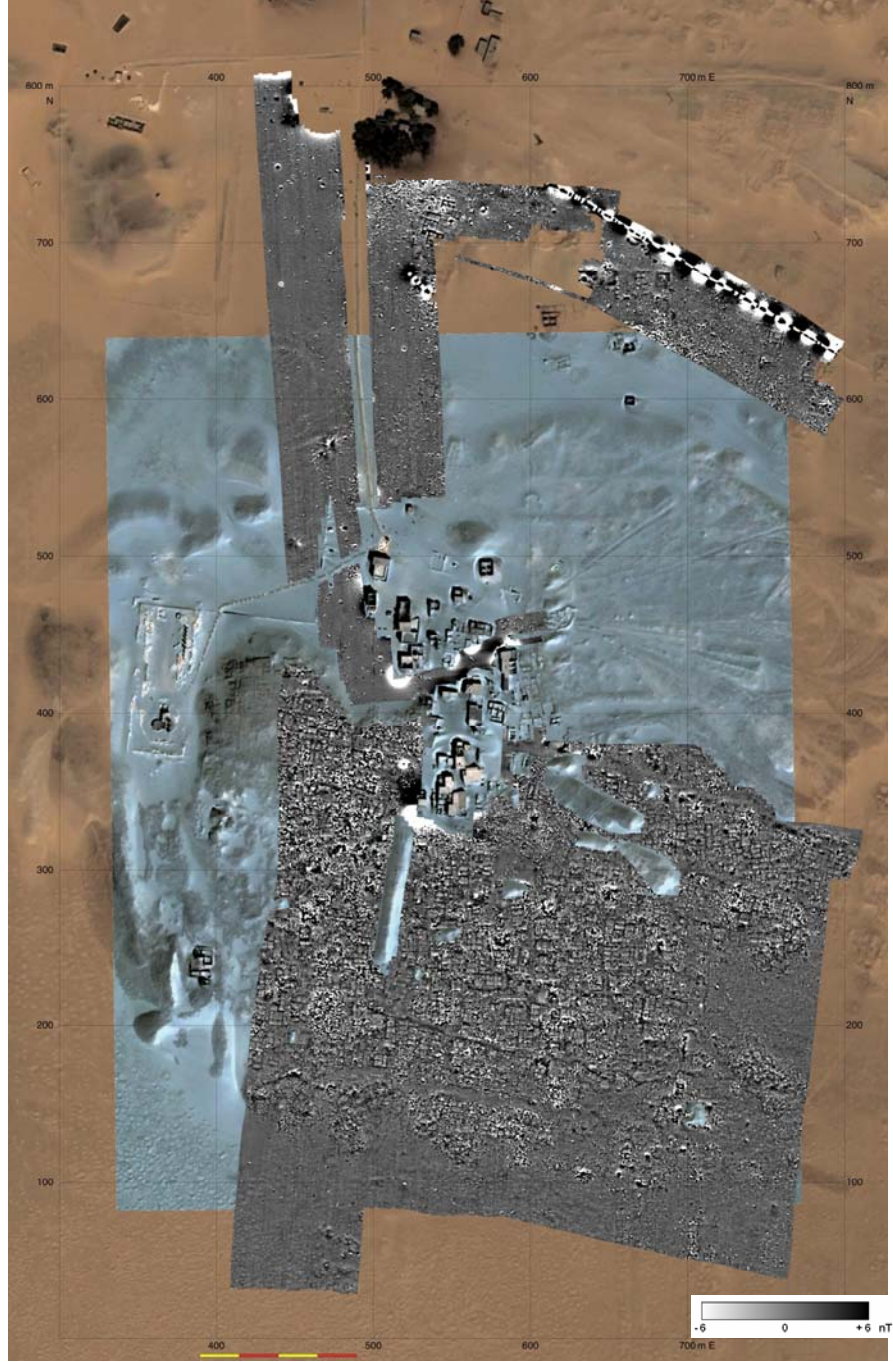
Arkeojeofizik ölçümlerin temelini oluşturan ve en yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntem, yer manyetiği yöntemidir. Yer manyetiği ölçümleri sonucunda araştırma sahasının yeraltı yapısı ortaya konmaktadır. Daha sonra da uygulanacak diğer jeofizik yöntemler bu sonuçlar ışığında belirlenen noktalarda yapılmaktadır.

On gün boyunca yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen manyetik sonuçları Şekil 4.4'de gösterilen araştırma sahasına ait hava fotoğrafı üzerine yerleştirilmiştir. Bölgede uygulanacak olan yer radarı yöntemi için ölçüm noktaları manyetik sonuçlar doğrultusunda belirlenmiştir.



Şekil 4.4: Araştırma sahasına ait hava fotoğrafı

Manyetik sonuçlar incelendiğinde yeraltında bulunan yapıların pozisyonlarına ait önemli yorumlar yapılabilir. Şekil 4.5'de çalışma sahasına ait manyetik sonuçlar verilmektedir.



Şekil 4.5: Çalışma sahasına ait yer manyetiği sonuçları.

Manyetik sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda arazi üzerinde yüzeyde bulunan yapıların güney kesiminde yeraltında yoğun bir yapılaşmanın bulunduğu, kuzey kesimde ise güney kesime nazaran çok daha az yapılaşma olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte sonuç haritasının kuzeybatı kesiminde, güneydoğu-

kuzeybatı yönünde uzanan su borularının oluşturduğu manyetik anomali görülmektedir.

4.3.2 Araştırma sahasında yapılan yer radarı çalışması

Basit olarak GPR dizgesi; bilgisayar, kontrol ünitesi, antenler (verici-alıcı) ve güç kaynağı olmak üzere başlıca bu kısımlardan oluşmaktadır. Araştırmanın özelliklerine göre farklı frekansta antenler kullanılmaktadır. Bu çalışmada GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) firmasının ürettiği SIRveyor20 model kayıt aleti ve aynı firmaya ait 400MHz'lik GPR anteni kullanılmıştır (Şekil 4.6). Antenler ayrı ayrı olabildiği gibi tek bir parça içinde de yer alabilirler. İki anten paralel olarak kullanılabilir gibi, iki antenle dört kanalda da ölçü alınabilmektedir. Yani iki direk kanal ve alıcı, verici anten çalıştırmak suretiyle dört kanal üzerinden kayıt alınabilmektedir. Bu çalışmada verici ile alıcı olarak bir anten kullanılmaktadır.



Şekil 4.6: (a) SIRveyor 20 model data kayıtçısı, (b) 400 MHz'lik GPR anteni.

Ölçümlere başlamadan önce yeni bir proje dosyası oluşturulmaktadır. Proje dosyası hazırlanırken, anten cinsleri ve kombinasyonları, kanal seçenekleri, örnekleme aralıkları gibi seçenekler belirlenmektedir. Ölçüme ilişkin parametreler daha sonra proje dosyası altına kayıt edilmektedir. Proje dosyası altına kayıt edilen parametreleri şöyle sıralanabilir;

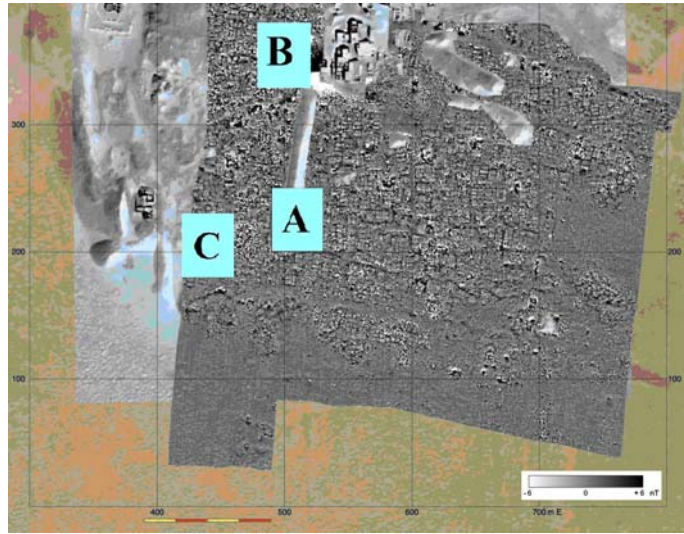
- Sinyalin t_0 noktası
- Kazanç eğrisi

- Yığma
- Yatay ve düşey filtreler

Bu ayarların ölçüme başlamadan önce mutlaka yapılması ve kayıt edilmesi gerekmektedir. Hazırlanan projenin kayıt edilmemesi durumunda, örneğin aynı alanda ölçüme başlarken ayarlar başa döner ve aynı alandan alınmış ölçüler özellik ve kalite bakımından farklılık gösterirler.

Tüm hazırlıkların sonunda ölçüme başlamadan önce bir deneme ölçümü yapılmakta ve böylece gönderilen sinyallerin davranışları gözlenmektedir. Bu ölçümler sonucunda sinyal kalitesi yeterli bulunmaz ise sinyale uygulanan güçlendirme değerleri tekrar gözden geçirilmektedir. Deneme ölçümü, çalışma alanını ortalama dolaşacak şekilde alınmaktadır. Yer radarı ölçümleri, ölçüm doğrultusu boyunca serilmiş olan metrenin üzerinden radar anteninin aşağı yukarı sabit bir hızla çekilmesi suretiyle alınır. Alınan verinin ölçüm alanındaki pozisyonu ise, profiller boyunca çekilmiş metre üzerindeki ölçüm noktalarının bir buton ile veri üzerine işaretlenmesiyle olmaktadır.

Yer manyetiği ölçümleri ışığında arkeologlar ile yapılan tartışmalar sonucunda yer radarı çalışması yapılmak üzere üç ana bölge seçilmiştir. Bu bölgeler; A, B ve C bölgeleri olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Yer radarı uygulaması için belirlenmiş üç alan. Birinci alan A, ikinci alan B ve üçüncü alan C.

Yer radarı yönteminin uygulanması için seçilen ilk saha olan A bölgesi, arkeologlar tarafından diğer mezarlardan farklı olabileceği düşüncesiyle seçilmiştir. Bu düşünce burada mezarın birkaç defa üst üste inşa edilebilmiş olacağı düşüncesidir. Nekropole ait tüm arkeolojik veriler ışığında manyetik sonuçları da göz önünde bulundurularak bu alan inceleme alanı olarak belirlenmiştir. Profiller ortalama 28m uzunluğunda olup, yüksek çözünürlük elde edebilmek amacıyla profiller arası 30cm alınmıştır. Her bir hat üzerinde bir gidiş bir dönüş olacak şekilde iki ölçü alınmıştır.

İkinci çalışma sahası olan B sahasında ise, yüzeyde birçok pişmiş seramik ve çanak, çömlek parçalarına rastlanmıştır (Şekil 4.8). Yüzeyde bulunan bu kalıntılar bu bölgeye araştırma açısından ağırlık kazandırmıştır. Ayrıca yüzeyde bulunan bu pişmiş malzemelerin etkisiyle manyetik anomali haritasında bu bölgeye ait sonuçlar çok net bir şekilde elde edilememiştir. B sahasında profiller 25m ile 29m arasında değişmektedir. Profiller arası 30cm alınmıştır.



Şekil 4.8: Yer manyetiği ölçümleri sırasında yüzeyde görülen seramik parçaları.

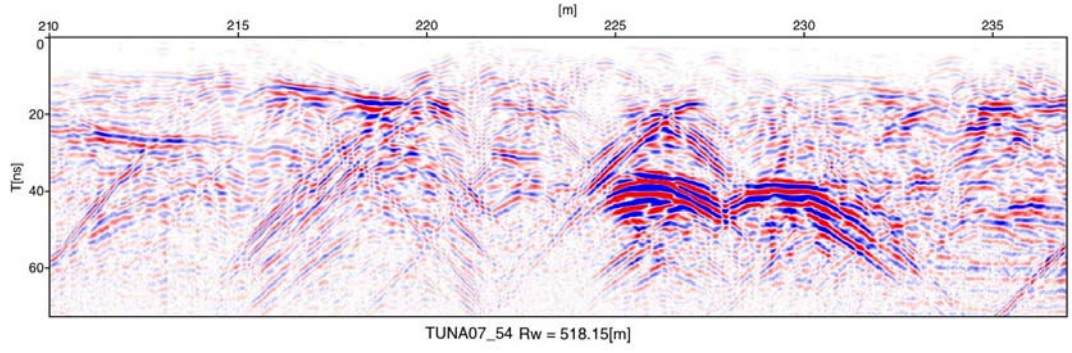
Son olarak seçilmiş olan C sahası ise, manyetik anomali haritasında en net sonuç veren bölgelerden birini oluşturduğu için dikkat çekmiştir. Yer radarı sonuçlarının da uygun olması durumunda test kazılarının yapılabileceği bir alan olarak

düşünülmektedir. C bölgesinde ölçümler 29m boyunda, 30cm aralıklı profiller şeklinde alınmıştır.

Üçüncü bölümde anlatılan veri-işlem aşamaları sırasıyla veriye uygulanmıştır (Şekil 3.1). Şemada gösterilen ilk altı işlem rutin olarak her yer radarı çalışmasında uygulanmaktadır ve zaman kesitleri bu aşamalardan hemen sonra da oluşturulabilmektedir. Ancak dikdörtgen kutular içerisinde belirtilen veri işlem aşamaları yeraltındaki yapıyı daha net ortaya koymak amacıyla yapılmış olan ve her yer radarı çalışmasında uygulanmayan aşamalardır. Bazı çalışmalarda bu veri-işlem aşamalarının değişik sıralarda uygulandığı görülmüştür. A çalışma sahası üzerinden örnek olarak seçilmiş olan 54 numaralı profil üzerinde dikdörtgen kutular içerisinde yer alan veri-işlem aşamalarının etkisi sırasıyla gösterilecektir.

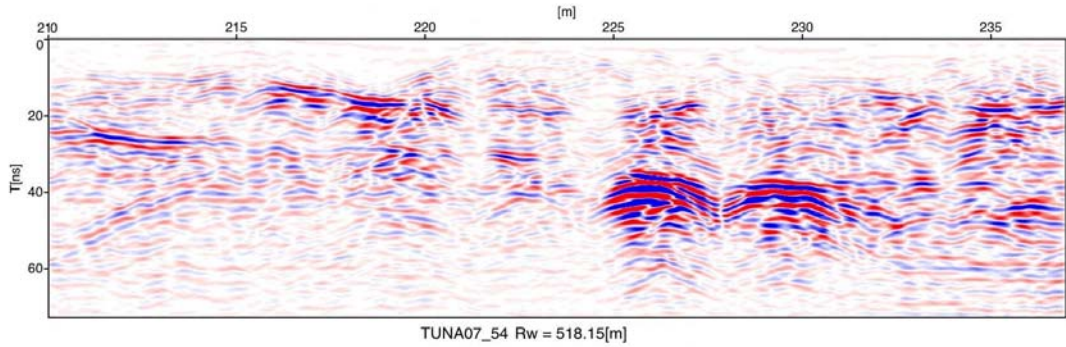
Veri-işlem sırasında DT (DT_BaP, DT_Log ve DT_Plot) programları ile Seismic Unix programı kullanılmıştır. DT programları ile genel rutin veri-işlem aşamaları olan, format dönüşümleri, koordinat kombinasyonları, yön düzeltmeleri, çeşitli filtreler ve zaman kesitleri elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Seismic Unix programı ile ise FK filtresi, dekonvolüsyon, migrasyon, band geçişli filtre ve topoğrafya düzeltmelerinden oluşan veri-işlem aşamaları yapılmıştır.

Öncelikli olarak araziden DZT formatında toplanan veriler DT programlarında değerlendirilebilmek için DT_BaP programı ile .RDT formata dönüştürülmüştür. Sonrasında koordinat değerlerini derleyen ve düzenleyen DT_Log programı ile yer radarı verilerine koordinat bilgileri eklenmiştir. Ölçümler bir hat boyunca gidiş ve dönüş şeklinde yapıldığı için aynı hat üzerinden elde edilen profillerin yönleri ters durumdadır ve bu durumun giderilmesi için verilere yön düzeltilmesi yapılmış ve profil yönleri eşleştirilmiştir. Daha sonra da verilere medyan filtresi uygulanarak, profile bitişik olan noktanın ortalama değerini kullanmak yerine, o alanın ortalaması kullanılmıştır. Bu aşamalardan sonra elde edilen örnek profil Şekil 4.9'da verilmektedir.

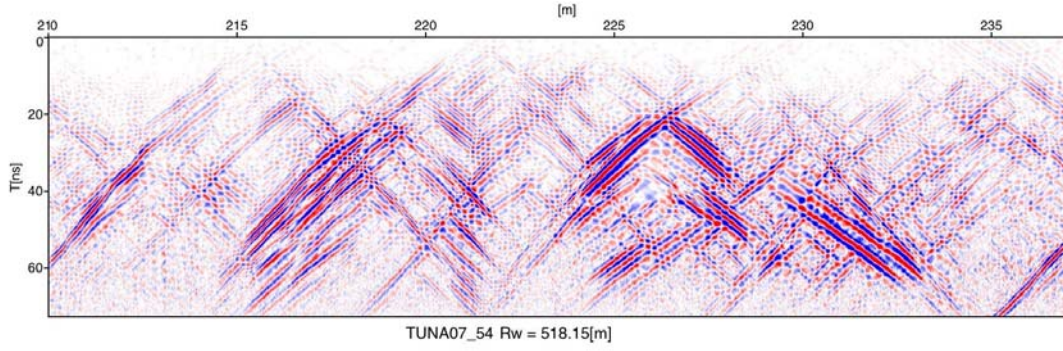


Şekil 4.9: Rutin veri-işlem aşamalarından sonra elde edilen örnek radargram

Elde edilen bu kesit üzerinde yansıtıcı yüzeyler, hiperboller ve çeşitli eğimlere sahip yansımalar görülmektedir. Çalışma alanı üzerinde ölçümler öncesinde yapılan gözlemlerde, çalışma sahası civarında birçok duvar ve antik yapı kalıntısının bulunduğu görülmüştür. Elde edilen profiller üzerinde bu yapılardan gelen yansımalar eğimli yansımalar olarak görülmektedir. Yatay doğrultudaki yansıtıcı yüzeylerle ilgilendiğimiz için bu yapılardan gelen yansımalar FK filtresi uygulanarak atılmıştır. FK filtresi için kullanılan eğim değerleri ise $slp1$: 0.80, 0.85, 1.60, 1.65, $slp1'$: -0.80, -0.85, -1.60, -1.65 ve $slp2$: 2.25, 2.30, 16.50, 16.55, $slp2'$: -2.25, -2.30, -16.50, -16.55' dir. Bu işlem ile kesit üzerinde yatay yansıtıcılar baskın hale getirilmiştir (Şekil 4.10). FK filtresi ile veriden ayıklanan eğimli yansımalar Şekil 4.11'de verilmektedir.

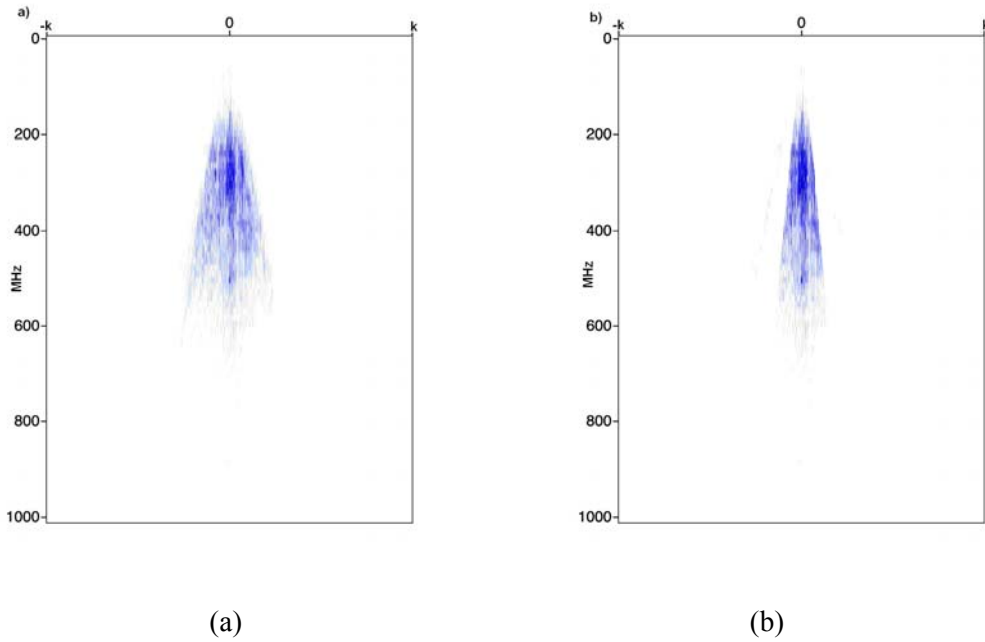


Şekil 4.10: FK filtresi uygulanmış kesit.



Şekil 4.11: FK filtresi ile veriden atılmış olan yansımalar.

FK filtresi uygulanmadan önce ve FK filtresi uygulandıktan sonra elde edilmiş olan FK spektrumları Şekil 4.12’de verilmektedir.

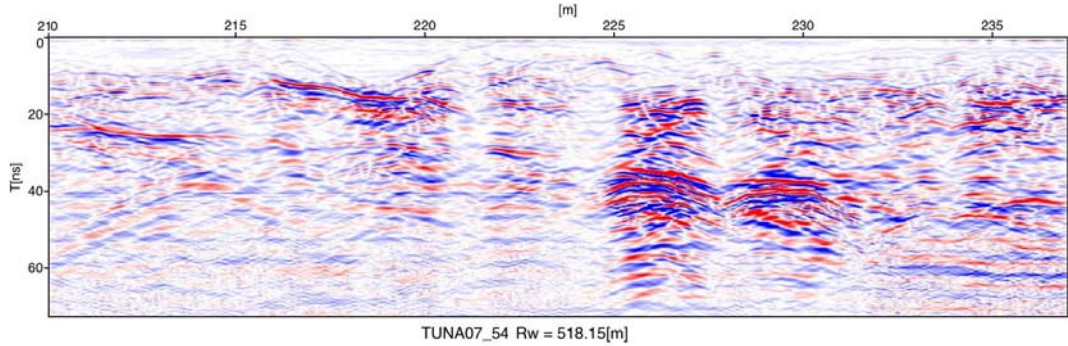


Şekil 4.12: (a) Filtrelemeden önce FK spektrumu, (b) filtrelemeden sonra FK spektrumu

Veriden ardışık yansımaları elemine etmek ve ana yansımaları güçlendirmek amacıyla dekonvolüsyon işlemi uygulanmıştır. Dekonvolüsyon operatör uzunluğu 20 (sample), tahmin operatör değeri 5 (sample) olarak kullanılmıştır. Örnek profilin dekonvolüsyon işleminden sonraki görünümü Şekil 4.13’de verilmektedir.

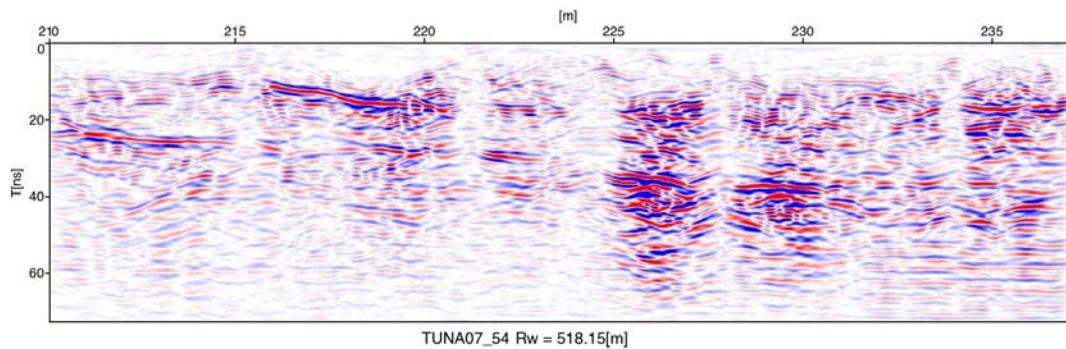
Dekonvolüsyon işleminden sonra yansıma hiperbollerini ve yansıtıcı yüzeyleri gerçek yerlerine taşımak amacıyla migrasyon işlemi yapılmıştır. Bu işlemde

kullanılacak olan hız değerleri hiperboller üzerinden 0.138 m/ns olarak belirlenmiş olup migrasyon için belirlenen bu sabit hız değeri kullanılmıştır. Şekil 4.14’de örnek profilin migrasyon işleminden sonraki görünümü verilmektedir.

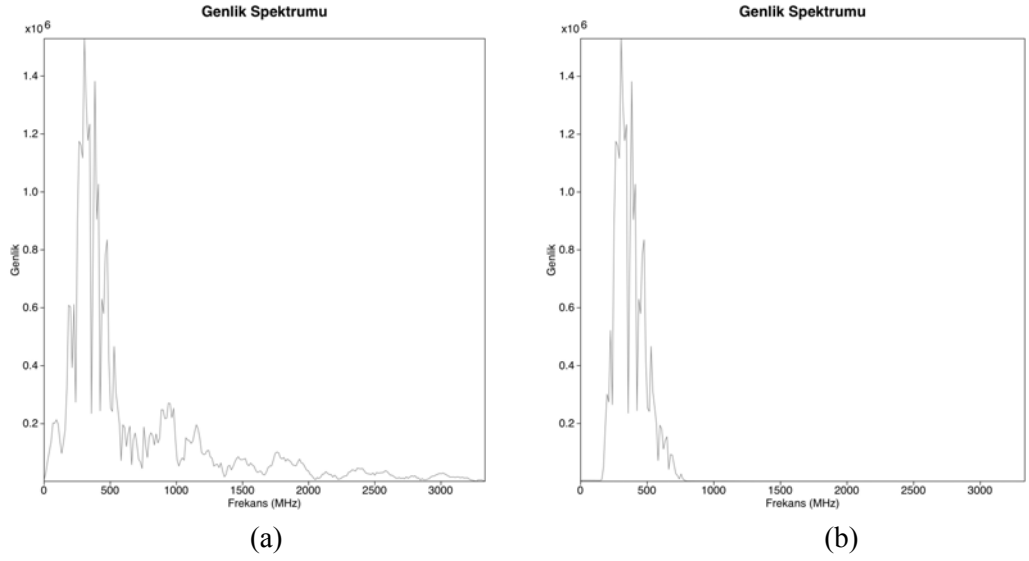


Şekil 4.13: Dekonvolüsyon uygulanmış kesit.

Migrasyon işleminde sonra, migrasyondan kaynaklanan saçılmaları gidermek ve istenmeyen frekansları veriden ayırmak için band geçişli filtre uygulanmıştır. Bu işlem yapılmadan önce genlik spektrumu çizdirilmiş ve sinyalin özellikleri incelenmiştir (Şekil 4.15a). Yapılan denemelerden sonra uygun filtreleme 160, 240, 600, 800MHz frekans aralığında seçilmiştir. Filtreleme işleminden sonra elde edilen genlik spektrumu Şekil 4.15b’de verilmektedir. Filtreleme aralığının daha düşük alınması (80MHz-190MHz) durumda yansıtıcı yüzeylerin olduklarından daha geniş bir hal aldıkları gözlenmiştir. Filtreleme aralığının daha yüksek (700MHz-1200MHz) frekans bandında seçildiği zaman yansıtıcı yüzeylerin kayıtlardan silindiği görülmüştür. Kesit için en uygun frekans aralığı olarak belirlenen, 240MHz-600MHz frekans aralığında uygulanan band geçişli filtreleme sonucu elde edilen kesit Şekil 4.16’ da verilmiştir.

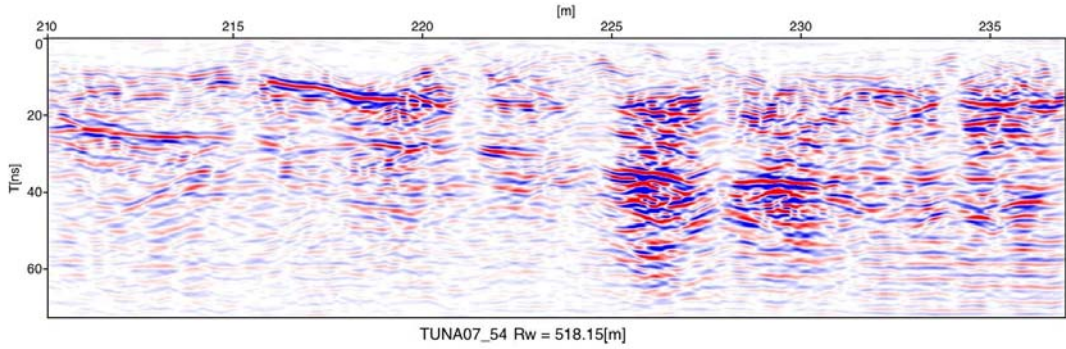


Şekil 4.14: Migrasyon uygulanmış kesit.



Şekil 4.15: Genlik spektrumu. (a) Filtrelemeden önce, (b) filtrelemeden sonra.

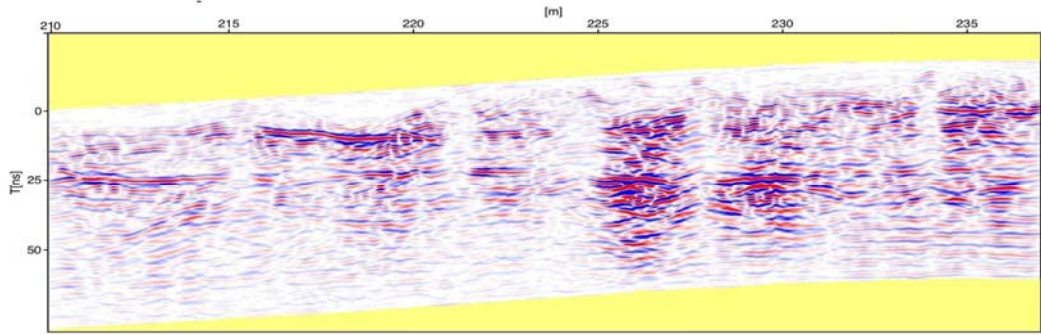
Sonuç olarak veriye uygulanan topoğrafya düzeltmesi ile profiller, zaman kesitleri haline getirilmek üzere hazırlanmıştır. (Şekil 4.17)



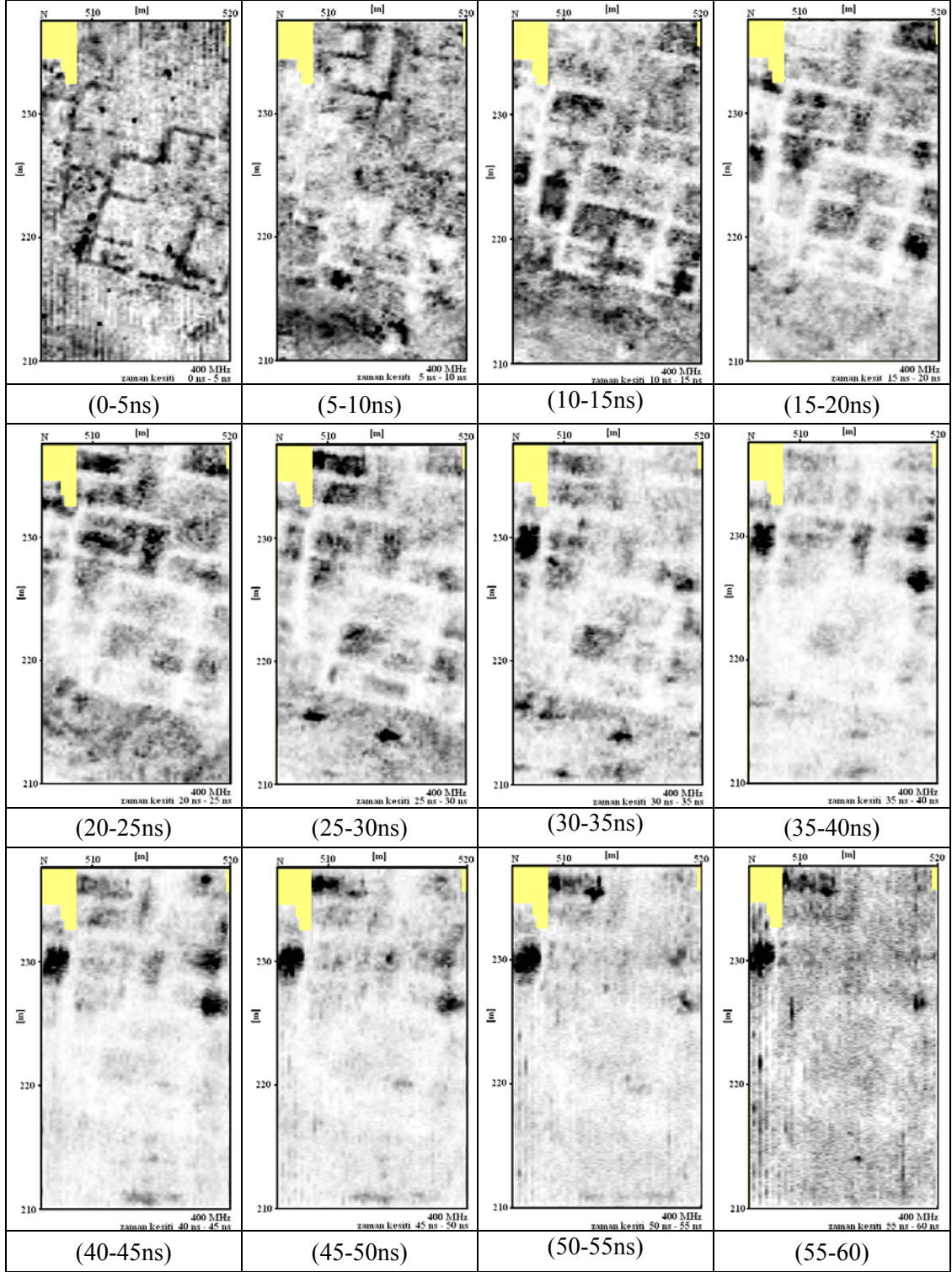
Şekil 4.16: Band geçişli filtre uygulanmış kesit.

Veri-işlem aşamaları sonucunda elde edilen kesitler bir araya getirilerek zaman kesitleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu zaman kesitleri sayesinde yeraltındaki yapının farklı zaman aralıklarında göstereceği değişimleri izlemek mümkün olacaktır. Şekil 4.18’de A araştırma sahası için oluşturulmuş zaman kesitleri gösterilmektedir. Bu kesitler incelendiğinde ilk kesitten başlayarak yapının oda ve duvar sistemi açıkça görülmektedir. Son dört kesite gelindiğinde enerjinin azaldığı ve yapının da sonlanmaya başladığı görülmektedir. B sahasına ait zaman kesitleri Şekil 4.19’de verilmektedir. Bu zaman kesitleri üzerinde yapı hakkında sağlıklı yorumu

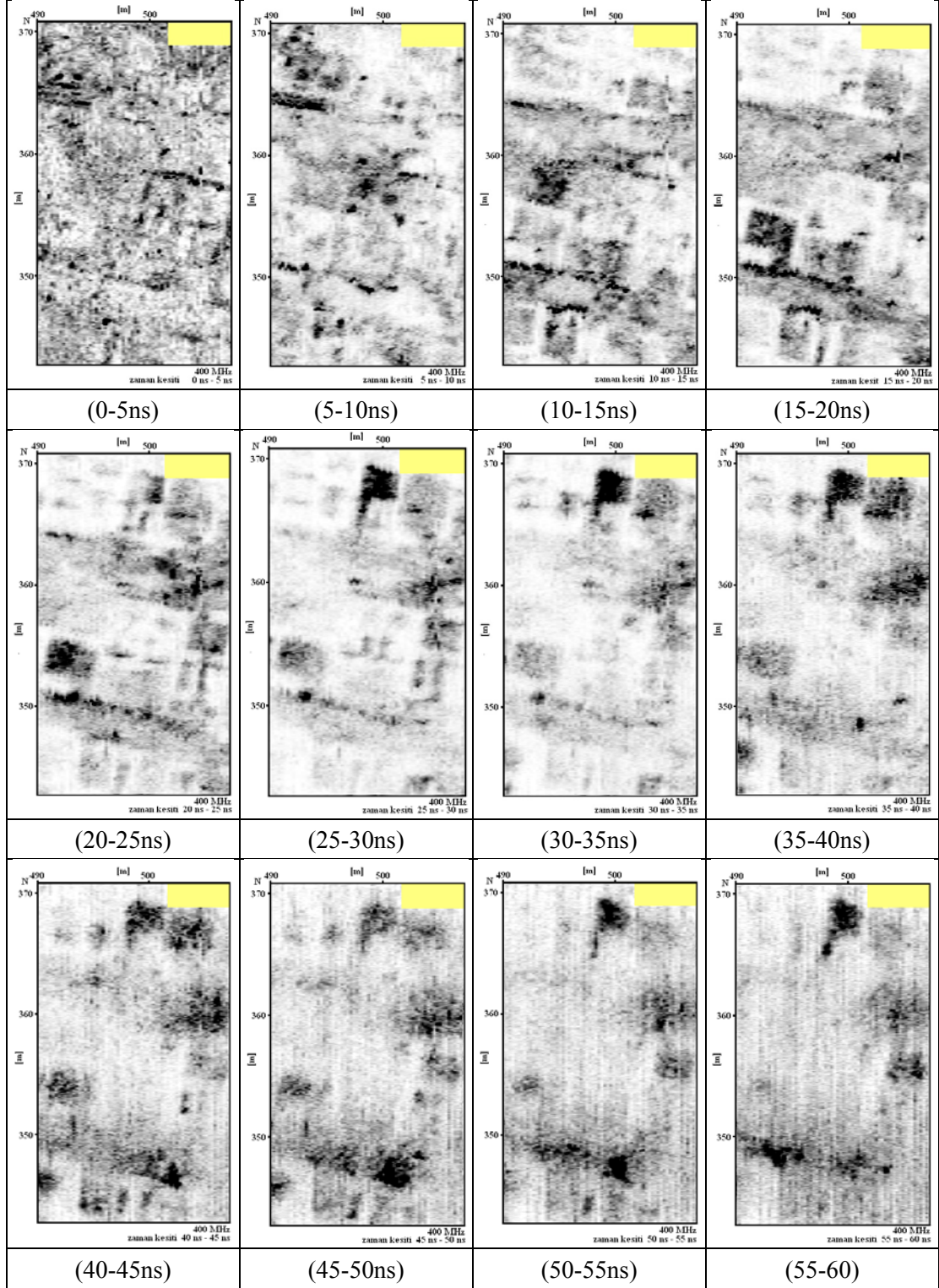
üçüncü ve dördüncü zaman kesitinde sonra daha net yapabilmektedir. Son araştırma sahası olan C alanı için hazırlanmış olan kesitler Şekil 4.20' de gösterilmektedir. C alanına ait zaman kesitleri yeraltındaki yapıyı açıkça ortaya koymaktadır. Bu kesitler üzerinde yapının sahip olduğu, odalar, geçiş kısımları, kapı boşlukları gibi ayrıntılar açık bir şekilde görülmektedir. Diğer alanlara ait zaman kesitlerinde olduğu gibi son kesitlere doğru yapılar sonlanmakta ve bu durum da kesitlere yansımaktadır.



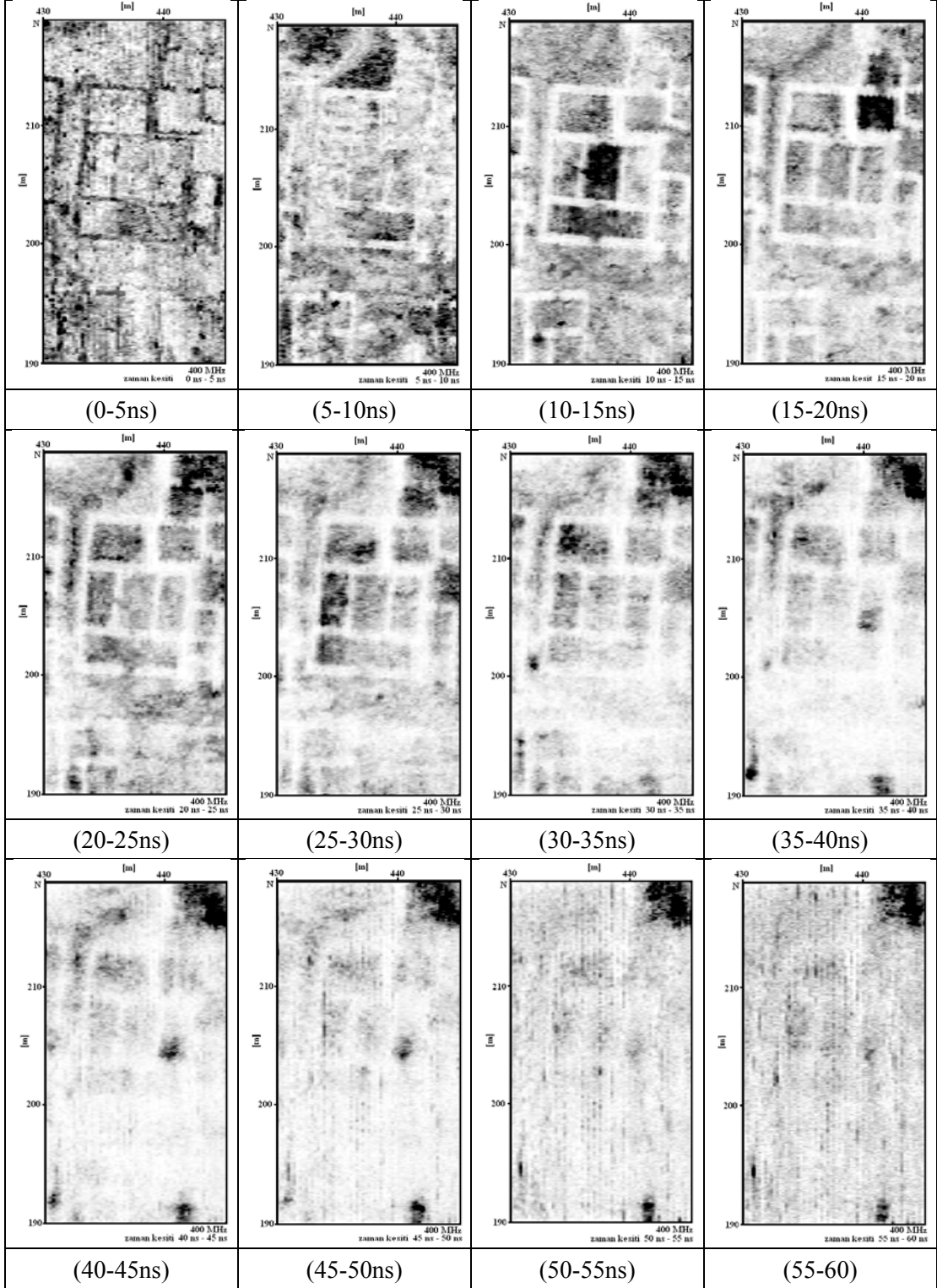
Şekil 4.17: Topoğrafya düzeltmesi yapılmış kesit



Şekil 4.18: A sahasına ait zaman kesitleri (Koyu gri: yüksek refleksiyon)



Şekil 4.19: B sahasına ait zaman kesitleri (Koyu gri: yüksek refleksiyon)



Şekil 4.20: C sahasına ait zaman kesitleri (Koyu gri: yüksek refleksiyon)

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

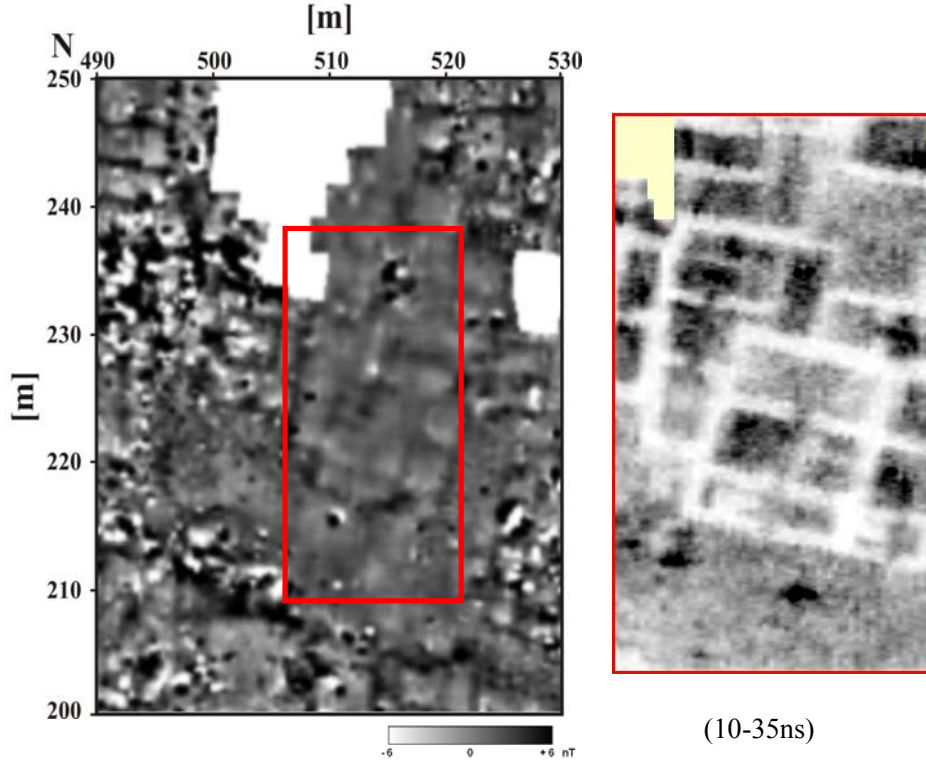
Tuna el-Gebel (Mısır) nekropol alanında 10 gün boyunca yer manyetiği ve yer radarı ölçümleri yapılmıştır.

Yer manyetiği yöntemi ile yaklaşık olarak 0.2 km² lik alan ölçülmüştür. Oluşturulan yer manyetiği haritası ile yeraltındaki yapılaşma büyük ölçüde ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, bölgeye ait hava fotoğrafı üzerine koordinat eksenleri çizilerek yerleştirilmiştir.

Yer radarı yöntemi toplam üç bölge üzerinde uygulanmış olup 188 adet profil elde edilmiştir. Ölçümlerde, 0.130m/ns ile 0.148m/ns aralığında hız değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen hızların yüksek çıkmasında çalışma alanını oluşturan kuru kum en önemli faktör olmuştur.

Elde edilen yer radarı verilerine, veri kalitesini arttırmak amacıyla uygulanan rutin veri-işlem aşamalarında sonra FK filtresi, dekonvolüsyon, migrasyon, band geçişli filtre ve topoğrafya düzeltmeleri yapılarak tatmin edici netlikte sonuçlara ulaşılmıştır.

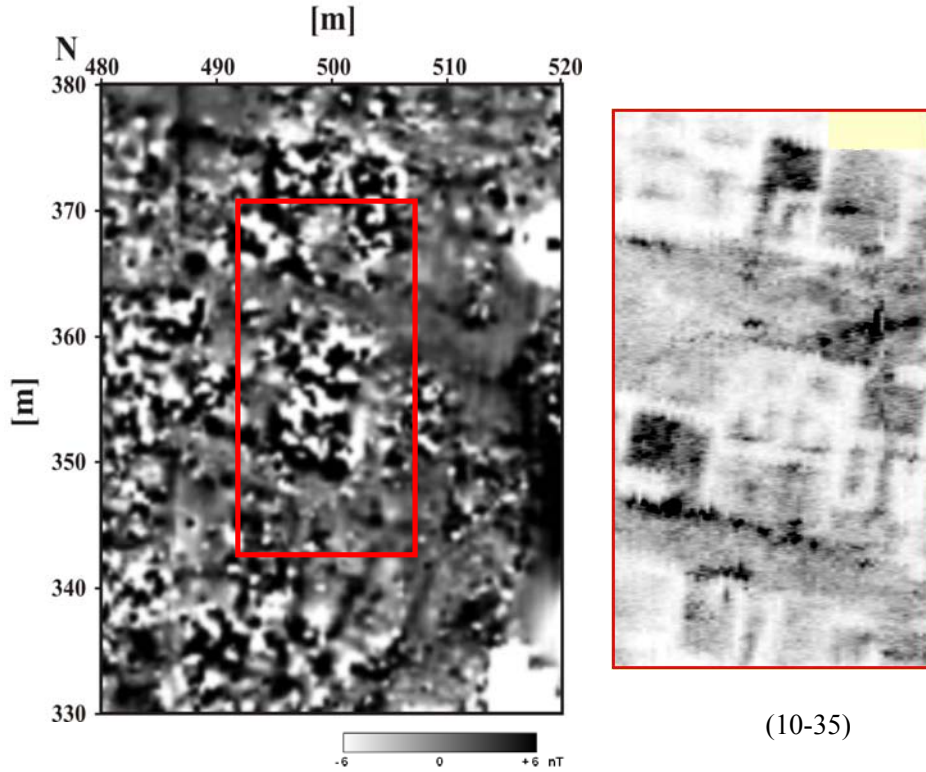
Yer radarı ile araştırılan üç alana ait zaman kesitleri, aynı alanlara ait yer manyetiği sonuçları ile karşılaştırılarak yeraltında bulunan yapılar daha sağlıklı yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu üç alandan ilki olan A araştırma sahasına ait yer manyetiği ve yer radarı sonuçları Şekil 5.1'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1: A bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)

Sonuçlar dikkatli incelendiğinde her iki yönteme ait sonuçların birbirlerini destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Yer radarı ölçümleri ile oluşturulan zaman kesiti, yeraltındaki yapının en iyi görüldüğü aralık olan 10-35ns aralığında hazırlanmıştır. Kesitin orta kısmında 11m uzunluğunda ve 9m genişliğinde üç geniş odaya sahip ana bir yapı bulunmaktadır. Bu ana yapıya bitişik benzer yapıda eklentiler bulunduğu görülmektedir. Bu eklentilerin mezar evlerde yer kalmadığı durumlarda ölen diğer aile fertlerini gömmek amacıyla inşa edilmiş ek yapılar olduğu düşünülmektedir. Yapılar arasında bağlantı ve geçiş noktaları bulunmaktadır

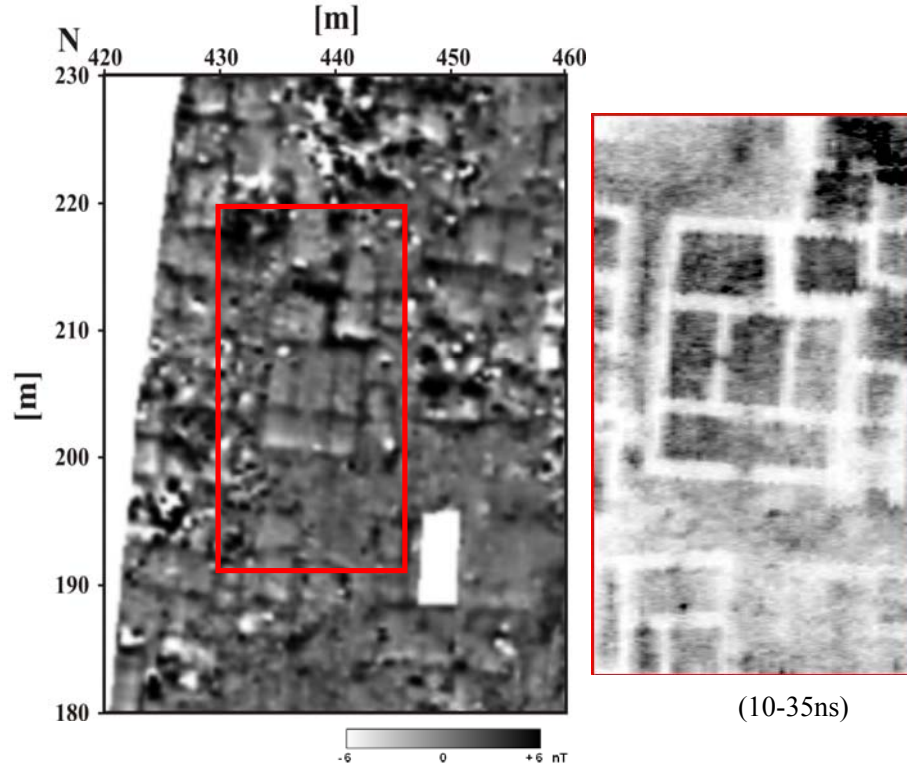
İkinci inceleme sahası olan B sahasında yapılan ölçümler sonucu elde edilen yer manyetiği ve yer radarı sonuçları Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2: B bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)

Çalışma sahası üzerinde bulunan pişmiş seramik parçaları, çanak çömlek kırıkları manyetik anomali haritasında bozucu etkiler oluşturmuştur. Bu nedenle bu bölge daha iyi incelenebilmek için ikinci uygulama sahası olarak seçilmiştir. 10-35ns aralığında hazırlanan zaman kesiti bölgede elde edilmiş yer manyetiği sonuçlarına göre çok daha net bir sonuç vermiştir. Elde edilen zaman kesitinin orta kısmında dört göz odalı bir yapı ve bu yapıya ait ekler görülmektedir. Kesitin en üst kısmında, orta kısımda yer alan yapıya benzerlik gösteren ikinci bir yapı görülmektedir.

Üçüncü ve son inceleme alanı olan C sahasına ait yer manyetiği ve yer radarı sonuçları Şekil 5.3'de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.3: C bölgesine ait yer manyetiği sonuçları (solda), yer radarı verisinden elde edilen zaman kesitleri (sağda) (koyu gri: yüksek refleksiyon.)

Bu araştırma sahasına ait yer manyetiği ve yer radarı sonuçları diğer araştırma sahalarına ait sonuçlara göre daha başarılı netice vermiştir. Her iki sonuçta da büyük odalara sahip ana yapı görülmektedir. Bu büyük yapının solunda en az bu yapı kadar büyük ikinci bir yapının bir kısmı görülmektedir. Bu yapıların altında iki tane daha yapı ve kesitin üst kısmında yarım yay şeklinde bir anomali görülmektedir.

Bu veriler ışığında nekropol alanına ait çeşitli bilgiler edinilmiş olup, başlatılacak kazılara yön verme açısından önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Uygulanan veri-işlem basamakları ile daha net zaman kesitleri hazırlanabildiği görülmüştür. Jeofizik ölçümlere ait sonuçlar, bu nekropol alanında ölçümlerin gelecek dönemlerde de devam ettirilmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

1. Annan, A.P., Waller, W.M., Strangway, D.W., Rossiter, J.R., Redman, J.D., Watts, R.D., "The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer dielectric earth for horizontal electric dipole excitation", *Geophysics*, 40, 285-298, (1975)
2. Ateş, A., "Archaeogeophysical Investigations Around the Bilge Qugan Monument in Khosho Tsaidam, Mongolia", *Archaeological Prospection*, 9,23-33, (2002).
3. Balanis, C.A., "Advanced Engineering Electromagnetics", *John Willey&Sons*, (1989).
4. Conyers, L.B., and Goodman, D., "Ground penetrating radar: An introduction for archaeologists" *Altamira pres, California*, 232 p, (1997).
5. Cott, P.J., "Archaeological Geophysics in East Anglia, UK" *Archaeological Prospection*, 9,157-161, (2002).
6. Daniels, D., "Surface-Penetrating Radar The Institution of Electrical Engineers", *London*, (1996).
7. Drahor, M.G., "Arkeoloji jeofiziği: Arkeojeofizik-1", *Arkeoloji ve Sanat*, 87, 16-25, (1998).
8. Drahor, M.G., "Arkeoloji jeofiziği: Arkeojeofizik-2", *Arkeoloji ve Sanat*, 88, 2-12, (1999).
9. Drahor, M.G., "Arkeolojik Alan İncelemelerinde Yer Radarı Uygulamaları", *Arkeoloji ve Sanat*, 125, 107-138, (2007).
10. Geophysical Survey System I; SIRveyor SIR-20, (2002).
11. Hollender, F., and Tillards, S., "Modelling groundpenetrating radar propagation and reflection with the Johcner parametrization" *Geophysics*, 63, 1933-1942, (1998)
12. Hulsmeyer, C., German Patent Number 165546, (1904).
13. Kadioğlu, S., Kadioğlu, Y.K., "Yer Radarı Yöntemi İle Bir Mermer Sahasındaki Kırıkların, Sağlam ve Bozuk Alanların Belirlenmesi", Selçuk *Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak. Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1, (2006).

14. Kaya, M.A., Başokur, A.T., Ateş, A., Peşken, E., ve Candansayar, E., “Göndürle-1 Höyük Mezarlığının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması” **TÜBİTAK YDABÇAĞ-142 no’lu Proje Raporu**, (1996).
15. Kaya, M.A., “Arkeojeofizik Araştırmalar”, **Meslek İçi Eğitim ve Belgelendirme Kurs Notları-2**, (2007).
16. Knödel, E., Krummel, M., Lanke, J., “Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten/BGR” **Bd.3 Geophysik Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg**, (1997).
17. Kurtuluş, C., “Sismik Arama Ders Kitabı”, **Kocaeli Üniversitesi Yayınları**, Yayın No:5, (2002).
18. Lowy, H., German Patent Number 254517, (1911).
19. Leica-Geosystems, GPS Basics, GPS System 500, (2002).
20. Mala Geoscience, “Basics Radar Theory, Fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD)”, **Sweden**, (2003).
21. Matias, M.S., and Almeida, F., “Geophysical Survey On The Archaeological Site of Mugaros NW Iberian Peninsula”, **Journal of Applied Geophysics**, 29, 119-124, (1996).
22. Neal, A., “Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress”, **Earth Science**, 66, 261-330, (2004).
23. Öztürk, K., “Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri, Temel Kavramlar, Uygulama ve Yorumlama”, **İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul**, (1995).
24. Schön, J., “Physical Properties of Rocks Fundamentals and Principles of Petrophysics”, **Bd. 18, Pergamon**, (1998).
25. Sears, F.W., Zemansky, M, W, and Young, H.D, “University Physics” 6th. **Edition Addison-Westley Publishing Company**, (1982).
26. Cohen, J.K., Stockwell, J.W., CWP/SU: Seismic Unix Release 31: a Free Package for Seismic Research and Processing Center for Wave Phenomena Colorado School of Mines, (1997).
27. Stern, W., “Principles methods and results of electrodynamic thickness measurement of glacier ice”, **Zeitschrift für Gletscherkunde**, 18-24, (1930).

28. Von Hippel, “ Dielektric materials and applications”, *John Willey and Sons, New York*, (1954).
29. Wynn, J.C., “ Archaeological Prsopection: An Introduction to The Special Issue”, *Geophysics*, 51, 537-553, (1986).

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Sakarya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sabihahanım İlköğretim Okulunda, lise öğreniminin ilk iki yılını Sakarya Atatürk Lisesi'nde son yılı ise İzmit Atılım Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılından bölüm üçüncülüğü ile mezun oldu. Aynı yılda Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 yılının güz döneminden bu yana Christian Albrechts Üniversitesi'nde öğrenci araştırmacı olarak çalışmalarına devam etmektedir.