

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Yürütülen bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında öncelikle maddi-manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam sevgili Prof. Dr. Aysel ŞEREN'e, verilerin toplanmasında her türlü desteği sağlayan Arş. Gör. Hilal ALEMDAĞ ve çocukluk arkadaşım Ahmet GÜNAÇAR'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, bana inanan, güvenen aileme, Babam Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman KARA'ya, annem Mukaddes KARA'ya, kardeşlerim Yasemin Esra KARA'ya ve Şule Dilara BİLİCİ'ye sonsuz minnetlerimi sunarım.

Yürütülen bu tez çalışmasını varlığı ile hayat bulduğum, biricik kızım Zeynep İlay KARA'ya ithaf ederim.

Muhammet Ertuğrul KARA
Trabzon 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yer Radarı Tomografi Uygulaması ile Betonarme Elemanlardaki Nem İçeriğinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aysel ŞEREN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 01/07/2020

Muhammet Ertuğrul KARA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

| | |
|--|-----|
| ÖNSÖZ..... | III |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | IX |
| TABLolar DİZİNİ..... | XV |
| SEMBOLLER DİZİNİ..... | XVI |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. YER RADARI YÖNTEMİ..... | 2 |
| 2.1. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi..... | 3 |
| 2.2. Yer Radarı Yönteminin Kullanıldığı Alanlar..... | 7 |
| 2.3. Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları..... | 9 |
| 2.4. Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama Teknikleri..... | 10 |
| 2.4.1. Ortak Ofset (Common Offset) veri toplama tekniği..... | 10 |
| 2.4.2. Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Veri Toplama Tekniği..... | 12 |
| 2.4.3. Ortak Derinlik Noktası Veri Toplama Tekniği..... | 13 |
| 2.4.4. Karşılıklı Kuyu İçi Radar Tomografisi Ölçü Tekniği..... | 14 |
| 3. YER RADARI YÖNTEMİNİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL ALTYAPISI..... | 16 |
| 3.1. Maxwell Denklemleri..... | 16 |
| 3.1.1. Faraday Kanunu..... | 17 |
| 3.1.2. Ampere Kanunu..... | 20 |
| 3.1.3. Manyetik Alanlar İçin Gauss Kanunu..... | 21 |
| 3.1.4. Elektrik Alanlar İçin Gauss Kanunu..... | 22 |
| 3.2. Elektromanyetik Dalga Denklemi..... | 23 |
| 3.2.1. Elektromanyetik Dalgaların Materyal İçinde Davranışları..... | 25 |
| 4. YER RADARI MODELLEMESİ..... | 41 |
| 4.1. Zaman Ortamı Sonlu Farklar (FDTD) Yöntemi..... | 42 |
| 4.1.1. Sonlu Farklar Yöntemi ile Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümü..... | 43 |
| 4.1.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü..... | 45 |
| 4.1.3. FDTD Modellemesinde Elektromanyetik Dalga Kaynağı Oluşturulması..... | 52 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5. | TOMOGRAFİ..... | 52 |
| 5.1. | Tomografi Tekniğinin Temel Prensipleri | 54 |
| 5.1.1. | Geri-İz düşüm/Back Projection (BP) Yaklaşımı | 57 |
| 5.1.2. | Matris Ters Çözümü (Birleşik Gradient ve En Küçük Kareler Yöntemi)..... | 57 |
| 5.1.3. | Yinelemeli Rekonstrüksiyon (Iterative Reconstruction) | 59 |
| 5.2. | Sırt Tekniğinin Matematiksel Temeli..... | 59 |
| 5.3. | Bağıl Dielektrik Permittivite Yardımı ile Su İçeriğinin Belirlenmesi | 64 |
| 6. | BETON VE BETONARME YAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER..... | 66 |
| 7. | YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 70 |
| 7.1. | Modelleme Çalışmaları..... | 70 |
| 7.2. | Arazi Çalışmaları | 78 |
| 8. | SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 108 |
| 9. | KAYNAKLAR..... | 110 |
| | ÖZGEÇMİŞ | |

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YER RADARI TOMOGRAFİ UYGULAMASI İLE BETONARME ELEMANLARDAKİ NEM
İÇERİĞİNİN BELİRLENMESİ

Muhammet Ertuğrul KARA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aysel ŞEREN
2020, 115 Sayfa

Teknolojinin gelişmesi ile yapılarda kullanılan geleneksel ve hasar verici test yöntemlerinin yerine hasar vermeyen Jeofizik yöntemlerin kullanımı son yıllarda artmaktadır. Bu kapsamda temeli elektromanyetik dalgaların farklı malzemeler içinde yayılımı, yansıma, saçılma ve kırılma esaslarına bağlı olan Yer Radarı (GPR) yöntemi özellikle beton ve benzeri malzemelerin iç yapılarının ve fiziksel özelliklerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton dayanımının önemli bir parametresi olan nem içeriğinin belirlenmesine yönelik elektromanyetik (EM) dalga teorisi temelli çalışmalar, başka araştırmacılar tarafından laboratuvar ortamında yürütülmüştür. Bu çalışmanın amacı betonarme yapılardaki nem içeriğinin yer radarı (GPR) yöntemi kullanılarak belirlenmesidir. Bu maksatla, EM dalgaların oluşumu, bunların farklı dielektrik ortamlar içerisinde ilerleyişi ve tomografi çalışmaları ile ilgili matematik modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çerçevede, EM dalgaların ilk varışları kullanılarak tomografi kesitleri oluşturulmuş ve ölçü alınan ortama ait bağlı dielektrik permittivite dağılımı hesaplanarak elde edilen bu değerler ile ölçü alınan ortama ait yüzde su içeriği miktarı belirlenmiştir. İlk olarak tomografik çözümlenelerde kullanılan SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) algoritması modelleme çalışmaları ile test edilmiş ve daha sonra Trabzon'da E70 karayoluna ait bir viyadük ayağı üzerinde 12 yer radarı profili boyunca GPR tomografi verileri toplanmıştır. Verilerin analizi ve tomografik kesitlerin oluşturulması neticesinde viyadük ayağının beton içi bağlı dielektrik permittivite değeri ortalama 5 olarak bulunmuş ve yüzde su içeriği dağılımı ise yaklaşık %4-6 arasında hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, betonarme yapıların nem içeriğinin tespitinde zahmetli, zaman alıcı ve hasar verici geleneksel yöntemler yerine GPR tomografi yönteminin başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: GPR, Tomografi, Yer radarı, Dielektrik permittivite, Nem içeriği, Betonarme yapı, İnşaat

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT WITH USING OF GPR TOMOGRAPHY
APPLICATION ON REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Muhammet Ertuğrul KARA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Aysel ŞEREN
2020, 115 Pages

With the advancements in technology, the usage of non-destructive geophysical techniques has increasing recently instead of traditional and destructive test methods. In this context, the GPR method which is based on propagation of EM waves in different materials on the basis of reflection, refraction and scattering is widely used to investigate inner structure and physical properties of concrete or similar materials. Towards the determination of moisture content, one of the important parameters of concrete strength, the studies using the electromagnetic wave theory have already been conducted in laboratory environment. Following the same approach, this study was executed to determine the percent moisture content (PMC) of the reinforced concrete constructions (RCC) using Ground Penetrating Radar (GPR) method that works based on the propagation of the electromagnetic (EM) waves in a medium. In achieving this, mathematical modelling practices on the formation of the EM waves and their propagation in various dielectric media and tomography studies using GPR method were executed. Within this context, by detecting the first arrivals of EM waves, tomography cross sections were created, and relative dielectric permittivity (DP) was calculated, and finally PMC of the studied material was determined using these parameters. Firstly, SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) algorithm that is used in tomographical analysis was tested by modelling studies in the study. Secondly, GPR tomography data were obtained from 12 geo-radar profiles on one of the pillars of a viaduct on the E70 highway in Trabzon province, Turkey. In analysis of the data, relative DP was found to be 5, and PMC was calculated to be around 4 to 6 percent in the inside of the studied viaduct pillar. Study results proved that GPR tomography can successfully and safely substitute for the time consuming, exhausting, and destructive traditional methods in determination of the PMC of RCCs.

Key Words: GPR, Ground penetrating radar, Tomography, Dielectric permittivity, moisture content, Reinforced concrete structure, Construction

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

- Şekil 1. Yer radarı yöntemi ile veri toplanmasını gösteren blok diyagram (Daniels, 2004).....2
- Şekil 2. Yer radarı kullanılarak ortak ofset veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, s_i , ortamın iletkenliği ve h ise yeryüzü ile yansıtıcı yüzey arasındaki derinliktir.11
- Şekil 3. Yer radarı anten dizilim türleri, (a) ölçüm hattına paralel ve uzun kenarları birbirine bakan dizilim türü, (b) ölçüm hattına dik ve uzun kenarları birbirine bakan dizilim türü, (c) ölçüm hattına paralel ve kısa kenarları birbirine bakan dizilim türü, (d) ölçüm hattına dik ve kısa kenarları birbirine bakan dizilim türü.12
- Şekil 4. Yer radarı kullanılarak geniş açılı yansıma ve kırılma veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, s_i , ortamın iletkenliği ve h ise yeryüzü ile yansıtıcı yüzey arasındaki derinliktir.13
- Şekil 5. Ortak derinlik noktası veri toplama tekniğinde kaydedilen dalga türleri. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, s_i , ortamın iletkenliğidir (Steelman ve Endres, 2009'dan düzenlenerek alınmıştır).....14
- Şekil 6. Yer radarı kullanılarak ortak derinlik noktası veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, s_i , ortamın iletkenliğidir.14
- Şekil 7. Kuyu içi GPR anteni kullanılarak tomografi ölçüsü alınması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, s_i , ortamın iletkenliğidir.15
- Şekil 8. Lenz Yasası18
- Şekil 9. Stokes teoreminin uygulandığı S yüzeyi ve L eğrisi19
- Şekil 10. Elektromanyetik dalgayı oluşturan H manyetik alan bileşeni ile E elektrik alan bileşeninin yayılım doğrultusunda ilerleyişi.....25
- Şekil 11. Bir ortam içinde yayılan elektromanyetik dalganın yer içerisinde zamanla sönümlenmesi (Annan, 2009'dan düzenlenerek alınmıştır.)....27

| | |
|---|----|
| Şekil 12. Tipik materyal sönümlenme değerleri verilmiştir. Uzun çizgiler tam sönümlenme aralığını, kare şekilli noktalar ise materyaller için tipik sönümlenme değerini, manyetik karışımlar için ise ortalama sönümlenme değerini temsil etmektedir. Daniels (1996, 2004) ve Cassidy (2008)' den düzenlenerek alınmıştır..... | 28 |
| Şekil 13. (a) Herhangi bir elektrik alan uygulanmadan önce akışkan içerisinde ki serbest iyonik partiküller statik durumdadır ve ısı üretmek için etkileşime geçmezler. (b) Yayılarak ilerleyen elektromanyetik uyarım (puls), materyal boyunca seyahat etmektedir. Enerji iyonik yüklere transfer edilerek bu yükler hızlıca uyarımın sınırlarına ivmelenerek yükselirler. Transfer boyunca yüklü partiküller birbirleriyle çarpışarak etkileşime geçerler ve atalet enerjileri ısıya dönüşerek enerji kaybına neden olurlar. | 29 |
| Şekil 14. İdeal, kayıplı dielektrik materyalin geçirimsizlik serbestlenme durumu. A bölgesi, serbest yük ve materyal etkileşimleriyle ilişkili kutuplaşmayı, B bölgesi ise sınırlandırılmış yüklerle ilişkili moleküler ve atomik kutuplaşmayı göstermektedir. (Daniels, 1996' dan değiştirilerek alınmıştır)..... | 33 |
| Şekil 15. Snell yasasına göre bir ortamdan diğerine doğru ilerleyen bir elektromanyetik dalganın farklı iki ortam arasındaki süreksizlik ara yüzeyinden geçişi sırasında yansıması ve kırılmasının temsili gösterimi | 34 |
| Şekil 16. (a) TE modu, (b) TM modu | 36 |
| Şekil 17. Silindirik bir boşluğun radargram üzerinde oluşturduğu hiperbolik saçılım | 39 |
| Şekil 18. Elektrik ve manyetik alanları kartezyen koordinatlarla gösteren bir Yee hücresi (Yee, 1966' dan değiştirilerek alınmıştır). | 42 |
| Şekil 19. İleri, geri ve merkezi sonlu fark yöntemi ile bir eğri üzerindeki noktaların hesaplanması. | 45 |
| Şekil 20. (4.1.23) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 48 |
| Şekil 21. (4.1.24) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 48 |
| Şekil 22. (4.1.25) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 49 |
| Şekil 23. (4.1.26) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 49 |
| Şekil 24. (4.1.27) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 50 |

| | |
|---|----|
| Şekil 25. (4.1.28) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları | 51 |
| Şekil 26. Direğe tutulan ışık kaynağının bir duvar üzerinde oluşturduğu gölgelerin gözlenmesi ile direğin yerinin tespit edilmesi (Lehmann, 2007'den değiştirilerek alınmıştır)..... | 52 |
| Şekil 27. r-l eksenleri, α açısıyla x-y eksenini etrafında döndürülmesiyle elde edilen tomografi geometrisi..... | 55 |
| Şekil 28. Doğrusal ışın yayılımı kabulüyle kaynaktan çıkan üç örnek ışının hücreler içerisinde geçerek alıcılara ulaşması (Lehmann, 2007) | 56 |
| Şekil 29. SIRT Yöntemi için akış şeması (Lo ve Inderwiesen, 1994). | 63 |
| Şekil 30. 800 örnek üzerinde yapılan analizler sonucunda bulunan bağıl dielektrik permittivite ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişki (Leucci, 2012'den düzenlenerek alınmıştır.) | 65 |
| Şekil 31. Bekleme süresine göre su-çimento oranı ile sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (Amhudo, R., L., vd., 2018'den düzenlenerek alınmıştır)..... | 67 |
| Şekil 32. (a) Bağıl dielektrik permittivite ve sıkışma dayanımı arasındaki ilişki, (b) İletkenlik ile sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (Piladaeng vd., 2016'dan düzenlenerek alınmıştır). | 68 |
| Şekil 33. (a) Bağıl dielektrik permittivite ve beton yaşı arasındaki ilişki, (b) İletkenlik ile beton yaşı arasındaki ilişki (Piladaeng vd., 2016'dan düzenlenerek alınmıştır). | 68 |
| Şekil 34. İki farklı dielektrik özelliğe sahip bir ortam modeli (Kare dışı bağıl dielektrik permittivite 5, kare içi bağıl dielektrik permittivite 30 olacak şekilde tasarlanmıştır). | 70 |
| Şekil 35. Şekil 34'te verilen modele göre hesaplanan yapay radargramlar ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafında kaydedilen atış grupları (a) ve sağ tarafında kaydedilen atış grupları (b)..... | 71 |
| Şekil 36. Tasarlanan model için verici anten konumlarına göre ışın yolları..... | 71 |
| Şekil 37. Tasarlanan model (a) ve tomografi kesiti (b)..... | 72 |
| Şekil 38. Farklı noktalara konumlandırılmış ortam modeli | 72 |
| Şekil 39. Şekil 38'de verilen model için hesaplanan radargramlar ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafında kaydedilen atış grupları (a) ve sağ tarafında kaydedilen atış grupları (b) | 73 |
| Şekil 40. Tasarlanan model (a) ve bu modele ait tomografi kesiti (b)..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Şekil 41. Farklı anten frekansları kullanılarak hesaplanan tomografi kesitleri, 500 MHz (a) ve 1 GHz (b)..... | 74 |
| Şekil 42. Yarıçapı 15 cm olan daire şekilli farklı dielektrik özelliğe sahip nesnenin merkeze konumlandırılmasıyla oluşturulan model (a) ve aynı dielektrik özelliğe sahip unsurun model sınırları içerisinde farklı noktalara konumlandırılmasıyla oluşturulan model (b)..... | 75 |
| Şekil 43. Şekil 42-a’da verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a) ve modelin sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)..... | 75 |
| Şekil 44. Şekil 42-b’de verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a) ve modelin sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)..... | 75 |
| Şekil 45. Şekil 42-a’da verilen modele ait tomografi kesiti (a) ve Şekil 42-b’de verilen modele ait tomografi kesiti (b) | 76 |
| Şekil 46. Yanyana modellenen dielektrik unsurlar (a) ve alt alta modellenen dielektrik unsurlar (b) | 76 |
| Şekil 47. Şekil 46-a’da verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a), sağ tarafından elde edilen atış grupları (b) | 77 |
| Şekil 48. Şekil 46-b’de verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a), sağ tarafından elde edilen atış grupları (b) | 77 |
| Şekil 49. Şekil 46’de verilen modellere ait tomografik çözümler. Şekil 46-a’da verilen model için tomografik çözüm (a) ve Şekil 46-b’de verilen model için tomografik çözüm (b) | 77 |
| Şekil 50. MALA ProEx sistem ve bileşenleri | 79 |
| Şekil 51. Çalışma alanının harita üzerinde konumu (WGS 84 Koordinatlar: 41° 0'17.45"K, 39°41'42.88"D)..... | 79 |
| Şekil 52. Viyadük ayağı üzerinde ölçüm profilleri ve noktalarının belirlenmesi .. | 80 |
| Şekil 53. Viyadük ayağı üzerinde belirlenen ölçüm noktaları ve profiller. Ayağın doğu yüzü (a), ayağın batı yüzü (b) yer almaktadır. | 82 |
| Şekil 54. Sıfır zamanı varış noktası sinyal izi üzerinde kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. | 83 |
| Şekil 55. Verici anten viyadük ayağının batı yüzünde belirlenen profil üzerindeki kayıt noktasında sabit tutulurken alıcı anten ile ayağın doğu yüzünde aynı profile karşılık gelen profil üzerinde ölçü alımı | 84 |

| | |
|--|----|
| Şekil 56. Viyadük ayağının temsili modeli ve oluşturulan profiller ile kayıt noktalarının gösterimi | 85 |
| Şekil 57. Viyadük ayağı üzerinde verici antenin batı yüzünde ilk noktaya konumlandırılmasıyla alıcı anten ile doğu yüzünde profil boyunca kaydedilen ham verinin görüntüsü..... | 86 |
| Şekil 58. Ham veri görüntüsü (a), Başlangıç zamanı düzeltmesi ve DC kayması düzeltmesi uygulanan veri görüntüsü(b) ve DC kayması düzeltmesi(c) 87 | |
| Şekil 59. Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış ham veri (a), DC kayması düzeltmesi uygulanmış veri (b), dewow işlemi uygulanmış veri (c), genlik normalizasyonu (d), bant geçişli süzgeç uygulanmış veri (e), f-k süzgeci uygulanmış veri (f), dekonvolüsyon uygulanmış veri (g) ve tekrar genlik normalizasyonu uygulanmış veri (h) | 88 |
| Şekil 60. 2. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grupları (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grupları (b) | 89 |
| Şekil 61. Alıcı-verici antenlerin konumunu gösteren grafik. Kırmızı çizgi alıcı antenin kayıt uzunluğunu, kırmızı çarpı, kaydedilen verideki izin konumunu, yeşil çarpı ise verici antenin konumunu göstermektedir. | 90 |
| Şekil 62. Wiggle penceresinde ilk varışların işaretlenmesi | 91 |
| Şekil 63. 2. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 91 |
| Şekil 64. 3. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 92 |
| Şekil 65. 4. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 92 |
| Şekil 66. 5. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 93 |
| Şekil 67. 6. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 93 |
| Şekil 68. 7. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 94 |
| Şekil 69. 8. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 94 |
| Şekil 70. 9. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 95 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 71. 10. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 95 |
| Şekil 72. 11. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 96 |
| Şekil 73. 12. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları | 96 |
| Şekil 74. 2. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 97 |
| Şekil 75. 3. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 98 |
| Şekil 76. 4. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 98 |
| Şekil 77. 5. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 99 |
| Şekil 78. 6. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 99 |
| Şekil 79. 7. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 100 |
| Şekil 80. 8. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 100 |
| Şekil 81. 9. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 101 |
| Şekil 82. 10. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 101 |
| Şekil 83. 11. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 102 |
| Şekil 84. 12. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b) | 102 |
| Şekil 85. Ortak ofset GPR verilerinin değerlendirilmesi. Genlik kazancı uygulanmış ham veri ve kolon kalınlığı (a), aynı verinin işlenmiş ve zaman-derinlik dönüşümü uygulanmış hali (b) ve migrasyon işlemi uygulanmış hali (c) | 103 |
| Şekil 86. Viyadük ayağının batı yüzünden elde edilen ortak ofset GPR verilerinden oluşturulan üç boyutlu görüntü..... | 104 |
| Şekil 87. Viyadük ayağının doğu yüzünden elde edilen ortak ofset GPR verilerinden oluşturulan üç boyutlu görüntü..... | 105 |
| Şekil 88. Viyadük ayağı üzerindeki profillerde oluşturulan paralel GPR tomografi kesitlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan 3B bağıl dielektrik permittivite görüntüsü | 106 |
| Şekil 89. Viyadük ayağı üzerindeki profillerde oluşturulan paralel GPR tomografi kesitlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan 3B su içeriği görüntüsü..... | 107 |

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Tablo 1. Bazı yeraltı materyallerinin 100 MHz frekanslı antenle elde edilen iletkenlik ve dielektrik katsayısı tipik değerleri (Conyes ve Goodman, 1997; Reynolds, 1997; Daniels, 2004). | 31 |
| Tablo 2. Beton numunelerinin karakteristik özellikleri (Ihamouten vd., 2016'den düzenlenerek alınmıştır) | 69 |
| Tablo 3. İklimlendirme odasında farklı bağıl nem oranlarına maruz bırakılan beton örneklerinin ortalama yüzde su içeriği miktarları (Ihamouten vd., 2016'den düzenlenerek alınmıştır) | 69 |

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|--------------|--|
| ART | Cebirsel Rekonstrüksiyon Tekniği |
| ASCII | Bilgi Değişimi için Amerikan Standart Kodlama Sistemi |
| B | Manyetik Akı Yoğunluğu |
| BP | Geri İzdüşüm Yaklaşımı |
| c | Işık Hızı |
| DC | Doğru Akım |
| E | Elektrik Alan |
| ϵ | Dielektrik Permittivite |
| ϵ_0 | Boşluğun Dielektrik Permittivitesi |
| ϵ_r | Bağlı Dielektrik Permittivite |
| \vec{F} | Vektör Alanı |
| ϕ | Manyetik Alan Çizgilerinin Sayısı |
| FDTD | Zaman Ortamı Sonlu Farklar |
| GHz | Giga Hertz |
| GPR | Yer Radarı |
| GAYK | Geniş Açılı Yansıma Kırılma |
| H | Manyetik Alan |
| I_{TE} | Enine Elektrik Alanın Gücü |
| I_{TM} | Enine Manyetik Alanın Gücü |
| J | Elektrik Akım Yoğunluğu |
| J_d | Yer Değiştirme Akım Yoğunluğu |
| μ_0 | Boşluğun Manyetik Geçirgenliği |
| μ_r | Bağlı Manyetik Geçirgenlik |
| MARSIS | Mars Gelişmiş Yeraltı ve İyonosfer Sondaj Radarı |
| MHz | Mega Hertz |
| q | Yük Yoğunluğu |
| NASA | Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi |
| ODN | Ortak Derinlik Noktası |
| R | Yansıma Katsayısı |

| | |
|-----------|--|
| RADAR | Radyo Algılama ve Aralığı |
| RIMFAX | Mars'ın Yeraltı Radar Görüntüleyici Projesi |
| RMS | Kök Ortalama Kare |
| σ | İletkenlik |
| SHARAD | Mars Sığ Sondaj Radarı |
| SIRT | Eşzamanlı Tekrarlamalı Rekonstrüksiyon Tekniği |
| T | İletim Katsayısı |
| TE | Enine Elektrik Alan |
| TM | Enine Manyetik Alan |
| v | Elektromanyetik Dalga Hızı |
| V_{emk} | Elektromotor Kuvveti |
| 3B | Üç Boyutlu |

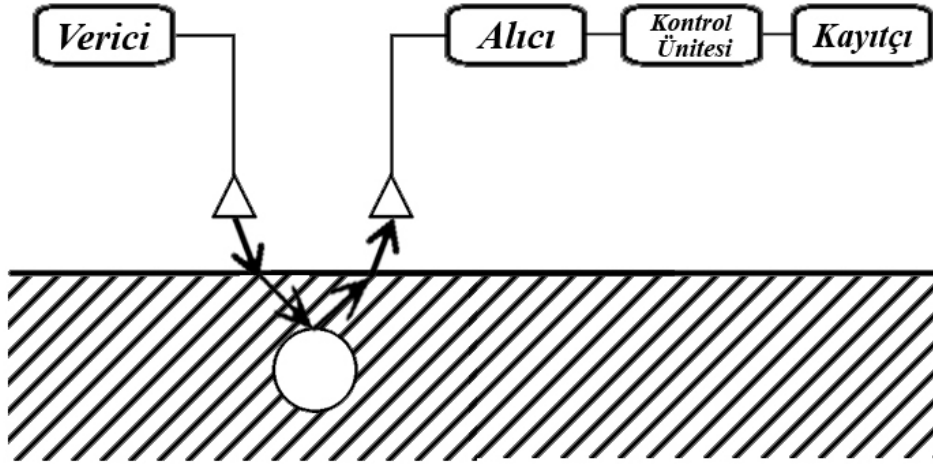
1. GİRİŞ

GPR (Ground Penetrating Radar) yöntemi 40 yılı aşkın bir süredir sığ yeraltı araştırmalarında kullanılan oldukça etkili bir jeofizik yöntemdir. Yer altında ışık hızına ya da diğer bir deyişle boşlukta bir elektromanyetik dalganın yayılım hızına yakın bir hızda yayılarak, incelenen ortamda bulunan süreksizlik yapılarından yansımaların nanosaniye mertebelerinde kaydedilmeleri ile zemin altının görüntülenmesini sağlayan bir yöntemdir. Yöntem, arkeoloji, hidroloji, sedimantoloji, yapısal jeoloji araştırmalarında ve boşluk, mayın gibi unsurların araştırılması noktasında askeri uygulamalarda başarıyla uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında GPR yöntemi ile bir viyadük ayağında elde edilen radargramlar ve modellerden hesaplanan yapay radargramlar üzerinden ilk varış okumaları yapılarak, incelenen ortam içerisindeki bağıl dielektrik permittivite dağılımını ve su içeriğini belirlemek amacıyla tomografi çalışmaları yürütülmüştür.

Yapılan literatür araştırmalarında laboratuvar ortamında elektromanyetik dalgaların beton numuneler içerisinde yayılımı incelenerek numunelere ait bağıl dielektrik permittivite ve yüzde su içeriği değerlerinin hesaplanabildiği gözlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında GPR yöntemi kullanılarak ilk defa arazi ortamında bir viyadük ayağı içerisinde elektromanyetik dalgaların yayılımı incelenerek viyadük ayağı içerisinde bağıl dielektrik permittivite ile yüzde su içeriği miktarı, Giovanni Leucci'nin önerdiği bağıntı ile hesaplanmıştır ve viyadük ayağında belirlenen birbirine paralel 11 profil üzerinde 2B kesitler oluşturularak ortam içerisinde bağıl dielektrik permittivite ve yüzde su içeriği miktarı 3B olarak haritalanmıştır.

2. YER RADARI YÖNTEMİ

GPR (Yer Radarı veya Yere Nüfuz Eden Radar), yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların yayılımını esasına göre çalışan, yüksek çözünürlüklü görüntü sağlayan bir jeofizik yöntemdir. Yer Radarı yöntemi, yer altındaki jeolojik yapıları, insan kaynaklı gömülü nesnelere, materyallerin birbirinden olan dielektrik farklarına göre görüntüleme yapabilen bir yöntemdir. Kayıplı dielektrik materyallerde elektromanyetik alanlar sönümlenmeden önce belirli bir derinliğe kadar nüfuz edebilmektedir. Böylece zemin üzerinde verici antenden belirli bir frekansta gönderilen elektromanyetik dalga, yer altında nüfuz edebildiği derinliğe kadar içinden geçtiği farklı süreksizliklerde enerjisinin bir kısmını diğer ortama iletmektedir. Kalan kısmı da süreksizlik yüzeyinden yansırarak alıcı antenlerde nanosaniye mertebelerinde algılanarak kontrol ünitesi vasıtasıyla kayıtçı bilgisayarda kaydedilerek veri toplamaktadır (Annan ve Davis, 1989). Şekil 1’de yer radarı yönteminin çalışması genel hatlarıyla gösterilmiştir.



Şekil 1. Yer radarı yöntemi ile veri toplanmasını gösteren blok diyagram (Daniels, 2004)

2.1. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi

Yer radarının gelişimi 1886 yılında Heinrich R. Hertz tarafından elektromanyetik dalgaların ışık gibi yayılması ve yansımaları ispat etmesi ile başlamıştır. Elektromanyetik sinyaller kullanılarak uzak noktalardaki metalik nesnelere tespiti, ilk olarak 1904 yılında Hülsmeier tarafından RADAR (Radio Detection and Ranging)'in bulunması ile yapılmıştır. Ancak radarın gömülü nesnelere tespiti için kullanımının tanımlanması 6 yıl sonra Leimbach ve Löwy tarafından Alman patenti ile ortaya çıkmıştır. Yer radarının bugüne kadar gelişmesindeki tarihsel süreçler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

1900 – 1950

50 yıllık bu süreç içerisinde yeraltında radyo dalgalarının yayılımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Radyo dalgalarının yer altını araştırmak için kullanılabileceğine değinilmiş olmasına rağmen bu tarz ölçümlerin başarıyla uygulandığına dair bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak iletişim, yön bulma ve radar konusunda birçok makale yayınlanmıştır (Marconi, 1922; Butement ve Pollard, 1931; Hyland vd., 1934).

1950 – 1960

Radyo dalga sinyalleri kullanılarak yeraltı özelliklerinin araştırılması ilk defa denenmiştir. 1956 yılında El Said, yeraltı su tablasının derinliğini görüntülemek amacıyla havadan iletilen sinyaller ile su tablasından yansıyan sinyaller arasındaki girişimi kullanmıştır. Rapor edilen bir diğer gözlem ise jeolojik materyallerin radyo frekans sondajı, Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri (USAF)'nin Grönland buz tabakasına inişi sırasında meydana gelen altimetre hatalarını bildirmesi üzerine ortaya çıkmıştır (Waite ve Schmidt, 1961).

1960 – 1970

Buz içerisinde radyo yankı sondajları üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar Cambridge Scott Polar Araştırma Enstitüsü'nden, Bailey vd., 1964 ve Wisconsin Üniversitesi Jeofiziksel ve Kutup Araştırma Merkezi'nden Bentley ve Walford, 1964 buzullarda ve kutup bölgelerinde aktif çalışmalarda bulunmuştur.

1970 – 1980

Cook (1973), düşük kayıplı dielektrik materyal özelliği gösteren kömür depozitlerinin bu yöntem kullanılarak tespit edilebileceğini keşfetmiştir. Apollo 17 lunar keşif programı kapsamında ayın yeraltı elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla El Said (1956) tarafından yapılan çalışmalara benzer şekilde interferometre konseptleri kullanılarak yörüngeden ayın yüzeyine ölçümler alınmıştır (Simmons vd., 1973 ve Ward vd., 1973).

Ek olarak jeolojik materyallerin elektriksel özellikleri radyo frekanslarında daha iyi anlaşılmasına başlanmıştır. Olhoeft, 1975 yılında doğal yollarla oluşan jeolojik materyallerin elektriksel karakterleri ve bu materyallerin elektriksel iletkenlikleri ile dielektrik kutuplaşması arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasına öncülük etmiştir. 1980'li yıllara yaklaştıkça teknolojik gelişmeler bu alanda yapılan uygulamaların da gelişmesine neden olmuştur. 1976 yılında ılıman buzullarda radyo yankı sondajı saçılmaları daha iyi anlaşılmasına başlanmıştır. Saçılma etkisi ve düşük frekanslı radar ihtiyacı Watts ve England tarafından 1976' da bildirilmiştir.

1980 – 1990

Bu zaman diliminde GPR, çeşitli firmalar tarafından ticari amaçlı olarak üretilmeye başlanmıştır. Bazı ülkeler İsveç Jeolojik Araştırmalar' a kuyu radarı geliştirmeleri için yatırım yapmıştır. Bu çalışma Olsson vd. tarafından 1987' de bildirilmiştir.

Taşınabilirlik, dijital kayıt ve fiber optik kabloların kullanıldığı ticari olmayan birçok GPR prototipi de bu zaman diliminde geliştirilmiştir. Owen tarafından 1981 yılında, Birleşik Devletler ordusunun hassas askeri alanlarda tünel araştırmaları için kullanılmak üzere kuyu GPR'ın geliştirildiğini bildirmiştir.

GPR'nin güçlü ve zayıf olduğu alanlar daha iyi anlaşılmaya başlanmıştır. Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı, GPR ile kirletilmiş arazileri araştırmak ve temizlemek için çeşitli girişimlerde bulunmuştur (Benson vd., 1984).

GPR, yüksek çözünürlüklü yeraltı haritalandırılmasında doğal bir araç haline gelmiştir. Ek olarak bu yıllarda düşük frekanslı ve tam dijital GPR'lar ticari ürünler olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Tarımsal ihtiyaçlar doğrultusunda toprak sınıflandırmaları için GPR yöntemi kullanılmaya başlanmıştır (Doolittle ve Asmussen, 1992).

1990 – 2000

GPR'nin kullanımında en belirgin ilerleme, 1990'lı yılların başlarında meydana gelmiştir. Bu süre içerisinde dünya çapında birçok grup GPR ile ilgilenmeye başlamıştır.

Jeofizik ve elektrik mühendisleri toplulukları tarafından GPR'nin geliştirilmesine yönelik daha çok dikkat çekilmeye başlanmıştır. Çoklu katlamalı (Multi-fold) veri toplanması (Fisher vd., 1992), dijital veri işlem (Maijala (1995), Gerlitz vd. (1993)) ve 2 boyutlu sayısal simülasyonlar (Zeng vd. (1995), Cai ve McMechan (1995)) ortaya çıkmıştır. Arkeolojik (Goodman, 1994), çevresel (Brewster ve Annan, 1994), jeolojik stratigrafi (Jol, 1996) uygulamalarında avantaj sağlamıştır. Çevresel kuyu GPR geliştirmesi Redman vd. tarafından 1996 yılında bildirilmiştir.

1995 yılından sonra ticari olarak daha basit ve farklı çeşitli sistemler ortaya çıkmıştır. Ayrıca teknolojinin hızlı gelişmesine bağlı olarak bilgisayarların evrimi ile 3 boyutlu sayısal modellemeler yapılmaya başlanmıştır.

2000 – 2020

Son yirmi yılda teknolojik ilerlemelerinde hızlı bir şekilde gelişmesiyle GPR yöntemi uzay araştırmalarında da yer bulmuştur. NASA'nın MARSIS projesi kapsamında Mars yörüngesinden gönderilen radar sinyalleri vasıtasıyla elde edilen radar görüntüleri sayesinde Mars yüzeyinin altında su birikintisi olan bir göl keşfedilmiştir (Orosei vd., 2018). Yine NASA tarafından RIMFAX projesi kapsamında 2020 yılında Mars yüzeyinde GPR verisi toplayacak bir uzay aracının marsa gönderilmesi planlanmaktadır (URL-1,2020).

İnsansız hava araçlarının hızlıca gelişmesi Jeofizik alanına da katkıda bulunmuştur. Bu kapsamda sığ derinliklerdeki patlayıcı özelliğe sahip kara mayınları gibi unsurları tespit etmek amacıyla GPR sistemleri insansız hava araçlarına entegre edilerek havadan ölçüm yapılabilmektedir (Fernandez vd., 2019).

Karşılıklı kuyularda GPR ölçümleri ilk olarak 1997 yılında ortaya çıkmıştır. 2000'li yıllarda ise bu yöntemle ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Karşılıklı kuyu radar ölçümleri ile GPR yöntemi kullanılarak tomografik çalışmalar yapılmıştır (Hubbard vd., 1997; Alumbaugh vd., 2002; Chang vd., 2004; Irving vd., 2007).



2.2. Yer Radarı Yönteminin Kullanıldığı Alanlar

Yer radarı yöntemi günümüzde birçok alanda çeşitli problemlere çözüm getirmek için kullanılmaktadır. Bu alanların bazıları aşağıda sıralanmıştır.

2.2.1. Yeraltı Unsurlarının Haritalandırılmasında;

- Metalik veya PVC gibi metalik olmayan, gaz, atık su, içme suyu, telefon kabloları gibi insan kaynaklı gömülü nesnelere bulunmasında,
- Kuyu açmadan önce kuyu yerlerinin belirlenmesinde,

2.2.2. Yıkıcı Olmayan Etkisi ile Yapı Araştırmalarında;

- Yapıların inşa edileceği yerlerin uygun olup olmadığına karar verilmesinde,
- Yapıların iç kısmının araştırılmasında,
- Restorasyon amaçlı çalışmalarda yapıların son durumlarının karşılaştırılmasında,
- Duvar, zemin araştırmalarında,
- Tünel araştırmalarında,
- Park ve garaj alanlarının tespitine yönelik araştırmalarda,
- Yapı içerisindeki boşlukların tespitinde,
- Beton kalınlıklarının ölçülmesinde,

2.2.3. Yol Araştırmalarında;

- Asfalt ve beton kaldırımların kalınlıklarının haritalandırılmasında,
- Yol ve benzeri yapıların altındaki boşlukların tespit edilmesinde,

2.2.4. Kuyu Uygulamalarında;

- Karstik arazilerin görüntülenmesinde,
- Kırıklı yapıların belirlenmesinde,
- Kirlilik çalışmalarında,
- Kuyu tomografisi çalışmalarında,

2.2.5. Yer ve yeraltı çalışmalarında;

a) Jeolojik ve madencilik uygulamalarında;

- Temel kayanın haritalanması,
- Fay gibi kırıklı yapıların belirlenmesi,
- Göl tabanlarının ve dere, nehir yataklarının haritalanması,
- Kutuplarda buzulların altının araştırılması,
- Yeraltı suyu kaynaklarının araştırılması,
- Maden alanlarının haritalanması,

b) Çevresel Uygulamalarda;

- Deniz altı çalışmaları,
- Toprak ve çakıl araştırmaları,
- Atık alanların tespit edilmesi çalışmaları,
- Dolgu alanlarının belirlenmesi,

c) Jeoteknik Uygulamalarda;

- İnşaat mühendisliği,
- Baraj çalışmaları,

d) Arkeolojik Çalışmalarda;

- Arkeolojik kalıntıların yerlerinin belirlenmesinde,

e) Diğer Uygulamalar;

- Gömülü nesnelere,
- Mayın gibi patlamamış patlayıcı maddesi (UXO) tespit edilmesinde.

2.3. Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yer radarı yöntemi günümüzde çeşitli problemlere karşı hasarsız bilgi vermesi ile oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Ancak her yöntemde olduğu gibi bu yöntemde çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Yöntemin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Yüksek frekanslı antenler kullandığı için yüksek çözünürlüğe sahiptir.
- Farklı frekanslara sahip antenler kullanılabildiği için bir ortam hakkında daha sağlıklı yorum yapılabilir.
- Gelişmiş veri işlem teknikleri sayesinde insan kaynaklı gürültüler elde edilen veriden çıkarılarak sinyal/gürültü oranı artırılabilir.
- Hasarsız ölçü alabilme kabiliyetinden dolayı birçok alanda tercih sebebidir.
- Gömülü veya gizli nesnelerin ya da yer altına ait yapıların konumu hassas bir şekilde tespit edilebilir.
- Ölçü alımı kolaydır.
- Metalik ve metalik olmayan her türlü nesneye karşı duyarlıdır.

Yöntemin dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Yeraltı araştırmalarında kil gibi su tutabilen ve ya metalik mineral içeriği yüksek jeolojik birimler gönderilen elektromanyetik sinyallerin nüfuz kabiliyetini azaltabilir.
- Radyo vericileri gibi diğer elektromanyetik dalga üreten kaynaklardan etkilenebilir.
- İletkenliğin çok yüksek olduğu ortamlar sinyaller üzerinde bozucu etki oluşturmaktadır.

2.4. Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama Teknikleri

Yer radarı kullanılarak veri toplanırken ilk önce yapılacak olan çalışmanın amacına ve ortamın koşullarına göre anten tipi, anten frekansı ve anten dizilimi belirlenmektedir. Yer radarı için açık ve kapalı olmak üzere iki çeşit anten bulunmaktadır. 10 MHz ile 200 MHz aralığındaki frekansa sahip antenler korumasız olup, alıcı ve verici antenleri ayrı ayrı bulunmaktadır. 200 MHz ve yukarısı antenler ise korumalı olup alıcı ve verici antenler bir arada bulunmaktadır.

Yer radarı yönteminde genel olarak dört çeşit veri toplama tekniği bulunmaktadır.

Bunlar;

- Ortak ofset veya yansıma profili,
- Ortak derinlik noktası (ODN),
- Geniş açılı yansıma kırılma (GAYK)
- Kuyu içi radar uygulamaları

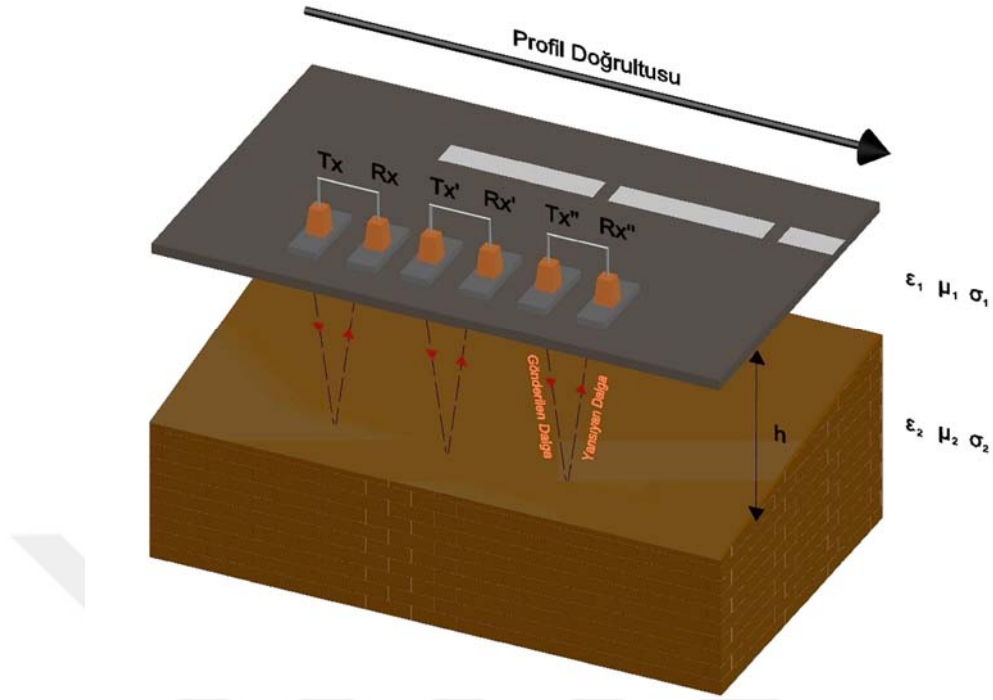
veri toplama teknikleridir. Bu veri toplama teknikleri detaylı olarak 2.4.1-2.4.4 başlıkları arasında verilmiştir.

2.4.1. Ortak Ofset (Common Offset) Veri Toplama Tekniği

Yansıma profili olarak da adlandırılan bu veri toplama tekniği kullanılırken, ölçü alınacak hat boyunca sabit aralıklı alıcı verici antenler hattın başlangıç noktasından sonuna kadar belirlenen düzenli iz aralıklarında alınmaktadır. Bu veri toplama tekniği kullanılarak yer yüzeyinde belirlenen hat üzerinde sürekli olarak alınan veri ile yeraltının haritalandırılması amaçlanmaktadır.

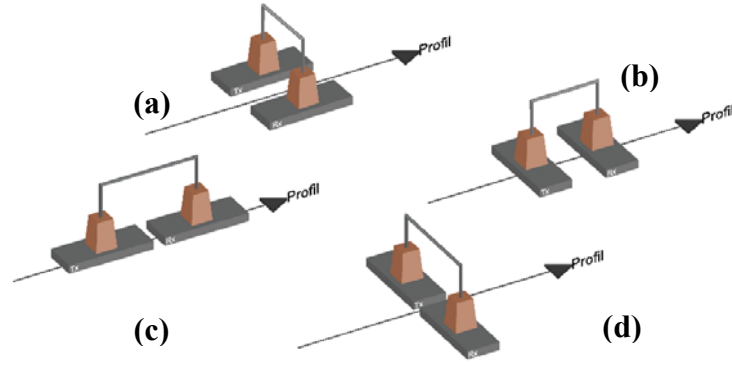
Ortak ofset ölçümünde kullanılan parametreler, yer radarı antenlerinin merkez frekansı, kayıt zaman penceresi, zaman örnekleme aralığı, anten aralığı, iz aralığı, profil aralığı ve anten yönelimidir.

Şekil 2’de ortak ofset veri toplama tekniği kullanılarak veri toplanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Yer radarı kullanılarak ortak ofset veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, σ_i , ortamın iletkenliği ve h ise yeryüzü ile yansıtıcı yüzey arasındaki derinliktir.

Veri toplama şekillerin şematik olarak gösterildiği tüm şekillerde Tx verici anteni ve Rx alıcı anteni, ϵ , ortamın dielektrik katsayısını, μ , ortamın manyetik geçirgenliğini ve σ ise ortamın iletkenliğini göstermektedir. Ayrıca ölçüm alınacak arazinin jeolojik koşullarına ve topoğrafyasına bağlı olarak farklı anten dizilim türleri kullanılmaktadır. Bu anten dizilim türleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

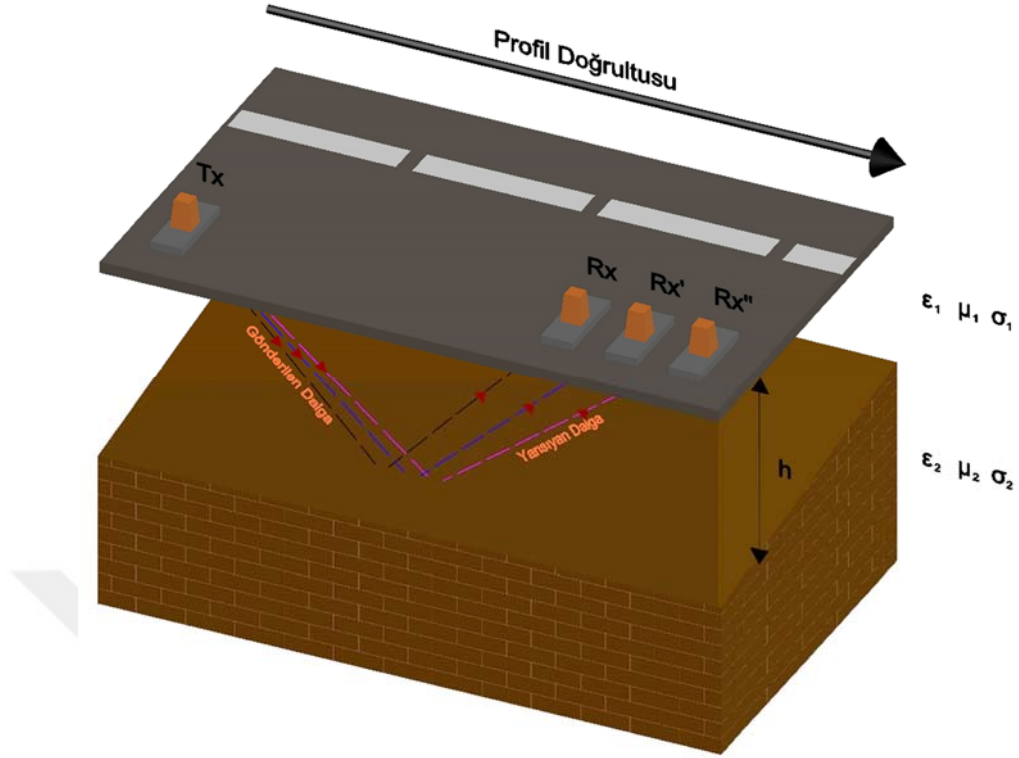


Şekil 3. Yer radarı anten dizilim türleri, (a) ölçüm hattına paralel ve uzun kenarları birbirine bakan dizilim türü, (b) ölçüm hattına dik ve uzun kenarları birbirine bakan dizilim türü, (c) ölçüm hattına paralel ve kısa kenarları birbirine bakan dizilim türü, (d) ölçüm hattına dik ve kısa kenarları birbirine bakan dizilim türü.

2.4.2. Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Veri Toplama Tekniği

Geniş açılı yansıma ve kırılma veri toplama tekniği kullanılarak ölçü alınırken, seçilen hattın başlangıç noktasında verici anten sabit tutularak, alıcı anten hattın sonuna kadar belirlenen ölçü aralıklarında hareket ettirilerek ölçü almaktadır. Bu ölçümler alıcı ile verici anten arasındaki mesafenin orta noktasından anten frekansının nüfuz edebildiği derinlikten yansımalar kaydedilmektedir. Her bir ölçü noktası üzerinde kaydedilen bu sinyaller ile yansıma profili oluşturulmaktadır. Geniş açılı yansıma kırılma ve ortak derinlik noktası veri toplama tekniklerindeki amaç, ortamda verici anten tarafından gönderilen elektromanyetik dalganın hızını belirlemektir. Bu ölçü tekniği ile belirlenen hız bilgisi ile tabakalar arası derinlikler hesaplanabilmektedir.

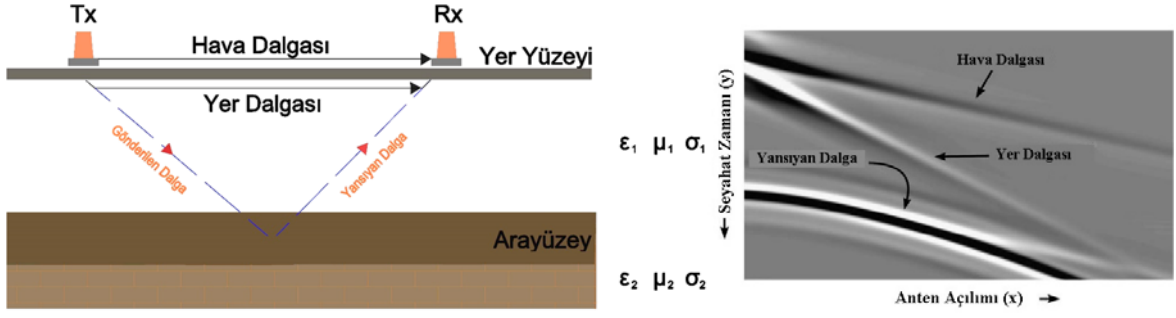
Şekil 4'te geniş açılı yansıma ve kırılma veri toplama tekniği kullanılarak veri toplanması şematik olarak gösterilmiştir.



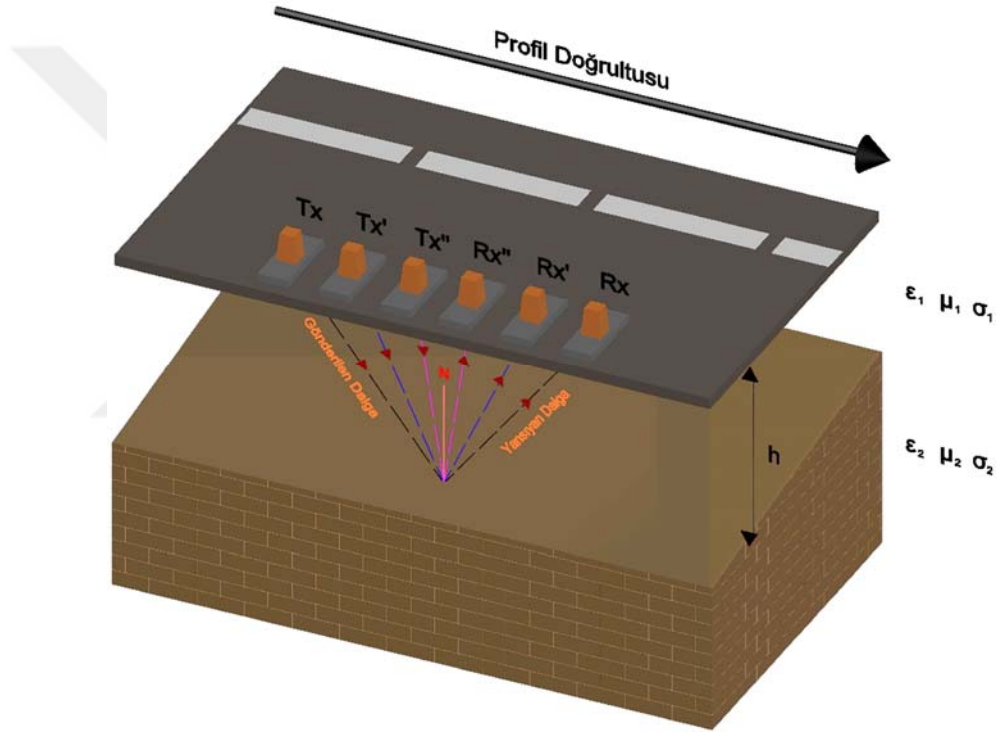
Şekil 4. Yer radarı kullanılarak geniş açılı yansıma ve kırılma veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, σ_i , ortamın iletkenliği ve h ise yeryüzü ile yansıtıcı yüzey arasındaki derinliktir.

2.4.3. Ortak Derinlik Noktası Veri Toplama Tekniği

Ortak derinlik noktası veri toplama tekniği kullanılarak ölçü alınırken, belirlenen profilin orta noktasının sağına ve soluna eşit aralıklarda alıcı ve verici antenler yerleştirilmektedir. Yerleştirilen bu antenler her ölçü alımından sonra belirlenen aralık mesafesi kadar her iki yana doğru eşit olarak kaydırılmaktadır. Hat boyunca kayıt alma işlemi devam ettirilerek ölçü alımı tamamlanmaktadır. Bu veri toplama tekniği ile elde edilen verilerde, hava dalgası, yer dalgası, kırılma ve yansıma dalgaları gözlenmektedir. Ortamdaki tabaka derinliğini belirlemek amacıyla hız analizi, yansıma dalgalarının oluşturduğu hiperboller dikkate alınarak yapılmaktadır. Şekil 5'te ortak derinlik noktası ile kaydedilen dalga türleri ve Şekil 6'da ise ortak derinlik noktası veri toplama tekniğinde veri toplanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Ortak derinlik noktası veri toplama tekniğinde kaydedilen dalga türleri. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, σ_i , ortamın iletkenliğidir (Steelman ve Endres, 2009'dan düzenlenerek alınmıştır).

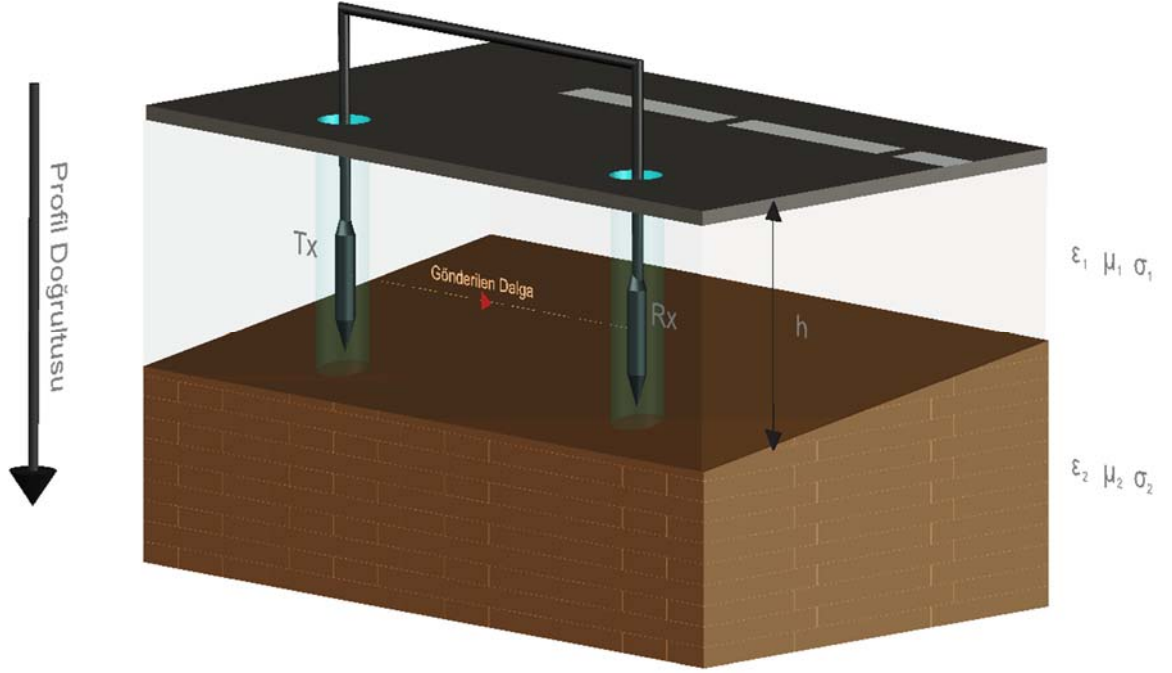


Şekil 6. Yer radarı kullanılarak ortak derinlik noktası veri toplama tekniği ile veri toplanması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, σ_i , ortamın iletkenliğidir.

2.4.4. Karşılıklı Kuyu İçi Radar Tomografisi Ölçü Tekniği

Karşılıklı kuyu içi radar tomografisi ölçü tekniği ile ölçü alınırken kuyulardan birine verici anten, diğerine alıcı anten indirilerek verici antenin belirli noktalarda sabit tutulmasıyla diğer kuyuda alıcı anten kuyu boyunca sürekli ölçüm almaktadır. Bu teknikle yapılan ölçümlerde elektromanyetik dalga doğrudan verici antenden çıkarak alıcı antene

ulaşmaktadır. Kaydedilen radargramlar üzerinde sinyallerin ilk varışları okunarak tomografi algoritmaları sayesinde ortamın bağıl dielektrik permittivite dağılımı haritalanmaktadır. Yanal süreksizlikler ve iki kuyu arasındaki farklı yapıların yerleri bu teknik ile tespit edilebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Kuyu içi GPR anteni kullanılarak tomografi ölçüsü alınması. ϵ_i , ortamın bağıl dielektrik permittivitesi, μ_i , ortamın manyetik geçirgenliği, σ_i , ortamın iletkenliğidir.

3. YER RADARI YÖNTEMİNİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL ALTYAPISI

Yöntem elektromanyetik dalgaların yayılımı esasına göre çalıştığı için temelinde elektromanyetik teori bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgaların yayılımını ise James Clerk Maxwell tarafından bir araya getirilen ve Maxwell denklemleri olarak adlandırılan, dört denklemden oluşan denklem takımı ile açıklanmıştır.

3.1. Maxwell Denklemleri

James Clerk Maxwell, elektrik ve manyetik alan yasalarını bir arada kullanarak, zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların birbirlerinden ayrı olarak var olamayacağını göstererek elektromanyetik dalga kavramını ortaya koymuştur. Elektromanyetik teorisinin temelini oluşturan ve dört denklemden meydana gelen Maxwell denklemleri, elektrik ve manyetik alanların birbirleriyle ilişkili olduğunu ve elektromanyetik dalgaların boşlukta ışık hızına sahip bir hız ile ilerlediğini keşfetmiştir. Işık hızı;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile tanımlanmıştır. Burada c ışık hızını, ϵ_0 boşluğun dielektrik permittivitesini ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir. Boşluğun dielektrik permittivitesi $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m ve manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m değerlerine sahip olup sabittirler. Bu sabit değerler (3.1) ifadesinde yerine konulursa ışık hızı $c = 2.997 \times 10^8$ m/sn olarak hesaplanmaktadır.

3.1.1. Faraday Kanunu

Oersted deneyi sırasında bir tele doğru akım uyguladığında tel etrafında bir manyetik alanın oluştuğunu fark etmiştir. Oluşan bu manyetik alan Biot-Savart yasası ile açıklanmaktadır. Biot-Savart yasası;

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a\pi} \quad (3.1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada B manyetik alanı, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, I akımı ve a mesafeyi temsil etmektedir. Biot-Savart yasasına göre I akımı taşıyan bir tel, a mesafesi kadar uzaklıkta bir manyetik alan oluşturabilmektedir.

Michael Faraday yaptığı deney sonucu, uçları akım ölçen galvanometreye bağlı halka şeklindeki bir tele bir mıknatıs yaklaştırıldığında galvanometre ibresi üzerinde bir sapma olduğunu farketmiştir. Böylece bu sapma ile telden bir akımın geçtiğini ispatlayarak gözlenen akıma indükleme akımı, akımı oluşturan kuvvete ise indükleme elektromotor kuvveti denilmiştir (Halliday ve Resnick, 1992).

Herhangi bir yüzeyden geçen manyetik alan çizgilerinin sayısı, o yüzey için tanımlanan manyetik akı ile ölçülmektedir ve

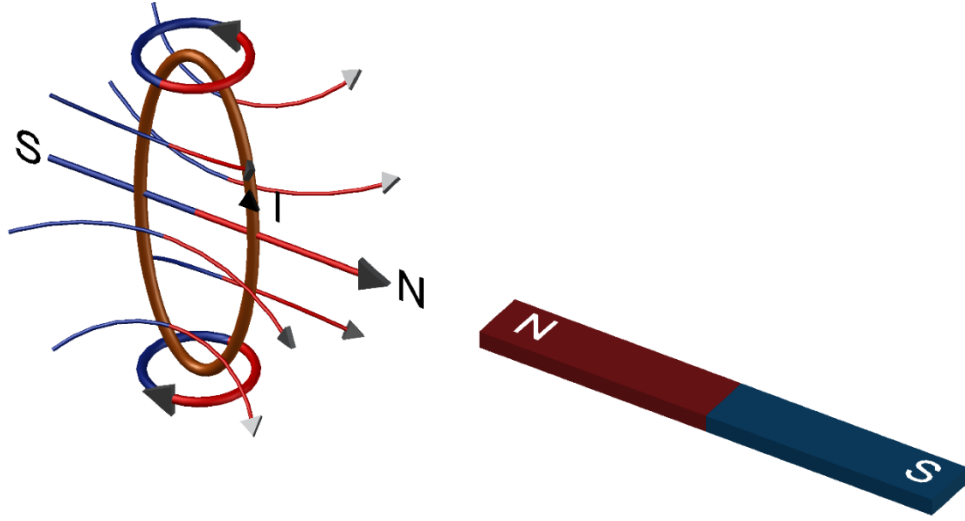
$$\Phi = \int B ds \quad (3.1.2)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır.

Faraday yasası bir devrede meydana gelen indüklenmiş elektromotor kuvvetinin devreden geçen B manyetik akı yoğunluğunun değişimine eşit olduğunu ifade etmiştir ve

$$V_{emk} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1.3)$$

şeklinde gösterilmektedir. İndüksiyon akımı kendisini oluşturan etkene zıt şekilde yönelmektedir. Bu durum ise 1834 yılında Heinrich Friedrich Lenz tarafından keşfedilmiş ve Lenz yasası olarak kabul edilmiştir (Şekil 8). (3.1.3) bağıntısı ile Faraday kanununda gösterilen “-” işareti bu zıt şekildeki yönelimi göstermektedir.



Şekil 8. Lenz Yasası

Faraday kanununa göre manyetik ve elektrik alan arasında bir ilişki kurulacak olursa,

$$V_{emk} = \oint_L E dl = -\frac{d}{dt} \int_S B ds \quad (3.1.4)$$

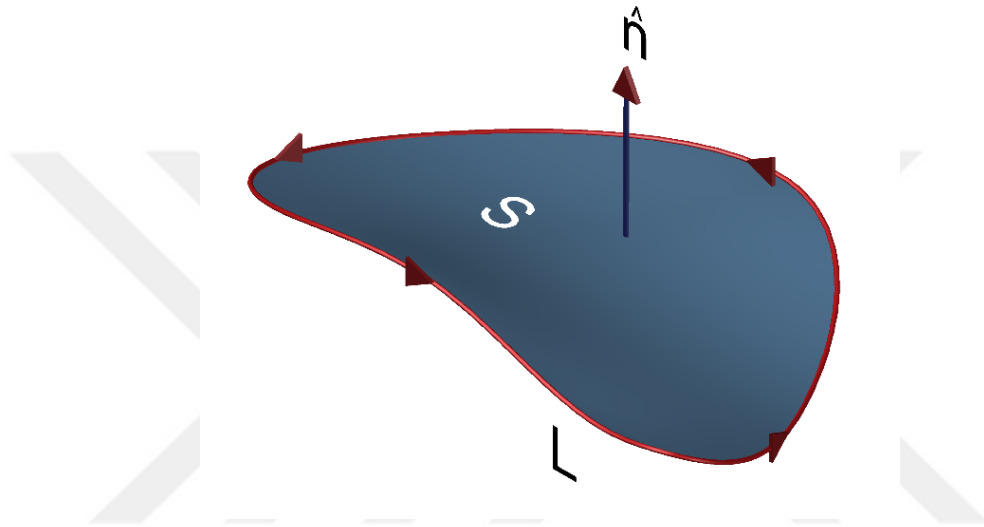
ifadesi elde edilmektedir. Bu ifade L ile sınırlanmış bir çizgisel uzunluğun sınırladığı S alanından geçen toplam akıyı belirtmektedir.

Üç boyutlu uzayda kapalı bir L eğrisi ve bu eğriyle sınırlanmış açık bir S yüzeyi düşünülecek olursa, \vec{F} vektör alanının bu L eğrisi üzerindeki eğrisel integrali yerine, S yüzeyi üzerinde rot \vec{F} nin akısı hesaplanabilmektedir (Şekil 9). Bu işleme Stokes teoremi denilmektedir. Vektör alanı $\vec{F} = M\hat{i} + N\hat{j} + P\hat{k}$ olarak tanımlanmış olsun ve \hat{n} vektör alanının her bir bileşenini temsil etsin. Bu durumda ilgili eşitlik, 3.1.5 ifadesinde gösterildiği gibi yazılabilmektedir.

$$\oint_L \vec{F} d\vec{r} = \iint_S (\vec{\nabla} \times \vec{F}) \hat{n} dS \quad (3.1.5)$$

Burada \vec{F} vektörünün $\vec{\nabla}$ operatörü ile çarpımına vektörün rotasyoneli denilmektedir ve rot \vec{F} ile gösterilmektedir. rot \vec{F} (3.1.6) ifadesinde gösterildiği gibi genişletilebilmektedir.

$$\text{rot } \vec{F} = \vec{\nabla} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ M & N & P \end{vmatrix} \quad (3.1.6)$$



Şekil 9. Stokes teoreminin uygulandığı S yüzeyi ve L eğrisi

(3.1.5) denkleminde Stokes teoremi uygulanırsa, ifade L ile sınırlanmış bir çizgisel uzunluğun sınırladığı S alanından geçen toplam akı tanımlanmaktadır. \vec{F} vektörü elektriksel alan E olarak kabul edilirse,

$$\int_S (\nabla \times E) ds = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} ds \quad (3.1.7)$$

ifadesi elde edilmektedir. Eşitliğin her iki tarafındaki integraller kaldırılırsa,

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1.8)$$

ifadesiyle değişken manyetik alanlar için I. Maxwell denklemi elde edilmektedir.

Ayrıca elektromanyetik alan içerisinde bulunan ortamlarda elektromanyetik dalganın davranışını hesaplayabilmek için çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir. (3.1.9) ifadesi ile gösterilen bağıntılar ortamın elektromanyetik özelliklerine göre elektrik alan (\vec{E}) ile elektrik akı yoğunluğu (\vec{D}), manyetik alan (\vec{H}) ile manyetik akı yoğunluğu (\vec{B}) ve elektrik alan (\vec{E}) ile elektrik akım yoğunluğu (\vec{J}) arasındaki ilişkileri belirleyen bağıntılardır (De Groot, 1969).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.1.9)$$

(3.1.9) ile ifade edilen bağıntılar, boşlukta yayılan elektromanyetik dalgalar için kullanılmaktadır.

3.1.2. Ampere Kanunu

Değişken manyetik alan $\nabla \times H$ elektostatikte sıfırdır. Doğru akım için $\nabla \times H = J$ ile gösterilmektedir. Vektör çarpımlarının diverjansı sıfıra eşittir:

$$\nabla(\nabla \times H) = \nabla J = 0 \quad (3.1.10)$$

Akımın sürekliliği gereği ∇J ifadesi sıfırdan farklı olmalıdır.

$$\nabla J = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \neq 0, \quad \rho_v = \nabla D \quad (3.1.11)$$

Bu durumda değişken alan denklemlerinde bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Uyumsuzluğu gidermek için $\nabla \times H = J$ ifadesine (3.1.12) ifadesi ile gösterilen değişiklik uygulanırsa,

$$\nabla \times H = J + J_d \quad (3.1.12)$$

diverjans teoremine göre (3.1.12) ifadesi, (3.1.10) ifadesinde yerine yazılırsa (3.1.13) ile gösterilen bağıntı elde edilebilmektedir.

$$\nabla(\nabla \times H) = 0 = \nabla J + \nabla J_d \quad (3.1.13)$$

(3.1.13) ile gösterilen J_d değeri (3.1.11) denkleminde uyarlanırsa,

$$\nabla J_d = -\nabla J = \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla D) = \nabla \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1.14)$$

şeklinde yazılabilir.

(3.1.14) ifadesi (3.1.12) denkleminde yerine konulursa,

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1.15)$$

ifadesi elde edilerek zamanla değişen alanlar için II. Maxwell denklemi yazılmış olur.

Burada $J_d = \frac{\partial D}{\partial t}$ ifadesine yer değiştirme akım yoğunluğu denilmektedir.

Elektromanyetik dalga denklemini oluşturmak için Ampere kanunu (3.1.9) ifadesinde gösterilen ilişkiler kullanılarak (3.1.16) ifadesi gibi değiştirilebilir.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.1.16)$$

3.1.3. Manyetik Alanlar İçin Gauss Kanunu

Manyetik alanlar için Gauss kanununa göre, herhangi bir kapalı yüzey boyunca manyetik akı değeri sıfırdır. Çünkü kapalı bir yüzeye giren manyetik alan çizgilerinden girenler negatif, çıkanlar pozitif olacağından toplam akıya katkıları olmayacaktır.

Dolayısı ile,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.1.17)$$

olacaktır. Bu ifade türev formunda (3.1.18) ifadesiyle gösterilmektedir.

$$\nabla B = 0 \quad (3.1.18)$$

Böylece III. Maxwell denklemi elde edilmiş olur.

3.1.4. Elektrik Alanlar İçin Gauss Kanunu

Elektrik alanlar için Gauss kanununa göre, bir yüzey parçası üzerindeki E elektrik akısı, o yüzeyi kesen çizgilerin sayısı ile orantılıdır. Kapalı bir yüzeyden geçen akı,

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.1.19)$$

ile tanımlandığında,

$$\oint \vec{E} \, ds = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.1.20)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu ifadede q kapalı bir yüzey içinde kalan yüklerin toplamını temsil etmektedir. (3.1.20) denkleminin diverjans teoremi uygulanırsa,

$$\oint_S \vec{E} \, d\vec{s} = \oint_V (\nabla \cdot \vec{E}) \, dv = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.1.21)$$

şekline dönüşür. Burada kapalı bir yüzey içerisindeki yüklerin yoğunluğunun toplamı,

$$q = \int \rho \, dv \quad (3.1.22)$$

olduğundan, (3.1.21) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\oint (\nabla \cdot \vec{E}) \, dv = \frac{\int \rho \, dv}{\epsilon_0} \quad (3.1.23)$$

ifadesi elde edilecektir.

Böylelikle,

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.1.24)$$

olacaktır. $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \rho_0}$ olduğundan ve çok küçük bir değere sahip olduğundan ihmal edilebilir. Böylece IV. Maxwell denklemi (3.1.25) ifadesiyle yazılabilir.

$$\nabla E = \rho \quad (3.1.25)$$

3.2. Elektromanyetik Dalga Denklemi

Elektromanyetik dalgalar, elektrik yüklerinin belirli bir frekansta ivmeli hareketleri sonucu meydana gelmektedir. Birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşeni bulunmaktadır ve bu iki alanın meydana geldiği düzleme dik doğrultuda ilerleyen dalgalardır (Şekil 10) (Balanis, 1989). Elektromanyetik dalga denklemleri Maxwell denklemleri kullanılarak 3.2.7-8 ifadelerinde gösterildiği gibi elde edilmektedir.

I. Maxwell denkleminin (3.1.8) rotasyoneli (Curl) alınır,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (3.2.1)$$

(3.1.9) ifadesi elde edilir ve \vec{B} manyetik akı yoğunluğu eşitliği yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (3.2.2)$$

ifadesi elde edilir. Buradan, (3.1.15) eşitliğinde verilen $\nabla \times \vec{H}$ ifadesi (3.2.2) denklemde yerine yazılırsa,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.2.3)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeye (3.1.9)' da gösterilen düzeltmeler elektrik akım yoğunluğu ve elektrik akı yoğunluğu için uygulanırsa,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\sigma \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (3.2.4)$$

ifadesi bulunur.

$$\nabla \times \nabla \times F = \nabla(\nabla F) - \nabla^2 F \quad (3.2.5)$$

Yukarıda gösterilen ikinci dereceden vektör özdeşliği, (3.2.4) denkleminde uygulanırsa,

$$\nabla(\nabla \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\sigma \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (3.2.6)$$

Denklemin elde edilir. $\nabla \vec{E} = \rho$ ve başlangıç durumu için $\rho = 0$ kabul edilirse, $\nabla \vec{E} = 0$ olur ve

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeye zaman bağımlı Helmholtz denklemi veya basitçe elektromanyetik dalga denklemi denilmektedir.

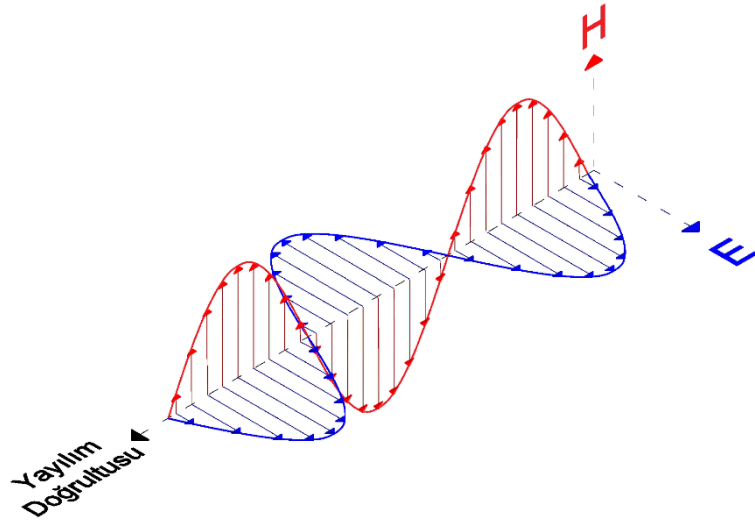
(3.2.7) ifadesini elde etmek için kullanılan yöntemlerin aynısı manyetik alanlar içinde uygulanırsa, benzer şekilde,

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2.8)$$

ifadesi elde edilir (Sadıku, 2001).

(3.2.7) ve (3.2.8) denklemleri, elektromanyetik dalgaların bir ortam içinde hareketini ifade etmektedirler.

Şekil 10'da bir elektromanyetik dalganın yayılım doğrultusu boyunca ilerleyişi gösterilmiştir.



Şekil 10. Elektromanyetik dalgayı oluşturan H manyetik alan bileşeni ile E elektrik alan bileşeninin yayılım doğrultusunda ilerleyişi

3.2.1. Elektromanyetik Dalgaların Materyal İçinde Davranışları

(3.1) bağıntısında bir elektromanyetik dalganın boşlukta yayılım hızı verilmiştir. Bu hız boşlukta ışığın hızına eşit olduğu için ışığında bir elektromanyetik dalga olduğu yorumu yapılmıştır. Bu bağıntıdan yola çıkılarak, bir elektromanyetik dalganın dielektrik bir ortam içindeki hızı;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3.2.9)$$

bağıntısı ile belirlenebilmektedir. Bir materyalin manyetik geçirgenliği, $\mu = \mu_0 \mu_r$, dielektrik geçirgenliği, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ olarak verilmektedir. Burada μ_r , bağıl manyetik geçirgenlik ve ϵ_r , bağıl dielektrik geçirgenlik veya dielektrik katsayısı olarak ifade edilmektedir (Annan, 1996).

Yer radarından elde edilen elektromanyetik sinyallerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için elektromanyetik dalgaların içinden geçtiği ortama ait karakteristik özelliklerin iyi bilinmesi oldukça önemlidir. Bir ortamın elektromanyetik karakteristik özellikleri teorik olarak dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenliği ve iletkenliği ile belirlenmektedir. Aynı zamanda bu parametreler, faz hızı, sönüm ve elektromanyetik empedans özelliklerini etkilemektedirler. Düşük frekanslarda bu özellikler açısal frekans ω

ya bağlıdır. Eğer dielektrik ve manyetik geçirgenlik ile iletkenlik parametreleri sabit ise yüksek frekanslarda bu özellikler frekanstan bağımsız hale gelmektedir. Bir materyal içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalga, materyalin elektromanyetik özelliklerine göre ilerleme doğrultusunda zamanla sönümlenmeye uğrayacaktır. Bu sönümlenme bağıntısı (3.2.10) ile verilmiştir.

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.2.10)$$

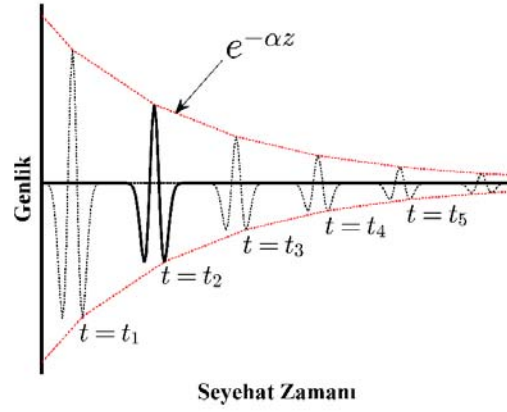
Ortamın empedansı ise;

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.2.11)$$

gibidir. Dolayısı ile (3.2.11) ifadesindeki bağıntı (3.2.10) ifadesinde yerine yazılırsa sönüm parametresi α ;

$$\alpha = \frac{\sigma Z}{2} \quad (3.2.12)$$

şeklinde yazılabilir (Annan, 1996). Manyetik geçirgenlik, iletkenlik ve dielektrik katsayısı bilinen bir ortamda elektromanyetik dalganın zamanla sönümlenmesi Şekil 11’de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 11. Bir ortam içinde yayılan elektromanyetik dalganın yer içerisinde zamanla sönümlenmesi (Annan, 2009'dan düzenlenerek alınmıştır.)

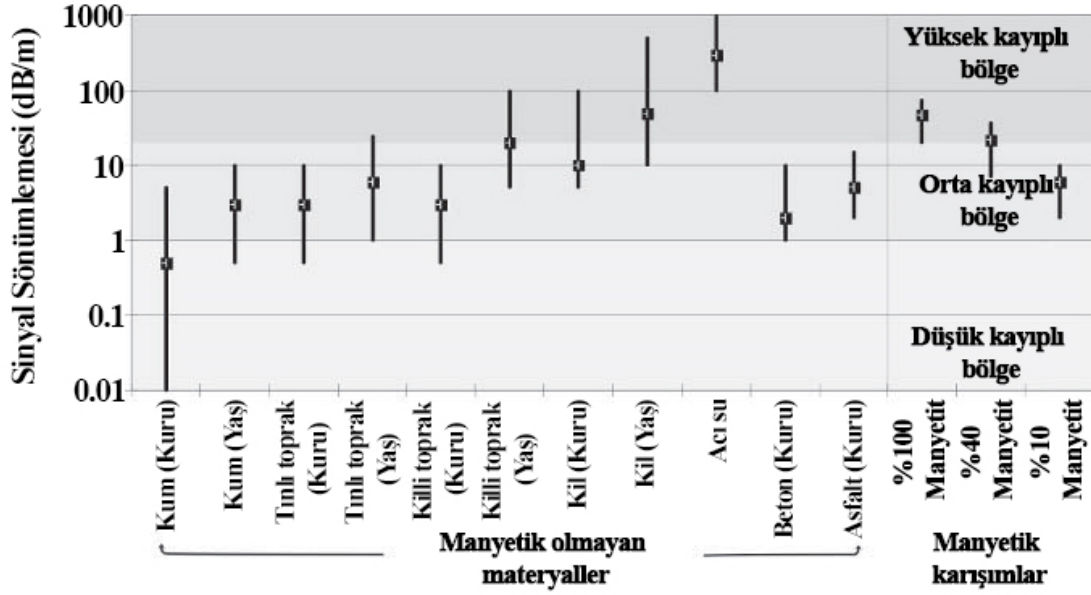
3.2.1.1. Manyetik Geçirgenlik

Birçok durumda materyallerin diyamanyetik ve paramanyetik gibi özelliklerinin yayılan yer radarı sinyaline bir etkisi bulunmaktadır. Ferromanyetik minerallerin ise yer radarı dalga hızı ve sinyal sönümlenmesine oldukça büyük bir etkisi bulunmaktadır. Demir, nikel ve bu minerallerin içerisindeki sülfür, oksit bileşimlerinin oldukça önemli ferromanyetik serbestleme mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizma elektron spin manyetik momentlerinin gelişimi ve yeniden konumlandırılması ile manyetik ortamın duvar sınırlarını kontrol etmektedir (Olhoeft, 1998). Manyetik serbestleme frekansları öncelikle dane boyutuna ve manyetik materyalin fiziksel yapısına bağlıdır. Birçok yeraltı jeolojik malzeme için ferromanyetik içeriğin miktarı önemsiz kabul edilmektedir (genellikle <2%). Ancak volkanik kayalarda, demirce zengin kum ve topraklarda bulunan kayda değer miktardaki manyetit, maghemit ve hematit mineralleri diğer ortamlara kıyasla elektromanyetik dalganın enerjisinde kayba neden olabilmektedir (Olhoeft ve Capron, 1993).

MARSIS ve SHARAD gibi Mars radar araştırmaları programlarının gelişimi sayesinde manyetik minerallerin yer radarı sinyallerine etkisi bir kez daha ortaya konulmuştur. Bu programlar sayesinde Mars yüzeyini oluşturduğuna inanılan yüksek kayıplı demir oksit bileşimlerinin elektromanyetik sinyallere olan etkisi belirlenmiştir (Bertheliera vd., 2000). Yapılan son çalışmalar ise göstermiştir ki %10 manyetit içeriğine sahip bir

materyal yer radarı sinyallerinin hızı ve sönümlenmesinde oldukça büyük bir etkiye neden olmaktadır (Mattei vd., 2007).

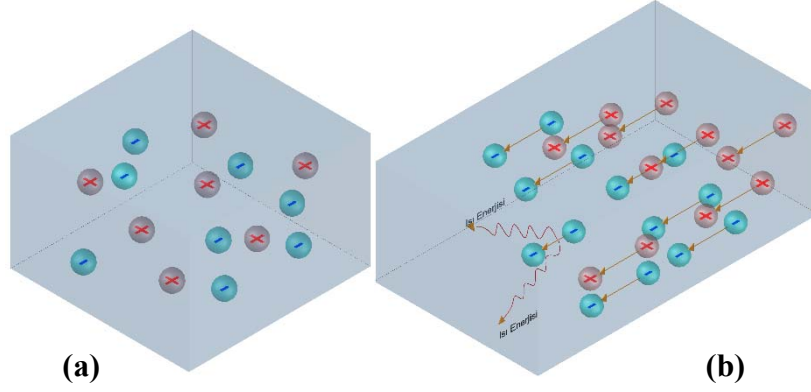
Şekil 12’de bazı materyallerin elektromanyetik sinyal sönümlenmeleri gösterilmiştir.



Şekil 12. Tipik materyal sönümlenme değerleri verilmiştir. Uzun çizgiler tam sönümlenme aralığını, kare şekilli noktalar ise materyaller için tipik sönümlenme değerini, manyetik karışımlar için ise ortalama sönümlenme değerini temsil etmektedir. Daniels (1996, 2004) ve Cassidy (2008)’ den düzenlenerek alınmıştır.

3.2.1.2. İletkenlik

Basit bir ifadeyle iletkenlik, uygulanan bir alanın altında materyal içerisinde elektrik yüklerinin serbestçe geçebilme yeteneği denilmektedir. Metallerde bu yükler, metal atomları içerisindeki serbest atomlarla ilişkilidir. Buna karşın akışkanlarda çözülmüş anyon ve katyonların yükleri (Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- ve CO_3^{-2} gibi) ile temsil edilmektedir. Bu yük taşıyıcıları dahili iletim akımları üreten terminal bir hıza doğru hızlıca ivmelenmektedir. Yayıldıkça diğer atom, iyon veya elektronlar ile rastgele çarpışarak ısı formunda enerji kaybı üretmektedirler. Düşük yer radarı frekanslarında, yük tepkisi oldukça etkili bir şekilde ani ve iletim akımları elektrik alan ile aynı fazda oluşmaktadır (Turner ve Siggins, 1994).



Şekil 13. (a) Herhangi bir elektrik alan uygulanmadan önce akışkan içerisindeki serbest iyonik partiküller statik durumdadır ve ısı üretmek için etkileşime geçmezler. (b) Yayılarak ilerleyen elektromanyetik uyarım (puls), materyal boyunca seyahat etmektedir. Enerji iyonik yüklere transfer edilerek bu yükler hızlıca uyarımın sınırlarına ivmelenerek yükselirler. Transfer boyunca yüklü partiküller birbirleriyle çarpışarak etkileşime geçerler ve atalet enerjileri ısıya dönüşerek enerji kaybına neden olurlar.

Yüksek frekanslarda, ivmelenen yüklerin atalet enerjileri fiziksel tepkide bir gecikmeye neden olmaktadır ve elektrik alan değişimleriyle birlikte iletim akımları faz dışı kalmaktadırlar. Böylelikle iletkenlik, imajiner bileşeni faz dışında kalan akım bileşenini gösteren karmaşık değerli nicelikler ile açıklanmaktadır. Bu durum tipik olarak frekansla artarak, geçirimsizliğin enerji depolama etkisine eklenmektedir. Radar frekansları için bu durum genellikle küçük ya da önemsiz olarak kabul edilmektedir ve imajiner bileşen genellikle ihmal edilerek iletkenlik parametresi sadece gerçel bileşen kullanılarak ile sadeleştirilmektedir. (Turner ve Siggins, 1994). Ancak doğal materyaller oldukça karmaşık olabilmektedir ve küçük yer altı hacminde akışkanlar içerisinde hareket halinde bulunan anyon ve katyonlar, katılar içerisinde yer değiştiren iyonlar, yüzey yükleri gibi çeşitli serbest yükler ortaya çıkabilmektedir. Her birinin farklı atalet özellikleri bulunmaktadır ve potansiyel olarak hiçbiri iletkenliğin imajiner bileşeninde benzerlik göstermemektedir (King ve Smith, 1981). Gerçel bileşen ile temsil edilen enerji kaybı derecesi, imajiner bileşenle ilişkili olan enerji depolama derecesinden daha önemlidir (Şekil 13) (King ve Smith, 1981). Genel olarak karmaşık iletkenlik ifadesi aşağıda gösterilmiştir.

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (3.2.13)$$

Burada, σ , iletkenliği, σ' , iletkenliğin gerçel bileşenini ve σ'' ise iletkenliğin sanal bileşenini temsil etmektedir.

3.2.1.3. Geçirimsizlik

Basitçe geçirimsizlik, bir materyalin elektromanyetik enerjiyi elektriksel yük formunda depolaması ve bırakması olarak açıklanabilmekte ve klasik olarak kondansatörlerin depolama yeteneği ile ilişkilidir. Ya da alternatif olarak, serbest yüklerin akışına karşı gösterilen direnç yeteneği veya uygulanan bir elektrik alan altında kalan materyalin kutuplaşma derecesi (F/m) olarak açıklanabilmektedir. Dielektrik geçirimsizlik, serbest uzayın dielektrik geçirimsizliği ile materyalin bağlı dielektrik geçirimsizliği veya dielektrik katsayısı ile çarpımına eşittir. Dielektrik katsayısı boyutsuzdur ve

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.2.14)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ϵ_r , dielektrik katsayısını, ϵ_0 , boşluğun dielektrik geçirimsizliği ve ϵ materyalin dielektrik geçirimsizliğini temsil etmektedir.

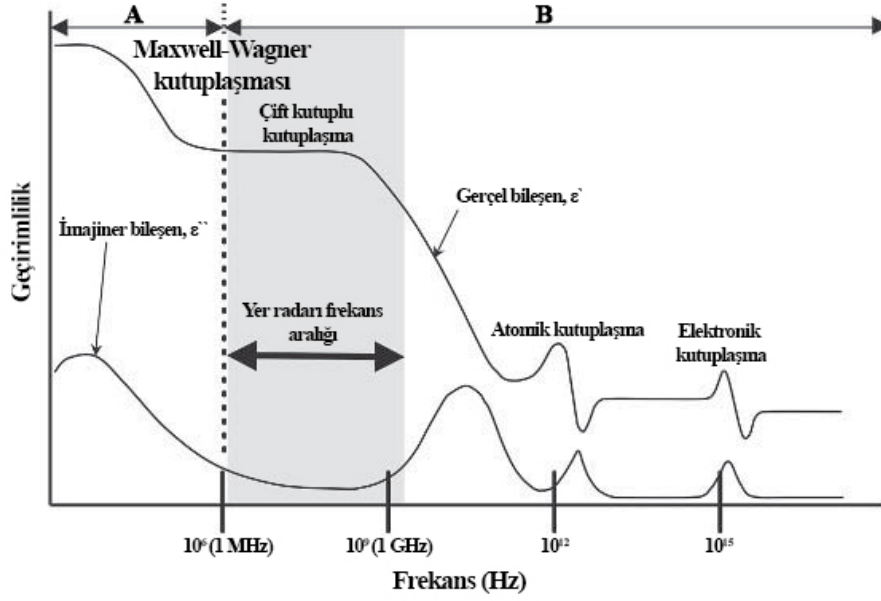
Yeraltı materyallerinin geçirimsizliği önemli ölçüde farklılıklar gösterebilmekte–ve genellikle karmaşık, frekans bağımlı gerçel (depolama) ve imajiner (kayıp) bileşenlere sahip niceliğe sahiptir. Bir materyalin geçirimsizlik değeri genellikle basitleştirilerek kayıp terimi ihmal edilmekte ve statik gerçel bileşeni bir sabite indirgenmektedir. Bu durum radar dalga hızlarının ve dalga boylarının yaklaşık hesaplanması için uygundur. Fakat detaylı bir analiz için oldukça geliştirilmiştir. Tablo 1'de yeraltına ait genel olarak bilinen bazı materyallerin dielektrik katsayısı ve iletkenlik değerleri gösterilmiştir. Bu değerler 100 MHz frekansında elde edilmiştir ve doğal koşullar altındaki tipik aralıklarını temsil etmektedir.

Tablo 1. Bazı yeraltı materyallerininin 100 MHz frekanslı antenle elde edilen iletkenlik ve dielektrik katsayısı tipik değerleri (Conyes ve Goodman, 1997; Reynolds, 1997; Daniels, 2004).

| Materyal | İletkenlik, σ (mS/m) | Dielektrik Katsayısı, ϵ_r |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Hava | 0 | 1 |
| Kil – kuru | 1 – 100 | 2 – 20 |
| Kil – yaş | 100 – 1000 | 15 – 40 |
| Beton – kuru | 1 – 10 | 4 – 10 |
| Beton – yaş | 10 – 100 | 10 – 20 |
| Temiz su | 0.1 – 10 | 78 (25 °C) – 88 |
| Donmuş temiz su | 1 – 0.000001 | 3 |
| Deniz suyu | 4000 | 81 – 88 |
| Donmuş deniz suyu | 10 – 100 | 4 – 8 |
| Kutuplardaki donmuş toprak | 0.1 – 10 | 2 – 8 |
| Granit – kuru | 0.001 – 0.000001 | 5 – 8 |
| Granit – kırıklı ve yaş | 1 – 10 | 5 – 15 |
| Kireçtaşı – kuru | 0.001 – 0.0000001 | 4 – 8 |
| Kireçtaşı – yaş | 10 – 100 | 6 – 15 |
| Kumtaşı – kuru | 0.001–0.0000001 | 4 – 7 |
| Kumtaşı – yaş | 0.01–0.001 | 5 -15 |
| Şeyl – doygun | 10 – 100 | 6 – 9 |
| Kum – kuru | 0.0001 – 1 | 3 – 6 |
| Kum – yaş | 0.1 – 10 | 10 – 30 |
| Kıyı kumu – kuru | 0.01 – 1 | 5 – 10 |
| Kumlu toprak – kuru | 0.1 – 100 | 4 – 6 |
| Kumlu toprak – yaş | 10 – 100 | 15 – 30 |
| Tınlı toprak – kuru | 0.1 – 1 | 4 – 6 |
| Tınlı toprak – yaş | 10 – 100 | 10 – 20 |
| Killi toprak – kuru | 0.1 – 100 | 4 – 6 |
| Killi toprak – yaş | 100 – 1000 | 10 – 15 |
| Toprak – ortalama | 5 | 16 |

Elektromanyetik alan uygulanmadan önce materyal içindeki yükler kutuplaşmamış ve materyal boyunca net yük sıfırdır. Anlık olarak verilen bir elektromanyetik uyarım (puls) durumunda, elektromanyetik dalga yayılarak materyal boyunca ilerlerken, yükler fiziksel olarak yer değiştirmektedir veya diğer bir ifadeyle başlangıç konumlarıyla ilişkili olarak kutuplaşmaktadır. Yük konsantrasyonu hem atomik ölçekte hem de etkiyi dengeleyecek komşu yüklerin bulunmadığı materyalin sınırlarında ortaya çıkacaktır. Verilen uyarımın yükselen sınırlarında enerji, enerji depolama formunda partiküllere aktarılmaktadır ve öteki sınırdaki serbest bırakılmaktadır. Materyaller içinde indüklenen bir dipol moment ve net dipol moment yoğunluğu kutuplaşmış yüklerin karşısında üretilmektedir. Basit materyallerde dipol moment yoğunluğu uygulanan elektrik alanın gücü ile orantılıdır. Elektromanyetik uyarımın destek enerjisi, ivmelenme formunda yükleri birbirinden ayırmaktadır. Böylelikle dairesel olarak yayılan elektromanyetik enerjiyi üreten küçük bir yer değiştirme akımı oluşmaktadır. Dolayısı ile geçirimsizlik parametresi doğrudan elektromanyetik dalganın materyal içerisindeki yayılım hızı ile ilişkilidir.

Eğer ayrılan yükler serbest ve fiziksel olarak etkileşime geçebiliyorsa yer değiştirme ve kutuplaşma işlemleri elektromanyetik dalga enerjisinin bir kısmını partikül etkileşimleri boyunca ısıya çevirmektedir. Bu durum birçok materyalde meydana gelmektedir ve böylece geçirimsizlik genellikle, gerçel kısmı anlık enerji depolama – serbest bırakma mekanizmasını, imajiner kısmı ise enerji yitimini temsil eden karmaşık bir nicelik olarak tanımlanmaktadır. Her iki bileşende tipik olarak frekans bağımlıdır. Serbestlenme frekansının altında partiküller, uygulanan alan ile hızlıca etkileşime geçebilme yeteneğine sahiptirler. Serbestlenme frekansının üstünde ve altına partiküller hızlıca değişen alanlara uyum sağlayamamaktadırlar ve zamanlarının büyük bir kısmını hareket halinde geçirmektedirler. Böylelikle çevreleyen matrikste ısı olarak büyük bir enerji kaybı açığa çıkmaktadır. Bu etken yer radarı için oldukça önemlidir. Çoğu materyalde, genellikle geçirimsizliğin gerçel kısmında bir azalma meydana gelirken imajiner kısımda ise frekans yükseldikçe bir pik artışı gözlenmektedir. Bu pik değerine serbestlenme frekansı adı verilmektedir. Şekil 14’te ideal, kayıplı dielektrik materyalin elektromanyetik spektruma karşı tepkisi gösterilmiştir.



Şekil 14. İdeal, kayıplı dielektrik materyalin geçirimsizlik serbestlenme durumu. A bölgesi, serbest yük ve materyal etkileşimleriyle ilişkili kutuplaşmayı, B bölgesi ise sınırlandırılmış yüklerle ilişkili moleküler ve atomik kutuplaşmayı göstermektedir. (Daniels, 1996' dan değiştirilerek alınmıştır)

Genel olarak geçirimsizlik aşağıda gösterildiği gibi karmaşık olarak ifade edilmektedir.

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' \quad (3.2.15)$$

Burada, ϵ , geçirimsizliği, ϵ' , geçirimsizliğin gerçel bileşenini ve ϵ'' ise geçirimsizliğin sanal bileşenini temsil etmektedir.

Elektromanyetik dalga yayılım denklemlerinde iletkenlik ve dielektrik geçirimsizlik daima birarada bulunmaktadır ve iletken dielektrik bir materyal üzerinde ölçüm alındığında ölçülen değerler görünür geçirimsizlik ve görünür iletkenlik formunda olmaktadır:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon'_e - j\epsilon''_e \quad (3.2.16)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma'_e - j\sigma''_e \quad (3.2.17)$$

Görünür geçirimsizlik ile görünür iletkenlik arasındaki ilişki (3.2.18) ifadesiyle gösterilmiştir.

$$\bar{\sigma} = j\omega\bar{\epsilon} \quad (3.2.18)$$

(3.2.18) ile gösterilen ifadeden yola çıkılarak, efektif iletkenlik ile efektif geçirimsizliğin gerçel kısımlar (3.2.19) ve (3.2.20) bağıntıları ile ifade edilmiştir.

$$\sigma'_e = \sigma' - \omega\varepsilon'' \quad (3.2.19)$$

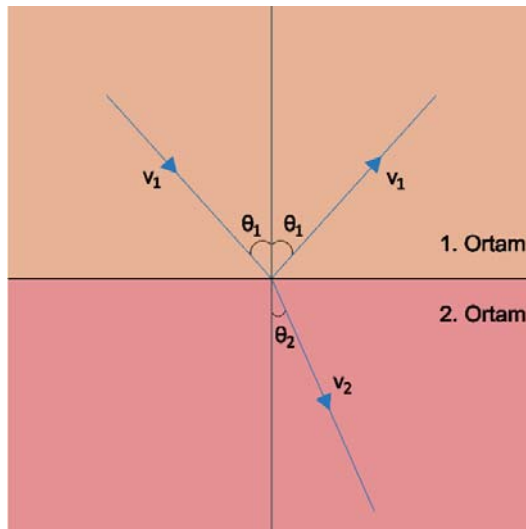
$$\varepsilon'_e = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \quad (3.2.20)$$

(3.2.19) ve (3.2.20) ifadeleri kullanılarak iletkenlik ile geçirimsizlik parametrelerinin gerçel değerleri arasında elde edilen ilişki (3.2.21) ifadesiyle gösterilmiştir (Daniels, 2004).

$$\sigma + j\omega\varepsilon = \sigma'_e - j\omega\varepsilon'_e \quad (3.2.21)$$

3.2.1.4. Elektromanyetik Dalga Enerjisinin Farklı Ortamlarda Yansıması ve İletilmesi

Bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalga, ilerlediği ortamın özelliklerinden farklı bir ortam ile karşılaştığında iki ortam arasındaki süreksizlik yüzeyinden enerjisinin bir kısmı geri yansımaktadır ve kalan kısmı ise diğer ortama aktarılmaktadır. Bu durum Snell kanunu ile açıklanmıştır.



Şekil 15. Snell yasasına göre bir ortamdan diğerine doğru ilerleyen bir elektromanyetik dalganın farklı iki ortam arasındaki süreksizlik ara yüzeyinden geçişi sırasında yansıması ve kırılmasının temsili gösterimi

Şekil 15'te v_1 hızıyla ve θ_1 açısıyla 1. ortamda ilerleyen bir elektromanyetik dalganın iki ortam arasındaki süreksizlik yüzeyinden θ_2 açısı ve v_2 hızıyla 2. ortama geçişi ile bu süreksizlik yüzeyinden aynı açı ile yansımaları gösterilmiştir.

Matematiksel olarak Snell yasası;

$$k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2 \quad (3.2.22)$$

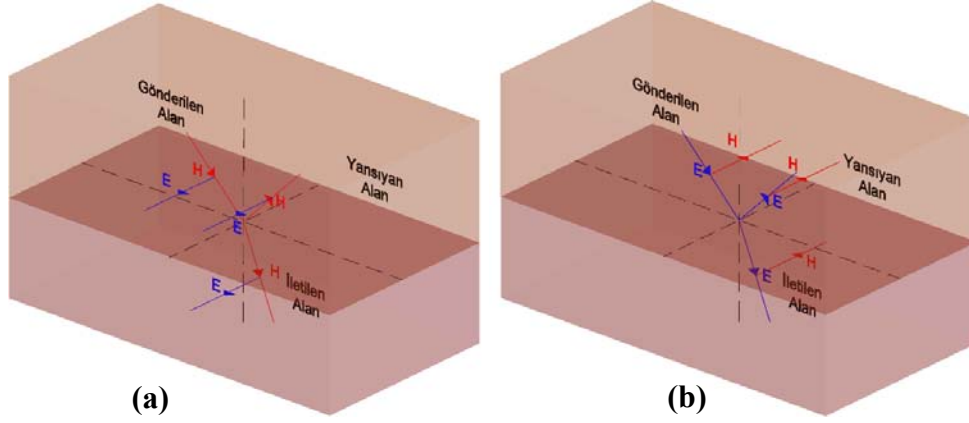
şeklinde yazılmaktadır. Dalga sayısı $k = \omega/v$ 'dir ve (3.2.22) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (3.2.23)$$

Snell yasası daha basit bir görünüme kavuşabilmektedir. Yer radarında 1. ortam, hava ortamıdır ve 2. ortam ise yer veya araştırılan materyaldir. Araştırılan yapıda ikiden fazla farklı ortam mevcut ise (3.2.23) ile gösterilen bağıntı ortam sayısı kadar genişletilebilmektedir.

Farklı ortamlarda ilerleyen bir elektromanyetik dalga yansıdığı ve diğer bir ortama geçtiğinde enerjisinde kayıp meydana gelmektedir ve bu kayıp ölçülen elektrik alanının genliğinde değişimlere neden olmaktadır. İki farklı materyal arasındaki süreksizlik yüzeyinde elektromanyetik alanların genliklerindeki değişimler, elektromanyetik dalgaların düzlemsel arayüzlerdeki yansıma ve kırılmalarını tanımlayan Fresnel yansıma ve iletim katsayıları ile belirlenmektedir.

Düzlemsel dalgalar iki farklı bileşenle tanımlanabilmektedir. Bunlar; enine elektrik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) dalgalarıdır. TE modundaki düzlemsel dalgaların elektrik alan bileşenleri karşılaşılan ara yüzle daima paraleldir. Aynı şekilde TM modundaki düzlemsel dalgalarında manyetik alan bileşenleri karşılaşılan ara yüzle daima paraleldir. Elektromanyetik alanın TE ve TM bileşenlerine ayrıştırılması, yansıma katsayısı R ve iletim katsayısı T parametreleri matematiksel olarak elde edilebilmektedir (Annan, 2003). TE ve TM modundaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri Şekil 16'da temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 16. (a) TE modu, (b) TM modu

TE ve TM modlarında ki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin yansıma ve iletim katsayıları alanların farklı davranışından dolayı matematiksel formları da birbirinden farklılık göstermektedir. Aşağıda TE ve TM modlarına ait yansıma ve iletim katsayılarının birbiri ile ilişkisi verilmiştir.

$$I_{TE} + R_{TE}I_{TE} = T_{TE}I_{TE} \quad (3.2.24)$$

$$I_{TM} + R_{TM}I_{TM} = T_{TM}I_{TM} \quad (3.2.25)$$

Yukarıda gösterilen ifade de R, yansıma, T, iletim katsayısını ve I_{TE} , elektrik alan gücünü ve I_{TM} , manyetik alan gücünü temsil etmektedir.

R ve I arasında ki matematiksel bağıntı iki temel nedene dayanmaktadır. Birincisi Snell yasasının uygulanabilirliği, ikincisi ise iki ortam arasındaki ara yüzey düzleminde elektrik ve manyetik alanların fiziksel davranışları ile elektrik akımı ve manyetik akı yoğunluğunun sınırın her iki tarafında da aynı olmasını gerektirmektedir. Bu koşullar sağlandığında TE ve TM modlarına ait yansıma ve iletim katsayıları aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cos \theta_1 - Y_2 \cos \theta_2}{Y_1 \cos \theta_1 + Y_2 \cos \theta_2} \quad (3.2.26)$$

$$R_{TM} = \frac{Z_1 \cos \theta_1 - Z_2 \cos \theta_2}{Z_1 \cos \theta_1 + Z_2 \cos \theta_2} \quad (3.2.27)$$

$$T_{TE} = 1 + R_{TE} = \frac{2Y_1 \cos \theta_1}{Y_1 \cos \theta_1 + Y_2 \cos \theta_2} \quad (3.2.28)$$

$$T_{TM} = 1 + R_{TM} = \frac{2Z_1 \cos \theta_1}{Z_1 \cos \theta_1 + Z_2 \cos \theta_2} \quad (3.2.29)$$

Ayrıca TE modunda manyetik ve elektrik alanlar ile TM modunda manyetik ve elektrik alanlar arasında da bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkiler de 3.2.30-33 ifadelerinde verilmiştir (Annan, 2003). 3.2.26-29 ifadelerinde Y, admitans ve Z, empedansı ifade etmektedir.

$$R_{TE}^E = -R_{TE}^H \quad (3.2.30)$$

$$R_{TM}^E = -R_{TM}^H \quad (3.2.31)$$

$$T_{TE}^E = \frac{Y_1}{Y_2} T_{TE}^H \quad (3.2.32)$$

$$T_{TE}^E = \frac{Y_1}{Y_2} T_{TE}^H, \quad Y \cdot Z = 1 \quad (3.2.33)$$

Bir ortamın gerçek empedans değeri ise, ortamın elektrik ve manyetik alanlarının oranına ya da başka bir ifadeyle manyetik geçirgenlik ile elektrik geçirimsizlik arasındaki orana eşittir. Aşağıda gerçek empedans bağıntısının matematiksel formu gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.2.34)$$

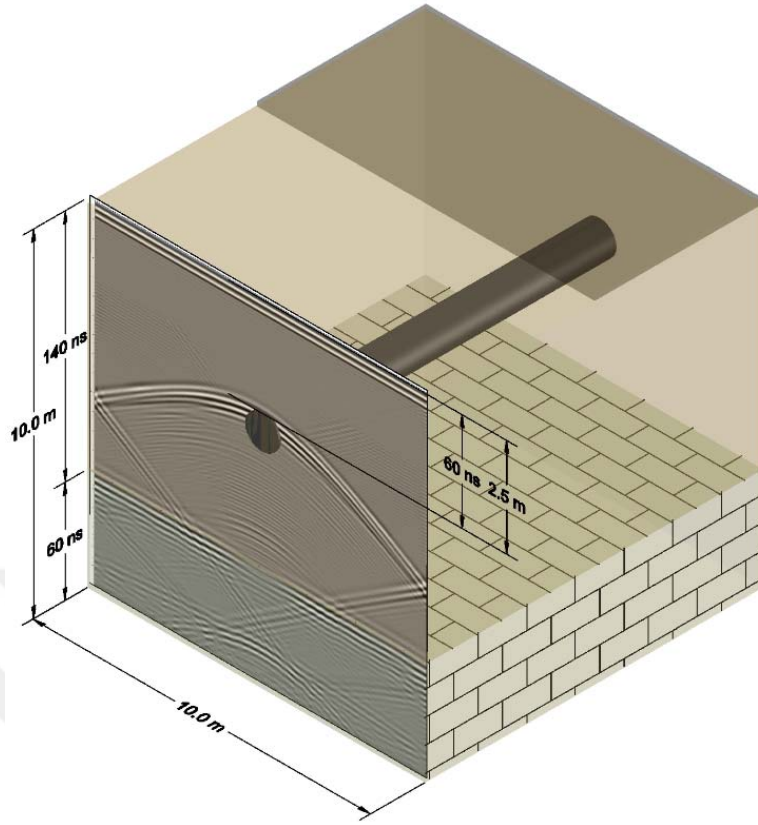
Bir ortamın empedansı o ortamın yansıtabilirliği ve iletibilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısı ile yansıma ve iletim katsayıları için ortamların empedans değeri aşağıda gösterildiği gibi kullanılabilir (Balanis, 1989).

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.2.35)$$

$$T = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_2} \quad (3.2.36)$$

3.2.1.5. Elektromanyetik Dalgaların Hızı ve Yer Radarı İçin Önemi

Bir elektromanyetik dalga, içinden geçtiği materyalin özelliklerine bağlı olarak belirli bir hızda ilerlemektedir. Yer radarında Şekil 2' de gösterildiği gibi ortak ofset ölçü tekniği kullanılarak ölçüm gerçekleştirildiği sırada yer radarının verici anteninden gönderilen elektromanyetik sinyal, yer altında ilerlerken geçtiği her bir tabakada o tabakanın elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak ilerlemektedir ve her bir tabaka ara yüzeyinde enerjisinin bir kısmını sonraki tabakaya ileterek diğer kısmını geri yansıtmaktadır. Böylece verici antenden gönderilen ve alıcı antende kaydedilen elektromanyetik dalga arasında kaydedilen süreye çift yol seyahat zamanı adı verilmektedir. Elektromanyetik dalga çok yüksek hızlarda ilerlediği için bu süre nanosaniyeler mertebesinde. Yer radarı ile yeraltı araştırılması yapıldığında araştırılan zeminin altında insan yapımı gömülü bir nesne, boşluk vb. unsurlar bulunduğu durumda ortamda ilerleyen elektromanyetik dalga enerjisi bu farklı yapılara çarptığında saçılmalara uğramaktadır ve bu saçılımlar hiperbol şeklinde radargramlar üzerinde görülmektedir. Şekil 17'de içinde silindirik bir boşluğun bulunduğu ortamın radargram üzerinde oluşturduğu hiperbolik saçılım görüntüsü temsili olarak modellenerek gösterilmiştir.



Şekil 17. Silindirik bir boşluğun radargram üzerinde oluşturduğu hiperbolik saçılım

Şekil 17’de 10 m uzunluğunda ve 10 m derinliğindeki yer modelinin ilk tabakası toprak, ikinci tabakası kireçtaşı ve 2.5 m derinliğinde silindirik bir boşluk ortamı modellenmiştir. Toprak tabakası için, iletkenlik, $\sigma = 5 \text{ mS/m}$, dielektrik katsayısı, $\epsilon_r = 16$, kireçtaşı tabakası için, $\sigma = 0.001 \text{ mS/m}$, dielektrik katsayısı, $\epsilon_r = 4$ ve silindirik boşluk için, $\sigma = 0 \text{ mS/m}$, dielektrik katsayısı, $\epsilon_r = 1$ değerleri Tablo 1’ de gösterilen değerler kullanılmıştır. Manyetik geçirgenlik için ise Patitz vd. ‘nin çeşitli yer altı materyalleri için manyetik geçirgenlik analizleri sonucu boşluk, kireçtaşı ve toprak için $\mu_r = 1$ değeri kullanılmıştır. Radargram modellemesi için yer radarı anten frekansı 250 MHz seçilmiş olup, uzaklık örnekleme aralığı $\Delta x = 0.01 \text{ m}$, ve zaman örnekleme aralığı $\Delta t = 0.01 \text{ ns}$ olarak seçilmiştir.

Yer radarı yönteminde bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın hızını hesaplamak için genel olarak hiperbol çakıştırma tekniği, ortak derinlik noktası ve geniş açılı yansıma kırılma ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Hiperbol çakıştırma tekniği kullanılırken ortamdaki geçen elektromanyetik dalganın çift yol seyahat zamanı bilgisine ihtiyaç vardır.

Tek tabakalı bir ortam için çift yol seyahat zamanı (3.2.37) ifadesi kullanılarak elde edilebilmektedir.

$$t^2(x) = \frac{x^2}{v^2} + t^2(0) \quad (3.2.37)$$

Burada x , kaynak ile alıcı arasındaki uzaklığı, t , çift yol seyahat zamanını v , ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın hızını ve $t(0)$, gömülü materyale dik olarak ilerleyen elektromanyetik dalganın çift yol seyahat zamanını göstermektedir:

$$t(0) = \frac{2d}{v} \quad (3.2.38)$$

(3.2.38) ifadesinde d , belirti veren gömülü materyalin derinliğini temsil etmektedir (Annan, 2003).

Ortak derinlik noktası ölçüm tekniği ile bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın hızını bulmak için ise; İlk olarak seçilen profil üzerinde Şekil 6'da gösterildiği gibi ölçümler alınmaktadır ve bu ölçümler neticesinde yansıyan tabakalara hiperbolik eğriler çakıştırılarak ortamın hızı belirlenmektedir. Bu işlem için kök ortalama kare hızlarından (RMS) faydalanılmaktadır. Kök ortalama kare hız bağıntısı (3.2.39) ifadesiyle verilmiştir.

$$V_N^2 = \sum_{i=1}^N \Delta t_i \frac{v_i^2}{\Delta t} \quad (3.2.39)$$

Burada V_N , N tabakalı ortam için kök ortalama kare hızını, v_i , i . tabakadaki elektromanyetik dalganın hızını, Δt_i , i . tabakada ki düşey tek yol seyahat zamanını ve Δt toplam düşey tek yol seyahat zamanını ifade etmektedir. Kök ortalama kare hızlar belirlendikten sonra ise her bir tabakanın gerçek hızını hesaplamak için DIX ara hız denklemleri kullanılmaktadır. İki tabaka arasında DIX ara hız denklemi (3.2.40) ifadesiyle gösterilmiştir (Tillard ve Dubois, 1995).

$$V_{DIX}^2 = \frac{v_n^2 \Delta t_n - v_{n-1}^2 \Delta t_{n-1}}{\Delta t_n - \Delta t_{n-1}} \quad (3.2.40)$$

4. YER RADARI MODELLEMESİ

Heterojen yer altının farklı elektromanyetik özelliklere sahip olması ve değişen oranlardaki su içeriği, ortamın iletkenliğini artırdığı için yer altını oldukça karmaşık bir yapıya büründürmektedir. Dolayısı ile bu durum, elektromanyetik dalgaların penetrasyon derinliğini azalttığı için yer radarı verilerinin yorumlanmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca geniş alan ölçümleri, ekonomik, erişilebilirlik ve uygunluk gibi nedenlerden dolayı gerçekleştirilmesi büyük zorluklar çıkarabilmektedir. Bu gibi nedenler yer radarı modellemesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca yer radarı modellemesi ile istenilen sayıda ortam ve koşullar oluşturularak sayısal deneyler yapılarak elektromanyetik dalganın yayılımının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Yer radarının sayısal modellemesi, yaklaşık 20 yılı aşkın aktif bir araştırma sahasıdır. İlk zamanlarda yer radarı modellemeleri hesaplama kaynağı kısıtlamalarından kaynaklı olarak gerçek alan ölçekli problemleri karşılayamamıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayarların hesaplama gücündeki hızlı artış yer radarı modellenmesi üzerine yapılan çalışmalara oldukça faydalı olmuştur. Günümüzde yer radarı modelleri çok daha gelişmiş olup, yeraltını daha gerçekçi bir şekilde yansıtabilmektedir (Giannopoulos, 2011).

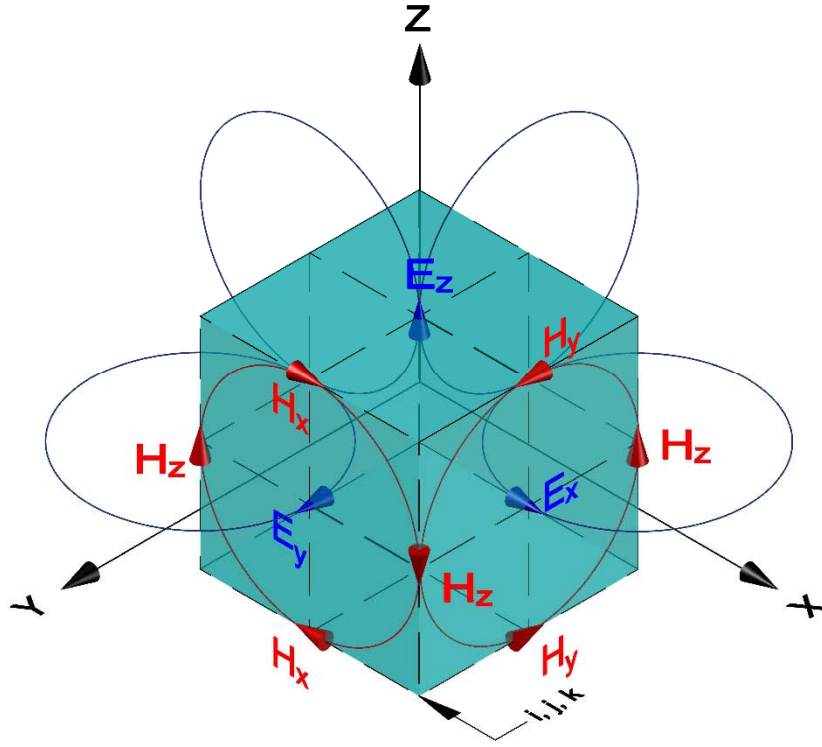
Bütün bu gelişmelere rağmen oldukça yer altı modelleme çalışmalarında oldukça yüksek bilgisayar gücüne ihtiyaç duyulmakla birlikte yüksek çözünürlükte modelleme çalışmaları uzun çok uzun süreler gerekmektedir.

Elektromanyetik dalganın yayılımını modellemek için birkaç teknik geliştirilmiştir. Bunlar; Zaman ortamı sonlu hacim (Finite volume time domain) tekniği, frekans ortamı sonlu farklar (finite difference frequency domain) tekniği, sonlu elemanlar (finite elements) tekniği, momentler tekniği (method of moments) ve yer radarı modellemesi için en yaygın olarak kullanılan zaman ortamı sonlu farklar (finite difference time domain, FDTD) tekniğidir.

FDTD tekniği, gelişmiş modelleme araçları içerisinde karmaşık ortamları modellemek için zamanla en yaygın olarak kullanılan yöntem haline gelmiştir (Taflove ve Hagness, 2005). FDTD yöntemi sayesinde karmaşık yer altı özellikleri diğer yöntemlere göre çok daha yüksek doğrulukta modellenebilmektedir. Ayrıca yöntemin uygulanabilirliği diğerlerine göre kolaydır, etkili ve dengelidir. Yaygın bir şekilde kullanılmasından dolayı daha olgun ve iyi gelişmiştir (Giannopoulos, 2005).

4.1. Zaman Ortamı Sonlu Farklar (FDTD) Yöntemi

Kane S. Yee (1966), Maxwell denklemlerini uzay-zaman boyutunda çözmek amacıyla bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma, elektromanyetik dalganın içerisinde ilerleyeceği ortamı belirli koşullar altında konuma ve zamana göre küçük hücelere ayırarak elektrik ve manyetik alanların davranışını modellemektedir. Bu küçük hücelere, Kane S. Yee'ye atıfta bulunarak Yee hücreleri adı verilmektedir. Uzay zaman içerisinde elektrik ve manyetik alanların kartezyen koordinatlarda konumlarını ifade eden bir Yee hücresi Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Elektrik ve manyetik alanları kartezyen koordinatlarla gösteren bir Yee hücresi (Yee, 1966' dan değiştirilerek alınmıştır).

Şekil 18'de E_x , E_y , E_z , üç boyutlu uzayda elektrik alan bileşenlerini ve H_x , H_y , H_z , üç boyutlu uzayda manyetik alan bileşenlerini göstermektedir. Bu bileşenlerin konumları ise i , j ve k vektörleri tarafından kontrol edilmektedir.

FDTD yönteminde diferansiyel formda ki Maxwell denklem takımları, Taylor serisinin açılımıyla elde edilen sonlu farklar yöntemiyle zamanın fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

4.1.1. Sonlu Farklar Yöntemi ile Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümü

Diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözebilmek amacıyla Taylor serisinden faydalanılarak sonlu farklar yöntemi geliştirilmiştir. Taylor serisinin genel bağıntısı:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad (4.1.1)$$

şeklinde verilmiştir.

$x = x_0 + \Delta x$ olsun. Böylece $\Delta x = x - x_0$ olur. Bu düzeltmeleri yukarıda gösterilen seriye uygulanırsa,

$$f(x_0 + \Delta x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (\Delta x)^n \quad (4.1.2)$$

ifadesi elde edilir. Toplam sembolü açılırsa,

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} \Delta x + \frac{f''(x_0)}{2!} \Delta x^2 + H(\Delta x^3) \quad (4.1.3)$$

bağıntısı elde edilir. Burada $H(\Delta x^3)$ terimi, hata değerini temsil etmektedir ve $\Delta x < 1$ olduğu durumlar için Δx ' in diğer bütün dereceleri bir önceki değerinden küçük olacaktır. Dolayısı ile hata terimi kullanılan son terimden sonraki ifadenin derecesi ile temsil edilebilmektedir.

Bir f fonksiyonunun türevi (4.1.4) ifadesinde belirtildiği gibi formülize edilmiştir.

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (4.1.4)$$

Çok küçük Δx değerleri için fonksiyonun türevi pratik uygulamalar için (4.1.5) ifadesinde gösterildiği gibi kullanılabilir.

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (4.1.5)$$

(4.1.3) bağıntısı ile verilen Taylor serisinde $f'(x_0)$ ifadesi çekilirse yukarıdaki bağıntı hata terimi ile birlikte elde edilebilmektedir. Birinci dereceden türev hesaplamaları için (4.1.3) bağıntısında ki ikinci dereceden oluşan terim de hata terimine dahil edilirse, (4.1.6) ile verilen ifadeye ulaşılmaktadır.

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + H(\Delta x) \quad (4.1.6)$$

Pratik uygulamalar için yukarıda gösterilen $H(\Delta x)$ terimi ihmal edilebilmektedir ve bu ifadeye birinci dereceden ileri farklar formülü adı verilmektedir.

Benzer şekilde, x 'in $x_0 - \Delta x$ ' de ki değeri için hesaplama yapılacak olursa (4.1.6) ifadesi (4.1.7) ile gösterilen ifadeye dönüşmektedir.

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + H(\Delta x) \quad (4.1.7)$$

Elde edilen bu ifadeye ise birinci dereceden geri farklar denilmektedir.

(4.1.6) ve (4.1.7) bağıntılarında verilen $f(x_0 + \Delta x)$ ve $f(x_0 - \Delta x)$ ifadeleri çekilerek Taylor serisi genişletilirse,

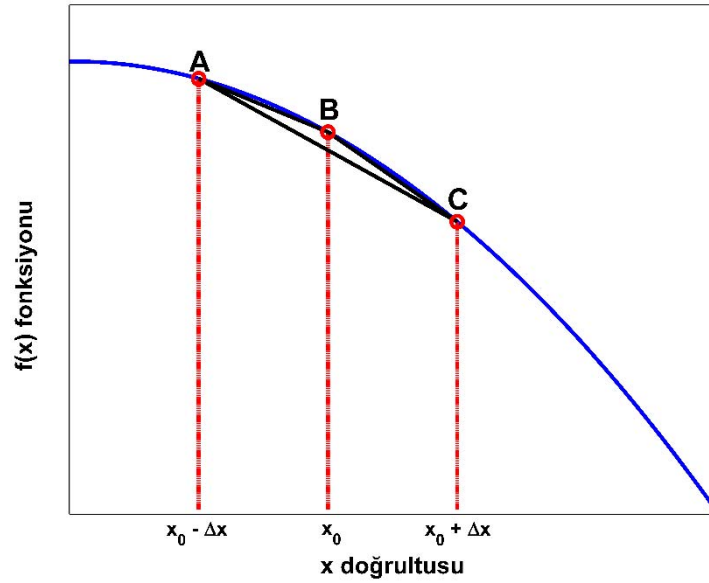
$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + f'(x_0)\Delta x + \frac{1}{2}f''(x_0)\Delta x^2 + \frac{1}{6}f^{(3)}(x_0)\Delta x^3 + E(\Delta x^4) \quad (4.1.8)$$

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - f'(x_0)\Delta x + \frac{1}{2}f''(x_0)\Delta x^2 - \frac{1}{6}f^{(3)}(x_0)\Delta x^3 + E(\Delta x^4) \quad (4.1.9)$$

ifadeleri elde edilmektedir. Bu ifadeler taraf tarafa çıkarılırsa ve $f'(x_0)$ terimi çekilirse (4.1.10) ifadesi elde edilecektir.

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} + \frac{f^{(3)}(x_0)}{3} \Delta x^3 + E(\Delta x^4) \quad (4.1.10)$$

Elde edilen bu ifadeye birinci dereceden merkezi farklar formülü adı verilmektedir ve işlem kolaylığı açısından sonlu farklar çözümleri yapılırken çoğunlukla bu bağıntı kullanılmaktadır. İleri, geri ve merkezi sonlu farkların bir eğri üzerindeki çözümü Şekil 19'da gösterilmiştir. Burada gösterilen x_0 , $x_0 + \Delta x$ ile $x_0 - \Delta x$ konumlarının merkezi farklar çözümü ile hesaplanan türevidir.



Şekil 19. İleri, geri ve merkezi sonlu fark yöntemi ile bir eğri üzerindeki noktaların hesaplanması.

4.1.2. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü

FDTD yöntemini iyi bir şekilde anlamak için Maxwell denklemlerinin üç boyutlu kartezyen koordinatlarda ki matematiksel davranışını iyi anlamak gerekmektedir.

(3.1.8) ve (3.1.15) ile verilen denklemler, elektrik ve manyetik alanlar için (3.1.9)' da verilen ifadelerle düzenlenirse,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.1.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.1.12)$$

ifadeleri elde edilir. Bu denklem takımları çözülürken ortamın doğrusal, izotropik, dispersif olmayan bir ortam olduğu kabul edilmiştir (Sadıku, 2001).

Bir vektörün rotasyoneli (3.1.6) denkleminde verilmiştir. Bu denklemin (4.1.11) ve (4.1.12) ifadeleri için determinant çözümü yapılırsa üç boyutlu uzaydaki ifadeleri (4.1.13-18) bağıntılarında gösterildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} \right) \quad (4.1.13)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} \right) \quad (4.1.14)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} \right) \quad (4.1.15)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} - \sigma \vec{E}_x \right) \quad (4.1.16)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} - \sigma \vec{E}_y \right) \quad (4.1.17)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} - \sigma \vec{E}_z \right) \quad (4.1.18)$$

Üç boyutlu kartezyen koordinatlarda Yee' nin notasyonu göz önüne alınırsa çözüm alanı için Şekil 18'de gösterildiği gibi i, j ve k' dan oluşan bir grid noktası (4.1.19) ifadesiyle gösterildiği gibi tanımlanabilmektedir.

$$(i, j, k) \equiv (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (4.1.19)$$

Burada Δx , Δy ve Δz örnekleme aralığı olarak kabul edilirse yukarıdaki ifade çözüm alanının büyüklüğünü temsil edecektir.

Ayrıca uzay ve zamana göre herhangi bir fonksiyon (4.1.20) bağıntısındaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$F^n(i, j, k) \equiv F(i\delta, j\delta, k\delta, n\Delta t) \quad (4.1.20)$$

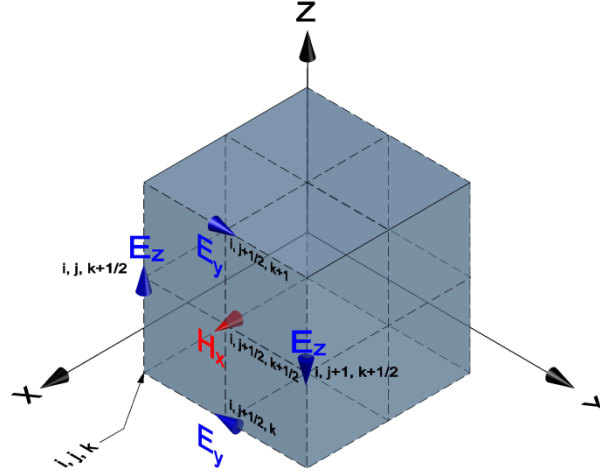
Burada i, j, k ve n bir tamsayı olmak üzere, $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$, uzay örnekleme aralığıdır ve Δt ise zaman örnekleme aralığıdır. İkinci dereceden doğrulukla uzay ve zaman türevleri için merkezi farklar yaklaşımı kullanılarak (4.1.20) ile gösterilen fonksiyon (4.1.21-22) bağıntılarıyla gösterildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\partial F^n_{(i,j,k)}}{\partial x} = \frac{F^n_{(i+\frac{1}{2},j,k)} - F^n_{(i-\frac{1}{2},j,k)}}{\delta} + E(\delta^2) \quad (4.1.21)$$

$$\frac{\partial F^n_{(i,j,k)}}{\partial t} = \frac{F^{n+\frac{1}{2}}_{(i,j,k)} - F^{n-\frac{1}{2}}_{(i,j,k)}}{\Delta t} + E(\Delta t^2) \quad (4.1.22)$$

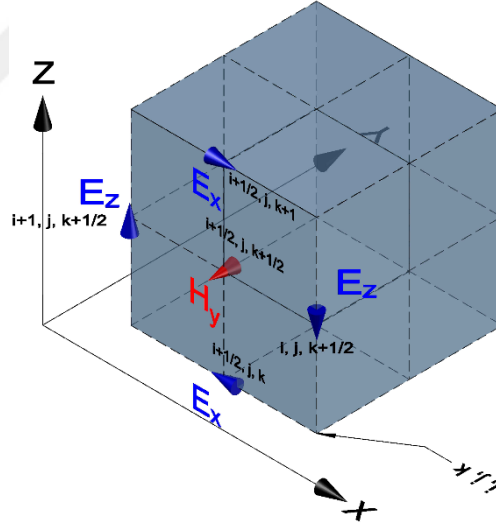
Elektrik ve manyetik alanlar için (4.1.13-18) arasında verilen ifadeler (4.1.21) denkleminde uyarlanırsa bir Yee hücresi içerisindeki konumları her bir bileşen için belirlenebilir. Boyutu 1 birim olan bir Yee hücresi için bu bileşenler yazılacak olursa (4.1.23-28) bağıntıları elde edilecektir. (4.1.22) ifadesinden de anlaşılacağı üzere E ve H alanları yarımşar zaman adımlarında ilerleyecektir.

$$H_x^{n+\frac{1}{2}} \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} = H_x^{n-\frac{1}{2}} \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left[\begin{array}{l} E_y^n \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+1} - E_y^n \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k} \\ + E_z^n \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}} - E_z^n \Big|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}} \end{array} \right] \quad (4.1.23)$$



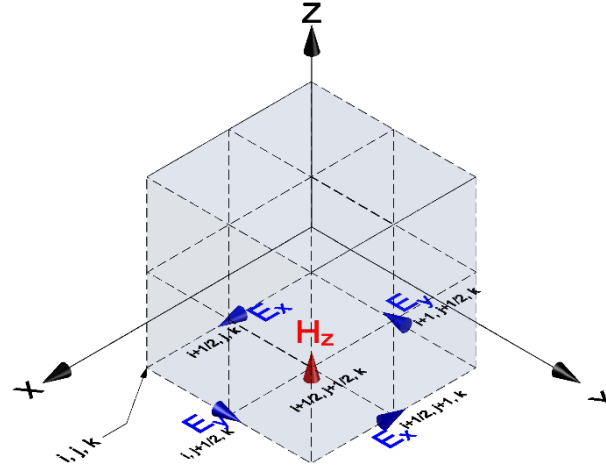
Şekil 20. (4.1.23) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

$$H_y^{n+\frac{1}{2}} \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} = H_y^{n-\frac{1}{2}} \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \Delta y} \left[E_z^n \Big|_{i+1,j,k+\frac{1}{2}} - E_z^n \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}} + E_x^n \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} - E_x^n \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+1} \right] \quad (4.1.24)$$



Şekil 21. (4.1.24) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

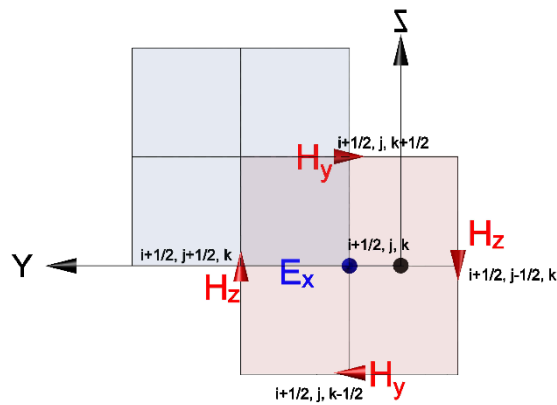
$$H_z^{n+\frac{1}{2}} \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} = H_z^{n-\frac{1}{2}} \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} + \frac{\Delta t}{\mu \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \Delta z} \left[E_x^n \Big|_{i+\frac{1}{2},j+1,k} - E_x^n \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} + E_y^n \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k} - E_y^n \Big|_{i+1,j+\frac{1}{2},k} \right] \quad (4.1.25)$$



Şekil 22. (4.1.25) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

$$E_x^{n+1}|_{i+\frac{1}{2},j,k} = \left(1 - \frac{\sigma|_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta t}{\epsilon|_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) E_x^n|_{i+\frac{1}{2},j,k} + \quad (4.1.26)$$

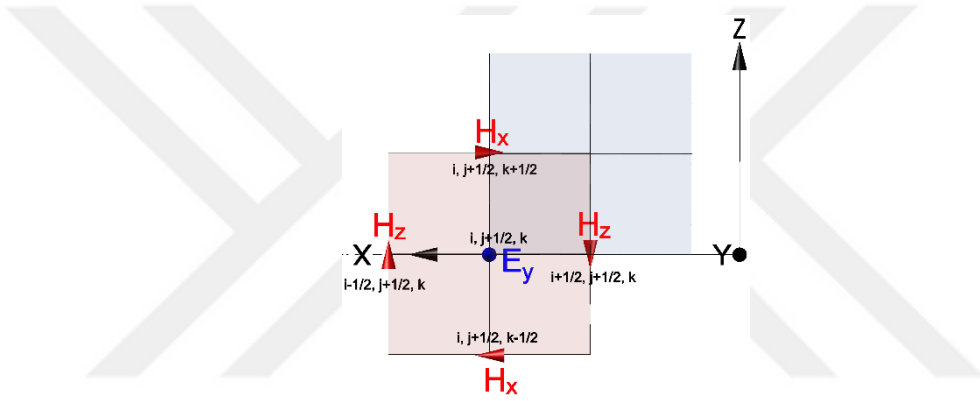
$$\frac{\Delta t}{\epsilon|_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta x} \begin{bmatrix} H_z^{n+\frac{1}{2}}|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} & -H_z^{n+\frac{1}{2}}|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \\ +H_y^{n+\frac{1}{2}}|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} & -H_y^{n+\frac{1}{2}}|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$



Şekil 23. (4.1.26) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

$$E_y^{n+1}\Big|_{i,j+\frac{1}{2},k} = \left(1 - \frac{\sigma|_{i,j+\frac{1}{2},k}\Delta t}{\varepsilon|_{i,j+\frac{1}{2},k}}\right)E_y^n\Big|_{i,j+\frac{1}{2},k} + \quad (4.1.27)$$

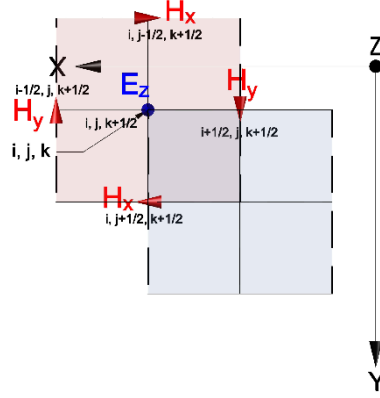
$$\frac{\Delta t}{\varepsilon|_{i,j+\frac{1}{2},k}\Delta y} \left[\begin{array}{cc} H_x^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} & - H_x^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}} \\ + H_z^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} & - H_z^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \end{array} \right]$$



Şekil 24. (4.1.27) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

$$E_z^{n+1}\Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{\sigma|_{i,j,k+\frac{1}{2}}\Delta t}{\varepsilon|_{i,j,k+\frac{1}{2}}}\right)E_z^n\Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}} + \quad (4.1.28)$$

$$\frac{\Delta t}{\varepsilon|_{i,j,k+\frac{1}{2}}\Delta z} \left[\begin{array}{cc} H_y^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} & - H_y^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \\ + H_x^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} & - H_x^{n+\frac{1}{2}}\Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \end{array} \right]$$



Şekil 25. (4.1.28) denklemi ile gösterilen manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin Yee hücresi üzerindeki konumları

(4.1.23-28) ifadeleri ile verilen bu denklemler genel ifadeler olup, bir boyutta, iki boyutta ve üç boyutta simülasyonlar hazırlayabilmek için her boyuta uyarlanabilmektedir. Zaman penceresi $n\Delta t$, hazırlanan model içinde elektromanyetik dalganın en uzaktaki sınıra ulaşabilmesi için kat edeceği zamana büyük veya eşit olarak seçilmesi gerekmektedir. Zaman örnekleme aralığı ise x,y ve z yönlerinde seçilecek olan örnekleme aralığı ise verilen kaynağın frekansına ve ortamın dielektrik geçirimsizliğine bağlı olarak en kısa dalga boyundan en az on kat daha küçük olarak seçilmesi gerekmektedir. Başka bir ifadeyle model içerisinde yer alan en yüksek dielektrik geçirimsizliğe sahip olan ortamda ki dalga boyundan en az on kat daha küçük seçilmelidir. Bütün bunlara bağlı olarak zaman örnekleme aralığı ise Courant-Friedrich-Lewy kararlılık koşuluna bağlı olarak seçilmektedir (Sadıku, 2001). (4.1.29) ifadesiyle bu koşul matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (4.1.29)$$

4.1.3. FDTD Modellemesinde Elektromanyetik Dalga Kaynağı Oluşturulması

Maxwell denklemlerinin modellenen bir ortam içerisinde sonlu farklar yaklaşımıyla çözümü 4.1.2 başlığı altında verilmiştir. Böyle bir ortamda elektromanyetik dalganın var olabilmesi ve yayılabilmesi için ortamda elektromanyetik dalga üretecek bir kaynağın bulunması gerekmektedir.

İstenilen zamanın bir fonksiyonu olarak elektrik alan veya manyetik alan bileşenleri üzerinde kabaca bir kaynak tanımlaması yapılabilmektedir. Kaynak için seçilen zaman fonksiyonu model içindeki her şeyden bağımsızdır. Yani bir boyutlu, x yönlü bir Yee hücresinde (4.1.30) ifadesiyle gösterilen E_z kaynağı model içerisindeki herhangi bir i_s noktasından frekansı f_0 olan sürekli sinüsoidal dalga;

$$E_z|_{i_s}^n = E_0 \sin(2\pi f_0 n \Delta t) \quad (4.1.30)$$

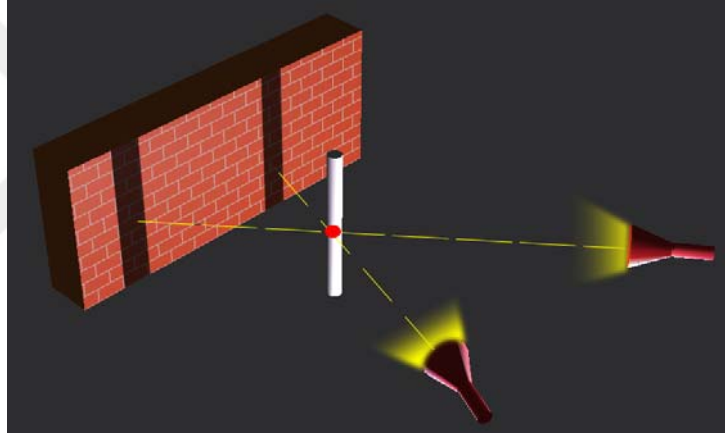
şeklinde üretilebilmektedir (Taflove ve Hagness, 2005). Yer radarı modellemeleri için düzlemsel dalga üreten kaynaklar tercih edilmektedir. Çünkü düzlemsel dalgaların düzlemsel dalga cepheleri yayılma yönüne diktir ve yayılma yönü, kutuplaşması ve süresi kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Bu yaklaşımda elektrik ve manyetik alan bileşen konumlarında başlangıç koşulları eklenmektedir. Yani $E_x|_0^0$, $E_y|_0^0$, $E_z|_0^0$, $H_x|_0^{\frac{1}{2}}$, $H_y|_0^{\frac{1}{2}}$ ve $H_z|_0^{\frac{1}{2}}$ değerleri modeli oluşturan kişi tarafından simülasyon öncesinde atanmalıdır. Her başlangıç bileşeninin işareti ve büyüklüğü, arzu edilen dalga kutuplaşmasını ve yayılma yönünü belirlemektedir (Taflove ve Hagness, 2005).

Günümüzde bu alandaki ihtiyaçları gidermek amacıyla çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Yer radarı modellemesi için en yaygın olarak açık kaynak kodlu ve Python tabanlı Gprmax yazılımı (Giannopoulos ve Warren, 2020) ile ReflexW yazılımı (Sandmeier, 2019) kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında ise modelleme tabanlı çalışmalarda ReflexW programı kullanılmıştır.

5. TOMOGRAFİ

Tomografi kelimesi eski Yunanca'da dilim anlamına gelen “*Tomos*” ve çizim anlamına gelen “*Graphos*” kelimelerinden türetilmiştir. Tomografi tekniğinin tıp biliminde gelişimi, jeofizik bilimde de tomografi algoritmalarının geliştirilmesine büyük katkı sağlamıştır.

Şekil 26'da kırmızı nokta ile gösterilen bir direğin yerini belirlemek için tomografi kullanımının temel prensibi gösterilmiştir. Direğe tutulan bir ışık kaynağı duvar üzerinde gölge oluşturmaktadır. Bu ışık kaynağı farklı bir açıdan direğe tutulduğunda duvara düşen gölgenin de yeri değişmektedir. Işık kaynağından gölgelerin bulunduğu yere çizilen hayali doğruların kesişim noktası direğin yerini gösterecektir (Lehmann, 2007).



Şekil 26. Direğe tutulan ışık kaynağının bir duvar üzerinde oluşturduğu gölgelerin gözlenmesi ile direğin yerinin tespit edilmesi (Lehmann, 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Tomografi tekniği, jeofizik verilerin değerlendirilmesinde ve görüntülenmesinde yüksek çözünürlüklü sonuçlar ortaya koyan bir yaklaşım olarak son yıllarda literatürde yer almaktadır (Lehmann, 2007). İncelenen ortamın yüksek çözünürlüklü görüntülenmesine yönelik olarak, doğrusal veya eğrisel ışın yollarının kabulüyle gerçekleştirilen tomografik görüntülemedeki gelişmeler ve ilerlemeler; seyahat zamanı tomografisi, genlik tomografisi gibi önemli yaklaşımlar ortaya çıkarmıştır. Araştırılan ortamı daha iyi anlayabilmek ve yorumlayabilmek için, Jeofizik görüntüleme ekipmanlarındaki gelişmeler, güncel bilgisayar tabanlı görüntüleme, işleme ve analiz yöntemlerinin de gelişmesine sebep olmuştur.

Tomografinin Tarihçesi

Radon (1917), ölçülen toplamlar veya iz düşümler kümesi ile nesneye ait parametrelerin hesaplanabileceğini göstermiştir.

Tomografinin tarihsel süreç içerisindeki gelişimi aşağıda sıralanmıştır.

- 1917 – Ters Radon dönüşümü (Radon, 1917)
- 1956 – Astronomik parlaklık görüntülemesi (Bracewell, 1956)
- 1968 – 3B elektron mikroskopu (DeRosier ve Klug, 1968)
- 1972 – İlk ticari X-Ray Computational Tomography (CT) tarayıcısı (Hounsfield, 1972)
- 1972 – İlk sismik tomografi çalışmaları (Bois vd., 1972)
- 1973 – İlk nükleer manyetik rezonans (NMR) tomogramı (Lauterbur, 1973)
- 1977 – Dünya için ilk 3B yapılarının görüntülenmesi (Dziewonski, Hager ve O'Connell, 1977)
- 1979 – CT için tıpta Nobel ödülü (Hounsfield ve Cormack, 1979)
- 1979 – Yeraltının görüntüsünü belirlemek için sondaj kuyuları arasında interaktif iz takibini içeren bilgisayarlı jeofizik tomografinin temelleri oluşturulmuştur (Dines ve Lytle, 1979)
- 1981 – Tomografi kullanılarak kömür damarı hız görüntülemesi (Mason, 1981)
- 1984 – Bütün dünyanın sismik tomografisi (Anderson ve Dziewonski, 1984)
- 1984 – Sismik arama tomografisi (Worthington, 1984)
- 1985 – Yansıma tomografisi (Bishop vd., 1985)
- 1991 – Emisyon tomografisi (Albrecht, 1991)
- 1995 – Sondaj esnasında sismik kullanılarak tomografik görüntüleme (Aleotti vd., 1995)
- 1997 – Değişken grid boyutlarının geliştirilmesi (Boehm, Rossi ve Vesnaver, 1997)
- 1998 – Nonlineer kırılma seyahat zamanı tomografisi (Zhang ve Toksöz, 1998)
- 2002 – Enine izotropik ortam için çok bileşenli yığıma-hız tomografisi (Grechka, Pech ve Tsvankin, 2002)
- 2003 – Birleştirilmiş sismik yansıma ve kırılma seyahat zamanı verisinin 3B tomografik ters çözümü (Hobro, Singh ve Minshull, 2003)
- 2012 – Betonarme yapılarda hacimsel su içeriğini kestirmek için GPR tomografi uygulaması (Leucci, 2012).

- 2012 – GPR tomografi ve yansımaları kullanılarak toprak nemliliğinin görüntülenmesi (El-Behiry ve Hanafy, 2012)
- 2016 – Karşılıklı kuyu yer radarı verilerinin modellenmesi (Balkaya ve Göktürkler, 2016)

Bir başka deyişle tomografi tekniği, enerji pulslarının (sismik, elektromanyetik vb.) içinden geçtiği, erişilmesi mümkün olmayan ortamların, fiziksel özelliklerini araştırmak için kullanılmaktadır. Bu tekniğin uygulamalardaki bilinen en iyi örneği, tıbbi amaçlar için canlı bedenlerin içinin, uzun dalga boylu x-ışınlarının kullanılmasıyla görüntülenmesidir (Lehmann, 2007).

Sismik veya elektromanyetik dalgalar, çeşitli materyallerin tanımlanmasında inşaat mühendisliği ve yer bilimleri alanlarında kullanılmaktadır. Bir örnek olarak; paralel iki sondaj kuyusu arasındaki kayaçların özelliklerindeki değişimler, kuyulardan birine kaynağı diğerine ise alıcıları yerleştirerek bir kayıtçı ekipman vasıtasıyla kaynaktan alıcılara gelen sismik veya elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla görüntülenip belirlenebilmektedir.

5.1. Tomografi Tekniğinin Temel Prensipleri

Tomografi incelemeleri, ortama ait bazı fonksiyonların çizgisel integral hesaplamaları ile yapılmaktadır. Sismik veya elektromanyetik dalgaların seyahat zamanları veya genlikleri ölçülmekte ve değişken, yavaşlık (hızın tersi) veya sönümleme faktörü olabilmektedir. İki boyutlu bir ortam için tomografik problem, verilen izdüşüm kümelerini veya çizgisel integrallerinden;

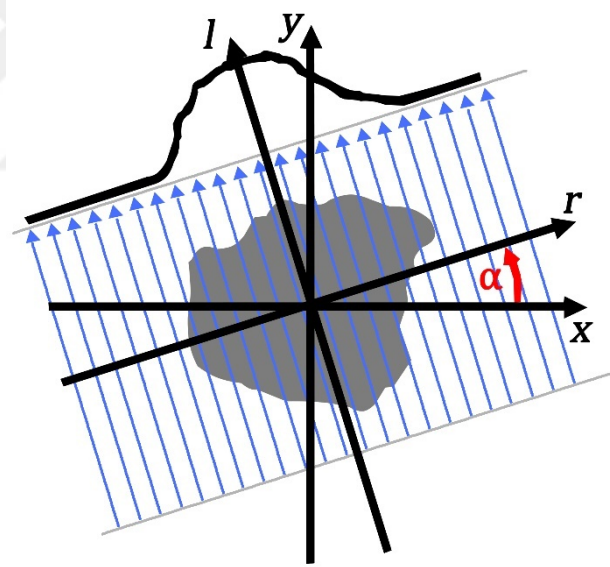
$$p(r, \alpha) = \int f(x, y) dl \quad (5.1.1)$$

$f(x, y)$ fonksiyonunun belirlenmesidir. İz düşüm açısı aralığı $\alpha = \tan^{-1}(l/r)$, x , y , r , l ve α Şekil 27’de gösterilmiştir. İntegral işlemi vericiden alıcıya doğru yapılmaktadır. İdeal rekonstrüksiyon (elde edilen veri setlerinden gerçek yer altının tespit edilmesi) için $f(x, y)$, iki boyutlu sürekli bir fonksiyon olmalıdır ve sonsuz sayıda iz düşüm gerekmektedir. Pratik

uygulamalarda ise bu mümkün değildir. $f(x,y)$, sonlu sayıda iz düşümden ve sonlu sayıda noktalardan hesaplanmaktadır.

Jeofizik uygulamalar için tomografi iki ana temele ayrılmıştır. Bunlardan biri, ters saçılma problemi için Born veya Rytov yaklaşımına dayalı Dalga Denklemleri Tomografisi (Wave Equation Tomography-WET veya kırılma tomografisi) dir (Devaney, 1984; Wu ve Toksöz, 1987). Diğeri ise ışın yollarına ve ışın yolu denkleminin yüksek frekanslı çözümüne dayalı Işın Tomografisi (Ray Tomography) dir.

Dalga formu ters çözümündeki ilerlemelere rağmen seyahat zamanı tomografisi, karşılıklı kuyu tomografisi için kullanılan ana yöntemdir. Bu yöntemde varış zamanlarıyla ilişkili ilk sinyaller kolayca gözlemlenebilmekte ve değişkenlikler daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Sonradan gelen fazların girişimi ile dalga formları genellikle karmaşık bir hale dönüşmektedir. Bu nedenle seyahat zamanı tomografik ters çözümleri yüksek frekanslı ışın yolu teorisine dayanarak gerçekleştirilmektedir (Lehmann, 2007).



Şekil 27. r-l eksenleri, α açısıyla x-y eksenini etrafında döndürülmesiyle elde edilen tomografi geometrisi

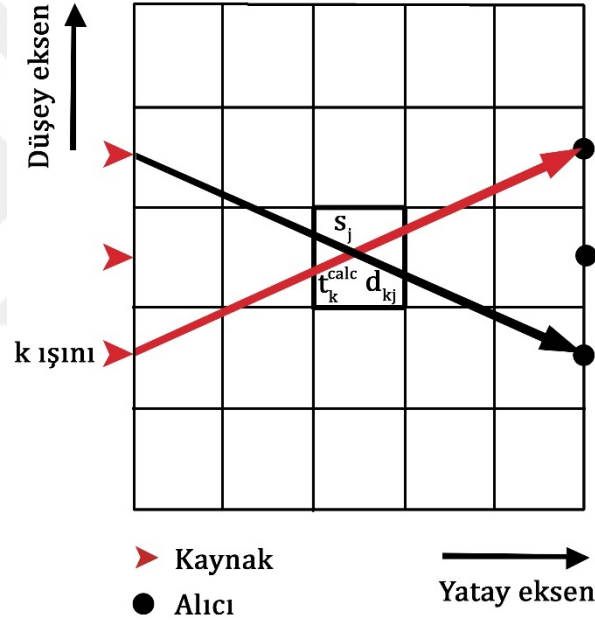
Işın yolu tomografisinde görüntülenecek ortam dikdörtgen hücreler ile grid oluşturacak şekilde bölünmektedir (Şekil 28). Bu her hücre için yavaşlık değeri s_j , sabit kabul edilmektedir. Bu hücreler boyunca geçen ışının hesaplanan seyahat zamanı t_k^{hes} ;

$$t_k^{hes} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j \quad (5.1.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada t_k^{hes} , k'inci ışının hesaplanan seyahat zamanı, d_{kj} , k'inci ışın yolunun j'inci hücredeki uzunluğu, s_j , j'inci hücredeki yavaşlık, N ise hücre elemanlarının sayısını ifade etmektedir. Bütün ışınlar için seyahat zamanları matris formunda

$$\mathbf{T} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{S} \quad (5.1.3)$$

olarak yazılmaktadır. Burada T, M genişliğinde seyahat zamanı vektörü, S, N genişliğinde hücre vektörü ve D ise MxN genişliğinde her hücredeki ışın boyutu vektörünü ifade etmektedir.



Şekil 28. Doğrusal ışın yayılımı kabulüyle kaynaktan çıkan üç örnek ışının hücreler içerisinde geçerek alıcılara ulaşması (Lehmann, 2007)

Görüntü rekonstrüksiyonu çözümleri için yaygın olarak kullanılan ana matematiksel yaklaşımlar; geri-izdüşüm, matris ters çözümü ve tekrarlamalı rekonstrüksiyon teknikleridir.

5.1.1. Geri-İz düşüm/Back Projection (BP) Yaklaşımı

Bu matematiksel yaklaşım, ilk tomografik hesaplamalarda kullanılmıştır (Herman, 1980). En basit ve anlaşılması en kolay yaklaşım biçimidir. Ancak rekonstrüksiyonlar oluşturulurken yapay olgular meydana getirmektedir. Geri-iz düşüm rekonstrüksiyonunun avantajlarından birisi kısa sürede hızlı hesaplanabilir olmasıdır. Bu rekonstrüksiyon yavaşlık dağılımının ilk ön kestirimi için kullanılabilir veya daha gelişmiş rekonstrüksiyon teknikleri için başlangıç modeli bu yaklaşım ile oluşturulabilmektedir. Geri-iz düşüm yaklaşımının çözümü oldukça basittir ve ileri bilgisayar hesaplamaları veya karmaşık matematik işlemleri gerektirmeyen bir yöntemdir.

İncelenen ortam hücrelere bölündüğündeki j'inci hücrenin yavaşlık dağılımı s_j ;

$$s_j = \frac{\sum_{k=1}^M \left[\frac{t_k}{d_k} \right] d_{kj}}{\sum_{j=1}^M d_{kj}} \quad (5.1.1.1)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

Burada d_k , kaynak ve alıcı arasındaki toplam mesafe, d_{kj} , j'inci hücredeki k'inci ışın yolunun uzunluğudur. Eğer bir ışın, bir hücre boyunca seyahat etmiyorsa bu hücre için d_{kj} sıfır olacaktır.

5.1.2. Matris Ters Çözümü (Birleşik Gradient ve En Küçük Kareler Yöntemi)

(5.1.3) denkleminde gösterilen D matrisi eğer kare matris ise bilinmeyen yavaşlık dağılımı, bu matrisin ters çözümü ile hesaplanabilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin yeni yeni geliştiği ilk yıllarda tomografi için uygulanan matris ters çözümünün en büyük dezavantajı, çözüm için gerekli hesaplama süresinin oldukça fazla olmasıdır.

(5.1.3) denklemi M seyahat zamanı ve N hücreden oluşan bir diziyi temsil etmektedir ve temelde D matrisinin tersi alınarak;

$$\mathbf{S} = \mathbf{D}^{-1} \cdot \mathbf{T} \quad (5.1.2.1)$$

ifade edildiği gibi çözülebilmektedir.

Burada \mathbf{D}^{-1} , \mathbf{D} matrisinin tersidir. Ancak tomografik amaçlar için matris ters çözümünün hesaplanmasında bazı problemler bulunmaktadır. Bunlar:

1. İz düşüm veri kümesi, gürültü ve diğer yapay nedenlerden kaynaklı olarak tutarsız olabilmektedir. Böyle bir durumda belirli bir çözüme ulaşılamamaktadır. Kare iz düşüm hatası;

$$\min = \sum_{k=1}^M \left(t_k^{\text{ölç}} - \sum_{j=1}^N d_{kj} s_j \right)^2 \quad (5.1.2.2)$$

şeklinde minimize edilerek s_j değerlerinin hesaplanması ile bu problemin üstesinden gelinmektedir.

2. Eğer görüntünün boyutu çok büyükse rekonstrüksiyon matrisi oldukça fazla eleman içereceğinden daha büyük grid aralıkları kullanılarak bu problemin üstesinden gelinmelidir.
3. Eğer matris kare değilse ($M \neq N$), \mathbf{D} matrisinin tersi doğrudan hesaplanamamaktadır. Böyle bir durumda genelleştirilmiş matris ters çözümü ve tekil değer ayrımı (Singular value decomposition-SVD) uygulanmalıdır.
4. Eğer N tane bağımsız eşitliği sağlayacak yeteri miktarda iz düşüm bulunmazsa çok çözümlülük problemi oluşacaktır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için yavaşlılığın toplam miktarı gibi belli bir büyüklük seçilerek minimize edilmesi gerekmektedir.

Örneğin;

$$\min = \sum_{i=1}^N (s_j - s_{av})^2$$

burada s_{av} ortalama hücre yavaşlılığına karşılık gelmektedir.

Diğer yöntemlere kıyasla, matris ters çözümünün en büyük dezavantajı; çok daha fazla hesaplama işlemleri içerdiğinden daha kapasiteli bilgisayar işlemcisi ve hesaplama zamanı gerektirmektedir (Paige ve Saunders, 1982; Kawata ve Nalcıoğlu, 1985)

5.1.3. Yinelemeli Rekonstrüksiyon (Iterative Reconstruction)

Bu teknikte en uygun çözüme ulaşılan kadar sistem kendini yenilemektedir. Birçok farklı yinelemeli rekonstrüksiyon tekniği geliştirilmiştir. Ancak bunlardan en yaygın olarak ikisi kullanılmaktadır. Bunlar, cebirsel rekonstrüksiyon tekniği (algebraic reconstruction technique-ART) (Gordon, Bender ve Herman, 1970) ve eşzamanlı tekrarlamalı rekonstrüksiyon tekniğidir (Simultaneous iterative reconstruction technique-SIRT) (Gilbert,1972). Tekrarlamalı teknikler, jeofiziksel görüntü rekonstrüksiyonu için en avantajlı teknik olduğu ispatlanmıştır (Worthington, 1984). Bu tekniklerin avantajı, göreceli olarak kısa hesaplama süresi, bütün kaynak-alıcı dizilim türlerinin kolayca uygulanabilir olması, sisteme ön bilgi tanıtılmasına olanak sağlanması ve eğrisel ışın rekonstrüksiyonu imkanlarını sunabilmesidir. SIRT tekniği pratik uygulamalar için kullanılan en yaygın ve en uygun yöntemdir. ART yönteminden biraz daha yavaş olmasına karşın, SIRT yönteminin ışın yollarının sırasına bağlı olmaması, daha kararlı ve güçlü sonuçlar üretmesi gibi büyük avantajları bulunmaktadır (Lehmann, 2007).

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında ve arazi verisi uygulamalarında SIRT tekniği kullanılarak tomografik çözümler üretilmiştir.

5.2. Sirt Tekniğinin Matematiksel Temeli

(5.1.3) eşitliğinin matris formu; (5.2.1-5.2.3) eşitliklerindeki vektörlerle ifade edilmektedir. M adet varış zamanına ait vektör;

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_M \end{bmatrix} \quad (5.2.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. S, grid hücrelerinin yavaşlık vektörüdür:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_N \end{bmatrix} \quad (5.2.2)$$

M tane ışın yolu ve N tane hücre için ışın yolu uzunluklarının oluşturduğu D ölçülen ya da hesaplanan veri vektörü;

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{M1} & d_{M2} & \dots & d_{MN} \end{bmatrix} \quad (5.2.3)$$

şeklindedir. T'yi üreten tahmini model vektörü S'nin doğrusal işlemcisi olduğu düşünülürse, bu denklem tomografik amaçlar için;

$$\mathbf{T}^{\text{ölç}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{S}^{\text{gerçek}} \quad (5.2.4)$$

gibi formülize edilmektedir. Ancak (5.2.4) denklemini doğrudan çözülememektedir. Gerçek model vektörü $\mathbf{S}^{\text{gerçek}}$, verilen $\mathbf{T}^{\text{ölç}}$ ve \mathbf{D} vektörleri ile belirlenmelidir. Böylece problem, genelleştirilmiş ters çözüm işlemcilerinden birini bulmaya dönüşecektir. Pratikte iki nedenden dolayı genelleştirilmiş ters çözüm işlemcisini belirlemek oldukça zordur. Bu nedenlerden biri, \mathbf{D} vektörünün genellikle oldukça geniş ve seyrek olması, ikincisi ise \mathbf{D} vektörünün ışın dağılımından dolayı kötü koşullu (ill-conditioned) olmasıdır. Bunlardan dolayı \mathbf{D} vektörün hesaplanması oldukça duraysız hale gelebilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için, geniş ve seyrek matrislerin ters çözümüyle ilişkili problemleri önlemeye yönelik Kaczmarz yöntemi, (5.2.4) denklemine tekrarlamalı işlemler uygulayarak yaklaşık bir çözümün bulunmasını sağlamaktadır (Kaczmarz, 1937).

Tekrarlamalı yöntemlerin temel stratejisi, gelişigüzel hücre yavaşlığına bir dizi düzeltmeler uygulayarak ölçülen ışın iz düşümleriyle bir eşleşme sağlamaya çalışmaktır. Hesaplanan iz düşümler, belirlenen doğruluk kriterleriyle ölçülen izdüşümler ile eşleşme sağlanana kadar tekrarlanmaktadır.

SIRT tekniğinin algoritmasındaki tekrarlamalı kısmın temel adımlarını oluşturan bir akış şeması şekil 29'da verilmiştir. Yavaşlılık vektörü S^0 başlangıç değer kümesi olarak seçilerek algoritma işlemi başlatılmaktadır. Bu işlem için temel adımlar:

Adım 1:

İlk olarak başlangıç değerlerinden iz düşümler hesaplanarak (5.1.2) denklemi ile düz modelleme başlatılmaktadır. Bu modelleme işleminde başlangıç değerleri ile oluşturulan ilk modelden elde edilen seyahat zamanı ilk varışları (5.2.5) ve ölçülerden belirlenen ilk varışlar arasında (belirlenen kriterler aralığında) bir uyum sağlanana kadar başlangıç modeline her iterasyon adımında bir dizi düzeltme katsayısı eklenmektedir. Başlangıç modelinden elde edilen seyahat zamanları;

$$t_k^{hes} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j^q \quad (5.2.5)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Burada bütün ışınlar için, $k=1, \dots, M$ 'ye kadar, q iterasyon sayısı ve N ; ilk varışların sayısıdır.

Adım 2:

Bir hücreyi kesen ışınlar belirlenerek her biri için düzeltme katsayıları hesaplanır. Bu düzeltmelerin ortalaması alınarak düzeltme değeri tespit edilir.

Düzeltilmeler ekleme veya çarpım düzeltmesi olarak iki kategoride ele alınabilmektedir.

Ekleme türü düzeltmede her hücreye bir ağırlıklarındırılmış düzeltme uygulanmaktadır. Düzeltmenin ağırlık katsayıları, ışının hücreden geçerken kat ettiği yol uzunluğu d_{kj} ile her hücre boyunca k 'inci yolun, $t_k^{ölç}$ ve t_k^{hes} arasındaki farkının oranının bir fonksiyonudur (Dines ve Lytle, 1979):

$$\Delta s_j = \Delta t_k \frac{d_{kj}}{\sum_{j=1}^N (d_{kj})^2} \quad (5.2.6)$$

burada $\Delta t_k = t_k^{ölç} - t_k^{hes,q}$ dır.

Çarpım türü düzeltmede ise yavaşlılığın yeni değeri s_j^{q+1} , mevcut atanmış değer olan s_j^q 'ya oranıdır:

$$\Delta c_j^q = \frac{t_k^{ölç}}{t_k^{hes,q}} \quad (5.2.7)$$

Hangi düzeltme türü seçilirse seçilsin, basit ART algoritması, düzeltmeler hesaplanana kadar yol boyunca s_j değerlerine düzeltme uygulayarak çalışmaktadır. Örnek olarak k 'inci yol için $t_k^{hes,q}$ değerleri hesaplanır hesaplanmaz, yolun geçtiği tüm hücreler güncellenmektedir. Diğer taraftan SIRT yönteminde bütün hücreler boyunca bütün yollar hesaplanana kadar düzeltme işlemi uygulanmamaktadır. Sonradan, verilen hücreler boyunca geçen bütün yollar için bütün düzeltme terimlerinin ortalaması alınmakta ve hücre yavaşlılığı bu ortalama düzeltme ile güncellenmektedir.

Adım 3:

Hesaplanan düzeltme j'inci hücredeki s_j^q yavaşlılığa sonraki iterasyon (q+1) adımında kullanılmak için ekleme durumunda (5.2.8), çarpım durumunda ise (5.2.9) eşitliği kullanılmaktadır.

Ekleme durumunda:

$$s_j^{q+1} = s_j^q + \Delta s_j \quad (5.2.8)$$

Çarpım durumunda:

$$s_j^{q+1} = s_j^q \cdot \Delta c_j^q \quad (5.2.9)$$

Böylece eğer hesaplanan seyahat zamanları ölçülenlere kıyasla çok küçük olursa, ışının geçtiği hücredeki yavaşlık değeri uygun bir miktarla arttırılacaktır. Bu işlem, bütün hücre ve ışınlar için gerçekleştirildikten sonra ilk iterasyon işlemi tamamlanmaktadır.

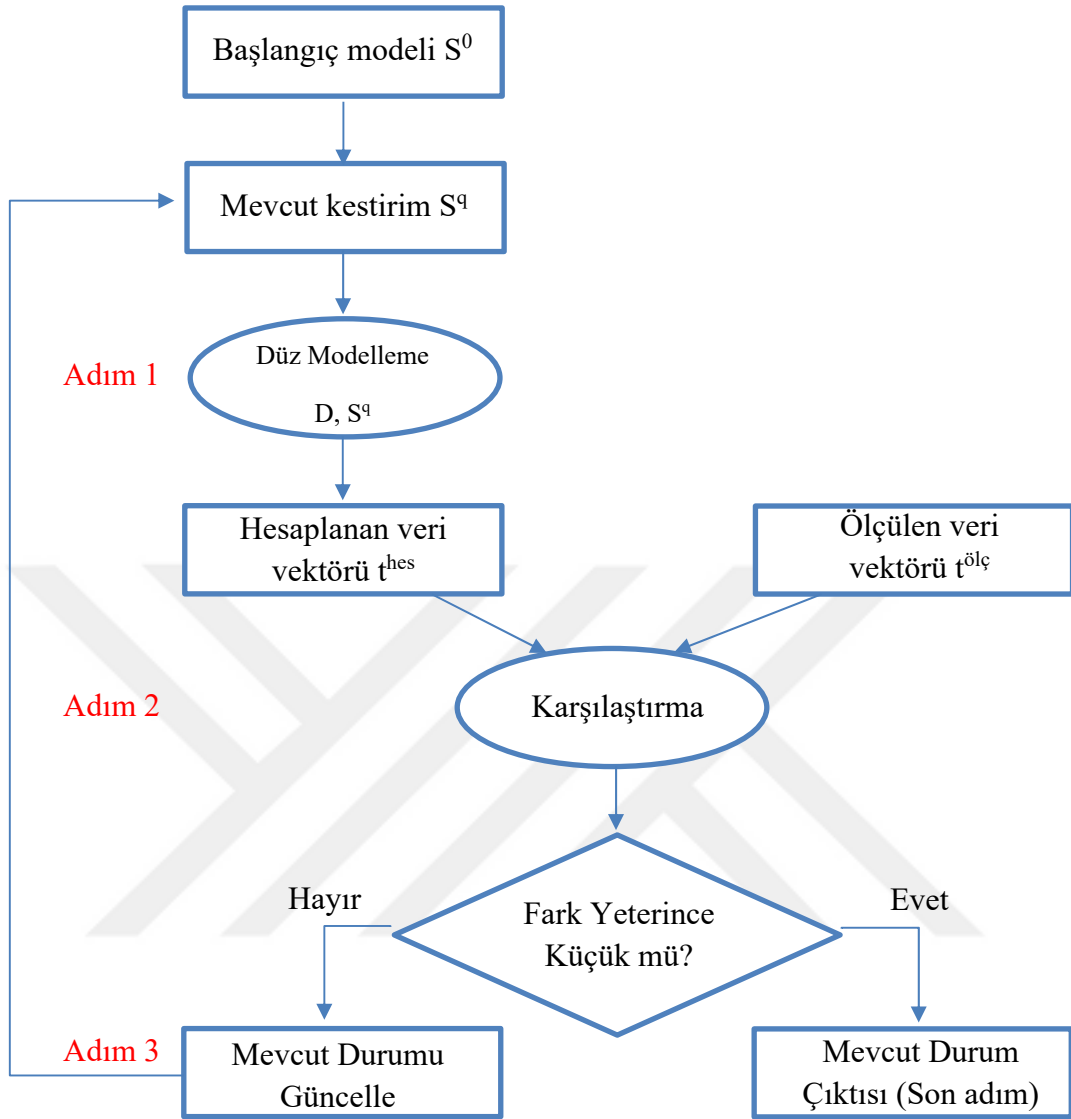
q'ncü iterasyon boyunca $t_k^{hes,q}$ değeri;

$$t_k^{hes,q} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j^q \quad (5.2.10)$$

şeklinde verilmektedir.

Hesaplanan bu değer, her yol için ölçülen gerçek $t_k^{ölç}$ değerleri ile kıyaslanmaktadır. Bu t değerleri arasındaki bütün farklar s_j^q parametresini düzeltmek için kullanılmalıdır. Böylece sonraki iterasyon $t_k^{hes,q+1}$ gerçek değerler olan $t_k^{ölç}$ değerlerine daha çok yaklaşacaktır.

Tekrarlamalı rekonstrüksiyon tekniklerinde iterasyonları belirli bir aşamadan sonra sonlandırmak için uygun bir "sonlandırma kriteri" bulmak çok kolay olmamaktadır. Çoğu kullanıcı en uygun iterasyon sayısını deneme yanılma yoluyla bulmaktadır. Başka bir yaklaşım; rezidüel hatalar için belirli bir eşik değerine ulaşmaya kadar veya hatanın azalımının oranına göre iterasyonu devam ettirmektir (Şekil 29).



Şekil 29. SIRT Yöntemi için akış şeması (Lo ve Inderwiesen, 1994).

5.3. Bağıl Dielektrik Permittivite Yardımı ile Su İçeriğinin Belirlenmesi

Giovanni Leucci, 2012 yılında Japon Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan çalışmasında bağıl dielektrik permittivite ile yüzde su içeriği arasında bir ilişki oluşturmuştur. Betonun dielektrik özelliklerinin değişimi, su içeriğinin değişiminin bir sonucudur. Beton içerisindeki dielektrik özelliklerin değişimlerini hacimsel su içeriğinin bir fonksiyonu olarak tanımlayabilmek için çeşitli inşaat alanlarından alınan 800 örnek üzerinde frekans aralığı 1 ile 1000 MHz arası olan empedans analizörü ile yapılan çalışmalar sonucunda bağıl dielektrik permittivite ile su içeriği arasındaki ilişki;

$$w = 0.001k^3 + 0.1232k^2 - 0.043k + 3.3035 \quad (5.3.1)$$

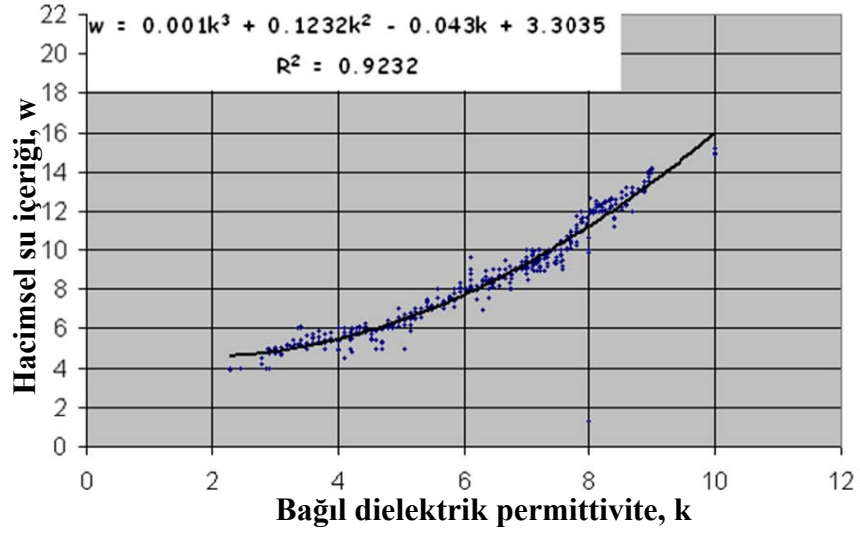
şeklinde bulunmuştur (Şekil 30). (5.3.1) eşitliğinde w , yüzde su içeriğini ve k , bağıl dielektrik permittiviteyi temsil etmektedir (Leucci, 2012). Empedans analizörü 1 ile 1000 MHz frekans aralığında elektriksel alan oluşturarak uygulanan materyal için elektriksel kapasitansı ve iletkenliği kaydetmektedir. Bağıl dielektrik permittivite (k), ölçülen kapasite ile;

$$k = s_{cell} \left(\frac{C}{k_0} \right) \quad (5.3.2)$$

şeklinde bir ilişkiye sahiptir. Burada s_{cell} , hücre sabiti (m^{-1}) olup;

$$s_{cell} = sR \quad (5.3.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. R , hücrenin ölçülen direnci, s iletkenlik ve k_0 , boşluğun dielektrik permittivitesidir (Beek vd., 1998).



Şekil 30. 800 örnek üzerinde yapılan analizler sonucunda bulunan bağıl dielektrik permittivite ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişki (Leucci, 2012'den düzenlenerek alınmıştır.)

6. BETON VE BETONARME YAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

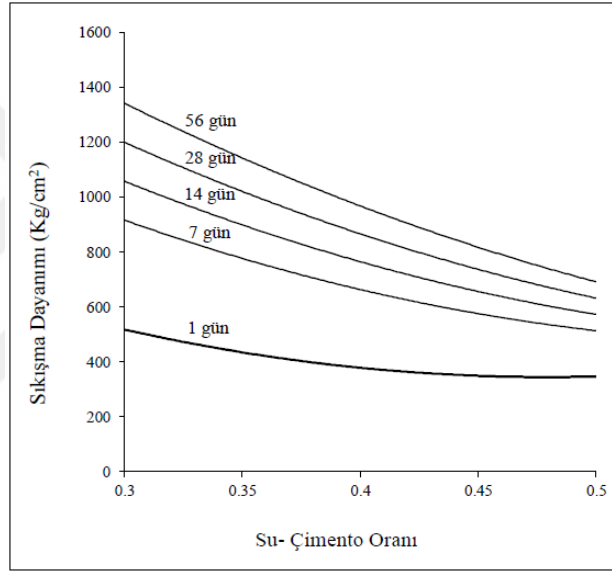
Beton, en genel tanımı ile dolgu malzemesi olarak kullanılan ve agrega adı verilen kum, çakıl gibi malzemeler ile bağlayıcı özelliği olan çimento ve suyun bir araya getirilmesi ile elde edilen bir yapı elemanıdır. Bağlayıcı türüne göre hidrolik ve hidrolik olmayan beton olmak üzere isimlendirilmektedirler. Hidrolik olmayan beton türü insanlık tarihi boyunca kullanılan en eski beton türüdür. Yaklaşık M.Ö. 6500 yıllarında hidrolik olmayan beton, Suriyeliler tarafından kullanılmıştır ve Mısır, orta doğu, Girit, Kıbrıs ve antik Yunan'a kadar kullanımı yayılmıştır. Romalılar, küçük daneli çakıl ve iri daneli kumu sıcak kireç, su ve bazen hayvan kanı kullanarak beton için ilkel karışımlar oluşturmuşlardır. Tarihsel kanıtlar, Asurların ve Babillerin bağlayıcı malzeme olarak kil kullandığını göstermektedir. Mısırlılar kireç yerine daha kolay kalsine haline getirilebilen jipsi kullanmışlardır. Hidrolik kireç, Yunanlılar ve Romalılar tarafından arjilik kireçtaşı kullanılarak geliştirilmiştir. Yunanlılar ayrıca hidrolik kireç oluşturmak için volkanik kül de kullanmışlardır. Bunun sebebi, hidrolik kireç ile oluşturulan harcın suya daha fazla dayanabildiğinin keşfedilmesidir. Ancak çimentolama malzemelerinin kalitesi orta çağa kadar azalmış, yüksek kaliteli harçlara uzun bir süre rastlanılmamıştır. 1756 yılında John Smeaton, yaptığı deneyler sonucu yüksek kil oranına sahip malzemeler ile kireçtaşından suda kullanılacak en iyi hidrolik kireci elde etmiştir. Bu tarihten sonra 1824 yılında Joseph Aspdin tarafından, günümüzde de kullanılan Portland çimentosu keşfedilmiştir (Li, 2011).

Betonun basınç, çekme, burulma ve kesme gibi etkilere karşı direncini arttırmak amacıyla çelik donatılar ile güçlendirilerek elde edilen yapı malzemesine betonarme adı verilmektedir. İlk olarak 1852 yılında François Coignet tarafından keşfedilerek kullanılmıştır (Day ve McNeil, 1996).

Atmosferde bulunan karbondioksit (CO_2) molekülleri betonarme yapılara nüfuz ederek betonarme yapıda kullanılan çimento içerisindeki kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile tepkimeye girerek betonarme yapı içerisinde karbonatlaşmaya neden olmaktadır. Karbonatlaşma sürecinde oluşan kimyasal tepkimeler, betonun alkalinitesinin güçlü bir şekilde azalmasına neden olmaktadır. Sağlıklı bir betonarme yapının alkalinite değerleri ortalama 12-14 pH değerlerindedir, karbonatlaşma sürecinde bu değerler, betonarme yapıda kalsiyum hidroksitin tükenmesi ile 8-9 pH gibi değerlere kadar azalabilmektedir. Alkalinitenin azalması betonarme yapıyı zayıflatmaktadır ve böylelikle karbonatlaşma,

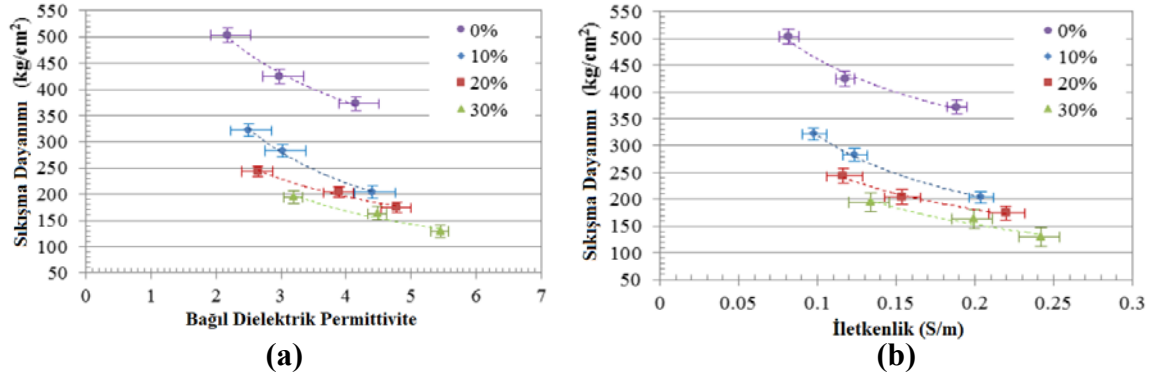
donatıyı kaplayan yapıya nüfuz ettikçe nemliliğin artmasına neden olarak betonarme yapının korozyona uğramasını kolaylaştırmaktadır. Betonarme yapı içerisinde karbonatlaşmanın derinliği, yapıyı korumak için önemli rol oynamaktadır. Karbonatlaşma derinlere ulaştıkça, yapı içerisindeki donatının da korozyona uğrama riski artmaktadır (Li, 2011).

Betonarme yapı içerisinde ıslaklığın ya da kuruluğun neden olduğu nem içeriğinin değişimi, betonun mekanik özellikleri yönünden önemli bir etkiye sahiptir (Bruhwiler ve Saouma, 1995). Su-Çimento oranının artması betonarme yapıların sıkışma dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Şekil 31’de Portland çimentosu kullanılarak farklı su-çimento oranlarındaki sıkışma dayanımı gösterilmiştir (Amhudo vd., 2018).

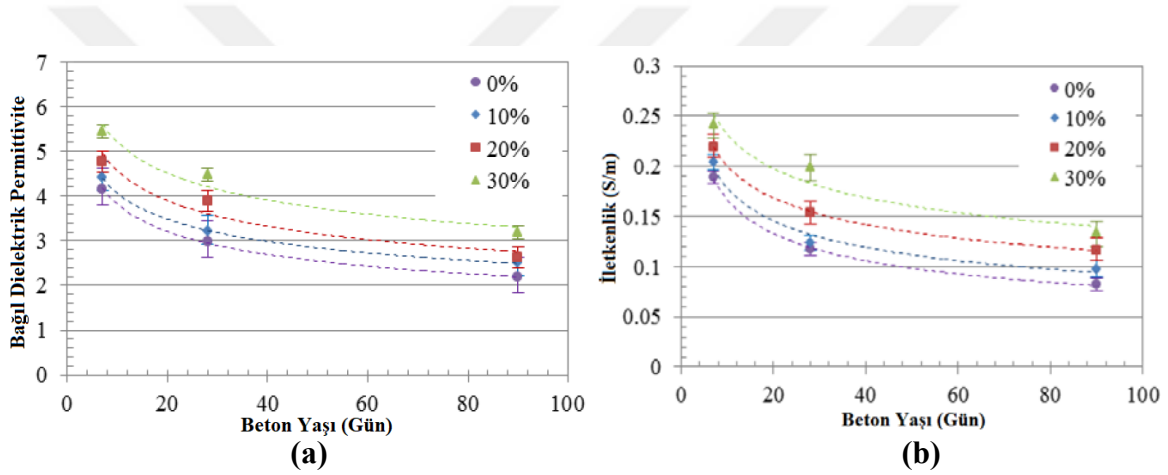


Şekil 31. Bekleme süresine göre su-çimento oranı ile sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (Amhudo, R., L., vd., 2018’den düzenlenerek alınmıştır)

Yüksek silis içeriğine sahip pirinç kabuğu külünün farklı oranlarda (%0-10-20-30) katkı malzemesi olarak kullanıldığı beton numuneleri üzerinde bağıl dielektrik permittivite, iletkenlik ve sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır (Piladaeng vd., 2016). Sıkışma dayanımı ile bağıl dielektrik permittivite, sıkışma dayanımı ile iletkenlik, ve bekleme süresine göre bağıl dielektrik permittivite ile iletkenlik arasındaki ilişkiler Şekil 32-33’te verilmiştir.



Şekil 32. (a) Bağıl dielektrik permittivite ve sıkışma dayanımı arasındaki ilişki, (b) İletkenlik ile sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (Piladaeng vd., 2016'dan düzenlenerek alınmıştır).



Şekil 33. (a) Bağıl dielektrik permittivite ve beton yaşı arasındaki ilişki, (b) İletkenlik ile beton yaşı arasındaki ilişki (Piladaeng vd., 2016'dan düzenlenerek alınmıştır).

Şekil 32'de bağıl dielektrik permittivitenin artması ile betonun sıkışma dayanımının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Benzer şekilde artan iletkenlik te sıkışma dayanımının azaldığını göstermektedir.

Şekil 33'te ise bağıl dielektrik permittivite ve iletkenliğin zamana göre değişimi gösterilmiştir.

Agrega boyutlarına göre sınıflandırılmış farklı beton türleri üzerinde yapılan deneyler sonucu hacimsel su içeriğinin bağıl nem değerlerine göre değişimi ortaya konulmuştur (Ihamouten vd., 2016). Tablo 2’de kuru koşullarda bulunan farklı türdeki betonların karakteristik özellikleri verilmiştir. Tablo 3’te ise farklı beton türlerinden elde edilen numunelerin iklimlendirme odalarında ortam nemliliğine göre yüzde su içeriği miktarları verilmiştir. Burada w, yüzde su içeriği miktarını ve BN ise “Bağıl nem”i ifade etmektedir.

Tablo 2. Beton numunelerinin karakteristik özellikleri (Ihamouten vd., 2016’den düzenlenerek alınmıştır)

| | Semboller (Birimler) | Beton Türleri | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
| Su-Çimento Oranı | w/c | 0.36 | 0.68 | 0.36 | 0.69 | 0.35 | 0.67 |
| Maksimum Agreganın Çapı | D_{max} (mm) | 20 | 20 | 10 | 10 | 4 | 4 |
| Ortalama doymuş yoğunluk | ρ_{sat} (kg/m ³) | 2437 ± 5 | 2346 ± 1 | 2396 ± 14 | 2302 ± 9 | 2290 ± 4 | 2176 ± 12 |
| Bulk Gözenekliliği | ϕ (%) | 12.5 ± 0.2 | 16.6 ± 0.3 | 13.5 ± 0.3 | 17.5 ± 0.6 | 19.5 ± 0.3 | 26.4 ± 0.5 |
| Çimento Hamuru Hacmi | l/m ³ | 374.6 | 351.4 | 369.2 | 350 | 531.2 | 503.1 |
| 360. Günde Sıkışma Dayanımı | $R_{c,sat}$ (MPa) | 82.4 ± 2.2 | 44.2 ± 1.9 | 82.5 ± 2.8 | 41.6 ± 1.6 | 82.1 ± 2.2 | 39.4 ± 1.3 |
| 360. Günde Statik Young Modülü | E_{sat} (GPa) | 42.2 ± 1.9 | 33.8 ± 1.8 | 41.6 ± 2.2 | 30.7 ± 1.6 | 32.9 ± 2.1 | 24.8 ± 1.5 |
| 2. Yılda Dinamik Young Modülü | E_{dyn} (GPa) | 53.4 ± 2.2 | 41.7 ± 1.6 | 51.8 ± 2.5 | 40.1 ± 1.4 | 43.0 ± 1.8 | 30.6 ± 1.2 |
| Sıvı Su Geçirgenliği | $K_l(10^{-20}m^2)$ | 4.7816 | 16.973 | 4.71.94 | 24.066 | 7.1628 | 22.915 |

Tablo 3. İklimlendirme odasında farklı bağıl nem oranlarına maruz bırakılan beton örneklerinin ortalama yüzde su içeriği miktarları (Ihamouten vd., 2016’den düzenlenerek alınmıştır)

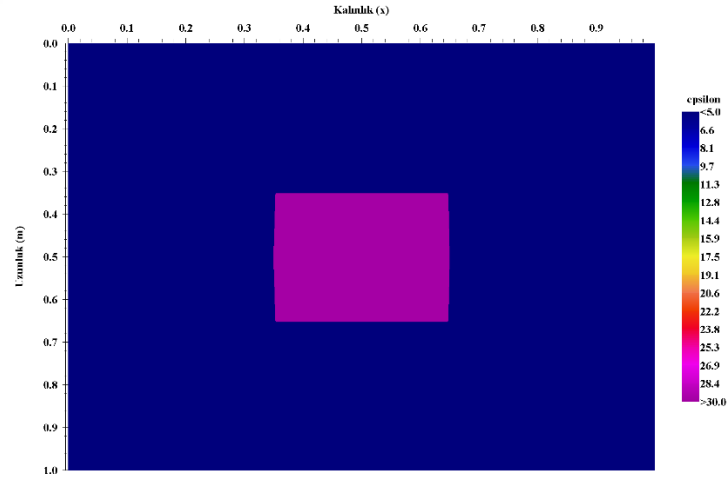
| Beton Türleri | %w | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | BN = 30 % | BN = 50 % | BN = 70 % | BN = 80 % | BN = 94 % | BN = 100 % |
| B1 | 3.07 | 3.55 | 4.26 | 5.48 | 7.89 | 12.5 |
| B2 | 1.96 | 3.37 | 4.26 | 5.64 | 7.67 | 16.6 |
| B3 | 3.70 | 4.33 | 5.11 | 6.18 | 8.79 | 13.5 |
| B4 | 3.68 | 5.08 | 5.95 | 7.29 | 9.38 | 17.5 |
| B5 | 4.84 | 5.79 | 6.97 | 8.77 | 12.10 | 19.5 |
| B6 | 4.96 | 6.75 | 7.96 | 9.96 | 12.62 | 26.4 |

7. YAPILAN ÇALIŞMALAR

7.1. Modelleme Çalışmaları

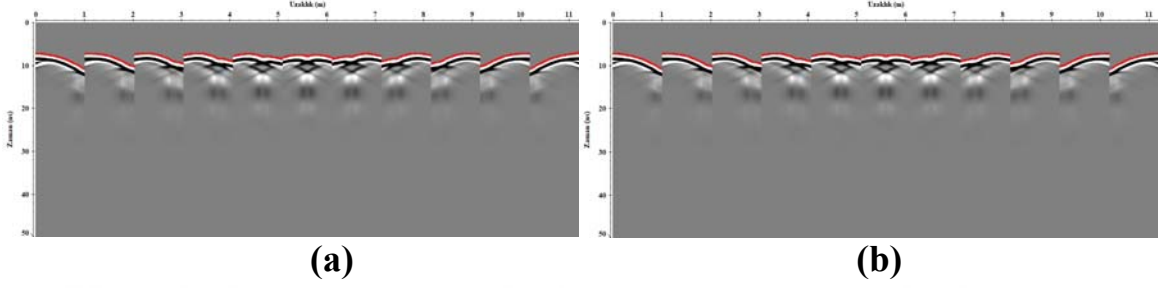
Bu tez çalışmasında kullanılacak olan SIRT tekniği, ilk olarak basit modeller oluşturularak verici anten sabit tutulup alıcı anten karşı taraftaki düşey eksen boyunca taşınarak ilk radargram elde edilmiş olur. Daha sonra düşey ekseninde 10 cm atış aralığı (her ölçüm sonunda verici anteni kaydırma miktarı) seçilerek aynı şekilde ölçümler hat sonuna kadar tekrarlanır. Bu şekilde elde edilen yapay radargramlar üzerinde ilk varış okumaları yapılarak SIRT tekniği test edilmiştir.

İlk modelde, bağıl dielektrik permittivitesi 5 olan bir beton blok içerisinde 30x30 cm'lik, bağıl dielektrik permittivitesi 30 olarak rastgele seçilen kare şekilli bir yapı düşünülerek tasarlanmıştır (Şekil 34). Betonarme kolonlar içerisinde farklı bağıl dielektrik permittivite değerine sahip kasa benzeri gömülü nesnelere yerleştirilebilmektedir. Burada amaç bir dielektrik ortam içerisinde farklı dielektrik özelliğe sahip bir malzemenin SIRT tekniği kullanılarak tomografik çözümlene ile tespit edilebilmesidir.



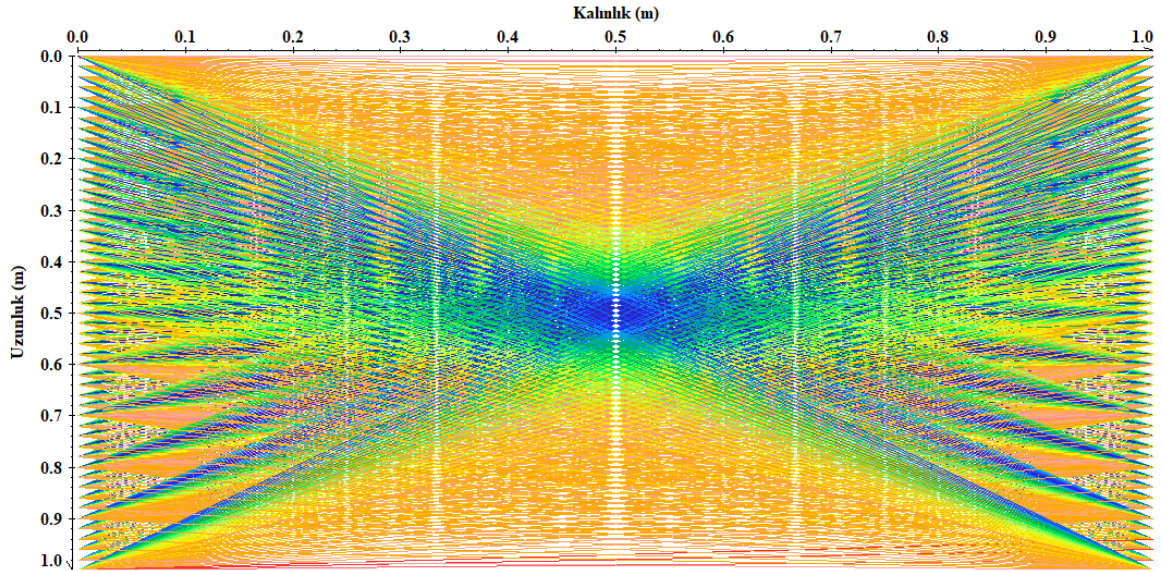
Şekil 34. İki farklı dielektrik özelliğe sahip bir ortam modeli (Kare dışı bağıl dielektrik permittivite 5, kare içi bağıl dielektrik permittivite 30 olacak şekilde tasarlanmıştır).

Şekil 34'te gösterilen ortam modeli oluşturulduktan sonra, 500 MHz anten frekansı kullanılarak verici anten konumlarına göre modelin karşı tarafında alıcı anten ile yapay radargramlar oluşturulmuştur. Şekil 35'te oluşturulan modelin her iki tarafında hesaplanan yapay radargramlar gösterilmiştir.



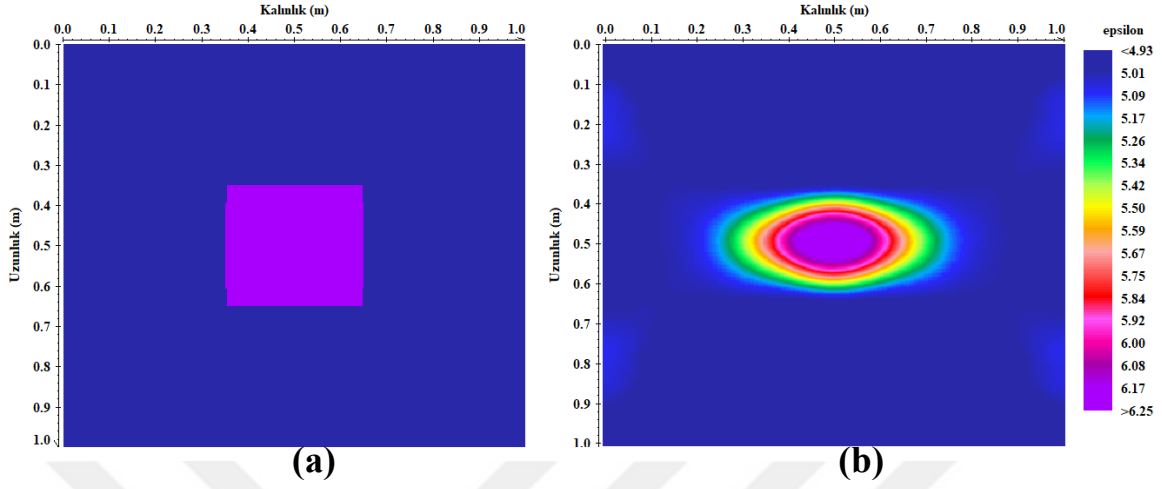
Şekil 35. Şekil 34'te verilen modele göre hesaplanan yapay radargramlar ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafında kaydedilen atış grupları (a) ve sağ tarafında kaydedilen atış grupları (b)

Burada kırmızı noktalar, ilk varış okumalarını göstermektedir. Şekil 36'da ise tasarlanan model için ışın yolları gösterilmiştir.



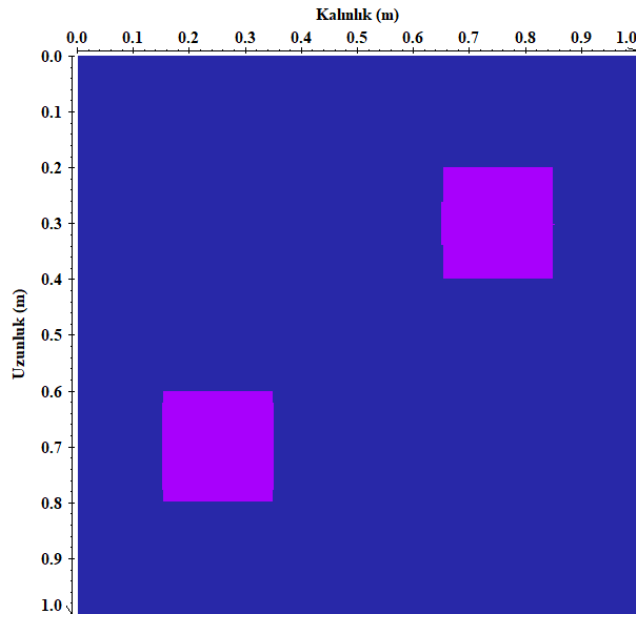
Şekil 36. Tasarlanan model için verici anten konumlarına göre ışın yolları

İlk varış okumaları gerçekleştirildikten sonra modele ait tomografi kesiti hesaplanmıştır. Model ve modele ait tomografi kesiti Şekil 37’de gösterilmiştir.



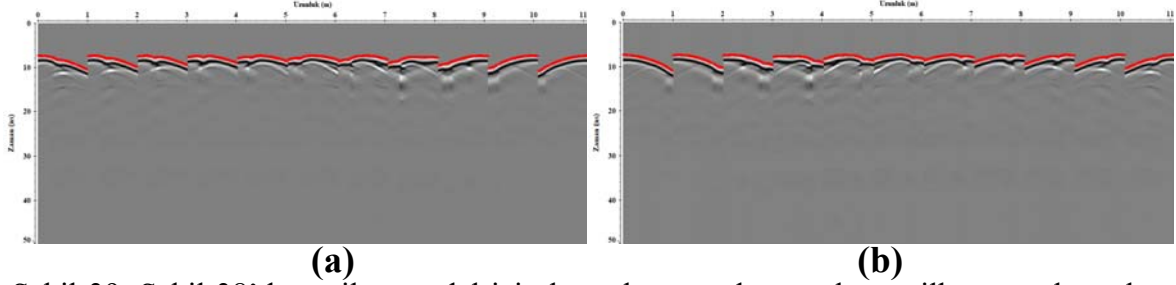
Şekil 37. Tasarlanan model (a) ve tomografi kesiti (b)

Tasarlanan model için elde edilen tomografi kesitinde ortama ait dielektrik katsayısı değerine oldukça yaklaşılmıştır. Tasarlanan model simetrik olduğundan hesaplanan radargramlar da simetrik oluşmuştur. Bu nedenle farklı noktalara konumlandırılmış iki farklı nesne modeli oluşturularak aynı işlemler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 38’de yeniden oluşturulan model gösterilmiştir.



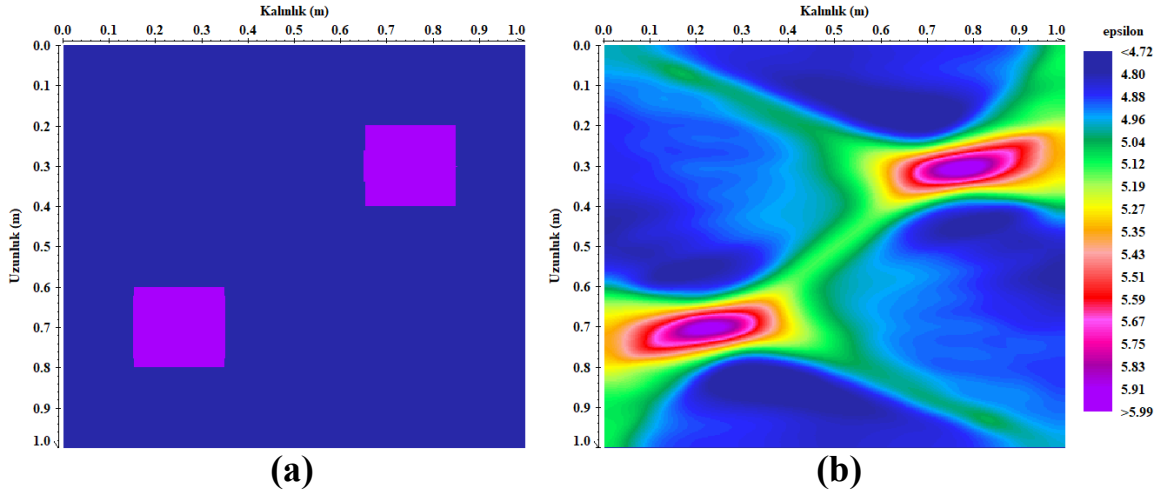
Şekil 38. Farklı noktalara konumlandırılmış ortam modeli

Şekil 38’de gösterilen model için oluşturulan yapay radargramlar ve ilk varış okumaları Şekil 39’da gösterilmiştir.



Şekil 39. Şekil 38’de verilen model için hesaplanan radargramlar ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafında kaydedilen atış grupları (a) ve sağ tarafında kaydedilen atış grupları (b)

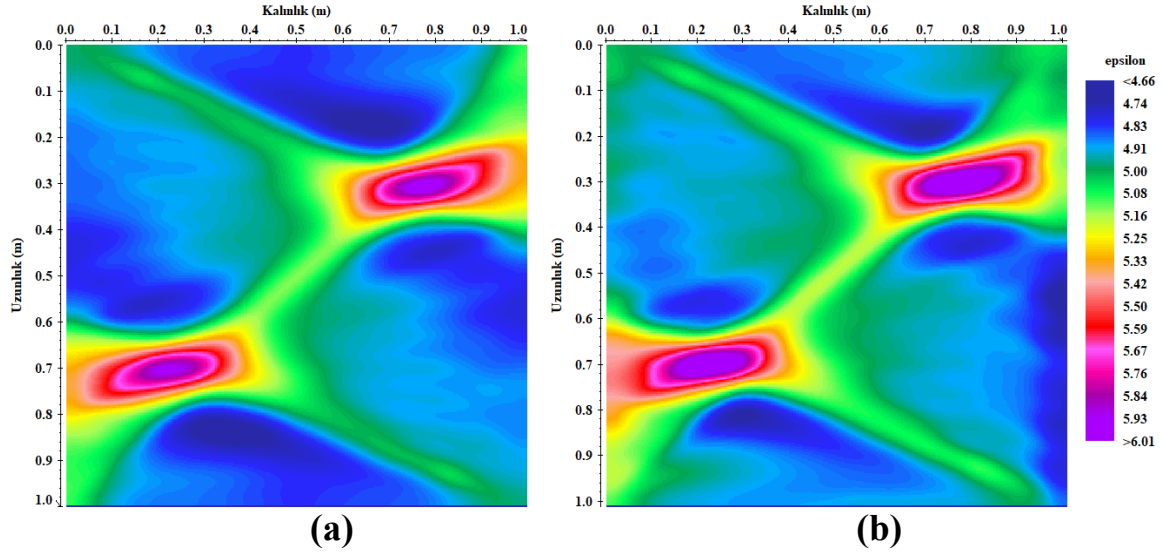
İlk varış okumaları ile elde edilen tomografi kesiti ve oluşturulan model Şekil 40’da gösterilmiştir.



Şekil 40. Tasarlanan model (a) ve bu modele ait tomografi kesiti (b)

Modelin tomografi kesitinde de ortama ait bağıl dielektrik permittivite değerinin, model değerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

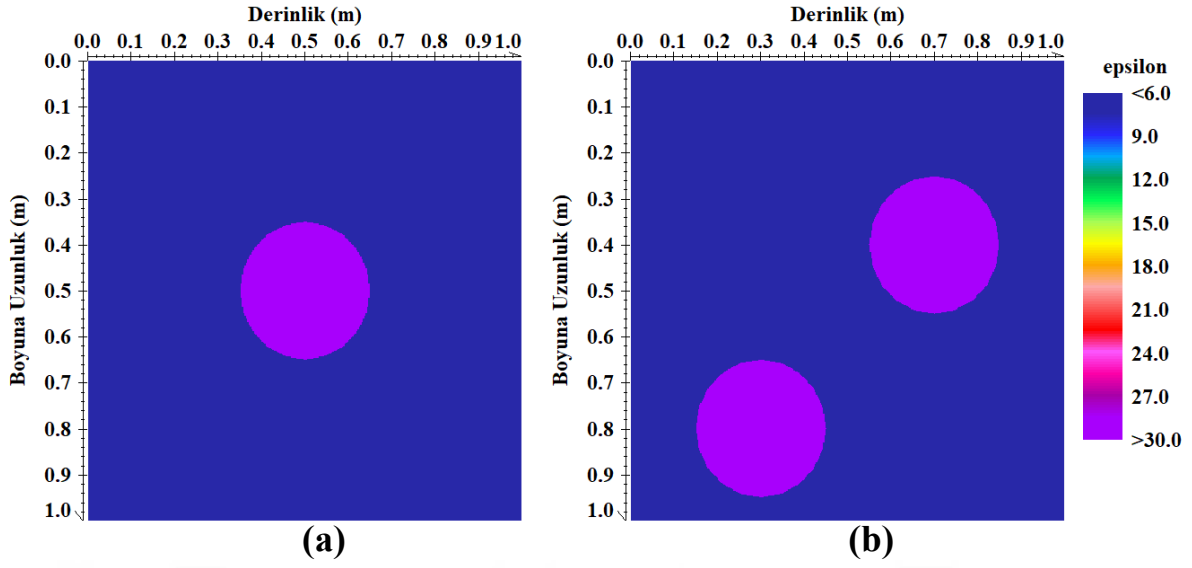
Çözünürlüğün etkisini gözlemlemek için benzer şekilde 1 GHz anten frekansı kullanılarak Şekil 38’de gösterilen model için yapay radargramlar oluşturulmuştur.



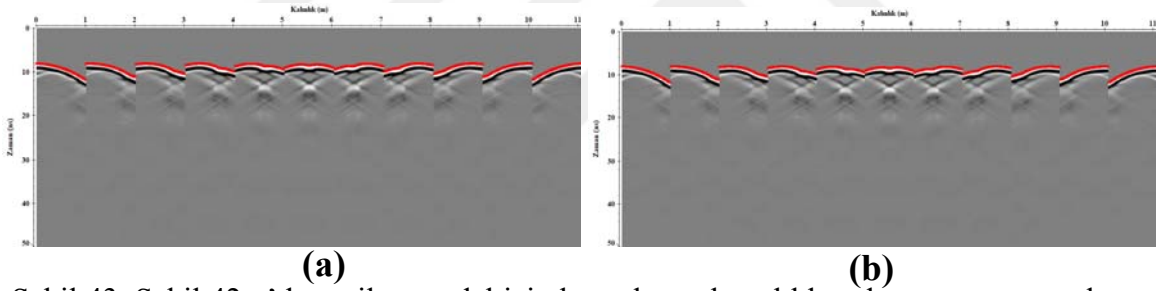
Şekil 41. Farklı anten frekansları kullanılarak hesaplanan tomografi kesitleri, 500 MHz (a) ve 1 GHz (b)

Şekil 38’de gösterilen model üzerinde (a) 500 MHz ve (b) 1 GHz anten frekansı kullanılarak hesaplanan tomografi kesitleri Şekil 41’de gösterilmiştir. Anten frekansı arttıkça çözünürlüğe bağlı olarak iz sayısı da artmaktadır. 500 MHz anten frekansı ile oluşturulan radargramlarda, toplamda 2222 noktada ilk varış okuması yapılmışken, 1 GHz anten frekansı ile oluşturulan radargramlarda, toplamda 3696 nokta üzerinde ilk varış okuması yapılmıştır.

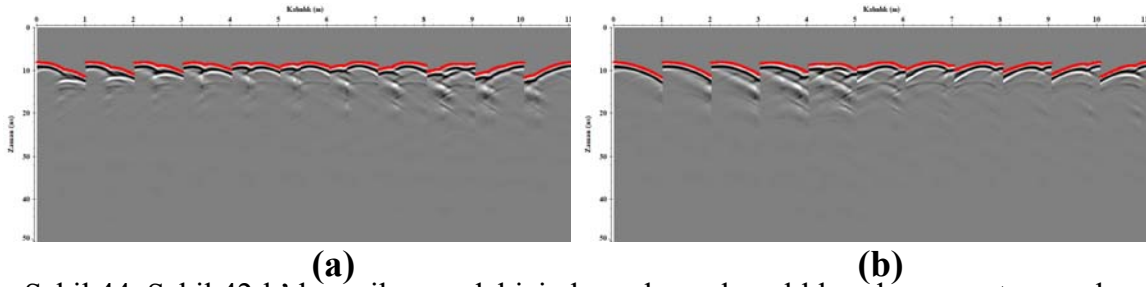
Benzer şekilde dielektrik bir ortam içerisinde yarıçapı 15 cm olan daire şekilli unsurlar da modellenmiştir. Tasarlanan modeller Şekil 42’de verilmiştir. Şekil 42-a’da verilen model için oluşturulan yapay radargramlar Şekil 43’te, Şekil 42-b’de verilen model için oluşturulan radargramlar Şekil 44’te ve Şekil 43-44’de verilen radargramlar üzerinde yapılan ilk varış okumaları sonucu hesaplanan tomografi kesitleri Şekil 45’te verilmiştir.



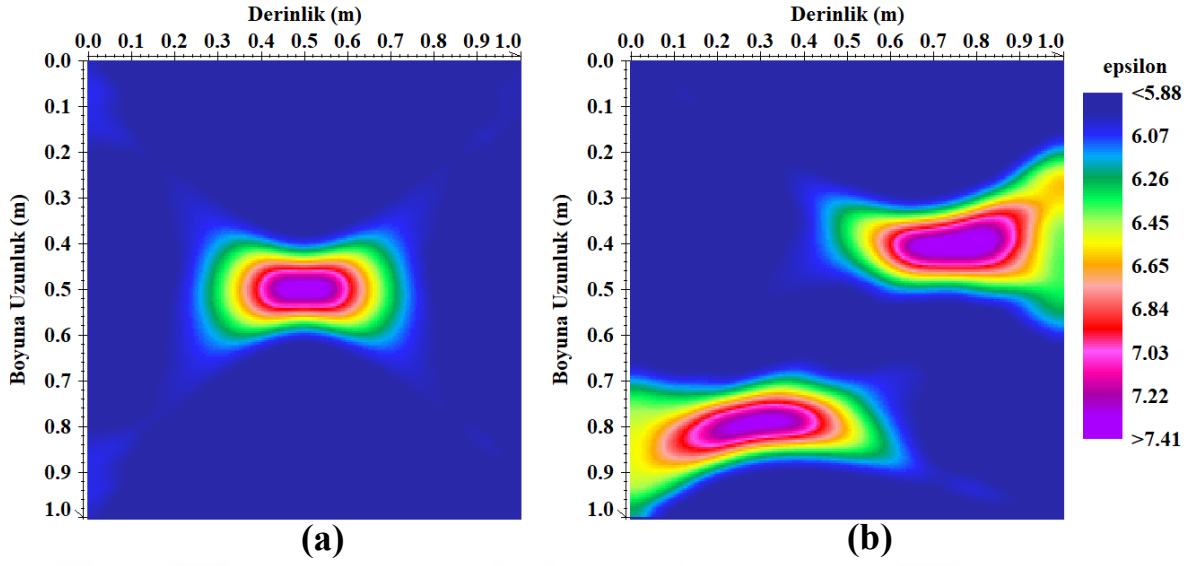
Şekil 42. Yarıçapı 15 cm olan daire şekilli farklı dielektrik özelliğe sahip nesnenin merkeze konumlandırılmasıyla oluşturulan model (a) ve aynı dielektrik özelliğe sahip unsurun model sınırları içerisinde farklı noktalara konumlandırılmasıyla oluşturulan model (b)



Şekil 43. Şekil 42-a'da verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a) ve modelin sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)

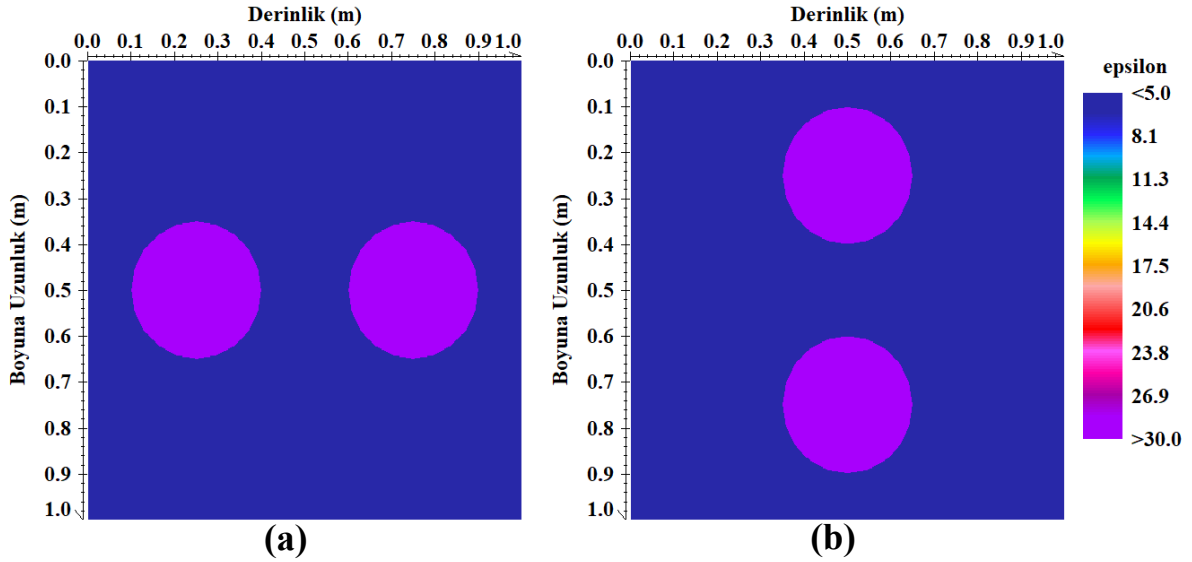


Şekil 44. Şekil 42-b'de verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a) ve modelin sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)



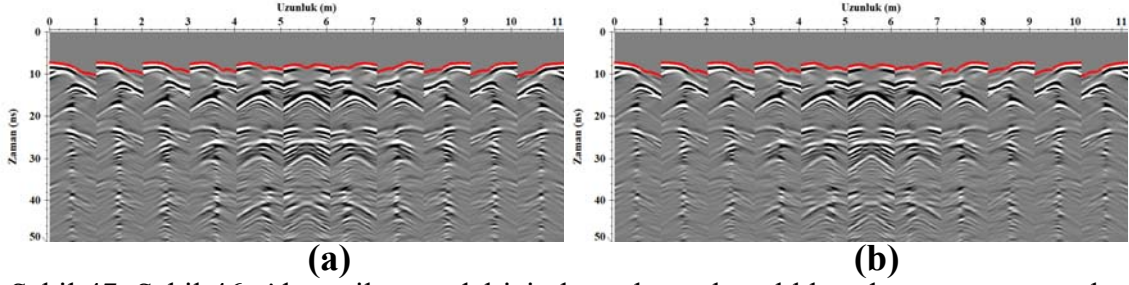
Şekil 45. Şekil 42-a'da verilen modele ait tomografi kesiti (a) ve Şekil 42-b'de verilen modele ait tomografi kesiti (b)

SIRT algoritması kullanılarak elde edilen tomografik çözümlerin tutarlılığı model sınırları içerisinde yan yana ve alt alta yerleştirilen dielektrik unsurlar üzerinde de test edilmiştir. Şekil 46-a'da yan yana yerleştirilen dielektrik unsurları gösteren model, Şekil 46-b'de ise alt alta yerleştirilen dielektrik unsurları gösteren model verilmiştir. Burada ortama ait bağıl dielektrik permittivite değeri 5, unsurlara ait bağıl dielektrik permittivite değeri ise 30 olarak seçilmiştir.

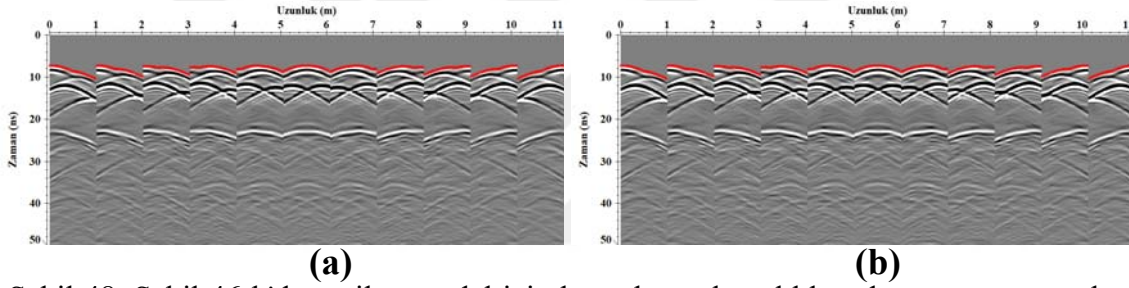


Şekil 46. Yanyana modellenen dielektrik unsurlar (a) ve alt alta modellenen dielektrik unsurlar (b)

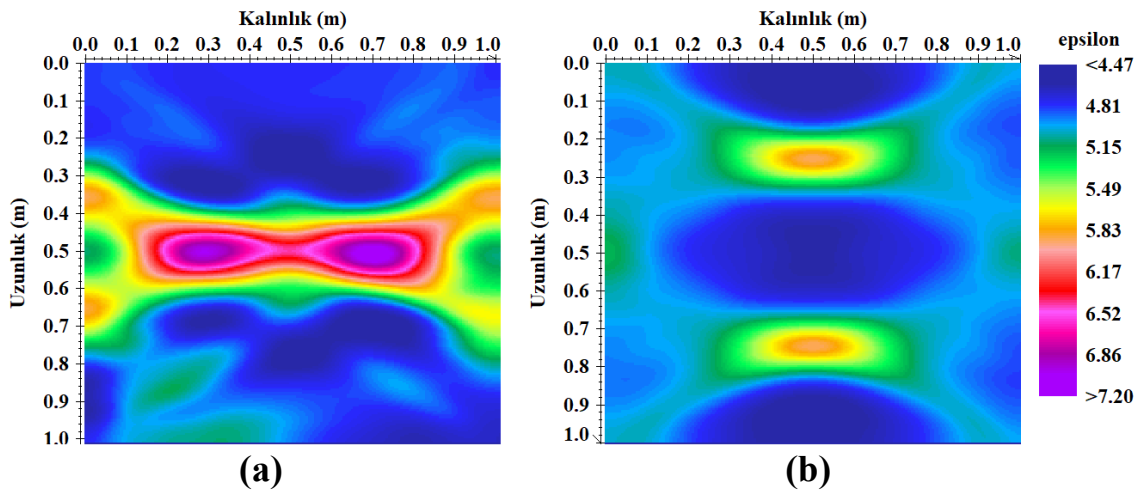
Şekil 46'da gösterilen modellere ait hesaplanan radargramlar yan yana model için Şekil 47'de, alt alta model için Şekil 48'de verilmiştir. Bu modellere ait tomografi kesitleri ise Şekil 49'da verilmiştir.



Şekil 47. Şekil 46-a'da verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a), sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)



Şekil 48. Şekil 46-b'de verilen model için hesaplanan karşılıklı radargram atış grupları ve ilk varış okumaları. Modelin sol tarafından elde edilen atış grupları (a), sağ tarafından elde edilen atış grupları (b)



Şekil 49. Şekil 46'de verilen modellere ait tomografik çözümler. Şekil 46-a'da verilen model için tomografik çözüm (a) ve Şekil 46-b'de verilen model için tomografik çözüm (b)

Şekil 46-a' da verilen model için hesaplanan tomografi kesiti üzerinde yanal ayrırlılığın azaldığı gözlenmiş ancak buna rağmen modellenen unsurların konumu tomografi kesiti üzerinde kolay bir şekilde ayırt edilebildiği gözlenmiştir. Burada ayrırlılığın azalmasının sebebinin ilk dielektrik unsur içerisinde geçen elektromanyetik dalganın tekrar ikinci bir dielektrik unsur içerisinde seyahat etmesi olduğu düşünülmektedir.

Yapılan modelleme çalışmalarında SIRT algoritması denenmiştir ve modellenen ortama ait bağıl dielektrik permittivite değerine yüksek doğrulukta yaklaşılmıştır. Ancak daire şekilli modeller için hesaplanan tomografi kesitlerinde model geometrisi çok iyi bir şekilde ortaya çıkmamıştır. Bunun nedeninin modelin sağından ve solundan elde edilen iz kayıt aralığının yeterince sık seçilmemiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir başka deyişle 500 MHz anten modelinin kıvrımlı ya da eğrisel geometrilerde etkili olmadığı düşünülmektedir. Yine de elde edilen tomografi kesitleri modellenen unsurların konularında anomali vermiştir. Bu tez çalışmasındaki esas amaç yapılar içerisindeki unsurları tespit etmekten öte yapıya ait ortam içerisinde bağıl dielektrik permittivite dağılımını tespit etmektir. Nitekim beton kolonlar içerisindeki donatı ve etriyelerin çapı göreceli olarak çok küçük olmasından dolayı GPR tomografi çalışmalarında bu unsurların anomali vermesi beklenmemektedir.

7.2. Arazi Çalışmaları

GPR tomografi modelleme çalışmalarının ardından gerçek saha uygulamalarına geçilmiştir. GPR ekipmanı olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği bölümü, Uygulamalı Jeofizik laboratuvarında yer alan MALA ProEx sistem GPR ekipmanı kullanılmıştır. Çalışmada MALA ProEx kontrol birimi, iki adet MALA 500 MHz korumalı anten, bir adet ortak ofset ölçümler için 800 MHz korumalı anten, bir adet mesafe ölçen tekerlek ve verilerin kaydedilmesi için bir adet dizüstü bilgisayar kullanılmıştır (Şekil 50).



Şekil 50. MALA ProEx sistem ve bileşenleri

Çalışma sahası olarak Trabzon-Rize Devlet Sahil Yolu, Ayasofya mevkiinde yer alan viyadük ayağı seçilmiştir. İlgili bölgede çalışma yapmak için T.C Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nden ve Trabzon Emniyet Müdürlüğü'nden gerekli izinler alınmıştır. Şekil 51'de çalışma alanına ilişkin harita ve konum gösterilmiştir.



Şekil 51. Çalışma alanının harita üzerinde konumu (WGS 84 Koordinatlar: 41° 0'17.45"K, 39°41'42.88"D).

İlk olarak ölçüm yapılacak viyadük ayağı için karelaj yapılarak ölçüm noktaları ve profiller belirlenmiştir (Şekil 52). Ölçüm noktaları ve profiller, modelleme çalışmalarında kullanılan verici anten aralıkları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında verici anten atış aralığı ölçüm yüzeyi boyunca 10 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Bağlı dielektrik permittivite dağılımının viyadük ayağı içerisinde nasıl değişiklik gösterdiğini gözlemleyebilmek amacıyla 15 cm aralıklarla ayağın her iki tarafında düşey profiller oluşturulmuştur.



Şekil 52. Viyadük ayağı üzerinde ölçüm profilleri ve noktalarının belirlenmesi

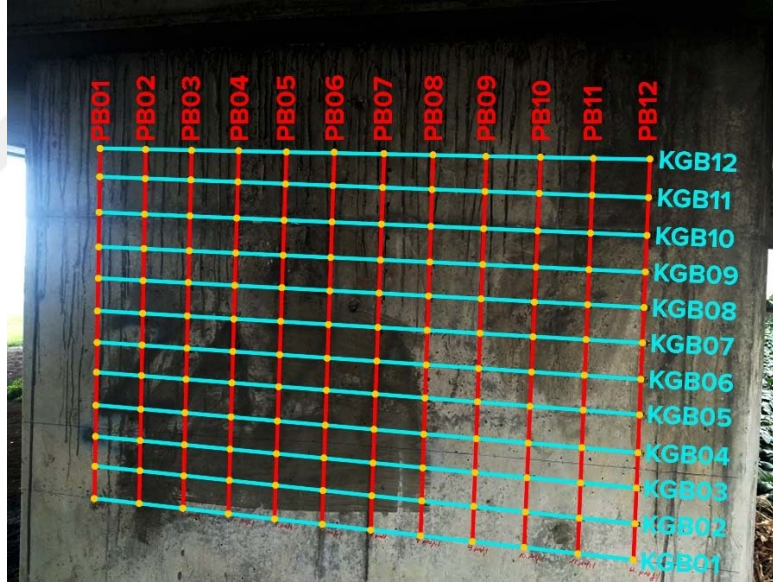
Viyadük ayağının tabandan itibaren boyu 220 cm, kalınlığı 100 cm ve genişliği 250 cm olarak ölçülmüştür. Ölçüm profilleri ayağın başından ve sonundan 30 cm içeriden başlayacak şekilde oluşturulmuştur. 15 cm aralıklar ile 12 profil belirlenmiştir. Ayağın denize bakan tarafı kuzey, Ayasofya camisi tarafına bakan kısmı güney, Rize tarafına bakan yüzü doğu ve Giresun tarafına bakan yüzü ise batı olarak isimlendirilmiştir. Doğu ve batı yüzlerinde eş profiller oluşturulmuştur ve her iki yüzde yer alan profiller üzerinde 10 cm aralıklarla 12 kayıt noktası işaretlenmiştir. Doğu ve batı yüzleri üzerinde belirlenen profiller

ve kayıt noktaları Şekil 53'te gösterilmiştir. PD01-12 arası kırmızı çizgiler ile gösterilen profiller, viyadük ayağının doğu yüzünde yer alan dikey tomografik ve ortak ofset ölçüm hatlarını, PB01-12 arası kırmızı çizgiler ile gösterilen profiller, viyadük ayağının batı yüzünde yer alan dikey tomografik ve ortak ofset ölçüm hatlarını, KGD01-12 arası turkuaz rengi ile gösterilen profiller, viyadük ayağının doğu yüzünde yer alan yatay ortak ofset ölçüm hatlarını, KGB01-12 arası turkuaz rengi ile gösterilen profiller, viyadük ayağının batı yüzünde yer alan ortak ofset ölçüm hatlarını ve viyadük ayağının her iki yüzünde yer alan sarı renkli noktalar ise tomografik ölçümler için verici anten konumlarını göstermektedir (Şekil 53).





(a)

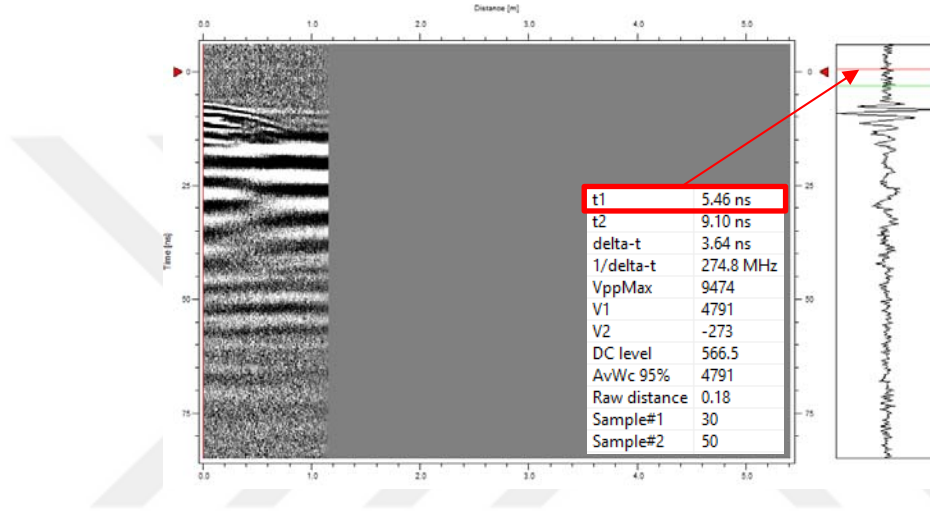


(b)

Şekil 53. Viyadük ayağı üzerinde belirlenen ölçüm noktaları ve profiller. Ayağın doğu yüzü (a), ayağın batı yüzü (b) yer almaktadır.

Ölçüm işlemine başlamadan önce GPR ölçüm seti için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. İlk olarak teker kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından verici anten olarak kullanılacak olan 500 MHz frekansa sahip korumalı antenin verici sinyal kablosunun bağlantısı, kontrol birimi üzerinde “Tx” bağlantı noktasına yapılmıştır. Aynı şekilde alıcı anten olarak kullanılacak olan 500 MHz frekansa sahip korumalı antenin alıcı sinyal kablosu, kontrol

birimi üzerinde “Rx” bağlantı noktasına, veri kablosu “D” bağlantı noktasına ve teker bağlantı kablosu “Wheel” bağlantı noktasına yapılmıştır. Daha sonra her iki antenin taban yüzeyleri aynı doğrultuda birleştirilerek MALA GroundVision yazılımı üzerinde sinyalin ilk varış zamanı işaretlenmiştir. Bu işlemin yapılmasındaki amaç, birbirinden bağımsız iki farklı antenin vericisinden gönderilen sinyal genliğinin alıcıya ulaşma sıfır zamanının tespit edilmesidir. Antenler arası mesafe arttıkça ve her iki anten arasındaki materyalin elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak verici antenden gönderilen sinyalin alıcı antene ulaşma zamanında doğal olarak gecikme durumu söz konusu olacaktır.



Şekil 54. Sıfır zamanı varış noktası sinyal izi üzerinde kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

Alıcı-verici anten arasındaki gecikme Şekil 54’te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere sıfır zamanından itibaren sinyalin alıcı antene varışında yaklaşık 7 ns kadar bir gecikme meydana gelmiştir. Burada “t1” ile gösterilen zaman değeri sıfır zamanı olup, verileri değerlendirmeden önce başlangıç zamanı düzeltmesi ile veriden atılmıştır.

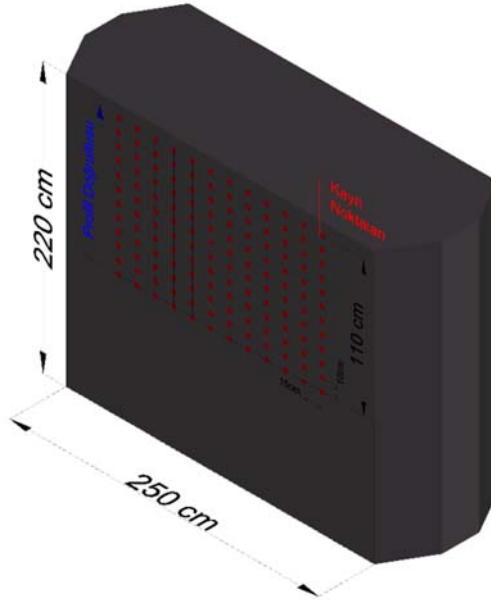
GPR ekipmanı üzerinde gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra verici anten, viyadük ayağının batı yüzünde belirlenen ilk profilin ilk kayıt noktası üzerinde sabit tutulmuş ve ayağın doğu yüzünde alıcı anten ile bu profile karşılık gelen profilin başlangıcından sonuna kadar sürekli ölçü alınmıştır. Daha sonra verici anten aynı profil üzerinde ikinci noktaya kaydırılmıştır ve ayağın doğu yüzünden alıcı anten ile aynı şekilde profilin başlangıcından sonuna kadar sürekli ölçü alınmaya devam edilmiştir. Bu şekilde verici antenin ayağın batı yüzünde aynı profil üzerinde konumlandığı her noktada alıcı anten ile ayağın doğu yüzünde aynı profil üzerinde sürekli ölçüler kaydedilmeye devam edilmiştir. Aynı işlemler viyadük

ayağı üzerinde belirlenen bütün profiller üzerinde gerçekleştirilmiş ve doğu yüzünde kaydedilen ölçümler tamamlandıktan sonra alıcı ve verici antenler yer değiştirerek aynı şekilde ayağın batı yüzünde de ölçüler kaydedilmiştir. Ölçü alım düzeninden bir görünüm Şekil 55’te verilmiştir.



Şekil 55. Verici anten viyadük ayağının batı yüzünde belirlenen profil üzerindeki kayıt noktasında sabit tutulurken alıcı anten ile ayağın doğu yüzünde aynı profile karşılık gelen profil üzerinde ölçü alımı

Şekil 56’da üzerinde çalışılan viyadük ayağının ölçüleri ve oluşturulan profiller ile verici kayıt noktaları gösterilmiştir.

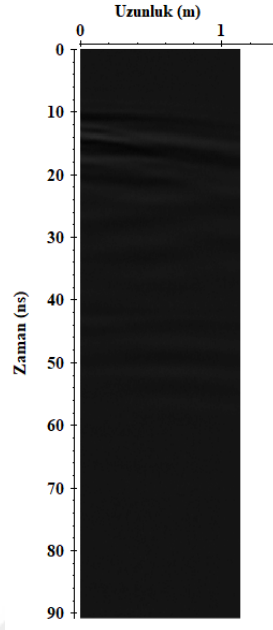


Şekil 56. Viyadük ayağının temsili modeli ve oluşturulan profiller ile kayıt noktalarının gösterimi

6.2.1 Veri-İşlem ve Değerlendirme

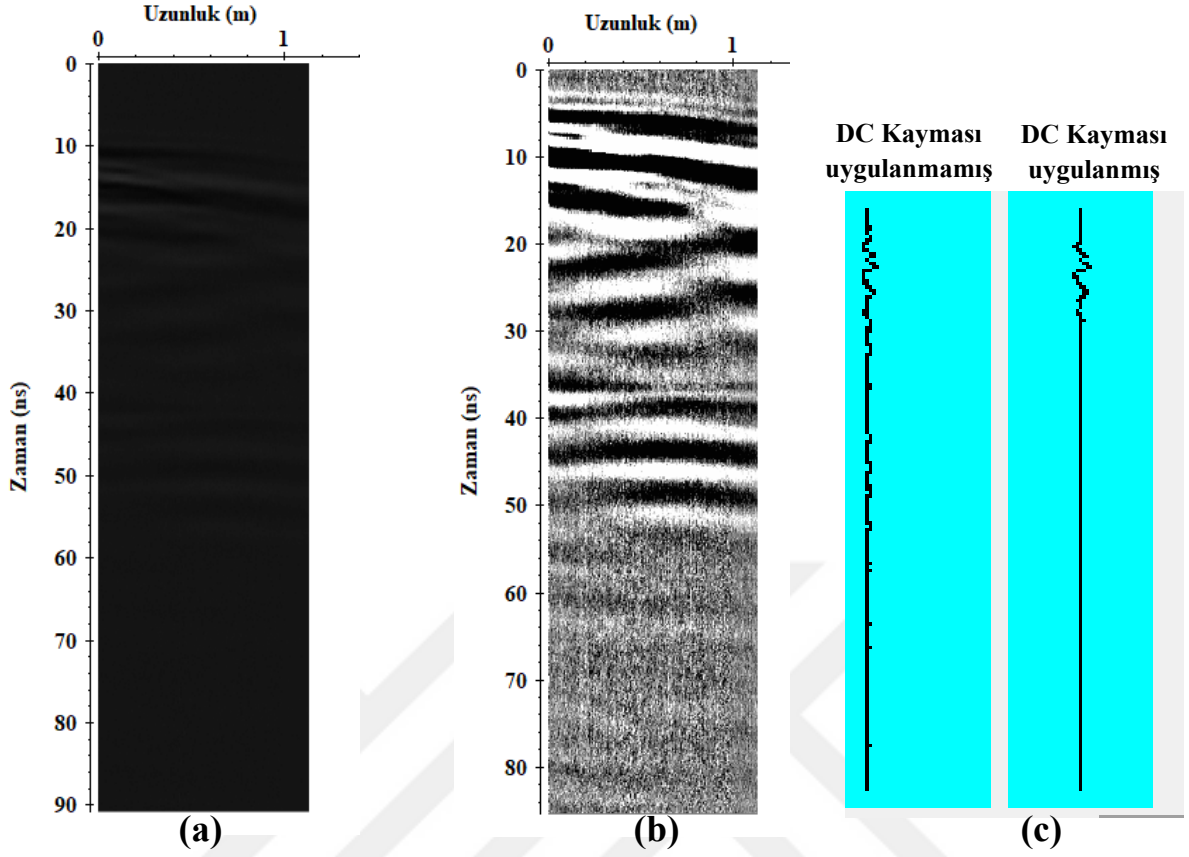
Viyadük ayağı üzerinde toplanan ham verilerin tamamı ölçüm doğası gereği eşit uzunlukta olamamaktadır. Viyadük ayağı üzerinde dikey yönde ölçü alınırken hat sonunda alıcı antenin tepe kısmı betonarme yapının tavan kısmına karşılık geldiği için ölçümler bu noktada sonlandırılmıştır. Ancak profil başlangıcında alıcı antenin konumlandırılması esnasında cm mertebesinde eksik veya fazla ölçüler kaydedilmiştir. Kaydedilen en az iz sayısına sahip olan veri grubu göz önünde bulundurularak alıcı anten ile kaydedilen bütün verilerin iz sayıları eşitlenmiştir. Bu düzenlemeden sonra elde edilen veriler veri-işlem aşamalarına tabi tutulmuştur. Her bir profil üzerinde verici antenin konumlandığı 12 kayıt noktasının karşı tarafında alıcı anten ile ölçüler alınmıştır. 1. Profil üzerinde kaydedilen verilerin bir kısmında tanımlanamayan bir gecikme durumu söz konusu olduğu için bu profil dışındaki tüm ölçüler değerlendirilmiştir.

2. Profil üzerinde verici antenin viyadük ayağının batı yüzünün ilk noktasında konumlanması ile ayağın doğu yüzünde alıcı anten ile profil boyunca alınan ham veri Şekil 57'de gösterilmiştir. Uygulanan düzeltme ve veri-işlem aşamaları Şekil 57'de gösterilen ham veri üzerinden ifade edilecektir.



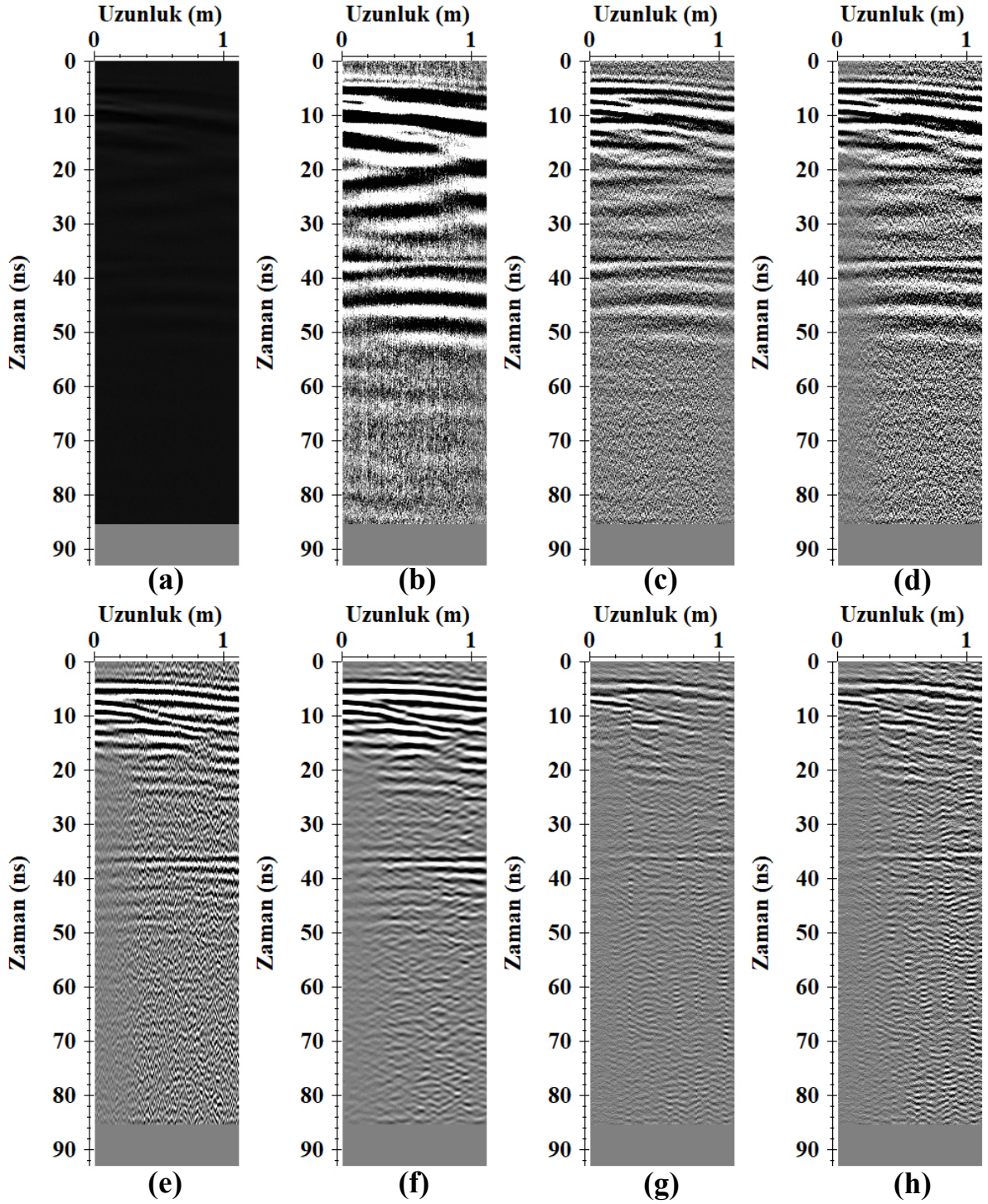
Şekil 57. Viyadük ayağı üzerinde verici antenin batı yüzünde ilk noktaya konumlandırılmasıyla alıcı anten ile doğu yüzünde profil boyunca kaydedilen ham verinin görüntüsü

İlk olarak elde edilen bütün verilere başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmıştır. Şekil 54'te başlangıç zamanı düzeltmesinin 5.46 ns olduğu gösterilmiştir. Bu zaman değerine karşılık gelen kısmın üstünde kalan alan bütün verilerden atılmıştır. Ardından veri izlerini sıfır eksenine taşımak için DC (Direct Current) kayması düzeltmesi uygulanmıştır. Şekil 58'de ham veri ve başlangıç zamanı düzeltmesi ile DC kayması düzeltmesi uygulanan veri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Elde edilen veri gruplarında ilk varışlardan erken gelen ve alıcı-verici anten konfigürasyonu ile cihaz elektroniğinden kaynaklandığı düşünülen gürültüler meydana gelmiştir ve bu gürültüler veri-işlem teknikleri ile veriden atılamamıştır.



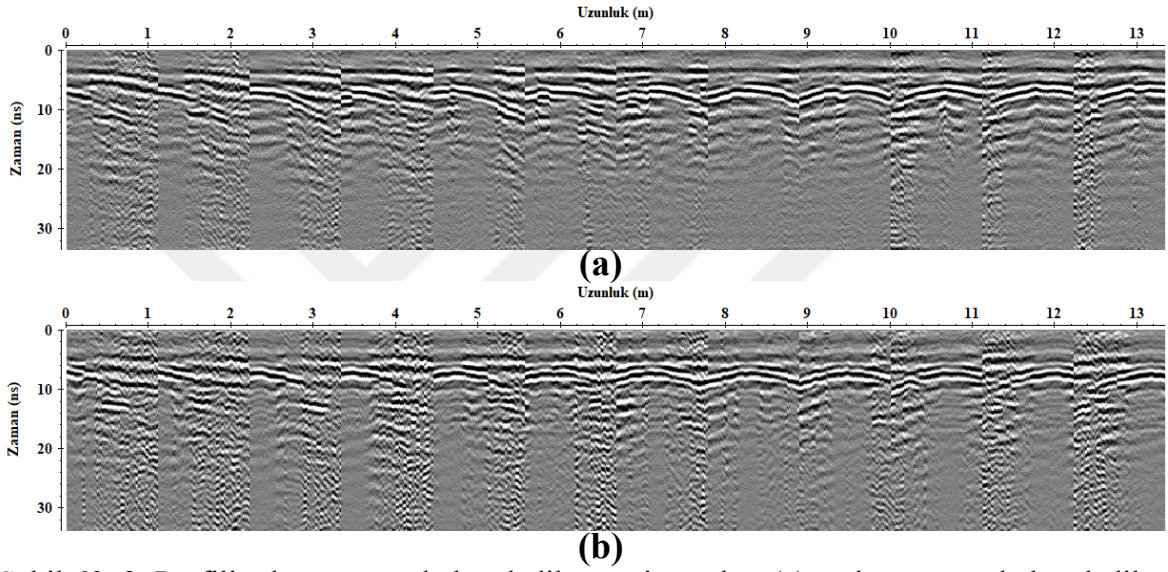
Şekil 58. Ham veri görüntüsü (a), Başlangıç zamanı düzeltmesi ve DC kayması düzeltmesi uygulanan veri görüntüsü (b) ve DC kayması düzeltmesi (c)

Uygulanan bu işlemlerden sonra alıcı anten ile kaydedilen ilk varışların daha net görüntülenmesi için bir dizi veri işlem aşaması uygulanmıştır. Bu işlemler sırasıyla, wow etkisini gidermek için “dewow”, genlik spektrumunda anten frekansının baskın olarak gözlemlendiği alanın dışında kalan gürültüleri atmak için bant geçişli süzgeç, bant geçişli süzgeç ile atılmayan ancak frekans-dalga sayısı ortamında dalga sayısı ekseninde gözlenebilen, zaman-uzaklık ortamında meydana gelen, veriyi maskeleyen yatay (ringing etkisi gibi) ve eğimli gürültüler, fourier dönüşümü ile frekans-dalga sayısı ortamında daha farklı konumlandığı için f-k süzgeci kullanılmıştır. Örneğin; zaman-uzaklık ortamında yatay görülen bir olay, frekans-dalga sayısı ortamında dikey görülmektedir. Dekonvolüsyon işlemi genellikle tekrarlı yansımaları ve ringing etkilerini gidermek için kullanılan bir filtreleme işlemidir. Tomografik çalışmalar için elde edilen GPR verileri üzerinde ilk varışları maskeleyen, düşük frekanslı baskın gürültülerin giderilmesi için kullanılmıştır. Ayrıca bütün izlerin genliklerini dengelemek üzere iz normalizasyonu işlemi uygulanmıştır. Şekil 57’de gösterilen verinin uygulanan veri-işlem aşamaları adım adım Şekil 59’da verilmiştir.



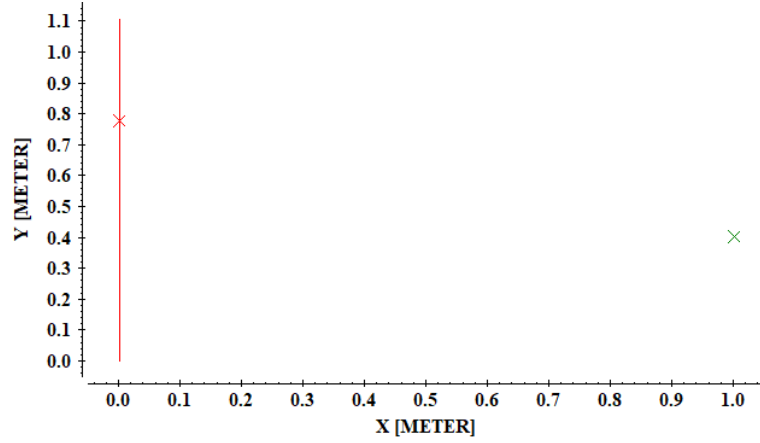
Şekil 59. Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış ham veri (a), DC kayması düzeltmesi uygulanmış veri (b), dewow işlemi uygulanmış veri (c), genlik normalizasyonu (d), bant geçişli süzgeç uygulanmış veri (e), f-k süzgeci uygulanmış veri (f), dekonvolüsyon uygulanmış veri (g) ve tekrar genlik normalizasyonu uygulanmış veri (h)

Viyadük ayağının üst kısmında çıkıntı oluşturan beton tavan yapı, ölçülen profillerin son noktasında alıcı antenin tepe noktasına karşılık geldiği için bütün veri gruplarının kaydı aynı noktada sonlanmıştır. Bu nedenle fazlalık olan izler verilerin baş kısmından çıkarılarak bütün veri gruplarındaki iz sayıları eşitlenmiştir. Veri gruplarındaki iz sayıları eşitlendikten sonra ölçü alınan profil üzerindeki bütün veri grupları ilk varış okuması yapmak üzere birleştirilmiştir. Şekil 60'da 2. Profilin doğu ve batı yüzlerinde kaydedilen veri grupları gösterilmiştir.



Şekil 60. 2. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grupları (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grupları (b)

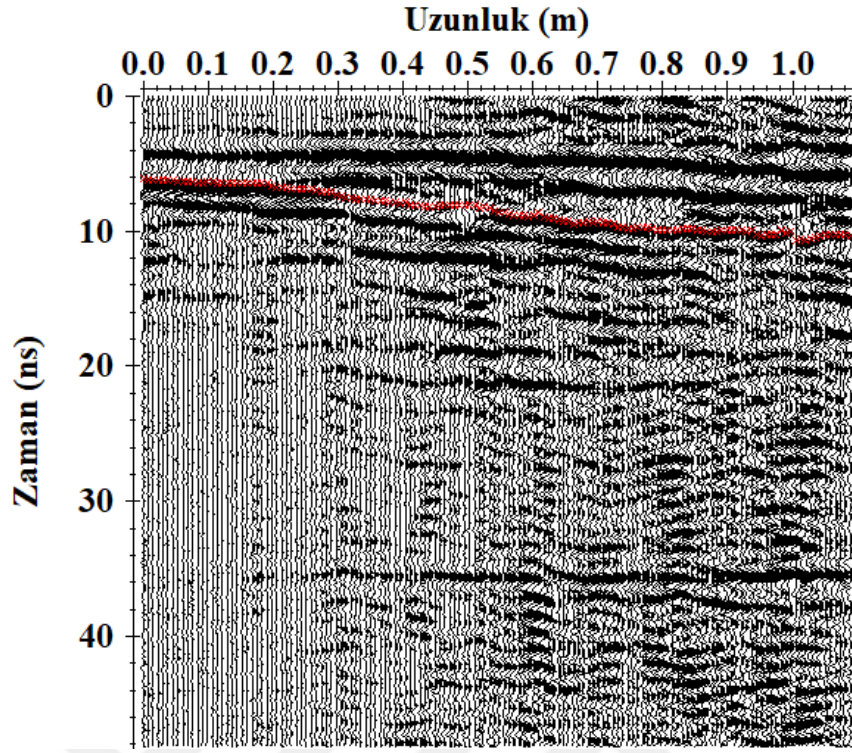
Daha sonra verilere ilk varış okuması yapılmadan önce verici antenin konumuna karşılık alıcı antenin konumunun belirlenmesi için elde edilen veri gruplarına geometri tanımlanmıştır. Şekil 61'de alıcı-verici antenlerin konumunu belirten geometri grafiksel olarak gösterilmiştir.



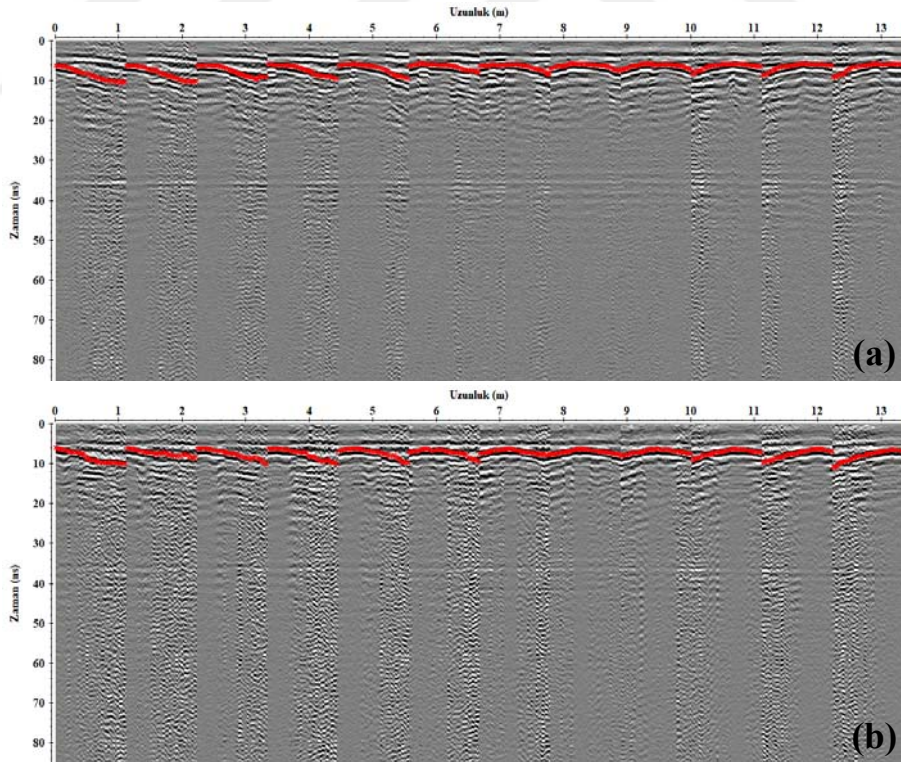
Şekil 61. Alıcı-verici antenlerin konumunu gösteren grafik. Kırmızı çizgi alıcı antenin kayıt uzunluğunu, kırmızı çarpı, kaydedilen verideki izin konumunu, yeşil çarpı ise verici antenin konumunu göstermektedir.

Geometri tanımlaması yapıldıktan sonra ilk varış okumalarına geçilerek elde edilen bütün veri grupları üzerinde ilk varış okumaları yapılmıştır. 2. Profil ve diğer profiller için ilk varış okumaları Şekil 63-73'te gösterilmiştir.

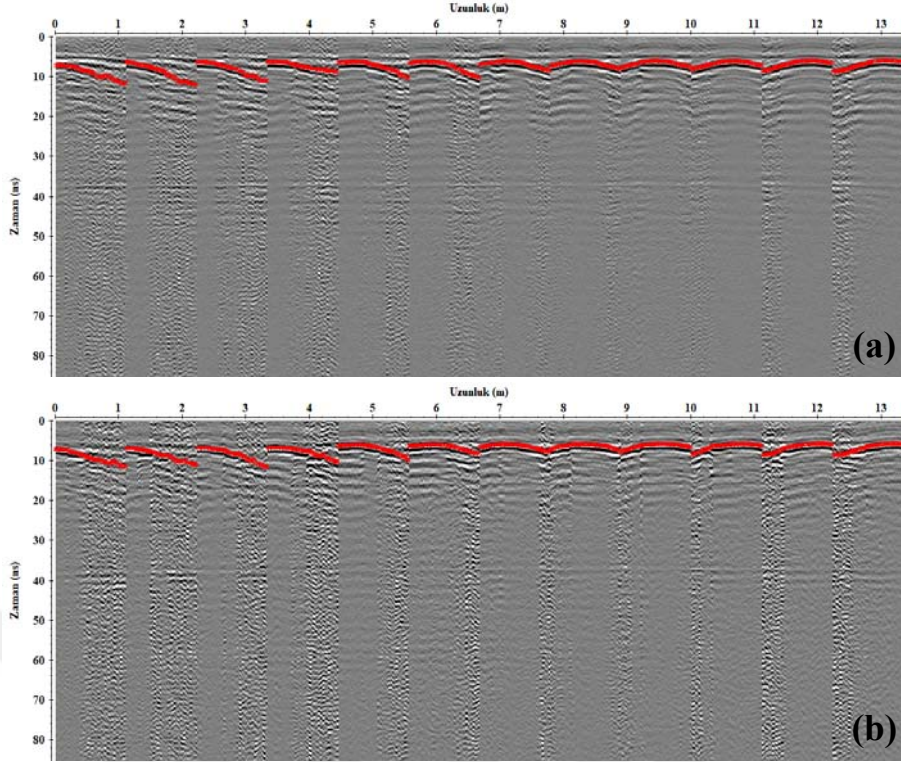
Radargramlar üzerinde GPR sinyallerinin ilk varışlarının en belirgin şekilde görüntülenebilmesi için Şekil 59'da gösterilen veri işlem sırası bir dizi deneme yanılma yoluyla oluşturulmuştur. Aynı veri işlem sırası diğer veri gruplarına uygulandıktan sonra ilk varış okuması için uygun olduğu tespit edildikten sonra bütün veriler üzerinde aynı veri-işlem dizisi uygulanmıştır. İlk varış işaretlemeleri yapılırken wiggle penceresi tercih edilmiştir. Bunun sebebi, wiggle penceresi üzerinde bütün izler üzerindeki genlik değişimlerinin daha kolay bir şekilde görüntülenebilmesidir. İlk varış okuması yapılırken verilere genlik kazancı uygulanmamıştır. Bunun sebebi, genlik kazancı uygulamasının genlikleri büyüterek ilk varışların varış zamanları üzerinde yanıltıcı etkiye sahip olabilmesidir. Şekil 62'de İlk varış okumalarının yapıldığı wiggle penceresi gösterilmiştir.



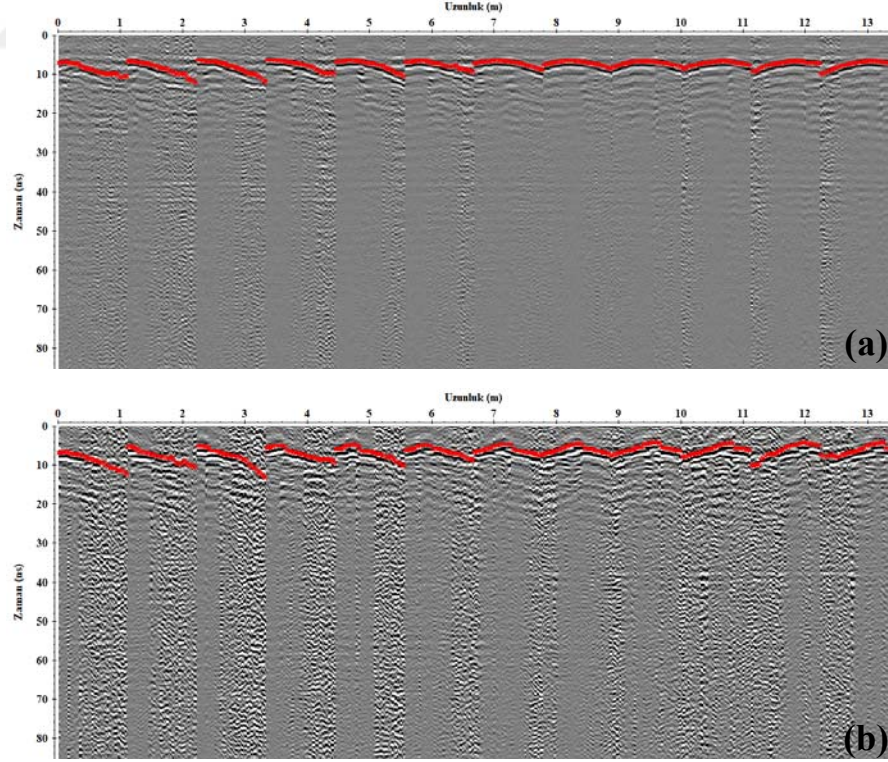
Şekil 62. Wiggle penceresinde ilk varışların işaretlenmesi



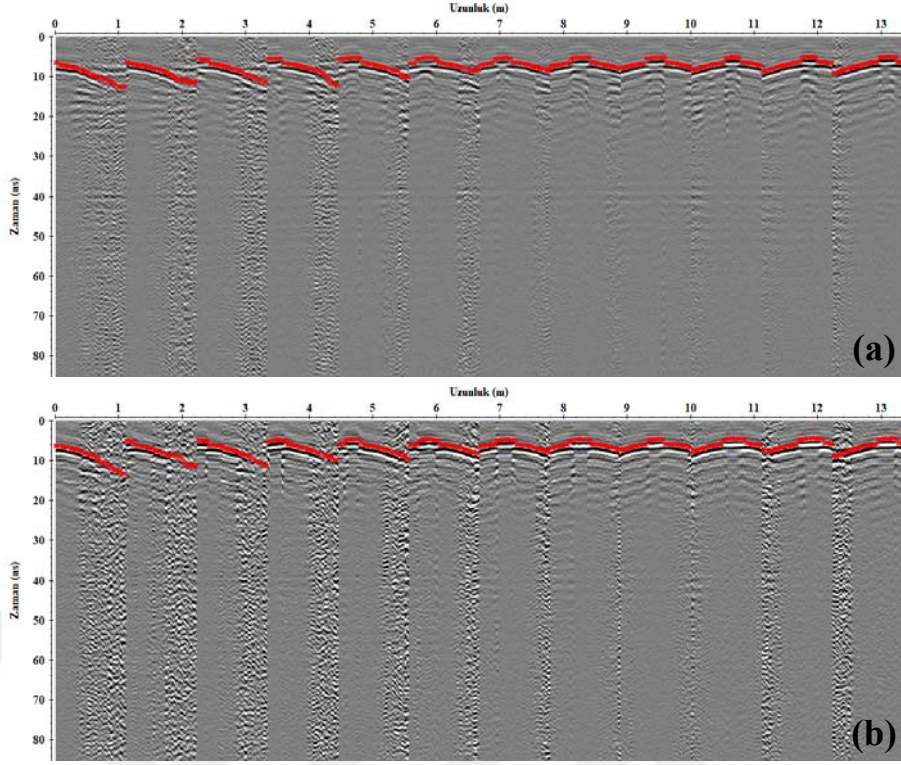
Şekil 63. 2. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



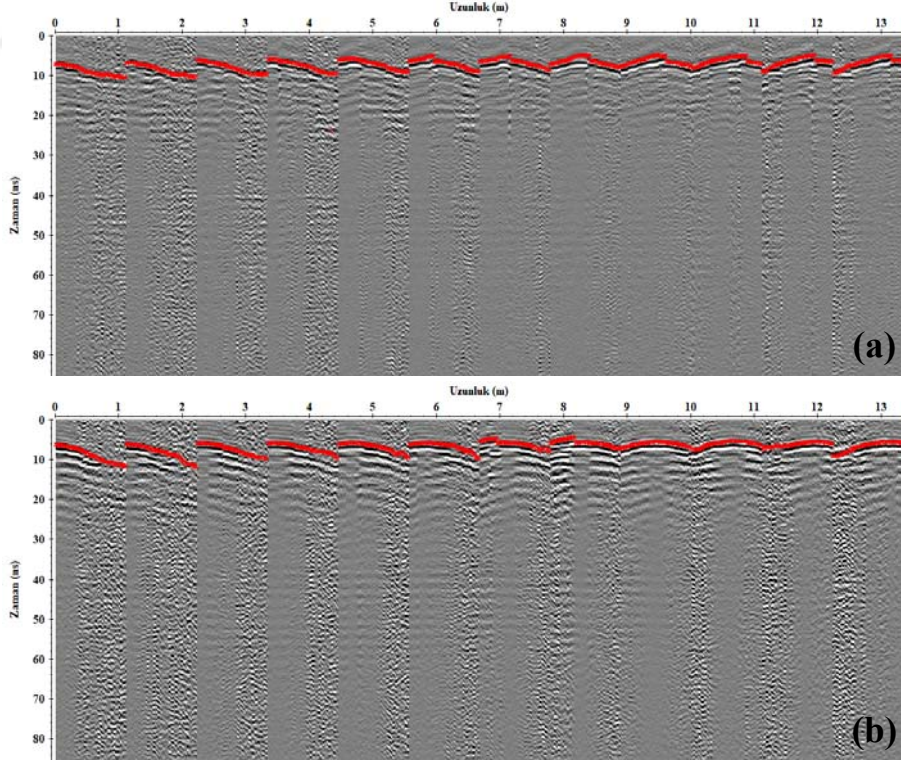
Şekil 64. 3. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



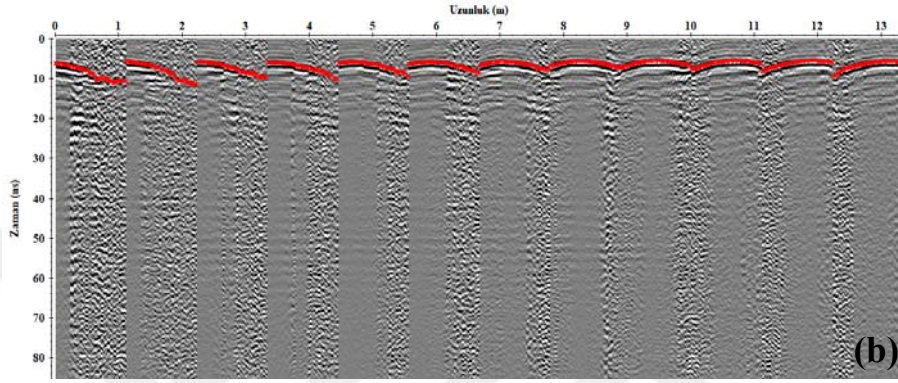
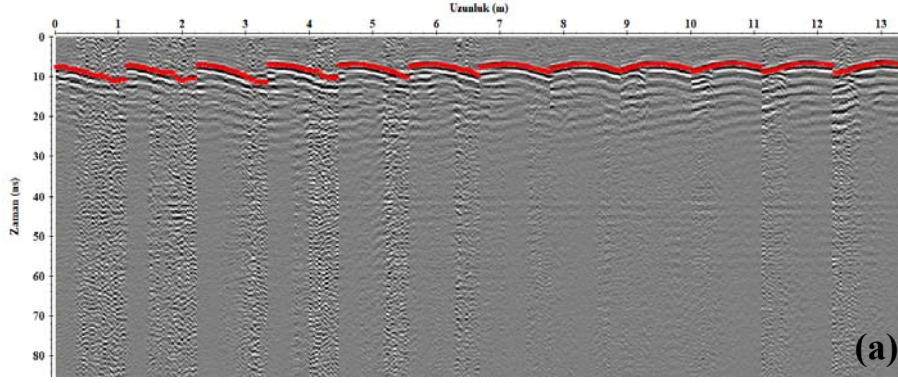
Şekil 65. 4. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



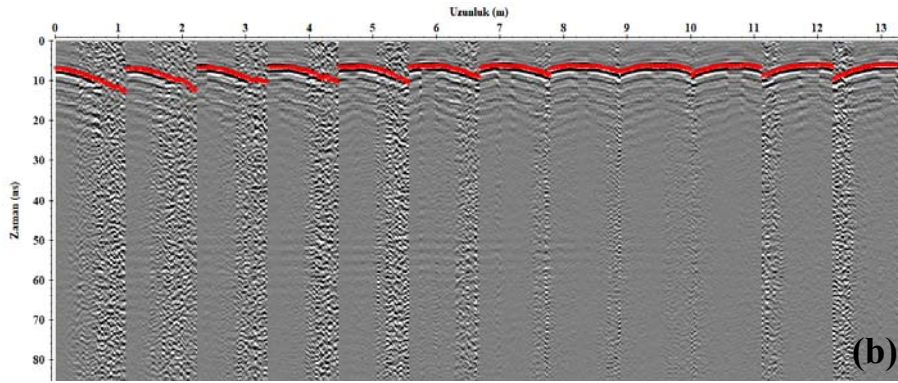
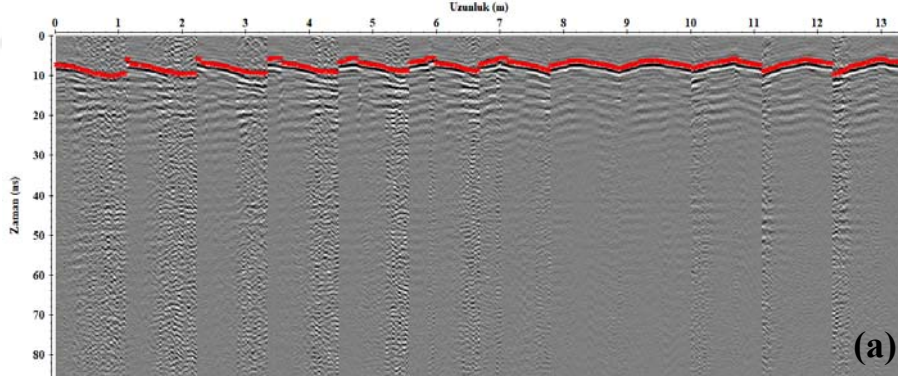
Şekil 66. 5. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



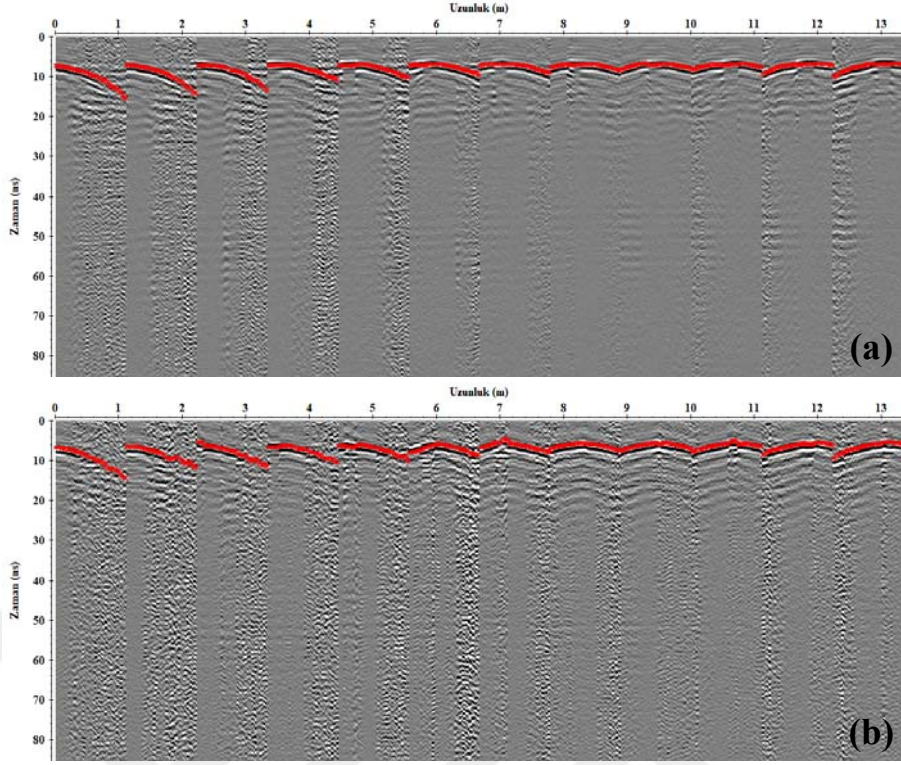
Şekil 67. 6. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



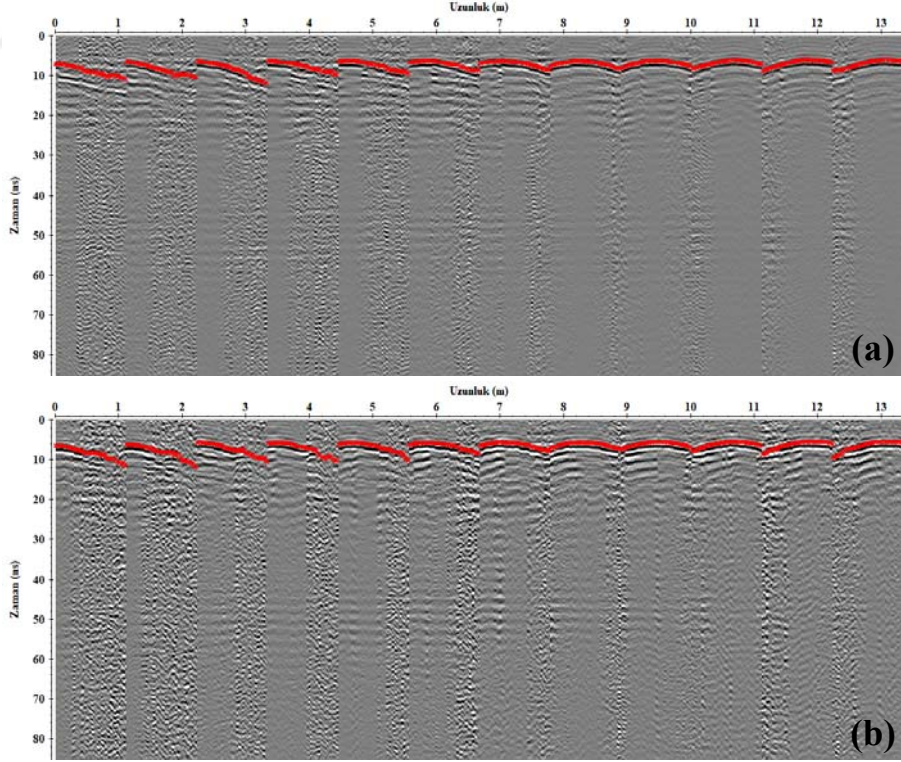
Şekil 68. 7. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



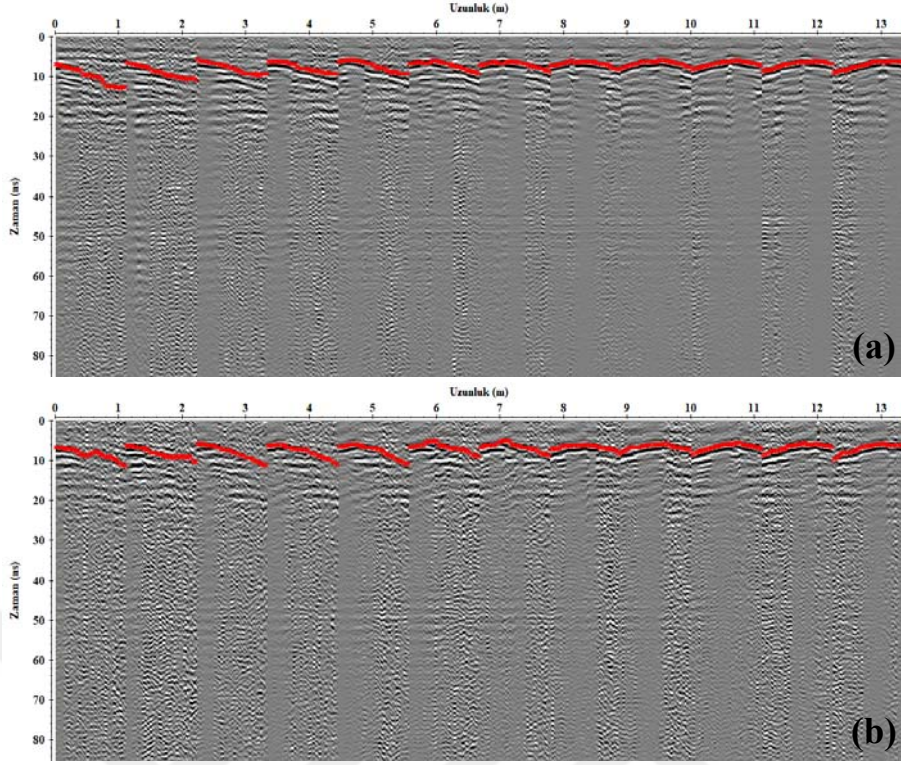
Şekil 69. 8. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



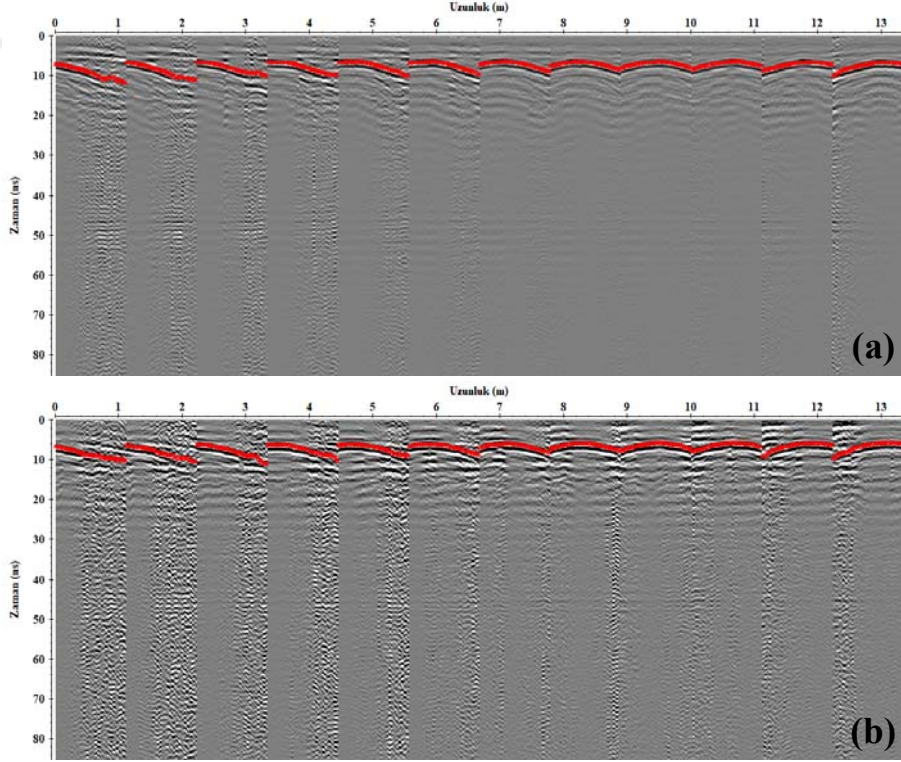
Şekil 70. 9. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



Şekil 71. 10. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



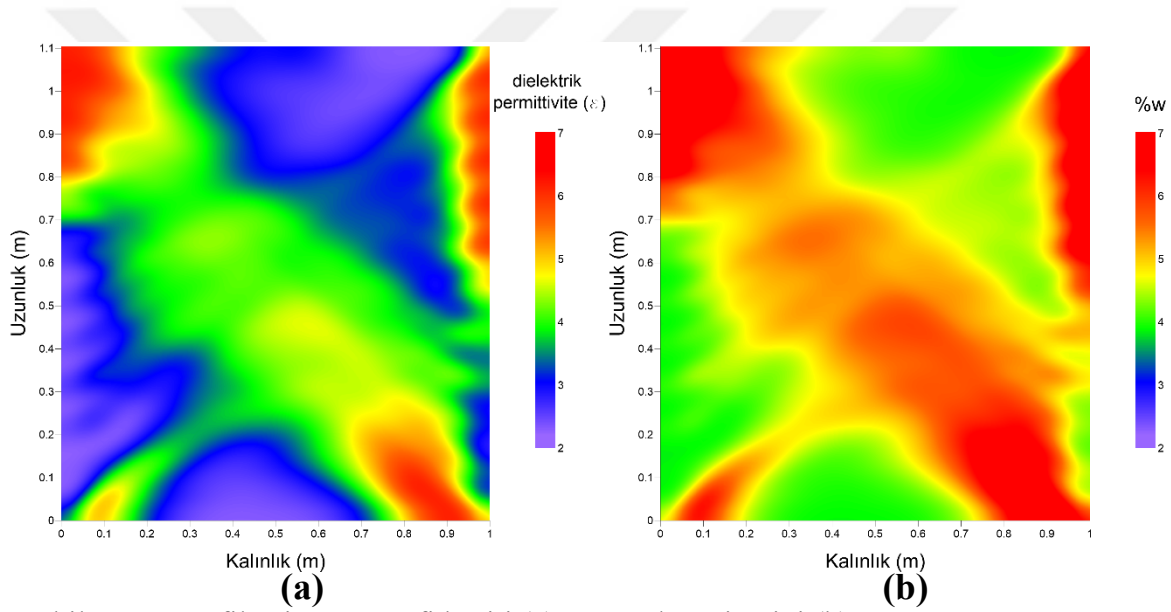
Şekil 72. 11. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları



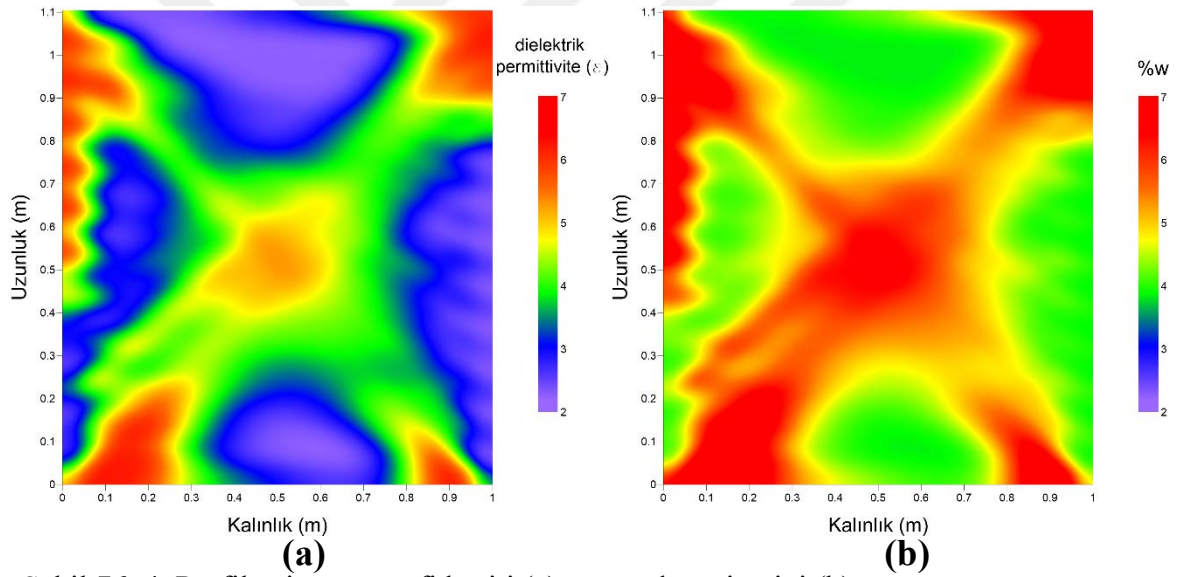
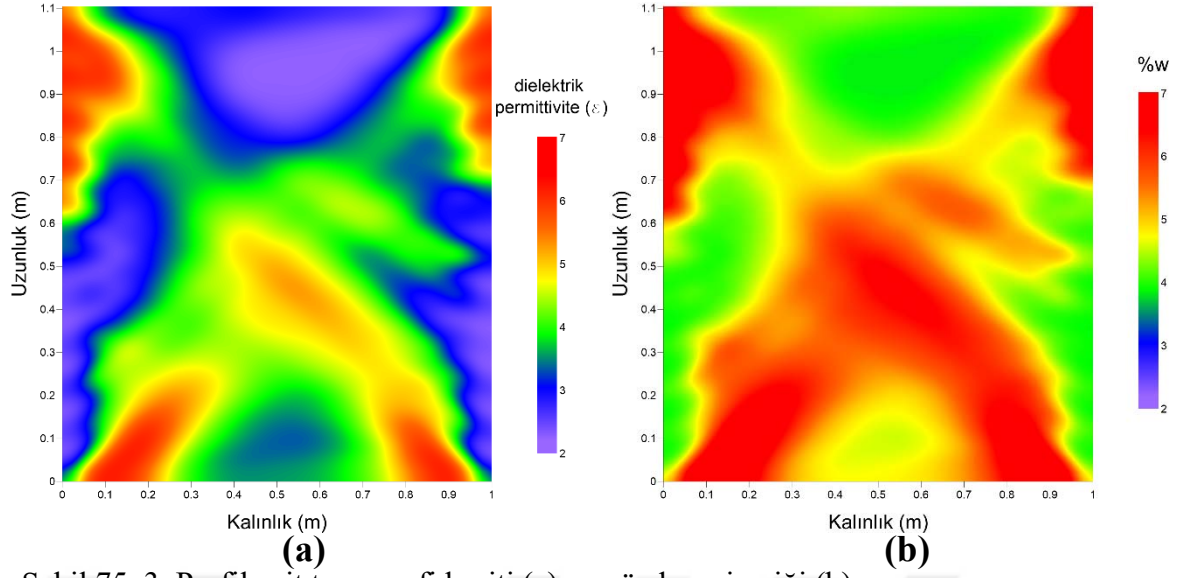
Şekil 73. 12. Profilin doğu yüzünde kaydedilen veri grubu (a) ve batı yüzünde kaydedilen veri grubu (b) için ilk varış okumaları

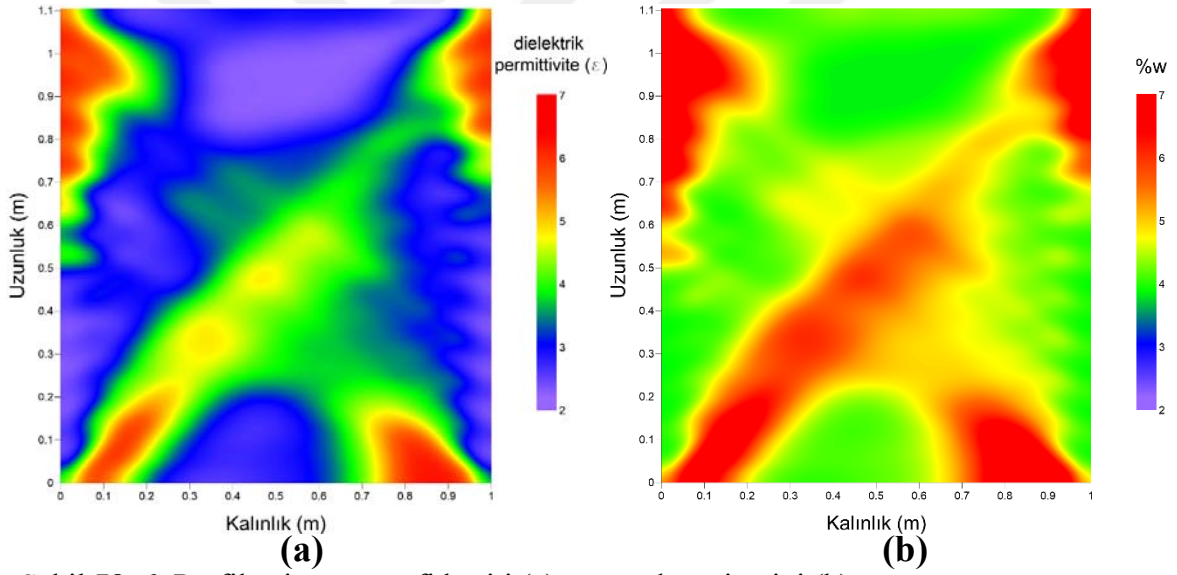
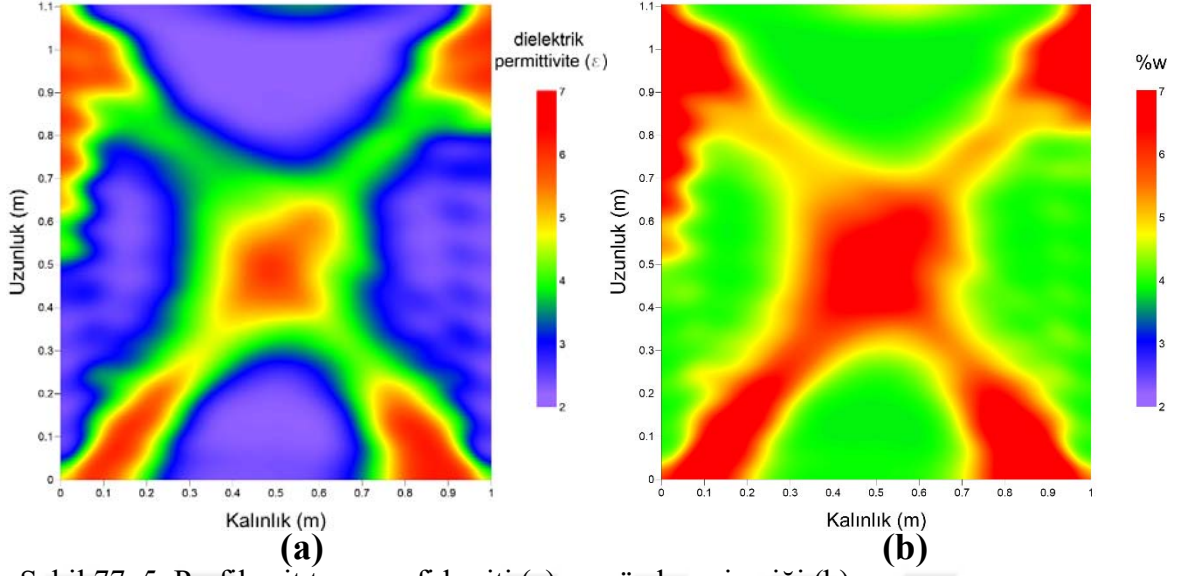
İlk varış okumaları tamamlandıktan sonra her profil için kaydedilen ilk varış dosyaları Reflexw yazılımında okutularak tomografi kesitleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu kesitler ASCII formatına dönüştürülerek Golden Software Surfer yazılımında çizdirilmiştir.

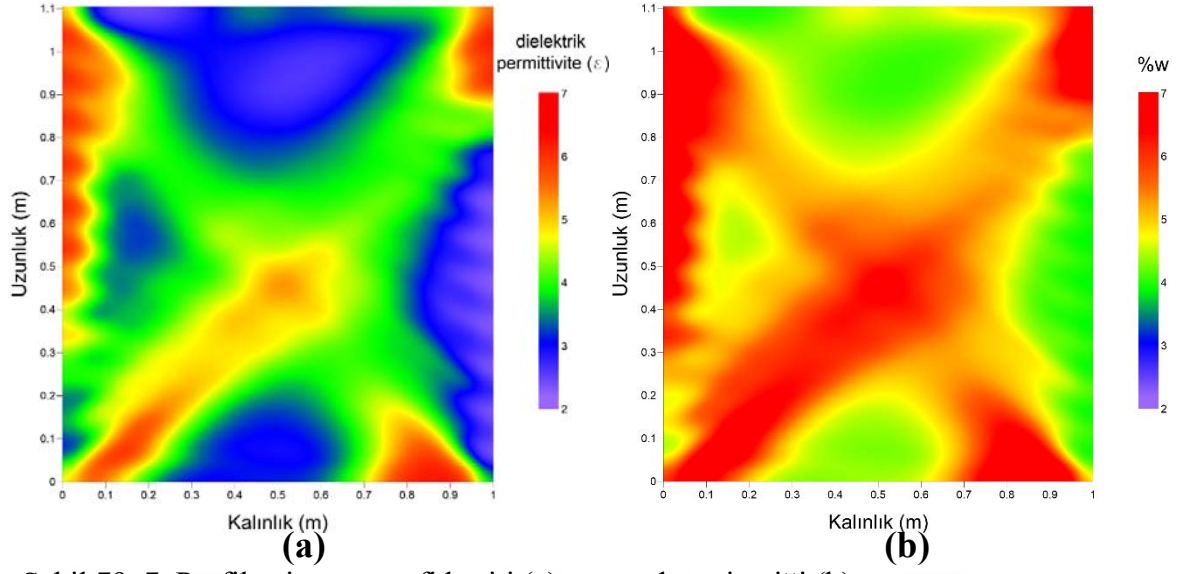
Oluşturulan tomografi kesitlerinden elde edilen bağıl dielektrik permittivite değerleri (5.3.1) eşitliğinde kullanılarak yüzde su içeriği kesitleri de oluşturulmuştur. Şekil 74-84'te 2. ve diğer profiller için oluşturulan tomografi kesitleri ve bu kesitlerden elde edilen bağıl dielektrik permittivite değerleri ile oluşturulan yüzde su içeriği kesitleri de gösterilmiştir. Tomografi kesitleri oluşturulurken, iterasyon sayısı 20, yatay ve dikey ekseninde hücre boyutu 0.005m parametreleri ile ilk varışlardan hesaplanan minimum ve maksimum hız değerleri seçilmiştir.



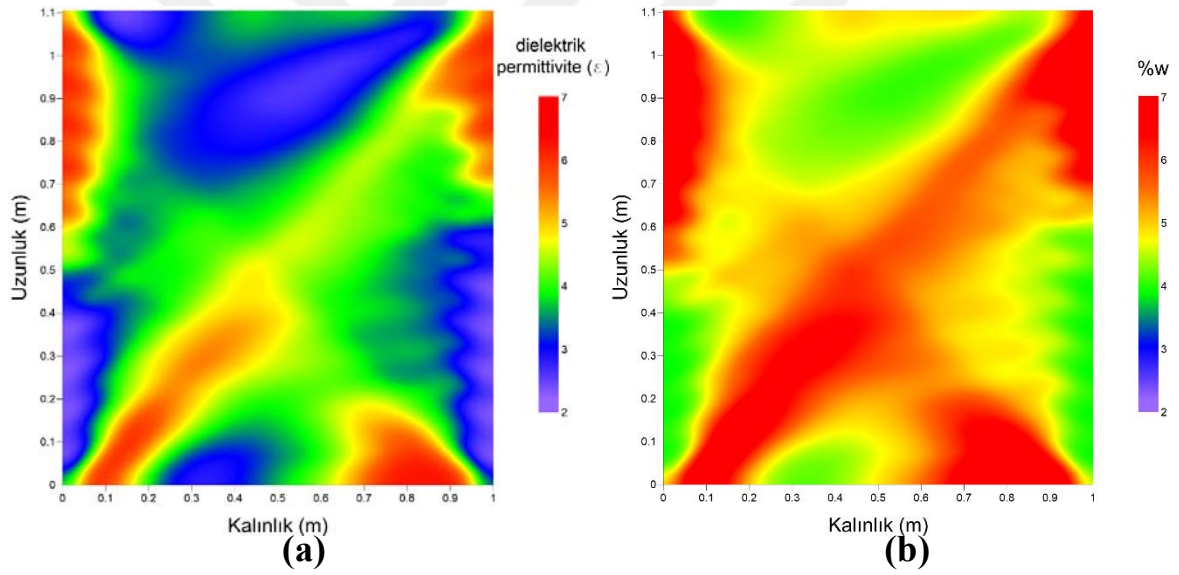
Şekil 74. 2. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)



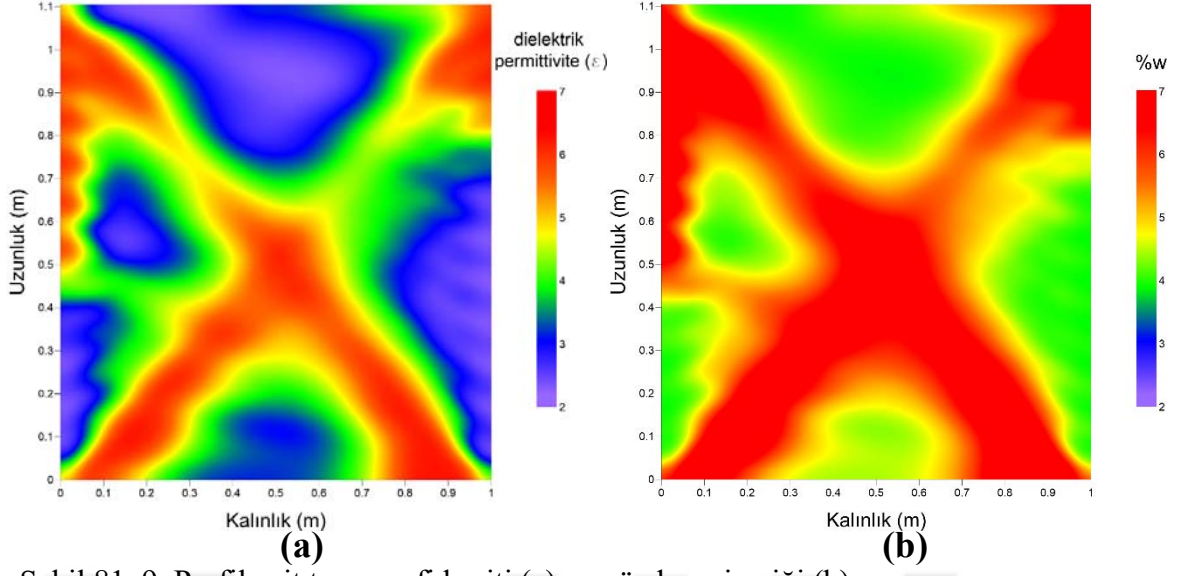




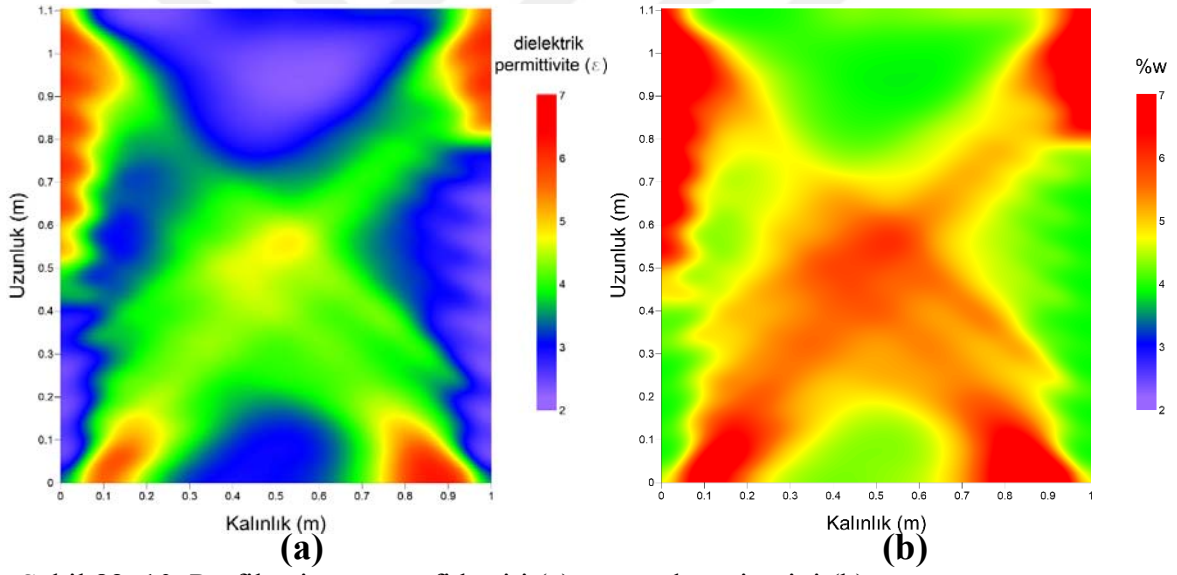
Şekil 79. 7. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)



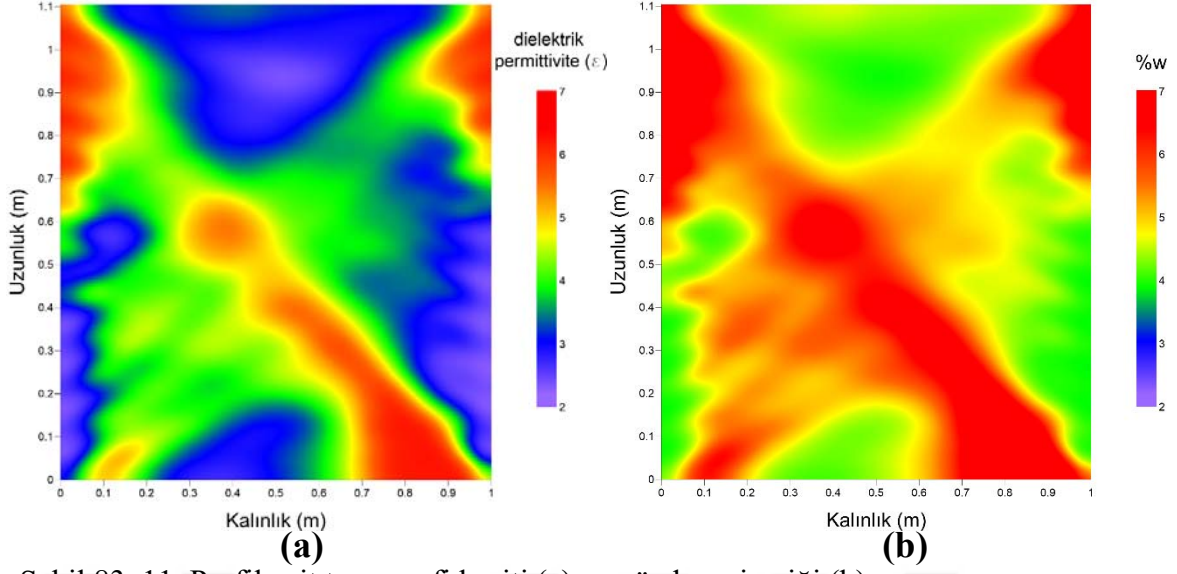
Şekil 80. 8. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)



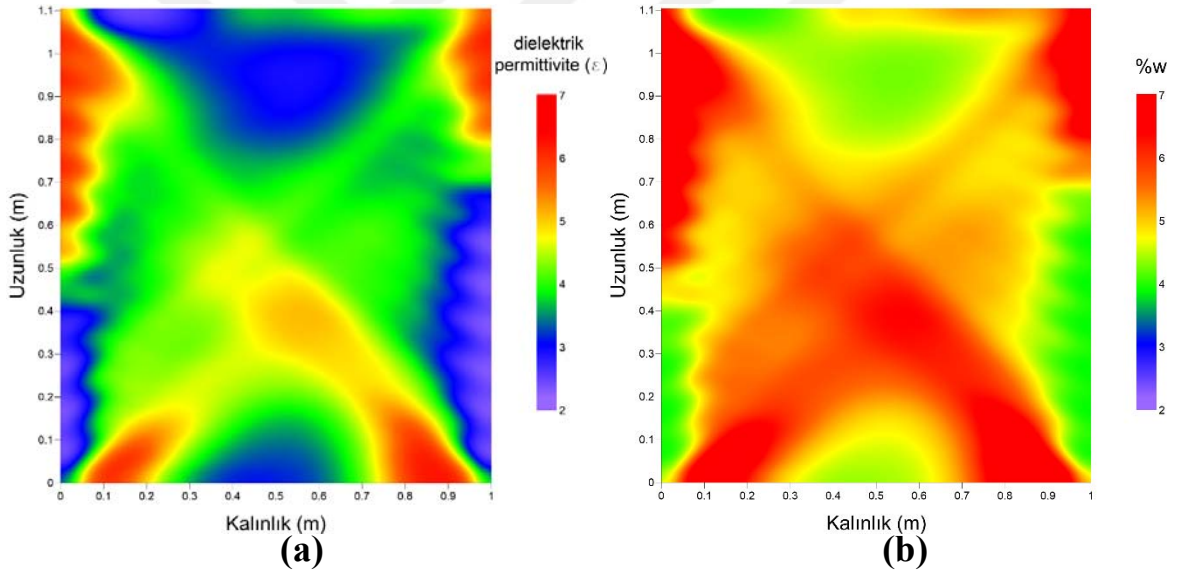
Şekil 81. 9. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)



Şekil 82. 10. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)



Şekil 83. 11. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)

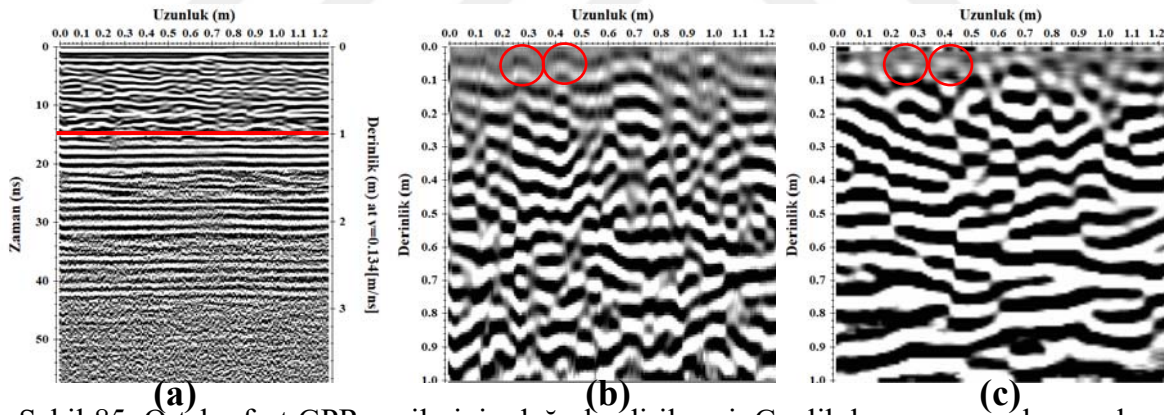


Şekil 84. 12. Profile ait tomografi kesiti (a) ve yüzde su içeriği (b)

Viyadük ayağı üzerinde tomografi çalışması için belirlenen profiller üzerinde ve atış noktaları ile bu profilleri kesecek şekilde ortak ofset GPR ölçümleri de alınmış ve değerlendirilmiştir (Şekil 53). Ortak ofset GPR ölçümlerine uygulanan veri işlem adımları:

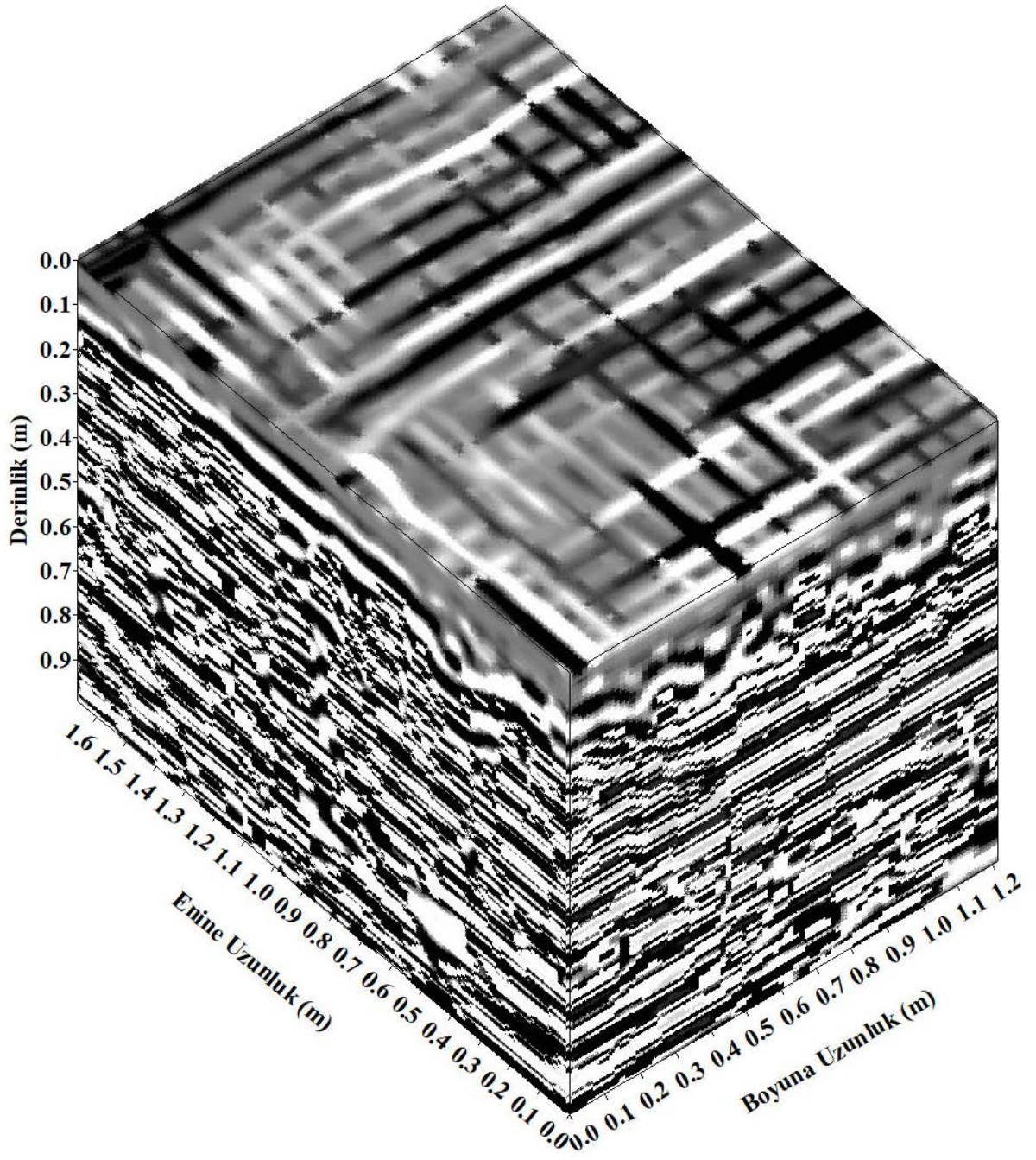
1. Dewow: wow etkisinin giderilmesi işlemi.
2. Statik düzeltme: Başlangıç zamanı düzeltmesi.
3. Enerji kazanımı: Genliklerin belirginleştirilmesi.
4. Background removal: Yatay bantlaşmaların giderilmesi.
5. Zaman kesmesi: Veri içermeyen kısmın veriden atılması.
6. Migrasyon: Saçılan enerjinin gerçek yerlerine konumlandırılması.

Şekil 85'te viyadük ayağının batı tarafında yer alan boyuna ikinci profile ait radargramın belirtilen veri işlem adımlarından ilk üçünün uygulanmasından sonra elde edilen görüntüsü (Dewow ve Enerji kazanımı ile radargram görünür hale getirilmiştir) ve bütün veri işlem aşamalarının görüntüsü birlikte verilmiştir. Derinlik eksenini oluşturan hız değeri, tomografi çalışmalarından elde edilen bağıl dielektrik permittivite değeri ile (3.2.9) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen hız bilgisi ile viyadük ayağının kalınlığı doğru bir şekilde hesaplanmıştır ve elektromanyetik dalganın saçılımına neden olan donatılar üzerinde uygulanan migrasyon işlemi ile bu saçılmalar donatıların gerçek konumlarına toplanmıştır.

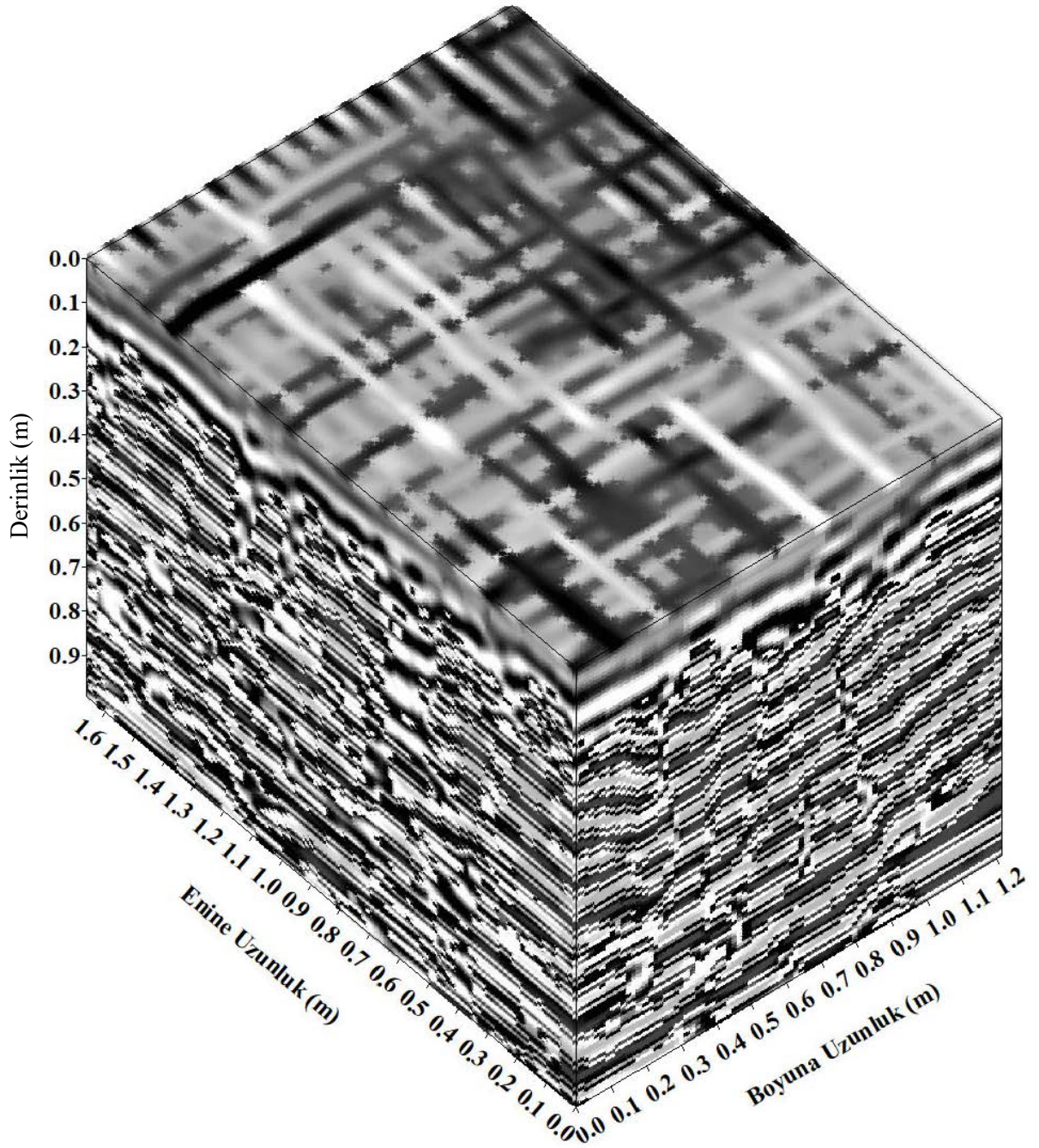


Şekil 85. Ortak ofset GPR verilerinin değerlendirilmesi. Genlik kazancı uygulanmış ham veri ve kolon kalınlığı (a), aynı verinin işlenmiş ve zaman-derinlik dönüşümü uygulanmış hali (b) ve migrasyon işlemi uygulanmış hali (c)

Viyadük ayağının doğu ve batı yüzlerinden elde edilen enine ve boyuna ortak ofset GPR verileri işlendikten sonra Reflexw yazılımının üç boyutlu veri yorumlama modülü kullanılarak viyadük ayağının her iki yüzünde 3B GPR görüntüleri oluşturulmuştur. Şekil 86'da viyadük ayağının batı yüzü için, Şekil 87'de ise doğu yüzü için oluşturulan 3B GPR görüntüsü verilmiştir.



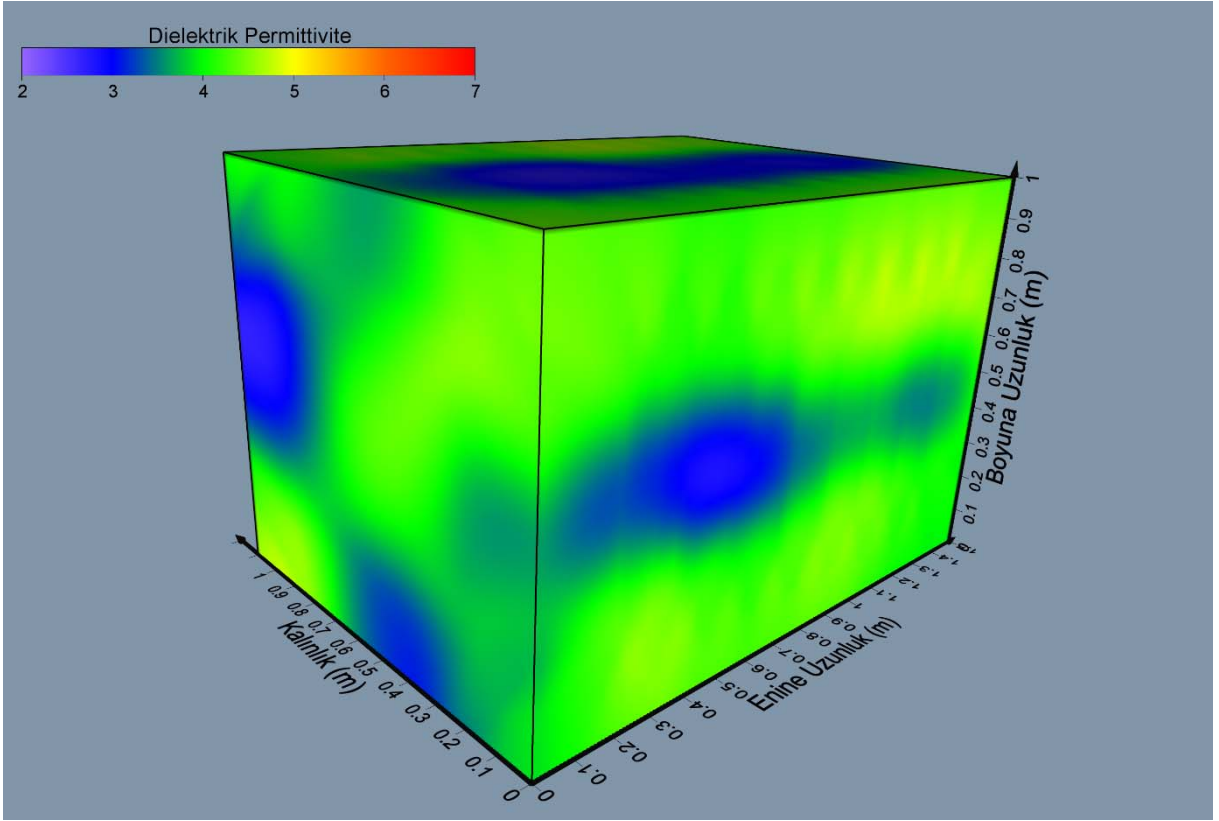
Şekil 86. Viyadük ayağının batı yüzünden elde edilen ortak ofset GPR verilerinden oluşturulan üç boyutlu görüntü



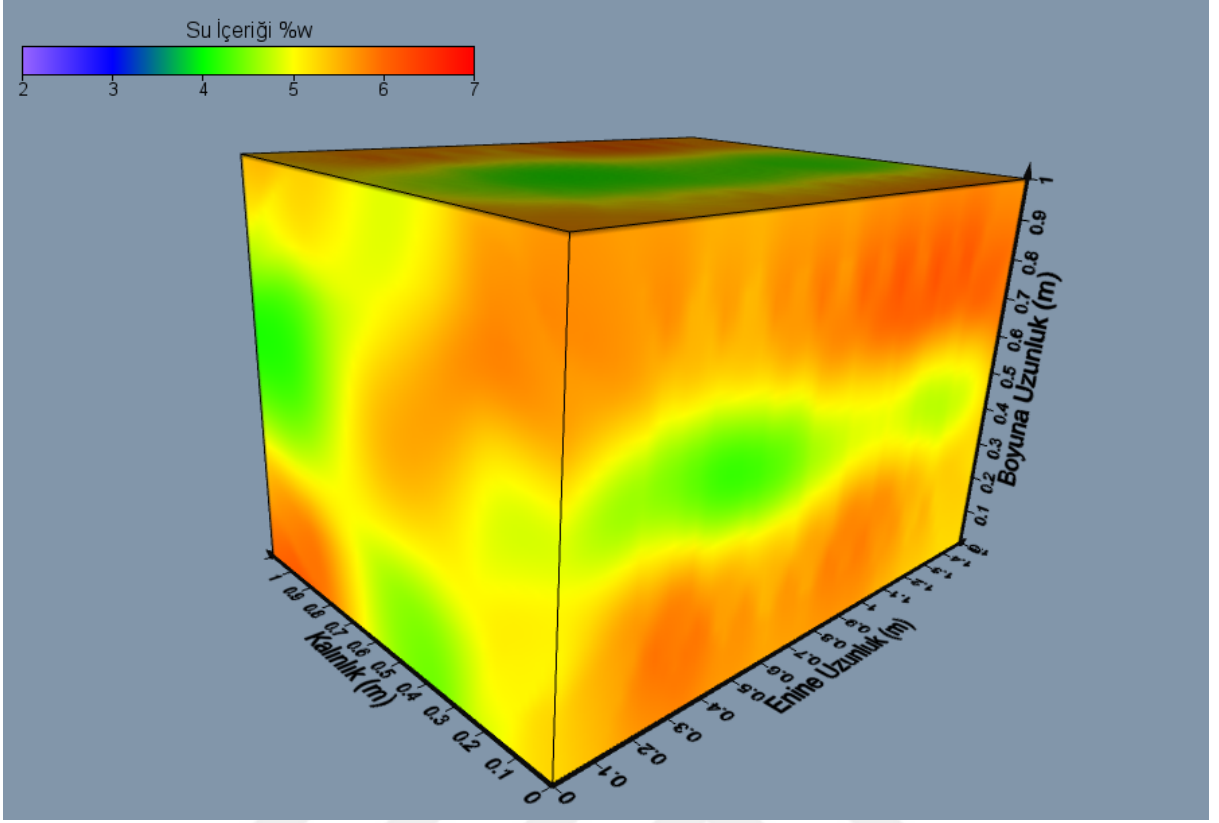
Şekil 87. Viyadük ayağının doğu yüzünden elde edilen ortak ofset GPR verilerinden oluşturulan üç boyutlu görüntü

Viyadük ayağının doğu ve batı yüzlerinden enine ve boyuna alınmış 2B radargramlardan elde edilen 3B GPR görüntüleri ile ayağın içerisinde yer alan donatılar görüntülenmiştir. Oluşturulan görüntülerden bu donatıların yaklaşık 10x10 cm olacak şekilde tasarlandığı gözlenmiştir (Şekil 86-87).

Benzer şekilde viyadük ayağı üzerinden elde edilen GPR tomografi kesitleri de birleştirilerek viyadük ayağı içerisinde bağlı dielektrik permittivite ve su içeriği dağılımının yaklaşık 3B kestirimi yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 88’de viyadük ayağına ait 3B bağlı dielektrik permittivite dağılımı, Şekil 89’da ise 3B su içeriği dağılımı gösterilmiştir. Ortam içerisinde bağlı dielektrik permittivite değeri arttıkça, nemlilikte de bir artış olduğu gözükmemektedir.



Şekil 88. Viyadük ayağı üzerindeki profillerde oluşturulan paralel GPR tomografi kesitlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan 3B bağlı dielektrik permittivite görüntüsü



Şekil 89. Viyadük ayağı üzerindeki profillerde oluşturulan paralel GPR tomografi kesitlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan 3B su içeriği görüntüsü

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Şekil 51’de gösterilen çalışma sahasında yer alan viyadük ayağı üzerinde betonun bağıl dielektrik permittivite dağılımını tespit etmek amacıyla belirlenen profiller üzerinde tomografi çalışması yürütülmüştür. Aynı profiller üzerinde ve bu profilleri dik kesecek şekilde 800 MHz anten kullanılarak viyadük ayağının doğu ve batı yüzlerinde ortak ofset GPR ölçümleri de alınmıştır. Elde edilen tomografi kesitlerinden betona ait bağıl dielektrik permittivite değeri yaklaşık olarak kesitlerin merkezi bölgesinde $\epsilon=4.7$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer, 5’e yuvarlatılarak elde edilen elektromanyetik dalga hızı değeri hesaplanmıştır. Ortak ofset ölçümlerinde zaman-derinlik dönüşümü ve migrasyon işlemlerinde, belirlenen bağıl dielektrik permittivite değeri ile hesaplanan hız bilgisi kullanılmıştır (Şekil 85b ve 85c). Kullanılan bu değere göre yapılan zaman-derinlik dönüşümü ile beton kalınlığı 1 metre olarak teyit edilmiştir. Aynı şekilde uygulanan migrasyon işleminde ise viyadük ayağının içerisinde yer alan demir donatıların neden olduğu saçılmış yansımalar tepe noktalarına doğru bir şekilde taşınmıştır. Elde edilen tomografi kesitlerindeki bağıl dielektrik permittivite değerleri kullanılarak oluşturulan yüzde su içeriği kesitlerinde de yaklaşık olarak %4-6 arası su içeriği tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlerin Leucci’nin çalışmasında elde edilen bulgularla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle üzerinde çalışılan viyadük ayağının nemlilik nedeniyle bozulmaya uğramadığı, betonarme yapının sağlam olduğu düşünülmektedir.

İncelenen viyadük ayağının doğu ve batı yüzlerinden enine ve boyuna alınmış 2B radargramlardan elde edilen 3B GPR görüntüleri ile ayağın içerisinde yer alan donatılar net bir şekilde görüntülenmiştir. Oluşturulan görüntülerden bu donatıların yaklaşık 10x10 cm olacak şekilde tasarlandığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde viyadük ayağı üzerinden elde edilen GPR tomografi kesitleri de birleştirilerek, viyadük iç yapısının bağıl dielektrik permittivite ve su (nem) içeriğinin kestirimi, 3B görüntülenerek yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 88 ve 89’da sırasıyla viyadük ayağına ait 3B bağıl dielektrik permittivite dağılımı ve 3B su içeriği dağılımı gösterilmiştir. Elde edilen tomografik çözümlerden viyadük ayağının tepe kısımlarında %w=4 civarında su içeriği tespit edilmiştir. Orta ve taban kısımlarda ise su içeriği miktarının %w=6 civarında değiştiği gözlenmiştir. Yüzde su içeriği miktarında %w=4-6 arasında meydana gelen küçük değişimlere rağmen elde edilen bulgular, su içeriği miktarının güvenli düzeylerde olduğuna yöneliktir. Viyadük ayağında yer alan 11 profil üzerinde elde edilen ölçümler neticesinde hesaplanan tomografik çözümlerin tamamında

birbirine benzer sonuçlar gözlenmiştir. Benzer şekilde oluşturulan yüzde su içeriği kesitlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kesitlerin üst kısmı daha düşük bağıl dielektrik permittivite değerine ve dolaylı olarak düşük yüzde su içeriği değerine sahipken orta ve alt kısımlarda bu değerlerde bir artış durumu söz konusudur. Bu durumun nemliliğin zemine doğru artması sonucu olduğu düşünülmektedir (Şekil 74-84).

Sonuç olarak; GPR tomografi çalışması, betonarme yapıların su içeriğini belirlemek için zahmetli, zaman alıcı, maliyetli ve hasar verici olan numune alma işlemi yapılmaksızın yapısal bazda hasarsız bir şekilde uygulanabilmektedir. Beton türü yapılarda su içeriğinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda GPR ölçü alımı ve bu ölçülerin değerlendirilmesi, beton kolon üzerinde alınan numunelerin laboratuvar analiz sonuçlarının elde edilmesine kıyasla çok daha kısa sürede yürütülebileceği sonucuna varılmıştır. Böylelikle zamandan tasarruf sağlanmakla birlikte daha ekonomik ve yapısal olarak hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir.

GPR yöntemi ile betonarme yapılar üzerinde bağıl dielektrik permittiviteyi ve bu değerlerden yüzde su içeriği miktarını belirleyebilmek için alıcı-verici antenlerin konumlandırılması doğru bir şekilde yapılmalıdır. Verici anten atış aralığı miktarı olabildiğince kısa tutularak ve yüksek frekanslı antenler kullanılarak mümkün olduğunca çok veri grubu elde edilmelidir. Böylece artan veri miktarı ile hesaplanacak olan tomografi kesitleri daha yüksek doğruluğa ve çözünürlüğe sahip olacaktır. Bir profil üzerinde ölçü alınırken verici antenin her atış noktasında alıcı anten ile eşit uzunlukta veri kaydedilmesine dikkat edilmelidir. Alıcı antenin son kayıt noktası bütün verici anten konumlarında eşit olmalıdır. Betonarme yapılar üzerinde bu yöntem kullanılarak elde edilecek olan veri grupları üzerinde ilk varış okumaları oldukça dikkatli bir şekilde yapılmalı ve mümkün olduğunca elde edilen verilere daha az veri işlem yöntemleri uygulanmalıdır. Tomografi çalışmalarında ilk varış okumaları esas olduğundan, veriler üzerinde yer alan ilk varışların konumlarını değiştirebilecek AGC gibi genlik kazancı uygulamalarından kaçınılmalıdır.

9. KAYNAKLAR

- Amhudo, R. L., Tavio, T. ve Raka, I. G. P. 2018. Comparison of Compressive and Tensile Strengths of Dry-Cast Concrete with Ordinary Portland and Portland Pozzolana Cements. Civil Engineering Journal, 4, 8.
- Annan, A.P., 1996. Transmission dispersion and GPR. JEEG, 125–136.
- Annan, A.P., 2003. Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc. Technical Paper.
- Annan, A., P., 2009. Chapter 1. Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Elsevier B.V., Oxford, United Kingdom.
- Davis, J.L. ve Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37, 531–551.
- Bailey, J. T., Evans, S. ve Robin, G. De Q. 1964. Radio-Echo Sounding of Polar Ice Sheets. Nature 204, 420-421.
- Balanis, C.A., 1989. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York.
- Beek, A. Van Breugel, K. ve Van Hilhorst, M. A., 1998. Dielectric Measurements for Non-Destructive Hardening Control of Concrete. Non-Destructive Testing and Experimental Stress Analysis of Concrete Structures, Kosice, 315-320.
- Benson, R.C., Glaccum, R.A. ve Noel, M.R., 1984. Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration. US EPA Contract No. 68-03-3053. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Office of R&D. US EPA, Las Vegas, Nevada 89114. 236p.
- Bentley C. R., 1975. Advances in Geophysical Exploration of Ice Sheets And Glaciers, Journal Of Glaciology, 15, 73, 113-135.

- Bertheliera, J. J., Neya, R., Costard, B.F., Hamelina, M., Meyera, A., Martinatc, B., Reineixc, A., Hansend, T.H., Banoe, M., Kofmanf, W, Lefeuvreg, F. ve Paillouh, P., 2000. The GPR Experiment on NETLANDER. Planetary and Space Science, 48, 1161–1180.
- Brühwiler, E. ve Saouma, V., 1995. Water fracture interaction in concrete: Part ii hydrostatic pressure cracks, ACI Materials Journal 92, 4, 383–390.
- Cassidy, N. J., 2008. Characterizing GPR Signal Attenuation and Scattering in a Mature LNAPL Spill: a FDTD Modeling and Dielectric Analysis Study. Vadoze Zone Journal, 7, 1, 140–159.
- Conyers, L. B. ve Goodman, D., 1997. Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists, Altamira Press, Sage Publications, California, USA.
- Daniels, D. J., 1996. Surface Penetrating Radar, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6, Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Daniels D. J., 2004. Ground Penetrating Radar, 2nd Edition, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Day, L., ve McNeil, I. 1996. Biographical dictionary of the history of technology, New York: Routledge.
- De Groot, S. R., 1969. The Maxwell Equation, Studies In Statistical Mechanics, Vol. IV, North Holland, Amsterdam.
- Devaney, A. J., 1984. Geophysical Diffraction Tomography, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-22, 3-13.
- Dines, K. A., ve Lytle, R. J., 1979. Computerized Geophysical Tomography. Proceedings of The IEEE, 67, 1065-1073
- Doolittle, J. A. ve Asmussen, L. E., 1992. Ten Years of Applications of Ground-Penetrating Radar by the United States Department of Agriculture. Proceedings, Fourth International Conference On Ground-Penetrating Radar, Rovaniemi, Finland, Geological Survey of Finland, Special Paper 16, 139–147.

- Fernandez, M. G., Lopez, Y. A. ve Las Heras, F., 2019. Autonomous Airborne 3D SAR Imaging System for Subsurface Sensing: UWB-GPR On Board a UAV for Landmine and IED Detection. Remote Sensing, 11, 20, 2357.
- Giannopoulos, A. 2005. Modelling Ground Penetrating Radar by Gprmax. Construction and Building Materials, 19, 755–762.
- Giannopoulos, A. 2011. Recursive Integration CFS-PML for GPR FDTD Modelling. 2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 1
- Gilbert, P., 1972. Iterative Methods for the Three-Dimensional Reconstruction of an Object From Projections. Journal of Theoretical Biology, 36, 105-117.
- Gordon, R., Bender, R. ve Herman, G. T., 1970. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) For Three-Dimensional Electron Microscopy and X-Ray Photography. Journal of Theoretical Biology, 29, 471-481.
- Halliday, D., Resnick, R. ve Krane K., 1992. Physics, Wiley, 4th Ed., 2 Extended, 787–789, New York, ABD.
- Ihamouten, A., Derobert, X., Le Bastard, C., Bosc, F. ve Villain, G., 2016. Using machine learning algorithms to link volumetric water content to complex dielectric permittivity in a wide (33-2000 MHz) frequency band for hydraulic concretes. Near Surface Geophysics. 14. 10.3997/1873-0604.2016045.
- Kaczmarz S., 1937. Angenaherte Auflosung Von Systemen Linearer Gleichungen, Bull. Acad. Pol. Sci. Lett. A, 6-8, 355-357.
- Kawata, S. ve Nalcioglu, O., 1985. Constrained Iterative Reconstruction by the Conjugate Gradient Method. IEEE Transactions on Medical Imaging, 4, 2, 65-71.
- King, R.W.P. ve Smith, G.S., 1981. Antennas in Matter, MIY Press, Cambridge, MA, USA.
- Lehmann, B., 2007. Seismic Traveltime Tomography for Engineering and Exploration Applications. EAGE Publications, Houten, The Netherlands.

- Leucci, G., 2012. Ground Penetrating Radar: An Application to Estimate Volumetric Water Content and Reinforced Bar Diameter in Concrete Structures. Journal Of Advanced Concrete Technology. 10, 411-422.
- Li, Z., 2011. Advanced Concrete Technology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Lo, T. W. ve Inderwiesen, P., 1994. Fundamentals of Seismic Tomography. Tulsa: Society of Exploration Geophysics.
- Mattei, E., De Santis, A., Pettinelli, E. ve Vannaroni, G., 2007. Effective Frequency and Attenuation Measurements of Glass Beads/Magnetite Mixtures by Time-Domain Reflectometry. Near Surface Geophysics, 5, 77–82.
- Olhoeft, G. R. ve Capron, D. E., 1993. Laboratory Measurements of The Radio Frequency Electrical and Magnetic Properties of Soils Near Yuma, Arizona. U.S. Department of Interior USGS Open File Report, 93–701.
- Olhoeft, G. R., 1998. Electrical, Magnetic And Geometric Properties That Determine Ground Penetrating Radar Performance. Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98), USA, 477–483.
- Orosei R., Lauro S. E., Pettinelli E., Cicchetti A., Coradini M., Cosciotti B., Di Paolo F., Flamini E., Mattei E., Pajola M., Soldovieri F., Cartacci M., Cassenti F., Frigeri A., Giuppi S., Martufi R., Masdea A., Mitri G., Nenna C., Noschese R., Restano M. ve Seu R., 2018. Radar Evidence of Subglacial Liquid Water on Mars. Science, 361, 6401, 490-493.
- Paige, C. C. ve Saunders, M. A., 1982a. LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations and Sparse Least Squares. ACM Transactions on Mathematical Software, 8, 43-71.
- Paige, C. C. ve Saunders, M. A., 1982b. Sparse Linear Equations and Least Squares Problems. ACM Transactions on Mathematical Software, 8, 195-209.
- Piladaeng, N., Angkawisittpan, N. ve Homwuttiwong, S., 2016. Determination of Relationship between Dielectric Properties, Compressive Strength, and Age of Concrete with Rice Husk Ash Using Planar Coaxial Probe. Measurement Science Review, 16, 14-20

- Reynolds, J. M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Sadiku, M. N. O., 2001. Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press.
- Simmons, G., Strangway, D., Annan, A. P., Baker, R., Bannister, L., Brown, R., Cooper, W., Cubley, D., Debettencourt, J., England, A.W., Groener, J., Kong, J.A., Latorraca, G., Meyer, J., Nanda, V., Redman, J.D., Rossiter, J., Tsang, L., Urner, J. ve Watts, R., 1973. Surface Electrical Properties Experiment in Apollo 17: Preliminary Science Report, Scientific and Technical Office, NASA, Washington D.C., Pp. 15-1 – 15-14.
- Steelman, C., M., Endres, A., L., 2009. Evolution of high-frequency ground-penetrating radar direct ground wave propagation during thin frozen soil layer development, *Cold Regions Science and Technology*, 57, 116-122.
- Taflove, A. ve Hagness, S., 2005. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd Edition, Artech House Antennas and Propagation Library, Artech House, London, UK.
- Tillard, S. ve Dubois, J.C., 1995. Analysis of GPR Data: Wave Propagation Velocity Determination: Journal Of Applied Geophysics, 33, 77-91.
- Turner, G. ve Siggins, A.F., 1994. Constant Q Attenuation of Subsurface Radar Pulses. Geophysics, 59, 8, 1192–1200.
- Waite, A.H. ve Schmidt, S.J., 1961. Gross Errors in Height Indication From Pulsed Radar Altimeters Operating Over Thick Ice or Snow. IRE International Convention Record, 5, 38–54.
- Walford M. E. R., 1964. Radio Echo Sounding Through an Ice Shelf, Nature, 204,4956, 317-319.
- Ward, S.H., Phillips, R.J., Adams, G.F., Brown, Jr., W.E., Eggleton, R.E., Jackson, P., Jordan, R., Linlor, W.I., Peeples, W.J., Porcello, L.J., Ryu, J., Schaber, G., Sill, W.R., Thompson, S.H. ve Zelenka, J.S., 1973. Apollo Lunar Sounder Experiment in Apollo 17 Preliminary Science Report, Scientific and Technical Office, NASA, Washington, D.C., P. 22-1 – 22-26.

Worthington M. H., 1984. An Introduction to Geophysical Tomography, First Break, 2, 6, 20-26.

Wu, R. S., ve Toksoz, M. N., 1987. Diffraction Tomography and Multisource Holography Applied to Seismic Imaging. Geophysics 52, 11-25.

Yee, K. S., 1966. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations In Isotropic Media. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, 43, 1460-1463.

URL-1, <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/rimfax>, RIMFAX, 03.08.2020



ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Malatya’da dünyaya gelmiştir. İlk öğrenimine Loreto National School-Dublin/İrlanda’da başlamıştır. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamlamıştır. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlamış, 2013 yılında ERASMUS öğrenci öğrenim hareketliliği programı kapsamında bir dönem Università degli studi di Trieste-Trieste/İtalya’da öğrenim görmüştür ve 2014 yılında mezun olmuştur. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimi almaya başlamıştır. Özel sektörde çeşitli firmalarda Jeofizik Mühendisi olarak görev almıştır. Proje bazlı sözleşmeli personel olarak MTA’da Jeofizik IP etütlerinde görev yapmaktadır. Akıcı bir şekilde İngilizce konuşabilmekte ve okuyup, yazabilmektedir. Çok iyi derecede bilgisayar bilgisine sahiptir. Mesleki yazılımları etkin bir şekilde kullanabilmektedir.