

YER RADARI (Ground Penetrating Radar – GPR)

Prof. Dr. M. Emin Candansayar

JFM409 Elektromanyetik Yöntemler Ders Notu

- Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Beşevler 06100 Ankara
 - (Ocak 2019)

Konu Başlıkları

- Giriş
- Yer Radarı Yöntemi Kuramı
- Ölçü Alım Teknikleri
- Yer Radarında Araştırma Derinliği
- Yöntemin Üstünlük Ve Zayıflıkları
- Veri İşlem Teknikleri
- Sistem Duyarlılığı
- Araştırma Derinliği
- Veri Sunumu
- Uygulama Örnekleri

Giriş

Elektromanyetik Yöntemlerin f-aralıkları

- MT : 0.0001- 1000 Hz
- AMT, CSAMT: 1-10.000 Hz (10kHz)
- YHEM : 35 Hz – 60 kHz)
- VLF, RMT : 10 kHz-2 MHz
- Yer Radarı : 10 MHz- 2 GHz

(Hatırlatma: 1Hz = 10^{-3} kHz = 10^{-6} MHz = 10^{-9} GHz)

Yer Radarı Yöntemi Kuramı ...

- Yer radarı (Georadar veya Ground Penetrating Radar-GPR) 1960 yıllarından sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmış bir “Jeofizik Elektromanyetik Yöntemdir”.
- Yöntemde, yatay doğrultuda elektrik alan yöneyi yayan (TE-Transverse Electric) bir verici anten aracılığı ile yerine yüksek frekanslı bir EM dalgacık (impulse) gönderilir.
- Ölçüler 10 Mhz -2000 MHz (2 GHz) f-aralığında alıcı ve verici antenler ile yapılır.

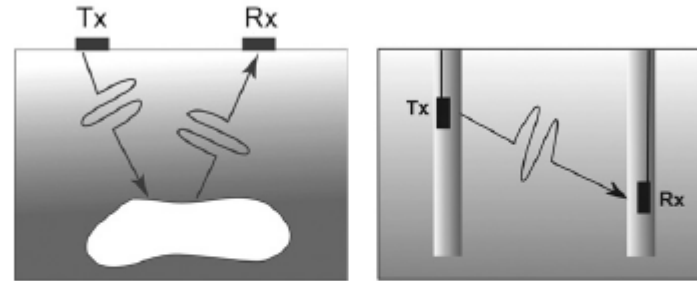
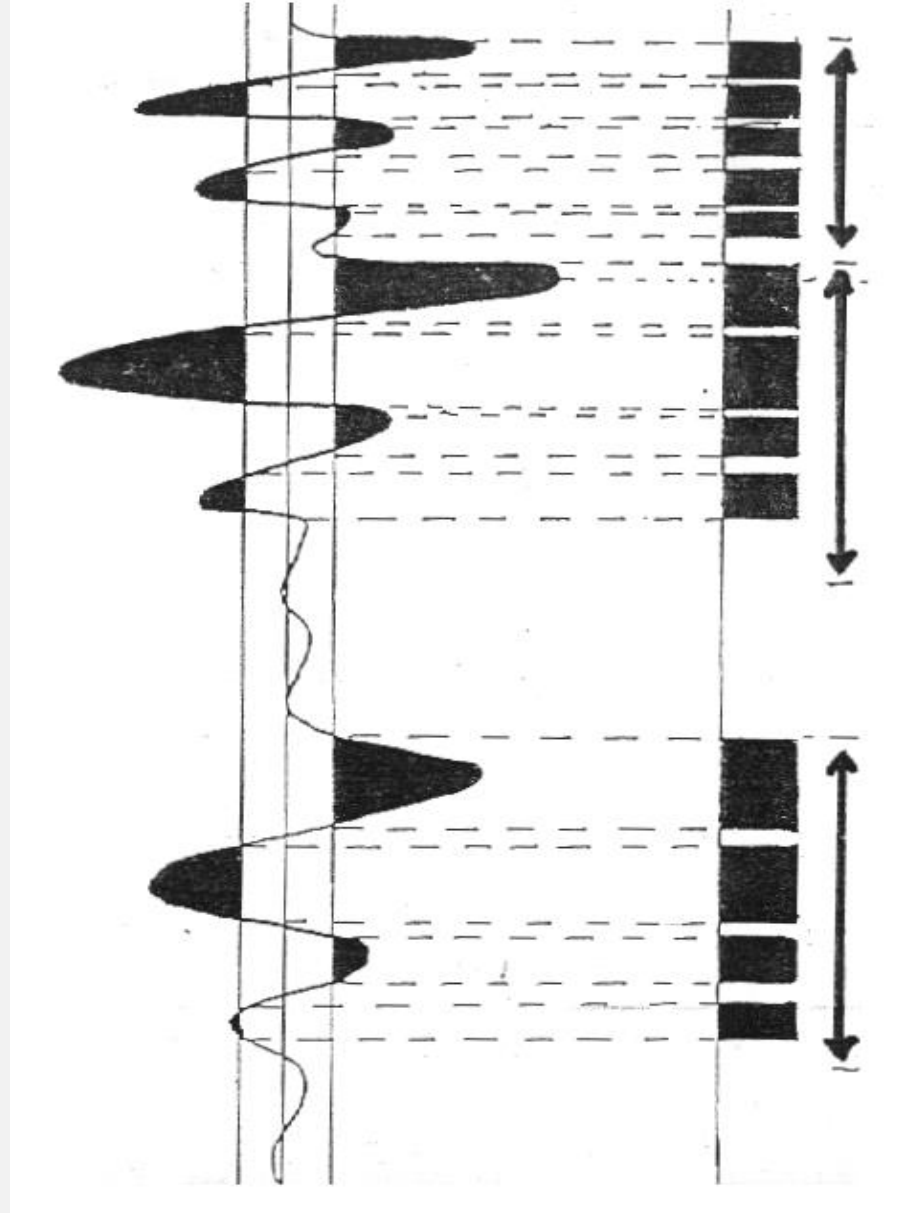


Figure 1.1 Ground penetrating radar (GPR) uses radio waves to probe the subsurface of lossy dielectric materials. Two modes of measurement are common. In the first, reflected or scattered energy is detected. In the second, effects on energy transmitted through the material are observed.

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

- Yeraltında her iki tarafı farklı **dielektrik özellikte ve özdirençli** kayalardan oluşan bir ara yüzeyde EM dalga yansıma ve ilettime uğrayacaktır.
- Bu dalgacık, yerinde yayılarak jeolojik sınırlardan yansıması ile yüzeye dönen dalganın alıcı antene geldiğinde **gidiş-geliş zamanın ve genliğinin** ölçülmesi esasına dayanır.
- Yöntem Sismik Yansıma yöntemine benzemektedir.

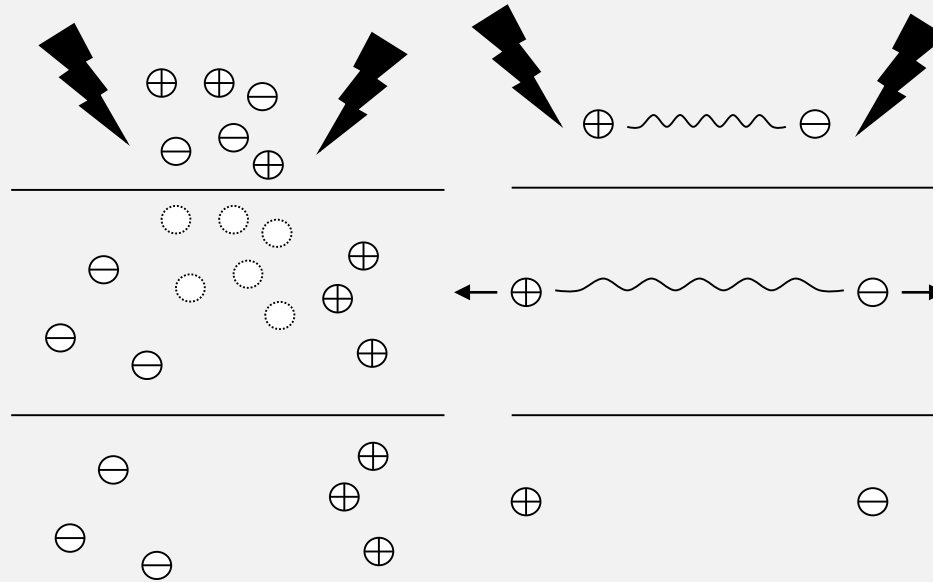
Seçilen bir yüzeyden büyük genlikli yansımış sinyaller, grafik bir kayıtçı üzerinde koyu renk ile çizilir.



(İlkışık 2001)

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

- Yer radarı, bir kaynak tarafından yer içine yayılan ve zaman içinde değişen EM alanları kullanarak yer altını incelemesi yapmaktadır.



(Annan 2009)

Yer Radarı Yöntemi Kuramı

MAXWELL DENKLEMELERİ

$$\nabla \times \mathbf{h} = \mathbf{J}_C + \mathbf{J}_D \quad (\text{I})$$

$$\nabla \times \mathbf{e} = -(\partial \mathbf{b} / \partial t) \quad (\text{II})$$

Materyal (malzeme) DENKLEMELERİ

$$\mathbf{J}_C = \sigma \cdot \mathbf{e} \quad (\sigma: \text{elektriksel iletkenlik})$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{e} \quad (\varepsilon: \text{dielektrik sabiti})$$

$$\mathbf{b} = \mu \cdot \mathbf{h} \quad (\mu: \text{manyetik geçirgenlik})$$


$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\varepsilon) \cdot \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\mu\omega \cdot \mathbf{H}$$

Bu göstermektedir ki, üç ortam deęiřtirgeni elektromanyetik alanı birlikte etkilemektedir.

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

Maxwell ve ilişkilendirici denklemlerden elde edilen denklemler frekans ortamına taşınırsa

$\mathbf{k}^2 = (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)$ tanımlaması yapılırsa;

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = \mathbf{0}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

elde edilir.

Burada k ; **dalga sayısı** olarak adlandırılır. k 'nın frekansa göre değişimi EM yöntemlerin temelidir

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

Jeofizik yöntemlerde kullanılan frekans 10^{-5} ile 10^5 Hz. arasında değişmektedir.

k-dalga sayısının frekansa göre değişimi incelenirse $k^2 = (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)$;

Çok düşük frekans durumu

Çok yüksek frekans durumu ($\gg 10^5$ Hz.)
(Yer radarı yönteminin temeli)

$$k^2 \approx \omega^2 \mu \epsilon$$

$$\nabla^2 \mathbf{h} = \mu \epsilon (\partial^2 \mathbf{h} / \partial t^2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{e} = \mu \epsilon (\partial^2 \mathbf{e} / \partial t^2)$$

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

$$\nabla^2 \mathbf{e} = \mu\epsilon (\partial^2 \mathbf{e} / \partial t^2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{h} = \mu\epsilon (\partial^2 \mathbf{h} / \partial t^2)$$

Çok yüksek frekans durumunda dalga denklemi

Çözümleri;

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cdot e^{-i(\omega t - kz)}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \cdot e^{-i(\omega t - kz)}$$

şeklindedir.

EMPEDANS

SERBEST UZAYDA

$$Z = E_x / H_y = \mu_0 \omega / k$$

$$\approx 377 \text{ ohm.}$$

YER İÇİNDE

$\epsilon' = \epsilon + i \cdot (\sigma / \omega)$ (karmaşık geçirgenlik veya dielektrik sabiti)

$$Z = \mu \cdot e^{-i\delta/2} / (\epsilon^2 + \sigma^2 / \omega^2)^{1/4}$$

$$\underline{Z = \mu \cdot e^{-i\delta/2} / (\epsilon^2 + \sigma^2 / \omega^2)^{1/4}}$$

Bu ifadedeki δ değeri, kayıp tanjantı olarak ifade edilen;

$$\text{Tan } \delta = (| \mathbf{J}_C | / | \mathbf{J}_D |) = (\sigma / \omega\epsilon)$$

bağıntısından çekilir.

k dalga sayısı ifadesinin karekökü alınıp gerçel ve sanal kısımlarına ayrılırsa; sanal kısım kullanılarak

$$\delta = (1 / k_+)$$

nüfuz derinliği bağıntısından bulunabilir.

Gerçel kısım ise;

Dalga Boyu

$$\lambda = v/f = 2\pi / k_+$$

$$k^2 \approx \omega^2 \mu \epsilon$$

Hız

$$v = \omega / k_+$$

$$\epsilon' = \epsilon + i \cdot (\sigma / \omega)$$

Kırılma indisi

$$\eta = c \cdot k_+ / \omega$$

ifadelerinin bulunmasında kullanılır. (Griffiths 1991)

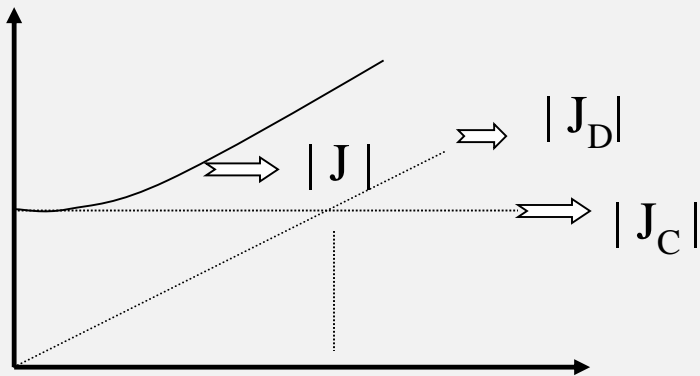
$$\mathbf{J}_C = \sigma \cdot \mathbf{E}$$

(İletkenlik Akımı)

$$\mathbf{J}_D = (\partial \mathbf{D} / \partial t) = \epsilon \cdot (\partial \mathbf{E} / \partial t) \quad (\text{Yer Değiştirme Akımı})$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_C + \mathbf{J}_D \quad (\text{TOPLAM AKIM})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \epsilon \cdot (\partial \mathbf{E} / \partial t)$$



$$|\mathbf{J}_C| = |\mathbf{J}_D|$$

$$\omega_t = \sigma / \epsilon$$

$$f_t = \sigma / 2\pi\epsilon \quad (\text{Geçiş-Kesme frekansı})$$

frequency is defined as follows.

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (1.16)$$

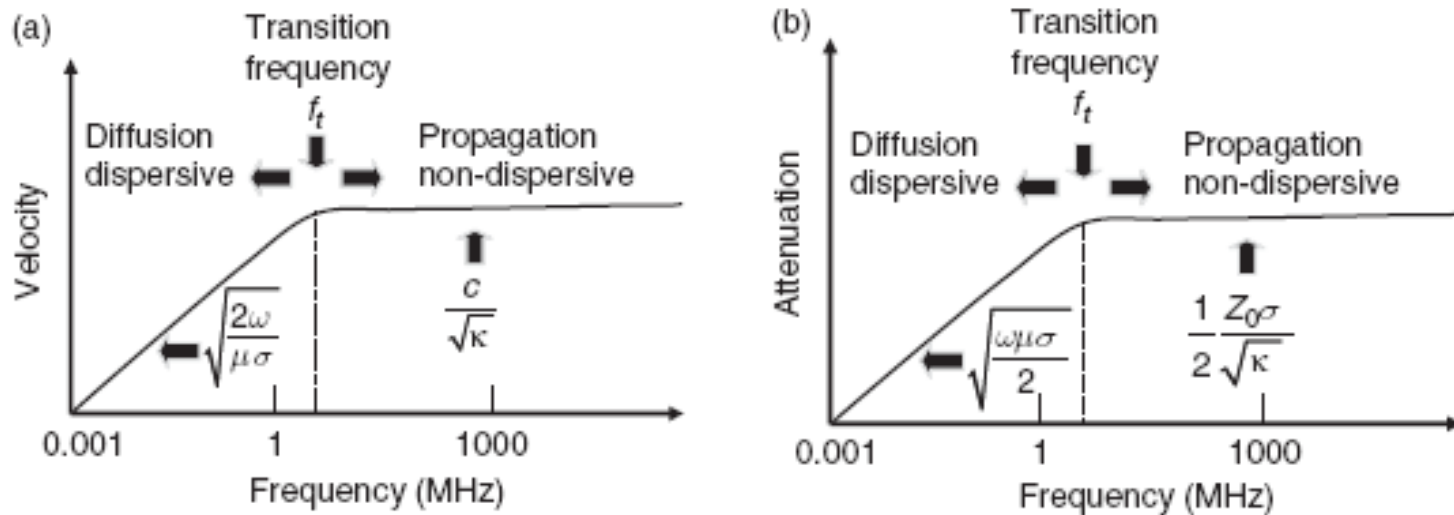


Figure 1.5 Variation in velocity and attenuation in a simple medium with nondispersive physical properties. c and Z_0 are the velocity and impedance of free space (i.e., a vacuum).

(H.M. Jol, 2009)

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

$$v = \omega / k_+$$

$$c = 1 / (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} = 2.98 \times 10^8 \quad \text{EM dalganın boşlukta yayılma hızı (Sear vd. 1982)}$$

$$v = 1 / (\epsilon \mu)^{1/2} \quad \text{EM dalganın madde içinde yayılma hızı}$$

$$K = \epsilon / \epsilon_0 \quad \text{bağıl geçirimsizlik}$$

$$K_m = \mu / \mu_0 \quad \text{bağıl geçirgenlik}$$

$$v = c / (K K_m)^{1/2} \quad \text{elektromanyetik dalga hızı}$$

Zayıf manyetik özelliklere sahip malzemeler için bağıl geçirgenlik yani K_m , yaklaşık olarak 1 alınabilir. Bu durumda elektromanyetik dalganın hızı,

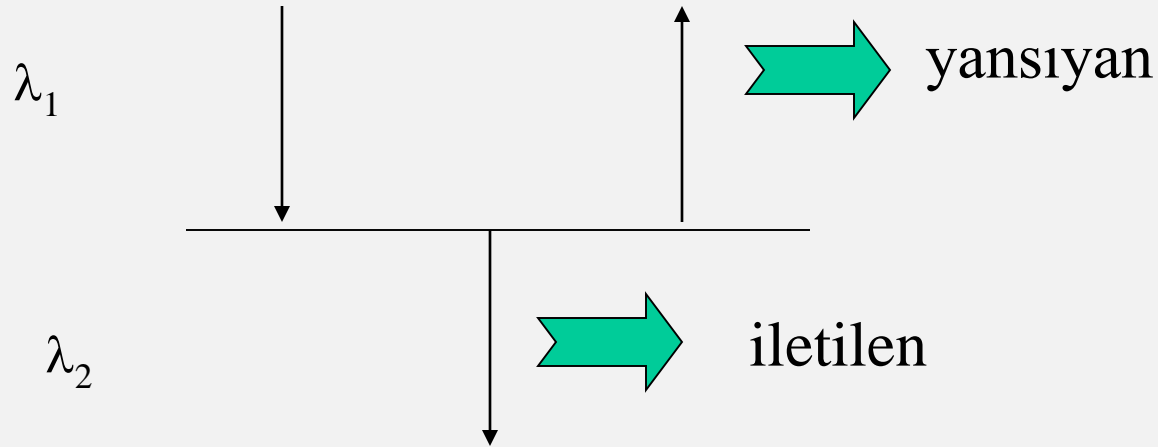
$$v = c / (K)^{1/2} \quad \text{bulunur.}$$

Yer Radarı Yöntemi Kuramı...

$$\lambda = v / f$$

Dalga boyu

Elektromanyetik dalganın **içinde ilerlemekte olduğu ortamdaki dalga boyu λ_1 , hedef ortamın dalga boyu ise λ_2 olsun**

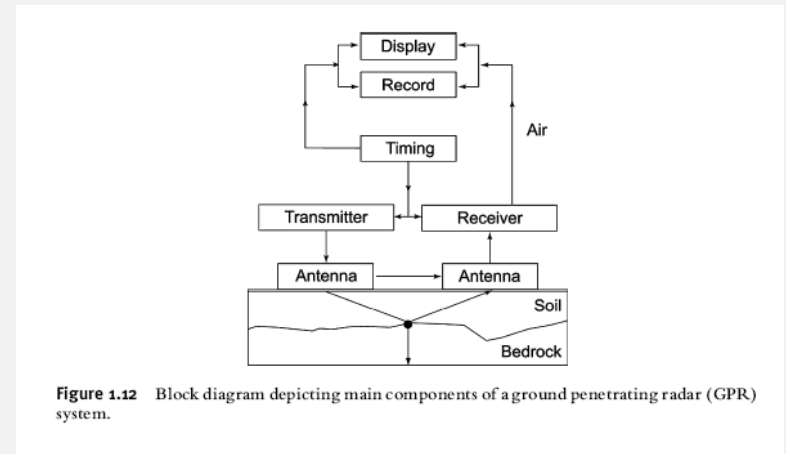
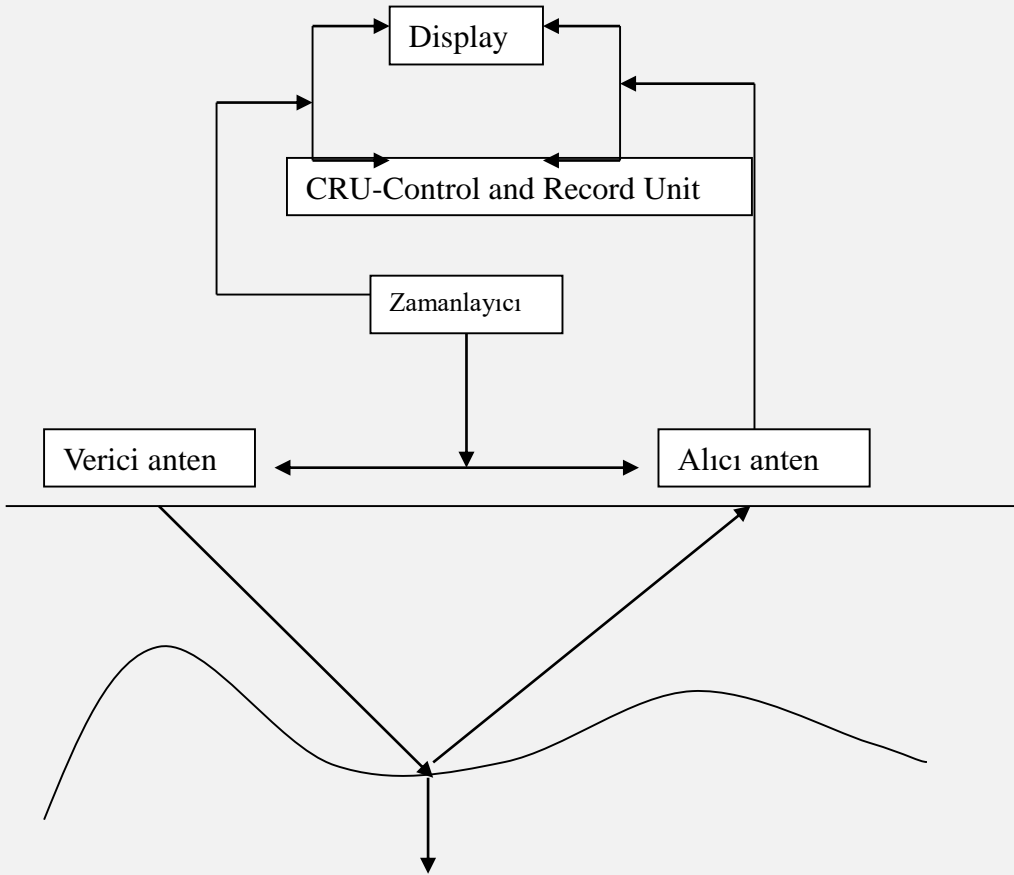


Yansıma katsayısı R ve iletim katsayısı T olarak gösterilirse,

$$\mathbf{R} = (\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_1 + \lambda_2)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{1} - \mathbf{R}$$

Ölçü alım teknikleri



YER RADARI DİZGESİ

Verici-Alıcı antenler

Bilgisayar

Kayıt aygıtı (CRU)

Ölçü alım teknikleri

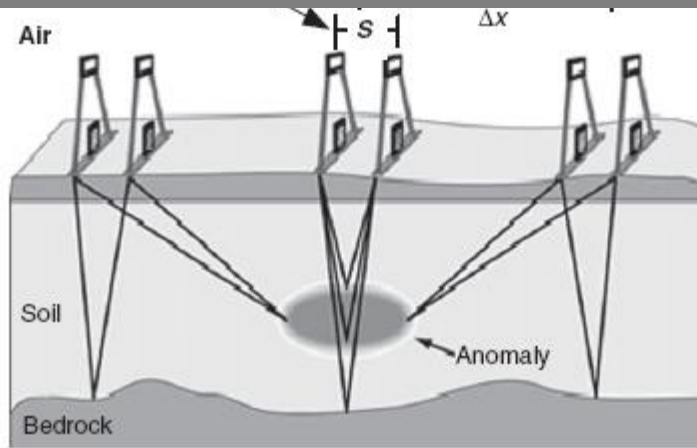


Figure 1.27 Schematic illustration of common-offset, single-fold profiling along a line showing major survey specification parameters.

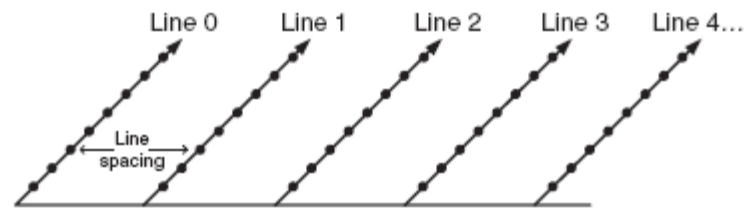
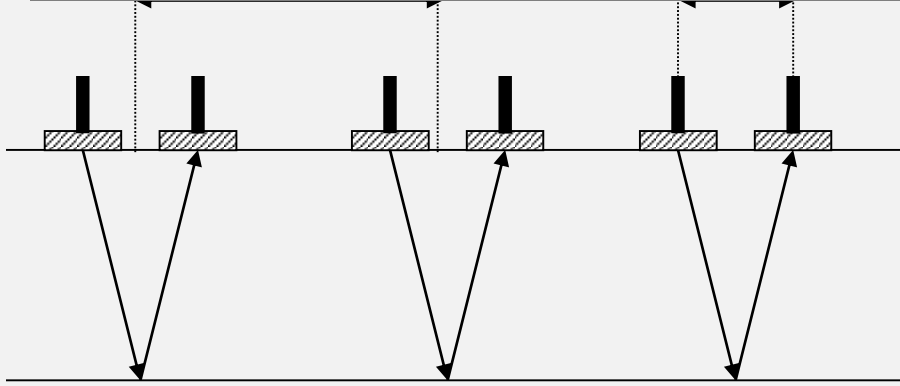


Figure 1.28 A survey area spanned by a number of survey lines. The ground response is measured at discrete points along the survey line. Although field practice may be more erratic, data of this format are key to most systematic data processing and visualization.

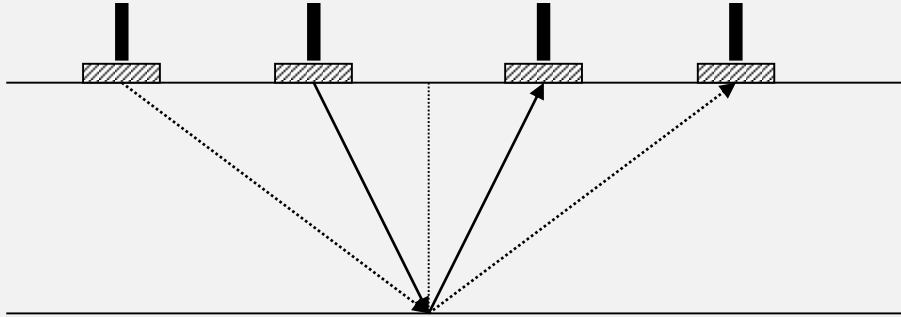
Ölçü alım teknikleri ...

SABİT AÇIKLIK PROFİLİ



Derinliklere doğru hız artımı, sismik kırılma yönteminin temelini oluşturmaktadır. Ancak EM dalga hızı giderek azaldığından, yer radarı kırılma yönteminin kullanılma şansını azaltmaktadır. Bu nedenle çoğu yer radarı araştırmalarında sabit anten aralığı kullanılır ve sabit açıklık profili dizilimi olarak tanımlanır.

ÇOKLU KATLAMA TEKNİĞİ

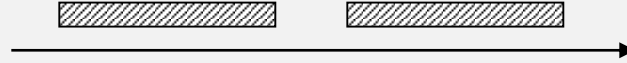


Orta nokta sabit kalacak şekilde farklı anten aralığı kullanarak, çoklu katlama tekniğidir

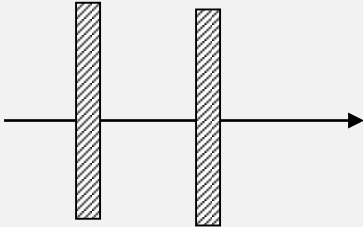
Ölçü alım teknikleri ...



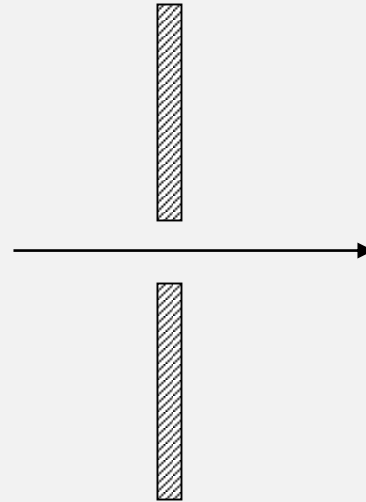
Paralel ve uzun kenar bakışlıklı



Paralel ve kısa kenar bakışlıklı

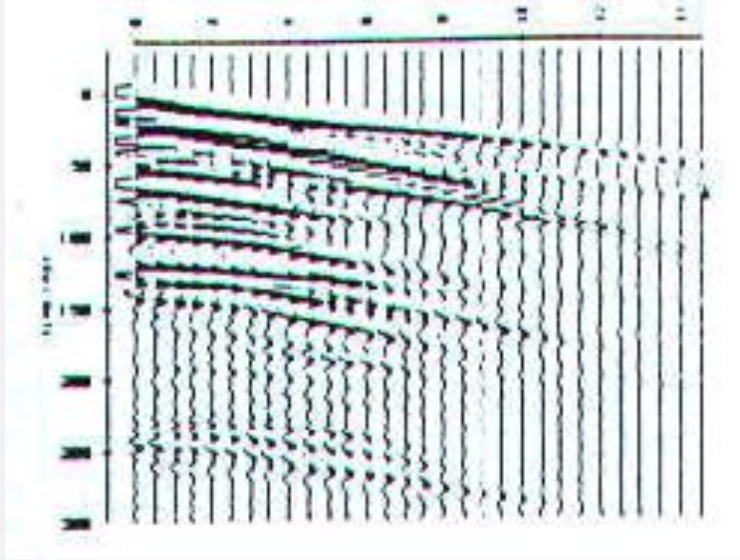


Dik ve uzun kenar bakışlıklı

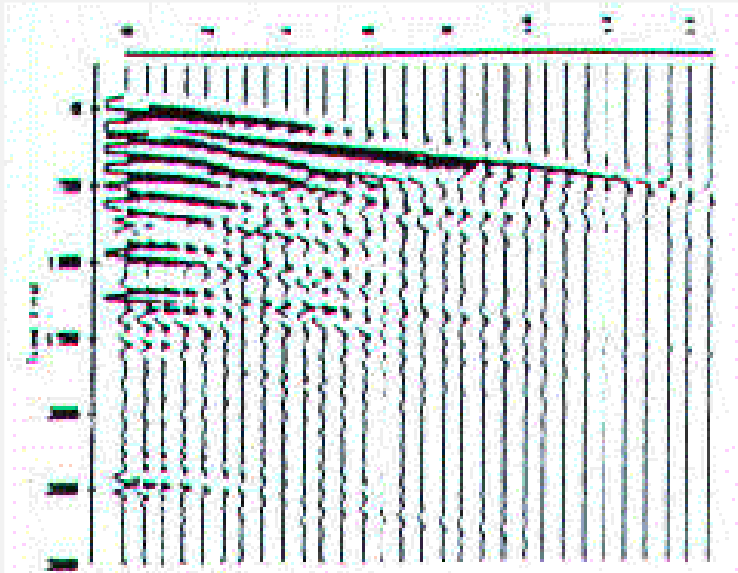
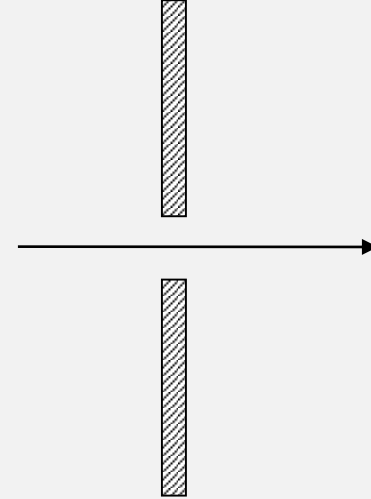


Dik ve kısa kenar bakışlıklı

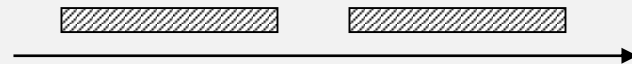
Ölçü alım teknikleri ...



Dik ve uzun kenar bakışımı



Paralel ve kısa kenar bakışımı



Ölçü alım teknikleri : Kuyu İçi

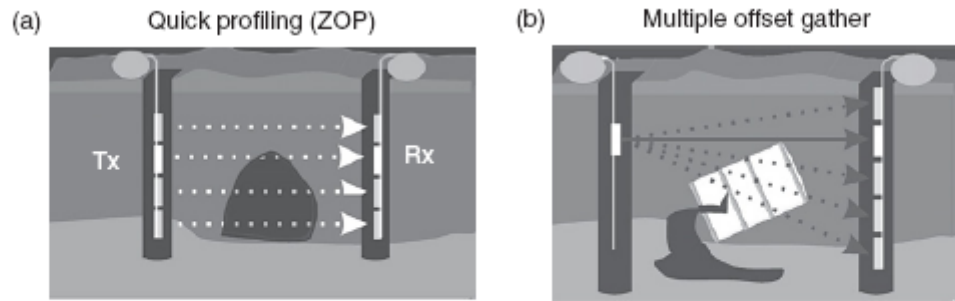


Figure 1.30 (a) Illustration of a transillumination zero-offset profiling (ZOP). (b) Illustration of a transillumination multioffset gather (MOG). Combining MOGs for each transmitter station provides the data for tomographic imaging.

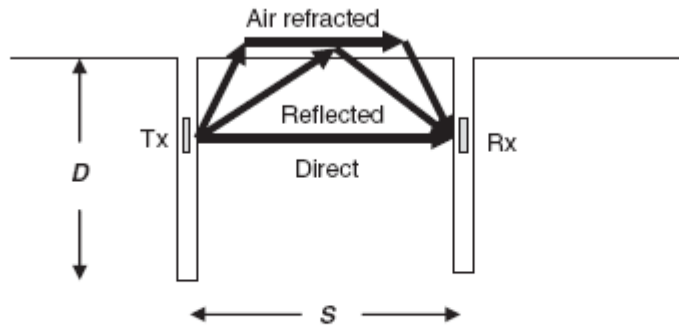


Figure 1.31 For borehole transillumination surveys, D/S should be kept as large as practical. Direct signals may be masked by faster refracted airwave arrivals.

Veri İşlem

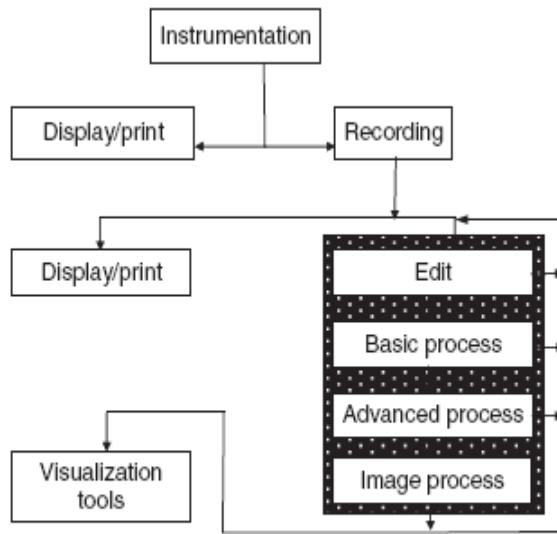


Figure 1.32 Overview of ground penetrating radar (GPR) data processing flow. Processing can vary from simple editing to total transformation of GPR information into different forms such as velocity versus depth.

- Dewow: yüksek-düşük değişimli filtre
- Zaman Genlik Düzeltmesi
- Dekonvolüsyon: bandgenişliğini artırarak “pulse saçılmalarını” yoketmek ve ayrımlılığını artırmak için yapılır.
- Migrasyon (Göç): alıcı – ver,c, yönlendirmesini yansıma verisinden atan bir dekonvolüsyon işlemidir.

(H.M. Jol, 2009)

Veri İşlem Adımları

- Dewow: yüksek-düşük değişimli filtre
- Zaman Genlik Düzeltmesi
- Dekonvolüsyon: bandgenişliğini artırarak “pulse saçılmalarını” yoketmek ve ayrımlılığı artırmak için yapılır.
- Migrasyon (Göç): alıcı –ver,c, yönlenmesini yansıma verisinden atan bir dekonvolüsyon işlemidir.
- Topoğrafik Düzeltme

Veri İşlem Adımları:: Zaman Genlik Düzeltmesi

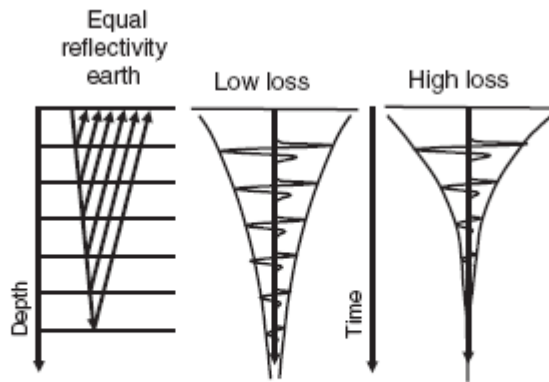


Figure 1.33 Layered earth model of equal reflectivity horizons and impulse response with envelope of reflection amplitude depicted. In reality, GPR for signal attenuation can be very high, making signal amplitudes small in a short time.

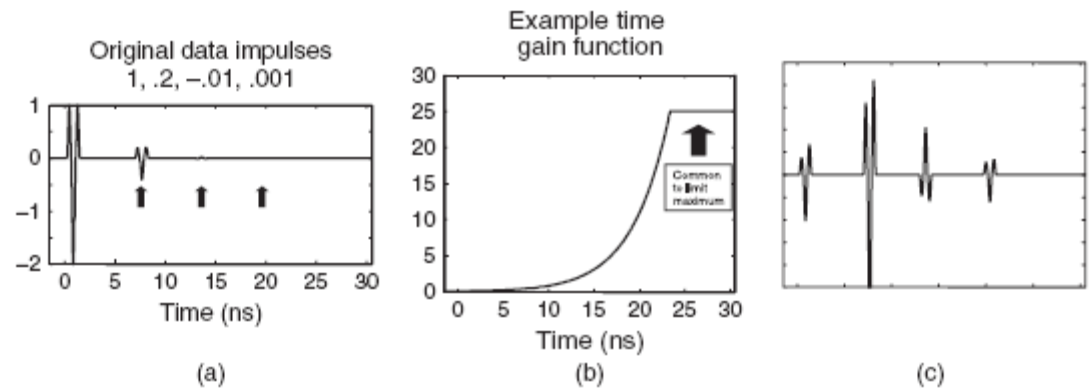


Figure 1.34 Concept of time-varying gain where signal amplification varies with time to compensate for attenuation. (a) shows a radar trace with four signals of decreasing amplitude with time, (b) shows a time gain function while (c) shows the result of multiplying (a) by (b). All four events are visible in (c).

Veri İşlem Adımları: Göç (migration)

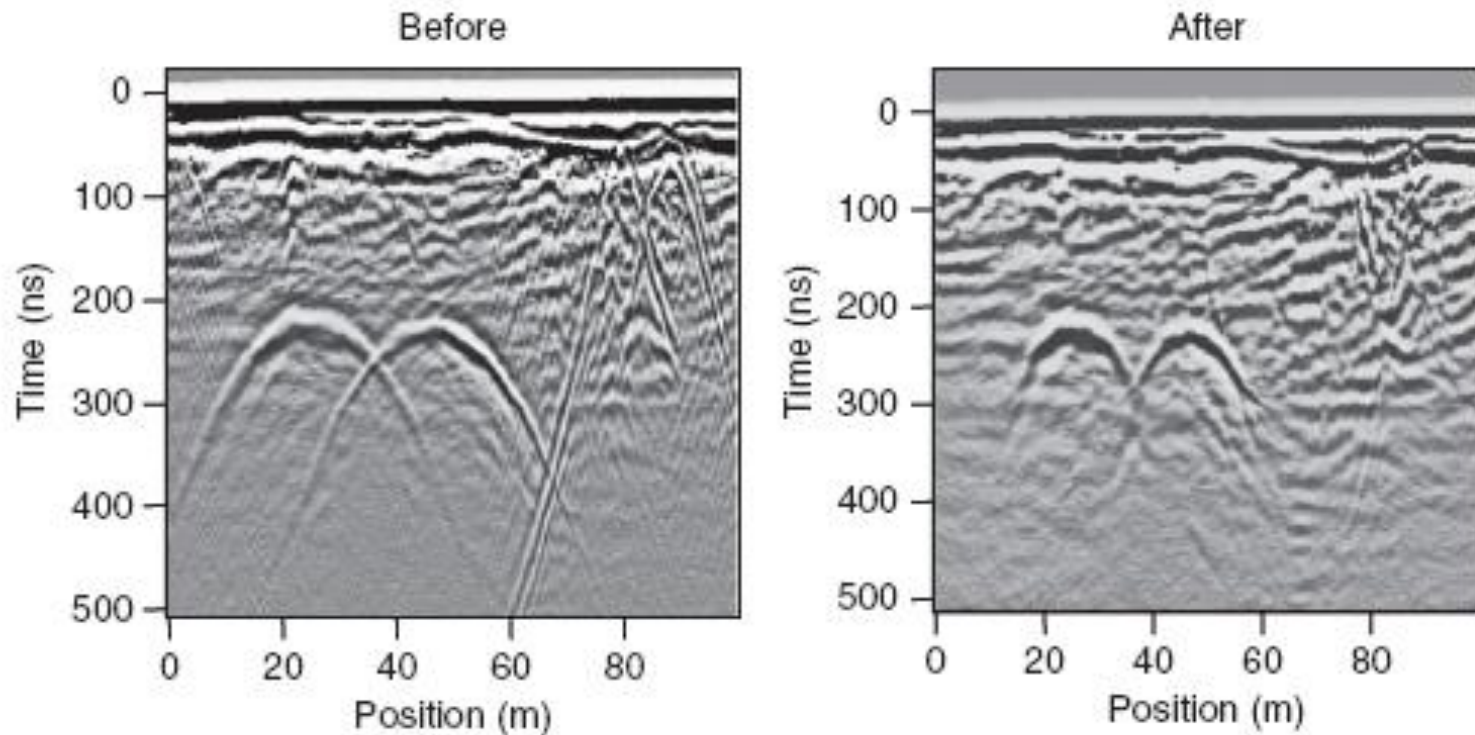
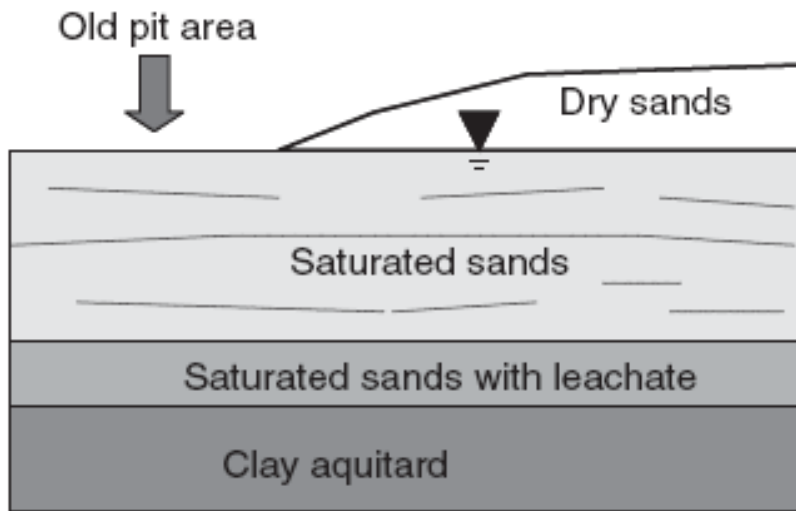


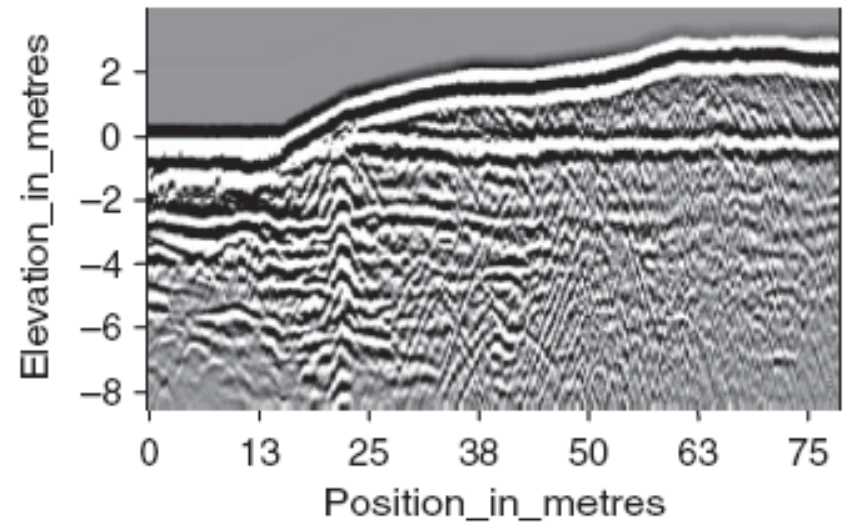
Figure 1.35 Ground penetrating radar (GPR) cross sections obtained with a 50-MHz system traverse over two road tunnels (shown in [Figure 1.2](#)) before and after migration.

Veri İşlem Adımları

Topoğrafik Düzeltme



(a)



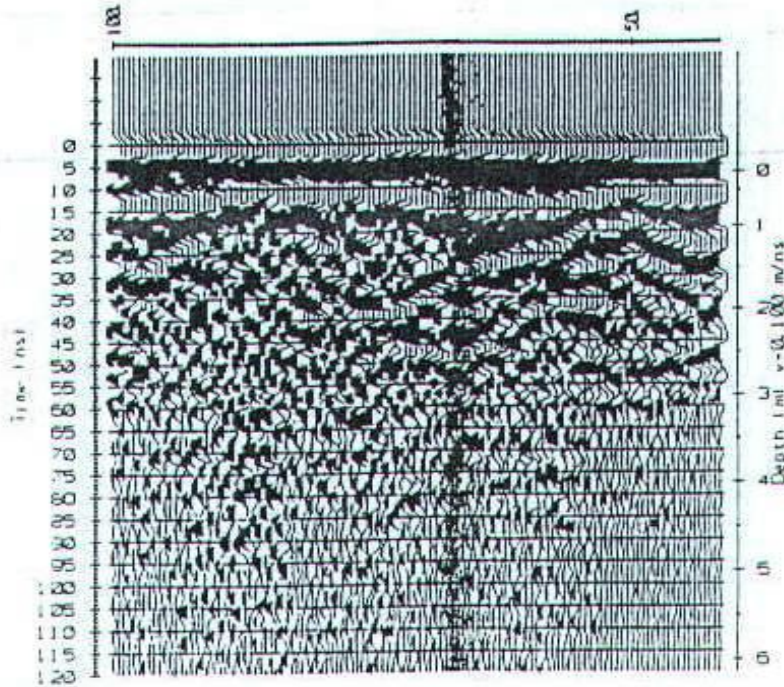
(b)

Figure 1.36 Illustration using trace time shifting to compensate for topographic variation. Note the water table is essentially flat in the ground penetrating radar (GPR) section.

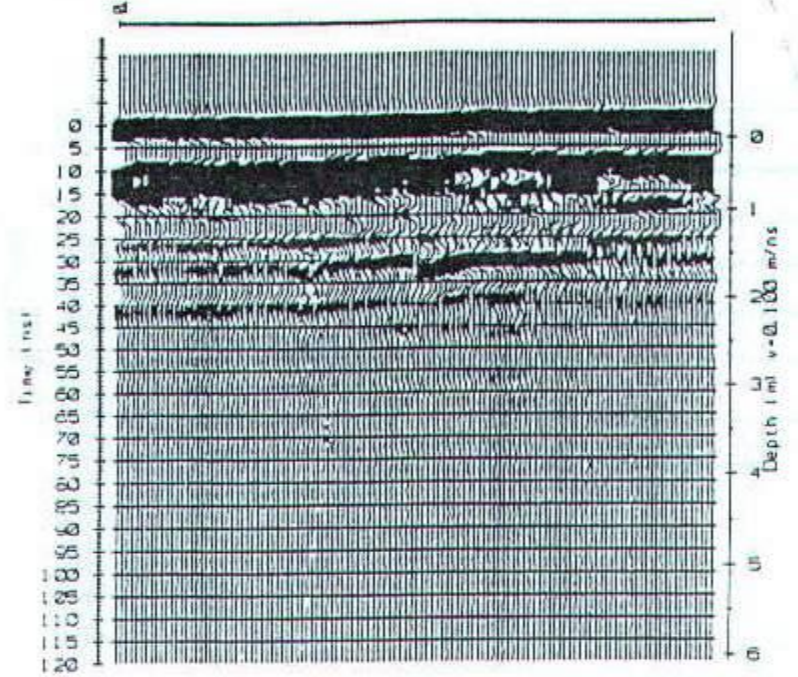
Veri İşlem Adımları

Genlik Düzeltmesi

KAZANÇ İŞLEMİ



Düşük sönümlü ortam

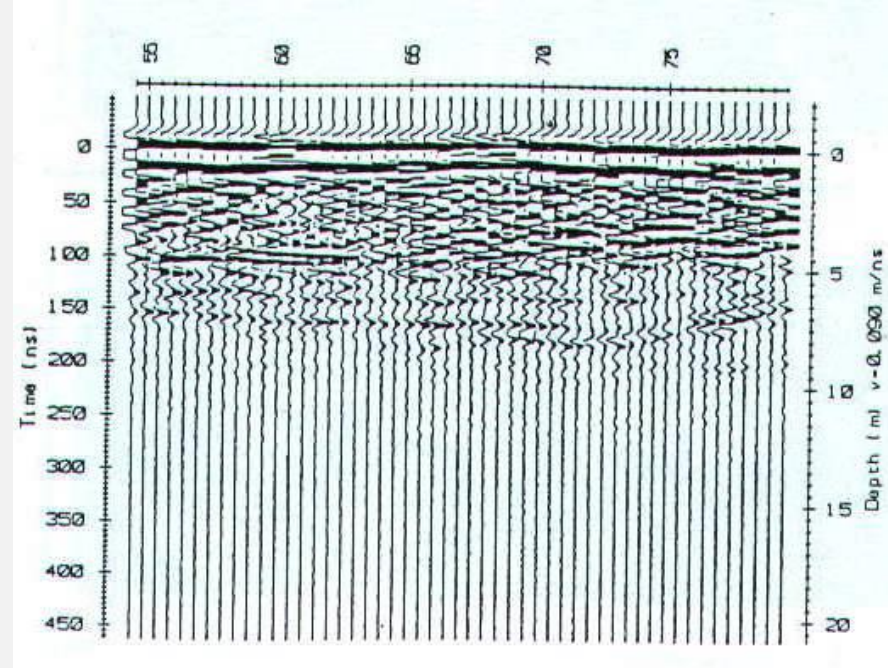
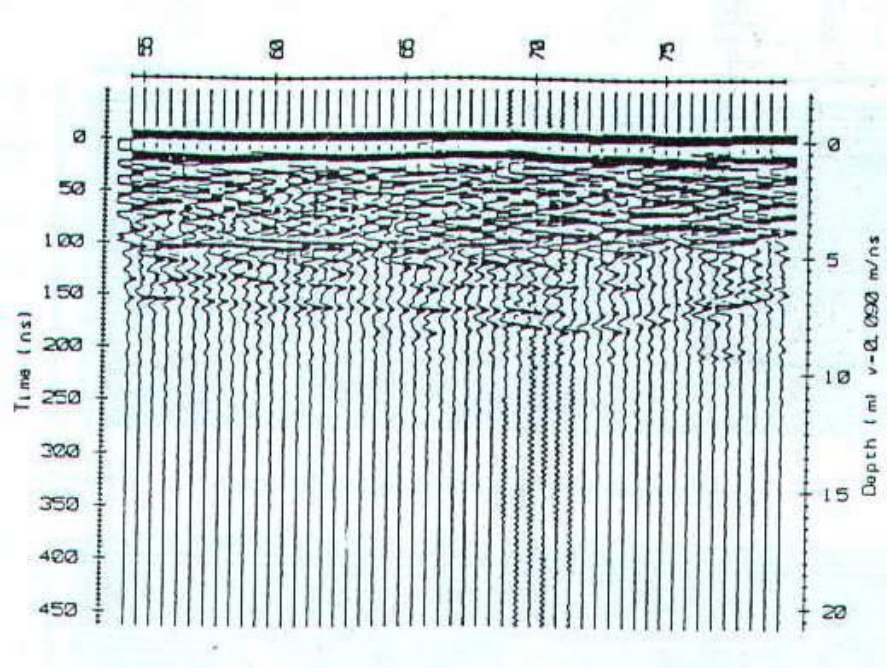


Yüksek sönümlü ortam

Veri İşlem Adımları

Geçici Filtreleme

Geçici filtreleme ile, boşluklu yapıdan yansıyan zayıf sinyaller veya farklı frekans içeriğine sahip yapılardan yansıyan sinyaller gibi yerin verdiği farklı cevaplar ayrılabilir ve sahte sinyaller kaldırılabilir (Annan 1992).

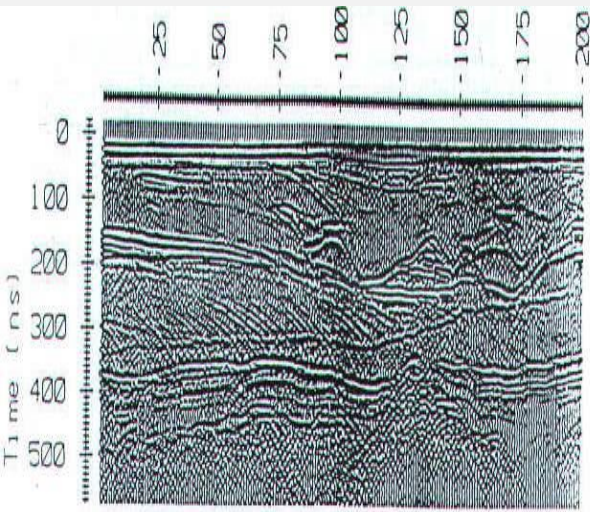


GEÇİCİ FİLTRELEME

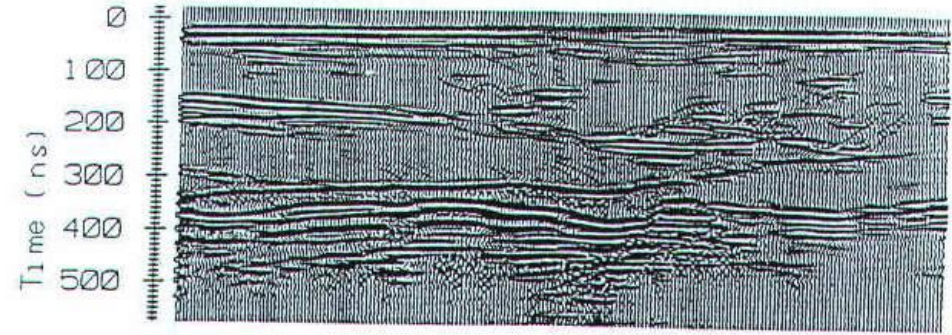
Veri İşlem Adımları

Uzay Ortamı Filtreleme

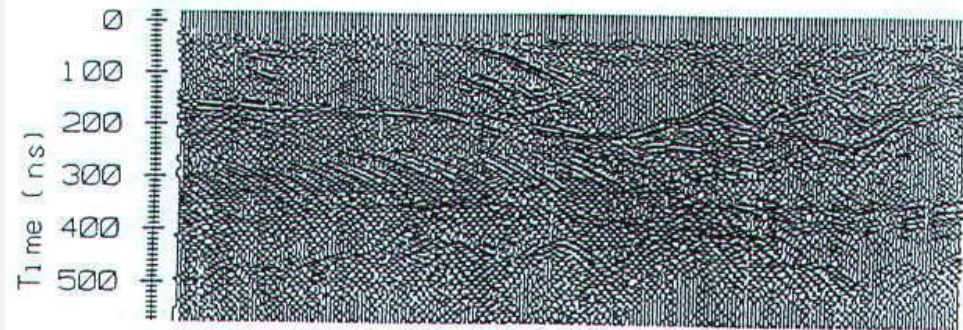
Alçak geçişli uzay ortamı filtreleme ile, uzun dalga boylu sinyaller filtrelenir. Esasen bu uygulama ile verideki yatay yönde uzanan tabaka özelliklerine ait sinyaller baskın hale getirilir. Diğer bir yaklaşım ise yüksek geçişli filtre ile veride bulunan, saçılmış ve yavaş değişen özellikteki izler baskın hale gelmesidir (Annan 1992).



Alçak



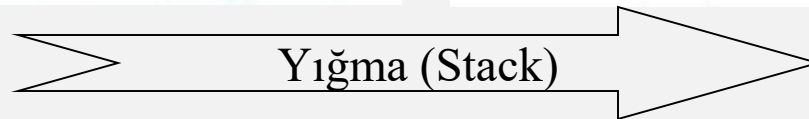
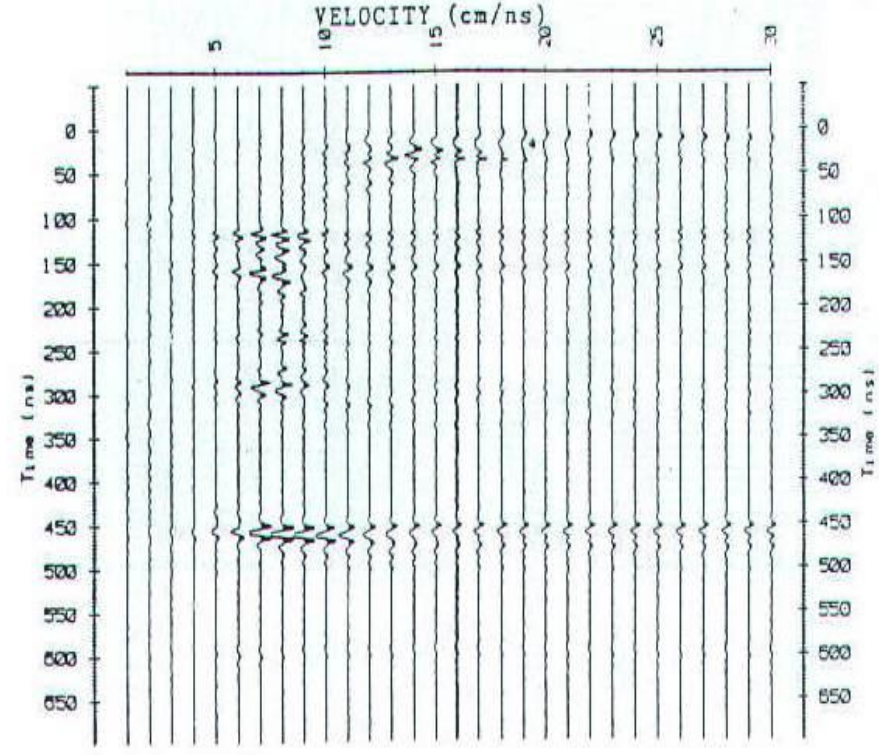
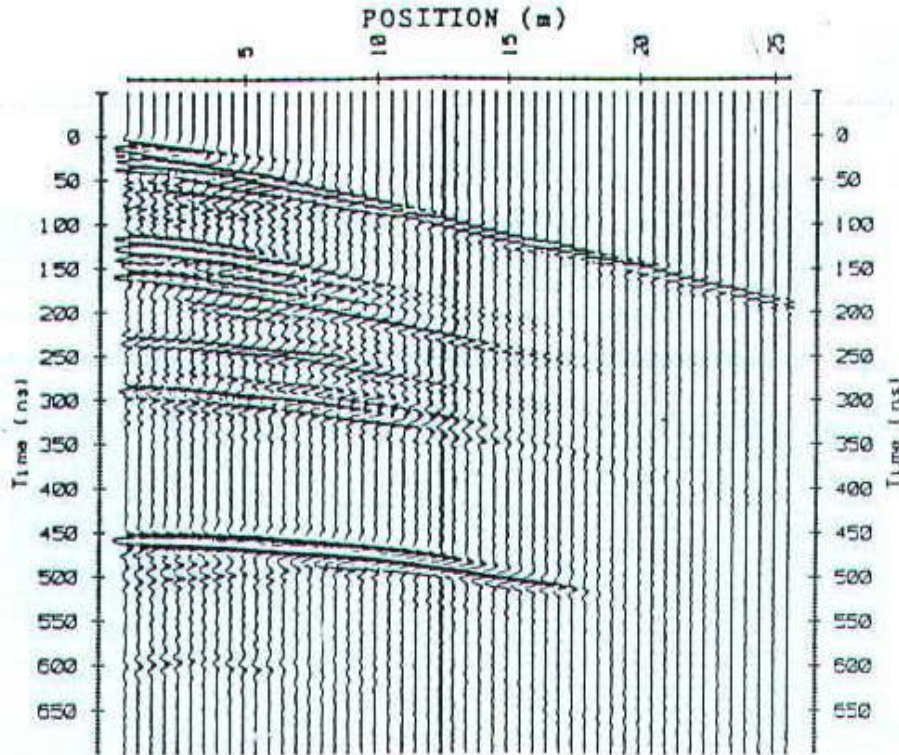
Yüksek



Veri İşlem Adımları

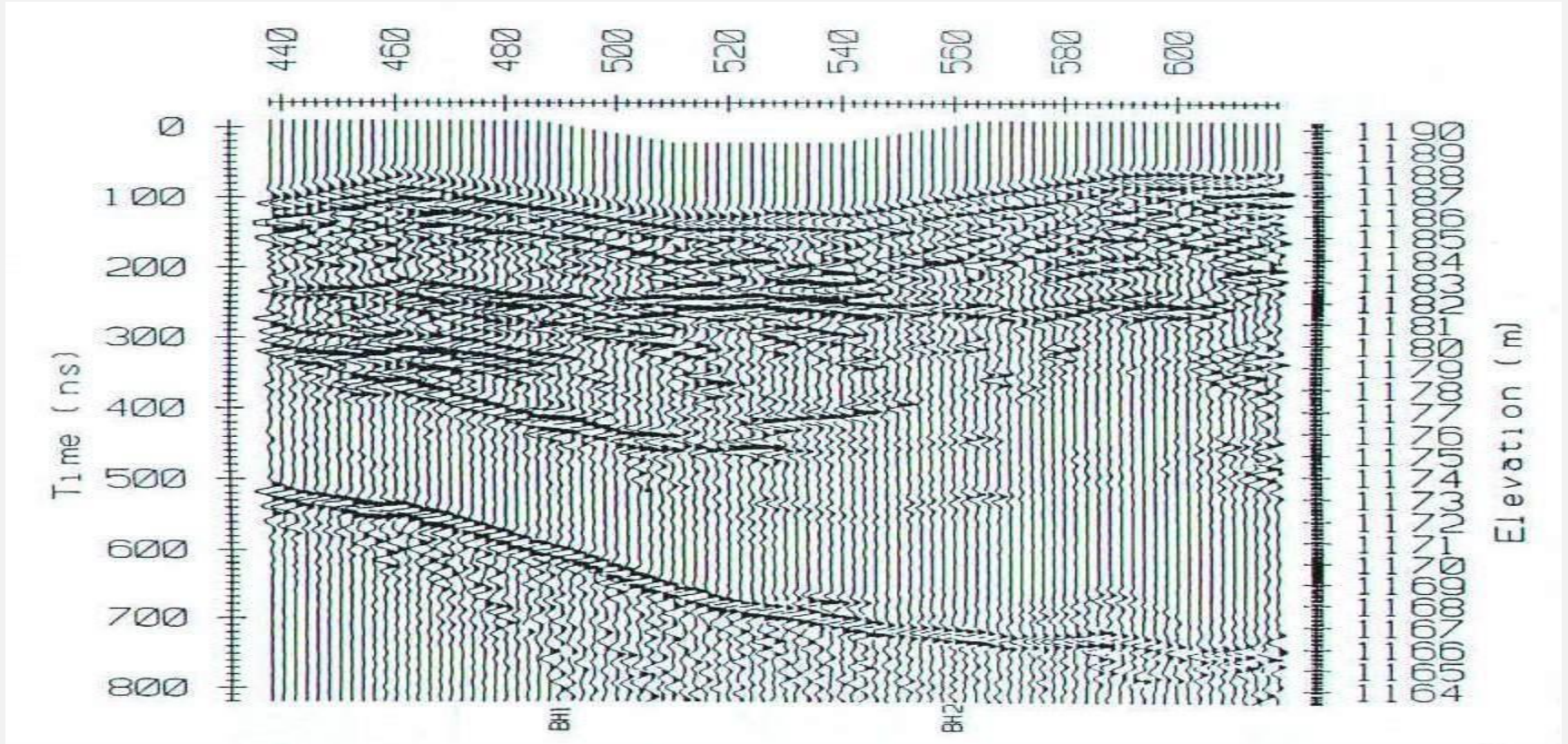
Yığma işlemi

Bir diğer veri işlem tekniği ise, derinliğin fonksiyonu olarak hızı kullanarak yer radarı verisinden hız analizi yapmaktır. Tıpkı sismik veri işlemde yapılan NMO işlemi gibi hız seçimi oldukça önemli etkiler doğurmaktadır.



Veri İşlem Adımları: Topoğrafya Düzeltmesi

Yüzey yüksekliklerindeki küçük değişimler, yer radarı verisinde önemli etkilere neden olurlar. Genellikle 10 metre kadar statik zaman kayması yapılır ve topoğrafya etkisi büyük ölçüde yer radarı kesitinden atılır (Annan 1992).



Sistem duyarlılığı

Verici antenden çıkan EM dalganın enerjisi (kaynak gücü veya çıkış gücü) ve alıcı antende algılanan enerji (algılanan güç), yer radarı yöntemindeki dizilimlerin duyarlılığını belirler. Duyarlılık bağıntısı desibel cinsinden,

$$Q = 10 \cdot \text{Log}_{10} (P_T / P_S)$$

olarak verilir. Burada, P_T , kaynak gücü ve P_S , algılanan güç şeklinde gösterilmiştir (Annan 2005).

Araştırma Derinliği

Araştırma derinliğinin %25'i olarak bilinen **derinlik çözünürlüğünü** etkileyen en önemli parametre **merkezi frekanstır**.

$$f = 150 / d \cdot \sqrt{K}$$

Araştırma derinliği ile ortamın elektriksel iletkenliği arasında;

$$D = 35 / \sigma$$

bağıntısı vardır.

(Annan 2005)

Derinlik çözünürlüğü (m)	Merkezi anten frekans (MHz)
0.3125	1000
0.625	500
0.25	200
0.5	100
1	50
2	25
4	12.5

Araştırma Derinliği

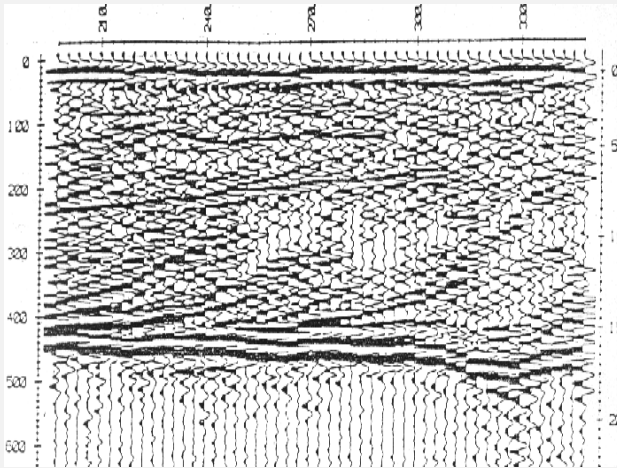
Araştırma derinliği, çalışma sırasında anten aralığının belirlenmesinde,

$$D_{\text{anten}} = (2 \cdot D) / \sqrt{(K - 1)} \quad (D : \text{Araştırma derinliği})$$

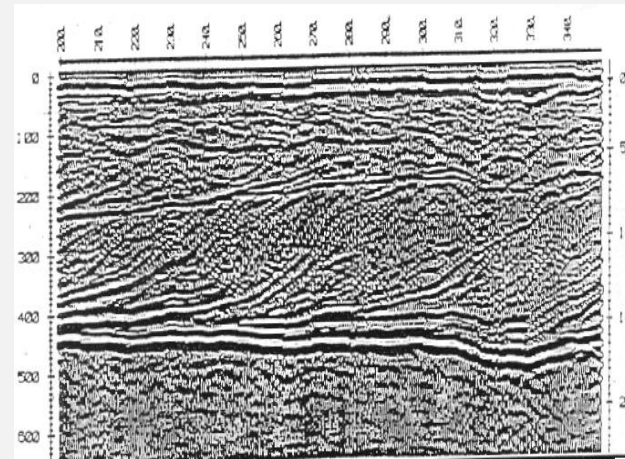
Merkezi frekans istasyonlar arası mesafenin, örnekleme aralığının bulunmasında kullanılır.

$$D_{\text{stasyon}} = 75 / f \cdot \sqrt{K}$$

$$t = 1000 / (6 \cdot f) \quad (t : \text{örnekleme aralığı} - \text{ns.})$$



0.5 m. aralıkla örneklenmiş veri



0.2 m. aralıkla örneklenmiş veri

(Annan 1992)

Yer Radarında Gürültü Kaynakları

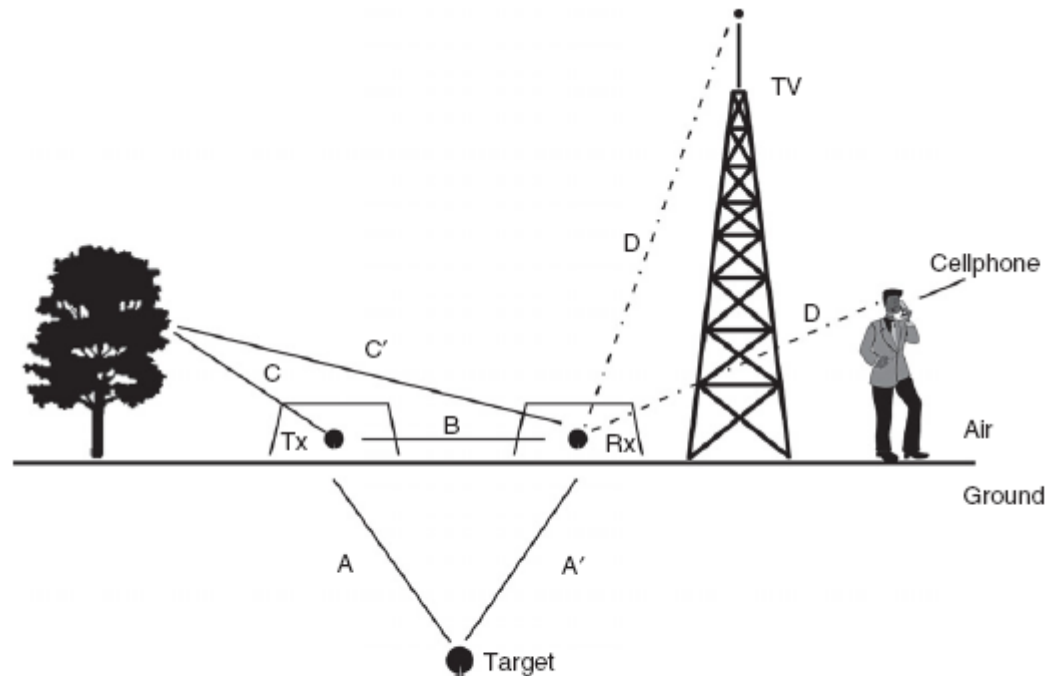


Figure 1.25 A ground penetrating radar (GPR) system emits and detects radio wave signals. There are many possible signals and paths and the objective is to maximize the target response and minimize others.

Yöntemin üstünlük ve zayıflıkları

ÜSTÜNLÜKLER

Yüksek frekans kullanılan yöntem olduğundan araştırma derinliği çözünürlüğü yüksektir.

Hedeflenen yapının derinliği, yapının elektriksel özelliklerine, jeolojik özelliklerine ve frekansa bağlı olarak hassas bir şekilde hesaplanır.

Ölçü alımı oldukça kolay ve hızlıdır.

ZAYIFLIKLAR

Yüksek frekans kullanımı araştırma derinliğini düşürmektedir.

Nemli ortamlarda istenilen verim alınamamaktadır.

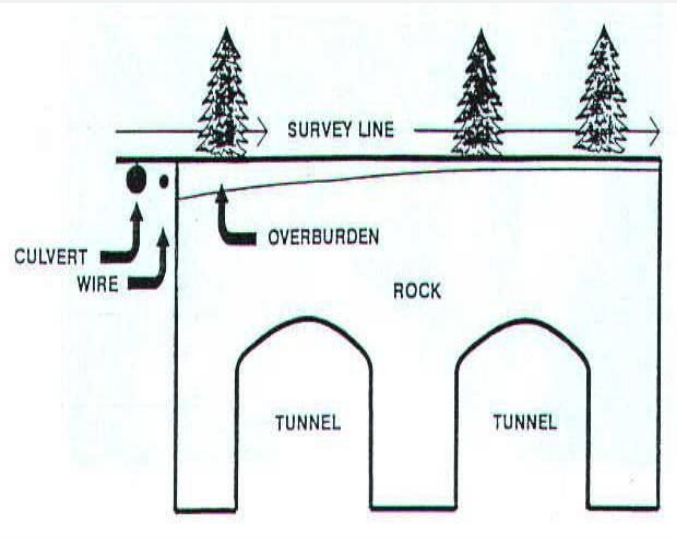
Ölçü alınan bölgede bulunan metalik nesnelere kesitte keskin yansımalara, yorumda yanlışlara neden olmaktadır.

Ölçü alınan bölgenin etrafında bulunan radyo vericileri yüksek gürültü yaratırlar.

Kullanım Alanları

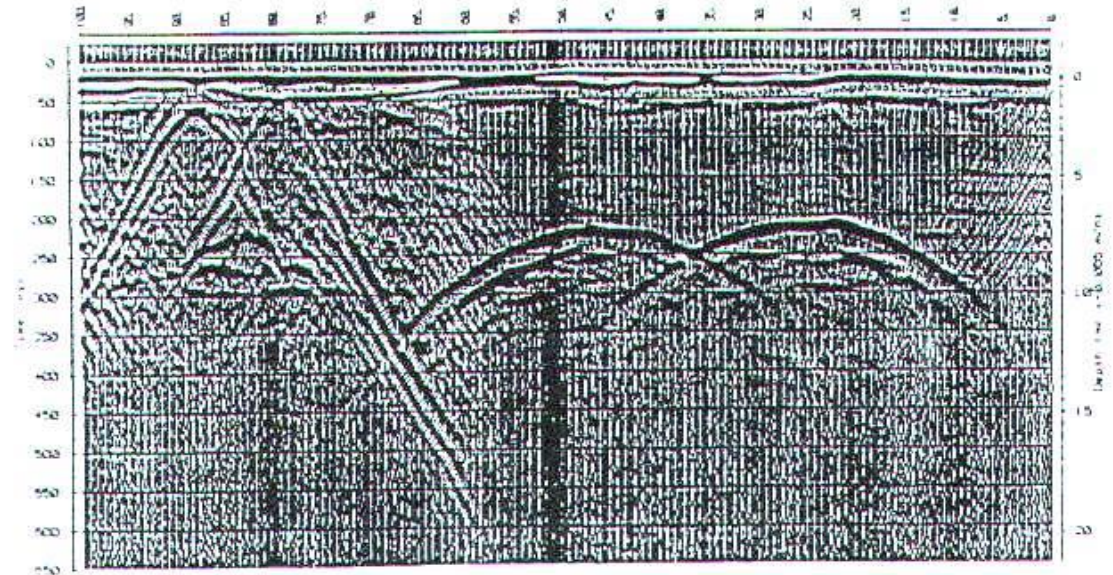
- **Jeolojik Yapıların İncelenmesinde:** kırık, çatlak, karstik boşluk, permafrost araştırmaları
- **Çevre Jeofiziđi Araştırmaları:** Yeraltısuyu kirlenmesi, atık alanları, su ve kanalizasyon yollarındaki kaçaklar, boru hatları vb. araştırılması
- **Mühendislik Yapılarının Araştırılması (Yapı Jeofiziđi):** Yol,Havaalanı, köprü, tünel yapımında zemin incelemelerinde, bu yapıların sağlamlıklarının tespitinde, duvar nemliliklerinin araştırılmasında
- **Arkeolojik Yapıların Araştırılmasında**
- **Maden Aramalarında:** yüzeye yakın (derinlik<40 metre) maden aramalarında, yer altı galerilerinde rezerv geliştirme çalışmalarında, göçük ve madne kazalarında

TÜNEL vb. YAPI BULMA ÇALIŞMALARI (Lerum, İSVEÇ)



50 MHz.

Company T S Geokonsult –
Sweden



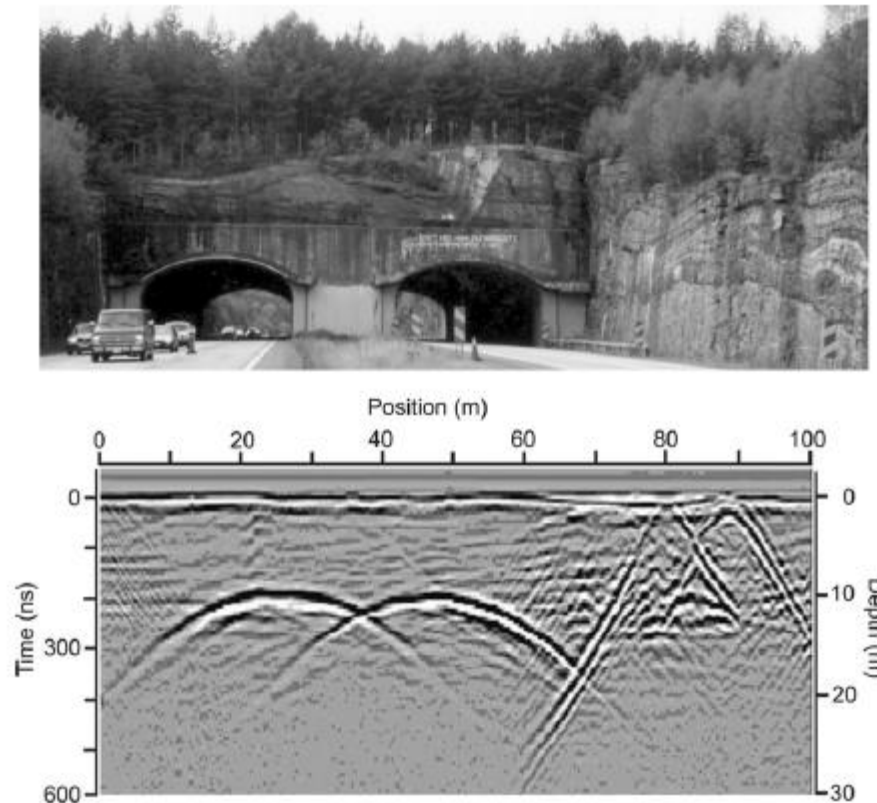
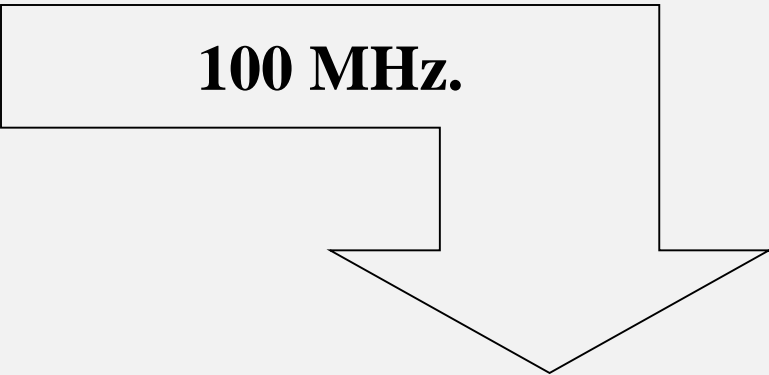
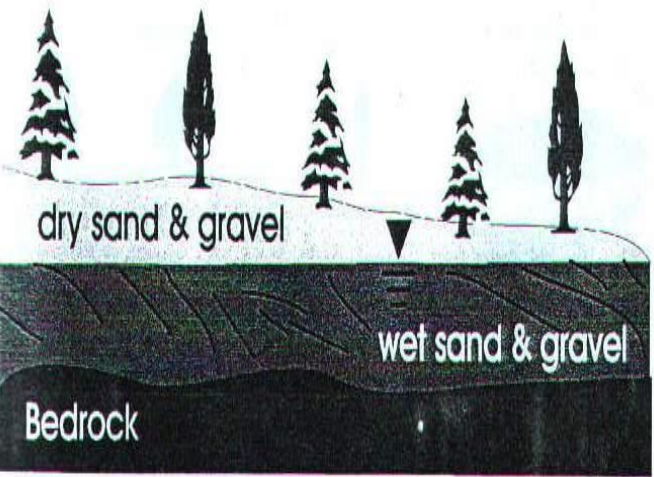
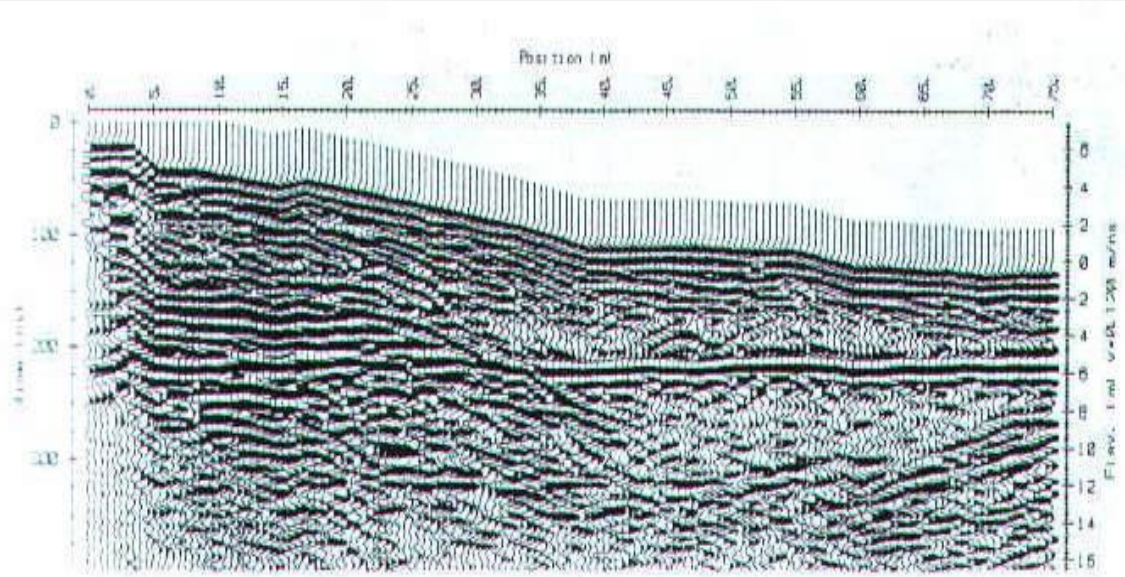


Figure 1.2 Ground penetrating radar (GPR) cross section obtained with a 50-MHz system traversing over two road tunnels. Ground penetrating radar signal amplitude is displayed as a function of position (horizontal axis) and travel time (vertical axis).

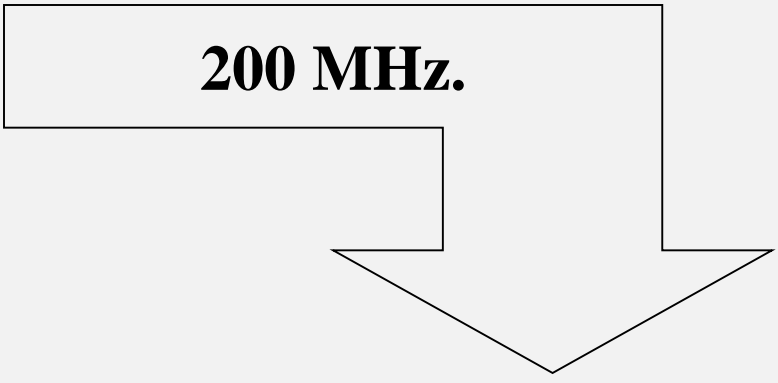
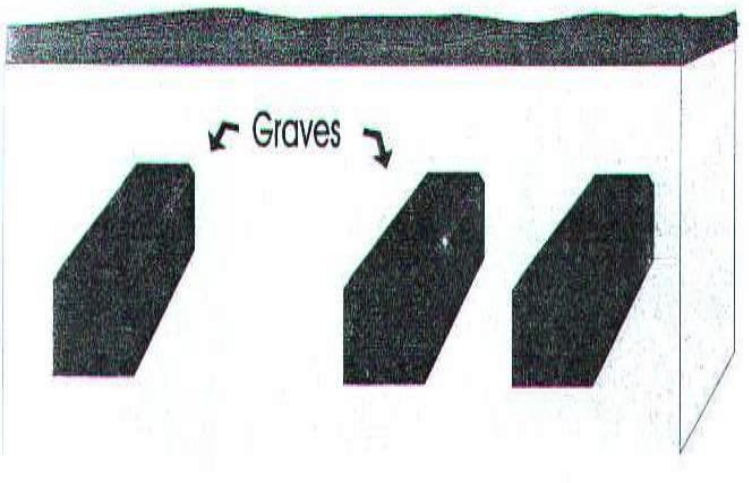
SU TABLASI YERİ BELİRLEME ÇALIŞMALARI (Ontario, KANADA)



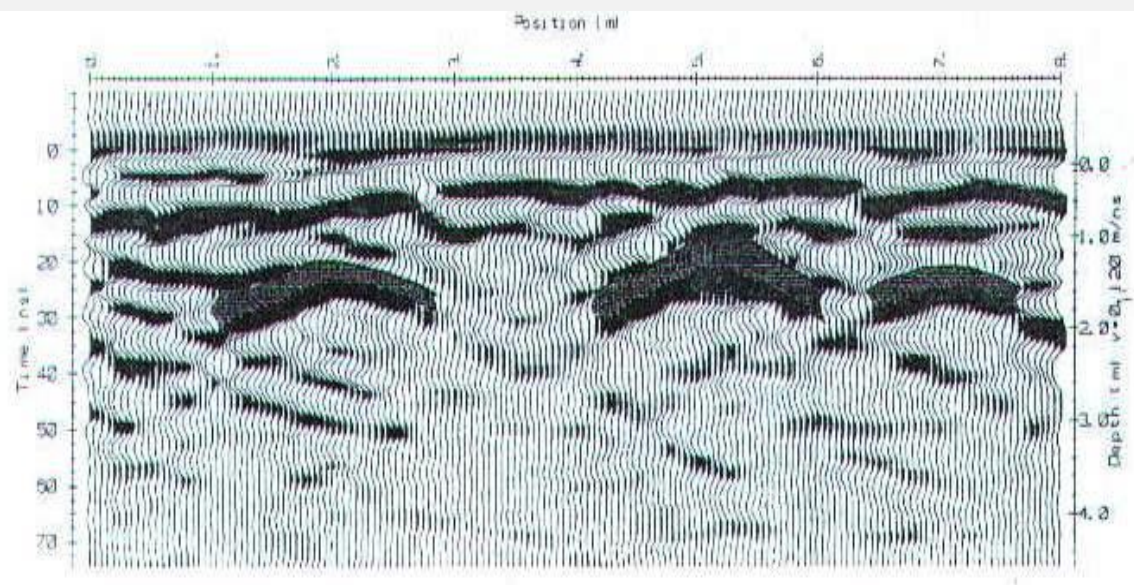
multiVIEW Geoservices Inc. –
Canada



MEZAR YERİ BELİRLEME ÇALIŞMALARI (KANADA)



University of Calgary,
Department of Geology -
Canada



Kuyu içi Çalışmalar: Akifer tabakanın belirlenmesi

Near Surface Geophysics, 2010, 8, 635-649

doi:10.3997/1873-0604.2010054

Full-waveform inversion of cross-hole ground-penetrating radar data to characterize a gravel aquifer close to the Thur River, Switzerland

Anja Klotzsche^{1*}, Jan van der Kruk¹, Giovanni Angelo Meles²,
Joseph Doetsch², Hansruedi Maurer² and Niklas Linde³

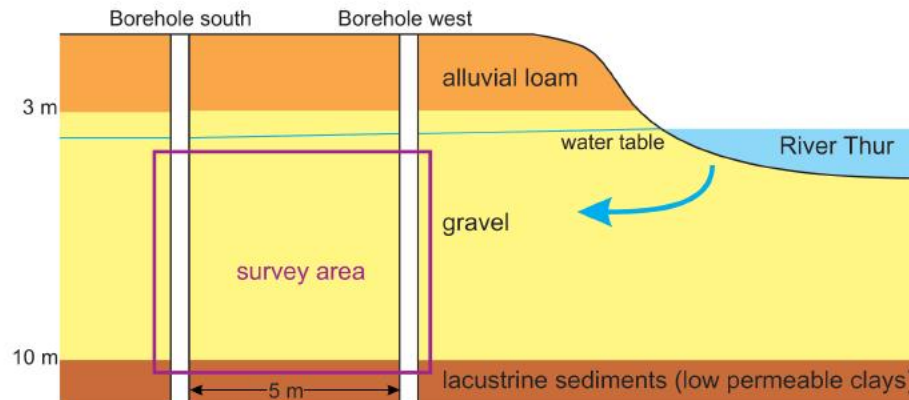


FIGURE 3

Simplified geological representation of the experimental area, showing a three-layer structure: alluvial loam, gravel, lacustrine (clay) sediments (from top to bottom); with boreholes close to the Thur River. The water table is approximately at 4 m depth.

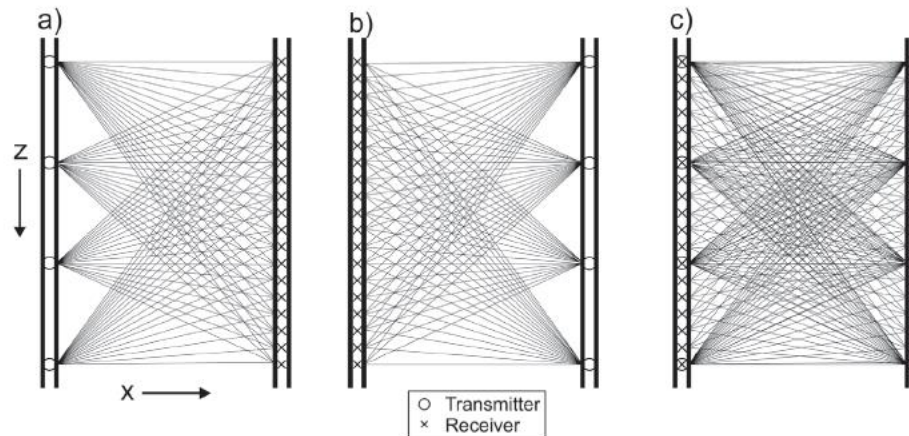


FIGURE 4

Schematic of the measurement setup employed that requires significantly less transmitter than receiver position, but has low ray-coverage in the transmitter borehole. Semi-reciprocal measurements, in which transmitter and receiver boreholes are interchanged, are indicated in (a) and (b). The combination of these measurements, shown in (c), improves the ray-coverage compared to the individual setups.

Full-waveform inversion of cross-hole ground-penetrating radar data to characterize a gravel aquifer close to the Thur River, Switzerland

Anja Klotzsche^{1*}, Jan van der Kruk¹, Giovanni Angelo Meles²,
Joseph Doetsch², Hansruedi Maurer² and Niklas Linde³

Permittivity Tomograms

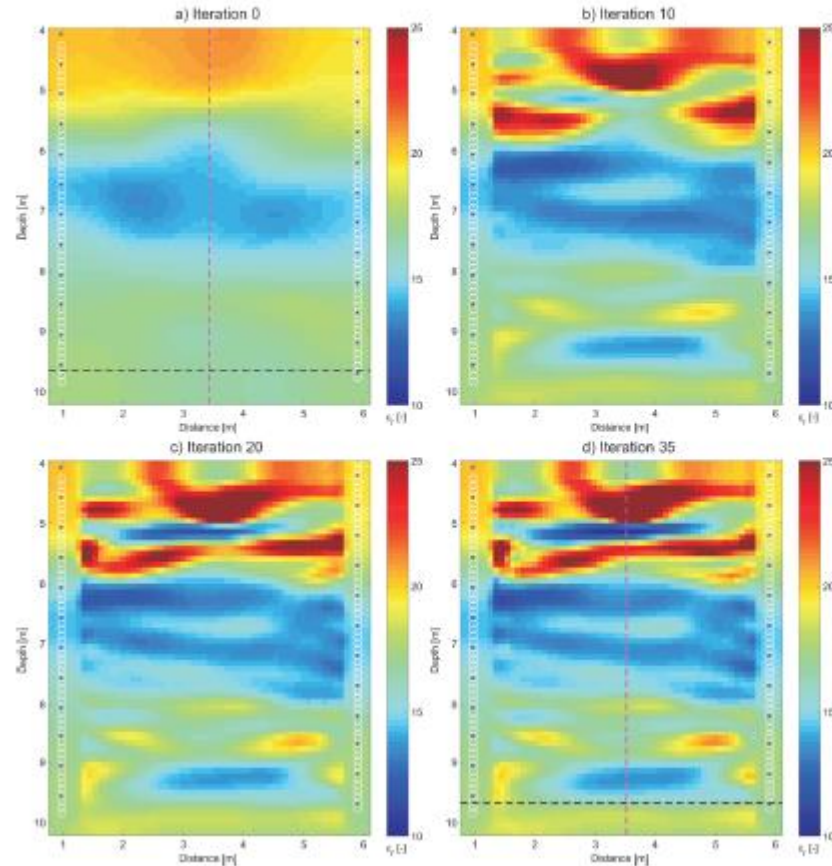


FIGURE 11
Relative permittivity tomograms for different iteration steps from a) initial model of the full-waveform inversion obtained from the ray-based inversion, b), c) and d) show the models obtained at iterations 10, 20 and 35, respectively. The dashed black line refers to Fig. 15(a), where a comparison of neutron-neutron logging data is presented. The violet dashed line indicates the position of the logging boreholes (2.5 m away).

GPR multi-component data analysis

P. Capizzi* and P.L. Cosentino

University of Palermo, C.F.T.A. Department, Geophysical section, Via Archirafi, 26, 90123 Palermo, Italy

Received May 2007, revision accepted November 2007

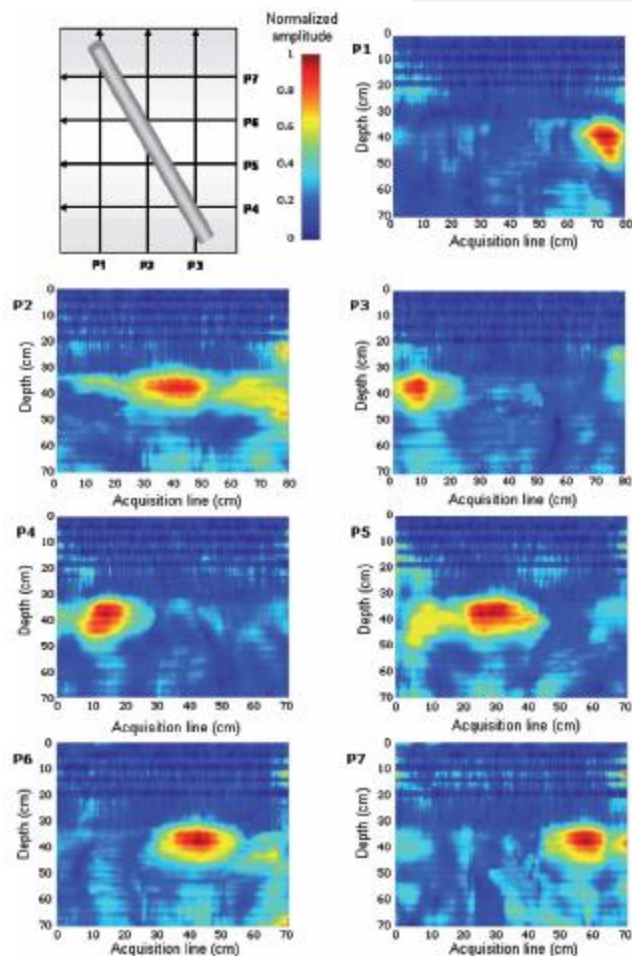


FIGURE 13
Seven profiles acquired using an iron pipe as a target. Only the S_{yy} dipole configuration is shown.

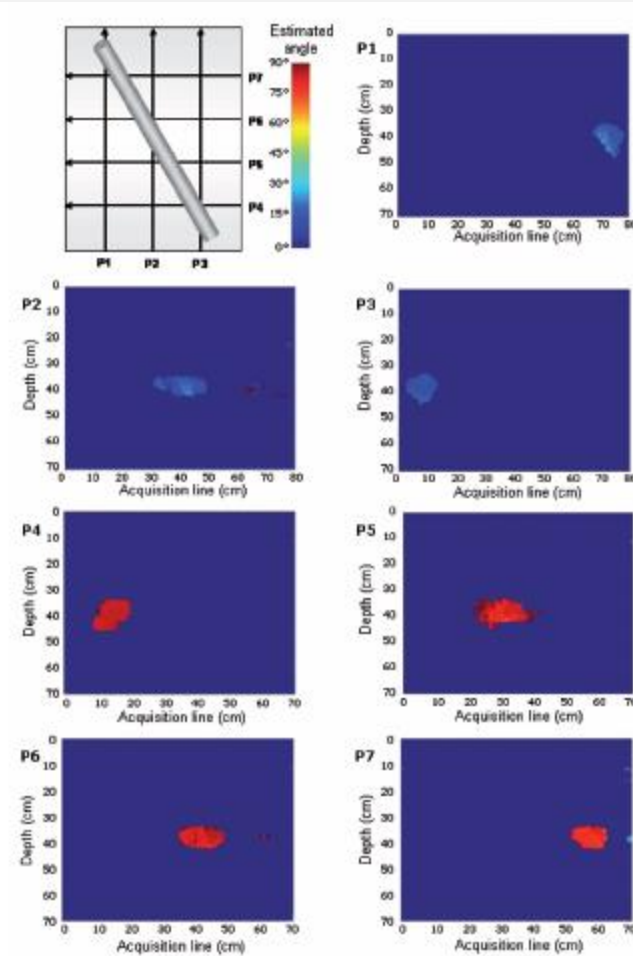
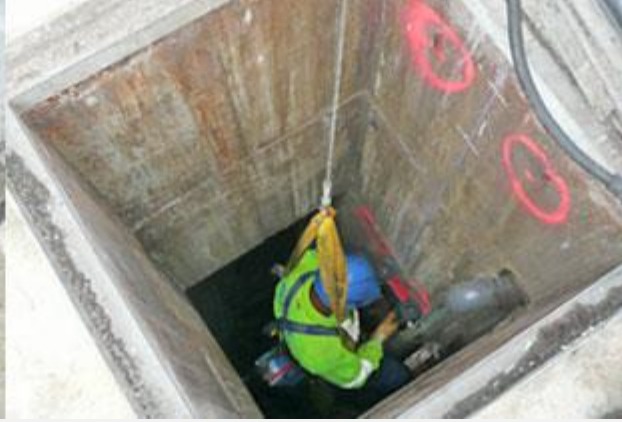


FIGURE 14
Direction angle calculated using an algorithm based on Alford's operator and weighed using the normalized amplitudes of S_{yy} configuration above a threshold of 0.7 as a weight matrix.

Yapı Jeofiziğinde Yer Radarı Uygulamaları: Beton Kalitesinin Araştırılması



Kullanılan Kaynaklar

Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.

Annan, A. P. *Electromagnetic principles of ground penetrating radar*. Vol. 1. chapter, 2009.

Annan, A. P. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics* (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.

Gündođdu Y., Yer Radarı ve Uygulamaları, Lisans bitirme tezi, 2002 (Ankara Üniv. Jeofizik M.B.