

GEÇİCİ ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLE YERALTININ 1-BOYUTLU MODELLENMESİ

ONE DIMENSIONAL MODELLING OF SUBSURFACE USING TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD

Mualla CENGİZ

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34850 Avcılar-İstanbul

ÖZ: Geçici elektromanyetik yöntem "Transient Electromagnetic Method" (TEM) akımın $t=t_0$ anında kesilmesi sonucu yeraltında indüklenen ikincil alanın etkisini inceleyen bir yöntemdir. Alıcı-verici aralığı araştırma derinliğinden daha büyük seçilerek gerçekleştirilen derin yeraltı araştırmalarında (LOTEM) verici olarak yatay bir elektrik dipol kullanılır. Bu çalışmada LOTEM yöntemi ile elde edilen verilerin 1-boyutlu modellenmesi için hazırlanmış olan MODALL yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım ile yatay tabakalı bir modelin erken, geç ve tüm zaman görünür özdirenç eğrileri hesaplanabilmektedir. Üç yatay tabakalı H, K, Q ve A tipi eğrilerde, modelin LOTEM tepkileri incelenmiş ve farklı model değişkenlerinin etkileri irdelenmiştir. Ayrıca Almanya'nın Ruhr-District bölgesinden elde edilmiş arazi verisi kullanılarak yöntemin başarısı denenmiş ve arazi verisiyle en iyi çıkan model için değişken analizi yapılarak modelleme ve yorumlamada değişken analizinin önemi tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Geçici Elektromanyetik, LOTEM, 1-B EM Modelleme

ABSTRACT: Transient Electromagnetic Method (TEM) investigates earth's effect of secondary field which is induced in ground by interrupting the current at $t=t_0$ time. In deep underground explorations where the transmitter receiver array is chosen larger than the exploration depth (LOTEM), a horizontal electric dipole is used as a transmitter. In this study the MODALL program is used that is prepared for 1-D modelling of the data obtained by LOTEM method. With this program early, late and all time apparent resistivity curves can be calculated of a horizontal model. LOTEM response of three horizontal layer in types of H, K, Q and A curves has been studied and the effect of different model parameters are discussed. In addition the accomplishment of the method is tested and the importance of the parameter analysis is discussed in interpretation and modelling with making parameter analysis for the best model that fits the field data by using field data obtained from Ruhr-District area of Germany.

Key words: Transient Electromagnetic, LOTEM, 1-D EM Modelling

GİRİŞ

Son yıllarda elektromanyetik (EM) teknikler hidrokarbon ve jeotermal kaynak araştırmalarında olduğu kadar derin kabuk araştırmalarında da yaygın biçimde uygulanmaktadır. Elektromanyetik yöntemler arasında bulunan Geçici-EM teknik hem elektromanyetik gürültü sorunlarının üstesinden geldiği hem de daha iyi EM alan verici kontrolüne sahip olarak daha yüksek çözüm gücü yarattığı için ilgi çekmektedir.

Geçici EM sondaj teknikleri jeolojik, petrol ve yeraltısuyu araştırmalarındaki yeraltı yapılarının bulunması ve jeotermal veya masif-metalik sülfürlü yapıların oluşturduğu iletken bölgelerin araştırılması için kullanılır

maktadır (Frischknecht ve Raab, 1984; Keller ve diğ., 1984; Rabinovich ve diğ., 1977; Wightman ve diğ., 1983; Nabighian, 1984).

Frekans-ortamı elektromanyetik (FEM) yöntemler yer yüzeyine yerleştirilen bir halka'dan alternatif akım (ac) geçirilerek uygulanır. Halkadaki birincil alan, yerde bulunan tüm iletkenleri indükleyerek girdap (eddy) akımlarının akışına neden olur. Bu akımlardan dolayı oluşan ikincil elektromanyetik alanlar birincil alan ile birlikte, yeryüzünün çeşitli noktalarında uygun bir alıcıyla kayıt edilir. Genelde, yeraltındaki iletkenlere ilişkin bilgileri kapsayan, alıcıdaki bu ikincil elektromanyetik alan birincil alanın çok küçük bir yüzdesi ka-

dardır. Bu koşullarda, ölçülen toplam EM alanın birincil ve ikincil kısımlarına ayrılması ve değerlendirilmesi zor olmaktadır. Bu gibi nedenlerle, frekans-ortamı yerine zaman ortamı EM ölçümlerinin yapılması düşüncesi gelişmiştir. Frekans ortamında alıcı-verici aralığının istenilen araştırma derinliğinden birkaç kat fazla olması gerekmektedir (Kaufman, 1979). Zaman ortamında alıcı verici sinyalleri birbirinden ayırdığı için böyle bir zorunluluk yoktur. Zaman ortamı ölçümlerinde, vericideki darbe sinyali geniş bir frekans içeriğine sahiptir, bundan dolayı tek bir ölçümle birçok farklı derinliklerden bilgi alınabilir. Frekans ortamı ölçümlerinde ise farklı frekanslarda birçok sinyalin ardı-ardına gönderilmesi gerekir. Şekil 1'de LOTEM yöntemi için bir arazi dizilimi gösterilmektedir. Halka biçimindeki alıcı, 1-2 km uzunluğundaki yere gömülü tel vericide üretilen kare dalga akımı (40-400 A) sonucu ortaya çıkan manyetik alanın zamana göre türevini ölçmekte, yere gömülü dipoller ise elektrik alan bileşenlerinin ölçülmesi için kullanılır.

LOTEM yönteminde yere gömülü verici tel için den bir süre için doğru akım (dc) geçirilirken yerde indüksiyon akımlarına neden olacak şekilde aniden $t=t_0$ anında kesilir. Faraday yasasına göre vericideki akım hızla azalırsa birincil manyetik alan da hızlı bir şekilde azalır. Bu da yeri iletken kesimlerde elektromotor güç (emf) indüklemeyi sağlar. Bu emf'nin büyüklüğü, iletkendeki birincil manyetik alanın zamana göre değişim oranına bağlıdır. Bu nedenle kısa süreli büyük emf açığa çıkması için, kısa bir zamanda güçlü bir verici akımı hızla sıfıra indirgenmelidir. Bu emf, iletkenliğin fonksi-

yonu, biçimi ve düzenine bağlı olarak iletken içinde, özgül bir girdap (*eddy*) akım akış rejimine neden olmaktadır. Bozulan akımların zamana göre değişimi, ikincil manyetik alanları meydana getirmektedir. Bu durumda birincil alan bulunmadığından, yeraltında indüklenen girdap akımlarının ikincil alanı uygun bir alıcıyla çok doğru olarak ölçülebilir.

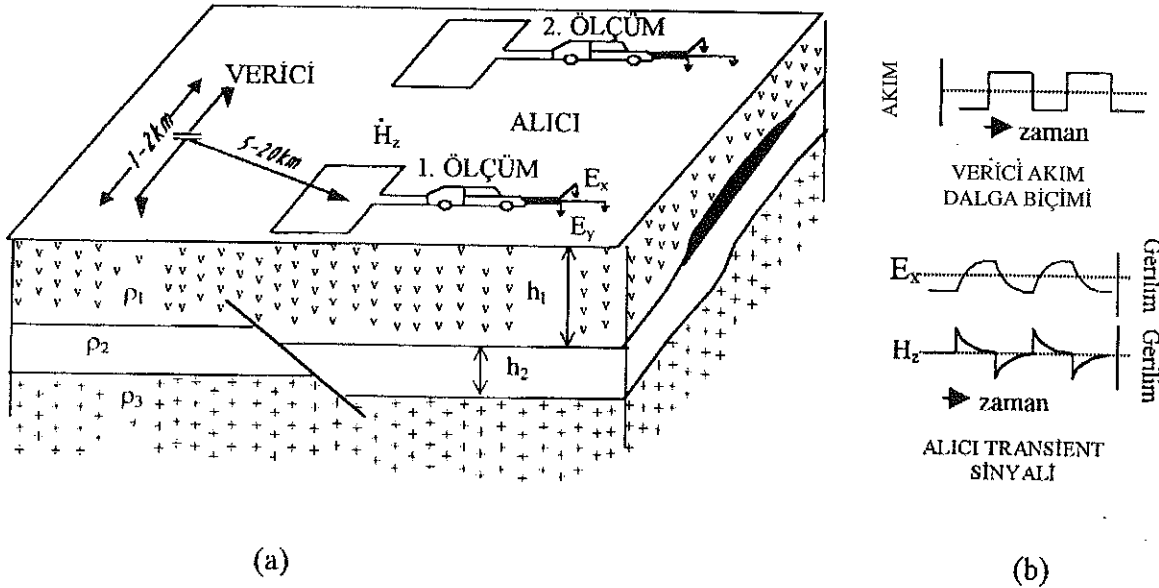
TEM ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için verici boyutlarının ve gönderilen akımın kaç amper olması gerektiği bilinmelidir. Arazi çalışmaları öncesinde yerin Geçici-EM yöntemle farklı yeraltı yapıları için kuramsal 1-boyutlu modelleme yapılarak bu sorunlar kolayca irdelenebilir.

GEÇİCİ-EM YÖNTEMİN İLKELERİ

Tekdüze yarı ortam için düşey bir manyetik alanın zamana bağlı değişimi bir indüksiyon bobininde gerilim benzeşimiyle, (1) eşitlinden bulunabilir (Petry, 1987).

$$V(t) = \frac{3DAy\rho}{2\pi r^3} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(1 + \frac{u^2}{3}\right) e^{-\frac{u^2}{2}} \right] \quad (1)$$

Bağıntıda; $u = 2\pi r/\tau$ ve $\tau^2 = 8\pi^2 \rho t / \mu_0$
 D = Vericinin dipol momenti ($I \cdot dl$)
 I = Akım (amper), dl = Dipol uzunluğu (m) A = Alıcı bobinin kesit alanı (m^2)
 ρ = Yeraltı öz direnci (ohm-m)
 μ_0 = Manyetik geçirgenlik (henry/m)
 r = Alıcı-verici aralığı (m)
 y = Alıcının yer koordinatları (m)
 t = Zaman (s)



Şekil 1. a) LOTEM yönteminin arazi dizilimi, b) Alıcı-verici dalga şekilleri (Strack, Hanstein ve Eilenz, 1989).
 Figure 1 a) Survey configuration of the LOTEM method, b) Receiver-transmitter waveform (Strack, Hanstein ve Eilenz, 1989).

$\text{erf}(x)$ = Hata fonksiyonu olarak verilmektedir (Abramowitz ve Stegun, 1964).

Geçici Elektromanyetik yönteminde tüm zamanlar için geçerli bir görünür öz direnç eğrisi yerine erken zaman ($t \rightarrow 0$) ve geç zaman ($t \rightarrow \infty$) aralıklarında iki ayrı sınır değeri oluşturularak iki üstel yaklaşım elde edilir. Erken zaman için; ($t \rightarrow 0$)

$$\lim_{u \rightarrow \infty} \text{erf} \left(\frac{u}{\sqrt{2}} \right) = 1 \quad (2)$$

değerini alacağından, (1) numaralı eşitlikteki

$$\text{gerilim denklemini; } V(t) = \frac{3DAy\rho}{2\pi r^5} \quad (3)$$

olarak değiştir. Geç zaman için; ($t \rightarrow \infty$, $u \rightarrow 0$) sınır değerlerini kullanırsak, (1) eşitliği

$$V(t) = \frac{DAy}{40\pi\sqrt{\pi}} \frac{\mu_0^{5/2}}{\rho^{3/2} t^{5/2}} \quad (4)$$

şeklini alır.

Manyetik alanın düşey bileşeni erken zaman için r uzaklığına bağlı olduğundan, alıcı bobini verici halkanın merkezinden uzaklaştığında görünür öz direnç eğrisinde değişimler gözlenir. Geç zaman için manyetik alanın düşey bileşeni r uzaklığına bağlı olmadığından görünür öz direnç eğrisi de hiçbir şekilde etkilenmemektedir.

(3) ve (4) eşitliklerindeki sınır değerleri uygulanarak iki üstel görünür öz direnç eğrisi elde edilir ve manyetik alan düşey bileşeni ile yerin elektriksel yapısı

$$\rho_a^{ET}(t) = \frac{2\pi r^5}{3ADy} V(t) \quad (5a)$$

$$\rho_a^{LT}(t) = \left(\frac{ADy}{40\pi\sqrt{\pi} V(t)} \right) \left(\frac{\mu_0}{t} \right)^{5/2} \quad (5b)$$

(5a) ve (5b) bağıntılarından belirlenir. Bağıntılarda ρ_a^{ET} "early-time" erken zaman için görünür öz direnç, ρ_a^{LT} "late-time" geç zaman için görünür öz direnç, $V(t)$ ise ölçülen gerilimi belirtmektedir.

Manyetik alan bileşenleri iletken ortamların belirlenmesinde daha duyarlı olmasına karşın elektrik alan bileşeni kullanıldığında dirençli katman daha iyi ayırt edilebilir. Tekdüze yarı ortam için Elektrik alanın yatay bileşeni (E_x) kullanıldığında, erken ve geç zaman görünür öz direnç eşitlikleri

$$\rho_a^{ET}(t) = \frac{4\pi r^3 E_x}{3D \sin^2 \phi} \quad (6a)$$

$$\rho_a^{LT}(t) = \frac{-2\pi r^3 E_x}{D \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \phi \right)} \quad (6b)$$

şekline dönüşür. Bağntıda,

$D = I \cdot dl =$ Dipol moment

$I =$ Akım (Amper)

$dl =$ Dipol uzunluğu (m)

$\rho_a^{ET} =$ erken zaman görünür öz direnç (ohm.m)

$\rho_a^{LT} =$ geç zaman görünür öz direnç (ohm.m)

$\phi =$ Alıcı verici arasındaki açı (derece)

$r =$ Alıcı verici aralığı (m)'dir.

MODEL TEPKİSİNİN HESAPLANMASI

Bu çalışmada yeraltının jeolojik yapısından hareketle LOTEM tepkilerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Modeli belirleyen fiziksel değişkenler (parametreler) yeraltındaki jeolojik bir cismi doğru tanımlayacak biçimde önceden olabildiğince kestirilerek model tepkisi hesaplanır. Araziye ölçtüğümüz yer tepkisi ile hesaplanan model tepkisinin uyumluluğu araştırılarak yeraltı yapıları çözümlenmeye çalışılır. Bu yöntem jeofizikte düz çözüm olarak anılır. Belli bir yer altı geometrisine ait model tepkilerinin saptanması, ölçülen yer tepkisini yaratan yer altı geometrisini çözmemize yardım eder. Arazi verileri gürültü diye adlandırdığımız değişik kökenli rasgele bileşenler içerdiğinden en iyi çakışmayı veren modele ait model değişkenlerin doğruluğuna tam da güvenilmemesi nedeniyle son ulaşılan model başka tür verilerden gelen (sondaj v.b.) bilgi ile denetlenmeli ve parametrelerin öncelik sırası irdelenmelidir. Başka yöntem ve disiplinlerden kaynaklanan bilgi yoksa modelin güvenilirliğinin denenmesi için parametre analizi önem kazanır.

Bu çalışmada ölçü alınan noktanın altında bulunduğu öngörülen yatay katmanlı ortamın modellenmesi için Strack (1992) tarafından hazırlanan MODALL yazılımı kullanılmıştır. Modelleme yapılarak jeolojik modele ait değişkenlerin çözümü arazi ölçümleri öncesinde belirlenebilir. Modelleme çalışması içerisinde ilk olarak H, K, Q ve A tipi sentetik modeller üzerinde değişken analizi yapılarak her bir değişkenin model üzerindeki etkisi irdelenmiştir. H tipi jeoelektrik model, dirençli iki tabaka arasındaki iletken bir tabakadan oluşmakta, bu tür jeoelektrik modellere verilebilecek jeolojik yapılar arasında LOTEM yönteminin en iyi çözümü verdiği dirençli iki katman arasındaki iletken akifer, dirençli katmanlar arasındaki iletken kumtaşı rezervuarı ve dirençli volkanik tabakalar arasındaki sedimenter tabaka yer almaktadır. İletken katmanlar arasındaki dirençli tuz domu LOTEM yöntemiyle çok iyi ayırt edilebildiğinden K tipi modele örnek olarak verilebilir.

1-B'lu MODALL programının ürettiği yer tepkisinin gerçek arazi verisinin çözümlenmesindeki başarısını denemek amacıyla Almanya'nın Ruhr-District bölgesinden LOTEM yöntemi ile elde arazi verisi kullanılmıştır. Değişken analizinin modelleme işlemine ve daha

da önemlisi yorumlamaya katkısını göstermek amacıyla bu veriye en iyi çakışan tepkiyi üreten modelin değişken analizi yapılmıştır.

Tüm zamanlar görünür öz direnç eğrileri arazi verilerinin modellenmesi açısından erken ve geç zaman eğrilerine kıyasla biraz daha hatalı olabilir. Yani gerçek arazi verileriyle çalışılırken modelleme aşamasında erken ve geç zaman eğrileri kullanılmalıdır. Ancak yeraltı modeli, değişkenlerin yorumlanması açısından daha kolay olduğu için sentetik modellerde tüm zamanlar görünür öz direnç eğrileri dikkate alınmış olup, gerçek arazi verilerinin kullanıldığı modelleme çalışmasında ise tüm zamanlar görünür öz direnç eğrisinin yanısıra erken ve geç zaman görünür öz direnç eğrileri ve elektrik alanın yatay bileşeninden elde edilen eğrileri de kullanılmıştır.

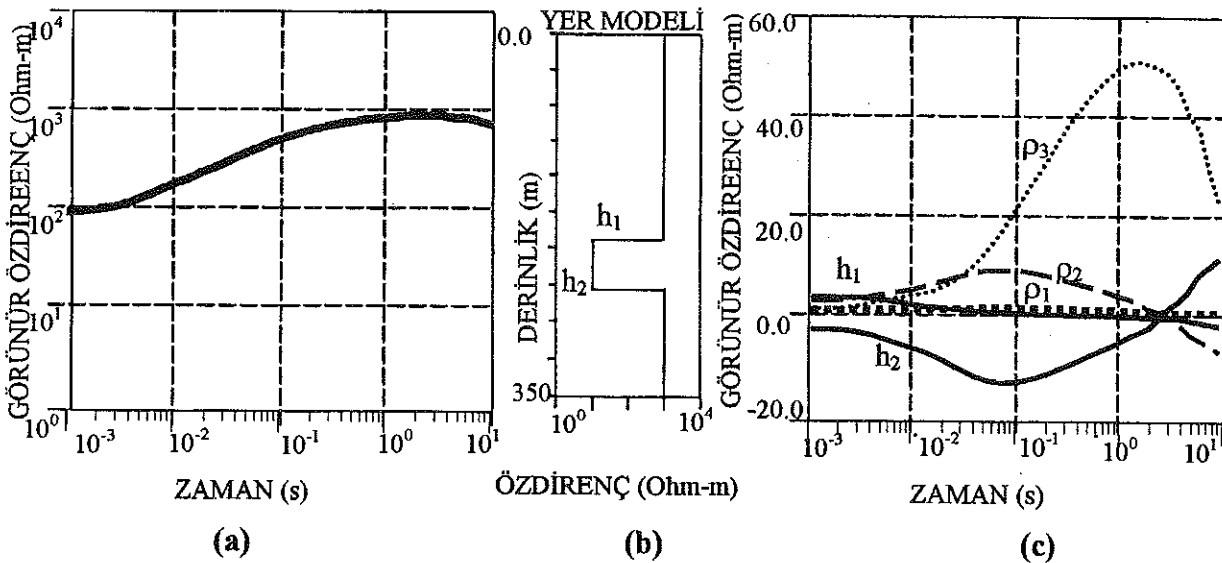
H tipi görünür öz direnç eğrisi veren yer modeli

İlk uygulamada değişkenleri $\rho_1=1000$ (ohm-m), $\rho_2=10$ (ohm-m), $\rho_3=1000$ (ohm-m), $h_1=200$, (m) $h_2=50$ (m) olan ve H tipi bir eğri verebilecek yer modeli incelenmiştir. Şekil 2a'da H tipi eğrinin manyetik alanın düşey bileşeninden elde edilen tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman grafiği çizilmiştir. Manyetik alanın yalıtkan ortamlara duyarsızlığı ve ilk katmanın yeterince kalın olmayışı sebebiyle ilk katman öz direncinin etkisi belirgin değildir. Vericiden 5000 m uzakta olan ölçü noktası altında temel kaya derinliği 250 m derinliktedir. Verilen yeraltı modeli Şekil 2b'de çizilmiştir. Şekil 2c'de H tipi

eğride verilen her bir parametre değerinin (sırasıyla ilk tabaka öz direnci ρ_1 , ikinci tabaka öz direnci ρ_2 , üçüncü tabaka öz direnci ρ_3 , ilk tabaka kalınlığı h_1 ve ikinci tabaka kalınlığı h_2) logaritmik ortamda ayrı ayrı artırılarak değişimlerin asıl model tepkisine etkileri çizilmiştir. Düşey manyetik alan kullanılarak elde edilen LOTEM tepkileri incelendiğinde; üçüncü tabakadaki öz direnç değeri logaritmik ortamda artırıldığında, eğrinin 10^{-1} s'den 10^1 s'ye kadar olan kısmını çok etkilediği görülmektedir. Bu modele göre, en etkili model değişkeni üçüncü tabakanın öz direncidir. İlk tabakanın öz direncinin ise model üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

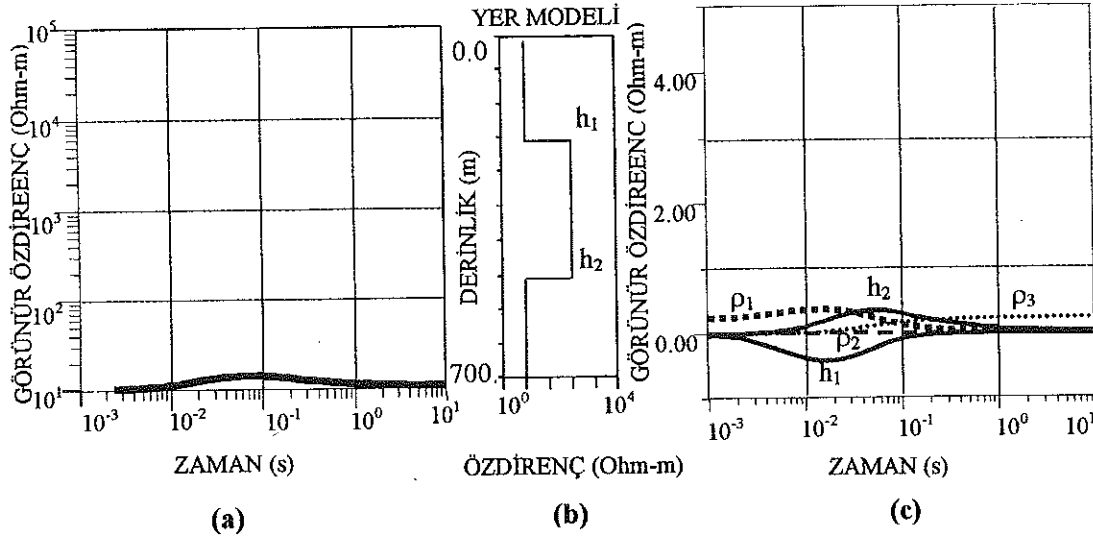
K tipi görünür öz direnç eğrisi veren yer modeli

İkinci modelde değişkenleri $\rho_1=10$ (ohm-m), $\rho_2=1000$ (ohm-m), $\rho_3=10$ (ohm-m), $h_1=200$ (m), $h_2=300$ (m) olan ve K tipi eğri verebilecek yer modeli incelenmiştir. Şekil 3a'da K tipi model için elde edilen tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman grafiği verilmiştir. Şekil 3b'de ise bu eğriye ait yer modeli görülmektedir. Şekil 3c'de K tipi eğride verilen her bir parametre değerinin (sırasıyla ilk tabaka öz direnci ρ_1 , ikinci tabaka öz direnci ρ_2 , üçüncü tabaka öz direnci ρ_3 , ilk tabaka kalınlığı h_1 ve ikinci tabaka kalınlığı h_2) logaritmik ortamda ayrı ayrı artırılarak bunların tepkilerinin ilk modelin tepkilerine göre değişimleri gözlenmiştir. Model üzerindeki parametre değişimleri incelendiğinde, en faz-



Şekil 2. a) H tipi eğriden manyetik alanın düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrisi; b) H tipi eğri için elde edilen yer modeli; c) H tipi modeldeki parametrelerin logaritmik ortamda artırılmasıyla elde edilen görünür öz direnç değerleri ile, asıl modeldeki görünür öz direnç değerleri arasındaki farkları.

Figure 2. a) Calculated all time apparent resistivity/time curve using the vertical magnetic field component of the type of H curve; b) Obtained earth model for the type of H curve; c) The subtraction between the apparent resistivity values obtained by increasing in the logarithmic domain the parameters in the H-type model and the apparent resistivity values of the main model.



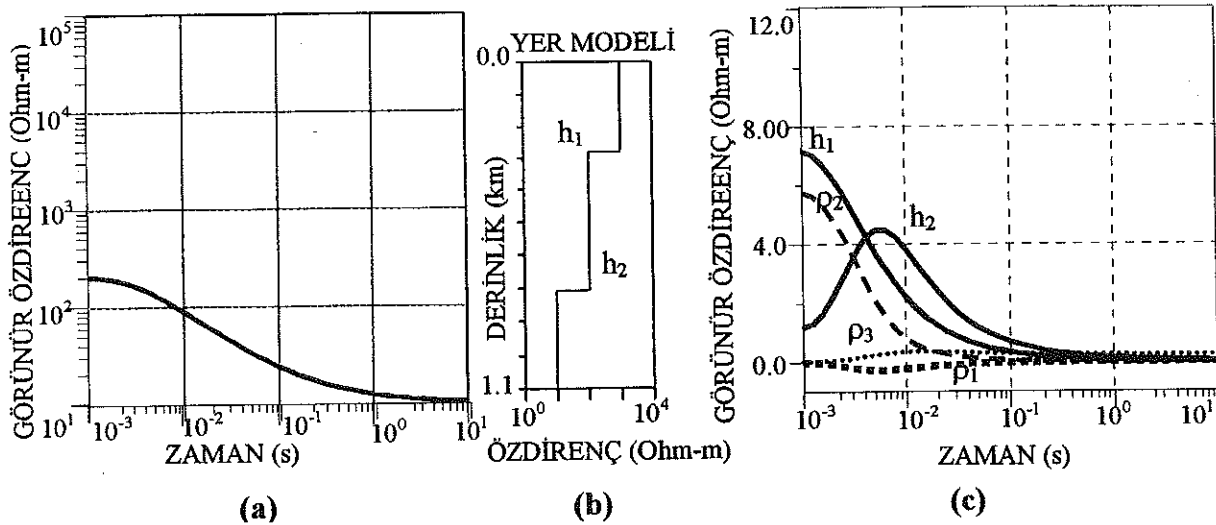
Şekil 3. a) K tipi eğri için manyetik alanın düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrisi; b) K tipi eğri için elde edilen yer modeli c) K tipi modeldeki parametrelerin logaritmik ortamda artırılmasıyla elde edilen görünür öz direnç değerleri ile, asıl modeldeki görünür öz direnç değerleri arasındaki farkları.
Figure 3. a) Calculated all time apparent resistivity/time curve using the vertical magnetic field component of the type of K curve; b) Obtained earth model for the type of K curve; c) The subtraction between the apparent resistivity values obtained by increasing in the logarithmic domain the parameters in the K-type model and the apparent resistivity values of the main model.

la etki eğrinin 0.02-0.15 s'lik kısmında birinci ve ikinci tabakanın kalınlığından kaynaklandığı görülmektedir. İkinci tabakanın öz direnci ise eğri üzerinde en az etkiyi göstermektedir.

Q tipi görünür öz direnç eğrisi veren yer modeli

Üçüncü modelde değişkenleri $\rho_1=1000$ (ohm-m),

$\rho_2=100$ (ohm-m), $\rho_3=10$ (ohm-m), $h_1=300$ (m), $h_2=500$ (m) olan ve Q tipi eğri verebilecek yer modeli incelenmiştir. Şekil 4a'da manyetik alanın düşey bileşeninden yararlanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrisi, Şekil 4b'de ise bu eğriye ait yer modeli verilmiştir. Şekil 4c'de Q tipi eğride verilen her bir parametre değerinin (sırasıyla ilk tabaka öz direnci ρ_1 ,



Şekil 4. a) Q tipi eğri için manyetik alanın düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrisi; b) Q tipi eğri için elde edilen yer modeli; c) Q tipi modeldeki parametrelerin logaritmik ortamda artırılmasıyla elde edilen görünür öz direnç değerleri ile, asıl modeldeki görünür öz direnç değerleri arasındaki farkları.
Figure 4. a) Calculated all time apparent resistivity/time curve using the vertical magnetic field component of the type of Q curve; b) Obtained earth model for the type of Q curve; c) The subtraction between the apparent resistivity values obtained by increasing in the logarithmic domain the parameters in the Q-type model and the apparent resistivity values of the main model.

ikinci tabaka özdirenci ρ_2 , üçüncü tabaka özdirenci ρ_3 , ilk tabaka kalınlığı h_1 ve ikinci tabaka kalınlığı h_2 ayrı ayrı logaritmik ortamda arttırılarak bunların asıl modele göre etkileri gözlenmiştir. En büyük etki eğrinin 0.001s ile 0.01s aralığında ilk tabaka kalınlığında görülmekte, ilk tabakanın ve üçüncü tabakanın özdirencinin model üzerinde önemli bir etkisi olmadığı izlenmektedir.

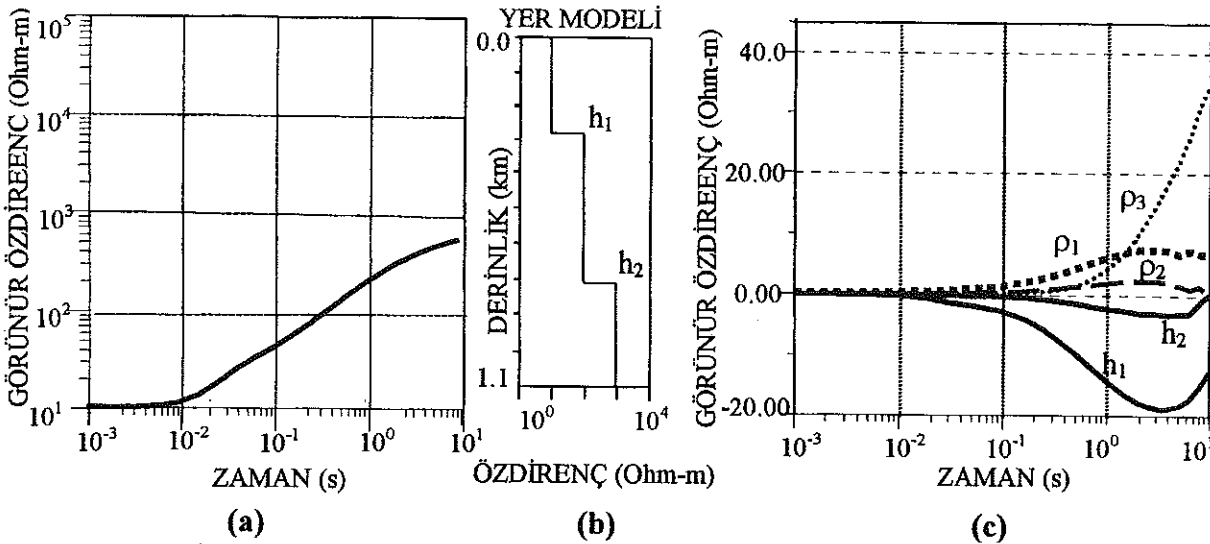
A tipi görünür özdirenç eğrisi veren yer modeli

Dördüncü modelde değişkenleri $\rho_1 = 10$ (ohm-m), $\rho_2 = 100$ (ohm-m), $\rho_3 = 1000$ (ohm-m), $h_1 = 300$ (m), $h_2 = 500$ (m) olan ve A tipi eğri verebilecek yer modeli incelenmiştir. Şekil 5a'da bu model için elde edilen tüm zamanlar görünür özdirenç/zaman grafiği verilmiştir. Şekil 5b'de ise bu eğriye ait yer modeli verilmiştir. Şekil 5c'de A tipi eğride verilen her bir parametre değerinin (sırasıyla ilk tabaka özdirenci ρ_1 , ikinci tabaka özdirenci ρ_2 , üçüncü tabaka özdirenci ρ_3 , ilk tabaka kalınlığı h_1 ve ikinci tabaka kalınlığı h_2) ayrı ayrı logaritmik ortamda arttırılarak bunların asıl modele göre etkileri gözlenmiştir. Üçüncü tabakanın özdirencinin eğrinin 1-10.0 s'lik kısmında en fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. İlk tabaka kalınlığı da oldukça etkin bir değişken olup, en az etkili parametrenin ikinci tabakadaki özdirenç olduğu görülmektedir.

Yöntemin Arazi Verisine Uygulanması

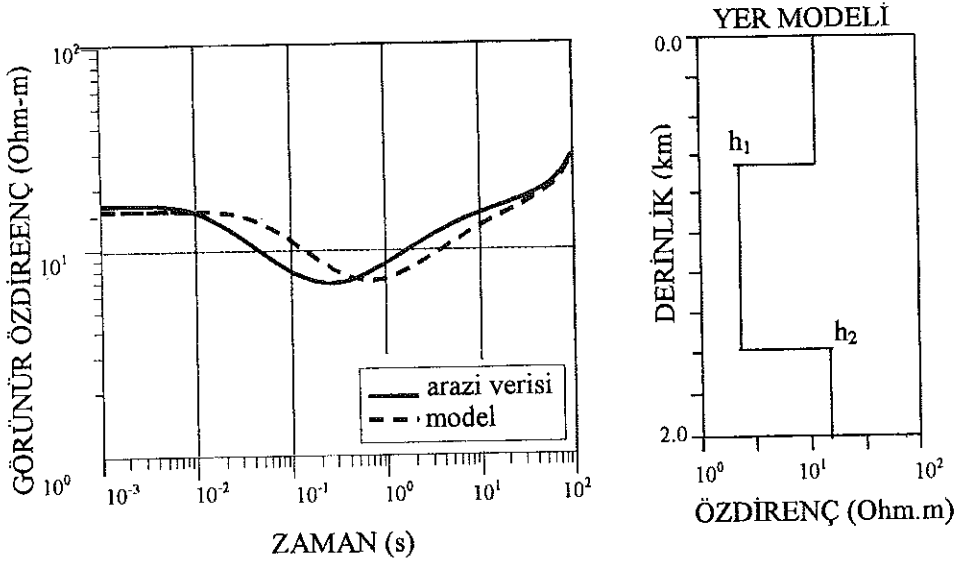
Köln Üniversitesi tarafından Almanya'nın Ruhr-District bölgesinde 1987-1988 yılları arasında LOTEM yöntemiyle kültürel gürültü sorununa çözüm getirmesi amacıyla 100 farklı alıcı lokasyonundan 145 sondaj gerçekleştirilmiştir (Stephan, A., 1989; Strack, 1992). Kömür yatağının varlığından dolayı bölgenin jeolojisi çok iyi bilinmektedir. İnceleme alanındaki ilk tabaka Üst Kretase-Kuvaterner yaşlı marn, kum ve kireçtaşı tabakasından oluşmaktadır. Kumtaşı tabakasının (Haltern kumu) bir kısmı su ihtiva ettiğinden dolayı bu tabakanın ayırımı için yansıma sismiği yetersiz kalmaktadır. İletken olan ikinci tabaka marn'lardan oluşmakta üçüncü tabaka ise Karbonifer yaşlı kömür damarıdır.

Şekil 6a'da Almanya'nın Ruhr-District Bölgesi'nden alınmış bir LOTEM sondaj verisinin manyetik alanın düşey bileşeni kullanılarak elde edilen tüm zamanlar görünür özdirenç/zaman eğrisi ve özdirenç değerleri 15.0 (ohm-m), 3.4 (ohm-m), 20.0 (ohm-m), kalınlık değerleri ise 629.0 (m) ve 931.0 (m) olan bir başlangıç modelin tepkisi çizilmiş olup yer modeli Şekil 6b'de görülmektedir. Şekil 6c'de logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı arttırılmış her bir model değişkeninin tüm zamanlar görünür özdirenç/zaman eğrileri ile model tepkisi yer almaktadır. Başlangıç modeli üzerinde yapılan değişken analizi ile 0.25-10 s arasında ikinci tabakanın kalınlığının çok etkili olduğu, 0.01-1 s arasında

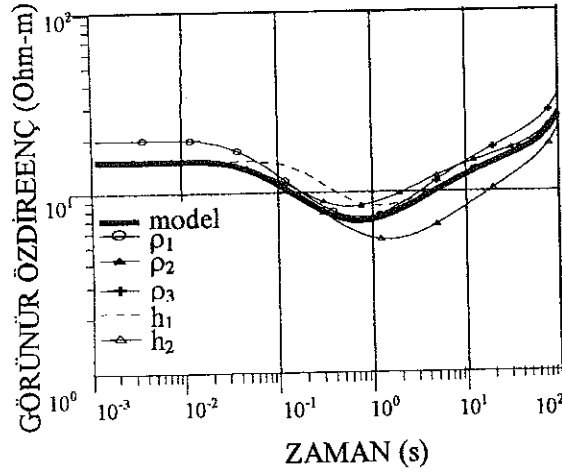


Şekil 5. a) A tipi eğri için manyetik alanın düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür özdirenç/zaman eğrisi; b) A tipi eğri için elde edilen yer modeli; c) A tipi modeldeki parametrelerin logaritmik ortamda arttırılmasıyla elde edilen görünür özdirenç değerleri ile, asıl modeldeki görünür özdirenç değerleri arasındaki farkları.

Figure 5. a) Calculated all time apparent resistivity/time curve using the vertical magnetic field component of the type of A curve; b) Obtained earth model for the type of A curve; c) The subtraction between the apparent resistivity values obtained by increasing in the logarithmic domain the parameters in the A-type model and the apparent resistivity values of the main model.



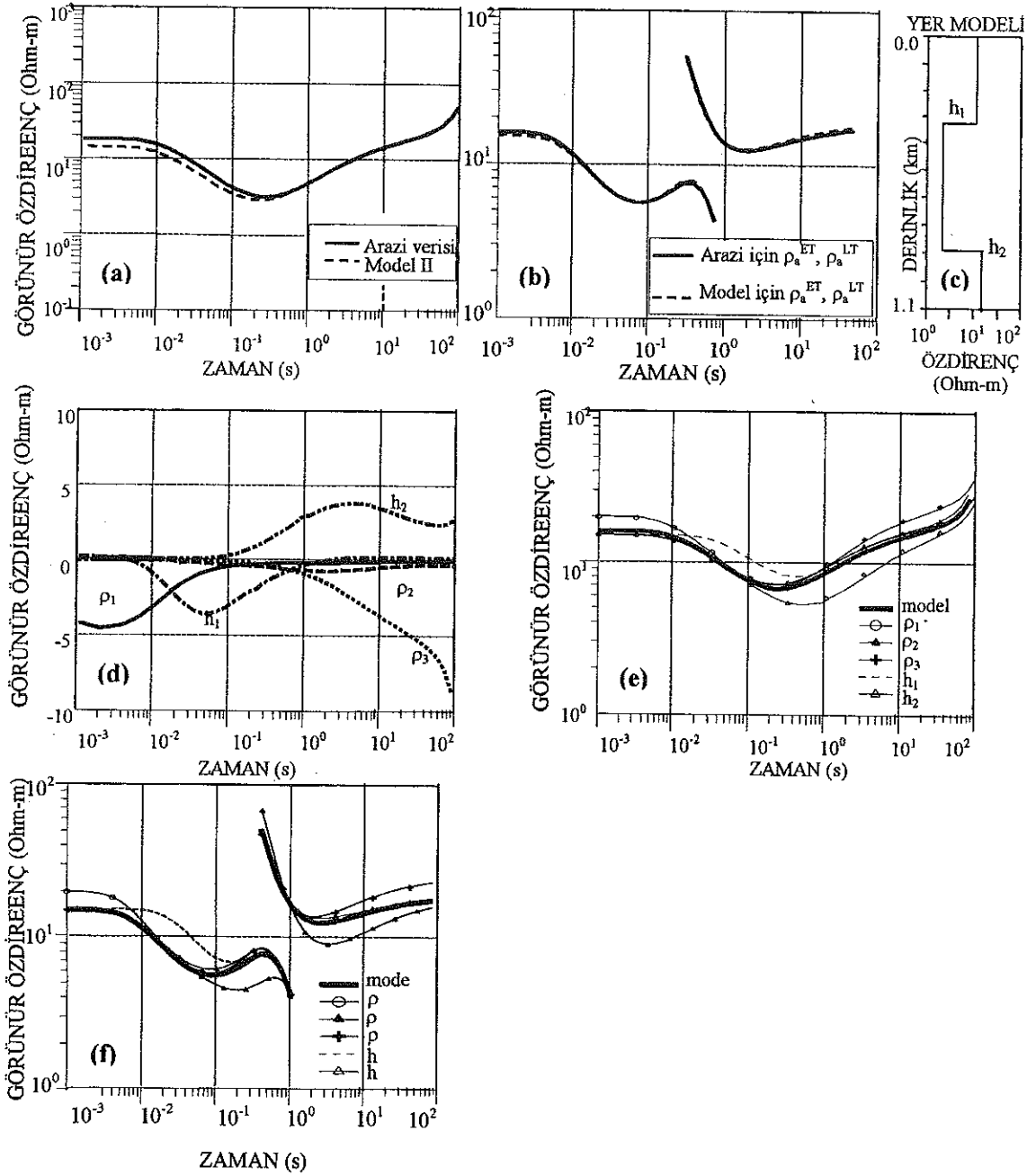
Şekil 6. a) Almanya'nın Ruhr-District Bölgesi'nden alınmış bir Lotem sondaj verisi ve başlangıç modeli için manyetik alan düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri; b) Yer modeli.
Figure 6. a) Calculated all time apparent resistivity/time curve using the vertical magnetic field component for the starting model and the LOTEM sounding data obtained from the Ruhr-District region Germany; b) Earth model.



Şekil 6. c) Model tepkisinin ve logaritmik ortamda eşit oranda arttırılmış her bir model değişkenlerine ait tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri.
Figure 6. c) All time apparent resistivity/time curves for the model response and each of the model parameters which are increased in equal rate in the logarithmic domain.

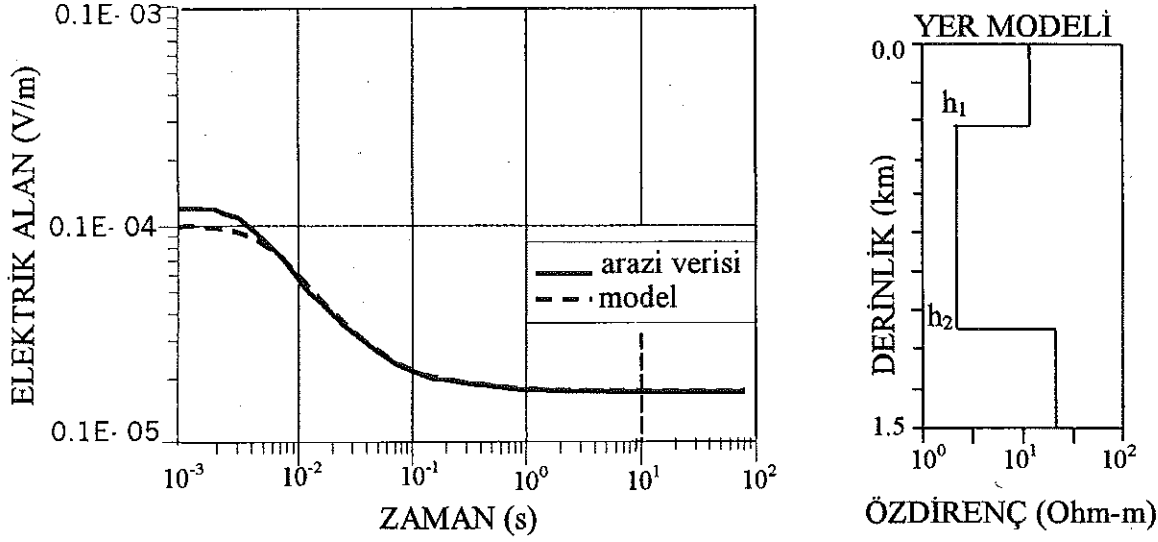
ilk tabaka kalınlığının, 0.02-10 s arasında ise ikinci tabaka öz direncinin çok etkili olduğu görülmektedir. Seçilmiş olan başlangıç modeli arazi eğrisi ile net olarak çakışmadığından ikinci bir deneme olarak en etkili değişken olan birinci ve ikinci tabaka kalınlıkları ile ikinci tabakanın öz direnç değerleri logaritmik ortamda eşit oranda azaltılmış ve değişken değerleri 15.0 (ohm-m), 3.0 (ohm-m), 20.0 (ohm-m) kalınlık değerleri ise 350 (m) ve 500.0 (m) olan ikinci bir model tepkisi arazi eğrisi ile çakıştırılarak tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri Şekil 7a'da erken zaman ve geç zaman görünür öz-

direnç eğrileri/zaman ise Şekil 7 b'de verilmiştir. Şekil 7c'de yer modeli görülmektedir. Logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı arttırılmış her bir model değişkenine ait görünür öz direnç değerlerinin model tepkisinden olan farkları Şekil 7d'de gösterilmektedir. Şekil 7e ise, logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı arttırılmış her bir model değişkeninin tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri ile model tepkisi yer alırken, Şekil 7 f'de logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı arttırılmış her bir model değişkeninin erken zaman ve geç zaman görünür öz direnç eğrileri model tepkisi ile karşılaştırıl-

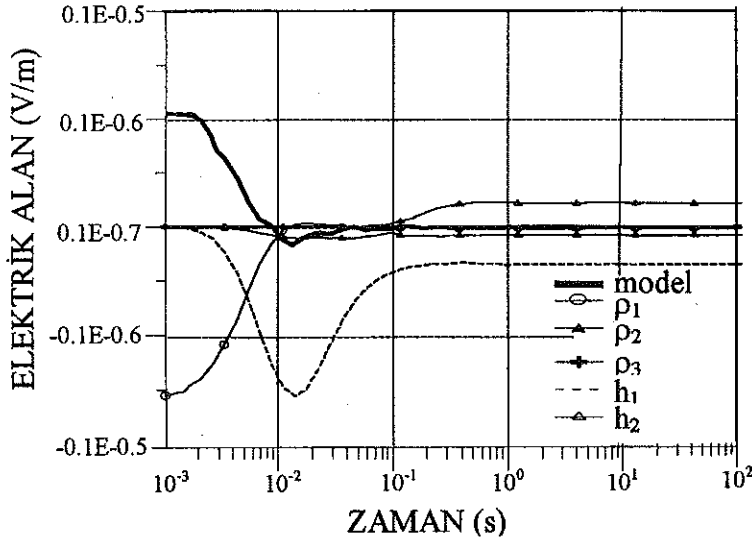


Şekil 7. Almanya'nın Ruhr-District Bölgesi'nden alınmış LOTEM sondaj verisi ve yeni model için manyetik alan düşey bileşeni kullanılarak hesaplanan a) tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri b) erken zaman (ρ_a^{ET}), geç zaman (ρ_a^{LT}) görünür öz direnç/zaman eğrileri c) Yer modeli d) model parametrelerin logaritmik ortamda eşit oranda artırılmasıyla elde edilen görünür öz direnç değerleri ile, asıl modeldeki görünür öz direnç değerleri arasındaki farkları e) model tepkisinin ve logaritmik ortamda eşit oranda artırılmış her bir model değişkenlerine ait tüm zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri model tepkisinin ve logaritmik ortamda eşit oranda artırılmış her bir model değişkenlerine ait erken zaman ve geç zaman zamanlar görünür öz direnç/zaman eğrileri.

Figure 7. With the use of the vertical magnetic field component for the new model and the LOTEM sounding data obtained from the Ruhr-District region Germany a) calculated all time apparent resistivity/time curves b) early time (ρ_a^{ET}) and late time (ρ_a^{LT}) apparent resistivity/time curves c) earth model d) the subtraction between the apparent resistivity values obtained by increasing in equal rate in logarithmic domain the model parameters and the apparent resistivity values of the model e) all time apparent resistivity/time curves for the model response and each of the model parameters which are increased in equal rate in the logarithmic domain f) early time and late time apparent resistivity/time curves for the model response and each of the model parameters which are increased in equal rate in the logarithmic domain.



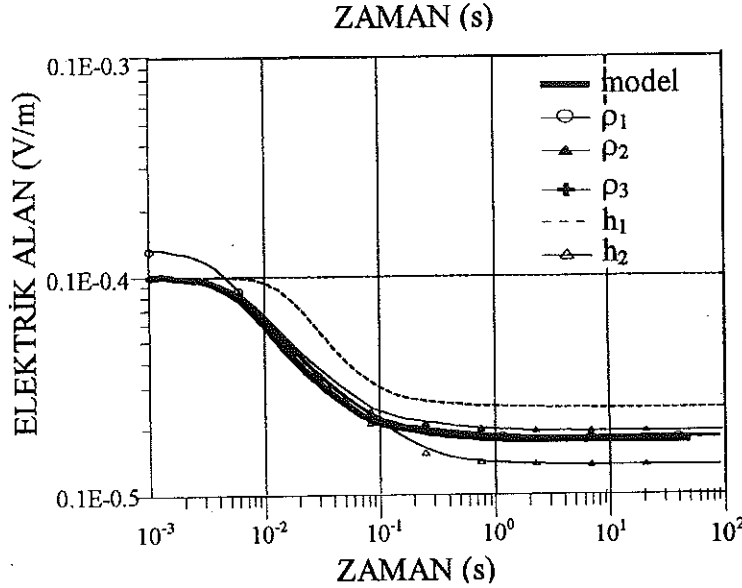
Şekil 8. a) Ruhr-District Bölgesi'nden alınmış LOTEM sondaj verisi ve yeni model için elektrik alan yatay bileşeniyle hesaplanan elektrik alan/zaman eğrileri b) yer modeli.
 Figure 8. a) Calculated electric field/time curves with the horizontal field component for the new model and LOTEM Sounding data obtained from the Ruhr-District region b) earth model.



Şekil 8. c) Model parametrelerinin logaritmik ortamda eşit oranda artırılmasıyla elde edilen elektrik alan değerleri ile asıl modeldeki elektrik alan değerleri arasındaki farkları.
 Figure 8. c) The subtraction between the electric field values obtained by increasing in equal rate in logarithmic domain the model parameters and the electric field values of the model.

mıştır. Tüm zamanlar görünür öz direnç eğrileri incelendiğinde, ikinci tabaka kalınlığının eğrinin 0.1-10 s'lik kısmında, eğrinin 0.01-1.0 s'lik kısmında ise ilk tabaka kalınlığının çok etkili olduğu görülmektedir. Erken zaman görünür öz direnç eğrisinin 0.01-0.1 s'lik kısmında en etkili değişkenin ilk tabakanın kalınlığı olduğu, 0.1-10 s arasındaki kısmında ise ikinci tabakanın kalınlığı olduğu görülmektedir. Geç zaman görünür öz direnç eğrisinde ise, 1-10 s arasında en etkili değişkenin ikinci tabakanın kalınlığı olduğu görülmektedir. Şekil 8a'da ay-

nı arazi verisi için elektrik alanın yatay bileşeni kullanılarak elde edilen elektrik alan/zaman eğrisi ve öz direnç değerleri 15.0 (ohm-m), 3.0 (ohm-m), 35.0 (ohm-m) kalınlık değerleri ise 300 (m) ve 800.0 (m) olan model tepkisi görülmekte olup yer modeli Şekil 8b'de verilmiştir. Şekil 8c'de logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı artırılmış her bir model değişkenine ait elektrik alan değerlerinin model tepkisinden olan farkları, Şekil 8d, logaritmik ortamda eşit oranda ayrı ayrı artırılmış her bir model değişkeninin elektrik alan/zaman eğrileri ile mo-



Şekil 8. d) Model tepkisinin ve logaritmik ortamda eşit oranda artırılmış her bir model değişkenine ait elektrik alan/zaman eğrileri.
Figure 8. d) Electric field/time curves for the model response and each of the model parameters which are increased in equal rate in the logarithmic domain.

del tepkisi yer almaktadır. En etkili değişkenin eğrinin 0.002-0.1 s'lik kısmında birinci tabakanın kalınlığı olduğu ikinci tabakanın kalınlığının ve öz direncinin de oldukça etkili olduğu üçüncü tabakanın öz direncinin ise herhangi bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir.

SONUÇLAR

LOTEM yöntemi verici olarak elektrik bir dipolün kullanılması ile yerin düşey yöndeki akışı hakkında bilgi vermektedir. Arazi bileşeni olarak kullanılan manyetik alan bileşenleri, iletken yapıların ayırt edilmesinde önemli rol oynar. Dirençli volkanik tabakalar arasındaki sedimenter tabakanın ortaya çıkarılmasındaki sorunlar bu bileşenin kullanılmasıyla daha iyi çözümlenebilmektedir. Elektrik alan bileşeninin kullanımıyla yapılan ölçümlerde amaç ölçülen sinyale etki eden anizotropiyi bulmaktır. Aynı zamanda bu bileşen dirençli katmanlara karşı daha duyarlıdır o yüzden K tipi eğrilerde örneğin iletken katmanlar arasındaki dirençli tuz domunun varlığı bu bileşenin kullanılmasıyla daha iyi ayırt edilebilir.

Yapılan 1-Boyutlu (1-B) modelleme çalışmasında LOTEM yönteminden elde edilen verilerin değerlendirilmesi için geliştirilen MODALL programı kullanılmış ve model tepkisi üretmesi denenmiş, bunun için en çok bilinen H, K, Q, A tipi katman modelleri üretilmiştir. Programın arazi verisini çözümlemedeki başarısı denenmiş ve öncelikle başlangıç modele ait tahmini sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra değişkenler uygun şekil-

de değiştirilerek arazi verisi ve model tepkisi iyi bir biçimde karşılaştırılmıştır.

Üretilen H, K, Q, A tipi eğriler için değişken analizi yapılmış ve yer altı modeli değiştirilince, model değişkenlerinin model tepkisi üzerindeki önem sıralamasının değiştiği gösterilmiştir.

H tipi bir eğri olan arazi verisine çakışma sağlamak için üretilen modeller üzerinde değişken analizi yapılmıştır. Değişken analizinin iki faydası olmuştur: Modelin arazi verisine daha uygun tepki vermesi için değiştirilmesi sırasında model tepkisini en çok etkileyen değişkenler üzerinde çalışarak arazi eğrisiyle çakışmayı daha hızlı ve etkin olarak sağlamamızda yardım etmiştir. İkinci ve daha önemli yararı ise, yorumlama aşamasında ortaya çıkarak Jeofizik modelleme işlemleri sırasında çok çözümlülük probleminin yarattığı belirsizlik nedeniyle yorumlama aşamasında oluşabilecek sorunları irdelememize yardımcı olur. Bu problemin üstesinden gelebilmek için modeldeki bazı değişkenleri varsa diğer bilgilerden (jeoloji, sondaj verisi, v.b.) modele katmak iyi bir yoldur. Bunun dışında değişken analizi yapmak da ilki kadar olmasa da yararlı olabilecek bir yoldur. Değişken analizi ile model tepkisini en çok değiştiren parametreleri ve tepkinin hangi bölgesinde daha etkin olduklarını saptamak yaptığımız çözümde en duyarlı saptadığımız model değişkenlerini de belirlemek anlamına gelir.

Arazi verisine en iyi çakışan model H tipi bir eğridir. Aynı tür ancak değişken parametreleri farklı olan, sentetik modelin parametrelerinin önem sıralaması parametrelerin sayısal değerlerine bağlı olarak değişebilmektedir (Şekil 2a,c). İki eğri de aynı tür olmasına karşın birinci sentetik modelin ilk katmanı ince ve çok dirençli (1000 ohm-m) ikinci sentetik modelde ise ilk katman kalın ve çok daha iletken olması bu farkın başlıca nedenidir. Aynı arazi verisini incelerken kurduğumuz iki ayrı model üzerinde yaptığımız değişken analizi, model değişkenlerinin önem sıralamasının korunduğunu da göstermiştir.

SUMMARY

Deep transient electromagnetic method (LOTEM) is a technique where the transmitter-receiver offset is approximately equal or larger than the exploration depth and in which a grounded wire dipol typically 1-2 km long is used as a transmitter. A mobile receiver as a induction loop located at a offset from 2-20 km is used to record the time derivative of the vertical magnetic field (H_z component) and a grounded wire dipol is used to record the electric field components (Figure 1). The E_x component is more sensitive to resistive layers where the magnetic field component (H_z) is much more sensitive to conductive layers. This method is succesful applied to oil explorations and deep crustal investigations.

As apparent, resistivity curves couldn't be calculated for all times two different resolutions for early time ($t \rightarrow 0$) and late time ($t \rightarrow \infty$) are formed. To determine earths electrical structure the measured magnetic field, its time derivative and the electric field components are transformed in to apparent resistivity.

In this paper the MODALL program is used as 1-D modelling to interpret the synthetic H (intermediate conductive layer), K (intermediate resistive layer), Q (decreasing resistivity with depth), A (increasing resistivity with depth) type curves as well as the sounding data from the Ruhr-District region (Germany) in which the LOTEM method is applied.

In the H-type synthetic curve where between two resistive volcanic layers a conductive sediment layer can exist it can be seen from the all time apparent resistivity curve obtained from the vertical magnetic field component that the first layer couldn't be identificate due to its high resistivity (1000 ohm-m) and also that the resistivity of the third layer is the most effective parameter of this type of curve (Figure 2a,c).

Also the curves obtained from the vertical magnetic field and electric field component of the LOTEM sounding data from the Ruhr-District region (Germany) is investigated to show the effiience in the solution of

the model program and the contribution of the parameters to the model response. After investigating the priority order of the initial model parameters the most effective parameters (h_2, h_1, ρ_2) are changed and a new model is obtained which shows the best fit to the H-type field curve. The importance order of the same type models (H-type in the field study) with different parameter values can change due to their numerical values.

KATKI BELİRTME

Bu makale, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünce kabul edilen yüksek lisans tezine (Cengiz, M.,1997) ait bir çalışmayı içermektedir. Bu çalışmada bana yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. O. Metin İlkışık'a, çalışmamın yazım aşamasında bana her türlü yardımı sağlayan Araş. Gör. Kenan Çinku'ya ve görüşleriyle çalışmamın sonuçlanmasında katkıda bulunan Doç. Dr. Aysan Gürer'e teşekkür ederim.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Abramowitz, M., ve Stegun, I.A., 1964**, Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 55.
- Cengiz, M., 1997**, Geçici Elektromanyetik yöntemle yerin 1-boyutlu modellenmesi. İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Frischknecht, F C., ve Raab, P. V., 1984**, Time domain electromagnetic soundings at the Nevada test side, Nevada: Geophysics, 49, 981-992.
- Kaufman, A. A., 1979**, Harmonic and transient field on the surface of a two-layer medium Geophysics 44, 1208-1217.
- Keller, G. V., Pritchard, J. I., ve Harthill, N., 1984**, Megasource timedomain electromagnetic sounding method, Geophysics 49, 993-1009.
- Nabighian, M. N., 1984**, Foreword und introduction, in: Special issue of geophysics on time-domain electromagnetic methods of exploration: Geophysics, 49, 849-851.
- Petry, H., 1987**, Transient elektromagnetische Tiefensondierung-Modellrechnungen und Inversion, Diplom thesis, University of Cologne, (yayınlanmamış).
- Rabinovich, B. I., Surkov, V. S., ve Mandel'baum, M. M., 1977**, Electrical prospecting for porous reservoirs with oil and gas on the Siberian platform: Sov. Geol. 2.
- Stephan, A., 1989**, Interpretation von transient elektromagnetischen Messungen (LOTEM) im Bereich der

- Halterner Sande und Entwicklung der lokalen Ra-
uschkompensation, Diplom thesis Geophysics, Uni-
versity of Cologne, (unpublished).
- Strack, K.M., 1992**, Exploration with deep Transient
Electromagnetics: Methods in Geochemistry and
Geophysics, 30.
- Strack, K. M., Hanstein, T. H., ve Eilenz, H. N., 1989**,
LOTEM data processing for areas with high cultural
noise levels, Phys. Earth planet. Int., in press.
- Wightman, W. E., Kaufman, A. A., ve Hoekstra, P.,
1983**, Mapping gas-water contacts in shallow produ-
cing formations with transient EM: Presented at the
53rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geoph.

Makalenin geliř tarihi : 29.11.2000
Makalenin yayına kabul tarihi : 16.04.2001
Received : November 29, 2000
Accepted : April 16, 2001