

# SCHLUMBERGER VE WENNER SONDAJ EĞRİLERİNİN OTOMATİK YORUMLANMASI İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

Yazan  
**A.A.R. Zohdy**

A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves  
Geophysics, 54, 245-253, (1989)

Çevirenler

**O. Metin İlkışık<sup>(1,2)</sup> ve Nilgün Akarsu Taybars<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Avcılar Kampüsü 34850, İstanbul

<sup>(2)</sup> İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Şehir Planlama Müdürlüğü, Yerbilimleri Grubu, Saraçhane, İstanbul.

1998

ANADOLU YERBİLİMLERİ, Eğitim Serisi, 98.01

## ÖZET

Schlumberger ve Wenner sondaj eğrilerinin otomatik değerlendirilmesi için geliştirilen bu hızlı tekrarlamalı yöntem, yeraltı modelindeki tabaka derinlik ve öz dirençlerinin sırasıyla elektrod açılım değerlerinin kaydırılması ve görünür öz dirençlerin düzeltilmesinden türetilmesine dayanır. Yöntem tamamıyla otomatiktir. Bu yöntemde tabakaların sayısı, kalınlıkları veya öz direnç değerleri için bir başlangıç modeli gerekmez ve ölçümleri eksik kalmış sondaj eğrilerinin uzatılmasına ihtiyaç duyulmaz. Yorumlanan yeraltı modelindeki tabakaların sayısı, sondaj eğrisindeki örneklenmiş noktaların sayısına eşittir. Sonuçta elde edilen, içinde ince, alı şılmamış derecede yüksek veya düşük öz direnç değerleri olmayan çok tabakalı bir model, arazi verileri ile daima iyi çakışma verir. Gürültülü veri için değerlendirme iki aşamalı yapılır. İlk aşamada gürültü nedeniyle oluşan anormal tabakalar ikinci aşamada düzeltilir. İlk aşamadaki en uygun çakışmadan elde edilen beklenmeyen tabakalar içeren yeraltı modelinden hesaplanan görünür öz direnç tepki fonksiyonu, ikinci aşamada yumuşatılmış gözlenmiş eğri kabul edilerek otomatik olarak yeniden değerlendirilir. Bu yöntemin uygulaması çeşitli örneklerle açıklanmıştır.

## GİRİŞ

Yatay tabakalı ortamlar üzerinde ölçülen düşey elektrik sondaj (DES) eğrilerinin bilgisayarda değerlendirilmesi için 1970'li yıllarda çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler iki gruba ayrılabilir. Birinci grup, DES eğrisinin Ghosh (1971a), Koefoed (1979) ve Strakhov ve Karelina (1969) gibi kişilerce geliştirilmiş süzgeçleri kullanarak ona karşı gelen öz direnç dönüşümünün (veya Kernel fonksiyonunun) elde edilmesine dayanır. Öz direnç dönüşüm eğrisi, Pekeris (1940) ve Koefoed (1979)'in bağıntılarına dayanan yöntemler kullanılarak yorumlanır. Bu yaklaşımın sorunları Zohdy (1975) tarafından tartışılmıştır. İkinci grup değerlendirme yöntemleri ise sondaj eğrisinin, önce bir öz direnç dönüşüm eğrisine çevrilmeden ters çözümünün bulunmasına dayanır. (Anderson, 1979a; Kunetz ve Rocroi, 1970; Zohdy, 1975).

Bu yazıda, örneklenmiş sondaj eğrisinden tabakalı yeraltı modelini doğrudan elde etmek için yeni bir tekrarlamalı işlem sunulmuştur. Bu yöntemde tabaka sayıları, bunların kalınlıkları veya öz dirençleri için bir başlangıç modeli ve sondaj eğrisinin ilk ve son kanatlarının kendi asimptodlarına uzatılması gerekmez. Tabakaların sayısı, örneklenmiş noktaların sayısına eşittir ve tabaka sınırları, logaritmik derinlik ölçeğinde eşit aralıklı olacak biçimde belirlenmiştir.

Bu yöntem, jeofizikçilere arazi eğrisine olabildiğince çakışan kuramsal bir eğri sağlayan, uygun tabakalı yeraltı modeli saptar. Bu modelde alışılmamış düşük ve yüksek öz dirence sahip çok ince tabakalar yoktur. Jeofizikçiler bu çözümü kabul edebilir veya eldeki jeolojik bilgilere uygun eşdeğer tabakalaşma modellerini kullanarak basitleştirebilir, daha karmaşık hale getirebilir veya değiştirebilir.

## YÖNTEMİN ANA HATLARI

Yatay tabakalı, yatay olarak tekdüze ve özellikleri değişmeyen ortam üzerinde elde edilen Schlumberger ve Wenner kuramsal eğrileri, katmanların sayısına veya öz direncin derinlikle dağılımına bağlı olmaksızın aşağıdaki şu özellikleri gösterir (Şekil 1).

(1) Hesaplanan görünür öz dirençler daima sıfırdan büyüktür.

(2) Sondaj eğrisinin şekli, gerçek öz direnç-derinlik eğrisinin şeklini yansıtır. Gerçek öz dirençler derinliğe bağlı olarak arttıkça (veya azaldıkça), görünür öz dirençler de elektrod aralıkları büyüdükçe artar (veya azalır). Bu, özellikle kalınlığı derinlikle logaritmik olarak artan tabakalar için geçerlidir.

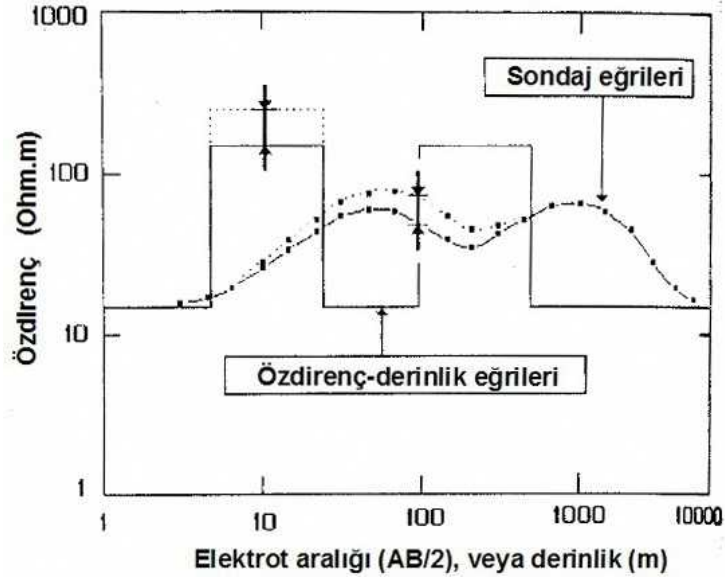
(3) Görünür öz dirençteki maksimum değişim, daima gerçek öz dirençte benzer değişimin meydana geldiği derinlikten daha büyük olan bir elektrod açılımında olur. Yani sondaj eğrisi, gerçek öz direnç-derinlik eğrisi ile aynı fazda değildir ve daima gerçek öz direnç-derinlik eğrisinin sağına doğru kayar.

(4) Sondaj eğrisinin genliği, gerçek öz direnç-derinlik eğrisinin genliğinden daima küçük veya eşittir. Görünür öz direnç, ilk tabakanın kalınlığından çok daha küçük elektrod aralıkları için, veya sonsuz kalın son tabakaya göre çok büyük elektrod açılımları için asimptotik olarak gerçek öz dirence yaklaşır.

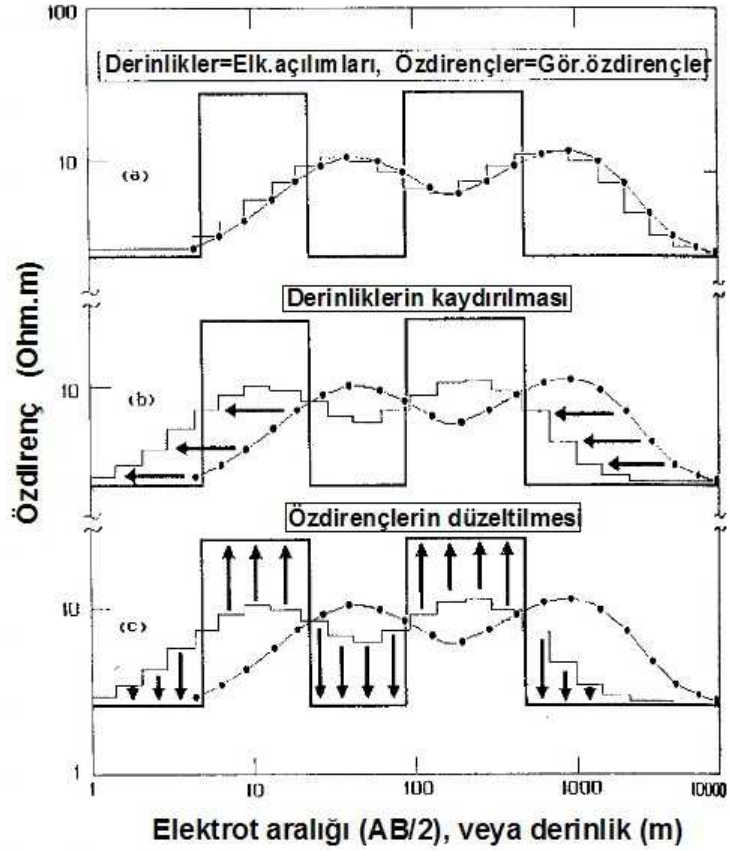
(5) Çok tabakalı bir modelde, kalın bir tabakanın gerçek öz direnci değiştirilirse buna uygun olarak sondaj eğrisinin benzer kısımları boyunca görünür öz direnç de değişecektir. Ayrıca, görünür öz dirençteki maksimum değişim, gerçek öz dirençteki net değişime aşağı yukarı eşit olacaktır (Şekil 1).

Yukarıdaki özellikler, hepsi için olmasa bile, yatay tabakalanmış ortam için hesaplanmış dipol-dipol sondaj eğrilerinin bir çoğu için de geçerlidir.

(1) ve (2). özellikler, elektrod aralığının sondaj derinliğine eşit ve görünür öz dirençlerin gerçek öz dirençlere hemen hemen eşit olduğunu farzetmeleri açısından yorumculara yardımcı olur.



Şekil 1. Beş tabakalı Schlumberger sondaj eğrisi ve tabakaları yansıtan iki grup çizim; elektrot aralıkları ve görünür özdirençler ile derinlikler ve gerçek özdirençler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Görünür özdirençteki en büyük değişimin yaklaşık olarak gerçek özdirençteki değişime eşit olduğu grafiklerde görülmektedir.



Şekil 2. Otomatik değerlendirme yönteminin temel adımları: a) Tabaka derinliklerinin elektrot açılımlarına ve gerçek özdirençlerinin de ölçülen görünür özdirençlere eşit olduğu kabul edilir; b) kabul edilen bu tabaka derinlikleri gerçek tabakalaşma ile aynı hizaya gelinceye dek sola kaydırılır ve c) kabul edilen özdirençlerin genlikleri gerçek tabakaların özdirençlerine yaklaşıncaya kadar düzeltilir.

(3), (4) ve (5)' deki özellikler açısından ve Şekil 2' den açıkça bellidir ki ;

(i) Elektrod aralıkları, çeşitli tabakaların yaklaşık derinliklerine tam olarak karşılık gelmez (Şekil 2a). Bu nedenle varsayılan tabakalanmanın derinlikleri, gerçek özdirenç-derinlik eğrisi ile aynı faza (hizaya) gelmesi için, sola doğru kaydırılmalıdır (Şekil 2b).

(ii) Görünür özdirençler gerçek özdirençlere yeteri kadar yaklaşmaz; ve bu nedenle tahmin edilen özdirençleri, gerçek özdirençlerin genliğine yaklaştırmak amacı ile, düzeltilmelidir (Şekil 2c).

(iii) Gereken özdirenç düzeltmelerini yapmak amacı ile 5. maddedeki özellikler kullanılabilir.

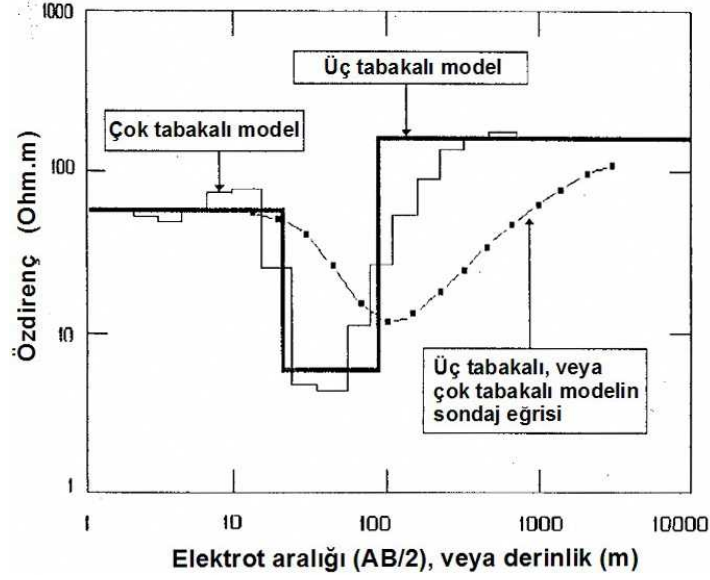
Yeni önerilen bu tekrarlamalı yöntemin temeli, gerçek özdirenç-derinlik dağılımlarına ilişkin bir ön bilgi olmaksızın derinliklerin yatay olarak kaydırılması ve özdirençlerin düşey olarak düzeltilmesi için gerekli olan miktarı belirlemektir.

## **ÇOK TABAKALI MODELLER ARASINDAKİ EŞDEĞERLİK**

Bu tekrarlama yönteminde çok tabakalı ortamlar arasındaki eşdeğerlik özelliklerinin avantajları kullanılmıştır. Örneğin, basit üç tabakalı model için hesaplanan bir sondaj eğrisi, %1 veya %2 hata sınırları içinde, bir çok tabakadan oluşan eşdeğer model için hesaplananla aynıdır (Şekil 3). Pratikte iki model eşdeğerdir ve biz hangi modelin gerçek yeraltı tabakalanmasına karşı geldiğini kesin olarak bilmeyiz. Bu nedenle, uygun kuramsal eğriler ile yöntem denendiğinde, seçilen kuramsal eğriye tam olarak uyan gerçek tabakalar bulunamayabilir. Kabul edilebilir bir model için, kuramsal eğrilere %1 veya 2 hata sınırı içinde uyan hesaplanmış bir sondaj eğrisi elde etmek yeterlidir. Bundan başka, her ne zaman arazi eğrisini %1 veya 2'den çok daha az hata ile karşılaştırmak gerekirse, yöntemin arazi verisindeki gürültüyü ve gürültüden dolayı oluşan düzensiz tabakaları uyumlu hale getirmeye çalışmasından kaynaklanan ve jeolojik olarak geçerli olmayan modeller ortaya çıkar. "Gürültülü arazi verileri" bölümünde bu soruna ilişkin daha fazla bilgi verilecektir.

## **BAŞLANGIÇ VERİLERİ HAZIRLIĞI**

Kuramsal bir eğriden farklı olarak, gerçek bir Schlumberger arazi sondaj eğrisi, üst üste binen, kaymış kısımlardan oluşmuştur. Parçalara ayrılmış olan bu Schlumberger arazi eğrisi yatay tabakalanmış model olarak değerlendirilmeden önce bir işlemle sürekli eğri haline getirilir (Depperman, 1954; Koefoed, 1979; KUNETZ, 1966; Mundry, 1980; Zohdy ve diğ., 1973).



**Şekil 3.** Üç tabakalı model ile çok tabakalı bir model arasındaki eşdeğerliği gösteren örnek. Her iki model de %2 hata sınırı içinde aynı sondaj eğrisini verir.

İşleme tabi tutulan Schlumberger veya Wenner arazi sondaj eğrisi, kuramsal sondaj eğrisinin hesaplamasında kullanılacak süzgecin logaritmik örnekleme aralığında veya katlarında örneklenir. Sondaj eğrisinin örneklenmesinin amacı, tekrarlama işleminde kullanılan kuramsal sondaj eğrisinin ard arda hesaplanmasının hızlandırılması içindir. Logaritmik döngü başına 6 noktalık örnekleme aralığının (O'Neill, 1975) arazide seçilen elektrod açılımları ile uyumlu olduğu ve bunun, sondaj eğrisini tam olarak yansıttığı kabul edilir. Anderson'un filtre katsayıları (Anderson, 1975, 1979b) dik olarak azalan kanatlara sahip Schlumberger sondaj eğrileri için çok büyük özdirenç farklarında daha büyük bir hesaplama doğruluğu sağlar. Dik olarak azalan kollar demekle, elektrod aralıkları ekseninde bir logaritmik döngü içinde, görünür özdirençin üç logaritmik döngüden fazla düşmesi kastedilmektedir. Wenner sondaj eğrisinin değerlendirilmesi için Ghosh'un ters süzgeç katsayıları kullanılır (Ghosh, 1971b). Bununla birlikte Ghosh'un Wenner dizilimi için ters süzgeç katsayıları logaritmik döngü başına üç noktalık örnekleme aralığını esas aldığından, logaritmik döngü başına altı noktalık daha iyi belirlenmiş eğriler elde etmek için, iki kere uygulanır.

Bir Schlumberger arazi sondaj eğrisi veya Wenner arazi eğrisi örneklendiğinde, tekrarlamalı yöntem ile değerlendirilmeye hazırdır. İzleyen bölümde, hazır hale getirilmiş ve örneklenmiş Schlumberger veya örneklenmiş Wenner arazi eğrilerinden kısaca gözlemsel eğri olarak söz edilecektir.

## TEKRARLAMA İŞLEMLERİ

Tekrarlama işlemleri aşağıdaki başlangıç kabullerine dayanır.

(i) Modeldeki tabakaların sayısı, gözlemsel egriden sayısallaştırılmış noktaların sayısına eşittir.

Bu kabul, tekrarlama işlemi boyunca değişmez.

(ii) Model tabakalarının derinlikleri, logaritmik derinlik ekseninde eşit aralıklarla örneklenmiş elektrod aralıklarına eşittir.

(iii) Modelin gerçek özdirençleri görünür özdirençlerine eşittir.

### Derinliklerin Belirlenmesi

Uygulamada gerçek özdirenç-derinlik eğrisi bilinmemektedir. Bu nedenle derinlikleri, bilinmeyen gerçek tabakalanmaya en uygun faza (hizaya) getirmek için gereken sola kaydırma miktarı, izleyen tekrarlamalı hesaplamalar ile bulunur.

(a) Örneklenmiş elektrod aralıklarının gerçek derinliklere ve görünür özdirençlerin de o derinliklerde gerçek özdirençlere eşit olduğu kabul edilir (Şekil 4a).

(b) Bu çok tabakalı model için evrişimle bir kuramsal sondaj eğrisi hesaplanır.

(c) Aşağıdaki bağıntıdan % rms hata değeri hesaplanır.

$$\%rms = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{\rho_{oj} - \rho_{cj}}{\rho_{oj}} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (1)$$

burada

$\rho_{oj}$  = j inci gözlenmiş görünür özdirenç ( $j= 1, \dots, N$ ).

$\rho_{cj}$  = j inci hesaplanmış görünür özdirenç ve

$N$  = örneklenmiş görünür özdirenç noktalarının sayısıdır.

(d) Tüm tabaka derinliklerini %10 azaltmak için (rastgele küçük bir miktar) tüm derinlikler 0.9 ile çarpılır.

(e) (b) ve (c) adımları tekrarlanır ve yeni % rms değeri hesaplanır.

(f) Yeni % rms bir önceki ile karşılaştırılır. Eğer yeni % rms bir öncekinden daha küçükse (ki bu ilk birkaç tekrarlamaya için olacaktır) son hesaplanan daha sık derinlikler, gerçek fakat bilinmeyen derinliklere bir önceki durumdan daha yakındır.

(g) % rms minimum olana kadar (d), (b), (c) ve (f) adımları tekrarlanır. Sola doğru derinlikler fazla kaydırıldığında % rms artacağından yerel bir minimum oluşur. Şekil 4c hesaplanmış sondaj eğrisi ile gözlenen sondaj eğrisi arasında minimum % rms için elde edilen kaymış tabakalanmayı göstermektedir.

Tekrarlama işlemini hızlandırmak amacıyla, ilk baştaki derinlikler, zaten elektrod aralığında biraz daha küçük olan değerlerde başlatılabilir. Örneğin, önce tüm elektrod aralıkları 0.8 ile çarpılır ve daha sonra derinlikler minimum % rms bulunana kadar ard arda % 10 küçültülür.

### Özdirençlerin Belirlenmesi

Kaydırılarak azaltılmış derinlikler ve görünür özdirençler ile hesaplanan kuramsal sondaj eğrisini kullanarak, gözlenen ve hesaplanan sondaj eğrilerinin daha iyi uyumunu sağlamak için, ara modeldeki özdirençlerin genliklerini de düzeltmemiz gerekir. Bu ise tekrarlamalı olarak şöyle yapılır.

(a) Gözlenmiş ve hesaplanmış eğriler üzerindeki her örneklenmiş elektrod açılımında, bir i inci değere karşı gelen görünür özdirenç, gözlenen görünür özdirençten az ise (veya çok ise) buna karşı gelen j inci tabakanın gerçek özdirenci hesaplanan görünür özdirenç gözlenene yaklaşıncaya kadar azalacak veya yükselecek biçimde arttırılmalı (veya azaltılmalı) dır (Şekil 4d). Tabakanın özdirencinin genliği tekrarlamalı olarak aşağıdaki gibi düzeltilir.

$$\rho_{i+1}(j) = \rho_i(j) \times \rho_0(j) / \rho_{ci}(j) \quad (2)$$

burada,

i= tekrarlama sayısı,

j= j inci tabaka ve j inci elektrot açılımı,

$\rho_i(j)$  = i inci tekrarlamaadaki j inci tabaka sayısı,

$\rho_{ci}(j)$  = i inci tekrarlamada için j inci elektrod açılımında hesaplanmış görünür özdirenç,

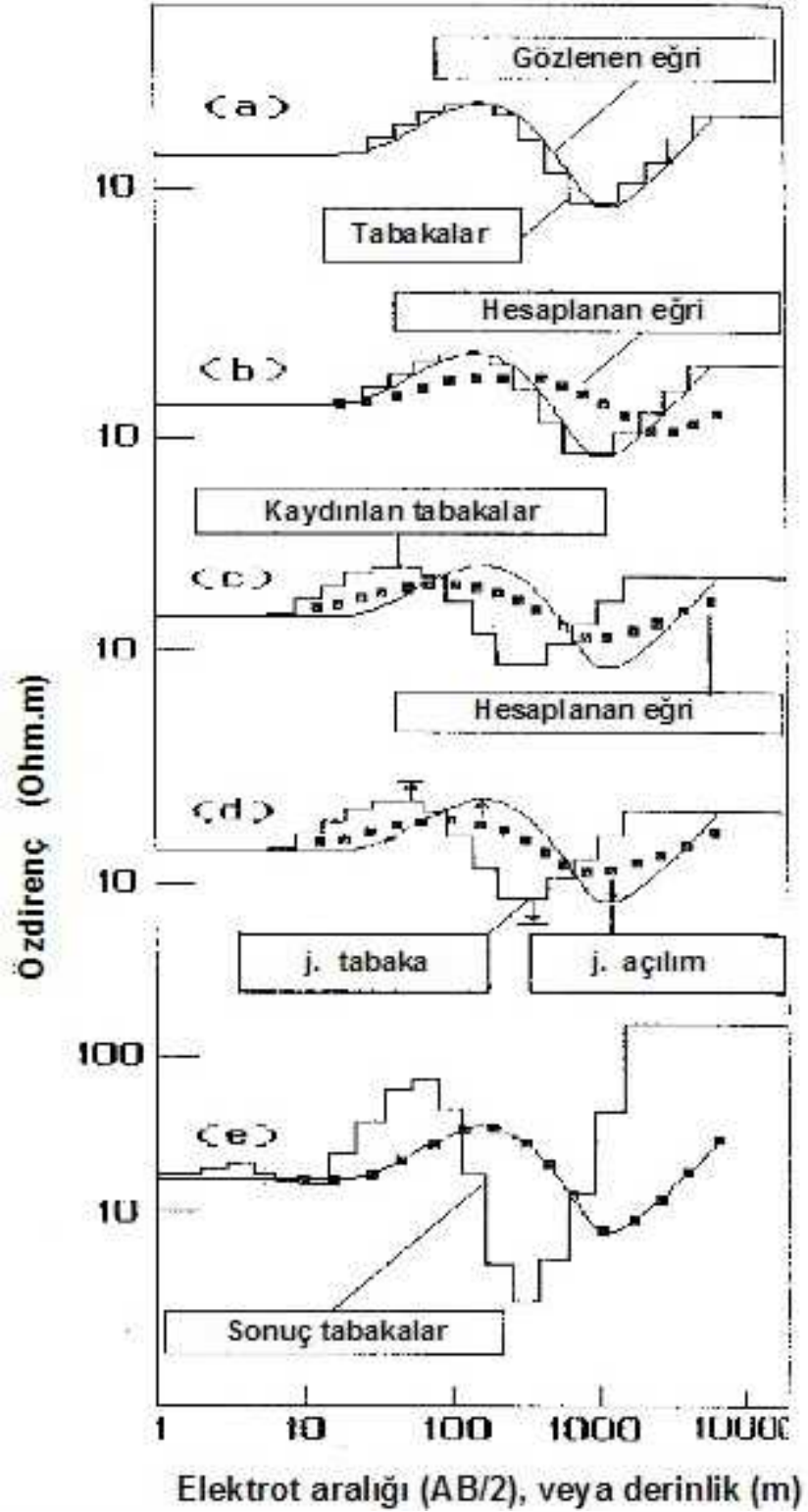
$\rho_0(j)$  = j inci elektrod açılımında gözlenmiş görünür özdirenç

dir. Gözlenmiş ve hesaplanmış görünür özdirencin oranı, buna karşı gelen tabaka özdirenciyle çarpılarak daha yüksek veya düşük yeni değer elde edilir.

(b) Düzeltilmiş tabaka özdirençleri kullanılarak yeni bir sondaj eğrisi hesaplanır.

(c) Yeni bir % rms hesaplanır ve bir önce elde edilen % rms ile karşılaştırılır.

(d) Gözlenen eğriye bir uyum sağlanıncaya kadar (Şekil 4e) veya diğer koşullardan birisi tekrarlamama işlemini durduruncaya kadar (a), (b) ve (c) adımları tekrarlanır.



Şekil 4. Çizimler, bilinmeyen tabakalar üzerindeki bir sondaj eğrisinin değerlendirilmesindeki tekrarlamalı işlemlerin aşamalarını göstermektedir: (a) Sondaj eğrisinden türetilen tabakalar, (b), (a) daki modelden hesaplanan sondaj eğrisi, (c) hesaplanan ve gözlenen eğriler arasındaki %rms hatası en az olacak biçimde kaydırılmış tabakalar ve bu ortam için sondaj eğrisi, (d) hesaplanan ve gözlenen sondaj eğrileri arasındaki logaritmik farklar kullanılarak her tabaka öz direncinin düzeltilmesi ve (e) bir kaç tekrarlanmadan sonra sonuçta elde edilen tabakalar ve gözlemsel eğri ile çakışan hesaplanan eğri.

Tekrarlama işlemi aşağıdaki koşullardan birisi sağlandığı zaman sona erer:

- Öngörülen bir minimum % rms (ki arazi verisi için % 2 den başlar) elde edilirse
- Çakıştırmadaki iyileştirme yavaşlarsa (peşpeşe gelen % rms ler arasındaki azalma % 5 den daha az ise)
  - Maksimum tekrarlama sayısı (30)' na ulaştığı zaman
  - veya % rms azalacağına yükseliyorsa

Ortalama tekrar sayısı 10 civarındadır.

## SEÇENEKLER VE ÖZELLİKLER

Yukarıda açıklanan tekrarlamalı işlem hemen hemen bütün pratik uygulamalarda yeterlidir. Bununla birlikte aşağıdaki seçenekler eşdeğer modeller üretmek, kısıtlamalar getirmek ve yöntemin bazı özelliklerini açıklığa kavuşturmak için kullanılabilir.

### Sabit Kayma Katsayısı

Her sondaj eğrisi için minimum bir % rms hatası sağlayacak tek bir derinlik kayma katsayısı vardır. Bu kayma katsayısının değeri

- (a) Eğrinin tipinin H, K, A, Q, HK, KH... gibi, ne olduğuna (Zohdy ve diğ., 1974)
- (b) Arazi eğrisinin soldaki ve sağdaki kanatlarının tamam olup olmadığına
- (c) Verilerdeki gürültü miktarına bağlıdır.

Bununla birlikte anlaşılmıştır ki eşdeğerlik ilkesi nedeniyle en uygun kayma katsayısının hesaplanması, eğrinin en son çakışmasının sağlanması için kritik bir büyüklük değildir. Bu nedenle, yaklaşık olarak 0.3-0.6 arasında sabit bir kayma katsayısı seçilebilir ve hemen bütün Schlumberger türü eğriler için kullanılabilir; ve özdirenç genliğindeki düzeltmeler de uygulandığında muhtemelen gözlenmiş eğriye tam bir çakışma sağlanacaktır. Wenner sondajlarına karşı gelen sabit kaydırma katsayısı ise yaklaşık olarak 0.4 ile 0.9 arasında seçilebilir.

Sabit bir kaydırma katsayısının kullanılması, her eğri tipi için en uygun kayma katsayısının bulunması için gerekli olacak birkaç tekrarlardan kurtulmayı sağlar. Bu aynı zamanda, yorumlanan modeldeki son katmana olan derinliğin sabit tutulması için de kullanılabilir. Bununla birlikte sabit kayma katsayısının kullanılmasıyla tekrarlama sayısındaki azalma, özdirenç genliklerinin düzeltilmesindeki tekrarlamalarda bir artışa yol açabilir. Buna ilaveten, seçilen sabit kayma katsayısı çok küçük ise (tabakalar sola çok uzağa kayacaktır) sıg derinliklerde gerçek üstü veya gerçek altı

tahminler ortaya çıkar ve bu durumda sığ tabakaların derinlikleri özdirençteki ani değişimler ile belirlenir.

### **Tabaka Kalınlığının Azaltılması**

Permafrost -donmuş toprak- arazilerde (Cagniard, 1959; Kalenov, 1958) veya ince bir iletken toprak ile kaplı kuru lav akıntıları (Zohdy ve Stanley, 1973) üzerinde çalışırken bazen bir çok K-türü eğriler ile karşılaşılır. Tam bir K-türü eğri  $45^0$  ye yakın bir açıyla yükselir ve yaklaşık iki logaritmik döngü boyu yükselmeye devam eder, sonra oldukça keskin bir dönüm noktası oluşturarak alçak özdirenç değerlerine doğru düşer. Tam bir K-türü eğri üzerindeki keskin bir dönüş, nisbeten dirençli ikinci katmanın sınırlı yanal uzanımları durumunda ortaya çıkan daha kısa dalga boyuna sahip ve genellikle daha keskin dönüşler ile karıştırılmamalıdır (Alfano, 1959, Şekil 19, s.362).

Tam K-türü kuramsal deneme eğrilerinin değerlendirilmesinde %5 ile %10 aralığında %rms hataları vardır. Bu tür eğriler, tabaka kalınlıkları örneklenmiş elektrod aralıklarından elde edildiği için gerçek (veya eşdeğer) tabaka-derinlik dağılımından daha büyük derinliklere kadar giden bir model olduğundan %2 hata sınırı içinde çakıştırılmaz. Bu nedenle tabaka kalınlıkları, özdirenç düzeltme işlemi ile iyi bir çakışma sağlayıncaya kadar azaltılmalıdır. Tabaka kalınlıklarının azaltılması, diğer bir deyimle önerilen tabakaların bilinmeyen gerçek tabakalarla aynı hizaya getirilmesi veya başka bir deyişle önerilen tabakaların dalga boyunun azaltılması, bilinmeyen tabakaların dalga boyuna daha yaklaşılması demektir.

Tabaka kalınlıklarının azaltılması, birinci katmana göre derinlikler sabit tutularak ve bu derinlikler  $(N-1)$  kere  $10^{(1/C)}$  ile çarpılarak yapılır. Burada N tabakaların toplam sayısıdır ve C ise logaritmik döngü başına tabaka sayısıdır. Bu nedenle  $C=6$  alarak ve döngü başına 6 nokta örnekleme aralığına dayanan O'Neil'in filtre katsayılarını kullanarak herhangi bir inceltme yapılmaz.  $C>6$  için, döngü başına tabaka sayısı arttıkça daha çok inceltme olur. Dikkat ediniz ki tabakaların toplam sayısı N hala örneklenmiş nokta sayısı kadardır ve birinci tabakanın altındaki bütün tabakaların kalınlıkları düzgün bir logaritmik oranla artmaktadır. Ancak şimdi derinlikler başlangıçta türetildiği elektrod aralıklarından daha azdır.

Şekil 5 te K-türü kuramsal bir deneme eğrisinin değerlendirme sonuçları görülmektedir. Tabaka kalınlığının azaltılması uygulanarak elde edilen tam bir çakışma görülmektedir. Bu örnekte C'nin son değeri 10 dur, yani başlangıçtaki  $C=6$  yerine döngü başına 10 tabakaya karşı gelmektedir.

Tabaka kalınlıklarının azaltılması K-türü eğrilerdeki bir çok özdirenç farklılıkları ve tabaka kalınlıkları için gerekli değildir ve diğer tür eğrilerde asla gerekmez. İlaveten, pratikte K-türü eğriler,

sınırlı yanal uzanımlar, ilk iletken tabakanın düzensiz kalınlıklar göstermesi ve gömülü sınırlı yanal uzanım gösteren yüksek dirençli tabakalar (gömülü nehir yatakları, buz mercekleri, lav akıntıları v.b.) gibi nedenlerle diğer tür eğrilere göre daha fazla bozulmaktadır. Bu tür bozulmuş eğriler için tabakaların kalınlıklarının azaltılması, gözlenmiş eğrilere daha iyi bir çakışma sağlanması açısından genellikle etkin değildir.

Tabaka kalınlığını azaltma, elektriksel yön bağımlılığın var olduğu veya değerlendirilen derinliklerin azaltma olmadan elde edilenlerden daha sığ olması gereken alanlarda, avantaj sağlayabilir. Tabaka kalınlığı azaltması uygulandığında yüksek öz dirençli tabakalar (tabakaların K parçası) azaltma olmadan elde edilenden daha yüksek öz dirençler gösterir. Benzer olarak düşük öz dirençli tabakalar ise (tabakaların H parçası) daha düşük öz dirençler gösterir. Bu, eşdeğerlik ilkesinin doğrudan bir sonucudur.

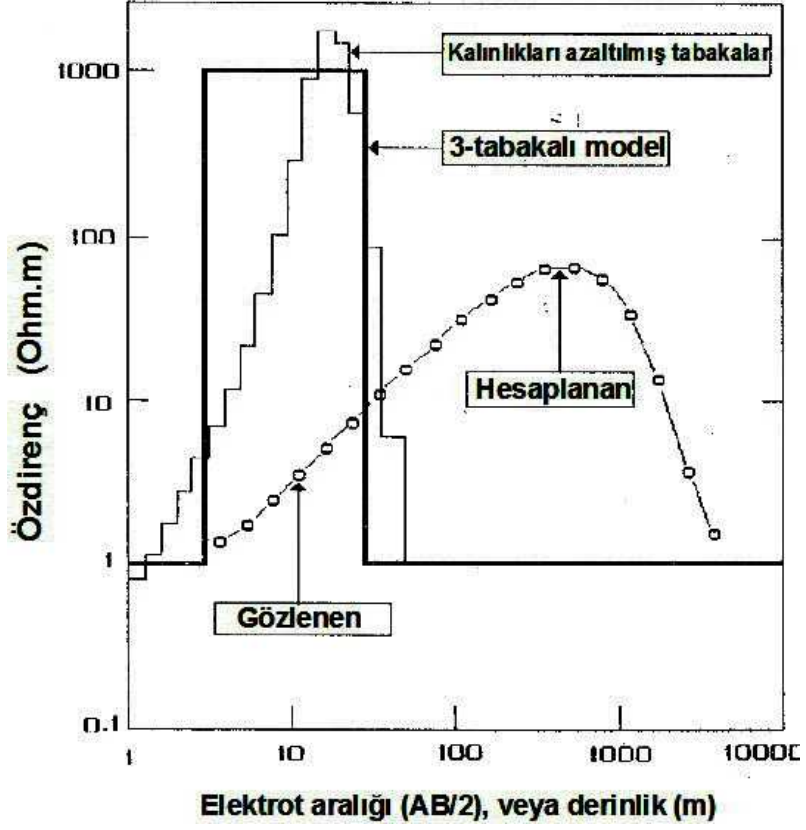
Tabaka kalınlığının azaltılmasına ilişkin yapılan denemeler kayma katsayısının 1'e yakın olduğu durumlarda inceltmenin en iyi çalıştığını göstermiştir. Gerçekte, soldaki yataya yakın olan sondaj eğrileri ile inceltme, 1'den daha büyük sabit bir kayma katsayısı kullanılarak uygulanabilir. Şekil 6 da H türü bir eğrinin 3 kayma katsayısı ve  $C=12$  inceltme katsayısı ve O'Neil filtresi kullanılarak yapılan bir değerlendirmesi görülmektedir. Burada hesaplanan modelin eğrinin biçimine uyması gerekmez.

### **Tabakaların Kalınlaştırılması**

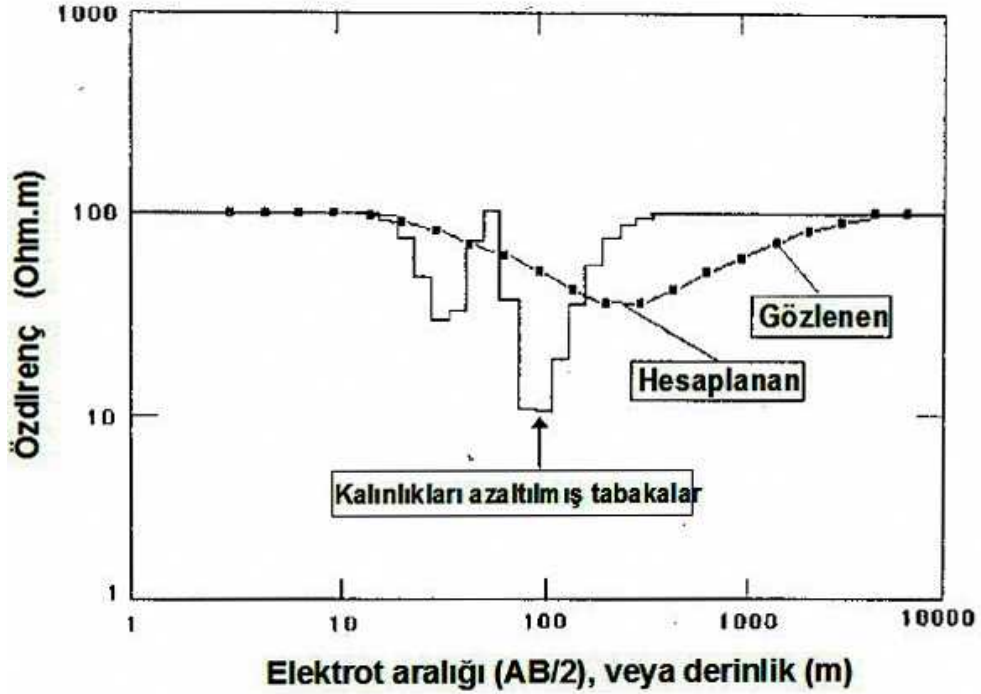
C değeri artırılarak (logaritmik döngü başına tabakaların sayısının artırılması) tabakaların inceltmesine benzer olarak, tabakaların kalınlaştırılması da C değeri azaltılarak yapılır (döngü başına tabaka sayısının azaltılması).

### **Son Tabaka Öz direncinin Sabitlemesi**

Jeoelektrik enine kesitlerde temel kayada ortak bir öz direnç değeri gösterebilmek için temele sabit bir öz direnç değeri atamak amacıyla, örneğin bütün sondaj eğrilerinin sağdaki kanadının yükselme göstermesi için (S line), yorumcu son tabakanın öz direncini sabit tutmak isteyebilir. Ortak bir temel kaya öz direnci elde etmek için en kolay yol, son tabakanın öz direncini arazi eğrisindeki son noktanın görünür öz direnci yerine istenilen bir değere eşitlemektir. Bu durumda son tabakanın öz direnci tekrarlama işlemleri süresince değişmeyecektir.



Şekil 5. K türü bir kuramsal deneme eğrisinin tabaka kalınlıkları azaltılarak otomatik değerlendirilmesine bir örnek.



Şekil 6. Soldaki kanadı yataya yakın H türü bir eğride, tabaka kalınlıkları oldukça azaltılarak yapılan bir değerlendirilme örneği. Kayma katsayısı 3 ve incelleme katsayısı 12 dir. Sonuç HKH türü beş-tabakalı bir modele eşdeğerdir.

## EKSİK EĞRİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

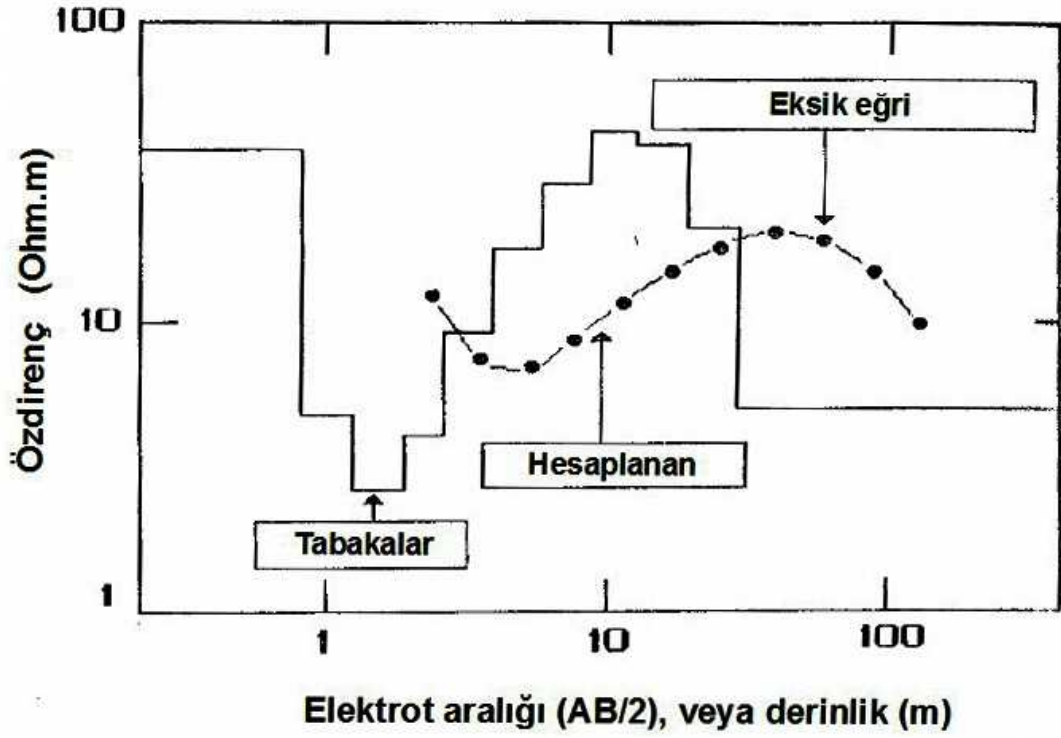
Tamamlanmamış bir sondaj eğrisi, soldaki veya sağdaki kanatların (birinci veya son tabakanın öz direncine asimptotlar) ölçülmemiş olduğu eğriler demektir. Arazi sondaj eğrilerinin çoğu eksiktir. Döngü başına altı örnekleme oranının uygulandığı düşünülürse bir arazi eğrisinin sağ kanadının (S line) tamamlanmış kabul edilebilmesi için  $45^0$  lik bir açıyla en az üç veya dört nokta, arazi eğrisinin üzerinde gözükmelidir. Burada sunulan otomatik değerlendirme yöntemi bu tür eksik sondaj eğrilerini çok etkin ve doğal olarak ele alır. Eksik bir sol kanat standart tekrarlar işlemi için çözüme yaklaşımda herhangi bir problem göstermez. Çünkü ilk tabakanın taban derinliği daima ilk elektrod açılımından daha azdır. İlk tabakanın öz direncinin değerinde daima bir belirsizlik vardır. Fakat gözlenen sondaj eğrisinin üzerindeki ilk nokta ele alınan eğri bozulmamışsa çakışacaktır. Benzer olarak sağ kanattaki eksiklik de son tabakanın öz direnç değerinde bazı belirsizliklere yol açar (eğri çakıştırma yönteminde olduğu gibi). Şekil 7 de sol ve sağ kanatlarının her ikisi de eksik bir sondaj eğrisinin değerlendirilmesine ilişkin bir örnek görülmektedir.

## BOZULMUŞ SONDAJ EĞRİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

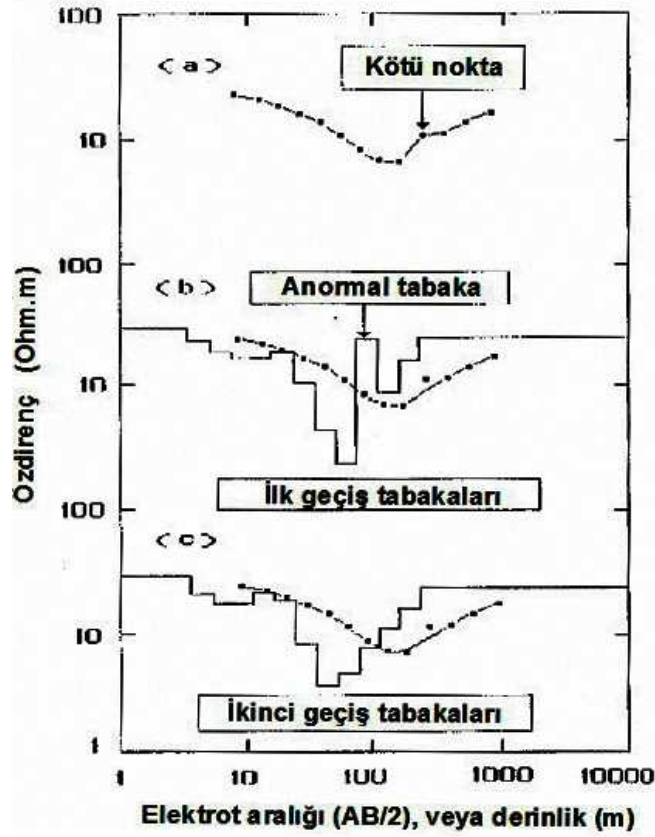
Sondaj eğrileri yatay katmanlı ortamlar için hesaplanan kuramsal biçimlerden ayrıldıkları zaman bozulmuş (*İng.; distorted*) olarak değerlendirilir. Bozulmalar, ölçü hatalarından, akım kaçaklarından (Zohdy, 1968), insan yapısı tesislerden (topraklanmış metal direkleri olan tel örgüler, metalik boru hatları, kurşun şiltli gömülü telefon kabloları v.b.) veya yanal jeolojik düzensizliklerden kaynaklanabilir. Bozulmalar sonuçtaki yeraltı modelini etkilediğinden otomatik değerlendirme iki aşamada yapılmaktadır.

### İlk Aşama

Şekil 8a'da orta derecede bozulmuş bir sondaj eğrisi görülmektedir. Bir sondaj eğrisinin üzerindeki her örnekleme noktası bir tabakaya karşı geldiğinden sondaj eğrisi üzerindeki kötü bir değer (veya değerler) otomatik değerlendirme işleminde ilk hesaplamalardan başlayarak oldukça anormal –beklenmeyen- tabakalar üretir. Öz direnç düzeltme işlemi devam ettikçe anormal tabakaların genliği artar ve son modelde gözükür (Şekil 8b). Kötü bir ölçüm yatay tabakalı ortam için hesaplanan eğri ile uyuşmayan bir nokta olarak tarif edilebilir. Anormal bir tabaka anormal olarak yüksek veya düşük öz direnç değerlerine sahiptir ve bilgisayar yazılımı sondaj eğrisi üzerindeki kötü noktaları da kapsayan bir çakıştırma işlemi yapar.



Şekil 7. Eksik bir Schlumberger sondaj eğrisinin otomatik değerlendirilmesine örnek.



Şekil 8. Orta derecede bozulmuş bir sondaj eğrisinin otomatik değerlendirilmesine örnek: (a) gözlenen eğri, (b) ilk geçiş sonucunda beklenmeyen tabakalar içeren model ve bu modelden hesaplanan sondaj eğrisi ve (c) ikinci geçiş sonunda beklenmeyen tabakaların elimine edildiği model ve bu modelden hesaplanan sondaj eğrisi.

Halbuki kötü noktaların tam olarak çakıştırılmaması gerekir. Sonuçta kuramsal sondaj eğrisi, gözlenen sondaja kabul edilebilir bir %rms hatasıyla çakışır. Fakat modelde bulunan tabakalar kabul edilemez değerlere sahiptir (Şekil 8b).

### **İkinci Aşama**

Anormal tabakayı gidermek için ilk aşamada elde edilen en uygun çakışmayı veren kuramsal eğri, gözlenen eğrinin yumuşatılmış yeni bir biçimi olarak kabul edilir ve ikinci geçişte otomatik olarak yeniden değerlendirilir. Bunun arkasındaki mantık ilk geçişte en iyi çakışmayı veren kuramsal eğrinin düzgün ve gürültüsüz olmasıdır. Böylece tekrarlamalı otomatik değerlendirme işlemi ilk denemelerde anormal tabakalar üretmez. Yeniden oluşturulmayan anormal tabakalar, çakıştırma aralığı gereksiz küçük bir %rms değerine (%0.1 gibi) ayarlanmadan sağlanabilir. İkinci aşamada çakıştırma toleransı %1'e ayarlanır; gözlenen eğrinin yuvarlatılmış şekline anormal tabakalar içermeyen yeni bir tabakalı model kullanılarak çakıştırılır (Şekil 8c).

Bununla birlikte not edilmesi gerekir ki, sondaj eğrisi üzerindeki çok kötü değerler kullanılarak ilk aşamada elde edilen en iyi eğri, bu sondaj için mantıklı bir yuvarlatılmış eğri olmayabilir. Gerçekte kötü noktayı da işe kattığından, elde edilen en iyi çakışma eğrisi tam anlamıyla doğru olan noktalarla çakışmayı sağlayamayacaktır (Şekil 9b). Burada iyi noktalar demekle tamamının yatay tabakalı ortamdan türetilen bir eğriyle çakışması ve kötü değerlerin bu çakışma üzerinde olmaması kastedilmektedir. İkinci aşamada, en iyi çakışan eğrinin yeniden değerlendirilmesi anormal tabakaları ortadan kaldırır fakat şüphesiz sonuçtaki ortam tepki eğrisi gözlenen eğriye hala tam bir çakışma sağlayamaz (Şekil 9c). Bu tür bir sondaj eğrisi veriler bilgisayar yazılımına girmeden önce elle düzeltilmelidir. Elle düzeltme her nokta için çakışma toleransı atamaktan çok daha hızlı ve etkindir.

### **Tek Aşama**

Orijinal gözlenmiş sondaj eğrisi bir %2 den daha az %rms ile uyum sağlıyorsa, tekrarlama işlemi bitirilir ve en iyi uyum sağlayan teorik sondaj eğrisi yeniden yorumlanmaz. Şüphesiz %2 den daha az olan çok iyi bir uyum için, gözlenmiş eğri kötü noktalar içermeyen düzgün bir arazi eğrisi olmalıdır.

## YÖNTEMİN UYGULAMASI

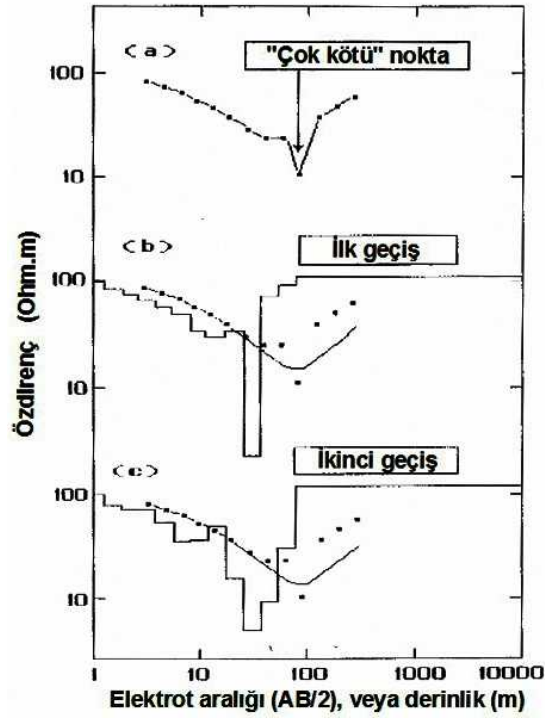
Tekrarlama işleminden elde edilen çok tabakalı ortamı yansıtan basamak fonksiyonu (step-function), düzeltme yapmaksızın jeoelektrik enine kesitlerin oluşturulmasında nadiren kullanılır. Çünkü, her tabakanın öz direncinin sabit tutulmasına ve eşdeğerlik ilkesine uygun olarak tabaka kalınlıklarının düzeltilmesine dayanan elle ve geleneksel yöntemlerle bir enine kesit hazırlamak için çizilecek ve karşılaştırılacak çok sayıda tabaka vardır. Dahası, eğer çok tabakalı basamak fonksiyonu, modelden öz direnç eğrilerinin haritasını çizen bir bilgisayar yazılımında kullanılırsa, sonuç girintili çıkıntılı tuğla döşemeleri gibi bloklardan oluşan bir enine kesit görüntüsü olacaktır. Bu nedenle her bir çok tabakalı basamak fonksiyon modeli için ya öz direncin derinlikle sürekli değişimini yansıtan eşdeğer bir model (Şekil 10a), ya da bir kaç tabakalı daha basit eşdeğer bir basamak fonksiyon modeli oluşturulur (Şekil 10b).

### Özdirencin Derinlikle Sürekli Değişimi

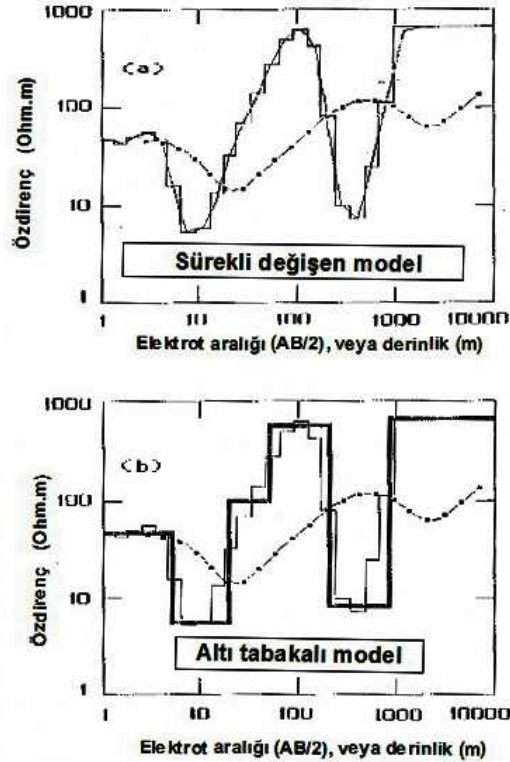
Özdirencin derinlikle sürekli bir değişimi, basamak fonksiyonu eğrisinden, her yatay ve dikey çizginin logaritmik olarak orta noktasından geçen bir eğri hesaplayarak veya çizerek türetilebilir. Gerçek şudur ki tabaka derinlikleri eşit logaritmik artımlarla seçildiğinden elde edilen öz direncin derinlikle sürekli değişim modeli orjinal modelle eşdeğerdir. Bu yaklaşım, farklı derinliklerde öz direnç haritaları ve jeoelektrik enine kesitler oluşturmak için kolaylık sağlar. Şekil 11 de öz direncin derinlikle sürekli değişiminin türetilmesi yöntemi ile oluşturulan bir harita ve bir enine kesit görülmektedir. Tüm sondajlar burada tanımlanan otomatik değerlendirme yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Yorumlamaların sonuçları, daha sonraki mekanik sondajlarla da desteklenen yeni bilgiler sağlamıştır.

### Basitleştirilmiş Tabakalanmalar

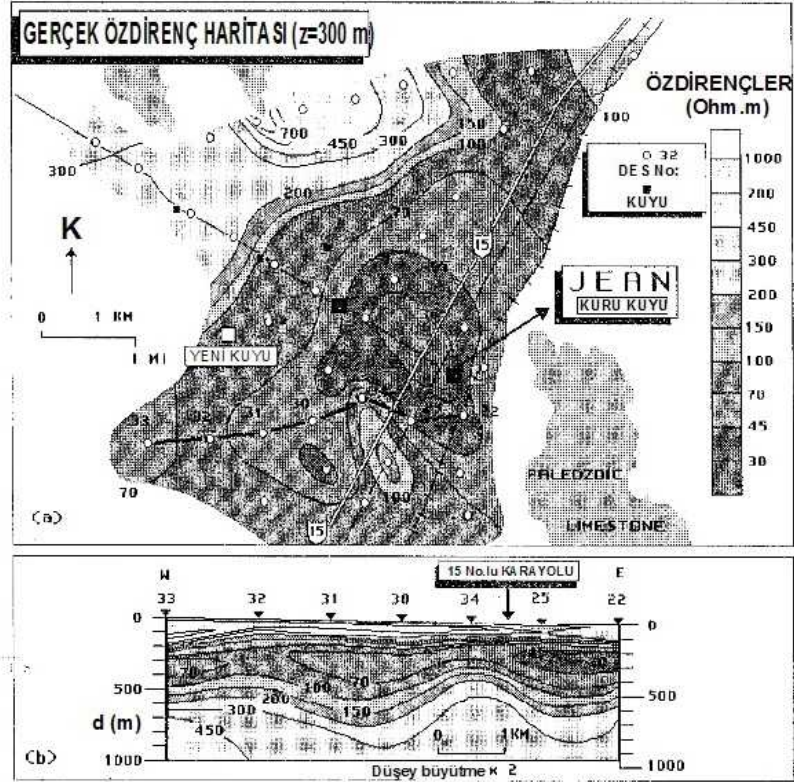
Çok tabakalı basamak fonksiyon modeli, ya Dar Zarrouk fonksiyonlarına (Maillet, 1947; Orellana, 1963; Zohdy, 1973, 1974) dayanan bir bilgisayar yazılımı (Zohdy, 1973; Zohdy and Bisdorf, 1975) kullanılarak veya çok tabakalı model üzerinde basit bir şekilde dikey ve yatay çizgiler çizilerek, daha az sayıda tabakaya indirgenebilir. Tabaka öz dirençleri ve kalınlıkları önemli derecede değiştirilirken Dar Zarrouk eğrilerinin elle ya da bilgisayarla kullanımı tercih edilir. Basitleştirilmiş tabakalanmanın orjinal modele eşdeğer olması için, kuramsal eğrisi hesaplanarak orjinal eğri ile karşılaştırılması gerekir.



**Şekil 9.** Önemli derecede bozulmuş bir sondaj eğrisinin otomatik değerlendirilmesi örneği: (a) Gözlenen eğri, (b) ilk aşamada beklenmeyen-anormal-tabaka oluşuyor ve hesaplanan eğri verilere tam olarak çakışmıyor ve (c) ikinci aşamada anormal tabaka gideriliyor fakat hesaplanan eğri verilere yine de tam olarak çakışmıyor.



**Şekil 10.** Otomatik değerlendirme sonuçları ve çok tabakalı modeli yorumlamak için eşdeğer tabakalar üreten iki yöntem: a)Derinliğe bağlı olarak öz dirençte sürekli bir değişim oluşturma ve b) çok tabakalı modelin altı tabakalı bir modele indirgenmesi.



**Şekil 11.** 300 m derinlikte hesaplanan gerçek özdirenç haritası (yaklaşık 1000 ft) ve Jean, Nevada yakınlarından geçen jeoelektrik enine kesit. Harita ve enine kesit özdirençin derinlikle sürekli değişiminin belirlenmesine dayanarak elde edilmiştir. Eğri değerlerinin birimi Ohm.m dir. Sondajlar Schlumberger dizilimi kullanılarak yapılmıştır (Zohdy, 1988).

## ÖZET VE SONUÇLAR

Schlumberger ve Wenner düşey elektrik sondaj (DES) eğrilerinin tam otomatik yorumlanması için aslında basit ama güçlü olan bir yöntem sunulmuştur. Kısa bir bilgisayar yazılımı gerektiren bu yöntem hızlıdır ve sonuçta göze hoş gelen bir tabakalanma modeli verir ve veri içindeki gürültüden dolayı oluşabilecek anormal tabakalanma hemen hemen yok edilir. Bu yöntem jeofizikçilere, jeolojik açıdan kabul edebilecekleri veya jeolojik bilgilerle uyuşması için üzerinde değişiklik yapabilecekleri bir tabakalanma modeli sağlar. Sabit kayma faktörü, katman kalınlığının inceltilmesi, katmanların kalınlaştırılması veya son katman özdirençinin sabitlenmesi gibi seçenekler kullanılarak yöntemin uygulanışı sırasında diğer bir eşdeğer model oluşturmak amacıyla bazı değişiklikler ve sınırlamalar konabilir. Yöntem, bir çok kuramsal eğri ile ve yaklaşık 200 arazi eğrisinin değerlendirilmesi ile elde edilen modeller üzerinde denenmiş olup yalnız jeoloji ve hidroloji ile uyuşmakla kalmayıp aynı zamanda mekanik sondajlarla da doğruluğu ispat edilen yeni değerli bilgiler sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

**Alfano, L., 1959**, Introduction to the interpretation of resistivity measurements for complicated structural conditions: *Geophys. Prosp.*, 7, 311-366.

**Anderson, W. L., 1975**, Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transform integrals: *Nat. Tech. Inform. Serv. PB-242 800.119*

\_\_\_\_\_ **1979a**, Program MARQDCLAG, Marquardt inversion of DC Schlumberger soundings by lagged-convolution: *U.S. Geol. Surv. open-file rep. 79-1432*, 58.

\_\_\_\_\_ **1979b**, Numerical integration of related Hankel transforms of order 0 and 1 by adaptive digital filtering: *Geophysics*, 44, 1287-1305.

**Cagniard, L., 1959**, Abaque pour sondages electriques sur glace: *Annal. de Geophys.*, 15, 561-563.

**Deppermann, K., 1954**, Die Abhangigkeit des Scheinbaren Widerstandes von Sondenabstand bei der Veirpunkt-Method: *Geophys. Prosp.*, 2, 262-273.

**Ghosh, D. P., 1971a**, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements: *Geophys. Prosp.*, 19, 192-217.

\_\_\_\_\_ **1971b**, Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standart curves over horizontally stratified earth: *Geophys. Prosp.*, 19, 769-775.

**Kalenov, E. N., 1958**, Application of electrical prospecting in permafrost conditions [in Russian] : *Razved. I promyslov. Geofiz.*, 23, 44-57.

**Koefoed, O., 1979**, Geosounding principles, 1, resistivity sounding measurements, *Methods in Geochemistry and Geophysics*: Elsevier.

**Kunetz, G., 1966**, Principles of direct current resistivity prospecting: *Gebruder-Borntraeger*.

**Kunetz, G., and Rocroi, J.P., 1970**, Traitment automatique des sondages electrique: *Geophys. Prosp.*, 18, 157-198.

**Maillet, R., 1947**, The fundamental equations of electrical prospecting: *Geophysics*, 12, 529-556.

**Mundry, E., 1980**, The effect of a finite distance between potential electrodes on Schlumberger resistivity measurements – A simple correction graph: *Geophysics*, 45, 1869-1875.

**O'Neill, D. J., 1975**, Improved linear filter coefficients for application in apparent resistivity computations: *Bull. Austral. Soc. Explor. Geophys.*, 6, 104-109.

**Orellana, E., 1963**, Properties and drawing of the so-called Dar Zarrouk curves: *Geophysics*, 28, 99-110.

**Pekeris, C. L., 1940**, Direct method of interpretation in resistivity prospecting: *Geophysics*, 5, 31-46.

**Strakhov, V. N., and Karelina, G. N., 1969**, On the interpretation of vertical electrical sounding data with an electronic calculating machine [in Russian] : *Prikladnaya Geofiz.*, 56, 118-129.

**Zohdy, A. A. R., 1968**, The effect of current leakage and electrode spacing errors on resistivity measurements: *U. S. Geol. Surv. prof. paper 600D. D258-D264*.

\_\_\_\_\_ **1973**, A computer program for the automatic interpretation of Schlumberger sounding curves over horizontally stratified media: *Nat. Tech. Inform. Serv.*, PB-232-703, 27.

\_\_\_\_\_ **1974**, Use of Dar Zarrouk curves in the interpretation of vertical electrical sounding data: U. S. Geol. Surv. Bull. 1313-D, 41.

\_\_\_\_\_ **1975**, Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar Zarrouk functions: U.S. Geol. Surv. Bull. 1313-E, 39.

\_\_\_\_\_ **1988**, Groundwater exploration with Schlumberger soundings near Jean, Nevada: U.S. Geol. Surv. open-file rep. 88-291, 66.

**Zohdy, A. A. R., Anderson, L. A., and Muffler, L. P. J., 1973**, Resistivity, self-potential, and induced polarization surveys of a vapor dominated geothermal system: *Geophysics*, 38, 1130-1144.

**Zohdy, A. A. R., and Bisdorf, R. J., 1975**, Computer programs for the forward calculation and automatic inversion of Wenner sounding curves: *Nat. Tech. Inform. Serv.*, PB-247-265, 27.

**Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P., and Mabey, D. R., 1974**, Application of surface geophysics to groundwater investigations: *Tech. of water-resources investigations of the U.S. Geol. Surv. Book 2*, chap. D1.

**Zohdy, A. A. R., and Stanley, W. D., 1973**, Preliminary interpretation of electrical sounding curves obtained across the Snake River Plain from Blackfoot to Arco, Idaho: U.S. Geol. Surv. open-file rep. 20.