



## DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ VE MANYETOTELLÜRİK VERİLERİNİN TERS ÇÖZÜMÜ İÇİN MELEZ ALGORİTMA

Kadir Bahadır KARA\*, Ertan PEKŞEN

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmit, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Melez Algoritma, Ters Çözüm, Tekil Değer Ayırışımı, Çok Hızlı Tavlama Benzetimi.</i>	<p>Bu çalışmada jeofizik verilerin ters çözümü için melez bir algoritma geliştirilmiştir. Melez algoritmada tekil değer ayrışımı ve çok hızlı tavlama benzetimi yöntemleri ardışık olarak kullanılmıştır. Global optimizasyon yöntemi olan çok hızlı tavlama benzetimi yöntemi tekil değer ayrışımı yönteminin başlangıç parametrelerinin ön kestirimi için kullanılmıştır. Ters çözüm algoritmasını test etmek amacıyla bir boyutlu doğru akım öz direnç ve manyetotellürik düz çözüm programı geliştirilmiştir. Bu programlar kullanılarak verilerin ters çözümü yapılmıştır. İlk önce verilerin ters çözümü tek başına tekil değer ayrışımı ve çok hızlı tavlama benzetimi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra ters çözüm, geliştirilen melez algoritma kullanılarak tekrarlanmıştır. Kestirilen parametreler ve programların çalışma süreleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, arazi verilerinin sonuçları daha önce kestirilen parametreler ile karşılaştırılmıştır. Programların çalışma süresi ve parametre kestirimi açısından melez algoritmanın çok hızlı tavlama benzetimi ve tekil değer ayrımı yöntemlerinin tek başına kullanılmasından daha verimli olduğu gösterilmiştir.</p>

## A HYBRID ALGORITHM FOR THE INVERSION OF DIRECT CURRENT RESISTIVITY AND MAGNETOTELLURIC DATA

Keywords	Abstract
<i>Hybrid Algorithm, Inversion, Singular Value Decomposition, Very Fast Simulated Annealing.</i>	<p>In this study, a hybrid algorithm was developed for the inversion of geophysical data. In the hybrid algorithm, singular value decomposition and very fast simulated annealing methods were sequentially used to obtain the best result. Very fast simulated annealing method is a global optimization method is used for pre-estimation of initial values of singular value decomposition. To test the inversion algorithm, developed one-dimensional direct current resistivity and magnetotelluric forward modeling codes were used. By using these codes, synthetic data were generated. Firstly, the inversion of data was calculated by using standard singular value decomposition and very fast simulated annealing methods. Subsequently, the inversion was repeated by using the developed hybrid algorithm. Parameters that were estimated and the run times of the codes were compared with each other. In addition, the results of field data were compared with the previous works. It was shown that in terms of run time and parameter estimation, the hybrid algorithm is more efficient than only the use of very fast simulated annealing and singular value decomposition methods.</p>

### Alıntı / Cite

Kara, K. B., Pekşen, E., (2021). Doğru Akım Öz direnç ve Manyetotellürik Verilerinin Ters Çözümü İçin Melez Algoritma, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 77-87.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K.B. Kara, 0000-0002-8899-3005  
E. Pekşen, 0000-0002-3515-1509

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	13.02.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.12.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	29.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	30.03.2021

\* İlgili yazar / Corresponding author: 155106028@kocaeli.edu.tr, +90-507-711-5991

## 1. Giriş (Introduction)

Jeofizik verilerinin yorumlanmasında veriyi etkileyen parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler türev tabanlı ve global yöntemler olmak üzere iki bölümde incelenebilir. Türev tabanlı yöntemler çözüme hızlı ulaşmasına karşın çözüm parametreleri başlangıç modeline duyarlıdır. Global yöntemler ise başlangıç tahminlerine bağlı değildir. Fakat çözüme ulaşmak için daha fazla zamana gereksinim duyar. Ters çözümde veri ile model arasındaki en iyi uyum (global en küçük) aranır. Başlangıç modelinin iyi seçilmesi ön koşulu ile türev tabanlı yöntemler bu uyumu çok hızlı şekilde bulabilir. Fakat kötü seçilmiş başlangıç modeli parametrelerinin yanlış belirlenmesine neden olacaktır ve veri ile model arasındaki uyum sağlanamayacaktır. Global yöntemler başlangıç modeline bağlı olmadıklarından, parametrelerin ön kestirimi için kullanılabilir.

Bu çalışmada türev tabanlı yöntem olan tekil değer ayrışımı (TDA) ve global optimizasyon yöntemi olan çok hızlı tavlama benzetimi (ÇHTB) yöntemi ardışık kullanılarak melez bir ters çözüm programı geliştirilmiştir. Literatürde birçok farklı melez algoritmalar düz ve ters çözüm problemlerinde modeli iyileştirmek ve hesaplama süresini düşürmek için kullanılmıştır ve genel olarak melez ters çözüm algoritmalarının türev tabanlı ve global yöntemlerin dezavantajını ortadan kaldıradığı ifade edilmektedir (Başokur vd., 2007; Liu vd., 2015; Maio vd., 2016; Nqueyen ve Nestorovic, 2016; Göktürkler, 2018).

Bu çalışmada başlangıç parametrelerinin kestirimi için çok hızlı tavlama benzetimi yöntemi kullanılmıştır. Ingber (1989) tarafından hızlandırılan tavlama benzetimi (TB) yöntemi ÇHTB yöntemi olarak adlandırılmıştır. Yüksek sıcaklıkta başlatılan sistem diğer bir deyişle yüksek enerji ile başlatılan algoritma, parametrelerin alt ve üst sınırı arasında rastgele arama yapar. Rastgele arama sıcaklığa bağlı bir fonksiyondur. Sistem yüksek sıcaklıklarda kararsızdır fakat sistem soğudukça global minimuma yaklaşacaktır. Her ne kadar yöntem hızlandırılmış olsa da global minimuma yaklaşmak için türev tabanlı yöntemlere göre daha fazla süreye ihtiyaç duyar. Fakat parametrelerin ön kestirimi için global minimuma yaklaşmasına ihtiyaç yoktur. ÇHTB yöntemi ile ön kestirimi yapılan parametreler TDA yöntemi için başlangıç parametresi olarak kabul edilebilir. TDA yöntemi matris tekilliğinin üstesinden gelmek için kullanılan oldukça iyi bir yöntemdir (Golub ve Reinsch, 1971). TDA yöntemi jeofizikte parametre kestirimi için sıklıkla kullanılmaktadır. Yöntem türev tabanlı bir yöntem olduğundan iyi bir başlangıç parametre kestirimine ihtiyaç duyar. Veri ile model arasındaki belli bir eşik değeri sağlandığında yineleme işlemi durdurulur. Bu nedenle başlangıç parametrelerinin ön kestirimini ÇHTB yöntemi ile yapılması programın hem hızını hem de doğruluğunu artıracaktır.

Çalışmada geliştirilen ters çözüm programını test etmek amacıyla bir boyutlu doğru akım özdirenç (DAÖ) ve bir boyutlu manyetotellürük (MT) düz çözüm programları geliştirilmiştir. Geliştirilen düz çözüm programları kullanılarak DAÖ ve MT yöntemleri için birer adet sentetik ve arazi verisi değerlendirilmiştir. DAÖ yönteminde Slaoui (2003) tarafından verilen veri ters çözülmüştür ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. MT yöntemi için ise Meju (1992) tarafından verilen 'Coprod' verisinin ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm işlemi TDA, ÇHTB ve melez ters çözüm programları aynı başlangıç parametreleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Elde edilen parametreler ve programların çalışma süreleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Düz Çözüm (Forward Modelling)

### 2.1. 1B Doğru Akım Özdirenç Yöntemi (1D Direct-Current Resistivity Method)

Teorik olarak Schlumberger dizilimi için izotropik ortamda özdirenç nasıl hesaplandığı aşağıda özetlemiştir. Yüzeyin herhangi bir x noktası ve z derinliği için nokta akım kaynağı için potansiyel değeri

$$v(x, z) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1)$$

ile hesaplanır. Burada I akım, r ise akım ile potansiyel elektrotları arasındaki mesafedir.  $r = \sqrt{x^2 + z^2}$  bağıntısı ile hesaplanabilir.  $\rho$  ise ortamın özdirençidir (Grant ve West, 1965). Analitik olarak iki tabakalı ortamda özdirenç Denklem 2 ile hesaplanabilir (Telford vd., 1996).

$$\rho_{ai} = \rho_1 \left[ 1 + 2p \sum_{m=1}^{\infty} k^m \left( \frac{1}{(r_1^2 + 4m^2 z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(r_2^2 + 4m^2 z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(r_3^2 + 4m^2 z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{(r_4^2 + 4m^2 z^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \quad (2)$$

burada  $\rho_1$  birinci tabakanın öz direnci ve  $z$  birinci tabakanın kalınlığıdır.  $m$  ise değişenlerin toplanması için gerekli sabittir.  $r_1, r_2, r_3$ , ve  $r_4$  ise elektrotlar arasındaki mesafedir.  $p$  değişkeni

$$p = \left\{ \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] - \left[ \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

ile hesaplanabilir ve  $k$  değişkeni ise Denklem (4) ile hesaplanabilir.

$$k = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (4)$$

burada  $\rho_2$  ikinci tabakanın öz direncidir. Tabakalı ortamda Schlumberger dizilimi için yarı analitik çözüm,

$$\rho_a(L) = L^2 \int_0^{\infty} T(\lambda) J_1(\lambda L) \lambda d\lambda \quad (5)$$

denklemi ile hesaplanabilir.  $L$  elektrotlar arası uzaklığın yarısıdır,  $J_1$  birinci derecen Bessel fonksiyonudur.  $T$  ise dönüşük öz direnç fonksiyonudur ve Denklem (6) ile hesaplanır.

$$T_i = \frac{T_{i+1}(\lambda) + \rho_i \tanh(\lambda z_i)}{1 + T_{i+1}(\lambda) \tanh(\lambda z_i) / \rho_i} \quad (6)$$

$i = n - 1, \dots, 1$

Denklem 6 da  $\rho_i$  i. tabakanın öz direnci,  $z_i$  i. tabakanın kalınlığıdır ve  $n$  tabaka sayısıdır (Koefoed, 1979). 1-B DAÖ yönteminin model tepkileri yarı analitik denklem sistemi kullanılarak hesaplanmıştır.

## 2.2. 1B Manyetotellürik Yöntemi (1B Magnetotelluric Method)

1B manyetotellürik yöntemde teorik olarak model cevabının nasıl hesaplanacağı aşağıda özetlenmiştir. MT yönteminde elektrik ve manyetik alan bileşenleri zamanın fonksiyonu olarak ölçülür. Ölçülen bileşenler frekans ortamına aktarılarak öz direnç ve faz eğrileri elde edilir. Maxwell denklemlerinin birincisi Faraday yasası,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

ile verilir. Düzlem dalga kabulü yapılırsa ve Faraday yasası frekans ortamında,

$$\begin{bmatrix} dx & dy & dz \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & 0 \end{bmatrix} = -i\omega\mu_0 (H_x d_x + H_y d_y) \quad (8)$$

şeklinde yazılır. Bünye denklemlerinden (constitutive relations)  $B = \mu_0 H$  dir ve  $x$  ve  $y$  yönündeki değişimler sıfır alınır

$$H_x = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{dE_y}{dz} \quad (9)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{dE_x}{dz} \quad (10)$$

elde edilir. Elektrik alanın manyetik alana oranına empedans ( $Z$ ) denilirse

$$Z_{xy} = -\frac{E_x(z)}{H_y(z)} \quad (11)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_x(z)}{H_y(z)} \quad (12)$$

şeklinde hesaplanır. Empedans bağıntıları cinsinden Cagniard (1953) görünür öz direnç ve faz bağıntıları

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 \quad (13)$$

$$\phi_{xy} = a \tan \left( \frac{\Im(Z_{xy})}{\Re(Z_{xy})} \right) \quad (14)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{yx}|^2 \quad (15)$$

$$\phi_{yx} = a \tan \left( \frac{\Im(Z_{yx})}{\Re(Z_{yx})} \right) \quad (16)$$

Tabakalı ortamda 1B MT model tepkisi

$$R(j) = \frac{1 - K(j)e^{(-2ik_u z(N-j+1))}}{1 + K(j)e^{(-2ik_u z(N-j+1))}} \quad (17)$$

ile hesaplanır (Zhdanov ve Keller, 1994). Burada,  $R(j)$  yansıma katsayılarını,  $z$  tabaka kalınlığını,  $N$  ise tabaka sayısını göstermektedir.  $K(j)$ ,  $k_u$  ve  $k_l$  sırayla Denklem (18), (19) ve (20)

$$K(j) = \frac{1 - \frac{k_u}{k_l} R(j-1)}{1 + \frac{k_u}{k_l} R(j-1)} \quad (18)$$

$$k_u = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma(N-j+1)} \quad (19)$$

$$k_l = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma(N-j+2)} \quad (20)$$

ile hesaplanabilir.  $k_u$  ve  $k_l$  sırayla tabakalardaki alt ve üst dalga sayılarını göstermektedir. Geliştirilen programda 1B model düz çözüm operatöründe Denklem (17) bağıntısı kullanılmıştır. MT yöntemi hakkında detaylı bilgi Cagniard (1953), Zhdanov ve Keller (1994), Meju (1994) kaynaklarından elde edilebilir.

### 3. Ters Çözüm (Inversion)

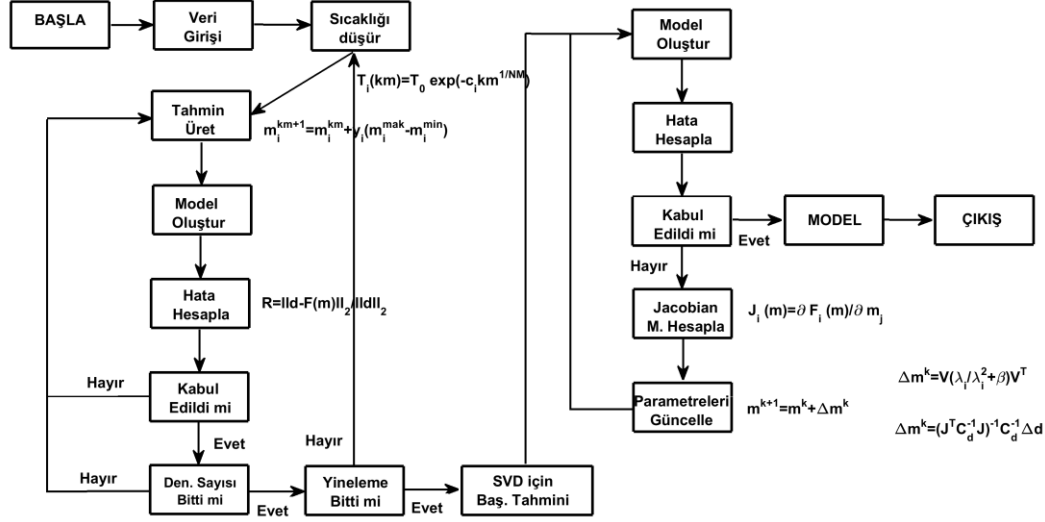
Jeofizik ölçüler alındıktan sonra ölçüyü oluşturan parametrelerin belirlenebilmesi (tabaka öz direnci, tabaka kalınlığı vb.) için ters çözüm yapılmalıdır. Jeofizik ölçülerin ters çözümü için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler türev tabanlı (Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt vb.) ve global yöntemler (ÇHTB, PSO vb.) olarak ikiye ayrılabilir. Türev tabanlı yöntemler birçok farklı jeofizik yöntemin ters çözümü için kullanılmıştır (Tikhonov ve Arsenin, 1977; Meju, 1994; Aster vd. 2005; Başokur, 2015). Aynı zamanda global yöntemlerde farklı jeofizik verilerinin ters çözümü için kullanılmıştır (Başokur vd., 2007; Sharma, 2011; Sen ve Stoffa, 2013; Balkaya, 2013; Kara ve Pekşen, 2017). Fakat her iki yönteminde (türev tabanlı ve global) üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Türev tabanlı yöntemler başlangıç modeline bağlı olmasına rağmen global yöntemler başlangıç parametrelerine bağlı değildir. Global yöntemlerde doğru parametrelerin çözüm aralığında olması yeterlidir (Sen ve Stoffa, 2013). Fakat global yöntemler rastgele arama yapan yöntemler olduklarından çözüme ulaşması türev tabanlı yöntemlere göre daha fazla zaman almaktadır.

Bu çalışma içerisinde tekil değer ayrışımı (TDA) ve (ÇHTB) yöntemleri ardışık kullanılarak iki yöntemde zayıflıkları giderilmeye çalışılmıştır. Çok hızlı tavlama benzetimi yöntemi (ÇHTB) türev tabanlı (TDA) yöntem için

başlangıç parametresi belirlemektedir. Böylece hem TDA için başlangıç parametreleri ve hem de zemin parametreleri daha kısa sürede doğru tahmin edilecektir. Programın akış şeması Şekil 1 de verilmiştir.

### 3.1. Çok Hızlı Tavlama Benzetimi (Very Fast Simulated Annealing)

Çok hızlı tavlama benzetimi (ÇHTB) yöntemi rastgele arama yapan global optimizasyon yöntemidir. Yöntem metallerin ısıtılıp tekrar soğutma yapılarak sertleştirme işlemini taklit eder. Tavlama benzetimi (TB) yönteminde Gauss dağılımı kullanılırken ÇHTB yönteminde Cauchy dağılımı kullanılır. Bu dağılım sıcaklığın daha hızlı düşürülmesine izin verir. ÇHTB yöntemi hakkında detaylı bilgi Sen ve Stoffa (2013) ten edinilebilir.



Şekil 1. Ters çözüm programının akış şeması (The flowchart of the inversion program)

Jeofizik bir problemin düz çözümü izleyen şekildeki doğrusal denklem sistemi şeklinde yazılabilir.

$$d = F(m) \quad (21)$$

burada  $d$  gözlem verisi,  $F$  düz çözüm operatörü,  $m$  ise model parametreleridir. Ters çözüm algoritması (ÇHTB) içerisinde düz çözüm operatörü çağırılarak ( $F$ ) model parametreleri ( $m$ ) kestirilmeye çalışılır. Her yinelemede bağıl hata Denklem (22) ile hesaplanır.

$$RE = \frac{\|d - F(m)\|_2}{\|d\|_2} \quad (22)$$

burada,  $RE$  bağıl hatadır. Ters çözümde her bir yinelemedeki rastgele arama Denklem (23) ile belirlenir.

$$m_i^{km+1} = m_i^{km} + y_i (m_i^{mak} - m_i^{min}) \quad (23)$$

burada,  $m_i^{km+1}$  bir sonraki yineleme adımıdaki parametreler,  $m_i^{mak}$  parametrelerin üst sınırını,  $m_i^{min}$  parametrelerin alt sınırı,  $km$  ise yineleme sayısıdır. Denklem (23) deki  $y_i$

$$y_i = \text{sgn}(u_i - 0.5) T_i \left[ \left( 1 + \frac{1}{T_i} \right)^{|2u_i - 1|} - 1 \right] \quad (24)$$

ile hesaplanır. Denklem (24)'te  $\text{sgn}$  işaret fonksiyonu (-1 ya da 1),  $u_i$  0 ila 1 arasında değişen rastgele bir sayı,  $T_i$  ise sıcaklıktır. Sıcaklık

$$T_i(km) = T_0 \exp(-c_i km^{1/NM}) \quad (25)$$

ile hesaplanır. Burada  $T_0$  başlangıç sıcaklığı,  $c$  ise probleme özel bir katsayıyı göstermektedir. Bu çalışmada 1 olarak alınmıştır.  $NM$  ise rastgele arama yapılan parametre sayısıdır. Ters çözümde ÇBHT yöntemi tek başına

kullanıldığında yineleme adım sayısı 100-150 olmalı ve her yinelemede 200-250 rastgele deneme yapılmaz. Fakat ÇHTB yöntemi TDA için başlangıç parametre kestirimi için kullanıldığında; 20 yineleme ve her yinelemede 100-150 arama yapılması TDA yöntemi için başlangıç parametre kestirimini doğru şekilde yapılmasını sağlayacaktır.

### 3.2. Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition)

TDA yöntemi jeofizikte verilerin ters çözümü için en sık kullanılan ve en başarılı yöntemlerden biridir. Fakat verilerin ters çözümü yapılırken parametrelerin başlangıç tahminleri model parametrelerinden çok uzak olduğunda tahmin edilen parametreler model parametrelerine ırsayacaktır ve elde edilen parametrelerin yanlış olmasına neden olacaktır. Bu yöntemde A matrisi üç adet matrisin çarpıdır (Golub ve Reinsch, 1971).

$$A = USV^T \quad (26)$$

burada, U ve V ortogonal matris, S ise köşegen matrisidir. Doğrusal olmayan ters çözümlerde Jacobian matrisi mutlaka hesaplanmalıdır. Jacobian matrisi

$$J_{ij}(m) = \frac{\partial F_i(m)}{\partial m_j} \quad (27)$$

ile hesaplanır. Burada,  $(m_j)$  model parametrelerindeki değişim,  $F_i(m)$  ise teorik değişim duyarlılığıdır. Yeni model parametreleri Denklem (28) ile elde edilir.

$$m^{k+1} = m^k + \Delta m^k \quad (28)$$

burada  $m^{k+1}$  bir sonraki yinelemedeki parametreler,  $\Delta m^k$  ise Denklem (29) ve (30) ile hesaplanır.

$$\Delta m^k = V \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \beta} \right) V^T \quad (29)$$

$$\Delta m^k = (J^T C_d^{-1} J)^{-1} J^T C_d^{-1} \Delta d \quad (30)$$

Denklem (29)'da ki  $\lambda_i$  i. dereceden sistemin öz değeri,  $\beta$  ise kısıtlama faktörüdür. Denklem (30)'deki  $C_d$  kovaryans matrisi,  $\Delta d$  ise gözlem ve teorik veri arasındaki farktır ( $\Delta d = d - F(m)$ ). TDA yöntemi hakkında detaylı bilgi Golub ve Loan (1996) dan elde edilebilir.

TDA yönteminde başlangıç tahminlerinin iyi şekilde seçilmesi hesaplanan model parametrelerini doğrulunu büyük ölçüde etkileyecektir. Bu nedenle başlangıç tahminlerinin ÇHTB yöntemi ile yapılması yöntemin başarısını artıracaktır.

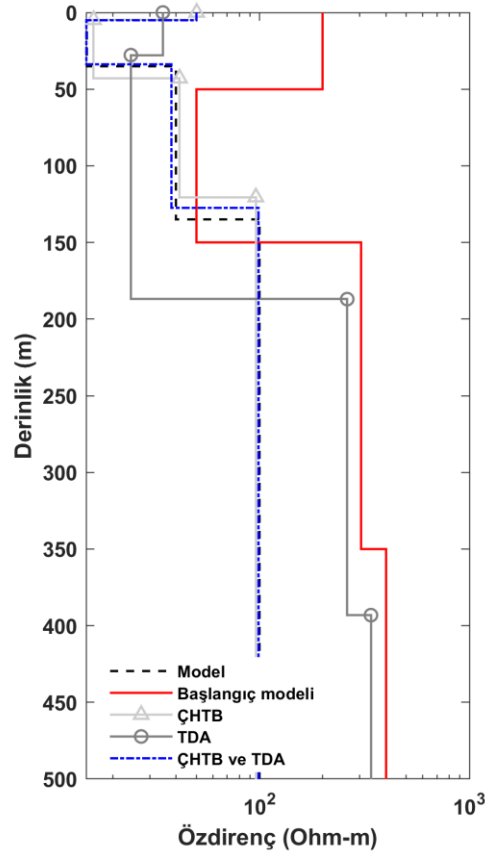
## 4. Sentetik ve Arazi Veri Örnekleri (Synthetic and Field Data Examples)

### 4.1. 1-B DAÖ Yöntemi İçin Sentetik ve Arazi Verileri (The Synthetic and Field Data for The DC Method)

DAÖ yönteminde dört tabakalı yapay verinin ve üç tabakalı arazi verisinin ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm işlemi tek başına ÇHTB, TDA kullanılarak ve ÇHTB ile TDA birlikte kullanılarak 3 kez tekrarlanmıştır. Modelin başlangıç tahminleri her üç ters çözüm için aynı seçilmiştir. TDA yönteminin doğru çözüm için başlangıç tahminlerine bağlı olduğunu ve ÇHTB yönteminin başlangıç tahminlerine bağlı olmadığını göstermek amacıyla; başlangıç tahminleri model parametrelerinden uzak seçilmiştir. Yapay model ve ters çözüm sonuçları Şekil 2 ve Tablo 1 de verilmiştir.

Her üç çözümde hesaplanan parametreler incelendiğinde, TDA yöntemi başlangıç parametrelerine bağlı olduğundan model parametrelerine doğru kestirilememiştir. Yapay DAÖ modeli tek başına ÇHTB ve melez algoritma kullanıldığında çözülebilmştir. Sadece ÇHTB yöntemi kullanılarak çözülen sentetik model çözüme 63 saniyede ulaşmıştır. ÇHTB ve TDA birlikte kullanıldığında ise 21 saniyede çözüme ulaşılmıştır. 42 saniyelik zaman kazancı az görünse de çok boyutlu ortamların (2B-3B) ters çözümünde bu zaman farkı çok daha önemli olacaktır ve hesaplanan zemin parametrelerinin doğruluğunu artıracaktır.

Arazi verisinde ise Slaoui vd. (2003) tarafından verilen verinin ters çözümü yapılmıştır ve kestirilen parametreler makaledeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Slaoui vd. (2003) ters çözüm algoritması olarak Levenberg-Marquardt yöntemini kullanmıştır. Bu yöntem matris tekiliğinden kaçınmak için modifiye edilmiş Gauss-Newton yöntemidir. Ters çözümde veri üç tabakalı olarak değerlendirilmiş olup, sonuçlar Tablo 2 verilmiştir. Arazi verisi ile hesaplanan eğri Şekil 3 de ve hesaplanan tüm modeller Şekil 4 de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1B sentetik DAÖ verisinin ters çözümü (The inversion of 1D synthetic DC data)

Tablo 1. DAÖ sentetik verisi için kestirilen parametre sonuçları (The estimated parameters for the synthetic DC data)

Parametreler	Gerçek değerler	Başlangıç değerleri	ÇHTB	TDA	ÇHTB ve TDA
$\rho_1$ (ohm-m)	50	200	50.2	34.6	49.9
$z_1$ (m)	5	50	4.8	27.8	5
$\rho_2$ (ohm-m)	15	50	16.2	24.36	14.9
$z_2$ (m)	30	100	38.2	159.2	28.7
$\rho_3$ (ohm-m)	40	305	41.6	261.6	38.1
$z_3$ (m)	100	200	77.5	206.2	93.6
$\rho_4$ (ohm-m)	100	400	95.9	339.5	98.8
Zaman (s)	-	-	63	4	21
Bağlı hata	-	-	0.4	24	0.05

Tablo 2. Arazi verisinin kestirilen parametre sonuçları (Estimated parameters for the field data)

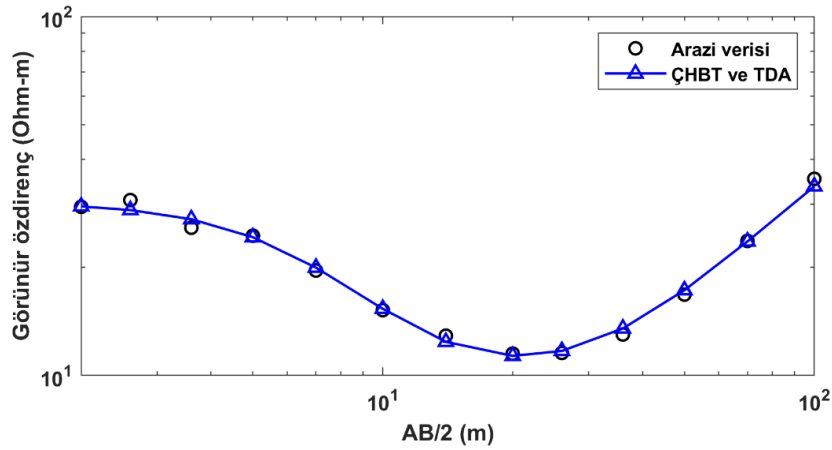
Parametreler	Başlangıç değerleri	Slaoui vd. (2003)	ÇHTB	TDA	ÇHTB ve TDA
$\rho_1$ (ohm-m)	100	30.2	30.6	17.5	30.2
$z_1$ (m)	20	3.6	3.4	18.85	3.4
$\rho_2$ (ohm-m)	70	8.36	9.4	21	9.5
$z_2$ (m)	50	21.6	25.9	62.07	26.77
$\rho_3$ (ohm-m)	300	864.6	3000	283.2	3395
Zaman (s)	-	-	14.1	0.6	4.8
Bağlı hata	-	0.75	0.80	8	0.85

Arazi verisi ÇHTB yöntemi ve melez algoritma kullanılarak ters çözümü yapıldığında Slaoui vd. (2003) tarafından kestirilen parametreler oldukça yakın olduğu görülmektedir. ÇHTB yöntemi ile ters çözüm 14.1 s sürerken melez algoritma ile 4.8 s de çözülmüştür. Başlangıç parametreleri kötü seçildiğinden TDA yöntemi ile çözülememiştir.

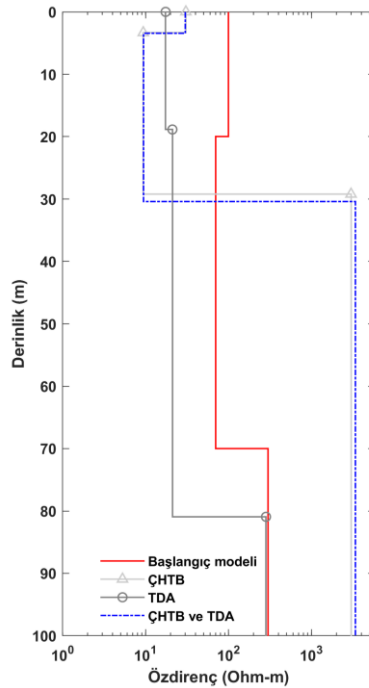
#### 4.2 1-B MT Yöntemi İçin Sentetik ve Arazi Verileri (The Synthetic and Field Data for The MT Method)

Bu yapay örnekte ise 3 tabakalı bir MT verisinin ters çözümü yapılmıştır. DAÖ yönteminde olduğu gibi yapay verinin çözümü 3 kez tekrarlanmıştır. Başlangıç tahminleri her üç çözüm için aynı alınmıştır. Hesaplanan parametreler ve model parametreleri Şekil 5 ve Tablo 3 de verilmiştir.

Şekil 5 ve Tablo 3 incelendiğinde DAÖ öz direnç yönteminde olduğu gibi TDA yönteminde elde edilen parametreler yapay verinin parametrelerinden oldukça uzaktır. Fakat diğer iki yöntem kullanıldığında (ÇHTB ve melez) oldukça yakın olduğu görülmektedir. ÇHTB yöntemi tek başına kullanıldığında yapay verinin parametrelerini 56 saniyede çözerken; TDA yöntemi ile birlikte kullanıldığında 6 saniyede çözüme başarılı şekilde ulaşılmıştır.

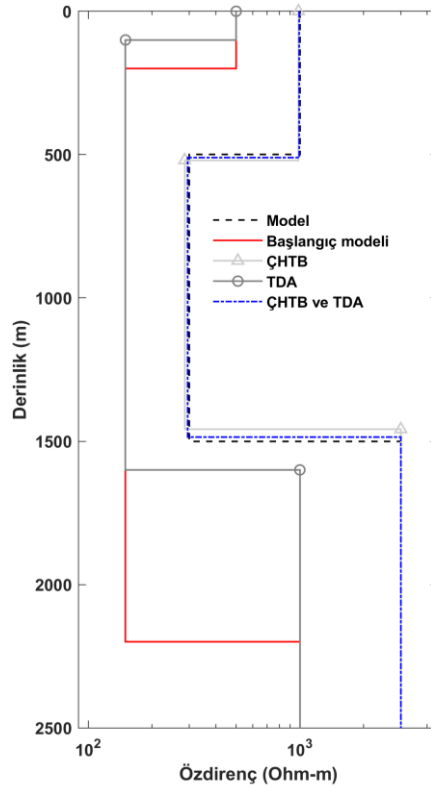


Şekil 3. Arazi verisi (Slaoui vd., 2003) ve ÇHTB ve TDA ile kestirilen eğri (The field data (Slaoui et al., 2003) and estimated curve by VFSA and SVD)



Şekil 4. Slaoui vd., (2003) tarafından verilen verinin ters çözümü (Inversion of the data given by Slaoui et al., (2003))





Şekil 5. 1B sentetik MT verisinin ters çözümü (The inversion of 1D synthetic MT data)

MT yönteminde Meju (1992) tarafından TDA yöntemi ile çözülen 'Coprod' verisinin ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 6-7 de ve Tablo 4 de verilmiştir.

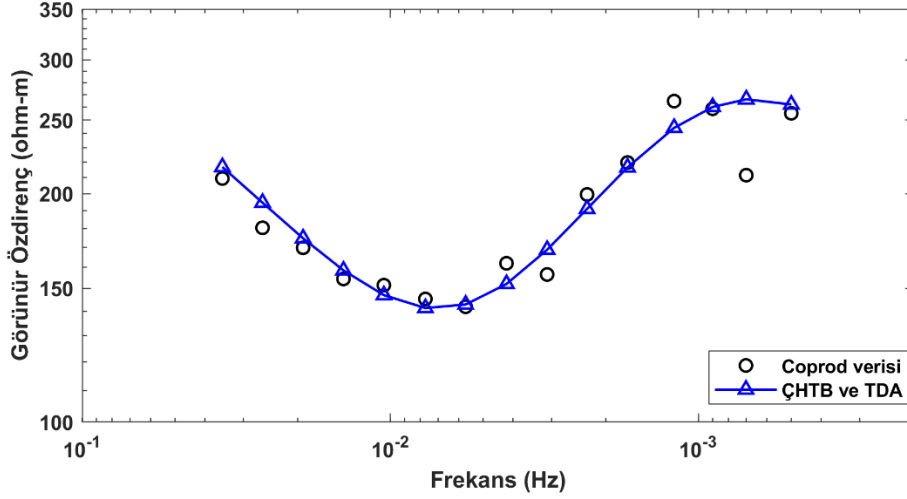
Kestirilen parametreler Meju (1992) tarafından kestirilen parametrelerle karşılaştırıldığında birbirleri ile örtüşmektedir. ÇHTB yöntemi ile parametreler 11.2 s de, melez algoritma ile 1.64 s de kestirilmiştir. Bu durum türev tabanlı ve global yöntemlerin birlikte kullanılarak doğru ve hızlı şekilde jeofizik verilerin çözülebileceğini göstermektedir.

Tablo 3. MT sentetik verisi için kestirilen parametre sonuçları (The estimated parameters for the synthetic MT data)

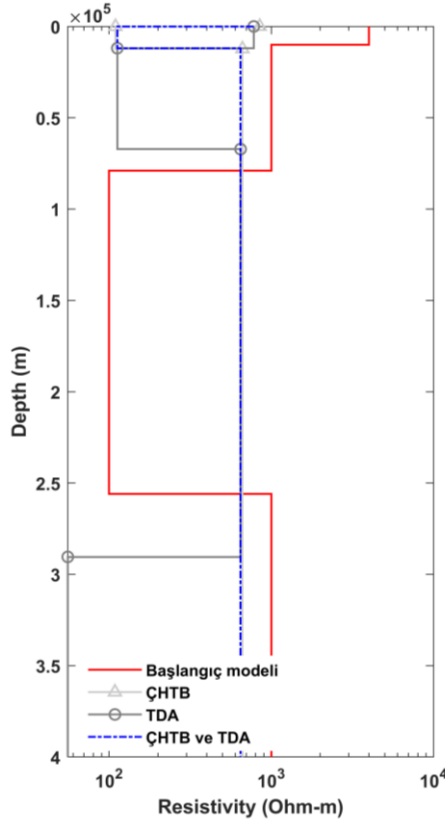
Parametreler	Gerçek değerler	Başlangıç değerleri	ÇHTB	TDA	ÇHTB ve TDA
$\rho_1$ (ohm-m)	1000	500	983	500	991
$z_1$ (m)	500	200	519	100	509
$\rho_2$ (ohm-m)	300	150	285	150	294
$z_2$ (m)	1000	2000	938	1500	995
$\rho_3$ (ohm-m)	3000	1000	2998	1000	2997
Zaman (s)	-	-	56	2	6
Bağıl hata	-	-	1.8	1891	0.87

Tablo 4. Coprod verisi için kestirilen parametre sonuçları (The estimated parameters for Coprod data)

Parametreler	Başlangıç değerleri	Meju (1992)	ÇHTB	TDA	ÇHTB ve TDA
$\rho_1$ (ohm-m)	4000	653.9	848.3	3824.8	779.9
$z_1$ (m)	10000	14062.3	12219.5	5473.1	11907.1
$\rho_2$ (ohm-m)	1000	106.8	109.5	475.1	112.4
$z_2$ (m)	69000	67828.1	52908	12563.1	55253.4
$\rho_3$ (ohm-m)	100	842.7	663	76.1	646.3
$z_3$ (m)	177000	313061	218771.3	27613.4	223270.9
$\rho_4$ (ohm-m)	1000	101	72	499.5	55.7
Zaman (s)	-	-	11.2	1.48	1.64
Bağıl hata	-	12.1	6.91	11.97	6.96



Şekil 6. Coprod verisi (Meju, 1992) ve melez yöntemle kestirilen eğri (Coprod data (Meju,1992) and the curve estimated by hybrid method)



Şekil 7. Coprod verisinin ters çözümü (Inversion of Coprod data)

## 5. Sonuç (Result)

Bu çalışmada türev tabanlı ve global optimizasyon yöntemlerinin melez bir algoritma ile ardışık kullanımının önemi ve başarısı gösterilmiştir. Ters çözüm algoritmasını test etmek amacıyla bir boyutlu DAÖ ve MT düz çözüm programları geliştirilmiştir. Geliştirilen programlarda birer adet sentetik verinin ve arazi verisinin ters çözümü yapılmıştır. Ters çözümde her bir tabakasının öz direnci ve tabaka kalınlıkları kestirilmiştir.

TDA yönteminde parametrelerin başlangıç tahminlerinin kötü kestirilmesi durumunda yöntemin başarısız olacağı gösterilmiştir. ÇHTB yöntemi tek başına kullanıldığında parametreler çözülmesine rağmen uzun zaman almıştır. ÇHTB ve TDA yöntemi birlikte kullanıldığında ise hem parametreler model parametrelerine oldukça yakın hesaplanmıştır hem de kısa sürede çözülmüştür. Melez algoritma kullanıldığında başlangıç sıcaklığı 20 (20 yinleme) ve her sıcaklık için 120 rasgele arama yapılmıştır. Buradan elde edilen parametreler TDA yöntemi için başlangıç parametreleri olarak kullanılmıştır. TDA ise son model parametrelerine ortalama 10 yinleme sonucunda ulaşmıştır. Geliştirilen algoritmanın jeofizik verilerinin ters çözümü için kullanılabileceği gösterilmiştir.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Görüş ve eleştirileriyle bu çalışmanın gelişmesine katkı sağlayan iki anonim hakeme teşekkür ederiz.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar (References)

- Aster RC, Borchers B, Thurber CH, 2005. Parameter Estimation and Inverse Problems. London, UK: Elsevier.
- Balkaya Ç., 2013. An implementation of differential evolution algorithm for inversion of geoelectrical data, *Journal of Applied Geophysics*, 98, 160-175.
- Başokur, A.T., Akca, İ., Siyam, N., 2007. Hybrid genetic algorithms in view of the evolution theories with application for the electrical sounding method, *Geophysical Prospecting*, 55 (3), 393-406.
- Başokur, A.T., 2015. Türev tabanlı parametre kestirim yöntemleri, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası yayını, Ankara.
- Cagniard, L., 1953. Basic Theory of the Magneto-telluric Method of Geophysical Prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635.
- Di Maio R., Rani P., Piegari E., Milano L., 2016. Self-potential data inversion through a Genetic-Price algorithm, *Computer & Geosciences*, 94, 86-95.
- Golub G.H., Reinsch, C., 1971. Singular value decomposition and least squares solutions, *Numerical Mathematics*, 13, 403-420.
- Golub G.H., Van Loan C.F., 1996. *Matrix Computations*, Baltimore, MD, USA, Johns Hopkins University Press.
- Göktürkler, G., 2018. A hybrid approach for tomographic inversion of crosshole seismic first-arrival times. *Journal of Geophysics and Engineering* 8 (1), 99-108.
- Grant, F.S., West, G.F., 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill, New York.
- Ingber, L., 1989. Very fast simulated reannealing. *Mathematical and Computer Modeling*, 12 (8), 967 -993.
- Kara, K.B., Pekşen, E., 2017. 1D fullwaveform optimization using Gpr data, 9th Congress of the Balkan Geophysical Society, Antalya. doi:10.3997/2214-4609.201702521.
- Koefoed, O., 1979. *Geosounding principles resistivity sounding measurements*. Elsevier, Amsterdam.
- LaBrecque D.J, Heath G, Sharpe R, Versteeg R, 2004. Autonomous monitoring of fluid movement using 3-D electrical resistivity tomography, *J Environ Eng Geoph.* 9, 167-176.
- Meju, M.A., 1994. *Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice*, SEG, Tulsa.
- Meju, M.A., 1992. An effective ridge regression procedure for resistivity data inversion, *Computer & Geosciences*, 18, 99-118.
- Nguyen, L.T., Nestorovic, T., 2016. Unscented hybrid simulated annealing for fast inversion of tunnel seismic waves, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 301, 281-299.
- Sen, M., Stoffa, P., 2013. *Global optimization methods in geophysical inversion*. Elsevier, Amsterdam.
- Sharma, S.P., 2011. VFSARES- a very fast simulated annealing Fortran program for interpretation of 1-D DC resistivity sounding data from various electrode arrays, *Computer and Geosciences*, 42 (C), 177-188.
- Slaoui, F.H., Georges, S., Lagace P.J., Do, X.D., 2003. The inverse problem of Schlumberger resistivity sounding measurement by ridge regression, *Electric Power Systems Research*, 67, 109-114.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tikhonov, A.N, Arsenin, VY 1977. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York, NY, USA: Halsted Press.
- Zhdanov, M.S., Keller, G. V., 1994. *The Geophysical Methods in Geophysical Exploration*, Elsevier.