

## Geçici Elektromanyetik Alan Difüzyonunun Du Fort-Frankel Sonlu Farklar Yaklaşımı ile İki Boyutlu Modellenmesi

### *Two Dimensional Modeling of Diffusion of Transient Electromagnetic Fields by Du Fort-Frankel Finite Difference Approximation*

GÜNGÖR DİDEM BEŞKARDEŞ<sup>1</sup>, GÜLÇİN ÖZÜRLAN AĞAÇGÖZGÜ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü C-117, Ayazağa Kampüsü, 34469 Sarıyer, İstanbul

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü D-107, Ayazağa Kampüsü, 34469 Sarıyer, İstanbul

Geliş (received) : 21 Şubat (February) 2012  
Kabul (accepted) : 01 Kasım (November) 2012

#### ÖZ

Bu çalışmada, iki boyutlu (2B) yerelektrik yapıların yarı sonsuz uzayda oluşturduğu elektromanyetik tepki yanıtı Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak zaman ortamında modellenmiştir. İki boyutlu yapı doğrultusundaki (TE modu) zaman ortamı elektromanyetik difüzyon denklemleri, bu yaklaşım ile belirlenen zaman adımlarında yinelenmeli olarak çözülerek birincil ve ikincil elektrik alanların difüzyonu hesaplanmıştır. Bu amaçla, iki çizgisel akım kaynağı için Dirichlet ve Neumann sınır koşullarıyla iki boyutlu iletkenlik yapılarının geçici elektromanyetik tepki yanıtlarını hesaplayan bir algoritma MATLAB programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Yarı-sonsuz tekdüze ortam için sınanan algoritma ile çeşitli modeller hesaplanmış ve iki boyutlu yer modellerinde difüzyon sürecini etkileyen faktörler incelenmiştir. Ülkemizin önemli çevre sorunlarından biri olan kıyılardaki tuzlu su girişiminin simülasyonu amacıyla hesaplanan kontur kesitlerinde, geçici elektromanyetik alanların difüzyonunun net olarak izlenebildiği ve yöntemin bu sorunun çözümünde üstün yanlarının bulunduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Jeofizik Yöntem, geçici elektromanyetik, iki boyutlu modelleme, Du Fort-Frankel, sonlu farklar.

#### ABSTRACT

*In this study, the electromagnetic response of a two dimensional (2D) body in a half-space is modeled in time domain by using Du Fort-Frankel finite difference approximation. Time domain electromagnetic diffusion equations for two-dimensional Transverse Electric (TE) mode are solved for specified time steps iteratively by this approximation and diffusion of primary and secondary electric fields are obtained. Using Dirichlet and Neumann boundary conditions, the transient electromagnetic responses of two-dimensional bodies under the excitation of a double line source are modeled by using the MATLAB.*

*Numerical models were generated in order to simulate saltwater intrusion that is one of the most important environmental problems in Turkey. In the cross-sections of saltwater model, the diffusion of the transient electromagnetic fields can be seen very clearly and this verifies that transient electromagnetic method has high potential to solve the saltwater intrusion problem.*

**Keywords:** Geophysical method, transient electromagnetic, two dimensional modeling, Du Fort-Frankel, finite differences.

---

\* G.Beşkardeş  
E-posta: beskardes@itu.edu.tr

## GİRİŞ

Geçici elektromanyetik yöntem (Transient Electromagnetic, TEM) uzun yıllardan beri sığ jeolojik ve hidrojeolojik problemlerin çözümü için standart bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, geçici elektromanyetik (EM) alanların yayılım süreçlerinin modellenmesi ve yüzeyde ölçülebilecek EM tepki yanıtlarının hesaplanabilmesi için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, TEM yönteminde 2B modelleme yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritmada, çizgisel bir akım kaynağı uyartımı ile oluşan elektromanyetik alanların iki boyutlu difüzyonunu tanımlayan parabolik denklem çözümünde Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır. Parabolik denklemlerin çözümünde, koşulsuz kararlı ve açık yapısı ile üstünlük sağlayan yaklaşım, kurbağa adımı şeklindeki etkili zaman adımlaması ve düzensiz grid kullanılan modellere uygulanabilirliği sebebiyle de EM difüzyon denklemleri çözümü için sıklıkla kullanılmaktadır. Oristaglio ve Hohmann (1984), Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımını çift çizgisel kaynak uyartımı için toplam elektrik alan eldesi için kullanmış, Adhidjaja ve Hohmann (1985; 1988) ise aynı yaklaşımı ikincil elektrik alanın çözümü için kullanmıştır.

Oristaglio ve Hohmann (1984)'dan yola çıkılarak geliştirilen iki boyutlu modelleme algoritmasının doğruluğunun sınanması amacıyla, tekdüze ortam sonuçları analitik çözümlerle karşılaştırılmış, duyarlılığına güvenilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur. Modelleme çalışmalarında, birincil ve ikincil elektrik alan değerlerinin yanısıra; elektrik alan değerlerinin sayısal türevlerinden yatay ve düşey elektromotor kuvvet (emk) profil eğrileri hesaplanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, yeraltındaki iletken yapılarla oldukça duyarlı olan TEM yönteminin ülkemizin önemli sorunlarından biri olan tuzlu su girişimi problemi için çözüm üretme yeteneği, tuzlu su girişim yer modelleri için hesaplanan anomaliler ile değerlendirilmiştir.

## YÖNTEM

### Du Fort-Frankel Sonlu Farklar Yaklaşımı

Kaynak bulunmayan bir ortam için yapı doğrultusundaki (TE modu) elektrik alan ( $E = E_y$ ) ve buna dik manyetik alan, yer değiştirme akımlarının ihmal edildiği quasi-statik durum için;

$$E(x, z, t) = E_y \hat{y}$$

$$H(x, z, t) = H_x \hat{x} + H_z \hat{z}$$

olmak üzere, iki boyutlu difüzyon eşitliği

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir; burada,  $x$  ve  $z$  uzaysal değişkenler,  $t$  ise zaman değişkenidir.

Şekil 1'de verilen sonlu farklar ağı üzerindeki tüm hücreler için manyetik geçirgenliğin serbest havadaki değeri sabittir ( $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ); iletkenlik değerleri ( $\sigma = \sigma(x, z)$ ) ise hücreden hücreye değişebilmektedir.

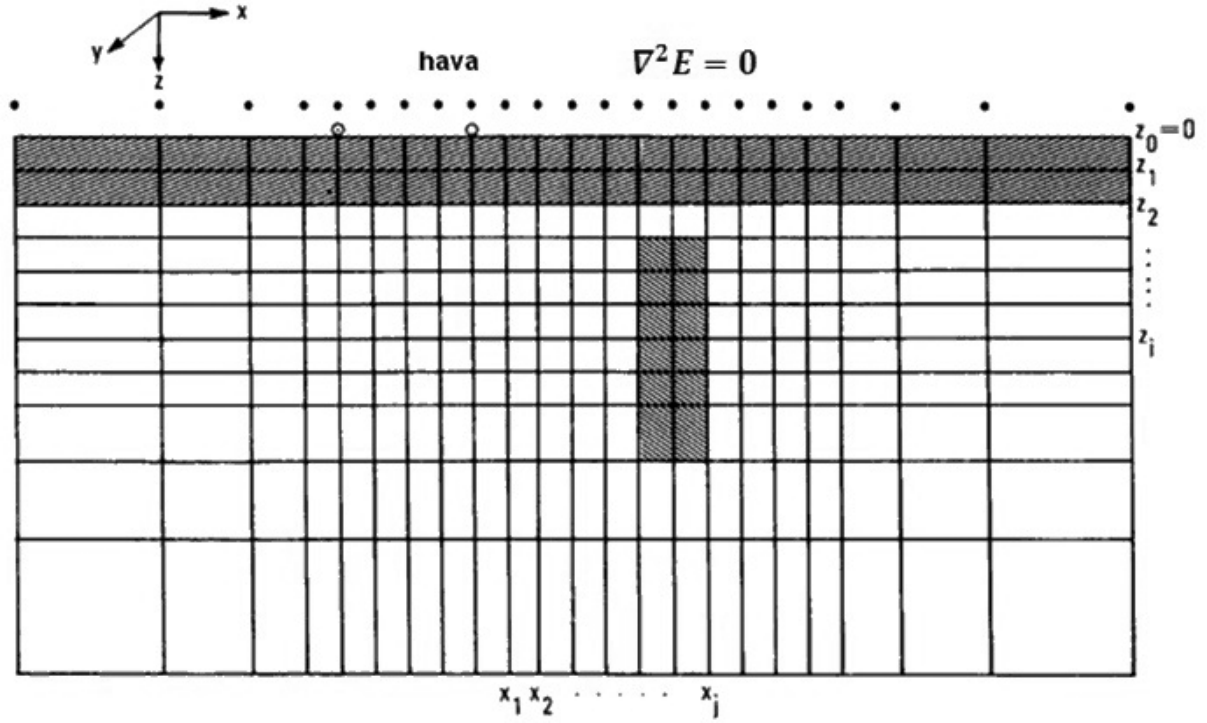
Kısmi türevlerin sonlu fark karşılıkları, eşit grid aralıkları için ( $\Delta = \Delta x = \Delta z$ ), (1) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\partial_t E_{i,j}^n = \frac{E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n - 4E_{i,j}^n}{\mu \bar{\sigma}_{i,j} \Delta^2} \quad (2)$$

Şekil 2'de, herhangi bir  $E_{i,j}$  noktası en yakın komşuları olan  $E_{i+1,j}$ ,  $E_{i-1,j}$ ,  $E_{i,j+1}$ ,  $E_{i,j-1}$  noktaları ile çevrelenmiştir. Burada,  $i$  ve  $j$  indisleri  $x = j \cdot \Delta x$ ,  $z = i \cdot \Delta z$  ve zamanı temsil eden  $n$  ise  $t = n \cdot \Delta t$  olarak verilmektedir.  $\partial_t E_{i,j}^n = \frac{\partial E_{i,j}^n}{\partial t}$  olmak üzere, zaman terimi ayrıklaştırılması Euler yönteminden farklı olarak merkezi farklar yardımıyla yapılmaktadır:

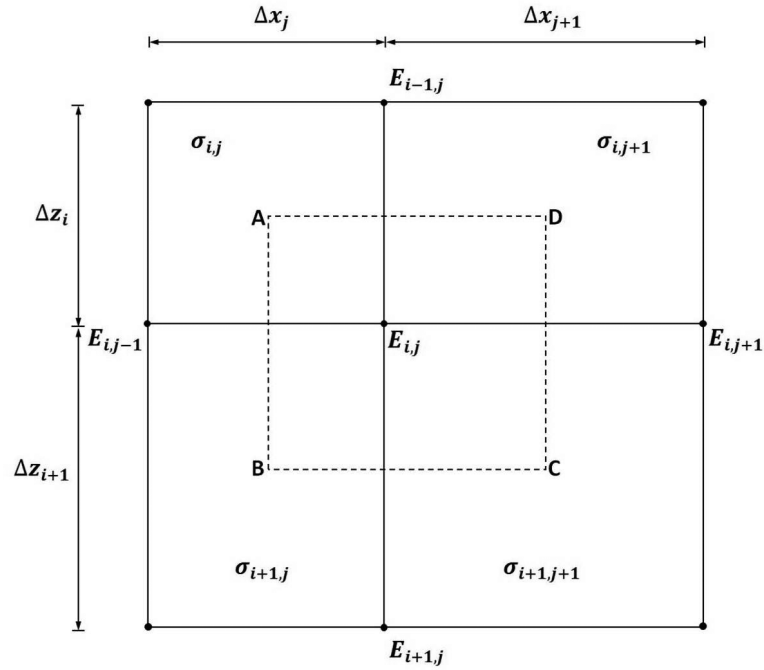
$$\partial_t E_{i,j}^n \approx \frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} + O(\Delta t) \quad (3)$$

Buradan hareketle  $E_{i,j}^n$ ,



Şekil 1. Sonlu farklar ağına bir örnek (Oristaglio ve Hohmann, 1984).

Figure 1. A finite difference mesh (Oristaglio and Hohmann, 1984).



Şekil 2. Sonlu farklar ağına tipik bir  $E_{i,j}$  noktası (Oristaglio ve Hohmann, 1984).

Figure 2. A typical grid point  $E_{i,j}$  in the finite difference grid (Oristaglio ve Hohmann, 1984).

$$E_{i,j}^n \approx \frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^{n-1}}{2} + O(\Delta t^2) \quad (4)$$

şeklinde basit ortalama olarak ifade edilebilir. (3) ve (4) ifadeleri (2) eşitliğinde yerine yazılır,

$$\frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} = \frac{E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n - 2(E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^{n-1})}{\mu\bar{\sigma}_{i,j}\Delta^2} \quad (5)$$

ve  $E_{i,j}^{n+1}$  terimi eşitliğinden çekilirse;

$$E_{i,j}^{n+1} = \frac{1 - 4r_{i,j}}{1 + 4r_{i,j}} E_{i,j}^{n-1} + \frac{2r_{i,j}}{1 + 4r_{i,j}} (E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n) \quad (6)$$

elde edilir. Bu denklem, eşit gridli sonlu farklar ağı için Du Fort-Frankel sonlu farklar çözümüdür. Burada  $r_{i,j}$  yerel ağ oranı ve  $\bar{\sigma}_{i,j}$  ise  $E_{i,j}$  noktasını çevreleyen iletkenliklerin alan ağırlıklı ortalamasıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilirler:

$$r_{i,j} = \frac{\Delta t}{\mu\bar{\sigma}_{i,j}\Delta^2} \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i+1,j} + \sigma_{i,j+1} + \sigma_{i+1,j+1}}{4} \quad (8)$$

(6) ifadesi düzensiz grid aralıkları için düzenlenirse,

$$E_{i,j}^{n+1} = \frac{1 - 4\bar{r}_{i,j}}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} E_{i,j}^{n-1} + \frac{2r_{i,j}^z}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} \left( \frac{\Delta z_i}{\Delta z_i} E_{i+1,j}^n + \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} E_{i-1,j}^n \right) + \frac{2r_{i,j}^x}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} \left( \frac{\Delta x_j}{\Delta x_j} E_{i,j+1}^n + \frac{\Delta x_{j+1}}{\Delta x_j} E_{i,j-1}^n \right) \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, ortalama grid aralıkları, izleyen biçimde

$$\bar{\Delta z}_i = \frac{\Delta z_{i+1} + \Delta z_i}{2} \text{ ve } \bar{\Delta x}_j = \frac{\Delta x_{j+1} + \Delta x_j}{2}, \quad (10)$$

difüzyon için x ve z yönündeki yerel ağ oranları

$$r_{i,j}^x = \frac{\Delta t}{\mu\bar{\sigma}_{i,j}\Delta x_j\Delta x_{j+1}} \text{ ve } r_{i,j}^z = \frac{\Delta t}{\mu\bar{\sigma}_{i,j}\Delta z_i\Delta z_{i+1}}, \quad (11)$$

Biçiminde ve ortalama yerel ağ oranı ise;

$$\bar{r}_{i,j} = \frac{r_{i,j}^x + r_{i,j}^z}{2} \quad (12)$$

olarak verilmiştir.

### İkincil Elektrik Alan

Kaynak bulunan bir ortam için TE modunda elektrik alan ( $E = E_y$ ), yerdeğiştirme akımlarının ihmal edildiği quasi-statik durum için,

$$\nabla^2 E_y - \sigma\mu \frac{\partial E_y}{\partial t} = \mu \frac{\partial j_\rho}{\partial t} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $j_\rho$  kaynağın akım yoğunluğunu göstermektedir. Çalışmada, kaynak terimi tanımlamasına gerek duyulmaması ve iletken yapılardan kaynaklanan ikincil elektrik alanın daha doğru şekilde elde edilmesi amacıyla toplam elektrik alan, birincil ve ikincil elektrik alan bileşenlerine ayrılmıştır:

$$E = E^p + E^s. \quad (14)$$

Toplam elektrik alandan çekilerek ikincil elektrik alan,

$$\nabla^2 E_y^s - \sigma^y\mu \frac{\partial E_y^s}{\partial t} = \mu(\sigma^y - \sigma) \frac{\partial E_y^p}{\partial t} \quad (15)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $\sigma$  ortamın ve  $\sigma^y$  ise yapının iletkenliğidir. Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımıyla (15) eşitliği ayrıştırılarak ikincil elektrik alan yinelemeli olarak hesaplanmıştır.

Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımı, seçilen her zaman adımı için karardır. Fakat EM modelleme çalışmalarında, EM alanlarda sönümlü dalga özelliğinden çok difüzyon davranışının baskın olması istenmektedir. Bu nedenle, zaman adımının bu kritere göre seçilmesi gerekmektedir. Çalışmada, Du Fort-Frankel yaklaşımı için Oristaglio ve Hohmann (1984) tarafından önerilen zaman adımı kullanılmıştır:

$$\Delta t \leq \frac{\mu \min(\bar{\sigma}_{i,j})\Delta^2}{4}. \quad (16)$$

EM alan difüzyonunun erken zamanlarda ani, geç zamanlarda ise daha yavaş değişimler göstermesi sebebiyle, EM alan modellemelerinde daha doğru sonuçlar elde etmek için erken zamanlarda daha küçük, geç zamanlarda ise daha büyük zaman adımları kullanılmıştır.

Birincil ve ikincil elektrik alanların belirlenmiş zaman adımlarında yinelemeli olarak modellenmesi için öncelikle başlangıç durumunun verilmesi gerekmektedir. Kaynak tanımı yapılmadığından, elektrik alanların  $t = 0$  anında kaynağın kapatılması sonucu yerin iletkenlik dağılımlarına bağlı olarak oluştuğu durumun verilmesi gerekmektedir. Yinelemeli ifadeler gereği, çift çizgisel kaynak uyarıtımı altında birincil elektrik alanın önceki iki zamana ait ( $t_0$  ve  $t_1$ ) ve değerleri analitik ifadeler yardımıyla hesaplanmıştır (Wait, 1971). Uygulamalarda,  $t_0 = 0$  olarak kullanılmak yerine, birincil elektrik alanın en az 1.5 grid aralığı kadar yeriçine nüfuz ettiği bir zaman başlangıç zamanı olarak seçilmektedir.  $t_1$  zamanı ise,  $t_0$  zamanı üzerine seçilen zaman adımının eklenmesiyle elde edilmektedir. İkincil elektrik alanın indüklenebilme ölçütü, iletkenlik kontrastı olduğundan başlangıç durumunda sıfır olarak kabul edilmektedir.

Sınır koşulları olarak sağ, sol ve alt sınırlarda homojen Dirichlet sınır koşulları kullanılmıştır. Bu sınır koşullarını sağlamak amacıyla, dereceli ağ aralıkları kullanılarak sınırlar kaynak noktalarından olabildiğince uzağa taşınmıştır.

Yer-hava arayüzeyinde, sonlu farklar ağında hava tabakasının gerekliliğini ortadan kaldırmak amacıyla yukarı uzanım sınır koşulu kullanılmıştır (Oristaglio ve Hohmann, 1984). Aksi halde, yüksek öz direnç ile tanımlanan hava tabakası nedeniyle başlangıç zaman adımı da küçük olacaktır. Yukarı uzanım sınır koşulu gereği, elektrik alan, havada Laplace denklemini sağlamalıdır.

### Düşey ve Yatay emk

TEM ölçümlerinde, doğrudan manyetik alan ölçümlerinin yapılamaması nedeniyle yer iletkenlik yapısı ile ilgili bilgiler manyetik alan bileşenlerinin zamana göre türevleri yardımıyla elde edilmektedir. Bu nedenle, geçici EM yönteminde, manyetik alan bileşenlerinin zamana göre türevleri oldukça önemlidir.

Elektrik alanın sadece y yönünde değiştiği durum için, Faraday yasası diferansiyel olarak,

$$\partial B_z / \partial t = - \partial E / \partial x \quad (17)$$

$$\partial B_x / \partial t = \partial E / \partial z$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu sayede, elektrik alanın yatay ve düşey sayısal türevleri alınarak manyetik alanın zamana göre türevi elde edilebilmektedir. Çalışmada, düşey ve yatay emk anomalileri uzaklığa bağlı olarak farklı zaman adımları için grafikler şeklinde sunulmuştur.

## MODELLEME

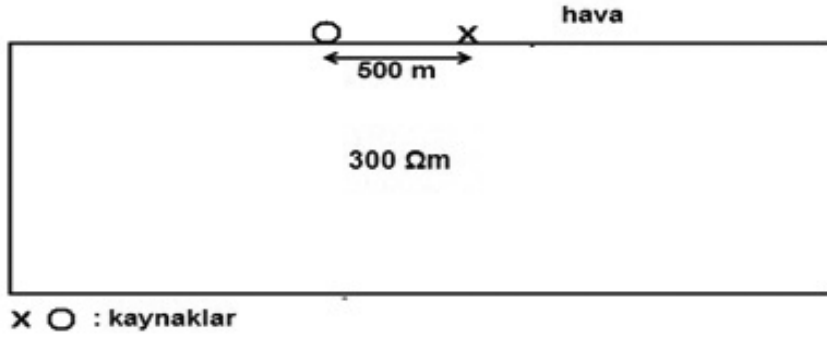
### Tekdüze Ortam

Bu çalışmada geliştirilen algoritmanın sınaması amacıyla, elektromanyetik tepkisi bilinen tekdüze ortam modeli için belirlenmiş zaman aralıklarında elektrik alan difüzyonu hesaplanmıştır. Modellemede kullanılan sonlu farklar ağı düşey ve yatayda olmak üzere, 79x199 düğüm noktası içermektedir. Düzensiz grid aralıkları kullanılan hesaplama ağında sağ ve sol sınırlar sırasıyla 3910 ve -3910 metrededir, alt sınır ise -2855 metrededir. Şekil 3'de verilen 300  $\Omega m$  öz dirençli tekdüze ortam modeli için elektrik alan değerleri sonlu farklar ağındaki her bir düğüm noktasında belli zaman adımları için hesaplanmıştır (Şekil 4). Bu ve diğer difüzyon kesitlerinde sıfır konturunun solunda kalan bölümde elektrik alan değerleri negatif değerlidir.

Programın test edilmesi için Du Fort-Frankel sonlu farklar yöntemiyle elde edilen elektrik alan değerleri analitik karşılıklarıyla kıyaslanmıştır. Şekil 5'de görüldüğü üzere, elektrik alan değerleri yeterli hassasiyette hesaplanabilmektedir.

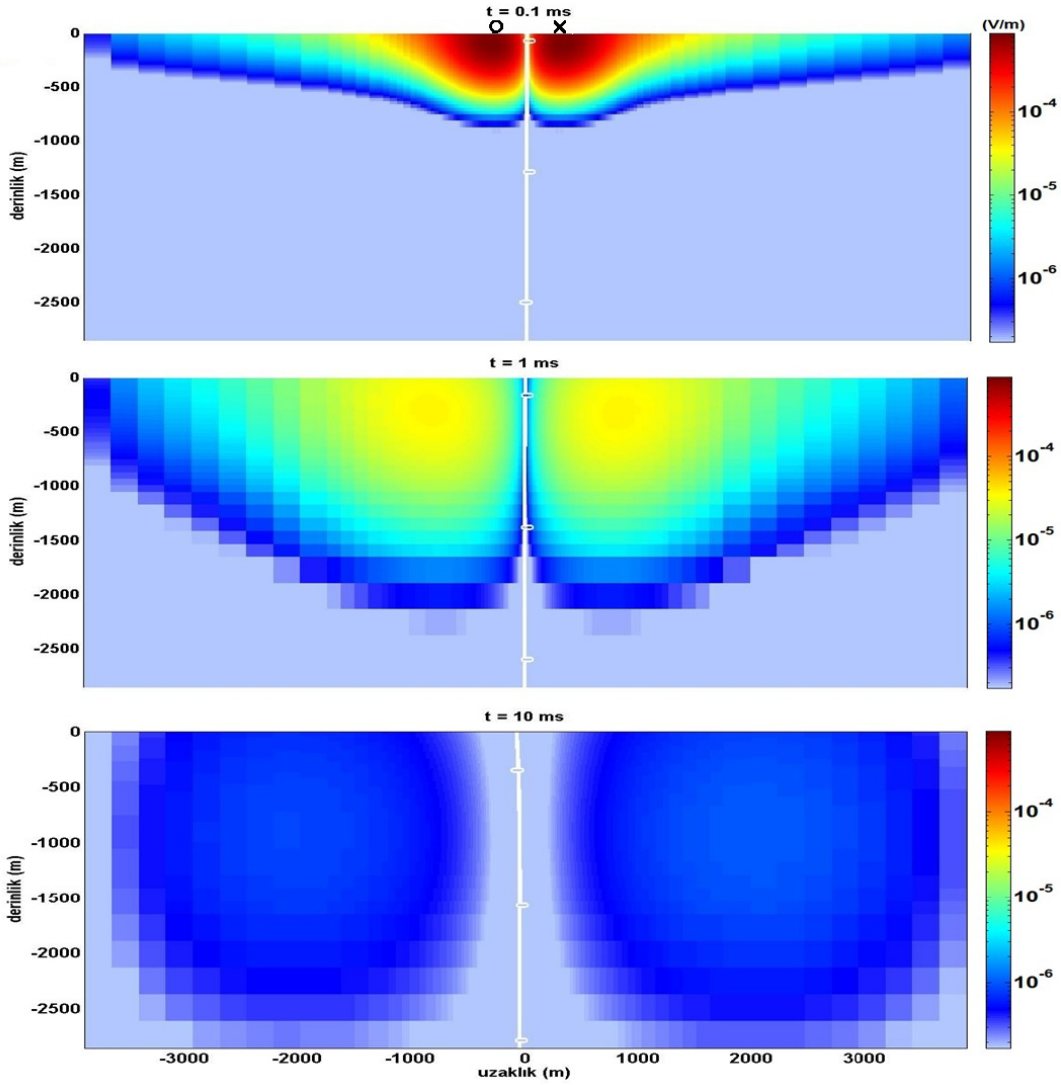
### Literatür Örneği: Dipol modeli

İki boyutlu elektromanyetik alanların modellenmesinde literatürde yeralan önemli modellerden biri düşey dipol modelidir. Oristaglio ve Hohmann (1984)'ın gerek ikincil ve toplam elektrik alanın iletken yapıya bağlı olarak nasıl oluştuğu hakkında fikir vermesi; gerekse elektrik alandan yararlanılarak sayısal türevler aracılığıyla hesaplanan ve manyetik alanlarla doğrudan



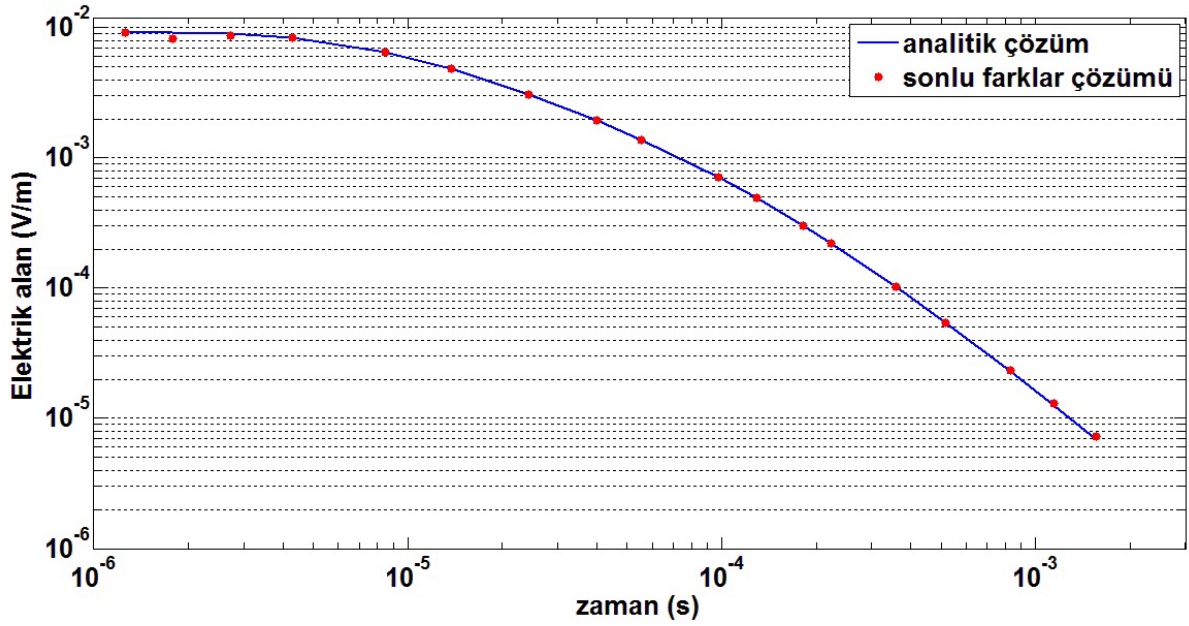
Şekil 3.  $300 \Omega\text{m}$  öz dirençli tekdüze ortam modeli; 'o' ile simgelenmiş negatif kaynak  $(-250, 0)$ 'de, 'x' ile verilen pozitif kaynak ise  $(250, 0)$  noktasındadır.

Figure 3. A  $300 \Omega\text{m}$  homogeneous half-space model; negative source is denoted by 'o' at  $(-250, 0)$ , positive source is denoted by 'x' at  $(250, 0)$ .



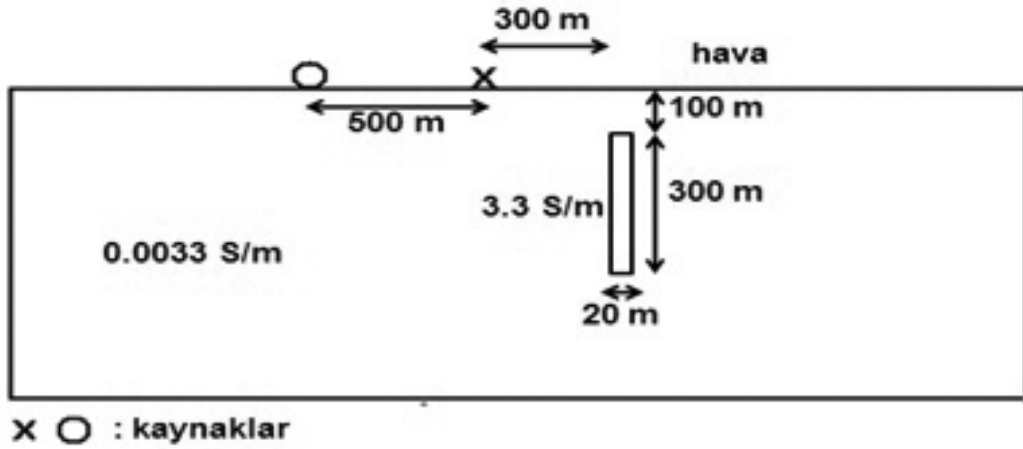
Şekil 4.  $300 \Omega\text{m}$  öz dirençli tekdüze ortamda, 0.1 ms, 1 ms ve 10 ms için elektrik alan kontur haritaları. Bu şekilde ve diğer şekillerde sıfır konturu beyaz düz çizgi ile gösterilmiştir.

Figure 4. Electric field cross-sections of a  $300 \Omega\text{m}$  homogeneous half-space at 0.1 ms, 1 ms and 10 ms. The white colored line shows the zero contour line in this figure and the following figures.



Şekil 5. 300  $\Omega$ m özdirençli tekdüze ortamda pozitif kaynaktan 100 m uzaklıktaki bir noktadaki elektrik alan için sonlu farklar çözümü ve analitik çözüm kıyaslaması.

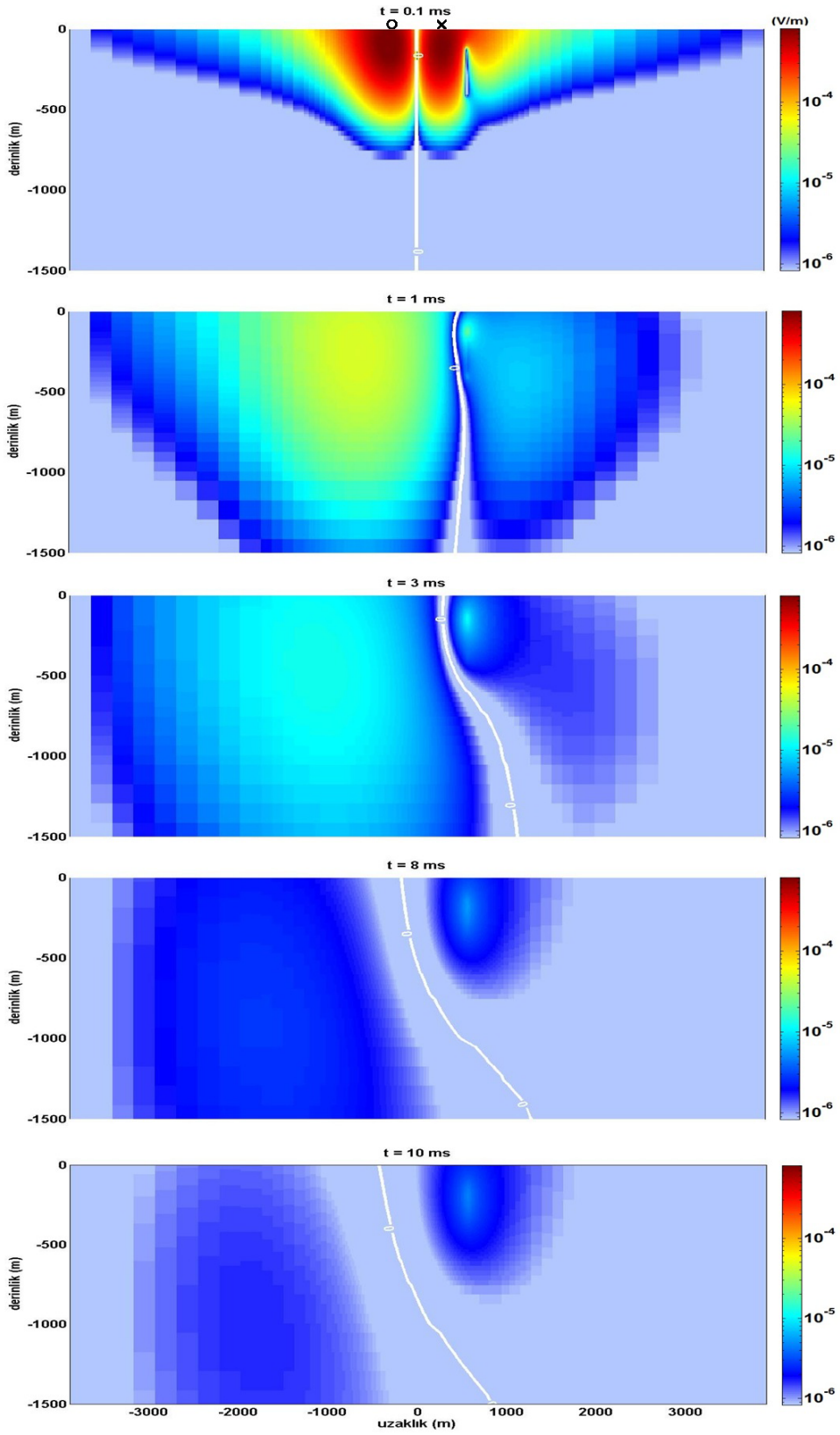
Figure 5. Comparison of analytical and finite difference solution for a 300  $\Omega$ m homogeneous half-space at a point which is located at 100 m far from positive source.



Şekil 6. Oristaglio ve Hohmann (1984)'ın dipol modeli.  
Figure 6. Dipol model (Oristaglio ve Hohmann, 1984).

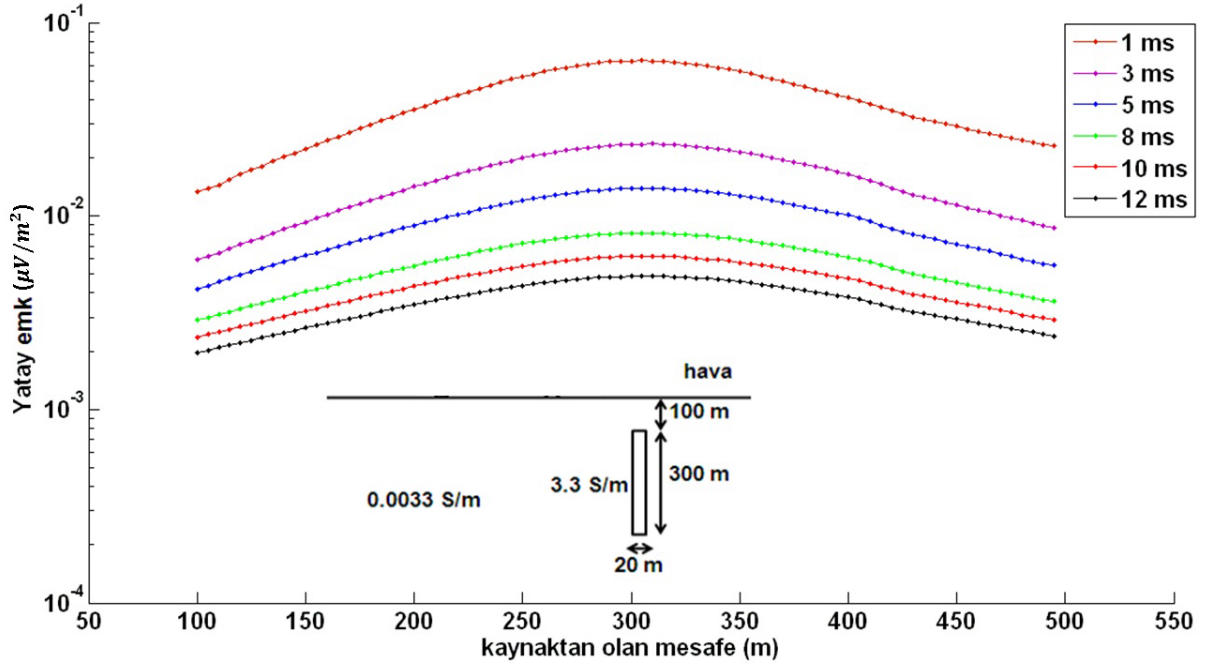
ilişkili olan düşey ve yatay emk anomalilerinin iletken yapılardan nasıl etkilendiği hakkında bilgi vermesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritma ile hesaplanan Oristaglio ve Hohmann (1984)'ın dipol modeli Şekil 6'da, elektrik alanların zamana bağlı difüzyonu Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 7'deki toplam elektrik alan kontur haritaları incelendiğinde, değişen elektrik alanın etkisiyle dipol içerisinde indüklenen emk ve buna bağlı olarak dipolün yeni bir kaynak gibi oluşturduğu kendi ikincil elektrik alanı farklı zaman adımlarında görülmektedir. Dipol modeli için yatay emk bileşeninin farklı zaman adımlarında çizdirilen

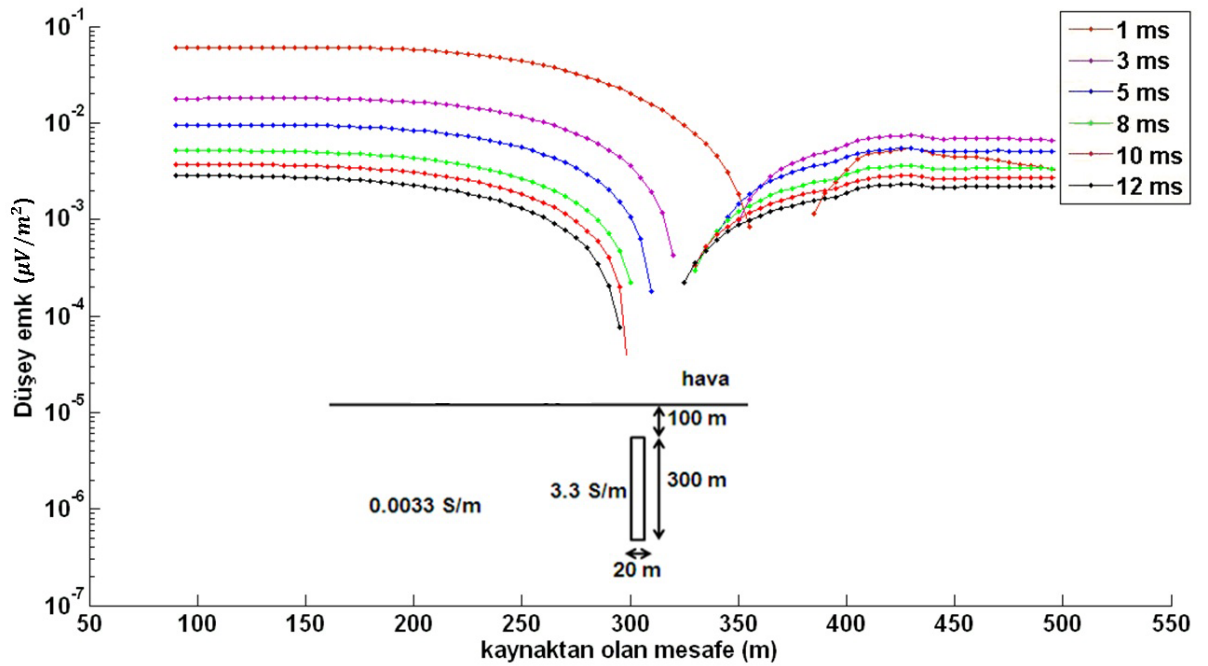


Şekil 7. Dipol modeli için toplam elektrik alanının (0.1 ms, 1 ms, 3 ms, 8 ms ve 10 ms) zamana bağlı difüzyonu.  
 Figure 7. Total electric field diffusion at 0.1 ms, 1 ms, 3 ms, 8 ms and 10 ms.

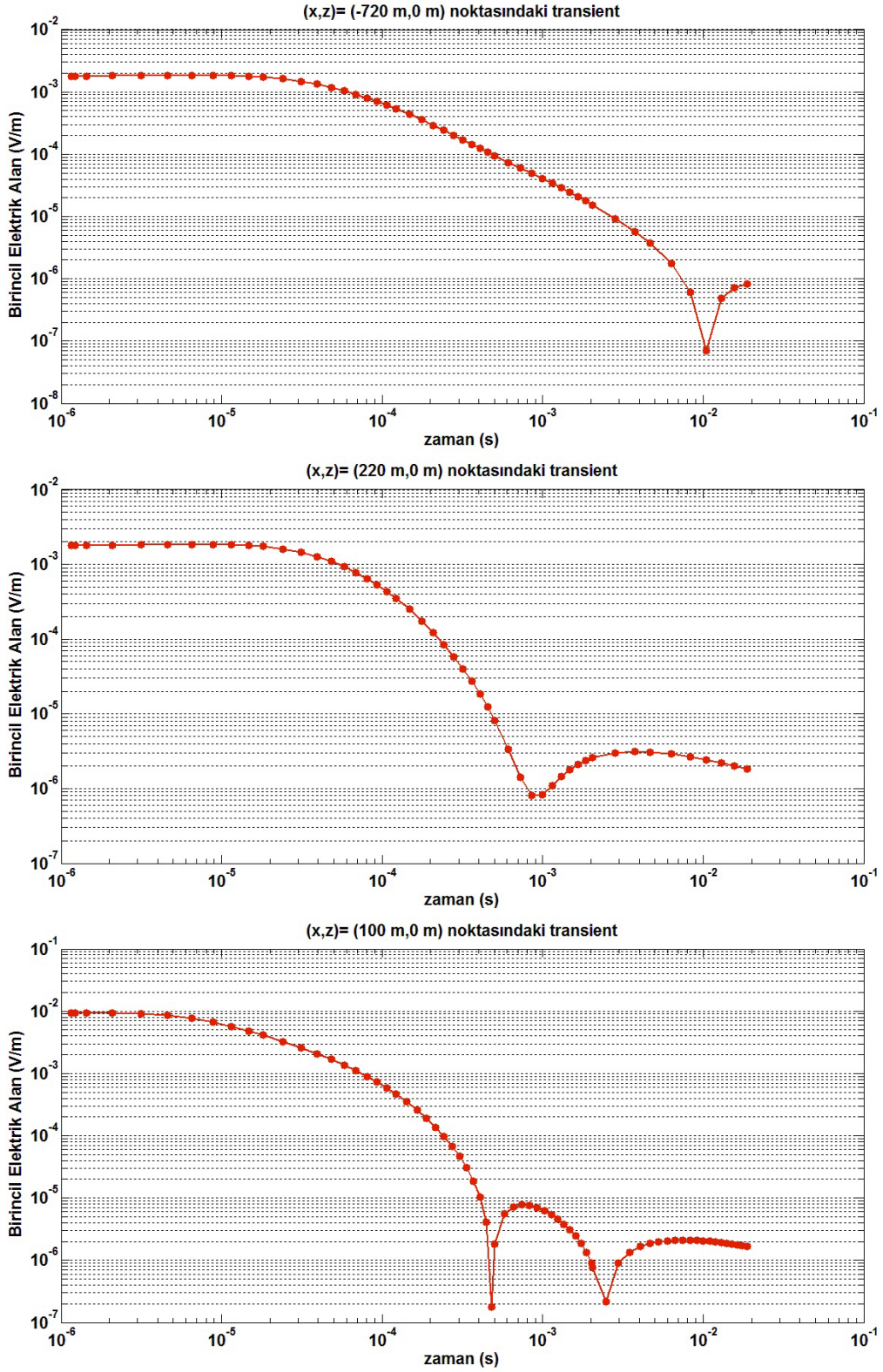




Şekil 8. Dipol modeli için (1 ms, 3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms ve 12 ms zaman adımlarında) yatay emk profilleri.  
Figure 8. Profiles of the horizontal emk for the dipole model (at 1 ms, 3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms and 12 ms).



Şekil 9. Dipol modeli için (1 ms, 3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms ve 12 ms zaman adımlarında) düşey emk profilleri.  
Figure 9. Profiles of the vertical emk for the dipole model (at 1 ms, 3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms and 12 ms).



Şekil 10. Dipol modeli için birincil elektrik alanının yüzeydeki  $[(-720 \text{ m}, 0 \text{ m}), (220 \text{ m}, 0 \text{ m})$  ve  $(100 \text{ m}, 0 \text{ m})$  noktalarındaki mesafe ve zamana bağlı sönüm eğrileri

Figure 10. Decay curves of Primary electric field respect to time and distance for the dipole model (points at  $(-720 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ,  $(220 \text{ m}, 0 \text{ m})$  ve  $(100 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ).

anomalilerinde (Şekil 8), iletken yapı üzerinde maksimum genliğe yükselme ve zamana bağlı olarak sönümlenme izlenmektedir. Aynı modelin düşey emk bileşeninin farklı zaman adımlarındaki anomalilerinde ise (Şekil 9) dipol üzerinde sıfır geçişleri görülmektedir. Düşey emk bileşeninin genliği difüzyon etkisiyle yatay emk bileşenine benzer olarak zamanla sönümlenmektedir. Bu grafikte, özellikle düşey bileşen anomalilerinin iletken yapının konumuna ait önemli bilgiler verdiği net olarak izlenmektedir.

Şekil 10'da toplam elektrik alanın yüzeydeki farklı noktadaki zamana bağlı sönüm eğrileri verilmiştir. Bu eğriler, dipolün kaynaktan olan uzaklığına bağlı olarak oluşan ikincil elektrik alandaki değişimleri açıkça göstermektedir. Kaynağa en yakın noktadaki (100 m, 0 m) sönüm eğrisinde, zaman içerisinde değişen birincil elektrik alana bağlı olarak, iletken dipolde indüklenen ikincil elektrik alanın eğride oluşturduğu dönel yapısı oldukça belirgin olarak görülmektedir. Kaynaktan uzak olan noktalarda birincil elektrik alan değeri daha düşük ve dipolün etkileri ise geç zamanlarda düşük genlikli olarak kendini göstermektedir.

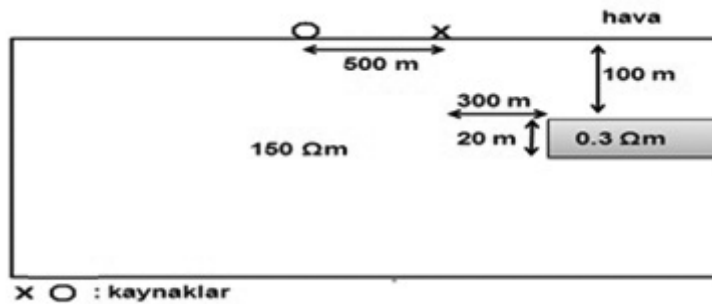
### Tuzlu Su Girişim Modeli

Literatür örneğinden sonra bu çalışmada, ülkemizde kıyı bölgelerinde karşılaşılan tuzlu su girişimi probleminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için olayı basit bir biçimde gösterebilecek çok iletken bir yatay dipol modeli seçilmiştir. Yeryüzünde farklı iki noktada, yatay ve düşey emk genlikleri için olası anomaliler elde

edilmiştir. Modelde tekdüze ortam  $150 \Omega\text{m}$  ve tuzlu su içeren birim  $0.3 \Omega\text{m}$  öz direnç ile temsil edilmiştir (Şekil 11). Tuzlu su girişiminin derinliği genel olarak ülkemizde karşılaşılan durumlar gözönünde bulundurularak 100 m olarak seçilmiştir. Şekil 12'deki toplam elektrik alan kontur haritaları incelendiğinde, yatay yönde ortama giriş yapan tuzlu suyun etkisi çok net bir biçimde izlenmektedir.

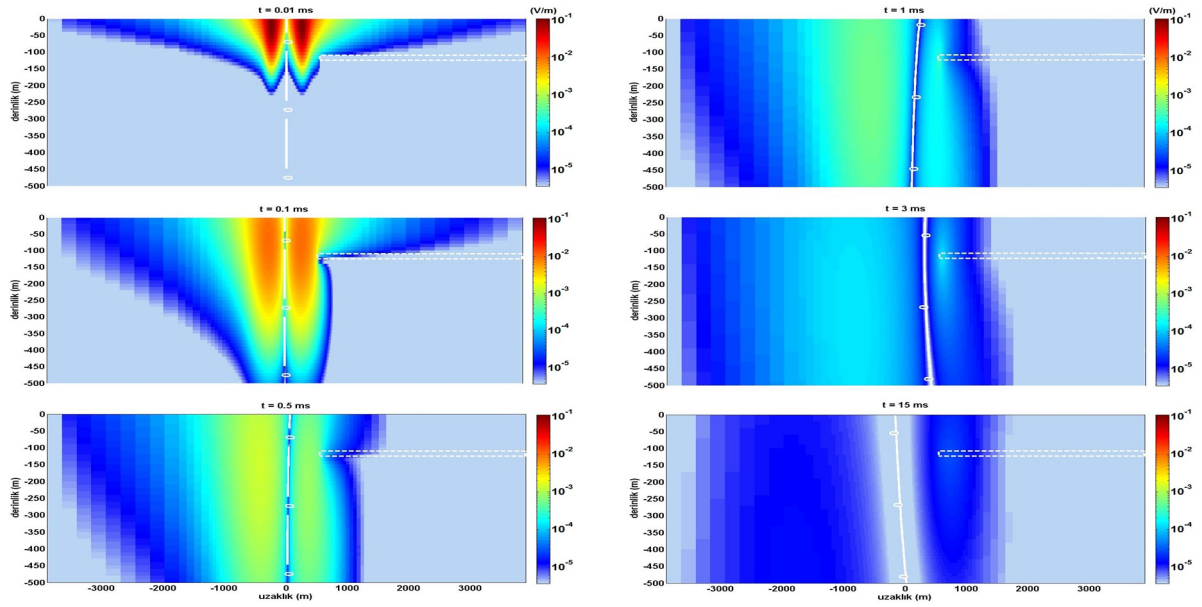
Tuzlu su girişim modeli için çizdirilen yatay emk bileşeninin farklı zaman adımlarındaki davranışları Şekil 13'de verilmiştir. Düşey dipol modelinde olduğu gibi, iletken yapı üzerinde maksimum genliğine ulaşacak şekilde karşımıza çıkmaktadır. Zaman içerisinde anomalinin genliğinin azaldığı açıkça görülmektedir. Bu model için, düşey emk bileşeninin farklı zaman adımlarındaki davranışı incelendiğinde, yatay emk'lardan farklı olarak düşey bileşenlerde tuzlu su girişimini temsil eden yatay dipolün başladığı yerden itibaren eğrilerde büyük bir değişim gözlenmektedir. Yatay dipol için öncelikle emk bileşenleri kaynağa yakın bölgelerde oluşmakta, daha sonra da yatay yönde ilerlemektedir. Buna bağlı olarak, düşey emk bileşeninin sıfır geçişi tam da iletken yapının kaynağa en yakın köşesinin yeryüzündeki izdüşüm noktasında görülmektedir. Zaman içerisinde, düşey emk bileşenine ait sıfır geçişleri yanal yönde hareket etmektedir.

Tuzlu su girişim modeli için hesaplanan difüzyon zamana bağlı kesitler ile yeryüzünde oluşturacağı düşey ve yatay emk davranışları gözönüne alındığında, TEM yönteminin çok iletken tuzlu



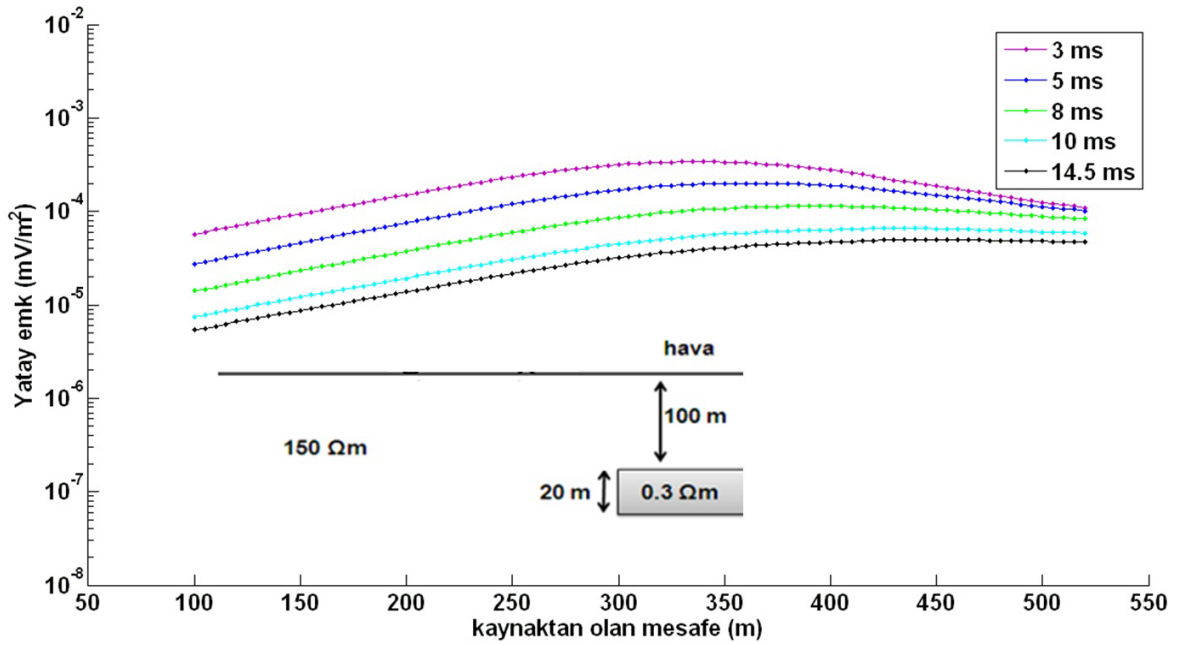
Şekil 11. Tuzlu su girişim modelinin şematik gösterimi.  $150 \Omega\text{m}$  öz dirençli tekdüze bir ortamda  $0.3 \Omega\text{m}$  öz dirençli tuzlu su içeren iletken birim 20 m kalınlığında, 100 m derinde ve kaynaktan 300 m uzaktadır.

Figure 11. Schematic view of the salt-water intrusion model. The  $0.3 \Omega\text{m}$  conductor with saltwater in a  $150 \Omega\text{m}$  host rock is at 100 m depth with 20 m thickness and 300 m away from the source.



Şekil 12. Tuzlu su girişim modelleri için hesaplanan toplam elektrik alanın (0.01 ms, 0.1 ms, 0.5 ms, 1 ms, 3 ms ve 15 ms) zamana bağlı difüzyon süreci

Figure 12. Total electric diffusion at 0.01 ms, 0.1 ms, 0.5 ms, 1 ms, 3 ms and 15 ms) for salt intrusion model.



Şekil 13. Tuzlu su girişim modeli için (3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms ve 14.5 ms zaman adımlarında) hesaplanan yatay emk profilleri.

Figure 13. Profiles of the horizontal emk for the salt-water intrusion (3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms ve 14.5 ms).

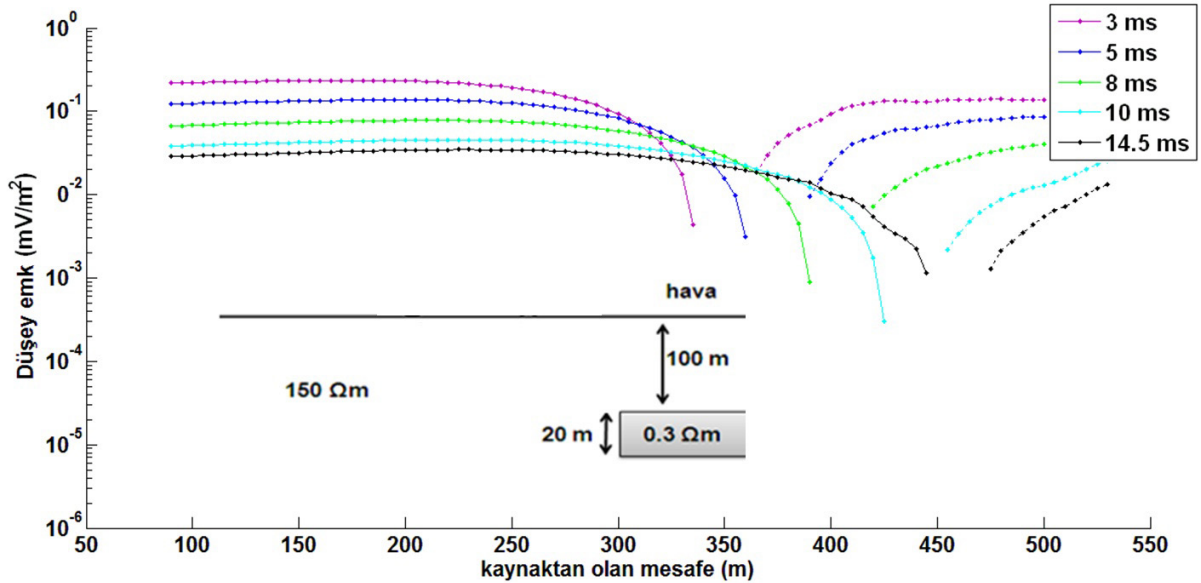
su girişim problemine oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, TEM yönteminin tuzlu su içeren birim sınırlarının belirlenmesi ve bu tür sorunların çözümünde gerçekçi bilgiler vereceği ortadadır. Ayrıca, zamana bağlı olarak tuzlu suyun gözenekli birimler içerisine ilerleme oranı (monitoring) belirli zaman aralıklarıyla ölçülen TEM verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilebileceği görülmektedir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Jeolojik ve hidrojeolojik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan geçici elektromanyetik yöntemle ilgili yeraltında oluşan elektromanyetik alanların yayılım süreçlerinin modellenmesi fiziksel sürecin anlaşılabilirliği açısından oldukça önemlidir. Farklı zaman dilimlerinde yeraltındaki elektromanyetik difüzyonun kesitler halinde sunumu kadar, yer yüzeyinde ölçülebilecek olası anomalilerin hesaplanarak görüntülenmesi de yeraltında iletken cisimlerin etkilerini açık olarak ortaya koymakta ve çok boyutlu ortamların yorumlanabilmesi yolunda olanaklar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, zaman ortamı elektromanyetik alanların difüzyon süreci iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bunun için, Maxwell denklemleri Du Fort-Frankel sonlu farklar yaklaşımı ile çözülmüştür. Oristaglio ve Hohmann (1984)'dan yola çıkılarak geliştirilen iki boyutlu modelleme algoritmasının doğruluğunun sınanması amacıyla, tekdüze ortam sonuçları analitik çözümlerle karşılaştırılmış, duyarlılığına güvenilebilir sonuçlar bulunmuştur. Modelleme çalışmalarında, birincil ve ikincil elektrik alan değerlerinin yanısıra; elektrik alan değerlerinin sayısal türevlerinden yatay ve düşey elektromotor kuvvet (emk) profil eğrileri hesaplanmıştır. Sayısal türevlerden hesaplanan yatay ve düşey emk profil eğrileri, uygulamada özellikle çok kanallı ölçümlerde elde edilen sonuçlarla doğrudan karşılaştırma olanağı sağlaması açısından önem kazanmaktadır.

Literatür örnekleri dışında, ülkemizin önemli çevre sorunlarından biri olan kıyılarda tuzlu su girişiminin simülasyonu amacıyla yatay dipol modeli oluşturulmuş, elde edilen kontur haritalarında, geçici elektromanyetik alanların difüzyonu açık olarak izlenebilmiş ve geçici elektromanyetik yöntemin (TEM) kıyılardaki tuzlu su



Şekil 14. Tuzlu su girişim modeli için (3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms ve 14.5 ms zaman adımlarında) hesaplanan düşey emk profilleri.

Figure 14. Profiles of the vertical emk for the salt-water intrusion (3 ms, 5 ms, 8 ms, 10 ms and 14.5 ms).

girişimi problemini çözme potansiyeli bir kez daha vurgulanmıştır.

### **KATKI BELİRLEME**

Yazarlar makaledeki öneri ve düzeltmelerinden dolayı, M. Emin Candansayar'a teşekkür ederler.

### **KAYNAKLAR**

- Adhidjaja, J.I. ve Hohmann, G.W, 1985. Two-dimensional transient electromagnetic responses. *Geophysics*, 50, 2849-2861.
- Adhidjaja, J.I. ve Hohmann, G.W, 1988. Step responses for two-dimensional electromagnetic models. *Geoexploration*, 25, 13-35.
- Oristaglio, M. L ve Hohmann, G. W., 1984. Diffusion of electromagnetic fields into a two-dimensional earth: A finite-difference approach. *Geophysics*, 49, 870-894.
- Wait, J.R., 1971. Transient Excitation of the Earth by a Line Source of Current. *Proc. IEEE Lett.*, 59, 1287-1288.