

### 3.4. Geçici Elektromanyetik Yöntem<sup>12</sup>

#### 1. Yöntem

Zaman Ortamı Elektromanyetik Yöntem (Time-Domain Electromagnetic Method) ya da Geçici Elektromanyetik Yöntem (Transient Electromagnetic Method -TEM) verici kontrolü ile sağlanabilen yüksek çözünürlüğü ile gerek ekonomik amaçlı doğal kaynakların aranmasında, gerekse yer kabuğunun hem derin hem de sığ kesimlerinin incelenmesinde kullanılan jeofizik yöntemidir. Uygulamalardaki kullanım üstünlükleri ve yapı-yöntem ilişkisi anlamında değişik ölçü dizgeleri istenilen sonuçlara ulaşma olasılığını artırması nedeniyle tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. TEM yöntemi, yerin iletkenlik değişimlerinin incelenmesi amacıyla yapay bir kaynaktan verilen elektrik akımının belirli süre kesilmesiyle oluşan uyartım (induction) akımlarının zamana bağlı yayılımını esasına dayalı olarak çalışır. Uyartım akımları sonucu oluşan elektromanyetik alanların ölçümü ve değerlendirilmesi ile ilgilenilen cevherleşme bölgelerine veya jeolojik yapılara ait bilgilere ulaşılabilir. Bu konuda ayrıntılı bilgiler veren çok sayıda kitap (Kaufmann and Keller, 1983; Ward and Hohmann, 1988; Strack, 1992) yayınlanmıştır. TEM yönteminin çok değişik alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır: Metalik cevherleşme bölgelerinin aranması (Buselli, 1977; Elliott and Staltari, 1985; Ogilvy, 1983; William and Fraser, 1992), yeraltısuyu araştırmaları (Fitterman ve Stewart, 1986; Fitterman ve diğ., 1988; McNeil, 1990; Hoekstra ve Blohm, 1990; Meju et al., 1999), jeotermal alan araştırmaları (Anderson, 1983), jeolojik haritalama amaçlı uygulamalar (Buselli, 1980; Frischknecht and Raab, 1984; Spies, 1976), kömür aramaları (Henderson and Dodds, 1981) ve çevre jeofiziği uygulamaları (Hoekstra and Blohm, 1990; Hoekstra and Blohm, 1991). TEM yöntemi yeryüzeyinde uygulandığı gibi aynı biçimde havada da başarılı bir biçimde uygulanmaktadır (Airborne TEM) (Palacky ve West, 1991, Wolfgram and Karlık, 1995).

Yöntemin uygulanması için amaca bağlı olarak kullanılabilen farklı alıcı-verici düzenekleri vardır. İki ucu topraklanmış bir elektrik kutup ya da bir halkadan (loop)

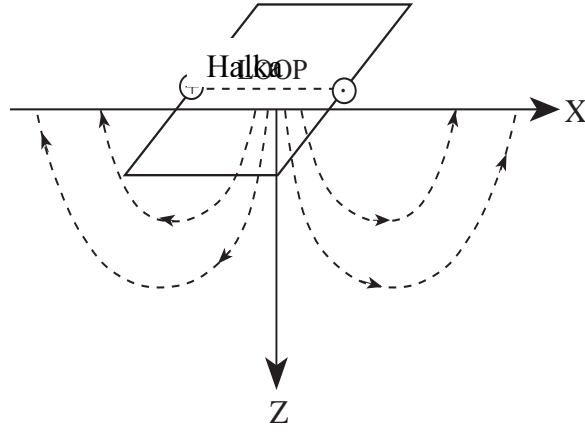
<sup>1</sup> Not: Bu yazının genişletilmiş ve ayrıntılı bir örneğine "Adobe PDF" formatında [www.jeofizik.org.tr](http://www.jeofizik.org.tr) adresinden ulaşılabilir. Hazırlayanlar: Gülçin Özürkan<sup>1</sup> ve Emin Uluggerli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, E-mail: ozurlan@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, E-mail: ugerli@science.ankara.edu.tr

<sup>2</sup> Bu ders notuna <http://jeofizik.ankara.edu.tr/download.html> sayfasından ulaşılabilir

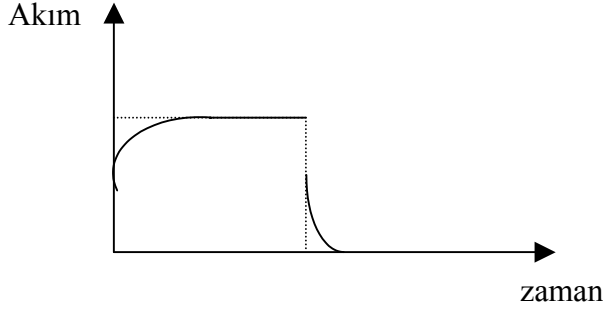
verilen değişken (alternatif) akım sonucu oluşan zamana bağlı manyetik alan ortamda bir iletken olması durumunda birincil manyetik alana dik yönde uyartım ya da Eddy akımlarının akmasına neden olur. Bu akımlar sönümlenirken kendilerini yaratan alana ters yönde ikincil manyetik alanları oluştururlar. Doğal olarak zamana bağlı uyartım akımları gibi, ikincil alanda zaman içinde sönümlenir. Sözü edilen bu sönümlenme uyartım akımlarının içinde olduğu iletken yapının öziletkenliği (veya özdirenci), boyutları, derinliği gibi değiştirgenlere bağlı olarak hızlı veya yavaş olarak gelişir. Şekil 1’de bir halka vericiden geçen değişken bir akımın oluşturacağı manyetik alan çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 1 Dikdörtgen bir halka vericiden geçen değişken elektrik akımın oluşturduğu manyetik alan çizgileri (yeryüzeyindeki alan çizgileri gösterilmemiştir).

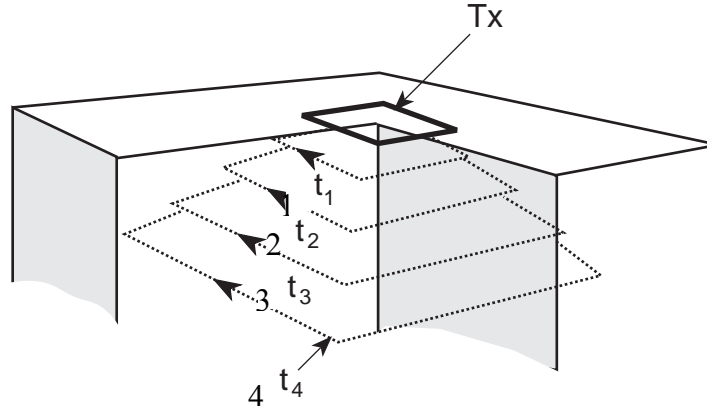
Yöntemin uygulanması aşamasında değişken akım için çeşitli kaynak türleri kullanılabilir. Kaynak seçiminde göz önüne alınması gereken noktalardan biri, verici olarak kullanılan halkada oluşturulan alan ile yer içinde oluşan ikincil alan arasında çok büyük bir genlik farkının olmasıdır. Eğer her iki alan birlikte ölçülmek istenirse çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir ve imlerin (signal) ayrımı sorun yaratabilir. Bu nedenle, vericideki akım kapatıldıktan sonra yapılan ölçümlerde, vericiden kaynaklanan birincil alanlar olmaksızın ölçüler alınması nedeniyle frekans ortamı ölçülerinden daha hızlıdır. Böylece birincil alandan dolayı oluşan sorunlardan bağımsız çalışır. Örneğin frekans ortamında her bir frekans ayrı bir derinliğe karşılık gelir. Yani her frekans için ayrı ölçme yapılması gerekir. Zaman ortamında yapılan ölçümler ise belirli bir aralıktaki frekansları kapsamakta ve dolayısıyla ölçmelerin

yapıldığı zaman aralığında tüm frekanslarda değişik ve istenen derinlikler gözönüne alınarak veri toplanabilmektedir.



Şekil 2 Akımın uygulanması anında ve kesilmesinden sonra gösterdiği değişim.

Uygulamalardan bilinen bir diğer gerçek ise; bir halkadan geçirilen elektrik akımı hemen en yüksek değerine ulaşamaz. Ters bir durumda da aniden kesilmeye çalışılırsa akım değeri hemen sıfır değerine düşmez (Şekil 2).

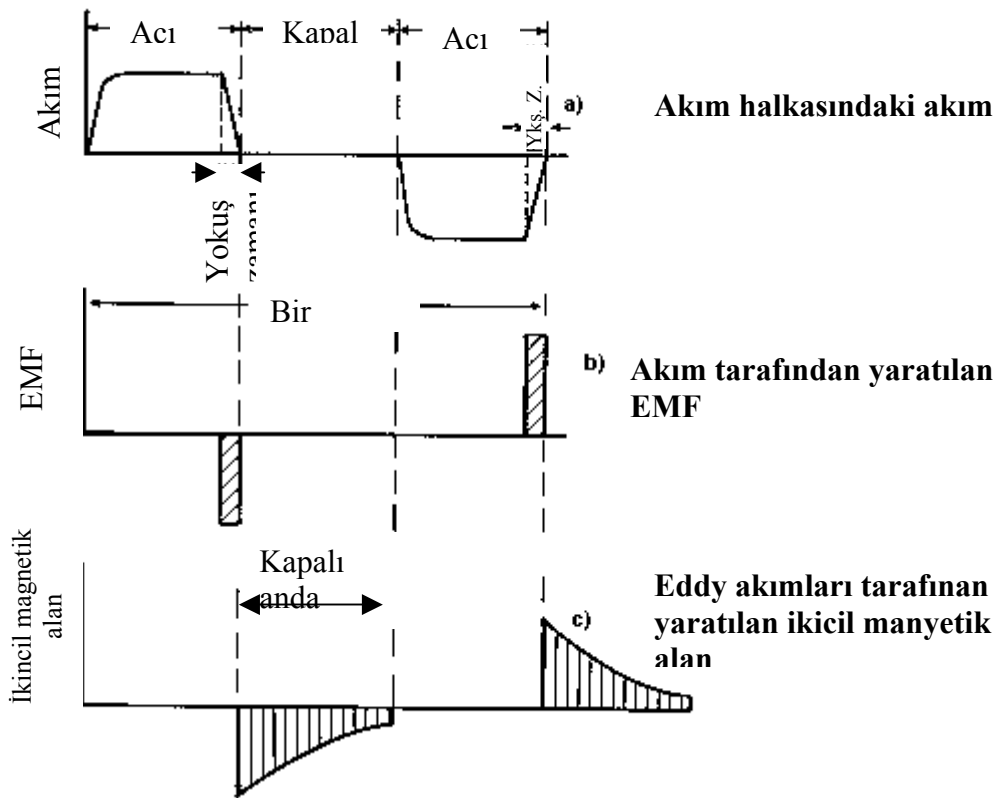


Şekil Akımın kesilmesinden sonra çeşitli zamanlardaki akım çizgileri ile aşağı ve yanlara doğru yayınımları (diffusion) (McNeill, 1990).

Yeryüzeyinde bir halkadan (verici, transmitter) verilen (geçen) akımın kesilme anını gözönüne alalım. Akımdaki bu ani ve hızlı değişim yeryüzeyinde bir manyetik alan yaratır. Manyetik alan çizgileri iletken ortamlardan (metalik maden yatakları, gömülü borular, tuzlu çözeltiler ve benzeri) geçerse, iletken içinde ikincil elektrik akımları yani Eddy akımlarını oluştururlar. Akımın kesilme anından sonraki herhangi bir zaman için yeriçinde oluşan uyartım akımları basit akım çizgileri ile gösterilebilir. Akım çizgileri verici halkanın şekli ile aşağı ve yanlara doğru yayınırlar (Şekil 3).

Akımın yayılımını (diffusion) ile sigara dumanının halkaları arasında benzerlik kurulursa, yerinde meydana gelen karmaşık olay basitçe gösterilebilir (bkz. “smoke rings”, Nabighian, 1979).

Uyartım akımları, içinde oluştukları ve yayındıkları ortamın fiziksel özelliklerine (biçim, boyut, iletkenlik, vs.) bağlı olarak zaman içinde sönümlenirler. Örnek olarak tabakalı bir ortam gözönüne alındığında, uyartım akımların yayılımını iletken tabakalar içinde daha yavaştır. Sönümlenen bu akımlarının yarattığı ikincil bir manyetik alanın etkisi uygun bir alıcı bobin veya halka ile ölçülebilir. Alıcı halkada oluşan gerilim değeri, sönümlenen akımlardan dolayı oluşan ikincil manyetik alanın alıcı halka eksenine paralel bileşeninin zamana göre değişimi ile orantılıdır. Geçici alan değerleri çeşitli pencerelerde (windows) örneklenerek kayıt edilir. Genelde kullanılan ölçüm süresi akımın kesildiği andan sonra 0.001 ile 300 milisaniye arasında değişir (Şekil 4).



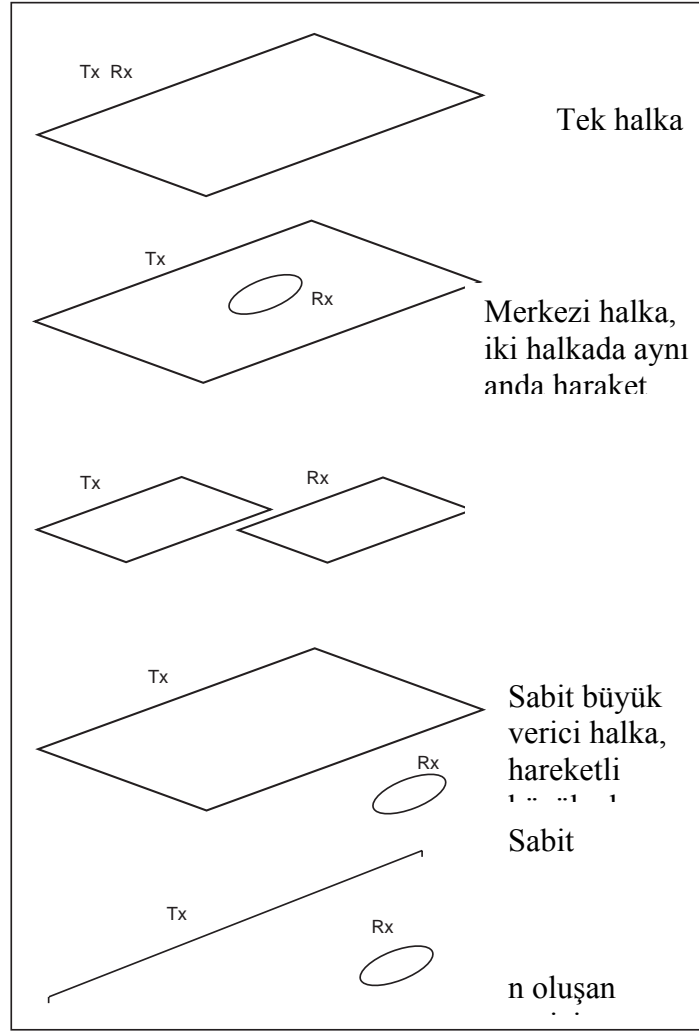
Şekil 4 TEM yöntemi kaynak sinyalleri ve alıcıda kaydedilen im (signal) (Hoekstra and Blohm, 1990).

## 2. Ölçüm Teknikleri

Uygulamada yaygın olarak kullanılan aygıtlara örnek olarak GeoInstrument tarafından üretilen SIROTEM ve ARTEMIS ile Geonics tarafından üretilen PROTEM düzenekleri verilebilir. Bu üreticilerin yanında TEM aleti üreten diğer kuruluşlarda verici olarak genelde ya PROTEM gibi farklı üreticilerin vericilerini kullanmakta yada ölçüm aralıkları geç zamnları kapsadığından yüzeye yakın bilgileri tam olarak sunamamaktadırlar. Ölçüm aygıtlarında karşılaştırma ölçütlerine örnekler aşağıda verilmiştir.

- a) vericide akımın kesilmesi ile halkadaki akımın sıfır değerine ulaşması arasında geçen zaman (turn off time),
- b) vericiden halkaya uygulanabilecek akım miktarı,
- c) alıcıda ölçüme başlayabildikleri en erken zaman aralığı,
- d) kayıt aralığı,
- e) pencere sayısı,
- f) arazide veri denetimi yapılabilmesi,
- g) farklı alıcı - verici düzeneklerini destekleme özellikleri,

SIROTEM, farklı alıcı - verici dizilimlerini destekleme, kullanım kolaylığı ve geniş zaman aralığında 53 pencereye kadar kayıt yapabilme özellikleri ile öne çıkarken kısıtlı akım uygulayabilmesi ( $<10A$ ) zayıf noktasını oluşturmaktadır. Sığ çalışmalar için geliştirilen ve çoklu alıcı düzeneklerini destekleyen ARTEMIS çevre çalışmalarında başarı ile kullanılmaktadır. Geonics farklı amaç ve dizilimler için farklı vericiler üretmektedir. PROTEM 47/P ve 47/S sığ çalışmalarda (2-150) tercih edilmektedir. PROTEM 57 elektrik üretici yardımı ile 600w çıkış gücü sağlayabilmekte ve orta derinliklerin (10 - 400m) hedeflendiği çalışmalarda tercih edilmektedir. PROTEM 37 elektrik üreteçi yardımı ile 30A akımı verici halkaya uygulamakta ve derin ( $<1000m$ ) çalışmalarda tercih edilmektedir. Alıcı olarak  $49\mu s$  ile 2.9 ms arasında 20 pencere ölçebilen aletler kullanılmaktadır. Her türlü dizilimi desteklememesi zayıf noktasını oluşturmaktadır. Uygulamada elde edilen TEM tepki (response) değerleri, verici (Tx) ve alıcı (Rx) arasındaki karşılıklı empedans (mutual impedance) değerleridir. Alıcı veya verici olarak kullanılan ve kapladıkları yüzey alanları aynı olan kare ve daire şekilli halkaların tepkileri de aynı olacaktır. Araştırmanın amacına göre çeşitli alıcı-verici dizilimleri kullanılabilir (Şekil 5).



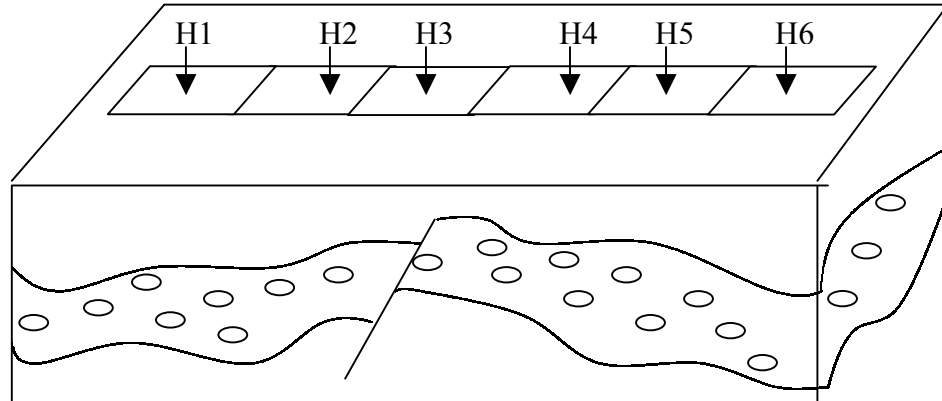
Şekil 5. TEM yöntemi için kullanılan farklı alıcı – verici dizilimleri (Swift, 1990).

Uygulamada en yaygın kullanılan alıcı-verici dizilimleri :

- **Tek halka (single loop);** verici halka akımının kesilmesinden sonra alıcı olarak kullanılır.
- **Çift halka (coincident loop);** tek halkaya benzer fakat alıcı ve verici için ayrı halkalar kullanılmıştır.
- **Merkezi halka (central loop);** verici halkanın merkezine yerleştirilen çok döngülü sargı (coil) alıcı görevi görür.
- **Ayrık halkalar (seperate loop);** iki ayrı halka alıcı ve verici olarak kullanılır.
- **Sabit büyük halka;** Büyük bir halka sabit tutulup küçük bir halka alıcı olarak kullanılır.

- **Yere bağılı verici** Akımın iki ucu topraklanmış bir elektrik dipol ile yani elektrotlar aracılığı ile yere uygulanması (grounded transmitter). Bu dizilimde alıcı olarak bir halka kullanılır. Bu dizilimde alıcı-verici aralığı geniş tutulur. Genel olarak derin amaçlı olarak kullanıldığı için LOTEM (Long-Offset TEM) özel ismi ile anılmaktadır.

TEM yöntemi son yıllarda Manyetotellürik (MT) yöntemine yardımcı olarak da uygulanmaktadır (Andrieux and Wightman, 1984; Sternberg et al 1988.; Pellerin and Hohmann 1990; Meju et al., 1999). MT yöntemi ile birlikte yapılan çalışmalarda amaç, MT ölçümü yapılan nokta etrafında bulunabilecek küçük ölçekli yapıların, MT görünür öz direnç değerlerinde yaratacağı durağan kaymanın (“static shift”) ortadan kaldırılmasıdır. Burada her dizgenin duyarlı olduğu yer-elektrik yapı ve gürültü türü farklı olduğundan merkezi halka ile birlikte tek halka veya çift halka ölçüm tekniklerinden birinin de kullanılmasında yarar vardır.



Şekil 6 TEM ölçümleri ölçüm doğrultusu

Verici halka olarak bir kenarının uzunluğu, MT yönteminde kullanılan elektrik alan (E) ölçen elektrotların aralığı olan kare şeklinde düzenek kullanılır. Arazi koşullarının uygun olmadığı durumlarda daha küçük ölçekli halkalarda kullanılabilir. Jeolojik yapıların veya istiflerin hedeflendiği çalışmalarda bir kenarları ortak olacak şekilde ardarda gelen halkalardan yararlanır. Bu durumda da Yapılan çalışmanın güvenilirliğini arttırmak için her noktada merkezi halka ile birlikte tek halka veya çift halka yöntemlerinden birinin de yapılmasında yarar vardır. Kullanılan halkaların boyutları hedeflenen araştırma derinliğine göre seçilmektedir.

Kuramsal olarak araştırma derinliği, halka alanından çok yaratılan alan şiddeti ile orantılı olmasına rağmen aletsel kısıtlamalar nedeni ile derin çalışmalar için büyük alanlı, sığ çalışmalar içinde küçük alanlı halkalar kullanılmaktadır. Yaklaşım yapmak amacıyla istenen araştırma derinliği, yeraltına ilişkin özdirenç değeri ve verici halka arasındaki ilişki Tablo-1’de verilmiştir. Basit bir genelleme yapılırsa, elektriksel gürültünün olmadığı ve yeterli sayıda veri toplanabildiği (örnek olarak SIROTEM ile 53 pencere boyunda veri) durumlarda, araştırma derinliği halka kenarının  $\frac{1}{4}$  ü ile 4 katı arasında olacaktır. Unutulmaması gereken, araştırma derinliğinin, ortamdaki birimlerin özdirençleri, kullanılan kablonun özdirenci, kullanılan güç kaynağı ve alıcının duyarlılığıyla, etraftaki elektromanyetik gürültü kaynakları ve jeolojik yapıların durumuyla ilişkili olmasıdır. Araştırma tasarımı ve uygulaması esnasında bu konular dikkatle gözönünde bulundurulmalıdır.

<b>Halka Boyu (m)</b>	<b>Üst katman özdirenci (Ohm-m)</b>		
	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>400</b>
10	50 m	70 m	95 m
40	90 m	120 m	160 m
80	120 m	160 m	220 m

Tablo-1: PROTEM cihazı için GEONICS firmasının öngördüğü en yüksek araştırma derinlikleri ile ortamın özdirenci ve halka büyüklükleri

## **2.1. ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜKLER**

Daha önce belirtildiği gibi, TEM yönteminde yerinde oluşan ikincil manyetik alanların zamana bağlı türevi, zamanın fonksiyonu olarak ölçülür. Alıcı halkada Eddy akımlarından dolayı oluşan gerilim farkı ile manyetik alanın zamana göre türevi arasındaki ilişki ve karşılıklı empedansın eldesi aşağıda verilmiştir. TEM ölçümlerinde kullanılan alıcı ve verici halkalarının alanları, ölçüm anında sabit tutulmaktadır. Kullanılan imlerin (daha sonra açıklanacaktır) frekansları göz önüne alındığında dalga boyları her zaman için kullanılan halkaların çaplarından büyük olması gerekmektedir.

Manyetik alanın zamana göre türevi ve alıcı halkada ölçülen  $\Delta V$  arasında bir bağıntı

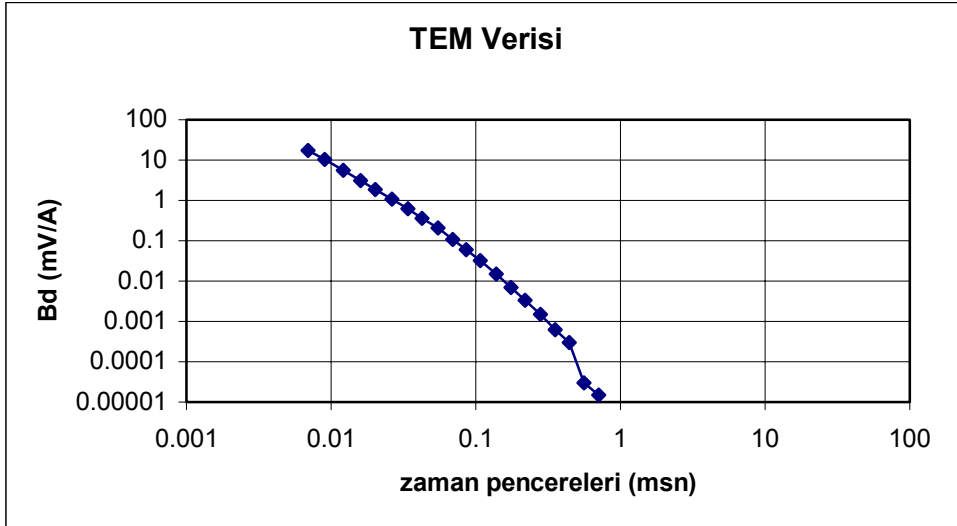


$$B_d = \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\text{mikroVolt}}{m^2} = \frac{\Delta V}{A_R} \quad (1.1)$$

olarak yazılabilir, burada,  $A_R$ ;  $R_x$  in kapladığı alandır. Karşılıklı empedans ise,

$$Z = \frac{E}{H} = \frac{\Delta V}{I} = \frac{B_d A_R}{I} = \frac{\text{mikroVolt}}{\text{Amper}} \quad (1.2)$$

olarak verilir. Veri işlem aşamasında çeşitli zaman aralıklarında ölçülen geçici alan değerleri görünür öz direnç değerlerine çevrilir ve çeşitli yorum teknikleri ile yeraltına ait bilgiler (katman kalınlıkları, öz dirençler, vs.) elde edilmeye çalışılır. Ölçülen  $B_d$  değerleri azalan eğri (decay curve) niteliğindedir (Şekil 7).

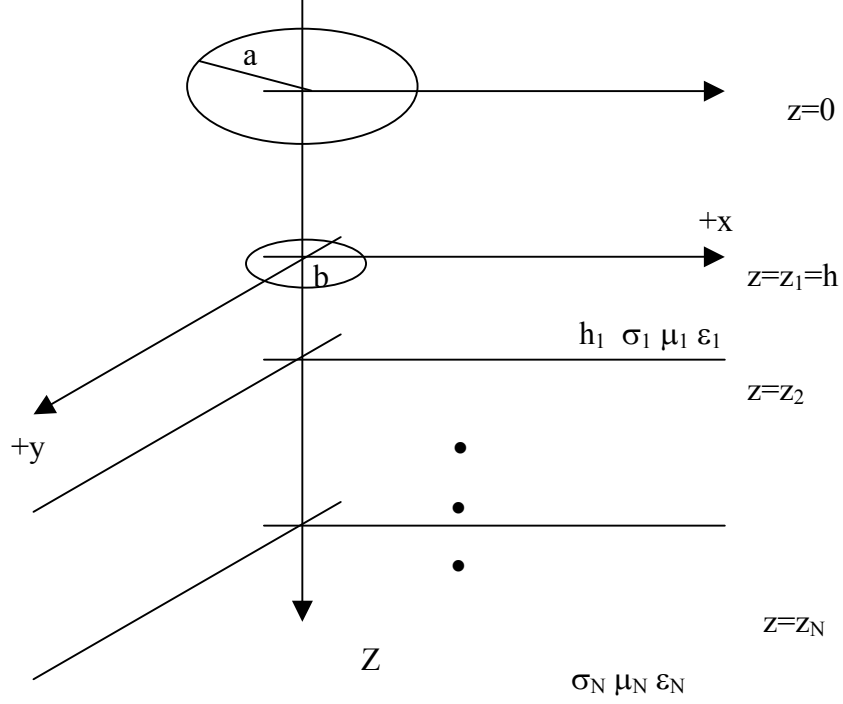


Şekil 7 TEM yönteminde ölçülen gerilim sönüm eğrisi örneği

Eğer eğri şekli herhangi bir şekilde değişiyorsa; örneğin, artma veya salınım yapıyorsa yorumlamada eğrinin sadece azalan kısımları göz önüne alınmalıdır. Yöntemde yüksek frekanslara karşılık gelen zaman pencereleri (0.001 ile 300 msn arasında) kullanılmasına rağmen bazı durumlarda IP etkisi gözlenmektedir. Bu etki kendisini önce artan sonra azalan eğri biçimi ile veya eksi değerli  $B_d$  değerleri ile göstermektedir.

### 3. Geçici elektromanyetik kuram

Yorum aşamasında gerekli olan sayısal çözüm için basit bir tabakalı ortam ele alalım (Şekil 8). Ortamda yanal süreksizliklerin ve başka bir kaynağın olmadığı varsayılmaktadır. Koordinat sisteminin merkezinde ( $z=0$ ), yüzeyden  $h$  yüksekliğine yarıçapı  $a$  olan bir halka yerleştirelim (Şekil 8).



Şekil 8 Basit tabakalı ortam (Morison ve diğ.. 1969).

Kaynak olarak koordinat sisteminin merkezine konulacak kutuplar, kaynak bağıntısı olarakda silindirik koordinatlarda birim impuls (dirac, delta) fonksiyonu alalım.

Merkezdeki bir akım elemanı,  $I(w)$  a  $d\theta$  nın merkezden  $a$  uzaklığında halka üzerinde yaratacağı akım yoğunluğu

$$dJ_{\theta} = \frac{I(w) \cdot a \cdot d\theta \cdot \delta(z) \cdot \delta(\theta - \theta_0)}{r} \cdot \bar{\theta} \quad (1.7)$$

bağıntısı ile verilir (Morrison et. al. 1969). Bağıntıda  $\bar{\theta}$ ,  $\theta$  yönündeki birim vektördür,  $I(w)$ ;  $I(t)$  akımının Fourier dönüşüdür. Akımın  $\theta$  ile değişmediği kabul edildiğinden  $d\theta$ 'ya göre yapılacak tümeleme

$$J_{s\theta} = \frac{I(w) \cdot a \cdot \delta(z) \cdot \delta(r-a)}{r} \cdot \bar{\theta} \quad (1.8)$$

kaynak akım yoğunluğunu verir. Kutup alanının geometrisi gözönüne alındığında EM alan  $E_\theta$ ,  $H_r$  ve  $H_z$  bileşenleri ile tanımlanmaktadır. Maxwell'in 1. denkleminde bileşenler arası ilişkiler yazılabilir.

$$i \cdot w \cdot \mu \cdot H_r = \frac{\partial E_s}{\partial z} \quad (1.9)$$

$$i \cdot w \cdot \mu \cdot H_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_s) \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = (i \cdot w \cdot \epsilon + \sigma) \cdot E_s + J_s \quad (1.11)$$

Alanlar  $\theta$  dan bağımsız olduğundan  $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$  dır ve E için  $\theta$  indisini yazmaya gerek yoktur. s kaynak terimini göstermektedir. Bu eşitliklerden  $E_s$  çözümlerse  $H_r$  ve  $H_z$  bileşenleri basit türev işlemleri ile bulunabilir. Eşitlik (1.9), (1.10) ve (1.11) nolu bağıntılardan yararlanarak kaynak elektrik alanı  $E_s$  için homojen olmayan scalar bir bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{I}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{I}{r^2} + k_0^2 \right] E_s(r, z, w) = \frac{i \cdot w \cdot \mu \cdot I(w) \cdot a \cdot \delta(z) \cdot \delta(r-a)}{r} \quad (1.12)$$

Bu denklemde halka havada olduğundan  $k_i^2 = w^2 \mu_i \epsilon_i - iw \cdot \mu_i \sigma_i$  değişkeni  $i=0$  için alınmıştır.

Bu bağıntıyı çözmek için aşağıdaki kabuller kullanılır.

1. Tx ve Rx yer yüzeyine yerleştirilip, Eşitlik (1.12) de  $z=0$  alınabilir.
2. Geçici (Transient) alan bağıntıları başlangıç değer problemleri olarak alınır. Denklem özelliklerinden dolayı Laplace dönüşümleri Fourier dönüşümlerinden daha kullanışlı olacaktır. Laplace dönüşümü için  $(-iw)$  yerine  $p$  konur.
3. Uygun bir kaynak modeli seçilir. Yaygın olarak kullanılanlar;
  - i. Yarım sinus dalgası
  - ii. Testere dişi dalga
  - iii. Yokuş bağıntısı (ramp function)

## iv. Birim basamak bağıntısı (step function)

Çözüm kolaylığı için son kaynak modeli en uygundur. Birim basamak bağıntısı akımın sıfır anında kesildiği varsayımına dayanır.

## 3.4.4.1. Tekdüze ortam için çözüm

Tek düze bir ortam (homogen half space) üzerine yarıçapı a olan bir verici halka ile yarıçapı b olan bir alıcı halka koyalım. Basmak fonksiyonu kaynak olarak kullanılırsa Eşitlik (1.12) çözümü

$$E(w) = \frac{1}{2} iw\mu a I \left[ \int_0^{\infty} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda + \int_0^{\infty} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) \frac{\lambda - s}{\lambda + s} d\lambda \right] \quad (1.13)$$

olarak verilir (Morrison et. al. 1969, Görgünoğlu 1997). Burada;  $s = (\lambda^2 - iw\mu\sigma_j)^{1/2}$ , I; Tx teki akım,  $\lambda$ ; tümlene değişkeni,  $J_1$ ; birinci dereceden Bessel fonksiyonlarıdır. Bağıntıda birinci kısım biricil (primer) elektrik alandır ve I akımı tarafından oluşturulur. İkinci kısım ise ikincil (sekonder) alanı verir ve Eddy akımları tarafından oluşturulur. Alıcı halkasında oluşan gerilim izleyen bağıntı ile tanımlanır

$$V = 2 \pi a E(w) \quad (1.14)$$

Halkada ikincil alandan dolayı oluşan gerilim  $V_s$  ise

$$V_s = -iw\mu a^2 I \left[ \int_0^{\infty} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) \frac{\lambda - s}{\lambda + s} d\lambda \right] \quad (1.15)$$

bağıntısı ile elde edilir. Son bağıntı ters Laplace dönüşümü alınarak zaman ortamına geçirilir. Halkaların aynı merkezli ve aynı yarıçaplı ( $a=b$ ) olması durumunda  $t>0$  için karşılıklı empedans bağıntısı ise aşağıdaki gibidir,

$$Z = \frac{V(t)}{I} = -2\pi\mu a^2 \left[ \int_0^{\infty} \mathbf{L}^{-1} \left[ \frac{1}{\lambda + s} \right] \lambda J_1^2(\lambda a) d\lambda \right] \quad (1.16)$$

burada  $\mathbf{L}^{-1}$  ters Laplace dönüşümünü gösterir. Bu bağıntının özel çözümleri çeşitli çalışmalarda görülebilir ( bkz. Morrison et. al. 1969, Gradshteyn ve Ryzhik 1965, Görgünoğlu 1997).

### 3.4.4.2. Katmanlı ortam için çözüm

Şekil 8'deki modelde  $h$  yüksekliğine yerleştirilen verici Tx tarafından  $b$  yarıçaplı ve yüzeyde bulunan alıcı Rx üzerinde oluşacak elektrik alan aşağıdaki bağıntı ile verilir,

$$E(w) = \frac{1}{2} \pi \mu a I \int_0^{\infty} \left\{ A_0(\mathbf{P}, w, \lambda) e^{[s_0(z-h_1)]} + B_0(\mathbf{P}, w, \lambda) e^{[-s_0(z-h_1)]} \right\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda. \quad (1.17)$$

Burada; daha önce tanımlanan değişkenlere ek olarak,  $S_0 = \lambda$ ,  $S_j = (\lambda^2 - i\omega\mu\sigma_j)^{1/2}$ ,  $\mathbf{P}$ ; katman kalınlıkları ve öz dirençlerini içeren dizey,  $A_0(\mathbf{P}, w, \lambda)$  ve  $B_0(\mathbf{P}, w, \lambda)$ ; katmanlı ortama ait çekirdek bağıntılarıdır ve sınır koşulları kullanılarak çözüleceklerdir. Alıcı halkasında oluşan gerilim izleyen bağıntı ile tanımlanır:

$$V = 2\pi a E(w)$$

ve buradan empedans;

$$Z = V/I$$

bağıntısı ile verilir. Eşitlik (1.17)'te  $z = h_1 = 0$  alınır,  $A_0$  ve  $B_0$  için uygun sınır koşulları kullanılarak basamak fonksiyonu şeklindeki kaynak,  $I$  için zaman ortamındaki empedans bağıntısı

$$Z(t) = -\pi \mu a b \int_0^{\infty} \mathbf{L}^{-1} \left\{ A_0(\mathbf{P}, p, \lambda) \right\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \quad t > 0 \quad (1.18)$$

olarak verilmektedir (Knight ve Raiche 1982). Eşitlik (1.18)'da  $p$ , Laplace değişkenidir. Denklem çözümü, Gaver-Stehfest yöntemi (Knight and Raiche 1982) veya doğrusal süzgeçler kullanılarak yapılan ters Hankel dönüşümü (Anderson, 1979) ile yapılabilir.  $A_0$ , çekirdek fonksiyonunu çözmek için aşağıdaki sınır koşulları kullanılabilir.

- a) Elektrik ve manyetik alanlar tabaka sınırlarında sürekli olmalıdırlar

$$E_j = E_{j+1} \quad \text{ve} \quad \partial E_j / \partial z = \partial E_{j+1} / \partial z$$

- b)  $z = \infty$  için alanlar sıfır olmalı. Sonuç olarak  $A_{n+1} = 0$  ve  $B_0 = 1$  dir.

Elektrik alan için  $E_j = \exp(-2S_j h_j)$  ve

$$F_j = \frac{E_j (R_j + F_{j+1})}{1 + R_j F_{j+1}}$$

tanımları yapılarak  $A_o$  bulunabilir.  $R_j$ , yansıma katsayıları ise

$$R_j = \frac{S_j - S_{j+1}}{S_j + S_{j+1}}$$

olarak verilebilir. Sınır koşulları kullanılarak

$$F_{N+1} = 0 \quad \text{ve} \quad F_N = R_N E_N$$

yazılabilir.  $A_o$  yüzey değeri ise yineleme bağıntısı ile bulunur.

$$A_o = (R_o + F_1)/(1 + R_o F_1).$$

### 3.1. Yokuş etkisinin (ramp effect) kaldırılması

Giriş bölümünde sözedildiği gibi, herhangi bir elektrik devresinde akımın ani olarak uygulanması halinde akım değeri tam değerine ulaşamaz veya tersi durumda kesilirse hemen sıfır değerine gidemez (Şekil 2). Akımın kesildikten sonraki değişimi yaklaşık olarak yokuş (ramp) ile tanımlanabilir (Şekil 4). Yokuş etkisi (ramp effect) de hesaplamalara katılmalıdır. Bu etki, ölçü aleti üreticilerinin farklı örnekleme yöntemleri kullanması nedeniyle, akım fonksiyonunun normalleştirilmesi aşamasında farklılıklar gösterir. Onun dışında uygulama aynıdır. Kuramsal yaklaşımlar Raiche (1984) tarafından verilmiştir ve burada sadece özetlenecektir. Ölçüm yöntemi için yaygın olarak kullanılan merkezi halka ve çift halka yöntemlerinde kullanılan bağıntılar verilecektir.

Buraya kadar, kaynak olarak kullanılan akımın basamak fonksiyonu olması durumu incelendi. Uygulamada değişik türde kaynak fonksiyonlarının kullanıldığı belirtilmişti. Eşitlik (1.18) ile verilen empedans bağıntısı genelleştirilirse;

$$Z(t) = -\pi \mu a b \int_0^{\infty} \mathbf{L}^{-1} \left\{ I(p) p A_o(\mathbf{p}, p, \lambda) \right\} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \quad t > 0 \quad (1.19)$$

yazılabilir. Burada  $I(p)$ ; normalize edilmiş ve Laplace dönüşümü alınmış kaynak fonksiyonudur. Özel halde, kaynak fonksiyonu için basamak fonksiyonunun kullanılması durumunda  $I(p)=-p^{-1}$  olur.

Akımın kesilme zamanı (turn-off time) işlemlere katılıp alıcı ve verici geometrisi ile ilgili bazı düzenlemeler yapılırsa merkezi halka için empedans bağıntısı;

$$Z^{mr}(t) = \frac{\pi\mu a}{2t_0} \frac{A_{Rx}}{A_{Tx}} \int_0^{\infty} \left\{ G(\mathbf{P}, \tau, \xi^2) \right\} J_1(\xi) \xi d\xi \quad t > 0 \quad (1.20)$$

ve çift halka için bağıntı;

$$Z^{ch}(t) = \frac{\pi\mu a}{t_0} \int_0^{\infty} \left\{ G(\mathbf{P}, \tau, \xi^2) \right\} J_2(\xi) d\xi \quad t > 0 \quad (1.21)$$

olarak verilir.  $G(\mathbf{P}, \tau, \xi^2)$ , çekirdek fonksiyonu ise,

$$G(\mathbf{P}, \tau, \xi^2) = F(\xi^2 \tau') - F(\xi^2 \tau).$$

ile verilir. Yukarıdaki bağıntılarda

$$F(\xi^2 \tau) = -L^{-1} \left| A_o(p) p^{-1} \right|$$

$\xi = \lambda a$ ,  $t_0$ ; akımın kesilme zamanı,  $A_R$ ; alıcının etkin alanı,  $A_T$ ; vericinin etkin alanı, normalleştirilmiş zamanlar;  $\tau$  ve  $\tau'$ ;

SIROTEM tarafından kullanılan zamanlar

$$\tau' = \frac{(t - t_0)}{\sigma\mu a^2} \quad \text{ve} \quad \tau = \frac{t}{\sigma\mu a^2}$$

ve Geonics EM-37 tarafından kullanılan zamanlar

$$\tau' = \frac{t}{\sigma\mu a^2} \quad \text{ve} \quad \tau = \frac{(t + t_0)}{\sigma\mu a^2}$$

bağıntıları ile verilir. Tabakalı ortamlarda  $\sigma = \sigma_1$  kullanılır. Empedans eşitliklerinde tümeleme işlemi Doğru akım özdirenç yönteminde (Direct Current resistivity) veya kısaca DAÖ yönteminde de yaygın olarak kullanılan sayısal süzgeçler yardımı ile yapılmaktadır. Sayısal süzgeçlerin çeşitli jeofizik yöntemlere uygulaması Anderson (1979) tarafından verilmiştir.

Özel bir durum olarak, Bessel fonksiyonlarının seriye açılımlarından yararlanılırsa (bkz. Abramowitz ve Stegun 1964) merkezi halka (central-loop) için empedans;

$$Z^{mr} = \frac{\sqrt{\pi} \mu a}{2 \delta} \frac{A_R}{A_T} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{4^n n! (2n+3)(2n+5)} \left[ \frac{1}{\tau^{n+3/2}} - \frac{1}{\tau^{n+3/2}} \right] \quad (1.22)$$

bağıntısı ile verilir (Spies ve Raiche, 1980; Sandberg, 1988). EM yöntemlerinin yorumunda yaygın olarak kullanılan görünür özdirenç değerlerinin eldesi için bu bağıntıdan özdirençlerin çekilebilmesi gerekir. Normalleştirilmiş zamanlar,  $\tau$  ve  $\tau'$  öziletkenliklere (veya özdirençlere) bağımlıdır ve bu bağıntıdan çekilemezler. Bu nedenle görünür özdirenç değerleri bu bağıntıdan ancak yinelemeli yöntemler kullanılarak elde edilebilirler. Görünür özdirenç tanımları için eşitlik (1.22)'nin tam çözümü yerine basit yaklaşımlar kullanılabilir.

#### **4. Araştırma Derinliği ve Görünür Özdirenç Tanımı**

TEM yöntemi ile yeraltında indüklenen Eddy akımlarının zamana bağlı olarak yeriçinde derinlere ve yanlara doğru yayıldığı söylenmişti. Bu yayılım sırasında derinliğe ve zamana bağlı olarak akım şiddeti sürekli azalırken yayılan dalganın ("smoke rings") yarıçapı büyümektedir (Şekil 8). Bu şekilde tanımlanan akım yoğunluğunun hareketidir ve en yüksek olduğu yer izleyen bağıntı ile hesaplanabilir

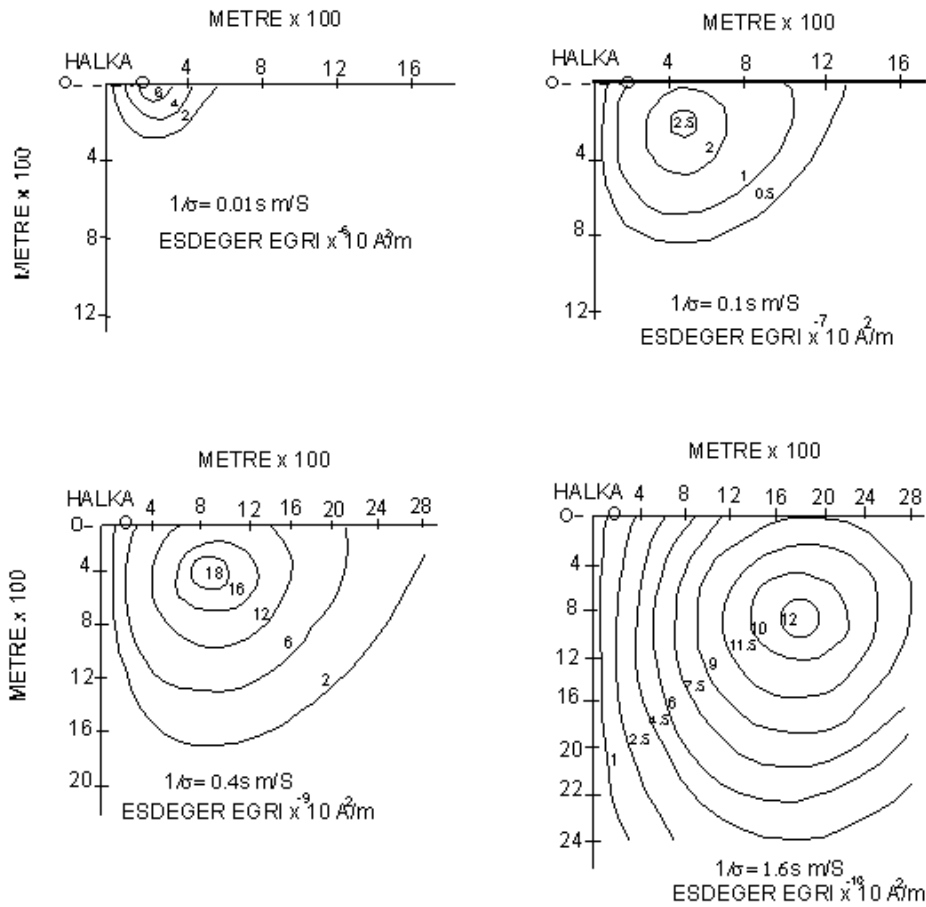
$$V_z = \frac{2}{\sqrt{\pi \sigma \mu t}}$$

Aynı biçimde, belirli bir zaman için akım yoğunluğunun en yüksek olduğu derinlik izleyen biçimde verilir:



$$\delta = \left( \frac{2t}{\mu\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Yaklaşık olarak en uygun araştırma derinliğinin iki katını veren bu bağıntı, genel olarak tüm elektromanyetik yöntemler, dolayısıyla manyetotellürikte kullanılan deri kalınlığı ("skin depth") tanımının TEM yöntemindeki eşdeğeri'dir.



Şekil 9. Özdirenci 30 Ohm-m olan homojen bir ortamda dikdörtgen halka vericinin oluşturduğu akım yoğunluğu eşdeğer eğrileri (veriler 400 x 800 m boyutlarındaki bir vericinin merkezinden geçen düşey düzlemde hesaplanmıştır (Nabighian, 1979)).

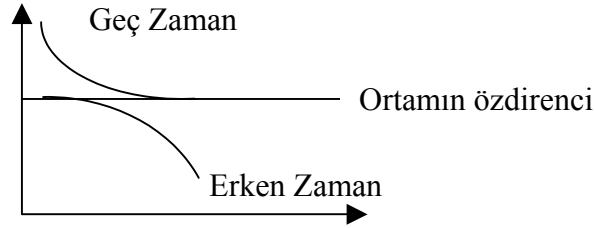
TEM yöntemi için zamana bağlı olarak doğru akım elektrik özdirenc yönteminde olduğu gibi, analitik olarak tek bir eğri elde etmek mümkün değildir (Kaufmann ve Keller, 1983; Spies and Eggers, 1986), ancak nümerik olarak zamana bağlı tek eğri ("all-time resistivity") hesaplamak olanaklıdır (Spies and Eggers, 1986; Sheng, 1986;

Karlık and Strack, 1990). Yukarıda sözü edildiği gibi, eşitlik (1.22) dan tekdüze bir ortam için elde edilen görünür özdirenç (GÖ) değerleri çizildiğinde iki ayrı eğri görülür (Şekil 10). Asimtotik eğriler farklı zamanlar için gerçek özdirenç değerini verirler. Diğer zamanlar için gerçek değerden asimtotik olarak uzaklaşırlar. Erken (early-time) ve geç (late-time) zamanların ayırımı için özgün yayılım mesafesi;

$$d = 2\pi \left( \frac{2t}{\mu\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ve alıcı verici uzaklığı,  $r$  kullanılarak aşağıdaki gibi basit bir denklem tanımlanabilir,.

$$d / r = \text{ yayılım mesafesi / alıcı – verici aralığı} = \begin{array}{l} >10 \text{ geç zaman} \\ <10 \text{ erken zaman} \end{array}$$



Şekil 10. Erken zaman (early time) ve geç zaman (late time) asimtotik görünür özdirenç eğrileri.

Yukarıdaki tanımdan yola çıkarak görünür özdirenç (GÖ) bağıntıları

$$\rho_a^{early} = \frac{a^3 Z}{3A_R} \quad (1.23)$$

ve

$$\rho_a^{late} = \frac{a^{4/3} A_R^{2/3} \mu^{5/3}}{20^{2/3} \pi^{1/3} t^{5/3} Z^{2/3}} \quad (1.24)$$

olarak verilir.

Bağıntılarda yer alan değişkenler daha önce tanımlanmışlardır. Eşitlik (1.22) kullanılarak özdirençler için ‘tam’ çözümler bulunabilir fakat bu bağıntıdan her bir

zaman penceresi için iki ayrı öz direnç değeri elde edilir (bkz. Sandberg, 1990; Spice and Raiche, 1981). Bu yolla elde edilen GÖ yokuş etkisi ile elde edilmiş GÖ'ler (Ramp-derived apparent resistivity) olarak adlandırılır. Basamak fonksiyonu ile çözülen bağıntılardan türetilen erken ve geç zaman asimtotik GÖ değerleri (Eşitlik (1.23) ve (1.24)) Eşitlik (1.22) dan elde edilen tam değerlerle özdeşdir. Denghai ve Meju (2000)'in yaklaşımına göre tüm zaman GÖ izleyen biçimde tanımlanabilir: Bu işlem için dairesel biçindeki merkezi halka düzeneği için TEM tepki bağıntıları yazılırsa (Ward & Hohmann, 1987),

$$\frac{\partial B_z}{\partial T} = \frac{I\rho}{a^3} \left[ 3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-(\theta a)^2} \right]$$

ve

$$B_z = \frac{I\mu}{2a} \left[ \frac{3}{\sqrt{\pi}\theta a} e^{-(\theta a)^2} + \left( 1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \text{erf}(\theta a) \right]$$

bu bağıntılarda

$\frac{\partial B_z}{\partial T}$  Düşey Manyetik alanın türevi

$B_z$  Düşey Manyetik alan

$I$ =Vericideki akım

$\rho$ =ortamın öz direnci

$a$ =halkanın çapı

$T$ =Sönümlenme zamanı

$$\theta = \sqrt{\frac{\mu}{4\rho T}}$$

$$\text{erf}(\theta a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{(\theta a)} e^{-t^2} dt \quad \text{hata bağıntısı.}$$

eğer

$$Z=(\theta a) = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\rho T}}$$

yazılırsa tüm zamanlar için görünür öz direnç bağıntısı

$$\rho = \frac{a^2 \mu}{4T} \frac{1}{Z^2} \quad (1.25)$$

eşitliğinden elde edilir. Bu işlemlerin ayrıntıları, Denghai and Meju (2000) de bulunabilir.

## 5. TEM verilerinin sunumu ve değerlendirilmesi

TEM verileri genelde delgi (sounding) eğrileri veya ölçüm doğrultusu boyunca elde edilen ölçümlerden herbir pencere için gerilim sönüm eğrilerinin ( $B_d$  değerlerinin) çizilmesi ile sunulur. Verilerin değerlendirilmesi için ise yapay derinlik-özdirenç dönüşümlerinden, yaklaşık ters çözüm ve ters çözümden yararlanır. Bir boyutlu hesaplamaların (Anderson, 1981; Goldman, 1983; ARRTI, Interpex, 1985) yanı sıra TEM verilerinin iki ve üç boyutlu modelleme çalışmaları da yapılmaktadır (Gunderson et al., 1986; Newman ve diğ., 1987). Ayrıca, ortama bağlı olarak yatay katmanlaşmanın görülmediği bir alanda ya da çok büyük verilerin söz konusu olduğu zamanlarda, bir başlangıç modeline bağlı kalınsızın uygulanabilen yaklaşık ve doğrudan dönüştürme yöntemlerinin de diğer bir yol olarak kullanılabileceği görülmüştür. Doğrusal olmayan sönümlü enküçük kareler (non-linear least squares) yöntemi ile yapılan ters çözümün temelleri, bilgi notunun kapsamı dışında kalmaktadır. Burada sadece veri tipi ve kısmi türevler düzeyinin nasıl elde edildiği kısaca özetlenecektir.

### 1. Yapay Derinlik / Özdirenç Dönüşümleri

Bu dönüşümler, MT yönteminde kullanılan Bostic dönüşümlerinin benzeridir. Zaman değerlerini yapay derinlik değerlerine çeviren bir çok bağıntı türetilir. Basit derinlik dönüşümlerine örnek olarak

$$\delta_{eff} = \frac{\delta}{2.3} \quad (1.26)$$

verilebilir (Meju 1992). Burada yapılan yayılım derinliğinin uygun bir katsayı ile ölçeklenmesidir. Eşitlik (1.19) da öziletkenlik,  $\sigma$  değerleri GÖ değerleri kullanılarak elde edilmektedir ( $\sigma = 1/\rho_a$ ). Yapay özdirenç değerleri için ise

$$\rho_{eff} = k \rho_a e^{-(1-\alpha)} \quad (1.27)$$

gibi bir yaklaşım kullanılabilir. Burada kullanılan değişkenler, deneme - yanılma yolu ile bulunabilir. Örnek olarak  $\alpha$  için 0.15 –0.2 arası bir değer alınabilir. k değeri ise kuramsal ve gözlemsel veriler arası benzerliği artıracak şekilde seçilir. Yapay dönüşümler, basit ve hızlı bir şekilde gözlemsel verinin yorumlanması ve daha karmaşık yöntemlere yapılan işlemlere ışık tutması bakımından önemlidir. Buradan elde edilen kestirimler gelecek bölümde verilecek olan ters çözüm işlemlerinde başlangıç değeri olarak kullanılabilir.

## 2. Ters Çözüm teknikleri

Doğrusal olmayan sönümlü enküçük kareler yöntemi ile yapılan ters çözümün temelleri birçok yayında bulunabilir. Burada sadece veri tipi ve kısmi türevler dizeyinin nasıl elde edildiği kısaca özetlenecektir.

$$\mathbf{d} = \mathbf{f}(\mathbf{P}) + \mathbf{e} \quad (1.28)$$

genel bağıntısında  $\mathbf{d}$ ; gözlemsel verileri içeren bir dizey,  $\mathbf{P}$ ; modele ait bilinmeyen parametreler dizeyi,  $\mathbf{f}(\mathbf{P})$ ; düz çözüm işleci, elde edilen değerler ise düz çözüm değerleridir (forward model).  $\mathbf{e}$ ; gözlemsel ile kuramsal değerler arası farkları içeren dizeydir. Gözlemsel veriler için genelde geç zaman GÖ değerleri kullanılmaktadır. Bunun yanısıra erken zaman GÖ, ölçülen manyetik alanın değişimi veya hepsinin aynı ters çözüm işleminde kullanımı da olasıdır (bkz. birleşik ters çözüm (Joint inversion) uygulamaları). Bu durumda kuramsal verilerinde aynı türde hesaplanmasına dikkat edilmelidir.

Diğer EM yöntemlerinde de olduğu gibi, TEM verisi ile parametreler (katman özdirençleri ve kalınlıkları) arası ilişki doğrusal değildir. Doğrusallaştırma için logaritmik gösterimden ve Taylor serisinden yararlanır. Bu işlemlerin ayrıntıları burada verilmeyecektir. Kısmi türevler (partial derivatives) dizeyi, J genelde sayısal olarak elde edilir. Örnek olarak  $P_1$  parametresine göre istenen logaritmik türev

$$\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log P_1} = \frac{\log \rho_a(P_1 + \Delta P) - \log \rho_a(P_1)}{\Delta P} \quad (1.29)$$

olarak elde edilebilir.  $\Delta P$  parametrenin belli bir yüzdesi (%1 - %3) veya küçük bir sayı (0.01 –0.05) olarak alınabilir (bkz. Meju, 1992). Elde edilen kısmi türevler doğrusal olmayan sönümlü en küçük kareler ters çözüm bağıntılarında kullanılarak aranan parametreler için düzeltme değerleri bulunur. Örnek olarak sönümlü en küçük kareler ters çözüm yöntemi için bağıntı

$$\Delta \mathbf{P} = \left[ (\mathbf{WJ})^T \mathbf{WJ} + \beta \mathbf{I} \right]^{-1} (\mathbf{WJ})^T \mathbf{WY} . \quad (1.30)$$

ile verilir. burada  $\mathbf{W}$ ; ağırlıkları içeren dizey,  $\beta$ ; sönüm faktörü,  $\mathbf{y}$ ; ölçülen ve hesaplanan GÖ değerleri arasındaki farkları içeren dizey,  $\Delta \mathbf{P}$ ; parametreler için düzeltme değerleridir. Eşitlik (1.30) nın çözümü bilinen yöntemler kullanılarak yapılır. Bu işlem her bir delgi verisi için tekrarlanırsa, ölçüm hattının altı için yer-elektrik kesitleri hazırlanabilir.

## 6. Yöntemin üstünlükleri ve zayıflıkları

Geçici veya zaman ortamı elektromanyetik (TEM veya TDEM) yöntemi arazi koşullarında hızla uygulanabilen ve güvenilir sonuçlar üreten bir yöntemdir. Genel olarak maden ve jeotermal alanların aranmasında, jeolojik, hidrojeolojik, çevre ve jeoteknik amaçlı çalışmalarda başarı ile kullanılabilir. Yöntem, doğrudan sonuç üretilmediği gibi diğer yöntemlere yardımcı olacak şekilde de yararlanılabilir. Buna en iyi örnek manyetotellürik (MT) yönteminden elde edilen görünür öz direnç eğrilerinde görülen, yerel küçük ölçekli jeolojik yapıların neden olduğu durağan kayma olarak adlandırılan etkinin verilerden çıkarılmasıdır. Yukarıda sayılan araştırmalar için kullanılacak birçok elektrik ve elektromanyetik yöntem vardır. En çok kullanılan yöntemlerden biri de doğru akım öz direnç - DAÖ yöntemidir. TEM – DAÖ karşılaştırması aşağıda verilmiştir:

1. TEM yönteminde yere doğrudan akım verilmediğinden DAÖ yönteminde kullanılan elektrotların farklı ortamlarda olması gibi nedenlerden kaynaklanan gürültü sorunu ortadan kalkmıştır.
2. TEM ile yapılan derinlik araştırmalarında, araştırma derinliğinin alıcı ve vericinin konumlarından çok ölçümlerin değişik zaman dilimlerinde yapılmasına bağlı olması, derin yapıların hedeflendiği araştırmalarda yönteme büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Araştırmanın amacına bağlı olarak TEM yöntemi ile daha derine inilebildiği gibi vericinin yer ile uyartım bağlantısı nedeniyle kontak sorunu yoktur. Bu nedenle DAÖ yönteminin uygulanamayacağı yerlerde kullanılabilir.
3. DAÖ yönteminde elektrotların farklı jeolojik birimler üzerinde olmasının getirdiği yanal süreksizlik etkisi en aza indirgenmiştir. Elde edilen veri bir boyutlu veri tanımına daha uyumludur.
4. TEM, DAÖ yöntemine göre, iletken ortamlara daha duyarlıdır.
5. TEM, yapay kaynaklı bir yöntem olması nedeniyle amaca bağlı olarak, gücü, zamanı ve yeri istenilen biçimlerde ayarlanabilmektedir.
6. TEM yönteminin zayıf yönlerine bakıldığında, birincisi; yer yüzeyinde çok sığ alanlardaki araştırmalar için çok erken zamanlarda ölçümlerde karşılaşılan güçlüklerdir. Verici halkasının yarıçapı birinci katman kalınlığından daha fazla ise, bu katmana ait bilgi elde etmek güçleşir. Bu durumlarda, diğer yöntemlerden DAÖ yöntemi ile birlikte kullanarak zorluklar aşılabılır.
7. TEM yönteminin en önemli zayıflığı yüksek öz dirençli alanlarda görülmektedir. Yöntem iletken katmanlar arasındaki yüksek öz dirençli ara katmanları belirleyememektedir. Buna karşı olarak, elektrik kutup verici kullanan LOTEM (Long-Offset TEM) yöntemi ile elektrik alanların ölçülmesi ile bu sorun aşılabilmektedir (Strack, 1992).

## 6. Uygulama Örnekleri

TEM yöntemi ile ilgili ilk uygulama örneği Brezilya'dan seçilmiştir. Magmatik bir sokulum üzerinde yapılan TEM ölçümleri SIROTEM aygıtı (Şekil 11) kullanılarak yapılmıştır. 2x12 V akü ile çalışan aygıt ile istenilen düzeneklerde (Şekil 5) ölçüm yapmak mümkündür.

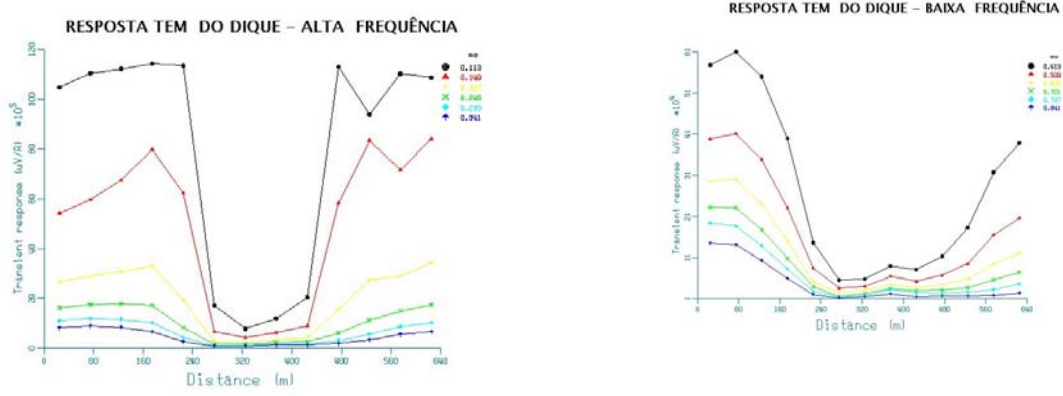


Şekil 11. SIROTEM TEM aygıtı ve güç kaynağı

Daha öncede belirtildiği gibi, TEM yöntemi bir çok amaç için kullanılabilir. Yorum aşamasında da çalışmanın amacına ve yorumcunun olanaklarına bağlı olarak farklı teknikler uygulanabilir. Uygulamada yararlanılan en kolay yorum yöntemi, bir hat boyunca yapılan bitişik düzen TEM ölçümlerinden elde edilen verilerden HLEM yöntemine benzer olarak her bir pencere (window) için dB/dt zamanları çizilmesidir. Şekil 12'de yüzeyde de izlenebilen bir sokulum yapısının vereceği belirti görülmektedir. Genlik değerlerindeki logaritmik farklardan dolayı erken zamanlar (ilk pencereler) ve geç zamanlar (son pencereler) ayrı ayrı verilmişlerdir. Her iki egride de sokulumun sınırları çok belirgin olarak izlenebilmektedir.

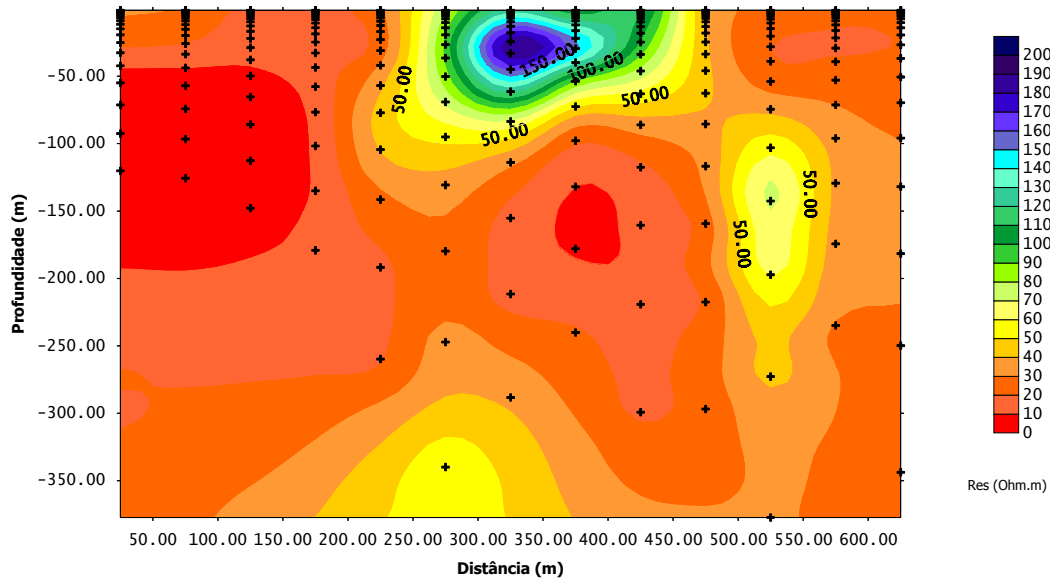
Diğer bir basit yorum yöntemi, TEM verilerinde Bostick- Niblet dönüşümüne benzer yöntemle zaman-derinlik dönüşümü ile yer elektrik yapısının elde edilmesidir. Şekil 12'deki jeolojik yapı için görünür öz direnç-zaman verilerinin derinlik değerlerine dönüştürülmesi ile elde edilen yer elektrik yapısı Şekil 13'de verilmiştir. Şekildeki (+) işaretleri pencere zaman değerlerini göstermektedir.





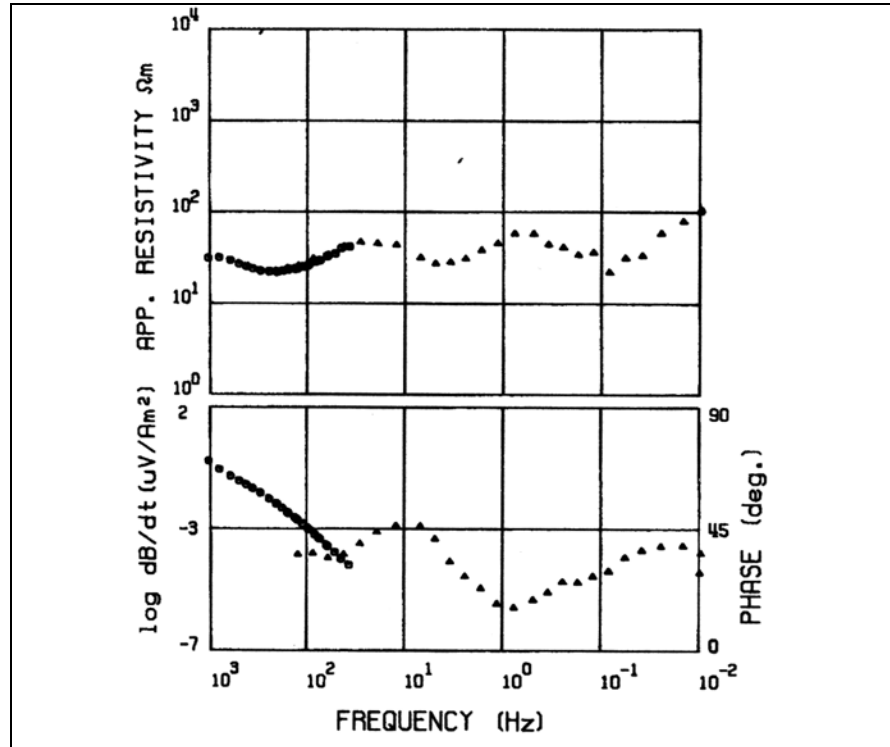
(a) (b)  
 Şekil 12 Yüzeyleyen jeolojik sokulum üzerinde yapılan ölçüm sonuçları. (a) erken zamanlar, (b) geç zamanlar. Düşey eksen akımla normalleştirilmiş dB/dt değerlerini, yatay eksen uzaklık değerlerini göstermektedir (Observatoria Nacional, Brezilya arşivi).

### DIQUE DE DIABÁSIO DE FARTURA - SP

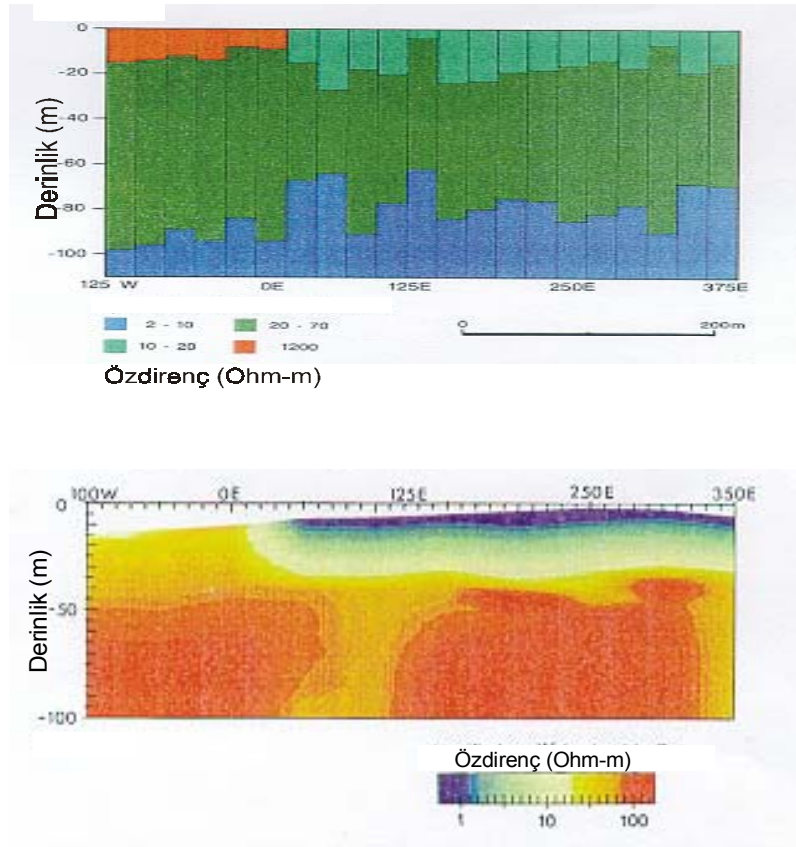
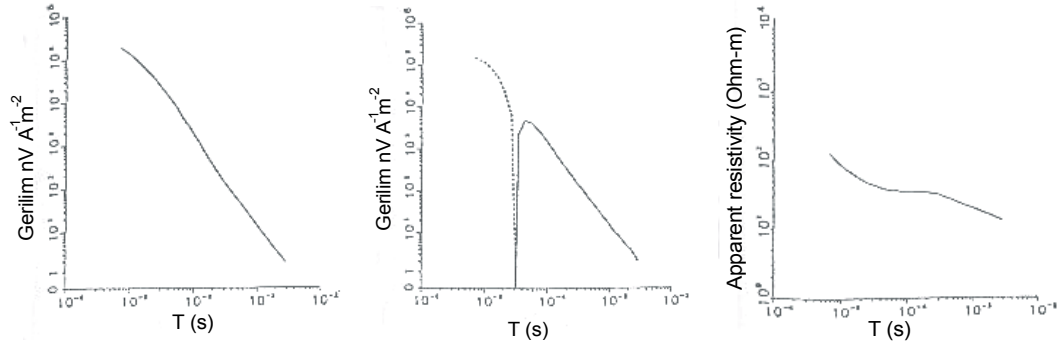


Şeki 13. TEM verilerinin zaman-derinlik dönüşümü ile elde edilen yer elektrik yapısı (Düşey ölçek derinlik, yatay ölçek uzaklık; + işareti veri yerlerini göstermektedir) (Observatoria Nacional, Brezilya arşivi).

TEM verilerin en yaygın kullanıldığı diğer bir alan Manyetotellürik (MT) verilerde karşılaşılan durağan kayma (static-shift) etkisinin ortadan kaldırılmasıdır (örn. Andrieux and Wightman, 1984; Sternberg et al., 1988; Pellerin and Hohmann, 1990). Durağan kayma, MT yönteminde elektrik alanın ölçümünde kullanılan elektrodların farklı birimlerde olması veya yüzeye yakın ve modelleme kuramı ile tanımlanamayacak kadar küçük ölçekteki yapıların bulunması durumunda karşılaşılan ve yorum sonuçlarını etkileyen bir olgudur. Galvanik akımlar tarafından yaratıldığından aynı alanda yapılacak ve galvanik ölçüm içermeyecek benzer türde verilerin bulunması durumunda tanımlanıp, etkileri MT verilerinden çıkarılabilir. Bu amaçla MT ölçümü yapılan alanlarda TEM ölçümleri yapılır ve elde edilen görünür öz direnç–zaman verileri basit bir dönüşüm ile görünür öz direnç–frekans verilerine dönüştürülerek MT yönteminden elde edilen görünür öz direnç–frekans verileri ile birlikte çizilerek MT görünür öz direnç değerlerinin ne kadar kaydığı belirlenmeye çalışılır (Şekil 14). Diğer bir yol ise, TEM verilerinden elde edilen 1B yapı modeli için MT verisindeki yüksek frekansları kullanarak kaymamış MT verisi yaratmaktır.



Şekil 14 TEM (yuvarlaklar) ve MT (üçgenler) Görünür öz direnç verilerinin birlikte sunumu (Meju et al, (1999) dan alınmıştır).



Şekil 15 Örtülü katı atık alanında elde edilen TEM ölçüm değerleri (en üstte), bir boyutlu ters çözümden elde edilen yerelektrik kesiti (Greinwald et al., 1992) ve yaklaşık öz direnç-derinlik dönüşümü ile elde edilen yerelektrik kesit (Karlık, 1995).

Basit dönüşüm işlemlerinin yanında bir-boyutlu (1B) ters çözüm yöntemi de TEM verilerinin yorumunda yaygın olarak kullanılmaktadır (örn. Sandberg, 1988; Wilt and Williams, 1989). Hesaplama süresi açısından çok uzun süre alması nedeni ile uygulamada çok boyutlu yorum pek yaygın değildir, fakat gelişen bilgisayar teknolojisine koşut olarak ve çoğunlukla bilimsel çalışmalar olmak üzere bu konudaki çalışmalar hızla artmaktadır (örn. Newman, Hohmann, and Anderson, 1986). Şekil 15'te örtülü bir katı atık alanında (Almanya-Ossendorf) ölçülen TEM verileri ve bir boyutlu ters çözüm sonuçları görülmektedir. Örtülü katı atık alanının yanal ve düşey sınırlarının belirlenmesi amacıyla yapılan ölçümlere ait yaklaşık bir boyutlu ters çözüm veya hızlı iletkenlik-derinlik dönüşümü (imaging) sonuçları aynı şekilde altta yer almaktadır. TEM ölçüleri (merkezi halka ("central-loop") düzeneği halka yarıçapı  $a=10$  ve  $50$  m, ölçüm aralıkları  $50$  m) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) tarafından yapılmıştır. Çalışma alanı, Ren nehrinin sürükleyerek getirdiği fluvial çökellerden oluşan teraslardan oluşmaktadır ve 50'li yıllarda burada belli yerlerde boşluklar açılarak ev ve inşaat çöplü ile doldurulmuş ve sonra yine kapatılmıştır. Geleneksel olarak yaygın bir biçimde kullanılan Marquardt ters çözümü ile elde edilen bir boyutlu öz direnç kesitine göre alanda çöp birikintisi öz direnci  $10$  ile  $20$  Ohm-m olan katmanlar ile sınırlanmaktadır.

Katı atık birikintisinin alt sınırı  $20$  metredir ve gayet belirgin olarak izlenmektedir. Yaklaşık iletkenlik-derinlik dönüşümünden elde edilen kesitte de yanal ve düşey sınırlar net olarak görülmekle birlikte, öz direnç değerleri bir boyutlu değerlendirme sonucuna göre daha düşük değerler göstermektedir. Ancak, buna rağmen öz direnç kontrastlarından sınırların net olarak saptanabildiği açıkça görülmektedir. Bu nedenle, klasik ters çözüme göre çok daha kısa bir sürede elde edilebilen böyle bir iletkenlik-derinlik dönüşümü, kısa zamanda ölçülerin alındığı alana ait genel bir bakış açısı vermesinin yanı sıra bir veya çok boyutlu hesaplamalar için başlangıç modeli olarak kullanılabilir. Bu örnekle birlikte genel olarak görüldüğü gibi TEM yöntemi çok çeşitli alanlarda kullanılarak yeraltında araştırma amacına bağlı olarak yeterli bilgi sağlamaktadır.

## 8. Genişletilmiş Kaynaklar

- Andrieux, P., and Wightman, W.E., 1984. The so-called static corrections in magnetotelluric measurements: 54th Ann. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 43-44.
- Abromowitz ve Stegun 1964, Handbook of Mathematical Function: Nat. Bur. Of Stan. Applied mathematics series, 1046 p.
- Asten, M.W., 1989, Full transmitter-waveform transient electromagnetic modelling and inversion for soundings over coal measures: *Geophysics*, **52**, 274-288.
- Barnett, C.T., 1984, Simple inversion of time-domain electromagnetic data: *Geophysics*, **49**, 925-933.
- Buselli, G. Barber, C., and Zerilli, A., 1988, The mapping of groundwater contamination with TEM and DC methods: *Explor. Geophys.*, **19**, 240-248.
- Christensen, N.B., and Soresen, K.I., 1994, Integrated use of electromagnetic methods for hydrogeological investigations: EEGS Proc. Symp. Application of Geophysics to Engineering & Environmental Problems, Boston, March 1994, p. 163-176.
- Denghai, B. and Meju, M.A. 2000, All-time apparent resistivity for Transient Electromagnetic method, 15th EM Induction Workshop Cabo Frio, Brazil August 19-26.
- Fitterman, D.V., and Stewart, M.T., 1986, Transient electromagnetic sounding for groundwater: *Geophysics*, **51**, 995-1005.
- Goldman, M., Du Plooy, D. and Eckard, M., 1994a, On reducing ambiguity in the interpretation of transient electromagnetic sounding data: *Geophys. Prosp.*, **42**, 3-25.
- Goldman, M., Tabarovsky, L. and Rabinovich, M., 1994b, On the influence of 3-D structures in the interpretation of transient electromagnetic sounding data: *Geophysics*, **59**, 889-901.
- Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A. and Melloul, A., 1991, Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the transient electromagnetic method: *Geoexploration*, **28**, 153-174.
- Gradshteyn, I.S., and Ryzhik, I.M., 1965, Tables of integrals, series and product: 4th Ed. (Eng. Trs.) New York, Academic Press, 1086p.
- Greinwald, S., Schaumann, G., Sandmann, G. -U., 1992, Entwicklung eines integrierten Mess- und Interpretationsverfahren für LF-R und TEM zur Erkundung des Untergrundes oberer Deponien und Altlasten: Statusbericht zum Forschungsvorhaben, BGR, Hannover.
- Karlık, G., and Strack, K.-M., 1990, "All-time" scheinbare Widerstandskurven für LOTEM, in Haak, V., and Homilius, J., (eds.), Protokoll über das 13. Kolloquium "Elektromagnetische Tieorschung", Hornburg, NLFb, 135-144.
- Knight, J.H. and Raiche A.P., 1982, Transient electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse laplace transform method: *Geophysics*, **47**, 47-50.
- McNeill, 1990, Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *in* Ward SH, Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Volume 1: Soc. of Expl. Geophysics., 191-218.
- Lindqvist, J.G., 1987, Use of electromagnetic techniques for groundwater exploration in Africa: *Geophysics*, **52**, 456-458.
- Meju, M.A., 1992, An effective ridge regression procedure for resistivity data inversion: *Computers & Geosciences*, **18**, 99-118.
- Meju, M.A., 1996, Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations: *Geophysics*, **61**, 56-65.
- Meju, M. A., Fontes, S.L., Oliveira, M.F.B., Lima, J.P.R., Ulugergerli, E.U. and Carrasquilla, A.A., 1999, Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semi-arid eastern margin of Parnaiba Basin, Brazil: *Geophysics*, **64**, 337-356.
- Morrison, M.F., Phillips, R.j. and O'brien D.P., 1969, Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space: *Geophysical prospecting* **17**, 82-101.

- Nabighian, M.N., 1979 Quasi –static transient response of a conductig half space – An approximate representation :Geophysics v 44 p. 1700-1705.
- Newman, G.A., Hohmann, G.W. and Anderson, W.L., 1986, Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered-earth: Geophysics, **51**, 1608-1627.
- Newman, G.A., Anderson, W.L., and Hohmann, G.W., 1987, Interpretation of transient electromagnetic soundings over three-dimensional structures for the central-loop configuration: Geophys. J. R. Astr. Soc., **89**, 889-914.
- Palacky, G.J., 1987, Resistivity characteristics of geological targets: In M. N. Nabighian ed., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Theory , v.1, 53-129, Soc. Expl. Geophys., Investigations in Geophysics series, no. 3.
- Palacky, G.J., Ritsema, I.L. and De Jong, S.J., 1981, Electromagnetic prospecting for groundwater in Precambrian terrains in the Republic of Upper Volta: Geophys. Prosp., **29**, 932-955.
- Palacky, G. J., and West, G. F., 1981, Airborne electromagnetic methods, in: Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics- Application, Vol. 2, Part B: Soc. Expl. Geophysics, 811-879.
- Pellerin, L. and Hohmann, G. W., 1990, Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts, Geophysics, Vol 55, 1242-1250.
- Raiche A.P., 1984, The effect of ramp function turnoff on the TEM response a layered ground: Exploration Geophys. 15,37-41.
- Rice, R. and Sharp, G.J., 1976, Copper mineralisation in the forest of Coed-y-Brenin, North Wales: Transactions of Institution of Mining & Metallurgy, 76 (B), B1-B13.
- Raiche, A. P., 1983, Comparison of apparent resistivity functions for transient electromagnetic methods. Geophysics, 48, 787-789.
- Raiche, A. P., and Spies, B. R., 1981, Coincident loop transient electromagnetic master curves for interpretation of two-layer earths. Geophysics, 46, 53-64.
- Sandberg, S.,1988, Microcomputer software for the processing and forward modelling of transient electromagnetic data taken in the central loop sounding configuration: New Jersey Geological Survey Open –File Report 88-1.,88pp.
- Sandberg, S.K., 1993, Examples of resolution improvement in geoelectrical soundings applied to groundwater investigations: Geophys. Prosp., **41**, 207-227.
- Spies, B.R., 1988, Local noise prediction filtering for central induction transient electromagnetic sounding: Geophysics, **53**,1068-1080.
- Spies, B. R., and Eggers, D. E., 1986, The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. Geophysics, 51, 1462-1471.
- Spies, B. R., and Raiche, A. P., 1980, Calculation of apparent conductivity for the transient electromagnetic (coincident loop) method using an HP-67 calculator. Geophysics, 45, 1197-1204.
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings. Geophysics, 53, 1459-1468
- Greinwald, S., Schaumann, G., Sandmann, G. -U., 1992, Entwicklung eines integrierten Mess- und Interpretationsverfahren für LF-R und TEM zur Erkundung des Untergrundes obertaegiger Deponien und Altlasten: Statusbericht zum Forschungsvorhaben, BGR, Hannover.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1987, Electromagnetic theory for geophysical applications, in Electromagnetic methods in applied geophysics. Edited by Misac N. Nabighian, SEG, v. 1, theory, p221.
- Wilt, M.J., Becker, A. and Morrison, H.F., 1986, Effects of vertical contacts on time-domain electromagnetic sounding: Extended Abstracts, SEG annual meeting, Houston, Texas 177-180.
- Wilt, M.J. and Williams, J.P., 1989, Layered model inversion of central-loop EM soundings near a geological contact: Explor. Geophys., **20**, 71-73.
- Zhdanov, M.S., Traynin, P.N. and Portniaguine, O., 1995, Resistivity imaging by time-domain electromagnetic migration: Explor. Geophys., **26**, 186-194.

### 3. Uygulamalar

- 1) TEM GÖ verileri dB/dt eğrilerinden yaklaşık formullerle elde edilmektedir. Ekte verilen zaman-dB/dt verileri için geç zaman GÖ değerlerini hesaplayınız. Efektif alıcı alanı = 5625 m<sup>2</sup>, verici; bir kenarı 75 m olan kare halkadır. Verilerde zamanın birimi milisaniye ölçülen veriler ise  $\mu\text{V}/(\text{amper m}^2)$  olarak verilmiştir. Diğer verileri ihmal ediniz.
- 2) TEM verilerinin en basit yorumu derinlik – öz direnç dönüşümleri ile yapılır.

$$\rho_{eff} = 2.3 \rho_a e^{-0.85}$$

ve

$$\delta_{eff} = \frac{\delta}{2.3}$$

bağıntılarını kullanarak ekte verilen eğriyi yorumlayınız.

TEM verisi

3	5	16	55	75
0.0069	17.55660057			
0.009	10.3302002			
0.0121	5.56020021			
0.016	3.13560009			
0.0202	1.89540005			
0.0263	1.0905			
0.0338	0.62040001			
0.0425	0.36585			
0.0547	0.20460001			
0.0693	0.10950001			
0.086	6.01E-02			
0.107	3.23E-02			
0.138	1.51E-02			
0.175	6.84E-03			
0.219	3.36E-03			
0.28	1.52E-03			
0.354	6.30E-04			
0.441	3.00E-04			
0.561	3.00E-05			
0.707	1.50E-05			