



Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Jeofizik Mühendisliği Bölümü

JFM316 ELEKTRİK YÖNTEMLER
LİSANS DERS NOTU

III- YAPAY UÇLAŞMA YÖNTEMİ
(INDUCED POLARIZATION METHOD)

Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Ankara Üniv.,Müh. Fak., Jeofizik Müh. Böl., 06100, Beşevler-Ankara.

E-posta: candansa@eng.ankara.edu.tr

Mart 2008

ANKARA

*Ankara Üniv. Müh.Fak. Jeofizik Müh.Böl., 06100- Tandoğan
Bu notu yazardan habersiz fotokopi ile çoğaltmak yasaktır.*



Bu ders notları tamamlanamamıştır. Eksik olan yerler "JFM316 Elektrik Yöntemler" dersinde anlatılmıştır. Ancak ders notlarınıza ek olarak bu hali ile bu notları kullanımınıza sunuyorum.

YAPAY UÇLAŞMA YÖNTEMİ (INDUCED POLARIZATION-IP)

1. GİRİŞ

Yapay Uçlaşma (YU) yer içindeki materyallerde bir akım uyarımı etkisiyle gecikmiş voltaj olarak ölçülen olaydır. Özellikle sülfürlü maden aramalarında kullanılan etkili bir elektrik yöntemidir. Jeofizik' te YU, öz direnç birikmesi veya materyaller içinde elektrik kutuplanma olarak bilinir. YU etkisi kayaçların içinde gruplanmış (kümelenmiş) şekilde bulunan metalik minerallerinde çok fazla görülür.

Minerallerden oluşan bütün kayaçlar elektriksel özellik bakımından hemen hemen yalıtkandır. Bu nedenle kayaçlarda, akım kayacın gözeneklerini dolduran yeraltı suyu içerisinde iyonlar ile taşınır. Metalik olan, yani elektriği metallerdeki gibi ileten birkaç mineral vardır. Bunlar genellikle sülfid mineralleridir. Birkaç oksit ve karbonun iletken biçimi olan grafitte bu gruptadır.

Yöntemin en büyük avantajı, özellikle birim hacim içinde % 0.5 oranında bulunan saçılmış sülfid yapılarından YU belirtisinin oluşmasıdır (Sumner 1974). YU yönteminde, ölçülen değer büyük oranda belirtiyeye neden olan yapıdan kaynaklanır. Dolayısı ile, DU, DAÖ veya EM yöntemlere göre doğrudan belirtiyeye neden olan yapıyı göstermesi bakımından avantajlıdır. YU cevabının büyüklüğü mineralizasyonun değerine (çokluğuna) bağlı artar. Bu değer masif sülfür yapısından dolayı çok büyüktür. Masif sülfür yatakları daha ucuz olan Elektrik ve EM yöntemlerle bulunabilir. Fakat YU yöntemi, saçılmış sülfür yataklarının aranmasında diğer elektrik yöntemlere göre en etkili yöntemdir.

YU cevabını keşfeden ve bu yönteme isim veren kişi bir Fransız olan Conrad Schlumberger' dir. Bu yöntem ile ilgili bir Alman patenti almıştır (1912). Yöntemi tanıtan bir monogramı ise 1920' de yayınlanmıştır. Bu çalışmasında, ilgilenilmeyen temelin(background) etkisi mineralizasyondan kaynaklanan cevabı silme-yoketme eğilimindedir şeklinde bir sonuca varmıştır. Bu ise yıllarca bu yöntem hakkında çalışmaların yapılmamasına neden olmuştur.



YU yöntemi 1930' larda petrol ve cevher aramalarında kullanılmaya başlamıştır. 1948' de Seigel yöntemin güvenilir olduğunu göstermiştir Newmont arama şirketi YU yöntemi konusunda . 1949' da araştırmalara başlamıştır. MIT' de Madden başkanlığında bir grup 1952' de YU konusunda çalışmalara başladı. Daha sonra Madden ve Marshall 1956-1959 tarihleri arasında ABD atom enerji komisyonu içinde yazdıkları raporlarda "elektrod uçlaşması (electrode polarization), "zar uçlaşması (membrane polarization)", " metal faktör (MF)", "yüzde frekans etki (percent f. Effect)" terimlerini tanımlamışlardır.

YU aletleri 1960' dan sonra kullanmaya elverişli hale gelmiş ve dünya genelinde kabul edilen ve kullanılan bir Jeofizik yöntem olmuştur. 1960' ların sonunda karmaşık öz direnç (complex resistivity) ölçümleri yapılmaya başlanmıştır. Böylece metalik minerallerle metalik olmayan mineraller (Grafit gibi) birbirinden ayırmak mümkün olmuştur. 1973' larda faz ve genlik ölçen aletler yapılmaya başlandı. Rusya, ABD ve Kanada' da düşük ve yüksek akım yoğunluğundaki sülfür ayrımı araştırıldı. Sülfür aramasında YU yönteminin kullanılabilceğini ilk öneren Dakhnov (1941) oldu. Fakat alet yetersizliğinden o dönemdir pratik uygulaması yapılamadı. YU-logu 1946' da A.E. Zeleznak tarafından maden cevherinin tesbiti için uygulandı. Petrol aramasında ilk çalışmalara Potapenko (1940) ve Peterson(1940) tarafından yapıldı.

Yapay kaynaklı EM (Induction EM) yöntemler, kutuplanma cevabının oluşturulamayacağını kanıtladı. Yine de bir firma Manyetik YU yöntemini geliştirdi. Fakat bu yöntemde de yeni bir elektrod çifti ile akım uygulanıyor ve bir AC manyetometre ile sinyal ölçülüyordu. YU yöntemi ile 1985' lardan sonra hidrokarbon aramaları yapılmaya başlandı.

YU yorumlamasının babası olarak bilinen Seigel 1959' da yüklenebilirlik (m-chargability) kavramını tanımlamıştır. Galvanik akım' dan oluşan manyetik YU yöntemini Seigel (1974) tanımlamıştır. Jim Wait (1959) zaman ve frekans ortamı YU ve EM yöntemlerin matematik temelini oluşturmuştur.

1950' lere kadar YU ölçüleri zaman ortamında yapılırken, 1950' de Collett ve Seigel sülfür içeren kayalarda GÖ' in zamana bağlı azaldığını gözlemlemişlerdir. 1950-51 yıllarında Scott ve Wait tasarladıkları alet ile frekans ortamı YU ölçüsünü arazide denemişlerdir.



Madden ve öğrencileri Hallof ve Vozoff 1954' de arazide cevher üzerinde "audio" frekanslarda test yapmışlardır. Madden bu sırada yapma-kesit (pseudosection) ölçü alma sistemini geliştirmiştir.

Kirli kum ve kil içinde "Zar uçlaşmasının" YU etkisi oluşturduğunu Vacquier ve diğ. (1957) gözlemlemiş ve 1B model bağıntısını geliştirmişlerdir. Pelton ve diğ. (1978) yüklenebilirlik ve zaman sabiti (time constant) kavramlarını tanımlamışlardır.

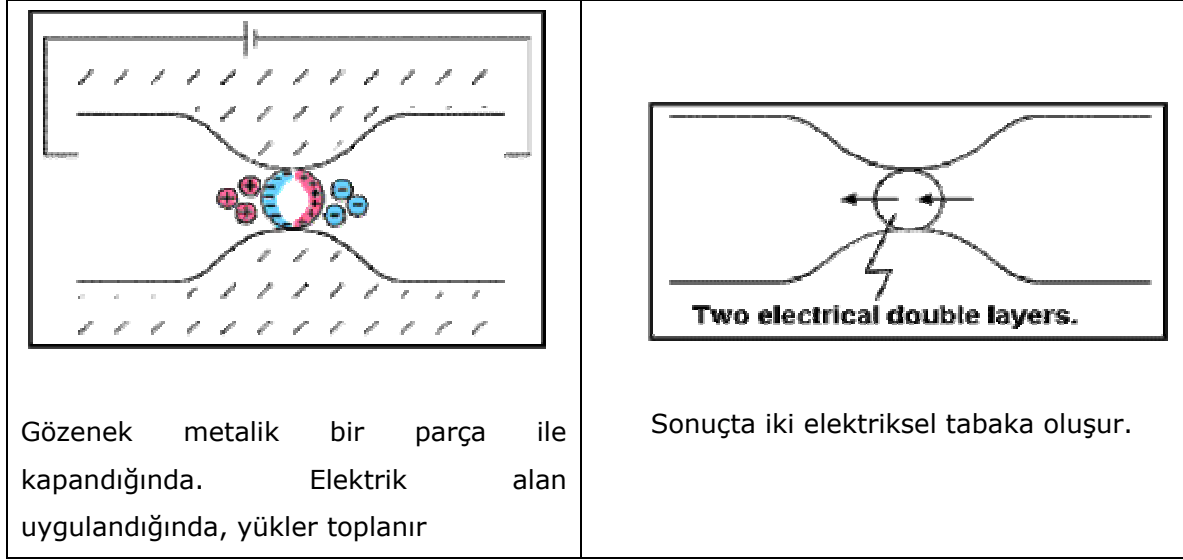
Yine, 1953 yılında New Mexico' da Vacquier ve grubu YU yöntemini su aramasında kullandılar. ABD' de 1955-1960 yıllarında birçok üniversite ve maden şirketinde YU konusunda çalışmalar yapılmıştır. Eski Rusya' da ise 1951' den itibaren YU yöntemi araştırılmaya başlandı. Maden aramacılığında kuyuda YU Webster (1986) tarafından yapılmıştır. Petrol aramacılığında, formasyonların incelenmesinde Freedman ve Vogiatzis(1980) in çalışmaları vardır. YU yöntemi, geliştirilen en karmaşık jeofizik yöntemdir ve en büyük dezavantajı pahalı bir yöntem olmasıdır.

2. YU OLUŞTURAN ETKİLER

Yerine iki elektrod yardımı ile doğru akım uygulanır ve bu akım belirli bir süre sonra kesilirse, bir gerilim ölçerden okunan gerilim farkı hemen sıfır olmaz. Zamanla azalarak bu etki sıfıra yaklaşır. Bu etki farklı durumda oluşur. Bunlar "Elektrot Uçlaşması ve Zar Uçlaşması" dır.

2.1. Elektrot Uçlaşması (Electrode Polarization)

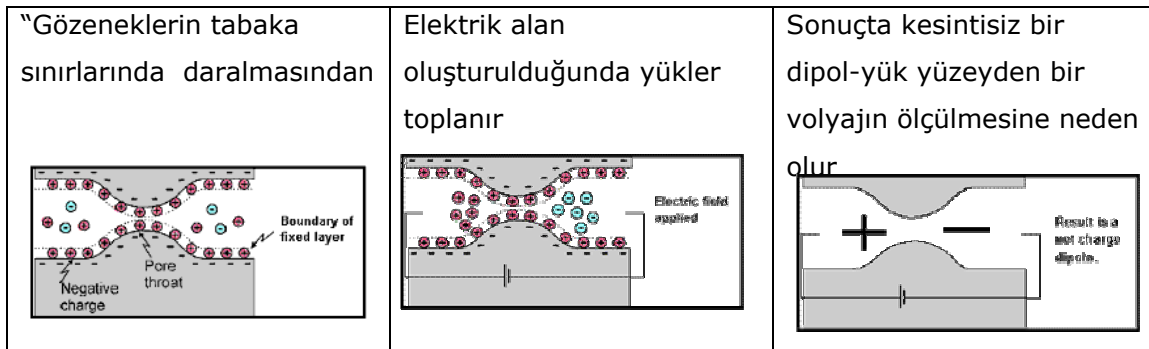
Elektrik akımı yer içerisinde kayaç gözeneklerindeki eriyiğin iyonları ile taşınır. Eğer bu iyonların yolu bazı mineral parçaları ile kapatılırsa, iyonlar metal sınırlarında toplanırlar. Çünkü akım mineral içerisinde elektronik iletkenlik ile taşınacaktır. Mineral etrafında akımın girdiği tarafta pozitif, çıktığı tarafta negatif iyonlar toplanır. Böylece biriken yükler elektrik akımının akışına ters yönde bir voltaj yaratırlar. Akım kesilince bu artık voltaj sürekli azalarak söner. Çünkü mineral yüzeyinde toplanan iyonlar tekrar eriyiğe döner. İyonların bu hareketi YU' yı oluşturur. Voltajın azalma biçimi cisimden cisime değişir.



Şekil 1. (UBC' den alınmıştır, URL: <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/>)

2.2. Zar Uçlaşması (Membrane Polarization)

Kayaç içinde dağılmış kil mineralleri ıslak olduklarında pozitif veya negatif yüklüdürler. Bu nedenle ıslak kil parçacığı üzerinde bir iyon bulutu oluşur. Yeraltına bir akım uygulandığında, pozitif iyonlar yer değiştirerek kil sınırlarından uzaklaşırlar. Akım kesildiğinde ise pozitif iyonlar tekrar kil mineralleri etrafındaki negatif iyonlara doğru hareket ederler. İyonların bu hareketi YU' yı doğurur. Zar Uçlaşması izleyen üç şekil ile açıklanmaktadır:



Şekil 2. (UBC' den alınmıştır, URL: <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/>)

3. YU YÖNTEMİNDE ÖLÇÜ ALIMI VE YU PARAMETRELERİ

Yu yönteminde ölçüler zaman ortamı veya frekans ortamında alınır.

3.1. Zaman Ortamı YU Ölçüsü

Zaman bölgesi ölçümlerde, yere uygulanan doğru akımın kesilmesinden sonra, ölçülen gerilim farkı aniden sıfıra düşmez. Belirli bir süre sönümlenerek sıfır olur. Bu gerilim eğrisi YU boşalım eğrisi olarak adlandırılır. Zaman bölgesi ölçümleri İki şekilde yapılmaktadır.

1. Yere uygulanan doğru akımdan dolayı gerilim elektrodları (fincan potlar) arasında ölçülen gerilim farkı V_m ve bu akım kesildikten sonra bir t-zamanında oluşan "ikincil" gerilim farkı $\phi_s(t)$ sembolü ile gösterilsin. $\phi_s(t)$ gerilim farkının ölçüldüğü bu t-zamanı arazide tüm ölçülerde aynı olmalıdır.

Ölçülen bu iki gerilim farkını kullanarak "yüklenebilirlik" (chargebility) olarak isimlendirilen YU parametresi izleyen eşitlik ile elde edilir.

$$m = \frac{\phi_s(t)}{\phi_m} = \frac{\phi_m - \phi_\sigma}{\phi_m}$$

Yüklenebilirlik boyutsuzdur. Parametreler, yandaki şekilde açıklanmaktadır.



(UBC' den alınmıştır, URL:
<http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/>)

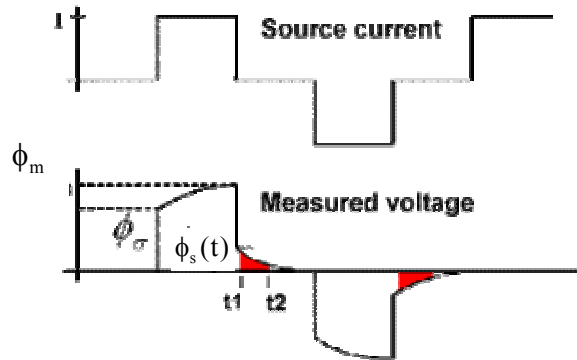
2. Daha genel kullanılan yöntem, sönüm eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasıdır.

Bu aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$M = \frac{1}{\phi_m} \int_{t_1}^{t_2} \phi_s(t) dt$$

(UBC' den alınmıştır, URL:

<http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/>)



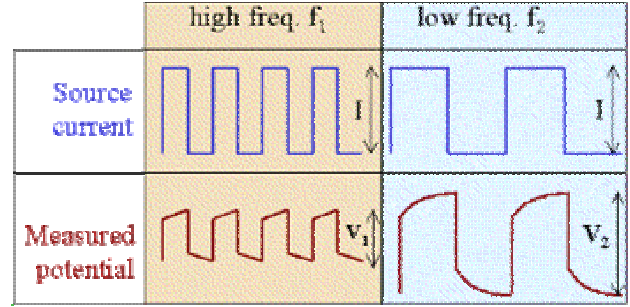
Zaman ortamı YU ölçülerinden elde edilen başka bir büyüklük aşağıdaki gibi tanımlanan %YU etkisidir:

$$\%YU = 100 \frac{V_s}{V_m}$$

3.2. Frekans Ortamı YU Ölçüsü

- İki şekilde yapılır:

1- Yüzde frekans etki (%FE) olarak bilinen değer, iki farklı frekansa yapılan ölçülerden hesaplanır. Yüksek frekansa, yerin cevabı kısa sürede ölçülür. Dolayısı ile sinyalin küçük olması beklenir. Aşağıda, %FE değerini veren bağıntı verilmiştir:



$$\%FE = 100 \left(\frac{\rho_a(f_2) - \rho_a(f_1)}{\rho_a(f_1)} \right)$$

(UBC' den alınmıştır, URL: <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/>)

Burada f_2 düşük frekans değeridir. Bu frekans için ölçülen öz direnç doğru akımdan dolayı ölçülen öz direnç olarak kabul edilebilir. Uygulamada (f_1, f_2) frekans çifti (0.3, 3) Hz veya (0.5, 5) olarak seçilebilir. FE ve m ' nin küçük değerleri için aralarındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir (Sumner (1976, S.63 ve S.80)

$$FE \approx \frac{m}{1+m} \text{ veya } m \approx \frac{FE}{1-FE}$$

ve küçük FE değerleri ($FE \ll 1$) için, $m \approx FE$ alınabilir.

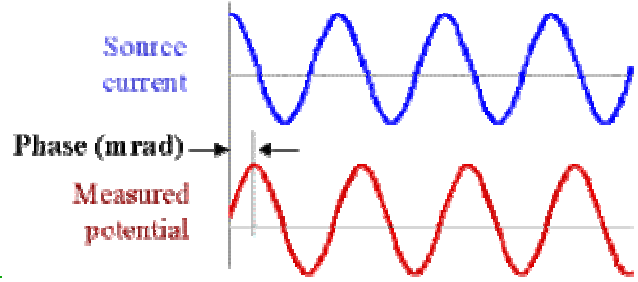
Frekans ortamı YU ölçülerinden elde edilen bir diğer büyüklük ise "Metal Faktör (MF-Metal factor)" olarak isimlendirilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Madden, 1957).

$$MF = 2\pi 10^5 \cdot \frac{FE}{\rho_a(f_2)} = 2\pi 10^5 \cdot \left(\frac{\rho_a(f_2) - \rho_a(f_1)}{\rho_a(f_1)\rho_a(f_2)} \right)$$

MF değeri, maden cevherinin özdirencinin yan kayaç özdirencinden küçük ve frekans etkisinin büyük olduğu yerlerde iletkenlik değeri de büyüktür. MF değeri zaman ortamı YU parametresi olan yüklenebilirlik kullanılarak da aşağıdaki gibi elde elde edilebilir (Bertin and Loeb, 1976):

$$MF = 2\pi 10^5 \cdot \frac{m}{\phi_{DA}}$$

2- Aynı salınım frekanslı iki sinüzoidal dalga formu, aralarındaki zaman kayması veya dalga boyunun açıl kesimi ile karşılaştırılabilir. Faz Alıcıdan verilen akım ve ölçülen gerilim değeri sinüs dalgası şeklinde çizilirse, uyarıcı akım ile kutuplanma voltajı sinyalleri arasındaki faz farkı (veya faz açısı) ölçülebilir (Sumner, 1976, Şekil 1.6). Birimi miliradyan' dır.



(Sumner Ş.1.6.)

YU faz gecikmesi dalga formuna göre iki bileşene ayrılabilir. Bunlar "in-phase" ve "out-of-phase" bileşenleridir (Şekil 1.7). Bu iki bileşen modern elektrik aygıtları ile daha kolay ölçülebilir. Faz açısının yanında bu iki bileşen, YU yorumunda ek bilgi sağlar. Faz açısı (β) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\beta(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{sanal}(\phi)}{\text{gerçek}(\phi)} \right)$$

Doğru akım uygulamalarında görünür özdirenc (3.1.) bağıntısı ile tanımlanırken, alternatif akım uygulamalarında,

$$\rho_a(w) = |\rho_a(w)|e^{i\beta(w)}$$

bağıntısı ile karmaşık görünür özdirenç tanımı yapılır.

Zaman ve frekans ortamı YU ölçüleri birbirinden farklı gözükmesine rağmen benzer uygulamalardır. Yüklenebilirlik şle frekans etki değerleri birbirine eşdeğer büyüklüklerdir. Frekans ortamı ölçüler hızlı olması bakımından zaman ortamına göre tercih edilmektedir. Yeriçindeki kayaç ve minerallerin İletkenlik değeri geniş bir aralıkta değışirken, YU cevapları (m ve FE) geniş aralıkta değışmez. Bu nedenle FE ve m değeri % şeklinde verilebilirler.

2.3. Görünür Yüklenebilirlik ve Görünür FE Kavramları

Arazide ölçülen gerilim farklarından bölüm 3.1 ve 3.2` de elde edilen m ve FE parametreleri, yeriçindeki farklı özdirenç ve YU özelliği olan yapıların toplamından etkilenmektedir. Dolayısı ile arazide ölçülen gerilim farklarından elde edilen yüklenebilirlik değeriine görünür yüklenebilirlik (m_a) ve frekans etki değeriine görünür frekans etki (FE_a) denir.



4. YU YÖNTEMİNDE VERİ TOPLAMA TEKNİKLERİ

YU Yönteminde, DAÖ yönteminde kullanılan elektrod dizilimlerinden birisi isteğe bağlı seçilir. Genel olarak Dipol-dipol veya Pole-Dipole dizilimi kullanılır.

- Ölçü alımt teknikleri ise DAÖ yönteminde olduğu gibi şunlardır;
 - Sondaj ölçüsü
 - Profil Ölçüsü
 - Sondaj-Profil ölçüsü

Bu ölçü tekniklerinden birisine göre ölçülen veriler ile Sondaj Eğrileri, Profil Eğrileri, yapma-kesitler ve seviye haritaları çizilebilir. Bu grafikler arazide ölçülen gerilim farkı değerlerinden elde edilen Görünür Özdirenç ve Görünür Yüklenebilirlik (veya F- ortamında %FE değerleri) değerleri için ayrı ayrı çizilir.

- YU Yönteminde Kullanılan Ölçü Aletleri DAÖ yöntemindekiler ile aynıdır. Farklı olarak
- YU yönteminde gerilim elektrodu olarak polarize olmayan potlar kullanılır.
 - Ölçü aleti olarak seçime bağlı Zaman veya Frekans ortamı ölçü alan aletler kullanılır. F-ortamı ölçümler için geliştirilen aletler hem doğru akım' da ($f=0$ veya sifira çok yakın) hemde seçime bağlı frekanslarda alternatif akımda gerilim değerlerini ölçer.

5. YU YÖNTEMİNDE VERİ YORUMU

YU verileri de DAÖ verilerine benzer nitel ve nicel olarak yorumlanabilir.

5.1. YU verilerinin Nitel Yorumu

Nitel yorum ölçülen gerilim farklarından elde edilen YU büyüklükleri ile ($GÖ(\rho_a)$, $GY(m_a)$) veya frekans ortamı için $GÖ$ ve $\%FE_a$) elde edilen sondaj-eğrileri, profil eğrileri, yapma-kesitler ve seviye haritalarına bakılarak yorumlar yapılır.

Nitel yorumda, örneğin sülfürlü maden arama amaçlı çalışmalarda; genel olarak ρ_a' nın düşük ve m_a' nın büyük olduğu yerler belirti bölgesi olarak kabul edilir.

Doğada bulunan bütün kayalar iletken içersin veya içermesin azda olsa YU etkisi gösterirler. Bu etkiye normal etki veya arka plan (background) etki denir. Genel olarak YU verilerinin yorumunda belirti türleri $\%FE_a$ ve m_a' nın büyüklüğüne bağlı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Başokur);

| $\%FE_a$ | m_a | Belirti Türü |
|----------|--------|---------------------------|
| 0 - 4 | 0 - 10 | Normal (arka plan) etkisi |
| 4 - 8 | | Zayıf Belirti |
| 8 - 40 | > 10 | Belirti |

5.2. YU Verilerinin Nicel Yorumu: Modelleme ve Ters Çözüm

YU yönteminde arazide ölçülen görünür yüklenebilirlik değerlerinden yüklenebilirlik değerlerinin hesaplanabilmesi için, önce Görünür Özdirenç verilerinden elde edilen verinin yeterliliğine göre 1-B, 2-B veya 3-B ters çözüm ile özdirençler elde edilir. Daha sonra bunlar kullanılarak yüklenebilirlikleri hesaplayabiliriz.

- Her iki veri grubunun eşzamanlı "modelleme" ve "ters çözüm" teknikleri ile veri işlemi yapılır. Daha sonra elde edilen modeller yorumda kullanılır.

Yeraltındaki herhangi bir kutuplanabilen yapı ve kullanılan herhangi bir elektrod dizilimi için Görünür yüklenebilirlik (m_a) değeri Seigel(1958) tarafından verilmiştir. Model parametreleri ve görünür yüklenebilirliği (m_a) ilişkilendiren "model bağıntısı" aşağıdaki gibi verilebilir (Siegel, 1958).

$$m_a = \frac{\phi_s(t)}{\phi_m} = \frac{\phi_m - \phi_\sigma}{\phi_m} = \frac{F_{DA}[\sigma(1-m)] - F_{DA}[\sigma]}{F_{DA}[\sigma(1-m)]} \quad (5.1)$$

Burada,

$$V_\sigma = F_{DA}[\sigma]$$

olduğu görülmektedir. $F_{DA}[\sigma]$, doğru akım özdirenç için düz çözüm operatörüdür ve üç boyutlu (x,y,z) kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi verilir:

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla \phi_\sigma] = -I\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0) \quad (5.2)$$

Burada σ (x,y,z) uzayında öziletkenlik(Özdirenç- $\rho = 1/\sigma$) ve m ise yine üç boyutlu uzayda yüklenebilirliktir. Benzer şekilde $\phi_m = F_{DA}[\sigma(1-m)]$ dir. Bu durumda $F_{DA}[\sigma(1-m)]$ düz çözüm operatörü aşağıdaki gibi verilir:

$$\nabla \cdot [\sigma(1-m)\nabla \phi_m] = -I\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0) \quad (5.3)$$

Eşitlik (5.2) ve (5.3) den sırasıyla ϕ_σ ve ϕ_m çözümlenerek (5.1) de yerine konursa, görünür yüklenebilirlik değeri hesaplanır. Hesaplanan değer üç boyutlu özdirenç ve yüklenebilirlik modelleri içindir. İki-boyutlu (2B) modelleme için eşitlik (5.2) ve (5.3)' de

$$\frac{\partial \sigma(x, y, z)}{\partial y} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial m(x, y, z)}{\partial y} = 0$$

kabul edilir. Sonuç denklemi DAÖ yönteminde anlatıldığı gibi çözülerek 2B öz direnç ve yüklenebilirlik modelleri için görünür yüklenebilirlik değeri elde edilmiş olur.

Yukarda görüldüğü m_a değerlerinin hesaplanabilmesi için iki kere DAÖ düz çözüm operatörü çözümlenmelidir. Ters çözüm ise DAÖ yöntemindeki gibi, doğrusal olmayan problemlerin ters çözüm yöntemlerinden birisi ile çözülür. YU yönteminde genellikle DAÖ verilerinin de ters çözümünde kullanılan, "yuvarlatılmış sönümlü-en küçük-kareler(OCCAM inversion)" yöntemi kullanılır.

Toplam görünür yüklenebilirlik (m_a) değeri, yer içindeki her bir kutuplanabilen yapının yüklenebilirliği (m_i) ile ağırlık fonksiyonunun (w_i) çarpımlarının toplamına eşittir.

$$m_a = \sum_i m_i w_i, \quad \text{burada } \sum_i w_i = 1 \text{ 'dir}$$

Genel olarak, yer içinde N-adet farklı öz dirençli yapı olsun. m_a izleyen şekilde elde edilir;

$$m_a = \sum_i^N m_i \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i}, \quad w_i = \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i}$$

Ağırlık fonksiyonu olarak, bir yeraltı modelinde, farklı kutuplanabilen yapıların görünür öz dirençlerindeki değişimin, her bir yapının öz direncine oranı olarak alınmıştır. Özel bir yeraltı geometrisi ve kullanılan elektrot dizilimi için boyutsuz olan ağırlık fonksiyonları özel bir yeraltı modeli için eğri şekline çizilebilir.

Frekans ortamı ölçülerinde, $\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log f}$ alınırsa, Görünür yüklenebilirlik aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log f} = \sum_i^N \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \frac{\partial \log \rho_i}{\partial \log f}$$



Burada zaman ortamındaki yüklenebilirliğin, frekans ortamında $\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log f}$ oranına eşdeğer olduğu görülmektedir. Yani,

$$m_i \rightarrow \frac{\partial \log \rho}{\partial \log f}$$

6. SPEKTRAL YU YÖNTEMİ (Faz YU Yöntemi)

Bu yöntem, zaman ve frekans ortamı yapay uçlaşma ölçümlerinin üstünlüklerini kapsar. Ek olarak daha duyarlı ve çabuk ölçü alınır. Bu yöntemde, faz ve genlik ölçüsü geniş bir frekans aralığında gerçekleştirilir. Frekans aralığı $1/32 (1/2^5)$ Hz' den – $1024 (2^{10})$ Hz' e kadar olabilir. Bu yöntemde amaç, bir elektrot yerleşimi için geniş frekans bölgesinde yeraltının elektrik yanıtını (transfer function) belirlemektir. Yanıttaki küçük bir değişim önemli olduğundan, ölçümleri mümkün olduğu kadar duyarlı yapmak gerekir.

Spektral YU yönteminde önlem alınması gereken şu üç gürültü ve saçılma (distortion) kaynağı vardır:

- I- Tellürik Akımlar:** Elektriksel gürültü olarak bütün frekanslarda bulunurlar. Ancak bu akımlar çok düşük frekanslarda büyük sorun haline gelir. Ölçülerden, tellürik akımları gidermek için "coherent" süzgeçler kullanılır. Bu sinyal birleştirme (signal stacking) tekniğini kullanmak için, akım kaynağı ile alıcı arasında son derece doğru faz kontrolü kurmak gerekir.
- II- Akım Kaynağındaki Değişimler:** Elektrodlar yardımı ile yere uygulanan akımın genliği ve frekansında, zamanla değişimler olur. Bu etkiler, akımın dalga formunda değişiklikler yaratırlar. Bu değişiklikler tanımlanıp, dengelenmezler ise duyarlı Spektral YU ölçüsü alınamaz. Bunun için alıcılara akım kanalı (current channel) eklenir. Bunlar ile akımın dalga formu alıcıya iletilir. Bu dalga formu, sinyalin genliğini ve fazını bulmak için kullanılır.
- III- "Inductive Coupling", Elektromanyetik Etkiler:** Spektral YU ölçülerini saçılmaya uğratmaları beklenebilir. Bu saçılmalar, frekansın ve iletkenliğin artması, elektrod aralığı ve açılımın büyümesi ile artar. Bu etki daha çok yüksek frekanslarda sorun oluşturur (Dey ve Morrison, 1978; Hohmann, 1973,1975). Bu elektromanyetik etkilerin frekans bağılından oldukça farkı olması iyi bir şanstır. Spektral YU ölçülerine yüksek frekanslarda devam ederek, bir elektrod yerleşimi ve yeraltı geometrisi için, bu etkinin büyüklüğünü ve frekansını belirlemek mümkündür. Spektral YU yanıtından EM saçılmaları kaldırmak için bir ters çözüm tekniği geliştirilmiştir (Halhof and Pelton, 1980)

6.1. Spektral YU Yanıtı

Geniş bir frekans aralığında, genlik ve faz ölçüleri duyarlı olarak yapılırsa ve inductive coupling uygun bir teknikle kaldırılırsa, bir elektrod yerleşimi için spektral YU yanıtı duyarlı olarak belirlenebilir. Yapılan çalışmalarda aşağıdaki gibi verilen Cole-Cole denkleminin SIP yanıtı olan karmaşık özdirenci (empedansı) (Z) tanımlayan en uygun bağıntı olduğu gözlemlenmiştir (Pelton ve diğ., 1978):

$$Z(w) = \rho_{DA} \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{(1 + iw\tau)^c} \right) \right]$$

Burada Z(w)'nin birimi ohm-m' dir. Geniş bir f-aralığında yukardaki gibi verilen spektral YU yanıtı izleyen dört parametre ile tanımlanır:

| | |
|-------------|--|
| Z(w) | Karmaşık Özdirenc (Karmaşık Empedans) (ohm-m) |
| ρ_{DA} | Doğru akımdaki özdirenc (ohm-m) |
| m | Yüklenebilirlik (Volt/Volt- boyutsuz) |
| τ | Zaman Sabiti (s) |
| c | Frekans bağılı |
| w | Açısal Frekans (s^{-1}) |

f_c frekansı kritik frekans olarak adlandırılır ve en büyük faz kaymasının ölçüldüğü frekanstır. f_c genellikle spektral yanıtı tanımlamak için kullanılır. Cole-Cole denkleminde f_c diğer parametreler cinsinden;

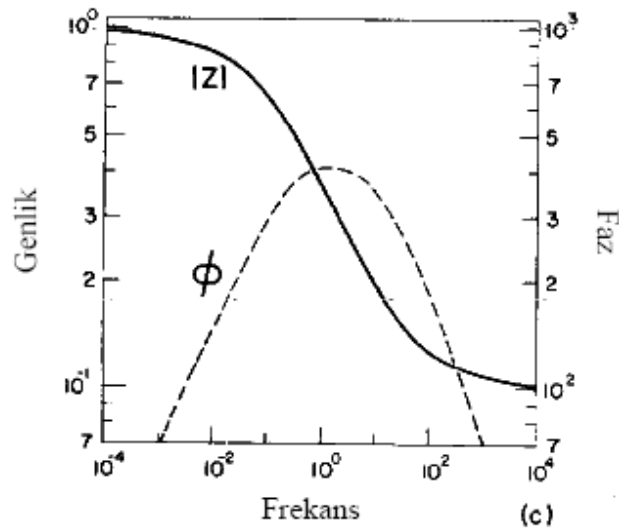
$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau(1-m)0.5^c}$$

olarak verilir. f_c , zaman sabiti ile ters orantılıdır. Bu değer yüksek frekanslarda ise zaman-sabiti küçük, alçak frekanslarda bulunursa zaman-sabiti büyüktür.

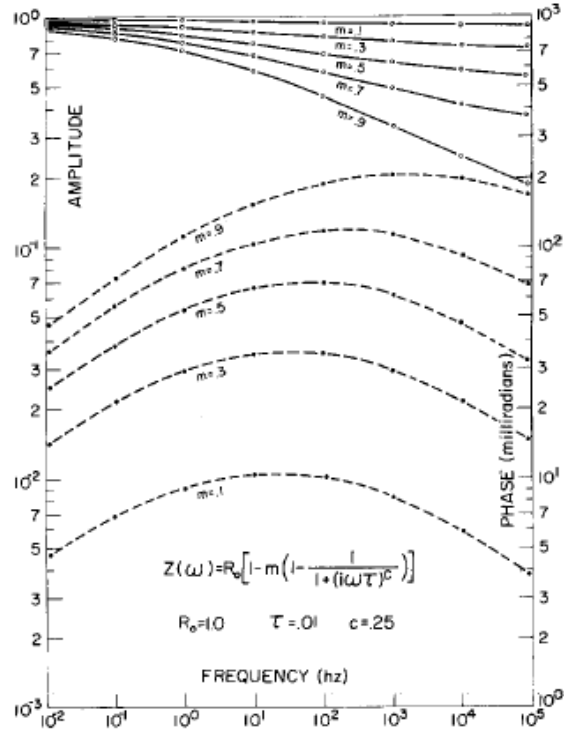
Herhangi polarize olabilen kayaç için ρ_{DA} ve m değerleri, kayacın gözeneklerine ve içerdiği metalik parçacıkların toplam yüzdesine bağlıdır. Metalik mineral yüzdesi artarsa, ρ_{DA} küçülür, m ise artar.

Araştırmalar ve arazi deneyimi, τ ve c değerlerinin, daha çok kayada bulunan metalik minerallerin türüne bağlı olarak "metal mineralleşme dokusu (texture)" ile ilişkilidir. Dokuyu tanımlayan iki etken bulunmaktadır. Bunlar,

- YU etkisine neden olacak polarizlenme parçacıklarının herbir popülasyonu için tane-iriliği ve
- Kayada bulunan parçacıkların farklı popülasyonlarının sayısı ve herbir polarizlenebilen parçacık popülasyonlarının içindeki tane-iriliği dağılımları.



Şekil 6.1. IP etkisini temsil eden basit bir devre modeli için karmaşık empedansın genlik ve fazının frekansla değişimi (Pelton ve diğ. 1978)



Şekil 6.2. Cole-Cole modeli için genlik ve faz eğrileri. Grafikte, $\rho_{DA} = 1.0$, $\tau = 0.01$, $c = 0.25$, ve $m = 0.1-0.9$ arasında değişmektedir (Pelton ve diğ. 1978).

KAYNAKLAR

Aşağıda bu ders notunun hazırlanmasında kullanılan kaynak ve YU yöntemi ile ilgili yararlanabileceğiniz diğer bazı kaynaklar sunulmuştur.

- Sumner, J.S., 1976. Principle of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Pub., Amsterdam-Oxford-New York.
- Fink, J.B., McAlister E.O, Sternberg, B.K., Wieduwilt G.W., Ward, S.H.. Induced Polarization application and case histories. SEG publication, 1990.
- Bevington, P.R., D.K. Robinson, 1992, Data Reduction and error analysis for the physical sciences, McGraw Hill Inc.
- Dey , A. and H.F. Morrison, 1979a, Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, Geophysical Prospecting, 27, 106-136.
- Dey, A. and H.F. Morrison, 1979b, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures: Geophysics, 44, no. 4, 753-780.
- Fink, J.B. ... (et al.) editors, 1990, Induced Polarization: applications and case histories. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Ok., 1990.
- Ghosh, D. P., 1971, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements: Geophysical Prospecting, 19, no. 2, 192-217.
- Inman, J.R., 1975, Resistivity inversion with ridge regression., Geophysics, Vol 40, #5, pg 798, or Geophysics, Vol 50, #11, pg 2112.
- Inman, J.R., Ryu, J., Ward, S.,1973, Resistivity inversion., Geophysics, Vol 38, #6, pg 1088.
- Milsom, J.M., 1996, Field Geophysics, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- McGillivry, P.R., 1992, Forward modelling and inversion of dc resistivity and mmr data., unpublished PhD. thesis, UBC.
- Oldenburg, D., and Y. Li, 1994, Inversion of induced polarization data, Geophysics, Vol 59, No. 9, Pg 1327.
- Oldenburg, D.W., Y. Li and R.G. Ellis, 1997, Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: a case history for Mt. Milligan, Geophysics, 62, 5, pp1419-1431
- Reynolds, J.M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons.
- Sharma, P.V., 1997, *Environmental and Engineering Geophysics*, Cambridge University Press.



Siegel. H.O., 1959, *Mathematical formulation and type curves for induced polarization* Geophysics, 38, 49-60.

Strangway, D.W., 1966. *Electromagnetic parameters of some sulfide ore bodies*, In Mining Geophysics, vol 1, 227-247. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists.

Telford, W.M., L.P. Geldart, and R.E. Sheriff, 1990, *Applied Geophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press, 1990.

Ulrich, C. and Slater, L. D., 2004, Induced polarization measurements on unsaturated, unconsolidated sands: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **69**, 762-771.

Hoheisel, A., Hordt, A. and Hanstein, T., 2004, The influence of induced polarization on long-offset transient electromagnetic data: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **52**, 417-426.

Davydycheva, S., Rykhlin, N. and Legeido, P., 2004, An electrical prospecting method for oil search using the induced polarization effect, 74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., 604-607.

Yoshioka, K. and Zhdanov, M., 2004, Three-dimensional inversion of induced polarization data for relaxation model parameters, 74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., 684-687.

Zhu, Y. and Li, Y., 2004, 3D inversion of induced polarization data in wavelet domain, 74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., 1183-1186.

Slater, L. D. and Glaser, D. R., 2003, Controls on induced polarization in sandy unconsolidated sediments and application to aquifer characterization.: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **68**, 1547-1558.

Watts, A., 2002, Discovery of the Ujina Cu Deposit, Collahuasi District, Chile, 72nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 412-415.

Kowalczyk, P., Thomas, S. and Visser, S., 2002, 3D inversion of resistivity and IP data, two case studies from mineral exploration, 72nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 419-422.

Petrick, W., 2002, Data considerations for 3D resistivity and induced polarization inversion, 72nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 673-675.

Comas, X. and Slater, L., 2002, Low frequency electrical properties of organic sediments, 72nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1456-1459.

Yoshioka, K. and Zhdanov, M.S., 2002, 3D inversion of the bipole-bipole array induced polarization data, 72nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 2422-2425.

Gasperikova, E. and Morrison, H. F., 2001, Mapping of induced polarization using natural fields: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **66**, 137-147.



Turai, E. and Dobroka, M., 2001, A New Method for the Interpretation of Induced Polarization Data - the TAU-Transform Approach, 63rd Mtg.: Eur. Assn. Geosci. Eng., Session: P049.

Slater, L. D. and Sandberg, S. K., 2000, Resistivity and induced polarization monitoring of salt transport under natural hydraulic gradients: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **65**, 408-420.

Li, Y. and Oldenburg, D. W., 2000, 3-D inversion of induced polarization data: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **65**, 1931-1945.

Ricarte, P., Srinivas, D., Sarma, V. S., Thomas, P. J., Joshi, M. S. and Prasad, P. R., 2000, Depth of detection of highly conducting and volume polarizable targets using induced polarization: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **48**, 797-814.

Basford, P. and Hughes, N., 2000, Geophysical response of the Hercules base metals deposit: A case study from western Tasmania: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **31**, 531-541.

Kowalczyk, P., 2000, Inversion of induced polarization data from Donlin Creek, Alaska, 70th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1067-1070.

Fullagar, P. K., Zhou, C. and Bourne, B. T., 2000, EM-coupling removal from time-domain IP data: 14th Geophysical Conference, Austr. Soc. Expl. Geophys., **31**, 134-139.

Peters, B. and Buck, P., 2000, The Maggei hays and Emily Ann nickel deposits, Western Australia: A geophysical case history: 14th Geophysical Conference, Austr. Soc. Expl. Geophys., **31**, 210-221.

Guo, W., Dentith, M. and Zhao, Y., 2000, Geophysical exploration in the Xi-Cheng lead-zinc orefield, Gansu Province, China: 14th Geophysical Conference, Austr. Soc. Expl. Geophys., **31**, 243-248.

Gomaa, M., Bayoumi, A. E.-R., El-Dewany, E. and Hussain, S., 1999, Renormalization group modeling of A. C. electrical properties of natural hematitic sandstone including texture effects, 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 204-207.

El-Kaliouby, H., Poulton, M. and ElDiwany, E., 1999, Inversion of coincident loop TEM data for layered polarizable ground using neural networks, 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 259-262.

Kemna, A., Dresen, L. and Raekers, E., 1999, Field applications of complex resistivity tomography, 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 331-334.

Kospiri, A., 1999, Integrated geophysical surveys for searching of podiform chromite in Albania, 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 354-357.

Stummer, P., Maurer, H. and Boerner, D., 1999, Real-time experimental design: Application to 3-D high-resolution DC resistivity and IP surveys, 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 555-558.



de Lima, O. A. L., 1998, Aquifer characterization and contaminant migration patterns with surface and borehole geophysics, 68th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 586-589.

Sampaio, E. E. S., Santos, A. B. and Sato, H. K., 1998, Spectral induced polarization and mineral discrimination, 68th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 740-743.

Wynn, J. C. and Laurent, K., 1998, A high-resolution electrical geophysical approach to mapping marine sediments in the Atlantic coastal shelf and the Gulf of Mexico, 68th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 805-808.

Routh, P. S., Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1998, Regularized inversion of spectral IP parameters from complex resistivity data, 68th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 810-813.

Krylov, S., Bobrov, N. and Wachter, B., 1998, Induced Polarization Effects in Frequency and Time Domain Electromagnetic Soundings, 60th Mtg.: Eur. Assn. Geosci. Eng., Session:10-02.

Basokur, A. T., Rasmussen, T. M., Kaya, C., Altun, Y. and Aktas, K., 1997, Comparison of induced polarization and controlled-source audio-magnetotellurics methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **62**, 1087-1096.

Esparza, F. J. and Gomez-Trevino, E., 1997, 1-D inversion of resistivity and induced polarization data for the least number of layers: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **62**, 1724-1729.

Nelson, P., 1997, Induced polarization research at Kennecott, 1965-1977: THE LEADING EDGE, **16**, no. 01, 29-33.

Vanhala, H., 1997, Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **45**, 303-326.

He, J., 1997, Frequency domain electrical methods employing special waveform field sources, 67th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 338-341.

Sakurai, K., Hasegawa, N. and Shima, H., 1997, Study of the efficiency and quality of complex resistivity measurement, 67th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 466-469.

Kriegshauser, B. and Tripp, A., 1997, Probing strata of anisotropic complex conductivity using surface-to-borehole methods, 67th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1953-1956.

Arai, E., 1997, Development of the IP tomography system and field testing in the Seta area, Japan, 67th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1961-1964.

Morrison, H. F. and Gasperikova, E., 1996, Mapping of induced polarization using natural fields, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 603-606.



Eaton, P. A. and Nabighian, M. N., 1996, Some quasi-quantitative approaches used to interpret IP data for gold exploration, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 607-610.

de Lima, O. A. L. and Araujo, F. F. S., 1996, Subsurface contaminant tracking by ground-penetrating radar and spectral induced polarization, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 924-927.

Hasegawa, N., Shima, H. and Sakurai, K., 1996, An application of two-dimensional IP image profiling to characterization of an active fault, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 928-931.

Fisher, R. and West, G. F., 1996, Synthetic arrays for interpreting 3-D pole-potential map resistivity and IP survey data, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 970-973.

Routh, P. S. and Oldenburg, D. W., 1996, Electromagnetic coupling removal from frequency domain IP data in 2-D environments, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1275-1278.

Cattach, M. K. and Stanley, J. M., 1996, The sub-audio magnetics (Sam) method, 66th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1310-1313.

Kamenetsky, F. M., 1996, Contribution of induced polarization into induction well-logging data, 58th Mtg.: Eur. Assn. Geosci. Eng., Session:P077.

Vanhala, H. and Soininen, H., 1995, Laboratory technique for measurement of spectral induced polarization response of soil samples: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **43**, 655-676.

Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **59**, 1327-1341.

El-Kaliouby, H. M., Hussain, S. A., El-Diwany, E. A. and Hashish, E. A., 1994, Optimum negative response of coincident loop above polarizable half-space, 64th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 346-349.

Prasad, T. R. M., Ramaiah, B. D., Jain, S. C. and Reddy, B. S., 1994, Complex resistivity measurements in field using a pseudo-noise source , 64th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 384-386. (* Paper withdrawn)

Vanhalla, H. and Soininen, H., 1994, Spectral-induced polarization method at the Keivitsa Ni-Cu deposit, northern Finland, 64th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 516-519.

Soininen, H. and Vanhala, H., 1994, Spectral induced polarization studies of a Ni-Cu Ore deposit, 56th Mtg.: Eur. Assn. of Expl. Geophys., Session:I001.

James, B. A. and Zerilli, A., 1994, Induced polarization effects in transient EM data for structural mapping, 56th Mtg.: Eur. Assn. of Expl. Geophys., Session:I026.

Vanhala, H. and Soininen, K., 1994, Mapping oil contaminated sand and till by spectral induced polarization method, 56th Mtg.: Eur. Assn. of Expl. Geophys., Session: P043.

Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1993, Inversion of induced polarization data, 63rd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 396-399.

Peltoniemi, M. P. and Vanhala, H. T., 1992, Spectral IP in frequency and time domain - A comparative study of six ore prospects in Finland, 62nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 416-419.

Beard, L. P. and Hohmann, G. W., 1992, Subsurface imaging using approximate IP inversion, 62nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 427-430.

Iseki, S. -I. and Shima, H., 1992, Induced polarization tomography: A cross-hole imaging technique using chargeability and resistivity, 62nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 439-442.

Soininen, H. T. and Vanhala, H., 1992, Spectral induced polarization method in mapping soils polluted by organic chemicals, 54th Mtg.: Eur. Assn. of Expl. Geophys., 366-367.

Samstag, F. J. and Morgan, F. D., 1991, Induced polarization of shaly sands: Salinity domain modeling by double embedding of the effective medium theory: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **56**, 1749-1756.

Apparao, A., Rao, T. G. and Sarma, V. S., 1991, Field results with downward continuation technique in induced polarization profiling using point electrodes: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **39**, 119-139.

Almeida, F. E. R. and Matias, J. S., 1991, A study of the orientational variation of induced polarization time domain data, 53rd Mtg.: Eur. Assn. of Expl. Geophys., 360-361.

Tyne, E. D. and Daggan, D. H., 1990, Analysis of induced polarization and radiometric logs from a test borehole in Hawkesbury sandstone: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **21**, 53-63.

Boulos, F. K. and Basta, N. Z., 1990, Geophysical investigations for ilmenite at Abu Ghalaga, eastern Egyptian desert, 60th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 745-747.

Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, *in* Ward, S. H., Ed., Geotechnical and environmental geophysics, **01**: Soc. of Expl. Geophys., 147-189.

Anderson, R., Bell, B. and Reynolds, J., 1990, Induced polarization used for highway planning, *in* Ward, S. H., Ed., Induced polarization: Soc. of Expl. Geophys., 397-410.

Johnston, R. H., Trofimenkoff, F. N. and Haslett, J. W., 1989, The influence of a conductor with multiple grounds on induced polarization surveys: J. Can. Soc. Expl. Geophys., **25**, 50-60.

Wynn, J. C., 1988, Titanium geophysics - The application of induced polarization to sea-

floor mineral exploration: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **53**, 386-401.

Loke, M. H., Lee, C. Y. and Arafin, M. S., 1988, Rapid computation of IP sounding curves : First Break, **06**, no. 11, 349-353. (* Discussion in FBR-7-4-139-139 with reply by authors)

Saizhen, Z., Yingxian, L., Jiping, Z., Xinwu, N., Anchang, Z. and Guanding, Y., 1988, The induced polarization (IP) method in oil exploration - The cause of the IP anomaly, *in* Jingxiang, Z., Ed., An overview of exploration geophysics in China: Soc. of Expl. Geophys., 247-272.

Wynn, J. C., 1986, Induced polarization used in titanium exploration in onshore and offshore environments, 56th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., Session:MIN1.1.

Seigel, H. O., Johnson, I. and Hennessey, J., 1984, Geophysical aids to gold exploration: THE LEADING EDGE, **03**, no. 06, 32-35.

Edwards, R. N., 1983, An approximate model of the magnetometric resistivity (MMR) and magnetic induced polarization (MIP) responses of dipping dikes beneath a conductive overburden: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **14**, 30-35.

Parra, J. O., 1983, Effects of pipelines on induced polarization and complex resistivity surveys, 53rd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., Session:E3.6.

McAlister, E. O. and Fink, J. B., 1982, Mining workshop 1--electrochemistry of induced polarization, 52nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., Session:MW1.1.

Oehler, D. Z. and Sternberg, B. K., 1982, Induced polarization for hydrocarbon exploration: Geochemical/geological interpretation, 52nd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., Session:NS.6.

Zonge, K. L., Hughes, L. J. and Carlson, N. R., 1981, Hydrocarbon exploration using induced polarization apparent resistivity, and electromagnetic scattering, 51st Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., Session:P3.6.

Gunn, P. J., 1980, Case history examples comparing dipole-dipole induced polarization and dual horizontal loop transient electromagnetic surveys in Australia: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **11**, 38-44.

West, R. E., Wieduwilt, W. G. and Hall, D. K., 1980, Discovery of a mineralized breccia pipe using gradient array induced polarization, 50th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., Session:M.1.

Gunn, P. J., 1979, Case history examples comparing dipole-dipole induced polarization and dual horizontal loop transient electromagnetic surveys in Australia: 1st Geophysical Conference, Austr. Soc. Expl. Geophys., **10**, 199-200.

Pelton, W. H. and Smith, P. K., 1976, Mapping porphyry copper deposits in the Philippines with IP: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **41**, 106-122.



Nabighian, M. N. and Elliot, C. L., 1976, Negative IP effects from layered media : GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **41**, 1236-1255. (* Discussion in GEO-42-05-1064-1065 with reply by author)

Wynn, J. C. and Zonge, K. L., 1975, EM coupling its intrinsic value its removal and the cultural coupling problem : GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **40**, 831-850. (* Discussion in GEO-41-03-0543-0543; Reply in GEO-41-03-0544-0545)

Zonge, K. L. and Wynn, J. C., 1975, Recent advances and applications in complex resistivity measurements : GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **40**, 851-864. (* Discussion in GEO-42-01-0120-0120; Reply in GEO-42-01-0121-0123)

Seigel, H. O., 1974, The magnetic induced polarization (MIP) method: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **39**, 321-339.

Quick, D. H., 1974, The interpretation of gradient array chargeability anomalies: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **22**, 736-746.

van Voorhis, G. D., Nelson, P. H. and Drake, T. L., 1973, Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization : GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **38**, 49-60. (* Letter in GEO-38-05-0984-0985)

Swift, C. M., Jr., 1973, The L/M parameter of time-domain IP measurements - A computational analysis: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **38**, 61-67.

Coggon, J. H., 1973, A comparison of IP electrode arrays: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **38**, 737-761.

Hohmann, G. W., 1973, Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer earth: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **38**, 854-863.

Fountain, D. K., 1972, Geophysical case-histories of disseminated sulfide deposits in British Columbia: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **37**, 142-159.

Baird, J. G., 1972, Coupling, masking and detection for induced polarization surveys in areas where low resistivity surface layers occur: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **03**, 1-15.

Hallof, P. G. and Winniski, E., 1971, A geophysical case-history of the Lakeshore ore body: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **36**, 1232-1249.

Shalley, M. J., 1971, A cost-probability approach to induced polarization in Australia: Expl. Geophys., Austr. Soc. Expl. Geophys., **02**, 25-33.

van Ngoc, P., Roussel, J. and Tournier, D., 1970, Remarques sur l'interpretation des sondages de polarisation provoquee - Essai de theorie quantitative: Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., **18**, 34-46.

Dieter, K., Paterson, N. R. and Grant, F. S., 1969, IP and resistivity type curves for three-dimensional bodies : GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **34**, 615-632. (* Discussion in



GEO-35-02-0359-0359 with reply by authors)

Seigel, H. O., Hill, H. L. and Baird, J. G., 1968, Discovery case-history of the pyramid ore bodies Pine Point Northwest Territories Canada: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **33**, 645-656.

Fraser, D. C., Keevil, N. B., Jr. and Ward, S. H., 1964, Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **29**, 832-847.

McEuen, R. B., Berg, J. W., Jr. and Cook, K. L., 1959, Electrical properties of synthetic metalliferous ore: GEOPHYSICS, Soc. of Expl. Geophys., **24**, 510-530.