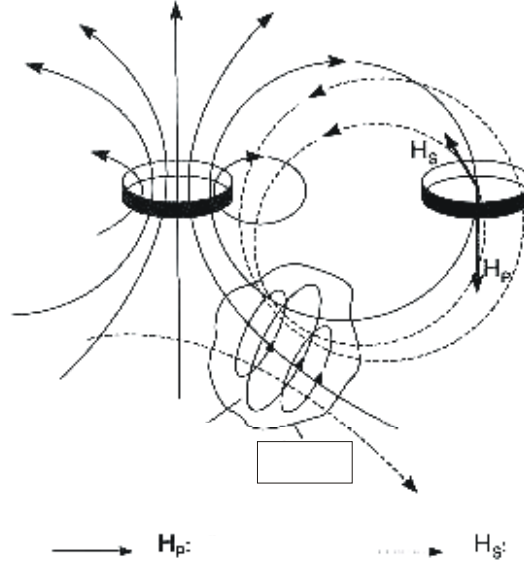


### 3.2. Çift Yatay Halka Elektromanyetik Yöntem<sup>12</sup>

#### Yöntem

“Slingram” yöntemi olarak tanınan çift yatay halka sargı (loop-loop) kullanılarak gerçekleştirilen elektromanyetik (EM) yöntem İsveç’te geliştirilmiştir. Taşınabilir aktif bir verici ile sinüs biçimli değişken (alternatif) akım kullanan yöntem 100 Hz – 60 kHz arasındaki frekans bandında çalışan bir frekans ortamı elektromanyetik yöntemdir. Şekil 1’de olduğu gibi yatay bir halka kaynak vericiden verilen değişken akım sonucu oluşan zamana bağlı manyetik alan ortamda bir iletken olması durumunda birincil manyetik alana dik yönde irkitim (indüksiyon) ya da Eddy akımlarının akmasına neden olur. Bu akımlar zaman içinde sönmülmürken kendilerini yaratan alana ters yönde ikincil manyetik alanları oluştururlar. Yeryüzeyinde bulunan ikinci halka ile oluşan ikincil manyetik alanın birincil alana oranı biçiminde kaydedilir.



Şekil 1 Çift yatay halka alıcı-verici için elektromanyetik alanların oluşumu.

<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 Özüran<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>1</sup> Bu ders notuna <http://jeofizik.ankara.edu.tr/download.html> sayfasından ulaşılabilir

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

Genel olarak yatay yöndeki iletkenlik değişimlerinin saptanması amacıyla cevher bölgelerinin ve süreksizliklerin aranmasında kullanılan yönteme ilişkin bir çok araştırma bulunmaktadır, özellikle kırık ve çatlaklar ile kesme bölgeleri içerisinde biriken yeraltısuyu araştırmalarında oldukça ideal bir yöntem görülerek yaygın olarak kullanılmaktadır (Palacky ve diğ., 1981; McNeill, 1990).

Çift yatay halka elektromanyetik yönteminin uygulama alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

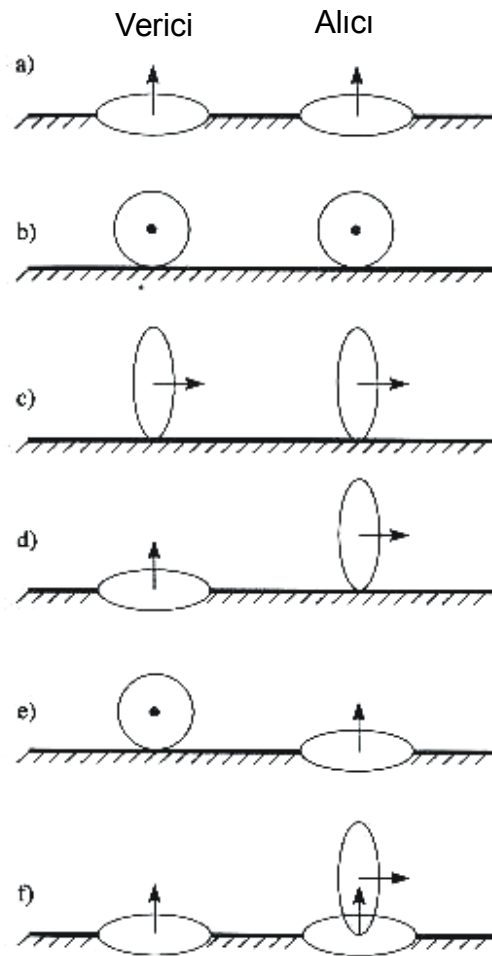
- Süreksizlik ve çatlaklı bölgelerin aranmasında,
- Hidrojeolojik amaçlı uygulamalarda,
- Yatay ve düşey iletkenlik değişimlerinin belirlenmesi amacıyla,
- Gömülü yapı ve cisimlerin aranmasında,
- Çevre jeofiziği uygulamalarında düşey sınırların saptanması amaçlı,
- Mühendislik jeofiziği uygulamalarında karstik boşluk arama amaçlı,
- Cevher bölgelerinin ve sokulum yapıların aranmasında.

### **Ölçüm Teknikleri**

Çift yatay halka elektromanyetik yöntem uygulamada diğer elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin uygulamalarının birçoğunda olduğu gibi kaydırma (profiling), delgi (sounding) haritalama (mapping) amaçlı kullanılır. Geleneksel olarak yapılan kaydırma ölçümlerinde verici ve alıcı bir profil boyunca kaydırılarak istenen frekansta yatay yöndeki iletkenlik değişimlerine ilişkin bilgiler sağlanabilir. Son dönemlerde yeni nesil ölçüm sistemleri ile mümkün hale gelen düşey yönde iletkenlik değişimlerinin saptanması, verici-alıcı aralığı değiştirilerek hem geometrik delgi hem de frekans değişimi ile parametrik delgi gerçekleştirilebilir.

Uygulamada en çok kullanılan ölçüm düzeneği uygulama kolaylığı ve hızlılığı nedeniyle her iki halkanın yatay bulunduğu (Şekil 2-a) konumdur ve birçok ölçüm sistemi tarafından kullanılmaktadır. Yaygın olarak bilinen çift halka ölçüm sistemleri EM-38, EM-31 ve EM-34-3, GENIE, MAX-MIN ve MAXIPROBE olarak tanınmaktadır ve ticari olarak kullanılmaktadırlar. Bunlardan EM-38 ve EM-31 daha çok yüzeye çok yakın düşey süreksizliklerin aranmasında kullanılırken çok frekanslı

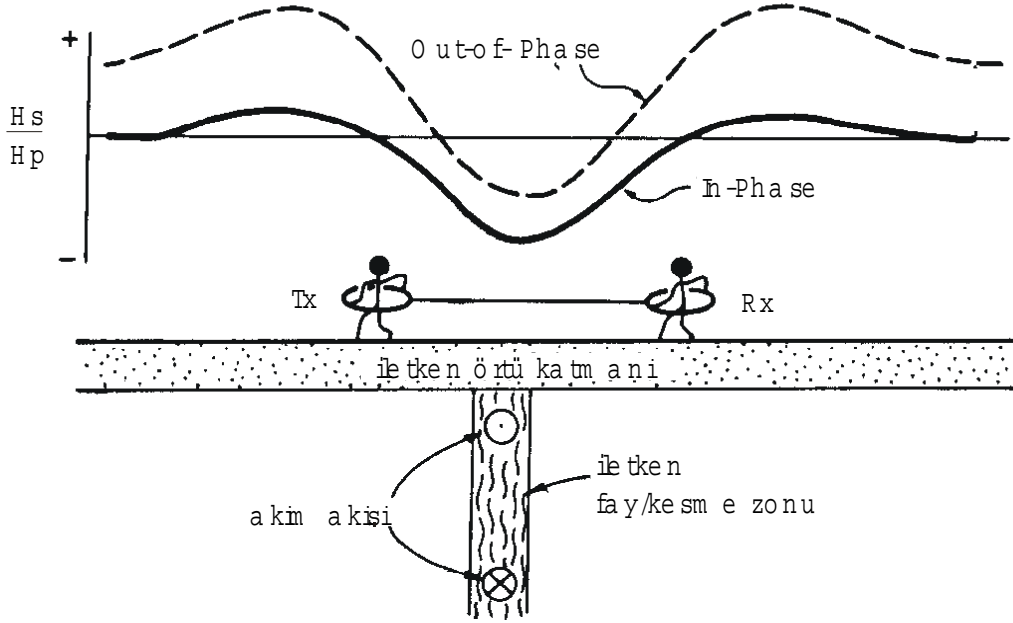
MAX-MIN sistemi 400 metreye varan derinliklerin incelenmesi amacıyla delgi ve kaydırma araştırmalarında kullanılabilmektedir. Bu sistemler içinde değiştirilebilir 256 farklı frekansıyla yaklaşık 1500 metreye varan araştırma derinliği ile MAXIPROBE yaygın olarak tercih edilen bir duruma gelmiştir. Bu sistemlerin en eski versiyonu olan EM-38 ve EM-31 ile sadece tek frekansta ölçüm yapılabilirken son jenerasyon GENİE (Geometry Normalized Inphase Electromagnetic System) sistemiyle 5 ayrı frekansta ölçümler yapılmakta ve VLF, VLF-R veya manyetometreler ile birlikte çalışılabilmektedir.



Şekil 2 Çift halka verici-alıcı düzenekleri (Frischknecht et al., 1991).

## ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜKLER

Uygulamada çift yatay halka elektromanyetik yöntem alıcı-verici düzeneği ve düşey bir iletken için ölçülecek kuramsal eğri Şekil 3'te yer almaktadır. Çift halka sistemleri ile yapılan ölçümlerde ikincil manyetik alanın birincil manyetik alana oranının yüzdesi gerçel (in-phase component) ve sanal (out-of-phase component) bileşenleri (real & imaginary components) cinsinden ölçülür. Gerçel bileşen birincil alanla aynı fazda ölçülürken sanal bileşen birincil alana göre 90 derecelik bir faz farkı ile elde edilir. Ölçülmek istenen referans sinyalleri genlik ve faz olarak alıcı ve verici arasında kablo bağlantısı ile sağlanırken yeni sistemler olan MAXIPROBE ve GENIE sistemlerinde bağlantı kablosuz olarak elde edilir.



Şekil 3 Düşey bir iletken üzerinde çift yatay halka elektromanyetik yöntem ölçümü ve kuramsal eğrisi (McNeill, 1990).

### **Araştırma Derinliği ve Görünür Öz direncin Tanımı**

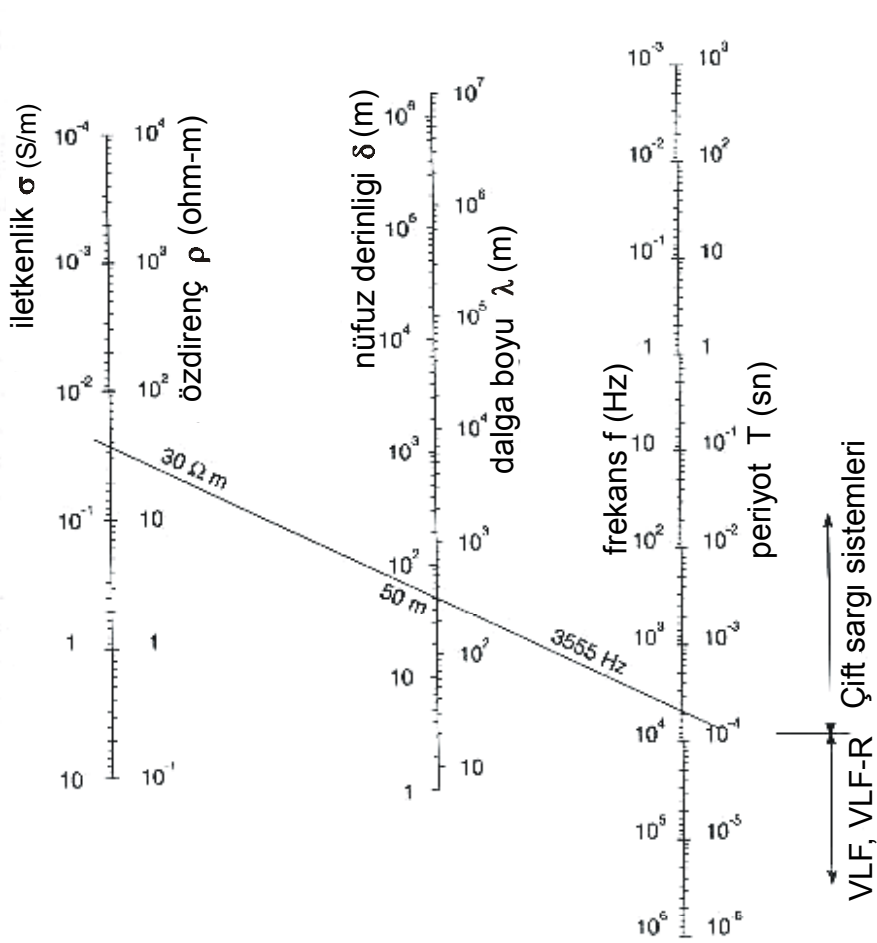
Yeraltında elektromanyetik dalgaların yayılımı ile ilgili olarak verici frekansı ve yer iletkenliğine bağlı olarak kaynaktan uzaklaştıkça dalga genliğinde üstel bir azalma olduğu bilinmektedir. Genel olarak tüm elektromanyetik yöntemler, dolayısıyla manyetotellürikte kullanılan deri derinliği ("skin depth") tanımı izleyen biçimde verilir:

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

Buradan, yaygın olarak bilinen formül elde edilebilir:

$$d = 503.2 \left( \frac{\rho}{f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Deri derinliği bu formülle hesaplanabildiği gibi Şekil 6'de görüldüğü gibi çizelgeler yardımıyla da hesaplanabilir



Şekil 6 Frekans ve öz dirence bağlı olarak elektromanyetik dalgaların deri derinliği (Vogelsang, 1991'den değiştirilerek alınmıştır).

Uygulamada genel olarak  $H_s/H_p$ 'nin çizimleriyle görsel değerlendirmeler yapılmasına rağmen bir yaklaşımla yukarıdaki bölümde verilen eşitlik yardımıyla ölçülen sanal bileşenden görünür öz direnç (apparent resistivity) elde edilebilir:

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \left( \frac{H}{H_p} \right)_{sanal}$$

Bu eşitlik mevcut sistemlerde ve yeni modifiye edilen versiyonlarında kullanılmakta ve istendiğinde ölçüm cihazı kalibre edilerek doğrudan görünür öz direnç değeri okunabilmektedir. Ancak, ölçüm yapılan ortamda metalik bir cisim varsa ya da iletkenliğin birden çok yükselebileceği bir ortam ise bu eşitlik yanılgılı olabileceğinden (bakınız Şekil 5) bu gibi durumlarda gerçel bileşenin okunması yararlı olacaktır.

### ***Slingram verilerinin sunumu ve değerlendirilmesi***

Çift yatay halka elektromanyetik yöntem uygulamada diğer elektrik ve elektromanyetik yöntemlerin uygulamalarının birçoğunda olduğu gibi kaydırma (profiling), delgi (sounding) haritalama (mapping) amaçlı kullanılır. Ölçülen verilerin ve değerlendirmeler sonucu elde edilen sonuçların sunumu izleyen bölümlerde ayrı ayrı verilecektir.

### ***Kaydırma Ölçümleri***

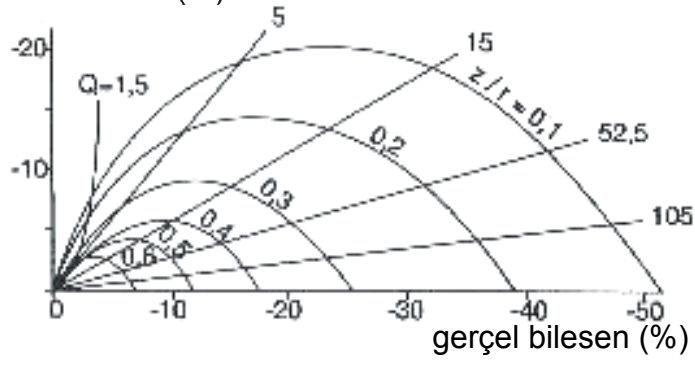
Çift yatay halka elektromanyetik yöntemi ile arazide görünür iletkenliğin ölçüldüğü sistemlerle (EM-31, EM-38, MAX-MIN) bir profil boyunca elde edilen veriler profil grafik şeklinde sunulabilir. Ancak iletkenliği ölçmeyen dizgelerle ölçüm alındığı

durumlarda gerçel ve sanal bileşenler ile eğim açısının (tilt) sunumu için ölçüm hatları ve eşyükselti haritaları kullanılır.

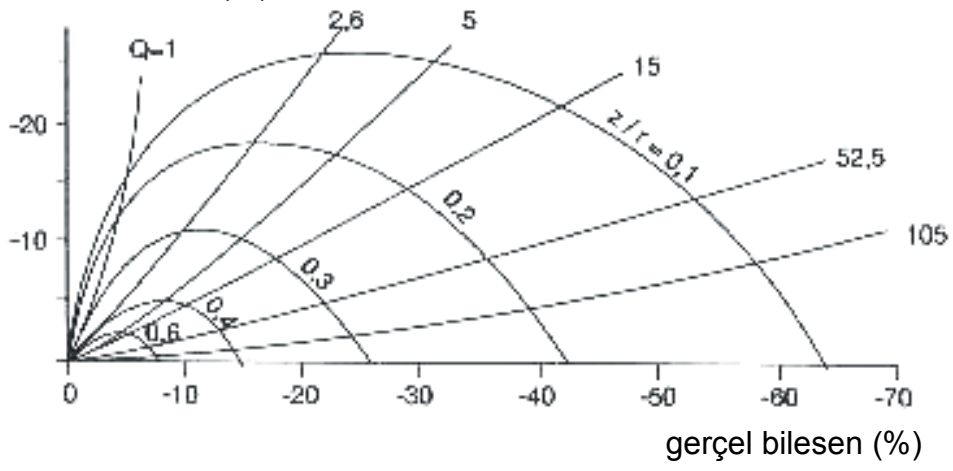
Günümüze değin, yeraltında düşey olarak konumlanmış bir iletkene ait değiştirgenlerin bulunması amacıyla Argand çizimleri (Şekil 7) yaygın olarak kullanılmıştır. Bu evre çizimlerinde ölçülen alanın gerçel ve sanal bileşeni daha önce sözü edilen tepki değiştirgenlerinin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Buradan tepki değiştirgeninin bağımlı olduğu iletkenlik, biçim ve sargı aralığına ilişkin sayısal bilgi doğrudan evre çizimlerine bakılarak okunabilir. 30, 60 ve 90° için hazırlanan çizimlere ek olarak derinlik bilgisi yer almaktadır.

Ölçümlerden nicel çözümlere ise modelleme çalışmaları ile ulaşılabilir. Literatürde hazırlanmış model kataloglarına rastlamak mümkündür. Ayrıntılı bir model katalogu Ketola & Puranen (1967) tarafından hazırlanmıştır. Şekil 8 bir iletkenin farklı eğimlerdeki konumları için model eğrilerini, Şekil 9 iletken bir ortamdaki ince düşey iletken bir çubuk için ölçülen veriler ve model eğrileri göstermektedir.

sanal bileşen (%)

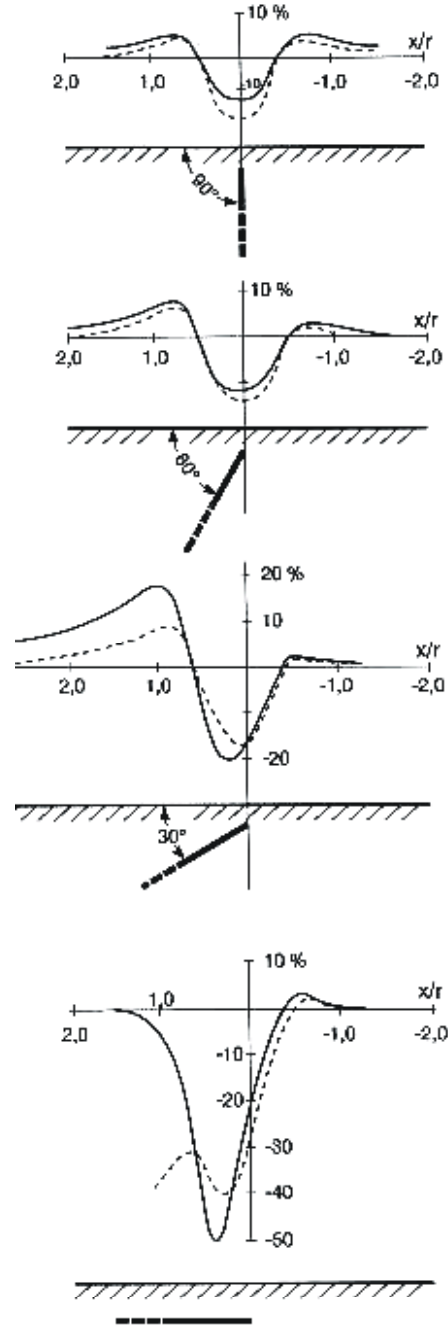


sanal bileşen (%)

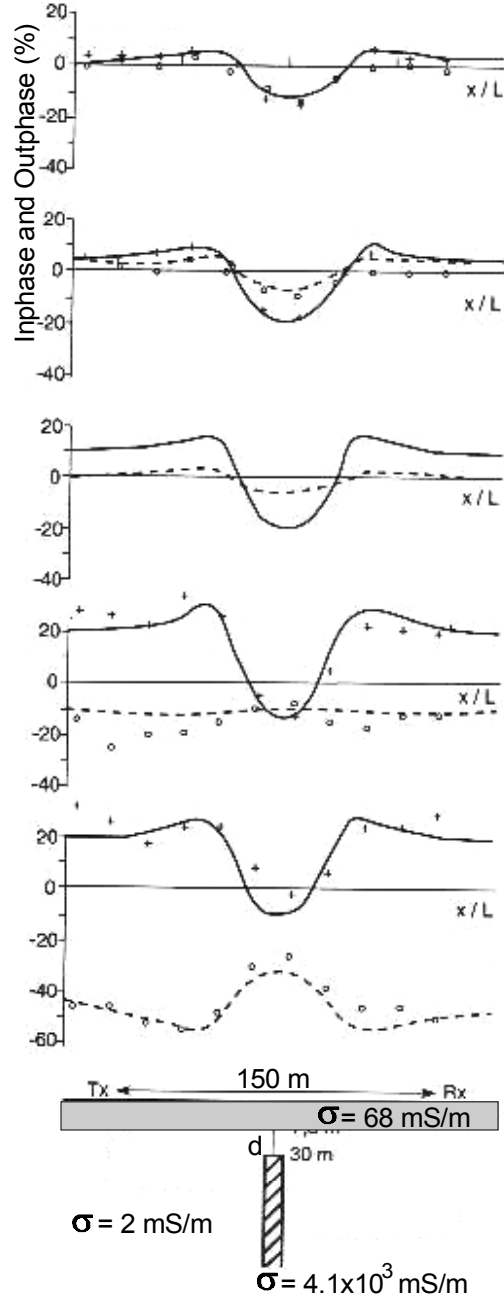


Şekil 7 Düşey iletken yapılar için Argand çizimleri (Strangway, 1966).





Şekil 8 Farklı eğimlerde iletkene ait model eğrileri (Vogelsang, 1991).



Şekil 9 İletken bir ortamdaki ince düşey iletken bir çubuk için ölçülen veriler ve model eğrileri (Hannesson & West, 1984'ten basitleştirilmiştir).

### **Frekans Delgi (frekans sondajı) Ölçümleri**

Henüz çok yaygın olarak kullanılmayan bir frekans delgi ölçümünde verici-alıcı düzeneği sabit tutulurken frekans değiştirilir. Frekansın adım adım düşürülmesiyle amaçlanan araştırma derinliği artarken özdirençin düşey yöndeki değişimi elde edilir. Ölçülen verilerin değerlendirilmesi için bir kaç yol izlenebilir. Son nesil cihazlarda yüklü hızlı ters çözüm (inversion) değerlendirme programlarıyla hemen arazide doğrudan veriler özdirenç-derinlik değerlerine dönüştürülebileceği gibi arazi sonrası alışlagelmiş ters çözüm programlarıyla ya da grafik gösterimlerle eğrilerle özdirenç - derinlik değişimi elde edilebilir.

Ölçüm sonuçlarının sunumu izleyen biçimlerde yapılabilir:

- Ayrı ayrı ya da toplu biçimde frekans delgi eğrilerinin gösterimi,
- Eliptiklik ve kutuplaşma elipsinin eğim açısının ölçüm doğrultusu boyunca değişiminin toplu biçimde gösterimi,
- Seçilen frekanslarda görünür özdirenç haritaları biçiminde gösterimi,
- Seçilen frekanslarda eğim açısı haritaları biçiminde gösterimi,
- Ters çözümle değerlendirme sonuçlarının geleneksel özdirenç-derinlik kesitleri biçiminde sunumu.

### ***Yöntemin üstünlükleri ve zayıflıkları***

Çift halka sisteminde, elektrik alan ölçümü için elektrot kullanılmadığından durağan kayma (static shift) sorunu yoktur ve iletkenliğin yanal yönde çok değişmediği yerlerde de iyi sonuçlar vermektedir. Yer ile halka sargı aracılığıyla sağlanan uyartım bağlantısı doğru akım elektrik yöntemin uygulanabilmesi için uygun olmayan yerlerde de, örneğin beton ve asfalt kaplı alanlarda, çok yüksek dirençli örtü katman bulunan yerlerde kolaylıkla uygulanabilir. Ölçümler esnasında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar izleyen biçimde sıralanabilir:

- Verici ve alıcının günlük senkronizasyonu,

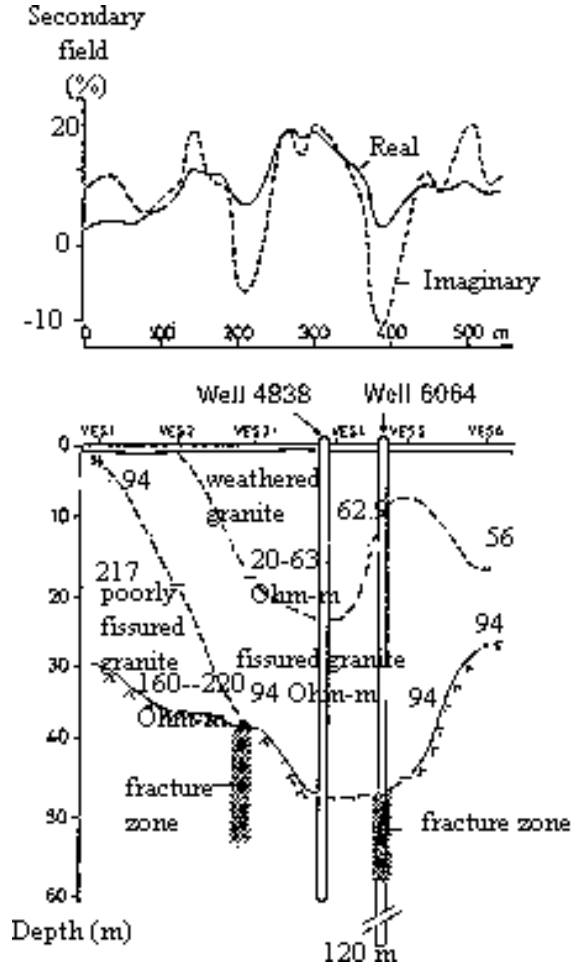
- Verici-alıcı düzeneğinin yer aldığı ölçüm alanındaki yükselti (topoğrafya) ve ölçüm alanı etrafındaki bozucu etkiler (başka tip vericiler, metalik cihazlar ve borular),
- Ölçümler esnasında Hz/Hx eğrilerinin görsel kontrolü,
- Verici ve alıcının değişimiyle ölçümlerin tekrar edilebilirliğinin sınanması.

Yöntemin özellikle son dönemde çeşitli yeni nesil sistemlerle sağladığı üstünlükler izleyen biçimde sıralanabilir:

- Ölçüm düzeneğinin kapladığı alanın azlığı nedeniyle yüksek oranda hareketlilik, ölçüm zamanında hızlilik,
- Ölçümlerde az sayıda çalışanın gerekliliği,
- Yanal düzensizliklerin azalması ve yüzeye yakın iletken yapıların etkisinin en aza inmesi,
- Yeraltında akım akışının görelî olarak küçük bir alanda olması nedeniyle iletkenlik değişimlerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesi.

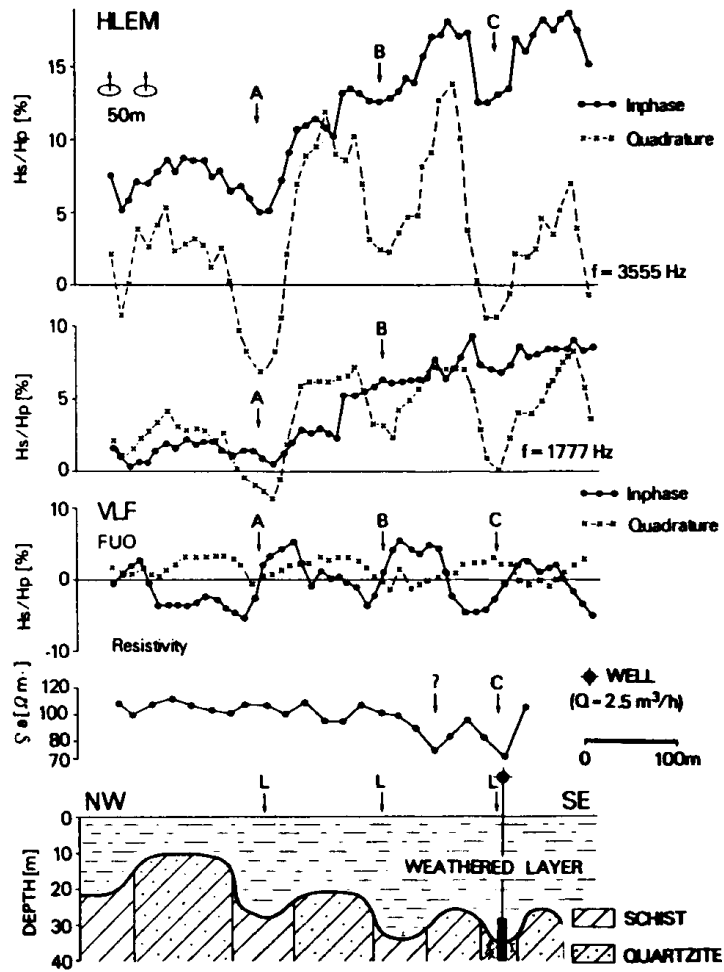
### **Örnek Uygulamalar**

Çift halka elektromanyetik yöntemi literatürde en fazla hidrojeolojik amaçlı başarılı uygulamalarla dikkat çeken bir yöntemdir. Palacky ve diğerleri (1981) tarafından Afrika'da yapılan birçok araştırma bulunmaktadır. Şekil 10, Güney Afrika'da Modipane çatlaklı granitleri içindeki kırıklı bölgelerde oluşan 3600 litre/saatlik bir akiferi ve üzerinde alınan elektromanyetik ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Diğer birçok çalışmada da olduğu gibi özellikle sanal bileşenin kırıklı bölgeler üzerinde çok belirgin belirti verdiği görülmektedir. Gerçekten de özellikle kırık ve çatlaklar ile kesme bölgeleri içerisinde biriken yeraltısuyu araştırmalarında çift halka elektromanyetik yöntemi oldukça ideal bir yöntem olarak kullanılabilir.



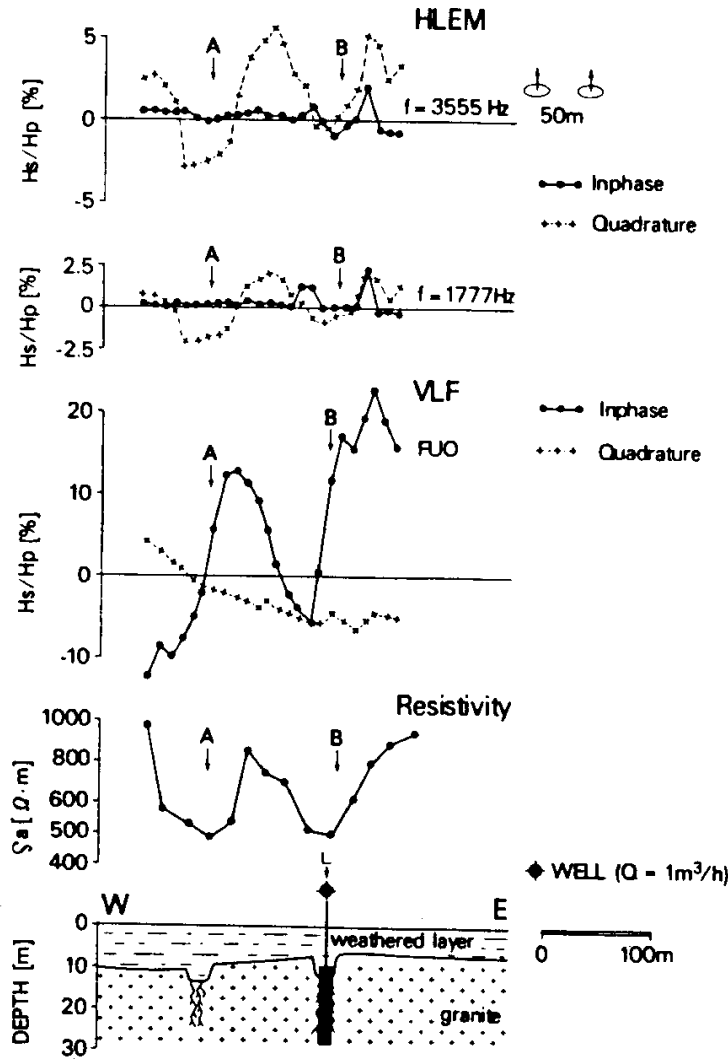
Şekil 10 Modipane, Botswana graniti üzerinde yapılan yatay halka elektromanyetik yöntem sonuçları ve doğru akım düşey elektrik dalgisi (DES) ile elde edilen yerelektrik kesiti ve açılan kuyular. Kesit üzerindeki rakamlar özdirenç değerlerini göstermektedir (ABEM Firması El Kitabından).

İzleyen bölümde, Palacky ve diğ. (1981)'in çalışmasında yer alan çift yatay halka elektromanyetik yöntemi yeraltısuyu araştırma örneği ile aynı yerde farklı jeofizik yöntemlerle birlikte kullanıldığı uygulamalar yer alacaktır. Her iki uygulamada da, iki farklı frekansta çift yatay halka yöntemi ile birlikte doğru akım özdirenç kaydırma ve VLF (Very-low frequency) ölçümleri yapılmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 11 Mankarga yakınlarında volkano-sedimanterler üzerinde yapılan 3 jeofizik yöntem sonuçları, “C”, üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir (Palacky ve diğ., 1981).

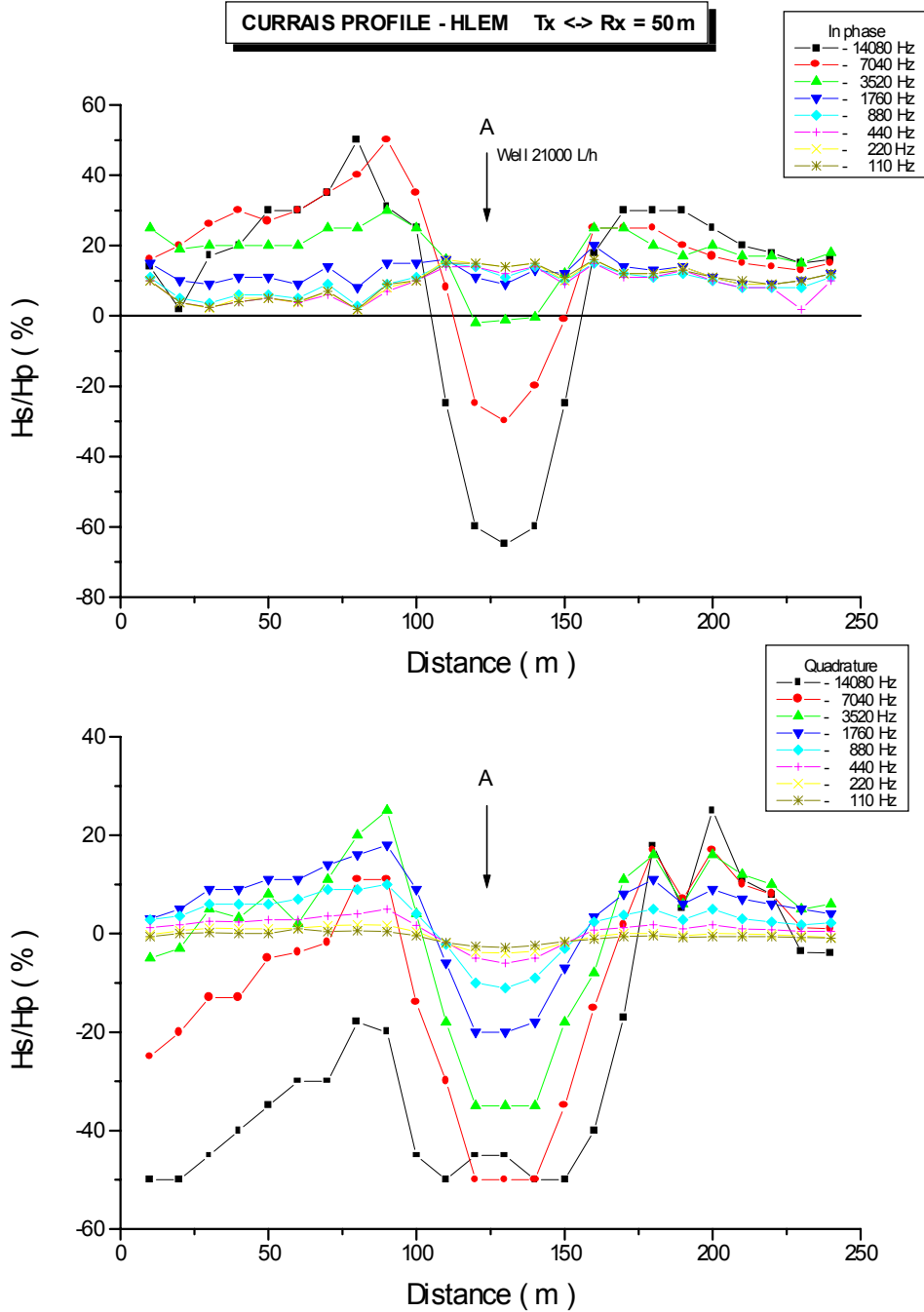
Şekil 10, çift yatay halka elektromanyetik yöntemi ile Afrika’da granit üzerinde yapılan bir araştırma hattını göstermektedir. “B” ile gösterilen noktada yapılan 30 metrelik bir delgi ile 1 m<sup>3</sup>/h debili kuyu elde ediliyor. Statik su seviyesi 10 metre ve alt kayaç yaklaşık 12 metrededir. Bölgede gerek yeryüzeyinden gerekse havadan görülemeyen kırık bölgeleri içerisinde oluşan akiferlerin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada her üç jeofizik yöntemin benzer sonuçlar verdiği görülüyor. Ek olarak, her iki frekans için çift yatay halka elektromanyetik ölçüm eğrileri iletkene duyarlı karakteristik görünümü ile göze çarpmaktadır.



Şekil 12 Mankarga yakınlarında kırıklı granit üzerinde yapılan 3 jeofizik yöntem sonuçları; “B” üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir (Palacky ve diğ., 1981).

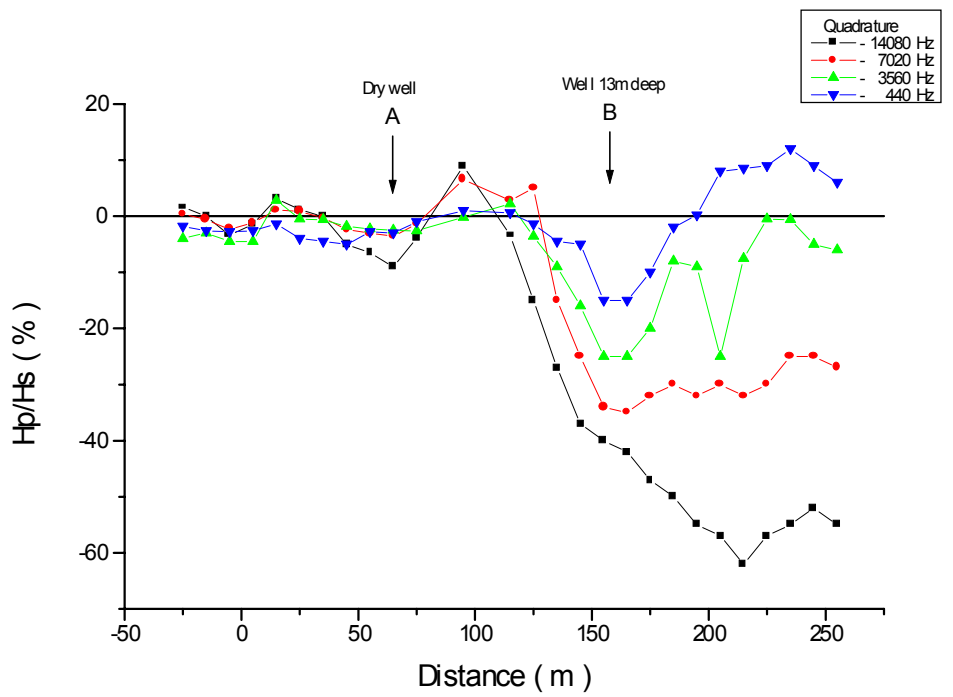
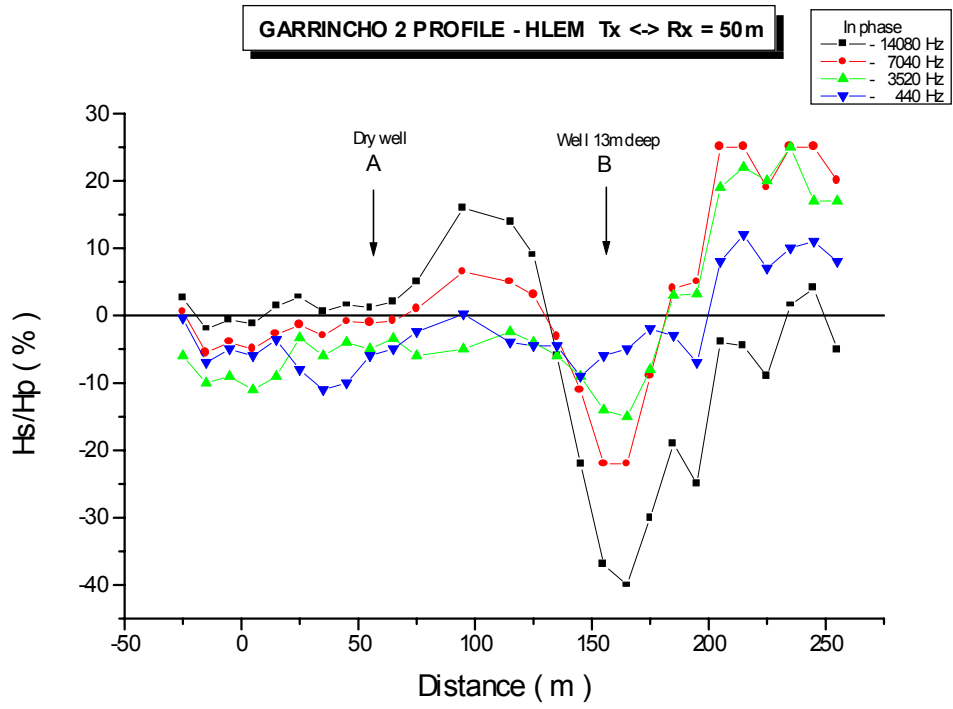
Volcano-sedimanterler üzerinde aynı türde bir araştırma örneği Şekil 11’de görülmektedir. Bir önceki uygulamadan farklı, ancak araştırma doğrultusundaki jeolojik yapıya uygun olarak her üç jeofizik yöntem sonuçlarında çok salımlı ölçü sonuçları görülmektedir. Yine, üretim yapılan kuyu üzerindeki çift yatay halka elektromanyetik ölçüm tepkisi oldukça belirgin olarak göze çarpmaktadır. Aynı bölgede çatlaklı ve kırıklı granitler üzerinde yapılan ölçümler Şekil 12’de görülmektedir. Bu ölçümlerde de “B” ile gösterilen delgi üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir. Afrika’da yapılan her iki örnekte doğru akım elektrik verileriyle elektromanyetik verilerinin birlikte kullanımı ve sağladığı yararlar açıkça

izlenmektedir. Yine Şekil-13 ve 14'te yeraltısuyu araştırması için Brezilye'da yapılan bir araştırmada yatay halka elektromanyetik yöntemle kesin sonuç alınabilen iyi bir örnek görülmektedir. Şekil 13'te Saatte 21000 litre su alınabilen kuyu farklı frekanslarda yapılan yatay halka elektromanyetik yöntem ile saptanarak üretime kazandırılmıştır.



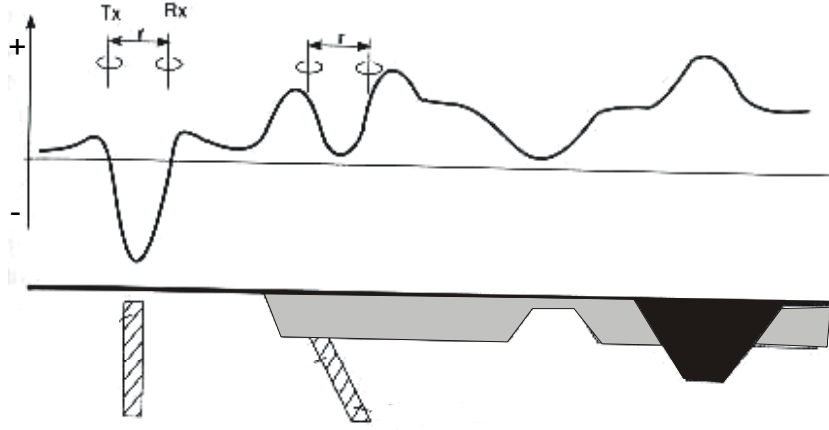
Şekil 13 Brezilya'da alınan HLEM yöntem sonuçları Gerçel bileşenler üst şekilde sanal bileşenler alt şekilde verilmiştir; "A" üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir (Observatorio Nacional, Brezilya arşivi).





Şekil 14 Brezilya’da alınan diğer bir HLEM yöntem sonuçları Gerçel bileşenler üst şekilde sanal bileşenler alt şekilde verilmiştir); “A” deneme amacı ile yapılan ve su olmayan, “B” ise üretim yapılan kuyuyu göstermektedir (Observatorio Nacional, Brezilya arşivi).

Şekil 14’te ise kırık çizgisi (“A”) üzerinde yapılan fakat kırığın su içermemesi durumunda elde edilen belirti verilmiştir. “B” kırığı su içerdiğinden iletkenliği “A” ile karşılaştırıldığında daha yüksektir bu nedenle ölçülen değerler mutlak genlik olarak daha büyüktür.



Şekil 15 Son nesil çift yatay halka elektromanyetik sistem GENIE ile farklı iletken yapıların üzerinde ölçülmüş verilerin şematik gösterimi (Griessemann & Ludwig, 1986’den değiştirilerek alınmıştır).

Son nesil Slingram dizgesi GENIE ile farklı türde çeşitli iletken yapıların üzerinde yapılan bir ölçümden elde edilen sonuçlar şematik olarak Şekil 15’de gösterilmiştir. Şematik eğride yatay yönde sıralanmış farklı yapıların tepkileri son derece güzel bir biçimde ölçülen eğride görülmektedir. Ancak, horst türü yapı üzerinde iyi iletken düşey bir iletken için alınabilecek eğriye benzer anomali vermesi dikkate değerdir. Bu tür yapılar üzerinde yapılan ölçümlerde yani gerek yeryüzeyinde gerekse yeraltında topoğrafyanın büyük değişiklikler gösterebileceği yerlerde dikkatli ölçüm yapmanın gereği ortadadır. Farklı frekanslarda yapılabilecek çeşitli ölçümlerle bu sorunların aşılması mümkün olabileceği gibi diğer jeofizik yöntemlerin sonuçlarıyla

entegrasyonun sağlanması yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermesi açısından önemlidir.

### **Kaynaklar**

- ABEM Firması Broşürü, ABEM Instrument AB, Hamngatan 27, S-172 66, Sundbyberg, Sweden.
- Frischknecht, F. C., 1988, Electromagnetic physical scale modeling. In: Nabighian, M. N. (ed.): Electromagnetic methods in applied geophysics – Theory, 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 365-441.
- Frischknecht F. C., Labson, V. F., Spies, B. R., & Anderson, W. L., 1991, Profiling methods using small sources. In: Nabighian, M. N. (ed.): Electromagnetic methods in applied geophysics – Theory, 2, Part A, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 105-270.
- Grant, F. S. And West, G. F., 1965, Interpretation theory in applied geophysics, Newyork,McGraw-Hill.
- Greinwald, S., 1985, Wechselstromverfahren. In: bender, F. /Hrsg.): Angewandte geowissenschaften, II: Methoden der Angewandten Geophysik und matematische Verfahren in den Geowissenschaften. Enke, Stuttgart, 352-387.
- Griessemann, Ch., & Ludwig, R., 1986, Recherche sur la fracturation profonde en zone de socle cristallin a partir de forages a gros debit et de lineaments landsat a l'aide de methodes geophysiques avancees. Cooperation techniques projet no. 82.2060.0, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Ketola, M. & Puranen, M.,1967, Type curves for the interpretation of slingram (Horizontal Loop) anomalies over tabular bodies. Report of Investigations, No. 1. Geological Survey of Finland, Otaniemi.
- Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., 1997, Geophysik, Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3, Bundesanstalt für geowissenschaften und Rohstoffe, Springer Verlag, pp 1051.
- McNeill, J. D., 1990, Use of electromagnetic methods for ground water studies, in: Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. I, S. H. Ward, Editor, SEG, Tulsa, OK.
- 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, Geophysical Prospecting, 29, 932-955.
- Spies, B. R., & Frischknecht, F. C., 1991, Electromagnetic Sounding. In: Nabighian, M. N. (ed.): Electromagnetic methods in applied geophysics – Theory, 2, Part A, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 285-425.
- Strangway, D. W., 1966, Electromagnetic parameters of some sulphide ore bodies, In Mining Geophysics, Vol. 1, pp. 227-42, Tulsa, SEG.
- Vogelsang, D., 1991, Elektromagnetische Erkundung grundwasserführender Strukturen, Geol. Jb., E48, Hannover, 283-308.