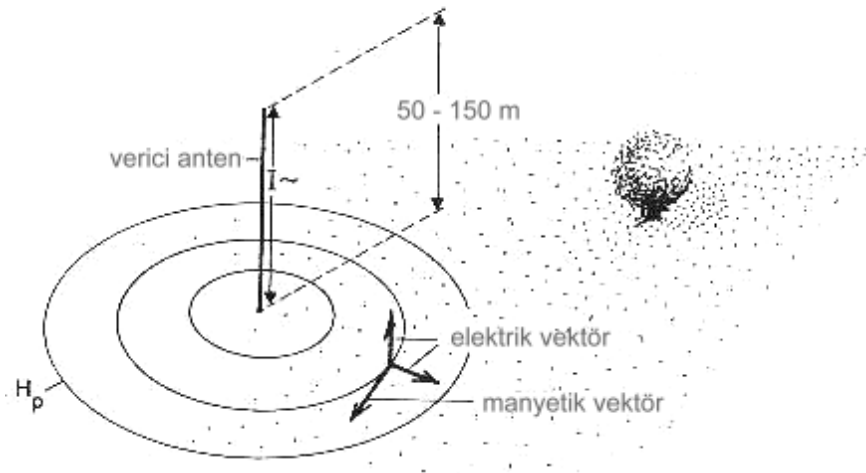


### 3.1 Çok Alçak Frekans Elektromanyetik Yöntem<sup>12</sup> Yöntem

Çok alçak frekans elektromanyetik yöntem (Very-Low Frequency Electromagnetic Method (VLF-EM)) bağıl olarak yerin sığ kesimlerinin araştırılması amacıyla kullanılan bir jeofizik yöntemdir. VLF-EM yönteminde, kaynak verici olarak dünyanın çeşitli yerlerinde deniz aşırı haberleşmeler için yapılan 15-30 kHz frekans aralığında yayın yapan çok güçlü askeri radyo istasyonlarının yaydığı elektromanyetik alanlar kullanılır. Yeni tasarım cihazlarla frekans aralığı 10 kHz'ten 2 MHz'e kadar genişletilerek yerin en sığ bölgelerindeki elektrik iletkenlik dağılımına ait bilgiler elde edilebilmektedir. Bu frekans aralığındaki yöntem Radio-Magnetotellürik (RMT) yöntemi olarak bilinmektedir. Gerek VLF gerekse RMT yöntemi için isteğe bağlı olarak yapay verici kullanılabilir (Hayles and Sinha, 1986).



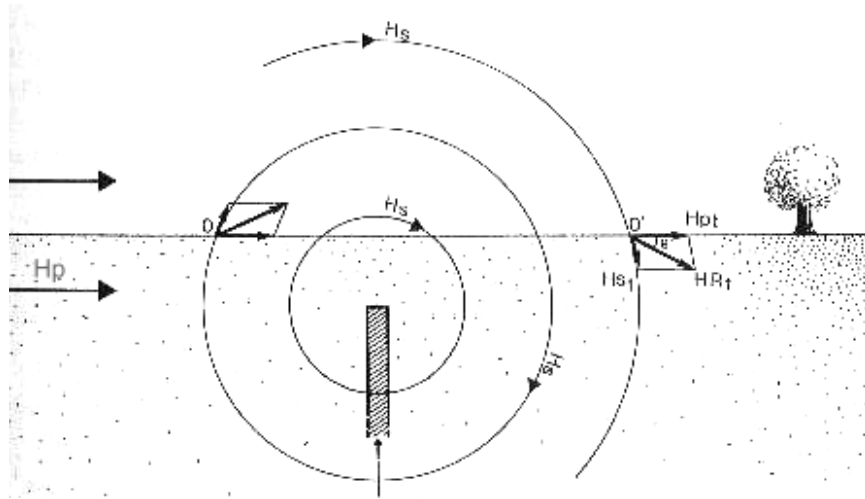
Şekil 1: VLF-EM anteni ve oluşturduğu birincil alanın ( $H_p$ ) şematik gösterimi (Meyer de Stadelhofen (1994)'ten değiştirilerek alınmıştır).

Yöntemin çalışma esası, kaynak vericiden yayılan elektromanyetik alanların araştırma yapılan ölçü noktası civarındaki süreksizlik veya iletken bölgelerdeki uyartıkları akımların (induced currents) bileşke vektörün yön ve şiddetini değiştirmesiyle elde

<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. Hazırlayan Gülçin Özürkan, İstanbul Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü e-mail: ozurlan@itu.edu.tr

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

edilen imlerin kaydedilmesidir. VLF vericileri, sabit duran ortalama 50-150 metre boyunda ve 100-1000 kW gücünde dikey antenlerdir. Vericilerde oluşan birincil manyetik alan ( $H_p$ ) yatay yönde yayılır ve verici ile çalışma alanları arasındaki büyük uzaklıklar nedeniyle düzlem dalga (plane wave) olarak kabul edilerek homojen ve sabit düşünülebilir (Şekil 1). Bir radyo vericisinden yayılan elektromanyetik alan yeryüzü ile iyonosferin alt katmanı arasında yayılma ve/veya yansımadan sonra yeriçinde yayınarak (difüzyon) orada içsel akımlar oluştururlar. Diğer elektromanyetik yöntemlerin de dayandığı fizik esasa bağlı olarak yeriçinde uyartılan akımların dağılımı ve oluşturduğu yeni elektromanyetik alanların (Şekil 2) kaydedilmesiyle yerin elektrik özellikleri saptanmaya çalışılır. Bu esnada seçime bağlı olarak oluşan elektromanyetik alanların manyetik alan bileşenleri (VLF) veya hem manyetik hem elektrik alan bileşenleri (VLF-Resistivity) ölçülerek yeraltına ilişkin dönüşüm denklemleri (transfer function) elde edilir ve bunlar yöntem ile elde edilen verilerin değerlendirilmesinin temel esasını oluştururlar. Özellikle son 10 yıldır yaygın bir biçimde tüm dünyada kullanılan VLF-EM yöntemi ölçüm için seçilen frekans ve ortamın özdirenç/iletkenliğine bağlı olarak yaklaşık 5-70 m arasındaki sığ yapıların, düşey süreksizliklerin araştırılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 2: VLF-EM yönteminde düşey bir iletkenin oluşturduğu elektromanyetik alan vektörlerinin şematik gösterimi (Meyer de Stadelhofen (1994)'ten alınmıştır).

Genel olarak yatay yöndeki iletkenlik değişimlerinin saptanması amacıyla kullanılan VLF-EM yöntemi çok çeşitli problemler için uygulama alanı bularak, kırık ve

çatlaklar ile kesme bölgeleri (shear zone) içerisinde biriken yeraltısuyu araştırmalarında (Palacky ve diğ., 1981; McNeill, 1990), karstik boşlukların aranmasında (Guerin and Benderitter, 1995), jeolojik haritalamalarda (McNeill and Labson, 1991), yeraltısuyu kirliliği araştırmalarında (Benson et al., 1997; Tezkan, 1999; Karlık and Kaya, 2001) kullanılmaktadır. Bunların yanısıra çok sayıda cevherleşme bölgelerinin araştırılması ile jeolojik haritalama örnekleri Telford et al. (1976)'da bulunabilir. Uygulamada oldukça hızlı, kolay ve ucuz bir yöntem olduğu için birçok araştırmada ön çalışmalar arasında yerini alan VLF-EM yönteminin uygulama alanları izleyen biçimde sıralanabilir:

- Süreksizlik ve çatlaklı bölgelerin aranmasında,
- Hidrojeolojik amaçlı uygulamalarda,
- Yatay ve düşey iletkenlik değişimlerinin belirlenmesi amacıyla,
- Gömülü yapı ve cisimlerin aranmasında,
- Çevre kirliliği araştırmalarında düşey sınırların saptanması amaçlı,
- Mühendislik jeofiziđi uygulamalarında,
- Karstik boşlukların aranmasında,
- Maden ve cevher zonlarının ve sokulum yapıların aranmasında,
- Arkeolojik yapıların aranmasında.

## **Ölçüm Teknikleri**

İlk VLF-EM ölçüm cihazı Geonics Ltd adlı Kanada firması tarafından üretilmiş ve yapılan testler bu yöntemin sığ iletken yapılar, kırıklar ve masif sülfid, grafit gibi mineralleşme bölgelerinin aranmasında gerçekten iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Daha sonraki yıllarda ABEM firması tarafından piyasaya sürülen tek frekansta ölçüm yapan bir cihaz (WADI) yaygın kullanım alanı bulurken SCINTREX firması aynı anda üç ayrı frekansta ölçüm yapılabilen ENVI sistemini üretti. Sözü edilen ölçüm cihazlarının çoğu ölçülen elektromanyetik alanın düşey manyetik alan bileşenini (Bz) ölçmekle birlikte bazıları birbirine dik yatay bileşenlerini de (Bx, By) ölçmek üzere tasarlanmıştır. Bugün kullanılan birçok cihaz manyetik alan bileşenlerinin yanı sıra yine birbirine dik uyartılan yatay elektrik alanları (Ex, Ey) da ölçebilmektedir. Daha önce sözü edildiği gibi elektrik alanların ölçüldüğu teknik VLF-Resistivity yöntemi

(VLF-R) olarak tanınmaktadır. Elektrik alanların ölçülmesi için geleneksel doğru akım elektrik yönteminde olduğu gibi yer ile galvanik bağlantı kurulan iki elektrot kullanılmaktadır.

VLF-EM yönteminde genel olarak yanal yöndeki elektrik iletkenliğin değişiminin belirlenmesi amacıyla bir doğrultu boyunca belirli aralıklarla kaydırma ölçümleri yapılır. Bu yolla, düşey iletken bölgelerin varlığının, yeri, yayılımı ve dalımı belirlenebilir. Yapıların derinliğine ilişkin bilginin sağlanamaması veya enaz düzeyde olması uygulamada yöntemin sınırlarından birini oluşturmaktadır. Ancak, son yıllarda geliştirilen yeni süzgeçleme, modelleme ve ters çözüm teknikleri ile bu sorun büyük ölçüde aşılabilmektedir.

Genel olarak her türlü amaç için en az iki vericiden (bkz. Tablo-1) yayılan imlerin kaydedilmesi sözkonusu olduğu gibi 15-30 kHz arasındaki frekans aralığındaki daha fazla farklı verici-alıcı doğrultularında ölçümler yapmanın uygulamada yararlı olacağı ortadadır. Arazi ölçümleri bir doğrultu boyunca yürütülebildiği gibi alansal ölçümlerin yapılması daha yaygındır. Ölçüm cihazı yani alıcı bir kişi tarafından sırtta taşınarak ölçümler yapılabildiği için (“one man measurements”) büyük bir alanda dahi ölçümler çok kısa bir sürede tamamlanabilmektedir. Elektrik alan ölçümlerinin (VLF-R) yapılması durumunda elektrotların yerleştirilebilmesi için en az iki kişiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırma amacına bağlı olarak ölçüm aralıkları değişebileceği gibi genel olarak 1-10 metre ve doğrultu aralıkları 2-10 metre arasında değişmektedir. VLF vericilerinin tamir ve diğer amaçlarla düzensiz çalışması nedeniyle tüm vericilerden hergün sinyal almak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ölçümlerin her gün aynı saatte yapılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ölçümler esnasında sadece çok uzun zaman diliminde gözlemlenebilecek diğer bir nokta, güneşin doğuşu ve batışı esnasında manyetik alan şiddetindeki azalmadır. Bunun yanısıra kaynak sinyalinde artış ve azalmalar da ölçümler esnasında gözlemlenebilecek ve dikkat edilmesi gereken diğer noktalardır. Bu nedenle, büyük alanlarda uzun süreli araştırmalarda rasathanelerdeki manyetik alan değişimleri gözlemlenerek olası büyük değişimler için önlemler alınmalıdır.

**Tablo-1:** VLF vericilerinin listesi (CCIR\* 1993; Paterson and Ronka, 1971; Tolstoy et al., 1986; McNeill and Labson, 1991).

<b>Frekans (kHz)</b>	<b>Vericinin yeri, ülke</b>	<b>Vericinin gücü (kW)</b>	<b>Verici kodu</b>
15.1	Le Blanc, Fransa	500	FUO
15.6	Odessa, Ukrayna	500	EWB
16.0	Rugby, İngiltere	750	GBR
16.4	Helgeland, Norveç	350	JXZ
16.8	Bordoeaux, Fransa	250	
17.1	Moskova, Rusya	1000	UMS
17.4	Yokosukaichi, Japonya	200	NDT
17.8	Cutler, USA	1000	NAA
18.1	Murmansk, Rusya		
18.3	Datong, Çin		
18.6	Seattle, USA	300	NLK
19.0	Criggeon, İngiltere	250	MHW
19.6	Anthorn, İngiltere	500	GBZ
20.3	Tavalora, İtalya	500	ICV
21.4	Annapolis, USA	400	NSS
21.8	Antalya, Türkiye		TBA
22.3	NW Cape, Avustralya	1000	NWC
23.4	Ramsloh, Almanya		
23.4	Honolulu, USA		NPM
24.0	Balboa, Panama	150	NBA
24.0	Cutler, USA	1000	NAA
24.8	Jim Creek, USA		
28.5	Aquada, Porto Rico	100	NAU

\* CCIR: Comité Consultatif International des Radiocommunications.

## **ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜKLER**

VLF-EM yönteminde verilen frekans aralığında seçilen bir veya birden fazla frekansta kullanılan ölçüm cihazına bağlı olarak farklı büyüklükler ölçmek mümkündür. En genel ölçülen büyüklükler, manyetik alanın düşey bileşeninin yatay bileşene oranı olarak otomatik olarak düzenek dönüşüm denklemi (system transfer function) olarak isimlendirilebilecek büyüklüğün ( $B_z/B_x$ ) gerçel (real component) ve sanal bileşendir (imaginary component). Bu büyüklükler yüzde (%) cinsinden birimsiz olarak ölçülür ve aynı zamanda manyetik kutuplanma elipsinin x ve z düzlemlerindeki eksenleridir. Gerçel bileşen ortamdaki birincil alanla aynı fazda olduğu için aynı fazlı “in-phase” ve sanal bileşen farklı fazda olduğu için “out-of-phase” veya “quadrature” isimleriyle kullanılmaktadır. VLF-EM yönteminde ölçülen diğer büyüklük, dalganın eğim açısı (wave-tilt) ve toplam manyetik alan şiddetidir ( $B_{total}$ ). VLF-R durumunda ise ölçülen yatay manyetik ve elektrik alan bileşenleri yardımıyla görünür öz direnç ve faz farkıdır.

Bilindiği gibi, vericiden uzakta yatay ve tekdüze olarak kabul edebileceğimiz birincil alan kendisine dik doğrultuda uzanan herhangi bir iletkende eddy akımları oluşmaktadır. Bu durum gözönüne alındığında VLF-EM yönteminden en iyi sonuç jeolojik uzanımın doğrultusundaki bir vericinin kullanılması ile elde edilir. Ortamda iletken yapının olmadığı durumlarda ölçülen toplam alan sadece yatay birincil alandır. Dalga eğimi sıfırdır ve fazı da birincil alanın fazıdır yani faz farkı yoktur. Ortamda bir iletken olması durumunda iletken içinde oluşan eddy akımları ikincil alanları yaratır. Bu alanlara birincil alanlar da eklenirler. Ölçülen toplam alan genlik değeri, yönlenme ve faz bakımından birincil alandan farklılık gösterirler. Genel olarak sıfırdan farklı dalga eğimi ve faz kayması gözlemlenir. İkincil alan birincil alana eklendiğinde toplam alan düşey düzlemde kutuplanma elipsini izler. VLF alıcı tarafından ölçülen ise EĞİM (% olarak derece veya tanjant değeri) ve kutuplanma elipsinin ELİPSELLİĞİ’dir (ellipticity).

Eğim, düşey alanın aynı-faz bileşeninin (in-phase) toplam aynı-faz yatay alana bölünmesine veya yaklaşık olarak ikincil düşey alanın aynı-faz bileşeninin birincil alana bölünmesine eşittir,

$$\text{Eğim} \approx H_z^i / H_p \times 100 \text{ (yüzde olarak)}$$

$$\text{Gerçel Bileşen} \approx \text{Dip (veya tilt) angle} \approx \text{in-phase}$$

Elipsellik, elipsin kısa ekseninin uzun eksene oranıdır (Şekil 5). İkincil alanın karşı-faz bileşeninin toplam aynı-faz alana (ikincil alan+birincil alan) oranı olarak da tanımlanabilir. Yaklaşık olarak ise, ikincil alanın karşı-faz bileşeninin birincil alana oranına eşittir,

$$\text{Elipsellik} \approx H_z^q / H_p \times 100 \text{ (yüzde olarak)}$$

$$\text{Sanal Bileşen} \approx \text{Quadrature} \approx \text{out of phase}$$

### **Araştırma Derinliği ve Görünür Özdirenç**

Düşey elektrik kutup tarafından yaratılan manyetik alanın vericiden uzak mesafelerdeki değeri,

$$H_0 = \left\{ i\omega I dl / 4\pi rc \right\} e^{i\omega(t-r/c)} \sin \theta$$

bağıntısı ile verilmiştir. EM alanın düşey yöndeki davranışı ise,

$$H_z = H_0 e^{-sz} \sin(\omega t - sz)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikten derinliğe göre genlikteki sönümlenme ve eşzamanlı oluşan fazdaki kayma miktarlarını görebiliriz. Burada  $s$ , önceki bölümlerde sönüm sabiti ve  $\delta$  deri kalınlığı veya derinliği (skin depth) olarak tanımlanmıştır.

$$s = (\mu\omega\sigma/2)^{1/2}$$

$$\delta = 1/s = (\mu\omega\sigma/2)^{-1/2}$$

VLF-EM yöntemi için örnek bir hesaplama yapılırsa,  $f=20$  kHz frekansında ve  $\sigma=0.01$  siemens/m iletken bir ortamda ise deri derinliği  $\delta = 35$  m olacaktır. Bu durumda oluşacak faz kayması ise  $s = 0.0028$  radian/m'dir.

Görünür özdirenç tanımı, VLF-EM yöntemi için yaygın olarak kullanılan bir büyüklük değildir. VLF-R yöntemi için ise görünür özdirenç ve faz farkı değerleri geleneksel manyetotellürik yönteminde olduğu gibi hesaplanarak benzer değerlendirme yöntemleri ve modellemeler kullanılabilir.

Elektrik alanın yatay bileşeninin düşey bileşene oranı yer yapısının özdirençinin belirlenmesinde önemli bir yeri vardır. Özdirençin eldesinde kullanılan bağıntı (Poikonen ve Suppala, 1989);

$$\rho_q = 2 |W_q|^2 \omega \epsilon_0$$

burada  $W_q = E_{xq}/E_{zi}$  karşı-faz dalga eğim değeri (q karşı-faz, i aynı-faz),  $\omega$  açısal frekans (rad/s),  $\epsilon_0$  boşluktaki dielektrik sabiti veya permitivite değeridir. Görünür özdirenç ve gerçek özdirenç arasındaki ilişki ise,

$$\rho_q = 2\rho_a \sin 2\phi$$

şeklinde verilmektedir. Bu bağıntıda  $\phi$ , eğim açısıdır. Eğim açısının değeri üst tabakanın özdirençine ve kalınlığına bağlıdır. Bir doğrultu boyunca yapılan ölçümlerde düşük eğim açı değeri veren bölgeler yüksek iletkenlik, yüksek eğim açısı ölçülen bölgeler ise yüksek özdirenç gösterir.

### ***Yöntemin Üstün ve Zayıf Noktaları***

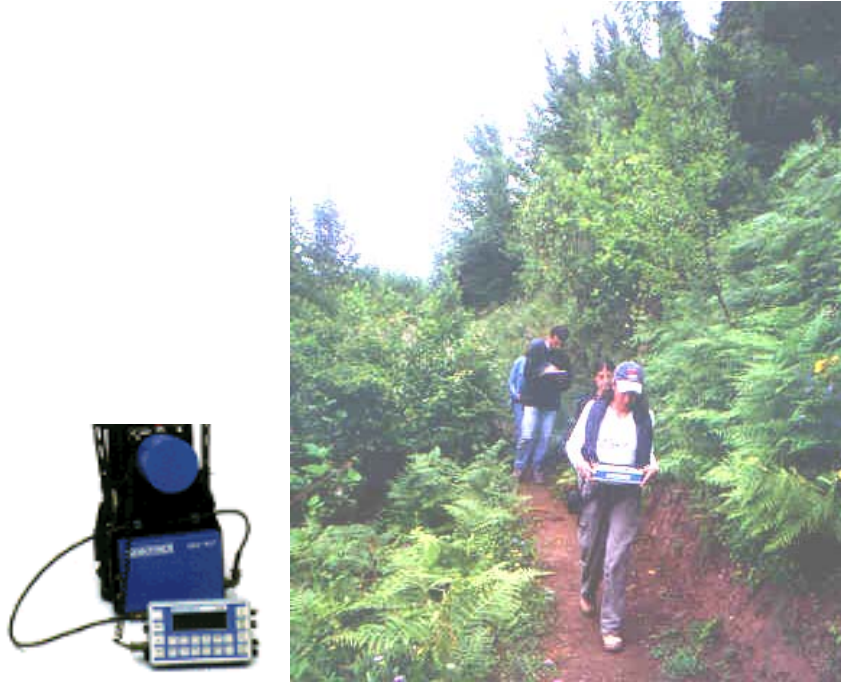
VLF-EM yöntem ölçümleri esnasında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar izleyen biçimde sıralanabilir:

- Bir doğrultu boyunca belirlenen aralıklarla yapılan her ölçümde alıcıyı taşıyan kişinin ayakta ve dik durması gerekmektedir. Alıcı sensörlerin bulunduğu kapalı bölümde her ne kadar bir eğim dengeleyici bulursa da düşeyden  $10^\circ$ 'den fazla sapmalar sonuçların doğruluğunu etkileyecektir.
- Okumaların yapıldığı süre boyunca hareketsiz kalınmalıdır. VLF vericilerinin yaydığı ve bu nedenle oluşan elektromanyetik alanların kaydedilmesi yaklaşık



5 saniye sürmektedir; bu süre boyunca ölçümü yapan jeofizikçi veya operatörün hareketsiz kalması gerekmektedir.

- Ölçümler esnasında ölüm doğrultusu boyunca telefon kabloları, elektrik hat ve trafoların bulunup bulunmadığına dikkat edilmeli, yaratacağı etkiler düşünülerek elde edilen eğrilerde mutlaka işaretlenmeli ve yarattığı etkiler süzgeçler yardımıyla giderilmelidir.

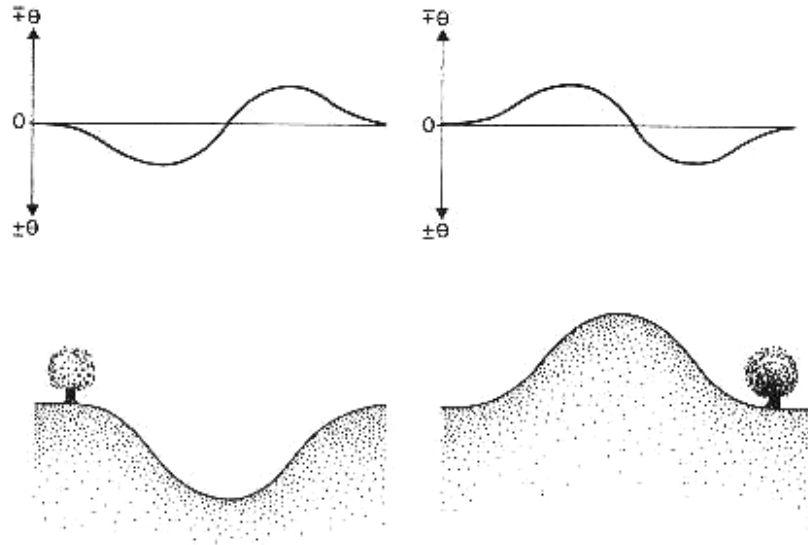


Şekil 7. SCINTREX ENVI Sistem VLF-EM cihazı ve bir ölçüm görünümü

- Araştırılmak istenen kırık yapılarının veya yataklanmanın uzanımı vericiye doğru olmalıdır. Aksi halde EM alanı hedefe paralel olacak ve herhangi bir anomali yaratılamayacaktır.
- Aynı biçimde her zaman araştırılmak istenen yapı uzanımı doğrultusunda bir verici bulunmaması da yöntemin sınırlamaları arasındadır.
- Çalışma alanı mümkün olduğu kadar düz olmalıdır, topografik değişimler uzun dalga boylu dalgaların yükseltiye yansımaları sağlayacağından ölçümleri etkileyebilir (Şekil 8).
- İletken yüzey katman araştırma derinliğini sınırlayan en büyük etkenlerdendir ve yöntemin sınırlayıcı bir özelliği olarak düşünülebilir.

VLF-EM yönteminin araştırma amacına bağlı olarak sağladığı üstünlükler:

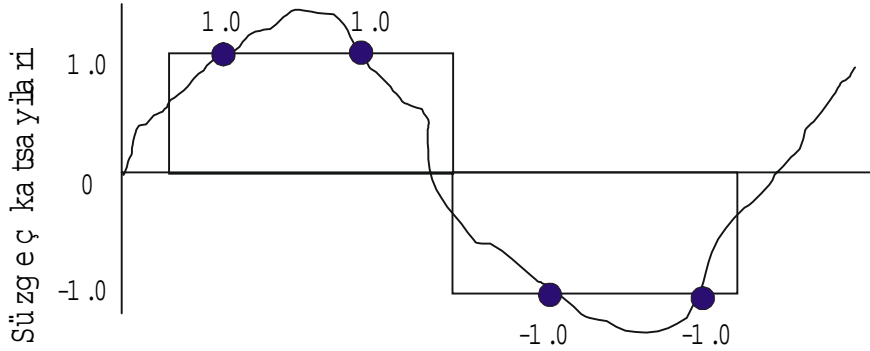
- Ölçümler sadece bir alıcı ile yapılabildiğinden bir vericinin maliyeti ortadan kalktığı için ucuz bir yöntemdir.
- Alıcının bir kişi tarafından sırtta taşınmasıyla ölçümler yapıldığı için (“one man measurements”) (Şekil 7) yöntemin uygulaması çok hızlı ve basittir. Bu hızlılığa ek olarak, VLF-EM ölçümleri ve daha geniş bir frekans aralığında (12-300 kHz) arabaya monte edilerek başarılı sonuçlar elde etmek mümkün olmuştur (Stiefelbogen, 1998).
- Oldukça kısa bir zaman içinde büyük alanlarda inceleme amacına bağlı olarak düşey süreksizlik veya yapılarla ilişkin bir ön bilgi elde etmek mümkün olmaktadır. Ön bilginin yanısıra özellikle son yıllarda geliştirilen süzgeçleme ve modelleme çalışmaları ile ayrıntıda yapıya ilişkin ek bilgiler sağlanabilmektedir.



Şekil 8. Eğim açısı ölçümlerinde topografya etkisinin şematik gösterimi (Meyer de Stadelhofen (1994)'ten alınmıştır).

## **VLF-EM verilerinin sunumu ve değerlendirilmesi**

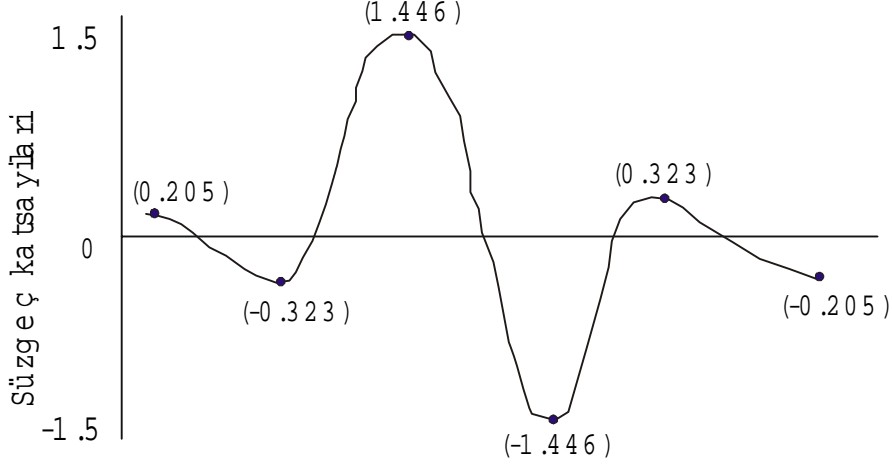
VLF-EM yönteminde genel olarak ölçülen verilerin (%in-phase - % IP ve %out-of-phase - % OP) ölçüm doğrultuları boyunca grafik çizimi veya alansal verilerin eşdeğer (kontur) haritaları biçimindeki gösterimi yaygındır. Herhangi bir süzgeç uygulanmadan verilerin bu şekilde gösterimi ile ölçüm yapılan alana ilişkin doğrudan nitel bir yorum elde etmek mümkündür. Yapılan araştırmaların çoğunda herhangi bir süzgeç uygulama sözkonusu olsa bile bu şekilde bir gösterim doğrudan bilgi vermesi açısından son derece yararlı olmaktadır. Ölçülen veriler için yaygın olarak kullanılan Fraser süzgeci (Fraser, 1969), gerçel bileşen verilerinin band geçişli bir sayısal süzgeç ile araştırılmak istenen düşey iletken üzerinde bir enbüyük değerin elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu süzgecin katsayıları +1, +1, -1, -1 olarak verilmiştir (Şekil 9) ve bu süzgeçle veri  $90^\circ$  kaydırılmakta ve yumuşatılmaktadır. Fraser süzgeci (Fraser, 1969) süzgeç şekli ile uyumlu belirtileri belirginleştirirken diğerlerini bastırmaktadır. Dolayısıyla, süzgeç şekline benzeyen belirtiler negatif değer alır, eşdeğer çizim haritalarında yalnızca pozitif değerler göz önüne alınır ve kullanılır. Bu tür süzgeçlemede süzgeç beklenen belirti şekline kesinlikle uymalıdır yani kullanıcı belirtiyi tanımlayabilmelidir.



Şekil 9. Fraser süzgeci (Fraser, 1969).

VLF-EM verileri için uygulanabilecek bir başka sayısal süzgeç, Karous-Hjelt süzgecidir (Karous and Hjelt, 1983). Bu süzgeçle Fraser süzgecinde bir iyileştirme sözkonusu olmuştur ve yine yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur. Bu süzgeçle manyetik alan bileşenleri bir derinlik değerine atanarak görünür bir akım yoğunluğu

tanımlanmıştır. Bu süzgeç sonucunda görsel olarak düşey iletkene ait bir eşdeğer haritası elde edildiği için Fraser süzgecine göre daha çok tercih edilmiştir. Karous-Hjelt süzgeci katsayıları, 0.205, 0.323, 1.446, -1.446, -323, -0.205 olarak (Şekil-10) uygulanmakla birlikte bu değerler normalize edilerek te kullanılmaktadır.

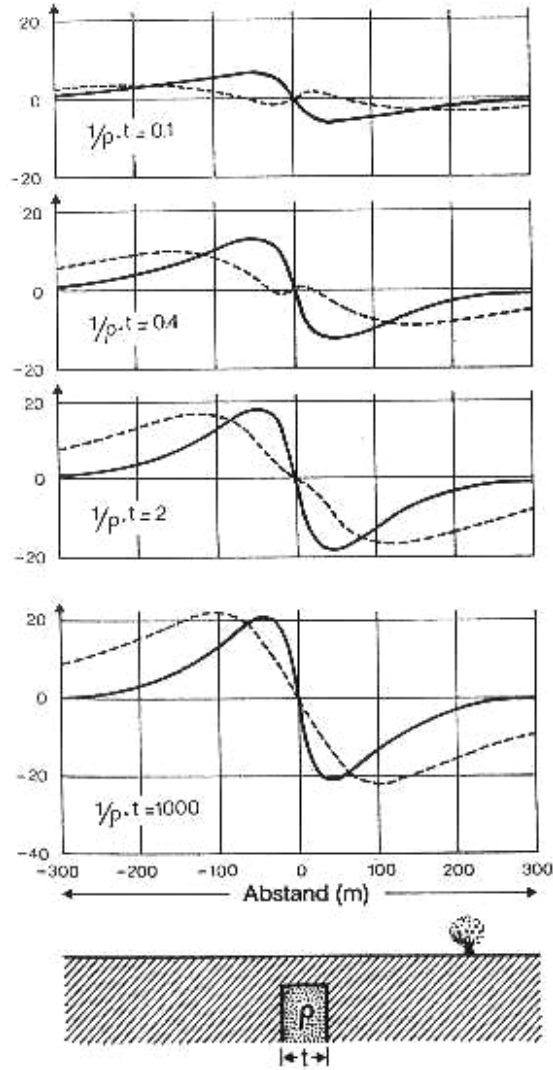


Şekil 10. Karous-Hjelt süzgeci (Karous and Hjelt, 1977).

VLF-EM verileri için yukarıda sözü edilen ilk süzgeçlerden sonra ölçülen gerçel ve sanal bileşen verilerinin dönüşümü ile bir görünür özdirenç tanımı Couteau et al., (1996) tarafından yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Başlangıçta değerlendirmelerde belirsizlikler içeren VLF-EM yöntemine ilişkin son yıllarda birçok süzgeçleme teknikleri, modelleme ve ters çözüm algoritmaları (Ogilvy and Lee, 1991; Beamish, 1994; Edsen and Nissen, 1997; Djeddi et al., 1998; Beamish, 1998) geliştirilerek uygulamadaki kolaylığına uygun değerlendirme yöntemleri geliştirilmekle birlikte iki ve üç boyutlu modelleme hesapları uzun zaman aldığından yaygın kullanım alanı bulmamıştır. Ancak tüm jeofizik yöntemler için olduğu gibi en az iki boyutlu modellemelerin yapılmasıyla elde edilecek sonuçların doğruya ve gerçeğe yakınlığı bu hesaplamaların yapılması gereğini ortaya koymaktadır. Özet olarak, VLF-EM verilerinin değerlendirilmesi amacıyla uygulanacak işlemler izleyen biçimde verilebilir:

- a) Modelleme çalışmaları (bir ve çok boyutlu modellemeler).
- b) Süzgeç hesaplamaları (Fraser, Karous-Hjelt, Couteau süzgeçleri).

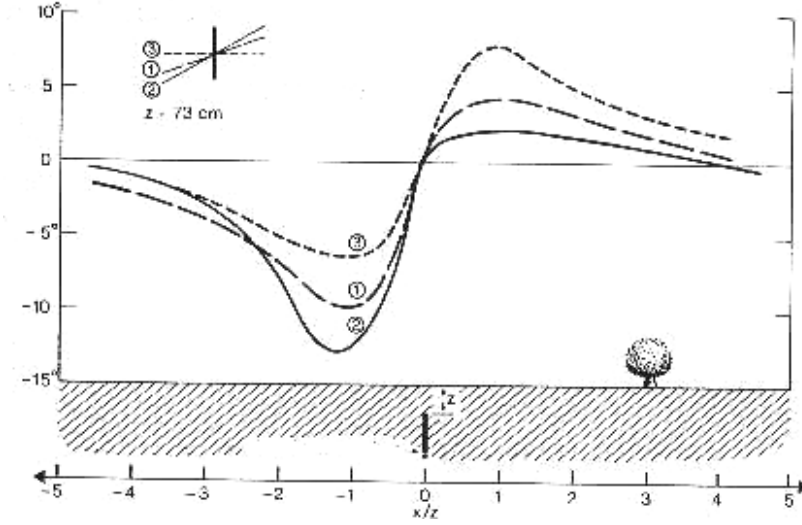
- c) Eğim belirleme çalışmaları (eşdeğer çizim haritalarından ve model eğri hesaplarından (Şekil 11, 12 ve 13) bulunur).
- d) Derinlik ve yüzeyi kaplayan birimin özdirencinin bulunması. Derinlik değeri,  $Z = \Delta x / 2$  olarak alınır. Burada  $\Delta x$  = eğim veya elipsellik eğrilerinde pozitif (+) ve negatif (-) en büyük değerler arasındaki mesafedir.



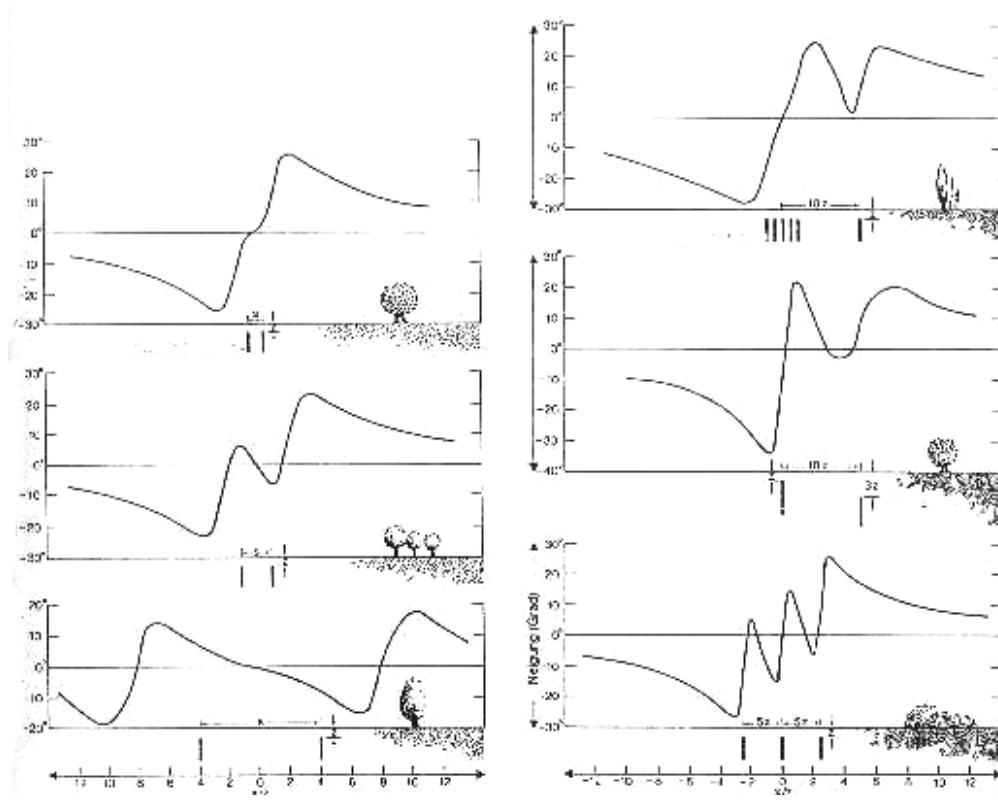
Şekil 11. Elipsellik parametreleri (b/a) ile düşey iletkene ait değiştirgenler arasındaki ilişki (Saydam, 1981).

- e) Jeolojik uzanımın uzunluğu, genişliği ve benzeri bilgilerin bulunması (eşdeğer çizim haritalarından modelleme çalışmaları ile bulunabilir).

- f) Elipsellik yaklaşımları. Mevcut radyo istasyonları yerine yapay bir kaynak kullanılarak uygulanacak VLF-EM yöntemi (EM 16) için Saydam (1981) tarafından hesaplanan çok çeşitli model hesaplamaları kullanılabilir. Bunlara bir örnek Şekil 11’de verilmiştir.
- g) Derinlik kestirimi. Kuramsal yöntemlerden yararlanarak VLF-EM eğrilerinden bir derinlik elde edilebilir. Görünür derinlik olarak adlandırılan yaklaşımda anomali bölgesindeki en büyük değerlerin ortalaması  $(A_{r+} + A_{r-}) / 2$  ile bu genliklerin konumları  $(X_{r+} + X_{r-})$  ye oranlarından elde edilir (Olsson, 1980; Poddar, 1982). Bu yöntemde  $X_{r+}$  değerinin belirlenmesi sorunludur, bu nedenle bu yöntemle bulunacak derinlik gerçek derinlikten daha fazla olacaktır. Eğer iletken örtü tabakası kalınlığı deri kalınlığından fazla ise bu yöntem çalışmayacaktır, yöntemin ayrıntıları ilgili yayınlarda bulunabilir.



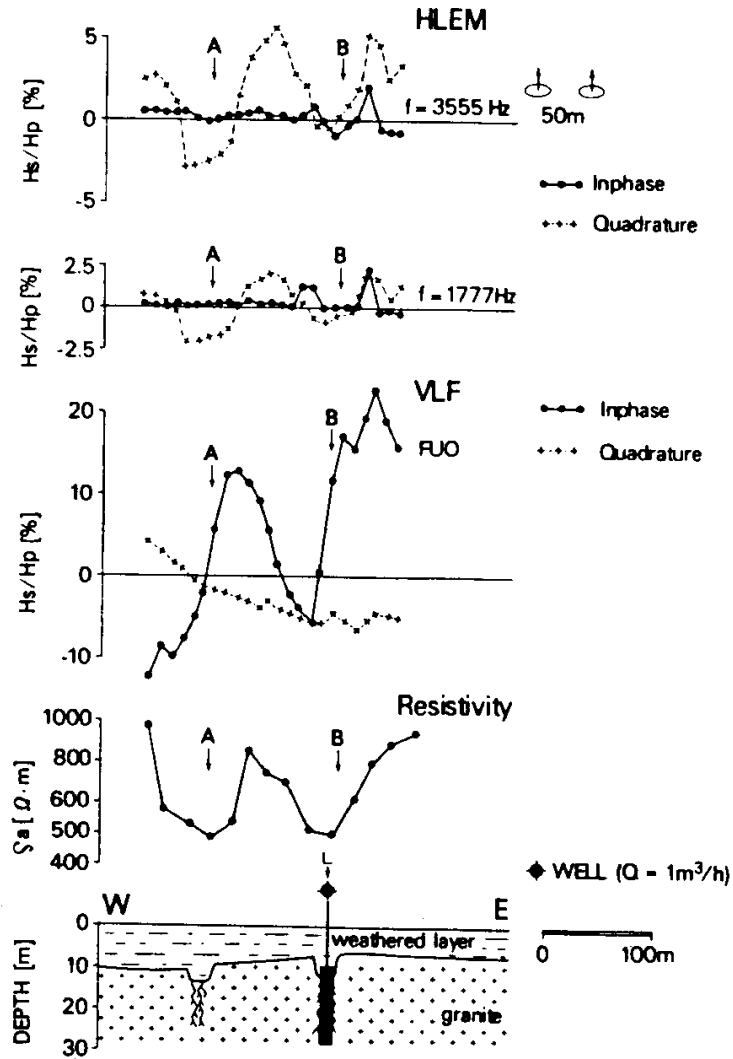
Şekil 12. VLF-EM ölçümlerinde düşey bir iletkenin eğiminin değişiminin eğrideki değişimi (Telford et al., 1976).



Şekil 13. VLF-EM ölçümlerinde çok sayıda düşey bir iletkenin ölçülen eğrilerdeki etkisi (Telford et al., 1976).

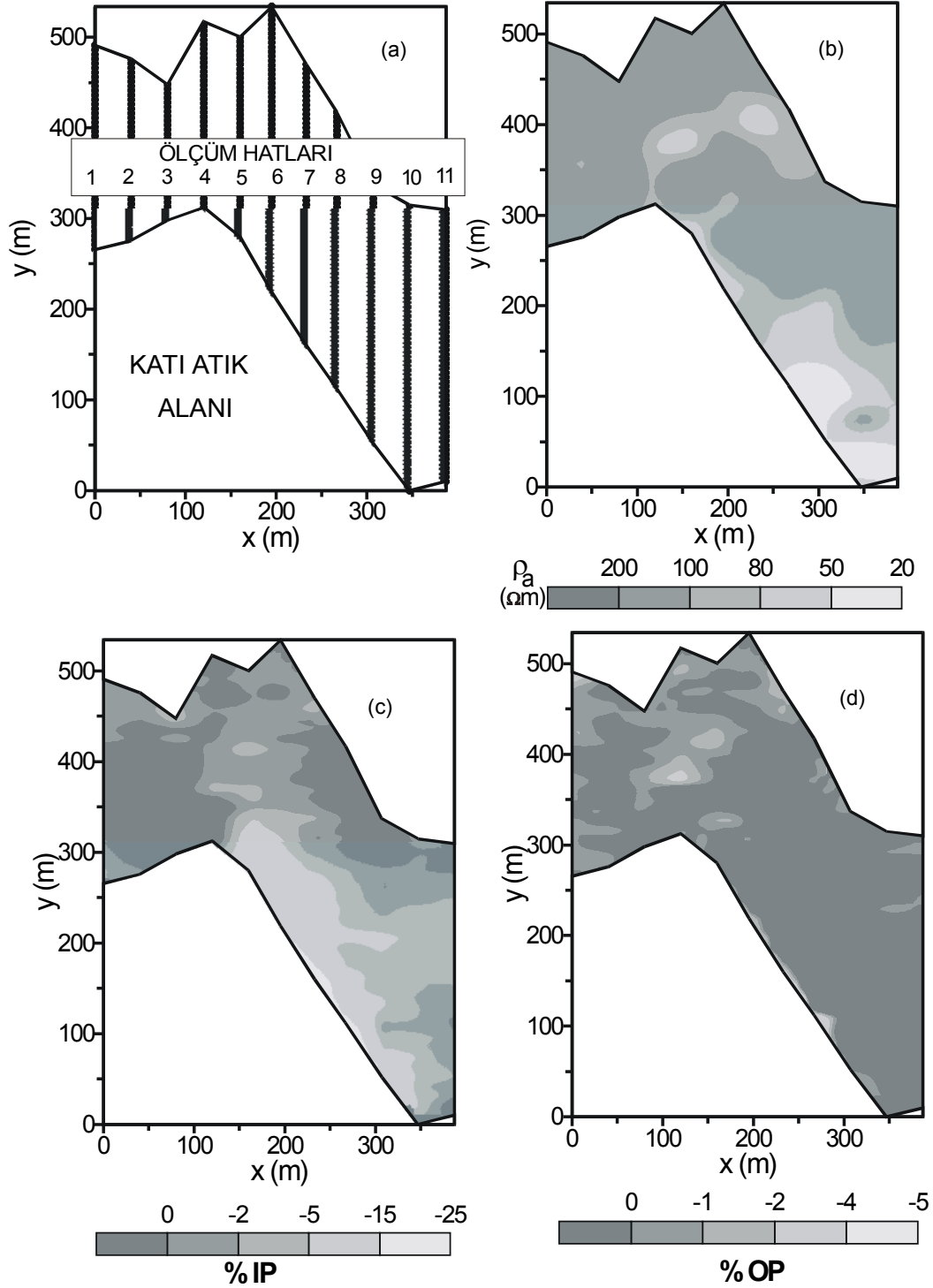
### Örnek Uygulamalar

VLF-EM yöntemi ile ilgili uygulamalara ilk örnek Afrika'da yapılan yeraltısuyu araştırmalarından seçilmiştir (Palacky et al., 1986). Genel olarak, bölgede ayrıışmış bir örtü katmanı altında yer alan çatlaklı ve kırıklı granitler üzerinde yapılan ölçümler Şekil 14'de görülmektedir. VLF-EM ölçümlerle birlikte Slingram ve Doğru Akım Elektrik (Schlumberger dizilimi kaydırma ölçümleri) yöntemlerinin uygulandığı bu alanda "B" ile gösterilen delgi üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir. Bu noktada tüm yöntemlerle elde edilen düşük ve negatif değerler uygulanan yöntemlerin iletkene (yeraltısuyu) duyarlılıklarını açık bir biçimde göstermektedir. VLF-EM yöntemi ölçülen verilerinde gerçel bileşenin (inphase) bu örnek için iletkene karşı daha duyarlı olduğu gözlemlenirken üstte her iki frekans için Slingram eğrilerinde sanal bileşenlerin (out of phase) daha belirgin bir davranış gösterdiği görülmektedir. Afrika'da yapılan bu uygulamada doğru akım elektrik verileriyle elektromanyetik verilerinin birlikte kullanımı ve sağladığı yararlar açıkça izlenmektedir.



Şekil 14. Afrika’da Mankarga yakınlarında kırıklı granit üzerinde yapılan 3 jeofizik yöntem sonuçları; “B” üretim yapılan bir kuyuyu göstermektedir (Palacky et al., 1981).





Şekil 15. Isparta katı atık alanındaki ölçüm doğrultu ve noktaları (a),  $AB/2=25$  m için ölçülen görünür öz direnç kat haritası (b), VLF-EM gerçel bileşen (%IP) kontur haritası (c), VLF-EM sanal bileşen (%OP) kontur haritası (Karlık and Kaya, 2001).

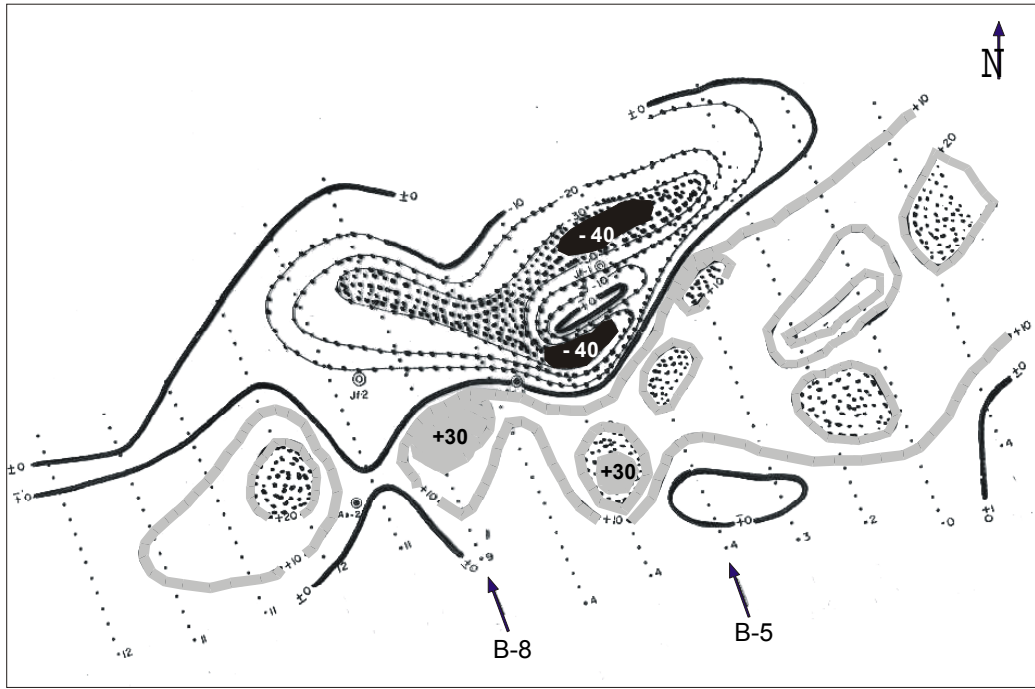
VLF-EM yöntemine bir başka örnek uygulama olarak yeraltısuyu kirliliği araştırması verilmiştir (Karlık and Kaya, 2001). Isparta şehri katı atık alanında yeraltısuyu kirliliğinin ve sınırlarının saptanması amacıyla yapılan VLF-EM ( $f=16.0$  kHz, Rugby, İngiltere) ve Doğru akım elektrik özdirenç ölçüm sonuçları Şekil 15'te görülmektedir. Alanda yapılan jeolojik araştırmalardan elde edilen verilere göre katı atık alanının bulunduğu bölgenin yapısı genel olarak yüzeyde kalınlığı 100 metreye varan alüvyon örtü ve onun altında tuf ve en altta kireçtaşı katmanlarından oluşmuştur ve hidrojeolojik araştırmada yeraltısuyu akış yönü kuzey-kuzeydoğu olarak belirlenmiştir (Karagüzel and Irlayıcı, 1988).

Gerek doğru akım verileri kat haritasında (Şekil 15-b) gerekse VLF-EM gerçel ve sanal bileşen haritalarında (Şekil 15-c ve d) ölçülen alan bileşenlerindeki işaret ve genlik değişimi ile 4. doğrultudan 11. doğrultuya doğru, kuzey ve kuzeydoğu yönünde yeraltısuyu akış yönünde bir iletkenlik artışı (yaklaşık 10 Ohm-m) açık bir biçimde izlenmektedir. Burada doğru akım verileri ile VLF-EM yöntem verilerinin uyumu yöntemlerin entegrasyonunun yararını bir önceki yeraltısuyu araştırmasında olduğu gibi vurgulama açısından önemlidir.

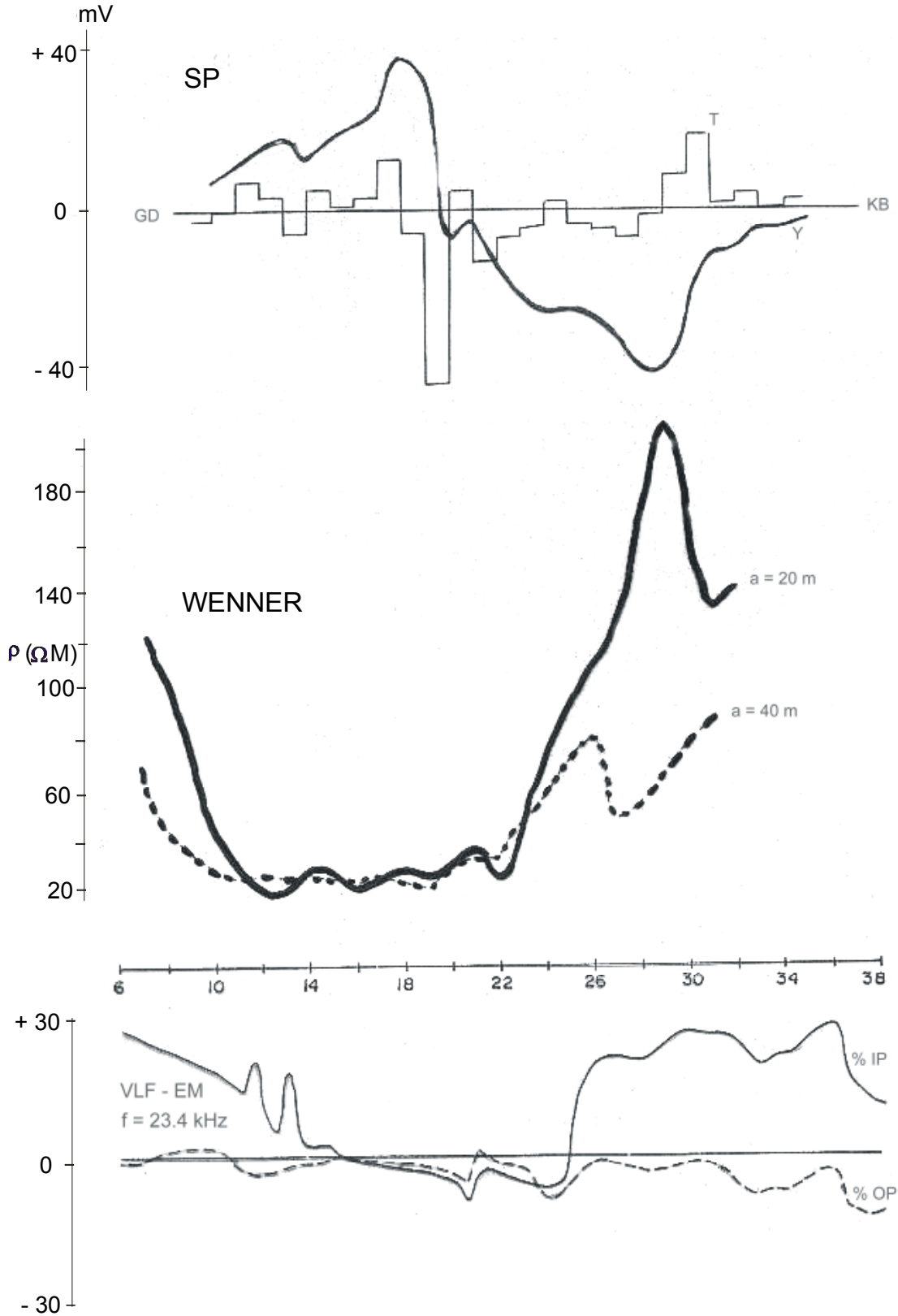
VLF-EM yöntemi uygulamalarına son örnek Manisa-Demirci'de yapılan bir jeotermal alan araştırmasından alınmıştır. VLF-EM yöntemi ( $f=23.4$  ve 16.0 kHz) ile birlikte aynı araştırmada Doğal Uçlaşma (Self potential – SP), Doğru akım elektrik özdirenç yöntemi Wenner dizilim ile kaydırma ölçümleri ( $a=20$  ve 40 metre açılımlar için) yapılmıştır (Şahin, 1997; Karlık and Şahin, 1997). Alanda yapılan ölçümler 50 metre aralıklarla 13 doğrultuda ve 10 metre aralıklı noktalarda yapılmıştır (Şekil 16). SP verilerine göre sıcak alanlar yüksek iletkenlik, basınç ve çözelti yoğunluğu gösteren negatif ölçümlerle kendini göstermiştir. SP haritasındaki değerlerde enbüyük-enküçük değer geçiş trendi  $-40$  mV (siyah çizgiler) ile  $+40$  mV (gri çizgiler) arasındadır. Bu veriler, SP anomalisini oluşturan mekanizmalar içinde termoelektrik mekanizmasının etkin ve denetleyici olduğunu göstermektedir (Şahin, 1997).

Alanı tümüyle kateden iki GD-KB doğrultulu profilde (Şekil 17 ve Şekil 18) ölçülen veriler genel olarak benzer görünüme sahip ve sıcak alana ait izler taşımaktadır. Özellikle Wenner kaydırma ölçümleri ile VLF-EM ölçümlerinde her iki taraftaki yanal geçişler ve faylı görünüm açık olarak izlenmektedir. Sıcak alan üzerine görünür

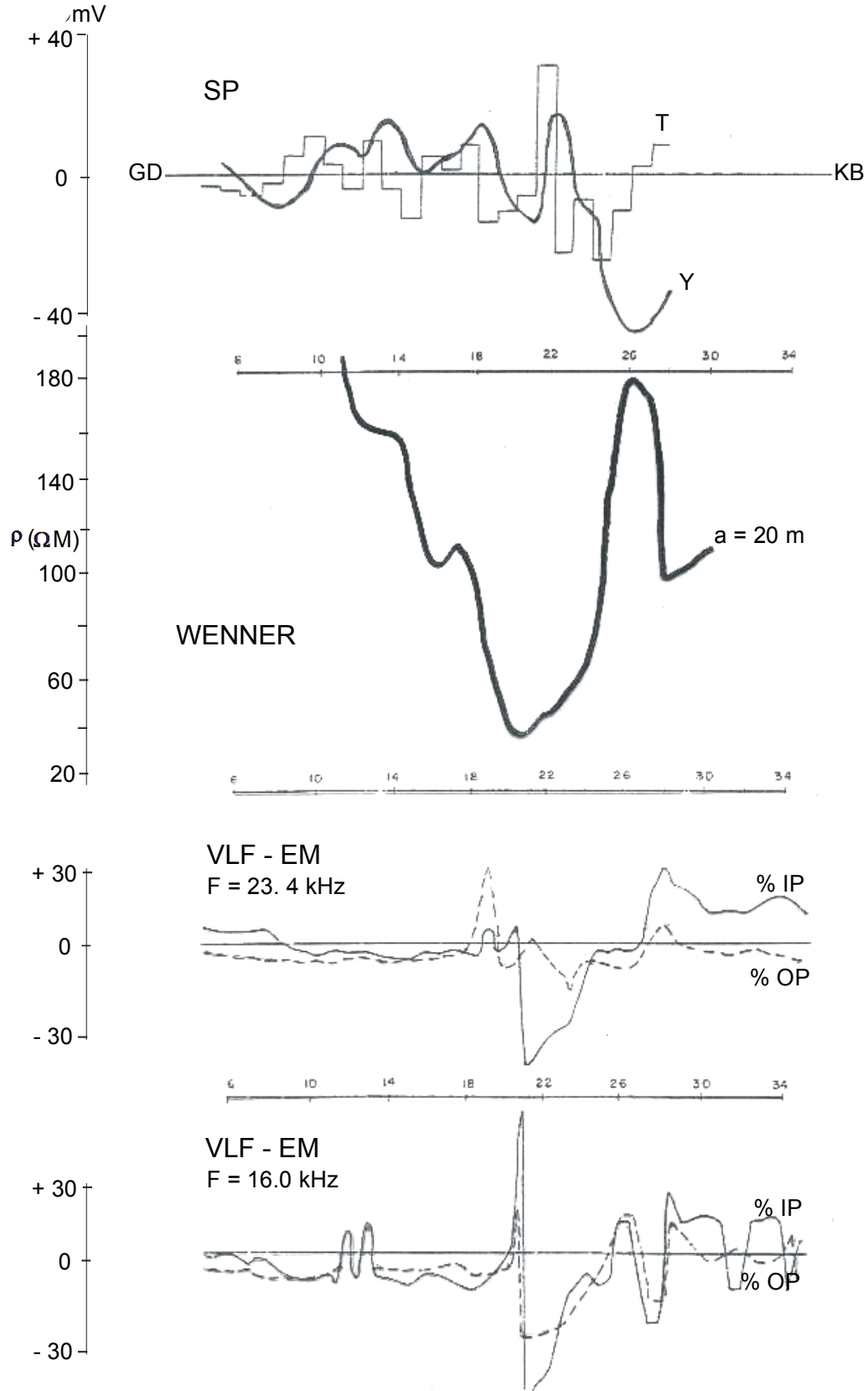
özdirenç değeri yaklaşık 20 Ohm-m civarında belirlenmiş ve aynı bölgede VLF-EM gerçel ve sanal bileşen değerleri negatif enbüyük değere ulaşmıştır. Genel olarak yerin sığ derinliklerinden bilgi alma amacıyla uygulanan bir yöntem olan VLF-EM yöntemi ile sıcak alanı sınırlayan süreksizliklerin/yanal geçişlerin açık bir biçimde elde edilmesi yöntemin kullanım amaçlarına uygun olup diğer jeofizik yöntemlerle ilişkilendirmenin yararı ortadadır.



Şekil 16. Manisa-Demirci jeotermal alan araştırmasında ölçülen doğal uçlaşma (SP) haritası (Şahin, 1997; Karlık and Şahin, 1997).



Şekil 17. Manisa-Demirci jeotermal alan araştırmasında ölçülen B-8 profili için doğal uçlaşma (SP) (en üstte), doğru akım elektrik öz direnç yöntemi Wenner dizilimi kaydırma ölçümleri ( $a=20$  ve  $40$  m için) (ortada) ve VLF- EM ölçümleri ( $f=23.4$  ve  $16.0$  kHz) profil gösterimleri (altta) (Şahin, 1997; Karlık and Şahin, 1997).



Şekil 18. Manisa-Demirci jeotermal alan araştırmasında ölçülen B-8 profili için doğal uçlaşma (SP) (en üstte), doğru akım elektrik öz direnç yöntemi Wenner dizilimi kaydırma ölçümleri ( $a=20$  ve  $40$  m için) (ortada) ve VLF-EM ölçümleri ( $f=23.4$  ve  $16.0$  kHz) profil gösterimleri (altta) (Şahin, 1997; Karlık and Şahin, 1997).

## Kaynaklar

- Beamish, D., 1994, Two dimensional regularized inversion of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 357-374.
- Beamish, D., 1998, Three dimensional modelling of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, 39 (2), 63-76.
- Benson, A.K., Payne K. L., Stubben, M.A., 1997, Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods – A case study. *Geophysics* 62, 80-86.
- Edsen N. A., Nissen J (1997) VLFMOD, a free forward VLF modelling software package. ftp: <http://home1.swipnet.se/~w-11019/ABEM-ftp/>.
- Fraser, D.C., 1969, Contouring of VLF-EM data, *Geophysics*, 34, 958-967.
- Guerin, R., Benderitter, Y., 1995, Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods, *Geophysical Prospecting*, 43, 635-653.
- Hayles, J. G., and Sinha, A. K., 1986, A portable local loop VLF transmitter for geological fracture mapping, *Geophysical Prospecting*, 34, 873-896.
- Kaikkonen, P., 1979, Numerical VLF Modeling, *Geophysical Prospecting*, 27, 815-835.
- Karagüzel, R, Irlayıcı, A., 1998, Groundwater pollution in the Isparta Plain, Turkey, *Environmental Geology*, 34, 303-308.
- Karlık, G., Kaya, M. A., 2000, Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at a solid waste disposal site – A case study from Isparta, West-Turkey, *Environmental Geology*, 40 (6), 725-731.
- Karlık, G., Şahin, H., 1997, VLF, SP and DC-Resistivity Measurements and Their Interpretation in the Hisar Geothermal area, *International Geophysical Conference and Exposition, Society of Exploration Geophysicists, Technical Program Abstracts, Istanbul*, 73.
- Karous, M., and Hjelt, S. E., 1983, Linear filtering of very-low-frequency (VLF) dip-angle measurements, *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794.
- McNeill, J. D., 1990, Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *In* Ward SH, Ed., *Geotechnical and environmental geophysics, Volume 1: Soc. of Expl. Geophysics.*, 191-218.
- McNeill, J. D. and Labson, V., 1991, Geological mapping using VLF Radio Fields. *In*

- Ward SH, Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics – Investigations in Geophysics, Volume 3: Soc. of Expl. Geophysics.
- Ogilvy, R. D., and Lee, A. C., 1991, Interpretation of VLF-EM Inphase data using current density pseudosections, *Geophysical Prospecting*, 39, 567-580.
- Olsson, O., 1980, VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden. *Geophysical Prospecting* 28, 415-434.
- 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.
- Paterson, N. R., and Ronka, V., 1971, Five years of surveying with the VLF-EM method. *Geoexploration* 9, 7-26.
- Poddar, M., 1982, Very low frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half-plane in a layered half – space, *Geophysics*, 47, 1059-1067.
- Saydam, A. S., 1981, Very low frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements, *Geophysics*, 46, 1594-1605.
- Stadelhofen, C. De Meyer, 1994, Anwendung geophysikalischer Methoden in der Hydrogeology, Springer Verlag.
- Stiefelhagen, W., 1998, Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM): Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen, PhD Thesis, pp 243.
- Şahin, H., 1997, Manisa-Demirci Hisar Kaplıca Alanı Sıcaksu Aramaları Jeofizik Etüdü, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Telford, W. M., Geldard, L. P., Sheriff, R. E., and Keyes, D. A., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.
- Tezkan, B., 1999, A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Survey in Geophysics* 20: 279-308.
- Tolstoy, A., Rosenberg, T. J., Inan, U. S., and Carpenter, D. L., 1986, Model predictions of subionospheric VLF signal perturbation-induced ionisation enhancement regions, *J. Geophys. Res.*, 91, 13473-13482.