

VLF YÖNTEMİNDE AKIM YOĞUNLUĞU DAĞILIMININ ELDE EDİLMESİ

Determination of Current Density Distribution in VLF Method

Ferhat ÖZÇEP*

ÖZET

VLF yöntemi, yerkabuğunun bağıl olarak sığ kesimlerinin elektrik özelliklerini belirlemek amacıyla 15-30 kHz frekans aralığında radyo dalgalarının yayımladığı elektromanyetik dalga enerjisini kullanan bir jeofizik yöntemidir.

VLF eğim açısı verilerinin doğrusal filtrelenmesi ile akım yoğunluğu dağılımı basit bir şekilde belirlenebilir. Önerilen yorumlama tekniği VLF verisinin ayırık doğrusal filtrelenmesine (KH filtresi) dayanır. Filtrelenmiş veri, ölçülen manyetik alanın neden olduğu akım yoğunluğu terimleri ile açıklanabilir.

Tekniğin kullanımı için kuramsal ve ülkemizden (Akyazı) bir saha örneği verilmiştir.

ABSTRACT

For determination of electrical property of relatively shallow part of the earth's crust, VLF method as a geophysical method uses electromagnetic waves which are propagated the radio waves in frequency range from 15 to 30 kHz. Using linear filtering of VLF dip angle measurements, distribution of current density can determine very easily.

The suggested interpretation technique is based on discrete linear filtering (KH Filter) of VLF. The output of the filtering results is expressed in terms of an equivalent current density at a specified depth that would cause the measured magnetic field.

The use of the technique was given on theoretical and field examples from Akyazı, Turkey.

GİRİŞ

Radyo dalgalarının yayını uzun süreden beri kuramsal ve uygulamalı olarak incelenmektedir. VLF radyo dalgalarının iletişim (telekomünikasyon) amacıyla yararlanma 1900'lü yıllarda başlar. Ancak bu dalgaların yer içinin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik kullanımı yüzyılın ikinci yarısıdır. Uzun dalga ya da VLF radyo yayınları uzun ve ilginç bir tarihe sahiptir. VLF sözcüğü etimolojik olarak İngilizce çok alçak frekans anlamına gelen Very Low Frequency sözcüklerinin ilk harflerine dayanmaktadır. VLF bandında yayın ilk olarak 1910-1912 arasında denenmiştir. Günümüzde bu dalgaların temel kullanımı amacı denizcilikle haberleşmeye yöneliktir.

Jeofizik mühendisliğinde ise VLF Radyo Dalgaları yöntemi, çok alçak frekanslı radyo yayınlarını kaynak olarak kabul eden bir elektromagnetik arama yöntemidir. Kullanılan alıcının türüne göre Elektromanyetik (EM) alan bileşenlerinin değişimlerinin veya eğim açısının ölçülmesi ilkesine dayanır. Kaynak olarak 15-30 kHz frekans aralıklarında işleyen haberleşme amaçlı radyo istasyonları kullanılır.

Jeofizik açıdan elektromagnetik (EM) kuramın ilkeleti Straton (1940), Wait (1962) ile Lorrain ve Corsari

(1970)'de bulunabilir. VLF uygulamaları açısından EM ilkeler ise Crossley (1981)'de açıklanmıştır. Yerdeğiştirme akımlarının etkileri ise Sinha (1977) tarafından ele alınmıştır.

Zamanla periyodik olarak değişen bir magnetik alan etkisi altındaki iletken bir kürenin davranışı Wait (1951) tarafından incelenmiştir. Doğal elektromagnetik alanlar için fay modeli ise d'Erceville ve Kunetz tarafından araştırılmıştır (1962). VLF yönteminde en çok uygulama sahası bulunmuş modellerden biri olarak dayk modeli çeşitli araştırmacılar tarafından analog ve sayısal olarak incelenmiştir. (Telford ve diğ., 1976; Saydam, 1980; Kaikonen, 1980; Sinha, 1990 v.d.).

VLF yöntemi ülkemiz için yenidir, yöntem hakkında daha ayrıntılı bilgi almak isteyenler Özçep (1992 ve 1994)'e bakabilirler.

VLF istasyonlarından yayılan sinyaller jeofizik açıdan çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Bunlar; maden araştırmaları, yeraltısuyu aramaları veya kirlenme çalışmaları zemin incelemeleri, iyonosfer çalışmaları, meteorolojik çalışmalar ve arkeolojik araştırmalar olarak sıralanabilirler.

Bu çalışmanın esas konusu VLF eğim açısı verilerinin filtrelenmesidir. Bu işleme bir tür modelleme gözüyle

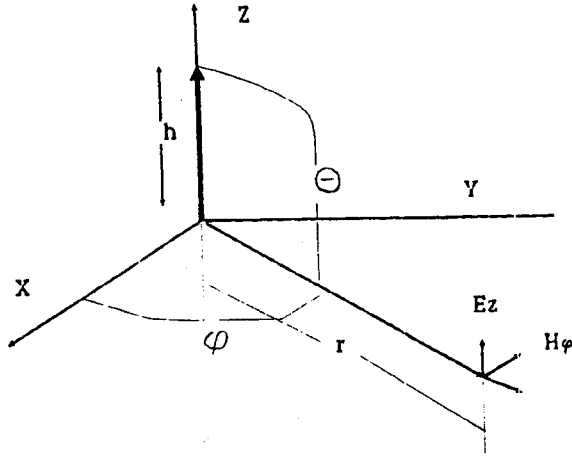
* İst. Üniv. Jeofizik Müh. Bölümü Yer Fiziği Anabilim Dalı

bakabiliriz. Bu işlemle, basit bir şekilde akım yoğunluğu dağılımı elde edilebilir (Karus ve Hjelt, 1983).

VLF KAYNAK DALGASI

VLF radyo dalgalarının yayınımları iki ayrı açıdan ele alınabilir. İlki, bir Elektromagnetik (EM) kaynağın (yani antenin) herhangi bir alıcı noktasında oluşturacağı potansiyelden yola çıkarak o noktadaki alan şiddetli değerini hesaplamak, ikincisi ise Maxwell denklemlerinin çözümünü gerektiren düzlem EM dalganın indüksiyonudur.

Aralarında çok küçük bir 1 uzaklığı bulunan iki noktaya uygulanmış $+q$ ve $-q$ elektrik yüklerini alalım (İdemen, 1987; Akkaya, 1982). Böyle bir düzene Hertz Dipolü adı verilir (Şekil.1.).



Şekil 1: Kartezyen koordinat sisteminde Hertz dipolü (McNeil ve Labson, 1993)

Figure 1: Hertz dipole in cartesian coordinate system (from McNeil ve Labson, 1993' den)

Şimdi bu dipolü (x, y, z) koordinat merkezine ve z eksenini boyunca yerleştirelim. θ noktasından r uzaklığındaki bir P noktasında oluşacak vektör potansiyelini hesaplayacak olursak bu potansiyelden elde ettiğimiz elektrik ve manyetik alanların sırasıyla $1/r$, $1/r^2$, $1/r^3$ şeklinde uzaklığa bağımlılık gösteren üç terimin toplamından oluştuğu görülür. Bu bileşenlerin anlamları ise;

- (1) r ile ters orantılı kısım "ışınım" (radyasyon) alanıdır.
- (2) $1/r^2$ ile orantılı kısım "indüksiyon" alanıdır.
- (3) $1/r^3$ ile ters orantılı kısımda ise elektrik alan bileşenlerinde vardır. Bu kısım statik alan olup zamanla değişmeyen yükler dikkate alındığında elde edilen alanın benzeridir. Bütün jeofizik araştırmalarında bu bileşenin ihmal edilebilir.

Küçük uzaklıklarda statik alan ve indüksiyon alanı baskındır. Fakat, $r > c/\omega$ olduğu zaman ışınım alanı daha

büyük olur. Bu durumda dipolden yeteri kadar uzaklıkta yalnızca $1/r$ ile orantılı ışınım alanı (1) bulunacak ve diğerleri bunun yanında ihmal edilecektir. Bu sözü edilen alanın bileşenleri;

$$E_r = 0 \quad (1a)$$

$$E_\theta = -\frac{\omega I_0 i \sin\theta}{4\pi r c^2} \sin\omega(t - r/c) \quad (1b)$$

$$E_\phi = 0 \quad (1c)$$

$$H_r = 0 \quad (1d)$$

$$H_\theta = 0 \quad (1e)$$

$$H_\phi = \frac{\omega I_0 i \sin\theta}{4\pi r c} \sin\omega(t - r/c) \quad (1f)$$

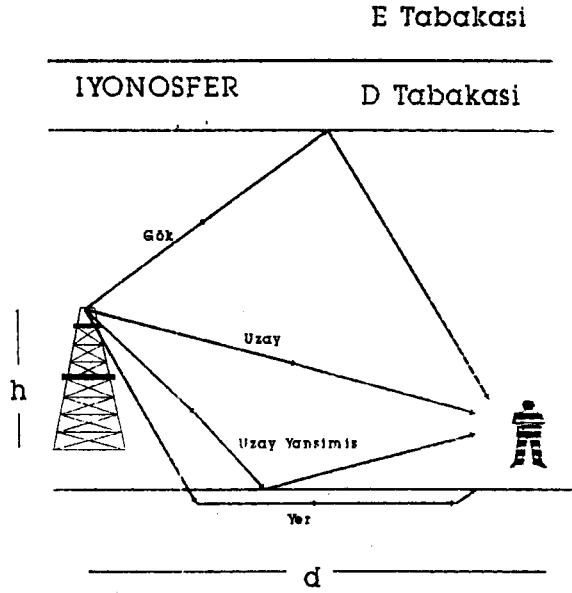
olur. Burada, $\omega = 2\pi f$; $I_0 =$ anten akımı, Amper; $c =$ ışık hızı; $r =$ kaynak ile alıcının arasındaki uzaklıktır. Bu durumda dipolün H_ϕ ve E_θ bileşeni olmak üzere iki bileşeni vardır. Çizelge 1'de VLF ve LF istasyonları çeşitli özellikleri (frekans, dalgaboyu, güç, enlem ve boylamlar) ile verilmiştir. Şekil 2'de ise aynı dalgaların yeryüzünde olası yayılım yörüngeleri görülmektedir.

İSTASYON	FREKANS (kHz)	YER	KOORDİNATLAR	YAYINIM GÜCÜ (kW)
ABD				
MLK	24.8	Washington	321W55-48N12	125
MSB	21.4	Maryland	76V27-38W57	400
MAA	24.0	Main	67W17-44N39	1000
PAU	28.5	Puerto Rico	67W11-18N23	100
HPH	23.4	Hawaii	158W09-21N25	600
AVRUPA				
BGR	16.0	Rugby, İngilt.	01W11-52N22	750
UMS	17.1	Monkova	37E01-55N49	1000
JXI	16.4	Helgoland, Nor.	13E01-64N25	350
FUO	15.1	Bordeaux	00W48-44N65	5000
AVUSTURALYA				
HVC	22.3	Nord West Cape	114E09-21S47	1000
JAPONYA				
NDT	17.4	Yosani	137E01-34N58	50

Çizelge 1: Çeşitli özellikleri ile VLF radyo dalgaları vericileri (McNeil ve Labson, 1993)

Table 1: VLF stations with the different properties (from McNeil and Labson, 1993)

Çoğu kez yer içi şartları, her biri içinde elektrik ve manyetik özelliklerin değişmediği homojen, izotrop materyallerden oluşan bölünmüş düşey ve yatay tabakalardan oluşuyormuş gibi düşünülür.



Sekil 2: VLF Radyo dalgaları için olası yayılım yörüngeleri (Crossley, 1981)

Figure 2: Possible propagation paths for VLF radio waves (from Crossley, 1981)

VLF yöntemine ilişkin değerlendirmelerde yüksek güce sahip verici antenler tarafından oluşturulan EM dalgalar düzlem dalgalar olarak kabul edilirler.

Jeofizik uygulamalarda EM dalga denkleminin genel çözümü zamanla ve ortamla (burada derinlik) değişimi gösterir. EM dalga bir boşlukta değil de sonlu iletkenliğe sahip kayalar içinde ilerliyorsa, bu dalganın genliğinin üstel bir şekilde azaldığı görülür. EM alan şiddetin başlangıç değerinin $1/e$ katına indirildiği değere nüfuz derinliği denir ve

$$d = 503 \sqrt{\rho / f} \quad (\text{m}) \quad (2)$$

bağıntısı ile ifade edilir (Sheff, 1984). (2) bağıntısını yer içine ilerleyen dalganın nüfuz derinliğinin ortamın öz direnci (ρ) ile doğru, dalganın frekansı (f) ile ters orantılı olduğunu gösterir. Çizelge 2'de Türkiye'ye yakın VLF istasyonlarının frekansları kullanılarak hesaplanmıştır.

VLF EĞİM AÇISI ÖLÇÜLERİNİN DOĞRUSAL FİLTRELENMESİ

Karous ve Hjelt (1983), VLF eğim açısı ölçümleri için farklı bir değerlendirme yöntemi geliştirmişlerdir. Değerlendirme çok basit olarak manyetik alan (H) ile ona neden olan akım (J) yoğunluğu arasındaki ilişkiden yola çıkar (Bakınız Şekil 3). Manyetik alanın düşey bileşeni Biot-Savart yasası (Reitz ve Milford, 1966) gereği aşağıda izlendiği gibi akım yoğunluğu

VLF İstasyonu	Frekans (kHz)	Özdirenc (ohm.m)	Nüfuz Derinliği (m)
FUO	15.1	10	12.9
BORDEAUX		100	40.9
		1000	129.4
		10000	409.0
		100000	1294.0
GBR RUGBY	16.0	10	12.5
		100	39.7
		1000	125.7
		10000	409.0
		100000	1294.0
JXZ HEIGELAND	16.4	10	12.4
		100	39.2
		1000	124.2
		10000	392.7
		100000	1242.0
JHS MOSKOVA	17.1	10	12.1
		100	38.4
		1000	121.2
		10000	384.6
		100000	1216.3

Çizelge 2: Türkiye'de kullanılacak VLF istasyonlarının çeşitli öz direnç değerleri için nüfuz derinlikleri (Yerdeğiştirme akımları ihmal edilmiştir.)

Table 2: The Skin depths versus the different resistivity values for various VLF stations for use in Turkey (Displacement currents are negligible)

$$J(\xi, \zeta)$$

tarafından oluşturulur.

$$H_z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} J(\xi, \zeta) (x - \xi) d\zeta / [(x - \xi)^2 + \zeta^2] \quad (3)$$

(3) konvolüsyon integrali $\zeta = z$ derinliğinde, z' nci genişlikte akım yoğunluğuyla sınırladığı varsayımıyla basitleştirilir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} J(\xi, \zeta) = J(\xi) \Delta z$$

ile biz,

$$H_z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} J_a(\xi) \Delta z (x - \xi) d\xi / [(x - \xi)^2 + z^2] \quad (4)$$

elde ederiz. Denklem, Bendat ve Piersol'un (1968) lineer filtre kuramı kullanarak J_a için çözülebilir. VLF'de ayrık hale getirmemiz gerekir. Bunun için varsayalım ki $H_z(x)$, x aralıklarıyla eşit olarak uzak noktalarda ölçülmüş olsun. Bu anomoliye yol açan akım yoğunluğu dağılımı z derinliğinde dağılan noktalarda hesaplanabilir:

$$H_{zm}(X_i) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_a(\xi_j) \Delta z \Delta x (x_i - \xi_j)}{[(x_i - \xi_j)^2 + \Delta x^2]} \quad (5)$$

$$x_i = i \Delta x$$

$$\xi_j = (j - j_0) \Delta x$$

$$0 \leq j_0 \leq 1$$

buradaki $H_j \frac{2\pi}{\Delta z} = H_{zm}(x_j)$ ve $J_a(\xi) = J_i$ dir. Böylece

$$H_i = \sum_{j=-\infty}^{\infty} J_j K_{ij} \quad (6)$$

$$K_{ij} = \frac{(i-j-j_0)}{((i-j-j_0)^2 + 1)}$$

elde edilir. İdeal ters filtre (6) denkleminin çözümüyle bulunur. Filtre katsayılarının sayısı kuramsal olarak sonsuzdur. Bu yüzden,

$$H_i = \sum_{j=-n}^{n+1} J_j K_{ij}$$

$$J_j = \sum_{i=-n}^{n+1} K_{io}^{-1} (H_{i+j})$$

olur. Sonuçlar göstermiştir ki aşağıdaki filtre pratikte iyi çalışır:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} J_a \left(\frac{\Delta x}{2} \right) = -0.205H_{-2} + 0.323H_{-1} \\ -1.446H_0 + 1.446H_1 - 0.323H_2 + 0.205H_3$$

burada, $H_j = H_{zm}(I, \Delta z)$ dir. Bu tek bir akım hattının alanının ters çözümü için %8'den daha küçük bir hata veren en kısa filtredir.

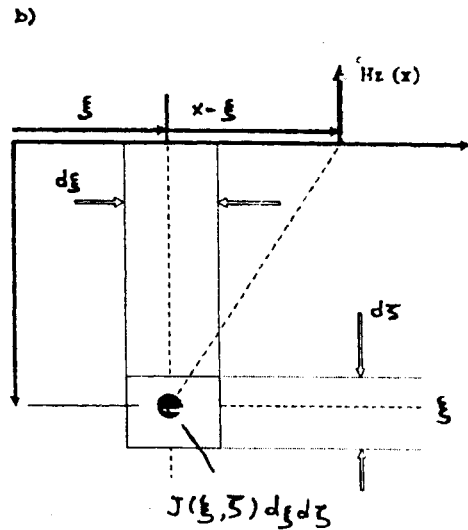
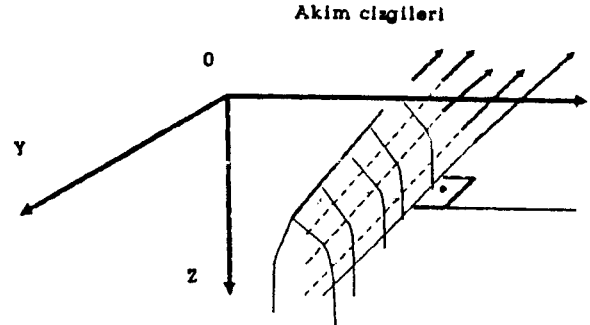
Alan verilerini yorumlarken ölçülmüş değerler yumuşatılmalıdır. Bununla birlikte simetrik filtre aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} J_a(0) = -0.102H_3 + 0.05559H_{-2} - 0.561H_{-1} \\ + 0.561H_1 - 0.05559H_2 + 0.102H_3$$

burada, $\bar{J}(0) = \frac{1}{2} [J(\Delta x/2) + J(-\Delta x/2)]$ ortalama akım yoğunluğudur.

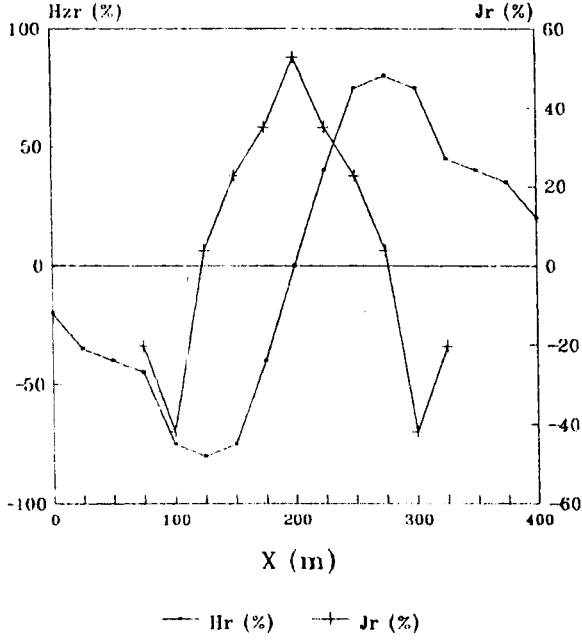
Filtre katsayıları akım yoğunluğu bileşenine karşılık olarak verilen bağıl anomali H_{zm}/H_o sanal ve gerçel bileşenine uygulanır. Bunu bir örnek üzerinde açıklamak için Şekil 3'deki H_r (%) eğrisine sahip olduğumuzu düşünelim. Bu eğriye filtremizi uygulayabilir ve akım yoğunluğu dağılımını elde edebiliriz. Yatay eksen nokta yerleri düşey eksen akım yoğunluğu değerleri olmak üzere çizerek Şekil 4'deki J_r (%) grafiğini elde etmiş oluruz. H_r (%) eğrisinin sıfır olduğu noktanın altında iletken bir dayk vardır. Filtrelemeden sonra elde edilen J_r (%) değeri de aynı şekil üzerine çizilmiştir. Dikkat edilirse J_r (%) eğrisi en büyük değerini daykın üzerinde almaktadır. Bu çok

önemlidir. Zira yüzlerce VLF verisinden elde edilmiş H_r (%) değerine bu filtreyi uyguladığınızda bu kadar çok veri içinde gözünüzden kaçan düşey iletkenlik süreksizliklerini filtrelemeden sonra kolayca haritalayabilirsiniz. Bu amaçla Akyazı'da 16.0 kHz frekansında alınan (İlkışık ve Bayrak, 1993) bir VLF profilinin H_r (%) ve H_{zi} (%) bileşen değerlerine bu yöntem uygulanmıştır. Gerçel bileşene (% H_r) uygulanan filtre sonucu elde edilen akım yoğunluğunun gerçel bileşeni (% J_r) bizim için yukarıdaki örnek nedeniyle daha önemli bilgiler taşımaktadır. Akyazıda alınan VLF verisine uygulanan filtre sonucu bulduğumuz akım yoğunluğunun gerçel bileşeni J_r (%) yi yorumladığımızda (Şekil 5) X ekseninin sıfırdan itibaren metre olarak 200, 375, 450, 525, 675, 750, 1150 noktalarının altında elde ettiğimiz pozitif J_r (%) piklerinden dolayı düşey iletkenlik süreksizlikleri beklenebilir. Ayrıca benzer filtre sanal bileşen değeri H_{zi} (%)'ne uygulanmış elde edilen değerler J_i (%) olarak gösterilmiştir. (Şekil 6).

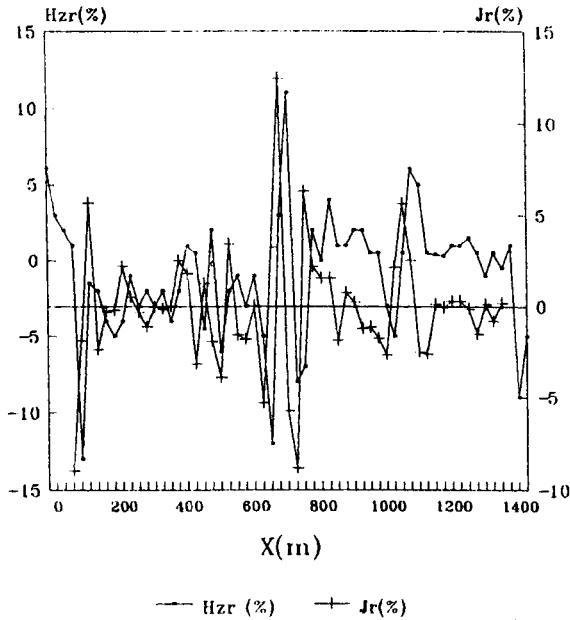


Şekil 3: a) Akım çizgilerinin yönelmesi, b) Akım yoğunluğu elemanının oluşturduğu manyetik alan (Kraus ve Hjelt, 1983)

Figure 3: a) Orientation of the current lines b) Magnetic field which originate current density element (from Fraus ve Hjelt, 1983)



Şekil 4: Akım yoğunluğu filtresi (KH) filtresi için bir örnek uygulama
Figure 4: A simple application for current density filter (KH)

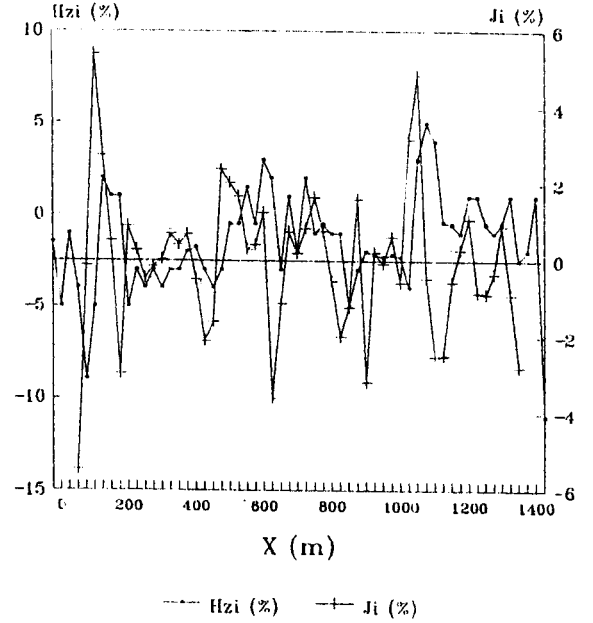


Şekil 5: Gerçel (Hrz) bileşen ve bu bileşene uygulanan filtre sonucu elde edilen Jr akım yoğunluğu
Figure 5: Jr. current density obtaining Hrz reel component.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bir akım kaynağının oluşturduğu manyetik alandan yola çıkarak VLF eğim açısı ölçülerinin filtrelenmesi üzerinde durulmuştur. Bu yolla VLF alanının bileşenlerinden olan manyetik alandan, ters filitrelere kullanımıyla bu alanı oluşturan akım yoğunluğu

dağılımını çeşitli derinlikler için hesaplamak mümkündür. Bu konuyla ilgili bir örnek ülkemizde Akyazı'da alınan VLF profillerinin Hrz (%) ve Hzi (%) bileşenlerine uygulanmış ve sonuçta profil hattı boyunca akım yoğunluğu dağılımının kolayca belirlenebileceği ortaya çıkmıştır.



Şekil 6: Sanal (Hzi) bileşen ve bu bileşene uygulanan filtre sonucu elde edilen Ji akım yoğunluğu
Figure 6: Ji current density obtaining Hzi imaginal component

KATKI BELİRLEME

Bu çalışma; İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yazar tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinin bir bölümünü oluşturmaktadır. Çalışmanın yazarı, tezin gerçekleşmesi aşamasında yardım, destek ve teşviklerinden dolayı Prof. Dr. O. Metin İlkışık, Prof. Dr. Naci Orbay, Araş. Gör. Mümtaz Hisarlı ve Jeofizik Yük. Müh. Tazegül Özçep'e ve ayrıca makale haline dönüşmesinde çizimlerde yardımını gördüğüm Jeofizik Mühendisi Avni Dinçer'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akkaya, İ., 1982, *Anten Teorisine Giriş*, İTÜ Yayınları, İstanbul
- Bendat, J.S., and Piersol, A.G., 1968, *Measurement and analysis of random data*, Wiley, New York.
- Caggon, J.H., 1971, *Electromagnetic and Electrical Modeling by Finite element Method*, *Geophysics*, 27, 651-665.
- Crossley, D.C., 1981, *Theory of EM Surface Wave Impedance Measurements*, *Geological Survey of Canada, Paper 81-15*, p.1-17.
- d'Erceville, I., and Kunetz, 1962, *The Effect of a Fault on the Earth's Natural Electromagnetic Field*, *Geophysics*, Vol. 27, 651-665.

- İdeman, M., 1987,** *Elektromanyetik Dalgaların Temelleri*, İTÜ Kıp. Yay., İstanbul.
- İlkışık, O.M., Bayrak, M., 1993,** *Akyazı incelemeleri: Elektromanyetik ve Termik Yöntemler ile Jeotermal araştırmalar; DPT Proje no:91k121050*, Ankara.
- Kaikonen, P., 1980,** *Interpretation Nomograms for VLF Measurements*, Acta Universitatis Ouluensis, University of Oulu.
- Karous, M., and Hjelt, S.E., 1983,** *Linear Filtering of VLF Dip Angle Measurements*, *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794.
- Lorrain, P., and Corsan, D.R., 1970,** *electromagnetic Fields and waves*, Freeman, San Francisco, 760 pp.
- McNeil, J.D. and Labson, V.F., 1993,** *Geological mapping using VLF radio fields*, in *Electromagnetic Methods in applied Geophysics*, Ed: M.N. Nabighan, Vol.2 Part B., SEG Pub. USA.
- Özçep, F., 1992,** *VLF Radyo Dalgaları Yöntemi*, İ.Ü. Müh. Fak. Jeofizik Müh. Böl., (Bitirme Ödevi), İstanbul.
- Özçep, F., 1994,** *VLF Yönteminde Modelleme*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Yayınlanmamış), İstanbul.
- Reitz, J.R., Milford, F.J., 1966,** *Foundation of electromagnetic theory*, Addison-Wesley, Tokyo.
- Saydam, S., 1981,** *VLF EM Interpretation Using Tiltangle and Ellipticity Measurements*, *Geophysics*, 46, 1594-1605.
- Sinha, A.K., 1977,** *Influence of Altitude and Displacement Current on Plane-Wave EM Fields*, *Geophysics*, 42, 77-91.
- Sinha, A.K., 1990,** *Interpretation of Ground VLF-EM data in terms of Inclined Sheet-like Conductor Models*, *PAGEOPH*, 132, 4, 733-756.
- Sheriff, R., 1984,** *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, SEG Pub., USA.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A., 1976,** *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.
- Wait, G.R., 1951,** *A Conducting Sphere in a Time-Varying Magnetic Field*, *Geophysics*, 16, 666-672.
- Wait, J.A., 1962,** *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, *International Series in Electromagnetic Waves*, Vol.3, Pergamon, 372 pp.