

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VLF YÖNTEMİNDE İNDİRGEME VE
KARMAŞIK GRADİYENT YÖNTEMİ (KGY)
UYGULAMALARI

Özer AKDEMİR

Kasım, 2005

İZMİR

**VLF YÖNTEMİNDE İNDİRGEME VE
KARMAŞIK GRADİYENT YÖNTEMİ (KGY)
UYGULAMALARI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Anabilim Dalı

Özer AKDEMİR

**Kasım, 2005
İZMİR**

Doktora Tezi Sınav Sonuç Formu

Özer AKDEMİR, tarafından **Prof. Dr. Rahmi PINAR** yönetiminde hazırlanan “**VLF YÖNTEMİNDE İNDİRGEME VE KARMAŞIK GRADİYENT YÖNTEMİ (KGY) UYGULAMALARI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Rahmi PINAR

Yönetici

Prof. Dr. Zafer AKÇIĞ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Harun EĞRİFES

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Naci ORBAY

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Mustafa AKGÜN

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans ve Doktora tez danışmanlığımı yapan, çalışmalarımı önerileri ile yönlendiren sayın hocam Prof. Dr. Rahmi PINAR'a, izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Zafer AKÇIĞ'a ve Doç. Dr. Harun EĞRİFES'e, tez jürimde bulunan Prof. Dr. Naci ORBAY ve Doç. Dr. Mustafa AKGÜN'e değerli katkılarından dolayı,

Arazi çalışmalarım süresince arkeoloji kazı kamplarında sağladıkları desteklerden dolayı sayın Prof. Dr. Tomris BAKIR, Prof. Dr. Recep MERİÇ ve Prof. Dr. Nuran ŞAHİN başta olmak üzere bütün kazı ekibi elemanlarına,

Zorlu arazi çalışmaları süresince destek aldığım Dr. Şenol ÖZYALIN'a, yardımlarından dolayı Uzm. Zülfikar ERHAN'a ve bölüm elemanları arkadaşlarıma, idari konularda gösterdikleri destekleriyle D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ve Jeofizik Bölümü çalışanlarına,

Maddi, manevi desteklerinden dolayı kardeşim Özay AKDEMİR'e ve manevi olarak her zaman yanımda olan değerli aileme,

SONSUZ TEŞEKKÜRLER

Özer AKDEMİR

VLF YÖNTEMİNDE İNDİRGEME VE KARMAŞIK GRADİYENT YÖNTEMİ (KGY) UYGULAMALARI

ÖZ

15-30kHz frekans aralığında yayın yapan vericiler, VLF-EM (Çok Düşük Frekans-Elektromanyetik) yönteminin kaynağını oluşturur. Elektromanyetik alanın, düzlem dalga şekli uzak kaynak ile sağlanır. Çok uzak kaynak kullanımının getirdiği, düşük genlik ve sinyal, gürültü oranı sorunları vardır.

Bu çalışmada; sinyal, gürültü oranının artırılması amaçlanmıştır. Sabit birincil elektromanyetik alan indirgenme işlemi ile indirgeme oranı tanımlanmıştır. Hesaplanan ikincil ve toplam manyetik alanlarına da indirgeme oranı düzeltilme işlemi uygulanmıştır. Yöntemin temel bağıntıları kullanılarak, tekdüze, tabakalı ortam modelleri için yüzey empedans çözümleri yapılmıştır. Ağ aralıklarının seçim kuralları ile sonlu farklar yöntemi kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Elektromanyetik alanın düşey ve yatay bileşenleri arasındaki ilişki, Hilbert dönüşümü (Karmaşık Gradyent Yöntemi) ile verilmiş, yüzey empedansı ve ortamın görünür özdirenç değişimi hesaplanmıştır.

Büyük ölçekli jeolojik araştırmalarda yöntemin ölçülen bileşenlerine uygulanan Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçleri araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu süzgeçler, doğrudan ölçülen verilere uygulandığından gürültülü H_p alandan etkilenmektedir ve sığ araştırmalardaki küçük değişimleri ortaya çıkarmada yetersizdir. Bu nedenle; sabit birincil alana indirgeme işlemi ile gürültülerin giderilmesi çok önemlidir. Sorunun çözümü için ölçümlerden hesaplanan birincil alanın ortalama değeri alınarak sabitlenir. Sabit birincil alan değerine göre, yüzdelik gürültü oranı hesaplanır ve bu değer bileşenlere eklenir.

VLF-R (Çok Düşük Frekans-Özdirenç) uygulaması, alete 5m veya 10m kalibre edilen galvanik bağlantılar ile yapılır. Geniş ölçekli çalışmalarda, bu elektrot mesafesi uygundur fakat sığ araştırmalar için bu aralıklar çok büyüktür. Önerilen

yöntemle galvanik bağlantı kullanılmadan, Hilbert dönüşümü ile elektromanyetik alan bileşenleri arasında geçiş sağlanmış, yüzey empedansına bağlı olarak ortamın özdirenç değişimi, düşük hata sınırları içinde elde edilmiştir. Hesaplanan bileşenlerden ortamın görünür özdirenç tanımlaması ile ortama ait gerçekçi bilgilere, düşük hata sınırları içinde ulaşılmıştır. Aynı zamanda kullanılan yöntem, araştırmada ölçüm kalitesini sınama şansı vermektedir.

Alan çalışmalarında; Scintrex-ENVI birleşik aleti kullanılarak üç ayrı arkeolojik alanda ölçmeler yapılmıştır. Geliştirilen yöntem, verilere uygulanmış ve ortama ait yapı tanımı diğer jeofizik yöntemlerin sonuçları ile sınanmıştır.

Anahtar sözcükler :

VLF-EM, İndirgeme Oranı, Hilbert Dönüşümü, Sonlu Farklar.

REDUCTION AND COMPLEX GRADIENT METHOD APPLICATIONS IN VLF METHOD

ABSTRACT

Transmitters that diffuse between 15-30kHz frequency band are the basic fundamentals of VLF-EM (Very Low Frequency-Electromagnetic) method. Plane wave form of electromagnetic is obtained from a distant source. Using a distant source causes low amplitude and signal to noise ratio problems.

In this study; it is aimed to increase the signal to noise ratio. Base reduction ratio is defined with constant primary magnetic field reduction level. Base reduction ratio procedure is applied to calculated secondary and total magnetic fields. Surface impedance solutions for the homogenous layers models are found by solving the basic equations of this method. Model solution is based on the finite difference method with choosing mesh distance rules. The relations between vertical and horizontal components of magnetic field are given in the form of Hilbert Transform (Complex Gradient Method) and surface impedance and apparent resistivity variables are calculated.

Fraser and Karous-Hjelt filters that applied to measured components of the method are improved in large scaled geology investigations. These filters are applied to directly measured data they are affected from the noisy primary field and are insufficient in detecting small variations in the shallow studies. Therefore preventing the noise with constant primary field reduction procedure is very important. The average primary field calculated from the measurements is therefore taken as constant in order to solve this problem. Percentage of noise ratio calculated from the average primary field value is then added to the components.

VLF-R (Very Low Frequency-Resistivity) applications is done with the galvanic connectors 5m or 10m calibrated to the device. This electrode interval is convenient to most scale researches but this interval is very high in shallow researches.

The components of electromagnetic field relation transfers are obtained by Hilbert Transform is this proposing method without using galvanized connectors and reach to the apparent resistivity with a little error limit depending on surface impedance. At the same time, using this method is giving a chance to compare the measurement quality.

Scintrex-ENVI combined device is used to measure three different archaeological areas in this study improved method applied to the datum and construction shape compared to other geophysics method results.

Keywords :

VLF-EM, Reduction Ratio, Hilbert Transform, Finite Difference

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1. Giriş.....	1
BÖLÜM İKİ – ELEKTROMANYETİK YÖNTEM ÇEŞİTLERİ	4
2. Elektromanyetik Yöntemler	4
2.1 Elektromanyetik Yöntem Çeşitleri	5
2.1.1 Frekans Ortamı Düzenekler	6
2.1.1.1 Dip Açısı Ölçümleri.....	6
2.1.1.2 Evre Bileşeni Ölçüm Türleri.....	7
2.1.2 Zaman Ortamı Düzenekleri (TDEM).....	8
2.1.3 Havadan Elektromanyetik Yöntem.....	9
BÖLÜM ÜÇ – ELEKTROMANYETİK ALANIN TEMEL İLKELERİ.....	10
3. Elektromanyetik Alan Tanımı	10
3.1 Temel Elektromanyetik Kuram	10
3.1.1 Elektromanyetik Alanın Sönümü.....	14
3.1.2 Elektromanyetik Alanlarda Genlik-Evre İlişkileri.....	16
3.1.3 Empedans, Özdirenç ve Evre İlişkileri	18
3.1.4 Eliptik Polarizasyon	20
3.2 VLF-EM Yöntemi ve Genel Tanımı	23
3.2.1 VLF- EM Vericiler ve Özellikleri.....	24

BÖLÜM DÖRT – VLF-EM YÖNTEMİ VE KURAMSAL İÇERİĞİ..... 29

4. Elektromanyetik VLF Yöntemi.....	29
4.1 VLF-EM Yöntemi Temel Bağlılıları	29
4.2 Tabakalı ortamlar için VLF-EM Çözümleri	37
4.2.1 İki Tabakalı Ortam için Temel Bağlılıları.....	37
4.2.2 Çok Yüksek Dirençli Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu	39
4.2.3 Çok İyi İletken Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu.....	39
4.2.4 Dirençli Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu.....	39
4.2.5 İyi İletken Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu	40
4.2.6 İki Tabakalı Ortam Diyagramı.....	41
4.2.7 Tabakalı Ortamlar için Yineleme Fonksiyonu.....	42
4.3 Sınır Koşulları.....	43
4.4 İki Boyutlu Tepki İşlevi için Düzlem EM Dalga Empedansı.....	46
4.4.1 İletkenlik ve Empedans Tensörü.....	47
4.4.2 İki Boyutlu Ortamlarda Maxwell Denklemleri ve Dalga Denklemi... ..	48
4.5 Sonlu Farklar Sayısal Modellemesi	50
4.5.1 Sonlu Farklar Yöntemi Temel Bağlılıları	50
4.5.2 Dizey Çözüm Teknikleri.....	53
4.5.3 Sonlu Farklar için Sınır Koşulları	53
4.5.4 Sonlu Farklar Ağının Tasarlanması	54
4.6 VLF-EM Yöntemi Birincil Alan (H_p) İndirgemesi.....	55
4.6.1 VLF-EM Yöntemi Alan Tanımları	55
4.6.2 Birincil Manyetik Alan İndirgeme Değeri Oranı.....	56
4.7 VLF-EM Yöntemi Görünür Özdirenci Tanımı.....	60
4.8 Karmaşık Gradyent Yöntemi (KGY).....	63

BÖLÜM BEŞ – ALAN ÇALIŞMALARI..... 66

5. VLF-EM Yöntemi Alan Çalışmaları.....	66
5.1 Balıkesir-Bandırma “Daskyleion” Arkeolojik Kazı Alanı	66
5.1.1 Daskyleion “Kösemtuğ” Tümülüsü	67
5.1.1.1 “Kösemtuğ” Tümülüsü Çalışmaları.....	68
5.1.1.1.1 ED ve EK Profilleri VLF-EM Uygulamaları.....	69

5.1.1.1.2 Açılı Profillerin Çift Yönlü VLF-EM Ölçüm Sonuçları.....	75
5.1.1.1.3 Toplam Manyetik Alan Ölçüm Sonuçları.....	77
5.1.2 Daskyleion “Hisartepe” Arkeolojik Kazı Alanı.....	79
5.1.2.1 “I Nolu” Araştırma Alanı.....	82
5.1.2.2 “II Nolu” Araştırma Alanı	84
5.1.2.3 “III Nolu” Araştırma Alanı	87
5.1.2.4 “IV Nolu” Araştırma Alanı.....	92
5.1.2.4.1 “IV Nolu” Araştırma Alanı “Paralel” Profiller.....	93
5.1.2.4.2 “IV Nolu” Araştırma Alanı “Dik” Profiller	96
5.2 İzmir-Torbali “Metropolis” Arkeolojik Kazı Alanı.....	102
5.2.1 “Roma Hamamı” Araştırma Bölgesi	103
5.3 İzmir-Ahmetbeyli “Klaros” Arkeolojik Kazı Alanı	107
5.3.1 Klaros Kazı Alanı Özellikleri ve Jeofizik Araştırma Alanları.....	108
5.3.1.1 “Birinci” Araştırma Alanı “U” Profilleri	110
5.3.1.2 “Birinci” Araştırma Alanı Profilleri.....	112
5.3.1.3 “İkinci” Araştırma Alanı Profilleri	113
5.3.1.3.1 “İkinci” Araştırma Alanı “Paralel-L” Profilleri.....	113
5.3.1.3.2 “İkinci” Araştırma Alanı “Dik-DL” Profilleri	115
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
6. Sonuçlar ve Öneriler.....	117
KAYNAKLAR	120
Yararlanılan İnternet Siteleri.....	131
EK A	132

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1. Giriş

Askeri iletişim amaçlı geliştirilen; 15 - 30kHz frekans aralığında yayın yapan çok güçlü VLF (Very Low Frequency) verici sistemleri, 80 yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. VLF sistemleri günümüzde; denizcilik, havacılık ve kara ulaşım hizmetlerinde (haberleşme, navigasyon vb.) yaygın kullanılmaktadır. VLF vericileri; 50-150m uzunluğunda ve 100-1000kW aralığında yüksek güce sahip, düşey antenlerdir. Güçlü VLF vericileri; elektromanyetik (EM) alanların farklı frekans aralıklarındaki, yeryüzü kaynaklarından sadece birini oluşturur.

Jeofizik araştırmalarda; EM yöntemlerinin, frekans aralıklarına bağlı olarak çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu nedenle, sığ ve derin araştırmalarda, yaygın olarak kullanılmaktadır. VLF-EM yöntemi, elektromanyetik alan bileşenlerin değişimlerinin ölçülmesine dayanan indüktif bir arama yöntemidir. Yöntemin uygulaması, veri toplaması kolay ve düşük maliyetlidir. Bu nedenle; 1960'lardan sonra teknolojik gelişmeler ile manyetik alan bileşenlerini, eğimi ve elektrik alanı bileşenlerini ölçen cihazlar geliştirilmiştir. Yeni tasarlanan cihazlar ile 10kHz-2MHz frekans aralıklarında ölçüler alınmakta, yerin sığ bölgelerinin iletkenlik dağılımı gibi bilgilere ulaşılmaktadır. Radio-Magnetotellürik (RMT) yöntem olarak bilinen bu yöntem, VLF yöntemi gibi sabit vericileri kullanmaktadır (Hayles ve Sinha, 1986).

Yöntemin ilk uygulamalarında, yalnızca manyetik alanın düşey bileşeni ve eğimi ölçülerek, ortamın öz direnci bulunuyordu (Frolov, 1961). Eğim açısı; ince iletken metalik maden damarlarına karşı duyarlıdır ve yüksek değerleri yapıyı tanımlar (Fraser, 1969; Paterson ve Ronka, 1971; Wait ve Nabulsi, 1996). Sedimanlar ile örtülü masif sülfid yatakların aranmasında kullanılmıştır (Telford ve diğer.,1977). İletkenlik, kalınlık, öz direnç ve frekansa bağlı değişimler ile dipol EM sistemlerin yorumu için analitik modelleme çalışmaları yapılmıştır (Ward, ve diğer., 1968; Saydam, 1981). Etkin derinliğin, yüksek öz dirençli ortamlarda artması, modelleme

çalışmalarının doğruluğunu arttırmaktadır. Bir çok araştırmacı tarafından, iki ve üç boyutlu model çalışmalar ile yer iletkenliği ve derinlik parametresinin bulunacağı gösterilmiştir (Gaur ve Verma, 1973; Olsson, 1980; Poddar, 1982; Beamish, 1994, 1998). Havadan; manyetik alan ve eğim ölçümleri alan düzenekler (Arcone, 1979; Herz, 1986) olduğu kadar, manyetotellürik esaslı yeryüzü VLF ölçümlerinin uygulamaları vardır. Sürekli ve hızlı veri toplanarak süreksizlik sınırlarını bulmada başarılı sonuçlar alınmıştır (Fischer ve diğer., 1983; Hjelt ve diğer., 1985).

Genel olarak; yatay yöndeki iletkenlik değişimlerinin bulunmasında, kırık ve çatlaklar ile kesme bölgelerinde (shear zone) biriken yer altı suyu araştırmalarında, karstik boşlukların aranmasında (Palacky ve diğer., 1981; Guerin ve Benderitter, 1995), yeraltı suyu kirliliği araştırmalarında (Benson ve diğer., 1997; Tezkan, 1999; Karlık ve Kaya, 2000), cevherleşme bölgelerinin bulunmasında ve jeolojik haritalamada (Telford, 1976; McNeill and Labson, 1991) VLF-EM yöntemi kullanılmaktadır. Geniş ölçekli araştırmalarda, ölçülen bileşenlere uygulanan sayısal süzgeçler geliştirilmiştir (Fraser, 1969; Karous ve Hjelt, 1983).

Elektrik ve EM yöntemler, sığ ve çevresel amaçlı çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kayaçların özdirençleri çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Özdirenç, kayaç cinsinin yanında, ayrışma düzeyi, doygunluk, boşluk oranı (kırıklar dahil) ve boşluk sıvısının iletkenliğine bağlıdır (Mooney, 1980). Keller (1971)'de özdirenç değişimine, EM yöntemlerin, doğru akım yöntemlerine göre daha az duyarlı olduğu ve değerlendirmedeki zorlukları açısından sığ aramacılıkta kullanılmasının uygun olmadığı görüşündedir. Buna rağmen; çevre ve sığ aramacılıkta, EM yöntemlerin kullanımı, son dönemlerde çok artmıştır (Dobecki ve Roming, 1985). Gelişen VLF yöntemi ekipmanları, özellikle sığ ve arkeolojik yapıların aranmasında kullanılmıştır (Nelson, 1977; Nishitani, 2000). Uygulama kolaylığı ve ölçüm sırasında yeraltını görüntüleme olanağı veren Yer Radarı (GPR); çevre, şehir plancılığı ve arkeolojik alanlarda sıkça kullanılmaktadır (Clarke ve diğer., 1999; Slepak, 1999; Savvaidis ve diğer., 1999; Pipan ve diğer., 2001). Çevresel amaçlı çalışmalarda, özellikle zaman ortamı EM (TDEM) yöntemi, en çok kullanılan yöntemdir. Buselli ve diğer (1992) ile Fitterman ve diğer (1992), TDEM'in atık

alanlarda uygulanabilirliği göstermişlerdir. Hoekstra ve Blohm (1992)'de TDEM yöntemi ile akifer ve tatlı-tuzlu su kontakların bulunmasında kullanmış, mevsime göre akiferdeki su seviyesini belirlemişlerdir.

Çalışmada; uzak kaynak VLF-EM yönteminin, sığ aramacılıktaki sinyal kalitesi ve duyarlılığın artırılmasına yönelik çözümler yapılmıştır. Öncelikle, tekdüze, tabakalı ortamların EM alan ve empedans çözümleri yapılmıştır. Modellemede kullanılan sonlu farklar yöntemi tanıtılarak, sınır koşulları ve grid (mesh) aralıklarının seçiminde dikkat edilmesi gereken konular verilmiştir. Hilbert dönüşümü ile manyetik alanların düşey (H_z) ve yatay (H_y) bileşenleri arasındaki ilişki kullanılarak yüzey empedansı ve ortamın görünür özdirenç değişimi incelenmiştir. Uzak kaynak kullanımın getirdiği, H_p alanı değişimi ve dış etkilerden oluşan gürültü tanımı ile indirgeme işlemi yapılmıştır. Böylece; değişken birincil manyetik (H_p) alanın oluşturduğu ikincil manyetik (H_s) ve toplam (H_T) alanlarına, indirgeme işlemi uygulanarak, ortamın görünür özdirencine, düşük hata sınırları içinde ulaşılmıştır. Alan çalışmalarında; Scintrex-ENVI birleşik aleti kullanılarak üç ayrı arkeolojik kazı alanında ölçmeler yapılmıştır. Geliştirilen yöntem alan verilerine uygulanmış sonuçlar, manyetik ve doğru akım özdirenç yöntemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

EM yöntem çeşitleri ve tanımları ikinci bölümde, temel kavramlar ile VLF yöntemin tanımı ve özellikleri üçüncü bölümde, uygulanan yöntemin çözüm aşamaları ve kuramsal içeriği dördüncü bölümde, yapılan çalışmalara ait alan uygulamaları beşinci bölümde, elde edilen sonuçlar ve öneriler ise altıncı bölümde verilecektir.

BÖLÜM İKİ

ELEKTROMANYETİK YÖNTEM ÇEŞİTLERİ

2. Elektromanyetik Yöntemler

EM yöntemler; gelişen alet çeşitliliği ve ölçüm teknikleri dikkate alındığında en zengin jeofizik aramacılık yöntemidir. Verici ve alıcı tiplerine bağlı olarak EM yöntemlerin uygulamadaki ölçüm teknikleri farklıdır. Yöntemler ana özellikleri ile Tablo 2.1’ deki gibi sınıflanabilir.

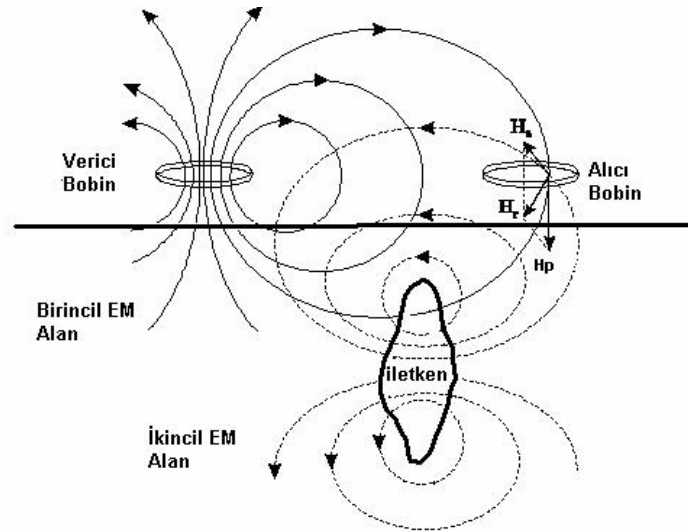
Tablo 2.1 Verici ve Alıcı özelliklerine göre EM yöntemlerin sınıflaması.

Yöntem Adı	Verici Türü	Alıcı Türü
- DC (Direct Current) Özdirenç - IP (Induction Polarization)	Elektrotlar ile yere akım verilmesi	Elektrotlar ile voltaj farkının ölçülmesi
-TEM (Transient Electromagnetic) -MMR (Magnetometric Resistivity) -MIP (Magnetic IP)	Elektrotlar ile yere akım verilerek, elektromanyetik alan yaratılması	Yeryüzündeki bir halkanın uçlarından oluşan potansiyel farkın ölçülmesi
CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotellurics)		Elektrot ve Bobinin Birlikte kullanımı
-Slingram -HLEM (Horizontal Loop Electromagnetic) -VLEM (Vertical Loop Electromagnetic) -Bazı TEM (Transient Electromagnetic) yöntemler	Akım verilen, küçük bir halkada oluşturulan elektromanyetik alan	Yeryüzündeki küçük bir halkadan oluşan EM alanlar
-Turam -Bazı TEM (Transient Electromagnetic) yöntemler	Akım verilen, büyük bir halkada oluşturulan EM alan	Yeryüzündeki küçük bir halkadan oluşan EM alanlar
Zaman ortamı havadan EM		Havada küçük bir halkadan oluşan EM alanlar
VLF (Very Low Frequency)	Yapay Kaynaklı düzlem dalga	Küçük veya büyük bir halkada oluşan EM alanlar
VLF-Özdirenç		Elektrot ve bobinin birlikte kullanımı
MT (Manyetotelluric)	Doğal Kaynaklı düzlem dalga	Elektrot ve bobinin birlikte kullanımı

2.1 Elektromanyetik Yöntem Çeşitleri

Elektromanyetik yöntemlerde, vericiler bir bobin yardımı ile değişken birincil (primary) elektromanyetik alan üretir. Üretilen bu alan, yeraltında bulunan iletken cisimleri etkiler. Bu etkileşim sonucu, yeraltındaki iletken ortamda foucoult (eddy) akımları oluşur. Bu akımlar nedeni ile iletken, kendi manyetik alanını oluşturur. Söz konusu bu alan, ikincil (secondary) elektromanyetik alan olarak isimlendirilir. İkincil alan, birincil alanla aynı frekansta olup, yalnızca genlik ve evre farklılıkları gösterir.

Yeryüzünde, yine bir bobinden oluşan alıcı sistem, bu ikincil alanı ile birincil alanın toplamından oluşan toplam elektromanyetik alanı ve yönelimi (eğim açısı) ölçer. Şekil 2.1’de iletken, alıcı ve verici bobin ile birincil ve ikincil elektromanyetik alanların oluşturduğu sistem verilmektedir.



Şekil 2.1 Birincil (sürekli çizgiler) ve ikincil (kesikli çizgiler) elektromanyetik alanlar ve yeraltındaki iletkenin görünümü.

Elektromanyetik yöntemlerin, uygulamadaki ölçü çeşitliliği çok fazladır. Bu durum, yöntemin sınıflandırılmasında güçlük yaratır. Uygulama yöntemleri; verici şekilleri, ölçülen bileşenler ve uygulama teknikleri açısından sınıflanabilmelerine rağmen (Tablo 2.1), aynı zamanda frekans ortamı, zaman ortamı, havadan elektromanyetik yöntemler olmak üzere de ayrılırlar.

2.1.1 Frekans Ortamı Düzenekler

Frekans Ortamı Düzenekler; verici bobin yardımı ile belirli frekansta değişken ve sürekli manyetik alan oluşturulur. Yeraltında bulunan bir iletken, indüklenerek içinde eddy akımlarını oluşturması için vericide üretilen alanın, zaman ile değişken olması gerekir. Bir veya birkaç frekansta oluşturulan birincil alanlar kullanılarak, dip açısı, evre bileşeni gibi nicelikler ölçülebilir. Düşükten yüksek frekanslara doğru, birden fazla frekansta alınan ölçümler ile iletken ortamın her frekansa olan tepkisinden yararlanarak derinlik hakkında bilgiler edinilir.

2.1.1.1 Dip Açısı Ölçümleri

Birincil ve ikincil alanın vektörel toplamından oluşan toplam alan vektörü, boşlukta bir elips çizer ve “polarizasyon elipsi” olarak tanımlanır. Elipsin uzun ekseninde birincil alan vektörü, kısa eksenini boyunca ikincil alan vektörü yer alır. Alanların eşit olması daireselliği, farklı olması elips geometrisini verir (Şekil 3.6). Dip açısı yöntemleri; polarizasyon elipsinin uzun ekseninin yataydan olan eğimini (dip) ölçerler. Verici bobin (yatay manyetik dipol) düşey düzlemli kullanıldığı için, ortamda iletken yoksa, bu vektörün eğimi 0° olacaktır. Çünkü düşey bir verici bobinin oluşturacağı elektromanyetik alan yataydır. Bununla birlikte, iletken bir yapının yakınında 0° 'den sapan eğim, sadece iletkenin tam üzerinde 0° olacaktır. Çünkü bu konumda ikincil alan düşey bileşene sahip olamaz (Parasnis,1966).

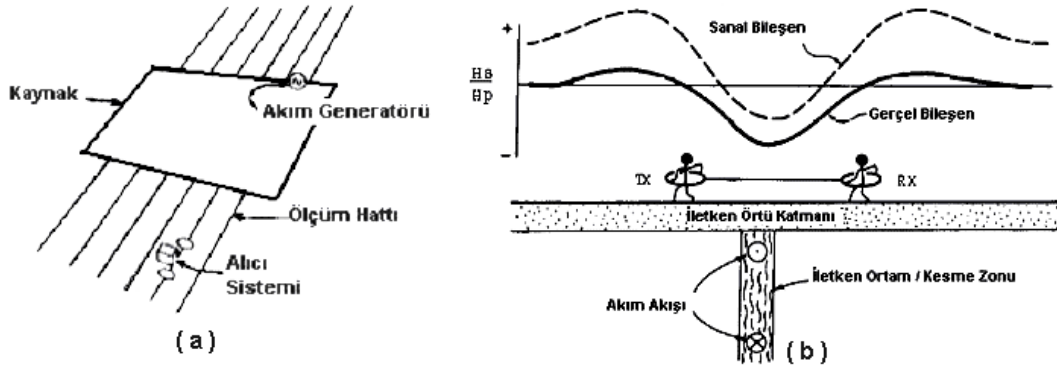
Toplam alanın dip açısını ölçen elektromanyetik düzenekler de vardır. Bunlardan sabit vericili düşey bobin (VLEM) düzeneğinde, verici ölçüm alanının merkezi bir noktaya yerleştirilir, alıcı ise paralel hatlar boyunca kaydırılarak ölçüm yapılır. Paralel hat ölçümlerinde, verici ile alıcı birlikte sabit ve eşit aralıklarla hareket ettirilir. Topografya etkisinin giderilmesi amacı ile geriye atış adı verilen teknik ile alıcı ve verici, her ölçüm için yer değiştirilir. Doğal kaynaklı dip açısı yöntemi olan AFMAG ise, ilk defa Ward (1959) tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntemde ise, üst atmosferdeki yıldırımlar sonucu oluşan manyetik alan, yatay birincil alanın kaynağı olarak kullanılır.

VLF yöntemi ise son yıllarda yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Verici olarak, düşük frekans bandında yayın yapan güçlü, genellikle askeri amaçlı, radyo istasyonların sinyalleri kullanılır (Sinha ve Hayles, 1988).

2.1.1.2 Evre Bileşeni Ölçüm Türleri

Dip açısı ölçüm yöntemleri, mevcut bilgilerin bir kısmını kullanarak iletkenin yerini belirler. Ancak elektromanyetik alan (ikincil alan), birincil alanla aynı evrede değildir. Bu evre farkının belirlenmesi, elektromanyetik aramacılıkta önem kazanır. Bu özellik, iletken zonun ortalama iletkenliği hakkında bilgi verebilmektedir.

Evre bileşeni ölçümü yapan düzenekler; verici ve alıcı arasında bir bağlantının sağlanması ile kullanılabilirler. Böylece vericiden alıcıya referans sinyali gönderilir. Alıcı düzenekleri genellikle, referans birincil alanı dengelemek ve bu alanın oranları ile ikincil alanın gerçel ve sanal bileşenlerini ölçme üzere kalibre edilmiştir. TURAM ve Slingram bu tip ölçümleri yapan başlıca iki düzenektir.



Şekil 2.2 Evre bileşeni ölçümü yapan; (a) TURAM (b) Yatay Bobin (Slinggram-Horizontal Loop Electromagnetic) düzenekleri.

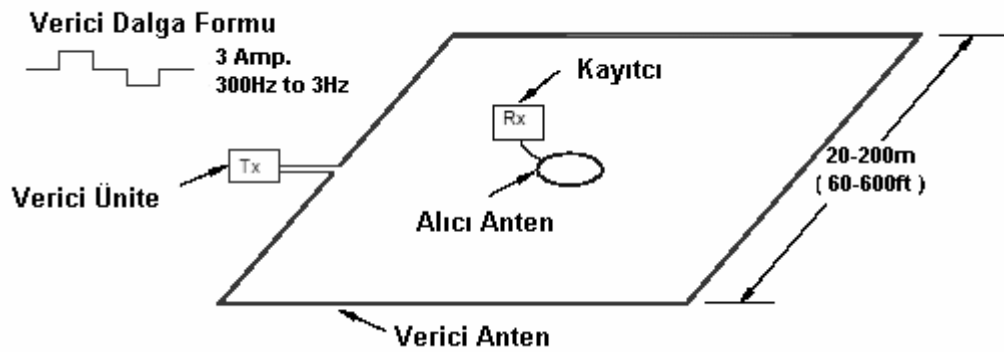
TURAM yönteminde; çok uzun tel veya geniş bir dikdörtgen verici olarak, alıcı olarak ise eşdeğer iki bobin kullanılır (Şekil 2.2.a). Alıcılar, vericiye dik profiller boyunca, aynı hat üzerinde hareket ettirilir. Her istasyonda, iki alıcı arasındaki evre farkı ve genliklerin oranı ölçülerek, bulunan değer alıcıların orta noktasına atanır (Telford ve diğer., 1990). Sonuçta; iletken cevher yatağın

doğrultusu, kalınlığı, eğimi, üst yüzeyin derinliği ve damar iletkenlik üretimi gibi parametreler bulunabilir (Duckworth, 1984).

Yatay bobin (Horizontal Loop Electromagnetic) olarak bilinen Slingram yöntemi, 1950'li yıllarda kullanılmaya başlamıştır (Morreau, 1957). Sistem; normalize alanın gerçel ve sanal bileşenlerin yüzdelik oranı cinsinden ölçmektedir. Slingram, yapay kaynaklı elektromanyetik yöntemler içinde en çok tercih edilen yöntemdir (Şekil 2.2.b).

2.1.2 Zaman Ortamı Düzenekleri (TDEM)

Zaman ortamı düzeneklerde; birincil alanı aniden sönmülendiren bir vericiden yararlanılır. Birincil alan kesildikten belli bir zaman sonra, kısa bir süre içinde ikincil alanı ölçebilen alıcılar kullanılır (Şekil 2.3). TDEM düzeneklerinin en büyük avantajı, frekans ortamı düzeneklerinden daha yüksek penetrasyon derinliğini sağlamasıdır. İletken örtü tabakası altındaki yapıların bulunmasında başarılıdır (Goldman ve diğer, 1994). Elektromanyetik derinlik sondajında, zaman ortamı elektromanyetik yöntemler kullanılır (Hoekstra ve Blohm, 1992).



Şekil 2.3 Zaman Ortamı (TDEM) ölçüm düzeneği.

MPP4 (Gallagher ve diğer., 1985), PEM (Bartel ve Hohmann, 1985), SIROTEM (Buselli ve O'Neil, 1977) ve UTEM (West ve diğer., 1984) olarak bilinen zaman ortamı EM düzenekler de vardır.

2.1.3 Havadan Elektromanyetik Yöntemler

Elektromanyetik araştırmalarda, havadan yapılan çalışmalar önemli bir üstünlüktür (Telford ve diğer, 1990). Hava etüdlerinde kullanılan frekanslar, yer düzenekleri ile aynıdır. Hava fotoğrafları yardımı ile uçuş doğrultusu seçilir. Nokta bazında ölçü alınmayıp, kayıt sürekli ve sayısal olarak yapılır (De Mouilly ve Becker, 1984). Bir uçağa bağlanmış belli uzaklıkta sarkan alıcı (bird - kuş) yardımı ile evre bileşeni, zaman ortamı ölçümleri ve havadan VLF lmleri yapılır.

BÖLÜM ÜÇ

ELEKTROMANYETİK ALANIN

TEMEL İLKELERİ

3. Elektromanyetik Alan Tanımı

Jeofizik araştırmalarda, sık kullanılan elektromanyetik yöntemlerinin hepsinde geçerli olan temel ilkeler EM alan teorisine bağlıdır. VLF-EM yöntemi de bu ilkelere bağlı olarak açıklanır. Kuramsal gelişmeler; bu tanımların doğrultusunda incelenmiştir.

Yeriçinde yayılan elektromanyetik dalgaların ifade edilmesinde, EM teorisinin ilkelerine ihtiyaç duyulur. EM dalgaların yayınımının ve sönümünün açıklanmasında, elektrik alan ve manyetik alan vektörlerini içeren Maxwell denklemleri kullanılır. Yeraltının manyetik permeabilitesi, dielektrik geçirgenliği ve elektriksel iletkenliği tamamen izotrop ve sabit olduğu varsayımından yola çıkılır (Grant ve West, 1965) .

3.1 Temel Elektromanyetik Kuram

Manyetik ve elektrik alanların; herhangi bir noktada tanımlanmasında beş alan vektörü kullanılır. Elektromanyetik alanı tanımlayan **B**, **H**, **E** ve **D** alan vektörleri, akım yoğunluğu **J** ise serbest yükün hareketini tanımlayan vektördür. Bu vektörlerin tanımları ve mks sistemi birimleri aşağıda verilmektedir (Telford ve diğer., 1990).

B = Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)

H = Manyetik alan şiddeti (Amper/m)

E = Elektrik alan şiddeti (Volt/m)

D = Elektrik deplasman (Coulomb/m²)

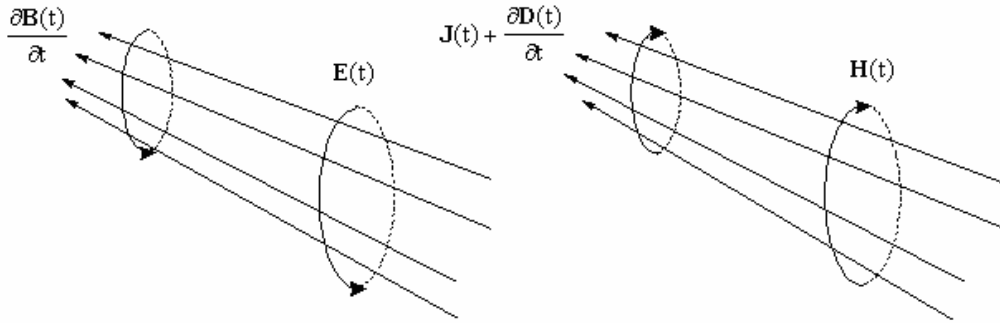
J = Akım yoğunluğu (Amper/m²)

Maxwell denklemleri; alan vektörleri arasındaki ilişkileri tanımlar.

$$\nabla \times \mathbf{E} = \text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

(3.1) denklemi ile verilen Faraday kanunu, zamanla değişen manyetik alan içinde oluşan elektrik alanını tanımlar. Bu ifadenin anlamı, herhangi bir C kapalı yörüngesinde oluşan toplam emk, C'den geçen manyetik akı değişiminin negatifi ile orantılıdır. (3.2) denklemi ise, bu C kapalı yolu etrafındaki bir manyetik alanın, C'den akan toplam akım (hem iletim hemde yerdeğiştirme akımları) ile orantılı olduğunu gösterir. $\partial \mathbf{D} / \partial t$ bağıntısı akım yoğunluğunun zamana bağlı yerdeğiştirmesidir. Maxwell denklemlerinin elektrik ve manyetik alan ilişkileri Şekil 3.1'de verilmiştir (Grant ve West, 1965).



Şekil 3.1 Elektrik ve manyetik alan ilişkileri.

(3.1) ifadesinde $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$ vektör eşitliği kullanalım.

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{B}) = 0 \quad (3.3.a)$$

\mathbf{B} vektörünün diverjansı zamandan bağımsızdır, ancak \mathbf{B} zamana bağımlı olduğundan sifıra eşit olacaktır.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.3.b)$$

Aynı işlemler (3.2) için de uygulanır.

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} + \nabla \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) = 0 \quad (3.4.c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) \quad (3.4.d)$$

Akım yoğunluğu \mathbf{J} 'nin diverjansı ($\nabla \cdot \mathbf{J}$), yük yoğunluğu Q 'nun birikim oranına ($\partial Q / \partial t$) eşittir.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) \quad (3.5.a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \mathbf{D} = Q \quad (3.5.b)$$

Sonlu iletkenliğe sahip bir ortamda, yük yoğunluğu Q , çok kısa bir zamanda ($t \approx \epsilon / \sigma$), kararlı değerine ulaşacağından, akım akışı sırasında yük yığılması oluşmaz ve $Q=0$ değerini alır.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{ve} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3.6)$$

Ayrıca, ohm kanunundan, izotrop ve sürekli bir ortamda, dört alan vektörü (\mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{D} ve \mathbf{E}) için de iki ayrı bağıntı elde edilebilir (Grant ve West, 1965).

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H} \quad \text{ve} \quad \mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.7)$$

(3.7) denklemleri serbest hava için olup, μ manyetik permeabilite (μ_0 serbest havanın permeabilitesi = $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m.) ve ϵ dielektrik geçirgenlik (ϵ_0 serbest havanın dielektrik geçirgenliği = 8.85×10^{-12} F/m.)'dir. İzotrop ve tekdüze ortamlarda ise birlikte ifade edilir.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad , \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad , \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.8)$$

(3.7) eşitliklerindeki, μ_0 ve ϵ_0 , mks sistemi kullanıldığından, kısaltma amacı ile çıkarılmıştır (Telford ve diğer., 1990). (3.8) eşitlikleri, (3.1) ve (3.2) denklemlerinde kullanılabilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.10.a)$$

\mathbf{H} ve \mathbf{E} alan vektörlerine bağımlı iki denklem elde edilebilir. Eğer ortamda, elektromanyetik alandan bağımsız bir kaynak nedeniyle, \mathbf{J}_0 gibi bir akım yoğunluğu da bulunuyorsa, (3.10.a) denklemi değişecektir.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_0 \quad (3.10.b)$$

(3.9) ve (3.10) eşitliklerinin her iki tarafının rotasyoneli alınırsa;

$\nabla_x(\nabla_x \mathbf{A}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{A} = \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \cdot \mathbf{A}$ vektör eşitliğinde, $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ ve $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ oldukları bilindiğine göre eşitlikler yeni formunu alacaktır.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.11.a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\sigma (\nabla \times \mathbf{E}) - \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.11.b)$$

Sinüsoidal dalga formu için Fourier dönüşümü alınır.

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t} \quad \text{ve} \quad \partial \mathbf{E} / \partial t = i\omega \mathbf{E}$$

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 e^{i\omega t} \quad \text{ve} \quad \partial \mathbf{H} / \partial t = i\omega \mathbf{H}$$

(3.11.a) ve (3.11.b) denklemleri son şekline ulaşır.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu\epsilon\mathbf{E} = \mathbf{k}^2\mathbf{E} \quad (3.12.a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \omega^2\mu\epsilon\mathbf{H} = \mathbf{k}^2\mathbf{H} \quad (3.12.b)$$

Bu eşitlikler ile frekans ortamı dalga denklemine ulaşılır ve Helmholtz bağıntıları olarak bilinir. Eşitlikler; σ iletkenliğe, μ permeabiliteye ve ϵ dielektrik geçirgenliğe sahip izotrop, tekdüze ortamın elektrik ve manyetik alan vektörleri ilişkisini tanımlar. ω ; açısal frekans olup, $\omega=2\pi f$ ve k ise yayılım sabitidir.

3.1.1 Elektromanyetik Alanın Sönümü

Elektromanyetik dalga, herhangi bir ortamdaki yayınımlı sırasında sönüme uğrar. Serbest hava için bu durum geçerli değildir. ϵ , μ , ω ve σ 'nın büyüklükleri düşünülürse, ϵ 'nin en büyük değeri suda olup 80 F/m'dir. Kayaçlarda ise 10 F/m'den küçüktür. μ 'nün değeri ise, ferromanyetik minerallerde bile 3'den küçüktür. Bu durumda; $\epsilon \approx 10\epsilon_0 \approx 9 \times 10^{-11}$ F/m ve $\mu \approx \mu_0 \approx 1,3 \times 10^{-6}$ Henry/m alınabilir. Serbest havada $\sigma=0$, $\epsilon=\epsilon_0$ ve $\mu=\mu_0$ 'dır. (3.12) denklemlerinde $(\omega^2\mu\epsilon)$ çarpanı 5×10^{-9} değerinde olup, elektromanyetik dalganın havada sönümlenmediğini gösterir.

İletkenliği düşük ortamlar için, $\epsilon=10\epsilon_0$, $\mu=\mu_0$ ve $\sigma=10^{-3}$ S/m olup, $\omega=2 \times 10^4$ için;

$$\nabla^2 \mathbf{E} \approx (-4 \times 10^{-8} + 2,5 \times 10^{-5} i) \mathbf{E} \approx 0$$

Yüksek iletkenlikteki ortamlarda ise, $\sigma=10^3$ S/m için,

$$\nabla^2 \mathbf{E} \approx (-4 \times 10^{-8} + 25i) \mathbf{E} \approx 25i \mathbf{E}$$

olur. (3.12) denklemlerinden, \mathbf{H} için de aynı eşitlikler yazılabilir. Sonuç olarak, eşitliklerin yerdeğiştirme akımını gösteren gerçel kısmı göz ardı edilebilir ve serbest hava gibi kötü iletken ortamlarda yaklaşık sıfır olacaktır.

$$\nabla^2 \mathbf{E} \approx 0 \quad \text{ve} \quad \nabla^2 \mathbf{H} \approx 0 \quad (3.13)$$

İyi iletken ortamlarda, sanal kısım önem kazanır ve (3.12) denklemleri değişir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} \approx \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \approx i\omega\mu\sigma \mathbf{E} \quad (3.14.a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} \approx \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \approx i\omega\mu\sigma \mathbf{H} \quad (3.14.b)$$

Dalğanın düzlemsel polarize olduğu kabul edilip, z ekseni boyunca yayılıyorsa x-y düzlemi polarizasyon düzlemi olacaktır. (3.14) denklemleri bu koşullar altında çözümlerse dalga denklemleri yeni form alır (Ward ve Hohmann, 1987).

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{H}_0 e^{i\omega t - (1+i)az} = \mathbf{H}_0 e^{-az + i(\omega t - az)}$$

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{H}_0 e^{-az} (\cos(\omega t - az) - i \sin(\omega t - az)) \quad (3.15.a)$$

Çözümün gerçel kısmını ele alırsak;

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{H}_0 e^{-az} \cos(\omega t - az) \quad a = \sqrt{\omega\mu\sigma / 2} \quad (3.15.b)$$

olur. Burada cosinüs terimi, evre kaymalı basit harmonik hareketi, exponansiyel ifade dalğanın sönümü gösterir. $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m alınarak sönüm miktarı bulunur.

$$\left| \mathbf{H}_y / \mathbf{H}_0 \right| \approx e^{-2 \times 10^{-3} z \sqrt{f/\rho}} \quad (3.15.c)$$

Elektromanyetik dalga için kabuk (etki - penetrasyon - skin depth) derinliği, gelen sinyalin genliğinin, 1/e (%37) genliğine kadar sönümlendiği derinliktir.

$$z_s \cong 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.16.a)$$

Kabuk derinliği; ortamın öz direncine (ρ) ve kullanılan frekansa (f) bağlıdır. Ortamın öz direnci düşük veya kullanılan frekans yüksek ise ya da her iki durum için EM dalga derine doğru ilerleyemez. Eğer elektromanyetik dalğanın ortamdaki

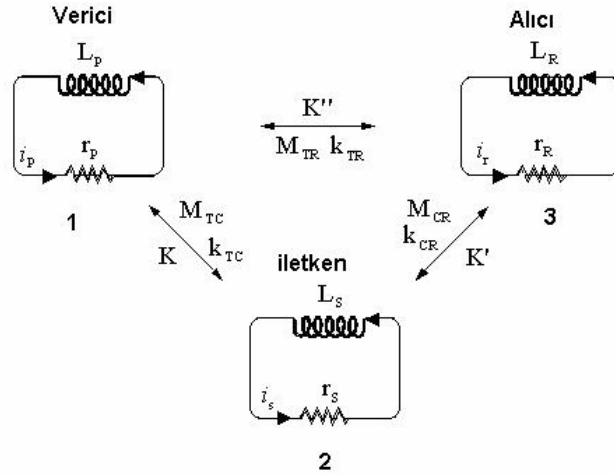
davranışı sırasında, kayaç cinslerine bağlı oluşan yerdeğiştirme akımlarını ifade eden çarpan ($\omega^2\mu\epsilon$) gözardı edilmez ise kabuk derinliği,

$$z_s = \frac{503.3}{((1+f^2)^{1/2} - f)} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \text{eşitliği ile verilir (Crossley, 1981).} \quad (3.16.b)$$

3.1.2 Elektromanyetik Alanlarda Genlik-Evre İlişkileri

Değişken manyetik alanlar; değişken akımlar ile oluşabilirler ve yayıldıkları ortamda sönmülenirler. Yeraltında iletken bir ortamla karşılaşan elektromanyetik alanda bir evre kayması oluşur. İletken ortam birincil alan ile aynı frekanstaki ikincil alanın kaynağını oluşturur. Bu durumda alıcı, hem birincil hem de ikincil alandan etkilenir.

İkincil alanın özellikleri, değişken akım (AC) devreleri ile tanımlanır. Birincisi; birincil alanın kaynağı, ikincisi; iletken ve üçüncüsü; alıcı konumunda üç ayrı bobin düşünülür (Şekil 3.2). M_i ; karşılıklı indüktans katsayısı, k_{CR} ; iletken-alıcı arasındaki etkileşim katsayısı ve L_i ;bobinlerin indüktanslarıdır (Telford ve diğer., 1990).



Şekil 3.2 Elektromanyetik sisteme eşdeğer elektrik devresi (Telford ve diğer., 1990).

Birinci bobindeki i_p akımının, iletkende oluşturduğu birincil alan tanımlanabilir.

$$H_p = K \cdot i_p = K \cdot I_p \cdot \sin \omega$$

Burada K sabiti, birinci bobinin sarım sayısı ve alanı ile dalganın sönümüne bağlıdır. Bu alanın sonucu; ikinci bobinde, birincil alanın $\pi/2$ gerisinde ikincil alan oluşur.

$$e_s = -M \frac{di_p}{dt} = -\omega M I_p \cos \omega t = \omega M I_p \sin(\omega t - \pi/2) = -i\omega M H_p / K$$

$M=M_{TC}$, birinci ile ikinci bobin arasındaki indüktansdır. Bu durumda ikinci bobinde akan akım bulunabilir.

$$i_s = e_s / z_s = e_s / (r_s + i\omega L_s)$$

$z_s=(r_s+i\omega L_s)$; r_s direncinde ve L_s indüktansındaki iletkenin etkin empedansdır. Sonuçta, alıcı (bobin uç) yakınındaki elektromanyetik alan elde edilir.

$$H_s = K'' i_s = \frac{-K'' i\omega M H_p}{K(r_s + i\omega L_s)} = \frac{-K'' M H_p (i\omega r_s + \omega^2 L_s)}{K(r_s^2 + \omega^2 L_s^2)}$$

$$H_s = \frac{-K'' M H_p (Q^2 + iQ)}{K L_s (1 + Q^2)} \quad (3.17.a)$$

Burada K' , K gibi bir sabit ve $Q=\omega L_s/r_s$ 'dir. Alıcıdaki birincil alan;

$$H'_p = K'' i_p = K'' I_p \sin \omega t = K'' H_p / K$$

ve toplam alanın genliği bulunur.

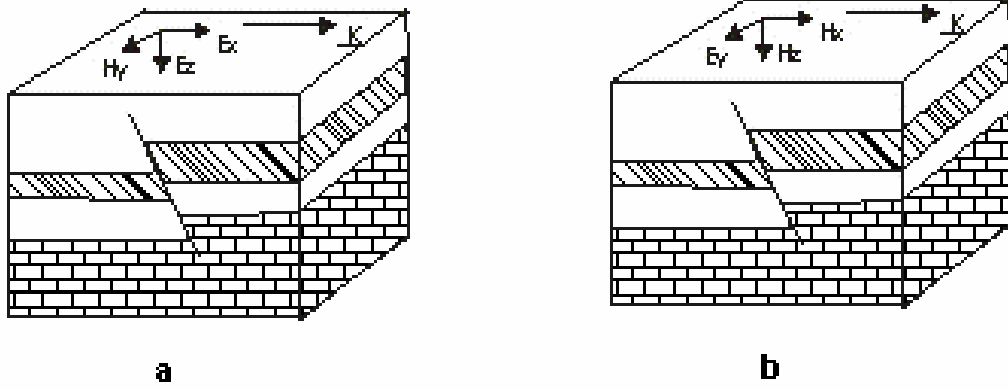
$$\left| \frac{H_s}{H'_p} \right| = \frac{K' i_s}{K'' i_p} = \frac{K' M}{K'' L_s} \left[\frac{Q^4}{(1+Q^2)^2} + \frac{Q^2}{(1+Q^2)^2} \right]^{1/2} = \frac{K' M}{K'' L_s} \frac{1}{(1+1/Q^2)^{1/2}} \quad (3.17.b)$$

Birincil ve ikincil alanlar arasındaki evre farkı da elde edilebilir.

$$\theta_p - \theta_s = (\pi/2 + \arctan(\omega L_s / r_s)) = (\pi/2 + \phi) \quad (3.18)$$

$$Z_{TE} = -\frac{E_Y}{H_X} = -\frac{i\omega\mu}{k_z} \quad (3.21)$$

$$Z_{TH} = \frac{E_X}{H_Y} = \frac{k_z}{(\sigma + i\omega\epsilon)} = \frac{i\omega\mu k_z}{k^2} \quad (3.22)$$



Şekil 3.4 EM alan TE ve TM modları; elektrik alan bileşenlerinin Jeolojik uzanıma, (a) dik modu (E-dik polarizasyon, TE) (b) paralel modu (E-paralel polarizasyon, TM) (Crossley,1981).

Frekans bant aralığına bağlı olarak, $k_z = k = (i\omega\mu\sigma)^{1/2}$ ortama ait empedans bağıntısı elde edilir (Cagniard, 1953).

$$Z_{TE} = Z_{TH} = \left(\frac{i\omega\mu}{\sigma}\right)^{1/2} \quad (3.23)$$

Empedansa bağlı olarak ortamın özdirenci ve evresi bulunur.

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (3.24)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_0}{Z_1} \right) \quad (3.25)$$

Özdirenç ve evre açısı, tekdüze bir ortam için belli frekanstaki gerçek özdirenci, tekdüze olmayan ortamlar için ise kabuk derinliğine kadar olan bölgenin görünür özdirencini verir.

3.1.4 Eliptik Polarizasyon

Elektromanyetik birincil ve ikincil alanlarının sinüsoidal bir dalga formunda olduğu düşünülerek tanımlanır (Telford ve diğer, 1976).

$$H_p = A \cdot \sin(\omega t) \quad (3.26)$$

$$H_s = B \cdot \sin(\omega t - \pi/2 + \phi) = B \cdot \cos(\omega t - \phi) \quad (3.27)$$

$$\cos(\omega t - \phi) = \cos(\omega t) \cdot \cos(\phi) + \sin(\omega t) \cdot \sin(\phi)$$

A ve B katsayıları; verici, alıcı ve iletken ortam özelliklerine bağlı katsayılarıdır ve trigonometrik bağıntılardan faydalanarak, ikincil alan eşitliğine ulaşılır.

$$\frac{H_s}{B} = \sqrt{\left(1 - \frac{H_p^2}{A^2}\right)} \cdot \cos(\phi) + \frac{H_p}{A} \cdot \sin(\phi) \quad (3.28)$$

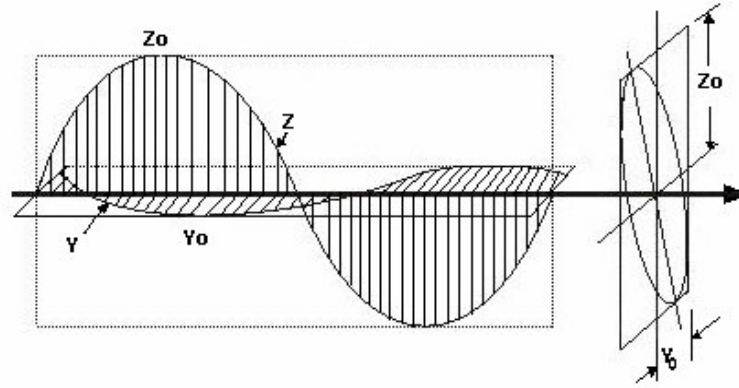
Eliptik kutuplanan alan, polarizasyon elipsi denklemi oluşturulur (Grant ve West, 1965; Dey ve Ward, 1970; Smith ve Ward, 1974; Kaikkonen, 1979).

$$\frac{H_p^2}{(A^2 \cdot \cos^2(\phi))} + \frac{H_s^2}{(B^2 \cdot \cos^2(\phi))} - \frac{(2 \cdot H_p \cdot H_s \cdot \sin(\phi))}{(AB \cdot \cos^2(\phi))} = 1 \quad (3.29)$$

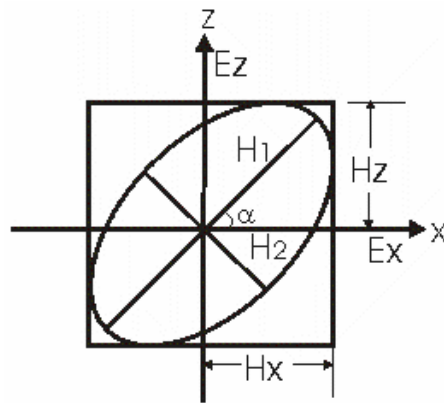
$$H_z = H_p + H_s \cdot \cos(\alpha) \quad ; \quad H_x = H_s \cdot \sin(\alpha)$$

(3.29) denklemi bir elips ($L \cdot z^2 - 2M \cdot xz + N/x^2 = 1$) denklemdir. Polarizasyon dalga formuna (manyetik alan genliklerine ve α eğim açısına) bağlı olarak, lineer, dairesel ve eliptik olabilir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de polarizasyon elipsinin üç ve iki boyutlu şekilsel anlamı verilmektedir.

Elips denklemini elde ederken iki kabulden yola çıkılır. Bunlardan birincisi, H_p ve H_s alanlarının birbirine dik olduğu, ikincisi ise H_s 'nin yalnızca iletken bir ortam içerisindeki akım ile oluştuğudur.



Şekil 3.5 Elektromanyetik alanlar ve düzlemde oluşturduğu kutuplanma elipsi.



Şekil 3.6 Kutuplanma elipsi değişkenleri
(Smith ve Ward, 1974).

Alanların bileşke vektörü, sürekli genlik değişimi ile dönen eliptik polarizeli alan oluşturur. Polarizasyon denkleminin iki özel durumu vardır ve jeofizik anlamları da önemlidir (Telford ve diğer., 1990).

- (3.29) denklemi; $\phi = \frac{\pi}{2}$ durumunda sadeleşir.

$$\left(\frac{H_p}{A} - \frac{H_s}{B}\right) = 0 \quad \text{veya} \quad BH_p - AH_s = 0 \quad (3.30)$$

(3.30) denklemi, B/A eğimine sahip, merkezden geçen bir doğruyu verir.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_s}{\rho_s}\right) = \frac{\pi}{2} \quad \text{veya} \quad \tan(\phi) = \infty, \quad \rho_s = 0 \quad (3.31)$$

Bu koşulda polarizasyon elipsi düz bir çizgide yoğunlaşır ve çok iyi iletken ortamı tanımlar.

- (3.29) denklemi; $\phi = 0$ durumunda basitleşir.

$$\left(\frac{H_p}{A} - \frac{H_s}{B}\right) = 1 \quad \text{veya} \quad BH_p - AH_s = 1 \quad (3.32)$$

$\phi = 0$ için (3.32) denkleminde; $\rho_s \gg \omega L_s$ olacağından düşük iletkenlikli ortamları verir. H_p ve H_s alanlarının, bileşke vektörü dairesel polarizasyon oluşturur.

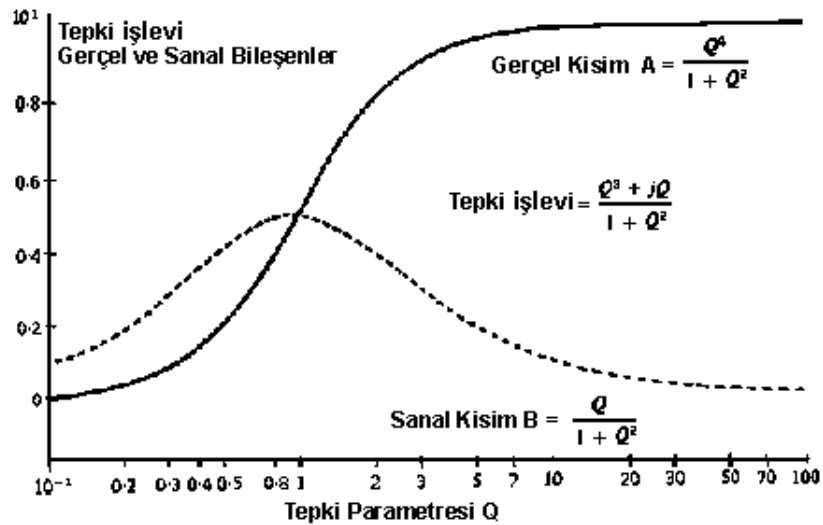
$$Q = \frac{\omega L_s}{\rho_s} \quad (3.33)$$

$$\text{Tepki İşlevi} = \frac{Q^2 + jQ}{1 + Q^2} = A + jB \quad (3.34)$$

(3.33) denklemi iletkenin tepki parametresi olarak bilinir ve (3.34) denklemi de tepki işlevini tanımlar. Tepki parametresine karşılık gelen işlevin;

$$\text{gerçel kısım (180}^\circ\text{); } A = \frac{Q^2}{1 + Q^2}, \quad \text{sanal kısım (90}^\circ\text{) } B = \frac{Q}{1 + Q^2} \quad (3.35)$$

oluşturan iki eğri elde edilir. Kötü iletken durumunda tepki işlevi sanal bileşene, iyi iletken durumunda gerçel bileşene egemen olur (Şekil 3.7).

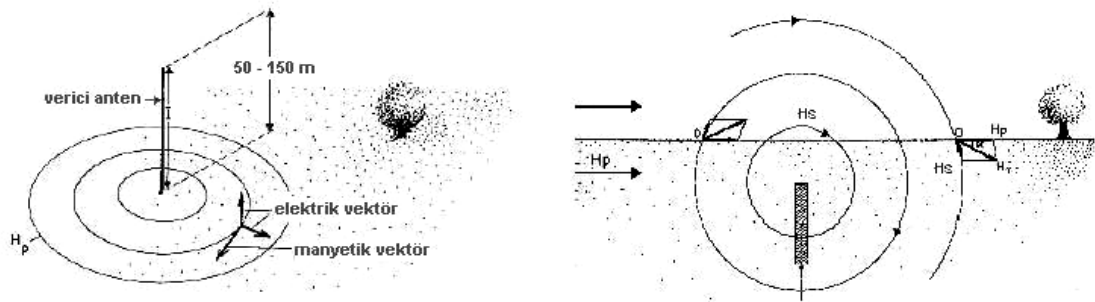


Şekil 3.7 Değişken akım içinde bir iletkenin tepki işlevi (Grant ve West, 1965).

Kısaca iyi iletken; büyük gerçel, küçük sanal bileşen ve kötü iletken; büyük sanal, küçük gerçel bileşen tepkisi verir. Bileşenlerin genlikleri oranı (gerçel / sanal) çok sık kullanılmaktadır. Bu oran, iyi iletken ortamlar için 1'den büyük, kötü iletkenler için 1'den küçük değerler sunar.

3.2 VLF-EM Yöntemi ve Genel Tanımı

Vericiden yayılan EM alanın, yeryüzü ile ionosferin alt katmanı arasında yayılma ve/veya yansımından kaynaklanan (diffüzyon) içsel akımlar, sistemin kaynağını oluşturur. Bu EM alanların araştırma yapılan bölgedeki süreksizlik veya iletken zonlarda oluşturduğu akımların incelenmesine dayanır.



Şekil 3.8 VLF-EM anteni ve oluşturduğu birincil alanın (H_p) ve düşey bir iletkenin oluşturduğu EM alan vektörlerinin şematik gösterimi (Stadelhofen, 1994)

Yaratılan bileşke alan vektörünün yön ve şiddetinin değişmesi ile elde edilen bilgilerin kaydedilmesidir. Vericilerden yatay yönde yayılan birincil manyetik alan (H_p), verici ile çalışma alanına olan uzaklığının çok olması nedeni ile düzlem dalga (plane wave) formu kabul edilir. Birincil alanın, tekdüze ve sabit genlikte olduğu kabul edilir (Şekil 3.8).

Diğer EM yöntemlerin dayandığı fiziksel esaslara bağlı olarak yer içinde uyarılan akımların dağılımı ve oluşturduğu yeni elektromanyetik alanların ölçülmesi ile yerin elektriksel özellikleri saptanmaya çalışılır. Bu esnada, oluşan EM alanların manyetik alan bileşenleri veya hem manyetik hem elektrik alan bileşenleri (VLF-R) ölçülerek yeraltına ilişkin dönüşüm denklemleri elde edilir. VLF-EM yöntemi; seçilen

frekansa, ortamın öz direncine bağlı olarak, 0-70m derinliğe kadar sığ yapıların ve düşey süreksizliklerin araştırılmasında sıkça kullanılmaktadır. Uygulama alanları;

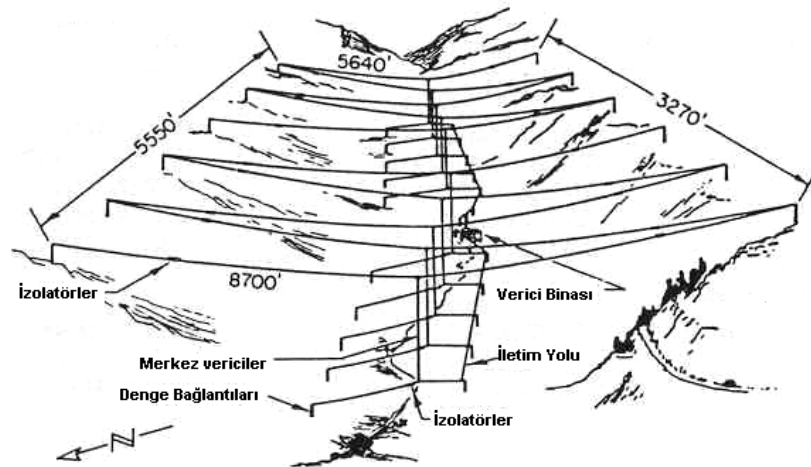
- Süreksizlik bölgelerin ve Karstik boşlukların aranması,
- Yatay ve düşey iletkenlik değişimlerinin belirlenmesi,
- Hidrojeolojik amaçlı uygulamaları,
- Maden, cevher zonlarının bulunması,
- Arkeolojik yapıların bulunmasında, gömülü yapı ve cisimlerin aranması,
- Çevre kirliliği araştırmalarında düşey sınırların bulunması,

olarak verilebilir.

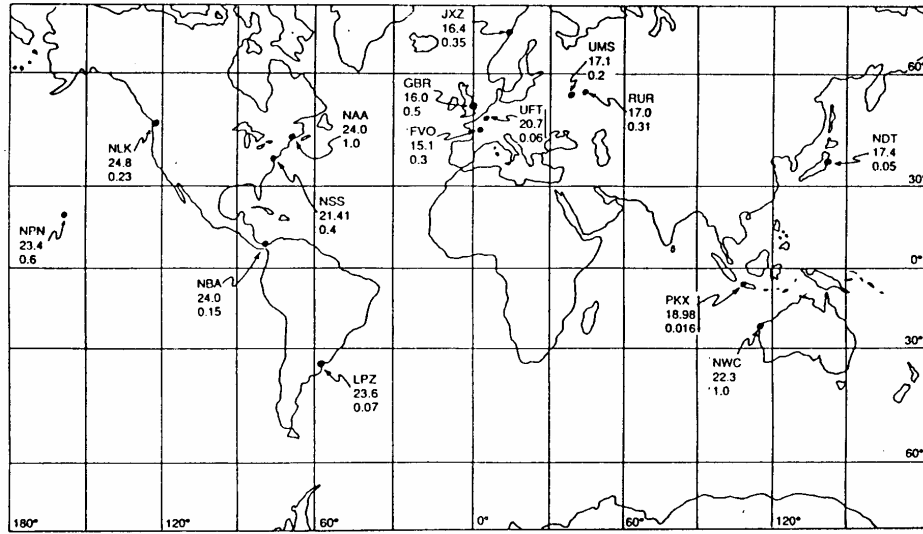
3.2.1 VLF-EM vericileri ve özellikleri

Verici anten sistemleri, genellikle bir vadinin yapısından faydalanarak 100-300m yüksekliğinde ve vericinin gücüne bağlı olarak geniş bir alana yayılan anten gruplarından oluşmaktadır (Şekil 3.9). Bazen, birbirine yakın bölgelerde, iki verici grubunun sinyal modülasyonu sağlanarak güçleri arttırılır.

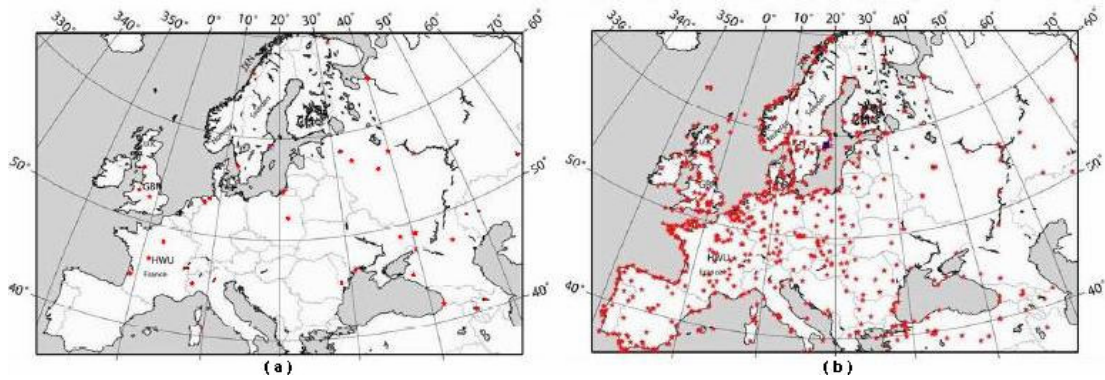
Dünya üzerindeki; başlıca VLF verici istasyonlarının yerleri, frekansları (kHz) ve güçleri (mW) Şekil 3.10'da verilmektedir. Avrupa'da askeri amaçlı hizmetler için kullanılan VLF (3-30kHz) ve RMT (30-300kHz) vericileri çok yaygındır (Şekil 3.11). RMT vericilerinin yanında, VLF verici sistemlerinin sayısı çok azdır.



Şekil 3.9 Amerika'daki Jim Greek (NLK) VLF verici sisteminin resmedilmiş görüntüsü (Watt (1967)'den türkçeleştirilmiştir).



Şekil 3.10 Dünyada yayın yapan VLF istasyonları (frekans-kHz ve güçleri-mW,1987)
(http://www.consciousness-centre.com/rival/1_tech/vlf1.htm alınmıştır).



Şekil 3.11 Avrupa'da bulunan a) VLF (3-30kHz) b) RMT (30-300kHz) vericileri.
(http://publications.uu.se/uu/fulltext/nbn_se_uu_diva-4146.pdf alınmıştır.)

Dünya üzerindeki özellikleri bilinen VLF vericilerin genel listesi Tablo 3.1'de verilmektedir (Paterson ve Ronka, 1971 ; Tolstoy ve diğer, 1986; McNeill ve Labson, 1991). Türkiye'deki araştırmalar için kullanılabilen aktif VLF verici istasyonlarının frekans, güç, yer ve kod listesi Tablo 3.2'de görülmektedir. Türkiye'de yapılacak araştırmalarda, sinyal sürekliliği sağlayan, verici özellikleri bilinen ve güç bakımından geniş alanları etkisi altında bulunduran, LeBlanc-Rosnay Fransa (HWU), Authorn-Rugby İngiltere (GBR) ve Rhauderfehn-Burlage Almanya (DHO) verici frekanslarının seçilmesi önerilir. Ölçümler sırasında seçilen frekansların verici özelliklerinin bilinmesi ve çalışma süresince belli aralıklar ile kontrol edilmesi gerekir.

Tablo 3.1 Dünya'daki aktif VLF vericilerinin listesi (Comité Consultatif International des Radiocommunications, 1993; Paterson ve Ronka, 1971, Tolstoy ve diğer, 1986).

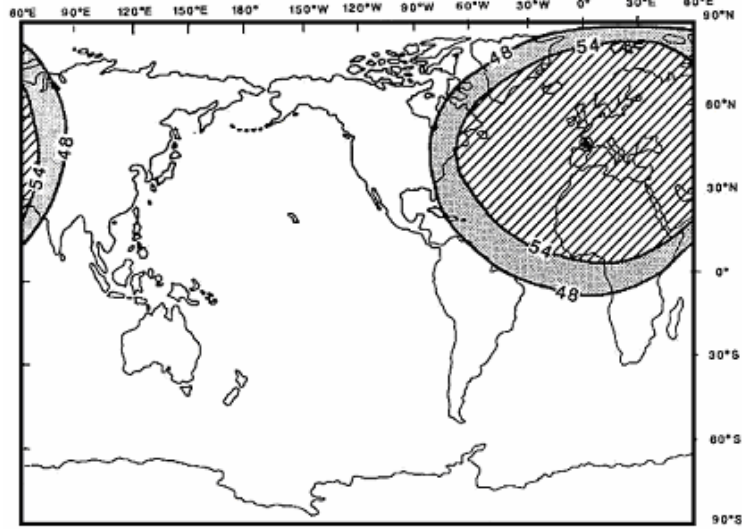
Frekans (kHz)	Verici Yeri Ülke	Verici Gücü (kW)	Verici Kodu	Frekans (kHz)	Verici Yeri Ülke	Verici Gücü (kW)	Verici Kodu
15.1	Le Blanc Fransa	500	FUO	19.0	Criggeon İngiltere	250	MHW
15.6	Odessa Ukrayna	500	EWB	19.6	Anthorn İngiltere	500	GBZ
16	Rugby İngiltere	750	GBR	20.3	Tavalora İtalya	500	ICV
16.4	Helgeland Norveç	350	JXZ	21.4	Annapolis USA	400	NSS
16.8	Bordoeaux Fransa	250	HWU	21.8	Antalya Türkiye		TBA
17.1	Moskova Rusya	1000	UMS	22.3	NW Cape Avustralya	1000	NWC
17.4	Yokosukaichi Japonya	200	NDT	23.4	Ramsloh Almanya		DHO
17.8	Cutler USA	1000	NAA	23.4	Honolulu USA		NPM
18.1	Murmansk Rusya		RKS	24.0	Cutler USA	1000	NAA
18.3	Datong Çin			24.8	Jim Creek USA		NLK
18.6	Seattle USA	300	NLK	28.5	Aquada Porto Rico	100	NAU

Tablo 3.2 Türkiye'de etkin olan (15-30 kHz) VLF vericileri (WUN-ELF and VLF Guide Version 1.0 - update 15.Nov.2001 web : <http://beaconworld.org.uk/files/VLF.pdf> alınmıştır).

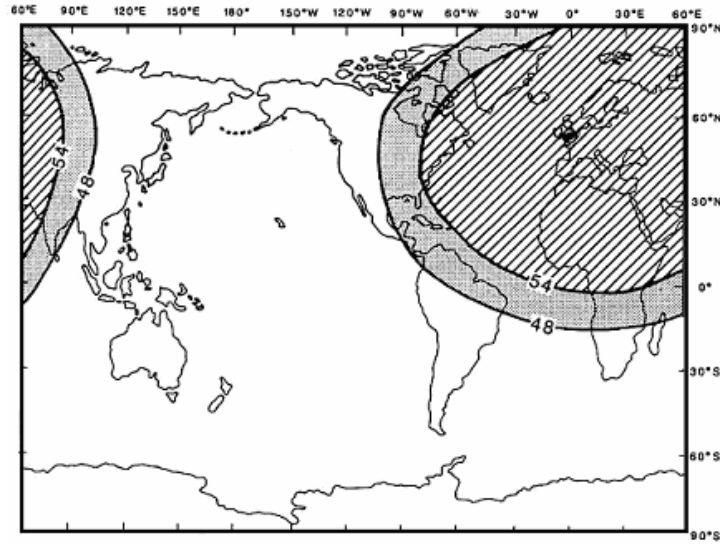
Frekans (kHz)	Verici Yeri	Ülke	Verici Gücü (kW)	Koordinat	Verici Kodu
15.1	Bordeaux Le Blanc	Fransa	500	44N45,00W48 46N42,01E15	FUO HWU
16	Rugby	İngiltere	750	52N22,01W15	GBR
16.4	Helgeland	Norveç	350	66N58,13E54	JXZ
17.9	Krasnodar	Rusya		45N24,38E09	RDL
18.3	Le Blanc	Fransa	500	46N37,01E05	HWU
18.9	Krasnodar Ryazan	Rusya		45N24,38E09 54N60,39E71	RDL RLO
19.6	Anthorn Rugby	İngiltere		54N54,03W18 52N22,01W15	GQD GBR
20.3	Tavalora	İtalya	500	40N55,09E45	ICV
20.9	Rosnay	Fransa	300	46N42,01E15	HWU
21.1	Krasnodar	Rusya		45N24,38E09	RDL
21.8	Antalya	Türkiye	100	36N53,30E43	TBA
22.1	Anthorn	İngiltere	750	54N54,03W18	GQD
23.4	Rhauderfehn,Ramsloh	Almanya		53N05,07E40	DHO38
26.7	Bafa	Türkiye	100	37N26,27E33	TBB
29.0	Rosnay	Fransa		46N42,01E15	HWU

Moskova Rusya (UMS-17,1kHz)'dan yayın yapan verici 1000 kW'lık güçlü bir verici olmasına karşılık, gizli iletişim amaçlı kullanıldığından sinyal sürekliliği bulunmamaktadır. Ölçümlerde kullanılan frekansları sağlayan istasyonların çalışma bölgesine uzaklığı ve birincil EM alan (Hp) değerinin yaklaşık bilinmesi, değerlendirme aşamasında yararlı olur.

Bazı istasyonların, elektrik alan şiddetlerine bağlı olarak ($E_z > 0,5$ mV/m 54 db'lik kuvvetli sinyal ve $E_z > 0,25$ mV/m 48 db'lik zayıf sinyal) etkin güç sınırları verilmiştir (Hauser ve Rhoads, 1974). Bunlardan; 19.6 kHz'den yayın yapan Rugby-İngiltere (GBR) vericisi (Şekil 3.12) ve 15.1 kHz'den yayın yapan Bordeaux-Fransa (FUO) istasyonlarının etkin güç alanları şekil 3.13'dedir.



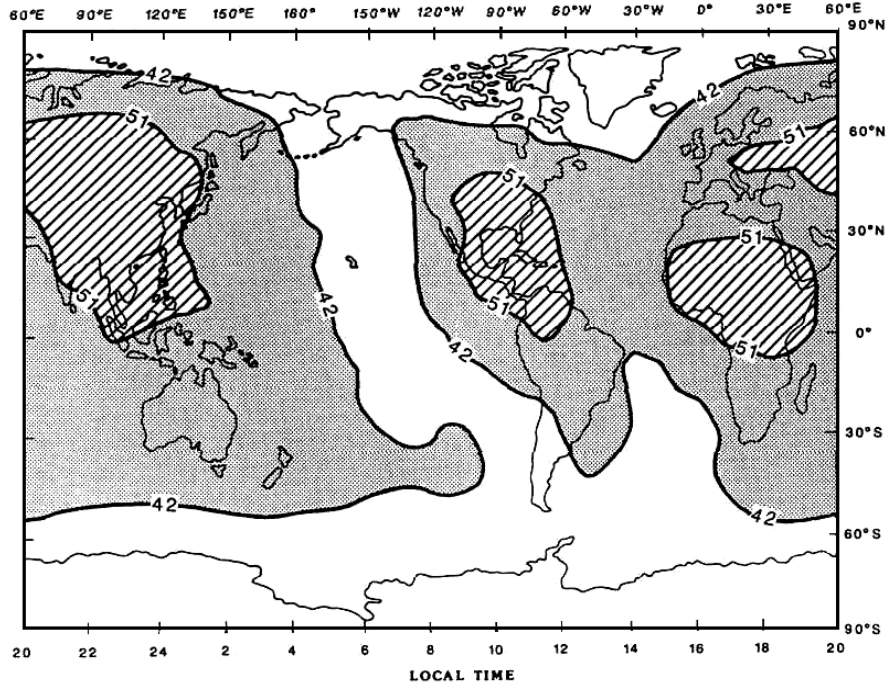
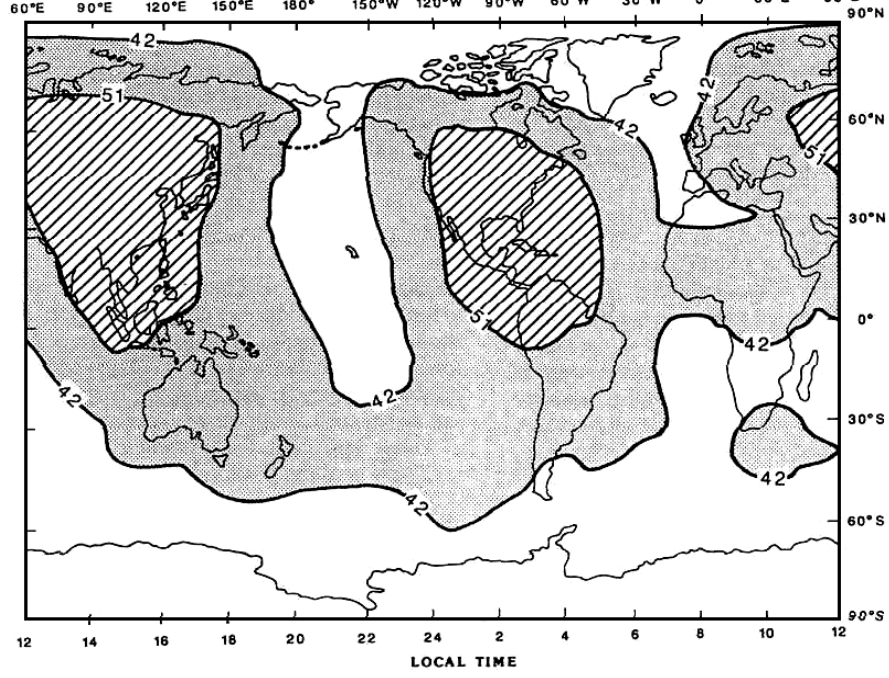
Şekil 3.12 19.6 kHz Rugby-İngiltere (GBR) VLF vericisi etkin alanı (Hauser ve Rhoads, 1974).



Şekil 3.13 15.1 kHz Bordeaux- Fransa (FUO) VLF vericisi etkin alanı (Hauser ve Rhoads, 1974).

İstasyonların yayınları sırasında atmosferik gürültü oranları, sinyal şiddetlerini zayıflatıcı bir faktördür. Atmosferik gürültü oranı; 1 kHz'lik bant genişliğinde ($db > 1\mu\text{V/m}$, 51db ve 42db), dünya genelindeki istasyonları kullanarak, gürültü seviye

haritalarını ay ve saat bazında oluşturmuştur (Hauser ve Rhoads, 1974). Şekil 3.14'de Temmuz ayı, saat 08:00 ve 16:00 için atmosferik gürültü seviye haritaları verilmiştir.



Şekil 3.14 Temmuz ayı (a) saat 8:00 , (b) saat 16:00 için atmosferik gürültü seviye ($db > 1\mu V/m$, 1kHz bant genişliği) haritaları (Hauser ve Rhoads, 1974).

BÖLÜM DÖRT

VLF-EM YÖNTEMİ

VE KURAMSAL İÇERİĞİ

4. Elektromanyetik VLF Yöntemi

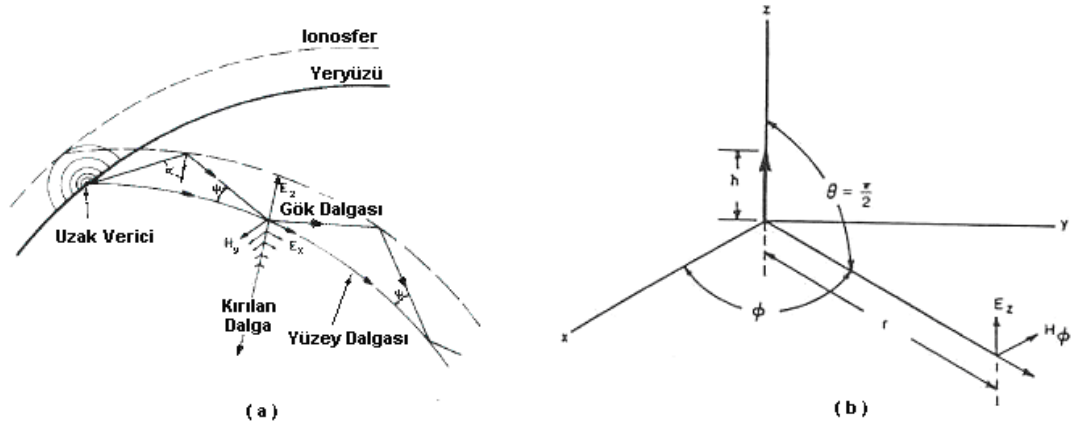
Elektromanyetik yöntemlerin bir uygulaması olan VLF-EM yönteminde monopole (tek anten) akım kaynağı tarafından oluşturulan düzlemsel EM dalganın, ortamlara karşı oluşturdukları tepki fonksiyonu çözümü incelenir (Şekil 4.1.a).

Bu bölümde; temel bağıntılardan yararlanarak sığ aramacılıkta karşılaşılan sorunlara yönelik matematiksel çözümler verilmiştir. Uzak kaynak özelliklerinden yola çıkılarak, tekdüze, tabakalı ortamların manyetik alan ve empedans çözümleri yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında kullanılan sonlu farklar yöntemi tanımlanarak, sınır koşulları ve ağ (mesh) aralıklarının seçiminde dikkat edilmesi gereken konular verilmiştir. Hilbert dönüşümü kullanılarak Hz, Hy alan ilişkileri ile yüzey empedansına ve ortamın görünür özdirenç değişimine geçiş tanımlanmıştır.

Uzak kaynak kullanımının getirdiği Hp alanın, dış etkilerden oluşan gürültü tanımı ve indirgeme işlemi tanımlanmıştır. Böylece, değişken Hp alanın oluşturacağı gürültülü Hs, H_T alanların düzeltilmesi yapılmıştır. Hesaplanan bileşenlerden, ortamın görünür özdirenç değişimine düşük hata sınırları içerisinde ulaşılmıştır.

4.1 VLF-EM Yöntemi Temel Bağıntıları

VLF-EM yönteminin kaynağını, Şekil 3.9' da verilen anten sistemleri oluşturur. Sistemin fizik ve matematik temellerinin anlaşılması için, anten kaynağının oluşturduğu alanların incelenmesi gerekir (Şekil 4.1.b). Elektromanyetik yöntemlerin temelini oluşturan kavramlar, Maxwell denklemleri kullanılarak, alan vektörleri arasındaki ilişkiler bölüm üç' de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde tek anten verici alanına bağlı düzlem EM dalga çözümleri sunulacaktır.



Şekil 4.1 (a) Yeryüzü ile ionosfer arası EM dalga yayılım geometrisi (Arcone, 1979), (b) Monopol (tek anten) akım kaynağı alanları geometrisi (Watt, 1967).

Yöntem, düşey bir telin yarattığı manyetik alanın “r” mesafesindeki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin incelenmesine dayanır. “A” vektör potansiyeli olarak gösterilirse,

$$\nabla^2 A = -\mu\sigma E = \mu J \quad (4.1)$$

dir. Genel denklem ile elektrik ve manyetik potansiyele Poisson eşitliğinin çözümü ile ulaşılır.

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{J \cdot dv}{r} = \frac{I \cdot dl}{4\pi \cdot r} \quad (r^2 = x^2 + y^2 + z^2) \quad (4.2)$$

(4.2) denklemi; “dl” boyunda “I” akımı geçen düşey bir telin, “r” mesafesinde oluşturacağı potansiyeli vermektedir. Bu potansiyelden türeyen elektrik ve manyetik alanlar da bulunur (Keller ve Frischknecht, 1966).

$$H = \nabla \times A \quad (4.3.a)$$

$$\nabla^2 A + k^2 A = -J$$

$$E = -i\omega\mu A + \frac{1}{i\omega\epsilon} \nabla(\nabla \cdot A) \quad (4.3.b)$$

Kaynağın, “r” mesafede oluşturacağı alan bileşenlerine $\nabla^2 A + k^2 A = 0$ denklemi küresel koordinatlara dönüştürülerek ulaşılır.

Küresel koordinatlarda;

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dA_z}{dr} \right) + kA = 0 \quad (4.4)$$

(4.4) denkleminin çözümü düşey akım kaynağının yaratmış olduğu vektör potansiyelidir.

$$A_z = \frac{Idl}{4\pi r} e^{-i.k.r} \quad (4.5)$$

Şekil 4.1.b göz önüne alındığında, vektör potansiyelinin “r” ve “ θ ” ya bağlı olarak eşitlikleri oluşturulur.

$$A_r = A_z \cdot \cos \theta = \frac{Idl}{4\pi r} e^{-i.k.r} \cdot \cos \theta \quad (4.6.a)$$

$$A_\theta = -A_z \cdot \sin \theta = -\frac{Idl}{4\pi r} e^{-i.k.r} \cdot \sin \theta \quad (4.6.b)$$

(4.2) denkleminde; manyetik alan eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} H = \nabla \times A = & \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \cdot A_\phi) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] u_r + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot A_\phi) \right] u_\theta \\ & + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] u_\phi \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$H_\phi = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] = \frac{Idl}{4\pi} e^{-i.k.r} \left[\frac{ik}{r} + \frac{1}{r^2} \right] \cdot \sin \theta \quad (4.8)$$

(4.3) denkleminde; elektrik alan eşitliği de çıkarılır. Bu aşamada, küresel koordinatlarda vektör potansiyelinin çözümü yapılır.

$$\nabla.A = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \cdot A_r) + \frac{1}{r \cdot \sin\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin\theta \cdot A_\theta) = \frac{Idl}{4\pi} \cdot e^{-i.k.r} \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{ik}{r} - \frac{2}{r^2} \right) \cdot \cos\theta \quad (4.9.a)$$

$$\nabla_r(\nabla.A) = \frac{\partial}{\partial r} (\nabla.A) = \frac{Idl}{4\pi} \cdot e^{-i.k.r} \cdot \left(\frac{2ik}{r^2} + \frac{2}{r^3} - \frac{k^2}{r} \right) \cdot \cos\theta \quad (4.9.b)$$

$$\nabla_\theta(\nabla.A) = \frac{\partial}{\partial \theta} (\nabla.A) = \frac{Idl}{4\pi} \cdot e^{-i.k.r} \cdot \left(\frac{1}{r^3} + \frac{ik}{r^2} \right) \cdot (\sin\theta) \quad (4.9.c)$$

(4.9) denklemleri kullanılarak, elektrik alan bileşenleri elde edilir.

$$E_r = \frac{Idl}{2\pi r} \cdot e^{-i.k.r} \cdot \left(\frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{r^2} + \frac{1}{i\omega\epsilon r^3} \right) \cdot \cos\theta \quad (4.10)$$

$$E_\theta = \frac{Idl}{4\pi} \cdot e^{-i.k.r} \cdot \left(\frac{i\omega\mu}{r} + \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{r^2} + \frac{1}{i\omega\epsilon r^3} \right) \cdot \sin\theta \quad (4.11)$$

VLF anten sistemleri, tek anten verici sistemleridir ve uzaklığa bağlı yaydıkları güç bulunur (McNeill ve Labson, 1991).

$$P = \frac{4\pi}{3} \eta_o \cdot \left(\frac{I \cdot dl}{\lambda} \right)^2 \quad (4.12)$$

(4.11) denkleminde “r” mesafesi arttıkça ters orantılı olduğundan ilk terimden sonrası çok küçülür ve gözardı edilebilir. Gerekli düzenlemeler yapıp, (4.12) bağıntısı kullanılarak, uzaklık ve verici gücüne bağlı elektrik alan bileşenine ulaşılır.

$$E_z = \sqrt{\frac{3 \cdot \eta_o}{4\pi} \cdot \frac{P}{r^2}} \cong 9,5 \cdot \frac{\sqrt{P}}{r} \quad (4.13.a)$$

$$E_z \text{ (mA / m)} \cong 300 \cdot \frac{\sqrt{P(\text{kW})}}{r(\text{km})} \quad (4.13.b)$$

Maxwell denklemleri kullanılarak manyetik ve elektrik alan arasındaki ilişkiler de yazılabilir (McNeill ve Labson, 1991).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\mu \partial \mathbf{H} \cdot e^{i\omega t}}{\partial t} = -i\omega \mu \mathbf{H} \quad (4.14.a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\epsilon \cdot \partial \mathbf{E} \cdot e^{i\omega t}}{\partial t} = (\sigma + i\omega \epsilon) \mathbf{E} \quad (4.14.b)$$

(3.12) denklemleri ile verilen frekans ortamı dalga formu incelenecek olursa; ikinci dereceden doğrusal differansiyel denklemlerdir. Bu differansiyel denklemin genel çözümünden birincil manyetik alanın “y” bileşenin eşitliği;

$$\mathbf{H}_{my} = (a_m \cdot e^{-u_m z} + b_m \cdot e^{u_m z}) \cdot e^{-i\lambda x} \quad (4.15)$$

$$u_m^2 = \lambda^2 - k_m^2$$

(m=0 serbest havada ve m=1 yarı sonsuz ortamda)

ile verilir. Serbest havada (k_0) ve ortam etkisindeki (k_1) yayılım sabitleri eşitlikleri;

$$k_0 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{1/2} = \omega (\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} \quad (4.16.a)$$

$$k_1 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_1 - i\omega \mu_0 \sigma_1)^{1/2} \quad (4.16.b)$$

kullanılarak dalganın birincil manyetik alanı elde edilir.

$$\mathbf{H}_{0y}^{pri} = \mathbf{H}_{0y} \cdot (e^{-i \cdot k_0 \cdot z \cdot \cos \theta_i}) (e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \theta_i}) \quad \lambda = k_0 \cdot \sin \theta_i \quad (4.17)$$

Sınır koşulları gereği (4.14) denklemlerinden, yer-hava ara yüzeyinde elektrik ve manyetik alan teğetsel bileşenleri, sürekli olma durumundadır.

$$\mathbf{E}_{mx} = \frac{-1}{\sigma_m + i\omega \epsilon_m} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_{my}}{\partial z} \quad (4.18)$$

Elektrik alan sınır koşulu gereği;

$$\frac{1}{i\omega\epsilon_0} \cdot \frac{\partial H_{0y}}{\partial z} = \frac{1}{\sigma + i\omega\epsilon_1} \cdot \frac{\partial H_{1y}}{\partial z} \quad (4.19)$$

Manyetik alan için; $H_{0y} = H_{1y}$,

$$H_{0y} = (a_0 \cdot e^{-u_0 z} + b_0 \cdot e^{u_0 z}) \cdot e^{-i\lambda x} \quad (4.20.a)$$

$$H_{1y} = a_1 \cdot e^{-u_1 z} \cdot e^{-i\lambda x} \quad (4.20.b)$$

denklemlerine göre $z=0$ sınır koşulunda $a_1 = a_0 + b_0$ olacaktır.

$$\frac{u_0}{i\omega\epsilon_0} \cdot (-a_0 + b_0) = \frac{-u_1}{\sigma + i\omega\epsilon_1} \cdot a_0 \cdot \left(1 + \frac{b_0}{a_0}\right) \quad (4.21)$$

Bu durumda yansıma katsayısı ve yüzey empedansı bulunur.

$$\frac{b_0}{a_0} = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} \quad (4.22)$$

$$Z_0 = \frac{u_0}{i\omega\epsilon_0} = \frac{(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2}}{i\omega\epsilon_0} = \frac{k_0(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2}}{\omega\epsilon_0} = \eta_0 \cdot (1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} \quad (4.23)$$

(4.23) denkleminde serbest uzay karakteristik iletim empedansı elde edilir.

$$\eta_0 = \frac{k_0}{\omega\epsilon_0} = \frac{\omega(\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{1/2}}{\omega\epsilon_0} = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} = 120\pi = 377\Omega \quad (4.24)$$

Ortama ait empedans bağıntısı ise;

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{u_1}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} = \frac{(\lambda^2 - k_1^2)^{1/2}}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} \\ &= \frac{ik_1}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} \left(1 - \frac{k_0^2}{k_1^2} \cdot \sin^2 \theta_i\right)^{1/2} = \eta_1 \cdot \left(1 - \frac{k_0^2}{k_1^2} \cdot \sin^2 \theta_i\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\eta_1 = \frac{ik_1}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} = \left(\frac{i\mu_0\omega}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1}\right)^{1/2} \quad (4.26)$$

olacaktır ki η_0 ve η_1 empedansın boyutlarıdır ve elektriksel özellikler (σ_1 ve ϵ_1) ile ilişkilidir. (4.18), (4.20) ve (4.22) denklemleri kullanılarak, yüzeyde oluşan elektrik ve manyetik alan oranı, yüzey empedansı cinsinden ifade edilebilir ($z=0$).

$$E_{0x} = a_0 \cdot Z_0 \left(1 - \frac{b_0}{a_0}\right) \cdot e^{-i\lambda \cdot x} \quad (4.27)$$

$$H_{0y} = a_0 \cdot \left(1 + \frac{b_0}{a_0}\right) \cdot e^{-i\lambda x} \quad (4.28)$$

$$\frac{E_{0x}}{H_{0y}} = Z_0 \cdot \frac{Z_1}{Z_0} = Z_1 = \eta_1 \cdot \left(1 - \frac{k_0^2}{k_1^2} \cdot \sin^2 \theta_i\right)^{1/2} \quad (4.29)$$

(4.29) denkleminde; $k_0^2 \cdot \sin^2 \theta_i = k_1^2 \cdot \sin^2 \theta_t$, $\theta_t = 90^\circ \Rightarrow \cos \theta_t = 1$ koşulları ve $\sigma_1 \gg i\omega\epsilon_1$ dikkate alınarak empedans bulunur.

$$Z_1 = \eta_1 \cdot (1 - \sin^2 \theta_t)^{1/2} = \eta_1 \cdot \cos \theta_t = \eta_1$$

$$\frac{E_{0x}}{H_{0y}} \cong \eta_1 = \left(\frac{i\mu_0\omega}{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{i\mu_0\omega}{\sigma_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{1+i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \left(\frac{\mu_0\omega}{\sigma_1}\right)^{1/2} \quad (4.30)$$

(4.30) denkleminde, elektrik alan bileşenleri oranına, $H_{0y} = E_{0z}/\eta_0$ eşitliği kullanılarak ulaşılır.

$$\frac{E_{0x}}{E_{0z}} = \frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{i\mu_0\omega}{\sigma_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{1+i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \left(\frac{\omega\epsilon_0}{\sigma_1}\right)^{1/2} \quad (4.31)$$

Yayılan EM dalganın yarattığı serbest uzaydaki akım yoğunluğu (J_o), ortama bağlı akım bileşeni (J_c) ve toplam akım (J_t) yoğunluğu bulunabilir.

$$J_o = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \cdot \frac{dE}{dt} = \epsilon \cdot \frac{E \cdot e^{i\omega t}}{dt} = i\omega\epsilon E \quad (4.32.a)$$

$$J_c = \sigma E \quad (4.32.b)$$

$$J_t = J_c + J_o = (\sigma + i\omega\epsilon) \cdot E \quad (4.32.c)$$

(4.28) denkleminde, yeriçinde (düşeyde) oluşacak yatay manyetik alan sınır koşulu altında $a_1 = a_0 + b_0$ ve $\eta_0 \gg \eta_1$ göz önüne alındığında ulaşılır.

$$\left(1 + \frac{b_0}{a_0}\right) = 1 + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_1} = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_1}$$

$$H_{1y}(z) = a_0 \cdot \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_1} \cdot e^{-ik_1 z} \cong 2a_0 \cdot e^{-ik_1 z} \quad (4.33)$$

Düşeyde ilerleyen manyetik ve elektrik alan arasındaki ilişki de (4.18) denklemi düzenlenerek $(\sigma_1 \gg i\omega\epsilon_1)$ kurulur.

$$E_{mx} = \frac{-1}{\sigma_1} \cdot \frac{\partial H_{1y}}{\partial z} \quad \text{ve} \quad H_{1y}(z) = 2a_0 \cdot e^{-ik_1 z}$$

$$E_{1x}(z) = 2a_0 \cdot \frac{ik_1}{\sigma_1} \cdot e^{-ik_1 z} \cong 2a_0 \cdot \eta_1 \cdot e^{-ik_1 z} = \eta_1 \cdot H_{1y} \quad (4.34)$$

Yeriçinde her iki bileşeninde derinlikle olan değişimi $e^{-i.k_1.z}$ ile verilmektedir. Bu durumda, (4.16) denklemindeki k eşitliği $\sigma_1 \gg i\omega\epsilon_1$ durumu için yeniden düzenlenebilir.

$$k = (-i\omega\mu_0\sigma_1)^{1/2} = (1-i) \cdot \left(\frac{\omega\mu_0\sigma_1}{2}\right)^{1/2} \quad (4.35)$$

$$e^{-ik_1 z} = e^{-(1+i) \cdot \left(\frac{\omega\mu_0\sigma_1}{2}\right)^{1/2} z} = e^{-(1+i) \cdot z/\delta_1} = e^{-z/\delta_1} \cdot e^{-iz/\delta_1} \quad (4.36)$$

(4.36) eşitliğinden, derine doğru ilerleyen VLF-EM düzlem dalganın kabuk derinliği (3.16 denkleminde benzer) bağıntısı bulunur ($w=2\pi f$, $\mu=4\pi \cdot 10^{-7}$ için).

$$\delta = \left(\frac{2}{\mu\sigma_1\omega}\right)^{1/2} \cong 500 \cdot \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2} \quad (4.37)$$

4.2 Tabakalı Ortamlar için VLF-EM Çözümleri

Yöntemin temelini oluşturan bağıntılar doğrultusunda tabakalı ortamlar için matematiksel tanımlar yapılmıştır. Yüzeysel empedansı ve buna bağlı olarak öz direnç ve evre eşitlikleri verilmiştir. Bu başlık altında iletken ve dirençli katman parametrelerine göre farklı katman modelleri için çözümleri verilmiştir.

4.2.1 İki Tabakalı Ortam için Temel Bağıntıları

Genel tanımlaması (3.23) denklemi ile verilen yüzeyde oluşan empedans bağıntısından, iki tabakalı ortam için de kurulur (Kaufman ve Keller, 1981).

$$Z_s = \frac{E_{0x}}{H_{0y}} \quad (4.38.a)$$

$$Z_s = \frac{E_{1x}}{H_{1y}} = \eta_1 \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2ik_1 h}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2ik_1 h}} \quad (4.38.b)$$

(4.16) ve (4.35) bağıntıları, aşağıda verilen tanımlamalar kullanarak empedans ifadesi yeniden düzenlenebilir.

$$k = (1-i) \cdot \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma_1}{2} \right)^{1/2} \quad \Rightarrow \quad e^{-2i(1-i) \cdot \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma_1}{2} \right)^{1/2} h} = e^{-2(i+1)h/\delta}$$

$$\eta_{12} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} - 1}{\sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} + 1} \quad (4.39)$$

$$Z_s = \eta_1 \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot 2h/\delta_1}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot 2h/\delta_1}} \quad (4.40)$$

(4.37) empedans denkleminin bağıntı olarak; görünür öz direnç (3.24) ve evre (3.25) ifadelerine ulaşılır.

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} \left| \eta_1 \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}} \right|^2 = \rho_1 \left| \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}} \right|^2$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \left| \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}} \right|^2 \quad (4.41.a)$$

$$\phi_\rho = \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{Im} \left(\eta_1 \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}} \right)}{\operatorname{Re} \left(\eta_1 \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-2(i+1)h/\delta}} \right)} \right] \quad (4.41.b)$$

İkinci katmanın görünür öz direnç ve evre fonksiyonuna olan etkisi de (4.41) denklemleri ile $\delta_1 / \delta_2 = (\rho_1 / \rho_2)^{1/2}$ eşitliği kullanılarak elde edilir.

$$\frac{\rho_a}{\rho_2} = \frac{\rho_a}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} = \left| \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}} \right| \quad (4.42.a)$$

$$\phi_\rho = \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{Im} \left[(1+i) \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}} \right]}{\operatorname{Re} \left[(1+i) \cdot \frac{1 - \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}}{1 + \eta_{12} \cdot e^{-(i+1) \cdot (2h/\delta_2) \cdot (\rho_2/\rho_1)^{1/2}}} \right]} \right] \quad (4.42.b)$$

(4.38) ve (4.39) denklemleri kullanılarak, empedans ifadesi tekrar düzenlenip üstel ifade yerine $\tanh(ik_1h)$ eşitliği yazılarak elde edilir.

$$\frac{Z_s}{\eta_1} = \frac{(\eta_1 + \eta_2) - (\eta_1 - \eta_2) \cdot e^{-2ik_1h}}{(\eta_1 + \eta_2) + (\eta_1 - \eta_2) \cdot e^{-2ik_1h}} = \frac{1 + \frac{\eta_1}{\eta_2} \left(\frac{1 - e^{-2ik_1h}}{1 + e^{-2ik_1h}} \right)}{\frac{\eta_1}{\eta_2} + \left(\frac{1 - e^{-2ik_1h}}{1 + e^{-2ik_1h}} \right)} \quad (4.43)$$

$$= \frac{1 + \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \tanh(ik_1h)}{\frac{\eta_1}{\eta_2} + \tanh(ik_1h)}$$

4.2.2 Çok Yüksek Dirençli Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu

Yüksek öz dirençli ortam üstünde bulunan iletken ince katmanın oluşturacağı empedans ifadesinde (4.40) denklemi kullanılır. Böylece ortamın, taban iletkenliği $\sigma_2=0$, $\eta_{12} = -1$ ve $|2ik_1h| \ll 1$ olacaktır. Bu koşullarda empedans, görünür öz direnç ve evre bağıntısı üstel ifadenin seriye açılımı $e^z = 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \dots$ ile elde edilir.

$$Z_s = \frac{1 + (1 - 2ik_1h)}{1 - (1 - 2ik_1h)} \cong \frac{\eta_1}{ik_1h} = \frac{1}{\sigma_1 \cdot h} \quad (4.44.a)$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{h}{\delta}\right)^2} \quad (4.44.b)$$

$$\phi_p = 0 \quad (4.44.c)$$

4.2.3 Çok İyi İletken Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu

Bu tip ortamda da (4.40) denkleminden yararlanarak elde edilir. Bu durumda (4.39) denkleminden ($\eta_2=0$) $\eta_{12} = 1$ olacaktır ki bu koşula göre empedans, görünür öz direnç ve evre bağıntısı bulunur.

$$Z_s \cong \frac{1 - (1 - 2ik_1h)}{1 + (1 - 2ik_1h)} \cong \eta_1 \cdot ik_1h = i\omega\mu h \quad (4.45.a)$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 2 \cdot \left(\frac{h}{\delta}\right)^2 \quad (4.45.b)$$

$$\phi_p = \tan^{-1}\left(\frac{Z_Q}{0}\right) = \tan^{-1}(\infty) = 90^\circ \quad (4.45.c)$$

4.2.4 Dirençli Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu

Bu tür ortamda ise (4.43) bağıntısı göz önüne alındığında, ik_1h değerinin çok küçük olması durumu $\tanh(ik_1h) \cong ik_1h$ sağlar. Bu koşulda; yeni empedans bağıntısı,

$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{k_2}{k_1}$, ince üst katman için $|k_2 \cdot ih| \ll 1$ sağlayacak ve kolaylık olması açısından

$\frac{\eta_1}{ik_1 h} = \frac{1}{\sigma_1 \cdot h} = \frac{1}{S}$, $Y(1-i) = \frac{1}{\eta_2}$ eşitlikleri kullanılarak elde edilir.

$$Z_s = \eta_1 \cdot \frac{k_1 + k_2 \cdot ik_1 h}{k_2 + ik_1^2 h} = \eta_1 \cdot \frac{k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot ih)}{k_2 + ik_1^2 h} = (\omega \mu) \cdot \frac{(1 + k_2 \cdot ih)}{k_2 + ik_1^2 h} \quad (4.46.a)$$

$$Z_s = (\omega \mu) \cdot \frac{1}{\frac{1}{\eta_2} + \frac{ik_1 h}{\eta_1}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_2} + S} = \frac{1}{Y(1-i) + S} = \frac{1}{(S + Y) - iY} = Z_1 + iZ_Q \quad (4.46.b)$$

Empedans bağıntısından, görünür özdirenç ve evre eşitlikleri de “S” ve “Y” ye bağlı olarak bulunur.

$$\frac{\rho_a}{\rho_2} = \frac{1}{\omega \mu} |Z_s|^2 = \frac{2}{1 + (1 + \frac{S}{Y})^2} \quad (4.46.c)$$

$$\phi_p = \tan^{-1} \left(\frac{Z_Q}{Z_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{Y}} \right) = \frac{Y}{Y + S} \quad (4.46.d)$$

4.2.5 İyi İletken Taban Üstü, İletken İnce Katman Durumu

Bu durumda (4.46.a) bağıntısında, iletken taban koşulu $|k_2| \gg ik_1^2 h$ olacağından empedans bağıntısı, görünür özdirenç ve evre eşitlikleri yeniden elde edilir.

$$Z_s = (\omega \mu) \cdot \frac{1 + ik_2 h}{k_2} = \eta_2 \cdot (1 + ik_2 h) = \eta_2 + i\omega \mu h \quad (4.47.a)$$

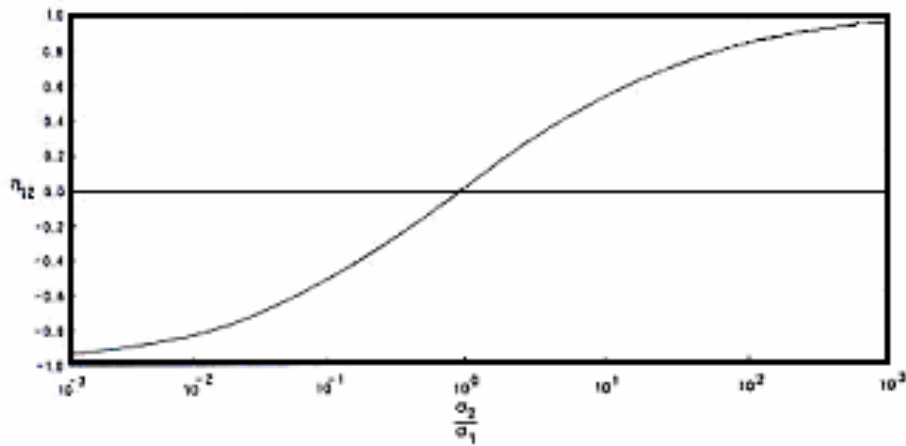
$$\frac{\rho_a}{\rho_2} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(1 + \frac{2h}{\delta_2} \right)^2 \right) \quad (4.47.b)$$

$$\phi_p = \tan^{-1} \left(1 + \frac{2h}{\delta_2} \right) \quad (4.47.c)$$

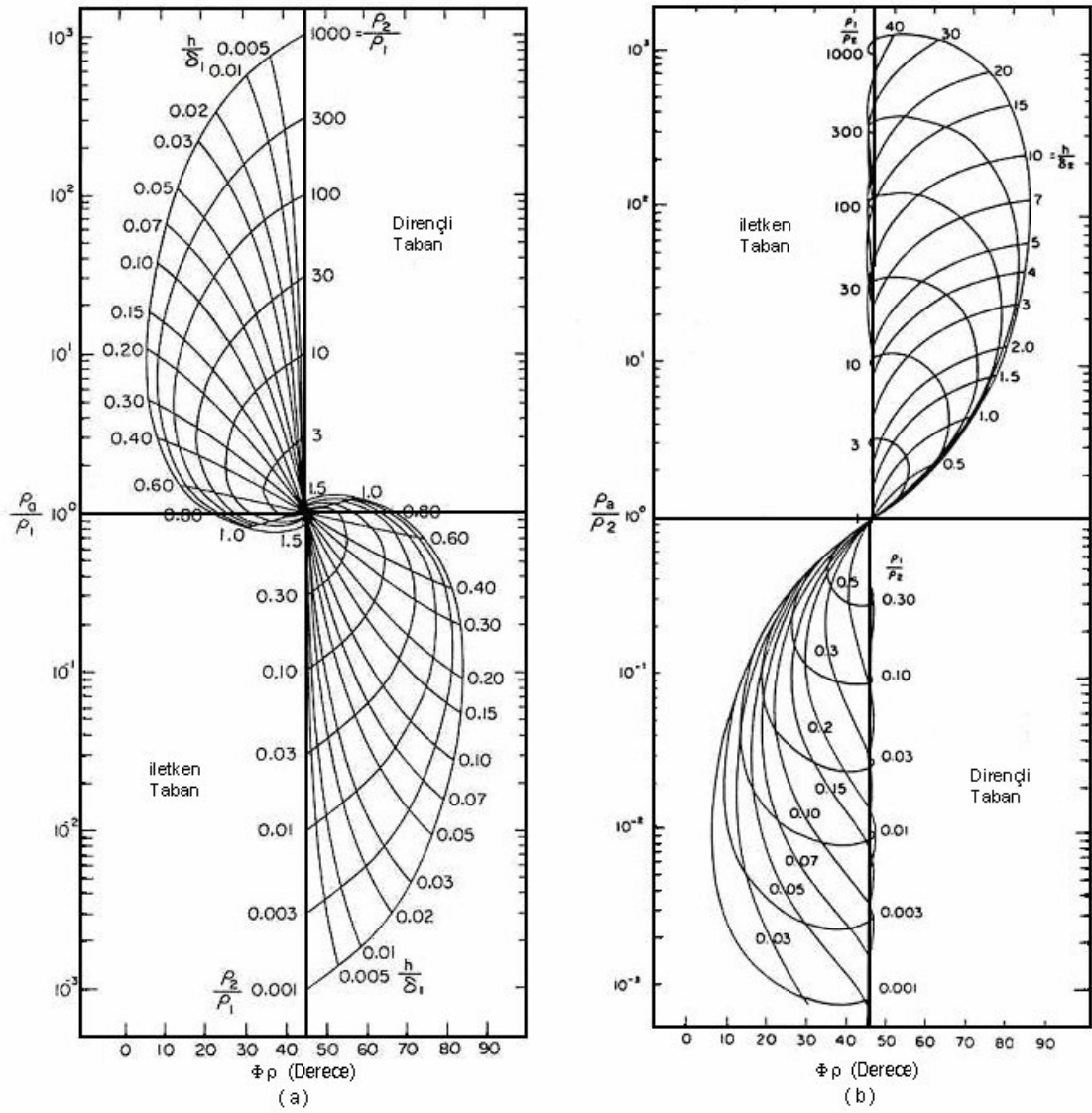
4.2.6 İki Tabakalı Ortam Diyagramı

4.2.1'den 4.2.5'e kadar başlıklarda verilen durumlar için elde edilen eşitlikler ortak anlamda grafiklenerek, ortam hakkında bilgi veren diyagramlar oluşturulur. Ortamı oluşturan katmanların η_{12} (4.39) ifadesinin, iletkenlik oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir (Şekil 4.2). η_{12} ifadesi -1 ile 1 değerleri arasındadır ki iletken ve dirençli ortamlar arasındaki iletkenlik değişimine bağlı farklılığı yansıtır.

Özdirençler ve kalınlığın etki derinliğine oranları, logaritmik görünür özdirencin, birinci katman özdirencine oranının ile evreye bağlı değişimi (Şekil 4.3.a) ve logaritmik görünür özdirencin, ikinci katman özdirencine bağlı değişimi (Şekil 4.3.b)'de grafikleri verilmiştir. Dirençli ve iletken taban ortam koşulları için 45° evre ekseninde değişmektedir. Katman özdirençleri oranı azaldıkça, kalınlık ve etki derinliği oranı da küçülecektir. İletken ve dirençli ortamların durumlarına bağlı olarakta görünür özdirenç ile ortam özdirenci oranı azalmakta veya artmaktadır. Görünür özdirencin, birinci ve ikinci katman özdirençlerine oranları için evre 45° ekseninde ters dönmeler görülecektir. Bu durum iletken ve dirençli ortamları tanımlamaktadır (McNeill ve Labson, 1991).



Şekil 4.2 İletim fark fonksiyonu grafiği (McNeill ve Labson, 1991).



Şekil 4.3 (a) Birinci katman (b) İkinci katman için öz direnç ve kalınlık oranlarına bağlı normalize edilmiş kompleks öz direnç, genlik ve faz diyagramları (McNeill ve Labson, 1991).

4.2.7 Tabakalı Ortamlar İçin Yineleme Fonksiyonu

Tabakalı ortamlar için yinelemeli empedans bağıntısına (4.38), (4.39) denklemleri kullanılarak ve üstel ifade $\tanh(ik_1h)$ olarak değiştirilerek ulaşılır. En alt tabaka empedansından, üste doğru yinelemeli olarak hesaplanır.

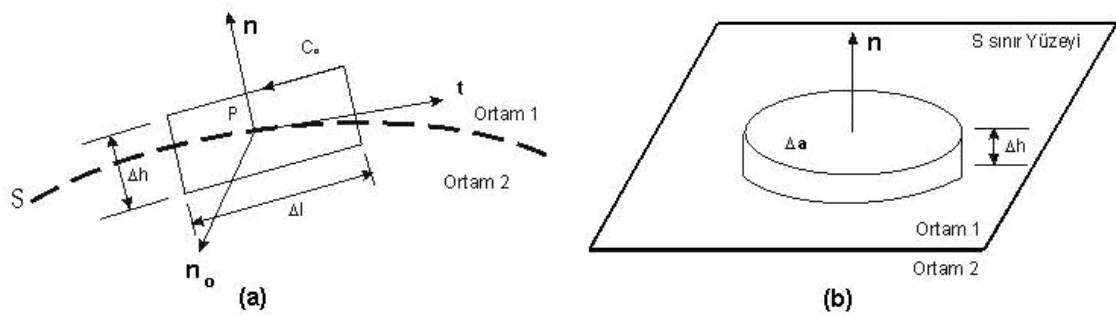
$$Z_s = \eta_1 \frac{\frac{\eta_1(1 - e^{-2ik_1h})}{\eta_2(1 + e^{-2ik_1h})} + 1}{\frac{\eta_1 + \eta_2(1 - e^{-2ik_1h})}{\eta_2(1 + e^{-2ik_1h})}} = \eta_1 \cdot \frac{\eta_2 + \eta_1 \left(\frac{e^{ik_1h} - e^{-ik_1h}}{e^{ik_1h} + e^{-ik_1h}} \right)}{\eta_1 + \eta_2 \left(\frac{e^{ik_1h} - e^{-ik_1h}}{e^{ik_1h} + e^{-ik_1h}} \right)}$$

$$\begin{aligned} Z_{s1} &= \eta_1 \cdot \frac{Z_{s2} + \eta_1 \cdot \tanh(ik_1h_1)}{\eta_1 + Z_{s2} \tanh(ik_1h_1)} \\ Z_{s2} &= \eta_2 \cdot \frac{Z_{s3} + \eta_2 \cdot \tanh(ik_2h_2)}{\eta_2 + Z_{s3} \tanh(ik_2h_2)} \\ Z_{s3} &= \eta_3 \cdot \frac{\eta_4 + \eta_3 \cdot \tanh(ik_3h_3)}{\eta_3 + \eta_4 \tanh(ik_3h_3)} \end{aligned} \quad (4.48)$$

(4.48) denkleminde, en alt tabaka için $h_3 = \infty$ ve $\tanh(ik_3h_3) = 1$ 'e eşit olacağından dolayı $Z_{s3} = \eta_3$ olacaktır.

4.3 Sınır Koşulları

Farklı özelliklere sahip ortamları ayıran ara kesit üzerinde; E, D, H ve B alanları sürekli olmayabilir. Bu durumda, alan vektörlerinin süreksizlik yüzeylerindeki davranışları sınır koşulları olarak tanımlanır. Alan vektörleri, iki farklı ortamın arakesitinde değişim gösterirler (Şeker ve Çerezci; 2000).



Şekil 4.4 İki ortam arakesitinde alan vektörleri (a) E ve H'nin teğetsel bileşenleri (b) B ve D'nin dik bileşenleri (Şeker ve Çerezci; 2000).

Şekil 4.4'de birinci ve ikinci ortamı ayıran sınır "S" ve sınır üzerinde bir "P" noktası düşünülür. "P" noktasındaki, "S" yüzeyine dik vektör "n", teğet vektör "t" dir. Bu noktada kenarları "n" ve "t" olan bir "C₀" çevresi alınır. "S" yüzeyinde

yüzeysel yük yoğunluğu ρ_s (C/m^2) ve bu yüzeye yayılmış yüklerden kaynaklanan bir akım, hacim yerine yüzey akımı olarak tabakanın en dışında ince bir katmandan akacaktır. Hacimsel akım dağılımını gösteren J (A/m^2) ile yüzeysel akım yoğunluğunu birbirinden ayırmak için K (A/m^2) “çizgisel akım yoğunluğu” tanımı kullanılır.

- Birinci Maxwell denklemini şekil 4.4 için düşünülürse “ C_o ” tarafından çevrelenen kapalı yüzey “ S_o ” için elektrik alan eşitliği bulunacaktır.

$$\oint_{C_o} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_{S_o} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_o da \quad (4.49)$$

“ S_o ” yüzeyine dik birim vektör $\mathbf{n}_o = t \times n$ ve teğet vektör “ t ” ile gösterilmektedir. “ C_o ” çevresi “ P ” noktasında çok küçültülürse “ S_o ” limit durumunda sifıra gidecek ve (4.49) denkleminin sağ tarafı sıfır olacaktır.

$$E_{t_1} \cdot \Delta l - E_{t_2} \cdot \Delta l = E_{t_1} - E_{t_2} = 0 \quad (4.50.a)$$

$$n \times (E_2 - E_1) = 0 \quad (4.50.b)$$

(4.50) bağıntısı arakesit yüzeyindeki elektrik alanın teğetsel bileşeninin sürekli olduğunu ifade etmektedir.

- İkinci Maxwell denklemi ile bu yaklaşım H 'in teğetsel bileşeni içinde uygulanır.

$$\oint_{C_o} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{S_o} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_o da + \frac{d}{dt} \int_{S_o} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}_o da \quad (4.51)$$

“ P ” noktasında “ C_o ” çevresinin eni sifıra yaklaşırken, limit durumunda (4.51) denkleminin sağındaki en son terim sıfır, soldaki ise $t \cdot (E_2 - E_1) \cdot \Delta l$ olacaktır.

$$t \cdot (H_1 - H_2) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta l} \frac{d}{dt} \int_{S_o} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_o da \quad (4.52)$$

Bu denklemde $t.(H_1 - H_2)$ 'nin, n_o yönünde çizgisel akım yoğunluğuna (K) eşit olduğu görülmektedir. Buradan “S_o” yüzeyine dik düzlem üzerindeki yüzeysel akım H'nin teğetsel bileşen ile ilişkisi bulunur.

$$n \times (H_2 - H_1) = K \quad (4.53)$$

Sınır yüzeyinde; H manyetik alan vektörünün teğetsel bileşenlerinin süreksizliği, yüzey üzerinde bir “P” noktasındaki çizgisel akım yoğunluğu kadar oluşacak ve K'nin yönü, süreksizlik yüzeyindeki manyetik alan şiddetinin yönüne bağlı olacaktır.

Farklı elektriksel özelliklere sahip ortamlarda, birincisi mükemmel iletkenlikte ise bu ortamda $E_1=0$ olur, birinci Maxwell denkleminde ancak $B_1=0$ şartında sağlanır.

$$n \times H_2 = K_1 \quad (4.54.a)$$

$$n \times (H_2 - H_1) = 0 \quad (4.54.b)$$

(4.54.a) denklemi $\sigma_1 \rightarrow \infty$ için mükemmel iletken yüzeyden akan akım ile iletken yüzeyin dışındaki alan arasındaki ilişkiyi gösterir. (4.54.b) denklemi eğer birinci ortam mükemmel iletken değilse akım, yüzey üzerinde sınırlı kalmaz. Bu durumda (σ_1, σ_2 sonlu), H'nin arakesit yüzeyindeki teğetsel bileşenleri süreklidir.

- Üçüncü Maxwell denkleminde faydalanarak, “C_o” çevresi “n” birim vektörü etrafında tam bir tur dönerse, oluşan silindirin yüzeyi Σ olarak gösterilir (Şekil 4.4).

$$\oint_{\Sigma} B \cdot n_0 da = 0 \quad (4.55)$$

İntegral sınırları tüm yüzeyler için alınır ve $\Delta h \rightarrow 0$ giderken silindirin yan yüzeyinin integrale katkısı azalarak sıfır olur. Böylece integral, B_{n_1} ve B_{n_2} arakesit yüzeyine dik bileşenlere bağlı olarak sonuca ulaşılır.

$$(B_{n_2} - B_{n_1}) \cdot \Delta a = 0 \quad (4.56.a)$$

$$n \cdot (B_2 - B_1) = 0 \quad (4.56.b)$$

İki farklı ortamın arakesitinde, B'nin dik bileşeninin sürekli olduğu sonucu çıkar.

• “S” yüzeyi boyunca, D elektriksel alan yoğunluğu için dördüncü Maxwell denkleminde alan hacim ilişkisi kurulabilir.

$$\oint_C \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a} = \int_V \rho dv \quad (4.57)$$

Silindir hacminin, giderek küçülmesi durumunda $\Delta h \rightarrow 0$ yan yüzeylerin, sol taraftaki integrale katkısı sıfır olur.

$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a} = (Dn_2 - Dn_1) \Delta a \quad (4.58)$$

Burada Δa taban alanı göstermektedir. Herhangi bir yüzey olması durumunda, ρ_s yüzeysel yük yoğunluğu da tanımlanır.

$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \int_V \rho dv = \rho_s \Delta a \quad (4.59)$$

(4.57) ve (4.58) denklemlerinden, sonuç eşitliklerine ulaşılır.

$$Dn_2 - Dn_1 = \rho_s \quad (4.60.a)$$

$$n \cdot (D_2 - D_1) = \rho_s \quad (4.60.b)$$

(4.60) denklemleri, D'nin sınır yüzeyindeki dik bileşeni, iki ortam arakesitindeki yüzeysel yük yoğunluğu kadar süreksizlik oluşturmaktadır.

Kısaca özetlersek; elektromanyetik alanların, farklı elektriksel özellikli ortamlar arası geçişlerinde, sınır koşulları olarak (4.50), (4.54), (4.56) ve (4.60) denklemleri ile verilen bağıntılar geçerlidir.

4.4 İki Boyutlu Tepki İşlevi için Düzlem EM Dalga Empedansı

Doğada, gerçek arazi koşulları her türlü karmaşık yapıyı içermektedir. Özellikle sığ aramacılık çalışmalarında bu tür düzensizlikler çoktur. Yanal süreksizlik gösteren her türlü jeolojik yapılar iki yada üç boyutlu olarak tanımlanır ve doğada çok sık karşılaşılır. Yeryüzüne paralel olarak uzanan her türlü yapı, elektromanyetik dalganın etki derinliğinden büyükse iki boyutlu olarak tanımlanır. İki boyutlu yapıların yer

modelinde, elektrik alan dişey ve yatay eksende değişirken, üç boyutlu yapılar için üç ana yönde değişmektedir.

4.4.1 İletkenlik ve Empedans Tensörü

Tek düze bir ortam için $\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E}$ ile tanımlanan ohm yasası, \mathbf{E} ve \mathbf{J} 'nin aynı doğrultuda olduğu ve σ 'nın skaler olduğunu göstermektedir. Yön bağımlı bir ortam için bu durum geçerli değildir ve bir tensör ile tanımlanır. Bu durumda \mathbf{E} ve \mathbf{J} artık aynı yönde değildir. Bu durumda ohm yasası dizey formunda ifade edilir (Kaikkonen, 1979).

$$\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{xx} & \delta_{xy} & \delta_{xz} \\ \delta_{yx} & \delta_{yy} & \delta_{yz} \\ \delta_{zx} & \delta_{zy} & \delta_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (4.61)$$

(4.61) denklemini bir noktadaki akım yoğunluğunun tanımlamak için dokuz iletkenlik değerinin gerektiğini göstermektedir. İletkenliğin sadece derinlik ile değil, yatay yönde de değiştii ortamlarda elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin ve buna bağlı empedans değişimleri tensör olarak ifade edilir.

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{H} \quad (4.62)$$

Bu duruma göre x ve y yönündeki elektrik alanları bulunur.

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y \quad (4.63.a)$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y \quad (4.63.b)$$

Tekdüze, yön bağımsız, yarı sonsuz ortam için Cagniard bağıntısına göre yönlere bağlı empedans eşitlikleri yazılır (Cagniard, 1953).

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \quad \text{ve} \quad Z_{xy} = -Z_{yx} \quad (4.64)$$

Yön bağımlı ortamlar (iki boyutlu yer modeli) için ölçüm eksenlerinden biri yapının doğrultusunda ise empedanslar değişecektir.

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \quad \text{ve} \quad Z_{xy} \neq -Z_{yx} \quad (4.65)$$

(4.64) ve (4.65) denklemlerinden, bir ortamda aynı noktadaki yöne bağlı ρ_{ax} ve ρ_{ay} değerleri farklı olacaktır. Bu durumda; TM (E-dik) modu ve TE (E-paralel) modu için iki ayrı öz direnç eşitlikleri bulunacaktır.

$$\rho_{ax} = \frac{1}{\omega\mu} \cdot \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (4.66.a)$$

$$\rho_{ay} = \frac{1}{\omega\mu} \cdot \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (4.66.b)$$

4.4.2 İki Boyutlu Ortamlarda Maxwell Denklemleri ve Dalga Denklemi

İki boyutlu ortamların modellenmesi için elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin ilişkileri bilinmelidir. Bir boyutlu ortamlarda, yer iletkenliği sadece derinliğin bir fonksiyonudur. Bu durumda iletkenlik derinliğin ve yanal değişimin etkisindedir. Elektrik alanın yapıya paralel (TE) modu için $\mathbf{E}(0, E_y, 0)$ ve $\mathbf{H}(H_x, 0, H_z)$; yapıya dik (TM) modu için $\mathbf{H}(0, H_y, 0)$ ve $\mathbf{E}(E_x, 0, E_z)$ olacaktır (Şekil 3.4). Zaman ortamı Maxwell denklemleri düzenlenirse her iki mod için tablo 4.1' deki denklemlere ulaşılır.

Alanlar arasındaki ilişki kurulduktan sonra ortamdaki dalga yayılım bağıntıları kurulur. TE modu için ikinci Maxwell denklemindeki H_x ve H_y , birinci Maxwell denkleminde yerine konulur.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = k^2 E_y \quad (4.67)$$

Aynı işlemler, TM modu içinde yapılarak elde edilir.

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = k^2 H_y \quad (4.68)$$

Tablo 4.1 İki boyutlu ortamlar için Maxwell denklemleri.

Maxwell Denklem No	TE Modu	TM Modu
1	$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y$	$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x$ $\frac{\partial H_y}{\partial x} = \sigma E_z$
2	$\frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu H_x$ $\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega\mu H_z$	$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\omega\mu H_y$
3	$\frac{\partial H_x}{\partial x} - \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$	$\nabla \cdot H_y = 0$
4	$\nabla \cdot E_y = 0$	$\frac{\partial(\sigma E_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma E_z)}{\partial z} = 0$

(4.67) ve (4.68) denklemleri dalga denklemleridir. TE modu için E_y ; TM için H_y çözülebilirse, diğer denklemlerde kullanılarak H_x, H_z ve E_x, E_z bileşenlerine ulaşılabilir. Bu denklemlerin analitik tam çözümleri 2B herhangi bir modelde yapılamamaktadır. Ancak bir kaç özel model için TM modu çözümleri vardır. Düşey fay (d'Erceville ve Kunetz, 1962) ve dayk modeli (Rankin, 1962) için çözümleri örnek olarak verilebilir.

Yeraltının jeolojik ve geometrik yapısının çok karmaşık olması, sınır koşullarının değişimi ile analitik çözümlemenin yerine modeli temsil eden yaklaşık sayısal çözüm yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir. Analitik çözümün bir dezavantajı çözümü yapılmış modlar için süreksizlik yakınlarında yaklaşım yapamamasıdır. TM modunun yapı sınırlarına ve TE modunun özdirence karşı daha duyarlı olduğu

görülmüştür. İki ve üç boyutlu değerlendirmelerde TE ve TM modlarının jeolojik yapılara duyarlılığı önemli bir konudur. Yüksek öz dirençli horst yapılı, yatay tabakalanmalı ortamlarda TM modu, TE moduna göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Derin horst yapısında ise TE modu, TM moduna göre daha duyarlıdır. Sonuç olarak; TE modu derin yapılara, TM modu sığ yapılara karşı daha duyarlı olduğu gösterilmiştir (Berdichevsky ve diğer., 1998; Wannamaker ve diğer., 1984-b).

Modelleme için kullanılan sayısal yöntemlerin temelini tekdüze hücrelerden oluşmuş bir ağ sistemi ile modelin tanımlanması oluşturur. Herbir hücrenin tekdüze elektrik ve manyetik alanları bulunarak, sınır koşulları ile komşu hücreleri bağlayan düğüm noktalarında ki alan değerleri sıra ile hesaplanır. Bu işlem, model tanımlanmasının sonuna kadar yapılarak yeryüzü tepkisi bulunur. Sonuç olarak; yeryüzü alan oranlarından empedans değerlerine ulaşılır.

Elektromanyetik model tepkilerinin bulunmasında, farklı yöntemler yayınlanmıştır. Sonlu farklar (Neves, 1957; Newman ve Alumbaugh, 1995; Wang ve Fang, 2001), sonlu elemanlar (Coggon, 1971; Wannamaker ve diğer., 1987), ışın izleme (Harrison, 1970; Nekut, 1994; Lee ve diğer., 2002), İntegral eşitliği yöntemi (Parry, 1971; Ting ve Hohmann, 1981; Wannamaker ve diğer., 1984-a; Mackie ve diğer., 1993), Rayleigh FFT (Jiracek ve diğer., 1989) yöntemleri örnek verilebilir.

4.5 Sonlu Farklar Sayısal Modellemesi

Fiziksel sistemleri tanımlayan bir çok diferansiyel denklemin çözümünde bu yöntem uygulanmaktadır. Helmholtz eşitlikleri olarak bilinen (4.67) ve (4.68) denklemleri için yöntem elektromanyetik sistemlere uyarlanmıştır. İlk olarak, bu yöntemi jeofizik elektromanyetik sistemlere Neves (1957) uygulamıştır.

4.5.1 Sonlu Farklar Yöntemi Temel Bağlantıları

Yöntemin temelinde Taylor Serisine açılan bir $P(x)$ fonksiyonu ele alınır.

$$P(x+h) = P(x) + hP'(x) + \frac{h^2}{2!}P''(x) + \frac{h^3}{3!}P'''(x) + \dots \quad (4.69)$$

(4.69) denkleminde; h , x eksenini boyunca örnekleme aralığı ve (') işareti türev derecesidir. Şimdi pozitif ve negatif yönde açılmış olan Taylor serisinden yüksek dereceden ifadelerin gözardı edilmesi ile birinci türev eşitliklerine ulaşılır.

$$\frac{\partial P(x)}{\partial x} = \frac{P(x+h) - P(x)}{h} \quad (4.70.a)$$

$$\frac{\partial P(x)}{\partial x} = \frac{P(x) - P(x-h)}{h} \quad (4.70.b)$$

(4.70) denklemleri Taylor serisinin açılımına göre ileri ve geri fark yaklaşımı olarak bilinir. Her iki ifade de yüksek dereceli terimlerin gözardı edilmeleri bir hata getirecektir. Bu nedenle; iki yönlü Taylor serisinin farkından yola çıkılıp bulunacak türev ifadesinde hata miktarı azaltılacaktır.

$$\frac{\partial P(x)}{\partial x} = \frac{P(x+h) - P(x-h)}{2h} \quad (4.71)$$

Aynı seri yaklaşımı ile yüksek dereceden terimler gözardı edilmesi ile $P(x)$ fonksiyonunun ikinci türev eşitliği bulunur.

$$\frac{\partial^2 P(x)}{\partial x^2} = \frac{P(x+h) + P(x-h) - 2P(x)}{h^2} \quad (4.72)$$

Birinci ve ikinci türev bağıntıları indislere göre eşitlikleri düzenlenebilir.

$$\left. \frac{\partial P(x)}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2h} \quad (4.73.a)$$

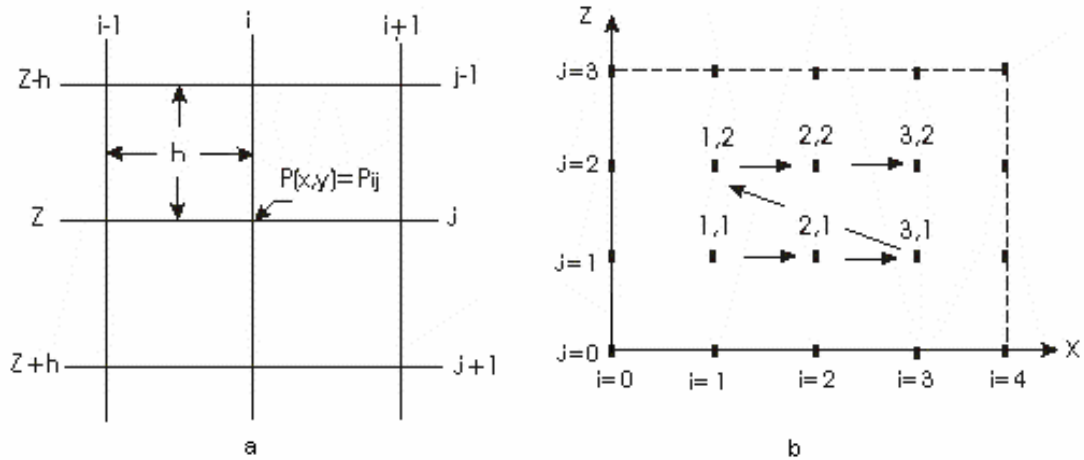
$$\left. \frac{\partial^2 P(x)}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} = \frac{P_{i+1} + P_{i-1} - 2P_i}{h^2} \quad (4.73.b)$$

(4.73) bağıntıları, elektromanyetik dalga denkleminde de uygulanır.

$$(\nabla^2 - k^2)P(x, z) = 0 \quad (4.74.a)$$

$$\frac{\partial^2 P(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, z)}{\partial z^2} - k^2 P(x, z) = 0 \quad (4.74.b)$$

(4.74) denklemlerinde $P(x, z)$; (4.67- 68) Helmholtz denklemlerinde TE modu için E_y , TM modu için H_y olarak alınır.



Şekil 4.5 a) Sonlu farklar ağı b) Sonlu farklar için bilinmeyenler şeması (Patra, Mallick, 1980)

Sonlu farklar için ağlara bölünmüş uzaya karşılık gelen Helmholtz denklemi düzenlenebilir (Şekil 4.5.a). $P_{i,j}$, ağdaki dört düğüm noktası ile ilişkilidir.

$$\frac{P_{i,j-1} + P_{i,j+1} + P_{i-1,j} + P_{i+1,j} - 4P_{i,j}}{h^2} + k^2 P_{i,j} = 0 \quad (4.75.a)$$

$$P_{i,j-1} + P_{i,j+1} + P_{i-1,j} + P_{i+1,j} - P_{i,j}(h^2 k^2 - 4) = 0 \quad (4.75.b)$$

(4.75.b) bağıntısı ile uzayın her düğüm noktasındaki alan değeri hesaplanır. Şekil 4.5.b'de verilen örnek ağ sistemi için bağıntının her düğüm noktasına uygulanması ile altı farklı difransiyel denklemin kullanıldığı bir denklem takımı oluşur. Bu denklem takımı dizey formunda yazılabilir. Dizey eşitliğinin çözülmesi ile sınır değerleri bilinen bir bölge içindeki noktaların alan değerleri hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} (h^2k^2 - 4) & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & (h^2k^2 - 4) & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & (h^2k^2 - 4) & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & (h^2k^2 - 4) & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & (h^2k^2 - 4) & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & (h^2k^2 - 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{31} \\ P_{12} \\ P_{22} \\ P_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{10} + P_{01} \\ P_{20} \\ P_{30} + P_{41} \\ P_{02} + P_{13} \\ P_{23} \\ P_{33} + P_{42} \end{bmatrix} \quad (4.76.a)$$

$$A.X = B \quad (4.76.b)$$

Şekil 4.5’de örnek verilen ağ için x-yönünde N, z-yönünde M tanımlandığından, dizeyin boyutu, $NM=N \times M=6$ ’dır. Dizey eşitliği, doğrusal bir denklemdir (4.76.b);

A = $NM \times NM$ boyutlu düğüm noktalarına bağlı katsayı dizeyi,

X = $NM \times 1$ boyutlu bilinmeyen alan değerlerini içeren sütun vektörü,

B = $NM \times 1$ boyutlu sınır koşullarından hesaplanan sütun vektörü,

olarak tanımlanır. A dizeyi beş köşegenden oluşur. Şekil 4.5’de verildiği gibi soldan sağa alındığından ana köşegene, son köşegen $N=3$ kadar uzaktadır.

4.5.2 Dizey Çözüm Teknikleri

İki boyutlu herhangi bir modelin tepkisi, ağ sistemi ile örülü ve sınır koşulları tanımlanmış dizey formunun çözümü ile bulunur. (4.76) denkleminin çözümü için doğrudan ve yinelemeli yöntemler kullanılır. Doğrudan çözümler, yinelemeli yöntemlere göre daha duyarlı sonuçlar vermektedir (Cerv ve Segent, 1982). Blok eliminasyonu, Gaussian eliminasyonu (Wannamaker ve diğer., 1987) doğrudan çözüm ve Gauss-seidel (Weaver, 1994) yinelemeli çözüm yöntemlerine örnektir. Sparse aritmetiği yöntemi ile dizeyde sıfırdan farklı değerler ve yerleri hafızada tutulur. Sıfır değerleri işleme sokulmaz ve bakışık dizey olduğundan çözüm hızı arttırılır (Dongarra ve diğer., 1979).

4.5.3 Sonlu Farklar için Sınır Koşulları

Sonlu farklar ağının kenarlarında oluşan **E**, **H** alanlarının bulunmasında çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kenarlarda asimtotik ve yüzeyde integral sınır koşullunu kullanmak bunlardan birisidir (Weaver ve Brewitt, 1978). İntegral sınır koşulu; TE modu için yüzeye fazladan hücre eklenmesini gerektirmez ve hücre ağı daha küçük

boyuttur. Genel düzey denkleminin, katsayı düzeyinin bakışıklığı bozulmakta ve çözümü yavaşlamaktadır (Weaver, 1994).

İzleyen sınır koşuluna göre, alt ve üst sınırlarda alanlar sabit alınıp, kenarlarda ise tabakalı ortam çözümüne göre bulunmaktadır (DeLugao ve diğer., 1997). Köşelerdeki düğüm noktalarında bir boyutlu ortam çözümlerinin aritmetik ortalaması alınır. Bu durum, köşe alanlarının sıfıra yakın değerlerde uzatılmasını gerektirir.

Çözümlemelerde kullanılan sınır değerleri bu koşullar kullanılarak bulunmuştur. Kenar sınır koşulları, tabakalı ortam çözümlerine bağlı bulunmuştur. Köşeler ise kenar sınır değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak tanımlanmıştır.

4.5.4 Sonlu Farklar Ağının Tasarlanması

Sonlu farklar kullanılırken öncelikle çözüm bölgesinin tanımlanması gerekir. Çözüm alanı, kendi içerisinde ayrıklaştırılarak sonlu farklar ağı düzenlenir. Ağ tasarımı; algoritmaların doğru çalışmasında önemlidir. Bu nedenle dikkat edilmesi gereken bazı koşullar vardır (Weaver, 1994).

- İki yapı arasındaki uzaklık etkin derinliğin iki katı ve arada kalan düğüm noktalarının birbirlerine olan uzaklıkları $\frac{1}{4}$ 'ünden fazla olmamalıdır.
- İlk ve son düşey grid, en yakın özdirenç sınırından enaz etkin derinliğin üç katı olmalıdır. Etkin derinlik en büyük özdirençli yapının derinliğidir.
- Özdirenç sınırına yakın komşu düğüm noktaları arası yaklaşık eşit olmalıdır. Süreksizliğin iki tarafında da bu aralıklar eşit olmalıdır.
- Model içerisinde, düğüm noktaları arasındaki mesafeler küçük aralıklar ile artırılmalı veya azaltılmalıdır. Birbirini izleyen düğüm noktaları arasındaki uzaklıklar farkı, küçük olan aralığın iki katından az olmalıdır.

Bu koşullar göz önünde tutularak, tanımlanan ağ içerisindeki gridler ve düğüm noktaları sıralanarak numaralandırılır. Gridler düğüm noktalarında kesişir ve $M \times N$ adet noktada E ve H alan değerleri hesaplanır. Sınır koşullarının uygulanacağı son

düğüm noktaları için ağ sınırlarına birer hücre eklenir. Bu noktalardaki E ve H alan değerleri sınır koşullarından hesaplanır.

4.6 VLF-EM Yöntemi Birincil Alan (H_p) İndirgemesi

Verici sistemlerinin yaydığı alanlar, uzak mesafelerde de etkilerini gösterirler. Bölüm üç'te vericilerin aktif enerji alanları şekiller ile verilmiştir. Uzak mesafelere ulaşan birincil manyetik alan üzerinde, dış enerji birikimi oluşarak gürültü etkisi yapmaktadır. Yöntemin temel ilkeleri önceki bölümlerde verilmiştir. Bu ilkelerin en önemlisi; birincil alanın sabit olduğu kabul edilmesidir. İkincil alanın genliğine, birincil alan şiddeti doğrudan etkilidir. Değişken enerji birikimi; birincil alanın, yer modelinde oluşturacağı ikincil alan genliklerini gürültü oranına bağlı olarak bozmaktadır.

Yöntem; gerçel ve sanal bileşenlere, ikincil alan bileşenlerinin, birincil alan ile toplam etkinin yüzdelik oranını alarak ulaşır. Bu nedenle; ölçülen oransal bileşenler, gürültülü alanların etkisinden kurtulmaktadır. Gürültülü birincil alandan etkilenen toplam (H_T) alanın, hilbert dönüşümü ile ulaşılan karmaşık gradyentleri hatalar içermektedir. Bu nedenle birincil alanın ve buna bağlı ikincil alan bileşenleri bu etkilerden kurtulması gerekir. Sığ araştırmalarda, ölçülen bileşen değerleri küçük aralıklarda değiştiğinden, değerlendirme ve yorumlama adımlarında bu düzeltmelerin yapılması çok önemlidir. Aksi durumda; gürültülü H_p alana ait, H_s ve H_T alan genlikleri de gürültü oranına bağlı değiştiğinden, hesaplanan görünür öz direnç değerlerinde yalancı belirtiler verecektir. Önerilen yöntem sonucu; gürültünün gün boyu değişimini veren indirgeme oranının, ölçülen verilere uygulanması ile sabit alan tepkisine ulaşıldığından yalancı belirtilerden kurtulacaktır.

4.6.1 VLF-EM Yöntemi Alan Tanımları

Evre diyagramına (Şekil 3.3) dikkate alınarak; EM alanları arasında trigonometrik eşitlikler kullanılıp, H_p ve H_s alanlarının bağıntıları oluşturulur. İkincil alan eşitliği, (3.20) bağıntısı da kullanılarak, H_T alana bağlı yazılır (4.77).

$$H_s = \frac{H_T \cdot \sin \alpha}{\cos \phi} \quad (4.77)$$

Hp alanın; $\text{Re}\{H_s\}$ ve $\text{Im}\{H_s\}$ değerleri kullanılarak, iki ayrı eşitliği kurulur (4.78.a-b). Bu denklemlerden hesaplanan, Hp alan değerleri, herhangi bir ölçüm sorunu yoksa aynı değerlerde çıkmalıdır.

$$H_p = H_s \cdot \cos \phi \cdot \left(1 + \frac{\%100}{\text{Re}\{H_s\}} \right) \quad (4.78.a)$$

$$H_p = H_s \cdot \left(\frac{\%100}{\text{Im}\{H_s\}} \cdot \sin \phi + \cos \phi \right) \quad (4.78.b)$$

4.6.2 Birincil Manyetik Alan İndirgeme Değeri Oranı

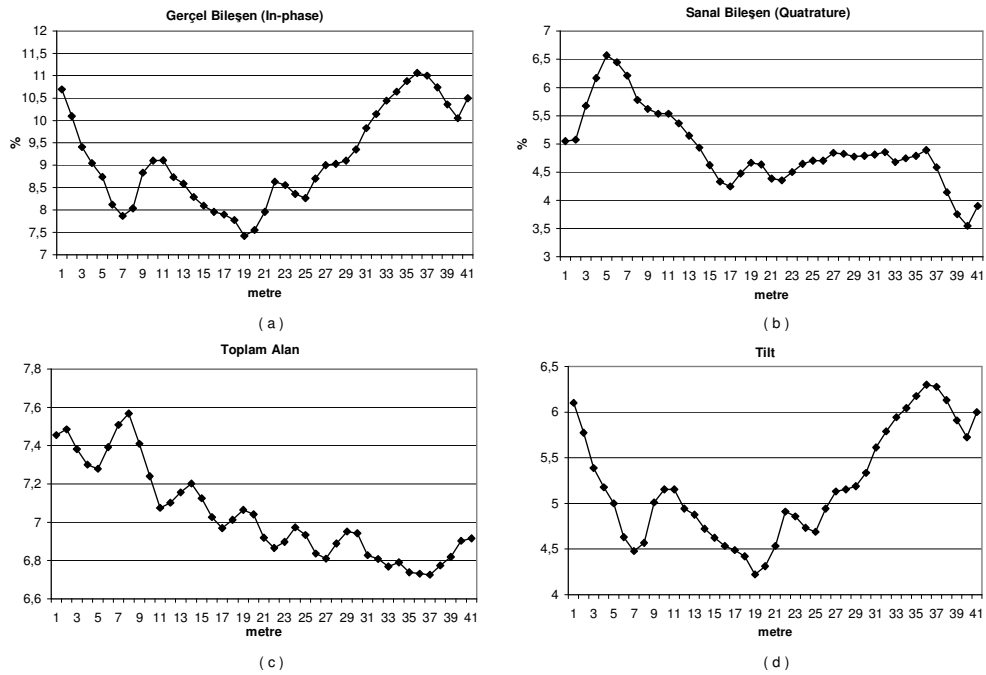
Bölüm üç ve dört'te verilen matematiksel ifadeler, birincil manyetik alanın sabit formu için yazılmıştır. Zamana ve mesafeye bağlı olarak değişen gürültü seviyelerinin bu ifadelere eklenmesi olanaksızdır. Çalışma alanında, manyetik alanın o an için gürültü miktarı her noktada değişken seviyede olacaktır. Bu yüzden bütün bileşenlerde bu etki oranını yüzdelik olarak tanımlamak ve birincil alanı sabit seviyeye indirmek gerekir.

Verici istasyonlarının maksimum güç seviyeleri bilinmektedir. Gerçekte ise çok özel durumlar dışında istasyonlar en yüksek güç seviyelerinde çalıştırılmazlar yada belli gün ve saatte yayındadırlar. Bu durum; bölge ve zaman farklılığında frekansların sabit güç seviyesinde olmadıklarını açıklar. (4.78) denklemleri ile verilen birincil alan şiddetinin profil boyunca hesaplanmış değerlerinin ortalaması, indirgeme değeri olarak alınacaktır. Çalışma bölgesinde eğer birden fazla profilde çalışılmış ise gün boyu alınan verilerin ortalamasına bağlı olarak indirgeme işlemi yapılmalıdır. Böylece çalışma alanı, bütünü ile sabit indirgenme değerindeki Hp alan etkisinde olacak ve bu alan içinde kalmış yapının, ikincil alan etkisi de düzeltilmiş olacaktır. Birincil alanın, indirgeme değeri ve bu değere bağlı profilin ölçüm noktalarına ait indirgeme oranı tanımlanır.

$$\frac{\sum_{i=1}^N H_{P_i}}{N} = H_{P_{\text{indirgeme}}} \quad (\text{İndirgeme Değeri, } N=\text{Veri Sayısı}) \quad (4.79.a)$$

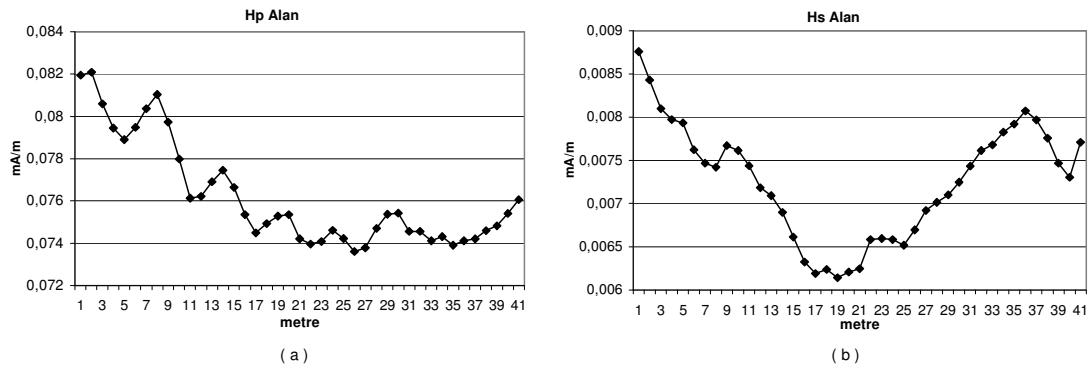
$$\frac{H_{P_{\text{indirgeme}}} - H_{P_{\text{ölçülen}}}}{H_{P_{\text{indirgeme}}}} = \% \text{ İndirgeme Oranı} \quad (4.79.b)$$

(4.79.b)'de verilen indirgeme oranı, hesaplanan H_s ve H_T alanları ile çarpılarak, bozucu etkilerden kurtulunur. Sabit H_p alan içinde alınmış, H_s ve H_T alan değerlerine ulaşılır. Düzeltilmiş alan değerlerinden, bileşenler hesaplandığında sabit alanın tepkisi bulunur. İndirgenmiş seviye bileşen değerlerinin, ölçüm sistemindeki gibi yüzdeler oranları alındığında aynı ölçüm değerlerini vermelidir. Eğer, yakın sonuçlara ulaşamıyor ise ölçüm veya operatör hatalarından kaynaklanan sorunlar vardır ve ölçüm tekrarlanmalıdır.



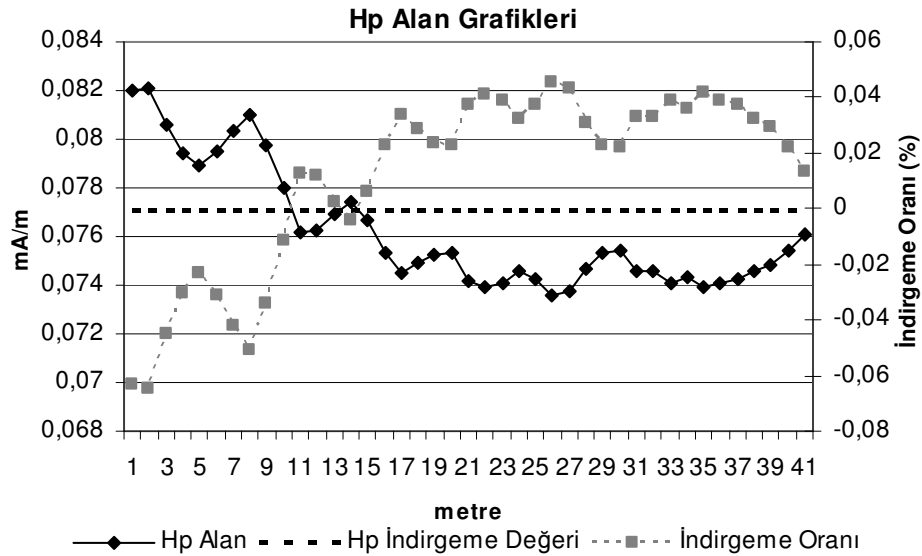
Şekil 4.6 Örnek profil ölçüsü; (a) gerçel (in-phase) bileşen, (b) sanal (quadrature) Bileşen, (c) toplam alan (d) tilt açısı değişim grafikleri.

Bu durumu bir örnek veri üzerinde gösterelim. Şekil 4.6.a-b-c-d'de bir profil üzerinde alınmış, hiçbir işleme tutulmamış VLF-EM verilerin gerçel, sanal, toplam alan ve tilt açısı grafikleri verilmiştir. Profil boyunca alınmış olan ölçüm sonuçlarından (4.77) ve (4.78) denklemleri kullanılarak H_p ve H_s alan değişimi hesaplanmıştır (Şekil 4.7.a-b).



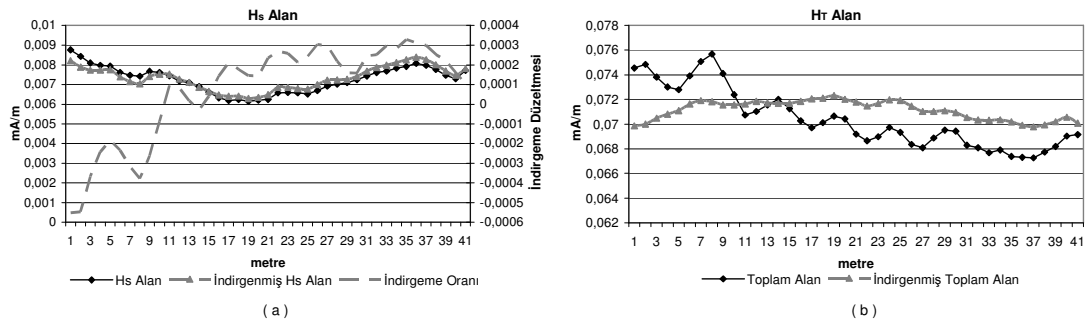
Şekil 4.7 Örnek profil ölçüsünden hesaplanan; (a) Hp alan, (b) Hs alan değişim grafikleri.

Profile ait Hp alan değişiminin (4.79) bağıntıları ile sabit alan değeri hesaplanmış, indirgeme değeri oranı hata miktarı olarak grafiklenmiştir (Şekil 4.8). Örnek profile ait $H_{p\text{indirgeme}} = 0,077104 \text{ mA/m}$ olarak bulunmuştur.



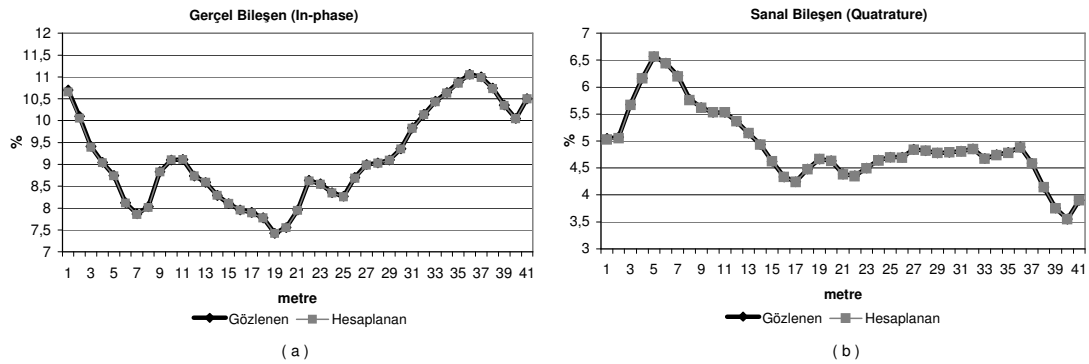
Şekil 4.8 Örnek profile ölçüsü hesaplanan; Hp alan, indirgeme değeri ve sabit Hp alana göre indirgeme oranı değişimi.

Sabit Hp alan değeri için Hs ve H_T alan değişimleri hesaplanmıştır. İndirgeme değerine bağlı değişim oranı, ikinci alan değişimi ile birinci alan etkisinin de girdiği toplam alanda daha güçlü görülmektedir. Değerlendirme aşamasında ölçülen değerler yerine indirgenmiş toplam alan değerlerinin kullanılması daha doğru olacaktır. Eğer ölçüm sırasında olabilecek herhangi bir hata söz konusu değilse, ölçülen bileşen değerleri ile indirgeme işlemi sonucu hesaplanan bileşen değerleri çok küçük hata sınırları içerisinde uyumlu olmalıdır.



Şekil 4.9 Örnek profil ölçüsü hesaplanan; (a) Hs alan, (b) H_T alan düzeltilmiş değişim grafikleri.

Hesaplamalar sonucunda hata oranı çok yüksek çıkıyorsa, ölçüm hatası (operatör hatası, ölçüm modu ayarlama hatası, atmosferik koşullar vs.) vardır ve tekrarlanmalıdır. Uygulanan yöntem aynı zamanda ölçüm kalitesini denetleyen bir mekanizmadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Örnek profil ölçüsü; gözlenen ve hesaplanan (a) Gerçek bileşen (in-phase), (b) Sanal Bileşen (quatrature) değişim grafikleri.

Gözlenen ile hesaplanan veriler arasındaki RMS hata (4.80) denklemi ve iki seri arasındaki R_{xy} ilişki katsayısı (4.81) ile hesaplanır.

$$RMS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \{f(x_i)_{\text{gözlenen}} - f(x_i)_{\text{hesaplanan}}\}^2}}{N} \quad (4.80)$$

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N \{(f(x_i)_{\text{göz}} - f(x_a)_{\text{göz}}) \cdot (f(y_i)_{\text{hes}} - f(y_a)_{\text{hes}})\}^2}{N \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \{f(x_i)_{\text{göz}} - f(x_a)_{\text{göz}}\}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \{f(y_i)_{\text{hes}} - f(y_a)_{\text{hes}}\}^2}} \quad (4.81)$$

Örnek profilin; Gerçel bileşen (in-phase) hata sınırı RMS = 0,0025 ve sanal bileşen (quadrature) için RMS = 0,0013 olarak bulunmuştur. Gözlenen ile hesaplanan arasındaki ilişki katsayısı ise $R_{xy} (Inp.) = 0,999962$ ve $R_{xy} (quat.) = 0,999971$ hesaplanmıştır. İki bileşen içinde, ilişkinin %100' lük uyumu örnek profil için iyi kalitede ölçme işleminin yapıldığı göstermektedir.

4.7 VLF-EM Yöntemi Görünür Özdirenç Tanımı

Birinci Maxwell denkleminde (3.1); iki boyutlu ortamda, düşey manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti ile yatay elektrik alan şiddeti arasındaki eşitlikler verilebilir (4.82.a-b).

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (4.82.a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z \quad (4.82.b)$$

(4.82.b) denkleminin her iki tarafı H_y yatay manyetik alana bölünürse, düşey manyetik alanın, yatay manyetik alana değişim oranından y doğrultusundaki Z_{xy} değişim oranına ulaşılır (4.83).

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E_x}{H_y} \right) = i\omega\mu \frac{H_z}{H_y} = \frac{\partial Z_{xy}}{\partial y} \quad (4.83)$$

Tekdüze ortamların empedans eşitliğinden (3.23), yeryüzünde ($z = 0$) ölçülen bir noktadaki manyetik alanlar oranı (Chouteau ve diğer., 1996);

$$i\omega\mu \frac{H_z}{H_y} = (i\omega\mu)^{1/2} \cdot \frac{\partial(\rho^{1/2})}{\partial y} \quad (4.84.a)$$

$$(i\omega\mu)^{1/2} \frac{H_z}{H_y} = \frac{\partial(\rho^{1/2})}{\partial y} \quad (4.84.b)$$

ile tanımlanır. (4.84.b) bağıntısını VLF yüzeyinde pozitif düşey manyetik alanına göre integrasyon tanımı da yapılabilir (4.85).

$$\rho^{1/2} \Big|_y - \rho^{1/2} \Big|_0 = -(i\omega\mu_0)^{1/2} \int_0^y \frac{H_z}{H_y} dy \quad (4.85)$$

Veri grubu, Δy örneklemedeki integrasyonu, toplam şeklinde yazılabilir (4.86.a).

$$(\rho_{j+1/2})^{1/2} = -(i\omega\mu_0)^{1/2} \sum_{k=1}^j \left(\frac{H_z}{H_y}\right)_k \cdot \Delta y + (\rho_{j-1/2})^{1/2} \quad (4.86.a)$$

$$x_t = \sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot x_{t-j} + e_t \quad (4.86.b)$$

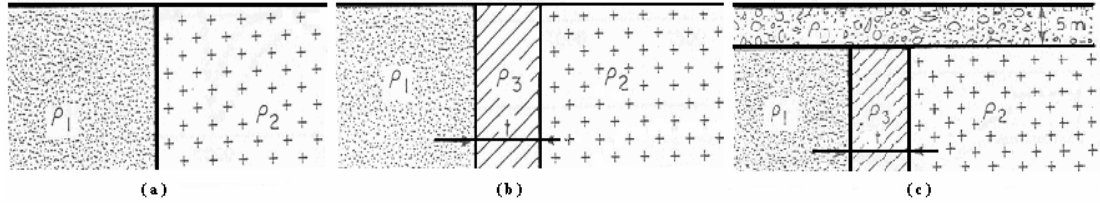
(4.86.a) denklemi, (4.86.b) ile tanımlanan otoregresif (önkestirim) süzgeç tanımına uymaktadır. Süzgeç incelendiğinde verinin önceki değerlerinin, α_j ile evrişimi sonucu bulunan değerdir ki hatalar içerir. Bu nedenle, e_t 'nin eklenmesi ile t anındaki gerçek x_t 'ye ulaşılır. Eklenen e_t (prediction error) önkestirimin yanılığıdır. Yanılığının enküçük değere ulaşması ile hata enaza inecektir. (4.86.a) denkleminde H_z/H_y 'nin karmaşık sayıdır ve “G” ve “S” karmaşık sayının gerçel ve sanal bileşenleri tanımlanarak yeniden yazılır (4.87).

$$(i\omega\mu)^{1/2} \cdot \frac{H_z}{H_y} = \left(\frac{\omega\mu}{2}\right)^{1/2} [(G - S) + i(G + S)] \quad (4.87)$$

Karmaşık sayının tekil durumu için $S = -G$ 'dir. Model çalışmalarında, iletken örtü katman durumu için sanal bileşen, gerçel bileşene göre çok küçüktür. (4.87) eşitliği bu durumda (4.86.a) denklemi ile yeniden yazılabilir (4.88).

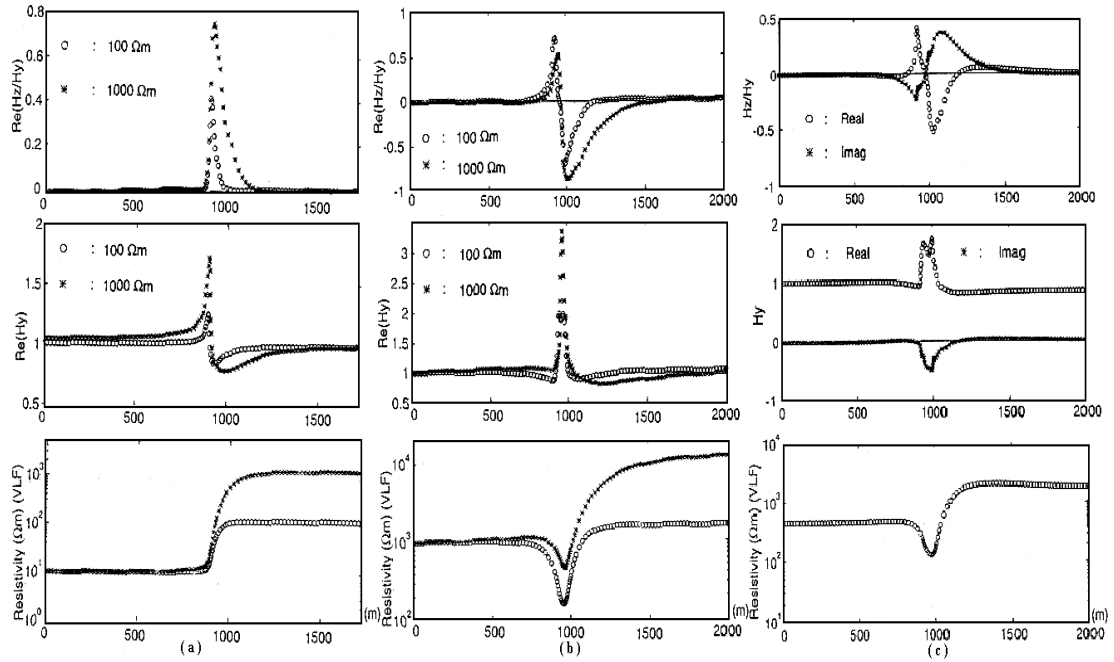
$$\rho_{j+1/2}^{1/2} = -(\omega\mu)^{1/2} \cdot \Delta y \cdot G_j + \rho_{j-1/2}^{1/2}, \quad j=1, n \quad (4.88)$$

Chouteau ve diğer (1996)'leri, tekdüze, izotrop yer modelleri için kuramsal eğriler oluşturmuştur. Şekil 4.11'de görülen düşey arayüzey, dayk ve örtü katmanı altı dayk modelleri için H_z/H_y , H_y 'nin gerçel bileşenleri ile görünür öz direnç değişimlerini hesaplamıştır.



Şekil 4.11 VLF-EM yöntemi için kuramsal belirtilerin hesaplandığı (a) düşey arayüzey (b) dayk ve (c) örtü katmanı altı dayk modelleri (Chouteau ve diğer., 1996).

Düşey arayüzey modelinde; $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 10^2 \Omega\text{m}$ ve $10^3 \Omega\text{m}$ için hesaplanmıştır (Şekil 4.12.a). Dayk modeli için $\rho_1 = 10^3 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 10^3 \Omega\text{m} - 10^4 \Omega\text{m}$ ve $\sigma_3.t = 8$ siemens tanımlanmıştır (Şekil 4.12.b). Örtü katmanı altı dayk modelinde ise örtü katmanı parametreleri $\rho_0 = 10^2 \Omega\text{m}$ ve $h = 5\text{m}$, sol katmanın $\rho_1 = 10^3 \Omega\text{m}$, sağ katmanın $\rho_2 = 10^4 \Omega\text{m}$ ve $\sigma_3.t = 8$ siemens olarak verilmiştir (Şekil 4.12.c).



Şekil 4.12 Chouteau ve diğer (1996) modelleri için hesaplanan, (a) düşey arayüzey; Hz/Hy, Hy gerçel bileşen (b) dayk; Hz/Hy, Hy gerçel bileşen (c) örtü katmanı altı dayk; Hz/Hy, Hy ve görünür öz direnç kuramsal eğrileri.

4.8 Karmaşık Gradyent Yöntemi (KGY)

Herhangi bir $f(t)$ sinyali;

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} -j & 0 \leq \omega < \pi \\ j & \pi \leq \omega < 2\pi \end{cases} \quad (4.89)$$

dönüşüm işlevi ile verilen düzendir. (4.89) denklemi ile verilen süzgeç tek bağımsız değişkenli Hilbert süzgeci olarak bilinir. Bu süzgeç tümüyle analitik sinyal kurallarına uyar ve zaman ortamı ifadesi de (4.90.b) yazılabilir (O'Brien, 1971; Nabighian, 1972,1974).

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} -j e^{j\omega_n t} .d\omega + \int_{\pi}^{2\pi} j e^{j\omega_n t} .d\omega \quad (4.90.a)$$

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1 - e^{j\pi t}}{\pi t} = \frac{2 \cdot \text{Sin}^2(\pi t / 2)}{\pi t} = \frac{1 - \text{Cos}(\pi)}{\pi t} & t \neq 0 \\ 0 & t = 0 \end{cases} \quad (4.90.b)$$

İdeal bir Hilbert süzgeci, gerçek sinyalin genliğini değiştirmemekte fakat $\pi/2$ radyanlık kayma yaratmaktadır. Elektromanyetik alan teorisinde; birincil akım kaynağının yarattığı, düzlemsel dalga manyetik alanının z ve y yönündeki bileşenleri ile tanımlanabilir (4.91).

$$H_z = H_z^s \quad (4.91.a)$$

$$H_y = H_o + H_y^s \quad (4.91.b)$$

İkincil alan bileşenleri serbest uzayda Laplace denklemini sağlar. Yatay ve düşey bileşenler arasındaki ilişki ise Hilbert dönüşümü ile gerçekleştirilir (O'Brien, 1971; Nabighian, 1972, 1974).

$$H_y^s = H_i \{H_z^s\} \quad (4.92)$$

(4.92) denkleminde; $H_i \{H_z^s\}$ dönüşüm işlevi zaman ve frekans ortamı eşitlikleri,

$$H_y^s = H_i \{H_z^s\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{y_0 - y} .H_y^s(y_0) .dy_0 \quad (4.93.a)$$

$$F\{H_y^s\} = -i \cdot \text{sgn}(k) \cdot F\{H_z^s\} \quad (4.93.b)$$

$$\text{sgn}(k) = \begin{cases} -1 & k < 0 \\ +1 & k > 0 \end{cases} \quad (4.93.c)$$

ile verilir ve ikincil manyetik alan bileşenleri arasındaki dönüşüm bağıntısı olarak kullanılır (Gharibi ve Pedersen, 1999). Elektromanyetik alan teorisi Maxwell denklemleri Faraday yasasının (3.1) integre edilmiş formuna uygulanır (4.94.a). Düşey ve yatay manyetik alan bileşenleri oranı tiper fonksiyonu olarak verilmiştir (4.94.b). Böylece, Faraday yasası 4.94.c eşitliğine döner.

$$E_x(y) = E_x(0) + \int_0^y i\omega\mu_0 \cdot H_z(y_0) \cdot dy_0 \quad (4.94.a)$$

$$B(y_0) = \frac{H_z(y_0)}{H_y(y_0)} \quad (4.94.b)$$

$$E_x(y) = E_x(0) + i\omega\mu_0 \cdot H_0 \int_0^y B(y_0) \cdot dy_0 \quad (4.94.c)$$

(4.94) denklemleri sonucu xy yönündeki empedans eşitliği elde edilir (4.95.a-b).

$$Z_{xy}(y) = \frac{E_x(y)}{H_y(y)} = \frac{E_x(0) + i\omega\mu_0 H_0 \int_0^y B(y_0) \cdot dy_0}{H_0} \quad (4.95.a)$$

$$Z_{xy}(y) = Z_{xy}(0) + i\omega\mu_0 \int_0^y B(y_0) \cdot dy_0 \quad (4.95.b)$$

(4.95) bağıntılarından; (4.91 ve 4.92) bağıntıları ile integral formundan, doğrusal eşitliğe geçilir (4.96).

$$\begin{aligned} H_z(y) = H_z^s(y) = B(y) \cdot H_y(y) &= B(y) [H_y^p(y) + H_y^s(y)] \\ &= B(y) \cdot H_0 + B(y) \cdot Hi\{H_z^s\} \end{aligned} \quad (4.96)$$

Yüzey manyetik alanın y bileşeni sabittir. Doğrusal yinelemeli işlevde başlangıç değerleri olarak; $H_y(y) = H_0 = 1$ ve $H_z(y) = B(y)$ verilerek yineleme yapılır (4.97).

$$H_z^s(n+1) = B(y) + B(y) \cdot Hi\{H_z^s(n)\} \quad (4.97)$$

Öncelikle; H_z^s bulunur, sonra Hilbert dönüşümü için tanımlanan denklemi kullanılarak (4.93.a-b), H_y^s bileşenin uzay veya frekans ortamı değerleri hesaplanır. Bileşenlerin hesaplanması ile ortamın empedansı Z_{xy} değerlerine ulaşılır (4.98).

$$\begin{aligned}
 Z_{xy}(y) &= \frac{E_x(y)}{H_y(y)} = \frac{E_x(0) + \int_0^y i\omega\mu_0 H_z(y_0).dy_0}{H_y(y)} \\
 &= Z_{xy}(0) \cdot \frac{H_y(0)}{H_y(y)} = \frac{i\omega\mu_0 \int_0^y H_z(y_0).dy_0}{H_y(y)}
 \end{aligned} \tag{4.98}$$

Sonuç olarak; (4.94.a) Faraday yasasından yola çıkarak, (4.92) ve (4.93) Hilbert dönüşümü kullanılarak; $Z_{xy}(0)$, yüzey empedansına ve yöne bağlı ortamın $Z_{xy}(y)$ empedansına ulaşılır.

BÖLÜM BEŞ

ALAN ÇALIŞMALARI

5. VLF-EM Yöntemi Alan Çalışmaları

VLF-EM yönteminin; sığ, küçük boyutlu ve düzensiz yapıların araştırılmasında, belirtilerin ayrımlılığının artırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle; arkeolojik alanlarda çalışmalar yapılmıştır. Turizm açısından büyük önemi olan bu bölgelerdeki araştırmalar, her geçen gün artmaktadır. Öncelikle kuramsal gelişmeleri desteklemek üzere, modeli bilinen bir yapı üzerinde ölçme ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Ölçme ve değerlendirmeler;

- Balıkesir-Bandırma ilçesi Ergili köyü “Daskyleion”,
- İzmir-Torbalı ilçesi Yeniköy “Metropolis”,
- İzmir-Menderes ilçesi Ahmetbeyli köyü “Klaros”,

arkeolojik kazı alanlarında yapılmıştır. Bu bölgelerde; VLF-EM yöntemi sonuçlarının diğer jeofizik yöntem sonuçları ile desteklenmesi amacıyla karşılaştırılmıştır. Alan çalışmaları yukarıda verilen başlıklar altında verilecektir.

5.1 Balıkesir-Bandırma “Daskyleion” Arkeolojik Kazı Alanı

Daskyleion; Bandırma'nın 30km güneyinde, Aksakal kasabasının 8km ve Ergili köyünün 2km batısında bulunmaktadır. Persler; Anadolu'da MÖ 547'den itibaren “Genel Valilikler” (Satraplık) kurarak ilk kez bir dünya imparatorluğu olmuşlardır. Daskyleion Satraplığı, batıdaki Pers genel valilik merkezlerinden biridir. Daskyleion'un lokalizasyonunu Prof. Dr. Kurt Bittel 1952 yılında yapmıştır. Prof. Dr. Ekrem Akurgal 1954'de kazılara başlamış ve 500 adet Bulla (yazılı metin mühürleri) bulmuş, Pers Satraplık merkezinin Hisartepe'de olduğunu kesinleştirmiştir. 1988'den günümüze Prof. Dr. Tomris Bakır başkanlığında çalışmalar devam etmektedir. Mimari buluntular ve kalıntılarda, tarih boyunca egemen olan medeniyetlerin ve günümüzde sit alanına alınmamasından büyük

yıkıma uğradığı görülmüştür. Yoğun mimari kalıntıların bulunduğu Hisartep, Kuşgözü'nün GD'da, doğal bir tepedir (Şekil 5.1). İnce, uzun bir yapıya sahip olan Hisartep, göl seviyesinden 25m yükseklikte ve üst yüzölçümü 27 dönümdür. Bu tepede üzerinde antik döneme ait sadece Satrap Saray Kompleksi yer almaktadır. Yerleşimin bölgesi ise, Hisartep'nin doğusunda, geniş bir alana yayılmış olması yapılan arkeolojik sondajlar ile anlaşılmıştır. Daskyleion Hisartep arkeolojik kazı alanında; dört ayrı bölgede ve kazısı ile restorasyonu tamamlanmış Kösemtuğ tümülüsü üzerinde jeofizik ölçümler yapılmıştır. Kösemtuğ tümülüsü ve Hisartep kazı alanı araştırma bölgelerine ait sonuçlar alt başlıklar altında verilecektir.

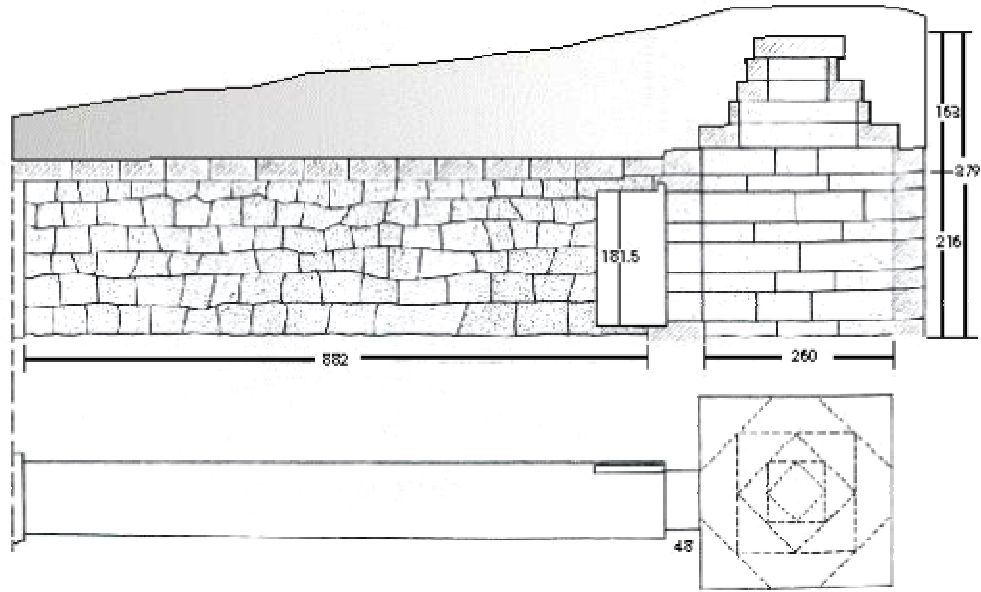


Şekil 5.1 Daskyleion Pers Satraplık merkezi konum haritası
(http://daskyleion.tripod.com/001_konum.html)

5.1.1 Daskyleion “Kösemtuğ” Tümülüsü

Daskyleion çevresindeki birçok tümülüsden biri olan “Kösemtuğ” tümülüsü Hisartep'nin 3km doğusundadır. Mezarın mimari özellikleri, Trakya tipi ve MS 4 yy'ın ikinci yarısında yapılmıştır. Daskyleion'a 334 yılından sonra gelen Makedonyalı bir soyluya aittir. Tümülüs; DB doğrultusunda, 22m çapında 5m yüksekliğindeki bir tepeciğin altındadır. Mezar yapısı; aynı ekseninde bir dromos (mezar odası giriş koridoru ile ön oda) ve mezar odasından oluşmaktadır. Mezar odası; 3x3m alanda, 3,80m (2,16+1,63) yükseklikte, kare mimaride ve dört adet hatır

ile çapraz bağlantılı daralan tavan yapısındadır. Dromos; 6,68m uzunluğunda 1,5m genişliğinde ve 2,30m yüksekliğindedir. Yapının toplam iç boyu 11,9m (8,82+0,48+2,60)'dir (Şekil 5.2). Yapı mimarisinin bilinmesi, jeofizik sonuçları anlamlandırmak için model oluşturmaktadır. Dromos, ön oda ve mezar odasını oluşturan duvar malzemesi değişen boyutlarda düzgün kesilip, işlenmiş andezit bloklardan oluşur (Ateşlier, 1992).

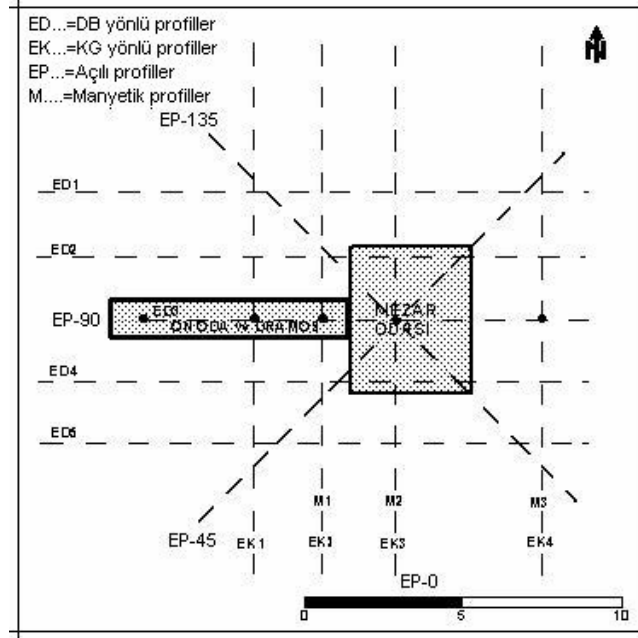


Şekil 5.2 Daskyleion "Kösemtuğ" Tümülüsü düşey ve yatay kesiti (Ateşlier, 1992)

5.1.1.1 "Kösemtuğ" Tümülüsü Çalışmaları

Medeniyetlerin buluşma noktası olan Anadolu sayısız antik mezar'a (Tümülüs) ev sahipliği yapmaktadır. Bu nedenle; tümülüs araştırmaları, çok sık jeofizik çalışmalara kaynak olmuştur. Pınar ve Akçığ 1992'de, ilk olarak dairesel karelajda, DES (Düşey Elektrik Sondajı), Yarım-Wenner dizilim sistemi kullanılarak "İlişki Katsayısı" yöntemi ile ilk çalışmalarını yapmıştır. Sonraki yıllarda; Manyetik ve SP (Doğal Potansiyel) yöntemleri uygulanarak "Karmaşık Gradyent" ve "Güç Spektrumu Analizi" çalışmaları ile yapı parametreleri hesaplanmıştır (Akçığ ve Pınar, 1995; Pınar ve Akçığ, 1997). Çalışmada, profil başına karşılaştırmaların yapılması için toplam manyetik alan ve VLF-EM ölçüleri alınmıştır.

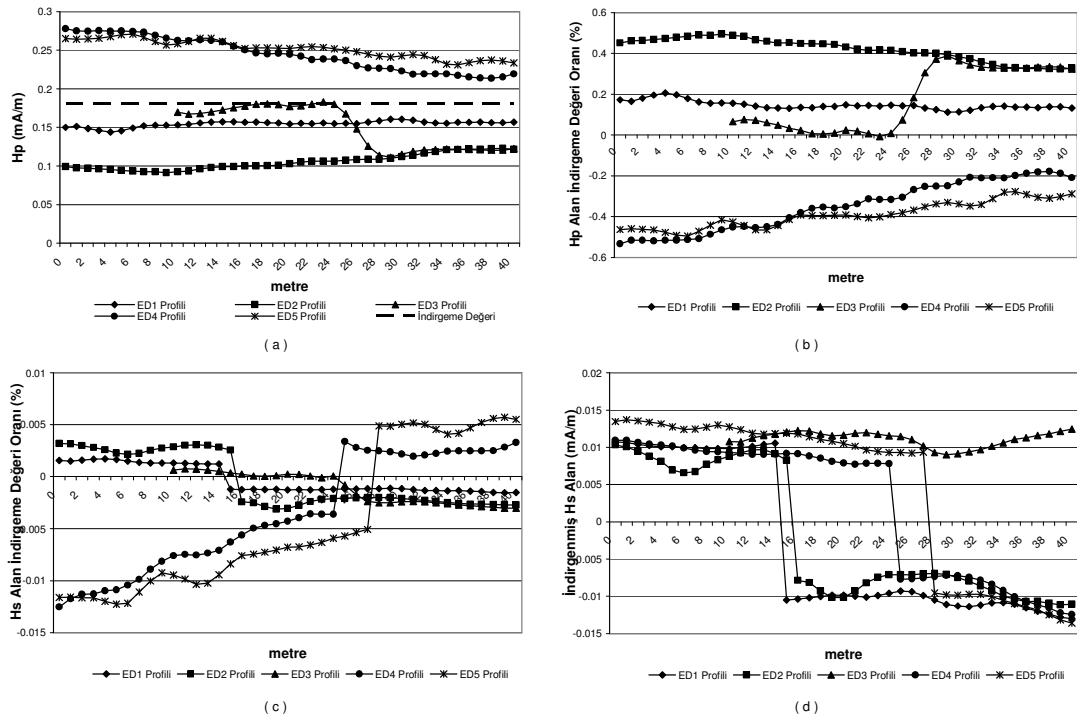
İlk olarak KG doğrultulu profillerde, yapıyı dik kesen 40m uzunluğunda 2,5m aralıklı üç profilde (M1, M2, M3) 1m örneklemeli toplam manyetik alan ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5.3). M1 dramas, M2 mezar odasını dik kesmektedir. M3 profili ise ortamın manyetik alan bilgisinin alınması için yapı dışından alınmıştır.



Şekil 5.3 Daskyleion "Kösemtuğ" Tümülüsü Lokasyon Haritası

İkinci olarak; aynı özelliklerine sahip, BD doğrultulu beş adet (ED1, ED2, ED3, ED4, ED5) profilde ölçmeler yapılmıştır. GK doğrultulu, dört adet (EK1, EK2, EK3, EK4) ile yapıyı açılı kesen dört adet (EP-0, EP-45, EP-90, EP-135) olmak üzere toplam onüç profilde 23,4kHz (DHO, Rhaderfehn-Ramsloh, Almanya) frekansı ölçümleri alınmıştır (Şekil 5.3). Yapıyı açılı kesen profillerde, alınan çift yönlü ölçümler ile EM dalganın geliş doğrultusuna bağlı H_p alanının oluşturacağı H_s alana etkisi incelenmiştir. Diğer iki frekans, ölçümleri yüksek indirgeme oranı nedeni ile değerlendirilememiştir.

5.1.1.1.1 ED ve EK Profilleri VLF-EM Uygulamaları. Kösemtuğ tümülüsü üzerinde; DB doğrultulu profillerinin H_p alan genlik değişimi 0,095 ile 0,285 mA/m aralığında değişmektedir (Şekil 5.4.a). Çalışma alanında etkin olan H_p alanının, sabit değere indirgenmesi işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucu ölçümlerin H_s , H_T alan ve gerçel-sanal bileşen değişimleri yeniden hesaplanmıştır.

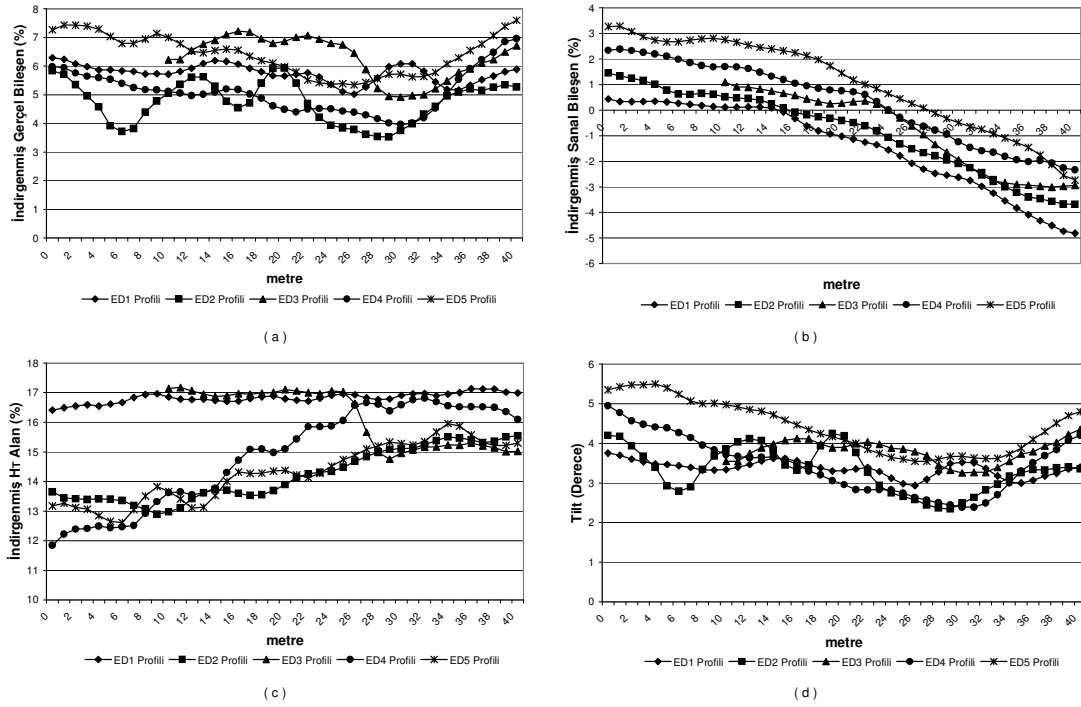


Şekil 5.4 DB doğrultulu, ED profillerinin; (a) Hp (mA/m) alan değışimi (b) Hp=0,181163mA/m indirgeme değeri yüzdelik değışimi (c) İndirgeme değeri oranına bağlı Hs alanın yüzdelik değışimi (d) İndirgeme değeri düzeltilmiş Hs alan değışim grafikleri.

Profillere ait Hp alan değışiminin ortalama değeri 0,18mA/m (4.79.a) olarak bulunmuştur. İndirgeme değeri bağlı yüzdelik gürültü değışimi grafiklenmiştir (Şekil 5.4.b). Profillerin nokta başına Hp alan şiddetleri, indirgeme değeri bağlı olarak sabit bir değere düzeltilir. Yüzdelik gürültü değışim oranının, Hs alana olan etkisi grafiklenmiştir (Şekil 5.4.c). Şekil 5.4.d'de düzeltilmiş Hs alan değışimi görülmektedir. Böylece; Hs alanı, sabit Hp alan değeri indirgenmiş olur.

Hp alan indirgeme değeri düzeltmesi yapılmış, gerçel (Şekil 5.5.a), sanal bileşenleri (Şekil 5.5.b), H_T alan (Şekil 5.5.c) ve tilt açısı (Şekil 5.5.d) grafikleri verilmektedir. Bu konunun ayrıntıları bölüm 4.6'da verilmiştir.

Bu alana ait çalışmada, ölçülen veriler ile uygulanan yöntem sonuçları karşılaştırmalı verilecektir. ED profillerine ait ölçülen değerden, hesaplanan ve indirgeme değeri düzeltmesi yapılmış H_T , Hs alan ve görünür özdirenç yapay yüzey haritaları karşılaştırılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.5 DB doğrultulu, ED profillerinin; (a) Gerçek bileşen (b) Sanal bileşen (c) H_T alan (d) Tilt açısı değişim grafikleri.

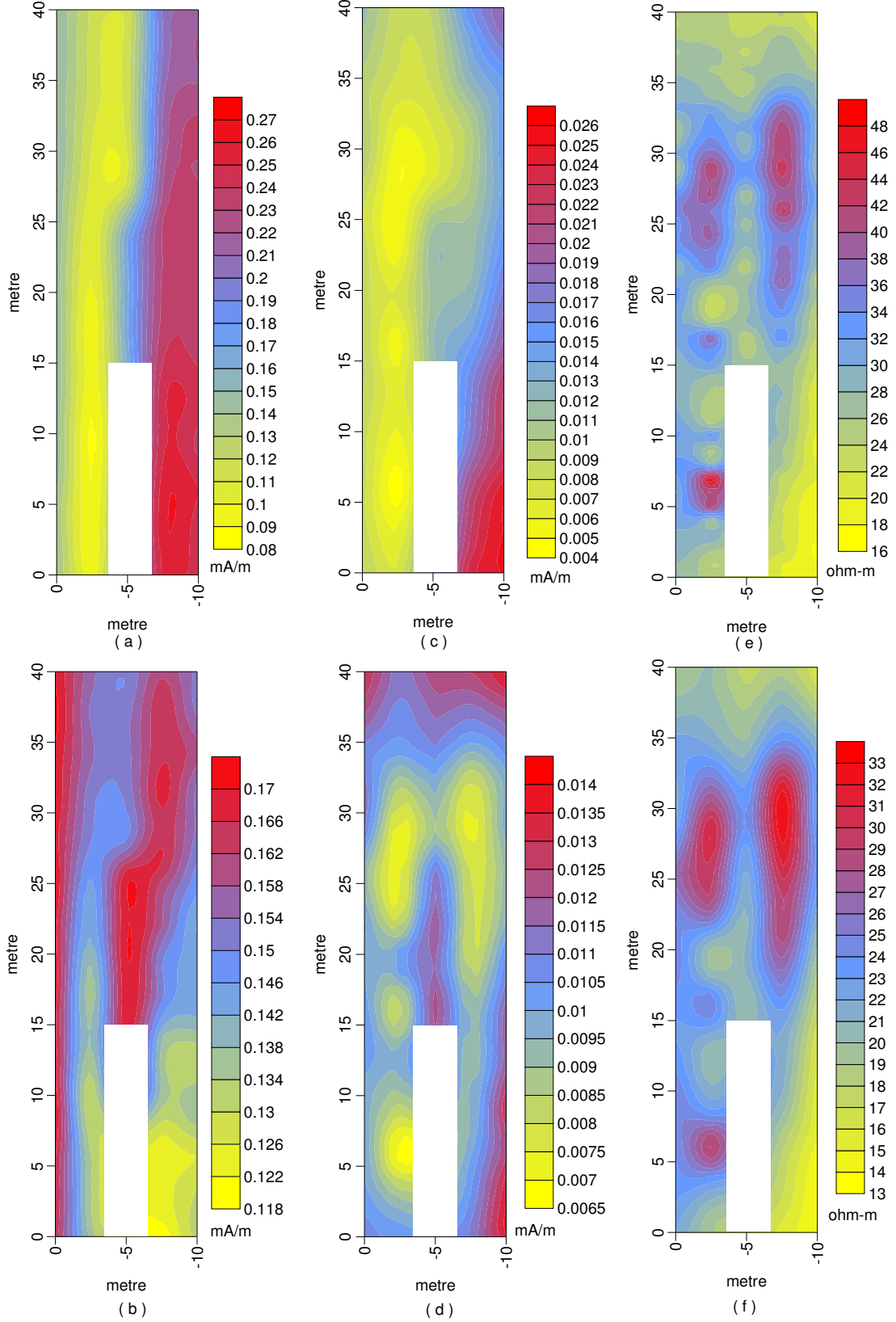
Öncelikle şekil 5.4.b’de verilen sabit H_p alana indirgeme işlemi için hesaplanan indirgeme değeri oranı grafiğine dikkat edilmesi gerekir. İlk üç profilde etkin olan pozitif indirgeme oranı, son iki profilde negatif değere dönmektedir. Bu farklılık, ölçülen verilerden hesaplanan H_T ve H_s alanları aynı oranda etkilemektedir.

Hesaplanan H_T alanın ölçülen ile indirgenmiş haritalarında (Şekil 5.6.a-b) H_s alan haritalarına (Şekil 5.6.c-d) göre daha az ayrımlılığı vardır. Bunun nedeni baskın olan H_p alan şiddetidir. H_s alanın sadece ortama ait bilgileri vermesi, iki harita arasındaki şiddet farklılığının nedenidir.

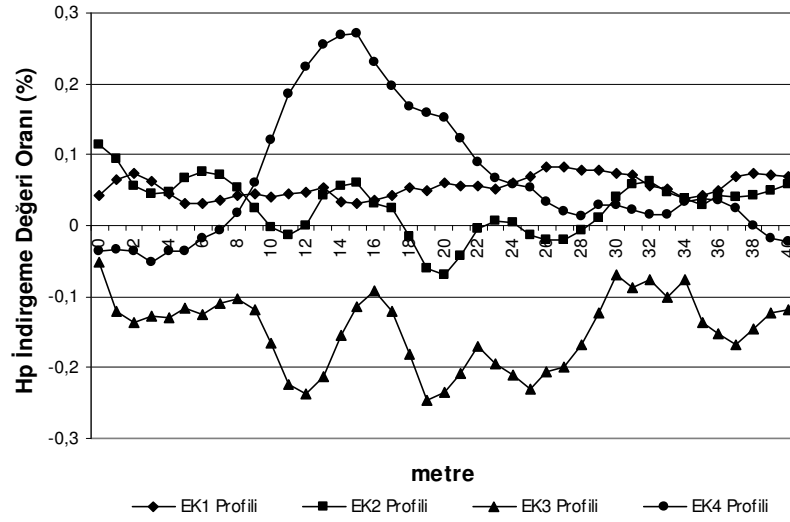
Ölçülen verilerden, hesaplanan görünür özdirenç haritası ile indirgenmiş harita arasında büyük ayrımlılık farkı vardır (Şekil 5.6.e-f). $25\Omega_m$ ile $33\Omega_m$ aralığındaki, yüksek görünür özdirenç belirtisi, çok belirgin olarak yapının mezar odasını sınırlamaktadır. 5m hattı boyunca, düşen özdirenç değerleri ($20\Omega_m$ - $25\Omega_m$) alınmış, dromos etkisi açık olarak görülememiştir. Bunun nedeni; içi boş bir yapının H_p alanın şiddetini kuvvetlendirmesi sonucu H_s ve H_T alan şiddetlerinin büyümesidir.

Diğer bir durum, düzlem dalganın geliş doğrultusunun etkisidir. Bu çalışma alanı için alet K25B doğrultusunda kalibre edilerek ölçümler alınmıştır. Düzlem dalganın geliş doğrultusuna bağlı olarak görünür öz direnç değerlerinde ilk profillere nazaran son iki profilde, dromosun sınırından kaynaklanan artış gözlenmektedir. Tümülüs mimarisi dikkate alındığında, en kuvvetli belirti 3×3m boyutlarındaki mezar odasıdır. Yapıdaki boşluk etkisi ED3 profilinde düşük görünür öz direnç değerleri ile görülmüştür.

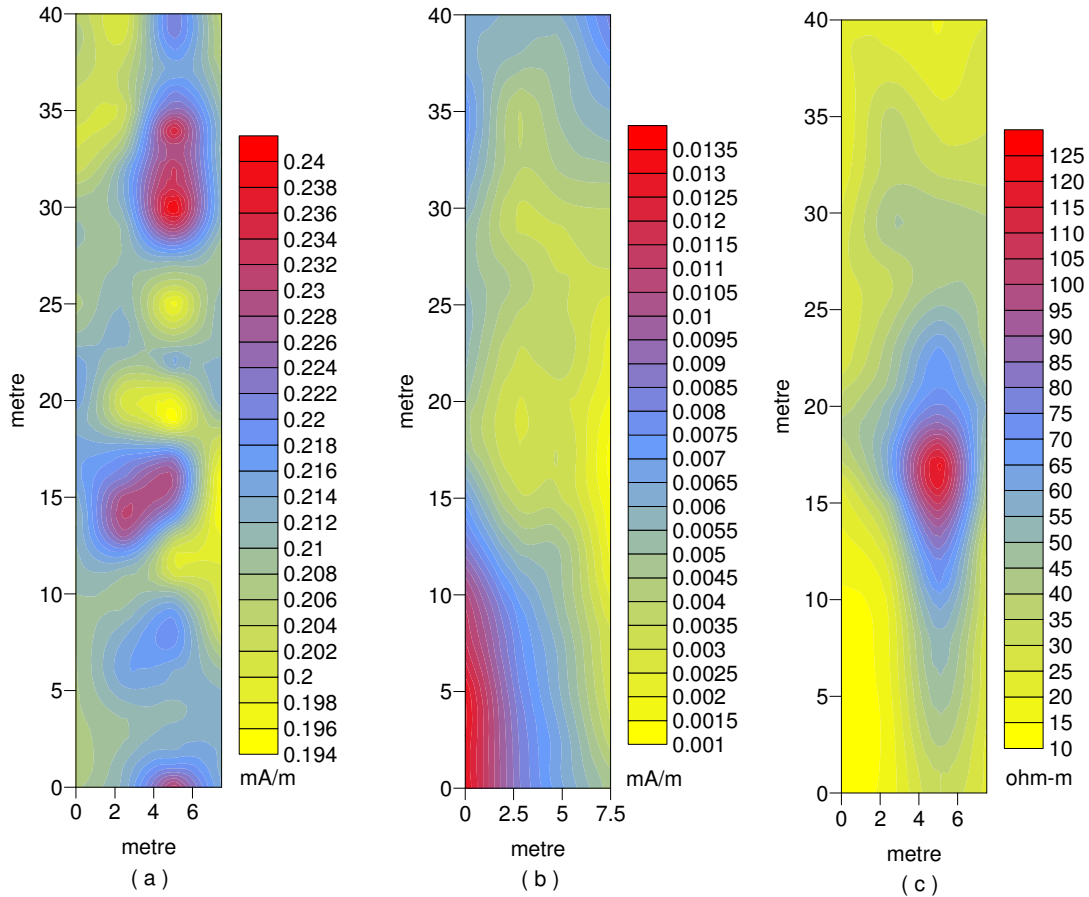
İndirgeme değeri düzeltme işlemleri; KG doğrultulu, EK profilleri içinde uygulanmıştır. Özellikle üçüncü ve dördüncü profillerde, indirgeme değerine göre H_p alanı yüzdelerle değişim oranı çok saçılımlıdır (Şekil 5.7). EK profillerine ait indirgeme değerine düzeltilmiş; H_T , H_s alan ve görünür öz direnç yapay yüzey haritaları hesaplanarak şekil 5.8'de verilmiştir. Mezar odasının tavan mimarisinin daralan hatırlardan (basamaklı, yukarı doğru daralan çatı yapısı) ve yüzeye yakın olması görünür öz direncin en büyük değerini vermektedir. Alanda, düzlem EM dalganın geliş doğrultusuna bağlı yapıya dik etki, paralel etkiden daha güçlüdür. Mezar odasının belirtisi çok yüksek ve ayrımlılığı fazladır. Yöntem aynı zamanda ölçüm kalitesini sınamaktadır. 23,4kHz için en büyük RMS hata dördüncü profilde $RMS(inp.)=0,00618$ ve $RMS(quad.)=0,00574$ olarak hesaplanmıştır. İlişki katsayısı $R_{xy}=0,9998$ ile iyi kalitede ölçüm yapıldığını göstermektedir. 18,3kHz ve 22,1kHz frekans ölçümleri, çalışma alanı için çok yüksek indirgeme oranı nedeni ile incelenememiştir.



Şekil 5.6 DB doğrultulu, ED profilleri; (a) ölçülen ve (b) indirgenmiş H_r alan, (c) ölçülen ve (d) indirgenmiş H_s alan, (e) ölçülen ve (f) indirgenmiş görünür öz direnç yapay yüzey haritalarının karşılaştırması. (İndirgeme değeri $H_p = 0,181163$ mA/m)



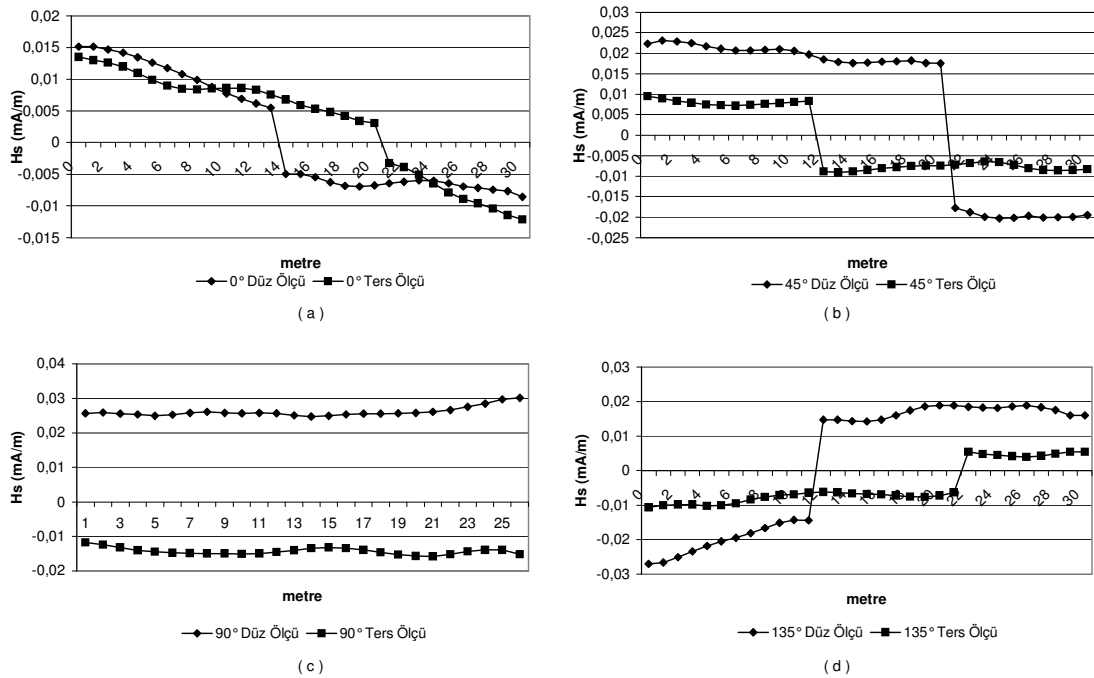
Şekil 5.7 KG doğrultulu, EK profilleri indirgeme oranı yüzdelik değişim grafiği (Hp İndirgeme değeri =0,2136 mA/m).



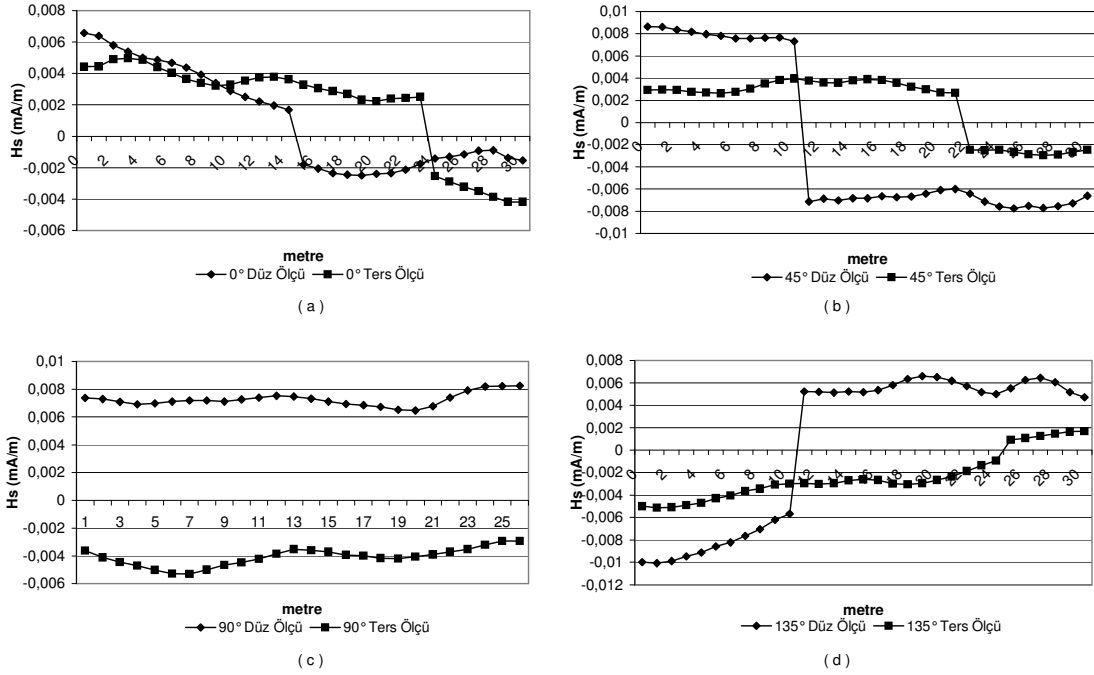
Şekil 5.8 KG doğrultulu, EK profilleri; indirgeme değerinde hesaplanmış (a) H_T alan (b) H_s alan (c) görünür öz direnç yapay yüzey haritaları (Hp İndirgeme değeri = 0,2136 mA/m).

5.1.1.1.2 Açılı Profillerin Çift Yönlü VLF-EM Ölçüm Sonuçları. Düzlem EM dalganın, ortama geliş yönüne bağlı olarak profil doğrultularının ve ölçüm yönünün etkisini araştırmak üzere açılı profillerde ölçmeler yapılmıştır. Yapının doğrultuya bağlı vereceği Hs alan değişimleri incelenmiştir.

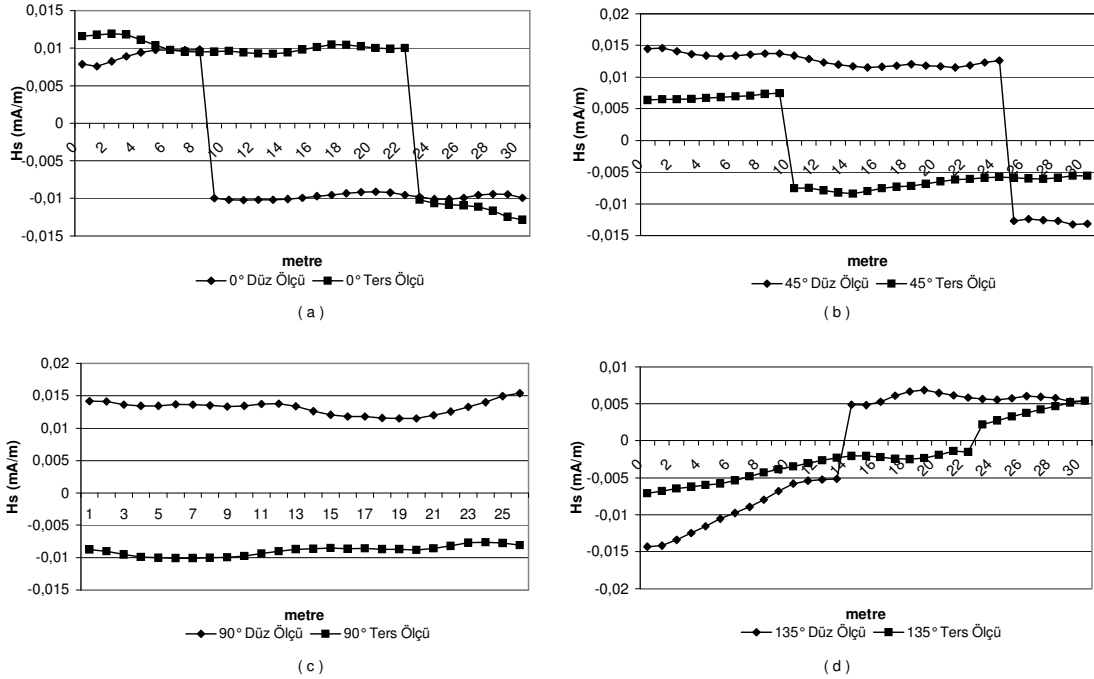
Yapı yaklaşık olarak merkezlenerek; 0° , 45° , 90° ve 135° 'lik açılı doğrultularda iki yönlü VLF-EM ölçümleri alınmıştır. Ölçümler; 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz olmak üzere üç frekansta alınmıştır. Profillerin her üç frekans için indirgeme değeri ve değişim oranları hesaplanmıştır. 18,3kHz için indirgeme değeri $H_p=0,261606$ mA/m, 22,1kHz için $H_p=0,101334$ mA/m ve 23,4kHz frekansı için $H_p=0,160612$ mA/m'dir. Açılı doğrultudaki her profil için Hs alan değişim grafikleri; 18,3kHz için şekil 5.9'da, 22,1kHz için şekil 5.10'da ve 23,4kHz için şekil 5.11'de verilmektedir. Öncelikle dikkat edilmesi gereken konu, profillerde düz ve ters ölçümlerin başlangıcında, alet yeni doğrultuya göre sıfırlanarak, kalibre edilmelidir. Eğer kalibre işlemi yapılmaz ise ilk kalibrasyon değerlerine göre ölçümler yapılacak ve hatalı veriler alınacaktır.



Şekil 5.9 Açılı profiller; 18,3kHz frekansı için indirgeme değerine düzeltilmiş Hs alan değişimleri (a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135° için düz ve ters ölçüm grafikleri (H_p İndirgeme değeri = 0,261606 mA/m).



Şekil 5.10 Açılı profiller; 22,1kHz frekansı için indirgeme değerine düzeltilmiş Hs alan değişimleri (a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135° için düz ve ters ölçüm grafikleri (H_p İndirgeme değeri = 0,101334 mA/m).

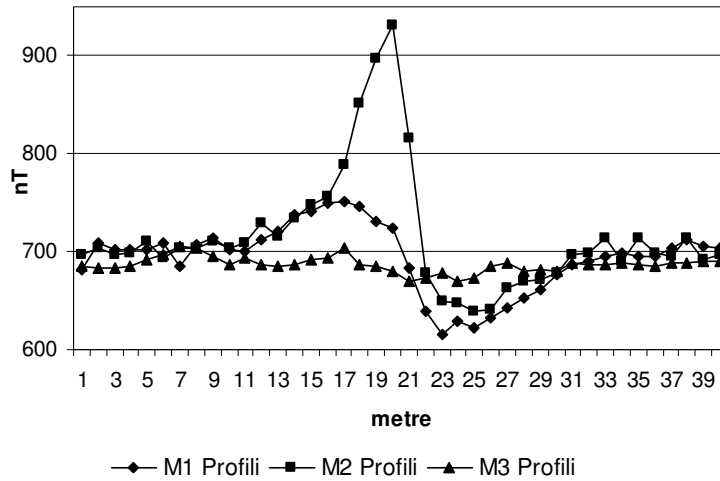


Şekil 5.11 Açılı profiller; 23,4kHz frekansı için indirgeme değerine düzeltilmiş Hs alan değişimleri (a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135° için düz ve ters ölçüm grafikleri (H_p İndirgeme değeri = 0,160612 mA/m).

İndirgeme işlemi yapılmış profil çözümleri sonucunda, yapıyı 0°, 45° ve 135° açılarda kesen profillerde, H_p alanın geliş doğrultusuna bağlı polarizasyon elipsinin

terslenmesi gözlenmektedir. Tilt açısının terslenmesi sonucu, yapı sınırlarında terslenen Hs alan değişimi görülmüştür. Üçüncü ED profilinde olduğu gibi yapı üzerinden alınan 90° profil ölçümlerinde Hs alan terslenmesi gözlenmemiştir. Düz ve ters ölçümlerin en büyük özelliği, düzlem dalganın geliş doğrultusuna göre Hs alanın işaret değiştirerek her iki ölçümde paralellik göstermesidir. Hp alan geliş doğrultusunda hesaplanan Hs alan genliği, doğrultuya ters yönde alınmış ölçümlerden yaklaşık 1/3 orana yakın değerlerde daha kuvvetli bulunmuştur. Bunun nedeni, TE modu için aletin sensor bobinlerinin Hp alanın geliş doğrultusuna daha duyarlı olmasıdır. Diğer bir konu, profilin her iki ölçümünün, yapıdan etkilenme metrelerinin farklılığıdır ki bu profil boyunca yapı sınırlarının etkisini tanımlar.

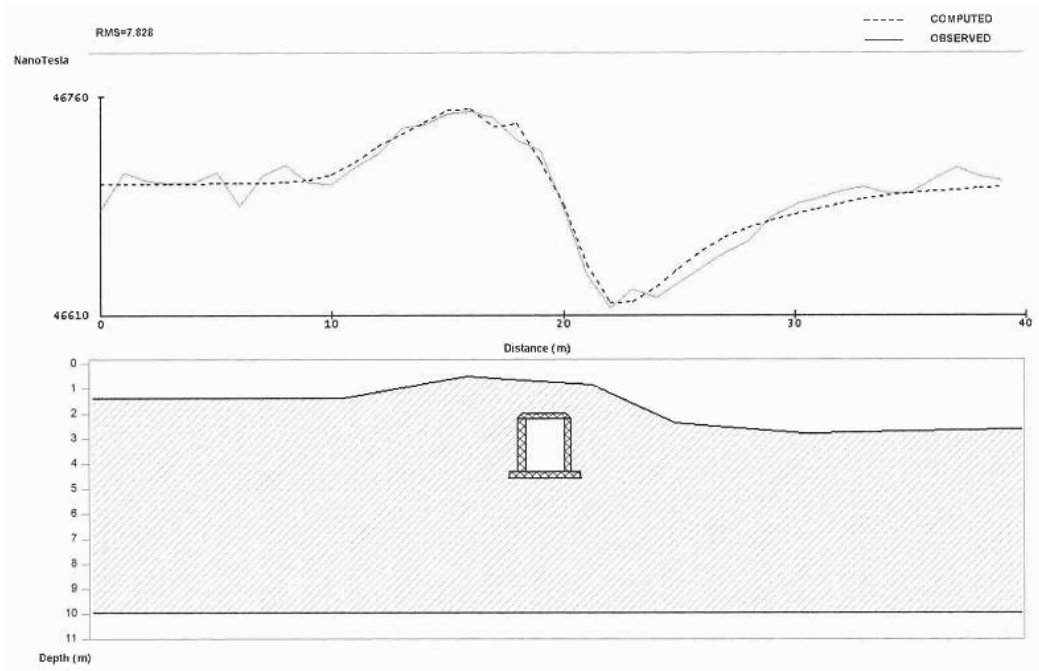
5.1.1.1.3 Toplam Manyetik Alan Ölçüm Sonuçları. Scintrex-ENVI cihazı toplam manyetik alan sensörü ile M1, M2, M3 profillerinde alınan ölçüler, Talwani (Talwani ve Heirtzler, 1964; Talwani, 1965; Özyalın ve Akçığ., 1999) modelleme yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. M1 ve M2 profilleri yapıyı dik kesmekte, M3 profili ise yapı dışında kalmaktadır. Veri aralığı; 46650nT ile 46950nT arasında değişmektedir (Şekil 5.12).



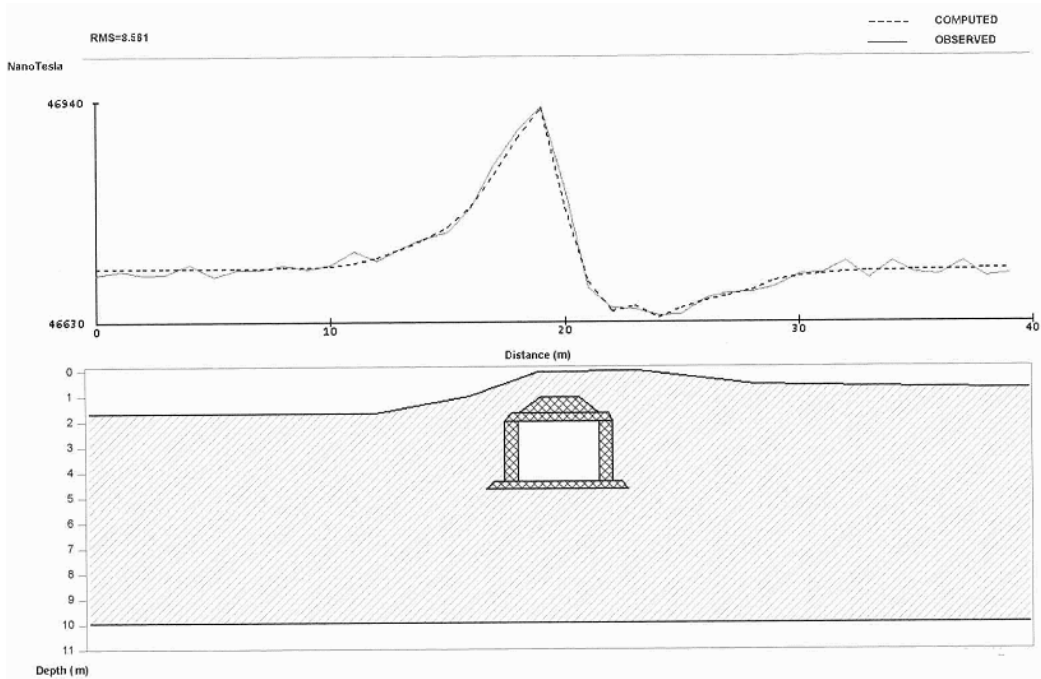
Şekil 5.12 “Kösemtuğ” tümülüsü; M1, M2, M3 profilleri toplam manyetik alan grafikleri (46000nT).

M1 dromos ve M2 profili mezar odasının belirtisini vermektedir. M3 profili yapı dışında kaldığından model kurulabilecek belirti göstermemektedir. Dış ortamın, toplam manyetik alanı, 46670nT ile 46705nT arasında değişmektedir. Talwani

modellemesi sonuçları ile olası modelin düşey kesitleri, M1 profiline ait şekil 5.13 ve M2 profiline ait şekil 5.14’de verilmiştir. M1 ve M2 profillerine ait olası yapı modeli parametreleri, tablo 5.1 ve tablo 5.2’dedir. M3 profiline ait bir model çözümü yapılamamıştır.



Şekil 5.13 Kösemtuğ tümülüsü, M1 profiline ait olası yeraltı modeli.



Şekil 5.14 Kösemtuğ tümülüsü, M2 profiline ait olası yeraltı modeli.

Tablo 5.1 M1 profiline ait hesaplanan olası yapı modeli parametreleri.

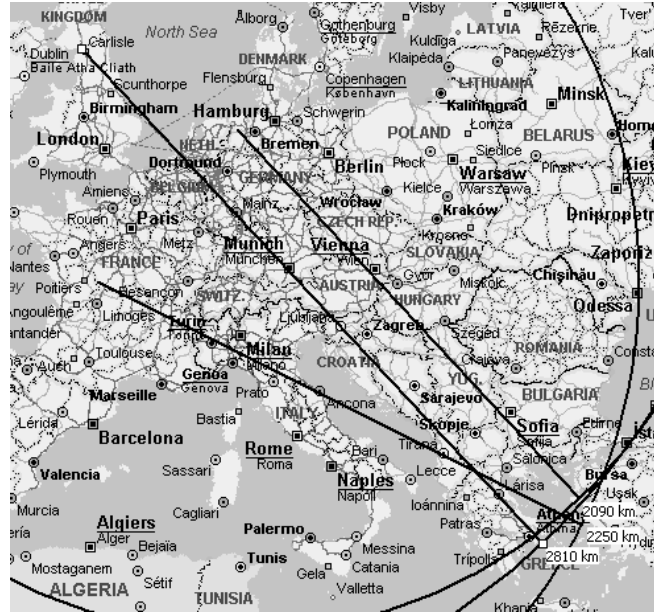
Baz Toplam Manyetik Alan : 45000 nT							
Denklinasyon Açısı : 2,3 °							
İnklinasyon Açısı : 55 °							
Ortam Susep. : 0,0009 emu				RMS : 7,828			
				Yapı Susep. : 0,004 emu			
Ortam	X(m)	10,8	16,1	18,5	21,5	25,1	30,6
	Z(m)	1,4	0,5	0,65	0,85	2,4	2,8
1.Yapı	X(m)	18,5	20,4	20,6	18,3		
	Z(m)	1,7	1,7	2,1	2,1		
2.Yapı	X(m)	20,3	20,6	20,6	20,3		
	Z(m)	2,1	2,1	4,3	4,3		
3.Yapı	X(m)	18,3	18,6	18,6	18,3		
	Z(m)	2,1	2,1	4,3	4,3		
4.Yapı	X(m)	17,9	20,9	20,9	17,9		
	Z(m)	4,3	4,3	4,6	4,6		

Tablo 5.2 M2 profiline ait hesaplanan olası yapı modeli parametreleri.

Baz Toplam Manyetik Alan : 45000 nT							
Denklinasyon Açısı : 2,3 °							
İnklinasyon Açısı : 55 °							
Ortam Susep. : 0,0009 emu				RMS : 8,561			
				Yapı Susep. : 0,004 emu			
Ortam	X(m)	12,1	16,2	19	23,3	28,4	35,8
	Z(m)	1,7	1	0,2	0,2	0,6	0,7
1.Yapı	X(m)	19,2	20,8	21,7	18,3		
	Z(m)	1,1	1,1	1,7	1,7		
2.Yapı	X(m)	18	22,1	22,3	17,7		
	Z(m)	1,7	1,7	2	2		
3.Yapı	X(m)	21,7	22,3	22,3	21,7		
	Z(m)	2	2	4,4	4,4		
4.Yapı	X(m)	17,7	18,2	18,2	17,7		
	Z(m)	2	2	4,4	4,4		
5.Yapı	X(m)	17,2	22,6	22,9	16,9		
	Z(m)	4,4	4,4	4,7	4,7		

5.1.2 Daskyleion “Hisartepe” Arkeolojik Kazı Alanı

Daskyleion Hisartepe arkeolojik kazı alanı, yoğun mimari kalıntıların bulunduğu Pers dönemi Satraplık Saray kompleksinin olduğu bölgedir. Antik dönemlerdeki birçok uygarlığın etkisi ve yıkımı (yangın, deprem, savaşlar vb.) arkeolojik kazılarda görülmektedir. Hisartepe'nin arkeolojik açmaların doğrultusunda, şüpheli bölgeler üzerinde jeofizik çalışmalar yapılmıştır. VLF-EM, Manyetik toplam alan ve DC-özdirenç yöntemi (Schlumberger-Wenner dizilimi) tomografi ölçümleri alınmıştır. Özdirenç tomografi ölçümleri Res2dinv (SemiDemo ver.3.54 - 2D Resistivity & IP Inversion Software) bilgisayar programı ile değerlendirilmiştir (Loke ve Dahlin, 2002; Loke ve diğer., 2003). VLF-EM yöntemi dışındaki çalışma sonuçları verilmeyecek, sonuçların karşılaştırılması amacı ile örnek olarak sunulacaktır.



Şekil 5.15 Fransa-LeBlanc-Rosney (HWU-18,3kHz), İngiltere-Anthorn (GBR-22,1kHz), Almanya-Rhauderfehn-Ramsloh (DHO-23,4kHz) VLF vericileri dağılımı ve Daskyleion kazı alanına uzaklıkları.

VLF-EM yönteminde; HWU-18,3kHz, GBR-22,1kHz ve DHO-23,4kHz verici frekansları seçilmiş ve araştırma alanlarında aynı frekanslar kullanılmıştır (Şekil 5.15). Daskyleion - Hisartepe araştırma bölgeleri; lokasyon haritasında numaralar ile belirtilen alanlardır (Şekil 5.16). Numaralandırılmış alanların; lokasyonları ve ölçüm profillerinin doğrultuları aşağıda verilmektedir.

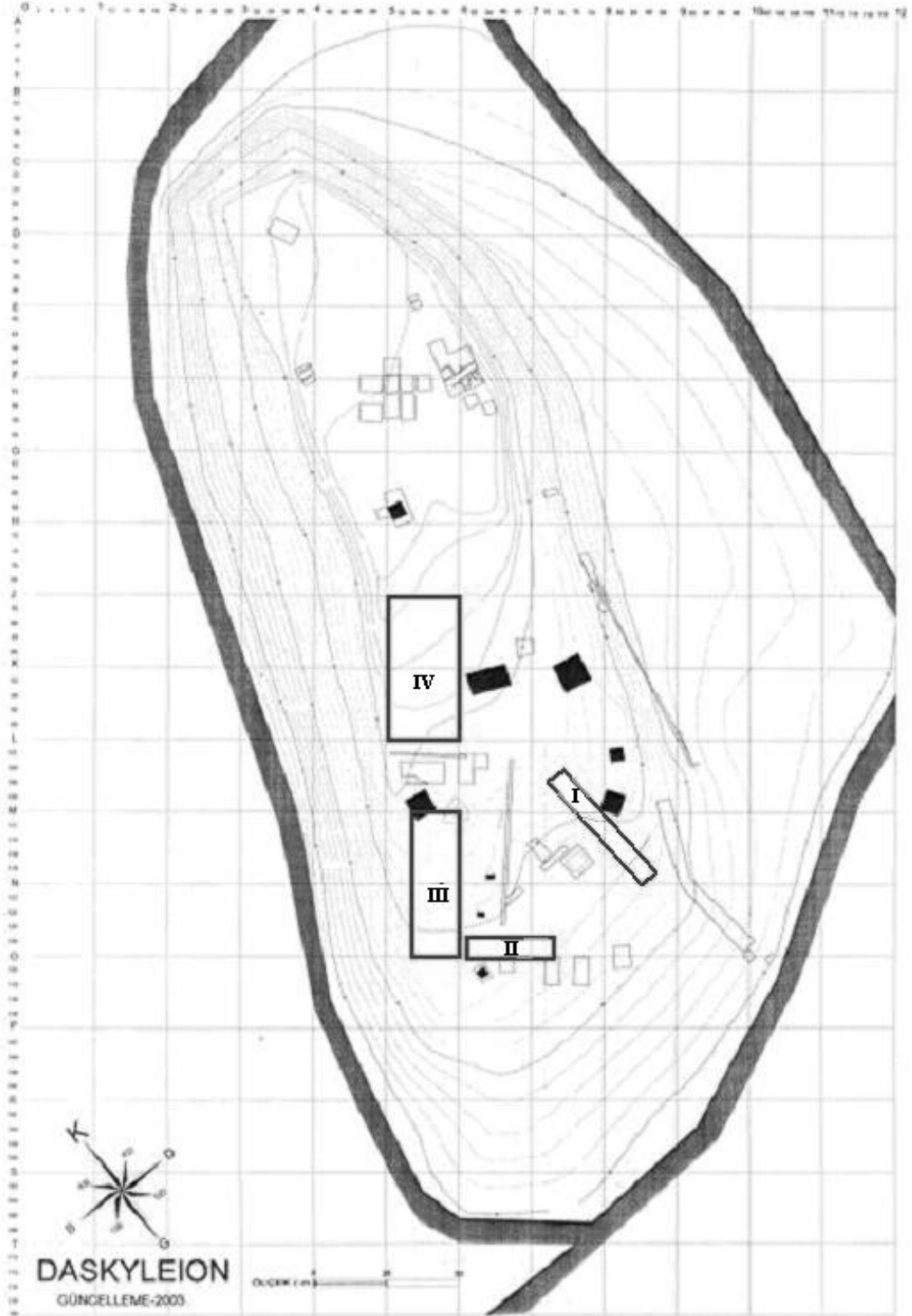
“I Nolu” araştırma alanı; 2,20m genişliğindeki BD uzanımlı sur duvarının devamlılığının bulunmasına yönelik olan araştırma bölgesidir. N9-L8 karelerinde, KG doğrultusundaki profillerden oluşmaktadır.

“II Nolu” araştırma alanı; eğimli yığma Pers duvarının devamlılığına yönelik çalışmadır. Duvarın özelliği arkeolojik açıdan tam bilinmemektedir. Bir açma ile duvarın bir bölümü bulunmuştur. Profiller; O8-O7 karelerinde, K45B doğrultuludur.

“III Nolu” araştırma alanı; olası yapılaşmanın varlığına yönelik araştırma yapılması istenen bir bölgedir. Herhangi bir arkeolojik açma bulunmamaktadır. Ölçüm profilleri; O6-M6 karelerinde, K45D doğrultusundadır.

“IV Nolu” araştırma alanı; yoğun yapılaşmanın bulunacağı kabul edilen ve Satraplık Saray kalıntılarının olabileceği düşünülen bölgedir. Araştırma alanına yakın birçok arkeolojik açma ve sondaj yapılmış küçük buluntular dışında belirgin

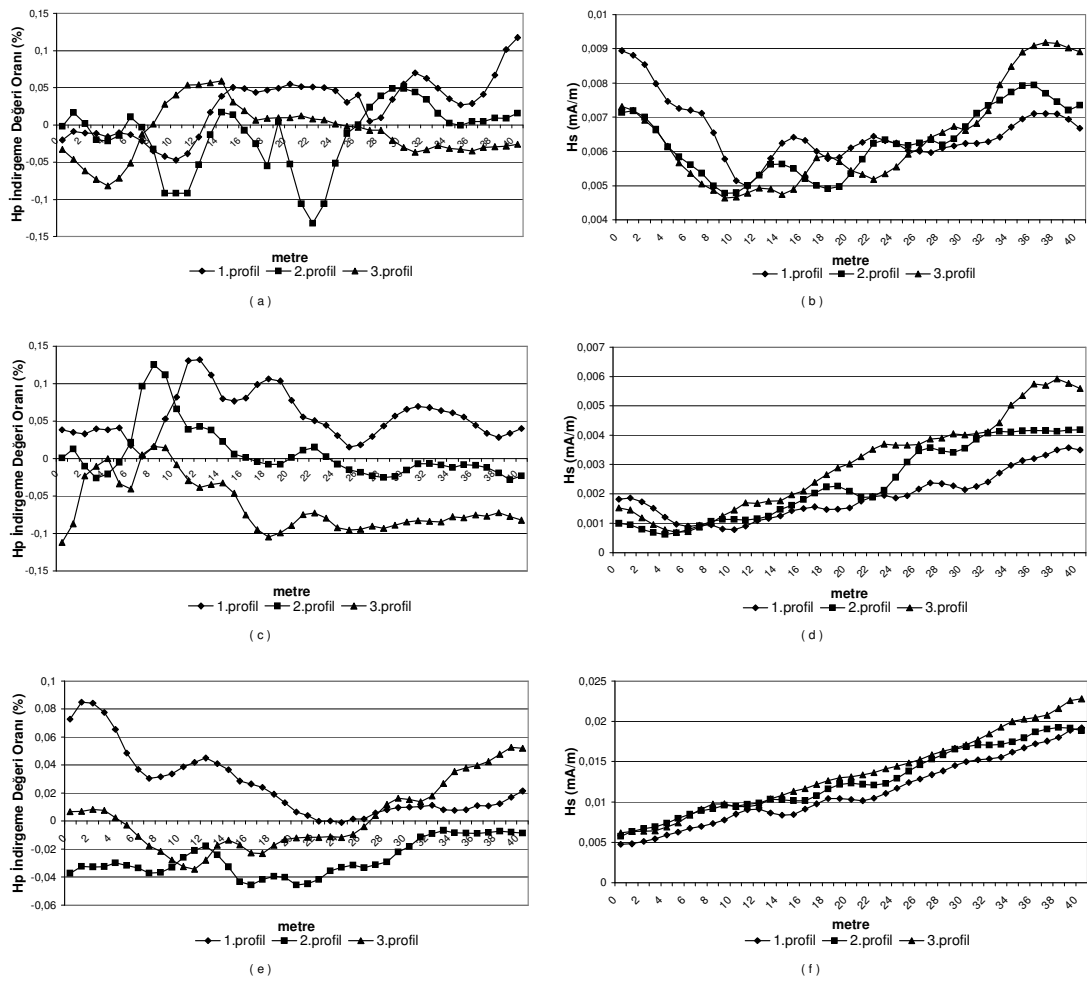
yapılaşmaya ulaşamamıştır. L6-I6'dan L5-I5 karelerine, K45D doğrultulu profiller üzerinde çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 5.16 Daskyleion arkeolojik kazı alanı “Hisartepe” lokasyonu ve jeofizik araştırma bölgeleri (Numaralandırılmış alanlar) yer bulduru haritası.

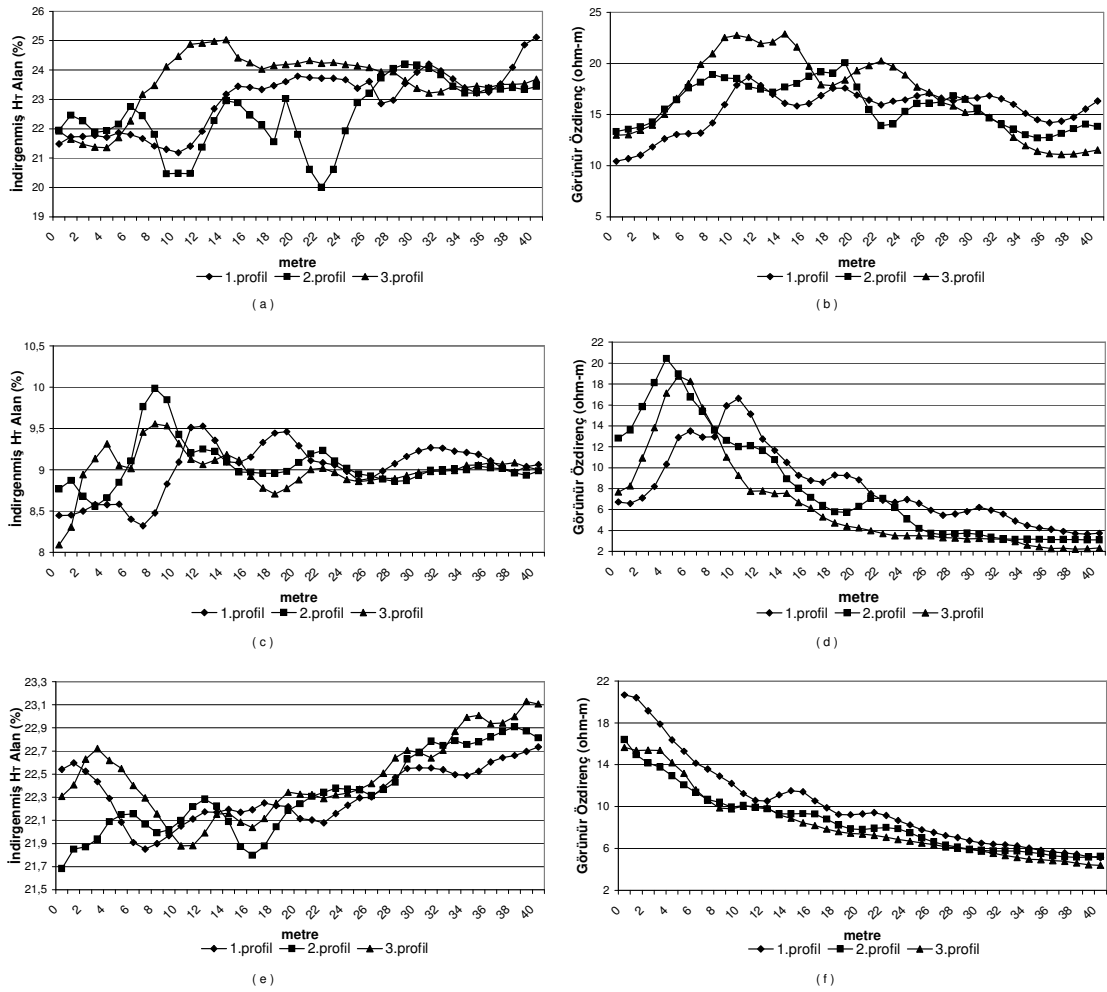
5.1.2.1 “I Nolu” Araştırma Alanı

Bu alanda; 2,20m genişliğinde BD uzanımlı sur duvarının devamlılığı araştırılmıştır. GK doğrultusunda, 2m aralıklı üç adet 40m’lik profilde 1m örnekleme aralığı ile ölçüler alınmıştır (Şekil 5.16). 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz istasyonları kullanılarak üç frekansta ölçümler yapılmıştır. Her frekanslar için indirgeme değeri değişim oranının EM alan ve bileşenlere etkisi hesaplanmıştır. Hesaplanan indirgeme değeri oranı ve Hs alan değişim grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5.17).



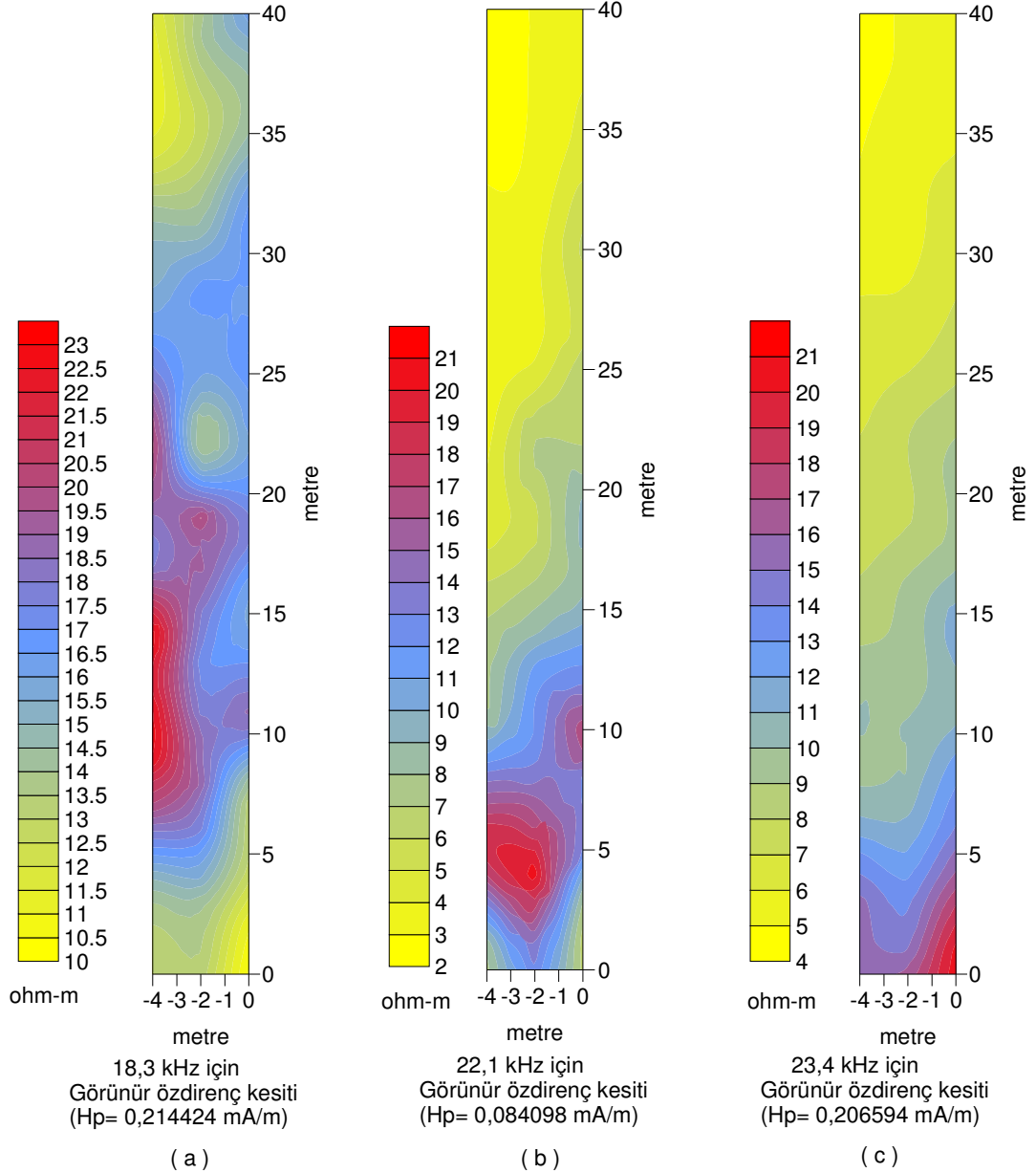
Şekil 5.17 “I Nolu” araştırma alanı profilleri; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan, 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

Her üç frekans için hesaplanan indirgeme değeri kullanılarak elde edilen düzeltilmiş H_T alan ve indirgenmiş bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç değişim grafikleri Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 “I Nolu” araştırma alanı profilleri (indirgeme değerine düzeltilmiş); 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür öz direnç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür öz direnç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür öz direnç grafikleri

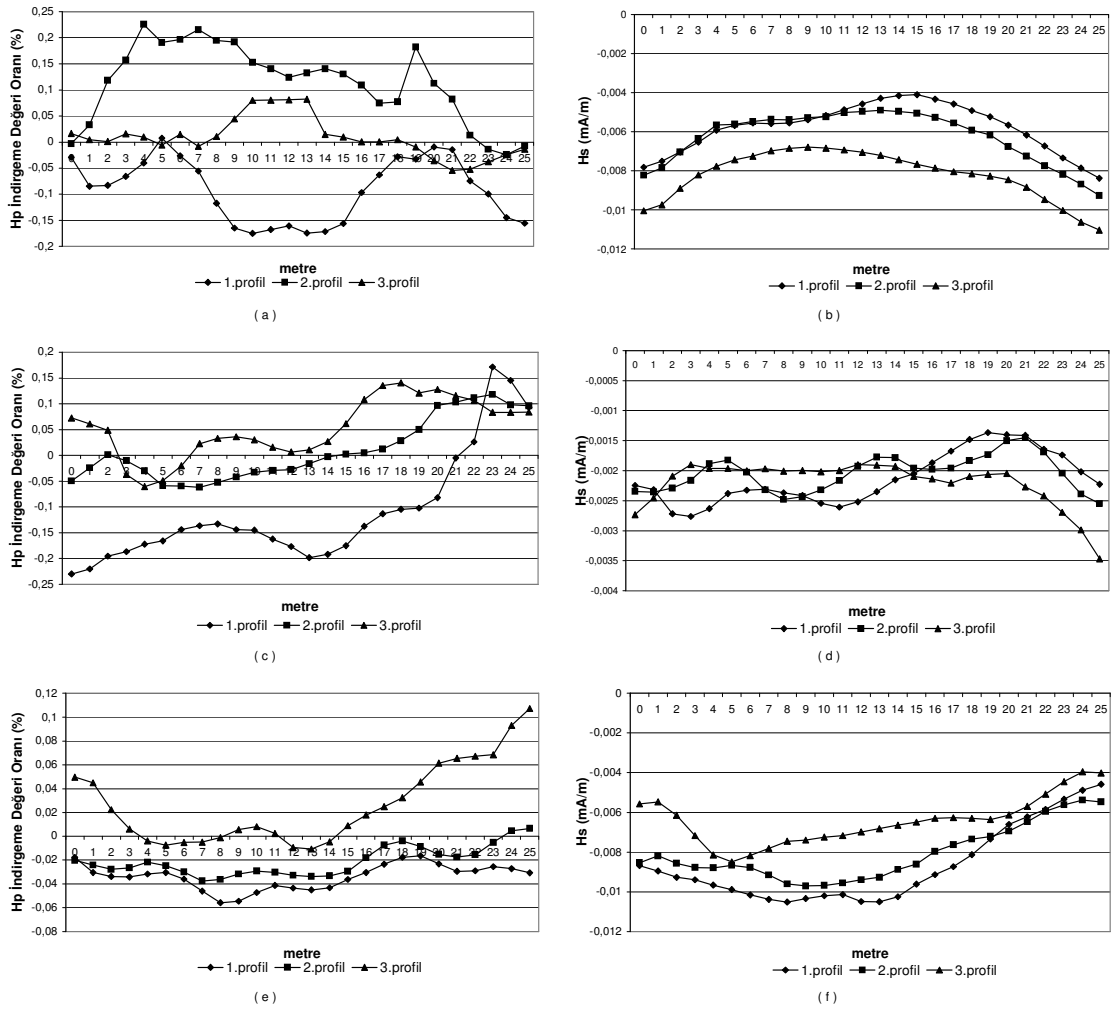
Ortamin, üç frekansa ait hesaplanan iki boyutlu görünür öz direnç yapay yüzey haritaları oluşturulmuştur (Şekil 5.19). Bu çalışma alanında; frekanslara bağlı etkin derinlik 18,3kHz için 14,9m, 22,1kHz için 9,4m ve 23,4kHz için 8,7m hesaplanmıştır. Şekil 5.19’da verilen 18,3kHz haritasında ikinci ve üçüncü profillerde etkisini arttıran 7m ile 16m ölçüm noktasına kadar uzanan yapının varlığı görülmektedir. 16m ile 24m arasında düzensiz bir dağılım görülmektedir. Etkin derinliğe bağlı olarak yüzeye yakın yüksek öz direnç değerleri 22,1kHz ve 23,4kHz frekans ölçümlerinde 0m ve 10m ölçüm noktaları arasına kaymaktadır.



Şekil 5.19 “I Nolu” araştırma alanı profilleri; (a) 18,3kHz (b) 22,1kHz (c) 23,4kHz için indirgeme değeri düzeltilmesi yapılmış bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç yapay yüzey haritaları.

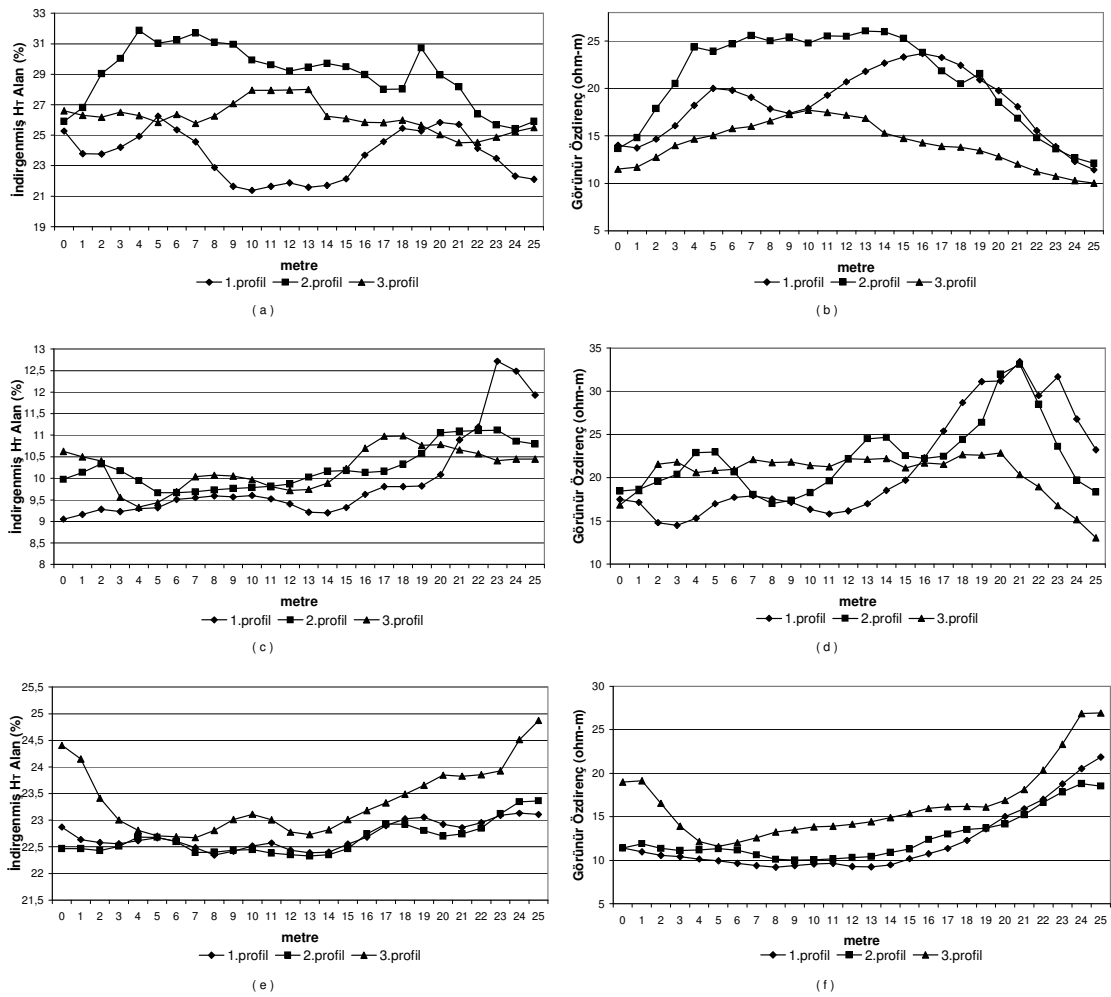
5.1.2.2 “II Nolu” Araştırma Alanı

“II Nolu” araştırma alanında; O8-O7 karelerinde, K45B doğrultulu, 1m örnekleme ile 2m aralıklı, üç adet 30m’lik profillerde veriler alınmıştır (Şekil 5.16). Her üç frekans için indirgeme değeri oranı ve bu orana bağlı H_s alan değişimleri grafiklenmiştir (Şekil 5.20).



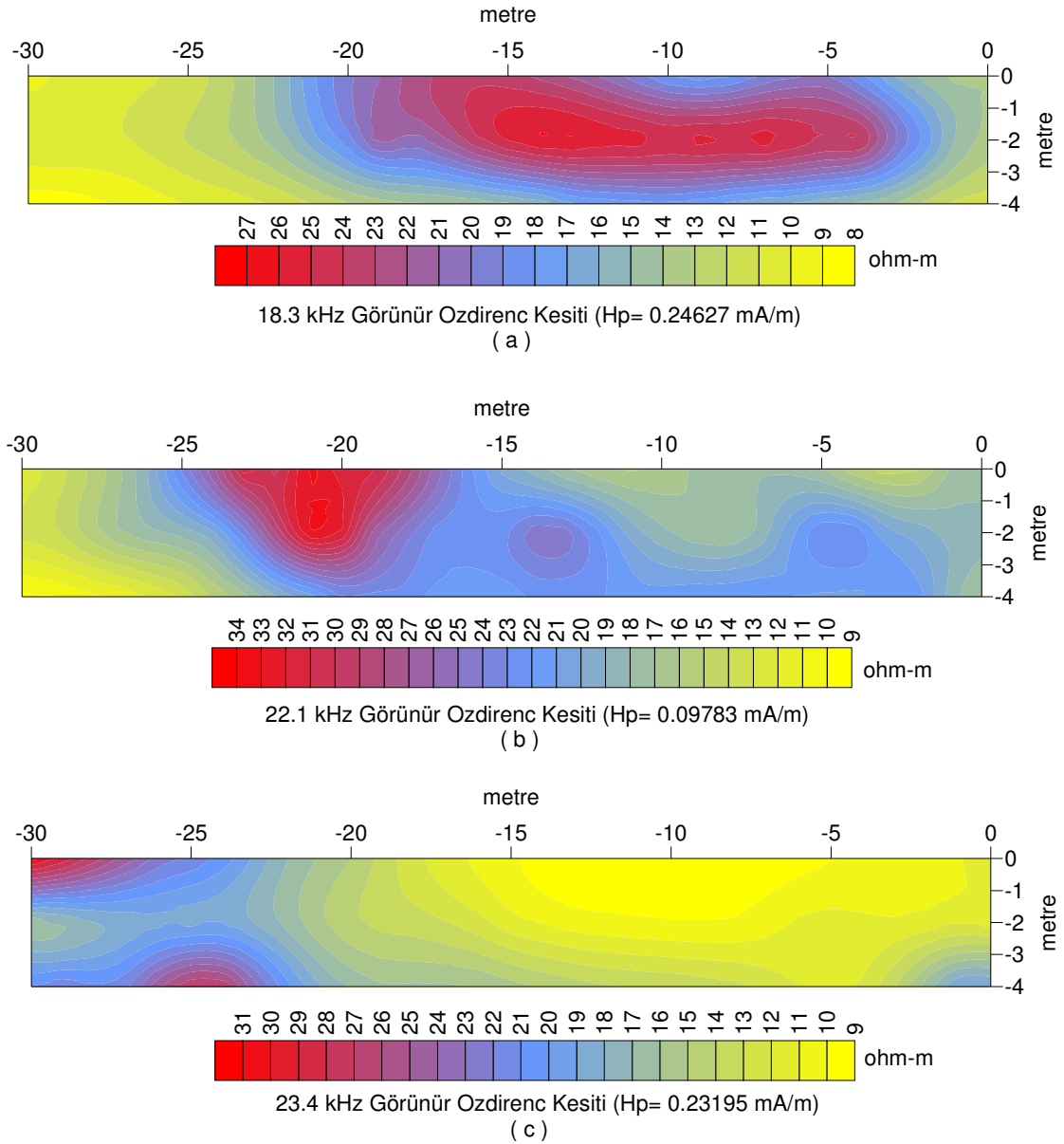
Şekil 5.20 “II Nolu” araştırma alanı profilleri; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan, 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

Frekansların, indirgeme değerine düzeltilmiş, H_T alan ve bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç değerleri değişim grafikleri verilmiştir (Şekil 5.21). 18,3kHz frekansı için sabit H_p alan içerisinde H_T alan değişimleri profiller arasında saçılım göstermektedir. Bu durum, derinlere doğru kuvvetli Hs alan yaratan öz direnci farklı bir yapılanmanın etkisidir.



Şekil 5.21 “II Nolu” araştırma alanı profilleri; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri

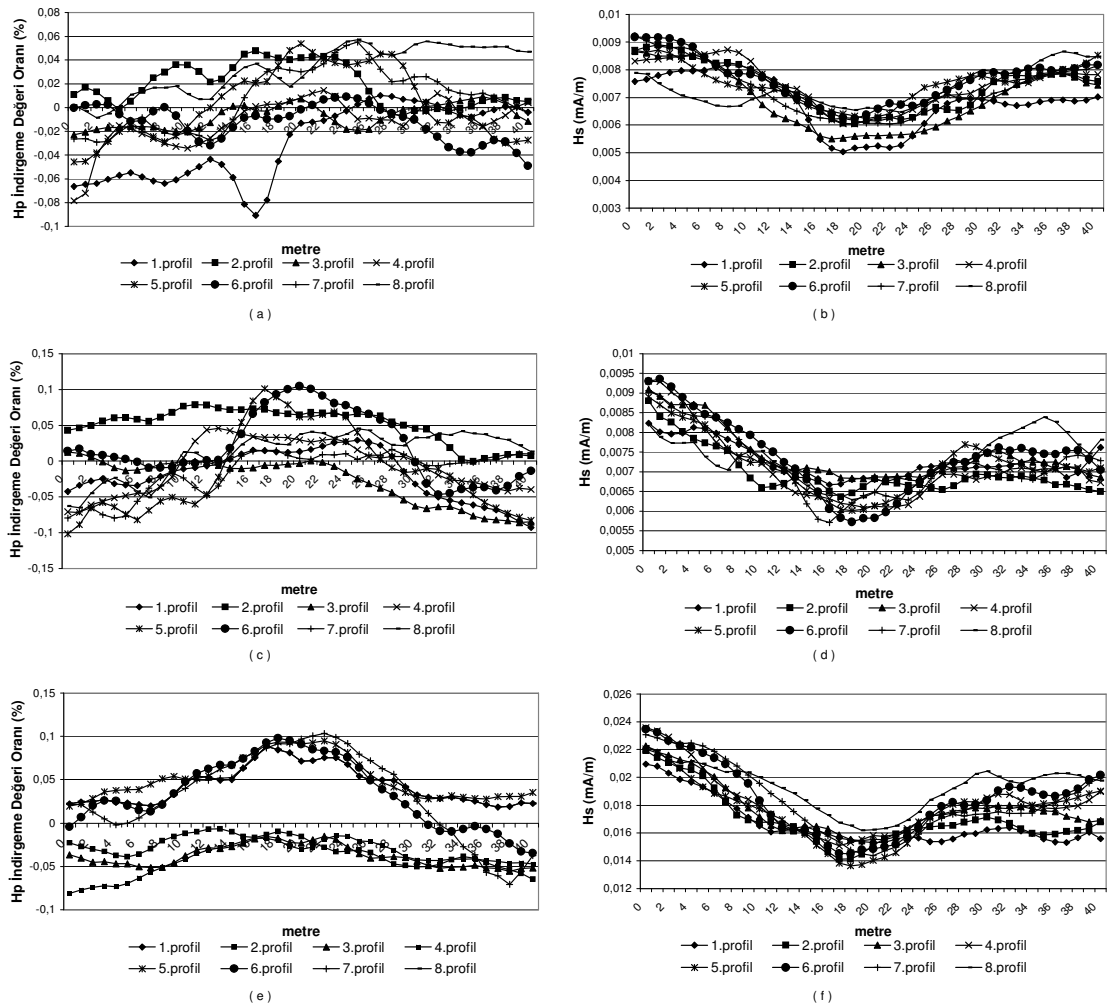
Üç frekansın ortama ait hesaplanan, iki boyutlu görünür özdirenç yapay yüzey haritaları oluşturulmuştur (Şekil 5.22). Çalışma alanında, frekanslara bağlı etkin derinlik 18,3kHz için 15,2m, 22,1kHz için 14,7m ve 23,4kHz için 12,8m bulunmuştur. Ortam özdirençine bağlı, düşük frekans ölçüleri bütün olası derin yapıların etkisini içermektedir. Şekil 5.22’de verilen haritalarda 3m ile 21m’ye kadar uzanan, özellikle ikinci profilde etkisi en büyük olası bir yapının varlığı görülmektedir. Bu belirti; eğimli Pers duvarın dönen uzanımı olma olasılığı yüksektir. 22,1kHz için 17m ile 23m ölçüm noktaları ve 23,4kHz frekansı için 23m ile 28m ölçüm noktaları arasındaki görünür özdirenç artışı, arkeolojik açma ile bulunmuş birleşik Roma mezar yapısıdır.



Şekil 5.22 “II Nolu” araştırma alanı profilleri; (a) 18,3kHz (b) 22,1kHz (c) 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnc yapay yüzey haritaları.

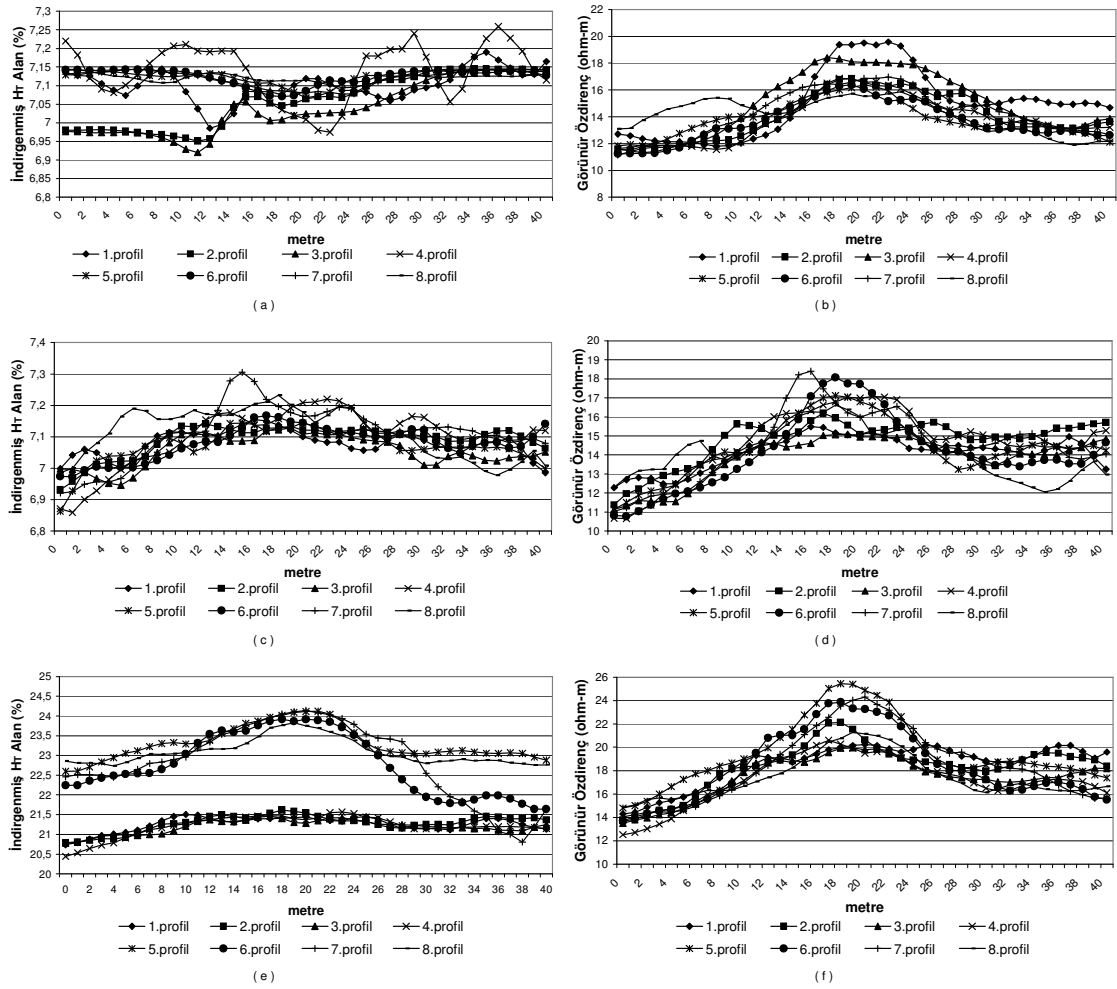
5.1.2.3 “III Nolu” Araştırma Alanı

Lokasyon haritasındaki; “III Nolu” araştırma alanı, O6-M6 karelerinde, K45D doğrultulu, 2m aralıklı, üç adet 40m’lik profilde 1m örnekleme aralığı ile veriler alınmıştır. 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz istasyon frekansları için indirgeme değeri oranı ve bu orana bağlı H_s alan değişim grafikleri şekil 5.23’de verilmektedir.



Şekil 5.23 “III Nolu” araştırma alanı profilleri; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b)indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan, 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

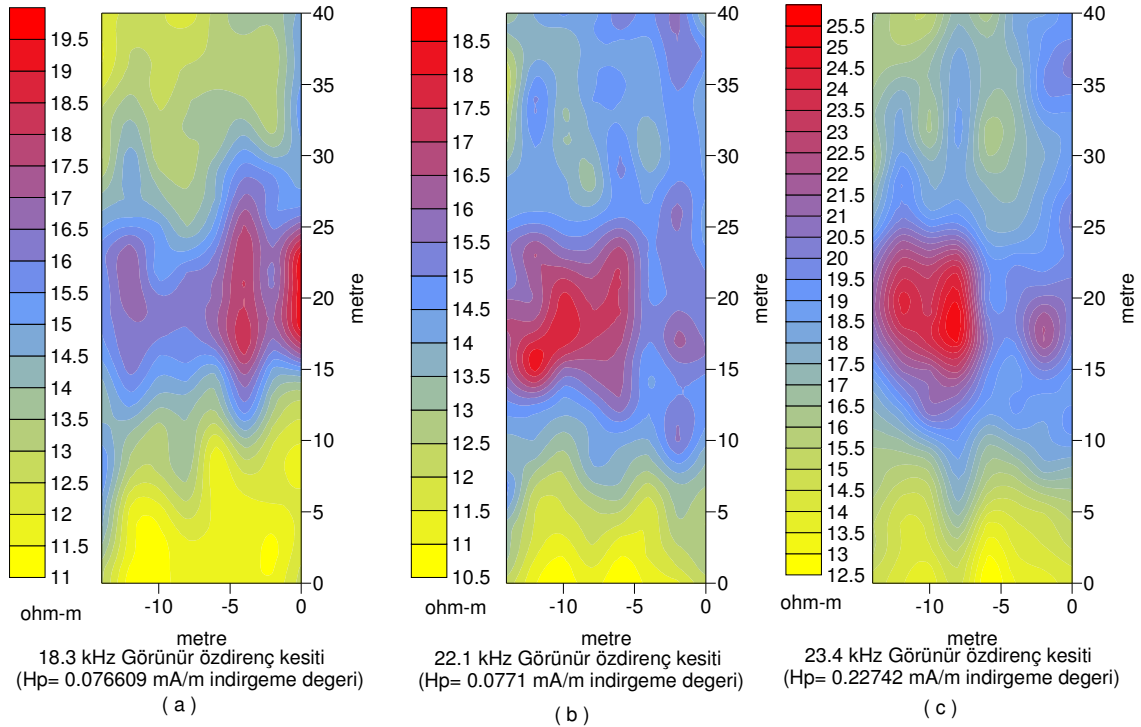
Her üç frekans ölçümünden hesaplanan, indirgeme değerine düzeltilmiş H_T alan ve bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç değişim grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5.24). Dikkat edilirse; 18,3kHz için ilk profilde Hp alan şiddetindeki değişim oranı, H_T alan değişimini doğrudan etkilemektedir. Ancak; düzeltilmiş alan bileşenlerinden hesaplanan görünür özdirenç değerleri, profiller arasında aynı trendi vermektedir. Aynı durum 23,4kHz frekansı ilk üç profil ölçümleri için de söylenebilir ki sabit Hp alana indirgeme işleminin önemini vurgulamaktadır. 18,3kHz frekansının oluşturduğu H_T alan şiddeti, bu çalışma alanı için düşük değerlerde çıkmıştır. Bu durum; VLF istasyonlarının aynı frekansta ama sürekli aynı güçte yayın yapmadıklarını göstermektedir.



Şekil 5.24 “III Nolu” araştırma alanı profilleri; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri

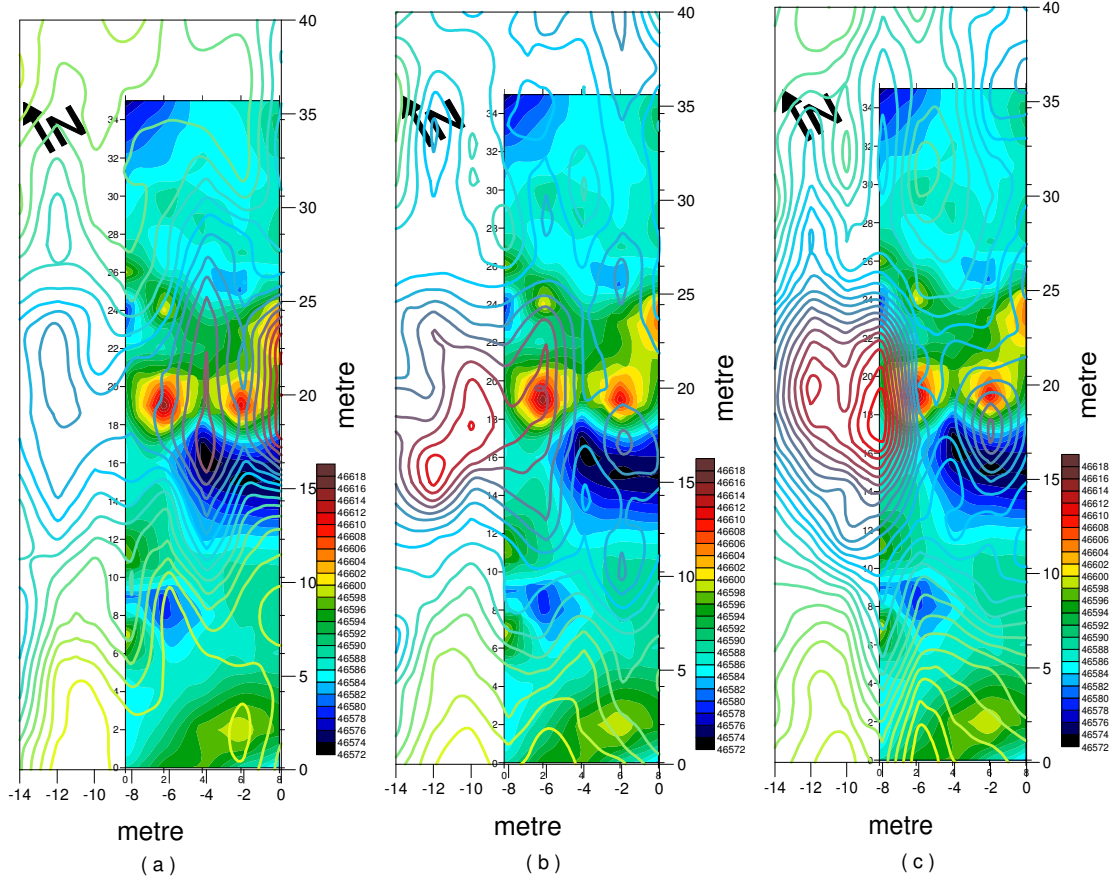
Ortama ait, üç frekans için hesaplanan iki boyutlu görünür özdirenç yapay yüzey haritaları hazırlanmıştır (Şekil 5.25). Alanın, frekanslara ait etkin derinlikler 18,3kHz için 14,4m, 22,1kHz için 12,8m ve 23,4kHz için 14,0m olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.25’de verilen görünür özdirenç yüzey haritalarında; 15m’den 25m ölçüm noktalarına uzanan ve bütün profillerde etkisi görülen olası bir yapının varlığıdır. Bu belirtinin etkisi geniş alana yayılmakta, son profillerde yüzeye yakın dağılıma dönmektedir. Belirtiler doğrultusunda birinci profilin 20m ile 24m arasına bir açma önerilmiştir. 3×3m’lik açmada yüzeyde, yakın döneme ait döküntüler ve ince teraslama katmanı çıkmıştır. Altta yaklaşık 1,5m derinlikte Pers dönemine ait olduğu kesinleşen profil başlangıcına doğru yıkılmış yapı duvarı bulunmuştur (yaklaşık

40cm yüksekliğinde iki sıra yapı temeli bozulmamıştır). Yapı duvarının iç tarafında kalın bir yangın katmanı ortaya çıkmıştır. Bu yangın katmanında Anadolu'da ilk defa bulunan Pers dönemine ait işlemeli ve sırlı seramik kap parçaları bulunmuştur. 15m ölçüm noktalarındaki anomalinin nedeni ise sonraki medeniyetlerin bıraktığı, silindirik yapıda, yaklaşık 1m çapında, çatı kiremitleri ile dolu atık çukurudur.



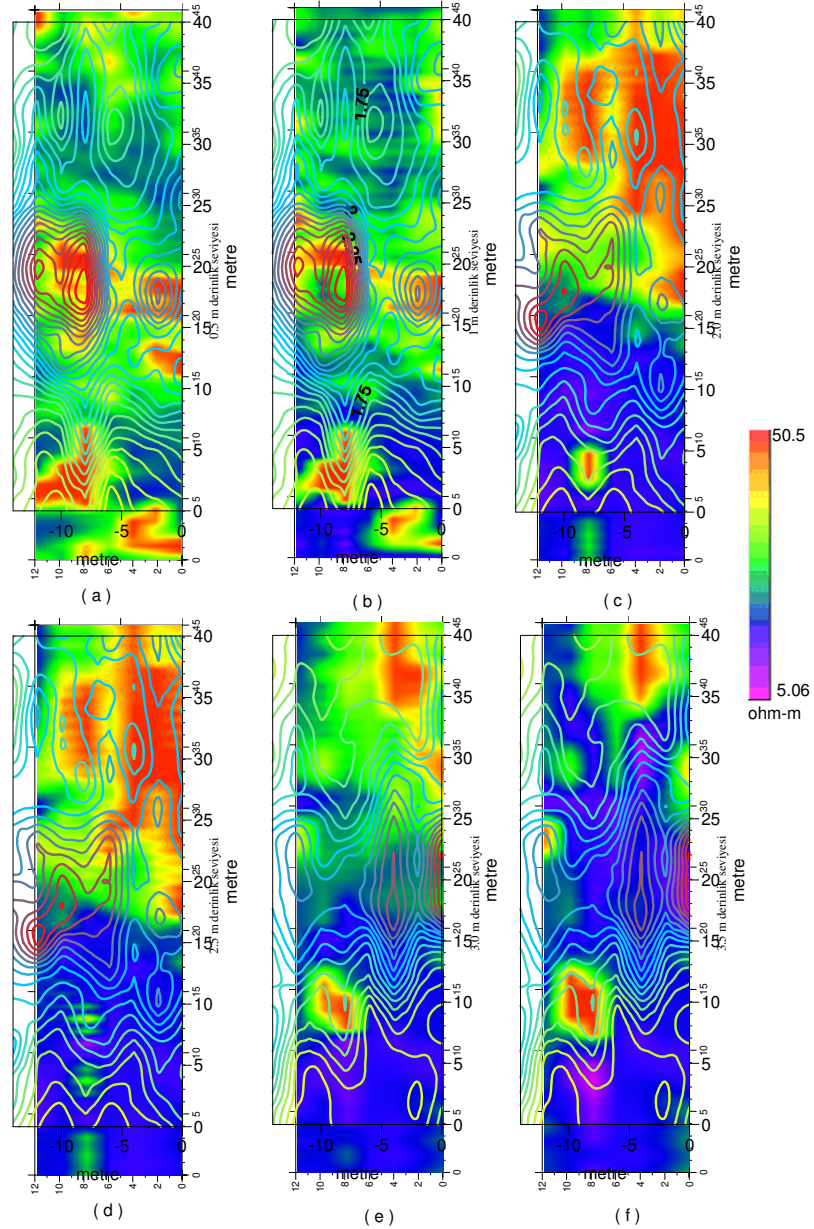
Şekil 5.25 “III Nolu” araştırma alanı, (a) 18,3kHz, (b) 22,1kHz, (c) 23,4kHz için indirgeme değeri düzeltilmesi yapılmış bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç değişimi yüzey haritaları.

Şekil 5.26’da bu alanda yapılmış olan toplam manyetik alan verilerinin yüzey haritası ile VLF-EM yönteminin her üç frekans ölçüm sonuçlarının aynı koordinata bağlanarak verilmiştir. Ortama ait ortak belirtiler, 15m ile 25m ölçüm noktaları arasında olası yapı varlığını göstermektedir. Manyetik ölçümler 46570nT ile 46620nT aralığında değişmektedir. En büyük manyetik alan değerleri yangın tabakasının ortaya çıkarıldığı bölgedir. Çatı kiremitlerinin bulunduğu atık çukuru da yangın tabakası ile sınırdır ve en büyük toplam manyetik alan değeri vermektedir.



Şekil 5.26 “III Nolu” araştırma alanı için aynı koordinatlara bağlanmış toplam manyetik alan ile a) 18,3kHz, b) 22,1kHz, c) 23,4kHz ölçümlerinden hesaplanan görünür özdirenç değişimi haritaları.

Şekil 5.27’de DC (doğru akım) Schlumberger-Wenner dizilimi özdirenç tomografi çalışması sonucu hesaplanan eşseyiye derinlik kesitleri ile VLF-EM yönteminin her üç frekans sonuçları, aynı koordinatlara bağlanarak verilmiştir. Tomografi kesitleri 0,5m, 1m, 2m, 2,5m, 3m ve 3,5m seviyeleri için oluşturulmuştur. Ortamın özdirenç değerleri 5 ohm-m ile 50 ohm-m aralığında değişmektedir. Yüksek frekanstan, düşüğe doğru VLF-EM yöntemi sonuçları, yüzeyden derine doğru değişen özdirenç seviye kesitleri ile bir uyum göstermektedir. VLF-EM yöntemi; ortamın manyetik geçirgenliği ile de ilişkili olduğundan, galvanik bağlantılı DC özdirenç yöntemleri kadar ortamın özdirenç değişimlerine karşı duyarlı değildir.



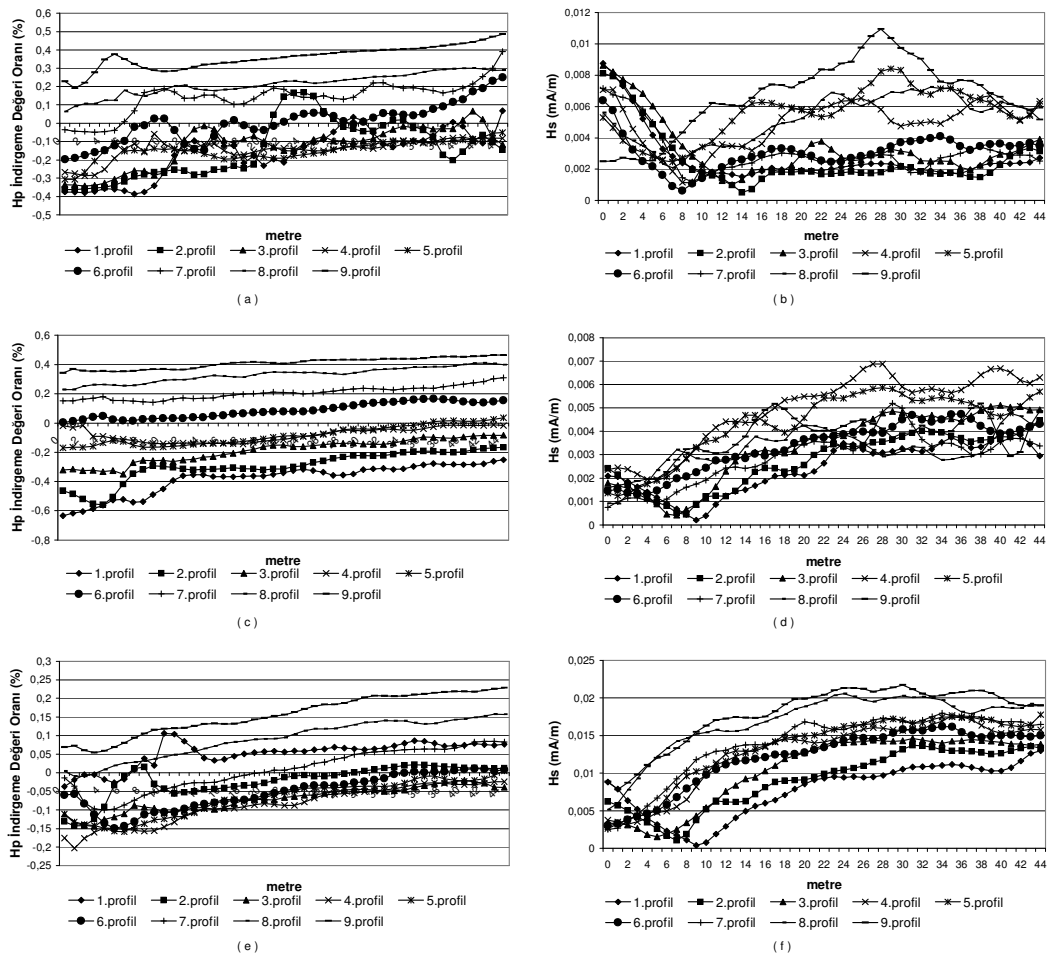
Şekil 5.27 “III Nolu” araştırma alanı; aynı koordinata bağlanmış, öz direnç (Sch-Wen) tomografi ve VLF-EM sonuçları a) 23,4kHz ile 0,5m , b) 23,4kHz ile 1m , c) 22,1kHz ile 2m , d) 22,1kHz ile 2,5m, e) 18,3kHz ile 3m , f) 18,3kHz ile 3,5m eş seviye haritalarının karşılaştırılması.

5.1.2.4 “IV Nolu” Araştırma Alanı

Lokasyon haritasında IV numara ile gösterilen araştırma alanında; çalışmalar iki aşamalı yapılmıştır. Bölgede, arkeologlar tarafından Satraplık Sarayı'nın küçük çaplı temel kalıntılarının olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle ortamdaki küçük değişimlerin görülebilmesi için kareler halinde ölçümler alınmıştır. Çalışma alanında;

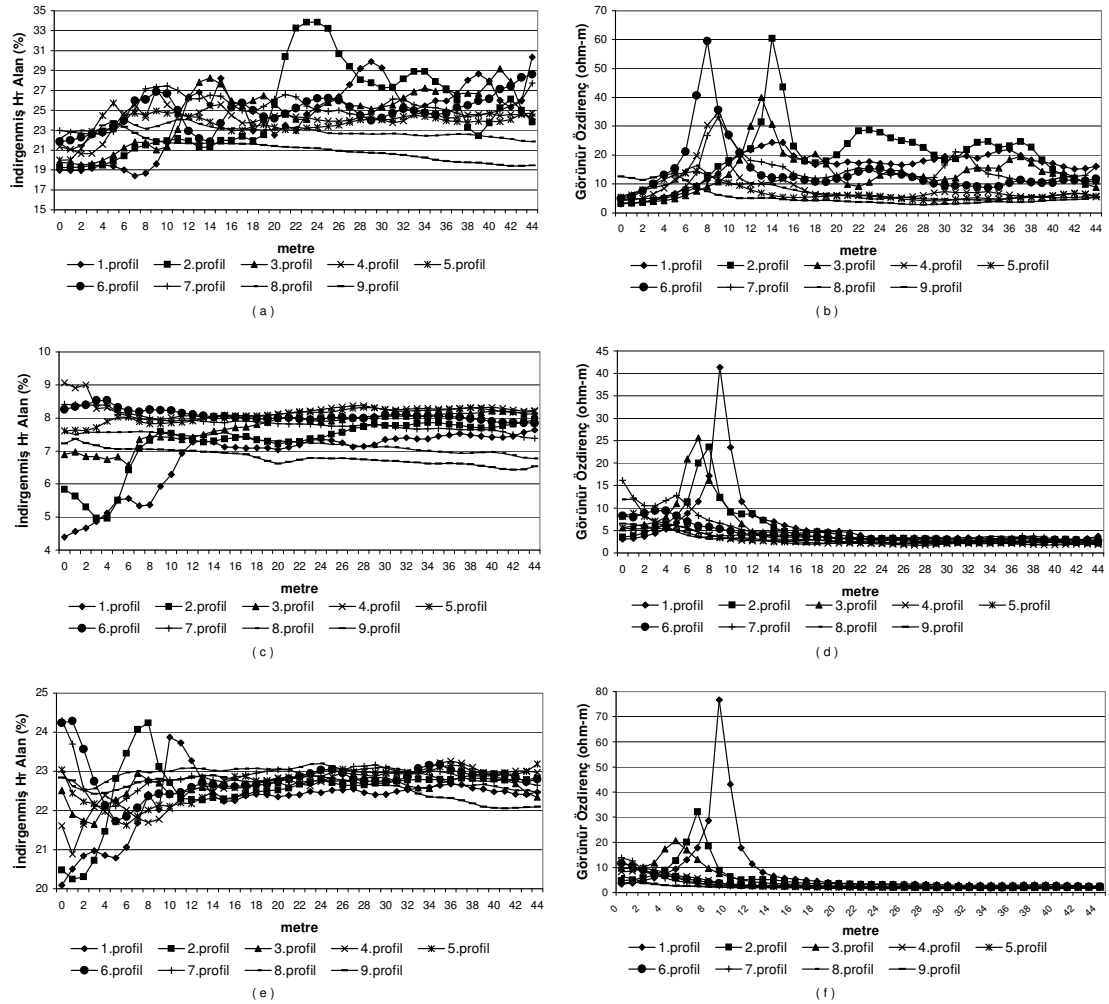
uzun ve kısa kenarlar boyunca profil ölçümleri alınmıştır. Birinci aşamada; L6-I6'dan L5-I5 karelerine doğru "Paralel" profillerde, K45D doğrultulu, 2m aralıklı, 44m'lik dokuz profilde, 1m örnekleme ölçmeler yapılmıştır. İkinci aşamada; kısa kenar boyunca, "Paralel" profillere "Dik" K45B doğrultulu, 2m profil, 1m örnekleme aralığında yirmi adet 21m'lik profillerde ölçümler alınmıştır (Şekil 5.16). Araştırma bölgesinde; 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz frekansları için, "paralel" ve "dik" doğrultulu profiller iki alt başlıkta verilmektedir.

5.1.2.4.1 "IV Nolu" Araştırma Alanı "Paralel" Profiller. Dokuz adet "Paralel" profil için her frekansa ait indirgeme değeri oranı ve ortama ait Hs alan değişimleri, hesaplanarak grafikleri verilmiştir (Şekil 5.28). Bu alanda; profil başına değişim oranları artan bir doğrusallık göstermektedir.

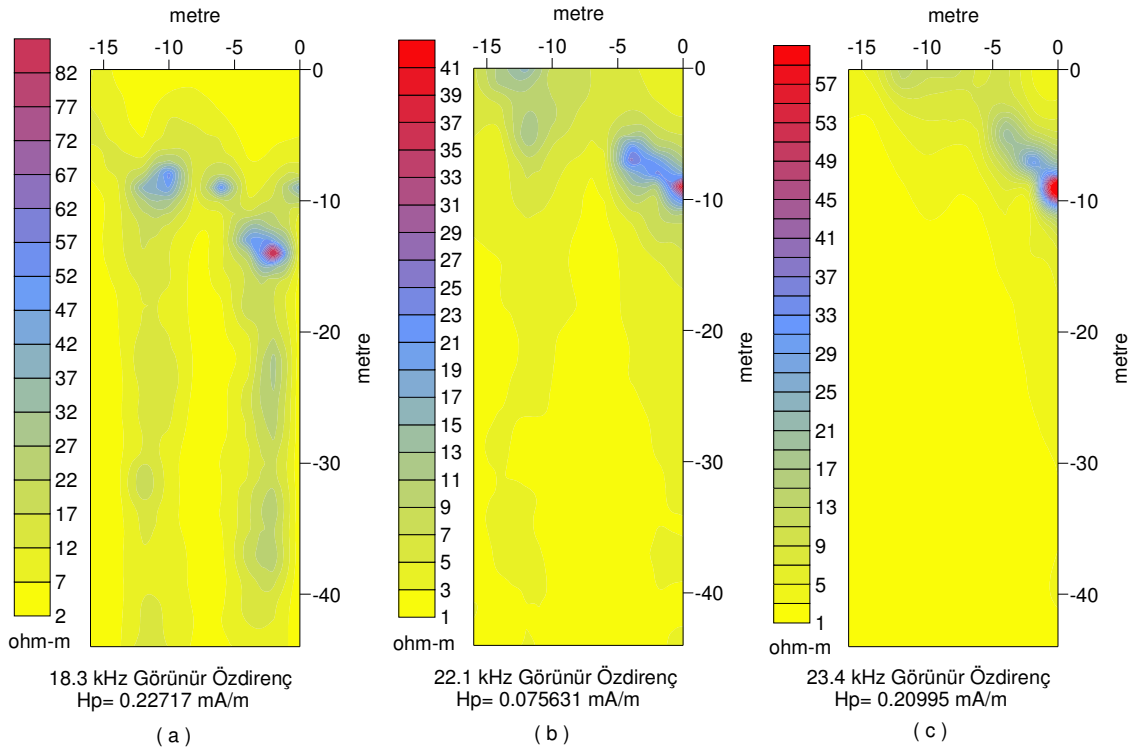


Şekil 5.28 "IV Nolu" araştırma alanı "Paralel" profiller; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan, 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

Her üç frekans için hesaplanan indirgeme değeri kullanılarak elde edilen düzeltilmiş H_T alan ve bileşenlerden hesaplanmış görünür özdirenç değişim grafikleri şekil 5.29’da verilmiştir. Dikkat edilirse; 22,1kHz ve 23,4kHz grafiklerinde H_p alan şiddetinin değişim oranı artan bir doğrusallık göstermesine karşın, H_T alan değişimi profillerin ilk 15m ölçüm noktasında çok değişken belirtiler vermektedir. Bu durum; çalışma alanında, yüzeye yakın ortamın, düzensiz olduğunu gösterir. Özdirenç grafiklerine bakıldığında, bazı noktalarda çok yüksek görünür özdirenç değerlerine ulaşıldığı görülür. 18,3kHz ölçüm sonuçları; derine doğru, bu karmaşık yapı formunun devam ettiğini göstermektedir. İndirgeme işleminin yapılmamış olsaydı böyle karmaşık bir ortam içerisinde yanıltıcı belirtilerin alınması kaçınılmazdı.



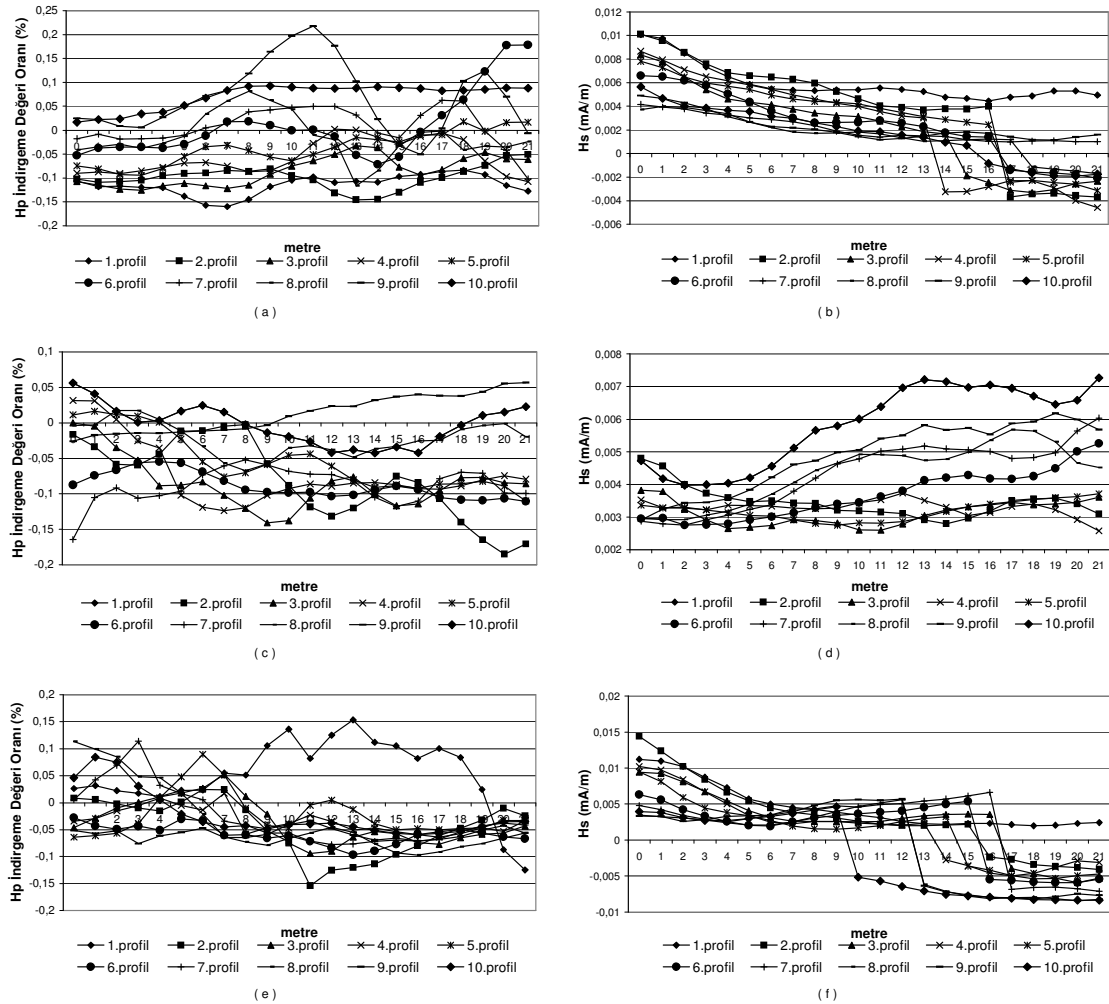
Şekil 5.29 “TV Nolu” araştırma alanı “Paralel” profiller; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri



Şekil 5.30 “IV Nolu” araştırma alanı “Paralel” profiller; (a) 18,3kHz (b) 22,1kHz (c) 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç yapay yüzey haritaları.

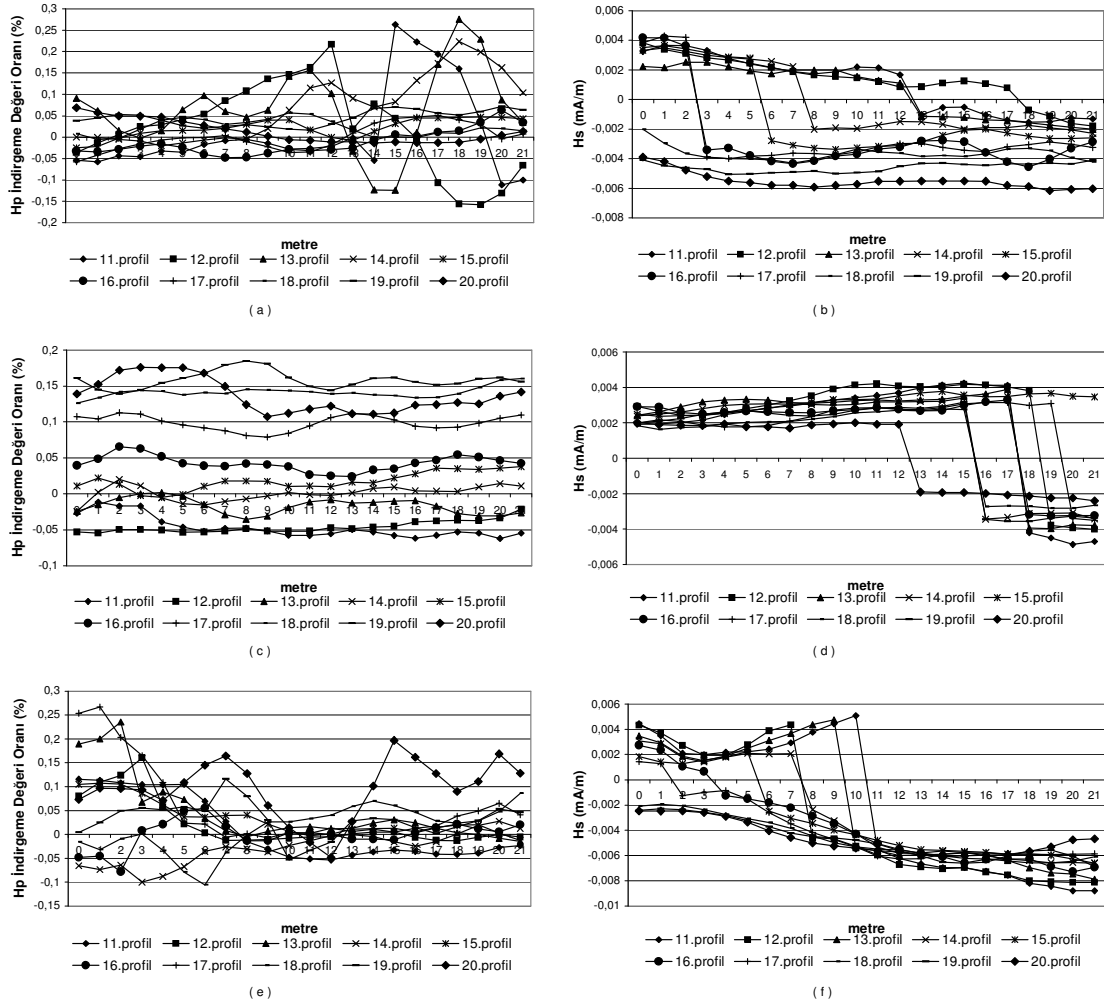
Üç frekans için hesaplanan görünür öz direnç yapay yüzey haritaları şekil 5.30’da verilmiştir. Frekanslara bağlı ortamın etki derinlikleri; 18,3kHz için 12,9m, 22,1kHz için 8,3m ve 23,4kHz için 7,2m olarak hesaplanmıştır. Ortamın öz direncine bağlı olarak, 18,3kHz ölçümleri ayrımlılığı en yüksek ve bütün olası yapıların etkilerini vermektedir. 2m ile 11m’lerde profillere paralel uzanan, olası bir yapının etkisi görülmektedir (Şekil 5.30). Bu belirtileri, 7m ile 11m ölçüm noktaları arasında dağılım gösteren, profillere dik uzanımlı belirtiler kesmektedir. Yüze doğru görünür öz direnç artışı, ilk profillerde 3m ile 10m ölçüm noktalarına doğru kaymaktadır. 22,1kHz ve 23,4kHz frekanslarında azalan değerlerde devam etmektedir. Çalışma alanında; arkeologlar tarafından Satrap Sarayı’nın teraslanmış temel yapısında olacağı düşünülmektedir. Bölgedeki açmalarda ortaya çıkan teraslama işleminde kil, marn ağırlıklı yoğun ve kalın dolgu malzemesi kullanılmıştır. 2005 kazı dönemin içinde bu bölgede açmaların yapılması planlanmaktadır.

5.1.2.4.2 “IV Nolu” Araştırma Alanı “Dik” Profiller. Araştırma alanının, kısa kenarı boyunca; yirmi adet “Dik” profilin her frekansa ait indirgeme değeri oranı ve ortama ait Hs alan değışim grafikleri onarlı gruplar halinde verilmiştir. İlk on ve son on profile ait grafikler şekil 5.31 ve şekil 5.32’de verilmektedir. Sabit Hp alan indirgeme oranı, geniş aralıkta düzensiz değışmektedir. İndirgeme değeri; 18,3kHz için 0,23mA/m, 22,1kHz için 0,09mA/m ve 23,4kHz frekansı için 0,25mA/m’dir. İndirgeme işleminin sonucu; Hs alan grafikleri, bölgede değışen öz dirençli ortam sınırlarında terslenme göstermektedir. Hs alanın ters dönmelerinin, farklı metrelerde olması profil bazında ortamın oldukça karmaşık ve düzensiz yer altı modeline sahip olduğunun belirtisidir.



Şekil 5.31 “IV Nolu” araştırma alanı ilk on “Dik” profil; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan , 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değışim grafikleri.

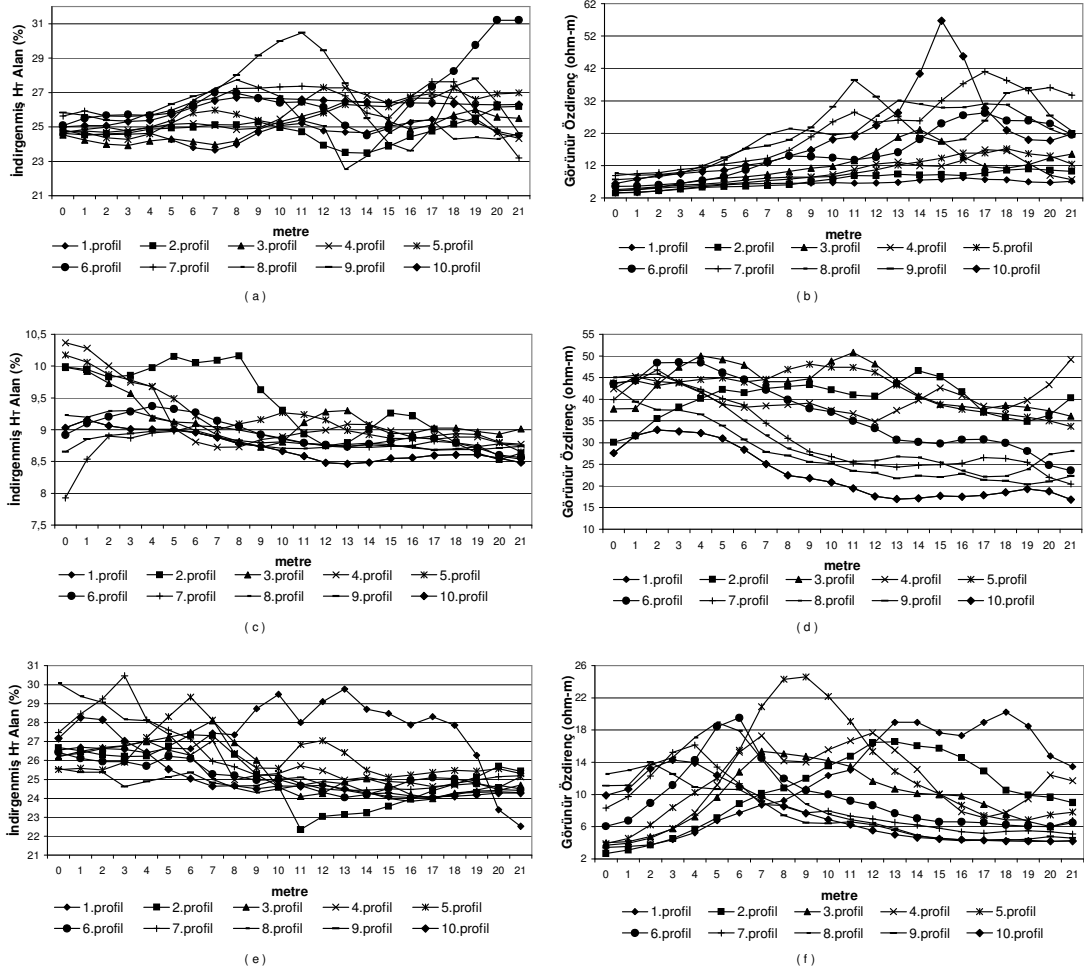
Son on ‐Dik‐ profilde; 22,1kHz frekansı için indirgeme değeri oranı grafiğinde g r ld ği üzere, her profilde artan baz değerinde, fakat sabite yakın bir doğrusallıktadır (Şekil 5.32.c). Atmosferik veya dış manyetik alan bozulmaları görülmemektedir. Ani alan değişimleri veya kısa süreli değişen genlikler yoktur. Bu nedenle, ortama ait Hs alan 13m’lerden sonra diğer profillerin de farklı metrelerinde ters polarlanma olarak ani değişim bölgelerini ve olası yer yapısını işaret etmektedir.



Şekil 5.32 ‐TV Nolu‐ araştırma alanı son on ‐Dik‐ profiller; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan , 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

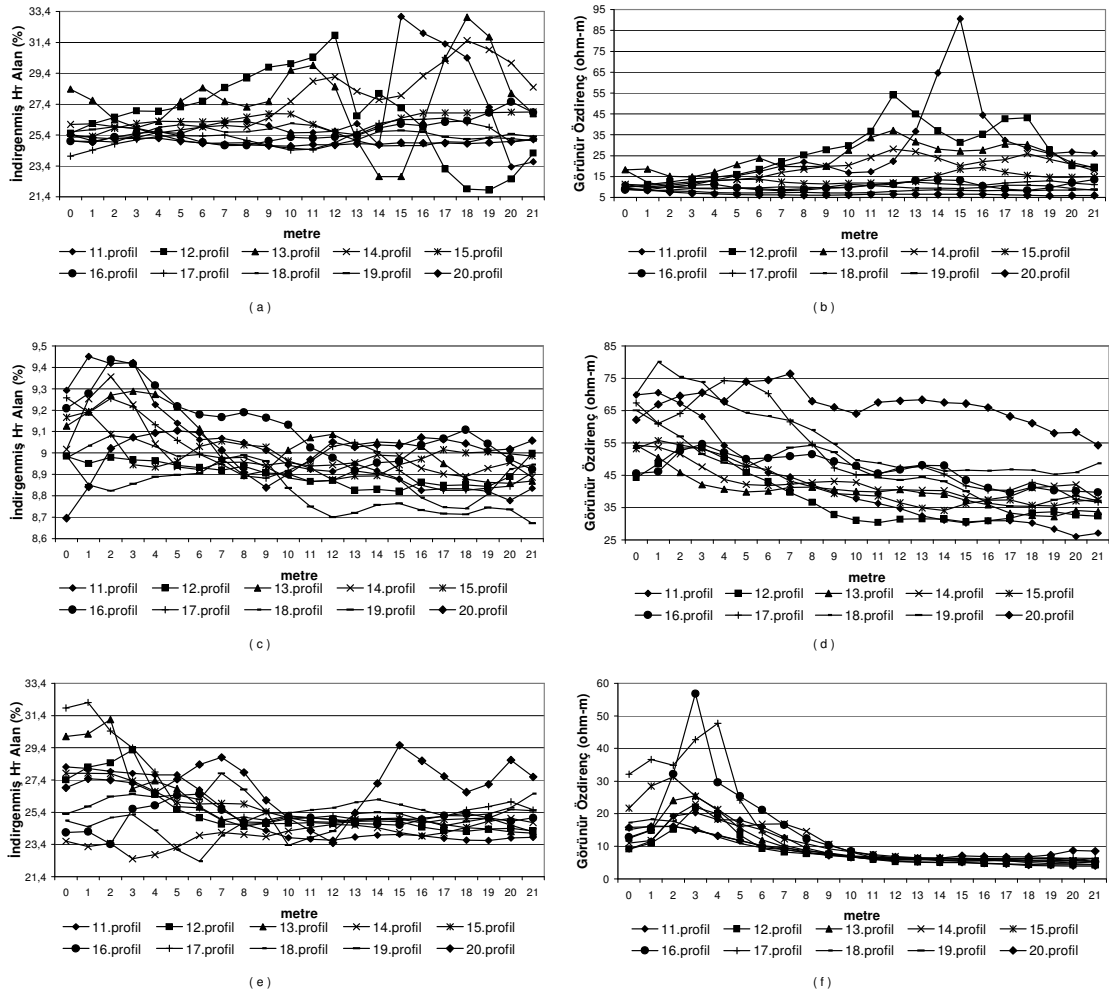
Şekil 5.33-34’de verilen dik profillerin H_T alan değişimleri ve görünür özdirenç grafikleri verilmiştir. 18,3kHz’de 9m ölçüm noktası yakınlarından baŐlayan ve profillerin sonuna kadar devam eden görünür özdirenç değerlerinde artan değişimler görülmektedir. Ortamda düzensizlik sınırları belli metrelerden baŐlamaktadır.

10'uncu profil 15m ölçüm noktası değeri en büyüktür (Şekil 5.33.b). 11'inci profilde de aynı metrelerde en büyük değer görülmektedir (Şekil 5.34.b).



Şekil 5.33 “IV Nolu” araştırma alanı ilk on “Dik” profiller; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri.

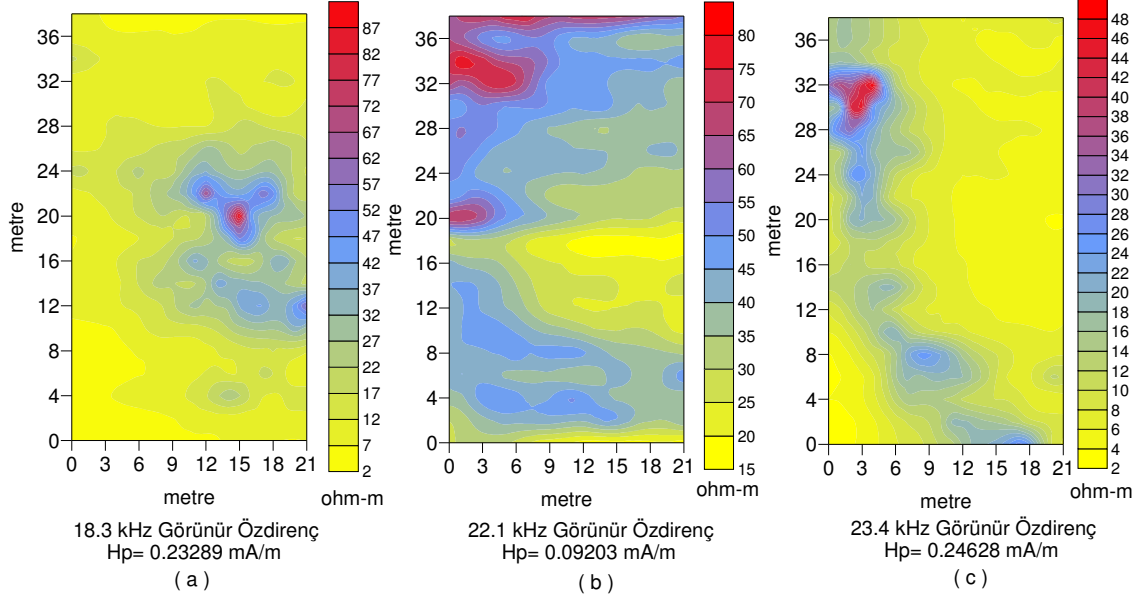
22,1kHz frekans çözümleri, bütün profilleri için fazla değişim göstermeyen özdirenç değerleri bulunmuştur. Ortamda; düşük özdirençli bir ara katman olduğunu göstermektedir. Yapılan arkeoloji açmalarda; medeniyet dönemleri arasında, yeni yapılanma öncesi killi marn kullanılarak sıkıştırma ve temel seviyesini teraslanma işleminin yapıldığı görülmüştür. Düşük özdirençli seviyenin, bu ara katmandan olma olasılığı yüksektir. 23,4kHz frekansı, ilk on profil sonuçlarına göre yüzeye yakın kesimlerde oldukça karmaşık bir yapının olması güçlüdür. Son on profilinin, 2m ile 6m’leri arasında yüksek özdirençli bir ortama girdiği ve son profillere doğru etkisini arttırdığı görülmektedir.



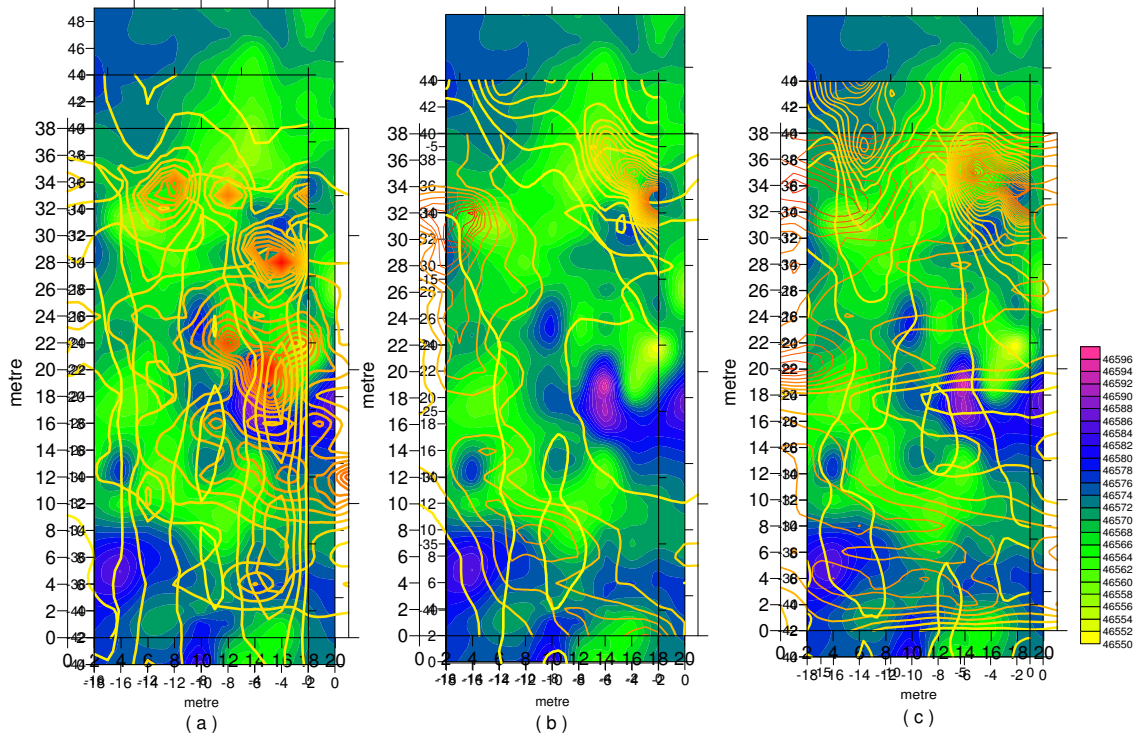
Şekil 5.34 “IV Nolu” araştırma alanı son on “Dik” profil; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri.

Üç frekansın çözümü ile görünür özdirenç yapay yüzey haritaları verilmiştir (Şekil 5.35). Frekanslara ait enbüyük etkin derinlikler; 18,3kHz’de 14,5m, 22,1kHz’de 13,2m ve 23,4kHz’de 10,5m olarak bulunmuştur. Bölgenin çok yıkıma uğramış olduğu arkeolojik açmalarla ortaya çıkmış bu nedenle karmaşık bir yeraltı modeli görülmektedir. “Dik” profiller, ortamdaki olası yapıları kısa kenarları boyunca kestiğinden, “Paralel” profillere göre olası yapı sınırlarına karşı daha duyarlıdır. Şekil 5.36’da bölgede yapılmış olan toplam manyetik alan verilerinin yüzey haritası ile VLF-EM yöntemi “dik” ve “paralel” profillerin her üç frekans ölçüm sonuçları aynı koordinatlara bağlanarak verilmiştir. Ortama ait ortak belirti, olası taban yapısının 18,3kHz frekans sonuçları ile uyumlu olmasıdır. Manyetik

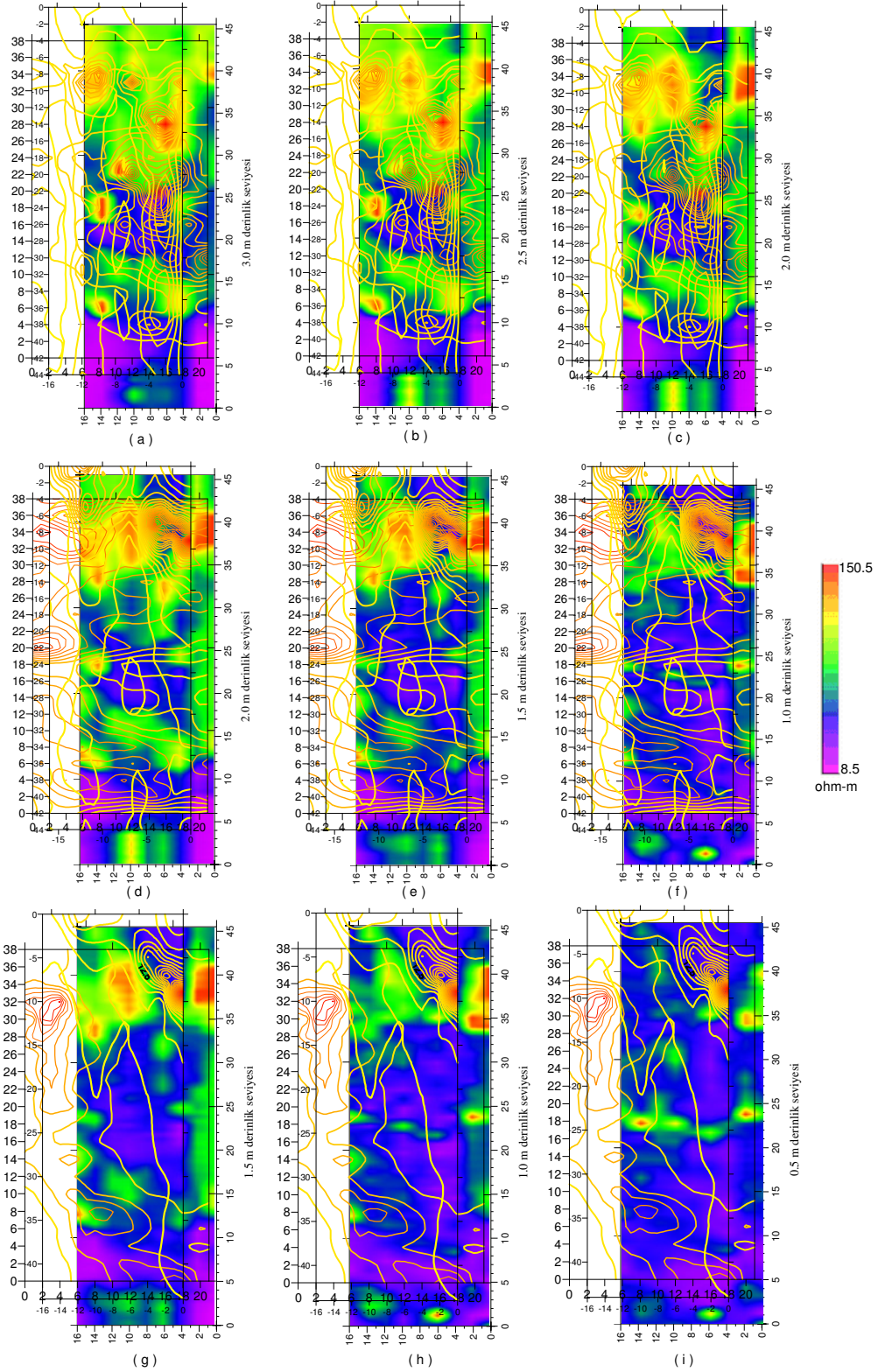
ölçümler 46550nT ile 46596nT aralığında değişmektedir. 14m ile 20m arası ve 28m ile 32m ölçüm noktaları arasındaki belirtilerin uyumu dikkati çekicidir. Yüzeye doğru 32m ile 36m ölçüm aralığına kaymaktadır.



Şekil 5.35 “IV Nolu” araştırma alanı “Dik” profiller; (a) 18,3kHz (b) 22,1kHz (c) 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç yapay yüzey haritaları.



Şekil 5.36 “IV Nolu” araştırma alanı, toplam manyetik alan ile aynı koordinata bağlanmış “Dik” ve “Paralel” profiller için görünür özdirenç değişiminin a) 18,3kHz, b) 22,1kHz, c) 23,4kHz frekans haritalarının karşılaştırması.



Şekil 5.37 “IV Nolu” araştırma alanı, öz direnç (Sch-Wen) tomografi sonuçları ile aynı koordinata bağlı “Dik” ve “Paralel” profiller VLF-EM görünür öz direnç; a) 18,3kHz ile 3m, b) 18,3kHz ile 2,5m, c) 18,3kHz ile 2m, d) 22,1kHz ile 2m, e) 22,1kHz ile 1,5m, f) 22,1kHz ile 1m, g) 23,4kHz ile 1,5m, h) 23,4kHz ile 1m, i) 23,4kHz ile 0,5m eşseviye haritalarının karşılaştırması.

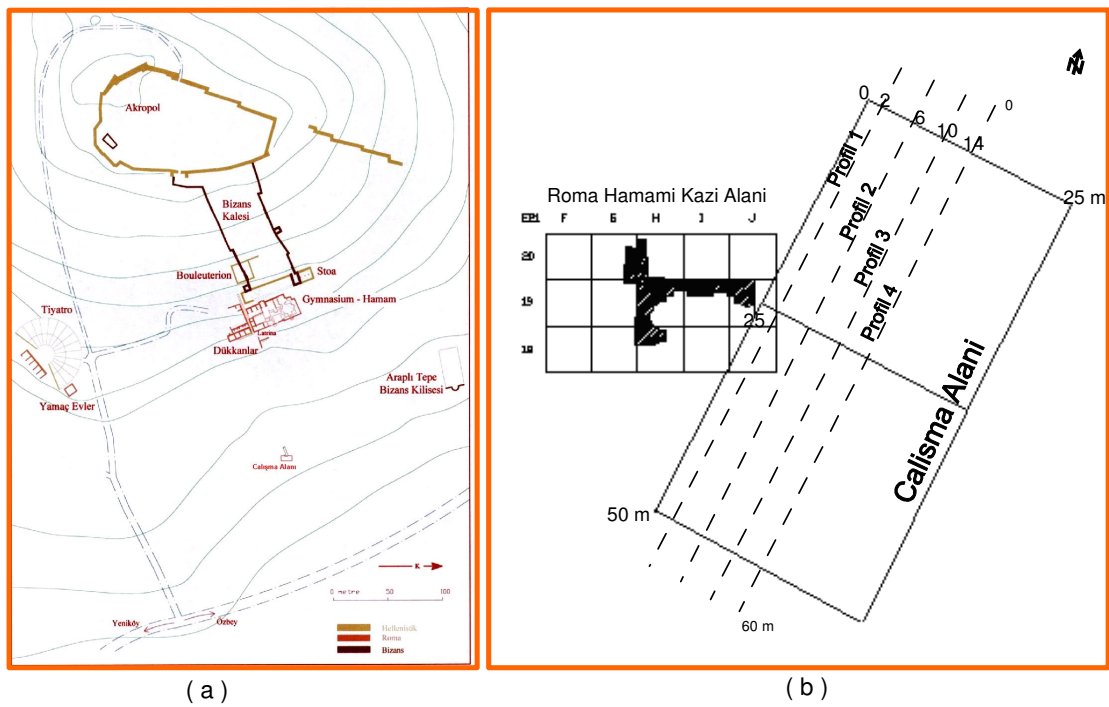
Şekil 5.37’de DC Schlumberger-Wenner dizilimi öz direnç tomografi çalışmasından hesaplanan eş seviye derinlik kesitleri ile üç frekansa ait görünür öz direnç sonuçları, aynı koordinatlara bağlanarak verilmiştir. DC öz direnç seviye kesitlerinde, alanın öz direnci 9ohm-m ile 151ohm-m aralığında değişmektedir. Yüksek frekandan düşüğe doğru VLF-EM yöntemi sonuçları, yüzeyden derine doğru değişen öz direnç seviye kesitleri ile bir uyum göstermektedir. Karmaşık yapılanma, profillerin sonlarına doğru her iki yöntemin sonuçlarında görülmektedir.

5.2 İzmir-Torbalı “Metropolis” Arkeolojik Kazı Alanı

Metropolis antik kenti; İzmir ili Torbalı ilçesinin 6km batısında, Yeniköy ve Özbek köyleri arasında yer alır (Şekil 5.38.a). Smyrna ile Ephesos arasındaki antik yol üzerinde bulunan, çok güzel mimari eserlere (Stoa, tiyatro, hamam ve gymnasium) sahip ticaret kentidir. Tören alanı (Akropol) surları, yaklaşık 16000 m²’lik alanı çevirmekte ve Helenistik mimarinin en başarılı örneği kabul edilmektedir. Kent, Osmanlı dönemine kadar onbir medeniyetin etkisinde kalmıştır. Stoa, tiyatro ve bouleuterion gibi kamu binaları Hellenistik döneme, hamam-gymnasium gibi birleşik yapılar Roma dönemine aittir. Bizans döneminde; surlarda eski yapı taşları kullanılarak bir kale yapılmıştır. Osmanlı döneminde; “Kızılhisar” adıyla kaza olmuş, İzmir-Aydın demiryolunun yapılması ile “Torbalı” ismini alarak bugünkü yerine taşınmıştır.

Metropolis yerleşimi; topografyaya bağlı teraslı kent planına sahiptir. Kent Merkezi ile şehrin diğer bölümlerini birleştiren, iki ana aks üzerinde kurulmuştur. Tepeden aşağıya doğru 7 paralel sokak ve 6 yapı terası kazılarda çıkarılmıştır. Üstten sırasıyla bouleuterion, stoa, hamam-gymnasium, latrina sarnıç-dükkanlar ve atriumlu ev-ticarethane yapıları bulunmaktadır. Roma döneminde; gymnasiumlar (eğitim görülen derslikler ve spor yapılan avlulu yapı), hamam yapıları ile birleşerek, hamam-gymnasium’u oluşturur. Mimari ve inşaa tekniği açısından (su kanalları ve hamam) karmaşık yapılardır (<http://kisi.deu.edu.tr/ali.oz/METROPOLIS.html>).

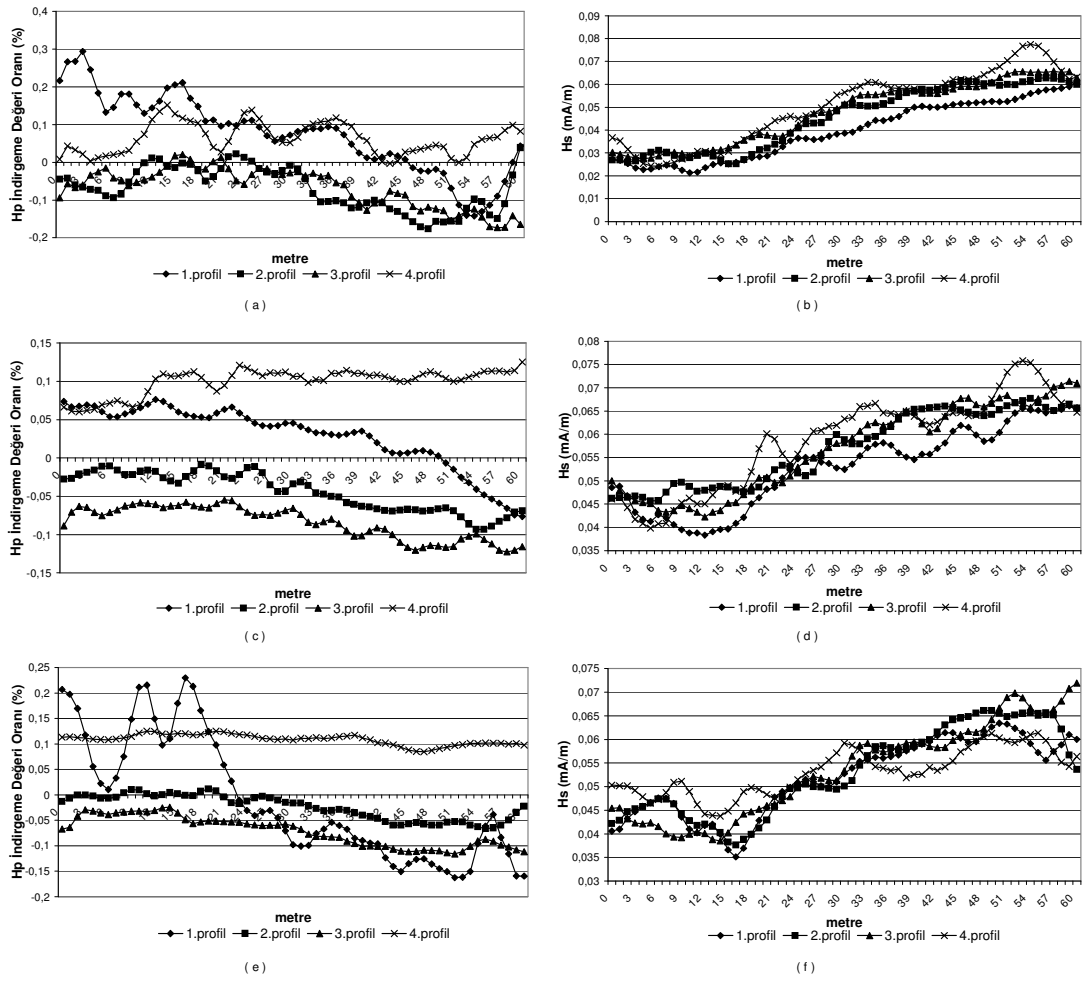
Lokasyon haritasında verilen çalışma alanı ise tepenin batı yamacında yeni ortaya çıkan ikinci hamam kompleksidir (Şekil 5.38.a). Hamam yapıları, çevresinde bir veya birkaç yapı ile birleşik olarak bulunmaktadır. Çalışmamızda, Roma Hamamı yapısı çevresinde olabilecek yapılar araştırılmaktadır. Kazı çalışmalarının sürmesi nedeni ile şimdilik hamam yapısının doğu kanadında 25x50m’lik alanda jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma süresince, batı kanadında devam eden arkeoloji açmada kemerli yapı ve koridorlar bulunmuştur. Çevre yapılar ile bağlantılı olma olasılığı yüksektir.



Şekil 5.38 Metropolis arkeolojik kazı alanı (a) Yerleşim planı (b) “Roma Hamamı” araştırma alanı lokasyonu (<http://kisi.deu.edu.tr/ali.oz/METROPOLIS.html>)

5.2.1 “Roma Hamamı” Araştırma Alanı

Lokasyon haritasında gösterilen “Roma Hamamı” araştırma bölgesinde; KG doğrultusunda, 4m aralıkla dört adet 60m’lik profilde 1m’lik örnekleme ile ölçümler yapılmıştır (Şekil 5.38.b). 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz istasyon frekansları kullanılmıştır. Ölçüm başlangıcı profillerin kuzey ucudur. Her frekans için indirgeme değeri değişim oranı ve bu orana bağlı Hs alan değişimleri hesaplanarak şekil 5.39’da verilmektedir.

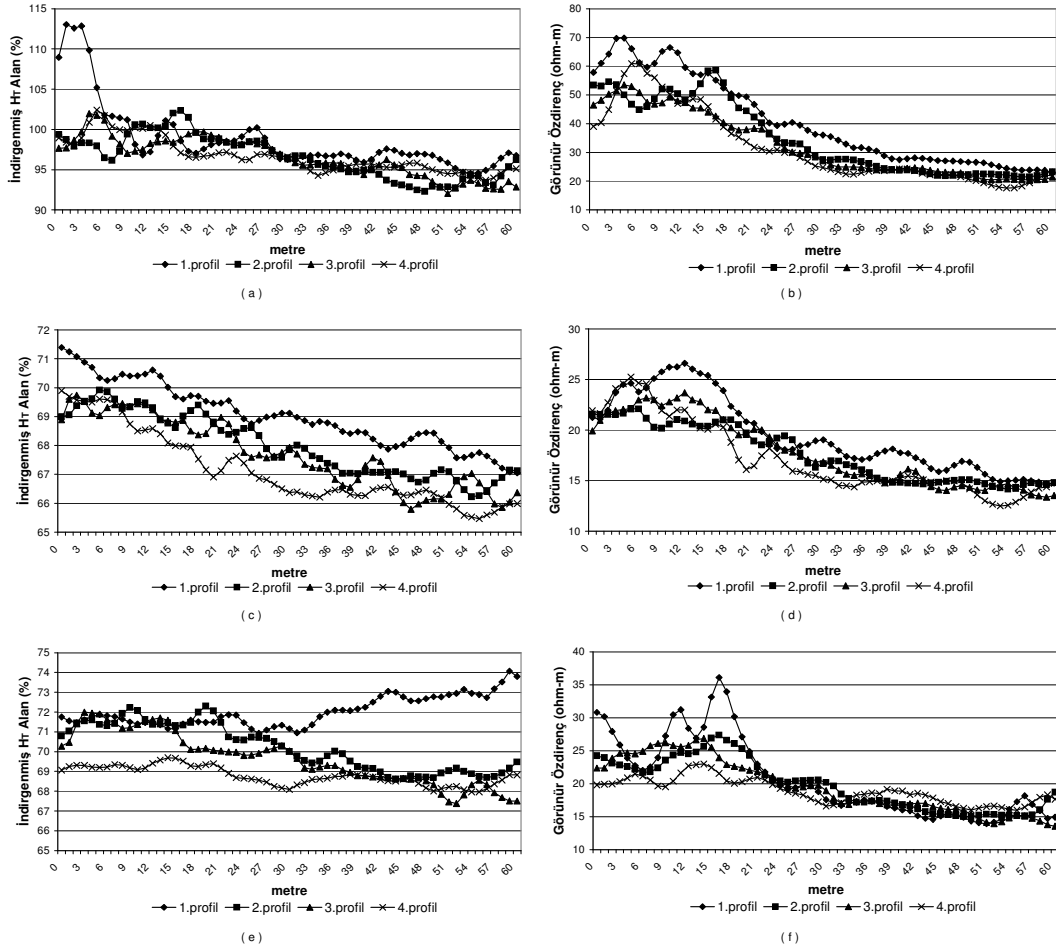


Şekil 5.39 Metropolis “Roma Hamamı” araştırma alanı profilleri; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri oranı (b) indirgenmiş Hs alan, 22,1kHz için (c) indirgeme değeri oranı (d) indirgenmiş Hs alan, 23,4kHz için (e) indirgeme değeri oranı (f) Hs alan değişim grafikleri.

Grafiklerin, birinci profil ölçümlerinde 18,3kHz, 22,1kHz ve 23,4kHz frekanslarında düzensiz Hp alan etkisinde kaldığı görülmektedir. Diğer profiller için sabit değere yakın alan etkisinde, ölçümlerin alındığı görülmektedir. Bölgede; her üç frekans için hesaplanan, indirgeme değeri düzeltmesi yapılmış H_T alan ve düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç değişim grafikleri verilmiştir (Şekil 5.40). 18,3kHz ve 23,4kHz frekansları için ilk profilde H_T alan genliğinde büyük değişimler görülmektedir.

Üç frekans için düzeltilmiş alan bileşenlerinden hesaplanan görünür özdirenç değişimi birinci profilde ortamın en büyük değerlerini vermektedir. Bütün profillerde görülen, ilk 22m’deki özdirenç değerlerindeki büyüklük, olası taban belirtisi olabilir.

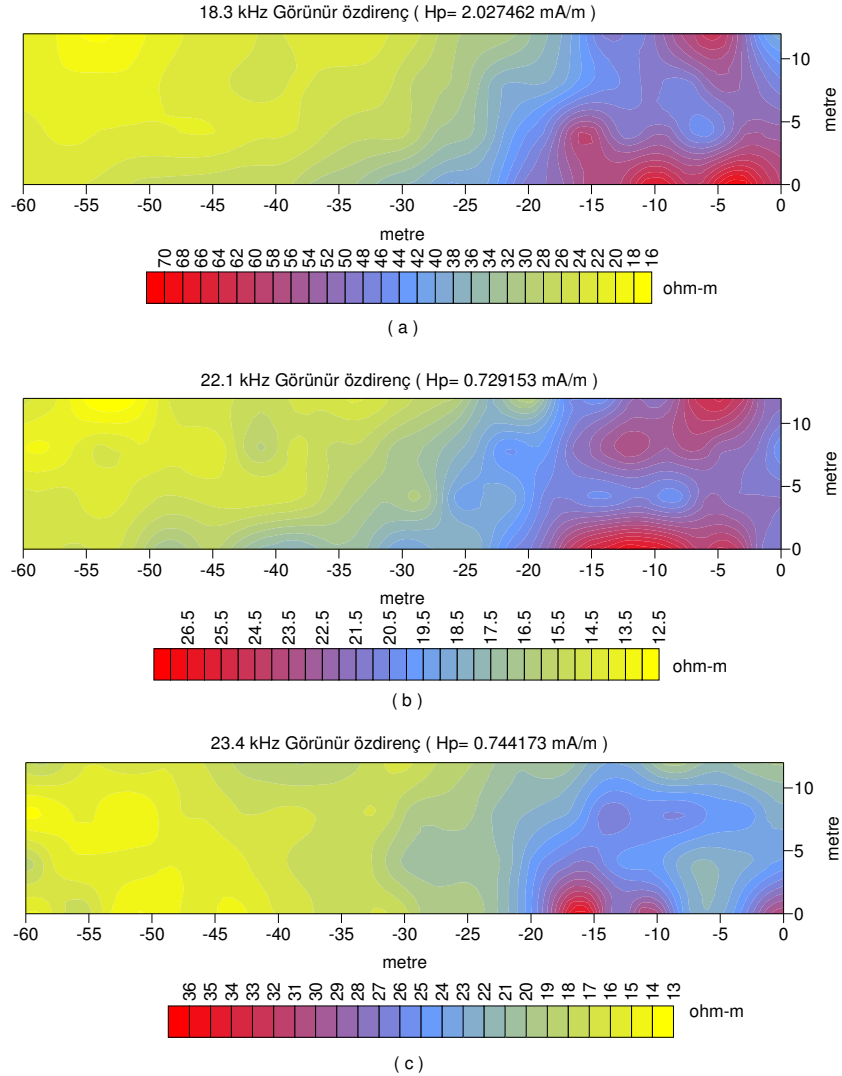
Ortamda aşırı derecede pişmiş toprak malzemelerinin (Çatı kiremitleri, künk ve testi parçaları) bulunması da önemli bir konudur. Yapılan açmalar doğrultusunda bu döküntü malzemenin kalınlığı yaklaşık 0,5m'dir. Her arkeolojik alanda olduğu gibi bu alanda da dağınık yapıları, deprem ve savaşlar sonucu yıkılmış bina, sur duvarı kalıntıları oluşturmaktadır.



Şekil 5.40 Metropolis "Roma Hamamı" araştırma alanı profilleri; indirgeme değerine düzeltilmiş; 18,3kHz için (a) H_T alan (b) görünür özdirenç, 22,1kHz için (c) H_T alan (d) görünür özdirenç, 23,4kHz için (e) H_T alan (f) görünür özdirenç grafikleri

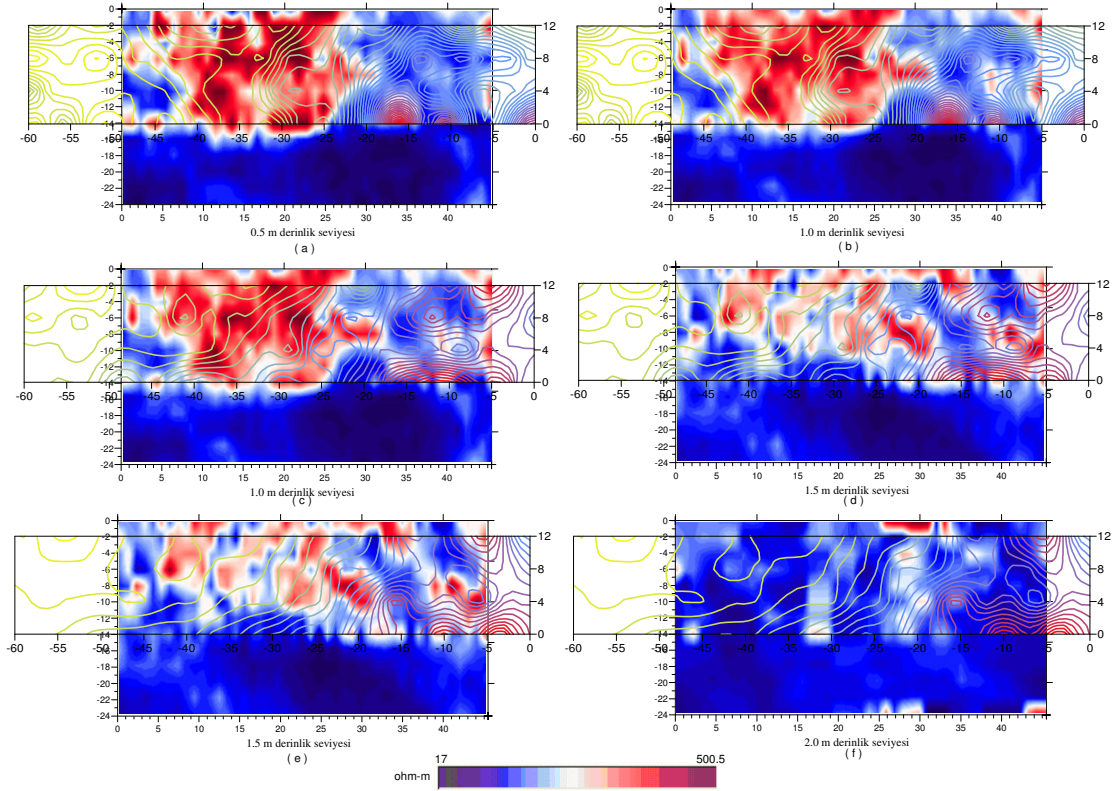
Her üç frekansın görünür özdirenç yapay yüzey haritaları verilmektedir (Şekil 5.41). Frekanslara bağlı olarak sistemin en büyük etki derinlikleri bu çalışma alanı için 18,3kHz'de 24,1m, 22,1kHz'de 15,4m ve 23,4kHz'de 15,8m olarak hesaplanmıştır. Üç frekans görünür özdirenç değerleri için ilk profillerin 25m'sinden, son profillere doğru 15m'ye kayan belirti gözlenmiştir. 18,3kHz ölçümlerinden gözlenen belirti, yüzeye doğru 22,1kHz ve 23,4kHz frekansları için azalan değerde

devam etmekte ve olası yapı belirtisini göstermektedir. Profil sonlarına doğru araştırma alanında gözlenen küçük değişimler yüzey döküntülerinin etkisidir.



Şekil 5.41 Metropolis “Roma Hamamı” araştırma alanı profilleri; (a) 18,3kHz (b) 22,1kHz (c) 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür öz direnç yapay yüzey haritaları.

Şekil 5.42’de Schlumberger-Wenner dizilimi öz direnç tomografi ölçümlerinden oluşturulan eşseviye derinlik kesitleri ile VLF-EM üç frekans görünür öz direnç sonuçları aynı koordinatlara bağlanarak verilmiştir. Tomografi kesitleri her seviye için ortamın öz direnç değerleri 17ohm-m ile 500ohm-m aralığında değişmektedir. Yüksek frekanstan düşüğe doğru VLF-EM görünür öz dirençleri ile tomografi öz direnç eşseviye kesitleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5.42 Metropolis “Roma Hamamı” araştırma alanı; öz direnç (Sch-Wen) tomografi sonuçları ile aynı koordinata bağlanmış VLF-EM görünür öz direnç; a) 23,4kHz ile 0,5m, b) 23,4kHz ile 1m, c) 22,1kHz ile 1m, d) 22,1kHz ile 1,5m, e) 18,3kHz ile 1,5m, f) 18,3kHz ile 2m, eş seviye haritaları.

5.3 İzmir-Ahmetbeyli “Klaros” Arkeolojik Kazı Alanı

Klaros antik kenti; İzmir ili Menderes ilçesi Ahmetbeyli köyünde yer alır. Oniki İon kentinden biri Klaros, Kolophon'a ait bir kehanet merkezidir. Klaros Apollon kutsal alanı ilk olarak C. Schuchardt tarafından bulunmuştur. Daha sonra 1907 yılında Theodore Macridy, 1913 yılında Charles Picard ile birlikte çalışmış, 1950 yılında Louis Robert tarafından 1961 yılına kadar sürdürülmüştür. 27 yıllık bir aradan sonra 1988-1989 arasında Prof. Dr. Juliette de La Geniere başkanlığındaki bir ekip tarafından sistematik temizlik çalışmaları ile, alüvyonlar altında kalmış olan yapılar ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde Prof. Dr. Nuran Şahin başkanlığında devam etmektedir. Apollon tapınağı, İzmir'in ilk kuruluşunda önemli rol oynamıştır. Pausanias'a göre; Büyük İskender'e rüyasında, Pagos Dağı'nın (Kadifekale) eteklerinde büyük bir kent kuracağı söylenmiş, rüyanın yorumu için Klaros'taki Apollon kâhinine danışmış ve Smyrna (İzmir) kentini kurmuştur.

Tapınak, 26x46m boyutlarında, Dor düzeninde ve beş krepis üzerine inşa edilmiştir (Şekil 5.43). Tapınağının 27m doğusunda bir sunak yer alır. Tapınak ile sunak arasında KG yönünde yerleştirilmiş dört sıra halinde hayvan bağlama blokları bulunmaktadır. Dikdörtgen formlu bu taş bloklar şimdiye kadar bulunmuş olan tek örnektir. (http://www.kulturturizm.gov.tr/portal/tarih_tr.asp?belgeno=3378).

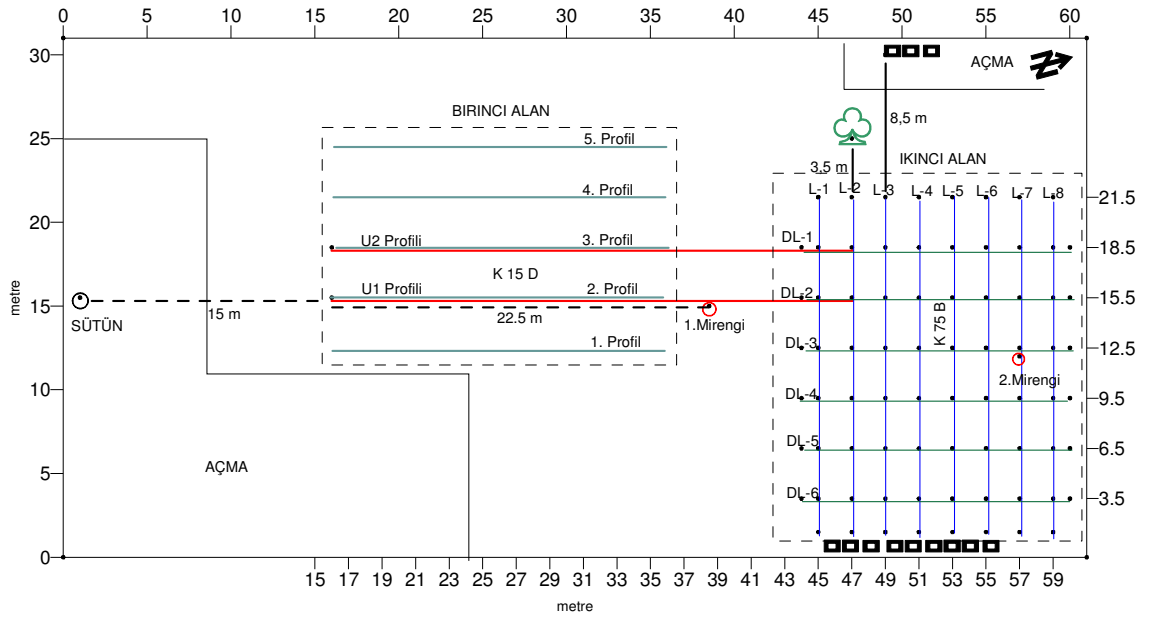


Şekil 5.43 Apollon Tapınağı'nın günümüzden genel bir görüntüsü ve doğal yeraltı suyu seviyesi.

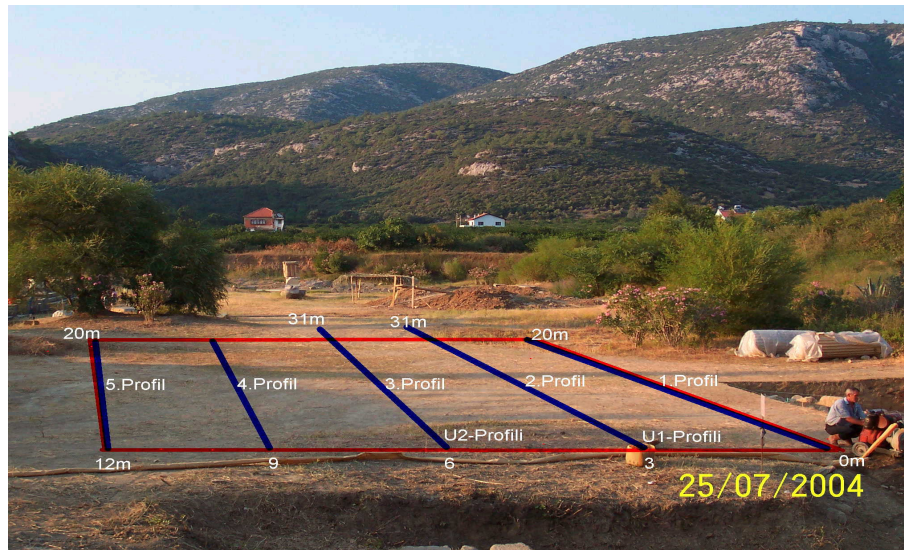
5.3.1 Klaros Kazı Alanı Özellikleri ve Jeofizik Araştırma Alanları

Arkeolojik ve turistik açıdan büyük önem taşıyan bölgenin en büyük sorunu, deniz koduna eş seviyesinde ve Ahmetbeyli graben havzasında bulunmasından dolayı yüksek yeraltı suyu seviyesidir. Kazı alanı, büyük oranda yamaç beslenmeli, yeraltı suyu seviyesinin yükselmesine bağlı olarak su altındadır ve sürekli su tahliyesi yapılmaktadır (Şekil 5.43). Bu durum, çalışmalarımızda olumsuz bir etkendir. Ortam; yeraltı su seviyesinin yüksekliği ile çok iletkendir ve EM dalganın yayılımını engellemektedir. Bölgenin vadi içinde kalmış olması da dalgaların etkisini azalmaktadır. Birinci alan, ölçümleri için 18,3kHz, iki uzun (U) profil ve ikinci alan ölçümleri 23,4kHz frekansı çözümleri ve sonuçları verilecektir.

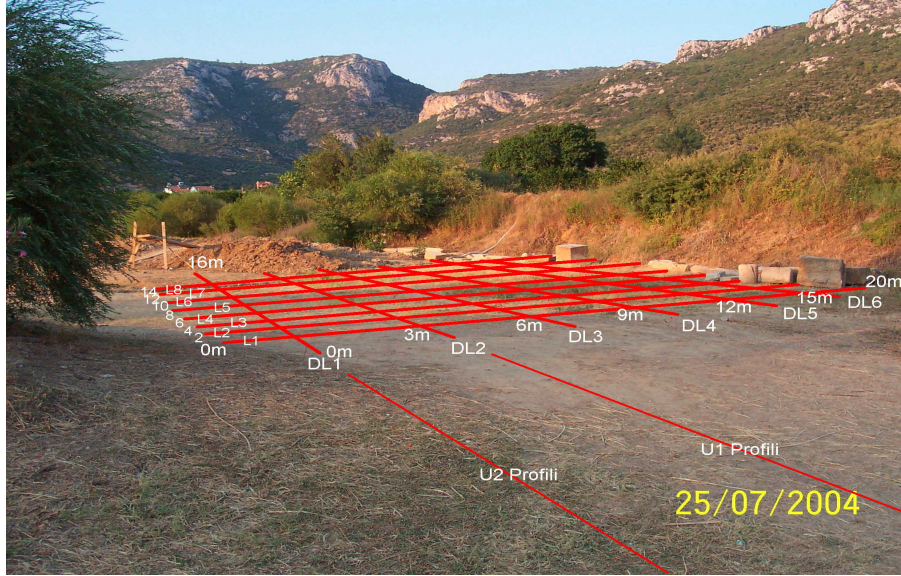
Araştırma bölgesi, birinci alanda beş adet normal, iki adet uzun profilde (U1-U2) ölçmeler yapılmıştır. İkinci alan; karelaşılanarak, “Paralel” ve “Dik” olmak üzere ondört profilde veriler alınmıştır (Şekil 5.44). Arazi fotoğrafları üzerinde profillerin konumları şekil 5.45 ile şekil 5.46’da gösterilmiştir. Çalışmalar, uzun (U) profiller, birinci ve ikinci alan olarak alt başlıklarda verilecektir.



Şekil 5.44 Klaros kazı alanı Jeofizik çalışmalara ait profillerin lokasyon haritası.



Şekil 5.45 Klaros kazı alanı, “U” ve “Birinci” alan çalışmalarına ait profillerin konumu.

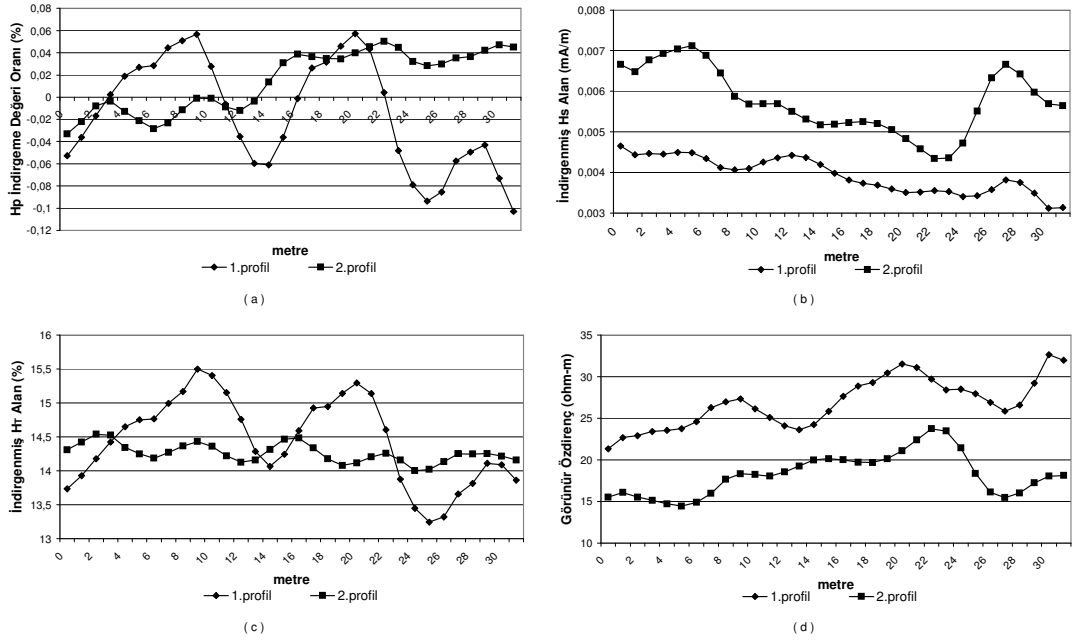


Şekil 5.46 Klaros kazı alanı, "ikinci" alan çalışmalarına ait L ve DL profillerinin konumu.

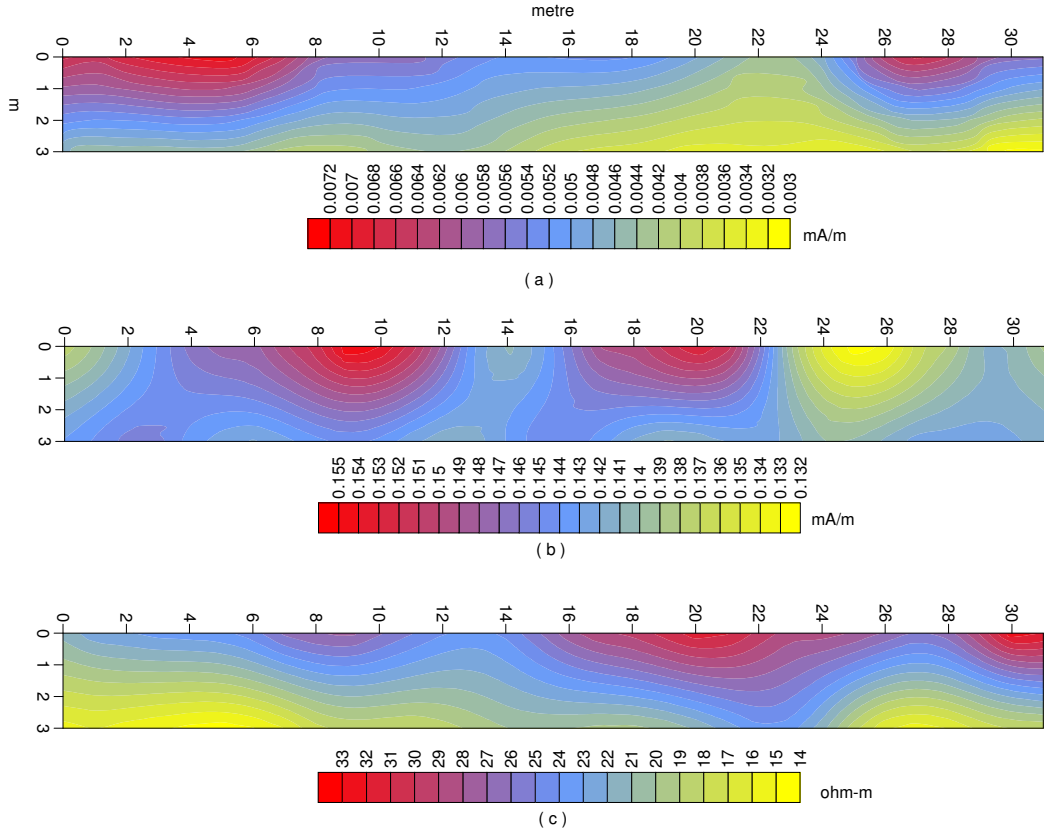
5.3.1.1 "Birinci" Araştırma Alanı "U" Profilleri

Klaros lokasyon haritasında gösterilen "U" profilleri; K15D doğrultulu, 3m aralıkla iki adet 31m'lik ve 1m'lik örnekleme aralığına sahiptir (Şekil 5.44). Profillerin 23,4kHz frekansına ait H_p alan indirgeme değeri değişim oranı, bu orana indirgenmiş H_s , H_T alan değişimi ve bileşenlerden elde edilen görünür özdirenç grafikleri şekil 5.47'de gösterilmektedir.

Hesaplanan H_s , H_T alan ve görünür özdirenç yapay yüzey haritaları oluşturulmuştur (Şekil 5.48). Bu frekansın ortama karşı verdiği enbüyük etki derinliği 10,24m hesaplanmıştır. U2 profilinde 7m ile 12m ve 15m ile 25m ölçüm noktaları arasında uzanan yüksek özdirençli olası yapıların varlığı dikkati çekmektedir. Yeraltı su seviyesinin yüksekliğinden dolayı özdirenç değerleri düşük bulunmuştur. Alan Klaros'un giriş kapısının olduğu bölgedir. Bu alanda devrilmiş sütun kalıntıları kazılar sırasında dağınık olarak çıkmaktadır.



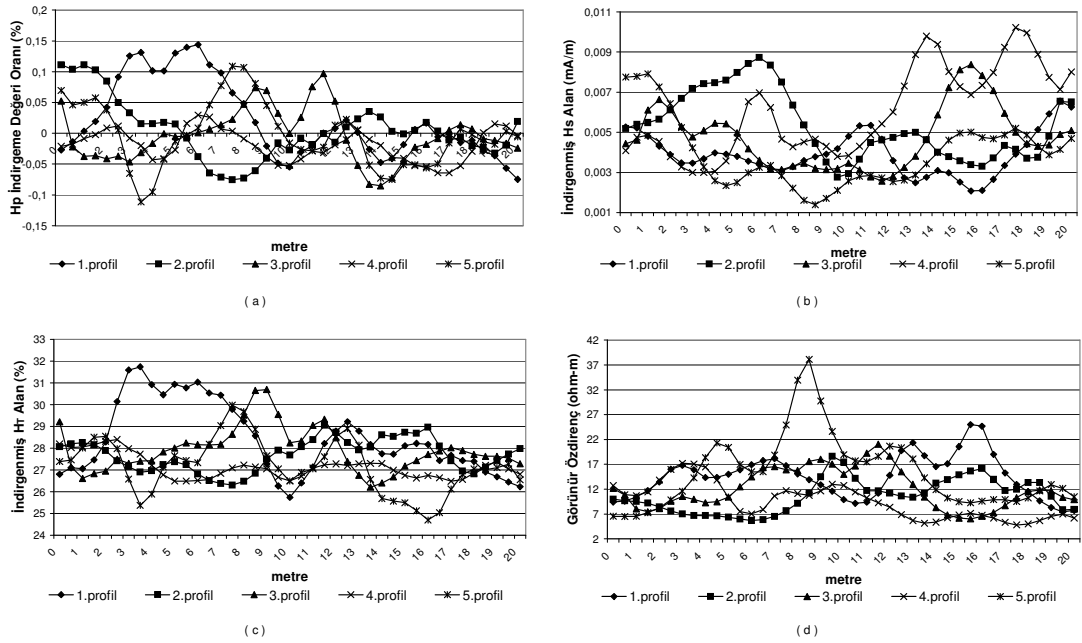
Şekil 5.47 “Birinci” alan, “U” profilleri; 23,4kHz için (a) indirgeme değeri değişim oranı b) düzeltilmiş H_s alan değişimi c) düzeltilmiş H_T alan değişimi d) düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri



Şekil 5.48 “Birinci” alan, “U” profilleri; 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş (a) H_s alan (b) H_T alan (c) hesaplanan görünür özdirenç yapay yüzey haritaları.

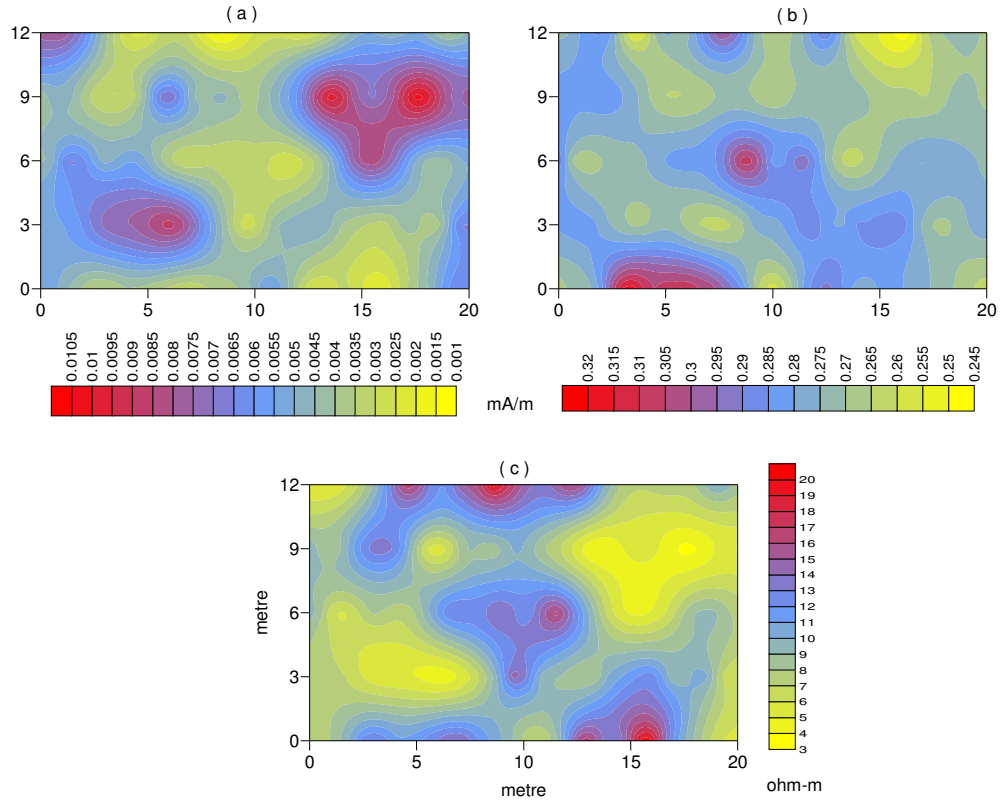
5.3.1.2 “Birinci” Araştırma Alanı Profilleri

Klaros lokasyon haritasında gösterilen “Birinci” alan profilleri; K15D doğrultulu, 3m aralıklı, 0,5m’lik örnekleme aralıklı ve 20m boyunda beş adettir (Şekil 5.44). Profillerin 18,3kHz frekansına ait H_p alan indirgeme değeri değişim oranı, bu orana indirgenmiş H_s alan, H_T alan değişimi ve bileşenlerden elde edilen görünür özdirenç grafikleri şekil 5.49’da verilmiştir.



Şekil 5.49 “Birinci” alan profilleri; 18,3kHz için (a) indirgeme değeri değişim oranı b) düzeltilmiş H_s alan değişimi c) düzeltilmiş H_T alan değişimi d) düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri.

18,3kHz frekansı için hesaplanan iki boyutlu H_s alan, H_T alan ve görünür özdirenç yüzey haritaları verilmiştir (Şekil 5.50). Ortama bağlı olarak enbüyük etki derinliği 12m bulunmuştur. Alanın birinci profili, şekil 5.45’de görülen açmanın kapalı bölümünde bir sütunun başı bulunmuştur. Sütunun devamının gömülü olarak devam ettiği bilinmektedir. Şekil 5.50.c’de 3m ile 7m arasındaki yüksek özdirenç belirtisi görülmüştür. Profillerde, batıya doğru 3m ile 7m aralığında görünür özdirenç değeri yükselmektedir. Birinci profilin 12m ile 17m aralığında aynı yüksek özdirenç değeri devam etmektedir.

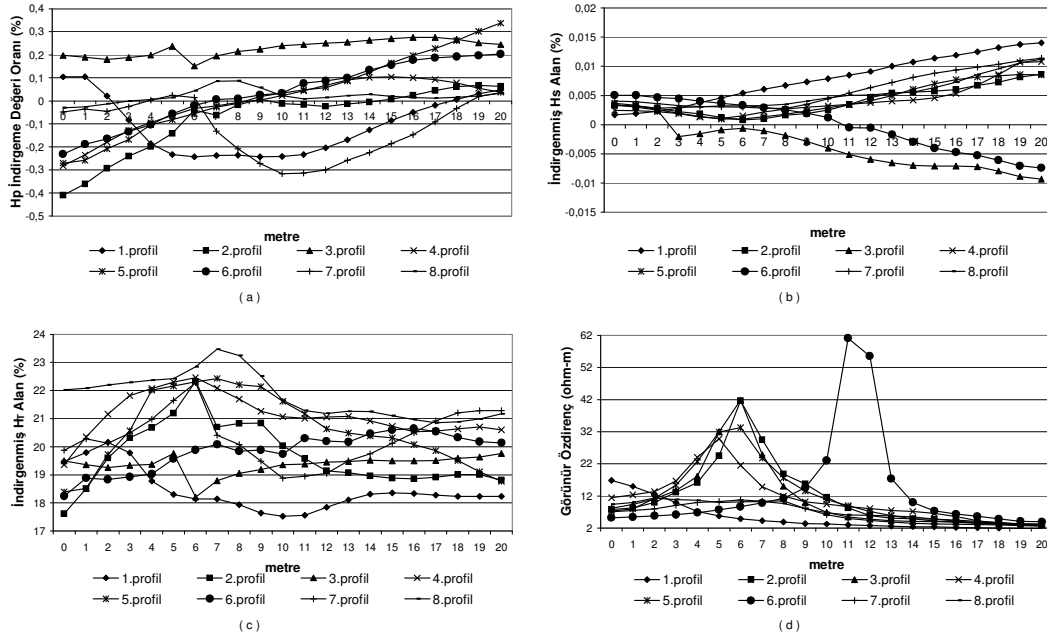


Şekil 5.50 “Birinci” alan profilleri; 18,3kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş (a) H_s alan (b) H_T alan (c) hesaplanan görünür özdirenç yapay yüzey haritaları.

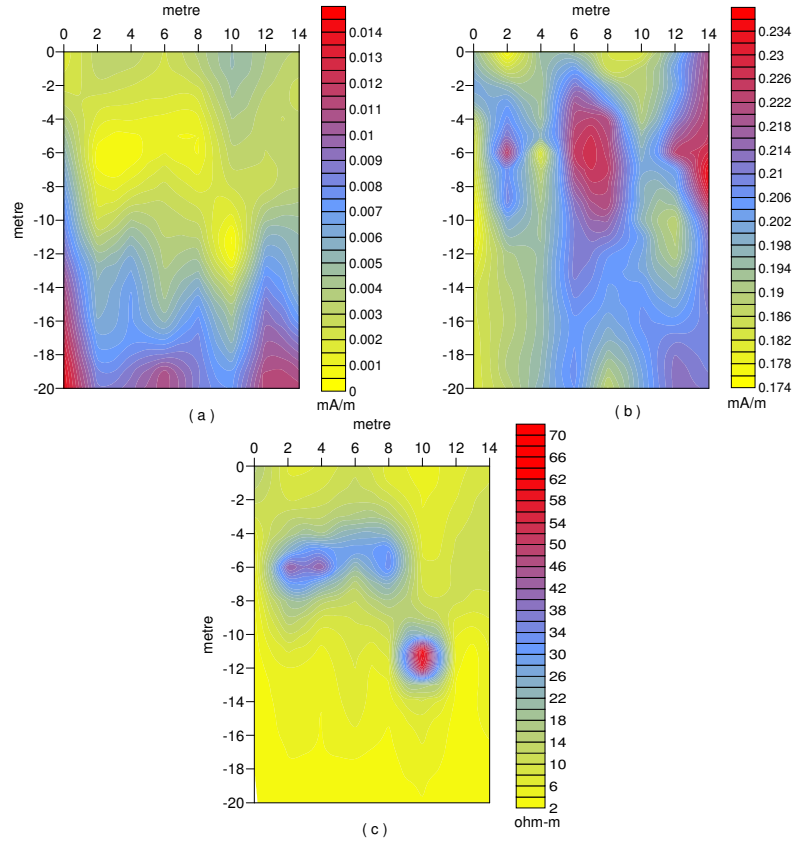
5.3.1.3 “İkinci” Araştırma Alanı Profilleri

Klaros lokasyon haritasında gösterilen “ikinci” çalışma alanında “Paralel-L” ve “Dik-DL” doğrultularda profiller alınmıştır. Yöne bağlı olarak ortamın özdirenç değişiminin görülmesi hedeflenmiş sonuçlar alt başlıklarda verilmiştir.

5.3.1.3.1 “İkinci” Araştırma Alanı “Paralel-L” Profilleri. “Paralel-L” profiller; K75B doğrultusunda 2m aralıklar ile 1m örnekleme ve sekiz adet 20m uzunluğunda alınmıştır (Şekil 5.44). Profillerin 23,4kHz frekansına ait H_p alan indirgeme değeri değişim oranı, bu orana indirgenmiş H_s, H_T alan değişimi ve bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri şekil 5.51’de verilmiştir. 23,4kHz frekansı için sabit alana indirgenmiş, iki boyutlu H_s, H_T alan ve görünür özdirenç yüzey haritaları oluşturulmuştur (Şekil 5.52). Ortama bağlı olarak enbüyük etki derinliği 10,24m bulunmuştur. Bütün profillerde özdirenç değişimleri aynı değişim aralıklarındadır.



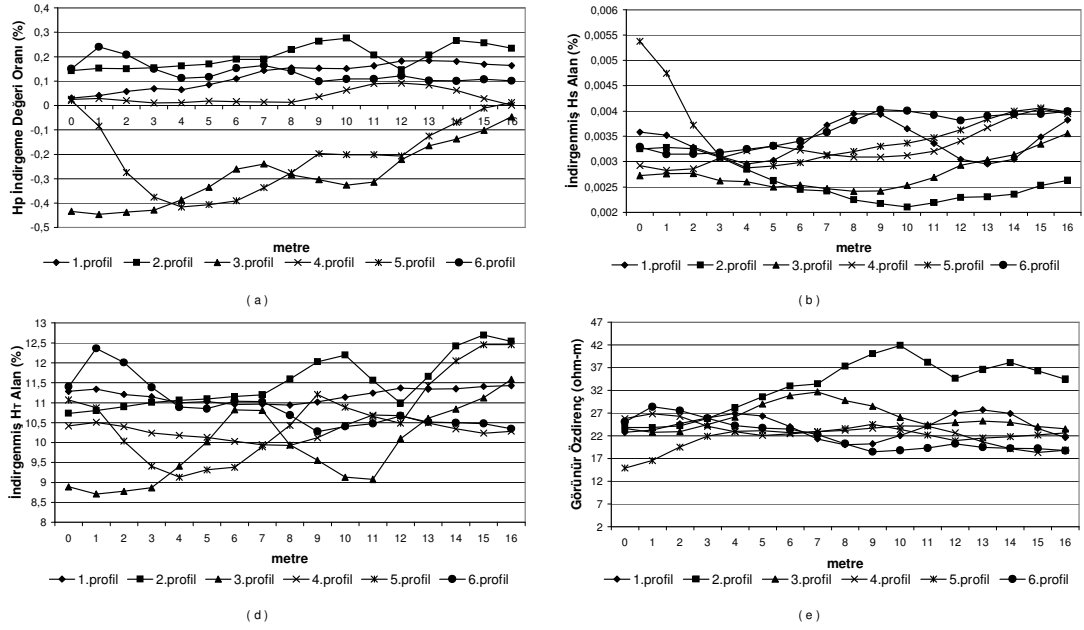
Şekil 5.51 “İkinci” alan, “Paralel-L” profilleri; 23,4kHz için (a) indirgeme değeri değişim oranı b) düzeltilmiş Hs alan değişimi c) düzeltilmiş H_T alan değişimi d) düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri.



Şekil 5.52 “İkinci” alan, “Paralel-L” profilleri; 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş (a) Hs alan (b) H_T alan (c) hesaplanan görünür özdirenç yapay yüzey haritaları.

Altıncı profilde 11m ile 13m arasında 60ohm-m değerine ulaşan belirti görülmektedir. Bu anomali yüzeye çok yakın bir yapının etkisinden kaynaklanmaktadır. Birinci ve sekizinci profiller tekdüze bir ortam etkisi göstermektedir. Geçmişte yapılan, çalışma alanına komşu açmalarda, ortaya çıkarılmış sürekliliği olmayan yığma duvarın doğrultusuna uyum sağlamaktadır.

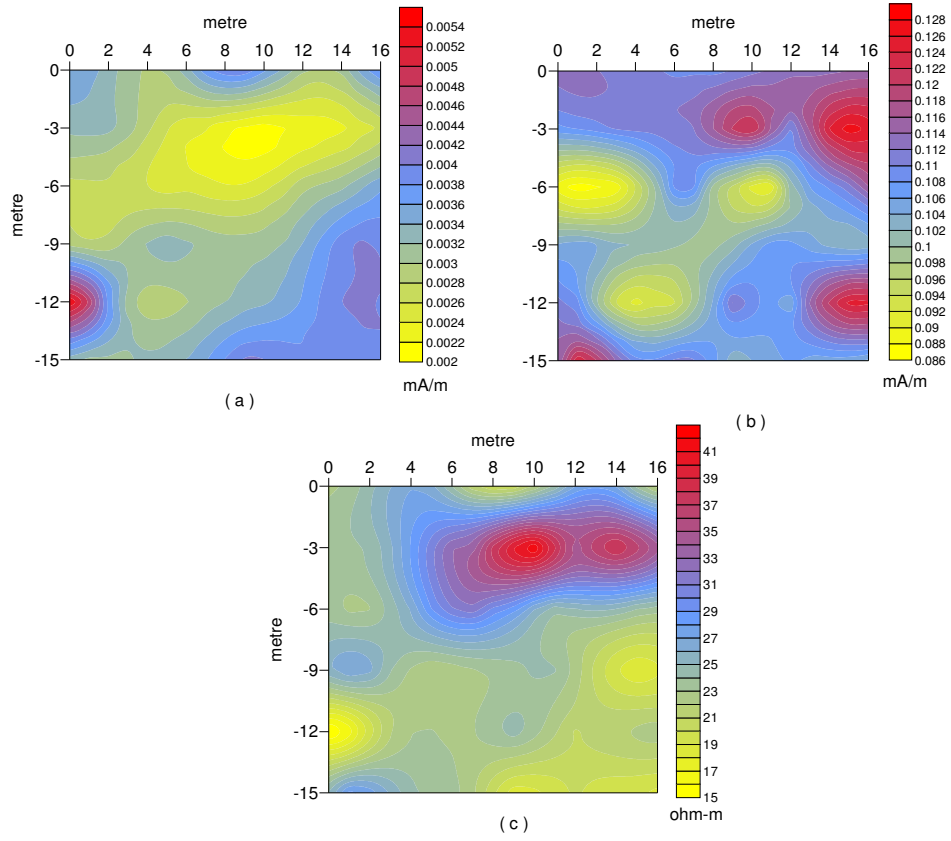
5.3.1.3.2 “İkinci” Araştırma Alanı “Dik-DL” Profilleri. “Dik-DL” profilleri, K15D doğrultusunda 3m aralıkla ve 1m örnekleme altı adet 16m uzunluğunda alınmıştır (Şekil 5.44). Profillerin 23,4kHz frekansına ait Hp alan indirgeme değeri değişim oranı, bu orana indirgenmiş Hs, H_T alan değişimi ve bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.53 “İkinci” alan, “Dik-DL” profilleri; 23,4kHz için (a) indirgeme değeri değişim oranı b) düzeltilmiş Hs alan değişimi c) düzeltilmiş H_T alan değişimi d) düzeltilmiş bileşenlerden hesaplanan görünür özdirenç grafikleri.

23,4kHz frekans ölçümlerinden hesaplanan Hs alan, H_T alan ve görünür özdirenç yüzey haritaları oluşturulmuştur (Şekil 5.54). Çalışma bölgesi ortamına bağlı olarak enbüyük etki derinliği 16,4m bulunmuştur. Özdirenç değişimi ikinci ve üçüncü profillerde diğer profillere göre daha büyüktür. İkinci ve üçüncü profil arasında 6m ile 16m ölçüm noktaları aralığında yüksek görünür özdirenç değerleri görülmektedir.

Paralel ve dik ölçülerin eş metrelerdeki belirtileri uyumludur. Dikkat edilmesi gereken bir konu olası yapının dik kesilmesi durumunda belirtiler kuvvetlenmektedir. Dik alınan ölçümlerin yapı sınırlarına olan duyarlılığı daha fazladır.



Şekil 5.54 “İkinci” alan, “Dik-DL” profilleri; 23,4kHz için indirgeme değerine düzeltilmiş (a) H_s alan (b) H_T alan (c) hesaplanan görünür öz direnç yapı yüzey haritaları.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada; VLF yönteminin temel bağıntılarından yararlanarak sığ araştırmaların öz direnç değişimine duyarlılığı araştırılmıştır. Kuramsal eşitlikler doğrultusunda alınan ölçülerde, etkili olan Hp ve Hs alan değişimleri incelenmiştir. Ölçüm aleti, 15kHz - 30kHz frekans aralığında kendini kalibre ederek, üç ayrı frekansta ölçme yapabilmektedir. Seçilen frekansların, sabit genlikte düzlemsel EM dalga olduğu kabul edilir. Vericiden yayılan VLF sinyalleri, atmosfer içerisinde doğrudan ve ionosfer tabakasından yansıyarak ölçüm noktasına ulaşır. VLF ve RMT sinyallerini güneş ve atmosferik basınç değişiminde etkilenmektedir. Özellikle gürültülü kaynak alanın vereceği yalancı belirtiler yorumlamayı güçleştirmektedir. Ölçümlerde alınan toplam alan bilgisi hatasız ve gürültü oranı düşük seviyede olmalıdır. Bu nedenle bölüm dörtte öneriler yöntemin, işlem sırası ve sağladığı yenilikler aşağıda verilmiştir.

- Öncelikle çalışma alanında ölçülen veriler ayrıştırılır, ortama ait olan etkin Hp ve Hs alan değerleri hesaplanır, grafiklenir. Böylece; EM alanların, bölgeye ait genlik değişimleri ve özellikle Hp alanın sinyal aralığı görülür.

- Hp alan değerlerinden, profil veya araştırma bölgesi için tek bir sabit Hp alan ortalama değeri hesaplanır ve indirgeme değeri olarak tanımlanır. Bütün çalışma alanına için sabitlenir. Böylece; çalışma alanı ölçümleri, tek bir sabit Hp alan etkisine indirgenmiş olur.

- Hp alan indirgeme değerinde, profil veya alan verilerini etkileyen yüzdelik indirgeme oranı hesaplanır. İndirgeme oranı değişim aralığının, yüksek veya düşük çıkması ölçüm kalitesi ile ilgilidir. Eğer; yüzde 50'yi geçen yüksek oran değerleri

bulunursa gürültüler, sinyalden baskındır ve ölçümler yorumlamaya alınmamalı, çalışma tekrarlanmalıdır. İndirgeme oranının en fazla yüzde 30'u geçmemesi önerilir.

- Yüzdeler indirgeme oranı değişimi, ölçülen ham veriler ile çarpılarak bütün alan verileri indirgenir. Böylece, zamana bağlı değişken H_p alan etkisi, verilerden çıkartılır. Bu aşamada; günümüzde sıkça kullanılan Fraser ve Karous-Hjielt süzgeçleme tekniklerinin bu işlem basamağından sonrasında uygulanması önerilir.

- Hilbert dönüşümü kullanılarak H_z ve H_y alan bileşenleri arasındaki geçiş bağıntısı ile EM alan bileşenleri oranına ve ortamın yüzey empedansına ulaşılır (Bölüm 4.8). Yüzey empedans değişiminden, ortamı tanımlayan görünür özdirenç haritaları oluşturulur. Bu durum, galvanik bağlantılı VLF-R yönteminin uygulama zorluğu ve ayrımlılığına çözüm getirir ve sığ çalışmalarda daha küçük değişimler görülebilir. Bölüm 5'teki alan çalışmalarında bu ayrımlılık sağlanmıştır.

- Modelleme çalışmalarında sonlu farklar yöntemi ile çözümler yapılırken, sınır koşulları ve ağ sistemini seçimi için dikkat edilmesi gereken kurallar verilmiştir (Bölüm 4.5.1, 4.5.3 ve 4.5.4). Derin amaçlı çalışmalara göre sığ araştırmalarda, ağ tasarımı daha çok önem kazanır ve ağ aralıkları seçiminin dikkatli yapılması önerilir.

Galvanik bağlantılı, iki veya üç elektrotlu (kalibre metreleri 5m-10m) VLF-R ölçümleri, geniş ölçekli araştırmalar için uygundur. Ancak arkeolojik alanlar gibi sığ çalışmalarda, 5m veya 10m elektrot aralıkları çok geniş kalmaktadır ayrıntıdan çok ortam hakkında genel bilgi vermektedir. Küçük boyutlu, dağınık yüzeye yakın yapıların vereceği belirtiler görülememektedir. Önerilen yöntem, H_p alanın oluşturduğu H_s ve H_T alan değişimleri kullanıldığı için sığ çalışmalarda ayrımlılığı yüksektir (Bölüm 4.6). Bu nedenle küçük boyutlu yapıların araştırılmasında önerilir (Bölüm 5.1.1.1).

Yapılan alan çalışmaları sonucunda; veri kalitesine yönelik önemli bilgiler elde edilmiştir. Örneğin, Kösemtoğ tümülüsü ED ve EK profilleri incelendiğinde sadece değerlendirilebilir indirgeme oranı, 23,4kHz frekansı için bulunmuştur ve bu frekans

sonuçları verilmiştir. Buna rağmen, ölçümün indirgeme oranı en fazla $\pm\%27$ ile kabul edilebilir sınırdadır. Yüzeğe yakın belirgin bir yapı olmasına karşılık çözüm sonucu, işlem yapılmamış veriye göre daha ayrılmıdır. İkinci aşamada, çift yönlü ölçümlerin doğrultuya bağlı tilt açısı değişiminden etkilenen Hs alanın terslenmesi gözlenmiştir. Olası yapının ilk sınır yüzeyine karşı duyarlılığı görülmüştür.

Hisartepe alanında yapılan çalışmaların sonucunda, arkeolojik alanlarda küçük ve dağınık yüzey yapılarına karşı duyarlı sonuçlar alınmıştır. İkinci alanda; belirtilere göre verilen, arkeolojik açma sonucu önerilen yöntemin uygulanabilirliği, kazı sonuçları ile desteklenmiştir. Önerilen yöntem, manyetik ve öz direnç tomografi yöntemi sonuçları ile de uyumludur. Arkeolojik alanlarda, kısa mesafelerde küçük yapı değişimlerinin olması, modelleme aşamasında, gerçeğe yakın olası modelin, ağ aralıklarının seçilme zorluğunu getirir.

Araştırma alanının özelliklerine bağlı, sinyal bozulmaları olabilmektedir. İzmir-Metropolis kazı alanında, yüzeyin 0,5m'si oldukça yoğun pişmiş kil seramik malzeme, yıkılmış duvar kalıntıları ile doludur. Pişmiş killi yüzey katmanı, Hp alanın ortama işlemlerini engelleyerek perdelemektedir. İzmir-Klaros araştırma alanında ise yüksek yeraltı suyu seviyesi probleminden kaynaklanan ölçüm sorunları yaşanmıştır. Yapılan hesaplamalar ile değerlendirilebilen tek frekans ölçümü olduğu görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda; VLF-EM ölçümlerinin değerlendirilmesinde, önerilen yöntemin sığ aramacılıktaki küçük boyutlu yapılara duyarlı olduğu ve yorumlama kolaylığı sağladığı görülmüştür. Ölçümlerin veri kalitesini de sınamak için alınan verilere, indirgeme işleminin yapılması önerilmektedir. Alan çalışmalarının, birbirine dik profiller ile taranması, düzlemsel EM dalganın geliş doğrultusuna, ortamın vereceği etkinin bulunmasında ve yorumlamada önemli olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akçığ, Z. & Pınar, R. (1995). Bandırma-Kösemtuğ tümülüsünde manyetik ve SP uygulamaları, *Jeofizik*, 9, 1-2, 1-5.
- Arcone, S.A. (1979). Resolution studies in airborne resistivity surveying at VLF, *Geophysics*, 44, 937-946.
- Ateşlier, Suat (1992). Daskyleion-Kösemtuğ Tümülüs mimarisi, Yüksek Lisans Tezi, *EÜ.Sosyal Bilimler Enstitüsü Klasik Arkeoloji anabilimdalı*.
- Bartel, D.C. & Hohmann, G.V. (1985). Interpretation of crone pulse electromagnetic data, *Geophysics*, 50, 1488-1499.
- Beamish, D. (1994). Two-dimensional regularized inversion of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 357-374.
- Beamish, D. (1998). Three-dimensional modeling of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, 39, 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.
- Berdichevsky, M.N ., Dmitriev, V.I. & Pozdnjakova, E.E. (1998) On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings, *Geophysical Journal International*, 133, 585-606.
- Busselli, G. & O'Neill, B. (1977). SIROTEM : A new portable instrument for multichannel electromagnetic measurements, *Bull.Aust.Soc.Exp.Geop.*, 8, 82-87.

- Buselli, G., Barber, C., Davis, G.B. & Salama, R.B. (1992). Detection of Groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods, *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol:2*, 27-39.
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics, 18*, 605-634.
- Cerv, V. & Segenth, K. (1982). A comparison of accuracy of finite difference solution of boundary-value problem for the Helmholtz equation obtained by direct and iterative methods. *Appl. Math.*, 27(5), 375-390.
- Chouteau, M., Zhang, P. & Chapellier, D. (1996) Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering, *Geophysical Prospecting, 44*, 215-232.
- Clarke, C. M., Utsi, E. & Utsi, V. (1999). Ground penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Highland-Scotland, *Archaeological Prospection, 6*, 107-121.
- Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by finite element method, *Geophysics, 36*, 132-155.
- Crossley, D.J. (1981). *The theory of EM surface wave impedance measurements*, Collet, L.S. & Jensen, O.G. (Ed.) Geophysical applications of surface wave impedance measurements, *Geological Survey of Canada, Paper 81-15*, 1-17.
- D'Erceville, I. & Kunetz, G. (1962). The effect of a fault on the earth's electromagnetic field, *Geophysics, 27*, 651-665.

- DeLugao, P.B., Portniaguine, O. & Zhdanov, M.S. (1997). Fast and stable two dimensional inversion of magnetotellurics data, *J.Geomag.Geolectr.*,49, 1469-1497.
- DeMouilly, G.T. & Becker, A. (1984). Automated interpretation of airborne electromagnetic data, *Geophysics*, 49, 1301-1313.
- Dey, A. & Ward, S. H., 1970, Inductive sounding of a layered earth with horizontal magnetic dipole, *Geophysics*, 35, 660 - 703.
- Dobecki, T.L. & Roming, P.R. (1985). Geotechnical and groundwater geophysics, *Geophysics*, 50, 2621 - 2636.
- Doggarra, J.J., Bunch, J.R., Moller, C.B. & Stewart, G.W. (1979). *LINPACK, Users' Guide*, SIAM, Philadelphia. http://www.ictp.trieste.it/texti/linpack/linpack_1.html
- Ducworth, K. & Bays, A.R. (1984). Modified mode of operation for the Turam electromagnetic exploration system with benefits for deep exploration, *Geophysical Prospecting*, 32, 317-352.
- Fischer, G., Le Quang, B.V., & Muller, I. (1983). VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, 31, 977-991.
- Fitterman, D.V., Frischknecht, F.C., Mazzella, A.T. & Anderson, W.L. (1992). Example of TDEM sounding in the presence of oil-field pipes, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol:2, 79-88.
- Fraser, D.C. (1969). Contouring of VLF-EM data, *Geophysics*, 34, 958 - 967.
- Frolov, A.D. (1961). Radio wave method of geological mapping, *International Geological Review*, 3, 1048 - 1059.

- Gallagher, P.R., Ward, S.H. & Hohmann, G.V. (1985). A model study of a thin plate in free space for the EM37 transient electromagnetic system, *Geophysics*, 50, 1002 - 1021.
- Gaur, V.K. & Verma, O.P. (1973). Enhancement of electromagnetic anomalies by a conducting overburden II, *Geophysical Prospecting*, 21, 159 - 184.
- Gharibi, M. & Pedersen, L. B. (1999). Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases, *Geophysics*, 64, 1393 - 1402.
- Goldman, M., Tabarowsky, L. & Rabinovich, M. (1994). On the influence of 3-D structures in the interpretation of transient electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 59, 889 - 901.
- Grant, F.S. & West, G.F. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, McGraw Hill Book Cop.
- Guerin, R. & Benderitter, Y. (1995). Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods, *Geophysical Prospecting*, 43, 635 - 653.
- Harrison, C.H. (1970). Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, *Geophysics*, 35, 1099 - 1115.
- Hauser, J. P. & Rhoads, F. J. (1974). Coverage predictions for the Navy's Fixed VLF transmitters. *NRL Memorandum Report 2884*.
- Hayles, J.G. & Sinha, A.K. (1986). A portable local loop VLF transmitter for geological fracture mapping, *Geophysical Prospecting*, 34, 873-896.
- Herz, A. (1986). Airborne EM instruments operating at VLF and higher frequencies. *Geol. Surv. of Canada*, 55-61.

- Hjelt, S.E., Kaikkonen, P. & Pietila, R. (1985). On the interpretation of VLF resistivity measurements, *Geoexploration*, 23, 171-181.
- Hoekstra, P. & Blohm, M.W. (1992). Case histories of TDEM soundings in environmental geophysics, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol:2, 102-110.
- Jiracek, G.R., Redding, R.P. & Kojima, R.K. (1989). Application of the Rayleigh-FFT technique to magnetotelluric modeling and correction, *Physics of the earth and planetary interiors*, 53, 3654-3750.
- Kaikkonen, P. (1979). Numerical VLF modeling, *Geophysical Prospecting*, 23, 104-124.
- 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, 725-731.
- Karous, M. & Hjelt, S.E. (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurements, *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794.
- Kaufman, A.A. & Keller, G.V. (1981). *The magnetotelluric sounding method*, Elsevier, New York.
- Keller, G.V. & Frischknecht, F.C. (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, Pergamon Press Inc., New York.
- Keller, G.V. (1971). Natural Field and Controlled-Source methods in electromagnetic exploration, *Geoexploration*, 9, 99-147.
- Lee, T. J., Suh, J.H., Kim, H.J., Song, Y. & Lee, K.H. (2002). Electromagnetic travelttime tomography using an approximate wavefield transform, *Geophysics*, 67, 68-76.

- Loke, M.H. & Dahlin, T. (2002). A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion, *Jour. of Applied Geophysics*, 49, 149-162.
- Loke, M.H., Acworth, I. & Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- Mackie, R. L., Madden, T. R. & Wannamaker, P. E. (1993). Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-Theory and comparisons to integral equation solutions, *Geophysics*, 58, 215–226.
- McNeill, J.D. & Labson, V. (1991). *Geological mapping using VLF radio fields. In Electromagnetic methods in applied geophysics, PartB: Applications*, Nabighian, M.N. (Ed.), SEG, Tulsa.
- Monney, H.M. (1980). *Handbook of Engineering Geophysics, Vol:2, Electrical Resistivity*, Bison Inst., Minneapolis.
- Morreau, M.J. (1957). The loop frame electromagnetic method of prospecting and its applications in Canada, *Private Report*.
- Nabighian, M.N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nabighian, M.N. (1974). Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 39, 85-92.
- Neves, A.S. (1957). The magneto-telluric method in two dimensional structures, PhD Thesis, *Dept. of Geology and Geophysics*, MIT, Massachusetts.

- Nekut, A.G.(1994). Electromagnetic ray-trace tomography, *Geophysics*, 59, 371-377.
- Nelson, P.H. (1977). Induced polarization effects from grounded structures, *Geophysics*, 42, 1241-1251.
- Newman, G. A. & Alumbaugh, D. L. (1995). Frequency-domain modeling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences, *Geophys. Prosp.*, 43, 1021–1042.
- Nishitani, T. (2000). Investigation of underground resistivity structures using the VLF-MT method, *Archaeological Prospection*, 7, 231-240.
- O'Brien, D.P. (1971). CompDepth, a new method for depth to basement computation, *Geophysics*, 38, 187.
- Olsson, O. (1980). VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden, *Geophysical Prospecting*, 28, 415-434.
- Özyalın, Ş., & Akçığ, Z. (1999). Computer interpretation of two-dimensional gravity and magnetic anomalies, *Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition July 5-9*, 264.
- Palacky, G. J., Ritsema, I. L. & De Jong, S. J. (1981). Electromagnetic prospecting for groundwater in precambrien terrains in the Republic of Upper Volta, *Geophysical Prospecting*, 29, 932-955
- Parasnis, D.S. (1966) *Mining Geophysics*, Elsevier Publ.Co., Amsterdam.
- Parry, J.R. & Ward, S.H. (1971). Electromagnetic scattering from cylinders of arbitrary cross-section in a conductive half-space, *Geophysics*, 36, 67-100.

- Paterson, N.R., & Ronka, V. (1971). Five years of surveying with the VLF-EM method, *Geoexploration*, 9, 7-26.
- Patra, H.P. & Mallick, K. (1980). *Geosounding Principles, Time varying geoelectric soundings*, Elsevier Scien. Book Comp. Amsterdam - Oxford – New York.
- Pınar, R. & Akçığ, Z. (1992). Kösemtuğ tümülüsünün jeofizik yöntemlerle araştırılması, *Uluslararası VII Arkeometri Sonuçları Toplantısı Kitabı*, 133-155.
- Pınar, R. & Akçığ, Z. (1997). Geophysical investigation of Kosemtug tumulus, Bandırma (NW Turkey), *Archaeological Prospecting*, 4, 1, 15-23.
- Pipan, M., Baradello, L., Forte, E. & Finetti, I. (2001) Ground penetrating radar study of iron age tombs in southeastern Kazakhstan, *Archaeological Prospection*, 8, 141-155.
- Poddar, M. (1982). Very low frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half-plane in a layered half-space, *Geophysics*, 47, 1059-106
- Rankin, D. (1962). The magnetotelluric effect on a dike, *Geophysics*, 27, 666-676.
- Savvaidis, A., Tsokas, G., Liritzis, Y. & Apostolou, M. (1999). The location and mapping of ancient ruins on the castle of Lefkas (Greece) by resistivity and GPR methods, *Archaeological Prospection*, 6, 63-73.
- Saydam, A.S. (1981). Very low frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements, *Geophysics*, 46, 1594-1605.
- Sinha, A.K. & Hayles, J.G. (1988). Experiments with a local loop VLF transmitter for geological studies in the Canadian nuclear fuel waste management program, *Geoexploration*, 25, 37-60.

- Smith, B.D. & Ward, S.H. (1974). On the computation of polarization ellipse parameters, *Geophysics*, 39, 867-869.
- Slepek, Z. (1999). Electromagnetic sounding and highprecision gravimeter survey difene ancient Stone Building Remains in the Territory of Kazan Kremlin (Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *Archaeological Prospection*, 6, 147-160.
- Stadelhofen, M.D. (1994). *Camille: Anwendung geophysikalischer Methoden in der Hydrogeologie*, Berlin: Springer, IX, 230.
- Şeker, S. ve Çerezci, O. (2000). *Elektromagnetik dalgalar ve mühendislik uygulamaları*, Boğaziçi Üniv. Yayınları, No: 548, İstanbul.
- Talwani, M. & Heirtzler, J.R. (1964). Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structure of arbitrary shape, in computers in the mineral industries, Part 1, *Stanford University Publications, Geol. Sciences*, 9, 464-480.
- Talwani, M. (1965). Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, 30,797-817.
- Telford, W.M., Geldard, L.P., Sheriff, R.E. & Keyes, D.A. (1976). *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.
- Telford, W.M., King, W.F. & Becker, A. (1977). VLF mapping of geological structure, *Geol. Surv. Can. Paper*, 25-76.
- Telford, W.M., Geldard, L.P., Sheriff, R.E. & Keyes, D.A. (1990). *Applied Geophysics, (2nd Ed.)*, Cambridge University Press.
- Tezkan, B. (1999). A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Survey in Geophysics*, 20, 279-308.

- Ting, S.C. & Hohmann, G.W. (1981). Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response, *Geophysics*, *46*, 182-197
- Tolstoy, A., Rosenberg, T.L., Inan, U.S. & Carpenter, D.L. (1986). Model predictions of subionospheric VLF signal perturbation-induced ionization enhancement region, *J. Geophys. Res.*, *91*, 13473-13482.
- Wait, J.R. & Nabulsi, K.A. (1996). Wave tilt of radio waves propagating over a layered ground, *Geophysics*, *61*, 1647-1652.
- Wang, T. & Fang, S. (2001). 3-D electromagnetic anisotropy modeling using finite differences, *Geophysics*, *66*, 1386-1398.
- Wannamaker, P.E., Hohmann, G.W. & San Filippo, W. A. (1984-a). Electromagnetic modeling of the three-dimensional bodies in layered earths using integral equations, *Geophysics*, *49*, 60-74.
- Wannamaker, P.E., Hohmann, G.W. & Ward, S.H. (1984-b). Magnetotelluric response of the three-dimensional bodies in layered earths, *Geophysics*, *49*, 1517-1533.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A. & Rijo, L. (1987). A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, *88*, 277-296.
- Ward, S.H. (1959). AFMAG-Airborne and ground, *Geophysics*, *24*, 761-789.
- Ward, S.H., O'Brien, D.P., Parry, J.R. & MC Knight, B.K. (1968). AFMAG interpretation, *Geophysics*, *33*, 621-644.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W. (1987). In *Electromagnetic theory for geophysical applications, Vol:1*, Nabighian, M.N. and Corbett, J.D. (Ed.), SEG, Tulsa.

Watt, A.D. (1967). *VLF radio engineering*, Pergamon Press, New York.

Weaver, J.T. & Brewitt, C.R. (1978). Improved boundary conditions for the numerical solution of E polarization problems in geomagnetic induction. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 54, 309-317.

Weaver, J.T. (1994). *Mathematical Methods for Geo-electromagnetic Induction*, Research Studies Press Ltd., Taunton, Summerset, England.

West, G.F., Mac Nae, J.C. & Lamontagne Y. (1984). A TDEM system measuring the step response of the ground, *Geophysics*, 49, 1010-1036.

Yararlanılan İnternet siteleri

http://www.consciousness-centre.com/rival/1_tech/vlf1.htm

http://publications.uu.se/uu/fulltext/nbn_se_uu_diva-4146.pdf

<http://beaconworld.org.uk/files/VLF.pdf>

http://daskyleion.tripod.com/001_konum.html

<http://kisi.deu.edu.tr/ali.oz/METROPOLIS.html>

http://www.kulturturizm.gov.tr/portal/tarih_tr.asp?belgeno=3378

http://www.ictp.trieste.it/txi/linpack/linpack_1.html

<http://www.goelectrical.com/>

<http://home1.swipnet.se/~w-11019/ABEM-ftp/>

EK A

Tabakalı Ortamlar için Düzlem Dalga E ve H Alanları Hesabı

Düzlemsel EM dalga için yeryüzünden, yer içine doğru yayılan “j” tabakasındaki elektrik alan değeri,

$$E_j(z) = E_j^+ \left[e^{-ik_j(z-d_j)} + R_j e^{+ik_j(z-d_j)} \right] \quad (\text{A.1})$$

eşitliği ile verilir (Wannamaker, 1983). Elektrik alanı havada ve yeryüzündeki değeri,

$$E_o(z) = E_o^+ \left[e^{-ik_o z} + R_n e^{+ik_o z} \right] \quad (\text{A.2})$$

$$E_n(z) = E_n^+ e^{-ik_n(z-d_{n-1})} \quad (\text{A.3})$$

ile verilir. j'ninci tabakanın altından, aşağı ve yukarı doğru hareket eden dalganın genliğine bağlı yansımaya katsayısı,

$$R_j = \frac{Z_j - \hat{Z}_{j+1}}{Z_j + \hat{Z}_{j+1}} \quad (\text{A.4})$$

olarak verilir (Ward, 1967). Burada; $Z_j = \frac{w\mu_j}{k_{jz}}$ dir, ve eşitlik tekrar düzenlenirse

j'ninci tabakanın empedans elde edilir. h_j ; j'ninci tabakanın kalınlığıdır.

$$\hat{Z}_j = Z_j \frac{\hat{Z}_{j+1} + Z_j \tanh(ik_j h_j)}{Z_j + \hat{Z}_{j+1} \tanh(ik_j h_j)} \quad (\text{A.5})$$

Yeryüzündeki elektrik alan ($z=0$);

$$E_o(0) = E_o^+[1 + R_o] \quad (\text{A.6})$$

ile verilir. Ara yüzeye dik gelen E alan süreklidir. Bu özellikten,

$$E_1(0) = E_1^+[e^{+ik_1d_1} + R_1e^{-ik_1d_1}] = E_o(0) \quad (\text{A.7})$$

olarak bulunur.

$$E_1^+ = \frac{E_o^+[(1.,0.) + R_o]e^{-ik_1d_1}}{[(1.,0.) + R_1]e^{-2ik_1d_1}} \quad (\text{A.8})$$

Denklemden;

$$E_1^+ = \frac{E_{1-1}^+[(1.,0.) + R_{1-1}]e^{-ik_1d_1}}{[(1.,0.) + R_1]e^{-2ik_1d_1}} \quad (\text{A.9})$$

$$E_n^+ = E_{n-1}^+[(1.,0.) + R_{n-1}] \quad (\text{A.10})$$

ve $E_0^+ = (1.,0.)$ olarak tanımlanır.

Maxwell denklemlerinden, manyetik alanlar;

$$H_j(z) = \frac{k_j}{w\mu_j} (\hat{k} \times E_1^+) [e^{+ik_j(z-d_j)} + R_j e^{-ik_j(z-d_j)}] \quad (\text{A.11})$$

$$H_n(z) = \frac{k_n}{w\mu_n} (\hat{k} \times E_1^+) e^{-ik_n z} \quad (\text{A.12})$$

ile tanımlanır. k ; z yönündeki birim vektördür.