

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM  
(VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC METHOD, VLF-EM)  
İTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI: *VLFINTEP***

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Müh. Mine DOĞAN**

**Anabilim Dalı: Jeofizik Mühendisliği**

**Programı: Jeofizik Mühendisliği**

**OCAK 2007**

**ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM  
(VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC  
METHOD, VLF-EM) İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE  
DEĞERLENDİRME PROGRAMI: *VLFINTEP***

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Mine DOĞAN  
Enstitü No: 505021404**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gülçin ÖZÜRLAN  
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. H. Argun KOCAOĞLU  
Yrd. Doç. Dr. Emin U. ULUGERGERLİ (Ç.O.M.Ü)**

**OCAK 2007**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirme fikri, arazi çalışmaları sırasında en büyük sıkıntımız olan, her günün gecesinde aldığımız ölçüleri değerlendirme ve yeni profiller belirleyerek ölçüm planımızı geliştirme zorunluluğundan doğdu. Ümit ediyorum ki, esas amacına hakkıyla hizmet eder ve arazi akşamlarını, sadece keyifli sohbetlerle geçirilen dinlenme zamanları haline dönüştürebilir.

Öncelikle, bu çalışmanın gerçekleşmesinde değerli fikirleriyle eşsiz katkıları bulunan, tüm telaşlarıma sabırla katlanan ve her zaman daha iyi olmam için beni destekleyen sevgili hocam, Doç. Dr. Gülçin Özüran'a sonsuz teşekkürler. Sinyal Analizi dersinde bir jeofizik sinyali ile yakınlığımızı pekiştirip bizleri birbirini anlayan dostlar haline getiren hocam, Doç. Dr. Argun Kocaoğlu'na sinyal analizi ve programlama konusundaki katkıları ve İTÜ'de geçen on yılımda destekleri ve bilgi dağarcığıma katkıları nedeniyle tüm hocalarıma teşekkür ederim, sağolsunlar. Yrd. Doç. Dr. Emin Ulugergerli'ye katkıları için teşekkürler. Jeofizik Mühendisliği Bölümü Başkanlığı'na ve Yer Fiziği Ana Bilim Dalı Başkanlığı'na sağladıkları tüm olanaklar için teşekkür ederim.

Bu çalışmada dostluğuyla büyük katkıları bulunan Sena Akçer'e, geceler boyu benimle oturan hatta bazen ne yaptığını hiç anlamadan da olsa sekreterliğimi yapan Melek Alptürkan'a, sabrı için sonsuz teşekkürler. Ve sevgili Deniz, çok kısa zamanlarda çok büyük işler başarmama neden oldun. Hayat, sen olmasan ve sende olmasam hiç bir şey olduğu gibi olamazdı, iyi ki varsın.

Son olarak, sevgili babama, bana daima güvendiği ve destek olduğu için, annem, ağabeyim ve Nazlı'ya tüm sıkıntılara sabırla katlandıkları için minnettarım.

Ocak, 2007

Mine Doğan

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xi</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. VLF-ELEKTROMANYETİK YÖNTEM</b>	<b>4</b>
2.1 Temel İlkeler	4
2.2 Kullanım Alanları	6
2.3 VLF-Elektromanyetik Kuramı	7
2.3.1 Kaynak alanlar	7
2.3.2 Yer ile etkileşim	12
2.3.3 İletken ortamda uyartım	13
2.3.4 Eliptik kutuplanma (Polarizasyon elipsi)	19
2.4 Ölçülen Büyüklükler	20
2.5 Kuramsal Eğriler	23
2.6 Değerlendirme ve Sunum	24
2.6.1 Fraser süzgeci	25
2.6.2 Karous-Hjelt süzgeci	26
2.6.3 Chouteau süzgeci	27
<b>3. VLFINTERP, İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI; İŞLEYİŞ VE FONKSİYONLAR</b>	<b>28</b>
3.1 Amaç	28
3.2 İçerik	28
3.3 VLFINTERP Programının Mevcut Yazılımlar İle Karşılaştırılması	29
3.4 VLFINTERP'in Yazım Dili, MATLAB	31
3.5 VLFINTERP Programının İşleyişi	33
3.6 VLFINTERP Programının Menüleri ve İşlemler	34
3.6.1 MATLAB menüleri	35
3.6.2 VLFINTERP menüleri	39
3.6.2.1 Yükle (Load) menüsü	39
3.6.2.2 Süzgeçler (Filters) menüsü	44
3.6.2.3 Profiller (Profiles) menüsü	50
3.6.2.4 Haritalar (Maps) menüsü	52
3.6.2.5 Blok görünüm (Block View) menüsü	58
3.6.2.6 Modelleme (Modelia) menüsü	59
3.6.2.7 Kütüphane (Library) menüsü	59
3.6.2.8 Yardım (Help) menüsü	61
<b>4. VLFINTERP, İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI İLE MODELLEME</b>	<b>62</b>
4.1 Kaynak Alanlar ve İkincil Alanlar	62
4.2 Polarizasyon Elipsinin Değiştirgenlerinin Modellenmesi	67
4.2.1 Çizgisel kaynak (Line Source) modeli	67

4.2.2 Sokulum modeli	73
4.2.3 Küre modeli	74
4.2.4 Model eğriler ile saha verisinin karşılaştırılması	76
<b>5. VLFINTERP İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI İLE UYGULAMA ÖRNEKLERİ</b>	<b>77</b>
5.1 Literatür Verisi	77
5.2 Saha Verisi; Demirci, Hisar Jeotermal Alanı	80
<b>6. SONUÇLAR</b>	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>87</b>

## KISALTMALAR

<b>VLf</b>	: Very Low Frequency (Çok Alçak Frekans)
<b>AM</b>	: Amplitude Modulation (Genlik Modülasyonu)
<b>FM</b>	: Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
<b>GPS</b>	: Global Positioning System (Küresel Konum Belirleme Sistemi)
<b>MT</b>	: Magnetotelluric Method (Manyetotellürik Yöntem)
<b>YKMT</b>	: Yapay Kaynaklı Manyetotellürik Yöntem (Controlled Source Audio Magnetotelluric Method, CSAMT)
<b>YHEM</b>	: Yatay Halka Elektromanyetik Yöntem (Horizontal Loop Electromagnetic Method, HLEM)
<b>GPR</b>	: Ground Penetrating Radar (Yer Radarı)
<b>TM</b>	: Transverse Magnetic
<b>TE</b>	: Transverse Electric
<b>IP</b>	: In-phase (%)
<b>OP</b>	: Out-of-phase (%)
<b>SP</b>	: Self Potential (Doğal Potansiyel)
<b>DAÖ</b>	: Doğru Akım Özdirenç
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Tablo 2.1</b> Başlıca VLF istasyonları için frekans listesi .....	8
<b>Tablo 2.2</b> Başlıca VLF istasyonları için istasyon bilgileri listesi .....	9
<b>Tablo 2.3</b> Karous-Hjelt süzgeci yarı katsayıları .....	26
<b>Tablo 3.1</b> Veri dosyası biçimi .....	42
<b>Tablo 3.2</b> Koordinat dosyası biçimi .....	42

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Şekil 2.1</b> : (a) Washington Oso'da bulunan Jim Creek anteninın şematik görünümü (b) İngiltere, Rugby'deki VLF vericisinin fotoğrafı .....	4
<b>Şekil 2.2</b> : Frekans ortamı elektromanyetik yöntemler için frekans aralıkları ve araştırma derinlikleri ile ilgili şematik gösterim .....	6
<b>Şekil 2.3</b> : TM modunda elektromanyetik alan bileşenlerinin durumu .....	10
<b>Şekil 2.4</b> : TE modunda elektromanyetik alan bileşenlerinin durumu .....	11
<b>Şekil 2.5</b> : VLF anteni ve oluşturduğu birincil alanın şematik gösterimi .....	11
<b>Şekil 2.6</b> : Bir düşey elektrik dipol civarında yaratılan alanlar .....	12
<b>Şekil 2.7</b> : VLF-Elektromanyetik alanının kaynak-alıcı arasındaki seyahat biçimleri; yer dalgası, gök dalgası, boşluk dalgası .....	13
<b>Şekil 2.8</b> : Birincil ve ikincil manyetik alanların vektörel gösterimi .....	14
<b>Şekil 2.9</b> : Çeşitli frekanslar için nüfuz derinliğinin özdirence bağlı değişimi	19
<b>Şekil 2.10</b> : Polarizasyon elipsinin değiştirgenleri .....	20
<b>Şekil 2.11</b> : Çeşitli iletken yapı modelleri için karakteristik eğriler .....	23
<b>Şekil 3.1</b> : <i>VLFINTERP</i> interaktif veri işleme ve değerlendirme programının işleyiş ve fonksiyonlarını gösterir diagram .....	29
<b>Şekil 3.2</b> : <i>VLFPROS</i> programının işleyiş ve fonksiyonlarını gösterir diagram .....	30
<b>Şekil 3.3</b> : <i>VLFPROS</i> programının çıktılarından örnekler. (a) Ham veriler için yığma profiller, (b) gerçel bileşen kontur haritası .....	30
<b>Şekil 3.4</b> : <i>VLFINTERP</i> programı açılış ekranının görünümü .....	34
<b>Şekil 3.5</b> : <i>VLFINTERP</i> programı menülerinin genel görünümü .....	35
<b>Şekil 3.6</b> : Dosya (File) menüsünün görünümü .....	35
<b>Şekil 3.7</b> : Düzenle (Edit) menüsünün görünümü .....	36
<b>Şekil 3.8</b> : Görüntüle (View) menüsünün görünümü .....	36
<b>Şekil 3.9</b> : Ekle (Insert) menüsünün görünümü .....	37
<b>Şekil 3.10</b> : Araçlar (Tools) menüsünün görünümü .....	37
<b>Şekil 3.11</b> : Masaüstü (Desktop) menüsünün görünümü .....	38
<b>Şekil 3.12</b> : Pencere (Window) menüsünün görünümü .....	38
<b>Şekil 3.13</b> : Yardım (Help) menüsünün görünümü .....	38
<b>Şekil 3.14</b> : Yükle (Load) menüsünün görünümü .....	39
<b>Şekil 3.15</b> : Çalışma alanı ile ilgili bilgilerin programa verilmesini sağlayan iletişim kutusunun görünümü .....	40
<b>Şekil 3.16</b> : Veri yükleme işlemi sırasında görüntülenen aktif yardım metni ..	41
<b>Şekil 3.17</b> : Veri dosyalarının programa tanıtılması .....	41
<b>Şekil 3.18</b> : Ölçüm nokta ve profil planı .....	43
<b>Şekil 3.19</b> : Yüklenen verinin profil ve ölçüm noktası sayısını bildiren iletişim kutusu .....	43
<b>Şekil 3.20</b> : Süzgeçler (Filters) menüsünün görünümü .....	44
<b>Şekil 3.21</b> : Düzenlenen veri noktası sayısını bildiren iletişim kutusu .....	45
<b>Şekil 3.22</b> : Tek nokta düzeltmesi yapılması istenen noktanın yatay mesafe değerini sorgulayan iletişim kutusu .....	45
<b>Şekil 3.23</b> : Bir verinin tek nokta düzeltmesi yapılmadan önceki (a) ve sonraki (b) görünümleri .....	46

<b>Şekil 3.24</b>	: Örnek bir verinin süzgeçleme işleci ile uygun biçimde süzgeçlenmesi .....	47
<b>Şekil 3.25</b>	: Butterworth süzgecinin biçimini gösterir şematik çizim .....	48
<b>Şekil 3.26</b>	: Örnek bir verinin süzgeçleme işleci ile amacına uygun olmayan biçimde süzgeçlenmesi .....	49
<b>Şekil 3.27</b>	: Süzgeçleme işleminin tamamlandığını bildiren iletişim kutusu ...	49
<b>Şekil 3.28</b>	: Profiller (Profiles) menüsünün görünümü .....	50
<b>Şekil 3.29</b>	: Çeşitli uzunlukta kayan ortalama işleçleri ile yuvarlatılan yapay bir verinin görünümü .....	51
<b>Şekil 3.30</b>	: Kayan ortalama işleminden sonra hesaplanan Chouteau görünür özdirenç değerleri .....	51
<b>Şekil 3.31</b>	: Yeryüzünden (ortam özdirenci, 200 $\Omega$ m) 10 m derinde 10x10 m kare kesitli iki boyutlu bir yapı (50 $\Omega$ m) için; (a) Fraser IP derinlik kesidi, (b) eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesidi, (c) 200 $\Omega$ m başlangıç özdirenci ile hesaplanan görünür özdirenç (log) derinlik kesidi .....	52
<b>Şekil 3.32</b>	: Haritalar (Maps) menüsünün görünümü .....	52
<b>Şekil 3.33</b>	: Gridleme (Gridia) işlecinin görünümü .....	53
<b>Şekil 3.34</b>	: Farklı hücre boyutları seçilerek hazırlanan kontur haritalarına örnekler .....	54
<b>Şekil 3.35</b>	: Farklı kontur aralıkları seçilerek hazırlanan kontur haritalarına örnekler .....	55
<b>Şekil 3.36</b>	: Farklı gridleme teknikleri ile hazırlanan kontur haritalarına örnekler .....	56
<b>Şekil 3.37</b>	: Farklı renk ölçekleri kullanılarak hazırlanan kontur haritalarına örnekler .....	57
<b>Şekil 3.38</b>	: Yığma profillerin görünümü .....	57
<b>Şekil 3.39</b>	: Blok görünüm (Block view) menüsünün görünümü .....	58
<b>Şekil 3.40</b>	: Yığma profillerin blok görünümü .....	58
<b>Şekil 3.41</b>	: Fraser süzgeci kullanılarak hazırlanan kat haritalarının görünümü .....	59
<b>Şekil 3.42</b>	: Örnek bir çalışma alanının seçilen üç farklı vericiye göre konumunu gösterir harita .....	60
<b>Şekil 4.1</b>	: 16.0, 23.4 ve 28.5 kHz'lik birincil manyetik alanlar .....	62
<b>Şekil 4.2</b>	: 16.0 kHz'lik birincil ve ikincil manyetik alanların $\phi$ açısına bağlı değişimleri .....	63
<b>Şekil 4.3</b>	: Ortamda iyi bir iletken olmaması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 0^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu .....	65
<b>Şekil 4.4</b>	: Ortamda iyi bir iletken olması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 45^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu .....	65
<b>Şekil 4.5</b>	: Ortamda çok iyi bir iletken olması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 90^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu .....	66
<b>Şekil 4.6</b>	: Ortamda çeşitli yapıların bulunması durumunda polarizasyon elipsinin / açısına bağlı değişimi .....	67
<b>Şekil 4.7</b>	: Çizgisel kaynak modeli ve deşğırtirgenlerinin şematik gösterimi ..	68
<b>Şekil 4.8</b>	: Eğrilerin deşğırlendirilmesinde kullanılan deşğırler .....	68
<b>Şekil 4.9</b>	: Zayıf iletken bir ortamda iyi iletken bir kaynak olması durumunda hesaplanan model eğriler .....	69
<b>Şekil 4.10</b>	: İletken olmayan bir ortamda zayıf iletken bir kaynak olması durumunda hesaplanan model eğriler .....	70

<b>Şekil 4.11</b>	: İletken olmayan bir ortamda zayıf iletken bir kaynak olması ve kaynak alan şiddetinin artması durumunda hesaplanan model eğriler .....	70
<b>Şekil 4.12</b>	: Farklı derinliklerde bulunan çizgisel kaynaklar için hesaplanmış model eğriler.....	71
<b>Şekil 4.13</b>	: Çizgisel kaynak ve ölçüm profilinin doğrultularının plan görünümü .....	71
<b>Şekil 4.14</b>	: Azimut açısının farklı değerleri için hesaplanmış model eğriler ..	72
<b>Şekil 4.15</b>	: Sokulum modeli ve değiştirgenlerinin şematik gösterimi .....	73
<b>Şekil 4.16</b>	: Farklı derinliklerde bulunan sokulum modelleri için hesaplanmış tilt açısı değerlerini gösteren model eğriler .....	74
<b>Şekil 4.17</b>	: Küre modeli ve değiştirgenlerinin şematik gösterimi .....	74
<b>Şekil 4.18</b>	: Farklı derinliklerde bulunan küre modelleri için hesaplanmış tilt açısı değerlerini gösteren model eğriler .....	75
<b>Şekil 4.19</b>	: Demirci fayı üzerinde ölçölmüş gerçel bileşen verisi ile sokulum modeli için hesaplanmış tilt açısı model eğrisinin karşılaştırılmalı gösterimi .....	76
<b>Şekil 5.1</b>	: GBR vericisi kullanılarak, Södra, Sahavaara'da ölçölmüş VLF-Elektromanyetik yöntem belirtisi .....	77
<b>Şekil 5.2</b>	: Süzgeçler ile elde edilmiş grafikler ve jeolojik kesit .....	78
<b>Şekil 5.3</b>	: Süzgeçler ile elde edilmiş derinlik kesitleri ve jeolojik kesit .....	79
<b>Şekil 5.4</b>	: Üç numaralı profilin Fraser IP ve eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesitleri .....	80
<b>Şekil 5.5</b>	: Üç numaralı profilin görünür özdirenç derinlik kesidi .....	81
<b>Şekil 5.6</b>	: 23.4 kHz frekansında ölçölen gerçel bileşen verileri kontur haritası .....	81
<b>Şekil 5.7</b>	: 23.4 kHz frekansında ölçölen gerçel bileşen değerlerinin blok görünümü .....	82

## SEMBOL LİSTESİ

$H$	: Manyetik alan şiddeti (Amperé-sarım/m)
$D$	: Elektrik yerdeğiştirme (Coulomb/m <sup>2</sup> )
$J$	: Akım yoğunluğu (Amperé/m <sup>2</sup> )
$t$	: Zaman (s)
$E$	: Elektrik alan şiddeti (Amperé/m <sup>2</sup> )
$B$	: Manyetik akı yoğunluğu (Weber/m <sup>2</sup> )
$\phi$	: Birincil ve ikincil alanlar arasındaki açı
$H_0$	: Birincil (kaynak) manyetik alan
$H_p$	: Birincil manyetik alan
$H_s$	: İkincil manyetik alan
$H_t$	: Toplam manyetik alan
$H_x$	: Toplam manyetik alanın yatay bileşeni
$H_y$	: Toplam manyetik alanın yatay bileşeni
$H_z$	: Toplam manyetik alanın düşey bileşeni
$\alpha$	: Toplam manyetik alanın yatayla yaptığı açı
$\omega$	: Açısal frekans
$f, W$	: Frekans (Hz)
$A, B$	: Verici ve iletkenin biçimine bağlı katsayılar
$\rho$	: Özdirenç ( $\Omega$ m)
$\delta$	: Nüfuz derinliği (m)
$a$	: Polarizasyon elipsinin uzun eksen
$b$	: Polarizasyon elipsinin kısa eksen
$\epsilon$	: Polarizasyon elipsinin elipselliği ( $b/a$ )
$\theta$	: Polarizasyon elipsinin eğim açısı (tilt açısı)
$c$	: Işık hızı ( $3 \times 10^8$ m/sn)
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik (permeabilite) (Henry/m)
$\mu_0$	: Boşluğun manyetik geçirgenliği ( $4 \pi \times 10^{-7}$ Henry/m)
$\epsilon$	: Dielektrik permittivite (Farad/m)
$\sigma$	: İletkenlik (Siemens/m)

## **ÇOK ALÇAK FREKANS ELEKTROMANYETİK YÖNTEM (VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC METHOD, VLF-EM) İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI: *VLFINTERP***

VLF-Elektromanyetik yöntem, tüm dünyada sığ iletken yapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ölçümlerde, farklı parametre ve frekanslar için çok sayıda veri elde edilmektedir. *VLFINTERP*, gereken tüm veri işlem aşamalarını tek bir paket içinde toplayarak değerlendirme işlemini hızlandırmak amacıyla geliştirilmiş, etkileşimli bir bilgisayar programıdır. MATLAB ortamında geliştirilen program, yöntemde ölçülen dört parametre ve üç farklı frekans için aynı anda işlemler yapılmasına olanak sağlamaktadır.

*VLFINTERP* interaktif veri işleme ve değerlendirme programı, verilerin kontrolü ve gürültülerden arındırılması amacıyla, çeşitli veri işlem süzgeçlerini ve yönteme özgü değerlendirme amaçlı süzgeçleri içermektedir. *VLFINTERP* programı, dört farklı parametre için ham verilerin grafik gösterimlerinin yanısıra Fraser IP (ikincil manyetik alanın birincil manyetik alana oranının gerçel bileşeni, in-phase), eşdeğer akım yoğunluğu ve görünür özdirenç grafikleri ve derinlik kesitlerini de içermektedir. VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesinde, eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesitleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte, Fraser IP derinlik kesitlerinin kullanımı yaygın değildir. Bir yenilik olarak, bu programla, diğer derinlik kesitlerinin oluşturulmasında kullanılan yönteme benzer bir teknik kullanılarak, görünür özdirenç derinlik kesitleri oluşturulmuştur. Ayrıca, *VLFINTERP* interaktif veri işleme ve değerlendirme programı, ham verilerin kontur haritaları, süzgeçlenmiş verilerin kontur ve kat haritaları biçiminde gösterimlerini içermektedir.

Programın GPS okumaları ile alınan bölgesel arazi koordinatları ile çalışması nedeniyle, kısa zamanda verilerin değerlendirilmesi ve başka jeofizik yöntemler ve jeolojik bilgiler ile ilişkilendirilmesi mümkün olabilmektedir.

Bütün bunlara ek olarak, *VLFINTERP* programı, birincil ve ikincil manyetik alanlar ile çizgisel kaynak, sokulum ve küre gibi bazı basit model yapılar için polarizasyon elipsinin değiştirgenlerini hesaplayan bir modelleme işlecini içermektedir.

## **VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC METHOD, VLF-EM INTERACTIVE DATA PROCESSING AND INTERPRETATION PACKAGE: *VLFINTERP***

VLF-Electromagnetic method is widely used for the detection of shallow conductive structures all over the world. Large data sets are collected for different parameters and frequencies during data acquisition. *VLFINTERP*, is an interactive software tool that is designed for the purpose of speeding up the data interpretation while combining all the required processing stages within a single package. The program is developed in MatLab programming language and it allows data processing and interpretation with four parameters and three different frequencies, simultaneously.

*VLFINTERP* interactive data processing and interpretation package includes different kinds of filters for denoising data and the special filters for data interpretation. In addition, it creates the raw data graphs for four different parameters and Fraser IP (real component of primary magnetic field and secondary magnetic field ratio, in-phase), equivalent current density and relative apparent resistivity graphs and depth sections. Equivalent current density depth sections are widely and Fraser IP depth sections are rarely used for VLF-Electromagnetic data interpretation. As an improvement of this program, relative apparent resistivity depth sections are created by a method like the other depth section creation methods. *VLFINTERP* interactive data processing and interpretation package, also, includes contour maps of raw data, contour and layer maps of filtered data.

It is possible to relate outputs of *VLFINTERP* with results of other geophysical methods and geological maps, because it works with GPS or local coordinates of investigation area. In addition, *VLFINTERP* package includes a modelling tool to calculate primary and secondary magnetic fields and parameters of polarization ellipse for some simple model structures like line source, dike and sphere.

## 1. GİRİŞ

Çok Alçak Frekans (15-30 kHz) Elektromanyetik Yöntem (Very Low Frequency Electromagnetic Method, VLF-EM), sığ derinliklerde bulunan metalik veya sülfürlü cevherlerin, arkeolojik kalıntıların, jeotermal alanların aranmasında, kırık, sokulum gibi düşey iletken yapılarla jeolojik birimlerin sınırlarının belirlenmesi ve haritalanmasında etkin bir yöntemdir (**McNeill, 1990**). VLF-Elektromanyetik yöntem, kullanım kolaylığının yanısıra hızlı ve düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle özellikle geniş sahalarda yapılan jeofizik araştırmalarda, hedef bölge seçimi amaçlı kullanımı ile öne çıkmaktadır. VLF-Elektromanyetik yöntemde kaynak olarak radyo istasyonlarından yayınlanan sinyaller kullanılmaktadır. Bu nedenle ölçümler esnasında sahada bir kaynak yaratılması söz konusu değildir ve ölçümler için sadece alıcı aygıtın kullanılması yeterli olmaktadır. Kullanılan alıcı aygıt, son derece hafif ve taşınabilir olduğundan VLF-Elektromanyetik yöntem ölçümlerinin sahada tek kişi tarafından kolaylıkla ve hızlı bir biçimde yapılabilir. Öyle ki, bir kullanıcı tek başına ve çok kısa sürelerde kilometrelerce ölçüm alabilmektedir. Bu durum, VLF-Elektromanyetik yöntemin en önemli üstünlüğüdür. Bu üstünlük, çok geniş sahalarda daha yüksek maliyetli ve zaman alıcı yöntemlerin kullanılmasından önce hedef bölgenin belirlenmesine de olanak sağlamaktadır.

VLF-Elektromanyetik yöntem, saha çalışmaları açısından son derece kolay uygulanabilir bir yöntem olmakla birlikte; çok kısa zamanda farklı frekanslar için çok sayıda farklı parametre ölçüldüğünden, toplanan veri sayısı zaman içinde giderek artmakta ve çoğu zaman bu verilerin kısa sürelerde kontrol edilip işlenebilmesi mümkün olmamaktadır. Örneğin, bir kullanıcı ölçüm profillerinin belirlenmesinin ardından, tek başına ortalama 50 nokta için ölçümü bir saatte tamamlayabilmekte, veri sayısı, üç farklı frekans için çalışıldığında üçe katlanmakta ve dört farklı parametrede ölçüm yapıldığından toplam veri sayısı 600'ü bulmaktadır. Özellikle hedef bölge belirleme çalışmalarında, ölçümler ile ilgili ilk değerlendirmelerin hemen aynı gün yapılması ve sonraki gün için yeni profillerin yerlerinin kontrolü ve ardından yeni profiller belirlenmesi veya olası değişiklikler gündeme gelmektedir. Bu durumda bir günlük çalışmadan elde edilebilecek veri takımının büyüklüğü gözönüne alındığında, bu işlemlerin kısa sürelerde ve sağlıklı biçimde yapılabilmesi için hızlı ve kullanımı kolay yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu amaçla hazırlanan yazılım, *VLFINTEP*, yöntemin veri işleme, değerlendirme ve yorumlama aşamalarını hızlandırmak, verileri mümkün olduğu kadar çabuk çeşitli süzgeçlerden geçirerek, istenen parametrelere ait harita ve grafiklerle, kesitlerin elde edilmesini sağlamak amacıyla MATLAB® (The MathWorks Inc., 1994-2006) ortamında yazılmış interaktif bir bilgisayar programıdır.

*VLFINTEP*, yerel saha koordinatlarıyla (GPS okumaları) çalışmaya olanak vermekte, yerel saha koordinatlarının girişi ile ölçüm alınan profillerin yerlerinin ve birbirlerine göre konumlarının doğrudan ve hızlı bir biçimde görülmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanısıra, ölçülen verilerin gürültülerden arındırılmasını sağlayan, sinyal analizinde yaygın olarak kullanılan süzgeç veya yuvarlatma işlemlerini (Butterworth, Kayan Ortalama) içermektedir. VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlere özgü süzgeçler (Fraser,1969; Karous ve Hjelt,1983; Chouteau ve diğ. 1996) de *VLFINTEP* programında yer almaktadır.

*VLFINTEP* programında, kullanımda bulunan aygıtın genellikle ölçtüğü dört büyüklük (gerçel bileşen, sanal bileşen, tilt açısı, toplam manyetik alan şiddeti) ile süzgeçlerle elde edilen verilerin grafik ve alansal gösterimleri de yer almaktadır. Bunların yanısıra, değerlendirme amaçlı süzgeçler kullanılarak elde edilen derinlik kesitleri ve kat haritaları da *VLFINTEP* programı ile hızlı bir biçimde görüntülenebilmektedir. Yukarıda sözü edilen VLF-Elektromanyetik yöntemlere özgü Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçlerinden verilerin değerlendirilmesi aşamasında sıklıkla yararlanılmaktadır. Özellikle Karous-Hjelt süzgeci kullanılarak derinlik kesitleri oluşturulması işlemi de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Seyrek olarak da Fraser süzgeci kullanılarak derinlik kesitleri hazırlanmaktadır. Ancak, literatür çalışması sırasında Chouteau süzgeci kullanılarak görünür öz direnç değerlerini içeren derinlik kesitlerinin oluşturulduğuna rastlanmamıştır. Bu çalışmada, diğer süzgeçlerle derinlik kesitleri hazırlanmasına benzer bir teknikle Chouteau görünür öz direnç derinlik kesitleri de oluşturulmuştur. Görünür öz direncin derinliğe bağlı değişimini haritalamayı amaçlayan bu kesitlerin yorumda kolaylık sağladığı görülmüştür.

Halen bu konu ile ilgili yazılmış başka bir bilgisayar programı (*VLFPROS*), serbest kullanımda bulunmakla birlikte bu programın kullanıma yönelik bazı eksiklikleri bulunduğundan, mümkün olan en çok gösterim, yani veri sunum biçimini içeren, kontrolü ve veri tanıma işlemleri kolaylaştırılmış bir programın yazılmasına gerek duyulmuştur. Mevcut programda, gerçel bileşen verilerinin alansal gösterimlerinin yanısıra, değerlendirme amaçlı VLF-Elektromanyetik yöntemlere özgü süzgeçlerden

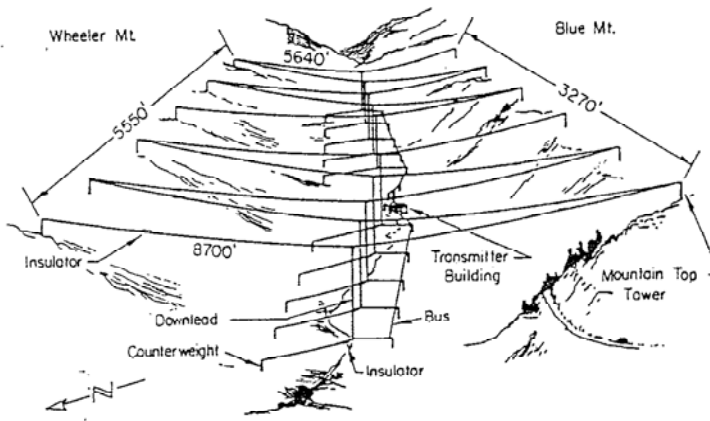
Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçleri kullanılmakta ve bunlara ait derinlik kesitleri de hazırlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, ikinci bölümde, VLF-Elektromanyetik yöntemle ilgili temel ve kuramsal bilgiler verilerek yöntemin tanıtımı yapılmaktadır. Yöntemde ölçülen büyüklükler ile değerlendirme ve sunum biçimleri de bu bölümde anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen *VLFINTEP* programının işleyişi ve fonksiyonları hakkında bilgiler verilmekte, menülerin içerikleri ile kullanılan hesaplama ve gösterim teknikleri açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, *VLFINTEP* programının içeriğinde bulunan modelleme işleci ayrı bir başlık altında incelenmektedir. Beşinci bölümde, programın çeşitli veriler kullanılarak elde edilen çıktılarından örnekler verilerek bunların anlamları üzerinde durulmaktadır. Altıncı bölümde bu çalışma ile ulaşılan sonuçlar özetlenmekte ve programın işlerliği ile geliştirilmesine yönelik gelecekte yapılması planlanan işler tartışılmaktadır.

## 2. VLF-ELEKTROMANYETİK YÖNTEM

### 2.1 Temel İlkeler

VLF-EM terimi, ingilizce “very low frequency electromagnetic” kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Dilimize “çok alçak frekans elektromanyetik” olarak çevirilen bu terim, aslında çok alçak frekanslı yayın yapan askeri radyo vericileri için kullanılmaktadır. Bu radyo vericileri AM (Amplitude Modulation, genlik modülasyonu) ve FM (Frequency Modulation, frekans modülasyonu) radyo istasyonlarından farklı olarak 15-30 kHz frekans aralığında yayın yapmaktadırlar. Vericiler, sıradan radyo antenlerinden oldukça karmaşık olup genelde bir vadi içine kurulan ve ortamın coğrafi özelliğini yansıtıcı olarak kullanan bir antenler ve kablolar sistemidir. Bir VLF vericisine ait şematik çizim Şekil 2.1’de görülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 2.1 :** (a) Washington Oso’ da bulunan Jim Creek anteninin şematik görünümü (McNeill ve Labson (1991)’dan yeniden düzenlenerek alınmıştır). (b) İngiltere, Rugby’deki VLF vericisinin fotoğrafı.

Sözü edilen frekans aralığı, jeofizik yöntemlerin tümü göz önüne alındığında çok alçak frekans sayılmamakla birlikte, yöntemin adı, elektronik mühendislerinin esas amacına uygun olarak verdiği isimle kullanılmagelmiştir. VLF vericileri, dünyanın pek çok noktasında kurulu, askeri amaçlı yayın yapan istasyonlardır. Diğer radyo vericilerinden çok daha düşük olan frekans bandıyla, çok uzak mesafelerde ve denizaltında askeri haberleşmenin sağlanması hedeflenmiştir. Özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında askeri hedef olan bu istasyonlar zaman içinde gelişen teknolojiyle güçlenmişlerdir. VLF sinyalleri askeri amaçlı mesajların iletilmesi için dünyanın her

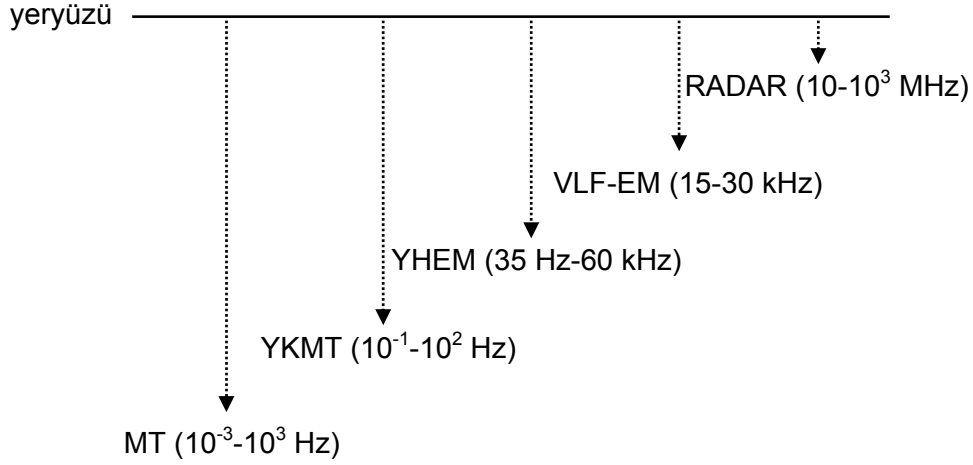
yerinde kullanılmaktadırlar. Mesajın içeriği genelde frekans modülasyonu ile bir sinüsoidal taşıyıcı dalgaya yüklenmektedir. Ancak genellikle taşıyıcı dalga mors kodu şeklinde nokta ve çizgilere bölündüğünden bu sinyalin jeofizik için kullanımı son derece zordur. Ancak VLF aygıtları bu duruma uygun önlemler alınarak geliştirilmişlerdir (**Milsom, 1996**).

VLF istasyonlarından yayınlanan sinyallerin yer yapısının elektrik özelliklerinden etkilendiği ve bu sinyallerin karakteristik davranışları uzun yıllardır bilinmektedir; ancak jeofizik araştırmalarda kaynak olarak kullanılması fikri gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkmıştır. **Paterson ve Ronka (1971)**'nin belirttiğine göre; VLF sinyallerini jeofizik araştırmalarda kullanma fikri yeni olmamakla birlikte sönümlenme ve uçuşma ölçümleri ilk olarak 1908'de Hack ve 1933'de Feldman tarafından çeşitli jeolojik ortamlar civarında gerçekleştirilmiştir; Eve ve Keyes (tarihi bilinmiyor) çeşitli metalik cevherler civarında sinyal şiddetini ölçmüşlerdir.

Radio frekans elektromanyetik yöntemlerin taşınabilir alıcılar kullanılarak uygulanması 1930'larda başlamıştır. Avrupa'da radyo frekans elektromanyetik yöntemler, kömür madenlerinin haritalanması ve metalik cevherlerin araştırılmasında kullanılmıştır. Ancak, bu yöntemin yeryüzünde ve havadan kullanımının süreklilik kazanması 1964 yılında Geonics Limited tarafından geliştirilen cihazla olmuş; 1966'nın sonlarında yöntem geniş bir kullanım alanına ulaşmış ve başka benzer sistemler de geliştirilmiştir. 1968 yılına gelindiğinde havadan ölçüm yapan iki farklı cihazın daha testleri tamamlanmıştır (**Paterson ve Ronka, 1971**).

Günümüzde tüm dünyada yaygın olarak kullanılan üç cihaz modeli; Geonics EM-16 (Geonics Limited, 1964), WADI VLF (ABEM) ve ENVI-VLF (Scintrex)'dir. Bu çalışma kapsamında verilen uygulama örneği, halen İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan SCINTREX ENVI-VLF cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Elektromanyetik yöntemler, frekans ve zaman ortamı elektromanyetik yöntemler olarak iki başlık altında sınıflandırılmaktadır. Frekans ortamı elektromanyetik yöntemler araştırma derinliklerine göre Şekil 2.2'deki gibi çeşitlilik göstermektedir.



**Şekil 2.2** : Frekans ortamı elektromanyetik yöntemler için frekans aralıkları ve araştırma derinlikleri ile ilgili şematik gösterim.

Manyetotellürik Yöntem (MT) en düşük frekans bandına sahip olan ve çok derin araştırmalara olanak sağlayan bir yöntemdir. Yapay Kaynaklı Manyetotellürik Yöntem (YKMT) ve Yatay Halka Elektromanyetik Yöntem (YHEM), Manyetotellürik Yönteme göre daha sığ araştırmalarda kullanılabilir. VLF-Elektromanyetik Yöntem (VLF-EM), Yer Radarından (GPR) sonra en sığ frekans ortamı elektromanyetik yöntemdir.

## 2.2 Kullanım Alanları

VLF-Elektromanyetik yöntem, temelde, düşey iletken yapıların araştırılmasında kullanılmaktadır. Çeşitli frekanslarda belirli doğrultular üzerinde yapılan ölçümlerle, derinliğe bağlı yatay tabakalı ortam yaklaşımı ile frekans sondajı yerine kaydırma türü ölçümlerle yanal süreksizliklerin ayrılması amacıyla uygulanmaktadır. Bu temel tanımlara uygun olarak VLF-Elektromanyetik yöntem; kırık, sokulum gibi yanal öz direnç farklılığı gösteren dokanaklar ve jeolojik birimlerin sınırlarının belirlenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, metalik cevher damarlarının yerlerinin ve uzanımlarının belirlenmesi ile saçılmış (disemine) maden yataklarının sınırlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (**Frasheri ve diğ.,1995**). Çevre jeofiziği araştırmalarında, yeraltı suyuna karışan atıkların iyonik içerikleri nedeniyle yeraltı suyunun elektrik iletkenliğini artırması esasına dayanarak kirliliğin yayılım sınırlarının ve benzer bir yaklaşımla sahil kesimlerinde yeraltı suyuna tuzlu su girişimlerinin haritalanmasında kullanılmaktadır (**Benson ve diğ., 1997**). VLF-Elektromanyetik yöntem, sıcaklığın öz direnci düşürdüğü ilkesinden hareketle ve

sıcak akışkanın kırık zonları boyunca hareketinden dolayı sığ jeotermal alanların sınırlarının belirlenmesinde de kullanılmaktadır (**Özürlan ve Şahin, 2005**). Tüm bu alanların yanısıra, özellikle büyük boyutlu sahalarda, daha yüksek maliyetli jeofizik yöntemlerin uygulanacağı hedef bölgelerin belirlenmesinde ve uygun büyüklük ve özellikteki iletken arkeolojik yapıların haritalanmasında da kullanılmaktadır.

## **2.3 VLF-Elektromanyetik Kuramı**

### **2.3.1 Kaynak Alanlar**

Yazılı kaynaklara göre, çok alçak frekanslarda çalışan ilk vericiler, uzun mesafeli iletişim ihtiyacı nedeniyle 1910 ve 1912 yılları arasında inşa edilmiştir. Bu derece uzun mesafelerle iletişim kurabilme ihtiyacının genellikle, çeşitli ülkelerin uzaktaki kolonilerinin varlığı ile ilgili olduğu bilinmektedir. Örneğin; Kootwijk'deki ilk Alman istasyonu, Java Malabar ile, Paris ve Lyon'daki Fransız istasyonları, Saigon ile (Fransa, Bordeaux'daki FÜO 1920'de Fransa için Amerikan ordusu tarafından inşa edilmiştir) iletişimi sağlamaktaydı. İngiliz Marconi, Birinci Dünya Savaşı'nın sonunda Wales'de GNC'yi, Rugby'de GBR'yi kurmuş, bu istasyonlarda 1927, 1938 ve 1958'de büyük değişiklikler gerçekleştirmiştir. 1930'ların başlarında vakum tüplü vericiler Balboa (NBA, Kanal Bölgesi), Pearl Harbour (NPM, Hawaii), Annapolis (NSS, Amerika) ve Cavite (NPO, Filipinler)'deki VLF istasyonlarına kurulmuş, Goliath VLF radyo istasyonu 1940'ların başında Almanya, Kalbe' de kurulmuştur. Bu vericiler 100 kW'ın üstündeki güçleriyle İkinci Dünya Savaşı boyunca deniz aşırı haberleşme için kullanılmışlardır (**McNeill ve Labson, 1991**). Dünya'daki bazı önemli VLF istasyonlarına ait bilgiler Tablo 2.1 ve 2.2'de verilmektedir.

**Tablo 2.1:** Başlıca VLF istasyonları için frekans listesi (**ABEM** firmasının resmi internet ortamından yeniden düzenlenerek alınmıştır).

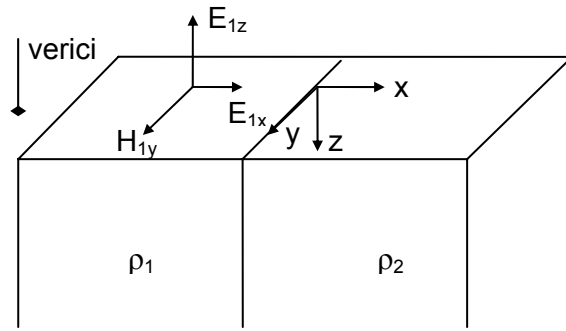
Frekans Listesi			
Frekans (kHz)	İstasyon Kodu	Frekans (kHz)	İstasyon Kodu
15.1	FUO HWU VTI	19.9	JJI
15.3	NHB NPN NLK NEJ	20.2	JJI ICV
15.5	NWC NPM NAA NSS	20.3	JJI
15.6	EWB	20.5	3SA 3SB
15.7	NPM NSS NAK NPL NPG	20.8	ICV
16.0	GBR	21.0	3SA 3SB
16.2	UGK JAP	21.2	JJI
16.3	VTX	21.4	NPM NAA NSS
16.4	JXN	21.6	3SB
16.6	NPM NSS NAK	21.8	TBA
16.8	FTA	21.9	JJI
17.0	VTX	22.2	JJI
17.1	UMS	22.3	NWC NAA NLK NPC NSS NPM
17.4	NDT	22.6	GBR
17.6	JXZ	22.8	NWC
17.8	NPM NAA NSS	22.9	JJI
17.9	UBE	23.3	JJI
18.0	NBA NPL NPG NLK	23.4	NPM
18.1	UPD	24.0	NPM NBA NSS NLK
18.2	VTX NSS JJH	24.8	NLK
18.3	HEU	25.3	NAA
18.5	DHO NAA	25.5	3SB
18.6	NHB NPN NPM NAA NLK NPG NEJ	25.8	NSS NAA
18.7	JJI	26.1	NPM NLK NPG NEJ
18.9	UMB	27.0	RCV NAU
19.0	GQD NPM NSS	27.5	NAU
19.1	JJI	27.7	3SB
19.2	VTX	28.0	DHO, 3SB
19.4	NHB NPN NPM NEJ NLK	28.5	NAU NPL
19.5	3SA	28.6	RAM
19.6	GBZ	29.0	3SA
19.8	NWC NPM NLK NPL NPG TBA	30.0	UNW

**Tablo 2.2:** Başlıca VLF istasyonları için istasyon bilgileri listesi (**ABEM** firmasının resmi internet ortamından yeniden düzenlenerek alınmıştır).

İstasyon Bilgileri				
İstasyon	Lokasyon	Ülke	Koordinatlar	
3SA	Changde	Çin	29N04	111E43
3SB	Datong	Çin	39N56	113E15
DHO	Burlage	Almanya	53N05	007E37
EWB	Odessa	Ukrayna	46N29	030E44
FTA	Assise	Fransa	48N32	002E34
FUO	Croix	Fransa	44N45	000W48
GBR	Rugby	İngiltere	52N22	001W11
GBZ	Rugby	İngiltere	52N22	001W11
GQD	Rugby	İngiltere	52N22	001W11
HWU	Le Blanc	Fransa	46N37	001E05
ICV	Tavolara	İtalya	40N55	009E45
JAP	Yosami	Japonya	34N58	137E01
JJH	Kure	Japonya	34N14	132E34
JJI	Ebino	Japonya	32N05	131E51
JXN	Helgeland	Norveç	66N25	013E01
JXZ	Helgeland	Norveç	66N25	013E01
NAA	Cutler ME	ABD	44N39	067W17
NAK	Annapolis	ABD	38N59	076W28
NAU	Aguada	Porto Riko	18N23	67W11
NBA	Balboa	Panama	09N04	079W39
NDT	Yokosukaichi	Japonya	34N58	137E01
NEJ	Seattle	ABD	47N41	122W15
NHB	Kodiak	Alaska	57N45	152W30
NLK	Oso Wash	ABD	48N12	121W00
NPC	Seattle	ABD	47N35	122W32
NPG	S. Francisco	ABD	38N06	122W16
NPL	S. Diego	ABD	32N44	117W05
NPM	Pearl Harbor	Hawai	21N25	158W09
NPN	Guam	Guatamala	13N34	144E50
NSS	Washington	ABD	38N59	076W27
NWC	North West Cape	Avustralya	21S47	114E09
RAM	Moscow	Rusya	55N49	037E18
RCV	Rostov	Rusya	47N18	039E48
TBA	Antalya	Türkiye	36N53	030E43
UBE	Petrolovsk	Rusya	52N59	158E39
UGK	Kaliningrad	Rusya	54N42	020E30
UMB	Rostov	Rusya	57N14	039E48
UMS	Moscow	Rusya	55N49	037E18
UNW	Kaliningrad	Rusya	55N45	020E30
UPD	Murmansk	Rusya	68N58	033E05
VTI	Bombay	Hindistan	19N00	073E00
VTX	Vijayanarayanam	Hindistan	08N26	077E44

Üzerinde çalışılan iletken yapı, geometrik olarak, bir boyutun diğerinden çok büyük olduğu bir uzanım biçiminde tanımlandığında kırık, sokulum, jeolojik birim sınırı ve benzeri jeolojik yapılara karşılık gelmektedir. Böylece, VLF elektromanyetik alanının iletkenin konumuna görece ilerleme doğrultusu ve yönü, yaratılan ikincil alanın fiziksel özelliklerini etkilediğinden, jeofizik amaçlı kullanım söz konusu olduğunda

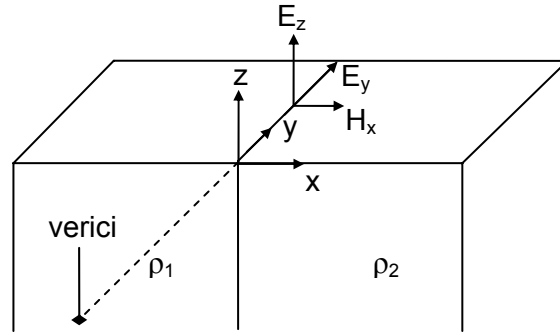
kaynak alanı yaratan vericinin iletkenine göre konumu da önem kazanmaktadır. İki boyutlu yapılar ile ilgili temelde iki farklı durum olduğu varsayılmakta ve bunlar TM (Transverse Magnetic) ve TE (Transverse Electric) modları olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik yöntemlerde kullanılan iki moddan biri olan TM (H-polarizasyon) modunda VLF elektromanyetik alanının yayımlandığı verici, iletkenin uzanımına dik doğrultudadır. VLF elektromanyetik alanının, vericiden çok uzaklarda düzlem dalga davranışına uyduğu varsayılmaktadır. Bu durumda düzlem dalganın ilerleme yönü, üzerinde çalışılan yapının arayüzeyine diktir ve manyetik alan bileşeni iletken doğrultusundadır. TM modunun ideal durumu olan bu halde, arayüzün belirlenebilmesi için sadece yatay elektrik alanın ölçülmesi yeterli olmaktadır. İdeal durumdan uzaklaştıkça problem karmaşık bir hal almakta ve ölçülen veriden yapının ayırdedilebilmesi için daha karmaşık veri işlem aşamalarının uygulanması gerekmektedir. Eğer örtü katman elektriksel olarak ince ise (deri kalınlığının birbuçuk katından daha az kalınlıkta), bir boyutlu geometride homojen bir ortamla yatay tabakalı bir ortamdan gelen belirtiler birbirinden ayırdedilememektedir. Yatay süreksizliğin varlığı durumunda, belirtinin en büyük genlik değeri iletken yapının üzerinde oluşmakta, ancak, ortamların gerçek özdirençlerine değil, özdirençler arasındaki orana bağlı olarak bu genliğin büyüklüğü değişmektedir (**McNeill ve Labson, 1971**).



**Şekil 2.3 :** TM modunda elektromanyetik alan bileşenlerinin durumu (**McNeill ve Labson (1971)**'dan yeniden çizilerek alınmıştır).

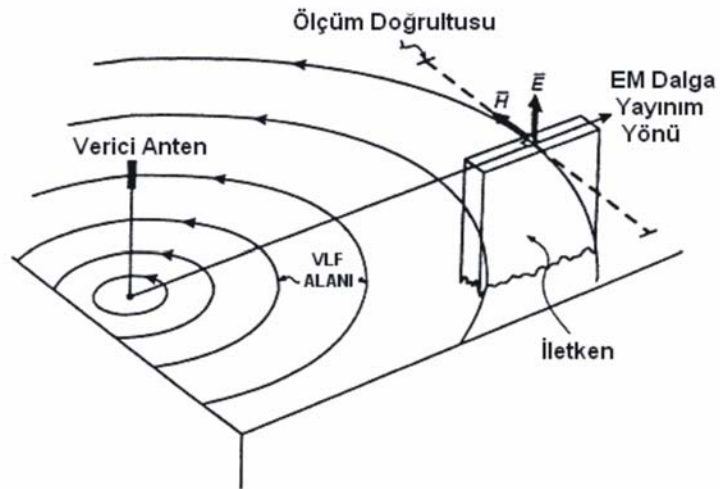
VLF-Elektromanyetik yöntem cihazları manyetik alan bileşenlerini ölçmek üzere tasarlandığından VLF elektromanyetik yöntem için TE (E-polarizasyon) modu önem kazanmaktadır (**McNeill ve Labson, 1971**). TE modunun ideal durumunda, VLF elektromanyetik alanının yayımlandığı verici, arayüzeyin uzanımı ile aynı doğrultudadır; bu durumda düzlem dalganın ilerleme yönü arayüzeye paraleldir ve manyetik alan bileşeni arayüzeye dik doğrultudadır. Jeofizik ölçümlerde, uzanım biçimindeki iletken yapıların en sağlıklı biçimde görüntülenmesi yapının uzanımına dik doğrultuda ölçümler alınması ile sağlanabildiğinden bu mod, VLF-

Elektromanyetik yöntem için ideal olan moddur; düşey kontağın belirlenmesi için sadece yatay manyetik alanın ölçülmesi yeterli olmaktadır. Bu nedenle, en yüksek genlikli ve doğru belirtiyi elde edebilmek için vericinin yeri jeolojik uzanımın doğrultusunda seçilmelidir. Böylece ölçümler süresince algılanacak kaynak alan şiddeti de değişmemekte ve belirtinin kaynak alan şiddetindeki değişimlerden etkilenmesinin de önüne geçilmiş olmaktadır. Ancak saha koşullarında ideal ölçüm planını seçmek ve uygulamak her zaman mümkün olmamaktadır. Vericinin başka bir doğrultuda seçilmesi durumunda, ölçülecek belirti TE ve TM modlarındaki manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin bir vektörel toplamı haline geldiğinden karmaşık bir yapıya bürümekte ve araştırılan yapıyı tanımlayan belirtinin veriden ayrılması güçleşmektedir (McNeill ve Labson,1971).



**Şekil 2.4** : TE modunda elektromanyetik alan bileşenlerinin durumu (McNeill ve Labson (1971)'dan yeniden çizilerek alınmıştır).

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, en doğru belirtiyi elde etmek için, VLF-Elektromanyetik yöntem ölçümleri ölçüm profilinin doğrultu ve yönüne bağımlı olduğundan seçilecek profiller mümkün olduğunca birbirine paralel ve ölçüm yönleri aynı olmalıdır.



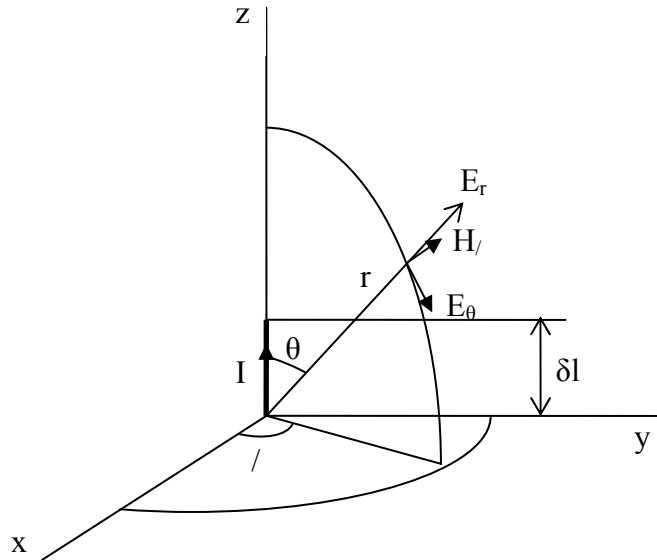
**Şekil 2.5** : VLF anteni ve oluşturduğu birincil alanın ( $H_p$ ) şematik gösterimi (Reynolds (1996)'dan değiştirilerek alınmıştır).

Bu durumda jeolojik yapının uzanım doğrultusuna dik olarak iletkenin içinden geçen birincil elektromanyetik alanın manyetik alan bileşeni, iletken içinde Eddy akımları indüklemekte ve iletkenin fiziksel özelliklerine (boyut, derinlik, iletkenlik) bağlı olarak farklı şiddette ikincil manyetik alanlar yaratılmaktadır. Fiziksel olarak ideal olan bu şartları sağlamak için iletkenin uzanım doğrultusunun jeoloji bilgilerinden tahmin edilmesi, ya da farklı doğrultularda bulunan birkaç istasyon kullanılarak ölçü alınması gerekmektedir. Uygulamada, her zaman uygun doğrultuda istasyon bulunamaması verilerin karmaşık bir hal almasına neden olmakta ve yorumlama işlemi güçleşmektedir; bu durum VLF-Elektromanyetik yöntemin zayıf bir yönünü oluşturmaktadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak taşınabilir VLF vericilerinin yapılması yöntemin bu zayıflığının önemli ölçüde giderilmesine yardımcı olmaktadır.

### 2.3.2 Yer ile Etkileşim

Bir VLF vericisi, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi fiziksel olarak bir düşey elektrik dipol şeklinde tanımlanmaktadır. Böyle bir düşey elektrik dipol tarafından yaratılan manyetik alan şiddeti Biot-Savart yasası kullanılarak (2.1) numaralı denklem ile açıklanabilmektedir:

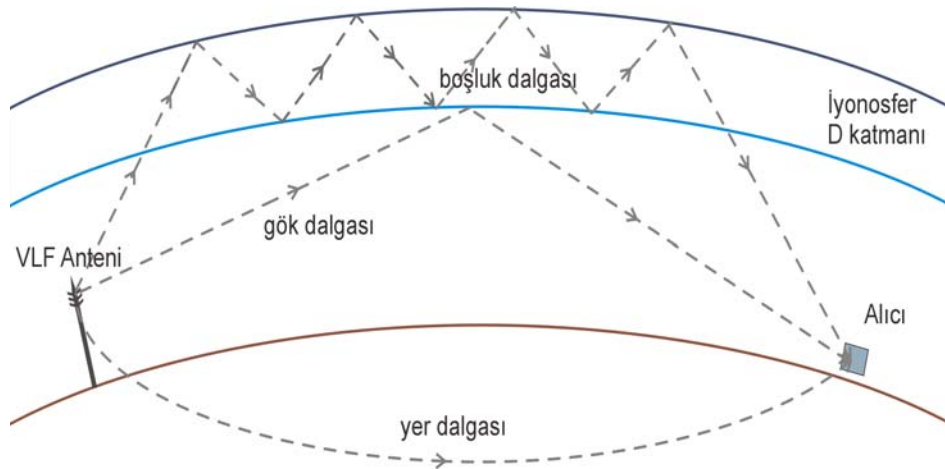
$$H_{\phi} = \frac{i\omega I \delta l}{4\pi cr} e^{i\omega(t-r/c)} \sin \theta \quad (2.1)$$



**Şekil 2.6** : Bir düşey elektrik dipol civarında yaratılan alanlar (Telford ve diğ., 1984).

Bu denklemde;  $\omega$ , açısal frekans,  $c$ , ışık hızını ( $c=3 \times 10^8$  m/s) göstermektedir. Burada vericiden yayımlanan kaynak alanının, temelde bir iletkenin içinden geçen akımın

yaratacağı bir elektromanyetik alana eş olduğu varsayılmaktadır. Böylece oluşan bir elektromanyetik dalga, birbirine dik iki alanın bileşiminden meydana gelmektedir, bunlar; elektrik ve manyetik alanlardır. VLF istasyonundan yayınlanan sinyal de, elektrik ve manyetik alan bileşenlerini içermekte ve Şekil 2.7'de görüldüğü gibi üç farklı biçimde seyahat etmektedir: gökdalgası (skywave), boşluk dalgası (spacewave) ve yerdalgası (groundwave). Çok uzak mesafelerde ilk algılanan dalga, yeryüzü ile iyonosfer arasında seyahat eden gökdalgasıdır; ancak ölçümlerde esas olarak kullanılan, yer içinde yayılan yerdalgasıdır (**Paterson ve Ronka,1971**). Yer dalgası, yer içindeki çeşitli ortamlardan geçerken fiziksel özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Atmosfer yeterince iletken olmadığından ve iyonosfer de elektromanyetik dalgaların yayılımını kolaylaştırdığı ve aynı zamanda yansıtıcı görevi yaptığından, VLF Elektromanyetik alanı, atmosferde (skywave) ve boşlukta (spacewave) enerjisinin büyük kısmını koruyarak uzak mesafelere seyahat edebilmektedir. Ancak bu şartlar altında bile elektromanyetik alanın enerjisinin bir kısmı uzaya kaçmakta ya da yere nüfuz etmektedir. Elektromanyetik dalganın yere nüfuz eden ve yer yüzeyine paralel olarak derinlere doğru seyahatine devam eden kısmı (groundwave) hem haberleşme hem de jeofizik amaçlı kullanımın temelini oluşturmaktadır.



**Şekil 2.7** : VLF-Elektromanyetik alanının kaynak-alıcı arasındaki seyahat biçimleri; yer dalgası, gök dalgası, boşluk dalgası.

### 2.3.3 İletken Ortamda Uyarım

VLF elektromanyetik alanının fiziksel davranışını ve yayılımını açıklayabilmek için Maxwell denklemlerinden Faraday ve Amperé yasalarını incelemek gerekmektedir. Bu yasalar, birbirleri ile bağlantılı olarak bir elektromanyetik alanın davranışını açıklamaktadırlar.

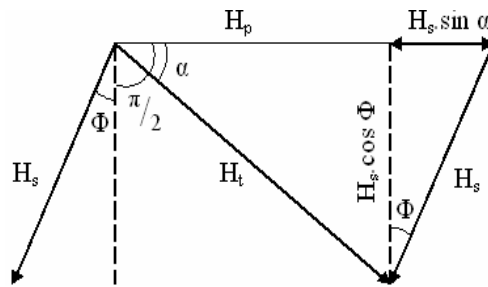
$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

Amperé yasası, içinden akım geçen bir tel etrafında akım şiddetiyle doğru orantılı olarak bir manyetik alan oluştuğunu göstermektedir; oluşan manyetik alanın yönü sağ el kuralı ile belirlenebilir. (2.2) denklemi ile verilen bu yasaya göre bir tel etrafında oluşan manyetik alan şiddeti, telden geçen akım şiddetiyle doğru orantılıdır. Denklemden; H, manyetik alan şiddetini (Amperé-sarım/m), D, elektrik yerdeğiştirmeyi (Coulomb/m<sup>2</sup>), j, akım yoğunluğunu (Amperé/m<sup>2</sup>) ve t, zamanı ifade etmektedir. Böylece VLF vericisinden yayımlanan, birincil (primary) ya da kaynak alan olarak adlandırılan elektromanyetik alanın fizik esası açıklanabilmektedir:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

(2.3) numaralı denklem ile verilen Faraday yasası, bir iletken civarında oluşturulan manyetik alanın iletkende akımlar (Eddy akımları) indüklediğini ve bu akımların bir ikincil manyetik alan yarattıklarını açıklamaktadır. Denklemden; E, elektrik alan şiddetini (Amperé/m<sup>2</sup>), B, manyetik akı yoğunluğunu (Weber/m<sup>2</sup>) ve t, zamanı ifade etmektedir.

Yerçi ve denizaltı, havadan daha iletken olduğundan birincil alan yer içine ya da deniz altına nüfuz ederken ortamın iletkenliği ile orantılı olarak ikincil (secondary) alanlar oluşmaktadır. Yine fizik yasaları gereği, birincil alanın yer içinde indüklediği akımlar, elektromanyetik alanın manyetik alan bileşeni doğrultusunda, yaratılan ikincil alan da bu akımların akış yolu ve dolayısıyla birincil alan ile dik açı yapacak biçimde ilerlemektedir. Bu durum, birincil ve ikincil alanlar arasında doğal olarak oluşan 90°'lik faz kaymasını da açıklamaktadır. Yer içinde, ortamın genelinden belirgin biçimde daha iletken olan yapılar bulunması durumunda, yaratılan ikincil alanların özellikleri bu yapının varlığına göre değişmektedir. Birincil ve ikincil elektromanyetik alanların vektörel gösterimleri Şekil 2.8'de görülmektedir.



**Şekil 2.8 :** Birincil ( $H_p$ ) ve ikincil ( $H_s$ ) manyetik alanların vektörel gösterimi (Telford ve diğ. (1976)'den yeniden çizilerek alınmıştır).

Daha önce bahsedildiği gibi, vericiden çok uzaklarda yayınlanan elektromanyetik alanın düzlem dalga davranışına uyduğu kabul edilmektedir. Böyle bir elektromanyetik dalganın davranışını açıklayabilmek için Amperé ve Faraday yasalarına ek olarak, (2.4), (2.5) ve (2.6) numaraları ile verilen bünye deklemleri de kullanılmaktadır.

$$B = \mu H \quad (2.4)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2.5)$$

$$J = \sigma E \quad (2.6)$$

Bu denklemlerde; B, manyetik akı yoğunluğunu (Weber/m<sup>2</sup>), D, elektrik yerdeğıştirmeyi (Coulomb/m<sup>2</sup>), J, akım yoğunluğunu (Amperé/m<sup>2</sup>),  $\mu$ ,  $\varepsilon$  ve  $\sigma$ , sırasıyla, ortamın manyetik geçirgenliğini (permeabilitesini), dielektrik sabitini (permittivitesini) ve iletkenliğini ifade etmektedir.

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.8)$$

Bünye denklemleri kullanılarak (2.2) ve (2.3) denklemleri ortamın fiziksel özelliklerini içerecek biçimde düzenlendiğinde (2.7) ve (2.8) denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemlerin her iki yanının rotasyonelinin alınması ve

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla \cdot \nabla A = \nabla \nabla \cdot A - \nabla^2 A \quad (2.9)$$

özdeşliğinin kullanılması ile Maxwell denklemlerinden zaman ortamı için elektromanyetik dalga denklemleri elde edilmiş olur:

$$\nabla^2 E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

$$\nabla^2 H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Helmholtz denklemleri olarak isimlendirilen bu denklemlerde; H, elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşenini, E, elektrik alan bileşenini ifade etmektedir. VLF-

Elektromanyetik yöntemde, ölçülen büyüklükler elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşenine ait büyüklükler olduğundan bundan sonraki bölümlerde (2.11) denklemi incelenecektir. Bilindiği gibi bu denklemde, birinci dereceden türevin katsayısı olan  $\mu\sigma$  terimi elektromanyetik dalganın sönümünü belirlemektedir. Genelde kayaçlar için manyetik geçirgenlik değerlerinin değişmediği kabul edildiğinden, elektromanyetik dalganın sönümlenmesini etkin olarak belirleyen terim iletkenlik olmaktadır.

$$H(t) = |H_0|e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

Elektromanyetik dalganın zamanla değişimi, genellikle sinusoidal olarak kabul edildiğinden manyetik alanın zamana bağlı değişimi, denklem (2.12)'de verildiği gibi olmaktadır. Bu denklemde,  $H_0$ , mutlak değer olarak manyetik alanın yayımlandığı ( $t=0$ ) andaki şiddetini,  $\omega$ , ise elektromanyetik dalganın açısal frekansını ( $2\pi f$ ) ifade etmektedir. Bu denklemin Fourier dönüşümü alınır,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = i\omega H \quad (2.13)$$

ve elde edilen (2.13) denklemi (2.11) denkleminde yerine konulursa,

$$\nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H - \omega^2 \varepsilon\mu H \quad (2.14)$$

(2.14) denklemi elde edilir. Bu denklem, manyetik alanın ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılımını tanımlamaktadır. Denklemde sağ tarafında bulunan  $\omega^2 \varepsilon\mu H$  terimi, düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar için dielektrik katsayısının etkisi çok küçük olduğundan ihmal edilebilmektedir. İletkenliğin düşük olduğu (hava, çok dirençli kayaçlar vs.) ortamlarda denklemin sağ tarafı sıfıra yaklaşmaktadır. İletken ortamlar için ise (2.15) numaralı difüzyon denklemine dönüşmektedir:

$$\nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H. \quad (2.15)$$

Üç boyutlu ortamda yayılan kaynak alanın manyetik alan bileşeninin yer içine doğru nüfuzunu gözönüne alarak z eksenini boyunca ilerlediği kabul edilirse; x,y düzlemi dalganın düzlemini ifade etmektedir.

$$H = H_y(z,t) = |H_0|e^{i\omega t + kz} \quad (2.16)$$

Denklem (2.16)'daki kabulle;

$$\nabla^2 H = \left( \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} \right) = k^2 H \quad (2.17)$$

denkleme ulaşılır ve türevin Fourier dönüşümü alınarak,

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} \mathfrak{S} = i\omega\mu \quad (2.18)$$

yerine konursa, k değeri (2.19) numaralı denklemde görüldüğü gibi elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamın fiziksel parametrelerine ve dalganın açısal frekansına bağlı gerçel ve sanal bileşenleri olan bir katsayıya dönüşmektedir:

$$k^2 = -i\omega\mu\sigma \quad (2.19)$$

(2.19) numaralı denklemde tanımlanan ve bir karmaşık sayı olan k katsayısının karekökü alınarak,

$$k = \pm(1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \pm(1+i)a \quad \text{ve} \quad a = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.20)$$

denkleme elde edilmektedir. Bu denklemde a, ortamın fiziksel özelliklerini ve kaynak alanın açısal frekansını içeren bir katsayıdır.

Düşey yöndeki değişim (z) pozitif ve sonsuza yaklaşan bir değer olduğunda, manyetik alan şiddetinin sonlu olması gerektiği için pozitif bileşenin kaldırılmasıyla,

$$H_y = H_0 e^{i\omega t + (1+i)az} = H_0 e^{-az + i(\omega t - az)} \quad (2.21)$$

denkleme ulaşılır. Bu denklemin çözümü olarak gerçel kısmının alınmasıyla,

$$H_y = H_0 e^{-az} \cos(\omega t - az) \quad (2.22)$$

denkleme ulaşılır. Manyetik alan şiddetinin yatay yöndeki değişimini tanımlayan bu denklemin sağ tarafında bulunan ifade, elektromanyetik alanın sinusoidal hareketini temsil etmektedir. Aynı denklemin sol tarafında bulunan üstel logaritma terimi ise kaynak alan şiddetinin, (negatif üsten dolayı) üstel olarak azalacağını ifade eder. Kaynak alan şiddetinin derinlikle azalmasını ifade eden bu terim tek başına incelendiğinde,

$$\frac{H_y}{H} \approx e^{-az} \quad (2.23)$$

ilişkisi elde edilir. Bu denklemde bulunan ve (2.20) denklemde tanımlanan “a” katsayısının değeri,  $\mu$  yerine boşluğun manyetik geçirgenliği olan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$  değeri konularak ve  $\sigma = 1/\rho$  ilişkisi kullanılarak düzenlenirse,

$$\frac{H_y}{H} \approx e^{-2 \times 10^{-3} z \sqrt{\frac{f}{\rho}}} \quad (2.24)$$

denklemine ulaşılır. Elektromanyetik dalgalar için yaygın olarak kullanılan nüfuz derinliği (skin depth), birincil elektromanyetik alanın genliğinin bir Neper’e (yüzeydeki genliğinin 1/e’si yani %37’sine) düştüğü derinliktir (**Paterson ve Ronka, 1971**). Bu kabulle (2.24) denklemde gerekli düzenlemeler yapılarak,

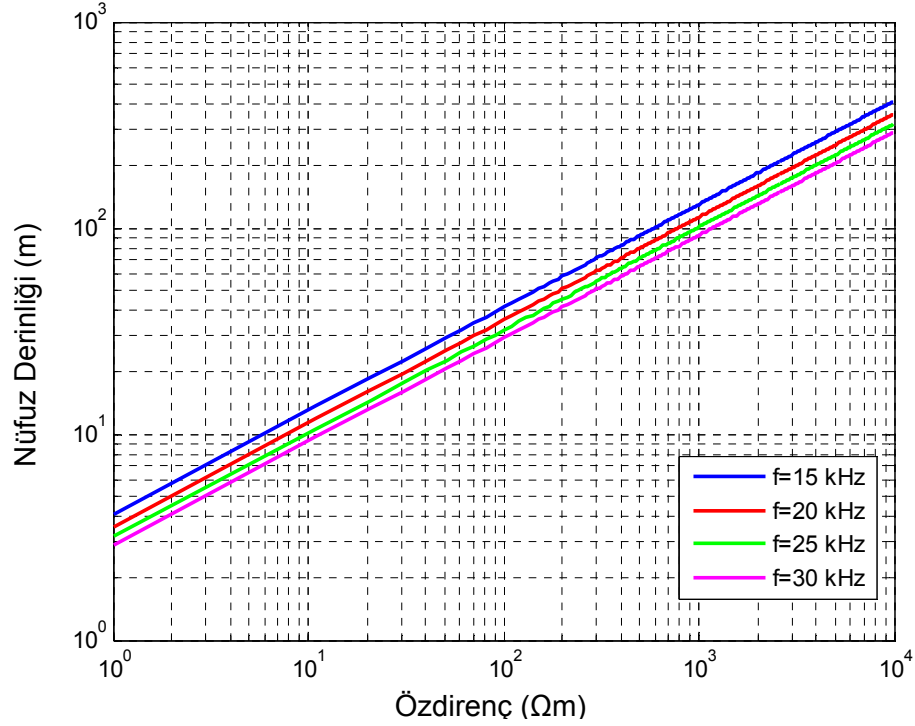
$$2 \times 10^{-3} z_s \sqrt{\frac{f}{\rho}} = 1 \quad (2.25)$$

denklemine veya daha basit bir ifadeyle,

$$z_s = 503.2 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.26)$$

denklemine ulaşılır. Elektromanyetik yöntemlerde kullanılan nüfuz derinliğini ifade eden bu denklemden de anlaşıldığı gibi, yer içinde yüksek frekanslar ve büyük genlikler, alçak frekanslar ve küçük genliklere göre çok daha çabuk soğurulmaktadır. Bir kaynağın enerjisinin çeşitli ortamlardan geçerken azalmasına neden olan bu duruma “atenüasyon” ya da “soğurulma” adı verilmektedir.

Atenüasyon, VLF-Elektromanyetik yöntemin iletken örtü katmanının bulunduğu ortamlarda kullanımını sınırlayıcı bir faktördür; çünkü elektromanyetik dalganın enerjisinin büyük kısmı iletken örtü katman içinde soğurulduğundan nüfuz derinliği düşmektedir (**Paterson ve Ronka, 1971**).



**Şekil 2.9** : Çeşitli frekanslar için nüfuz derinliğinin özdirence bağlı değişimi.

Özdirençleri farklı, yarı sonsuz, homojen ortamlarda, 15.0, 20.0, 25.0 ve 30.0 kHz frekanslı VLF elektromanyetik alanlarının nüfuz derinliklerinin özdirence bağlı değişimi, Şekil 2.9'da verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi; düşük frekanslarda ve yüksek özdirence sahip ortamlarda nüfuz derinliği artarken, yüzeyden derine doğru elektromanyetik dalganın genliği üstel (exponential) olarak azalmaktadır.

### 2.3.4 Eliptik Kutuplanma (Polarizasyon Elipsi)

VLF-Elektromanyetik yöntem için birincil ve ikincil alanlar, (2.27) ve (2.28) numaralı denklemlerde verilmektedir.

$$H_p = A \sin \omega t \quad (2.27)$$

$$H_s = B \cos(\omega t - \phi) \quad (2.28)$$

Bu denklemlerde; A ve B, verici, alıcı ve ortamdaki iletkenin biçimine ve fiziksel özelliklerine bağlı katsayılar,  $\omega$ , açısal frekans olmak üzere  $H_p$  ve  $H_s$  sırasıyla birincil ve ikincil alanları ifade etmektedir.

$$\cos(a - b) = \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b) \quad (2.29)$$

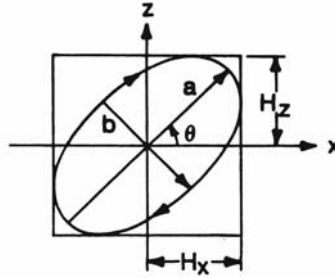
$$\cos(\omega t - \phi) = \cos(\omega t)\cos(\phi) + \sin(\omega t)\sin(\phi) \quad (2.30)$$

(2.29) numaralı denklemde verilen trigonometrik fark formülünün ikincil alan denkleminin sağ tarafına uygulanmasıyla (2.30) numaralı denklem elde edilmektedir.

$$\frac{H_p^2}{A^2} + \frac{H_s^2}{B^2} - \frac{2H_p H_s \sin \phi}{AB} = \cos^2 \phi,$$

$$\frac{H_p^2}{A^2 \cos^2 \phi} + \frac{H_s^2}{B^2 \cos^2 \phi} - \frac{2H_p H_s \sin \phi}{AB \cos^2 \phi} = 1 \quad (2.31)$$

(2.30) numaralı denklemin düzenlenmesiyle (2.31) numaralı denkleme ulaşılmaktadır. Bu denklem bir elips denklemdir ve bu elipse “Polarizasyon Elipsi” adı verilmektedir. Ortamdaki birincil ve ikincil alanların toplam manyetik alana etkisinin incelenmesi bakımından kolaylık sağlayan bir gösterim biçimidir. Birincil ve ikincil alanların vektörel toplamından oluşan toplam alanın yatay ve düşey bileşenlerinin genliklerinin, yatay eksen  $H_x$ , düşey eksen  $H_z$  olmak üzere çizilmesiyle polarizasyon elipsi elde edilmektedir. Şekil 2.10’da polarizasyon elipsinin değiştirgenleri görülmektedir.



**Şekil 2.10 :** Polarizasyon elipsinin değiştirgenleri (Telford ve diğ., 1976).

Polarizasyon elipsinin uzun eksenini “a”, kısa eksenini “b” olarak adlandırılmaktadır ve a ekseninin yatayla yaptığı açıya “tilt açısı” veya “eğim açısı ( $\theta$ )”, uzun eksenin kısa eksene oranına ( $b/a$ ) ise “polarizasyon elipsinin elipselliği (eccentricity,  $\epsilon$ )” adı verilmektedir. Polarizasyon elipsinin eğimini ve elipselliğini belirleyen bu parametreler, doğrudan birincil ve ikincil alanların vektörel toplamına bağlı olduğundan, yer içindeki iletken tarafından yaratılan etkiyi de ifade etmektedir.

#### 2.4 Ölçülen Büyüklükler

VLF-Elektromanyetik yöntemde, VLF vericisinden yayınlanan elektromanyetik alanın manyetik alan bileşenine ait parametreler ölçülmektedir. Manyetik alanın ölçümler sırasında algılanması, yeryüzeyine paralel (yatay) bir bobin kullanılarak sağlanmaktadır. Sinyalin algılanma hassasiyeti kullanılan bobinin sarım sayısına,

bobinin manyetik geçirgenliğine ve manyetik alanın bobin eksenine yaptığı açıya bağlıdır, eğer, manyetik alan bobin eksenine dik açı yapıyorsa, sinyalin algılanması mümkün olmamaktadır (**Milsom, 1996**). Bir VLF elektromanyetik sinyalinin jeofizik araştırmalar için kullanımında, tek başına sinyalin genliği ya da fazı ölçülmemektedir. Ayrıca, tek bir noktada bir bileşenin ölçülmesi de anlamsızdır. VLF-Elektromanyetik yöntem ölçümlerinde, bir bileşen referans olarak seçilmekte ve diğer bileşenlerin şiddet ve fazları bununla karşılaştırılmaktadır.

$$\tan(2\theta) = \frac{2\left(\frac{H_z}{H_x}\right)\cos\phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2} \quad (2.32)$$

$$\epsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin\phi}{H_z e^{i\phi} \sin\theta + H_x \cos(\theta)} \quad (2.33)$$

VLF-Elektromanyetik yöntemde ölçülen parametreler; kullanılan cihazın özelliğine bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle 15-30 kHz frekans bandından seçilen frekanslar için polarizasyon elipsinin deşıştırgenleri (elipsellik, tilt açısı), toplam manyetik alan şiddeti ile ikincil alanın birincil alana oranının gerçel ve sanal bileşenleridir. (2.32) numaralı denklem ile ifade edilen tilt açısı ( $\theta$ ), polarizasyon elipsinin uzun ekseninin yatayla yaptığı açıyı (polarizasyon elipsinin eğimi) ifade ettiğinden bu değer doğrudan toplam manyetik alanın yatay ve düşey bileşenlerine bağlıdır. Bu değişkenlerden (2.33) numaralı denklem ile verilen elipsellik ( $\epsilon$ ) ise birimsiz olup polarizasyon elipsinin uzun ekseninin kısa eksenine oranını ifade edmektedir. Bu oran elipsin daireden çizgiye değişimini belirlediğinden doğrudan birincil ve ikincil alanlar arasındaki faz kaymasına bağlıdır. Sonuç olarak, ortamdaki iletken yapı ile ilgili temel bilgileri veren parametreler, daha önce de belirtildiği gibi polarizasyon elipsinin bu iki parametresidir.

$$\operatorname{Re}\left(\frac{H_z}{H_x}\right) = 100 \times \tan\theta \quad (2.34)$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{H_z}{H_x}\right) = 100 \times \epsilon \quad (2.35)$$

VLF-Elektromanyetik yöntem cihazlarının çoğu yerel manyetik alanın gerçel ve sanal bileşenlerini ölçmektedir. Bu bileşenler, ikincil alanın birincil alana oranının

(Hs/Hp) gerçel ve sanal kısımlarını, bir başka deyişle; manyetik alanın birincil alanla aynı fazlı (in-phase, IP) ve farklı fazlı (out-of-phase, OP veya quadrature) bileşenlerini ifade etmektedirler. Gerçel ve sanal bileşenler ile polarizasyon elipsinin değiştirgenleri, (2.34) ve (2.35) numaralı denklemlerle verilen biçimde ilişkilidir.

**McNeill ve Labson (1991)**'in belirttiğine göre; bu bileşenler Biot Savart yasası gereği akım yoğunluğunun in-phase ve quadrature-phase bileşenleri ile de ilişkilidir, dolayısıyla derinlikle ve kontak geçişiyle değişmektedir. Böylece manyetik alanın gerçel ve sanal bileşenleri de aynı şekilde etkilenmekte, gerçel bileşen beklendiği gibi değişirken sanal bileşen, kontak civarında salınım yapmakta ve sonrasında işaret değiştirmektedir. Bir dūşey kontak geçişi sırasında akım yoğunluğundaki değişim, iletken tarafta daha hızlı oluşmaktadır. Akım yoğunluğunun bu değişimi sanal bileşendeki değişimlere neden olmaktadır, bu nedenle sanal bileşenin davranışı gerçel bileşenden daha karmaşıktır.

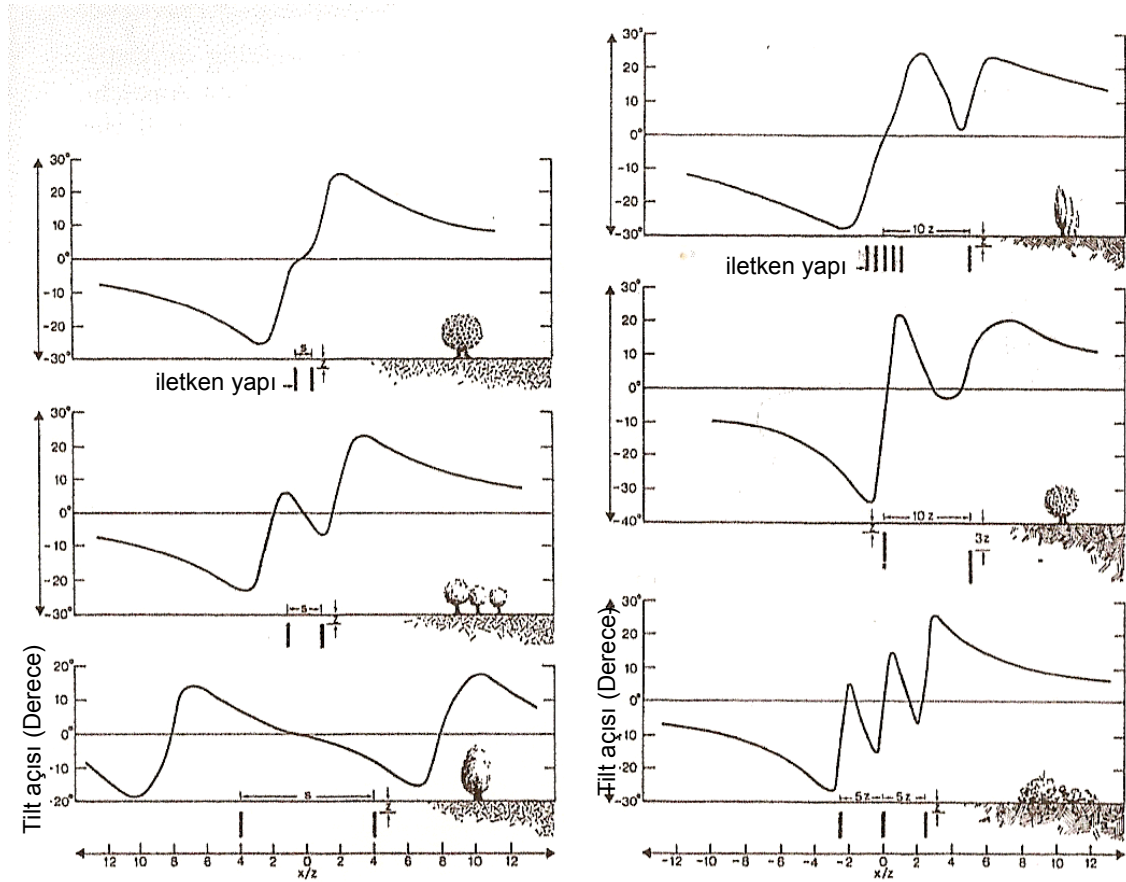
Diğer tüm frekans ortamı elektromanyetik yöntemler gibi VLF-Elektromanyetik yöntem de çevresel gürültü kaynaklarından etkilenmektedir. Kaynak olarak kullanılan birincil elektromanyetik alan yer içindeki ve ölçüm hattı civarındaki iletken malzemelerden etkileneceğinden, ölçüm yapılan hat boyunca gürültü kaynağı olabilecek demiryolu, elektrik hatları, metaller ve diğer elektromanyetik alan kaynaklarının varlığına dikkat edilmeli ve bunlar ölçü karnesinde uygun yerlere not edilmelidir.

VLF-Elektromanyetik yöntem hava durumundan çok fazla etkilenmemekle birlikte atmosferdeki elektrik yükünün arttığı dönemlerde ölçümlerde sorunlar yaşanmaktadır. Bu nedenle ölçümler manyetik fırtınalar, şimşekler gibi doğal manyetotellürik akım kaynaklarından sakınılarak yapılmalı, bölgede bulunabilecek askeri veya sivil radyo istasyonlarının da durumları gözönünde bulundurulmalıdır.

VLF-Elektromanyetik yöntem yatay halka kullanılan bir yöntem olduğundan diğer yatay halka ölçümlerinde olduğu gibi halkanın ideal pozisyonunun korunmasına özellikle dikkat edilmelidir. Bu nedenle alıcı cihazı taşıyan operatörün ayakta ve halkanın tam yatay olduğuna dikkat ederek ölçü alması gerekmektedir. Genelde kullanımda bulunan cihazların bu tür hataları en aza indirgemek için çeşitli eğim dengeleyiciler barındırmasına rağmen 10<sup>0</sup>'den daha büyük eğimlerin düzeltilmesi mümkün olmamaktadır (**Özürlan ve Uluggerli, 2005**).

## 2.5 Kuramsal Eğriler

VLF-Elektromanyetik yöntemin en temel belirti şekli, genliğin en küçük ve en büyük değeri arasındaki sıfır geçişidir. Kuramsal olarak, karakteristik eğrinin negatif işaretli en küçük ve pozitif işaretli en büyük genlik değerleri arasındaki sıfır geçişi iletkenin tam üzerinde oluşmaktadır. Bu en basit haldeki belirti, yeraltının heterojen yapısı nedeniyle çeşitli değişimlere uğrayabilmekte ve karmaşık hale gelebilmektedir. Ancak temelde, karakteristik eğrinin sadece biçimi, sıfır geçişi sırasında oluşan eğim, en büyük ve en küçük genlik değerleri incelenerek yeraltındaki iletken yapı hakkında fikir sahibi olmak mümkündür ve yaygın olarak tüm dünyada nitel (kalitatif) değerlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Yeraltındaki yapılar arasında yüksek öz direnç kontrastının olduğu durumlarda genlikler büyümekte ve yapının eğimine bağlı olarak sıfır geçişi dikleşmekte ya da bir eğim kazanmaktadır. Bütün bu ilkelerden hareketle bir VLF-Elektromanyetik yöntem verisinde, küçük dalga boylu belirtilerin yer yüzeyine yakın ya da küçük yapılardan kaynaklandığı, büyük dalga boylu belirtilerin ise daha derin ya da büyük alanlar kaplayan yapılara ait olduğu kabul edilmektedir.



**Şekil 2.11** : Çeşitli iletken yapı modelleri için karakteristik eğriler (Telford ve diğ., 1976).

Şekil 2.11'de çeşitli iletken yapı modelleri için tilt açısı ( $\theta$ )'nın değişimlerini gösteren karakteristik eğriler görülmektedir. İletken yapıların birbirlerine göre durumlarına bağlı olarak karakteristik eğride en küçük ve en büyük değerler ile sıfır geçişlerinin yerleri, genlikleri ve biçimleri değişmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi;

- a) birbirine yakın iletken yapılar, tek bir yapıya benzer belirti göstermekte,
- b) iletkenler arasındaki mesafe arttıkça belirtiler birbirinden ayrılmakta, ancak yine de genlikler birbirinden etkilenmekte,
- c) iletkenler arasındaki uzaklık bir limit değeri aştıktan sonra iki yapı için ayrı ayrı karakteristik eğriler oluşmakta,
- d) birbirine çok yakın ve çok sayıda iletken yapı tek ve büyük bir yapı gibi algılanmakta ve tek iletkenlerden daha büyük genlikli belirti vermekte,
- e) daha sık olan yapının belirtisi daha küçük dalga boylu ve büyük genlikli olmakta,
- f) eşit aralıklı ve aynı derinlikte üç iletken yapı için belirti tekrarlı olarak oluşmakta ancak genlikler üst üste bindiği için eğrinin biçimi değişmektedir.

Ayrıca elektromanyetik dalganın yer içinde ulaşabildiği en büyük derinliğe kadar karşılaştığı her iletken yapı nedeniyle ikincil alanlar yaratılacağından, elde edilen belirtinin, nüfuz derinliği ile yeryüzü arasında kalan tüm iletken yapıların etkilerinin bir toplamını içerdiği sonucuna ulaşılmaktadır. VLF-Elektromanyetik yöntemde ölçülen belirti, ortamdaki tüm iletkenlerin toplam etkisini taşıdığından doğrudan derinlik kestirimi yapmak mümkün olmamaktadır. Ancak çeşitli geometrik şekilli iletken yapılar için belirtideki en büyük ve en küçük genlikler arasındaki yatay uzaklığa bağlı olarak yaklaşık derinlik hesapları yapılabilmektedir.

## 2.6 Değerlendirme ve Sunum

VLF-Elektromanyetik yöntemde ölçülen tüm parametreler nitel (kalitatif) ve nicel (kantitatif) olarak değerlendirilebilmektedir. Özellikle tilt açısı değerleri, ortamdaki iletken yapının varlığından ve özelliklerinden doğrudan etkilendiğinden değerlendirme konusunda en çok kullanılan parametre olmaktadır (**McNeill ve Labson, 1991**).

VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin uzaklığı bağlı grafikler halinde çizilmesi ya da kontur haritaları oluşturulması ile görsel olarak değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Grafik ve kontur haritalarında karakteristik eğri modeline uyumlu bölümlerin iletken yapının varlığına işaret ettiği varsayılmaktadır. Görsel ve nitel

değerlendirmeye olanak sağlayan bu gösterimler, yapının yerini, uzanım ve doğrultusu ile sınırlarını belirlemeyi mümkün kılmakla birlikte, yapının bulunduğu derinlik hakkında da kullanılan frekansa bağlı olarak yaklaşık bir bilgi vermektedir.

Bahsedilen gösterim biçimlerinin ve nitel değerlendirmelerin yanısıra, verilerin nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak sayısal modelleme, iki ve üç boyutlu ters çözüm teknikleri de geliştirilmiştir (**Beamish, 1994; Beamish, 1998; Kaikkonen, 1979**). Ancak ölçülen parametrelerin çok boyutlu olarak ters çözümlerinin yapılması için hızlı bilgisayarlara ve zamana gerek duyulduğundan özellikle sahada yapılan değerlendirme işlemleri daha çok nitel yollarla gerçekleştirilmektedir.

VLF-Elektromanyetik yöntem verileri, yeraltındaki yapının karmaşıklığı derecesinde çeşitlenmekte ve yapının yerini her zaman nitel gösterimlerle ayırtmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle çeşitli sayısal süzgeçler geliştirilmiştir. Sinyal analizinde kullanılan ve verideki gürültünün giderilmesine yönelik olan süzgeçlerden farklı olarak sadece VLF-Elektromanyetik yöntemde özgü olan bu süzgeçler, yaratıcılarının isimleri ile anılmakta ve belirtide yapının yerini belirginleştirmeyi, çeşitli fiziksel yaklaşımlar üzerinden görünür özdirenç ve eşdeğer akım yoğunluğu değerlerini hesaplamayı amaçlamaktadırlar.

### 2.6.1 Fraser Süzgeci

VLF-Elektromanyetik yöntemde kullanılan sayısal süzgeçlerin en basidi olup bir tür türev operatörüdür. Saha personeli tarafından uygulanabilecek kadar basit olan bu süzgeç:

- a) tilt açısı verisine  $90^\circ$  faz kayması uygulanmasını ve verideki sıfır geçişleri ile ani değişimlerin tepciklere dönüştürülmesini,
- b) verideki DC etkisinin (tüm genlik değerlerinin aynı miktarda yukarı ya da aşağı ötelenmesi durumu) tamamen ortadan kaldırılmasını ve yerel belirtilerin ayrımlılığını arttırmak için uzun dalga boylarının bastırılmasını,
- c) istasyondan istasyona değişen ve düzenli olmayan gürültünün ayırılmasını amaçlamaktadır (**Fraser, 1969**).

Bu amaçlardan ilki, yanyana iki istasyona ait verilerin farkı alınarak sağlanabilmektedir. Üçüncü amacı gerçekleştirebilmek için ise veriye kayan ortalama ya da alçak geçişli bir süzgeç uygulanması gerekmektedir. Bu şart, farkları alınan iki verinin toplanması ve veri sayısına bölünmesiyle sağlanmaktadır. Hesaplama biçimi (2.36) numaralı denklemlerle verilen süzgecin boyu uzatılarak, daha

büyük dalga boylu anomalilerin belirginleştirilmesi sağlanabilmektedir. Çok yaygın olarak kullanılmamakla birlikte her basamakta filtre boyu uzatılarak basitçe bir derinlik kesiti oluşturulabilmektedir. Bu durumda çok derinlere ait kesitleri elde edebilmek için ölçüm noktaları arası mesafe ve ölçü sayısının bu amaca uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca derinlik kesidi oluşturulurken elektromanyetik dalganın nüfuz derinliği de gözardı edilmemelidir.

$$f_{2,3} = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2) \quad (2.36)$$

$M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  ve  $M_4$  birbirini takip eden ölçüm noktalarının tilt açısı (ya da gerçel bileşen) değerlerini ifade etmek üzere  $M_2$  ve  $M_3$  noktaları arasına atanacak değerler Fraser süzgeci ile hesaplanması, denklem (2.36)'daki gibi yapılmaktadır.

### 2.6.2 Karous-Hjelt Süzgeci

**Karous ve Hjelt (1983)** tarafından geliştirilen süzgeç, Fraser süzgecinden farklı olarak sadece matematiksel bir yaklaşımdan öte, fizik esaslar kullanılarak, Biot-Savart yasasından hareketle, tilt açısı değerlerinden ortamdaki eşdeğer akım yoğunluğunun değişimini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çeşitli uzunluklardaki süzgeçler için hesaplanmış katsayılar, Tablo 2.3'de verilmektedir.

**Tablo 2.3: Karous-Hjelt süzgeci yarı katsayıları (Karous ve Hjelt, 1983).**

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n										
0	1.250									
1	1.383	-0.115								
2	1.446	-0.323	0.205							
3	1.434	-0.299	-0.109	0.102						
4	1.434	-0.298	0.116	-0.003	0.116					
9	1.434	-0.299	0.109	0.013	0.027	0.020	0.019	0.022	0.022	0.081

Karous-Hjelt süzgecinin altı elemanlı katsayıları ( $n=2$ ), tek bir çizgisel kaynak tarafından yaratılan alanın çözümünde %8' den az bir hatayla sonuca ulaşılmasını sağlamaktadır (**Karous ve Hjelt, 1983**).

$$\frac{\Delta z}{2\pi} \cdot \bar{I}_a \left( \frac{\Delta x}{2} \right) = -0.102 \cdot (H_{-2}) + 0.323 \cdot (H_{-1}) - 1.446 \cdot (H_0) \\ + 1.446 \cdot (H_1) - 0.323 \cdot (H_2) + 0.205(H_3) \quad (2.37)$$

Bu denklemde alt indisli H değerleri, tilt açısı verilerini,  $\Delta x$ , ölçüm aralıklarını,  $\Delta z$ , derinlik aralığını ve  $\bar{I}_a$ , süzgeçlenmiş veriyi ifade etmektedir.

Tablo 2.3'deki katsayılar kullanılarak (2.37) denklemde verilen bağıntı ile hazırlanan grafik ve kesitlerin yorumlanmasında, elektrik akımının doğası gereği içinden kolaylıkla geçebileceği iletken yapılara yönelmesi ilkesinden faydalanılmaktadır. Bu ilkeden hareketle, iletken yapılar içerisinde birim alandan geçen akım çizgilerinin sayısının fazla olması, bir başka deyişle, akım yoğunluğunun iletken içinde en büyük değerini alması beklenmektedir.

Karous-Hjelt süzgeci kullanılarak hesaplanan akım yoğunluğu değerleri ortamdaki akım yoğunluğunun gerçek değerleri olmamakla birlikte, ortam içinde daha yüksek ve daha düşük akım yoğunluğuna sahip bölgeleri yaklaşımsal olarak belirlemeye yaradığından fayda sağlamaktadır. Tıpkı Fraser süzgecinde olduğu gibi, süzgeç boyu uzatılarak çeşitli derinlikler için eşdeğer akım yoğunluğu değerleri hesaplanabilmekte ve böylece eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesitleri elde edilebilmektedir.

### 2.6.3 Chouteau Süzgeci

Chouteau süzgeci, yine fiziksel bir yaklaşımla, ancak Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçlerinden farklı olarak, yinelemeli bir yolla ortamdaki görünür özdirenç değerlerini hesaplamaya yönelik bir süzgeçtir. (2.38) numaralı denklemle verilerin hesaplama işlemine başlanırken ortamın ortalama özdirencini yaklaşık olarak temsil edecek bir başlangıç değeri seçilmektedir (**Chouteau ve diğ., 1996**).

$$\rho_{j+1/2}^{1/2} = -(\omega\mu)^{1/2} \Delta y P_j + \rho_{j-1/2}^{1/2}, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.38)$$

Bu denklemde, indislerle verilen  $\rho$  değerleri, her adımdaki hesaplanmış özdirenç değerlerini,  $P_j$ , tilt açısı değerlerini ve  $\Delta y$ , adım aralığını ifade etmektedir. Süzgeç, her bir adımda bir önceki adım için hesaplanan özdirenç değerini ve özdirenci hesaplanacak noktanın tilt açısı değerini kullanarak yeni özdirenç değerini hesaplamaktadır. Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere, Chouteau süzgeci kullanılarak hesaplanan her yeni özdirenç değeri bir önceki özdirenç değerinden etkilenmekte ve bir sonraki noktanın hesaplanacak özdirenç değerini tilt açısı değeri ile birlikte etkilemektedir. Böylece ölçüm hattı boyunca civardaki noktalardan görece daha düşük ya da yüksek özdirençli alanlar belirlenebilmektedir. Hesaplanan bu özdirenç değerleri görelî ve başlangıç değerine bağımlıdır.

### **3. VLFINTERP, İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI; İŞLEYİŞ ve FONKSİYONLAR**

#### **3.1 Amaç**

Bu çalışma kapsamında, VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesine yönelik etkileşimli bir bilgisayar programının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Verilerin nitel (kalitatif) ve nicel (kantitatif) olarak değerlendirilmesine yönelik literatürde yer alan teknikler incelenerek programın içeriğine dahil edilmiş, yeni gösterim ve hesaplama biçimleri kullanılarak programın içeriği zenginleştirilmiştir.

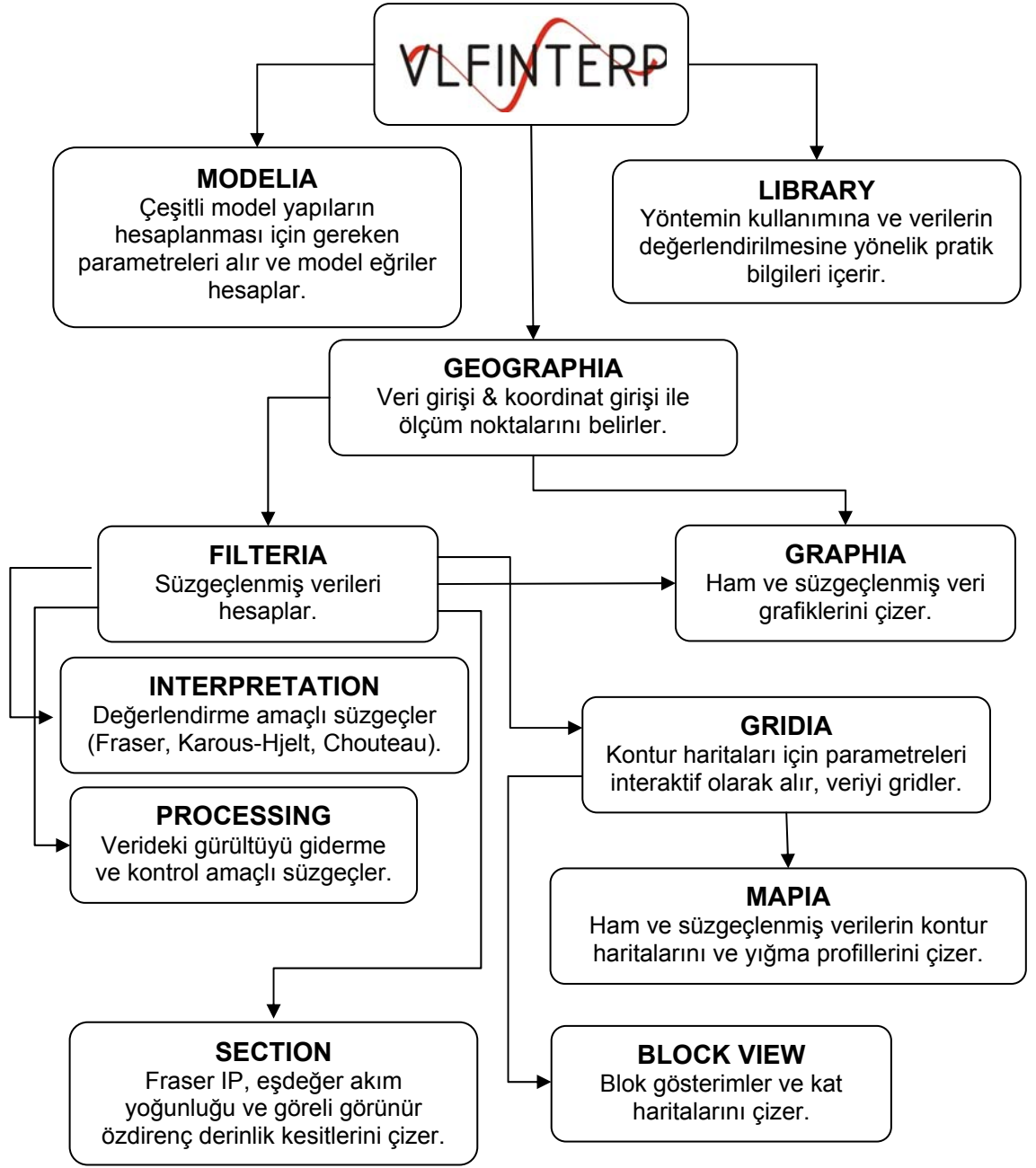
*VLFINTERP* interaktif veri işleme ve değerlendirme programı:

- a) VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin gerçek saha koordinatlarında hızlı biçimde kontrolünü,
- b) profil ve kontur haritalarının kısa sürede oluşturularak sunumunu,
- c) çeşitli veri işlem aşamaları kullanılarak verilerin gürültülerden arındırılmasını,
- d) VLF-Elektromanyetik yönetime özgü değerlendirme amaçlı süzgeçler ile yapıların yerlerinin belirginleştirilmesini ve çeşitli parametrelerin hesaplanmasını,
- e) kat haritaları ve derinlik kesitlerinin hazırlanmasını,
- f) blok gösterimler ile yorumda kolaylık sağlanmasını,
- g) çeşitli modeller için VLF-Elektromanyetik yöntem verilerini hesaplamayı amaçlamaktadır.

Bütün bu amaçların yanısıra, *VLFINTERP* programı, bir mini kütüphane bölümü ile saha çalışmaları sırasında ihtiyaç duyulabilecek bilgileri de içermektedir.

#### **3.2 İçerik**

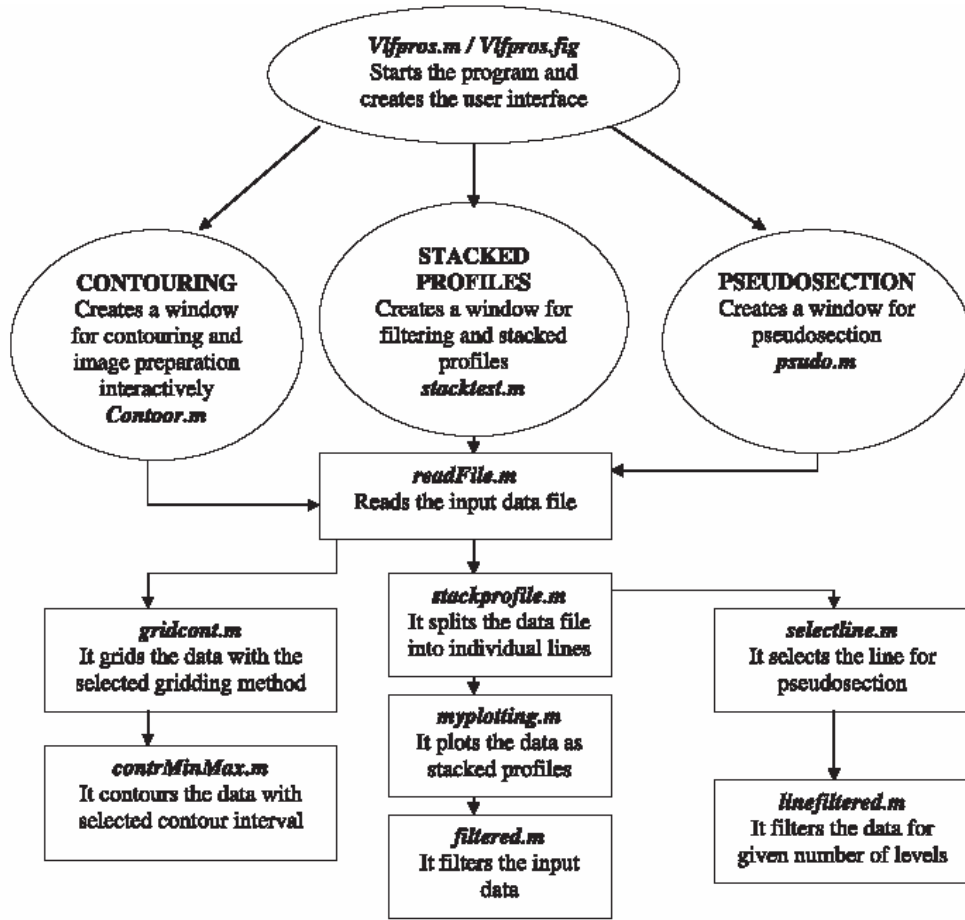
*VLFINTERP* programının içerik ve fonksiyonlarını gösteren bir akış şeması Şekil 3.1'de verilmektedir.



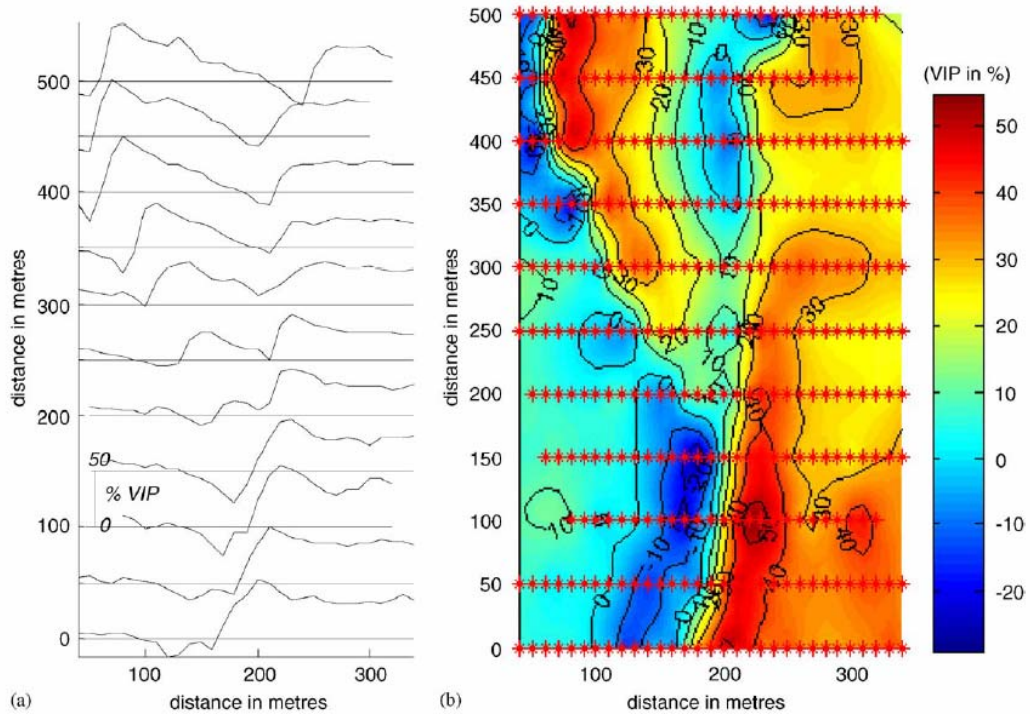
**Şekil 3.1 :** VLFINTERP interaktif veri işleme ve değerlendirme programının işleyiş ve fonksiyonlarını gösterir diagram.

### 3.3 VLFINTERP Programının Mevcut Yazılımlar ile Karşılaştırılması

Literatürde, VLFINTERP programı ile amaç ve içerik anlamında benzerlikler taşıyan VLFPROS (Sundararajan ve diğ., 2006) isimli bir program bulunmaktadır. Bu program da VLFINTERP gibi MATLAB ortamında yazılmıştır. Programın içeriğinde, VLF-Elektromanyetik yöntemle özgü değerlendirme amaçlı Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçleri ile elde edilen kontur haritaları, derinlik kesitleri ve yığma profil gösterimleri bulunmaktadır. Programın işleyişini gösteren akış diagramı ve çıktılardan örnekler Şekil 3.2 ve 3.3’de verilmektedir.



Şekil 3.2 : VLFPROS programının işleyiş ve fonksiyonlarını gösterir diagram (Sundararajan ve diğ., 2006).



Şekil 3.3 : VLFPROS programının çıktılarından örnekler. (a) Ham veriler için yığma profiller, (b) gerçel bileşen kontur haritası (Sundararajan ve diğ., 2006).

*VLFINTERP* programı, *VLFPROS* yazılımından farklı olarak;

- a) yerel saha koordinatlarıyla (GPS okumaları) çalışma imkanı vermekte,
- b) sinyal analizinde kullanılan gürültü giderme amaçlı kayan ortalama ve Butterworth süzgeçlerini,
- c) VLF-Elektromanyetik yöntemle özgü, ortamdaki görünür özdirenç değerlerini hesaplamakta kullanılan Chouteau süzgecini,
- d) kaynak alanlar, ikincil alanlar ile çizgisel kaynak, sokulum ve küre modelleri için polarizasyon elipsinin değiştirgenlerini içeren model eğriler hesaplayan bir modelleme işlecini de içermektedir.

Bu iki program, verilerin sunumu ve gösterim biçimleri açısından karşılaştırıldıklarında aralarındaki önemli bir fark; *VLFINTERP* programının kat haritaları ve blok gösterimleri de içermesidir. Ayrıca *VLFINTERP* programı, sadece gerçel bileşen ile değil; aynı anda dört farklı parametre ile (gerçel bileşen, sanal bileşen, tilt açısı, toplam manyetik alan şiddeti) ve aynı anda üç farklı frekansta çalışılmasına olanak vermektedir.

Bunların yanısıra, literatürdeki VLF-Elektromanyetik verilerinin değerlendirilmesine yönelik diğer çalışmalardan farklı olarak, *VLFINTERP* programı, Chouteau süzgeci kullanılarak derinliğe bağlı görünür özdirenç derinlik kesitlerini de hesaplamaktadır. Chouteau derinlik kesitleri, sözü edilen Karous-Hjelt ve Fraser süzgeci derinlik kesitlerinin oluşturulmasına benzer bir teknikle hesaplanmış ve hesaplama tekniği ile ilgili bilgiler Bölüm 3.6'da verilmiştir.

### **3.4 *VLFINTERP*'in Yazım Dili, MATLAB**

MATLAB, özellikle bilimadamları ve mühendisler tarafından kullanılan yüksek performanslı bir teknik programlama dili olarak bilinmektedir. MATLAB, ilk olarak, Fortran dili ile Cleve Moler tarafından yazılmış, içeriğindeki matris algoritması yıllar boyunca geliştirilmiş ve günümüzde kullanılan kapsamına ulaşmıştır. Halen kullanımda olan MATLAB 6.5 ve daha üst sürümler, C programlama dili kullanılarak Mathworks firması tarafından geliştirilmiştir.

İngilizce "Matrix Laboratory" kelimelerinden kısaltılarak oluşturulan adından da anlaşılacağı gibi MATLAB, temelde; matrislerin yapı ve boyut özelliklerinin bildirilmesini gerektirmeyen bir matris laboratuvarıdır. Bu özelliğiyle MATLAB, jeofizik araştırmalarının gerçekleştirilmesinde son derece önemli olan veri setleri ile çalışma konusunda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. MATLAB, komut satırından

giriş yapılan her sayıyı 1x1 boyutunda bir matris olarak algılamakta ve işlemleri bu ilkeyi temel alarak gerçekleştirmektedir. Birden fazla sayının yanyana girilmesi durumunda bu sayıları bir satır vektörüne (1xn boyutlu bir matrise), alt alta girilmesi durumunda ise bir sütun vektörüne (nx1 boyutlu bir matrise) atamaktadır.

Diğer programlama dillerine göre üstünlüğü; değişkenlerin türlerinin (real, integer vb) tanımlanmasını gerektirmemesi ve pek çok işlemi çok kısa komut dizileri ile kolaylıkla gerçekleştirebilmesidir. Fortran, Basic ve C gibi programlama dilleriyle karşılaştırıldığında, MATLAB, programlamaya ayrılacak zamanı en aza indirmekte ve pek çok ara tanımlamaya ve işleme ihtiyaç duymadan sonuca ulaşılmasını sağlamaktadır. MATLAB programlama dili, komut pencesine (command window) yazılan işlemleri bir hesap makinası hızıyla yerine getirmekten birbirine bağımlı karmaşık fonksiyon (function) dizileri arasında gerçekleştirilen işlemlere kadar değişen seviyelerde programlamaya olanak vermektedir.

MATLAB programlama dilinin diğer programlama dillerine göre bir diğer üstünlüğü de grafik işlemleri konusundaki başarısıdır. MATLAB, içeriğindeki grafik rutinleri ile görsel anlamda, bilimsel ve mühendislik çalışmalarının ihtiyaçlarını büyük ölçüde karşılayabilecek yeteneindedir. *VLFINTERP* programı, öncelikle VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin nitel olarak değerlendirmesini hızlı bir biçimde gerçekleştirmek amacıyla yazıldığından, programlama dilleri içinde görsel anlamda en yeteneklisi olan MATLAB (version 7.0) ortamında geliştirilmiştir.

Bütün bu üstünlüklerine ek olarak, MATLAB, içerdiği pek çok araç kutusu (tool) ile özellikle mühendislik çalışmalarında geniş kullanım olanağı bulan temel fonksiyon ve işlemlerin etkileşimli ve hızlı bir biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Tüm bu özellikleri ile MATLAB, sayısal analiz, matris ve dizi işlemleri, sinyal analizi, algoritma geliştirme, C, C++, Java ve İnternet ile bağlantılı programlama ve grafiksel kullanıcı arayüzü (Graphical User Interface, GUI) formulu program yazma gibi sayısal işlemleri, kullanımı kolay bir arayüz üzerinden, diğer programlama dillerinin geleneksel kodlama biçimine göre çok daha kısa sürelerde ve kolaylıkla yapılmasını sağlamaktadır. MATLAB programlama dilinin bahsedilen tüm bu özelliklerinden *VLFINTERP* programının geliştirilmesi sırasında gereken durumlarda yararlanılmıştır. İlerleyen bölümlerde ayrıca anlatılacak olmakla birlikte, *VLFINTERP* programının etkileşimli hale getirilmesinde MATLAB'ın grafiksel kullanıcı arayüzüne sahip olması özellikle önemli hale gelmektedir.

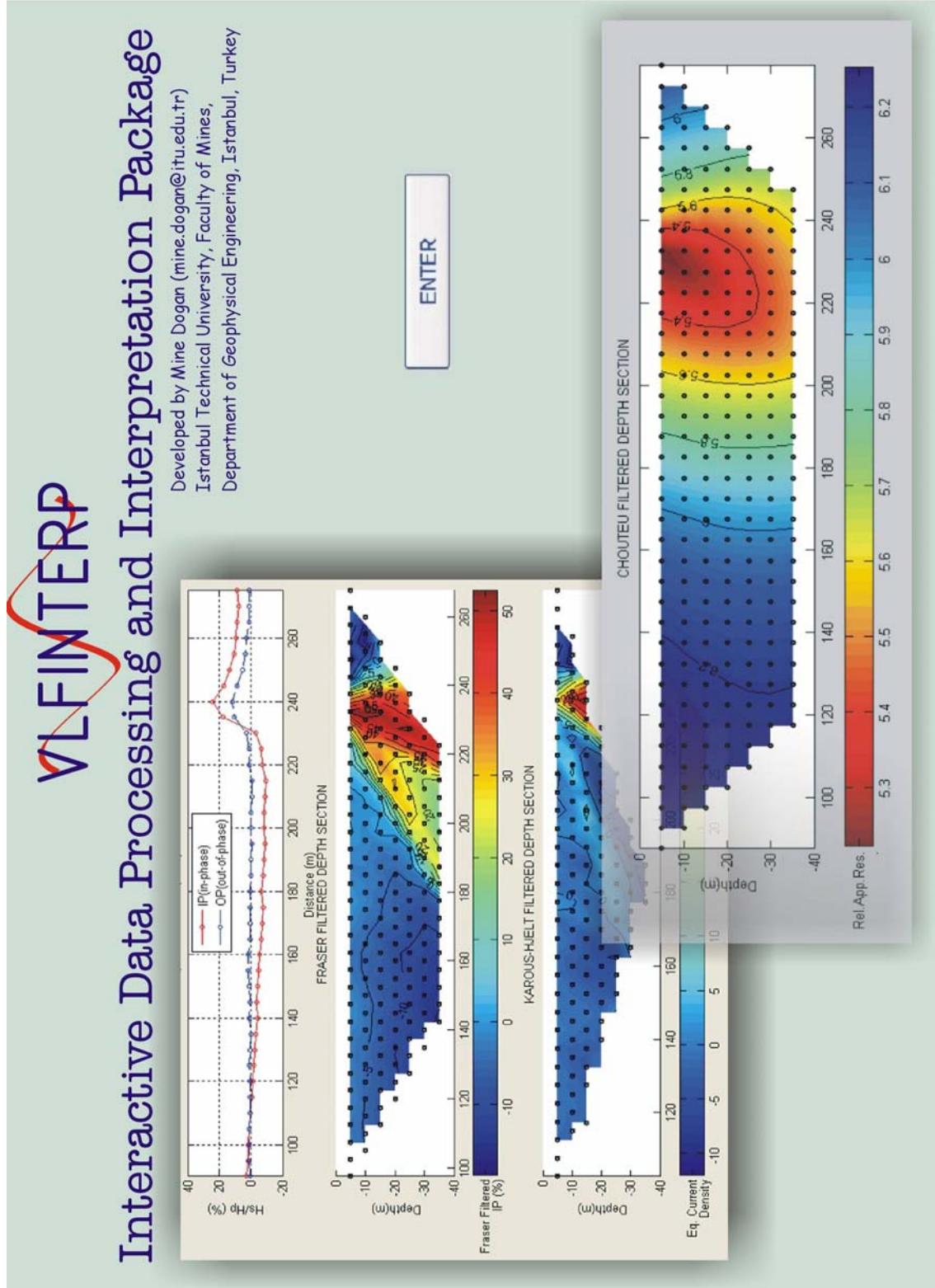
### 3.5 VLFINTERP Programının İşleyişi

Günümüzde, gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak grafik tabanlı programların kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Bu tür programlar, son kullanıcının programlama hakkında bilgisi olmasa bile grafik arayüzü aracılığıyla programa gereken parametrelerin girişlerini yapabilmesine olanak vermektedir. *VLFINTERP* programı da etkileşimli bir paket programdır. Yani, hesaplamalar ve çizimler için gereken parametre ve dosyaların kullanıcı tarafından girişlerinin yapılmasına ve sonuçların etkileşimli biçimde görüntülenmesine izin vermektedir. Böylece, hem programın kullanımı kolaylaşmakta hem de kullanıcının ihtiyacı olan hesaplamalara ve görüntüleme biçimlerine kolaylıkla ulaşması sağlanabilmektedir. Grafikselle kullanıcı arayüzü ile çalışmak son kullanıcıya büyük kolaylıklar sağlamakla birlikte programcı açısından çeşitli zorlukları bulunmaktadır. GUI kullanılarak yazılan programlarda girişler, hem klavye hem de fare aracılığıyla yapıldığından buton ve menüler ile parametre girişlerinin anlamlarını kullanıcıya belirtmek zordur. Bu zorluklar nedeniyle *VLFINTERP* programının ana ekranında, sağ üst köşede birkaç satırlık değişken yardım metinleri bulunmaktadır. Böylece kullanıcı, menüden seçtiği işlemi gerçekleştirmek için yapması gerekenleri ve sonuçların anlamlarını kolaylıkla öğrenebilmektedir. MATLAB'da ayrıca iletişim kutuları (dialog box) adı verilen birimlerle grafikselle kullanıcı arayüzü olmaksızın geliştirilen programlarda bile etkileşimli veri girişi ya da bilgilendirme yapılabilmektedir.

Daha önce de sözü edildiği gibi, MATLAB'da sadece komut penceresi kullanılarak da çeşitli hesaplamalar yapılabilmektedir. Ancak, daha geniş kapsamlı mühendislik hesaplarını içeren programlara gereksinim duyulduğunda komutların, "editör" adı verilen ayrı bir sayfada yazılması ve çalıştırılması gerekmektedir. Editör üzerinden yazılan bu tür programlar doğrudan \*.m dosyası olarak kaydedilmektedir. Bu uzantı, dosyanın sadece MATLAB üzerinden çalıştırılabileceğinin ifadesidir. MATLAB'da yazılan bir program, tek bir sayfa üzerinde tasarlanabileceği gibi farklı alt bölümlere ayrılarak da tasarlanabilmektedir. Bu tür programlar genellikle, bir ana program ve ana programdan çağırılan daha küçük program parçalarından oluşmaktadır. Sözü edilen program parçacıkları, örneğin; Fortran programlama dili için "subroutine" olarak adlandırılan program türüne karşılık gelmektedir. Bu alt programlar, MATLAB'da genellikle "fonksiyon (function)" olarak adlandırılmakta ve değişkenler bakımından birbirlerine bağımlı ya da tamamen bağımsız olabilmektedirler. Fonksiyonların değişkenler bakımından birbirlerine bağımlı olmaları durumunda, değişkenin, ilk oluşturulduğu fonksiyonda "global" komutu ile paylaşımına açılması ve

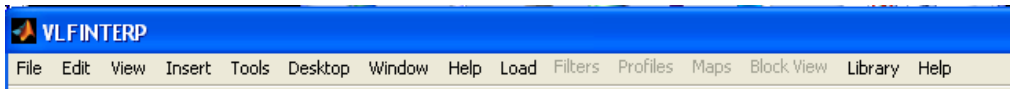
kullanılmasını gerektiren her fonksiyon içinde yine aynı komut ile fonksiyona tanıtılması gerekmektedir.

### 3.6 VLFINTERP Programının Menüleri ve İşlemler



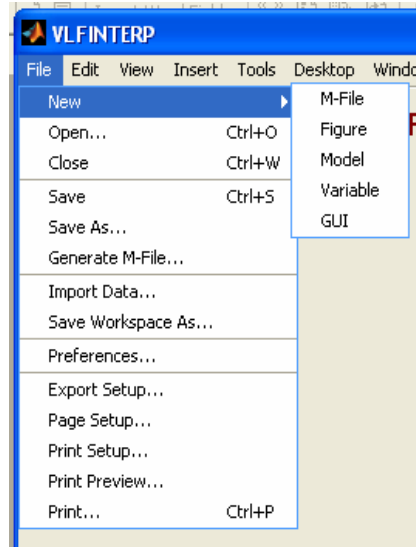
Şekil 3.4 : VLFINTERP programı açılış ekranının görünümü.

Şekil 3.4'de açılış ekranı görülen *VLFINTEP* programı, MATLAB'ın grafiksel kullanıcı arayüzü kullanılarak geliştirilmiştir. Program içeriğindeki işlemlerin gerçekleştirilmesi menü seçimleri ile sağlanmaktadır. Şekil 3.5'de *VLFINTEP* programının ana ekranında yer alan menüler görülmektedir. Soldan sağa doğru File (Dosya), Edit (Düzenle), View (Görüntüle), Insert (Ekle), Tools (Araçlar), Desktop (Masaüstü), Window (Pencere) ve Help (Yardım) menüleri MATLAB grafiksel kullanıcı arayüzünün orijinal menüleridir. Bu menüler, kullanıcıya MATLAB ortamında yeralan ve programın opsiyonlarını genişleten çeşitli işlemleri kullanma olanağı sağlamak amacıyla açık bırakılmıştır. Sözü edilen menüler, bunlara ait alt menüler ve işlevlerine dair açıklamalar izleyen bölümde verilmektedir.



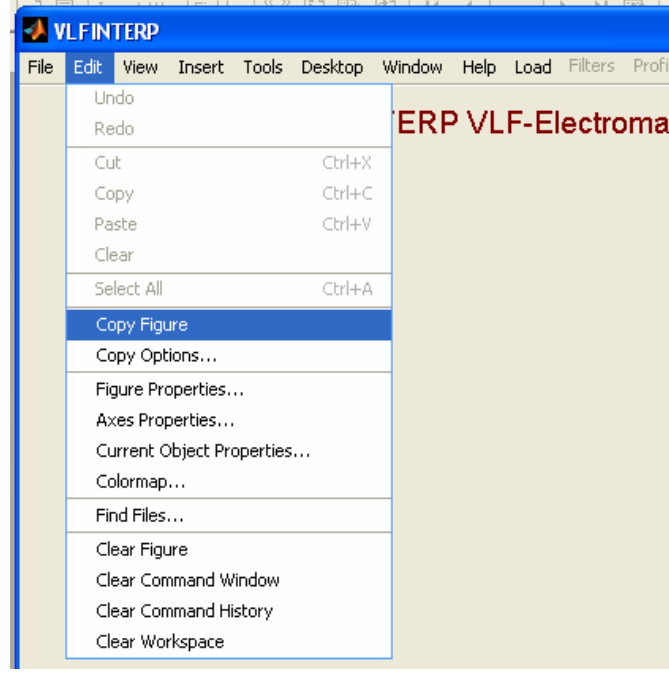
Şekil 3.5 : *VLFINTEP* programı menülerinin genel görünümü.

### 3.6.1 MATLAB Menüleri



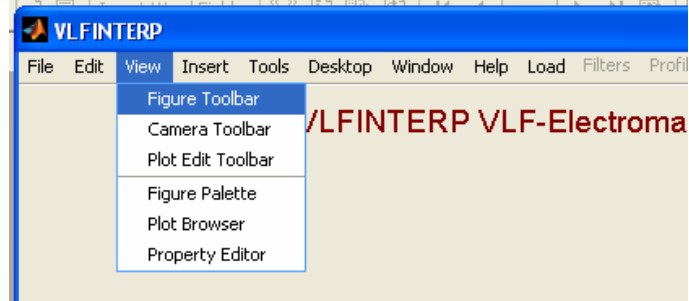
Şekil 3.6 : Dosya (File) menüsünün görünümü.

Şekil 3.6'da görülen Dosya (File) menüsü, MATLAB'ın temel işlemlerinin bulunduğu menüdür. Yeni dosyalar açmak ve kullanımda olan dosyayı kapatmak, ekrandaki çizimi grafik biçiminde kaydetmek ve çıkış almak gibi temel işlemler için gerekli alt menüler bu bölümde yer almaktadır. Dosya menüsü kullanılarak, MATLAB ortamında kayıtlı diğer \*.m dosyalarına ulaşmak, boş editör, figür, model, değişken ve grafiksel kullanıcı arayüzleri de açmak mümkün olmaktadır.



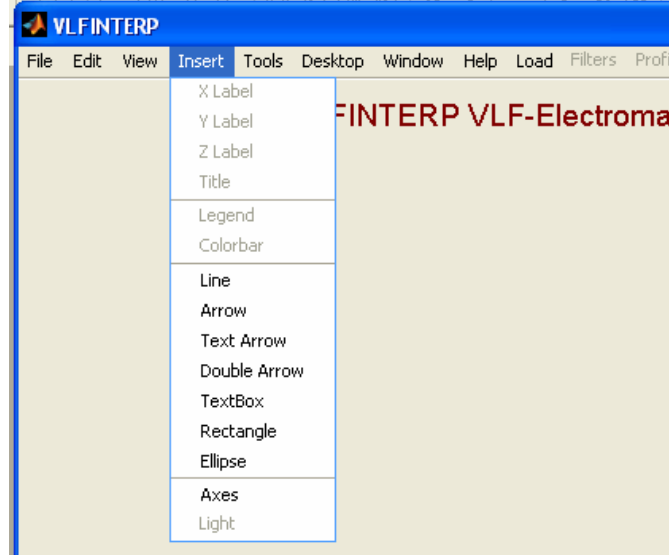
**Şekil 3.7 :** Düzenle (Edit) menüsünün görünümü.

Şekil 3.7’de görülen Düzenle (Edit) menüsü, ana ekran üzerinde istenen düzenlemeleri yapmak için kullanılmaktadır. Ekranı görülen çizimi kopyalamak ve özelliklerini görüntülemek için gerekli alt menüler bu bölümde yer almaktadır.



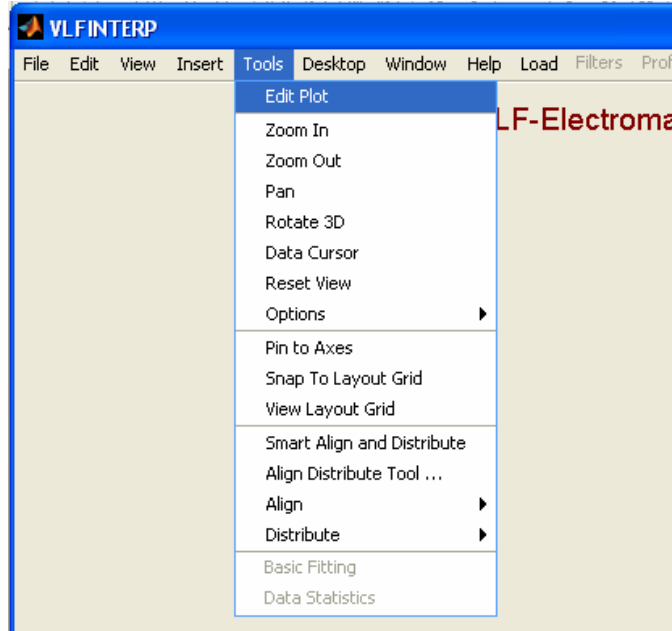
**Şekil 3.8 :** Görüntüle (View) menüsünün görünümü.

Grafiksel kullanıcı arayüzünün içerdiği çeşitli araçları görüntülemek için gerekli alt menüler, Şekil 3.8’de görülen Görüntüle (View) menüsü altında yer almaktadır. Bu alt menülerden seçimler yapılarak istenen araç bantları ana ekrana eklenebilmektedir.



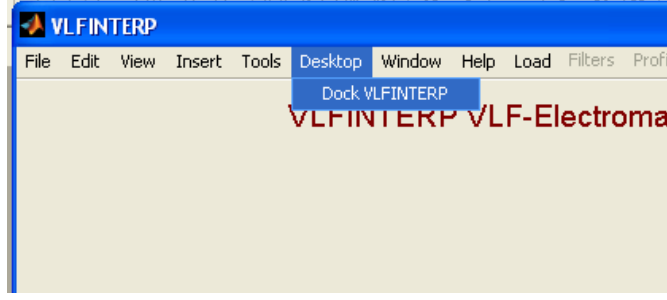
**Şekil 3.9** : Ekle (Insert) menüsünün görünümü.

Şekil 3.9'da görülen Ekle (Insert) menüsü, *VLFINTERP* kullanıcısının sıklıkla ihtiyaç duyacağı bir menüdür. Bu bölümde bulunan alt menüler kullanılarak, görüntülenen harita, kesit veya grafiklerin üzerinde çeşitli temel şekiller, yazı kutuları, ok işaretleri gibi araçlarla yorumlamada kolaylık sağlayacak işaretlemeler yapılabilmektedir. Ayrıca ihtiyaç duyulması halinde, ekrandaki çizimlerin yatay ve düşey eksen takımlarına yeni isimler vermek de olası hale gelmektedir.



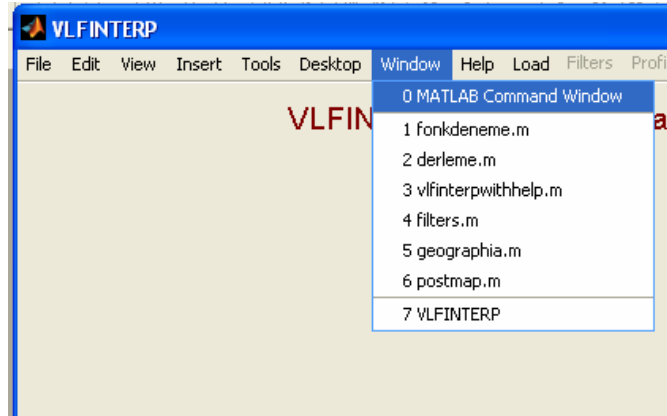
**Şekil 3.10** : Araçlar (Tools) menüsünün görünümü.

Şekil 3.10'da görülen Araçlar (Tools) menüsü kullanılarak, görüntülenen grafik üzerinde istenen bölüme yaklaşma, uzaklaşma (zoom in-zoom out), çizim içerisinde dolaşma (pan), hizalama (align) vb. işlemleri yapmak mümkün olmaktadır.



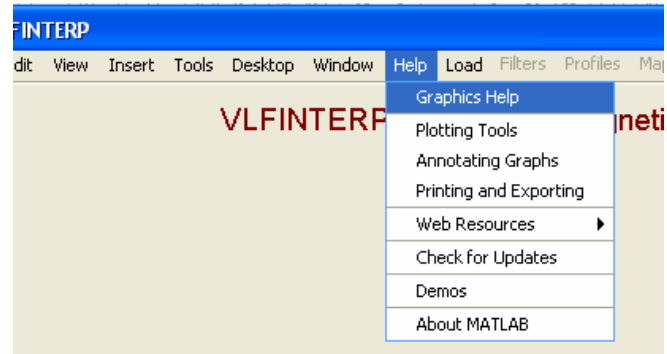
**Şekil 3.11** : Masaüstü (Desktop) menüsünün görünümü.

Şekil 3.11'de verilen Masaüstü menüsü, *VLFINTERP* programının ana ekranını MATLAB ekranına ilişirmeye yarayan Dock seçeneğini içermektedir.



**Şekil 3.12** : Pencere (Window) menüsünün görünümü.

Bu menü, daha çok etkin MATLAB kullanıcılarının ihtiyacı olan ve MATLAB pencereleri arasında dolaşıma olanak sağlayan bir menüdür.



**Şekil 3.13** : Yardım (Help) menüsünün görünümü.

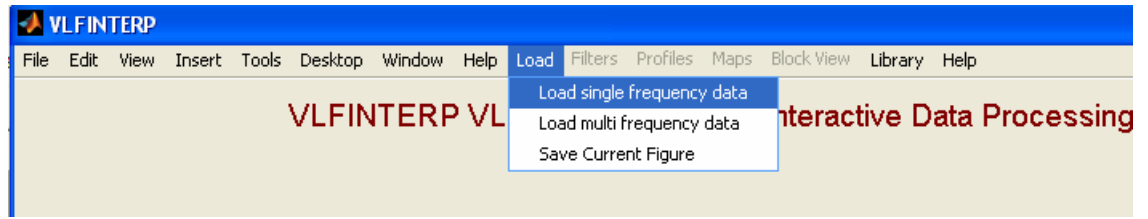
Yardım menüsü, MATLAB programlama dilinin kullanımı konusunda ihtiyaç duyulabilecek yardım dosyalarını ve demoları içeren bir menüdür. MATLAB programlama dilinin yardım dosyaları, son derece geniş kapsamlı olması ve içerdiği demolar nedeniyle kullanıcıya başka herhangi bir dökümana ihtiyaç duymadan gereken bilgileri sunmaktadır.

Bu bölüme kadar anlatılan menüler, daha önce de sözü edildiği gibi, MATLAB programlama dilinin grafiksel kullanıcı arayüzlerinde standart olarak bulunan menülerdir. *VLFINTEP* programının bu çalışma kapsamında sunulan versiyonu, tüm bu menüleri de ek olarak içerdiğinden menüler hakkındaki bilgiler verilmiştir. Sonraki bölümlerde, *VLFINTEP* programının özgün menüleri ve işleyişleri açıklanmaktadır.

### 3.6.2 *VLFINTEP* Menüleri

Şekil 3.5'de verilen menü çubuğunun ikinci bölümü, *VLFINTEP* programına özgü olan menüleri içermektedir. Bu menüler sırasıyla Yükle (Load), Süzgeçler (Filters), Profiller (Profiles), Haritalar (Maps), Blok Görünüm (Block View), Kütüphane (Library) ve Yardım (Help) menüleridir. *VLFINTEP* programı, tüm dünyada yaygın olan şekilde İngilizce olarak yazılmıştır.

#### 3.6.2.1 Yükle (Load) Menüsü

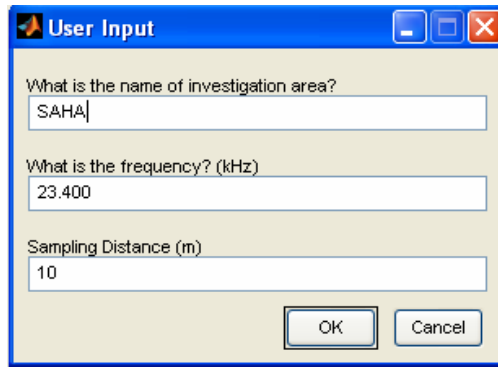


Şekil 3.14 : Yükle (Load) menüsünün görünümü.

Şekil 3.14'de görüldüğü gibi, *VLFINTEP* programı ilk açıldığında, programa ait üç tane menü, ekranda kullanılabilir durumdadır. *VLFINTEP* programının menülerinde kullanılabilmesi için çeşitli şartlar gerektiren başlıklar bulunmaktadır. Örneğin; herhangi bir parametre için kontur haritası görüntülenmek istenirse bu parametrenin önceden veri dosyası ile programa girişinin yapılmış olması gerekmektedir. Kullanım kolaylığı bakımından, bu tür şartlar gerektiren menülerin kullanımına izin vererek hata mesajları ile kullanıcıyı uyarmak yerine, menülerin, uygun şartlar oluştuğunda kullanılabilir hale getirilmesi tercih edilmiştir. Böylece, kullanıcının menülerin kullanım sıralaması konusunda da yönlendirilmesi sağlanmaktadır. *VLFINTEP* programının ana ekranında kullanılabilir durumda olan menülerden ilki olan Yükle (Load) menüsü, programa veri girişini sağlamaktadır. Kütüphane (Library) menüsü, VLF-Elektromanyetik yöntemin etkin kullanımını sağlamak amacıyla program içeriğine dahil edilen modelleme, vericilerin yerlerini gösteren etkileşimli harita işleci ve çeşitli bilgileri içerdiğinden programa veri girişi yapılmaksızın çalışabilir durumdadır. Son sırada yer alan, Yardım (Help) menüsü, kullanıcıya veri dosyasını

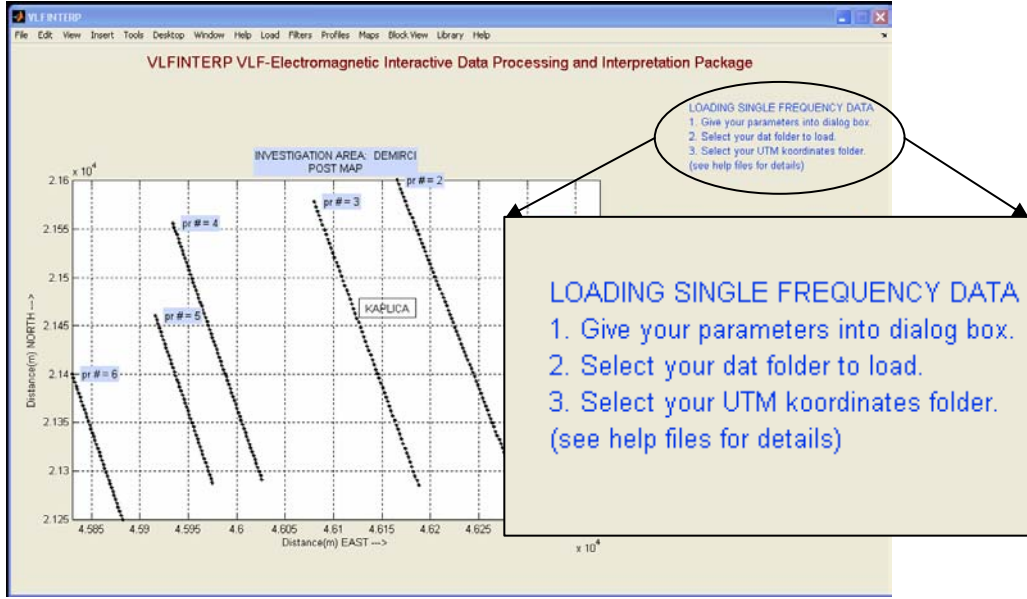
hazırlama ve programın kullanımı konusunda bilgi sağladığından erişimi kısıtlanmamıştır.

*VLFINTERP* programı, seçime bağlı olarak tek frekans ya da aynı anda üç frekansla karşılaştırmalı olarak gösterimler sunabilmektedir. Bu nedenle veri girişi iki farklı biçimde yapılabilmektedir. Tek bir frekans ile çalışmanın tercih edildiği durumlarda, "Tek frekans için veri yükle" (Load single frequency data) alt menüsü, aynı anda üç frekansla çalışmak istendiğinde, "Çok frekans için veri yükle" (Load multi frequency data) alt menüsü kullanılmaktadır. Her iki menü için de veri giriş işlemi, aynı biçimde yapılmaktadır. Tek fark, çok frekansla çalışılırken her frekans için verilerin sırayla ve ayrı ASCII dosyaları halinde programa tanıtılmasının gerekliliğidir.



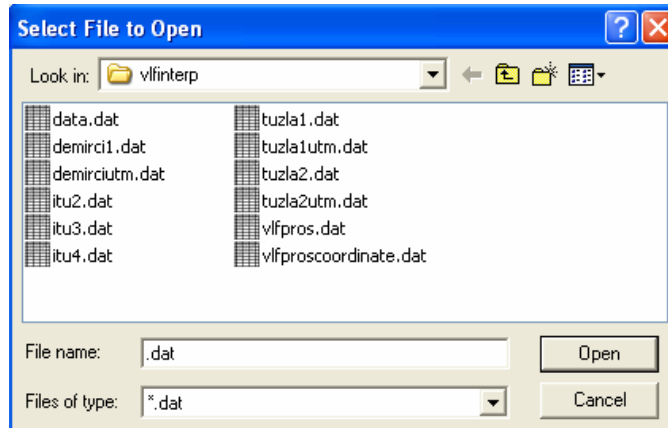
**Şekil 3.15** : Çalışma alanı ile ilgili bilgilerin programa verilmesini sağlayan iletişim kutusunun görünümü.

Programa veri girişinin yapılması sırasında öncelikle, Şekil 3.15'de görülen pencere yoluyla, çalışmaya ilişkin temel bilgilerin programa girdi olarak verilmesi gerekmektedir. Bu girdilerin ilki, çalışma alanının adı (name of investigation area), ikincisi çalışmada seçilen istasyonun frekansı (frequency), üçüncüsü ise çalışma sırasında seçilen ölçüm aralıklarıdır (sampling distance). Girdi biçiminden de anlaşılacağı üzere, *VLFINTERP* programı kullanılarak değerlendirilmesi düşünülen VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin sahanın tümü için aynı örnekleme aralığı ile toplanması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, grafiksel kullanıcı arayüzü ile çalışmanın bir zorluğu olan programcının kullanıcıya yapması gerekenlere ilişkin bilgileri verme zorunluluğu gereğince ana ekranın sağ üst köşesinde aktif yardım metinleri açılmaktadır. Şekil 3.16' da saha bilgilerinin girişi sırasında açılan yardım metni görülmektedir.



**Şekil 3.16 :** Veri yükleme işlemi sırasında görüntülenen aktif yardım metni.

Çalışma alanı ile ilgili bilgilerin programa verilip işlemin "OK" butonuna basılarak onaylanmasının ardından, ekranda sırayla iki tarayıcı açılmaktadır. Bunlardan ilki, saha verilerini içeren ASCII dosyasının kullanıcıya seçtirilmesini amaçlamaktadır (Şekil 3.17). Bu bölümde programa verilecek ASCII dosyalarının MATLAB'ın "work" dizini altına kaydedilmiş ya da başka bir dizin içinde çalışılacak ise, bu dizinin MATLAB'a tanıtılmış olması gerekmektedir. İlk tarayıcıdan saha verilerini içeren ASCII dosyasının tanıtımı yapıp bu işlemin onaylanmasının ardından, açılacak ikinci tarayıcı penceresinde yine "work" dizini altına kaydedilmiş ve profillerin başlangıç ve bitiş koordinatlarını içeren ASCII dosyası programa tanıtılmaktadır. Bu ASCII dosyalarının oluşturulması sırasında uyulması gereken dosya biçimleri Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmektedir.



**Şekil 3.17:** Veri dosyalarının programa tanıtılması.

**Tablo 3.1:** Veri dosyası biçimi.

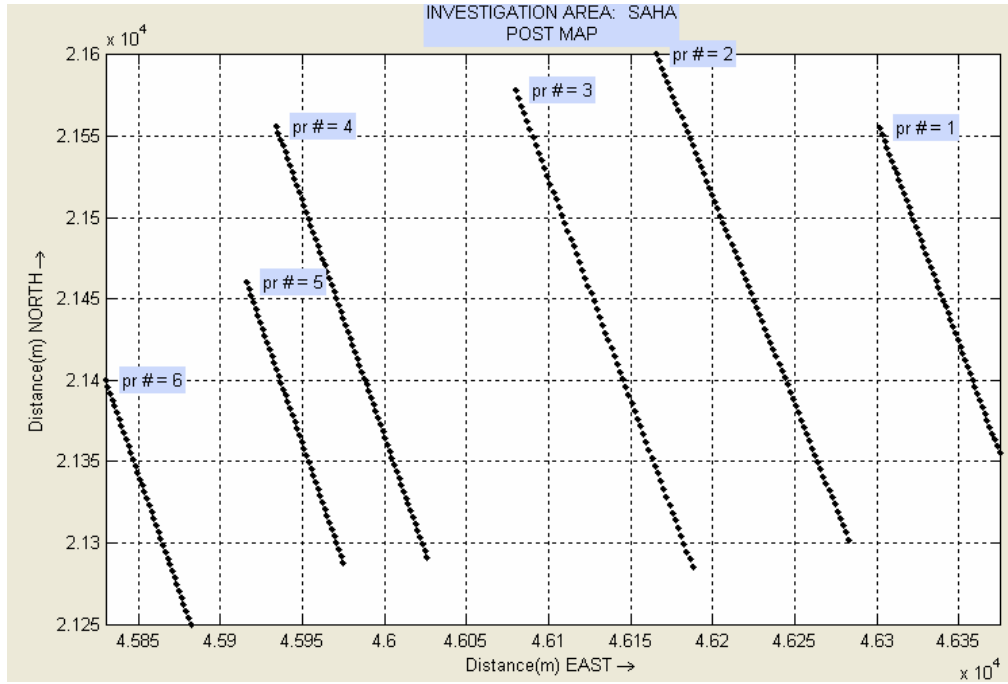
Yatay Mesafe Değerleri (m)	Gerçek Bileşen Değerleri (%)	Sanal Bileşen Değerleri (%)	Tilt Açısı Değerleri (derece)	Toplam Manyetik Alan Değerleri (nT)
$x_1$	$IP_1$	$OP_1$	$T_1$	$TF_1$
$x_2$	$IP_2$	$OP_2$	$T_2$	$TF_2$
$x_3$	$IP_3$	$OP_3$	$T_3$	$TF_3$
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
0	0	0	0	0

**Tablo 3.2:** Koordinat dosyası biçimi.

Başlangıç Koordinatları		Bitiş Koordinatları	
$X_1$	$Y_1$	$X_1$	$Y_1$
$X_2$	$Y_2$	$X_2$	$Y_2$
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
$X_n$	$Y_n$	$X_n$	$Y_n$

Verilerin ana programdan girişi, bir ASCII dosyasının programa tanıtılması biçiminde olmaktadır. Ana program, bir kez veri dosyasını aldıktan sonra bu veriyi, profil üzerindeki mesafeleri içeren birinci sütundan yararlanarak profillere ayırmaktadır. Tablo 3.1’de görüldüğü gibi programa tanıtılan veri dosyasındaki ilk iki sütun sırasıyla; verilerin ölçüldüğü profil üzerindeki yatay mesafe değerleri ve VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinden değerlendirme konusunda en çok bilgiyi veren gerçek bileşen değerleridir. Sonra sırasıyla sanal bileşen, tilt açısı ve toplam manyetik alan değerleri verilebilir. Programa girilecek saha verisinin nokta sayısı ve ölçülen parametre çeşidi konusunda bir sınırlama olmamakla beraber, bu dört parametre, kullanımda bulunan cihazlar tarafından ölçülen en temel büyüklükler olduğu için seçilmiştir. *VLFINTERP* programı, veri boylarının (ölçülen profillerin boylarının) eşit olmasını zorunlu kılmamaktadır. Bunun yerine, profillere ayırma işlemi sırasında her profile ait verileri sayarak bir matrise atamakta ve veri matrisinin seyrek kalmaması için gereken yerleri dizinin son değerini tekrarlayarak

doldurmaktadır. Süzgeçleme işlemi sırasında sayaçlar, her profilin içerdiği veri sayısına kadar saydırıldığından tekrarlı verilerin varlığı hesaplamaların sonuçlarını ve gösterimleri etkilememektedir. Ayrıca *VLFINTERP*, profil üzerindeki her noktanın koordinatının önceden hesaplanıp girdi olarak verilmesine ihtiyaç duymamaktadır. Bunun yerine Tablo 3.2'de görülen biçimde, profillerin GPS okumalarından faydalanılarak ya da sahada seçilen bir baza göre belirlenen başlangıç ve bitiş koordinatlarının verilmesi yeterli olmaktadır. Program, veri sayısına göre ara noktaları hesaplayarak Şekil 3.18'de görüldüğü gibi bir ölçüm planı oluşturmakta ve kullanıcıya sunmaktadır. Program, ölçüm planını oluştururken her profile aşağıdan yukarıya ve sağdan sola doğru konumlarına göre sırayla birer numara vermekte ve bu numaraları da ölçüm planında göstermektedir. Böylece kullanıcının seçtiği bir profil için istediği parametreleri görüntülemesi mümkün olmaktadır. *VLFINTERP*, ölçüm planı ile birlikte Şekil 3.19'da görüldüğü gibi bir iletişim kutusu aracılığıyla, yüklenen verideki nokta ve profil sayısını da bildirmektedir.



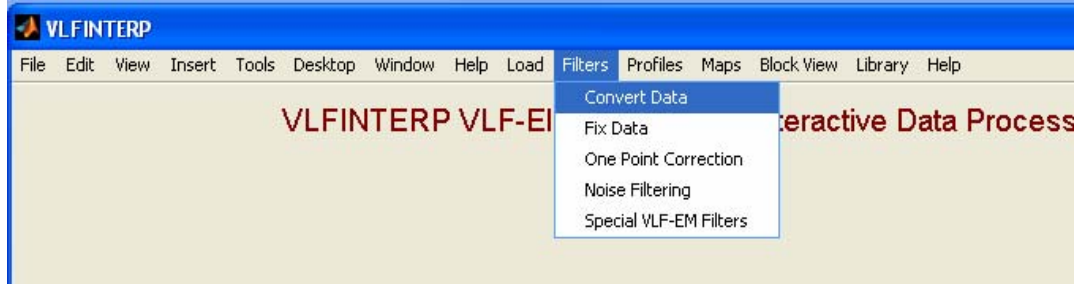
Şekil 3.18 : Ölçüm nokta ve profil planı.



Şekil 3.19 : Yüklenen verinin profil ve ölçüm noktası sayısını bildiren iletişim kutusu.

### 3.6.2.2 Süzgeçler (Filters) Menüsü

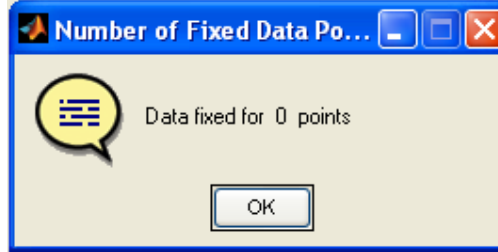
Kontrol amaçlı bu bilginin verilmesinin ardından, programda veri yükleme işlemi tamamlandığından, çalışması için bu verilere ihtiyaç duyulan fonksiyonlara ait menüler de kullanılabilir hale gelmektedir. Kullanılabilir hale gelen bu menülerden ilki Süzgeçler (Filters) menüsüdür. Bu menü, temel olarak iki farklı tip süzgeç ile VLF-Elektromanyetik yönteme özgü veri denetleme seçeneklerini içermektedir.



**Şekil 3.20** : Süzgeçler (Filters) menüsünün görünümü.

Şekil 3.20'de görüldüğü gibi bu bölümdeki alt menülerden ilki, "veriyi dönüştür" (convert data) seçeneğidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, VLF-Elektromanyetik yöntem, yöne bağımlıdır ve seçilen vericinin üzerinde çalışılan iletken yapının uzanımına göre konumu, yöntemin doğru sonuçlara ulaşabilmesi için önemlidir. Ölçümler sırasında tek bir noktada ölçülmüş genlik değerleri, jeofizik prospeksiyon açısından herhangi bir anlam taşımamaktadır. Ölçülen verinin jeofizik araştırmalarda kullanımının anlamlı olabilmesi için, bir doğrultu boyunca ölçümler alınmakta ve bir referans noktaya göre, parametrelerin genlik ve işaretlerindeki değişim izlenmektedir. Bu nedenle, zaman zaman veriler ideal belirti biçiminin ters işaretli olarak oluşmaktadır. Bir başka deyişle; ölçümlerin birbirine ters yönde (gidiş-dönüş) olarak tekrarlanması durumunda, şekil olarak aynı, ancak ters işaretli ve genlikleri farklı iki belirti elde edilebilmektedir. Verilerin değerlendirilmesi sırasında, diğer jeofizik yöntemlerde olduğu gibi doğrudan genlik değerleriyle ilgilenilmediğinden, belirtinin en büyük ve en küçük genlik değerlerine ulaştığı tepe ve çukur noktaları ile sıfır geçişinin yerini belirlemek yeterli olmaktadır. Bu nedenle, zaman zaman gösterimle ilgili kaygılar ve süzgeçleme işleminde doğru işaretli sonuçları elde etme gerekliliği nedeniyle, verilerden gerçel ve sanal bileşenlerin değerlerinin ters işaretlilerini elde etmek için bu alt menünün kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Verilerin ters işaretli hale dönüştürülmesi işlemi, sadece, ikincil alanın birincil alana oranının gerçel ve sanal bileşenlerine uygulanmaktadır. Ölçülen diğer parametrelerden tilt açısı ve toplam manyetik alan değerlerine böyle bir işlem uygulanmasına gerek görülmemektedir.

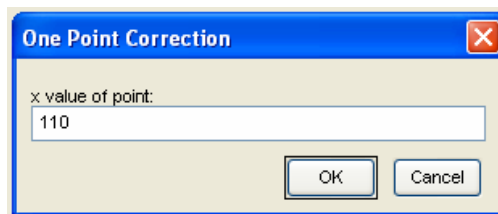
Süzgeçler menüsünün ikinci alt menüsü olan “veriyi sınırla” (fix data) alt menüsü, gerçel ve sanal bileşenlerin birimsiz ve Hs/Hp oranının yüzde (%) cinsinden ifadesi olmaları gerçeğinden hareketle -100 ve 100 aralığı dışında kalan verileri bu aralığın içine sabitleme işlemini gerçekleştirmektedir. Böylece, özellikle çevresel ya da aletsel gürültülerden kaynaklanan aşırı büyük ya da küçük genlikler 100 ve -100 değerlerine eşitlenerek, üzerinde çalışılan yapıya ait gerçek belirtinin gözden kaçmasının önüne geçilmesi sağlanmaktadır.



**Şekil 3.21** : Düzenlenen veri noktası sayısını bildiren iletişim kutusu.

Program, bu menünün seçilmesi durumunda işlemi gerçekleştirmekte ve ardından Şekil 3.21’de görüldüğü gibi bir iletişim kutusu aracılığıyla, kaç adet verinin değişime uğradığını kullanıcıya bildirmektedir.

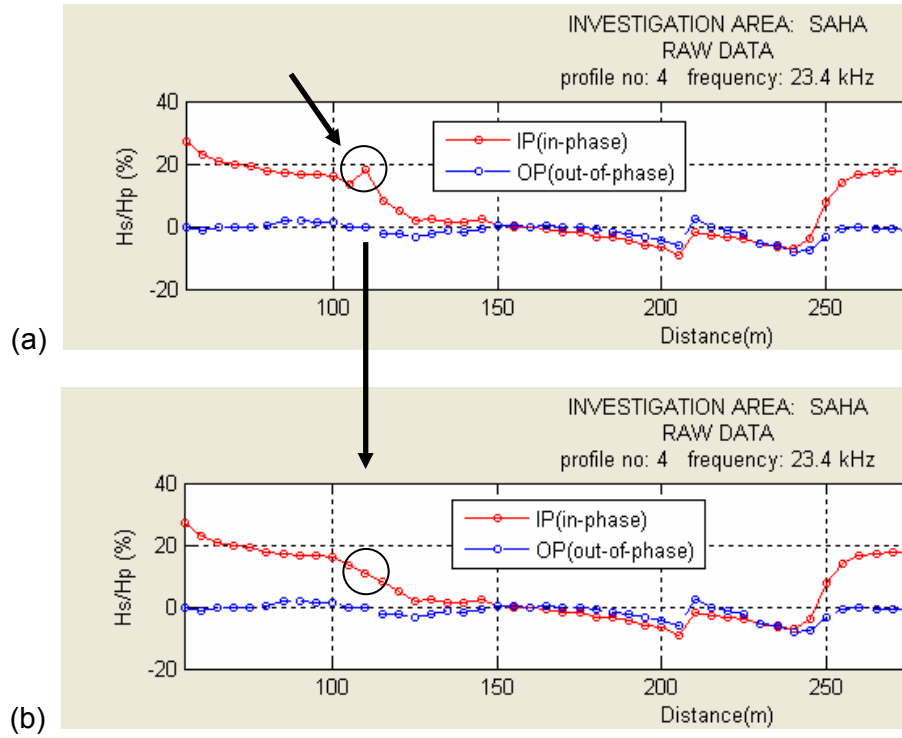
Bu bölümde yeralan üçüncü alt menü, “tek nokta düzeltmesi” (one point correction) menüsüdür. VLF-Elektromanyetik yöntem, diğer tüm frekans ortamı elektromanyetik yöntemler gibi çeşitli çevresel gürültülerden etkilenmektedir. Bu durumda, ölçümler sırasında, yöntem için gürültü kaynağı olabilecek (yüksek gerilim hattı, trafo vb) bir yapının civarında ölçülen noktaların, ölçü karnesine, gürültü kaynağının tanımı ile birlikte not edilmesi gerekmektedir. Böyle yapıların civarında oluşan gürültü, genellikle tek bir noktada, veriye çok büyük ya da küçük genlikli bir etkinin katılması şeklinde olmaktadır. Verideki bu tür değişimler, bilinen sinyal işlemeye yönelik süzgeçlerle giderilememekte, aksine, bu tek noktanın etkisi, civarındaki noktaların gerçek genlik değerlerini de bozmaktadır. Bu nedenle, böyle bir tek nokta düzeltmesi işlemine ihtiyaç duyulmaktadır.



**Şekil 3.22** : Tek nokta düzeltmesi yapılması istenen noktanın yatay mesafe değerini sorgulayan iletişim kutusu.

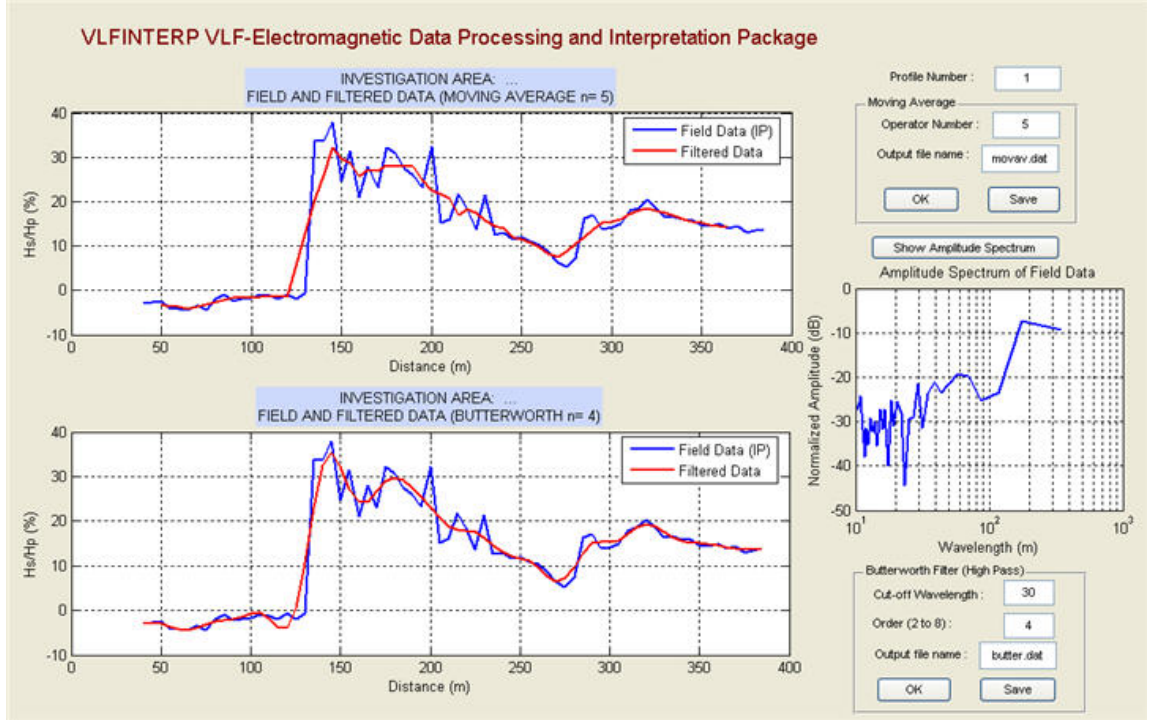
Bir profile ait verinin uzaklığın fonksiyonu olarak gösterimi sırasında, tek nokta hatası için bu menü kullanıldığında, Şekil 3.22'de görülen iletişim kutusu aracılığıyla, gürültünün giderilmesi istenen noktanın yatay mesafe değeri sorgulanmaktadır.

Örneğin, Şekil 3.23'de görülen örnek veri üzerinde işaretli olan tek nokta hatasının düzeltilmesi için öncelikle, iletişim kutusuna bu noktanın yatay mesafe değeri olan 110 (m) girilmektedir. Girdinin onaylanmasının ardından program, bir önceki ve bir sonraki noktaların değerlerinin bir ortalamasını alarak ölçü noktasına atamaktadır. Tek nokta düzeltmesi işlemi, sadece, VLF-Elektromanyetik yöntemin değerlendirme anlamında en etkin parametresi olan gerçel bileşen verilerine uygulanmakta ve bundan sonra yapılacak tüm işlemlerde bu düzeltilmiş değerler kullanılmaktadır.



**Şekil 3.23** : Bir verinin tek nokta düzeltmesi yapılmadan önceki (a) ve sonraki (b) görünüşleri.

Süzgeçler menüsünün son iki alt menüsü, veri denetleme ve düzenleme işleminden farklı olarak doğrudan verilerin süzgeçlenmesine yöneliktir. Bunlardan ilki olan "gürültü süzgeçleme" (noise filtering) menüsü, sinyal analizinde yaygın olarak kullanılan ve alçak geçişli bir süzgeç olan kayan ortalama ve yüksek geçişli Butterworth süzgeçlerini içermektedir. Bu menünün seçilmesi durumunda, ekranda, Şekil 3.24'de görülen süzgeçleme işleci açılmaktadır. *VLFINTERP* programının içinde bir alt program olarak çalışan bu işleç, sadece verileri programdan almakta, süzgeçleme işleminin ardından elde edilen süzgeçlenmiş veriyi yeni bir ASCII dosyası olarak çalışılan dizine kaydetmektedir.



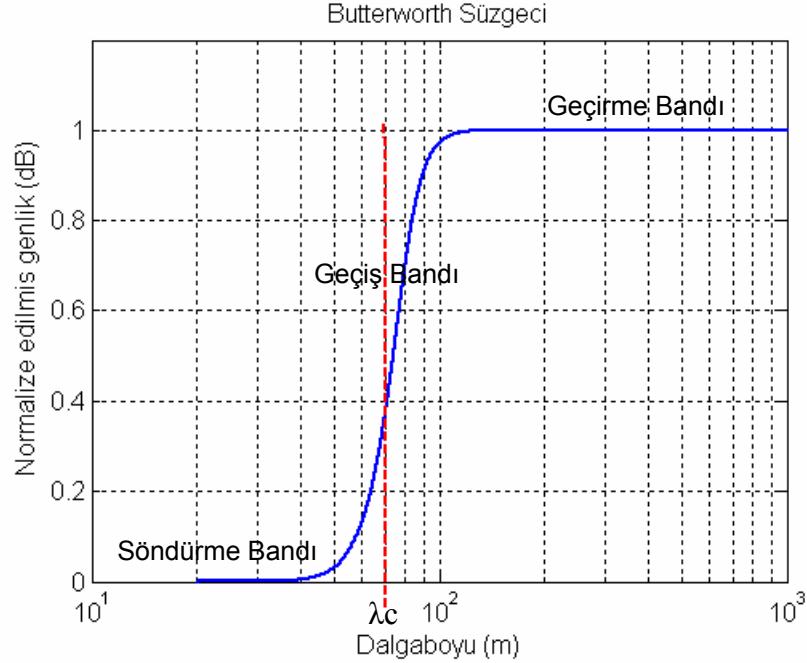
**Şekil 3.24** : Örnek bir verinin süzgeçlenmesi.

Şekil 3.24'de görülen süzgeçleme işlecinin sağ bölümünde, süzgeçleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için kullanıcı tarafından verilmesi gereken girdilerin alındığı pencereler görülmektedir. Kullanıcı, süzgeçleme işlemini izlemek istediği profilin numarasını ve süzgeçleme için gereken parametreleri, programa bu pencereler aracılığıyla verebilmektedir. Profil seçiminin ardından "Verinin genlik spektrumunu göster" (Show Amplitude Spectrum) butonuna basılarak sağ orta bölümde gösterilen çizimle, verideki genlik içeriğinin dalgaboyuna bağlı dağılımı incelenebilmektedir. Sinyal analizinde genellikle zaman ortamı sinyallere uygulanan bu dönüşüm, benzer bir yaklaşımla, uzaklığa bağlı olarak uygulanmaktadır.

İkinci bölümde yer alan, kayan ortalama işleci için, uygulanması istenen süzgecin adım sayısının verilmesi yeterli olmaktadır. Girdinin onaylanmasının ardından, sol bölümdeki ilk çizim, saha verisi ile kayan ortalama işlecinden geçirilmiş veriyi üstüste göstererek kullanıcıya seçim yapma imkanı vermektedir. Görüntülenen süzgeçleme işleminin uygun bulunmaması durumunda, yeni bir adım sayısı verilerek işlemin tekrarlanması mümkündür.

Bu bölümde yer alan ikinci süzgeç olan Butterworth süzgeci, kayan ortalama işlecine göre çok daha kontrollü bir süzgeçtir. Bu süzgecin uygulanabilmesi için, programda ayrılan bölümlere süzgecin geçirmesi istenen en küçük dalgaboyu değeri ile süzgecin derecesinin girilmesinin ardından, girdiler onaylanarak yine saha verisi ile süzgeçlenmiş veri üstüste çizilerek görüntülenmektedir. Bu çizimin başlığında,

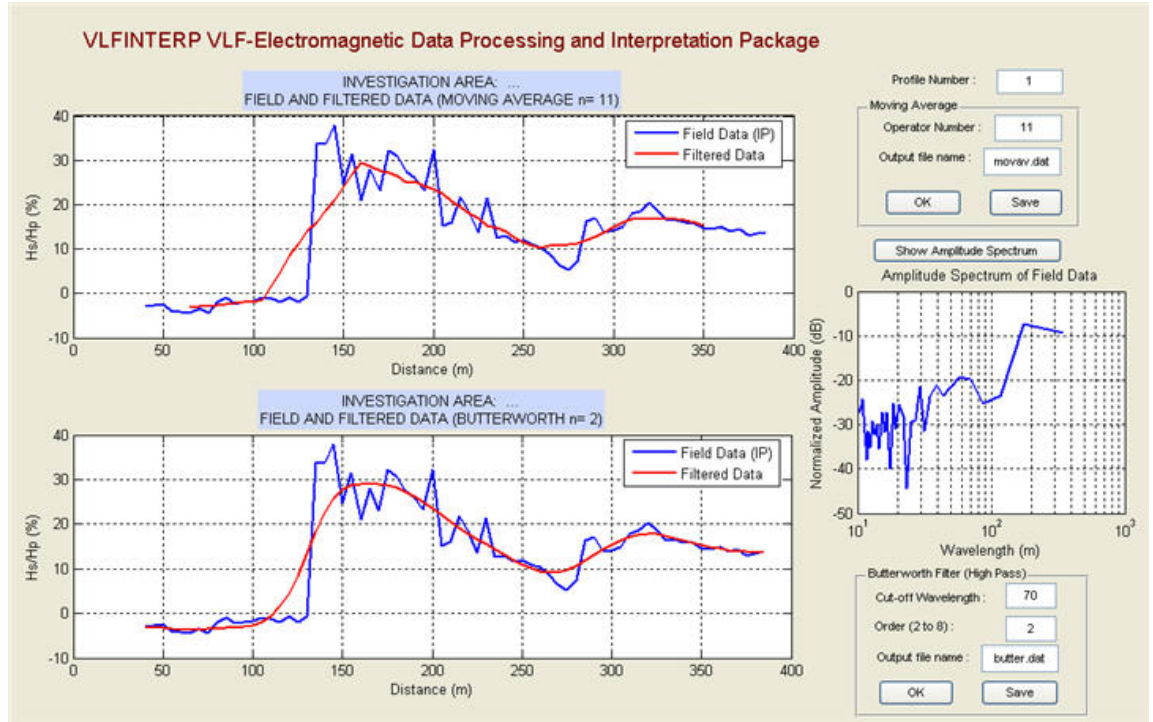
Butterworth süzgecinin adım sayısı da “n” değeri ile bildirilmektedir. Bu bölümde kullanılan Butterworth süzgeci yüksek geçişli bir süzgeç olup, VLF-Elektromanyetik verilerinde genellikle görülen gürültü tiplerine uygun olması nedeniyle seçilmiştir. Süzgeç, veride bulunan küçük dalga boylu salınımları ortadan kaldırarak gerçek belirtinin belirginleşmesini sağlamaktadır.



**Şekil 3.25** : Butterworth süzgecinin biçimini gösterir şematik çizim ( $\lambda_c$ , kesme (cut-off) dalgaboyu).

Butterworth süzgeci, sinyal analizinde çok yaygın olarak kullanılan bir süzgeçtir. Şekil 3.25’de görüldüğü biçimde, tüm yüksek geçişli süzgeçler gibi; geçirme bandındaki (pass band) dalgaboylarındaki veriyi tamamen korumak, söndürme bandındaki (stop band) dalgaboylarındaki veriyi ise tamamen ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanmaktadır. Ancak, bu ideal durumu sağlamak çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Geçirme ve söndürme bantları arasında bir geçiş bandı (transition band) oluşmaktadır. Geçiş bandı içindeki verinin bir kısmı korunmakta bir kısmı ise süzülmemektedir. Süzgeç biçiminin ideale yaklaştırılması durumunda hesaplanan süzgeç katsayılarının sayısı artmakta ve verinin başında ve sonunda süzgeç biçimi ile uyumlu artıklar oluşmaktadır. Bu durumda ideal bir süzgecin geçiş bandının mümkün olduğunca dar ve süzgeç boyunun mümkün olduğunca kısa olması gerekmektedir. Şekil 3.24’de görülen süzgeçleme işlemi minimum veri kaybı ile verinin şeklini koruma ve gürültünün önemli bir bölümü atabilme yeteneğinde olduğundan bu gerekleri sağlamaktadır. Şekil 3.26’da görülen süzgeçleme işleminde ise kayan ortalama işlecinin adım sayısı gereğinden büyük seçildiği ve Butterworth

süzgecinin söndürme bandı gereğinden geniş tutulduğu için, verideki gürültüler ile birlikte belirtinin önemli bir kısmının da kaybedildiği görülmektedir.



**Şekil 3.26** : Örnek bir verinin süzgeçleme işleci ile amacına uygun olmayan biçimde süzgeçlenmesi.

Yukarıda bahsedilen durumlar gözönüne alınarak kullanıcı tarafından uygunluğuna karar verilen süzgeçlenmiş veri, “Çıkış dosyası adı” (Output file name) kutucuklarına dosya isimleri yazılıp, işlem, “Kaydet” (Save) butonu ile onaylanarak, çalışılan dizine kaydedilebilmektedir. Süzgeçlenmiş ve ASCII formatında kaydedilmiş verinin programda görüntülenebilmesi için, programa, veri girişi ile tanıtılması gerekmektedir.

Bu bölümde bulunan son alt menü, “Özel VLF-EM süzgeçleri (Special VLF-EM filters)”dir, bu süzgeçlerin hesaplama biçimleri hakkındaki bilgiler, Bölüm 2’de verilmektedir. Program, Şekil 3.27’de verilen iletişim kutusu aracılığı ile işlemin tamamlandığını kullanıcıya bildirmektedir.



**Şekil 3.27** : Süzgeçleme işleminin tamamlandığını bildiren iletişim kutusu.

### 3.6.2.3 Profiller (Profiles) Menüsü

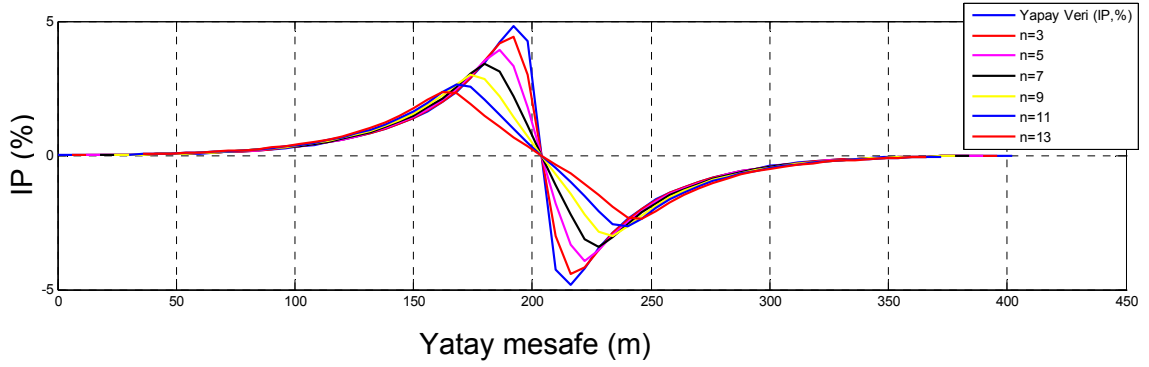


Şekil 3.28 : Profiller (Profiles) menüsünün görünümü.

*VLFINTERP* programının üçüncü ana menüsü, Şekil 3.28’de görülen, Profiller (Profiles) menüsüdür. Bu bölümde, VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin görüntülenmesi ve değerlendirilmesinde en yaygın biçim olan, yatay mesafeye bağlı grafik ve kesitler yer almaktadır. Bu bölümün alt menüleri olan; Saha Verisi Grafikleri (Raw data graphs), ölçülen veriye ait tüm parametrelerin grafikler halinde görüntülenmesini, Süzgeçlenmiş Veri Grafikleri (Filtered data graphs), ham verinin gerçel ve sanal bileşenleri ile süzgeçlenmiş verilerin birlikte grafik gösterimlerini ve Kesitler (Sections), VLF-Elektromanyetik yöntem öze özgü filtreler ile hesaplanan derinlik kesitlerinin görüntülenmesini sağlamaktadır.

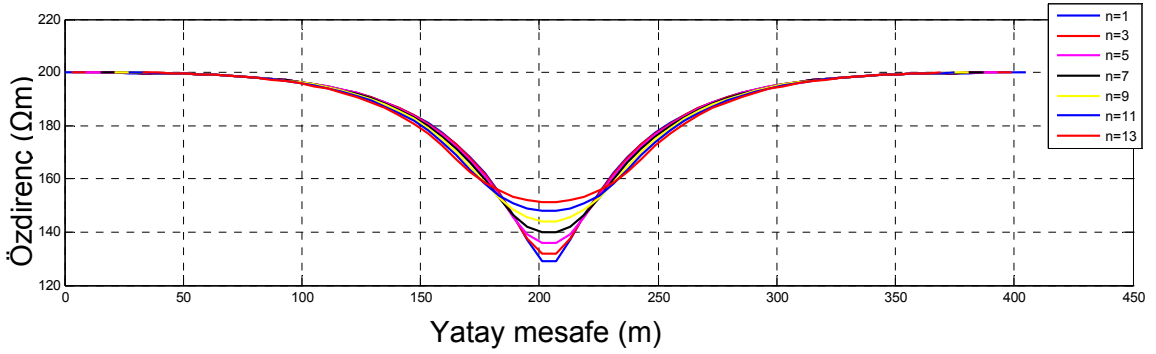
Kesitler bölümünde, yaygın olarak kullanılan ve Karous-Hjelt süzgeci kullanılarak elde edilen eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesidi ve daha ender olarak kullanılan Fraser derinlik kesitleri bulunmaktadır (Şekil 3.31). Bu kesitlerin yanısıra, *VLFINTERP* programı, literatürde örneği bulunmayan ve diğerlerine benzer bir yaklaşımla Chouteau süzgeci kullanılarak oluşturulan, görünür özdirenç değerlerini gösteren bir derinlik kesidini içermektedir.

Daha önce sözü edilen eşdeğer akım yoğunluğu ve Fraser IP derinlik kesitleri, süzgeç boyu uzatılarak hesaplanmaktadır. Böylece, daha büyük dalga boylu belirtilere ait süzgeçlenmiş veriler, ölçüm aralığının eş derinliklere atanarak yaklaşımsal olarak derinlik kesitleri oluşturulmaktadır. Chouteau süzgeci, bu süzgeçlerden farklı olarak, yinelemeli bir yolla görünür özdirenç değerlerini hesapladığından, süzgeç boyunun uzatılması mümkün olmamaktadır. Verinin adım atlanarak örneklenmesi durumunda ise, bazı belirtilerin abartılması ya da tamamen ortadan kaldırılması riski bulunduğundan, kayan ortalama değerleri hesaplanarak daha büyük dalga boylu anomaliler belirginleştirilmiştir. Şekil 3.29’da yapay bir verinin (Edsen ve Nissen, 1997), artan adım sayısıyla kayan ortalama işlecinden geçirilmiş halleri görülmektedir.



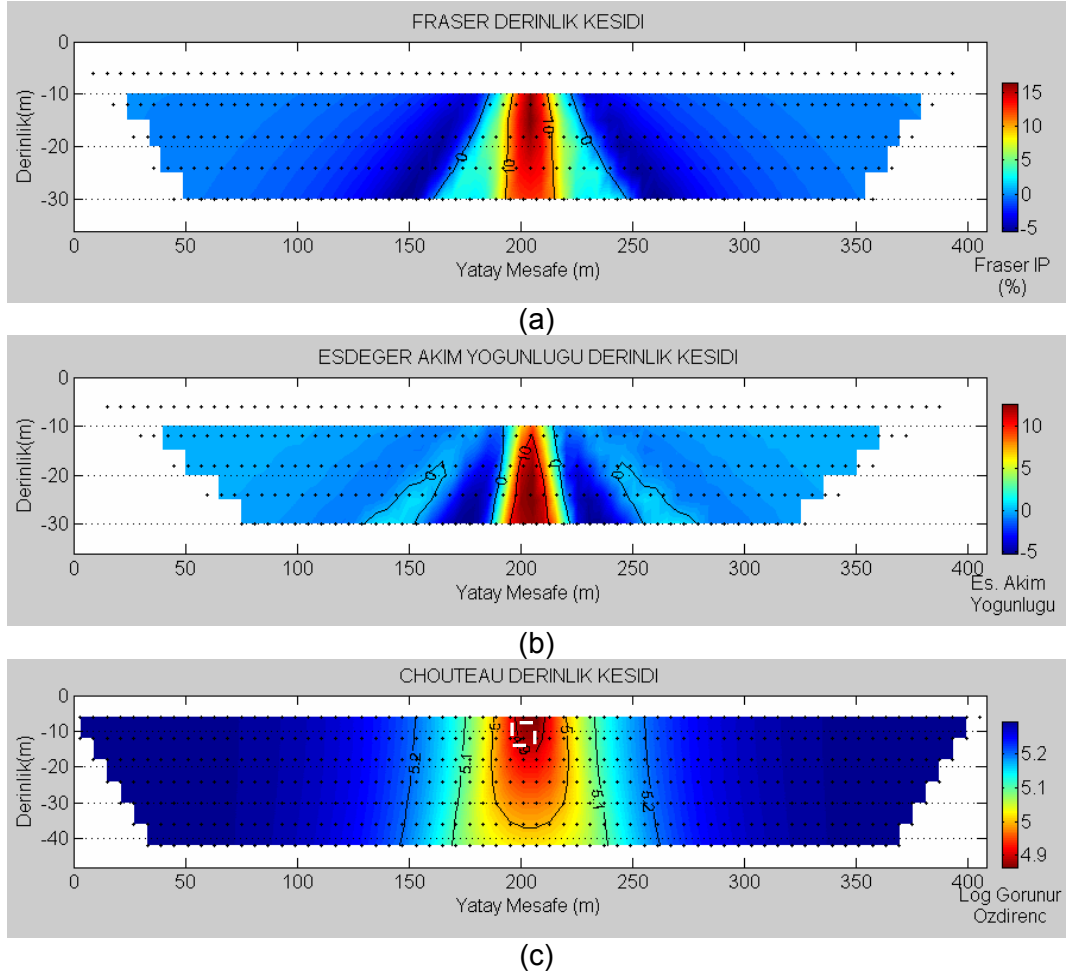
**Şekil 3.29** : Çeşitli uzunluklarda kayan ortalama işleçleri ile yuvarlatılan yapay bir verinin görünümü.

Kayan ortalama işleminin ardından, elde edilen her bir veri, aynı başlangıç öz direnci değeri kullanılarak Chouteau süzgecinden geçirilmiş ve Şekil 3.30'da verilen görünür öz direnç değerleri hesaplanmıştır.



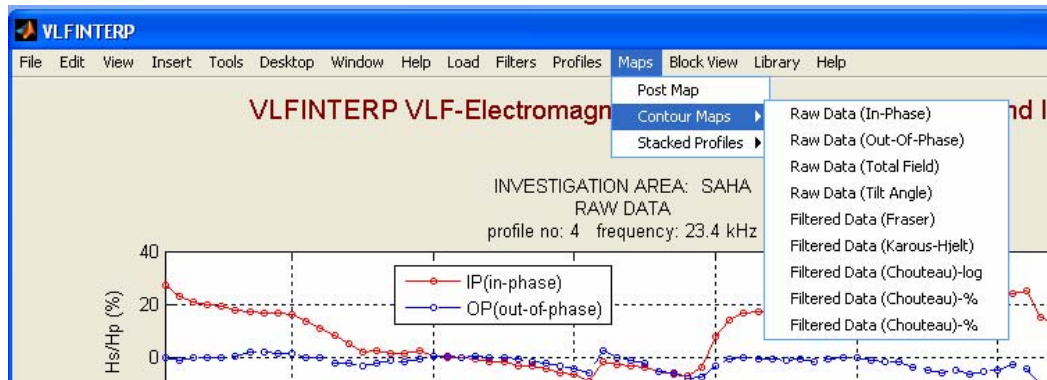
**Şekil 3.30** : Kayan ortalama işleminden sonra hesaplanan Chouteau görünür öz direnç değerleri.

Bir sonraki adımda, hesaplanan Chouteau görünür öz direnç değerleri, ölçüm aralığının katları derinliklere atanarak Şekil 3.31'de görülen derinlik kesidi elde edilmiştir. Çeşitli yapay veriler ve literatürden seçilen veriler ile yapılan testler sonucunda, yapının eğiminin ve yerinin yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Derinlik kesidinde, model yapının alt ucunun derinliği başlangıç öz direncinin değişimlerinden etkilendiğinden, kesitlerin oluşturulması sırasında, ortamın öz direncine yakın ya da daha büyük başlangıç değerlerinin seçilmesi gerekmektedir.



**Şekil 3.31** : Yeryüzünden (ortam öz direnci,  $200 \Omega m$ ) 10 m derinde 10X10 m kare kesitli iki boyutlu bir yapı (50  $\Omega m$ ) için; (a) Fraser IP derinlik kesidi, (b) eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesidi, (c)  $200 \Omega m$  başlangıç değeriyle hesaplanan görünür öz direnç (log) derinlik kesidi.

### 3.6.2.4 Haritalar (Maps) Menüsü

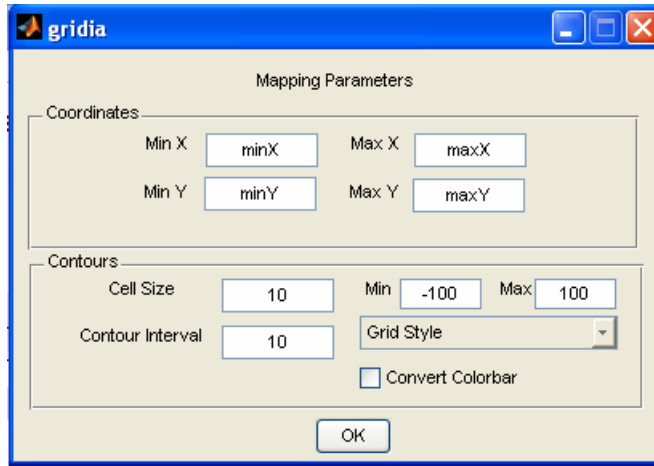


**Şekil 3.32** : Haritalar (Maps) menüsünün görünümü.

Şekil 3.32’de görülen ve programdaki bir diğer ana menü olan “Haritalar (Maps)” menüsü, “Ölçüm haritası (Post map)”, “Kontur haritaları (Contour maps)” ve “Yığılma profiller (Stacked Profiles)” olmak üzere üç ana gösterim biçimini içermektedir. Ölçüm haritasının oluşturulması ve örnek gösterimi önceki bölümlerde

anlatılmaktadır. Kontur haritaları alt menüsü, *VLFINTERP* programına girdi olarak verilen veri dosyasındaki parametrelere ve VLF-Elektromanyetik yöntemle özgü süzgeçlere ait kontur haritalarının görüntülenmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Verilen parametrelere ve süzgeçleme işleminin gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğine bağlı olarak, alt menüler kullanılabilir hale gelmektedir.

Programdan herhangi bir kontur haritası çizmesi istendiğinde, öncelikle, “Gridia” adlı arayüz açılmaktadır. Şekil 3.33’de görülen bu arayüzde, kontur haritasının çiziminde kullanıcıya seçim yapma özgürlüğü tanımak amacıyla çeşitli girdiler sorulmaktadır.

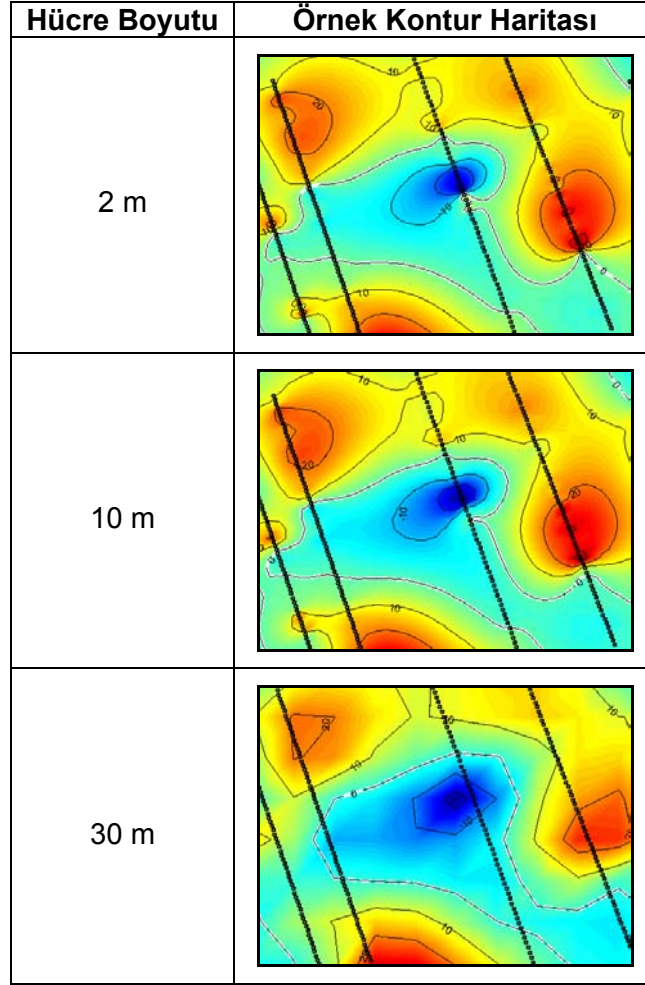


**Şekil 3.33** : Gridleme (Gridia) işlecinin görünümü.

Gridia arayüzünde yer alan ilk bölüm, koordinat seçimiyle ilgilidir. Bu bölümde, kontur haritasının özellikle görüntülenmek istenen bölümüne ait yatay ve dikey koordinatlar verilerek haritaların herhangi bir bölümüne yakından bakabilmek mümkündür. Bu sınırlar, kullanıcı tarafından girilmediği takdirde program, otomatik olarak tüm sahayı gösterecek koordinat aralıklarını seçmektedir. İkinci bölüm ise, kontur haritasının oluşturulması ile ilgili seçenekleri içermektedir. Hücre boyutu (Cell size) kutucuğu, haritanın oluşturulması sırasında gerçekleştirilen gridleme işlemi için adım aralığının belirlenmesine yöneliktir. Kullanıcı tarafından özel bir değer girilmediği sürece 10 m olarak alınmaktadır.

Gridleme işlemi özetle, programa girdi olarak verilen arazi verilerinden faydalanarak veri bulunmayan noktalar için veri üretme işlemidir. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere, hücre boyutu ne kadar küçük seçilirse gridleme işlemi sırasında seçilecek adım aralığı da o derece küçük olmaktadır. Uygun adım aralığı ile yapılan gridleme işleminde, veriler arasındaki boş alanlar mümkün olduğunca yeni veri uydurulmadan korunmaktadır. Ancak adım aralığının çok küçük seçilmesi durumunda çok miktarda yeni veri yaratılmakta, kullanılan bilgisayarın geçici hafızası (Random Access Memory, RAM), işlemin tamamının gerçekleştirilmesinde yeterli olmayabilmekte ya

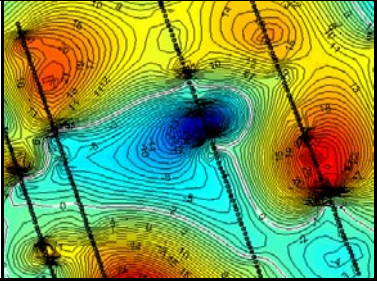
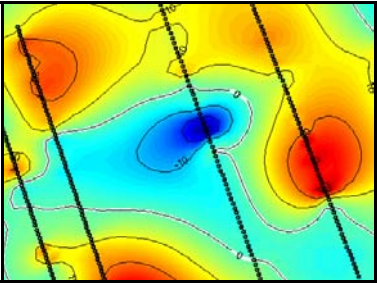
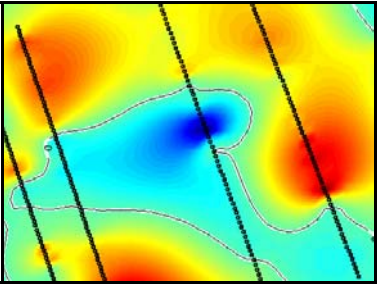
da işlemin gerçekleştirilmesi için gereken süre uzayabilmektedir. Adım aralığının çok büyük seçilmesi durumunda ise, gridleme işlemi sırasında tüm veriler etkin olarak kullanılmamakta ve bazı ayrıntıların gözden kaçırılması olasılığı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, optimum adım aralığı olarak, ölçümlerin alınması sırasında profiller için kullanılan ölçüm aralığının seçilmesi yerinde olmaktadır. Hücre boyutunun çok küçük, çok büyük ve ortalama değerler seçilmesi durumunda kontur haritalarında oluşabilecek değişimler Şekil 3.34'de görülmektedir.



**Şekil 3.34** : Farklı hücre boyutları seçilerek hazırlanan kontur haritalarına örnekler.

Aynı bölümde yer alan “Kontur aralığı (Contour interval)” girdisi, kontur haritası üzerinde görüntülenmek istenen kontur çizgilerinin aralığını ifade etmektedir. Herhangi bir değer verilmemesi durumunda program, bu aralığı 10 olarak seçmektedir. Verilerin küçük bir aralıkta değiştiği durumlarda kontur aralığının büyük seçilmesi, gerekli konturların görüntülenmemesine neden olmaktadır. Aralığın çok küçük seçilmesi durumunda ise, kontur haritasının görünümü karmaşık bir hal almakta ve yorumda güçlükler ortaya çıkmaktadır. “Kontur minimum (Contour min)” ve “Kontur maksimum (Contour max)” girdileri ise haritada görüntülenmesi istenen

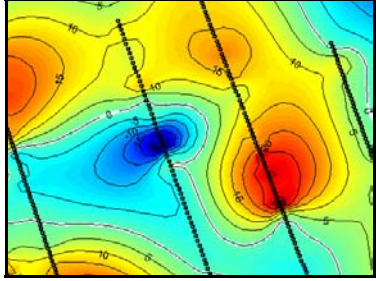
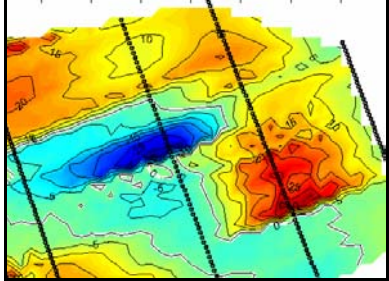
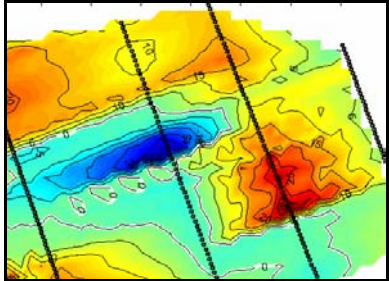
en küçük ve en büyük kontur değerlerini ifade etmektedir. Herhangi bir giriş yapılmadığında, program tarafından -100 ve +100 olarak seçilmektedir. Bu aralığın gerekenden geniş seçilmesi, anomalilerin renk ayrımı yoluyla görüntülenmesini güçleştirmektedir, dar seçilmesi durumunda ise, tüm veriler doğru biçimde görüntülenememektedir. Olası durumları gösteren örnek kontur haritaları Şekil 3.35'de görülmektedir.

Kontur Aralığı	Örnek Kontur Haritası
1	
10	
50	

**Şekil 3.35** : Farklı kontur aralıkları seçilerek hazırlanan kontur haritalarına örnekler.

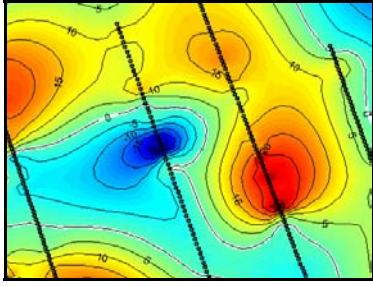
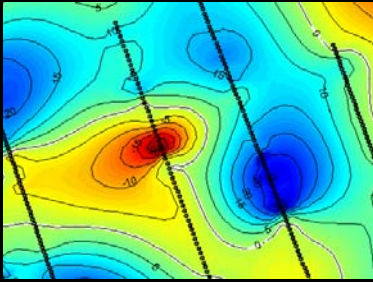
Şekil 3.33'de görülen "Grid biçimi (Grid style)" seçimli menüsü, kontur haritasının oluşturulması sırasında kullanılacak olan gridleme yönteminin seçimini içermektedir. Bu bölümde üç adet gridleme şekli bulunmaktadır. Bunlardan ilki olan "v4"; elle kontur çizimine yakın sonuçlar vermektedir. İkincisi olan "Cubic"; kübik interpolasyonla gridleme şeklidir. "Linear" ise doğrusal interpolasyona dayalı bir gridleme biçimidir. İki noktaya ait değerlerin ortalamasını alarak doğrusal bir ara değer oluşturmakta ve orta noktaya atamaktadır. Kübik ve lineer interpolasyonla gridleme yöntemlerinin avantajı; haritada profillerin bulunduğu alanın dışında kalan kısım için veri türetmemeleri, bu bölgeleri boş bırakmalarıdır. Böylece, ölçüm alanı

dışında sanal veri yaratılması engellenmektedir. Şekil 3.36'da bu üç farklı gridleme yöntemi kullanılarak hazırlanan kontur haritaları görülmektedir.

Gridleme Yöntemi	Örnek Kontur Haritası
v4	
Kübik interpolasyon	
Lineer interpolasyon	

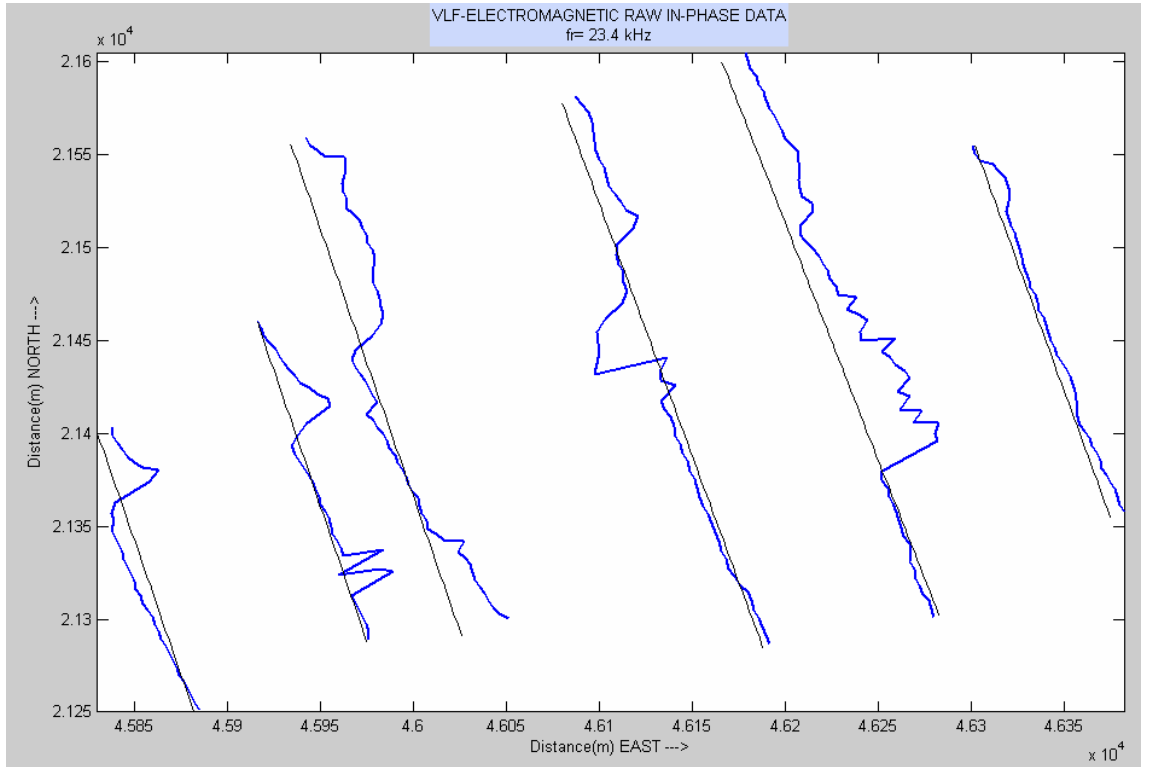
**Şekil 3.36** : Farklı gridleme teknikleri ile hazırlanan kontur haritalarına örnekler.

Şekil 3.33'de, son olarak, "Renk ölçeğini ters çevir" (Convert colorbar) seçeneği görülmektedir. Daha önce sözü edildiği gibi, VLF-Elektromanyetik yöntem yöne bağımlı olduğundan, değerlendirme aşamasında her zaman en büyük ya da en küçük değerler değerlendirme için kullanılmamaktadır. Ölçümlerin yönüne göre negatif olan değerler, ters yönde ölçümler alındığında pozitif hale gelebilmektedir. Bu durum gözönüne alınarak bu seçenek, gösterimlerde kolaylık sağlama bakımından gridleme işlecine eklenmiştir. Böylece, belirti olduğu düşünülen alanın, dikkat çekmesi bakımından, Şekil 3.37'deki gibi seçime bağlı olarak farklı renklerle gösterilmesi sağlanabilmektedir. Kontur haritalarının renklendirilmesi sırasında "jet" renk ölçeği seçilmiştir. Bu ölçek, maviden kırmızıya 64 farklı renk tonu ile görüntülenen parametrenin değişimlerini göstermektedir.

Renk Ölçeği	Örnek Kontur Haritası
Mavi (düşük) Kırmızı (yüksek)	
Kırmızı (düşük) Mavi (yüksek)	

**Şekil 3.37** : Farklı renk ölçekleri kullanılarak hazırlanan kontur haritalarına örnekler.

*VLFINTEP* programının içeriğinde bulunan alansal gösterim biçimlerinin üçüncüsü, yağma profilleridir. “Yağma profiller (Stacked profiles)” alt menüsü ile, program içinde kullanılan tüm veri biçimleri için yağma profil görünümünü elde etmek mümkündür.



**Şekil 3.38** : Yağma profillerin görünümü.

*VLFINTEP* programında benzerinden farklı olarak, profillerin tam doğu-batı doğrultusunda uzanmaları gerekmemektedir. Program, her bir profilin kuzeyle

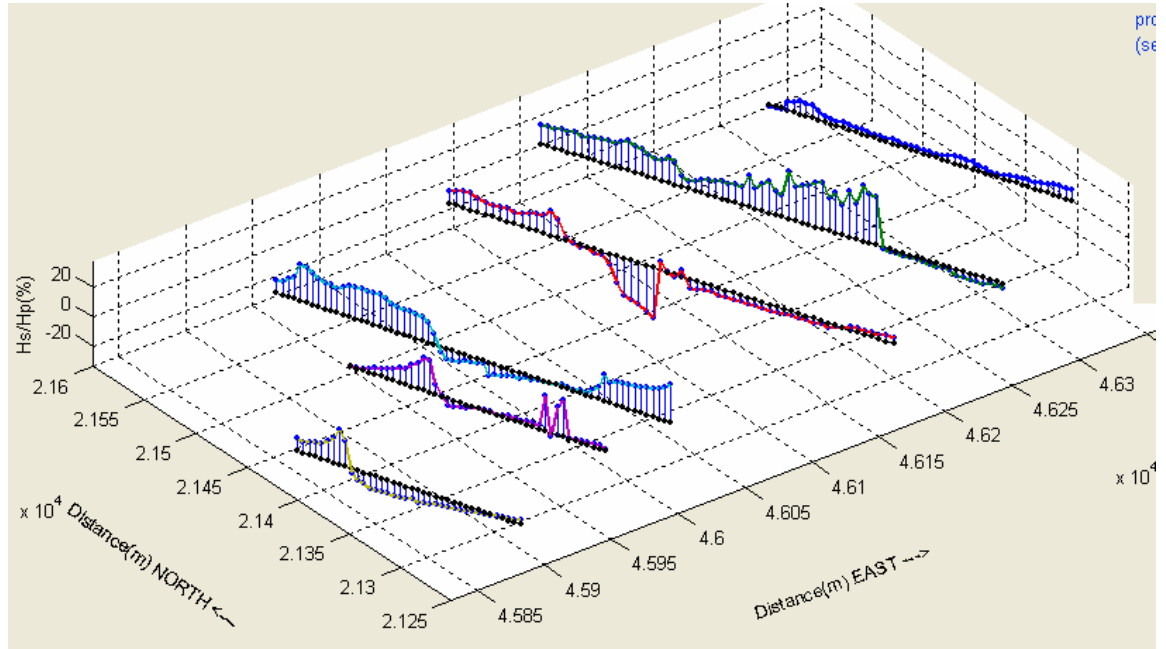
yaptığı açıyı hesaplamakta ve yığma işlemini, verinin bu açıya göre yatay ve düşey bileşenlerini hesaplayarak gerçekleştirmektedir. Şekil 3.38’de kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı gerçel bileşen yığma profilleri verilmektedir.

### 3.6.2.5 Blok Görünüm (Block View) Menüsü

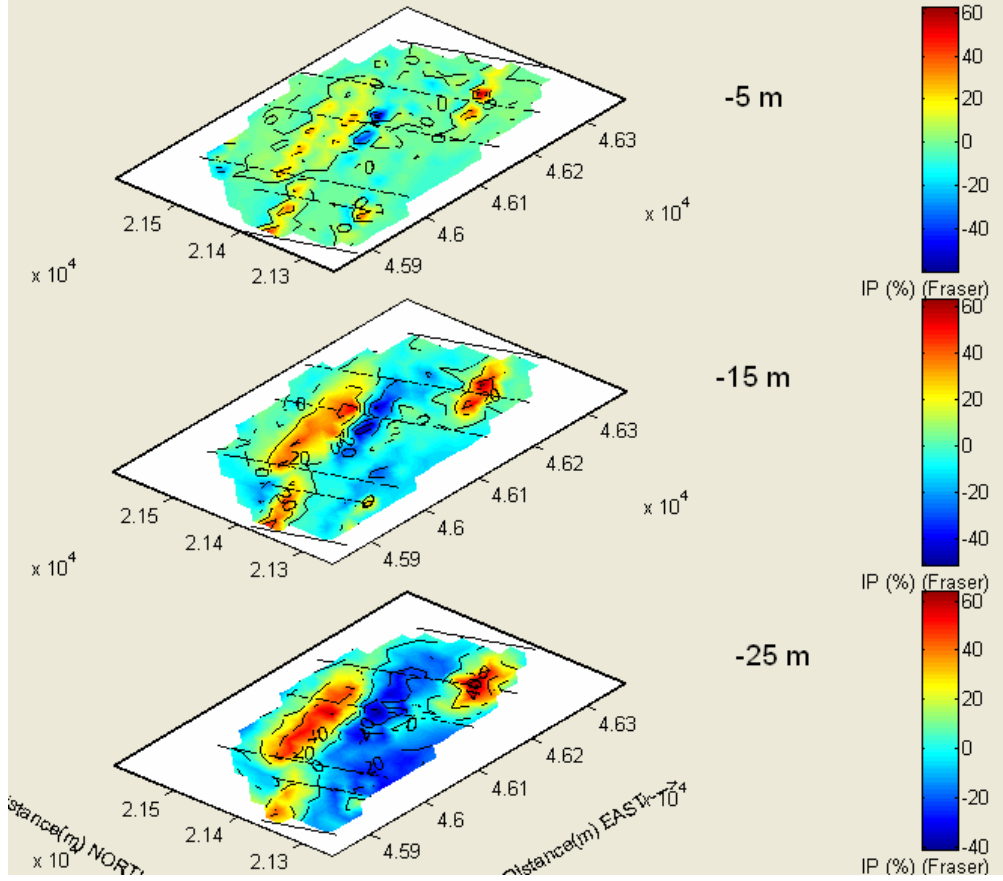


Şekil 3.39 : Blok görünüm (Block view) menüsünün görünümü.

VLFINTERP programının içeriğinde alansal gösterim biçimlerinin yanısıra, yorumlama işlemini kolaylaştırmak amacıyla verilerin blok görünümüleri ve kat haritaları da yer almaktadır. Şekil 3.39’da görülen “Blok görünüm (Block view)” menüsü, ham ve süzgeçlenmiş veriler için yığma profillerin gösterimine yönelik “Yığma profiller (Stacked profiles)” ve değerlendirmeye yönelik süzgeçler ile elde edilen verilerle hazırlanan “Kat haritaları (Layer maps)” alt menülerini içermektedir. Bu menü kullanılarak elde edilebilecek gösterim biçimlerine örnekler, Şekil 3.40 ve 3.41’de verilmektedir.



Şekil 3.40 : Yığma profillerin blok görünümü.



**Şekil 3.41** : Fraser süzgeci kullanılarak hazırlanan kat haritalarının görünümü.

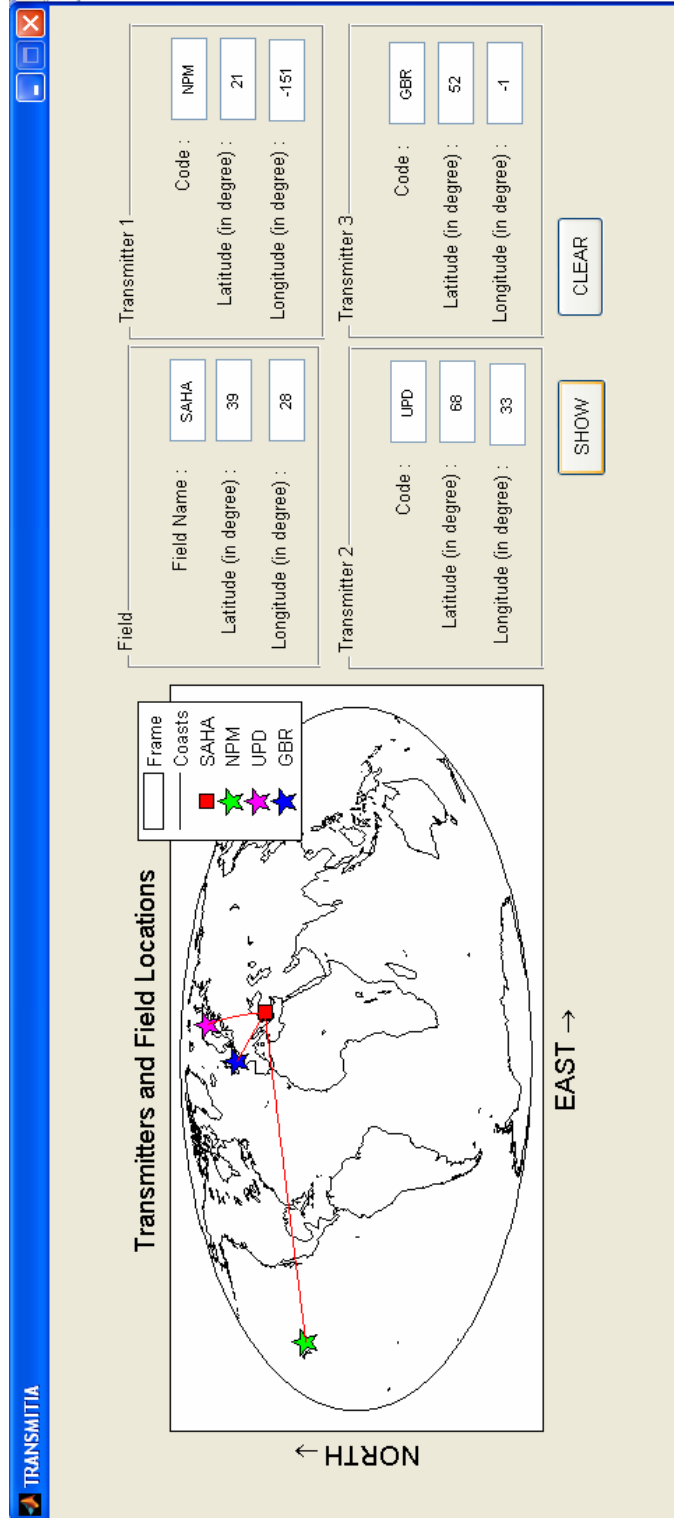
### 3.6.2.6 Modelleme (Modelia) Menüsü

*VLFINTERP* programı, bu bölüme kadar anlatılan ve VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesi ve sunumuna yönelik fonksiyonlarının yanısıra, üç farklı menü aracılığıyla, yöntemle ilgili çalışmaların kolaylaştırılmasını da sağlamayı amaçlamaktadır. Bu menülerden ilki, çeşitli yapı modelleri için tilt açısı ve elipsellik parametrelerinin hesaplanmasını amaçlayan modelleme işlecidir. Bu işlecin fonksiyonlarına yönelik bilgiler bir sonraki bölümde ayrıca anlatılmaktadır.

### 3.6.2.7 Kütüphane (Library) Menüsü

Daha önce de belirtildiği gibi, VLF-Elektromanyetik yöntem ölçümlerinin yapılması sırasında, kullanılacak vericilerin seçimi önem kazanmaktadır. Bu nedenle, ölçümler için gerekli pratik bilgileri içeren bir "Kütüphane (Library)" menüsü *VLFINTERP* programının içeriğinde yer almaktadır. Bu bölümde, çeşitli dökümanların yanısıra çalışma alanı ve seçilen üç farklı vericinin birbirlerine göre konumlarının görüntülenmesini sağlayan ve bağımsız bir pencerede çalışan bir işleç (Transmitia) bulunmaktadır. Dökümanlar arasında bulunan verici listesinden seçilebilecek koordinatların işlece girdi olarak verilmesi sırasında; koordinat değerleri dünya haritası üzerinde gösterileceğinden kuzey paralelleri ile doğu meridyenlerinin pozitif,

güney paralelleri ile batı meridyenlerinin negatif işaretli açı değerleri olarak kullanılması gerekmektedir. Böyle bir veri girişi ile elde edilen örnek harita Şekil 3.42'de verilmektedir.



Şekil 3.42 : Örnek bir çalışma alanının seçilen üç farklı vericiye göre konumunu gösterir harita.

### **3.6.2.8 Yardım (Help) Menüsü**

Son olarak *VLFINTERP* programı, kullanımını kolaylaştırmak amacıyla hazırlanmış yardım metinlerinin bulunduğu bir “Yardım (Help)” menüsünü de içermektedir. Bu menüde, *VLFINTERP* programının kullanımına yönelik yardım dosyaları \*.pdf formatında verilmektedir. Programın ana ekranında görüntülenen aktif yardım metinlerinin içerikleri ayrıntılı olarak açıklanmakta ve elde edilen grafik, kesit ve kontur haritalarının yorumlanmasına yönelik fiziksel esaslar verilmektedir.

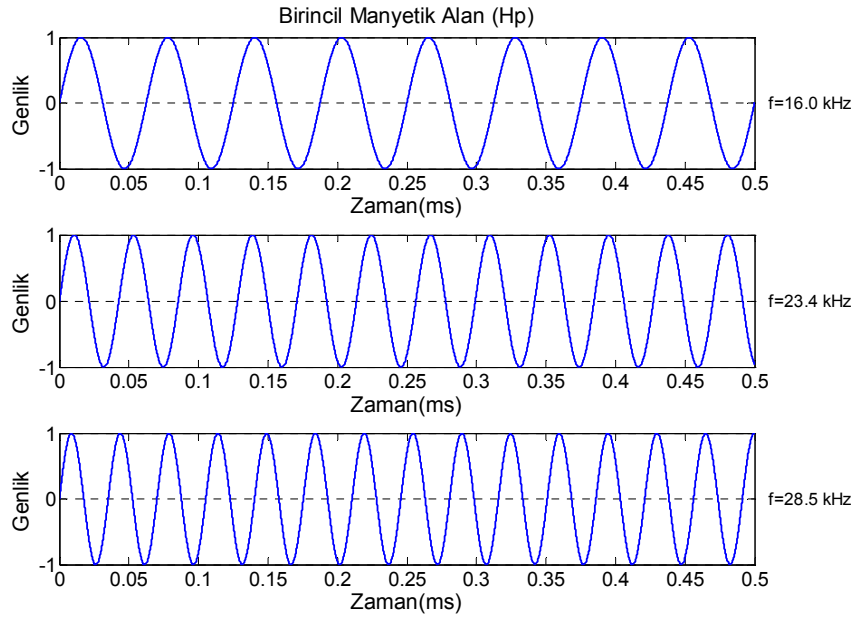
#### 4. VLFINTERP, İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI İLE MODELLEME

##### 4.1 Kaynak Alanlar ve İkincil Alanlar

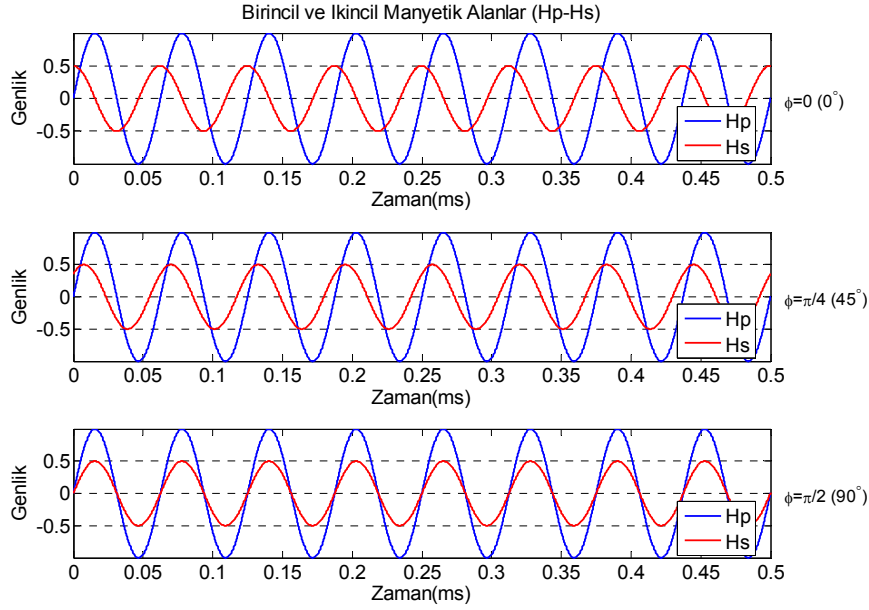
VLFINTERP programında yer alan modelleme işleci, iki ana başlık içermektedir; bunlardan ilki, kaynak alanlar ve bu alanlara bağlı olarak birincil ve ikincil alanlar arasındaki faz kaymasının ( $\phi$ ) çeşitli değerleri için ikincil alanların modellenmesidir.

$$H_p = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.1)$$

Kaynak alanlar, (4.1) denkleminde ifade edildiği gibi bir sinüzoidal dalga davranışına uymaktadır. Bu denklemde A, vericinin biçimine ve özelliğine bağlı bir katsayıyı,  $\omega$ , açısal frekansı ( $2\pi f$ ), t, zamanı ifade etmektedir. Şekil 4.1'de 16.0, 23.4 ve 28.5 kHz frekansları için hesaplanmış kaynak alanlar görülmektedir.



Şekil 4.1 : 16.0, 23.4 ve 28.5 kHz'lik birincil manyetik alanlar.



**Şekil 4.2 :** 16.0 kHz'lik birincil ve ikincil manyetik alanların  $\phi$  açısına bağlı değişimleri.

Daha önce de bahsedildiği gibi, VLF vericisinden yayınlanan birincil elektromanyetik alanın, vericiden uzaklarda düzlem dalga prensibine uyduğu varsayıldığından, sadece yeryüzeyine paralel olarak yayıldığı kabul edilebilmektedir. Birincil elektromanyetik alanın yer içine nüfuzu sırasında, ortamın iletkenliği nedeniyle Eddy akımları indüklenmekte, böylece, kaynak alana dik bir ikincil alan yaratılmaktadır. Bu durumda, kaynak ve ikincil elektromanyetik alanlar arasında doğal olarak  $90^\circ$ 'lik bir faz kayması oluşmaktadır. Ortamda özel bir iletken yapının varlığı durumunda bu faz kayması ve ikincil elektromanyetik alanın şiddeti, iletkenin boyutlarına ve ortamdaki öz direnç kontrastına bağlı olarak artmaktadır.

$$H_s = B \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi\right) = B \cdot \cos(\omega t - \phi) \quad (4.2)$$

Sözü edilen ikincil elektromanyetik alan, matematiksel olarak (4.2) numaralı denklemde verilen biçimde ifade edilmektedir. Bu denklemde, B, ortamdaki öz direnç kontrastına ve yapının geometrik özelliklerine bağlı bir katsayıyı,  $\omega$ , açısal frekansı ( $2\pi f$ ), t, zamanı ifade etmektedir.

Aynı ortamda yayılan iki elektromanyetik alanın birbirlerine göre durumlarının bilinmesi halinde, vektörel toplamlarını ve bu toplama ait bileşenleri de hesaplamak mümkün olabilmektedir. Kaynak (birincil) alan, yeryüzeyine paralel olarak yayıldığından sadece yatay bileşene sahiptir. İkincil alan, ortamda özel bir iletken yapı olmaması durumunda birincil alanla  $90^\circ$ 'lik açı yaptığından, sadece düşey

bileşene sahip olmaktadır. Bu durumda toplam manyetik alan, aralarında dik açı bulunan iki vektörün toplanması biçiminde hesaplanabilir. Ancak ortamda özel bir iletkenin bulunması durumunda iki manyetik alan arasındaki faz kayması ( $90^\circ + \phi$ ),  $90^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında değişmektedir. Faz kayması  $180^\circ$ 'ye ulaşana dek ikincil alanın hem yatay hem düşey bileşenleri bulunmakta, faz kayması  $180^\circ$ 'ye ulaştığında ikincil alan da sadece yatay bileşene sahip olmakta ve toplam manyetik alan şiddeti de en büyük değerine ulaşmaktadır.

VLF elektromanyetik alanı, yer içinde ulaşabildiği en derin noktadan yüzeye doğru, karşılaştığı tüm iletken yapılar içinden geçerken ikincil alanlar indükleyerek seyahatine devam eder. Bu sırada, yeryüzünde bir alıcı ile ortamdaki elektromanyetik alan şiddeti ölçülmesi durumunda, elde edilecek değer birincil ve ikincil alanların toplamından oluşacaktır.

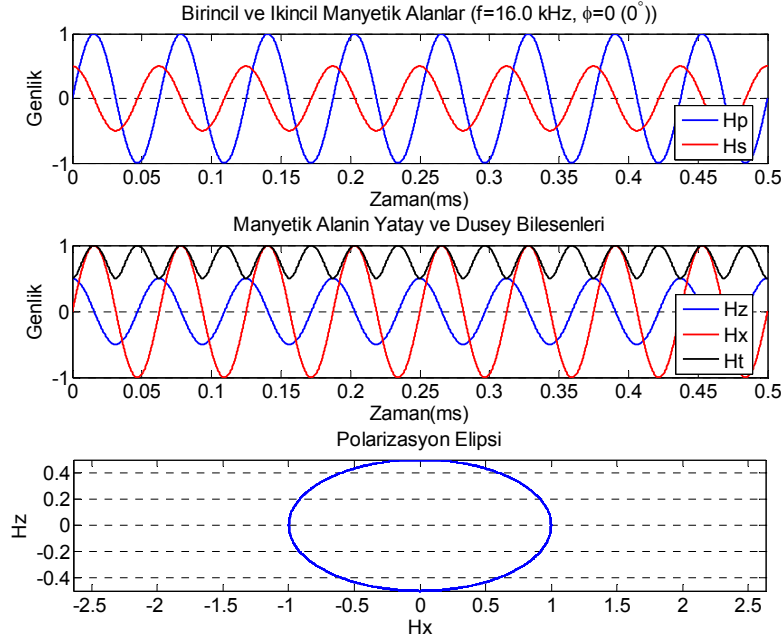
$$H_x = H_p + H_s \cdot \sin(\phi) \quad (4.3)$$

$$H_z = H_s \cdot \cos(\phi) \quad (4.4)$$

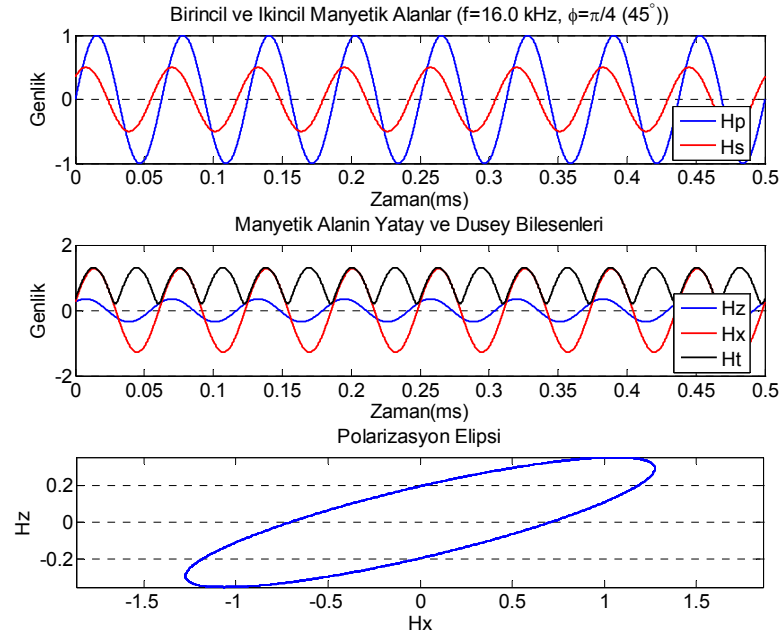
$$H_t = \sqrt{H_x^2 + H_z^2} \quad (4.5)$$

Toplam manyetik alan vektörünü oluşturan yatay ve düşey bileşenler, birincil ve ikincil alan şiddetleri ile aralarındaki açının bilinmesi durumunda (4.3), (4.4) ve (4.5) denklemleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Denklemlerden de anlaşılacağı gibi, birincil alanın sadece yatay yönde ilerlediği varsayıldığından, düşey bileşeni yoktur. Bu nedenle toplam manyetik alanın düşey bileşeni, sadece ikincil alan tarafından yaratılmaktadır.

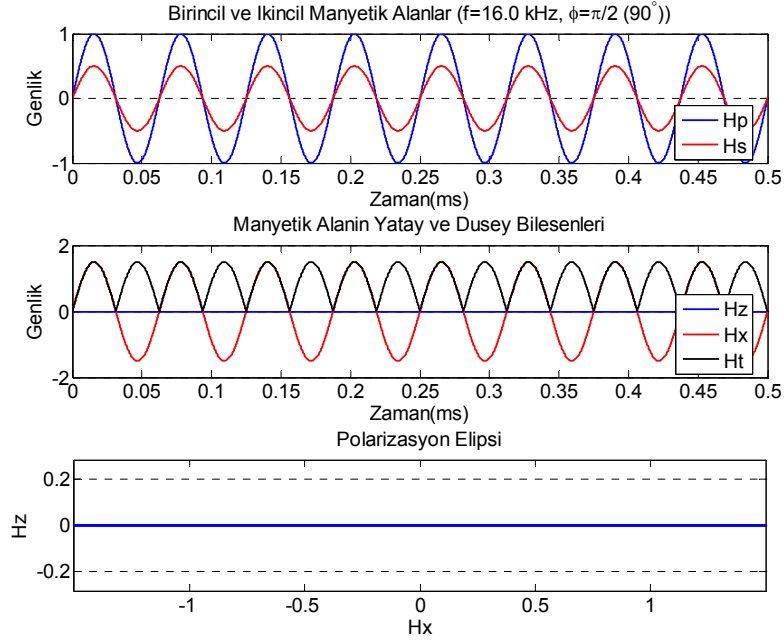
Bu denklemlerde;  $H_x$ , toplam manyetik alanın yatay bileşenini,  $H_z$ , toplam manyetik alanın düşey bileşenini,  $H_p$ , birincil (primary) manyetik alanı,  $H_s$ , ikincil (secondary) manyetik alanı,  $\phi$ , birincil ve ikincil alanlar arasındaki açığı ( $90^\circ + \phi$ ),  $H_t$  ise toplam manyetik alanı ifade etmektedir. İzleyen şekillerde çeşitli faz kayması ( $\phi$ ) değerleri için 16.0 kHz frekanslı bir manyetik alanın bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumları görülmektedir.



**Şekil 4.3:** Ortamda iyi bir iletken olmaması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 0^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu.



**Şekil 4.4 :** Ortamda iyi bir iletken olması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 45^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu.

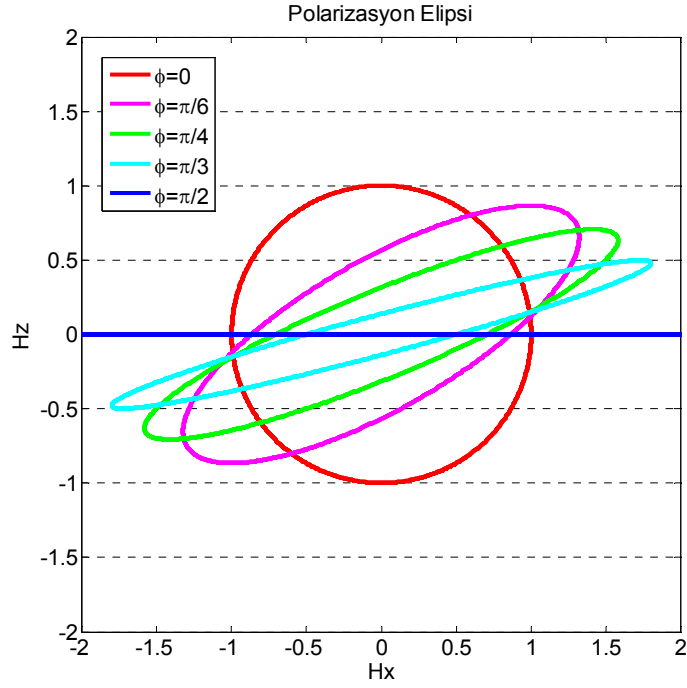


**Şekil 4.5 :** Ortamda çok iyi bir iletken olması durumunda ( $\phi = 90^\circ + 90^\circ$ ), 16.0 kHz frekanslı birincil ve ikincil manyetik alanlar ile toplam manyetik alan bileşenleri ve polarizasyon elipsinin durumu.

Bir iletken yakınında polarizasyon elipsinin biçimi, iletkene olan yatay mesafeye göre değişmekte, toplam manyetik alan vektörü zamanın fonksiyonu olarak döndüğünden polarizasyon elipsi de dönmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, ortamda özel bir iletken yapının hiç olmaması durumunda bile, birincil ve ikincil alanlar arasında  $90^\circ$ ’lik doğal bir faz kayması oluşmakta ve bu durumda, toplam manyetik alanın yatay bileşeni sadece birincil alan, düşey bileşeni ise sadece ikincil alan tarafından yaratılmaktadır.

İdeal bir yaklaşımla, birincil ve ikincil alanların genliklerinin eşit olduğu varsayıldığında, toplam manyetik alanın yatay ve düşey bileşenlerinin değerleri de eşit olmaktadır. Bu durumda, bu bileşenleri temsil eden polarizasyon elipsinin “a” ve “b” eksenlerinin eşit olduğu hale ulaşılmaktadır. Sonuç olarak, ortamda özel bir iletken yapının bulunmaması durumunda, polarizasyon elipsi, her iki eksenini eşit bir elipse (daireye) dönüşmekte ve bu elipsin yatayla yaptığı açı olan eğim açısı da  $0^\circ$  olmaktadır. Ortamda çok iyi iletken bir yapının bulunması durumunda, birincil ve ikincil alanlar arasındaki toplam faz kayması  $180^\circ$ ’ye ulaştığından toplam manyetik alan vektörünün sadece yatay bileşeni bulunmaktadır. Bu halde, toplam manyetik alanın düşey bileşeni sıfır olduğundan polarizasyon elipsinin “b” ekseninin boyu da sıfır olmaktadır. Böyle bir ortamda oluşan polarizasyon elipsinin elipselliği ( $b/a$ ) de sıfır değerine ulaşmakta ve polarizasyon elipsi düz bir çizgi halini almakta, eğim açısı da  $90^\circ$  olmaktadır. Sonuç olarak birincil ve ikincil alanlar arasındaki faz

kayması ( $\phi$ )  $90^\circ$  ile  $180^\circ$  derece arasında değişirken polarizasyon elipsinin elipselliği 1'den 0'a, eğim açısı ( $\theta$ )  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye, biçimi de daireden düz bir çizgiye dönüşmektedir. Şekil 4.6'da çeşitli faz kayması ( $\phi$ ) değerleri için hesaplanmış polarizasyon elipslerinin karşılaştırmalı bir gösterimi verilmektedir.



**Şekil 4.6 :** Ortamda çeşitli yapıların bulunması durumunda polarizasyon elipsinin  $\phi$  açısına bağlı değişimi.

## 4.2 Polarizasyon Elipsinin Değiştirgenlerinin Modellenmesi

### 4.2.1 Çizgisel Kaynak (Line Source) Modeli

Bu bölümde, basit bir yaklaşımla, bir çizgisel kaynak (line source) üzerinde ölçülebilecek VLF-Elektromanyetik yöntem belirtisi hesaplanmaktadır. Yeraltında derinliği  $z$  olan ve içinden akım geçen sonsuz uzunlukta bir kablo bulunması durumunda (Şekil 4.7), böyle bir kaynağın tam üzerinde ( $x=0$  noktasında), ölçülecek manyetik alanların oranının bilinmesi halinde, bu noktanın uzağındaki herhangi bir noktada (P noktası), ölçülecek manyetik alanların oranı (4.6) numaralı denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir (**Paterson ve Ronka, 1971**).

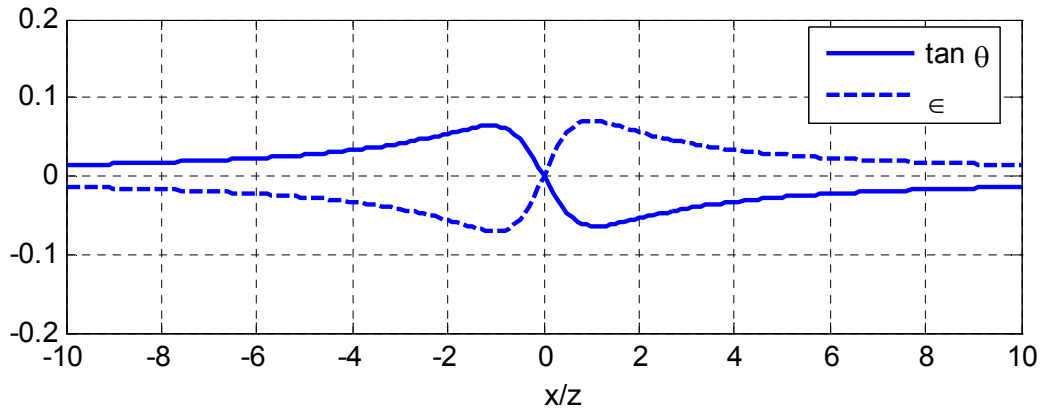


(4.8) ve (4.9) denklemleri kullanılarak elde edilen model eğriler için, polarizasyon elipsinin eğim açısı (tilt açısı) ve elipselliğinin genlikleri ( $\theta_{\max}$  ve  $\epsilon_{\max}$ ) ile eğride sıfır geçişinin olduğu bölümler, verilerin değerlendirilmesinde önemli hale gelmektedir (Şekil 4.8). Ayrıca tilt açısı eğrisinin en büyük ve en küçük değerleri arasındaki yatay mesafe ( $\Delta x$ ) değeri, yaklaşık derinlik kestiriminde kullanılmaktadır.

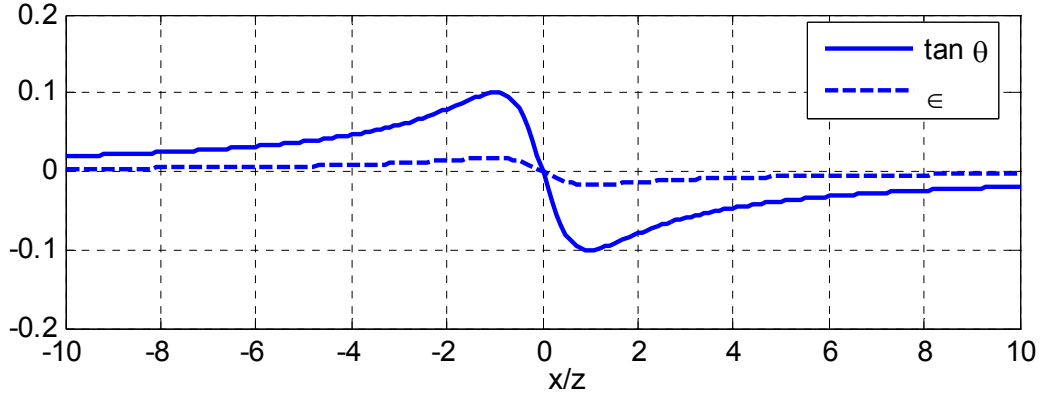
$$z \cong \frac{\Delta x}{2} \quad (4.10)$$

Bu bölümde anlatılan çizgisel kaynak modeli için derinlik kestirimi (4.10) denklemi ile verilmektedir (**Paterson ve Ronka, 1971**). Bu denklemde;  $\Delta x$ , en büyük ve en küçük genlik değerlerinin olduğu ölçüm noktaları arasındaki yatay mesafe ve  $z$ , çizgisel kaynağın yaklaşık derinliğidir.

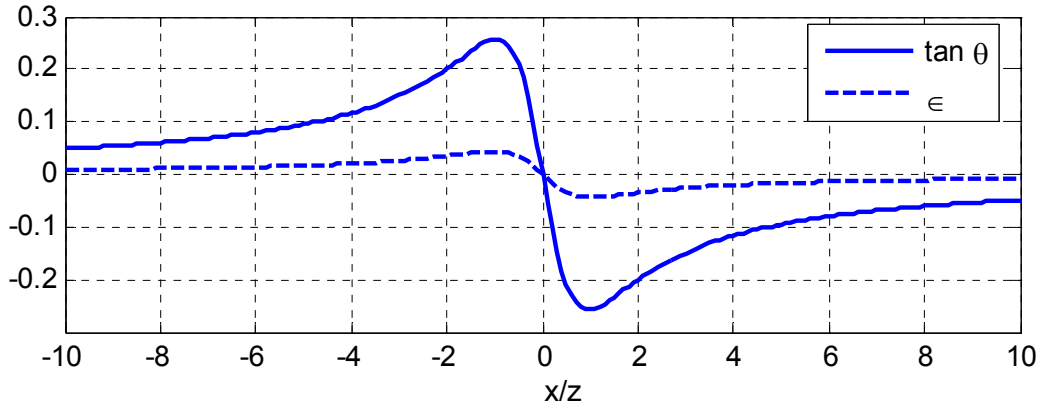
Çizgisel bir kaynak üzerinde elde edilebilecek belirtinin biçimi ve genliği, ortamdaki öz direnç kontrastına bağlı olarak değişmektedir, bu değişimlerin incelenmesi amacıyla **Paterson ve Ronka (1971)**'da verilen parametreler kullanılarak model eğriler hesaplanmış ve izleyen şekillerde verilmiştir. Zayıf iletken bir ortamda iyi iletken bir kaynak olması durumunda, yani ortamdaki öz direnç kontrastı çok büyük değil ise elde edilen eğriler Şekil 4.9'daki gibi olmaktadır. İletken olmayan bir ortamda bulunan zayıf iletken bir yapının model eğrileri ise Şekil 4.10'da, aynı ortamda kaynak alan şiddetinin büyük olması durumunda eğrilerin genliklerindeki değişim Şekil 4.11'de verilmektedir.



**Şekil 4.9** : Zayıf iletken bir ortamda iyi iletken bir kaynak olması durumunda hesaplanan model eğriler.

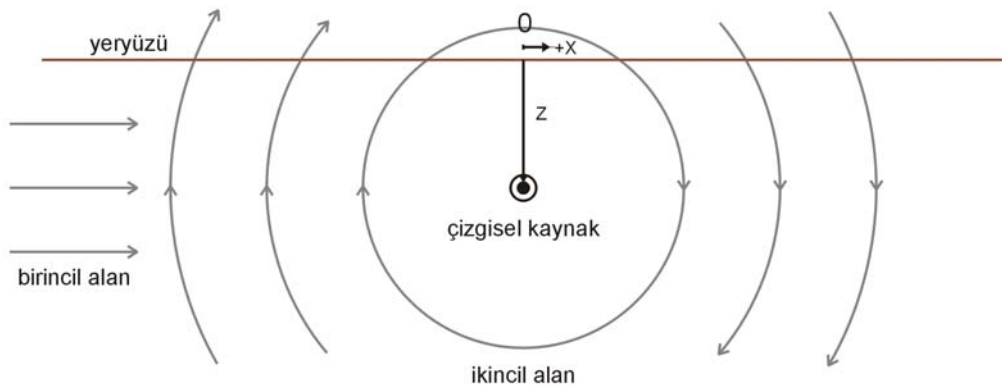
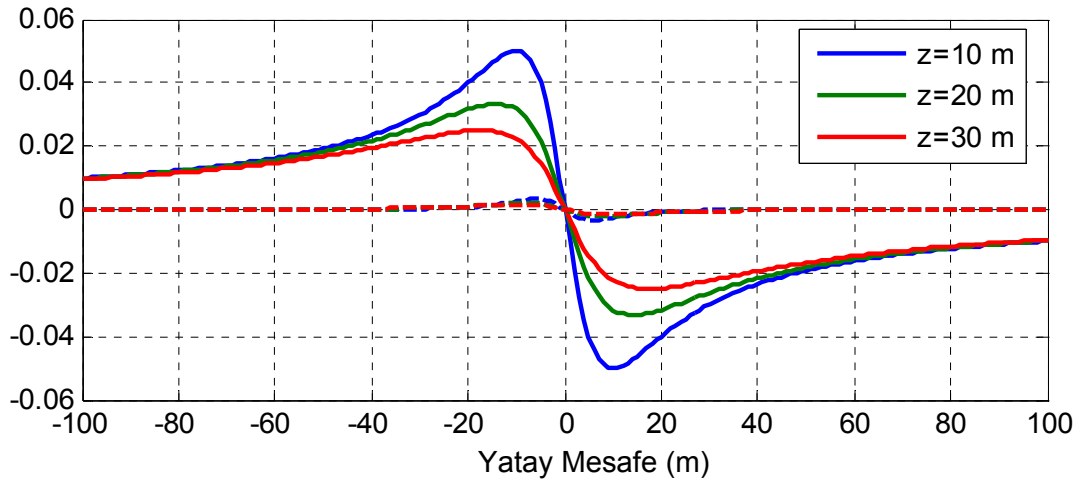


**Şekil 4.10 :** İletken olmayan bir ortamda zayıf iletken bir kaynak olması durumunda hesaplanan model eğriler.



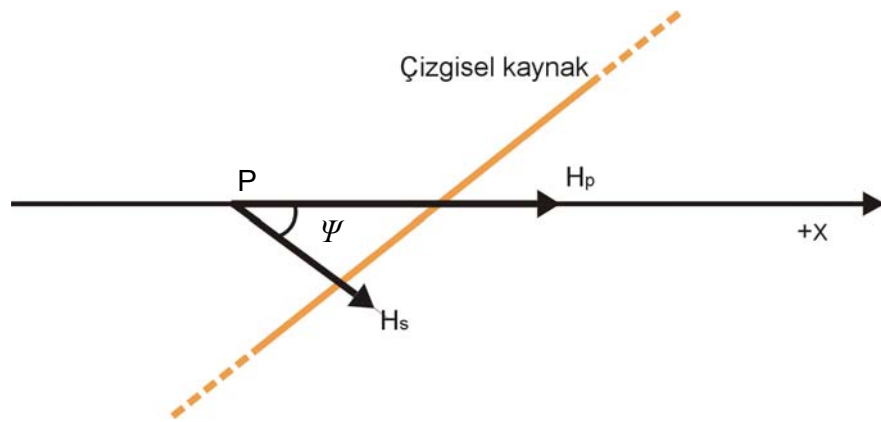
**Şekil 4.11 :** İletken olmayan bir ortamda zayıf iletken bir kaynak olması ve kaynak alan şiddetinin artması durumunda hesaplanan model eğriler.

Aynı fiziksel özelliğe sahip ancak farklı derinliklerde bulunan çizgisel kaynaklar için hesaplanan model eğriler, Şekil 4.12’de verilmektedir. Bu model eğrilerde, polarizasyon elipsinin eğim açısının tanjantı ( $\tan \theta$ ) değerleri düz çizgi, elipsellik ( $\epsilon$ ) değerleri ise kesikli çizgi ile gösterilmektedir. Polarizasyon elipsinin eğim açısı, ikincil alanın birincil alana oranının gerçel bileşeni (in-phase, IP) ile ve elipselliği de sanal bileşeni (out-of-phase, quadrature, OP) ile önceki bölümlerde anlatıldığı biçimde ilişkilidir. Çizgisel kaynağın derinliği, gerçel bileşen ve eğim açısı eğrilerinin en büyük ve en küçük değerleri arasındaki yatay mesafenin yarısı alınarak hesaplanabilmektedir.



**Şekil 4.12** : Farklı derinliklerde bulunan çizgisel kaynaklar için hesaplanmış model eğriler (kesikli çizgiler elipsellik, düz çizgiler  $\tan \theta$  değerlerini göstermektedir).

Daha önce de sözü edildiği gibi, en uygun belirti şeklini elde etmek için, VLF-Elektromanyetik yöntemde ölçülen profilin, uzanım biçimindeki yapının doğrultusuna dik doğrultuda seçilmesi gerekmektedir. Ancak, yeraltındaki jeolojik yapının uzanımını her zaman bilmek ya da yüksek doğrulukla tahmin etmek mümkün olmadığından, bu ideal durum, saha çalışmalarında çoğunlukla sağlanamamaktadır.



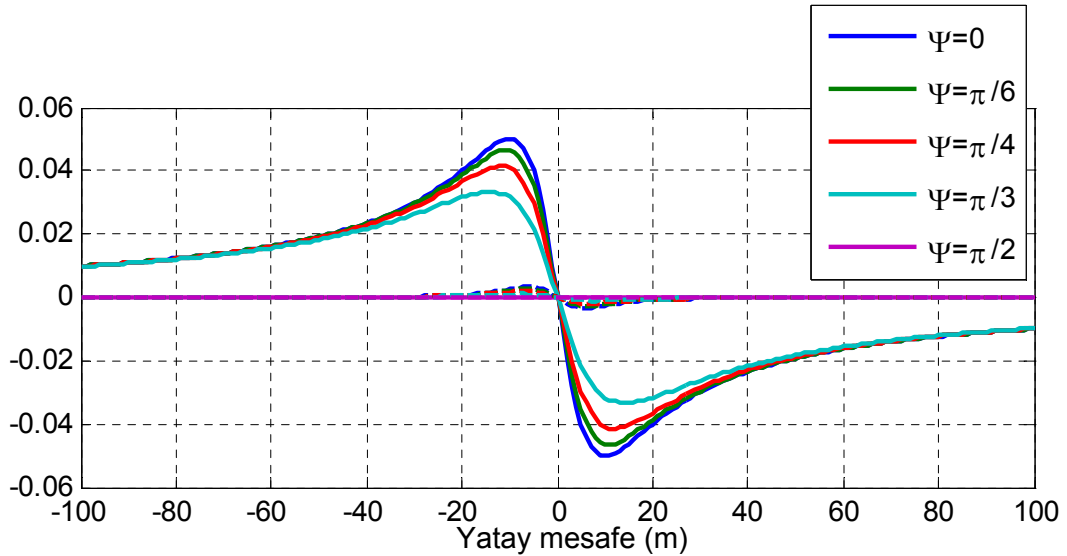
**Şekil 4.13** : Çizgisel kaynak ve ölçüm profilinin doğrultularının plan görünümü (Paterson ve Ronka (1971)'dan yeniden çizilerek alınmıştır).

Seçilen ölçüm profillerinin doğrultularının iletkenin uzanım doğrultusu ile tam dik açı yapmaması durumunda, açının diklikten sapma miktarına, “azimut açısı ( $\Psi$ )” adı verilmektedir. Bu durumda, belirtilerde çeşitli değişimler gözlenmektedir. İdeal durumdan farklı olarak, en büyük ve en küçük genlikler ile sıfır geçişi arasındaki mesafeler farklı olmakta, belirti eğimli bir yapı göstermektedir.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{x \cos \psi}{z}\right) \quad (4.11)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left[\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_p \sin \alpha \cos \phi + \left(\frac{H_s}{H}\right)_p \frac{\sin 2\alpha \cos \psi \sin \phi}{2}\right] \quad (4.12)$$

Şekil 4.13’de plan görünümü verilen bir ortamda, azimut açısının değişen değerleri için belirtiler (4.11) ve (4.12) numaralı denklemler ile hesaplanabilmektedir (**Paterson ve Ronka, 1971**). Bu denklemlerde  $\psi$ , azimut açısını ifade etmektedir. Diğer değişirgenler önceki denklemlerde açıklandığı gibidir.

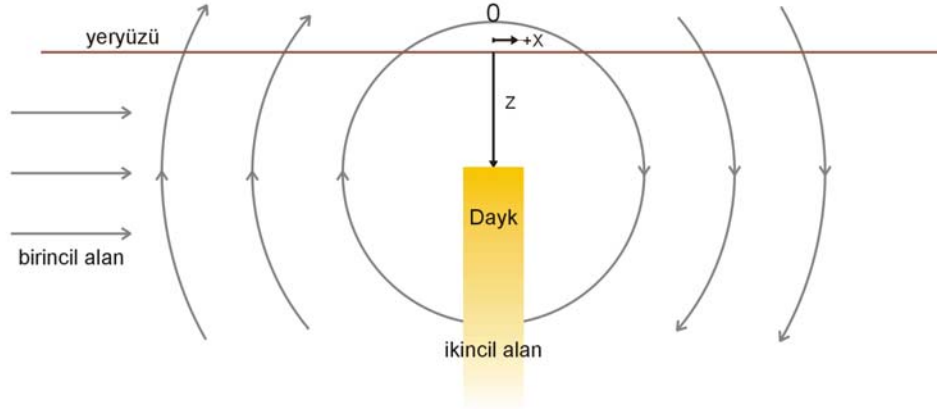
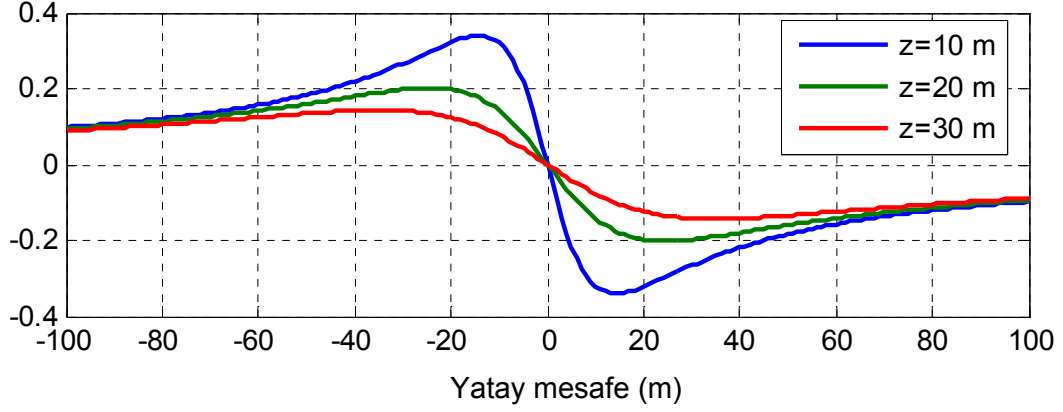


**Şekil 4.14** : Azimut açısının farklı değerleri için hesaplanmış model eğriler (kesikli çizgiler elipsellik, düz çizgiler  $\tan \theta$  değerlerini göstermektedir).

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak, farklı azimut açısı değerleri için hesaplanmış model eğriler, Şekil 4.14’de verilmektedir. Bu şekilde, düz çizgiler, tilt açısının tanjantını ( $\tan \theta$ ), kesikli çizgiler ise elipsellik ( $\epsilon$ ) değerlerini ifade etmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, azimut açısı  $0^\circ$  iken elde edilen model eğri, önceki eğrilerle aynıdır, azimut açısı  $90^\circ$ ’ye yaklaştıkça profil ile yapının uzanım doğrultuları da birbirine yaklaşmakta, belirtilerin genliği düşmekte, en büyük ve en küçük değerleri arasındaki yatay mesafe artmaktadır. Bu nedenle, azimut etkisinin



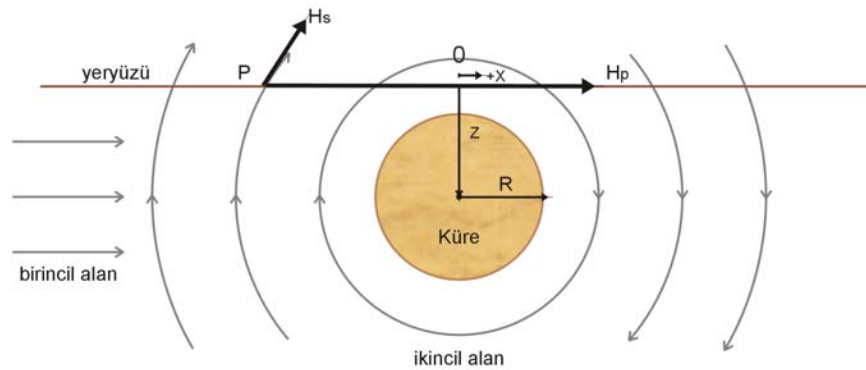
sokulumun üst yüzeyinin derinliği arttıkça hesaplanan model eğrinin dalga boyu da artmaktadır. Sokulum modeli için yaklaşık derinlik hesabı, çizgisel kaynak gibi yapılmaktadır. Eğrilerin en büyük ve en küçük genlik değerlerinin olduğu noktalar arasındaki mesafenin ( $\Delta x$ ) yarısı, derinlik değerlerine karşılık gelmektedir.



**Şekil 4.16 :** Farklı derinliklerde bulunan sokulum modelleri için hesaplanmış tilt açısı değerlerini gösteren model eğriler.

#### 4.2.3 Küre Modeli

Bu bölümde, son olarak, merkezi yeryüzeyinden  $z$  kadar derinde bulunan  $R$  yarıçaplı bir küre için tilt açısı (polarizasyon elipsinin eğimi,  $\theta$ ) değerlerinin değişimi modellenmektedir. Küre yapıyı oluşturan jeolojik birimin ortamın genelinden daha iletken olması durumunda belirtinin algılanması mümkün olmaktadır.



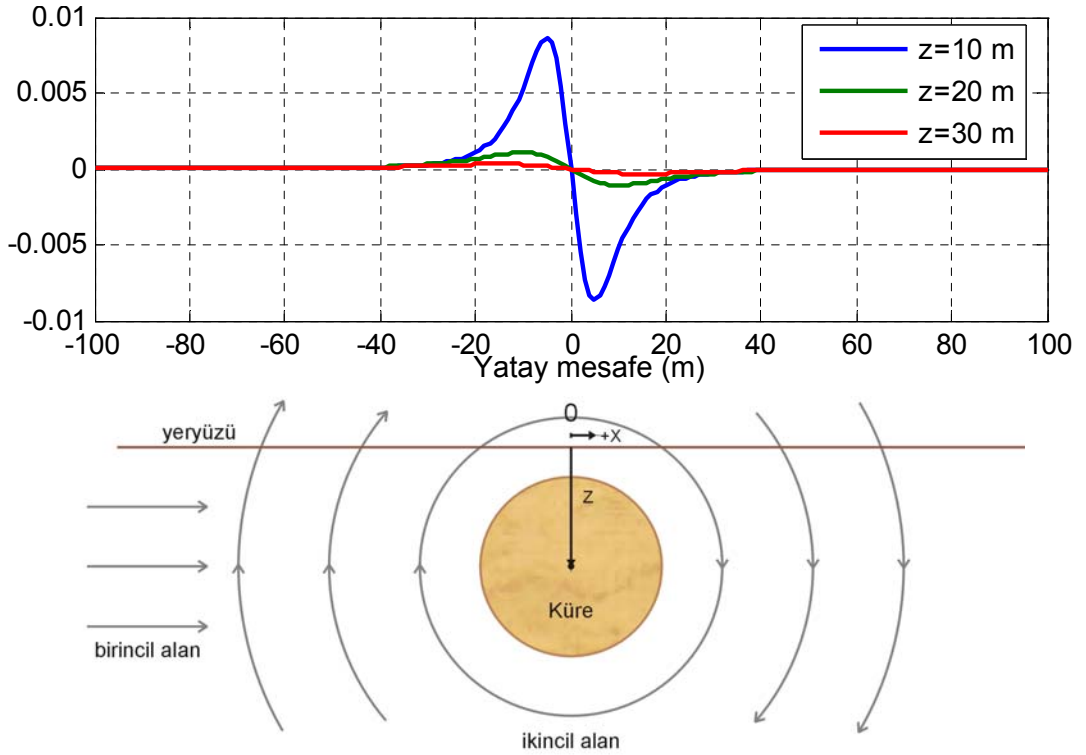
**Şekil 4.17 :** Küre modeli ve değişirgenlerinin şematik gösterimi.

$$H_{sx} = kH_0 \frac{(2x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (4.16)$$

$$H_{sz} = kH_0 \frac{3xz}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (4.17)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{H_{sz}}{H_{sx} + H_0} \right) = \tan^{-1} \left[ \frac{3kxz}{k(2x^2 - z^2) + (x^2 + z^2)^{5/2}} \right] \quad (4.18)$$

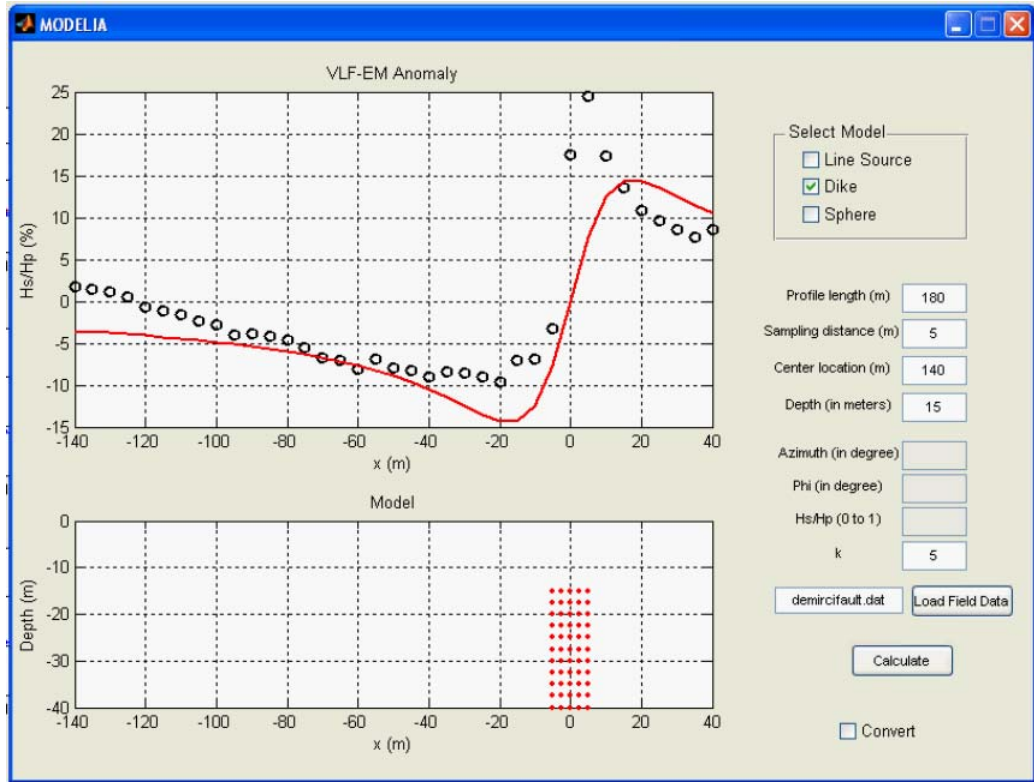
Şekil 4.17’de görüldüğü gibi kürenin merkezinin yeryüzeyine izdüşümü, yatay mesafenin sıfır noktası olmak üzere, bir kaynak alan şiddetine ( $H_0$ ) bağımlı olarak tilt açısı değerleri yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (**Fraser, 1969**). Denklemlerde  $k$ ; iletkenin boyutuna ve ortamdaki özdirenç kontrastına bağlı ( $R^8/2$  değeri ile ilişkili) bir katsayıyı,  $x$ ; hesaplama profili boyunca değişen yatay mesafe değerlerini ifade etmektedir. Şekil 4.18’de, farklı  $z$  değerleri için hesaplanmış model eğriler görülmektedir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi, kürenin merkezinin derinliği arttıkça hesaplanan model eğrinin dalga boyu da artmaktadır. Eğrilerin en büyük ve en küçük değerlerinin oluştuğu noktalar arasındaki mesafeler, derinlik değerlerine karşılık gelmektedir.



**Şekil 4.18** : Farklı derinliklerde bulunan küre biçimli yapılar için hesaplanmış tilt açısı değerlerini gösteren model eğriler.

#### 4.2.4 Model Eğriler ile Saha Verisinin Karşılaştırılması

*VLFINTERP* programının içeriğinde bulunan modelleme işleci, bu bölüme kadar anlatılan hesaplamaların yanısıra, herhangi bir saha verisi üzerine hesaplanan model eğrinin çizilmesine ve karşılaştırmalı olarak değerlendirme yapılmasına olanak vermektedir. Böyle bir gösterim oluşturabilmek için, daha önce sözü edilen modellerden uygun olanı seçilerek, saha verisi üzerinden en büyük ve en küçük genlik değerleri arasındaki açıklık ( $\Delta x$ ) belirlenerek yaklaşık derinlik kestirimi yapılması gerekmektedir. Her model yapı için daha önce açıklanan parametrelerin programa verilmesiyle istenen yapının model eğrisi hesaplanarak saha verisi üzerinde gösterilmektedir. Şekil 4.19'da, Demirci fayı üzerinde, 23.4 kHz frekansında ve 5 m ölçüm aralığı ile ölçülmüş veri ile sokulum modeli için hesaplanan model eğri görülmektedir. Şekilde, saha verisi noktalarla, derinlik değerinin derinlik kestiriminden 15 m, k katsayısının da 5 seçilmesi ile hesaplanmış tilt açısı değerlerini içeren model eğri de düz çizgi ile gösterilmiştir.



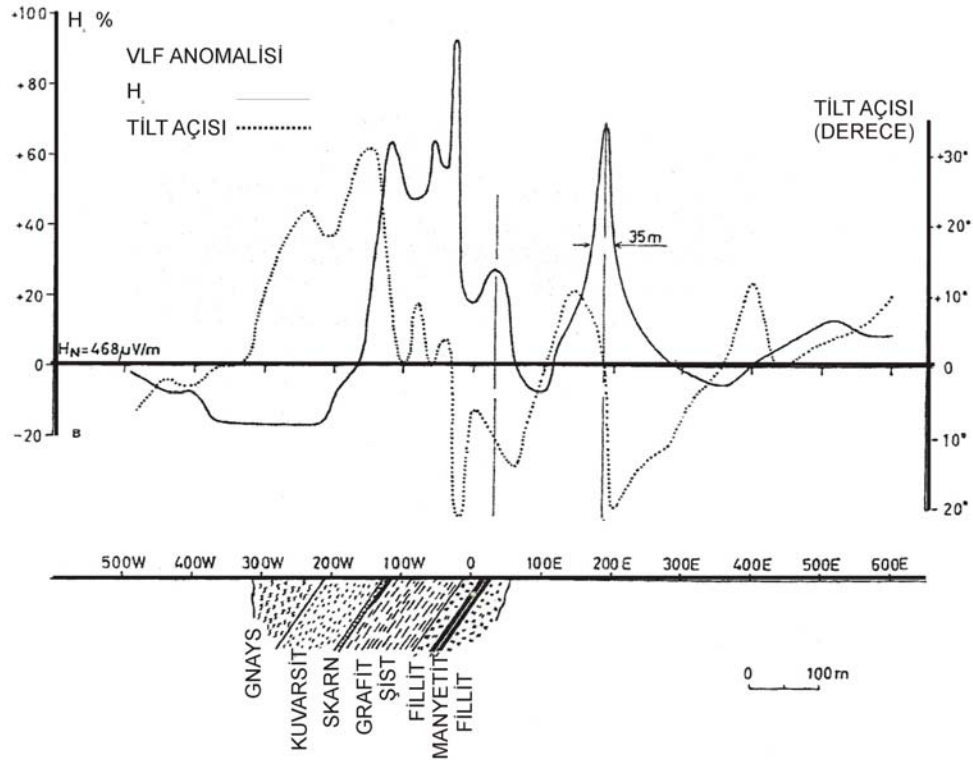
**Şekil 4.19 :** Demirci fayı üzerinde ölçülmüş gerçel bileşen verisi ile sokulum modeli için hesaplanmış tilt açısı model eğrisinin karşılaştırmalı gösterimi.

Şekilde görüldüğü gibi, model eğri ile saha verisi arasında oldukça iyi uyum gözlenmektedir. Çok iyi uyum göstermeyen bölümlerin, fayın dalım açısı ve ölçümlerin azimut açısı gibi nedenlerden meydana geldiği düşünülmektedir.

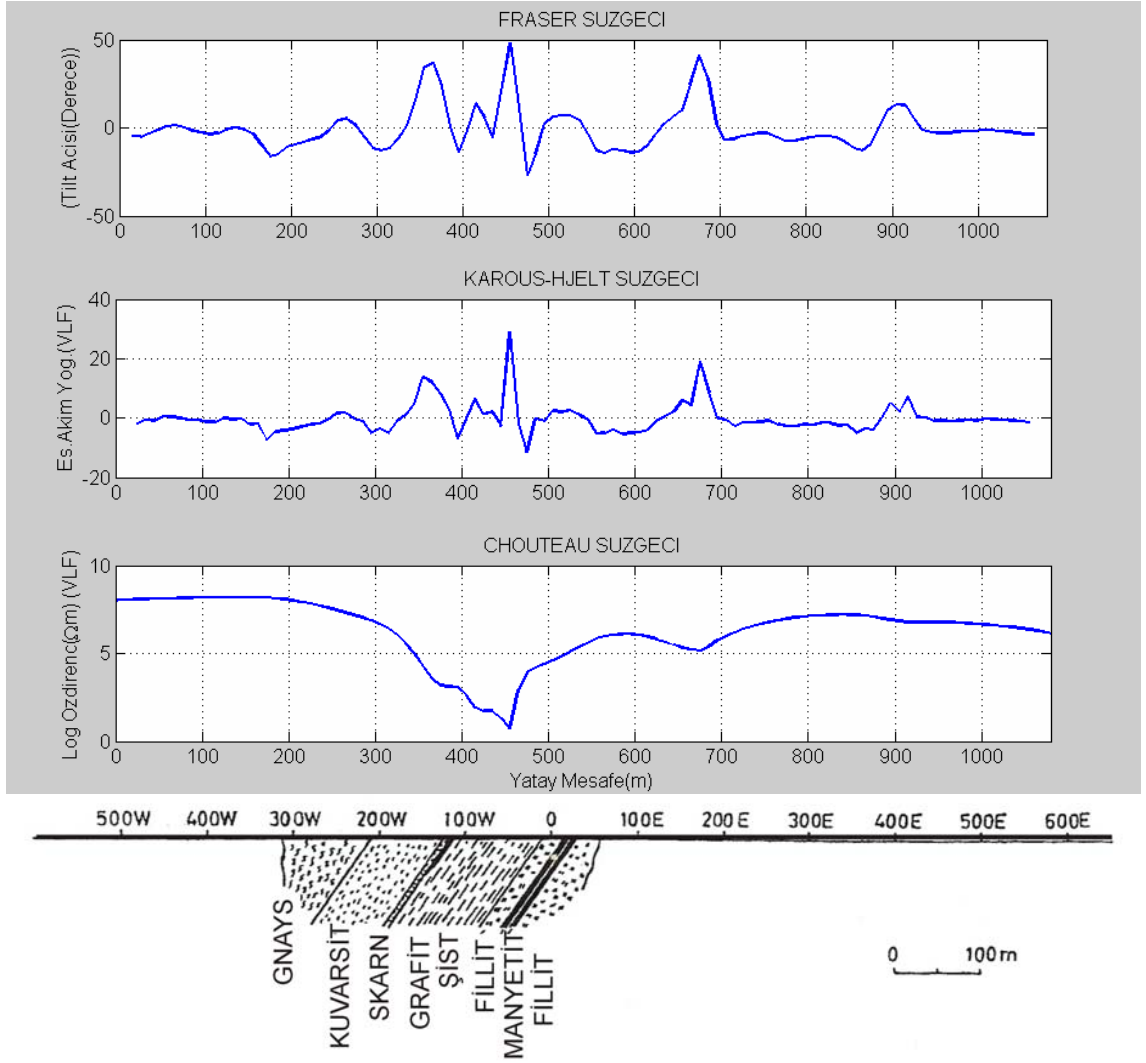
## 5. VLFINTERP, İNTERAKTİF VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME PROGRAMI İLE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

### 5.1 Literatür Verisi

VLFINTERP programının geliştirilmesi sırasında literatürden seçilmiş VLF-Elektromanyetik yöntem verileri de kullanılmıştır. Şekil 5.1'de, Paal (1968) tarafından yayınlanmış bir VLF-Elektromanyetik yöntem belirtisi görülmektedir. Gerçel bileşen verileri toplam manyetik alan şiddeti verileri ile desteklendiği ve ortamın jeolojik kesitini de içerdiği için bu veri, bu bölümde, uygulama örneği olarak verilmek üzere seçilmiştir. Şekil 5.1'de noktalı çizgi ile gösterilen tilt açısı değerleri sayısallaştırılarak VLFINTERP programının içeriğinde bulunan VLF-Elektromanyetik yönteme özgü süzgeçler ile derinlik kesitleri hazırlanmıştır.



**Şekil 5.1** : GBR vericisi kullanılarak, Södra, Sahavaara'da ölçülmüş VLF-Elektromanyetik yöntem belirtisi (Paal, 1968).

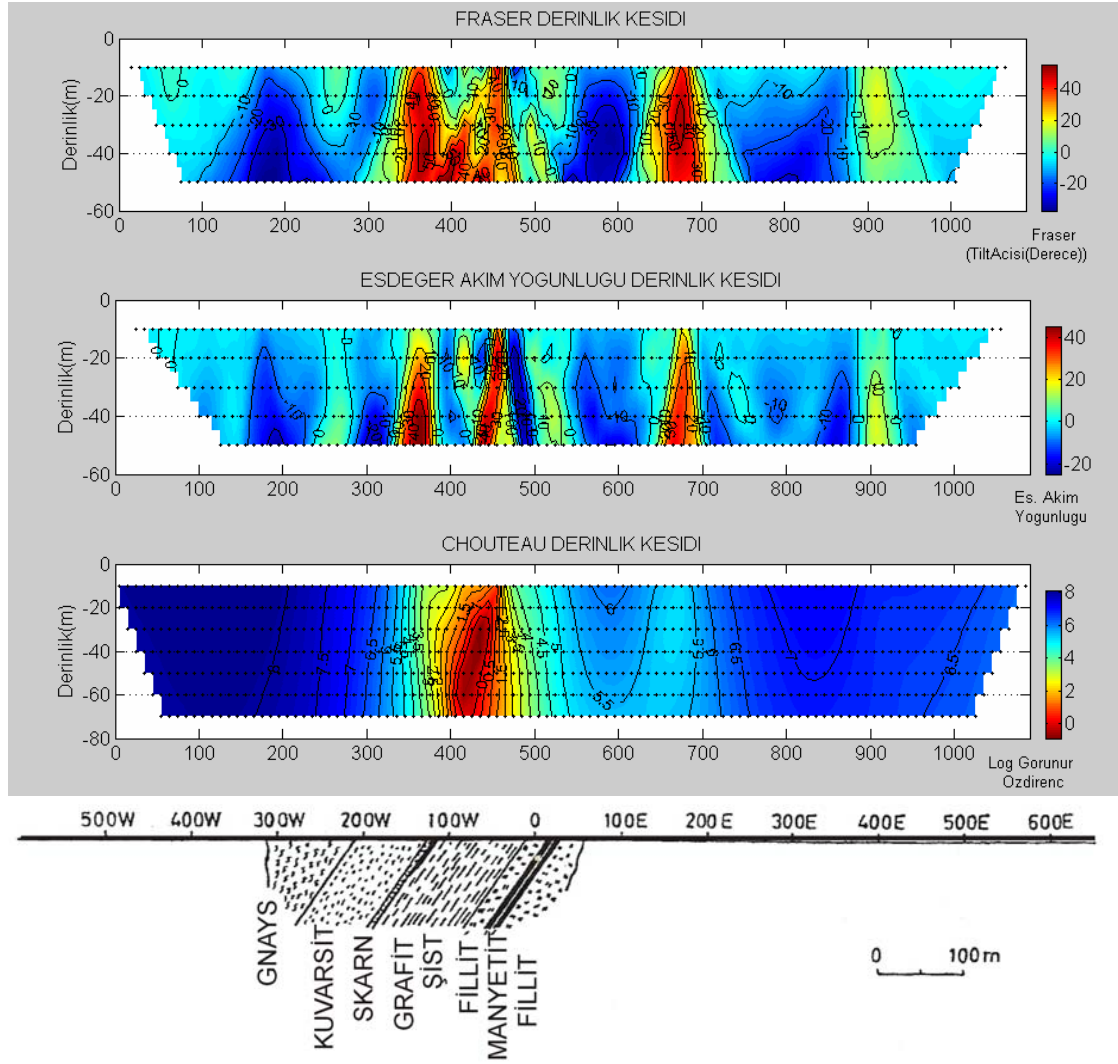


**Şekil 5.2 :** Süzgeçler ile elde edilmiş grafikler ve jeolojik kesit.

Şekil 5.2'de saha verisinin süzgeçlenmesiyle elde edilen Fraser tilt açısı, eşdeğer akım yoğunluğu ve görünür öz direnç değerlerini içeren grafikler ile jeolojik kesit görülmektedir. Kesitte yer alan kayalardan gnays; granit ile magmatik ya da tortul kayaların başkalaşıma uğramasıyla oluşan bir metamorfik kayaç; kuvarsit, kuvars taneleri içeren bir tür kumtaşı, skarn; genellikle bakır, kurşun, demir gibi metalik cevherler içerebilen bir tür metamorfik kayaç ve grafit, bir karbon türüdür. Fillit; tabakalı yapı gösteren bir başkalaşım kayacı, şist; çamur ya da şeyl gibi tortul kayalardan oluşan bir tür başkalaşım kayacı, manyetit ise zengin bir demir kaynağıdır. Bu kayaç türlerinden grafit ve manyetit, düşük öz dirençli kayaç türleri olduğundan belirti yaratmaları beklenmektedir.

Fraser tilt ve eşdeğer akım yoğunluğu ilk seviye grafikleri incelendiğinde, formasyon sınırları üzerinde genlikleri değişen yüksek değerler görülmektedir. En yüksek genlikli tepicikler ise skarn, grafit ve manyetit üzerine denk gelmektedir. Görünür

özdirenç değerlerini içeren grafikte ise, aynı bölümde, ortamın genelinden oldukça düşük özdirenç değerleri yer almaktadır.



**Şekil 5.3 :** Süzgeçler ile elde edilmiş derinlik kesitleri ve jeolojik kesit.

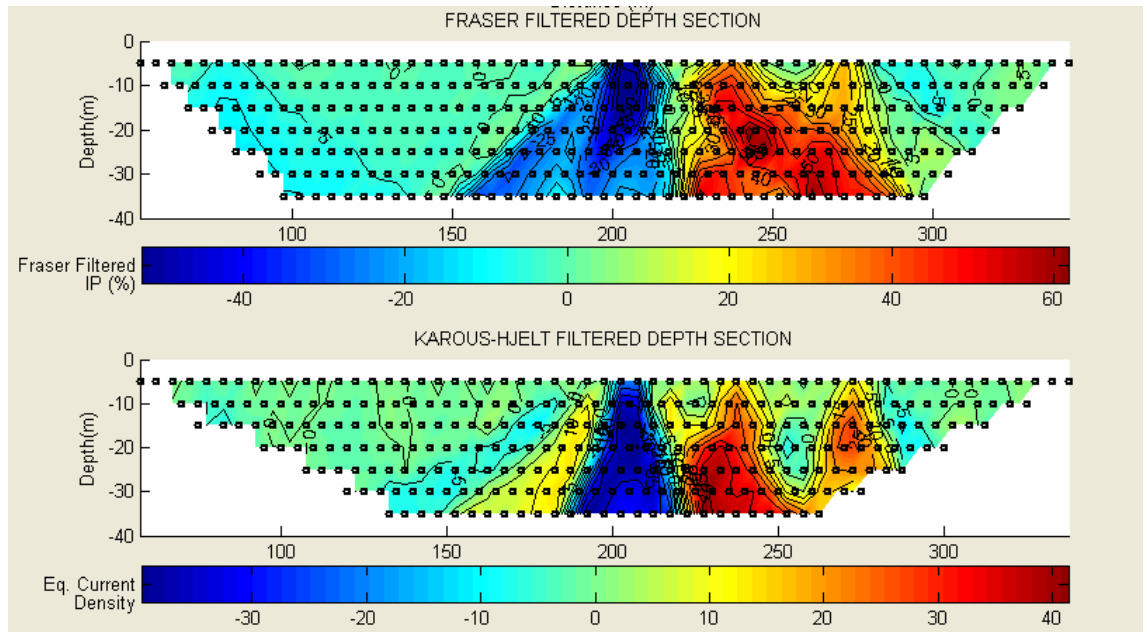
Şekil 5.3'de Fraser tilt, eşdeğer akım yoğunluğu ve görünür özdirenç derinlik kesitleri verilmektedir. Her üç kesitte de, grafiklerdekine benzer biçimde, skarn, grafit ve manyetitin bulunduğu bölümde belirtiler görülmektedir. Fraser kesidinde, batı tarafta, tek parça görünen belirti, eşdeğer akım yoğunluğu kesidinde iki parça olarak izlenmektedir. Her iki kesitte de yapıların eğimlerine dair bir bilgi bulunmamaktadır. Görünür özdirenç derinlik kesitinde ise, tek parça olarak oluşan belirti, yapıların eğimli olduğu konusunda bir fikir vermektedir. Ancak, çok ince jeolojik birimler arasında ayırım görülmemektedir. Her üç kesitte de 700 m civarında görülen yapı hakkında, jeolojik kesitte bilgi bulunmadığından bir karşılaştırma yapmak mümkün olamamaktadır. Ayrıca, VLF-Elektromanyetik yöntemin formasyon sınırlarını ortaya

koymadaki başarısı da veride, formasyon sınırlarına denk gelen salınımlarla kendini göstermektedir.

## 5.2 Saha Verisi; Demirci, Hisar Jeotermal Alanı

Bu bölümde, 1997 yılında, Türkiye'nin batısında, Manisa ili, Demirci ilçesindeki Hisar jeotermal alanında ölçülen VLF-Elektromanyetik yöntem verileri uygulama örneği olarak incelenmektedir. Sahada, halen kullanılan bir kaplıca ile bir antik hamam bulunmaktadır ve kullanımda bulunan üç kuyudan 36-46 °C aralığında sıcak su alınabilmektedir. Aynı çalışma kapsamında sahada, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (MTA) tarafından Doğal Potansiyel (SP), Elektrik Özdirenç (DAÖ) ve Radon gazı ölçümleri yapılmış ve tüm veriler birlikte değerlendirilerek sıcak alanın sınırları ile fay ve kırıkların yerleri belirlenmiştir (Özürlan ve Şahin, 2005).

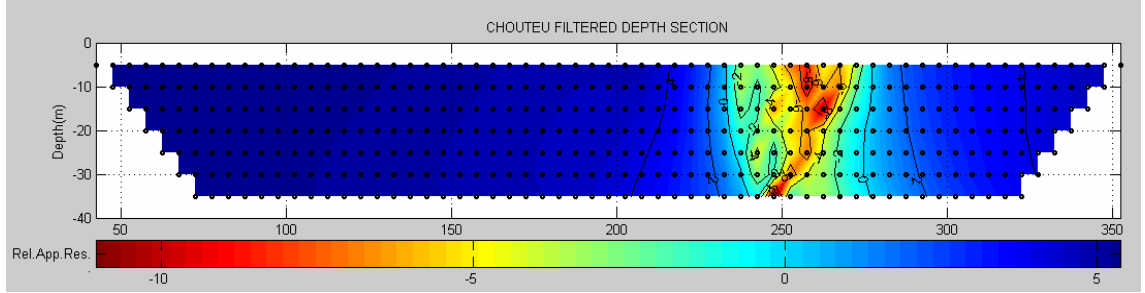
VLF-Elektromanyetik yöntem verileri, 16.0 kHz (GBR), 18.1 kHz (UPD) ve 23.4 kHz (NPM) frekanslarında, toplam altı profil üzerinde 5 m aralıklarla ölçülmüştür. Verilerin, *VLFINTERP* programı ile, amaçlandığı gibi, çok kısa sürede değerlendirilmesi ile elde edilen kesit ve kontur haritaları izleyen şekillerde verilmektedir.



**Şekil 5.4** : Üç numaralı profilin Fraser IP ve eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesitleri.

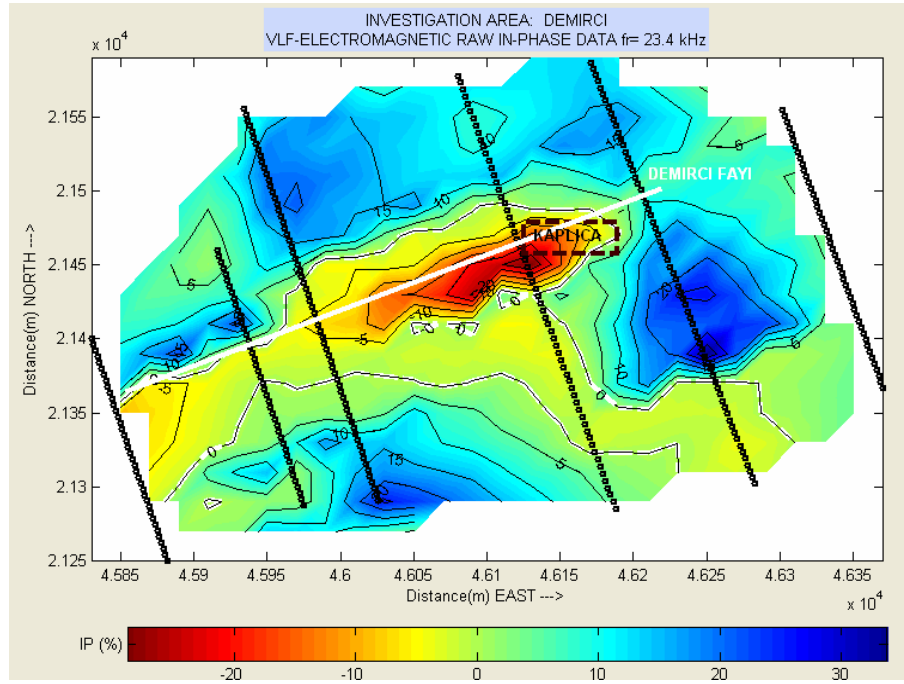
Şekil 5.4' de verilen, üç numaralı profilin Fraser IP ve eşdeğer akım yoğunluğu derinlik kesitlerinde iki parçalı belirtiler görülmektedir. Daha önce sözü edildiği gibi, yöne bağımlı olan VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin değerlendirilmesinde geniş bir bant boyunca devam eden ya da birbirine yakın iki yapıdan kaynaklanan

belirtilerde, yapıların net olarak ayrılması sadece nitel yollarla her zaman mümkün olmadığından, değerlendirme amaçlı süzgeçler kullanılmaktadır. Ancak, bu süzgeçlerle hazırlanmış eğri ve kesitlerin yorumlanması aşamasında, VLF-Elektromanyetik yöntemin sözü edilen yön bağımlılık özelliği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5.5 : Üç numaralı profilin görünür öz direnç derinlik kesidi.

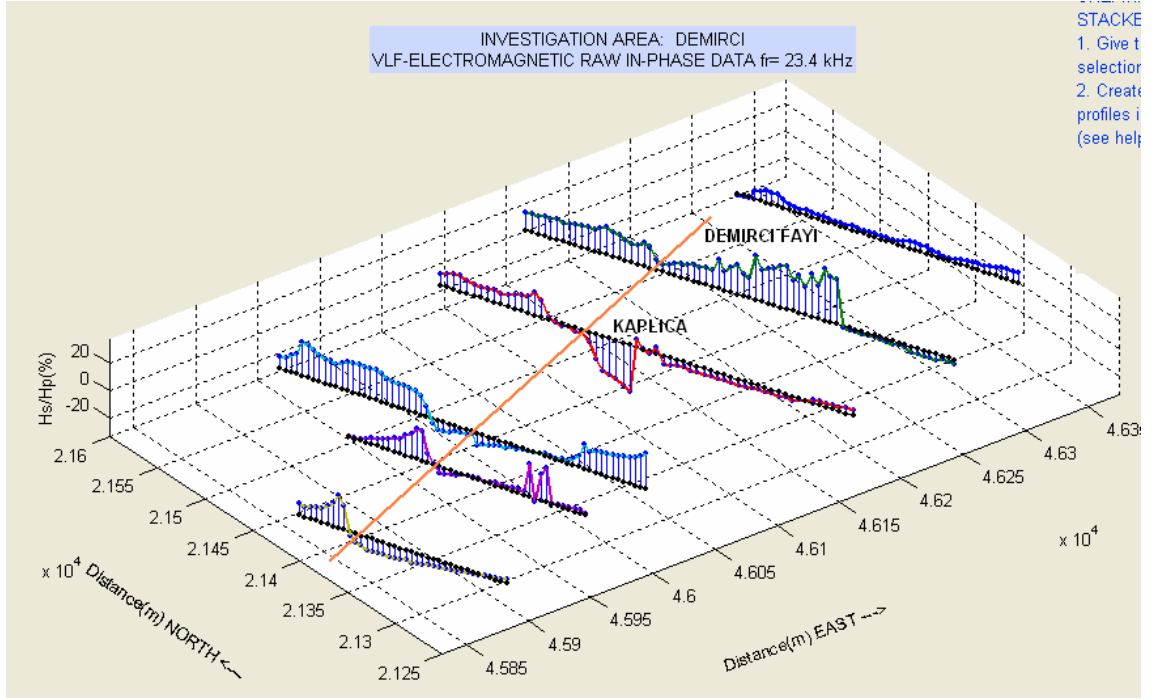
Aynı profilin görünür öz direnç değerleri ile hazırlanan derinlik kesidi Şekil 5.5'de verilmektedir. Bu kesitte, tam olarak kaplıcanın ve Demirci kırığının bulunduğu bölümde, eğimli bir yapı gösteren düşük öz dirençli kapanımlar görülmektedir.



Şekil 5.6 : 23.4 kHz frekansında ölçülen gerçel bileşen verileri kontur haritası.

Demirci, Hisar jeotermal alanında ölçülen VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin profil bazında incelenmesinin ardından, *VLFINTERP* programının alansal gösterim biçimleri kullanılarak değerlendirme işlemine devam edilmiştir. İlk olarak, Şekil 5.6'da bir örneği verilen ham veri kontur haritaları çizilmiştir. Şekil 5.6'da verilen gerçel bileşen (IP) kontur haritası, 5 m hücre boyu ve lineer interpolasyon gridleme tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Kontur haritası üzerinde, Demirci kırığı ve

kaplıcanın yerleri MATLAB'ın figür menüsünün “metin kutusu ekle (Insert/Text box)” ve “çizgi ekle (Insert/Line)” seçenekleri kullanılarak eklenmiştir. Gerçek bileşen kontur haritasında, sıfır geçişlerini gösteren beyaz kontur çizgisi ile sıcak alanın yaklaşık sınırlarını kaplıca civarındaki negatif işaretli kapanımların ise en sıcak bölgeyi ve Demirci kırığına gösterdiği düşünülmektedir. Şekil 5.7'de verilen gerçek bileşen verilerinin blok gösteriminde, yine Demirci kırığına ait belirti kolaylıkla izlenebilmektedir.



**Şekil 5.7 :** 23.4 kHz frekansında ölçülen gerçek bileşen değerlerinin blok görünümü.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, VLF-Elektromanyetik yöntem verilerinin kontrolü, düzeltilmesi, gürültüden arındırılması, değerlendirme amaçlı süzgeçlerin uygulanması, yatay uzaklığa bağlı grafikler ve derinlik kesitleri ile kontur ve kat haritalarının hızlı bir biçimde sunumu için etkileşimli bir bilgisayar programı olan *VLFINTERP* yazılımı geliştirilmiştir.

*VLFINTERP* programı, verilerin değerlendirme amaçlı sunumunun yanısıra, basit bir yaklaşımla çeşitli yapılar için model eğrilerin hesaplanmasına da olanak sağlamaktadır. Programın, GPS okumaları ile alınan bölgesel arazi koordinatları ile çalışması nedeniyle, kısa zamanda verilerin değerlendirilmesi ve başka jeofizik yöntemler ve jeolojik bilgiler ile ilişkilendirilmesi mümkün olabilmektedir. Yapay ve saha verileri kullanılarak yapılan testler sonucunda, *VLFINTERP* programının etkileşimli arayüzü aracılığıyla, büyük veri setleri ile çalışmayı kolaylaştırdığı, değerlendirme ve yorumlama işlemini oldukça hızlandırdığı görülmüştür.

Özellikle çok büyük alanlarda, hedef bölge belirleme amaçlı çalışmalarda, ölçülen verilerin anında değerlendirilmesi ve ölçüm planında uygun düzenlemelerin yapılmasını sağlayarak VLF-Elektromanyetik yöntemin etkin kullanımına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca, bu çalışma kapsamında, literatürde daha önce örnekleri bulunmayan görünür öz direnç derinlik kesitleri hesaplanmıştır. VLF-Elektromanyetik yöntemle özgü değerlendirme amaçlı süzgeçlerden Fraser ve Karous-Hjelt süzgeçleri ile derinlik kesitlerinin hazırlanmasına benzer bir teknikle hesaplanan kesitlerde, yapının yerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesinin yanısıra eğimi hakkında da bilgi alınması mümkün olmaktadır. Yine literatürde kullanımı yaygın olmayan Chouteau süzgeci kullanılarak kontur ve kat haritaları çizilmiş ve yorumlamaya sağladığı katkılar irdelenmiştir.

VLF-Elektromanyetik yöntemin saha çalışması bakımından son derece pratik bir yöntem olmasının yanısıra *VLFINTERP* programı kullanılarak çok çeşitli gösterim biçimleri ve süzgeçlerle verilerin değerlendirilmesi ve yorum aşamaları da pratik hale getirilmiştir. Öyle ki, binlerce veriden oluşan bir veri seti, tüm frekans ve parametreleriyle birkaç dakika içinde programa yüklenebilmekte ve istenen

süzgeçlerden geçirilip denetlenen veriler yoruma hazır hale getirilebilmektedir. Ayrıca, modelleme işleci ile çok kısa sürelerde çeşitli frekanslar için birincil ve ikincil alanlar ile basit modeller (çizgisel kaynak, sokulum, küre) için tilt açısı ve elipsellik değerleri hesaplanabilmektedir. Böylece, hesaplanan model eğrilerin saha verileri ile karşılaştırılması ve üzerinde çalışılan yapı hakkında daha detaylı bilgilerin edinilmesi mümkün olmaktadır.

*VLFINTERP* programı, saha çalışmasının ardından verilerin değerlendirilmesi ve sunumu amacıyla kullanılabilirdiği gibi içerdirdiği mini kütüphane bölümüyle saha çalışması öncesinde ve sırasında mümkün olan en uygun ölçüm planının geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır. Kütüphane bölümü içinde bulunan Transmitta işleci, çalışılacak sahanın koordinatları ile birlikte, yine aynı bölümde bulunan frekans listesinden seçilen vericilerin koordinatlarının verilmesi ile bunların birbirlerine göre konumlarını bir dünya haritası üzerinde göstermekte ve yapının uzanımına uygun verici seçimine yardımcı olmaktadır.

Sözü edilen tüm bu özellikleriyle *VLFINTERP*, başlangıçtaki amacını yerine getirmiş olmakla birlikte yeni ve özellikle üç boyutlu gösterim teknikleri ile geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, modelleme işlecine daha karmaşık yapılar için model eğriler üreten bölümlerin eklenmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Beamish, D.**, 1994. Two dimensional regularized inversion of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 357-374.
- Beamish, D.**, 1998. Three dimensional modelling of VLF data, *Journal of Applied Geophysics*, **39 (2)**, 63-76.
- Benson, A. K., Payne, K. L. and Stubben, M. A.**, 1997. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods-A case study, *Geophysics*, **62**, 80-86.
- Chouteau, M., Zhang, P. and Chapellier, D.**, 1996. Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering, *Geophysical Prospecting*, **44**, 215-232.
- Edsen, N. A. and Nissen, J.**, 1997. VLFMOD, a free forward VLF modelling software package, <http://home1.swipnet.se/~w-11019/ABEM-ftp/>.
- Fraser, D. C.**, 1969. Contouring VLF-EM data, *Geophysics*, **34**, 958-967.
- Fraseri, A., Lubonja, L. and Alikaj, P.**, 1995. On the application of geophysics in the exploration for copper and chrome ores in Albania, *Geophysical Prospecting*, **43**, 743-757.
- Kaikkonen, P.**, 1979. Numerical VLF modeling, *Geophysical Prospecting*, **27**, 815-834.
- Karous, M. and Hjelt, S. E.**, 1983. Linear filtering of VLF Dip-Angle measurements, *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794.
- McNeill, J. D.**, 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: S.H. Ward (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, SEG*, **1**, 191-218.
- McNeill, J. D. and Labson, V. F.**, 1991. Geological mapping using VLF radio fields, in Nabighian, M. N. Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics II: Soc. Exp. Geophysics*, 521-640.
- Milsom, J.**, 1996. *Field Geophysics*, John Wiley & Sons, New York.
- Ogilvy, R. D. and Lee, A. C.**, 1991. Interpretation of VLF-EM In-Phase data using current density pseudosections, *Geophysical Prospecting*, **39**, 567-580.
- Özürlan, G. ve Ulugergerli, E. U.**, 2005. Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özürlan, G. and Şahin, M. H.**, 2005. Integrated geophysical investigations in the Hisar geothermal field, Demirci, western Turkey, *Geothermics*, **35**, 110-122.

**Paal, G.**, 1968. Very low frequency measurements in northern Sweden, *Geoexploration*, **6**, 141-149.

**Paterson, N. R. and Ronka, V.**, 1971. Five years of surveying with the Very Low Frequency-Electro Magnetics method, *Geoexploration*, **9**, 7-26.

**Reynolds, J. M.**, 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons, New York.

**Sundararajan, N., Babu, R., Prasad, N. S. and Srinivas, Y.**, 2006. VLFPROS-A Matlab code for processing of VLF-EM data, *Computer and Geosciences*, article in press.

**Telford, W. M., Geldard, L. P., Sheriff, R. E. and Keyes, D. A.**, 1976. Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.

#### **Web Kaynakları**

ABEM Printed Matter No.93062 (<http://www.abem.se/products/wadi/vlf-freq.pdf>)

MATHWORKS official web site (<http://www.mathworks.com>)

## **ÖZGEÇMİŞ**

Mine Doğan, 1979 yılında Kocaeli'nin Kandıra ilçesinde dünyaya geldi. İlk ve Orta öğreniminin bir kısmını Akçakoca İlkokulu ve Kandıra Lisesi ortaokul kısmında tamamladı. Üsküdar Kız Lisesi'nden Şubat 1996'da iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve eğitimini Şubat 2003'de tamamladı. Aynı dönem, bölümünde yüksek lisans eğitime başladı. Bir yıl süreyle Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, Etüt, Proje ve Tesis Dairesi'nde mühendis olarak görev yaptı; Orhaneli ve Yatağan ocaklarında çalıştı. Şubat 2006'dan bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Yer Fiziği Ana Bilim Dalı'nda araştırma görevlisidir. İyi derecede İngilizce ve başlangıç seviyesinde İtalyanca bilmektedir.