

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک [ژئوالکترونیک]

مدل سازی عددی داده های تیپر روش VLF

جهت شناسایی زون های آلوده ناشی از معدنکاری

(مطالعه موردی معدن سرب و روی تاش)

اساتید راهنما

دکتر علی مرادزاده

دکتر فرامرز دولتی اردجانی

دانشجو

سارا فلاح پيشه

تير ۱۳۸۷

تقديم به

مادر و پدر مهربانم

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس فقط شایسته ذات اوست.

پس از حمد باری تعالی بر خود واجب می‌دانم نسبت به اساتید گرانقدر خود که در زمان تحصیل در این دانشگاه آنچه می‌دانستم و نپرسیدم به من آموختند، بی‌نهایت قدردان باشم. از جناب دکتر دولتی به خاطر تمام بزرگواری‌هایشان و به دلیل ایجاد انگیزه در تحقیق و تلاش علمی سخت‌گیرانه و از جناب دکتر مرادزاده که برای راهنمایی این پایان‌نامه از هیچ کمکی فروگذاری نکرده و بی‌شک سهم عمده‌ای در به پایان رساندن این تحقیق داشته‌اند، سپاسگذارم. از همه اساتیدی که با خلوص نیت در تلاشند جامعه‌ای متعالی بسازند، قدردانی می‌نمایم.

از داوران محترم جناب دکتر کامکار روحانی و دکتر کرمی که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفته‌اند، بی‌نهایت قدردان می‌باشم. از تمام اساتید و کارمندان دانشکده معدن و ژئوفیزیک

به ویژه جناب دکتر دولتی و آقای شاه‌حسینی سپاسگزارم. در پایان از تمام دوستان عزیز و هم‌کلاسی‌های خود که صبورانه مرا تحمل کردند، تشکر می‌کنم.

زبان از سپاسی در خور شما عزیزان که مرا یاری فرمودید قاصر است.

امیدوارم که در سایه عنایت‌های الهی همیشه سلامت و پیروز باشید.

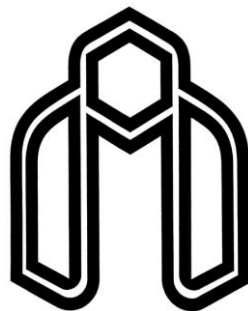
سارا فلاح پیشه

چکیده

فعالیت‌های معدنی و پساب اسیدی مرتبط با آن خصوصاً در معادن سولفیدی اثرات مخربی را ممکن است برای محیط زیست داشته باشد. در تحقیق حاضر هدف اصلی بر آن است تا اثرات زیست‌محیطی ناشی از معدنکاری سرب و روی معدن تاش مجن به کمک روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی VLF و ژئوالکتریک (مقاومت ویژه و قطبش القایی) مورد بررسی قرار داده شود. برای نیل به این هدف، داده‌های VLF بر روی چهار پروفیل عمود بر محور دره موجود در پایین‌دست معدن و پروفیلی موازی محور دره همراه با داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی برداشت شدند و سپس برای شناسایی زون‌های آلوده احتمالی، با روش‌های مختلف مورد مدل‌سازی عددی قرار گرفتند تا ضمن تهیه مقاطع مقاومت ویژه تفسیر لازم با بهره‌گیری همه نوع اطلاعات موجود صورت گیرد. مدل‌سازی عددی داده‌های VLF با استفاده از نرم‌افزار INV2DVLF صورت گرفته است و علاوه بر آن مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP با نرم‌افزار RES2DINV انجام یافته است.

بررسی حاضر نشان می‌دهد که با استخراج داده‌های تیپر از روی داده‌های صحرایی روش VLF و مدل‌سازی مناسب آنها می‌توان مقطع مقاومت ویژه قابل قبولی را تهیه نمود که تا حدود زیادی با مقطع مقاومت ویژه ژئوالکتریک حاصل از مدل‌سازی داده‌های روش مقاومت ویژه و IP در تطابق خوبی باشد. مطالعه و مقایسه نتایج حاصل از روش‌های بکار گرفته شده نشان می‌دهند که پساب‌های اسیدی ناشی از انباشت و

دپوی مواد معدنی و باطله‌های همراه آنها در مناطق اطراف معدن به احتمال زیاد توانسته‌اند مناطق نسبتاً وسیعی از مناطق پایین‌دست محدوده معدنکاری را تا فاصله بیش از ۳۵۰ متری دهانه معدن با گسترش عرضی ۲۰ تا ۴۰ متر تا عمق حدود ۳۰ متر در حد قابل توجهی آلوده نمایند که این زون‌های آلوده احتمالی در مقاطع الکتریکی حاصل از مدل‌سازی داده‌های VLF و مقاومت ویژه به صورت زون‌های رسانا نمایان می‌باشند که البته برای تایید نهایی نیاز به بررسی‌های بیشتری دارند.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining and Geophysics

MSc Thesis In Exploration Geophysics

**Numerical modelling of tipper data of VLF method for the detection of polluted zones related to mining operation.
(Case study: Lead and zinc mine in Tash area)**

By:

Sara Fallah Pisheh

Supervisors:

Dr. Ali Moradzadeh

Dr. Faramarz Dolati Ardejani

JUN 2008

Abstract

Mining activities and related acide drainage may cause detrimental impacts on the environment particularly in the sulphide mines. In the present research, the main goal is to consider that the environmental problems, caused by lead and zinc mining operation in Tash-Mojen area by using VLF-EM and geoelectric (resistivity and induced polarization) geophysical methods. In order to reach this target, VLF data were measured on four profiles which were perpendicular to the axis of valley in the downstream of mine, as well as VLF, resistivity and induced polarization (IP) data on one profile which was parallel to the axis of valley. Then, for the detection of probable polluted zones, the different methods were modelled numerically to provide and interpret resistivity section by using all various information. The numerical modelling of VLF data has been performed by a computer software called INV2DVLF and the modelling of resistivity and IP data have been performed by RES2DINV software program.

This research shows that by acquiring tipper data from the field data of VLF method and suitable modelling of them, resistivity sections can be provided which are in good agreement with those of resistivity data. Studying and comparing results obtained from the used methods reveals that acide

drainage emanating from the low grade waste dumps probably could have polluted considerably a vast area with a dimension of $350 \times (20 \text{ to } 40) \text{ m}^2$ and an approximate depth of 30 m in the downstream of the dump. These polluted zones in electric section resulted from modelling of VLF data and resistivity are detected as conductor zones. Of course, more investigations are needed for the last confirmation.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- آلودگی زیست محیطی ناشی از باطله‌های معدنی و ارزیابی آنها با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک.....	۳
۳-۱- بررسی سوابق مطالعات VLF در اکتشاف معادن، شناسایی زون‌های حاوی آب زیرزمینی و مطالعات زیست محیطی.....	۶
۴-۱- اهمیت و ضرورت مطالعه.....	۹
۵-۱- اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق.....	۱۰
۶-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۱۱
فصل دوم: مبانی روش‌های VLF، مقاومت ویژه و قطبش القایی	
۱-۲- مقدمه.....	۱۳

- ۱۳-۲-۲- اصول روش های الکتریکی.....
- ۱۳-۳-۲- خواص الکتریکی سنگ ها.....
- ۱۴-۳-۲- مقاومت ویژه سنگ ها.....
- ۱۵-۲-۳-۲- فعالیت های الکتروشیمیایی.....
- ۱۶-۳-۳-۲- ثابت دی الکتریک یا نارسانایی.....
- ۱۶-۴-۲- اصول و مبانی روش مقاومت ویژه.....
- ۱۷-۵-۲- اصول و مبانی روش قطبش القایی.....
- ۱۸-۲-۵-۱- پلاریزاسیون غشایی یا IP غیر فلزی.....
- ۱۸-۲-۵-۲- پلاریزاسیون فلزی یا اور ولتاژ.....
- ۲۰-۶-۲- اندازه گیری ولتاژ رو به زوال IP در حوزه زمان.....
- ۲۰-۷-۲- اندازه گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP.....
- ۲۱-۸-۲- آرایه های به کار رفته در روش های مقاومت ویژه و IP.....
- ۲۲-۱-۸-۲- مزایای استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی.....
- ۲۲-۲-۸-۲- نحوه اندازه گیری با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی و رسم شبه مقطع.....
- ۲۴-۹-۲- اصول روش های الکترومغناطیسی.....
- ۲۵-۱۰-۲- رابطه فاز و دامنه.....
- ۲۶-۱۱-۲- قطبش بیضی وار.....
- ۲۸-۱۲-۲- روش VLF.....
- ۳۰-۱۳-۲- فرستنده های VLF.....
- ۳۲-۱۴-۲- گیرنده های VLF.....

۳۳	۱۵-۲- کمیت‌های مورد اندازه‌گیری در روش VLF
۳۳	۱-۱۵-۲- زاویه شیب
۳۴	۲-۱۵-۲- اندازه‌گیری تابع مختلط تیپر در روش VLF
فصل سوم: ارائه و تفسیر کیفی و نیمه کمی داده‌های VLF برداشت شده	
۳۷	۱-۳- مقدمه
۳۷	۲-۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
۳۸	۳-۳- زمین‌شناسی عمومی و کانی‌زایی محدوده مورد مطالعه
۴۱	۴-۳- سوابق معدنکاری قدیمی در منطقه
۴۳	۵-۳- عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها
۴۸	۶-۳- تفسیر داده‌های VLF
۴۹	۱-۶-۳- تفسیر کیفی
۴۹	۲-۶-۳- تفسیر نیمه کمی
۴۹	۷-۳- فیلترسازی
۵۰	۱-۷-۳- فیلتر فریزر
۵۰	۲-۷-۳- فیلتر کاروس - هجالت
۵۲	۸-۳- ارائه و تفسیر نیمه کمی داده‌های برداشت شده
۵۲	۱-۸-۳- پروفیل W-۰
۵۳	۲-۸-۳- پروفیل W-۱
۵۴	۳-۸-۳- پروفیل W-۲

۴-۱۰- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه ، IP و VLF برداشت شده

در امتداد پروفیل Tash (یا W-۰)..... ۸۲

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری..... ۸۷

۵-۲- پیشنهادات..... ۸۸

فهرست منابع ۸۹

فهرست پیوست ها

پیوست الف- دستگاه ABEM-WADI..... ۹۵

پیوست ب- جداول مربوط به داده های برداشتی VLF ، مقاومت ویژه و IP..... ۹۸

پیوست ج- معکوس سازی به روش کمترین مربعات خطی و غیر خطی..... ۱۰۶

پیوست د- فرمت داده های ورودی و خروجی نرم افزار INV2DVLF..... ۱۰۹

پیوست ه- مقایسه نمودار داده های برداشتی VLF و پاسخ مدل بدست آمده با نرم افزار

INV2DVLF..... ۱۲۰

فهرست اشکال

فصل اول: کلیات

شکل (۲-۱) - وضعیت اکسید شدن کانی‌های سولفیدی در باطله معدنی..... ۵

فصل دوم: مبانی روش‌های VLF، مقاومت ویژه و قطبش القایی

- شکل (۱-۲) - پلاریزاسیون غشایی و الکترودی (الف) - پراکندگی نرمال الکترون‌ها در ماسه‌سنگ متخلخل (ب) - پلاریزاسیون غشایی (ج) - پلاریزاسیون الکترودی..... ۱۹
- شکل (۲-۲) - اندازه‌گیری منحنی رو به زوال ولتاژ..... ۲۰
- شکل (۳-۲) - نمای کلی آرایه دوقطبی - دوقطبی..... ۲۲
- شکل (۴-۲) - تهیه شبه مقطع در آرایش دوقطبی - دوقطبی..... ۲۳
- شکل (۵-۲) - نمایش شماتیکی امواج EM..... ۲۴
- شکل (۶-۲) - نمودار برداری میدان‌های اولیه (H_s)، ثانویه (H_p)، برآیند (H_r) و اختلاف فاز..... ۲۵
- شکل (۷-۲) - پارامترهای بیضی پلاریزان..... ۲۸
- شکل (۸-۲) - نحوه ایجاد میدان‌های ثانویه با امواج VLF..... ۲۹
- شکل (۹-۲) - موقعیت فرستنده‌های مهم جهان..... ۳۰
- شکل (۱۰-۲) - ایستگاه فرستنده GBR..... ۳۰
- شکل (۱۱-۲) - شدت سیگنال دریافتی بر حسب دسی‌بل برای فرستنده UMS, Moscow..... ۳۱

شکل (۲-۱۲) - شدت سیگنال دریافتی بر حسب دسی بل برای فرستنده GBR, Rugby ۳۱

شکل (۲-۱۳) - نمودار زاویه شیب در بالای یک توده رسانا..... ۳۳

فصل سوم: ارائه و تفسیر کیفی و نیمه کمی داده‌های VLF برداشت شده

شکل (۳-۱) - موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی منطقه. نقطه قرمز محل تقریبی

منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد..... ۳۸

شکل (۳-۲ الف) - نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۲۵۰:۰۰۰ ۴۰

شکل (۳-۲ ب) - راهنمای نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۴۱

شکل (۳-۳) - محل دپوی ماده معدنی به فاصله چند متری از دهانه معدن..... ۴۳

شکل (۳-۴) - عکس ماهواره‌ای منطقه مورد نظر و موقعیت پروفیل‌های برداشتی..... ۴۴

شکل (۳-۵) - نحوه قرارگیری پروفیل‌های برداشت داده‌های ژئوفیزیکی همراه با محل انباشت

باطله‌ها و محل تقریبی تونل موجود را همراه با جهت برداشت داده‌های VLF (نقطه چین)

نشان می‌دهد..... ۴۶

شکل (۳-۶) - نمایی از منطقه برداشت، دره موجود و محل انباشت باطله‌های معدنی..... ۴۸

شکل (۳-۷) - نمودار داده‌های پروفیل W-۰ (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی

و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان

برای بخش حقیقی داده‌ها..... ۵۳

- شکل (۳-۸) - نمودار داده‌های پروفیل $W-1$ (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها..... ۵۵
- شکل (۳-۹) - نمودار داده‌های پروفیل $W-2$ (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها..... ۵۶
- شکل (۳-۱۰) - نمودار داده‌های پروفیل $W-3$ (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها..... ۵۸
- شکل (۳-۱۱) - نمودار داده‌های پروفیل $W-4$ (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها..... ۵۹
- شکل (۳-۱۲) - پلات ۴ پروفیل موازی $W-1$ ، $W-2$ ، $W-3$ و $W-4$ (الف) - عمق فیلتری ۱۵ متر (ب) - عمق فیلتری ۳۰ متر..... ۶۰
- فصل چهارم: مدل سازی عددی داده‌های VLF، مقاومت ویژه و IP و تفسیر کمی نتایج آنها
- شکل (۴-۱) - شبکه بکار رفته در روش عناصر محدود..... ۶۵
- شکل (۴-۲) - داده‌های حقیقی اندازه‌گیری شده و فیلتر شده..... ۶۹
- شکل (۴-۳). a - داده‌های مصنوعی b. VLF - مدل مقاومت ویژه دوبعدی بدست آمده با معکوس سازی..... ۷۰
- شکل (۴-۴) - (الف). نمودار مؤلفه حقیقی و موهومی داده‌های برداشتی و محاسبه شده بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF برای پروفیل $W-0$ (ب). شبه مقطع چگالی جریان (ج). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده‌های VLF..... ۷۳

- شکل (۴-۵) - (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل $W-1$ (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده های VLF بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF..... ۷۵
- شکل (۴-۶) - (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل $W-2$ (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده های VLF بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF..... ۷۶
- شکل (۴-۷) - (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل $W-3$ (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده های VLF بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF..... ۷۷
- شکل (۴-۸) - (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل $W-4$ (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده های VLF بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF..... ۷۹
- شکل (۴-۹) - نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل Tash (الف). شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب). شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج). مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی..... ۸۱
- شکل (۴-۱۰) - نتایج مدل سازی معکوس هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل Tash (الف). شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب). شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج). مقطع بارپذیری..... ۸۱
- شکل (۴-۱۱) - مقاطع معکوس سازی هموار پروفیل Tash (الف)، داده های مقاومت ویژه (ب)، داده های IP حاصل از مدل سازی..... ۸۳
- شکل (۴-۱۲) - قرارگیری مقاطع مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی دوبعدی داده های VLF و گسترش زون رسانا (زون های احتمالاً آلوده) را نشان می دهد..... ۸۴

فهرست جداول

فصل دوم: مبانی روش‌های VLF، مقاومت ویژه و قطبش القایی

جدول (۱-۲) - مقاومت ویژه برخی مواد زمین..... ۱۵

جدول (۲-۲) - بارپذیری مواد گوناگون..... ۱۷

جدول (۳-۲) - مشخصات برخی دستگاه‌های گیرنده VLF زمینی..... ۳۲

فصل سوم: ارائه و تفسیر کیفی و نیمه کمی داده‌های VLF برداشت شده

جدول (۱-۳) - مشخصات پروفیل‌های ژئوفیزیکی..... ۴۷

۱-۱- مقدمه

به طور کلی ژئوفیزیک شامل مطالعه زمین توسط اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی زمین با استفاده از وسایل مناسب و بکارگیری تکنیک‌های بخصوص در سطح زمین می‌باشد. ژئوفیزیک اکتشافی شاخه‌ای از ژئوفیزیک کاربردی است که با استفاده از آن می‌توان به اکتشاف مواد معدنی، شناسایی مناطق‌های آلوده و شناخت ساختمان‌های زمین شناسی اقدام نمود [۱]. در بین روش‌های ژئوفیزیک سطحی، روش‌های

الکتریکی و الکترومغناطیسی کاربرد وسیعی در اکتشافات آب، نفت و گاز، کانی‌های اقتصادی، معادن، ساختگاه‌های مهندسی، مطالعات زیست‌محیطی و تعیین مناطق آلوده شده دارند.

هدف اصلی روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین می‌باشد و ویژگی‌های زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی و سایر خصوصیات موجود به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. در این روش‌ها برای مشخص شدن ویژگی ساختار زیرسطحی، باید مقاومت ویژه الکتریکی آن متفاوت از محیط اطرافش باشد. بنابراین استفاده از روش‌های الکتریکی به حالت‌هایی که یک اختلاف بارز مقاومت ویژه¹ وجود داشته باشد محدود می‌شود.

از میان روش‌های مختلف الکتریکی روش مقاومت ویژه از کاربرد گسترده‌ای برخوردار است. یکی از دلایل این امر آن است که دامنه تغییرات مقاومت ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها بسیار وسیع می‌باشد. برای انجام این روش، معمولاً جریان مستقیم DC که به طور متناوب جهتش عکس می‌شود و یا جریان AC با فرکانس خیلی کم (معمولاً کمتر از ۱ هرتز) را توسط الکترودهای جریان وارد زمین نموده و اختلاف پتانسیل را توسط یک جفت الکتروود پتانسیل اندازه‌گیری می‌نمایند [۲،۳].

روش پلاریزاسیون (قطبش) القایی^۲ (IP) روش دیگری است که در آن بارپذیری مواد مختلف درون زمین اندازه‌گیری می‌شود. این روش در بررسی‌های زیست‌محیطی و آشکارسازی زبانه‌های^۳ آلودگی ناشی از معادن سولفیدی کاربرد دارد [۴،۵]. امروزه با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی موجود امکان انجام روش‌های مختلف مدل‌سازی معکوس دو و سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه و IP برداشت شده فراهم می‌باشد.

یکی دیگر از روش‌های الکتریکی روش الکترومغناطیسی می‌باشد که احتیاج به تماس الکتروود به زمین برای برداشت داده ندارد. از میان روش‌های الکترومغناطیسی^۴ (EM)، روش VLF^۵ یکی از روش‌های الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین است که از فرستنده‌های امواج EM رادیوئی که برای مقاصد نظامی به تعداد معدودی در سراسر دنیا توزیع شده‌اند، جهت برداشت‌های اکتشافی استفاده می‌کند. پارامتر مورد اندازه‌گیری در این

¹-Resistivity contrast

²-Induced Polarization

³-Plume

⁴-Electromagnetic

⁵-Very Low Frequency

روش معمولاً زاویه کجی^۶ (شیب) و بیضوی شدگی^۷ می باشد که برای تفسیر به صورت نمودارهایی در امتداد هر پروفیل ارائه می شوند [۶]. نهایتاً برای تفسیر نیمه کمی با استفاده از فیلترهای مناسب (روش فیلترسازی فریزر^۸، کاروس - هجلت^۹) داده ها به صورت شبه مقطع چگالی جریان پروفیل ارائه می گردند تا اطلاعات تقریبی از عمق نیز حاصل شود [۷،۸].

داده های VLF می توانند سریع، با دقت بالا و قیمت ارزان جمع آوری شوند و فقط نیاز به یک یا دو نفر نیروی انسانی دارد. این روش را می توان به صورت هوایی نیز انجام داد و نیاز به نصب فرستنده در صحرا نمی باشد. ابزار و وسایل مورد نیاز کم حجم و سبک هستند. نحوه برداشت این روش در مقایسه با روش های دیگر به گونه ای است که در مناطق صعب العبور کاربرد آسانتری دارد.

۱-۲- آلودگی های زیست محیطی ناشی از باطله های معدنی و ارزیابی آنها با استفاده از روش های ژئوالکترونیک

آلودگی های زیست محیطی (به ویژه آلودگی آب های زیرزمینی) نتیجه فعالیت های مختلف بشری است که از جمله مهمترین آنها می توان به فعالیت های کشاورزی، صنعتی، معدنکاری، دفن باطله ها و راه یافتن پساب ها، شیرابه ها و محلول های ناشی از آنها به آب های زیرزمینی اشاره کرد. در نتیجه فعالیت معدنی، مواد معدنی ارزشمند منطقه استخراج و باطله های همراه آنها در محل های دیگری انباشته شده است. باطله های مربوط به صنعت معدنکاری شامل سنگ هایی هستند که بعد از جدا کردن کانی های با ارزش از سنگ معدن باقی می ماند. بسیاری از باطله های معدنی سمی بوده و به طور خطرناکی تأثیر مستقیم و غیر مستقیم بر محیط زیست گذاشته و تعادل سیستم های آبی موجود در داخل زمین را از بین می برد. بسیاری از معادن از قبیل معادن زغال سنگ، معادن سولفید فلزی و... شامل کانی های سولفید آهن به ویژه پیریت می باشند. اکسید شدن این کانی ها توسط اکسیژن و آب و خصوصاً در حضور یکسری باکتری های خاص، تولید اسید سولفوریک نموده و موجب ایجاد پساب های اسیدی معدن^{۱۰}

⁶-Tilt angle

⁷-Ellipticity

⁸-Fraser

⁹-Karous - Hjelt

¹⁰-Acid Mine Drainage (AMD)

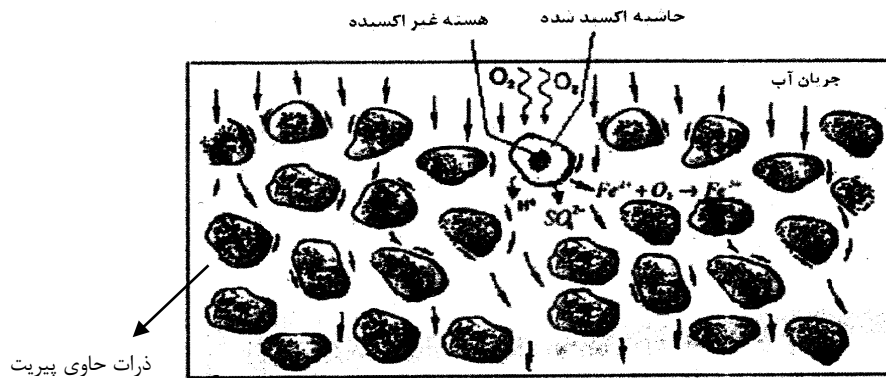
می‌گردد [۹،۱۰،۱۱]. پساب‌های اسیدی در معادن وقتی تولید می‌گردند که کانی‌های سولفیدی در سطح زمین رخنمون داشته باشند. بنابراین نه تنها فعالیت‌های معدنی سبب ایجاد پساب‌های اسیدی معدن می‌گردند بلکه هر جا که کانی‌های سولفیدی در سطح زمین رخنمون پیدا کنند، این پساب اسید تولید می‌شود [۱۰].

پساب‌های اسیدی معمولاً حاوی تعداد زیادی یون‌های فلزی همچون آهن، مس، روی و آرسنیک می‌باشند. چنین فلزاتی می‌توانند به عنوان پتانسیلی برای آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی باشند. بسته به وضعیت زمین‌شناسی سنگ بستر، پساب‌های اسیدی معدنی می‌تواند سایر آلاینده‌های فلزی را بشویند و حمل نمایند. این آلاینده‌های فلزی عبارتند از: مس، سرب، جیوه، سولفور و روی. این فلزات به طرف منابع آب‌های اطراف حمل شده و سبب آلودگی آنها می‌گردند. پساب‌های اسیدی موجب افزایش غلظت فلزات سنگین شده و اثرات سمی و مخرب آنها را تشدید می‌کند. مقدار اسیدیته به صورت pH یعنی فعالیت یون هیدروژن سنجیده می‌شود. پساب‌های اسیدی ممکن است با دو ویژگی مهم اثرات نامطلوب بر محیط زیست داشته باشند [۱۲،۱۳]:

۱- pH های پایین برای آبزیان زیان‌آور هستند.

۲- غلظت بالای فلزات سنگین نیز ممکن است اثرات مضر بر ارگانیزم آبی داشته باشند.

شکل (۱-۲) وضعیت اکسید شدن کانی‌های سولفیدی در باطله‌های معدن سرب و روی، آزاد شدن گوگرد (SO_4^{2-})، مکانیزم جدا شدن آلاینده‌ها نظیر کربنات و سولفات سرب و روی و حمل آنها از طریق سیستم جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل (۲-۱) وضعیت اکسید شدن کانی‌های سولفیدی در باطله معدنی [۱۴]

آلودگی آب‌های سطحی نیز از دیگر اثرات منفی در ارتباط با تولید پساب‌های اسیدی معدنی می‌باشد. این آب‌های حاوی غلظت‌های بالای فلزات و سولفات‌های محلول وقتی وارد رودخانه‌های شیرین می‌گردند، هیدروکسید آهن آنها ته‌نشین شده و سبب تغییر رنگ آب می‌شود [۱۵].

اثرات زیست‌محیطی پساب‌های اسیدی به شرح زیر است:

- کاهش کیفیت آب معدن

- آلودگی سفره آب‌های زیرزمینی

- خطرات سلامتی برای انسان و سایر موجودات

- مرگ و میر اکثر ماهی‌ها

آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنکاری خصوصاً معادن فلزی نظیر سرب و روی و عدم انتخاب محل مناسب انباشت باطله‌های حاصل اثرات مخربی روی محیط زیست دارد. این آلودگی‌ها ممکن است به مرور زمان از نظر عمقی و جانبی و یا از هر دو نظر، وسعت بیشتری در زیر سطح زمین پیدا کند. اثرات زیست‌محیطی مخرب که از پساب‌های اسیدی معدن نتیجه می‌شوند به دلیل مدیریت ضعیف در طول طراحی و توسعه کارهای معدنی و همچنین به دلیل غلط از پساب‌های اسیدی معدن در گذشته می‌باشند.

روش‌های ژئوفیزیکی به خصوص روش‌های الکتریکی از روش‌های مناسبی هستند که برای بررسی زیست‌محیطی مربوط به آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به کار برده می‌شوند. دلیل این امر آن است که

محلول‌های آلوده در بسیاری مواقع دارای اختلاف مقاومت ویژه کافی با مواد اطراف هستند. علاوه بر این سرعت بالا، کاهش قابل توجه هزینه‌ها و غیرتهاجمی بودن این روش‌ها از مهمترین مزایای آنهاست. با بررسی‌های ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی در محل انباشت باطله‌ها و یا در اطراف آنها می‌توان شدت، وسعت، نحوه توزیع و گسترش آلودگی را در زیر سطح زمین مشخص نمود.

۱-۳- بررسی سوابق مطالعات VLF در اکتشاف معادن، شناسایی زون‌های حاوی آب زیرزمینی و مطالعات زیست‌محیطی

استفاده از روش VLF برای مطالعه آب‌های زیرزمینی موجود در زونهای گسلی و شکستگی‌ها، شناخته شده و رضایت‌بخش می‌باشد. از آنجایی که روش VLF می‌تواند زون‌های گسلی اشباع از آب را تشخیص دهد، این امکان نیز وجود دارد که بتواند رگه‌های کانساری با هدایت الکتریکی بالا را نیز تشخیص دهد. به دلیل سهولت استفاده از روش VLF، برای اکتشافات رگه‌های معدنی سولفیدی استفاده‌های فراوانی صورت گرفته است که ذیلاً به چند نمونه از آنها می‌پردازیم.

السون^{۱۱} در سال ۱۹۸۰ با استفاده از روش VLF در سوئد یک منطقه کانی‌سازی شده با شیب ۵۵° را با استفاده از فرستنده NAA آمریکا شناسایی کرد که بعداً توسط حفاری‌های اکتشافی حضور کانی‌سازی تایید شد [۱۶].

ساید^{۱۲} (۱۹۸۱) به منظور بررسی سولفیدهای ولکانیکی داخل سنگ‌های آندزیتی و ریولیتی از روش VLF همراه با روش الکترومغناطیسی شوتبک در منطقه‌ای از کانادا استفاده نمود که نتایج بدست آمده با حفر یک گمانه اکتشافی نیز تایید شد [۱۷].

کاروس و هجالت در سال ۱۹۸۳ در منطقه ایولو کشور فنلاند از روش VLF به منظور بررسی احتمال وجود یک رگه تقریباً عمودی استفاده کردند که متعاقباً توسط مطالعات مغناطیس‌سنجی آنومالی‌های روش VLF تایید شدند [۸].

¹¹-Olsson
¹²-saydam

شارما^{۱۳} در سال ۲۰۰۴ در غرب بنگال از روش VLF برای به نقشه در آوردن زون‌های شکسته آبدار در سنگ بستر استفاده نمود. در این روش جریان آب موجود در سنگ بستر تایید شده و در قسمت شمال منطقه زون کم عمق و در قسمت جنوب زون عمیقی حاوی آب رویت گردید. برای تکمیل مطالعات فوق از روش سونداژنی مقاومت ویژه استفاده شد و نهایتاً نتایج یکسانی از هر دو روش حاصل گردید [۱۸].

سنتوز^{۱۴} (۲۰۰۴) به منظور مطالعات هیدروژئولوژیکی در جزیره سانتیاگو از روش VLF و مگنتوتلوریک استفاده نمود. در این بررسی مطالعه ساختارهای تکتونیکی به روش مگنتوتلوریک و مطالعه سفره‌های کم عمق حاوی آب به روش VLF انجام گرفت. داده‌های VLF پس از فیلترسازی منطقه‌ای با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم متر را در عمق ۴۰ متری نشان دادند که حاکی از وجود آب شور در این منطقه بود که در مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک نیز این زون مشاهده گردید [۱۹].

بابو و همکاران^{۱۵} در سال ۲۰۰۷ به منظور آشکارسازی زون‌های شکسته حاوی اورانیوم در منطقه‌ای از هند از روش VLF به همراه روش مغناطیس‌سنجی استفاده نمودند. پس از مدل‌سازی داده‌های VLF مقاومت ویژه زیرسطحی کمتر از ۱۰۰ اهم متر نشان دهنده زون‌های رسانا در این شکستگی‌ها بود که در نقشه مغناطیسی نیز این آنومالی مشاهده گردید. با حفر گمانه‌های اکتشافی نتایج حاصل از این دو روش مورد تایید قرار گرفت [۲۰].

در سال‌های اخیر، روش‌های الکتریکی به ویژه روش VLF به طور چشم‌گیری به عنوان یک روش غیر مستقیم برای کنترل و بررسی آلودگی‌های زیست‌محیطی به کار گرفته شده‌اند. اگر چه قسمت اعظم این کارها را می‌توان با استفاده از چاه‌های فرابینی^{۱۶} انجام داد، ولی هزینه عملیاتی مربوط به آنها بسیار بالاست. مزایای روش VLF نسبت به سایر روش‌های الکتریکی سبب شده تا این روش یک فن‌آوری جدید، پیشرفته و غیر تهاجمی به طبیعت محسوب شود. با به‌کارگیری این روش می‌توان گسترش طولی و عمقی آلودگی‌های ایجاد شده را در حد قابل قبولی تعیین کرد.

¹³-Sharma

²-Santos

¹⁵-Babu et al

¹⁶-Drill holes

یوآل¹⁷ و الدنبرگ¹⁸ در سال ۱۹۹۶ با تلفیق مدل‌های حاصل از اندازه‌گیری مقاومت ویژه و قطبش القایی و مقایسه آنها با اطلاعات کیفی آب مانند میزان کل املاح محلول (TDS)¹⁹ آلودگی ناشی از دمپ‌های باطله مس را در شمال آمریکا به خوبی نشان دادند [۲۱].

بنسون و همکاران^{۲۰} (۱۹۹۷) در منطقه یوتای آمریکا از روش VLF و مقاومت ویژه برای آشکارسازی آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده نمودند. پس از فیلترسازی داده‌های VLF برای ۸ پروفیل، محدوده زون آلوده معلوم و گسترش عمقی آن با سونداژنی الکتریکی مقاومت ویژه تعیین شد [۲۲].

در سال ۲۰۰۱ کامکار روحانی، آلودگی‌های ناشی از کارخانه فرآوری بوکسیت را با استفاده از روش پروفیل زنی مقاومت ویژه با آرایش‌های مختلف با فواصل مختلف در ایالت استرالیای غربی مورد بررسی قرار داده است [۲۳].

حفیظی (۱۳۸۱) در اطراف پالایشگاه شیراز به بررسی آلودگی نفتی خاک با روش VLF پرداخت. از آنجا که مواد هیدروکربنی به عنوان آلاینده، مقاومت خاک را افزایش می‌دهند، از روش VLF برای شناسایی زون‌های آلوده استفاده گردید. در ناحیه مورد مطالعه چندین حلقه گمانه آزمایشی نیز حفر شد و میزان مواد آلی آلاینده در آنها اندازه‌گیری و به صورت نقشه نمایان و با نقشه چگالی جریان تهیه شده داده‌های VLF مقایسه شد. بررسی‌ها و مقایسه نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش به خوبی توانسته‌اند محدوده بیشینه آلودگی را در بخش جنوب شرقی پالایشگاه به نقشه در آورند [۲۴].

فارینگر²¹ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش الکترومغناطیس کم‌عمق²²، آلودگی ناشی از تشکیل پساب‌های اسیدی معدن (AMD) در لایه‌های زیرین معدن زغال زیرزمینی در ایالت ویرجینیا را مورد بررسی قرار داد و پس از فیلتر نمودن داده‌ها زون آلوده شناسایی گردید [۲۵].

17- Yuval

18- Oldenburg

19- Total dissolved solids

20- Benson et al

5- Fahringer

22- Shallow EM

هامک^{۲۳} و همکاران در سال ۲۰۰۳، اثرات زیست‌محیطی ناشی از دیو ایجاد شده از معدن گوگرد مرکوری^{۲۴} در ایالات کالیفرنیا را با روش‌های ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار دادند. داده‌های حاصل چهار آنومالی رسانی ناشی از وجود آلودگی آب زیرزمینی را نشان دادند. جهت تکمیل نتایج، برداشت‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی به صورت هوایی انجام گرفت و با ترکیب نتایج حاصل از این برداشت‌ها گسترش جانبی زون‌های رسانا نشان داده شد [۲۶].

سنتوس^{۲۵} و همکاران در سال ۲۰۰۵ با برداشت چندین پروفیل VLF در منطقه‌ای از پرتغال نشان داد که دفن زباله^{۲۶} باعث آلوده شدن محدوده‌ای از منطقه مورد نظر و تأثیر آن بر روی آب‌های زیرزمینی می‌شود. در برداشت‌های قبلی به روش مقاومت ویژه نیز بی‌هنجاری رسانی در غرب محل دفن زباله دیده شد. تفسیر نیمه کمی داده‌های VLF با فیلتر فریزر و کاروس- هجالت و تفسیر کمی آنها با مدل‌سازی معکوس داده‌ها به کمک اطلاعات موجود قبلی صورت گرفت. در مدل‌های مقاومت ویژه حاصل از معکوس‌سازی داده‌های VLF زون‌هایی با مقاومت ویژه زیر ۴۰۰ اهم- متر دیده شد که در نتایج مدل‌سازی حاصل از روش مقاومت ویژه نیز مشاهده گردید. با مطالعات ژئوشیمی، نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها، آلوده بودن آب‌های زیرزمینی تایید شد [۲۷].

مرادزاده و همکاران (۱۳۸۵) از روش VLF جهت شناسایی آلودگی حاصل از پساب‌های اسیدی محل انباشت باطله‌های زغال‌شویی البرز شرقی شاهرود استفاده نمودند. بررسی‌ها بر روی ۶ پروفیل با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی زمین در پایین دست محل انباشت باطله‌ها انجام گرفت و در نهایت دو زون آلوده احتمالی در منطقه شناسایی گردید [۲۸].

مرادزاده و همکارانش در سال ۱۳۸۶ طی کار جداگانه‌ای آلودگی ناشی از باطله‌های شستشوی زغالسنگ البرز شرقی را به روش VLF و ژئوالکتریک مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها نشان دادند که سد باطله زغال مناطق قابل توجهی را آلوده کرده است [۲۹،۳۰]. در ادامه مرادزاده و همکاران (۱۳۸۶) به مطالعه محدوده آلودگی ناشی از معدنکاری سرب و روی تاش شاهرود با روش‌های ژئوفیزیکی VLF، IP و

23-Hammack

24-Mercury

25-Santos et al

26-Landfill

مقاومت ویژه پرداختند. نتایج بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های صورت گرفته نشان داد که باطله‌های معدنی مناطق پایین دست محدوده را در راستای طول و عمق آلوده نمودند [۳۱،۳۲].

۱-۴- اهمیت و ضرورت مطالعه

نتایج حاصل از بررسی آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنکاری خصوصاً معادن فلزی نظیر سرب و روی و عدم انتخاب محل مناسب انباشت باطله‌های حاصل نشان می‌دهد که ورود عناصر مختلف فلزی و سمی به چرخه آب زیرزمینی می‌تواند سبب تغییرات قابل توجهی در رسانندگی زمین‌های اطراف محدوده معدنی گردد و اثرات مخربی روی محیط زیست بگذارد. از این رو روش‌های ژئوفیزیکی الکتریکی مقاومت ویژه و قطبش القایی به همراه روش‌های الکترومغناطیسی در شناسایی محدوده آلوده شده و شیوه گسترش آن می‌توانند نقش مهمی ایفا نمایند. به همین منظور با توجه به بررسی‌هایی که در محدوده معدن سرب و روی تاش انجام گرفت و با توجه به سمی بودن سرب و روی و اینکه در مناطق پایین دست محدوده، رودخانه و چشمه سارهای متعددی که آب آنها برای شرب و کشاورزی توسط اهالی منطقه و گونه‌های مختلف حیوانی و گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، از این رو به دلیل سرعت بالا، سهولت برداشت، کاهش قابل توجه هزینه‌ها و صعب‌العبور بودن منطقه، از روش VLF به همراه روش‌های کمکی مقاومت ویژه و قطبش القایی (IP) برای بررسی اثرات مخرب زیست‌محیطی استفاده گردید. با توجه به اینکه در روش VLF نیازی به فرستنده مصنوعی جهت اندازه‌گیری نمی‌باشد، با استفاده از این روش می‌توان محدوده وسیعی را در زمان کوتاهی برداشت نمود. بیشتر تفسیرهای انجام شده روی داده‌های روش VLF عمدتاً به صورت کیفی بوده و در مواردی کمتر با استفاده از روش فیلترسازی تفسیر نیمه کمی صورت گرفته است و در زمینه مدل‌سازی کمی داده‌های روش VLF و قابلیت‌های آن متأسفانه تاکنون کار زیادی صورت نگرفته است. در کشور ما هم به کارگیری این روش از سابقه زیادی برخوردار نمی‌باشد و آن هم در غالب موارد برای اکتشاف مواد معدنی بوده است. بررسی منابع علمی منتشر شده نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر فقط در چند مورد تلاش شده است که داده‌های این روش به صورت کمی نیز تفسیر گردد.

بنابراین با توجه به موارد فوق و نقش این روش در تعیین محل رگه‌های معدنی مدفون، تعیین مناطق آلوده و اکتشاف آب‌های زیرزمینی ایجاب می‌کند که داده‌های VLF به شیوه مناسبی با انجام مدل‌سازی عددی به مقاطع مقاومت ویژه تبدیل شده و مورد تفسیر کمی قرار گیرند.

۱-۵- اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق

هدف از مطالعه حاضر این است که به کمک داده‌های برداشت شده به روش VLF کمیّت دیگر به نام تیپر که محل قرارگیری بی‌هنجاری‌های الکتریکی را بهتر مشخص می‌کند استخراج نموده و با مدل‌سازی عددی دو بعدی داده‌های آن، مقاطع واقعی ژئوالکتریک را تهیه نموده و با سنجش اعتبار و مقبولیت آنها از این روش همراه با داده‌های مقاومت ویژه و IP جهت آشکارسازی اثرات مخرب زیست‌محیطی مربوط به معدن سرب و روی تاش شاهرود استفاده نمود. برای نیل به هدف در محدوده پایین دست معدن که دره‌ای را شامل می‌شود، تعداد ۵ پروفیل که یکی از آنها در راستای محور دره و چهارتای دیگر در راستای عمود بر آن بودند، انتخاب و داده‌های VLF روی همگی آنها برداشت شدند. در ادامه برای مقایسه نتایج در امتداد پروفیل موازی محور دره داده‌های مقاومت ویژه و IP نیز اندازه‌گیری شدند. پس از برداشت و تصحیح داده‌ها با تهیه شبه مقطعی در امتداد پروفیل، نتایج بدست آمده مورد تفسیر کیفی و نیمه کمی قرار گرفته و در ادامه برای تفسیر کمی همگی داده‌های برداشت شده، با روش‌های عددی مناسب و با بهره‌مندی از نرم-افزارهای INV2DVLF [۳۳] و RES2DINV [۳۴] مدل‌سازی شدند تا محدوده آلوده شده احتمالی در مناطق پایین دست شناسایی شوند.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

در فصل اول به مقدمه و کلیات روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی و کاربرد آنها در موارد مختلف اشاره شده و علاوه بر آن به اهداف مطالعه حاضر پرداخته می‌شود. در فصل دوم اصول اولیه برداشت داده‌های مقاومت ویژه، IP، VLF و آرایش‌های مورد استفاده در عملیات صحرائی و عوامل مؤثر در انتخاب یک آرایش مناسب بررسی می‌شود. در فصل سوم در مورد چگونگی برداشت داده‌ها در منطقه مورد نظر و تفسیر نیمه کمی داده‌های VLF صحبت به میان خواهد آمد. در ادامه در فصل چهارم

مدل‌سازی معکوس داده‌های VLF با نرم‌افزار INV2DVLF انجام و نتایج حاصله همراه با نتایج مدل‌سازی معکوس هموار داده‌های مقاومت ویژه و IP با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV مقایسه می‌گردد. در فصل آخر نتایج مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و همراه پیشنهاداتی برای ادامه کار مطرح خواهند شد.

۲-۱- مقدمه

روش‌های الکتریکی بسیار متنوع‌تر از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند. هدف اصلی روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی و تغییرات آن در زمین می‌باشد. در این روش‌ها به منظور تعیین ویژگی‌های زیرزمینی یک توده، باید مقاومت ویژه الکتریکی آن متفاوت از محیط اطرافش باشد. بعضی از روش‌های الکتریکی مانند پتانسیل خودزا، جریان تلوریک و مگنتوتلوریک از منابع انرژی الکتریکی طبیعی بهره می‌گیرند. از طرفی روش‌های الکتریکی دیگر مثل مقاومت ویژه و قطبش القایی نیاز به جریان و یا میدان الکتریکی به صورت مصنوعی دارند [۲]. از آنجایی که در نظر است از روش‌های مقاومت ویژه، IP و VLF برای مطالعه حاضر استفاده گردد، شرح مختصری از اصول و مبانی آنها همراه با پارامترهای مورد اندازه‌گیری در این فصل ارائه می‌شود.

۲-۲- اصول روش‌های الکتریکی

هدف اصلی روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری زمین می‌باشد. برای انجام این روش معمولاً جریان مستقیم DC (که متناوباً جهتش عکس می‌شود) و یا جریان متناوب AC با فرکانس خیلی کم (معمولاً کمتر از ۱ هرتز) را توسط الکترودهای جریان وارد زمین کرده و اختلاف پتانسیل را توسط

یک جفت الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌نمایند و تغییرات مقاوت ویژه و یا بارپذیری زمین مورد مطالعه قرار گرفته و بر اساس آنها می‌توان وضعیت ساختارهای زیرسطحی را بررسی نمود [۳۵].

۲-۳- خواص الکتریکی سنگ‌ها

روش‌های الکتریکی به طور کلی از سه خواص بنیادی و مهم سنگ‌ها به شرح ذیل بهره می‌گیرند.

۱- مقاوت ویژه^{۲۷} (ρ) که عکس رسانایی (σ) می‌باشد. روش مقاوت ویژه و الکترومغناطیس بر مبنای اندازه‌گیری مقاوت ویژه پایه گذاری شده‌اند.

۲- فعالیت الکتروشیمیایی که در رابطه با الکتروولت‌های محلول در سفره‌های آبدار می‌باشند. این فعالیت‌ها اساس روش‌های پلاریزاسیون القایی (IP) و پتانسیل خودزا (SP) می‌باشند.

۳- ثابت دی‌الکتریک که اطلاعاتی درباره ظرفیت سنگ‌ها در ذخیره نمودن انرژی الکتریکی هنگام عبور جریان، ارائه می‌نماید. این ویژگی در روش‌های IP و GPR²⁸ که یکی از روش‌های الکترومغناطیسی است، کاربرد دارد [۳۵].

۲-۳-۱- مقاوت ویژه سنگ‌ها

دامنه تغییرات مقاوت ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها بسیار وسیع می‌باشد. هیچ نوع ویژگی فیزیکی دیگر در سنگ‌ها و خاک‌ها نمی‌توان یافت که دامنه تغییراتش تا به این اندازه باشد. سنگ‌ها و کانی‌هایی که دارای مقاوت ویژه بین 10^{-6} الی 10^{-1} اهم متر باشند هادی‌های قوی، بین 10^1 اهم متر الی 10^6 اهم متر را هادی‌های متوسط و بین 10^7 الی 10^{15} را هادی‌های ضعیف می‌گویند [۳۵]. در بیشتر سنگ‌ها هدایت جریان الکتروسیسته بصورت الکتروولتی توسط محلول‌های موجود در خلل و فرج سنگ‌ها و بین دانه‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین مقاوت ویژه سنگ‌ها عمدتاً توسط تخلخل، نفوذ پذیری، آب موجود در سنگ‌ها کنترل شده و

²⁷-Resistivity

²⁸-Ground penetration Radar

خمیره²⁹ آنها سهم چندانی در هدایت الکتریکی ندارند [۳۶]. برای آشنایی بیشتر با مقادیر مقاومت ویژه مواد مختلف به جدول (۱-۲) مراجعه نمایید.

جدول (۱-۲) مقاومت ویژه برخی مواد زمین [۳۶]

مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر	کانی‌های دیگر	مقاومت ویژه بر حسب اهم- متر	کانسارهای سولفیدی
۱۰ ^{۱۲} -۱۰ ^{۱۳}	کلسیت	۱۰ ^{-۴}	کالکوسیت
۱۰ ^۰ -۱۰ ^{۱۳}	نمک	۴×۱۰ ^{-۳}	کالکوپیریت
۱۰ ^۰ -۱۰ ^{۱۱}	زغال	۳×۱۰ ^{-۱}	پیریت
	سنگ های بلورین	۲×۱۰ ^{-۳}	گالن
۱۰ ^۲ -۱۰ ^۶	گرانیت	۱۰ ^{-۳} -۳۰۰	کوپریت
۱۰ ^۴ -۱۰ ^۵	دیوریت	۱۰ ^{-۳} -۱۰ ^۷	هماتیت
۱۰ ^۳ -۱۰ ^۶	گابرو	۱۰ ^{-۵} -۱۰ ^۴	مگنتیت
۱۰ ^۲ -۱۰ ^۴	آندزیت	مقاومت ویژه بر حسب اهم- متر	کانی‌های سیلیکانه
۱۰ ^۰ -۱۰ ^۴	شیست	۱۰ ^{۱۰} -۱۰ ^{۱۵}	کوارتز
۱۰ ^۴ -۱۰ ^۶	گنایس	۱۰ ^۲ -۱۰ ^{۱۴}	موسکویت

۰/۰۵-۰/۲	شورابه خیلی شور	۱۰ ^۲ -۱۰ ^۶	بیوتیت
۳۰-۱۰۰	لندفیل غیر اشباع	۱۰ ^۲ -۱۰ ^۴	فلدسپات
۱۵-۳۰	لندفیل اشباع	۱۰ ^۳ -۱۰ ^۴	اولیوین
<۱۰-۵۰	آب‌های آلوده	محدوده مقاومت ویژه	رسوبات سخت نشده
۲۰	آب اسیدی معدن	۱-۱۰ ^۳	ماسه
۲۰-۱۰۰	آب باران	۱-۱۰ ^۲	رس

۲-۳-۲- فعالیت‌های الکتروشیمیایی

فعالیت الکتروشیمیایی به ترکیب شیمیایی سنگ‌ها و ترکیب و غلظت الکترولیت‌های محلول در آب‌های زیرزمینی که با این سنگ‌ها در تماس می‌باشند، بستگی دارد [۳۶].

۲-۳-۲- ثابت دی‌الکتریک^{۳۰} یا نارسانایی

ثابت نارسانایی همانند قابلیت نفوذپذیری (μ) در مواد مغناطیسی یکی از ویژگی‌های فیزیکی مواد می‌باشد. در واقع ثابت نارسانایی میزان قابلیت پلاریزه شدن یک جسم را در میدان الکتریکی نشان می‌دهد. ویژگی‌های خازنی و ذخیره جریان الکتریکی در مواد به این پارامتر فیزیکی بستگی دارد. این ویژگی در روش IP از اهمیت بالایی برخوردار است [۳۶].

۲-۴- اصول و مبانی روش مقاومت ویژه

این روش به منظور نیل به اهداف اکتشافی توسط شلومبرژه در سال ۱۹۱۲ میلادی ابداع گردید. در این روش یک جریان مستقیم یا جریان متناوب با فرکانس کم توسط دو الکتروود جریان به زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل حاصل از تزریق این جریان توسط دو الکتروود پتانسیل در نقاطی از سطح زمین اندازه‌گیری

¹⁻ Dielectric

می‌شود. کمیّت مورد بررسی در این روش مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مختلف زمین است که به وسیله آن می‌توان لایه‌های دارای ترکیبات مختلف را از یکدیگر متمایز نمود. در روش مقاومت ویژه پس از اندازه‌گیری این اختلاف پتانسیل (ΔV) با معلوم بودن میزان جریان تزریقی (I) مقاومت ویژه حاصله از فرمول زیر بدست می‌آید [۳۵]:

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AB} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \times \frac{\Delta V}{I} \quad (1-2)$$

عبارت داخل کروشه در رابطه (۱-۲) را فاکتور هندسی آرایش الکترودی می‌نامند که به چگونگی قرارگیری الکترودها و فاصله آنها از هم بستگی دارد و معمولاً آن را با حرف K نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان رابطه بالا را به صورت زیر نوشت:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2-2)$$

اگر ρ در یک محیط همگن و ایزوتروپ اندازه‌گیری شود آنگاه آن را مقاومت ویژه واقعی،³¹ ρ_t ، می‌نامند. اما اگر اندازه‌گیری در یک محیط ناهمگن و غیر ایزوتروپ صورت گیرد آن را مقاومت ویژه ظاهری،³² ρ_a ، می‌گویند [۳۵].

۲-۵- اصول و مبانی روش قطبش القائی

در روش اکتشافی IP از چهار الکتروود (دو الکتروود پتانسیل و دو الکتروود جریان) برای اندازه‌گیری بارپذیری زمین همراه با مقاومت ویژه آن استفاده می‌شود. اگر جریان الکتریکی ارسالی به طور ناگهانی قطع شود ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل فوراً صفر نخواهد شد، به طوری که پس از قطع جریان، ولتاژ یک افت ناگهانی اولیه نشان می‌دهد و سپس به تدریج بعد از گذشت چند ثانیه به صفر نزدیک می‌شود [۳۶]. با اندازه‌گیری ولتاژ

¹-True Resistivity

²- Apparent Resistivity

گذرای پس از قطع جریان و داشتن ولتاژ قبل از قطع جریان می‌توان بارپذیری زمین را اندازه‌گیری کرد. در جدول (۲-۲) بارپذیری مواد گوناگون آورده شده است [۳۵].

جدول (۲-۲) بارپذیری مواد گوناگون [۳۵]

بارپذیری (میلی ثانیه)	ماده	بارپذیری (میلی ثانیه)	ماده
۱۳/۲	پیریت	۱۰-۲۰	سنگ آهک یا دولومیت
۱۳/۲	کالکوپیریت	۳-۱۲	ماسه سنگ
۱۲/۳	مس	۰	آب زیرزمینی
۳۰۰-۸۰۰	توف آتشفشانی	۳-۹	شن (گراول)
۵۰-۱۰۰	شیل	۶/۳	بورنیت
۳/۷	گالن	۲/۲	مگنتیت
۰/۰	هماتیت	۲۰۰۰-۳۰۰۰	سولفید ۲۰٪
		۱۰۰۰-۲۰۰۰	سولفید ۲۰٪-۸٪

تجارب آزمایشگاهی نشان داده که انرژی الکتریکی در داخل سنگ‌ها اساساً توسط فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره می‌شود و این عمل معمولاً به دو طریق زیر صورت می‌گیرد [۳۵].

۲-۵-۱- پلاریزاسیون غشایی^{۳۳} یا IP غیر فلزی

عبور جریان الکتریکی از داخل اغلب سنگ‌ها توسط الکترولیت‌های موجود در خلل و فرج آنها صورت می‌گیرد (شکل ۲-۱-الف). اغلب کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها دارای باری منفی در سطح تماس خود با سیال موجود در حفرات^{۳۴} می‌باشند و در نتیجه یون‌های مثبت را به طرف خود جلب می‌کنند. تجمع یون‌های مثبت در مجاورت سطح کانی‌ها معمولاً قشری به ضخامت یک دهم میکرون (از سطح کانی‌ها به داخل سیال) بوجود می‌آورد. اگر ضخامت این قشر در حدود قطر روزنه‌های ارتباطی حفرات باشد باعث جلوگیری از تحرک

³³- Membrane Polarization

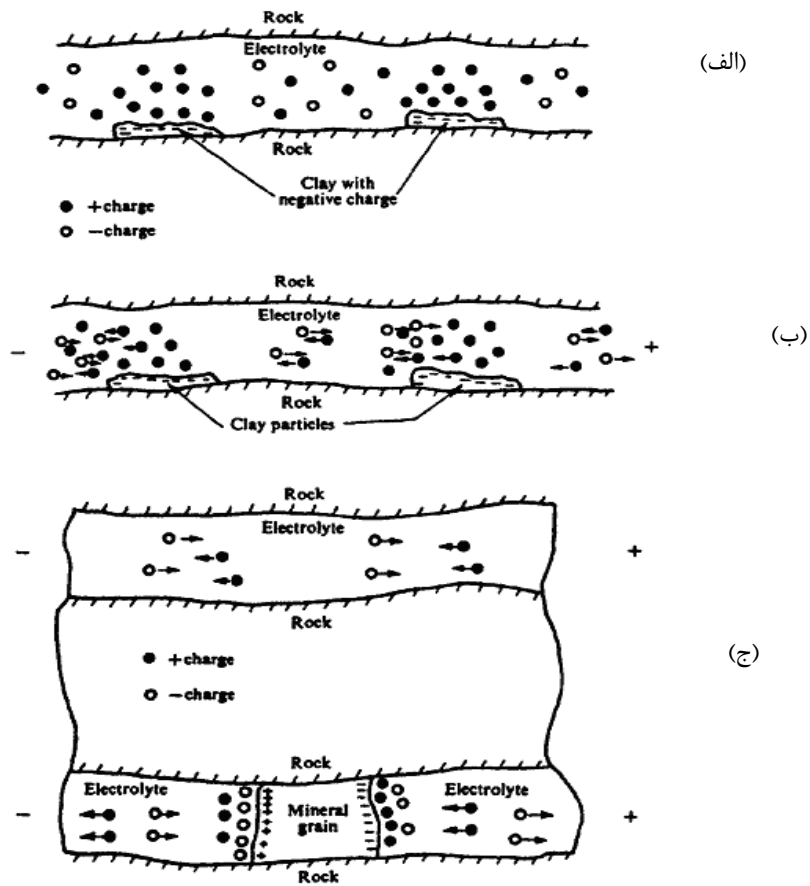
³⁴- Pore Fluids

یون‌ها (حاصله از جریان تزریقی) در سیال خواهد شد. در نتیجه، یون‌های مثبت و منفی در دو طرف سد ایجاد شده تجمع پیدا کرده و تعادل قشرهای مثبت و منفی در سطح کانی‌ها بر هم خواهد خورد (شکل ۲-۱-ب). بعد از گذشت زمانی اندک، یک تعادل جدید پدید خواهد آمد. حال اگر جریان تزریقی ناگهان قطع شود بعد از مدت زمانی کوتاه، یون‌ها دوباره به محل اولیه خود باز می‌گردند و سبب ایجاد ایجاد ولتاژ رو به زوال IP می‌شوند. این نوع IP به بهترین وجه در حضور کانی‌های رسی (که خصوصاً دارای فضاهای بی‌شمار کوچک می‌باشند) صورت می‌گیرد. این نوع IP با افزایش شوری الکترولیت‌های موجود در حفرات، کاهش خواهند یافت [۴،۳۵].

۲-۵-۲- پلاریزاسیون فلزی یا اور ولتاژ^{۳۵}

اگر کانی‌های فلزی در سنگ حضور داشته باشند، هدایت جریان الکتریکی به صورت الکترونیکی نیز صورت می‌گیرد. شکل (۲-۱-ج) یک کانی فلزدار را نشان می‌دهد که پس از تزریق جریان پدیده قطبش القایی الکترودی در آن اتفاق می‌افتد. با تزریق جریان الکتریکی در داخل سنگ، ذرات فلزی هادی (به علت هدایت الکترونیکی) قطبیده خواهد شد (یون‌های مثبت برای گرفتن الکترون از ذره فلزی و یون‌های منفی برای دادن الکترون به آنها) [۴،۳۵]. معمولاً میزان سرعت هدایت الکترون‌ها از طریق ذره فلزی کمتر از سرعت تبادل الکترونی بین یون‌ها و ذره فلزی خواهد بود. در نتیجه در دو طرف ذره فلزی، یون‌ها مثبت و منفی (که هنوز بار خود را از دست نداده‌اند) تجمع پیدا می‌کنند. هنگامی که جریان تزریقی ناگهان قطع شود، یون‌ها به آهستگی پراکنده شده و به محل اولیه خود مراجعت خواهند نمود و سبب پیدایش ولتاژ ضعیف و رو به زوال IP می‌شوند. تمام کانی‌هایی که قابلیت هدایت خوبی دارند (مثل سولفیدهای فلزی، اکسیدها، گرافیت و غیره) سهم بسزایی در این نوع IP دارند. طول مدت دوام ولتاژ روبه زوال IP در داخل زمین به عواملی مثل ساخت سنگ‌ها، تخلخل، نفوذپذیری، قابلیت هدایت الکتریکی کانی‌های فلزی و قابلیت هدایت الکترولیت موجود در حفرات سنگ‌ها بستگی دارند. بزرگی و شدت IP فلزی (الکترودی) به مقدار ولتاژ تزریقی، نوع ماده معدنی، درصد ماده معدنی، اندازه دانه‌ها، تخلخل و مقاومت ویژه سنگ‌های در برگیرنده بستگی دارد [۳۵].

35- Overvoltage



شکل (۱-۲) پلاریزاسیون غشایی و الکترودی. (الف)- پراکندگی نرمال الکترون‌ها در ماسه‌سنگ متخلخل.
 (ب)- پلاریزاسیون غشایی. (ج)- پلاریزاسیون الکترودی [۳۵].

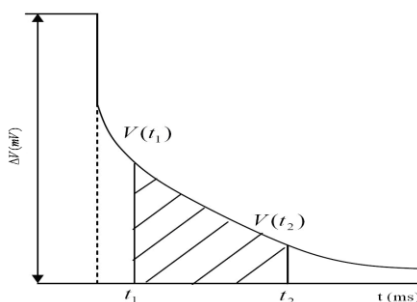
۲-۶- اندازه‌گیری ولتاژ رو به زوال IP در حوزه زمان

در کارهای ژئوفیزیکی روش‌هایی که در حوزه زمان پدیده قطبش القایی را اندازه‌گیری می‌کنند، خیلی سریع‌تر و تفسیر پارامترهای آن نیز آسان‌تر می‌باشد. از این رو این روش‌ها بیشتر متداول می‌باشند. در مطالعات آب‌های زیرزمینی معمولاً اندازه‌گیری IP در حوزه زمان صورت می‌گیرد. در روش قطبش القایی در حوزه زمان (TDIP^{۳۶}) جریان تزریق شده به داخل زمین می‌تواند به صورت موج مربعی، مثلثی و پالسی تزریق باشد. کلاً در این روش از جریان DC و یا AC با فرکانس خیلی کم (حدود ۱/۰ Hz) استفاده می‌شود. معمولاً جریان (I) را به مدت ۱ الی ۵ دقیقه وارد زمین می‌کنند تا اختلاف پتانسیل به یک حالت ثابت و پایدار ΔV_s برسد، سپس جریان را ناگهان قطع می‌کنند. در این حالت نحوه اندازه‌گیری در بخش بعدی اندازه‌گیری می‌شود [۳۵].

³⁶-Time Domain Induced Polarization

۲-۷- اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP

اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است. بعضی از دستگاه‌ها می‌توانند ولتاژهای IP را نسبت به زمان بطور پیوسته ثبت کرده و مساحت زیر منحنی را در یک محدوده زمانی معین $(t_1 - t_2)$ محاسبه نمایند. اگر دستگاه ثبت نتواند ولتاژ دشارژ شدن IP را نسبت به زمان به طور پیوسته اندازه‌گیری نماید، برای بارپذیری استاندارد اندازه‌گیری‌ها در یک بازه زمانی بین ۰/۴۵ و ۱/۱ میلی‌ثانیه انجام می‌گیرد و بعد به کمک آنها منحنی ولتاژ IP را رسم می‌کنند و سپس به کمک انتگرال مساحت زیر منحنی را در محدوده t_1 و t_2 بدست می‌آورند [۳۵].



شکل (۲-۲) اندازه‌گیری منحنی رو به زوال ولتاژ [۳۵].

در هر دو حالت کمیت بارپذیری ظاهری از نسبت مساحت زیر منحنی (A) ولتاژ IP در یک محدوده زمان معین $(t_1 - t_2)$ به ΔV_s بدست می‌آید [۳۵].

$$M = \frac{A}{\Delta V_s} = \frac{1}{\Delta V_s} \times \int_{t_1}^{t_2} \Delta V(t) dt \quad (۳-۲)$$

که در آن M بارپذیری ظاهری بر حسب واحد میلی‌ثانیه می‌باشد.

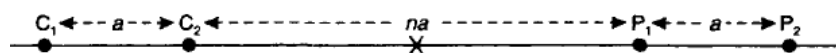
۲-۸- آرایه‌های بکار رفته در روش‌های مقاومت ویژه و IP

برای طراحی مناسب عملیات برداشت IP و مقاومت ویژه، داشتن اطلاعات کلی در رابطه با شکل اندازه، عمق و ویژگی‌های ساختاری هدف ضروری می‌باشد. انتخاب یک آرایش مناسب در عملیات میدانی از نکات بسیار مهم است. در عملیات صحرائی ژئوالکتریک آرایه وِنر، آرایه شلومبرژه، آرایه‌های

دوقطبی - دوقطبی^{۳۷} (d-d)، قطبی - دوقطبی (p-d) یا سه نقطه‌ای، آرایه گرادیان از کاربردی‌ترین آرایه‌ها می‌باشند. در روش IP، آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی بیشتر استفاده می‌شوند [۳۵].

شکل (۳-۲) چگونگی قرارگیری الکترودها در آرایه دوقطبی را نشان می‌دهد که در آن $C_1C_2 = P_1P_2 = a$ و $C_1P_1 = na$ می‌باشد. $n=1,2,3,\dots,10$

در آرایش دوقطبی - دوقطبی فاصله بین الکترودهای جریان (C_1C_2) و فاصله بین الکترودهای پتانسیل (P_1P_2) تقریباً ثابت بوده و به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فاصله بین مراکز دو قطبی یعنی na خواهد بود. در این آرایش اندازه‌گیری‌ها نسبت به تغییرات افقی بسیار حساس است. عمق تجسس در این آرایه به فاکتور n و فاصله جدایش الکترودی a بستگی دارد، به طوری که هر چه a (طول دو قطبی) کوچکتر باشد قدرت تفکیک - پذیری جانبی افزایش می‌یابد ولی عمق اکتشاف پایین خواهد بود. یکی از معایب این آرایه کوچک بودن شدت سیگنال به نوبه برای مقادیر بزرگ فاکتور n می‌باشد که در عمل برای کاهش نویز بندرت n از ۸ تجاوز می‌کند. از این رو انتخاب طول دو قطبی، طول پروفیل و مقدار حداکثر n باید متناسب با عمق مورد بررسی طراحی شود و برای افزایش عمق اکتشاف نمی‌توان فاکتور n را بیش از ۱۰ افزایش داد [۳۶].



$$k = \pi n(n+1)(n+2)a$$

شکل (۳-۲) نمای کلی آرایه دوقطبی - دوقطبی [۳۶]

دلیل کاربرد گسترده این آرایه در روش‌های مقاومت ویژه و IP، میزان کم نویزهای حاصل از جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین الکترودهای جریان و پتانسیل در این آرایه می‌باشد. علاوه بر آن، این آرایه دارای مزایای دیگری نیز می‌باشد که اختصاراً به آنها اشاره می‌شود.

۲-۸-۱- مزایای استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی

مزایای استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی به شرح زیر می‌باشد [۳۶]:

- ۱- با فواصل نسبتاً کم P_1P_2 و C_1C_2 می توان اعماق زیادی را مورد بررسی و تجسس قرار داد.
- ۲- فواصل کم P_1P_2 و C_1C_2 باعث کاهش کار صحرایی و افزایش کارآیی و راندمان کار می شوند.
- ۳- به علت فواصل کم P_1P_2 و C_1C_2 کابل های برق مورد استفاده بسیار کوتاه می باشد.
- ۴- تجسسات دو جانبه را ممکن می سازد یا به عبارتی از عمق و راستای افقی اطلاعات خوبی ارائه می دهد.
- ۵- نوفه حاصل از جفت شدگی الکترومغناطیسی، داده های بدست آمده را کمتر آلوده می سازد.

۲-۸-۲- نحوه اندازه گیری با استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی محوری³⁸ و رسم شبهه مقطع

جهت تهیه یک شبهه مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری معمولاً طرز عمل بدین صورت است که یک خط پروفیل در جهت عمود بر امتداد³⁹ ساختها، کانسارها و لایه های زیرسطحی در نظر می گیرند و عملیات اندازه گیری با آرایش دوقطبی - دوقطبی (محوری) در روی این پروفیل انجام می شود.

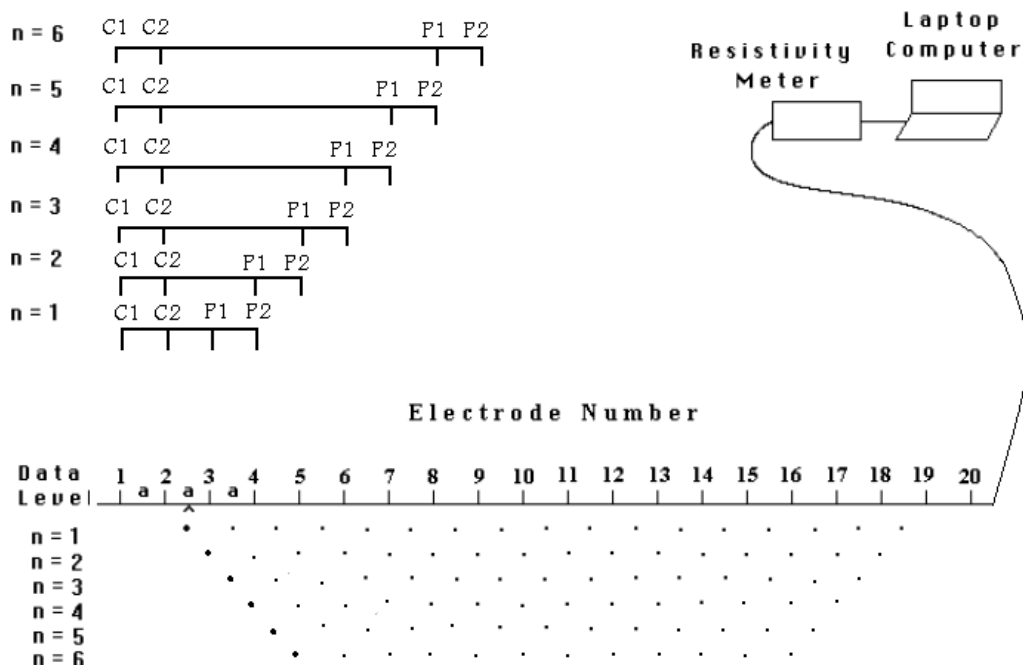
در این آرایش $P_1P_2 = C_1C_2 = a$ می باشد و با در نظر گرفتن O و O' بترتیب به عنوان نقاط میانی P_1P_2 و C_1C_2 ، OO' برابر na تعیین می گردد. n فاکتور عددی است.

در ابتدای عملیات $OO' = 2a$ (یعنی $n=2$) در نظر گرفته می شود. اعداد اندازه گیری شده توسط الکترودهای P_1 و P_2 معمولاً در محل برخورد خطوطی که با زاویه ۴۵ درجه از O و O' رسم می شود نسبت داده می شوند. عمق نفوذ با زیاد شدن r زیاد می شود. نخست C_1 و C_2 را ثابت نگه داشته و الکترودهای P_1 و P_2 را در طول پروفیل و هر بار به اندازه a جابجا می کنند. در این حالت عمق نفوذ (عمق تجسس) برابر $na/2$ خواهد بود. سپس الکترودهای C_1 و C_2 را به اندازه a در طول پروفیل جابجا کرده و عمل فوق را تکرار می نمایند. اعمال فوق معمولاً تا انتهای پروفیل انجام می گیرد. سپس مقادیر بدست آمده از هر کمیت IP و یا مقاومت ویژه را کانتور می نمایند و به صورت یک شبهه مقطع بارپذیری و یا مقاومت ویژه در می آورند. به کمک این شبهه مقطعها می توان تا حدودی نحوه قرار گرفتن زون های آنومال را نیز در داخل زمین

¹- Axial

²- Strike

نشان داد. مناسبترین شبه مقطع یا به عبارتی شیوه نمایش داده‌های آرایش دوقطبی - دوقطبی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است [۳۴].



شکل (۲-۴) تهیه شبه مقطع در آرایش دوقطبی - دوقطبی [۳۴].

۲-۹- اصول روش‌های الکترومغناطیسی

روش‌های EM با توجه به منبع تولید میدان به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- روش‌های میدان طبیعی

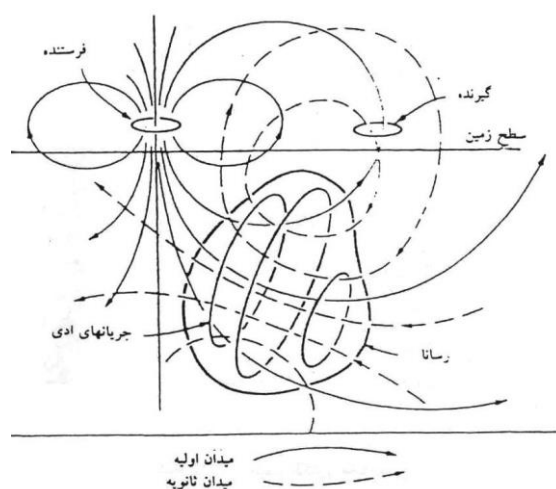
اینگونه روش‌های EM را می‌توان با استفاده از سیگنال‌های طبیعی زمین یا چشمه میدان‌های EM موجود در اطراف ناحیه مورد نظر انجام داد. از میان این روش‌ها، روش‌های مغناطیسی با فرکانس شنوایی ($AFMAG^{40}$) و مگنتوتلوریک (MT^{41}) دارای اهمیت خاصی بوده و کاربرد بیشتری دارند.

۲- روش‌های میدان مصنوعی

⁴⁰-Audio Frequency Magnetic

⁴¹-Magnetotelloric

در این روش‌ها، میدان اولیه EM با عبور جریان متناوب از درون یک حلقه، کابل یا سیم پیچ با استفاده از یک ژنراتور ایجاد می‌شود. اگر جسمی رسانا در زیر زمین وجود داشته باشد مؤلفه مغناطیس ناشی از موج تابشی EM جریان‌های گردابی^{۴۲} (جریان‌های القایی) در داخل رسانا را القا می‌نماید. میزان جریان القایی ایجاد شده در یک هادی در اثر میدان اولیه، به مقاومت الکتریکی هادی و فرکانس چشمه میدان بستگی دارد و در کل میزان جریان القایی با کاهش مقاومت توده مورد مطالعه و افزایش فرکانس چشمه، افزایش می‌یابد. این جریان‌های ادی به نوبه خود میدان ثانویه EM ایجاد می‌کند که به وسیله گیرنده آشکار می‌شود. شکل (۲-۵) این موارد را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۲-۵) نمایش شماتیکی امواج EM [۱]

گیرنده میدان اولیه EM را نیز که از هوا عبور می‌کند آشکار می‌سازد، بنابراین پاسخ کلی گیرنده ترکیبی از میدان‌های اولیه و ثانویه است. در نتیجه پاسخ اندازه‌گیری شده هم از نظر فاز و هم از نظر دامنه نسبت به میدان اولیه متفاوت خواهد بود. از درجه تفاوت این مؤلفه‌ها می‌توان اطلاعات مهمی در مورد هندسه و خواص الکتریکی رسانای زیر سطحی بدست آورد [۳۷].

۲-۱۰- رابطه فاز و دامنه

⁴²-Eddy current

با عبور جریان متناوب با فرکانس f و شدت I_p از سیم پیچ فرستنده، میدان مغناطیسی اولیه (H_p) ایجاد می‌شود که این میدان متناسب و هم‌فاز با I_p بوده و رابطه زیر بین آنها برقرار می‌باشد [۳۵]:

$$H_p = KI_p \sin(2\pi ft) \quad (۴-۲)$$

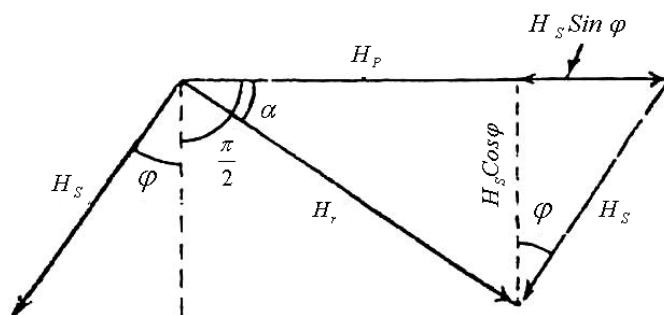
K پارامتر هندسی نام دارد که به شکل، تعداد دور و سطح سیم پیچ بستگی دارد.

با اعمال این میدان روی ساختار هادی یک جریان القایی ایجاد می‌شود. این جریان یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه H_s را تولید کرده که با H_p متناسب بوده و 90° درجه با آن اختلاف فاز دارد. وجود جسم رسانای موجود در زیر زمین نیز باعث اختلاف فاز φ نسبت به اختلاف پتانسیل القایی می‌شود. بنابراین اختلاف فاز بین میدان‌های اولیه و ثانویه برابر است با:

$$\theta_p - \theta_s = (90 + \varphi) \quad , \quad \varphi = \text{Arc tan} \frac{\omega L_s}{r_s} \quad (۵-۲)$$

که R مقاومت الکتریکی جسم رسانا، f فرکانس میدان H_p ، $\omega = 2\pi f$ و L القاء جسم رسانا است.

در شکل (۶-۲) این تأخیر فاز به خوبی نشان داده شده است.



شکل (۶-۲) نمودار برداری میدان‌های اولیه (H_p)، ثانویه (H_s)، برآیند (H_r) و اختلاف فاز [۳۵]

با توجه به مقدار φ دو حالت برای مقاومت جسم مورد تجسس می‌توان در نظر گرفت:

۱- زمانیکه مقاومت جسم خیلی زیاد باشد ($r_s \rightarrow \infty$) داریم: $\varphi = 0$. در این صورت اختلاف فاز بین میدان اولیه و ثانویه برابر 90° درجه می‌شود.

۲- در حالتی که رسانندگی جسم بالا باشد ($r_s \rightarrow 0$) داریم: $\varphi = 90$. در نتیجه اختلاف فاز بین میدان اولیه و ثانویه 180° درجه می‌گردد.

مؤلفه میدان القایی در امتداد میدان اولیه که برابر $H_s \sin \varphi$ می‌باشد، را مؤلفه حقیقی یا هم‌فاز نامیده می‌گویند. به همین ترتیب مؤلفه قائم میدان ثانویه $H_s \cos \varphi$ را مؤلفه مجازی یا غیر هم‌فاز می‌نامند که 90° درجه نسبت به میدان اولیه اختلاف فاز دارد. بدین ترتیب میدان ثانویه (H_s) را می‌توان به دو مؤلفه حقیقی با دامنه ($H_s \sin \varphi$) و مجازی با دامنه ($H_s \cos \varphi$) تجزیه نمود.

نسبت دامنه مؤلفه حقیقی میدان ثانویه $(H_s)_R$ به مؤلفه مجازی آن $(H_s)_{Im}$ به اختلاف فاز φ بستگی داشته $\tan \varphi = \frac{(H_s)_R}{(H_s)_{Im}}$ و می‌توان از این نسبت به جای اختلاف فاز برای تشخیص توده‌های معدنی استفاده نمود. هر چه نسبت فوق بزرگتر باشد، رسانندگی جسم بیشتر است [۳۵].

۲-۱۱- قطبش بیضی وار

میدان برآیند حاصل از میدان‌های اولیه و ثانویه، یک میدان مغناطیسی است که به صورت بیضی پلاریزه شده است. میدان‌های اولیه و ثانویه را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۳۵]:

$$H_p = A \sin \omega t \quad ; \quad H_s = B \cos(\omega t - \varphi) \quad (۲-۶)$$

که در آن A و B توابعی از وضعیت فرستنده، توده رسانا و گیرنده هستند. با کمک گرفتن از بسط $\cos(\omega t - \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi$ خواهیم داشت:

$$\left(\sqrt{1 - \frac{H_p^2}{A^2}} \right) \cos \varphi + \left(\frac{H_p}{A} \right) \sin \varphi = \frac{H_s}{B} \quad (۲-۷)$$

با مجذور کردن و ساده کردن رابطه فوق داریم:

$$\frac{H_p^2}{A^2} + \frac{H_s^2}{B^2} - \frac{2H_p H_s \sin \varphi}{AB} = \cos^2 \varphi \quad (۲-۸)$$

و

$$\frac{H_p^2}{A^2 \cos^2 \varphi} + \frac{H_s^2}{B^2 \cos^2 \varphi} - \frac{2H_p H_s \sin \varphi}{AB \cos^2 \varphi} = 1 \quad (9-2)$$

معادله (۹-۲)، معادله یک بیضی است که برای بدست آوردن این معادله، دو فرض زیر در نظر گرفته شده است:

۱. H_p و H_s بر هم عمودند.

۲. H_s تنها از جریان واقع در رسانا بوجود آمده است.

دو حالت مهم که قبلاً نیز گفته شد، در اینجا وجود دارد:

۱- وقتی $\varphi = 90$ باشد، معادله بیضی به صورت زیر در می آید:

$$B^2 H_p^2 + A^2 H_s^2 - 2AB H_p H_s = 0 \quad (10-2)$$

و

$$\left(\frac{H_p}{A} - \frac{H_s}{B} \right)^2 = 0 \Rightarrow H_s = \frac{B}{A} H_p \quad (11-2)$$

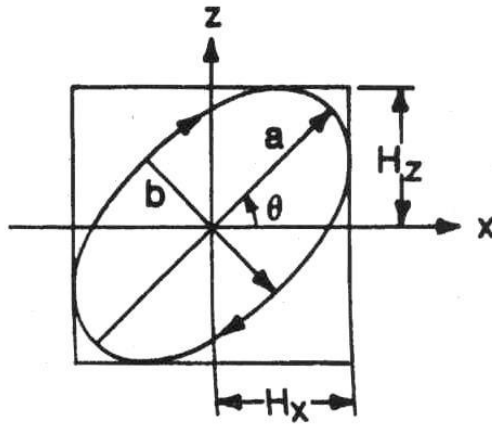
رابطه (۱۱-۲) بیانگر خطی است که از مرکز می گذرد و ضریب زاویه آن $\frac{B}{A}$ می باشد. این حالت نشان دهنده وجود رسانای بسیار خوب در زیر زمین می باشد.

۲- وقتی $\varphi = 0$ باشد، معادله بیضی به فرم زیر خواهد شد:

$$\frac{H_p^2}{A^2} + \frac{H_s^2}{B^2} = 1 \quad (12-2)$$

این وضعیت بیانگر وجود جسم مقاوم در زیر سطح زمین است.

در بعضی از روش های الکترومغناطیسی مثل روش VLF، زاویه کجی یا شیب (θ) بیضی قطبش و همچنین قطرهای بزرگ و کوچک آن (a و b) اندازه گیری می شود. شکل (۷-۲) بیضی پلاریزان و زاویه شیب را نشان می دهد [۳۸].



شکل (۷-۲) پارامترهای بیضی پلاریزان [۳۸]

روش‌های EM با چشمه مصنوعی به دلیل کاربردهای مختلف از تنوع زیادی برخوردار هستند که همگی آنها را می‌توان در دو حوزه فرکانس $(FDEM)^{۴۳}$ و زمان $(TDEM)^{۴۴}$ تقسیم کرد [۳۵]. روش VLF یکی از روش‌های EM با چشمه مصنوعی حوزه فرکانس است که از فرستنده‌های نظامی پر قدرت استفاده می‌کند. عمق نفوذ روش‌های با چشمه مصنوعی از روش‌های چشمه طبیعی کمتر است.

۲-۱۲- روش VLF

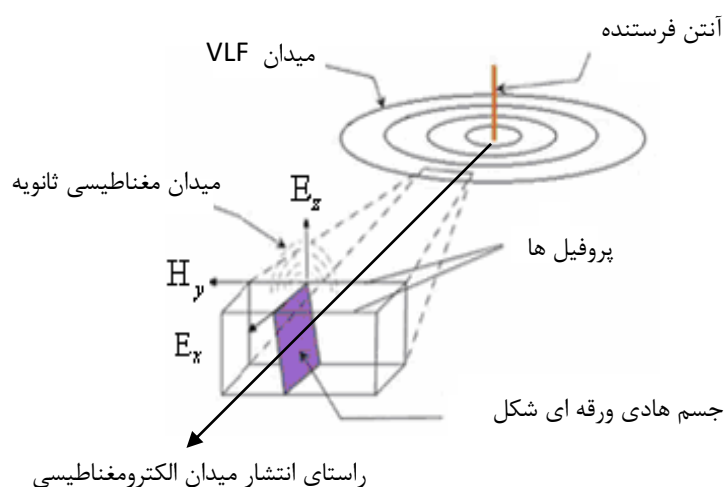
روش VLF روش EM با فرکانس خیلی پایین است که از میدان‌های اولیه ارسالی توسط فرستنده‌های رادیویی نظامی پر قدرت در فواصل دور استفاده می‌کند. این فرستنده‌ها (آنتن بلند قائم) با انتشار امواج EM که شامل میدان الکتریکی قائم و میدان مغناطیسی افقی متناوب عمود بر هم است به اکتشافات ساختارهای زیر سطحی کمک می‌کند. همچنین از این روش می‌توان در مطالعات زیست محیطی، هیدروژئولوژی و تهیه نقشه مقاومت ویژه به دلیل سرعت بالا و هزینه پایین در مراحل اولیه استفاده نمود [۳۷، ۳۸].

روش VLF به طور قراردادی و مرسوم در رنج فرکانسی ۱۵ تا ۳۰ کیلو هرتز (kHz) عمل می‌کند که در چنین باندی تفکیک‌پذیری قائم و عمق اکتشاف پایین است [۳۸]. امواج EM منتشر شده در فاصله ده‌ها کیلومتر از

⁴³-Frequency Domain Electromagnetic

⁴⁴-Time Domain Electromagnetic

منبع به صورت امواج تخت افقی عمل می‌کنند. انتشار سیگنال به طور افقی است و مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی امواج رادیویی در غیاب رساناهای زیر سطحی به صورت خطی پلاریزه می‌شوند. هنگامی که جهت انتشار امواج VLF عمود بر امتداد زون هادی باشد، به علت اینکه میدان مغناطیسی امواج VLF هم امتداد زون هادی قرار می‌گیرند، هیچ گونه القایی صورت نمی‌گیرد و میدان ثانویه (H_s) برابر صفر خواهد بود. اگر راستای انتشار امواج VLF با راستای زون رسانا یکی باشد، یک جریان (گردابی) ثانویه در آن القا می‌شود. وجود جریان‌های القایی داخل رسانای الکتریکی مدفون نهایتاً میدان مغناطیسی ثانویه ایجاد می‌کند که جهت آن مطابق شکل (۲-۸) خلاف جهت میدان مغناطیسی اولیه ساطع شده از فرستنده می‌باشد [۳۹].



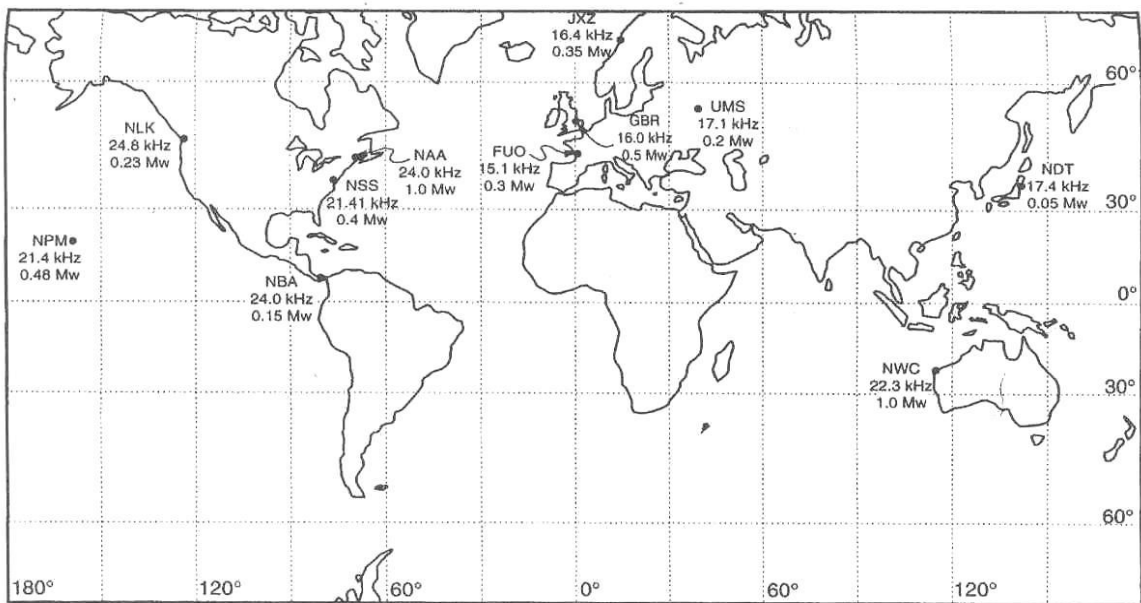
شکل (۲-۸) نحوه ایجاد میدان‌های ثانویه با امواج VLF [۳۹]

برداشت‌های زمینی VLF به وسیله دستگاه‌هایی نیرومند با سرعت بالا برای مطالعه ساختارهای زمین شناسی تا حداکثر عمق کمتر از ۱۰۰ متر انجام می‌شود.

باید توجه داشت که روش VLF قادر به آشکارسازی کانسارهای فلزی پراکنده (مثل کانسارهای پرفیری) نمی‌باشد و توانایی آن بیشتر برای اکتشاف ساختارهای قائم و شیب‌دار می‌باشد و از اکتشاف زون‌های افقی عاجز است. این روش تحت تأثیر تمام رساناهای الکتریکی و ساخته‌های دست بشر مانند خطوط انتقال نیرو، لوله‌ها و... قرار می‌گیرد [۳۸].

۲-۱۳- فرستنده‌های VLF

اولین فرستنده بزرگ VLF بین سال‌های ۱۹۱۰-۱۹۱۲ برای دستیابی به مخابره مطمئن در فواصل دور ساخته شد. در سال‌های بعد فرستنده‌های دیگری ساخته شدند که عمده کاربرد آنها مصارف نظامی به ویژه مخابره دریایی بود. از آن جمله می‌توان به ایستگاه‌های GBR در راکبی بریتانیا، NPM در هاوایی و NSS در آنابلیس ایالات متحده و... اشاره نمود [۳۸]. در شکل (۲-۹) محل قرارگیری چند ایستگاه مهم فرستنده VLF در جهان و در شکل (۲-۱۰) ایستگاه فرستنده GBR [۴۰] نشان داده شده است.

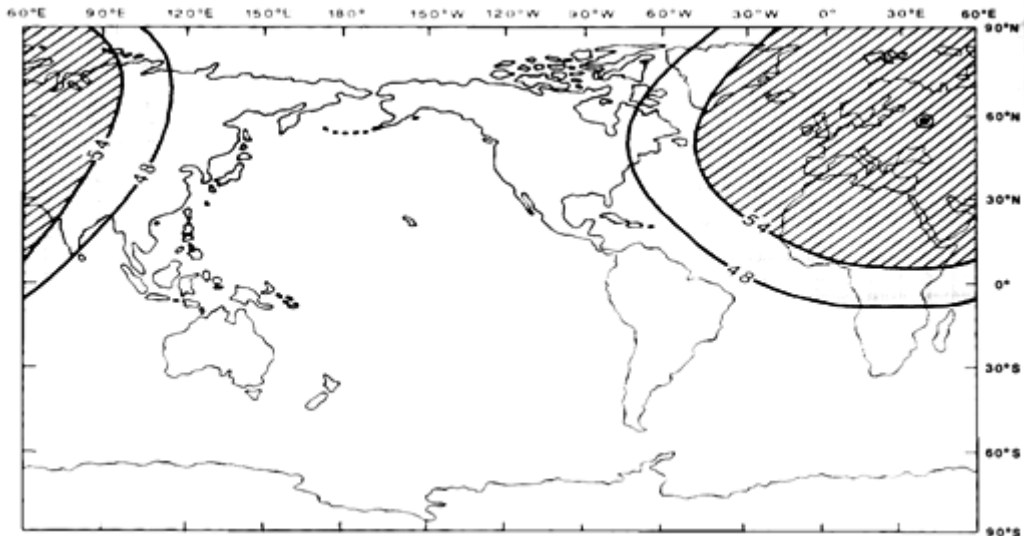


شکل (۲-۹) موقعیت فرستنده‌های مهم جهان [۳۷]

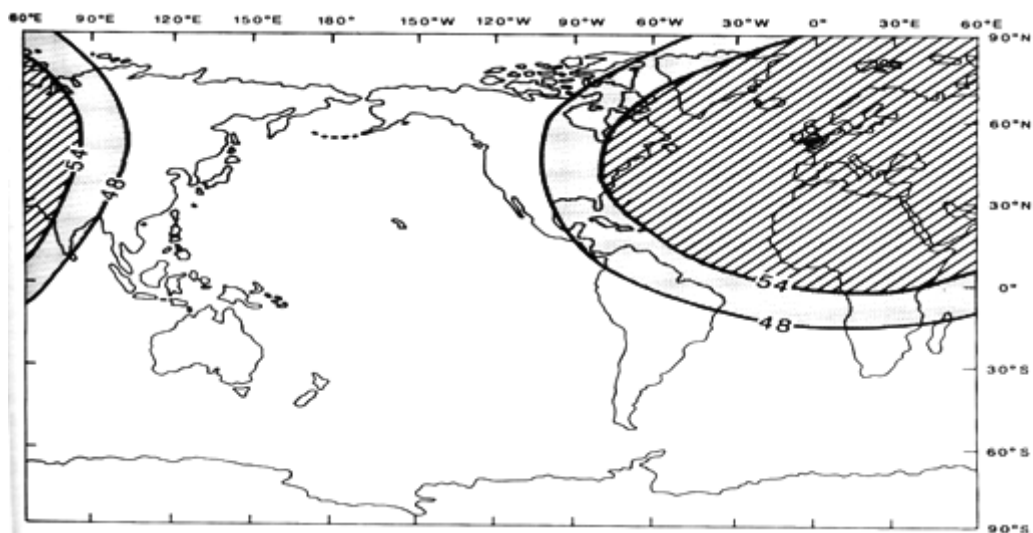


شکل (۲-۱۰) ایستگاه فرستنده GBR [۴۰]

مک نیل^{۴۵} و لابسون^{۴۶} در سال ۱۹۷۵ برای تعدادی از فرستنده‌های مهم نقشه‌های کنطوری نسبتاً کاملی را برای ارزیابی توان و قدرت سیگنال‌های فرستاده شده ارائه داده‌اند. اشکال (۲-۱۱) و (۲-۱۲) نقشه‌های ترسیمی را برای ایستگاه‌هایی که کشور ما را تحت پوشش قرار می‌دهند، نشان می‌دهند [۳۸]. لازم به ذکر است که ایستگاه‌های دیگری نیز کشور ما را پوشش می‌دهند.



شکل (۲-۱۱) شدت سیگنال دریافتی بر حسب دسی‌بل برای فرستنده UMS, Moscow [۳۸]



شکل (۲-۱۲) شدت سیگنال دریافتی بر حسب دسی‌بل برای فرستنده GBR, Rugby [۳۸]

1-Mcneill
2-Labson

۲-۱۴- گیرنده‌های VLF

اولین دستگاه نظامی VLF زمینی در سال ۱۹۶۴ توسط رونکا⁴⁷ به کار گرفته شد. از سال ۱۹۶۹ چندین سیستم VLF هوابردی به وجود آمدند که برای مقاصد تجاری استفاده می‌شدند. همانند سایر سیستم‌های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس، در این روش نیز تمام دستگاه‌های زمینی و هوایی VLF قادر هستند مؤلفه‌های حقیقی (زاویه شیب) و موهومی (الیپتیسیته یا بیضویت) میدان مغناطیسی القایی را برای آشکارسازی زون‌های هادی الکتریکی اندازه‌گیری کنند. جدول (۲-۳) خلاصه‌ای از دستگاه‌های VLF زمینی را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۳) مشخصات برخی دستگاه‌های گیرنده VLF زمینی [۳۷]

توضیحات	تعداد سیم پیچها	فاز مرجع	فاکتور اندازه گیری	نوع کاربرد	دستگاه گیرنده
دو فرکانس	۲	Hy	θ, ε	زمینی	Geonics EM 16
چند فرکانسی کالت و بکر		Hy	Ex(I,R)	زمینی	Geonics EM 16R
دارای قابلیت تنظیم پیوسته	۲	Hy	H _z (I,R)	زمینی	ABEM WADI
دو فرکانس بطور همزمان	۳	Hy	Ex(I,R), θ, ε	زمینی	BRGM VLF2

θ = زاویه شیب، ε = الیپتیسیته و E_x = شدت میدان الکتریکی در راستای محور افقی X می‌باشد.

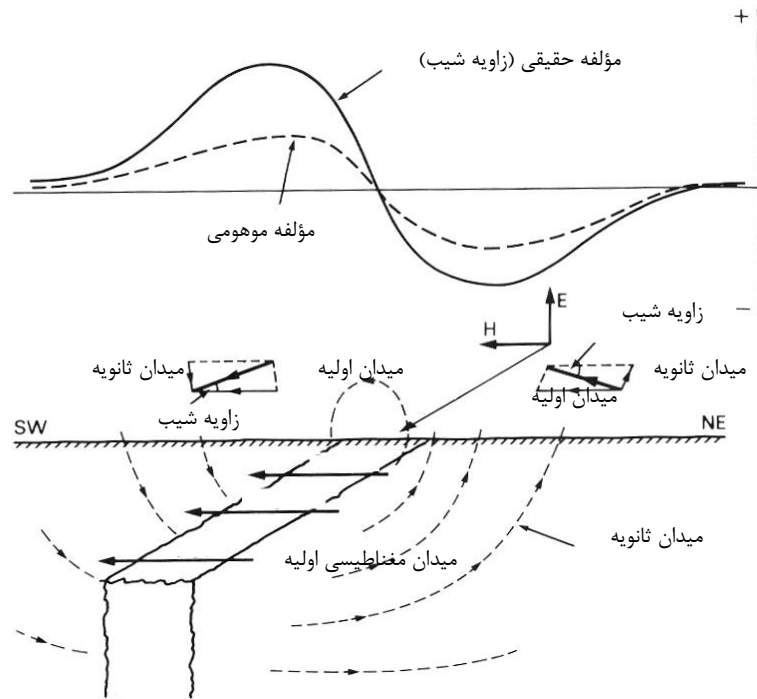
دستگاه سوئدی ABEM- WADI [۴۱] قادر است به صورت رقومی داده‌ها را اندازه‌گیری، پردازش و نمایش دهد.

¹-Ronka

۲-۱۵- کمیت‌های مورد اندازه‌گیری در روش VLF

۲-۱۵-۱- زاویه شیب^{۴۸}

زاویه‌ای که بردار برآیند حاصل از میدان‌های اولیه و ثانویه (H_r) با سطح افق می‌سازد، زاویه شیب (θ) نام دارد. در روش VLF مطابق شکل (۲-۱۳) میدان اولیه (H_p) افقی و میدان ثانویه (H_s) در اطراف توده زیرسطحی به صورت دوایر متحدالمرکز منتشر می‌شود. میدان برآیند (H_r) در اطراف فرستنده به سمت بالا شیب دارد. با نزدیک شدن حلقه گیرنده به ساختار هادی، شیب (H_r) کم شده و در روی توده این شیب (θ) صفر می‌شود. با دور شدن حلقه گیرنده از زون هادی زاویه شیب زیاد شده که جهت آن به سمت پایین می‌باشد [۳۸].



شکل (۱۳-۲) نمودار زاویه شیب در بالای یک توده رسنا [۳۷]

در سال ۱۹۷۴ اسمیت^{۴۹} و وارد^{۵۰} نشان دادند که زاویه شیب را می‌توان به وسیله فرمول (۱۳-۲) بدست آورد [۳۸]:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \left(\frac{H_z}{H_x} \right) \cos \varphi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x} \right)^2} \right) \quad (13-2)$$

دامنه میدان قائم نسبت به میدان افقی کوچکتر است به طوری که میدان افقی با H_x و میدان قائم با $H_z e^{i\varphi}$ بیان می‌شود.

برای الپتیسیته بیضوی قطبش داریم [۳۸]:

1- Smith
2- Ward

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin \varphi}{|H_z e^{i\varphi} \sin \theta + H_x \cos \theta|^2} \quad (14-2)$$

زاویه (θ) تقریباً با مؤلفه حقیقی $\frac{H_z}{H_x}$ برابر و الیپتیسیته ($\varepsilon = \frac{b}{a}$) تقریباً با مؤلفه موهومی $\frac{H_z}{H_x}$ برابر می‌باشد [۳۸].

۲-۱۵-۲- اندازه‌گیری تابع مختلط تیپر در روش VLF

میدان اولیه در فاصله بسیار زیاد از فرستنده VLF به صورت امواج تخت عمل می‌کند. در این صورت بین مؤلفه‌های افقی و قائم میدان مغناطیسی (H_x, H_y, H_z) رابطه خطی (۲-۱۵) برقرار است [۴۲]:

$$H_z = AH_x + BH_y \quad (15-2)$$

برای یک ساختار دوبعدی با امتداد در جهت x در واقع نسبت میدان مغناطیسی قائم به میدان مغناطیسی افقی ($\frac{H_z}{H_y}$) همان تیپر است و شاخص مهمی در تشخیص ناپیوستگی‌های الکتریکی در تفسیر VLF

می‌باشد. اندازه تیپر در مقابل لبه‌های یک بی‌هنجاری دو بعدی عریض زیاد و در روی خود آنومالی مقدار

صفر خواهد داشت و برای یک ساختار قائم نازک یک پاسخ صفر بر روی مرکز آن خواهد داد و در روی یک زمین لایه‌ای و همگن نیز مقداری برابر با صفر خواهد داشت. تابع مختلط تیپر به ساختار زمین بستگی دارد و مستقل از جهت فرستنده می‌باشد [۴۲].

عملاً در هر منطقه مورد مطالعه، محور x را در راستای زمین شناسی (ترجیحاً در جهت فرستنده VLF) و محور y را در راستای پروفیل قرار می‌دهند که تابع انتقال یا همان مقدار اسکالر تیپر، B_{sca} نامیده شده و به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$H_z = BH_y \quad (16-2)$$

فقط وقتی $A = 0$ باشد، تابع تیپر B با B_{sca} برابر است.

دستگاه گیرنده VLF نوع ABEM-WADI [۴۱] این قابلیت را دارد که به جای اندازه‌گیری زاویه شیب و الیپتیسیته، نسبت‌های حقیقی و موهومی تابع تیپر $B = \frac{H_z}{H_y}$ را به صورت درصد تعیین کرده و با رسم نمودار این داده‌ها می‌توان به پردازش و تفسیر آنها پرداخت.

حال که با تئوری روش‌های مقاومت ویژه، IP و VLF آشنا شدیم، در فصل بعدی با اعمال فیلترها بر روی داده‌های تیپر برداشتی VLF برای منطقه مورد مطالعه به تفسیر کیفی و نیمه کمی این داده‌ها می‌پردازیم.

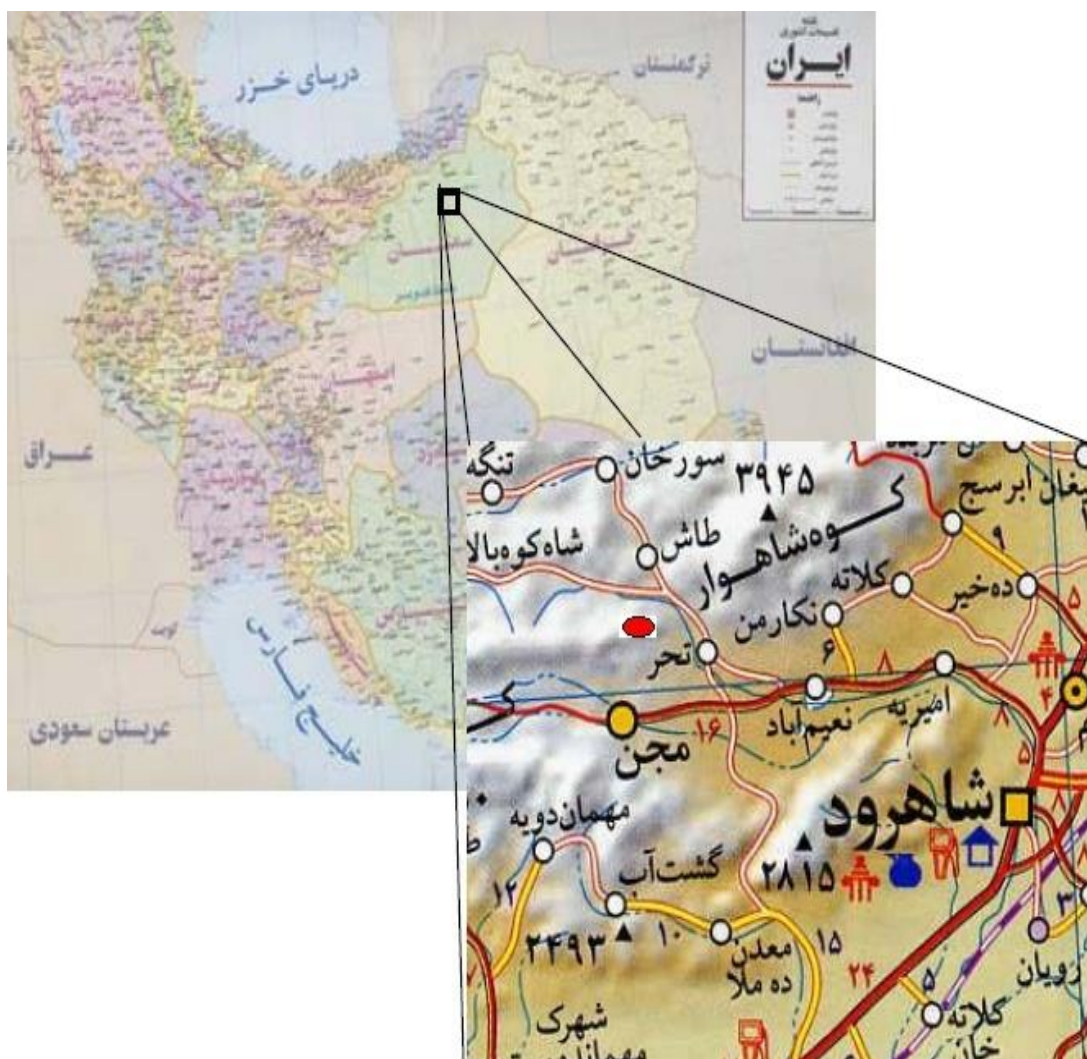
۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ضمن شرح مختصری از محل و موقعیت جغرافیایی و شرایط زمین‌شناسی منطقه، پروفیل‌های اندازه‌گیری داده‌های VLF ارائه می‌شوند و سپس با فیلتر کردن داده‌های VLF، محل تقریبی زون‌های بی‌هنجار (آلودگی‌های احتمالی حاصل از معدنکاری) مشخص شده و در ادامه برای تعیین گسترش عرضی و عمقی این زون‌های آنومال، شبه مقطع چگالی جریان برای داده‌های هر پروفیل با استفاده از نرم‌افزار مربوطه تهیه و تفسیر خواهند شد.

۳-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در شمال غرب شهرستان شاهرود و در نزدیکی شهر مجن در منطقه‌ای کوهستانی واقع شده است. نزدیکترین روستا به این محل روستای تاش از توابع شهر مجن می‌باشد. مطابق شکل (۳-۱) برای دسترسی به محل باید پس از طی ۳۰ کیلومتر جاده آسفالت‌شاهرود- تاش و رسیدن به محل تفریحی

به نام فرح زاد، وارد فرعی سمت چپ جاده (شمال منطقه) شده و ۷ کیلومتر از جاده خاکی را طی کرده تا به محدوده مورد نظر رسید.



شکل (۱-۳) موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی منطقه. نقطه قرمز محل تقریبی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۴۳].

۳-۳- زمین شناسی عمومی و کانی‌زایی محدوده مورد مطالعه

شهر مجن در مرکز یک نادویس بزرگ به نام ناودیس میاناب قرار دارد که این ناودیس خود جزئی از چین خوردگی البرز است که در اوائل دوران سوم زمین شناسی بوجود آمده است. مواد معدنی شناخته شده

در محدوده مورد مطالعه عمدتاً سرب و روی می‌باشد. ذخیره سرب منطقه تاش و مجن غالباً از نوع سولفیدی و به صورت کانی گالن است که بخشی از این ذخیره در نزدیکی سطح زمین بر اثر هوازدگی به کانی سروریت و در حالات بسیار نادر به کانی انکلزیت تبدیل شده است. اما به طور کلی گالن در برابر هوازدگی تا حدود زیادی مقاوم می‌باشد. لذا علی‌رغم هوازدگی قسمت‌های سطحی، بخش‌های درونی به صورت دست نخورده باقی می‌ماند. کانی‌سازی در این بخش بیشتر در داخل آهک و دولومیت‌های سازند لار صورت گرفته است که بالاخص در زون‌های درزه‌دار یا نواحی فرو ریزشی و در تغییرات رخساره‌ای سرب متمرکز شده است که این مسأله نمایانگر کنترل و تمرکز ماده معدنی به درجه تغییرات و دگرگونی مربوط به چین‌خوردگی و رواندگی است. این انباشته‌ها از رگه‌های کوچک ده سانتی‌متری تا پنجاه سانتی‌متری و حتی یک متری متغیر است. در منطقه مورد مطالعه آهک‌های لار مستقیماً روی تشکیلات شمشک قرار دارند و سازند دلیچای در این منطقه دیده نمی‌شود. در بالای آهک‌های لار نیز بازالت‌های آلکالن مربوط به فاز اتریشن (بین کرتاسه بالایی و پایینی) قرار دارد. روی این بازالت‌های آلکالن را آهک‌های کرتاسه می‌پوشاند. در منطقه مجن آهک‌های لار تشکیل ستیغ‌های مرتفعی را می‌دهد که بیشتر از آهک و آهک‌های دولومیتی زرد رنگ همراه با ندول‌های چرت تشکیل شده است. در این آهک‌ها تکه‌های خرد شده آمونیت نیز وجود دارد [۴۴]. سنگ‌های ژوراسیک (به‌ویژه سازند لار) در ناحیه مورد مطالعه گسترش نسبتاً فراوانی دارند و مناطق مرتفع کوهستانی را بوجود آورده‌اند.

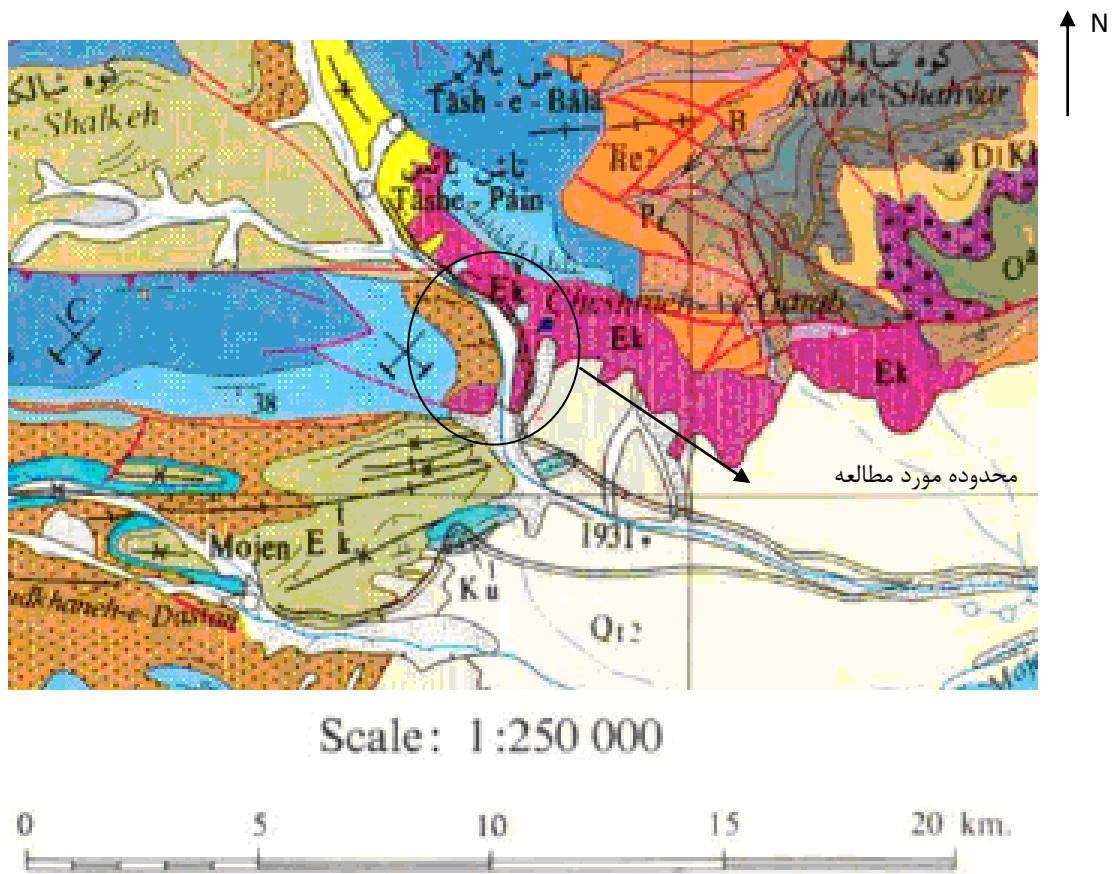
سنگ‌های کرتاسه که عمدتاً آهکی هستند در حقیقت وابسته به کرتاسه بالایی‌اند. وجود لایه بازالتی در قاعده بین آهک‌ها و همچنین ناپیوستگی هم‌شیب و گاه دگرشیب میان سنگ‌های کرتاسه و سنگ‌های ژوراسیک بالایی به دلیل وجود رخداد تکتونیک کیمرین - آبسین است. شکل (۳-۲) نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی را در نقشه چهار گوش ۱:۲۵۰:۰۰۰ گرگان نمایش می‌دهد.

در قسمت شرقی منطقه مورد مطالعه کانی‌سازی بیشتر به صورت روی می‌باشد، به ویژه از نوع کانی‌های کربناته روی نظیر اسمیت زونیت، همی‌مورفیت و کالامین. همی‌مورفیت به دلیل مجاورت با ترکیبات آهن‌دار موجود به رنگ قهوه‌ای مشاهده می‌شود [۴۵].

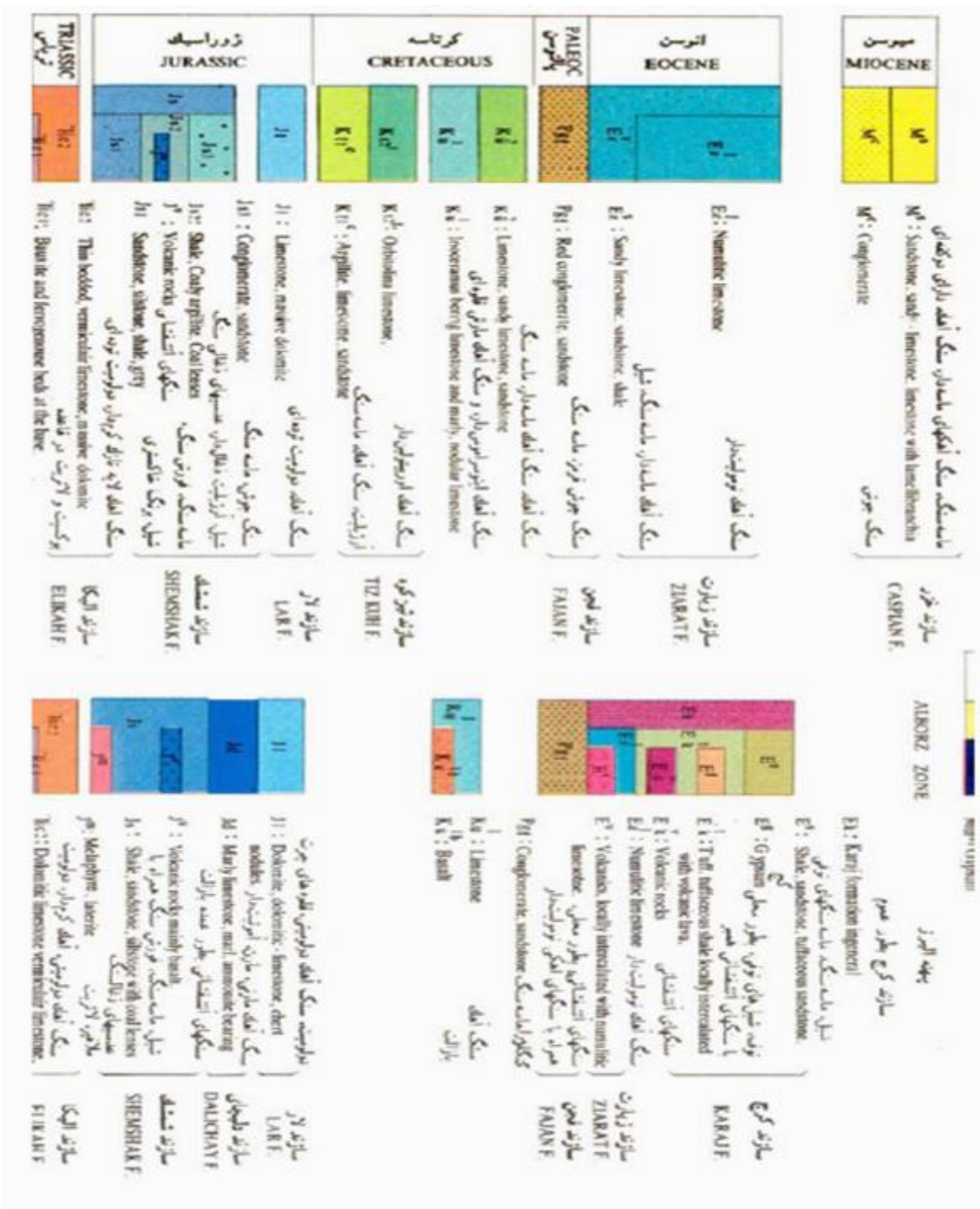
معدن تاش و مجن در اثر چین‌خوردگی سیمین پسین در این زون و همچنین چین‌خوردگی اوایل دوگر که یکی از ویژگی‌های این زون می‌باشد دیده می‌شود. با مقایسه ویژگی‌های موجود در کانسار و ویژگی‌های کانسارهای سرب و روی تیپ دره می‌سی‌سی‌پی می‌توان این کانسار را در گروه کانسارهای سرب

و روی با سنگ میزبان کربناته و دسته تیپ دره می‌سی‌سی‌پی قرار داد. در کانسار مورد مطالعه روی از فراوانی بیشتری برخوردار بوده و این نسبت به بیشتر از ۲ می‌رسد. بنابراین کانسار مورد نظر نوع غنی از روی است [۴۴].

لازم به ذکر است که در بخش پایینی محدوده معدنکاری و تونل استخراجی، دره‌ای پر شیب با رسوبات واریزهای مربوط به سازندهای آهکی و ماسه سنگی بالادست قرار دارد. علاوه بر آن تلی از مواد معدنکاری شده هوازده به همراه با طله‌های حاوی پیریت در مناطق بالادست این دره و مناطق اطراف آن دپو شده‌اند [۳۱].



شکل (۳-۲- الف) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۲۵۰:۰۰۰ [۴۶]



شکل (۳-۲-ب) راهنمای نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [۴۶]

۳-۴- سوابق معدنکاری قدیمی در منطقه

در حوالی محدوده مورد مطالعه شواهد معدنکاری قدیمی که قدمت آن به حدود ۴۵ تا ۵۰ سال پیش باز می‌گردد، مشاهده می‌شود. در گذشته رگه‌های پرعیار ماده معدنی شناسایی گردیده و

حفریات معدنی بر روی آنها صورت گرفته است. به طور کلی عملیاتی که به عنوان کارهای قدیمی شناخته شده‌اند، عبارتند از:

۱- در منطقه کوه برفکی ۵ دهانه تونل قدیمی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند که مجموع طول آنها به ۱ کیلومتر می‌رسد.

۲- در منطقه یورت بابا اکتشافات قدیمی (شامل تونل و ترانشه) به تعداد بسیار زیاد وجود داشته که در اثر گذر زمان و تأثیر شرایط محیطی بسیاری از آنها تخریب شده است و در حال حاضر آثار آنها مشاهده می‌شود. از بین آنها تعداد ۳ دهانه تونل با مجموع طول ۴۰۰ متر هنوز باقیست.

۳- در بخش‌های دیگر محدوده آثاری از وجود اکلون‌ها، چاه‌ها و دویل‌های مختلفی مشاهده می‌شود که به دلیل عدم وجود نقشه‌های آنها و بعضاً بسته شدن دهانه بعضی از آنها امکان بررسی داخلی آنها امکان‌پذیر نمی‌باشند [۴۳].

با استخراج کانه‌های فلزی از معدن در طول مدت زمان طولانی، در دهانه تونل و منطقه بالادست محدوده مورد مطالعه (شکل (۳-۳)) انباشت مواد معدنی استخراجی و باطله‌های غنی از مواد سولفیدی بخصوص پیریت مشاهده می‌شود. اکسید شدن پیریت به عنوان یک کانی متداول هم در معادن سولفیدی فلزی و هم در معادن زغال سبب تولید اسید سولفوریک می‌گردد [۱۰]. تولید این اسید به عنوان یک اثر منفی و نامطلوب عملیات معدنی شناخته شده است. اسید تولید شده معمولاً حاوی سولفات‌ها، کانی‌های محلول⁵¹ و فلزات مختلف بوده و باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی از جمله رودخانه واقع در پایین دست منطقه که جهت آب شرب ساکنین محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌شود. علاوه بر این در سال‌های اخیر پیشنهاداتی برای اکتشاف و بهره‌برداری مجدد از این معدن ارائه شده است [۴۳، ۴۵] که در صورت اجرا، این امر بر شدت آلودگی مناطق پایین دست خواهد افزود. به همین منظور برای آشکارسازی نواحی آلوده احتمالی که دارای اختلاف رسانندگی با محیط اطراف هستند از روش‌های ژئوفیزیکی بخصوص VLF به دلیل داشتن مزایای قابل توجه، استفاده می‌شود.

⁵¹-Dissolved minerals



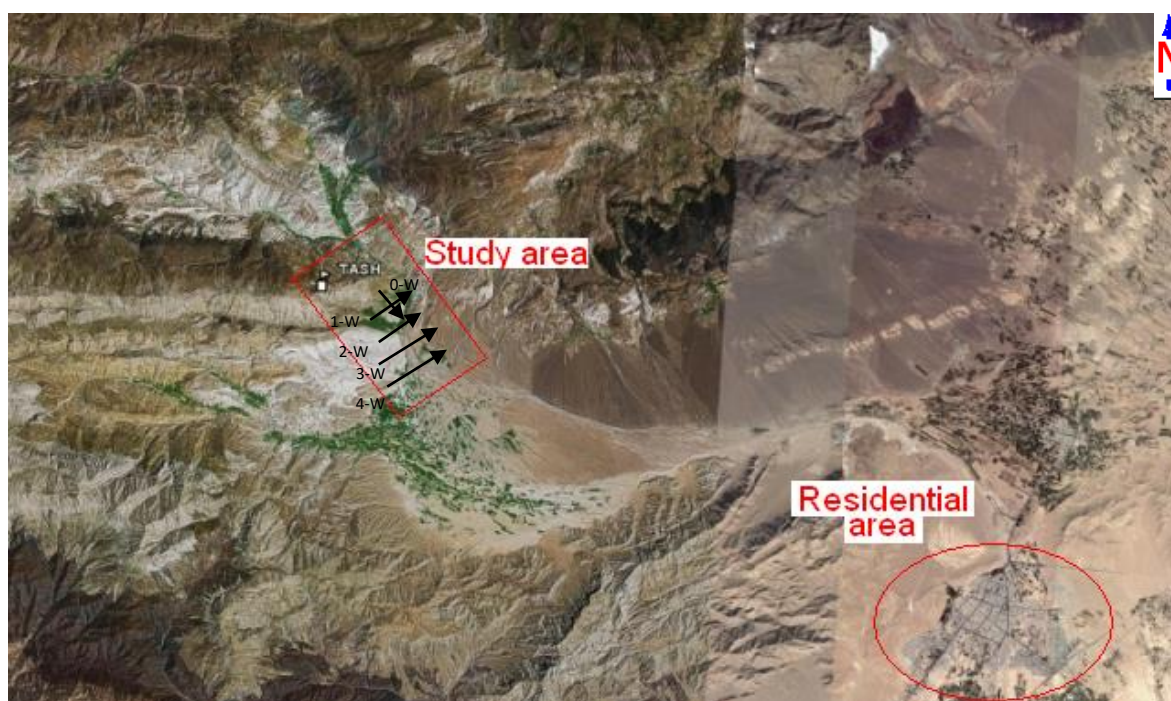
شکل (۳-۳) محل دیوی ماده معدنی به فاصله چند متری از دهانه معدن [۴۴].

۳-۵- عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

بدیهی است برای انجام یک تفسیر خوب و قابل اعتماد نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق و کافی می‌باشد. برای این منظور با انجام بازدید صحرائی از منطقه مورد مطالعه و با در نظر داشتن یک دید کلی از ساختارهای زمین شناسی منطقه تصمیم بر این گرفته شد که پروفیل‌های برداشت ژئوفیزیک عمود بر روند عمومی ساختارهای زمین شناسی انتخاب گردد. در طول پیمایش پروفیل باید این نکات را در نظر بگیریم که راستای پروفیل در طول آن حفظ شود و همچنین طول پروفیل به اندازه کافی طولانی باشد. بدین ترتیب با توجه به عوامل فوق الذکر، داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی به طور همزمان با برداشت‌های VLF توسط دستگاه سوئدی SAS1000 [۴۷] متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی در طول یک پروفیل، آن هم در راستای دره برداشت گردید تا از طریق آن بتوان گسترش طولی زون آلوده شده را نمایان نمود. در برداشت داده‌های فوق، طول دوقطبی‌های پتانسیل و جریان (a) مساوی ۱۵ متر در نظر گرفته شد. تعداد استاندارد گام‌ها (جدایش دوقطبی‌ها n) برای اجتناب از افزایش نویز حداکثر

هشت گام انتخاب شد. در برداشت داده‌های پلاریزاسیون القایی حوزه زمان از پالس‌های جریان مربعی با زمان وصل و قطع برابر ۵/۱ ثانیه استفاده و سپس مقادیر بارپذیری⁵² محاسبه شد.

برداشت داده‌های VLF بر روی پروفیل‌های مربوطه توسط دستگاه ABEM-WADI متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود در امتداد ۵ پروفیل صورت گرفت. شکل (۳-۴) محل تقریبی پروفیل‌ها را روی عکس ماهواره‌ای منطقه نشان می‌دهد.



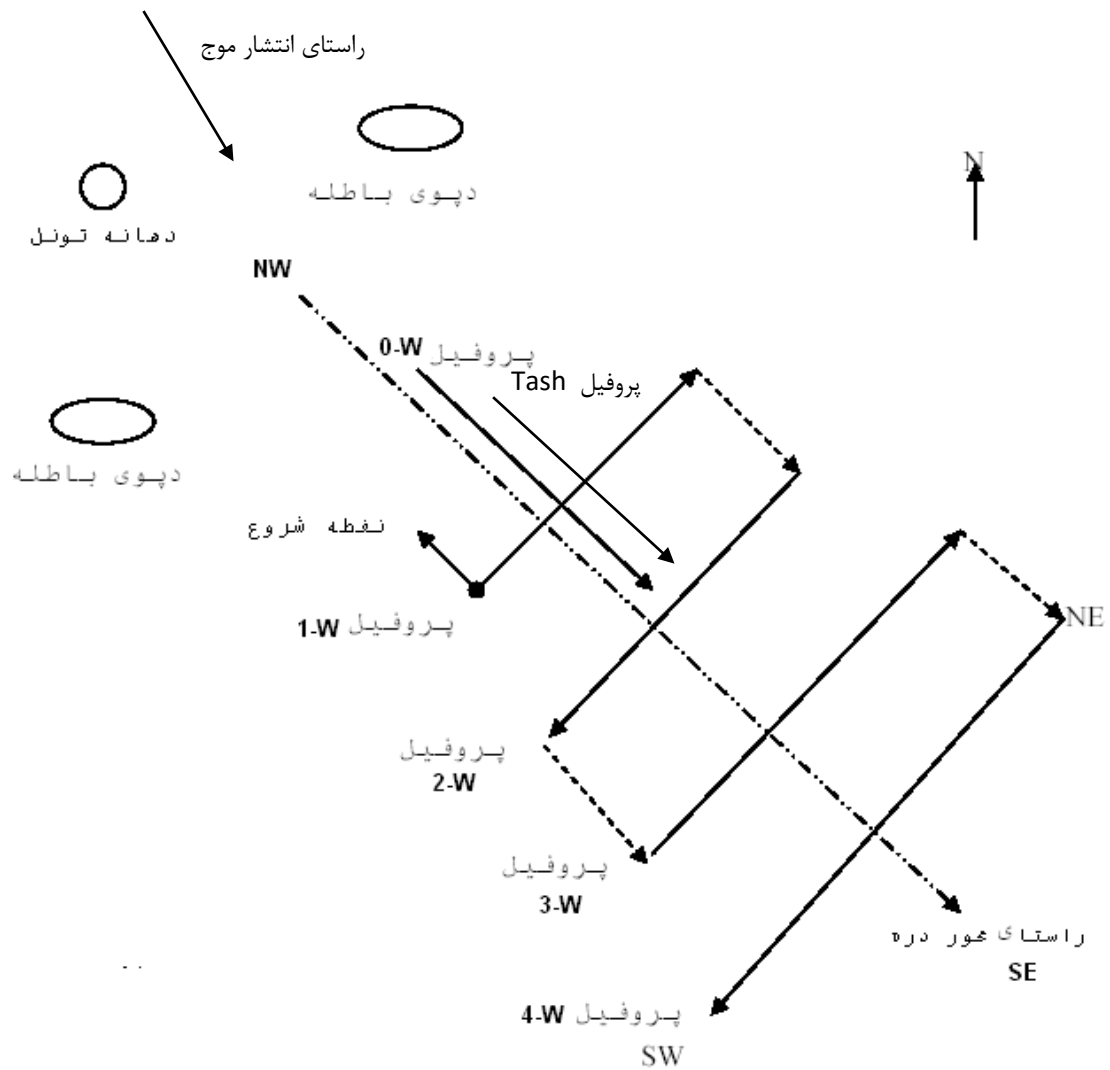
شکل (۳-۴) تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد نظر و موقعیت پروفیل‌های برداشتی [۴۴]

برداشت داده‌های VLF با دستگاه سوئدی WADI ساخت شرکت ABEM که شرح آن در پیوست (الف) آمده است، صورت گرفت.

در برداشت داده‌های VLF بر روی پروفیل‌های انتخابی باید مناسب ترین ایستگاه فرستنده امواج رادیویی VLF انتخاب شود. در انتخاب یک فرستنده به دو نکته باید توجه داشت، اول اینکه سیگنال‌های دریافتی آن در محل مورد نظر از شدت و میزان توان کافی برخوردار باشند و دوم اینکه راستای انتشار امواج آن با راستای

⁵²-Chargeability

ساختار زمین شناسی مورد نظر تقریباً یکی باشد. در اینجا با حفظ نکات فوق، فرستنده (GBZ) در انگلستان با فرکانس ۱۹/۶ کیلوهرتز انتخاب شد. هر ۵ پروفیل با یک ایستگاه برداشت گردید. آزیموت پروفیل W-۰ با راستای انتشار موج به طور تقریبی ۳۰ درجه اندازه‌گیری شد. پس از انتخاب فرستنده مناسب، باید مختصات نقطه شروع، فاصله بین نقاط اندازه‌گیری و فاصله بین پروفیل‌ها را به دستگاه داد که در اینجا مختصات نقطه شروع $x=291365$ ، $y=4045238$ و $z=2558$ متر، فاصله بین نقاط اندازه‌گیری ۵ متر و فاصله بین پروفیل‌ها ۱۰۰ متر انتخاب شد. پس از اندازه‌گیری در نقطه شروع، با حرکت کردن روی پروفیل، محل نقطه دوم را با متر پیدا کرده و در آن نقطه قرائت را انجام می‌دهیم و به همین منوال بر روی خط پروفیل حرکت کرده تا تمامی نقاط روی پروفیل اول برداشت گردند. سپس به میزان ۱۰۰ متر عمود بر خط پروفیل اول حرکت کرده و پروفیل دوم را با آزیموت معکوس (90°) پروفیل اول انتخاب می‌کنیم. پروفیل دوم را نیز مانند پروفیل اول برداشت کرده به همین ترتیب ۴ پروفیل به نام‌های W-۱، W-۲، W-۳، W-۴ را عمود بر محور دره برداشت نمودیم. هدف از برداشت این پروفیل‌ها بررسی و ارزیابی نحوه گسترش عرضی آلودگی احتمالی ایجاد شده توسط فرایند اکسایش باطله‌های معدنی است. در پایان پروفیل W-۰ را بر روی پروفیل ژئوالکتریک عمود بر چهار پروفیل فوق‌الذکر و به موازات دره برداشت کردیم. شکل شماتیکی (۳-۵) نمایش شماتیکی از نحوه قرارگیری پروفیل‌های برداشتی همراه با چگونگی برداشت داده‌های VLF را نشان می‌دهد.



شکل شماتیکی (۳-۵) نحوه قرارگیری پروفیل‌های برداشت داده‌های ژئوفیزیکی همراه با محل انباشت باطله‌ها و محل تقریبی تونل موجود را همراه با جهت برداشت داده‌های VLF (نقطه چین) نشان می‌دهد

جزئیات پروفیل‌های برداشتی در جدول (۳-۱) آمده است.

جدول (۱-۳) مشخصات پروفیل‌های برداشتی داده‌های VLF، مقاومت ویژه و IP

نام پروفیل	مختصات ابتدای پروفیل در سیستم <i>UTM</i>		مختصات انتهای پروفیل در سیستم <i>UTM</i>		طول پروفیل (m)	توضیحات
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)		
Tash	۲۹۱۰۲۵	۴۰۴۵۱۰۵	۲۹۱۰۹۷	۴۰۴۵۱۷۰	۱۰۵	پروفیل مقاومت و IP در راستای دره
۰-W	۲۹۱۰۴۸	۴۰۴۵۱۳۰	۲۹۱۱۰۰	۴۰۴۵۱۷۵	۱۳۰	پروفیل VLF در راستای دره
۱-W	۲۹۱۰۹۷	۴۰۴۵۱۷۳	۲۹۱۱۴۷	۴۰۴۵۰۹۳	۹۰	پروفیل‌های VLF عمود بر دره
۲-W	۲۹۱۲۱۶	۴۰۴۵۱۷۸	۲۹۱۱۵۶	۴۰۴۵۲۴۸	۱۰۰	
۳-W	۲۹۱۲۱۰	۴۰۴۵۲۸۰	۲۹۱۲۸۳	۴۰۴۵۱۸۱	۱۰۵	
۴-W	۲۹۱۳۶۵	۴۰۴۵۲۳۸	۲۹۱۲۳۰	۴۰۴۵۲۶۲	۱۵۰	

لازم به ذکر است که راستای پروفیل‌های Tash و ۰-W بر هم منطبق بوده و در راستای محور دره قرار دارند.

شکل (۳-۶) نمایی از منطقه برداشت را در راستای دره به سمت پایین نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶) نمایی از منطقه برداشت، دره موجود و محل انباشت باطله‌های معدنی

در تمام این مدت فقط فاصله بین نقاط و پروفیل‌ها با متر چک شده و دستگاه به طور اتوماتیک فاصله بین نقاط را ۵ متر و فاصله بین پروفیل‌ها را ۱۰۰ متر در نظر می‌گرفت. داده‌های VLF برای پروفیل‌های W-۰، W-۱، W-۲، W-۳ و W-۴ و داده‌های مقاومت ویژه و IP برای پروفیل Tash در پیوست (ب) آورده شده است. تعداد داده‌های برداشتی VLF روی پروفیل‌های W-۰، W-۱، W-۲، W-۳ و W-۴ به ترتیب ۲۷، ۱۹، ۲۱، ۲۴ و ۳۱ عدد می‌باشد. مسائل زمین‌شناسی و توپوگرافی باعث شد که به ناچار طول بعضی از پروفیل‌ها را کم انتخاب کنیم.

۳-۶- تفسیر داده‌های VLF

پس از اتمام برداشت داده‌ها و جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، داده‌ها از حافظه دستگاه به کامپیوتر انتقال یافته و توسط نرم افزار RAMAG [۴۸] که نرم افزار اختصاصی دستگاه WADI است، مورد پردازش و متعاقب آن مورد تعبیر و تفسیر کیفی و نیمه کمی قرار می‌گیرند. به کمک نرم افزار فوق نمودارهای خام،

فیلتر شده و همچنین شبه مقاطع عرضی چگالی جریان برای این ۵ پروفیل به طور مجزا تهیه شد که نتایج آن به تفصیل در ذیل آمده است. لازم به ذکر است که در تفسیر پروفیل‌های ذیل بر روی مؤلفه حقیقی تأکید شده است.

به طور کلی تفسیر داده‌های VLF به سه روش تفسیر کیفی، نیمه کمی و کمی صورت می‌گیرد.

۳-۶-۱- تفسیر کیفی

اغلب روش‌های متداول تفسیر داده‌های VLF تا قبل از دهه ۹۰ به صورت کیفی انجام می‌شد. بدین ترتیب که نقطه با زاویه شیب صفر که به نقطه فراگذر نیز معروف است برای عبور از قطبیت مثبت به قطبیت منفی در روی پروفیل داده‌های خام مؤلفه حقیقی، بالای زون رسانا قرار می‌گیرد. وجود رساناهای متعدد مجاور هم و توپوگرافی پروفیل و عوامل دیگر در غالب اوقات باعث می‌شوند تا نقاط فراگذر کاذبی ایجاد شوند و یا محل این نقاط جابجا شوند [۳۵]. از این رو کیفی بودن تفسیر باعث ایجاد مشکلاتی در توصیف و تفسیر مؤثر و دقیق می‌شود. بنابراین از داده‌های خام فقط به صورت کمکی در تفسیر کیفی استفاده می‌شود.

۳-۶-۲- تفسیر نیمه کمی

از سال ۱۹۷۱ به بعد، روش‌های نیمه کمی بیشتری برای تفسیر داده‌های VLF مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با استفاده از روش‌های فیلتر کردن مانند فیلتر فریزر⁵³ [۷] اکثراً می‌توان اثر توپوگرافی بر روی داده‌ها را کاهش داد و محل آنومالی‌ها را با دقت بیشتری روی پروفیل تعیین کرد.

۳-۷- فیلترسازی

روش‌های فیلتر کردن اغلب برای بهبود داده‌ها (کم کردن اثر توپوگرافی) و واضح و آشکار کردن نقطه فراگذر زاویه شیب استفاده می‌شوند. فیلترسازی خطی اندازه‌گیری‌های زاویه شیب می‌تواند به تشخیص

موقعیت هدف مدفون کمک کند. دو روش رایج فیلترسازی، استفاده از فیلتر فریزر (۱۹۶۹) و کاروس - هجالت⁵⁴ (۱۹۸۵) است [۴۸].

۳-۷-۱- فیلتر فریزر

فریزر یک فیلتر ریاضی خطی و ساده را برای داده‌های زاویه شیب پیشنهاد کرد تا تحلیل آنها آسانتر باشد. این فیلتر شرایط زیر را دارا می‌باشد [۷]:

۱- تغییر وضعیت داده‌های زاویه شیب با ۹۰ درجه چرخش به حدی که نقطه عطف (نقطه فراگذر) به پیک تبدیل شود.

۲- تضعیف اثر طول موج در فواصل طولانی برای افزایش قدرت تفکیک پذیری آنومالی‌های محلی

۳- افزایش نیافتن نوفه‌های اتفاقی در داده‌ها

۴- آسانتر شدن تفسیر آنومالی‌ها

در این فیلتر مقادیر زاویه شیب ایجاد شده توسط رسانای زیرسطحی میانگین‌گیری می‌شوند و تفسیر بدین گونه است که مکان پیک با تقریبی درست، مکان تغییرات می‌باشد. اگر M_4, M_3, M_2, M_1 به ترتیب داده‌های مربوط به ۴ نقطه برداشت متوالی باشد، جهت کاهش نویز میانگین ارزش وزنی عددی برای سه گزینه مجاور متفاوت می‌باشد، یعنی برابر است با؛

$$\frac{1}{4}(M_2 - M_1) + \frac{1}{2}(M_3 - M_2) + \frac{1}{4}(M_4 - M_3) \quad (1-3)$$

با حذف ضرایب ثابت، یک فیلتر بی‌نهایت مؤثر و مفید بدست می‌آید. تابع فیلتر به صورت زیر خواهد بود [۷]:

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

مقدار $F_{2,3}$ بین دو نقطه برداشت M_2 و M_3 مقدار $F_{3,4}$ بین دو نقطه برداشت M_3 و M_4 قرار می‌گیرد. این فیلتر امروزه به طور گسترده برای کاهش نویزهای VLF به کار می‌رود.

۳-۷-۲- فیلتر کاروس - هجالت

روابط زیادی وجود دارند که می‌تواند چگالی جریان معادل⁵⁵ را با اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در عمق مشخص محاسبه کنند. (چگالی جریان شامل جریان‌هایی است که در زون‌های رسانا القا می‌شوند). کاروس و هجالت ابتدا کار خود را برای شرح میدان مغناطیسی حاصل از نشر توزیع جریان در فضای دو بعدی آغاز کردند و از تئوری فیلتر کردن خطی برای بدست آوردن توزیع جریان ورقه‌ای نازک که در عمق برابر فواصل نقاط اندازه‌گیری در هر جای زمین قراردارند، استفاده کردند. با انتخاب نقاط داده به طور تصاعدی در فواصل دورتر، چگونگی رفتار پخش جریان در صفحه فرضی در عمق‌های بیشتر را می‌توان استنباط کرد. کوچکترین فیلتری که به طور صحیح داده‌های صحرائی را تبدیل به چگالی جریان معادل (۱) با خطای کمتر از ۸ درصد محاسبه می‌کند، به صورت زیر داده می‌شود [۸]:

$$\frac{\Delta Z}{2\pi} I\left(\frac{\Delta x}{2}\right) = -0.205H_{-2} + 0.323H_{-1} - 1.446H_0 + 1.446H_1 - 0.323H_2 + 0.205H_3 \quad (3-3)$$

که Δz ضخامت فرضی صفحه جریان، Δx فاصله بین نقاط برداشت و عمق صفحه جریان (محل چگالی جریان زیر نقطه مرکزی شش نقطه اندازه‌گیری) و H میدان مغناطیسی قائم‌القایی نرمال شده برای هر یک از شش نقطه اندازه‌گیری است. با محاسبه فیلتر معکوس در عمق‌های مختلف (... و Δx و $2\Delta x$ و Δx) مطالعه تغییرات چگالی جریان با عمق امکان‌پذیر می‌باشد. چگالی جریان حاصل می‌تواند به تفسیر پهنا و شیب شکستگی بر حسب عمق کمک کند. برای سهولت کار در بیشتر موارد از فرمول (۳-۴) برای فیلتر کردن در امتداد پروفیل مشابه روش فریزر [۸] و همچنین از فرمول (۳-۵) [۳۹] برای محاسبه شبه مقطع چگالی جریان معادل برای هر پروفیل استفاده می‌شود:

$$Filter(K - H) = 0.102H_{-3} - 0.059H_{-2} + 0.561H_{-1} - 0.561H_1 + 0.059H_2 - 0.102H_3 \quad (4-3)$$

$$I_a(0) = \frac{2\pi(-0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3)}{\Delta Z} \quad (5-3)$$

⁵⁵-Current Density

که در آن $I_a(0)$ چگالی جریان معادل در نقطه صفر که در نقطه مرکزی شش نقطه اندازه‌گیری قرار دارد، می‌باشد.

با استفاده از فیلتر کاروس - هجرت اثر نوفه‌های محلی تعدیل یافته و علاوه بر آن شبه مقطع چگالی جریان ظاهری بر حسب عمق رسم شده و نقشه‌های توزیع چگالی جریان برای استفاده در تفسیر تهیه می‌شوند. نحوه تفسیر این نقشه‌ها بدین گونه می‌باشد [۸]:

۱- نواحی با چگالی جریان بالا متناظر با محل قرارگیری رساناهای خوب می‌باشد. ۲- چگالی جریان پایین نشان دهنده نواحی با مقاومت ویژه بالا می‌باشند. ۳- روند الگوی کانتورها تا حدودی نشان دهنده شیب رسانا می‌باشد.

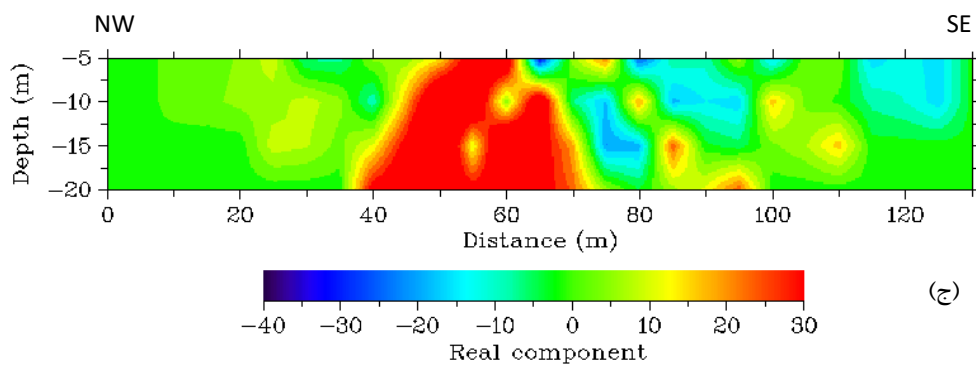
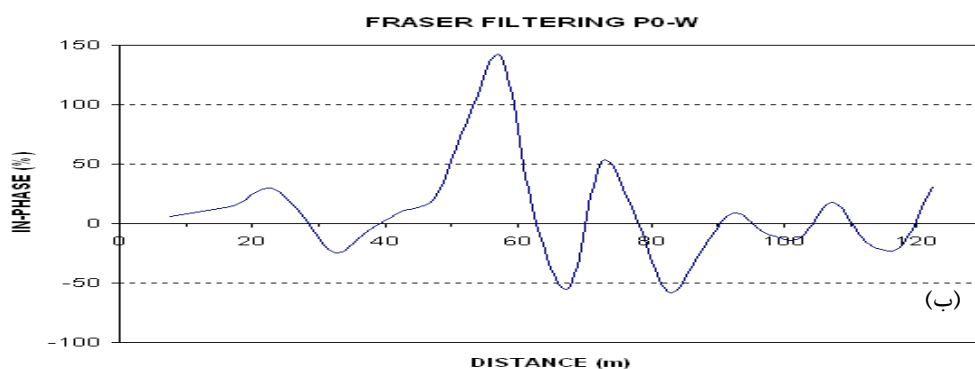
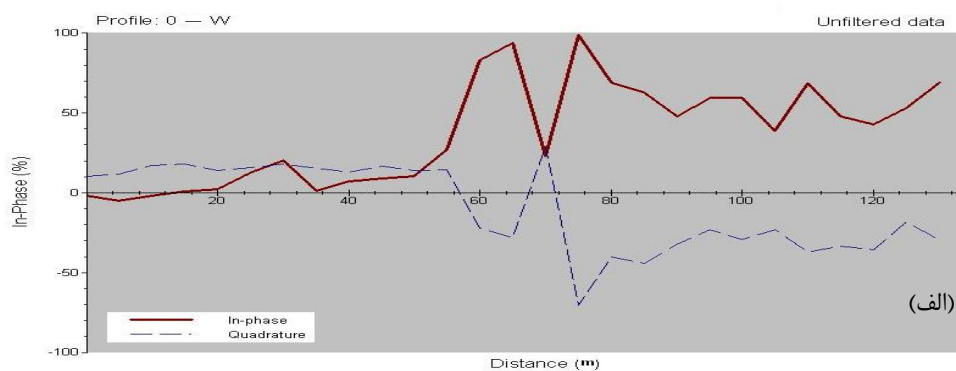
حال با توجه به مطالب اشاره شده و به کمک نرم‌افزار RAMAG به تفسیر کیفی و نیمه کمی داده‌های VLF با مد نظر قرار دادن فیلتر کاروس - هجرت و شبه مقطع چگالی جریان برای داده‌های مؤلفه حقیقی خواهیم پرداخت و بقیه نمودارها به صورت کمکی و تایید کننده این تفسیر توضیح داده خواهد شد.

۳-۸- ارائه و تفسیر نیمه کمی داده‌های برداشت شده

۳-۸-۱- پروفیل w -۰

شکل (۳-۷- الف) نمودار خام داده‌های پروفیل w -۰ را نشان می‌دهد که محور افقی فاصله بر حسب متر و محور قائم میزان مؤلفه حقیقی و موهومی تابع تیپر را بر حسب درصد بیان می‌کنند. همان گونه که در شکل (۳-۷- الف) ملاحظه می‌شود بر اساس نمودار داده‌های خام نمی‌توان تفسیر مناسبی ارائه داد. اما شکل (۳-۷- ب) نمودار داده‌های فیلتر شده بخش حقیقی را نشان می‌دهد که تفسیر آن راحت می‌باشد. در این شکل می‌توان مراکز آنومالی‌های الکتریکی را به صورت پیک‌های مثبت در محل‌های ۵۸ ، ۷۵ ، ۹۳ و ۱۰۷ متری مبداء پروفیل به سمت پایین دره مشاهده نمود که با توجه به جنس واریزه‌ها احتمالاً حاکی از زون‌های آلوده می‌باشد. شبه مقطع چگالی جریان (شکل ۳-۷- ج) نیز زون اصلی مورد نظر با چگالی جریان بالا و مقاومت ویژه پایین با گسترش طولی از نقطه ۴۰ تا ۷۰ متری به سمت پایین دره و گسترش عمقی از سطح

زمین تا عمق تقریبی ۲۵ متری را تایید می‌کند. سایر زون‌های آنومال با اهمیت کمتر نیز در شبه مقطع چگالی جریان به طرف پایین دره در جهت جنوب شرقی دیده می‌شوند.



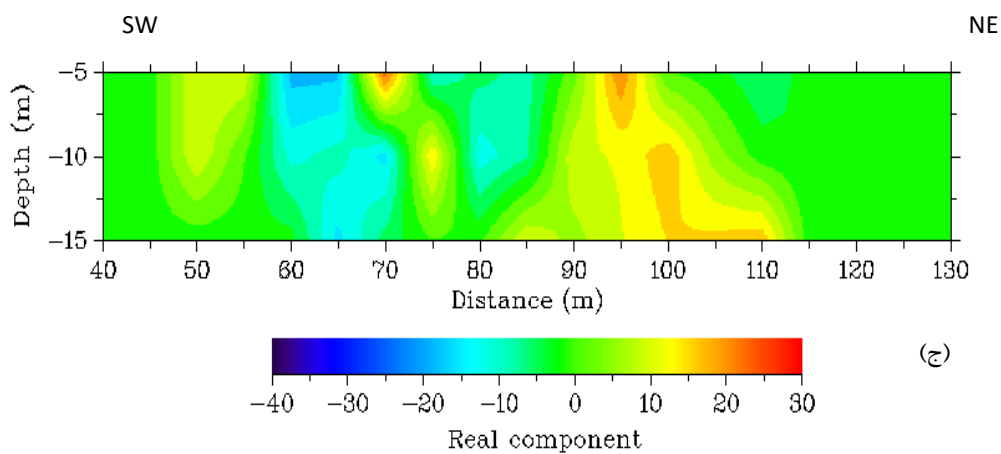
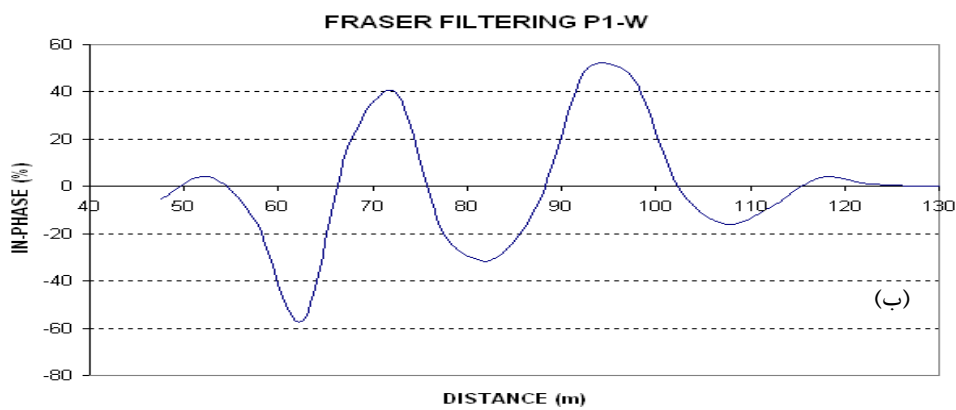
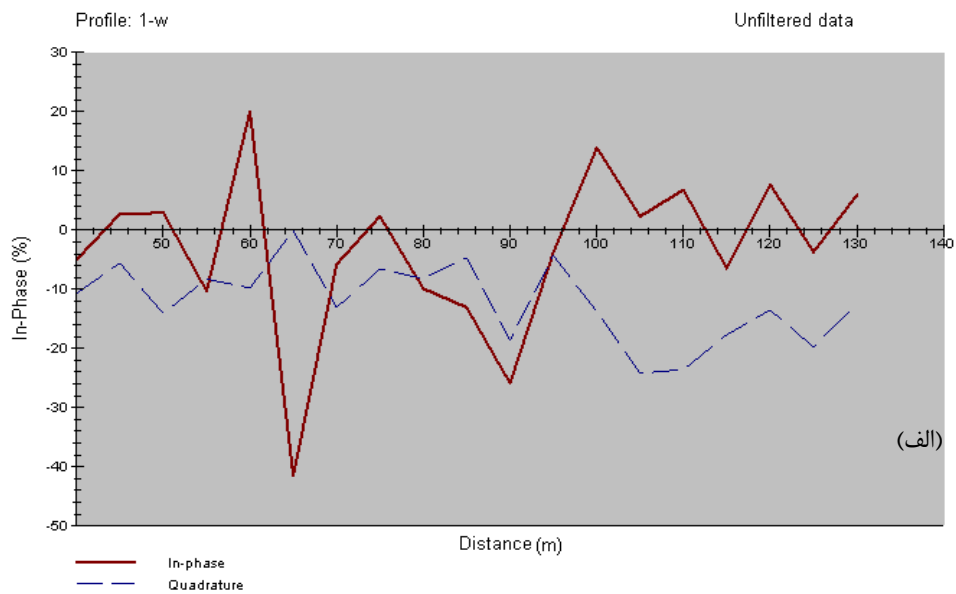
شکل (۳-۷) نمودار داده‌های پروفیل ۰-W (الف)- نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب)- نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج)- شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها

۳-۸-۲- پروفیل ۰-W

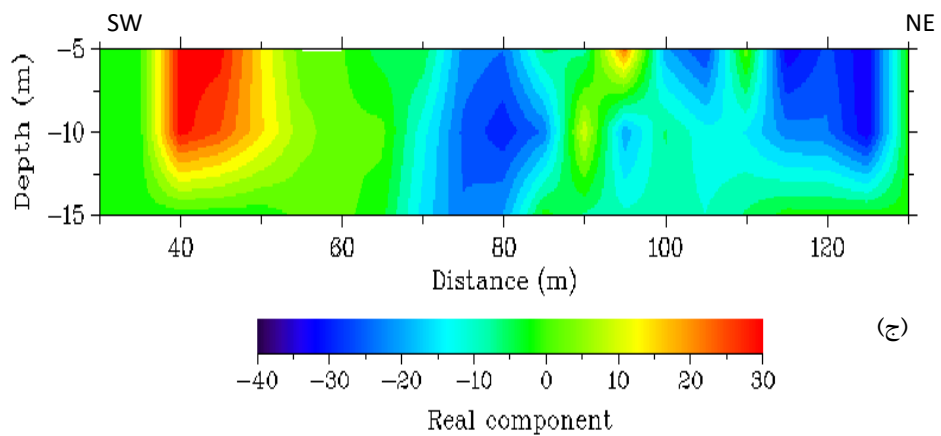
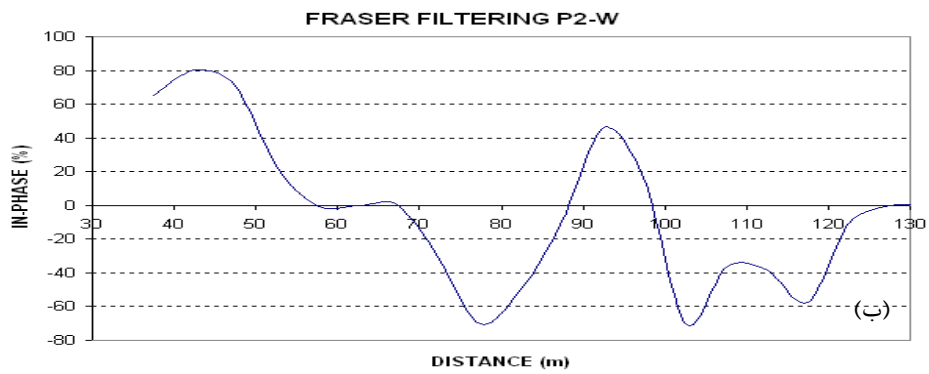
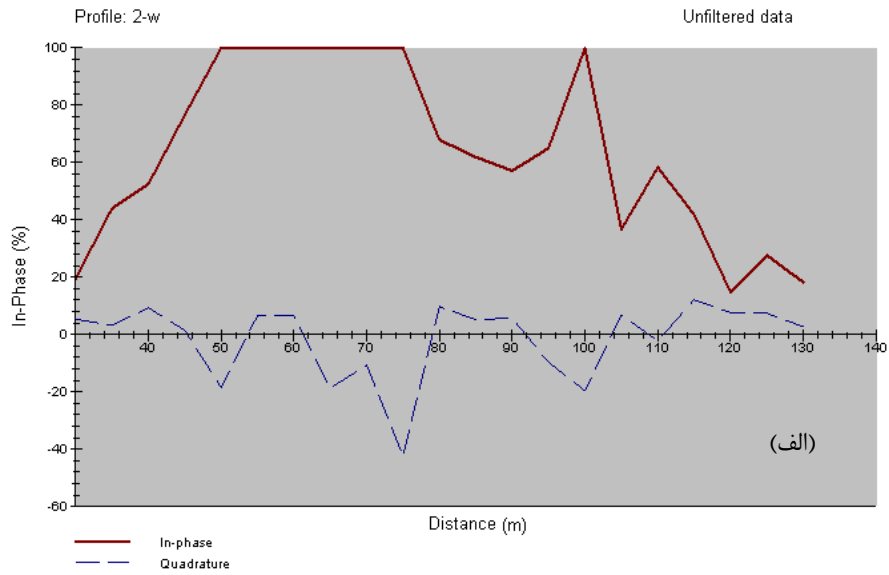
شکل (۳-۸-الف) منحنی خام داده‌های پروفیل W-۱ را نشان می‌دهد. مانند حالت قبل تفسیر این منحنی مشکل می‌باشد و به ناچار از شکل (۳-۸-ب) که منحنی فیلتر شده را نشان می‌دهد، استفاده می‌گردد. در این شکل ۲ آنومالی واضح در نقاط ۷۳ و ۹۵ متری در منحنی فیلتر شده داده‌های حقیقی دیده می‌شود و زون دوم به عنوان زون اصلی در نظر گرفته می‌شود. شکل (۳-۸-ج) شبه مقطع چگالی جریان این پروفیل را نشان می‌دهد. در این شکل، ۲ زون با چگالی جریان بالا دیده می‌شود که حاکی از آلودگی احتمالی محدوده مورد مطالعه است. زون اول با ابعاد کوچکتر سطحی بوده و در نقطه تقریبی ۷۰ متری واقع شده است. آنومالی دوم در محدوده ۹۵ تا ۱۱۰ متری می‌باشد که از سطح زمین تا عمق ۱۵ متری را شامل می‌شود. از آنجا که پروفیل W-۱، پروفیل W-۰ (در امتداد محور دره) را در نقطه ۹۵ متری خود قطع می‌کند، در محل تلاقی این دو پروفیل، زون رسانای آشکار شده در پروفیل W-۰ (شکل ۳-۷-ج) از نقطه ۴۰ تا ۷۰ متری همان زون اصلی رسانا در محدوده ۹۵ تا ۱۱۰ متری در پروفیل W-۱ (شکل ۳-۸-ج) می‌باشد که دارای گسترش عرضی قابل توجه است. لازم به ذکر است که پروفیل W-۰ پروفیل W-۲ را قطع نمی‌کند.

۳-۸-۳- پروفیل W-۲

برای این پروفیل با توجه به اینکه در نمودار داده‌های خام شکل (۳-۹-الف) نقطه فراگذر مشخص نمی‌باشد تفسیر مناسبی را نمی‌توان ارائه داد. در شکل (۳-۹-ب) که نمودار فیلتر شده را نشان می‌دهد یک پیک بلند در نقطه ۴۵ متری پروفیل دیده می‌شود. در نقطه ۹۵ متری نیز پیک نسبتاً ضعیفی وجود دارد. در شکل (۳-۹-ج) که مربوط به چگالی جریان می‌باشد این دو زون رسانا دیده می‌شوند که زون اصلی که در ابتدای پروفیل قرار گرفته از نقطه ۳۷ تا ۵۰ متری پروفیل و تا عمق تقریبی ۱۵ متر قرار می‌گیرد. زون دوم که کوچک و بسیار سطحی می‌باشد در نقطه ۹۵ متری قرار گرفته است.



شکل (۳-۸) نمودار داده‌های پروفیل ۱-W (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها



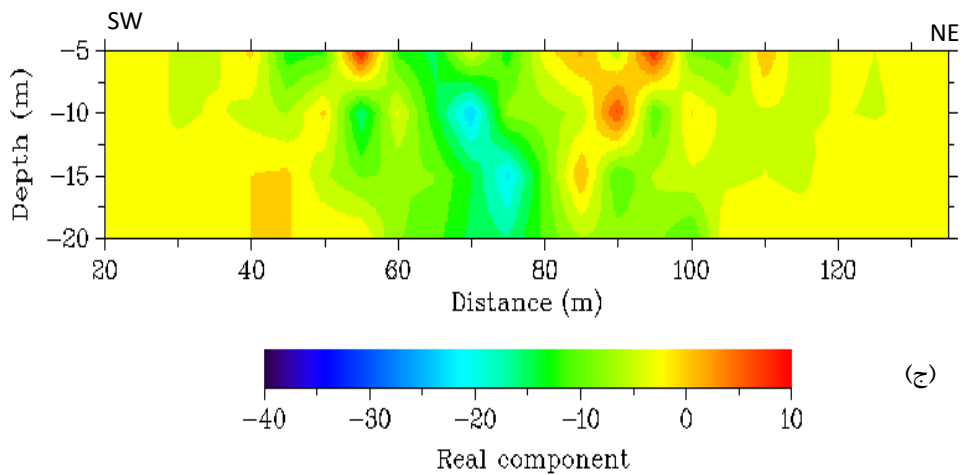
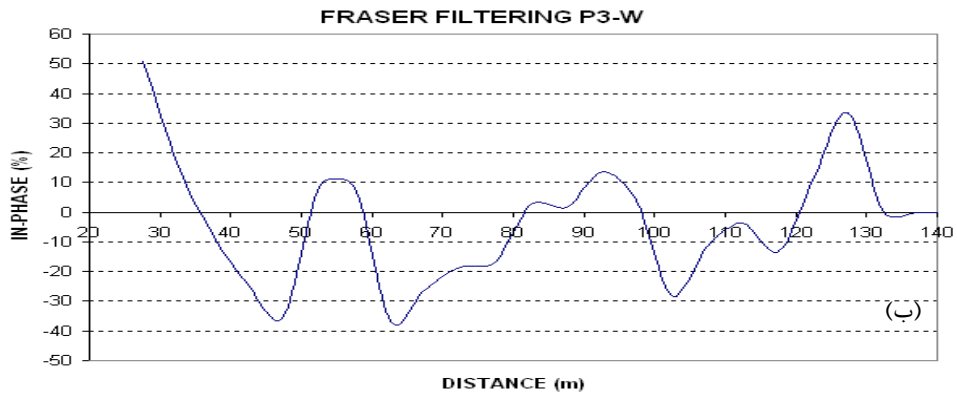
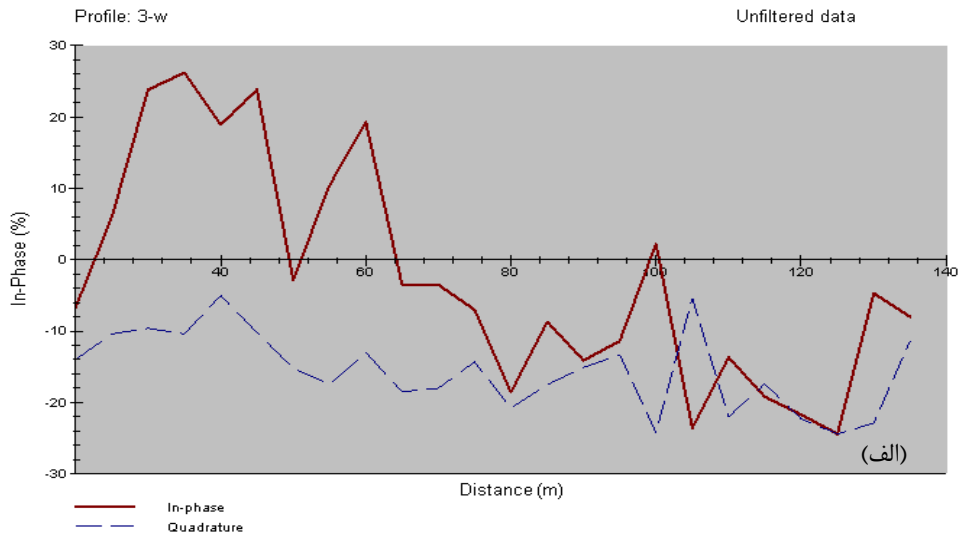
شکل (۳-۹) نمودار داده‌های پروفیل ۲-W (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها

۳-۸-۳ - پروفیل ۳-W

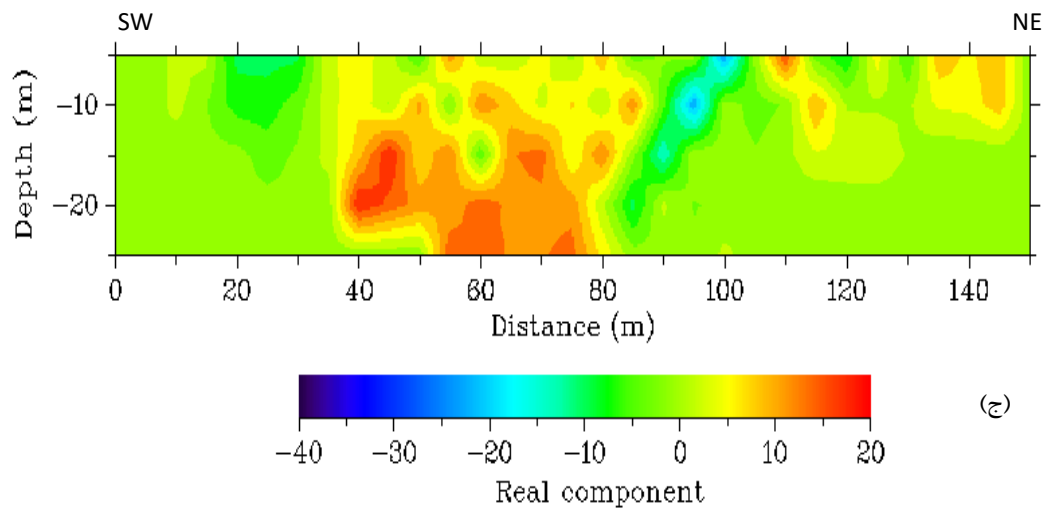
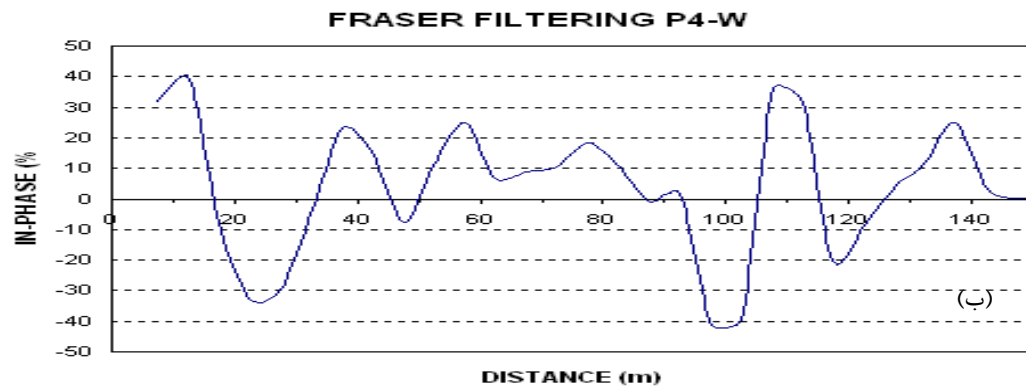
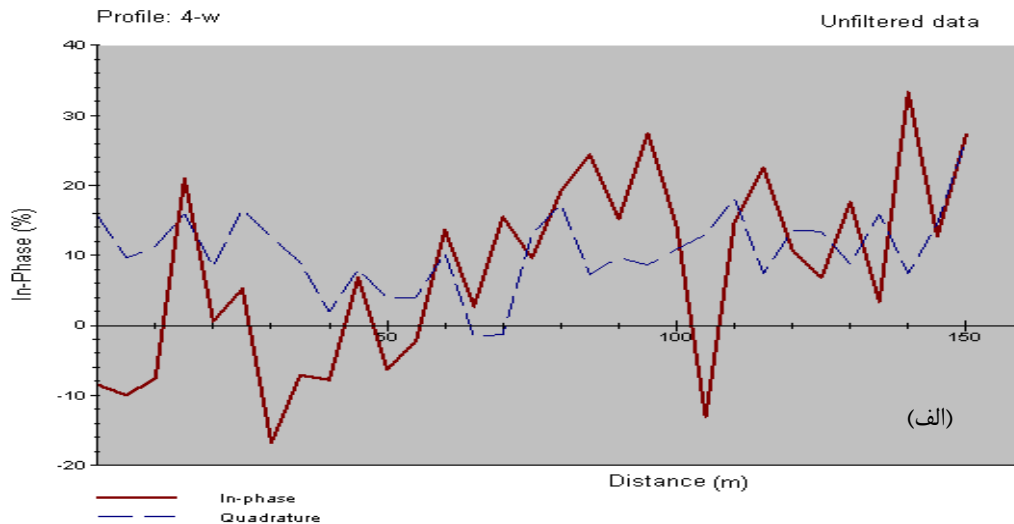
شکل (۳-۱۰-الف) منحنی خام پروفیل W-۳ را نشان می‌دهد. تفسیر این منحنی کمی آسانتر از پروفیل‌های قبلی می‌باشد و سه نقطه فراگذر در محدوده نقاط ۶۲، ۵۰ و ۱۰۰ ملاحظه می‌شود. در شکل (۳-۱۰-ب) که منحنی فیلتر شده را نشان می‌دهد یک پیک بزرگ در نقطه ۵۵، ۹۲ و ۱۲۷ متری دیده می‌شود. (یکی از معایب فیلتر کردن این است که مکان آنومالی را قدری جابجا می‌کند و نقاط فراگذر به طور دقیق بر روی منحنی فیلتر شده قرار نمی‌گیرند و جابجا می‌شوند). در شبه مقطع چگالی جریان شکل (۳-۱۰-ج)، ۳ زون رسانا وجود دارد که اولین زون در ابتدای پروفیل سطحی بوده و در نقطه ۵۵ متری قرار دارد. زون دوم به عنوان زون اصلی از نقطه ۸۰ تا ۱۰۰ متری دارای گسترش عمقی از سطح زمین تا حدود ۲۰ متر بوده که نشان دهنده ناحیه آلوده شده می‌باشد. زون سوم زونی سطحی است که در نقطه ۱۱۰ متری واقع شده است.

۳-۸-۵- پروفیل W-۴

در نمودار خام شکل (۳-۱۱-الف) نقاط فراگذر در محدوده نقاط ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ قرار گرفته‌اند که در شکل (۳-۱۱-ب) مربوط به نمودار داده‌های فیلتر شده محدوده نقاط ۵۰ تا ۹۰ متری پیک پهنی را نشان می‌دهد. در نقاط ۱۱۰ و ۱۳۷ متری نیز پیک‌های نسبتاً بلندی دیده می‌شود. در شبه مقطع چگالی جریان شکل (۳-۱۱-ج) سه زون رسانا دیده می‌شود. زون اصلی که تقریباً در وسط پروفیل و از دو زون دیگر بزرگتر می‌باشد از نقطه ۳۷ تا ۹۰ متری و در عمق ۱۰ تا ۳۰ متر گسترش دارد. دو زون دیگر در انتهای پروفیل به سمت شمال شرق به ترتیب در نقاط ۱۱۰ و ۱۴۰ متری واقع شده‌اند و گسترش عمقی آنها از سطح تا ۱۰ متر می‌باشد. از آنجا که این پروفیل آخرین پروفیل برداشتی از دهانه معدن می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که آلودگی ایجاد شده با دور شدن از محل دپوی باطله‌ها به تدریج کاهش یافته و این آلودگی به وسط دره منتقل می‌شود.



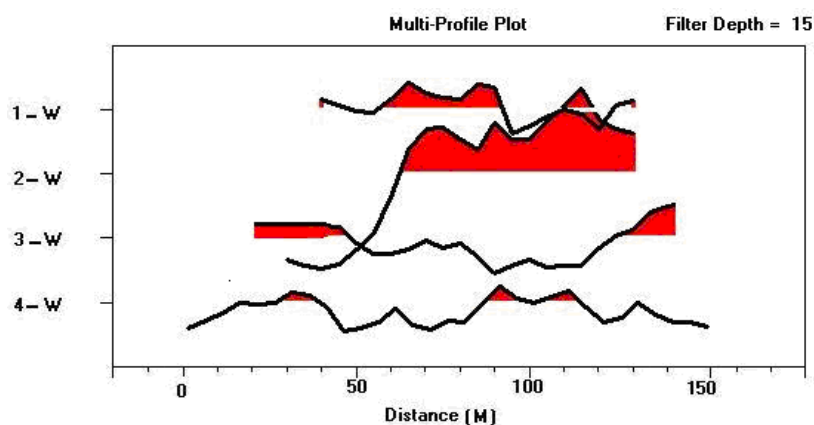
شکل (۳-۱۰) نمودار داده‌های پروفیل ۳-W (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها



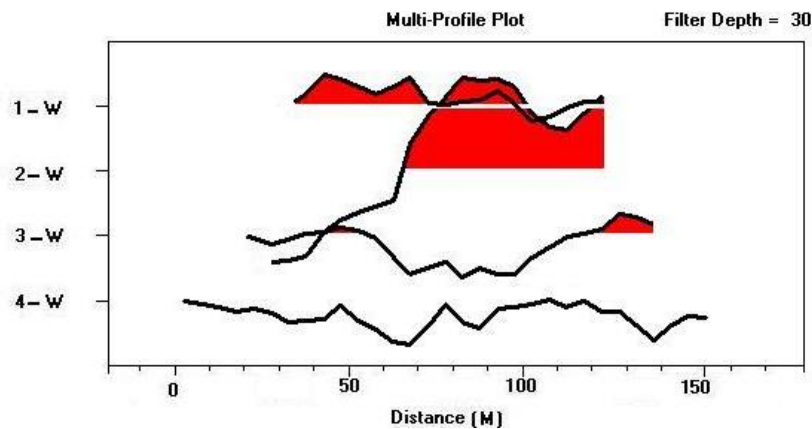
شکل (۳-۱۱) نمودار داده‌های پروفیل ۴-W (الف) - نمودار داده‌های خام برای بخش حقیقی و موهومی (ب) - نمودار فیلتر شده برای بخش حقیقی (ج) - شبه مقطع چگالی جریان برای بخش حقیقی داده‌ها

با توجه به مطالب فوق‌الذکر و با مشاهده شکل (۳-۱۲-الف) که یک پلات ترکیبی از ۴ پروفیل موازی ۱-W، ۲-W، ۳-W و ۴-W را با عمق فیلتری ۱۵ متر نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که زون‌های آلوده قرمز رنگ در پروفیل‌های ابتدایی با توجه به نزدیک بودن به باطله‌ها دارای گستردگی طولی و

عمقی بیشتری بوده و در پروفیل‌های انتهایی اثرات ناچیزی از نواحی آلوده شده دیده می‌شود. برای شکل (۳-۱۲-ب) که عمق فیلتری ۳۰ متر می‌باشد، مناطقی با مقاومت ویژه پایین (نواحی قرمز رنگ) در پروفیل‌های ابتدایی آشکار شده و برای پروفیل‌های انتهایی تقریباً اثری از بی‌هنجاری دیده نمی‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۳-۱۲) پلات ۴ پروفیل موازی ۱-W، ۲-W، ۳-W و ۴-W. (الف) - عمق فیلتری ۱۵ متر. (ب) - عمق فیلتری ۳۰ متر پس از تهیه شبه مقطع چگالی جریان برای هر یک از پروفیل‌ها و تفسیر نیمه کمی آنها، در فصل بعدی داده‌های برداشت شده به کمک نرم افزار INV2DVLF مدل‌سازی شده و به صورت کمی تفسیر می‌شوند.

۴-۱- مقدمه

در این فصل داده‌های VLF هر پروفیل به روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار INV2DVLF مورد مدل‌سازی قرار گرفته و نتایج حاصل با نتایج مدل‌سازی معکوس دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه و IP که به کمک نرم‌افزار RES2DINV صورت می‌گیرد، مقایسه می‌شوند. در ادامه با توجه به نتایج مدل‌سازی‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، نتایج تفسیر شده و علاوه بر آن گسترش و عمق آلودگی ناشی از معدنکاری تعیین می‌شود.

۴-۲- تفسیر کمی

در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی توجه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی به طور مستقیم از داده‌های خام صحرایی امری ناممکن می‌باشد. روش‌های سنتی تفسیر داده‌های ژئوفیزیک نظیر شبه مقاطع ترسیم شده

صرفاً دیدی کیفی از داده‌های بدست آمده از ساختار زیرسطحی مورد بررسی ارائه می‌دهد. بنابراین به منظور تفسیر کمی داده‌ها می‌توان از مدل‌سازی استفاده نمود. امروزه با ظهور کامپیوترهای دیجیتالی و با قابلیت‌های شگفت‌انگیز از حیث حافظه و سرعت پردازش زمینه، استفاده از روش‌های عددی برای محققین در رشته‌های مهندسی و علوم بیش از پیش و به طرز فزاینده‌ای فراهم شده است.

مدل‌سازی عددی داده‌های صحرایی ژئوفیزیکی به وسیله دو روش انجام می‌شود. روش مستقیم که آن را به عنوان روش پیشرو^{۵۶} می‌شناسیم و روش غیرمستقیم یا معکوس‌سازی^{۵۷} که رابطه نزدیکی با مدل‌سازی پیشرو دارد. معکوس‌سازی یا به عبارتی "مدل‌سازی معکوس" مشخص نمودن و شناسایی ساختارهای زیر سطحی از سری داده‌های اندازه‌گیری شده و تطابق پاسخ مدل با داده‌های اندازه‌گیری در بازه اطمینان مورد نظر می‌باشد. مسائل معکوس‌سازی با توجه به روابط حاکم بر آن به روش‌های خطی و غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند، که با توجه به نوع مسئله از هر یک در جای خود استفاده می‌گردد [۴۹].

در ارتباط با مدل‌سازی داده‌های VLF نرم‌افزارهای محدودی مانند INV2DVLF طراحی شده است که برای تفسیر داده‌های مورد نظر در تحقیق حاضر از آن استفاده می‌شود. اما قبل از بکارگیری این نرم‌افزار مختصری در مورد چگونگی مدل‌سازی عددی و طرز کار آن بحث می‌شود.

۴-۳- مدل‌سازی پیشرو

در این نوع مدل‌سازی با وارد نمودن پارامترهای یک مدل فرضی همخوان با داده‌های تجربی یک سری داده‌های تئوری منطبق بر پارامترهای مدل پیشنهادی به دست می‌آید که در صورت زیاد بودن خطای بین این داده‌ها و داده‌های تجربی (خطای جذر میانگین مربعات^{۵۸}) فرایند مدل‌سازی با تغییر پارامترهای مدل دوباره تکرار خواهد شد [۵۰].

به طور کلی مدل‌سازی پیشرو شامل مراحل زیر می‌باشد [۵۰]:

۱- برآورد اولیه یک مدل قابل مقایسه با مدل زمینی

⁵⁶- Forward modelling

⁵⁷-Inverse modelling

⁵⁸-Root Mean Square Error (RMS-error)

۲- محاسبه پاسخ آنومالی تئوری برای این مدل

۳- مقایسه پاسخ تئوری با داده‌های اندازه‌گیری شده

۴- تعدیل اصولی مدل با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و دیگر اطلاعات به منظور انطباق بهتر داده‌های محاسبه شده و داده‌های مشاهده شده

۵- بازگشت به مرحله ۲ و ادامه کار

۶- توقف در مرحله ۳ هنگامی که تطابق مقبولی بدست آید

روش‌های عددی مختلفی مثل روش اجزاء محدود^{۵۹} و تفاضل محدود^{۶۰} برای حل مسائل پیشرو وجود دارد. در انتخاب یک روش سادگی، دقت و سرعت عمل در انجام فرایند از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. به طور خلاصه در مدل‌سازی پیشرو با کمک علم فیزیک می‌توان از پارامترهای فیزیکی به نتیجه‌ای در رابطه با داده‌ها نائل شد و یا به عبارتی از مدل به داده رسید.

از منظر ریاضی بیان این مسئله به صورت معادله (۴-۱) می‌باشد:

$$d_j = F_j[m] \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (4-1)$$

در رابطه فوق بردار d_j نمایانگر داده‌های مشاهده شده (پاسخ مدل) در فضای M بعدی است که می‌توان آن را با اعمال عملگر پیشرو F بر بردار مدل m در فضای N بعدی استنتاج نمود. این عملگر و رابطه متناظر با آن تقریباً در تمامی موقعیت‌های واقعی غیرخطی می‌باشد. نکته دیگری که حائز اهمیت است آن است که مسائل پیشرو بهنجار^{۶۱} می‌باشند که بدین ترتیب دارای جواب تکینی می‌باشند و یا به عبارتی با اعمال تغییرات کوچک در پارامتر مدل جواب بدست آمده دچار تغییرات محسوسی نمی‌گردد [۴۹].

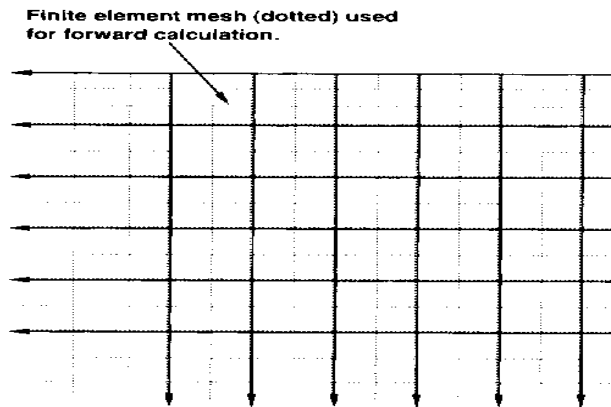
⁵⁹-Finite element method

⁶⁰-Finite difference method

⁶¹-Well-Posed

۴-۳-۱- روش اجزاء محدود

یکی از روش‌های حل مسائل مقدار مرزی است که برای مدل‌سازی در محیط‌های ناهمگن نیز کاملاً قدرتمند عمل می‌نماید. استفاده از دو روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای حل مسائلی که با معادلات خیلی بزرگ و پیچیده همراهند، بسیار مناسب می‌باشد. با استفاده از روش‌های تکرار و نیز با قابلیت بالای محاسبات، امکان مدل‌سازی دو و سه بعدی به روش اجزاء محدود و نیز تفاضل محدود میسر شده است. در این روش محدوده مدل به صورت مجموعه‌ای از نواحی ساده و کم اثر به صورت شبکه در نظر گرفته می‌شود، مانند شکل (۴-۱) و به هریک از شبکه‌ها پارامترهایی به اندازه یکسان نسبت می‌دهند [۵۱].



شکل (۴-۱) شبکه بکار رفته در روش اجزاء محدود [۵۱].

در ادامه، جواب مسئله پیشرو با ترکیب خطی پارامترهای نامعلوم و روابط ریاضی مربوطه بدست می‌آید. در این شیوه از روش عنصر محدود شبکه‌بندی عادی شامل واحدهای کاملاً ثابت و مستقل از زمان بکار می‌رود، اما در ویرایش جدید شبکه‌ای با عنوان "روش اجزاء محدود متحرک"^{۶۲} که در آن محل گره‌ها متغیر می‌باشد، بکار می‌رود. این ویژگی از ناپیوستگی که در پاسخ‌های شیوه قبلی رخ می‌داد جلوگیری می‌نماید [۵۱].

۴-۳-۲- روش تفاضل محدود

تفاضل محدود روشی ساده و موثر برای حل عددی مسائل مقدار مرزی الکترومغناطیسی است که به دلیل سادگی ذاتی و محاسبات کمتر، اغلب در نرم‌افزارهای تجاری استفاده می‌شود. در روش تفاضل محدود و اجزاء

⁶²-Moveable finite element method

محدود، مبنای کار بر اساس تقسیم یک میدان پیوسته الکترومغناطیسی به بخش‌های کوچک می‌باشد. به گونه‌ای که می‌توان رفتار این بخش‌های منقطع را جداگانه مورد بررسی قرار داده و رفتار کل را از برآیند آنها تعیین نمود و در ادامه با در نظر گرفتن توزیع پتانسیل سه بعدی حول یک منبع نقطه‌ای بر روی نیم‌فضای دو بعدی احجامی به شکل دلخواه با گسترش در یک راستا تا بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود و سپس از ماتریسی برای تخمین معادله پواسون استفاده می‌گردد. این روش از روش‌های دیگر مطرح شده در مدل‌سازی پیشرو بسیار سریع‌تر می‌باشد [۵۰].

اما روش تفاضل محدود با وجود کامل بودن، در مدل‌سازی ساختار زمین‌شناسی نامنظم مناسب نمی‌باشد. بدین دلیل که در این مدل‌سازی نیاز به شبکه‌بندی به شکل مربعی یا مستطیلی می‌باشد و بدین ترتیب دقت این روش برای مدل‌سازی توپوگرافی کاهش می‌یابد. برای مدل‌سازی داده‌های مورد نظر در هر دو نرم‌افزار RES2DINV و INV2DVLV از روش اجزاء محدود استفاده گردید [۳۳، ۳۴].

۴-۴- معکوس سازی

با توجه به آنکه روش پیشرو سرعت پایینی در انجام مدل‌سازی دارد، مدل‌سازی معکوس در پروژه‌های اکتشافی و تفسیر داده‌های صحرایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این روش مدل‌سازی، عکس روش مدل‌سازی پیشرو انجام می‌شود. به طوری که در هر مرحله از تکرار با اعمال یک سری عملیات ریاضی پیچیده بر روی داده‌های تجربی پارامترهای فیزیکی مدل را بدست می‌آوریم. مسائل معکوس-سازی بر خلاف مسائل پیشرو، که اغلب مستقیم و یک مرحله‌ای و بهنجار هستند، به علت وجود نویزهای زمین‌شناسی و نیز ناقص بودن اطلاعات و خطای ظاهر شده در اندازه‌گیری‌ها اغلب غیرمستقیم، تکراری و نابهنجار⁶³ می‌باشند [۵۱]. نابهنجار بودن مسائل معکوس‌سازی بدان معناست که تغییر کوچک در داده‌ها منجر به ایجاد تغییرات بزرگ در پارامترها می‌گردد و جواب پایدار و تکینی حاصل نمی‌گردد. در مسئله معکوس‌سازی مطابق معادله (۴-۱) هدف یافتن پارامترهای مدل m از روی داده‌های مشاهده شده d می‌باشد. با فرض خطی بودن تابع عملگر پیشرو در مدل‌سازی پیشرو، می‌توان عملگر مترادف آن A را تعریف و مسئله معکوس‌سازی را با معادله (۴-۲) طرح نمود.

$$F(m) = d \quad (2-4)$$

$$m = A^{-1}d \quad (3-4)$$

۴-۵- روش حل مسائل معکوس سازی

برای حل مسائل معکوس سازی روش های متعددی به شرح زیر وجود دارند [۵۱]:

روش کمترین مربعات^{۶۴}، گرادیان مزدوج^{۶۵}، ماکزیموم آنترپی^{۶۶}، تجزیه مقدار تکین^{۶۷}، شبیه سازی گداخت^{۶۸}، شبکه های عصبی^{۶۹}، روش گرادیان^{۷۰}، روش های تصادفی^{۷۱} و ...

بطور عموم روشی که برای معکوس سازی داده های VLF دو بعدی و سه بعدی بکار می رود بر مبنای روش بهینه کمترین مربعات تعمیم داده شده می باشد که چگونگی آن در پیوست (ج) آمده است [۵۱].

با توجه به اینکه در این تحقیق از نرم افزار INV2DVLF جهت مدل سازی داده های VLF و برای مدل سازی معکوس داده های مقاومت ویژه و IP از نرم افزار RES2DINV استفاده شده است، لذا شرح مختصری از این نرم افزارها خواهیم داشت.

۴-۶- نرم افزار INV2DVLF

INV2DVLF نرم افزاری است که تحت DOS عمل می نماید. این نرم افزار توسط فرناندو سنتوس^{۷۲} [۳۷] طراحی شده و به طور خودکار مدل سازی عددی دو بعدی داده های صحرائی VLF را انجام می دهد. در این نرم افزار از روش عناصر محدود که کاربرد وسیعی در مگنتوتلوریک، الکترومغناطیس و

⁶⁴-Least Square

³-Conjugate-gradient

⁴-Maximum entropy

⁶⁷-Singular value decomposition (SVD)

⁶-Simulated annealing

⁷-Artificial neural- networks (ANN)

⁷⁰-Gradient

⁷¹-Random methods

⁷²-Fernando A.Monteiro Santos

ژئوالکتریک دارد، در معکوس‌سازی هموار داده‌ها استفاده می‌گیرد و نهایتاً می‌توان از داده‌های برداشتی VLF به مقطع ژئوالکتریک رسید. به منظور استفاده از این نرم‌افزار در ابتدا داده‌ها و توپوگرافی نقاط برداشت طبق فرمت خاص برنامه در فایل‌های جداگانه ذخیره می‌گردد.

نرم‌افزار INV2DVLF از دو قسمت PrepVLF و INV2DVLF تشکیل شده است که خروجی PrepVLF به عنوان ورودی INV2DVLF به کار برده می‌شود. در قسمت PrepVLF داده‌های برداشتی شامل مقادیر حقیقی و موهومی تیپر، توپوگرافی نقاط برداشتی و مقاومت زمینه برای زمین همگن فرضی فراخوانی می‌شود. این فایل خروجی به نام Input در قسمت Inv2DVLF استفاده شده که شامل اطلاعات ضروری برای معکوس‌سازی است و با تعیین تعداد تکرار (به طور معمول بین ۲۰ تا ۳۰) و پارامتر ضریب لاگرانژ فایل‌های خروجی ساخته می‌شود. این فایل‌ها شامل اطلاعاتی در زمینه مراحل معکوس‌سازی، مدل نهایی⁷³، داده‌های ورودی و داده‌های محاسبه شده به وسیله نرم‌افزار⁷⁴، پاسخ مدل⁷⁵ و خطای مدل‌سازی⁷⁶ است. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار به طور خودکار تصحیح توپوگرافی را اعمال می‌کند [۳۳]. نمونه‌ای از فایل ورودی و خروجی این نرم‌افزار برای پروفیل ۱-W برداشت شده در این تحقیق در پیوست (د) آورده شده است.

مدل نهایی را می‌توان با نرم‌افزار Surfer رسم کرد تا تغییرات مقاومت ویژه را در راستای عمق و طول پروفیل بررسی نمود. با رسم نمودار مؤلفه حقیقی و موهومی داده‌های برداشتی و محاسبه شده در فایل FDATA می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های اندازه‌گیری شده تا چه حدی با پاسخ مدل تطابق دارند. در صورت وجود نوفه در داده‌ها اختلاف مقادیر حقیقی و موهومی داده‌های برداشتی و محاسبه شده زیاد خواهد بود. در این صورت برای رسیدن به مدل مطلوب باید ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده را با روش تجزیه غیر خطی⁷⁷ فیلتر نموده تا نسبت سیگنال به نویز به مقدار قابل قبولی کاهش یابد. این فیلترسازی با هموار کردن داده‌ها انجام می‌شود. شکل (۴-۲) مربوط به داده‌های حقیقی (هم‌فاز) مصنوعی است که نسبت $\frac{S}{N} = 3$ (نسبت سیگنال

⁷³-Final Model

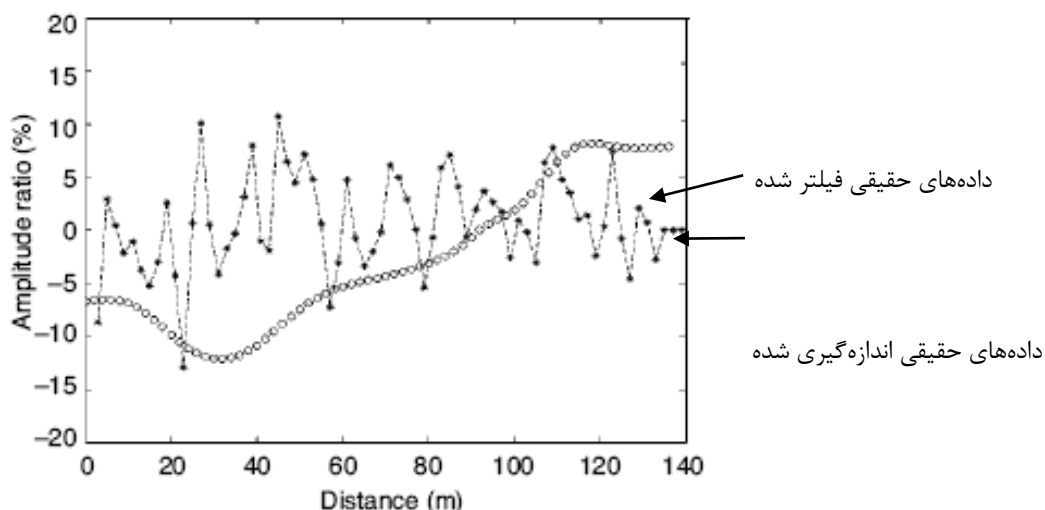
⁷⁴-FDATER

⁷⁵-Model Response

⁷⁶-Route Mean Squar

⁷⁷-Nonlinear decomposition method

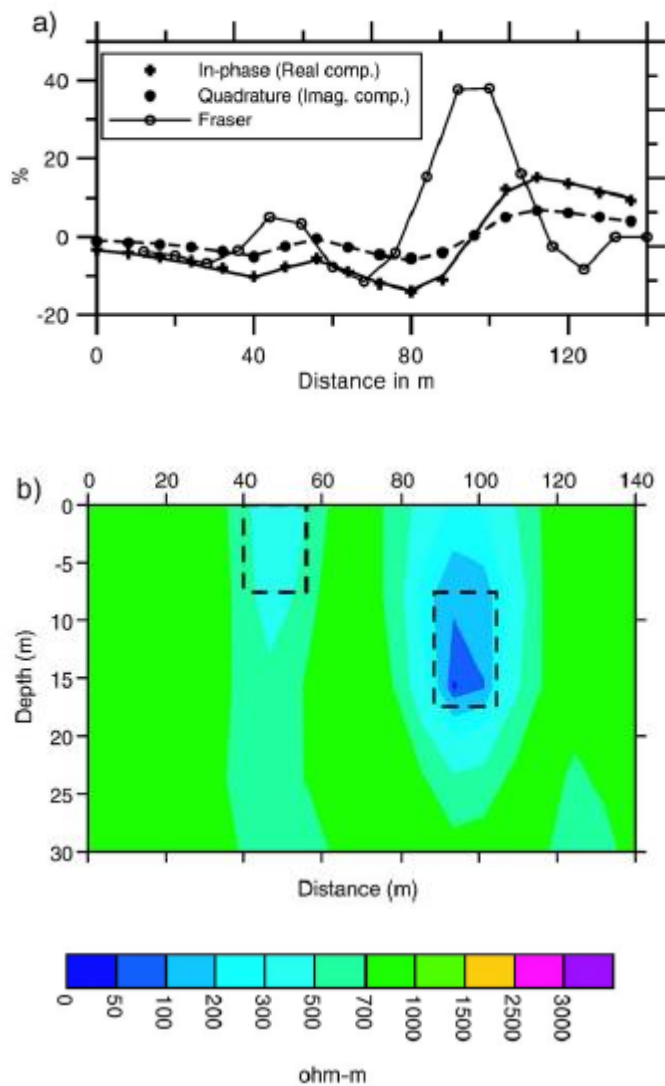
(S) به نویز (N)) در نظر گرفته شده است. بعد از فیلتر کردن، داده‌ها از تغییرات تدریجی خوبی برخوردار شده است [۵۲].



شکل (۲-۴) داده‌های حقیقی اندازه‌گیری شده و فیلتر شده [۳۳]

لازم به ذکر است که تمامی داده‌های VLF با روش فوق به‌گونه‌ای فیلتر می‌شوند تا مدل‌سازی عددی آنها با دقت بیشتری صورت گیرد.

برای ارزیابی عملکرد نرم‌افزار INV2DVLF مطابق شکل (۳-۴- b) مدلی دو بعدی که دو زون هادی با مقطع مستطیلی شکل در زمینه مقاوم قرار دارند را در نظر می‌گیریم. این دو زون رسانا با مقاومت ویژه ۳۰۰ و ۵۰ اهم-متر در محیط میزبان ۱۰۰۰ اهم-متری قرار گرفته‌اند. با انجام مدل‌سازی مستقیم توسط نرم‌افزار پاسخ مصنوعی مدل به صورت درصد بخش حقیقی و موهومی تابع تیپر محاسبه و در شکل (۳-۴- a) همراه پروفیل فیلتر شده بخش حقیقی داده توسط روش فریزر نشان داده می‌شود. با در اختیار داشتن داده‌های مصنوعی و انجام عملیات مدل‌سازی معکوس با نرم‌افزار مورد نظر مدل ژئوالکتریکی بدست می‌آید که با مدل واقعی در تطابق خوبی می‌باشد [۳۳].



شکل (۴-۳). a - نقاط، داده‌های مصنوعی VLF و خطوط، پاسخ مدل حاصل از معکوس‌سازی می‌باشند. b - مدل مقاومت ویژه دوبعدی بدست آمده با معکوس‌سازی [۳۳]

۴-۷- نرم افزار RES2DINV

RES2DINV نرم افزار گرافیکی است که تحت ویندوز عمل می‌نماید. این نرم‌افزار توسط لوک طراحی [۳۸] شده است و به طور خودکار مدل دو بعدی هموار داده‌های صحرایی مقاومت‌ویژه و قطبش القائی را بدست می‌آورد. در این نرم‌افزار به طور معمول مدل‌سازی پیشرو عنصر محدود و تفاضل محدود برای محاسبه مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری بکار می‌رود و پس از آن شیوه بهینه کمترین مربعات برای معکوس‌سازی داده‌ها استفاده

می‌شود. این برنامه را می‌توان برای مدل‌سازی داده‌های بدست آمده از آرایش‌های مختلفی مانند ورنر، شلومبرژه، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی، دوقطبی-دوقطبی، دوقطبی-دوقطبی استوایی و گرادیان بکارگرفت. یکی از محاسن بکارگیری این نرم‌افزار عدم نیاز به دادن مدل آغازین توسط کاربر برای انجام مدل‌سازی می‌باشد، زیرا نرم‌افزار بصورت پیش فرض مدل اولیه را یک زمین همگن در نظر می‌گیرد.

در این برنامه مدل زیر سطحی دو بعدی به شبکه‌های مستطیلی تقسیم می‌گردد. هدف در این برنامه تعیین مقاومت ویژه شبکه‌های مستطیلی است که یک شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری را ایجاد می‌نمایند که با داده‌های خام مشاهده شده هماهنگ باشد. یکی از مشکلات عمومی در مدل‌سازی حضور نقاط داده‌های بد در سری داده‌ها می‌باشد. در این نرم‌افزار می‌توان مقادیر مقاومت ویژه ظاهری بالا و پایین را کنترل نمود و در صورت لزوم با حذف این مقادیر به رفع این مشکل کمک نمود.

۴-۸- مدل‌سازی داده‌های برداشت شده و تفسیر کمی آنها

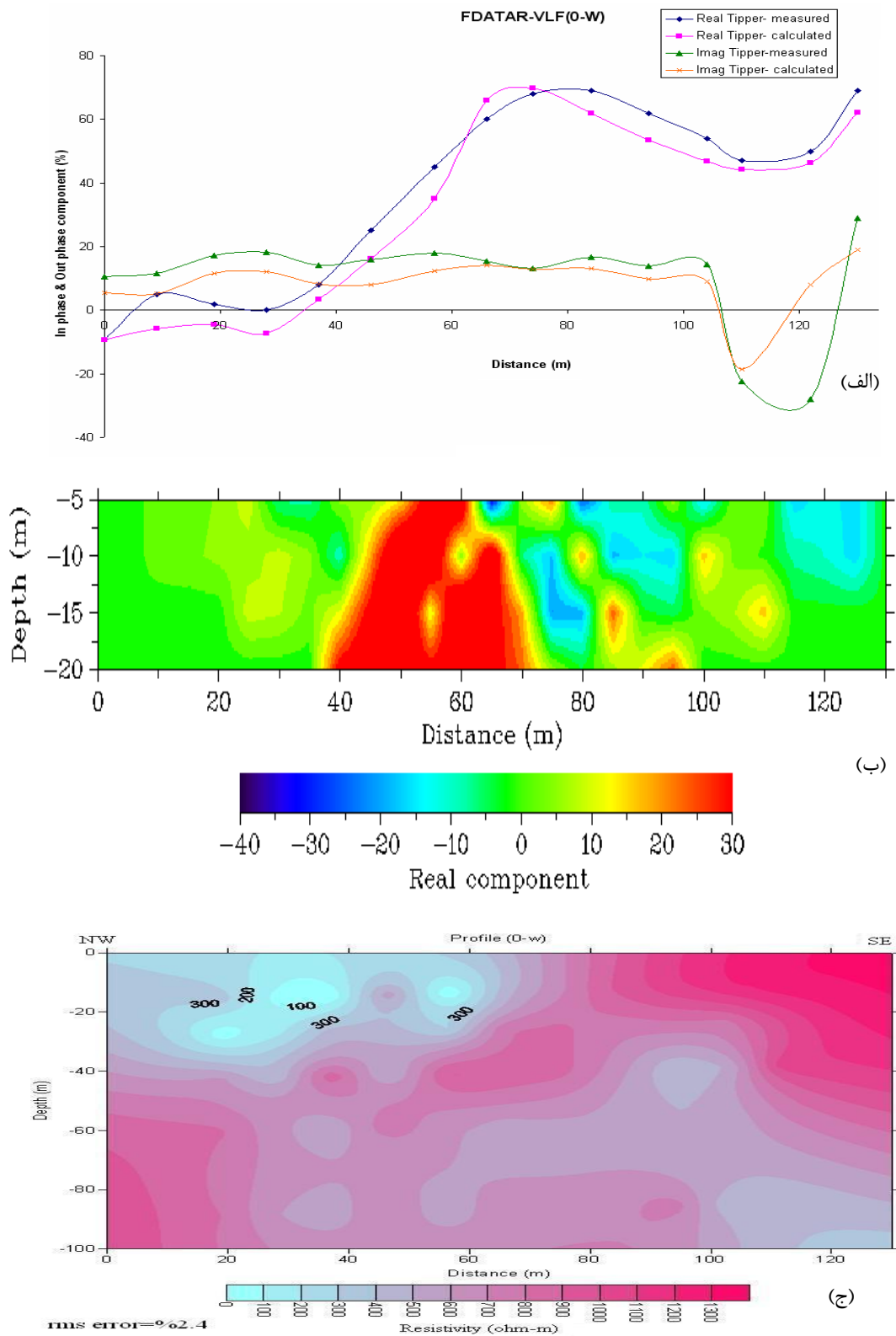
پس از آنکه با تئوری مدل‌سازی عددی و طرز کار با نرم‌افزارهای مورد استفاده و قابلیت‌های آنها آشنا شدیم، برای تفسیر کمی، داده‌های VLF برای ۵ پروفیل توسط نرم‌افزار INV2DVLF و داده‌های مقاومت ویژه و IP را برای یک پروفیل به کمک نرم‌افزار RES2DINV مورد مدل‌سازی قرار می‌دهیم تا محل‌های آلوده شده احتمالی به طور بارزتری مورد شناسایی قرار گیرند. پس از مدل‌سازی داده‌های VLF، نتایج به صورت مقاطع مقاومت ویژه توسط نرم‌افزار Surfer تا عمق ۱۰۰ متر تهیه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با مقاطع چگالی جریان مقایسه می‌گردند. در تفسیر کمی این مقاطع نواحی با مقاومت ویژه زیر ۱۰۰ اهم-متر را به عنوان زون آلوده احتمالی و مناطق با مقاومت ویژه زیر ۲۰۰ اهم-متر را به عنوان زون آلوده ممکن در نظر می‌گیریم.

۴-۸-۱- پروفیل W- (پروفیل در امتداد دره)

در شکل (۴-۴- الف) که نمودار مربوط به مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده بعد از هموارسازی و داده‌های محاسبه شده (پاسخ مدل) است مؤلفه حقیقی اندازه‌گیری شده با مؤلفه حقیقی محاسبه شده

توسط نرم‌افزار دارای روند تقریباً مشابهی بوده و برای مؤلفه موهومی اندازه‌گیری شده با مؤلفه موهومی محاسبه شده نیز همین شرایط صادق است. برای سایر پروفیل‌ها نیز نمودار مقایسه‌ای رسم شده و در پیوست (د) آمده است. علاوه بر آن خطای مدل‌سازی (RMS) در پایین هر مدل آورده شده است. برای پروفیل W-10 این خطا ۲/۴ درصد محاسبه شده است.

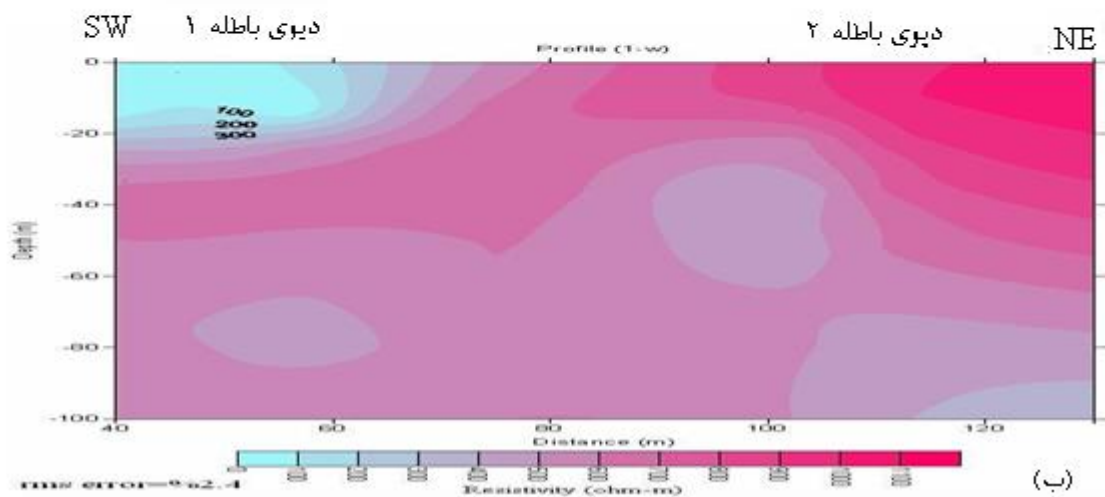
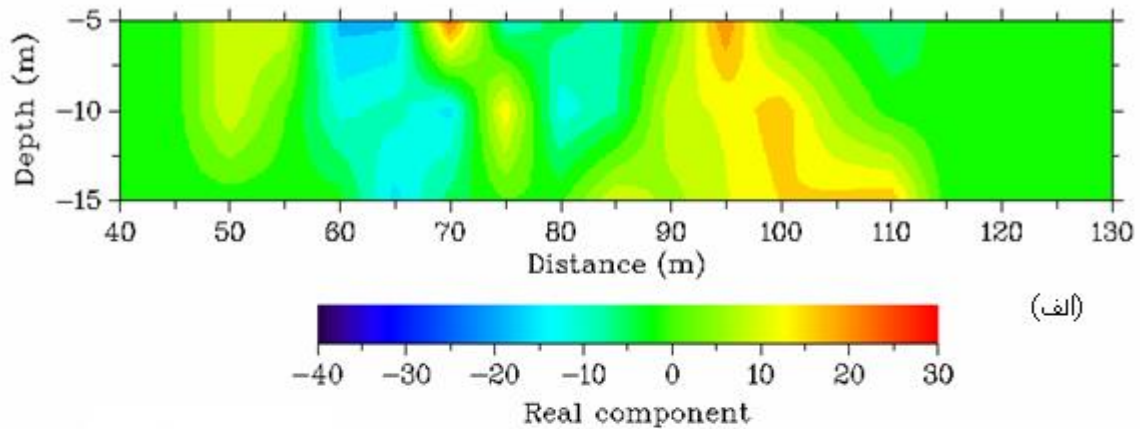
در مقطع مقاومت ویژه این پروفیل (شکل (۴-۴-ج)) همانطور که دیده می‌شود ۳ زون با مقاومت ویژه تقریبی زیر ۱۰۰ اهم-متر وجود دارد که در نقاط ۲۰، ۳۸ و ۴۰ متری قرار گرفته و به ترتیب دارای عمق ۳۰، ۱۸ و ۱۷ متری هستند. وجود این زون در محدوده مورد نظر با مقاومت ویژه پایین تأییدی بر بالا بودن چگالی جریان در محدوده بین ۴۰ تا ۶۰ متری در شکل (۴-۴-ب) است که تا حدود زیادی آلوده بودن منطقه از ابتدای پروفیل تا اواسط آن را توسط باطله‌های معدنی نشان می‌دهد. زون آلوده ممکن نیز از فاصله ۲۰ تا ۴۰ متری با گسترش عمقی ۳۰ متر مشاهده می‌شود. در طول پروفیل از نقطه ۶۰ متری به بعد مقاومت ویژه روند افزایشی داشته و تا انتهای پروفیل ادامه می‌یابد. در واقع می‌توان چنین نتیجه گرفت که در نزدیکی معدن (دهانه تونل موجود) شدت و عمق آلودگی بالا و با دور شدن از آن میزان آلودگی کاهش می‌یابد. به طور کلی با تهیه شبه مقطع چگالی جریان می‌توان به دید کیفی از آنومالی رسید. در حالی که مدل‌های تهیه شده برای هر پروفیل دارای دقت بیشتری می‌باشد.



شکل (۴-۴). (الف). نمودار مؤلفه حقیقی و موهومی داده‌های برداشتی و محاسبه شده بدست آمده توسط نرم‌افزار INV2DVLF برای پروفیل 0-W (ب). شبه مقطع چگالی جریان (ج). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس‌سازی داده‌های VLF

۴-۸-۲- پروفیل W-۱

در شکل (۴-۵-الف) که شبه مقطع چگالی جریان را نشان می‌دهد، زونی با رسانندگی تقریباً بالا در فاصله ۴۵ تا ۶۰ متری دیده می‌شود. زون بعدی در نقطه ۷۰ متری واقع شده و سطحی می‌باشد. زون سوم در شبه مقطع چگالی جریان در فاصله ۹۵ تا ۱۱۰ با گسترش عمقی ۱۵ متر قرار گرفته است. در مقطع مقاومت ویژه شکل (۴-۵-ب) نیز از ابتدای پروفیل یعنی نقطه ۴۰ متری تا ۶۰ متری زونی با مقاومت ویژه زیر ۱۰۰ اهم- متر وجود دارد که از سطح زمین تا عمق تقریبی ۲۰ متری گسترش دارد. این زون‌های آلوده با مقاومت ویژه پایین در ابتدا پروفیل ممکن است به دلیل دپوی باطله معدنی باشد که در قسمت راست و چپ دهانه معدن قرار گرفته است و اثر خود را در جهت جنوب غربی پروفیل نشان داده است. خطای مدل‌سازی این پروفیل ۲/۴ درصد می‌باشد. با مقایسه نمودار داده‌های اندازه‌گیری شده و پاسخ مدل در پیوست (ه) می‌توان به این نتیجه رسید که دقت مدل‌سازی بالا می‌باشد زیرا نمودارها تقریباً مشابه می‌باشند.

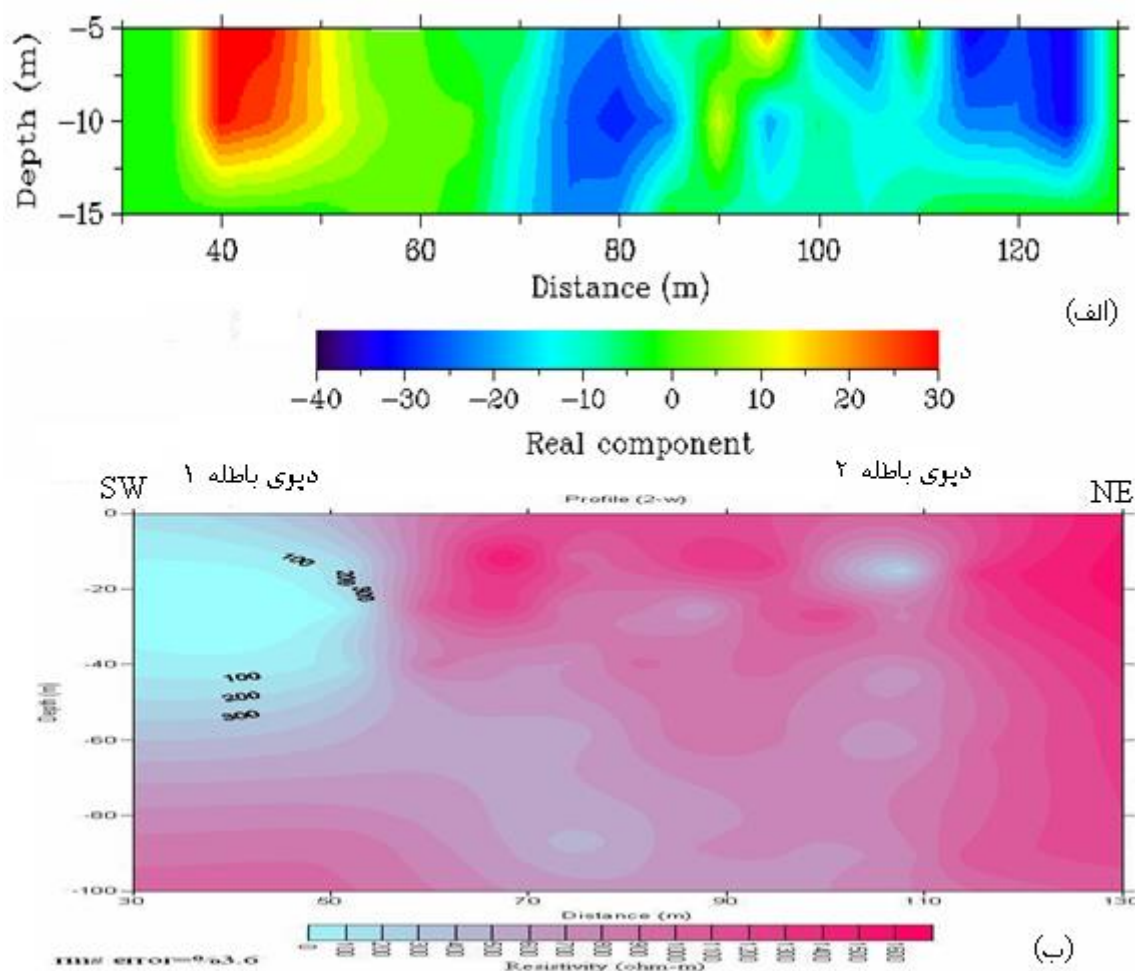


شکل (۴-۵). (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل W-۱. (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده‌های VLF بدست آمده توسط نرم‌افزار INV2DVLF

۴-۸-۳- پروفیل W-۲

در شبه مقطع چگالی جریان این پروفیل (شکل ۴-۶-الف) از نقطه ۴۰ تا ۵۰ متری زونی با رسانندگی بالا مشاهده می‌شود که از سطح زمین تا عمق تقریبی ۱۳ متر گسترش یافته است. زون سطحی دیگری در نقطه ۹۷ متری وجود دارد. در شکل (۴-۶-ب) مربوط به مقطع مقاومت ویژه این پروفیل زونی با مقاومت ویژه پایین دیده می‌شود که در ابتدای پروفیل از نقطه ۳۰ متری شروع شده و تا فاصله ۶۰ متری پروفیل

ادامه دارد. عمق این زون رسانا بیش از ۴۰ متر است که مقاومت ویژه آن در نزدیک سطح کمتر بوده و با رفتن به عمق مقاومت ویژه افزایش می‌یابد. زونی دیگری با مقاومت ویژه پایین در نقطه ۱۱۰ متری قرار گرفته است که عمق آن ۲۰ متر می‌باشد. هر دو زون در شکل شبه مقطع چگالی جریان و مقطع مقاومت ویژه همدیگر را تایید می‌کنند. خطای مدل‌سازی برای این پروفیل ۳/۶ درصد بوده و نمودار مقایسه‌ای داده‌های اندازه‌گیری شده و پاسخ مدل (پیوست ه) هم‌خوانی خوبی با هم دارند.

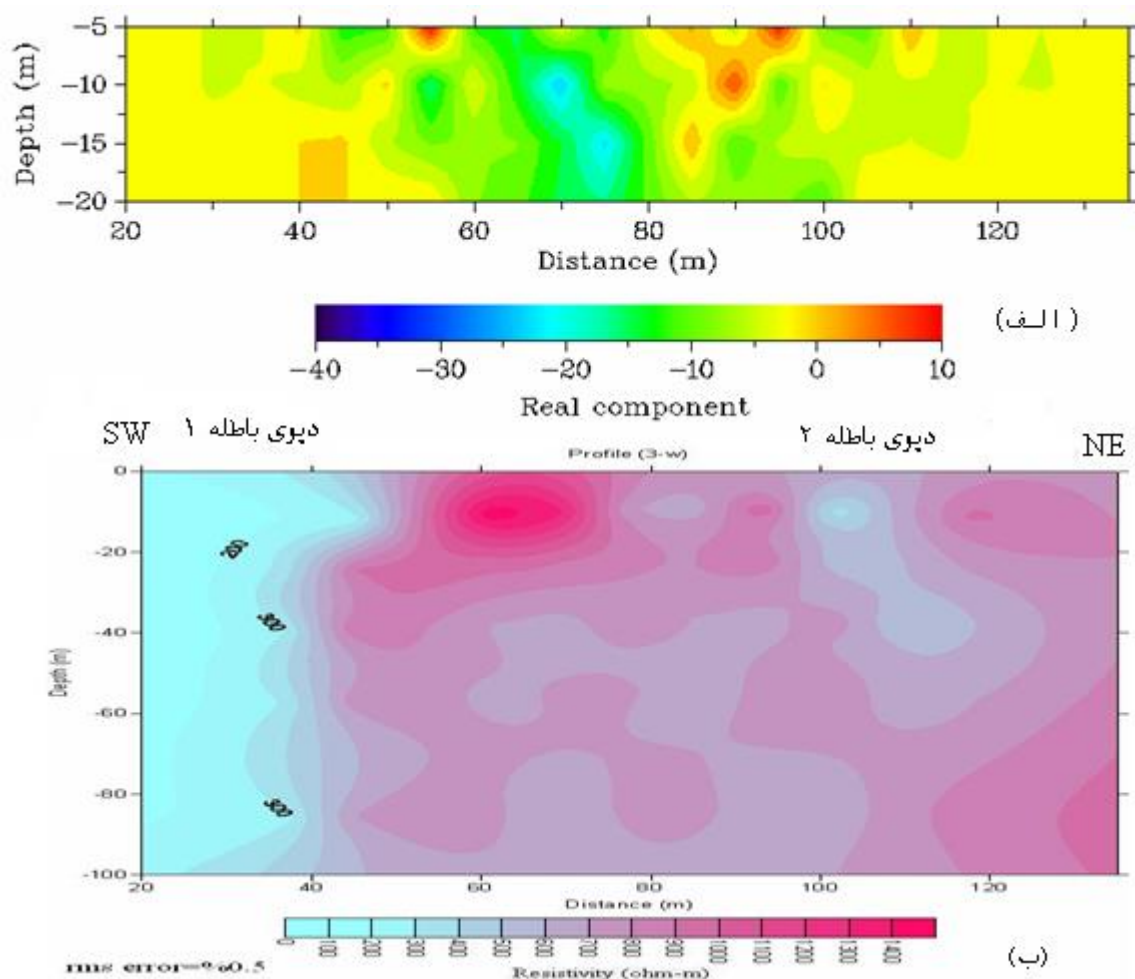


شکل (۴-۶)، (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل ۲-W. (ب) مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس‌سازی داده‌های

VLF بدست آمده توسط نرم‌افزار INV2DVLF

۴-۸-۴ - پروفیل ۳-W

در شبه مقطع چگالی جریان این پروفیل (شکل ۴-۷-الف) دو زون رسانای سطحی کوچک در نقاط ۵۷ و ۱۱۰ متری وجود دارند که در مقطع مقاومت ویژه (شکل ۴-۷-ب) به صورت آنومالی کوچکی در نقطه ۱۱۰ متری و در عمق ۱۰ متری به نمایش در آمده است. علاوه بر آن در شکل (۴-۷-ب) زون کم مقاومتی مشاهده می شود که از نقطه ۲۰ متری در ابتدای پروفیل شروع و تا نقطه ۴۰ متری گسترش می یابد. گسترش عمقی این زون رسانا تا حدود ۱۰۰ متر و مقاومتش کمتر از ۱۰۰ اهم-متر می باشد که آلوده بودن محدوده ابتدایی پروفیل را نشان می دهد. با مقایسه شکل (۴-۷-ب) با اشکال (۴-۵-ب) و (۴-۶-ب) می توان روند آلودگی را دنبال کرده و به این نتیجه رسید که امتداد زون آلوده در پروفیل های قبلی در این پروفیل نیز مشاهده می شود. برای این پروفیل خطای RMS پایین و ۰/۵ محاسبه شده است و پاسخ مدل نزدیکی زیادی با داده های اندازه گیری (پیوست ه) دارد.



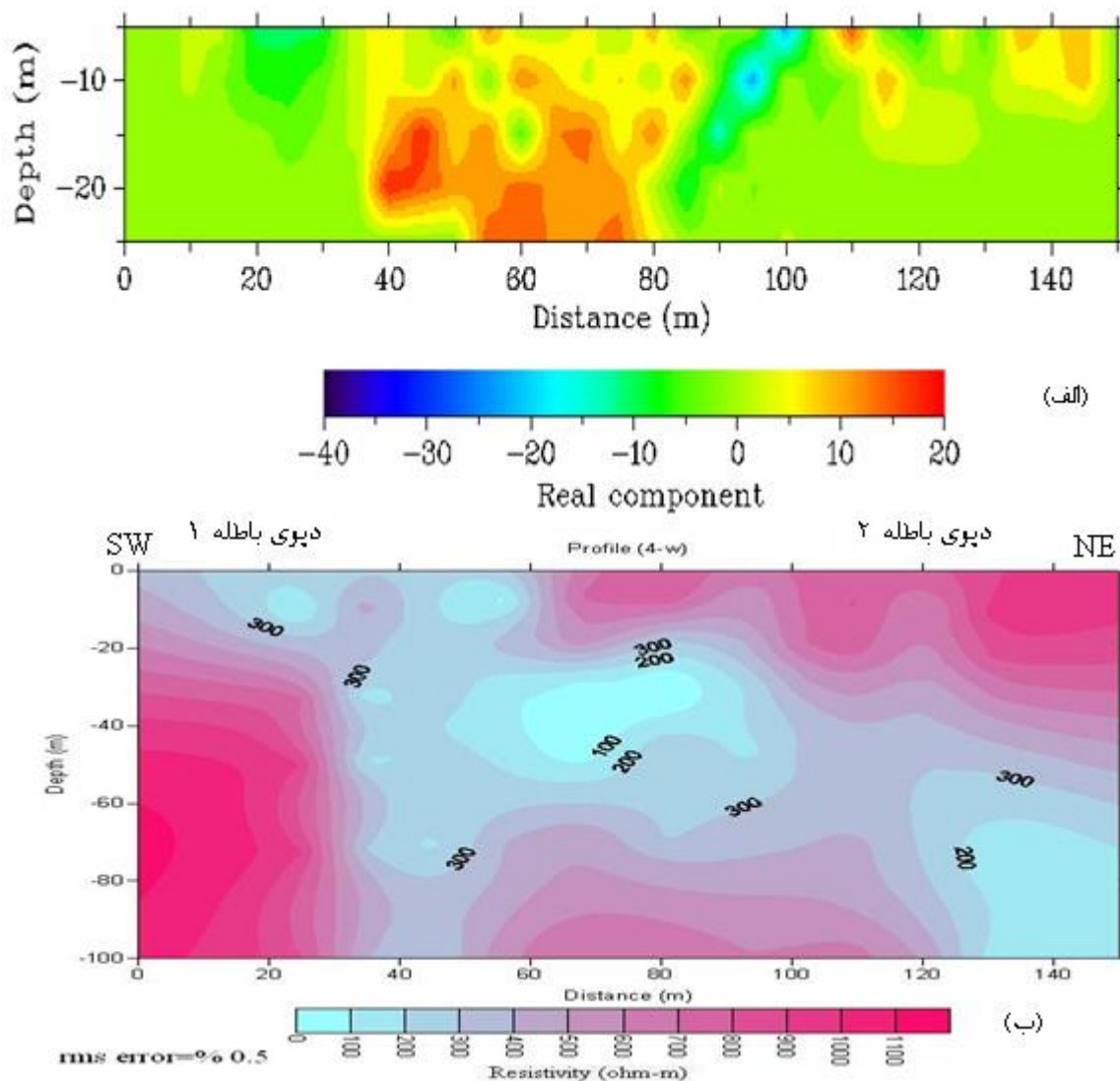
شکل (۷-۴). (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل W-۳. (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس سازی داده های

VLF بدست آمده توسط نرم افزار INV2DVLF

۴-۸-۵-۴- پروفیل W-۴

شکل (۴-۸-الف) شبه مقطع چگالی جریان این پروفیل را نشان می دهد که در آن زون رسانایی در فاصله ۴۰ تا ۸۰ متری قرار گرفته و از عمق ۵ تا ۲۵ متری گسترش دارد. دو زون فرعی دیگر در نقطه ۱۱۰ و ۱۳۰ تا ۱۴۵ متری قرار دارند. در شکل (۴-۸-ب) مربوط به مقطع مقاومت ویژه این پروفیل دو زون با مقاومت ویژه زیر ۲۰۰ اهم - متر وجود دارد. زون اول به عنوان زون اصلی از نقطه ۵۰ تا ۱۰۰ متری به صورت طولی گسترش یافته و از عمق ۲۰ تا ۶۰ متری نیز دارای گسترش عمقی می باشد. زون به ظاهر با رسانایی کمتری از نقطه ۱۲۰ متری در طول پروفیل شروع شده و تا انتهای پروفیل ادامه یافته است. عمق این آنومالی از ۵۰ تا ۱۰۰ متر تخمین زده می شود که به دلیل واقع شدن در عمق زیاد نمی توان برای آن تفسیر درستی ارائه نمود. خطای RMS محاسبه شده ۰/۵ است و تطابق خوبی بین نمودار مقایسه ای داده های برداشتی و پاسخ مدل (پیوست ه) وجود دارد.

با توجه به اینکه در پروفیل های قبلی دو زون رسانا در طرفین پروفیل قرار گرفته، به نظر می رسد آنومالی رسانای اصلی در وسط پروفیل W-۴ از به هم پیوستن این دو زون ناشی شده است.



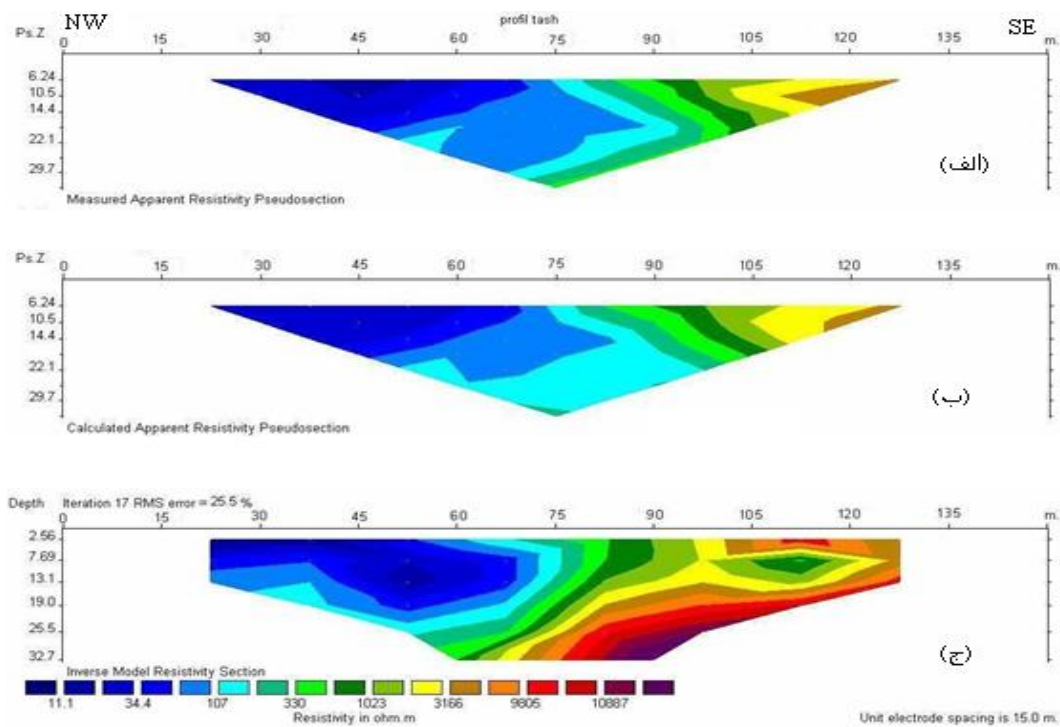
شکل (۸-۴). (الف). شبه مقطع چگالی جریان برای پروفیل ۴-W. (ب). مدل دوبعدی مقاومت ویژه با معکوس‌سازی داده‌های

VLF بدست آمده توسط نرم‌افزار INV2DVLF

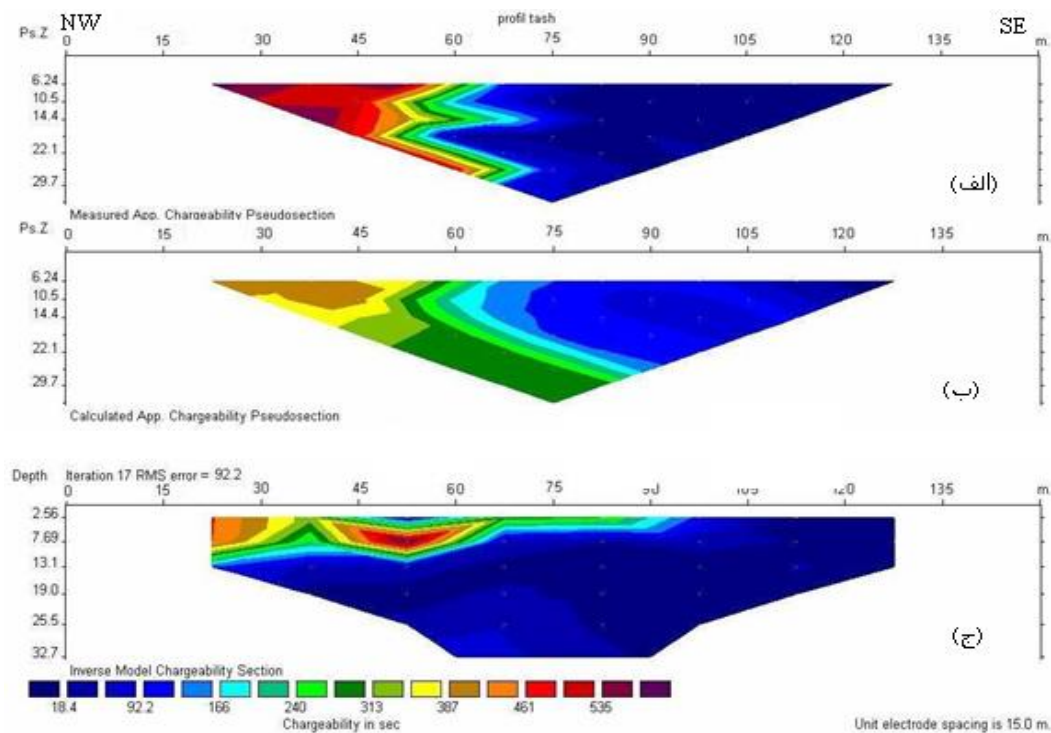
۹-۴- مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP برداشت شده در امتداد پروفیل Tash (یا W-۰)

برای تایید نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های VLF در امتداد پروفیل W-۰، داده‌های مقاومت ویژه و IP با نرم‌افزار RES2DINV مورد مدل‌سازی معکوس هموار قرار گرفتند که نتایج آن برای داده‌های مقاومت ویژه در شکل (۹-۴) و برای داده‌های IP در شکل (۱۰-۴) نشان داده می‌شوند. با مقایسه شبه مقطع داده‌های خام در شکل‌های (۹-۴-الف) و (۱۰-۴-الف) با داده‌های محاسبه شده در شکل‌های

(۴-۹-ب) و (۴-۱۰-ب) می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل‌سازی به خصوص برای داده‌های مقاومت ویژه از دقت خوبی برخوردار است. با توجه به مدل‌های حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه شکل (۴-۹-ج) و داده‌های IP شکل (۴-۱۰-ج) می‌توان گفت که در ابتدای پروفیل از محدوده ۲۳ تا ۶۵ متری زونی با مقاومت ویژه پایین و کمتر از ۱۰۰ اهم-متر و بارپذیری بیشتر از ۴۰۰ میلی‌ثانیه تا عمق ۲۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است که تاییدی بر آلوده بودن منطقه می‌باشد. از فاصله ۶۵ متری به بعد مقاومت ویژه افزایش یافته و بارپذیری کاهش می‌یابد و این مطلب نشان دهنده آن است که آلودگی در اواسط پروفیل از لحاظ طولی و عمقی به میزان زیادی کاهش یافته و در انتهای پروفیل اثرات آن ناچیز است.



شکل (۴-۹) نتایج مدل سازی معکوس هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل W-۰ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مدل مقاومت ویژه

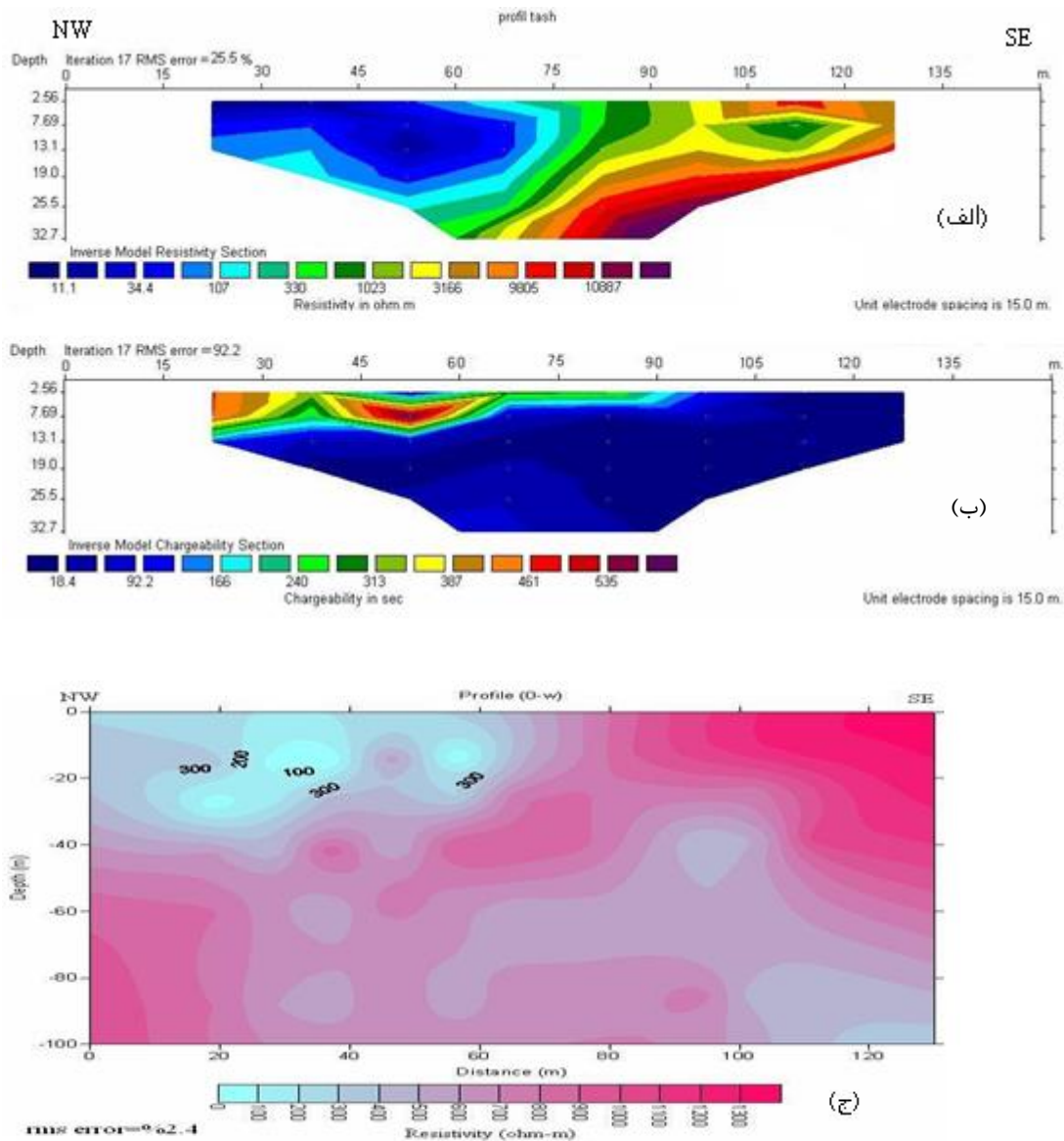


شکل (۴-۱۰) نتایج مدل‌سازی معکوس هموار داده‌های IP توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل W-۰ (الف)، شبه مقطع داده‌های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی (ج)، مدل بارپذیری حاصل از مدل‌سازی معکوس

۴-۱۰- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه، IP و VLF برداشت شده در

امتداد پروفیل Tash (یا W-۰)

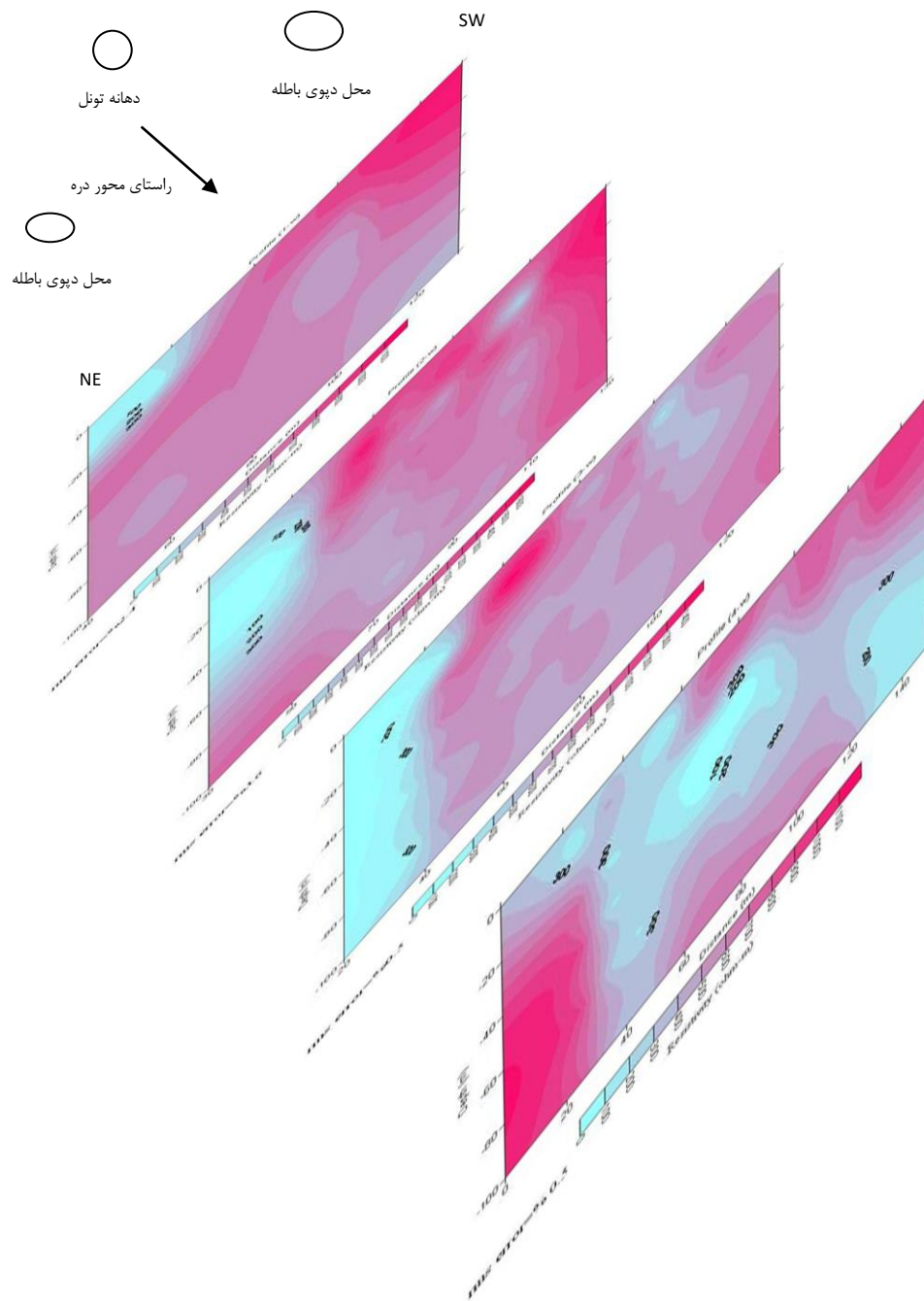
در شکل (۴-۱۱) مقاطع معکوس‌سازی هموار این پروفیل برای داده‌های مقاومت ویژه و IP با نتایج مدل‌سازی داده‌های پروفیل VLF با هم مقایسه شده است. در مقطع معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP در ابتدای پروفیل، زون رسانا با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم-متر و با بارپذیری ۴۰۰ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود. در اواسط پروفیل این زون سطحی شده در انتهای پروفیل اثری از زون مورد نظر دیده نمی‌شود. در مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی دو بعدی داده‌های VLF نیز زونی با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم-متر با گسترش عمقی ۲۰ متری در ابتدای پروفیل دیده می‌شود که با زون ذکر شده در مقاطع معکوس‌سازی مقاومت ویژه و IP تا حدود قابل قبولی سازگاری داشته و همدیگر را تایید می‌کنند. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که محل آلودگی احتمالی در ابتدای پروفیل دارای مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا بوده و از اواسط پروفیل به بعد اثری از زون آلوده مشاهده نمی‌شود.



شکل (۴-۱۱) مقاطع معکوس سازی هموار پروفیل ۰-W (الف)، داده‌های مقاومت ویژه (ب)، داده‌های IP (ج)،

داده‌های VLF

با قرار دادن مقاطع ژئوالکتریک حاصل از مدل سازی داده‌های VLF برای پروفیل‌های موازی در کنار هم (شکل ۴-۱۲) می‌توان امتداد آنومالی‌ها (محدوده آلوده شده)، نحوه گسترش و روند آنها را از دهانه معدن به طرف پایین دره نشان داد. در پروفیل‌های ۱-W، ۲-W و ۳-W زون آلوده، سمت چپ مقاطع و بعضاً در سمت راست آنها واقع شده و در پروفیل ۴-W آلودگی در وسط مقطع (محور دره) قرار گرفته است.



شکل (۴-۱۲) قرارگیری مقاطع مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی دوبعدی داده های VLF و گسترش زون رسنا (زون های احتمالاً آلوده) را نشان می دهد.

با مقایسه مدل سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه، IP و VLF برای پروفیل W-0 زون آلوده با مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا در ابتدای پروفیل مشاهده می گردید که دارای عمقی در حدود ۳۰ متر در راستای شمال غربی می باشد و در اواسط پروفیل زون مورد نظر سطحی می شود. نتایج مدل سازی

داده‌های VLF برای پروفیل W-1 که عمود بر پروفیل W-0 است، زونی با مقاومت ویژه پایین را در عمق کمتر از ۲۰ متر در ابتدای پروفیل در جهت جنوب غربی نشان می‌دهد. امتداد این زون، راستای زون موجود در پروفیل W-2 می‌باشد که تا پروفیل W-3 امتداد یافته است و به صورت زون رسانایی در عمق ۴۰ متر در پروفیل W-3 آشکار شده است. با دور شدن از محل انباشت باطله‌ها، زون‌های رسانا (زون‌های آلوده احتمالی) به سمت محور دره متمایل شده، به طوری که در پروفیل W-4 آلودگی در وسط پروفیل مشاهده می‌گردد.

با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه شامل قطعات خرد شده سنگ‌های بالادست آهکی که روی سنگ بستر آهکی مقاوم قرار گرفته شده‌اند می‌باشد، از این رو حتی در صورت وجود اثرات آب زیرزمینی مقدار بارپذیری بالای مشاهده شده قابل توجیه نمی‌باشد. با بازدیدهای صحرائی صورت گرفته و شناسایی جنس سنگ‌های آهکی بالادست وجود رس در مناطق پایین دست معدن (داخل دره) تقریباً منتفی است. بنابراین تنها دلیل باقی مانده که می‌تواند توجیه‌گر مناطق با مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا باشد به احتمال زیاد اثرات پساب‌های اسیدی ناشی از فعالیت‌های معدنکاری در مناطق بالادست می‌باشد. علی‌رغم این موارد لازم است با انجام برداشت‌های بیشتر مقاومت ویژه در امتداد پروفیل W-1 و W-4 و نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی نمونه‌های سطحی و عمقی از آب و خرده سنگ‌های منطقه، اطلاعات جامع و کامل‌تری از زون‌های آلوده حاصل شود. مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

پس از برداشت و تفسیر نتایج حاصل از داده‌های VLF ، IP و مقاومت ویژه در منطقه مورد نظر و تعیین زون‌های احتمالی آلوده، نتایج نسبتاً مطلوبی حاصل گردید که به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

۵-۱- نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام گرفته می‌توان اهم نتایج زیر را به شرح زیر بیان نمود:

♣ با تفسیر شبه مقاطع چگالی جریان معادل داده‌های VLF می‌توان به دیدی کیفی از داده‌های بدست آمده از ساختار زیر سطحی رسید. ولی برای تفسیر کمی داده‌ها باید از مدل‌سازی استفاده نمود.

♣ مدل‌های تهیه شده برای داده‌های VLF دارای تطابق خوب و قابل قبولی با مدل‌های بدست آمده از مقاومت ویژه و IP هستند.

♣ با تلفیق و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های VLF با سایر روش‌های اکتشافی ژئوفیزیک، تعبیر و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی بهتر صورت می‌گیرد.

♣ با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه با قطعات خرد شده سنگ‌های بالادست آهکی که روی سنگ بستر آهکی مقاوم قرار گرفته شده‌اند، پوشیده شده است، از این رو حتی در صورت وجود اثرات آب زیرزمینی مقدار بارپذیری بالای مشاهده شده قابل توجیه نمی‌باشد.

♣ با توجه به جنس سنگ‌های آهکی بالادست وجود رس در مناطق پایین‌دست معدن (داخل دره) تقریباً منتفی است و بازدهی‌های صحرایی نیز این مطلب را تایید می‌کند.

♣ بنابراین می‌توان توجیه کرد که مناطق با مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا به احتمال زیاد ناشی از اثرات پساب اسیدی ناشی از فعالیت‌های معدنکاری مناطق بالادست می‌باشد.

♣ تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی همراه با شواهد موجود در منطقه نشان می‌دهند که مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا احتمالاً ممکن است به علت انباشت باطله معدنی و آلوده کردن مناطق پایین‌دست توسط کانی‌های سولفیدی همراه با تشکیل پساب سولفیدی می‌باشد.

♣ نتایج بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که باطله‌های معدنی و پساب‌های اسیدی منتج آنها احتمالاً توانسته‌اند مناطق پایین دست محدوده معدنی را تا فاصله بیش از ۳۵ متری با گسترش جانبی ۲۰ تا ۴۰ متر و تا عمق متوسط ۳۵ متر آلوده نمایند.

۵-۲- پیشنهادات

برای تکمیل کار در منطقه حاضر پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می‌شود:

♣ هیچ یک از روش‌های ژئوفیزیکی کامل نیست و روش VLF نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. بدین جهت روش‌های دیگر اندازه‌گیری مانند مقاومت ویژه و IP برای سایر پروفیل‌های برداشتی برای انجام عملیات صحرائی پیشنهاد می‌گردد. (در امتداد پروفیل‌های W-1, W-4)

♣ در صورت تایید نتایج بدست آمده از مدل‌سازی داده‌های VLF، با انجام آزمایشات ژئوشیمی، مطالعات هیدروژئولوژی و نمونه‌برداری سطحی و عمقی از آب، خاک و سنگ‌های منطقه می‌توان میزان آلودگی و گسترش آن را تخمین زد.

♣ با برداشت بیشتر داده‌های VLF و مدل‌سازی آنها می‌توان آلوده بودن بخش‌های دیگری از منطقه را بررسی نمود.

♣ در انتخاب محل مناسب برای دپوی باطله‌های معدنی در سطح زمین باید عوامل مختلفی مانند تعیین وضعیت و جهت آبهای زیرزمینی، موقعیت و محل دپوی باطله از نظر توپوگرافی، منابع آب و مناطق مسکونی و... مورد توجه قرار گیرد.

پیوست حاضر شامل اطلاعاتی در مورد دستگاه WADI برای اندازه‌گیری داده‌های VLF می‌باشد.

شرکت سوئدی ABEM در سال ۱۹۸۷ دستگاه اندازه‌گیری VLF جدید خود به نام WADI را ارائه کرد که به عنوان گیرنده کامل VLF مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا دارای یک میکرو کامپیوتر و یک حافظه‌ای داخلی است. با رسم یک دیاگرام از شدت سیگنال‌ها بر روی مانیتور دستگاه، تشخیص قویترین سیگنال‌های امواج ارسالی توسط فرستنده‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. این دستگاه زاویه شیب و مؤلفه حقیقی و موهومی میدان ثانویه را اندازه‌گیری می‌کند و از توانایی فیلتر کردن داده‌ها بر اساس فیلتر کاروس - هجالت بصورت درجا برخوردار است. داده‌های پروفیل‌های برداشتی را می‌توان با فیلتر نمودن در فواصل مختلف اصلاح و چگالی جریان میدان را برای عمق‌های مختلف بدست آورد.

دستگاه WADI از قسمت‌های زیر تشکیل شده است (شکل الف-۱):

۱- قسمت کنترل کننده دستی

۲- قسمت اندازه‌گیری به همراه محفظه باتری

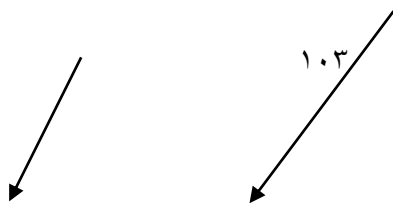
۳- آنتن

قسمت کنترل کننده دستی شامل صفحه کلید و صفحه تصویر می باشد و در حقیقت یک میکرو کامپیوتری است که توانایی ثبت ۴۰۰۰ نقطه اطلاعاتی را دارا می باشد.

سیستم اندازه گیری در قسمت عقب کمر بند واقع شده و گیرنده رادیویی، آمپلی فایر، فیلتر آنالوگ و مدارهای الکتریکی را شامل می باشد. در این قسمت باتری و رابط هایی که ارتباط دستگاه را با کامپیوتر ممکن می سازند، قرار گرفته اند.

آنتن شامل دو میله عمود بر هم به طول ۱۵ سانتی متر است که هر کدام از آنها مجهز به هزاران دور سیم پیچ می باشند و به ترتیب مؤلفه های میدان مغناطیسی افقی و قائم را دریافت می کنند [۴۱].

(ب)





(الف) (پ)

شکل (الف-۱) تصویر دستگاه ABEM-WADI جهت برداشت داده‌های VLF

الف) قسمت کنترل دستگاه و میکرو کامپیوتر

ب) محفظه باتری و قسمت اندازه‌گیری پ (آنتن دستگاه)

در این پیوست جداول مربوط به داده‌های برداشتی ۵ پروفیل VLF همراه با داده‌های مقاومت ویژه و IP آورده شده است.

جدول (ب-۱) داده‌های پروفیل ۱-W

نام پروفیل	تعداد ایستگاه	فرکانس (هرتز)
1-w	۱۹	۱۹۶۰۰
موقعیت ایستگاه	Real Tipper	Imaginary Tipper
۴۰	-۵	-۱۰/۷
۴۵	۲/۷	-۵/۶
۵۰	۹,۲	-۱۴/۱
۵۵	-۱۰/۳	-۸/۳

۶۰	۲۰	-۹/۸
۶۵	-۴۱/۵	-۰/۱
۷۰	-۵/۸	-۱۳/۱
۷۵	۲/۳	-۶/۶
۸۰	-۹/۹	-۸/۲
۸۵	-۱۳/۱	-۴/۷
۹۰	-۲۵/۹	-۱۸/۶
۹۵	-۳/۸	-۴/۳
۱۰۰	۱۳/۹	-۱۳/۸
۱۰۵	۲/۳	-۲۴/۲
۱۱۰	۶/۸	-۲۳/۶
۱۱۵	-۶/۵	-۱۷/۷
۱۲۰	۷/۷	-۱۳/۵
۱۲۵	-۳/۷	-۱۹/۸
۱۳۰	۵/۹	-۱۲/۴

جدول (ب-۲) داده‌های پروفیل ۲-W

نام پروفیل	تعداد ایستگاه	فرکانس (هرتز)
2-w	۲۱	۱۹۶۰۰
موقعیت ایستگاه	Real Tipper	Imaginary Tipper
۳۰	۱۹/۵	۵/۳
۳۵	۴۳/۹	۳/۲
۴۰	۵۲/۴	۹/۳
۴۵	۷۶/۵	۱/۵
۵۰	۹۹/۹	-۱۸/۵
۵۵	۹۹/۹	۶/۶
۶۰	۹۹/۹	۶/۸
۶۵	۹۹/۹	-۱۸/۷
۷۰	۹۹/۹	-۱۰/۷
۷۵	۹۹/۹	-۴۲/۴
۸۰	۹۹/۹	۹/۷
۸۵	۶۱/۹	۵/۲
۹۰	۵۷/۱	۵/۷
۹۵	۶۵	-۹/۷
۱۰۰	۹۹/۹	-۱۹/۶
۱۰۵	۳۶/۷	۶/۸
۱۱۰	۵۸/۳	-۲/۲
۱۱۵	۴۱/۸	۱۲/۱
۱۲۰	۱۴/۸	۷/۶

۱۲۵	۲۷/۶	۷/۴
۱۳۰	۱۸/۲	۲/۷

جدول (ب-۳) داده‌های پروفیل W-۳

نام پروفیل	تعداد ایستگاه	فرکانس (هرتز)
۳-W	۲۴	۱۹۶۰۰
موقعیت ایستگاه	Real Tipper	Imaginary Tipper
۲۰	-۶/۷	-۱۴
۲۵	۶	-۱۰/۴
۳۰	۲۳/۸	-۹/۶
۳۵	۲۶/۲	-۱۰/۴
۴۰	۱۸/۹	-۵
۴۵	۲۳/۸	-۱۰/۲
۵۰	-۲/۸	-۱۵/۲

۵۵	۱۰/۴	-۱۷/۴
۶۰	۱۹/۳	-۱۳
۶۵	-۳/۵	-۱۸/۵
۷۰	-۳/۵	-۱۸
۷۵	-۷	-۱۴/۳
۸۰	-۱۸/۶	-۲۰/۸
۸۵	-۸/۷	-۱۷/۵
۹۰	-۱۴/۱	-۱۵/۱
۹۵	-۱۱/۴	-۱۳/۳
۱۰۰	۲/۲	-۲۴/۲
۱۰۵	-۲۳/۶	-۵/۴
۱۱۰	-۱۳/۷	-۲۲
۱۱۵	-۱۹/۲	-۱۷/۴
۱۲۰	-۲۱/۷	-۲۲/۳
۱۲۵	-۲۴/۴	-۲۴/۴
۱۳۰	-۴/۷	-۲۲/۹
۱۳۵	-۸	-۱۱/۴

جدول (ب-۴) داده‌های پروفیل ۴-W

نام پروفیل	تعداد ایستگاه	فرکانس (هرتز)
------------	---------------	---------------

۴-w	۳۱	۱۹۶۰۰
موقعیت ایستگاه	Real Tipper	Imaginary Tipper
۰	-۸/۵	۱۵/۶
۵	-۱۰	۹/۶
۱۰	-۷/۵	۱۱/۳
۱۵	۲۱	۱۵/۹
۲۰	۰/۶	۸/۴
۲۵	۵/۲	۱۶/۶
۳۰	-۱۶/۸	۱۲/۶
۳۵	-۷/۱	۹
۴۰	-۷/۸	۱/۹
۴۵	۶/۸	۸
۵۰	-۶/۳	۳/۹
۵۵	-۲/۲	۴
۶۰	۱۳/۶	۱۰/۳
۶۵	۲/۷	-۱/۶
۷۰	۱۵/۵	-۱/۳
۷۵	۹/۶	۱۳
۸۰	۱۹/۱	۱۷/۳
۸۵	۲۴/۴	۷/۳
۹۰	۱۵/۲	۹/۷
۹۵	۲۷/۴	۸/۶
۱۰۰	۱۴/۲	۱۰/۹
۱۰۵	-۱۳/۱	۱۳
۱۱۰	۱۴/۸	۱۸/۱

۱۱۵	۲۲/۵	۷/۴
۱۲۰	۱۰/۷	۱۳/۶
۱۲۵	۶/۸	۱۳/۴
۱۳۰	۱۷/۶	۸/۷
۱۳۵	۳/۴	۱۵/۹
۱۴۰	۳۳/۳	۷/۴
۱۴۵	۲۴/۷	۱۴/۵
۱۵۰	۲۷/۲	۲۶/۶

جدول (ب-۵) داده‌های پروفیل W-۰

نام پروفیل	تعداد ایستگاه	فرکانس (هرتز)
۰-W	۲۷	۱۹۶۰۰
موقعیت ایستگاه	Real Tipper	Imaginary Tipper
۰	-۲	۱۰/۵
۵	-۵/۲	۱۱/۷
۱۰	-۱/۹	۱۷/۲
۱۵	۰/۹	۱۸/۲
۲۰	۲/۳	۱۴/۱
۲۵	۱۲/۶	۱۵/۸
۳۰	۲۰/۴	۱۸
۳۵	۱/۳	۱۵/۵
۴۰	۴/۷	۱۳
۴۵	۹	۱۶/۷
۵۰	۱۰/۴	۱۳/۹
۵۵	۲۶/۹	۱۴/۳
۶۰	۸۳/۱	-۲۲/۳

جدول (ب-۶) داده‌های مقاومت ویژه و IP برای پروفیل Tash

موقعیت ایستگاه	مقاومت ویژه (اهم متر) ۷۰	بارپذیری (میلچ ثانیه)
۰	۱۹/۱۷۳۸۴۴۸/۹	-۷۰/۳۸۰۲
۱۵	۱۹/۳۰۶۶۶۶/۶۹	-۴۱/۶۲۷
۳۰	۱۹/۱۰۳۴۷۶۴/۷	-۴۴/۴۹۷۲
۴۵	۴۵/۵۷۲۰۷۴۷/۹	-۳۱/۶۲۴
۶۰	۲۹۰/۶۵۴۵۹/۷	-۲۳/۶۴۸

۷۵	۱۰۰	۱۱۴۴/۹۸۲۲۵۶/۷	-۲۹/۸۴۱۵
۹۰	۱۰۵	۱۸۳۶/۷۳۰۳۸/۸	-۲۸۰/۱۸
۱۰۵	۱۱۰	۳۲۷۴/۴۸۶۸۸/۴	-۳۷/۱۶۶
۷۵	۱۱۵	۳۵/۲۹۳۳۴۸/۸	-۳۳/۳۷۴
۲۲/۵	۱۲۰	۱۸/۲۲۹۹۶۰/۴۳	-۳۵۶/۶۶۳
۳۷/۵	۱۲۵	۴۱/۶۴۲۸۰۵۸/۲	-۱۳/۸۱۲۴
۵۲/۵	۱۳۰	۸۰/۸۷۲۲۰۷۴۹	-۱۵۸/۵۹۱۱
۶۷/۵		۳۵۳/۵۶۶۵۱۲	۰/۰۳۹۸
۸۲/۵		۲۵۰۹/۹۴۰۱۶	۰/۷۰۵۵
۹۷/۵		۵۶۱۳/۵۶۶۴	۰/۹۱۵۹
۱۵		۲۴/۰۰۳۷۶۱۴	۱۱۳/۷۴
۳۰		۳۴/۹۵۱۹۶۸	۵۹۲/۷۸
۴۵		۸۴/۷۸۸۴۷۸	۱۹۶/۱۱
۶۰		۹۳/۳۸۲۳۴۴	۱۱/۲۴۴
۷۵		۵۰۸/۷۰۸۲۶	۰/۰۴۸۵
۹۰		۲۱۶۰/۱۹۴۴	۱/۶۲۸۱
۲۲/۵		۳۹/۱۰۳۹۲۷۲	۶۴/۴۴۹
۳۷/۵		۱۰۷/۸۴۵۸۱۲	۱۴/۱۱۹
۵۲/۵		۹۰/۷۲۰۲۵۲	.
۶۷/۵		۱۰۸/۸۱۷۹۵۶	۱۸/۸۵۲
۸۲/۵		۹۲۹/۵۸۴۴۴	۱/۷۴۸۹
۳۰		۱۳۲/۴۱۰۸۱۷	۴۲/۴۰۱
۴۵		۷۱/۵۴۲۵۹۲۱	۵۹/۸۳۷
۶۰		۱۱۸/۳۴۵۸۱۵	۴/۷۹۵

ادامه جدول (ب-۶) داده‌های مقاومت ویژه و IP برای پروفیل Tash

۷۵	۳۴۷/۹۰۶۰۳۴	۲۳/۹۴۴
۳۷/۵	۹۴/۰۸۳۱۹۲	۱۲۹/۱۷
۵۲/۵	۱۰۰/۹۰۴۰۲۵۶	۷۴/۱۳۹
۶۷/۵	۳۶۰/۶۴۹۵۹۸۴	۶/۵۲۱۷
۴۵	۱۰۱/۶۱۴۵۹۵	۱۰۷/۲۳
۶۰	۳۴۵/۷۴۹۷۹۶	۲۷/۲۱۱

در این پیوست به طور خلاصه به بررسی معکوس‌سازی به روش کمترین مربعات خطی و غیر خطی پرداخته می‌شود.

ج-۱- معکوس‌سازی بر اساس روش کمترین مربعات خطی

روش انتخابی که امروزه بطور عموم برای معکوس‌سازی داده‌های صحرایی الکترومغناطیس امواج تخت استفاده می‌شود، روش مدل‌سازی هموار کمترین مربعات می‌باشد.

یک معادله خطی ساده را در نظر می‌گیریم [۵۱].

$$d = Gm \quad (\text{ج-۱})$$

که در آن d بردار داده، G ماتریس مدل، m بردار پارامتر می‌باشد.

برای داده‌های بدون نویز داریم:

$$m = G^{-1}d \quad (\text{ج-۲})$$

اگر فرض کنیم که خطاها (نوفه‌ها) جمع پذیر باشند، رابطه زیر برقرار می‌باشد.

$$d = Gm + e \quad (\text{ج-۳})$$

مجموع خطاهای تجربی e در نظر گرفته می‌شود. بنابراین بهترین راه برای بدست آوردن جواب تکین، کمینه نمودن خطا با استفاده از روش کمترین مربعات می‌باشد.

که Q شبه تابع عدم انطباق است. بدین ترتیب شبه تابع عدم انطباق را بصورت مجذور خطای تجمعی⁷⁸ تعریف می‌نماییم.

معادله بالا را می‌توان به شکل ماتریسی نوشت، بدین ترتیب:

$$Q = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (\text{ج-۴})$$

هدف آن است که Q را به کمترین مقدار برسانیم. بنابراین با مشتق گرفتن از Q نسبت به هر یک از پارامترهای مدل m_j به این مهم می‌توان دست یافت. در نتیجه یک سری معادلات بدست می‌آید:

$$GG^T m = G^T d \quad (\text{ج-۵})$$

بنابراین حل کمترین مربعات بدین صورت دنبال می‌شود.

$$\hat{m} = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (\text{ج-۶})$$

حاصل $(G^T G)^{-1} G^T$ ، اغلب معکوس تعمیم داده شده کمترین مربعات نامیده می‌شود.

ج-۲- معکوس‌سازی بر اساس روش کمترین مربعات غیرخطی

رابطه عمومی بین داده‌های مشاهده شده و پارامترهای مدل را در نظر می‌گیریم.

$$d = f(m) \quad (\text{ج-۷})$$

برای حل مسائل غیرخطی نیاز به یک مدل آغازین m^0 می‌باشد. این مدل آغازین از اطلاعات در دسترس مانند زمین‌شناسی و غیره بدست می‌آید. اگر فرض کنیم که رابطه بین داده‌های مشاهده شده و پارامترهای مدل بطور ضعیفی غیرخطی باشد می‌توان با استفاده از روش بسط تیلور رابطه را در مجاورت مدل اولیه خطی نمود.

$$d - f(m) = f(m^0) + \frac{\partial f(m^0)}{\partial m} (m - m^0) + O(\|m - m^0\|) \quad (\text{ج-۸})$$

در رابطه بالا $\frac{\partial f(m^0)}{\partial m}$ ژاکوبین یا $f(m)$ در عبارت $O(\|m - m^0\|)$ می‌باشد. بدین ترتیب رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$m = m^0 + (J^T W J)^{-1} J^T W (d - f(m^0)) \quad (\text{ج-۹})$$

در رابطه فوق W ماتریس وزن‌دهی می‌باشد [۵۱].

نمونه‌ای از فرمت فایل ورودی و خروجی نرم افزار INV2DVLV برای پروفیل ۱-W آورده شده است.

فایل ورودی

1-W	75	33	25	8	13	8
104	15					
600						
-162.8548	-107.6566	-70.65618	-45.85403	-29.22866		
-18.08434	-10.61407	-5.606606	-2.250000	0.000000E+00		
2.250000	4.500000	6.750000	9.000000	11.50000		
14.00000	16.50000	19.00000	21.25000	23.50000		
25.75000	28.00000	30.25000	32.50000	34.75000		
37.00000	39.25000	41.50000	43.75000	46.00000		
48.75000	51.50000	54.25000	57.00000	59.25000		
61.50000	63.75000	66.00000	68.00000	70.00000		
72.00000	74.00000	76.50000	79.00000	81.50000		
84.00000	86.50000	89.00000	91.50000	94.00000		
96.50000	99.00000	101.5000	104.0000	105.5000		
107.0000	108.5000	110.0000	113.0000	116.0000		
119.0000	122.0000	124.0000	126.0000	128.0000		
130.0000	132.2500	135.6066	140.6141	148.0843		
159.2287	175.8540	200.6562	237.6566	292.8548		
430.1058	386.5870	347.0245	311.0586	278.3622		
248.6383	221.6165	197.0513	174.7193	154.4174		
135.9612	119.1828	103.9297	90.06332	77.45747		
65.99760	55.57955	46.10859	37.49863	29.67139		
22.55572	16.08693	10.20621	4.860098	0.000000E+00		
-5.832118	-14.58030	-27.70256	-47.38596	-76.91106		
-121.1987	-187.6302	-287.2774				
11.00000	11.00000	11.00000	11.00000	11.00000		

11.00000	11.00000	11.00000	11.00000	11.00000
10.87500	10.75000	10.62500	10.50000	10.37500
10.25000	10.12500	10.00000	9.875000	9.750000
9.625000	9.500000	9.375000	9.250000	9.125000
9.000000	8.875000	8.750000	8.625000	8.500000
8.375000	8.250000	8.125000	8.000000	7.875000
7.750000	7.625000	7.500000	7.375000	7.250000
7.125000	7.000000	6.875000	6.750000	6.625000
6.500000	6.375000	6.250000	6.125000	6.000000
5.875000	5.750000	5.625000	5.500000	5.375000
5.250000	5.125000	5.000000	4.875000	4.750000
4.625000	4.500000	4.500000	4.500000	4.500000
4.500000	4.500000	4.500000	4.500000	4.500000
4.500000	4.500000	4.500000	4.500000	4.500000

1 15

19600

10	11	9
14	15	13
18	19	17
22	23	21
26	27	25
30	31	29
34	35	33
38	39	37
42	43	41
46	47	45
50	51	49
54	55	53
58	59	57
62	63	61
66	67	65
0.0	-9.0000	10.5000
9.0	5.0000	11.7000
19.0	2.0000	17.2000

28.0	0.0000	18.2000
37.0	8.0000	14.1000
46.0	25.0000	15.8000
57.0	45.0000	18.0000
66.0	60.0000	15.5000
74.0	68.0000	13.0000
84.0	69.0000	16.7000
94.0	62.0000	13.9000
104.0	54.0000	14.3000
110.0	47.0000	-22.3000
122.0	50.0000	-28.1000
130.0	69.0000	29.0000

1	16	23	25	600.0000
16	20	23	25	600.0000
20	24	23	25	600.0000
24	28	23	25	600.0000
28	32	23	25	600.0000
32	36	23	25	600.0000
36	40	23	25	600.0000
40	44	23	25	600.0000
44	48	23	25	600.0000
48	52	23	25	600.0000
52	56	23	25	600.0000
56	60	23	25	600.0000
60	75	23	25	600.0000
1	16	21	23	600.0000
16	20	21	23	600.0000
20	24	21	23	600.0000
24	28	21	23	600.0000
28	32	21	23	600.0000
32	36	21	23	600.0000
36	40	21	23	600.0000
40	44	21	23	600.0000
44	48	21	23	600.0000

48	52	21	23	600.0000
52	56	21	23	600.0000
56	60	21	23	600.0000
60	75	21	23	600.0000
1	16	19	21	600.0000
16	20	19	21	600.0000
20	24	19	21	600.0000
24	28	19	21	600.0000
28	32	19	21	600.0000
32	36	19	21	600.0000
36	40	19	21	600.0000
40	44	19	21	600.0000
44	48	19	21	600.0000
48	52	19	21	600.0000
52	56	19	21	600.0000
56	60	19	21	600.0000
60	75	19	21	600.0000
1	16	17	19	600.0000
16	20	17	19	600.0000
20	24	17	19	600.0000
24	28	17	19	600.0000
28	32	17	19	600.0000
32	36	17	19	600.0000
36	40	17	19	600.0000
40	44	17	19	600.0000
44	48	17	19	600.0000
48	52	17	19	600.0000
52	56	17	19	600.0000
56	60	17	19	600.0000
60	75	17	19	600.0000
1	16	14	17	600.0000
16	20	14	17	600.0000
20	24	14	17	600.0000
24	28	14	17	600.0000

28	32	14	17	600.0000
32	36	14	17	600.0000
36	40	14	17	600.0000
40	44	14	17	600.0000
44	48	14	17	600.0000
48	52	14	17	600.0000
52	56	14	17	600.0000
56	60	14	17	600.0000
60	75	14	17	600.0000
1	16	11	14	600.0000
16	20	11	14	600.0000
20	24	11	14	600.0000
24	28	11	14	600.0000
28	32	11	14	600.0000
32	36	11	14	600.0000
36	40	11	14	600.0000
40	44	11	14	600.0000
44	48	11	14	600.0000
48	52	11	14	600.0000
52	56	11	14	600.0000
56	60	11	14	600.0000
60	75	11	14	600.0000
1	16	8	11	600.0000
16	20	8	11	600.0000
20	24	8	11	600.0000
24	28	8	11	600.0000
28	32	8	11	600.0000
32	36	8	11	600.0000
36	40	8	11	600.0000
40	44	8	11	600.0000
44	48	8	11	600.0000
48	52	8	11	600.0000
52	56	8	11	600.0000
56	60	8	11	600.0000

60	75	8	11	600.0000
1	16	1	8	600.0000
16	20	1	8	600.0000
20	24	1	8	600.0000
24	28	1	8	600.0000
28	32	1	8	600.0000
32	36	1	8	600.0000
36	40	1	8	600.0000
40	44	1	8	600.0000
44	48	1	8	600.0000
48	52	1	8	600.0000
52	56	1	8	600.0000
56	60	1	8	600.0000
60	75	1	8	600.0000

8

13 0.8000000
13 0.8400000
13 0.8819999
13 0.9260998
13 0.9724048
13 1.021025
13 1.072076
13 1.125680

0

فایل خروجی نرم افزار

<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	0	2.9999999E-02	1000.000	3.744375
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	1	2.9999999E-02	3.744375	3.737447
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	2	1.5000000E-02	3.737447	3.723913
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	3	7.4999998E-03	3.723913	3.697474
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	4	3.7499999E-03	3.697474	3.648048

<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	5	1.8750000E-03	3.648048	3.559889
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	6	9.3749998E-04	3.559889	3.408668
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	7	4.6874999E-04	3.408668	3.265741
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	8	2.3437499E-04	3.265741	3.108650
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	9	1.1718750E-04	3.108650	3.120001
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	9	3.5156248E-04	3.120001	3.106747
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	10	1.7578124E-04	3.106747	3.052490
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	11	8.7890621E-05	3.052490	2.597276
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	12	4.3945311E-05	2.597276	3.222000
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	12	1.3183593E-04	3.222000	2.588471
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	13	6.5917964E-05	2.588471	3.031326
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	13	1.9775389E-04	3.031326	2.592934
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	14	9.8876946E-05	2.592934	2.909378
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	14	2.9663084E-04	2.909378	2.590036
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	15	1.4831542E-04	2.590036	2.851648
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	15	4.4494626E-04	2.851648	2.589453
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	16	2.2247313E-04	2.589453	2.782929
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	16	6.6741940E-04	2.782929	2.596803
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	17	3.3370970E-04	2.596803	2.738623
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	17	1.0011292E-03	2.738623	2.599108
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	18	5.0056458E-04	2.599108	2.696843
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	18	1.5016937E-03	2.696843	2.603458
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	19	7.5084687E-04	2.603458	2.870714
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	19	2.2525406E-03	2.870714	2.600777
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	20	1.1262703E-03	2.600777	2.593029
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	21	5.6313514E-04	2.593029	2.484566
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	22	2.8156757E-04	2.484566	2.551967
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	22	8.4470271E-04	2.551967	2.482935
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	23	4.2235135E-04	2.482935	2.523798
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	23	1.2670541E-03	2.523798	2.482966
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	24	6.3352706E-04	2.482966	2.502522
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	24	1.9005812E-03	2.502522	2.483016
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	25	9.5029059E-04	2.483016	2.483022
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	25	2.8508718E-03	2.483022	2.484609

<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	25	8.5526155E-03	2.484609	2.482763
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	26	4.2763078E-03	2.482763	2.432376
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	27	2.1381539E-03	2.432376	2.420668
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	28	1.0690769E-03	2.420668	2.410401
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	29	5.3453847E-04	2.410401	2.419841
<i>nit,alamp,rmsa,rms</i>	29	1.6036155E-03	2.419841	2.411395
<i>n° iterations,final rms</i>	30	2.411395		

mesh

<i>n° of blocks,envir. r0</i>	104	600.0000		
1	16	23	25	74.52474
16	20	23	25	30.08486
20	24	23	25	103.4748
24	28	23	25	12.00852
28	32	23	25	129.1635
32	36	23	25	8.278552
36	40	23	25	399.9574
40	44	23	25	630.8329
44	48	23	25	716.5895
48	52	23	25	783.6769
52	56	23	25	833.2795
56	60	23	25	986.0602
60	75	23	25	1259.850
1	16	21	23	619.4991
16	20	21	23	224.3144
20	24	21	23	270.0507
24	28	21	23	440.2458
28	32	21	23	411.0881
32	36	21	23	509.7698
36	40	21	23	619.6967
40	44	21	23	692.6753
44	48	21	23	651.6113
48	52	21	23	583.3839
52	56	21	23	578.9174
56	60	21	23	866.1042

60	75	21	23	1339.182
1	16	19	21	887.0267
16	20	19	21	528.7275
20	24	19	21	463.0510
24	28	19	21	660.9922
28	32	19	21	662.7609
32	36	19	21	656.5021
36	40	19	21	644.1998
40	44	19	21	664.1649
44	48	19	21	586.8956
48	52	19	21	433.9753
52	56	19	21	420.5993
56	60	19	21	735.5309
60	75	19	21	1229.108
1	16	17	19	1028.802
16	20	17	19	698.5399
20	24	17	19	507.6138
24	28	17	19	563.5891
28	32	17	19	556.5209
32	36	17	19	515.2394
36	40	17	19	531.2738
40	44	17	19	601.0617
44	48	17	19	568.8580
48	52	17	19	477.0995
52	56	17	19	450.5471
56	60	17	19	618.8872
60	75	17	19	986.4119
1	16	14	17	1084.405
16	20	14	17	766.3828
20	24	14	17	528.3935
24	28	14	17	516.6983
28	32	14	17	509.9501
32	36	14	17	478.8447
36	40	14	17	505.3166

40	44	14	17	552.8399
44	48	14	17	571.8237
48	52	14	17	554.4397
52	56	14	17	510.8558
56	60	14	17	449.7567
60	75	14	17	507.2692
1	16	11	14	949.8182
16	20	11	14	725.5025
20	24	11	14	594.5593
24	28	11	14	621.3680
28	32	11	14	663.0435
32	36	11	14	664.6971
36	40	11	14	664.4221
40	44	11	14	678.1447
44	48	11	14	679.1013
48	52	11	14	719.6673
52	56	11	14	583.9722
56	60	11	14	256.7846
60	75	11	14	1.450386
1	16	8	11	704.0767
16	20	8	11	546.2727
20	24	8	11	526.2867
24	28	8	11	635.4272
28	32	8	11	703.0340
32	36	8	11	780.4875
36	40	8	11	757.8781
40	44	8	11	726.4467
44	48	8	11	760.2693
48	52	8	11	785.2415
52	56	8	11	692.3967
56	60	8	11	504.2816
60	75	8	11	294.0042
1	16	1	8	444.5675
16	20	1	8	574.5596

20	24	1	8 653.6156
24	28	1	8 750.0643
28	32	1	8 762.8248
32	36	1	8 743.3882
36	40	1	8 629.3292
40	44	1	8 614.5649
44	48	1	8 642.8243
48	52	1	8 684.0699
52	56	1	8 609.5336
56	60	1	8 589.9489
60	75	1	8 581.2134

FINAL MODEL

-74.43	-15.73	74.52
18.75	-15.11	30.08
28.00	-14.62	103.47
37.00	-14.12	12.01
46.50	-13.63	129.16
56.50	-13.14	8.28
65.75	-12.64	399.96
74.50	-12.15	630.83
84.00	-11.65	716.59
94.00	-11.16	783.68
103.00	-10.67	833.28
111.50	-10.17	986.06
204.43	-9.80	1259.85
-74.43	-27.01	619.50
18.75	-26.42	224.31
28.00	-25.93	270.05
37.00	-25.45	440.25
46.50	-24.97	411.09
56.50	-24.49	509.77
65.75	-24.01	619.70
74.50	-23.53	692.68

84.00	-23.05	651.61
94.00	-22.57	583.38
103.00	-22.09	578.92
111.50	-21.61	866.10
204.43	-21.25	1339.18
-74.43	-40.67	887.03
18.75	-40.09	528.73
28.00	-39.63	463.05
37.00	-39.16	660.99
46.50	-38.70	662.76
56.50	-38.23	656.50
65.75	-37.77	644.20
74.50	-37.30	664.16
84.00	-36.84	586.90
94.00	-36.37	433.98
103.00	-35.91	420.60
111.50	-35.44	735.53
204.43	-35.10	1229.11
-74.43	-57.20	1028.80
18.75	-56.64	698.54
28.00	-56.20	507.61
37.00	-55.75	563.59
46.50	-55.30	556.52
56.50	-54.86	515.24
65.75	-54.41	531.27
74.50	-53.97	601.06
84.00	-53.52	568.86
94.00	-53.07	477.10
103.00	-52.63	450.55
111.50	-52.18	618.89
204.43	-51.85	986.41
-74.43	-83.49	1084.40
18.75	-82.98	766.38
28.00	-82.57	528.39

37.00	-82.15	516.70
46.50	-81.73	509.95
56.50	-81.32	478.84
65.75	-80.90	505.32
74.50	-80.49	552.84
84.00	-80.07	571.82
94.00	-79.66	554.44
103.00	-79.24	510.86
111.50	-78.83	449.76
204.43	-78.52	507.27
-74.43	-123.72	949.82
18.75	-123.26	725.50
28.00	-122.89	594.56
37.00	-122.52	621.37
46.50	-122.16	663.04
56.50	-121.79	664.70
65.75	-121.42	664.42
74.50	-121.05	678.14
84.00	-120.68	679.10
94.00	-120.31	719.67
103.00	-119.94	583.97
111.50	-119.58	256.78
204.43	-119.31	1.45
-74.43	-177.25	704.08
18.75	-176.88	546.27
28.00	-176.57	526.29
37.00	-176.26	635.43
46.50	-175.96	703.03
56.50	-175.65	780.49
65.75	-175.34	757.88
74.50	-175.04	726.45
84.00	-174.73	760.27
94.00	-174.42	785.24
103.00	-174.12	692.40

111.50 -173.81 504.28
204.43 -173.59 294.00
-74.43 -324.38 444.57
18.75 -324.24 574.56
28.00 -324.10 653.62
37.00 -323.97 750.06
46.50 -323.83 762.82
56.50 -323.70 743.39
65.75 -323.56 629.33
74.50 -323.43 614.56
84.00 -323.29 642.82
94.00 -323.16 684.07
103.00 -323.02 609.53
111.50 -322.89 589.95
204.43 -322.82 581.21

weights

8

13 0.8000000
13 0.8400000
13 0.8819999
13 0.9260998
13 0.9724048
13 1.021025
13 1.072076
13 1.125680

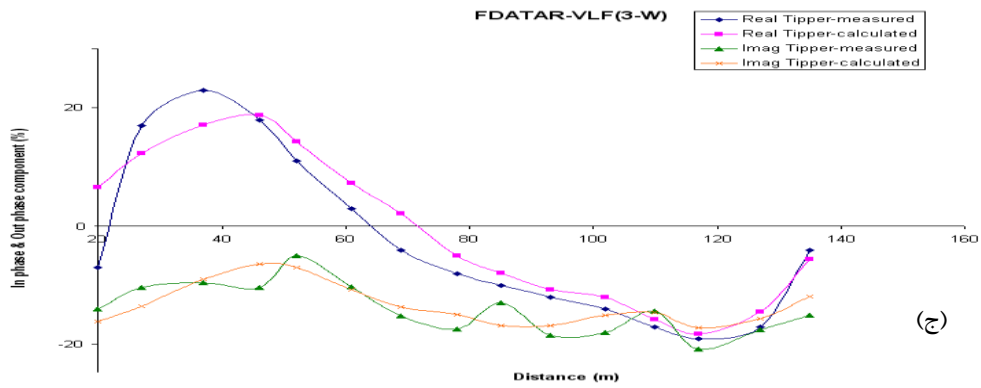
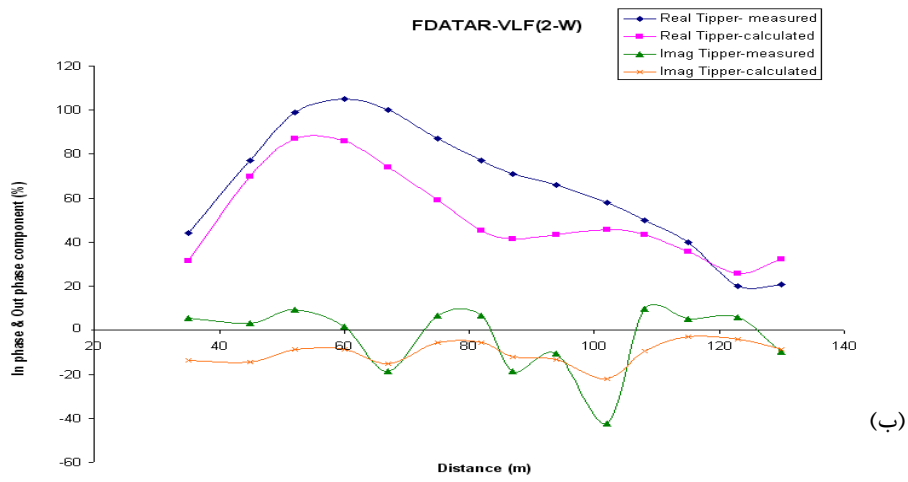
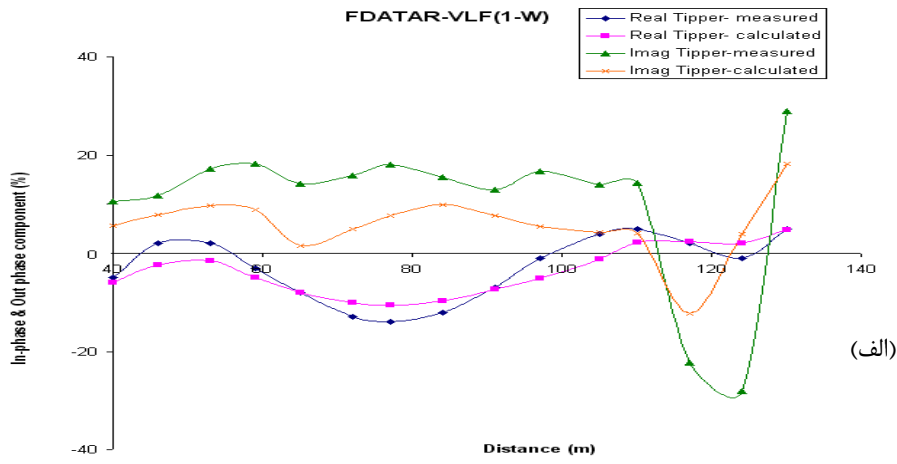
Measured and calculated data (Tipper)

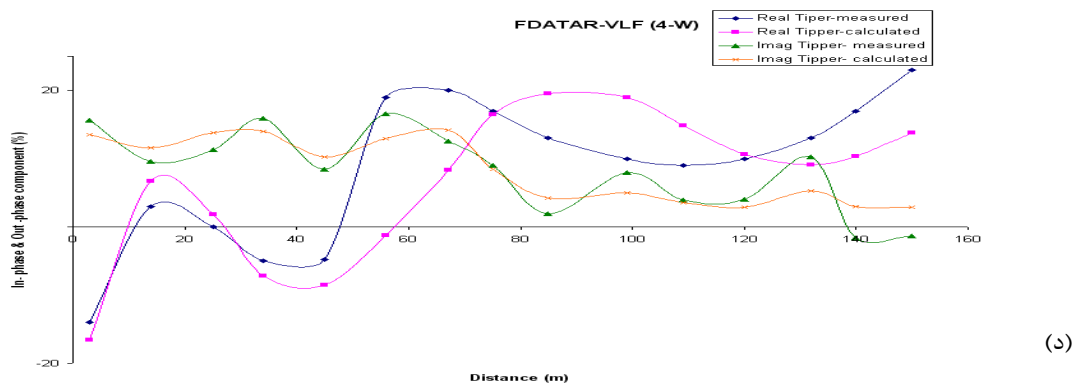
Xs,Zs,TRob,Tlob,TRc,Tlc,dR,dIm

frequency 19600.00

40.00	11.00	-5.0000	10.5000	-5.9278	5.5355	54.75	47.28
46.00	10.50	2.0000	11.7000	-2.3024	3.8981	486.05	66.68
53.00	10.00	2.0000	17.2000	-1.4713	4.7186	823.57	72.57
59.00	9.50	-3.0000	18.2000	-5.8969	2.8946	65	84.10
65.00	9.00	-8.0000	14.1000	-7.0848	1.5114	113.56	89.28
72.00	8.50	-13.0000	15.8000	-9.0288	-0.8860	75.88	105.61
77.00	8.00	-14.0000	18.0000	-10.5862	-0.5860	27.59	103.26
84.00	7.50	-12.0000	15.5000	-9.6988	9.9569	47.83	35.76
91.00	7.00	-7.0000	13.0000	-7.3581	7.6429	12.29	41.21
97.00	6.50	-1.0000	16.7000	-5.1670	5.4017	8.45	67.65
105.00	6.00	4.0000	13.9000	-1.5069	4.2412	13.70	69.49
110.00	5.50	5.0000	14.3000	2.2077	4.0754	10.73	71.50
117.00	5.00	2.0000	-22.3000	2.3328	4.2126	7.80	118.89
124.00	4.50	-1.0000	-28.1000	1.9991	3.8323	30.00	113.64
130.00	4.50	5.0000	29.0000	4.7011	3.2282	58.40	88.87

نمودار مقایسه پاسخ مدل محاسبه شده (نمودار قرمز، مؤلفه حقیقی و نمودار نارنجی، مؤلفه مجازی پاسخ مدل) با نرم افزار INV2DVLF با داده‌های برداشتی VLF (نمودار آبی، مؤلفه حقیقی و نمودار سبز، مؤلفه مجازی داده‌های اندازه‌گیری شده) برای پروفیل‌های ۱-W ، ۲-W ، ۳-W و ۴-W آورده شده است.





فهرست منابع

[۱] تلفورد، دبلیو، جلدارت، ام، شریف، ال پی، کینز، آر.ای، (۱۳۷۵). ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه زمردیان و حاجب حسینی، انتشارات دانشگاه تهران،

[۲] یانگل، ای.ایچ، (۱۳۸۳). روش‌های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوزه‌های رسوبی عمیق، ترجمه فرزاد مهدوی، ناشر فرزاد مهدوی با همکاری دانشگاه تهران.

[۳] قاسم‌العسگری، م، (۱۳۸۳). اصول ژئوفیزیک اکتشافی (روش‌های سنجش و چاه پیمایی ژئوفیزیک)، ناشر تهران آییژ.

[۴] حسن‌زاده، ح، (۱۳۸۲). مدل‌سازی توام داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[5] Loke, M.H., (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys

[6]Pedersen, L.B., (1998). Tensor VLF measurements: Our first experiences. *Exploration Geophysics*, **29**, 52-57.

[7]Fraser, D.C., (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, **34**, 958-967.

[8]Karous, M. and Hjelt, S.E., (1983). Linear filtering of VLF dip angle measurements. *Geophysical prospecting*, **31**, 782-794

[۹]دولتی اردهجانی، ف.، شفایی تنکابنی، ض.، میر حبیبی، ع.، و بدیعی، خ.، (۱۳۸۴). بیوتکنولوژی، ژئوشیمی زیست‌محیطی و مدیریت پساب‌ها. ج اول - پساب‌های معدنی. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[10]Atkins, A.S., and Pooly, F.D., (1982). The effects of Bio-Mechanisms on acidic Mine drainage in coal mining. *International Journal of Mine Water*, **1**, 31-44.

[11]Adam, K., Kourtis, A., Gazea, B. and Kontopoulos, A. (1997). Evaluation of static tests used to Predict the potential for acid drainage generation at sulphide mine sites. *Transactions of the Institution of mining and Metallurgy, Section A, Mining Industry*, **106**, 1-50.

[12] Stokstand, P. (1998). Structuring a reclamation program for abandoned non-coal mine. *Ecology Law Quarterly*, **25**, 121-165.

[13]Williams, R.E., (1975). Waste production and disposal in mining, milling, and Metallurgical industries, Miller-Freeman publishing Company, San Francisco, California.

[14]Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., and Baafi, E.Y., (2004). Use of PHOENICS for solving one dimensional mine pollution problems. *The PHOENICS Journal: Computational Fluid Dynamics and its applications*, **16**, CHAM, UK.

[15]Singh, R.N., (1998). *Mine Water*, University Press, Wollongong, Australia.

[16]Olsson, o., (1980). VLF anomalies from a conducting half-plane below an overburden. *Geophysical prospecting*, **28**, 415-434.

[17] Saydam, A.S., (1981). Very low-frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements. *Geophysics*, **46**, 1594-1605.

[18] Sharma, S.P., and Baranwal, V.C., (2004). Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data. *Journal of Applied Geophysics*, **57**, 155-166.

[19] Monteiro Santos, A., Eugénio P., Gomes, M., and Pina, A., (2004). Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. *Journal of Applied Geophysics*, **45**, 421-430.

[20] Ramesh Babu, V., Ram, S., and Sundararajan, N., (2007). Modeling and inversion of magnetic and VLF-EM data with an application to basement fractures: A case study from Raigarh, India. *Geophysics*, **72**, 133-140.

[21] Oldenburg, D.W., (1996). DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments, *Journal of Applied Geophysics*, **34**, 187-198

[22] Benson, K.A., Kelly L. Payne, and Stubben, A.M., (1997). Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods-A case study. *Geophysics*, **62**, 80-86.

[23] Kamkar Rouhani, A., (2001). Developments in Resistivity Methods for Detection of Subsurface Pollution, Proceedings of the 31st Congress of International Association of Hydrogeologists (IAH), 734-738.

[۲۴] حفیظی، م.، امینی، ن.، (۱۳۸۱). تشخیص آلودگی نفتی خاک با روش VLF در محل پالایشگاه شیراز. دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. جلد اول.

[25] Fahringer P., (2002). Shallow EM investigations of AMD at an abandoned coal mine in northern west Virginia, *The leading Edge*, 478-481.

[26] Hammack, R.W., Sams, J.I., Veloski, G.A., and Mabie J.S., (2003). Geophysical Investigation of the Sulphur Bank Mercury Mine Superfund Site, Lake County, California, Mine Water and the Environment, **22**, 69–79.

[27] Monteiro Santos, A., Mateus, A., Figueiras, J., and Goncalves. A., (2005). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method. Journal of Applied Geophysics, **01586**, 11-22.

[28] مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی. ف.، و جدیری شکری. ب.، (۱۳۸۵). شناسایی آلودگی حاصل از پسماندهای اسیدی محل انباشت باطله‌های زغال‌شوئی البرز شرقی. اولین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست. ۳۴۶۲-۳۴۵۵.

[29] مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی. ف.، و زارع. م.، (۱۳۸۶). استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی ژئوالکتریک و VLF جهت شناسایی آلودگی ناشی از باطله‌های ناشی از زغالسنگ. پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. ۱۵۱۷-۱۵۲۵.

[30] مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی. ف.، و زارع. م.، (۱۳۸۶). مطالعات زیست‌محیطی دپو باطله‌های زغال‌شویی البرز شرقی با استفاده از برداشت و مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئوالکتریک. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. ۱۲۶-۱۲۳.

[31] مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی. ف.، و فلاح پیشه. س.، (۱۳۸۶). مطالعه محدوده آلودگی ناشی از معدنکاری سرب و روی تاش با روش‌های ژئوفیزیکی VLF، IP و مقاومت ویژه. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. ۲۸۸-۲۸۳.

[32] Moradzadeh, A., Doulati Ardejani, F., and Fallah Pisheh, S., (2008). An Investigation on the Environmental effects of sulphide mine using geophysical studies. 10th IMWA congress. 379-382.

[33] Fernando A. Monteiro Santos Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, May (2006). Instructions for Running PrepVLF and Inv2DVLF2-D Inversion of VLF-EM single frequency programs., Version-1.0.

[34]Lock, M.H., (2001). Res2dinv ver.2.1, Geotomo software.

[35]Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E., (1998). Applied geophysics, Second Edition, Cambridge University Press.

[36]Reynolds, J.M., (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley and Sons Ltd.

[37].Milson.J., (2003). Field geophysics. Cambridge University Press.

[38]McNeill, J. D., Labson, V.F., (1975). Geological mapping using VLF Radio Field, in: Electromagnetic methods in Applied Geophysics, Edited by Nabighian M.N., (1991), society of exploration geophysics.

[39]Peter, J. Hutchinson and Laura S. Barta, (2002). VLF surveying to delineate longwall mine-induced fractures. The Leading EDGE.

www.Nukephoto.com[40]

[41]ABEM Co., (2000). Instruction manual for WADI VLF instrument.

[42]Gharibi,m. and Pedersen, L.B., (1998). Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases.Geophysics, **64**, 1393-1402.

[۴۳]عرب امیری، ع.، (۱۳۸۵). گزارش قرارداد پژوهشی برداشت، مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی شرکت صنعتی تاش و مجن شاهرود.

[۴۴]فردوست، ف.، (۱۳۸۶). گزارش زمین شناسی نقشه ۱:۱۰۰۰ معدن تاش و مجن، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۴۵] مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی. ف.، و کثیری. ا.، (۱۳۸۶). مدل سازی وارون و تفسیر داده های مقاومت ویژه

و قطبش القایی کانسار سرب و روی تاش، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.

[۴۶] سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۰). نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰:۰۰۰ اگراگان.

[47] ABEM, (1999). Instruction manual for Terameter SAS 1000. ABEM Instrument AB, 91.

[48] ABEM Co., (2002). RAMAG instruction manual, VLF survey planning and interpretation software.

[49] deGroot-Hedlin, C., and Constable, S., (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data: *Geophysics*, **55**, 1613-1624.

[50] Marquardt, D., (1970). Generalized inverse, ridge regression, biased linear estimation and nonlinear estimation: *Technometrics*, **12**, 591-612.

[51] Meju, M.A., (1996). Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations, *Geophysics*, **61**, 56–65.

[52] Yih Jeng, Ming-Juin Lin, Chih-Sung Chen and Yu-Huai Wang, (2007). Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method, *Geophysics*, **5**, 223-235.