

بنام خداوند

یکتا و عزیزان

تقدیر و تشکر

از اساتید محترم جناب دکتر علی مرادزاده و جناب دکتر فرامرز دولتی سپاسگذاری و قدر دانی می نمایم که در انجام و به پایان رساندن این پژوهش از یاری و مساعدت ایشان بهره مند شدم. از همیاری مشاور دلسوز جناب مهندس عرب امیری در آغاز و انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می نمایم. از جناب دکتر ایرج پیروز استاد محترم بنده در طی تحصیل و جناب دکتر کامکار و همچنین سرکار خانم دکتر عابدی، ممنون و سپاسگذارم. در پایان از مهندس عرب یار محمدی، مهندس محمد طلوعی، مهندس رضا امیری و مهندس حسین موسوی و سرکار خانم سمیه طالب زاده و سرکار خانم هدی حسینی و مهندس حمید سرخیل و آقایان شاه حسینی و ترابی تشکر می نمایم.

فصل اول

مقدمه و کلیات

فصل دوم

مبانی روش های مقاومت ویژه و

قطبش القایی IP

فصل سوم

مبانی مدل سازی عددی

فصل چهارم

مدل سازی معکوس داده های مقاومت

ویژه و IP و تفسیر نتایج حاصل

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

تقدیر و تشکر

چکیده

فصل اول: مقدمه و کلیات

۵.....	۱-۱) مقدمه.....
۶.....	۲-۱) کاربرد روش های الکتریکی در اکتشافات کانسارهای معدنی.....
۷.....	۳-۱) اصول روشهای الکتریکی.....
۸.....	۱-۳-۱) مروری بر مطالعات دیگران در روش مقاومت ویژه.....
۹.....	۴-۱) روش قطبش القایی IP.....
۹.....	۱-۴-۱) مروری بر مطالعات دیگران در روش قطبش القایی (IP).....
۱۰.....	۵-۱) مروری بر مطالعات دیگران در مدلسازی عددی داده های ژئوفیزیک.....
۱۳.....	۶-۱) اهداف پایان نامه.....
۱۳.....	۷-۱) ساختار پایان نامه.....

فصل دوم: مبانی روش های مقاومت ویژه و قطبش القایی IP

۱۵.....	۱-۲) مقدمه.....
۱۵.....	۲-۲) خواص الکتریکی سنگها.....
۱۶.....	۱-۲-۲) مقاومت ویژه الکتریکی.....
۱۷.....	۱-۱-۲-۲) مقاومت ویژه سنگها.....
۱۸.....	۲-۲-۲) فعالیتهای الکتروشیمیایی.....
۱۸.....	۳-۲-۲) ثابت دیالکتریک یا نارسانایی.....
۲۰.....	۳-۲) اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی.....
۲۱.....	۴-۲) روش پلاریزاسیون القایی IP.....
۲۲.....	۱-۴-۲) انواع روش های IP.....

۲۳	 اصول و منشاء IP	۲-۴-۲
۲۴	 پلاریزاسیون غشایی یا IP غیر فلزی	۲-۴-۲-۱
۲۴	 پلاریزاسیون الکترودی یا اور ولتاژ و یا پلاریزاسیون فلزی	۲-۴-۲-۲
۲۶	 اندازه گیری ولتاژ رو به زوال IP در قلمرو زمان	۲-۴-۳
۲۷	 $\Delta V_{IP} / \Delta V_s$ نسبت	۲-۴-۳-۱
۲۸	 اندازه گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP	۲-۴-۳-۲
۲۹	 عملیات صحرائی در روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش قطبش القایی IP	۲-۵-۲
۳۰	 آرایه های بکار رفته در روش های مقاومت ویژه و IP	۲-۵-۱
۳۱	 آرایش دوقطبی-دوقطبی	۲-۵-۱-۱
۳۲	 مزایای استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی	۲-۵-۱-۲
۳۳	 نحوه اندازه گیری با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری و رسم شبهه مقطع	۲-۵-۲
۳۴	 عمق اکتشاف	۲-۶

فصل سوم: مبانی مدل سازی عددی

۳۷	 مقدمه	۳-۱
۳۸	 مدل سازی پیشرو	۳-۲
۴۰	 روش عنصر محدود	۳-۲-۱
۴۱	 تفاضل محدود	۳-۲-۲
۴۱	 معکوس سازی	۳-۳
۴۶	 روش های عددی برای حل مسائل معکوس سازی	۳-۳-۱
۴۷	 معکوس سازی براساس روش کمترین مربعات خطی	۳-۳-۱-۱
۴۸	 معکوس سازی براساس روش کمترین مربعات غیر خطی	۳-۳-۱-۲
۵۰	 معکوس سازی پارامتری	۳-۳-۱-۳
۵۲	 مدل سازی وارون هموار	۳-۳-۱-۴
۵۵	 معکوس سازی داده های IP و مقاومت ویژه	۳-۴
۵۸	 روش های پر سرعت در معکوس سازی هموار دوبعدی	۳-۵
۶۱	 الگوریتم شبه نیوتن	۳-۵-۱
۶۳	 نرم افزار RESIXIP2DI	۳-۶

۶۶	نرم افزار RES2DINV.....
----	-------------------------

فصل چهارم: مدل سازی معکوس داده های مقاومت ویژه و IP و تفسیر نتایج آنها

۷۱	مقدمه.....
۷۱	موقعیت جغرافیایی و اقلیمی منطقه اکتشافی.....
۷۲	سوابق معدنکاری قدیمی در منطقه.....
۷۴	زمین شناسی کانسار.....
۷۴	کانی شناسی، بافت و ساخت کانسار.....
۷۸	ژنز کانسار.....
۷۹	عملیات صحرایی.....
۸۰	ارائه داده های برداشت شده تفسیر کیفی آنها.....
۸۰	تاش ۱.....
۸۲	تاش ۲.....
۸۳	تاش ۳.....
۸۴	مدل سازی معکوس دو بعدی و تفسیر کمی نتایج حاصل.....
۸۴	مدل سازی داده های پروفیل تاش ۱.....
۹۳	مدل سازی داده های پروفیل تاش ۲.....
۱۰۰	مدل سازی داده های پروفیل تاش ۳.....

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۱۰	نتیجه گیری.....
۱۱۲	پیشنهادهات.....
۱۱۴	مراجع.....

فهرست اشکال

فصل اول: مقدمه و کلیات

- شکل (۱-۲) شکل کلی آرایش الکترودهای پتانسیل و جریان در روش مقاومت ویژه..... ۲۱
- شکل (۲-۲) پلاریزاسیون الکترودی..... ۲۵
- شکل (۳-۲) موج مربعی بکاررفته در روش TDIP و منحنی ولتاژ اضافی آن..... ۲۶
- شکل (۴-۲) موج مربعی جریان تزریقی در روش TDIP..... ۲۷
- شکل (۵-۲) اندازه‌گیری منحنی رو به زوال ولتاژ..... ۲۸
- شکل (۶-۲) نمای کلی برخی از انواع آرایه های الکترودی..... ۳۲
- شکل (۷-۲) تهیه شبه مقطع در آرایش دوقطبی-دوقطبی..... ۳۴

فصل سوم: مبانی مدل سازی عددی

- شکل (۱-۳) شبکه بکاررفته در روش عنصر محدود..... ۴۰
- شکل (۲-۳) مدل شبکه بندی شده..... ۵۹

فصل چهارم: مدل سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه و IP و تفسیر نتایج آنها

- شکل (۱-۴) حدود قرار گیری کانسار مورد مطالعه..... ۷۳
- شکل (۲-۴) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۷۶
- شکل (۳-۴) راهنمای نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۷۷
- شکل (۴-۴) موقعیت پروفیل های برداشت شده بر روی نقشه توپوگرافی منطقه..... ۸۰
- شکل (۵-۴) شبه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاش ۱ تهیه شده توسط نرم افزار RESIXIP2DI، (الف) مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری..... ۸۱
- شکل (۶-۴) شبه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاش ۲ تهیه شده توسط نرم افزار RESIXIP2DI، (الف) مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری..... ۸۲

- شکل (۴-۷) شبه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاش ۳، (الف) مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری ۸۳
- شکل (۴-۸) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همرا با نمایش توپوگرافی ۸۵
- شکل (۴-۹) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های IP توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همرا با نمایش توپ ۸۶
- شکل (۴-۱۰) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مدل معکوس ۸۸
- شکل (۴-۱۱) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی معکوس ۸۹
- شکل (۴-۱۲) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل تاش ۱ ۹۱
- شکل (۴-۱۳) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همرا با نمایش توپوگرافی ۹۳
- شکل (۴-۱۴) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های IP توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همرا با نمایش توپوگرافی ۹۴
- شکل (۴-۱۵) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مقطع حاصل از مدل سازی معکوس ۹۶
- شکل (۴-۱۶) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی معکوس ۹۷

شکل (۴-۱۷) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل تاش ۲.....	۹۹
شکل (۴-۱۸) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همرا با نمایش توپوگرافی.....	۱۰۱
شکل (۴-۱۹) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های IP توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ).....	۱۰۲
شکل (۴-۲۰) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مقطع حاصل از مدل سازی معکوس.....	۱۰۴
شکل (۴-۲۱) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی معکوس.....	۱۰۵
شکل (۴-۲۲) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل تاش ۳.....	۱۰۷

فهرست جداول

فصل دوم: مبانی روش های مقاومت ویژه و قطبش القایی IP

جدول (۲-۱) مقاومت ویژه مواد برخی مواد زمین.....	۱۹
جدول (۲-۲) بارپذیری مواد گوناگون.....	۲۹

فصل چهارم: مدل سازی معکوس داده های مقاومت ویژه و IP و تفسیر نتایج آنها

جدول (۴-۱) مختصات جغرافیایی رئوس منطقه برداشت.....	۷۲
جدول (۴-۲) مشخصات پروفیل ها.....	۷۹
جدول (۴-۳) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۱.....	۹۱

جدول (۴-۴) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۲.....	۹۹
جدول (۵-۴) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۳.....	۱۰۷

فهرست علائم اختصاری

علامت اختصاری فصل دوم

R

L

A

ρ

ΔV

I

E

مفهوم اختصارات فصل دوم

مقاومت الکتریکی

طول سیم استوانه ای

سطح مقطع

مقاومت ویژه

اختلاف پتانسیل

شدت جریان

میدان الکتریکی

J	چگالی جریان
K	فاکتور هندسی
ρ_t	مقاومت ویژه واقعی
ρ_a	مقاومت ویژه ظاهری
m	بارپذیری
τ	ثابت زمانی قطبش پذیری القایی
α	وابسته فرکانسی
ω	فرکانس زاویه‌ای
j	عدد موهومی
علامت اختصاری فصل سوم	مفاهیم اختصاری فصل سوم
F	عملگر پیشرو
m	بردار مدل
d_j	بردار داده‌های مشاهده شد
A	عملگر معکوس
Q	شبه تابع عدم انطباق است
A_∞	عملگر مشتق جزئی
X_{ML}	نقطه شامل بیشینه احتمال با حداقل عدم انطباق
G	ماتریس مدل
m	بردار پارامتر
e	مجموع خطاهای تجربی
β	ضریب نامعین
J	ماتریس ژاکوبین
W	ماتریس وزن دهی
R_l	ماتریس دیفرانسیل گیری

∂_z	ماتریس صفر
∂_{y_i}	ماتریس ناهمواری
δ_i	خطای تخمین
χ^{*2}	معیار چشمداشتی منطقی
U	شبه تابع غیرخطی
r	موقعیت نقطه اندازه گیری
r_s	موقعیت الکتروود جریان
L_1	معیار کمترین مربعات مطلق
L_2	معیار کمترین مربعات هموار
σ_b	عنوان هدایت ویژه زمینه
$\sigma(x, y, z)$	هدایت ویژه
$\eta(x, y, z)$	بار پذیری
ϕ_η	پتانسیل
F_{dc}	عملگر پیشرو
ϕ_b	پتانسیل خودزا
C	ماتریس هموار سازی
g_i	بردار تفاضل که شامل اختلاف بین لگاریتم های مقاومت ویژه ظاهری و محاسبه شده
λ_i	فاکتور میرایی
p_i	بردار آشفستگی پارامترهای مدل برای تکرار i ام می باشد.
λ_m	فاکتور میرایی کمینه
ε_i	ε_{i+1} خطای RMS برای تکرار i ام
f_i	مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده

تعداد نقاط داده ها
ماتریس ژاکوبین

n
 B_0

بنام خداوند

پاک و عزیزان



پایان نامه کارشناسی ارشد

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

عنوان:

مدل سازی و تفسیر داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه به
منظور اکتشاف سرب و روی در منطقه تاش و مجن

اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده

دکتر فرامرز دولتی

استاد مشاور:

مهندس علیرضا عرب امیری

دانشجو:

افسانه کثیری

تابستان ۱۳۸۶

تقدیر و تشکر

از اساتید محترم جناب دکتر علی مرادزاده و جناب دکتر فرامرز دولتی سپاسگذاری و قدر دانی می نمایم که در انجام و به پایان رساندن این پژوهش از یاری و مساعدت ایشان بهره مند شدم. از همیاری مشاور دلسوز جناب مهندس عرب امیری در آغاز و انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می نمایم. از جناب دکتر ایرج پیروز استاد محترم بنده در طی تحصیل در این دانشگاه و جناب دکتر کامکار و جناب دکتر کاکائی همچنین سرکار خانم دکتر عابدی، ممنون و سپاسگذارم. در پایان از مهندس احسان عرب یار محمدی، مهندس محمد طلوعی، مهندس رضا امیری و مهندس حسین موسوی و سرکار خانم مهندس سمیه طالب زاده و مهندس حمید سرخیل و آقایان شاه حسینی و ترابی تشکر می نمایم.

چکیده

این تحقیق شامل مطالعه و تفسیر کمی و کیفی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری ۱۰ پروفیل جهت اکتشاف سرب و روی در منطقه تاش و مجن می باشد که با استفاده از آرایش دو قطبی-دو قطبی برداشت شده است. با توجه به این که از هر پروفیل اطلاعات محدودی بدست می آید و این اطلاعات باید به حجم وسیعی از منطقه تعمیم داده شوند، لذا هدف اصلی در این تحقیق، تعمیم صحیح داده های اکتسابی با انتخاب روش صحیح مدل سازی و آگاهی از شرایط توپوگرافی، زمین شناسی و سوابق معدنکاری قدیمی و دیگر عوامل موثر جهت اکتشاف سرب و روی در مناطقی از تاش و مجن، که پتانسیل وجود این مواد معدنی در فعالیتهای اکتشافی گذشته مشبوت گشته، می باشد. از آنجا که مدل بدست آمده و تجزیه و تحلیل آن برای ادامه عملیات اکتشافی در آن منطقه و تعیین نقاط حفاری به کار می رود، لذا با کسب مدل بهینه در این پروژه می توان ریسک ادامه کارهای اکتشافی را تا حد زیادی کاهش داد و هدف نهایی، یعنی اکتشاف آنومالی سرب و روی را در صورت وجود، به بهترین نحو ممکن سازد. تهیه شبه مقاطع و مدل سازی داده ها با استفاده از دو نرم افزار RES2DINV و RESIXIP2DI صورت گرفته است. با نرم افزار RES2DINV مدل سازی معکوس هموار و در نرم افزار RESIXIP2DI، مدل سازی معکوس و به روش پارامتری انجام شده است. پس از انجام مدل سازی معکوس و تهیه شبه مقاطع داده های صحرایی مقاومت ویژه و IP به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از دو نوع مدل سازی معکوس پارامتری و هموار، پرداخته شده است. در نهایت با مقایسه نتایج مدل سازی، پس از انجام مدل سازی داده ها و مقایسه نتایج مدل سازی مشخص گردید که در سه محدوده مناطق کانی سازی با گسترش قابل توجه وجود دارد.

کلید واژه ها : مدل سازی معکوس، مدل سازی پیشرو، مدل سازی پارامتری و هموار، روش مقاومت ویژه، روش پلاریزاسیون القایی.

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱) مقدمه

به طور کلی ژئوفیزیک شامل مطالعه زمین توسط اندازه گیری خصوصیات فیزیکی زمین با استفاده از وسایل مناسب و بکار گیری تکنیک های بخصوص در سطح زمین می باشد. ژئوفیزیک اکتشافی شاخه ای از علم ژئوفیزیک کاربردی است که با استفاده از آن می توان پدیده های پیچیده طبیعی زمین، ساختمان های زمین شناسی و زمین ساخت منطقه را شناسایی نمود. روش های ژئوفیزیکی بر پایه ارزیابی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی زمین استوار است [۱]. پاسخ خاکهای تشکیل دهنده لایه های مختلف زیر سطحی و آب زیر زمینی به طیف های الکترومغناطیس، پرتوهای گامای تزریقی، امواج نورانی قابل رویت و امواج رادار در حد ریز موج ها و امواج رادیویی و امواج لرزه و صوتی، یا روش های میدان های پتانسیل، نظیر گرانی و مغناطیس، اساس ارزیابی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی این مواد را شامل می شود. در بین روش های ژئوفیزیکی سطحی، روش های مختلف ژئوفیزیک اکتشافی کاربرد وسیعی در اکتشافات آب، نفت و گاز، کانی های اقتصادی، کارهای مهندسی عمران و مطالعات زیست محیطی دارد. روش های ژئوفیزیکی همچنین برای توصیف مخازن هیدروکربوری، کنترل و نظارت در ازدیاد برداشت استفاده شده است [۲].

نیاز روزافزون بشر به مواد معدنی فلزی و غیر فلزی، مواد انرژی زا و آب سبب گردیده که روش های نوینی برای پی جویی آنها طراحی و بکار گرفته شوند. ساختار تمدن بشری بر پایه وجود فلزات پایه از قبیل آهن، مس، سرب، روی و ... بنا شده است و چرخ صنعت و تکنولوژی به شدت به این معادن فلزی وابسته است. همگی این فلزات در دل زمین پنهانند و صرفا با اطلاعات زمین شناسی سطحی نمی توان به وجود این منابع مدفون در زیر زمین و زیر دریاها پی برد. روش های ژئوفیزیکی از جمله روش هایی هستند که در اکتشافات این ذخایر کمک شایانی می نمایند. اغلب اکتشافات کانیهای اقتصادی با روش های ژئوفیزیکی مانند ژئوالکتریک، مغناطیس سنجی و گرانی سنجی صورت

می گیرد[۱]. با توجه به اینکه در این تحقیق برای اکتشاف کانسار های سولفیدی سرب و روی از روش مقاومت ویژه و قطبش القایی استفاده شده است در ادامه این روش ها بطور مختصر همراه با کاربرد هایشان معرفی می شوند. امید است که با استفاده از نتایج حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی منطقه تاش و مجن نقاط بهینه حفاری جهت اکتشاف کانسار های سرب و روی در منطقه مشخص گردد و با تلفیق داده های ژئوفیزیک و اطلاعات زمین شناسی شبکه مناسب اکتشافی طراحی گردد.

۲-۱) کاربرد روش های الکتریکی در اکتشافات کانسارهای معدنی

به طور کلی در میان روش های ژئوفیزیکی، روش های الکتریکی جزء مهمترین روش های بکار گرفته شده در اکتشاف ذخایر معدنی می باشند. اکتشافات الکتریکی بسیار متنوع تر از دیگر روش های ژئوفیزیکی می باشند. بعضی از روش های الکتریکی مانند پتانسیل خودزا^۱ (SP)، جریان تلوریک و مگنتوتلوریک از منابع انرژی الکتریکی طبیعی بهره می گیرند. روش SP عمق نفوذ چندانی ندارد و در اکتشاف کانسارهای معدنی کاربرد چندانی ندارد. از طرف دیگر، روش های الکتریکی دیگر مانند مقاومت ویژه و قطبش القایی^۲ (IP)، نیاز به جریان میدان الکتریکی مصنوعی دارند. روش های الکتریکی اغلب برای پی جویی کانی های فلزی و هادی بکار می روند. بیشتر این روش ها برای اکتشاف در اعماق کم مفید می باشند. به طور عمده شناسایی سولفیدهای فلزی بوسیله روش های الکتریکی انجام می گیرد. سولفید پراکنده معمولاً به کمک قطبش القایی (IP) مورد اکتشاف قرار می گیرند. و سولفیدهای توده ای بوسیله روشی که آن را القا الکترومغناطیسی^۳ EMI می خوانند، بصورت زمینی و هواپردی مورد اکتشاف قرار می گیرند. بطور معمول روش های EMI برای یافتن رسانا-هایی که در عمق کم مدفون گردیده اند طراحی شده اند [۱،۲].

¹ Spontaneous potential

² Induced polarization

³ Induction electromagnetic

با توجه به اینکه در این پژوهش، برای اکتشاف کانسارهای سولفیدی سرب و روی از روش مقاومت ویژه و قطبش القایی استفاده شده است، در ادامه این روش ها بطور مختصر همراه با کاربردهایشان معرفی می شوند.

۱-۳) اصول روشهای الکتریکی

به طور کلی اکتشافات ژئوفیزیکی براساس روش های الکتریکی از سه ویژگی بنیادی و مهم سنگها بهره می گیرند. مقاومت ویژه، فعالیت الکترو شیمیایی و ثابت دی الکتریک ویژگی هایی فیزیکی و شیمیایی هستند که بر اساس اندازه گیری آنها می توان ساختار های زیرسطحی را بررسی نمود. مقاومت ویژه سنگها بطور عمده توسط تخلخل، نفوذ پذیری، آب موجود در سنگها و میزان شوری و ترکیب املاح آبها کنترل می شود[۱].

هدف اصلی روش های الکتریکی اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین می باشد. در این روش ها برای مشخص شدن ویژگی ساختار زیرسطحی، باید مقاومت ویژه الکتریکی آن متفاوت از محیط اطرافش باشد. بنابراین استفاده از روش های الکتریکی به حالتهایی که یک اختلاف مقاومت ویژه^۱ وجود داشته باشد محدود می شود، نکته ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که در روش های الکتریکی فقط اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی و یا پلاریزاسیون القایی اندازه گیری می شود و ویژگی های زمین شناسی، آبهای زیر زمینی و سایر خصوصیات موجود به طور مستقیم اندازه گیری نمی شود. این بدان معنی است که برای تفسیر مناسب داده های الکتریکی به یک سری اطلاعات خارجی نیاز می باشد. در بعضی مواقع داده های کمی بسیار پراکنده بوده و برای محدود کردن تفسیرهای ممکن برای دادهای ژئوفیزیکی مناسب نمی باشد، در بعضی موارد هم اطلاعات کمی موجود به محدود کردن تفسیرها و انتخاب یک سری خصوصیات زمین شناسی با توجه به دادهای الکتریکی کمک می نمایند. از میان روشهای مختلف الکتریکی روش مقاومت ویژه از کاربرد گسترده ای برخوردار است. یکی از دلایل این امر آن است که دامنه تغییرات مقاومت ویژه سنگها و کانیها بسیار وسیع می باشد. چنانچه از واژه روش های مقاومت ویژه بر می آید. از نظر کاربردی دلالت بر شرایط

¹Resistivity contrast

جاری شدن جریان مستقیم در حالت پایدار (جریان DC) دارد، جریان مستقیم از طریق القاء نمیتواند به زمین اعمال شود، بلکه این کار بوسیله تماس فیزیکی الکترودهایی که گالوانیکی می باشند صورت گیرد. بنابراین باید از دو الکتروود متصل به زمین استفاده نمود. برای انجام این روش معمولاً جریان مستقیم DC که به طور متناوب جهتش عکس می شود 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 اندازه گیری می نمایند [۳،۲].

۱-۳-۱) مروری بر مطالعات دیگران در روش مقاومت ویژه

آزمایشات صحرایی کنراد شلومبرژه در سال ۱۹۱۲ منجر به ابداع روش مقاومت ویژه گردید و با انتشار کتاب حاصل تحقیقاتش در سال ۱۹۲۰، تاثیر فزاینده ای بر روی کاربردهای اقتصادی اولیه برای روش های مقاومت ویژه داشته است. در پی آن استفاده از این روش در سال ۱۹۲۳ منجر به کشف گاز در کشور رومانی گردید. گنبد های نمکی فرانسه نیز در سال ۱۹۲۶ کشف و اعلام گردید. در کشور امریکا بکارگیری روش مقاومت ویژه در سال ۱۹۲۵ آغاز شد [۴،۲].

کاربردهای صحرایی این روش، کم و بیش در فاصله بین دو جنگ جهانی توسعه زیادی پیدا کردند ولی روش های موثر تعبیر و تفسیر عمدتاً به دلیل ظهور کامپیوترهای دیجیتالی در دهه ۱۹۶۰ توسعه یافت [۲]. تا دهه ۱۹۸۰ در برداشت های صحرایی مقاومت ویژه فقط از شیوه سونداژزنی با بکارگیری آرایه های شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی، ونر و قطبی-دوقطبی و به نقشه درآوردن داده های بدست آمده استفاده می شد. داده های یک بعدی مقاومت ویژه بدست آمده از سونداژ در تعیین ساختارهایی که تغییرات مقاومت ویژه در آنها شامل تغییرات عمودی می شود، از قابلیت مناسبی برخوردار می باشد. اما در آشکارسازی ساختارهایی با تغییرات افقی چندان مناسب نمی باشد. در سال ۱۹۸۵ گریفیس^۱ و ترنبون^۲ در سال ۱۹۹۰ گریفیس و همکاران در روش مقاومت ویژه با بکارگیری سیستم های چند الکتروودی متحرک امکان انجام برداشت های دوبعدی را فراهم نمودند. در سال های بعد با ابداع

^۱ Griffiths

^۲ Trunbun

روشهای مختلف معکوس‌سازی تصویرسازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه امکان‌پذیر شد [۹، ۱۰].

۴-۱) روش قطبش القایی IP^۱

این روش برای اکتشاف کانی‌های فلزات جلادار سولفیدی پراکنده (افشان) و کانی‌های رسی و ژئولیت‌ها بسیار مناسب می‌باشد. این روش کاربرد وسیعی در اکتشاف فلزات پایه دارد. عمق نفوذ این روش بطور تقریبی از عمق ۵۰ متری تا ۲۰۰ متری می‌باشد. این روش در آشکارسازی آنومالی‌های سولفیدهای پراکنده نسبت به سولفیدهای توده‌ای بهتر عمل می‌نماید. بدین ترتیب بیشترین کاربرد این روش در زمینه اکتشافات سولفیدهای پراکنده می‌باشد. هرچند که ممکن است کمتر از ۵۰٪ درصد از کانی‌های فلز جلادار سولفیدی قابل اکتشاف باشد. البته این روش کاربردهای دیگری نیز دارند. در بررسی‌های زیست‌محیطی و آشکار سازی زباله‌های آلودگی ناشی از معادن سولفیدی این روش جایگاه ویژه‌ای دارد [۵، ۸]. تحقیق و پژوهش در رابطه با اصول این روش سبب توسعه انواع مختلفی از این روش شده است این روش‌ها شامل مقاومت ویژه مختلط، پلاریزاسیون طیفی و سیستم‌های فازی می‌گردد. البته کاربرد برخی از این روش‌ها مانند روش سنتی IP عمومیت ندارد، مگر در موارد خاص، بطور مثال روش مقاومت ویژه مختلط، در زمینه آشکار سازی آلودگی‌های مربوط به مواد آلی در آب و خاک کاربرد ویژه‌ای دارد [۹]. در کشور ما نیز مطالعاتی در زمینه اکتشاف کانسارهای معدنی صورت گرفته است از جمله چاکری در سال ۱۳۸۴ عرب‌امیری در سال ۱۳۸۳.

۱-۴-۱) مروری بر مطالعات دیگران در روش قطبش القایی (IP)

یکی از روش‌های بسیار حساس ژئوالکتریک برای تشخیص کانی‌ها و عناصر موجود در سنگ‌ها روش القاء قطبی است. گُنراد شلومبرژه در سال ۱۹۲۰ برای اولین بار اولین وجود پدیده پلاریزاسیون القایی را در ژئوفیزیک مطرح نمود. در سال ۱۹۱۴ زمانی که او مشغول اندازه‌گیری سنتی بر مبنای روش مقاومت ویژه بود، متوجه شد که بعد از قطع جریان اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط دو

¹ Induced polarization (IP)

الکترو د پتانسیل فوراً صفر نمی شود بلکه بعد از قطع جریان ابتدا یک افت ناگهانی نشان می دهد نشان می دهد و بعد به تدریج و طی زمانی معین به سمت صفر می رود. شلومبرژه این اختلاف پتانسیل را پلاریزاسیون تحریک شده نامید. تجربیات آزمایشگاهی نشان داده است که انرژی الکتریکی ذخیره شده در سنگها به طور معمول از طریق فرایندهای الکترو شیمیایی انتقال می یابد. پدیده IP برای اولین بار توسط کنراد شلومبرژه گزارش شده است. این روش اول بار در اواخر ۱۹۴۰ وسیعاً برای اکتشاف ذخایر سولفیدی افشان بکار گرفته شد تا سال ۱۹۵۰ اندازه گیری ها با استفاده از این روش در حوزه زمان صورت می گرفت [۱،۳].

در دهه ۱۹۶۰ از این روش بطور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیکی معدنی زمین پایه استفاده شده است. روش قطبش القایی در صنعت معدنکاری از سال ۱۹۵۰ و در کاربرد های دیگر از سال ۱۹۷۰ استفاده شده است و اخیراً نیز جهت کاربردهای ژئو تکنیکی معروفیت و اهمیت پیدا نموده است [۹]. سیگل^۱ در سال ۱۹۵۹ اثرات قطبش پذیری مواد را از منظر ریاضی بیان نمود. در همان سال مادلین^۲ منشأ قطبش القایی را بر اساس قطبش الکترولیتی و الکترو دی بیان نمود. در سال ۱۹۷۸ پلتون^۳ و همکاران نشان دادند که می توان ولتاژ میرای مشاهده شده پس از تزریق جریان را از نظر تئوری توسط مدل کل-کل^۴ بیان نمود و این مدل تئوری مبنای شیوه دیگری از روش IP با عنوان قطبش القایی طیفی شد [۱۰]. در رابطه با روش قطبش القایی سامر^۵ در سال ۱۹۷۶، برتین^۶ و لوب^۷ در همان سال، فینک^۸ و همکاران در سال ۱۹۹۰ و ادوارد^۹ در سال ۱۹۹۰ مطالعات ارزنده ای صورت گرفته است [۹].

۱-۵) مروری بر مطالعات دیگران در مدل سازی عددی داده های ژئوفیزیک

1-Siegle

2 Madelline

3 Pelton

4 Cole-Cole

5 Samner

6 Bertine

7 Lub

8 Finke

9 Edwards

مدل سازی عددی بر مبنای روابط ریاضی صورت می گیرد، مدل سازی عددی به دو دسته مستقیم یا پیشرو تقسیم می گردد. مبانی تئوری معکوس سازی غیر خطی عددی در مسائل مربوط به ژئوفیزیک به طور اساسی توسط گیلبرت^۱ و بروکس^۲ در سال ۱۹۶۷ مطرح شد. و بدین ترتیب روش های بهینه غیرخطی برای حل مسائل معکوس سازی مقاومت ویژه و قطبش القایی توسعه یافتند. معکوس سازی داده های یک بعدی مقاومت ویژه توسط کونتز^۳ و رکروی^۴ و گوش^۵ در سال ۱۹۷۱ انجام گرفت. در سال ۱۹۷۰ مارکوات^۶ روش معکوس سازی بر مبنای روش کمترین مربعات هموار یا میرا را در مدل سازی معکوس پارامتری بیان نمود. یک روش معکوس سازی ماتریسی با بکارگیری روش تفاضل محدود توسط دی^۷ و موریسون^۸ در سال ۱۹۷۹ پایه گذاری شد. کاستیل و همکاران در سال ۱۹۷۸ معکوس سازی هموار اکام داده های یک بعدی داده های مگنتوتلوریک را انجام دادند و در سال ۱۹۹۱ لایروک^۹ در مدل سازی معکوس داده های دوبعدی IP، روش معکوس سازی هموار اکام را بکار برد. اسمیت^{۱۰} و وزوف^{۱۱} در سال ۱۹۸۴ مدل سازی داده های مقاومت ویژه با بکارگیری روش بر مبنای روش بهینه کمترین مجموع مربعات کانستیل^{۱۲} و دیگروت-هدلین^{۱۳} در سال ۱۹۹۰ معکوس - سازی هموار داده های دوبعدی مگنتوتلوریک را در سال ۱۹۹۰ انجام دادند. ساساکی^{۱۴} در سال ۱۹۸۹ معکوس سازی داده های دوبعدی مقاومت ویژه و مگنتوتلوریک بدست آمده از آرایش دو قطبی-دو قطبی را با استفاده از روش عنصر محدود با تاکید بر الگوریتم کامپیوتری تشریح نمود. پلتون^{۱۵} در سال ۱۹۷۸، داد های دوبعدی مقاومت ویژه و IP را با استفاده از حل مسئله پیشرو متناظر و توجه به رابطه مسئله معکوس سازی و پیشرو انجام داد. الگوریتم هموار مقید داده های دوبعدی مقاومت ویژه

¹ Gillbert

² Bruks

³ kunetz

⁴ Rocroi

⁵ Ghosh

⁶ Marquat

⁷ Dey

⁸ Morrison

⁹ Labruk

¹⁰ Smith

¹¹ Vozoff

¹² Constable

¹³ deGroot-Hedlin

¹⁴ Sasaki

⁶ Pelton

توسط ساساکی^۱ در طی سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۲ و اکسو^۲ در سال ۱۹۹۳ و اولدنبرگ و الیس در سال ۱۹۹۳ ارائه شده‌است. در پی آن اولدنبرگ و لی در سال ۱۹۹۴ الگوریتم کاملی از معکوس سازی هموار داده‌های مقاومت ویژه و IP دو بعدی با بکارگیری مدل‌سازی پیشرویی تفاضل محدود بر مبنای روش کمترین مربعات هموار ارائه نمودند. در سال ۱۹۹۰ ون^۳ و یانگ^۴ مدل‌سازی معکوس داده‌های دوبعدی مقاومت ویژه را با در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه ارائه نمودند. در سال ۱۹۹۶ لوک^۵ و بارکر^۶ مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری را بر مبنای الگوریتم معکوس‌سازی هموار انجام دادند. اما الگوریتم مدل‌سازی معکوس هموار در تشخیص مرزهای تیز^۷ قابلیت چندانی ندارد. بنابراین مدل-سازی معکوس شبکه‌ای توسط یامارسین^۸ و الایینکا^۹ در سال ۲۰۰۰ برای رفع این مشکل بیان شده است. روش اشباع‌شدگی گداخت^{۱۰} در سال ۱۹۸۳ توسط کایرک پاتریک^{۱۱} و الگوریتم ژنتیک توسط هرن^{۱۲} و مک‌بث^{۱۳} ارائه شده است که با وجود پرهزینه بودن این روش‌ها در مواقعی که نقطه آغازین برای شروع مدل‌سازی موجود نباشد، بسیار مناسب می‌باشند. اما پیشرفت قابل توجه مدل‌سازی عددی مرهون برنامه‌های کامپیوتری است. برنامه‌های مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیک بر پایه روش کمترین مربعات غیرخطی در سال ۱۹۸۴ توسط تریپ^{۱۴} و هومان^{۱۵} و سویفت^{۱۶} طراحی شده است. در سال ۱۹۹۲ وانمارکر^{۱۷} برنامه مدل‌سازی بر مبنای شبکه بندی عنصر محدود ارائه نمود [۱۲، ۱۳، ۱۱].

¹ Sasaki

² Xu

³ Wan

⁴ Yang

⁵ luke

⁶ Barker

⁷ Sharp

⁸ Yamarcin

⁹ Olayinka

¹⁰ Simulated annelling

¹¹ Kirkpatrick

¹² Horne

¹³ MacBeth

¹⁴ Tripp

¹⁵ Hohman

¹⁶ Swift

¹⁷ Wanmarker

۶-۱) اهداف پایان نامه

هدف از مطالعه حاضر این است که با تلفیق اطلاعات زمین شناسی منطقه و داده های ژئوفیزیکی برداشت شده و پردازش آنها بتوان یک مدل مناسب ژئوفیزیکی برای کانسار مورد مطالعه ارائه نمود. و بدین ترتیب گسترش و عمق آنومالی هدف که کانسار سرب و روی می باشد، تعیین شود. در ادامه با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می توان نقاط حفاری مناسب را انتخاب نموده و در نهایت شبکه اکتشافی بهینه را طراحی نمود.

۷-۱) ساختار پایان نامه

در فصل اول به کلیات روش های الکتریکی و نقش آن در اکتشاف توده های معدنی پرداخته می شود. در فصل دوم این مجموعه در ارتباط با ویژگی های الکتریکی قابل بررسی در روش های الکتریکی و در پی آن اصول اولیه برداشت داده های مقاومت ویژه و IP، آرایش های مورد استفاده در عملیات صحرایی، عوامل موثر در انتخاب یک آرایش مناسب، در ادامه به بررسی انواع روش های IP در حوزه زمان و تجهیزات و طراحی شبکه برداشت صحبت به میان خواهد آمد.

در فصل سوم در رابطه با انواع روش های مدل سازی عددی و به ویژه روش مدل سازی معکوس پارامتری و هموار که در این مطالعه بکار رفته است بحث می گردد.

در ادامه در فصل چهارم، این نتایج مدل سازی معکوس هموار داده های مقاومت ویژه و IP با استفاده از نرم افزار RES2DINV و مدل سازی معکوس پارامتری داده های مقاومت ویژه و IP با استفاده از نرم افزار RESIXIP2DI بررسی می گردد و همچنین این دو روش معکوس سازی مقایسه می گردد. در فصل آخر نتایج مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و همراه با پیشنهاداتی برای ادامه کار مطرح خواهند شد.

فصل دوم

مبانی روش های مقاومت ویژه و قطبش

القایی IP

۲-۱) مقدمه

اکتشافات الکتریکی بسیار متنوع تر از دیگر روش های ژئوفیزیکی می باشند. بعضی از روش های الکتریکی مانند پتانسیل خودزا ، جریان تلوریک، و مگنتو تلوریک از منابع انرژی الکتریکی طبیعی بهره می گیرند که از این نظر همانند اکتشافات گرانی و مغناطیسی می باشند. از طرف دیگر، روش های الکتریکی دیگر مثل مقاومت ویژه و قطبش القایی القایی نیاز به جریان و یا میدان الکتریکی بصورت مصنوعی داشته و از این نظر شباهت زیادی به روش های اکتشافات لرزه ای دارند. هدف اصلی روش های الکتریکی اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین می باشد. در این روش ها به منظور تعیین ویژگی های زیر زمینی، باید مقاومت ویژه الکتریکی آن متفاوت از محیط اطرافش باشد. بنابراین استفاده از روش های الکتریکی به حالتهایی که یک اختلاف مقاومت ویژه وجود داشته باشد محدود می شود، نکته ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که در روش های الکتریکی فقط اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی و یا پلاریزاسیون القایی قابل اندازه گیری می باشد. در این روش ها ویژگی هایی مانند زمین شناسی، آب های زیر زمینی و سایر خصوصیات موجود به طور مستقیم اندازه گیری نمی شود. این بدان معنی است که برای تفسیر مناسب داده های الکتریکی نیاز به یک سری اطلاعات خارجی می باشد

روش های الکتریکی اغلب برای پی جویی کانی های فلزی و هادی بکار می روند. همچنین این روش ها بطور وسیع در اکتشاف آب، کارهای مهندسی (برای تعیین عمق سنگ های بستر)، و ژئوترمال بکار می روند [۱].

۲-۲) خواص الکتریکی سنگها

اکتشافات الکتریکی بطور کلی از سه خواص بنیادی و مهم سنگها بهره می گیرند.

۱- مقاومت ویژه^۱ ρ که عکس رسانایی σ می باشد. روش مقاومت ویژه و الکترومغناطیس بر مبنای اندازه گیری مقاومت ویژه پایه گذاری شده اند.

۲- فعالیت الکتروشیمیایی که در رابطه با الکترولیت های محلول در سفره های آبدار می باشند. این فعالیت ها اساس روش های پلاریزاسیون القایی (IP) و پتانسیل خودزا (SP) می باشند.

۳- ثابت دی الکتریک که اطلاعاتی درباره ظرفیت سنگها در ذخیره نمودن انرژی الکتریکی هنگام عبور جریان، ارائه می نماید. این ویژگی در روش های IP و GPR^۲ کاربرد دارد [۹]. تعریف یک دی الکتریک کامل این است که اجازه عبور جریان های گالوانیک یا اهمی را نمی دهد. یک عایق است، اما به انواع مختلف جریان که جریان جانشینی نامیده می شود و تنها در شرایط متغیر با زمان که در آن جدایش بار (قطبش) به وقوع می پیوندد و میدان الکتریکی عبور می نماید، اجازه عبور می دهد [۱].

۲-۱- مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت ویژه یک سیم استوانه ای برابر است با:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق، هر یک از پارامتر ها بصورت زیر تعریف می گردد :

R : مقاومت الکتریکی استوانه بر حسب اهم (Ohm)

L : طول سیم استوانه ای بر حسب متر

A : سطح مقطع سیم استوانه ای بر حسب متر مربع

ρ : مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر

طبق قانون اهم داریم

$$\Delta V = IR \quad \Rightarrow R = \frac{\Delta V}{I} \quad (۲-۲)$$

بنابراین می توان دو رابطه بالا را بصورت زیر نوشت:

¹ Resisivity

² Ground peneteration Radar

$$\frac{A}{L} \rho = \frac{\Delta V}{I} \quad (3-2)$$

در این رابطه

ΔV : اختلاف پتانسیل در دو سر سیم

I : شدت جریان در طول سیم بر حسب آمپر

از رابطه فوق برای تعیین مقاومت ویژه مواد همگن و ایزوتروپ با اشکال هندسی منظم، استفاده می شود. اگر در رابطه (3-2) طول L و سطح مقطع A سیم آنقدر کوچک شوند که به سمت یک مقدار حدی میل کنند خواهیم داشت.

$$\rho = \frac{\lim_{L \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta V}{L} \right]}{\lim_{A \rightarrow 0} \left[\frac{I}{A} \right]} \Rightarrow \rho = \frac{E}{J} \quad (4-2)$$

در رابطه فوق داریم

E : میدان الکتریکی

J : چگالی جریان بر حسب جریان / متر مربع

واحد مقاومت ویژه در سیستم M.K.S "اوم-متر" ($\Omega \text{ m}$ یا Ohm - Cm) و یا بر حسب (۱۰۰۰ میلی زیمنس / متر) تعریف می گردد. در سیستم C.G.S بر حسب واحد اوم سانتیمتر (Cm) (Ω) یا (Ohm - m) می باشد. عکس مقاومت ویژه را قابلیت هدایت الکتریکی^۱ می گویند [۱].

۲-۱-۱-۲) مقاومت ویژه سنگها

دامنه تغییرات مقاومت ویژه سنگها و کانی ها بسیار وسیع می باشد. هیچ نوع ویژگی فیزیکی دیگر در سنگها و خاکها نمی توان یافت که دامنه تغییراتش تا به این اندازه باشد. سنگها و کانی هایی که دارای مقاومت ویژه هایی بین 10^{-6} الی 10^{-1} اوم متر باشند هادی های خوب، بین 10^1 اوم متر الی 10^6 اوم متر را هادی های متوسط و بین 10^7 الی 10^{15} را هادی های بد می گویند. در بیشتر

^۱ Conductivity

سنگها هدایت جریان الکتریسیته بصورت الکترولیتی توسط محلول های موجود در خلل و فرج سنگها و بین دان ها صورت می گیرد. بنابراین مقاومت ویژه سنگها عمدتاً توسط تخلخل، نفوذ پذیری، آب موجود در سنگها کنترل شده و خمیره^۱ آنها سهم چندانی در هدایت الکتریکی ندارند. بیشتر کانه های فلزی (آنهایی که دارای جلای فلزی هستند) جریان الکتریسیته را بصورت الکترونیکی هدایت می کنند. در اعماق زیاد در اثر افزایش فشار لیتواستاتیک تمامی خلل و فرج سنگها بسته شده و رسانایی الکتریکی بیشتر توسط دانه ها و ماتریکس سنگ صورت می گیرد. مقدار مقاومت ویژه برای رسوبات غیرسنگی رسی و ماسه ای اشباع از آب شور حدود ۱ اهم متر می باشد. مقاومت ویژه ماسه و گراول اشباع شده از آب شیرین بین ۱۵ الی ۶۰۰ اهم متر می باشد [۱]. برای آشنایی بیشتر با مقادیر مقاومت ویژه مواد مختلف به جدول (۲-۱) مراجعه نمایید.

۲-۲-۲) فعالیت های الکتروشیمیایی

فعالیت الکتروشیمیایی به ترکیب شیمیایی سنگها و ترکیب و غلظت الکترولیت های محلول در آبهای زیرزمینی که با این سنگها در تماس می باشند بستگی دارد. در واقع میزان چنین فعالیتی مقدار و علامت (مثبت و منفی بودن) جریان الکتریکی حاصل را تعیین می نماید [۱].

۳-۲-۲) ثابت دی الکتریک^۲ یا نارسانایی

ثابت نارسانایی همانند قابلیت نفوذپذیری μ در مواد مغناطیسی یکی از ویژگی های فیزیکی مواد می باشد. در واقع ثابت نارسانایی میزان قابلیت پلاریزه شدن یک جسم را در میدان الکتریکی نشان می دهد. ویژگی های خازنی و ذخیره جریان الکتریکی در مواد به این پارامتر فیزیکی بستگی دارد. این ویژگی در روش IP از اهمیت بالایی برخوردار است [۱، ۱۰].

^۱ Matrix

^۲ Dielectric

جدول (۱-۲) مقاومت ویژه مواد برخی مواد زمین [۴].

مواد زمین	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر	مواد زمین	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر
فلزات		کانی های دیگر	
مس	$1/7 \times 10^{-8}$	کلسیت	$10^{12} - 10^{13}$
طلا	$2/4 \times 10^{-8}$	انیدریت	$10^9 - 10^{10}$
نقره	$1/6 \times 10^{-8}$	نمک	$10 - 10^{13}$
گرافیت	10^{-3}	زغال	$10 - 10^{11}$
آهن	10^{-7}	سنگ های بلورین	
سرب	$2/2 \times 10^{-7}$	گرانیت	$10^2 - 10^6$
نیکل	$7/8 \times 10^{-8}$	دیوپریت	$10^4 - 10^5$
قلع	$1/1 \times 10^{-7}$	گابرو	$10^3 - 10^6$
روی	$5/8 \times 10^{-8}$	آندزیت	$10^2 - 10^4$
کانسارهای سولفیدی	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر	بازالت	$10 - 10^7$
کالکوسیت	10^{-4}	پریدوتیت	$10^2 - 10^3$
کالکوپریت	4×10^{-3}	شیست	$10 - 10^4$
پیریت	3×10^{-1}	گنایس	$10^4 - 10^6$
مولیبدنیت	10^4	اسلیت	$10^2 - 10^7$
گالن	2×10^{-3}	ماربل	$10^2 - 10^8$
سفالریت	10^2	کوارتزیت	$10 - 10^8$
کانسار های دیگر	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر	سنگهای رسوبی	محدوده R
پرکمیت	$10^2 - 10^2$	شیل	$10 - 10^3$
درومیت	$1 - 10^6$	ماسه سنگ	$1 - 10^8$
کوپریت	$10^{-3} - 300$	آهک	$50 - 10^7$
هماتیت	$10^{-3} - 10^7$	دولومیت	$10^2 - 10^4$
مگنتیت	$10^{-5} - 10^4$	رسوبات سخت نشده	محدوده R
ایلمنیت	$10^{-3} - 10^2$	ماسه	$1 - 10^3$
روتیل	$10 - 10^3$	رس	$1 - 10^2$
کانی های سیلیکانه	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر	مارل	$1 - 10^2$
کوارتز	$10^{10} - 10^{15}$	آب زیرزمینی	مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر
موسکویت	$10^2 - 10^{14}$	آب قابل حمل چاه	$0/1 - 10^3$
بیوتیت	$10^2 - 10^6$	آب شور	$0/3 - 1$
اولیوین	$10^3 - 10^4$	آب دریا	$0/2$

۳-۲) اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی

با توجه به شکل (۱-۲) اگر دو الکتروود جریان A (مثبت) و B (منفی) و دو الکتروود پتانسیل M و N را در سطح زمین در نظر بگیریم، اختلاف پتانسیل (ΔV) بین دو الکتروود M و N بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta V_{MN}^{AB} = V_M^{AB} - V_N^{AB} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{\overline{AB}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}} \right) \quad (۵-۲)$$

رابطه بالا را می توان بصورت زیر نوشت :

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{\overline{AB}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}}} \right] = \frac{\Delta V}{I} \quad (۲-۶)$$

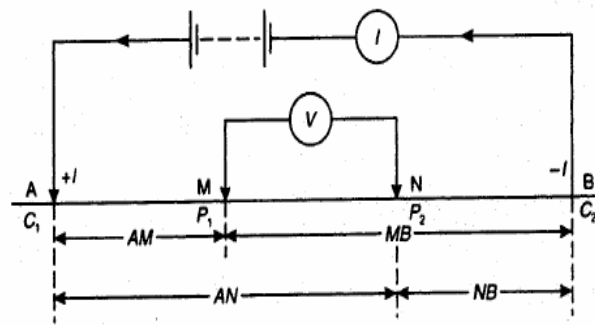
ضریب عبارت $\frac{\Delta V}{I}$ در رابطه (۲-۶) را فاکتور هندسی آرایش الکتروودی می نامند که به چگونگی قرار گیری الکتروود ها و فاصله آنها از هم بستگی دارد و معمولاً آن را با حرف K نشان می دهند. بنابراین می توان رابطه بالا را به صورت زیر نوشت :

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (۷-۲)$$

اگر ρ در یک محیط همگن و ایزوتروپ اندازه گیری شود آن گاه آن را مقاومت ویژه واقعی^۱ ρ_t می نامند. اما اگر اندازه گیری در یک محیط ناهمگن و غیرایزوتروپ صورت گیرد آن را مقاومت ویژه ظاهری^۲ ρ_a می گویند.

^۱ True Resistivity

^۲ Apparent Resistivity



شکل (۱-۲) شکل کلی آرایش الکترودهای پتانسیل و جریان در روش مقاومت ویژه [۹]

مقدار ρ_a تابعی از چند متغیر زیر می باشد.

۱- فواصل بین الکترودهای یعنی AM , BM , AN , BN

۲- وضعیت هندسی آرایش الکترودها

۳- مقاومت ویژه واقعی و دیگر خصوصیات مواد زیر سطحی از قبیل ضخامت لایه ها ، شیب لایه

ها ، و خواص غیرایزوتروپی^۱ لایه ها [۹،۱].

۲-۴) روش پلاریزاسیون القایی IP

خاک و لایه های زیر سطح زمین فقط دارای ویژگی مقاومت ویژه الکتریکی نمی باشند ، بلکه دارای مولفه های الکتریکی خازنی نیز می باشند. یک نمایش عمومی این ویژگی های الکتریکی مدل کل-کل^۲ می باشد. مدل کل-کل با رابطه زیر بیان می گردد.

$$Z(j\omega) = Z(0) \left[1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \right] \right] \quad (۲-۸)$$

در آن $Z(0)$ امپدانس در فرکانس صفر را نشان می دهد. m بارپذیری^۳ و τ ثابت زمانی قطبش

پذیری القایی و α وابسته فرکانسی و ω فرکانس زاویه ای و j عدد موهومی $\sqrt{-1}$ می باشد [۱۰].

^۱ Anisotropy

^۲ Cole-Cole

^۳ Chargeability

قطبش پذیری در یک کانسار معدنی به دلیل عبور الکترون برانگیخته فلزات و عبور یون های الکترولیتی صورت می گیرد [۱۴].

روش پلاریزاسیون القایی الکتریکی بطور گسترده برای اکتشاف کانی های سولفیدی پراکنده مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد این روش برای اکتشاف آبهای زیرزمینی نسبتاً محدود می باشد. مگر در مواردی که سفره های آب زیرزمینی در بین لایه های رسی محبوس شوند [۱].

برخی از کانسارها مانند کانسارهای سولفیدی زمانی که تحت تاثیر یک جریان متغیر القایی قرار می گیرند، از خود واکنش های فیزیکی- شیمیایی متفاوتی نشان می دهند. منشاء این واکنش ها پدیده پلاریزاسیون بارهای مثبت و منفی در این کانسارها می باشد. اثر این پلاریزاسیون در سطح زمین با توجه به نوع جریان القایی و روشی که برای اندازه گیری بکار می رود، متفاوت است. فرآیند IP یا قطبش پذیری القایی را می توان به دو گروه قطبش سطحی و حجمی دسته بندی نمود. اما از نظر میکروسکوپی تمامی قطبش ها، قطبش سطحی هستند [۱۴، ۱].

۲-۴-۱) انواع روش های IP

به طور معمول اندازه گیری قطبش القایی به یکی از صورت های زیر انجام می گیرد :

- * روش حوزه زمان^۱، در این روش ولتاژ اضافی^۲ به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری می شود.
- * روش حوزه فرکانس^۳، در این روش مقاومت ویژه ظاهری در دو فرکانس خیلی متفاوت اندازه گیری می شود.
- * روش حوزه فاز^۴، در این روش اختلاف فاز بین جریان بکار گرفته شده و ولتاژ اندازه گیری شده در مقیاس لگاریتمی اندازه گیری می شود. این فاز به مشخصه طبیعت کانی های زیر سطحی بستگی دارد.

¹ Time domain IP (TDIP)

² Overvoltage

³ Frequency domain IP

⁴ Phase domain IP

* روش قطبش القایی طیفی¹ SIP، این روش هم در حوزه زمان و هم حوزه فرکانس قابل اندازه گیری است. در این روش اختلاف فاز بین قسمت‌های حقیقی و موهومی ولتاژ و دامنه آن روی محدوده فرکانسی ۰/۰۰۱ تا ۴۰۰۰ هرتز اندازه گیری می شود.

* یکی از روش های توسعه یافته قطبش القایی روش مقاومت ویژه مختلط^۲ می باشد. اما تفاوت این روش نسبت به قطبش القایی سنتی آن است که اندازه گیری های مقاومت ویژه مواد مختلف در بازه وسیعی از طیف های صورت می گیرد. بنابراین این روش اطلاعات بیشتری از مواد زیر سطح زمین نسبت به روش مرسوم IP ارائه می دهد. اما تجهیزات برداشت صحرایی پیچیده تر و تحلیل و تفسیر داده های این روش نیز پیچیده تر و به مراتب گران تر می باشد. اما مزیتی که این روش دارد این است که قابلیت آشکارسازی حوضچه های آلودگی شامل مواد آلی را دارد. روش مقاومت ویژه تقریباً برای این امر قابلیت ندارد [۱۵،۶].

در مطالعه حاضر از روش IP در حوزه زمان که ولتاژ اضافی را بصورت تابعی از زمان اندازه گیری می کند به منظور اکتشاف استفاده شده است.

۲-۴-۲) اصول و منشاء IP

هنگام استفاده از چهار الکتروود (دو الکتروود پتانسیل و دو الکتروود جریان) در اندازه گیری مقاومت ویژه ، اگر جریان الکتریکی بطور ناگهانی قطع شود ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل فوراً صفر نخواهد شد. پس از قطع جریان، ولتاژ یک افت ناگهانی اولیه نشان می دهد و سپس به تدریج بعد از گذشت چند ثانیه به صفر نزدیک می شود. تجارب آزمایشگاهی نشان داده که انرژی الکتریکی در داخل سنگها اساساً توسط فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره می شود و این عمل معمولاً بدو طریق صورت می گیرد [۱].

¹ Spectrume IP

² Complex resistivity

۲-۴-۲-۱) پلاریزاسیون غشایی^۱ یا IP غیر فلزی

توجیه مکانیسم پلاریزاسیون غشایی و الکترولیتی توسط مادلین^۲ در سال ۱۹۵۹ صورت گرفت. عبور جریان الکتریکی از داخل اغلب سنگها توسط الکترولیت های موجود در خلل و فرج آنها صورت می گیرد. اغلب کانی های تشکیل دهنده سنگها دارای باری منفی در سطح تماس خود با سیال موجود در حفرات^۳ می باشند و در نتیجه یونهای مثبت را بطرف خود جلب می کنند. تجمع یونهای مثبت در مجاورت سطح کانی ها معمولاً قشری به ضخامت یکدهم میکرون (از سطح کانیها به داخل سیال) بوجود می آورد. اگر ضخامت این قشر در حدود قطر روزنه های ارتباطی حفرات باشد باعث جلوگیری از تحرک یونها (حاصله از جریان تزریقی) در فلوئید 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 کانی ها برهم خواهد خورد. بعد از گذشت زمانی اندک یک تعادل جدید پدید خواهد آمد. حال اگر ولتاژ تزریقی ناگهان قطع شود بعد از مدت زمانی کوتاه، یونها دوباره به محل اولیه خود بازمی گردند و سبب ایجاد ایجاد ولتاژ روبه زوال IP می شوند. این نوع IP به بهترین وجه در حضور کانی های رسی (که خصوصاً دارای فضا های بیشمار کوچک می باشند) صورت می گیرد. این نوع IP با افزایش شوری الکترولیت های موجود در حفرات، کاهش خواهند یافت [۱،۱۶].

۲-۴-۲-۲) پلاریزاسیون الکترودی یا اور ولتاژ^۴ و یا پلاریزاسیون فلزی

اگر کانیهای فلزی در سنگ حضور داشته باشند، هدایت جریان الکتریکی بصورت الکترونیکی نیز صورت می گیرد. در شکل (۲-۲) یک کانی فلز دار را نشان می هد که پس از تزریق جریان پدیده قطبش القایی الکترودی در آن اتفاق می افتد. موقعی که جریان الکتریکی داخل سنگ تزریق شود، 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). این امر در شکل (۲-۲) مشاهده می گردد. معمولاً میزان سرعت هدایت الکترون ها از طریق ذره فلزی کمتر از سرعت تبادل الکترونی

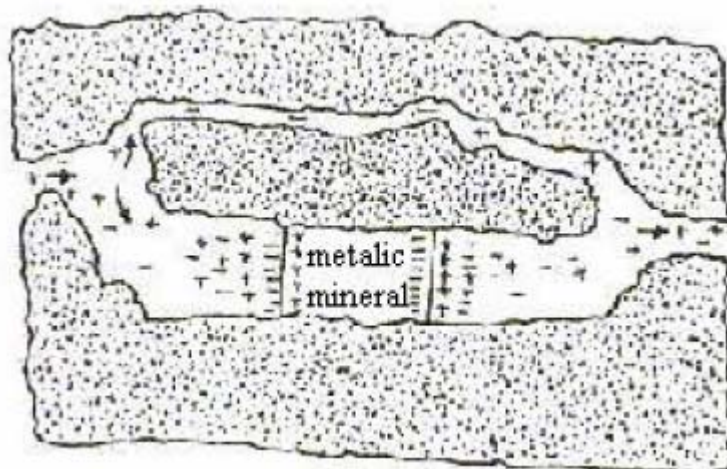
¹ Membrane Polarization

² Madlin

³ Pore Fluids

⁴ Overvoltage

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 نداده اند) تجمع پیدا می کنند. 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 می شوند. 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 ، نفوذ پذیری، قابلیت هدایت الکتریکی کانی‌های فلزی، و



شکل (۲-۲) پلاریزاسیون الکترودی [۱۶].

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 دانه ها، تخلخل، مقاومت و نوع الکترولیت، و مقاومت ویژه سنگ های دربرگیرنده بستگی دارد.

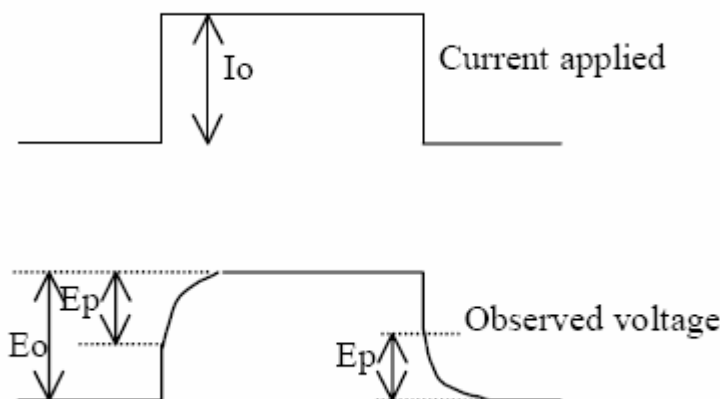
هر چه ماده معدنی هادی تر و درصد آن بیشتر باشد، IP بزرگتر، و هر چه کانیها پراکنده تر (دیسپینه تر) در متن سنگ میزبان باشند IP برجسته تر خواهد بود زیرا در این حالت سطح تماس جهت تبادل الکترونی _ یونی به حداکثر خواهد رسید. با افزایش تخلخل مقدار IP کاهش می یابد. زیرا مسیرها و معابر موجود برای هدایت یونی (بجای الکترونیکی) به اندازه کافی افزایش می یابند. واضح است در اکتشافات کانسارهای فلزی ، IP فلزی از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. معمولاً در حین اندازه گیری IP نمی توان اثر پلاریزاسیون غشایی را از پلاریزاسیون فلزی تشخیص داد. در نتیجه

پلاریزاسیون غشایی در اندازه گیری های IP برای اکتشاف ذخایر فلزی هادی، نوفه محسوب می شود که مقدار آن ممکن است به اندازه IP فلزی حاصله از یک سنگ حاوی ۲٪ کانی فلزی باشد. اگر بجای جریان تزریقی DC از جریان AC استفاده شود، مقدار IP فلزی با افزایش فرکانس جریان تزریقی، کاهش خواهد یافت. زیرا زمان لازم برای تشکیل ولتاژ IP، طولانی تر از پریود جریان AC تزریقی می باشد [۱].

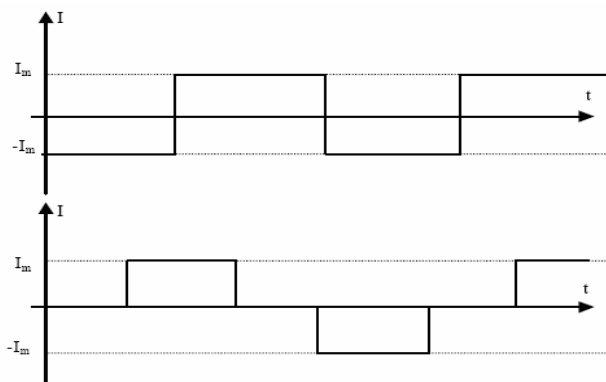
۳-۴-۲) اندازه گیری ولتاژ رو به زوال IP در قلمرو زمان

در کارهای ژئوفیزیکی روش هایی که در حوزه زمان پدیده قطبش القایی را اندازه گیری می کنند خیلی سریع تر و تفسیر پارامترهای آن نیز آسانتر می باشد. از این رو این روش ها بیشتر متداول می باشد.

در مطالعات آبهای زیرزمینی معمولاً اندازه گیری IP در قلمرو زمان صورت می گیرد. در روش TDIP جریان تزریق شده به داخل زمین می تواند بصورت موج مربعی، مثلثی و پالسی تزریق شود. نمونه ای از شکل جریان مربعی بکاررفته در روش TDIP و منحنی ولتاژ اضافی آن را در شکل (۳-۲) و (۴-۲) مشاهده می نمایید.



شکل (۳-۲) موج مربعی بکاررفته در روش TDIP و منحنی ولتاژ اضافی آن [۱۵]



شکل (۲-۴) موج مربعی جریان تزریقی در روش TDIP [۱۵]

کلاً در این روش از جریان DC و یا AC با فرکانس خیلی کم (حدود ۱/۰ Hz) استفاده می شود. معمولاً جریان (I) را به مدت ۱ الی ۵ دقیقه وارد زمین می کنند تا اختلاف پتانسیل به یک حالت ثابت و پایدار ΔV_s برسد، سپس جریان را ناگهان قطع می کنند. در این حالت نحوه اندازه گیری معمولاً به سه صورت می باشد [۱].

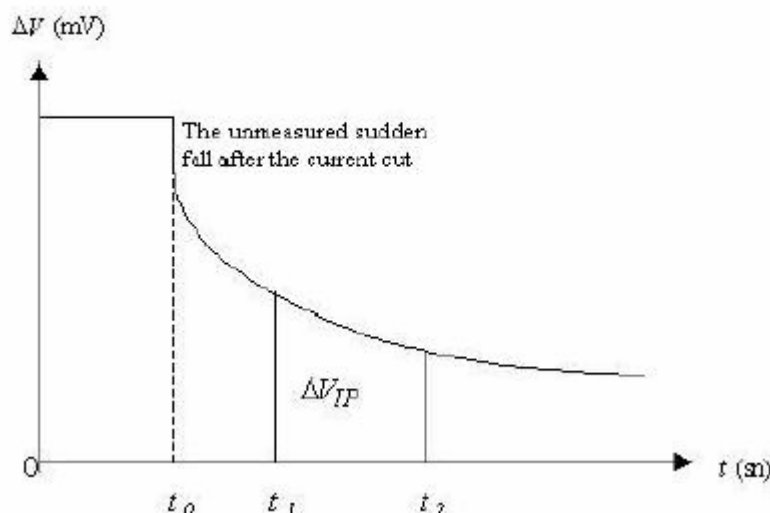
۲-۴-۳-۱) اندازه گیری بارپذیری^۱ ظاهری بر اساس نسبت $\Delta V_{IP} / \Delta V_s$

در این طریق کمیت ΔV_{IP} را در یک زمان معین t پس از قطع جریان ، اندازه گیری می کنند و نسبت آن را ΔV_s (اندازه گیری شده در زمان t_0 که معمولاً بصورت % بیان می شود ، بارپذیری ظاهری می گویند. ولتاژ اندازه گیری شده در یک زمان معین t بعد از قطع جریان می باشد. در این شیوه زمان t درست کمی بعد از قطع جریان t_0 انتخاب می شود تا اثر جریانات الکترومغناطیسی ثانویه حاصل از بین برود. از سوی دیگر زمان t نباید زیاد طولانی باشد زیرا ممکن است افت پتانسیل IP آنقدر زیاد باشد که به حد سطح نوفه برسد [۱].

^۱ Chargeability

۲-۴-۳) اندازه گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP

اندازه گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP در شکل (۵-۲) نمایش داده شده است. بعضی از دستگاه ها می توانند 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 بطور پیوسته اندازه گیری نماید، برای بارپذیری استاندارد اندازه گیری ها در یک بازه زمانی بین ۰/۴۵ و ۱/۱ انجام می گیرد و بعد به کمک آنها منحنی ولتاژ IP را رسم می کنند و سپس به کمک انتگرال مساحت زیر منحنی را در محدوده t_1 و t_2 بدست می آورند [۱۶،۱].



شکل (۵-۲) اندازه گیری منحنی رو به زوال ولتاژ [۱۶].

در هر دو حالت کمیت بارپذیری ظاهری، از نسبت مساحت (A) زیر منحنی ولتاژ IP در یک محدوده زمان معین ($t_1 - t_2$) به ΔV_s بدست می آید [۱].

A مساحت زیر منحنی ولتاژ رو به زوال می باشد.

$$A = \int_{t_1}^{t_2} \Delta V(t) dt \quad (۹-۲)$$

$$\Delta V(t) = \Delta V_{IP}$$

M بارپذیری ظاهری و بر حسب واحد میلی ثانیه تعریف می گردد.

$$M = \frac{A}{\Delta V_s} \Rightarrow \frac{A}{\Delta V_s} = \frac{I}{\Delta V_s} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V(t) dt \quad (10-2)$$

از رابطه بالا رابطه (۱۱-۲) نتیجه می شود [۱].

$$M = \frac{A}{\Delta V_s} = \frac{1}{\Delta V_s} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V(t) \quad (11-2)$$

در جدول (۲-۲) مقادیر بارپذیری برخی مواد ذکر شده است.

جدول (۱-۲) بارپذیری مواد گوناگون [۳].

بارپذیری (میلی ثانیه)	ماده	بارپذیری (میلی ثانیه)	ماده
۱۳/۲	پیریت	۱۰-۲۰	سنگ آهک (دولومیت)
۱۳/۲	کالکولیت	۳-۱۲	ماسه سنگ
۱۲/۳	مس	۰	آب زیرزمینی
۹/۴	کالکوپیلیت	۳-۹	شن (گراول)
۳۰۰-۸۰۰	توف آتشفشانی	۶/۳	بوزیت
	سنگهای آتشفشانی	۲/۲	مانیتیت
۱۰۰-۵۰۰	چگال	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۲۰٪ سولفید
۵۰-۱۰۰	شیل	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۸٪-۲۰٪ سولفید
۳/۷	گالنا	۵۰۰-۱۰۰۰	۲٪-۸٪ سولفید

۵-۲) عملیات صحرایی در روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش قطبش القایی IP

سونداژزنی الکتریکی قائم^۱ (V.E.S) روندی است که توسط آن تغییرات عمقی مقاومت ویژه و بارپذیری لایه های زیر سطحی مورد مطالعه قرار می گیرند. پروفیل زنی^۱ افقی (H.P.) روندی است

^۱ Vertical electrical sounding

که توسط آن تغییرات جانبی مقاومت ویژه و بارپذیری سنگهای زیر سطحی در روش مقاومت ویژه و قطبش القایی اندازه گیری می‌شوند[۱]. روش سونداژزنی در مواردی که گسترش ساختار هدف عمودی باشد بسیار مناسب می‌باشد و در مواردی که گسترش ساختار هدف افقی باشد روش پروفیل‌زنی نتایج خوبی ارائه می‌دهد. تلفیق این دو روش برای بررسی گسترش عمودی و افقی ساختار های زمین شناسی بسیار مناسب است.

تکنیک هایی که برای اندازه گیری IP بکار گرفته می شوند شبیه به اندازه گیری های مقاومت ویژه می باشند. جریان الکتریکی توسط دو الکتروود جریان A و B به زمین تزریق می شود و اختلاف پتانسیل بعد از قطع جریان، توسط دو الکتروود پتانسیل M و N غیر پلاریزه شونده و حاوی حفره که در آنها محلول سولفات مس قرار دارد اندازه گیری می‌شود. کلاً اندازه گیری IP در صحرا به دو طریق صورت می گیرد. در روش IP آنچه اندازه گیری می گردد مشابه مقاومت ویژه ظاهری، بارپذیری ظاهری می باشد[۱۶، ۱].

۲-۵-۱) آرایه های بکار رفته در روش های مقاومت ویژه و IP

برای طراحی مناسب عملیات برداشت IP و مقاومت ویژه داشتن اطلاعات کلی در رابطه با شکل اندازه و عمق و ویژگی های ساختار هدف ضروری می باشد. انتخاب یک آرایش مناسب در عملیات میدانی از نکات بسیار مهم است. در عملیات صحرایی ژئوالکتریک آرایش وِ نر ، آرایه شلومبرژه ، آرایه های دوقطبی-دوقطبی (d-d) ، قطبی-دوقطبی (p-d) یا سه نقطه ای، آرایش گرادیان از کاربردی ترین آرایه ها می باشند. تمام آرایه های نام برده در روش های مقاومت ویژه مورد استفاده قرار می گیرند. روش های سونداژ IP را نیز می توان با آرایش های شلومبرژه ، وِ نر ، و دوقطبی-دوقطبی اجرا نمود. اما در روش IP آرایه های دوقطبی-دوقطبی (d-d) و قطبی-دوقطبی (p-d) بیشتر استفاده می شوند، دلیل این کاربرد گسترده میزان کم نسبی نویز های حاصل از جفت شدگی الکترومغناطیسی بین الکتروودهای جریان و پتانسیل در این آرایه ها در روش IP می باشد. البته در برخی موارد از آرایه

¹ Horizontal profiling

شلومبرگر در این روش استفاده می گردد. در شکل (۲-۶) نمای کلی برخی از این آرایه ها به طور خلاصه نشان داده شده است. آرایه های دیگری همچون، لی پارتیشینگ امروزه کاربرد کمتری دارد. اما برای برداشت های میدانی IP و مقاومت ویژه آرایه های دیگری نیز طراحی شده است که در موارد خاص کاربرد دارد. این آرایه ها عبارتند از آرایه اتصال به جرم^۱ و آرایه درون چاهی^۲ [۹، ۱، ۱۶]. نمای کلی برخی آرایه ها را در شکل (۲-۶) مشاهده می نمایید.

۲-۵-۱-۱) آرایش دوقطبی-دوقطبی^۳

این آرایش در اتحاد جماهیر شوروی سابق^۴ در سال ۱۹۵۰ توسعه یافت و بدین ترتیب امروزه از آرایش های مختلف دوقطبی-دوقطبی در اکتشافات الکتریکی بطور گسترده استفاده می گردد. بالاخص موقعی که تئوریهای لازمه توسط آلپین توسعه یافتند. این آرایه هنوز هم کاربرد گسترده ای در روش های مقاومت ویژه و IP دارد.

در آرایش دوقطبی-دوقطبی فاصله بین الکترودهای جریان C_1 و C_2 (C_1C_2) و فاصله بین الکترودهای پتانسیل P_1 و P_2 (P_1P_2) تقریباً ثابت بوده و بطور قابل ملاحظه ای کمتر از فاصله بین مراکز دو قطبی یعنی r خواهد بود. با استفاده از آن اطلاعات مناسبی در مورد تغییرات ویژگی اندازه گیری شده در امتداد جانبی بدست آورد. یکی دیگر از مزایای عمده این آرایه تفسیر کیفی دادهای بدست آمده با استفاده از شبه مقاطع بدست آمده در حین عملیات صحرایی امکان پذیر می باشد. میدان الکتریکی حاصل از یک دوقطبی در یک نقطه معین معکوساً متناسب با توان سوم فاصله (r) می باشد و دیگر آنکه برای یک زاویه آزیمویتی معین، مقدار ρ_a تابعی از متغیر r می باشد. از بین آرایش های مختلف دوقطبی-دوقطبی، آرایش های محوری^۵ و استوایی^۶ بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار می گیرند. با افزایش فاصله C_1C_2 جریان الکتریکی لازم برای تولید اختلاف پتانسیل (ΔV) در یک فاصله معین r ، کاهش می یابد. در این آرایش اندازه گیری ها نسبت به تغییرات افقی بسیار

^۱ Mise-a-la-Mass

^۲ In-holl

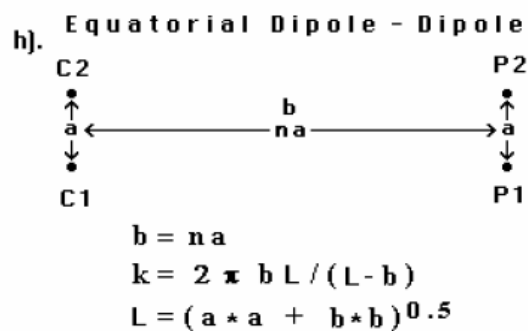
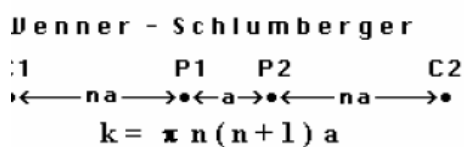
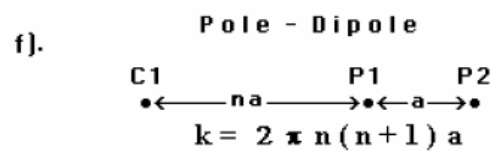
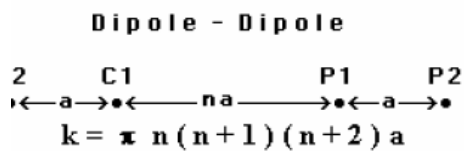
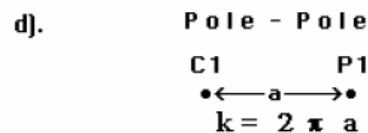
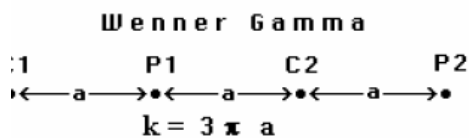
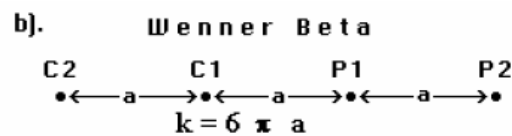
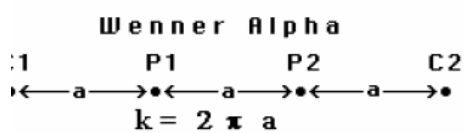
^۳ Dipole –Dipole Array

^۴ Soviet Union

^۵ Axial

^۶ Equatorial

حساس است. بنابر این برای به نقشه در آوردن ساختارهای زیر سطحی عمودی مانند دایک ها بسیار مناسب می باشد. اما نسبت به تغییرات عمودی حساس نیست، بنابراین برای به نقشه در آوردن لایه های رسوبی و افقی چندان مناسب نمی باشد. عمق اکتشاف در این آرایه به فاکتور n در شکل (۲-۶) بستگی دارد، همانطور که به a ، فاصله جدایش الکترودی بستگی دارد. یکی از معایب این آرایه کوچک بودن شدت سیگنال به نویز برای مقادیر بزرگ فاکتور n می باشد. بنابراین برای افزایش عمق اکتشاف نمی توان فاکتور n را بیش از ۱۰ افزایش داد. اما یکی از مزایای عمده این آرایه آن است که جفت شدگی الکترومغناطیسی نسبت به سایر آرایه ها کمتر در بکارگیری آن رخ می دهد [۸، ۱].



Geometric Factor

شکل (۲-۶) نمای کلی برخی از انواع آرایه های الکترودی [۹]

۲-۵-۱-۲) مزایا و معایب استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی

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 بوده و مسائلی از قبیل نشت جریان از جانب سیم های لخت شده وجود نخواهد داشت.
- ۴- تجسسات دو جانبه را ممکن می سازد، یا به عبارتی هم از عمق و راستای افقی اطلاعات خوبی ارائه می دهد.
- ۵- نویز حاصل از جفت شدگی الکترومغناطیسی داده های بدست آمده را کمتر آلوده می سازد.
- ۶- بخاطر کم بودن فاصله C_1C_2 ، یک ژنراتور بزرگ لازم دارد تا مقادیر زیادی جریان الکتریکی (بخصوص هنگام اکتشاف اعماق زیاد) تولید کند.
- ۷- برای تعبیر و تفسیر یافته ها، مسائل تئوریک آن باید بیشتر توسعه یابند [۱،۹].

۲-۵-۲) نحوه اندازه گیری با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری^۱ و رسم شبه مقطع

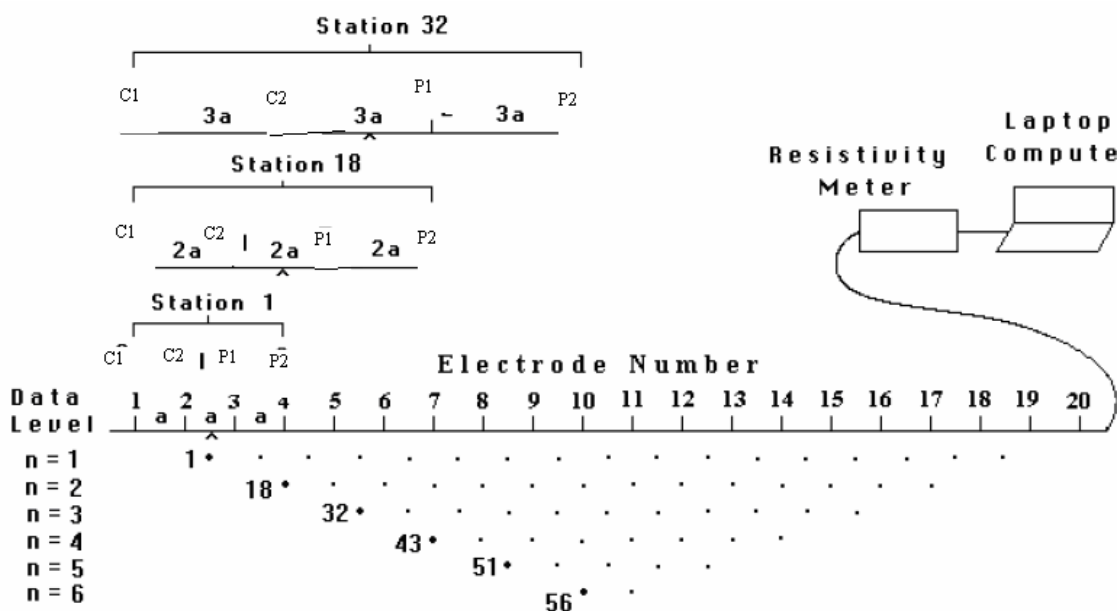
جهت تهیه یک شبه مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری معمولاً طرز عمل بدین صورت است که یک خط پروفیل در جهت عمود بر امتداد^۲ ساخت ها، کانسار ها، و لایه های زیرسطحی در نظر میگیرند و عملیات اندازه گیری با آرایش دوقطبی-دوقطبی (محوری) در روی این پروفیل انجام می شود. به شکل (۷-۲) توجه نمایید. در این آرایش $P_1P_2 = C_1C_2 = a$ 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 مقاومت ویژه های ظاهری در تقاطع قطرهایی که دارای زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط عبور کرده از مرکز دو قطبی ها می باشند، ترسیم شده و سپس تراز بندی می شوند. نتیجه یک مقطع کاذب است. نگهداشته و الکترودهای P_1 و P_2 را در طول پروفیل و هر بار به اندازه a

¹ Axial

² Strike

جابجا می کنند. در این حالت عمق نفوذ (عمق تجسس) برابر $nL/2$ خواهد بود. سپس الکترودهای C_1 و C_2 را به اندازه L در طول پروفیل جابجا می کنند 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 خطوط تراز می نمایند. و بصورت یک شبه مقطع بارپذیری و یا مقاومت ویژه در می آورند. به کمک این شبه مقطع ها می توان نحوه قرار گرفتن افقهای ژئوالکتریک را نیز در داخل زمین نشان داد. این شبه مقطع عمق واقعی را نشان نمی دهد. مناسبترین شبهمقطع یا به عبارتی شیوه نمایش داده‌های آرایش دوقطبی-دوقطبی در شکل (۷-۲) نشان داده شده است [۱].



شکل (۷-۲) تهیه شبه مقطع در آرایش دوقطبی-دوقطبی [۹].

۶-۲) عمق اکتشاف

عمق محدود کننده اکتشاف عبارت است از بیشینه عمق لایه‌ای که تاثیر آن در اندازه گیری‌ها، در حالتی که نوع و ابعاد آرایه داده شده باشد، دارای اهمیت می باشد. در یک محیط همگن، ایزوتروپ، و نیمه نامحدود^۱ یک رابطه بین فاصله C_1C_2 و عمق نفوذ جریان وجود دارد. فاصله

^۱ Semi-infinite

الکترودی C_1C_2 بیشتر شود مقدار بیشتری از جریان می تواند تا یک عمق معین نفوذ کند. رابطه زیر در این مورد صدق می کند.

$$\frac{I_z}{I_t} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2z}{C_1 C_2} \right) \quad (2-14)$$

I_z جریان نفوذی تا عمق z .

I_t کل جریانی که به داخل زمین نفوذ نموده است.

اما بطور تقریبی عمق اکتشاف برای آرایه های مختلف بصورت زیر می باشد

برای آرایه شلومبرژر: از $\frac{C_1 C_2}{8}$ تا $\frac{C_1 C_2}{2}$ ، میانگین آن $\frac{C_1 C_2}{4}$.

برای آرایه دو قطبی-دو قطبی محوری: میانگین $\frac{R}{3}$ و R فاصله بین نقطه میانی دو قطبی ها

می باشد [۱].

رابطه فوق را که برای یک محیط همگن و ایزوتروپ بیان شده است، نمی توان بعنوان یک قاعده کلی عمق نفوذ مورد استفاده قرار داد. این رابطه را همچنین نمی توان برای یک محیط ناهمگن و انیزوتروپ بکار برد. برای یک محیط ناهمگن درصد کل جریانی که تا عمق z نفوذ می کند نه تنها به فاصله بین الکترودها بلکه به رزستیویته لایه های زیر سطحی نیز بستگی دارد. در واقع در تعبیر و تفسیر رزستیویته، درصد جریانی که تا عمق معین بداخل زمین (لایه ها) نفوذ می کند اهمیت چندانی ندارد زیرا با اندازه گیری کل جریان (I) و اختلاف پتانسیل (ΔV) می توان به راحتی ρ_a را بدست آورد [۱،۲].

فصل سوم

مبانی مدل سازی عددی

۳-۱) مقدمه

مدل سازی عددی در رشته های مختلف علوم و مهندسی کاربرد گسترده ای دارد و ژئوفیزیک نیز از این قاعده مستثنی نیست. امروزه کسب آشنایی با روش های مدل سازی عددی به عنوان ابزاری در دست پژوهشگران و طراحان امری اجتناب ناپذیر می باشد. زیرا این روش ها اساس بسیاری از پژوهش ها و طراحی ها را تشکیل می دهند. امروزه با ظهور کامپیوتر های دیجیتالی و با قابلیت های شگفت انگیز از حیث حافظه و سرعت پردازش زمینه، استفاده از روش های عددی برای محققین در رشته های مهندسی و علوم بیش از پیش و به طرز فزاینده ای فراهم شده است [۱۷].

در تفسیر داده های ژئوفیزیکی توجیه دقیق رفتار لایه های زیرسطحی به طور مستقیم از داده های خام صحرایی امری ناممکن می باشد. روش های سنتی تفسیر داده های ژئوفیزیک نظیر شبه مقاطع ترسیم شده که توسط ادوارد و همکاران در سال ۱۹۷۸ ارائه شد، صرفاً برای دیدی کیفی از داده های بدست آمده از ساختار زیر سطحی مورد بررسی ارائه می دهد و بنابراین به منظور تفسیر کمی داده ها می توان از مدل سازی استفاده نمود. بدین ترتیب مدل سازی در ژئوفیزیک کاربردی به منظور تفسیر داده های بدست آمده در طی عملیات صحرایی از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد [۱۸].

در ژئوفیزیک مدل سازی به دو دسته فیزیکی و عددی تقسیم می شود. مدل سازی فیزیکی شامل شبیه سازی آزمایشگاهی ساختار زیرسطحی می باشد، اما با توجه به آنکه مدل سازی فیزیکی به طور عموم روشی پرهزینه می باشد، کاربرد چندانی در مدل سازی ندارد و بیشتر در تفسیرهای ژئوفیزیکی از مدل سازی عددی استفاده می شود [۱۸]. مدل سازی عددی داده های صحرایی ژئوفیزیک بدست آمده از ساختارهای زیرسطحی به وسیله دو روش انجام می شود. روش مستقیم که آن را به عنوان روش پیشرو می شناسیم و روش غیر مستقیم یا معکوس سازی که رابطه نزدیکی با مدل سازی پیشرو دارد. حل مسائل معکوس سازی شامل یک سری گام های پیاپی می باشد که منجر به کشف علت

آنومالی می گردد. معکوس سازی یا به عبارتی " مدل سازی معکوس " مشخص نمودن و شناسایی ساختارهای زیر سطحی از سری داده های اندازه گیری شده و تطابق پاسخ مدل داده های اندازه گیری می باشد. در واقع انتخاب یک مدل مناسب از مراحل بسیار بحرانی در این پروسه می باشد. مسائل معکوس سازی با توجه به روابط حاکم بر آن به روش های خطی و غیر خطی دسته بندی می شوند ، که با توجه به نوع مسئله از هر یک در جای خود استفاده می گردد. مسائل معکوس سازی مقاومت ویژه و قطبش القایی ، طبیعت غیر خطی دارند. مدل سازی معکوس داده های مقاومت ویژه به طور عموم پروسه ای است که شامل سه مرحله می باشد ، گام اول شامل محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با استفاده روش تفاضل محدود و یا عنصر محدود می باشد. گام دوم شامل محاسبه عناصر ماتریس ژاکوبین و گام سوم حل سیستم معادلات خطی است که در مراحل قبل تشکیل شده است [۱۹].

در ارتباط با مدل سازی داد های مقاومت ویژه و IP نرم افزارهایی مختلف و با قابلیت های متفاوت مانند RES2DINV و RES2DIP طراحی شده است که برای تفسیر داده های مورد نظر در تحقیق حاضر از آنها استفاده می شود اما قبل از بکارگیری این نرم افزارها مختصری در مورد چگونگی مدل سازی عددی و طرز کار آنها بحث می شود.

۲-۳) مدل سازی پیشرو

یکی از روش های مدل سازی برای تفسیر داده های ژئوفیزیکی مدل سازی پیشرو است که بر مبنای روش آزمون و خطا صورت می گیرد. مدل سازی پیشرو زمانی مطرح می گردد که پارامترهای فیزیکی در ارتباط با داده های مشاهده شده در عملیات صحرایی با آرایه الکترودی ، معلوم است. بدین ترتیب مدل سازی پیشرو شامل محاسبه برپایه تفسیر پارامترهای مدل می باشد. تازمانی که انطباق مناسب بین آنومالی محاسبه شده و آنومالی مشاهده شده بدست آید [۱۸].

بطور کلی مدل سازی پیشرو شامل مراحل زیر می باشد

۱- برآورد اولیه یک مدل قابل مقایسه با مدل زمینی.

۲- محاسبه پاسخ آنومالی تئوری برای این مدل.

۳- مقایسه پاسخ تئوری با داده های اندازه گیری شده.

۴- تعدیل اصولی مدل با توجه به اطلاعات زمین شناسی 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.

روش های عددی مختلفی برای حل مسائل پیشرو وجود دارد. در انتخاب یک روش سادگی، دقت و سرعت عمل در انجام پروسه از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد.

این روش ها را به طور خلاصه می توان به صورت زیر دسته بندی نمود [۱۹].

روش تحلیلی^۱، روش انتگرالی مرزی یا روش انتگرال حجمی^۲، روش های فوریه^۳، روش هیبرید^۴، روش عنصر محدود^۵، تفاضل محدود^۶، روش شبکه ای^۷.

به طور خلاصه در مدل سازی پیشرو با کمک علم فیزیک می توان از پارامترهای فیزیکی به نتیجه ای در رابطه با داده ها نائل شد و یا به عبارتی از مدل به داده رسید.

از منظر ریاضی بیان این مسئله بصورت معادله (۳-۱) می باشد:

$$d_j = F_j[m] \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (1-3)$$

در رابطه فوق بردار d_j نمایانگر داده های مشاهده شده (پاسخ مدل) در فضای M بعدی است که می توان آن را با اعمال عملگر پیشروی F بر بردار مدل m در فضای N بعدی استنتاج نمود. این عملگر و رابطه متناظر با آن تقریباً در تمامی موقعیت های واقعی غیر خطی می باشد. نکته دیگری که حائز اهمیت است آن است که مسائل پیشرو بهنجار^۸ می باشند که بدین ترتیب دارای جواب تکین می باشند و یا به عبارتی با اعمال تغییرات کوچک در پارامتر مدل جواب بدست آمده دچار تغییرات محسوسی نمی گردد [۶، ۲۰].

¹ analytical method

² boundary integral or volume integral method

³ fourier methods

⁴ hybrid method

⁵ finite element method

⁶ finite difference method

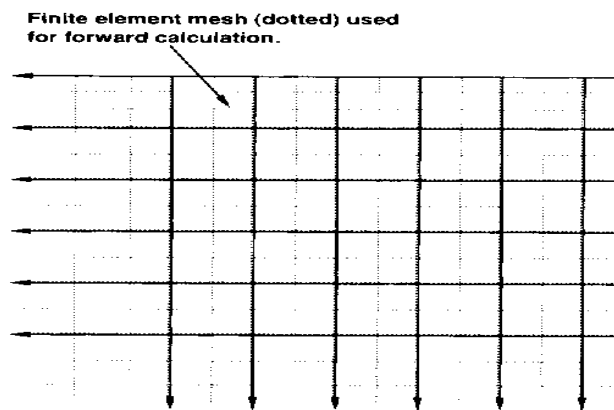
⁷ Network method

⁸ Well-posed

۳-۲-۱) روش عنصر محدود

یکی از روش‌های حل مسائل مقدار مرزی است که برای مدل‌سازی در محیط‌های ناهمگن نیز کاملاً قدرتمند عمل می‌نماید. استفاده از دو روش عنصر محدود و تفاضل محدود برای حل مسائلی که با معادلات خیلی بزرگ و پیچیده همراهند، بسیار مناسب می‌باشد. با استفاده از تکنیکهای تکرار و نیز با قابلیت بالای محاسبات امکان مدل‌سازی دو و سه بعدی به روش عنصر محدود و نیز تفاضل محدود مسیر شده است. این روش برای مدل‌سازی در محیط‌های کاملاً ناهمگن توانا می‌باشد.

در این روش محدوده مدل به صورت مجموعه‌ای از نواحی ساده و کم اثر به صورت شبکه در نظر گرفته می‌شود، مانند شکل (۳-۱) و به هریک از شبکه‌ها پارامترهایی به اندازه یکسان نسبت می‌دهند.



شکل (۳-۱) شبکه بکاررفته در روش عنصر محدود [۱۳].

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 عنصر محدود متحرک" که در آن محل گره‌ها متغیر می‌باشد، بکار می‌رود. این ویژگی از نا پیوستگی که در پاسخ‌های شیوه قبلی رخ می‌داد جلوگیری می‌نماید [۶].

۳-۲-۲) تفاضل محدود^۱

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. دستورالعمل روش تفاضل محدود توسط دی و موريسون برای انجام مدل‌سازی بیان شده است [۶]. در روش تفاضل محدود و عنصر 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 سه‌بعدی 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 [۶، ۱۷].

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. در هر دو نرم‌افزار RESIX 2DIP و RES2DINV از روش تفاضل محدود و عنصر محدود استفاده می‌شود [۵، ۱۸].

۳-۳) معکوس سازی

مسائل معکوس سازی نه تنها در ژئوفیزیک مطرح است، بلکه در علوم دیگر نیز برای حل مسائل از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. 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. بطوری 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

^۱ Finite elemente

یک مرحله ای و بهنجار^۱ هستند، به علت وجود نویز های زمین شناسی و نیز ناقص بودن اطلاعات و خطای ظاهر شده در اندازه گیری ها اغلب غیر مستقیم، تکراری و نابهنجار^۲ می باشند [۸]. نابهنجار بودن مسائل معکوس سازی بدان معناست که تغییر کوچک در داده ها منجر به ایجاد تغییرات بزرگ در پارامترها می گردد و جواب پایدار و تکینی حاصل نمی گردد و در واقع در حل مسائل معکوس سازی لزومی ندارد که جواب تکین و پایداری نتیجه شود.

به طور معمول روند حل مسائل معکوس سازی را می توان به مراحل زیر خلاصه نمود [۲۰]:

۱. پارامتری نمودن مدل

۲. خطی سازی و فرمولاسیون مسئله با استفاده از قضیه بسط تیلور

۳. فرمولاسیون مسئله به شکل ماتریسی

۴. یافتن پاسخ مؤثر در مدل سازی پیشرو

۵. کنترل روند معکوس سازی و انتخاب مدل نهایی

در مسئله معکوس سازی مطابق معادله (۳-۱) هدف یافتن پارامترهای مدل m از روی داده های مشاهده شده d می باشد. با فرض خطی بودن تابع به عنوان عملگر پیشرو در مدل سازی پیشرو، می توان عملگر مترادف آن A را تعریف و مسئله معکوس سازی را با معادله (۳-۲) طرح نمود.

$$F(m) = d \quad (2-3)$$

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

در مسائل معکوس سازی حالت های مختلفی پیش می آید. اگر در مسائل مربوطه تعداد داده های تجربی را n در نظر بگیریم و تعداد پارامترهای مجهول در ماتریس مشتقات جزئی m در نظر می گیریم، امکان وقوع چهار حالت پیش خواهد آمد که به شرح زیر می باشد [۲۱]:

* $n > m$: که مدل تعیین شده شامل پارامترهای کمتر از تعداد داده های تجربی است. مسئله معکوس سازی در این حالت (Overdetermined) می باشد یا به عبارتی بیش از نیاز تعیین شده است. اینگونه مسائل را می توان با استفاده از شیوه هایی که منجر به بهترین هماهنگی با داده ها میشود حل نمود.

¹ well-posed

² Ill-posed

* $m > n$ ؛ این حالت زمانی رخ می دهد که تعداد پارامترهای تخمین زده شده بیشتر از داده های تجربی با شد مسئله معکوس سازی در این حالت (Underdetermined) است. در این حالت تعداد جواب ها یا به عبارت دیگر تعداد مدل هایی که با داده ها ی اندازه گیری شده هماهنگی دارد بینهایت است.

* $m = n$ ؛ در این حالت که تعداد پارامترها مدل مطابق تعداد داده های مسئله است، مسئله بطور کامل تعیین شده است که (Evenly determined) نام دارد.

در حل مسئله معکوس سازی جستجوی پاسخ چندین سوال مهم از ارکان اساسی حل مسئله میباشد. اولین سوال آن است که آیا مسئله جواب دارد یا خیر ، برای یافتن پاسخ این سوال می توان از سیستم معادلات حاکم بر مسئله معکوس سازی به جواب رسید. دومین سوال در ارتباط با تکینگی^۱ جواب مسئله معکوس سازی مطرح می گردد. به طور خلاصه می توان گفت یکی از مشکلات اساسی مطرح در مسائل مربوط به معکوس سازی مربوط به چندگانگی ذاتی^۲ جواب مدل سازی معکوس می باشد. این چندگانگی ذاتی در هر روش مبتنی بر میدان پتانسیل استاتیک وجود دارد. بطور معمول، این چندگانگی ها در مسائل میدان پتانسیل، از دو منبع ناشی می شود. اولین دلیل مربوط به ابهام ذاتی ناشی از فیزیک مسئله می باشد که تعداد بیشماری جواب میدان پتانسیل برای یک آنومالی نتیجه می دهد [۲۱].

دومین دلیل نتیجه بکارگیری تعداد محدودی داده آلوده به نوفه است که ممکن است این داده ها شامل اطلاعات مناسبی برای وجود یک جواب یکتا نباشند [۵]. مسئله دیگری که در حل مسئله معکوس سازی مطرح می شود ، مربوط به پایداری و یا عدم پایداری جواب مسئله است. پایداری جواب مسئله معکوس سازی به وجود نوفه در داده های مشاهده شده مرتبط است. فرض کنید از دو سری داده صحرایی با اختلاف کمتر از نوفه داده ها ، دو مدل با اختلاف بسیار زیاد بدست آمده است، که در این صورت تفکیک مدل ها غیر ممکن می باشد [۲۲].

¹ Singularity

² inherent

هر مسئله معکوس سازی شامل یک رابطه بین پارامترهای مدل و داده های محاسبه شده میباشد. بدین ترتیب چهار حالت ممکن می توان برای مسئله معکوس سازی در نظر گرفت که به شرح زیر می باشد.

رابطه کاملاً خطی است، در این حالت چگالی احتمال داده های ناپایدار از نوع تابع گاوسی است.

رابطه خطی نیست، اما در همسایگی یک مدل اولیه x^0 ، به طور تقریبی خطی می شود :

$$F(x) = F(x^0) + A_0(x - x^0) \quad (4-3)$$

که رابطه بین مدل و داده های مشاهده شده بدین صورت تعریف می گردد :

$$d = F(x) \quad (5-3)$$

که در آن :

F یک عملگر غیر خطی است که بر روی یک مدل عمل می کند تا داده های فضایی شکل گیرد

و A_0 عملگر مشتق جزئی است و به صورت زیر ارائه می گردد :

$$A_0 = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x^0} \quad (6-3)$$

در این نمونه توابع، چگالی احتمال داده های بی ثبات تقریباً از نوع گاوسی است. این مورد به عنوان غیر خطی ضعیف شناخته شده است و رابطه غیر خطی گاوسی است. در این نمونه توابع، رابطه را می توان در مجاورت و همسایگی یک مدل اولیه با حداکثر احتمال خطی نمود. در این حالت یک تابع عدم انطباق¹ مینیموم، بین داده های مشاهده شده و محاسبه شده وجود دارد.

$$f(x) = f(x_{ML}) + A_{\infty}(x - x_{ML}) \quad (7-3)$$

Q شبه تابع عدم انطباق است. A_{∞} عملگر مشتق جزئی است و از رابطه زیر بدست می آید :

$$A_{\infty} = \left. \frac{\partial Q}{\partial x} \right|_{x_{ML}} \quad (8-3)$$

x_{ML} نقطه شامل بیشینه احتمال با حداقل عدم انطباق بدست می آید بنابراین مدل مدل با این

رابطه زیر بدست می آید:

¹ Misfit function

$$x_{n+1} = x_n + \delta x_n \quad (9-3)$$

که در آن x_n نقطه فعلی و x_{n+1} نقطه بعدی است. در این حالت روش های گرادیان برای رسیدن و تمرکز روی مدل بهینه اول و جهت حرکت پس از آن مورد استفاده قرار می گیرند. اشتباه و فروپاشی معکوس سازی در این نوع بیشتر از قبل است. رابطه به شدت غیر خطی است و امکان خطی شدن وجود ندارد. در این نمونه تابع چگالی احتمال عدم قطعیت داده ها از حالت گاوسی بسیار دور است. روش تحقیق تصادفی بر مبنای سعی و خطا را می توان در حل اینگونه مسائل بکار برد. به موجب آن که جوابی منحصر به فرد در تمامی حالت ها و با نقطه شروع متفاوت ارائه می دهند، در این روش ها ، کامپیوتر با تولید داده های شبه تصادفی، مثلاً از طریق روش مونت کارلو مدل ها و داده مصنوعی حاصل از آن ها را ساخته و با داده صحرایی مقایسه می نماید. ولی تمامی روش های گرادیان به جای کمینه های کلی به سمت نقاط کمینه محلی و موضعی می روند که این امر حل مسئله را با مشکل مواجه می کند. اگر میزان خطا بیش از حد تعیین شده باشد، این عمل تکرار می شود. ممکن است این عمل بار ها تکرار شود. به همین دلیل روش پر هزینه ای است.

یکی دیگر از روش های بهینه برای حل اینگونه مسائل غیر خطی، روش الگوریتم ژنتیک^۱ IGA، می باشد با همگرایی سریع، تطابق بین مدل تخمینی و مدل محاسبه شده تحقق می یابد. همچنین از دقت بالایی برخوردار است. جواب های بدست آمده در این روش، پایداری بسیار خوبی دارند. ویژگی واضح و مسلم روش IGA آن است که یافتن مدل معکوس شده به مدل اولیه بستگی ندارد و فقط باید حدودی برای هر پارامتر معکوس شده تهیه گردد. این روش بسیار گران می باشد، و در موارد خاص کاربرد دارد [۲۵].

یکی دیگر از روش ها ، الگوریتم "تونل زنی"^۲ است در این روش با همگرا شدن به نقاط حدی از طریق طرح های غیر آماری عمل می کند. روش "شبیه سازی گداخت"^۳ (یکی دیگر از روش های بهینه سازی است که ایده طرح آن از سیستم ترمودینامیکی اخذ شده است که در آن یک سیستم فیزیکی از طریق (گداختن) و سرد شدن به سمت حالت حداقل انرژی می رود [۶].

¹ Inversion genetic algorithm

² Tunnelling Algorithm

³ simulated annealing

برای مسائل غیر خطی می توان از روش کمترین مربعات مقید در تکرار های متوالی برای تعیین و تصحیح گام به گام بردار پارامتر ها استفاده کرد. در این روش می توان بردار پارامتر m را با استفاده از یک سری تخمین کمترین مربعات خطی مقید بدست آورد. به دلیل اهمیت و کاربرد آن این مبحث در بخش های بعدی به اجمال توضیح داده می شود. در این روش جواب حاصل در بازه معین از خطا (که در حدود نوفه احتمالی داده های صحرایی است) با مشاهدات تطابق دارد، اما به دلیل بحث غیر یکتایی در مسائل غیر خطی، ضمانتی وجود ندارد که جواب واقعی و بهتری وجود نداشته باشد [۲۵].

۳-۳-۱) روش های عددی برای حل مسائل معکوس سازی

در این بخش به بررسی برخی از این روش های که برای حل مسائل معکوس سازی بکار می روند می پردازیم. برای حل مسائل معکوس سازی روش های متعددی وجود دارد که بطور خلاصه به شرح زیر می باشد. [۲۶]

♦ روش کمترین مربعات

♦ گرادیان مزدوج^۱

♦ ماکسیموم آنترپی^۲

♦ تجزیه مقدار تکین

♦ شبیه سازی گداخت^۳

♦ شبکه عصبی^۴

♦ روش گرادیان

♦ کمترین شیب نزول

♦ روش های تصادفی

بطور عموم روشی که برای معکس سازی داده های مقاومت ویژه دو بعدی و سه بعدی بکار می رود بر مبنای روش بهینه کمترین مربعات تعمیم داده شده می باشد [۲۷].

¹ Conjugate-gradient

² Maximume entropy

³ Simulated annealing

⁴ Artificial neuron- networks

۳-۱-۱) معکوس سازی بر اساس روش کمترین مربعات خطی

الف) نمونه نا مقید

روش انتخابی که امروزه بطور عموم برای معکوس سازی داده های صحرایی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می شود، روش مدل سازی هموار مقید کمترین مربعات می باشد که هم برای معکوس سازی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری دوبعدی و سه بعدی بکار می رود [۲۳].

یک معادله خطی ساده را در نظر می گیریم

$$d = Gm \quad (۱۰-۳)$$

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

برای داده های بدون نویز داریم:

$$m = G^{-1} d \quad (۱۱-۳)$$

اگر فرض کنیم که خطاها (نوفه ها) جمع پذیر باشند، رابطه زیر برقرار می باشد

$$d = Gm + e \quad (۱۲-۳)$$

مجموع خطاهای تجربی e در نظر گرفته می شود. بنابر این بهترین راه برای بدست آوردن جواب

تکین، کمینه نمودن خطا با استفاده از روش کمترین مربعات می باشد.

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

تجمعی^۱ تعریف می نماییم.

معادله بالا را می توان به شکل ماتریسی نوشت، بدین ترتیب :

$$Q = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (۱۳-۳)$$

هدف آن است که Q را به کمترین مقدار برسانیم. بنابر این با مشتق گرفتن از Q نسبت به هر یک

از پارامترهای مدل m_j به این مهم می توان دست یافت. در نتیجه یک سری معادلات بدست می آید:

$$GG^T m = G^T d \quad (۱۴-۳)$$

^۱ Sum squares error

بنابراین حل کمترین مربعات بدین صورت دنبال می شود.

$$\hat{m} = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (۱۵-۳)$$

حاصل $(G^T G)^{-1} G^T$ ، اغلب معکوس تعمیم داده شده کمترین مربعات نامیده می شود [۲۳].

ب) نمونه مقید

در برخی از موقعیت ها، اطلاعات اضافی مانند اطلاعاتی که از اکتشافات پیشین بدست آمده است، در دسترس است. این اطلاعات را می توان از قوانین عمومی نیز بدست آورد. این اطلاعات اضافی را می توان در مسائل معکوس سازی تلفیق نمود. بدین ترتیب این اطلاعات معلوم جواب های ممکن مسئله را محدود می کند. بدین ترتیب این روش حل مسئله را مقید^۱ می نامند. معادلات مقید را می توان به صورت زیر مرتب نمود:

$$h = Dm \quad (۱۶-۳)$$

ماتریس D در پارامترهای مدل m ضرب می شود. تا مقادیر قبلی که بردار h را شامل می شوند بدست آید. بدین ترتیب معادله زیر را کمینه می نماییم:

$$Q = (d - Gm)^T (d - Gm) + \beta^2 (h - Dm)^T (h - Dm) \quad (۱۷-۳)$$

که در آن β ضریب نامعین نامیده می شود [۲۳].

معادله نرمال بدست آمده به صورت زیر است

$$(G^T G + \beta^2 D^T D)m = G^T d + \beta^2 D^T h \quad (۱۸-۳)$$

بنابراین با حل معادله بالا جواب زیر حاصل می شود:

$$\hat{m} = (G^T G + \beta^2 I)^{-1} (G^T d + \beta^2 h) \quad (۱۹-۳)$$

۳-۱-۲) معکوس سازی بر اساس روش کمترین مربعات غیر خطی

رابطه عمومی بین داده های مشاهده شده و پارامترهای مدل را در نظر می گیریم.

¹ Constrained

$$d = f(m) \quad (20-3)$$

برای حل مسائل غیر خطی نیاز به یک مدل آغازین m^0 می باشد. این مدل آغازین از اطلاعات در دسترس مانند زمین شناسی و غیره بدست می آید. اگر فرض کنیم که رابطه بین داده‌های مشاهده شده و پارامترهای مدل بطور ضعیفی غیر خطی باشد می توان با استفاده از روش بسط تیلور رابطه را در مجاورت مدل اولیه خطی نمود [23].

$$d - f(m) = f(m^0) + \frac{\partial f(m^0)}{\partial m}(m - m^0) + O(\|m - m^0\|) \quad (21-3)$$

در رابطه بالا $\frac{\partial f(m^0)}{\partial m}$ ژاکوبین یا J ، $f(m)$ در عبارت $O(\|m - m^0\|)$ می باشد. بدین ترتیب رابطه زیر حاصل می گردد.

$$m = m^0 + (J^T W J)^{-1} J^T W (d - f(m^0)) \quad (22-3)$$

در رابطه فوق W ماتریس وزن دهی می باشد.

یکی از روش های معمول برای حل مسائل غیر خطی، روش بهینه سازی گاوس-نیوتن است. این روش بطور گسترده ای در حل مسائل معکوس سازی منجمله در نرم افزار RES2DINV بکار می رود. روش گاوس-نیوتن، تابع زیر را به سری تیلور تبدیل می نماید. بدین ترتیب:

$$Q(m) = \|Ld - LF(m)\|^2 \quad (23-3)$$

$$Q(m) \cong Q(m^0) + \left[\frac{\partial Q(m^0)}{\partial m} \right]^T (m - m^0) + (m - m^0)^T \left[\frac{\partial^2 Q(m^0)}{\partial m^2} \right] (m - m^0) = r(m) \quad (24-3)$$

که $\frac{\partial Q}{\partial m}$ گرادیان Q نسبت به m است، و $\frac{\partial^2 Q}{\partial m^2}$ هسیان^۱ تابع می باشد. کمینه $Q(m)$ برای $m = \hat{m}$ بدست می آید.

$$\frac{\partial r(m)}{\partial m} \Big|_{n=m} = \frac{\partial Q(m^0)}{\partial m} + \frac{\partial^2 Q(m^0)}{\partial m^2} (\hat{m} - m^0) = 0 \quad (25-3)$$

از محاسبه رابطه بالا رابطه (25-3) مربوط به گرادیان $Q(m)$ حاصل می شود:

¹ Hessian

$$\frac{\partial Q(m)}{\partial m} = -2 \left(\frac{\partial F(m)}{\partial m} \right)^T L^T L (d - F(m)) \quad (26-3)$$

هدف آن است که هسیان، یعنی جمله دوم رابطه در الگوریتم گاوس-نیوتن حذف شود. یا به عبارتی رابطه زیر مساوی صفر شود.

$$\frac{\partial^2 Q(m)}{\partial m^2} = 2 \left(\frac{\partial F(m)}{\partial m} \right)^T L^T L \left(\frac{\partial F(m)}{\partial m} \right) - 2 \left(\sum_{j=1}^M (d_j - F_j(m^0)) L L^T \frac{\partial F_j}{\partial m^2} \right) \quad (27-3)$$

در نهایت، رابطه (۲۷-۳) حاصل می گردد:

$$\hat{m}_{i+1} = \hat{m}_i + \left(J_i^T L^T L J_i \right)^{-1} \left(J_i^T L L^T (d - F(\hat{m}_i)) \right) \quad (28-3)$$

۳-۱-۳ معکوس سازی پارامتری

این روش به دلیل ریاضیات آن در مواجهه با داده های نادقیق و ناکافی و متناقض فوق العاده محبوب و پرکاربرد می باشد. برداشت و مطالعات فراوانی بر پایه آن در چهار دهه اخیر انجام پذیرفته است معکوس سازی پارامتری این قابلیت را دارد که مرزهای تیز را نشان دهد بنابراین، در مدل سازی گسل ها روش بسیار مناسبی می باشد. از این شیوه در نرم افزار استفاده می شود [۳۱]. همانطور که می دانیم در مدل سازی، هر چه اختلاف بین داده های تجربی و داده های تئوری کمتر باشد، جواب های بدست آمده، از دقت بیشتری برخوردار می باشد. روش های مختلفی برای رسیدن به این هدف یعنی کمینه نمودن این خطا وجود دارد. در اینجا دو شیوه وجود دارد. در یک شیوه با فرض مدل اولیه ساده با تعداد محدود اجسام و اولیه ها و در نظر گرفتن مقاومت ویژه ضخامت و مکان، آنها را به عنوان پارامتر انتخاب و با تغییرات جزئی مدل اولیه سعی در رسیدن به کمترین خطای عدم انطباق می کنند و بنام Overparameterization موسوم بوده و منجر به حذف بسیاری از اطلاعات واقعی موجود در داده ها می گردد. در صورتی که عارضه ای بر عوارض مدل اولیه در داده ها حضور داشته باشد درون عوارض مدل مستهلک می گردد. این شیوه به شدت به مدل اولیه و نوع پارامترسازی آن و دانش اولیه زمین شناسی در مورد منطقه متکی است. شیوه دوم به نام Under parameterization، مدل را به واحدهای بسیار بیشتر از آزادی داده ها تقسیم می کند. این شیوه (مانند روش برگشت مرزی) اغلب

عوارض جعلی و اضافه بر اصطلاحات داده ها تولید کند. اگر چه این شیوه برای زمین با اجسام محدود و محیط همگن داخل هر یک آنها که تغییرات مقاومت ویژه فقط دو سوی مرزهای تیز اجسام رخ می دهد عملکرد قابل قبولی دارد ولی با افزایش پارامترها و برای ناهمگنی های ملایم مرزها و تغییرات نرم و هموار که واقعیت بسیاری از زمین ها ست جوابهایی با نوسانات خارج از کنترل و عوارض جعلی غالب بر عوارض اصلی بدست می دهد. آنومالی های پراکنده با مقاومت ویژه های غیر منطقی بسیار بالا یا پایین از این نوع است [۶،۲۵].

طبیعت مسائل معکوس سازی دادهای مقاومت ویژه و IP غیر خطی می باشد ، طبیعت پخش شونده میدان های الکتریکی و مغناطیسی در زیر زمین به طور ذاتی قادر به آوردن اطلاعات دقیق از محل مرزهای ساختارها نیست و با استفاده از روش هایی که متعقد به دریافت اطلاعات کامل هستند. منجر به عوارض و مرزهایی غیر واقعی می شود که بودن یا نبودن آنها به مقدار کمی در خطای انطباق مؤثر است. به عبارتی مسئله معکوس سازی جواب ناپایداری دارد. این غیر خطی بودن سبب ناپایداری جواب مسائل می گردد در واقع این مسائل شرطی ناپهنجار^۱ می باشند، زیرا تغییرات کوچک در دادهای مشاهده شده الگوریتم معکوس سازی را ناپایدار می نماید. و عواملی مانند آلودگی نوفه ای داده ها و انتخاب نامناسب شبکه ها ی پارامتری شده ممکن است باعث افزایش این ناپایداری شود. روش های مختلفی برای کنترل روند مسائل معکوس سازی دادهای مقاومت ویژه و IP به منظور رفع ناپایداری طراحی شده است [۳۴]. لونبرگ^۲ در سال ۱۹۴۰ در مدل سازی معکوس پارامتری نشان داد که با تصحیح پارامترهای مدل اولیه در تقریبات تیلور در هر مرحله از تکرار می توان از ناپایدار شدن مسئله و بدست آمدن نتایج غلط جلوگیری نمود این نظریه چند سال بعد توسط مارکات^۳ در سال ۱۹۶۳ و سپس توسط کنارد^۴ در سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفت و بدین ترتیب یک الگوریتم غیر خطی مناسب جهت مدل سازی داده های ژئوفیزیکی پیشنهاد گردید که امروزه به رگرسیون ریبج^۵ یا روش "مارکارت-لونبرگ" معروف می باشد که با استفاده از روش کمترین مربعات غیر خطی میرا

^۱ Ill conditioned

^۲ Levenberg

^۳ Marquardt

^۴ Kennard

^۵ ridge regression

ناپایداری مسائل معکوس سازی را رفع می نماید. کاربرد الگوریتم رگرسیون ریج زمانی از اهمیت برخوردار است که داده های مشاهده شده به شدت آلوده به نوفه باشد. با استفاده از این روش می توان پایداری در مدل سازی را افزایش داد. بدین ترتیب با یک حدس اولیه ضعیف هم می توان به سوی مدل واقعی همگرا شد. الگوریتم رگرسیون ریج به منظور مدل سازی پارامتری داده ها در نرم افزار های Ipi2win و REXIP2DI بکار می رود [۶،۲۶].

۳-۳-۱-۴) مدل سازی وارون هموار^۱

استفاده از روش مارکات-لونبرگ در معکوس سازی پارامتری برای یک زمین با تعداد لایه های زیاد باعث عدم ظهور تعدادی از لایه ها می گردد. اما این روش عیوبی نیز دارد. از جمله اینکه نتیجه بدست آمده از مدل سازی به شدت به مدل اولیه انتخابی بستگی دارد. و این امر موجب دقت بسیار در انتخاب مدل اولیه یا آغازین می باشد. هر چند که این روش به طور وسیعی در مدل سازی داده های ژئوالکتریک مورد استفاده قرار می گیرد. اما برای کنترل ناپایداری مسائل معکوس سازی روش دیگری نیز طراحی شده است که با اعمال قید هموار سازی بر مسائل معکوس سازی صورت می گیرد. این روش معکوس سازی هموار می باشد. این روش توسط کانستبل^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۷ در نظر گرفته شده است و آن را معکوس سازی اکام^۳ نامید. این روش را اولین بار برای معکوس سازی داده های یک بعدی مگنتوتلوریک و مقاومت ویژه بکار بردند. پیشنهاد جدید این بود که به جای کمینه کردن شبه تابع عدم انطباق بدون هیچ قید و شرطی مدل انتخابی گردد که با کمترین ناهموازی ممکن مقدار شبه تابع مذکور را درون بازه قابل قبولی از خطا نگاه دارد. به این ترتیب تنها عوارض ژئوالکتریکی در مدل حضور خواهند داشت که بدون عمل آنها مدل به شدت ازداده ها فاصله می گیرد. در واقع با بکارگیری روش هموار اکام می توان ناپایداری مسائل معکوس سازی را رفع نمود. ابتدا شبکه مدل سازی پیشرو مثلاً عنصر محدود به گونه ای بر روی شبکه مقاومت ویژه تعریف می شود تا

^۱ Smooth inversion

^۲ Constable

^۳ Occam

حداقل یک گره آن روی هرکدام از مرزهای مقاومت ویژه قرار گیرد. پس ناهمواری بردار پارامتری مدل m دوبعدی با کمک ماتریس دیفرانسیل گیری به شکل زیر تعریف می شود

$$R_1 = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 \quad (29-3)$$

$$R_2 = \|\partial_y^2 m\|^2 + \|\partial_z^2 m\|^2 \quad (30-3)$$

در صورتیکه در مدل سازی پیشرو از شبکه ای با لایه های بی نهایت در گوشه ها و شبکه های بی نهایت در پایین استفاده کنیم مشتق اول R_1 بهترین انطباق را با شرایط مرزی مربوطه خواهد داشت، بنابراین تنها از آن استفاده می کنیم. با فرض شبکه ای با n عنصر که شامل P عدد به عرض h در جهت افقی و ۱ عدد به طول v_i ، در جهت عمودی می باشد، ماتریس های ناهموار به شکل زیر تعریف می شوند.

$$\partial_z = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & -1 & \dots & 1 & & \\ & & & & 0 & & & \end{bmatrix} \quad (31-3)$$

∂_z ماتریس صفر با ابعاد $P \times N$ است.

$$\partial_{z(N \times N)} = \begin{bmatrix} \partial_{y1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \partial_{yz} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \partial_{yl} \end{bmatrix} \quad (32-3)$$

هرکدام از ∂_{y_i} ها یک ماتریس ناهمواری افقی $P \times P$ به شکل زیر هستند.

هر کدام از $\underline{\partial}_y$ ها پارامترهای بین واحدهای مجاور افقی را مقایسه می کنند. معیار کمترین مربعات را به شکل زیر تعریف می کنیم.

$$\chi^2 = \|\underline{W}d - \underline{W}F[m]\|^2 \quad (3-33)$$

d بردار داده ها که هر یک دارای خطای تخمین δ_i می باشند.
 $F[m]$ تابع غیرخطی پاسخ مدل و $\underline{W}$ تابع وزن دهی که با فرض استقلال خطا ها به شکل قطری قابل تعریف می باشد، هستند.

$$\underline{W} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\delta_1}, \frac{1}{\delta_2}, \dots, \frac{1}{\delta_m} \right\} \quad (3-34)$$

با فرض توزیع گاوسی خطاها و ملاحظات آماری، مقدار معیار چشمداشتی مناسب و منطقی محاسبه می گردد که با علامت χ^{*2} نشان می دهیم. مقادیر چشم داشتی بسیار کوچک، مدل هایی با ناهمواری های اضافی نه چندان مفید تولید می نمایند، در حالیکه مسئله در واقع پیدا کردن مدلی با کمترین ناهمواری ممکن است که در عین حال مقدار χ^{*2} را در حد χ^{*2} کوچک نگاه دارد. برای کمینه کردن مفید یک شبه محاسبه کمک روش ضرب کننده لاگرانژی رابطه غیرمفید زیر بدست می آید.

$$U[m] = \|\underline{\partial}_y m\|^2 + \|\underline{\partial}_z\|^2 + \mu^{-1} (\|\underline{W}d - \underline{W}F[m]\|^2 - \chi^{*2}) \quad (3-34)$$

در مدل سازی پارامتری ، سعی می شود که مدلی با بهترین انطباق با داده ها بدست آید اما در شیوه اکام بازه قابل قبول خطای عدم انطباق مدل با داده ها تعریف و معادله بالا برای مدلی با کمترین ناهمواری و عوارض ، که بین این بازه قرار گیرد. حل می شود. چون شبه تابع U غیرخطی است. ابتدا حول مدل اولیه m_1 خطی سازی می شود.

$$\underline{J} = \nabla_m F \quad (3-35)$$

$$J_{i,j} = \frac{\partial F[m]}{\partial m_t} \quad (3-36)$$

که J ماتریس $M \times N$ ژاکوبین است که عناصر آن مشتق جزئی F نسبت به مدل متناظر با آن است. پس با جایگزینی در U داریم.

$$F[m_t + \Delta] = F[mt] + J_1 \Delta + \varepsilon_0 \quad (37-3)$$

$$\Delta = m_2 - m_1 \quad (38-3)$$

با جایگزینی این روابط در معادله (34-3) معادله زیر حاصل می شود:

$$U = \|\partial_y m_2\|^2 + \|\partial_z m_2\|^2 + \mu^{-1} \left(\|\underline{W} \hat{d}_1 - \underline{W} J_1 m_2\|^2 - \chi^{*2} \right) \quad (39-3)$$

$$\hat{d}_1 = d - F[m_1] + J_1 m_1 \quad (40-3)$$

اکنون U حول m_2 خطی است. با مشتق گیری و حل برای مدلی که U را کمینه کند و تکرار روند خواهیم داشت.

$$m_{i+1} = [\mu(\partial_y^T \partial_y + \partial_z^T \partial_z) + (\underline{W} J_i)^T \underline{W} J_i]^{-1} (\underline{W} J_i)^T \underline{W} \hat{d}_1 \quad (41-3)$$

در این شیوه پاسخ مستقل از مدل اولیه است. از این رو اغلب از نیم فضایی همگن با مقاومت ویژه میانگین داده ها به عنوان مدل اولیه می توان استفاده کرد. الگوریتم مدل هموار دو بعدی داده ها با نرم افزار RES2DINV بصورت فوق می باشد [27].

۴-۳) معکوس سازی داده های IP و مقاومت ویژه

در مسائل مربوط به معکوس سازی داده های مقاومت ویژه و IP، چندین مرحله را قبل از انجام پروسه معکوس سازی باید انجام شود. این مراحل به قرار زیر می باشد :

♣ ایجاد یک مدل آغازین ، این مدل ممکن است از تحلیل دیگر داده های ژئوفیزیکی نظیر چاه نگاری، حفاری و یا اطلاعات زمین شناسی منطقه و غیره استنتاج شود.

♣ تعیین نواحی که در آن زمین واقعی به مدل آغازین نزدیک است و تعیین نواحی که اختلاف بین مدل آغازین و زمین واقعی زیاد است.

♣ اتخاذ تصمیم بر این مبنا که کدام نوع هموار سازی نیاز است. به طور مثال، در نمونه هایی که لایه ها رسوبی است، هموار سازی افقی است و مناطقی که گسل خوردگی وجود دارد هموار سازی

قائم است. فرض بعدی این نکته را روشن می سازد که کدام معیار را بکار برد، معیار کمترین مربعات

مطلق L_1 یا معیار کمترین مربعات هموار L_2 برای مدل های هموارتر معیار، مناسب است.

♣ انتخاب نواحی که در آنها هموار سازی باید متوقف گردد. مانند نواحی نزدیک به یک گسل.

♣ تعیین وزن های نسبی مؤلفه W_m یا تابع وزن دهی و به حداقل رساندن تابع ϕ_m ، تابع اختلاف

بین پارامترهای مدل و داده های تجربی [۲۷].

معکوس سازی سری داده های مقاومت ویژه و IP بطور توأم یک روند دو مرحله ای می باشد.

انجام مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP بر اساس مدل زمینی که زیگل^۱ در سال ۱۹۵۹ بیان نمود پایه گذاری شده است. بنابراین مدل زمینی توسط دو کمیت مقاومت ویژه و بارپذیری نسبت داده می شود. اما یکی دیگر از ارکان عملیات معکوس سازی داده های IP تغییرات بارپذیری نسبت به تغییرات مقاومت ویژه می باشد. بنابراین در این روند ابتدا داده های مقاومت ویژه معکوس سازی می شود تا رسانایی زمینه σ_b ، بدست آید و در مرحله بعدی با در نظر گرفتن σ_b به عنوان هدایت ویژه زمینه مقادیر بارپذیری معکوس سازی می شود. در ابتدا باید از منطقه ای که در آن عملیات صحرایی صورت گرفته است، یک دید کلی، موجود باشد. بدین منظور که با استفاده از این اطلاعات اولیه، فضای مدل را پارامتری نموده و سپس به مراحل بعدی حل مسئله معکوس سازی پرداخته می شود. به طور عموم در الگوریتم های اخیر برای معکوس سازی داده های IP و مقاومت ویژه، مدل زمینی را به تعدادی شبکه های کوچک پارامتری نموده و به هر شبکه یک سری پارامترهای ثابت فیزیکی یا هندسی نسبت داده می شود. اما در رابطه با این شبکه بندی، مشکلاتی وجود دارد. به طور خلاصه می توان گفت که اگر ساختار هدایت ویژه زمین پیچیده باشد، به ندرت می توان با استفاده از تعداد کمی شبکه، توزیع واقعی ویژگی فیزیکی خاص را بدست آورد [۲۹].

همچنین اختلاف زیادی بین نواحی دارای آنومالی هدایت ویژه بالا و پائین با تعداد شبکه های محدود وجود دارد که جواب مسئله را با خطا همراه می سازد. نحوه عملیات پارامتری نمودن در معکوس سازی داده های IP و مقاومت ویژه مشابه یکدیگر است. در مدل سازی IP و مقاومت ویژه به هر یک از شبکه ها، دو کمیت هدایت ویژه $\sigma(x,y,z)$ و بار پذیری $\eta(x,y,z)$ که هر دو مثبت

¹ Siegel

هستند را نسبت می دهیم. در معکوس سازی داده های IP و ابتدا ، داده های مقاومت ویژه مدل سازی می شود. و سپس مدل سازی داده های IP انجام می گیرد.

همانطور که می دانیم در روش IP ، جریان I به داخل زمین تزریق می شود و پتانسیل ϕ_η اندازه گیری می شود. در سیستم حوزه زمان ، جهت جریان به طور متناوب عوض می گردد ، بنابراین در یک بازه زمانی ، بین پالس های جریان تزریقی صفر است. پتانسیل اندازه گیری شده در این بازه ، یک پتانسیل خودزا می باشد و از دیدگاه ریاضی بدین ترتیب بیان می شود.

$$\phi_\sigma = F_{dc} [\sigma] \quad (42-3)$$

F_{dc} عملگر پیشرو ، ϕ_b پتانسیل خودزا می باشد و در نهایت با استفاده از مدل سازی پیشرو ، معادله زیر حاصل می گردد.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi_b) = -I \delta(r - r_s) \quad (43-3)$$

r موقعیت نقطه اندازه گیری و r_s موقعیت الکتروود جریان می باشد.

اگر زمین بار پذیر باشد، پتانسیل ϕ_η که در زمان تزریق جریان ثابت ، اندازه گیری می شود ، از ϕ_b متفاوت است. در این صورت با جایگزینی هدایت ویژه ، توسط $\sigma = \sigma(1-\eta)$ معادله زیر نتیجه می شود.

$$\phi_\eta = F_{dc} [\sigma(1-\eta)] \quad (44-3)$$

و یا

$$\nabla \cdot (\sigma(1-\eta) \nabla \phi_\eta) = -I \delta(r - r_s) \quad (45-3)$$

داده های مشاهده شده بارپذیری ظاهری IP، با معادله زیر بیان می شود.

$$\eta_a = \frac{\phi_s}{\phi_\eta} = \frac{\phi_\eta - \phi_b}{\phi_\eta} \quad (46-3)$$

یا

$$\eta_a = \frac{F_{dc} [\sigma(1-\eta)] - F_{dc} [\sigma]}{F_{dc} [\sigma(1-\eta)]} \quad (47-3)$$

بنابراین باریپذیری ظاهری با رابطه فوق بدست می آید. در ادامه هدف حل این مسئله می باشد. سه شیوه برای حل این مسئله معکوس سازی طراحی شده است. در همه این شیوه ها اولین قدم تعیین ϕ_b می باشد.

الف) شامل خطی نمودن معادله (۳-۴۷) در مجاورت رسانایی زمینه و حل مسئله معکوس سازی خطی می باشد. این روش با این فرض انجام می گردد که η خیلی کوچکتر از ۱ باشد.

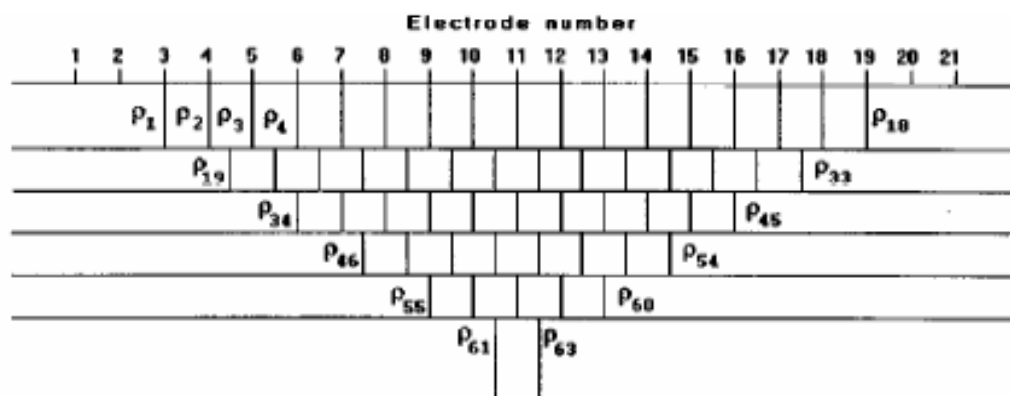
همانطور که گفته شد، مدل زمینی را به M سلول تقسیم نموده و η_i و σ_i بار پذیری و هدایت ویژه سلول i ام در نظر گرفته می شود. با خطی نمودن رابطه مربوط به ϕ_η در مجاورت رسانایی مدل σ ، معادله زیر حاصل می گردد.

$$\phi_\eta = \phi(\sigma - \eta\sigma) = \phi(\sigma) - \sum_{j=1}^M \frac{\partial \phi_\eta}{\partial \sigma_j} \frac{\partial \phi_\sigma}{\partial \sigma_j} \eta_j \sigma_j \quad (۳-۴۸)$$

با جایگزینی معادله فوق در معادله (۳-۴۷) مدل سازی معکوس داده های IP انجام می گردد. ب) در این شیوه با تعریف یک عملگر معکوس سازی F_{dc}^{-1} و بدست آوردن η با ضرب مدل های رسانایی بدست آمده پس از اعمال عملگر F_{dc}^{-1} بر ϕ_η و ϕ_b بدست می آید. ج) برای معکوس سازی داده های IP با استفاده از حل مسئله غیر خطی انجام می شود. در این شیوه لزومی بر کوچک بودن باریپذیری نمی باشد. در واقع در این شیوه مسئله معکوس سازی غیرخطی، خطی می شود. این شیوه مزیت آن را کنترل داده های باریپذیری بزرگ را دارد [۲۹]

۳-۵) روش های پر سرعت در معکوس سازی هموار دو بعدی

همانطور که می دانیم، روش حل مسائل معکوس سازی بر مبنای روش کمترین مربعات هموار مقید در برنامه های کامپیوتری از روش های کاربردی بسیار مهم است. اساس مدل سازی د ربرخی از نرم افزارها بر پایه و اصول روش کمترین مربعات مقید می باشد. مانند نرم افزار بکار رفته در پایان نامه، در این روش ها ابتدا در اولین تکرار، یک مدل همگن زمینی به عنوان مدل آغازین بکار می رود، مدل بکار گرفته شده به تعدادی شبکه مستطیلی تقسیم می گردد مانند شکل (۳-۲).



شکل (۳-۲) مدل شبکه بندی شده [۳۰]

تعداد شبکه ها برابر و یا بیش از تعداد داده ها می باشد. پارامترهای فیزیکی مورد نظر مانند مقاومت ویژه و بار پذیری به هر یک از شبکه ها نسبت داده می شود و در ادامه با انجام پروسه سعی و خطا می توان تفاضل بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری شبکه های مستطیلی مجاور رابه حداقل رساند، البته لازم به ذکر است که این شبکه های مستطیلی ، اندازه یکسانی ندارند. بلکه در برخی موارد، می توان شبکه های نازکتری را برای نزدیک به سطح و شبکه های ضخیم تر برای عمق بکار برد، بدین ترتیب مدل سازی و انجام محاسبات شامل سه مرحله می باشد.

مرحله اول : شامل محاسبه مقادیر ویژه ظاهری برای مدل اولیه انتخابی است . مرحله دوم شامل محاسبه ماتریس ژاکوبین J ، مشتقات جزئی مقادیر ویژه ظاهری است. مرحله سوم شامل حل دستگاه معادلات خطی به کمک برخی روش های عددی نظیر گرام اشمیت، تجزیه چولسکی و روش های تجزیه مقدار تکین می باشد[۳۰].

در نرم افزار RES2DINV دو فیلتر R_1 و R_2 مورد استفاده قرار می گیرند که عبارتند از :

$$R_1 = \int \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 dz \quad (۴۹-۳)$$

$$R_2 = \int \left(\frac{d^2 m}{dx^2} \right)^2 dx \quad (۵۰-۳)$$

در این رابطه، m بردار پارامترهای مدل، x فاصله افقی، z عمق این معادلات را می توان به صورت زیر تبدیل نمود.

ماتریس هموارسازی را می توان بر حسب فیلترهای R_1 و R_2 تعریف نمود.

$$R_1 = \|C_m^2\|^2 \quad (51-3)$$

$$R_2 = \|C_m^2\|^2 \quad (52-3)$$

C_m همان ماتریس هموار سازی C می باشد که ماتریس $N \times N$ است.

در پی کمینه نمودن مربعات تفاضل بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری شبکه های مستطیلی سیستم معادلات نرمال زیر حاصل می گردد. معادله زیر از معادله (3-18) که در بخش (3-3-1) قابل استنتاج می باشد.

$$J_i^T g_i = (J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) p_i \quad (53-3)$$

J_i ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی، g_i بردار تفاضل که شامل اختلاف بین لگاریتم های مقاومت ویژه ظاهری و محاسبه شده می باشد. λ_i فاکتور میرایی و p_i بردار آشفته گی پارامترهای مدل برای تکرار i ام می باشد. ماتریس هموار سازی C نیز برای فشرده سازی آشفته گی های مربوط به پارامترهای مدل به برخی مقادیر ثابت بکار می رود. مقدار فاکتور λ_i بستگی به سطح درصد نویز راندوم در داده ها دارد [31].

یکی از مشکلات اساسی در پروسه مدل سازی معکوس در برنامه های کامپیوتری محاسبه ماتریس ژاکوبین می باشد که بیشترین زمان از زمان لازم برای کل معکوس سازی به این امر اختصاص می یابد. اما می توان با استفاده از روش های بر سرعت رایانه ای به حل این مشکل پرداخت. در واقع جستجوی عناصر ماتریس ژاکوبین از مسائل مطرح در این نرم افزار ها می باشد، روش های مختلفی بدین منظور ابداع شده است می توان از روش های تسریع محاسباتی رایانه ای استفاده نمود که روش های گاوس- نیوتن و شبه -نیوتن از جمله این روش ها می باشند. برای تکرارهای متوالی، یک روش شبه-نیوتن برای تخمین مشتقات جزئی بکار می رود. که زمان انجام و فضای حافظه ای که در کامپیوتر بکار می رود نسبت به بطور تقریب 8 تا 20 برابر در مقایسه با روش مرسوم کمترین مربعات کاهش می یابد این روش حدود یک دقیقه طول می کشد تا معکوس سازی با استفاده از یک میکرو کامپیوتر با 80486 پیکسل صورت گیرد. در این روش همگرایی به مدل هدف به سرعت صورت می گیرد اما بسیار به نویز راندومی حساس می باشد. این روش ها در مرحله نخست مدل سازی، از روش های تحلیلی مدل سازی برای انجام محاسبات مشتقات جزئی مدل اولیه انتخابی استفاده می نماید. و در مراحل بعدی

نیز با روش تقریب شبه نیوتن می توان به جای روش مستقیم گوس - نیوتن ، می توان از محاسبه مجدد مشتقات جزئی پرهیز نمود [۳۲،۳۳].

۳-۵-۱) الگوریتم شبه نیوتن

گام های اصلی الگوریتم شبه نیوتن یکی از موثرترین روش ها می است که در معکوس سازی در نرم افزارهای کامپیوتری از در نرم افزار RES2DINV بکار می رود، به طور خلاصه این مراحل در الگوریتم شامل سه گام پیایی می باشد.. الف) در گام اول ، ابتدا برخی پارامترهایی که پروسه معکوس سازی را کنترل می کنند ، انتخاب می شوند . فاکتور میرایی اولیه، λ_0 ، و فاکتور میرایی کمینه ، λ_m ، برای روش کمترین مربعات انتخاب می گردد. به طور تجربی ، این نتیجه حاصل شده است که مقادیر 0.2 و 0.4 برای λ_0 و λ_m ، نتایج قابل قبول و رضایت بخشی برای بیشترین سری داده های میدانی ارائه نموده است . بیشترین عدد تکرار برای روش معکوس سازی شبه نیوتن نیز باید انتخاب شود ، این عدد تکرار یا به عبارتی تعداد تکرار ، به منظور رسیدن به یک مقدار کمینه خطای RMS^1 و همگرایی بهینه صورت می گیرد.

برای سری داده های میدانی ، سطوح دقیق نویز معمولاً مشخص نیست . بنابراین مناسب تر است که خطای RMS که به صورت زیر تعریف می گردد ، تغییر یابد.

$$e_i = \frac{1}{\varepsilon_i} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) \quad (3-54)$$

در اینجا ε_i و ε_{i+1} خطاهای RMS برای تکرارهای i و $i+1$ ام می باشند. به طور نرمال ، پروسه معکوس سازی ، زمانی که e_i کمتر از ۵ درصد باشد ، متوقف می گردد.

ب) در گام دوم یک مدل زمینی همگن به عنوان مدل آغازین بکار می رود ، برای اولین تکرار . لگاریتم مقاومت ویژه R^0 این مدل با میانگین گیری لگاریتم های مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده f_i بکار رفته در معادله زیر محاسبه می گردد .

¹ Regular standard minimum

$$r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (55-3)$$

سپس ماتریس ژاکوبین B_0 محاسبه می شود، در این معادله n تعداد نقاط داده ها است برای آرایه الکترودهای بکار رفته از مشتقات جزئی که از قبل محاسبه شده اند و در فایل دیسک ذخیره شده می باشند.

پس معادله کمترین مربعات پارامتر مدل بردار آشفستگی P_0 حل می شود. بردار P_0 به صورت زیر تعریف می شود. r_1 تخمینی است که از مقاومت ویژه بلوکها ارائه می شود.

$$r_1 = r_0 + P_0 \quad (56-3)$$

ماتریس J_i بوسیله یک مقدار تقریبی B_i جایگزین می گردد. گام سوم (این مرحله شامل روش برویدن¹ است که برای هماهنگ نمودن تقریب ماتریس ژاکوبین B_{i+1} برای تکرار بعدی بکار می رود.

$$B_{i+1} = u_i m_i^T \quad (57-3)$$

$$u_i = \frac{(\Delta y - B_i m_i)}{m_i^T m_i} \quad (58-3)$$

در این رابطه $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ می باشد، و y_i جواب مدل در تکرار i ام می باشد. در واقع در این روش ماتریس ژاکوبین در تکرار اول تخمین زده شده و در تکرارهای بعدی تعدیل می گردد.

به طور نرمال اگر خطای RMS نسبت به تکرار قبلی کاهش یافته باشد، فاکتور میرایی به نصف

کاهش می یابد، اما با این شرط که این مقدار هنوز کمتر از مقدار کمینه λ_m در گام الف باشد. اگر خطای RMS بزرگتر از مقدار بدست آمده در تکرار پیشین باشد، با استفاده از روش های کاربردی نرم افزار مقدار بهینه بردار آشفستگی پارامتر P_i تعیین می شود بدین منظور که یک مدل با خطای RMS کمتر حاصل شود. اما اگر این روش نتیجه نداد، فاکتور میرایی λ ، افزایش داده می شود و بردار P_i مجددا محاسبه می گردد.

¹ Broyden

گام چهارم (پارامتر بردار آشفته‌گی P_{i+1} توسط به کار گیری ماتریس ژاکوبین تخمین زده شده B_{i+1} در معادله (۳-۵۷) محاسبه می شود.

گام های سوم و چهارم تا همگرایی برنامه یا تعیین بزرگترین عدد تکرار به طور مرتب انجام میشود [۳۴،۳۵].

۶- نرم افزار RESIXIP2DI

این نرم افزار یک نرم افزار گرافیکی است که در محیط ویندوز قابل اجرا نمی باشد. این نرم افزار برای مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مقاومت ویژه و IP طراحی شده است. در این بسته نرم افزاری یک مدل تعمیم داده شده دو بعدی برای محاسبه پاسخ های تئوری پارامتر های مدل بکار میرود. این نرم افزار داده های بدست آمده از آرایشهای ونر، شلومبرژه، قطبی - قطبی، دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی را پوشش می دهد. شبکه بندی شامل واحدهای مثلثی چهارگانه درون هر مستطیل می باشد. از این رو این نرم افزار نه تنها در پی گیری انحنای توپوگرافی از نرم افزار RES2DINV بهتر عمل می نماید، بلکه مدل نهایی و آنومال های آن با قدرت تفکیک بیشتر ارائه می گردد [۶]. مدل پلیگون این امکان را ایجاد می نماید که مدل های آغازین برای انجام مدل سازی معکوس ایجاد شود. این مدل هارا می توان به صورت چند ضلعی و لایه ای در نظر گرفت. به هر یک از مدل های آغازین پارامترهایی اختصاص داده می شود و در مراحل بعدی با تعدیل این پارامترها می توان به مدل نهایی همگرا شد. البته می توان بعضی از پارامترهای مدل اولیه را آنچنان تحت فشار^۱ قرار داد که عمل معکوس سازی نتواند آنها را تعدیل کند. (این پارامترها آزاد نباشند و طی معکوس سازی مقدار آنها تغییر نکند) [۳۷].

این پارامترها ویژگی های فیزیکی مدل مانند مختصات رئوس چند ضلعی، مقاومت ویژه و IP می باشد. در مدل پلیگون حداکثر می توان تا ۱۰۰ چندضلعی که بطور مجموع شامل ۱۰۰۰ ضلع می باشند در نظر گرفت. داده های مقاومت ویژه ظاهری می توانند بدون داده های پلاریزاسیون القایی در این نرم افزار تفسیر شوند. مدلسازی معکوس این توانایی را ایجاد می کند که بهترین مدل برازش شده

^۱ Fix or freezing

روی داده ها را با استفاده از روش کمترین مربعات بدست آورد. این عمل با استفاده از الگوریتم رگرسیون ریج نیز انجام می شود [۳۷].

اگر مدل های اولیه شامل هر دو سری داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه باشند، این نرم افزار قادر است بالغ بر ۷ لایه را تشخیص دهد. و چنانچه داده های مدل اولیه، فقط شامل داده های مقاومت ویژه باشند، نرم افزار قادر است ۱۰ لایه را تمایز دهد. شبکه بندی عنصر محدود، مهمترین بخش پروسه مدل سازی را شامل می شود. مدل سازی پیشرو این امکان را مهیا می سازد که مقادیر مقاومت ویژه و IP محاسبه شده را برای شبکه های مدل محاسبه نماید. و بنابر این می توان براساس این مقادیر شبه مقاطع داده های محاسبه شده را بدست آورد. در این نرم افزار پاسخ تئوری مدل با استفاده از روش عنصر محدود هموار که توسط^۱ در سال ۱۹۷۷ توسعه یافته است، بدست می آید. یکی از قابلیت های RESIXIP2D امکان فراخوانی نتایج مدل سازی از نرم افزارهای دیگر است. بدین ترتیب نتایج منسجم تری حاصل می شود [۳۷].

مدل سازی هموار در این نرم افزار این امکان را ایجاد می نماید که بصورت خودکار بتوان داده های مقاومت ویژه و یا بارپذیری را در شکل مدل هموار، تا ۱۰ لایه تفسیر نمود. عمقها در مدل بصورت بازه های لگاریتمی نشان داده می شوند [۵].

همچنین این نرم افزار قادر به انجام دو شیوه کلی مدل سازی معکوس می باشد. در شیوه اول بدون تعریف مدل اولیه با تقسیم مدل به شبکه ای با تعداد زیاد واحدهای مثلثی و انجام مدل سازی وارون بر مبنای روش برگشت مرزی یا هموار اکام^۲ به دلیل ایجاد پایداری در مدل بدست آمده بسیار موثر می باشد. [5]. معکوس سازی هموار سریع بر مبنای روش کمترین مربعات با استفاده از روش های بهینه غیرخطی که توسط بارکر^۳ و لوک^۴ بطور کلی در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است و برای محاسبه ماتریس ژاکوبین می توان از روشهای تسریع محاسبه ژاکوبین مرحله اول و روش شبه نیوتن در تکرارهای بعدی استفاده نمود [۳۷]. همچنین در محاسبه عامل میرایی^۵ یا تکثیر کننده لاگرانژی می

¹ Rijo

² occam

³ Barker

⁴ Loke

⁵ Damping factor

توان از جستجوی کامل و یا روشهای سریعتر تقریبی دیگر استفاده نمود. در مورد قید هموار امکان وزن دهی بیشتر به مرزهای افقی یا عمودی ساختارها وجود دارد. این نرم افزار قادر به انجام تصحیحات توپوگرافی بر روی شبکه مدلسازی نیز هست که به نام مدل زونگ ارائه شده است. این مدل سازی بر پایه الگوریتمی مشابه روش اصلاح شده هموار اولدنبرگ و لی عمل می کند. تنها تفاوت بجز مدل سازی پیشرو و عنصر محدود، اعمال توپوگرافی بر روی شبکه است. الگوریتم کامل مدل زونگ از نرم افزار TS2DIP اقتباس شده است [۵].

انجام تمامی این روشها بر روی یک شبه مقطع می تواند درک بهتری از عوارض اصلی مدل که واقعاً ناشی از داده ها بوده و ساخته های جعلی فرضها و قیود نظری ما نیستند، ارائه دهد. از این رو آنومالی هایی که در مدل های مختلف و روشهای مختلف حضور دارند به احتمال زیاد واقعی و مستقل از نویزها می باشند. در شیوه دوم مدل سازی وارون، نرم افزار از تعداد محدودی چند ضلعی های دو بعدی و لایه برای ساختن مدل و محاسبات پیشرو استفاده می کند. این مدل باید توسط کاربر تعریف شده و نزدیک به واقعیت زمین باشد. به دلیل تعداد واحدهای کم مدل در این شیوه دقت بالایی در تعریف مدل اولیه باید صورت گیرد و عملاً بسیاری از اطلاعات داده ها که در مدل اولیه منظور نشده باشند، تاثیری بر مدلسازی نخواهند داشت. در عوض در صورتی که خواهان ارائه مدلی با آنومالی های برجسته و مرزهای کاملاً مشخص باشیم، شیوه ای مطلوب می باشد. اغلب با راهنمایی مدل حاصل از شیوه قبلی کار تعریف مدل چند ضلعی انجام می گیرد. سپس با آزاد گذاشتن بعضی پارامترهای مدل و ثابت کردن بعضی دیگر، به نرم افزار اجازه می دهیم که بدنبال پارامتری با کمترین خطای ممکن، در نزدیکی پارامترهای آزاد قبلی، باشد. پس از یافتن پارامتر جدید، محاسبات پیشرو دوباره انجام و نرم افزار در محدوده خاصی اطراف مقدار جدید، جستجو را ادامه می دهد. بدین ترتیب الگوریتم با پرشهای کوچک روی مقادیر جدید در فضای پاسخ و جستجوی مدلی با خطای کمتر حول آن ادامه می یابد. کار با پارامترها در این شیوه ظریف و زمانبر است. آزاد کردن تعداد زیادی پارامتر، به معنی سردرگمی نرم افزار در انتخاب راههای بسیار میان مدلها برای رسیدن به مدل بهینه است که باید از آن پرهیز شود. از این نظر کاربر نقشی اساسی در هدایت نرم افزار با تقدم و تاخر آزادسازی پارامترها

¹ Zonge

دارد. نداشتن درک تقریبی قبلی از جواب نهایی و اطلاعات جانبی دیگر در این شیوه باعث گمراه شدن کاربر خواهد شد [۳۷].

۷-۳ نرم افزار RES2DINV

RES2DINV نرم افزار گرافیکی است که تحت ویندوز عمل می نماید. نرم افزار RES2DINV توسط لوک^۱ طراحی شده است. و بطور خودکار مدل دوبعدی داده های صحرایی مقاومت ویژه و قطبش القائی را بدست می آورد. در این نرم افزار بطور معمول مدل سازی پیشرو عنصر محدود و تفاضل محدود برای محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری بکار می رود و پس از آن شیوه بهینه کمترین مربعات برای معکوس سازی داده ها استفاده می شود. به منظور استفاده از این نرم افزار در ابتدا داده ها طبق فرمت خاص برنامه، در یک فایل با پسوند txt ذخیره می گردد. مدل سازی پیشرو با استفاده از روش عنصر محدود یا تفاضل محدود قابلیت مدل سازی داده های بدست آمده در عملیات صحرایی با تعداد تقریبی ۱۶۰۰۰ الکتروود و ۲۱۰۰۰ داده را دارا می باشد. این برنامه را می توان برای مدل سازی داده های بدست آمده از آرایش های مختلفی مانند وئر، شلومبرژه، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی، دوقطبی استوایی و گرادیان بکار گرفت. حتی می توان نرم افزار را برای آرایش های دیگر نیز برنامه ریزی نمود. برای شروع نرم افزار از مدلی با شبکه های مستطیلی استفاده می نماید که تعداد و چینش داده ها مطابق توزیع داده های صحرایی می باشد. به دلیل استفاده از شبکه های مستطیلی، امکان استفاده از تمامی روش های تصحیحات توپوگرافی روی شبکه وجود دارد. این برنامه قابلیت انجام مدل سازی داده های برداشتی دریایی و درون چاهی را نیز دارا می باشد. یکی از محاسن بکارگیری این نرم افزار عدم نیاز به دادن مدل آغازین توسط کاربر برای انجام مدل سازی می باشد، زیرا نرم افزار بصورت پیش فرض مدل اولیه را یک زمین همگن در نظر می گیرد. [۳۸].

این نرم افزار تنها بر اساس الگوریتم هموار اوکام عمل می نماید. در این نرم افزار مدل سازی با استفاده از روش کمترین مربعات هموار مقید انجام می پذیرد. روشهای تسریع محاسبات نظیر محاسبات تقریبی ماتریس ژاکوبین در مرحله اول و شبه نیوتن در مراحل بعدی قابل انتخاب است.

1 Loke

روش شبه نیوتن ۱۰ برابر سریع‌تر از روش کمترین مربعات نسبی می‌باشد. و برای سری داده‌های بزرگ نیاز به حافظه کمتری دارد. همچنین می‌توان روش گاوس-نیوتن را نیز بکار برد. این روش از شبه نیوتن آهسته‌تر می‌باشد، اما در نواحی با کنتراست^۱ مقاومت ویژه ۱۱ الی ۱۰ اهم-متر، نتایج بهتری ارائه می‌دهد و بطور کل دقت بیشتری در انجام مدل‌سازی دارد. انتخاب عامل میرایی و بعضی راهکارهای جانبی دیگر که به سرعت بیشتری می‌انجامد نیز در این نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. نرم افزار مقاطع گوناگونی را تهیه و نمایش می‌دهد. علاوه بر مدل نهایی، مقاطع حساسیت و عدم قطعیت واحدها قابل محاسبه هستند. در این برنامه امکان استفاده از دو معیار L_1 و L_2 وجود دارد. امکان انتخاب معیار کمترین انحراف مطلق به جای معیار مرسوم کمترین مربعات وجود دارد. علاوه بر مدل نهایی، مقاطع حساسیت و عدم قطعیت واحدها قابل محاسبه هستند. امکان انتخاب معیار کمترین انحراف مطلق یا روش بهینه با معیار L_2 به جای معیار مرسوم کمترین مربعات یا معیار L_1 وجود دارد. یکی از مزایای این نرم‌افزار قابلیت تنظیم فاکتور میرایی و فیلترهای هموارسازی برای انواع سری داده‌ها می‌باشد. این معیار مدل بسیار بهتری برای زمین‌هایی که دارای مرزهای بسیار تیز و تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه می‌باشند، ارائه می‌نماید. از دیگر ویژگی‌های این نرم افزار امکان تغییر عرض واحدها به نصف فاصله الکترودی است که بنا بر تجربیات نتایج بهتری با نوسانات حجمی کمتر مدل بدست می‌دهد، همچنین با افزایش عامل میرایی برای نواحی خاص در مدل می‌توان میزان تغییرات مقاومت ویژه را با توجه به اطلاعات دقیق قبلی از آن نقاط تقریباً ثابت نگه داشت. در مجموع این نرم افزار اگر چه از انتخابهای گسترده تری نسبت به RESIXIP2DI برخوردار است، اما تکیه بیش از حد آن بر قید هموار بودن در الگوریتم پیشنهادی، همچنین استفاده از شبکه مستطیلی باعث شده تا مدل نهایی بسیار کلی بوده و قادر به تفکیک آنومالی‌های نزدیک به هم و ارائه مرزهای آشکار آنها نباشد [۵]. یکی از مزایای این روش آن است که فاکتور میرایی و فیلترهای هموارسازی را می‌توان برای انواع مختلف از سری داده‌ها تنظیم نمود در این برنامه، می‌توان روش گاوس-نیوتن مرسوم را که پس از هر تکرار ماتریس ژاکوبین را مجدداً محاسبه می‌نماید، بکار برد. نکته قابل توجه دیگر آن است که می‌توان روش گاوس-نیوتن را برای ۲ یا ۳ تکرار پس از بکار بردن روش شبه نیوتن استفاده

^۱ Contraste

نمود. بدین ترتیب نتیجه بهتری حاصل می گردد [۳۸]. مدل زیر سطحی دو بعدی در این برنامه را به شبکه های مستطیلی تقسیم می نماید. هدف در این برنامه تعیین مقاومت ویژه شبکه های مستطیلی است که یک شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری را ایجاد می نمایند که با داده های خام مشاهده شده هماهنگ می باشد. برخی موارد برای آرایش های شلومبرژر و ونر، ضخامت لایه اول شبکه ها را، نصف فاصله الکترودی در نظر گرفته می شود. کاربر می تواند عمق لایه ها را بطور دستی تغییر دهد. بطور اساسی ضخامت شبکه ها برای آرایش های قطبی-قطبی و دو قطبی-دو قطبی محدود ۰/۶، ۰/۳ و ۰/۹ برابر فاصله الکترودی در نظر گرفته می شود. اما ضخامت لایه های عمیق تر بطور متوالی، با ۱۰٪ الی ۲۵٪ لایه های بالایی افزایش می یابد. در بهترین روش سعی بر آن است که تفاضل بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و محاسبه شده با مرتبط نمودن مقاومت ویژه شبکه های مدل به حداقل رساند. سنجش این تفاضل توسط خطای RMS یا ریشه میانگین مربعی انجام می پذیرد. هر چند که مدل با کمترین خطای ممکن RMS را می توان اغلب بزرگ نشان داد. اما این مدل مقاومت ویژه ممکن است که همیشه بهترین مدل نباشد. از این رو بطور عموم از منظر زمین شناسی بهترین مدل پس از هر تکرار خطای RMS نباید بطور قابل توجهی تغییر نماید. بطور معمول بهترین مدل بین تکرار ۳ و ۵ واقع می شود. در هر نمونه از مدل سازی داده ها مدل مقاومت ویژه بدست آمده در آخرین تکرار کمترین RMS برای مدل سازی معکوس سری داده های قطبش القایی بکار می رود. اگر مدل مقاومت ویژه یک نمایش واقعی از مقاومت ویژه زیر سطحی زمین ارائه دهد، این شیوه موثرترین شیوه می باشد. در معکوس سازی سری داده ها اگر تعداد تکرار ها برابر یا بیش از ۵ باشد، مدل محاسبه شده می تواند شامل انحرافات شود. این بدان علت است که معکوس سازی بر پایه تعداد محدودی از نقاط داده ای استوار می باشد. انحراف زمانی بیشتر می گردد که داده شامل نویز باشد. بیشتر کاربرها تمایل به انجام بیشترین تکرار را دارند، تا RMS را کاهش دهند. اگر یک مدل مقاومت ویژه شامل انحراف در مدل سازی معکوس داده های قطبش القایی بکار می رود، این انحراف بر مدل قطبش القایی در تمام تکرار های بعدی اثر می گذارد. معکوس سازی بکار رفته در این برنامه بر مبنای یک روش گام به گام می باشد. معکوس سازی سری داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در این روش هنوز بطور جداگانه انجام می شود. هر چند که پس از یک تکرار معکوس سازی داده های، فوراً یک تکرار معکوس سازی داده های قطبش القایی صورت می گیرد. و بدین ترتیب مدل مقاومت ویژه

بدست آمده در یک تکرار مخصوص داده‌های مقاومت ویژه برای معکوس سازی داده های قطبش القایی در همان تکرار بکار می رود. در واقع بدین علت که مدل های مقاومت ویژه در تکرارهای اولیه به سبب حضور نوفه در داد ها کمتر انحراف دارند. مدل های قطبش القایی نیز کمتر تحت تاثیر نوفه واقع می گردند و انحراف بین مدل داده های خام و محاسبه شده کمتر می باشد. یکی از مشکلات عمومی در مدل سازی حضور نقاط داده های بد در سری داده ها می باشد. در این نرم افزار می توان مقادیر مقاومت ویژه ظاهری بالا و پایین را کنترل نمود و در صورت لزوم با حذف این مقادیر به رفع این مشکل کمک نمود. خطای مربوط به مقادیر بالا و پایین را می توان به خطای ابزار و تجهیزات اندازه گیری در طی برداشت‌های صحرایی و یا اتصال الکتروودی ضعیف در زمین خشک و ماسه ای یا سنگی نسبت داد.

در معکوس سازی هموار کاربر می‌تواند پارامترهای مدل را تغییردهد. با استفاده از اطلاعات حاصل از منابع دیگر مانند زمین شناسی منطقه و حفاری های انجام شده در منطقه مورد مطالعه، می توان دقت مدل سازی را به کمک این نرم‌افزار افزایش داد.

حال که با تئوری مدل‌سازی عددی و طرز کار نرم‌افزارهای مورد استفاده و مزایا و معایب آنها آشنا شدیم در فصل بعد داده های مورد نظر را به کمک نرم‌افزار های فوق مورد مدل‌سازی قرار می‌دهیم تا محل‌های کانی‌سازی شده احتمالی بطور بارزتری موردشناسایی قرار گیرند [۳۸،۶].

فصل چهارم

مدل سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه و

IP و تفسیر نتایج حاصل

۴-۱) مقدمه

در این مبحث مدل سازی معکوس هموار و پارامتری داده های مقاومت ویژه و IP انجام می شود و نتایج مدل سازی معکوس هموار بدست آمده از نرم افزار RES2DINV Ver.3.50 و نتایج مدل سازی معکوس پارامتری داده های مقاومت ویژه و IP بدست آمده از نرم افزار RESIXIP2DI، بررسی و مقایسه می شود. در نهایت با توجه به اطلاعات زمین شناسی منطقه و سایر اطلاعات در دست، گسترش و عمق آنومالی هدف، تعیین و بدین ترتیب نقاط حفاری نیز پیشنهاد می گردد.

۴-۲) موقعیت جغرافیایی و اقلیمی منطقه اکتشافی

کانسار اکتشافی سرب و روی در ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان شاهرود و در مختصات جغرافیایی ۳۹° ۳۶' شمالی، در نزدیکی شهر مجن در منطقه ای کوهستانی واقع شده است. نزدیکترین روستا به این کانسار روستای تاش از توابع شهر مجن می باشد. برای رسیدن به محل کانسار باید از جاده آسفalte شاهرود روستای تاش به طول تقریبی ۳۰ کیلومتر استفاده کرد. کروکی تقریبی برای دسترسی به کانسار مورد مطالعه در شکل (۴-۱) مشاهده می شود. همچنین مشخصات جغرافیایی محدوده اکتشافی در جدول (۴-۱) درج شده است [۱].

جدول (۴-۱) مختصات جغرافیایی رئوس منطقه برداشت [۷].

رئوس	A	B	C	D
طول جغرافیایی	۵۴ ۴۰ ۵۵	۵۴ ۴۰ ۵۵	۵۴ ۳۵ ۰۰	۵۴ ۳۵ ۰۰
عرض جغرافیایی	۳۶ ۳۰ ۵۵	۳۶ ۳۲ ۰۰	۳۶ ۳۲ ۰۰	۳۶ ۳۰ ۵۵

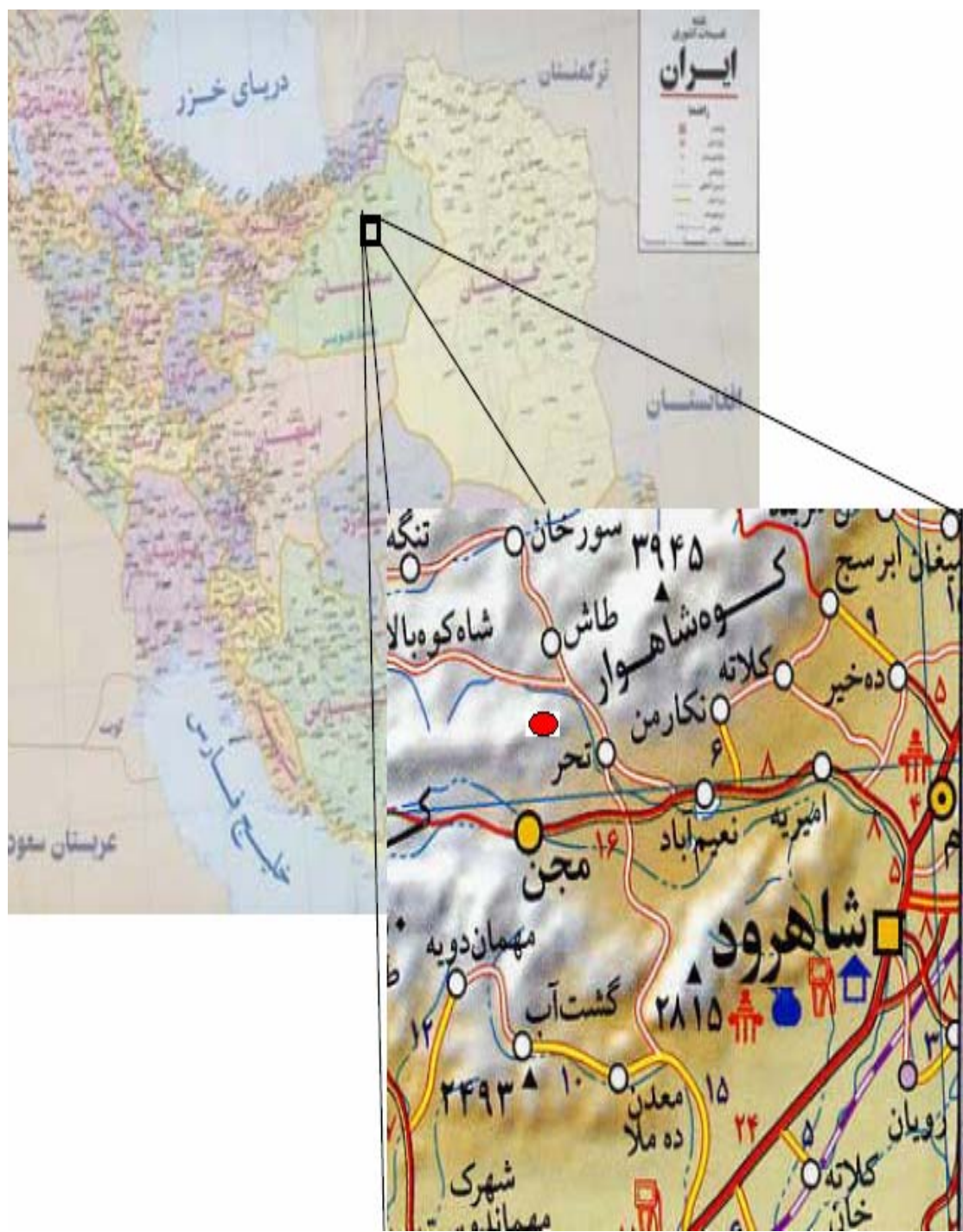
۳-۴) سوابق معدنکاری قدیمی در منطقه

در حوالی محدوده مورد مطالعه کارهایی معدنکاری در قدیم بر روی سرب و روی انجام شده که قدمت آن به حدود ۴۵ تا ۵۰ سال پیش باز می گردد در گذشته رگه های پرعیار ماده معدنی شناسایی گردیده و حفاریات معدنی بر روی آنها صورت گرفته است به طور کلی عملیات که به عنوان کارهای قدیمی شناخته شده اند شامل :

۱- در منطقه کوه برفکی ۵ دهانه تونل قدیمی مورد شناسایی قرار گرفته اند . که مجموعاً به طول حدود ۱ کیلومتر می باشند.

۲- در منطقه یورت بابا کارهای 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 می شود. از بین آنها تعداد ۳ دهانه تونل تقریباً سالم مانده که مجموعاً طول معادل ۴۰۰ متر را شامل می شود.

۳- در بخشهای دیگر محدوده آثاری از وجود اکلونها، چاهها و دویلهای مختلفی مشاهده می شود که بدلیل عدم وجود نقشه های آنها و بعضاً بسته شدن دهانه بعضی از آنها امکان بررسی داخلی آنها امکانپذیر نمی باشند [۷].



شکل (۴-۱) حدود قرار گیری کانسار مورد مطالعه [۷].

۴-۴) زمین شناسی کانسار در محدوده مورد مطالعه

کانسار روی و سرب برفکه در زون البرز شرقی واقع شده و توالی چینه‌شناسی منطقه را سنگ‌های رسوبی و ولکانیکی- رسوبی تشکیل می‌دهند. سازند شیلی و ماسه سنگ شمشک قدیمترین واحد چینه‌شناسی و سازند توفی و گذاره‌ای کرج، جوانترین سازند منطقه هستند. ماده معدنی به صورت اپی‌ژنتیک و استراتاباند در سازند آهکی لار با سن ژوراسیک بالایی قرار دارد. این سازند به صورت تکتونیکی و رورانده در مجاورت سازنده کرج و به صورت ناپیوسته در کنار سازند شمشک قرار دارد ماده معدنی به شکل عدسی و رگه‌ای حفرات کارستی و شکستگی‌های موجود را پر کرده است [۸].

۴-۵) کانی شناسی، بافت و ساخت کانسار

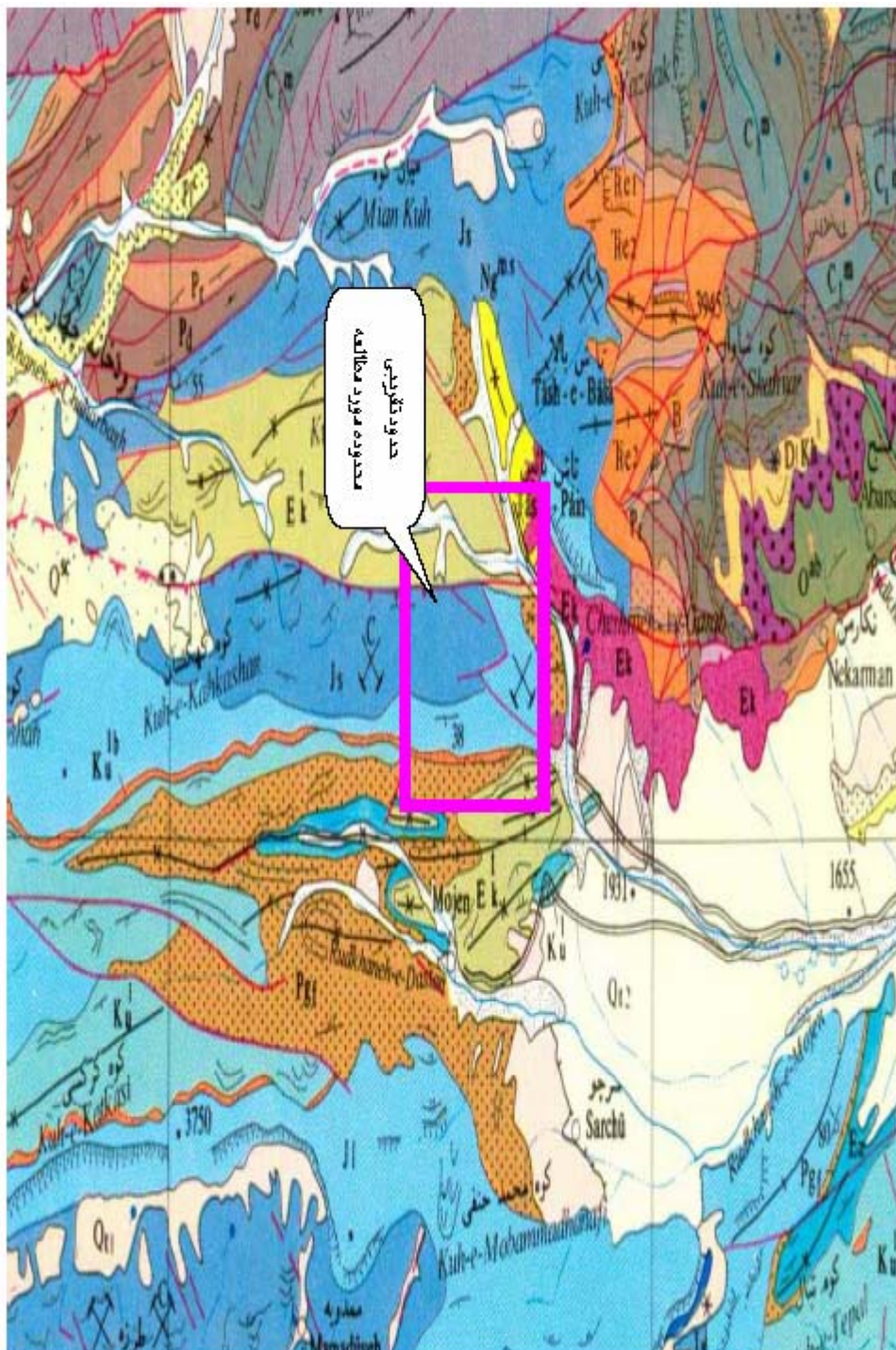
مطالعات مختلف کانی شناسی، نشان می‌دهد که اسمیت زونیت، همی مورفیت و کالامین از کانی‌های روی، گالن و سروزیت از کانی‌های سرب، کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این کانسار هستند. اسمیت زونیت فراوان‌ترین کانی تشکیل‌دهنده کانسار است و بر خلاف انتظار هیچگونه اثری از اسفالریت، چه در نمونه دستی و چه در مطالعات میکروسکوپی و XRD مشاهده نشده است. کالامین بعد از اسمیت زونیت دومین تشکیل‌دهنده اصلی کانسار است. گالن نسبتاً کم و در بعضی افق‌ها، مشاهده می‌شود. شواهد میکروسکوپی دلالت بر جانشینی آن توسط کربنات‌های کلسیم، سرب و روی می‌باشد. در بخش غربی منطقه (پورت بابا) گالن نسبتاً فراوان است. سروزیت بسیار اندک و به صورت بافت گل کلمی و کلو فورم در داخل فضاهای خالی و شکستگی‌ها ظاهر می‌شود. کانی‌های فرعی شامل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از جمله هماتیت، گوتیت و لمونیت است که در افق‌های خاص، جایی که کانی‌های سرب و روی از فراوانی کمتری برخوردارند، تجمع دارند. کانی‌های باطله شامل آراگونیت، کلسیت، دولومیت، کوارتز و کانی‌های رسی هستند. در ادامه به طور اختصار به شرح هر یک از آنها می‌پردازیم.

اسمیت زونیت: عمده‌ترین کانی سازنده کانسار است که به شکل عدسی و توده‌ای خیلی دانه‌ریز حفرات و فضاهای خالی موجود را پر کرده است. گاهی به صورت بلورهای دانه ریز و بافت گل کلمی یا کلو فورم و گاهی به صورت لامینه‌های خیلی ریز ظاهر می‌شود.

همی مورفیت: دومین کانی فراوان روی در این کانسار است که به صورت خیلی دانه‌ریز، حتی پودر مانند و به رنگ سفید دیده می‌شود. تشخیص آن در صحرا با مشخصات ظاهری (پودر سفید رنگ) و همچنین توسط دیفراکسیون اشعه اکسیون اشعه ایکس صورت گرفت.

گالن: تنها کانی سولفور در این کانسار است و نسبت به اسمیت زونیت و همی مورفیت از فراوانی کمتری برخوردار است (در قسمت غربی منطقه، یعنی معدن یورت بابا از فراوانی بالایی برخوردار است و کانی اصلی کانسار محسوب می‌شود). گالن به‌ندرت ذرات دانه درشت تشکیل می‌دهد و در اغلب موارد از حاشیه‌ها توسط کانی‌های کربناته جانشین شده است. غالباً به‌صورت بلورهای دانه‌ریز دیده می‌شود. عدم وجود اسفالریت، فراوانی کم گالن و جانشینی گالن از حاشیه‌ها شواهد انجام پدیده جانشینی در کانسار است. نظر به اینکه اسفالریت در شرایط اکسیدان پایداری کمتری نسبت به گالن دارد، لذا احتمالاً به‌صورت اولیه وجود داشته ولی در ادامه توسط اسمیت زونیت و سایر کانی‌های ثانویه جانشین شده است.

سروزیت: این کانی نسبت به اسمیت زونیت و کالامین، فراوانی کمتری دارد و ظهور آن بیشتر به‌صورت تبلور در سطوح شکستگی‌ها و یا سطح کانی‌های دیگر و به حالت بافت کلو فورم است. مهمترین کانی‌های باطله در این کانسار شامل آرگونیت، کلسیت، دولومیت، کوارتز، کانی‌های رسی و گوتیت است [۸]. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و راهنمای آن را به ترتیب در شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) مشاهده می‌نمائید.



شکل (۴-۲) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۷].

۴-۶) ژنز کانسار

ضمن مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی مشخص شد که ماده معدنی به صورت اپی ژنتیک و استراتاباند در داخل حفرات انحلالی و شکستگی های موجود در آهک دولومیتی سازند لار جایگزین شده است. کانی سازی در منطقه به صورت تجمعات کوچک و پراکنده می باشد به طوری که در یک مساحت محدود تعداد زیادی تمرکز مشاهده می شود. کانی سازی در یک حوضه فورلند صورت گرفته و شورابه های تکتونیکی، شورابه های عمیق حوضه و آب فیلتر شده از داخل شیل های سازند شمشک نقش اساسی در انتقال عناصر به حاشیه حوضه داشته اند. حرکت محلول در امتداد شکستگی ها، گسل ها و احتمالاً از طریق تخلخل ماسه سنگ های سازند شمشک صورت گرفته است. به طور کلی از نظر ژنتیکی چند ویژگی اساسی را برای این کانسار می توان عنوان نمود که عبارتند از:

- سنگ میزبان از نوع کربناته و شامل آهک و دولومیت سازند لار است.
- کانسار از نوع اپی ژنتیک است. شواهد ساختمانی و بافتی ماده معدنی، مخصوصاً بافت پراکنده فضای خالی گویای این مدعاست.
- هیچ گونه شاهدی دال بر ارتباط آن با فعالیت آذرین و آتشفشانی در منطقه مشاهده نمی شود.
- کانی شناسی از نوع ساده و عمدتاً شامل اسمیت زونیت، همی مورفیت، گالن و سروزت است. به استثنای گالن سایر کانی ها به صورت ثانویه تشکیل شده اند که نشان دهنده وقوع پدیده اکسیداسیون و دگرسانی شدید بعد از مرحله کانی سازی اولیه است. احتمالاً کانی سازی اولیه به صورت سولفور (گالن و اسفالریت) بوده است.
- تبلور مجدد آراگونیت، کلسیت و دولومیت در دیواره رگه ها و حفرات کانی سازی شده صورت گرفته است.
- بافت ماده معدنی متغیر است و از دانه درشت تا دانه ریز (در مورد گالن صادق است) تغییر می کند.
- ماده معدنی به شکل توده های عدسی شکل و رگه ای در ابعاد کوچک ولی تعداد زیاد و پراکنده در منطقه ای وسیع دیده می شود.
- با توجه به نوع کانی های موجود می توان حدس زد که ماده معدنی از یک محلول گرم دمای پایین ته نشین شده است که دمایی حدود ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد داشته است.

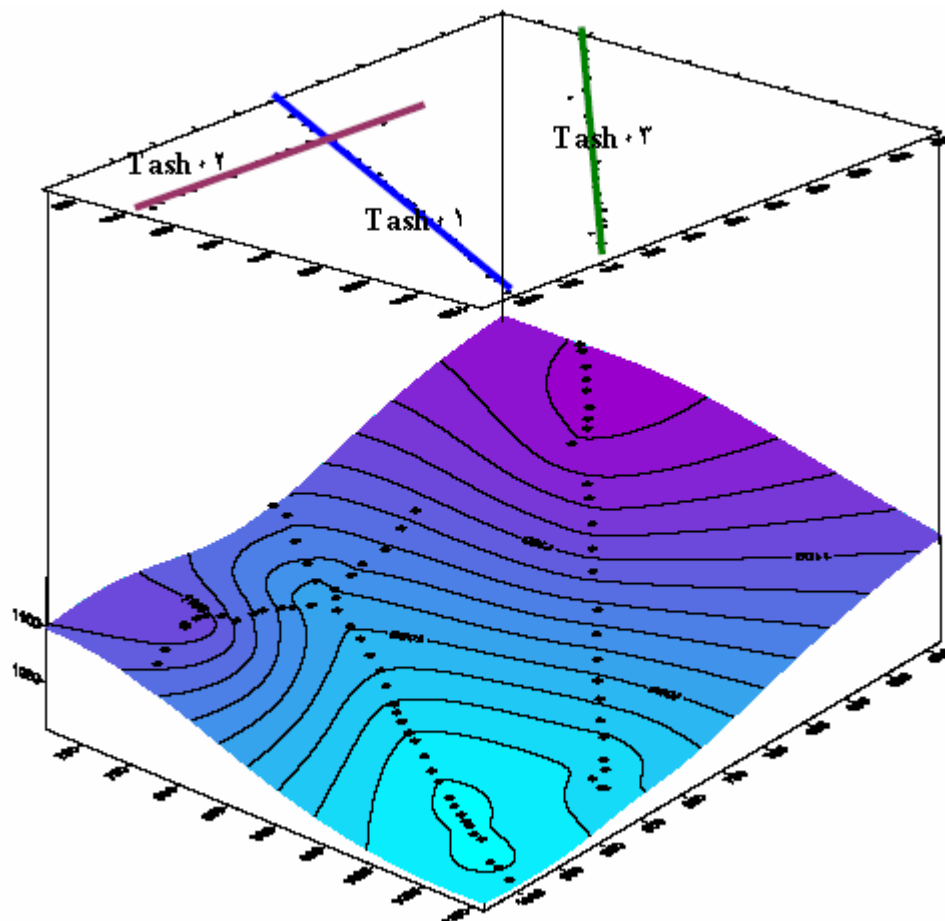
با مقایسه این شواهد با نتایج تحقیقات لیچ و همکاران در سال ۱۹۹۵ و لیچ و سنگستر در سال ۱۹۹۳ که در مورد ویژگی‌های کانسارهای سرب و روی تیپ دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) عنوان کرده‌اند، می‌توان این کانسار را در گروه کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته و دسته MVT نوع غنی از روی قرار داد [۸].

۷-۴) عملیات صحرایی

داده های IP و مقاومت ویژه توسط دستگاه SAS1000 متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود در منطقه تالش و مجن و با استفاده از آرایش دو قطبی-دو قطبی در طول سه پروفیل مطابق شکل (۴-۴) توسط مهندس عرب امیری و همکاران برداشت شده است. وضعیت پروفیل ها بر روی توپوگرافی در شکل (۴-۳) نمایش داده شده است. این برداشت با فاصله جدایش ۴۰ متر و فاکتور عددی n برابر ۸ انجام شده است. در طول پروفیل تاش ۱، ۵۹ داده برداشت شده است. اولین قرائت در فاصله افقی ۶۰ متر از مبدا و ۳۲۰ متر انجام گرفته است. در طول پروفیل تاش ۲ که متقاطع با پروفیل ۱ می باشد، ۲۸ داده برداشت شده است. اولین قرائت در فاصله افقی ۶۰ متر و آخرین قرائت در فاصله ۱۸۰ متر انجام می گردید، اما در پروفیل ۲، فاکتور عددی برابر ۷ می باشد. در طول پروفیل ۳ تاش، که با دو پروفیل دیگر تقاطعی ندارد، ۶۰ داده برداشتی قرائت شده است. فاکتور عددی برابر ۸ است. اولین قرائت در فاصله ۶۰ و آخرین قرائت در فاصله ۳۲۰ متری انجام شده است. جدول (۴-۲) مشخصات پروفیل های برداشت آمده است.

جدول (۴-۲) مشخصات پروفیل‌ها [۷].

ردیف	نام پروفیل	آزیموت	طول پروفیل (m)	مختصات نقطه ابتدایی براساس اطلاعات نقشه‌برداری کارفرما
۱	Tash-۱	۲۱۰	۵۲۰	$X = 764/1069$
				$Y = 664/2609$
۲	Tash-۲	۲۶۰	۳۰۰	$X = 705/0821$
				$Y = 760/7021$
۳	Tash-۳	۲۲۰	۵۲۰	$X = 482/8755$
				$Y = 742/4189$



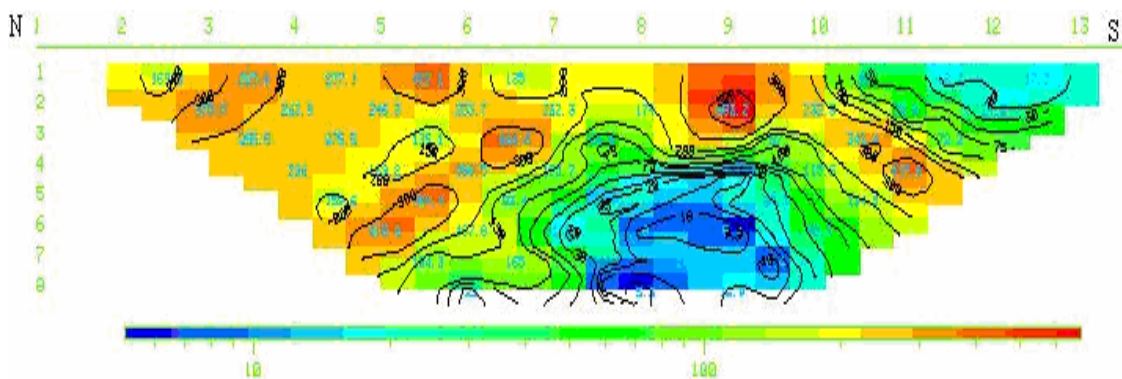
شکل (۴-۴) موقعیت پروفیل های برداشت شده بر روی نقشه توپوگرافی منطقه [۷].

۸-۴) ارائه داده های برداشت شده و تفسیر کیفی آنها

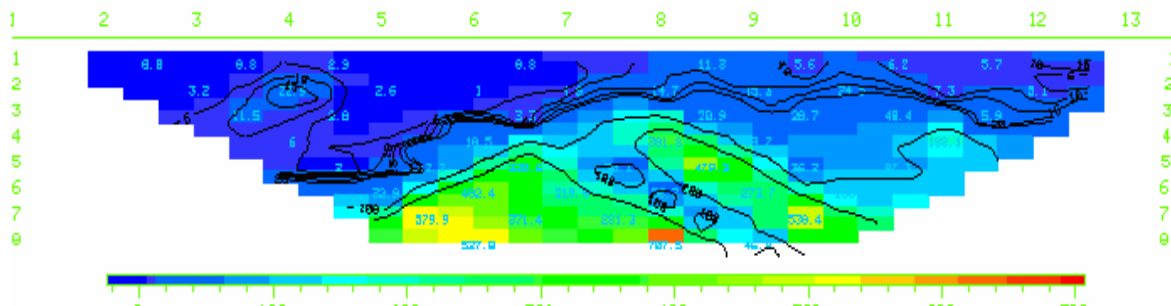
۸-۴-۱) پروفیل تاش ۱

با توجه به شکل (۴-۵) بر روی شبه مقطع داده های مقاومت ویژه ، یک آنومالی با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم-متر در حد فاصل الکترودهای ۷ تا ۱۰ بر روی خط پروفیل قرار دارد. این آنومالی بر روی محور قائم شبه مقطع در عمق تقریبی متناسب با $n=5$ به سمت عمق بیشتر امتداد می یابد. بر روی شبه مقطع داده های مشاهده شده IP تهیه شده با نرم افزار RESIXIP2DI، یک آنومالی با شدت بارپذیری بالا تقریباً در همین محدوده در فاصله بین الکترودهای ۵ و ۱۰ قرار دارد. شروع این

آنومالی بر روی محور قائم، از عمق مربوط به $n=3$ به طرف اعماق بیشتر می باشد. در سایر نقاط شبهه مقطع IP، مقادیر پایینی از بارپذیری مشاهده می گردد. در شبهه مقطع داده های مشاهده شده مقاومت ویژه، در محدوده الکترودهای ۸ و ۱۰ یک توده با مقاومت ویژه بسیار بالا قرار دارد. این توده از سطح آغاز می شود و به صورت شیبدار به طرف عمق مربوط به $n=5$ بر روی محور قائم و به سمت محدوده بین الکترودهای ۱۰ و ۱۱ پیش می رود. بنابراین می توان در شبهه مقاطع فوق محدوده ای که مقادیر IP بالا و مقاومت ویژه پایین مشاهده می گردد زون کانی سازی سرب و روی را پیش بینی نمود.



(الف)

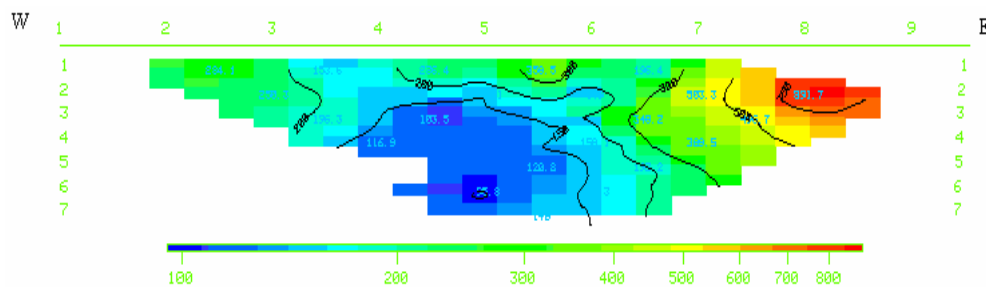


(ب)

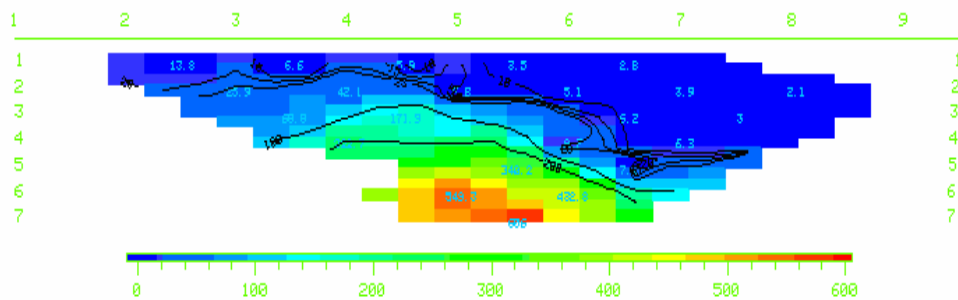
شکل (۴-۵) شبهه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاشا تهیه شده توسط نرم افزار RESIXIP2DI، (الف) مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری

۴-۸-۲) پروفیل تاش ۲

با توجه به شکل (۴-۶) در شبه مقطع داده های مقاومت ویژه حاصل از نرم افزار RESIXIP2DI، یک زون با مقاومت ویژه کمتر از ۱۵۰ اهم-متر در فاصله بین الکترودهای ۴ و ۶ مشاهده می گردد.



(الف)



(ب)

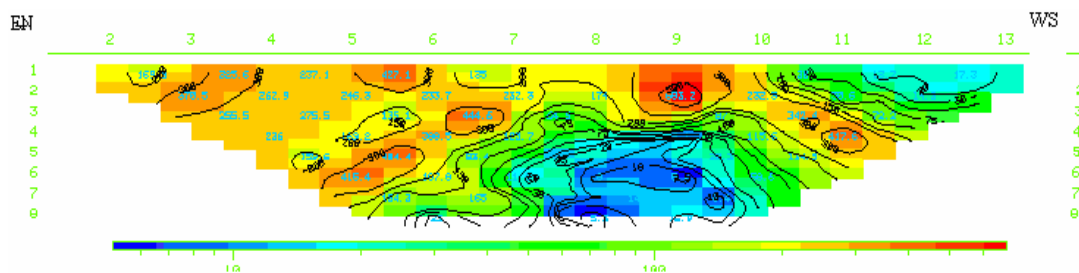
شکل (۴-۶) شبه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاش ۲ تهیه شده توسط نرم افزار RESIXIP2DI. (الف)

مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری

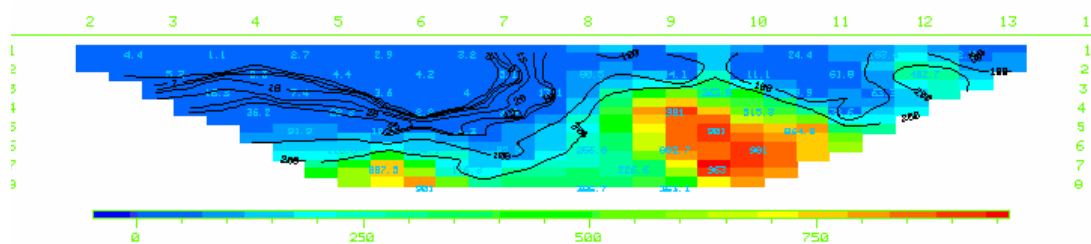
این آنومالی از عمق متناسب با $n=3$ بر روی محور قائم به سمت عمق شبه مقطع امتداد دارد. در شبه مقطع داده های IP (شکل ۴-۶ب)، در این محدوده آنومالی با شدت بارپذیری ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی ثانیه قرار دارد. در سایر نقاط شبه مقاطع مربوطه مقادیر مقاومت ویژه نسبتاً بالا و بارپذیری با شدت پایین مشاهده می گردد. بنابراین می توان در محدوده مذکور که مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت ویژه پایین مشاهده می گردد زون احتمالی کانی سازی سرب و روی را پیش بینی نمود.

۳-۸-۴) پروفیل تاش ۳

شکل ۴-۷ شبه مقطع داده های مقاومت ویژه و بارپذیری داده های برداشت شده روی این پروفیل را که توسط نرم افزار RESIXIP2DI تهیه شده است را نشان می دهد. در روی شبه مقطع مقاومت ویژه یک آنومالی رسانا با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم-متر در محدوده مابین الکترودهای ۷ و ۱۰ در عمق بیشتر از $n=5$ قرار دارد. این آنومالی با گسترش جانبی بیشتر در شبه مقطع داده های IP، در محدوده الکترودهای ۵ و ۱۰ با مقادیر بارپذیری ظاهری ۲۰۰ تا ۸۰۰ میلی ثانیه خود را نمایان می سازد. از این رو این آنومالی را می توان به زون کانی سازی سرب و روی موجود در منطقه که با آثار معدنکاری موجود نیز تا حدودی انطباق دارد نسبت داد.



(الف)



(ب)

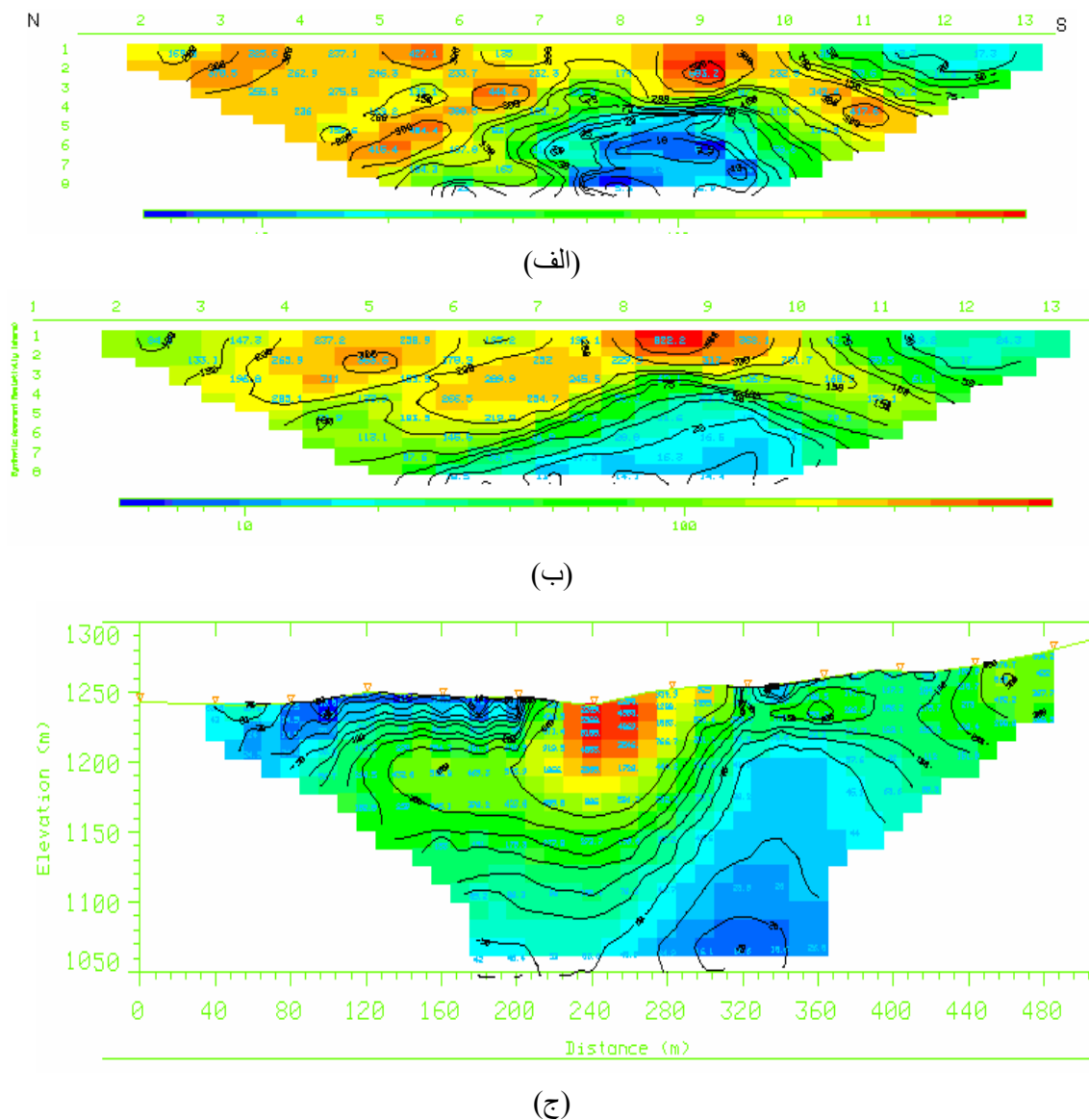
شکل (۴-۷) شبه مقاطع داده های مشاهده شده پروفیل تاش ۳، (الف) مقاومت ویژه، (ب) بار پذیری

۹-۴) مدل سازی معکوس دو بعدی و تفسیر کمی نتایج حاصل

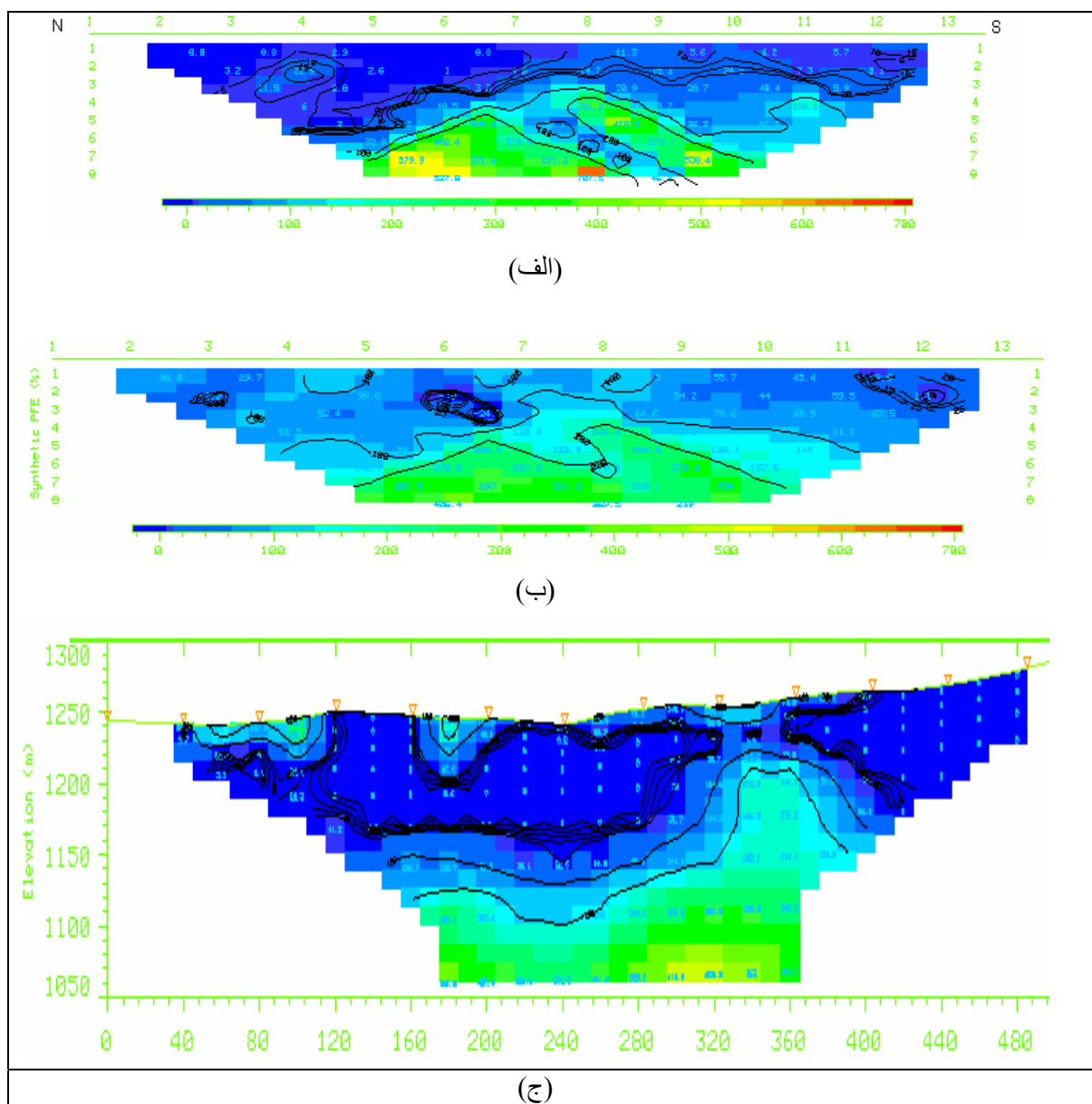
در این بخش برای تعیین مشخصات بیشتر زون های کانی سازی شده احتمالی و تعیین هندسه و شکل هر یک از آنها در زیر هر یک از پروفیل ها، مدل سازی عددی معکوس دو بعدی بصورت هموار و پارامتری با بهره گیری از نرم افزارهای RES2DINV و RESIXIP2DI همراه با تصحیح توپوگرافی صورت گرفته است و نتایج آن برای هر یک از داده های مقاومت ویژه و بارپذیری بصورت جداگانه برای هر پروفیل ارائه شده و ضمن مقایسه نتایج هر یک از روشهای مدل سازی و بهره گیری از اطلاعات موجود زمین شناسی و معدنی تفسیرهای لازم ارائه خواهند شد.

۹-۴-۱) مدل سازی داده های پروفیل تاش ۱

کلیه داده های این پروفیل ابتدا بکمک نرم افزارهای فوق بصورت هموار مدل سازی معکوس شدند که نتایج مدل سازی هموار صورت گرفته توسط نرم افزار RESIXIP2DI که بنام مدل زونگ نامیده می شود همراه با نمایش توپوگرافی به ترتیب برای داده های مقاومت ویژه در شکل ۴-۸ و برای داده های بارپذیری در شکل ۴-۹ آورده شده اند.



شکل (۴-۸) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۱
 (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل سازی هموار
 (مدل زونگ) همرا با نمایش توپوگرافی

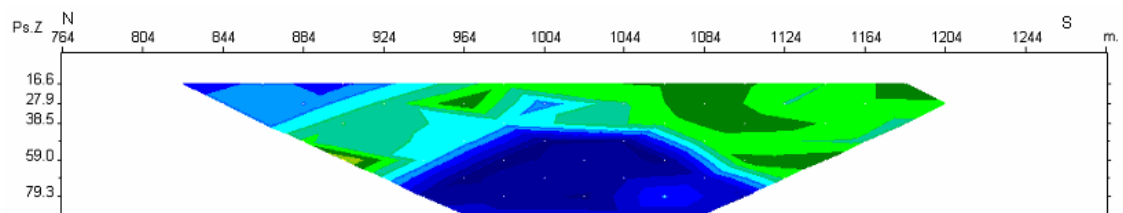


شکل (۴-۹) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های IP توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همراه با نمایش توپوگرافی

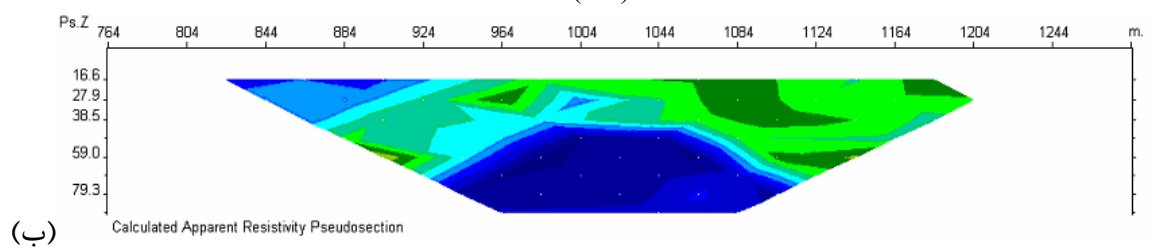
در هر دو شکل فوق با مقایسه شبه مقاطع داده های مشاهده ای و شبه مقاطع داده های محاسبه شده (پاسخ مدل) می توان دریافت که مدل سازی با دقت قابل قبولی صورت گرفته است. نتایج مدل حاصل از داده های مقاومت ویژه شکل (۴-۸-ج) نشان می دهد که در حد فاصل ۲۰۰ تا ۳۷۰ متری زون کم مقاومتی با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم-متر در عمق بیش از تراز ارتفاعی ۱۱۰۰ متر دیده می شود که به طرف راست پروفیل با گسترش عمودی بیشتر تا تراز ۱۲۰۰ متر ادامه می یابد. این آنومالی مشاهده شده از نظر شکل و گسترش توسط نتایج مدل سازی داده های IP (شکل ۴-۹-ج) بخوبی مورد تائید قرار می گیرد. در این شکل مقادیر بارپذیری مدل شده این زون از شدت بالایی برخوردار بوده و در یک دامنه ۱۵۰ تا بیش از ۵۰۰ میلی ثانیه در تغییر است. با توجه به مطالب آورده شده در فصول قبلی و شواهد معدنکاری و زمین شناسی موجود این زون را می توان به کانی سازی سولفیدی سرب و روی نسبت داد.

برای تائید نتایج فوق داده های همین پروفیل با الگوریتم متفاوت توسط نرم افزار RES2DINV مورد مدل سازی هموار قرار گرفتند که نتایج آن برای داده های مقاومت ویژه در شکل ۴-۱۰ و برای داده های IP در شکل (۴-۱۱) نشان داده می شوند.

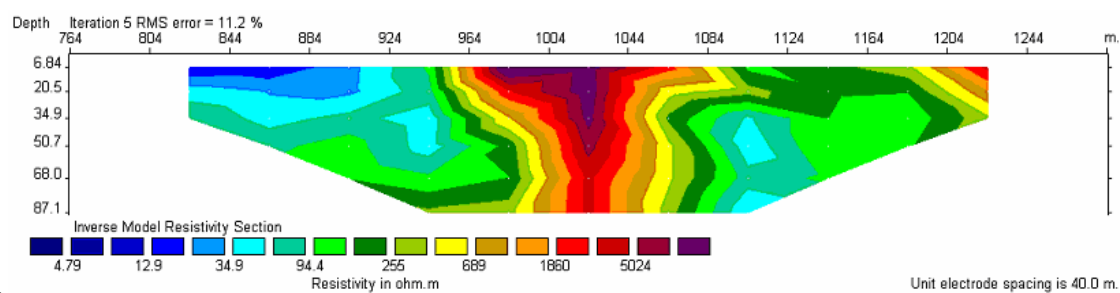
با مقایسه شبه مقاطع داده های خام و داده های محاسبه شده در شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ می توان گفت که نتایج مدل سازی به خصوص برای داده های مقاومت ویژه از دقت خوبی برخوردار است. با توجه به مدل های حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه در شکل (۴-۱۰-ج) و داده های IP در شکل (۴-۱۱-ج) می توان گفت که آنومالی مشاهده شده در مدل زونگ که قبلاً مورد بحث قرار گرفت توسط این روش مدل سازی نیز تا حدودی مورد تائید قرار می گیرد اگر چه در این روش زون کم مقاومت مشاهده شده در شکل (۴-۱۰-ج) توسط یک زون مقاوم به دو قسمت تقسیم شده است.



(الف)



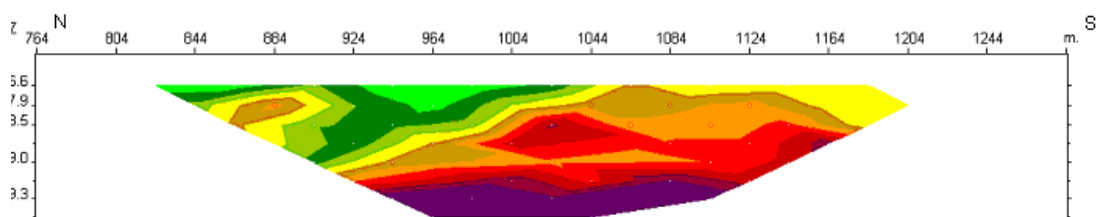
(ب)



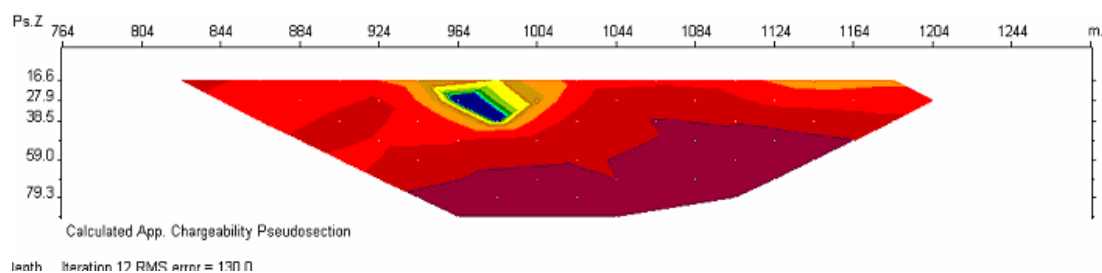
(ج)

شکل (۴-۱۰) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۱ (الف)،

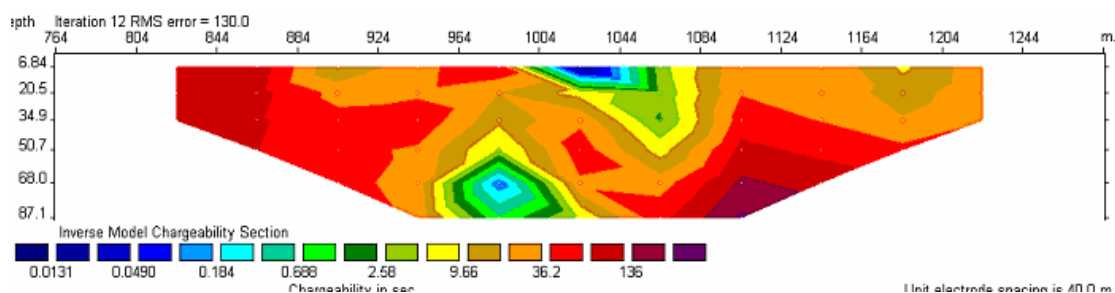
شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مدل معکوس



(الف)



(ب)



(ج)

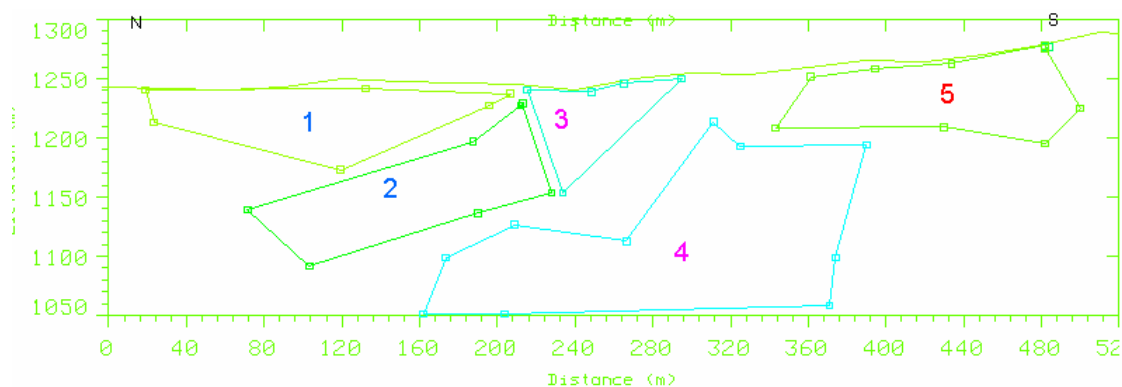
شکل (۴-۱۱) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۱ (الف)، شبه

مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی

معکوس

با توجه به اینکه نتایج مدل سازی های هموار صورت گرفته توسط هر دو نرم افزار مورد استفاده دقیقاً یکسان نبوده و علاوه بر آن حدود زون کانی سازی شده را بصورت هاله ای از تغییرات مشخصات فیزیکی مورد نظر به نمایش می گذارند و نمی توانند مرزهای تیز و تند اطراف زون های مورد علاقه را بخوبی نشان دهند تصمیم گرفته شد تا با استفاده از تلفیق نتایج مدل سازی های صورت گرفته و با استفاده از نرم افزار RESIXIP2DI مدل سازی دو بعدی همزمان داده های مقاومت ویژه و IP بصورت پارامتری (مدل پلیگون) برای کسب نتیجه بهتر برای تصمیم گیری موثرتر اکتشافات آتی برای هر یک از پروفیل ها صورت گیرد.

در شکل (۴-۱۲) نتایج حاصل از مدل سازی پارامتری داده های پروفیل تاش ۱ همراه با جزئیات لازم آورده شده است.



شکل (۴-۱۲) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت

ویژه و IP پروفیل تاش ۱

جدول (۴-۲) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۱

تاش ۱		
توده	مقاومت ویژه (اهم-متر)	بارپذیری (میلی ثانیه)
۱	۱۴/۳	۱۹/۶۲۳
۲	۳۲۹	۱۲۷
۳	۱۶۰۱	۰/۰۰۹۲
۴	۸	۵۹۶/۵۶
۵	۱۵۵	۰/۱۶۲
BG	۸۷/۳۴۷	۳۵/۶۷۴

با توجه به شکل فوق در زیر این پروفیل ۵ توده با خصوصیات الکتریکی متفاوت در یک زمینه (BG) نسبتاً همگن و مقاوم مدل شده اند. با مقایسه این مدل با دیگر مدل های حاصل توسط مدل سازی هموار شکلهای (۴-۸ ج)، (۴-۹ ج)، (۴-۱۰ ج) و (۴-۱۱ ج) می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل در این شیوه مدل سازی در حد قابل توجهی با نتایج هر یک از شیوه های مدل سازی هموار

در تطابق قابل قبول می باشد بااین اختلاف که حدود هر یک از توده های (زون های) رسانا و یا مقاوم با وضوح و برجستگی بیشتری نمایان گشته اند.

در این بخش با توجه به زمین شناسی و شواهد معدنی موجود در منطقه، هریک از توده ها در شکل ۴-۱۲ به ترتیب زیر تعبیر و تفسیر می شوند.

توده ۱: توده ای سطحی است که در فاصله ۲۰ تا ۲۰۰ متری بر روی خط پروفیل امتداد می یابد. این توده با مقاومت ویژه و بار پذیری کم از سطح تا تراز عمقی ۱۱۷۰ متری قرار دارد و ممکن است در ارتباط با سنگهای آلتیره و هوازده سطحی باشد.

توده ۲: این توده مقاومت ویژه متوسط و بارپذیری بالایی دارد که با توجه به زمین شناسی منطقه، ممکن است در ارتباط با مارن یا زون های شیل موجود و یا به احتمال ضعیف تر مرتبط با زون کانی سازی شده سولفیدی در ناحیه باشد.

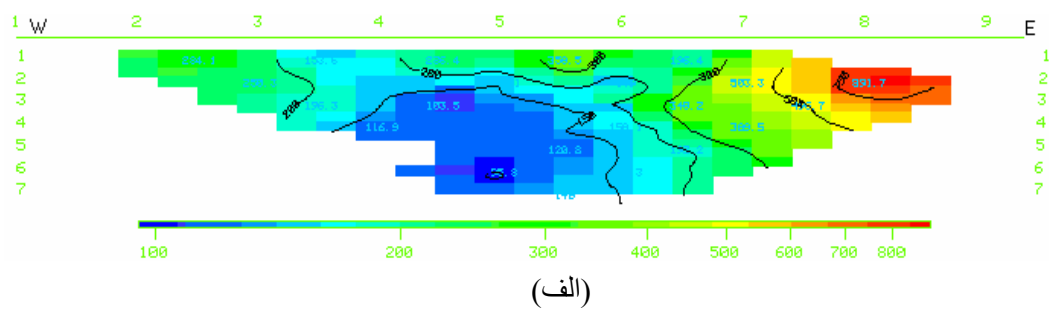
توده ۳: این توده سطحی در فاصله بین ۲۲۰ متر تا ۲۹۰ متری بر روی خط پروفیل قرار دارد و با توجه به مقاومت ویژه بسیار بالا و بار پذیری بسیار کم ممکن است مرتبط با توده های آهک دولومیتی منطقه باشد.

توده ۴: این توده که از رسانایی و بارپذیری بسیار بالایی برخوردار است با توجه به شواهد موجود در منطقه و با مقایسه مدل حاصل در شکل (۴-۹-ج) ممکن است با کانی سازی سرب و روی موجود در ارتباط باشد. توده مزبور در فاصله ۱۶۰ تا ۳۸۰ متری بر روی خط پروفیل قرار دارد که در فاصله ۲۸۰ تا ۳۸۰ متری بر ضخامت آن افزوده می شود و یا بعبارتی از عمق کمتری برخوردار می شود.

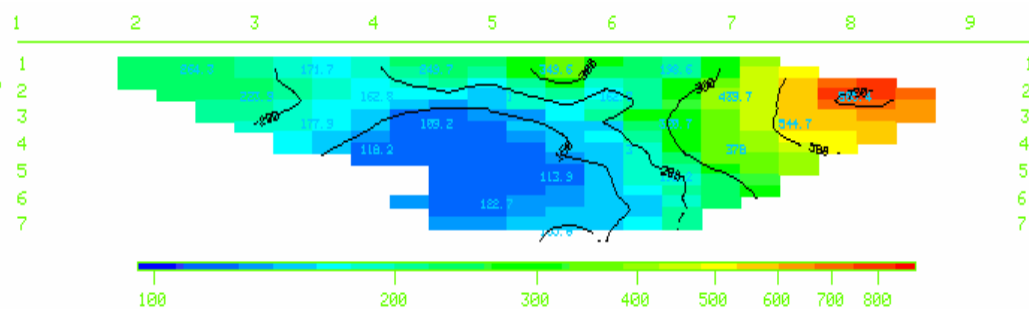
توده ۵: توده ای سطحی است که مقاومت ویژه متوسط و نسبتاً نزدیکی به زمینه دارد و علاوه بر از بارپذیری کمی برخوردار است. این توده ممکن است مرتبط به آهک های دولومیتی هوازده موجود که در برخی قسمت ها دارای رخنمون است در ارتباط باشد.

۴-۹-۲) مدل سازی داده های پروفیل تاش ۲

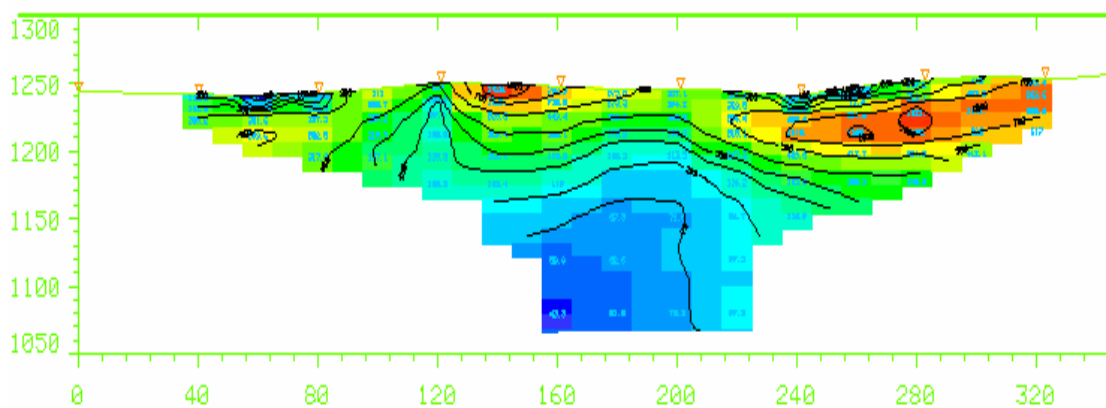
نتایج حاصل از مدل سازی هموار داده های این پروفیل که با نرم افزار RESIXIP2DI تهیه شده است بصورت مدل زونگ و همراه با نمایش توپوگرافی مسیر پروفیل به ترتیب در شکل (۴-۱۳) برای داده های مقاومت ویژه و در شکل (۴-۱۴) برای داده های روش IP نشان داده شده است.



(الف)

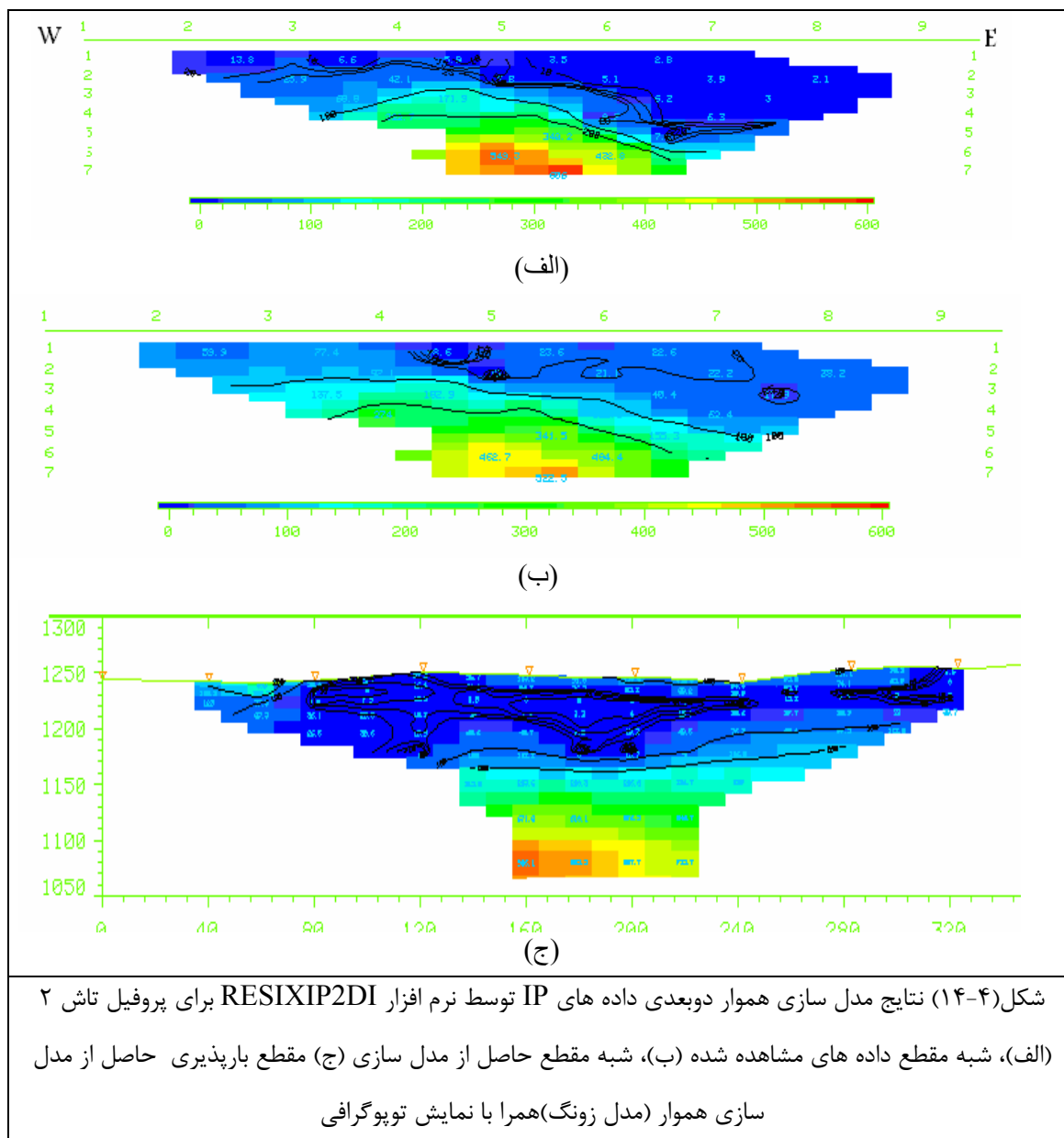


(ب)



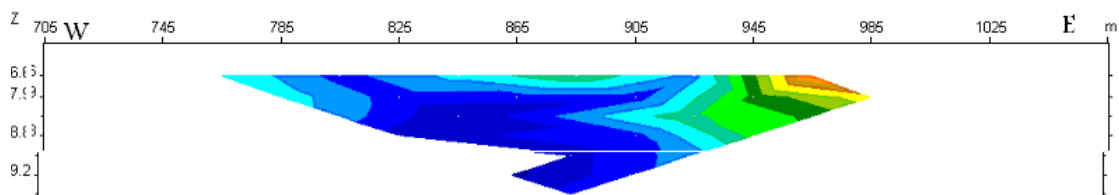
(ج)

شکل (۴-۱۳) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ) همراه با نمایش توپوگرافی

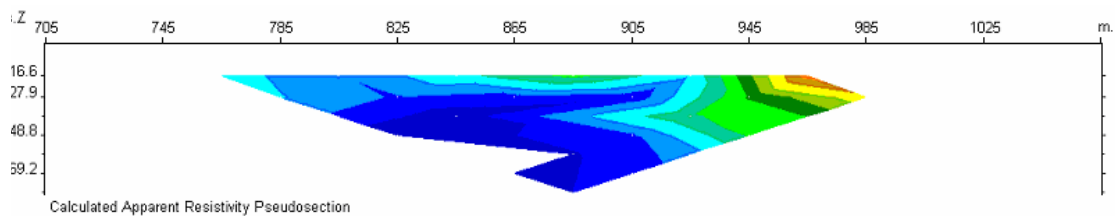


از تشابه خوب شبه مقاطع داده های مشاهده ای و داده های محاسبه شده در شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) می توان نتیجه گرفت که مدل سازی با دقت خوبی صورت گرفته است. بعلاوه در هر دو مدل (بخش ج هر دو شکل) می توان یک زون آنومال با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم-متر و با بار پذیری ۲۰۰ تا بیش از ۵۰۰ میلی ثانیه را در اعماق زیر تراز ارتفاعی ۱۱۵۰ متر ملاحظه نمود که در بخش میانی پروفیل جایی که این پروفیل با پروفیل تاش ۱ تلاقی می کند، قرار می گیرد. با توجه به مطالب قبلی این آنومالی را می توان به کانی سازی سرب و روی موجود در ناحیه نسبت داد که با توجه به مدل سازی در اعماق کمتر از ۱۰۰ متر از سطح زمین قرار می گیرد. وجود یک تونل قدیمی در حوالی این پروفیل چنین نتایجی را تا حدود زیادی تائید می کند.

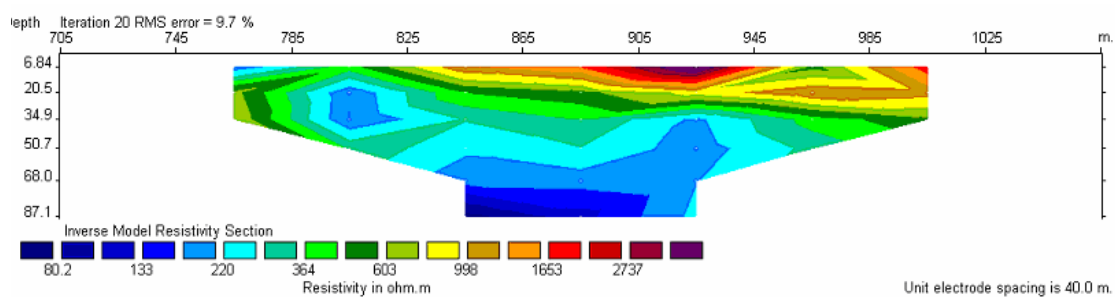
نتایج دیگر شیوه مدل سازی هموار داده های این پروفیل که با نرم افزار RES2DINV تهیه شده است برای مقایسه بهتر و تائید نتایج، برای داده های مقاومت ویژه در شکل (۴-۱۵) و برای داده های روش IP در شکل (۴-۱۶) آمده است.



(الف)



(ب)

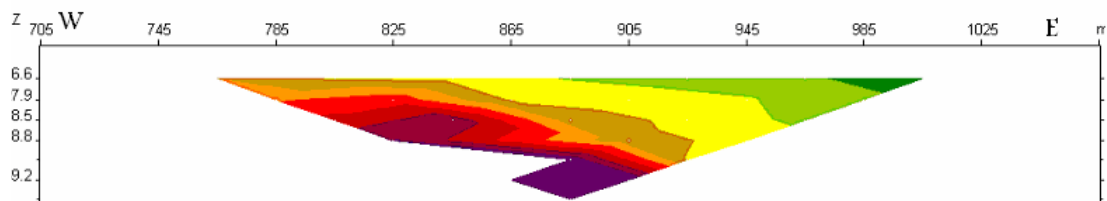


(ج)

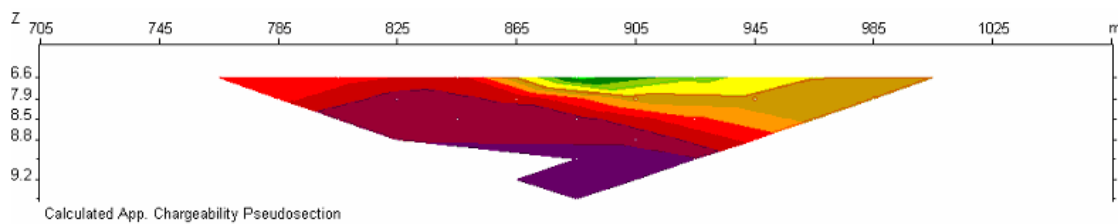
شکل (۴-۱۵) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۲

(الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مقطع حاصل از مدل سازی

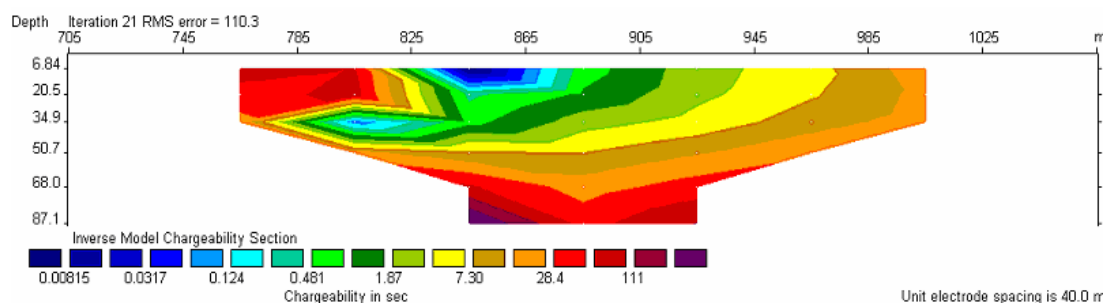
معکوس



(الف)



(ب)



(ج)

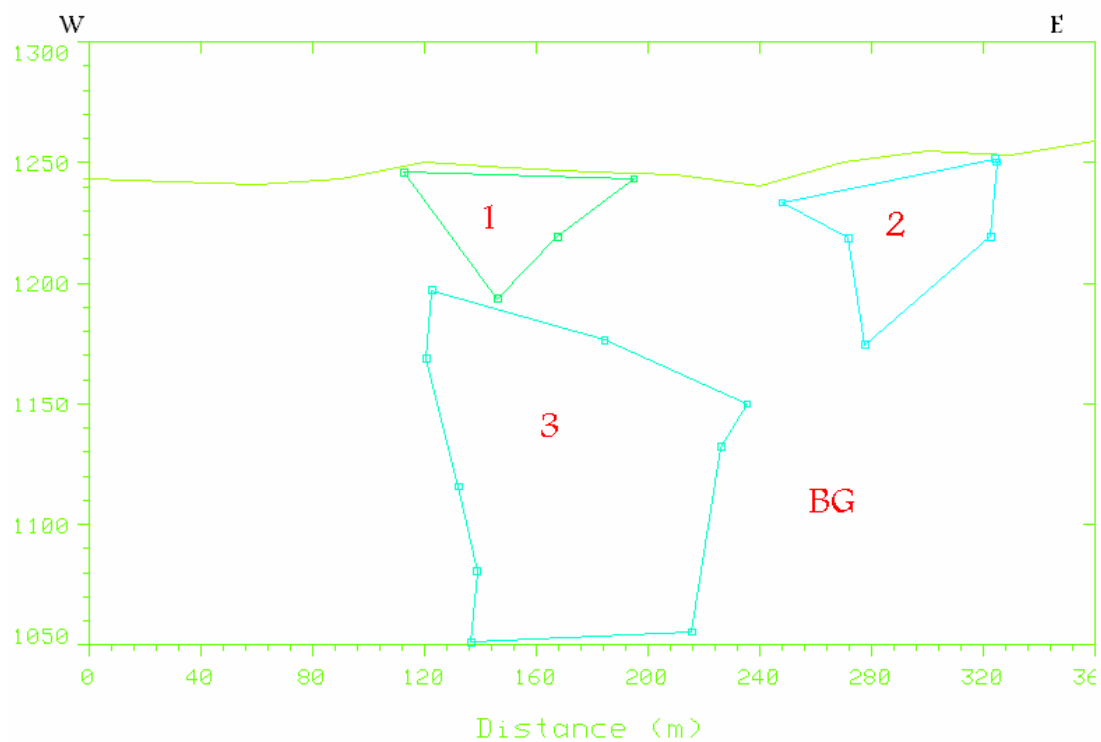
شکل (۴-۱۶) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۲ (الف)، شبه

مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی

معکوس

با نگاهی به مدل حاصل در شکل (۴-۱۵-ج) می توان دریافت که یک زون با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم-متر در عمق بیش از ۸۰ متری سطح زمین در بخش میانی پروفیل قرار دارد. این آنومالی در شکل (۴-۱۶-ج) خود را با بار پذیری بیش از ۱۰۰ میلی ثانیه در همین محدوده نشان می دهد. با در نظر گرفتن این موارد می توان گفت که نتایج حاصل از این شیوه مدل سازی در تطابق نسبتاً خوب (ولو با الگوریتم متفاوت) با نتایج حاصل شده مدل زونگ در شکل های (۴-۱۳-ج) و (۴-۱۴-ج) می باشد.

با تلفیق نتایج مدل سازی های صورت گرفته مدل سازی همزمان داده های مقاومت ویژه و بارپذیری این پروفیل بصورت پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI صورت گرفت و نتایج حاصل در شکل ۴-۱۷ آمده است.



شکل (۴-۱۷) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل تاش ۲

جدول (۴-۳) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۲

تاش ۲		
توده	مقاومت ویژه (اهم-متر)	بارپذیری (میلی ثانیه)
۱	۲۶۲	۸
۲	۱۷۷۳۱	۰
۳	۲/۸	۲۷۶/۷
BG	۲۸۷/۵۸	۱

با توجه در نظر گرفتن اطلاعات زمین شناسی و شواهد معدنکاری می توان نتایج مدل سازی پارامتری را بشرح زیر تفسیر نمود:

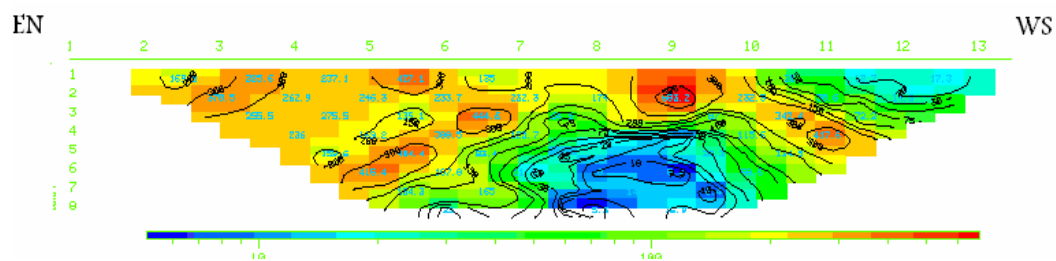
توده ۱: توده ای سطحی با مقاومت ویژه متوسط و بارپذیری کمی است که تا تراز عمقی ۱۲۵۰ متری ادامه می یابد. با توجه به زمین شناسی منطقه این توده را ممکن است به آهک های خرد شده و هوازده سطحی نسبت داد.

توده ۲: این توده که فاقد رخنون است در فاصله ۲۴۰ تا ۳۳۰ متری بر روی خط پروفیل قرار دارد. مقاومت ویژه این توده بسیار بالا و بار پذیری آن ناچیز است و از نظر عمقی تا تراز ۱۱۷۵ متری گسترش دارد. با توجه به این اطلاعات این توده را می توان به آهک های سخت و متراکم موجود در منطقه نسبت داد.

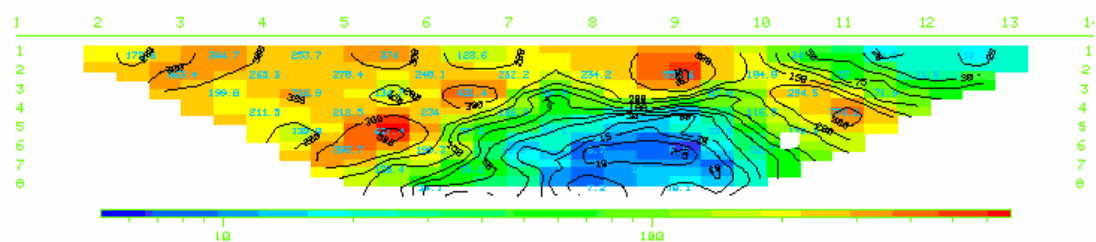
توده ۳: این توده با رسانایی و بارپذیری بسیار بالا نسبت به زمینه را می توان به زون کانی سازی شده سولفیدی سرب و روی منطقه نسبت داد که در یک زمینه آهک دولومیتی شده با مقاومت ویژه متوسط قرار گرفته است. موقعیت قرار گیری این زون آنومال در بخش میانی پروفیل و در زیر تراز ارتفاعی ۱۱۵۰ متر و یا در عمق تقریبی بیش از ۸۰ متری از سطح زمین می باشد. چنین زون آنومال در دیگر روش های مدل سازی نیز نتیجه شده است ولی در این روش همانطوری که انتظار می رفت مرزهای اطراف این زون کانی سازی شده بهتر مشخص شده است.

۳-۹-۴) مدل سازی داده های پروفیل تاش ۳

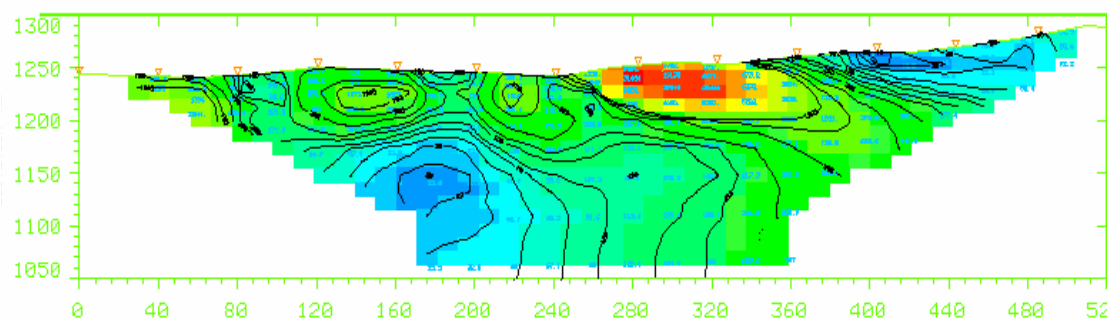
مطابق دیگر پروفیل ها، داده های این پروفیل برای شناسایی محل های احتمالی کانی سازی شده در ابتدا توسط نرم افزار RESIXIP2DI بصورت هموار دو بعدی مدل سازی شدند و نتایج حاصل بصورت مدل زونگ همراه با توپوگرافی پروفیل در شکل ۴-۱۸ برای داده های مقاومت ویژه و در شکل ۴-۱۹ برای داده های روش IP نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

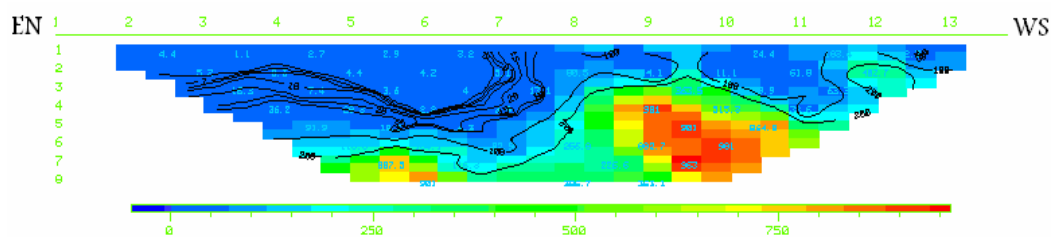


(ج)

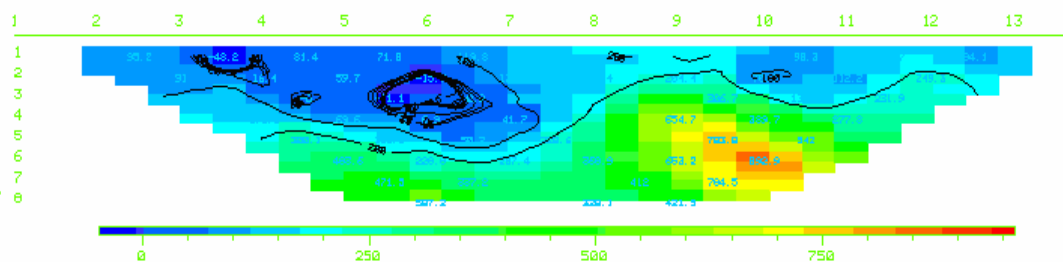
شکل (۴-۱۸) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل

تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع حاصل از مدل

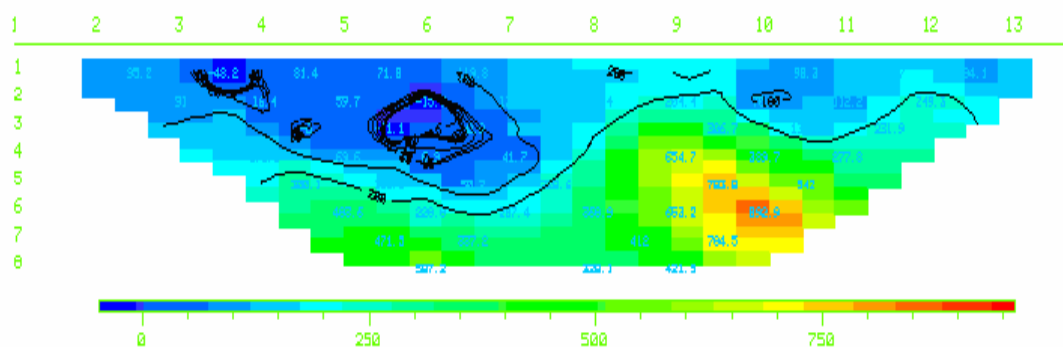
سازی هموار (مدل زونگ) همراه با نمایش توپوگرافی



(الف)



(ب)



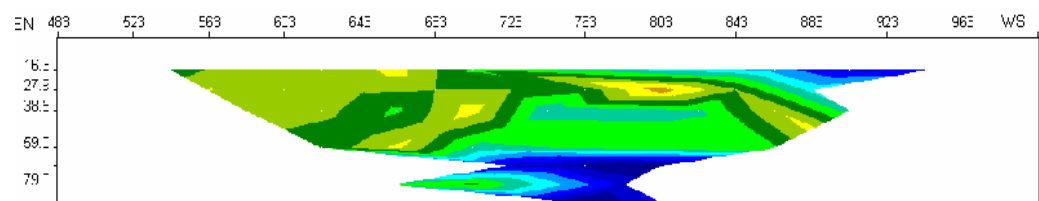
(ج)

شکل (۴-۱۹) نتایج مدل سازی هموار دوبعدی داده های IP توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع باریذیری حاصل از مدل سازی هموار (مدل زونگ)

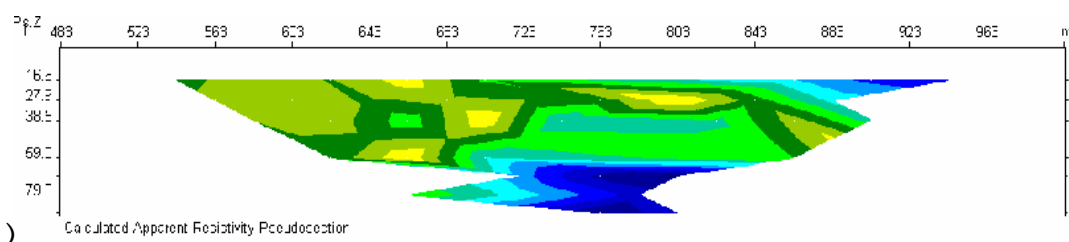
با نگاهی اجمالی به شبه مقاطع داده های مشاهده ای و داده های محاسبه شده در شکل های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) و مقایسه آنها با یکدیگر می توان نتیجه گرفت که نتایج مدل سازی از دقت نسبتاً

خوبی برخوردار است. مدل حاصل در شکل (۴-۱۸-ج) یک زون با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم-متر را در سمت چپ پروفیل با مختصات طولی ۱۸۰ متری و ارتفاعی ۱۱۵۰ متری نشان می دهد که این زون خود را بارپذیری بیش از ۲۵۰ میلی ثانیه خود را در مدل مندرج در شکل (۴-۱۹-ج) نمایان می سازد. علاوه بر آن یک زون کم مقاومت دیگر در بخش های سطحی و عمق کمتر در سمت راست مدل آورده شده در شکل (۴-۱۸-ج) نمایان است که بار پذیری مدل شده آن در شکل (۴-۱۹-ج) بیش از ۱۰۰ میلی ثانیه می باشد. این دو زون به عنوان محل های احتمالی کانی سازی سولفیدی پیشنهاد می گردند که در ادامه با آوردن نتایج دیگر شیوه های مدل سازی بیشتر مورد بررسی قرار می گیرند.

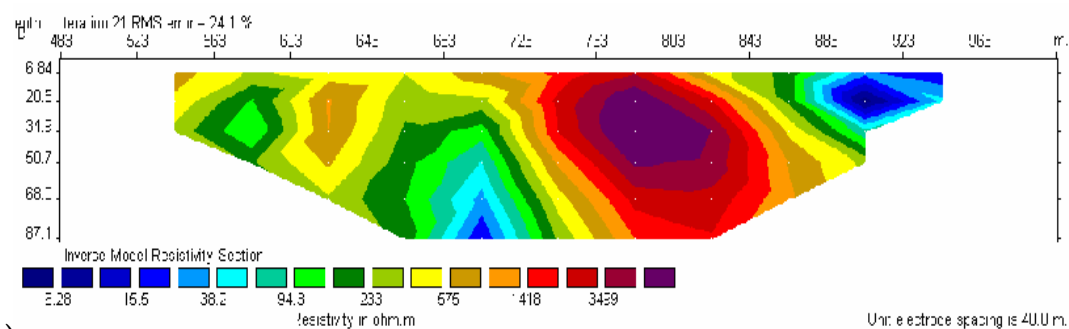
در ادامه نتایج مدل سازی صورت گرفته به شیوه هموار را که توسط نرم افزار RES2DINV حاصل شده است را مورد بررسی قرار می دهیم. مدل حاصل برای داده های مقاومت ویژه در این روش در شکل (۴-۲۰) و مدل حاصل برای داده های IP در شکل (۴-۲۱) آمده است.



(الف)

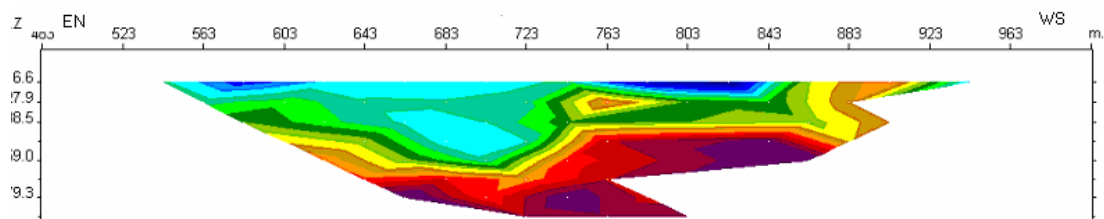


(ب)

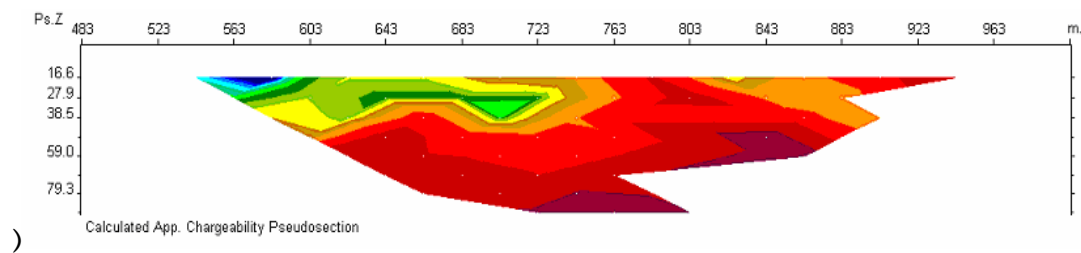


(ج)

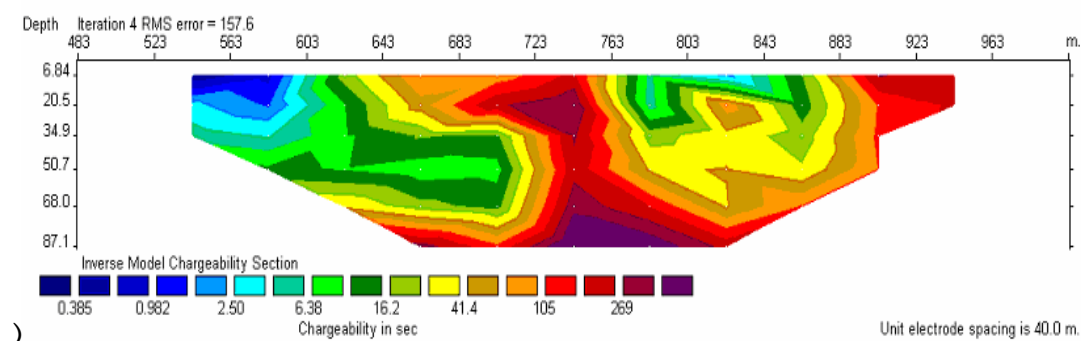
شکل (۴-۲۰) نتایج مدل سازی هموار داده های مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش
 ۳(الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج)، مقطع حاصل از مدل سازی
 معکوس



(الف)



(ب)

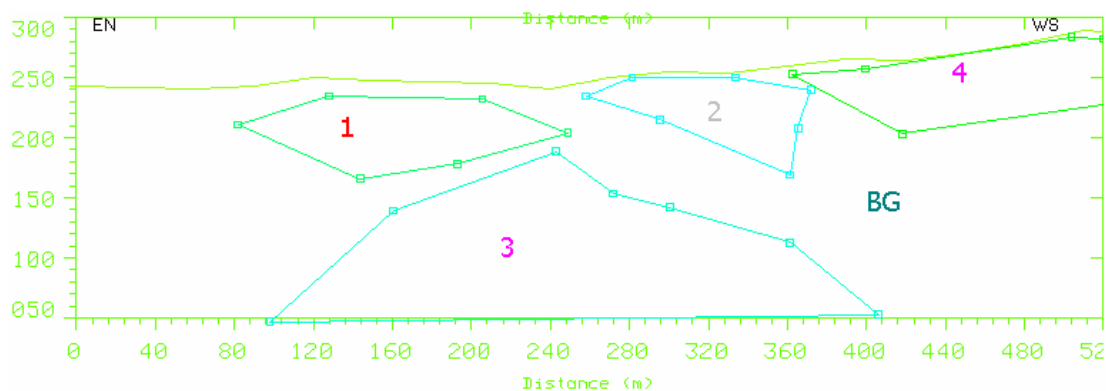


(ج)

شکل (۴-۲۱) نتایج مدل سازی هموار داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل تاش ۳ (الف)، شبه مقطع داده های مشاهده شده (ب)، شبه مقطع حاصل از مدل سازی (ج) مقطع بارپذیری حاصل از مدل سازی معکوس

با توجه به شکل (۴-۲۰) می توان نتیجه گرفت که نتایج مدل سازی داده های مقاومت ویژه از دقت قابل قبول برخوردار می باشند. در این شکل دو زون کم مقاومت مدل شده همانند شکل (۴-۱۸) بخوبی نمایان می باشند و محل قرار گیری هر دوی آنها در تطابق خوبی با هم بر خوردار می باشند. اما نتایج مدل سازی داده های IP شکل (۴-۲۱) به دلیل خطای زیاد مورد اعتماد نمی باشد و از آن صرف نظر می گردد.

در نهایت برای بررسی بیشتر و تعیین محل دقیق تر زون های آنومال کلیه داده های این پروفیل بصورت ترکیبی با نرم افزار RESIXIP2DI و بصورت پارامتری مدل سازی شده و نتایج حاصل بصورت مدل پلیگون در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۲) مدل پلیگون حاصل از مدل سازی پارامتری توسط نرم افزار RESIXIP2DI برای داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل تاش ۳

جدول (۴-۳) مشخصات توده های حاصل از مدل سازی پروفیل تاش ۳

تاش ۳		
توده	مقاومت ویژه (اهم-متر)	بارپذیری (میلی ثانیه)
۱	۹۳۱	۰/۲۴۴
۲	۵۲۳۲۸	۱/۶۵۴
۳	۱۵	۱۱۹۵
۴	۲۹	۲۳۱/۱۷۸
BG	۱۰۰	۶۰/۱۴۴۵

تفسیر نتایج مدل سازی صورت گرفته با لحاظ اطلاعات زمین شناسی و شواهد معدنکاری منطقه برای هر یک از توده های مدل شده بصورت زیر ارائه می گردد:

توده ۱: این توده کم عمق با مقاومت ویژه بسیار بالا و بارپذیری کم که در فاصله طولی ۸۰ تا ۲۶۰ متر روی خط پروفیل و در بازه عمقی ۱۲۳۰ تا ۱۱۶۰ متر بر روی خط قائم مشاهده می شود می تواند مرتبط با آهک دولومیتی شده تفسیر شود.

توده ۲: توده ای سطحی است که به صورت شیب دار تا تراز عمقی ۱۱۷۵ امتداد دارد. با توجه به مقاومت ویژه بسیار بالا و بارپذیری بسیار کم می تواند مرتبط با آهک های سخت و متراکم موجود در منطقه باشد.

توده ۳: این توده در عمده محدوده بخش میانی و در فاصله ۱۰۰ تا ۴۱۰ متری پروفیل گسترش دارد. کمترین عمق قرار گیری این توده از سطح زمین حدود ۶۰ متر است. این توده با مقاومت ویژه بسیار کم و بارپذیری بسیار بالا، کانسار معدنی سرب و روی پیش بینی می گردد.

توده ۴: این توده بارپذیری متوسط و مقاومت ویژه کمی دارد که در گوشه راست پروفیل و در بخش های سطحی قرار دارد. این توده ممکن است کانسار معدنی سرب و روی با عیار کمتر نسبت به توده ۳ باشد.

در مجموع می توان گفت که مدل حاصل در این شیوه مدل سازی در تطابق خوبی با دیگر روشهای مدل سازی ولی با نتیجه دقیقتر از نظر تعیین محل زون های آنومال است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱) نتیجه گیری

با توجه به نتایج مدل سازی معکوس هموار و پارامتری داده های مقاومت ویژه و بارپذیری هر یک از پروفیل ها و با در نظر گرفتن تئوری حاکم بر مسئله هر نوع مدل سازی عددی و آگاهی از نقاط قوت و ضعف هر یک از این نوع مدل سازی ها موارد زیر بطور خلاصه می تواند از بررسی های صورت گرفته نتیجه شود:

- از مجموع مدل سازی های صورت گرفته می توان نتیجه گرفت که یک زون آنومال با مقاومت ویژه کم و قابلیت بار پذیری بالا با گسترش جانبی حدود ۲۰۰ متر و ضخامت حدود ۵۰ متر در بخش های میانی پروفیل تاش ۱ قرار دارد که ضخامت آن به طرف راست پروفیل تا حدود ۱۲۰ متر نیز گسترش می یابد طوری که در این قسمت ها این آنومالی در عمق کمتر از ۵۰ متری سطح زمین قرار می گیرد (نگاه به شکل ۴-۱۲). با توجه به مشخصات فیزیکی نتیجه شده برای این توده و تلفیق آنها با اطلاعات زمین شناسی و آثار معدنکاری های قدیمی می توان این آنومالی را به کانی سازی سرب و روی موجود در منطقه نسبت داد که با توجه به بارپذیری بالای آن احتمالاً از عیار خوبی نیز ممکن است برخوردار باشد.

- با نگاه به شکل ۴-۴ از فصل قبلی ملاحظه می گردد که پروفیل تاش ۲ تقریباً بصورت عمود بر هم با پروفیل تاش ۱ جایی که بخش ضخیم زون کانی سازی شده (توده ۴ شکل ۴-۱۲) در آنجا قرار می گیرد تلاقی می کند. نتایج مدل سازی هموار و پارامتری داده های پروفیل تاش ۲ وجود چنین زون کانی سازی شده سرب و روی را بصورت توده ۳ در شکل (۴-۱۷) با ضخامت بیش از ۱۰۰ متر و در عمق حدود ۵۰ متر مجدداً تأیید می کند. با در نظر گرفتن شکل و گسترش جانبی و گسترش عمقی این زون کانی سازی شده که به ترتیب بصورت توده هایی با شماره های ۴ و ۳ در شکل های (۴-۱۲) و (۴-۱۷) نشان داده شده است می توان آن را در واقع توده ای سه بعدی در نظر گرفت که به

دلیل گسترش طولی قابل توجه (بیش از ۲۰۰ متر) در امتداد پروفیل تاش ۱، توانسته خودش را در نتایج مدل سازی های دو بعدی بصورت بارزی نشان دهد.

- با نگاه به نتایج مدل سازی های صورت گرفته بر روی داده های پروفیل تاش ۳ می توان دو زون آنومال را شناسایی نمود طوری که آنومالی اصلی در بخش میانی پروفیل (توده ۳ در شکل ۴-۲۲ فصل ۴) با گسترش جانبی متوسط ۲۵۰ متر و ضخامت متوسط ۱۰۰ متر قرار دارد. با توجه به مقادیر بالای بارپذیری و مقاومت ویژه پایین و آثار معدنکاری بجای مانده می توان آنرا با احتمال زیاد به کانی سازی سرب و روی موجود در منطقه نسبت داد. تفسیر اینکه آیا این زون کانی سازی شده ادامه زون آنومال شناسایی شده در بخش میانی پروفیل تاش ۱ (توده ۴ در شکل ۴-۱۲) فصل قبلی) باشد به دلیل فاصله قابل توجه بین پروفیل های تاش ۱ و ۳ مشکل است. برای تائید این مطالب باید برداشت داده ها در امتداد پروفیل تاش ۲ طوری ادامه یابد تا با پروفیل تاش ۳ تلاقی نماید. آنومالی کم اهمیت تر دیگر، توده ۴ در شکل ۴-۲۲) با گسترش محدود در بخش های سطحی سمت راست پروفیل وجود دارد که با توجه به مقدار بار پذیری کمتر آن نسبت به آنومالی قبلی می تواند زون کانی سازی شده سرب و روی با عیار کمتر نسبت به توده قبلی تفسیر شود.

- نتایج نشان می دهند که لزوم دخالت دادن توپوگرافی پروفیل در فرآیند مدل سازی هر دو شیوه مدل سازی هموار و پارامتری برای کسب نتایج دقیق تر ضروری است.

- همانطوری که در این تحقیق ملاحظه شد مدل سازی هموار داده ها با هر دو نرم افزار مورد استفاده بجز در موارد محدود، در تائید یکدیگر می باشند و برای ارزیابی صحت نتایج اینگونه مدل سازی لازم است. اگر چه با مدل سازی های هموار زون های آنومال و محل قرارگیری آنها با دقت قابل قبولی شناسایی شدند ولی نتایج مطالعه نشان می دهد که تلفیق نتایج مدل سازی های هموار و استفاده از مدل سازی پارامتری (در قالب نرم

افزار RESIXIP2DI) نتایج دقیق تری در مورد هندسه زون آنومال و مرزهای اطراف آن با سنگ میزبان نتیجه می دهد.

- انتخاب مدل آغازین در انجام پروسه معکوس سازی پارامتری با استفاده از نرم افزار RESIXIP2D از نکات قابل توجه است. هر چه مدل آغازین با دقت بیشتری بر مبنای اطلاعات بدست آمده از سایر روش های مدل سازی و دیگر داده های موجود انتخاب شود روند معکوس سازی بهتر صورت می گیرد و همگرایی به مدل معکوس با خطای کمتری صورت می گیرد.

- با تلفیق روش های مختلف مدل سازی می توان تا حدودی ابهامات در تفسیر داده های صحرایی مربوط به داده های مقاومت ویژه و IP را تا حدود زیادی بر طرف نمود.

۵-۲) پیشنهادات

برای اکتشاف بیشتر آنومالی های شناسایی شده در مطالعه حاضر پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می شوند:

- برای تائید گسترش زون کانی سازی سرب و روی در حد فاصل پروفیل های تاش ۱ و ۳ لازم است برداشت داده ها در امتداد پروفیل تاش ۲ آنقدر ادامه پیدا کند تا با پروفیل تاش ۳ تقاطع نماید. علاوه بر آن برداشت داده های مقاومت ویژه و IP در روی پروفیل دیگری به موازات پروفیل تاش ۲ در بخش های میانی منطقه صورت گیرد طوری که هر دو پروفیل تاش ۱ و ۳ را قطع نماید.

- برای تائید زون اصلی کانی سازی شناسایی شده در زیر پروفیل های تاش ۱ و ۲ پیشنهاد می شود یک گمانه اکتشافی با توجه به مدل آورده شده در شکل (۴-۱۲) در فصل پیشین به صورت قائم در فاصله ۳۲۰ متری از مبدا پروفیل تاش ۱ و با عمق حدود ۷۰ متر

حفر گردد. علاوه بر آن لازم است گمانه قائم دیگری با عمق ۷۰ متر در ۲۴۰ متری مبدا پروفیل تاش ۳ (شکل ۴-۲۲ فصل ۴) حفر گردد تا حضور زون کانی سازی سرب و روی شناسایی شده‌توده ۳ در شکل (۴-۲۲) در زیر این پروفیل مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست مراجع

- [۱]. کلاگری، ع.، ۱۳۷۱، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، ناشر علی اصغر کلاگری.
- [۲]. یانگل، ای. ایچ.، ۱۳۸۳، روش‌های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوزه‌های رسوبی عمیق، ترجمه فرزاد مهدوی، ناشر فرزاد مهدوی با همکاری دانشگاه تهران.
- [۳]. قاسم العسگری، م.، ۱۳۸۳، اصول ژئوفیزیک اکتشافی (روشهای سنجش و چاه پیمایی ژئوفیزیک)، تهران آیت.
- [۴]. تلفورد، دبلیو. ام.، جلدات، ال. پی.، شریف، آر. ای.، کینز، دی. ا.، ۱۳۷۵، ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه زمردیان و حاجب حسینی، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۵]. حسن‌زاده، ح.، ۱۳۸۲، مدل‌سازی توام داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۱۸ ص.
- [۶]. چاکری، م.، ۱۳۸۴، مدل‌سازی معکوس پارامتری و هموار دو بعدی داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۶۵ ص.
- [۷]. عرب امیری، ع.، ۱۳۸۵، گزارش قرارداد پژوهش برداشت، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی شرکت صنعتی تاش و مجن شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۸]. فردوست، ف.، ۱۳۸۶، کانسار روی و سرب برفکه شمال غرب شاهرود نمونه ای از یک کانسار MVT در یک حوضه فورلند، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [9]. Loke, M.H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. (<http://www.abem.se/ftp/loke/res2dinv.pdf>).
- [10]. Siegel, H., 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization Geophysics, 24, 547-565.
- [11]. Marquardt, D., 1970, Generalized inverse, ridge regression, biased linear estimation and nonlinear estimation: Technometrics, 12, 591-612.
- [12]. Constable, S., Parker, R., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: Geophysics, 52, 289-300.
- [13]. deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data: Geophysics, 55, 1613-1624.

- [14]. Zonge Engineering and Research Organization, Inc., 2001, Introduction to IP.
www.zonge.com.
- [15]. Dahlin, T., 2002, Leroux, V., Measuring techniques in induced polarisation imaging, Applied Geophysics 50, 279–298.
- [16]. Tezel, O., 2002, Interpretation of the field observations in induced polarization, , International Conference on Earth Sciences and Electronics : Istanbul University Engineering Faculty Geophysics Engineering Department, 245-254.
email: otezel@istanbul.edu.tr
- [17]. Rijo, L., 1984, Inversion of 3-D resistivity and induced polarization data: 54th International Meeting Society Exploration, Geophysics, Expanded Abstracts, 113-117.
- [18]. Sasaki, Y. 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric: Geophysics, 54, 254-262.
- [19]. Ellis, R., Oldenburg D.W., 1994, Applied geophysical inversion: Geophysics, 59, 1165-1171.
- [20]. Parker, R.L., Whaler, K.A., 1981. Numerical methods for establishing solutions to the inverse problem of electromagnetic induction: Geophys, 86, 9574-9584.
- [21]. Tsourlos, P.I., Szymanski, J.E., Tsokas, G.N., 1998, A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data, Jurnal of the Balkan Geophysics Society , 1, 3-13.
- [22]. Broyden, C.G., 1965, A class of methods for solving nonlinear imultaneous equations: Mathematics of Computing, 19, 577-593.
- [23]. Wtorek, J., Bujnowska, A., 2004, EUEM2 Technology Survey Electromagnetic methods in geophysics, Gdańsk University of Technology,
<http://www.eudem.info/>
- [24]. Alumbaugh, D. L., and Newman, G. A., 2000, Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic inversion: Geophysics, 65, 1455–1467.
- [25]. Dey, A. Morrison, H. F., 1979, Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped 2-Dimensional Structures: Geophysical Prospecting, 27, 106-136.
- [26]. Pelton, W., Rijo, L Swift, J., 1978, Inversion of twodimensional resistivity and induced polarization data: Geophysics, 43, 788-803.
- [27]. Parker, R.L., Whaler, K.A., 1981. Numerical methods for

establishing solutions to the inverse problem of electromagnetic induction: J. Geophys. Res., 86, 9574-9584.

[28]. Smith, N., Vozoff, K., 1984, Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data: IEEE Trans. Geosc., 22, 21-28.

[29]. Tripp, A., Hohmann, G., Swift, C., 1984, Two-dimensional resistivity inversion: Geophysics, 49, 1708-1717.

[30]. Oldenburg, D., Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data: Geophysics, 59, 1327-1341.

[31]. Loke M.H., and Barker, R., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method: Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
email : mhloke@pc.jaring.my
drmhloke@hotmail.com

[32]. Broyden, C. G., 1972, Quasi-Newton methods, in Numerical methods for unconstrained optimization: Academic Press Inc., 87-106.

[33]. Smith, T., Hoversten, M., Gasperikova, E., Morrison, F., 1999, Sharp boundary inversion of 2D magnetotelluric data: Geophysical Prospecting, 47, 469-486.

[34]. Loke, M. H., Dahlin, Torleif, and Acworth, Ian, 2001, A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-Delectrical imaging surveys: 15th Geophysica Conference and Exhibition, August 2001, Brisbane., ASEG,

[35]. Porsani, M. J., Niwas, S., Ferreira, N.R, 2001, Robust inversion of vertical electrical sounding data using a multiple reweighted least-squares method, Geophysical Prospecting, 49, 255-264

[36]. Olayinka A. I. and U. Yaramanci, 2000, Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion, Journal of Applied Geophysics, 45, 63-81

[37]. Interpex Limited, 1999, RESIXIP2DI, ver.4.08. Manual.

[38]. Geotomo Software, 2004, RES2DINV, ver.3.54 Manual.
www.geoelectrical.com