





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک

تعیین مقاومت ویژه ظاهری از روی داده های الکترومغناطیس هوایی در حوزه  
فرکانس (روش دیگم (DIGHEM)

نگارش

داود رجبی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علی مرادزاده

تابستان ۸۷

تقدیم به

# پدرو مادر عزیزم

و تمامی آنان که دانسته‌های خویش را بی هیچ منتی بر دیگران عرضه می‌دارند.

به نام تو ای. تشنه مهربان

خداوند را سپاس می گویم که مرا در راه یادگیری علم یاری نمود.

در ابتدا بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ اساتید ارجمند، جناب آقای دکتر کامکار روحانی و جناب آقای دکتر مرادزاده تقدیر و تشکر نمایم.

لازم است از زحمات بسیار، دوست گرامی ام جناب آقای مهندس عرب امیری و استاد مشاور ایشان جناب آقای دکتر سیمن کمال

قدردانی و تشکر نمایم که مدلسازی داده بدون کمک و مساعدت آنها مقدور نمی شد.

از داوران محترم، آقای دکتر پیروز و آقای دکتر مروی کمال تشکر و قدردانی را می نمایم که در مدت زمان بسیار محدود پایان نامه را مطالعه و زحمت

داوری آن را بر عهده گرفتند.

در پایان از زحمات تمامی پرسنل محترم دانشکده معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود کمال قدردانی و تشکر را دارم و موفقیت آنان را از

خداوند منان خواستارم.

## چکیده

بطور معمول در نخستین مراحل ارزیابی داده‌های الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس، مقاومت ویژه ظاهری بر اساس مدلی از یک نیم‌فضای همگن، در برابر عمق محاسبه می‌شود. برای انجام این مهم تاکنون الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است. الگوریتم‌های ارائه شده در دو حوزه فرکانس و زمان جهت معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله الگوریتم‌های معکوس‌سازی در حوزه فرکانس می‌توان به الگوریتم‌های ارائه شده توسط سنگپیل (۱۹۸۸)، سیمون (۲۰۰۰)، دیفرانسیلی هوانگ و فریزر (۱۹۹۷) و روش بهبود یافته سیمون (۲۰۰۰) اشاره نمود. از این رو در این پایان نامه سعی شده است که به تشریح الگوریتم‌های معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی برای تعیین میزان مقاومت ویژه در برابر عمق پرداخته شود. با این حال باید توجه داشت که هر یک از این روش‌ها دارای محاسن و معایبی هستند. از این رو سعی بر آن شده است تا به نحوی مزایا و معایب مربوط به هر یک از این روش‌ها تا آنجا که ممکن است بیان گردد. از طرفی به دلیل نیاز به یک برنامه معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس و عدم دسترسی به کد برنامه‌های موجود، در این پایان نامه دو برنامه پیشرو و معکوس طراحی گردید و کلیه نتایج حاصل از معکوس‌سازی‌های انجام شده در این پایان نامه بر اساس برنامه‌های نگارش یافته صورت گرفته است. لازم است خاطر نشان کنیم، کد برنامه‌ها به صورت آزاد بوده و بر اساس زبان برنامه‌نویسی ویژوال سی-شارپ و بانک اطلاعات داده‌های اس-کیو-ال سرور تهیه شده است. با انجام مطالعه حاضر، مشخص شد، بهترین روش برای معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی، روش سیمون می‌باشد و در صورتی که تعداد فرکانس‌های مورد استفاده زیاد باشد، روش دیفرانسیلی هوانگ جواب بهتری از مقاومت ویژه-عمق را ارائه خواهد داد. از طرفی الگوریتم‌های محاسباتی بر اساس نیم فضای کاذب جواب بسیار مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم‌های نیم فضای همگن ارائه می‌کنند. در نهایت باید خاطر نشان کنیم، نرم‌افزار تهیه شده هنوز در ابتدای راه قرار دارد و امیدواریم در آینده‌ای نزدیک شاهد یک نرم‌افزار کامل و مستقل باشیم.

|        |  |
|--------|--|
| أ..... | چکیده  |
| ب..... | فهرست مطالب  |
| د..... | فهرست پیوست‌ها                                       |
| د..... | فهرست جدول‌ها و شکل‌ها                               |
| ز..... | فهرست جدول‌ها و شکل‌های مربوط به پیوست‌های ارائه شده |

## فهرست مطالب

|         |   |
|---------|---|
| ۱.....  | فصل اول - کلیات                                 |
| ۲.....  | ۱-۱: مقدمه                                      |
| ۳.....  | ۱-۲: مروری بر مطالعات انجام شده                 |
| ۴.....  | ۱-۳: ضرورت انجام پایان نامه                     |
| ۴.....  | ۱-۴: هدف از مطالعه حاضر                         |
| ۵.....  | ۱-۵: ساختار پایان نامه                          |
| ۶.....  | فصل دوم- تئوری روش الکترومغناطیس                |
| ۷.....  | ۲-۱: مقدمه                                      |
| ۸.....  | ۲-۲: القای متقابل و خود القایی                  |
| ۱۶..... | ۲-۳: عمق پوسته                                  |
| ۱۶..... | ۲-۴: پاسخ نیم فضا                               |
| ۱۹..... | فصل سوم- روش‌های الکترومغناطیس هوایی            |
| ۲۰..... | ۳-۱: مقدمه                                      |
| ۲۰..... | ۳-۲: برداشت‌های حوزه زمان                       |
| ۲۱..... | ۳-۳: برداشت‌های حوزه فرکانس                     |
| ۲۲..... | ۳-۴: انواع سیستم‌های برداشت هوایی الکترومغناطیس |
| ۲۳..... | ۳-۴-۱: روش شبه هوایی (نیمه هوایی)               |
| ۲۳..... | ۳-۴-۲: روش دو هواپیما                           |
| ۲۴..... | ۳-۴-۳: روش سیستم پرنده معلق                     |
| ۲۵..... | ۳-۴-۴: روش تیرک صلب                             |
| ۲۶..... | ۳-۵: مدل‌های القای الکترومغناطیس                |
| ۲۶..... | ۳-۵-۱: زمین لایه‌ای                             |
| ۲۹..... | ۳-۵-۲: رساناهای مدفون                           |

|  |    |
|--|----|
| ۳-۵-۳: عمق اکتشاف .....                                | ۳۰ |
| ۳-۶: محدوده اثر سیستم .....                            | ۳۱ |
| ۳-۷: ارتفاع پرنده .....                                | ۳۲ |
| ۳-۸: سیستم برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری DIGHEM ..... | ۳۴ |
| ۳-۸-۱: سیم پیچ های گیرنده و فرستنده .....              | ۳۵ |
| ۳-۸-۲: گستره فرکانسی در برداشت های الکترومغناطیس ..... | ۳۷ |
| ۳-۸-۳: جدایش سیم پیچ ها و نرمال سازی .....             | ۳۹ |

#### فصل چهارم- روش های معکوس سازی الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس .....

|   |    |
|---|----|
| ۴-۱: مقدمه .....  | ۴۲ |
| ۴-۲: مقاومت ویژه الکتریکی .....   | ۴۲ |
| ۴-۳: انواع روش های معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس ..... | ۴۵ |
| ۴-۴: انواع الگوریتم ها و روش های مدل سازی الکترومغناطیس هوایی .....             | ۴۶ |
| ۴-۴-۱: مدل سازی معکوس با روش تبدیل مستقیم داده ها .....                         | ۴۶ |
| ۴-۴-۲: روش معکوس سازی داده ها با تکرار محاسبات .....                            | ۷۲ |
| ۴-۴-۳: روش های غیر دیفرانسیلی .....   | ۷۷ |
| ۴-۵: نرم افزار های تجاری جهت مدل سازی داده های الکترومغناطیس هوایی .....        | ۸۱ |

#### فصل پنجم- روش تهیه الگوریتم های معکوس سازی تقریبی الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس .....

|  |    |
|--|----|
| ۵-۱: مقدمه .....   | ۸۴ |
| ۵-۲: روش های محاسبه انتگرال ماندری .....   | ۸۲ |
| ۵-۳: روش محاسبه انتگرال ماندری به وسیله ضرایب هنکل با استفاده از روش گوپتاسامارا وسینک ..... | ۸۷ |
| ۵-۴: طراحی الگوریتم های معکوس سازی الکترومغناطیس هوایی .....                                 | ۸۹ |

#### فصل ششم- مقایسه نتایج میان روش های مختلف معکوس سازی، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات .....

|  |     |
|--|-----|
| ۶-۱: مقدمه .....   | ۱۱۲ |
| ۶-۲: نتایج حاصل از مدل سازی تقریبی معکوس الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس ..... | ۱۱۲ |
| ۶-۲-۱: مدل دو لایه .....   | ۱۱۲ |
| ۶-۲-۲: مدل چهار لایه .....   | ۱۱۲ |
| ۶-۲-۳: مقایسه نتایج با نتایج معکوس سازی BGR .....                              | ۱۱۴ |
| ۶-۲-۴: مدل زمین دو لایه .....  | ۱۲۴ |
| ۶-۲-۵: مدل زمین چهار لایه .....  | ۱۲۵ |
| ۶-۲-۶: پاسخ معکوس سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک زمین دو لایه .....        | ۱۲۸ |
| ۶-۲-۷: پاسخ معکوس سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک زمین چهار لایه .....      | ۱۲۸ |
| ۶-۲-۸: پاسخ معکوس سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک دایک قائم .....           | ۱۲۸ |
| ۶-۲-۹: بررسی پاسخ معکوس سازی تقریبی بر روی یک زمین واقعی .....                 | ۱۲۸ |

|   |     |
|---|-----|
| ۳-۶: روش یافتن مقاومت ویژه-عمق بر اساس تقسیم زمین به لایه های همگن متعدد..... | ۱۴۲ |
| ۴-۶: نتیجه گیری نهایی و ارائه پیشنهادات.....                                  | ۱۴۸ |
| ۱-۴-۶: نتیجه گیری نهایی.....  | ۱۴۸ |
| ۲-۴-۶: ارائه پیشنهادات.....   | ۱۵۰ |
| فهرست منابع مورد استفاده.....   | ۱۵۲ |

### فهرست پیوست ها

|  |      |
|--|------|
| شماره پیوست.....   | صفحه |
| پیوست الف-راهنمای استفاده از نرم افزار نگارش یافته.....                            | ۱۵۸  |
| پیوست ب-ضرایب وزنی گوپتاسامارا و سینک برای حل عددی انتگرال ماندری.....             | ۱۶۵  |
| پیوست ج- تئوری معکوس سازی تقریبی داده های الکترومغناطیس هوایی توسط روش سنگییل..... | ۱۷۰  |

### فهرست جدول ها و شکل ها

|  |      |
|--|------|
| شماره شکل - جدول.....  | صفحه |
| شکل (۱-۲): پاسخ زمین به میدان مغناطیسی اولیه.....  | ۷    |
| شکل (۲-۲): نمودار شدت پاسخ نسبت به عدد القا برای شش آرایش مختلف بر حسب عدد القا.....                               | ۱۷   |
| شکل (۱-۳): چگونگی عملکرد جریان در روش حوزه زمان.....   | ۲۱   |
| شکل (۲-۳): نحوه برداشت با روش شبه هوابرد و چگونگی آرایش فرستنده.....   | ۲۳   |
| شکل (۳-۳): نحوه برداشت با روش دوهواپیما.....   | ۲۴   |
| شکل (۴-۳): سیستم برداشت پرنده معلق (سیستم مدل GEOTEM).....   | ۲۴   |
| شکل (۵-۳): سیستم برداشت تیرک صلب.....  | ۲۵   |
| شکل (۶-۳): روش برداشت هلی کوپتری سیستم DIGHEM.....   | ۲۵   |
| شکل (۷-۳): چگونگی توزیع امواج الکترومغناطیس هوایی در یک زمین همگن.....   | ۲۷   |
| شکل (۸-۳): چگونگی شارش جریان در عمق برای سه فرکانس متفاوت برای زمینی با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر.....               | ۲۸   |
| شکل (۹-۳): شارش جریان گردابی در زمینی متشکل از لایه های رسانا و مقاوم.....   | ۲۸   |
| شکل (۱۰-۳): جریان های گردابی و میدان ثانویه ایجاد شده در توده رسانای مدفون.....                                    | ۲۹   |
| شکل (۱۱-۳): بیشترین عمق حساسیت زمین همگن برای فرکانسهای مختلف در سیستم RESOLVE.....                                | ۳۱   |
| شکل (۱۲-۳): عمق اکتشاف و محدوده اثر یک سیستم الکترومغناطیس هوایی.....  | ۳۲   |
| شکل (۱۳-۳): تاثیر ارتفاع برداشت بر حساسیت سیستم الکترومغناطیس هلیکوپتری.....                                       | ۳۳   |
| شکل (۱۴-۳): پاسخ بر روی رسانای منفردواقع در مبدا و دو رسانای مجزا با فواصل ۲۰ و ۴۰ متر با ارتفاع پرواز ۳۰ متر..... | ۴۸   |



- شکل (۳-۱۵): نحوه قرارگیری پیچه‌های سیستم DIGHEM<sup>V</sup>..... ۳۵
- شکل (۳-۱۶): پاسخ رساناهای شیبدار برای سیم‌پیچ‌های هم محور و هم صفحه..... ۳۶
- شکل (۳-۱۷): اختلاف حساسیت سیم‌پیچ‌های با فرکانس گوناگون نسبت به اهداف مختلف..... ۳۷
- شکل (۳-۱۸): پاسخ مولفه‌های همفاز و ناهمفاز به صورت تابعی از عدد القا..... ۳۸
- جدول (۴-۱): مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانیها و مواد معدنی متداول بر حسب  $(\Omega - m)$ ..... ۴۳
- شکل (۴-۱): توزیع حقیقی مقاومت ویژه (بالا) و رسانایی (پایین) در یک زمین..... ۴۴
- شکل (۴-۲): توزیع ظاهری مقاومت ویژه (بالا) و رسانایی (پایین) در یک زمین..... ۴۴
- شکل (۴-۳): پارامترهای قابل استفاده برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری..... ۴۵
- شکل (۴-۴): برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای همگن..... ۴۷
- شکل (۴-۵): نمودار دامنه-ارتفاع برای مدل نیم‌فضای همگن، در حالتی که بیشترین جفت‌شدگی سیم‌پیچ گیرنده برای فرکانس ۹۰۰ هرتز وجود دارد..... ۴۸
- شکل (۴-۶): برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای لایه کاذب..... ۴۹
- شکل (۴-۷): نمودار دامنه-فاز برای مدل نیم‌فضای لایه کاذب، در حالتی که بیشترین جفت‌شدگی سیم‌پیچ گیرنده برای فرکانس ۹۰۰ هرتز وجود دارد..... ۵۰
- شکل (۴-۸): تغییرات شدت دامنه و زاویه فاز برای یک مدل زمین دو لایه (مقاومت ویژه لایه بالایی  $100 \Omega m$  و مقاومت ویژه لایه شیبدار پایینی،  $10 \Omega m$  است)..... ۵۱
- شکل (۴-۹): الگوریتم‌های محاسبه مقاومت ویژه با عمق نفوذ کم..... ۵۴
- شکل (۴-۱۰): مدل فرضی یک لایه رسی رسانای که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع سنگپیل..... ۶۱
- جدول (۴-۲): مشخصات یک زمین چهار لایه..... ۶۲
- شکل (۴-۱۱): منحنی‌های سونداژ روش‌های سنگپیل و سیمون برای یک زمین چهار لایه..... ۶۲
- شکل (۴-۱۲): مدلی از محاسبات روش پارامتر دیفرانسیلی هوانگ..... ۶۴
- شکل (۴-۱۳): محاسبه عمق موثر بر اساس عمق ظاهری و عمق پوسته..... ۶۵
- شکل (۴-۱۴): منحنی‌های سونداژ روش‌های سنگپیل و پارامتر دیفرانسیلی برای یک زمین دولایه..... ۶۶
- شکل (۴-۱۵): مقطع بدست آمده توسط روش دیفرانسیلی برای مدلی فرضی از یک لایه رسی رسانا..... ۶۷
- شکل (۴-۱۶): منحنی‌های سونداژ روش‌های مقاطع سیمون و روش دیفرانسیلی سیمون برای یک زمین دولایه..... ۶۹
- جدول (۴-۳): مدل یک زمین چهار لایه برای مقایسه روش‌های مقاطع سیمون و روش بهبود یافته سیمون..... ۷۰
- شکل (۴-۱۷): منحنی‌های سونداژ روش‌های مقاطع سیمون و روش بهبود یافته سیمون برای یک زمین چهار لایه..... ۷۰
- شکل (۴-۱۸): منحنی‌های سونداژ روش‌های منگ و مقاطع سیمون برای یک زمین سه لایه..... ۷۱
- شکل (۴-۱۹): مدل فرضی یک لایه رسی رسانای که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع مدل‌سازی هموار اکام..... ۷۳
- شکل (۴-۲۰): الف، مقطع معکوس‌سازی شده اکام مدل فرضی شکل (۴-۱۹) با  $4 \pm$  متر خطای ارتفاع، ب، همان مقطع با انتخاب چندین لایه نازک سطحی در فرایند معکوس‌سازی..... ۷۴
- شکل (۴-۲۱): مدل فرضی یک لایه رسی رسانای که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع مدل‌سازی معکوس با لایه‌های گسسته..... ۷۵
- شکل (۴-۲۲): مقطع مدل‌سازی شده با روش لایه‌های گسسته مثال شکل (۴-۲۱) در حالتی که تعداد لایه‌ها درست انتخاب نشده..... ۷۶
- شکل (۴-۲۳): مقطع حاصل از دو روش مدل‌سازی معکوس: الف) تجزیه مقادیر تکین، ب) اکام..... ۷۷

- شکل (۵-۱): نمایش کلی فلوچارت الگوریتم معکوس سازی تقریبی الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس ..... ۹۰
- شکل (۵-۲): فلوچارت الگوریتم جدول تفسیر ..... ۹۲
- شکل (۵-۳): فلوچارت الگوریتم محاسبات پاسخ زمین برای پر کردن جدول تفسیر ..... ۹۳
- شکل (۵-۴): فلوچارت انتخاب نوع الگوریتم معکوس سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس ..... ۹۵
- شکل (۵-۵): الگوریتم جستجو در جدول تفسیر جهت یافتن بهترین پاسخ ..... ۹۶
- شکل (۵-۶): فلوچارت الگوریتم محاسبه پاسخ زمین بر اساس مقدار بدست آمده از جدول تفسیر ..... ۹۷
- شکل (۵-۷): الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش سنگپیل و سیمون ..... ۹۸
- شکل (۵-۸): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش سنگپیل و سیمون بهبود یافته ..... ۱۰۰
- شکل (۵-۹): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش دیفرانسیلی ..... ۱۰۱
- شکل (۵-۱۰): منحنی های عمق موثر در روش دیفرانسیلی ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۱۱): منحنی های مصنوعی تهیه شده جهت یافتن عمق موثر در روش دیفرانسیلی ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۱۲): الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش منگ ..... ۱۰۵
- شکل (۵-۱۳): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش عمق پوسته و نسبت مولفه حقیقی به مولفه موهومی ..... ۱۰۷
- شکل (۵-۱۵): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش های نیم فضای همگن ..... ۱۰۹
- شکل (۶-۱): نتایج معکوس سازی مدل اول ماندری (۱۹۸۴) ..... ۱۱۳
- شکل (۶-۲): نتایج معکوس سازی مدل دوم ماندری (۱۹۸۴) ..... ۱۱۴
- جدول (۶-۱): مشخصات زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی ..... ۱۱۵
- شکل (۶-۳): نتایج بدست آمده حاصل از معکوس سازی زمین دو لایه با مشخصات جدول (۶-۱) ..... ۱۱۶
- جدول (۶-۲): مشخصات زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی ..... ۱۱۵
- شکل (۶-۴): نتایج معکوس سازی زمین دو لایه جدول (۶-۲) ..... ۱۱۸
- جدول (۶-۳): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی ..... ۱۱۹
- شکل (۶-۵): نتایج بدست آمده حاصل از معکوس سازی زمین چهار لایه جدول (۶-۳) ..... ۱۲۰
- جدول (۶-۴): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی ..... ۱۲۱
- شکل (۶-۶): نتایج بدست آمده حاصل از معکوس سازی زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۴) ..... ۱۲۳
- شکل (۶-۷الف): پاسخ مدل اول ارائه شده توسط هوانگ و فریزر (۱۹۹۷) ..... ۱۲۵
- شکل (۶-۷ب): پاسخ مدل دوم ارائه شده توسط هوانگ و فریزر (۱۹۹۷) ..... ۱۲۶
- شکل (۶-۸الف): نتایج بدست آمده از مدل دو لایه در صورتی که مقادیر حقیقی و موهومی میدان الکترومغناطیس از الگوریتم پیشرو برنامه بدست آمده باشد ..... ۱۲۷
- شکل (۶-۸ب): نتایج بدست آمده از مدل چهار لایه در صورتی که مقادیر حقیقی و موهومی میدان الکترومغناطیس از الگوریتم پیشرو برنامه بدست آمده باشد ..... ۱۲۸
- جدول (۶-۵): مشخصات یک زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی ..... ۱۲۸
- شکل (۶-۹): نمایشی از یک مدل دو لایه با مقاومت ویژه لایه اول ۴۰ اهم متر و لایه دوم ۵۰ اهم متر ..... ۱۲۹
- شکل (۶-۱۰): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش سنگپیل ..... ۱۲۹
- شکل (۶-۱۱): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش سیمون ..... ۱۳۰
- شکل (۶-۱۲): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش دیفرانسیلی ..... ۱۳۰
- شکل (۶-۱۳): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش سنگپیل بهبود یافته ..... ۱۳۱
- شکل (۶-۱۴): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش سیمون بهبود یافته ..... ۱۳۱

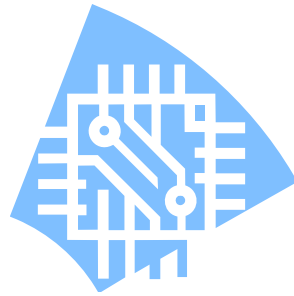
|   |     |
|---|-----|
| شکل (۶-۱۵): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش منگ   | ۱۳۲ |
| جدول (۶-۶): مشخصات یک زمین چهار لایه جهت انجام معکوس سازی   | ۱۳۲ |
| شکل (۶-۱۶): نمایشی از یک مدل چهار لایه با مقاومت ویژه لایه اول ۵۰ اهم متر، لایه دوم ۱۰۰۰ اهم متر، لایه سوم ۱ اهم متر و لایه چهارم ۱۰۰۰ اهم متر        | ۱۳۳ |
| شکل (۶-۱۷): نتایج معکوس سازی تقریبی دو بعدی یک زمین چهار لایه   | ۱۳۴ |
| شکل (۶-۱۸): نمایش یک دایک قائم با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر در میان دو منطقه مقاوم با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متر  | ۱۳۵ |
| شکل (۶-۱۹): نمایش معکوس سازی های دوبعدی انجام شده بر روی دایک قائم با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر در میان دو منطقه مقاوم با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متر      | ۱۳۶ |
| شکل (۶-۲۰): خط برداشت الکترومغناطیس هوابرد هلیکوپتری با سیستم برداشت DIGHEM   | ۱۳۷ |
| شکل (۶-۲۱): تغییرات ارتفاع پرند در برداشت الکترومغناطیس هوابرد هلیکوپتری به روش DIGHEM  | ۱۳۸ |
| شکل (۶-۲۲): پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوابرد توسط فرکانس ۵۶۰۰۰ هرتز   | ۱۳۸ |
| شکل (۶-۲۳): پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوابرد توسط فرکانس ۷۲۰۰ هرتز  | ۱۳۹ |
| شکل (۶-۲۴): پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوابرد توسط فرکانس ۹۰۰ هرتز   | ۱۳۹ |
| شکل (۶-۲۵): نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۵۶۰۰۰ هرتز است  | ۱۴۱ |
| شکل (۶-۲۶): نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۷۲۰۰ هرتز است   | ۱۴۱ |
| شکل (۶-۲۷): نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۹۰۰ هرتز است  | ۱۴۲ |
| شکل (۶-۲۸): فلوچارت الگوریتم تعیین مقاومت ویژه بر اساس تقسیم زمین به لایه های همگن متعدد  | ۱۴۵ |
| جدول (۶-۷): مشخصات یک زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی   | ۱۴۵ |
| شکل (۶-۲۹): نتایج معکوس سازی بدست آمده از زمین دو لایه با مشخصات جدول (۶-۷)   | ۱۴۶ |
| جدول (۶-۸): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی  | ۱۴۵ |
| شکل (۶-۳۰): نتایج معکوس سازی بدست آمده از زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۸)   | ۱۴۷ |
| شکل (۶-۳۰): نتایج معکوس سازی بدست آمده از زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۸) در صورتی که تغییرات مقاومت ویژه و ارتفاع پرواز به درستی تعیین شده باشند | ۱۴۸ |

## فهرست جدول ها و شکل های مربوط به پیوست های ارائه شده

|   |      |
|---|------|
| شماره شکل - جدول  | صفحه |
| شکل (الف-۱): شمایی از صفحه آغازین اجرای نرم افزار                             | ۱۵۷  |
| شکل (الف-۲): ورود اطلاعات مربوط به فرکانس                                     | ۱۵۸  |
| شکل (الف-۳): ورود اطلاعات مربوط به ایستگاه ها                                 | ۱۵۹  |
| شکل (الف-۴): ورود مقادیر برداشت شده برای هر فرکانس                            | ۱۶۰  |
| شکل (الف-۵): ورود ضرایب هنکل  | ۱۶۱  |
| شکل (الف-۶): ورود اطلاعات پایه جهت انجام فرآیند معکوس سازی                    | ۱۶۲  |
| شکل (الف-۷): نمایش پاسخ های اولیه حاصل از معکوس سازی داده های مصنوعی          | ۱۶۳  |
| شکل (الف-۸): نمایش پاسخ نهایی حاصل از معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هوایی | ۱۶۴  |
| شکل (الف-۹): نمایش پاسخ نهایی به صورت فایل اکسل                               | ۱۶۴  |

- جدول (ب-۱): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۶۱ نقطه ای  $J_0$  ..... ۱۶۶
- جدول (ب-۲): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۱۲۰ نقطه ای  $J_0$  ..... ۱۶۷
- جدول (ب-۳): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۴۷ نقطه ای  $J_1$  ..... ۱۶۸
- جدول (ب-۴): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۱۴۰ نقطه ای  $J_1$  ..... ۱۶۹

# فصل اول



کلیات

روش‌های الکترومغناطیس<sup>۱</sup> بسیار متنوع و در زمینه‌های مختلفی وارد شده و کاربرد پیدا کرده‌اند، عملیات اجرای این روش‌ها سریع و نسبتاً کم هزینه است؛ از این رو روش‌های الکترومغناطیس به سرعت در حال توسعه می‌باشند. این روش‌ها در بین روش‌های ژئوفیزیکی دیگر (به استثنای روش مغناطیسی) بیشترین کاربرد را در اکتشاف مواد معدنی دارند. روش‌های الکترومغناطیس نسبت به سایر روش‌ها تنوع بیشتری در برداشت داده‌ها از سطح زمین را دارا هستند [Reynolds, 1997]. همان‌طور که از نام روش‌های الکترومغناطیس پیدا است، در این روش‌ها میدان‌های الکترومغناطیس موج مداوم<sup>۲</sup> یا گذرا<sup>۳</sup> در بالای سطح زمین یا درون زمین منتشر می‌گردند. در این روش‌ها فرستنده، گیرنده و توده‌های مدفون، در یک تقابل سه‌جانبه با میدان الکترومغناطیسی قرار دارند و جریان‌های الکتریکی در داخل توده‌های هادی به همراه القای الکترومغناطیس، بطور همزمان به وجود می‌آیند. از آنجا که القای جریان الکتریکی توسط مولفه مغناطیسی میدان الکترومغناطیس اولیه صورت می‌گیرد، لذا نیازی به تماس مستقیم فرستنده و گیرنده با زمین نیست. به همین دلیل اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیس بسیار سریع‌تر از روش‌های الکتریکی انجام می‌شود [Nabighian, 1996]. اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیس می‌تواند به دو صورت غیرفعال<sup>۴</sup> یا فعال<sup>۵</sup> انجام شوند. در اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی به صورت فعال، از سیگنال‌های طبیعی زمین (نظیر مگنتوتلوریک) استفاده می‌شود. اما در اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی به صورت غیر فعال در یک مکان مشخص؛ یک فرستنده مصنوعی در نزدیکی محل برداشت و یا در مکانی دورتر از محل برداشت (مثل فرستنده‌های رادیویی نظامی و غیرنظامی در روش‌هایی نظیر امواج با فرکانس بسیار پایین<sup>۶</sup> (۱۵ تا ۲۵ کیلوهرتز) و مگنتوتلوریک رادیویی<sup>۷</sup>) نصب می‌شود. دامنه اجرایی یا حیطه انجام این روش‌ها شامل زمین، هوا، دریا و درون گمانه است [Nabighian, 1996].

روش‌های الکترومغناطیسی در دو حوزه فرکانس و زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های حوزه فرکانس تفسیر ساده‌تری نسبت به روش‌های حوزه زمان دارند و روابط حاکم بر آنها ساده‌تر می‌باشد

<sup>1</sup> Electromagnetic methods (EM)

<sup>2</sup> Continuous

<sup>3</sup> Transient

<sup>4</sup> Passive

<sup>5</sup> Active

<sup>6</sup> Very Low Frequency (VLF)

<sup>7</sup> Radio Magneto Telluric (RMT)

[Nabighian, 1996]. به طور کلی روش‌های الکترومغناطیس را می‌توان به دو صورت؛ هوایی و زمینی به کار بست. روش‌های الکترومغناطیس هوایی نسبت به روش‌های الکترومغناطیس زمینی بسیار سریع‌تر انجام می‌گیرند و از این رو می‌توان منطقه وسیعی را در مدت زمانی کوتاه برداشت نمود.

البته شایان ذکر است که روش‌های هوایی قدرت نفوذ کمی دارند و نوفه<sup>۸</sup> در داده‌های برداشت شده بیشتر وارد می‌شود، از طرفی تفسیر آنها مشکل‌تر و روابط ریاضی حاکم بر آنها در مقایسه با سایر روش‌های الکترومغناطیس پیچیده‌تر است. همچنین برای آن که جواب‌های به دست آمده قابل اعتماد باشند؛ نیازمند تصحیحات متعدد بر روی داده‌های برداشت شده می‌باشیم.

در روش‌های حوزه فرکانس توسط هلی‌کوپتر به علت قدرت بالاتر مانور هلی‌کوپتر و پایین بودن ارتفاع پرواز، مقادیر برداشت شده دارای دقت بالاتری هستند و بی‌هنجاری‌های کم عمق را بهتر از سایر روش‌های هوایی می‌توان نشان داد. از این رو در این پایان‌نامه روش الکترومغناطیس هوایی هلی‌کوپتری<sup>۹</sup> در حوزه فرکانس مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

#### ۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده

در زمینه برداشت الکترومغناطیس هوایی کارهای وسیعی انجام شده است. که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

مدل‌سازی پیشرو و معکوس داده‌های اکتشافی الکترومغناطیس هوایی (روش دیگهم) [تمدن، ۱۳۸۶]، اکتشافات منابع معدنی [Sengpiel & Siemon, 2000]، مطالعه آب‌های زیر زمینی [Yin&Fraser, 2004]، نقشه برداری زمین شناسی [Huang & Fraser, 1996, 2002a & band 2003؛ Fraser, 1978]، مکانیابی محل‌های دفن مهمات منفجر نشده<sup>۱۰</sup> (UXO) [Asten & Duncan, 2006؛ Beard et al, 2004]، عمق سنجی بستر دریا [Yapar, 2006] و اکتشافات منابع گرمایی [Harinarayana & Zlotnicki, 2006] را نام برد.

<sup>8</sup> Noise

<sup>9</sup> Helicopter Electromagnetic (HEM)

<sup>10</sup> Unexploded ordnance(UXO)

## ۳-۱- ضرورت انجام پایان نامه

به علت اینکه برداشت الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری از دقت بالاتری نسبت به روش‌های هوایی دیگر برخوردار است از این رو برداشت توسط این روش در حال گسترش است. از طرف دیگر تا کنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه روش‌های تفسیر داده‌ها در کشور ما صورت نگرفته است. به خصوص هنگامی که به بررسی روش‌های معکوس‌سازی می‌پردازیم از یافتن یک الگوی مناسب جهت استفاده دانشجویان و مراکز علمی جهت بررسی روند معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی باز می‌مانیم. البته نرم‌افزارهای بسیار خوبی در زمینه تهیه مدل‌های زمین لایه‌ای در کشور ما وجود دارند اما هیچ یک از این نرم‌افزارها تولید داخل کشور نمی‌باشند و جهت کارهای مطالعات پایه‌ای به کار نمی‌آیند، چرا که کد این نرم‌افزارها به دلیل تجاری بودن نرم‌افزار در اختیار افراد و موسسات قرار داده نمی‌شود. از این رو ما بر آن شدیم تا در این پایان‌نامه به بررسی مدل‌های مختلف معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری در حوزه فرکانس بپردازیم و در نهایت نرم‌افزاری را بر این اساس تهیه نماییم تا در زمینه مدل‌سازی الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری در حوزه فرکانس، جهت کارهای پژوهشی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۴-۱- هدف از مطالعه حاضر

باید توجه داشت که نرم‌افزارهای بسیار خوبی در کشور ما وجود دارند اما هیچ یک از این نرم‌افزارها تولید داخل کشور نمی‌باشند و جهت مطالعات پایه‌ای به کار نمی‌آیند، چرا که کد این نرم‌افزارها در اختیار افراد و مراکز تحقیقاتی قرار داده نمی‌شود. از این رو در این پایان‌نامه به نوشتن دو برنامه مجزا برای حالت‌های پیشرو<sup>۱۱</sup> و معکوس‌سازی<sup>۱۲</sup> داده‌های الکترومغناطیس هوایی پرداخته‌ایم. هر دو برنامه با کمک آقای دکتر سیمون<sup>۱۳</sup> با نتایج مرکز مطالعاتی BGR<sup>۱۴</sup> که در شهر هانور<sup>۱۵</sup> کشور آلمان قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته و با مقایسه میان نتایج مشخص گردید برنامه‌های نگارش یافته از دقت عمل خوبی برخوردار هستند.

برای رسیدن به این هدف، مدل‌های مختلف معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری در حوزه فرکانس را مورد بررسی قرار دادیم. از طرفی جهت استفاده دانشجویان، اساتید و دیگر مراکز علمی

---

<sup>11</sup> Forward

<sup>12</sup> Inversion

<sup>13</sup> Siemon

<sup>14</sup> Geosciences and Natural Resources

<sup>15</sup> Hanover



الگوریتم‌های معکوس‌سازی جهت برنامه کامپیوتری برای مدل‌های ارائه شده را تهیه نمودیم، تا افراد به راحتی قادر به بررسی روند معکوس‌سازی باشند، و به راحتی بتوانند کدهای مندرج در بدنه برنامه را تغییر دهند. البته باید توجه داشت که تمامی مطالعات انجام شده هنوز در ابتدای راه قرار دارد و برای رسیدن به یک برنامه صحیح و بیان قطعیت در به دست آوردن نتایج هنوز در ابتدای راه قرار داریم، از این رو امیدواریم در آینده‌ای نزدیک شاهد ارائه یک نرم‌افزار کامل در این زمینه برای کارهای پژوهشی باشیم.

در این پایان‌نامه برنامه‌های کامپیوتری بر اساس زبان برنامه‌نویسی ویژوال سی-شارپ<sup>۱۶</sup> ساخت شرکت میکروسافت<sup>۱۷</sup> و بانک اطلاعات اس-کیو-ال سرور میکروسافت<sup>۱۸</sup> تهیه شده است. تمام ابزارهای مورد استفاده در کدنویسی برنامه‌ها به صورت رایگان بوده و تحت مجوز استفاده آزاد<sup>۱۹</sup> می‌باشند. کد این برنامه به صورت آزاد بوده تا افراد به راحتی بتوانند در کدهای آن تغییرات مورد نظر خود را اعمال دارند و نتایج را بر اساس موارد مورد نظر مشاهده کنند و در نهایت در صورت لزوم کد برنامه را اصلاح و آن را تکمیل نمایند.

#### ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۶ فصل تهیه و تنظیم گردیده است. در فصل اول کلیات و مقدمه‌ای در مورد تحقیق حاضر و همچنین ضرورت و هدف انجام آن مطالبی ارائه گردید. در فصل دوم به بیان تئوری برداشت الکترومغناطیس می‌پردازیم. در فصل سوم به روش‌های برداشت الکترومغناطیس هوایی و بیان کامل روش برداشت الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری در حوزه فرکانس می‌پردازیم. در فصل چهارم روش‌های معکوس‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم به تشریح الگوریتم‌های محاسباتی ارائه شده در این پایان‌نامه می‌پردازیم و در نهایت در فصل ششم به تشریح نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده و مقایسه پاسخ آنها با پاسخ نرم‌افزارهای پایه‌ای دیگر نظیر نتایج مرکز تحقیقاتی BGR و نرم‌افزار HEM-Geosoft، پرداخته می‌شود و در انتهای فصل به بیان نتایج و ارائه پیشنهادات لازم جهت کارهای آینده خواهیم پرداخت.

<sup>16</sup> Visual C#

<sup>17</sup> Microsoft

<sup>18</sup> Microsoft SQL database

<sup>19</sup> Free

# فصل دوم

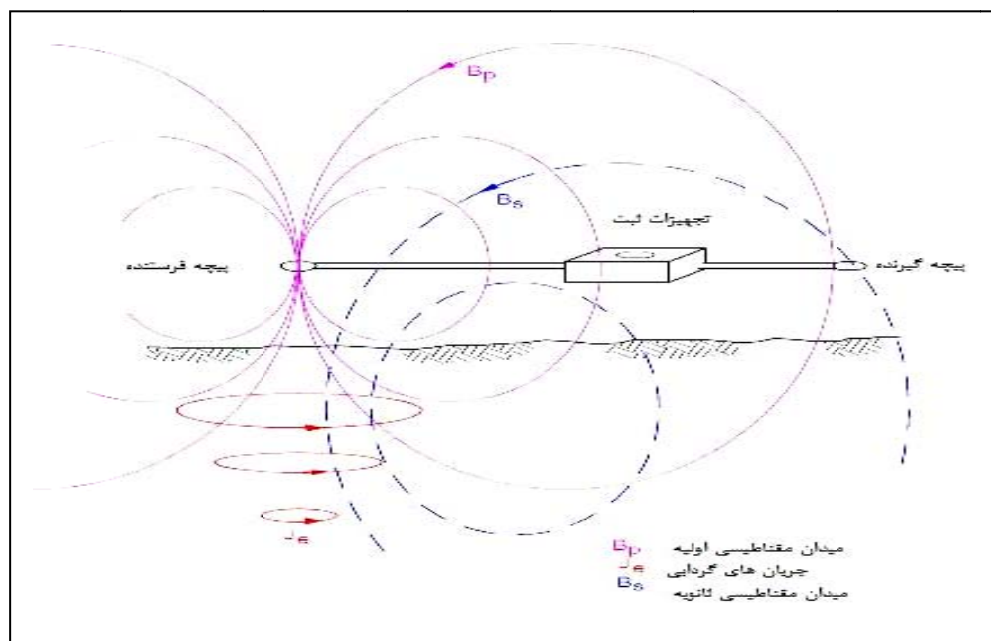


تئوری روش الکترومغناطیس

## ۲-۱- مقدمه

اساس روش الکترومغناطیس، ایجاد و ارسال میدان الکترومغناطیس (میدان اولیه<sup>۱</sup>) توسط یک فرستنده<sup>۲</sup> به داخل زمین و سپس دریافت و اندازه‌گیری میدان الکترومغناطیس ثانویه (القایی) بوسیله یک گیرنده<sup>۳</sup> است. با توجه به روش الکترومغناطیس مورد مطالعه، وضعیت قرارگیری و فاصله فرستنده و گیرنده<sup>۴</sup> نسبت به یکدیگر می‌تواند متفاوت باشد؛ معمولاً چشمه جریان فرستنده میدان اولیه و گیرنده میدان الکترومغناطیس از سیم‌پیچ‌هایی با چندین دور ساخته شده‌اند. مستقل از روش به کار رفته، در نهایت توزیع مقاومت ویژه نسبت به عمق به دست می‌آید [Dobrin & Sovit, 1988].

در شکل (۲-۱) همان گونه که مشخص است در اثر اعمال جریان الکترومغناطیس به درون یک محیط، وجود یک جسم رسانا در آن محیط سبب تغییر در شکل میدان اولیه می‌گردد. این تغییر میدان در سیم‌پیچ گیرنده به همراه میدان مغناطیسی اولیه دریافت می‌گردد.



شکل (۲-۱): پاسخ زمین به میدان مغناطیسی اولیه

تئوری روش‌های الکترومغناطیس بر پایه روابط ماکسول می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم معادلات ماکسول بر اساس روابط زیر تعریف می‌گردند:

- <sup>1</sup> Primary field
- <sup>2</sup> Transmitter
- <sup>3</sup> Receiver
- <sup>4</sup> T-R separation

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4-2)$$

هر یک از این معادلات بیان کننده تعمیم یک دسته از مشاهدات تجربی هستند [Reitz et al, 1993]. حال به بیان تئوری القا الکترومغناطیس که اساس کارهای الکترومغناطیس را شامل می شود می پردازیم. بر این اساس ابتدا به بیان قانون آمپر<sup>5</sup> و روابط حاکم بر آن پرداخته و سپس قانون القای فاراده<sup>6</sup> که بیانگر القای متقابل میان دو سیم پیچ می باشد، را بیان می کنیم.

## ۲-۲- القا متقابل و خودالقایی

طبق قانون آمپر نیروی بین دو حلقه حاوی جریان الکتریکی را می توان به صورت رابطه (۲-۵) بیان

نمود:

$$\vec{F}_{ab} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_a I_b \oint_a \oint_b \frac{d\vec{l}_b \times (d\vec{l}_a \times \vec{r}_{12})}{r^2} \quad (5-2)$$

که در آن،  $d\vec{l}_a$  و  $d\vec{l}_b$  به ترتیب جزءهای طولی دو حلقه  $a$  و  $b$ ،  $r$  فاصله بین این دو جزء و  $\vec{r}_{12}$  بردار یکه قائم، در امتداد خط واصل بین این دو جزء طولی است. بر طبق قانون سوم نیوتن نیروی اعمال شده از سوی حلقه  $a$  به  $b$  برابر نیروی اعمال شده از سوی حلقه  $b$  به  $a$  می باشد. اگر در این رابطه نیرو از طرف حلقه  $a$  بر حلقه  $b$  اعمال شود؛ رابطه (۲-۵) به صورت (۲-۶) نوشته می شود [Reitz et al, 1993]:

$$\vec{F}_{ab} = I_b \oint_b d\vec{l}_b \times \left[ \frac{\mu_0}{4\pi} I_a \oint_a \frac{(d\vec{l}_a \times \vec{r}_{12})}{r^2} \right] \quad (6-2)$$

عبارت داخل کروشه در رابطه (۲-۶) خاصیتی از حلقه  $a$  را بیان می کند که با تاثیر متقابل بر روی حلقه  $b$ ، باعث وارد آمدن نیرویی بر این حلقه می شود. این اثر را می توان ناشی از اعمال یک عامل خارجی یا میدان

<sup>5</sup> Ampere

<sup>6</sup> Faraday

خارجی<sup>۷</sup> دانست. از این رو نیروی وارد بر جزء طولی  $d\vec{\ell}_b$  که حامل جریان حلقه<sup>۸</sup>  $b$  است، از رابطه (۷-۲) به دست می‌آید.

$$d\vec{F}_b = I_b d\vec{\ell}_b \times \vec{B} \quad (7-2)$$

پارامتر  $\vec{B}$  بیان‌گر میدان مغناطیسی خارجی می‌باشد. این میدان مغناطیسی توسط قانون بیوساوار<sup>۹</sup> برای یک توزیع حجمی، با چگالی جریان  $\vec{J}$ ، از رابطه (۸-۲) به دست می‌آید [Reitz et al, 1993].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times \vec{r}_1}{r^2} dV \quad (8-2)$$

که در آن  $dV$  جزء حجم مورد نظر است. از طرفی همان طور که می‌دانیم:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (9-2)$$

این رابطه، به نام شکل دیفرانسیلی قانون آمپر<sup>۱۰</sup> خوانده می‌شود. در این رابطه از تغییرات جریان جابجایی صرف نظر شده است.

اما شار<sup>۱۱</sup> مغناطیسی ( $\Phi$ ) گذرنده از حلقه دوم با توجه به تعریف شار، از انتگرال‌گیری مولفه عمود بر سطح میدان مغناطیسی ( $\vec{B}$ ) (عمود بر سطح گذرنده از حلقه دوم) در یک مسیر بسته که آن را در بر می‌گیرد، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Phi_2 = \oint_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (10-2)$$

از طرفی میدان مغناطیسی متغیر با زمان، ضمن عبور از یک حلقه، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی<sup>۱۱</sup> در حلقه<sup>۱۰</sup> مورد نظر می‌گردد. این نیروی محرکه که به سبب تغییر شار مغناطیسی پدیدار می‌گردد، با  $\text{emf}$  نمایش داده می‌شود [Reitz et al; 1993].

لذا داریم:

$$\text{emf} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (11-2)$$

<sup>7</sup> External Force

<sup>8</sup> Biot and Savart

<sup>9</sup> Ampere's Law

<sup>10</sup> Flow

<sup>11</sup> Electromotive Force

در این رابطه،  $\vec{E}$  بردار میدان الکتریکی،  $d\vec{\ell}$  جزء طول در امتداد مدار یا حلقه بسته و  $t$  زمان است. همان طور که می دانیم میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  عبوری از حلقه دوم، با جریان عبوری از حلقه اول، متناسب است. پس می توان  $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$  را با استفاده از قاعده مشتق زنجیره ای<sup>۱۲</sup> به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = \frac{d\Phi_2}{dI_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (12-2)$$

برای هر مدار دلخواه، مقدار  $\frac{d\Phi_2}{dI_1}$  ثابت است و آن را القای متقابل<sup>۱۳</sup> بین حلقه اول و دوم می نامند و با

$M_{12}$  نمایش می دهند [Telford et al; 1990]. از این رو برای  $M_{12}$  می توان چنین نوشت:

$$M_{12} = \frac{\Phi}{i_2} = \int_{S_1} \frac{\mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{s}_1}{i_2} = \int_{S_1} \frac{\nabla \times \mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{s}_1}{i_2} = \oint_{C_1} \frac{\mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{l}_a}{i_2} \quad (13-2)$$

که در آن،  $S_1$  یک سطح بسته محدود بر روی سطح بسته  $C_1$  است. در نهایت به کمک قانون بیوساوار به حالت کلی فرمول نیومن<sup>۱۴</sup> برای القای متقابل می رسیم:

$$M_{12} = \oint \frac{\mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{l}_a}{i_2} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{d\mathbf{l}_a \cdot d\mathbf{l}_b}{r} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{\cos \theta}{r} d\mathbf{l}_a \cdot d\mathbf{l}_b \quad (14-2)$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه بین عناصر طول دو مدار است. این رابطه در صورتی که حلقه مورد نظر دارای شکل هندسی خاص باشد، القای متقابل توسط روش های متداول انتگرال گیری قابل حل است. اما در بسیاری از موارد به دلیل آن که شکل حلقه یک شکل هندسی خاص نیست، برای به دست آوردن پاسخ، لازم است انتگرال گیری با روش های عددی انجام شود. به عنوان مثال برای دو حلقه دایره ای هم محور<sup>۱۵</sup> با شعاع های  $a$  و  $b$  که فاصله آنها از یکدیگر  $r$  است؛ مقدار القای متقابل وابسته به شعاع دو حلقه و فاصله آنها از یکدیگر است و بوسیله پارامتر  $k$ ،

<sup>12</sup> Chain Rule

<sup>13</sup> Mutual Inductance

<sup>14</sup> Neumann Formula

<sup>15</sup> Coaxial

مطابق رابطه زیر کنترل می‌شود.

$$k = \left[ \frac{(a-b)^2 + r^2}{(a+b)^2 + r^2} \right]^{1/2} \quad (15-2)$$

مقدار این پارامتر برای مقادیر مختلف  $a$ ،  $b$  و  $r$  به صورت جداولی تهیه شده است و مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً وقتی  $r \geq 10a$  و یا  $r \geq 10b$  باشد؛ مقدار تقریبی القای متقابل دو حلقه دایره‌ای  $a$  و  $b$  برابر است با [Telford et al, 1990]:

$$M = \frac{0.2\pi a^2 \pi b^2}{r^3} \approx \frac{2a^2 b^2}{r^3} \quad (16-2)$$

همچنین برای برای دو حلقه دایره‌ای هم‌صفحه<sup>۱۶</sup> با شعاع‌های  $a$  و  $b$  که فاصله مراکز آنها از یکدیگر  $r$  است، با شرط  $r \gg a$  و  $r \gg b$ ؛ مقدار القای متقابل برابر است با [Telford et al, 1990]:

$$M = -\frac{0.1\pi a^2 \pi b^2}{r^3} \approx -\frac{a^2 b^2}{r^3} \quad (17-2)$$

باید توجه داشت در یک مدار واحد حامل جریان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی تولید می‌شود، این میدان تنها از خود مدار عبور می‌کند. بنابراین بین شار عبوری از مدار و جریان مربوط به آن، رابطه (۱۸-۲) برقرار می‌گردد. این رابطه به عنوان خودالقایی<sup>۱۷</sup> ( $L$ ) نامیده می‌شود [Reitz et al, 1993].

$$L = \frac{\partial \Phi_1}{\partial I_1} \quad (18-2)$$

به کمک قضیه استوکس<sup>۱۸</sup> می‌توان شکل دیفرانسیلی قانون فاراده را نیز مطابق رابطه (۲-۲) که در ابتدای فصل بیان شده است، به دست آورد [Reitz et al, 1993].

تئوری القای فاراده برای توجیه القای الکترومغناطیس در فرکانس‌های پایین و در رساناهای خوب معتبر است. اما برای تعمیم آن باید پارامتر دیگری را نیز به این رابطه افزود. برای بیان این موضوع نیازمند معادلات ماکسول می‌باشیم. بر این اساس "نیروی محرکه القایی که فاراده در یک مدار مشاهده نمود، باید در فضای آزاد<sup>۱۹</sup>

<sup>16</sup> Coplanar

<sup>17</sup> Self inductance

<sup>18</sup> Stokes' Theorem

<sup>19</sup> Free space

(خلاء) و در تمامی محیطها وجود داشته باشد. از این رو باید "شکلی از جریان در فضای آزاد (خلاء) وجود داشته باشد و این جریان باید بر میزان تغییرات میدان الکتریکی نسبت به زمان عمود باشد". به این ترتیب بردار جابجایی<sup>۲۰</sup> ( $\vec{D}$ ) باید به صورت زیر تعریف گردد. مقدار این بردار برای فضای آزاد از رابطه (۱۹-۲) به دست می آید:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (19-2)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ضریب ثابت گذردهی<sup>۲۱</sup> هوا یا خلاء می باشد. در صورتی که محیطی با ثابت دی الکتریک<sup>۲۲</sup> (C)، در نظر بگیریم رابطه (۲) -

(۱۹) با توجه به اینکه  $C = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  در نظر گرفته شود، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{D} = C \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (20-2)$$

در این روابط،  $\left(\frac{V \cdot s}{Am}\right)$   $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ ، ضریب گذردهی خلاء (فضای آزاد) نامیده می شود. از این رو با

اعمال جریان جابجایی<sup>۲۳</sup>  $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)$ ، در قانون آمپر، تعمیم قانون آمپر بصورت رابطه (۲۱-۲) ارائه می گردد [Reitz et al, 1993].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (21-2)$$

مجموعه کامل معادلات ماکسول در حوزه فرکانس و با وابستگی زمانی  $e^{i\omega t}$  به شرطی که بار حجمی

وجود نداشته باشد، به صورت زیر بیان می گردد:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + i\omega \vec{D} = (\sigma + i\omega \epsilon) \vec{E} \quad (\text{قانون آمپر}) \quad (22-2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega \mu \vec{H} \quad (\text{قانون فاراده}) \quad (23-2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (\nabla \cdot \vec{H} = 0 \ \& \ \nabla \cdot \vec{E} = 0) \quad (24-2)$$

<sup>20</sup> Displacement vector

<sup>21</sup> Permiability

<sup>22</sup> Dielectric constant

<sup>23</sup> Displacement current



که در این روابط پارامتر  $\vec{H}$  شدت میدان مغناطیسی،  $i = \sqrt{-1}$  مولفه مختلط،  $\omega$  فرکانس زاویه ای<sup>۲۴</sup> و  $\sigma$  میزان رسانندگی را نشان می‌دهند. معادلات ماکسول می‌توانند در یک معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه دوم به صورت رابطه (۲۵-۲) با یکدیگر ترکیب شوند.

اگر از طرفین قانون آمپر (رابطه (۲۲-۲))، کرل (ضرب خارجی با عامل  $\nabla$ ) بگیریم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= \nabla \times (\vec{J} + i\omega\vec{D}) = (\sigma + i\omega\varepsilon)\nabla \times \vec{E} \\ &= -i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)\vec{H} \\ &= (\omega^2\mu\varepsilon - i\omega\mu\sigma)\vec{H}\end{aligned}\quad (25-2)$$

از طرفی با توجه به تعریف لاپلاسیان، داریم:

$$\nabla^2 \vec{H} = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla \times \nabla \times \vec{H} \quad (26-2)$$

و با توجه به رابطه (۲۴-۲) مشخص است که مقدار  $\nabla \cdot \vec{H} = 0$  است؛ از این رو رابطه (۲۵-۲) به صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$\nabla^2 \vec{H} + (\omega^2\mu\varepsilon - i\omega\mu\sigma)\vec{H} = 0 \quad (27-2)$$

یا

$$\nabla^2 \vec{H} + \kappa^2 \vec{H} = 0 \quad (28-2)$$

که در آن،  $\kappa = \omega^2\mu\varepsilon - i\omega\mu\sigma$  ثابت پخش<sup>۲۵</sup> محیط نامیده می‌شود. این معادله، به معادله هلمولتز<sup>۲۶</sup> معروف است [Reitz et al, 1993] و مفهوم آن بر اساس قضیه هلمولتز این است که، اگر دیورژانس و کرل یک بردار در کلیه نقاط فضا معلوم باشد؛ این بردار را می‌توان بطور کامل تعیین نمود. به عبارت دیگر، اگر منابع بوجود آورنده یک میدان مغناطیسی معلوم باشند، آن میدان بطور کامل قابل محاسبه است.

اگر تغییرات میدان مغناطیسی به صورت نمایی ( $e^{i\omega t}$ ) صورت گیرد، می‌توان نشان داد که در روابط به

جای  $(\frac{\partial}{\partial t})$  می‌توان  $(i\omega)$  قرار داد. از این رو نسبت جریان رسانایی<sup>۲۷</sup>،  $(\vec{J})$ ، به جریان جابجایی  $(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t})$  بر اساس

رابطه (۲۹-۲) برابر  $(\frac{\sigma}{\omega\kappa\varepsilon})$  می‌گردد.

<sup>24</sup> Angular frequency

<sup>25</sup> Propagation constant

<sup>26</sup> Helmholtz Equation

<sup>27</sup> Conduction Currents

$$\left| \frac{\vec{J}}{\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}} \right| = \frac{\sigma \vec{E}}{\omega \kappa \epsilon_0 \vec{E}} = \frac{\sigma}{\omega \kappa \epsilon_0} \quad (2-29)$$

این نسبت برای مقادیر معمول  $\sigma$  و  $\kappa$  در سنگ‌ها به ترتیب برابر  $0/1$  (زیمنس بر متر) و  $3$  است.

[<http://www.appliedgeophysics.berkeley.edu>]

با استفاده از یک تقریب مناسب؛ در صورتی که رابطه  $\frac{6 \times 10^8}{f}$ ، که در آن  $f$  فرکانس است را در نظر

بگیریم، (به جز هنگامی که فرکانس مورد استفاده بالاتر از  $10^6$  هرتز (۱ مگا هرتز) باشد)؛ می‌توان از جریان‌های جابجایی صرف‌نظر نمود. از سوی دیگر با توجه به قوانین آمپر و فاراده داریم:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = i\omega\mu(\nabla \times \vec{H}) = i\omega\mu(\sigma\vec{E} - i\epsilon\omega\vec{E}) \quad (2-30)$$

با استفاده از تعریف لاپلاسین داریم:

$$\nabla^2 \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla \times \nabla \times \vec{E} \quad (2-31)$$

و نیز

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu(\sigma\vec{E} - i\epsilon\omega\vec{E}) \quad (2-32)$$

با استفاده از فرض رابطه (2-24)،  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$  داریم:

$$\nabla^2 \vec{E} + (\omega^2 \mu \epsilon - i\omega\mu\sigma)\vec{E} = 0 \quad (2-33\text{-الف})$$

$$\nabla^2 \vec{E} + \kappa^2 \vec{E} = 0 \quad (2-33\text{-ب})$$

برای سنگ‌های مقاوم،  $\nabla^2 \vec{E} \approx 0$  است. از طرفی، با مقایسه رابطه‌های (2-27) و (2-33-الف) و (2-33-ب) روابط مشابهی برای  $\vec{H}$  نیز می‌توان بدست آورد. بنابراین در تمامی موارد بخش حقیقی، طرف راست معادله (که وابسته به جریان جابجایی است)، ناچیز فرض می‌شود. در نتیجه، برای هوا و سنگ‌های مقاوم، معادله هلمولتز به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود و داریم:

$$\nabla^2 \vec{H} = 0 \quad (2-34\text{-الف})$$

$$\nabla^2 \vec{E} = 0 \quad (2-34\text{-ب})$$

در صورتی که برای یک رسانای خوب قسمت موهومی روابط (2-27) و (2-32) مهم است و این روابط

به شکل رابطه (2-33-الف) و (2-33-ب) نوشته می‌شوند:

$$\nabla^2 E \approx \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} \approx i\omega\mu\sigma E \quad (2-33\text{-الف})$$

$$\nabla^2 H \approx \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} \approx i\omega\mu\sigma H \quad (2-33\text{-ب})$$

روابط فوق معادله پخش<sup>۲۸</sup> نامیده می‌شوند. حل این معادله در حالت کلی بسیار دشوار است البته با استفاده از روش‌های مختلف عددی می‌توان به پاسخ‌هایی برای آنها دست یافت. به عنوان مثال در حالتی که موج انتشار یافته به صورت تخت (موجی که میدان‌های الکترومغناطیس در صفحه  $xy$  پلاریزه می‌شوند و در راستای قائم منتشر می‌شود) باشد؛ یک راه حل تحلیلی برای حل آن وجود دارد [Telford et al; 1990].

در حالت دوبعدی موج به دو حالت پلاریزاسیون مغناطیسی عرضی<sup>۲۹</sup> (TM) و پلاریزاسیون الکتریکی عرضی<sup>۳۰</sup> (TE) تجزیه می‌گردد در این حالت با کمک روش‌های حل عددی مانند اجزا محدود<sup>۳۱</sup> یا تفاضل محدود<sup>۳۲</sup> مساله را می‌توان حل نمود. در حالت سه بعدی حل مساله در حالت کلی دشوار است ولی برای مدل‌های ساده می‌توان به کمک معادلات انتگرالی جواب را تخمین زد.

### ۲-۳-۲- عمق پوسته

بر اساس رابطه (۲-۳۱-الف) و (۲-۳۱-ب)، برای مقادیر اندک عدد القا<sup>۳۳</sup>، مربع مقدار عدد موج ( $K$ ) برابر است با [Kaufman & Hoekstra, 2001]:

$$\kappa^2 = i\omega\mu\sigma \quad (2-34)$$

حال اگر ریشه دوم رابطه (۲-۳۴) را محاسبه نماییم؛ داریم:

$$\kappa = \frac{1}{p} + i \frac{1}{p} \quad (2-35)$$

که در آن،  $p = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \cong 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$  است این پارامتر عمق پوسته<sup>۳۴</sup> نامیده می‌شود. این پارامتر، یکی از

پارامترهای مفید در مطالعات اکتشافی روش الکترومغناطیس است؛ که به عنوان معیاری برای نفوذ امواج

<sup>28</sup> Diffusion equation

<sup>29</sup> Transverse Magnetic

<sup>30</sup> Transverse Electric

<sup>31</sup> Finite element

<sup>32</sup> Finite Differential

<sup>33</sup> Induction number

<sup>34</sup> Skin depth

الکترومغناطیسی در داخل زمین، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنا به تعریف، عمق پوسته برای یک زمین همگن و همسانگرد، برابر با عمقی است که در آن دامنه موج به  $1/e$  مقدار اولیه‌اش در سطح زمین، کاهش می‌یابد. در این رابطه با افزایش مقاومت ویژه زمین ( $\rho$ )، عمق پوسته افزایش و با افزایش فرکانس میدان الکترومغناطیسی، عمق پوسته کاهش خواهد داشت و قدرت نفوذ امواج به داخل زمین کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه اینکه، مقدار عمق پوسته می‌تواند در تخمین عمق اکتشاف<sup>۳۵</sup> برداشت‌های الکترومغناطیس مورد استفاده قرار گیرد [Nabighian, 1996].

#### ۲-۴- پاسخ نیم‌فضا

برای چشمه‌های واقع در سطح یک زمین نیم‌فضای لایه‌ای<sup>۳۶</sup>، مولفه‌های مختلف میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فاصله  $r$  از چشمه را می‌توان به صورت تابعی از عدد القای ( $\beta = \sigma\mu \cdot \omega r^2$ ) رسم نمود. شکل (۲-۲) اندازه این میدان‌ها (شدت پاسخ) را بر حسب عدد القا برای شش آرایش فرستنده-گیرنده نشان می‌دهد.

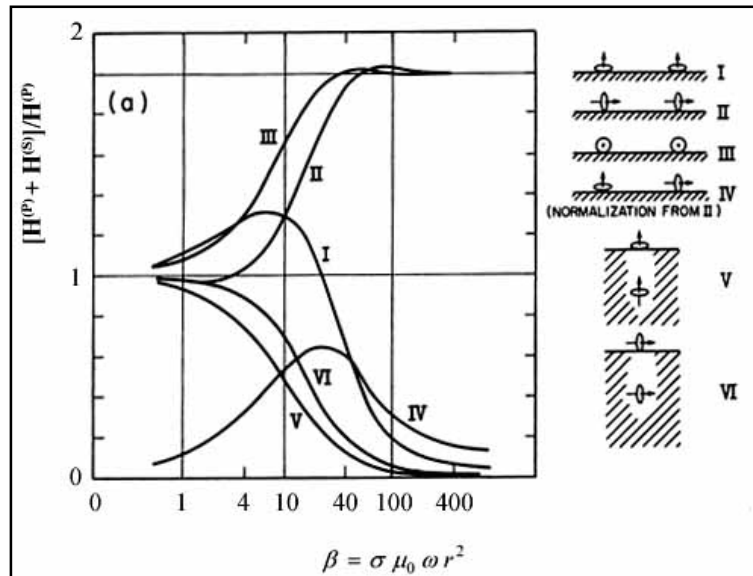
شدت و زاویه فاز میدان ثانویه به اندازه و رسانندگی توده رسانا بستگی دارد؛ ضمن اینکه اندازه و تا حدودی زاویه فاز، به جهت گیری نسبی و فاصله بین فرستنده با توده رسانا و توده رسانا با گیرنده نیز وابسته است. از این موضوع با نام جفت شدگی<sup>۳۷</sup> اجزا در سیستم، یاد می‌شود. از این رو جفت شدگی عبارت است از حاصل ضرب سطح رسانا در سینوس زاویه بین خطوط میدان با صفحه رسانا ( $A_e \sin\beta$ ).

مطابق با تعریف بالا بهترین جفت شدگی بین فرستنده و رسانا حالتی است که، رسانا به فرستنده نزدیک بوده و زاویه میدان اولیه با صفحه رسانا ۹۰ درجه باشد و یا هنگامی که فاصله توده رسانا با گیرنده کم و زاویه میدان ثانویه حاصل از رسانا بر گیرنده ۹۰ درجه باشد. باید توجه داشت، در اثر جابجایی سیستم برداشت نسبت به توده رسانا، میزان جفت شدگی تغییر می‌کند. لذا شکل بی‌هنجاری به دست آمده، در تفسیر هندسه توده رسانا نقش مهمی ایفا می‌کند [http://www.appliedgeophysics.berkeley.edu].

<sup>35</sup> Depth of exploration

<sup>36</sup> Layered half-space

<sup>37</sup> Coupling



شکل (۲-۲): نمودار شدت پاسخ نسبت به عدد القا برای شش آرایش مختلف بر حسب عدد القا

[<http://www.appliedgeophysics.berkeley.edu>]

از سوی دیگر به راحتی می‌توان ثابت نمود که جفت شدگی القایی بین مدارهای الکتریکی متناسب با ضریب القای متقابل میان آنها است. از این پارامتر می‌توان تا حد زیادی در تعیین دامنه علائمی که از فرستنده و توده مدفون هادی در گیرنده دریافت می‌شود؛ استفاده نمود. اگر سیم پیچ‌های فرستنده و گیرنده و توده رسانا را به شکل مدارهای الکتریکی ساده شبیه سازی کنیم؛ امکان محاسبه القای متقابل که آنها را به هم جفت می‌کند، وجود دارد. با توجه به شکل (۲-۲)، مشاهده می‌شود مقدار پاسخ در سیم‌پیچ‌های هم صفحه افقی<sup>۳۸</sup> (I)، با افزایش عدد القا به آرامی افزایش و سپس به سمت صفر تنزل می‌یابد.

در این هنگام مطابق قانون لنز<sup>۳۹</sup> جریان‌های القایی به درون زمین با عامل تغییر شار مغناطیسی (میدان اولیه) مخالفت می‌کنند یعنی آن را از زمین به بیرون می‌رانند. بنابراین در فرکانس‌های بالا، میدان کاملاً افقی می‌شود. به طوری که مولفه عمودی آن صفر می‌گردد.

همان طور که از شکل (۲-۲) دیده می‌شود، همین اثر در سیم‌پیچ‌های هم محور قائم<sup>۴۰</sup> (II) در محدوده اعداد القای بالا، باعث دو برابر شدن میدان اندازه‌گیری شده می‌شود. در عمل شدت و فاز میدان ثانویه نسبت به میدان اولیه اندازه‌گیری می‌شود. از آنجایی که میدان ثانویه القایی نسبت به میدان اولیه در

<sup>38</sup> Horizontal coplanar

<sup>39</sup> Lenz's law

<sup>40</sup> Vertical coaxial

برداشت‌های هوایی بسیار کوچک است لذا ساده ترین راه این است که میدان ثانویه به صورت یک نسبت مثلاً به شکل قسمت در میلیون<sup>۴۱</sup> میدان اولیه بیان شود.

در محدوده اعداد القای بالا اثر مشاهده شده در منحنی (III) مربوط به سیم‌سیم‌پیچای هم صفحه قائم<sup>۴۲</sup> همانند منحنی (II) می باشد. در منحنی (IV) با افزایش اعداد القاء ملاحظه می گردد که میدان مغناطیسی اندازه گیری شده به سمت صفر میل می کند. در برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری<sup>۴۳</sup> (HEM) غالباً از سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم صفحه افقی و هم محور قائم استفاده می شود. در فصل بعد به بیان روش‌های معکوس سازی الکترومغناطیس هوایی به ویژه هلیکوپتری می پردازیم.

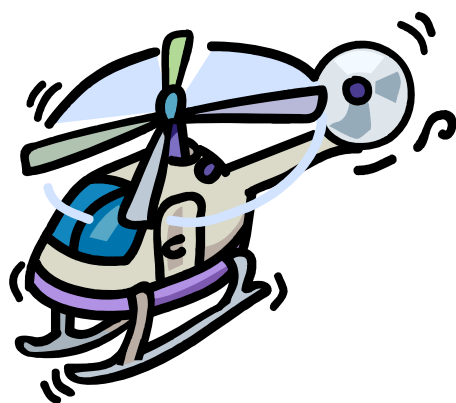
---

<sup>41</sup> Parts Per Million (ppm)

<sup>42</sup> Vertical Coplaner

<sup>43</sup> Helicopter Electromagnetic

# فصل سوم



روش های الکترومغناطیس هوایی

## ۳-۱- مقدمه

برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی در دهه ۱۹۵۰ به کار گرفته شدند. تا اوایل دهه ۱۹۶۰ تجهیزات الکترومغناطیس اعم از فرستنده و گیرنده طوری ساخته می‌شدند که ارسال و دریافت پاسخ به طور هم زمان و در یک فرکانس صورت می‌گرفت. اگرچه تلاش‌های چندی در دهه ۱۹۳۰ برای فرستادن پالس‌های گذرا و دریافت پاسخ زمین در زمان قطع جریان صورت گرفت؛ اما اولین کاربردهای موفق این تلاش‌ها تا سال ۱۹۶۲ به نتیجه نرسید [Nabighian, 1996].

در این فصل به معرفی روش‌های مختلف برداشت داده‌های الکترومغناطیس هوایی، با تمرکز بر روش برداشت هوایی توسط هلی کوپتر می‌پردازیم.

۳-۲- برداشت‌های حوزه زمان<sup>۱</sup>

در برداشت‌های حوزه زمان، اندازه‌گیری‌های انجام شده به صورت تابعی از زمان برداشت می‌باشد. در این روش‌ها جریان الکتریکی القایی در داخل زمین که با گذر زمان در اعماق بیشتری تولید می‌شوند سر و کار داریم. با افزایش عمق، گستره این جریان‌ها بیشتر می‌گردد. این جریان‌ها، در داخل زمین یک میدان مغناطیسی متغیر تولید می‌کنند. با اندازه‌گیری این میدان‌های مغناطیسی در بازه‌های زمانی<sup>۲</sup> مختلف، ویژگی‌های زیرسطحی زمین و ترکیب لایه‌بندی‌ها در اعماق مختلف قابل ارائه می‌گردد. در شکل (۳-۱) جریان موجود در حلقه سیم فرستنده، یک میدان مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. این میدان مغناطیسی سبب ایجاد یک جریان ضعیف‌تر گردابی<sup>۳</sup> (جریان الکتریکی القایی) که دقیقاً در زیر حلقه فرستنده است، ایجاد می‌کند.

همانند این جریان‌های گردابی رو به کاهش اولیه نزدیک سطح، میدان‌های مغناطیسی در اعماق بیشتر نیز جریان‌های کاهش یافته بیشتری تولید می‌کنند. این روند با گذشت زمان برای اعماق بیشتر ادامه می‌یابد. اندازه و تغییر نزول این جریان‌های گردابی به رسانندگی (هدایت ویژه) الکتریکی و هندسه لایه‌های رسانای زیرسطحی بستگی دارد. در این روش گیرنده، میدان القایی مغناطیسی در زیرسطح را پس از قطع میدان اولیه، اندازه‌گیری می‌نماید. این اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی معین صورت می‌گیرد. در این

<sup>1</sup> Time domain Electromagnetic (TEM) or (TDEM)

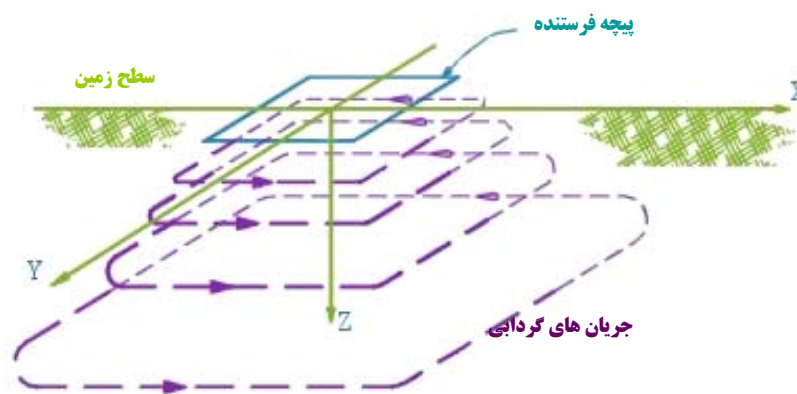
<sup>2</sup> Time gates

<sup>3</sup> Eddy currents



روش، جریان تولیدی توسط فرستنده یک پالس تیز یا یک سیگنال ناپایدار<sup>۴</sup> است. جریان‌های گردابی القایی و میدان‌های مغناطیسی مرتبط با آنها نیز به سبب همین سیگنال‌هایی است؛ که چند لحظه دیرتر تولید می‌شوند.

اندازه‌گیری میدان مغناطیسی القایی بطور معمول در فاصله زمانی ۱۰ میکروثانیه تا ۱۰ میلی ثانیه پس از قطع میدان اولیه انجام می‌شود. بدلیل آنکه اندازه‌گیری در زمان قطع جریان توسط فرستنده انجام می‌شود؛ اندازه‌گیری میدان تولیدی بوسیله مواد زیرسطحی، بشدت حساس است.



شکل (۱-۳) : چگونگی عملکرد جریان در روش حوزه زمان [After <http://www.nga.com>]

لذا اندازه‌گیریها در ۲۰ تا ۳۰ فاصله زمانی گسسته پس از تولید جریان بوسیله فرستنده انجام می‌شود. برای اکتشافات عمیق تر (تا هزار فوت) در مقاطع رسانا، زمان اندازه‌گیری می‌تواند تا بیش از یک ثانیه نیز افزایش یابد [Nabighian, 1996].

سیستم‌های هوایی برداشت با هواپیما با نام‌های GEOTEM و MEGATEM و سیستم‌های هوایی برداشت با هلی‌کوپتر با نام‌های AeroTEM و HeliGEOTEM از معروفترین سیستم‌های برداشت حوزه زمان می‌باشند.

### ۳-۳- برداشت‌های حوزه فرکانس<sup>۵</sup>

در روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس، اندازه‌گیری‌ها در یک یا چند فرکانس مختلف انجام می‌شود. در این روش امواج الکترومغناطیسی که به درون زمین ارسال می‌گردند، سبب ایجاد جریان‌های

<sup>4</sup> Transient signal

<sup>5</sup> Frequency domain Electromagnetic (FEM) or (FDEM)

القایی می‌شوند. این جریانها به نوبه خود سبب تشکیل یک میدان مغناطیسی ثانویه القایی در توده زیرسطحی می‌شوند. با اندازه‌گیری این میدان مغناطیسی القایی، توسط یک گیرنده می‌توان به ویژگی‌های مواد زیرسطحی و مشخصات آنها پی برد. روش الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس<sup>۶</sup> اولین بار در سال ۱۹۴۸، توسط شرکت مک فار<sup>۷</sup> در کشور کانادا ابداع و بکار گرفته شد [Fountain, 1998]. این روش در ابتدا برای اکتشاف موادمعدنی توسعه داده شد. ویژگی مهم این روش این است که به کمک آن حجم بسیار زیادی داده در مدت کمی به دست می‌آیند. از این رو مناطق وسیع را می‌توان در مدت زمانی بسیار کوتاه‌تر از روش‌های برداشت دیگر، مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

مناسب‌ترین محل برای برداشت‌های حوزه فرکانس در مناطقی است که سنگ در برگیرنده یک توده رسانا، بسیار مقاوم باشد. روش‌های گوناگونی برای برداشت در حوزه فرکانس وجود دارد. عملیات برداشت داده‌های الکترومغناطیس هوایی<sup>۸</sup> می‌تواند بوسیله هواپیما<sup>۹</sup> و یا هلی‌کوپتر<sup>۱۰</sup> و با تجهیزات مختلفی انجام شود. به دلیل مزایای قابل توجه هلی‌کوپتر در مقایسه با هواپیما از جمله، کوچکتر بودن ابعاد هلی‌کوپتر نسبت به هواپیما، قابلیت پرواز آن در ارتفاعات کمتر، قابلیت دنبال کردن بهتر ناهمواریهای سطح زمین، قدرت تفکیک بیشتر اهداف در برداشت‌های هلی‌کوپتری نسبت به هواپیما، قابلیت بهره‌مندی از هلی‌کوپتر در مناطق کم‌وسعت، ناهموار و مناطق مسکونی و همچنین توان مانور و جابجایی ساده‌تر و امکان نشست و برخاست سریع‌تر آن نسبت به هواپیما، امروزه بیشتر از هلی‌کوپتر در برداشت‌های هوایی استفاده می‌شود.

### ۳-۴- انواع سیستم‌های برداشت‌های الکترومغناطیس

همان‌طور که بیان کردیم برداشت‌ها می‌توانند توسط هواپیما یا هلیکوپتر انجام شوند؛ البته برای برداشت بهتر ممکن است تغییراتی در سیستم‌های آن صورت بگیرد. انواع سیستم‌های برداشت هوایی را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود.

<sup>6</sup> Frequency Airborne Electromagnetic

<sup>7</sup> Mcphar Geosurveys Ltd

<sup>8</sup> Airborne electromagnetic (AEM)

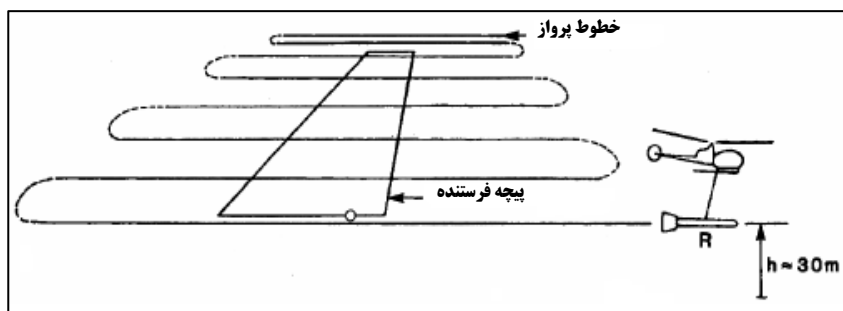
<sup>9</sup> Fixed- Wing plane

<sup>10</sup> Helicopter-borne electromagnetic (HEM)

۳-۴-۱- روش شبه هوایی (نیمه هوایی)<sup>۱۱</sup>:

در این روش فرستنده به صورت یک حلقه در سطح زمین قرار داده می‌شود. گیرنده بر روی سیستم پروازی نصب است و عملیات ثبت نتایج در آسمان انجام می‌شود.

این روش به دلیل آنکه در آن فرستنده بر روی زمین قرار دارد به روش فرستنده ثابت<sup>۱۲</sup> نیز معروف است. مشکل عمده این روش آن است که به علت تماس فرستنده با زمین، علاوه بر وجود اثرات القایی<sup>۱۳</sup>، اثرات گالوانیک<sup>۱۴</sup> نیز بوجود می‌آید؛ و این مسئله باعث ایجاد نوفه در داده‌ها می‌شود که تعبیر و تفسیر نتایج را دشوارتر می‌نماید. شکل (۲-۳) از نحوه برداشت با این روش و چگونگی آرایش فرستنده را نشان می‌دهد [Nabighian, 1996]. از معروفترین سیستم‌های کاربردی در این روش، سیستم Turair است. امروزه از این روش کمتر استفاده می‌شود.

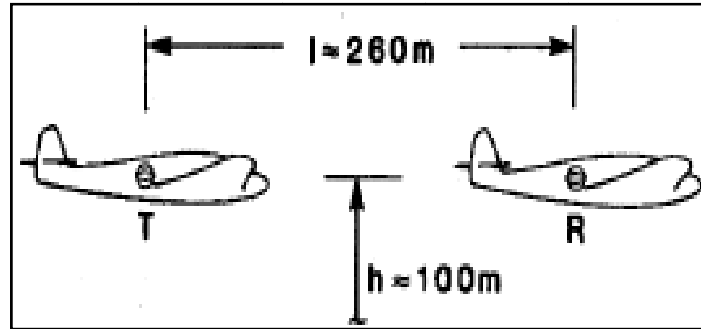


شکل (۲-۳): نحوه برداشت با روش شبه هوایی و چگونگی آرایش فرستنده [After Nabighian, 1996]

۳-۴-۲- روش دو هواپیما<sup>۱۵</sup>

در این حالت فرستنده و گیرنده بر روی دو هواپیما به صورت مجزا وصل می‌شوند. از این رو در یک هواپیما فرستنده و در هواپیمای دیگر گیرنده قرار می‌گیرد. هزینه برداشت در این روش بسیار بالا و مانور آن بسیار پایین است. از این رو امروزه بندرت از این روش استفاده می‌شود. در شکل (۳-۳) نحوه برداشت با این روش را به طور جزئی نشان داده شده است [Nabighian, 1996].

<sup>11</sup> Semi-Airborne  
<sup>12</sup> Fixed Transmitter  
<sup>13</sup> Inductive effects  
<sup>14</sup> Galvanic effects  
<sup>15</sup> Two Planes

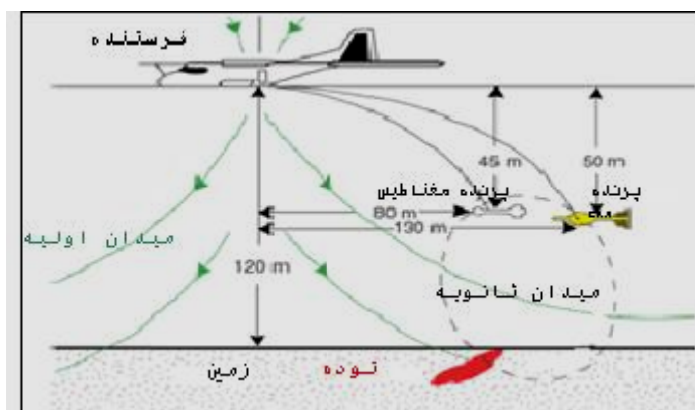


شکل (۳-۳): نحوه برداشت با روش دو هواپیما [Nabighian, 1996]

### ۳-۴-۳- روش سیستم پرنده معلق<sup>۱۶</sup>

در برداشتهای هوایی ممکن است فرستنده و گیرنده از یکدیگر جدا بوده و امکان تغییر فاصله آنها وجود داشته باشد. مثلاً گاهی فرستنده بر روی بال‌های هواپیما نصب شده و گیرنده بصورت آویزان و در یک محفظه آیرودینامیک و عایق که پرنده<sup>۱۷</sup> نامیده می‌شود؛ با یک کابل از هواپیما جدا شده است؛ و توسط هواپیما کشیده می‌شود، به این سیستم پرنده معلق (یدک شده) گفته می‌شود [Nabighian, 1996].

در عمل به علت وجود بال ثابت در هواپیما تنها امکان بکارگیری این روش در این وسیله پروازی میسر است و در برداشتهای هلی کوپتری اجرای آن ممکن نیست. امروزه در این نوع سیستم برداشت، پرنده معلق دیگری نیز وجود دارد که این پرنده دوم عملیات مغناطیس سنجی را انجام می‌دهد. شکل (۴-۳) نمونه‌ای ساده از سیستم برداشت پرنده معلق را نشان می‌دهد [Smith, et al; 2003].



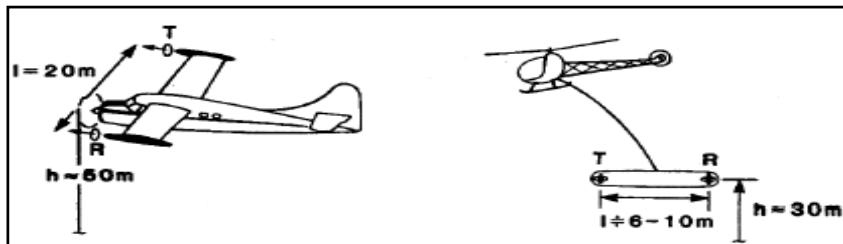
شکل (۴-۳): سیستم برداشت پرنده معلق (سیستم GEOTEM) [Nabighian, 1996]

<sup>16</sup> Towed bird

<sup>17</sup> Bird

۳-۴-۴- روش تیرک صلب<sup>۱۸</sup>

گاهی تجهیزات فرستنده و گیرنده به صورت صلب درون یک یا دو محفظه قرار داده می‌شود. ممکن است این سیستم بر روی سیستم پروازی (بر روی بدنه سیستم) نصب و یا به صورت معلق و آویزان از سیستم پروازی باشد. در شکل (۳-۵) نمایشی ساده از این سیستم برداشت نشان داده شده است [Nabighian, 1996]. در هر دو سیستم پرنده معلق و تیرک صلب، عنوان پرنده برای جسم آویزان از سیستم پروازی اطلاق می‌شود.



شکل (۳-۵): سیستم برداشت تیرک صلب [Nabighian, 1996]

سیستم برداشت هلی کوپتری که امروزه در برداشت‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل سیستم برداشت هلی کوپتری به وسیله پرنده‌ای است که فرستنده و گیرنده و سایر تجهیزات برداشت را حمل می‌کند. امروزه این روش، متداول‌ترین روش برای برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی می‌باشد. در این وسیله به دلیل قدرت مانور بالا و سرعت برخاستن و نشستن بالا توسط هلی کوپتر، انجام عملیات برداشت به سرعت صورت می‌گیرد. از متداول‌ترین سیستم‌های برداشت فوق می‌توان به سیستم برداشت الکترومغناطیسی دیگهم اشاره نمود. در شکل (۳-۶) نمایش از یک سیستم برداشت نشان داده شده است.



شکل (۳-۶): روش برداشت هلی کوپتری سیستم DIGHEM. [www.fugro.com]

<sup>18</sup> Rigid Boom

## ۳-۵- مدل‌های القای الکترومغناطیس

معمولاً در مدل‌های ژئوفیزیکی فرض بر این است که زمین مورد مطالعه همگن است. برای حالت‌های پیچیده‌تر زمین را به شکل لایه‌های افقی در نظر می‌گیرند، که این فرض به حالت طبیعی زمین نزدیک‌تر می‌باشد. از طرفی گسترش هر لایه بینهایت و خواص آن (از قبیل مقاومت ویژه، نفوذ پذیری مغناطیسی و...) در تمام نقاط ثابت در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی رساناهای گسسته<sup>۱۹</sup> از مدل‌های پیشرفته‌تر و پیچیده‌تر که به زمین واقعی نزدیک‌تر است، استفاده می‌شود. از طرفی می‌توان رساناهای شیبدار را به صورت صفحات بسیار نازک که در راستای افقی و عمقی نامحدود هستند؛ مدل‌سازی نمود. در مدل‌های پیشرفته‌تر می‌توان ابعاد و اندازه‌های محدود با شیب و امتدادی غیرافقی، برای رساناها در نظر گرفت. اما مشکل اساسی مدل‌سازی ریاضی ضخامت لایه‌ها است [Fugro, 2003].

در حقیقت مدل‌ها بر اساس روابط حاکم بر آنها که به صورت ریاضی بیان می‌گردند، معنی پیدا می‌کنند. مدل‌های در نظر گرفته شده برای معکوس‌سازی تقریبی<sup>۲۰</sup> از مدل زمین لایه‌ای پیروی می‌کنند. از این رو در ادامه به بررسی این مدل می‌پردازیم.

## ۳-۵-۱- زمین لایه‌ای

در سیستم‌های الکترومغناطیس هوایی، زمین به صورت تعدادی لایه افقی در نظر گرفته می‌شود. مدل زمین همگن (نیم‌فضای همگن<sup>۲۱</sup>) به عنوان ساده‌ترین مدلی که در تمامی نقاط خود دارای مقادیر ثابتی از پارامترهای ژئوفیزیکی؛ از قبیل مقاومت ویژه، نفوذ پذیری مغناطیسی و... است؛ در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۳-۷) فرستنده‌ای به صورت یک دوقطبی مغناطیسی عمودی (Tx) (در این حالت پیچه بطور افقی قرار گرفته و خطوط میدان مغناطیسی به سمت بالا یا پایین خارج می‌شوند)، نشان داده شده است. میدان مغناطیسی اولیه، سبب القاء جریان‌های گردابی در زمین می‌گردد؛ این جریان‌ها به صورت حلقه‌های افقی در زمین جریان می‌یابند. این جریان‌های الکتریکی (جریان‌های گردابی)، یک میدان مغناطیسی ثانویه (خطوط خط چین) ایجاد می‌کنند که در گیرنده (Rx) دریافت می‌شود. قطر این حلقه‌های جریان و عمق تمرکز آنها تابع مقدار رسانندگی زمین و فرکانس امواج الکترومغناطیسی است.

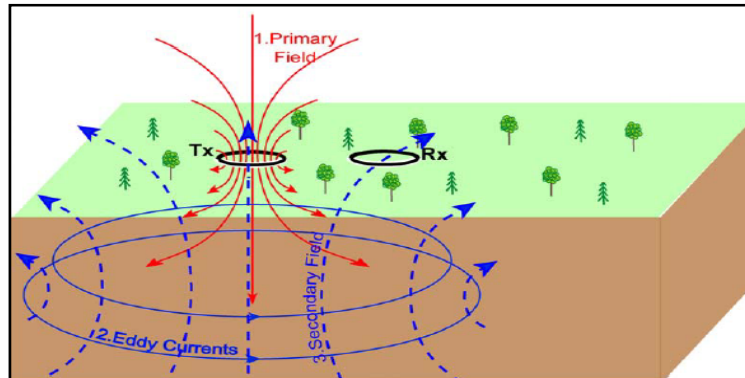
برای یک زمین همگن، همان‌گونه که در شکل (۳-۷) دیده می‌شود، این جریان‌های الکتریکی، در

<sup>19</sup> Discrete conductor modeling

<sup>20</sup> Approximate Inversion

<sup>21</sup> Homogeneous half space

سطوحی به شکل حلقوی و متقارن در داخل زمین جریان می‌یابند. عمق مراکز حلقه‌های جریان (که بیشترین چگالی جریان در آنجا وجود دارد) از سطح زمین، تقریباً برابر با نصف عمق پوسته است [Fugro, 2004].



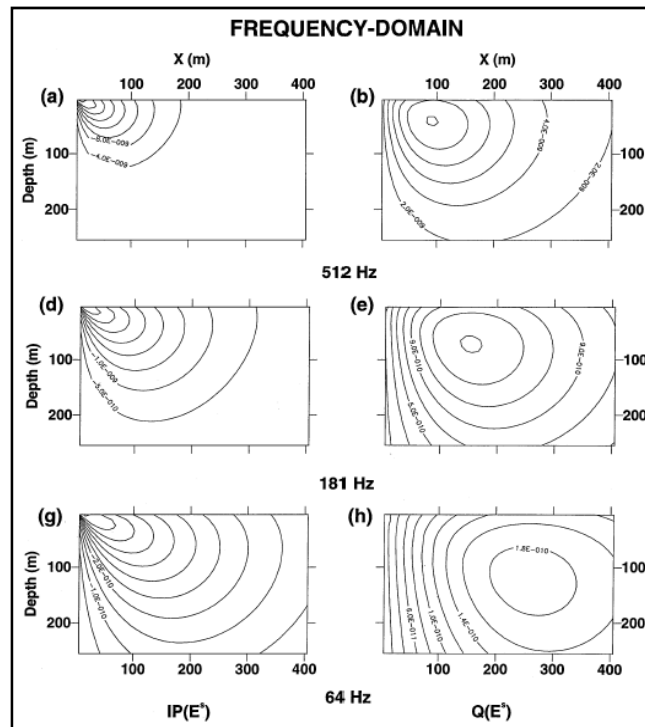
شکل (۷-۳) : چگونگی توزیع امواج الکترومغناطیس هوایی در یک زمین همگن [Fugro, 2003]

برای هر فرکانس، عمق حلقه مرکزی<sup>۲۲</sup> جریان، متفاوت است. این عمق معمولاً به عنوان عمق بیشترین حساسیت<sup>۲۳</sup> برای آن فرکانس خاص در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸-۳) شبه مقطعی از چگالی جریان به صورت منحنی‌های میزان از شارش جریان برای سه فرکانس ۶۴ و ۱۸۱ و ۵۱۲ هرتز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش فرکانس، شارش جریان در عمق کمتری صورت می‌گیرد. در صورتی که زمین همگن باشد می‌توان عمق نفوذ را تخمین زد. اما در مورد زمین لایه ای این تخمین عمق به خوبی صورت نمی‌گیرد. از طرفی همان‌طور که در شکل (۹-۳) مشاهده می‌شود، جریان‌های گردابی تمایل به شارش و تمرکز در لایه‌های رسانا را دارند و شارش اندکی در لایه‌های مقاوم رخ می‌دهد. لذا این مسئله اکتشاف لایه‌های مقاوم را، به جز مواردی که لایه مقاوم خیلی ضخیم است، بوسیله برداشت الکترومغناطیس هوایی مشکل می‌کند. اگر این لایه‌ها به حد کافی ضخیم باشند؛ در این صورت، تنها تفسیر دقیق می‌تواند معین کند که شارش در عمق بیشتر یا کمتر (پایین تر یا بالاتر از لایه مقاوم) از حد انتظار زمین همگن اتفاق افتاده است یا خیر [Fugro, 2003].

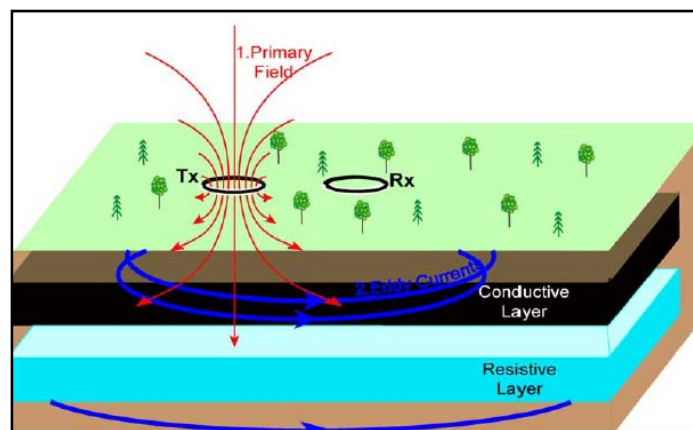
<sup>22</sup> Depth of central loop

<sup>23</sup> Depth of maximum sensitivity



شکل (۳-۸): چگونگی شارش جریان در عمق برای سه فرکانس متفاوت برای زمینی با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر

[Reid & Macnae, 1998]



شکل (۳-۹): شارش جریان گردابی در زمینی متشکل از لایه‌های رسانا و مقاوم [Fugro, 2003]

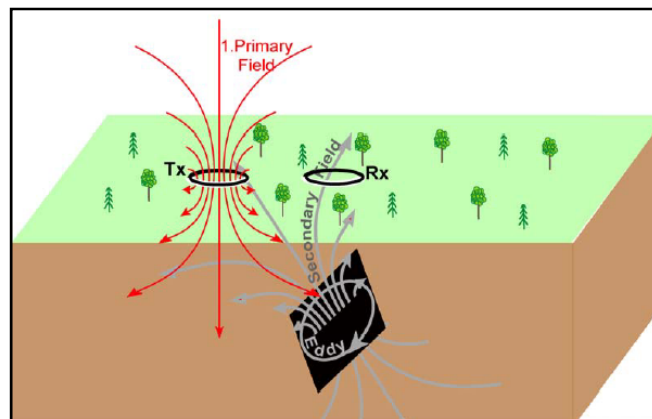
از آنجا که جریان‌های گردابی ناشی از فرکانس‌های بالا ممکن است در بالای لایه و جریان‌های ناشی از فرکانس‌های پایین در زیر لایه مقاوم انتشار یابند؛ با بهره‌مندی از روش الکترومغناطیس هلی کوپتری چند فرکانسی، می‌توان به تفسیر بهتری از لایه‌های زیرسطحی رسید. البته لازم به ذکر است که برای یک لایه بسیار



رسانای ضخیم، ممکن است جریان‌های گردابی ناشی از تمام فرکانس‌ها، تنها در همین لایه شارش یابند. از این رو پاسخ به دست آمده بیشتر از همین لایه خواهد بود و ممکن است تنها این لایه در معکوس‌سازی‌ها دیده شود.

### ۳-۵-۲- رساناهای مدفون

به طور کلی تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی رسانا یکی از مهمترین اهداف در برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی می‌باشند. این رساناها شامل سولفیدهای فلزی متبلور یا زون‌های خرد شده قائم اشباع از آب می‌توانند در نظر گرفته شوند. در شکل (۳-۱۰) رسانایی مدفون در یک زمین مقاوم در نظر گرفته شده است از آنجایی که زمین مورد نظر مقاوم است. می‌توان از جریان‌های گردابی القا شده در زمین صرف‌نظر کرده و تنها جریانهای گردابی تولید شده توسط میدان اولیه در رسانای مدفون را در نظر بگیریم. لذا میدان اولیه باعث القای یک جریان الکتریکی در جسم رسانا می‌گردد. این جریان نیز باعث تشکیل یک میدان ثانویه می‌شود که اثر آن در گیرنده قابل اندازه‌گیری و مشاهده می‌باشد. در مورد شدت و زاویه فاز میدان ثانویه باید به اندازه و رسانندگی توده رسانا و جفت شدگی اجزا سیستم برداشت توجه نمود. زیرا در اثر جابجایی سیستم برداشت نسبت به توده رسانا، میزان جفت شدگی میان فرستنده و توده رسانا تغییر می‌کند. از این رو شکل بی‌هنجاری به دست آمده، در تفسیر هندسه توده رسانا نقش مهمی ایفا می‌کند.



شکل (۳-۱۰): جریان‌های گردابی و میدان ثانویه ایجاد شده در توده رسانای مدفون [Fugro, 2003].

باید توجه داشت که، اگر زمین نسبت به توده رسانا مقاوم‌تر باشد، پاسخ رسانا در برداشت انجام شده اثر بیشتری دارد. در این صورت می‌توان از پاسخ زمین صرف‌نظر کرد. اما اگر زمین رسانا باشد، تبادل پیچیده‌ای میان جریان شارش یافته در زمین و توده رسانا بوجود خواهد آمد. در این حالت یک پاسخ قوی از سوی زمین می‌تواند

بطور کامل، پاسخ رسانا را از بین ببرد و پاسخ زمین در طول خط پرواز به مقدار قابل توجهی تغییر نماید. اما اگر توده رسانا در راستای شارش جریان در داخل زمین، گسترش یابد؛ این جریان‌ها همگی از داخل توده رسانا عبور کرده و باعث افزایش اندازه بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده توسط سیستم هنگامی که در بالای رسانا قرار دارد می‌شوند. به این پدیده کانالیزه شدن جریان<sup>۲۴</sup> گفته می‌شود [Fugro, 2003].

از آنجا که توده رسانا یک جسم محلی<sup>۲۵</sup> (محدود) است، شدت پاسخ اندازه‌گیری شده توسط سیستم، وقتی که در راستای افقی به آن نزدیک می‌شود، افزایش می‌یابد و با دور شدن سیستم از توده رسانا، کاهش می‌یابد. این قله محلی در داده‌های الکترومغناطیس هوایی، بی‌هنجاری مربوط به آن توده رسانا خوانده می‌شود. از نظر تئوری پاسخ مربوط به زمین لایه‌ای باید در همه جا یکسان باشد؛ اما در عمل در اثر تغییر شرایط زمین و تغییر مداوم ارتفاع پرواز در طول خط برداشت، تغییراتی در داده‌ها دیده می‌شود [Fugro, 2003].

### ۳-۵-۳- عمق اکتشاف

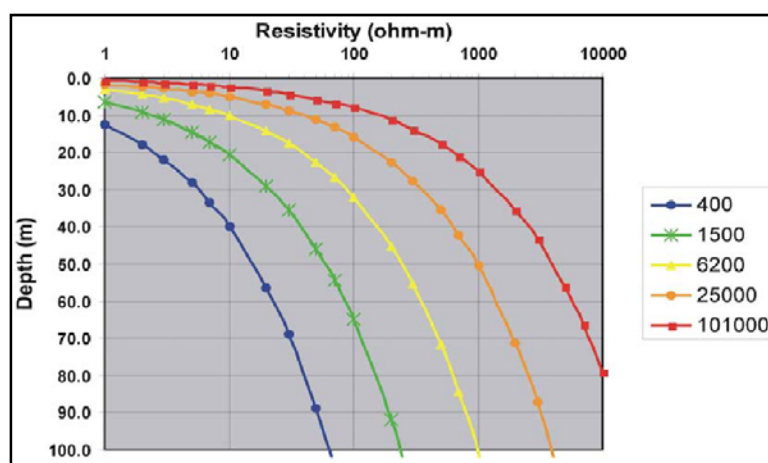
همان گونه که قبلاً بیان شد، عمقی که جریانهای گردابی القا شده در آن انتشار می‌یابند؛ به رسانندگی زمین و فرکانس امواج الکترومغناطیسی سیستم هوایی وابسته است. هر چه فرکانس امواج بالاتر و زمین مورد مطالعه رساناتر باشد، عمق اکتشاف کمتر می‌گردد. برای یک زمین همگن، محاسبه این عمق ساده و تقریباً نصف عمق پوسته است. این عمق می‌تواند به عنوان بیشترین عمق حساسیت سیستم و فرکانس مورد استفاده، در نظر گرفته شود. در شکل (۳-۱۱) بیشترین عمق حساسیت یک سیستم الکترومغناطیس هلی کوپتری (سیستم Resolve) برای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. تعیین عمق دقیقی که تغییرات رسانندگی در آن عمق رخ می‌دهد بسیار دشوار است. برای اهداف بزرگ‌تر و یا رساناتر و همچنین رساناهایی که جهت یافتگی آنها عمود بر جهت میدان اولیه است؛ عمق اکتشاف افزایش می‌یابد.

همان گونه که گفته شد، وقتی که سنگ میزبان یک توده مدفون رسانا با رسانندگی بالایی داشته باشد؛ عمق اکتشاف توده مدفون کاهش می‌یابد. از طرفی وقتی مقاومت ویژه یک توده میزبان بطور جانبی تغییر می‌کند؛ در پاسخ الکترومغناطیس در طول مجموعه داده‌ها تغییر ایجاد می‌کند و این موضوع می‌تواند ناشی از یک پاسخ کوچک، حاصل از رساناهای مدفون عمیق‌تر را نیز کم‌رنگ کرده یا به طور کامل محو نماید. نوع روش تفسیر نیز می‌تواند بر عمق اکتشاف اثر بگذارد. مشخص است روش‌های پیشرفته‌تر و پیچیده‌تر می‌توانند میزان حساسیت

<sup>24</sup> Current channeling

<sup>25</sup> Local

عمق را افزایش دهند. وضعیت هندسی میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه نیز بر عمق اکتشاف تاثیر می‌گذارد. در نقاط دور از فرستنده، شدت میدان اولیه تقریباً با توان سوم (مکعب) فاصله گیرنده تا فرستنده کاهش می‌یابد. برای یک رسانای کوچک نیز شدت میدان ثانویه به همین مقدار کاهش می‌یابد. شدت میدان ثانویه برای توده‌های بزرگ رسانا نیز با آهنگ کمتری کاهش می‌یابد. هنگام اکتشاف با سیستم الکترومغناطیس هلی کوپتری، معمولاً رساناها در بهترین شرایط تا عمق حداکثر ۱۶۰ متر قابل آشکارسازی هستند؛ این میزان محدوده حساسیت سیستم<sup>۲۶</sup> در شرایط ایده آل خوانده می‌شود. غالباً میزان عمق اکتشاف طبیعی از مقدار تعیین شده کمتر می‌باشد [Fugro, 2003].



شکل (۳-۱۱): بیشترین عمق حساسیت زمین همگن برای فرکانسهای مختلف در سیستم Resolve [Fugro, 2003].

### ۳-۶- محدوده اثر سیستم<sup>۲۷</sup>

برای بیان محدوده اثر سیستم، در یک زمین لایه‌ای، می‌توان از میزان قطر حلقه‌های جریان‌های گردابی منتشر شده در داخل زمین، بهره برد. بدین شکل که هر چه رسانندگی زمین مورد مطالعه بیشتر باشد یا فرکانس سیستم برداشت بالاتر باشد، این حلقه‌ها کوچکتر خواهند بود.

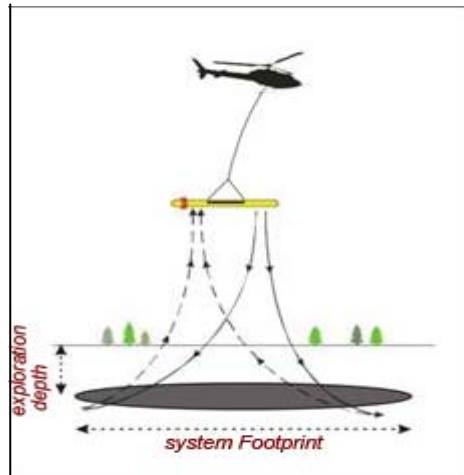
هنگام جستجوی توده‌های رسانا، تعیین محدوده اثر سیستم بسیار مهم و دشوار است. در واقع این مقدار بیانگر میزان گستره اکتشاف<sup>۲۸</sup> (در مقابل عمق اکتشاف) است. گستره اکتشاف شدیداً تحت تاثیر اندازه، شکل هندسی رسانا، مقاومت ویژه و پیچیدگی سنگ میزبان است. دیگر اینکه حساسیت سیستم در تمامی محدوده اثر آن ثابت و یکنواخت نیست. بلکه هنگامی که سیستم دقیقاً در بالای هدف مورد نظر قرار گیرد، بهترین جفت

<sup>26</sup> System sensitivity

<sup>27</sup> System Footprint

<sup>28</sup> Width of exploration

شدگی میان سیستم فرستنده و توده رسانا وجود دارد از این رو عمق اکتشاف بیشتر خواهد بود. شکل (۳-۱۲) نمایشی از عمق اکتشاف و محدوده اثر یک سیستم برداشت هوایی را نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد، محدوده اثر سیستم برای اهداف بزرگ، قطری برابر ۵۰ تا ۱۰۰ متر دارد [Fugro, 2003].



شکل (۳-۱۲): عمق اکتشاف و محدوده اثر یک سیستم الکترومغناطیس هوایی [Fugro, 2003].

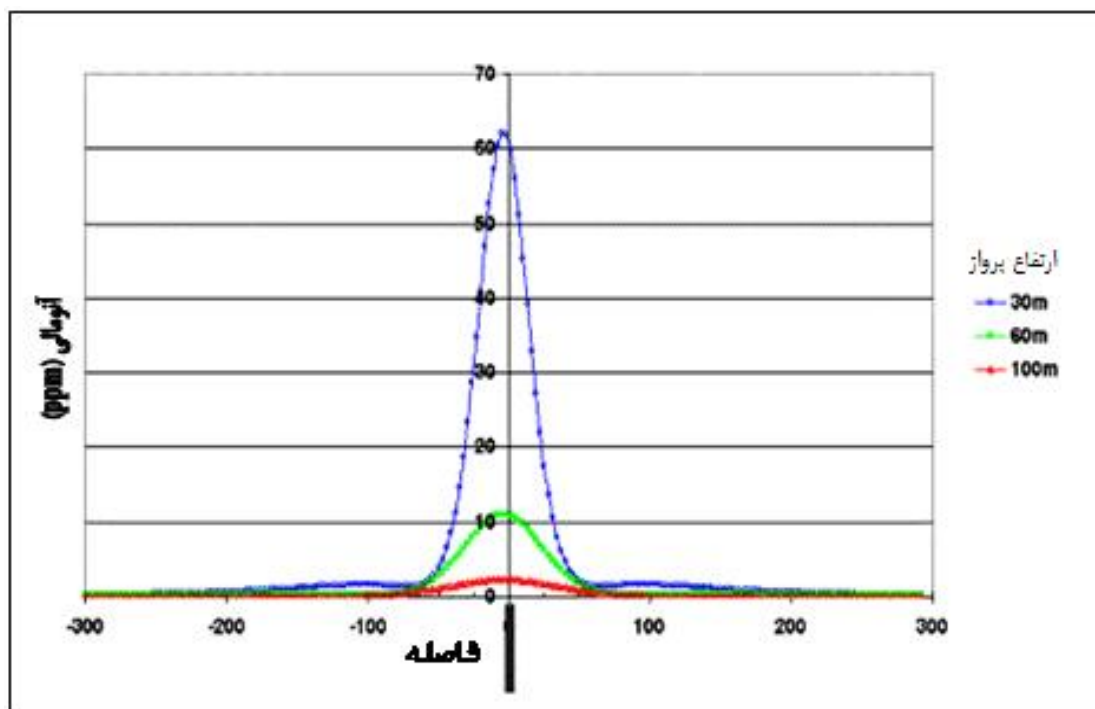
از این رو وقتی به دنبال اهداف کوچک هستیم، فاصله خطوط پروازی باید کوچکتر از محدوده اثر سیستم انتخاب شود تا مطمئن باشیم با پرواز مستقیم از روی هدف، بی‌هنجاری به شکلی واضح به دست خواهد آمد. روش دیگر آن است که، سیستم برداشت تا حد امکان به هدف نزدیک شود، باید توجه داشت تاثیر ارتفاع پرواز بسته به شرایط توپوگرافی زمین و ابعاد اهداف مورد نظر، متفاوت خواهد بود [Beamish, 2003].

### ۳-۷- ارتفاع پرنده

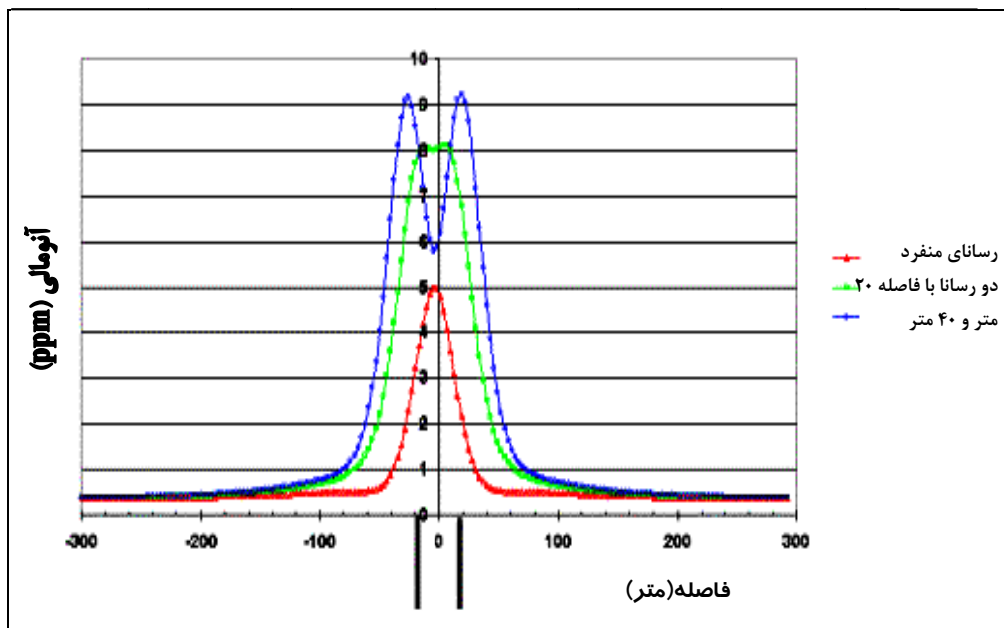
همان گونه که می‌دانیم میزان شدت میدان مغناطیسی ثانویه با توان سوم فاصله هدف تا منبع فرستنده کاهش می‌یابد. از این رو هر چه این ارتفاع (فاصله) بیشتر گردد، میزان افت میدان مغناطیسی نیز افزایش پیدا می‌کند. ارتفاع پایین و سرعت اندک پرواز در سیستم‌های الکترومغناطیس هلی‌کوپتری، باعث افزایش دقت ثبت بی‌هنجاری‌ها و حساسیت بیشتر نسبت به رساناهای ضعیف می‌شود. یک گستره باریک فرکانسی در سیستم‌های حوزه فرکانس، می‌تواند میزان نسبت سیگنال به نویز را در برابر یک سیستم حوزه زمان با گستره زمانی بزرگ، افزایش دهد.

از این نظر می‌توان یک سیستم به همراه فرستنده‌ای با انرژی اندک را با یک سیستم بال ثابت با فرستنده‌ای با انرژی بالا می‌توان مقایسه نمود. شکل (۳-۱۳) نشانگر تاثیر ارتفاع برداشت بر حساسیت سیستم الکترومغناطیس هلیکوپتری است. با توجه به شکل (۳-۱۳) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ارتفاع پرواز، در دامنه بی‌هنجاری افت ایجاد می‌شود و قله بی‌هنجاری مربوطه گستردگی و یا پهن شدگی بیشتری پیدا می‌کند.

در شکل (۳-۱۴) به مقایسه تغییرات پاسخ سیستم بر روی سه مدل، شامل یک رسانای منفرد (واقع در مبدا پروفیل)، دو رسانای جدا از هم یک بار با فواصل ۲۰ متر (ده متری در دو سوی مبدا) و بار دیگر با فاصله ۴۰ متر (بیست متری در دو سوی مبدا) پرداخته شده است. در ارتفاع پرواز پایین (۳۰ متری)، به وضوح بین دو رسانای با فاصله جدایش ۴۰ متر و تا حد زیادی برای فاصله جدایش ۲۰ متر تفکیک دیده می‌شود [Fugro, 2004].



شکل (۳-۱۳): تاثیر ارتفاع برداشت بر حساسیت سیستم الکترومغناطیس هلیکوپتری [Hodges, 2004].



شکل (۳-۱۴): پاسخ بر روی رسانای منفرد واقع در مبدا و دو رسانای مجزا با فواصل ۲۰ و ۴۰ متر با ارتفاع پرواز ۳۰ متر

[Hodges, 2004]

### ۳-۸- سیستم برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری DIGHEM

سیستم برداشت مورد نظر یک سیستم هلی کوپتری حوزه فرکانس با پرنده ساخت شرکت فوگرو<sup>۲۹</sup> است که یکی از جدیدترین آنها به نام مدل دیگهم نوع پنج<sup>۳۰</sup> (DIGHEM<sup>V</sup>) می‌باشد. این سیستم دارای قابلیت‌های بالا و کاربردهای زیادی است. از طرفی از آنجایی که سیستم فوق در کشور ما موجود می‌باشد از این رو مطالعات پایه بر اساس این سیستم برداشت صورت گرفته است.

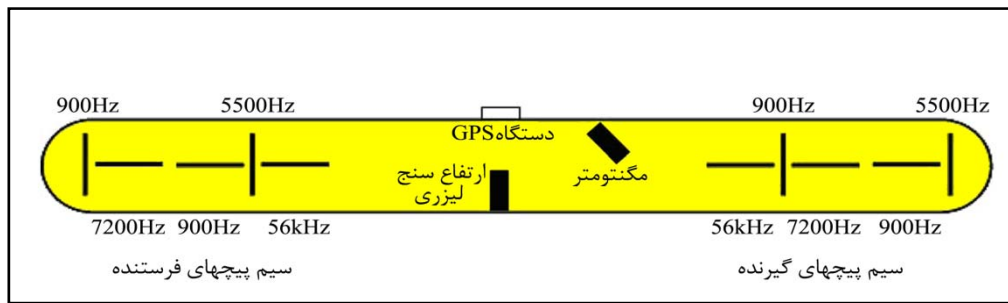
مطابق شکل (۳-۱۵) این سیستم دارای سه جفت سیم‌پیچ هم صفحه افقی<sup>۳۱</sup> ( $CP_z$ ) با فرکانس‌های ۹۰۰ Hz (یا ۳۸۰ Hz)، ۷۲۰۰ Hz، ۵۶۰۰۰ Hz و دو جفت سیم‌پیچ هم محور قائم<sup>۳۲</sup> ( $CX_x$ ) با فرکانس‌های ۹۰۰ Hz و ۵۵۰۰۰ Hz است. فاصله فرستنده و گیرنده برای تمامی جفت سیم‌پیچ‌های ذکر شده، برابر ۸ متر است؛ به جز سیم‌پیچ‌های ۵۶۰۰۰ Hz که فاصله آنها ۶/۳ متر است.

<sup>29</sup> Fugro

<sup>30</sup> Dighem

<sup>31</sup> Horizontal Coplanar Loops

<sup>32</sup> Vertical Coaxial Loops



شکل (۳-۱۵): نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌های سیستم DIGHEM<sup>V</sup> [Fugro, 2003].

سیستم‌های برداشت‌هلی کوپتری ارائه شده توسط شرکت فوگرو از یک پرنده (استوانه توخالی آیرودینامیک از جنس کولار<sup>۳۳</sup>) تشکیل شده‌اند. پرنده به وسیله یک کابل از هلی کوپتر آویزان است به طوری که در فاصله ۳۰ متری از هلیکوپتر و با سرعتی در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت حمل می‌شود. طول پرنده نه متر و قطر آن ۰/۵ متر است و وزنی بالغ بر ۲۷۵ کیلوگرم دارد. بهتر آن است فاصله پرنده تا زمین نیز ۳۰ متر قرار داده شود. همچنین به منظور پایدار ماندن جهت پرنده در راستای پرواز هلیکوپتر، چند پره صلب و سنگین به انتهای آن متصل می‌شود. سیستم در هر ثانیه ده داده ثبت می‌کند؛ که اگر این تعداد بر سرعت هلیکوپتر تقسیم شود، در هر سه متر، یک داده ثبت می‌شود. فاصله بین خطوط پرواز متغیر و وابسته به اندازه اهداف مورد جستجو یا جزئیات مورد انتظار در نقشه مقاومت سنجی است. این فاصله بطور متوسط بین ۵۰ تا ۲۰۰ متر متغیر می‌باشد [Fugro, 2003].

معمولاً تجهیزات مختلفی ممکن است درون پرنده نصب گردد. از این تجهیزات می‌توان به دستگاه موقعیت یاب جغرافیایی<sup>۳۴</sup> (جهت تعیین موقعیت مکانی)، مغناطیس سنج<sup>۳۵</sup> (جهت اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین) و ارتفاع سنج لیزری (جهت اندازه‌گیری فاصله پرنده تا سطح زمین محل برداشت) اشاره نمود.

### ۳-۸-۱- سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده

سیستم‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری دیگر هم دارای سیم‌پیچ‌های افقی هم صفحه (دو قطبی مغناطیسی قائم<sup>۳۶</sup>)  $CP_z$ ، و سیم‌پیچ‌های هم محور قائم (دو قطبی افقی<sup>۳۷</sup>)  $CX_x$ ، هستند. به دلیل استفاده همزمان

<sup>33</sup> Kevlar

<sup>34</sup> Global Position System

<sup>35</sup> Magnetometer

<sup>36</sup> Vertical magnetic dipole

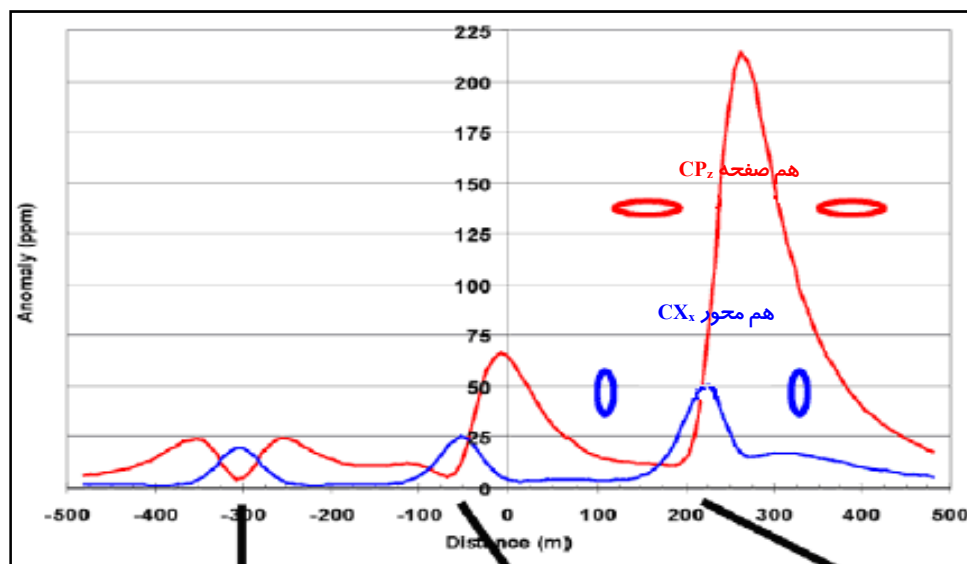
<sup>37</sup> Horizontal dipole

از هر دو نوع سیم‌پیچ، به دست آوردن اطلاعات از نحوه قرارگیری هدف و رسیدن به ماکزیمم حساسیت در مواجهه با توده‌های هندسی مختلف مدفون بسیار بهتر صورت می‌گیرد.

همان‌طور که می‌دانیم حساسیت سیستم‌های الکترومغناطیس نسبت به رساناهایی که بزرگترین بعدشان عمود بر راستای میدان اولیه است؛ ماکزیمم می‌باشد. لذا سیم‌پیچ‌های افقی هم صفحه ( $CP_z$ ) غالباً نسبت به لایه‌ها و توده‌های افقی حساس می‌باشند. از سوی دیگر به علت آنکه میدان اولیه ناشی از سیم‌پیچ‌های هم محور قائم ( $CX_x$ )، وقتی که در بالای رسانا قرار دارند؛ افقی است؛ لذا در این سیم‌پیچ‌ها بیشترین حساسیت نسبت به رساناهای شیبدار با شیب تند وجود دارد [Fugro, 2003].

در شکل (۱۶-۳) بی‌هنجاری‌های حاصل از سیم‌پیچ‌های  $CP_z$  و  $CX_x$  بر روی صفحات رسانای شیبدار ساده با شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. برای یک رسانای شیبدار با شیب کم، بی‌هنجاری به دست آمده از سیم‌پیچ‌های  $CP_z$  بسیار بزرگتر از بی‌هنجاری سیم‌پیچ‌های  $CX_x$  است و علت این امر جفت شدگی بیشتر بین میدان اولیه سیم‌پیچ‌های  $CP_z$  با رسانا و میدان ثانویه رسانا با گیرنده است.

نتیجه اینکه، وقتی هدف تعیین محل و تفسیر توده‌های بی‌هنجاری گسسته است، نتایج حاصل از سیم‌پیچ‌های  $CX_x$  بسیار مهم و تعیین کننده است. اما هنگامی که هدف یافتن لایه‌های رسانای افقی یا اهداف کوچک افقی باشد، سیم‌پیچ‌های  $CP_z$  موثرترند.

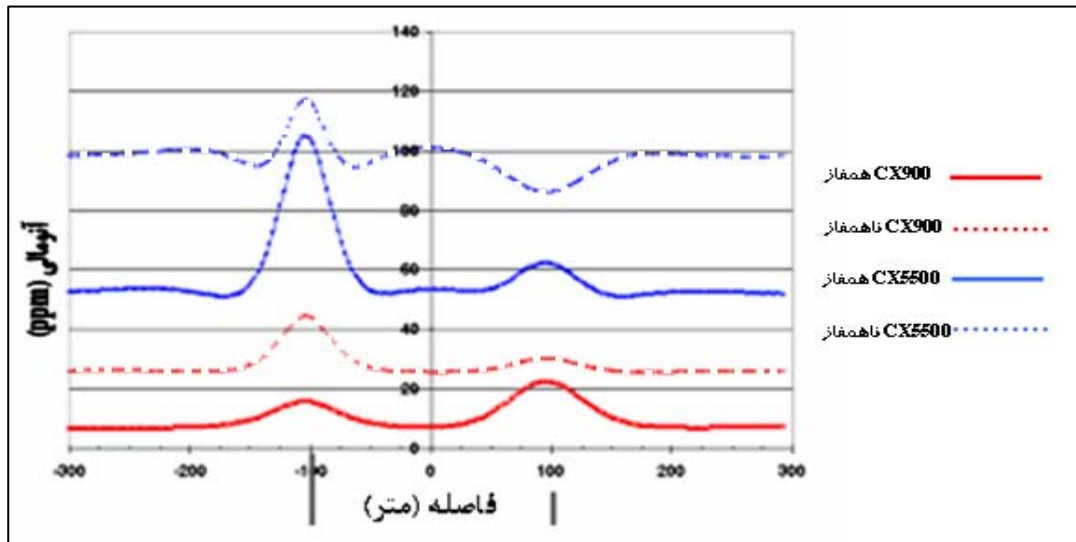


شکل (۱۶-۳): پاسخ رساناهای شیبدار برای سیم‌پیچ‌های هم محور و هم صفحه [Fugro, 2003].

در یک سیستم هلی کوپتری الکترومغناطیس حوزه فرکانس، دو جفت سیم‌پیچ هم محور قائم با فرکانس‌های ۹۰۰ و ۵۵۰۰ هرتز وجود دارد. این سیم‌پیچ‌ها حساسیت بیشتری نسبت به رساناهای شیبدار دارند و



بازه فرکانسی در آنها باعث می‌شود همان مقدار که به توده‌های رسانای قوی حساس هستند، در برابر رساناهای عمیق و ضعیف نیز حساسیت داشته باشند. در شکل (۳-۱۷) اختلاف حساسیت پاسخ برای فرکانس‌های مختلف (پاسخ مولفه‌های حقیقی و موهومی میدان ثانویه) نسبت به اهداف رسانا و سنگ میزبان مقاوم نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۷): اختلاف حساسیت سیم‌پیچ‌های با فرکانس گوناگون نسبت به اهداف مختلف [Hodges, 1999].

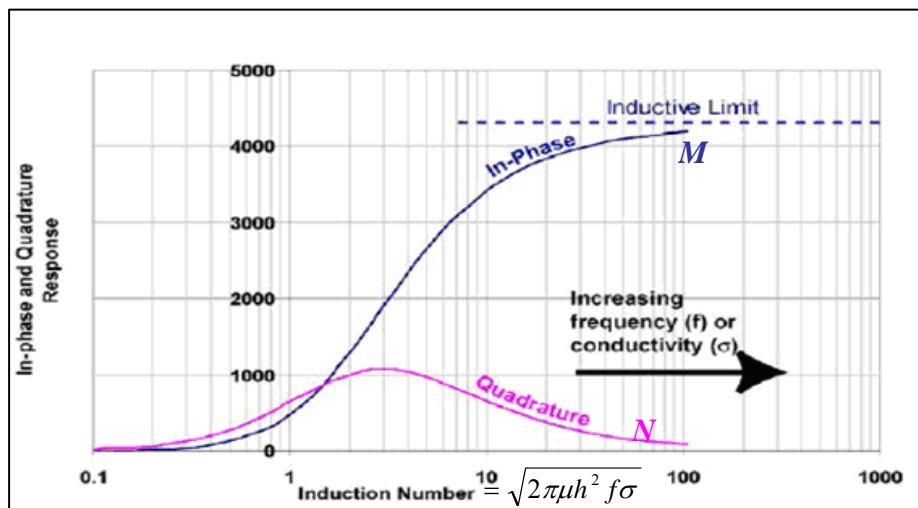
همان‌طور که در شکل (۳-۱۷) مشخص است، رسانای سمت چپ ضعیف و نزدیک به سطح است و پاسخ قوی‌تری در برابر فرکانس  $5500\text{ Hz}$  از خود نشان می‌دهد. توده واقع در سمت راست، علی‌رغم اینکه رسانایی بالایی دارد اما در عمق بیشتری نسبت به توده قبلی و در یک سنگ میزبان رسانا واقع شده است. در این حالت پاسخ سیم‌پیچ  $900\text{ Hz}$  شایان توجه بیشتری است [Hodges, 1999]. لذا می‌توان چنین بیان نمود که برای یافتن نتایج بهتر لازم است از پاسخ هر دو سیم‌پیچ های  $CP_z$  و  $CX_x$  استفاده نمود تا بتوان رساناهای با اشکال مختلف (اعم از لایه‌ای و گسسته) را اکتشاف و شناسایی نمود.

### ۳-۹- گستره فرکانسی در برداشت‌های الکترومغناطیس

می‌توان چنین بیان نمود که برای یک رسانای مدفون در عمق مشخص و در زمین مقاوم، بهترین پاسخ را یک فرکانس خاص ارائه می‌نماید. غالب برداشت‌های الکترومغناطیس به منظور یافتن اهدافی با بازه مشخص از نظر ابعاد، عمق قرارگیری و حتی رسانندگی (هدایت ویژه) انجام می‌شوند. لذا از چندین فرکانس در بازه بین

۴۰۰ Hz تا ۱۰۰ kHz برای دستیابی به این اهداف استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۳-۱۸) ملاحظه می‌گردد که فرکانس‌های بالاتر و با اعداد القای بزرگ‌تر، نسبت به رساناهای ضعیف‌تر، حساسیت بیشتری دارند. از طرفی این فرکانس‌ها عمق نفوذ کمتری داشته و غالباً تحت تاثیر لایه‌های نزدیک به سطح قرار دارند. به عکس فرکانس‌های پایین‌تر، کمتر تحت تاثیر رسانندگی نزدیک به سطح قرار می‌گیرند و عمق نفوذ بیشتری دارند. از این رو فرکانس‌ها با اعداد القای کوچک، عمدتاً قادر به تشخیص اهداف با رسانندگی بالا هستند و نمایش دقیق‌تری از رسانندگی واقعی اهداف در اختیار ما قرار می‌دهند. البته در این زمینه قدرت تشخیص<sup>۳۸</sup> (تمایز)، پارامتر مهمی است. چرا که همواره بهترین پاسخ، تنها قوی‌ترین پاسخ نیست، زیرا بهترین پاسخ، باید بهترین تخمین از رسانایی یا رسانندگی هدف را ارائه نماید. به عنوان مثال قوی‌ترین پاسخ هنگامی به دست می‌آید که سیستم و رسانا در حد القا<sup>۳۹</sup> قرار داشته باشند (شکل ۳-۱۸).

در هنگامی که در گستره حد القا، قرار داریم، سیستم برداشت قادر به اندازه‌گیری رسانایی واقعی هدف نیست. از این رو بهترین سیستم برداشت الکترومغناطیس، سیستمی است که بتواند در وسیع‌ترین گستره فرکانسی، از بیشترین تعداد فرکانس ممکن استفاده نماید. سیستم‌هایی که از تعداد زیادی فرکانس در یک گستره (پهنای باند<sup>۴۰</sup>) کوچک بهره می‌برند؛ کارایی کمتری دارند. هر فرکانس به تنهایی اطلاعات اندکی را در مقایسه با تمام بازه فرکانسی در اختیار قرار می‌دهد [Fugro, 2003].



شکل (۳-۱۸): پاسخ مولفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز به صورت تابعی از عدد القا [Fugro, 2003].

<sup>38</sup> Discrimination

<sup>39</sup> Inductive limit

<sup>40</sup> Bandwidth

۳-۱۰- جدایش سیم‌پیچ‌ها<sup>۴۱</sup> و نرمال سازی

تأثیر فاصله بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده بر نتایج به دست آمده از سوی کاربران سیستم‌های الکترومغناطیس هوایی بسیار مهم است. مثلاً اگر فاصله بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده خیلی کمتر از ارتفاع سیستم در بالای هدف باشد، در اثر تغییر این فاصله، شکل سیگنال اندازه‌گیری شده خیلی تغییر نخواهد کرد. از طرفی جدایش سیم‌پیچ‌ها تأثیرات پیچیده‌ای بر سطح نویز ظاهری دستگاه و محدوده قابل اندازه‌گیری سیستم الکترومغناطیس هلی کوپتری نیز دارد. بمنظور رسیدن به پاسخ‌های دقیق‌تر، لازم است اثر میدان اولیه تا حد امکان کم شود؛ تا میدان ثانویه که اصولاً ضعیفتر است، بتواند به خوبی در برابر مقادیر بزرگ میدان اولیه، مشخص گردد. از آنجا که شدت میدان اولیه با افزایش فاصله به صورت توان سوم فاصله کاهش می‌یابد؛ افزایش جدایش سیم‌پیچ‌ها، به شدت باعث کاهش شدت میدان اولیه در محل گیرنده می‌شود. مثلاً تغییر فاصله بین سیم‌پیچ‌ها از ۶/۵ متر به ۸ متر سبب می‌شود که شدت میدان اولیه با ضریب  $0.54 = \left(\frac{6.5}{8}\right)^3$  کاهش یابد و به همین نسبت باعث می‌شود تا نویز مربوط به میدان اولیه نیز کم شود [Fugro, 2003].

با توجه به نکات بیان شده، بیش از یک ربع قرن است که سیستم دیگهم به منظور اکتشافات مواد معدنی طراحی شده است. استفاده از چندین سیم‌پیچ در فرکانس‌های مختلف و نزدیک به هم باعث تولید داده‌های مناسبی در تشخیص هندسه توده رسانی مدفون می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، می‌توان گفت سیم‌پیچ‌های هم صفحه افقی، بیشترین حساسیت را به رسانی زمین و حالت لایه‌ای آن دارند؛ و به خوبی تغییرات رسانندگی را ثبت می‌نمایند. در عین حال این سیم‌پیچ‌ها، کمترین حساسیت را در تغییر جهت برداشت دارند. اما سیم‌پیچ‌های هم محور قائم، بزرگترین بی‌هنجاری‌ها را در برابر رسانی‌های قائم، نظیر رگه‌های پرشیب سولفیدهای فلزی توده‌ای و قطعات رسانی مدفون ساخت بشر نشان می‌دهند. محدوده اثر سیستم دیگهم نیز بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است که این مقدار به شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نیز وابسته است [Fugro, 2003].

باید توجه داشت که در مورد رسانی‌های مغناطیسی، که دارای نفوذپذیری یا تراوایی مغناطیسی<sup>۴۲</sup> بسیار بزرگتری نسبت به متوسط سنگ‌های پوسته زمین هستند، سبب اعمال اثرات کاملاً متمایزی بر سیستم‌های حوزه فرکانس می‌گردند به طوری که گاهی نفوذپذیری مغناطیسی بالای این رسانی‌ها حتی

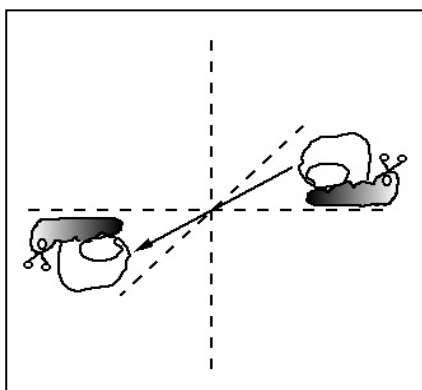
<sup>41</sup> Coil separation

<sup>42</sup> Magnetic permeability

باعث معکوس شدن مولفه هم فاز بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده نیز می‌شود. از این رو نیازمند روش‌هایی نوین برای معکوس‌سازی داده‌های ناشی از رساناهای مغناطیسی هستیم [Huang & Fraser, 1996].

در این فصل به بیان روش‌های الکترومغناطیس با تکیه بر روش‌های الکترومغناطیس هوایی مطالبی بیان گردید. در فصل بعد به بیان انواع روش‌های معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی می‌پردازیم.

# فصل چهارم



روش‌های معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس، هوایی

حوزه فرکانس

## ۴-۱- مقدمه

در فصل قبل دیدیم، داده‌های اندازه‌گیری شده در هر فرکانس در ارتباط مستقیم با یک عمق خاص که بیانگر مقاومت ویژه ظاهری مشخصی است، می‌باشد. از همین ویژگی مهم روش الکترومغناطیس هوایی، در اندازه‌گیری تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق می‌توان استفاده نمود. باید توجه داشت که، میدان مغناطیسی ثانویه اندازه‌گیری شده توسط یک سیستم الکترومغناطیس هوایی برای یک زمین همگن دقیقاً نمایشگر مقاومت ویژه زمین است. اما در عمل به دلیل ناهمگنی زمین مورد مطالعه ولایه بندی‌های مختلف موجود در زمین، مقدار اندازه‌گیری شده بیانگر مقاومت ویژه ظاهری است [Huang & Fraser, 1996].

از این رو لازم می‌دانیم در ابتدا به بیان تفاوت میان مقاومت ویژه حقیقی<sup>۱</sup> (رسانایی ویژه<sup>۲</sup>) و مقاومت ویژه ظاهری<sup>۳</sup> (رسانایی ویژه ظاهری<sup>۴</sup>) اندکی توضیح دهیم و سپس در ادامه این فصل به بیان انواع روش‌های معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی بپردازیم.

۴-۲- مقاومت ویژه الکتریکی<sup>۵</sup>

اساس روش‌های متداول در مهندسی ژئوفیزیک بر مبنای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی زمین است. با توجه به اینکه لایه‌های زمین به واسطه اختلاف جنس مواد تشکیل‌دهنده آنها مقاومت‌های ویژه الکتریکی متفاوتی دارند با استفاده از روش‌های برداشت الکترومغناطیسی می‌توان لایه‌های زمین را از نظر مقاومت ویژه الکتریکی آنها از یکدیگر تفکیک نمود.

اما باید توجه داشت آنچه که ما در محاسبات انجام شده به دست می‌آوریم، مقاومت ویژه حقیقی نیست بلکه یک مقدار متوسط از لایه‌های زمین می‌باشد. در حقیقت مقاومت ویژه حقیقی بیانگر خاصیتی ذاتی از یک مقدار میکروسکوپی یک ماده مانند چگالی، می‌باشد. جدول (۴-۱)، نمونه‌ای از مقاومت ویژه مواد مختلف را نشان می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Resistivity

<sup>2</sup> Conductivity

<sup>3</sup> Apparent Resistivity

<sup>4</sup> Apparent Conductivity

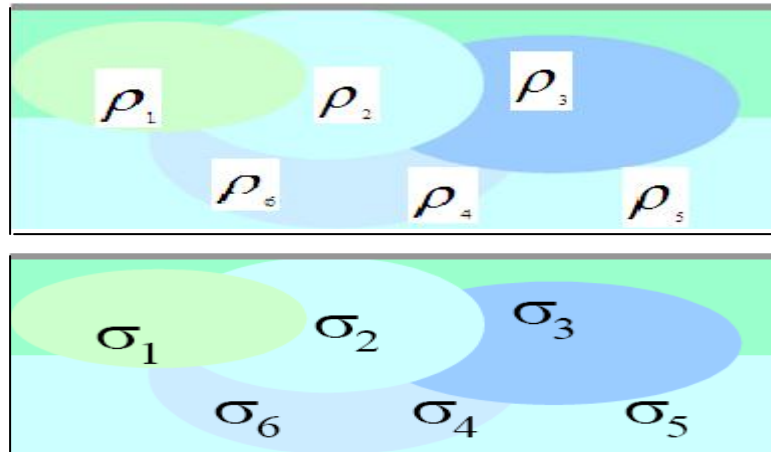
<sup>5</sup> Electrical Resistivity

جدول (۴-۱) : مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانیها و مواد متداول برحسب  $(\Omega - m)$  [Loke,1999].

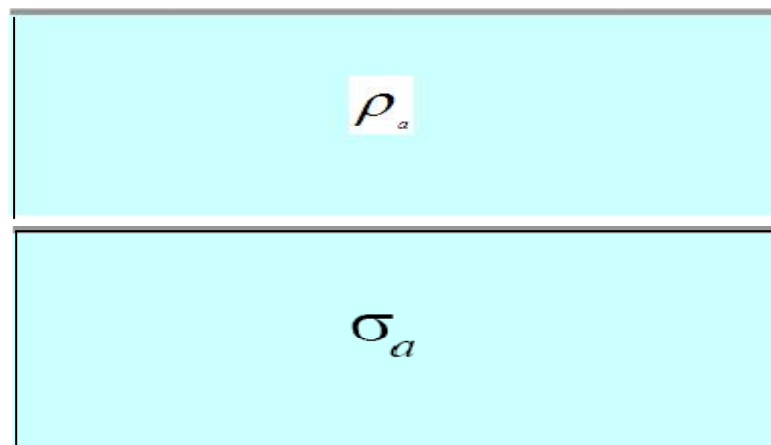
| مقاومت ویژه<br>( $\Omega.m$ ) | ماده                | مقاومت ویژه<br>( $\Omega.m$ )   | ماده                  |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| $8 - 4 \times 10^3$           | ماسه سنگ            | $5 \times 10^3 - 10^6$          | گرانیت                |
| $20 - 2 \times 10^3$          | شیل                 | $10^3 - 10^6$                   | بازالت                |
| $50 - 4 \times 10^2$          | سنگ آهک             | $6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$ | اسلیت                 |
| $10^3 - 5 \times 10^5$        | گابرو               | $10^2 - 2 \times 10^8$          | کوارتزیت              |
| $500 - 5 \times 10^3$         | ماسه سست            | 1 - 100                         | رس                    |
| 0.2                           | آب دریا             | 10 - 100                        | آب زیرزمینی           |
| $10^2 - 10^{-2}$              | پیریت               | $9.074 \times 10^{-8}$          | آهن                   |
| $10^{-2} - 10^{-3}$           | مگنتیت              | $5 \times 10^{-3} - 0.1$        | کالکوپریت             |
| 0.843                         | کلرید سدیم<br>0.01M | 0.708                           | کلرید پتاسیم<br>0.01M |
| $6.998 \times 10^{16}$        | اکسیلن              | 6.13                            | اسید استیک<br>0.01M   |
| $10^3 - 10^2$                 | گالن                | $10^3 - 10^2$                   | پیروتیت               |
| $10^{-2} - 10^6$              | هماتیت              | $10^3 - 10^6$                   | اسفالریت              |

اما ما در اندازه گیری‌های ژئوفیزیکی به جز هنگامی که با یک زمین هموزن و یا همگن روبرو می‌شویم، نمی‌توانیم از مقدار مقاومت ویژه استفاده کنیم، از این رو غالباً از واژه مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی به جای مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می‌کنیم.

در حقیقت مقاومت ویژه ظاهری عبارت است از یک مقدار متوسط مقاومت ویژه که از لایه‌های مختلف زمین به دست می‌آید این مقدار متوسط به معنای متوسط‌گیری حسابی نمی‌باشد بلکه مقداری است که برای مقاومت ویژه الکتریکی یک ناحیه که به صورت لایه‌هایی با مقاومت ویژه الکتریکی متفاوت می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که مقدار تعیین شده برای مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی به نوع تجهیزات اندازه‌گیری و چگونگی به کار بردن آنها نیز وابسته است. لذا مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده توسط دو ابزار مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) نمایشی از زمینی با مقاومت ویژه حقیقی و ظاهری نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): توزیع حقیقی مقاومت ویژه (بالا) و رسانندگی (پایین) در یک زمین



شکل (۴-۲): توزیع ظاهری مقاومت ویژه (بالا) و رسانندگی (پایین) در یک زمین

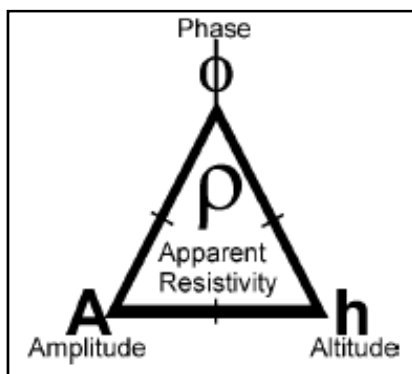
محاسبه پارامتر مقاومت ویژه ظاهری از روی داده‌های الکترومغناطیس هوایی، با استفاده از دو پارامتر از سه پارامتر مهم، امکان پذیر است. همان گونه که در رئوس مثلث شکل (۴-۳) ملاحظه می‌گردد، این پارامترها شامل زاویه فاز سیگنال<sup>۶</sup>، دامنه سیگنال<sup>۷</sup> و ارتفاع سیستم<sup>۸</sup> از سطح زمین می‌باشند. این که کدام یک از دو پارامتر را به عنوان ورودی سیستم انتخاب نماییم، چندان تفاوتی ندارد چرا که نتیجه خروجی مقاومت ویژه ظاهری خواهد بود.

<sup>6</sup> Phase angle

<sup>7</sup> Signal amplitude

<sup>8</sup> Altitude





شکل (۴-۳) : پارامترهای قابل استفاده برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری [Fugro, 2003]

به منظور ارائه نتایج برداشت به صورت نقشه‌های مقاومت ویژه و مقاطع عرضی، پارامترهای مقاومت ویژه و عمق باید در اختیار قرار باشند. تاکنون الگوریتم‌های متعددی برای دستیابی به این پارامتر ارائه شده است. این الگوریتم‌ها عبارتند از: روش‌های ساده و تقریبی سریع و روش‌های پیچیده و دقیق [Fugro, 2003].

#### ۴-۳- انواع روش‌های معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس

در ابتدا لازم است برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری از روی داده‌های حاصل از الکترومغناطیس هوایی دو فرض زیر را در نظر بگیریم :

الف) ارتفاع سیستم به مقدار مشخصی از فاصله میان پیچه‌های فرستنده و گیرنده بیشتر است. به عنوان مثال در سیستم برداشت *DIGHEM* فاصله سیم‌پیچ‌ها در بیشترین حالت ۸ متر می باشد در صورتی که ارتفاع پرواز در حدود ۳۰ متر می باشد.

ب) در محاسبات زمین به صورت یک نیم فضای همگن در نظر گرفته می‌شود. در این حالت ما زمینی را که به صورت لایه‌هایی دارای مقاومت ویژه‌های متفاوت است، به صورت یک زمین همگن که دارای مقاومت الکتریکی ظاهری مشخصی است، در نظر می‌گیریم. با این عمل محاسبات به صورت ساده‌تری انجام می‌گیرد.

## ۴-۴- انواع الگوریتم‌ها و روش‌های مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی

مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس بر اساس دو الگوریتم، مدل نیم‌فضای همگن<sup>۹</sup> و مدل لایه کاذب<sup>۱۰</sup>، صورت می‌گیرد، این دو الگوریتم اساس مدل‌سازی‌های گوناگون می‌باشند. بر این اساس می‌توان روش‌های مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس را به سه دسته کلی تقسیم نمود.

۱. مدل‌سازی معکوس با روش‌های تبدیل مستقیم داده‌ها

۲. مدل‌سازی معکوس با فرایند تکرار محاسبات

۳. مدل‌سازی معکوس از طریق روش‌های غیر دیفرانسیلی

## ۴-۴-۱- مدل‌سازی معکوس با روش‌های تبدیل مستقیم داده‌ها

## ۱- روش مقاطع فریزر

در این روش که در سال ۱۹۷۸ ارائه گردید از دو مدل نیم‌فضا برای به نقشه در آوردن مقاومت‌ویژه ظاهری در برابر تغییرات عمق استفاده می‌شود [Fraser, 1978]. این دو مدل عبارتند از:

۱. مدل نیم‌فضای همگن

۲. مدل نیم‌فضای کاذب

## الف) مدل نیم‌فضای همگن

در شکل (۴-۴) این الگوریتم نشان داده شده است. در این الگوریتم برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری در برابر عمق، شدت دامنه و ارتفاع<sup>۱۱</sup> مورد نیاز است. از این رو می‌توان چنین بیان نمود که مقاومت ویژه ظاهری تابعی از ارتفاع پرنده و شدت دامنه میدان الکترومغناطیس می‌باشد و داریم:

$$\rho_a = f(A, a) \quad (۴-۱)$$

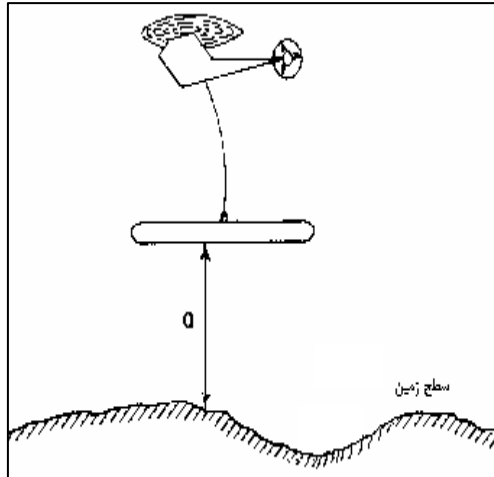
که در آن  $\rho_a$  مقاومت ویژه ظاهری،  $A$  دامنه سیگنال الکترومغناطیس دریافت شده در گیرنده و  $a$  ارتفاع پرنده از زمین است. از آنجا که در برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی فاصله بین فرستنده و گیرنده نسبت به ارتفاع

<sup>۹</sup> Homogenous half space model

<sup>۱۰</sup> Pseudo layer model

<sup>۱۱</sup> Amplitude-Altitude

پروازی کوچک است، بنابراین می‌توان مجموعه فرستنده و گیرنده را به صورت یک دوقطبی مغناطیسی نوسان‌کننده<sup>۱۲</sup> در نظر گرفت که این فرض باعث سادگی محاسبات خواهد شد [Fraser, 1978].



شکل (۴-۴): برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای همگن [Fraser, 1978].

همان‌طور که بیان کردیم، در عمل معمولاً میدان ثانویه ( $Z$ ) نسبت به شدت میدان اولیه در محل گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار اندازه‌گیری شده به صورت یک عدد مختلط می‌باشد و به صورت ترکیبی از یک مولفه همفاز یا حقیقی ( $R$ ) و یک مولفه ناهمفاز یا موهومی ( $Q$ ) بیان می‌شود. از این رو داریم:

$$Z = R + iQ \quad (۲-۴)$$

اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) برحسب ppm نیز برابر است با

$$A = [R^2 + Q^2]^{\frac{1}{2}} \quad (۳-۴)$$

حال با استفاده از ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط پرنده و مقادیر دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) و به کمک جداولی که توسط فرشنخت<sup>۱۳</sup> [Frischnecht, 1967] ارائه شده است، نمودارهایی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری مربوط به فرکانس‌های مختلف، به دست می‌آید. در شکل (۴-۵) نمونه‌ای از این نمودارها برای فرکانس ۹۰۰ هرتز، نشان داده شده است [Fraser, 1978].

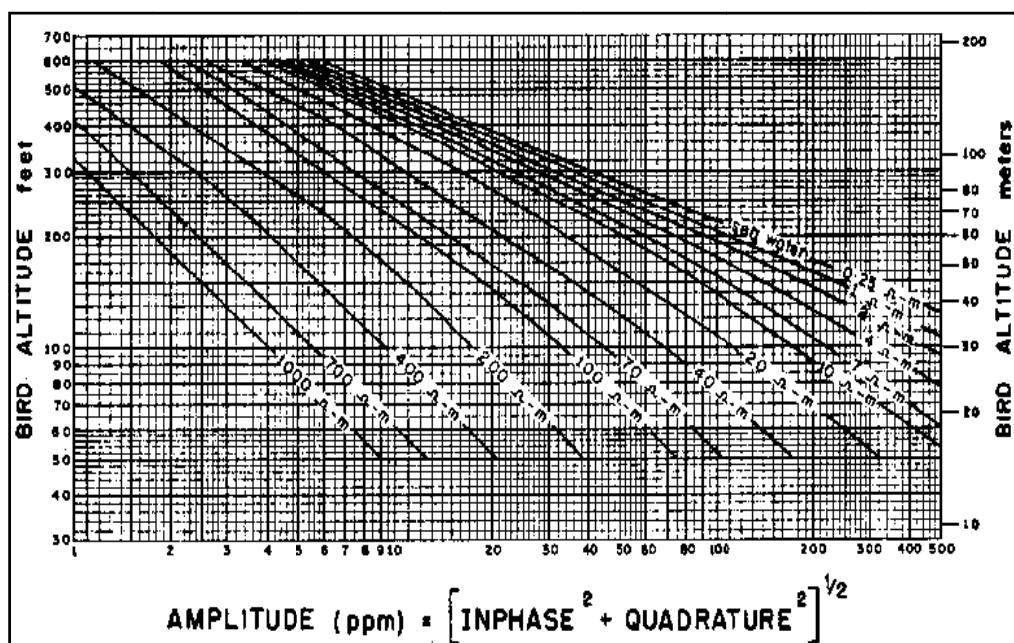
محاسبات مربوط به الگوریتم نیم‌فضای همگن بسیار ساده و اجرای آن بسیار سریع است. از سوی دیگر این الگوریتم تخمین نسبتاً دقیقی از مقاومت ویژه زمین ارائه می‌نماید. هر چقدر در عمل زمین مورد مطالعه به

<sup>12</sup> Oscillating magnetic dipole

<sup>13</sup> Frischnecht

زمین همگن نزدیکتر باشد، مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده از الگوریتم نیم‌فضای همگن به مقاومت ویژه واقعی زمین نزدیکتر خواهد بود. هر چند زمین معمولاً دارای ساختاری لایه‌ای بوده و تغییرات منطقه‌ای مقاومت ویژه نیز در آن وجود دارد [Huang & Fraser, 2003].

اما همان گونه که می‌دانیم، یکی از بزرگترین مشکلات در برداشت‌های هوایی، مساله صحت اندازه‌گیری ارتفاع می‌باشد. خطای اندازه‌گیری ارتفاع وقتی که پوشش گیاهی منطقه برداشت متراکم (مثل جنگلهای انبوه) باشد؛ یا برداشت‌ها در مناطق شهری با تراکم ساختمان‌ها و تاسیسات انجام شود، بوجود می‌آید. زیرا ارتفاع‌سنج در این حالت، نوک درختان و سقف ساختمان‌ها و تاسیسات، را به عنوان سطح زمین در نظر می‌گیرد و سبب ثبت ارتفاع نادرست می‌شود. در این حالت با استفاده از این الگوریتم، مقادیر بالاتری از مقاومت ویژه ظاهری نسبت به مقادیر واقعی آن ثبت می‌شود.



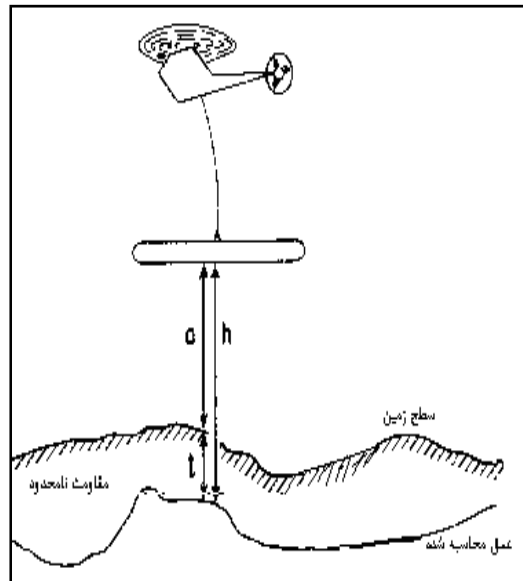
شکل (۴-۵): نمودار دامنه-ارتفاع برای مدل نیم‌فضای همگن، در حالتی که بیشترین جفت‌شدگی سیم‌پیچ گیرنده برای فرکانس ۹۰۰ هرتز وجود دارد [Fraser, 1978].

به دلیل مشکلات موجود در این الگوریتم، از اوایل دهه ۱۹۹۰، تمامی شرکت‌های بزرگ ژئوفیزیک هوایی، روش دقیق‌تر الگوریتم لایه کاذب را مبنای محاسبات خود قرار دادند. لازم به ذکر است که سیستم‌های الکترومغناطیس هوایی فوگرو نوع دیگهم پنج (DIGHEM<sup>V</sup>) نیز از این الگوریتم برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌نمایند [Fugro, 2003].

## ب) مدل نیم‌فضای لایه کاذب

این مدل در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. اختلاف بین ارتفاع ظاهری<sup>۱۴</sup> ( $h_a$ ) و ارتفاع واقعی ( $a$ )، لایه کاذب ( $t$ ) نامیده می‌شود که نشان دهنده اختلاف بین زمین‌شناسی واقعی منطقه و مدل نیم‌فضای همگن است. از این رو می‌توان چنین بیان نمود:

$$t = h_a - a \quad (۴-۴)$$



شکل (۴-۶): برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای لایه کاذب [Fraser, 1978].

این الگوریتم از فاز ( $\phi$ ) و دامنه ( $A$ ) به عنوان ورودی سیستم استفاده می‌کند و خروجی آن مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) و ارتفاع ظاهری سیستم ( $h_a$ ) از سطح نیم‌فضای همگن است؛ از این رو مقاومت ویژه ظاهری به صورت تابعی از دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) و ارتفاع ظاهری سیستم اندازه‌گیری ( $h_a$ ) بیان می‌گردد، در این صورت داریم:

$$\rho_a = f(A, \phi) \quad (۵-۴)$$

از سوی دیگر داریم:

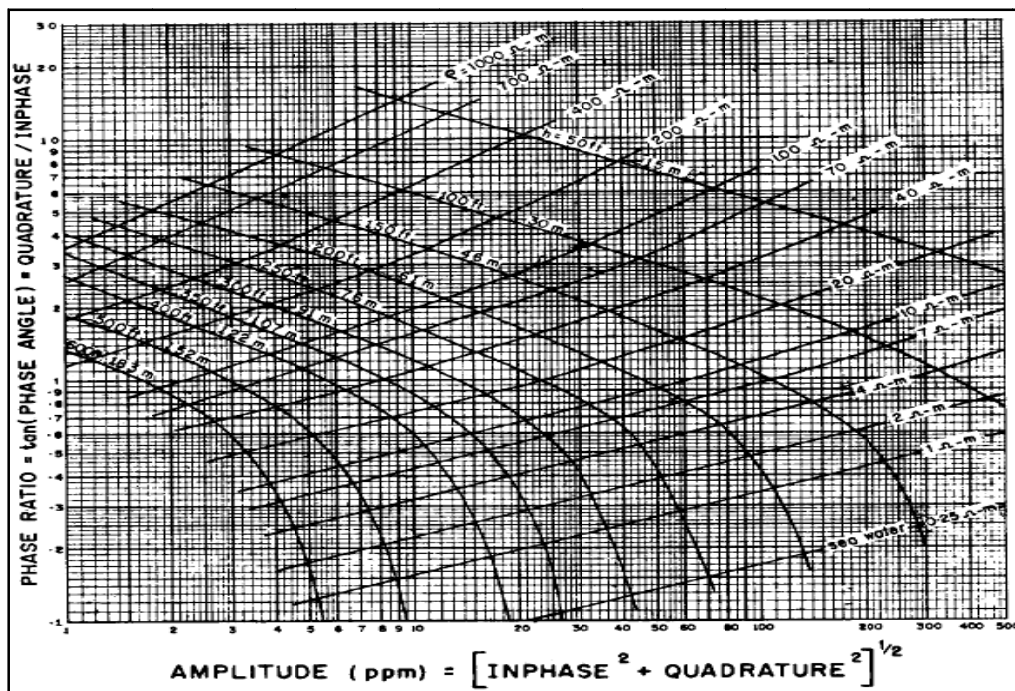
$$\tan \phi = \frac{Q}{R} \Rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{R}\right) \quad (۶-۴)$$

همچنین:

<sup>14</sup> Apparent altitude

$$h_a = f(A, \phi, h) \quad (7-4)$$

که در آن  $h$  ارتفاع سیستم اندازه‌گیری از عمق محاسبه شده است. در عمل با استفاده از مقادیر زاویه فاز و دامنه و به کمک روابط و جداولی که توسط فرشنخت [Frischnecht, 1967] ارائه شده است. نمودارهایی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری و ارتفاع ظاهری مربوط به فرکانس‌های مختلف برداشت، به دست می‌آید. در شکل (7-4) یک نمونه از این نمودارها که مربوط به فرکانس ۹۰۰ هرتز است، نشان داده شده است.

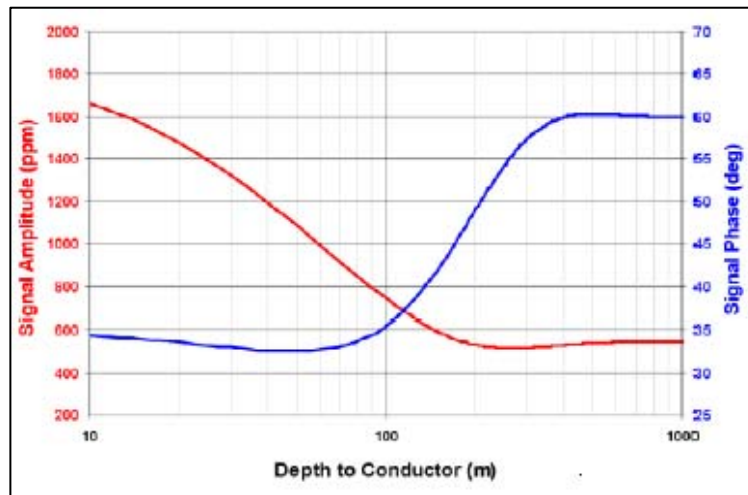


شکل (7-4): نمودار دامنه-فاز برای مدل نیم‌فضای لایه کاذب، در حالتی که بیشترین جفت شدگی سیم‌پیچ گیرنده برای فرکانس ۹۰۰ هرتز وجود دارد [Fraser, 1978].

از آنجا که زاویه فاز نسبت به سیگنال‌های رسیده از توده‌های رسنای مدفون عمیق (پاسخ‌های ضعیف‌تر) بیشترین حساسیت را دارد؛ لذا امروزه از این الگوریتم استفاده بیشتری می‌شود. در صورتی که در الگوریتم‌هایی که پایه محاسبات آنها (ورودی‌های الگوریتم) ارتفاع و شدت دامنه است؛ مانند الگوریتم نیم‌فضای همگن، حساسیت نسبت به توده‌های مدفون رسنای عمقی کمتر است. زیرا در این الگوریتم‌ها پاسخ مولفه هم‌فاز رسنای عمیق نسبت به پاسخ مولفه ناهم‌فاز سنگ در برگیرنده، ضعیفتر است و لذا از بین می‌رود.

در شکل (8-4) یک لایه با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  روی لایه شیب‌دار با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  قرار گرفته است. در این شکل شدت دامنه سیگنال برای لایه  $10 \Omega m$  و در عمق ۱۲۰ متری از سطح زمین تنها به صورت

مجانب و مرزی تغییر کرده است؛ به عبارت دیگر از عمق ۱۲۰ متر به بعد تقریباً ثابت است حال آنکه زاویه فاز تغییرات قابل توجهی را تا رسیدن به یک مقدار ثابت را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۴): تغییرات شدت دامنه و زاویه فاز برای یک مدل زمین دو لایه (مقاومت ویژه لایه بالایی  $100 \Omega m$  و مقاومت ویژه لایه شیبدار پایینی،  $10 \Omega m$  است) [Fugro, 2003].

همان‌طور که می‌دانیم در این الگوریتم علاوه بر محاسبه مقاومت ویژه ظاهری، ارتفاع ظاهری نیز به دست می‌آید. از آنجایی که ممکن است این مقدار با مقدار اندازه‌گیری شده بوسیله ارتفاع‌سنج و حتی ارتفاع واقعی سیستم برابر نباشد، معمولاً ارتفاع اندازه‌گیری شده از ارتفاع ظاهری محاسبه شده، کم می‌شود و به عنوان پارامتر عمق ظاهری<sup>۱۵</sup> بیان و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که ارتفاع اندازه‌گیری شده ( $h$ ) و ارتفاع ظاهری محاسبه شده ( $D_a$ ) در نظر گرفته شود، می‌توان پارامتر عمق ظاهری ( $d_a$ ) را به صورت زیر تعریف نمود:

$$d_a = D_a - h \quad (8-4)$$

گاهی ممکن است به علت وجود وجود پوشش گیاهی یا تاسیسات و ساختمان‌ها، ارتفاع اندازه‌گیری شده به وسیله اندازه‌گیری ارتفاع‌سنج، خیلی کوچک باشد، بنابراین ارتفاع محاسبه شده از ارتفاع اندازه‌گیری شده بزرگتر خواهد شد که در این حالات عمق ظاهری مثبت خواهد شد. این مطلب نشانگر آن است که فاصله زمین نسبت به سیستم، دورتر از آن است که ارتفاع‌سنج نشان می‌دهد. لازم به ذکر اینکه حتی وقتی که ارتفاع‌سنج ارتفاع صحیح را نیز نشان می‌دهد؛ باز هم اگر ساختار زمین ناهمگن باشد، عمق ظاهری می‌تواند صفر نشود.

<sup>15</sup> Apparent depth

برای زمین دو لایه ای، با پوشش لایه ای مقاوم، اگر  $d_a$  مثبت باشد، لایه رویی نسبت به لایه پایینی بسیار مقاوم است، و اگر  $d_a$  منفی باشد، لایه رویه از لایه پایینی بسیار رساناتر می باشد و در صورتی که مقادیر  $D_a$  و  $h$  با یکدیگر برابر باشند، زمین مورد مطالعه یک زمین همگن می باشد [Fraser, 1978]. بر اساس روش های ارائه شده توسط فریزر الگوریتم های دیگری نیز ارائه شده اند که بر پایه الگوریتم فریزر، عملیات معکوس سازی را انجام می دهند. اما مهمترین نکته در این الگوریتم ها عمق نفوذ کم می باشد. در ادامه به بیان یک دسته بندی کلی برای الگوریتم های مشابهی که از روش ارائه شده توسط فریزر برای معکوس سازی تقریبی داده های الکترومغناطیس هوایی استفاده می کنند، می پردازیم. در این صورت دو دسته کلی را به شرح زیر معرفی می نماییم:

- الگوریتم های قدیمی و غیر پیشرفته

- الگوریتم های پیشرفته و نوین

#### ۴-۱-۱-۴- الگوریتم های قدیمی و غیر پیشرفته

الف - الگوریتم های محاسبه مقاومت ویژه تک فرکانسی با عمق نفوذ کم

در این نوع الگوریتم ها غالباً ورودی الگوریتم ارتفاع پرنده ثبت شده پرواز می باشد و پارامتر دوم نیز بنا به نوع الگوریتم مورد استفاده، یکی از پارامتر های ذکر شده در زیر می باشد. بنابراین داده های ورودی الگوریتم یکی از موارد زیر است.

- ارتفاع پرنده - مولفه موهومی میدان الکترومغناطیسی ( $Q-a$ )

- ارتفاع پرنده - نسبت مولفه موهومی به مولفه حقیقی میدان الکترومغناطیسی ( $\varepsilon = Q/R - a$ )

- ارتفاع پرنده - زاویه نسبت فاز ( $\arctan(\varepsilon) - a$ )

- ارتفاع پرنده - اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A = |Z| = (R^2 + Q^2)^{1/2} - a$ )

با توجه به آن که ارتفاع پرنده به عنوان تابع ورودی در نظر گرفته شده است از این رو الگوریتم های فوق بر اساس مدل نیم فضای همگن مقدار مقاومت ویژه ظاهری را به دست می آورند. در این الگوریتم هادر صورتی که زمین مورد مطالعه دارای توپوگرافی و یا پوشش گیاهی باشد، پاسخ نادرست برای مقاومت ویژه ثبت می گردد از این رو استفاده از این نوع الگوریتم ها غالباً توصیه نمی گردد.

البته در مورد الگوریتم های محاسبه مقاومت ویژه تک فرکانسی با عمق نفوذ کم می توان به یک الگوریتم دیگر که به صورت متداول مورد استفاده قرار می گیرند نیز اشاره نمود. الگوریتم فوق بر خلاف



الگوریتم‌های ذکر شده دیگر از مدل نیم فضای کاذب برای به دست آوردن مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌کند. در این الگوریتم که مقدار جفت مولفه‌های هم فاز ( $R$ ) و موهومی ( $Q$ ) و یا اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) و زاویه نسبت فاز ( $\arctan(\varepsilon)$ ) به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شوند و خروجی الگوریتم نیز مقاومت ویژه ظاهری و ارتفاع پرنده از نیم فضای کاذب می‌باشد.

بر اساس مقدار به دست آمده و ارتفاع پرنده ثبت شده می‌توان از رابطه (۴-۸) عمق ظاهری را نیز به دست آورد. همان طور که می‌دانیم برای هر فرکانس، دو مولفه حقیقی ( $R$ ) و موهومی ( $Q$ ) برای میدان الکترومغناطیسی ثانویه و همچنین ارتفاع پرنده ( $h$ ) اندازه گیری می‌شود. تخمین مقاومت ویژه از روی مدل نیم فضای همگن متناظر با مقاومت ویژه ظاهری  $\rho_a$ ، به وسیله به کاربردن ۲ پارامتر از ۳ پارامتر دریافت شده صورت می‌گیرد (Fraser,[1978]&Simeon,[1997]). اگر ارتفاع  $h$  به عنوان ورودی جهت مدل سازی مورد استفاده قرار گیرد، مقاومت ویژه ظاهری، به طور کلی از تلفیق مولفه هم فاز ( $R$ ) و موهومی ( $Q$ ) با در نظر گرفتن دامنه به صورت  $A = |Z| = (R^2 + Q^2)^{1/2}$ ، یا با در نظر گرفتن نسبت فاز  $\varepsilon = Q/R$ ، می‌تواند به دست بیاید. به عبارت دیگر اگر مقاومت ویژه ظاهری از قسمت موهومی منتج شود (به عنوان مثال از  $A$  و  $\varepsilon$ ) مقدار ارتفاع سنج قرار گرفته بر روی مدل نیم فضای همگن به عنوان پارامتر خروجی می‌باشد.

روش‌های گوناگون دیگری نیز وجود دارند که از ترکیب روش‌های بالا به دست می‌آیند. مثلاً در شکل (۴-۹) مقادیر، دامنه ( $A^{1/3} = A^{1/3}/\gamma$ ) و نسبت فاز ( $\varepsilon = Q/R$ ) و عمق پوسته ( $\delta = h/p$ ) برای حالتی که  $\gamma = 8/30$  است، مختص سیستم‌های HEM رسم شده است. منحنی‌های متناظر در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی نشان داده شده‌اند.

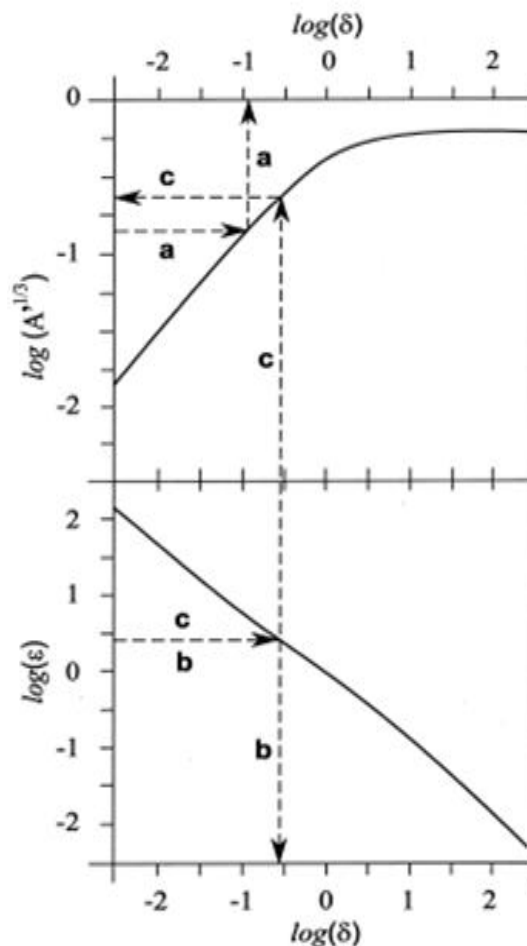
ماندری در سال ۱۹۸۴ منحنی‌های  $A^{1/3}(\delta)$  و  $\varepsilon(\delta)$  را با در نظر گرفتن تقریب  $J_0 = 1$  محاسبه نمود. او این منحنی‌ها را در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی به وسیله چندین خط پرواز و ضرایب مشترک از درون یابی خطی به صورت تقریبی به دست آورد. این تقریب ناهموار، به خصوص در هر دو قسمت نهایی و میانی خط پرواز نتایج نادرست ایجاد می‌نمود. نتایج دقیق‌تر در صورتی که همه منحنی‌ها به صورت چند جمله‌ای زیر ( $N=12$ ) تخمین زده شوند، به دست می‌آیند [Simeon, 2001].

$$y_m = \sum_{n=0}^N a_n x_m^n \quad m=1,2,3,\dots \quad (9-4)$$

این نسبت بهتر جهت برآزش هر منحنی به صورت دقیق به خصوص قسمت های شبه خطی از منحنی ها می باشد. در رابطه (۹-۴) ،  $y_m$  مقدار داده های اندازه گیری  $(\log(A^{1/3})$  و  $\log(\varepsilon)$  ) می باشد و  $x_m$  پارامتر مدل مورد نظر یا مقدار  $\log(\delta)$  است، و یا بالعکس.

تعداد ضرایب مشترک  $a_n$  برابر  $(2N+2)$  است، که در مقایسه با همان مقدار درون یابی خطی است و با این تغییر دقت تخمین به وضوح بالا می رود. در این حالت معکوس‌سازی به سادگی صورت می گیرد زیرا  $\log(A^{1/3})$  و  $\log(\varepsilon)$  برای هنگامی که ارتفاع پرواز ۳۰ متر است به خوبی  $\delta(A^{1/3})$  و  $\delta(\varepsilon)$  دارای مقدار یکتا در بازه  $\log(\delta) \leq 2.5$  که متناظر با عمق پوسته ۰.۱ تا ۱۰۰۰۰ متر می باشد، هستند.

برای یک ارتفاع معین  $h$ ، نسبت  $\delta$  از داده های اندازه گیری، به دست می آید، دامنه تبدیل یافته  $A^{1/3}$  (شکل (۹-۴) قسمت  $a$ ) یا نسبت فاز  $\varepsilon$  (شکل (۹-۴) قسمت  $b$ ) جهت ذخیره ضرایب مشترک مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل (۹-۴) : الگوریتم های محاسبه مقاومت ویژه تک فرکانسی با عمق نفوذ کم. [Siemon,2001]

بر این اساس مقاومت ویژه از تعریف عمق پوسته و با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{h}{\delta} \\ p = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \end{array} \right\} \Rightarrow \rho_a = \frac{\omega\mu_0}{2} \left(\frac{h}{\delta}\right)^2 \quad (10-4)$$

به ترتیب بیان‌گر مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده از روی دامنه و یا نسبت فاز است. اگر ارتفاع پرنده جهت مدل سازی معکوس مورد استفاده قرار نگیرد، هر دو منحنی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری مورد نیاز هستند (شکل (4-9) قسمت C). در این صورت مقدار ارتفاع ظاهری از رابطه زیر به دست می‌آید [Simeon, 2001].

$$h = r\left(\frac{A}{A}\right)^{1/3} \equiv D_a \quad (11-4)$$

ب- الگوریتم‌های کاربردی تک فرکانسی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با توجه به مدل نیم فضا در صورتی که زمین مورد مطالعه دارای نفوذ پذیری مغناطیسی باشد

در این حالت ما دو نوع الگوریتم را مورد استفاده قرار می‌دهیم:

(1) مولفه حقیقی ( $R$ ) - مولفه موهومی ( $Q$ ) - ثابت تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ )

در این حالت مقاومت ویژه ظاهری و ارتفاع پرنده از نیم فضای کاذب به عنوان خروجی های الگوریتم فوق می‌باشد. از این رو خطاهای مربوط به نیم فضای همگن وجود ندارد. از آنجایی که روش های جدید دیگری که در ادامه بیان می‌گردد برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری جهت زمین هایی که دارای نفوذ پذیری مغناطیسی هستند به وجود آمده است از این رو این الگوریتم امروزه کاربرد چندانی ندارد.

(2) اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) - ارتفاع پرنده ( $a$ ) - ضریب تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ )

در این روش مقدار مقاومت ویژه ظاهری بر اساس مدل نیم فضای همگن به دست می‌آید. با توجه به این که ارتفاع پرنده به عنوان تابع ورودی در نظر گرفته شده است لذا همان گونه که قبلاً بیان نمودیم مشکلات ناشی از پوشش گیاهی وجود دارد از این رو امروزه این الگوریتم به صورت بسیار محدود و در صورتی که زمین مورد مطالعه یک نیم فضای کاملاً همگن باشد، استفاده می‌گردد.

ج- الگوریتم‌های کاربردی تک فرکانسی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با توجه به مدل نیم فضا در صورتی که زمین مورد مطالعه مقاوم باشد

در این حالت نیز روش‌های معکوس‌سازی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(۱) مولفه حقیقی ( $R$ ) - مولفه موهومی ( $Q$ ) - ضریب گذردهی دی الکتریک ( $K$ )

در نوع اول مقاومت ویژه ظاهری و ارتفاع پرنده از نیم فضای کاذب به عنوان خروجی‌های الگوریتم به دست می‌آید از این رو خطاهای مربوط به نیم فضای همگن وجود ندارد. این الگوریتم امروزه کاربرد چندانی ندارد و به صورت محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(۲) اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) - ارتفاع پرنده ( $a$ ) - ضریب گذردهی دی الکتریک ( $K$ )

در این روش مقدار مقاومت ویژه ظاهری بر اساس مدل نیم فضای همگن به دست می‌آیند. با توجه به این که ارتفاع پرنده به عنوان تابع ورودی در نظر گرفته شده است. لذا همان گونه که قبلاً بیان نمودیم مشکلات ناشی از پوشش گیاهی وجود دارد. امروزه استفاده از این الگوریتم کاملاً منسوخ شده است.

د- الگوریتم‌های کاربردی تک فرکانسی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با توجه به مدل نیم فضا در صورتی که زمین مورد مطالعه مقاوم و دارای نفوذپذیری مغناطیسی باشد

الگوریتم‌های مورد استفاده در این حالت شامل موارد زیر هستند:

(۱) مولفه حقیقی ( $R$ ) - مولفه موهومی ( $Q$ ) - ضریب گذردهی دی الکتریک ( $K$ ) - ضریب تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ )

در این حالت مقاومت ویژه ظاهری و ارتفاع پرنده از نیم فضای کاذب به عنوان خروجی‌های الگوریتم فوق می‌باشد. از این رو خطاهای مربوط به نیم فضای همگن وجود ندارد. باید توجه داشت که این روش امروزه کاربرد چندانی ندارد.

(۲) اندازه دامنه میدان الکترومغناطیس ( $A$ ) - ارتفاع پرنده ( $a$ ) - ضریب گذردهی دی الکتریک ( $K$ ) - ثابت

نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ )

در این روش مقدار مقاومت ویژه ظاهری بر اساس مدل نیم فضای همگن به دست می‌آیند. با توجه به این که ارتفاع پرنده به عنوان تابع ورودی در نظر گرفته شده است لذا همان گونه که قبلاً بیان نمودیم مشکلات ناشی از پوشش گیاهی وجود دارد. امروزه استفاده از این الگوریتم کاملاً منسوخ شده است.

#### ۴-۱-۲- الگوریتم‌های پیشرفته و نوین

دسته دوم از الگوریتم‌های محاسبه مقاومت ویژه که امروزه کاربرد بیشتری دارند، عموماً بر اساس الگوریتم‌های نیم فضای کاذب می‌باشند. در این دسته از الگوریتم‌ها غالباً مقاومت ویژه ظاهری از همان رابطه نیم فضا به دست می‌آید، البته در پاره ای از موارد همانند روش پارامتردیفرانسیلی می‌توان از روابط دیگری مقدار مقاومت ویژه ظاهری را به دست آورد. باید توجه داشت که عمق نفوذ در این الگوریتم‌های جدید مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در حقیقت در الگوریتم‌های جدید شاهد عمق ظاهری بیشتر هستیم تا بتوانیم مقاومت ویژه ظاهری ناشی از لایه‌های عمیق تر را بهتر به دست آوریم. حال به بررسی الگوریتم‌های موجود می‌پردازیم.

#### الف- روش مقاطع سنگپیل

سنگپیل با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط اشموکر ([Schmucker, 1970]) برای مدل‌سازی معکوس داده‌های مگنتوتلوریک<sup>۱۶</sup>، روش مهمی را برای مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس ارائه نمود. بر این اساس یک موج الکترومغناطیس پلاریزه شده در صفحه  $xy$  را که در جهت عمق  $z$  جابجا می‌شود، در نظر می‌گیریم. حال بردار مغناطیسی  $H_0$  که با محور  $x$  زاویه  $\theta$  ساخته را به اجزای آن در راستای محورهای  $x$  و  $y$  تبدیل می‌کنیم. که داریم [Telford et al, 1990]:

$$H_x = (H_0 \cos \theta) e^{-az} \cos(\omega t - az) \quad (۱۱-۴)$$

$$H_y = (H_0 \sin \theta) e^{-az} \cos(\omega t - az) \quad (۱۲-۴)$$

همچنین از تعمیم قانون آمپر می‌توان چنین بیان نمود:

<sup>16</sup> Magnetotelluric (MT)

$$E_x = (x \text{ component of } \nabla \times H) = \frac{1}{\sigma} \left( -\frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (13-4)$$

$$= \sqrt{2} \frac{a}{\sigma} (H_0 \sin \theta) e^{-az} \cos(\omega t - az + \frac{\pi}{4})$$

و برای مولفه  $y$  نیز می‌توان چنین نوشت:

$$E_y = \sqrt{2} \frac{a}{\sigma} (H_0 \cos \theta) e^{-az} \cos(\omega t - az + \frac{\pi}{4}) \quad (14-4)$$

حال با استفاده از روابط (۱۱-۴) تا (۱۴-۴) برای زمین همگن لایه‌ای می‌توان چنین نوشت:

$$\left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 = \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = 2 \left( \frac{a}{\sigma} \right)^2 = \omega \mu \rho \quad (15-4)$$

اگر فرض کنیم  $\sigma$  رسانندگی در عمق تجسس  $DI$  باشد، می‌توان مقادیر تقریبی این دو پارامتر را با جایگزینی

$$\frac{1}{DI} \text{ بجای } \frac{\partial}{\partial z} \text{ و } \frac{2\pi}{T} \text{ بجای } \omega \text{ به دست آورد. در اینصورت داریم [Telford et al, 1990]:}$$

$$DI \approx \frac{1}{\sigma} \left| \frac{H_y}{E_x} \right| \approx \frac{1}{\omega \mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right| \quad (16-4)$$

و

$$\rho \approx \frac{1}{\omega \mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (17-4)$$

اشموکر با استفاده از روابط پیشین تابع تبدیل<sup>۱۷</sup> (امپدانس زمین<sup>۱۸</sup>) مقدار مختلط  $c_o$  که مرتبط با

میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است را تعریف نمود [Sengpiel, 1988]:

$$c_o = \frac{1}{i\mu_o \omega} \frac{E_x}{H_y} \quad (18-4)$$

این تابع برای یک میدان اولیه یکنواخت<sup>۱۹</sup> و در مدل نیم‌فضای لایه‌ای با استفاده از یک الگوریتم ریاضی دقیق، به

سرعت با کامپیوتر قابل محاسبه است. با توجه به روابط (۱۵-۴) و (۱۶-۴) می‌توان چنین نتیجه گرفت که،

مولفه حقیقی تابع تبدیل ( $C_0$ ) برابر عمق تمرکز ( $z_o^*$ ) جریان هم‌فازی که بوسیله یک چشمه میدان

<sup>17</sup> Transfer function

<sup>18</sup> Impedance Earth

<sup>19</sup> Uniform primary field

یکنواخت<sup>۲۰</sup> القا شده است. مولفه موهومی آن نیز مقاومت ویژه متوسط ( $\rho^*$ ) مرتبط با عمق ( $z_0^*$ ) را نشان می‌دهد. در صورتی که مقدار این تابع تبدیل برای چندین فرکانس معلوم باشد، به سهولت و با کمک روابط زیر می‌توان مقاطع مقاومت ویژه- عمق پروفیل‌های برداشت را تهیه نمود.

$$\rho_0^* = 2\mu_0\omega(\text{Im}c_0)^2 \quad (۱۹-۴)$$

$$z_0^* = \text{Re}c_0 \quad (۲۰-۴)$$

اگر اندازه‌گیری در یک نیم‌فضای لایه‌ای که لایه اول رسانای ضعیفی است، انجام شود، تابع  $\rho_0^*(z_0^*)$  تقریب مناسبی از توزیع عمقی مقاومت ویژه ارائه خواهد نمود [Schmucker, 1970].

از آنجایی که در برداشت‌های هوایی لایه اول که هوا می‌باشد دارای رسانایی پایین می‌باشد، از این رو می‌توان از این روش جهت محاسبه مقاومت ویژه ظاهری یک محیط نیم فضا استفاده نمود. اما برخلاف روش مگنتوتلوریک که در آن میدان اولیه یکنواخت است، در برداشت‌های هوایی میدان الکترومغناطیسی به صورت یکنواخت نیست. لذا ناچاریم تابع تبدیل فوق‌الذکر را برای میدان‌های غیریکنواخت اصلاح، و سپس آن را به کار ببندیم. همان گونه که می‌دانیم ممکن است چشمه میدان تک فرکانس باشد و بتواند با یک عدد موج<sup>۲۱</sup> بیان شود، از این رو می‌توان چنین بیان نمود:

$$\lambda = \frac{2\pi}{L} \quad (۲۱-۴)$$

که در آن  $L$  طول موج فضایی<sup>۲۲</sup> چشمه میدان الکترومغناطیس است؛ از این رو تابع تبدیل ( $c_\lambda$ ) برای یک نیم‌فضای همگن از رابطه زیر به دست می‌آید [Schmucker, 1970]:

$$c_\lambda = \left[ \lambda^2 + \left( \frac{1+i}{p} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (۲۲-۴)$$

<sup>20</sup> Uniform source field

<sup>21</sup> Wavenumber

<sup>22</sup> Spatial wavelength

در این رابطه  $p$  عمق پوسته است، با توجه به رابطه بالا تابع تبدیل می‌تواند به شکل عمق پوسته تعمیم یافته<sup>۲۳</sup> برای میدانی با عدد موج  $(\lambda)$  فرض شود [Sengpiel, 1988]. در صورتی که میدان یکنواخت باشد، طول موج فضایی بیشترین مقدار ممکن را خواهد داشت از این رو  $(\lambda = 0)$  می‌گردد و می‌توان نوشت:

$$c_0 = \frac{p}{2} - i \frac{p}{2} \quad (23-4)$$

از آنجا که در برداشتهای هوایی، مجموعه فرستنده و گیرنده را می‌توان به صورت یک دوقطبی مغناطیسی نوسان کننده فرض نمود، لذا مولفه‌های میدان حاصل به صورت یک طیف پیوسته از طول موج‌ها قابل تعریف هستند [Sengpiel, 1988]. اگر میدان مغناطیسی ثانویه نرمالیزه شده در محل گیرنده (در بالای یک زمین لایه‌ای) را با  $Z$  نشان دهیم. با فرض اینکه:

$$h \geq 3.3 r \quad (24-4)$$

که در آن  $r$ ، فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده و  $h$  ارتفاع پرنده از سطح زمین باشد؛ داریم:

$$Z \cong G_j \left(\frac{r}{h}\right)^3 \int_0^\infty k^2 R_1 e^{-2k} dk \quad (25-4)$$

در این رابطه،  $G_j$  ضریبی است که به نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده بستگی دارد و برای حالات مختلف عبارتست از:

- برای سیم‌پیچ‌های هم صفحه افقی  $G_1=1, j=1$ .
- برای سیم‌پیچ‌های هم صفحه عمودی  $G_2=1/2, j=2$ .
- برای سیم‌پیچ‌های هم محور قائم  $G_3=-1/4, j=3$  [Mundry, 1984].

$R_1$ ، ضریب بازتاب<sup>۲۴</sup> نامیده می‌شود و عددی مختلط می‌باشد. از آنجا که مدل نیم فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد، به دلیل آنکه بیان محاسبات ریاضی حجم مطالب را بالا می‌برد لازم دیدیم تا نحوه به دست آوردن پارامتر تابع تبدیل ( $C$ ) و مقاومت ویژه را در انتهای پایان نامه و در پیوست (۱) بیان کنیم. از این رو پس از تعریف

<sup>23</sup> Generalized skin depth

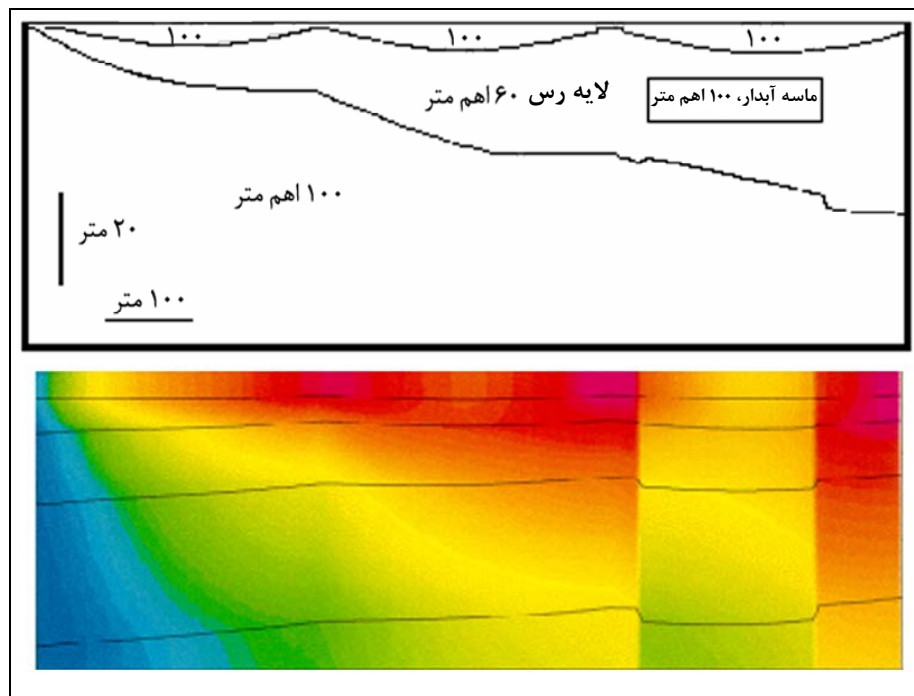
<sup>24</sup> Reflection factor



ضریب بازتاب و محاسبه تابع تبدیل مربوطه ( $C$ )، مقدار  $z^*$  یعنی عمق مرکزی از سطح واقعی زمین با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [Sengpiel, 1988].

$$z^* = d_a + z_c^* = d_a + D_a \text{Re } C \quad (۲۶-۴)$$

از این رو با محاسبه رابطه (۲۶-۴) برای فرکانس‌های مختلف، می‌توان منحنی سونداژ<sup>۲۵</sup>  $\rho_a(z^*)$  را به دست آورد [Sengpiel, 1988]. در صورتی که بازه فرکانس مورد استفاده وسیع انتخاب گردد، این تابع می‌تواند تقریب همواری از توزیع واقعی مقاومت ویژه  $\rho(z)$ ، زمین را ارائه نماید. از ویژگی‌های بارز این روش می‌توان به سرعت بالا، عدم حساسیت نسبت به نویزهای موجود در داده‌های خام، عدم نیاز آن به حدس یک مدل اولیه را نام برد. این روش می‌تواند یک ایده تقریبی از تغییرات مقاومت ویژه را در اختیار ما قرار دهد. از محدودیت‌های این روش نیز می‌توان به تعیین عمق اکتشاف اشاره نمود، که اساساً در این روش مقدار آن کمتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌شود [Huang & Fraser, 1996]. در شکل (۱۰-۴) یک مدل فرضی از یک لایه رسی رسنای گوه‌ای، که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته است، نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۴): مدل فرضی یک لایه رسی رسنای گوه‌ای که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع سنگپیل

[Fugro, 2003]

<sup>25</sup> Sounding curve

در قسمت پایین شکل (۴-۱۰)، مقطع حاصل از روش سنگپیل نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود لایه روباره و توده ماسه آبدار درون رس در این مقطع قابل تشخیص نیست. ضمن اینکه عمق قرارگیری لایه رسی گوه ای نیز از مقدار واقعی آن بیشتر نشان داده شده است [Fugro, 2003].

ب- روش مقاطع سیمون ( $z_p^*$ )

در سال ۱۹۹۷ سیمون برای محاسبه عمق مرکزی، رابطه زیر را بیان نمود [Siemon, 2001]:

$$z_p^* = d_a + \frac{P_a}{2} \quad (۴-۲۷)$$

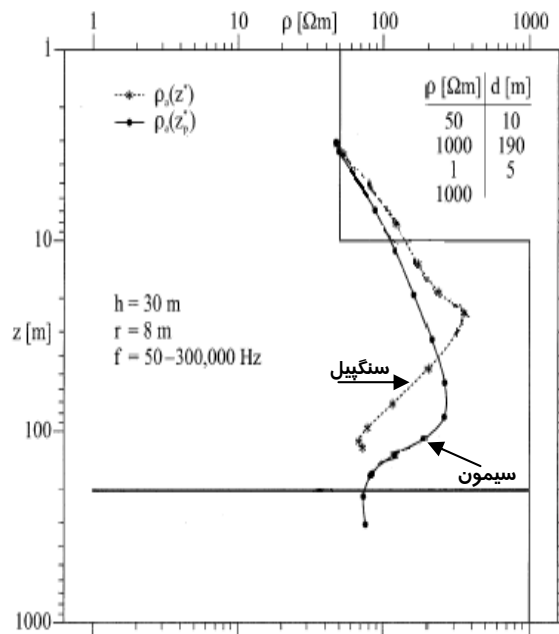
با محاسبه رابطه فوق برای فرکانس‌های مختلف، منحنی سونداژ  $\rho_a(z_p^*)$  حاصل می‌شود. در این روش تنها عمق نفوذ افزایش یافته است و سایر محاسبات لازم برای به دست آوردن منحنی سونداژ همانند روش سنگپیل است.

در مثال شکل (۴-۱۱) نتایج روش سیمون و مقاطع سنگپیل برای برداشت داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس بر روی یک مدل زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۴-۲) نشان داده شده است. در این مثال، فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده ۸ متر، ارتفاع پرنده از زمین ۳۰ متر و برداشت‌ها در چندین فرکانس در بازه ۵۰ تا ۳۰۰۰۰۰ هرتز انجام شده است [Sengpiel & Siemon, 2000].

جدول (۴-۲): مشخصات یک زمین چهار لایه [Sengpiel & Siemon, 2000]

| توضیحات                    | لایه اول | لایه دوم | لایه سوم | لایه چهارم |
|----------------------------|----------|----------|----------|------------|
| مقاومت ویژه ( $\Omega.m$ ) | ۵۰       | ۱۰۰۰     | ۱        | ۱۰۰۰       |
| ضخامت (m)                  | ۱۰       | ۱۹۰      | ۵        | $\infty$   |

همان‌گونه که در شکل (۴-۱۱) دیده می‌شود؛ هر دو روش در شناسایی لایه‌های بالایی مدل خوب عمل می‌کنند، ولی روش سیمون در شناسایی لایه‌های عمیق تر موفق تر عمل می‌کند. از این رو همان‌گونه که مشخص است روش سنگپیل اطلاعات مفیدی از لایه‌های عمیق تر نمی‌دهد.



شکل (۴-۱۱): منحنی‌های سونداژ روش‌های سنگپیل و سیمون برای یک زمین چهارلایه

[After Sengpiel & Siemon, 2000]

### ج- روش پارامتر دیفرانسیلی<sup>۲۶</sup> هوانگ ( $Z_{\Delta}$ )

در این روش ابتدا محاسبه پارامتر عمق با تعریف عمق موثر<sup>۲۷</sup> بصورت تابعی از عمق پوسته و عمق

ظاهری، آغاز می‌شود [Huang & Fraser, 1996].

$$z = f(p, d_a) \quad (۴-۲۸)$$

که در آن  $p$  عمق پوسته،  $Z$  عمق موثر و  $d_a$  عمق ظاهری حاصل از الگوریتم نیم‌فضای لایه کاذب است.

از آنجا که مقاومت ویژه با عمق تغییر می‌کند، مقاومت ویژه ظاهری حاصل از مدل نیم‌فضا بعنوان یک میانگین

غیرخطی از مقاومت ویژه‌های مواد بالاتر تا عمق موثر و به طور دقیقتر مواد زیر عمق موثر در نظر گرفته می‌شود.

بوستیک [Bostick, 1977] مقاومت ویژه ظاهری  $\rho_{a_i}$  برای فرکانس  $f_i$  را بطور تخمینی بصورت رابطه زیر

محاسبه می‌کند:

$$\rho_{a_i} \approx z_i \int_0^{z_i} \frac{1}{\rho(z)} dz \quad (۴-۲۹)$$

در این حالت  $\rho(z)$ ، بیانگر مقاومت ویژه بصورت تابعی از عمق می‌باشد و در عمل ناشناخته است.  $Z_i$  نیز

<sup>26</sup> Differential parameter method

<sup>27</sup> Effective depth

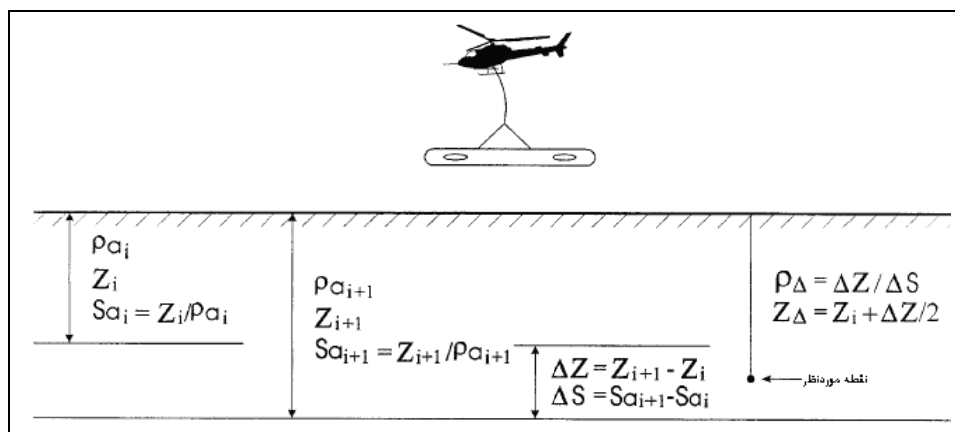
عمق موثر برای  $i$  امین فرکانس است. در عمل  $\rho_a$  مقاومت ویژه ظاهری نیز از الگوریتم نیم‌فضای لایه کاذب به دست می‌آید.

اختلاف میان دو عمق موثر در دو فرکانس هم‌جوار  $f_i$  و  $f_{i+1}$ ، (همواره مقدار فرکانس  $f_{i+1}$  از مقدار فرکانس  $f_i$  کمتر است.) ضخامت لایه فرضی ( $\Delta Z$ ) را می‌دهد [Huang & Fraser, 1996].

$$\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i = f(p_{i+1}, d_{a_{i+1}}) - f(p_i, d_{a_i}) \quad (۳۰-۴)$$

عمق مربوط به وسط هر لایه فرضی در اینجا عمق دیفرانسیلی<sup>۲۸</sup> نامیده می‌شود، که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده و از رابطه زیر به دست می‌آید.

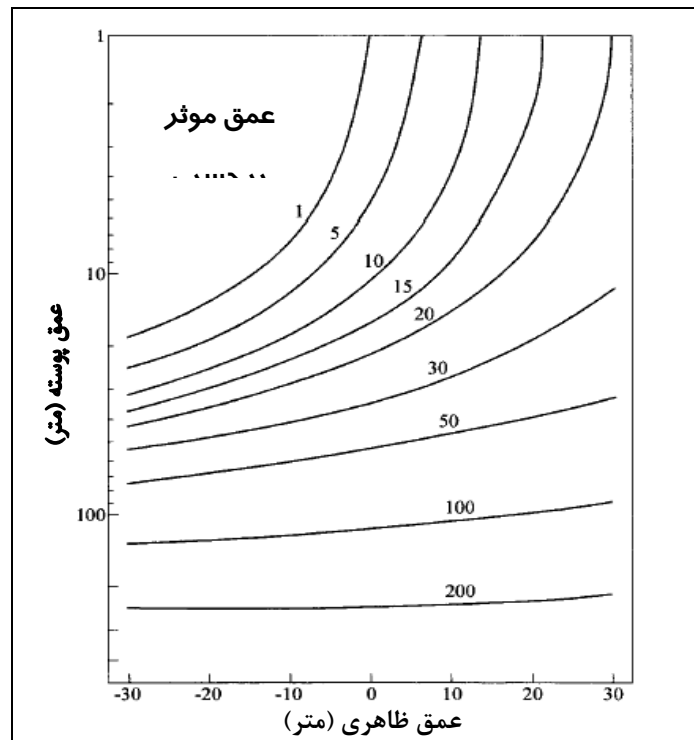
$$Z_{\Delta} = Z_i + \frac{\Delta Z}{2} = \frac{(Z_{i+1} + Z_i)}{2} \quad (۳۱-۴)$$



شکل (۴-۱۲): مدلی از محاسبات روش پارامتر دیفرانسیلی هوانگ [Huang & Fraser, 1996].

همان‌گونه که مشخص است عمق دیفرانسیلی ( $Z_{\Delta}$ ) با کاهش فرکانس افزایش می‌یابد. این عمق با مقاومت ویژه در ارتباط است. از سوی دیگر عمق موثر تعریف شده در رابطه (۴-۲۸)، بطور تجربی محاسبه شده و در شکل (۴-۱۳) نمایش داده شده است. باید توجه داشت روابط (۴-۳۰) و (۴-۳۱)، جهت حل به مقدار عمق موثر نیازمند هستند [Huang & Fraser, 1996].

<sup>28</sup> Differential depth



شکل (۴-۱۳): محاسبه عمق موثر بر اساس عمق ظاهری و عمق پوسته [Huang & Fraser, 1996].

در این الگوریتم برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری از رسانایی ظاهری<sup>۲۹</sup> استفاده می‌شود. رسانایی ظاهری ( $S_a$ )، برای فرکانس  $f_i$  برابر با نسبت عمق موثر به مقاومت ویژه ظاهری است [Huang & Fraser, 1996]. از این رو بر اساس رابطه (۴-۳۲) داریم:

$$S_{a_i} = z_i / \rho_{a_i} \approx \int_0^{z_i} 1 / \rho(z) dz \quad (۴-۳۲)$$

اختلاف بین دو رسانایی ظاهری مربوط به دو فرکانس همجوار، رسانایی لایه فرضی را نشان می‌دهد:

$$\Delta S = S_{a_{i+1}} - S_{a_i} \quad (۴-۳۳)$$

با به دست آوردن  $\Delta S$  و  $\Delta Z$  می‌توان مقاومت ویژه ظاهری را از رابطه زیر محاسبه نمود:

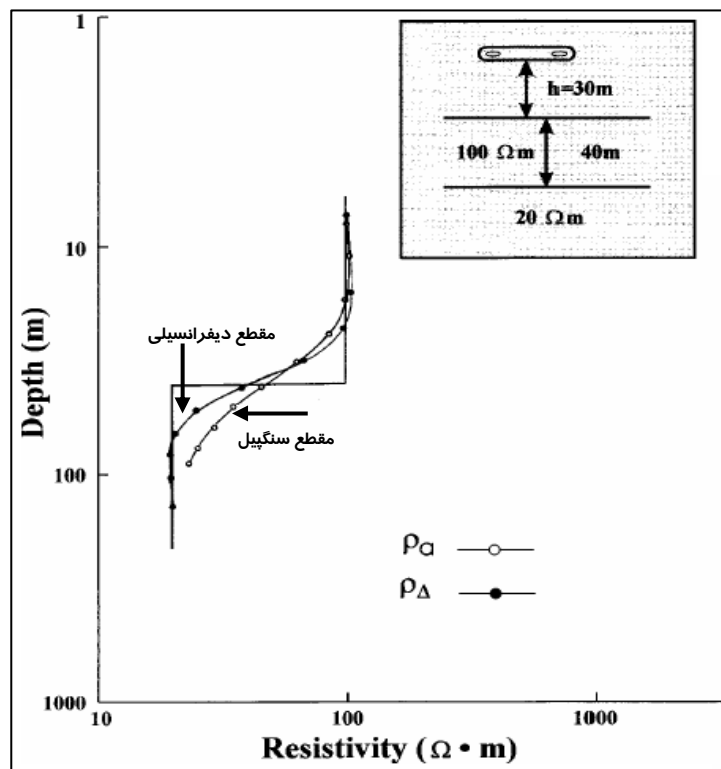
$$\rho_{\Delta} = \frac{\Delta Z}{\Delta S} \quad (۴-۳۴)$$

حال چنانچه مقاومت ویژه ظاهری برای تعدادی از فرکانس‌ها معلوم باشد، با استفاده از روابط (۴-۳۱) و (۴-۳۴)

<sup>29</sup> Apparent conductance

می‌توان به محاسبه مقاومت ویژه و عمق دیفرانسیلی ( $\rho_{\Delta}, Z_{\Delta}$ ) برای هر جفت فرکانس هم‌جوار پرداخت. همچنین با انجام درون‌یابی می‌توان مقاومت ویژه دیفرانسیلی را در میانه عمق به دست آورد، این عمل سبب تخمین مناسب مقاومت ویژه واقعی میان لایه‌های مختلف می‌گردد. در عمل هر چقدر بازه فرکانسی وسیع‌تر و تعداد فرکانس‌ها بیشتر باشد، به شفافیت بیشتری در نتایج می‌رسیم [Huang & Fraser, 1996].

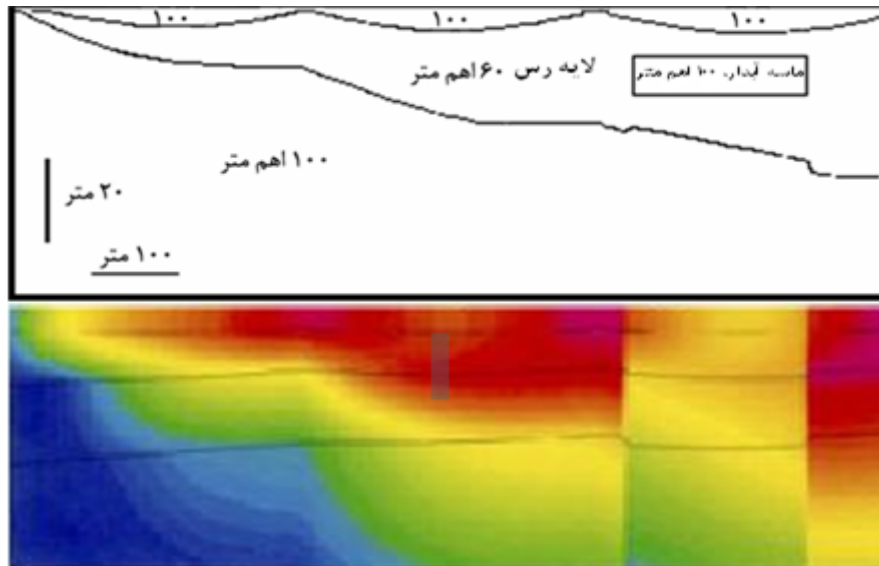
برای مقایسه نتایج این روش و روش سنگپیل نیز، شکل (۴-۱۴) را در نظر می‌گیریم، در این شکل داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس بر روی یک مدل زمین دو لایه برداشت شده، ارائه می‌شود. در این مثال، فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده ۸ متر، ارتفاع پرنده از زمین ۳۰ متر و برداشتها در ده فرکانس در بازه ۲۲۰ تا ۱۱۵۰۰۰ هرتز انجام شده است.



شکل (۴-۱۴): منحنی‌های سونداژ روش‌های سنگپیل و پارامتر دیفرانسیلی برای یک زمین دو لایه [Huang & Fraser, 1996].

در شکل (۴-۱۵) مقطع به دست آمده توسط روش دیفرانسیلی برای مدلی فرضی از یک لایه رسی رسانای گوه‌ای، که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته است، نشان داده شده است. چون اثر لایه‌های سطحی را از نتایج حاصل از لایه‌های عمیق حذف می‌گردد، بنظر می‌رسد دقت و عمق اکتشاف این

روش نسبت به روش سنگپیل بیشتر بوده و رساناهای عمیق‌تر را بهتر از روش سنگپیل آشکار سازد [Fugro,2003].



شکل (۴-۱۵) : مقطع بدست آمده توسط روش دیفرانسیلی برای مدلی فرضی از یک لایهٔ رسی رسنا [Fugro,2003].

#### ه- روش دیفرانسیلی سیمون ( $Z_S^*$ )

این روش که روش دیفرانسیل گیری برحسب فرکانس نیز خوانده می‌شود؛ نخستین بار توسط سیمون در سال ۱۹۹۷ ارائه شد [Siemon, 2001]. اساساً این روش در اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک استفاده دارد. برداشتهای مگنتوتلوریک فاز امپدانس MT، در به دست آوردن پروفیل‌های بهبود یافته<sup>۳۰</sup> مقاومت ویژه- عمق کاربرد دارد.

اما باید توجه نمود فاز اندازه‌گیری شده در برداشتهای الکترومغناطیس هلیکوپتری

گستره فاز الکترومغناطیس هلیکوپتری بین صفر تا ۹۰ درجه متغیر است؛ حال آنکه فاز مگنتوتلوریک ثابت و برابر

۴۵ درجه است [Siemon, 2001].

بنابراین باید به دنبال یک پارامتر جدید متناظر با فاز مگنتوتلوریک در برداشتهای الکترومغناطیس

<sup>30</sup> Enhance profiles

هلیکوپتری بود. ویدلت<sup>۳۱</sup> با دیفرانسیل‌گیری از مقاومت‌ویژه ظاهری مگنتوتلوریک نسبت به فرکانس، یک فاز تقریبی به صورت زیر تعریف نمود [Weidelt, 2001]:

$$\varphi_a(f) \approx \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{f}{\rho_a(f)} \frac{d\rho_a(f)}{df} \right) \quad (35-4)$$

در رابطه بالا  $\varphi_a$ ، فاز ظاهری نامیده می‌شود و نباید با فاز الکترومغناطیس هلیکوپتری ( $\varphi_\varepsilon$ ) اشتباه شود. در صورتی که تبدیل نیبلت<sup>۳۲</sup> - بوستیک<sup>۳۳</sup> [Jones, 1983] را به کار ببندیم، به یک مقاومت‌ویژه ظاهری جدید می‌رسیم، از این رو می‌توان این روابط را به صورت صورت زیر بیان نمود:

$$\rho_{NB} = \rho_a \frac{1+m}{1-m} \quad m' = 1 - \frac{4}{\pi} \varphi_a \quad m = m' \left( \frac{m'+c}{1+c} \right) \quad (36-4)$$

که در آن مقدار  $c = 3 \log(5)$  بطور تجربی و از محاسبات مربوط به مدل‌سازی به دست آمده است. همچنین عمق مرکزی وابسته به آن برابر است با:

$$Z_S^* = d_a + \frac{P_a}{\sqrt{2}} \quad (37-4)$$

با محاسبه دو رابطه فوق برای فرکانسهای مختلف، منحنی سونداژ  $\rho_{NB}(Z_S^*)$  حاصل می‌شود. قابل توجه اینکه انجام دیفرانسیل‌گیری نسبت به فرکانس، سبب حساسیت بیشتر این منحنی سونداژ در نفوذ به اعماق بیشتر می‌شود. دیگر اینکه در این روش نیازی به ارتفاع سنسور (که معمولاً دقیق نیست) به عنوان داده ورودی نمی‌باشد [Siemon, 2001].

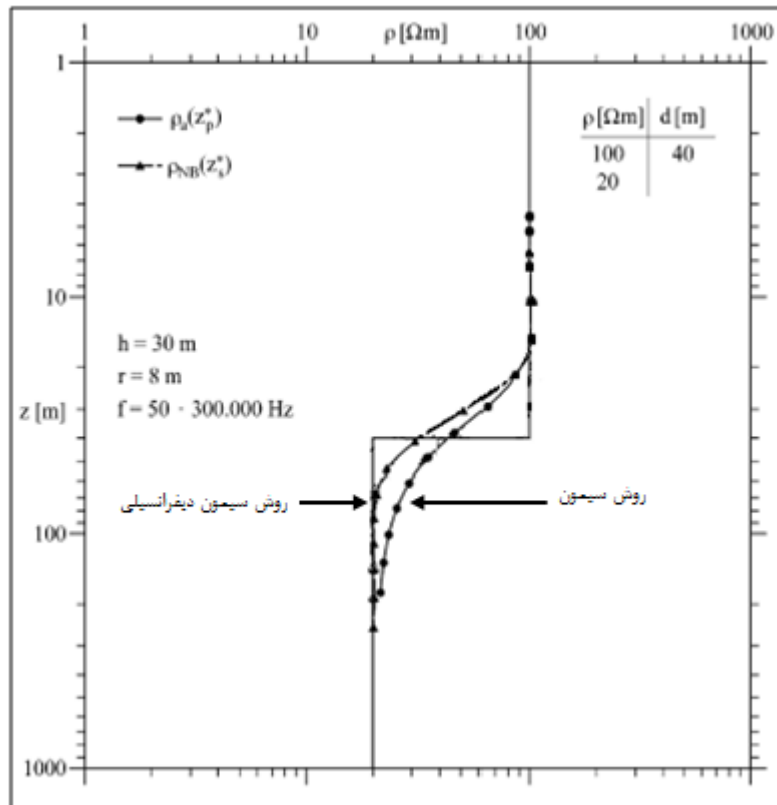
در شکل (۴-۱۶) که در آن داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس بر روی یک مدل زمین دو لایه برداشت شده، نشان داده شده است. در این مثال فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده ۸ متر، ارتفاع پرنده از زمین ۳۰ متر و برداشت‌ها در یک بازه فرکانسی بین ۵۰ تا ۳۰۰۰۰۰ هرتز انجام شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، روش دیفرانسیلی سیمون با کیفیت و دقتی بیش از روش مقاطع سیمون، توانسته است محل قرارگیری و مقاومت‌ویژه هر دو لایه را مشخص نماید.

<sup>31</sup> Weidelt

<sup>32</sup> Niblett

<sup>33</sup> Bostick





شکل (۴-۱۶): منحنی‌های سونداژ روش‌های مقاطع سیمون و روش دیفرانسیلی سیمون برای یک زمین دولایه

[Siemon, 2001]

### و- روش بهبود یافته سیمون $\rho_a^E(Z_p^*)$

از این روش به علت حساسیت زیاد به تمایز مقاومت ویژه در اعماق مختلف، به عنوان یک روش بهبود یافته یاد می‌شود [Siemon, 2001]. ایده اصلی، برای اجرای این روش نیز از روش مگنتوتلوریگ گرفته شده و برای القای دوقطبی بهبود یافته است. در این روش مقاومت ویژه ظاهری از نسبت مولفه‌های همفاز به ناهمفاز داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری و ارتفاع دقیق پرواز ( $h$ ) استنتاج می‌شود و داریم:

$$\rho_a^E = \rho_a \left( \frac{h}{D_a} \right)^2 \quad (۴-۳۸)$$

که در آن،  $D_a$  فاصله ظاهری بین پرنده و سطح نیم‌فضای رسانا و  $\rho_a$  مقاومت ویژه ظاهری حاصل از روش مقاطع سیمون است. عمق مرکزی متناظر، همان عمق مرکزی مقاطع سیمون  $(z_p^* = d_a + \frac{P_a}{2})$  است. یکی از مزایای منحنی‌های سونداژ بهبود یافته حساسیت بیشتر به مقاومت ویژه قائم نسبت به منحنی‌های معمول سونداژ است [Sengpiel & Siemon, 2000]. برای آن که موضوع بهتر مشخص گردد، یک مدل زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۴-۳) را در نظر می‌گیریم. در شکل (۴-۱۳) نیز منحنی‌های سونداژ برای این زمین چهار لایه رسم شده

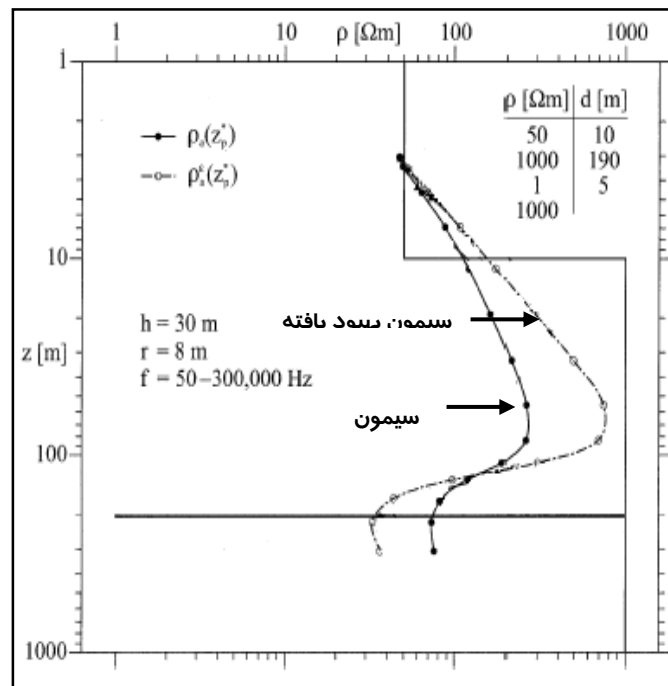
است، در این مثال فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده ۸ متر، ارتفاع پرنده از زمین ۳۰ متر و برداشت‌ها در چندین فرکانس در بازه ۵۰ تا ۳۰۰۰۰۰ هرتز انجام شده است.

جدول (۴-۳): مدل یک زمین چهارلایه برای مقایسه روش‌های مقاطع سیمون و روش بهبودیافته سیمون

[Sengpiel & Siemon, 2000]

| توضیحات                    | لایه اول | لایه دوم | لایه سوم | لایه چهارم |
|----------------------------|----------|----------|----------|------------|
| مقاومت ویژه ( $\Omega.m$ ) | ۵۰       | ۱۰۰۰     | ۱        | ۱۰۰۰       |
| ضخامت (m)                  | ۱۰       | ۱۹۰      | ۵        | $\infty$   |

همانگونه که در شکل (۴-۱۷) مشاهده می‌شود، روش بهبود یافته سیمون با کیفیت و دقتی بیش از روش مقاطع سیمون، توانسته است محل قرارگیری و مقاومت ویژه لایه‌ها را مشخص نماید؛ مقطع سیمون از تشخیص محل لایه‌ها خصوصاً لایه‌های زیرین و مقدار مقاومت ویژه نزدیک به واقعیت ناتوان است. روش بهبود یافته سیمون دو اشکال اساسی دارد. یکی اینکه بیش از حد به مقاومت ویژه لایه‌های همگن خیلی ضخیم تاکید دارد و دیگر اینکه به مقدار دقیق ارتفاع اندازه‌گیری شده نیز نیاز دارد [Sengpiel & Siemon, 2000].



شکل (۴-۱۷): منحنی‌های سونداژ روش‌های مقاطع سیمون و روش بهبود یافته سیمون برای یک زمین چهار لایه

[Sengpiel & Siemon, 2000]

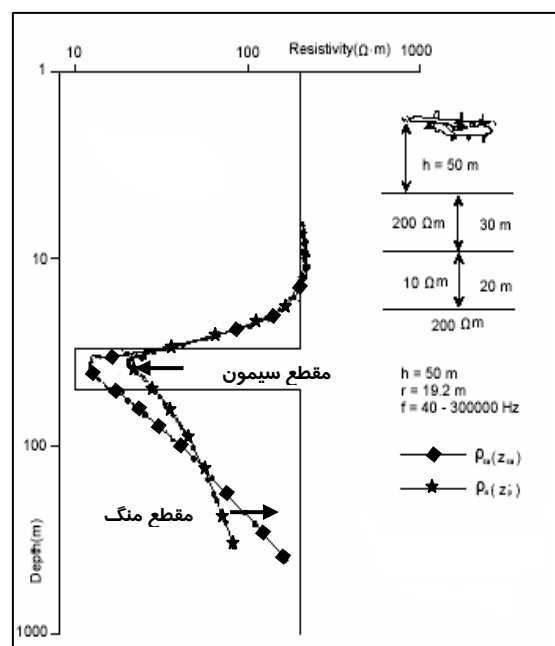
ز- روش مینگ<sup>۳۴</sup>

با توجه به اینکه در کشور چین بخش عمده ای از برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی بوسیله هواپیمای بال ثابت و با یک سیستم سه فرکانسی انجام می‌شود، و از آنجا که فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در این سیستم بزرگتر از سیستم هلیکوپتری می‌باشد، لذا فرمول‌های مرسوم برای ترسیم منحنی‌های سونداژ مقاومت‌ویژه-عمق به دلیل عمق نفوذ متفاوت سیستم مذکور با سیستم‌های هلیکوپتری اندکی تفاوت دارد. مینگ با تجربه و آزمایش، فرمول‌های زیر را برای محاسبه مقاومت‌ویژه و عمق ارائه داد [Meng & Hu, 2006]:

$$\rho_{sa} = \rho_a \left( \frac{h}{D_a} \right)^{\sqrt{3}} \quad (۳۹-۴)$$

$$Z_{sa} = d_a + \frac{P_a}{\sqrt{3}} \quad (۴۰-۴)$$

که در آن ( $D_a$ ) فاصله ظاهری (فاصله سیستم اندازه‌گیری تا سطح نیم‌فضا) می‌باشد.



شکل (۴-۱۸): منحنی‌های سونداژ روش‌های مینگ و مقاطع سیمون برای یک زمین سه لایه [Meng & Hu, 2006].

شکل (۴-۱۸) به منظور ارزیابی کارایی روش ارائه شده ترسیم شده است. بدین ترتیب فرض می‌شود که برداشت‌های الکترومغناطیس با هواپیمای بال ثابت روی یک زمین سه لایه انجام شده است. فاصله جدایش سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده، ۱۹/۲ متر، ارتفاع پرنده از زمین ۵۰ متر و برداشت‌ها در چندین فرکانس در بازه

<sup>34</sup> Meng

۴۰ تا ۳۰۰۰۰۰ هرتز انجام پذیرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود، روش منگ با کیفیت و دقتی بیش از روش مقاطع سیمون، توانسته است محل قرارگیری و مقاومت ویژه لایه‌ها را مشخص نماید. در صورتی که روش سیمون حتی از تشخیص درست مقاومت ویژه لایه سوم قاصر است [Meng & Hu, 2006].

#### ۴-۲- روش‌های معکوس‌سازی داده‌ها با تکرار محاسبات

##### الف- روش اکام<sup>۳۵</sup>

روش اکام در مدل‌سازی معکوس هموار<sup>۳۶</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد [Constable et al, 1987]. در مدل‌سازی هموار، مدل زمین به صورت تعداد بسیار زیادی لایه نازک با ضخامت‌های یکسان در نظر گرفته گرفته می‌شود، لذا لایه‌های مدل با لایه‌های واقعی زمین در تناظر یک به یک نیستند. از سوی دیگر چنانچه تعدادی از این لایه‌های نازک با یکدیگر ترکیب شوند؛ قادرند یک لایه ضخیم را نیز مدل نمایند.

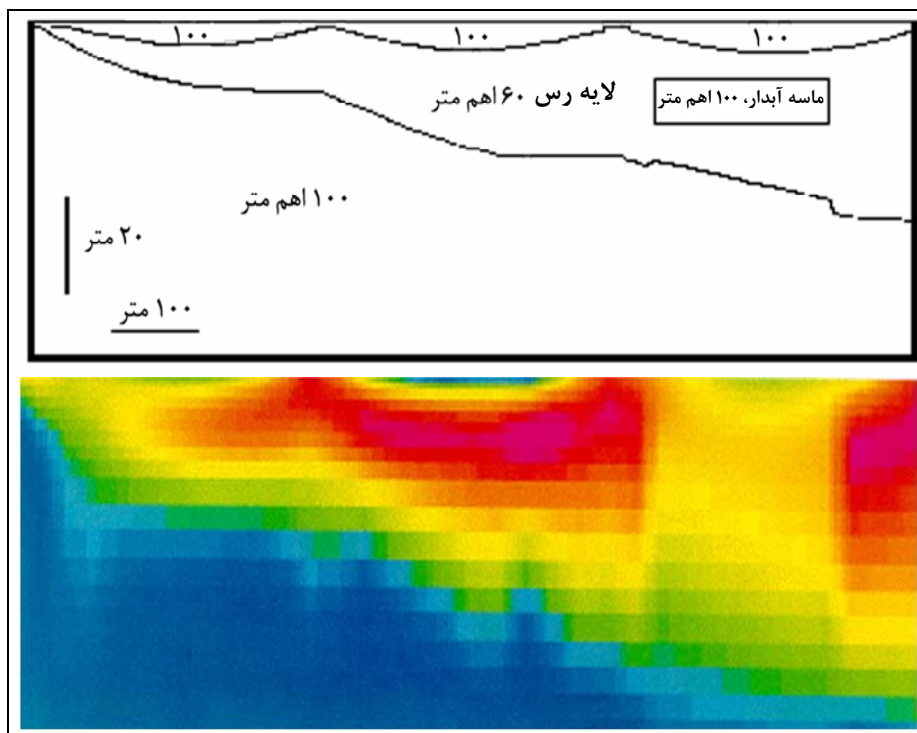
قابل توجه اینکه، مدل‌سازی معکوس هموار یا چندلایه مانند اکام، از نظر محاسباتی کند است ولی نسبت به تغییرات زمین‌شناسی انعطاف نسبتاً مناسبی دارد. یکی از مهمترین ویژگی‌های این روش مدل‌سازی نیاز اندک آن به داده‌های ورودی از سوی کاربر است. این روش مدل‌سازی هنگامی که تعداد داده‌های برداشت اندک، ناقص، بعضاً متناقض و همراه با نوفه است؛ یکی از کاربردی‌ترین روش‌های معکوس‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی می‌باشد [Fugro, 2003].

در شکل (۴-۱۹) یک مدل فرضی از یک لایه رسی رسنای گوه‌ای است که در داخل آن یک توده ماسه آبدار قرار دارد، در نظر می‌گیریم. در این شکل نتایج حاصل از مدل‌سازی هموار اکام نشان داده شده است [Fugro, 2003].

در این مثال لایه‌ها نسبتاً خوب تعریف شده‌اند و یک همواری در نتایج به چشم می‌خورد. اما نمی‌توان یک لایه زمین‌شناسی را با یک لایه مقطع مقاومت ویژه معادل قرار داد، به بیان دیگر در این روش امکان تشخیص دقیق مرز لایه‌ها و توده‌های زیرسطحی وجود ندارد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، توده ماسه درون لایه گوه‌ای رسی شناسایی نشده است. از سوی دیگر عمق قرارگیری لایه‌های مختلف نیز با واقعیت فاصله دارد. اما نکته جالب توجه این است که لایه‌های نازک سطحی به خوبی مدل شده‌اند.

<sup>35</sup> Occam's inversion

<sup>36</sup> Smooth inversion



شکل (۴-۱۹): مدل فرضی یک لایه رسی رسانای که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع مدل‌سازی هموار

اکام [Fugro, 2003]

قابل توجه اینکه، یکی از پارامترهای مهم در معکوس‌سازی، پارامتر ارتفاع است. در صورتی که در برداشت این پارامتر خطایی رخ دهد، نتایج را تا حد زیادی تحت تاثیر قرار خواهد داد.

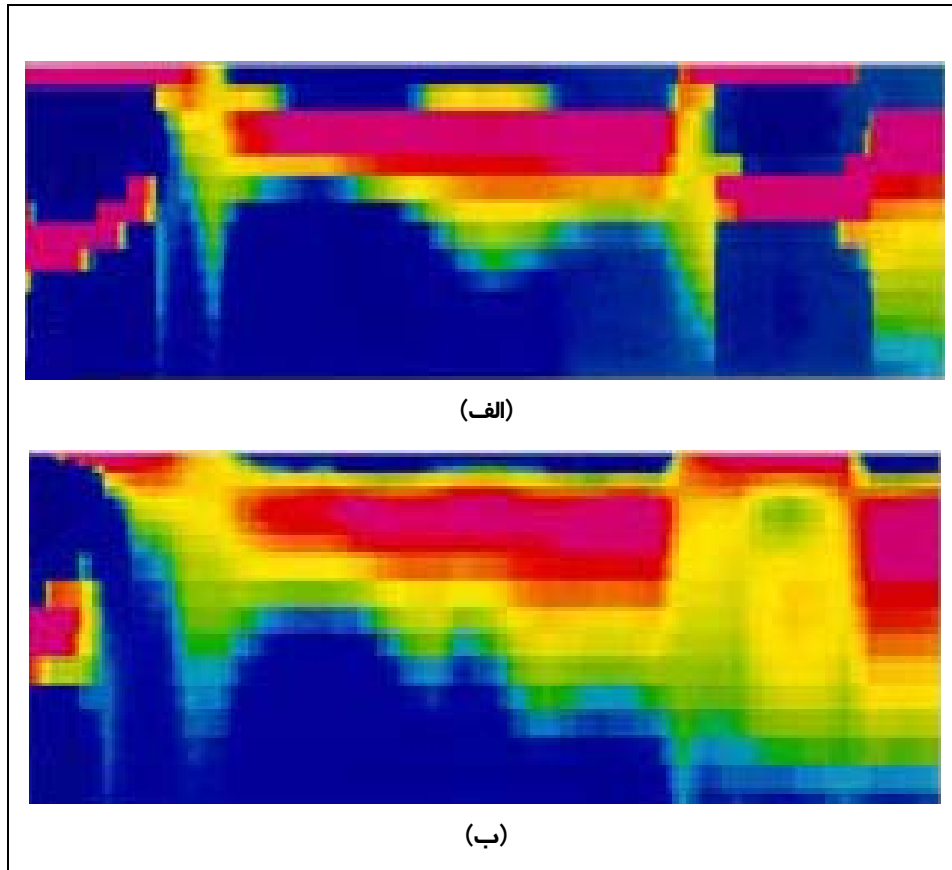
در معکوس‌سازی چندلایه، باید همواره یک لایه در بالای تمام لایه‌ها با عنوان لایه هوا<sup>۳۷</sup> و با مقاومت ویژه بینهایت فرض شود. این لایه سبب می‌شود هرگونه خطای موجود در ارتفاع از بین برود و لذا مدل دقیقی همخوان با ویژگی‌های زمین‌شناسی تعریف شود [Huang & Palacky, 1991].

اگر در معکوس‌سازی اکام این تسهیلات دیده نشود، آنگاه وجود خطای ارتفاعی می‌تواند منجر به تحریف مدل شود. به عنوان مثال اگر تنها ۴ متر خطای ارتفاعی به داده‌های مدل شکل (۴-۱۹) افزوده یا از آنها کم شود، نتیجه به شکل مقطع شکل (۴-۲۰-الف) در خواهد آمد.

یک راه حل کاهش اثر خطای ارتفاع، تعریف چندین لایه نازک سطحی است. به گونه‌ای که مقاومت ویژه نامحدود بینهایت را در پروسه معکوس‌سازی به فاصله ناشی از خطای ارتفاعی نسبت دهد. البته با این انتخاب نه بطور کامل، بلکه تا حد زیادی خطای ناشی از ارتفاع بدون اینکه تاثیر عمده‌ای بر نتایج مقطع بگذارد از بین خواهد رفت. در شکل (۴-۲۰-ب) نتیجه حاصل از معکوس‌سازی اکام پس از انتخاب چندین لایه نازک

<sup>37</sup> Air layer

سطحی آورده شده است [Hodges, 2000b]. همانگونه که در این مقطع مشاهده می‌شود، آشفتگی موجود در مقطع الف شکل (۴-۲۰) تا حدودی از بین رفته ولی هنوز تا رسیدن به مقطع شکل (۴-۱۹) فاصله دارد.



شکل (۴-۲۰): الف، مقطع معکوس‌سازی شده اکام مدل فرضی شکل (۴-۱۹) با  $\pm 4$  متر خطای ارتفاع، ب، همان مقطع با انتخاب چندین لایه نازک سطحی در فرایند معکوس‌سازی [Hodges, 2000b].

### ب- روش لایه‌های گسسته<sup>۳۸</sup>

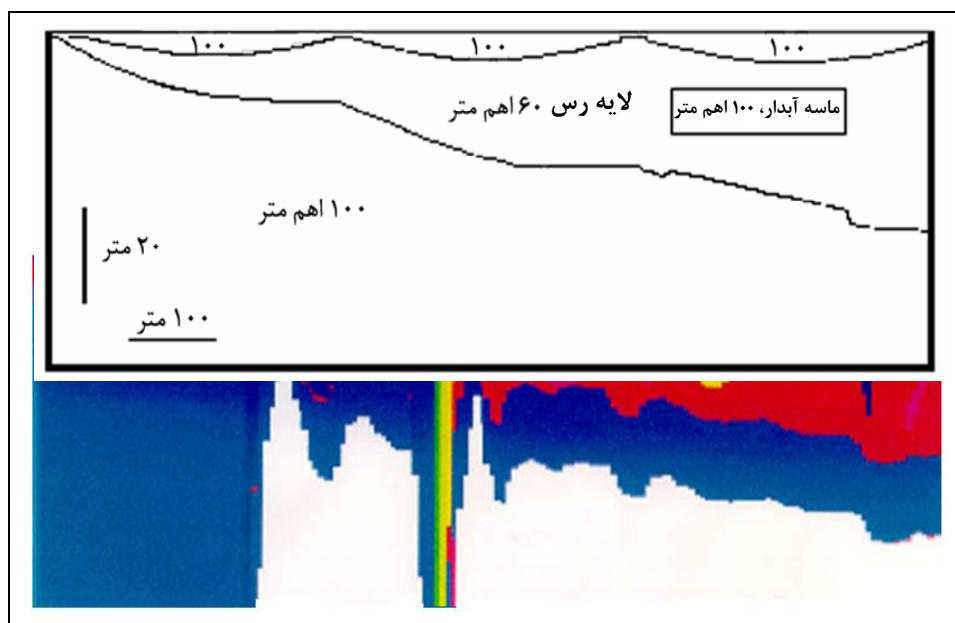
در این نوع مدل‌سازی معکوس، لازم است تعداد لایه‌های مدل دقیقاً برابر تعداد لایه‌های زمین باشد. این نوع مدل‌سازی می‌تواند نتایج بسیار دقیقی ارائه دهد اما انجام محاسبات ریاضی مربوط به آن بسیار دشوار است. همچنین در مواقعی که تعداد لایه‌های مدل با تعداد لایه‌های موجود در زمین تطابق ندارد، این فرآیند بسیار ناپایدار و غیرقابل اعتماد است.

مدل‌سازی معکوس با روش لایه‌های گسسته، علاوه بر اینکه به یک مدل اولیه دقیق نیاز دارد، همواره باید بر فرآیند معکوس‌سازی آن نیز نظارت داشت، چرا که باید تغییرات مربوط به داده‌ها و زمین‌شناسی بطور

<sup>38</sup> Discrete layer inversion

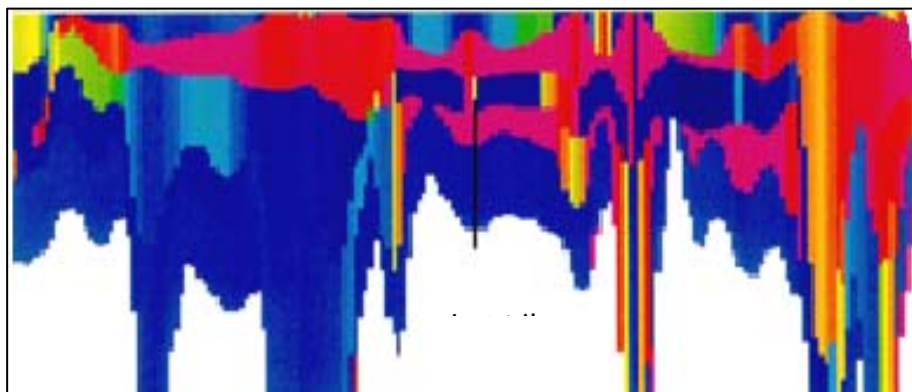
پیوسته تصحیح شوند. بنابراین نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی، به داده‌های ورودی دقیق‌تری از سوی پردازشگر نیاز دارد [Fugro, 2003]. شکل (۴-۲۱) یک مدل فرضی از یک لایه رسی رسانی گوه‌ای است که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته است، را نشان می‌دهد. در همین شکل نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس با لایه‌های گسسته نیز نشان داده شده است [Fugro, 2003]. در این روش معکوس‌سازی با دقت بالایی تمامی ویژگی‌های زمین‌شناسی، محل لایه‌ها و توده‌های زیرسطحی قابل شناسایی است. ضمن آنکه مرز لایه‌ها و توده‌ها نیز تا حد زیادی بر مدل واقعی منطبق است [عربامیری، ۱۳۸۶].

در غالب موارد اطلاعات ما از توده‌های زیرسطحی بسیار اندک است. لذا در این موارد پاسخ‌های این روش معکوس‌سازی با واقعیت، تفاوت‌های فاحشی دارد. برای روشن‌تر شدن موضوع مثال قبلی را در نظر می‌گیریم. در مدل ارائه شده در این مثال و با حضور ماسه آبدار، عملاً پنج لایه وجود خواهد داشت. در صورتی که در صورت عدم وجود آب، تعداد لایه‌ها به سه لایه تقلیل می‌یابد [Fugro, 2003].



شکل (۴-۲۱): مدل فرضی یک لایه رسی رسانی که در داخل آن یک توده ماسه آبدار جای گرفته؛ به همراه مقطع مدل‌سازی معکوس با لایه‌های گسسته [Fugro, 2003].

حال چنانچه کاربر تعداد لایه‌ها را مانند حالت قبل همان پنج لایه فرض نماید، در اینصورت مدل حاصل به شکل (۴-۲۲) تبدیل خواهد شد. لذا نرم افزار سفره آب را به اشتباه در وسط مقطع مدل می‌کند و بدین شکل یک لایه دروغین تشکیل می‌دهد [Hodges, 2000b].



شکل (۴-۲۲): مقطع مدل‌سازی شده با روش لایه‌های گسسته مثال شکل (۴-۲۱) در حالتی که تعداد لایه‌ها درست انتخاب نشده [Hodges, 2000b].

### ج- روش تجزیه مقادیر تکین<sup>۳۹</sup>

یکی از روش‌های مدل‌سازی معکوس با تکرار محاسبات، روش تجزیه مقادیر تکین (SVD) است. در این روش بر خلاف روش اکام، تعداد ثابتی لایه با ضخامت و مقاومت ویژه مختلف انتخاب می‌شود [Huang&Palacky, 1991]. در این روش سعی بر آنست تا با انتخاب حداقل لایه زیرسطحی با مقاومت های مختلف، حداکثر برآزش بین مدل و داده‌های زمین‌شناسی ایجاد شود.

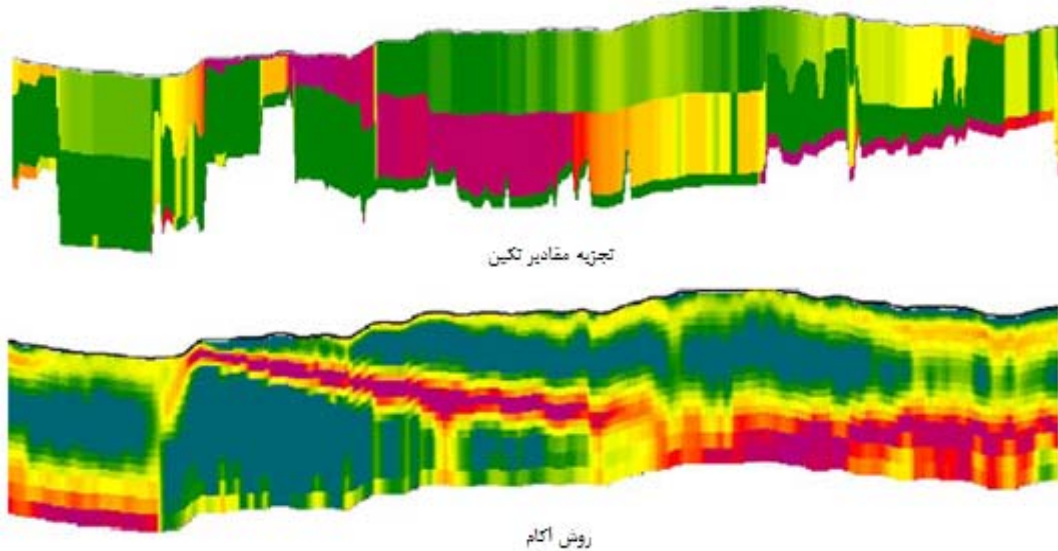
به منظور درک بهتری از نتایج حاصل از این روش در شکل (۴-۲۳) نمونه ای از نتایج مدل‌سازی یک زمین لایه‌ای با دو روش تجزیه مقادیر تکین و روش اکام آمده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، در روش تجزیه مقادیر تکین (مقطع الف)، حد و مرز لایه‌ها بهتر مشخص شده و وضوح بیشتر وجود دارد. حال آنکه مقطع مربوط به روش اکام (مقطع ب)، به واقعیت های زمین‌شناسی و آنچه که در عمل رخ می‌دهد نزدیکتر است، هر چند تفکیک و تعیین لایه‌های مختلف به سادگی ممکن نیست. در مقایسه این روش مدل‌سازی نسبت به روش لایه‌های گسسته، باید بیان داشت که این روش از قطعیت بیشتری در تعیین عمق لایه‌ها یا ضخامت آنها برخوردار است.

<sup>39</sup> Singular Value Decomposition (SVD)



اما از آنجا که سعی می‌کند با یک تعداد لایه ثابت، مدل‌سازی را انجام دهد نسبت به مدل اولیه انتخابی فوق‌العاده حساس است. به عبارت ساده‌تر در صورتی که تعداد لایه‌ها خیلی کم باشند، ادامه مدل‌سازی مشکل خواهد شد. این روش مدل‌سازی از کندترین روش‌های مدل‌سازی است و از حساسترین روش‌ها نسبت به نوفه و خطا است [Hodges, 2000b].



شکل (۴-۲۳): مقطع حاصل از دو روش مدل‌سازی معکوس: الف) تجزیه مقادیر تکین، ب) اکام [Hodges, 2000b].

#### ۴-۴-۳- روش‌های غیر دیفرانسیلی

در مشتق‌گیری مقاومت ویژه نیازمند داده‌های چند فرکانس هستیم. برای یک فرکانس مشخص، عمق ظاهری  $d_a$  می‌تواند از مقاومت ویژه ظاهری به دست بیاید. مشابه این حالت در فاز بدست آمده به روش مگنتوتلوریک (MT) برای یک مدل ۲ لایه، عمق ظاهری اطلاعاتی تولید می‌کند بدین ترتیب که اگر لایه رویه بسیار مقاوم باشد، عمق ظاهری کوچکتر از صفر ( $d_a < 0$ ) و در صورتی که این لایه بسیار رسانا باشد، عمق ظاهری بزرگتر از صفر ( $d_a > 0$ ) می‌گردد. در این صورت مدل را مدل  $h$  می‌نامیم [Schmucker, 1987].

به عنوان مثال، لایه‌ای مقاوم که بر روی یک نیم فضا با مقاومت کمتر قرار گرفته است را در نظر می‌گیریم. اگر مقاومت ویژه نیم فضا را  $\rho_s$ ، مقدار مقاومت ویژه برای روباره  $\rho_c$  و مقاومت ویژه ظاهری

<sup>40</sup> H model

بدست آمده را  $\rho_a$  در نظر بگیریم، می‌توان چنین بیان نمود که در فرکانس‌های پایین‌ترین تقریب برای مقاومت ویژه ظاهری همان مقدار مقاومت روباره است. به همین سبب بنا به یک تعبیر فیزیکی عمق ظاهری ( $d_a$ ) در فرکانس‌های پایین به ضخامت روباره ( $h_c$ ) میل می‌کند.

از طرفی در صورتی که، یک لایه رسانای نازک نیم فضایی با رسانایی کمتری را بپوشاند، مدل را مدل  $\tau$  می‌نامیم [Schmucker, 1987]. در این مدل برای فرکانس‌های نسبتاً پایین مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ )، به مقاومت ویژه نیم فضا، میل می‌کند. از این رو، مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده به حد کافی کوچک

می‌گردد. از این رو رسانندگی روباره با توجه به رابطه تجربی  $\tau = \frac{h_c}{\rho_c}$ ، بدست می‌آید.

توجه به این نکته لازم است که نسبت‌های کوچک  $\frac{\rho_c}{\rho_s}$  و  $\frac{h_c}{p_a}$  جواب بهتری را ارائه می‌دهند. از

طرفی، از آنجایی که مقاومت ویژه بدست آمده به صورت ظاهری است، بنابراین رسانندگی روباره  $\tau$  توسط رسانندگی ظاهری  $\tau_a$  تقریب زده شود [Siemon, 1997]. بنابراین با توجه به مطالب بیان شده می‌توان برای مدل  $\tau$  می‌توان چنین نوشت:

$$d_a < 0: \tau_a = \frac{-d_a}{\rho_a} \frac{h}{D_a} \leq \frac{h_c}{\rho_s} \left( \frac{\rho_s}{\rho_c} - 1 \right) = \tau \left( 1 - \frac{\rho_c}{\rho_s} \right) \leq \tau \quad (41-4)$$

#### ۴-۳-۱- روش $h - \tau$

این روش بر اساس مدل زمین دو لایه‌ای، از یک لایه بسیار مقاوم با ضخامت بینهایت (مدل  $h$ ) و یک لایه نازک رسانا (مدل  $\tau$ ) به عنوان روباره تشکیل می‌شود. در مدل  $h$ ، لایه روباره رسانا باید به حد کافی نسبت به لایه نیم فضا رسانایی کمتری داشته باشد، از این رو ضخامت روباره می‌تواند فاصله سنسور ارتفاع تا فاصله سنسور سیستم از زمین رسانا تلفیق گردد.

از طرفی در مدل  $\tau$ ، اگر مقاومت ویژه لایه هوا را،  $\rho_1 = \infty$ ، و سنسور ارتفاع را به صورت  $h_1 = h$ ، در نظر بگیریم، در این صورت با سه پارامتر روبرو می‌گردیم، دو لایه مقاوم با پارامترهای،  $\rho_2 = \rho_c$  و  $\rho_3 = \rho_c$  و یک ضخامت که به صورت پارامتر لایه روباره  $h_2 = h_c$  تعریف می‌شود.

برای تعیین مقاومت ویژه نیم فضا، که بسیار حساس با یک نیم فضای مقاوم است، باید یکی از سه

پارامتر فوق معین باشند و یا تلفیقی از آنها در دسترس باشد. در سال ۱۹۸۴ ماندری ترکیب پارامترهای  $\frac{h_c}{h}$

و  $\frac{\rho_s}{\rho_c}$  را به دست آورد. در این صورت اگر نسبت مقاومت ویژه لایه مقاوم به مقاومت ویژه روباره نیم

فضا را با  $\alpha$  نشان دهیم به گونه ای که  $\alpha = \frac{\rho_s}{\rho_c} \gg 1$ ، به طور مثال  $\alpha = 10$ ، از طرفی برای تنظیم منحنی

های  $\delta_q(\varepsilon)$ ،  $(\delta = \frac{h}{p_s} = \frac{h}{(\rho_c \alpha^{1/2})})$ ، می‌توان برای نسبت های مختلف  $q_j = \frac{h_c}{h}$  با  $0.001 \leq q_j \leq 1$  که در

این روابط با قرار دادن  $j=1, 2, \dots$  می‌توان این مقادیر را محاسبه نمود.

بنابراین می‌توان منحنی‌های  $\delta_q(\varepsilon)$  توسط یک یا چند، چند جمله‌ای در یک مقیاس لگاریتمی-

لگاریتمی تخمین زده و ضرایب مشترک را بدست آورد. از این رو دو گام برای معکوس‌سازی مورد نیاز است؛

در ابتدا پارامترهای  $\rho_a$  و  $D_a$  و  $d_a$  محاسبه گردند، سپس با در نظر گرفتن تقریب  $\rho_s \cong \rho_a$  و تخمین  $q_a$

برای نسبت  $q = \frac{h_c}{h}$  از رابطه (۴-۴۱) چنین نوشت:

$$q_a \cong \frac{-d_a}{D_a} \frac{1}{\alpha - 1} \quad (۴-۴۴)$$

از این رو با داشتن پارامتر  $\delta$  از تناظر منحنی  $\delta_q(\varepsilon)$  و با استفاده از روش دوم بیان شده در قسمت (b)

شکل (۴-۹)، مقاومت ویژه جدید نیم فضا را بدست آورد. این مقاومت ویژه را با  $\rho_\tau^\varepsilon$ ، نمایش می‌دهیم.

حال اگر  $q_a$  برابر یکی از مقادیر  $q_j$  که  $\delta_q(\varepsilon)$  محاسبه شده، نباشد پارامتر  $\delta$  از تناظر دو منحنی

$\delta_q(\varepsilon)$  مجاور (نزدیک به هم) توسط میانگین‌گیری به دست می‌آید. سرانجام می‌توان چنین بیان نمود که

مقاومت ویژه ظاهری در حالت  $h - \tau$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_{h\tau}^\varepsilon \begin{cases} \rho_h \xrightarrow{\text{if}} d_a \geq 0 \\ \rho_\tau^\varepsilon \xrightarrow{\text{if}} d_a < 0 \end{cases} \quad (۴-۴۳)$$

که در این رابطه اندیس،  $h - \tau$ ، نشانه استفاده از مدل های  $h$  یا مدل  $\tau$  می باشد و اندیس  $\varepsilon$ ، تنها نشانه

منحنی‌های  $\delta_q(\varepsilon)$  می باشد، که برای قسمت دوم از معکوس‌سازی به دست آمده است.

باید توجه داشت که همواره برای حالتی که  $d_a \geq 0$  است،  $\rho_h = \rho_a$  در نظر گرفته می‌شود. عمق مرکزی متناظر در این روش به صورت  $z_p^*$  بیان می‌گردد [Simeon,1997].

ب- روش  $\rho^* - z^*$

فاز بدست آمده در روش مگنتوتلوریک،  $\varphi_{MT}$ ، در روش  $\rho^* - z^*$ ، برای به دست آوردن پروفیل مقاومت ویژه-عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد [Schmucker,1971,1972].

$$\rho_{MT}^* = \rho_a^{MT} \begin{cases} 2 \cos^2 \varphi_{MT} \xrightarrow{\text{for}} \varphi_{MT} \geq 45^\circ \\ 1/2 \sin^2 \varphi_{MT} \xrightarrow{\text{for}} \varphi_{MT} < 45^\circ \end{cases} \quad (44-4)$$

$$z_{MT}^* = \text{Re}(C_{MT})$$

$$\varphi^* = \begin{cases} \arctan\left(1 + \frac{d_a}{P_a/2}\right) \xrightarrow{\text{if}} \geq 45^\circ, d_a \geq 0 \\ \arctan\left[\frac{1}{\left(1 - \frac{d_a}{P_a/2} \frac{h}{D_a}\right)}\right] \xrightarrow{\text{if}} < 45^\circ, d_a < 0 \end{cases} \quad (45-4)$$

$$\varphi_{MT} = \arctan\left(\frac{\text{Re}(C_{MT})}{-\text{Im} C_{MT}}\right) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{z_{MT}^*}{z_{MT}^* - h_{MT}}\right) \xrightarrow{\text{if}} \geq 45^\circ \\ \arctan\left(\frac{1}{1 + \omega \mu_0 \tau_{MT} P_{MT}}\right) \xrightarrow{\text{if}} < 45^\circ \end{cases} \quad (46-4)$$

مقاومت ویژه  $\rho^*$ ، از رابطه (44-4) توسط جایگزینی  $\varphi_{MT}$  توسط  $\varphi^*$  و  $\rho_a^{MT}$  توسط  $\rho_a$  به دست می‌آید. در صورتی که پارامترهای توصیف شده در رابطه (45-4) افزایش یابند حساسیت این روش ممکن است بالا رود.

در صورتی که  $d_a < 0$  باشد، لازم است پارامتر  $\frac{2d_a h}{\rho_a D_a}$  در عدد ۳ ضرب شود [Simeon,1997].

عمق مرکزی در این حالت به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$z_d^* = d_a + |C| \quad (47-4)$$

که قسمت حقیقی ( $\text{Re}(C)$ ) از روابط مندرج در پیوست ج، با جایگزینی  $h$  به جای  $D_a$  به دست می‌آید و قسمت موهومی ( $\text{Im}(C)$ ) نیز برابر  $-\frac{P_a}{2}$  می‌باشد [Siemon, 1997].

البته روش‌های مدل‌سازی معکوس به این چند روش محدود نیست و امروزه گسترش قابل توجهی یافته است. اما روش‌های بیان شده نسبت به سایر روش‌های معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس اهمیت بیشتری دارند و کاربردی‌تر می‌باشند.

#### ۴-۵- نرم افزارهای تجاری جهت مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی

امروزه برای مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، به خصوص داده‌های روش دیگر، نرم افزارهای محدودی طراحی شده اند. که برخی از آنها عبارتند از:

۱. EM Flow: این نرم افزار ساخت شرکت Encom است، که کارهایی نظیر نمایش، تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی داده‌های حوزه زمان و فرکانس الکترومغناطیس هوایی را انجام می‌دهد. به وسیله این نرم افزار امکان مدل‌سازی معکوس تبدیل مستقیم داده‌ها با روش مقاطع سنگپیل وجود دارد. از آنجا که در برداشت‌های هوایی حجم بسیار بزرگی از داده‌ها جمع‌آوری می‌شود، این نرم افزار قادر است در مدت زمان کوتاهی محاسبات مربوطه را به انجام برساند. به عنوان مثال در یک روز برداشت‌هوایی نزدیک به ۵۰ میلیون نقطه برداشت می‌شود. انجام محاسبات مربوط به این تعداد داده بوسیله نرم‌افزارهای سنتی، ۱۲ روز وقت می‌خواهد، در صورتی که همین محاسبات بوسیله نرم افزار فوق‌الذکر ۱/۵ ساعت به طول می‌انجامد [Encom, 2007].

۲. EMIGMA: این نرم افزار ساخت شرکت Petroseikon می‌باشد. بوسیله این نرم‌افزار امکان انجام محاسبات مربوط به تجزیه و تحلیل، مدل‌سازی و نمایش داده‌های مختلف حوزه زمان و فرکانس برداشت‌های الکترومغناطیس هوایی وجود دارد. به کمک این نرم افزار می‌توان مدل‌سازی‌های معکوس یک و دوبعدی با روش‌های تبدیل مستقیم داده‌ها و روش‌های تکرار محاسبات (مانند روش‌های مارکارت، اکام و روش‌های چندلایه با حداکثر ۱۹ لایه با ضخامت‌های مختلف) را انجام داد. همچنین این نرم‌افزار قادر است نتایج محاسبات را به شکل‌های دو و سه‌بعدی نیز نمایش دهد [Petroseikon, 2007].

۳. Geosoft HEM: این نرم افزار توسط شرکت Geosoft ابداع شده است. از آن می‌توان در پردازش، آنالیز نمایش و مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی هلیکوپتری، استفاده نمود. با این نرم‌افزار امکان

مدل‌سازی معکوس با روش مقاطع سیمون وجود دارد [Geosoft, 2007].

حال که با روش‌های معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس آشنا شدیم در فصل بعد به بررسی جزئی روش‌ها و الگوریتم‌های به کار رفته در این پایان‌نامه می‌پردازیم. از آنجایی که در کشور ما برنامه‌ای بابت کارهای علمی جهت پردازش داده‌ها و مدل‌های هوایی وجود ندارد از این رو یکی از اهداف ما نوشتن یک برنامه کامپیوتری جهت نیل به این هدف بوده است.

# فصل پنجم



تهیه الگوریتم های معکوس سازی تقریبی داده های

الکترومغناطیس، هوایی

## ۵-۱- مقدمه

همان گونه که در فصل قبل دیدیم، روش‌های بسیار متنوعی برای معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس وجود دارد. پاره‌ای از این روش‌ها از یک الگوریتم خاص پیروی می‌کنند و پاره‌ای از آنها نیز دارای روش حلی منحصر به فرد می‌باشند. از این رو در این فصل به بیان چگونگی نوشتن الگوریتم‌های معکوس‌سازی تقریبی استفاده شده در این پایان‌نامه می‌پردازیم.

در ابتدا لازم است متذکر شویم که تمام برنامه‌ها بر اساس الگوریتم‌های مندرج نوشته شده است. از آنجایی که بهتر است، برنامه نوشته شده مستقل از برنامه‌های دیگر باشد، تمامی برنامه‌های کامپیوتری در یک محیط مجازی تست شده و پس از اطمینان از صحت عملکرد تحت آخرین روش‌های برنامه نویسی پیشرفته به صورت سه لایه تحت زبان برنامه نویسی ویژوال سی-شارپ و بانک اطلاعاتی داده‌های اس-کیو-ال که هر دو به صورت نسخه‌های رایگان می‌باشد. نسخه‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه بر اساس نسخه‌های سریع<sup>۱</sup> که قابل دریافت رایگان از سایت شرکت میکروسافت<sup>۲</sup> است، نوشته شده است. از این رو نیازی به مشکلات ناشی از عدم وجود مجوزهای<sup>۳</sup> نرم افزارها برای توزیع آنها وجود ندارد.

در ابتدا لازم است که با چگونگی محاسبه انتگرال ماندری که اساس محاسبات الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس می‌پردازیم.

## ۵-۲- روش‌های محاسبه انتگرال ماندری

بر طبق الگوریتم‌های ارائه شده، یکی از مهمترین مشکلات در فرآیند معکوس‌سازی، حل انتگرال ماندری است. از آنجا که انتگرال فوق‌الذکر بر اساس روش‌های متداول انتگرال‌گیری قابل حل نیست از این رو باید بر اساس روش‌های حل عددی از قبیل روش لاپلاس و روش ضرایب هنکل به حل این انتگرال همت پرداخت. از مهمترین و پیچیده‌ترین مسائل در این مسیر نیز آگاهی از کرنل و ضرایب وزنی مورد نیاز است. متأسفانه در مقالات و گزارش‌های ارائه شده در این زمینه، تقریباً در غالب موارد کرنل و ضرایب ارائه نشده‌اند. به همین دلیل رسیدن به نتایج روش سنگپیل و به دنبال آن روش سیمون و سایر روش‌ها ناممکن است. برای حل انتگرال ماندری روش‌های متنوع زیادی وجود دارد. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به روش حل لاپلاس، روش ضرایب سریع هنکل و روش بسط تابع بسل را نام برد. اما برای حل این انتگرال کدام

<sup>1</sup> Express

<sup>2</sup> www.microsoft.com

<sup>3</sup> Licence



روش را بهتر است به کار بندیم؟ در نگاه اول شاید چنین بیان شود که، روش حل لاپلاس از بقیه بهتر است، اما چرا ما این روش را پیشنهاد نمی‌کنیم؟

روش حل لاپلاس یکی از روش‌های بسیار مفید برای حل انتگرال‌ها و انتگرال ماندری می‌باشد. در این روش کافی است انتگرال مربوطه را به صورت لاپلاسی در آورد و آنگاه از طریق معکوس لاپلاس آن را حل نماییم. این روش بسیار سریع می‌باشد چرا که برای رسیدن به جواب و همگرا شدن به تعداد جملات کمتری از تابع بسل نیازمندیم. از طرفی این روش در حدود ده برابر از روش حل ضرایب هنکل سریع‌تر است. اما باید در نظر داشت، در صورتی که می‌خواهیم در یک محیط مستقل برنامه نویسی کنیم، کد نویسی به روش حل لاپلاس بسیار مشکل‌تر از روش‌های دیگر است.

البته در صورتی که بخواهیم در نرم افزارهای دیگر که دارای محیط برنامه نویسی هستند، مانند نرم افزار مطلب<sup>۴</sup>، روش کد نویسی بسیار ساده می‌گردد. اما چون برنامه نوشته شده به صورت مستقل از برنامه‌های دیگر است از این رو ما از این روش برای حل عددی انتگرال ماندری استفاده نمی‌کنیم. روش پیشنهادی دوم، بسط تابع بسل است. در این حالت تابع بسل را بر اساس ضرایب بسط بسل به صورت باز شده می‌نویسیم. اما مشکل این روش چیست؟

در حالتی که یکی از راه‌های ساده استفاده از بسط تابع بسل می‌باشد اما چون برنامه‌های کامپیوتری قادر به تشخیص تعداد جملات مورد نیاز برای بسط تابع بسل نیستند از این رو در صورتی که بسط تابع فوق را بنویسیم و انتگرال‌گیری را بر اساس بسط فوق به دست آوریم، ملاحظه می‌کنیم که جواب انتگرال ماندری هنگامی که به جملات بالای هفتم می‌رسیم، بی معنی می‌شود از این رو محاسبات با خطا مواجهه می‌گردد. اما سوال ما این است که آیا این مشکل ناشی از انتگرال ماندری است و یا ناشی از عدم تعیین تعداد جملات برای محاسبه انتگرال ماندری می‌باشد؟

بر این اساس لازم است اندکی در زمینه تابع بسل اطلاعات داشته باشیم. همان گونه که می‌دانیم، وجود تابع بسل کمک می‌کند تا انتگرال مربوطه در زمان‌های بالا به یک مقدار معین میل نماید و همگرا گردد. از این رو اگر چه در جملات اولیه با مقدار بزرگ تابع بسل روبرو هستیم، اما این مقدار در جملات بعدی تضعیف می‌گردد، از این رو تابع فوق همگرا می‌شود.

اما در برنامه‌های کامپیوتری لازم است انتگرال تمام جملات به صورت آنی محاسبه گردد در غیر این صورت مشاهده خواهیم کرد که انتگرال فاقد جواب می‌گردد.

<sup>4</sup> Matlab Software

البته در صورتی که این عمل را با نرم افزارهایی که مختص محاسبات ریاضی نوشته شده اند ، مانند نرم افزار *Matlab*، انجام دهیم، جواب به راحتی و بدون هیچ مشکلی به دست می‌آید. اما با این عمل ما دست خویش را برای آزاد بودن نرم افزار از یک نرم افزار دیگر بسته ایم.

از طرفی سرعت محاسبات را به میزان قابل توجهی پایین آورده‌ایم. لذا ما از نرم افزارهای مربوطه برای محاسبه انتگرال ماندیری کمک نگرفتیم. از این رو از روش بسط تابع بسط نیز استفاده نکردیم.

اما روش سوم که به صورت گسترده در حال استفاده و کاربرد است روش حل ضرایب هنکل می باشد. بر این اساس ما نیز بر پایه مقالاتی که در این زمینه موجود بود، در صدد استفاده از این روش برآمدیم.

بر این اساس تقریباً تمام مقالات روش حل به وسیله ضرایب سریع هنکل نظیر، اندرسن<sup>۵</sup>، کریستنسن<sup>۶</sup>، دس و گاوش<sup>۷</sup>، یوهانسون و سورنسن<sup>۸</sup>، کوفود<sup>۹</sup> و محسن و حشیش<sup>۱۰</sup> را مورد مطالعه قرار دادیم. اما مهمترین مشکل موجود در این زمینه آن است که ، اگر چه مقالات در زمینه استفاده از روش ضرایب هنکل به میزان کافی موجود است اما، تمامی این مقالات یا ضرایب هنکل را ارائه نکرده‌اند و یا ناقص ارائه داده‌اند و از طرفی پاره‌ای از مقالات که ضرایب را به صورت کامل ارائه کرده‌اند از بیان روش حل آن و به دست آوردن تابع کرنل<sup>۱۱</sup> (هسته) خودداری کرده‌اند و فقط به بیان نتایج روش خود و مقایسه آن با سایر روش ها پرداخته‌اند.

از این رو لازم بود تا به یک مرجع که هم ضرایب را به صورت کامل ارائه داده بود و هم روش به دست آوردن تابع کرنل در آن به خوبی بیان شده بود، مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس با استفاده از مقاله ارائه شده توسط گوپتاسارما و سینگ<sup>۱۲</sup> و روش ارائه شده توسط آنها [Guptasarma & Singh, 1997] به محاسبه انتگرال فوق‌الذکر پرداختیم. در ادامه به روش حل انتگرال ماندیری که اساس روش‌های محاسبات در الکترومغناطیس هوایی است، می‌پردازیم.

۵-۳- روش محاسبه انتگرال ماندیری به وسیله ضرایب هنکل با استفاده از روش گوپتا سامارا و سینک

همان گونه که می‌دانیم تابع هنکل به صورت فرم کلی زیر بیان می‌شود:

$$f(r) = \int_0^{\infty} k(\lambda) J_n(\lambda r) d\lambda$$

<sup>5</sup> Anderson

<sup>6</sup> Christensen

<sup>7</sup> Das and Ghosh

<sup>8</sup> Johansen and Sorensen

<sup>9</sup> Koefoed

<sup>10</sup> Mohsen and Hashish

<sup>11</sup> Kernel Function

<sup>12</sup> Guptasarma and Singh

(۱-۵)

که در آن  $\lambda$  متغیر انتگرال،  $r$  موقعیت مکانی،  $k(\lambda)$  تابع کرنل انتگرال و  $J_n(\lambda r)$  بیانگر تابع بسمل می‌باشند. حل این انتگرال به صورت تحلیلی ناممکن است و با استفاده از کرنل و ضرایب وزنی به صورت زیر قابل حل است. در ابتدا می‌توانیم انتگرال را به صورت یک نمایش از مجموع چند تابع با ضرایب وزنی معین در نظر بگیریم. در این صورت می‌توان فرم تابع را به صورت زیر نوشت:

$$f(r) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n k(\lambda_i) W_i \quad (۲-۵)$$

همان گونه که مشخص است، در رابطه بالا  $k(\lambda_i)$  بیانگر توابع معین می‌باشد که بر اساس مقادیر مختلف  $\lambda$  تغییر می‌کند. از طرفی  $W_i$  نیز بیانگر ضرایب وزنی می‌باشد که برای مقادیر مختلف  $i$  متفاوت می‌باشد. برای بیان توابع متغیر لازم است مقدار متغیر  $\lambda$  را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{r}\right) \times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (۳-۵)$$

بر همین اساس می‌توان تابع اولیه را به صورت زیر تعریف نمود:

$$rf(r) = \sum_{i=1}^n k(\lambda_i) W_i \Rightarrow f(r) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n k(\lambda_i) W_i \quad (۴-۵)$$

حال باید ضرایب وزنی و تابع کرنل درون انتگرال تعیین شود. اما پیش از آن بر اساس انتگرال ماندری داریم:

$$f(r) = \frac{4}{M} \int_0^{\infty} \lambda^2 e^{-2\lambda} R_1 J_n(\lambda r) d\lambda \quad (۵-۵)$$

که در آن  $e$  تابع نمایی، و  $R_1$  ضریب بازتاب است. حال لازم است تابع فوق به فرم قابل استفاده در رابطه گوپتاسارما و سینگ درآید. بدین منظور با توجه به رابطه ارائه شده برای  $R_1$  در مقاله سنگپیل می‌توان چنین نوشت [Sengpiel, 1988]:

$$f(a) = \frac{4}{M} \int \lambda^2 e^{-2\lambda} R_1 J_n(\lambda a) d\lambda \quad (۶-۵)$$

$$R_1 = \frac{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} + \lambda} \Rightarrow f(a) = \frac{4}{M} \int \lambda^2 e^{-2\lambda} \frac{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} + \lambda} J_n(\lambda a) d\lambda$$

که در آن  $i = \sqrt{-1}$  است و ضریب  $M$  برابر است با  $\frac{4}{G_i} \left(\frac{h}{r}\right)^3$  که خود تابع تغییرات ارتفاع پرواز ( $h$ ) و فاصله سیم‌سیم‌پیچ ( $r$ ) است و  $G_i$  مقدار ثابتی است که به نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده بستگی دارد؛ مقدار  $a = \frac{r}{h}$  برای آنکه مقادیر را بر حسب تغییرات ارتفاع پرواز محاسبه کنیم، تعریف شده است. از این رو با بیان بالا می‌توان چنین بیان نمود:

$$f\left(\frac{r}{h}\right) = G_i \left(\frac{r}{h}\right)^3 \int \lambda^2 e^{-2\lambda} \frac{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} + \lambda} J_n\left(\lambda \frac{r}{h}\right) d\lambda \quad (7-5)$$

حال می‌توان مقدار ثابت و تابع کرنل را به صورت روابط زیر بیان نمود:

$$\lambda_i = (h/r) \times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (8-5)$$

$$K(\lambda_i) = G_i \left(\frac{r}{h}\right)^3 \lambda^2 e^{-2\lambda} \frac{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} + \lambda} \quad (9-5)$$

که در آن  $G_i$  ضریبی ثابت است که همان طور که قبلاً بیان کردیم بر اساس نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده تعریف می‌گردد.

از این رو مقدار  $G_i \left(\frac{r}{h}\right)^3$  ثابت است؛ لذا می‌توان مقدار کرنل را به شکل زیر ساده‌تر نمود:

$$K(\lambda_i) = \lambda^2 e^{-2\lambda} \frac{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + 2i\delta^2} + \lambda} \quad (10-5)$$

در نهایت ضرایب  $\lambda_i$  و تابع  $f\left(\frac{r}{h}\right)$  با استفاده از رابطه گویتاسارما و سینک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\lambda_i = (h/r) \times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (11-5)$$

$$f(r/h) = (h/r) \sum_{i=1}^n k(\lambda_i) W_i \quad (12-5)$$

از رابطه بالا همان گونه که مشخص است، با در نظر گرفتن مقادیر متغیر ارتفاع پرواز ( $h$ )، مقادیر مختلف عمق پوسته  $\delta$ ، مقادیر مختلف متغیر  $\lambda_i$ ، تابع کرنل  $k(\lambda_i)$  و ضرایب وزنی متغیر  $W_i$  مقدار انتگرال مانداری را به ازای مقادیر مختلف ارتفاع پرواز و عمق پوسته‌های مختلف که بیانگر مقاومت ویژه‌های متفاوت نیز هستند، به دست آورد.

حال که به چگونگی روش محاسبه انتگرال مانداری پی بردیم، می‌توانیم روش‌های مختلف معکوس‌سازی را که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است را مورد بررسی قرار دهیم. در ادامه به بیان روش‌های به کار رفته و تشریح الگوریتم‌های آنها در پایان‌نامه جهت محاسبه مقاومت ویژه و عمق ظاهری می‌پردازیم.

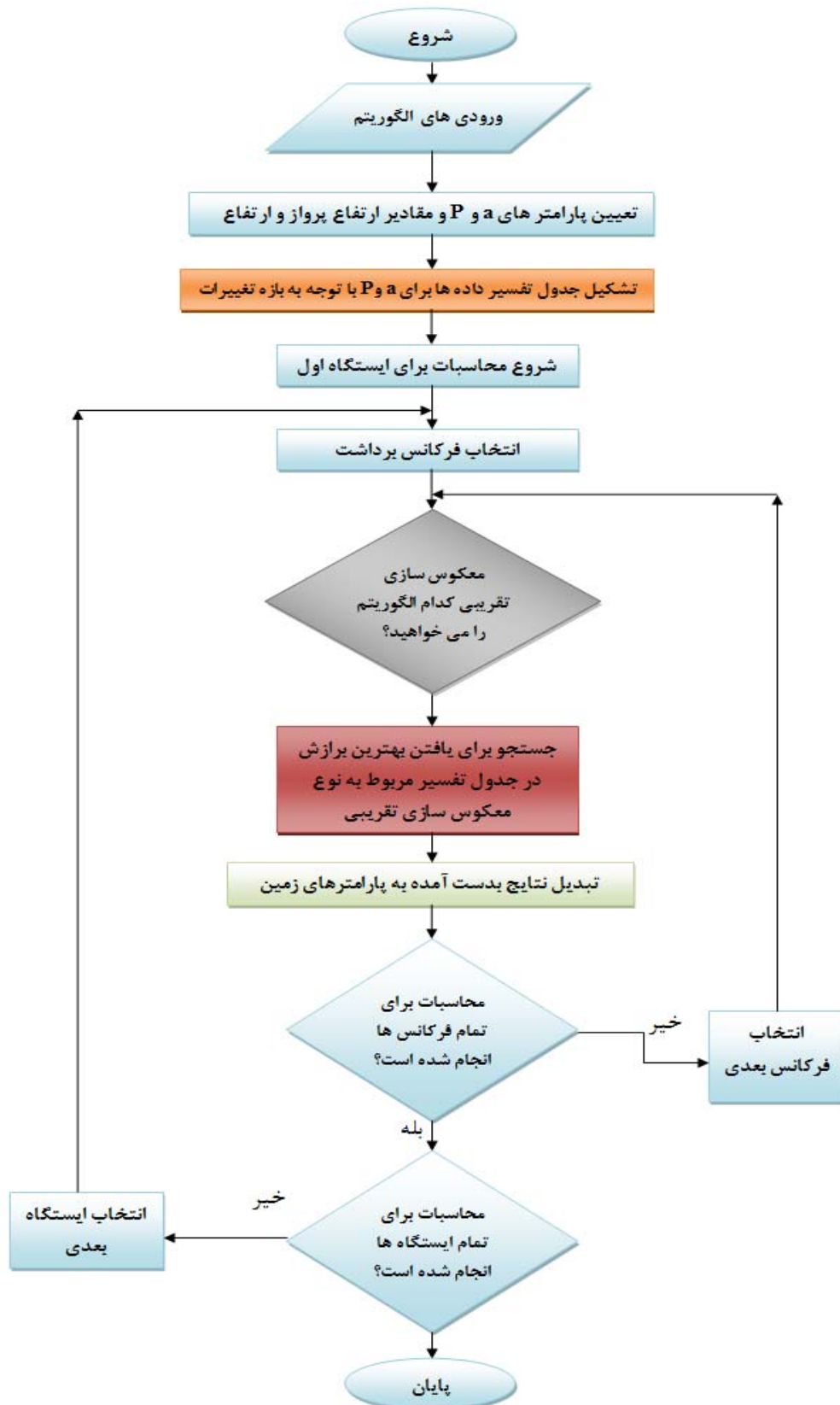
#### ۵-۴- طراحی الگوریتم‌های معکوس‌سازی الکترومغناطیس هوایی

در ابتدا به نمایش کلی الگوریتم مورد استفاده می‌پردازیم. همان گونه که در شکل (۵-۱) مشخص است، می‌پردازیم. همان گونه که در شکل می‌بینیم، در ابتدا لازم است که از یک سری اطلاعات اولیه مانند، اطلاعات عددی فرکانس‌ها، تعداد ایستگاه‌ها و ... توسط کاربر وارد شود. همان‌طور که مشخص است الگوریتم فوق به وضوح نحوه عملکرد را نشان می‌دهد لذا از بیان توضیحات اضافی پرهیز می‌کنیم.

#### ۵-۴-۱- ورودی‌های الگوریتم

همان گونه که مشخص است لازم است کاربر یک سری داده را به عنوان ورودی در برنامه وارد نماید. این داده‌ها شامل داده‌های زیر می‌باشند:

- ✓ اطلاعات مربوط به فرکانس برداشت
- ✓ اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها
- ✓ اطلاعات مربوط به ارتفاع ابزار برداشت الکترومغناطیس هوایی
- ✓ اطلاعات مربوط به مقادیر برداشت هوایی



شکل (۵-۱): نمایش کلی (فلوچارت) الگوریتم معکوس‌سازی تقریبی الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس

۵-۴-۲- تعیین پارامترهای  $P$  و  $a$ 

به جهت انجام عملیات معکوس‌سازی نیاز است تا جدولی بر اساس مقادیر مختلف ارتفاع پرواز مختلف و مقاومت ویژه های مختلف تشکیل دهیم تا بر اساس آن بتوانیم مقادیر هم‌فاز و ناهم‌فاز انتگرال ماندری را به دست آوریم و محاسبات را بر اساس جدول تفسیر به دست آمده انجام دهیم. به جهت انجام عملیات معکوس‌سازی نیاز است تا جدولی بر اساس مقادیر مختلف ارتفاع پرواز مختلف و مقاومت ویژه های مختلف تشکیل دهیم تا بر اساس آن بتوانیم مقادیر هم‌فاز و ناهم‌فاز انتگرال ماندری را به دست آوریم و محاسبات را بر اساس جدول تفسیر به دست آمده انجام دهیم. به جهت انجام عملیات معکوس‌سازی نیاز است تا جدولی بر اساس مقادیر مختلف ارتفاع پرواز مختلف و مقاومت ویژه‌های مختلف تشکیل دهیم تا بر اساس آن بتوانیم مقادیر هم‌فاز و ناهم‌فاز انتگرال ماندری را به دست آوریم و محاسبات را بر اساس جدول تفسیر به دست آمده انجام دهیم. از این رو برای آن که ارتفاع پرواز نسبت به پارامتر فاصله سیم‌پیچ‌ها سنجیده می‌شود [Sengpiel, 1988]، از این رو پارامتر  $a$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$a = \frac{h}{r} \quad (۱۳-۵)$$

در این رابطه  $h$  ارتفاع پرواز هلیکوپتر و  $r$  بیانگر فاصله میان سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده می‌باشد. از طرفی برای آن که تغییرات عمق پوسته را نیز در محاسبات وارد نماییم، مقدار پارامتر  $P$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

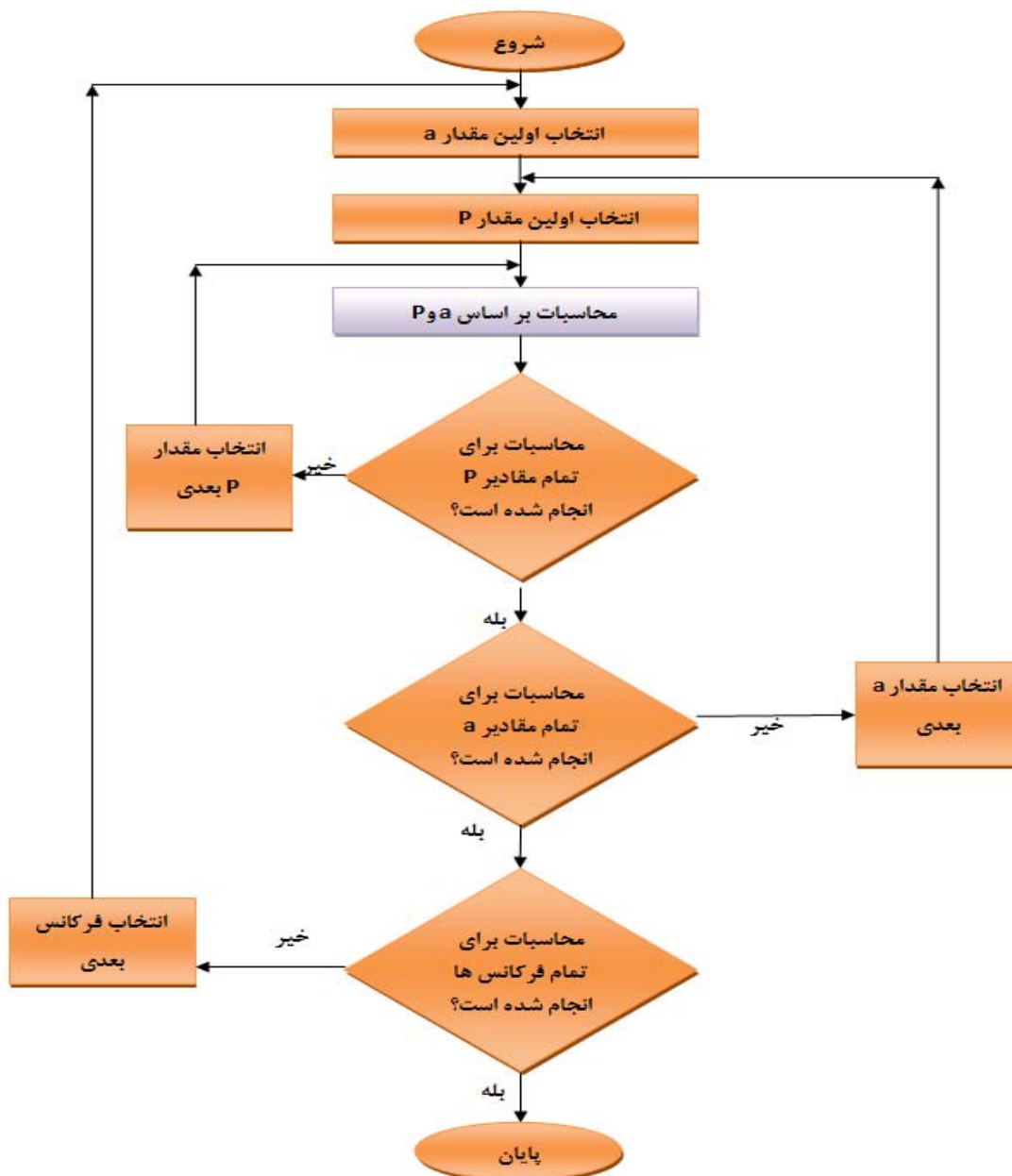
$$P = \delta = \frac{D_a}{p} \quad (۱۴-۵)$$

در این رابطه  $D_a$  بیانگر ارتفاع ظاهری پرواز می‌باشد که از طریق محاسبات به دست می‌آید. البته برای آن که محاسبات راحت تر صورت گیرد و روند محاسبات خطی باشد می‌توان به مقدار  $P$  ضریبی اضافه نمود.

۵-۴-۳- تشکیل جدول تفسیر داده‌ها برای  $a$  و  $P$  با توجه به بازه تغییرات

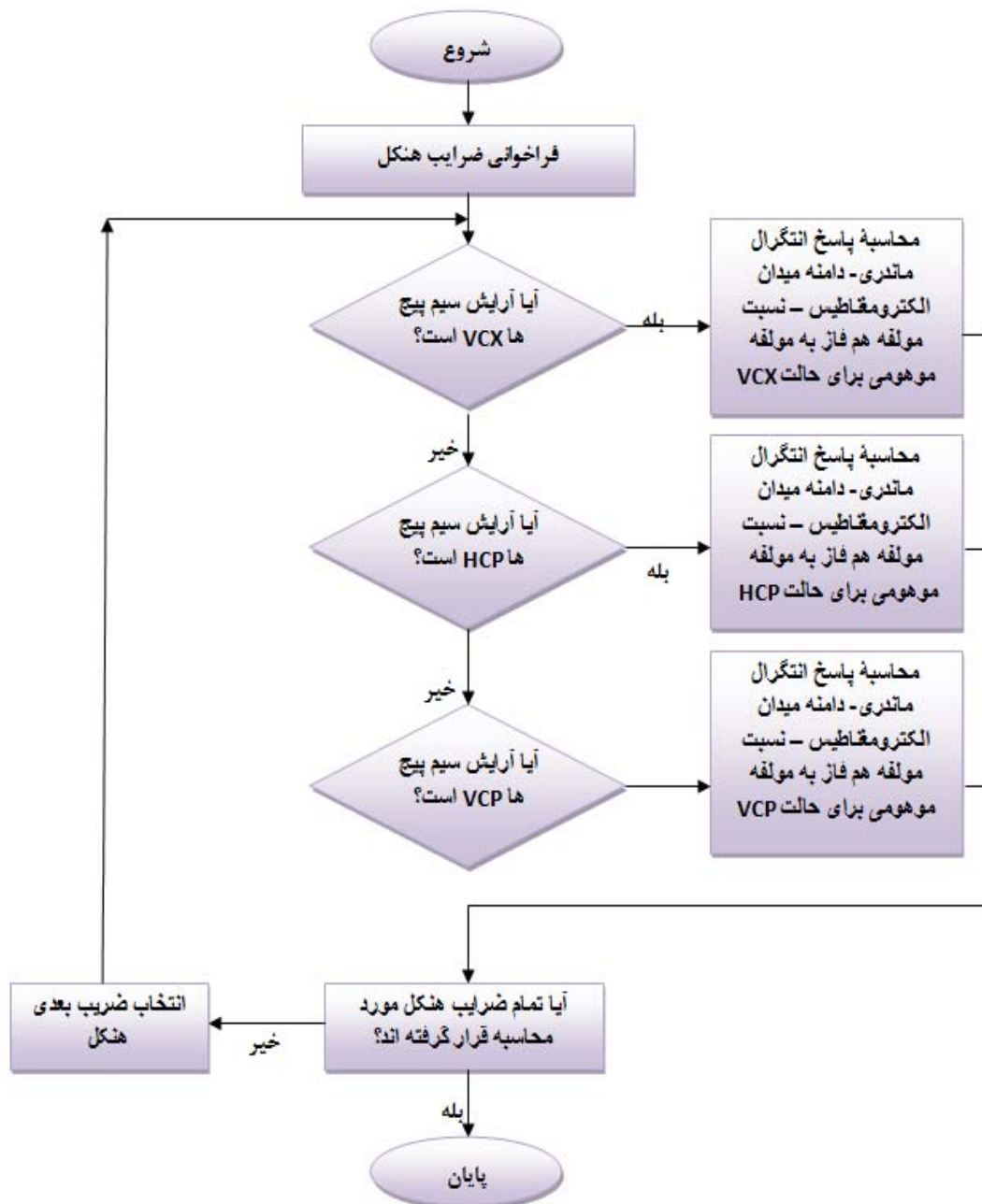
پس از آن که مقادیر  $a$  و  $P$  تعیین شدند، و بازه تغییرات مربوط به آنها معین گردید، بر اساس الگوریتم شکل (۵-۲) یک جدول تفسیر اولیه تولید می‌شود. از آنجایی که شکل الگوریتم بسیار گویا می‌باشد، از بیان جزئیات مربوط به آن صرف نظر می‌کنیم.

تنها یاد آور می شویم؛ هنگامی که الگوریتم شکل (۲-۵) اجرا می گردد، ضرایب هنکل از جدول تعیین شده در پایگاه داده ها فراخوانی می گردد و آنگاه با توجه به روش ارائه شده در حل انتگرال ماندری و وضعیت قرارگیری سیم‌پیچ ها مقادیر انتگرال و سایر محاسبات انجام می گردد. در شکل (۳-۵) فلوچارت محاسبات آورده شده است. پس از پایان این مرحله برای تمام فرکانس ها، تمام ایستگاه ها، تمام مقادیر  $a$  و  $P$  جدول تفسیر ما آماده می گردد. تمامی محاسبات به نحوی به این جدول وابسته است. از این رو ممکن است ساخت این جدول و محاسبات اولیه آن اندکی طولانی شود.



شکل (۲-۵) : فلوچارت الگوریتم جدول تفسیر





شکل (۵-۳): فلوچارت الگوریتم محاسبات پاسخ زمین برای پر کردن جدول تفسیر

#### ۵-۴-۴- انتخاب اولین فرکانس

در این حالت اولین فرکانس برداشت برای انجام عملیات معکوس‌سازی انتخاب می‌شود. پس از انجام محاسبات برای به دست آوردن نتیجه معکوس‌سازی ها این عمل برای تمام فرکانس های برداشت نیز انجام می‌گردد.

## ۵-۴-۵- انتخاب اولین ایستگاه

در این حالت مقادیر اولین ایستگاه برداشت برای انجام عملیات معکوس‌سازی انتخاب می‌شود. پس از انجام محاسبات برای به دست آوردن نتیجه تمام ایستگاه‌ها این عمل برای تمام ایستگاه‌های برداشت نیز انجام می‌گردد.

## ۵-۴-۶- انتخاب روش معکوس‌سازی تقریبی

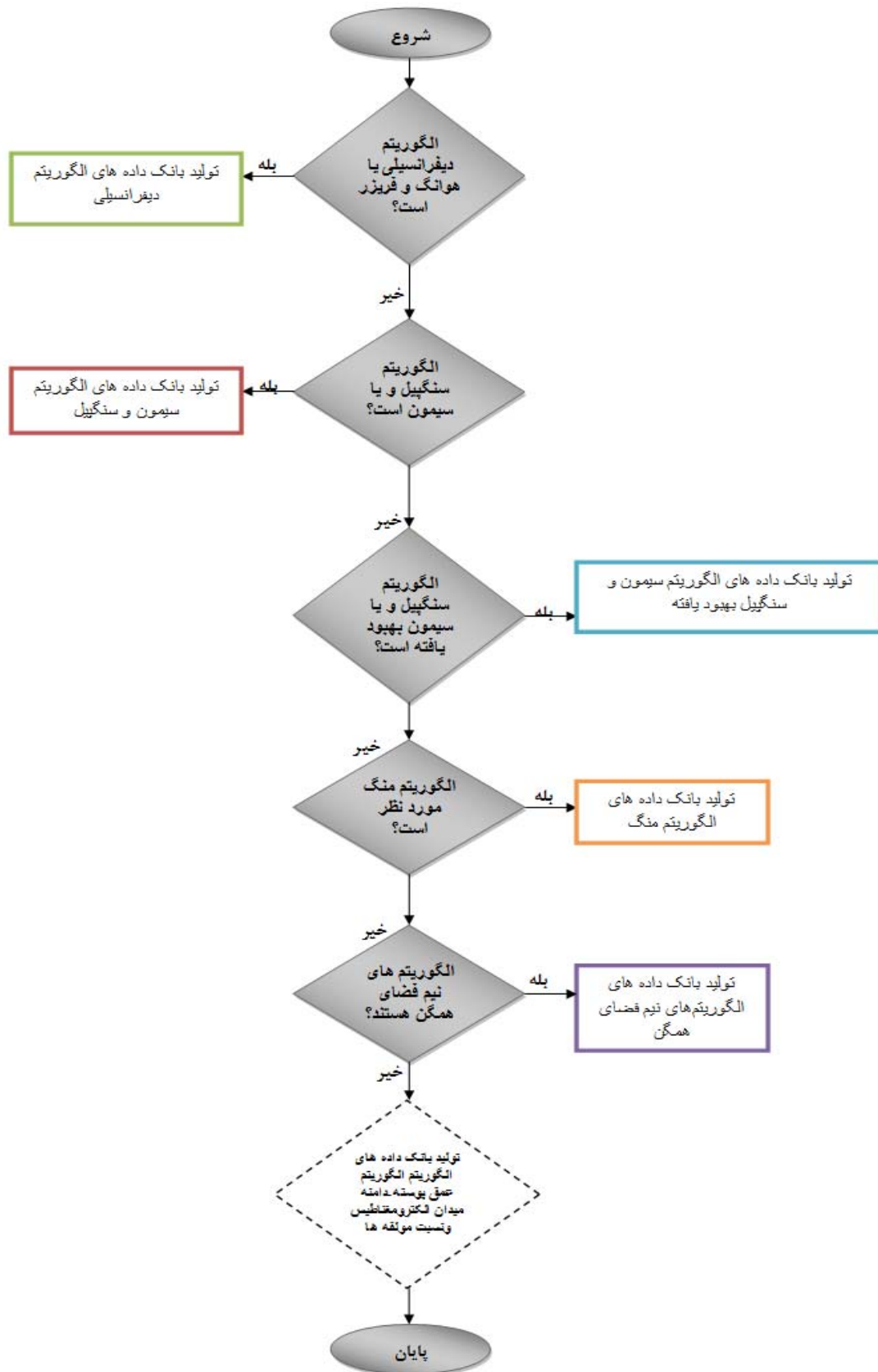
در این مرحله با توجه به نوع معکوس‌سازی مورد نظر عملیات معکوس‌سازی انجام می‌گردد. بر این اساس عملیات معکوس‌سازی انجام شده و نتایج مربوطه به صورت یک جدول در بانک داده‌های ذخیره می‌گردد. در شکل (۴-۵) فلوچارت این قسمت از برنامه آورده شده است.

## ۵-۴-۷- جستجو برای یافتن بهترین برازش در جدول تفسیر مربوط به نوع معکوس‌سازی تقریبی

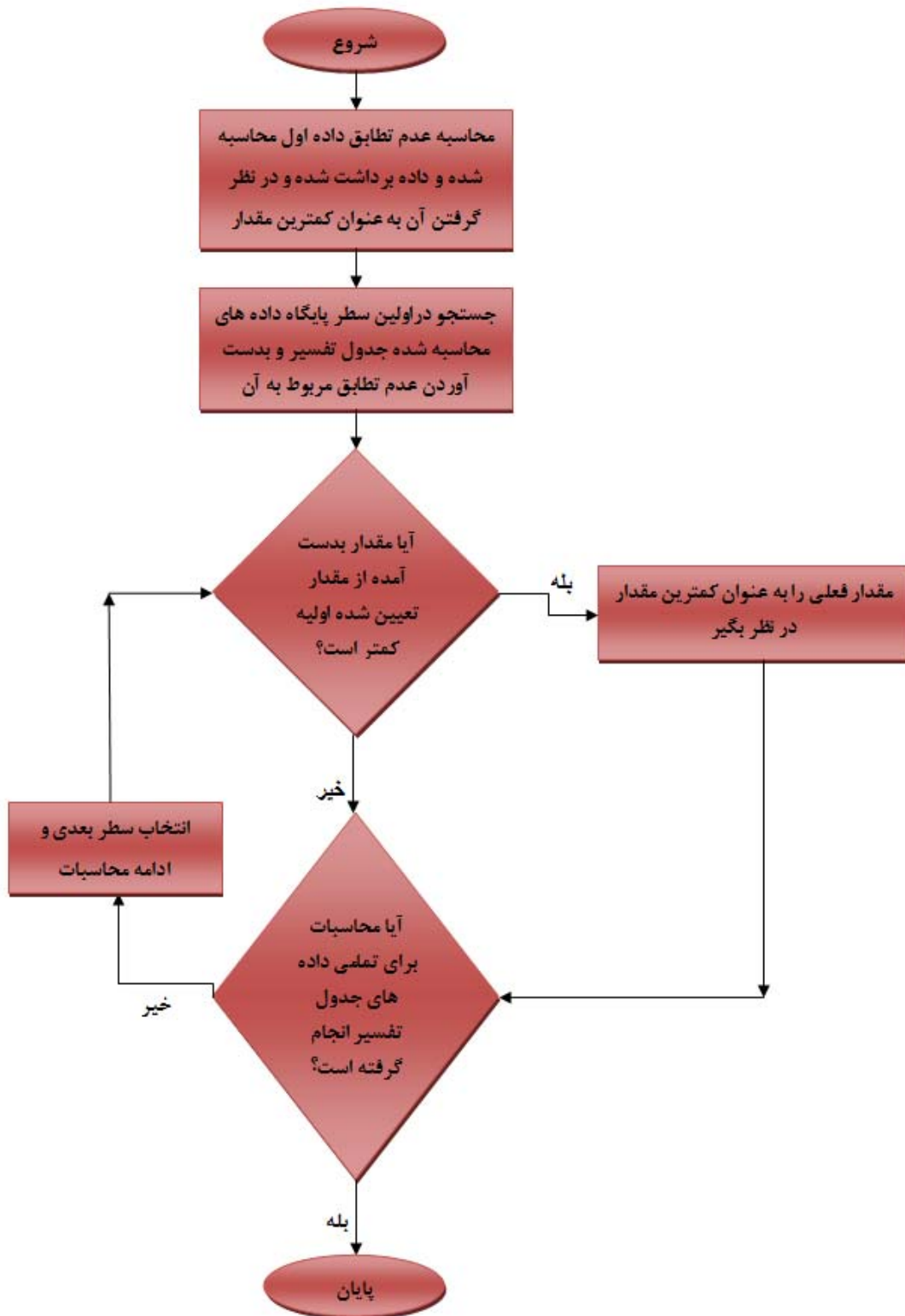
بر این اساس پس از تعیین نوع معکوس‌سازی تقریبی بر اساس فلوچارت شکل (۵-۵) نرم افزار شروع به انجام عملیات جستجو برای یافتن بهترین برازش در جدول تفسیر مربوط به نوع معکوس‌سازی تقریبی و مقدار وارد شده توسط کاربر برای هر ایستگاه و برای هر فرکانس می‌نماید و نتیجه را در یک بانک داده ذخیره می‌نماید.

## ۵-۴-۸- تبدیل نتایج به دست آمده به پارامترهای زمین

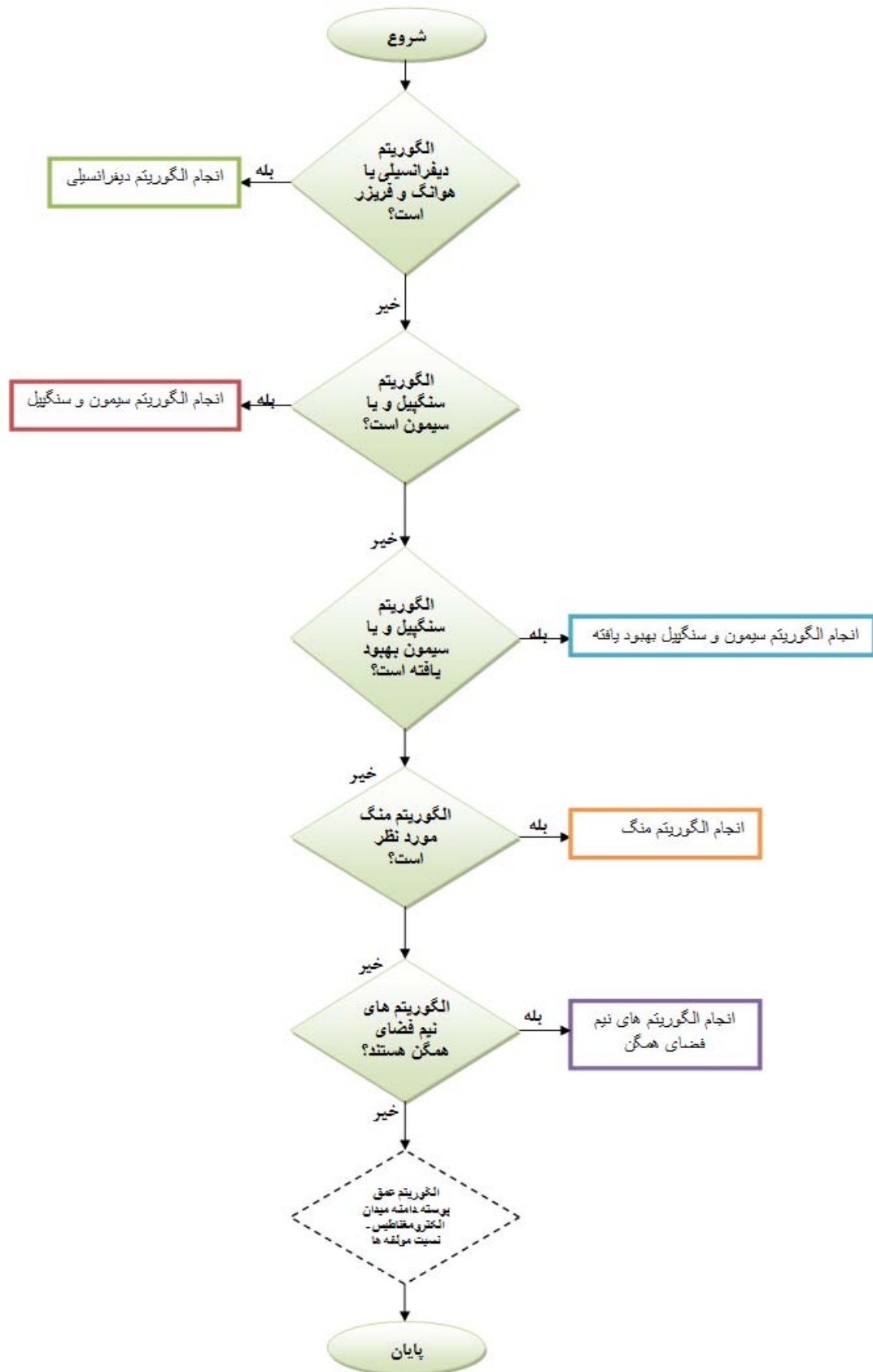
در این قسمت با توجه به مقدارهای به دست آمده توسط فلوچارت‌های بالا و ذخیره اطلاعات به دست آمده در بانک‌های اطلاعاتی، با توجه به نوع الگوریتم مورد نظر لازم است تا پارامترهای مربوطه که به صورت یک سری اعداد خام هستند به مقادیر مقاومت ویژه و عمق تبدیل گردند. فلوچارت مربوط به این قسمت در شکل (۶-۵) نشان داده شده است. در این قسمت الگوریتم‌های محاسباتی به صورت زیر تقسیم می‌شوند.



شکل (۴-۵) : فلوچارت انتخاب نوع الگوریتم معکوس‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس



شکل (۵-۵): الگوریتم جستجو در جدول تفسیر جهت یافتن بهترین پاسخ



شکل (۵-۶): فلوچارت الگوریتم محاسبه پاسخ زمین بر اساس مقدار به دست آمده از جدول تفسیر

## ۵-۴-۸-۱- الگوریتم سنگپیل

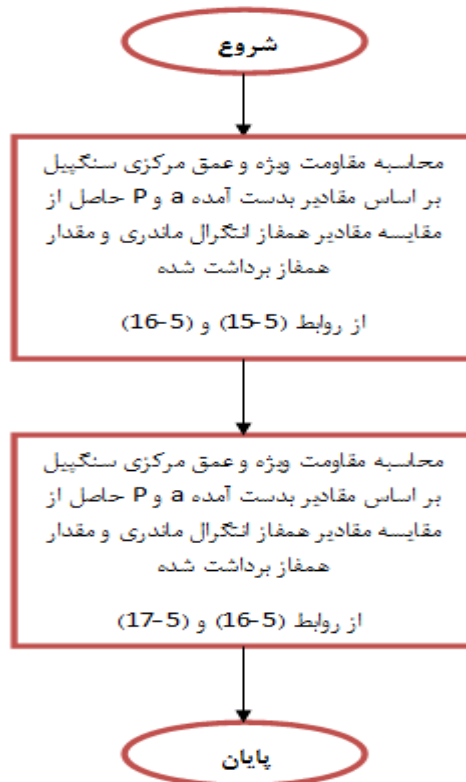
در این الگوریتم مقادیر حقیقی حاصل از جدول تفسیر با مقادیر حاصل از برداشت الکترومغناطیس مورد برآزش با یکدیگر قرار می‌گیرند. از این رو تک تک مقادیر مورد برداشت با مقادیر محاسبه شده مورد مقایسه قرار می‌گیرند و بهترین برآزش میان داده‌ها انجام می‌گیرد. با معلوم شدن مقدار بهینه مقدار  $a$  و  $P$  مربوط به آن از جدول استخراج می‌گردد. سپس مقدار مقاومت ویژه سنگپیل و عمق ظاهری سنگپیل از روابط (۵-۱۵) و (۵-۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$z^* = d_a + z_s^* = d_a + D_a \operatorname{Re} C \quad (۵-۱۵)$$

$$(۵-۱۶)$$

$$\rho_a = \frac{\omega \mu_0}{P^2}$$

در شکل (۵-۷) فلوچارت مربوط به الگوریتم سنگپیل رسم شده است. اشکال عمده این روش نیز آن است که هنگامی که روباره ما هادی می‌گردد این روش جواب خوبی را ارائه نمی‌دهد و قادر به شناسایی عمق‌های بالا نمی‌باشد.



شکل (۵-۷): الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش سنگپیل و سیمون

از طرفی چون این روش فقط مقادیر حقیقی را مورد تجزیه تحلیل قرار می‌دهد و معکوس‌سازی تقریبی را براساس مقدار حقیقی انجام می‌دهد لذا خطای ما در حالتی که روبراه هادی است بالا می‌رود. اما باید توجه داشت که، این روش در حالتی که هیچ پیش‌زمینه‌ای در مورد منطقه مورد مطالعه نداریم، بسیار مفید است. زیرا در این حالت نیازمند مدل اولیه نمی‌باشیم.

#### ۵-۴-۸-۲- الگوریتم روش سیمون

همان‌طور که در فصل قبل بیان کردیم، به وسیله روش سیمون می‌توانیم عمق نفوذ را تا حد زیادی نسبت به روش سنگپیل گسترش دهیم. از این رو با توجه به این که روش سیمون نیز همانند روش سنگپیل مقدار مقاومت ویژه را از رابطه مقاومت ویژه نیم‌فضا به دست می‌آورد لذا مقاومت ویژه مربوط به این دو روش با یکدیگر برابر است. در روش سیمون عمق نفوذ افزایش می‌یابد و از رابطه (۵-۱۷) به دست می‌آید.

$$z_p^* = d_a + \frac{P_a}{2} \quad (۵-۱۷)$$

از این رو لازم بود تا هم عمق نفوذ را بالا ببریم و هم دقت محاسبات را افزایش دهیم. بنابراین تصمیم گرفتیم این دو الگوریتم را بهبود بخشیم. بنابراین هر دو مولفه هم‌فاز و ناهم‌فاز را مورد مقایسه قرار دادیم تا از این طریق مقدار به دست آمده  $a$  و  $P$  نسبت به حالت‌های قبل بهتر به دست آید. اما این روش نیز دارای کاستی‌هایی می‌باشد.

#### ۵-۴-۸-۳- الگوریتم بهبود یافته سنگپیل

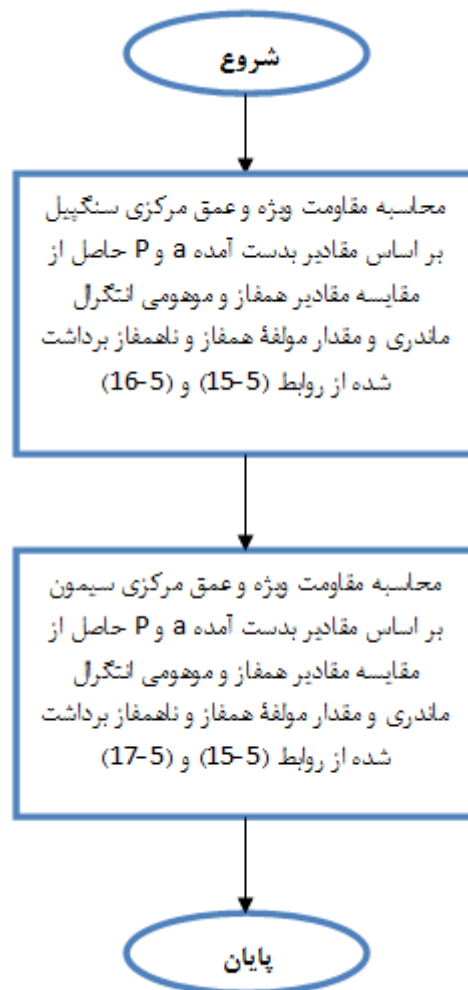
در این راستا علاوه بر پاسخ حقیقی، پاسخ موهومی را هم مورد مطالعه قرار دهیم و بهترین برآزش را میان پاسخ موهومی و پاسخ حقیقی به طور همزمان انجام دهیم. از این رو دقت را می‌توانیم در حالتی که از الگوریتم بهبود یافته فوق استفاده کنیم بالا ببریم.

با این عمل جواب‌های به دست آمده بهتر از قبل گردید، اما یک مشکل هنوز هم به چشم می‌خورد، این جواب‌ها هنوز هم شکل حقیقی دارند! در این حالت با توجه به مقادیر تصحیح یافته دوباره مقادیر  $a$  و  $P$  را از جدول تفسیر به دست آورده و با توجه به روابط (۵-۱۵) و (۵-۱۶) مقاومت ویژه ظاهری و عمق

ظاهری را به دست می آوریم. در شکل (۵-۸) فلوجارت مربوط به الگوریتم بهبود یافته سنگپیل و سیمون نشان داده شده است.

#### ۵-۴-۸-۴- الگوریتم بهبود یافته سیمون

در این حالت نیز ما همانند روش سنگپیل بهبود یافته، هر دو مولفه حقیقی و موهومی را مورد استفاده و مقایسه قرار می دهیم ، در این حالت جواب به دست آمده نسبت به حالت قبل افزایش می یابد. اما جواب‌ها در پاره ای از مدل‌ها بسیار دور از انتظار است.



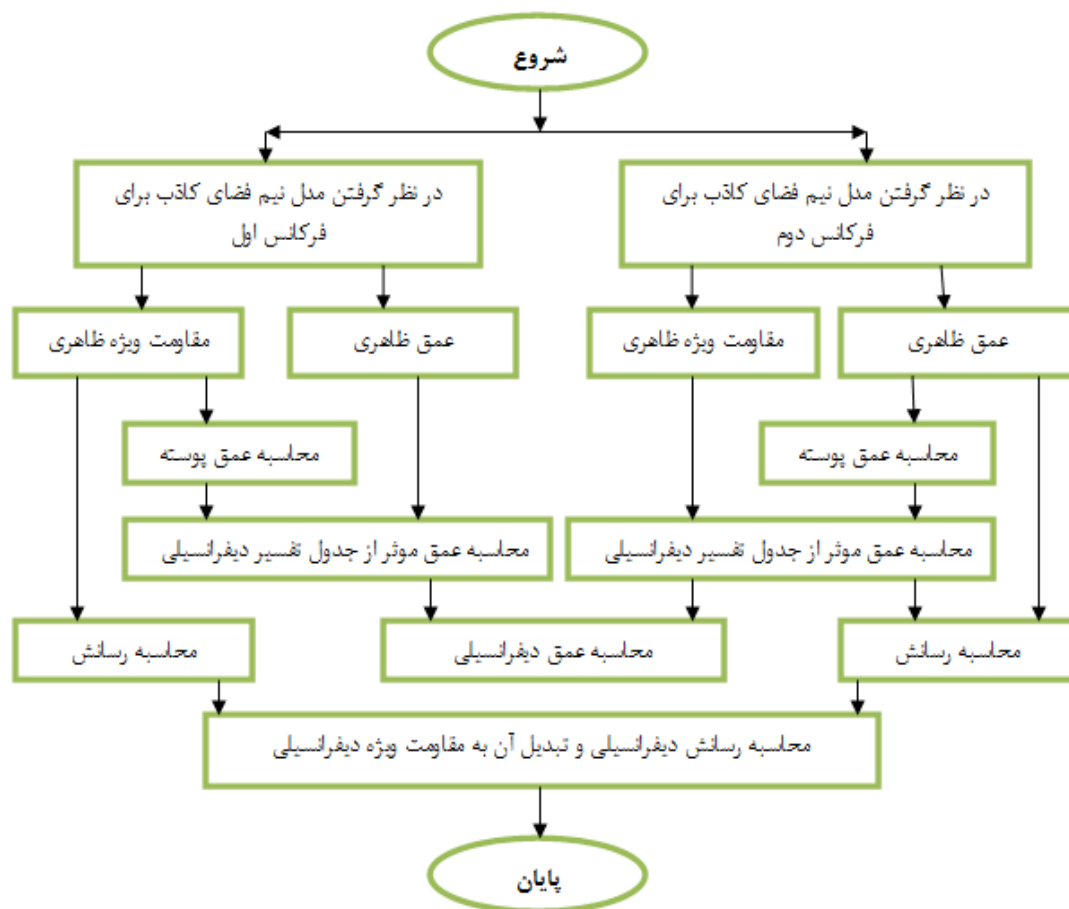
شکل (۵-۸) : فلوجارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش سنگپیل و سیمون بهبود یافته



## ۵-۴-۸-۵- الگوریتم هوانگ و فریزر - روش دیفرانسیلی

همان طور که در قبل بیان شد الگوریتم محاسباتی هوانگ و فریزر بر اساس مقادیر به دست آمده دو فرکانس مجاور هم انجام می‌شود. شاید در ابتدا این تفکر به نظر برسد که این الگوریتم با معین شدن دو مقدار برای مقاومت ویژه ظاهری و دو مقدار برای عمق ظاهری و ایجاد یک رابطه دیفرانسیلی میان آنها به راحتی حل گردد. اما مساله بسیار مشکل تر از این تفکر ساده است.

در شکل (۵-۹) نمایش کلی از این روش نشان داده شده است. در ابتدا برای محاسبات به روش الگوریتم هوانگ و فریزر لازم است دو مقدار مقاومت ویژه ظاهری برای هر دو فرکانس مجاور به دست آید و مقادیر عمق ظاهری آنها نیز تعیین گردد. این مقادیر می‌توانند از الگوریتم‌های قبل مورد استفاده قرار گیرند. اما مشکل کار در این جا است که این الگوریتم بسیار به مدل اولیه حساس است و اگر مدل اولیه به درستی تعیین نگردد جواب به دست آمده دور از انتظار خواهد بود. از این رو لازم است مدل اولیه را با دقت تعیین کنیم.



شکل (۵-۹): فلوجارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش دیفرانسیلی

مشکل عمده و بسیار پیچیده دوم این است که پارامتر عمق دیفرانسیلی برای هر فرکانس چگونه تهیه گردد؟ روش مورد استفاده برای معکوس‌سازی هوانگ و فریزر به صورت شکل زیر بیان می‌گردد: در این حالت ما با توجه به روش ارائه شده در مقاله سال ۱۹۹۷ توسط هوانگ و فریزر به تبادل اطلاعات با آنها پرداختیم تا به نحوی روش به دست آوردن عمق موثر نفوذ را دریابیم. اما در نهایت به این نتیجه رسیدیم که مطالب ارائه شده در مقاله به صورت کلی می‌باشد و تنها به بیان مطالب کلی و نتایج مربوط به آن پرداخته شده است چرا که روش فوق و الگوریتم محاسباتی آن به صورت تجاری می‌باشد و لذا آنها قادر به بیان اطلاعات در زمینه الگوریتم محاسباتی جهت یافتن پارامتر عمق موثر که به عمق ظاهری هر فرکانس و عمق پوسته مربوط به آن فرکانس وابسته است، نمی‌باشند.

از این رو لازم بود تا به نحوی این مشکل رفع گردد. لذا تصمیم گرفتیم تا معادله مربوط به پارامتر عمق موثر را به دست آوریم. اما مشکل کار در این جا بود که این تابع به صورت سه بعدی است به این معنی که می‌توان این تابع را به فرم زیر نمایش داد:

$$z^{\pm k} = a_{\pm 1} x^{\pm 1} + a_{\pm 2} x^{\pm 2} + a_{\pm 3} x^{\pm 3} + \dots a_{\pm m} x^{\pm m} + b_{\pm 1} y^{\pm 1} + b_{\pm 2} y^{\pm 2} + b_{\pm 3} y^{\pm 3} + b_{\pm n} y^{\pm n} \quad (18-5)$$

از طرفی نرم افزارهای موجود امکان برازش دو بعدی را دارا هستند. به طور مثال دستور برازش نرم افزار مطلب تنها قادر به یافتن معادله منحنی‌هایی که به صورت زیر بیان می‌گردند می‌باشد:

$$y = a_{\pm 1} x^{\pm 1} + a_{\pm 2} x^{\pm 2} + a_{\pm 3} x^{\pm 3} + \dots a_{\pm m} x^{\pm m} \quad (19-5)$$

از این رو تنها دو روش را می‌توانستیم به کار ببندیم. این دو روش عبارت بودند از:

۱- روش رقومی کردن تصویر

۲- روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی

از آنجایی که تعداد داده‌ها مربوطه چندان زیاد نبود روش شبکه‌های عصبی و دیگر روش‌های هوش مصنوعی جواب خوبی نمی‌دهند. البته اگر تعداد نقاط را افزایش دهیم این روش می‌تواند کمک زیادی به ما نماید. اما روش دوم نیز نیازمند یک رقومی کردن دقیق بود. بر این اساس از نرم افزارهای منبع باز و رایگان جهت رقومی کردن شکل مربوط به محاسبه پارامتر عمق موثر از عمق ظاهری هر فرکانس و عمق پوسته مربوط به آن پرداختیم. سپس برای آن که از صحت کار اطمینان حاصل نماییم داده‌های مربوطه را

در نرم افزار مطلب بازسازی و از روش معکوس به تولید شکل اولیه پرداختیم. پس از آن که از دقت کار اطمینان حاصل نمودیم به تولید داده های مصنوعی در درون منحنی های موجود در شکل پرداختیم. در نهایت نتایج را در یک ماتریس  $3 \times 30000$  ذخیره نمودیم.

باید توجه داشت که نرم افزار های محاسباتی مانند *Matlab* از ذخیره نمودن این حجم داده عاجز هستند و نرم افزار با پیغام خطای خود اعلام می دارد که قادر به انجام چنین کاری نمی باشد.

از این رو انجام معکوس‌سازی تقریبی هوانگ و فریزر با نرم افزار مطلب غیر قابل اجرا می باشد مگر آنکه تابع مربوط به عمق ظاهری هر فرکانس و عمق پوسته مشخص باشد. لذا ما مقادیر به دست آمده را در یک بانک اطلاعاتی داده ذخیره نمودیم تا در مواقع ضروری جهت محاسبه به کار بسته شود. پس از آن که این جدول عمق موثر تهیه گردید به معکوس‌سازی داده ها به روش زیر پرداختیم.

در ابتدا مدل های اولیه را از روش سیمون بهبود یافته مورد استفاده قرار دادیم آنگاه بر اساس مقدار عمق پوسته و عمق ظاهری مربوط به فرکانس مورد نظر مقدار پارامتر عمق موثر را از برازش داده های فوق و داده های موجود در جدول عمق موثر تهیه شده استخراج می نماییم.

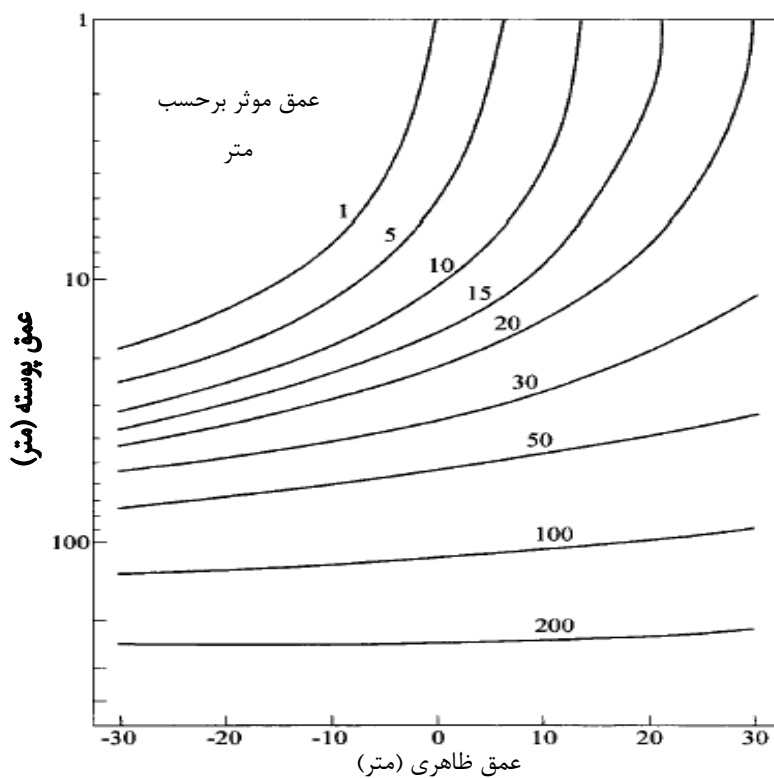
آنگاه این عمل را برای تمامی فرکانس های برداشت مورد استفاده قرار دادیم. سپس با توجه به رابطه‌های بیان شده در فصل قبل مقادیر عمق دیفرانسیلی و مقاومت ویژه دیفرانسیلی با استفاده از روابط (۲۰-۵) و (۲۱-۵) می توانیم به دست آوریم.

$$\rho_{\Delta} = \frac{\Delta Z}{\Delta S} \quad (20-5)$$

$$Z_{\Delta} = Z_i + \frac{\Delta Z}{2} = \frac{(Z_{i+1} + Z_i)}{2} \quad (21-5)$$

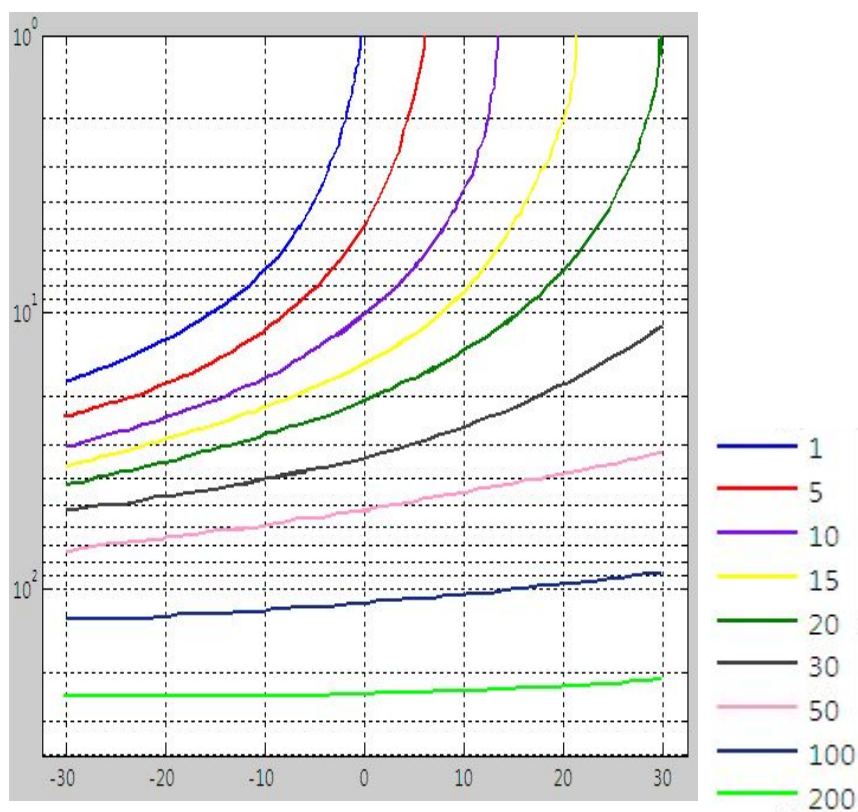
مهمترین و مشکل ترین نکته در این راستا به دست آوردن مقدار عمق موثر است که روی نتایج ما تاثیر بسیاری می گذارد از این رو لازم است تا رقومی کردن به خوبی انجام گیرد و از طرفی مدل اولیه نیز به خوبی تعیین گردد.

در شکل (۵-۱۰) شکل اصلی عمق موثر از مقاله هوانگ و فریزر [Huang&Fraser,1997] و در شکل (۵-۱۱)، شکل تولید شده از طریق معکوس‌سازی نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۰): منحنی های عمق موثر بدست آمده بر حسب عمق پوسته و عمق ظاهری در روش دیفرانسیلی

[Huang&Fraser,1997]

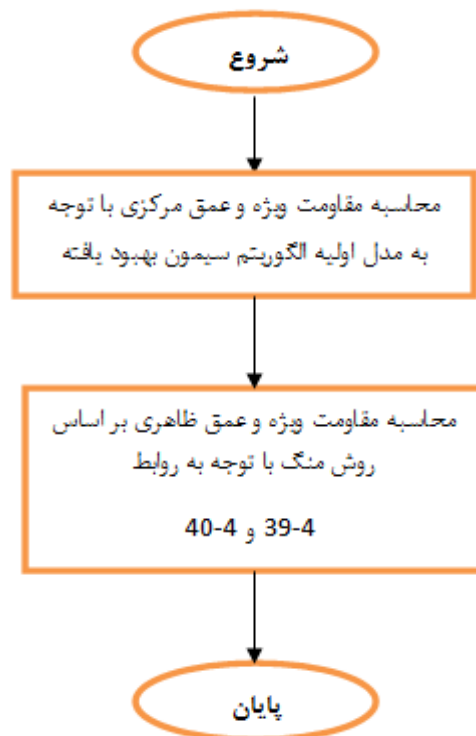


شکل (۵-۱۱): منحنی های مصنوعی تولید شده از طریق معکوس‌سازی انجام شده در این پایان نامه

## ۵-۴-۸-۶- روش منگ

در این روش نیز ما نیازمند یک مدل اولیه هستیم تا معکوس‌سازی تقریبی را بر اساس آن انجام دهیم، از این رو در به دلیل آنکه مدل سیمون نتایج بهتری را ارائه می‌دهد، مدل اولیه را بر اساس مدل سیمون بهبود یافته در نظر گرفتیم.

سپس بر اساس روابط (۴-۳۹) و (۴-۴۰) می‌توانیم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و عمق ظاهری را برای هر فرکانس تعیین کنیم. البته روش فوق برای برداشت‌های الکترومغناطیس بال ثابت می‌باشد اما از آنجایی که این روش در اصول محاسبه همانند روش‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری می‌باشد لذا نتایج این روش را نیز در پایان نامه منظور نمودیم. فلوچارت شکل (۵-۱۲) بیانگر چگونگی انجام الگوریتم مورد نظر می‌باشد.



شکل (۵-۱۲): الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش منگ

## ۵-۴-۸-۷- روش‌های نیم فضای همگن

آنچه تاکنون بیان گردید الگوریتم‌های مورد استفاده برای نیم فضای لایه کاذب بود. اما همان گونه که در فصل قبل بیان نمودیم الگوریتم‌های معکوس‌سازی تقریبی بسیار گسترده هستند و برای حالتی که نیم فضای ما همگن است می‌توانیم از روش‌های نیم فضای همگن استفاده کنیم. این روش‌ها هنگامی که

منطقه مورد نظر فاقد پوشش های گیاهی و یا توپوگرافی باشد، جواب های به دست آمده با روش های دیگر با روش های همگن جواب یکسان خواهد داد. این دو روش تنها در صورتی که وضعیت زمین ما به صورت لایه لایه نباشد، مقاومت ویژه صحیحی را ارائه می کنند. از این رو لازم دانستیم دو نمونه از روش های همگن را نیز در برنامه وارد سازیم تا میان مقادیر به دست آمده نوعی مقایسه انجام دهیم.

#### الف- روش اندازه دامنه الکترومغناطیس و عمق پوسته

در این حالت لازم است که برای مقادیر مختلفی که در جدول تفسیر برای مقادیر مختلف ارتفاع پرند و مقاومت ویژه های مختلف که نشانه عمق پوسته های مختلف است، جدولی را تنظیم می نماییم. نگاه بر اساس مقایسه میان اندازه دامنه الکترومغناطیس برداشت شده و اندازه دامنه الکترومغناطیس محاسبه شده بهترین برازش میان آنها را به دست می آوریم. نگاه مقدار مناسب به دست آمده برای عمق پوسته را از روی جدول می خوانیم.

بر اساس مقدار به دست آمده عمق پوسته می توانیم مقادیر مناسب  $a$  و  $P$  را بخوانیم و بر اساس روابط زیر مقادیر عمق نفوذ و مقاومت ویژه را به دست آوریم. البته مقاومت ویژه به دست آمده در حالتی که زمین همگن است بیانگر مقاومت ویژه حقیقی زمین است. روش های همگن در صورتی که زمین ما حالت لایه لایه داشته باشد جواب های دور از انتظار خواهد داشت. این روش در شکل (۵-۱۳) به عنوان روش اول بیان شده است. از این رو با توجه به مقادیر به دست آمده،  $a$  و  $P$  می توان مقدار مقاومت ویژه را از رابطه (۵-۲۲) و مقدار ارتفاع ظاهری را از رابطه (۵-۲۳) به دست آورد.

$$\rho_a = \frac{\omega \mu_0}{P^2} \quad (۵-۲۲)$$

$$h = a \times r \quad (۵-۲۳)$$

#### ب- روش عمق پوسته و نسبت مولفه حقیقی به مولفه موهومی

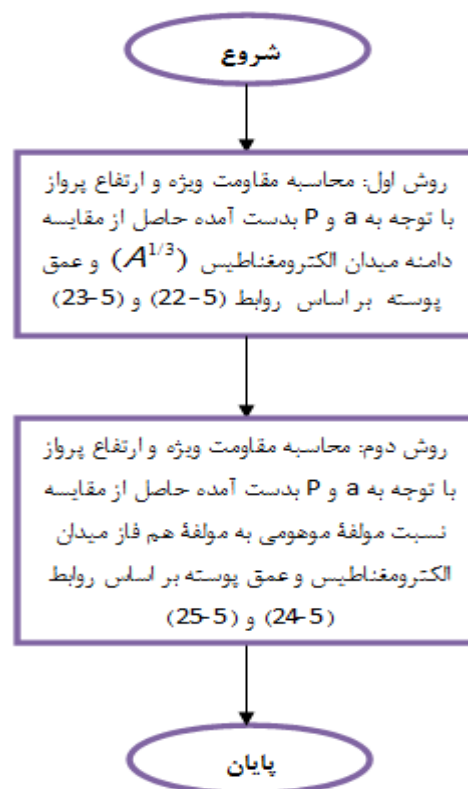
در این حالت لازم است که برای مقادیر مختلفی که در جدول تفسیر برای مقادیر مختلف ارتفاع پرند و مقاومت ویژه های مختلف که نشانه عمق پوسته های مختلف است، مقادیر حقیقی و موهومی را به دست آوریم. نگاه مقادیر عمق پوسته و نسبت مولفه های حقیقی و موهومی مندرج در جدول تفسیر را در جدولی جداگانه تنظیم نماییم. سپس بر اساس مقایسه میان نسبت مولفه حقیقی به مولفه موهومی میدان

الکترومغناطیس برداشت شده و نسبت مولفه حقیقی به مولفه موهومی مقادیر مختلف میدان الکترومغناطیس محاسبه شده در جدول تفسیر، بهترین برازش میان آنها را به دست آوریم. آنگاه مقدار مناسب به دست آمده برای عمق پوسته را از روی جدول می‌خوانیم. بر اساس مقدار به دست آمده عمق پوسته می‌توانیم مقادیر مناسب  $a$  و  $P$  را بخوانیم و بر اساس روابط (۲۴-۵) و (۲۵-۵) مقادیر مقاومت ویژه و عمق ظاهری را به دست آوریم.

$$\rho_a = \frac{\omega \mu_0}{P^2} \quad (24-5)$$

$$h = a \times r \quad (25-5)$$

در شکل (۱۳-۵) فلوچارت روش دوم بیانگر استفاده از این روش برای معکوس‌سازی تقریبی می‌باشد. البته مقاومت ویژه به دست آمده در حالتی که زمین همگن است بیانگر مقاومت ویژه حقیقی زمین است. این روش نیز در صورتی که زمین ما حالت لایه لایه داشته باشد جواب‌های دور از انتظار خواهد داشت.



شکل (۱۳-۵): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش عمق پوسته و نسبت مولفه حقیقی به مولفه

موهومی

## ج- روش عمق پوسته-دامنه میدان الکترومغناطیس - نسبت فاز

همان گونه که در فصل قبل بیان کردیم، این روش اگر چه از روش های قدیمی محاسبه عمق ظاهری می باشد، اما هنوز کاربرد خود را در معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوایی دارد. از این رو لازم است که مدل سازی فوق نیز مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس با توجه به الگوریتم ارائه شده در شکل زیر مراحل زیر را جهت معکوس‌سازی تقریبی پیش رو بگیریم:

در ابتدا لازم است تا برای هر یک از مقادیر مقاومت ویژه و ارتفاع از سطح زمین در جدول تفسیر پارامتر عمق پوسته محاسبه شود. آنگاه با توجه به مقادیر به دست آمده از انتگرال ماندری برای هر مقاومت ویژه و نسبت ارتفاع پرنده به فاصله سیم‌پیچ ها، مقدار دامنه میدان الکترومغناطیس تعیین گردد. این دامنه گاهی به صورت  $A^{\frac{1}{3}}$  نیز در مقالات نشان داده می شود. سپس لازم است مقدار نسبت مولفه همفاز به مولفه ناهمفاز برای هر از مقادیر به دست آمده از انتگرال ماندری محاسبه گردد.

تمامی آنچه که در بالا بیان شده است باید به صورت یک جدول تفسیر جداگانه که در مواقع لزوم از آن استفاده شود، ذخیره گردد. حال بر اساس مقدار نسبت مولفه همفاز به مولفه ناهمفاز میدان الکترومغناطیسی برداشت شده و مقدار نسبت مولفه همفاز به مولفه ناهمفاز در جدول تفسیر بهترین برازش را برای آنها به دست می آوریم. از این طریق می توانیم مقدار  $P$  را از جدول استخراج کنیم. بر این اساس می توانیم مقدار مقاومت ویژه ظاهری را با توجه به رابطه (۲۶-۵) محاسبه کنیم.

سپس لازم است بهترین برازش میان دامنه میدان الکترومغناطیس برداشت شده و دامنه میدان الکترومغناطیس حاصل از جدول تفسیر را به دست آوریم. بر این اساس می توانیم مقدار ارتفاع ظاهری را از رابطه (۲۷-۵) به دست آوریم.

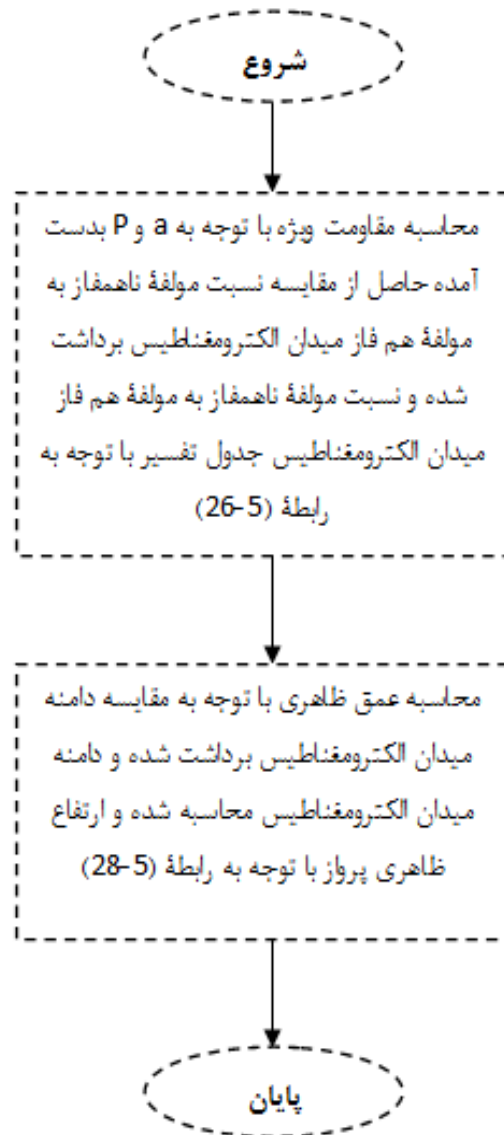
$$\rho_a = \frac{\omega \mu_0}{P^2} \quad (26-5)$$

$$D_a = \left( \frac{A^{\frac{1}{3}}}{A^3} \right) \times a \times r \quad (27-5)$$

با به دست آمدن مقدار ارتفاع ظاهری و ارتفاع پرنده از سطح زمین می توانیم عمق ظاهری را با توجه به رابطه (۲۸-۵) عمق نفوذ را به دست آوریم. فلوجارت این روش در شکل (۱۴-۵) را نشان داده شده است.

$$d_a = D_a - h \quad (28-5)$$





شکل (۵-۱۴): فلوچارت الگوریتم محاسبه مقاومت ویژه و عمق به روش‌های نیم فضای همگن

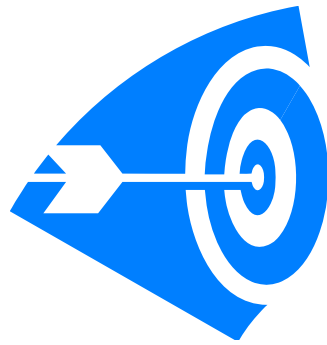
#### ۵-۴-۹- مراحل حلقه ای

با توجه به این که ممکن است، معکوس‌سازی بر اساس چندین فرکانس و چندین ایستگاه انجام شده باشد از این رو در این مراحل دو شرط اساسی صورت می‌گیرد:

۱. انجام عملیات معکوس‌سازی برای تمام فرکانس‌ها
۲. انجام عملیات معکوس‌سازی برای تمام ایستگاه‌ها

پس از آن که عملیات معکوس‌سازی برای تمامی فرکانس‌ها و ایستگاه‌ها انجام گردید، نتیجه نهایی به دست آمده و برنامه به پایان می‌رسد. در فصل ششم به بیان نتایج حاصل میان مدل‌های مختلف معکوس‌سازی شده در این پایان‌نامه که توسط نرم‌افزار نگارش یافته صورت گرفته است، خواهیم پرداخت.

# فصل هشتم



مقایسه نتایج میان روش‌های مختلف معکوس سازی،

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

## ۶-۱- مقدمه

در فصل قبل به بیان روش های معکوس سازی الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس پرداختیم. همان گونه که بیان شد، در این فصل به بیان نتایج مدل سازی های انجام شده می پردازیم. در ابتدا به بیان نتایج با دیگر مقالات ارائه شده می پردازیم و در ادامه به بیان پیشنهادات در زمینه بهتر نمودن برنامه معکوس سازی می پردازیم.

## ۶-۲- نتایج حاصل از مدل سازی تقریبی معکوس الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس

## ۶-۲-۱- مدل ۱

در ابتدا به مقایسه نتایج حاصل از معکوس سازی ماندری که در سال ۱۹۸۴ ارائه شده است می پردازیم. در این مثال یک زمین یک لایه با مقاومت ویژه ۲۲.۷۴ اهم متر و ضخامت بینهایت در نظر گرفته می شود، فرکانس برداشت با سیم پیچ های هم محور قائم ( $HCP$ )، ۹۰۰ هرتز و فاصله سیم پیچ ها ۸ متر و ارتفاع پرنده از سطح زمین ۳۲ متر است.

در شکل (۶-۱) نتایج حاصل از معکوس سازی تقریبی و نتیجه ارائه شده توسط ماندری را مشاهده می کنید. همان گونه که از این شکل ملاحظه می گردد، تمامی الگوریتم ها مقاومت ویژه این زمین را به طور صحیح تخمین زده اند. از طرفی مقدار تعیین شده برای عمق ظاهری در مدل "عمق پوسته-دامنه میدان الکترومغناطیس- نسبت مولفه ها ( $H-AED$ )" مقدار بسیار جزئی و منفی نمایش داده شده است. این مقدار منفی بیانگر این حقیقت است که لایه فوق نسبت به لایه هوا مقاومت ویژه کمتری دارد. از آنجایی که زمین همگن است، دو معکوس سازی با روش نیم فضای همگن (دو روش پایانی) به خوبی مقاومت ویژه و ارتفاع پرنده را تشخیص داده اند.

## ۶-۲-۲- مدل ۲

در این مدل نیز به مقایسه نتایج حاصل از معکوس سازی ماندری که در سال ۱۹۸۴ ارائه شده است، می پردازیم. در این مثال یک زمین دو لایه که لایه اول با مقاومت ویژه ۱۴.۳۵ اهم متر و ضخامت ۲۰ متر و لایه دوم با مقاومت ویژه صفر (بسیار رسانا) و ضخامت بی نهایت در نظر گرفته می شود، فرکانس برداشت توسط سیم پیچ های هم محور قائم ( $HCP$ )، ۳۶۰۰ هرتز و فاصله سیم پیچ ها ۸ متر و ارتفاع پرنده از سطح زمین ۴۰ متر است. همان گونه که مشخص است، تقریباً تمامی الگوریتم ها از به دست آوردن لایه اول باز

مانده‌اند، با این همه در نتایج به دست آمده الگوریتمی که از عمق پوسته و دامنه میدان الکترومغناطیس برای معکوس‌سازی استفاده می‌کند، (آخرین پاسخ)، جواب بهتری را ارائه داده است.

| Frequency (HZ)                     | Real (ppm)  | Quadrature (ppm)    |
|------------------------------------|-------------|---------------------|
| 900                                | 140         | 289                 |
| Algorithm Information              |             |                     |
|                                    | Depth (m)   | Resistivity (ohm-m) |
| Mundry                             | H-Mundry    | R-Mundry            |
|                                    | 33.5        | 23.6                |
| Sengpiel                           | D-Sengpiel  | R-Sengpiel          |
|                                    | 37.90786679 | 22.73956854         |
| Simeon                             | D-Simeon    | R-Simeon            |
|                                    | 79.6        | 22.73956854         |
| Meng                               | H-Meng      | R-Meng              |
|                                    | 45.78802154 | 23.24043395         |
| Reformed Sengpiel                  | HC-Sengpiel | RC-Sengpiel         |
|                                    | 37.90786679 | 22.73956854         |
| Reformed Simeon                    | HC-Simeon   | RC-Simeon           |
|                                    | 79.6        | 22.73956854         |
| Differential                       | D-Diff      | R-Diff              |
|                                    | 98.32843018 | 22.73956871         |
| Skin depth- Amplitude- Phase ratio | da-AED      | R-AED               |
|                                    | -0.4        | 22.73956854         |
| Phase ratio- Amplitude             | HEA-Bird    | R-EA                |
|                                    | 31.6        | 22.73956854         |
| Skin Deph- Amplitude               | HSA-Bird    | R-SA                |
|                                    | 29.4        | 22.73956854         |

شکل (۶-۱): نتایج معکوس‌سازی مدل اول ماندری (۱۹۸۴)

| Frequency (HZ)                     | Real (ppm)  | Quadrature (ppm)    |
|------------------------------------|-------------|---------------------|
| 3600                               | 624         | 171                 |
| Algorithm                          |             |                     |
| Information                        | Depth (m)   | Resistivity (ohm-m) |
| Mundry                             | H-Mundry    | R-Mundry            |
|                                    | 12.1        | 1.6                 |
| Sengpiel                           | D-Sengpiel  | R-Sengpiel          |
|                                    | 15.87       | 5.98                |
| Simeon                             | D-Simeon    | R-Simeon            |
|                                    | 25.31       | 5.98                |
| Meng                               | H-Meng      | R-Meng              |
|                                    | 14.42       | 3.24                |
| Reformed Sengpiel                  | HC-Sengpiel | RC-Sengpiel         |
|                                    | 19.86       | 3.94                |
| Reformed Simeon                    | HC-Simeon   | RC-Simeon           |
|                                    | 24.66       | 3.94                |
| Differential                       | D-Diff      | R-Diff              |
|                                    | 31.6        | 3.94                |
| Skin depth- Amplitude- Phase ratio | da-AED      | R-AED               |
|                                    | 4.8         | 1.35                |
| Phase ratio- Amplitude             | HEA-Bird    | R-EA                |
|                                    | 48          | 1.35                |
| Skin Deph- Amplitude               | HSA-Bird    | R-SA                |
|                                    | 44.8        | 18.79               |

شکل (۶-۲): نتایج معکوس‌سازی مدل دوم ماندری (۱۹۸۴)

### ۶-۲-۳- مقایسه نتایج با نتایج معکوس‌سازی در BGR

مدل‌هایی که در این بخش آورده شده است، بر اساس مکاتبات انجام شده با دکتر سیمون در *BGR*، جهت انجام مقایسه میان نتایج حاصل از برنامه طراحی شده و نتایج حاصل از نرم‌افزارهای موجود در آن مرکز تهیه و آورده شده است.

## (۱) مدل زمین ۲ لایه (روباره رسانا)

بر این اساس یک زمین ۲ لایه با مشخصات جدول (۱-۶) در نظر گرفته می‌شود:

جدول (۱-۶): مشخصات زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس‌سازی

| لایه | مقاومت ویژه | ضخامت |
|------|-------------|-------|
| ۱    | ۲۰          | ۴۰    |
| ۲    | ۵۰۰         | ∞     |

ارتفاع پرنده ۳۰ متر و فرکانس‌های برداشت شامل ۴ فرکانس ۵۶۰۰۰، ۱۸۰۰، ۹۰۰ و ۴۵۰ هرتز، فاصله سیم‌پیچ‌ها ۸ متر و شکل قرارگیری سیم‌پیچ‌ها به صورت هم محور قائم ( $HCP$ ) می‌باشند. در شکل (۳-۶) نتایج مربوط به معکوس‌سازی‌های تقریبی آورده شده است.

همان گونه که در شکل (۳-۶) مشخص است، روند افزایشی که در مدل اولیه وجود دارد، در بیشتر مدل‌سازی‌های معکوس نیز مشاهده می‌گردد. باید توجه داشت که، الگوریتم‌های همگن جواب مدل اولیه را در لایه اول به خوبی نمایش می‌دهند.

از طرفی در حالتی که از معکوس‌سازی همگن "عمق پوسته و نسبت فاز" استفاده می‌کنیم، جواب‌های به دست آمده بسیار به جواب‌های الگوریتم‌های پیشرفته نزدیک می‌گردد. از طرفی این الگوریتم در نمایش ارتفاع پرواز با اختلاف ۸ متر نیز به خوبی مسأله عدم تغییر ارتفاع پرواز را نشان می‌دهد.

جواب مدل سیمون و سنگپیل معمولی بیشترین تطابق را با جواب‌های به دست آمده از BGR را دارا هستند. از طرفی پاسخ الگوریتم‌های پیشرفته دیگر نیز جواب خوبی را به نمایش گذاشته‌اند.

از طرفی در روش دیفرانسیلی یک ناهماهنگی و عدم روند در پاسخ‌ها به چشم می‌خورد. علت این امر می‌تواند به کم بودن تعداد فرکانس‌های مورد استفاده و همچنین عدم تعیین مقدار صحیح در نتایج جستجو جهت یافتن عمق موثر نفوذ باشد.

البته همان گونه که می‌دانیم عدم تعیین دقیق عمق موثر نفوذ در روش دیفرانسیلی سبب ایجاد پاسخی نامطلوب می‌گردد. از این رو می‌توان چنین بیان نمود، که به دلیل عدم دقت کافی در تهیه نمودارهای مورد نیاز جهت یافتن عمق موثر نفوذ این ناهماهنگی ایجاد شده است.

| Frequency (HZ)                            | Real (ppm)         | Quadrature (ppm)    |
|---|--------------------|---------------------|
| 56000.00                                  | 2647.14            | 1064.67             |
| 1800.00                                   | 289.52             | 562.20              |
| 900.00                                    | 116.99             | 350.09              |
| 450.00                                    | 40.78              | 197.92              |
| <b>Algorithm Information</b>              |                    |                     |
|   | Depth (m)          | Resistivity (ohm-m) |
| <b>BGR</b>                                | <b>H-BGR</b>       | <b>R-BGR</b>        |
|   | 4.73               | 19.83               |
|   | 27.15              | 26.53               |
|   | 42.12              | 33.20               |
| <b>Sengpiel</b>                           | <b>D-Sengpiel</b>  | <b>R-Sengpiel</b>   |
|   | 4.94               | 19.58               |
|   | 30.00              | 23.20               |
|   | 41.17              | 28.07               |
| <b>Simeon</b>                             | <b>D-Simeon</b>    | <b>R-Simeon</b>     |
|   | 9.41               | 19.58               |
|   | 57.14              | 23.20               |
|   | 89.69              | 28.07               |
| <b>Meng</b>                               | <b>H-Meng</b>      | <b>R-Meng</b>       |
|   | 19.58              | 5.43                |
|   | 23.20              | 32.99               |
|   | 21.73              | 46.99               |
| <b>Reformed Sengpiel</b>                  | <b>HC-Sengpiel</b> | <b>RC-Sengpiel</b>  |
|   | 4.94               | 19.58               |
|   | 30.00              | 23.20               |
|   | 39.32              | 22.74               |
| <b>Reformed Simeon</b>                    | <b>HC-Simeon</b>   | <b>RC-Simeon</b>    |
|   | 9.41               | 19.58               |
|   | 57.14              | 23.20               |
|   | 80.00              | 22.74               |
| <b>Differential</b>                       | <b>D-Diff</b>      | <b>R-Diff</b>       |
|   | 15.33              | 19.58               |
|   | 41.05              | 24.56               |
|   | 82.55              | 21.82               |
| <b>Skin depth- Amplitude- Phase ratio</b> | <b>da-AED</b>      | <b>R-AED</b>        |
|   | 6.40               | 31.52               |
|   | 3.20               | 56.15               |
|   | 5.60               | 90.96               |
| <b>Phase ratio- Amplitude</b>             | <b>HEA-Bird</b>    | <b>R-EA</b>         |
|   | 38.00              | 31.52               |
|   | 38.00              | 56.15               |
|   | 38.00              | 90.96               |
| <b>Skin Deph- Amplitude</b>               | <b>HSA-Bird</b>    | <b>R-SA</b>         |
|   | 36.40              | 30.60               |
|   | 34.80              | 26.91               |
|   | 30.80              | 22.74               |
|   | 34.00              | 31.58               |

شکل (۳-۶) : نتایج بدست آمده حاصل از معکوس‌سازی زمین دو لایه با مشخصات جدول (۱-۶)



## ۲) مدل زمین ۲ لایه (روباره مقاوم)

بر این اساس یک زمین ۲ لایه با مشخصات جدول (۲-۶) در نظر گرفته می‌شود:

جدول (۲-۶): مشخصات زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس‌سازی

| لایه | مقاومت ویژه | ضخامت |
|------|-------------|-------|
| ۱    | ۱۰۰         | ۴۰    |
| ۲    | ۲۰          | ∞     |

ارتفاع پرنده ۳۰ متر و فرکانس‌های برداشت شامل ۴ فرکانس ۵۶۰۰۰، ۱۸۰۰۰، ۹۰۰ و ۴۵۰ هرتز، فاصله سیم‌پیچ‌ها ۸ متر و شکل قرارگیری سیم‌پیچ‌ها به صورت هم محور قائم (*HCP*) می‌باشند. در شکل (۴-۶) نتایج مربوط به معکوس‌سازی‌های تقریبی این مدل نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است تقریباً اکثر مدل‌های معکوس انجام شده جواب خوبی ارائه داده‌اند. اگر اندکی بیشتر دقت کنیم، به نظر می‌رسد که پاسخ مربوط به مدل سنگپیل بهبود یافته و سیمون بهبود یافته به جواب‌های ارائه شده توسط BGR نزدیک‌تر می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم ارائه شده توسط سیمون از لحاظ عمق نفوذ بسیار بهتر از روش سنگپیل عمل می‌کند. لازم به ذکر است که در روش منگ میز جواب‌های ارائه شده از روند خوبی برخوردار هستند و عمق را نسبتاً خوب تخمین زده‌اند. دو الگوریتم نیم فضای همگن هم روند را به درستی تشخیص داده‌اند اما در اندازه‌گیری ارتفاع پرواز اختلاف ۸ متری را ثبت نموده‌اند.

این اختلاف از آنجا ناشی می‌شود که لایه رویه مقاوم‌تر از لایه زیرین می‌باشد. از این رو این لایه با لایه هوا تقریباً یکسان در نظر گرفته شده و ارتفاع پرواز به درستی مشخص نمی‌شود. در روش دیفرانسیلی باز هم در تعیین مقدار مقاومت ویژه لایه پایین دچار اشتباه می‌شویم.

| Frequency (HZ)                            | Real (ppm)         | Quadrature (ppm)           |
|---|--------------------|----------------------------|
| 56000.00                                  | 1336.00            | 1068.00                    |
| 1800.00                                   | 130.40             | 197.40                     |
| 900.00                                    | 76.15              | 132.30                     |
| 450.00                                    | 41.31              | 85.62                      |
| <b>Algorithm Information</b>              |                    |                            |
|   | <b>Depth (m)</b>   | <b>Resistivity (ohm-m)</b> |
| <b>BGR</b>                                | <b>H-BGR</b>       | <b>R-BGR</b>               |
|   | 10.62              | 101.58                     |
|   | 48.28              | 35.51                      |
|   | 61.14              | 29.18                      |
|   | 78.11              | 25.65                      |
| <b>Sengpiel</b>                           | <b>D-Sengpiel</b>  | <b>R-Sengpiel</b>          |
|   | 13.07              | 61.41                      |
|   | 44.47              | 45.48                      |
|   | 53.99              | 35.53                      |
|   | 60.65              | 31.58                      |
| <b>Simeon</b>                             | <b>D-Simeon</b>    | <b>R-Simeon</b>            |
|   | 20.67              | 61.41                      |
|   | 84.80              | 45.48                      |
|   | 107.20             | 35.53                      |
|   | 139.73             | 31.58                      |
| <b>Meng</b>                               | <b>H-Meng</b>      | <b>R-Meng</b>              |
|   | 16.15              | 78.89                      |
|   | 50.99              | 35.17                      |
|   | 73.18              | 31.97                      |
|   | 98.78              | 32.54                      |
| <b>Reformed Sengpiel</b>                  | <b>HC-Sengpiel</b> | <b>RC-Sengpiel</b>         |
|   | 8.00               | 97.99                      |
|   | 51.32              | 45.48                      |
|   | 55.79              | 46.41                      |
|   | 60.65              | 45.48                      |
| <b>Reformed Simeon</b>                    | <b>HC-Simeon</b>   | <b>RC-Simeon</b>           |
|   | 21.05              | 97.99                      |
|   | 88.00              | 45.48                      |
|   | 122.29             | 46.41                      |
|   | 166.40             | 45.48                      |
| <b>Differential</b>                       | <b>D-Diff</b>      | <b>R-Diff</b>              |
|   | 33.77              | 97.99                      |
|   | 66.05              | 35.52                      |
|   | 107.24             | 52.30                      |
|   | 135.98             | 42.96                      |
| <b>Skin depth- Amplitude- Phase ratio</b> | <b>da-AED</b>      | <b>R-AED</b>               |
|   | 3.20               | 157.21                     |
|   | 8.00               | 26.91                      |
|   | 4.80               | 18.79                      |
|   | 3.20               | 17.77                      |
| <b>Phase ratio- Amplitude</b>             | <b>HEA-Bird</b>    | <b>R-EA</b>                |
|   | 38.00              | 157.21                     |
|   | 38.00              | 26.91                      |
|   | 38.00              | 18.79                      |
|   | 38.00              | 17.77                      |
| <b>Skin Deph- Amplitude</b>               | <b>HSA-Bird</b>    | <b>R-SA</b>                |
|   | 33.20              | 122.40                     |
|   | 38.00              | 126.33                     |
|   | 34.80              | 90.96                      |
|   | 33.20              | 71.06                      |

شکل (۴-۶): نتایج معکوس‌سازی زمین دو لایه جدول (۲-۶)

## ۳) مدل زمین ۴ لایه

بر این اساس یک زمین ۴ لایه با مشخصات جدول (۳-۶) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۳-۶): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس‌سازی

| لایه | مقاومت ویژه | ضخامت |
|------|-------------|-------|
| ۱    | ۵۰          | ۱۰    |
| ۲    | ۱۰۰۰        | ۵۰    |
| ۳    | ۱           | ۱     |
| ۴    | ۱۰۰۰        | ∞     |

ارتفاع پرنده ۳۰ متر و فرکانس‌های برداشت شامل ۴ فرکانس ۹۰۰، ۱۸۰۰، ۵۶۰۰۰ و ۴۵۰ هرتز، فاصله سیم‌پیچ‌ها ۸ متر و شکل قرارگیری سیم‌پیچ‌ها به صورت هم محور قائم ( $HCP$ ) می‌باشند. در شکل (۵-۶) نتایج مربوط به معکوس‌سازی‌های تقریبی این مدل نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل (۵-۶) مشخص است، مدل ارائه شده توسط BGR تنها توانسته است روند کاهش را نشان دهد. درحقیقت تنها دو لایه را تشخیص داده شده است. البته به دلیل ضخامت بسیار کم لایه سوم تشخیص این لایه بسیار مشکل است و اکثر ابزارهای معکوس‌سازی از انجام آن باز می‌مانند. اما در معکوس‌سازی‌های انجام شده توسط نرم افزار تهیه شده، ملاحظه می‌گردد که لایه اول و لایه دوم و در پاره‌ای موارد لایه سوم نیز در معکوس‌سازی‌ها به خوبی مشخص شده است. در مدل سنگپیل با کاهش فرکانس ملاحظه می‌گردد که یک روند بازگشتی به لایه بالا اتفاق می‌افتد و به جای رفتن به عمق بیشتر شاهد کاهش عمق نفوذ هستیم.

در این روش ما به مشخص نمودن سه لایه در سه عمق مختلف می‌رسیم. در پاسخ روش سیمون دوباره سه لایه مشخص شده است، اما در این پاسخ مشکل عمق دیگر ملاحظه نمی‌گردد. به عبارت دیگر همان‌طور که در فصل‌های قبل گفتیم، روش سنگپیل با افزایش عمق دچار اشکال می‌گردد. از این رو معکوس‌سازی به روش سیمون از لحاظ نتایج از روش سنگپیل بهتر است.

| Frequency (HZ)                     | Real (ppm)  | Quadrature (ppm)    |
|------------------------------------|-------------|---------------------|
| 56000.00                           | 1741.03     | 1428.80             |
| 1800.00                            | 75.54       | 156.55              |
| 900.00                             | 55.00       | 98.33               |
| 450.00                             | 33.66       | 66.34               |
| Algorithm Information              | Depth (m)   | Resistivity (ohm-m) |
| BGR                                | H-BGR       | R-BGR               |
|                                    | 6.99        | 88.48               |
|                                    | 58.38       | 68.65               |
|                                    | 70.97       | 37.28               |
| Sengpiel                           | D-Sengpiel  | R-Sengpiel          |
|                                    | 9.96        | 35.65               |
|                                    | 55.19       | 71.06               |
|                                    | 59.00       | 46.41               |
| Simeon                             | D-Simeon    | R-Simeon            |
|                                    | 15.90       | 35.65               |
|                                    | 108.00      | 71.06               |
|                                    | 122.29      | 46.41               |
| Meng                               | H-Meng      | R-Meng              |
|                                    | 160.00      | 45.48               |
|                                    | 12.82       | 51.52               |
|                                    | 65.74       | 47.19               |
| Reformed Sengpiel                  | HC-Sengpiel | RC-Sengpiel         |
|                                    | 84.98       | 41.94               |
|                                    | 115.47      | 71.06               |
|                                    | 6.11        | 61.41               |
| Reformed Simeon                    | HC-Simeon   | RC-Simeon           |
|                                    | 55.19       | 71.06               |
|                                    | 59.00       | 63.17               |
|                                    | 64.23       | 71.06               |
| Differential                       | D-Diff      | R-Diff              |
|                                    | 16.67       | 61.41               |
|                                    | 108.00      | 71.06               |
|                                    | 141.33      | 63.17               |
| Skin depth- Amplitude- Phase ratio | da-AED      | R-AED               |
|                                    | 204.00      | 71.06               |
|                                    | 26.37       | 61.41               |
|                                    | 68.19       | 74.77               |
| Phase ratio- Amplitude             | HEA-Bird    | R-EA                |
|                                    | 121.36      | 41.06               |
|                                    | 164.00      | 96.70               |
|                                    | 8.00        | 168.24              |
| Skin Deph- Amplitude               | HSA-Bird    | R-SA                |
|                                    | 1.60        | 71.06               |
|                                    | 6.40        | 22.74               |
|                                    | 8.00        | 14.04               |
|                                    |             |                     |
|                                    | 38.00       | 168.24              |
|                                    | 38.00       | 71.06               |
|                                    | 38.00       | 22.74               |
|                                    |             |                     |
|                                    | 38.00       | 14.04               |
|                                    | 33.20       | 58.93               |
|                                    | 31.60       | 126.33              |
|                                    |             |                     |
|                                    | 36.40       | 142.12              |
|                                    | 38.00       | 126.33              |

شکل (۵-۶) : نتایج بدست آمده حاصل از معکوس‌سازی زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۳-۶)

در پاسخ روش مگ سه لایه مشخص شده است، اما در این پاسخ هم مشکل عمق دیگر ملاحظه نمی‌گردد. این روش نسبت به روش سیمون عمق کمتری را نشان می‌دهد از این رو معکوس‌سازی به روش سیمون از لحاظ نتایج از روش مگ برای داده‌های الکترومغناطیس هوایی هلی کوپتری بهتر می‌باشد.

در روش‌های بهبود یافته سنگپیل و سیمون جواب‌های به دست آمده بسیار جالب است. هر دو روش چهار لایه را تشخیص داده‌اند اما روش سیمون عمق بالاتری را نسبت به روش سنگپیل نشان می‌دهد. در حقیقت روش سیمون بهبود یافته بهترین جواب را برای مدل چهار لایه ارائه می‌دهد.

از طرفی مسأله عمق در روش بهبود یافته سنگپیل نسبت به روش متداول سنگپیل برطرف شده است. در پاسخ روش دیفرانسیلی جواب‌های به دست آمده در خور توجه می‌باشد. در این روش چهار لایه به خوبی مشخص شده‌اند، اما روش سیمون عمق بالاتری را باز هم نشان می‌دهد.

پاسخ‌های مربوط به دو روش نیم فضای همگن همان گونه که انتظار داشتیم مقدار مقاومت ویژه لایه اول را دور از انتظار نشان داده‌اند. اگر چه روند کاهشی BGR در این مدل‌ها نیز نمایان شده است. در پاسخ مربوط به مدل AED ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت ویژه لایه اول را دور از انتظار نشان داده‌اند. اگر چه روند کاهشی BGR در این مدل نیز نمایان شده است.

#### ۴) مدل دوم زمین ۴ لایه

بر این اساس یک زمین ۴ لایه با مشخصات جدول (۴-۶) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۴-۶): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس‌سازی

| لایه | مقاومت ویژه | ضخامت |
|------|-------------|-------|
| ۱    | ۵۰          | ۱۰    |
| ۲    | ۱۰۰۰        | ۱۹۰   |
| ۳    | ۱           | ۱     |
| ۴    | ۱۰۰۰        | ∞     |

ارتفاع پرنده ۳۰ متر و فرکانس‌های برداشت شامل ۴ فرکانس ۵۶۰۰۰، ۱۸۰۰، ۹۰۰ و ۴۵۰ هرتز، فاصله سیم‌پیچ‌ها ۸ متر و شکل قرارگیری سیم‌پیچ‌ها به صورت هم محور قائم (HCP) می‌باشند. در شکل (۶-۶) نتایج مربوط به معکوس‌سازی‌های تقریبی این مدل نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل (۶-۶) مشخص است، مدل ارائه شده توسط BGR توانسته است سه لایه را به خوبی نشان دهد. در معکوس‌سازی‌های انجام شده توسط نرم افزار تهیه شده، ملاحظه می‌گردد این روند نیز در معکوس‌سازی‌ها به خوبی مشخص شده است.

در مدل سنگپیل با کاهش فرکانس ملاحظه می‌گردد که یک روند بازگشتی به لایه بالا اتفاق می‌افتد و به جای رفتن به عمق بیشتر شاهد کاهش عمق نفوذ هستیم. در این روش ما به مشخص نمودن سه لایه در سه عمق مختلف می‌رسیم.

در پاسخ بدست آمده حاصل از روش سیمون دوباره سه لایه مشخص شده است، اما در این پاسخ مشکل عمق دیگر ملاحظه نمی‌گردد. به عبارت دیگر همانند مدل قبل روش سنگپیل با افزایش عمق دچار اشکال می‌گردد. از این رو معکوس‌سازی به روش سیمون از لحاظ نتایج از روش سنگپیل بهتر است.

در پاسخ روش منگ دوباره سه لایه مشخص شده است، اما در این پاسخ هم مشکل عمق دیگر ملاحظه نمی‌گردد. این روش نسبت به روش سیمون مقاومت ویژه لایه اول را بسیار بهتر از دو روش قبل نشان می‌دهد. در روش‌های بهبود یافته سنگپیل و سیمون جواب‌های به دست آمده بسیار جالب است. هر دو روش سه لایه را تشخیص داده‌اند اما روش سیمون عمق بالاتری را نسبت به روش سنگپیل نشان می‌دهد.

از طرفی مقدار مقاومت ویژه لایه اول بسیار خوب تشخیص داده شده است و مسأله عمق در روش بهبود یافته سنگپیل نسبت به روش متداول سنگپیل برطرف شده است. در پاسخ روش دیفرانسیلی دو لایه به خوبی مشخص شده‌اند، علت این امر این است که تعداد فرکانس‌های مورد استفاده برای این روش کم می‌باشد. از این رو اگر چه عمق افزایش یافته است اما تعداد لایه‌ها تغییری نکرده است.

| Frequency (HZ)                     | Real (ppm)          | Quadrature (ppm) |
|------------------------------------|---------------------|------------------|
| 56000.00                           | 1745.12             | 1424.66          |
| 1800.00                            | 24.40               | 156.11           |
| 900.00                             | 13.44               | 81.21            |
| 450.00                             | 8.67                | 43.75            |
| Algorithm Information              |                     |                  |
| Depth (m)                          | Resistivity (ohm-m) |                  |
| BGR                                | H-BGR               | R-BGR            |
|                                    | 6.98                | 87.93            |
|                                    | 83.83               | 259.64           |
|                                    | 109.29              | 190.01           |
|                                    | 133.05              | 119.91           |
| Sengpiel                           | D-Sengpiel          | R-Sengpiel       |
|                                    | 10.54               | 20.05            |
|                                    | 64.11               | 181.92           |
|                                    | 70.07               | 142.12           |
|                                    | 64.81               | 126.33           |
| Simeon                             | D-Simeon            | R-Simeon         |
|                                    | 15.12               | 20.05            |
|                                    | 165.60              | 181.92           |
|                                    | 205.60              | 142.12           |
|                                    | 266.67              | 126.33           |
| Meng                               | H-Meng              | R-Meng           |
|                                    | 15.03               | 43.81            |
|                                    | 82.58               | 93.92            |
|                                    | 121.07              | 105.66           |
|                                    | 153.96              | 126.33           |
| Reformed Sengpiel                  | HC-Sengpiel         | RC-Sengpiel      |
|                                    | 4.16                | 58.93            |
|                                    | 49.31               | 126.33           |
|                                    | 54.33               | 142.12           |
|                                    | 69.86               | 126.33           |
| Reformed Simeon                    | HC-Simeon           | RC-Simeon        |
|                                    | 16.33               | 58.93            |
|                                    | 133.33              | 126.33           |
|                                    | 200.00              | 142.12           |
|                                    | 268.27              | 126.33           |
| Differential                       | D-Diff              | R-Diff           |
|                                    | 25.99               | 58.93            |
|                                    | 79.35               | 175.10           |
|                                    | 164.00              | 193.40           |
|                                    | 217.30              | 193.40           |
| Skin depth- Amplitude- Phase ratio | da-AED              | R-AED            |
|                                    | 5.60                | 147.23           |
|                                    | 0.80                | 1136.98          |
|                                    | 3.20                | 568.49           |
|                                    | 0.00                | 126.33           |
| Phase ratio- Amplitude             | HEA-Bird            | R-EA             |
|                                    | 35.60               | 147.23           |
|                                    | 35.60               | 1136.98          |
|                                    | 35.60               | 568.49           |
|                                    | 35.60               | 126.33           |
| Skin Deph- Amplitude               | HSA-Bird            | R-SA             |
|                                    | 33.20               | 58.93            |
|                                    | 30.00               | 126.33           |
|                                    | 30.80               | 142.12           |
|                                    | 30.00               | 126.33           |

شکل (۶-۶): نتایج بدست آمده حاصل از معکوس‌سازی زمین چهارلابه با مشخصات جدول (۴-۶)

در مورد پاسخ‌های مربوط به دو روش نیم فضای همگن هم می‌توان چنین گفت: در صورتی که از عمق پوسته برای معکوس‌سازی استفاده گردد، لایه اول بهتر مشخص می‌گردد و در صورتی که از نسبت فاز و عمق پوسته برای به دست آوردن مقاومت ویژه ظاهری بهره بگیریم، مقدار لایه دوم نسبت به لایه اول بهتر نمایان می‌گردد.

در پاسخ مربوط به مدل *AED* ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت ویژه لایه اول را دور از انتظار نشان داده‌اند اما لایه دوم وضعیت بهتری را دارا می‌باشد. از آنجایی که در این روش همانند یکی از روش‌های همگن از عمق پوسته و نسبت فاز برای یافتن مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌کنیم، از این رو غالباً مقاومت ویژه به دست آمده توسط این دو روش با هم برابر می‌گردد.

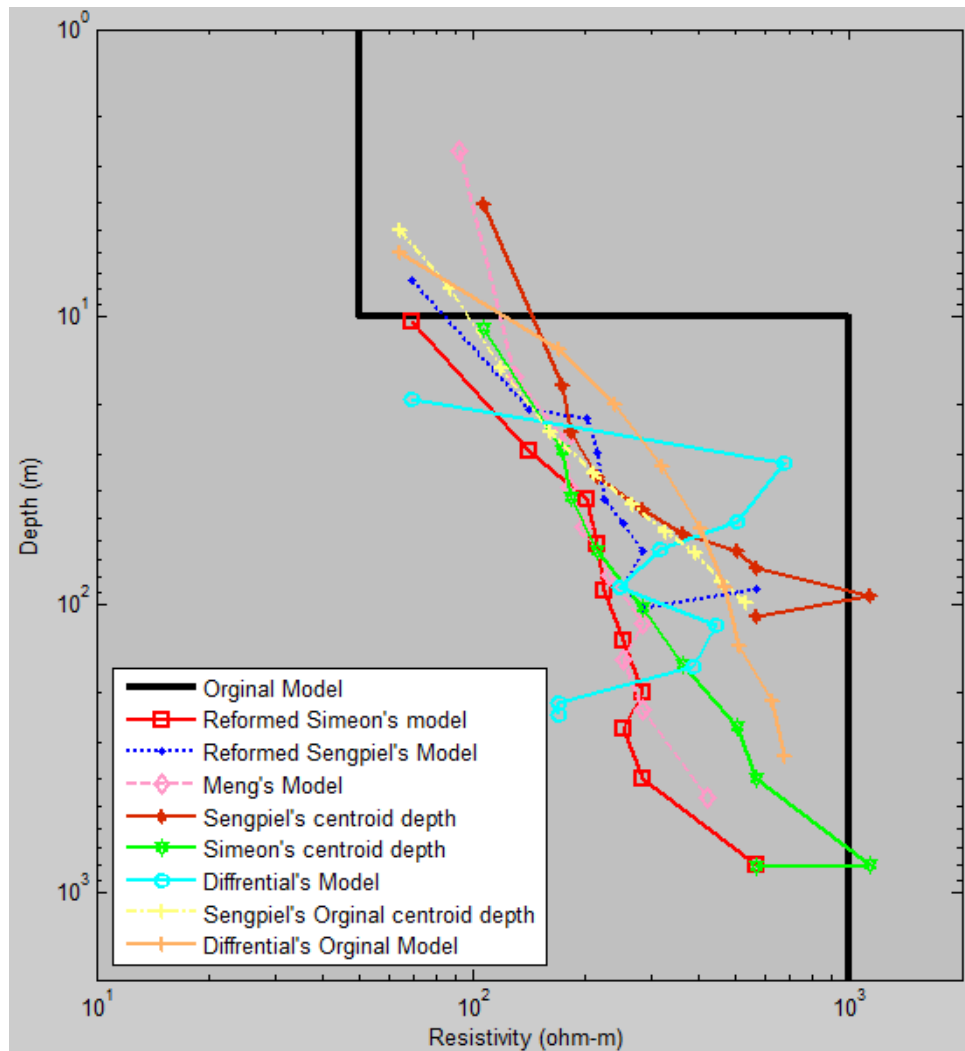
#### ۶-۲-۴-مدل زمین ۲ لایه

اما بر اساس مقایسه میان روش‌های ارائه شده در مقالات گوناگون مدلی را بر اساس مقاله ارائه شده توسط هوانگ و فریزر [Huang&Fraser,1997] در نظر گرفته شد.

از آنجایی که مقادیر ارائه شده بر اساس مدل‌سازی پیشروی هوانگ و فریزر است لذا در این مدل یک از هم گسیختگی میان نتایج دیده می‌شود. بنابراین می‌توان چنین بیان نمود که نتایج بدست آمده از روش پیشرو جهت مدل‌سازی اولیه و استفاده حاصل از نتایج بدست آمده در یافتن پاسخ معکوس، بسیار مهم است. لذا در صورتی که مقادیر بدست آمده در روش پیشرو به درستی تعیین نگردند، پاسخ‌های حاصل از معکوس‌سازی نیز قابل اطمینان و اعتماد نیستند.

همان گونه که از شکل (۶-۷-الف) مشخص است، روش بهبود یافته سیمون و روش منگ جواب‌های بسیار بهتری را ارائه داده‌اند. در روش دیفرانسیلی ملاحظه می‌گردد که نتایج بسیار نادرست می‌باشد. که علت این امر وابستگی شدید این روش به مدل اولیه می‌باشد، از این رو از آنجایی که مدل‌های اولیه درست تشخیص داده نشده‌اند، پاسخ روش دیفرانسیلی بسیار ناپایدار است.

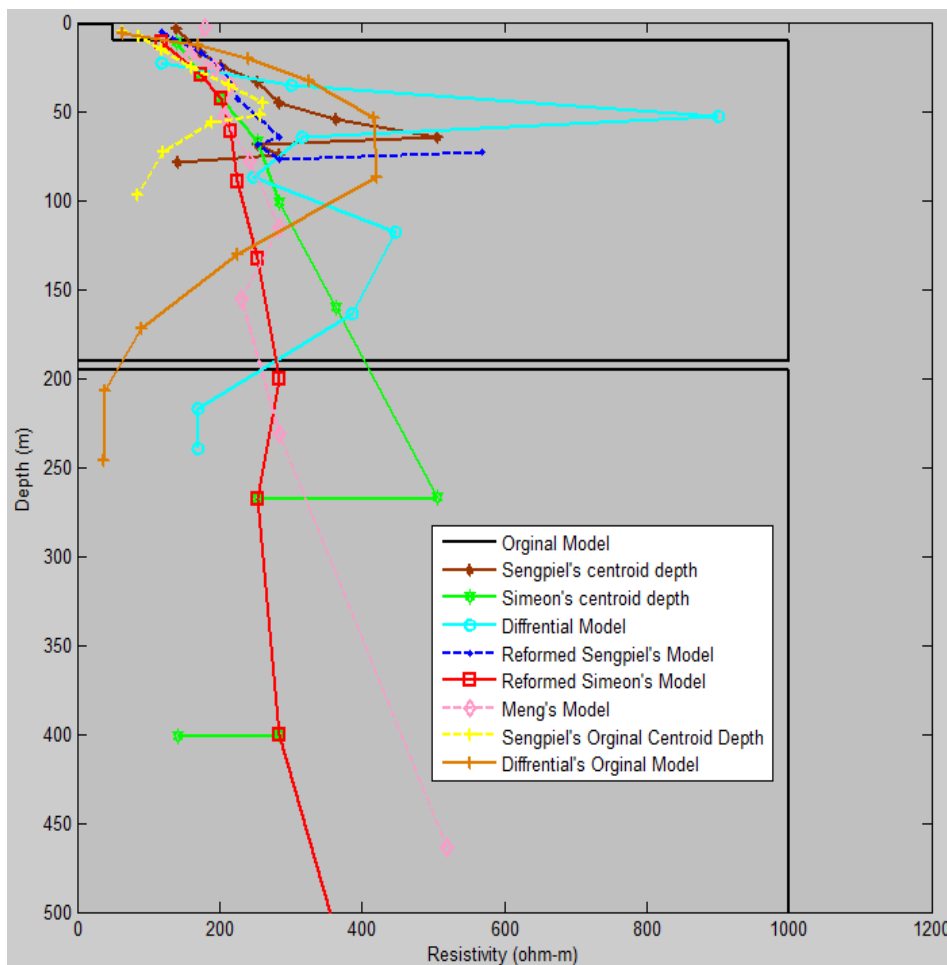




شکل (۶-۷-الف): پاسخ مدل اول ارائه شده توسط هوانگ و فریزر (۱۹۹۷)

#### ۶-۲-۵- مدل زمین ۴ لایه

یکی دیگر از مدل‌های مورد مقایسه مدل ارائه شده توسط هوانگ و فریزر [Huang&Fraser,1997] در نظر گرفته گردید. از آنجایی که مقادیر ارائه شده بر اساس مدل سازی پیشروی هوانگ و فریزر انجام یافته است و این مقادیر با مقادیر مدل پیشرو نرم افزار متفاوت است، لذا در این مدل یک از هم گسیختگی میان نتایج دیده می‌شود. در صورتی که در این مدل مقادیر هم‌فاز و ناهم‌فاز میدان الکترومغناطیس را بر اساس الگوریتم پیشرو نوشته شده توسط خودمان انجام دادیم، نتایج بسیار بهتری حاصل گردید. با این حال در صدد برآمدیم تا مقادیر ارائه شده را تغییر ندهیم. نتایج مربوط به زمین ۴ لایه در شکل (۶-۷-ب) نشان داده شده است.

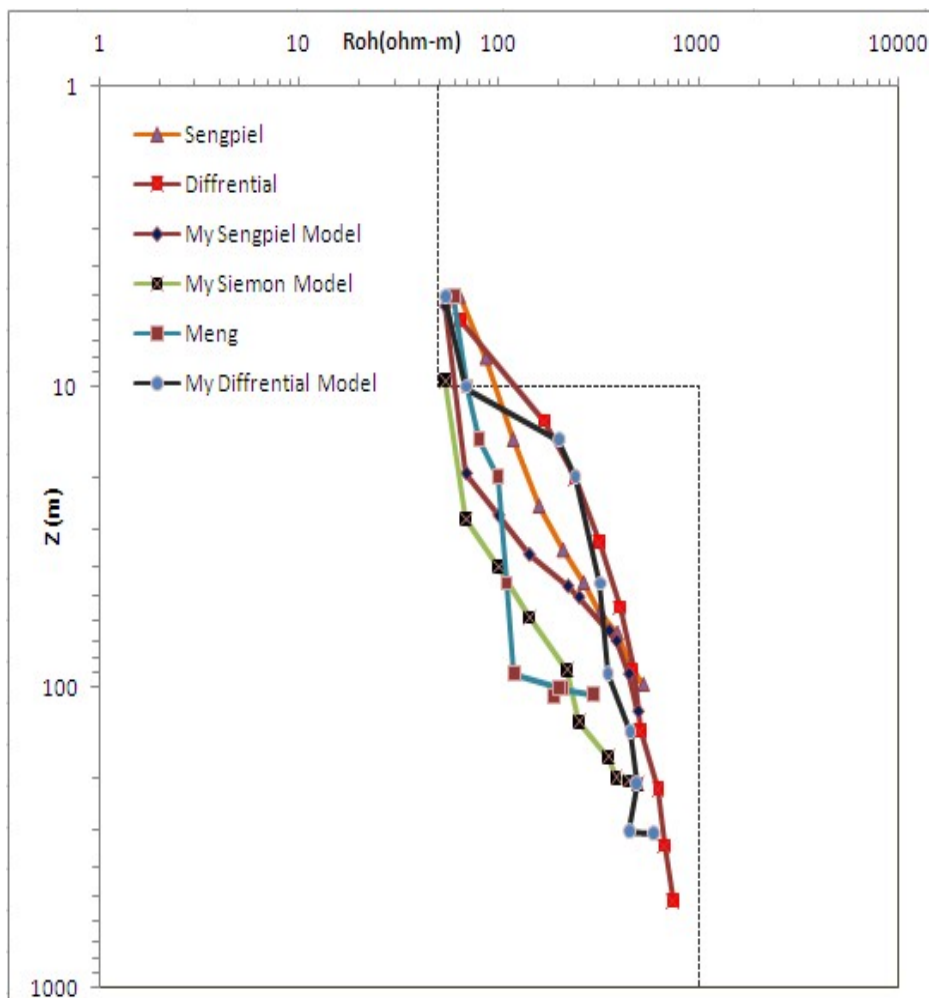


شکل (۶-۷-ب): پاسخ مدل دوم ارائه شده توسط هوانگ و فریزر (۱۹۹۷)

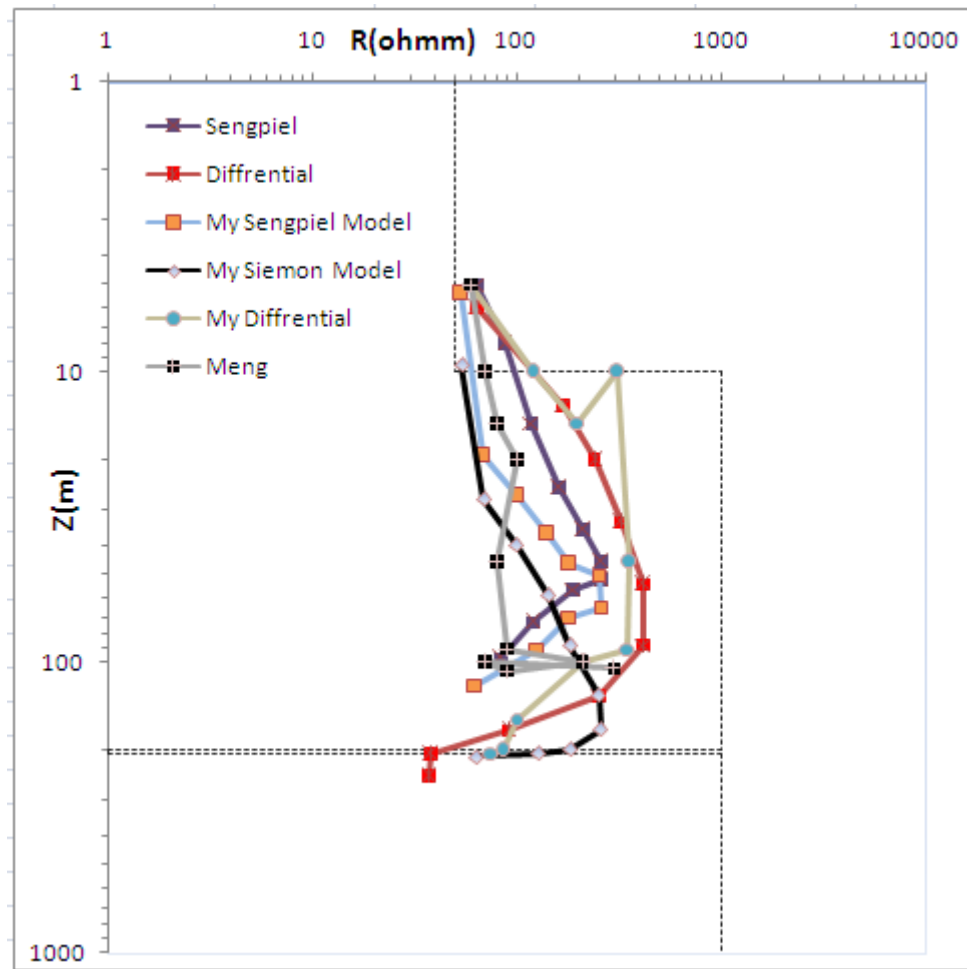
همان طور که مشخص است روش سنگپیل متداول و سیمون بهبود یافته بهترین جواب را نسبت به بقیه روش‌ها ارائه داده‌اند. البته با افزایش عمق همان طور که انتظار داریم جواب مدل سنگپیل دچار اشکال گردد. البته باید توجه داشت که پاسخ‌های اصلی نیز از معکوس‌سازی صحیح این مدل باز مانده‌اند و جواب‌های ارائه شده روند خوبی ندارند و تنها سه لایه را تشخیص داده‌اند. در روش دیفرانسیلی به دست آمده به دلیل تشخیص نادرست مدل اولیه پاسخ از دقت خوبی برخوردار نیست.

اما در صورتی که بخواهیم نتایج را بر اساس مقادیر بدست آمده از برنامه پیشروی نوشته شده مورد سنجش قرار دهیم ملاحظه می‌گردد نتایج بدست آمده بسیار متفاوت از حالت ناپهنجار قبل بدست می‌آید. شکل‌های (۶-۸-الف) و (۶-۸-ب) نتایج حاصل از مقادیر بدست آمده از مقادیر پیشرو را برای مدل‌های ارائه شده در حالت دو لایه (شکل (۶-۷-الف)) و حالت چهار لایه (شکل (۶-۷-ب)) نشان می‌دهد. پاسخ‌های بدست آمده در بازه فرکانسی ۲۲۵ تا ۱۱۵۲۰۰ هرتز می‌باشند. با توجه به شکل‌های بدست آمده

الگوریتم‌های نیم‌فضای همگن همچنان نتایج دور از انتظار ارائه می‌دهند، بنابراین جهت آن که شکل بدست آمده برای تعیین نمودارها شلوغ نشود، از آوردن نتایج دور از انتظار خودداری می‌کنیم. از طرفی مقادیر بدست آمده از روش‌های بهبود یافته سیمون و سنگپیل و روش‌های متداول آنها جوابی تقریباً یکسان ارائه می‌دهند. از این رو نتایج حاصل از مقادیر بهبود یافته آنان را در نتیجه نهایی آورده‌ایم. باید توجه داشت در مواردی که الگوریتم دیفرانسیلی جواب خوبی نمی‌دهد، اشکال می‌تواند از عدم تعیین صحیح مدل اولیه و یا عدم تعیین صحیح مقدار رسانندگی از جدول تفسیر مربوط به این قسمت باشد. در نهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود، روش سیمون جواب‌های بسیار بهتری از روش‌های دیگر ارائه می‌دهد و عمق نفوذ بسیار بهتری نسبت به روش سنگپیل دارا است [کامکار و همکاران، ۱۳۸۶].



شکل (۶-۸-الف): نتایج بدست آمده از مدل دو لایه در صورتی که مقادیر حقیقی و موهومی میدان الکترومغناطیس از الگوریتم پیشرو برنامه بدست آمده باشد.



شکل (۶-۸-ب): نتایج بدست آمده از مدل چهار لایه در صورتی که مقادیر حقیقی و موهومی میدان الکترومغناطیس از الگوریتم پیشرو برنامه بدست آمده باشد.

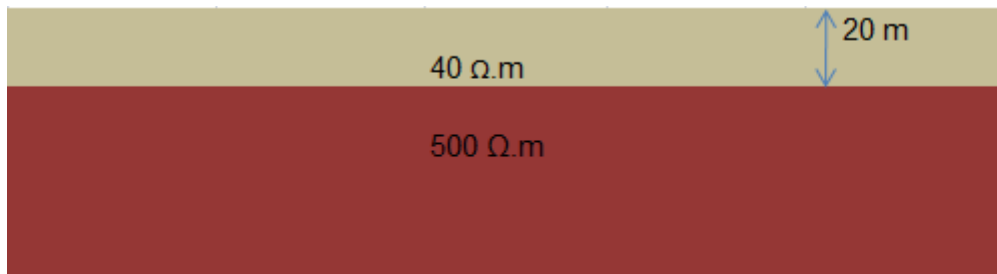
#### ۶-۲-۶- پاسخ معکوس‌سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک زمین دولایه

برای این که نتایج حاصل از معکوس‌سازی بر روی یک زمین دو لایه را به دست آوریم، یک مدل از یک زمین دولایه با مشخصات زیر در نظر می‌گیریم:

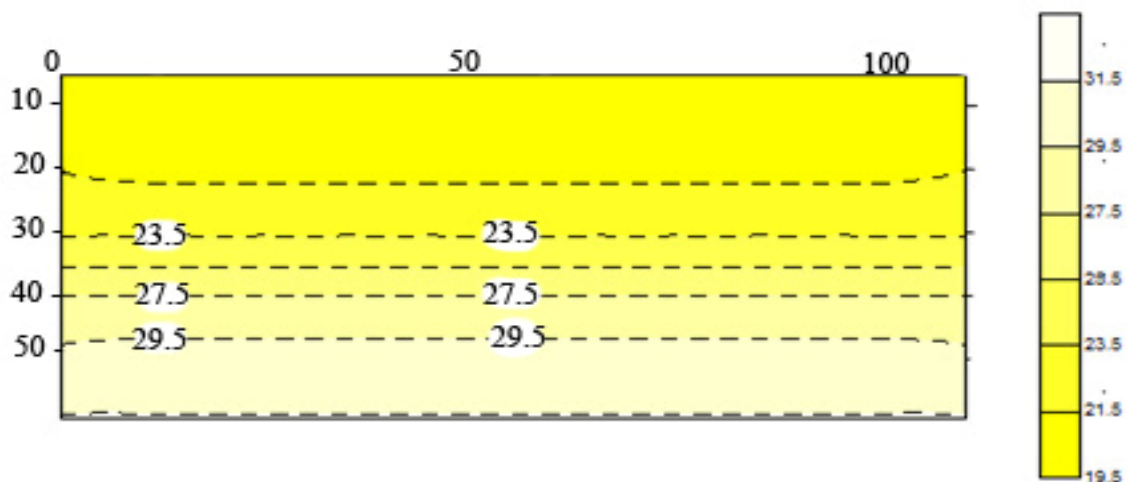
جدول (۶-۵): مشخصات یک زمین دو لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس‌سازی

| لایه | مقاومت ویژه | ضخامت |
|------|-------------|-------|
| ۱    | ۴۰          | ۲۰    |
| ۲    | ۵۰۰         | ∞     |

زمین فوق را بر اساس یک زمین دو لایه همگن که گستردگی آن ۱۱۰ متر است در نظر می گیریم. در این راستا ۱۱ ایستگاه به فواصل ۱۰ متر از یکدیگر در نظر می گیریم. شکل اولیه این مدل در شکل (۶-۹) زیر نشان داده شده است. فرکانس های برداشت شامل چهار فرکانس، ۴۵۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰ و ۵۶۰۰۰ هرتز می باشد. فاصله سیم پیچ ها ۸ متر و به صورت هم محور (HCP) و ارتفاع پرند ۳۰ متر می باشد.

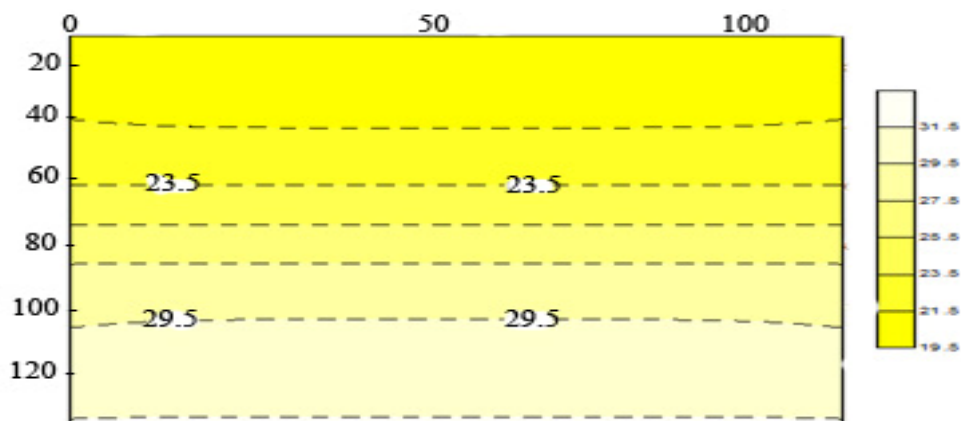


شکل (۶-۹): نمایشی از یک مدل دو لایه با مقاومت ویژه لایه اول ۴۰ اهم متر و لایه دوم ۵۰۰ اهم متر پس از انجام معکوس سازی برای مشخص شدن نتایج شکل دو بعدی هر یک از روش ها ترسیم گردید. از آنجایی که تمرکز ما به یافتن نتایج عمقی می باشد لذا از مدل هایی که نتایج ضعیفی ارائه می دهند صرف نظر نموده ایم. در شکل (۶-۱۰) معکوس سازی مربوط به مدل سنگپیل نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است روند افزایشی مقاومت ویژه به خوبی در این مدل مشخص است. تقریباً میتوان زمین را به دو لایه تفکیک نمود، لایه ای که مقاومت ویژه پایینی دارد (ناحیه زرد پر رنگ) و ناحیه ای که مقاومت ویژه بالایی دارد (ناحیه زرد کم رنگ)، باید توجه داشت که عمق نفوذ در این حالت حداکثر ۶۰ متر نشان داده شده است. از طرفی ضخامت لایه بالا بیشتر از مقدار اصلی و مقاومت ویژه آن کمتر از مقدار اصلی نشان داده شده است.



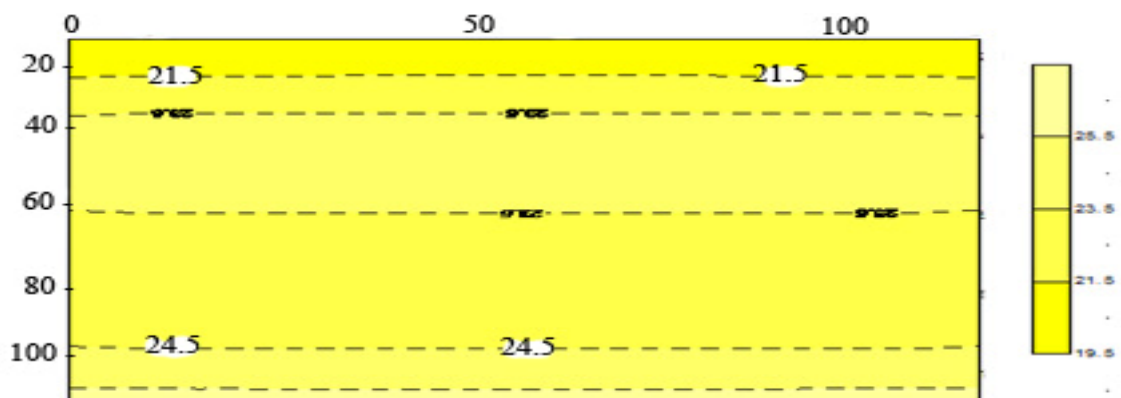
شکل (۶-۱۰): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش سنگپیل

در شکل (۶-۱۱) معکوس‌سازی مربوط به مدل سیمون نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است روند افزایشی مقاومت ویژه به خوبی در این مدل مشخص است. تقریباً میتوان زمین را به دو لایه تفکیک نمود، لایه ای که مقاومت ویژه پایینی دارد (ناحیه زرد پر رنگ) و ناحیه ای که مقاومت ویژه بالایی دارد (ناحیه زرد کم رنگ)، باید توجه داشت که عمق نفوذ در این حالت حداکثر ۱۴۰ متر نشان داده شده است که تقریباً دو برابر روش سنگپیل می باشد. از طرفی ضخامت لایه بالا در حدود ۴۰ تا ۶۰ متر تخمین زده می شود که بیشتر از مقدار اصلی آن است.



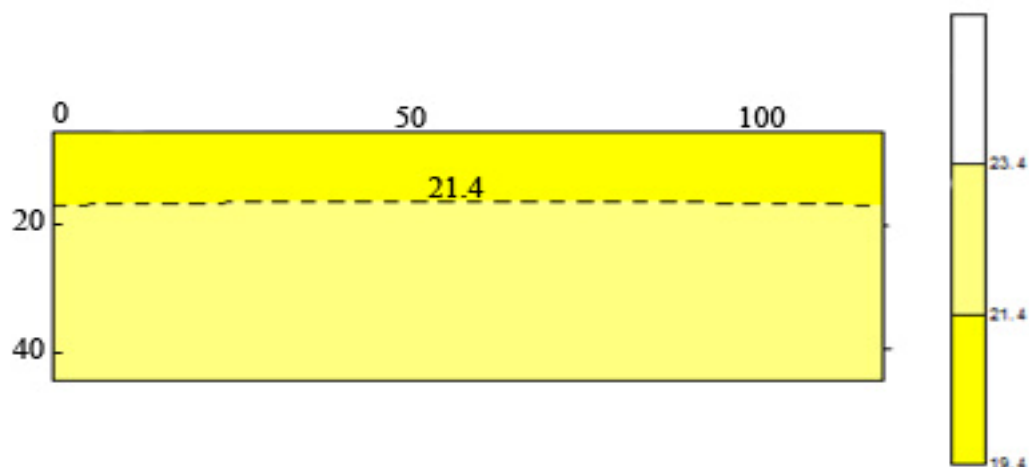
شکل (۶-۱۱): نتایج معکوس‌سازی دو بعدی به روش سیمون

در شکل (۶-۱۲) معکوس‌سازی مربوط به مدل دیفرانسیلی نشان داده شده است. باید توجه داشت که چون تعداد فرکانس‌های به کار رفته کم می باشد (۴ فرکانس) از این رو ما حداکثر از پاسخ سه عمق آگاه می گردیم، لذا نتیجه معکوس‌سازی به دست آمده چندان حائز اهمیت نمی باشد. از این رو پیشنهاد می کنیم در صورتی که تعداد فرکانس‌های مورد استفاده پایین است از این روش جهت معکوس‌سازی تقریبی استفاده نگردد.

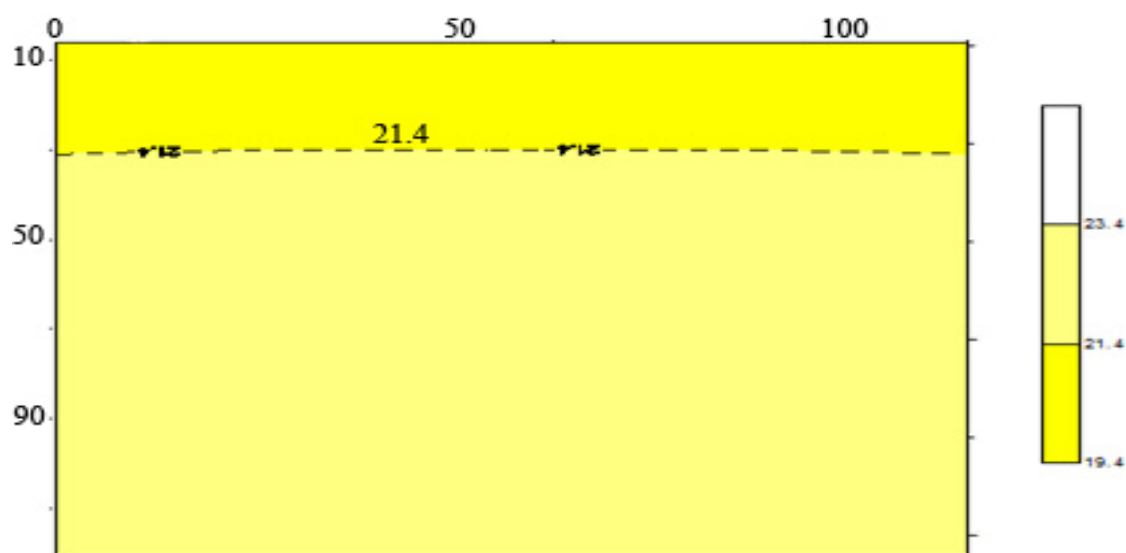


شکل (۶-۱۲): نتایج معکوس‌سازی دو بعدی به روش دیفرانسیلی

در شکل (۶-۱۳) معکوس‌سازی مربوط به مدل سنگپیل بهبود یافته و در شکل (۶-۱۴) نتایج روش سیمون بهبود یافته نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است روند افزایشی مقاومت ویژه به خوبی در این مدل‌ها مشخص است. زمین به دو لایه تفکیک شده است، لایه‌ای که مقاومت ویژه پایینی دارد (ناحیه زرد پررنگ) و ناحیه‌ای که مقاومت ویژه در حال افزایش است (ناحیه زرد کم‌رنگ)، باید توجه داشت که عمق نفوذ در روش سیمون از روش سنگپیل به وضوح بیشتر است.



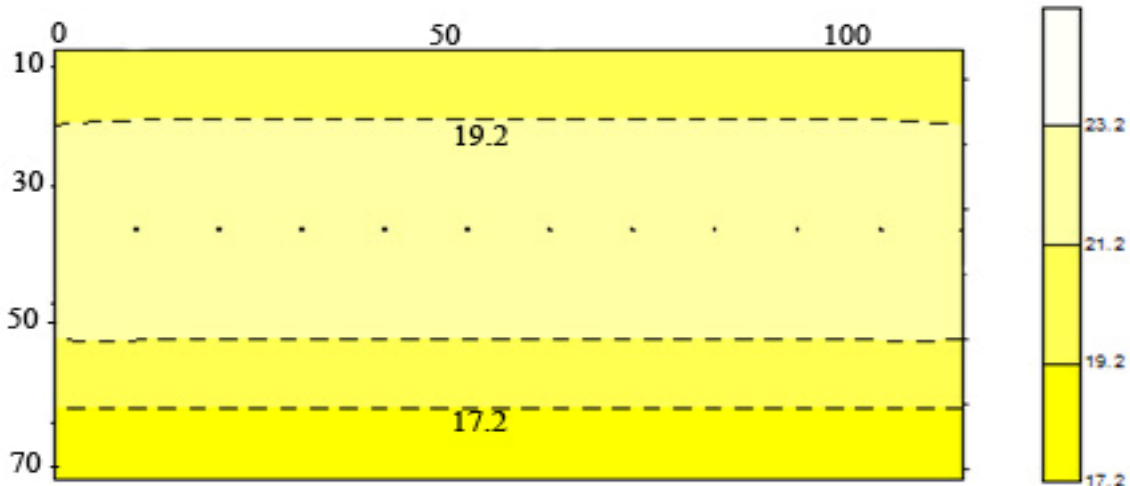
شکل (۶-۱۳): نتایج معکوس‌سازی دو بعدی به روش سنگپیل بهبود یافته



شکل (۶-۱۴): نتایج معکوس‌سازی دو بعدی به روش سیمون بهبود یافته

در شکل (۶-۱۵) نیز نتایج مربوط به روش منگ آورده شده است. به وضوح مشخص است که این روش در تشخیص لایه‌ها به درستی عمل نکرده است. از این رو یک لایه رسا در اطراف دو لایه مقاوم تر از

خود به نمایش در آمده است. از آنجایی که این روش بیشتر در زمینه هوایی با روش بال ثابت مورد استفاده قرار می گیرد، از این رو نتایج این روش برای معکوس سازی الکترومغناطیس هوایی توصیه نمی گردد.



شکل (۶-۱۵): نتایج معکوس سازی دو بعدی به روش منگ

#### ۶-۲-۷- پاسخ معکوس سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک زمین چهار لایه

برای این که نتایج حاصل از معکوس سازی بر روی یک زمین چهار لایه را به دست آوریم، یک مدل از یک زمین چهار لایه با مشخصات زیر در نظر می گیریم:

جدول (۶-۶): مشخصات یک زمین چهار لایه جهت انجام معکوس سازی

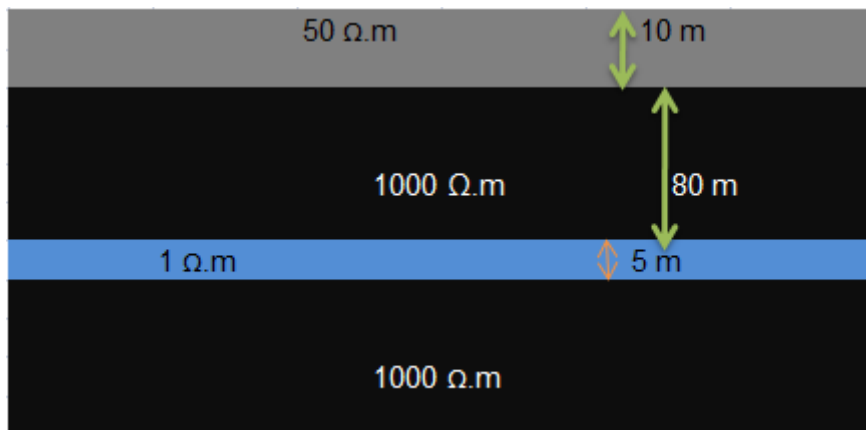
| ضخامت | مقاومت ویژه | لایه |
|-------|-------------|------|
| ۱۰    | ۵۰          | ۱    |
| ۱۹۰   | ۱۰۰۰        | ۲    |
| ۱     | ۱           | ۳    |
| ∞     | ۱۰۰۰        | ۴    |

زمین فوق را بر اساس یک زمین چهار لایه همگن که گستردگی آن ۱۱۰ متر است در نظر می

گیریم. در این راستا ۱۱ ایستگاه به فواصل ۱۰ متر از یکدیگر در نظر می گیریم.

شکل اولیه این مدل در شکل (۶-۱۶) زیر نشان داده شده است. فرکانس های برداشت شامل چهار فرکانس، ۴۵۰، ۱۸۰۰، ۹۰۰ و ۵۶۰۰۰ هرتز می باشد. فاصله سیم پیچ ها ۸ متر و به صورت هم محور (HCP) و ارتفاع پرنده ۳۰ متر می باشد.



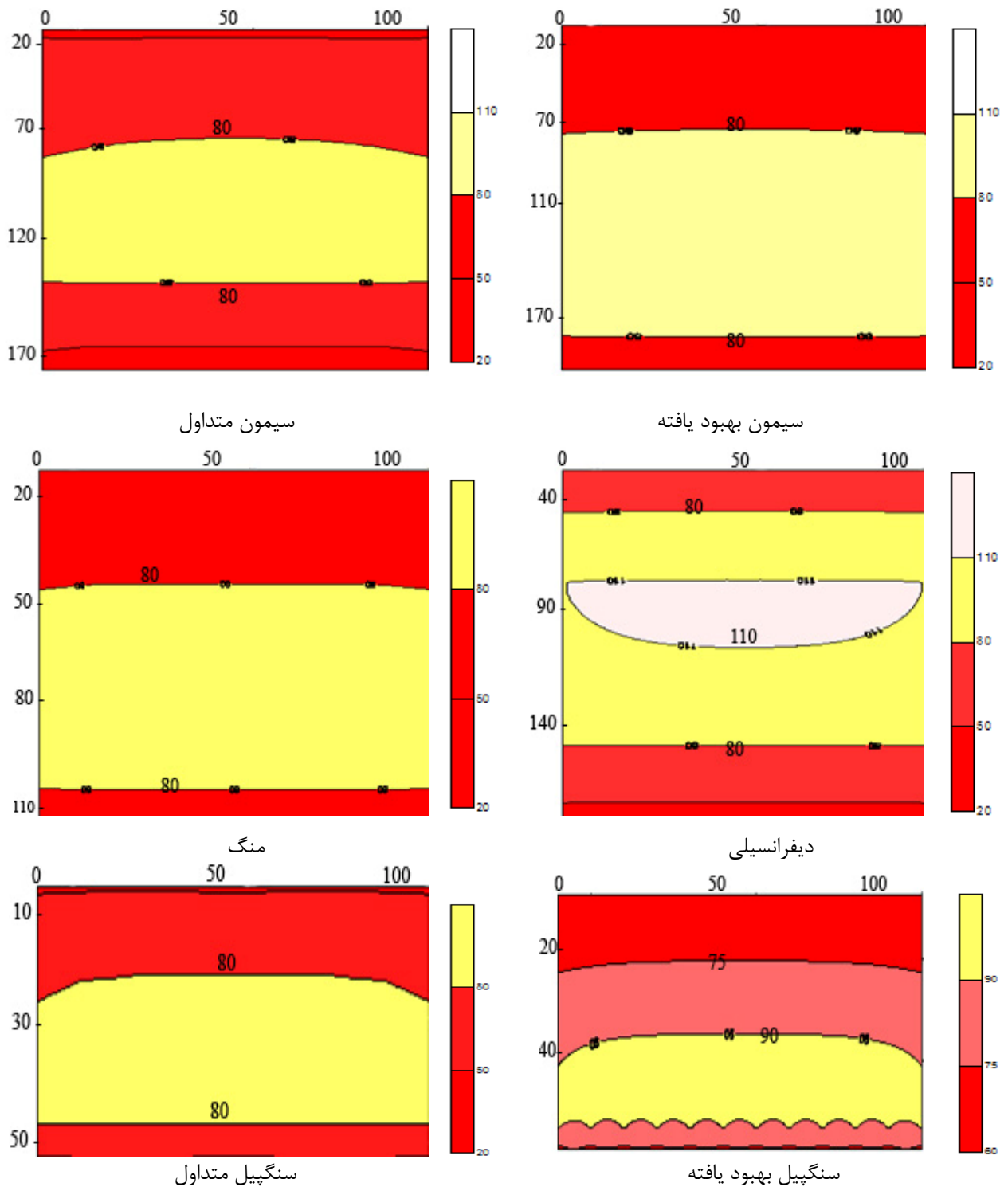


شکل (۶-۱۶): نمایشی از یک مدل چهار لایه با مقاومت ویژه لایه اول ۵۰ اهم متر، لایه دوم ۱۰۰۰ اهم متر، لایه سوم ۱ اهم متر و لایه چهارم ۱۰۰۰ اهم متر

نتایج معکوس‌سازی تقریبی برای این مدل را در شکل (۶-۲۳) آورده ایم. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، تقریباً تمامی شکل‌ها روندی را که مدل اولیه دارد را رعایت کرده‌اند. همانگونه که در شکل (۶-۱۷) مشخص است، روند نشان داده شده در روش‌های بهبود یافته سنگپیل و سیمون از سایر روش‌ها بهتر می‌باشد.

در مدل دیفرانسیلی یک لایه با مقاومت ویژه‌ای در حدود ۱۱۰ اهم متر در بین لایه‌های دیگر به چشم می‌آید. باید توجه داشت که در روش دیفرانسیلی عمق نفوذ نسبت به بیشتر روش‌ها افزایش یافته است. از آنجایی که در این روش هر چه تعداد فرکانس‌های برداشت بیشتر باشد مقاومت ویژه ظاهری بهتر تشخیص داده می‌شود، لذا برای آنکه از جواب‌های به دست آمده اطمینان حاصل نماییم بهتر است تعداد فرکانس‌های برداشت شده بیشتر از تعداد لایه‌ها باشد.

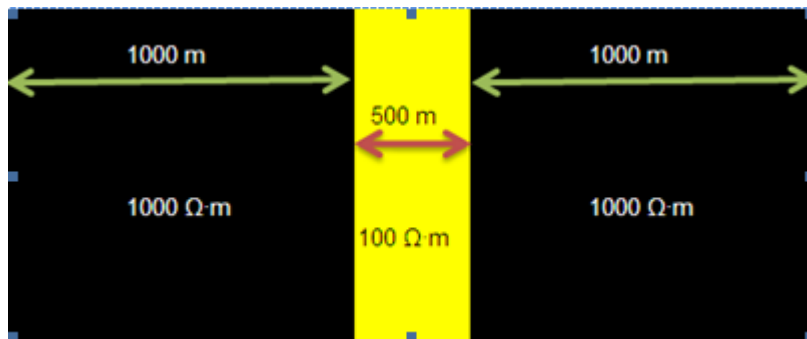
نکته دیگری که لازم است مورد توجه قرار گیرد ضخامت لایه اول است. همان طور که مشخص است، ضخامت لایه اول به خوبی تشخیص داده نشده است. در صورتی که لایه‌ها را به دو دسته تقسیم کنیم، لایه اول تا عمق ۴۰ متری حضوری پر رنگ خواهد داشت در صورتی که ضخامت این لایه در حدود ۱۰ متر می‌باشد.



شکل (۶-۱۷): نتایج بدست آمده حاصل از معکوس سازی تقریبی دو بعدی یک زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۶)

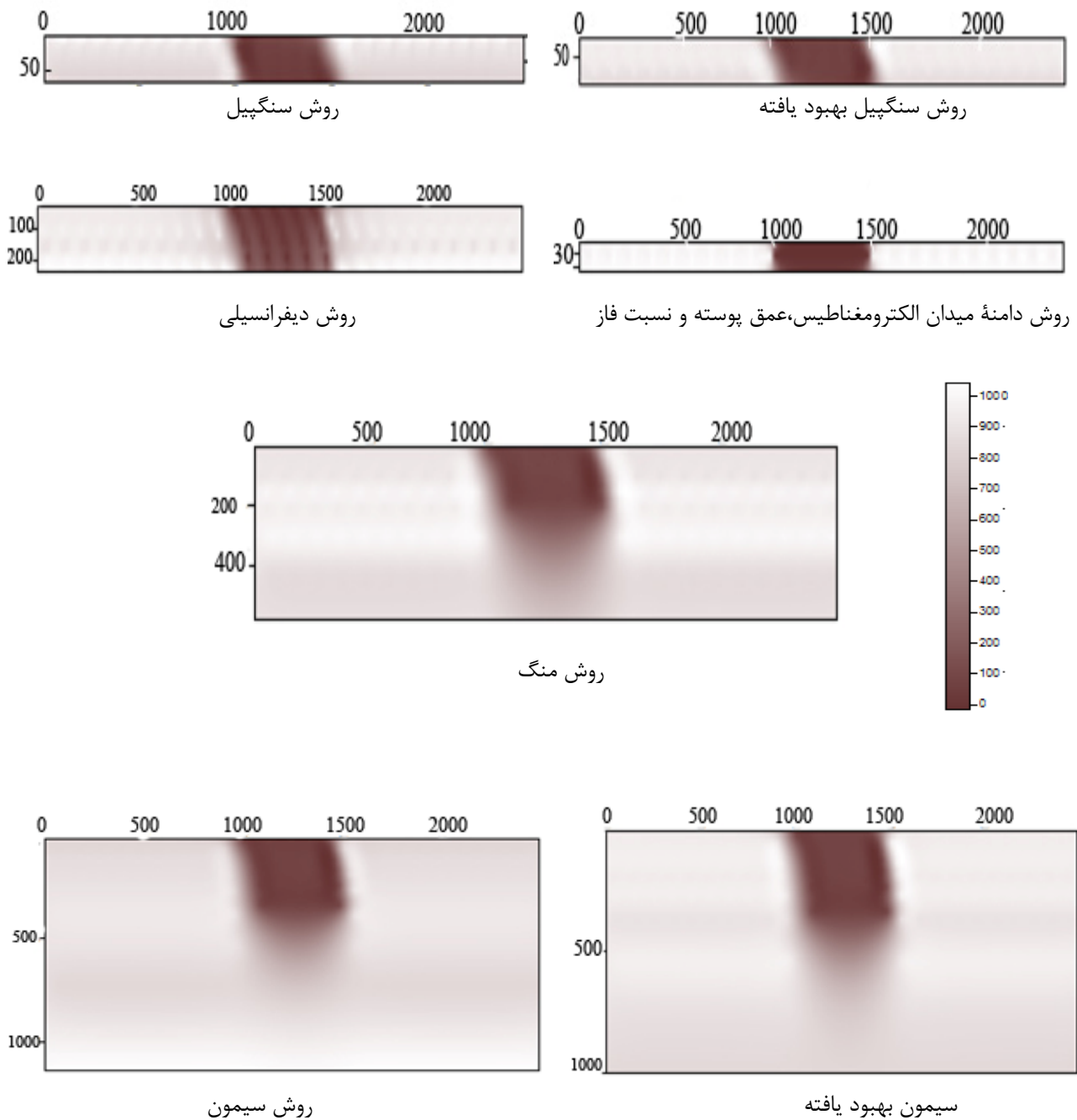
## ۶-۲-۸- پاسخ معکوس‌سازی دو بعدی الکترومغناطیس برای یک دایک قائم

شکل (۶-۱۸) بیانگر وضعیت یک دایک قائم با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر در میان دو منطقه مقاوم با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متر می‌باشد. اگر چه در مدل سازی‌ها ضخامت دایک را کم در نظر می‌گیرند، اما در این جا برای بهتر مشخص شدن محدوده دایک مورد نظر این ضخامت اغراق آمیز در نظر گرفته شده است. برای ساده شدن انجام عملیات معکوس‌سازی تقریبی محیط اطراف دایک را همگن و خود دایک مزبور را نیز همگن فرض نموده ایم. در شکل (۶-۱۹) نتایج معکوس‌سازی‌های انجام شده بر روی این مدل نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۸): نمایش یک دایک قائم با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر در میان دو منطقه مقاوم با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متر

همان طور که در شکل‌های بالا مشخص است بهترین جواب برای عمق را روش سیمون بهبود یافته ارائه می‌دهد. البته باید توجه داشت روش سیمون و سایر روش‌ها نیز دایک را به خوبی مشخص نموده‌اند. در روش دیفرانسیلی یک ناهماهنگی در میان دایک نشان داده شده وجود دارد. در روش سنگپیل و روش سنگپیل بهبود یافته عمق نسبت به روش‌های سیمون کاهش یافته است. مشکلی که در تمام شکل‌ها دیده می‌شود آن است که در تمام شکل‌ها دایک یک انحراف به سمت راست پیدا کرده است. از این رو ما بر آن شدیم تا یک مدل دیگر را نیز بررسی کنیم. نتیجه به دست آمده بسیار جالب است، در روش دامنه میدان الکترومغناطیس، عمق پوسته و نسبت فاز شکل دایک به صورت قائم به دست آمده است، همان گونه که مشخص است محل دایک نیز به خوبی مشخص شده است. از این رو به نظر می‌رسد این روش نیز بهتر است در معکوس‌سازی‌های تقریبی مورد توجه قرار گیرد.

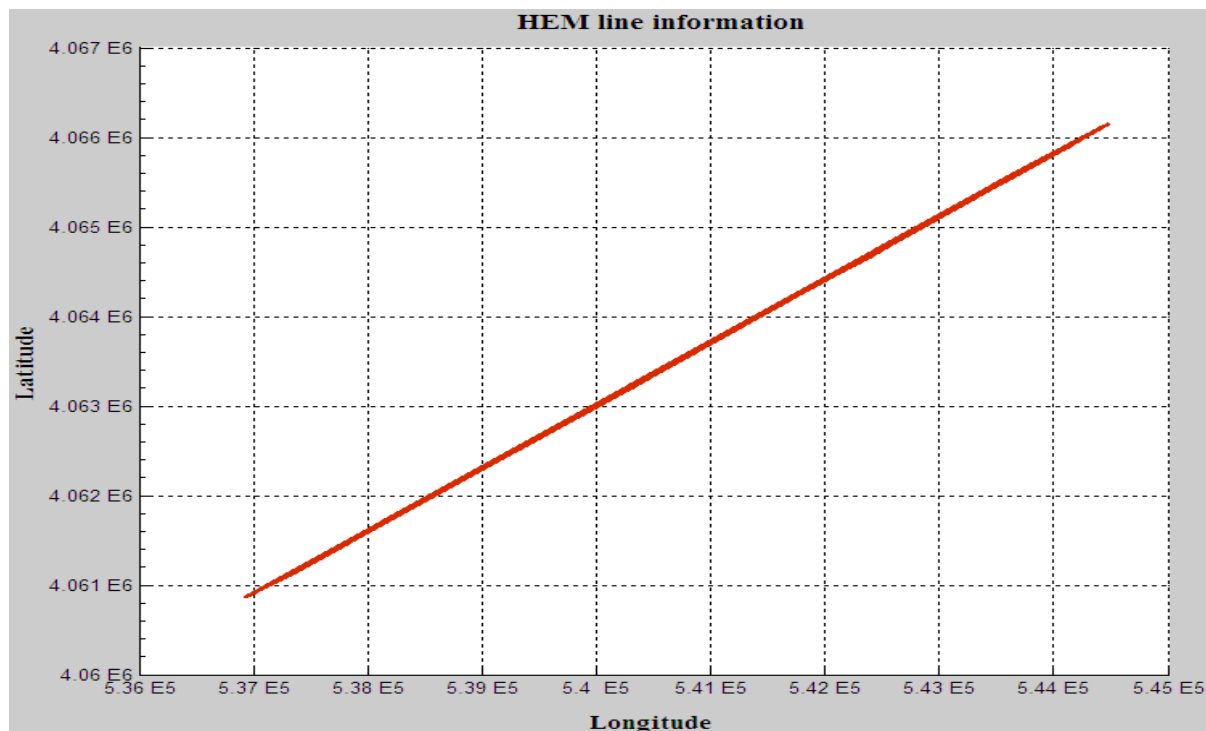


شکل (۶-۱۹): نمایش معکوس سازی های دوبعدی انجام شده بر روی دایک قائم با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر در میان دو منطقه مقاوم با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متر

#### ۹-۲-۶- بررسی پاسخ معکوس سازی تقریبی بر روی یک زمین واقعی

در شکل (۶-۲۰) یک خط برداشت الکترومغناطیس هوایی هلیکوپتری که با سیستم برداشت DIGHEM انجام گرفته است، ملاحظه می گردد. برداشت ها توسط سه فرستنده هم محور قائم (HCP) و

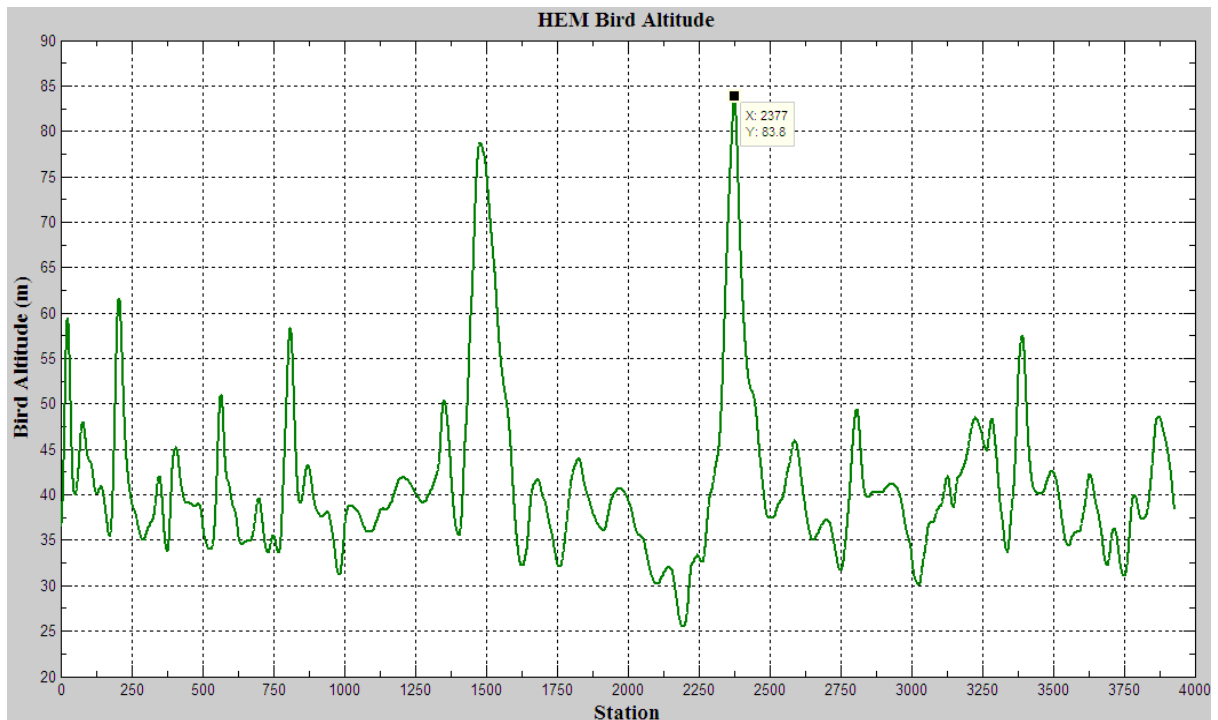
با فرکانس های ۵۶۰۰۰، ۷۲۰۰ و ۹۰۰ هرتز انجام شده است. و در شکل (۶-۲۱) تغییرات ارتفاع پرواز را در طول پروفیل برداشت شده ملاحظه می کنید.



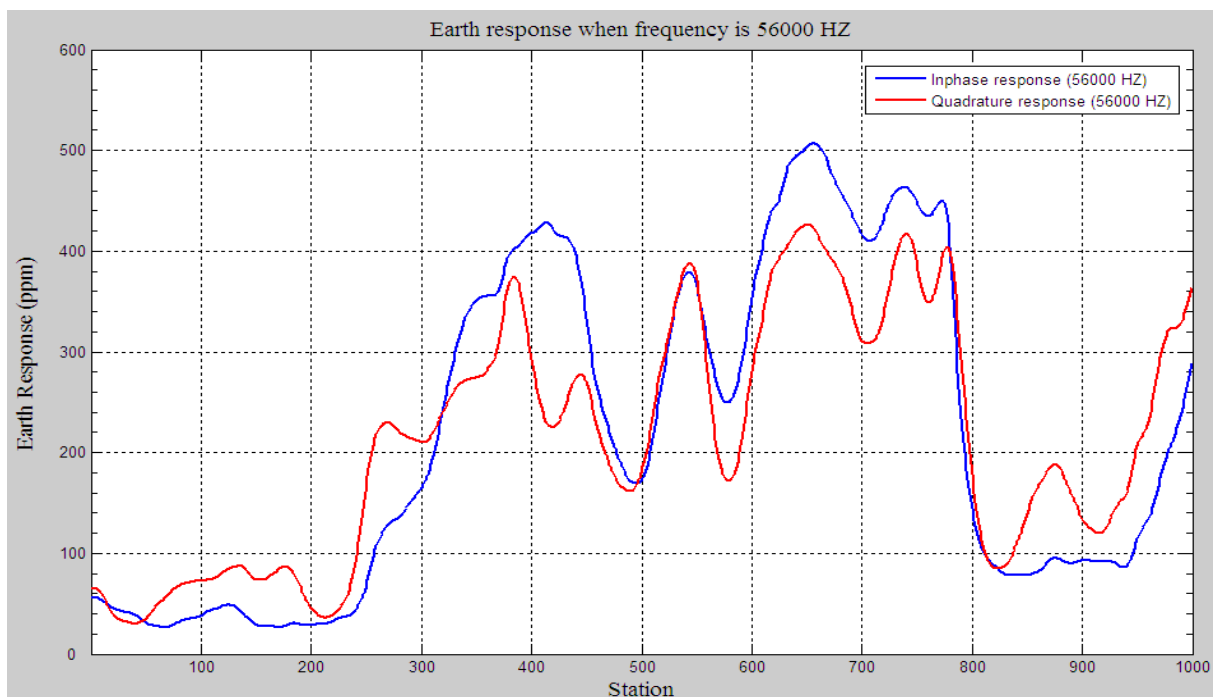
شکل (۶-۲۰): خط برداشت الکترومغناطیس هوایی هلیکوپتری با سیستم برداشت DIGHEM

همان گونه که مشخص است در ۱۰۰۰ ایستگاه اول تغییرات ارتفاعی نسبتاً خوبی به چشم می خورد، اما در مراحل میانی تغییرات ارتفاع بسیار نامنظم است. از این رو نیازمند آن هستیم تا تصحیح ارتفاع را اعمال نماییم. از آنجایی که داده های در نظر گرفته شده به صورت خام هستند، و تصحیح ارتفاع به روی آنها اعمال نشده است، لذا تصمیم گرفتیم تا عملیات معکوس سازی داده ها را بر اساس ۱۰۰۰ ایستگاه اول انجام دهیم. البته همان گونه که مشخص است قسمت پایانی نیز گزینه مناسبی برای معکوس سازی تقریبی می باشد. لازم به ذکر است که هنگامی که تغییرات ارتفاع از حد معینی بیشتر می گردد، داده های برداشت شده بیشتر شامل نوفه می باشند، تا پاسخ زمین. از این رو لازم است قبل از انجام عملیات معکوس سازی تقریبی داده ها، مقادیر برداشت شده توسط روش های تصحیح ارتفاع، تصحیح گردند.

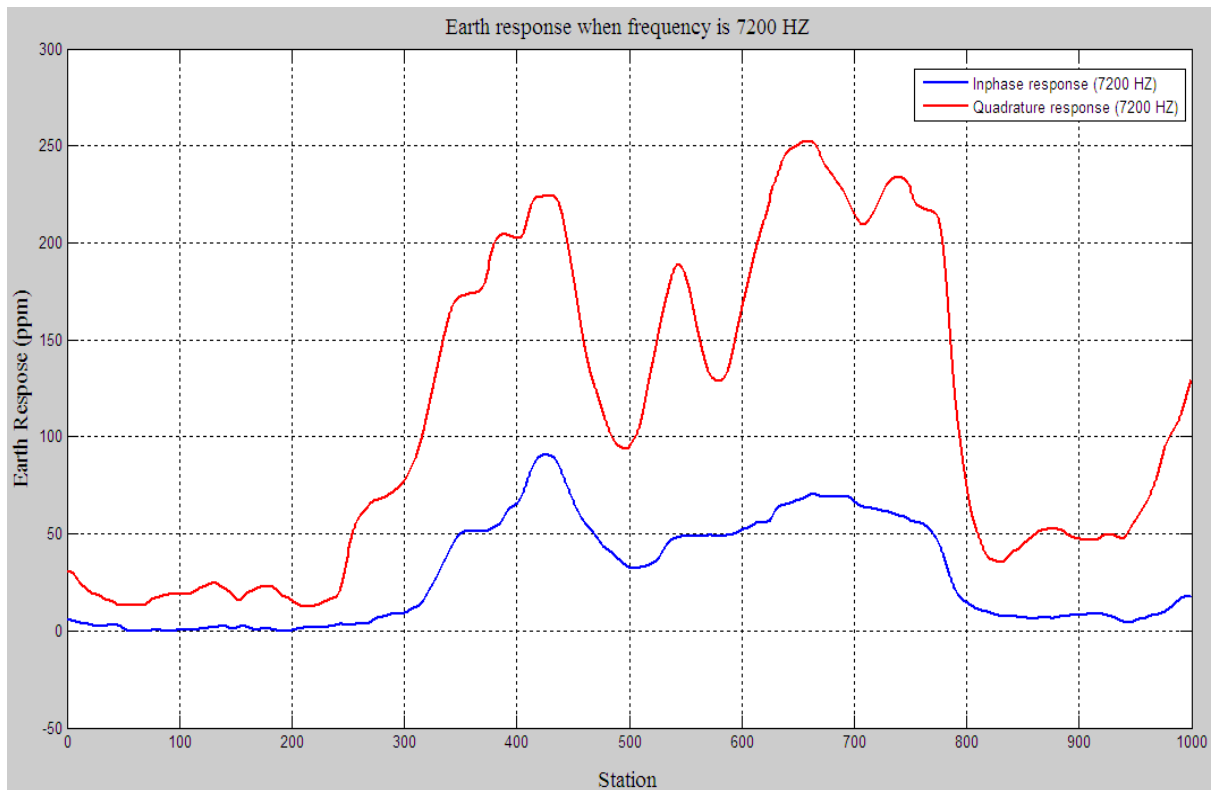
در شکل های (۶-۲۲)، (۶-۲۳) و (۶-۲۴) نمودار مولفه های همفاز و ناهمفاز، برای سه فرکانس برداشت شده در ۱۰۰۰ ایستگاه اول نشان داده شده است. در ادامه به بیان پاسخ حاصل از معکوس سازی تقریبی هریک از روش های ارائه شده در فصل پنجم می پردازیم. باید بیان کنیم روش هایی که در ادامه بیان می کنیم مربوط به پاسخ های روش هایی است که نسبت به بقیه دارای پاسخ بهتری بودند.



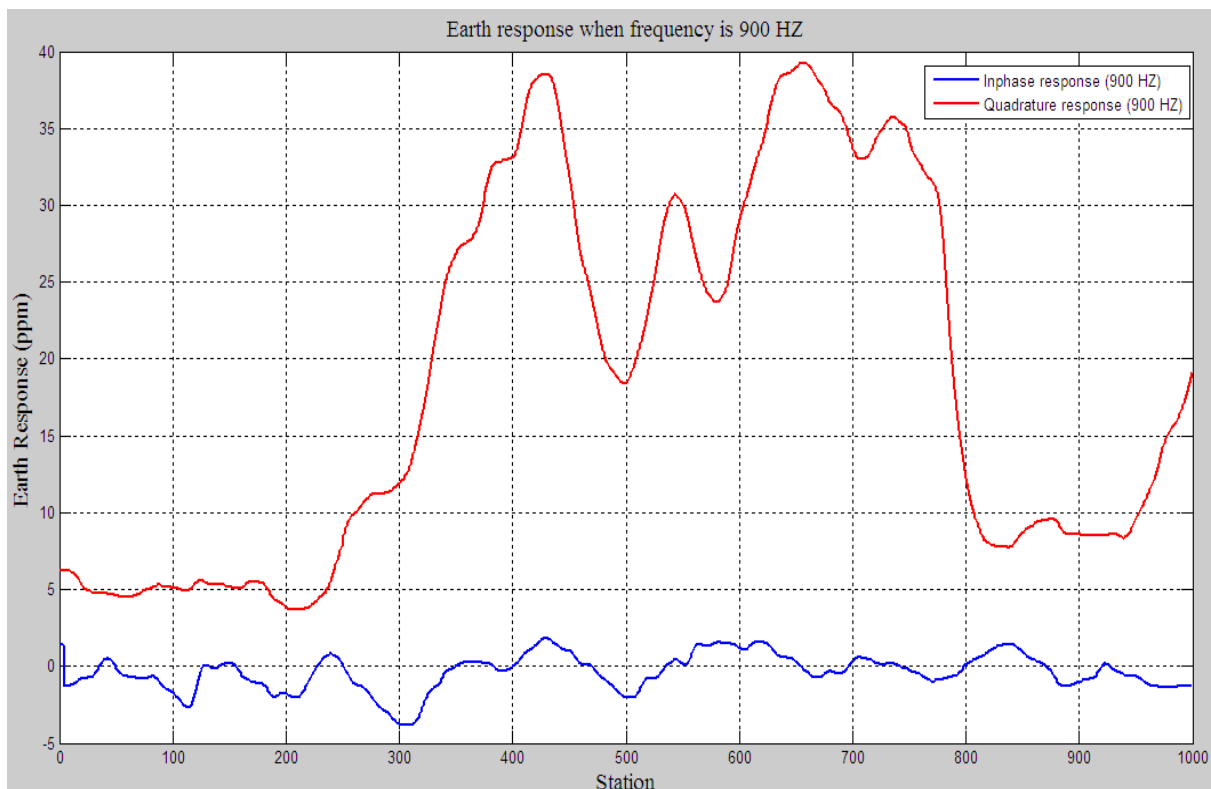
شکل (۶-۲۱): تغییرات ارتفاع پرنده در برداشت الکترومغناطیس هوایی هلیکوپتری به روش DIGHEM



شکل (۶-۲۲): پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوایی توسط فرکانس ۵۶۰۰۰ هرتز



شکل (۶-۲۳) : پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوایی توسط فرکانس ۷۲۰۰ هرتز



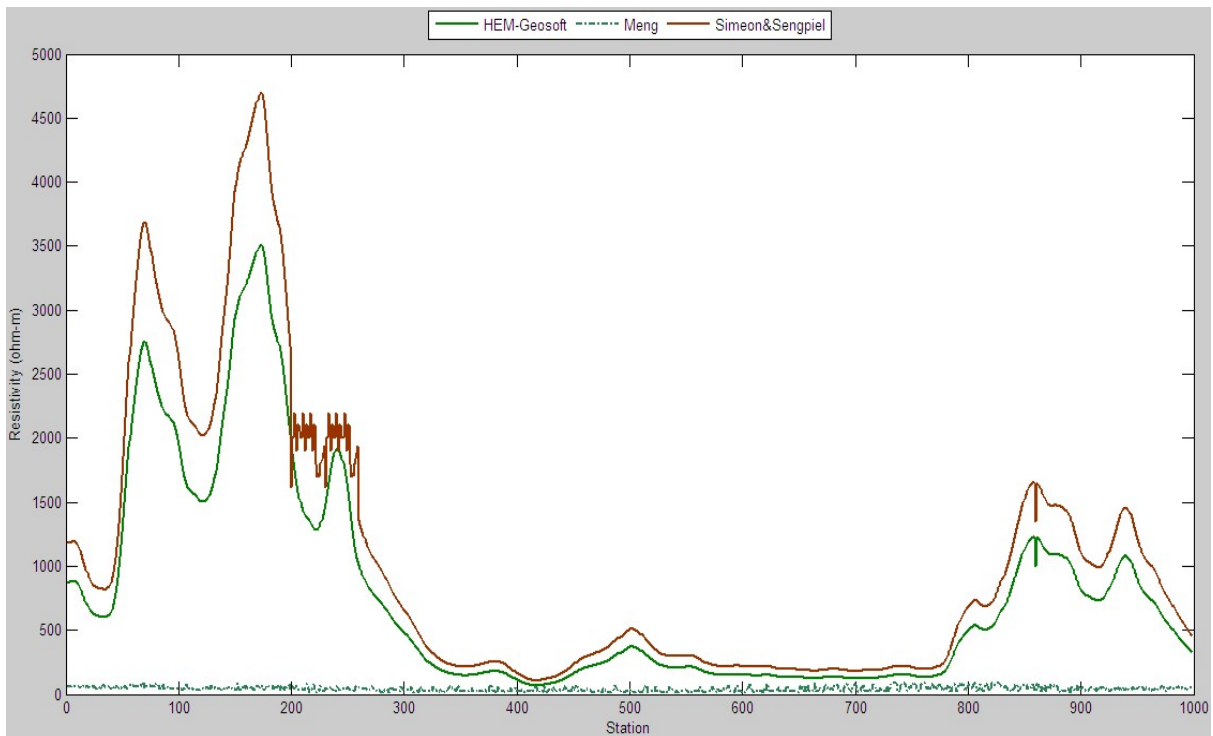
شکل (۶-۲۴) : پاسخ مولفه های همفاز و ناهمفاز برداشت الکترومغناطیس هوایی توسط فرکانس ۹۰۰ هرتز

باید توجه داشت که روش های نیم فضای همگن ، جواب هایی بسیار دور از انتظار می دهند. البته این موضوع دور از انتظار نیست زیرا تغییرات ارتفاع پرنده مدام در حال تغییر می باشد. از این رو تنها یک مورد از نتایج مربوط به نیم فضای همگن را ارائه می نماییم.

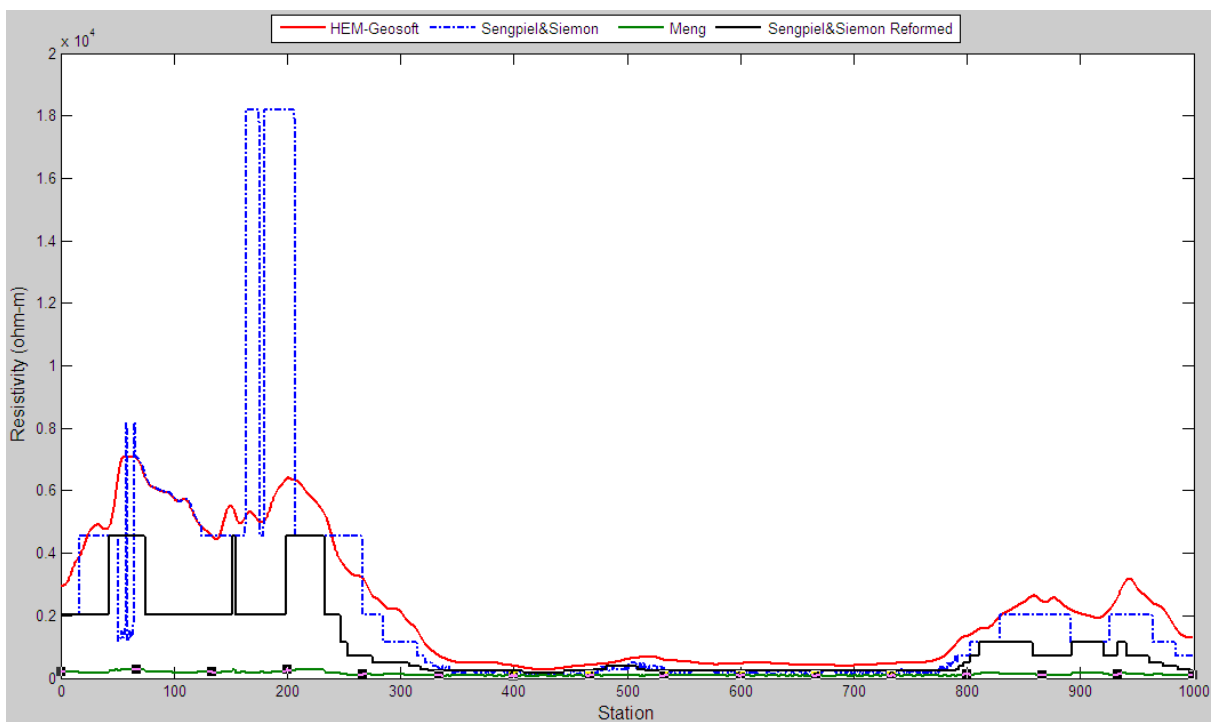
از طرفی نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از نرم افزار *HEM-Geosoft* مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج حاصل به صورت نمودارهای تغییرات مقاومت ویژه نسبت به هر ایستگاه ارائه شده است. در شکل های (۶-۲۵)، (۶-۲۶) و (۶-۲۷) نتایج مربوط به الگوریتم های مختلف برای سه فرکانس برداشت شده نشان داده شده است. از آنجایی که معکوس سازی های انجام شده بر اساس مدل ارائه شده سنگپیل انجام می شوند، از این رو تنها در فرکانس ۵۶۰۰۰ هرتز جواب های بدست آمده با جواب های نرم افزار فوق مطابقت دارد. در فرکانس ۷۲۰۰ تنها در قسمت مرکزی که میزان مقادیر همگاز بیشتر از ناهمگاز است جواب های بدست آمده از روند یکسانی برخوردار هستند. از طرفی در مورد نتایج مربوط به فرکانس ۹۰۰ هرتز بدترین نتایج بدست آمده را مشاهده می کنیم. علت این امر آن است که در این فرکانس مقادیر ناهمگاز بسیار بیشتر از مقادیر همگاز می باشند.

از طرفی چون تعداد فرکانس های برداشت پایین است، و همچنین از مدل اولیه مطمئنی برخوردار نیستیم، مقاومت ویژه تخمین زده شده توسط روش دیفرانسیلی بسیار دور از انتظار است. البته می توان این مورد را به عدم تشخیص مدل صحیح توسط نرم افزار نیز بیان نمود. از این رو از آوردن نتایج این روش خودداری می نماییم. در تمامی شکل ها روش منگ جواب بسیار یکنواخت می دهد. از آنجایی که این روش جهت استفاده در برداشت های بال ثابت استفاده می شود، می توان چنین نتیجه گرفت که این روش اصلاً برای معکوس سازی الکترومغناطیس هلی کوپتری مناسب نیست.

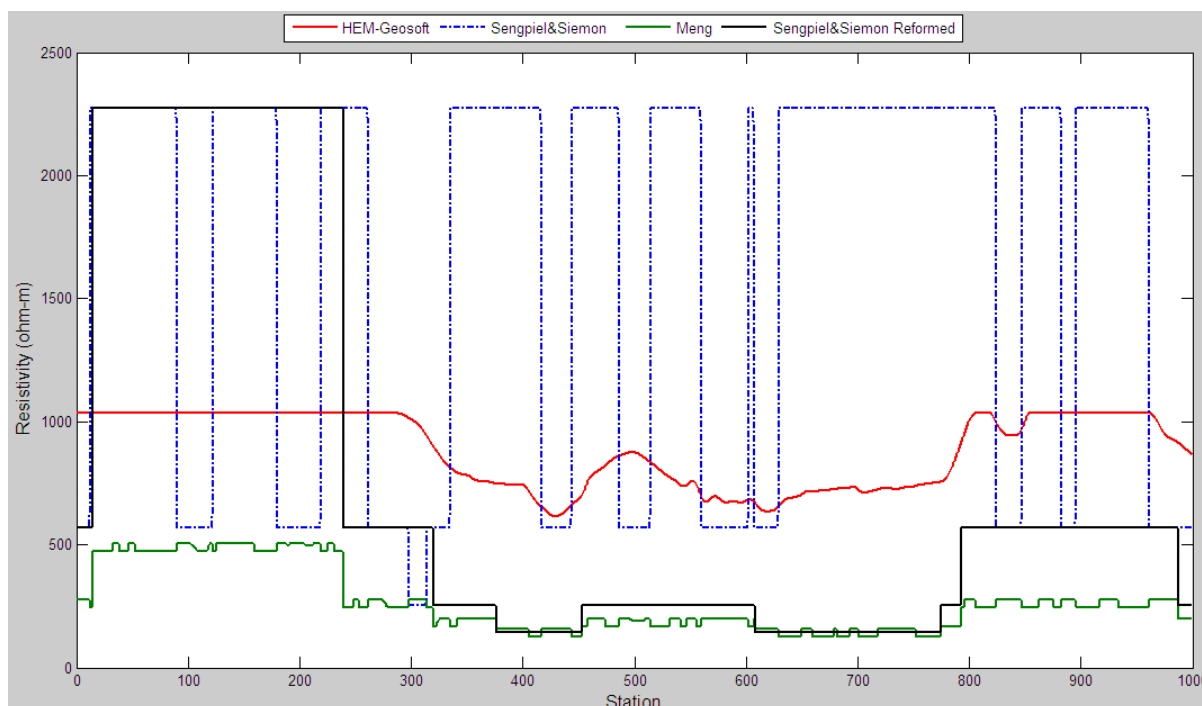




شکل (۶-۲۵): نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۵۶۰۰۰ هرتز است.



شکل (۶-۲۶): نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۷۲۰۰ هرتز است.



شکل (۶-۲۷) : نمایش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در صورتی که فرکانس برداشت ۹۰۰ هرتز است.

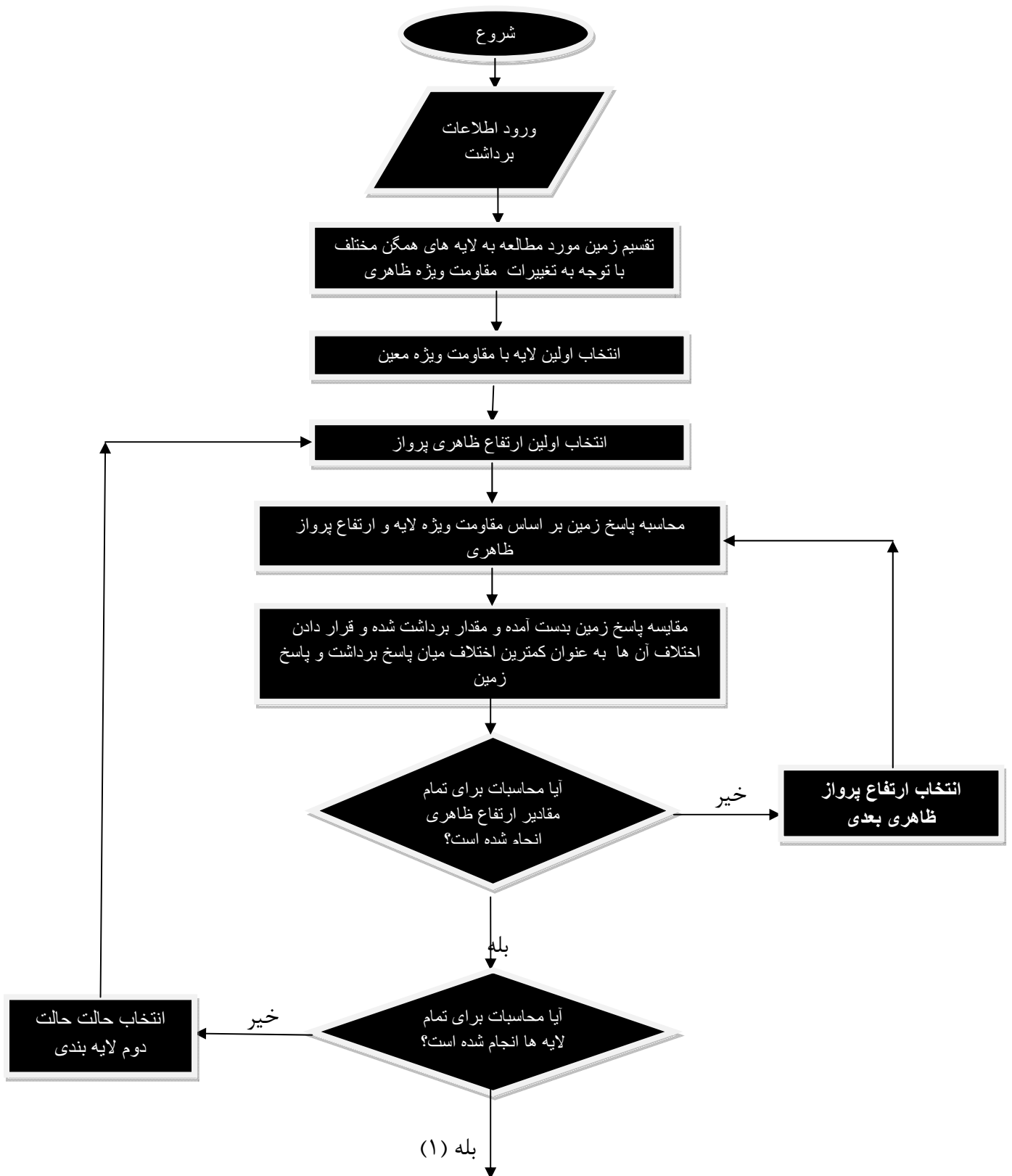
پس از انجام روش‌های فوق و آگاهی از انجام روند معکوس‌سازی‌های انجام شده در ادامه روشی را به عنوان روشی جدید برای محاسبه مقاومت ویژه - عمق ارائه می‌دهیم. به دلیل آن که این روش پس از اتمام پایان‌نامه فوق ابداع گردید از این رو به دلیل کمبود وقت نتوانستیم، مقایسه‌ای میان این روش و روش‌های دیگر انجام دهیم. از این رو به دلیل آن که یکی از بهترین روش‌ها برای محاسبه مقاومت ویژه - عمق روش سیمون می‌باشد، از این رو نتایج ارائه شده با نتایج ارائه شده توسط روش سیمون مورد مقایسه قرار گرفت.

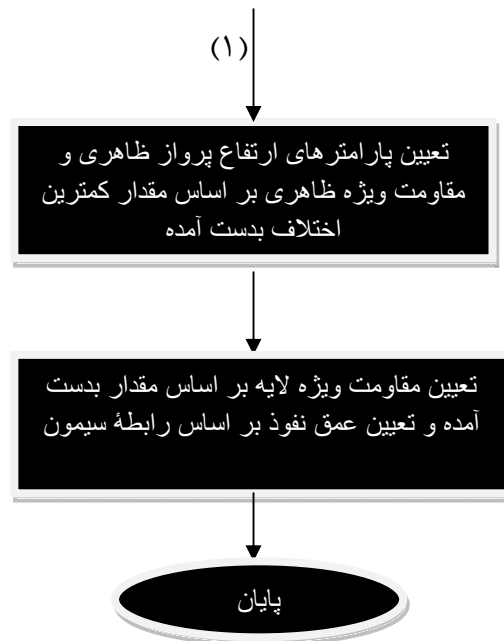
### ۶-۳- روش یافتن مقاومت ویژه-عمق بر اساس تقسیم زمین به لایه‌های همگن متعدد

در مثال‌های قبلی همان گونه که مشخص است، به بررسی روش ارائه شده متداول پرداختیم. غالب این روش‌ها بر اساس مقایسه میان مقادیر هم‌فاز در جدول تفسیر و مقدار حقیقی بدست آمده از طریق برداشت جواب نهایی را ارائه می‌دهد، از این رو هنگامی که مقدار عدد ناهم‌فاز برداشت شده در مقابل مقدار هم‌فاز از تفاوت چشم‌گیری برخوردار باشد، روش‌های فوق دچار اشتباه می‌گردند. از این رو در ادامه روند مطالعه توانستیم روشی را ابداع نماییم که به کمک آن بتوان نتایج بهتری را بدست آوریم.

بر اساس این روش ما زمین را به لایه‌های متعدد همگن تقسیم بندی می‌کنیم، و تعداد لایه‌ها و تغییرات مقاومت ویژه آنها را با توجه به وضعیت زمین شناسی منطقه تعیین می‌کنیم. با توجه به مقدار ارتفاع پرواز و تغییرات آن در محدوده‌ای مشخص مقدار پاسخ زمین را بر اساس مقدار مقاومت ویژه لایه، فرکانس برداشت و ارتفاع ظاهری پرواز بدست می‌آوریم و مقدار پاسخ بدست آمده را با مقدار برداشت شده مورد مقایسه قرار می‌دهیم. از این رو پارامترهایی که کمترین اختلاف را با مقدار برداشت شده، داشته باشند به عنوان پاسخ مقاومت ویژه و ارتفاع ظاهری در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به این که این روش پس از اتمام کار پایان نامه تکمیل گردید و هنوز در حالت تست است از این رو فرصت کافی برای مقایسه با سایر روش‌ها بوجود نیامد. بنابراین تنها به مقایسه این روش با مقادیر حاصل از روش سیمون بدست آمده از مرکز تحقیقاتی *BGR* پرداختیم. در شکل (۶-۲۸) فلوجارت الگوریتم این روش نشان داده شده است.





شکل (۶-۲۸) : فلوجارت الگوریتم تعیین مقاومت ویژه بر اساس تقسیم زمین به لایه های همگن متعدد

با توجه به آن که فلوجارت ارائه شده در بالا به اندازه کافی واضح می باشد از این رو از بیان جزئیات آن خودداری می کنیم. برای مقایسه میان نتایج ارائه شده مدل های زیر را در نظر می گیریم.

#### ❖ مدل زمین دو لایه

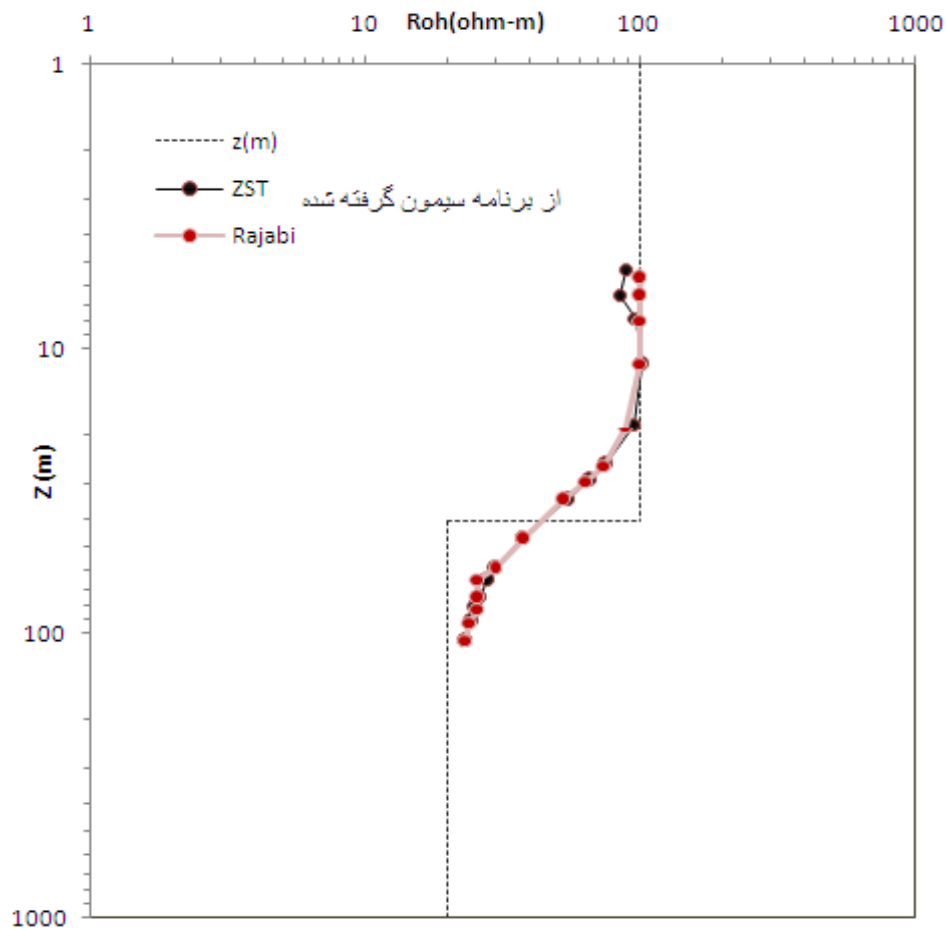
در جدول (۶-۷) یک زمین دولایه با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است.

جدول (۶-۷) : مشخصات زمین دولایه در نظر گرفته شده جهت معکوس سازی

| ضخامت | مقاومت ویژه | لایه |
|-------|-------------|------|
| ۴۰    | ۱۰۰         | ۱    |
| ∞     | ۲۰          | ۲    |

در شکل (۶-۲۹) نتایج حاصل از معکوس سازی به روش ارائه شده و همچنین نتایج بدست آمده با روش سیمون نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است به دلیل آن که لایه بندی انتخاب شده به خوبی

صورت گرفته است، از این رو پاسخ بدست آمده بسیار مطلوب است و توانسته ایم لایه ها را به خوبی تشخیص دهیم.



شکل (۶-۲۹): نتایج معکوس سازی زمین حاصل از زمین دو لایه با مشخصات جدول (۶-۵)

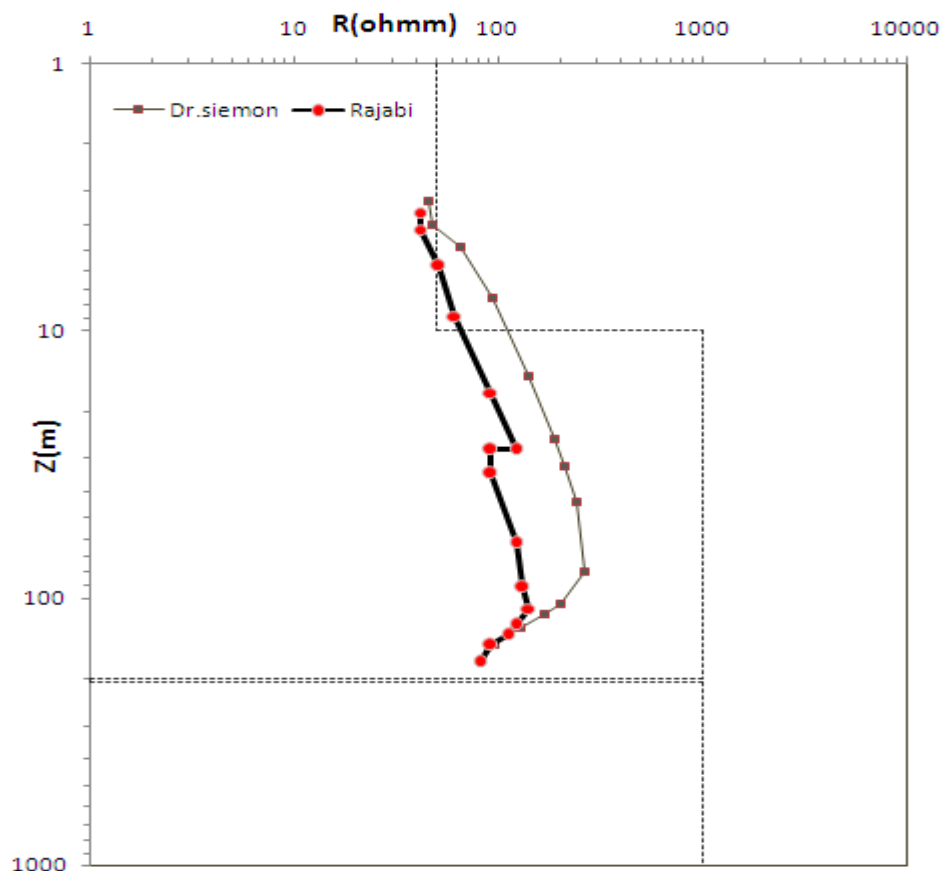
#### ❖ مدل زمین چهار لایه

مدل دوم یک زمین چهار لایه با توجه به مشخصات جدول (۶-۸) در نظر گرفته شده است.

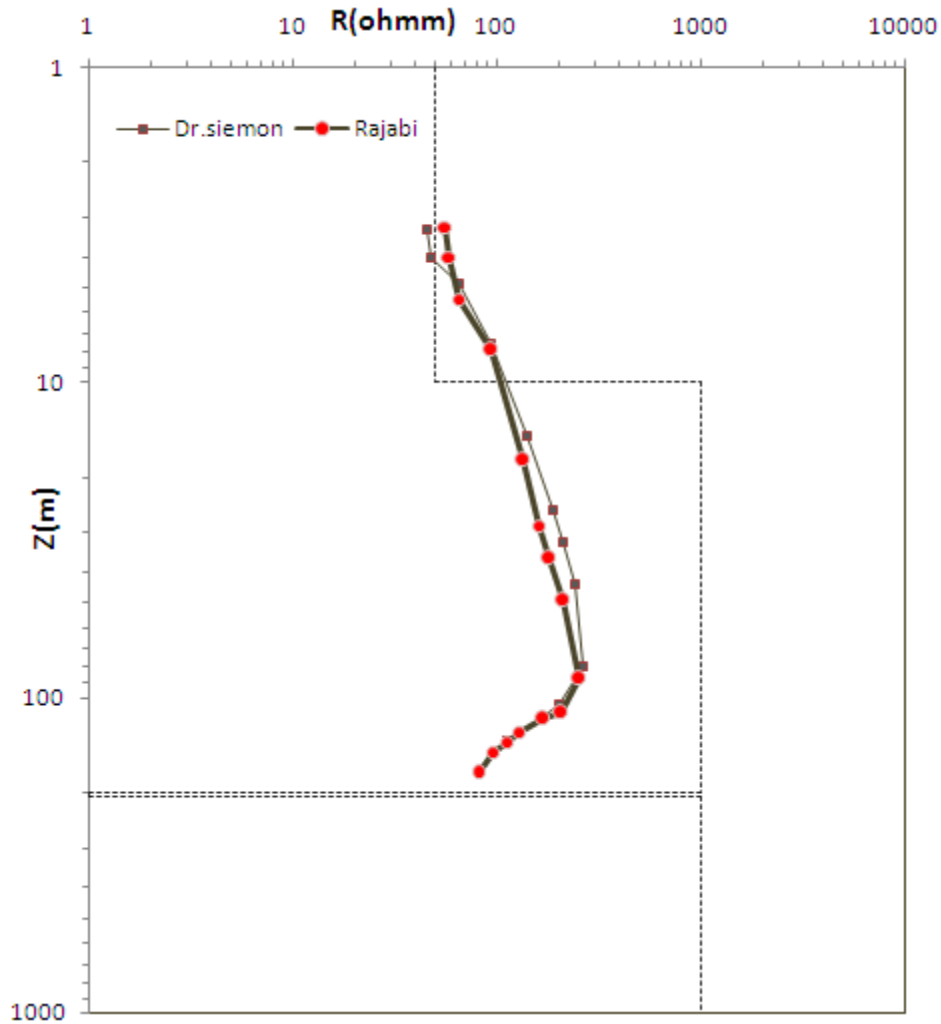
جدول (۶-۸): مشخصات زمین چهار لایه در نظر گرفته شده برای انجام معکوس سازی

| ضخامت | مقاومت ویژه | لایه |
|-------|-------------|------|
| ۱۰    | ۵۰          | ۱    |
| ۱۹۰   | ۱۰۰۰        | ۲    |
| ۱     | ۱           | ۳    |
| ∞     | ۱۰۰۰        | ۴    |

نتایج حاصل از معکوس سازی و مقایسه میان نتایج بدست آمده در شکل (۶-۳۰) آورده شده است. همانطور که در شکل (۶-۳۰) مشخص است، به دلیل آن که تعداد لایه ها را به خوبی تشخیص نداده ایم این پاسخ در قسمت مرکزی دارای یک شکستگی می باشد. با تغییر تعداد لایه ها و تصحیح ارتفاع پرواز همانگونه که در شکل (۶-۳۱) مشخص است نتایج مطلوب تری حاصل می گردد. از این رو می توان چنین نتیجه گیری نمود که اگر چه در حالت دولایه نتایج بدست آمده نسبت به نتایج بدست آمده *BGR* مطلوب تر است اما این روش نیازمند تعیین صحیح تعداد لایه ها می باشد و از آنجایی که تعیین تغییرات مقاومت ویژه زمین به سادگی صورت نمی گیرد، این روش هنگامی که تغییرات مقاومت ویژه به درستی تعیین نشده باشد، در فرکانس های میانی که مقادیر همفاز و موهومی آنها تقریباً به یکدیگر نزدیک است، (مثلاً فرکانس ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰)، جواب صحیحی ارائه نمی کند. مشکل دوم در این روش سرعت آن است که به دلیل وجود حلقه های تکرار سرعت این روش نسبتاً کند می باشد. از این رو امید داریم تا در آینده با حذف حلقه های تکرار کمتر سرعت انجام کار را بهبود ببخشیم.



شکل (۶-۳۰): نتایج معکوس سازی زمین حاصل از زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۶)



شکل (۶-۳۱): نتایج معکوس‌سازی زمین حاصل از زمین چهار لایه با مشخصات جدول (۶-۸) در صورتی که تغییرات مقاومت ویژه و ارتفاع پرواز به درستی تعیین شده باشد.

#### ۶-۴-۶- نتیجه‌گیری نهایی و ارائه پیشنهادات

##### ۶-۴-۶-۱- نتیجه‌گیری نهایی

پس از انجام مطالعات به روی روش‌های معکوس‌سازی تقریبی الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس، الگوریتم‌های روش‌های فوق توسط نرم افزار مطلب آزمایش گردید و پس از انجام تصحیحات لازم به دلیل نبودن برنامه و عدم انجام پاره‌ای از روش‌های معکوس‌سازی توسط نرم افزار مطلب، کد برنامه با زبان برنامه نویسی ویژوال C# و بانک اطلاعاتی Sql Server به صورت سه لایه نوشته شد. از آنجایی که برای مدل‌سازی نیازمند، برنامه پیشرو می‌باشیم، برنامه پیشرو به صورت یک برنامه الحاقی توسط نرم افزار مطلب نوشته شد و جهت مدل‌سازی داده‌ها



مورد استفاده قرار گرفت. البته لازم به ذکر است که در بیشتر مطالعات انجام شده مدل‌ها ابتدا توسط نرم افزارهای BGR تهیه گردید و پس از دریافت نتایج این مدل‌ها جهت مقایسه معکوس‌سازی‌های انجام شده مورد استفاده قرار گرفت. در پایان پس از انجام کلیه مراحل فوق نتایج زیر حاصل گردید:

- ✓ با انجام ۹ روش از روش‌های معکوس‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس هوایی هلیکوپتری، روش‌های نیم فضای کاذب برای معکوس‌سازی تقریبی بسیار بهتر و از خطای کمتری جهت تعیین مرزهای میان نواحی مختلف برخوردار هستند.
- ✓ تمامی روش‌ها هنگامی که زمین مورد مطالعه همگن باشد، جواب یکسانی را ارائه می‌دهند.
- ✓ روش‌های نیم فضای همگن دامنه میدان الکترومغناطیس - عمق پوسته - ارتفاع پرنده نسبت به روش دامنه میدان الکترومغناطیس - نسبت فاز - ارتفاع پرنده معکوس‌سازی تقریبی بهتری را انجام می‌دهد.
- ✓ روش دامنه میدان الکترومغناطیس - عمق پوسته - نسبت فاز دارای عمق نفوذ کمی می‌باشد، با این وجود برای به دست آوردن یک مدل اولیه جهت معکوس‌سازی تقریبی بسیار مناسب است.
- ✓ روش سنگپیل هنگامی که مولفه همفاز داده‌های برداشت شده نسبت به مولفه ناهمفاز تفاوت زیادی داشته باشد جواب مطلوبی را ارائه می‌دهد.
- ✓ روش سیمون عمق نفوذ بالاتری نسبت به روش سنگپیل دارد.
- ✓ در روش دیفرانسیلی جهت معکوس‌سازی تقریبی بهتر است تعداد فرکانس‌های برداشت بیشتر از ۴ فرکانس باشد. هر چه تعداد فرکانس‌های برداشت شده بیشتر باشد، عمق نفوذ بیشتر و مناطق بهتر مشخص می‌شوند.
- ✓ روش منگ برای معکوس‌سازی تقریبی الکترومغناطیس هلیکوپتری جواب‌های خوبی ارائه نمی‌کند. این روش به شدت به مدل اولیه جهت معکوس‌سازی تقریبی وابسته است.

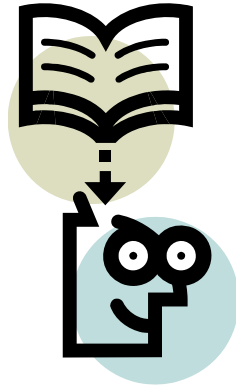
- ✓ روش سنگپیل بهبود یافته که هر دو مولفه هم‌فاز و ناهم‌فاز را برای معکوس‌سازی تقریبی استفاده می‌کند جواب‌های بهتری نسبت به روش قدیمی آن ارائه می‌کند.
- ✓ در روش سیمون بهبود یافته یافته که هر دو مولفه هم‌فاز و ناهم‌فاز را برای معکوس‌سازی تقریبی استفاده می‌کند، عمق نفوذ بیشتر از عمق نفوذ سنگپیل می‌باشد و جواب‌های به دست آمده به پاسخ زمین نزدیک‌تر هستند.
- ✓ در میان روش‌های مورد مطالعه بهترین روش جهت معکوس‌سازی تقریبی یک زمین چند لایه روش سیمون بهبود یافته می‌باشد.
- ✓ جهت یافتن نتایج بهتر لازم است قبل از معکوس‌سازی تقریبی، داده‌های برداشت شده را تصحیح ارتفاع نمود.
- ✓ تغییرات زیاد ارتفاع پرواز سبب بالا رفتن نوفه و نوفه در پاسخ زمین می‌گردد، از این رو نتایج به دست آمده چندان مطلوب نخواهد گشت.
- ✓ روش معکوس‌سازی توسط متغیرهای  $a$  و  $P$  از روند کندی برخوردار هستند و برای انجام معکوس‌سازی مناسب نیستند.

#### ۶-۴-۲- پیشنهادات

- جهت انجام مطالعات بیشتر نکات زیر را متذکر می‌گردیم:
- ✓ جهت نیل به نتایج بهتر لازم است انتگرال ماندری به روش ضرایب هنکل دوگانه مورد بررسی و حل مجدد قرار گیرد.
- ✓ برای بهتر شدن جواب روش دیفرانسیلی لازم است که معادله حاکم بر منحنی‌های روش دیفرانسیلی (شکل (۴-۱۴)) مشخص گردد.
- ✓ برای سرعت بخشیدن به انجام محاسبات معکوس‌سازی بهتر است روش لاپلاس جهت حل انتگرال ماندری مورد استفاده قرار گیرد.
- ✓ با توجه به این که روش‌های معکوس‌سازی تقریبی مینگ و دیفرانسیلی نیازمند مدل اولیه هستند، لذا لازم است روشی طراحی نمود تا مدل مورد اولیه مورد نظر را بر اساس پاسخ زمین به درستی تعیین کند.

- ✓ جهت انجام معکوس‌سازی‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی روش سیمون بهبود یافته که در این پایان نامه ارائه گردید، به عنوان مدل اولیه پیشنهاد می‌گردد.
- ✓ بهتر است روش حل انتگرال ماندری به روش گوپتاسامارا و سینک را با روش‌های حل عددی دیگر مورد مقایسه قرار داد و بهترین نتیجه را به عنوان مبنا جهت محاسبات ریاضی نرم افزار به کار برد.
- ✓ در روش مربوط به عمق پوسته-نسبت فاز-دامنه میدان الکترومغناطیس باید در نظر داشت که روند تغییرات به صورت خطی نمی‌باشد. از این رو در صورتی که روند تغییرات به صورت خطی در نظر گرفته شود، پاسخ‌ها چندان مطلوب نمی‌گردد. از این رو لازم است تا با توجه به مقادیر مورد نظر در نمودار مربوطه ضرایب  $a$  را به دست آورد و با توجه به روش گاوسی مساله را حل نمود.
- ✓ استفاده از یک نمودار که برای مقادیر مختلف مقاومت ویژه و ارتفاع پرواز تعیین شده باشد و همچنین یافتن معادله خط حاکم بر آن در سرعت محاسبات بسیار تاثیرگذار است و یکی از بهترین روش‌ها جهت معکوس‌سازی داده است که می‌تواند برای مطالعات بعدی در نظر گرفته شود.

# فہرست منابع مورد استفادہ



## منابع مورد استفاده

- تمدن، بابک، ۱۳۸۶، مدل‌سازی پیش‌رو و معکوس داده‌های اکتشافی الکترومغناطیس هوایی (روش دیگهم)، پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود
- کامکار روحانی، مرادزاده، عرب امیری، قطبی، رجیبی، ۱۳۸۷، ارائه یک الگوریتم مناسب در محاسبه مقاومت ویژه و عمق داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- عرب امیری، علیرضا، ۱۳۸۶، ارائه روشی بهبود یافته جهت مدل‌سازی معکوس داده‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری، طرح پیشنهادی رساله دوره دکتری مهندسی اکتشاف معدن.
- Asten, M.W., Duncan, A. C., 2006, Fast approximate EM induction modeling of metallic and UXO targets using a permeable prism: *Journal of Applied Geophysics*, in press.
- Beamish, D., 2002, An assessment of inversion methods for AEM data applied to environmental studies: *Journal of Applied Geophysics*, **51**, 75– 96.
- Beamish, D., 2003, Airborne EM footprints: *Geophysical Prospecting*, **51**, 49-60.
- Bostick, F.X., 1977, A simple almost exact method of MT analysis, Workshop on electrical methods in geothermal exploration: *U.S. Geol. Surv.*, 174- 183.
- Brian R. S., Dwight E. E., 1986, The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic method: *Geophysics*, **51**(7), 1462- 1471. 14 Figs
- Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: *Geophysics*, **52** (3), 289-300.
- Dobrin, M.B., Sovit, C.H., 1988, An Introduction to Geophysical Prospecting: *McGrawHill, Inc.* 868 pp.
- Fountain, D., 1998, Airborne electromagnetic systems- 50 years of development: *Exploration geophysics*, **29**, 1-11.
- Fraser, D.C., 1978, Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system: *Geophysics*, **43** (1), 144-172,
- Frischknecht, F.C., 1967, Fields about an oscillating magnetic dipole over the two- layer earth: *Quart.*, Colorado School of Mines, **62** (1), 326 pp.
- Ghosh, D.P., 1971a. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, **19**, 192-217.
- Ghosh, D.P., 1971b. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, **19**, 769-775.
- Guptasarma, D., Singh, B., 1997, New digital linear filters for Hankel  $J_0$  and  $J_1$  transforms. *Geophysical Prospecting*, **45**, 745-762

- Harinarayana, T., Zlotnicki, J., 2006, Special issue of journal of applied geophysics belectrical and electromagnetic studies in geothermally active regionsQ: *Journal of Applied Geophysics*, **58**, 263– 264.
- Hodges, G., 1999, HEM Advantages and Disadvantages, *Fugro Airborne Surveys*.
- Hodges, G., 2000a, Designing (Digital) HEM for Maximum Data Quality: *Fugro Airborne Surveys*.
- Hodges, G., 2004, Effects of Bird Height: *Fugro Airborne Surveys*.
- Huang, H., Palacky, G.J., 1991, Damped least-squares inversion of time-domain airborne EM data based on singular value decomposition: *Geophysical Prospecting*, **39**, 827-844.
- Huang, H., Fraser, D.C., 1996, The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping: *Geophysics*, **61** (1), 100–109.
- Huang, H., Fraser, D.C., 2002a, Dielectric permittivity and resistivity mapping using high-frequency, helicopter-borne EM data: *Geophysics*, **67** (3), 727–738.
- Huang, H., Fraser, D.C., 2002b, The use of quad–quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping: *Geophysics*, **67** (2), 459–467.
- <http://www.appliedgeophysics.berkeley.edu>, 2007.
- <http://www.encom.com.au>, 2007.
- <http://www.fugroairborne.com>, Airborne electromagnetic surveys short course, 2003, *Fugro Airborne Surveys Inc*.
- Johansen, H.K. Sorensen, K., 1979. Fast Hankel transforms. *Geophysical Prospecting*, **27**, 876-901
- Loke, M.H., 1999, Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies; A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys, **pp. 1-4**
- Meng, Q.M., Hu, P., 2006, Frequency-domain Airborne Electromagnetic Approximate Inversion and application:, SEG/ Annual Meeting, *Society of Exploration. Geophysics*. New Orleans.
- Mundry, E., 1984, On the interpretation of airborne electromagnetic data for the two-layer case: *Geophysical Prospecting*, **32**, 336-346.
- Nabighian, M.N., 1988, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, vol 1, Theory, *Society of Exploration. Geophysics*, 513pp.
- Nabighian, M.N., 1996, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics- Applications, Part A and Part B, *Society of Exploration. Geophysics*, 972pp.
- Reitz, J.R., Milford, F.J. and Christy, R.W., 1993, Foundations of Electromagnetic Theory: *Addison-Wesley Publishing Company*, 630 pp.
- Reynolds, J.M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics: *John Wiley and sons*, 796pp.

Sengpiel, K.P., 1988, Approximate inversion of airborne EM data from a multi-layered ground: *Geophysical Prospecting*, **36**, 446-459.

Sengpiel, K.P., Siemon, B., 1997, Advanced Tools and Inversion Methods for AEM Exploration, *Exploration 97*, edited by A.G. Gubins, pp. 553–556, Canada.

Sengpiel, K.P., Siemon, B., 2000, Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration: *Geophysics*, **65** (6), 1983-1992.

Siemon, B., 2001, Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data: *Journal of Applied Geophysics*, **46**, 65-76.

Telford, W.M., Geldart, L.P. Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics: *Cambridge University Press*. 770pp.

Yapar, A., 2006, A regularized Newton method for one-dimensional profile inversion of a lossy cylinder: *Int. J. Electron. Commun*, **60**, 590–595.

Yin, C., Fraser, D.C., 2004, The effect of the electrical anisotropy on the response of helicopter- borne frequency- domain electromagnetic systems: *Geophysical Prospecting*, **52**, 399-416.

پیوست الف



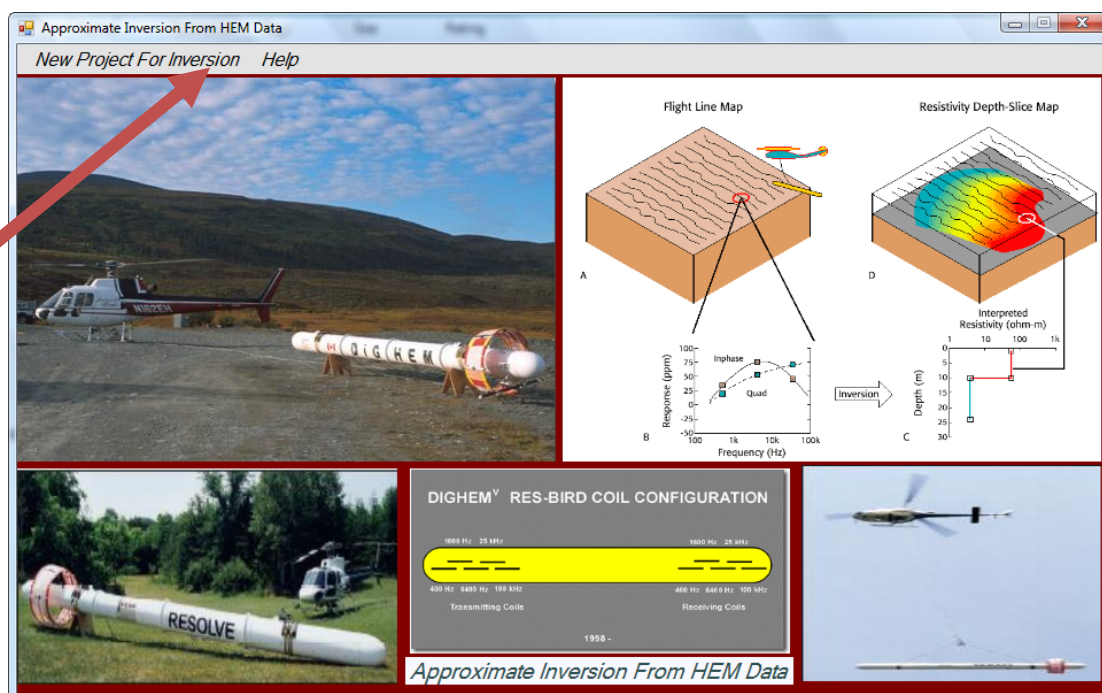
راهنمای استفاده از نرم افزار نگارش یافته



همان گونه که در فصل پنجم بیان نمودیم، برای انجام عملیات معکوس سازی تقریبی نرم افزار طراحی گردید. در این پیوست به صورت مختصر به روش کار با نرم افزار می پردازیم.

#### ❖ - اجرای نرم افزار

با اجرای فایل اجرایی نرم افزار ، مطابق شکل (۱-الف) صفحه اول شروع به کار نرم افزار اجرا می شود. برای ادامه کافی است در قسمت مشخص شده کلیک نماییم . با کلیک بر روی این گزینه پنجره شکل (۲-الف) ظاهر می گردد. در ادامه به طور مختصر با روند معکوس سازی تقریبی الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس توسط این نرم افزار آشنا می گردیم.



شکل (۱-الف) : شمایی از صفحه آغازین اجرای نرم افزار

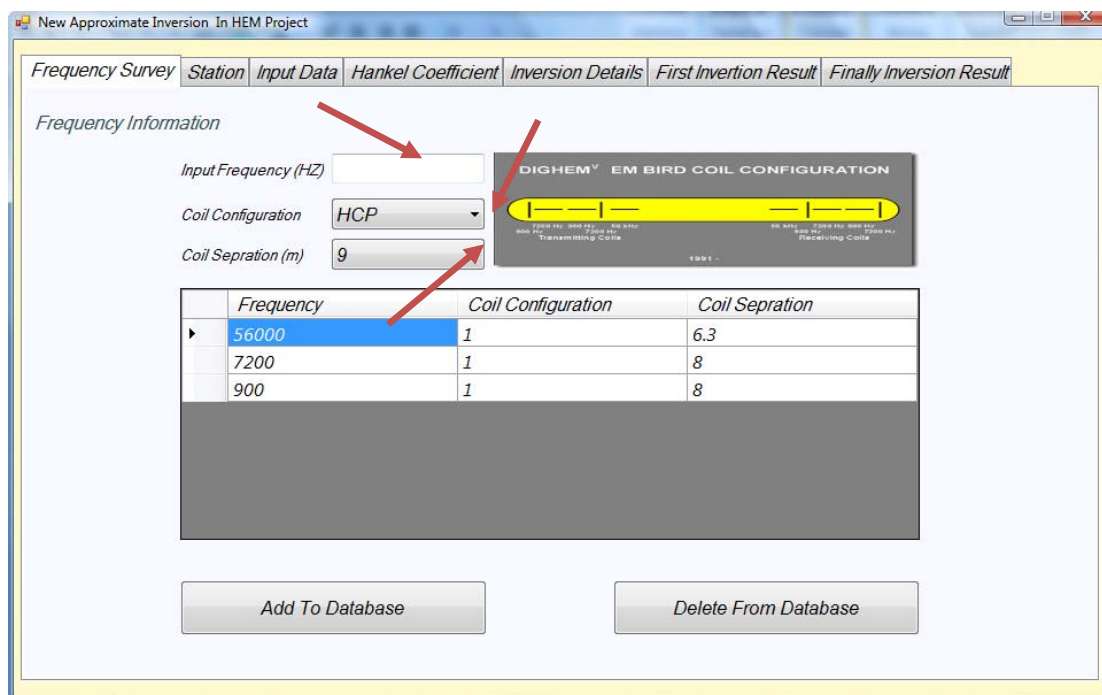
#### ❖ - ورود اطلاعات فرکانس

همان گونه که در شکل (۲-الف) مشخص است در ابتدا کاربر لازم است اطلاعاتی در مورد فرکانس های مورد برداشت ، فاصله سیم پیچ های برداشت و چگونگی قرار گیری سیم پیچ ها را تعیین کند. بر این اساس داده های وارد شده توسط کاربر از سوی برنامه کنترل شده و بر اساس اطلاعات وارد شده از سوی کاربر مقادیر در محل خود در فایل مخصوصی که برای آنها معین شده است وارد می شود.

اطلاعات مربوط به فرکانس نیازمند تعیین سه مقدار ورودی می باشد:

- مقدار عددی فرکانس برداشت بر حسب هرتز (HZ)

- ترکیب سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده: این سیم‌پیچ‌ها به سه حالت VCP ، HCP و VCX می‌توانند قرار گیرند.
- فاصله میان سیم‌پیچ‌ها: بر اساس نوع سیستم برداشت و فاصله سیم‌پیچ‌ها از یکدیگر، فاصله میان سیم‌پیچ‌ها توسط کاربر تعیین می‌گردد.



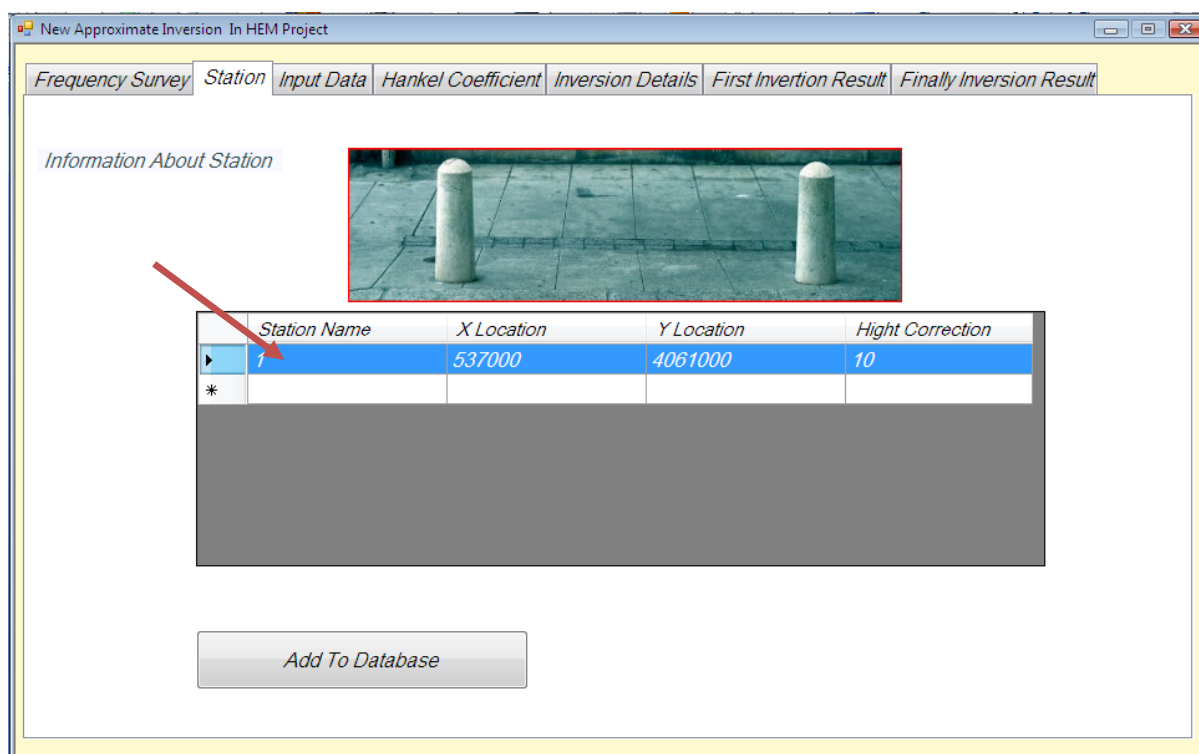
شکل (۲-الف) : ورود اطلاعات مربوط به فرکانس

در این حالت به راحتی کاربر قادر است فرکانس‌های مورد برداشت را به صورت مجزا و تک تک وارد نماید و یا در صورت لزوم آنها را اصلاح و یا حذف کند. از این رو کاربر قادر است با آزادی تمام اطلاعات فرکانس را تغییر دهد. در پایان این اطلاعات در جدول مربوط به بانک اطلاعاتی SQL Server نرم افزار در قسمت اطلاعات مربوط به فرکانس‌ها ذخیره می‌گردد.

البته این امکان نیز به کاربر داده شده است تا به طریق بانک اطلاعاتی به وارد کردن داده‌ها به صورت کلی در محل مربوطه نماید. تنها کافی است که فرمت داده‌های مورد نظر بر اساس نرم افزار میکروسافت اکسل و طبق آنچه که به عنوان پیش فرض است تعیین شده باشد.

## ❖ - اطلاعات ایستگاه ها

در شکل (۳-الف) نمایش ناحیه در نظر گرفته شده برای ایستگاه ها نشان داده شده است. در این مقطع کاربر می تواند اطلاعات ایستگاه های مورد برداشت را با توجه به موقعیت جغرافیایی ایستگاه ، مقادیر طول و عرض جغرافیایی توسط کاربر وارد می گردد. در پاره ای موارد که لازم است تصحیحات ارتفاع نیز صورت گیرد کاربر می تواند تصحیح ارتفاعی مورد نظر را نیز اعمال کند.



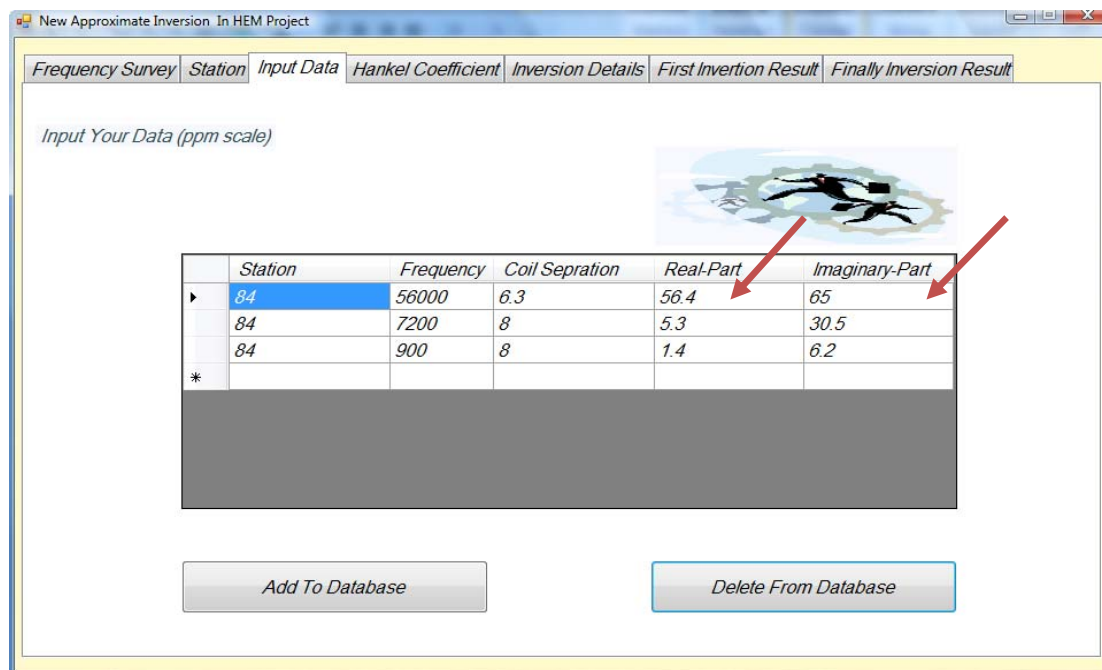
شکل (۳-الف) : ورود اطلاعات مربوط به ایستگاه ها

در این حالت نیز در صورت اشتباه وارد شدن مقادیر می توانیم آنها را اصلاح نماییم. البته در زمینه کارهای علمی که غالباً کارهای یک بعدی می باشد تنها یک ایستگاه معرفی می گردد. در پایان این اطلاعات در جدول مربوط به بانک اطلاعاتی نرم افزار در قسمت اطلاعات مربوط به ایستگاه ها ذخیره می گردد.

## ❖ - اطلاعات مربوط به مقادیر برداشت شده توسط هلیکوپتر

همان طور که در شکل (۴-الف) مشخص است ، در این قسمت مقادیر برداشت شده همفاز و ناهمفاز میدان الکترومغناطیس هوایی برای هر ایستگاه و برای هر فرکانس در محل مشخص شده وارد می گردد. داده های

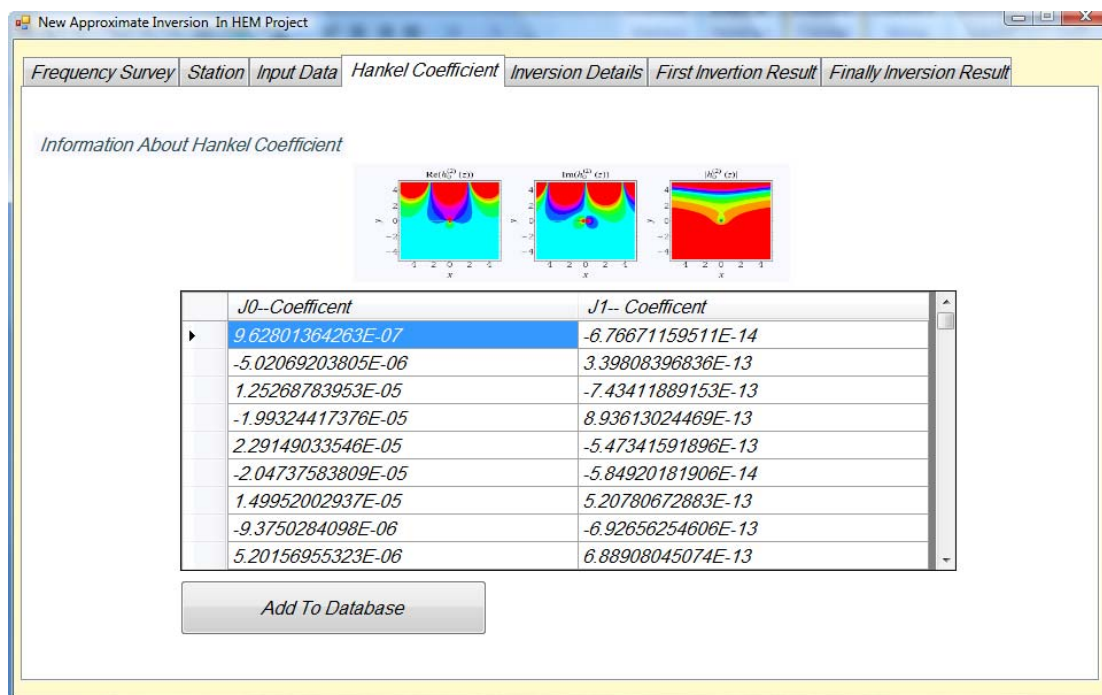
وارد شده پس از تصحیح اولیه در محل مربوط به مقادیر برداشت شده در بانک اطلاعاتی نرم افزار ذخیره می شوند.



شکل (۴-الف) : ورود مقادیر برداشت شده برای هر فرکانس

#### ۵-۴-۵-۵-اطلاعات مربوط به ضرایب هنکل

در ابتدای فصل بیان گردید که ما برای محاسبه انتگرال ماندیری از روش ضرایب هنکل استفاده می نماییم. در این روش نیازمند یک سری ضرایب وزنی هستیم تا بتوانیم از طریق حل عددی، انتگرال را حل نماییم. از این رو لازم است در قسمتی این ضرایب تعیین و مورد استفاده واقع شوند. این ضرایب وزنی به صورت پیش فرض در بانک اطلاعاتی ذخیره شده است. اما گاهی در پژوهش های علمی نیاز مند آن هستیم تا روش های مختلف ارائه شده، مورد بررسی قرار دهیم و یا ضرایب وزنی را تغییر دهیم، لذا لازم دانستیم تا در یک قسمت مجزا دست کاربر را در تغییر این ضرایب آزاد گذاریم تا طبق آنچه که می خواهد مقادیر مربوطه را تغییر دهد. در شکل (۵-الف) محل ورود ضرایب وزنی نشان داده شده است. در پایان این اطلاعات در بانک اطلاعاتی نرم افزار در قسمت اطلاعات مربوط به ضرایب هنکل ذخیره می گردد.



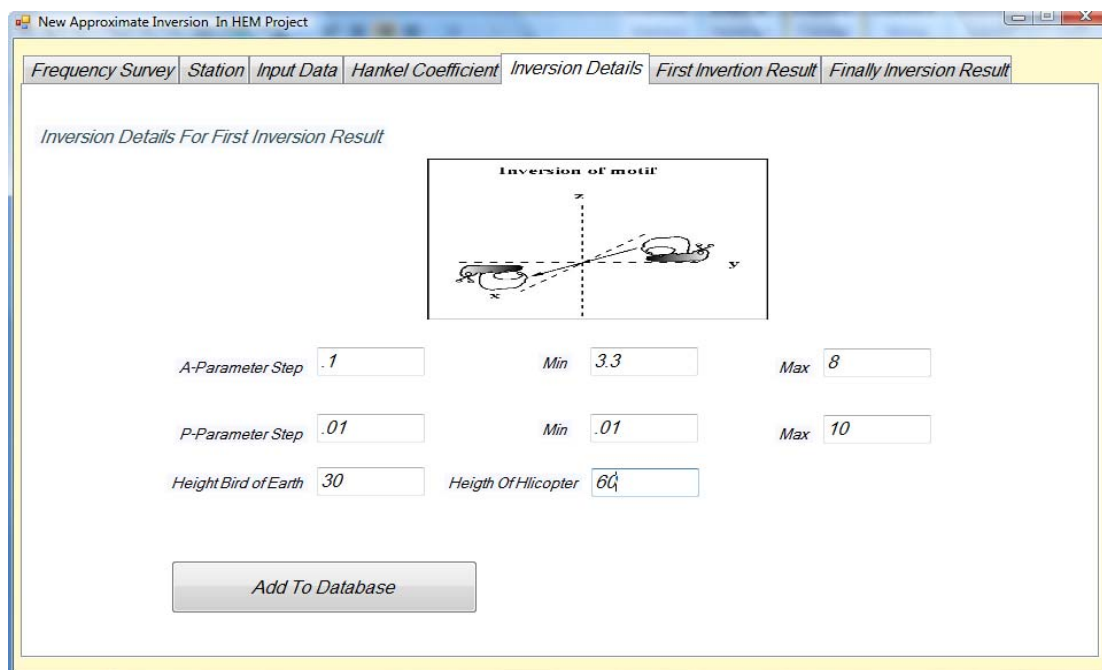
شکل (۵-الف) : ورود ضرایب هنکل

#### ❖ - اطلاعات پایه ای جهت محاسبات

در این قسمت ما به تولید بدنه محاسبات جهت انجام عملیات معکوس سازی تقریبی می پردازیم. همان گونه که در قبل بیان کردیم ، لازم است جهت محاسبات جدولی از مقادیر مختلف ارتفاع پرنده و مقادیر مختلف مقاومت ویژه جهت محاسبه مقدار انتگرال ماندیری تهیه نماییم تا بر اساس آن بهترین برآزش را میان مقادیر محاسباتی و مقادیر برداشت شده به دست آوریم .

بر این اساس لازم است تا دو متغیر  $a$  (این متغیر جهت اعمال تغییرات ارتفاع پرواز در محاسبات تعیین می شود.) و  $P$  ( این متغیر جهت اعمال تغییرات مقاومت ویژه در محاسبات و همچنین متغیر نمودن عمق پوسته مورد استفاده قرار می گیرد.) را به صورت زیر تعریف کنیم . علت تعریف این دو پارامتر به صورت زیر آن است که محاسبات ما به صورت خطی تر و ساده تر صورت بگیرد.

لذا بهتر است همان طور که در شکل (۶-الف) مشخص است، بازه تغییرات  $a$  و  $P$  را بر اساس زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و تغییرات ارتفاعی پرنده در برداشت الکترومغناطیس هوایی حوزه فرکانس تعیین شوند. تغییرات این محدوده کاملاً در اختیار کاربر قرار داده می شود تا به راحتی محدوده مورد نظر را تغییر دهد.



شکل (۶-الف) : ورود اطلاعات پایه جهت انجام فرآیند معکوس سازی

در پایان لازم است با وارد نمودن پارامترهای ارتفاع پرواز و ارتفاع هلی کوپتر از زمین کاربر می تواند این اطلاعات را در بانک اطلاعاتی نرم افزار در قسمت اطلاعات مربوط به پارامترهای تفسیر a-P ذخیره کند. لازم به ذکر است که با این عمل جدولی از داده های تعیین شده توسط کاربر بر اساس بیشترین و کمترین مقدار و بازه تغییرات a-P در نرم افزار ایجاد می گردد. این جدول اساس کارهای محاسباتی را تشکیل می دهد.

#### ❖ - نمایش پاسخ اولیه

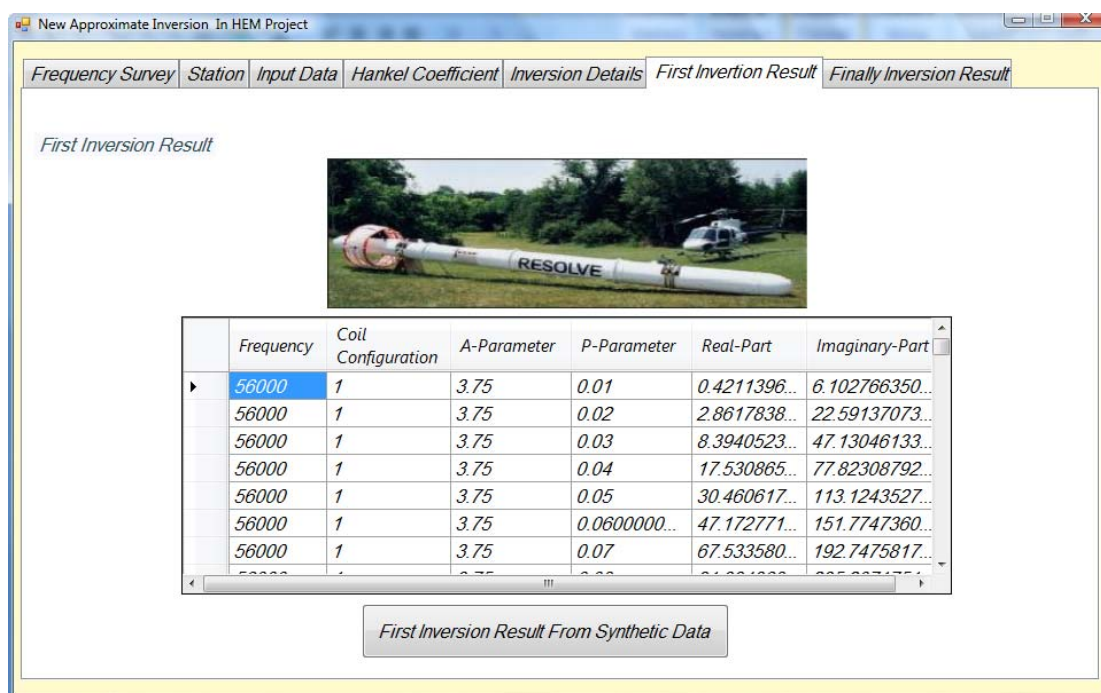
با وارد نمودن اطلاعات پایه جهت تفسیر نرم افزار به تولید جدولی از مقادیر a و P با محدوده تغییرات تعیین شده می پردازد و برای هر فرکانس برداشت این اطلاعات در یک جدول ذخیره می گردد. این جدول با وارد نمودن دکمه محاسبات اولیه شروع به محاسبات جهت حل انتگرال ماندی می نماید و مقادیر را در جدول مشخص شده پر می کند.

البته ما در این پایان نامه به انجام چندین روش مختلف محاسباتی پرداخته ایم از این رو جدول محاسباتی بسیار بزرگی تهیه نموده ایم که در برخی موارد پر شدن این جدول طولانی می گردد. همان طور



که در شکل (۷-الف) مشخص است برای هر  $a$  و  $P$  مورد مطالعه و برای هر فرکانس برداشت مقدار حقیقی و موهومی انتگرال ماندری محاسبه شده است.

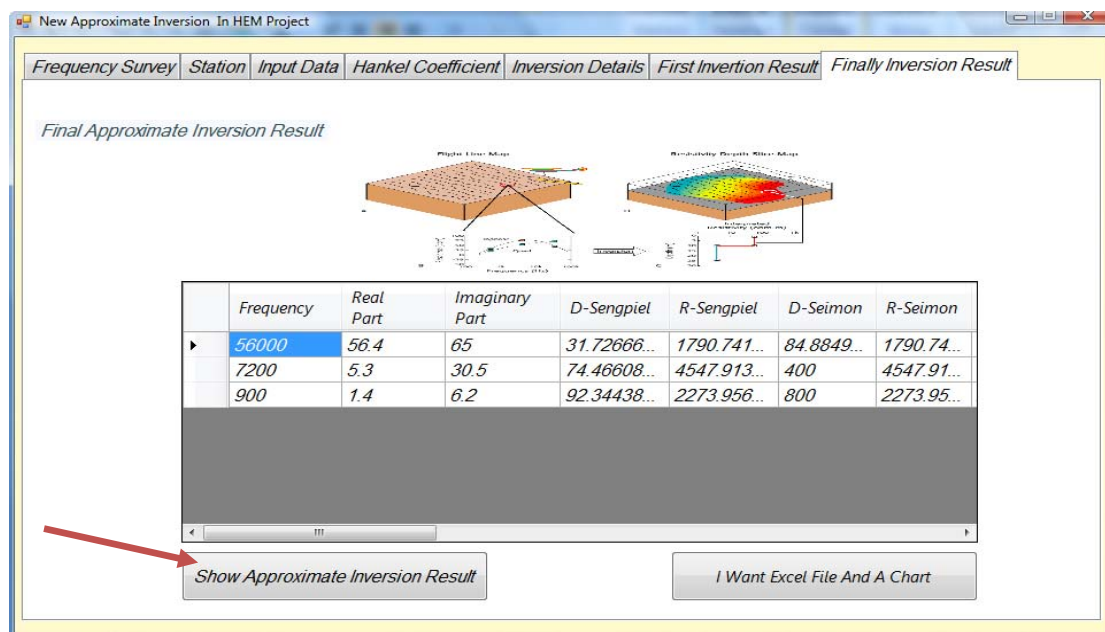
این مقادیر برای انجام عملیات برازش میان مقادیر برداشت و مقادیر محاسبه شده مورد استفاده قرار می گیرد. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات در محل مربوط به جدول اولیه ذخیره می گردند.



شکل (۷-الف): نمایش پاسخ های اولیه حاصل از معکوس سازی داده های مصنوعی

#### ❖ - پاسخ نهایی

پس از آن که تمامی مراحل بالا انجام گردید حال لازم است تا محاسبات بر اساس هر یک از الگوریتم های ارائه شده در این پایان نامه صورت بگیرد. بر اساس آنچه که در نتیجه نهایی مشاهده می کنیم ، این برنامه به بررسی و محاسبه ۸ نوع الگوریتم متفاوت می پردازد. از این تعداد، دو نوع بر اساس مدل نیم فضای همگن و بقیه بر اساس مدل نیم فضای کاذب عمل می کنند. از این رو با زدن دکمه مربوط به نتایج نهایی در شکل (۸-الف)، می توانیم نتایج الگوریتم های معکوس سازی تقریبی را مشاهده کنیم.



شکل (۸-الف): نمایش پاسخ نهایی حاصل از معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هوایی

در این قسمت می توانیم نتایج را به صورت یک فایل میکروسافت اکسل تهیه نماییم و تمام محاسبات انجام شده را در یک فایل میکروسافت اکسل، همانند شکل (۹-الف) مشاهده نماییم و تغییرات مورد نظر را اعمال نموده و مقادیر مورد نظر را چاپ نماییم.

|    | A      | B                 | C           | D           | E        | F        | G        | H        | I     |
|----|--------|-------------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 1  |        | R-Sengpiel-Simeon | D-Sengpiel  | D-Simeon    | R-AED    | H-AED+30 | Dif-Z    | Dif-Ro   | Meter |
| 2  | 115200 | 1019.104644       | 24.88437875 | 46.99277108 | 1136.978 | 29.6     | 60.3541  | 995.4053 | 0     |
| 3  | 57600  | 1027.704531       | 34.48407918 | 66.24065041 | 1139.739 | 30.4     | 68.24808 | 988.7195 | 10    |
| 4  | 28800  | 1031.27295        | 39.49529399 | 94.03809524 | 1136.978 | 31.2     | 88.11311 | 641.9279 | 20    |
| 5  | 14400  | 977.7831138       | 50.90689743 | 132.347541  | 1119.831 | 31.2     | 115.2718 | 1555.652 | 30    |
| 6  | 7200   | 983.8645123       | 59.09365034 | 187.2465116 | 1136.978 | 31.2     | 159.6232 | 1421.759 | 40    |
| 7  | 3600   | 1010.647491       | 61.92801221 | 265.4666667 | 1160.182 | 31.2     | 214.0486 | 644.517  | 50    |
| 8  | 1800   | 1031.27295        | 67.96117339 | 378.952381  | 1136.978 | 32       | 239.3103 | 644.517  | 60    |
| 9  | 900    | 1010.647491       | 78.18212841 | 532.1333333 | 1160.182 | 30.4     | 239.3103 | 644.517  | 70    |
| 10 | 450    | 939.6515926       | 95.90886312 | 729.2727273 | 1136.978 | 32       | 239.3103 | 644.517  | 80    |
| 11 | 225    | 888.2643961       | 95.47844385 | 1140.857143 | 1160.182 | 32       | 239.3103 | 644.517  | 90    |
| 12 | 115200 | 1019.104644       | 24.88437875 | 46.99277108 | 1136.978 | 29.6     | 60.3541  | 995.4053 | 100   |
| 13 | 57600  | 1027.704531       | 34.48407918 | 66.24065041 | 1139.739 | 30.4     | 68.24808 | 988.7195 | 110   |
| 14 | 28800  | 1031.27295        | 39.49529399 | 94.03809524 | 1136.978 | 31.2     | 88.11311 | 641.9279 | 120   |
| 15 | 14400  | 977.7831138       | 50.90689743 | 132.347541  | 1119.831 | 31.2     | 115.2718 | 1555.652 | 130   |
| 16 | 7200   | 983.8645123       | 59.09365034 | 187.2465116 | 1136.978 | 31.2     | 159.6232 | 1421.759 | 140   |
| 17 | 3600   | 1010.647491       | 61.92801221 | 265.4666667 | 1160.182 | 31.2     | 214.0486 | 644.517  | 150   |

شکل (۹-الف): نمایش پاسخ نهایی به صورت فایل اکسل



پوستب



ضرایب وزنی کویتا سامارا او سینک برای حل عددی

انگزال ماندری

همان گونه که بیان کردیم برای یافتن پاسخ انتگرال ماندری از روش حل عددی هنکل با توجه به روش گوپتاسامارا وسینک استفاده نمودیم. در این روش نیازمند ضرایب وزنی  $W_i$  برای هر یک از جملات هستیم. در روش گوپتاسامارا وسینک ۴ جدول برای ضرایب وزنی  $W_i$  ارائه شده اند که بستگی به تعداد جملات تعیین شده این ضرایب متفاوت می باشند. از طرفی همان طور که مشخص است، با تغییر تعداد جملات مقادیر ثابت  $a$  و  $s$  نیز تغییر می کنند. نکته حائز اهمیت این است که؛ این چیدمان این ضرایب از سمت چپ به راست است. به این معنی که ضریب اول سطر اول ستون اول و ضریب دوم سطر اول ستون دوم می باشد و به همین ترتیب ضرایب در نظر گرفته می شوند. در جدول های (۱-ب)، (۲-ب)، (۳-ب) و (۴-ب) جداول مربوط به ضرایب وزنی  $W_i$  و مقادیر  $a$  و  $s$  آورده شده اند.

|                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 3.30220475766e-04  | -1.18223623458e-03 | 2.01879495264e-03  | -2.13218719891e-03 |
| 1.60839063172e-03  | -9.09156346708e-04 | 4.37889252738e-04  | -1.55298878782e-04 |
| 7.98411962729e-05  | 4.37268394072e-06  | 3.94253441247e-05  | 4.02675924344e-05  |
| 5.66053344653e-05  | 7.25774926389e-05  | 9.55412535465e-05  | 1.24699163157e-04  |
| 1.63262166579e-04  | 2.13477133718e-04  | 2.79304232173e-04  | 3.65312787897e-04  |
| 4.77899413107e-04  | 6.25100170825e-04  | 8.17726956451e-04  | 1.06961339341e-03  |
| 1.39920928148e-03  | 1.83020380399e-03  | 2.39417015791e-03  | 3.13158560774e-03  |
| 4.09654426763e-03  | 5.35807925630e-03  | 7.00889482693e-03  | 9.16637526490e-03  |
| 1.19891721272e-02  | 1.56755740646e-02  | 2.04953856060e-02  | 2.67778388247e-02  |
| 3.49719672729e-02  | 4.55975312615e-02  | 5.93498881451e-02  | 7.69179091244e-02  |
| 9.91094769804e-02  | 1.26166963993e-01  | 1.57616825575e-01  | 1.89707800260e-01  |
| 2.13804195282e-01  | 2.08669340316e-01  | 1.40250562745e-01  | -3.65385242807e-02 |
| -2.98004010732e-01 | -4.21898149249e-01 | 5.94373771266e-02  | 5.29621428353e-01  |
| -4.41362405166e-01 | 1.90355040550e-01  | -6.19966386785e-02 | 1.87255115744e-02  |
| -5.68736766738e-03 | 1.68263510609e-03  | -4.38587145792e-04 | 8.59117336292e-05  |
| -9.15853765160e-06 |                    |                    |                    |

جدول (۱-ب): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۶۱ نقطه ای  $J_0$ .

مقادیر  $a = -5.0825000000e+00$  و  $s = 1.16638303862e-01$  در نظر گرفته می شوند.

|                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 9.62801364263e-07  | -5.02069203805e-06 | 1.25268783953e-05  | -1.99324417376e-05 |
| 2.29149033546e-05  | -2.04737583809e-05 | 1.49952002937e-05  | -9.37502840980e-06 |
| 5.20156955323e-06  | -2.62939890538e-06 | 1.26550848081e-06  | -5.73156151923e-07 |
| 2.76281274155e-07  | -1.09963734387e-07 | 7.38038330280e-08  | -9.31614600001e-09 |
| 3.87247135578e-08  | 2.10303178461e-08  | 4.10556513877e-08  | 4.13077946246e-08  |
| 5.68828741789e-08  | 6.59543638130e-08  | 8.40811858728e-08  | 1.01532550003e-07  |
| 1.26437360082e-07  | 1.54733678097e-07  | 1.91218582499e-07  | 2.35008851918e-07  |
| 2.89750329490e-07  | 3.56550504341e-07  | 4.39299297826e-07  | 5.40794544880e-07  |
| 6.66136379541e-07  | 8.20175040653e-07  | 1.01015545059e-06  | 1.24384500153e-06  |
| 1.53187399787e-06  | 1.88633707689e-06  | 2.32307100992e-06  | 2.86067883258e-06  |
| 3.52293208580e-06  | 4.33827546442e-06  | 5.34253613351e-06  | 6.57906223200e-06  |
| 8.10198829111e-06  | 9.97723263578e-06  | 1.22867312381e-05  | 1.51305855976e-05  |
| 1.86329431672e-05  | 2.29456891669e-05  | 2.82570465155e-05  | 3.47973610445e-05  |
| 4.28521099371e-05  | 5.27705217882e-05  | 6.49856943660e-05  | 8.00269662180e-05  |
| 9.85515408752e-05  | 1.21361571831e-04  | 1.49454562334e-04  | 1.84045784500e-04  |
| 2.26649641428e-04  | 2.79106748890e-04  | 3.43716968725e-04  | 4.23267056591e-04  |
| 5.21251001943e-04  | 6.41886194381e-04  | 7.90483105615e-04  | 9.73420647376e-04  |
| 1.19877439042e-03  | 1.47618560844e-03  | 1.81794224454e-03  | 2.23860214971e-03  |
| 2.75687537633e-03  | 3.39471308297e-03  | 4.18062141752e-03  | 5.14762977308e-03  |
| 6.33918155348e-03  | 7.80480111772e-03  | 9.61064602702e-03  | 1.18304971234e-02  |
| 1.45647517743e-02  | 1.79219149417e-02  | 2.20527911163e-02  | 2.71124775541e-02  |
| 3.33214363101e-02  | 4.08864842127e-02  | 5.01074356716e-02  | 6.12084049407e-02  |
| 7.45146949048e-02  | 9.00780900611e-02  | 1.07940155413e-01  | 1.27267746478e-01  |
| 1.46676027814e-01  | 1.62254276550e-01  | 1.68045766353e-01  | 1.52383204788e-01  |
| 1.01214136498e-01  | -2.44389126667e-03 | -1.54078468398e-01 | -3.03214415655e-01 |
| -2.97674373379e-01 | 7.93541259524e-03  | 4.26273267393e-01  | 1.00032384844e-01  |
| -4.94117404043e-01 | 3.92604878741e-01  | -1.90111691178e-01 | 7.43654896362e-02  |
| -2.78508428343e-02 | 1.09992061155e-02  | -4.69798719697e-03 | 2.12587632706e-03  |
| -9.81986734159e-04 | 4.44992546836e-04  | -1.89983519162e-04 | 7.31024164292e-05  |
| -2.40057837293e-05 | 6.23096824846e-06  | -1.12363896552e-06 | 1.04470606055e-07  |

جدول (۲-ب) : ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۱۲۰ نقطه ای  $J_0$  .

مقادیر  $a = -8.3885000000e+00$  و  $s = 9.044226468670e-02$  در نظر گرفته می شوند.

|                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| -6.76671159511e-14 | 3.39808396836e-13  | -7.43411889153e-13 | 8.93613024469e-13  |
| -5.47341591896e-13 | -5.84920181906e-14 | 5.20780672883e-13  | -6.92656254606e-13 |
| 6.88908045074e-13  | -6.39910528298e-13 | 5.82098912530e-13  | -4.84912700478e-13 |
| 3.54684337858e-13  | -2.10855291368e-13 | 1.00452749275e-13  | 5.58449957721e-15  |
| -5.67206735175e-14 | 1.09107856853e-13  | -6.04067500756e-14 | 8.84512134731e-14  |
| 2.22321981827e-14  | 8.38072239207e-14  | 1.23647835900e-13  | 1.44351787234e-13  |
| 2.94276480713e-13  | 3.39965995918e-13  | 6.17024672340e-13  | 8.25310217692e-13  |
| 1.32560792613e-12  | 1.90949961267e-12  | 2.93458179767e-12  | 4.33454210095e-12  |
| 6.55863288798e-12  | 9.78324910827e-12  | 1.47126365223e-11  | 2.20240108708e-11  |
| 3.30577485691e-11  | 4.95377381480e-11  | 7.43047574433e-11  | 1.11400535181e-10  |
| 1.67052734516e-10  | 2.50470107577e-10  | 3.75597211630e-10  | 5.63165204681e-10  |
| 8.44458166896e-10  | 1.26621795331e-09  | 1.89866561359e-09  | 2.84693620927e-09  |
| 4.26886170263e-09  | 6.40104325574e-09  | 9.59798498616e-09  | 1.43918931885e-08  |
| 2.15798696769e-08  | 3.23584600810e-08  | 4.85195105813e-08  | 7.27538583183e-08  |
| 1.09090191748e-07  | 1.63577866557e-07  | 2.45275193920e-07  | 3.67784458730e-07  |
| 5.51470341585e-07  | 8.26916206192e-07  | 1.23991037294e-06  | 1.85921554669e-06  |
| 2.78777669034e-06  | 4.18019870272e-06  | 6.26794044911e-06  | 9.39858833064e-06  |
| 1.40925408889e-05  | 2.11312291505e-05  | 3.16846342900e-05  | 4.75093313246e-05  |
| 7.12354794719e-05  | 1.06810848460e-04  | 1.60146590551e-04  | 2.40110903628e-04  |
| 3.59981158972e-04  | 5.39658308918e-04  | 8.08925141201e-04  | 1.21234066243e-03  |
| 1.81650387595e-03  | 2.72068483151e-03  | 4.07274689463e-03  | 6.09135552241e-03  |
| 9.09940027636e-03  | 1.35660714813e-02  | 2.01692550906e-02  | 2.98534800308e-02  |
| 4.39060697220e-02  | 6.39211368217e-02  | 9.16763946228e-02  | 1.28368795114e-01  |
| 1.73241920046e-01  | 2.19830379079e-01  | 2.51193131178e-01  | 2.32380049895e-01  |
| 1.17121080205e-01  | -1.17252913088e-01 | -3.52148528535e-01 | -2.71162871370e-01 |
| 2.91134747110e-01  | 3.17192840623e-01  | -4.93075681595e-01 | 3.11223091821e-01  |
| -1.36044122543e-01 | 5.12141261934e-02  | -1.90806300761e-02 | 7.57044398633e-03  |
| -3.25432753751e-03 | 1.49774676371e-03  | -7.24569558272e-04 | 3.62792644965e-04  |
| -1.85907973641e-04 | 9.67201396593e-05  | -5.07744171678e-05 | 2.67510121456e-05  |
| -1.40667136728e-05 | 7.33363699547e-06  | -3.75638767050e-06 | 1.86344211280e-06  |
| -8.71623576811e-07 | 3.61028200288e-07  | -1.05847108097e-07 | -1.51569361490e-08 |
| 6.67633241420e-08  | -8.33741579804e-08 | 8.31065906136e-08  | -7.53457009758e-08 |
| 6.48057680299e-08  | -5.37558016587e-08 | 4.32436265303e-08  | -3.37262648712e-08 |
| 2.53558687098e-08  | -1.81287021528e-08 | 1.20228328586e-08  | -7.10898040664e-09 |
| 3.53667004588e-09  | -1.36030600198e-09 | 3.52544249042e-10  | -4.53719284366e-11 |

جدول (۳-ب) : ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۱۴۰ نقطه ای  $J_1$  .

مقادیر  $a=-7.91001919000e+00$  و  $s=8.79671439570e-02$  در نظر گرفته می شوند.

|                   |                    |                    |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 3.17926147465e-06 | -9.73811660718e-06 | 1.64866227408e-05  | -1.81501261160e-05 |
| 1.87556556369e-05 | -1.46550406038e-05 | 1.53799733803e-05  | -6.95628273934e-06 |
| 1.41881555665e-05 | 3.41445665537e-06  | 2.13941715512e-05  | 2.34962369042e-05  |
| 4.84340283290e-05 | 7.33732978590e-05  | 1.27703784430e-04  | 2.08120025730e-04  |
| 3.49803898913e-04 | 5.79107814687e-04  | 9.65887918451e-04  | 1.60401273703e-03  |
| 2.66903777685e-03 | 4.43111590040e-03  | 7.35631696247e-03  | 1.21782796293e-02  |
| 2.01097829218e-02 | 3.30096953061e-02  | 5.37143591532e-02  | 8.60516613299e-02  |
| 1.34267607144e-01 | 2.00125033067e-01  | 2.74027505792e-01  | 3.18168749246e-01  |
| 2.41655667461e-01 | -5.40549161658e-02 | -4.46912952135e-01 | -1.92231885629e-01 |
| 5.52376753950e-01 | -3.57429049025e-01 | 1.41510519002e-01  | -4.61421935309e-02 |
| 1.48273761923e-02 | -5.07479209193e-03 | 1.83829713749e-03  | -6.67742804324e-04 |
| 2.21277518118e-04 | -5.66248732755e-05 | 7.88229202853e-06  |                    |

جدول (۴-ب): ضرایب وزنی  $W_i$  برای فیلتر ۴۷ نقطه ای  $J_1$ .

مقادیر  $a=-3.05078186795e+00$  و  $s=1.10599010095e-01$  در نظر گرفته می شوند

پوستج



تئوری معکوس سازی تقریبی داده های الکترومغناطیس

هوایی توسط روش سنکسپل

همان گونه که بیان کردیم میدان مغناطیسی ثانویه نرمالیزه شده در محل گیرنده (در بالای یک زمین لایه‌ای) با  $Z$  که عددی مختلط است، از این رو می توان چنین نوشت:

$$Z=R+iQ \quad (\text{ج-۱})$$

از طرفی در صورتی که میان ارتفاع پرنده ( $h$ ) و فاصله جدایش سیم‌پیچ‌ها ( $r$ ) رابطه زیر برقرار باشد

$$h \geq 3.3 r \quad (\text{ج-۲})$$

می توان چنین نوشت:

$$Z \cong G_j \left(\frac{r}{h}\right)^3 \int_0^\infty k^2 R_1 e^{-2k} dk \quad (\text{ج-۳})$$

در این رابطه،  $G_j$  فاکتوری است که به نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده بستگی دارد و برای حالات مختلف عبارتست از:

- برای سیم‌پیچ‌های هم صفحه افقی  $j=1$ ،  $G_1=1$ .
- برای سیم‌پیچ‌های هم صفحه عمودی  $j=2$ ،  $G_2=1/2$ .
- برای سیم‌پیچ‌های هم محور قائم  $j=3$ ،  $G_3=-1/4$  [Mundry, 1984].

در رابطه (ج-۳)،  $R_1$  ضریب بازتاب<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. ضریب بازتاب عددی مختلط است. که مقدار آن برای یک زمین همگن از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_1 = \frac{\nu - k}{\nu + k} \quad (\text{ج-۴})$$

که در آن:

$$\nu = \sqrt{k^2 + i2\delta^2} \quad (\text{ج-۴-الف})$$

$$k = \lambda h = 2\pi \frac{h}{L} \quad (\text{ج-۴-ب})$$

$$\delta = \frac{h}{p} \quad (\text{ج-۴-ج})$$

پارامتر  $k$  عدد موج نرمالیزه شده<sup>۲</sup>،  $L$  طول موج فضایی<sup>۳</sup>،  $\delta$  پارامتر فاصله<sup>۴</sup> و  $P$  عمق پوسته است

[Sengpiel, 1988]

<sup>1</sup> Reflection factor

<sup>2</sup> Normalized wavenumber

از طرفی همان طور که می دانیم :

$$\nu = \frac{h}{c_\lambda} \quad (\text{ج-۵})$$

در صورتی که  $C_k$  را به صورت زیر تعریف نماییم:

$$C_k = \frac{1}{\nu} = \frac{c_\lambda}{h} \quad (\text{ج-۶})$$

در این صورت با استفاده از رابطه (ج-۴)، ضریب بازتاب را می توان به صورت زیر نوشت:

$$R_1 = \frac{1 - k C_k}{1 + k C_k} \quad (\text{ج-۷})$$

با تعیین ضریب بازتاب به صورت رابطه (ج-۷) و قرار دادن آنها در رابطه (ج-۳)، مولفه های تابع تبدیل ( $C_k$ )، به مولفه های میدان ثانویه ( $Z$ ) مرتبط می شوند. اما این رابطه برای حالتی است که مدل نیم فضای همگن در نظر گرفته شده باشد. در صورتی که زمین به صورت لایه ای باشد، در این صورت زمین لایه ای به چند لایه با مقاومت ویژه های مختلف ( $\rho_i$ ) تقسیم می گردد. از طرفی برای هر لایه فاصله میان سطح فوقانی هر لایه تا پرنده به عنوان پارامتر ( $h_i$ ) در نظر گرفته می شود. در این صورت ضریب بازتاب  $R_1$  از طریق روابط بازگشتی زیر قابل محاسبه است [Mundry, 1984]:

$$R_{n-1} = K_{n-1} \quad (\text{ج-۸})$$

$$R_{i-1} = \frac{K_{i-1} + R_i \cdot u_i}{1 + K_{i-1} \cdot R_i \cdot u_i} \quad \text{و} \quad i=2,3,4,\dots \quad (\text{ج-۸-الف})$$

که در آن :

$$u_i = \exp(-2 h_i \nu_i) \quad (\text{ج-۸-ب})$$

$$\nu_i = \left[ \lambda^2 + \frac{i \omega \mu_0}{\rho_i} \right]^{1/2} \quad (\text{ج-۸-ج})$$

رابطه (ج-۸-ج) همان رابطه (ج-۴-الف) است و اما چون زمین به صورت لایه ای در نظر گرفته شده

است برای تعداد معین  $i$  لایه باز نویسی شده است. از این رو می توان چنین نوشت:

$$K_{i-1} = \frac{V_{i-1} - V_i}{V_{i-1} + V_i} \quad (\text{ج-۹})$$

<sup>3</sup> Spherical wavelenght

<sup>4</sup> Distance parameter



که در این صورت ضریب بازتاب ( $R_I$ ) برای زمین لایه‌ای قابل محاسبه است. از این رو با معلوم بودن  $K_{i-1}$  می توان  $R_{i-1}$  را به دست آورد. با معلوم شدن این مقادیر می توان ضرایب بعدی را نیز به دست آورد. باید توجه داشت که محاسبات از لایه یکی مانده به آخر شروع می شود و تا لایه اول ادامه می یابد.

از آنجا که  $u_i$  یک عدد حقیقی است و  $R_1$  ضریب بازتاب لایه‌ها، عددی مختلط است؛ پس رابطه (ج-۳) به صورت رابطه زیر قابل بازنویسی است [Sengpiel, 1988]:

$$Z \cong \frac{4}{M} \int_0^{\infty} (\text{Re } R_1 + i \text{Im } R_1) k^2 e^{-2k} dk \quad (\text{ج-۱۰})$$

که در آن :

$$M = \frac{4}{G_j} \left( \frac{h}{r} \right)^3 \quad (\text{ج-۱۰-الف})$$

با توجه به این که  $Z$  یک مقدار مختلط است؛ می توان رابطه (ج-۱) را برای مولفه های حقیقی ( $R$ ) و موهومی اش ( $Q$ )، بازنویسی نمود [Sengpiel, 1988]:

$$R = \frac{4}{M} \text{Re } R_1(k_r) \int_0^{\infty} k^2 e^{-2k} dk = \frac{1}{M} \text{Re } R_1(k_r) \quad (\text{ج-۱۱-الف})$$

$$Q = \frac{4}{M} \text{Im } R_1(k_i) \int_0^{\infty} k^2 e^{-2k} dk = \frac{1}{M} \text{Im } R_1(k_i) \quad (\text{ج-۱۱-ب})$$

که در این روابط،  $k_r$  و  $k_i$  مقادیر متوسط  $k$  می باشند. بدلیل آنکه تابع باقیمانده زیر انتگرال در بازه تعریف شده، تغییر علامت نمی دهد و عبارت پشت انتگرال نیز تابعی پیوسته است؛ نوشتن رابطه به صورت دو رابطه تجزیه شده بالا اشکالی ندارد. حال برای معکوس سازی تقریبی رابطه زیر را تعریف می کنیم:

$$v = u + iw \quad (\text{ج-۱۲})$$

که اگر رابطه (ج-۱۲) را در رابطه (ج-۴) جایگذاری نماییم داریم:

$$\text{Re } R_1 = \frac{w^2}{u(\bar{k} + u)} \quad (\text{ج-۱۳-الف})$$

$$\text{Im } R_1 = \frac{w\bar{k}}{u(\bar{k} + u)} \quad (\text{ج-۱۳-ب})$$

که در آن :

$$u = \sqrt{\frac{l + \bar{k}^2}{2}} \quad (\text{ج-۱۳-ج})$$

$$w = \sqrt{\frac{l - \bar{k}^2}{2}} \quad (\text{ج-۱۳-د})$$

$$l = \sqrt{\bar{k}^4 + 4\delta^4} \quad (\text{ج-۱۳-ه})$$

در روابط فوق،  $\bar{k}$  می‌تواند  $k_r$  یا  $k_i$  باشد [Sengpiel, 1988]. همچنین با استفاده از روابط (ج-۱۳-)

۱۳-الف) و (ج-۱۳-ب)، برای محاسبه مقدار  $k_r$  (بخش حقیقی میدان منتشرشده) می‌توان چنین نوشت:

$$k_r = \delta^4 \sqrt{\frac{1}{B(B-1)}} \quad (\text{ج-۱۵-الف})$$

که در آن:

$$B = \frac{1}{(1-MR)^2} \quad \text{برای } (MR < 1) \quad (\text{ج-۱۵-ب})$$

در این حالت مقدار عددی  $MR$  برابر است با:

$$MR = 4 \operatorname{Re} \left( \int_0^{\infty} k^2 R_1 e^{-2k} dk \right) \quad (\text{ج-۱۵-ج})$$

در نتیجه  $k_r$  که تنها تابعی از  $\delta$  است؛ محاسبه می‌شود. اما برای محاسبه  $k_i$  نمی‌توان همانند روش

قبل عمل نمود و تنها راه حل موجود استفاده از روش‌های حل عددی است. با استفاده از روابط (ج-۵)، (ج-۱۲)

و (ج-۱۳-الف) می‌توان مقدار  $\operatorname{Re} C$  را به دست آورد [Sengpiel, 1988]:

$$\operatorname{Re} C = \frac{u(k_r)}{l(k_r)} \quad (\text{ج-۱۶})$$

که با بهره‌گیری از آن، مقدار  $z^*$  قابل محاسبه است.

$$z^* = h \operatorname{Re} C \quad (\text{ج-۱۷})$$

همان گونه که می‌دانیم، داده‌های هوایی برای یک زمین لایه‌ای به دست می‌آیند، از این رو می‌توان

این داده‌ها را براساس پارامترهای یک نیم‌فضای معادل محاسبه نمود. در این حالت نیازمند تعریف پارامترهای

جدیدی هستیم، این پارامترها را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

الف) فاصله سیستم اندازه گیری تا سطح نیم فضای معادل که آن را فاصله ظاهری<sup>۵</sup> ( $D_a$ ) می نامیم.

ب) مقاومت ویژه نیم فضای معادل که آن را مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) می نامیم.

برای تبدیل فاصله ظاهری به عمق مرکزی در روش سنگپیل از روابط (ج-۱۶) و (ج-۱۷) استفاده می کنیم.

البته پیش از آن چون از فاصله ظاهری استفاده می کنیم نیازمندیم تا ارتفاع  $h$  را با  $D_a$  و مقاومت ویژه نیم فضا

$\rho$  را با  $\rho_a$  جایگزین نماییم، در این صورت داریم:

$$\delta_a = \frac{D_a}{p_a} \quad (\text{ج-۱۸-الف})$$

$$p_a = \sqrt{\frac{\rho_a}{\pi f \mu_0}} \quad (\text{ج-۱۸-ب})$$

$$M = \frac{4}{G_j} \left( \frac{D_a}{r} \right)^3 \quad (\text{ج-۱۸-ج})$$

در این روابط  $p_a$  عمق پوسته ظاهری<sup>۶</sup> خوانده می شود. اگر در رابطه (ج-۱۵-الف) نیز بجای  $\delta$  پارامتر  $\delta_a$  را قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$k_r = \delta_a^4 \sqrt{\frac{1}{B(B-1)}} \quad (\text{ج-۱۹})$$

و در نهایت  $\text{Re } C$  نیز از رابطه (ج-۱۶) محاسبه می شود که با قرار دادن آن در رابطه (ج-۱۷) عمق مرکزی

( $z_c^*$ )، از سطح نیم فضای معادل محاسبه می گردد [Sengpiel, 1988].

$$z_c^* = D_a \text{Re } C \quad (\text{ج-۲۰})$$

<sup>5</sup> Apparent distance

<sup>6</sup> Apparent skin depth

## **Abstract**

The calculation of apparent resistivity, based on the model of a homogeneous half-space, is commonly the first step in order to evaluate helicopter electromagnetic (HEM) data. Several algorithms for deriving enhanced resistivity–depth profiles, which are more sensitive to resistivity variations with respect to depth, are presented. These algorithms have been devised in two domains, time and frequency. Some simple methods for this purpose are Sengpiel's algorithm (1988), Siemon's algorithm (2000), Huang & Fraser algorithm (1997) and reformed Siemon's method (2000).

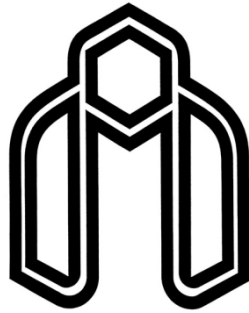
So, in this thesis we try to explain some airborne electromagnetic algorithms and describe them, to know which one is the best. We try to say some benefits and blemishes whichever. We also, devise two free softwares, forward and inversion, for solve these algorithms, because no free software was available.

We plan them with Visual C# 2005 and SQL-SERVER 2005, all codes are free and you can change them every time you want.

All result have been attained with these softwares. At last we understand that Siemon's algorithm is better than other, and when we have more than 4 frequencies the Differential's algorithm has the best depth result. Also the Homogenous's algorithms has the worst result for inversion HEM data, and Pseudo layer algorithm is more better than homogenous algorithms.

At long last, these softwares are in initial stages, and we hope to plan perfect software in the future.

Key words: Algorithm, Helicopter electromagnetic (HEM), Pseudo layer, Homogenous, Resistivity



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining and Geophysics**

**MSc Thesis In Exploration Geophysics**

**Determination of apparent resistivity from  
DIGHEM electromagnetic frequency data**

**By**  
**Davood Rajabi**

**Supervisors**  
**Dr. Abolghasem Kamkar Rohani**  
**Dr. Ali Moradzadeh**

**JUN 2008**