



دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت

گروه: اکتشاف معدن، نفت و ژئوفیزیک

مدل سازی معکوس تقریبی داده های مصنوعی الکترومغناطیس هلیکوپتری

حوزه فرکانس به روش های مختلف و مقایسه نتایج

**دانشجو:**

حسن نقی پور اوندری

**اساتید راهنما:**

دکتر علیرضا عربامیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

**مشاور:**

مهندس داود رجبی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ماه ۱۳۹۰

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت

گروه: اکتشاف معدن، نفت و ژئوفیزیک

### پایان نامه کارشناسی ارشد حسن نقی پور

تحت عنوان: مدل سازی معکوس تقریبی داده های مصنوعی الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس به

روش های مختلف و مقایسه نتایج

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد ژئوالکترونیک مورد

ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : مهندس داود رجبی		نام و نام خانوادگی : دکترعلیرضا عرب امیری
			نام و نام خانوادگی : دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی
امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر سوسن ابراهیمی		نام و نام خانوادگی : دکتر حمید آقاجانی
			نام و نام خانوادگی : دکتر علیرضا احمدی فرد

## تقدیر و تشکر:

اکنون که این پایان نامه به اتمام رسیده است لازم است که از زحمات بی دریغ آقایان دکتر علیرضا عرب امیری و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی به عنوان اساتید راهنما و مهندس داود رجبی به عنوان مشاور که با رهنمودهایشان مرا در انجام این پایان نامه یاری فرمودند، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از کلیه اساتید ارجمند دانشکده به دلیل کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان در طول تحصیل کمال تشکر و قدردانی را دارم. امیدوارم همه این عزیزان در تمام مراحل زندگیشان موفق و سربلند باشند.

## تعهد نامه

اینجانب حسن نقی پور اوندری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوالکتریک دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی معکوس تقریبی داده های مصنوعی الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس به روش های مختلف و مقایسه نتایج تحت راهنمایی آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عرب امیری و مهندس داود رجبی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «**Shahrood University of Technology**» به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۹۰/۱۱/۳۰

امضای دانشجو: حسن نقی پور اوندری

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

برداشت‌های الکترومغناطیس هوابرد امروزه به طور وسیع در اکتشاف مواد معدنی، فعالیت‌های مهندسی، بررسی‌های زیست محیطی، کشف فلزات مدفون و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها بر اساس اندازه‌گیری میدان ثانویه ناشی از القای یک میدان اولیه متغیر با زمان به داخل زمین عمل می‌کند. سپس با استفاده از این میدان ثانویه اندازه گرفته شده توزیع مقاومت ویژه زمین را نسبت به عمق مشخص می‌سازند. چند سالی است که امکان انجام این برداشت‌ها در کشور فراهم شده است. لذا در حال حاضر برای بهره‌مندی از نتایج این برداشت‌ها، که حجم آنها نیز خیلی زیاد است، این داده‌ها باید به گونه‌ای مناسب تفسیر شوند. از بین راه‌های مختلف، مدل‌سازی عددی، بکارگیری روش‌های معکوس‌سازی تقریبی یا روش‌های معکوس با تکرار محاسبات راهگشاست. با توجه به نتایج حاصل از روش‌های مختلف مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس هلیکوپتری، مشاهده می‌شود که متاسفانه تاکنون روشی که بتواند عمق قرارگیری لایه یا توده زیرسطحی و مقاومت‌ویژه آن را بدرستی و برای تمامی مدل‌های زیرسطحی مشخص نماید، ابداع نشده و در روش‌های مدل‌سازی یک ابهام وجود دارد. لذا در این بخش هنوز محل تحقیق بیشتر برای رسیدن به یک وحدت رویه وجود دارد.

در این تحقیق هدف شناسایی نقاط قوت و ضعف روش‌های موجود در مواجهه با مدل‌های مختلف مصنوعی و در نهایت انتخاب یک یا چند روش به عنوان بهترین روش‌های ممکن برای مدل یا مدل‌های مذکور می‌باشد. روش‌های تقریبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌ها وجود دارند که احتیاج به حدس یک مدل اولیه نداشته و از نظر زمان محاسبات بسیار سریع می‌باشند. روش‌های مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از: روش نسبت فاز، روش دامنه، روش سیمون، روش نیلت-بوستیک و روش SUTHEM. در مدل‌سازی پیشرو جهت محاسبه انتگرال پیچیده زمین از روش حل عددی ارائه شده توسط گوپتاسارما و سینگ استفاده شد. کد مربوط به این روش‌ها در محیط GUI نرم‌افزار مطلب نوشته شد و در قالب یک

نرم افزار برای معکوس سازی تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. مدل های مصنوعی پیش بینی شده شامل مدل های یک و دو بعدی می باشد. مدل های یک بعدی شامل نیم فضای همگن و نیم فضای لایه ای (دو، سه و چهار لایه) می باشد. مدل های دوبعدی شامل صفحه رسانای شیب دار با شیب های مختلف، لایه رسانای شیب دار، دایک رسانا و نارسانا به صورت محدود و نامحدود و دو آنومالی کنار و زیر همدیگر می باشند.

پروفیل مقاومت ویژه-عمق و مقاطع دوبعدی مدل های مذکور تهیه شد و پاسخ روش های استفاده شده در هر مورد با هم مقایسه شد. روش های نیم فضای لایه کاذب برای معکوس سازی تقریبی جهت تعیین مرزهای میان نواحی مختلف دارای نتایج بسیار بهتری بودند. این روش ها در یافتن عمق و مقاومت ویژه یک لایه رسانای واقع در بین دو لایه مقاوم، نتایج قابل اعتمادی دارند. روش نیپلت-بوستیک در این مورد بهترین پاسخ را می دهد. روش سیمون و روش SUTHEM عملکرد تقریباً مشابه هم دارند. در مدل سازی های دوبعدی آنومالی های محدود پاسخ روش نسبت فاز، نسبت به پروفیل های یک بعدی از نتایج بهتری برخوردار بودند.

## واژگان کلیدی:

مدل سازی معکوس، الکترومغناطیس هلیکوپتری، حوزه فرکانس، داده های مصنوعی

## مقاله مستخرج:

نقی پور اوندری حسن، رجبی داود، عرب امیری علیرضا، کامکار روحانی ابوالقاسم، بررسی تفکیک دایک‌های قائم در معکوس سازی مستقیم داده‌های هوایی، سی امین کنفرانس علوم زمین در تهران.



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۱-۲- سابقه و ضرورت انجام تحقیق..... ۴
- ۱-۳- هدف‌ها و کاربرد مطالعه حاضر..... ۴
- ۱-۴- ساختار پایان نامه..... ۴

### فصل دوم: تئوری روش‌های الکترومغناطیس

- ۱-۲- مقدمه..... ۷
- ۲-۲- معادلات ماکسول..... ۷
- ۲-۲-۱- معادلات ماکسول در ماده..... ۱۰
- ۲-۲-۲- محاسبه عمق پوسته در یک زمین رسانا با استفاده از قوانین ماکسول..... ۱۲
- ۲-۳- مدل‌های القای الکترومغناطیسی..... ۱۴
- ۲-۳-۱- زمین لایه‌ای..... ۱۵
- ۲-۳-۲- رساناهای مدفون در زمین..... ۱۷

### فصل سوم: سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری

## عنوان

## صفحه

۳-۱- مقدمه.....	۲۱
۳-۲- روش های حوزه زمان.....	۲۱
۳-۳- روش های حوزه فرکانس.....	۲۲
۳-۴- الکترومغناطیس هلیکوپتری.....	۲۴
۳-۵- فاصله پیچه ها و نرمالیزه کردن.....	۲۷
۳-۶- معرفی دو سیستم الکترومغناطیس هوابرد.....	۲۹
۳-۶-۱- سیستم دیگر.....	۲۹
۳-۶-۲- سیستم RESOLVE.....	۳۰
۳-۷- ارتفاع پرنده الکترومغناطیس.....	۳۱

### فصل چهارم: روش های معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس

۴-۱- مقدمه.....	۳۳
۴-۲- مقاومت ویژه الکتریکی.....	۳۳
۴-۳- معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس.....	۳۵
۴-۴- انواع الگوریتم ها و روش های مدل سازی داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری.....	۳۹

- الف- روش مقاطع فریزر..... ۴۰
- الف-۱- مدل نیم فضای همگن..... ۴۱
- الف-۲- مدل نیم فضای لایه کاذب..... ۴۳
- ب- روابط پایه‌ای برای محاسبات..... ۴۶
- ج- روش‌های نیم فضای همگن..... ۴۹
- ۴-۵- عمق مرکزی..... ۵۲
- الف- روش مقاطع سنگپیل ( $\rho_a(z_s^*)$ )..... ۵۳
- ب- روش عمق مرکزی سیمون ( $\rho_a(z_s^*)$ )..... ۵۴
- ج- روش‌های بهبود یافته سیمون..... ۵۶
- ج-۱- روش بهبود یافته دیفرانسیلی سیمون ( $\rho_{NB}(Z_s^*)$ )..... ۵۶
- ج-۲- روش بهبود یافته غیر دیفرانسیلی سیمون ( $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$ )..... ۵۸
- د- روش SUTHEM..... ۶۰
- ن- روش پارامتر دیفرانسیلی هوانگ..... ۶۲

عنوان	صفحه
۵-۱- مقدمه.....	۶۷
۵-۲- مدل های یک بعدی.....	۶۸
۵-۲-۱- مدل های نیم فضای همگن.....	۶۸
۵-۲-۲- مدل های نیم فضای لایه ای.....	۷۰
۵-۳- مدل سازی دوبعدی.....	۸۷
۵-۳-۱- مدل سازی صفحه شیب دار رسانا در یک زمین مقاوم.....	۸۷
الف) صفحه رسانای افقی (شیب صفر درجه).....	۸۷
ب) صفحه رسانای با شیب ۳۰ درجه.....	۹۰
ج) صفحه رسانای با شیب ۴۵ درجه.....	۹۲
د) صفحه رسانای با شیب ۶۰ درجه.....	۹۴
ن) صفحه رسانای قائم (شیب ۹۰ درجه).....	۹۶
۵-۳-۲- مدل سازی لایه رسانای شیب دار قرار گرفته در سنگ میزبان مقاوم تر.....	۹۸
۵-۳-۳- مدل سازی دایک.....	۱۰۰
الف- دایک رسانا در یک محیط بسیار مقاوم.....	۱۰۰
الف-۱- دایک رسانای محدود.....	۱۰۰

صفحه	عنوان
۱۰۴.....	الف-۲- دایک رسانای نامحدود.....
۱۰۸.....	ب- دایک مقاوم در یک محیط رسانا.....
۱۰۸.....	ب-۱- دایک مقاوم محدود.....
۱۱۱.....	ب-۲- دایک مقاوم نامحدود.....
۱۱۴.....	۵-۳-۴- مدل سازی دو آنومالی.....

### فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۱۱۸.....	نتایج.....
۱۱۹.....	پیشنهادات.....
۱۲۰.....	فهرست منابع.....

### فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۶.....	شکل (۱-۲) برهمکنش امواج الکترومغناطیس با یک زمین همگن.....
۱۷.....	شکل (۲-۲) شارش جریان گردابی در زمینی با لایه‌های رسانا و مقاوم.....
۱۸.....	شکل (۳-۲) جریان‌های گردابی و میدان ثانویه در یک توده رسانا.....

- شکل (۱-۳) نحوه نفوذ حلقه‌های میدان با گذشت زمان..... ۲۲
- شکل (۲-۳) حلقه‌های جریان در سه فرکانس در زمینی با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$ ..... ۲۳
- شکل (۳-۳) نمایش شماتیک سیستم دیگهم..... ۲۴
- شکل (۴-۳) مقایسه پاسخ صفحه رسانا با زاویه‌های شیب مختلف..... ۲۶
- شکل (۵-۳) ساختار پیچه دیگهم..... ۳۰
- شکل (۶-۳) نمایش ساختار پیچه RESOLVE..... ۳۰
- شکل (۱۰-۳) تاثیر ارتفاع پرواز بر دامنه آنومالی مشخص..... ۳۱
- شکل (۱-۴) مقاومت ویژه و رسانندگی سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد متداول..... ۳۴
- شکل (۲-۴) زمینی با مقاومت ویژه واقعی و مقاومت ویژه ظاهری..... ۳۵
- شکل (۳-۴) پارامترهای قابل استفاده برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری..... ۳۶
- شکل (۴-۴) انواع معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد..... ۴۰
- شکل (۵-۴) برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای همگن..... ۴۱
- شکل (۶-۴) نمودار دامنه-ارتفاعی مدل نیم‌فضای همگن..... ۴۲
- شکل (۷-۴) نمایش عمق و فاصله ظاهری و اثر درختان بر اندازه‌گیری ارتفاع..... ۴۳
- شکل (۸-۴) نحوه برداشت الکترومغناطیس هلی کوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای کاذب..... ۴۴
- شکل (۹-۴) نمودار دامنه-فاز مدل نیم‌فضای لایه کاذب..... ۴۵
- شکل (۱۰-۴) تغییرات مولفه هم‌فاز و غیرهم‌فاز بر حسب  $\delta$ ..... ۴۹

- شکل (۴-۱۱) منحنی‌های تخمین زده شده برای محاسبه مقاومت ویژه..... ۵۱
- شکل (۴-۱۲) مقایسه منحنی‌های سونداژ بدست از آمده از دو تعریف مختلف عمق مرکزی..... ۵۴
- شکل (۴-۱۳) مقایسه منحنی‌های سونداژ بدست آمده عمق مرکزی سیمون و سنگپیل..... ۵۵
- شکل ۴-۱۴- مقایسه منحنی‌های سونداژ عمق مرکزی و دیفرانسیلی سیمون..... ۵۸
- شکل (۴-۱۵) مقاطع مقاومت ویژه ظاهری لایه شیب دار..... ۶۰
- شکل (۴-۱۶) نمایش عمق موثر به صورت تابعی از عمق پوسته و عمق ظاهری..... ۶۳
- شکل (۴-۱۷) مقایسه نتایج روش‌های دیفرانسیلی و سنگپیل در زمین دو لایه..... ۶۴
- شکل (۴-۱۸) مقایسه روش‌های دیفرانسیلی و سنگپیل در مورد زمین چهار لایه..... ۶۵
- شکل (۵-۱) منحنی سونداژ نیم فضای همگن رسانا با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$ ..... ۶۹
- شکل (۵-۲) منحنی سونداژ نیم فضای همگن مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$ ..... ۷۰
- شکل (۵-۳) منحنی سونداژ یک زمین دو لایه (لایه روباره مقاوم)..... ۷۱
- شکل (۵-۴) منحنی سونداژ یک زمین دو لایه (لایه روباره رسانا)..... ۷۲
- شکل (۵-۵) منحنی‌های سونداژ یک زمین سه لایه (یک لایه بسیار رسانا بین دو لایه رسانا)..... ۷۴
- شکل (۵-۶) منحنی سونداژ یک زمین سه لایه (لایه مقاوم بین دو لایه رسانا)..... ۷۵

- شکل (۷-۵) منحنی حاصل از یک زمین سه لایه (یک لایه بسیار رسانا بین دو لایه مقاوم با مقاومت‌های متفاوت)..... ۷۶
- شکل (۸-۵) منحنی‌های سونداژ حاصل از یک زمین سه لایه (یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم با مقاومت یکسان)..... ۷۸
- شکل (۹-۵) منحنی‌های سونداژ حاصل از یک زمین سه لایه..... ۷۹
- شکل (۱۰-۵) منحنی‌های سونداژ یک زمین سه لایه (یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم)..... ۸۰
- شکل (۱۱-۵) منحنی‌های سونداژ یک زمین چهار لایه (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۵۰ m)..... ۸۲
- شکل (۱۲-۵) منحنی‌های سونداژ یک زمین چهار لایه (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۹۰ m)..... ۸۳
- شکل (۱۳-۵) منحنی‌های زمین چهار لایه ( لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۲۰۰ m)..... ۸۴
- شکل (۱۴-۵) منحنی‌های سونداژ زمین چهار لایه..... ۸۵
- شکل (۱۵-۵) منحنی سونداژ یک زمین چهار لایه..... ۸۶
- شکل (۱۶-۵) حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانا با شیب صفر درجه..... ۸۹
- شکل (۱۷-۵) تصویرهای حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانا با شیب ۳۰ درجه..... ۹۱
- شکل (۱۸-۵) تصویرهای حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانا با شیب ۴۵ درجه..... ۹۳
- شکل (۱۹-۵) تصویرهای حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانا با شیب ۶۰ درجه..... ۹۵
- شکل (۲۰-۵) تصویرهای حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانای قائم..... ۹۷



- شکل (۵-۲۱) تصویرهای حاصل از مدل سازی لایه رسانای شیب دار..... ۹۹
- شکل (۵-۲۲) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک رسانای محدود (طول ۵m)..... ۱۰۲
- شکل (۵-۲۳) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک رسانای محدود (طول ۲۰m)..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۴) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک رسانای نامحدود (طول ۵m)..... ۱۰۶
- شکل (۵-۲۵) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک رسانای نامحدود (طول ۲۰m)..... ۱۰۷
- شکل (۵-۲۶) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای محدود (طول ۵m)..... ۱۰۹
- شکل (۵-۲۷) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای محدود (طول ۲۰m)..... ۱۱۰
- شکل (۵-۲۸) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای نامحدود (طول ۵m)..... ۱۱۲
- شکل (۵-۲۹) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای نامحدود (طول ۲۰m)..... ۱۱۳
- شکل (۵-۳۰) حاصل از مدل سازی دو صفحه رسانا با شیب صفر درجه..... ۱۱۵
- شکل (۵-۳۱) تصویرهای حاصل از مدل سازی دو دایک رسانای محدود (طول ۲۰m)..... ۱۱۶

فصل اول:

کلیات

امروزه با استفاده از روش‌های هوابرد<sup>۱</sup> می‌توان داده‌های ژئوفیزیکی را در یک مقیاس بزرگ از یک منطقه وسیع با کمترین هزینه و زمان بدست آورد. برداشت‌های ژئوفیزیک هوابرد شامل فرایندهایی هستند که در آنها تغییرات چندین پارامتر فیزیکی با استفاده از وسایل پروازی نظیر هواپیما، هلیکوپتر اندازه‌گیری می‌شوند، مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده رسانندگی، پذیرفتاری مغناطیسی، چگالی، غلظت عناصر رادیواکتیو، ثابت دی‌الکتریک و طیف‌های انعکاسی می‌باشند.

کاربرد اکتشافات ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی در مقایسه با دیگر روش‌های الکتریکی بطور نسبی جوان‌تر است. در حالی که قدمت استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه به بیش از یک قرن می‌رسد؛ کاربرد و منبع روش‌های الکتریکی به زحمت از چند دهه می‌گذرد. با این وجود روش‌های الکترومغناطیسی در مقایسه با روش‌های الکتریکی از دو جنبه مورد استقبال متخصصین و کارشناسان قرار گرفته‌اند: نخست از دیدگاه فنی: در بررسی‌های مقاومت‌ویژه وجود ناهمگنی‌های الکتریکی مواد سطحی در مجاورت الکترودهای پتانسیل سبب ایجاد خطای زیاد در اندازه‌گیری شده و علاوه بر آن غالباً در سرزمین‌های خشک مانند ایران، مقاومت زیاد لایه‌های فوقانی موجب جلوگیری از تزریق برق به زمین می‌شود. از نقطه نظر اقتصادی نیز به دلیل سرعت انجام برداشت‌های صحرایی الکترومغناطیسی و عدم نیاز به نیروی انسانی فراوان و به تبع آن کاهش در هزینه انجام مطالعات، کاربرد آنها را بیش از پیش مطرح می‌سازد. علاوه بر آن تنوع این روش‌ها امکان کاربردهای زیاد آن را در مناطق گوناگون نسبت به مقاومت‌ویژه افزایش می‌دهد: لذا، این تنوع به استفاده روزافزون سیستم‌های الکترومغناطیسی در مطالعات مهندسی زمین‌شناسی، پی‌جویی مستقیم اجسام رسانای فلزی، پی‌جویی غیرمستقیم میزبان‌های مساعد ذخایر کانی، ساختگاه سازه‌ها، تعیین مرز جدایی آب‌های شور و شیرین، کشاورزی، آشکارسازی غارها در

---

<sup>۱</sup> . Airbone

سنگ‌های کربناته، به نقشه درآوردن زبانه‌های آلودگی زیرزمینی در مطالعات زیست محیطی و پیگرد خطواره گسل‌ها و ... منجر شده است [مرادزاده، ۱۳۸۶].

در روش‌های الکترومغناطیس، میدان‌های الکترومغناطیس از طریق پیچه فرستنده در بالای سطح زمین یا درون زمین منتشر می‌شود. در این روش‌ها فرستنده، گیرنده و توده‌های زیر سطحی در یک تقابل سه‌جانبه با میدان الکترومغناطیسی قرار دارند و جریان‌های الکتریکی داخل توده‌های هادی به همراه القای الکترومغناطیس به طور هم‌زمان به وجود می‌آیند. از آنجا که القای جریان الکتریکی توسط مولفه مغناطیسی میدان اولیه صورت می‌گیرد، بنابراین لازم نیست فرستنده و گیرنده با زمین تماس مستقیم داشته باشند. به همین دلیل اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیس بسیار سریع‌تر از روش‌های الکتریکی انجام می‌شوند [Nabighian, 1996].

امروزه برداشت‌های الکترومغناطیس هوابرد، با توجه به دارا بودن مزایای قابل توجه از جمله سرعت بالا و هزینه پایین آنها نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی از اهمیت و محبوبیت ویژه‌ای برخوردارند. دقت و قدرت تفکیک برداشت‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری<sup>۱</sup> در مقایسه با روش‌های الکترومغناطیس هوابرد دیگر عموماً بالاتر است. سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری در حوزه فرکانس دارای چندین فرکانس قابل سنجش در محدوده ۴۰۰ هرتز تا بالای ۱۴۰ کیلوهرتز می‌باشند. پیچه‌های فرستنده و گیرنده آرایش‌های مختلفی از قبیل هم‌صفحه افقی<sup>۲</sup> و هم‌محور قائم<sup>۳</sup> و... دارند. این سیستم‌ها به علت دارا بودن ارتفاع پرواز کم و آرایش‌های مختلف، نقش مهمی در اکتشاف زمین‌شناسی و معدنی یک منطقه بزرگ ایفا می‌کنند. در حال حاضر برداشت‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری در اکثر کشورهای جهان به صورت بسیار متداول انجام می‌شود که این نشان از قابلیت بسیار بالای این روش‌ها دارد [Fugro, 2003].

---

<sup>۱</sup>. Helicopter Electromagnetic (HEM)

<sup>۲</sup>. HCP (Horizontal coplanar)

<sup>۳</sup>. VCX (Vertical coaxial)

## ۱-۲- سابقه و ضرورت انجام تحقیق :

برداشت‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری به سرعت در حال گسترش است ولی تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه روش‌های تفسیر این داده‌ها در کشور ما صورت نگرفته است. مخصوصاً هنگامی که به بررسی روش‌های مدل‌سازی معکوس می‌پردازیم؛ از یافتن یک الگوی مناسب برای استفاده دانشجویان و مراکز علمی برای بررسی روند معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس باز می‌مانیم. در ایران این موضوع چند سالی است که در قالب چند پایان‌نامه تحصیلات تکمیلی مورد بررسی قرار گرفته است. البته هنوز بر روی مدل‌های مختلف مصنوعی کار چندانی انجام نشده یا تحقیق کامل نشده است؛ که این امر ضرورت تحقیق را نشان می‌دهد.

## ۱-۳- هدف‌ها و کاربرد مطالعه حاضر:

در این مطالعه روش‌های رایج مدل‌سازی وارون سریع داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، در برابر مدل‌های مختلف زمین‌شناسایی می‌شوند؛ سپس بهترین روش مدل‌سازی سازگار با شرایط زمین‌شناسی و احتمالاً گانی‌سازی در مناطق برداشت تعیین می‌شود. نقاط ضعف و قوت روش‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس در فرایندهای اکتشافی و مهندسی نیز بررسی می‌شوند.

## ۱-۴- ساختار پایان‌نامه:

این پایان‌نامه در ۶ فصل تهیه و تنظیم شده است. در این فصل، کلیات و مقدمه‌ای درباره تحقیق حاضر و نیز ضرورت و اهداف انجام آن ارائه شده است. در فصل دوم مطالبی در مورد تئوری برداشت الکترومغناطیس و قوانین فیزیکی حاکم در این روش‌ها ارائه شده است. در فصل سوم روش‌های برداشت الکترومغناطیس هوابرد مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم انواع روش‌های معکوس‌سازی تقریبی داده‌ها در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم به مدل‌سازی مدل‌های مختلف

مصنوعی اعم از یک و دو بعدی پرداخته شده و در فصل ششم جمع‌بندی نتایج مختلف و نتیجه‌گیری‌ها گنجانده شده است.

**فصل دوم:**

**تئوری روش‌های الکترومغناطیس**

## ۲-۱- مقدمه:

سیستم‌های القای الکترومغناطیسی بر مبنای دو قانون فیزیکی استوارند:

(۱) قانون بیوساوار<sup>۱</sup> که طبق آن جریان‌های الکتریکی، میدان‌های مغناطیسی تولید می‌کنند. یک جریان الکتریکی در یک سیم مستقیم یک میدان مغناطیسی در اطراف محور آن به وجود می‌آورد. یک حلقه جریان مثل اکثر فرستنده‌های الکترومغناطیس، یک میدان مغناطیسی در جهت بالا یا پایین قسمت داخلی حلقه به وجود می‌آورد و یک میدان مغناطیسی در قسمت بیرونی حلقه که در جهت خلاف میدان داخل حلقه می‌باشد [Tølbøl, 2007].

(۲) قانون فارادی: میدان مغناطیسی متغیر با زمان یک جریان الکتریکی را در هر رسانا القاء می‌کند. این جریان الکتریکی به شکل دایره حول جهت میدان مغناطیسی می‌باشد [Tølbøl, 2007].

## ۲-۲- معادلات ماکسول<sup>۲</sup>:

معادلات ماکسول معادلات تجربی هستند که اغلب رفتار ماکروسکوپی الکترومغناطیسی را به خوبی توصیف می‌کنند. تئوری کلاسیک الکترومغناطیس بر اساس معادلات ماکسول می‌باشد. یک میدان الکترومغناطیسی توسط پنج تابع برداری تعریف می‌شود:

۱. شدت میدان الکتریکی (E)، بر حسب ولت بر متر (v/m)
۲. جابجایی دی الکتریکی (D)، بر حسب کولن بر متر مربع ( $C/m^2$ )
۳. شدت میدان مغناطیسی (H)، بر حسب آمپر بر متر (A/m)
۴. القای مغناطیسی (B)، بر حسب تسلا (T)
۵. چگالی شدت جریان الکتریکی (J)، بر حسب آمپر بر متر مربع ( $A/m^2$ )

---

<sup>1</sup>. Bio savart

<sup>2</sup>. Maxwell



برهم کنش بین تابع‌های برداری بوسیله معادلات تجربی ماکسول بیان می‌شوند. معادلات ماکسول معادلات دیفرانسیلی خطی مرتبه اول می‌باشند؛ که در حوزه زمان تعریف می‌شوند. قانون اول که به احترام مایکل فارادی<sup>۱</sup> به قانون فارادی مشهور است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1-2)$$

این معادله نشان می‌دهد که یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان باعث ایجاد یک میدان الکتریکی می‌شود که حول آن در چرخش می‌باشد.

معادله بعدی به قانون آمپر مشهور است، که ویژگی‌های کرل<sup>۲</sup> میدان مغناطیسی را توضیح می‌دهد. به این صورت که جریان‌های الکتریکی متغیر با زمان در یک سیم مستقیم میدان مغناطیسی چرخانی را حول محور شارش جریان بوجود می‌آورند.

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

معادله بعدی که بدون اسم است نشان می‌دهد که تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد و خطوط القای مغناطیسی به صورت پیوسته هستند.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3-2)$$

معادله آخر در مورد واگرایی<sup>۳</sup> جابجایی الکتریکی می‌باشد. این معادله نشان می‌دهد که واگرایی جابجایی الکتریکی برابر بار الکتریکی می‌باشد.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (4-2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی بار الکتریکی بر حسب کولن بر متر مکعب ( $C/m^3$ ) می‌باشد [Davis, 2007].

<sup>1</sup>. Micheal Faraday

<sup>2</sup>. Curl

<sup>3</sup>. Divergence

معادله لورنتس<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (۵-۲)$$

که در آن  $q$  مقدار بار الکتریکی بر حسب کولن،  $V$  سرعت بار و  $F$  نیروی به وجود آمده به خاطر حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشند. معادلات ماکسول به همراه قانون لورنتس، به‌طور کامل الکترومغناطیس کلاسیک را توضیح می‌دهند. با اعمال عملگر دیورژانس روی معادله (۲-۲) معادله پیوستگی بدست می‌آید. در ابتدا با اعمال دیورژانس به این معادله داریم:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \quad (۶-۲)$$

چون دیورژانس کرل هر میدان برداری صفر است داریم:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (۷-۲)$$

با فرض این که میدان الکتریکی پیوسته است و می‌تواند از عملگرهای مشتقات اول و دوم عبور کند، مرتبه مشتقات فضایی و جزئی را می‌توانیم تغییر دهیم یعنی:

$$\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\partial (\vec{\nabla} \cdot \vec{E})}{\partial t} \quad (۸-۲)$$

و با استفاده از معادله (۴-۲) نتیجه زیر بدست می‌آید:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (۹-۲)$$

که نشان می‌دهد مقدار بار الکتریکی پایسته است.

برای تعریف ویژگی‌های فیزیکی و الکترودینامیکی زمین این معادلات باید به یک شکل متناوب درآیند. به‌ویژه وقتی که با یک توده حجیم و یا یک فصل مشترک روبرو باشیم؛ توانایی تشخیص بین موادی که تحت تاثیر میدان الکتریکی و یا قطبش مغناطیسی قرار گرفته‌اند، مهم است [Davis, 2007].

<sup>۱</sup>. Lorentz

## ۲-۲-۱- معادلات ماکسول در ماده:

نخست لازم است رابطه بین میدان‌های برداری  $\vec{H}, \vec{B}, \vec{D}, \vec{E}$  بیان شود، که به آنها روابط ترکیبی گفته می‌شود. بردار جابجایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی خلاء و بردار پلاریزاسیون<sup>۱</sup>  $\vec{P}$  در مواد پلاریزه شده به دلیل عدم توزیع متعادل بار اتم‌ها در سطح میکروسکوپیک می‌باشد. بعضی اوقات پلاریزاسیون به خاطر قرار گرفتن ماده در یک میدان الکتریکی است؛ به طوری که:

$$\vec{P} = \vec{\epsilon}(\omega, E, r, T, P, \dots) \cdot \vec{E} \quad (۱۱-۲)$$

که تانسور<sup>۲</sup>  $\vec{\epsilon}$ ، یک تابع مختلط است که تغییرات پلاریزاسیون را بر اساس متغیرهایی از قبیل فرکانس زاویه‌ای، شدت میدان الکتریکی، مکان، زمان، دما، فشار و یا دیگر متغیرهای فیزیکی نشان می‌دهد. به علاوه شدت میدان مغناطیسی بر حسب القای مغناطیسی و میدان برداری  $\vec{M}$ ، که مغناطش<sup>۳</sup> ماده را نشان می‌دهد، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (۱۲-۲)$$

برداری مغناطش از چرخش‌های جریان در سطح میکروسکوپیک ناشی می‌شود. مغناطش مشابه بردار پلاریزاسیون با استفاده از تانسور کمیت  $\vec{\mu}$ ، تابعی از فرکانس زاویه‌ای، شدت میدان مغناطیسی، مکان و زمان می‌باشد.

$$\vec{M} = \vec{\mu}(\omega, H, r, t, T, P, \dots) \cdot \vec{H} \quad (۱۳-۲)$$

---

<sup>۱</sup> . Polarization

<sup>۲</sup> . Tensor

<sup>۳</sup> . Magnetization

در عمده مطالعات ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی منطقی است که فرض‌های زیر درباره خواص فیزیکی مواد داخل زمین در نظر گرفته شوند.

۱. مواد زمین به طور خطی، همسان‌گرد و همگن توزیع شده‌اند.

۲. خواص الکتریکی مستقل از زمان، دما و فشار می‌باشند.

۳. پذیرفتاری مغناطیسی برابر با  $\mu_0$  (ثابت پذیرفتاری در خلاء) در نظر گرفته می‌شود.

رابطه بین  $\vec{P}, \vec{E}, \vec{H}, \vec{M}$  به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (۱۴-۲)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (۱۵-۲)$$

این رابطه‌ها نشان می‌دهد که پلاریزاسیون مواد متناسب با پذیرفتاری الکتریکی ( $\chi_e$ ) می‌باشد و جابجایی الکتریکی متناسب با میدان الکتریکی می‌باشد.  $\epsilon$  نیز ثابت دی‌الکتریک مواد است.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (۱۶-۲)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (۱۷-۲)$$

رابطه بین چگالی جریان خلاء و میدان الکتریکی که به قانون اهم معروف است به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{J}_F = \sigma \vec{E} \quad (۱۸-۲)$$

که در آن  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی ماده است [Davis, 2007].

## ۲-۲-۲- محاسبه عمق پوسته<sup>۱</sup> در یک زمین رسانا با استفاده از قوانین ماکسول:

عمق پوسته یکی از پارامترهای مفید در مطالعات اکتشافی روش الکترومغناطیس می‌باشد، که به عنوان معیاری برای نفوذ امواج الکترومغناطیس داخل زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معادلات زیر برای به دست آوردن رابطه عمق پوسته استفاده می‌کنیم.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (۱۹-۲)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (۲۰-۲)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (۲۱-۲)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (۲۲-۲)$$

با کرل گرفتن از طرفین معادلات (۱۹-۲) و (۲۱-۲)، و استفاده از رابطه کلی زیر:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (۲۳-۲)$$

با استفاده از رابطه  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  و اینکه در اجسام رسانا نیز  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ ، رابطه زیر بین  $\vec{H}$  و  $\vec{E}$  بدست می‌آید؛ که به آن معادله پخش گفته می‌شود.

$$\left( \nabla^2 - \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\vec{E}}{H} = 0 \quad (۲۴-۲)$$

برای حل معادله پخش باید از روش جداسازی متغیرها استفاده شود. میدان مغناطیسی متغیر با زمان و با شدت H را در نظر می‌گیریم.

$$\vec{H} = \vec{h}(z)\theta(t) \quad (۲۵-۲)$$

و یا به صورت:

$$\vec{H} = \vec{h}(z)e^{i\omega t}, \quad (۲۶-۲)$$

---

<sup>۱</sup>. Skin depth

با این جداسازی قسمت مکانی شدت میدان مغناطیسی به صورت زیر است:

$$(\nabla^2 - i\omega\sigma\mu)\vec{h}(z) = 0 \quad (27-2)$$

معادله (27-2) یک معادله پواسون است که راه حل خیلی ساده‌ای دارد. جواب این معادله به صورت

زیر می‌باشد:

$$\vec{h}(z) = \vec{h}_0 e^{ikz} \quad (28-2)$$

که در آن  $K$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k^2 = i\omega\sigma\mu \quad (29-2)$$

با گرفتن ریشه دوم:

$$k = \pm \frac{1+i}{\delta} \quad (30-2)$$

و بالاخره:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \quad (31-2)$$

مقدار  $\delta$  اهمیت ویژه‌ای دارد. واحد آن از جنس طول می‌باشد، که به آن عمق پوسته ماده گفته

می‌شود. این عمق برابر با عمقی است که شدت میدان مغناطیسی (یا میدان الکتریکی) به  $1/e$ ، مقدار

اولیه‌اش می‌رسد. با در نظر گرفتن قسمت حقیقی نتایج فیزیکی جواب‌ها، میدان مغناطیسی داخل رسانا به

صورت زیر می‌باشد:

$$H_x(z,t) = H_0 e^{-z/\delta} \cos\left(\frac{z}{\delta} - \omega t\right) \quad (32-2)$$

با استفاده از میدان الکتریکی و قانون اهم و معادله (19-2) داریم:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (33-2)$$

مولفه این میدان در جهت  $y$  به صورت آتی بدست می‌آید:

$$E_y = -\frac{1}{\sigma} \frac{dH_x}{dz} = \frac{1-i}{\sigma\delta} H_0 e^{-z/\delta} e^{i(z/\delta - \omega t)} \quad (34-2)$$

با استفاده از معادله (33-2) مولفه y میدان الکتریکی به شکل زیر می‌باشد:

$$E_y = \frac{\mu\omega\delta}{\sqrt{2}} \left( \frac{1-i}{\sqrt{2}} \right) H_0 e^{-z/\delta} e^{i(z/\delta - \omega t)} = \frac{\mu\omega\delta}{\sqrt{2}} H_0 e^{-z/\delta} e^{i(z/\delta - \omega t)} e^{-i\pi/4} \quad (35-2)$$

و در نهایت بخش حقیقی معادله بالا بدست می‌آید:

$$E_y = \frac{\mu\omega\delta}{\sqrt{2}} H_0 e^{-z/\delta} \cos(z/\delta - \omega t - \pi/4) \quad (36-2)$$

با مقایسه روابط (36-2) و (32-2) دیده می‌شود که میدان الکتریکی با شدت میدان مغناطیسی

$\pi/4$  رادیان اختلاف فاز دارد و اندازه آن نسبت به شدت میدان مغناطیسی به اندازه ضریب  $\mu\omega\delta/\sqrt{2}$ ،

تفاوت می‌کند [Davis, 2007].

### ۳-۲- مدل‌های القای الکترومغناطیسی:

در تئوری ژئوفیزیکی و کاربردهای آن معمولاً باید فرض کرد که ساختار زمین دارای فرمی است که

می‌توان آن را به صورت ریاضی بیان کرد. این شکل ریاضی بیان ساختار زمین، مدل نامیده می‌شود.

معمولاً برای مدل‌های ژئوفیزیکی فرض بر این است که زمین همگن است. برای موارد غیرهمگن،

زمین به صورت لایه‌های افقی مدل می‌شود؛ که هر لایه در صفحه XY دارای گستردگی بی‌نهایت بوده و

خواص آن در تمام نقاط ثابت است. البته مدل‌های بسیار پیشرفته‌تر برای مدل‌سازی رساناهای گسسته

مثل ذخایر معدنی استفاده می‌شوند [رجبی، ۱۳۸۷].

رساناهای شیب‌دار به سادگی به صورت صفحات بسیار نازکی که در راستای افقی و عمقی نامحدود هستند،

مدل‌سازی می‌شوند. مدل‌های کامل‌تر (پیچیده‌تر) می‌توانند هر ابعاد و اندازه‌ای را برای رساناها قائل شوند.

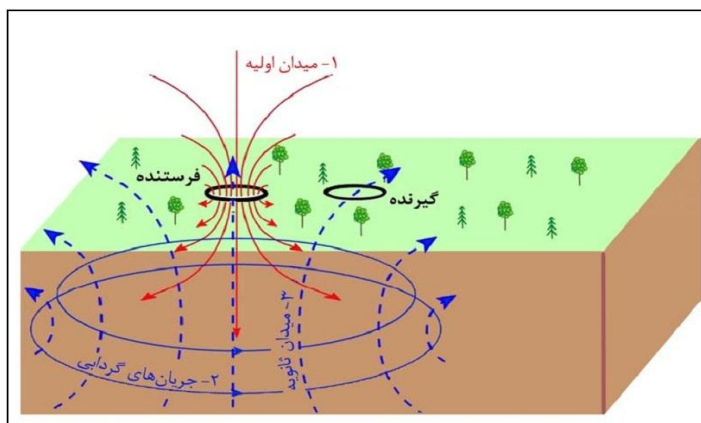
یکی از سخت‌ترین پارامترها در مدل‌سازی، تعیین ضخامت لایه‌ها می‌باشد [Fugro, 2003].

در ادامه این بخش به بررسی کیفی اثر متقابل سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد با زمین می‌پردازیم.

### ۲-۳-۱- زمین لایه‌ای:

در سیستم‌های الکترومغناطیس هوابرد معمولاً زمین به صورت تعدادی لایه‌های افقی در نظر گرفته می‌شود که هر لایه در جهت افقی تا بی‌نهایت گسترش یافته و خواص ژئوفیزیکی آن در تمامی نقاط ثابت می‌باشد. ساده‌ترین مدل از این نوع، مدل زمین همگن است (که معمولاً نیم‌فضای همگن نامیده می‌شود) که در تمامی نقاط خود دارای مقدار ثابتی از پارامتر ژئوفیزیکی مثلاً مقاومت ویژه می‌باشد. برای یک پیچه فرستنده که به صورت افقی قرار گرفته ( $T_x$ ) جهت دو قطبی مغناطیسی عمودی می‌باشد و خطوط میدان مغناطیسی به‌طور عمودی به سمت بالا یا پایین از آن خارج می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده، این میدان مغناطیسی اولیه، جریان‌های الکتریکی در زمین القاء می‌کند، که به صورت حلقه‌های افقی در زمین انتشار می‌یابند. این جریان‌های الکتریکی گردابی (القایی)، یک میدان مغناطیسی ثانویه (خطوط خط‌چین شکل ۱-۲) ایجاد می‌کنند؛ که در گیرنده ( $R_x$ ) دریافت می‌شود. قطر حلقه‌های مذکور و تمرکز آنها تابع مقدار رسانندگی زمین و فرکانس سیگنال الکترومغناطیسی می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای یک زمین همگن این جریان‌های الکتریکی در سطوح توزیع شده و به شکل حلقوی متقارن در داخل زمین جریان می‌یابند. عمق مرکز حلقه جریان (که بیشترین چگالی جریان در آنجا وجود دارد) از سطح زمین تقریباً برابر با نصف عمق پوسته است [Fugro, 2003].



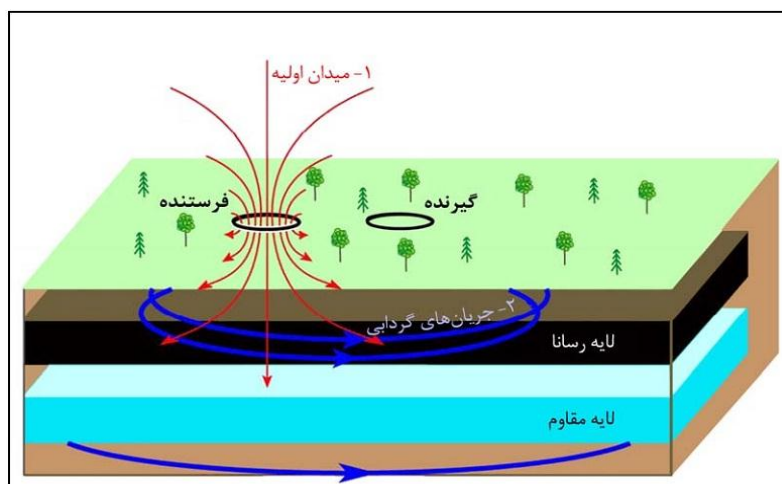


شکل (۱-۲): برهمکنش امواج الکترومغناطیس با یک زمین همگن [تمدن، ۱۳۸۶].

برای هر فرکانس، عمق حلقه مرکزی جریان متفاوت بوده و این عمق معمولاً به عنوان عمق بیشترین حساسیت برای آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

با این‌که عمق شارش جریان در یک زمین همگن تقریباً قابل پیش‌بینی و قابل تخمین است، اما در یک زمین لایه‌ای که لایه‌ها دارای رسانندگی متفاوتی می‌باشند، این امر بسیار پیچیده‌تر خواهد بود.

همان‌طور که در شکل (۲-۲) دیده می‌شود، جریان‌های گردابی تمایل به شارش و تمرکز در لایه‌های رسانا داشته و شارش بسیار اندکی در لایه‌های مقاوم اتفاق می‌افتد. این امر اکتشاف لایه‌های مقاوم توسط برداشت الکترومغناطیس هوابرد را دشوار می‌سازد؛ مگر در شرایطی که لایه مقاوم بسیار ضخیم باشد. اگر این لایه‌ها به حد کافی ضخیم باشند، در این صورت تفسیر دقیق می‌تواند مشخص‌کننده شارش جریان در عمقی بیشتر یا کمتر (پایین‌تر یا بالاتر از لایه مقاوم) از حد انتظار در مورد زمین همگن رخ داده است [Fugro, 2003].



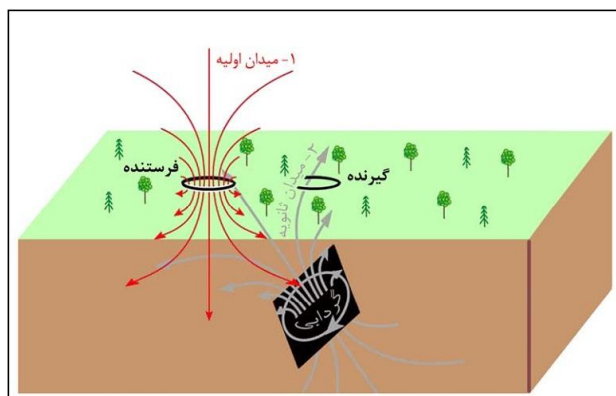
شکل (۲-۲): شارش جریان گردابی در زمینی با لایه‌های رسانا و مقاوم [تمدن، ۱۳۸۶].

سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری معمولاً از چند فرکانس استفاده می‌کنند. استفاده از چند فرکانس مختلف منجر به تفسیر بهتر زمین مورد مطالعه می‌گردد. چون جریان‌های گردابی ناشی از فرکانس‌های بالا در بالای لایه و جریان‌های ناشی از فرکانس‌های پایین در پایین لایه رسانا انتشار می‌یابند. البته برای یک لایه بسیار رسانا ممکن است جریان‌های گردابی ناشی از تمام فرکانس‌ها در همین لایه شارش یابند.

### ۲-۳-۲- رساناهای مدفون در زمین:

علاوه بر لایه‌های افقی، ساختارهای زمین‌شناسی رسانا نیز معمولاً در برداشت‌های ژئوفیزیک هوارد به عنوان هدف، مورد اکتشاف قرار می‌گیرند. این رساناها ممکن است سولفیدهای فلزی متبلور شده و یا دایک‌ها باشند. اگر رسانایی را که در یک زمین مقاوم مدفون شده در نظر بگیرید، نوسانات میدان حاصله از مولفه مغناطیسی میدان اولیه سبب القاء جریان‌های گردابی در داخل جسم رسانا خواهد شد. جریان‌های گردابی تولید شده توسط میدان اولیه در رسانای مدفون نسبت به جریان‌های گردابی در زمین بیشتر قابل توجه می‌باشد. شدت جریان‌های القایی به رسانایی الکتریکی، شکل و اندازه جسم رسانا، شدت و فرکانس میدان اولیه، موقعیت و جهت جسم رسانا نسبت به فرستنده بستگی دارد [رجبی، ۱۳۸۷].

در شکل (۳-۲) این وضعیت نشان داده شده است. شدت و زاویه فاز میدان ثانویه به اندازه و رسانندگی توده رسانا بستگی دارد. همچنین اندازه و تا اندکی کمتر، زاویه فاز به جهت گیری نسبی و فاصله بین فرستنده با توده رسانا و توده رسانا با گیرنده بستگی دارند. این موضوع "جفت‌شدگی"<sup>۱</sup> اجزاء سیستم خوانده می‌شود. جفت‌شدگی عبارت است از حاصل ضرب سطح رسانا در سینوس زاویه بین خطوط میدان در محل رسانا با صفحه رسانا ( $A_c \sin \beta$ ). میزان جفت‌شدگی در زاویه ۹۰ درجه، ماکزیمم و در صفر درجه، صفر خواهد بود. اگر رسانا به فرستنده نزدیک باشد و زاویه میدان اولیه با صفحه ۹۰ درجه باشد، بین فرستنده و رسانا بهترین جفت‌شدگی وجود دارد [تمدن، ۱۳۸۶].



شکل (۳-۲): جریان‌های گردابی و میدان ثانویه در یک توده رسانا [تمدن، ۱۳۸۶].

به طور مشابه، اگر فاصله توده رسانا با گیرنده کم باشد و میدان ثانویه حاصل از رسانا بر گیرنده عمود باشد، میزان جفت‌شدگی بین آن دو بیشتر خواهد بود. در اثر جابجایی سیستم برداشت هوابرد نسبت به توده رسانا، میزان این جفت‌شدگی تغییر کرده و شکل آنومالی بدست آمده، در تفسیر هندسه توده رسانا نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند.

<sup>۱</sup>. Coupling

اگر توده رسانا در راستای شارش جریان در داخل زمین گسترده شده باشد، این جریان‌ها همگی از داخل توده رسانا عبور کرده و باعث افزایش اندازه آنومالی اندازه‌گیری شده توسط سیستم در بالای رسانا می‌شوند. به این پدیده کانالیزه شدن<sup>۱</sup> جریان گفته می‌شود [Fugro, 2003].

چون توده رسانا یک آنومالی محلی (محدود) است، شدت پاسخ اندازه‌گیری شده توسط سیستم هنگامی که در راستای افقی به آن نزدیک می‌شوند، افزایش می‌یابد و با دور شدن سیستم از آن شدت پاسخ کاهش می‌یابد. این ماکزیمم محلی که در داده‌های الکترومغناطیس اندازه‌گیری می‌شود آنومالی<sup>۲</sup> مربوط به آن توده رسانا نامیده می‌شود. در حقیقت جواب یک زمین لایه‌ای از نظر تئوری در همه جا باید یکسان باشد، اما به خاطر تغییر شرایط زمین و ارتفاع پرواز در طول انجام برداشت جواب‌ها تغییر می‌کند. در اکتشاف توده‌های رسانا، هدف پیدا کردن و توصیف این آنومالی‌های محلی می‌باشد [Fugro, 2003].

---

<sup>1</sup>. Current channeling

<sup>2</sup>. Anomaly

فصل سوم :

سیستم‌های الکترومغناطیس

هلیکوپتری (HEM)

### ۳-۱- مقدمه:

تمام روش‌های الکترومغناطیس برای کاربردهای ژئوفیزیکی بر اساس برهم‌کنش بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی متغیر، طبق معادلات ماکسول می‌باشند و کم و بیش طبق اصل مشابهی عمل می‌کنند. دستگاه‌های الکترومغناطیسی هوابرد دارای یک سیستم فرستنده، یک سیستم گیرنده می‌باشد که در داخل یک پرنده<sup>۱</sup> که از هلیکوپتر آویزان می‌باشد تعبیه می‌گردند. عملیات برداشت الکترومغناطیس هوابرد می‌تواند به وسیله هواپیما، هلیکوپتر و یا ابزار پروازی دیگر انجام شود. اما بنا به دلایلی که در ادامه ذکر می‌شود، امروزه در برداشت‌های هوابرد بیشتر از هلیکوپتر استفاده می‌شود [رجبی، ۱۳۸۶].

### ۳-۲- روش‌های حوزه زمان<sup>۲</sup>:

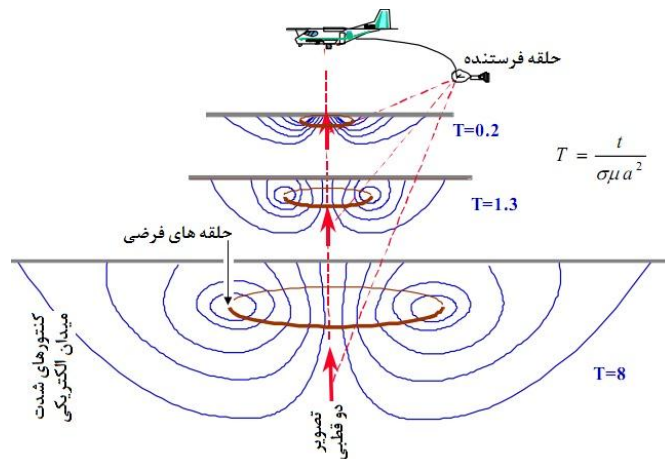
روش‌های حوزه زمان در یک فرکانس ثابت اندازه‌گیری‌ها را بر حسب تابعی از زمان انجام می‌دهند. در این روش‌ها با جریان الکتریکی القایی در داخل زمین که با گذر زمان در اعماق بیشتری تولید می‌شوند؛ سروکار داریم. با افزایش عمق، گستره این جریانات بیشتر می‌گردد. اساس این روش اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی ثانویه میرای القاء شده در زمین، ناشی از پالس‌های جریان فرستنده آویزان از زیر ابزار پروازی می‌باشد. این جریان‌ها، در داخل زمین یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید می‌کنند. این میدان با گذشت زمان دارای سطح گسترش بیشتر می‌شود و به اعماق بیشتر نفوذ می‌کند. تغییرات میرایی میدان مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد، تا با استفاده از آن اطلاعاتی از ساختار زیر سطحی بدست آید. برای توصیف پخش میدان داخل زمین از اصطلاح "حلقه‌های دود"<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، مشابه پخش دود سیگار در فضا که با گذشت زمان حلقه‌ها بزرگتر می‌شوند و فاصله آنها از یکدیگر بیشتر می‌شود. نحوه پخش حلقه‌های میدان با گذشت زمان در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup>. Bird

<sup>۲</sup>. Time domain

<sup>۳</sup>. Smoke rings



شکل (۳-۱): نحوه نفوذ حلقه‌های میدان با گذشت زمان [After Fugro, 2003].

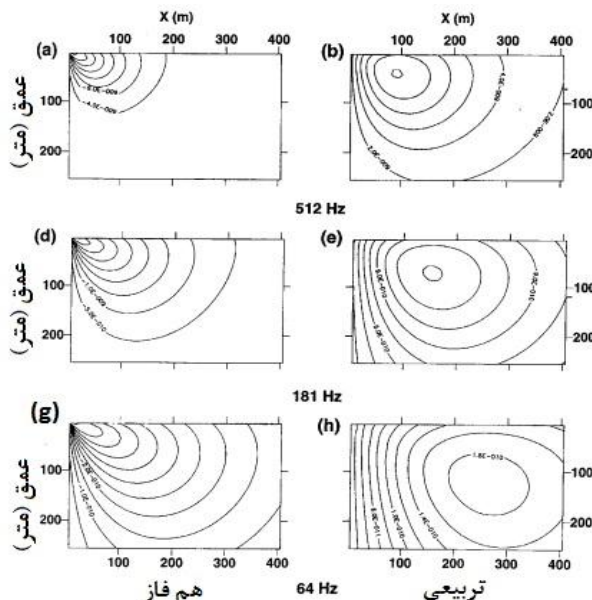
شدت این میدان مغناطیسی (T) با توان دوم فاصله (a) رابطه عکس دارد. این میدان مغناطیسی در بازه‌های زمانی مشخص اندازه گرفته می‌شود و با استفاده از آن ویژگی‌های زیر زمین و نحوه لایه‌بندی مطالعه می‌شود. البته در این روش‌ها در هنگام اندازه‌گیری میدان ثانویه به وسیله پیچه گیرنده، پیچه فرستنده خاموش می‌باشد؛ بنابراین هنگام اندازه‌گیری میدان اولیه وجود ندارد، که این مسئله باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌شود. نویز ناشی از تغییرات هوا نیز در این روش به حداقل می‌رسد [Fugro, 2003].

### ۳-۳- روش‌های حوزه فرکانس<sup>۱</sup>:

در روش‌های حوزه فرکانس از یک یا چند فرکانس مختلف برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. در این روش‌ها فرستنده یک جریان سینوسی نوسانی را در یک فرکانس ثابت تولید می‌کند و گیرنده که در فاصله‌ای دورتر قرار دارد، مولفه همفاز (قسمتی از سیگنال که با میدان اولیه همفاز است) و مولفه تریبلی (بخشی از میدان که ۹۰ درجه با میدان اولیه اختلاف فاز دارد) میدان ثانویه را اندازه می‌گیرد. بررسی عمق با اندازه‌گیری در فرکانس‌های مختلف انجام می‌شود. فرکانس‌های بالا ساختارهای سطحی را و

<sup>۱</sup>. Frequency domain

فرکانس‌های پایین ساختارهای عمقی‌تر را مشخص می‌کنند. در شکل (۲-۳) نحوه نفوذ میدان در فرکانس‌های بالا و پایین نشان داده شده است [Fugro, 2003].



شکل (۲-۳): حلقه‌های جریان در سه فرکانس در زمینی با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  [After Fugro, 2003].

به این روش عموماً سونداژزنی پارامتری می‌گویند. بررسی عمق با استفاده از روش سونداژزنی هندسی که در آن فاصله بین فرستنده و گیرنده در یک فرکانس ثابت تغییر می‌کند؛ نیز انجام می‌شود. داده‌ها در امتداد خطوط پرواز انتخاب شده در فاصله‌های از قبل تعیین شده، جمع‌آوری می‌شوند و ارتفاع پرواز هم‌زمان به کمک ارتفاع سنج لیزری و یا راداری ثبت می‌شوند. در اغلب سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری جدید برداشت در دو تا شش فرستنده با فرکانس‌های مختلف در گستره چند صد هرتز تا بیشتر از صد مگاهرتز انجام می‌شود. عموماً مجموعه پیچیده‌های فرستنده و گیرنده در هر فرکانس عملیات استفاده می‌شود و فاصله جدایش پیچیده‌ها بین ۵ تا ۱۰ متر می‌باشد. مولفه هم‌فاز و مولفه غیرهم‌فاز به صورت قسمت در میلیون بیان می‌شوند؛ که به صورت نسبت بدون بعد شدت میدان ثانویه به میدان اولیه می‌باشد [Tølbøl, 2007].



## ۳-۴- الکترومغناطیس هلیکوپتری:

سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری از پیچه‌های گیرنده و فرستنده کوچک حداکثر به قطر یک متر استفاده می‌کند. سیگنال فرستنده (میدان مغناطیسی اولیه) به وسیله شارش جریان سینوسی از داخل پیچه‌های فرستنده در فرکانس‌های بخصوصی تولید می‌شود. چون میدان مغناطیسی اولیه نزدیک به میدان دوقطبی در فاصله نزدیک پیچه فرستنده است، می‌توان آن را به عنوان یک میدان دوقطبی مغناطیسی که در مرکز پیچه فرستنده می‌باشد و محور آن عمود بر صفحه پیچه می‌باشد، در نظر گرفت. میدان مغناطیسی اولیه نوسانی جریان‌های گردابی را در زیر سطح زمین القاء می‌کند. میدان مغناطیسی ثانویه ناشی از القاء جریان در ساختارهای داخل زمین نیز توسط پیچه‌های گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. به دلیل فرایند القاء در داخل زمین، یک اختلاف فاز بین میدان اولیه و ثانویه بوجود می‌آید. جهت قرارگیری پیچه فرستنده به شکل افقی یا عمودی می‌باشد و پیچه گیرنده در جهتی قرار می‌گیرد که بیشترین جفت‌شدگی را داشته باشد؛ که به شکل هم‌صفحه افقی، هم‌صفحه عمودی یا هم‌محور عمودی می‌تواند باشد [Siemon, 2007].

نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌ها در سیستم دیگر<sup>۱</sup>، در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): نمایش شماتیک سیستم دیگر [After Fugro, 2003].

در عملیات برداشت به‌وسیله هلیکوپتر به دلیل کوچک بودن سیستم، ارتفاع پرواز کم و قابلیت دنبال کردن ناهمواری‌های سطح زمین، قدرت تفکیک اهداف بیشتر از هواپیما است. کوچک بودن ابعاد سیستم باعث شده که در مناطق کم‌وسعت و ناهموار، مخصوصاً مناطق مسکونی نیز قابل استفاده باشد.

<sup>۱</sup>. Dighem

سیستم‌های هلیکوپتری حوزه فرکانس به دلیل استفاده از یک بازه فرکانسی وسیع دارای حساسیت بسیار خوبی هستند. معمولاً در برداشت‌های هلیکوپتری از یک مغناطیس‌سنج نیز جهت اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین ناشی از تغییرات زمین‌شناسی استفاده می‌شود. در برخی از سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری، این مغناطیس‌سنج برای نزدیک‌تر شدن به سطح زمین و در نتیجه قدرت تفکیک و حساسیت بیشتر، در داخل پرنده قرار می‌گیرد و در برخی از سیستم‌های قدیمی‌تر، مغناطیس‌سنج در زیر پرنده نصب می‌شود [Fugro, 2003].

با حل معادله القا برطبق سیستم پیچه هم‌صفحه افقی، بدون در نظر گرفتن تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ ) و ثابت گذردهی دی‌الکتریک ( $\epsilon$ ) داریم [Wait, 1982]:

$$Z = R + iQ = r^3 \int_0^{\infty} R_0(\omega, \lambda, \rho(z)) \lambda^2 e^{-2\lambda h} j_0(\lambda r) d\lambda \quad (1-3)$$

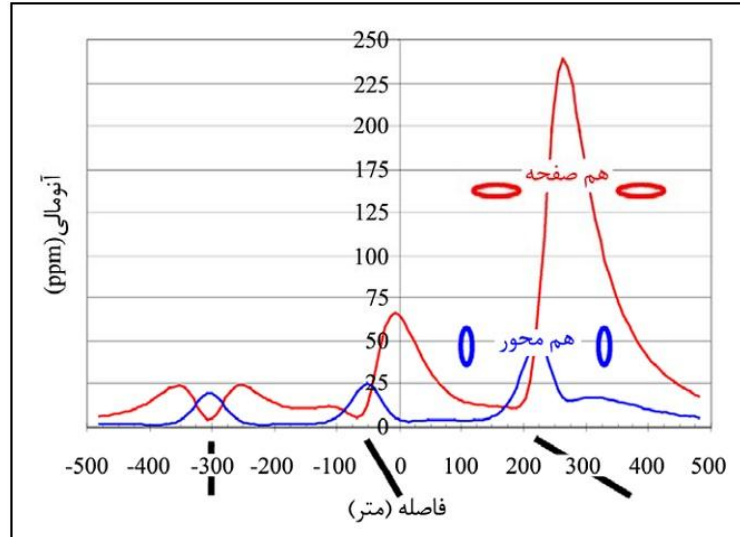
که در آن  $Z$  میدان مغناطیسی ثانویه،  $i$  عدد موهومی،  $r$  فاصله پیچه‌ها،  $h$  ارتفاع حسگر،  $j_0$  تابع بسل نوع اول و مرتبه صفر،  $R_0$  ضریب بازتاب مختلط وابسته به فرکانس سیستم  $f$ ؛  $\lambda$  طول موج و  $\rho(z)$  مقاومت ویژه عمودی است. برای نیم‌فضای همگن  $R_0$  به صورت زیر تعریف می‌شود [Siemon, 2007]

$$R_0 = \frac{\lambda - v}{\lambda + v}, \quad v = \sqrt{\lambda^2 + 2i/p^2}, \quad p = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (2-3)$$

چون حساسیت سیستم‌های الکترومغناطیس نسبت به رساناهایی که بزرگترین بعدشان عمود بر جهت میدان اولیه قرار گرفته، بیشتر است؛ در نتیجه پیچه‌های هم‌صفحه افقی بیشتر نسبت به لایه‌ها و توده‌های رسانای افقی حساس می‌باشند. از آنجایی که میدان اولیه ناشی از پیچه‌های هم‌محور عمودی، هنگامی که در بالای رسانا قرار دارند افقی می‌باشد، در نتیجه این پیچه‌ها بیشترین حساسیت را نسبت به توده‌های رساناهای قائم دارند [Fugro, 2003].

در شکل (۳-۴) آنومالی‌های بدست آمده از پیچه‌های هم‌صفحه افقی و هم‌محور عمودی بر روی صفحه رسانای شیب‌دار با شیب کم (۳۰ درجه)، شیب زیاد (۶۰ درجه) و عمودی (۹۰ درجه) نشان داده شده‌اند. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل آنومالی‌های الکترومغناطیس تابع موقعیت و جهت‌گیری سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده و هم‌چنین نحوه قرارگیری و عمق رساناها می‌باشند.

همان طور که مشاهده می‌شود اندازه آنومالی بدست آمده توسط پیچه هم‌صفحه افقی بر روی یک صفحه رسانای عمودی تقریباً برابر با آنومالی بدست آمده توسط پیچه هم‌محور عمودی می‌باشد. هر چند آنومالی بدست آمده توسط پیچه هم‌محور عمودی نازک‌تر و تیزتر از آنومالی پیچه هم‌صفحه افقی است. در مورد رسانای شیب‌دار با شیب کم، آنومالی بدست آمده توسط پیچه هم‌صفحه افقی بسیار بزرگ‌تر از آنومالی پیچه هم‌محور عمودی می‌باشد و علت این امر جفت‌شدگی بهتر بین میدان مغناطیسی اولیه پیچه هم‌صفحه افقی با رسانا و میدان مغناطیسی ثانویه رسانا با پیچه گیرنده می‌باشد [رجبی، ۱۳۸۷].



شکل (۳-۴): مقایسه پاسخ صفحه رسانا با زاویه‌های شیب ۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه برای دو آرایش پیچه‌های هم‌صفحه افقی و هم‌محور عمودی [رجبی، ۱۳۸۷].

معمولاً وقتی هدف تعیین محل و تفسیر آنومالی گسسته در داخل زمین باشد نتایج بدست آمده از پیچه‌های هم‌محور عمودی بسیار مهم است. در مورد اهداف کوچک و لایه‌های رسانای افقی پیچه‌های هم‌صفحه افقی بهتر می‌باشند. به دلیل حساسیت سیستم‌ها، پاسخ پیچه هم‌صفحه افقی می‌تواند در اثر رساناهای افقی نزدیک به سطح مانند مناطق و روباره‌های هادی رسی، تضعیف شده و باعث شود که اثر رساناهای عمیق‌تر و سنگ بستر حذف شود. در حالی که اثر رساناهای عمیق را می‌توان بوسیله پیچه‌های هم‌محور عمودی آشکار نمود. برای انجام یک عملیات برداشت معمولی نیاز به هر دو آرایش هم‌صفحه افقی و هم‌محور عمودی است تا بتوان رساناهای با اشکال مختلف (هم رساناهای لایه‌ای و هم رساناهای گسسته) را اکتشاف و تفسیر نمود [رجبی، ۱۳۸۷].

### ۳-۵- فاصله پیچه‌ها و نرمالیزه کردن<sup>۱</sup>:

فاصله بین پیچه‌ها تاثیر زیادی بر مقدار و همچنین سطح نویز ظاهری اندازه‌گیری شده سیستم الکترومغناطیس هلیکوپتری دارد. پیشتر اشاره شد که پاسخ الکترومغناطیس به صورت قسمت بر میلیون یا (ppm) بیان می‌شود. علت این است که فرستنده به طور پیوسته میدان مغناطیسی اولیه را در فضا منتشر می‌کند و این میدان در محل گیرنده اندازه‌گیری شده و باعث به وجود آمدن سیگنالی بسیار بزرگ‌تر از میدان ثانویه حاصل از زمین می‌شود. اگر میدان اولیه تغییر نماید میدان ثانویه نیز به نسبت مشابه تغییر خواهد کرد، بنابراین بهترین کار این است که میدان ثانویه به صورت یک نسبت یا قسمت در میلیون میدان اولیه بیان شود [Fugro, 2003].

برای انجام یک برداشت موثر لازم است اثر میدان اولیه را تا حد امکان حذف نمود تا میدان ثانویه که ذاتاً ضعیف‌تر است بتواند بهتر و دقیق‌تر اندازه‌گیری شود. حذف اثر میدان اولیه می‌تواند با استفاده از

---

<sup>۱</sup>. Normalize

روش‌های الکترونیکی مختلفی مانند استفاده از سیم‌پیچ‌های جبران‌کننده<sup>۱</sup> و یا تولید سیگنال‌های الکتریکی مصنوعی انجام گیرد. در هنگام حذف اثر میدان اولیه باید مراقب تغییرات اندازه میدان اولیه در محل گیرنده بود. چنانچه در اثر عواملی مانند تاب خوردن یا کج شدن پرنده در اندازه میدان اولیه تغییراتی حاصل شود، باید سیگنال جبران‌کننده آن در گیرنده نیز به همان نسبت تغییر کند در غیر این صورت قسمت حذف نشده میدان اولیه، میدان ضعیف ثانویه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. یک روش برای حذف حساسیت به میدان اولیه و تغییرات آن دور کردن سیم‌پیچ گیرنده از فرستنده است و در این روش دو سیم‌پیچ را تا حد امکان (تا جایی که در عمل ممکن باشد) از یکدیگر دور می‌کنند. اگر این فاصله خیلی زیاد انتخاب شود باعث ازدیاد بیش از حد طول پرنده شده و موجب خمیدگی آن از وسط و تغییر میزان جفت‌شدگی بین فرستنده و گیرنده می‌شود. از سوی دیگر بزرگ شدن اندازه پرنده باعث سنگینی آن و بروز برخی از مشکلات عملی می‌شود. بنابراین انتخاب فاصله مناسب بین سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده نیاز به تجربه و آزمایشات بسیار زیادی دارد. در سیستم برداشت الکترومغناطیس هوابرد شرکت فوگرو که از نوع دیگم است این فاصله برابر با ۸ متر انتخاب شده و با استفاده از این فاصله بین سیم‌پیچ‌ها بهترین نتایج بدست آمده است [Fugro, 2003].

میدان ثانویه‌ای که توسط یک سیستم الکترومغناطیس هوابرد بر روی یک زمین همگن اندازه‌گیری می‌شود؛ دقیقاً نمایانگر مقاومت‌ویژه زمین می‌باشد. اما برای زمین‌های لایه‌ای این پاسخ آشکار و واضح نیست و از این‌رو مقاومت‌ویژه ظاهری بدست می‌آید. برای تهیه نقشه‌ای از مقاومت‌ویژه زمین، مقاومت‌ویژه ظاهری از روی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد محاسبه می‌شود. تمامی برداشت‌های صحرائی مقاومت‌ویژه از جمله برداشت‌های الکترومغناطیس هوابرد، پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری را اندازه‌گیری

---

<sup>۱</sup> . Compensated coils

می‌نمایند، چرا که تمام اینها در مورد وضعیت زمین‌شناسی زیر زمین از یک سری فرضیات استفاده می‌کنند که کاملاً منطبق بر واقعیت نیستند [Fugro, 2003].

### ۳-۶- معرفی دو سیستم الکترومغناطیس هوابرد:

از آنجائی که شرکت فوگرو<sup>۱</sup> یکی از بزرگترین و معتبرترین شرکت‌های موجود در زمینه برداشت داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری می‌باشد، در این قسمت دو سیستم برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس که توسط این شرکت طراحی شده معرفی می‌شوند.

سیستم‌های برداشت هلیکوپتری ارائه شده توسط این شرکت، از یک پرنده به طول ۹ و قطر ۰/۵ متر از جنس فایبرگلاس که تجهیزات الکترونیکی درون آن نصب شده، استفاده می‌کنند. پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم‌صفحه به صورت افقی و پیچ‌های هم‌محور به صورت عمودی نصب شده‌اند، به شکلی که دوقطبی ایجاد شده توسط آنها، با محور پرنده در جهت خط پرواز موازی باشد. پرنده به فاصله ۳۰ متر در زیر هلیکوپتر با سرعتی در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت حمل می‌شود [Fugro, 2003].

### ۳-۶-۱- سیستم دیگم:

سیستم دیگم دارای سه جفت سیم‌پیچ هم‌صفحه افقی در فرکانس‌های ۷۲۰۰Hz، ۴۰۰Hz، ۵۶۰۰۰Hz بوده هم‌چنین از دو جفت سیم‌پیچ هم‌محور عمودی در فرکانس‌های ۹۰۰Hz، ۵۵۰۰Hz استفاده می‌کند. برای تمامی جفت سیم‌پیچ‌های ذکرشده، به‌غیر از سیم‌پیچ‌های ۵۶۰۰۰Hz که فاصله آنها ۶/۳ متر می‌باشد فاصله فرستنده و گیرنده برابر ۸ متر است. وضعیت قرارگیری سیم‌پیچ‌ها نسبت به یکدیگر در شکل (۳-۵) نشان داده شده است [Fugro, 2003].

---

<sup>۱</sup>. Fugro

سیستم دیگهم از ابتدا جهت اکتشافات مواد معدنی طراحی شده است. استفاده از سیم‌پیچ‌هایی در فرکانس‌های نزدیک به هم، باعث می‌شود که داده‌های بسیار مناسبی جهت تفسیر هندسه توده رسانا به دست آیند. هم‌چنین بازه فرکانسی وسیع این سیستم، امکان اکتشاف از سطح زمین تا ماکزیمم عمق حدود ۱۰۰ متر را فراهم می‌سازد (این عمق ماکزیمم بسته به شرایط زمین می‌تواند تغییر نماید) [تمدن، ۱۳۸۶].



شکل (۳-۵): ساختار پیچه دیگهم [After Fugro, 2003]

### ۲-۶-۳- سیستم RESOLVE:

این سیستم دارای پنج جفت سیم پیچ هم‌صفحه افقی در فرکانس‌های ۱۵۰۰Hz، ۴۰۰Hz، ۱۱۵kHz، ۲۵kHz، ۶۲۰۰Hz بوده و هم‌چنین از یک جفت سیم‌پیچ هم‌محور عمودی در فرکانس ۱۴۰۰Hz استفاده می‌کند. برای تمامی جفت سیم‌پیچ‌های ذکر شده، فاصله فرستنده-گیرنده ۸ متر است. به غیر از سیم پیچ‌های هم‌محور که فاصله آنها ۹ متر می‌باشد. وضعیت قرارگیری سیم‌پیچ‌ها نسبت به یکدیگر در شکل (۳-۶) نشان داده شده است [Fugro, 2003].



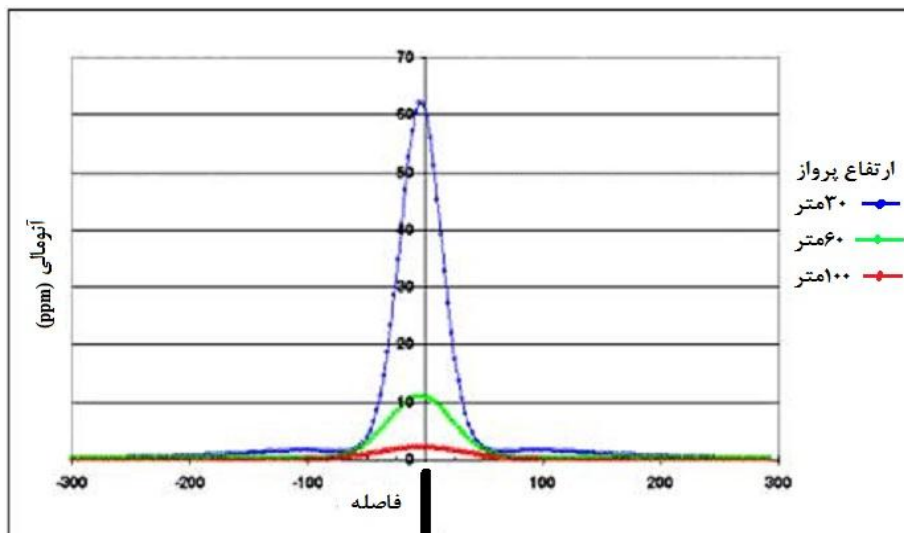
شکل (۳-۶): نمایش ساختار پیچه RESOLVE [After Fugro, 2003]

سیستم RESOLVE ابزاری ایده‌آل برای اکتشاف در زمین‌های لایه‌ای به جهت یافتن واحدهای وسیع مسطح می‌باشد. این سیستم علاوه بر دارا بودن عمق اکتشاف مناسب، به دلیل استفاده از فرکانس‌های بسیار بالا، دارای حساسیت بسیار خوبی نسبت به رساناهای سطحی می‌باشد. از آنجایی که این

سیستم از یک جفت حلقه هم‌محور عمودی و یک جفت حلقه هم‌صفحه افقی در یک فرکانس استفاده می‌کند؛ تفسیر وضعیت هندسی تودهٔ رسانا ممکن خواهد بود. در سال‌های اخیر از این سیستم برای مطالعات زیست محیطی نیز استفاده می‌شود [تمدن، ۱۳۸۶].

### ۷-۳- ارتفاع پرنده الکترومغناطیس:

ارتفاع سیستم الکترومغناطیس تا زمین توسط ارتفاع‌سنج راداری اندازه‌گیری می‌شود. این ارتفاع‌سنج در داخل هلیکوپتر قرار گرفته و از آنجا که فاصله بین هلیکوپتر و سنجنده (پرنده) مشخص است، بنابراین می‌توان ارتفاع پرنده را از سطح زمین با کم کردن مقادیر ارتفاع‌سنج از فاصله ثابت بین پرنده و هلیکوپتر به دست آورد. این مقادیر سپس به داده‌های اصلی در مختصات‌های مربوطه اضافه می‌شوند و به عنوان داده‌های کمکی در مراحل پردازش به کار می‌روند [Ronning et al, 2003]. شکل (۷-۳) تاثیر ارتفاع پرنده را در مشخص کردن یک آنومالی نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش ارتفاع پرواز دامنه آنومالی کم شده و پهن‌شدگی بیشتری در آنومالی نمایان می‌شود.



شکل (۷-۳): تاثیر ارتفاع پرواز بر دامنه آنومالی‌های سطحی [رجبی، ۱۳۸۷].



## فصل چهارم:

روش‌های معکوس‌سازی داده‌های

الکترومغناطیس هلیکوپتری 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 روش‌های الکترومغناطیس هوابرد، 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 و لایه 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<sup>۱</sup> حقیقی و مقاومت ویژه ظاهری<sup>۲</sup> اندکی توضیح دهیم و سپس در ادامه این فصل به بیان انواع روش‌های معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد پردازیم.

#### ۴-۲- مقاومت ویژه الکتریکی:

روش‌های الکترومغناطیس برای بررسی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی داخل زمین به کار می‌رود. محاسبه مقاومت‌های ویژه ظاهری گام اول در ارزیابی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس می‌باشد. توزیع مقاومت ویژه جانبی<sup>۳</sup> تمام یک منطقه برداشت با نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس‌های منفرد نمایش داده می‌شوند. با این حال توزیع مقاومت ویژه عمودی را با استفاده از تمام فرکانس‌های مورد استفاده بدست می‌آورند [Siemon, 2001].

---

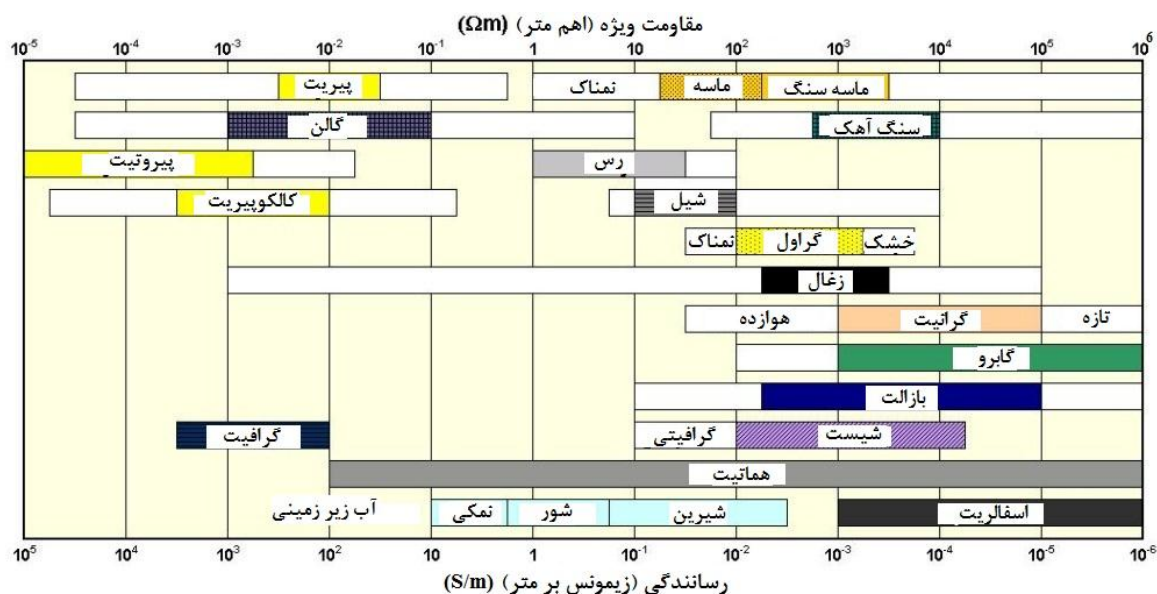
<sup>1</sup>. Resistivity

<sup>2</sup>. Apparent resistivity

<sup>3</sup>. Lateral Resistivity

با توجه به اینکه مواد تشکیل دهنده لایه‌های زمین مقاومت‌ویژه‌های الکتریکی متفاوتی دارند، با استفاده از روش‌های برداشت الکترومغناطیسی می‌توان لایه‌های زمین را با استفاده از مقاومت‌ویژه الکتریکی آنها از یکدیگر تفکیک نمود.

مقاومت‌ویژه متغیرترین خاصیت فیزیکی می‌باشد، که عموماً تحت تاثیر مقدار محتوای آب، تخلخل، وجود شکستگی و یا میزان هوازدگی سنگ‌ها و مواد معدنی می‌باشد. از این رو نمی‌توان عدد خاصی برای مقاومت‌ویژه مواد در نظر گرفت؛ بلکه باید آن را به شکل یک بازه بیان نمود. به منظور یادآوری مقاومت‌ویژه برخی مواد در شکل (۴-۱) نشان داده شده است [Reeves & Bullock, 2005].

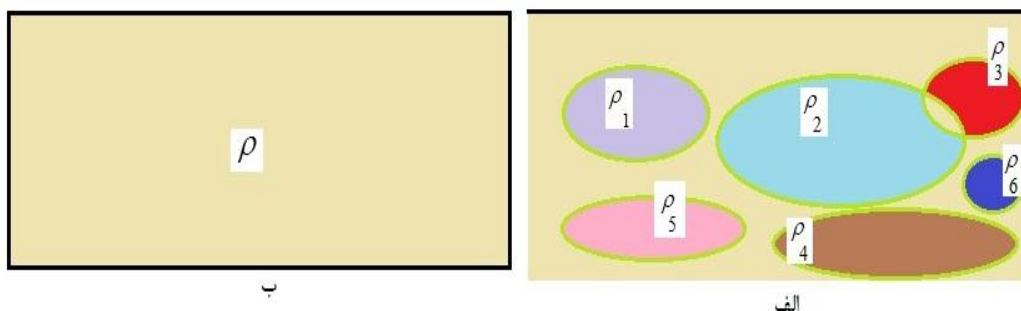


شکل (۴-۱): مقاومت‌ویژه و رسانندگی سنگ‌ها، کانی‌ها و برخی مواد متداول [After Reeves & Bullock, 2005].

اما باید در نظر داشت که مقدار بدست آمده در محاسبات مقاومت‌ویژه حقیقی زمین نیست بلکه یک مقدار متوسط از لایه‌های زمین می‌باشد. غالباً به جای مقاومت‌ویژه الکتریکی از واژه مقاومت‌ویژه ظاهری استفاده می‌شود، چون در اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی در حقیقت با یک زمین غیر همگن روبرو هستیم. چون هدف اصلی برداشت‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری موقعیت‌یابی آنومالی‌های قابل

پیش‌بینی است، نقشه‌های مقاومت‌ویژه ظاهری که برای تفسیر و نقشه‌سازی زمین‌شناسی ارزشمند است با استفاده از داده‌ها تهیه می‌شود [رجبی، ۱۳۸۷].

مقاومت‌ویژه‌های ظاهری از هر فرکانس مورد استفاده در برداشت قابل محاسبه است. از سوی دیگر ترکیبی از پیچ‌های هم‌صفحه افقی اغلب در محاسبه مقاومت‌ویژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ چون بیشترین جفت‌شدگی را با لایه‌بندی افقی دارند. مقاومت‌ویژه ظاهری یک مقدار متوسط می‌باشد که با استفاده از مقاومت‌ویژه لایه‌های مختلف زمین بدست می‌آید. البته این مقدار به معنای متوسط‌گیری ریاضی نیست بلکه مقداری است که برای مقاومت‌ویژه الکتریکی یک ناحیه که به صورت لایه‌هایی با مقاومت الکتریکی مختلف می‌باشند در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴-۲)، زمینی با مقاومت‌ویژه حقیقی و ظاهری نمایش داده شده است [رجبی، ۱۳۸۷].



شکل (۴-۲): الف) زمینی با مقاومت‌ویژه واقعی ب) زمینی با مقاومت‌ویژه ظاهری

#### ۴-۳- معکوس‌سازی<sup>۱</sup> داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس:

مدل‌سازی معکوس داده‌های الکترومغناطیس و بدست آوردن پارامترهای مدل مانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی مشکل‌ترین بخش تفسیر و پردازش این داده‌ها می‌باشد. معکوس‌سازی (مدل‌سازی معکوس) فرایندی است که طی آن پاسخ ژئوفیزیکی مورد انتظار از یک مدل زمین‌شناسی تعیین‌شده<sup>۲</sup> (مدل

<sup>۱</sup>. Inversion

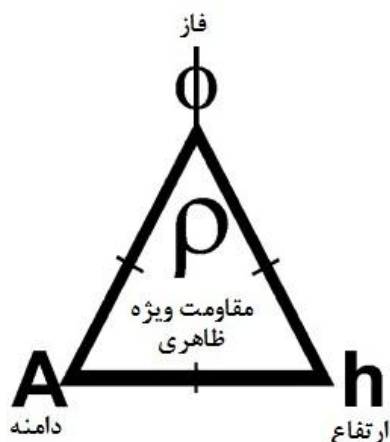
<sup>۲</sup>. Specific model

پیشرو<sup>۱</sup>) با داده‌های ژئوفیزیکی جمع‌آوری شده مقایسه می‌شود و مدل آن قدر تغییر می‌کند تا اختلاف بین نتایج مدل پیشرو و داده‌های جمع‌آوری شده به حداقل برسد. معمولاً در طی این فرایند به پارامترهای مدل و داده‌های ورودی ضرایبی برای کنترل و تعادل مدل‌سازی اعمال می‌شود و عموماً یک مدل اولیه به عنوان ورودی توسط کاربر تعریف می‌شود [Fugro, 2003].

در محاسبات مقاومت ویژه ظاهری الکترومغناطیس هلیکوپتری ملاحظات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ارتفاع سیستم به طور قابل توجهی از فاصله پیچ‌ها بیشتر است ( $h \cong 4r$ ).
- زمین یک نیم‌فضای همگن<sup>۲</sup> می‌باشد.

در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با یک سیستم الکترومغناطیس هلیکوپتری دو پارامتر از سه پارامتر زیر لازم است. این سه پارامتر همان طور که در شکل (۳-۴) دیده می‌شود، عبارتند از فاز سیگنال<sup>۳</sup>، دامنه سیگنال<sup>۴</sup> و ارتفاع سیستم [Fugro, 2003].



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

<sup>1</sup>. Forward model

<sup>2</sup>. Homogenous halfspace

<sup>3</sup>. Signal phase

<sup>4</sup>. Signal amplitude

پارامترهای دامنه و فاز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \sqrt{R^2 + Q^2} \quad (1-4)$$

$$\phi = \text{Arc tan}\left(\frac{Q}{R}\right) \quad (2-4)$$

که در آنها  $R$  و  $Q$  به ترتیب مولفه‌های همفاز و ناهمفاز میدان مغناطیسی ثانویه می‌باشند.

برای ارائه نتایج برداشت به صورت نقشه‌های مقاومت‌ویژه و مقاطع عرضی، باید پارامترهای مقاومت‌ویژه و عمق را در اختیار داشته باشیم. تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای رسیدن به این پارامترها ارائه شده است.

از اوایل دهه ۱۹۵۰ الگوریتم‌هایی برای محاسبه مقاومت‌ویژه‌های ظاهری در تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک<sup>۱</sup> استفاده می‌شد. مقاومت‌ویژه ظاهری با استفاده از دامنه امپدانس<sup>۲</sup> مگنتوتلوریک در هر فرکانس بدست می‌آمد. در این مشاهدات فرض بر این بود که میدان‌های الکترومغناطیسی بوسیله جریان‌های القاء شده داخل یک نیم‌فضای همگن با مقاومت‌ویژه  $\rho$  ایجاد می‌شوند. بنابراین  $\rho_a$  مقاومت‌ویژه نیم‌فضا نامیده می‌شد. با این حال برای داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری الگوریتم‌هایی برای محاسبه مقاومت‌ویژه‌ها تهیه شده است. مثلاً یک الگوریتم برای محاسبه عددی مقاومت‌ویژه ظاهری توسط ماندری<sup>۳</sup> و در سال ۱۹۸۴ منتشر شد. بعد از مدت کوتاهی سنگپیل<sup>۴</sup> (۱۹۸۸) الگوریتمی را برای بدست آوردن پارامتر عمق که عمق مرکزی<sup>۵</sup> نامیده می‌شد ( $Z^*$ ) را توسعه داد. از آن زمان به بعد امکان نمایش داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری به شکل منحنی‌های سونداژ ( $\rho_a(Z^*)$ ) و یا مقطع‌های

---

<sup>1</sup>. Magnetotelluric

<sup>2</sup>. Impedance

<sup>3</sup>. Mundry

<sup>4</sup>. Sengpiel

<sup>5</sup>. Centroid depth

مقاومت‌ویژه (سنگپیل ۱۹۹۰) فراهم شد. در ادامه هوانگ<sup>۱</sup> و فریزر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۶ با انتشار مقاله‌ای پیشرفت‌ها در این زمینه را نشان دادند [siemon, 2001].

بعد از آن آقای سیمون<sup>۳</sup> در سال‌های ۱۹۹۷ و سپس ۲۰۰۱ با اصلاح تعریف عمق‌مرکزی و مشتق‌گیری نسبت به فرکانس در محاسبات مربوط به مقاومت‌ویژه، عملکرد و عمق نفوذ این روش‌ها را بهبود بخشید. منحنی‌های ارائه شده سیمون نسبت به تغییرات عمودی مقاومت‌ویژه بسیار حساس‌تر بود. در کل روش‌های فوق‌الذکر تحت عنوان مدل‌سازی معکوس تقریبی معروف شدند. روش‌های تقریبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌ها نیازی به حدس یک مدل اولیه نداشته و هم‌چنین از نظر زمان محاسبات خیلی سریع‌تر از الگوریتم‌های مدل‌سازی با تکرار می‌باشند.

از دیگر روش‌های مدل‌سازی معکوس داده‌های الکترومغناطیس هوابرد می‌توان به روش تصویرسازی رسانندگی-عمق<sup>۴</sup> (مکنا<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۱)، روش تجزیه مقادیرتکین<sup>۶</sup> (هوانگ و پالاکي<sup>۷</sup>، ۱۹۹۱)، برای مدل‌سازی داده‌های حوزه زمان و هم‌چنین روش اکام<sup>۸</sup> (کنستیل<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۸۷) اشاره کرد. این دسته روش‌های معکوس‌سازی به دو دسته لایه‌های گسسته<sup>۱۰</sup> و مدل هموار<sup>۱۱</sup> تقسیم

---

<sup>1</sup>. Huang

<sup>2</sup>. Fraser

<sup>3</sup>. Siemon

<sup>4</sup>. Conductivity Depth Imaging

<sup>5</sup>. Macnae

<sup>6</sup>. Singular Value Decomposition (SVD)

<sup>7</sup>. Huang and Palacky

<sup>8</sup>. Occam

<sup>9</sup>. Constable

<sup>10</sup>. Discrete layers

<sup>11</sup>. Smooth

می‌شوند. در معکوس‌سازی‌های هموار (مثل روش اکام و روش تصویرسازی رسانندگی-عمق) یک مدل که تعداد لایه‌های زیادی (۲۰ لایه یا بیشتر) با ضخامت ثابت دارد، در نظر گرفته می‌شود، سپس رسانندگی این لایه‌ها را آن‌قدر تغییر می‌دهند تا بهترین توزیع رسانندگی در این لایه‌ها برای رسیدن به برازش<sup>۱</sup> مناسب با داده‌ها بدست آید. مدل‌سازی معکوس هموار یا چند لایه مانند اکام از نظر محاسباتی کند بوده ولی نسبت به تغییرات زمین‌شناسی انعطاف نسبتاً خوبی دارد. بنابراین به ورودی کمی از سوی کاربر نیاز دارد [Fugro, 2003]. در ادامه به بررسی مهم‌ترین الگوریتم‌ها در معکوس‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، پرداخته می‌شود.

#### ۴-۴- انواع الگوریتم‌ها و روش‌های مدل‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری:

داده‌های میدان ثانویه (مولفه هم‌فاز و ناهم‌فاز) با استفاده از دو مدل اساسی به مقاومت‌ویژه تبدیل می‌شوند. این دو مدل عبارتند از مدل نیم‌فضای هم‌گن<sup>۲</sup> و مدل نیم‌فضای لایه‌ای<sup>۳</sup> که در شکل (۴-۴) نشان داده شده‌اند [Kirsch, 2006].

بر این اساس روش‌های مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد را می‌توان به طور کلی به دو دسته تقسیم نمود:

۱. تبدیل مستقیم داده‌ها به یک مدل تعمیم یافته مثلاً یک نیم‌فضا.

۲. معکوس‌سازی داده‌ها با فرایند تکرار محاسبات.

مزیت روش اول این است که یک جواب واحد برای پارامتر خروجی بدست می‌آید و عیب آن این است که ممکن است پارامتر خروجی تصویر زمین‌شناسی ضعیفی را نشان دهد. در روش دوم یک مدل

---

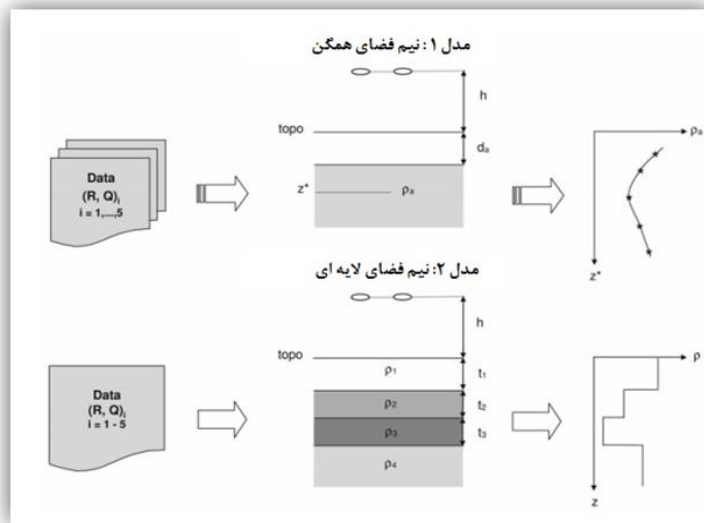
<sup>1</sup>. Fit

<sup>2</sup>. Homogeneous half-space

<sup>3</sup>. Layered half-space



اولیه انتخاب می‌شود و محاسبات انجام شده روی داده‌ها آن قدر تکرار می‌شود تا به بهترین برازش و حداقل تفاوت با مدل اولیه حاصل شود. مزیت این روش این است که پارامتر خروجی قدرت تفکیک فوق‌العاده‌ای دارد و عیب آن این است که در حین تغییر دادن مدل اولیه؛ ممکن است پارامتر خروجی نیز همراه آن تغییر کند [Huang and Fraser, 2003].



شکل (۴-۴): انواع معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد: ۱. مدل نیم‌فضای همگن ۲. مدل نیم‌فضای لایه‌ای برای مجموعه داده‌های پنج فرکانسی [After Kirsch, 2006].

## الف - روش مقاطع فریزر:

این تبدیلات که گام مهمی در تفسیر بهتر برداشتها محسوب می‌شود، نخستین بار توسط فریزر (Fraser, 1978) برای سیستم چند فرکانسی دیگهم استفاده شد. در این روش از دو مدل برای بدست آوردن مقاومت‌ویژه ظاهری و عمق استفاده می‌شود.

۱. مدل نیم‌فضای همگن<sup>۱</sup> (دامنه-ارتفاعی)

۲. مدل نیم‌فضای لایه‌کاذب<sup>۱</sup>

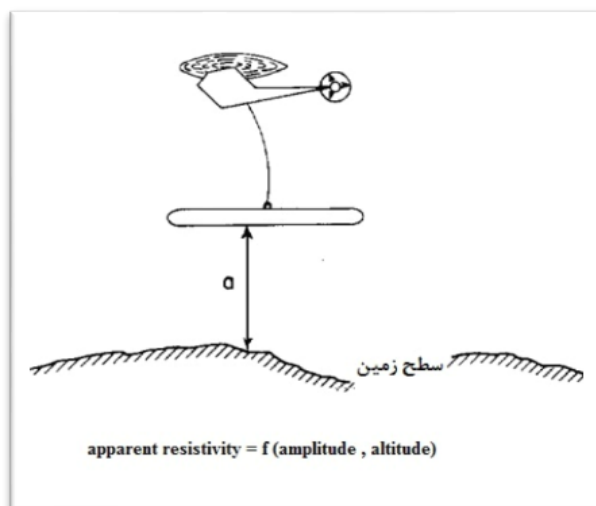
<sup>۱</sup>. Homogenous half space model

## الف-۱- مدل نیم‌فضای همگن:

در این روش اثرات ناشی از ارتفاع سیستم پرواز را می‌توان به حداقل رساند و یا حذف نمود. در این الگوریتم زمین به صورت یک نیم‌فضای همگن در نظر گرفته می‌شود. سطح بالای نیم‌فضا بر سطح زمین منطبق است، ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط رادار و دامنه سیگنال به عنوان ورودی‌ها در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌شوند [Fraser, 1978].

$$\rho_a = f(A, a) \quad (3-4)$$

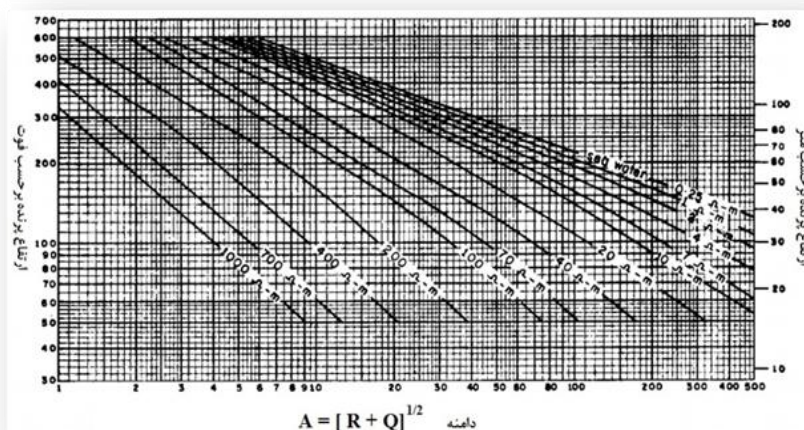
شکل (۴-۵) نحوه برداشت با استفاده از مدل نیم‌فضای همگن نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵): برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای همگن [After fraser, 1978].

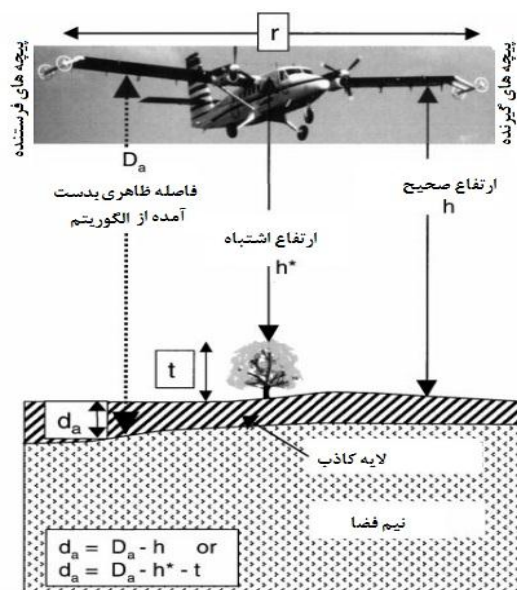
حال با استفاده از مقدار دامنه و ارتفاع اندازه‌گیری و نمودارهای استاندارد ارائه شده توسط فرشنخت [Frischnecht, 1967] مقادیر مقاومت ویژه بدست می‌آیند. شکل (۴-۶) نمونه‌ای از این نمودارهای استاندارد را برای فرکانس ۹۰۰Hz نشان می‌دهد.

<sup>1</sup>. Pseudo-layer model



شکل (۴-۶): نمودار استاندارد دامنه-ارتفاعی مدل نیم‌فضای همگن برای تفسیر، در حالت بیشترین جفت‌شدگی پیچه گیرنده با فرکانس ۹۰۰ Hz [After fraser, 1978].

این روش عموماً نسبت به مشکلات دریافت و بی‌کیفیتی داده‌ها انعطاف‌پذیر است و تصحیحات چندانی برای رسیدن به نتایج مطلوب نیاز ندارد. محاسبات مربوط به این الگوریتم ساده و اجرای آن بسیار سریع است و هر قدر زمین مورد مطالعه به زمین همگن نزدیک‌تر باشد، مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده به مقاومت ویژه واقعی زمین نزدیک‌تر خواهد بود. استفاده از ارتفاع سنسور (ارتفاعی که در برداشتهای صحرائی توسط ارتفاع سنج‌های لیزری یا راداری اندازه‌گیری می‌شود) به عنوان یک پارامتر ورودی برای وارون‌سازی مشکلات بیشتری بوجود می‌آورد چرا که ممکن است تحت تاثیر درختان یا ساختمان‌ها قرار گیرد و ارتفاع نادرست را ثبت کند. چون نوک درختان و یا بالای ساختمان‌ها به جای سطح زمین در نظر گرفته می‌شوند. این مشکل در شکل (۴-۷) نشان داده شده است [Kirsch, 2006].



شکل (۴-۷): نمایش عمق و فاصله ظاهری و اثر درختان بر اندازه‌گیری ارتفاع [After Beamish, 2002].

به دلیل مشکلات موجود در این الگوریتم از سال ۱۹۹۰ ژئوفیزیک‌دانان و فریزر الگوریتم دقیق‌تری

با عنوان لایه کاذب را برای محاسبات خود استفاده نمودند.

## الف-۲- مدل نیم‌فضای لایه کاذب:

این مدل در شکل (۴-۸) نشان داده شده است. در این مدل از دامنه و فاز برای بدست آوردن

مقاومت‌ویژه ظاهری استفاده می‌شود.

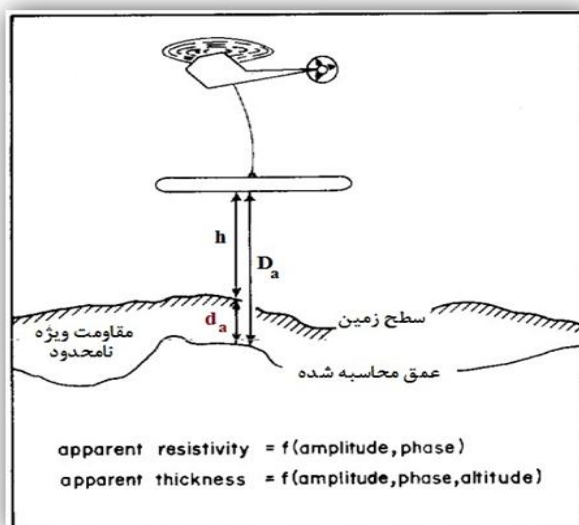
پارامترهای ورودی برای این الگوریتم دامنه ( $A$ ) و فاز ( $\phi$ ) میدان اندازه‌گیری شده در پیچه

گیرنده با حداکثر جفت‌شدگی می‌باشد. پارامتر خروجی با استفاده از این الگوریتم مقاومت‌ویژه ظاهری و

ارتفاع ظاهری پرنده می‌باشند. بنابراین مقاومت‌ویژه ظاهری بدست آمده تابعی از دامنه و فاز می‌باشد و

ارتفاع ظاهری پرنده بالای نیم‌فضا نیز به عنوان پاسخ فرعی بدست می‌آید.

$$\rho_a = f(A, \phi) \quad (۴-۴)$$

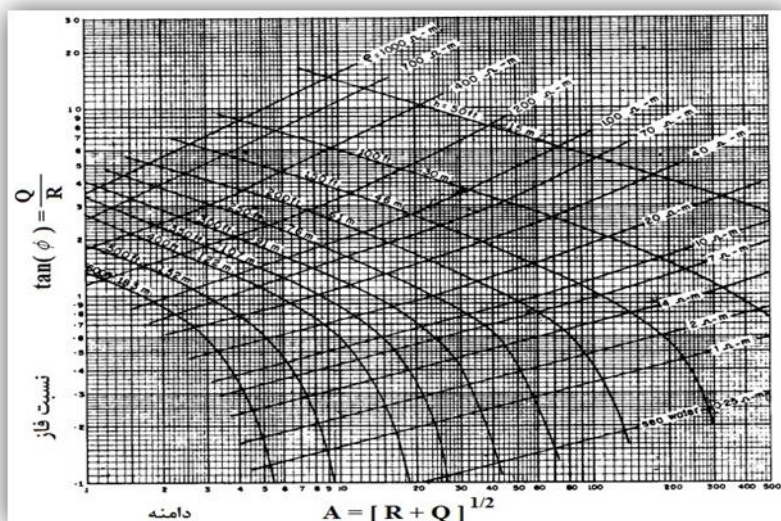


شکل (۴-۸): نحوه برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری بر اساس مدل نیم‌فضای کاذب [After Fraser, 1978].

اختلاف بین ارتفاع ظاهری پرنده ( $D_a$ ) و ارتفاع واقعی پرنده ( $h$ ) به وجود یک لایه مقاوم رویی با عمق ظاهری ( $d_a$ ) نسبت داده می‌شود؛ که به آن لایه کاذب ( $d_a$ ) گفته می‌شود. این اختلافات در زمین‌های لایه‌ای و ناهمگن ممکن است رخ دهد و نیز ممکن است به دلیل خطا در ارتفاع محاسبه شده باشد [Fraser, 1978].

پس از اندازه‌گیری دامنه و فاز در این الگوریتم، با استفاده از نمودارهای استاندارد فرسخت، مقاومت‌ویژه ظاهری محاسبه می‌شود. یک نمونه از این نمودارها برای فرکانس  $900\text{ Hz}$  در شکل (۴-۹) آمده است.

در این الگوریتم ممکن است به دلیل وجود پوشش گیاهی ارتفاع کم اندازه‌گیری شود و متعاقباً مقادیر عمق ظاهری بزرگتری محاسبه شود، با این حال اندازه‌گیری اشتباه ارتفاع، بر مقاومت‌ویژه ظاهری تاثیر نمی‌گذارد؛ چون لایه‌های مقاوم سطحی در محاسبات نادیده گرفته می‌شوند؛ لذا مقاومت‌ویژه دقیق‌تری بدست می‌آید. این مسئله مزیت اصلی مدل نیم‌فضای کاذب نسبت به مدل نیم‌فضای همگن می‌باشد [رجبی، ۱۳۸۷].



شکل (۴-۹): نمودار دامنه-فاز مدل نیم‌فضای لایه کاذب در حالتی که بیشترین جفت‌شدگی برای فرکانس ۹۰۰ Hz وجود دارد [After Fraser, 1978].

عمق ظاهری نیم‌فضای رسانا یک وسیله بسیار مفید برای تفسیر می‌باشد (بعد از کم کردن ارتفاع پرند) چرا که با آن نقشه‌هایی از ضخامت لایه سطحی مقاوم را در صورت وجود می‌توان تهیه نمود. مزیت دیگر مدل نیم‌فضای لایه کاذب حساسیت بیشتر به توده‌های رسانای مدفون عمیق می‌باشد. چون زاویه فاز نسبت به سیگنال‌های رسیده از توده‌های رسانای مدفون عمیق بیشترین حساسیت را دارد. بنابراین امروزه از مدل نیم‌فضای لایه کاذب استفاده بیشتری می‌شود [رجبی، ۱۳۸۷].

اگر زمین همگن باشد، تمام مقاومت‌ویژه‌های محاسبه شده با مقاومت‌ویژه‌های نیم‌فضا برابر است. در این شرایط ارتفاع ظاهری سنسور ( $D_a$ ) برابر ارتفاع اندازه‌گیری شده ( $h$ ) می‌باشد. مقاومت‌ویژه ظاهری یک زمین ناهمگن مثلاً نیم‌فضای لایه‌ای تقریبی از مقاومت‌ویژه حقیقی زمین می‌باشد. این موضوع به فرکانس و پارامتر اندازه‌گیری شده مورد استفاده در معکوس‌سازی بستگی دارد. علاوه بر این ارتفاع اندازه گرفته شده ( $h$ )، الزاماً مساوی ارتفاع ظاهری سنسور ( $D_a$ ) نیست. اختلاف بین ارتفاع اندازه گرفته شده ( $h$ ) و ارتفاع ظاهری ( $D_a$ ) عمق ظاهری ( $d_a$ ) نامیده می‌شود [Fraser, 1978].

$$d_a = D_a - h \quad (5-4)$$

اگر  $d_a$  مثبت باشد؛ لایه رویی از لایه زیری مقاومتر است و اگر  $d_a$  منفی باشد، لایه رویی نسبت به زیری بسیار رساناتر است؛ و اگر  $d_a$  مساوی صفر باشد زمین مورد مطالعه همگن است. البته در تمام روش‌هایی که از ارتفاع سنسور ( $h$ ) به عنوان پارامتر ورودی استفاده می‌کنند، این مشکل وجود دارد که ارتفاع سنسور اندازه گرفته شده اغلب دارای خطا می‌باشد. بخصوص در جنگل‌های انبوه و محل وجود ساختمان‌ها این اندازه‌گیری اشتباه می‌باشد، بنابراین به مقادیر مقاومت ویژه اشتباه منتهی می‌شود، لذا بهتر است که مقاومت ویژه ظاهری از مقادیر میدان ثانویه مختلط ( $A, \phi$ ) محاسبه شود [Fraser, 1978].

تمام مقاومت ویژه عمق‌های محاسبه شده با استفاده از این روش‌ها مقادیر ظاهری می‌باشند؛ چون شرایط واقعی زمین یک نیم‌فضای رسانای یکنواخت نیست. در واقع اگر زمین یک نیم‌فضای یکنواخت می‌بود هر دو روش نتایج مشابهی داشت. بنابراین مقایسه نتایج این دو روش برای تفسیر خیلی کارساز است و پیشنهاد می‌شود در صورت امکان هر دو روش بر روی تمام مجموعه داده‌ها پیاده شود.

#### ب- روابط پایه‌ای برای محاسبات:

در یک میدان مغناطیسی نوسانی میدان اولیه به وجود آمده توسط پیچه فرستنده در ارتفاع  $h$  جریان‌های گردابی در یک زمین رسانا القاء می‌کند به طوری که میدان مغناطیسی ثانویه در فاصله  $r$  و ارتفاع  $h$ ، به وسیله پیچه گیرنده برداشت می‌شود. اثر سیگنال میدان اولیه در گیرنده نادیده گرفته می‌شود. برای داده‌های مگنتوتلوریک میدان‌های الکترومغناطیس به طور مستقیم برای یک نیم‌فضای همگن و یا نیم‌فضای لایه‌ای قابل محاسبه می‌باشد [Siemon, 2001]. برای محاسبه پاسخ داده‌های الکترومغناطیس هوابرد باید انتگرال زیر در حوزه عدد موج حل شود:

$$Z[ppm] = \frac{Z_s}{Z_p} = R + iQ = r^3 \int_0^{\infty} R_l(f, \lambda, \rho(z)) \lambda^2 e^{-2\lambda h} j_0(\lambda r) d\lambda \quad (6-4)$$

این فرمول که به انتگرال ماندری معروف است برای حلقه‌های هم‌صفحه (دوقطبی مغناطیسی عمودی) معتبر می‌باشد.  $Z$  مولفه عمودی میدان ثانویه می‌باشد. برای سایر ساختار پیچدها (هم‌صفحه عمودی یا هم‌محور عمودی) فرمول‌های مشابهی وجود دارد. ضریب بازتاب  $R_1$  برای یک نیم‌فضای  $n$  لایه با رابطه بازگشتی (۷-۴) بدست می‌آید:

$$R_{j-1} = \frac{K_{j-1} + R_j u_j}{1 + K_{j-1} R_j u_j} \quad j = n-1, n-2, \dots, 2$$

$$R_{n-1} = K_{n-1} \quad K_{j-1} = \frac{v_{j-1} - v_j}{v_{j-1} + v_j}$$

$$u_j = e^{-2h_j v_j} \quad v_j = \sqrt{\lambda^2 + \frac{i\omega\mu_0}{\rho_j}} \quad (7-4)$$

روش‌های متعددی برای محاسبه انتگرال (۶-۴) وجود دارد. که در اینجا از الگوریتم ویدلت<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) که بر اساس تبدیل سریع هنکل می‌باشد استفاده شده است [Siemon, 2001]. با تغییر متغیر،

$$\lambda = \frac{k}{h} \text{ در معادله (۶-۴) و استفاده از نسبت } \gamma = \frac{r}{h} \text{ داریم:}$$

$$Z = \gamma^3 \int_0^{\infty} R_1(f, k, \rho(z)) k^2 e^{-2k} j_0(k\gamma) dk \quad (8-4)$$

اگر فاصله پیچدها ( $r$ ) به اندازه کافی کوچکتر از ارتفاع سنسور باشد ( $\gamma = \frac{r}{h} \leq 3$ )، در تابع بسل به جای  $z$  می‌توان مقدار یک را در نظر گرفت. این عمل منجر به تبدیل داده‌های اندازه‌گیری شده به پارامترهای نیم‌فضا (مقاومت ویژه ظاهری  $\rho_a$  و فاصله ظاهری سیستم از بالای نیم‌فضا) می‌شود. برای یک نیم‌فضای همگن انتگرال ماندری فقط به نسبت  $\delta = \frac{h}{p}$  بستگی دارد [Siemon, 2001].

<sup>1</sup>. weidelt



$$p = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (9-4)$$

که در آن،  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  و  $\omega = 2\pi f$ . همچنین ضریب بازتاب برای یک نیم‌فضای

همگن با مقاومت ویژه  $\rho$  (زمین قرار گرفته زیر یک لایه نارسانای هوا) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_l = \frac{k-v}{k+v}, \quad v = \sqrt{k^2 + i2\delta^2}$$

$$\delta = \frac{h}{p}, \quad p = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (10-4)$$

از معادله‌های (۸-۴) و (۱۰-۴) می‌توان نتیجه گرفت که اندازه Z فقط به نسبت  $\delta = h/p$  و  $\gamma$

بستگی دارد.

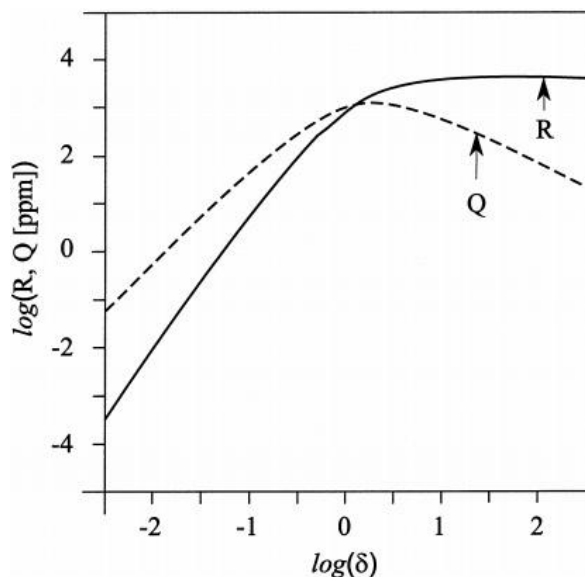
در شکل (۱۰-۴) پاسخ‌های همفاز و ناهمفاز میدان ثانویه بر حسب  $\delta$  (برای نسبت  $\gamma = \frac{r}{h} = \frac{8}{30}$ )

در مقیاس لگاریتمی- لگاریتمی نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که پاسخ مولفه

همفاز در عمق نفوذهای بالا ( $\delta \ll 1$ ) و مولفه غیر همفاز در مقدار حد وسط  $\delta$  به مقدار بیشینه می‌رسد.

بنابراین بکاربردن مولفه‌های همفاز و غیرهمفاز به تنهایی برای بدست آوردن مقاومت ویژه مناسب نیستند.

در ادامه روش محاسبه مقاومت ویژه با استفاده از دامنه و نسبت فاز توضیح داده می‌شود [Siemon, 2001]



شکل (۴-۱۰): مولفه همفاز و غیرهمفاز بر حسب  $\delta$  برای یک نیم فضای همگن با رسانندگی دلخواه [Siemon, 2001].

### ج- روش های نیم فضای همگن:

این روش ها اگر چه از روش های قدیمی محاسبه عمق ظاهری می باشند، اما هنوز کاربرد خود را در معکوس سازی داده های الکترومغناطیس هوا برد دارد. از این رو لازم است که مدل سازی فوق نیز مورد بررسی قرار گیرد. مدل های نیم فضای همگن بررسی شده در این پایان نامه عبارتند از روش دامنه و نسبت فاز، جواب های مقاومت ویژه با استفاده از این دو روش به صورت  $\rho_a^E(Z_\epsilon^*)$  و  $\rho_a^A(Z_A^*)$  نشان داده شده است. بنابراین داده های ورودی این الگوریتم ها یکی از موارد زیر است [رجبی، ۱۳۸۷].

ارتفاع پرنده و نسبت مولفه موهومی به مولفه حقیقی میدان الکترومغناطیسی  $(\epsilon = \frac{Q}{R}, a)$ .

ارتفاع پرنده و 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 بدست می آورند. این دو روش تنها در صورتی که وضعیت زمین به صورت لایه لایه نباشد، مقاومت ویژه صحیحی را ارائه می کنند. اگر زمین مورد

مطالعه ناهمگن باشد جواب بدست آمده از دو الگوریتم بالا متفاوت خواهد بود. چون نحوه توزیع هندسی جریان همگاز و ناهمگاز با هم فرق می‌کند و این توزیع هندسی متفاوت مقاومت‌ویژه‌های ظاهری متفاوتی را برای مدل نیم‌فضای همگن نتیجه می‌دهد. این موضوع شبیه روش‌های زمینی با جریان مستقیم می‌باشد؛ به این صورت که آرایش‌های الکتروودی مختلف منجر به توزیع جریان به شکل‌های مختلف و در نتیجه مقادیر مقاومت‌ویژه متفاوت خواهد شد [Fraser, 1978].

روش‌های دیگری نیز وجود دارند که از ترکیب روش‌های بالا بدست می‌آیند. مثلاً در ابتدا مقادیر دامنه تبدیل یافته  $A'^{1/3} = A^{1/3} / \gamma$  و نسبت فاز  $\varepsilon = Q/R$ ، برای نسبت ثابت  $\gamma = 8/30$  که ویژه سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری می‌باشد بدست می‌آید. سپس منحنی‌های متناظر در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی رسم می‌شوند (شکل ۴-۱۰). ماندری در سال ۱۹۸۴ منحنی‌های مشابه را برای  $\varepsilon(\delta)$  و  $A'^{1/3}(\delta)$  با تقریب  $j_0 = I$  بدست آورد. ماندری این منحنی‌ها را در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی به وسیله چندین خط پرواز و ضرائب مشترک از درون‌یابی‌های خطی به صورت تقریبی بدست آورد. این تقریب ناهموار، بخصوص در هر دو قسمت نهائی و میانی خط پرواز نتایج نادرستی ایجاد می‌نمود [Siemon, 1997].

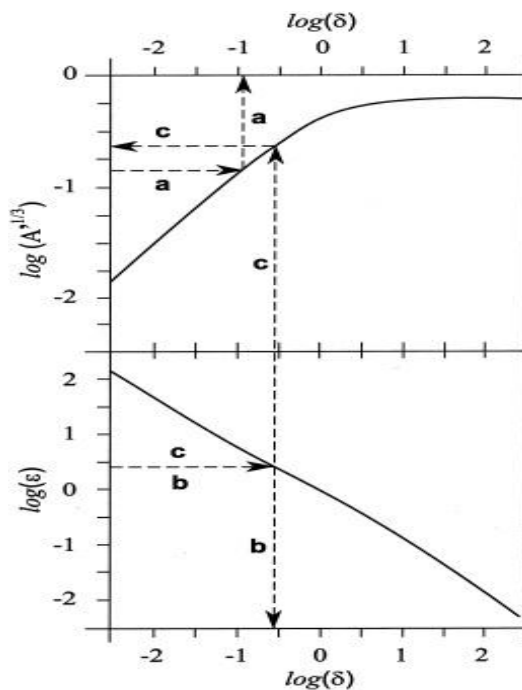
برای یک ارتفاع معین  $h$ ، با استفاده از دامنه تبدیل یافته  $A'^{1/3}$  در شکل (۴-۱۱) قسمت a و یا با استفاده از نسبت فاز  $\varepsilon$  در شکل (۴-۱۱) قسمت b مقدار  $\delta$  بدست می‌آید. سپس با استفاده از مقدار  $\delta$  بدست آمده مقدار مقاومت‌ویژه از رابطه (۴-۱۱) بدست می‌آید:

$$\rho_a^A, \rho_a^\varepsilon = \frac{\omega \mu_0}{2} \left( \frac{h}{\delta} \right)^2 \quad (4-11)$$

به ترتیب بیانگر مقاومت‌ویژه ظاهری بدست آمده از روی دامنه و نسبت فاز می‌باشند. اگر ارتفاع پرنده جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگیرد، هر دو منحنی برای محاسبه مقاومت‌ویژه

ظاهری مورد نیاز می‌باشند (شکل ۴-۱۱ قسمت c). نسبت  $\delta$  از منحنی  $\delta(\varepsilon)$  بدست می‌آید که برای بدست آوردن دامنه تبدیل یافته متناظر  $A'^{1/3}$  از منحنی  $A'^{1/3}(\delta)$  استفاده می‌شود. در این صورت مقدار ارتفاع ظاهری از رابطه زیر محاسبه می‌شود [Siemon, 2001].

$$h = r \left( \frac{A'}{A} \right)^{1/3} \equiv D_a \quad (4-12)$$



شکل (۴-۱۱): منحنی‌های تخمینی برای محاسبه مقاومت ویژه  $\rho_a$  (a) با استفاده از  $\delta(A'^{1/3})$  و  $h$  بدست می‌آید، (b)  $\rho_a$  با استفاده از  $h$  و  $\delta(\varepsilon)$  بدست می‌آید، (c)  $D_a$  و  $\rho_a$  با استفاده از  $A'^{1/3}(\delta)$  و  $\delta(\varepsilon)$  بدست می‌آید. ارتفاع  $h$  در قسمت a و b پارامتر ورودی است، در حالی که در قسمت c پارامتر خروجی است ( $h = D_a$ ) [Siemon, 2001].

الگوریتم‌هایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند، الگوریتم‌های قدیمی و اغلب دارای عمق نفوذ کم می‌باشند و هدف از ارائه آنها آشنایی پایه‌ای با روش‌های معکوس‌سازی در نیم‌فضای همگن بود. حال آنکه روش‌های جدید اغلب بر اساس الگوریتم‌های نیم‌فضای لایه کاذب می‌باشند. در این روش‌ها غالباً مقاومت ویژه از همان روابط نیم‌فضا بدست می‌آید. البته در بعضی موارد مثل روش پارامتر دیفرانسیلی از

روابط دیگری نیز برای بدست آوردن مقاومت ویژه استفاده می کنند. در روش های جدید عمق نفوذ بهبود یافته و در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری لایه های عمیق تر مورد بررسی قرار می گیرند. قبل از ارائه این روش ها در ابتدا لازم است با مفهوم عمق مرکزی آشنا شویم.

#### ۴-۵- عمق مرکزی:

مفهوم عمق مرکزی که در اصل برای داده های مگنتوتلوریک بسط یافته، در سال ۱۹۹۸ توسط سنگپیل به منظور اختصاص دادن عمق های ویژه به مقاومت ویژه های ظاهری محاسبه شده برای لایه کاذب و در نتیجه تهیه یک روش برای تبدیل مجموعه داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری به پروفیل ها و یا منحنی های سونداژ می باشد. عمق مرکزی با علامت  $Z^*$  نشان داده می شود، برای یک فرکانس به صورت مجموع عمق ظاهری ( $d_a$ ) و قسمت حقیقی تابع تبدیل مختلط C تعریف می شود و رابطه آن به صورت زیر می باشد:

$$z^* = d_a + D_a \operatorname{Re}(C) \quad (4-13)$$

تابع تبدیل C برای یک مدل نیم فضای همگن با مقاومت ویژه  $\rho_a$  و فاصله ظاهری  $D_a$  تعریف می شود و قسمت حقیقی آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\operatorname{Re}(C) = \frac{\sqrt{(k^2 + \sqrt{k^4 + 4\delta^4})/2}}{\sqrt{k^4 + 4\delta^4}} \quad (4-14)$$

که در آن  $\delta$  به صورت زیر است:

$$\delta = \frac{D_a}{\rho_a} = \frac{D_a}{\sqrt{2\rho_a/\omega\mu_0}} \quad (4-15)$$

و عدد موج موثر از رابطه آتی محاسبه می شود:

$$k = \frac{\delta}{\sqrt[4]{\frac{1}{(1-B)^2} \left( \frac{1}{(1-B)^2} - 1 \right)}}, \quad B = \frac{4GR}{\gamma^3} \quad (16-4)$$

که در آن  $G$  به ساختار و طرز قرار گیری پیچه‌ها بستگی دارد، برای ساختارهای پیچه‌ای هم‌صفحه افقی  $G=1$ ، برای ساختارهای هم‌صفحه عمودی  $G=1/2$ ، و برای ساختارهای هم‌محور عمودی  $G=-1/4$  می‌باشد. اساساً با استفاده از عمق مرکزی، عمقی را که بیشترین شارش جریان القاء شده را دارد می‌توان تخمین زد و متعاقباً مجموعه داده‌های چند فرکانسی را می‌توان به سادگی به منحنی‌های سونداژ مقاومت‌ویژه-عمق، در عمق‌های مرکزی مرتبط تبدیل کرد. این منحنی‌های سونداژ را می‌توان به عنوان تقریب‌های هموار شده تغییرات عمودی مقاومت‌ویژه داخل زمین در نظر گرفت [Tølbøl, 2007].

در ادامه روش‌هایی که بر اساس مفهوم عمق مرکزی می‌باشند معرفی می‌شوند.

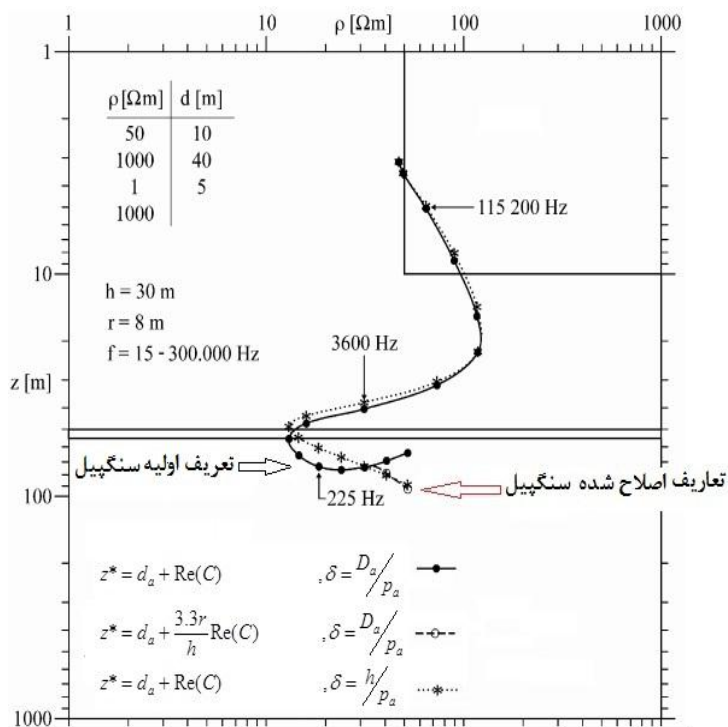
#### الف- روش مقاطع سنگپیل ( $\rho_a(z^*)$ ):

سنگپیل با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط اشموکر برای مدل‌سازی معکوس داده‌های مگنتوتلوریک روش مهمی را در سال ۱۹۸۸ برای مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس ارائه نمود. او در روش خود تعریف عمق مرکزی را به صورت زیر اصلاح نمود:

$$z^* = d_a + \begin{cases} \text{Re}(C) & \text{for } D_a \geq 3.3r \\ \text{Re}(C) \cdot 3.3r / D_a & \text{for } D_a < 3.3r \end{cases} \quad (17-4)$$

با استفاده از این تعریف، سنگپیل به نتایج قابل قبولی در مورد داده‌های اندازه‌گیری شده سیستم‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری رسید. به عنوان مثال منحنی‌های سونداژ  $\rho_a(z^*)$  (شکل ۴-۱۲) را که برای یک زمین چهار لایه نشان داده شده، بررسی می‌شود. با توجه به شکل واضح است که تعریف اولیه عمق مرکزی، پروفیل‌های مقاومت‌ویژه-عمقی نامطمئنی را ایجاد می‌کند (منحنی پررنگ). به طوری که مشاهده می‌شود، در انتهای منحنی با افزایش فرکانس، عمق مرکزی افزایش چندانی نمی‌یابد و حتی

مقادیر آن روند نزولی پیدا می‌کنند و منحنی یک حالت برگشتی دارد. البته اگر از تعریف اصلاح شده استفاده شود، حالت برگشتی منحنی اصلاح می‌شود. اما با کاهش فرکانس،  $z^*$  به اندازه مطلوب افزایش ندارد (خط تیره پررنگ آخر منحنی که زیاد واضح نیست و با نقطه‌چین تقریباً یکی است). اگر در معادلات (۱۵-۴) و (۱۶-۴) به جای فاصله ظاهری محاسبه شده ( $D_a$ ) از ارتفاع اندازه‌گیری شده ( $h$ ) استفاده شود؛ رفتار مطلوبی خواهد داشت (منحنی نقطه‌چین) [Siemon, 2001].



شکل (۴-۱۲): مقایسه منحنی‌های سونداژ بدست آمده از تعریف‌های مختلف عمق مرکزی [After Siemon, 2001].

### ب- روش عمق مرکزی سیمون $\rho_a(z_s^*)$ :

سیمون در سال ۱۹۹۷ رابطه عمق مرکزی را به صورت زیر بر پایه عمق پوسته ظاهری تعریف

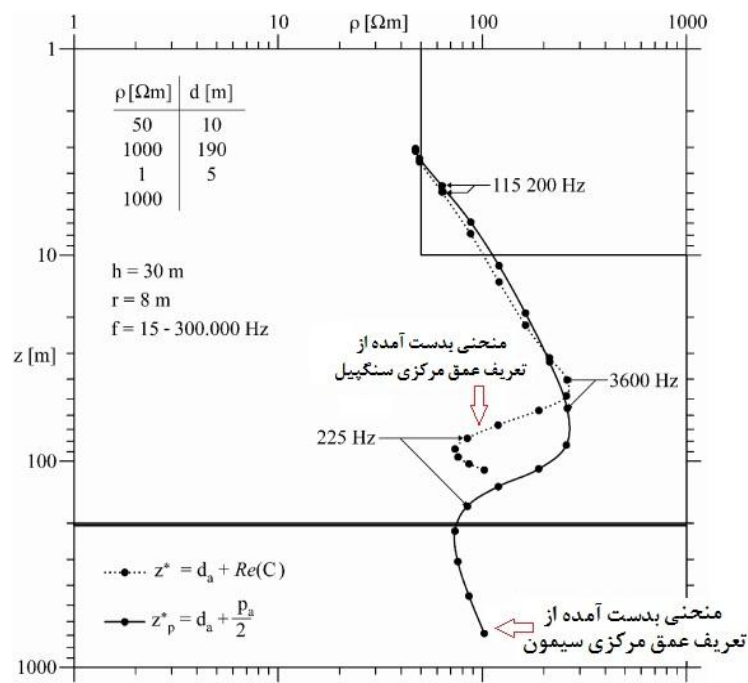
نمود:

$$z_s^* = d_a + \frac{p_a}{2} \quad (۴-۱۸)$$

که در آن، عمق پوسته ظاهری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p_a = \sqrt{\frac{2\rho_a}{\omega\mu_0}} \quad (۱۹-۴)$$

با محاسبه رابطه فوق برای فرکانس‌های مختلف منحنی سونداژ  $\rho_a(z_p^*)$  بدست می‌آید. یک نمونه منحنی سونداژ بر روی یک زمین چهار لایه با استفاده از روش‌های سیمون و سنگپیل در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، هر دو روش در شناسایی لایه‌های سطحی یکسان عمل می‌کنند؛ اما منحنی بدست آمده از روش سیمون لایه‌های عمیق‌تر را بهتر نشان می‌دهد و روش سنگپیل در شناسایی مکان لایه‌های عمیق ضعیف عمل کرده است.



شکل (۴-۱۳): مقایسه منحنی‌های سونداژ بدست آمده از تعریف‌های مختلف عمق مرکزی سیمون و سنگپیل

[After Siemon, 2001]



### ج- روش‌های بهبودیافته<sup>۱</sup> سیمون:

یک سری منحنی‌های سونداژ که نسبت به تباین<sup>۲</sup> عمودی مقاومت‌ویژه حساسیت بیشتری دارند، را منحنی‌های بهبودیافته می‌گویند. این منحنی‌ها در سال ۱۹۹۷ توسط سیمون ارائه شد. پایه اصلی این روش‌ها در مورد داده‌های مگنتوتلوریک می‌باشد و برای القای دو قطبی اصلاح شده است. این روش‌ها را بر اساس طرز محاسبه مقاومت‌ویژه به دو دسته دیفرانسیلی و غیر دیفرانسیلی تقسیم می‌کنند.

#### ج-۱- روش بهبودیافته دیفرانسیلی سیمون $\rho_{NB}(Z_s^*)$ :

اساس این روش دیفرانسیل‌گیری نسبت به فرکانس می‌باشد. نخست این روش در مورد داده‌های مگنتوتلوریک برای بدست آوردن پروفیل‌های مقاومت‌ویژه-عمق بهبودیافته استفاده می‌شود (Schmucker, 1987). فاز مگنتوتلوریک و فاز اندازه‌گیری‌شده داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری  $\varepsilon = Q/R$  و  $\phi_\varepsilon = \arctan(\varepsilon)$  به هم ربطی ندارند و نباید این دو با هم اشتباه گرفته شوند. مثلاً در یک مدل نیم‌فضای همگن فاز داده‌های الکترومغناطیس در بازه صفر تا نود درجه متغیر است، در حالی که فاز مگنتوتلوریک برابر مقدار ثابت ۴۵ درجه می‌باشد [Siemon, 2001].

برای آشنایی با کاربرد روش‌های مگنتوتلوریک در داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری، به یک پارامتر جدید متناظر با فاز مگنتوتلوریک نیاز است، ویدلت در سال ۱۹۷۲ یک فاز تقریبی را با مشتق‌گیری از مقاومت‌ویژه ظاهری مگنتوتلوریک نسبت به فرکانس بدست آورد [Weidelt, 2001].

$$\varphi_a(f) \approx \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{f}{\rho_a(f)} \frac{d\rho_a(f)}{df} \right) \quad (۲۰-۴)$$

---

<sup>۱</sup>. Enhanced

<sup>۲</sup>. Contrast

این مقدار فاز بدست آمده از داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری برای اجتناب از اشتباه شدن با

فاز داده‌های الکترومغناطیس  $(\varphi_\varepsilon)$ ، فاز ظاهری  $(\varphi_a)$  نامیده می‌شود. مشتق  $\frac{d\rho_a}{df}$  بوسیله

دیفرانسیل‌گیری از منحنی الحاقی  $\rho_a(f)$  به صورت عددی تعیین می‌گردد. با استفاده از تبدیل نیبلت<sup>۱</sup>-

بوستیک<sup>۲</sup> مقاومت‌ویژه بهینه به صورت زیر محاسبه می‌شود (Jones, 1983):

$$\rho_{NB} = \rho_a \frac{1+m}{1-m} \quad (21-4)$$

که در آن داریم:

$$m = m' \left( \frac{m'+c}{1+c} \right), \quad m' = 1 - \frac{4}{\pi} \varphi_a \quad (22-4)$$

مقدار  $c$  به طور تجربی از محاسبات مدل‌سازی بدست می‌آید و مقدار آن برابر  $3 \log(5)$  می‌باشد.

پارامتر عمق مرکزی برای نمایش مقادیر  $\rho_{NB}$  در یک عمق بخصوص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_s^* = d_a + \frac{p_a}{\sqrt{2}} \quad (23-4)$$

با استفاده از رابطه‌های (21-4) و (23-4) منحنی سونداژ  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در فرکانس‌های مختلف

بدست می‌آید. به دلیل دیفرانسیل‌گیری، منحنی سونداژ  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  نسبت به منحنی  $\rho_a(Z_s^*)$

حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. لذا باعث می‌شود، در نمایش عمق‌های بیشتر موفق‌تر عمل کند. شکل

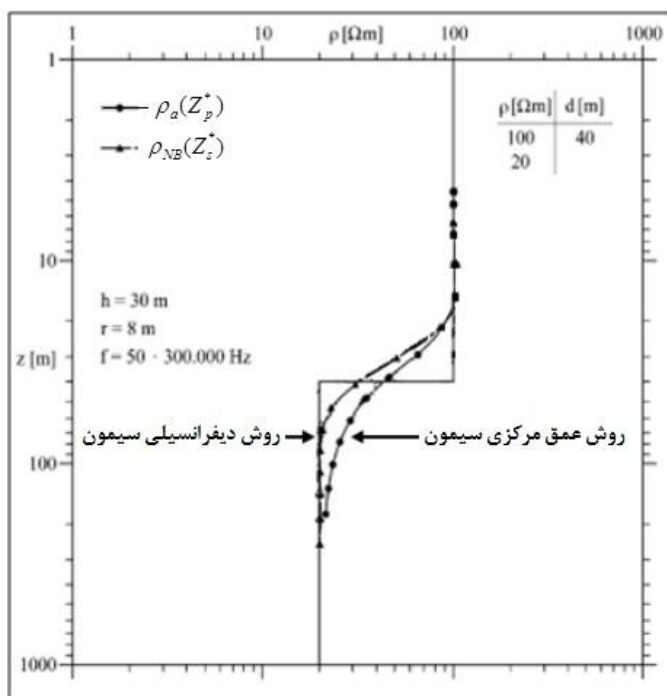
(14-4) منحنی‌های سونداژ برای یک زمین دو لایه حاصل از این دو روش سیمون (مرکزی و دیفرانسیلی)

با هم مقایسه شده‌اند، همان‌طور که می‌بینید منحنی روش دیفرانسیلی به طور واضح‌تر و دقیق‌تر این دو

لایه و مقاومت‌ویژه آنها را نشان داده است [Siemon, 2001].

<sup>1</sup>. Niblett

<sup>2</sup>. Bostick



شکل (۴-۱۴): مقایسه منحنی‌های سونداژ دو روش عمق مرکزی و دیفرانسیلی سیمون [After Siemon, 2001].

### ج-۲- روش بهبودیافته غیر دیفرانسیلی سیمون $\rho_a^e(Z_p^*)$ :

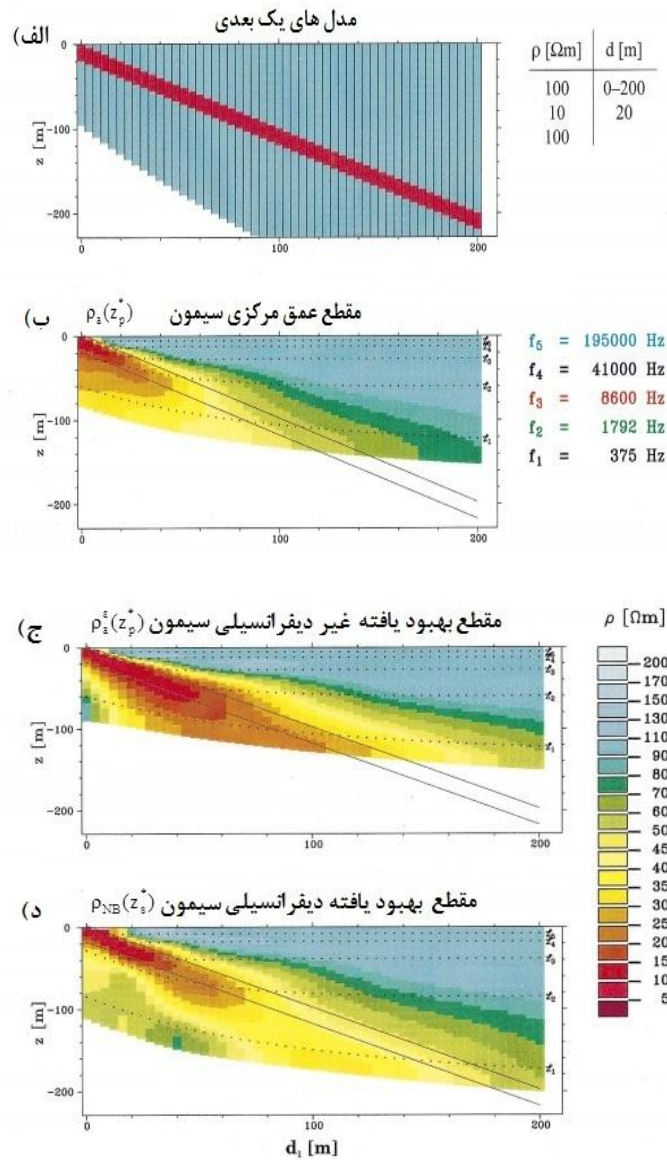
در این روش مقاومت ویژه از نسبت مولفه‌های همفاز و غیرهمفاز داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری و ارتفاع واقعی از سطح زمین بدست می‌آید. رابطه نهایی محاسبه مقاومت ویژه به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho_a^e = \rho_a \left( \frac{h}{D_a} \right)^2 \quad (۴-۲۴)$$

که در آن  $\rho_a$  مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده از روش عمق مرکزی سیمون و  $D_a$  فاصله ظاهری بین پرده و سطح نیم‌فضای رسانا می‌باشد. این منحنی‌های سونداژ بهبودیافته نسبت به منحنی‌های سونداژ معمولی به تغییرات عمودی مقاومت ویژه حساسیت بیشتری دارند. اما دو اشکال اساسی نیز دارند: اول اینکه، مقدار مقاومت ویژه لایه‌های همگن ضخیم بالایی را بیش از حد نشان می‌دهند. یعنی نیم‌فضایی

که در زیر یک لایه دوباره قرار گرفته، حتی در فرکانس‌های خیلی پایین به درستی معین نمی‌شود. ثانیاً اینکه، نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق ارتفاع دارند [Sengpiel & Siemon, 2000].

برای مقایسه سه روش اخیر پاسخ مدل دوبعدی که در یک زمین سه لایه در پنج فرکانس (Hz) ۱۹۵۰۰۰ و ۴۱۰۰۰ و ۸۶۰۰ و ۱۷۹۲ و ۳۷۵ محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های  $\rho_a(z_p^*)$ ،  $\rho_a^e(z_p^*)$  و  $\rho_{NB}(z_s^*)$  در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. مدل زیر سطحی شامل یک لایه رسانا می‌باشد ( $\rho_r = 10 \cdot \Omega m, d_r = 20 \cdot m$ ) که در میان سنگ میزبان با رسانندگی کمتر قرار گرفته است. تنها پارامتر متغیر در این مدل‌ها ضخامت لایه بالایی ( $d_1 = 0 - 20 \cdot m$ ) می‌باشد که به تدریج عمق رسانا در آنها بیشتر می‌شود. مقطع‌های مقاومت ویژه-عمق  $\rho_{NB}(z_s^*)$  و  $\rho_a^e(z_p^*)$  و  $\rho_a(z_p^*)$  در شکل‌های (۴-۱۵) تا (۴-۱۵) نشان داده شده‌اند. در شکل (۴-۱۵) واضح است که مقطع  $\rho_a(z_p^*)$  به ازای مقادیر  $d_1 < 60 \cdot m$  مدل سه لایه را به خوبی نشان می‌دهد. مقطع  $\rho_a^e(z_p^*)$  شکل (۴-۱۵) رسانا را نسبت به مقطع استاندارد  $\rho_a(z_p^*)$  بهتر نشان می‌دهد و بهترین نتایج با استفاده از مقطع  $\rho_{NB}(z_s^*)$  بدست آمده است. در این مدل، لایه رسانا در عمق ۸۰ متر قرار گرفته است و تا  $d_1 = 20 \cdot m$  قابل مشاهده است چون  $z_s^*$  همراه  $z_p^*$  افزایش می‌یابد [Sengpiel & Siemon, 2000].



شکل (۴-۱۵) مقاطع مقاومت ویژه ظاهری لایه شیب دار با روش های عمق مرکزی و بهبود یافته سیمون

[After Sengpiel & Siemon, 2000]

د- روش SUTHEM  $(Z_{SUT}^*)$ :

این روش در سال ۱۳۸۸ ارائه شد. اسم این روش از مخفف دانشگاه صنعتی شاهرود و روش های الکترومغناطیس هلیکوپتری،<sup>۱</sup> SUTHEM انتخاب شده است. می دانیم در روش مگنتوتلوریک، پیش از

<sup>۱</sup>. Shahrood University of Technology – Helicopter Electromagnetic Method

مدل‌سازی داده‌ها، باید به گونه‌ای اثر شیف‌ت استاتیکی (جابجایی ایستایی) را در منحنی سونداژ مقاومت‌ویژه در برابر فرکانس حذف نمود [Moradzadeh, 1998 & 2002]. در این روش با استفاده از تعریف زونگ<sup>۱</sup> و اعمال تغییراتی در آن و در نظر گرفتن مدل اولیه به روش سیمون ترکیبی، به محاسبه مقاومت‌ویژه ظاهری داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری می‌پردازد. رابطه نهایی محاسبه مقاومت‌ویژه در این روش به صورت زیر است:

$$\rho_{SUT} = \rho_s \left[ -\frac{4}{\pi} \left( \tan^{-1} \left( \frac{Q}{R} \right) - \frac{\pi}{4} \right) (\ln f_1 - \ln f_2) \right] \quad (۲۵-۴)$$

که در آن  $\rho_s$ ، مقاومت‌ویژه ظاهری حاصل از روش سیمون می‌باشد.  $Q$  و  $R$  مولفه‌های حقیقی و موهومی میدان ثانویه می‌باشند.  $f_1$  و  $f_2$ ، فرکانس‌های بالا و پایین برداشت می‌باشند. اما برای مدل‌سازی معکوس، دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و عمق ظاهری لازم است. برای تعیین عمق ظاهری با انجام بررسی‌های متعدد بر روی مدل‌های متنوع و داده‌های مصنوعی با استفاده از روش سعی و خطا، مناسب‌ترین فرمول برای محاسبه عمق ظاهری در روش SUTHEM مطابق رابطه (۲۶-۴) پیشنهاد شده است [عرب‌امیری، ۱۳۸۸].

$$Z_{SUT}^* = d_a + \frac{P_a}{\sqrt{2}} \quad (۲۶-۴)$$

روش SUTHEM همانند آنچه سیمون تعریف نموده، در زمره روش‌های بهبودیافته قرار می‌گیرد. بهبودیافته به این دلیل که منحنی‌های سونداژ حاصل از این روش نسبت به روش‌های معمول دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات عمقی و مقاومت‌ویژه است. این بهبود محصول استفاده از انتگرال

---

<sup>۱</sup>. Zong

مقاومت ویژه نسبت به فرکانس و با استفاده از عمق ظاهری است. برای انجام محاسبات لازم کد مربوط به این روش در نرم افزار مطلب<sup>۱</sup> نوشته شد و برای بررسی نتایج به خدمت گرفته شد [عربامیری، ۱۳۸۸].

## ن- روش پارامتر دیفرانسیلی<sup>۲</sup> هوانگ:

این روش توسط هوانگ و فریزر در سال ۱۹۹۶ ارائه شد، که از یک الگوریتم متناوب برای تبدیل داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری چند فرکانسی به منحنی های سونداژ استفاده می کند. در هر فرکانس یک مقاومت ویژه دیفرانسیلی بدست می آورد، این مقاومت ویژه متناظر با عمق دیفرانسیلی می باشد، که روی نمودار کشیده می شود. عمق نقطه وسط هر لایه فرضی عمق دیفرانسیلی نامیده می شود، در فرکانس منفرد  $f_i$  عمق دیفرانسیلی  $z_{\Delta,i}$  به صورت زیر تعریف می شود [Tølbøl, 2007]:

$$z_{\Delta,i} = z_{eff,i} + \frac{z_{eff,i+1} - z_{eff,i}}{2} = \frac{z_{eff,i+1} + z_{eff,i}}{2} \quad (۲۷-۴)$$

$z_{eff}$  عمق موثر می باشد که با استفاده از عمق پوسته موج صفحه ای ( $\delta$ ) و عمق ظاهری بدست آمده از الگوریتم نیم فضای لایه کاذب فریزر محاسبه می شود:

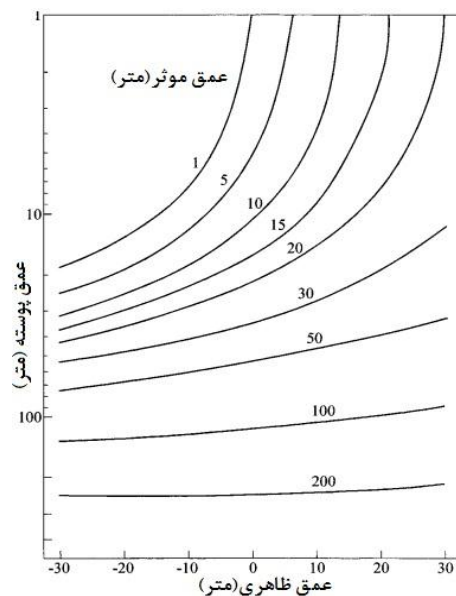
$$z_{eff} = f(\delta, d_a) \quad (۲۸-۴)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f}} \quad (۲۹-۴)$$

$f$  فرکانس،  $\mu_0$  پذیرفتاری مغناطیسی در خلاء و  $\rho$  مقاومت ویژه زمین می باشد. با کاهش فرکانس، عمق دیفرانسیلی افزایش می یابد. عمق موثر در معادله (۳۰-۴) به صورت تجربی بسط داده شده و در شکل (۱۶-۴) نمایش داده شده است. هدف از بسط عمق موثر، رسیدن به داده های ورودی معادله های بالا می باشد؛ تا بتوان مقطعی تقریبی از توزیع مقاومت ویژه واقعی برحسب عمق محاسبه کرد [Huang, 1996].

<sup>۱</sup>. Matlab

<sup>۲</sup>. Differential parameter



شکل (۴-۱۶): نمایش عمق موثر به صورت تابعی از عمق پوسته و عمق ظاهری [After Huang, 1996].

فرکانس‌ها به صورت نزولی مرتب می‌شوند ( $f_{i+1} < f_i$ ). مقاومت ویژه دیفرانسیلی مربوط به

فرکانس  $f_{i+1}$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\rho_{\Delta,i} = \frac{z_{eff,i+1} - z_{eff,i}}{S_{a,i+1} - S_{a,i}} \quad (۳۰-۴)$$

که  $S_a$  رسانندگی ظاهری می‌باشد و با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{a,i} = \frac{z_i}{\rho_{a,i}} \quad (۳۱-۴)$$

نهایتاً منحنی سونداژ برای هر فرکانس با استفاده از رسم مقاومت ویژه دیفرانسیلی در عمق

دیفرانسیلی متناظر و وصل کردن نقاط متناظر ساخته می‌شود. روش پارامتر دیفرانسیلی مقاومت ویژه

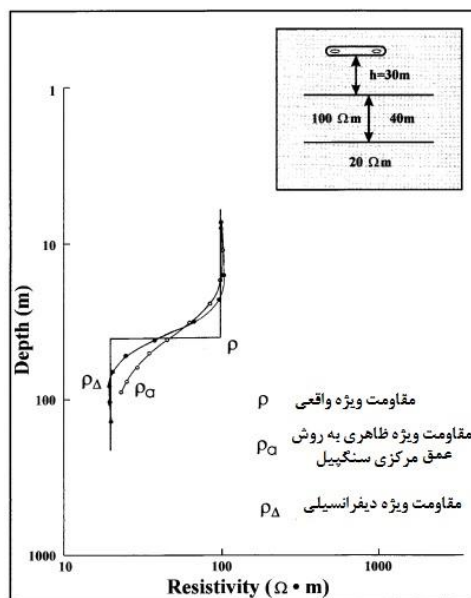
حقیقی یک نیم‌فضای همگن را بدست می‌آورد. دقت مقاومت ویژه بستگی به باند فرکانس و تعداد

فرکانس‌های مورد استفاده دارد. تعداد بیشتر فرکانس‌ها و باند وسیع‌تر، دقت و قدرت تفکیک بیشتری



نتیجه می‌دهد. این روش نسبت به روش عمق مرکزی در نمایش تغییرات عمودی مقاومت ویژه حساس‌تر است و همچنین لایه‌های رسانا را در عمق‌های بیشتر پیدا می‌کند [Tølbøl, 2007].

در شکل (۴-۱۷)، نتایج بدست آمده از این روش و روش عمق مرکزی سنگپیل با هم مقایسه شده‌اند. این اندازه‌گیری‌ها در ۱۰ فرکانس در بازه ۲۲۰Hz تا ۱۱۵۰۰۰Hz بر روی یک مدل، که در آن یک لایه با مقاومت ویژه بالا روی یک لایه رسانا قرار گرفته، انجام شده است. در این حالت مقاومت ویژه لایه بالایی به خوبی هم با روش دیفرانسیلی و هم با روش سنگپیل در فرکانس‌های بالا ظاهر می‌شود. با نزدیک شدن عمق دیفرانسیلی به لایه دوم، در فرکانس‌های پایین مقاومت ویژه دیفرانسیلی سریعاً به مقدار مطلوب  $\rho_p$  می‌رسد. (البته با یک خطای قابل چشم‌پوشی) [Huang, 1996].

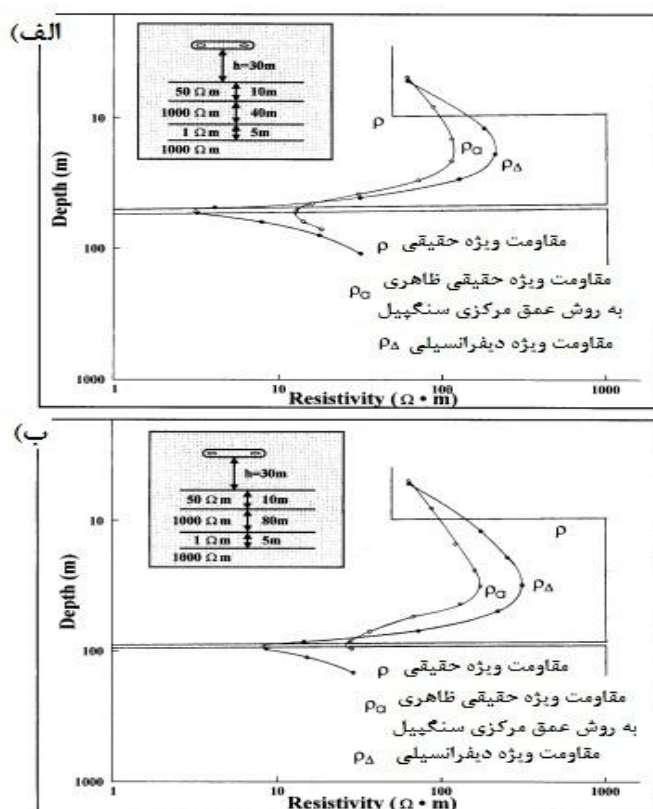


شکل (۴-۱۷) مقایسه نتایج روش‌های دیفرانسیلی و سنگپیل در زمین دو لایه [After Huang, 1996].

نتایج در مورد یک زمین چهار لایه در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده‌اند. هدف از ارائه این تصاویر مقایسه نتایج روش‌های دیفرانسیلی و سنگپیل در یک زمین چهار لایه می‌باشد. مدل شکل (۴-۱۸الف) یک زمین چهار لایه را با مقاومت‌های  $50-1000-1-1000 \Omega \cdot m$  نشان می‌دهد که منعکس‌کننده اثر روباره بر سنگ میزبان مقاوم که داخل یک هدف رسانا (توده رسانا) قرار گرفته، می‌باشد. مدل شکل (۴-۱۸ب)

مشابه شکل (۴-۱۸ الف) است؛ با این تفاوت که ضخامت لایه دوم افزایش یافته است. هر دو روش به طور کیفی چهار لایه را نشان داده‌اند. روش دیفرانسیلی تغییرات تیز و ناگهانی مقاومت‌ویژه در فصل مشترک لایه‌ها را بهتر نشان می‌دهد و همچنین مقادیر مقاومت‌ویژه دیفرانسیلی در شکل‌ها نسبت به مقاومت‌ویژه‌های ظاهری روش سنگپیل به حقیقت نزدیک‌تر است. همان طور که در بالا شرح داده شد، شکل (۴-۱۸) با استفاده از فرکانس‌هایی در بازه  $220\text{ Hz}$  تا  $115000\text{ Hz}$  محاسبه شده‌اند [Huang, 1996].

1996]



شکل (۴-۱۸): مقایسه روش‌های دیفرانسیلی و سنگپیل در مورد زمین چهار لایه [After Huang, 1996].

با توجه به مطالب پیش به نظر می‌رسد که دقت و عمق اکتشاف روش دیفرانسیلی نسبت به روش

سنگپیل بیشتر بوده و رساناهای عمیق‌تر را بهتر از روش سنگپیل نشان می‌دهد [Fugro, 2003].

در فصل بعد به معکوس‌سازی مدل‌های مصنوعی مختلف پرداخته می‌شود.

## فصل پنجم:

### مدل سازی معکوس تقریبی

در فصل قبل به بیان روش‌های معکوس‌سازی الکترومغناطیس هلیکوپتری در حوزه فرکانس پرداخته شد. در این فصل نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده ارائه می‌شود؛ به این صورت که مدل‌های مصنوعی متعدد یک و دوبعدی در نظر گرفته شد، سپس پاسخ مدل‌سازی معکوس مربوط به این مدل‌ها تهیه شد و پاسخ روش‌های مختلف در کنار یکدیگر آورده شد، تا مزایا و معایب هر یک از روش‌های مدل‌سازی در شرایط مختلف زمین‌شناسی تعیین گردد و عملکرد این روش‌ها با هم مقایسه شود. با توجه به موجود نبودن کد مربوط به همه روش‌های مذکور در فصل قبل، فقط پنج روش برای مدل‌سازی معکوس انتخاب شدند؛ که کد آنها تهیه شده بود. این روش‌ها در دو گروه روش‌های مبتنی بر نیم‌فضای همگن و نیم‌فضای لایه کاذب ارائه شده‌اند. دو روش مدل‌سازی بر مبنای مدل‌سازی نیم‌فضای همگن ارائه شده است. روش اول روش دامنه می‌باشد؛ جواب نتایج بدست آمده با این روش تحت عنوان  $(\rho_a^A(Z_A^*))$  در متن آورده شده، روش بعدی روش نسبت فاز می‌باشد؛ جواب نتایج بدست آمده با این روش تحت عنوان  $(\rho_a^E(Z_E^*))$  در متن آورده شده، سه روش دیگر که در ادامه ذکر شده جزء روش‌های بهبودیافته تلقی می‌شوند. این روش‌ها بر پایه مدل‌سازی در نیم‌فضای لایه کاذب می‌باشند. روش اول روش سیمون می‌باشد؛ جواب نتایج بدست آمده با این روش تحت عنوان  $(\rho_a(Z_s^*))$  در متن آورده شده، روش دوم به تبدیل نیبلت-بوستیک معروف است؛ جواب نتایج بدست آمده با این روش تحت عنوان  $(\rho_{NB}(Z_s^*))$  در متن آورده شده و سومین روش بهبودیافته روش دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد که جواب نتایج بدست آمده با این روش تحت عنوان  $(\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*))$  در متن آورده شده است. پس از انجام مطالعات گسترده به روی روش‌های معکوس‌سازی تقریبی الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، الگوریتم‌های روش‌های فوق‌الذکر توسط نرم‌افزار مطلب آزمایش گردید از آنجایی که برای مدل‌سازی نیازمند، برنامه پیشرو بودیم، مدل‌سازی با این روش‌ها در قالب یک نرم‌افزار تحت عنوان "نرم‌افزار پیشرو و معکوس داده‌های

الکترومغناطیس هوابرد" در محیط GUI<sup>۱</sup> نرم افزار مطلب تهیه شد. برای مدل سازی پیشرو در این نرم افزار حداکثر پانزده لایه و پانزده فرکانس برای مدل های اولیه می تواند، توسط کاربر پیش بینی شود و با توجه به روش حل عددی گوپتاسارما و سینگ<sup>۲</sup> به محاسبه و معکوس سازی مدل طراحی شده پردازد. جواب های مدل های یک بعدی در محیط نرم افزاری اکسل<sup>۳</sup> و جواب های مدل های دوبعدی در محیط نرم افزاری سرفر<sup>۴</sup> ترسیم شده است. در ابتدا پاسخ مدل های یک بعدی را به دو صورت نیم فضای همگن و نیم فضای لایه ای بررسی می کنیم. شکل های بدست آمده از مدل سازی یک بعدی همان منحنی های سونداژ می باشند. مدل های یک بعدی این پایان نامه از مجموعه مقالات ( Sengpiel,1988, Huang, 1996, ) (Sengpiel 2000, Siemon 2001, Meng 2006) برگرفته شد.

در تمام مدل سازی ها پیچله های هم صفحه افقی با فاصله ۸ متر از یکدیگر انتخاب شدند و برای بالا بردن دقت و افزایش قدرت تفکیک عمودی مقاومت ویژه از بازه فرکانسی بین ۲۰۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلوهرتز (۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۷۵۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰۰) تعیین گردید. ارتفاع پرواز در همه موارد ۳۰ متر و ضرایب نفوذ پذیری مغناطیسی و الکتریکی یک در نظر گرفته شد.

## ۵-۲- مدل های یک بعدی:

### ۵-۲-۱- مدل های نیم فضای همگن:

ساده ترین مدل یک نیم فضای همگن است که مقاومت ویژه در سرتاسر زمین مورد نظر یکسان باشد. البته یکبار یک نیم فضای همگن رسانا با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  و یکبار یک نیم فضای همگن بسیار

<sup>1</sup> . Graphical user interface

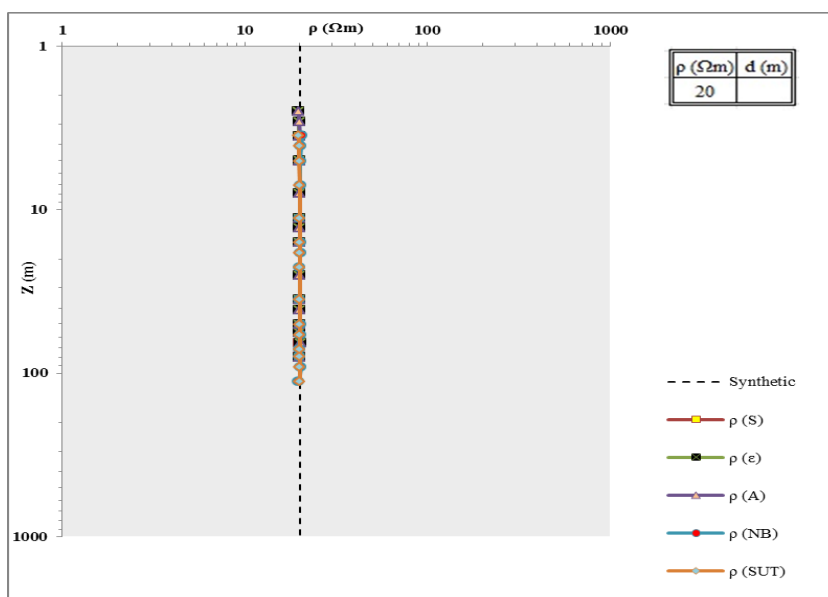
<sup>2</sup> . Guptasarma and Singh

<sup>3</sup> . Excel

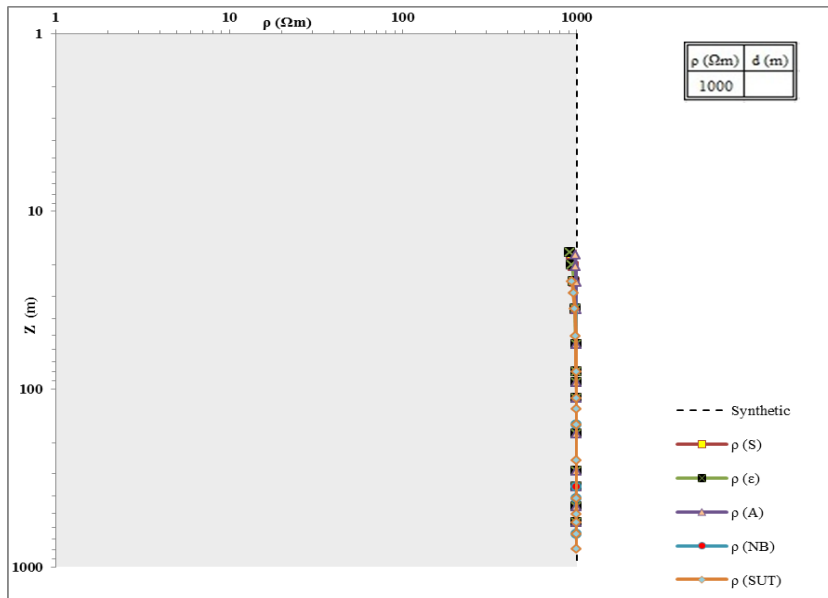
<sup>4</sup> . Surfer

مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در نظر گرفته شد. منحنی مربوط به مدل نیم‌فضای همگن رسانا را در شکل (۵-۱) و منحنی مربوط به مدل نیم‌فضای همگن نارسانا در شکل (۵-۲) قابل مشاهده است. در قسمت راهنمای تمام شکل‌های مدل‌های یک‌بعدی در این فصل به دلیل محدودیت تایپ در محیط اکسل عناوین اختصاری به صورت زیر استفاده شده‌اند: روش سیمون با  $\rho(s)$  و روش نسبت فاز با  $\rho(\varepsilon)$  و روش دامنه با  $\rho(A)$  و تبدیل نیپلت بوسستیک با  $\rho(NB)$  و روش دانشگاه صنعتی شاهرود با  $\rho(SUT)$  نشان داده شده است.

همان طور که از این تصاویر مشخص است، تمامی روش‌ها مقدار مقاومت ویژه را در هر دو مدل (زمین مقاوم و زمین رسانا) به درستی تشخیص داده‌اند. البته در روش‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و روش  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  که جواب‌هایشان تقریباً بر هم منطبق است، جواب‌ها از عمق پایین‌تری شروع شده‌اند و نسبت به بقیه روش‌ها تا عمق بیشتری نفوذ کرده‌اند. این موضوع نشان دهنده برتری این دو روش در عمق نفوذ نسبت سایر روش‌ها می‌باشد. در نتیجه این دو روش را می‌توان هنگامی که عمق اکتشاف بیشتری نیاز است، بکار برد و سه روش دیگر در اهداف سطحی‌تر ما را به جواب مورد نظر خواهند رساند.



شکل (۵-۱): منحنی سونداژ نیم‌فضای همگن رسانا با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$



شکل (۲-۵): منحنی سونداژ نیم‌فضای همگن مقاوم با مقاومت‌ویژه  $1000 \Omega m$

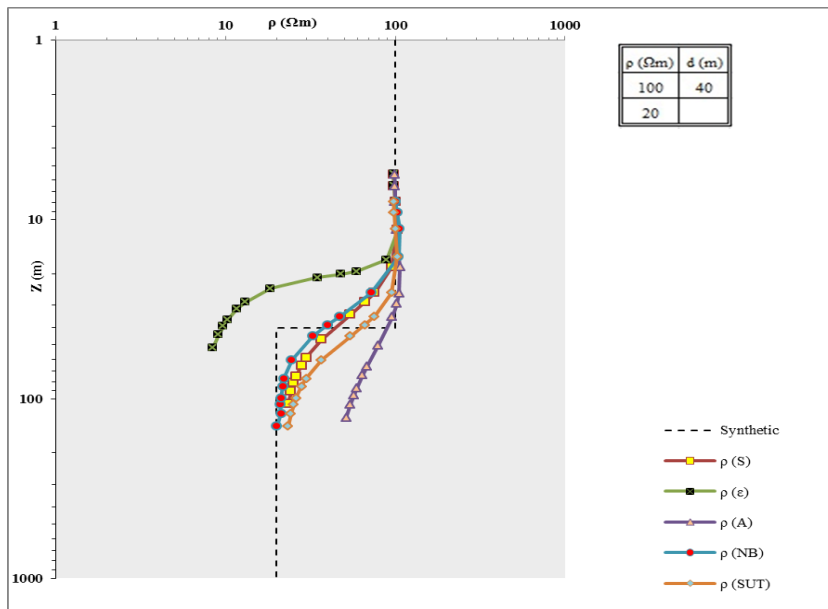
## ۲-۲-۵- مدل‌های نیم‌فضای لایه‌ای:

### مدل شماره ۱ (روباره مقاوم):

در مدل اول یک لایه با مقاومت‌ویژه بالا روی یک بستر رسانا در نظر گرفته شد. مقاومت‌ویژه روباره  $100 \Omega m$  با ضخامت  $40 m$  و مقاومت‌ویژه بستر رسانا  $20 \Omega m$  لحاظ شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۳-۵) می‌توان گفت:

همه روش‌ها مقاومت‌ویژه لایه اول را به خوبی نشان می‌دهند؛ اما عمق لایه اول در همه روش‌ها یکسان نیست  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  در مورد عمق لایه اول خیلی ضعیف عمل کرده است و روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  بهترین جواب را در مورد عمق لایه اول نشان می‌دهد. در شناسایی مقاومت‌ویژه لایه دوم، روش‌های  $\rho_a^A(Z_A^*)$  و  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  جواب‌های نامناسبی دارند، به طوری که جواب‌های روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در فرکانس‌های پایین (کمتر از  $1000 Hz$ ) به سمت مقادیر مقاومت‌ویژه بالا متمایل است؛ این مسئله باعث شده این منحنی در

این فرکانس‌ها رفتار همواری داشته باشد و جواب‌های روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  نیز در فرکانس‌های پایین به سمت مقادیر مقاومت‌ویژه خیلی پایین متمایل است. منحنی‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  تغییرات مقاومت‌ویژه را به خوبی نشان می‌دهند. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  مقاومت‌ویژه لایه رسانا را به خوبی نشان داده است و دارای عمق نفوذ خوبی می‌باشد. به طور کلی تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را می‌توان موفق‌ترین روش در این مورد بخصوص در فرکانس‌های پایین دانست. البته اگر به فرکانس‌های خیلی پایین (۲۰۰ و ۳۰۰ هرتز) در انتهای منحنی  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  دقت کنیم متوجه می‌شویم جواب‌های این تبدیل به جواب‌های تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بسیار نزدیک شده و در نتیجه می‌توان ادعا کرد این دو روش در فرکانس‌های بسیار پایین جواب‌های یکسانی دارند.



شکل (۳-۵): منحنی سونداژ یک زمین دو لایه (لایه روباره مقاوم).

## مدل شماره ۲ (روباره رسانا):

در این مدل یک روباره رسانا بر روی سنگ بستر مقاوم در نظر گرفته شد. مقاومت‌ویژه روباره  $20 \Omega m$  و تا عمق ۴۰ m ادامه دارد و مقاومت‌ویژه سنگ بستر  $500 \Omega m$  و ضخامت آن نامحدود است. با

توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۴-۵) می‌توان گفت:



مقاومت‌ویژه لایه اول توسط تمام منحنی‌های سونداژ نشان داده شده است. در مورد لایه دوم نیز

هیچ‌کدام از این روش‌ها نتوانسته‌اند مقدار مقاومت‌ویژه را به درستی نشان دهند، هر چند روش  $\rho_a^E(Z_\epsilon^*)$

در این مورد از بقیه بهتر بوده و عمق نفوذ آن نیز از همه بیشتر است. لایه دوم در روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  به

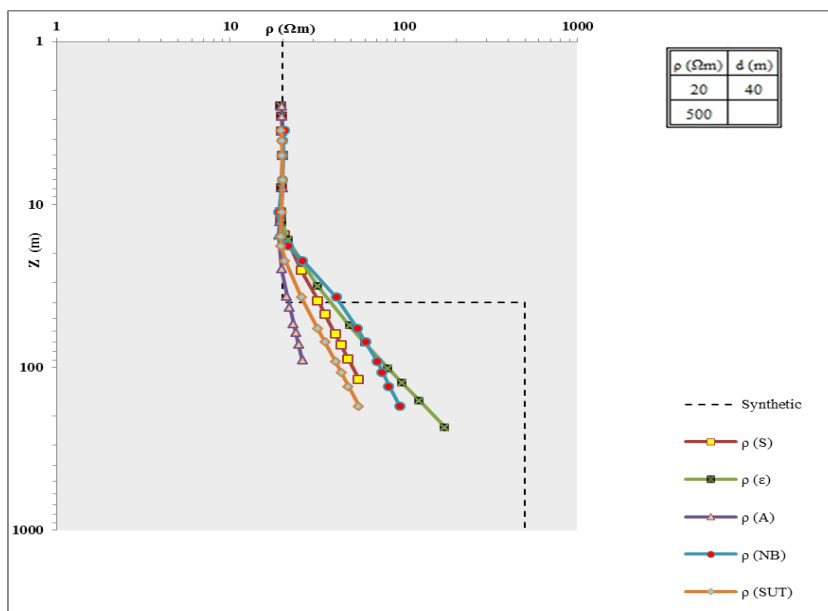
مقدار زیادی تحت تاثیر لایه روباره رسانا قرار گرفته به طوری که رفتار آن در فرکانس‌های پایین بسیار

هموار می‌باشد. منحنی‌های مربوط به  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  نیز نسبت افزایش

مقاومت‌ویژه حساسیت خوبی دارند. علت این‌که مقدار مقاومت‌ویژه لایه دوم در هیچ‌کدام از این روش‌ها

درست بدست نیامده، رسانا بودن لایه بالایی می‌باشد. چرا که جریان‌های گردابی تمایل به شارش و تمرکز

در لایه‌های رسانا داشته و شارش جریان بسیار اندکی در لایه‌های مقاوم رخ می‌دهد.

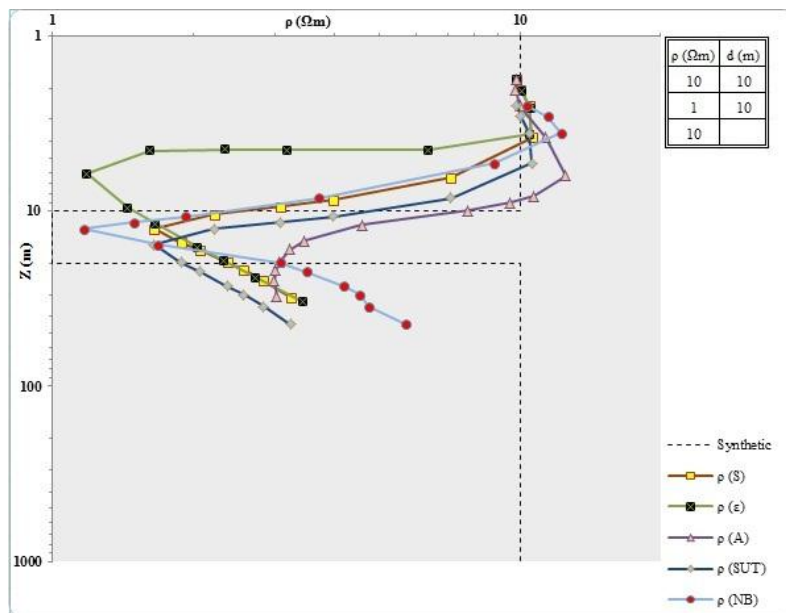


شکل (۴-۵): منحنی سونداژ یک زمین دو لایه (لایه روباره رسانا).

### مدل شماره ۳ (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۱۰m):

در این مدل لایه اول با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  و ضخامت  $10 m$ ، مقاومت ویژه لایه دوم  $1 \Omega m$  با ضخامت  $10 m$  و مقاومت ویژه لایه سوم  $10 \Omega m$  پیش بینی شده است. منحنی‌های حاصل از این مدل در شکل (۵-۵) نشان داده شده اند. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۵) می‌توان گفت:

روش  $\rho_a^e(Z_\epsilon^*)$  بدترین پاسخ را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه داده است. اگر چه در این روش همانند روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  از مدل نیم فضای همگن جهت معکوس سازی استفاده می‌شود، اما روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  پاسخ قابل قبول تری را ارائه می‌دهد. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در فرکانس‌های بالا نسبت به فرکانس‌های پایین تر، پاسخ بهتری دارد. بیشتر روش‌ها در فرکانس‌های بسیار پایین پاسخ اشتباه می‌دهند، این پاسخ بخصوص در فرکانس‌های پایین تر از  $1000 \text{ Hz}$  رخ می‌دهد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بهترین پاسخ را در میان روش‌های ارائه شده می‌دهد. این روش علاوه بر نمایش بهتر عمق نسبت به تغییرات مقاومت ویژه نیز حساس تر است. هر دو تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در عمق‌های بالا (فرکانس‌های پایین) پاسخ‌های نسبتاً یکسانی را ارائه می‌دهند. با این حال تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  نسبت به تغییرات مقاومت ویژه هموارتر عمل می‌کند. روش  $\rho_a(Z_s^*)$  نسبت به تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  پاسخ بهتری ارائه داده است؛ گر چه به نظر می‌رسد پاسخ این روش و تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  همانند هم بوده و تنها یک جابجایی نسبت به عمق وجود دارد. در پایان می‌توان گفت تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  که بر پایه روش سیمون می‌باشد، علاوه بر شناسایی مقاومت ویژه لایه‌ها، مقدار عمق را نیز نسبت به تمام روش‌ها بهتر تشخیص می‌دهد.

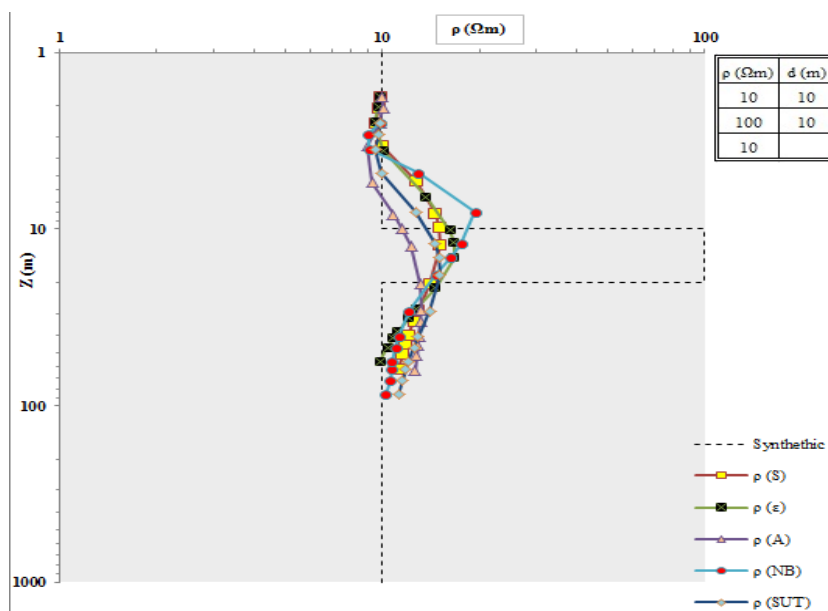


شکل (۵-۵): منحنی‌های سونداژ یک زمین سه لایه (یک لایه بسیار رسانا بین دو لایه رسانا).

#### مدل شماره ۴ (لایه نازک نسبتاً مقاوم در بین دو لایه رسانا):

در این مدل یک لایه با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  بین دو لایه رسانا با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  در نظر گرفته شد. ضخامت لایه اول و دوم برابر  $10 m$  است. با توجه به نتایج شکل (۵-۶) مشاهده می‌شود: روند سه لایه‌ای زمین در همه روش‌ها پیداست. البته در روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  این روند از بقیه هموارتر است و بهترین روند را روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  نشان می‌دهد. مقاومت ویژه لایه اول در همه روش‌ها درست تشخیص داده شده، ولی عمق این لایه در این روش‌ها به خوبی مشخص نیست. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  این عمق را بهتر از بقیه نشان داده است. در مورد لایه دوم، مقدار مقاومت ویژه در هیچ کدام از روش‌ها درست نشان داده نشده است. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در فرکانس‌های بالا نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر پاسخ بهتری را ارائه می‌دهد. در فرکانس‌های خیلی پایین (لایه سوم) روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  مقدار مقاومت ویژه را بهتر از بقیه نشان داده و همچنین دارای عمق نفوذ بالاتری است. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  هموارترین پاسخ را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد. در این مدل بر عکس مدل شکل قبل، روش  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  جواب قابل قبول‌تری نسبت به روش

دو  $\rho_a^A(Z_A^*)$  ارائه می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت روش  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  در مورد لایه‌های مقاوم قرار گرفته بین دو لایه رسانا خوب عمل می‌کند؛ به طوری که حتی می‌توان ادعا کرد در این مورد با روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  رقابت دارد، به ویژه در نشان دادن مقاومت ویژه لایه دوم از آن هم بهتر عمل کرده است. جواب‌های تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  در فرکانس‌های خیلی پایین نزدیک به جواب‌های روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  می‌باشد؛ با این حال تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  مشابه قبل نسبت به تغییرات مقاومت ویژه هموارتر عمل کرده و عمق نفوذ این دو روش نیز برابر می‌باشد.

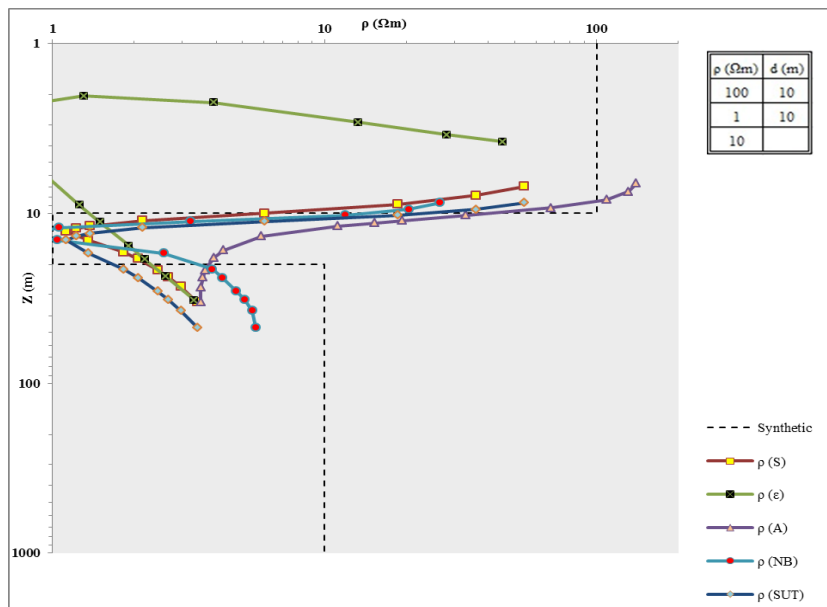


شکل (۵-۶): منحنی سونداژ یک زمین سه‌لایه (لایه مقاوم بین دو لایه رسانا).

## مدل شماره ۵:

در این بخش یک مدل سه لایه با روباره‌ای به مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  و ضخامت  $10 m$  در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه لایه دوم که بسیار رسانا است،  $1 \Omega m$  و ضخامت آن  $10 m$  است. لایه آخر هم یک لایه رسانا با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۷) می‌توان گفت:

روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  در این مورد اصلاً پاسخ مناسبی ارائه نداده و جای بحث و بررسی ندارد. روش‌های  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ،  $\rho_a(Z_s^*)$  ،  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  روند سه لایه‌ای بودن و مقاومت ویژه لایه دوم را خوب نشان داده‌اند (جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  از همه بهتر می‌باشد) البته مقاومت ویژه لایه اول در روش  $\rho_a(Z_s^*)$  و تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  به مقدار ایده‌آل نزدیک‌تر می‌باشد. مشابه مدل قبلی بیشتر روش‌ها در فرکانس‌های بسیار پایین پاسخ اشتباه می‌دهند؛ این پاسخ بخصوص در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰HZ رخ می‌دهد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بهترین پاسخ را در میان روش‌های ارائه شده می‌دهد، هم‌چنین مقاومت ویژه لایه سوم در تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  از همه بهتر آشکار شده است. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  تنها دو لایه تشخیص داده است. هدف از ارائه این مدل سنجیدن توانایی این روش‌ها در آشکار کردن لایه بسیار رسانا می‌باشد، که با توجه به شکل باز هم  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  موفق‌ترین روش می‌باشد.



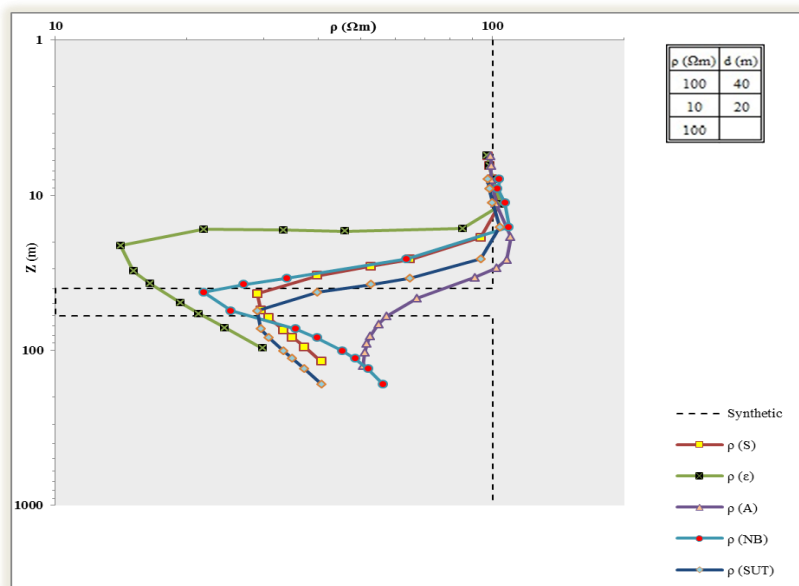
شکل (۵-۷): منحنی حاصل از یک زمین سه لایه (یک لایه بسیار رسانا بین دو لایه مقاوم با مقاومت‌های متفاوت)

## مدل شماره ۶:

در این مدل سه لایه، مقاومت ویژه لایه اول  $100 \Omega m$  با ضخامت  $40 m$ ، لایه دوم یک لایه رسانا با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  و ضخامت  $20 m$  و لایه آخر هم یک لایه با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۸) می توان گفت:

روش  $\rho_a^*(Z_s^*)$  بدترین پاسخ را نسبت به سایر روش ها ارائه داده است. اگر چه در این روش همانند روش  $\rho_a^*(Z_A^*)$  از مدل نیم فضای همگن جهت معکوس سازی استفاده می شود، اما روش  $\rho_a^*(Z_A^*)$  پاسخ قابل قبول تری را ارائه می دهد. روش  $\rho_a^*(Z_A^*)$  در فرکانس های بالا پاسخ بهتری را نسبت به فرکانس های پایین تر ارائه می دهد. بیشتر روش ها در فرکانس های بسیار پایین پاسخ نادرستی می دهند. این پاسخ بخصوص در فرکانس های پایین تر از  $1000 Hz$  رخ می دهد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بهترین پاسخ را در میان روش های ارائه شده می دهد. این روش علاوه بر نمایش بهتر عمق نسبت به تغییرات مقاومت ویژه نیز حساس تر است. هر دو تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در عمق های بالا (فرکانس های پایین) پاسخ های نسبتاً یکسانی را ارائه می دهند. با این حال تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  نسبت به تغییرات مقاومت ویژه هموارتر عمل می کند.

روش  $\rho_a(Z_s^*)$  نسبت به تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  پاسخ بهتری را ارائه داده است، گر چه به نظر می رسد پاسخ این روش و تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  همانند هم بوده و تنها یک جابجایی نسبت به عمق صورت گرفته باشد. در پایان می توان گفت تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  که بر پایه روش سیمون می باشد علاوه بر شناسایی مقاومت ویژه لایه ها عمق لایه دوم را نیز نسبت به تمام روش ها بهتر تشخیص می دهد.

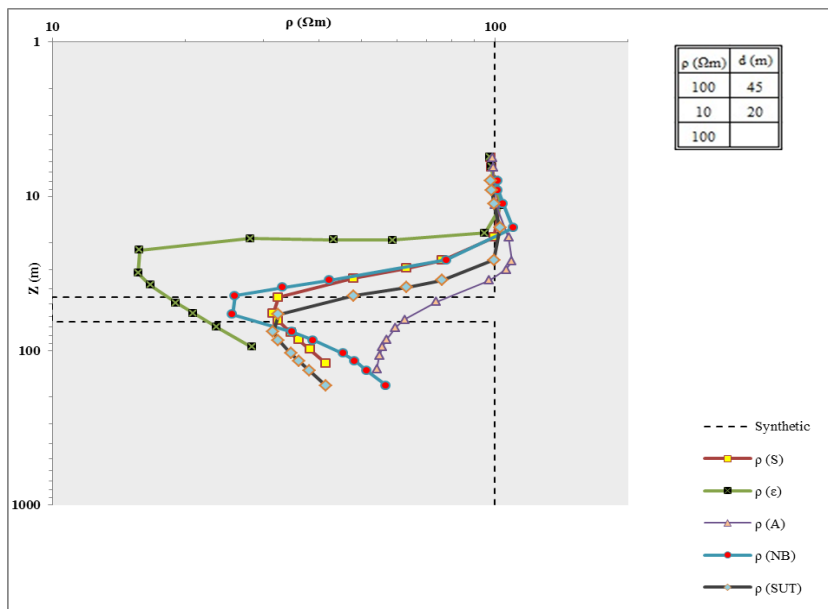


شکل (۵-۸): منحنی‌های سونداژ حاصل از یک زمین سه لایه (یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم با مقاومت یکسان)

### مدل شماره ۷:

این مدل مشابه مدل شکل قبلی می‌باشد، با این تفاوت که در این مدل ضخامت لایه اول ۴۵m در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۹) می‌توان گفت:

رفتار منحنی‌های سونداژ مشابه شکل (۵-۸) می‌باشد؛ با این تفاوت که مقاومت ویژه لایه دوم در همه روش‌ها نسبت به مثال قبلی کمی بیشتر نشان داده شده است. شاید علت این امر افزایش ضخامت لایه رویی و در نتیجه تضعیف بیشتر امواج الکترومغناطیس در رسیدن به لایه دوم باشد. نکته قابل توجه اینکه عمق نفوذ هیچ کدام از روش‌ها تغییر چندانی نشان نمی‌دهد.



شکل (۵-۹): منحنی‌های سونداژ حاصل از یک زمین سه لایه (یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم با مقاومت یکسان)

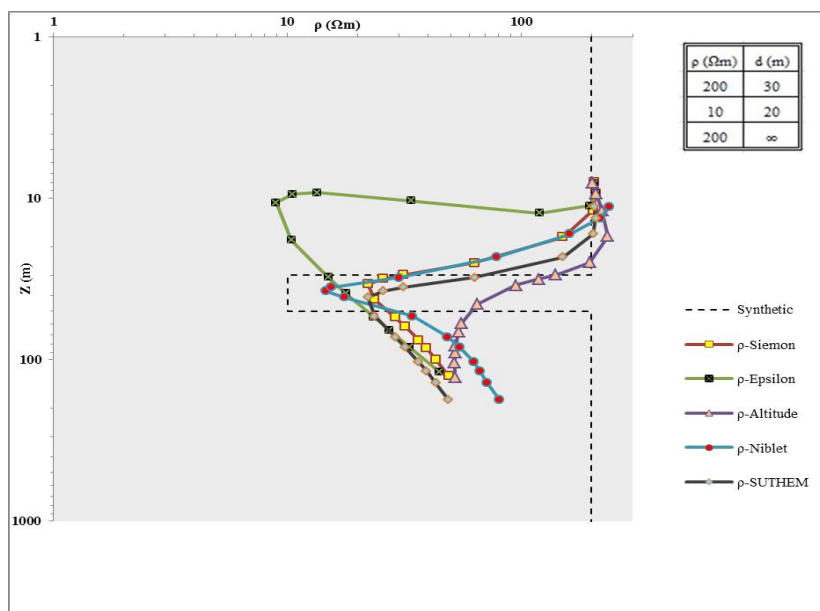
## مدل شماره ۸:

هدف از ارائه این مدل بررسی تاثیر تغییر پارامترهای مدل شماره ۶ در پاسخ به روش‌های ارائه شده می‌باشد. در این مدل، مقاومت ویژه لایه اول  $200 \Omega m$  با ضخامت  $30 m$ ، لایه دوم یک لایه رسانا با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  و ضخامت  $20 m$  و لایه آخر هم یک لایه با مقاومت ویژه  $200 \Omega m$  در نظر گرفته شد. با توجه به این اطلاعات و مقایسه آنها با مدل شماره ۶ مشاهده می‌شود که ضخامت لایه اول  $10 m$  کاهش داده شده و مقاومت ویژه آن دو برابر شده است، مشخصات لایه دوم (هدف رسانا) مثل مشخصات مدل شماره ۶ می‌باشد و مقاومت ویژه لایه سوم دو برابر شده. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۱۰) می‌توان گفت:

روند منحنی‌های مختلف در این شکل مشابه منحنی‌های مدل شماره ۶ می‌باشد. برای توضیح عملکرد هر یک از منحنی‌ها به توضیح مدل شماره ۶ مراجعه شود. اگر بیشتر دقت شود، مقدار مقاومت ویژه لایه دوم در این منحنی‌ها در همه روش‌ها بهبود یافته و به مقدار ایده‌آل نزدیک‌تر شده است.



این بهبود ممکن است ناشی از تباین بیشتر مقاومت ویژه لایه اول و دوم و یا کاهش ضخامت لایه اول باشد. رفتار همه منحنی‌ها در فرکانس‌های بالا (نمایش عمق لایه اول) نسبتاً ضعیف‌تر شده است. این ضعف در منحنی  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  از همه مشهودتر است. همچنین رفتار بد منحنی‌ها در فرکانس‌های پایین تغییر چندانی نکرده است. با استفاده از نتایج سه شکل اخیر روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  در شناسایی عمق لایه‌های رسانا در یک زمین مقاوم توصیه نمی‌شود. بدون شک تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را باید بهترین روش در این مورد دانست و روش  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

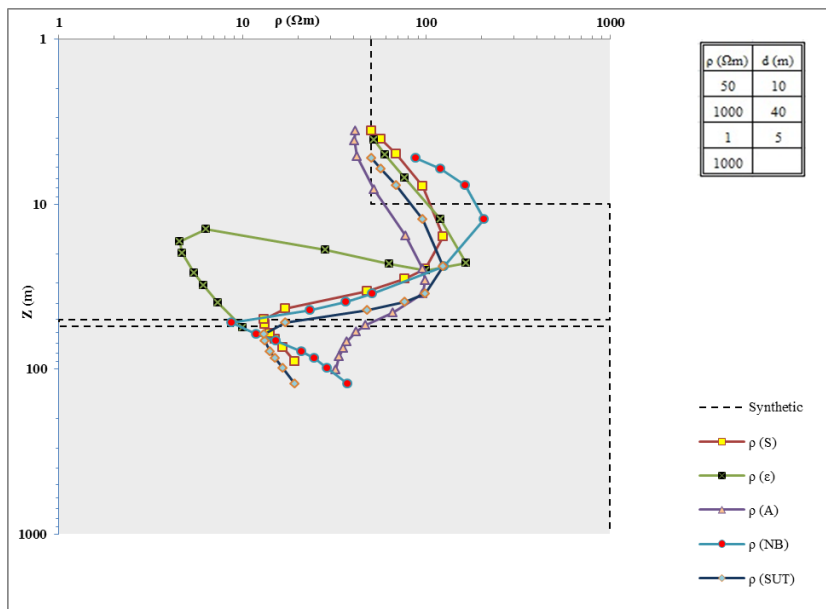


شکل (۵-۱۰): منحنی‌های سونداژ یک زمین سه لایه (یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم)

## مدل شماره ۹:

در این مدل یک زمین چهار لایه در نظر گرفته شد مقاومت ویژه لایه اول  $50 \Omega m$  با ضخامت  $10 m$ ، لایه دوم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  و ضخامت  $40 m$  و لایه سوم هم یک لایه بسیار رسانا با مقاومت ویژه  $1 \Omega m$  و ضخامت  $5 m$  و لایه چهارم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۱۱) می‌توان گفت:

روند چهار لایه‌ای در همه منحنی‌ها به جز روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  مشاهده می‌شود، البته روش  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  بدترین پاسخ را در میان سایر روش‌ها دارد. بخصوص در مورد عمق لایه دوم حتی در قسمتی از منحنی با کاهش فرکانس عمق کاهش می‌یابد و یک حالت برگشتی در منحنی به وجود آمده است.  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در فرکانس‌های پایین ضعیف عمل کرده و منحنی به شکل هموار تبدیل شده است. بیشتر روش‌ها در فرکانس‌های بسیار پایین پاسخ اشتباه می‌دهند. این پاسخ بخصوص در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۰۰۰HZ رخ می‌دهد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در فرکانس‌های بالا (مقاومت ویژه لایه اول) خوب عمل نکرده ولی در ادامه و در فرکانس‌های پایین بسیار بهتر از بقیه منحنی‌ها می‌باشد. روش  $\rho_a(Z_s^*)$  در همه فرکانس‌ها یک رفتار قابل قبول‌تر نسبت به بقیه نشان داده است. عمق نفوذ تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  از همه بیشتر می‌باشد. تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  هم رفتاری مشابه روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  دارد البته یک شیفت نسبت به آن به سمت پایین دارد. جواب‌های تبدیلات  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  نسبت به روش‌های دیگر از عمق بیشتری شروع به ظاهر شدن می‌کنند و تا عمق بیشتری هم ادامه دارند که این مسئله نشان دهنده برتری این دو روش در عمق نفوذ و شناسایی لایه‌های عمیق می‌باشد. اگر هدف یافتن لایه نازک رسانا باشد، تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را می‌توان بهترین دانست و چنانچه هدف بررسی کلی همه لایه‌ها بخصوص لایه‌های سطحی‌تر باشد، روش  $\rho_a(Z_s^*)$  را می‌توان به عنوان بهترین روش معرفی نمود.



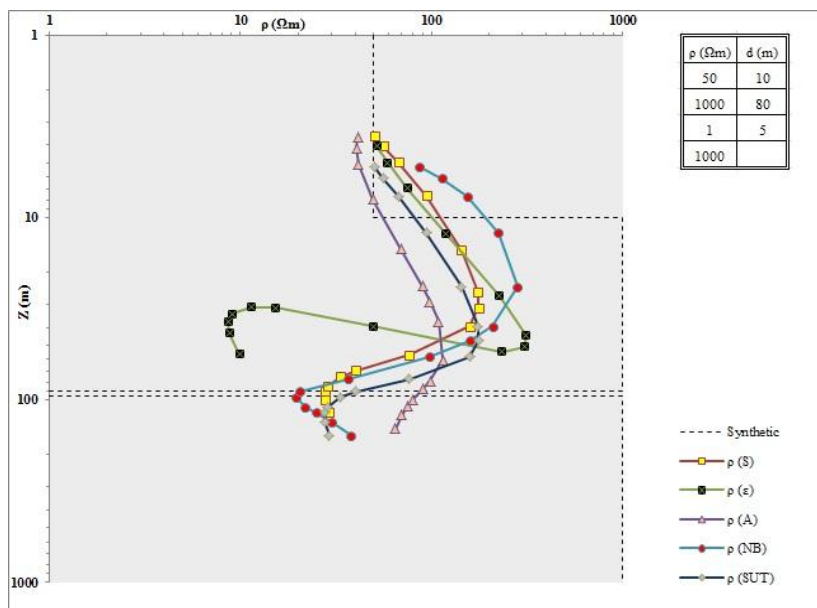
شکل (۵-۱۱): منحنی‌های سونداژ یک زمین چهار لایه (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۵۰m)

### مدل شماره ۱۰:

در این مدل نیز یک زمین چهار لایه در نظر گرفته شد، که به جز ضخامت لایه دوم، بقیه پارامترهای این مدل مشابه مدل قبل می‌باشد. مقاومت ویژه لایه اول  $50 \Omega m$  با ضخامت ۱۰m، لایه دوم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  و ضخامت ۸۰m، لایه سوم یک لایه بسیار هادی با مقاومت ویژه  $1 \Omega m$  و ضخامت ۵m و لایه چهارم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در نظر گرفته شد. هدف از ارائه این مدل، بررسی میزان حساسیت روش‌های مورد بررسی در این پایان‌نامه نسبت به تغییر ضخامت لایه دوم (بسیار مقاوم) می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۱۲) می‌توان گفت:

روند منحنی‌ها به طور کلی تغییر چندانی نکرده است، فقط پهنای منحنی‌ها در لایه دوم بیشتر شده، روش‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a(Z_s^*)$ ، بیشترین تاثیر را از این تغییر پذیرفته‌اند. به این معنا که این

روش‌ها به تغییرات ضخامت لایه‌های بسیار مقاوم حساسیت خوبی دارند. رفتار همه منحنی‌ها در فرکانس‌های پایین (لایه سوم و چهارم) ضعیف‌تر شده و از مقدار ایده‌آل فاصله گرفته‌اند.



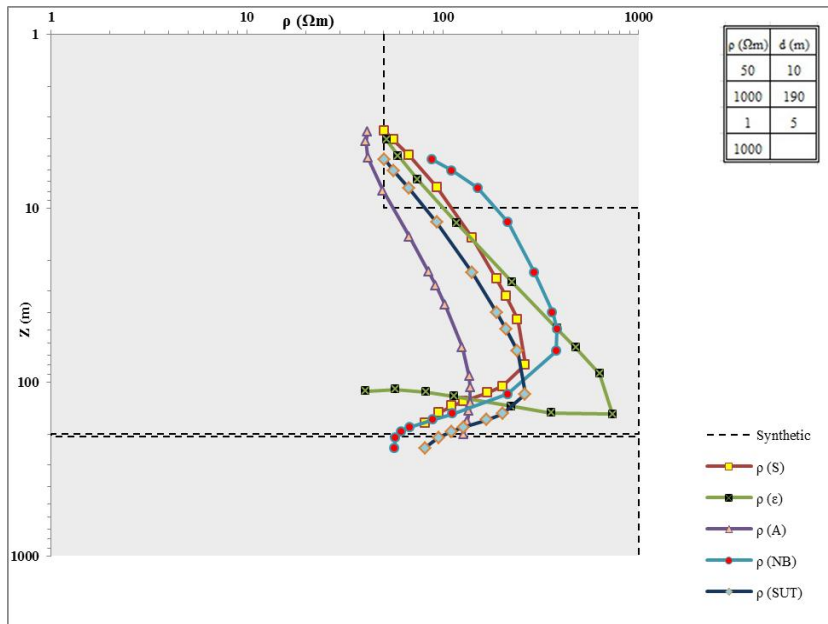
شکل (۵-۱۲): منحنی‌های سونداژ یک زمین چهار لایه (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۹۰m)

## مدل شماره ۱۱:

این مدل نیز یک زمین چهار لایه را در نظر گرفته است، که به غیر از ضخامت لایه دوم، بقیه پارامترهای آن مشابه مدل‌های قبل می‌باشد. مقاومت‌ویژه لایه اول  $50 \Omega m$  با ضخامت ۱۰m، لایه دوم بسیار مقاوم با مقاومت‌ویژه  $1000 \Omega m$  و ضخامت ۱۹۰m، لایه سوم یک لایه بسیار رسانا با مقاومت‌ویژه  $1 \Omega m$  و ضخامت ۵m و لایه چهارم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت‌ویژه  $1000 \Omega m$  در نظر گرفته شد. هدف از ارائه این مدل نیز بررسی میزان حساسیت روش‌های مورد بررسی در این پایان‌نامه نسبت به تغییر ضخامت لایه دوم می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل (۵-۱۲)، می‌توان گفت:

عملکرد منحنی‌ها در فرکانس‌های پایین بسیار تحت تاثیر قرار گرفته؛ به طوری که اکثر منحنی‌ها فقط سه لایه را نشان می‌دهند. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  بسیار هموار شده، به طوری که منحنی آن نشان دهنده

یک زمین دو لایه می‌باشد. این رفتار ممکن است به خاطر عمق نفوذ کم روش‌های الکترومغناطیس باشد (عمق مفید ۱۵۰ تا ۱۸۰ متر) با این حال روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  هم‌چنان بهترین جواب را در فرکانس‌های پایین دارد. این مساله نشان‌دهنده عمق نفوذ بالای این روش می‌باشد. رفتار منحنی  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  نسبت به منحنی آن در دو مدل قبل بهتر شده، این مسئله نشان‌دهنده توانایی این روش در مورد لایه‌های عایق و ضعف آن در مواجهه با لایه‌های بسیار رسانا می‌باشد.

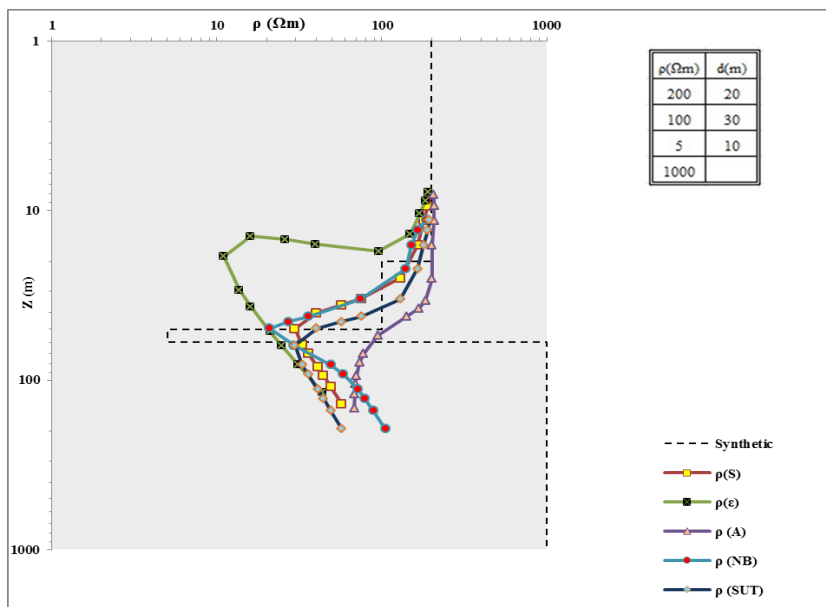


شکل (۵-۱۳): منحنی‌های زمین چهار لایه (لایه نازک بسیار رسانا در عمق ۲۰۰m)

## مدل شماره ۱۲:

در این مدل نیز یک زمین چهار لایه بررسی شده است. مقاومت‌ویژه لایه اول  $200 \Omega m$  و ضخامت آن ۲۰m، لایه دوم یک لایه رساناتر از لایه اول، با مقاومت‌ویژه  $100 \Omega m$  و ضخامت ۳۰m، لایه سوم یک لایه بسیار رسانا با مقاومت‌ویژه  $5 \Omega m$  و ضخامت ۱۰m و لایه چهارم یک لایه بسیار مقاوم با مقاومت‌ویژه  $1000 \Omega m$  در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۱۴) می‌توان گفت:

روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  هم‌چنان بدترین رفتار را دارد. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  نیز رفتاری بسیار هموار دارد. به طوری که منحنی آن مشابه یک زمین دو لایه‌ای می‌باشد. تبدیل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  در فرکانس‌های بالا (عمق‌های کم) رفتار مشابهی دارند. البته جواب‌های تبدیل  $\rho_a(Z_s^*)$  در اعماق بالاتری ظاهر شده‌اند. بقیه روش‌ها در فرکانس‌های بسیار پایین پاسخ اشتباه می‌دهند. این پاسخ بخصوص در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ Hz رخ می‌دهد. با این حال تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بهترین جواب را در میان روش‌های ارائه شده دارد. جواب‌های این تبدیل در فرکانس‌های بالا نسبت به مدل‌های قبلی بهتر شده است. این رفتار نشان دهنده پاسخ بهتر این تبدیل در لایه‌های رساناتر می‌باشد.



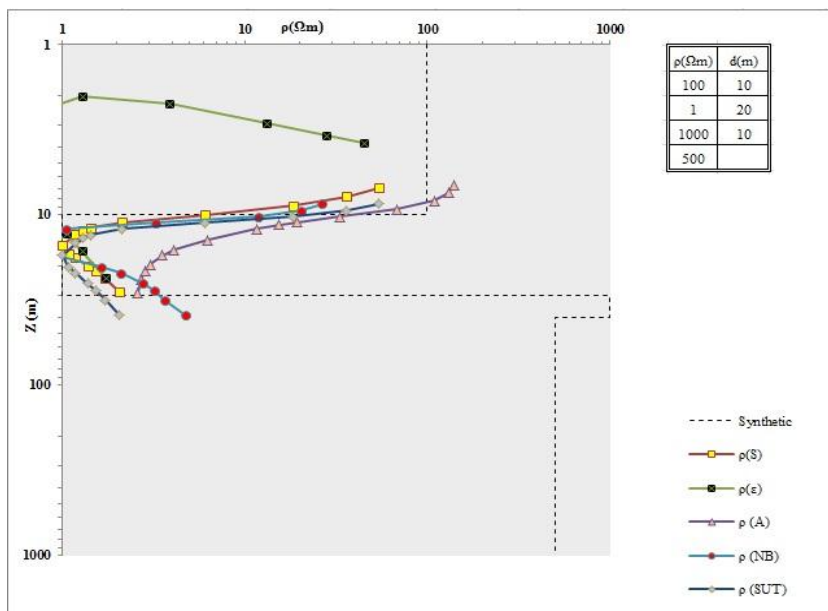
شکل (۵-۱۴): منحنی‌های سونداژ زمین چهار لایه

### مدل شماره ۱۳:

در این مدل نیز یک زمین چهار لایه بررسی شده است. مقاومت ویژه لایه اول  $100 \Omega m$  با ضخامت ۱۰ m، لایه دوم یک لایه بسیار رساناتر از لایه اول، با مقاومت ویژه  $1 \Omega m$  و ضخامت ۲۰ m، لایه سوم یک

لایه بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  و ضخامت  $10 m$  و لایه چهارم یک لایه با مقاومت ویژه  $500 \Omega m$  در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۵-۱۵) می توان گفت:

پاسخ روش  $\rho_a^e(Z_e^*)$  از همه بدتر می باشد؛ به طوری که حتی قسمتی از داده ها در آن از بین رفته اند. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در فرکانس های بالا (لایه اول) جواب های بهتری نسبت به بقیه دارد. البته در فرکانس های پایین تر رفتار همواری را از خود نشان می دهد. عمق نفوذ روش ها بسیار کاهش یافته است علت این است که جریان های گردابی تمایل به شارش و تمرکز در لایه های بسیار رسانا داشته و جریان های الکترومغناطیس در گذار به لایه مقاوم مستهلک شده اند؛ بنابراین جریان بسیار کمی در لایه های مقاوم شارش پیدا کرده است. رفتار منحنی های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  هم نسبت به مدل های قبلی ضعیف تر شده؛ به طوری که این منحنی ها بیشتر شبیه زمین سه لایه می باشند. با این حال چون هدف این پایان نامه مقایسه کیفی این روش ها نسبت به یکدیگر است، در این مدل می توان تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را موفق تر از بقیه روش ها دانست.



شکل (۵-۱۵): منحنی سونداژ یک زمین چهار لایه

### ۵-۳- مدل سازی دوبعدی:

مدل سازی دوبعدی، تغییر پارامترهای ژئوفیزیکی را در دو راستای عمودی (عمقی) و افقی (در طول خط برداشت) بررسی می کند. طول خط برداشت در مدل های دوبعدی ۲۰۰m در نظر گرفته شد و چون عمق موثر برداشت های هوا برد الکترومغناطیس ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر می باشد؛ عمق بررسی نتایج ۱۵۰m متر در نظر گرفته شد. مدل های دوبعدی مورد بررسی در این پایان نامه عبارتند از دایک رسانا در محیط مقاوم و دایک مقاوم در محیط رسانا با گستردگی ۵ و ۲۰ متر. صفحه رسانای با ضخامت ۱۰m با شیب های مختلف (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰) قرار گرفته در یک زمین مقاوم تر نسبت به آن و لایه شیب دار رسانا با شیب ۴۵ درجه قرار گرفته بین دو لایه مقاوم تر. برای بدست آوردن مدل های دوبعدی، پروفیل برداشت به ۴۱ سونداژ تقسیم شد؛ سپس داده های بدست آمده از هر یک از این سونداژها در محیط نرم افزاری سرفر کنار هم قرار داده شد و تغییرات مقاومت ویژه در راستای عمق در طول پروفیل ترسیم شد.

### ۵-۳-۱- مدل سازی صفحه شیب دار رسانا در یک زمین مقاوم:

صفحه شیب دار رسانا در عمق ۱۰m و با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  در نظر گرفته شد. ضخامت آن نیز ۱۰m در نظر گرفته شد. مقاومت ویژه زمین در برگیرنده این صفحه،  $100 \Omega m$  و طول این صفحه را به اندازه ۳۰m (۶ ایستگاه) پیش بینی شد. برای بررسی حساسیت روش ها نسبت به شیب توده رسانا؛ این صفحه در شیب های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

#### الف) صفحه رسانای افقی (شیب صفر درجه):

جواب های بدست آمده مربوط به صفحه رسانای افقی در شکل (۵-۱۶) به تصویر کشیده شده است.

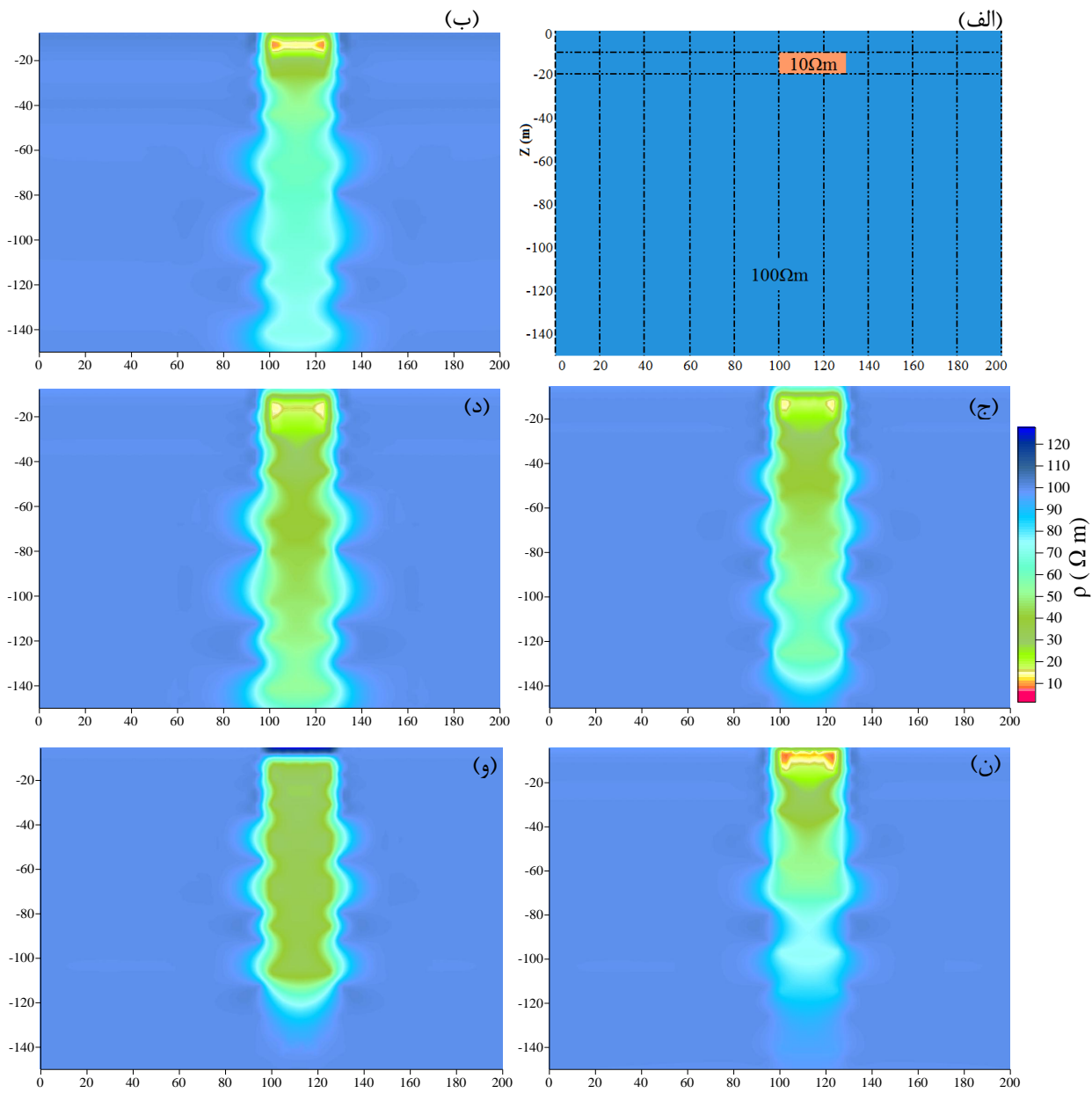
با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ها داریم:

این آنومالی در روش های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a^E(Z_e^*)$ ،  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  به خوبی به تصویر

کشیده شده است، همه شکل های مذکور عمق آنومالی را خوب تشخیص داده اند، اما در روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



این عمق خیلی بیشتر نشان داده است (۲۰m). همان طور که مشاهده می‌کنید این آنومالی در محیط زمینه‌اش (زیر آنومالی) تاثیر گذاشته و آن را دچار ناهمگنی کرده است. روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  دارای کمترین ناهمگنی در محیط زمینه این آنومالی می‌باشد و می‌توان گفت در این روش آنومالی کمترین تاثیر را در محیط مجاورش داشته است. این موضوع نشان دهنده این است که روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  نسبت تغییرات عمودی مقاومت ویژه بیشترین حساسیت را دارد. با نگاه به راهنمای رنگی کنار شکل‌ها دیده می‌شود که، بهترین مقادیر مقاومت ویژه تعیین شده برای این آنومالی در  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  می‌باشد.  $\rho_a^A(Z_A^*)$  در تشخیص مقدار مقاومت ویژه‌ها از همه بدتر عمل کرده است. تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  به نظر در تشخیص ضخامت آنومالی از بقیه بهتر می‌باشد. گر چه روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  در این مورد هم تشخیص خوبی داشته است. به طور کلی بهترین جواب در این مثال روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  است و تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در رتبه دوم قرار می‌گیرد.



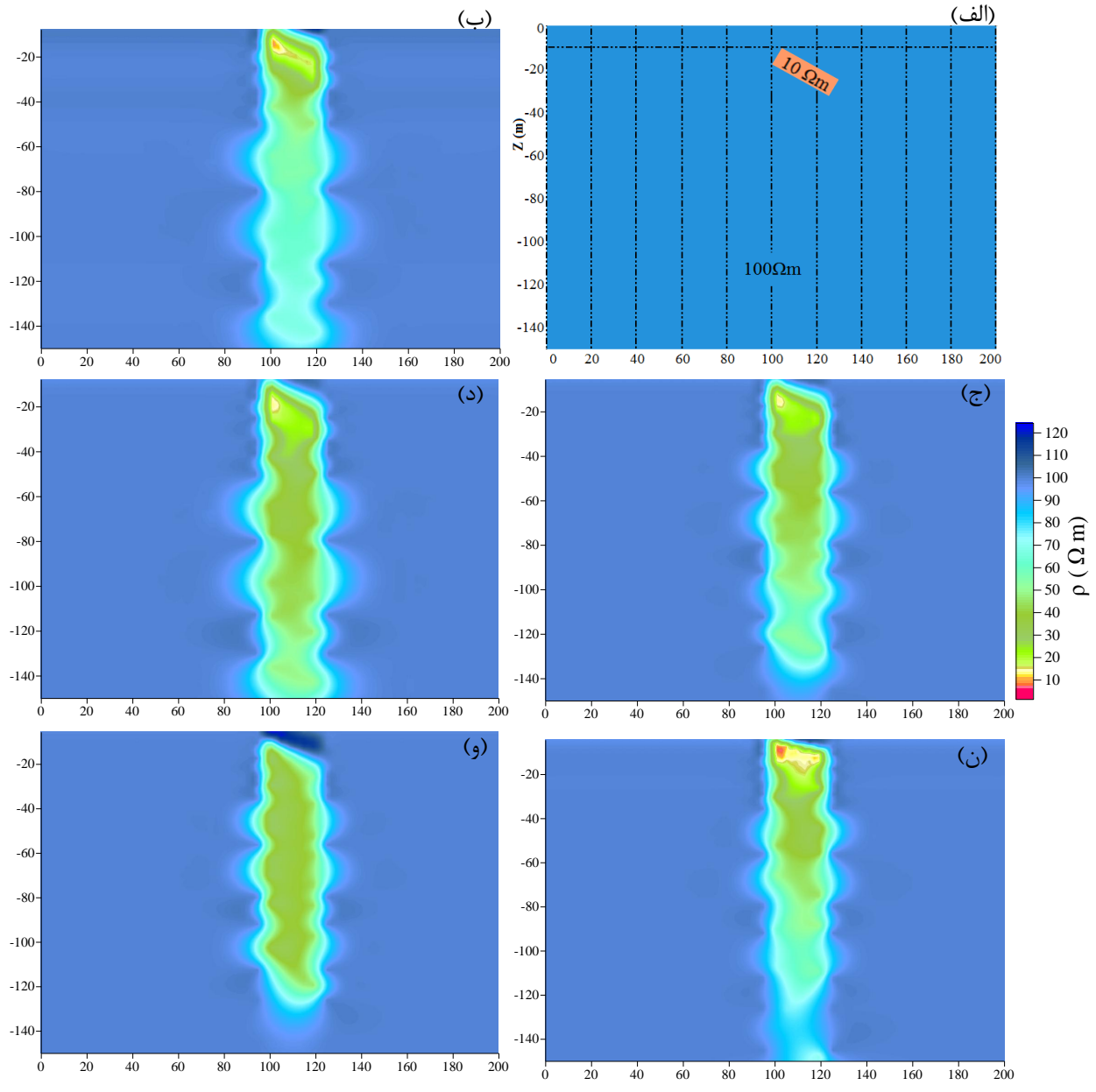
شکل (۵-۱۶): حاصل از مدل سازی صفحه رسانا با شیب صفر درجه الف) مدل واقعی ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$

ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ن) جواب روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  ز) جواب روش  $\rho_a^E(Z_{\epsilon}^*)$

## ب) صفحه رسانی با شیب ۳۰ درجه:

جواب‌های بدست آمده مربوط به صفحه رسانی با شیب ۳۰ درجه در شکل (۵-۱۷) به تصویر کشیده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل‌ها داریم:

روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  ضعیف‌ترین جواب در بین سایر روش‌ها نشان می‌دهد. این آنومالی در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  به خوبی به تصویر کشیده شده‌اند. شکل‌های مذکور عمق آنومالی را خوب تشخیص داده‌اند. شکل‌های  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  از لحاظ عمق نفوذ و مقادیر مقاومت ویژه نسبت به شکل قبل بخصوص تشخیص عمق لبه پایینی این صفحه نیز دچار اشتباه شده‌اند. البته شیب آنومالی را درست تشخیص داده‌اند. شکل  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  در تشخیص ضخامت لایه رسانا خوب عمل کرده ولی شیب این آنومالی را خیلی کمتر (۱۸ درجه) نشان داده است. این موضوع بیان‌گر این مسئله است که این روش نسبت به شیب آنومالی حساسیت کمتری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید این آنومالی مشابه شکل قبل در محیط زمین‌اش (زیر آنومالی) تاثیر گذاشته و جواب آن را دچار خطا کرده است. در روش  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  آنومالی کمترین تاثیر را در محیط زمین‌ه گذاشته است. شکل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در نگاه اول خوب به نظر می‌رسد، هم عمق لبه بالایی آنومالی و هم شیب آنومالی (تقریباً ۳۲ درجه) و متعاقباً عمق لبه پایینی را درست تشخیص داده است. تنها اشکال این شکل در مورد تشخیص آنومالی این است که ضخامت آنومالی را کمتر نشان داده است که با توجه به عملکرد خوب آن در بقیه موارد می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. بنابراین بهترین جواب در این مثال تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  می‌باشد.



شکل (۵-۱۷): تصویرهای حاصل از مدل سازی صفحه رسانا با شیب ۳۰ درجه الف) مدل واقعی ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ن) جواب روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

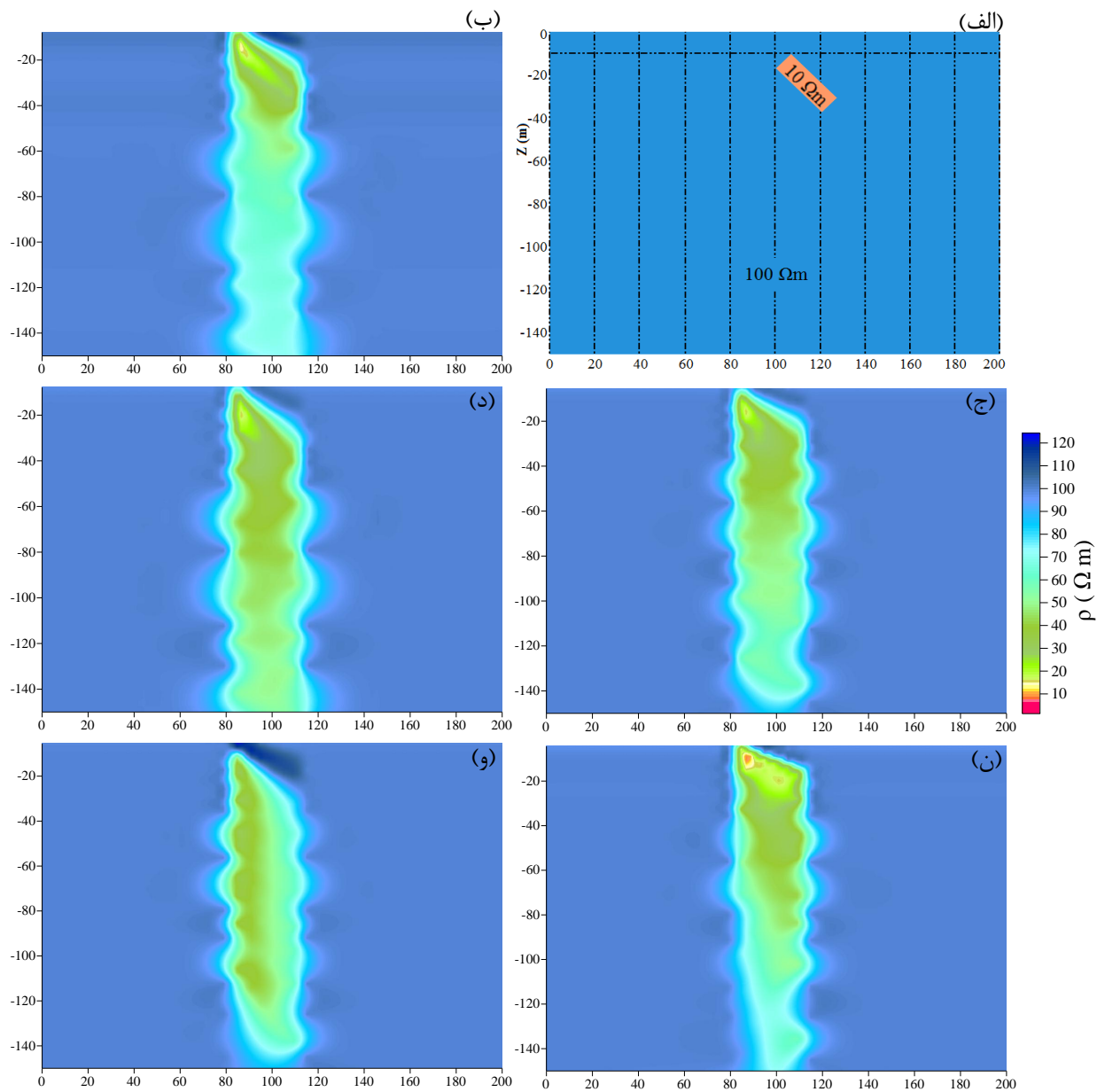
### ج) صفحه رسانای با شیب ۴۵ درجه:

پاسخ بدست آمده مربوط به صفحه رسانا با شیب ۴۵ درجه در شکل (۵-۱۸) به تصویر کشیده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل داریم:

مشابه شکل‌های قبل، روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  بدترین تصویر را از این آنومالی نشان داده؛ این آنومالی در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  به خوبی به تصویر کشیده شده است، شکل‌های مذکور عمق آنومالی را خوب تشخیص داده‌اند. شکل‌های  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  از لحاظ عمق نفوذ و مقادیر مقاومت‌ویژه مشابه شکل قبل است. بخصوص در تشخیص عمق لبه پایینی این صفحه نیز دچار اشتباه شده‌اند. البته شیب آنومالی را درست تشخیص داده‌اند. شکل  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  در تشخیص ضخامت لایه رسانا خوب عمل کرده ولی شیب این آنومالی را خیلی کمتر (۳۰درجه) نشان داده است. این موضوع دوباره بر این مسئله تاکید می‌کند که این روش نسبت به شیب آنومالی حساسیت کمتری دارد و در نشان دادن مقدار شیب ضعیف می‌باشد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  هم‌چنان بهترین جواب را از نظر روند آنومالی دارد؛ ولی تاثیر مقادیر مقاومت‌ویژه آنومالی از زمین در برگیرنده‌اش بیشتر شده به طوری که مقاومت‌ویژه آنومالی در قسمت پایین آن نسبت به شکل قبلی، از مقدار مدل اولیه بیشتر شده است. روش‌های  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  روند (شیب) آنومالی را خوب نشان داده‌اند. این دو روش از لحاظ عمق نفوذ و مقادیر مقاومت‌ویژه نسبت به شکل قبل، بخصوص در تشخیص عمق لبه پایینی این صفحه دچار اشتباه شده‌اند. نکته دیگر که قابل اشاره می‌باشد این است که ناهمگنی شکل  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  با افزایش عمق نسبت به دو شکل قبلی بیشتر شده است.

در یک بررسی کلی می‌توان تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  از نظر روند و تشخیص عمق بهترین دانست و

روش  $\rho_a^\varepsilon(Z_\varepsilon^*)$  را از نظر تعیین پارامتر مقاومت‌ویژه و ضخامت آنومالی بهترین فرض کرد.

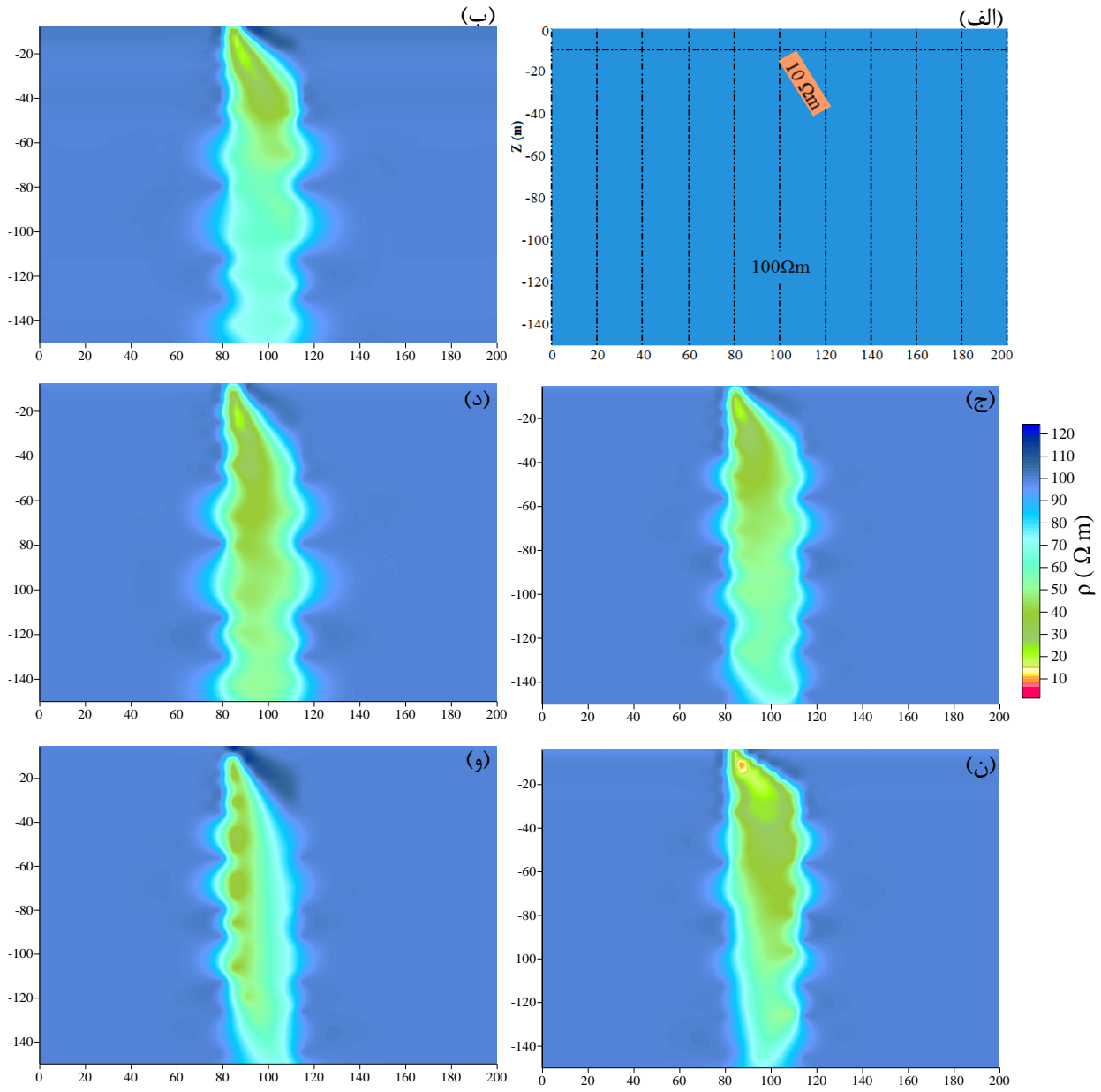


شکل (۵-۱۸): تصویرهای حاصل از مدل سازی صفحه رسانا با شیب ۴۵ درجه الف) مدل واقعی ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ن) جواب روش  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  و جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

(د) صفحه رسانای با شیب ۶۰ درجه:

جواب‌های بدست آمده مربوط به صفحه رسانا با شیب ۶۰ درجه در شکل (۵-۱۹) به تصویر کشیده شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل داریم:

شیب آنومالی نشان داده شده در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ،  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  نسبت به قبل، از دقت کمتری برخوردار است (تقریباً ۵۳ درجه را نشان می‌دهند). بنابراین عمق لبه پایینی آنومالی را پایین‌تر از مقدار مورد انتظار نشان می‌دهند و شکل  $\rho_a^E(Z_e^*)$  نیز شیب ۳۸ درجه را نشان می‌دهد. بقیه مشخصات تقریباً مشابه شکل قبلی می‌باشد. بنابراین از تکرار توضیحات اجتناب می‌شود.



شکل (۵-۱۹): تصویرهای حاصل از مدل سازی صفحه رسانا با شیب ۶۰ درجه الف) مدل واقعی ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ن) جواب روش  $\rho_a(Z_\epsilon^*)$  و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



## ن) صفحه رسانای قائم (شیب ۹۰ درجه):

جواب‌های بدست آمده مربوط به صفحه رسانای قائم در شکل (۵-۲۰) به تصویر کشیده شده است.

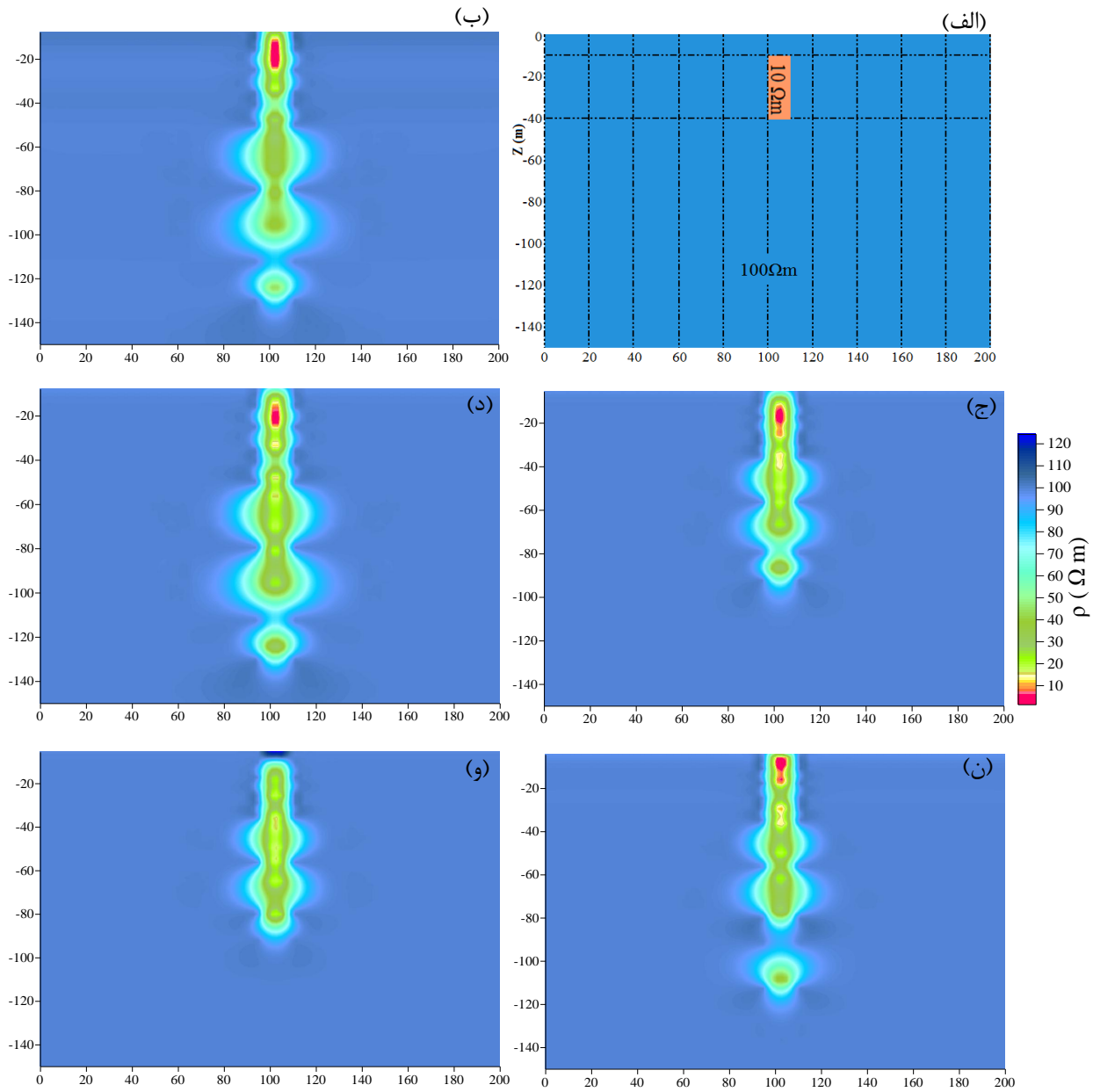
با توجه به نتایج بدست آمده در شکل داریم:

همه شکل‌ها شیب قائم را به خوبی نشان می‌دهند. همه شکل‌ها به جز شکل مربوط به روش

تغییرات عمودی مقاومت ویژه نسبت به تغییرات افقی مقاومت ویژه می‌باشد. تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در این مورد

نسبت به بقیه روش‌ها آنومالی را پیوسته نشان می‌دهد. تاثیرپذیری محیط زمینه از آنومالی مشابه

مدل‌های قبلی در روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  از همه کمتر می‌باشد.



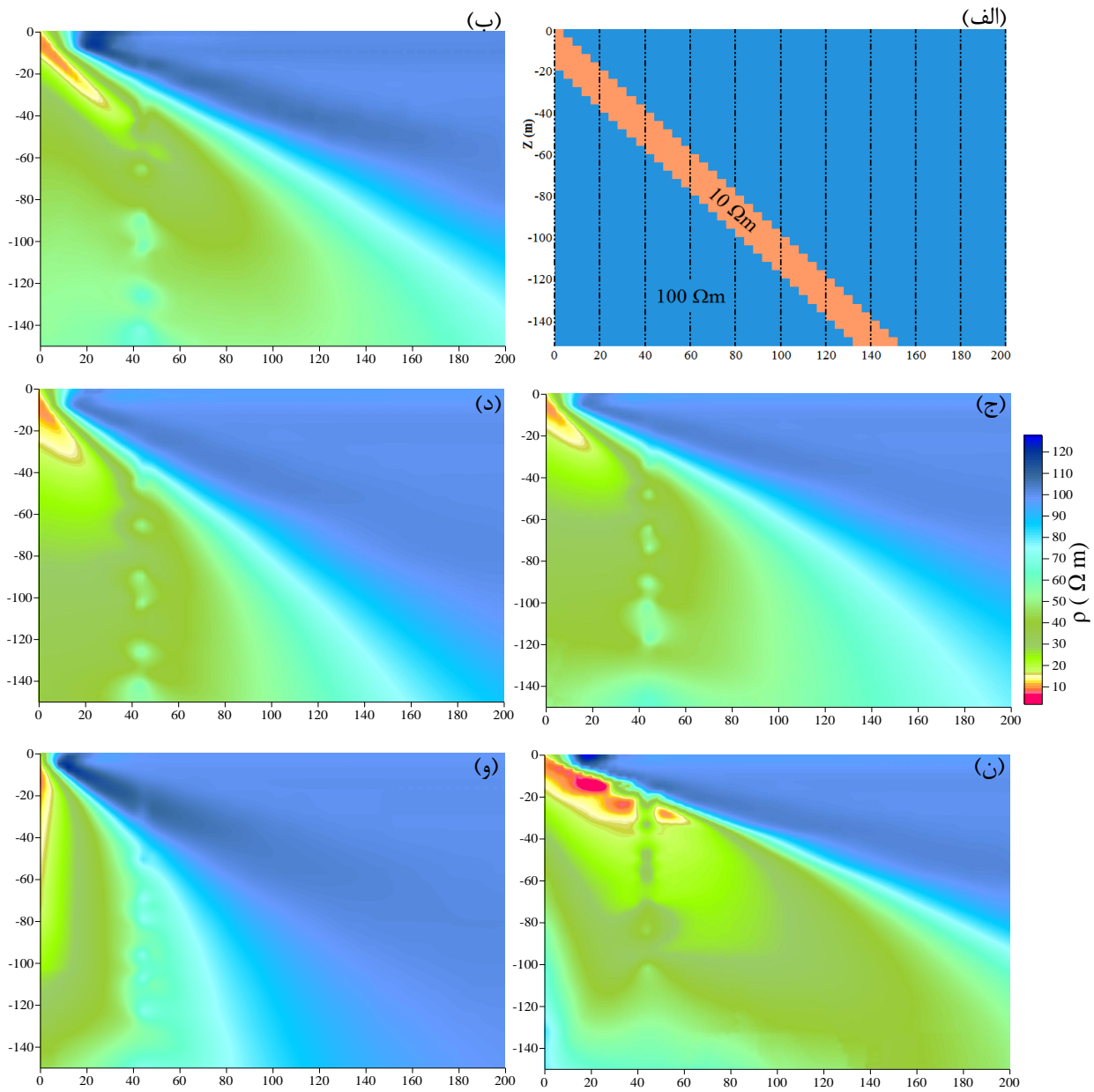
شکل (۵-۲۰): تصویرهای حاصل از مدل‌سازی صفحه رسانای قائم (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$

(ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

### ۵-۳-۲- مدل سازی لایه رسانای شیب دار قرار گرفته در سنگ میزبان مقاوم تر:

در این مدل یک لایه رسانا با مقاومت ویژه  $10 \Omega m$  و ضخامت  $20 m$  با شیب  $45^\circ$  درجه در یک سنگ میزبان با رسانندگی کمتر و با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی این لایه جواب های ۵۱ مدل یک بعدی یک زمین سه لایه کنار هم قرار داده شده و تصویر دوبعدی مربوط به این لایه رسانا بدست آمده است. تصویرهای این لایه در سنگ میزبان به روش های مورد بررسی در این پایان نامه در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده با توجه به شکل ها و بررسی نتایج می توان گفت:

روند سه لایه ای در اعماق کمتر از  $30 m$  متر در همه شکل ها به جز شکل  $\rho_a^A(Z_A^*)$  دیده می شود. شیب این لایه در سه شکل مربوط به  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  تقریباً درست است، اما در شکل مربوط به روش  $\rho_a^E(Z_E^*)$  این شیب کمتر از  $45^\circ$  درجه می باشد. عمق نفوذ تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بیشتر از سایر شکل ها می باشد؛ به طوری که لایه رسانا در عمق  $60$  متری نیز به راحتی قابل تشخیص است. فقط این روش ضخامت این لایه را نازک تر از  $20 m$  تشخیص داده است. روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  مشابه قبل بدترین جواب ها در میان این شکل ها نشان می دهد. در نهایت باز هم تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را می توان بهترین روش معکوس سازی در این مورد دانست. جواب های روش  $\rho_a(Z_s^*)$  و تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  قابل قبولند هر چند عمق نفوذ آنها کمتر از روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  می باشد.



شکل (۵-۲۱): تصویرهای حاصل از مدل سازی لایه رسانای شیب دار (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

### ۵-۳-۳- مدل سازی دایک<sup>۱</sup>:

در این بخش مدل سازی یک دایک مورد بررسی قرار می گیرد. زمین مورد بررسی یک زمین به طول ۲۰۰m می باشد. فاصله ایستگاه ها ۵m در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن تصویر دوبعدی پاسخ های ۴۱ سونداژ یک بعدی کنار هم قرار گرفته است. دایک به دو صورت رسانا و مقاوم بررسی شده است. برای بررسی عملکرد روش ها در اعماق زیاد، دایک به دو شکل محدود و نامحدود فرض شد و همچنین برای بررسی تغییرات جانبی، گستردگی آن در راستای افقی یک بار به اندازه ۵ و بار دیگر به اندازه ۲۰m پیش بینی شد.

#### الف- دایک رسانا در یک محیط بسیار مقاوم:

##### الف-۱- دایک رسانای محدود:

در این قسمت دایک با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  که محیط پیرامون آن یک زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  بود، در نظر گرفته شد. این دایک از عمق ۴۰ متری زمین شروع می شود و تا عمق ۸۰ متری ادامه پیدا می کند. شکل های مدل سازی دایک محدود رسانا با گستردگی ۵m در شکل (۲۲-۵) و شکل های مدل سازی همان دایک با گستردگی ۲۰m در شکل (۲۳-۵) آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این دو شکل می توان گفت:

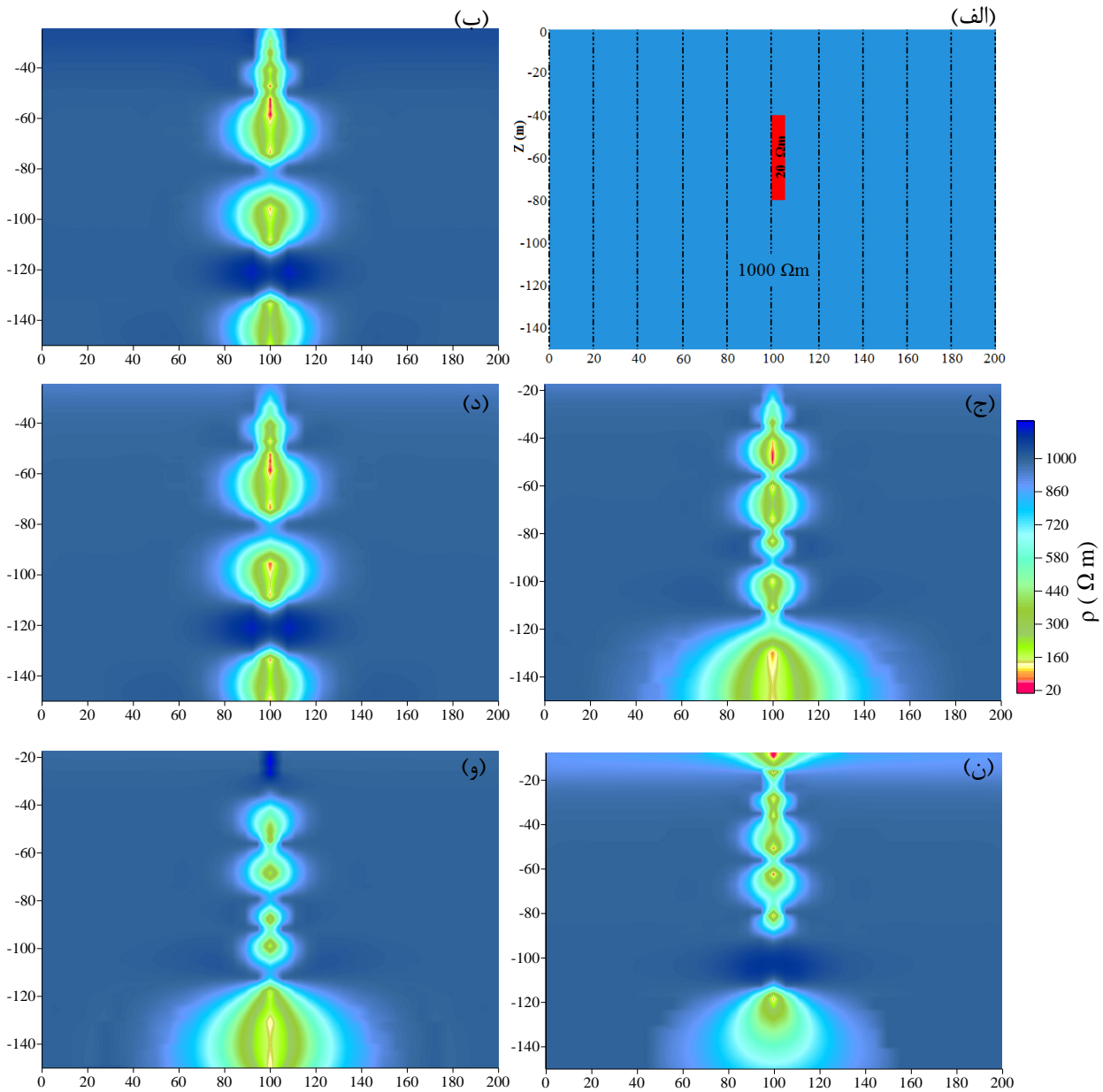
نخست در شکل (۲۲-۵) پاسخ های مربوط به دایک رسانای محدود با گستردگی ۵m مورد بررسی قرار می گیرد. مدل سازی با روش های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  با توجه به نازک بودن این دایک نتایج نسبتاً خوب و قابل قبولی از نظر تشخیص عمق ارائه کرده اند؛ اما در فرکانس های پایین (اعماق زیاد) به جای یکنواخت بودن دچار ناپیوستگی هایی شده اند که این ناپیوستگی در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  به طور وسیع تر در اعماق پایین نمایان شده است هر چند در روش های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  این آشفتگی ها

<sup>۱</sup>. Dike

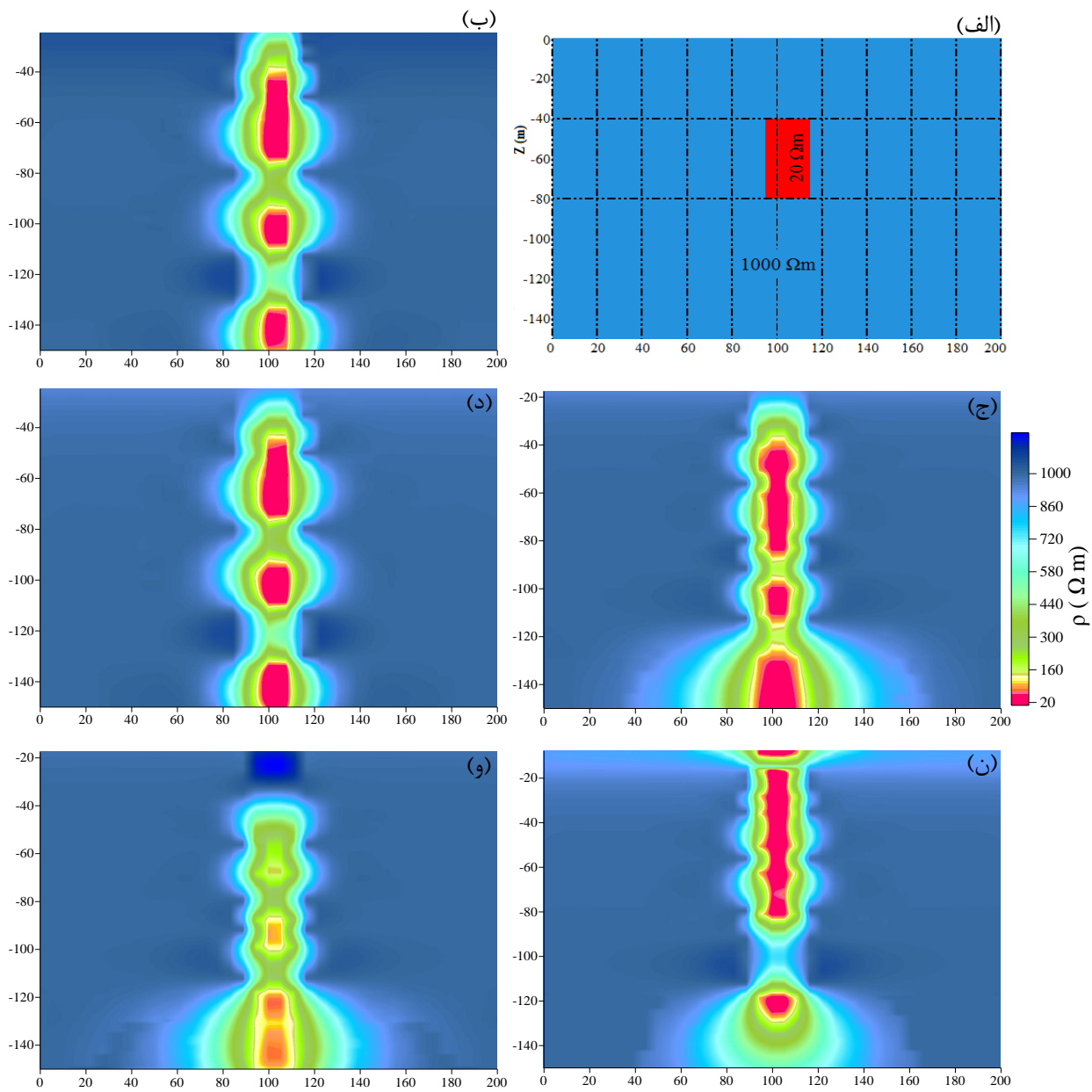
کمر است. این موضوع نشان دهنده این مسئله می‌باشد که این دو تبدیل نسبت به روش  $\rho_a(Z_s^*)$  از عمق نفوذ بیشتری برخوردار می‌باشند و در فرکانس‌های پایین عملکرد بهتری دارند. همچنین در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  دایک به‌طور جانبی تحت تاثیر محیط مقاوم قرار گرفته، به طوری که دایک را به صورت دو آنومالی جدا از هم نشان می‌دهد. دو روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  و  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  در تشخیص عمق لبه بالایی دایک ضعیف عمل کرده‌اند؛ به طوری که  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  آن را بالاتر از ۴۰m نشان داده است و روش  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  عمق آن را خیلی پایین‌تر از ۴۰m نشان داده است. بنابراین در این مورد نمی‌توان به پاسخ‌های این دو روش اعتماد کرد. پاسخ‌های بدست آمده از دو تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را می‌توان بهترین پاسخ‌های بدست آمده در این مدل‌سازی دانست.

حالا به بررسی شکل (۵-۲۳) که مربوط به دایک رسانای محدود با گستردگی ۲۰m می‌باشد می‌پردازیم. با نگاه کلی به شکل‌ها درمی‌یابیم که مقدار مقاومت ویژه مربوط به دایک در همه شکل‌ها بسیار بهبود یافته و به مقدار در نظر گرفته شده در مدل واقعی ( $20 \Omega m$ ) نزدیک شده است. این بهبود پاسخ‌ها به خاطر افزایش گستردگی افقی دایک می‌باشد. ناپیوستگی دایک در عمق ۶۰m در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  رفع شده است. تخمین اشتباه عمق در روش‌های  $\rho_a^A(Z_A^*)$  و  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  تغییری نکرده است. شکل‌های مربوط به روش‌های  $\rho_a(Z_s^*)$ ،  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  تا عمق ۱۰۰m خیلی شبیه هم می‌باشند، البته تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  جواب‌های بسیار خوبی برای مقاومت ویژه دایک بدست آورده است. در اعماق بیشتر دو منحنی  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  نیز جواب‌های بسیار نزدیک هم دارند. ولی آشفتگی (ناهمگنی) جواب‌های عمیق در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  نسبت به دو شکل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  خیلی بیشتر شده است. این موضوع نشان دهنده برتری این دو روش از نظر عمق نفوذ می‌باشد. ضخامت افقی دایک در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  به اندازه ۲۰m نیست ولی با توجه به عملکرد مناسب در پیدا کردن عمق و مقاومت ویژه، می‌توان از آن چشم پوشید. برای معرفی بهترین روش‌ها در این مورد می‌توان تبدیل

$\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  را معرفی کرد. البته روش  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در عمق‌های کمتر از ۱۰۰m چیزی از این دو روش کم ندارد.



شکل (۵-۲۲): تصویرهای حاصل از مدل‌سازی دایک رسانای محدود با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  با گستردگی افقی ۵m (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^E(Z_\varepsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



شکل (۵-۲۳): تصویرهای حاصل از مدل‌سازی دایک رسانای محدود با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  با گستردگی افقی  $20 m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a(Z_\varepsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a(Z_A^*)$



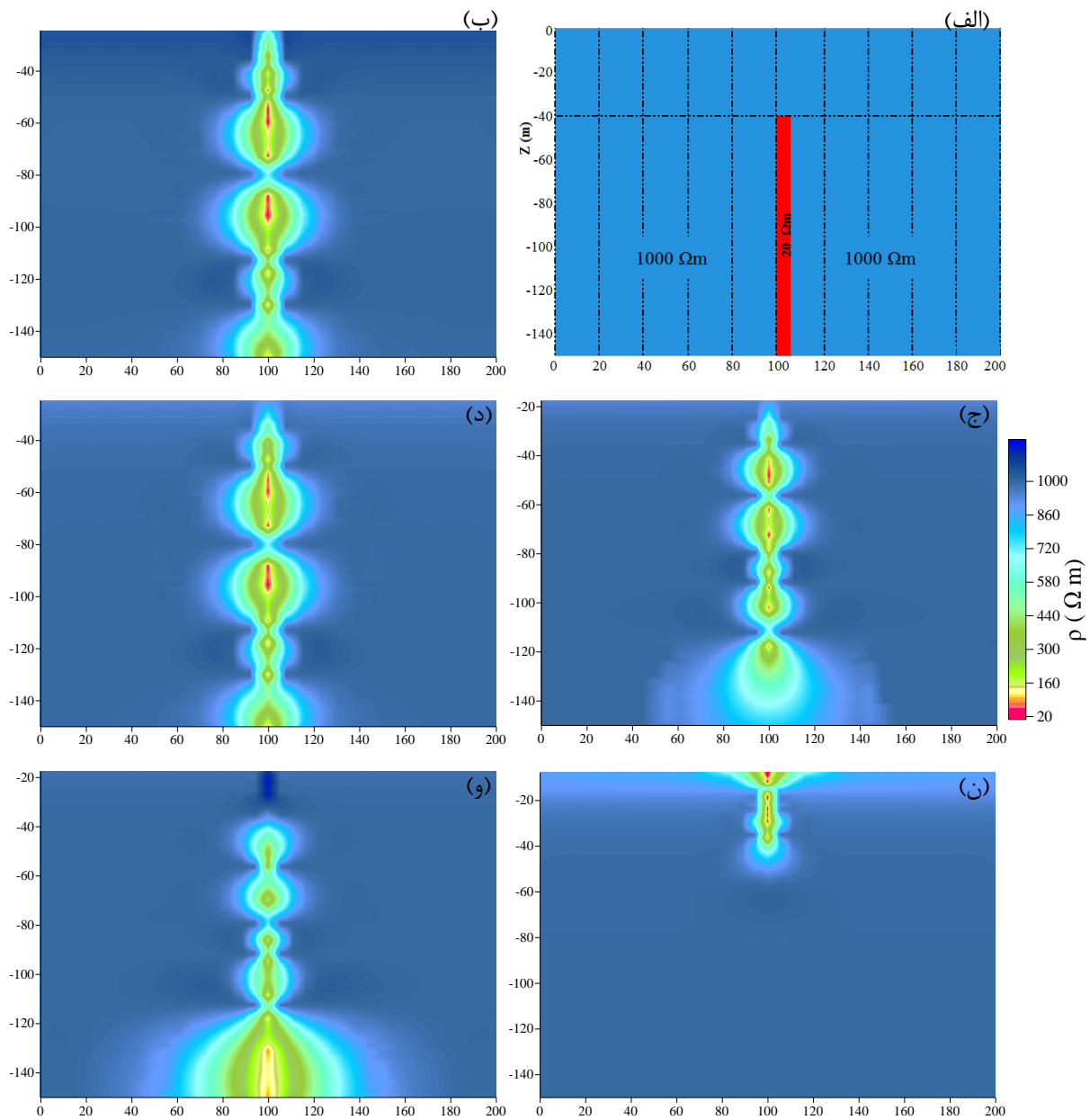
## الف-۲- دایک رسانای نامحدود:

در این بخش یک دایک با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  که محیط پیرامون آن یک زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  قرار دارد، در نظر گرفته شده است. این دایک از عمق ۴۰ متری زمین شروع می‌شود و به طور نامحدود ادامه پیدا می‌کند. برای بررسی دقت روش‌ها، نسبت به گسترش جانبی، گستردگی افقی این دایک یک بار به اندازه ۵m و یک بار به اندازه ۲۰m در نظر گرفته شد. شکل‌های مدل‌سازی دایک نامحدود رسانا با گستردگی ۵m در شکل (۲۴-۵) و شکل‌های مدل‌سازی دایک نامحدود رسانا با گستردگی ۲۰m در شکل (۲۵-۵) آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت:

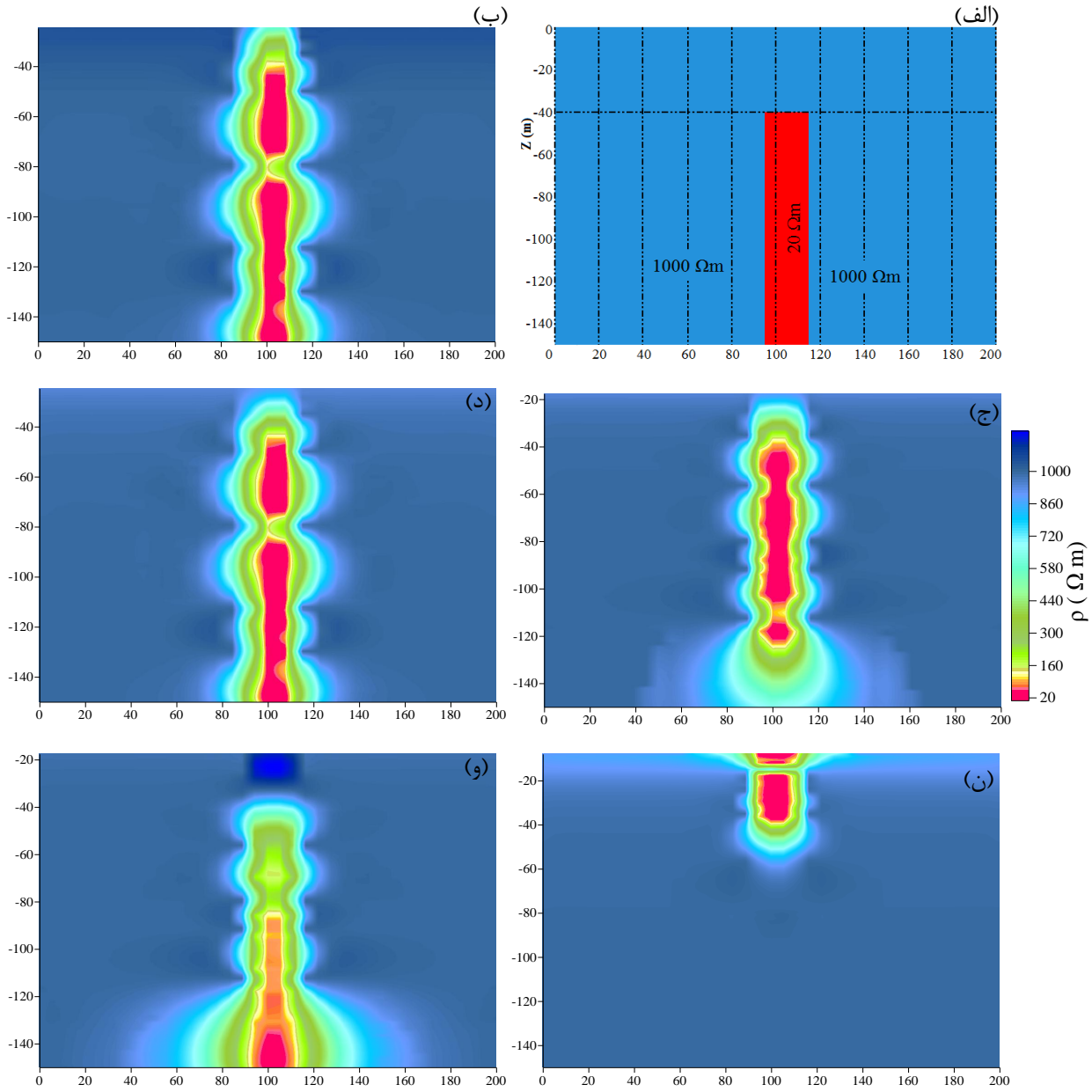
ابتدا جواب‌های (۲۴-۵) که مربوط به دایک رسانای محدود با گستردگی ۵m می‌باشد بررسی می‌شود. نتایج مدل‌سازی با روش‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$ ، با توجه به نازک بودن این دایک، نتایج نسبتاً خوب و قابل قبولی از نظر تشخیص عمق است. در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$ ، اثرات دایک تا اعماق ۱۴۰m هنوز پیداست؛ اما در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  این عمق ۱۲۰m می‌باشد. این موضوع نشان دهنده این مسئله می‌باشد که این دو تبدیل نسبت به روش  $\rho_a(Z_s^*)$  از عمق نفوذ بیشتری برخوردار می‌باشند و در فرکانس‌های پایین عملکرد بهتری دارند. هم‌چنین در شکل  $\rho_a(Z_s^*)$  دایک به طور جانبی تحت تاثیر محیط مقاوم قرار گرفته، به طوری که دایک را به صورت سه آنومالی جدا از هم نشان می‌دهد. این تاثیر در شکل‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  دایک را به صورت دو آنومالی جدا از هم نشان می‌دهد. این موضوع شاید به خاطر ضخامت افقی کم این دایک باشد. البته دو روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  و  $\rho_a^E(Z_E^*)$  در تشخیص عمق لبه بالایی دایک ضعیف عمل کرده‌اند؛ به طوری که  $\rho_a^E(Z_E^*)$  آن را بالاتر از ۴۰m نشان داده است و روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$  عمق آن را خیلی پایین‌تر از ۴۰m نشان داده است. حتی روش  $\rho_a^E(Z_E^*)$  از نمایش نامحدود بودن این دایک ناتوان است. بنابراین در این مورد نمی‌توان به جواب‌های این دو روش اعتماد کرد. جواب‌های بدست آمده از دو تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و

$\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  را می‌توان بهترین جواب‌های بدست آمده در این مدل‌سازی دانست. با این حال چون گستردگی این دایک کم است جواب‌ها در فرکانس‌های پایین در این دو روش هم چندان رضایت بخش نیست.

حالا در شکل (۵-۲۵) به بررسی دایک رسانی نامحدود با گستردگی ۲۰m می‌پردازیم. با نگاه کلی به شکل‌ها دیده می‌شود که مقدار مقاومت ویژه مربوط به دایک در همه شکل‌ها بسیار بهبود یافته و به مقدار در نظر گرفته شده در مدل واقعی ( $20 \Omega m$ ) نزدیک شده است. این بهبود، به خاطر افزایش گستردگی افقی دایک می‌باشد. جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  تا عمق ۱۲۰m بسیار خوب شده است. تخمین اشتباه عمق در روش‌های  $\rho_a^A(Z_A^*)$  و  $\rho_a^E(Z_e^*)$  تغییری نکرده است. شکل‌های مربوط به تبدیل‌های  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ،  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ، تقریباً بر هم منطبق می‌باشند؛ همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، نامحدود بودن دایک بسیار واضح است. البته اگر آشفتگی ناچیزی که در عمق ۷۶m-۸۴m بوجود آمده نادیده گرفته شود. ضخامت افقی دایک در شکل‌های  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ،  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  و  $\rho_a(Z_s^*)$  به اندازه ۲۰m نیست، ولی با توجه به عملکرد خوب در پیدا کردن عمق و مقاومت ویژه، می‌توان از آن چشم پوشید. برای معرفی بهترین روش‌ها در این مورد می‌توان تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  و  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  را معرفی نمود. البته نتایج  $\rho_a(Z_s^*)$  در عمق‌های کمتر از ۱۰۰m مناسب‌تر از دو تبدیل مذکور است.



شکل (۵-۲۴): تصویرهای حاصل از مدل‌سازی دایک رسانای نامحدود با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  با گستردگی افقی  $5m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



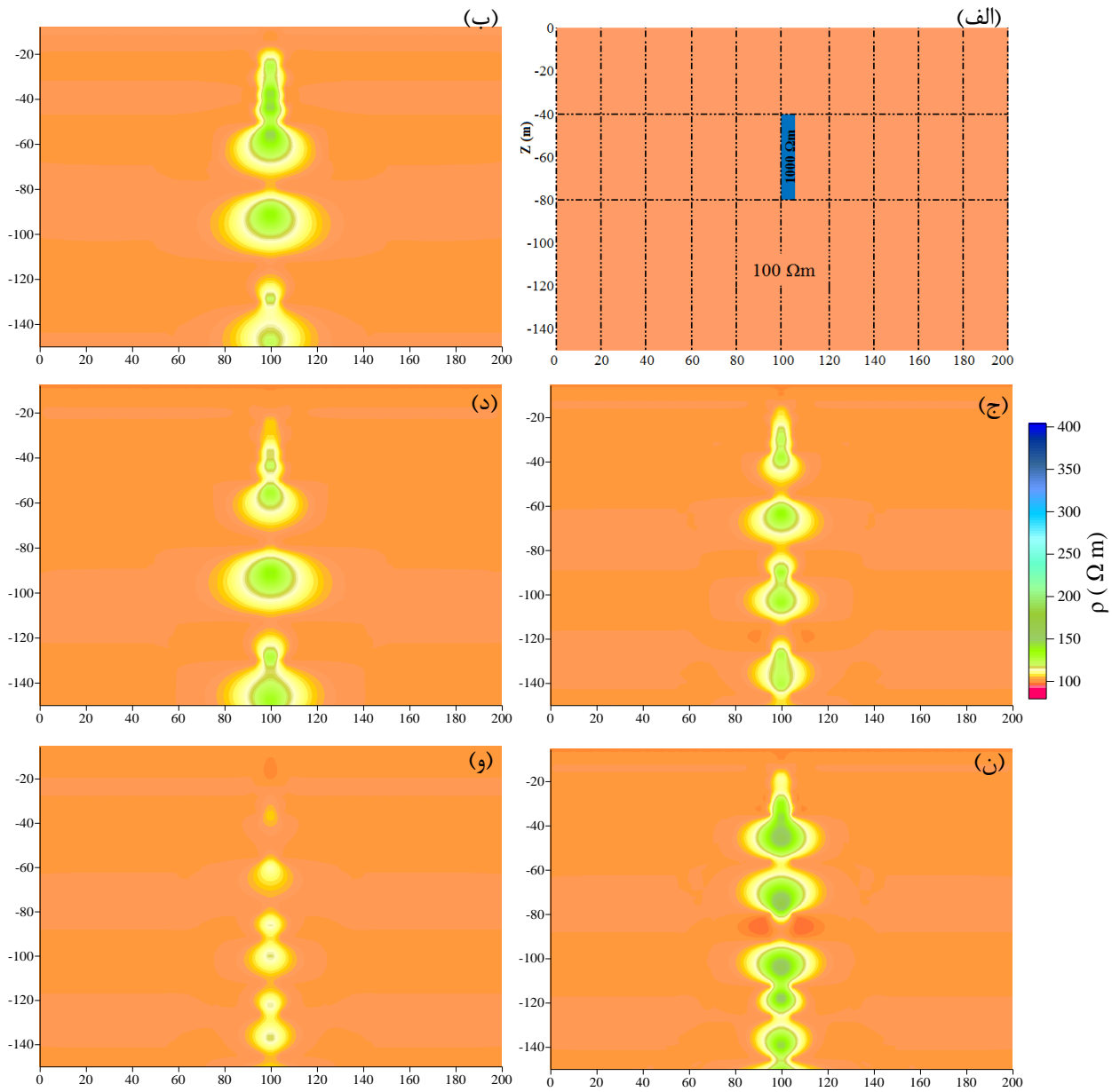
شکل (۵-۲۵): تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک رسانای نامحدود با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  با گستردگی افقی  $20 m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a(Z_\epsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

ب- دایک مقاوم در یک محیط رسانا:

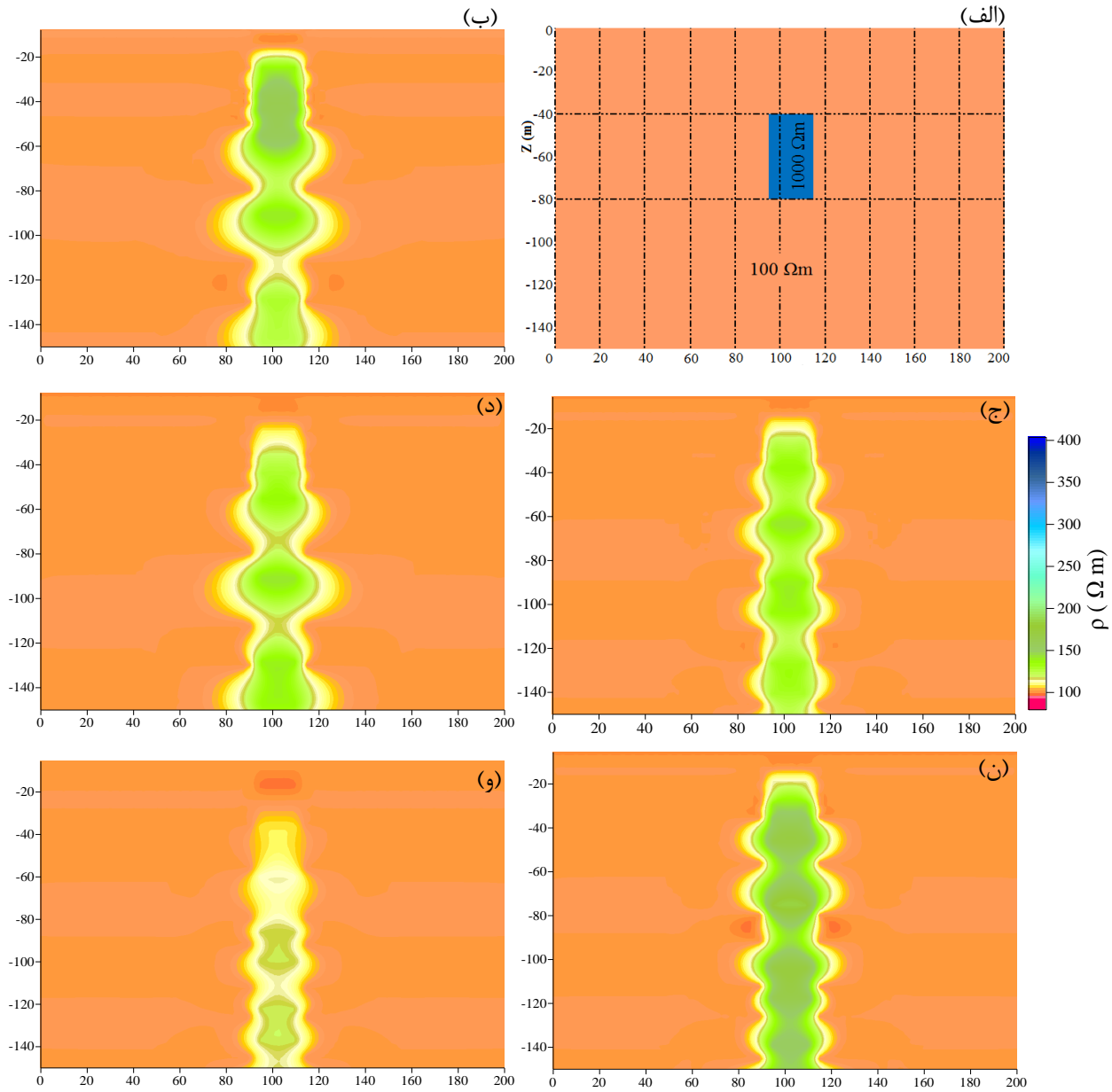
ب-۱- دایک مقاوم محدود:

در این قسمت دایک با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  که محیط پیرامون آن را یک زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  پوشانده، در نظر گرفته شد. این دایک از عمق ۴۰ متری زمین شروع می‌شود و تا عمق ۸۰ متری آن ادامه پیدا می‌کند. برای بررسی دقت روش‌ها نسبت به تغییرات جانبی، گستردگی افقی این دایک را یک بار به اندازه ۵m و بار دیگر به اندازه ۲۰m در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی دایک محدود نارسانا با گستردگی ۵m در شکل (۵-۲۶) و نتایج مدل‌سازی دایک محدود نارسانا با گستردگی ۲۰m در شکل (۵-۲۷) آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این دو شکل می‌توان گفت:

با نگاه به نتایج این روش‌ها در دو شکل فوق‌الذکر و دقت در راهنمای رنگی مشخص است که همه این روش‌ها در نشان دادن مقدار مقاومت ویژه در نظر گرفته شده برای این دایک بسیار ضعیف می‌باشند و هیچ کدام نتوانسته‌اند اختلاف زیاد مقدار مقاومت ویژه بین دایک و محیط پیرامونش را نشان دهند. این مسئله نشان می‌دهد که بر خلاف دایک رسانا ضخامت‌های افقی ۵m و ۲۰m برای پیدا کردن دایکی با این اختلاف مقاومت ویژه کافی نیست و این ضخامت باید خیلی بیشتر باشد. حال می‌توان گفت که در دایک مقاوم با ضخامت ۵ m تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  بهترین مدل می‌باشد و در دایک مقاوم با ضخامت ۲۰m هم باز می‌توان دید که همین تبدیل بهترین است.



شکل (۵-۲۶): تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای محدود با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  با گستردگی افقی  $5m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



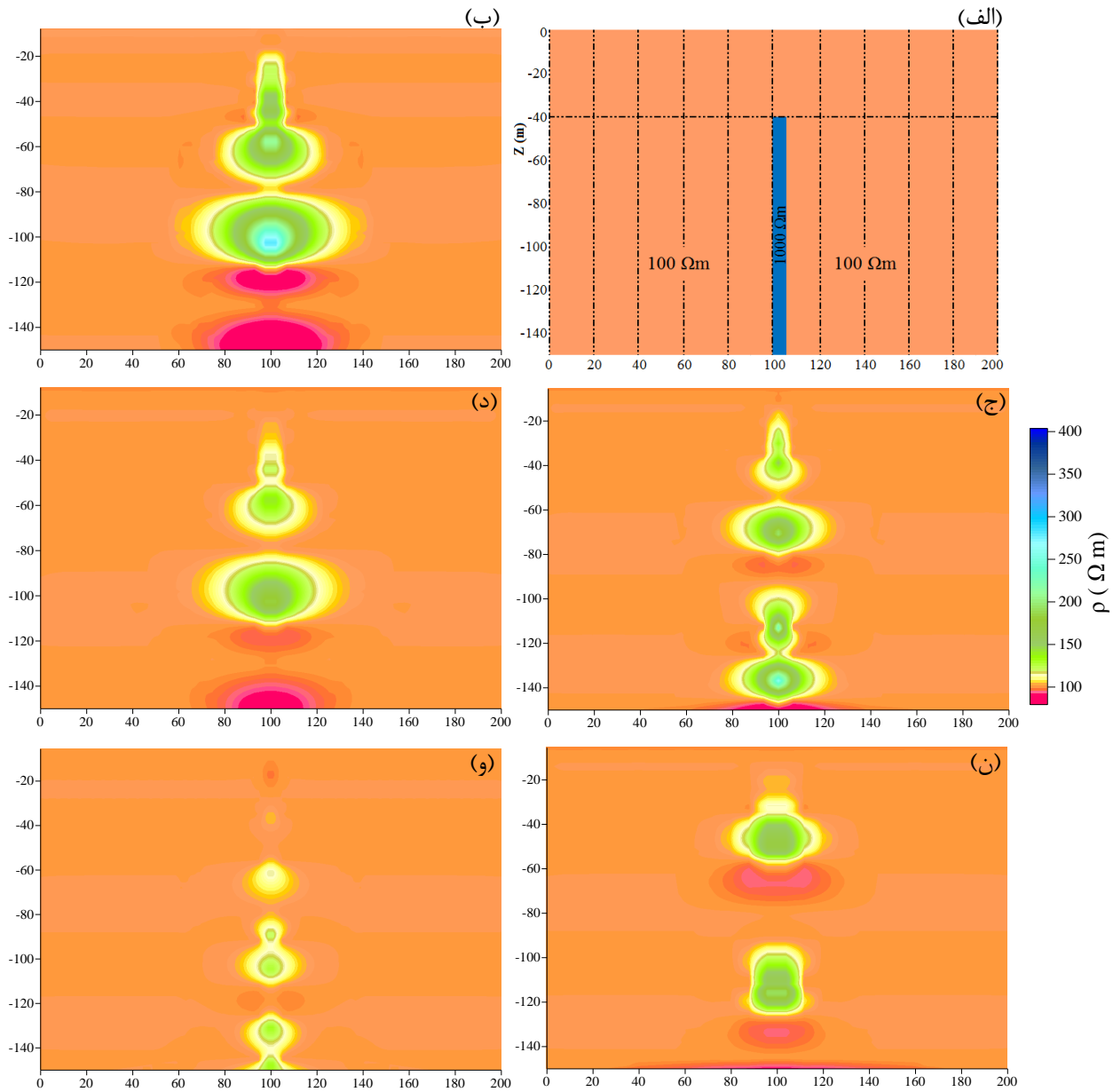
شکل (۵-۲۷): تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای محدود با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  با گستردگی افقی  $20 m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

## ب-۲- دایک مقاوم نامحدود:

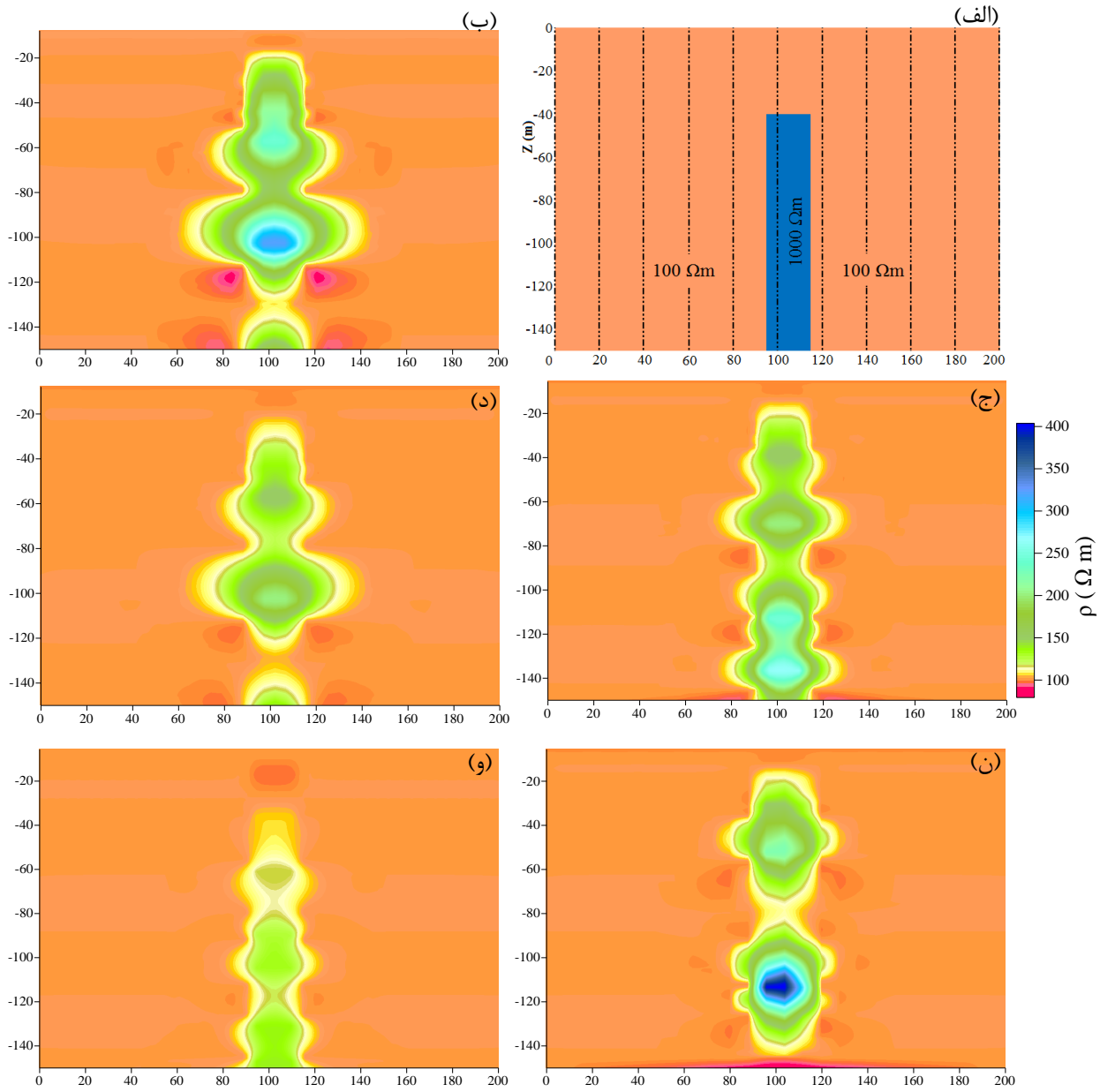
در این قسمت دایک با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  که محیط پیرامون آن یک زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  قرار گرفته، در نظر گرفته شد. این دایک از عمق ۴۰ متری زمین شروع می‌شود و به طور نامحدود ادامه می‌یابد. برای بررسی دقت روش‌ها نسبت به تغییرات جانبی، گستردگی افقی این دایک یک بار به اندازه ۵m و بار دیگر به اندازه ۲۰m در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی دایک نامحدود نارسانا با گستردگی ۵m در شکل (۵-۲۸) و نتایج مدل‌سازی همان دایک با گستردگی ۲۰m در شکل (۵-۲۹) آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این دو شکل می‌توان گفت:

همه این روش‌ها در نشان دادن مقدار مقاومت ویژه در نظر گرفته شده برای این دایک نسبت دایک مقاوم محدود بخصوص در دایک با ضخامت افقی ۲۰m بهتر شده است. این بهبود پاسخ‌ها باید ناشی از نامحدود بودن دایک و افزایش ضخامت افقی آن باشد. نکته قابل توجه دیگر اینکه مقدار مقاومت ویژه دایک در فرکانس‌های پایین نسبت به فرکانس‌های بالا بهتر است.





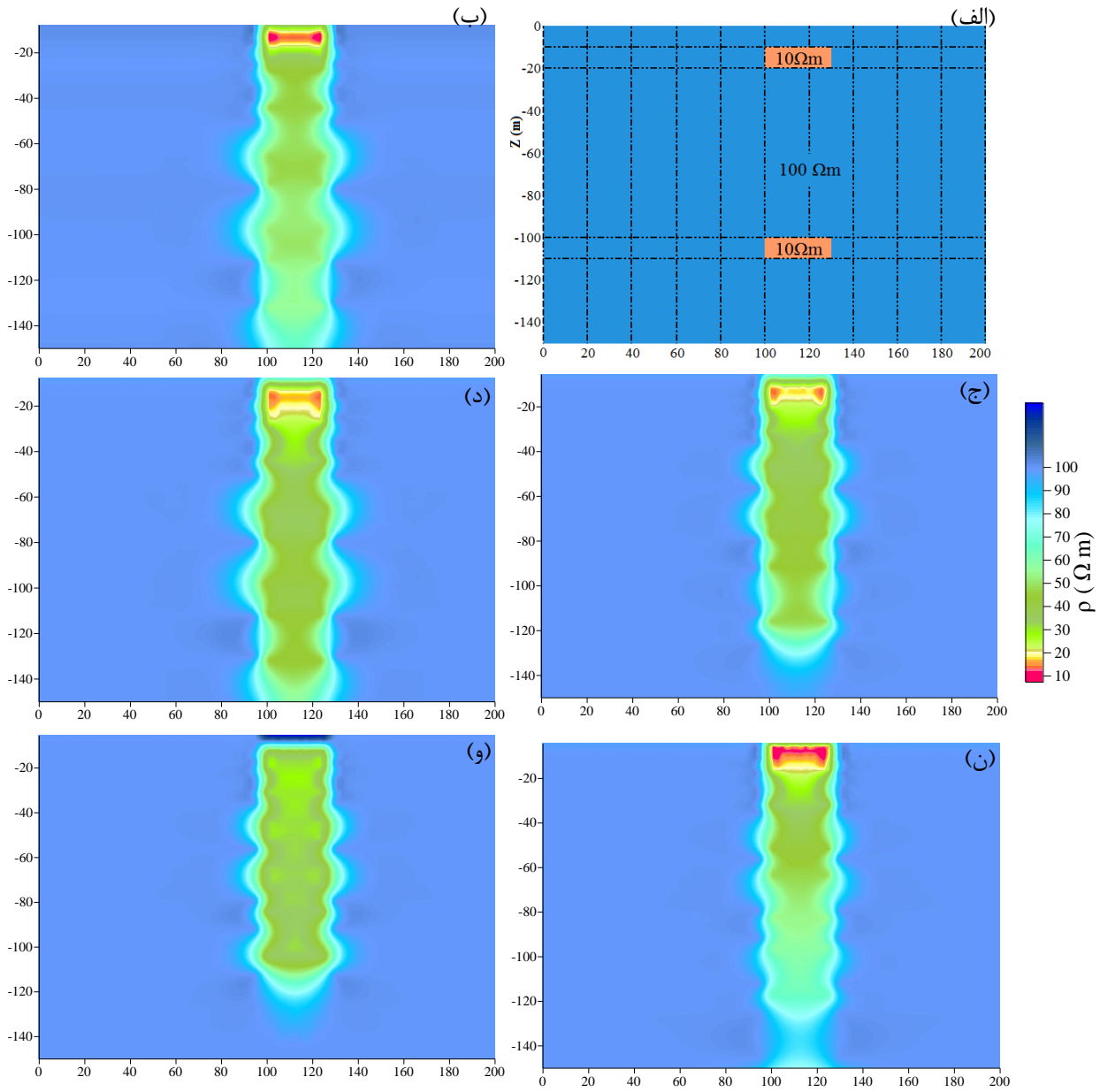
شکل (۵-۲۸): تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای نامحدود با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  با گستردگی افقی  $5m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^e(Z_\varepsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



شکل (۵-۲۹) تصویرهای حاصل از مدل سازی دایک نارسانای نامحدود با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  در زمین رسانا با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  با گستردگی افقی  $20 m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a^\epsilon(Z_\epsilon^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

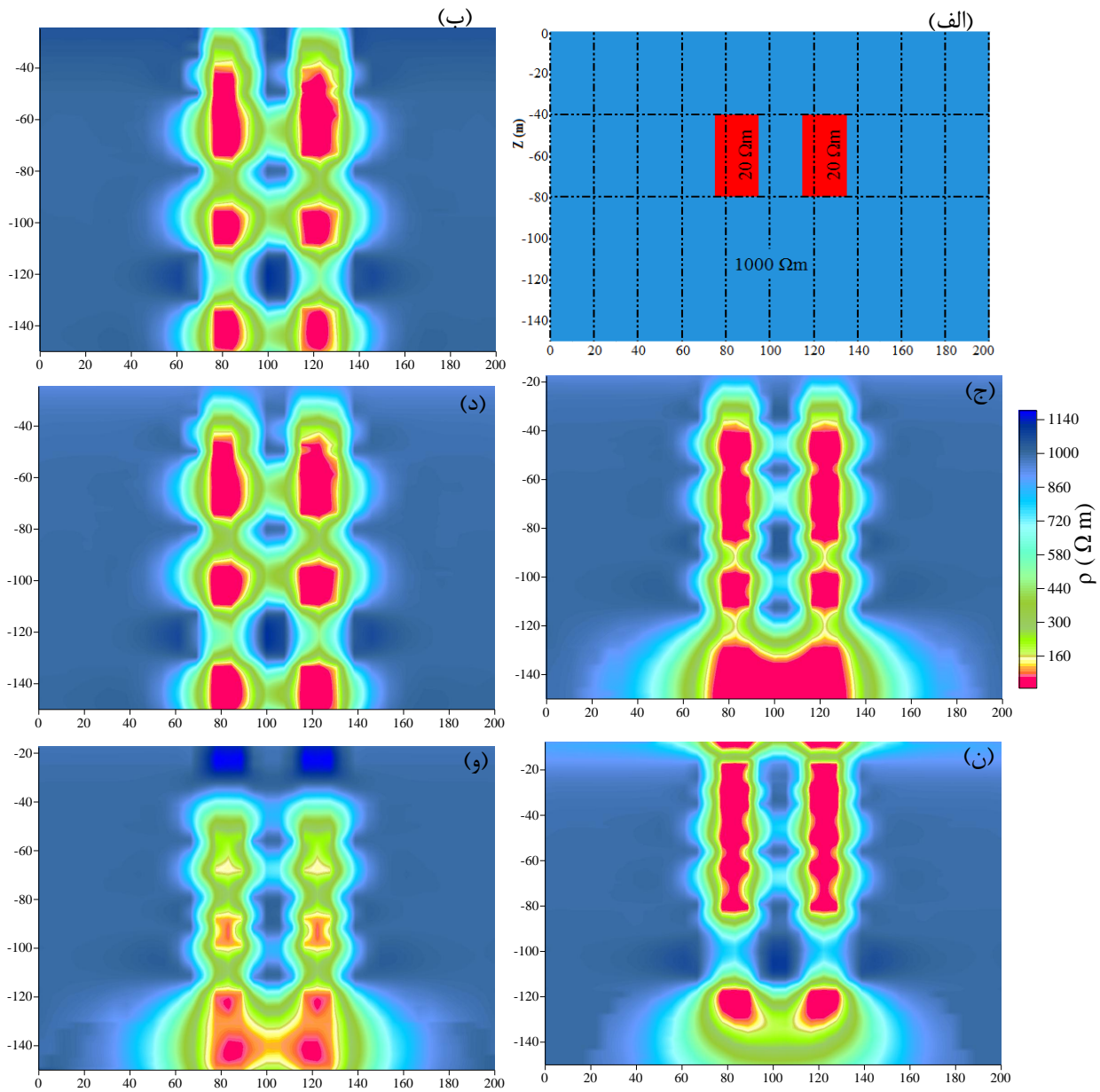
### ۵-۳-۴- مدل سازی دو آنومالی:

در این بخش دو آنومالی به صورت دو صفحه رسانا در زیر هم و دو دایک رسانا در کنار هم در نظر گرفته شد. ارائه این مدل ها برای بررسی حساسیت این روش ها نسبت به تغییرات عمودی و جانبی مقاومت ویژه و توانایی این روش ها در تفکیک آنومالی های مجاور هم می باشد. صفحه های رسانا با شیب صفر، ضخامت  $10\text{m}$ ، گستردگی افقی  $30\text{m}$ ، مقاومت ویژه  $10\ \Omega\text{m}$  و مقاومت ویژه پیرامونی  $1000\ \Omega\text{m}$  در نظر گرفته شدند. یکی از این صفحه ها در عمق  $10$  متری و دیگری در عمق  $100$  متری مدفون می باشد. مدل اولیه و جواب های بدست آمده به روش های مورد نظر در شکل (۵-۳۰) آمده است. با دقت به شکل ها می توان گفت هیچ کدام از این روش ها نتوانسته اند این دو آنومالی را از هم تفکیک کنند و جواب های بدست آمده مشابه مدل دارای یک آنومالی می باشند. هر چند ضخامت این آنومالی نسبت به حالت تک آنومالی (۵-۱۶) ضخیم تر شده و مقادیر مقاومت ویژه نیز به مقدار ایده آل نزدیک تر شده است. البته قابل ذکر است، صفحه پایینی در عمق های کمتر ( $30$  و  $50$  متری) نیز در نظر گرفته شد، که جواب ها به همین شکل بود، لذا از آوردن آنها خودداری شد. در مدل دیگری نیز دو دایک در کنار یکدیگر در نظر گرفته شد، مقاومت ویژه این دایک ها  $20\ \Omega\text{m}$  و مقاومت ویژه محیط پیرامونی آنها  $1000\ \Omega\text{m}$  در نظر گرفته شد. نتایج این مدل در شکل (۵-۳۱) آمده است. همان طور که در شکل ها قابل مشاهده است، این دو دایک در کنار یکدیگر به درستی تشخیص داده شده اند. از این دو شکل نتیجه می شود، که این روش ها نسبت به تغییرات جانبی حساسیت بیشتری دارند و در تغییرات عمودی حساسیتی کمتر از حالت قبل دارند.



شکل (۵-۳۰): حاصل از مدل سازی دو صفحه رسانا با شیب صفر درجه الف) مدل واقعی ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$

ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  ن) جواب روش  $\rho_a^{\epsilon}(Z_{\epsilon}^*)$  و جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$



شکل (۵-۳۱): تصویرهای حاصل از مدل‌سازی دو دایک رسنای محدود با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در زمین بسیار مقاوم با مقاومت ویژه  $1000 \Omega m$  با گستردگی افقی  $20 m$  (الف) مدل واقعی (ب) جواب تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  (ج) جواب روش  $\rho_a(Z_s^*)$  (د) جواب تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  (ن) جواب روش  $\rho_a(Z_e^*)$  (و) جواب روش  $\rho_a^A(Z_A^*)$

## فصل ششم:

### نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

## نتایج:

- با انجام پنج روش از روش‌های معکوس‌سازی تقریبی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری، روش‌های نیم‌فضای لایه کاذب برای معکوس‌سازی تقریبی بسیار بهتر و از خطای کمتری جهت تعیین مرزهای میان نواحی مختلف بودند.
- مزیت اصلی در استفاده از روش‌های ساده تقریبی به جای روش‌های مدل‌سازی معکوس پیچیده و دقیق، سرعت بالا و در عین حال دقت قابل قبول نتایج حاصل از این روش‌ها بود.
- در روش‌های ساده تقریبی نیاز به حدس اولیه برای شروع مدل‌سازی نیست و در نتیجه وابستگی به حدس اولیه از بین می‌رود.
- این روش‌ها در برخورد با لایه‌های بسیار مقاوم ضعیف عمل می‌کنند و توانایی نشان‌دادن این مقاومت‌ویژه‌ها را ندارند.
- روش‌های  $\rho_{NB}(Z_s^*)$ ،  $\rho_a(Z_s^*)$  و  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  در یافتن عمق و مقاومت‌ویژه یک لایه رسانای واقع در بین دو لایه مقاوم، نتایج قابل اعتمادی دارند. همان‌طور که در توضیح مدل‌ها اشاره شد تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  در این مورد بهترین جواب را می‌دهد.
- روش  $\rho_a(Z_s^*)$  و تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  عملکرد تقریباً مشابه هم دارند، البته از لحاظ روند کلی روش  $\rho_a(Z_s^*)$  برتر است و از لحاظ عمق نفوذ تبدیل  $\rho_{SUT}(Z_{SUT}^*)$  موفق‌تر عمل کرده است.
- تمامی روش‌ها هنگامی که زمین مورد مطالعه همگن باشد، جواب یکسانی را ارائه می‌دهند.
- روش  $\rho_a^E(Z_\epsilon^*)$  دارای عمق نفوذ کمی می‌باشد؛ با این وجود برای بدست آوردن یک مدل اولیه جهت معکوس‌سازی با تکرار محاسبات مناسب می‌باشد.

- در میان روش‌های مورد مطالعه بهترین روش جهت معکوس‌سازی تقریبی یک زمین چند لایه روش سیمون بهبود یافته می‌باشد.
- اگر تعداد فرکانس‌های برداشت کم باشد (۳ یا کمتر)، جواب‌های تبدیل  $\rho_{NB}(Z_s^*)$  ضعیف می‌شود، چون در این روش برای محاسبه جواب نسبت به فرکانس دیفرانسیل‌گیری می‌شود و با کم شدن تعداد فرکانس دقت محاسبات کاهش می‌یابد.
- جهت یافتن نتایج بهتر لازم است قبل از معکوس‌سازی تقریبی، داده‌های برداشت شده را تصحیح ارتفاع نمود.

#### پیشنهادات:

- بهتر است روش حل انتگرال ماندری به روش گوپتاسارما و سینگ را با روش‌های حل عددی دیگر مورد مقایسه قرار داد و بهترین نتیجه را به عنوان مبنا جهت محاسبات ریاضی نرم‌افزار به کار برد.
- کد مربوط به روش دیفرانسیلی هوانگ نیز تهیه شود و جواب مدل‌های مصنوعی با این روش‌ها نیز بدست آید؛ تا یک نتیجه کلی و منسجم‌تر در مورد روش‌های تقریبی حاصل شود.
- جهت دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر می‌توان روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر فرایند تکرار محاسبات را هم در مورد مدل‌های مصنوعی مختلف مورد بررسی قرار داد و به مقایسه کلی روش‌های تقریبی و تکرار محاسبات پرداخت.



## منابع:

مرادزاده، علی، ۱۳۸۶ معرفی مختصر روش‌های الکترومغناطیس و کاربردهای آن، جزوه آموزشی.

عرب امیری، علیرضا، ۱۳۸۸، ارائه روشی بهبودیافته جهت مدل‌سازی معکوس داده‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری، رساله دوره دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رجبی، داود، ۱۳۸۷، تعیین مقاومت ویژه ظاهری از روی داده‌های الکترومغناطیس در حوزه فرکانس (سیستم Dighem)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

تمدن، بابک، ۱۳۸۶، مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های الکترومغناطیس هوابرد (سیستم Dighem)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

Davis, A.C., 2007, BSc, MSc, quantitative characterization of airborne electromagnetic systems, a thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctorate of Philosophy, Science, Engineering and Technology RMIT University.

Beamish, D., 2002, The canopy effect in airborne EM, GEOPHYSICS, VOL. 67, NO. 6 (NOVEMBER-DECEMBER 2002); P. 1720–1728, 10 FIGS.  
10.1190/1.1527073

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.

Fugro, 2003, Airborne electromagnetic surveys short course, 2003, Fugro Airborne Surveys Inc.

Fugro, 2005, airborne exploration, The Foundation of Earth Resources and Environmental Mapping, A handbook for non-specialists by Colin Reeves and Sam Bullock.

Guptasarma, D., and Singh, B., 1997, New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms. Geophysical Prospecting, 45, 745-762.

Huang, H., and Fraser, D.C., 1996, The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping: Geophysics, 61 (1), 100–109.

Huang, H., and Fraser, 2003, Inversion of helicopter electromagnetic data to a magnetic conductive layered earth, GEOPHYSICS, 68( 4), 1211–1223

Jones, A.G., 1983. On the equivalence of the ANiblettB and ABostickB transformations in the magnetotelluric method. J. Geophys. 53, 72–73.

Kirsch, r.,2006, Ground water geophysics: A tool for hydrogeology, springer.

Moradzadeh, A., 1998. Electrical imaging of the Adelaide geosyncline using magnetotelluric (MT). Ph.D Thesis, University of south Australia, 334 pp.

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.

Tølbøl, R.J, 2007, The application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetic methods to hydrogeological investigations in Denmark, PhD Dissertation, Department of Earth Sciences Faculty of Science University of Aarhus Denmark.

Ronning, H.J., Kihle, O., Mogaard, J.O., 2003, Forsmark site investigation Helicopter borne geophysics at Forsmark, Osthhammar, Sweden, SKB P-03-41.

Sengpiel, K.P., 1988, Approximate inversion of airborne EM data from a multi-layered ground: *Geophysical Prospecting*, 36, 446-459.

Sengpiel, K.P., and 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., and 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.

**Abstract:**

Airborne electromagnetic surveys are extensively used in mineral exploration, engineering activities, and environmental investigations. These methods measure secondary field induced due to primary field varying with time. Then using this secondary measured field, we determine earth resistivity distribution. In our country these surveys are carried out in recent years. So it is necessary to interpret the results of the surveys. Available methods for interpretation are numerical modeling, approximate inversion and inversion methods with iterative calculation. In attention to results from various methods in helicopter electromagnetic data it is obviously seen that there is not a unique method that can show the depth and resistivity for entire underground models. For this reason more investigation for this purpose is needed.

The purpose of this research is to recognize advantages and disadvantages of available modeling methods in face of different synthetic models and finally choose one or more of them for the best in mentioned models. Approximate methods do not need an initial model for inversion and also are very fast in time. The methods used in this research are phase ratio, amplitude, Siemon, Niblett-Bostick and SUTHEM methods. In forward modeling for calculating complicated integral of earth, GuptaSarma and Singh method is used. The code related these methods is written in GUI with Matlab and a software for inversion prepared is used. Synthetic models involved are in one and two dimensions. One dimensional models are in homogenous half space and layered half space (two, three and four layers). Two dimension models are dipping conductive plate with different dips, dipping conductive layer, resistive and conductive dike (in finite and infinite state) and two anomalies near and under each other.

Resistivity-depth profiles and two-dimensional cross-sections prepared for the above mentioned models. Pseudo-layer half-space method is better for approximate inversion in determining boundary of different areas. We can obtain more reliable results in determining depth and resistivity values using pseudo-layer half-space method. Niblett-Bostick method is the best in this case. Siemon and SUTHEM methods have similar results. The results of the phase ratio method for finite anomalies are better than one-dimensional profiles.

Key words: inverse modeling, frequency domain, helicopter electromagnetic, synthetic data



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**Approximate inverse modeling of frequency domain  
helicopter electromagnetic synthetic data using  
different methods and comparison of the results**

**Hassan Naghipour Avandari**

**Supervisors:**

**Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani**

**Dr. Ali reza Arab-Amiri**

**Advisor:**

**Davood Rajabi**

**Jan 2012**