

رسالة محمد



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد اکتشاف مواد معدنی

اکتشاف ذخایر پلی متال در شمال منطقه بردسکن با مدل سازی و تفسیر داده های  
مقاومت ویژه و قطبش القایی

نگارنده: مهدی دهقانیان

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

دکتر مهدی محمدی ویژه

دی ۱۴۰۰

با احترام تقدیم به

پدرم، کوهی استوار و حامی من در تمام طول زندگی

مادرم، سنگ صبوری که انبساطی زندگی را به من آموخت

و تقدیم به

برادر و خواهرم

که همیشه دوستان دارم و شادی و موفقیتشان را از خداوند سبحان می‌خواهم

## مشکر و قدردانی

خداوند بجان را پسا سگزارم که به بنده حقیر توفیق انجام و اتمام پژوهش حاضر را عنایت فرمود.

در آغاز بر خود لازم می‌دانم از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که راه‌نمایی این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند؛ مشکر نمایم.

از جناب آقای دکتر مهدی محمدی ویژه که استاد مشاور این پایان‌نامه بودند؛ نیز مشکر و قدردانی می‌نمایم. از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده‌اند؛ مشکرم.

و در پایان این پایان‌نامه را تقدیم می‌کنم به خانواده‌ام؛ که با حضورشان و همراهی‌شان، همیشه راه را به من نشان داده و مرا در این راه استوار و ثابت قدم نموده‌اند.

## تعهدنامه

اینجانب مهدی دهقانین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی به منظور اکتشاف ذخایر پلی متال در منطقه کبودان تحت راهنمایی دکتر علیرضا عربامیری و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 بافت های 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 اخلاقی رعایت شده است.

## تاریخ

امضای دانشجو

### 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

امروزه روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل نتایج قابل قبول و هزینه کم و سرعت بالای اجرای آن‌ها کاربرد وسیعی در اکتشاف معادن فلزی دارا می‌باشند. فعالیت‌های اکتشافی در مقیاس‌های متفاوتی صورت می‌گیرند که در نهایت هدف آن‌ها تمرکز بر روی مناطقی است که پتانسیل کانسار شدن را دارند. محدوده مورد مطالعه در شمال روستای کبودان از توابع شهرستان بردسکن و در استان خراسان رضوی واقع می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی بخش قابل توجهی از محدوده را سازند تکنار تشکیل داده است. رخنمون وسیعی از سنگ‌های گرانودیوریتی و گرانیتی در غرب محدوده و همچنین رخنمون‌های کوچکی از سنگ‌های آهکی، اولترابازیک، توف، آندزیت، رادیولاریت، کنگلومرای کرمان در شمال محدوده مشاهده می‌شود. به منظور پی‌جویی ذخایر پلی‌متال از روش‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی با ۶ آرایه مستطیلی و ۹ آرایه دوقطبی-دوقطبی در منطقه برداشت شد. نتایج برداشت‌ها با آرایه مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه، مناطق بی‌هنجار یا رسانا که مستعد کانی‌سازی فلزی بودند، شناسایی شدند و سپس برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی با آرایه دوقطبی-دوقطبی بر روی این مناطق بی‌هنجار انجام شد. به منظور تعیین مقاومت‌ویژه و بارپذیری ساختارهای زیرسطحی و تفسیر نتایج، داده‌های حاصل از برداشت با آرایه دوقطبی-دوقطبی مورد مدل‌سازی وارون قرار گرفته و مقاطع دوبعدی حاصل از مدل‌سازی وارون با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شد و به کمک اطلاعات زمین‌شناسی مورد تفسیر قرار گرفت. مناطق کانه‌زای فلزی با بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه پایین تا متوسط شناسایی شدند که این امر نشان‌دهنده حضور کانی‌های فلزی سولفیدی و غیر سولفیدی در مناطق مذکور است. البته در برخی نقاط به دلیل سیلیسی شدن مناطق کانی‌سازی، مقاومت‌ویژه این نواحی تا اندازه‌ای بالاتر بوده است. با توجه به برداشت‌های IP و مقاومت‌ویژه صورت گرفته در منطقه محدوده‌های شماره ۳ و ۵ از پتانسیل بالاتری نسبت به محدوده‌های ۲، ۴، ۷ برخوردار هستند و دارای بیشترین اهمیت برای کانی‌سازی می‌باشند. با توجه به وجود سنگ‌های شیستی در محدوده‌های ۶ و ۸ بی‌هنجاری‌های IP و مقاومت‌ویژه ناشی از وجود سنگ‌های شیستی در منطقه بوده هر چند شواهدی از کانی‌سازی در این مناطق مشاهده می‌شود ولی از نظر کانی‌سازی از اهمیت بالایی

برخودار نمی‌باشند. در نهایت با حفاری‌های اجرا شده بر روی پروفیل‌های ژئوفیزیکی به جز محدوده شماره

۲ بی‌هنجاری‌های تعیین شده ناشی از حضور کانی‌های فلزی، مورد تأیید قرار گرفت.

### کلمات کلیدی:

قطبش‌القایی (IP)، مقاومت‌ویژه الکتریکی، ذخایر پلی‌متال، آرایه مستطیلی، آرایه دوقطبی-دوقطبی،

بردسکن.

## فهرست مطالب

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه .....	۲
۲-۱ مروری بر کارهای گذشته در رابطه با موضوع تحقیق.....	۳
۳-۱ اهداف و ضرورت انجام پایان نامه .....	۴
۴-۱ ساختار پایان نامه .....	۴
فصل دوم: روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده .....	۷
۱-۲ مقاومت‌ویژه الکتریکی .....	۸
۱-۱-۲ مقدمه .....	۸
۲-۱-۲ اصول روش مقاومت‌ویژه الکتریکی .....	۸
الف) مقاومت‌ویژه و رسانایی الکتریکی .....	۸
۳-۱-۲ رسانندگی و مقاومت‌ویژه کانی‌ها و سنگ‌ها.....	۹
توزیع جریان پیوسته در زمین همگن و همسانگرد.....	۱۳
چیدمان الکترودها .....	۱۷
۳-۱-۲ کاربردهای روش مقاومت‌ویژه.....	۲۱
۴-۱-۲ محدودیت‌های روش مقاومت‌ویژه .....	۲۲
۲-۲ قطبش القایی (IP) .....	۲۳
۱-۲-۲ مقدمه .....	۲۳
۲-۲-۲ عوامل پدید آورنده IP.....	۲۵
پلاریزاسیون الکترودی (فلزی) .....	۲۵
پلاریزاسیون الکترولیتی (غشایی).....	۲۷
۳-۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی .....	۲۹
روش حوزه زمان .....	۳۰
۴-۲-۲ کاربرد روش IP .....	۳۲
۳-۲ عملیات صحرائی .....	۳۳
۱-۳-۲ آرایه‌های الکترودی .....	۳۳
آرایه مستطیلی .....	۳۳
آرایه دوقطبی-دوقطبی .....	۳۴
فصل سوم زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه .....	۳۵

۳۶	۱-۳ مقدمه .....
۳۷	۲-۳ زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه .....
۴۱	۱-۲-۳ منطقه تک اسبی، گذار چهاربخشی تا گذار بارو .....
۴۱	۲-۲-۳ منطقه دامن قر .....
۴۲	۳-۲-۳ منطقه کلاته نوری .....
۴۳	<b>فصل چهارم برداشت صحرایی، مدل‌سازی داده‌های IP و مقاومت‌ویژه، نقاط حفاری شده و تفسیر نتایج .....</b>
۴۴	۱-۴ مقدمه .....
۴۴	۲-۴ نحوه انجام عملیات صحرایی در منطقه .....
۴۵	۳-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۱ .....
۴۵	بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱ .....
۴۷	۴-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۲ .....
۴۸	۱-۴-۴ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲ .....
۵۰	۲-۴-۴ بررسی مقطع B2-DD1 .....
۵۳	۵-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۳ .....
۵۳	۱-۵-۴ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۳ .....
۵۶	۲-۵-۴ بررسی مقطع B3-DD1 .....
۵۹	۳-۵-۴ بررسی مقطع B3-DD2 .....
۶۱	۶-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۴ .....
۶۱	بررسی مقطع B4-DD1 .....
۶۴	۷-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۵ .....
۶۴	۱-۷-۴ بررسی مقطع B5-DD1 .....
۶۷	۲-۷-۴ بررسی مقطع B5-DD2 .....
۷۰	۸-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۶ .....
۷۰	۱-۸-۴ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۶ .....
۷۲	۲-۸-۴ بررسی مقطع B6-DD1 .....
۷۵	۳-۸-۴ بررسی مقطع B6-DD2 .....
۷۸	۹-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۷ .....
۷۸	بررسی مقطع B7-DD1 .....
۸۰	۱۰-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۸ .....
۸۱	بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸ .....

۸۳	..... ۱۱-۴ حفاریهای انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه
۹۱	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۲	..... ۱-۵ مقدمه
۹۲	..... ۲-۵ نتیجه گیری:
۹۳	..... ۳-۵ پیشنهادها:
۹۵	..... منابع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ نمایش مقاومتویژه الکتریکی (الف) و مقاومت(ب)..... ۹
- شکل ۲-۲ چگونگی شارژ جریان و تشکیل سطوح هم پتانسیل در یک زمین همگن و همسانگرد، الف: خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل، ب: تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله..... ۱۴
- شکل ۳-۲: چگونگی توزیع خطوط شارش جریان و تشکیل هم پتانسیل در حالتی که از دو الکتروود جریان نزدیک به هم استفاده می‌شوند..... ۱۶
- شکل ۴-۲: آرایه چهار الکتروودی که در آن الکتروودهای پتانسیل بین الکتروودهای جریان قرار دارند..... ۱۶
- شکل ۵-۲: کسری از جریان که برای فاصله الکتروودی AB در زیر عمق Z..... ۱۷
- شکل ۷-۲: شکل آرایه الکتروودهای مورد استفاده در بررسی‌های الکتریکی..... ۱۹
- شکل ۶-۲: مقاطع سهم سیگنال الف: ونر، ب: شلومبرژه، ج: دوقطبی-دوقطبی..... ۲۰
- شکل ۷-۲: اثر ولتاژ اضافی تولید شده توسط IP..... ۲۴
- شکل ۸-۲: قطبش الکتروودی. (الف) شارش الکتروولیت در یک کانال باز. (ب) پلاریزاسیون دانه رسانا که در کانال ارتباطی سنگ قرار گرفته است..... ۲۶
- شکل ۹-۲ اثرات ماکروسکوپییک قطبش دانه بر روی یک سنگ معدن منتشر شده..... ۲۷
- شکل ۱۰-۲ چگونگی گسترش پلاریزاسیون غشایی، (الف) تنگشدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی، (ب) بار منفی ذرات رس و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی..... ۲۹
- شکل ۱۱-۲ اندازه‌گیری IP در روش زمان-حوزه‌های، (الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارش و تخلیه و تغییرات جریان تزریقی، (ب) پارامتر پلاریزاسیون ظاهری، (ج) پارامتر بارپذیری..... ۳۱
- شکل ۱۲-۲: افزایش زمان شارژ (کاهش فرکانس) موجب افزایش ولتاژ اضافی می‌شود..... ۳۲
- شکل ۱۳-۲: شمائی از آرایه مستطیلی..... ۳۳
- شکل ۱۴-۲: شمائی از آرایه دوقطبی-دوقطبی..... ۳۴
- شکل ۱-۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن..... ۳۶
- شکل ۲-۳: نقشه زمین شناسی ساختاری ایران که محدوده مورد مطالعه با دایره مشخص شده است..... ۳۷
- شکل ۳-۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۳۹
- نقشه ۱-۴: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱..... ۴۶
- نقشه ۲-۴: نقشه مقاومتویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱..... ۴۷
- نقشه ۳-۴: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲..... ۴۸
- نقشه ۴-۴: نقشه مقاومتویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲..... ۴۹
- نقشه ۵-۴-الف: شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومتویژه برای پروفیل ۲۲۵ شرقی (B2-DD1)..... ۵۱
- نقشه ۵-۴-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل ۲۲۵ شرقی (B2-DD1)..... ۵۲
- نقشه ۵-۴-ج: مقاطع دوبعدی مقاومتویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B2-DD1..... ۵۲
- نقشه ۶-۴: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۳..... ۵۴
- نقشه ۸-۴-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومتویژه برای پروفیل B3-DD1..... ۵۷
- نقشه ۸-۴-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B3-DD1..... ۵۸
- نقشه ۸-۴-ج: مقاطع دوبعدی مقاومتویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B3-DD1..... ۵۸
- نقشه ۹-۴-الف: شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومتویژه برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2)..... ۶۰
- نقشه ۹-۴-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2)..... ۶۰

- نقشه ۴-۹-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2) ..... ۶۱
- نقشه ۴-۱۰-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B4-DD1 ..... ۶۴
- نقشه ۴-۱۱-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B5-DD1 ..... ۶۶
- نقشه ۴-۱۱-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B5-DD1 ..... ۶۷
- نقشه ۴-۱۲-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل B5-DD2 ..... ۶۸
- نقشه ۴-۱۲-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B5-DD2 ..... ۶۹
- نقشه ۴-۱۳: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۶ ..... ۷۱
- نقشه ۴-۱۵-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل ۵۰ شرقی B6-DD1 ..... ۷۳
- نقشه ۴-۱۵-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل ۵۰ شرقی B6-DD1 ..... ۷۴
- نقشه ۴-۱۶-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل B6-DD2 ..... ۷۶
- نقشه ۴-۱۶-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B6-DD2 ..... ۷۷
- نقشه ۴-۱۷-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه پروفیل B7-DD1 ..... ۷۹
- نقشه ۴-۱۷-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری پروفیل B7-DD1 ..... ۸۰
- نقشه ۴-۱۷-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی پروفیل B7-DD1 ..... ۸۰
- نقشه ۴-۱۸: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸ ..... ۸۲
- نقشه ۴-۱۹: نقشه مقاومت‌ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸ ..... ۸۳
- نقشه ۴-۲۰: مختصات نقاط حفاری در نرم‌افزار Voxler 4 ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۱: کانی‌سازی مس در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۲: کانی‌سازی سرب در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۳: کانی‌سازی روی در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۴: کانی‌سازی طلا در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب pbb ..... ۸۹
- شکل ۵-۱: محدوده پیشنهاد شده برای طراحی یک آرایه مستطیلی بر روی نقشه بارپذیری در محدوده شماره ۸ ..... ۹۳
- شکل ۵-۲: نقطه حفاری پیشنهاد شده بر روی منطقه ۳ پروفیل شماره ۲ ..... ۹۴

## فهرست جداول

جدول ۱-۲: مقاومت ویژه الکتریکی مواد معدنی و سنگ‌ها.....	۱۲
جدول ۲-۲ - مقایسه آرایه‌های ونر، شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی و مربعی.....	۲۱
جدول ۱-۳: مختصات رئوس محدوده اکتشافی.....	۳۶
جدول ۱-۴: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۲.....	۵۱
جدول ۲-۴: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۳.....	۵۷
جدول ۳-۴: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۴.....	۶۳
جدول ۴-۴: مشخصات نقاط حفاری در محدوده ۵.....	۶۵
جدول ۵-۴: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۷.....	۷۹
جدول ۶-۴: مشخصات نقاط حفاری صورت گرفته در منطقه.....	۸۴

## فصل اول کلیات

## ۱-۱ مقدمه

اکتشافات ژئوفیزیکی بخشی از روش‌های ژئوفیزیکی است که برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی اجسام یا سنگ‌ها استفاده می‌شود و به ویژه، برای تشخیص تفاوت‌های قابل اندازه‌گیری بین سنگ‌ها بدون ذخایر معدنی یا هیدروکربن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ژئوفیزیک اکتشافی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های زیرسطحی برای اکتشاف ذخایر پنهان شده در زیر سطح زمین می‌توان استفاده کرد [Gadallah and Fisher, 2009]. شناسایی تضادها در خواص فیزیکی مختلف مواد اساس روش‌های ژئوفیزیکی است [Telford and Geldart, 1990]. در یک کانسار معدنی، اکتشاف به ویژگی‌های فیزیکی هدف و محیط زمین‌شناسی سنگ همراه آن و حتی به روش ژئوفیزیکی مورد استفاده و توپوگرافی آن نیز بستگی دارد. در بسیاری از موارد، برای دستیابی به نتایج مشخص‌تر، ادغام روش‌ها ضروری است [Mostafaie and Ramazi, 2013]. به دلیل بهینه‌سازی هزینه و زمان، اخیراً کاربرد روش‌های اکتشافات ژئوفیزیکی در اکتشافات معدنی افزایش یافته است. روش‌های یکپارچه ژئوفیزیکی معمولاً در اکتشافات معدنی برای به دست آوردن نتایج واجد شرایط استفاده می‌شود [Mostafaie and Ramazi, 2015]. در اکتشافات معدنی، ابزارهای ژئوفیزیکی شامل تکنیک‌های مختلف مانند قطبش‌القایی (IP) و مقاومت‌ویژه الکتریکی روش‌های مهمی هستند [Sultan et al., 2009]. روش‌های IP و مقاومت‌ویژه از جمله روش‌های ژئوفیزیک مورد استفاده در مطالعه زیرسطحی برای ارزیابی پتانسیل اکتشاف مواد معدنی است. اهداف روش‌های IP و مقاومت‌ویژه انتخاب بهترین نقاط حفاری برای اهداف اکتشافی است [Ferdows and Ramazi, 2015]. به دلیل هزینه کم و زمان کارکرد آن و همچنین آسیب‌های محدود آن به محیط زیست، ترکیبی از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه الکتریکی به طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف اکتشاف مواد معدنی مانند اکتشاف ذخایر پلی‌متال در چین مورد استفاده قرار گرفته است [Jin et al., 2008].

## ۱-۲ مروری بر کارهای گذشته در رابطه با موضوع تحقیق

بر روی ذخایر پلی‌متال با دو روش مقاومت‌ویژه و IP در دنیا و ایران مطالعات فراوانی صورت گرفته است؛ که در اینجا به دلیل رعایت اختصار تنها به چند مورد آن اشاره شده است.

در سال ۲۰۲۱ جمالی و همکاران در محدوده کبودان واقع در شهرستان بردسکن عملیات ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP به‌منظور اکتشاف ذخایر پلی‌متال صورت پذیرفت که منجر به آشکارسازی چند ناحیه مستعد کانی‌سازی گردید [Jamali et al., 2021].

در سال ۲۰۱۶ توکلی و همکاران داده‌های IP حاصل از ۳ پروفیل و یک بررسی ۳ بعدی در ناحیه مرکزی اسکلفت در شمال سوئد را مورد بررسی قرار داده و چندین ناحیه با شارژپذیری بالا و مقاومت‌ویژه پایین به عنوان کانی‌سازی ماسیوسولفاید و دگرسانی هیدروترمال مرتبط با آن را شناسایی کردند [Tavakoli et al., 2016].

در سال ۲۰۱۶ هان<sup>۱</sup> و همکاران در منطقه معدنی سئونگسان<sup>۲</sup> از روش IP و مقاومت‌ویژه به‌منظور اکتشاف ذخایر اپی‌ترمال با سولفید کم استفاده کردند و در نتیجه محدوده سیلیسی شده و مناطق کانی‌زایی شناسایی شدند [Han et al., 2016].

در سال ۲۰۱۵ یاسمی و قادری در شرق شهرستان زنجان، کانسار چودرچای با استفاده از روش IP و مقاومت‌ویژه، عمق و گسترش کانه‌زایی مس موجود در منطقه را مشخص کردند [Yasami and Ghaderi, 2015].

در سال ۲۰۱۴ علی‌لو و همکاران در منطقه چند فلزی حلب شهرستان زنجان با ترکیب روش مغناطیس‌سنجی و IP و مقاومت‌ویژه ابتدا مکان کانی‌زایی و روند آن را تشخیص داده و با روش IP شیب و ضخامت کانی‌زایی در عمق را تشخیص دادند [Alilou et al., 2014].

---

<sup>1</sup> Han

<sup>2</sup> seongsan

در سال ۲۰۱۲ بری<sup>۱</sup> و همکاران در پاگو مالزی با روش IP حوزه زمان و مقاومت ویژه الکتریکی به اکتشاف سنگ آهن پرداختند که در این مطالعه نتایج قابل اطمینانی برای مناطق احتمالی برای اکتشاف سنگ آهن فراهم آورده است [Bery et al., 2012].

### ۱-۳ اهداف و ضرورت انجام پایان نامه

به منظور اکتشاف ارزان و سریع مناطق مستعد کانی‌سازی و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و وجود کانی‌های سولفیدی و فلزی در محدوده می‌توان از اکتشافات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP بهره برد. در نهایت به وسیله نرم‌افزارهای مربوطه و تفسیر، محل‌های مستعد کانی‌سازی مشخص شده تا در مراحل بعدی اکتشاف این نتایج مفید و کاربردی باشند. اکتشاف ناکافی یا غیرتخصصی مواد معدنی باعث شده که در طول سالیان گذشته معادن بزرگ کمتری یافت شود و این موضوع به‌تنهایی باعث ترسیم افقی مبهم در بخش معدن ایران شده است. در کنار این معضل، استفاده ناصحیح از تکنولوژی‌ها نیز به بخش اکتشافات ضربات سنگینی زده و هزینه‌های زیادی را به آن تحمیل کرده است. این در حالی است که معادن ایران از زیربنای استواری برخوردارند و متخصصان معتقدند بخش بسیار کوچکی از حجم عظیم معادن کشور کشف شده است.

### ۱-۴ ساختار پایان نامه

پایان‌نامه حاضر از ۵ فصل تشکیل شده است. فصل اول کلیاتی در مورد روش‌های ژئوفیزیکی، مروری بر مطالب گذشته و اهداف پایان‌نامه می‌باشد. فصل دوم مروری است بر مبنای روش‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP که در انجام این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته همچنین در آخر به معرفی آرایه‌های الکترودی استفاده شده در کارهای صحرائی پرداخته شده است. در فصل سوم زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و در فصل چهارم عملیات برداشت صحرائی و تحلیل و بررسی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP و شناسایی مناطق امیدبخش و حفاری به‌منظور

---

<sup>11</sup> Bery

تأیید بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی صورت‌گرفته و در فصل پایانی نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده و پیشنهاد‌های لازم ارائه شده است.



## فصل دوم: روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده

## ۱-۲ مقاومت ویژه الکتریکی

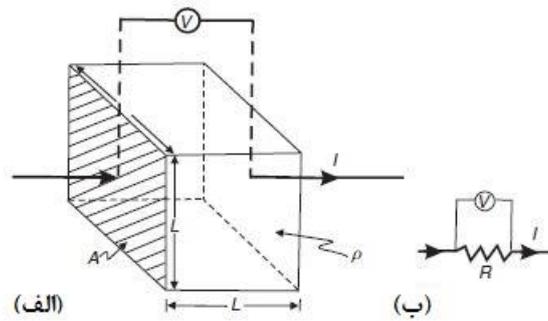
### ۱-۱-۲ مقدمه

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ توسعه یافته‌اند؛ اما از دهه ۱۹۷۰ بسیار بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دلیل اصلی این امر وجود کامپیوتر برای پردازش و تحلیل داده‌ها است. این روش‌ها به طور گسترده‌ای مناسب برای جستجوی منابع آب زیرزمینی و همچنین برای نظارت بر انواع آلودگی‌های آب زیرزمینی استفاده می‌شود. در بررسی‌های مهندسی برای تعیین حفره‌های زیرسطح، گسل‌ها و شکاف‌ها، یخ‌زارها، چاه‌های معدنی و ... و در باستان‌شناسی برای شناسایی محدوده بقایای مدفون بناهای باستانی و همچنین از کاربردهای دیگر از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، اندازه‌گیری مقاومت ویژه درون چاهی به ویژه در زمینه اکتشاف نفت استفاده می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی یک ویژگی فیزیکی تشخیصی و اساسی است که می‌تواند با انواع مختلفی از روش‌ها از جمله القای الکترومغناطیسی شناسایی شود. وجود روش‌های جایگزین برای تعیین ویژگی یکسان بسیار مفید است، زیرا برخی از روش‌ها در برخی شرایط به طور مستقیم بیشتر از سایر موارد کاربردی یا قابل اجرا هستند. علاوه بر این، روش‌های مورد استفاده برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی ممکن است کاملاً متمایز باشند - به عنوان مثال، روش‌های تماسی با زمین در مقایسه با تکنیک‌های القاء هوابرد. تفاسیر مستقل اما سازگار به تفسیرکننده اطمینان بیشتری می‌دهد که مدل به دست آمده تقریب خوبی از زیر سطح زمین است [Reynolds, 2011].

### ۲-۱-۲ اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی

#### الف) مقاومت ویژه و رسانایی الکتریکی

یک مکعب یکنواخت با طول جانبی  $L$  را در نظر بگیرید که از طریق آن یک جریان  $I$  در حال عبور است (شکل ۱-۲). ماده درون مکعب در برابر انتقال الکتریسیته از طریق آن مقاومت می‌کند و منجر به افت پتانسیل  $V$  بین صفحات مخالف می‌شود.



شکل ۱-۲ نمایش مقاومت ویژه الکتریکی (الف) و مقاومت (ب) [Reynolds, 2011]

مقاومت الکتریکی در رابطه اهم<sup>۱</sup> متناسب با نسبت طول سیم ( $l$ ) به سطح مقطع ( $S$ ) آن می‌باشد.

$$R = \rho(l/S) \quad (1-2)$$

ضریب تناسب  $\rho$ ، بیانگر خاصیت الکتریکی مواد سازنده سیم است. واحد این ضریب که مقاومت ویژه نامیده می‌شود، در صورتی که  $R$  بر حسب اهم،  $l$  بر حسب متر و  $S$  بر حسب مترمربع بیان شود، اهم متر<sup>۲</sup> است. بنا به تعریف یک اهم متر عبارت است از مقاومت الکتریکی یک رسانا به طول یک متر و سطح مقطع یک مترمربع. عکس مقاومت ویژه، رسانندگی نام دارد و با  $\sigma$  (یا  $C$ ) نشان داده می‌شود ( $\sigma = 1/\rho$ ). واحد رسانندگی موهور<sup>۳</sup> بر متر ( $\text{moh/m}$ ) است. عکس اهم ( $\Omega^{-1}$ ) را زیمنس<sup>۴</sup> ( $S$ ) نیز می‌نامند. به این ترتیب واحد رسانندگی بر حسب زیمنس بر متر ( $S/m$ ) نیز بیان می‌شود.

## ۱-۲-۳ رسانندگی و مقاومت ویژه کانی‌ها و سنگ‌ها

جریان الکتریکی از سه طریق در زمین منتشر می‌شود: الکترولیتی، فلزی (اهمی) و دی‌الکتریکی. رسانایی الکترولیتی به واسطه حرکت نسبتاً کند یون‌های موجود در یک الکترولیت به وجود می‌آید. این رسانایی به پارامترهای مختلفی از جمله نوع یون، غلظت یونی و قدرت تحرک یون‌ها وابسته است. رسانایی فلزی از خواص فلزات است؛ که در آن امکان حرکت سریع الکترون‌ها و در نتیجه انتشار بار الکتریکی فراهم می‌شود.

<sup>1</sup> Ohm

<sup>2</sup> ohm-metr

<sup>3</sup> Moho

<sup>4</sup> siemens

رسانایی دی‌الکتریکی خاص مواد با رسانایی بسیار ضعیفی (با عایق) است؛ که تحت تأثیر یک جریان متناوب خارجی قرار می‌گیرند. دلیل آن جابه‌جایی ضعیف الکترون‌ها نسبت به هسته اتم آنهاست. به دلیل فعال شدن این نوع رسانایی در فرکانس‌های بسیار زیاد، در مطالعاتی که از جریان پیوسته یا جریان متناوب با فرکانس پایین استفاده می‌شود، از این رسانایی می‌توان صرف نظر کرد. در بسیاری از سنگ‌ها که به طور معمول عایق هستند، رسانایی موجود از نوع الکترولیتی است و در حالت‌های خاص‌تر از این رسانه‌هایی که خاصیت فلزی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های مورد تجسس در مطالعات اکتشاف معدن مربوط می‌شود. بسیاری از کانی‌های سولفیدی و بعضی کانی‌های دیگر مانند مگنتیت و گرافیت رسانایی فلزی دارند [Reynolds, 2011].

گستره تغییرات مقاومت‌ویژه مواد موجود در زمین بسیار زیاد است ( $1.6 \times 10^{-8} \Omega m$  تا  $10^{16} \Omega m$ ). به طور معمول سنگ‌های آذرین بیشترین مقاومت‌ویژه را دارند؛ در سنگ‌های رسوبی بسته به درجه تخلخل، نوع و مقدار الکترولیت موجود در خلل و فرج آنها، مقدار مقاومت‌ویژه می‌تواند کمتر باشد. مقادیر مقاومت‌ویژه سنگ‌های دگرگونی بین سنگ‌های آذرین و رسوبی قرار دارد. سن سنگ‌ها نیز در مقدار مقاومت‌ویژه آنها موثر است. برای مثال یک سنگ آذرین کواترنری می‌تواند مقاومت‌ویژه‌ای بین ۱۰ تا ۲۰۰ اهم متر داشته باشد، در حالی که معادل همین سنگ با سن پرکامبرین مقاومت‌ویژه بیشتری دارد. در واقع با افزایش سن سنگ، امکان پر شدن فضاهای خالی سنگ به واسطه تبلور کانی‌ها، افزایش تراکم و در نتیجه کاهش پارامترهای موثر بر روی مقاومت‌ویژه مانند تخلخل و مقدار سیال درون سنگ وجود دارد. در سنگ‌های رسوبی، مقاومت‌ویژه سیال درون سنگ از اهمیت بیشتری نسبت به سنگ میزبان برخوردار است. آرچی، در سال ۱۹۴۲ رابطه‌ای تجربی برای مقاومت‌ویژه موثر سنگ‌ها ارائه داده است [Archie, 1942]:

$$\rho = a\varphi^{-m}s^{-n}\rho_w \quad (2-2)$$

در رابطه (۱-۱)  $\varphi$  درجه تخلخل،  $s$  قسمت تخلخل آبدار (درجه اشباع آب)، مقاومت‌ویژه آب درون خلل و فرج و  $a$ ،  $m$  و  $n$  ضرایب ثابتی هستند که به لیتولوژی، سیمان‌شدگی و بافت سنگ از نظر چگونگی توزیع خلل و فرج و کانال‌های ارتباطی کوچک بین آنها بستگی دارد ( $0.5 \leq a \leq 2.5$ ,  $1.3 \leq m \leq 2.5$ , and  $n \approx 2$ ).

رابطه آرچی بیشتر در مطالعات مقاومت ویژه، درون چاهی به کار می‌رود، آب‌های زیرزمینی شور می‌توانند مقاومت ویژه تا کمتر از ۰/۰۵ اهم متر نیز داشته باشند. از طرف دیگر، مقاومت ویژه بعضی از آب‌های زیرزمینی و آب‌های حاصل از ذوب یخ‌ها به بیش از ۱۰۰۰ اهم متر هم می‌رسد [Korvin, 1982].

مقاومت ویژه بعضی از کانی‌ها و سنگ‌های معمول در جدول (۱-۲)، نشان داده شده است. بلورهای بعضی از کانی‌ها مانند پیریت گالن و مگنتیت رسانا هستند؛ درحالی‌که همین کانی‌ها به صورت توده‌ای رسانندگی کمتری دارند.

هماتیت و اسفالریت خالص، به طور ذاتی عایق هستند؛ ولی زمانی که با ناخالصی‌های رسانا همراه می‌شوند، ممکن است از رسانندگی زیادی برخوردار شوند. گرافیت پراکنده در توده سنگ می‌تواند سبب کاهش مقاومت ویژه کلی سنگ شود [Reynolds, 2011].

به‌طور کلی اندازه‌گیری مقاومت ویژه سنگ‌ها از روش‌های حائز اهمیت در مطالعات الکتریکی است؛ که از یک طرف در اکتشاف کانسارهای معدنی از آن‌ها استفاده می‌کنند و از طرف دیگر در تعیین پارامترهای پتروفیزیکی سنگ‌ها به ویژه سنگ‌های رسوبی و در راستای مطالعات هیدرولوژی و ژئوتکنیکی نقش مهمی به عهده دارد. اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه درون چاهی نیز اهمیت ویژه‌ای در مطالعات اکتشاف نفت دارد.

جدول ۱-۲: مقاومت ویژه الکتریکی مواد معدنی و سنگها [Telford et al., 1990]

Material	Nominal resistivity ( $\Omega\text{m}$ )	Material	Nominal resistivity ( $\Omega\text{m}$ )
<b>Sulphides:</b>		London clay	4-20
Chalcopyrite	$1.2 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$	Lias clay	10-15
Pyrite	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$	Boulder clay	15-35
Pyrrhotite	$7.5 \times 10^{-6} \times 1^{-2}$	Clay (very dry)	50-150
Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	Mercia mudstone	20-60
Sphalerite	$1.5 \times 10^7$	Coal measures clay	50
<b>Oxides:</b>		Middle coal measures	>100
Haematite	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	Chalk	50-150
Limonite	$10^3 - 10^7$	Coke	0.2-8
Magnetite	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$	Gravel (dry)	1400
Ilmenite	$10^{-3} - 50$	Gravel (saturated)	100
Quartz	$300 - 10^6$	Quaternary/Recent sands	50-100
Rock salt	$30 - 10^{13}$	Ash	4
Anthracite	$10^{-3} - 2 \times 10^5$	Colliery spoil	10-20
Lignite	9-200	Pulverised fuel ash	50-100
Granite	$300 - 1.3 \times 10^6$	Laterite	800-1500
Granite (weathered)	30-500	Lateritic soil	120-750
Syenite	$10^2 - 10^6$	Dry sandy soil	80-1050
Diorite	$10^4 - 10^5$	Sand clay/clayey sand	30-215
Gabbro	$10^3 - 10^6$	Sand and gravel	30-225
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$	Unsaturated landfill	30-100
Schists (calcareous and mica)	$20 - 10^4$	Saturated landfill	15-30
Schist (graphite)	10-100	Acid peat waters	100
Slates	$600 - 4 \times 10^7$	Acid mine waters	20
Marble	$100 - 2.5 \times 10^8$	Rainfall runoff	20-100
Consolidated shales	20-2000	Landfill runoff	<10-50
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$	Glacier ice (temperate)	$2 \times 10^6 - 1.2 \times 10^8$
Sandstones	$1 - 7.4 \times 10^8$	Glacier ice (polar)*	$5 \times 10^4 - 3 \times 10^5$ *
Limestones	$50 - 10^7$	Permafrost	$10^3 - >10^4$
Dolomite	$350 - 5 \times 10^3$		
Marls	3-70		
Clays	1-100		
Alluvium and sand	10-800		
Moraine	$10 - 5 \times 10^3$		
Hydrocarbon reservoir	25 - 27.5		
Sherwood sandstone	100-400		
Soil (40% clay)	8		
Soil (20% clay)	33		
Topsoil	250-1700		

\*-10°C to -60°C, respectively; strongly temperature-dependent (Reynolds, 1985).  
Based on Telford et al. (1990) with additional data from McGinnis and Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds and Paren (1980, 1984) and many commercial projects.

## توزیع جریان پیوسته در زمین همگن و همسانگرد

اگر الکتروود نقطه A جریان به شدت I را در سطح زمین همگن و همسان گردی به مقاومت ویژه  $\rho$  تزریق کند (فرض بر این است که الکتروود برگشت جریان در فاصله بسیار دوری قرار دارد)، جریان به صورت خطوط شعاعی منتشر می شود (شکل ۲-۲-الف). افت پتانسیل ( $\delta V$ )، بین دو نقطه به فاصله  $r$  و  $r + \delta r$  از نقطه A به صورت گرادیان پتانسیل ( $-\delta V / \delta x$ ) نشان داده می شود؛ که علامت منفی بیانگر کاهش پتانسیل بر حسب فاصله است. با فرض زمین همگن و همسانگرد، سطوح هم پتانسیل (سطحی که مقدار پتانسیل روی آن ثابت است) نیمکره-هایی را تشکیل می دهند که مقدار پتانسیل بر حسب افزایش فاصله کاهش می یابد. اگر مخروطی از نقطه A و زاویه بسیار کوچکی رسم شود (شکل ۲-۲-الف)، افت پتانسیل عبور جریان از سطح کوچک  $ds$  و در طول  $\delta r$  (شکل ۲-۲-الف) برابر است با [Reynolds, 2011]:

$$-\delta V / \delta x = \rho I / dS \quad (۳-۲)$$

بنابراین افت پتانسیل بین سطح واقع بین دو نیمکره به شعاع های  $r$  و  $r + \delta r$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$-dV / \delta r = \rho I / 2\pi r^2 \quad (۴-۲)$$

با انتگرال گیری از رابطه در فاصله صفر تا  $r$ ، مقدار پتانسیل ( $V$ ) روی سطح نیمکره با شعاع  $r$  به دست می آید:

$$V = \rho I / 2\pi r + c \quad (۵-۲)$$

مقدار ثابت انتگرال گیری ( $C$ )، با توجه به این که با میل کردن  $r$  به سمت بینهایت مقدار پتانسیل به سمت صفر میل می کند، به دست می آید (شکل ۲-۱-د):

$$r \rightarrow \infty, \quad V \rightarrow 0, \quad \Rightarrow \quad c = 0$$

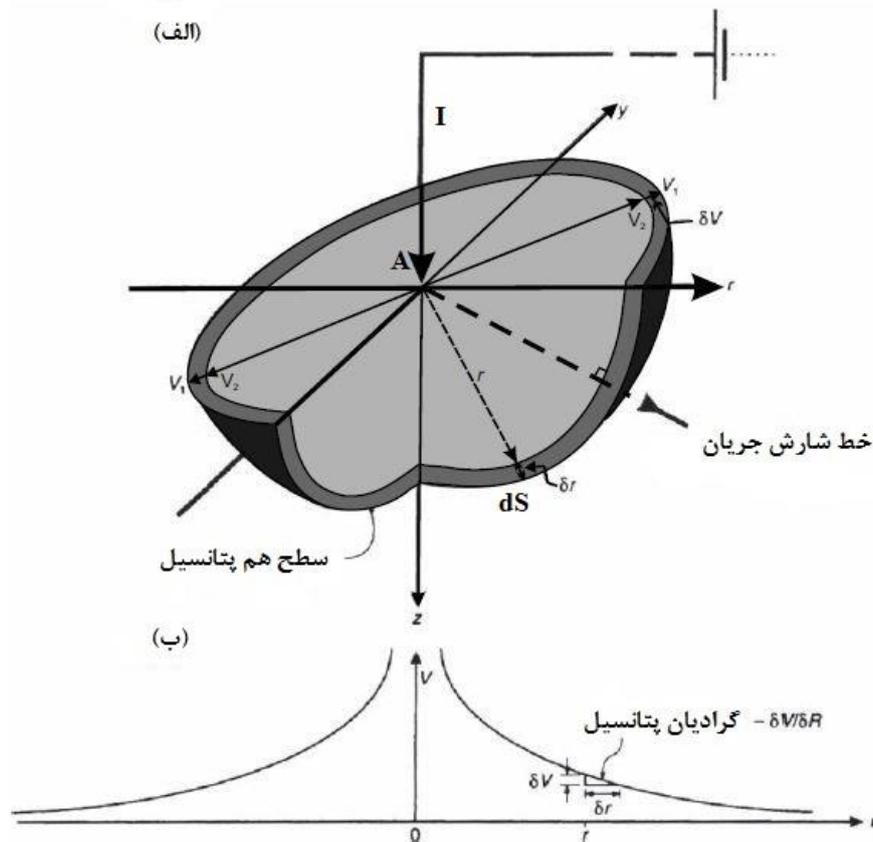
رابطه (۲-۵) را می توان با استفاده از رابطه میدان الکتریکی و چگالی جریان نیز به دست آورد:

$$dV / dr = E = -\rho J, \quad J = I / 2\pi r^2$$

$$dV / dr = - \rho I / 2\pi r^2$$

(۶-۲)

با انتگرال گیری از رابطه (۶-۲)، پتانسیل مطابق رابطه ۵-۲ به دست می آید.



شکل ۲-۲ چگونگی شارژ جریان و تشکیل سطوح هم پتانسیل در یک زمین همگن و همسانگرد، الف: خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل، ب: تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله [Reynolds, 2011]

رابطه  $(V = \rho I / 2\pi r)$ ، تغییرات در محاسبه پتانسیل و مقاومت ویژه در مطالعات الکتریکی به عهده دارد. در صورتی که الکتروود برگشت جریان به فاصله نزدیک (نسبت به حالت قبل) آورده شود، توزیع خطوط شارژ جریان و هم پتانسیل‌ها مطابق شکل ۲-۳ خواهد بود. در این حالت پتانسیل نقطه‌ای مانند  $M (V_M)$  برابر با حاصل جمع پتانسیل‌های ایجاد شده توسط الکتروودهای  $A$  و  $B$  است:

$$V_M = V_A + V_B \quad , \quad V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad (۷-۲)$$

نقطه دیگری مانند N، را در نظر بگیرید، پتانسیل این نقطه ( $V_N$ ) برابر است با:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \quad (۸-۲)$$

به این ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو نقطه M و N ( $\sigma V_{MN}$ )، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\} \quad (۹-۲)$$

با استفاده از رابطه ۹-۲، می‌توان مقدار مقاومت ویژه زمین ( $\rho$ ) را نیز محاسبه کرد:

$$\rho = \frac{2\pi\sigma V_{MN}}{I} \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \quad (۱۰-۲)$$

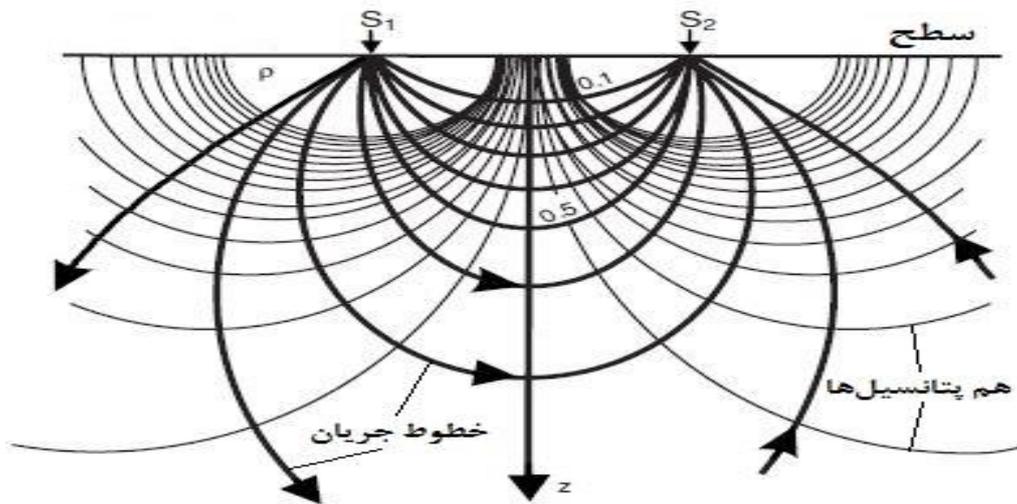
در عمل برای به دست آوردن اختلاف پتانسیل و محاسبه مقاومت ویژه از چهار الکتروود (دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل) استفاده می‌شود که می‌توان آرایه‌های مختلفی را برای این ۴ الکتروود در نظر گرفت، پتانسیل و مقاومت ویژه برای آرایه‌های مختلف با استفاده از رابطه‌های ۹-۲ و ۱۰-۲ کلی و محاسبه می‌شود. برنامه هر آرایه مشخص با فاصله‌های الکتروودی ثابت، عددی وجود دارد که آنرا ثابت یا ضریب آرایه می‌نامند و به طور معمول با حرف K نشان می‌دهند:

$$K = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (۱۱-۲)$$

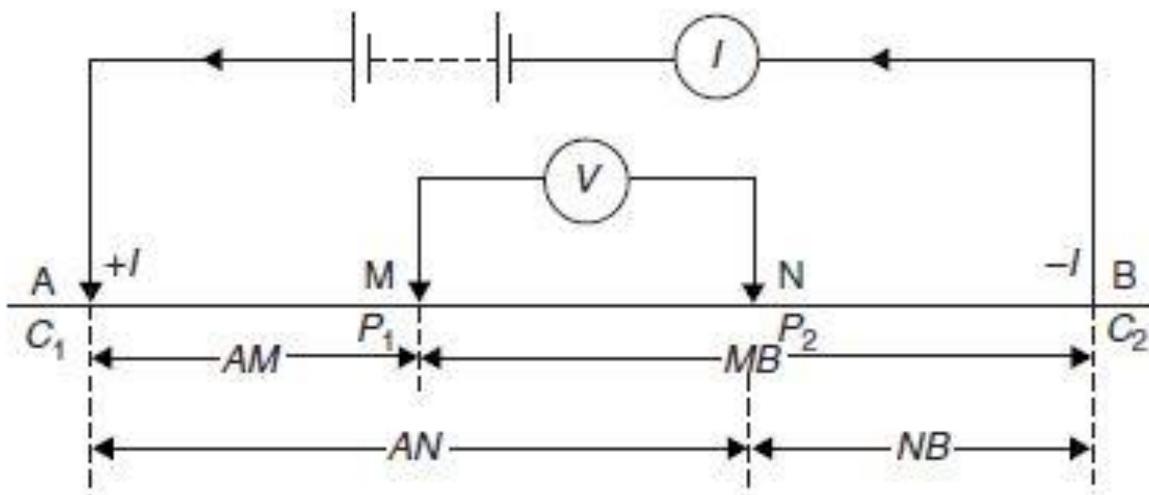
با توجه به مقدار K و  $R = \sigma V_{MN}/I$  (مقاومت الکتریکی)، مقاومت ویژه از رابطه زیر نیز به دست می‌آید:

$$\rho = R K \quad (۱۲-۲)$$

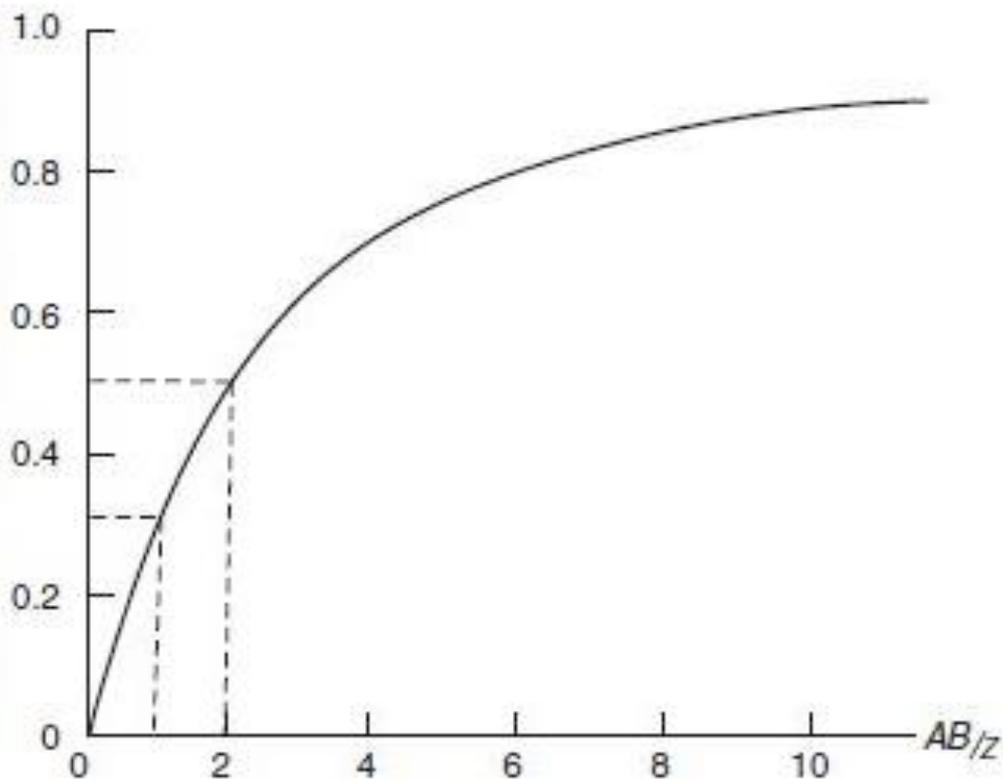
در واقعیت، سطح زیرزمین با یک محیط همگن مطابقت ندارد و بنابراین مقاومت به دست آمده دیگر مقاومت "واقعی" نیست؛ بلکه مقاومت ظاهری ( $\rho_a$ ) است، که حتی می‌تواند منفی هم باشد. بسیار مهم است که به یاد داشته باشید که مقاومت ظاهری بر خلاف مقاومت واقعی یک ویژگی فیزیکی از رسانای سطحی نیست. در نتیجه، همه داده‌های مقاومت میدانی برای مقاومت ظاهری هستند، در حالی که آن‌هایی که با روش‌های تفسیر به دست می‌آیند، مقاومت‌های "واقعی" هستند [Reynolds, 2011].



شکل ۲-۳: چگونگی توزیع خطوط شارش جریان و تشکیل هم پتانسیل در حالتی که از دو الکتروود جریان نزدیک به هم استفاده می‌شوند  
 . [Van Nostrand and Cook, 1966]



شکل ۲-۴: آرایه چهار الکتروودی که در آن الکتروودهای پتانسیل بین الکتروودهای جریان قرار دارند [Reynolds, 2011].



شکل ۲-۵: کسری از جریان که برای فاصله الکترودی AB در زیر عمق Z [Reynolds, ۲۰۱۱]

شکل ۲-۵ نشان می دهد، برای این که حداقل ۵۰٪ جریان از طریق سطح مشترک در عمق z متر در محیط دوم جریان یابد، جداسازی الکترودهای جریان باید حداقل دو برابر و ترجیحاً بیش از سه برابر عمق باشد. این امر دارای مفاهیم عملی آشکاری است، به ویژه هنگام برخورد با موقعیتهایی که عمق آنها چند صد متر است. بنابراین نیاز به طول کابل‌های بسیار طولانی است، که می تواند اثرات نامطلوب جفت شدگی القایی ایجاد کند. برای سونداژهای با عمق زیاد، وقتی که فاصله الکترودها بیش از چند کیلومتر است، داده‌ها هوایرد تنها راه حل عملی تبدیل می شوند [Shabtaie et al., 1980 ; Shabtaie et al., 1982].

## چیدمان الکترودها

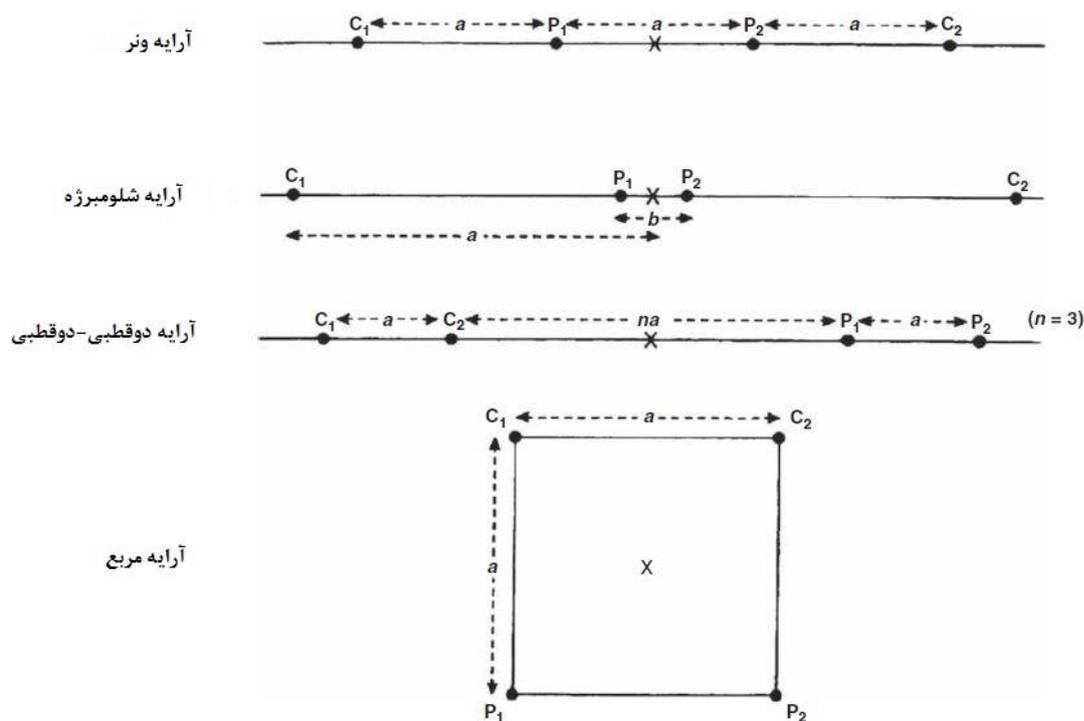
مقدار مقاومت ظاهری به هندسه الکترودها بستگی دارد و به وسیله ضریب هندسی K تعریف می شود. در حال حاضر حداقل ۱۰۲ نوع آرایه سطحی مختلف وجود دارد [Szalai and Szarka, 2008]، که بیشتر آنها به ندرت مورد استفاده قرار می گیرند. آرایه‌های اضافی در بردارنده سطح یا ترکیب شده با چاه و یا صرفاً آرایه‌های

درون چاهی. آرایه‌های درون چاهی اغلب از انواع آرایه‌های سطحی هستند. وجود انواع مختلف آرایه‌ها نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری روش مقاومت سنجی است؛ اما شناخت مزایا و معایب هر آرایه مهم است. انتخاب آرایه اغلب تابعی از آشنایی قبلی کاربر با نوع آرایه، در دسترس بودن نرم‌افزار، کابل‌کشی و جمع‌آوری داده‌ها، نرم‌افزار پردازش داده‌ها و وارون‌سازی<sup>۱</sup> و عوامل خاص محیط برداشت است. به عنوان مثال RES2DINV، یک بسته نرم‌افزاری بسیار محبوب و در دسترس است [Geotomo Software, 2009a]، که از ده نوع آرایه سطحی و دو آرایه درون‌چاهی متقاطع پشتیبانی می‌کند. آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی از سال ۱۹۵۰ به ویژه توسط ژئوفیزیکدان‌های روسی بکار گرفته شده، برای بررسی‌های "قطبش‌القایی" در اکتشافات معدنی و در ایالات متحده در بررسی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Zohdy, 1974].

این انواع و شیوه‌های چیدمان الکترودها دارای مزایا، مضرات و حساسیت ویژه‌ای هستند. عواملی که بر انتخاب نوع آرایه تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از: فضای مورد نیاز برای اجرای آرایه، سهولت و حساسیت آنهاست. یکی از عوامل مورد توجه، حساسیت آرایه به ناهمگونی‌های الکتریکی جانبی و فصل مشترک‌های شیب‌دار است [Habberjam and Watkins, 1967; Broadbent and Habberjam, 1971]. شکل ۲-۷ آرایه‌هایی را نشان می‌دهد که در بررسی‌های الکتریکی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

---

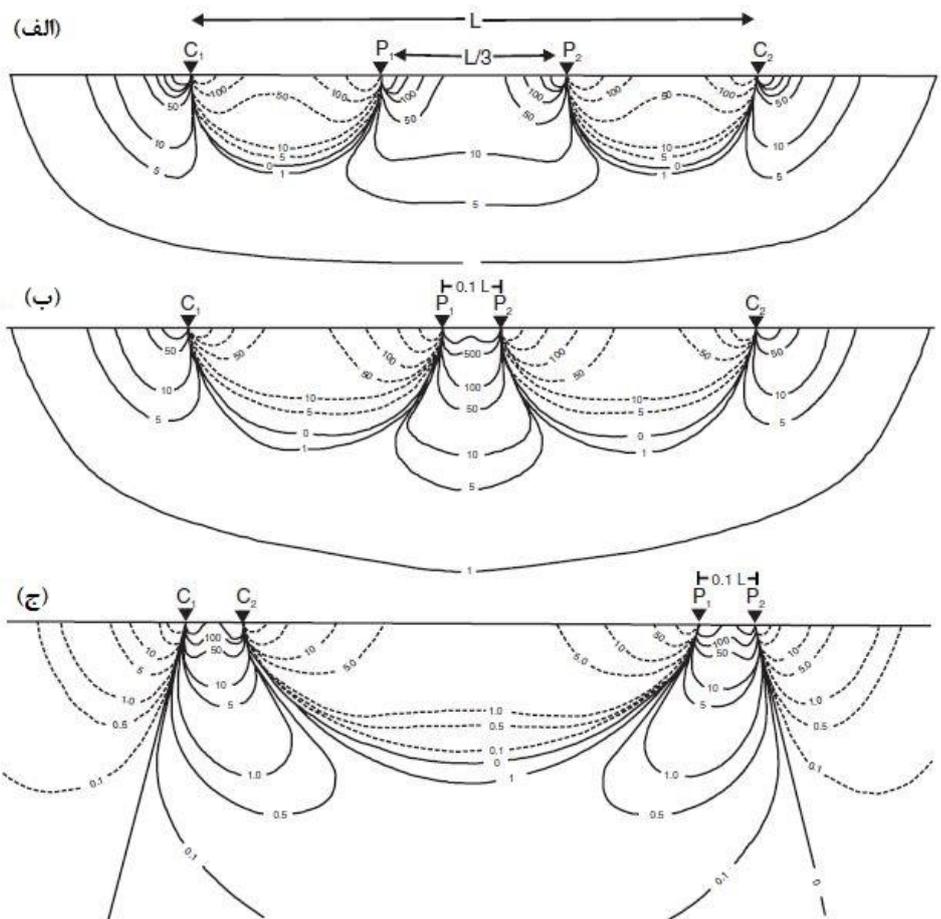
<sup>1</sup> inversion



شکل ۲-۷: شکل آرایه الکترودهای مورد استفاده در بررسی‌های الکتریکی [Reynolds, 2011]

مثالی از پاسخ‌های مختلف سه آرایه اصلی به صورت "مقاطع سهم سیگنال" [Barker, 1979] در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. این مقطع‌ها نمودارهایی از سهم هر واحد حجم سنگ‌های زیرسطحی را برحسب و اندازه آن‌ها در سطح نشان می‌دهد.

شکل ۲-۶ الف سهم سیگنال برای آرایه و نر را نشان می‌دهد. در ناحیه نزدیک به سطح، مناطق پتانسیل مثبت و منفی، یکدیگر را خنثی می‌کنند و پاسخ اصلی که از عمق سرچشمه می‌گیرد، تا حد زیادی مسطح است (شکل ۲-۶ الف را ببینید). این نشان می‌دهد که برای لایه‌ها افقی، آرایه و نر قدرت تفکیک قائم بالایی دارد. آرایه شلومبرژه قدرت تفکیک قائم زیادی دارد. اما توجه داشته باشید که شکل سهم سیگنال در عمق مقعر است (شکل ۲-۶ ب). برای آرایه دوقطبی-دوقطبی (شکل ۲-۶ ج)، شکل سهم سیگنال نشان می‌دهد که قدرت تفکیک قائم ضعیف است؛ ولی این آرایه به تغییرات مقاومت ویژه جانبی حساسیت دارد [Bhattacharya, and Patra, 1968] و از این حساسیت می‌توان در پروفیل‌های مقاومت ویژه استفاده کرد.



شکل ۲-۶: مقاطع سهم سیگنال الف: ونر، ب: شلومبرژه، ج: دوقطبی-دوقطبی [Barker, 1979].

جدول ۲-۲ - مقایسه آرایه‌های ونر، شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی و مربعی [After Reynolds, 2011]

مربع	دوقطبی-دوقطبی	شلومبرژه	ونر	معیارها
✓✓	✓	✓✓	✓✓✓	تفکیک عمودی
✓✓	✓✓✓	✓✓	✓	عمق نفوذ
x	✓	✓✓✓	✓✓	مناسب بودن برای سونداژ الکتریکی عمودی
✓✓✓	✓✓✓	x	✓✓✓	مناسب برای پیمایش جدایی ثابت
خیر	متوسط	بله	بله	حساسیت به جهت گیری
پایین	متوسط	متوسط	بالا	حساسیت به ناهمگونی‌های جانبی
پایین	متوسط (نه*)	متوسط (نه*)	بله (نه*)	نفر بر (از لحاظ نیروی کاری)
✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	در دسترس بودن ابزارهای تفسیری
ضعیف = ✓ متوسط = ✓✓ خوب = ✓✓✓ نامناسب = x				
*با استفاده از کابل چند مغزه‌ای و اجرای آرایه الکترودی بطور خودکار از شدت سختی کار کاسته می‌شود.				

## ۲-۱-۳ کاربردهای روش مقاومت‌ویژه

امروزه در مطالعات اکتشاف معدن از مقاومت‌ویژه بیشتر به عنوان روش کمکی در کنار روش‌هایی مانند پلاریزاسیون القایی استفاده می‌کنند، زیرا عیار و گستردگی کانی‌سازی‌های رسانا اغلب به گونه‌ای است که نمی‌توانند مقاومت‌ویژه زمین‌های مقاوم را به طور چشمگیری کاهش دهند.

از روش مقاومت‌ویژه به طور گسترده در زمین‌شناسی مهندسی و اکتشاف آب نیز استفاده می‌کنند.

از روش مقاومت‌ویژه به طور گسترده در بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه‌های بزرگ مانند سد‌ها پیش از عملیات ساختمانی آن‌ها استفاده می‌کنند.

از دیگر کاربردهای مهندسی روش مقاومت‌ویژه، شناسایی مکان‌های دفن زباله<sup>۱</sup> و پتانسیل لیچینگ<sup>۲</sup> آن‌ها، معادن قدیمی و غارهای کارستی پنهان است، که در ساخت جاده‌ها، مسیرهای خط لوله و دیگر مطالعات مهندسی مورد توجه است.

مطالعات زمین‌شناسی (شناخت ساختمان تکتونیک، روند لایه‌ها، تعیین امتداد عمومی لایه‌ها، موقعیت چین-خوردگی‌های احتمالی، محل گسل‌ها و زون‌های دارای شکستگی)

اکتشاف کانسارهای معدنی (شناخت توده‌ها، رگه‌ها و کانی‌سازی‌های پراکنده معدنی رسانا، به‌طورکلی کانسارهای سولفیدی مس، آهن، سرب و همچنین بعضی اکسیدها مگنتیت و کانسارهای گرافیتی) شاید گسترده‌ترین کاربرد روش مقاومت‌ویژه، اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی باشد، با این روش می‌توان اطلاعات حائز اهمیتی در هیدرولوژی منابع آب‌های زیرزمینی به دست آورد و از هزینه کردن برای حفر گمانه‌های اکتشافی کاست.

## ۲-۱-۴ محدودیت‌های روش مقاومت‌ویژه

- \_\_\_ تفسیر داده‌ها اغلب دارای ابهام است، در نتیجه اطلاعات زمین‌شناسی، داده‌های ژئوفیزیکی دیگر و داده‌های گمانه‌های اکتشافی به کاهش ابهام‌های موجود کمک می‌کند.
- \_\_\_ پاسخ روش اغلب به ساختارهای زمین‌شناسی ساده محدود می‌شود و در مناطقی پیچیدگی ساختاری دارند، با مشکل روبرو می‌شود.
- \_\_\_ توپوگرافی و اثر تغییرات مقاومت‌ویژه مرتبط با ناهمگونی لایه‌های نزدیک به سطح از جمله هوازگی لایه‌ها موجب پنهان ماندن اثر مقاومت‌ویژه لایه‌های عمیق‌تر می‌شود.

---

<sup>1</sup> landfills  
<sup>2</sup> leaching

عمق نفوذ روش به مقدار توان بیشینه الکتریکی قابل تولید و فضای موردنیاز برای بازکردن سیم‌های فرستنده جریان الکتریکی وابسته است؛ که به این ترتیب عمق بررسی این روش را محدود می‌کند.

## ۲-۲ قطبش‌القایی (IP)

### ۲-۲-۱ مقدمه

پدیده قطبش‌القایی (IP) ایجاد شده در برداشتهای مقاومت‌ویژه بعد از قطع جریان توسط کنراد شلومبرژه<sup>۱</sup> در اوایل سال ۱۹۱۳ گزارش شده است. یک جنبه از IP، که به عنوان اثر ولتاژ اضافی شناخته می‌شود، از قرن نوزدهم شناخته شده است. روش IP از سال ۱۹۴۲ به کار رفت و در طول جنگ جهانی دوم به عنوان بخشی از پروژه نیروی دریایی آمریکا برای کشف مین‌ها در دریا توسعه داده شد [Grow, 1982]. در دهه ۱۹۵۰، افزایش سریعی در ارتباط به روش IP در هر دو بخش معدن و اکتشاف نفت وجود داشت. در دهه ۱۹۷۰ پیشرفت‌های قابل توجهی در ابزار انجام شد [Zonge and Wynn, 1975] که منجر به توسعه روش قطبش‌القایی طیفی<sup>۲</sup> (SIP)، به ویژه در اوایل دهه ۱۹۸۰ شد [Pelton et al., 1978]. در سال ۱۹۸۳، تجهیزات کانادایی به چین صادر شد که منجر به توسعه قابل توجه روش IP به ویژه برای معدن شد. با این حال، بسیاری از خروجی‌های این دوره فقط به زبان چینی تولید می‌شد و به طور گسترده در دسترس نبود؛ تا اینکه تک نگارش لو<sup>۳</sup> و ژانگ<sup>۴</sup> به زبان انگلیسی توسط SEG در سال ۱۹۹۸ منتشر شد. تاریخچه‌های دقیق تری از روش IP توسط [Seigel et al., 2007] کاربرد اصلی جریان IP در جستجو برای سنگ‌های فلزی منتشر شده، به خصوص مس پورفیری، سرب و روی و ذخایر طلای مرتبط با سولفید و به میزان کم‌تر، آب‌های زیر زمینی و زمین گرمایی است. از اوایل دهه ۱۹۹۰، علاقه زیادی به استفاده از روش‌های IP در کاربردهای زیست‌محیطی، براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اثرات IP مرتبط با مواد معدنی غیر فلزی وجود داشته است [Börner et al., 1996; Olhoeft, 1985]. [Weller et al., 2006].

<sup>1</sup> Conrad Schlumberger

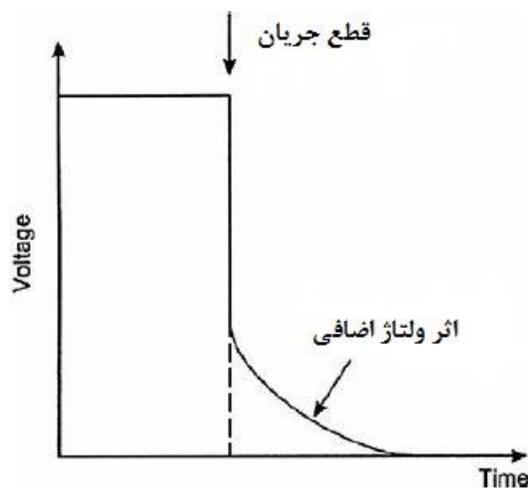
<sup>2</sup> spectral IP

<sup>3</sup> Luo

<sup>4</sup> Zhang

به طور فزاینده‌ای واضح است که فراگیری روش IP نوید قابل توجهی را در تشخیص آلاینده‌های آلی نشان می‌دهد؛ که برای تشخیص با استفاده از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی مشکل هستند. از آنجا که روش‌های تحلیلی به بهبود خود ادامه می‌دهند، انواع کاربردها افزایش خواهند یافت.

اندازه‌گیری قطبش‌القایی با استفاده از آرایه‌های الکترودی مرسوم انجام می‌شود؛ که شامل دو الکتروود پتانسیل جریان و دو الکتروود پتانسیل غیر پلاریزه است. هنگامی که جریان تزریق شد، ولتاژ بین الکتروودهای پتانسیل یک زمان محدود و قابل اندازه‌گیری (چند ثانیه تا چند دقیقه) را برای واپاشی صفر (شکل ۲-۷) می‌گیرد. زیرا زمین به طور موقت شارژ می‌شود (پلاریزه می‌شود) و تا حدی شبیه خازن عمل می‌کند. وقتی جریان به حالت قبلی برگردد، ولتاژ به طور آنی به اوج خود نمی‌رسد؛ بلکه در یک دوره زمانی (زمان صعود) تا حداکثر مقدار اعمال‌شده، بالا می‌رود. واپاشی ولتاژ و زمان صعود بستگی به عوامل ابزاری و جغرافیایی دارد و در نتیجه از ماهیت زمین تشخیص داده می‌شود.



شکل ۲-۷: اثر ولتاژ اضافی تولید شده توسط IP [Reynolds, 2011]

چهار سیستم اندازه‌گیری پلاریزاسیون ایجاد شده وجود دارد:

روش دامنه زمانی (یا پالس گذرا)، ولتاژ اضافی را به عنوان تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌کند؛ و در روش‌های حوزه فرکانس، مقاومت ظاهری در دو یا چند فرکانس متفاوت معمولاً کم‌تر از ۱۰ هرتز، [Patella and Schiavone, 1977] اندازه‌گیری می‌شود.

در تکنیک دامنه فاز، تاخیر فاز بین جریان اعمال شده و ولتاژ اندازه‌گیری شده، از زیرسطحی تشخیص داده می‌شود. در روش SIP، اندازه‌گیری فاز و دامنه در گستره فرکانسی از  $10^{-3}$  تا  $4 \times 10^3$  هرتز اندازه‌گیری می‌شوند.

روش IP یک روش فعال است؛ زیرا ولتاژ که می‌تواند به اندازه چندین هزار ولت در آمارگیری با دامنه زمانی بالا باشد، به منظور تولید ولتاژهای شدید اضافی به زمین اعمال می‌شوند. تجهیزات مورد استفاده مشابه تجهیزاتی است که در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی استفاده می‌شود. روش IP باعث ایجاد واکنش در زمین می‌شود؛ که وابسته به توزیع و ماهیت دانه‌های فلزی است، و بسیار مؤثر است وقتی که دانه‌های فلزی به جای توده‌ای با یک شکل پراکنده توزیع شوند.

## ۲-۲-۲ عوامل پدید آورنده IP

علت دقیق ایجاد پلاریزاسیون هنوز مشخص نیست، اما دو مکانیسم اصلی برای توجیح این پدیده عبارت‌اند از، پلاریزاسیون الکترودی<sup>۱</sup> (فلزی) و پلاریزاسیون الکترولیتی (غشائی<sup>۲</sup>) که هر دو از طریق فرایندهای الکتروشیمیایی رخ می‌دهند [Reynolds, 2011].

## پلاریزاسیون الکترودی (فلزی)

ایجاد پلاریزاسیون الکترودی به وسیله یک دانه فلزی همانند روندی است که پتانسیل خود را به وجود می‌آورد. اگر الکتروود فلزی را در محلول یونی بدون اعمال ولتاژ قرار داده شود، بارهایی با قطبیت<sup>۳</sup> مختلف از هم جدا می‌شوند که منجر به ایجاد اختلاف پتانسیل بین الکتروود و محلول می‌شود.

بزرگی کل پتانسیل را، پتانسیل نرنست<sup>۴</sup> و بخش مربوط به پتانسیل لایه جذب سطحی الکتروود را پتانسیل زتا<sup>۵</sup> نامیده‌اند [Reynolds, 2011]. هنگامی که ولتاژ اعمال می‌شود، تعادل یونی مختل می‌شود. این باعث شارش

---

<sup>1</sup> electrode

<sup>2</sup> membrane

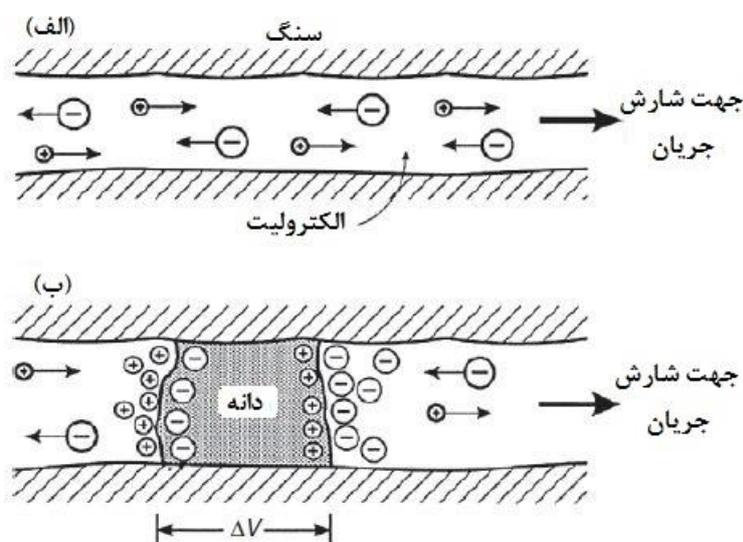
<sup>3</sup> polarity

<sup>4</sup> nernst

<sup>5</sup> zeta

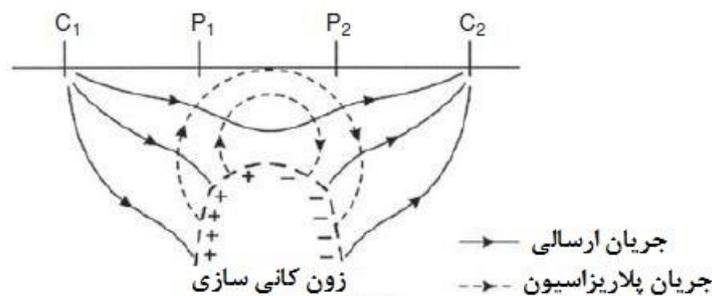
جریان می‌شود که به نوبه خود تغییرات اختلاف پتانسیل بین الکتروود و محلول را به دنبال دارد. هنگامی که ولتاژ اعمال شده حذف می‌شود، تعادل یونی به وسیله یون‌ها احیا می‌شود.

انتشار جریان در زمین به وسیله حرکت یون‌ها از طریق آب‌های زیرزمینی موجود در خلل و فرج مرتبط به هم، شکستگی‌ها و ریزترک در داخل سنگ صورت می‌گیرد. هنگامی که دانه‌ای رسانا الکترونیکی (به عنوان مثال یک سولفید فلزی) کانال شارش جریان را مسدود می‌کند (شکل ۲-۸)، سلول الکتروشیمیایی از بار الکتریکی ساخته می‌شود که در تقابل با شارش جریان قرار می‌گیرد و دانه فلزی پلاریزه می‌شود، بنابراین اختلاف پتانسیلی در دو طرف دانه فلزی ایجاد می‌شود. با قطع ولتاژ اولیه، یون‌ها برای برگشت به حالت تعادل اولیه از طریق محیط الکترولیتی پخش شده و اختلاف پتانسیل ایجاد شده در اثر دانه فلزی در طی زمان کوتاهی به سمت صفر میل می‌کند این فرایند مبنای اندازه‌گیری زوال ولتاژ در روش اندازه‌گیری زمان - حوزه‌ای است. پلاریزاسیون دانه، در اصل یک پدیده سطحی است و همین دلیلی بر پاسخ قابل توجه IP برای کانی‌سازی فلزی پراکنده است، یکی از مزیت‌های عمده این روش نسبت به دیگر روش‌های الکتریکی است. باید توجه داشت که در عین حال در بعضی حالت‌ها پاسخ IP در بالای هاله کانه‌های پراکنده واقع در اطراف کانسار توده‌ای از خود کانسار اصلی قوی‌تر است.



شکل ۲-۸: قطبش الکتروودی. (الف) شارش الکترولیت در یک کانال باز. (ب) پلاریزاسیون دانه رسانا که در کانال ارتباطی سنگ قرار گرفته است [Reynolds, 2011].

پاسخ IP حاصل اثر دانه‌های کانه با رسانایی فلزی است که به طور منفرد هنگام شارژ زمین پلاریزه می‌شوند. برای مثال برای آرایه ونر در شکل ابتدا زون غنی شده کانسار با جریان ارسالی از الکترودهای  $C_1$  و  $C_2$  پلاریزه می‌شود و به دنبال آن با قطع جریان اولیه، جریان پلاریزه کننده گذرای تولید می‌شود؛ که اختلاف پتانسیل آن را در سطح اندازه می‌گیرند [Merriam, 2007]. عوامل موثر در هنگام برگشت تعادل یعنی پس از قطع جریان متنوع و پیچیده است، که در این میان می‌توان به اندازه و شکل خلل و فرج، ساخت کانسنگ، تراوایی، رسانایی الکترولیتی، غلظت یونی رسانایی فلزی دانه‌های کانه اشاره کرد. برنیت، کاسیتريت، کالکوپیریت، گالن، گرافیت، ایلمنیت، مگنتیت، پیریت، پیرولولزیت و پیروتیت از جمله کانی‌های هستند که به دلیل رسانندگی فلزی زیاد، پاسخ‌های IP زیادی ایجاد می‌کنند، اسفالریت، سینابر و استینیت به دلیل رسانایی فلزی کم قادر به ایجاد پدیده IP شاخصی نیستند.



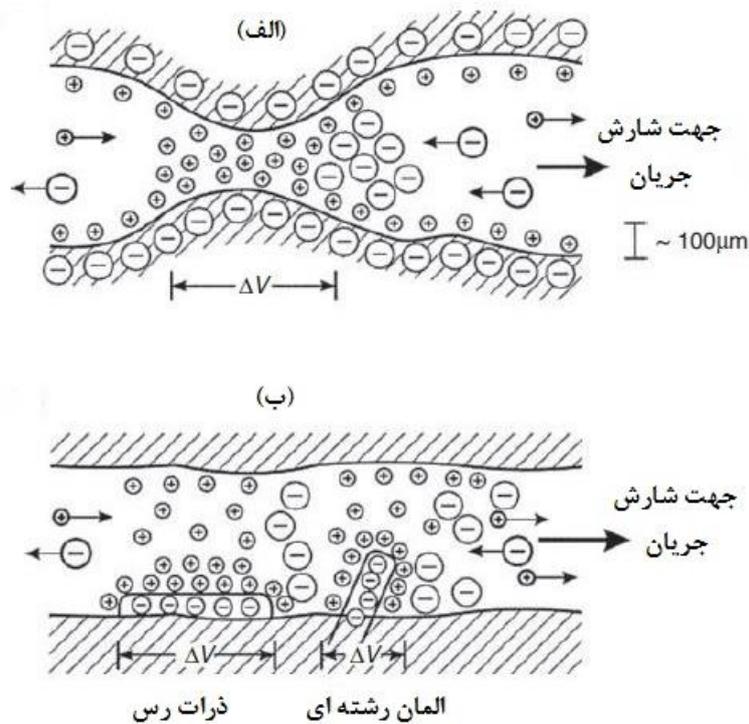
شکل ۹-۲ اثرات ماکروسکوپی قطبش دانه بر روی یک سنگ معدن منتشر شده [Reynolds, 2011].

## پلاریزاسیون الکترولیتی (غشایی)

پلاریزاسیون غشایی که به طور معمول IP زمینه را در محدوده اکتشافی تشکیل می‌دهند؛ با کانی‌های غیرفلزی ارتباط دارد. ولتاژ اضافی در اثر این پدیده گاه ممکن است با ولتاژ کانی‌سازی‌های فلزی ضعیف یکسان شود، که در این صورت تفکیک آن‌ها با روش‌های IP معمول (زمان - حوزه‌ای و فرکانس - حوزه‌ای) است. دو علت برای پلاریزاسیون غشایی وجود دارد [Ulrich and Slater, 2004; Scott, 2006] یکی تنگ شدن مقطع کانال‌های ارتباطی خلل و فرج و دیگری وجود کانی‌های رسی در این کانال‌ها مانند ماسه سنگ‌های رسی. بین مرز بخش جامد سنگ (کانی‌ها) و الکترولیت داخل خلل و فرج اغلب سنگ‌ها، بار منفی مشخصی انبار می‌شود.

به این ترتیب بارهای مثبت الکترولیت به سمت سطح فصل مشترک بخش جامد و آبدار سنگ جذب شده و لایه بسیار نازکی از بار مثبت با ضخامت حدود ۱۰۰ میکرومتر تشکیل می‌شود. در این حالت بارهای منفی داخل الکترولیت از سطح فصل مشترک رانده می‌شوند (شکل ۲-۱۳-الف). اگر قطر کانال ارتباطی در قسمتی از این کانال کم شود، زمانی که جریان را به زمین می‌فرستند، تنگ شدگی مانع شارش یون‌ها می‌شود. یون‌های منفی زون تنگ شده را ترک می‌کنند، ولی جنبه‌های مثبت این زون افزایش می‌یابند و در نتیجه اختلاف پتانسیلی در طول این زون ایجاد می‌شود (شکل ۲-۱۳-ب). زمانی که جریان را قطع می‌کنند، عدم تعادل ایجاد شده در تمرکز یون‌ها با برگشت به حالت عادی خود، پتانسیل IP را ایجاد می‌کند.

دومین علت پلاریزاسیون غشایی به حضور ذرات پراکنده رس یا کانی‌های رشته‌ای که موجب تمرکز بارهای منفی می‌شوند، مربوط است (شکل ۲-۱۳-ب). جذب یون‌های مثبت به طرفین بارهای منفی، تمرکزی از ابر بارهای مثبت را در خلل و فرج به وجود می‌آورد، زمانی که به چنین سنگی، جریان الکتریکی تزریق می‌کنند، بارهای مثبت می‌توانند جابه‌جا شوند، درحالی‌که بارهای منفی گیر می‌افتند (شکل ۲-۱۳-ب). با قطع جریان الکتریکی، بازگشت توزیع یون‌های مثبت و منفی به حالت اولیه موجب ایجاد پاسخ IP در اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲-۱۰ چگونگی گسترش پلاریزاسیون غشایی، (الف) تنگ‌شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی، (ب) بار منفی ذرات رس و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی [After Fraser et al., 1964].

## ۲-۲-۳ روش‌های اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی

اندازه‌گیری‌های IP را به کمک دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل و همراه با برداشت‌های مقاومت‌ویژه ظاهری انجام می‌دهند که اغلب در آرایه دوقطبی-دوقطبی برداشت می‌شود. گاهی اوقات ونر، شلومبرژه و آرایه‌های قطبی - دوقطبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پایان‌نامه از آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و مستطیلی استفاده شده‌اند.

فاصله الکتروودی بر حسب عمق بررسی مورد نظر تا چند صد متر می‌رسد. از این روش در مرحله نیمه تفصیلی و به ویژه مرحله تفصیلی استفاده می‌کنند. در مرحله نیمه تفصیلی از آرایه‌های گسترده و خاص مانند آرایه مستطیلی و قطبی دوقطبی و در مرحله تفصیلی بیشتر از آرایه دوقطبی-دوقطبی استفاده می‌کنند. تجهیزات مورد نیاز در مطالعات پلاریزاسیون القایی نسبت به تجهیزات اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه معمول بیشتر هستند [Reynolds, 2011].

روش‌های اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی عبارت‌اند از:

حوزه زمان، اندازه‌گیری زوال ولتاژ اضافی؛

حوزه فرکانس، اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه ظاهری در دو یا تعداد بیشتری فرکانس (به طور معمول فرکانس‌های کمتر از ۱۰ هرتز)؛

حوزه فاز، اندازه‌گیری اختلاف فاز بین جریان ارسالی و اختلاف پتانسیل؛

طیف IP، اندازه‌گیری فاز و دامنه در گستره‌ای از فرکانس (بین ۱۰ به توان منفی ۳ تا ۴۰۰۰۰۰ هرتز).

## روش حوزه زمان

زمانی که جریان پیوسته طی مدت کوتاهی به زمین تزریق می‌شود، اگر پس از شارژ شدن زمین جریان را قطع کنند، ولتاژ اضافی ( $V_p$ ) ایجاد شده در مدت کوتاهی پس از قطع جریان به مقدار صفر می‌رسد (شکل ۲-۱۴ الف). پتانسیل مشاهده شده در حالت شارژ زمین ( $V_0$ ) شامل دو قسمت است، یکی پتانسیل حقیقی مربوط به جریان تزریق شده و دیگری ولتاژ اضافی که در اثر پلاریزه شدن زمین ایجاد می‌شود. زمانی که جریان را قطع می‌کنند، کل پتانسیل ابتدا به صورت لحظه‌ای به اندازه  $V$  (شکل ۲-۱۴ الف) کم می‌شود و سپس ولتاژ اضافی به صورت منحنی زوال طی زمان تخلیه به صفر می‌رسد. بطور معمول اندازه‌گیری پتانسیل روی منحنی زوال و در زمان کوتاهی پس از قطع جریان انجام می‌گیرد [Reynolds, 2011].

دستگاه نمی‌تواند اختلاف پتانسیل را در لحظه قطع جریان اندازه بگیرد. علاوه بر آن در لحظه قطع جریان آثار القایی پارازیتی نیز شدید است، بنابراین زمان اندازه‌گیری پتانسیل IP که به آن زمان نمونه‌گیری ( $t$ ) می‌گویند، لحظه‌ای پس از قطع جریان و به‌طور نوعی حدود ۰/۵ ثانیه است. اگر اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده در زمان  $t$  (پس از قطع جریان) برابر  $\Delta V_{IPt}$  باشد، نسبت این اختلاف پتانسیل به مقدار اختلاف پتانسیل در حالت شارژ ( $V_0$ ) در هر نقطه یکی از پارامترهای اندازه‌گیری IP هست که آنرا پلاریزاسیون ظاهری ( $P_a$ ) می‌نامند. دستگاه‌های IP تجارتي به طور معمول به جای اندازه‌گیری در یک زمان مشخص، اختلاف پتانسیل را در طول

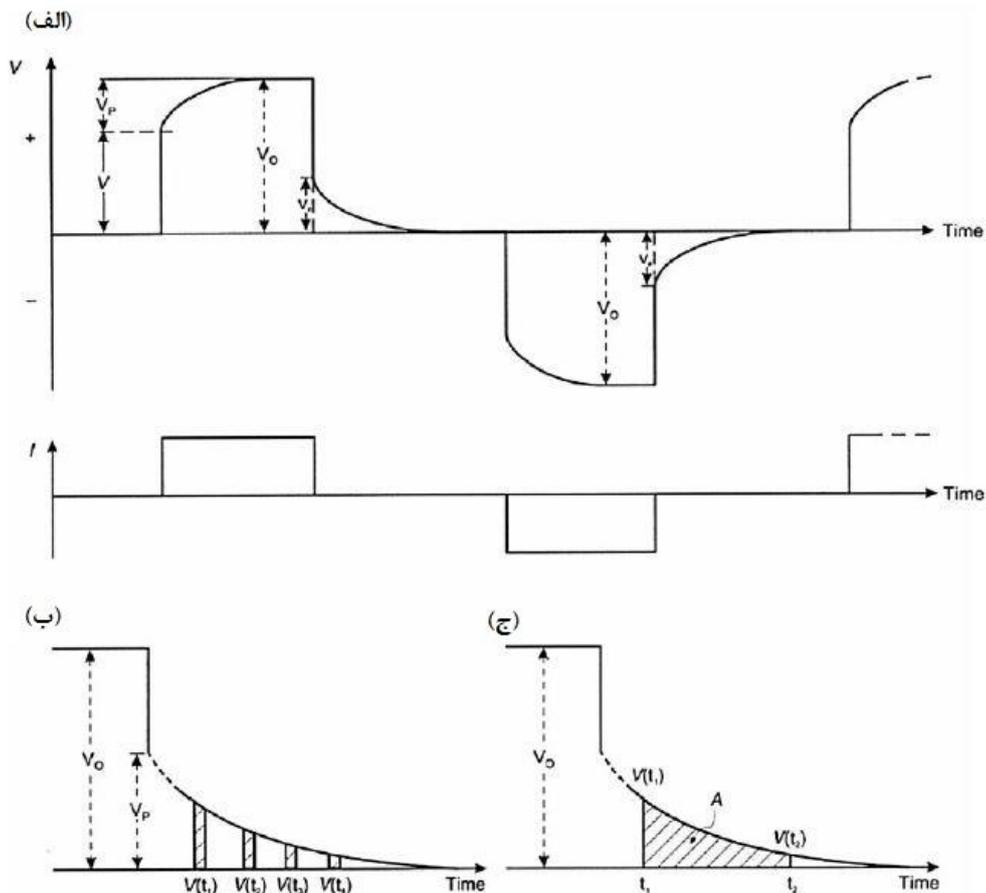
زمان معینی از منحنی زوال IP اندازه می‌گیرند ( $V_{t2}, V_{t1}$  در شکل ۱۱-۲-ب). به این ترتیب پلاریزاسیون ظاهری در زمان  $t$ ، عبارت است از:

$$P_a = \Delta V_t / V_0 \quad (۱۲-۲)$$

اگر پتانسیل‌های ولتاژ اضافی را در پریودهای کوتاه (یک دهم ثانیه) فاصله زمانی حدود نیم ثانیه اندازه‌گیری کنند، نسبت حاصل جمع آن‌ها به پتانسیل  $V_0$  بارپذیری ظاهری ( $M_a$ ) می‌نامند که پارامتر اندازه‌گیری دیگری در این مطالعات است.

$$M_a = (1/V) \int V_{IPt} dt = A/V_0 \quad (۱۳-۲)$$

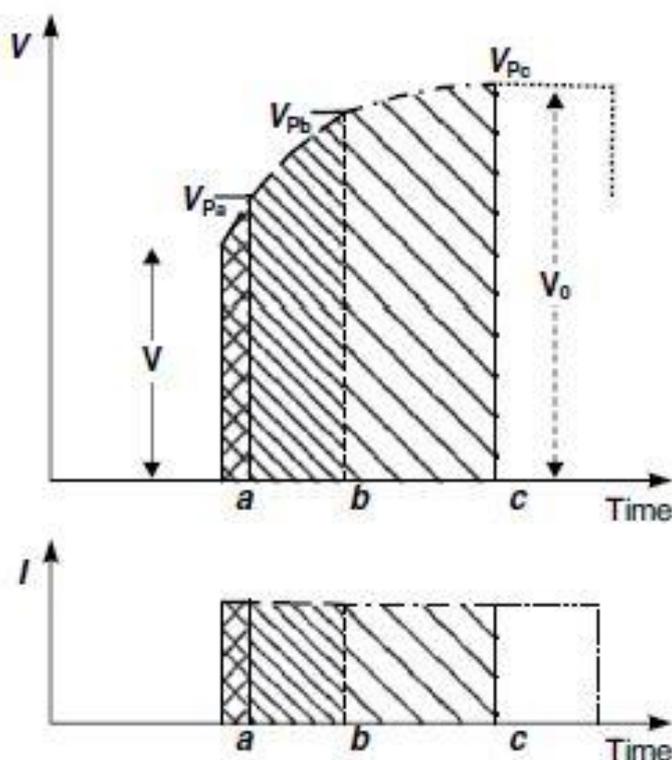
A: عبارت است از سطح زیر منحنی تخلیه در فاصله زمانی  $t_1$  و  $t_2$  (شکل ۱۴-۲-ج)



شکل ۱۱-۲: اندازه‌گیری IP در روش زمان-حوزه‌ای، (الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارش و تخلیه و تغییرات جریان تزریقی،

(ب) پارامتر پلاریزاسیون ظاهری، (ج) پارامتر بارپذیری [Reynolds, 2011]

اندازه‌گیری بارپذیری حقیقی در هر نقطه به طور عملی امکان پذیر نیست، زیرا آنچه به عنوان پاسخ زمین دریافت می‌شود، حاصل اثر پذیری مطلق و مقاومت ویژه حقیقی مجموعه لایه‌ها و سنگ‌هایی است که بر اساس حجم مورد تجسس دستگاه، اندازه‌گیری می‌شود. شدت IP با افزایش زمان شارژ افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر در یک نقطه هرچه زمان تزریق جریان کوتاه‌تر باشد، ولتاژ اضافی کمتر خواهد شد. (شکل ۲-۱۵)



شکل ۲-۱۵: افزایش زمان شارژ (کاهش فرکانس) موجب افزایش ولتاژ اضافی می‌شود [Reynolds, 2011]

## ۲-۲-۴ کاربرد روش IP

بیشترین کاربرد IP به مطالعات کانسارهای فلزی در اکتشافات معدنی اختصاص دارد و از دیگر کاربردهای این روش نیز می‌توان به اکتشاف آب‌های زیرزمینی، تعیین ضخامت روباره هوازه، آشکارسازی شکستگی‌ها و گسل‌ها و... اشاره کرد [Reynolds, 2011].

## ۳-۲ عملیات صحرائی

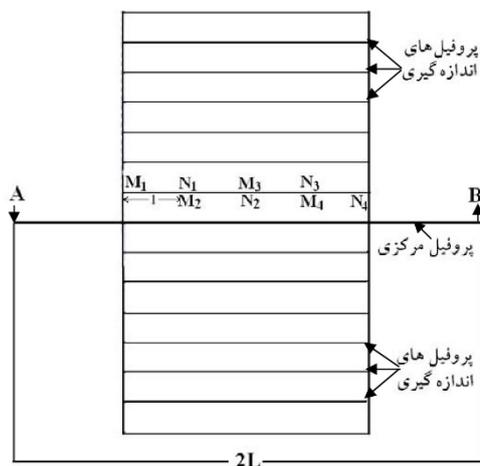
در محدوده مورد مطالعه در این پایان‌نامه از آرایه مستطیلی و دوقطبی-دوقطبی برای برداشت داده‌های ژئوفیزیکی انجام گرفت و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. ۶ آرایه مستطیلی  $AB=800$  متر با فواصل ایستگاهی ۲۰ متر و فواصل پروفیلی ۵۰ متر، ۶ آرایه دوقطبی-دوقطبی  $AB=40$  متر و ۳ آرایه دوقطبی-دوقطبی  $AB=20$  متر برداشت شد که در ادامه مقادیر اندازه‌گیری شده در خروجی‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## ۱۱-۳-۲ آرایه‌های الکترودی

آرایه‌های بکار گرفته شده در این پایان‌نامه عبارت‌اند از آرایه مستطیلی و دوقطبی-دوقطبی به همراه داده‌های حفاری استفاده شده که در این بخش کمی بیشتر در مورد این آرایه‌ها صحبت خواهیم کرد.

## آرایه مستطیلی

در این آرایه خطی را به عنوان خط مبنا موازی با روند بی‌هنجاری یا برون زدگی ماده معدنی بر روی زمین در نظر می‌گیریم. سپس با توجه به عمق مورد مطالعه و تشکیلات زمین‌شناسی منطقه فاصله الکترودهای فرستنده ( $AB$ ) و همچنین با در نظر گرفتن موقعیت و ابعاد توده معدنی و پراکندگی آن فاصله الکترودهای گیرنده ( $MN$ ) را مشخص می‌شوند. مقدار  $IP$  و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده به نقطه وسط  $MN$  نسبت داده می‌شود.

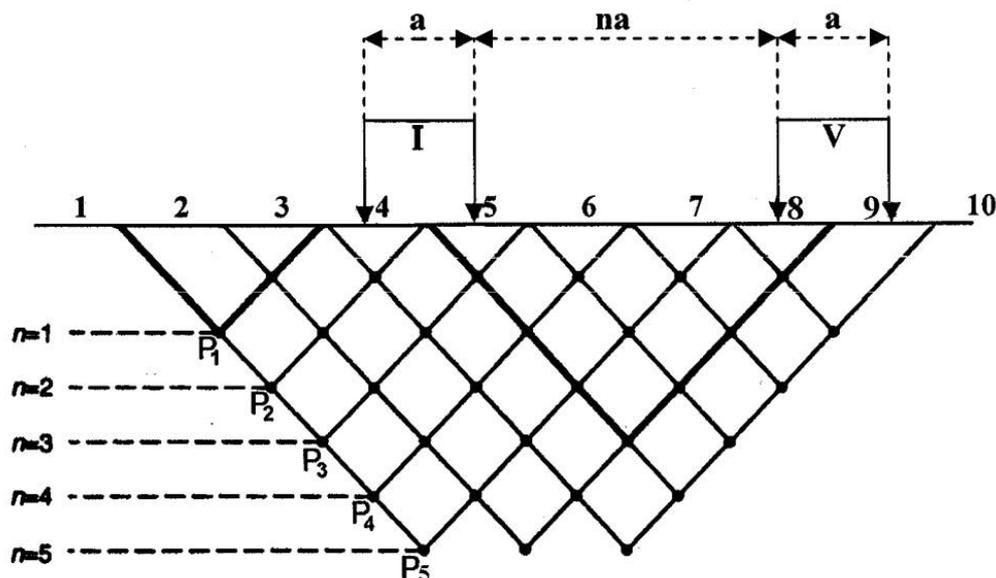


شکل ۲-۱۳: شمائی از آرایه مستطیلی [نوروزی غ، ۱۳۹۹]

## آرایه دوقطبی-دوقطبی

از این نوع آرایه برای مطالعه و بررسی تغییرات و گسترش بی‌هنجاری در عمق و به‌دست‌آوردن شبه مقطعی از مقادیر IP و مقاومت‌ویژه ظاهری در محل یک پروفیل استفاده می‌شود. در این نوع آرایه هر چهار الکتروود A,B,M,N در امتداد یک پروفیل قرار داشته و عملاً فاصله الکتروودهای فرستنده مساوی فاصله الکتروودهای گیرنده و برابر مقدار ثابت  $a$  می‌باشد ( $AB=MN=a$ ). در هر اندازه‌گیری الکتروودهای AB ثابت بوده و الکتروودهای MN در امتداد پروفیل حرکت می‌کنند.

فاصله بین نزدیک‌ترین الکتروودهای جریان و پتانسیل برابر  $na$  می‌باشد ( $n=1,2,3,\dots$ ) و عمق هر اندازه‌گیری برابر  $(n+1)a/2$  خواهد بود. عدد اندازه‌گیری شده به نقطه‌ای در محل تلاقی دو خط با زاویه  $45^\circ$  درجه نسبت به سطح زمین که از وسط  $AB, MN$  رسم شده نسبت داده می‌شود. به این ترتیب از مجموع نقاط اندازه‌گیری شده با این روش شبه مقطعی از بارپذیری و مقاومت‌ویژه ظاهری در امتداد یک پروفیل بدست خواهد آمد.



شکل ۲-۱۴: شمائی از آرایه دوقطبی-دوقطبی [نوروزی غ، ۱۳۹۹]

## فصل سوم زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

### ۱-۳ مقدمه

برگه ۱:۲۵۰۰۰ کبودان یکی از برگه‌های شانزده‌گانه ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ بردسکن است؛ که در فاصله ۲۷۰ کیلومتری جنوب غرب مشهد و در حدفاصل مختصات ۵۷۵۲۳۰ تا ۵۸۰۰۰۰ طول شرقی و ۳۵۳۰۲ تا ۳۵۰۰۳۰ عرض شمالی قرار گرفته است (در جدول ۱-۳ مختصات رئوس محدوده اکتشافی قابل مشاهده است) و چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰ آن نیز کاشمر نام دارد [صفری، ۱۳۸۸].

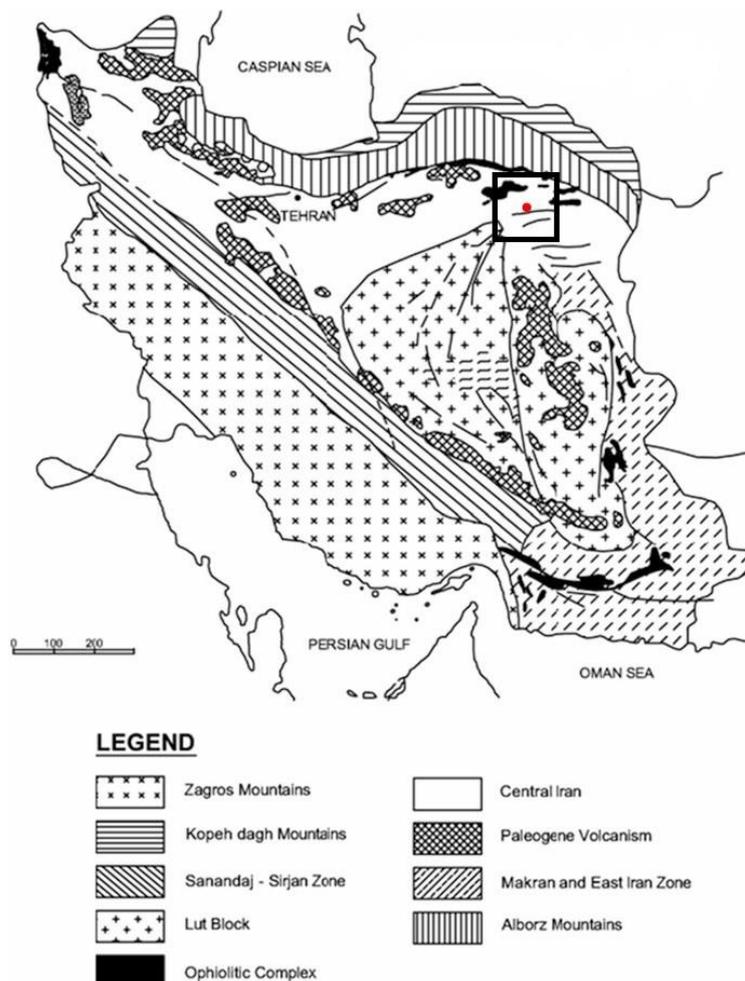
جدول ۱-۳: مختصات رئوس محدوده اکتشافی

point	X(WGS84)	Y(WGS84)	طول جغرافیایی			عرض جغرافیایی		
			درجه	دقیقه	ثانیه	دقیقه	درجه	ثانیه
A	585500	3921900	57	56	31	35	26	13
B	591000	3921900	58	0	9	35	26	13
C	585500	3917900	57	56	31	35	24	3
D	591000	3917900	58	0	9	35	24	3

منطقه مورد بررسی در این مطالعه در برگه ۱:۲۵۰۰۰ کبودان قرار گرفته است. شکل ۱-۳ موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲-۳ منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران قابل مشاهده است.



شکل ۱-۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن [http://www.google.com/map/]



شکل ۲-۳: نقشه زمین شناسی ساختاری ایران که محدوده مورد مطالعه با دایره مشخص شده است [Stöcklin 1968]

### ۲-۳ زمین شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

از نظر زمین شناسی (شکل ۳-۳) بخش قابل توجهی از محدوده مورد مطالعه را سازند تکنار (به سن پرکامبرین) تشکیل داده است که شامل شیست‌های سبز با منشأ توف‌های آتشفشانی همراه با لایه‌هایی از متاریوداسیت و متاریولیت می‌باشد که ضخامت زیادی دارد و دگرگونی بسیار ضعیفی را نیز متحمل شده است. رخنمون‌های نسبتاً وسیعی از سنگ‌های گرانودیوریتی و گرانیتی در غرب محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شوند که به داخل سازند تکنار نفوذ کرده‌اند. علاوه بر آن رخنمون‌های کوچکی از سنگ‌های آهکی (کرتاسه)، سنگ‌های اولترابازیک و مجموعه آمیزه رنگین کوه بیجورد (کرتاسه فوقانی) و رخنمون‌های محدودتری از سنگ‌های توف، آندزیت، رادیولاریت و سنگ‌های اولترابازیک (کرتاسه فوقانی)، کنگلومرای کرمان (پالئوسن) و آندزیت (پالئوزن) در شمال محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شود. رخنمون‌های کوچک‌تری از سازندهای سلطانیه (کامبرین) و

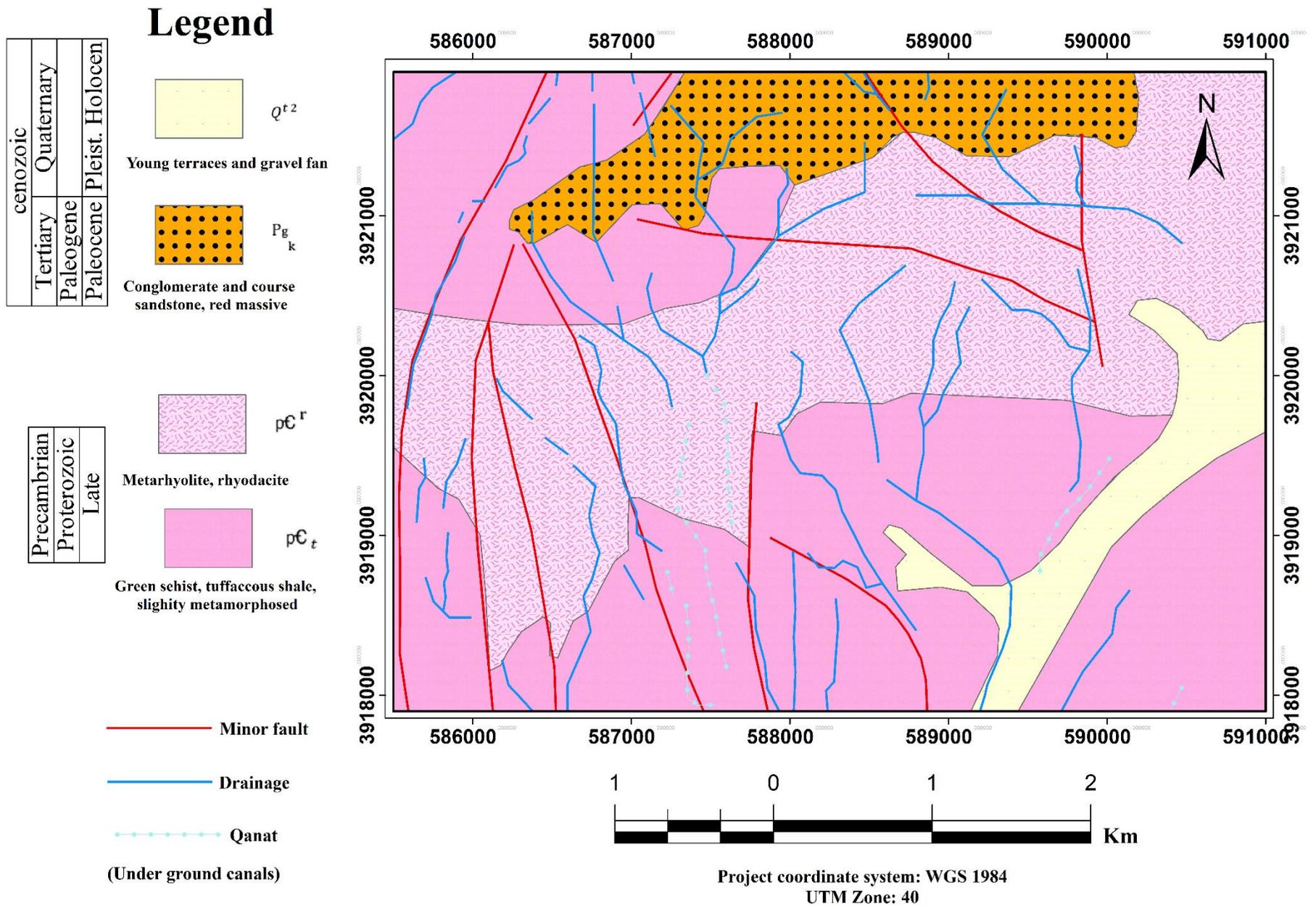
برونزد نسبتاً گسترده‌ای از رسوبات آهکی سازند جمال (پرمین) و شمشک (ژوراسیک) نیز در جنوب محدوده مشاهده می‌گردد [http://www.gsinet.ir]

واحدهای سیلیسی-فلدسپاتی و برشی گنبدی شکل که میزان سیلیس بالایی دارند، در منطقه رخنمون دارد و در بعضی قسمت‌ها با کانی‌سازی همراه است. این منطقه جزئی از زون ایران مرکزی، پهنه مرکزی کمر بند آلپ-همالیا و زیر زون تکنار محسوب می‌شود [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹]. زون ساختاری تکنار توسط کمر بند افیولیتی در شمال و گسل درونه در جنوب محدود می‌شود. این ساب‌زون توسط گسل تکنار یا ریوش از ساب‌زون سبزوار در شمال جدا می‌شود. سازند و زون تکنار یک ریفت درون قاره‌ای عقیم مانده است؛ که به پرکامبرین نسبت داده شده است [صفری، ۱۳۸۹]. سازند تکنار در معرض دگرگونی ناحیه درجه پایین (رخساره شیست سبز) قرار گرفته است [کریم‌پور، ۱۳۸۹].

کانی‌سازی در تکنار از نوع کانی‌سازی ماسیوسولفید است. اما این کانسار به علت داشتن بیش از ۶۰ درصد مگنتیت همراه با کانی‌های سولفیدی، از بقیه کانسارهای ماسیوسولفید متمایز می‌شود. کانسار پلی‌متال تکنار به عنوان ماسیوسولفید پلی‌متال (Pb-Ag-Au-Zn-Cu) غنی از مگنتیت تیپ تکنار معرفی شده است [کریم‌پور، ۱۳۸۹].

علاوه بر معدن معروف تکنار در قسمت غربی این زون، در قسمت شرقی زون تکنار (منطقه کبودان)، ذخایر جدیدی از کانی‌سازی سولفید توده‌ای شناسایی گردیده است [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

گسل کویر بزرگ (گسل درونه) و گسل تکنار دو عامل تأثیرگذار در زمین‌ساخت و زمین‌شناسی منطقه کبودان بوده و پنجره فرسایشی تکنار بلوک گوه شکلی از سنگ‌های پرکامبرین و پالئوزوئیک ایران را در حدفاصل بلوک لوت در جنوب و زون سبزوار در شمال بالا زده است. از نظر چینه‌شناسی قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه به مجموعه دگرگونی سازند تکنار با سن پرکامبرین تعلق دارد [صفری، ۱۳۸۹].



شکل ۳-۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بردسکن]

از نظر زمین‌شناسی اقتصادی، به نظر می‌رسد کانی‌سازی‌ها در منطقه کبودان به دو صورت سین‌ژنتیک و اپی‌ژنتیک رخ داده باشد. به طوری که انواع سین‌ژنتیک با ولکانیسم‌های زیردریایی اسیدی در ارتباط بوده و فرایندهای پلوتونیک هم‌زمان یا بعد از ولکانیسم نیز توانسته است، موجبات تشدید دگرسانی و کانی‌سازی را فراهم نمایند. به عبارت دیگر کانی‌سازی‌های سین‌ژنتیک در زون تکنار در ارتباط مستقیم با کالدرهای بازخیز<sup>۱</sup> و گنبد‌های ریولیتی - درشی با حجم قابل توجهی از سنگ‌های کوارتز فلدسپاتی بوده است [صفری، ۱۳۸۹] و نوع اپی‌ژنتیک متأثر از فرایندهای هیدروترمال به وجود آمده باشد [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

کانی‌سازی‌ها در این منطقه عمدتاً از نوع طلا، روی، مس، سرب، نقره، منگنز، آهن و آغشتگی‌های آرسنیک، جیوه، بیسموت، آنتیموان است. از نظر کانی‌شناسی وجود کانی‌های مالاکیت، آزوریت، مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و کولیت در این منطقه محرز شده است [صفری، ۱۳۸۹].

با توجه به وجود سنگ‌های در برگیرنده شیست سبز و سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده از قبیل ریولیت، ریوداسیت و داسیت و نیز محیط تکتونو - ماگمایی ذخایر مورد اشاره، می‌توان نتیجه گرفت کانی‌سازی‌های سین‌ژنتیک منطقه عموماً شباهت‌های زیادی با کانسارهای ماسیوسولفید نوع کوروکو دارند، ولی از لحاظ مقدار بعضی از عناصر مانند آهن و منگنز با آن‌ها تفاوت‌هایی نشان می‌دهند [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

بر اساس عملیات پی‌جویی ۱۳ هدف معدنی در برگه کبودان شناسایی شده که به شرح زیر می‌باشد:

- هدف‌های معدنی مس، روی، طلا، سرب، نقره و آهن زون تکنار (هدف شماره ۱ تا ۹)
- هدف‌های معدنی مس، طلا، نقره، منگنز، کرومیت و آهن در زون سبزواری (هدف شماره ۱۰ تا ۱۳)

[صفری، ۱۳۸۹].

در این مطالعه به بررسی مناطق تک‌اسبی، دامن قر و کلاته نوری که در اهداف شماره ۱ تا ۹ قرار می‌گیرند، پرداخته شده است.

---

<sup>1</sup> Caldera Resurgence

### ۳-۲-۱ منطقه تک اسبی، گذار چهاربخشی تا گذار بارو

از نظر موقعیت جغرافیایی این کانی‌سازی در شمال کبودان واقع شده است. دسترسی به این محدوده از طریق یک جاده خاکی که از کیلومتر ۲۱ جاده بردسکن - سبزوار که از کنار کارخانه آسفالت منشعب می‌شود، امکان‌پذیر است. سنگ‌های آن بیشتر از نوع شیست‌های سبز و متاتوف‌های ریولی و برش‌های سیلیسی - فلدسپاتی می‌باشد. در بخش‌هایی از محدوده نیز دایک‌های دیابازی برون‌زد یافته است. زون کانی‌سازی به صورت مگنتیت، مالاکیت و سولفیدهای پیریت و کالکوپیریت با دگرسانی‌های کلریتی و هماتیتی - لیمونیتی و استوکورک منطبق شده است [صفری، ۱۳۸۸].

به‌طور کلی در این منطقه کانی‌سازی در محل‌های برخورد متاتوف‌های اسیدی و متاریولیت‌ها با شیست‌های سبز تکنار رخ داده است. دایک‌های دیاباز نیز به نظر فاز ساب‌ولکانیک پس از ولکانیسم (سازند تکنار) و قبل از پلوتونیزم ترشیاری می‌باشند. به نظر می‌رسد دایک‌های مذکور نقش حرارتی مناسبی را در جهت ایجاد برش‌های سیلیسی - فلدسپاتی در گنبد‌های ریولیتی ایفا کرده باشند [صفری، ۱۳۸۸].

این زون نسبتاً بزرگ و از انواع استراتی باند آتشفشانی - رسوبی (سولفید توده‌ای) است که کانی‌سازی آهن در بخش بالا و دگرسانی اکسیدی - آرژیلی - لیمونیتی - استوکورکی (کوارتز - سربیسیت شیست مملو از اکسید آهن) در بخش پایین آن به وقوع پیوسته است. شواهد کانی‌سازی به صورت مالاکیت، مگنتیت، منگنز و سولفیدهای آهن و مس دیده می‌شود [صفری، ۱۳۸۸].

### ۳-۲-۲ منطقه دامن قر

منطقه دامن قر در منطقه‌ای معروف به منطقه خاک‌های زرد قرار گرفته است [صفری، ۱۳۸۸]. دسترسی به این محدوده نیز از طریق یک جاده خاکی که از کیلومتر ۲۱ جاده بردسکن - سبزوار که از کنار کارخانه آسفالت منشعب می‌شود، امکان‌پذیر است. سنگ‌های منطقه لیمونیتی هستند و ترکیب اسیدی (داسیت تا ریوداسیت) و گاه تراکیتی و رسوبی دگرگون شده مانند شیست سبز دارند. میلونیتی شدن و هجوم محلول‌های هیدروترمال بر سنگ تأثیر گذاشته است [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

در این منطقه کانی‌سازی طلا به صورت رگه‌ای وجود دارد [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹]. وجود کانی‌سازی طلا در کوارتز - سریسیت شیست‌های مملو از آهن و آرسنیک و همچنین در دپوی خاک‌های زرد (احتمالاً ناشی از لیچینگ طبیعی در دپوی اولیه سنگ‌های دگرسان شده یا ماده معدنی اولیه با ماهیت کوارتز - سریسیت شیست‌های مملو از آهن و آرسنیک) می‌باشد. آغشتگی‌های سرب، آرسنیک و آنتیموان نیز در این محدوده به وضوح قابل مشاهده است. ماهیت کانی‌سازی باید نخست از نوع سین‌ژنتیک (سولفید توده‌ای) و در درجه دوم متأثر از فازهای متأخر اپی‌ژنتیک (اپی‌ترمال) باشد که در سنگ‌های کوارتز - سریسیت شیست با زون‌های خرد شده نیز تشدید شده است [صفری، ۱۳۸۸].

کانی‌سازی در منطقه دامن قر با دیگر مناطق یاد شده تفاوت‌هایی نشان می‌دهد. در این منطقه کانی‌سازی اصلی طلا است که همراه با کانی‌سازی منگنز، روی، آهن، سرب، نقره و جیوه رخ داده است. به نظر می‌رسد که فرایندهای هیدروترمال در این منطقه قوی‌تر عمل کرده و در ترکیب پاراژنزی تأثیرگذار بوده‌اند [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

### ۳-۲-۳ منطقه کلاته نوری

دسترسی به این محدوده پس از طی مسافت ۱۴ کیلومتر از جاده بردسکن - سبزوار و عبور از داخل روستای کبودان، توسط یک جاده خاکی به مسافت تقریبی ۳ کیلومتر، امکان‌پذیر است. در منطقه کلاته نوری یک‌روند کانی‌سازی با امتداد شمال غرب - جنوب شرق مشاهده می‌شود. در این منطقه به ترتیب عناصر روی، سرب، منگنز، مس و آهن آنومالی دارد. مقدار سرب و روی در منطقه کلاته نوری بیشتر است [صفری و اکبری مقدم، ۱۳۸۹].

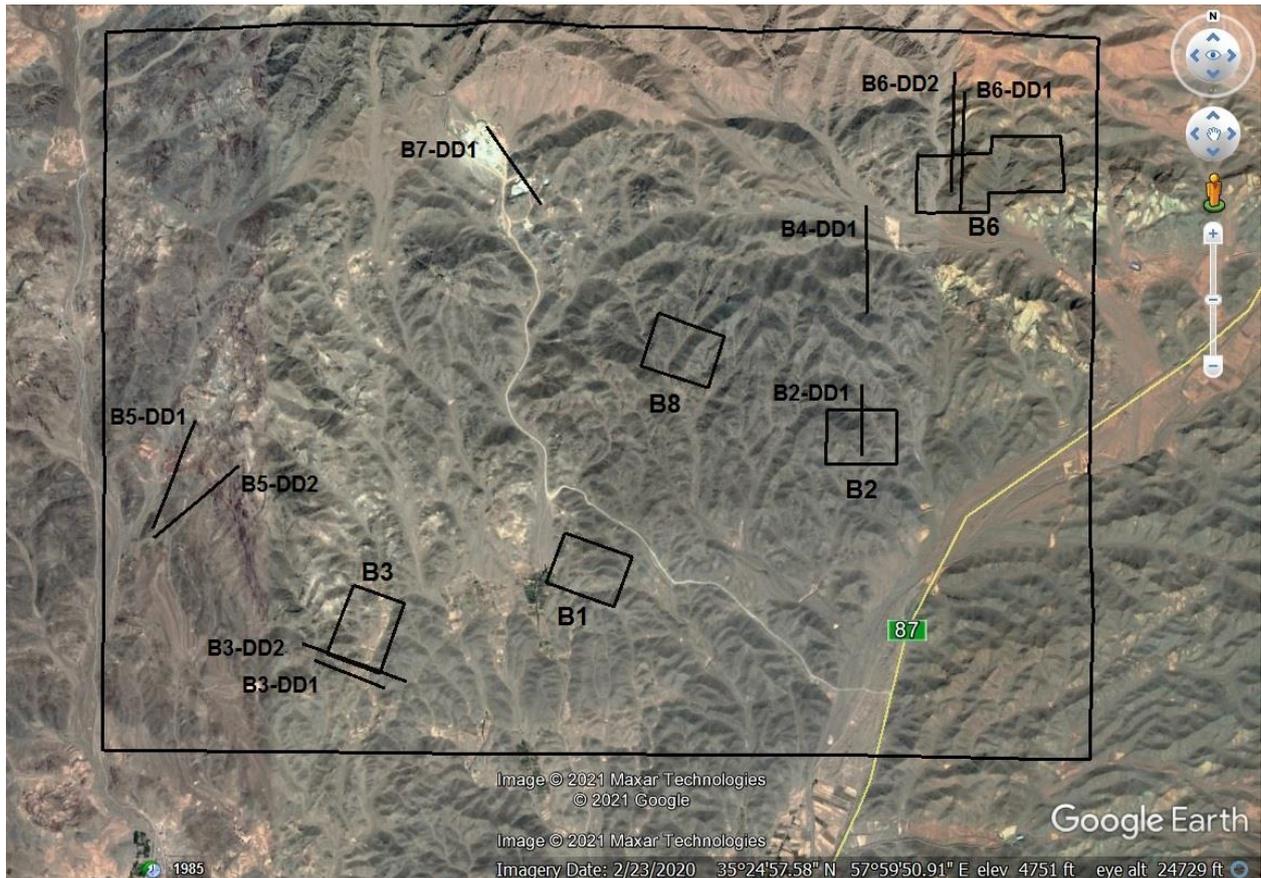
فصل چهارم برداشت صحرائی، مدل سازی داده های IP و  
مقاومت ویژه، نقاط حفاری شده و تفسیر نتایج

#### ۱-۴ مقدمه

روش‌های IP و مقاومت‌ویژه از جمله روش‌های ژئوفیزیک مورد استفاده در مطالعه زیرسطحی برای ارزیابی پتانسیل اکتشاف مواد معدنی است. هدف روش‌های IP و مقاومت‌ویژه انتخاب بهترین نقاط حفاری برای اهداف اکتشافی است. [Ferdows and Ramazi, 2015] با توجه به هزینه کم و زمان کارکرد آن و همچنین آسیب‌های محدود آن به محیط زیست، ترکیبی از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه الکتریکی به طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف اکتشاف مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Jin et al. 2008]. مقاومت‌ویژه و IP برداشت شده در آرایه‌های مستطیلی و پروفیل دوقطبی-دوقطبی با وارونه سازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv انجام گرفت، همبستگی بین مقاومت‌ویژه و IP می‌تواند محل مناسبی برای کانی‌سازی باشد که با استفاده از گمانه‌های اکتشافی در این مناطق نهایتاً دقت مدل‌های ساخته شده و همچنین وجود ماده معدنی در محدوده‌های برداشت مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۲-۴ نحوه انجام عملیات صحرائی در منطقه

در منطقه مورد مطالعه در این پایان‌نامه به منظور مشخص کردن تغییرات جانبی و گسترش سطح بی‌هنجاری‌ها، برداشت صحرائی داده‌ها با دو روش IP و مقاومت‌ویژه، در ۵ محدوده با آرایه مستطیلی انجام گرفت و پس از مشخص شدن مناطق بی‌هنجاری، ۹ پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی برای شناسایی بی‌هنجاری در عمق نیز برداشت شد و در نهایت مناطق با پتانسیل بالا برای تأیید وجود ماده معدنی حفاری گردید که در این فصل به بررسی جداگانه هرکدام از آرایه و حفاری‌ها پرداخته خواهد شد. شکل ۱-۴ موقعیت منطقه، محدوده‌های برداشت شده با آرایه مستطیلی و همچنین موقعیت پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: منطقه مورد مطالعه همراه با موقعیت برداشت محدوده‌ها با آرایه مستطیلی و پروفیل‌های برداشت شده با آرایه دوقطبی -

دوقطبی [http://www.google.com/earth]

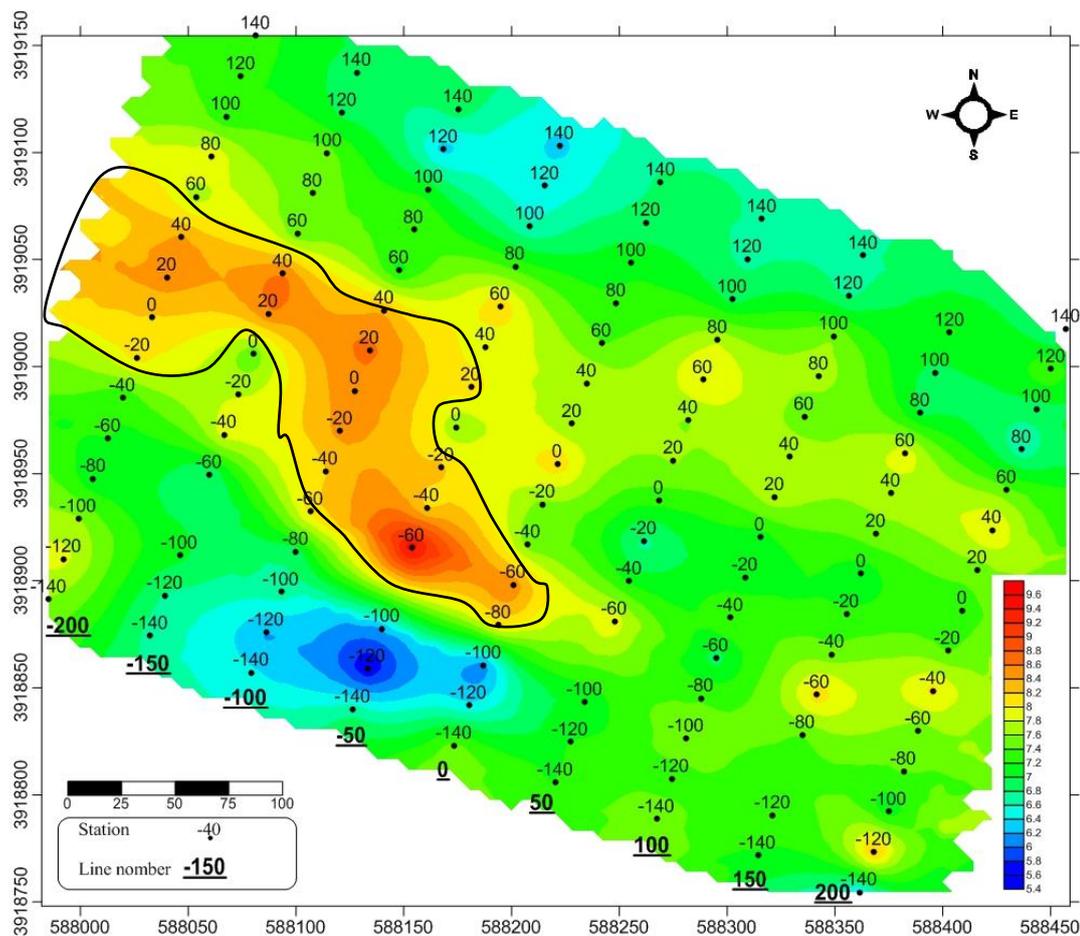
### ۴-۳ بررسی نتایج در محدوده شماره ۱

این محدوده توسط یک آرایه مستطیلی با مشخصات  $AB=800$  متر و فواصل پروفیل‌های ۵۰ متر و  $MN=20$  متر مورد پیمایش قرار گرفته و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده نقشه‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

### بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱

در این محدوده حداقل مقدار عددی بارپذیری  $5/6$  و حداکثر مقدار عددی آن  $9/6$  می‌باشد. با توجه به نقشه بارپذیری ظاهری (نقشه ۴-۱)، محدوده تغییرات بارپذیری بسیار کوچک است. محدوده بی‌هنجار (طیف رنگی

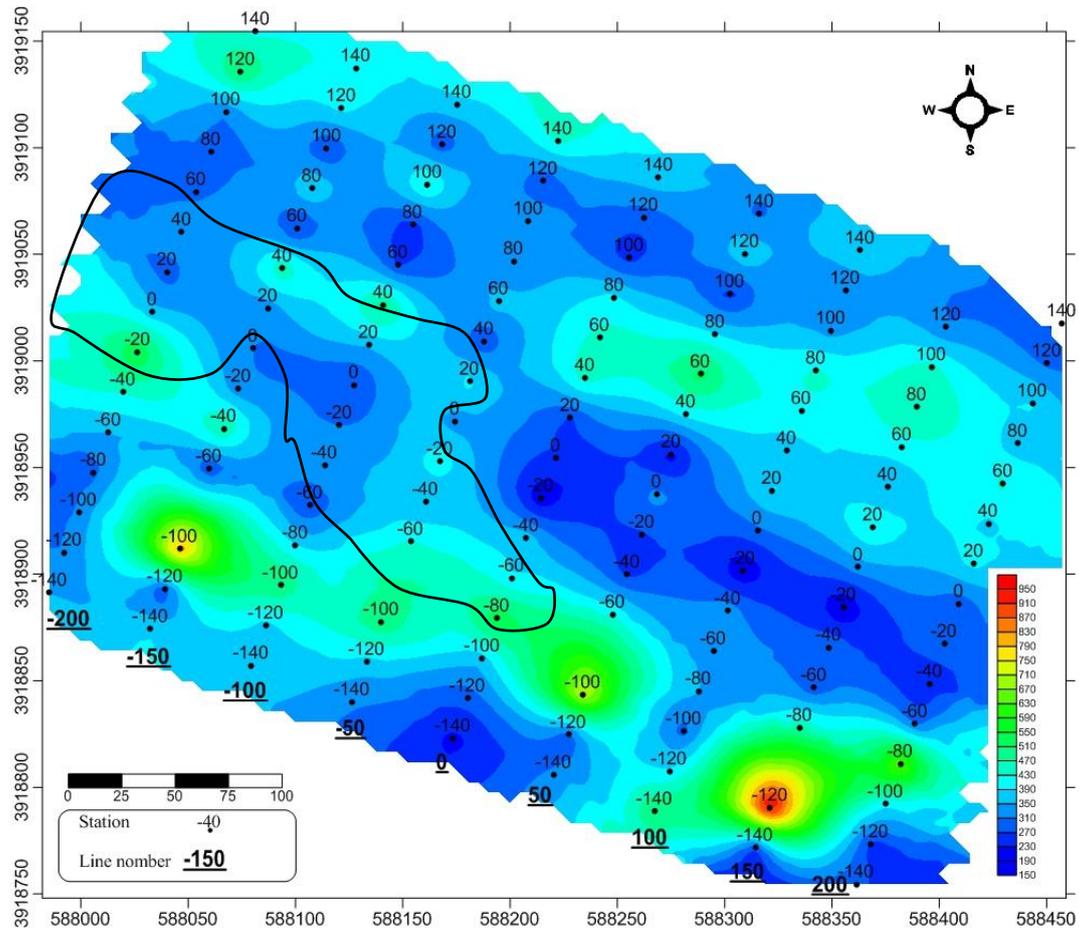
نارنجی تا قرمز) که احتمالاً نشان‌دهنده کانه‌زایی می‌باشد، به مقدار کمی از مقدار زمینه (حدود ۷/۴ میلی‌ولت بر ولت) تجاوز می‌کند.



نقشه ۴-۱: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱

نقشه مقاومت‌ویژه ظاهری این محدوده در نقشه ۴-۲ به نمایش در آمده است. محدوده تغییرات عددی مقاومت‌ویژه ظاهری بین ۱۸۹ تا ۹۸۵ اهم متر می‌باشد. در این نقشه مقاومت‌ویژه بیشتر نواحی از مقاومت‌ویژه الکتریکی در حد ۲۰۰ تا ۴۰۰ اهم متر برخوردار است. به نظر می‌رسد که نقشه مقاومت‌ویژه تبعیتی از نقشه بارپذیری ندارد ولی بخش‌هایی از مناطق با مقاومت‌ویژه الکتریکی متوسط (طیف رنگی سبز تا زرد) منطبق بر بی‌هنجاری مشاهده شده بر روی نقشه بارپذیری است. با توجه به شواهد کانی‌سازی در سطح زمین بی‌هنجاری ضعیف در نقشه بارپذیری می‌تواند در ارتباط با کانی‌سازی باشد مقدار IP متوسط و مقاومت‌ویژه متوسط تا بالا در نقشه‌ها را می‌توان به کانی‌سازی ضعیف و پراکنده سولفیدی همراه با سیلیسی شدن کانه‌زایی نسبت

داد [محمدی ویزه، ۱۳۸۸]. از آنجا که مقادیر بی‌هنجاری IP در این محدوده بالا نمی‌باشد و به دلیل اولویت‌بندی مناطق مورد مطالعه از برداشت‌های دوقطبی-دوقطبی بر روی بی‌هنجاری بارپذیری در این ناحیه خودداری شده است.



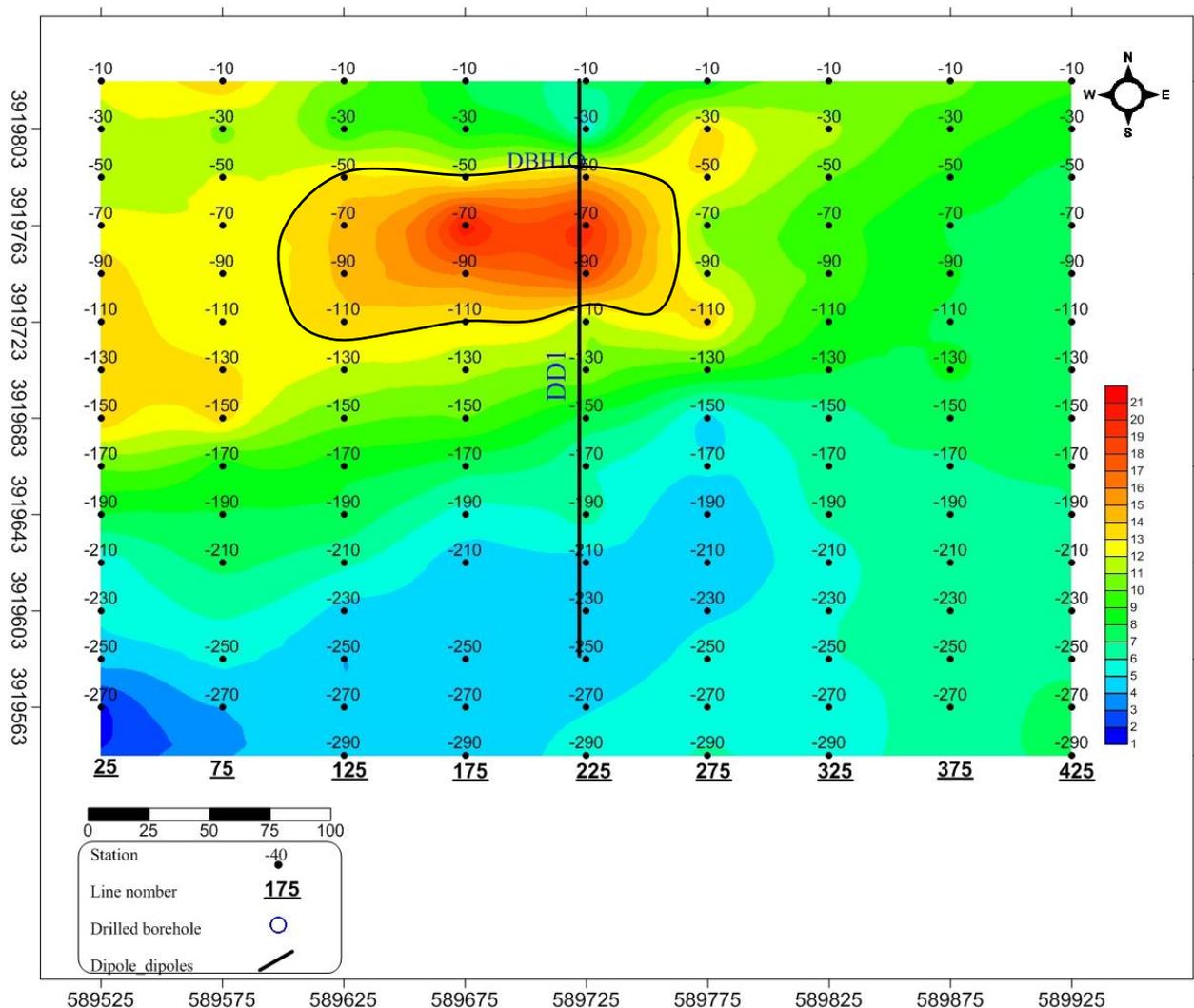
نقشه ۴-۲: نقشه مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۱

#### ۴-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۲

این محدوده توسط یک آرایه مستطیلی با مشخصات  $AB=800$  متر و فواصل پروفیل‌های  $50$  متر و  $MN=20$  متر و یک پروفیل دوقطبی-دوقطبی مورد پیمایش قرار گرفته و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. در ادامه مقادیر اندازه‌گیری شده در نقشه‌های مقاومت ویژه و بارپذیری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

#### ۴-۴-۱ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲

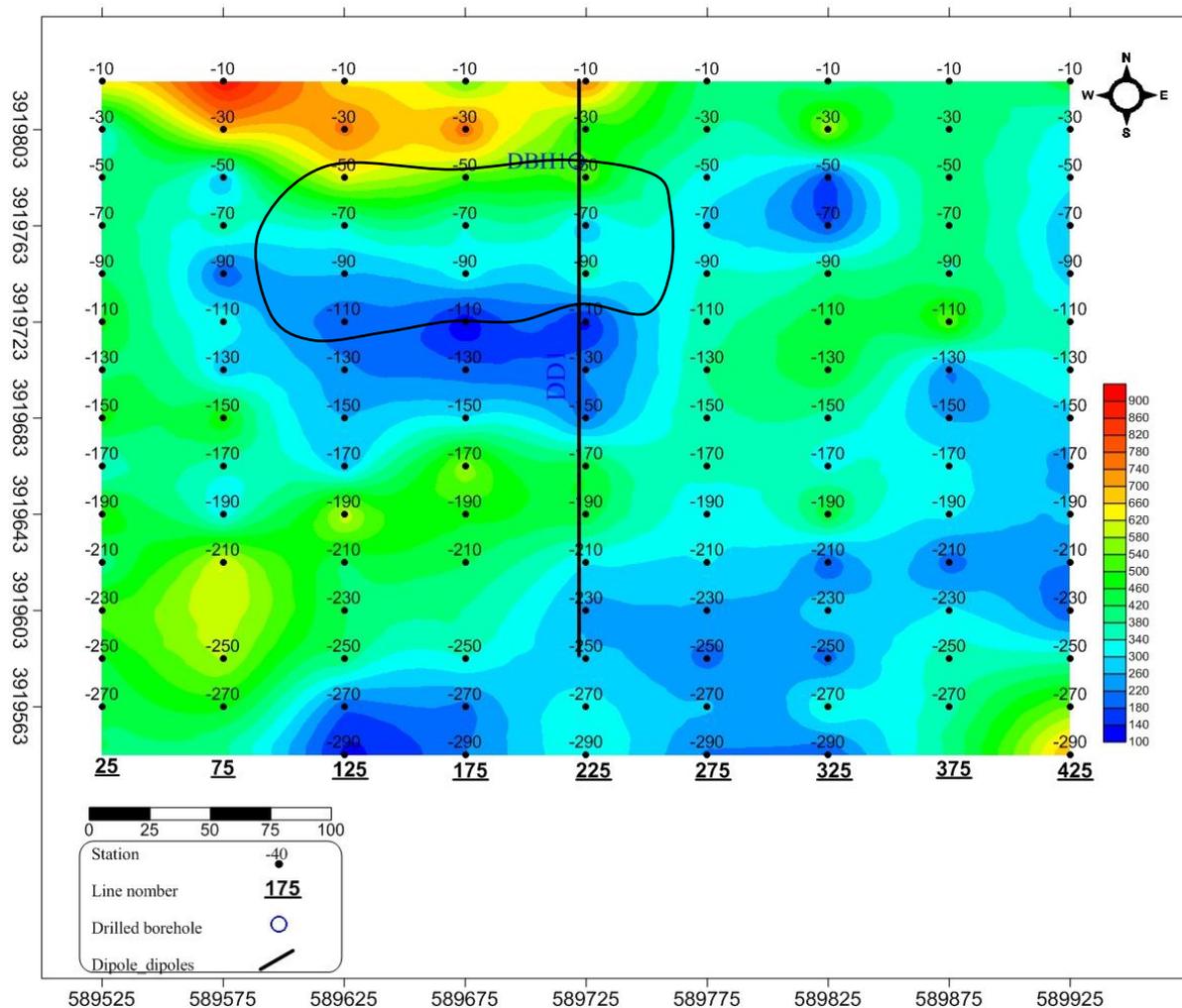
نقشه بارپذیری ظاهری این محدوده با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۳-۴ به نمایش درآمده است. در این نقشه نواحی با بارپذیری بالا که مشخصه کانه‌زایی می‌باشند؛ با رنگ قرمز از دیگر نواحی متمایز شده‌اند. حداقل مقدار عددی بارپذیری ۱/۸ و حداکثر مقدار عددی آن ۲۱ می‌باشد. همان‌طور که از این نقشه مشاهده می‌شود، در محدوده بالا نقشه در فاصله پروفیل‌های ۱۲۵ تا ۲۷۵ و مابین ایستگاه‌های ۵۰ تا ۱۱۰، از بارپذیری بالایی برخوردار است.



نقشه ۳-۴: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲

نقشه مقاومت‌ویژه ظاهری محدوده شماره ۲ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۴ به نمایش درآمده است. محدوده تغییرات عددی مقاومت‌ویژه ظاهری بین ۱۰۴ تا ۸۹۸ اهم متر می‌باشد. در این نقشه نواحی با

مقاومت ویژه الکتریکی پایین (طیف رنگی آبی) از انطباق نسبی خوبی با بی‌هنجاری با IP بالا (طیف رنگی قرمز) بر روی نقشه بارپذیری برخوردار است. این دو بی‌هنجاری از نظر موقعیت مکانی کاملاً منطبق نیستند. در ادامه و در بررسی مقاطع آرایه دوقطبی-دوقطبی (B2-DD1) مشاهده خواهد شد که این جابه‌جایی عمدتاً به واسطه بی‌هنجاری‌های محلی سطحی ناشی شده است و در عمق این دو بی‌هنجاری از انطباق قابل توجهی برخوردارند. از آنجا که کانی‌سازی در این منطقه به صورت ملاکیت و سولفیدی می‌باشد، این ناحیه را می‌توان از پتانسیل مناسبی برای کانی‌سازی برخوردار دانست. از این رو برای بررسی‌های جزئی‌تر، یک آرایه دوقطبی-دوقطبی بر روی بی‌هنجاری IP در این ناحیه در نظر گرفته شد.



نقشه ۴-۴: نقشه مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۲

## ۴-۴-۲ بررسی مقطع B2-DD1

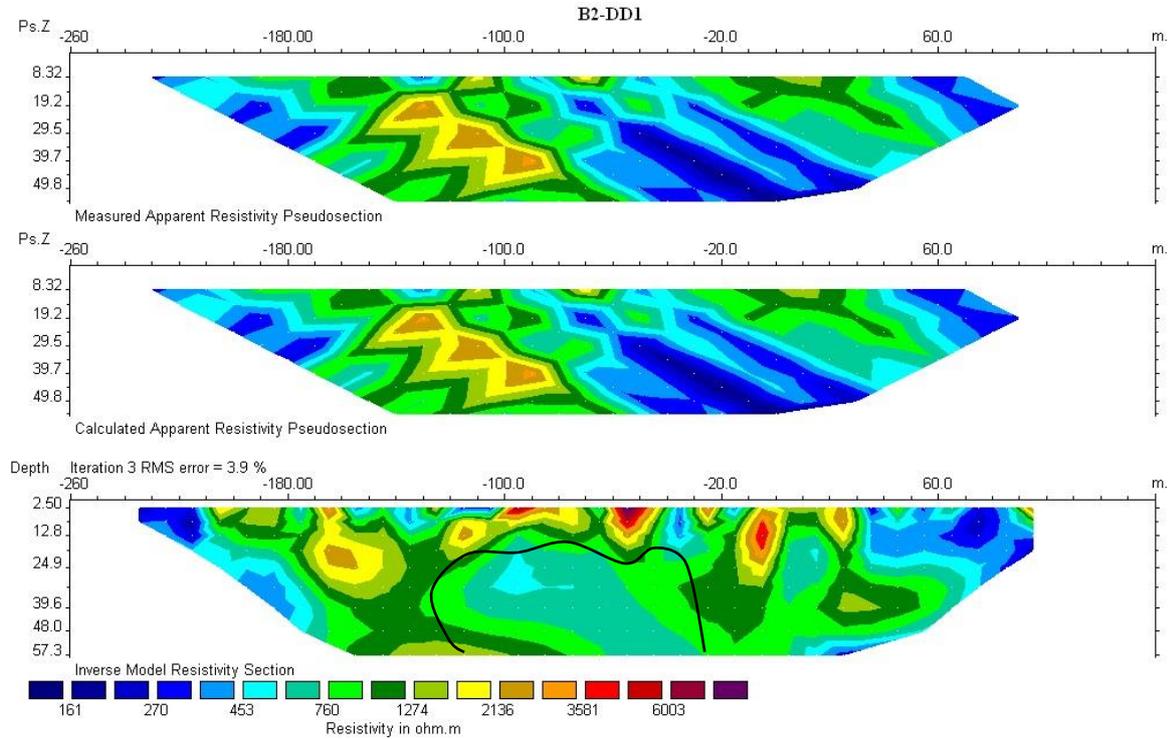
به منظور بررسی عمقی و ردیابی بی‌هنجاری واقع در نقشه بارپذیری آرایه مستطیلی (نقشه ۴-۳)، یک برداشت با آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی و پرش ۲۰ متر ( $AB=MN=Leap=20\text{ m}$ ) بر روی پروفیل در موقعیت ۲۲۵ متر در طول مستطیل (نقشه‌های ۴-۳ و ۴-۴) برداشت شد. موقعیت این پروفیل در نقشه‌های ۴-۳ و ۴-۴ به نمایش درآمده است. به منظور پوشش جانبی این بی‌هنجاری آرایه دوقطبی-دوقطبی به سمت شمال آرایه مستطیلی گسترش یافته است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت ویژه مربوطه با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۵ مشاهده می‌شود. در نقشه‌های ۴-۵-الف و ۴-۵-ب به ترتیب شبه مقطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون (معکوس) مربوط به این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۵-ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت ویژه به ترتیب ۰/۱۴ تا ۳۲ میلی‌ولت بر ولت و ۱۴۲ تا ۳۰۹۲ اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. این بی‌هنجاری که در فاصله ایستگاه‌های ۲۰ تا ۱۲۰ و در عمق تقریبی بالای ۱۵ متری واقع شده از انطباق خوبی با بی‌هنجاری با مقاومت ویژه نسبتاً پایین (حدود ۵۰۰ اهم متر) برخوردار است. با توجه به کانی‌سازی مس به صورت مالاکیت و حضور کانی‌های سولفیدی در این منطقه، این ناحیه را می‌توان از پتانسیل بالایی برای کانی‌سازی برخوردار دانست. همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده بارپذیری (نقشه ۴-۵-ج) دیده می‌شود، بی‌هنجاری IP در عمق ۵۰ متر (عمق مدل‌سازی) محدود نشده و امکان گسترش آن در عمق وجود دارد.

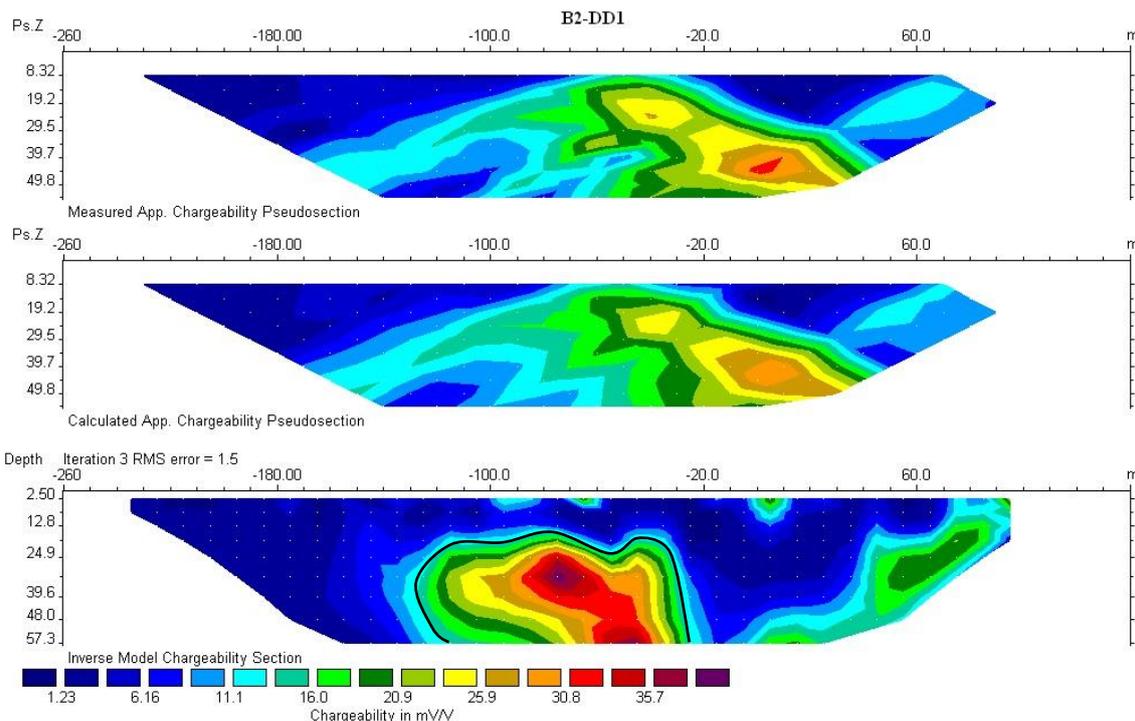
با توجه به موارد ذکر شده فوق گمانه اکتشافی بنا بر نقشه بارپذیری در این محدوده حفر گردید که اطلاعات آن به شرح زیر است.

جدول ۴-۱: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۲

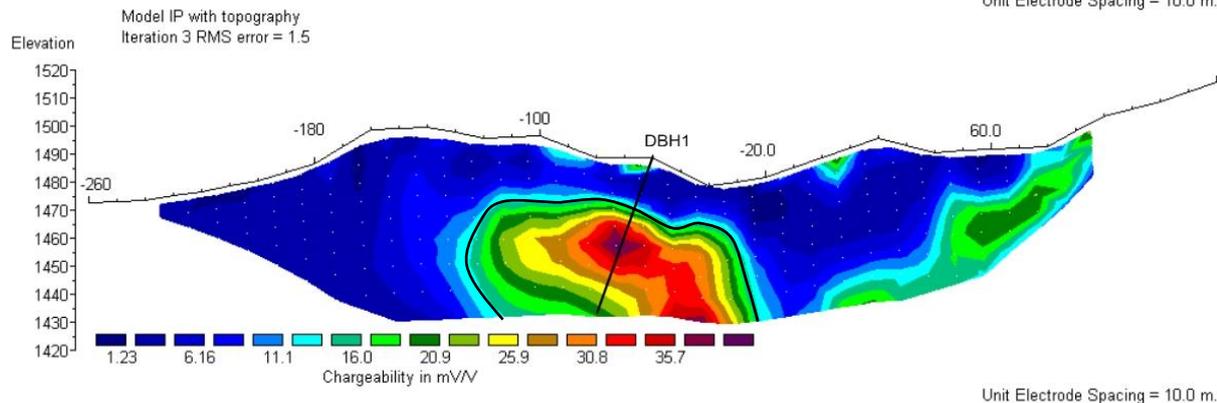
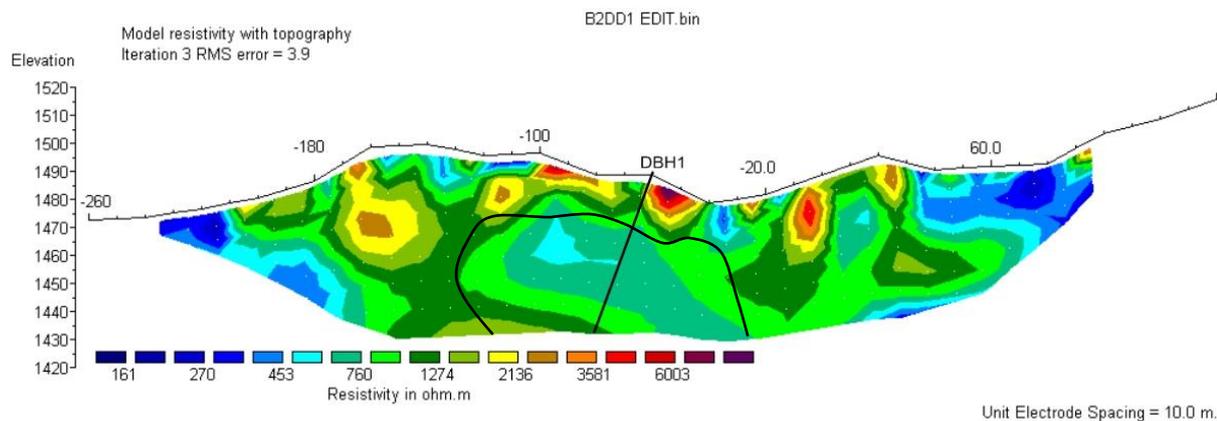
کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	عمق حفاری انجام شده
B2	DD1	DHB1	589721	3919970	زوسیه	180	60	84



نقشه ۴-۵-الف: شبه مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل ۲۲۵ شرقی (B2-DD1)



نقشه ۴-۵-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های بارپذیری برای پروفیل ۲۲۵ شرقی (B2-DD1)



Horizontal scale is 23.00 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 1.00

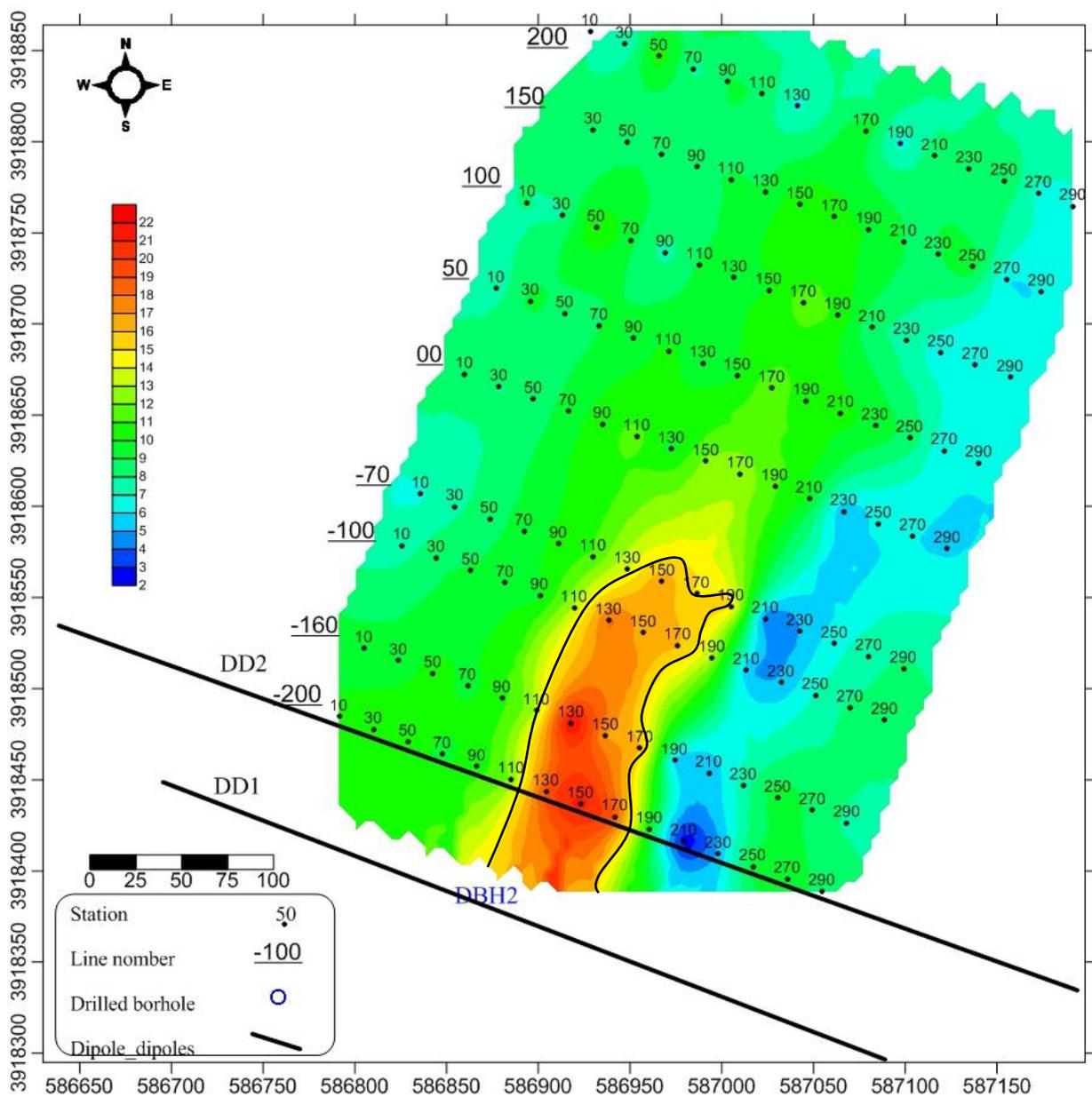
نقشه ۴-۵-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B2-DD1

#### ۴-۵ بررسی نتایج در محدوده شماره ۳

این محدوده توسط یک آرایه مستطیلی با مشخصات  $AB=800$  متر و فواصل پروفیل‌های  $50$  متر و  $MN=20$  متر و دو پروفیل دوقطبی-دوقطبی مورد پیمایش قرار گرفته و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. در ادامه مقادیر اندازه‌گیری شده در نقشه‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

#### ۴-۵-۱ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۳

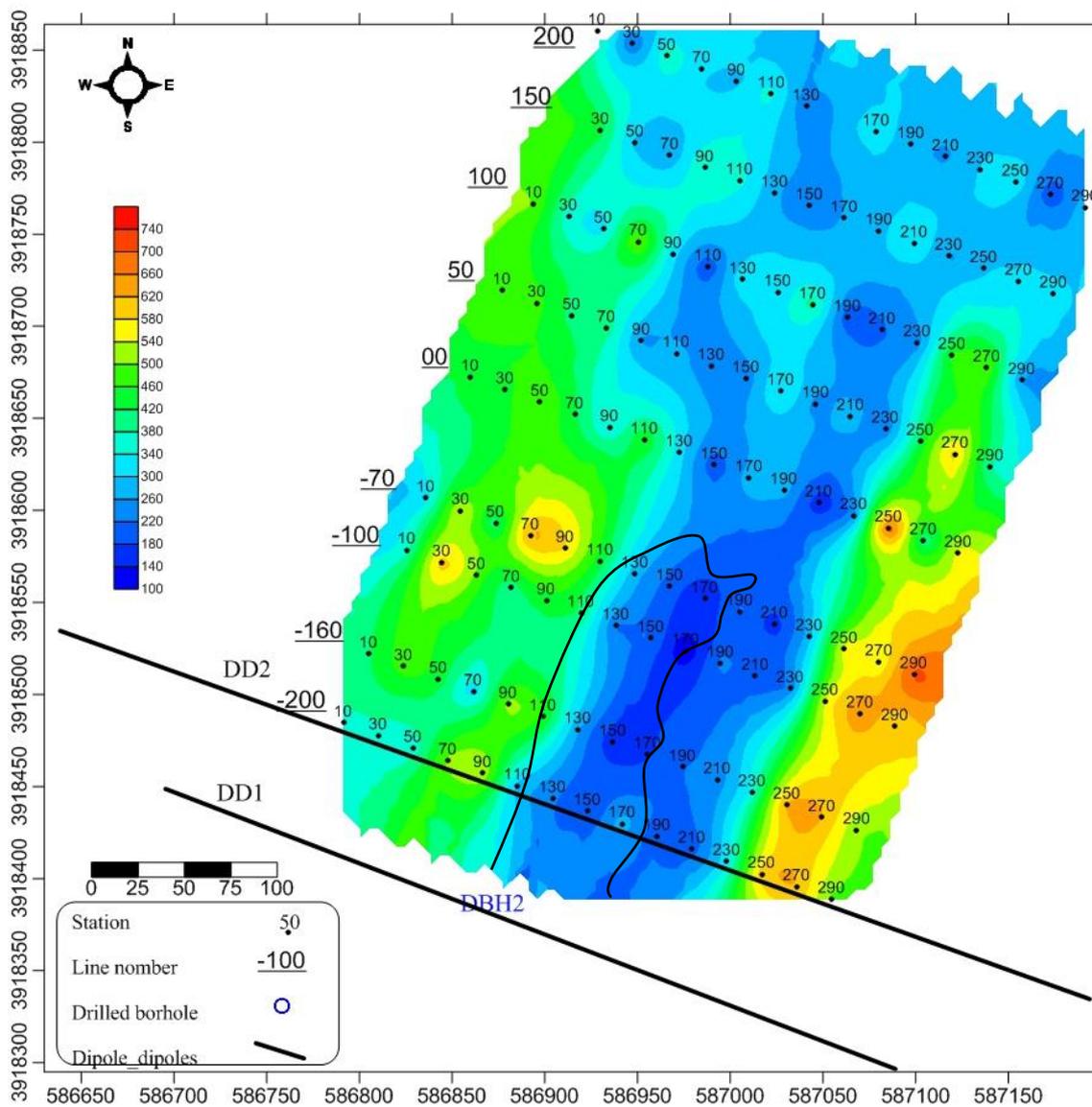
نقشه بارپذیری ظاهری محدوده شماره ۳ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۶ به‌نمایش درآمده است. در این نقشه نواحی با بارپذیری بالا که مشخصه کانه‌زایی می‌باشند با رنگ قرمز از دیگر نواحی متمایز شده‌اند. حداقل مقدار عددی بارپذیری  $2/04$  و حداکثر مقدار عددی آن  $22/5$  می‌باشد. همان‌طور که از این نقشه مشاهده می‌شود در بخش جنوبی محدوده واقع در فاصله پروفیل‌های  $70$  تا  $200$  و فاصله ایستگاه‌های  $110$  تا  $190$  شرقی از بارپذیری بالایی برخوردار است. همان‌طور که در این نقشه دیده می‌شود، بی‌هنجاری مزبور در جنوب آرایه مستطیلی محدود نشده است.



نقشه ۴-۶: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۳

نقشه مقاومت ویژه ظاهری این محدوده با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۷ به نمایش درآمده است. محدوده تغییرات عددی مقاومت ویژه ظاهری بین ۱۰۴ تا ۸۹۸ اهم متر می باشد. در این نقشه نواحی با مقاومت ویژه الکتریکی پایین (طیف رنگی آبی تا سبز) از انطباق خوبی با بی هنجاری با IP بالا (طیف رنگی نارنجی تا قرمز) بر روی نقشه بارپذیری برخوردار است. از این رو این ناحیه می تواند از نظر کانی سازی با اهمیت

تلقی شود؛ بنابراین برای بررسی‌های جزئی‌تر دو پروفیل برای پیمایش با آرایه دوقطبی-دوقطبی در این ناحیه در نظر گرفته شد.



نقشه ۴-۷: نقشه مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۳

#### ۴-۵-۲ بررسی مقطع B3-DD1

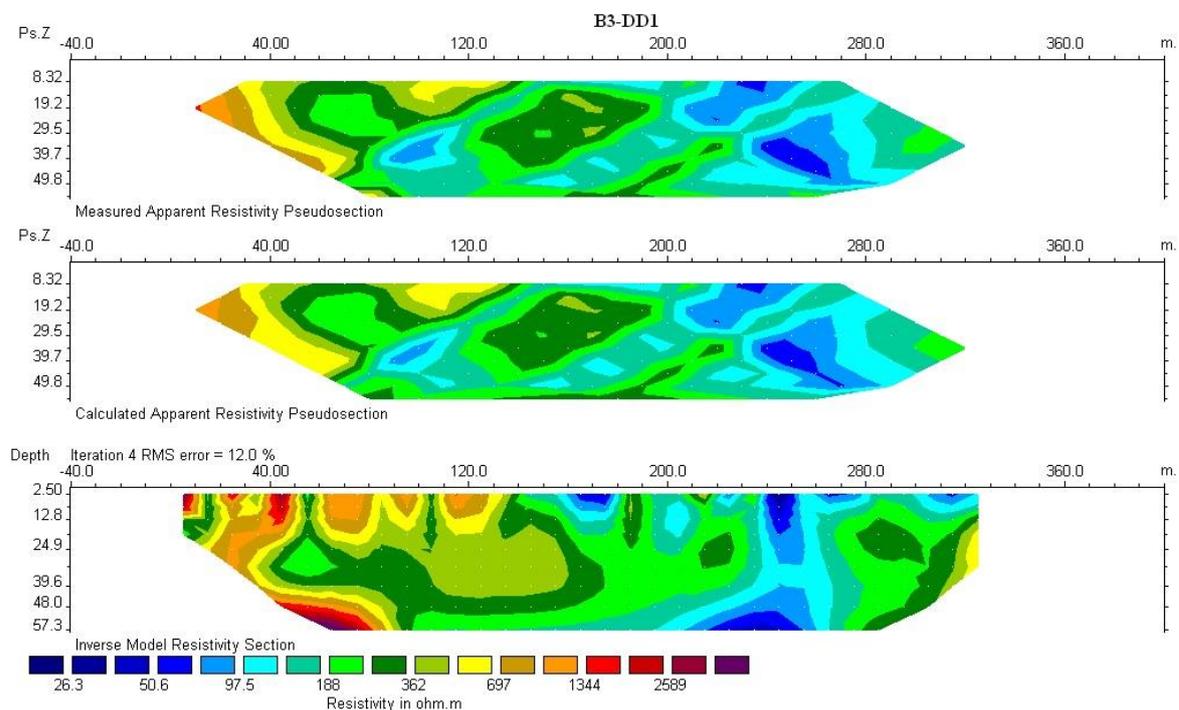
به منظور بررسی عمقی رگه‌ای که در این منطقه واقع شده است، یک پروفیل دوقطبی-دوقطبی در حاشیه جنوبی محدوده برداشت شده با آرایه مستطیلی در نظر گرفته شد. موقعیت این پروفیل در نقشه‌های ۴-۶ و ۴-۷ با واژه DD1 به نمایش درآمده است. این پروفیل به طول ۳۳۰ متر و با آزمون ۱۱۲ درجه با مشخصات  $AB=MMN=Leap=20$  متر مورد پیمایش قرار گرفت. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت‌ویژه مربوط با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۸ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۸ الف و ۴-۸ ب شبیه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۸ ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت‌ویژه به ترتیب ۱/۴ تا دو ۲۶/۳ میلی‌ولت بر ولت و ۴۹ تا ۱۴۲۲ اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده‌های بی‌هنجار با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. بی‌هنجاری اول که در فاصله ایستگاه‌های ۴۰ تا ۱۲۰ شرقی و در عمق تقریبی ۲۰ متری واقع است، در نقشه مقاومت‌ویژه منطبق بر نواحی با مقاومت‌ویژه بالا است. اما بی‌هنجاری دوم که در فواصل ایستگاهی ۱۵۰ تا ۲۳۰ شرقی واقع است و از سطح به عمق گسترش یافته است، از انطباق خوبی با بی‌هنجاری با مقاومت‌ویژه پایین (۵۰ تا ۱۰۰ اهم متر) برخوردار است. البته یک گسستگی قابل توجه در عمق تقریبی ۳۰ متری این بی‌هنجاری قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری در سطح و در فاصله ایستگاهی ۱۴۰ و ۱۶۰ شرقی در هر دو مقطع IP و مقاومت‌ویژه قابل تشخیص است و منطبق بر رخنمون زون کانی‌سازی در این ناحیه است [محمدی‌ویژه، ۱۳۸۸]. با توجه به نوع کانی‌سازی و حضور احتمالی کانی‌های سولفیدی در این منطقه، بی‌هنجاری دوم را می‌توان از پتانسیل بالایی برای کانی‌سازی برخوردار دانست. همان‌طور که در مقاطع مدل‌سازی شده (نقشه ۴-۸ ج) دیده می‌شود، بی‌هنجاری‌های IP و مقاومت‌ویژه در عمق ۵۰ متر (عمق مدل‌سازی) محدود نشده و امکان گسترش آن در عمق وجود دارد.

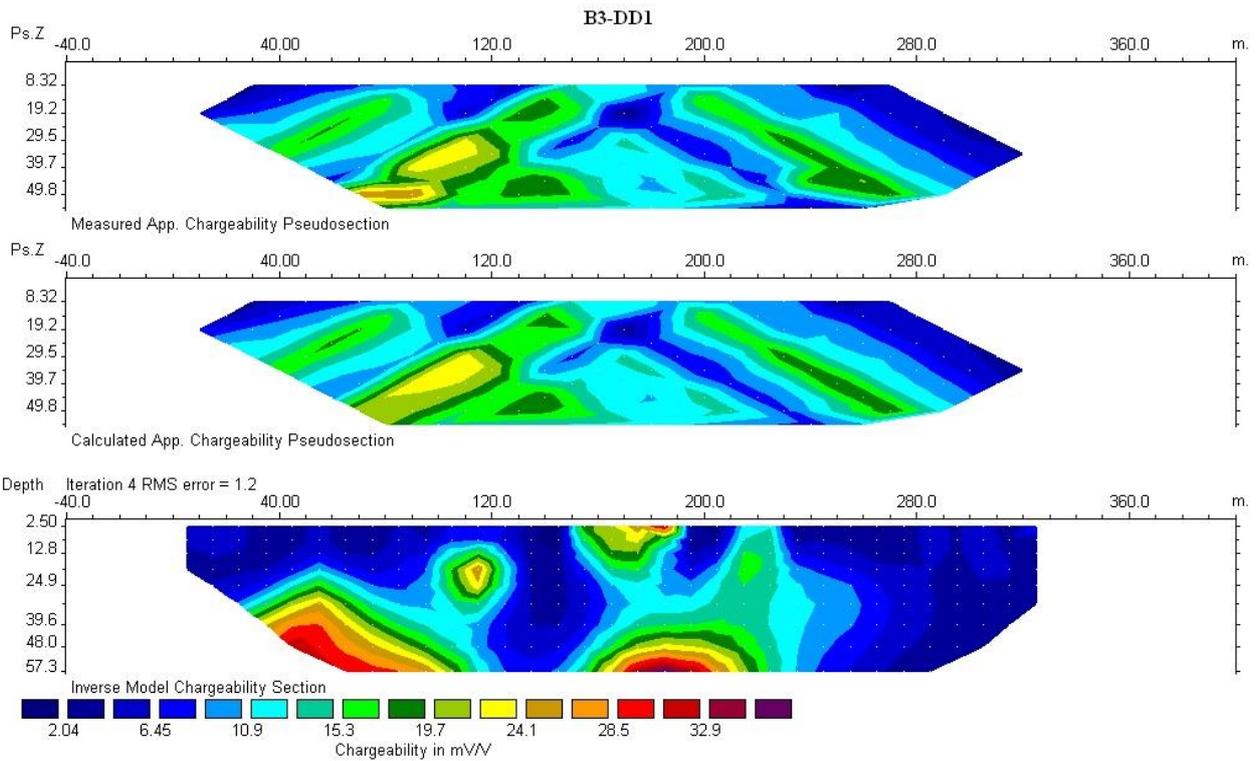
با توجه به موارد ذکر شده فوق گمانه اکتشافی بنا بر نقشه بارپذیری در این محدوده حفر گردید که اطلاعات آن به شرح زیر است.

جدول ۴-۲: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۳

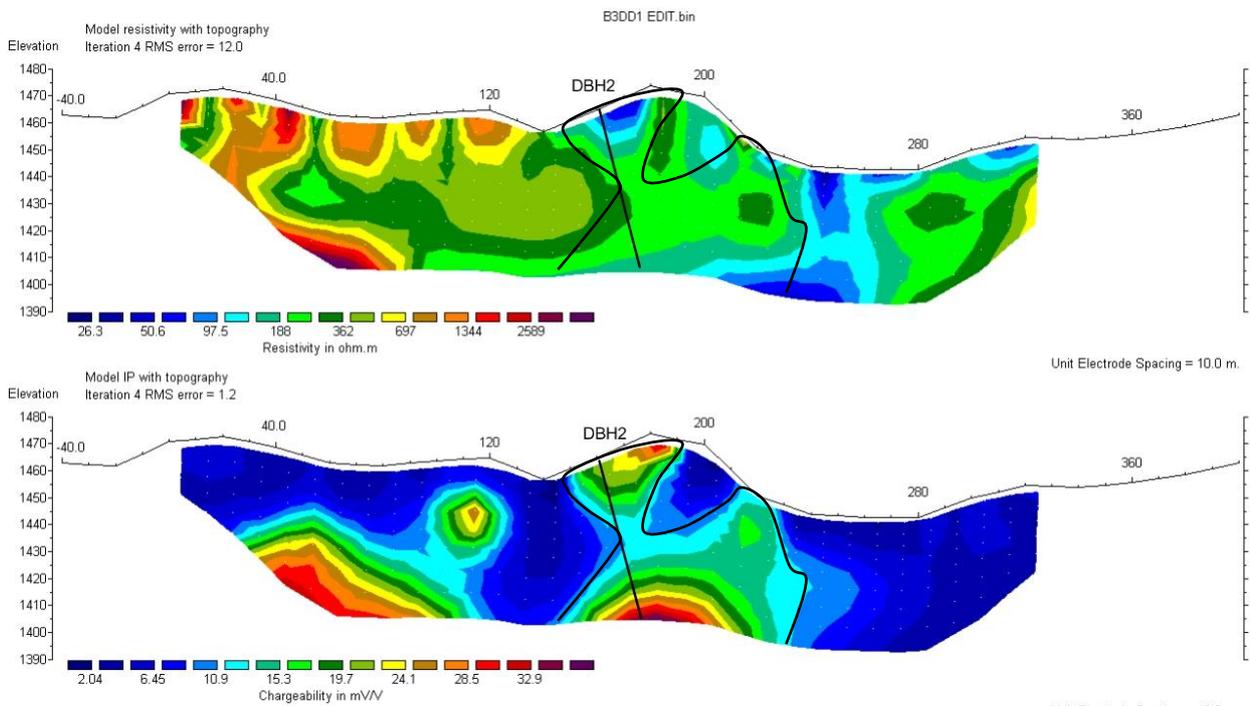
کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	عمق انجام شده
B3	DD1	DHB2	586872	3918398	کلاته رستم	100	74.68	87



نقشه ۴-۸-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومتی ویژه برای پروفیل B3-DD1



نقشه ۴-۸-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B3-DD1



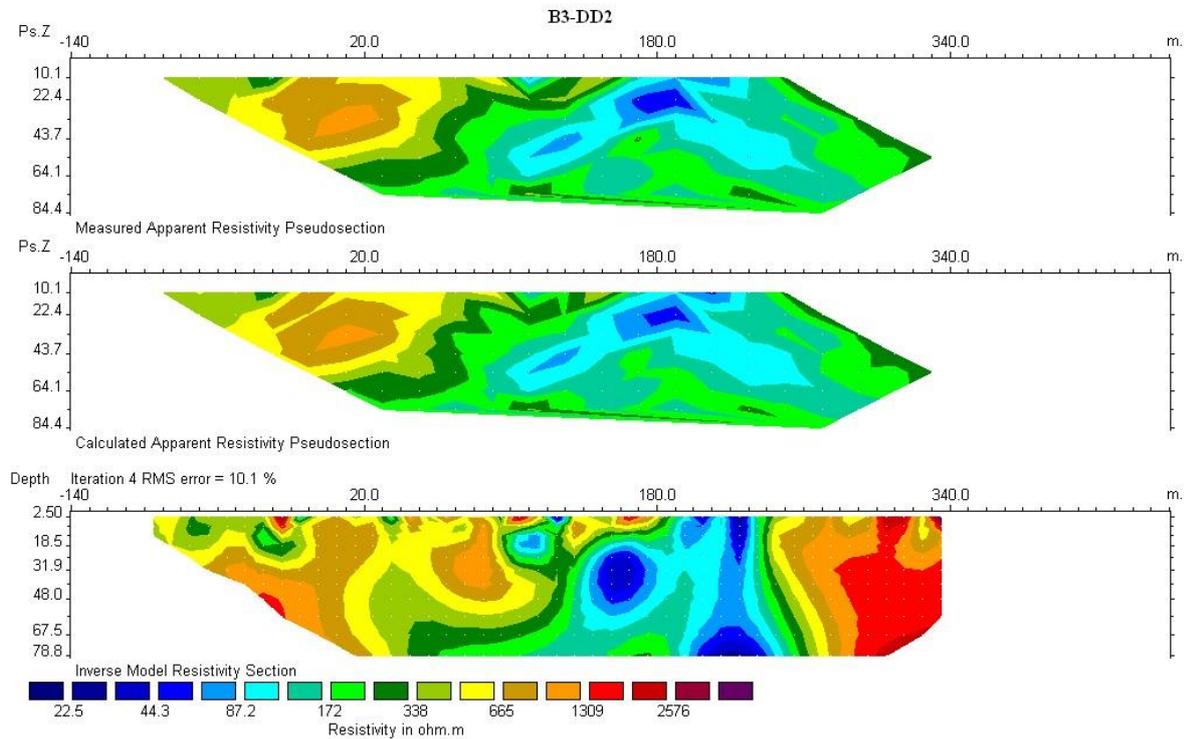
نقشه ۴-۸-ج: مقاطع دویبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B3-DD1

#### ۴-۵-۳ بررسی مقطع B3-DD2

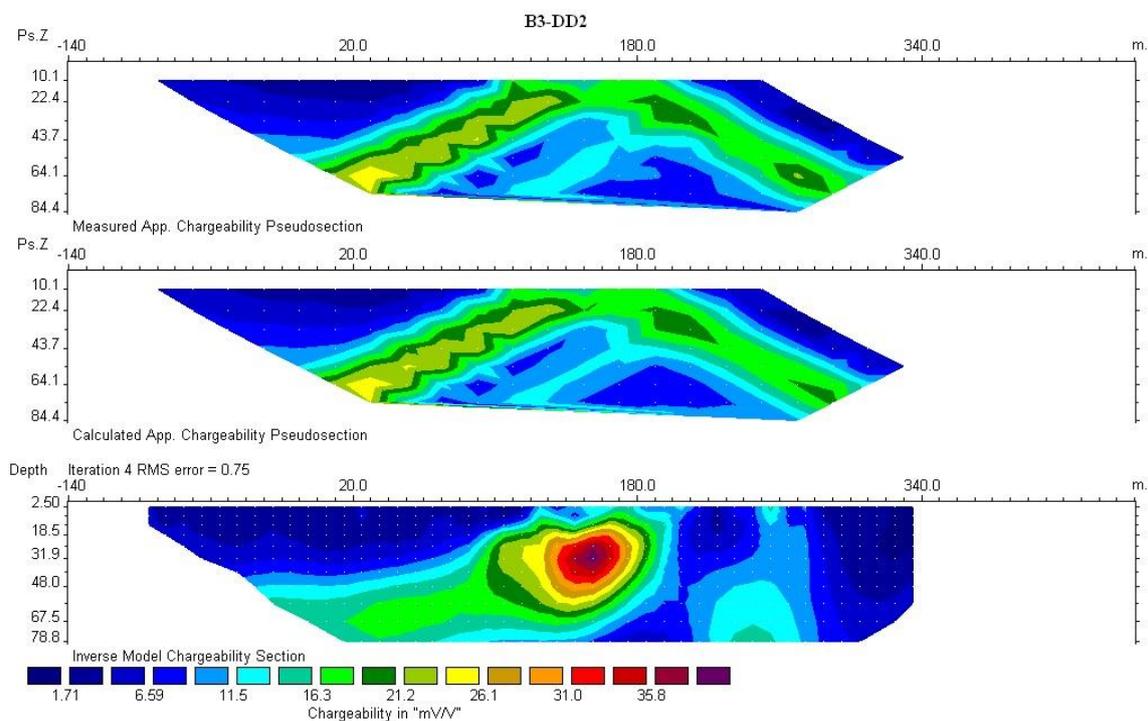
به منظور بررسی و عمقی و ردیابی بی‌هنجاری واقع در نقشه بارپذیری آرایه مستطیلی (نقشه ۴-۶) یک پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۴۰ متر و با پش ۲۰ متر بر روی پروفیل ۲۰۰ متر جنوبی به طول ۴۳۰ متر و با آزیموت ۱۱۰ درجه برداشت شد. موقعیت این پروفیل در نقشه‌های ۴-۶ و ۴-۷ با واژه DD2 به نمایش درآمده است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت‌ویژه مربوطه با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۹ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۹-الف و ۴-۹-ب شبه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۹-ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت‌ویژه به ترتیب ۲/۷ تا ۲۶ میلی‌ولت بر ولت ۴۳ تا ۱۱۶۶ اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. این بی‌هنجاری که از گستردگی قابل توجهی برخوردار است، در فاصله ایستگاه‌های ۱۰۰ تا ۱۹۶ شرقی و در عمق تقریبی ۳۰ متری دارای بیشترین مقدار است. همان‌طور که در نقشه IP دیده می‌شود، این بی‌هنجاری به شدت کمتری به سمت شمال غربی گسترش دارد. نکته قابل توجه، انطباق دقیق این زون با بی‌هنجاری با مقاومت‌ویژه خیلی پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم متر) در نقشه مقاومت‌ویژه می‌باشد. این مسئله می‌تواند ناشی از کانی‌سازی فلزی در این ناحیه باشد. یک بی‌هنجاری دیگر با مقدار بارپذیری ۱۳ تا ۱۶ میلی‌ولت بر ولت که در عمق محدود نشده است، در فاصله ایستگاهی ۲۲۰ تا ۲۷۰ شرقی به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری از انطباق خوبی با بی‌هنجاری با مقاومت‌ویژه پایین (پایین‌تر از ۱۰۰ اهم متر) برخوردار است. با توجه به نوع کانی‌سازی در این ناحیه، این

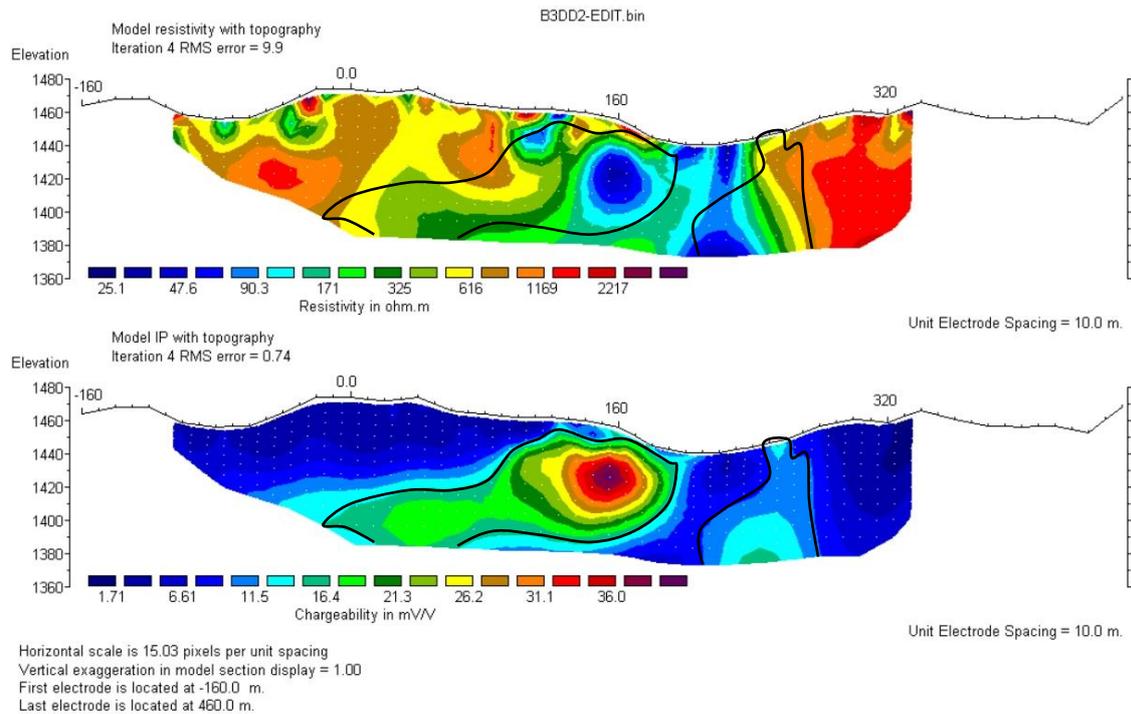
منطقه نیز می‌تواند به عنوان زون احتمالی کانی‌سازی، معرفی شود. همان‌طور که در مقاطع مدل‌سازی شده (نقشه ۴-۹-ج) دیده می‌شود، بی‌هنجاری شماره ۱ در عمق ۱۰۰ متر (عمق مدل‌سازی) محدود شده است.



نقشه ۴-۹-الف: شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2)



نقشه ۴-۹-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2)



نقشه ۴-۹-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل ۲۰۰ جنوبی (B3-DD2)

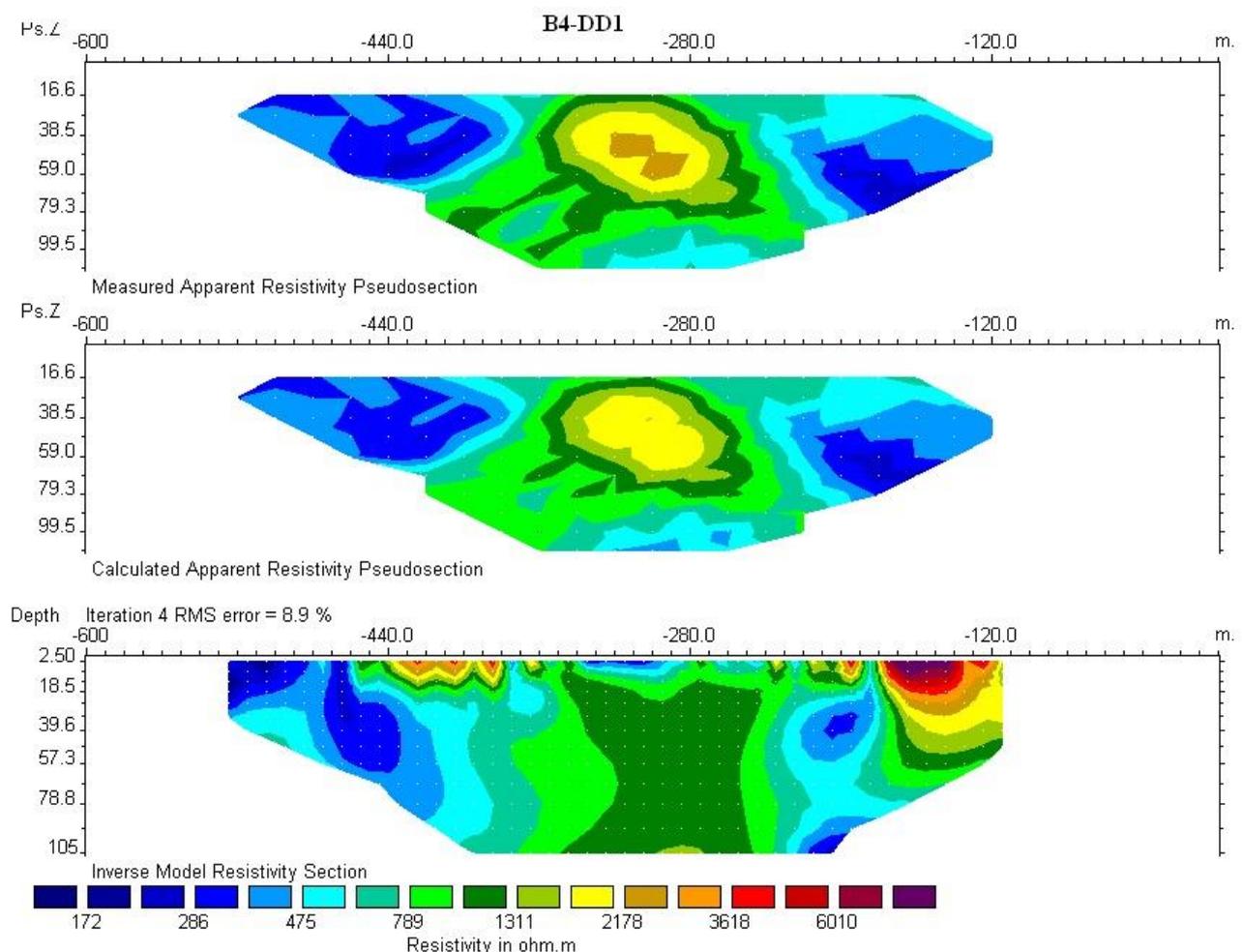
#### ۴-۶ بررسی نتایج در محدوده شماره ۴

##### بررسی مقطع B4-DD1

به منظور بررسی عمقی رگه‌ای که در این منطقه واقع شده است، یک پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی با امتداد شمالی - جنوبی به طول ۴۱۰ متر در این منطقه برداشت شد. موقعیت این پروفیل که با فاصله الکترودی ۴۰ متر و پرش ۲۰ متری در این ناحیه در نظر گرفته شده است، در شکل ۴-۱ با واژه B4-DD1 به نمایش درآمده است. مقاطع مدل سازی شده IP و مقاومت ویژه مربوط با نرم افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۱۰ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۱۰-الف و ۴-۱۰-ب شبه مقاطع در مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۱۰-ج

آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت ویژه به ترتیب  $1/3$  تا  $13/9$  میلی‌ولت بر ولت و  $212$  تا  $2436$  اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. یک بی‌هنجاری کوچک با مقدار بارپذیری نسبتاً بالا در فاصله ایستگاه‌های  $420$  تا  $450$  جنوبی که از سطح شروع شده و تا عمق  $55$  متری ادامه دارد، مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه پایین تا متوسط ( $200$  تا  $400$  اهم متر) در نقشه RS می‌باشد. با توجه به مقادیر IP و مقاومت ویژه در سایر نواحی این پروفیل، این مناطق از نظر حضور کانی‌های سولفیدی ضعیف به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه به وجود شواهد کانی‌سازی به صورت مالاکیت در سنگ‌های متاریولیت و متاتوف‌های ریولیتی مناطق با بارپذیری متوسط و بالا (طیف رنگی سبز تا زرد) و مقاومت ویژه بالا (طیف رنگی سبز)، می‌توانند از نظر کانی‌سازی با اهمیت باشند.

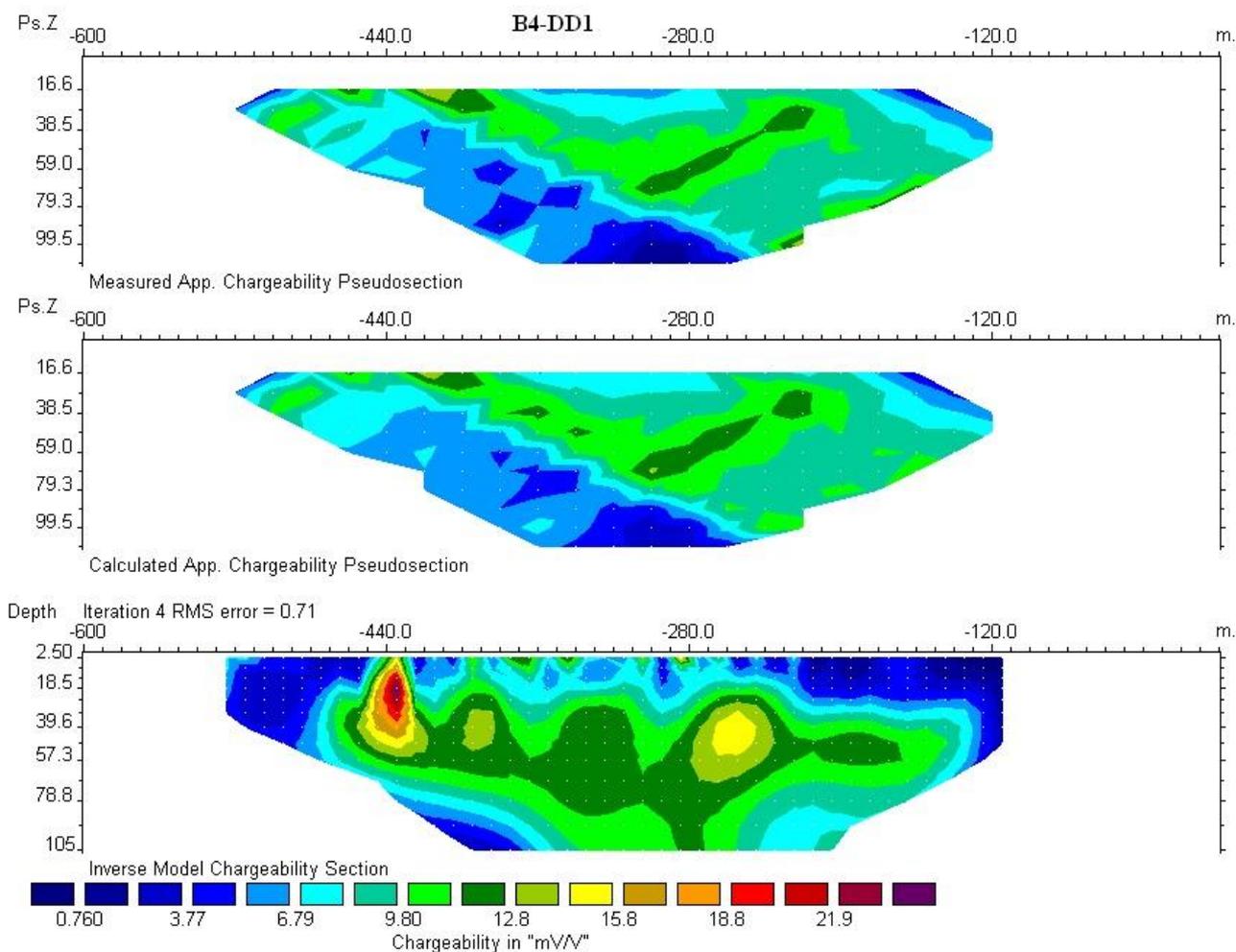


نقشه ۴-۱۰-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل B4-DD1

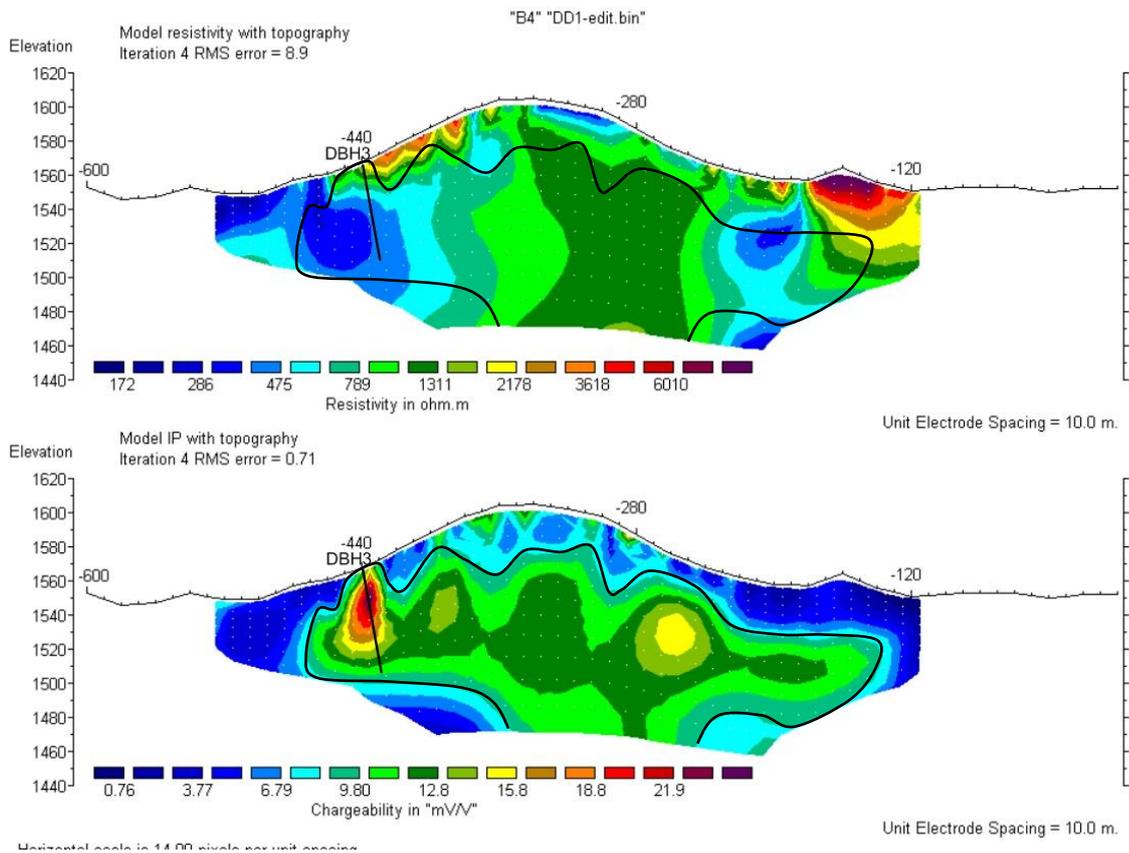
با توجه به موارد ذکر شده فوق گمانه اکتشافی بنابر نقشه بارپذیری در این محدوده حفر گردید که اطلاعات آن به شرح زیر است.

جدول ۳-۴: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۴

کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	عمق حفاری انجام شده
B4	DD1	DHB3	589775	3920550	کلاسیک	230	70	50



نقشه ۴-۱۰-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری پروفیل B4-DD1



Horizontal scale is 14.00 pixels per unit spacing

نقشه ۱۰-۴ ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B4-DD1

#### ۷-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۵

به‌منظور بررسی عمقی رگه‌ای که در این محدوده واقع شده، برداشت دو پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی با امتدادهای  $N24^{\circ}E$  و  $N52^{\circ}E$  در این محدوده در نظر گرفته شد. موقعیت این پروفیل‌ها که با فواصل الکترودی ۴۰ متر و پرش ۲۰ متری در این ناحیه مورد پیمایش قرار گرفتند، در شکل ۱-۴ به نمایش درآمده‌اند.

#### ۱-۷-۴ بررسی مقطع B5-DD1

موقعیت این پروفیل در شکل ۱-۴ با واژه B5-DD1 به نمایش درآمده است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت‌ویژه مربوط به این پروفیل با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۱۱-۴ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۱۱-۴-الف و ۱۱-۴-ب شبه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دو بعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری

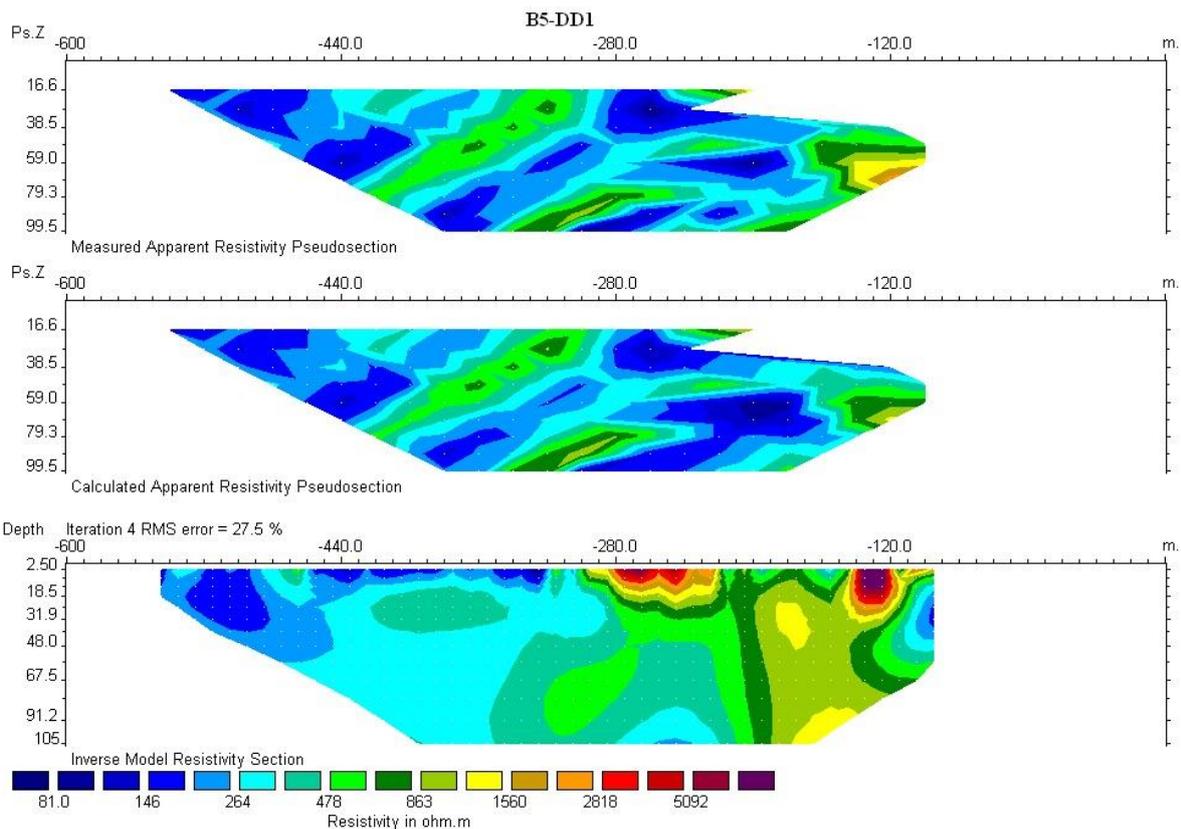
حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۱۱- ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت ویژه به ترتیب ۲/۶ تا ۱۳ میلی ولت بر ولت و ۸۳ تا ۲۴۲۰ اهم متر می باشد.

در نقشه IP محدوده بی هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. یک بی هنجاری رگه ای شکل با شیب تقریبی ۳۰ درجه نسبت به افق با مقدار بارپذیری نسبتاً بالا (طیف رنگی سبز تا قرمز) در فاصله ایستگاه های ۲۸۰ تا ۴۲۰ جنوبی واقع است. این بی هنجاری منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه متوسط (۳۰۰ تا ۷۰۰ اهم متر) در نقشه مقاومت ویژه می باشد. دگرسانی این منطقه از نوع سیلیسی - هماتیسی و گاهاً لیمونیتی است. همچنین شواهدی از حضور مالاکیت در این ناحیه دیده می شود. از این رو بی هنجاری مشاهده شده بر روی نقشه بارپذیری را می توان به عنوان منطقه با پتانسیل بالای کانی سازی معرفی کرد. در فاصله ایستگاه های ۱۲۰ تا ۲۸۰ جنوبی مقادیر مقاومت ویژه بالا است. این ناحیه منطبق بر واحدهای متاریولیت و توقف های اسیدی دگرگون شده است؛ که از مقاومت ویژه بالایی برخوردارند.

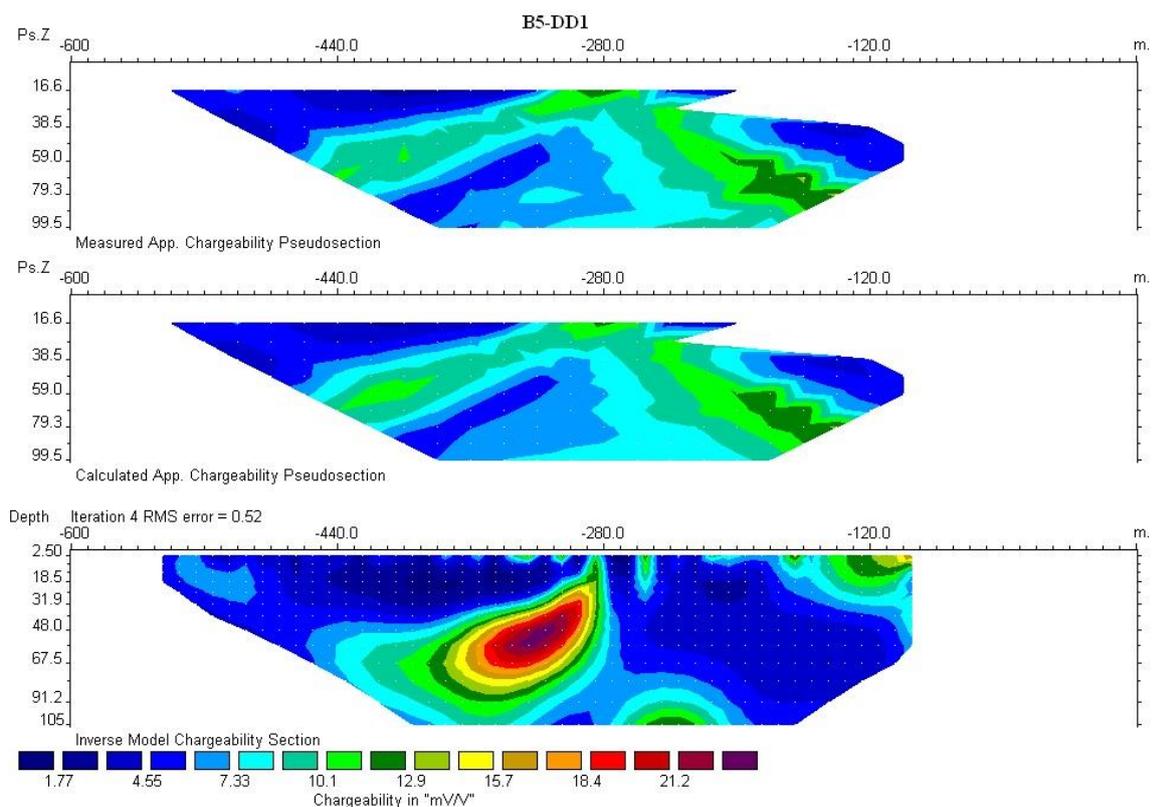
با توجه به موارد ذکر شده فوق گمانه های اکتشافی بنا بر نقشه بارپذیری در این محدوده حفر گردید که اطلاعات آن به شرح زیر است.

جدول ۴-۴: مشخصات نقاط حفاری در محدوده ۵

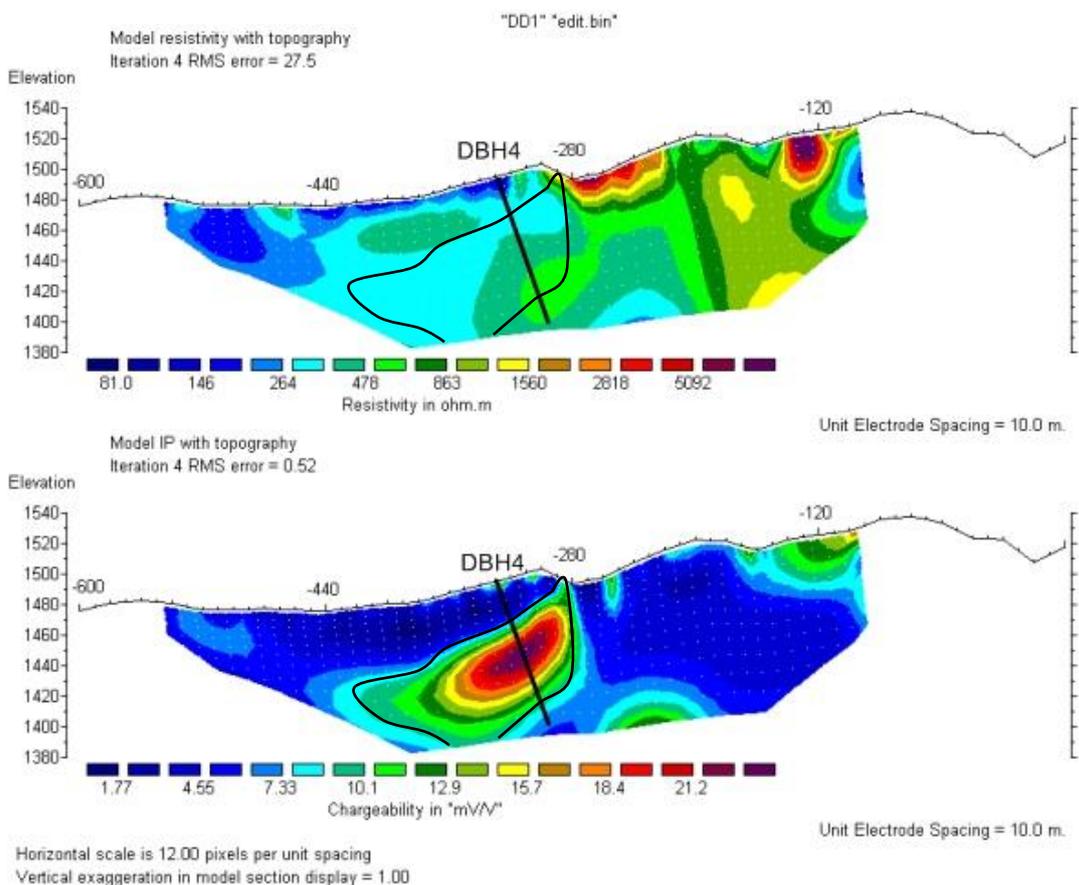
کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	عمق حفاری انجام شده
B5	DD1	DHB4	585900	3919396	سربرج	24	70	73.2
B5	DD2	DHB5	586098	3919340	سربرج	52	60	64.2



نقشه ۴-۱۱-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل B5-DD1



نقشه ۴-۱۱-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های بارپذیری برای پروفیل B5-DD1

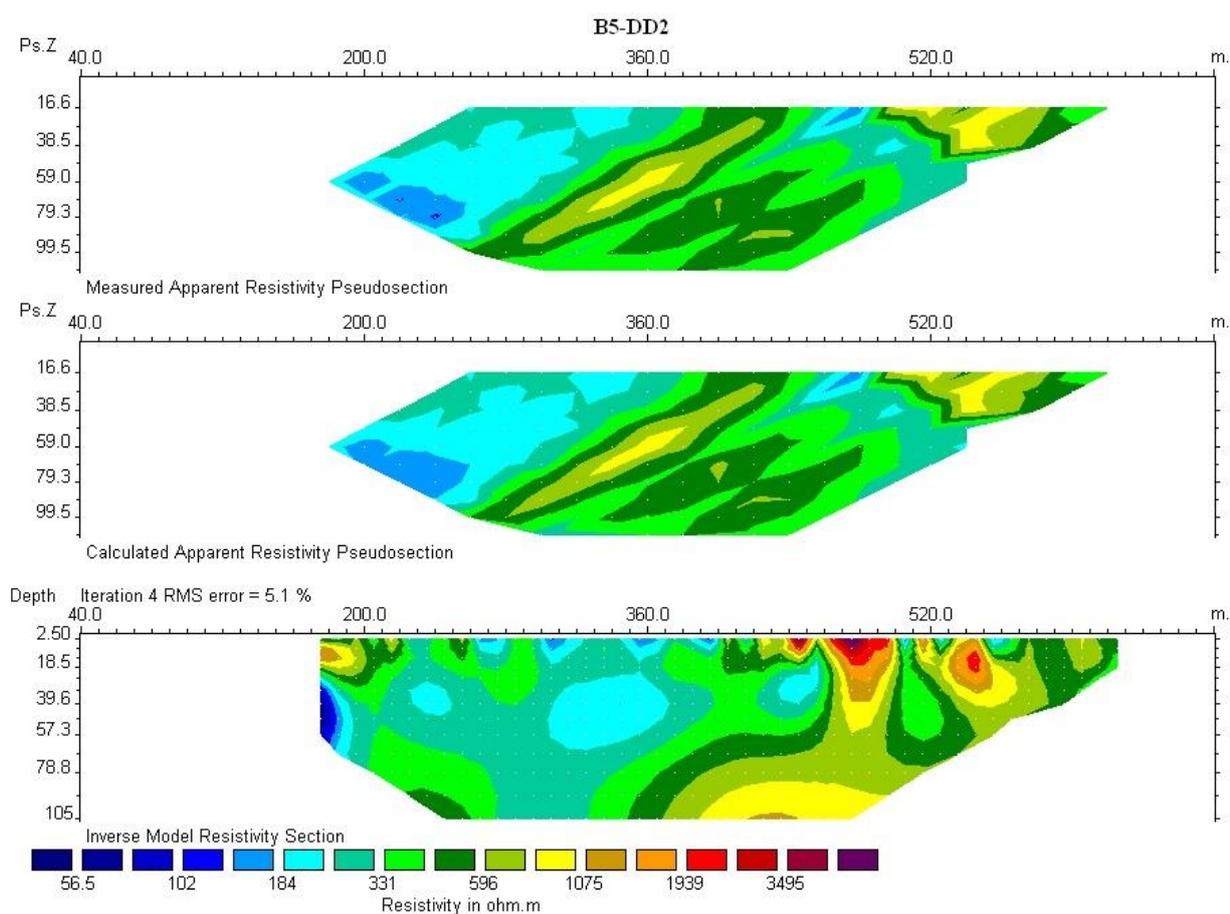


نقشه ۱۱-۴ ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B5-DD1

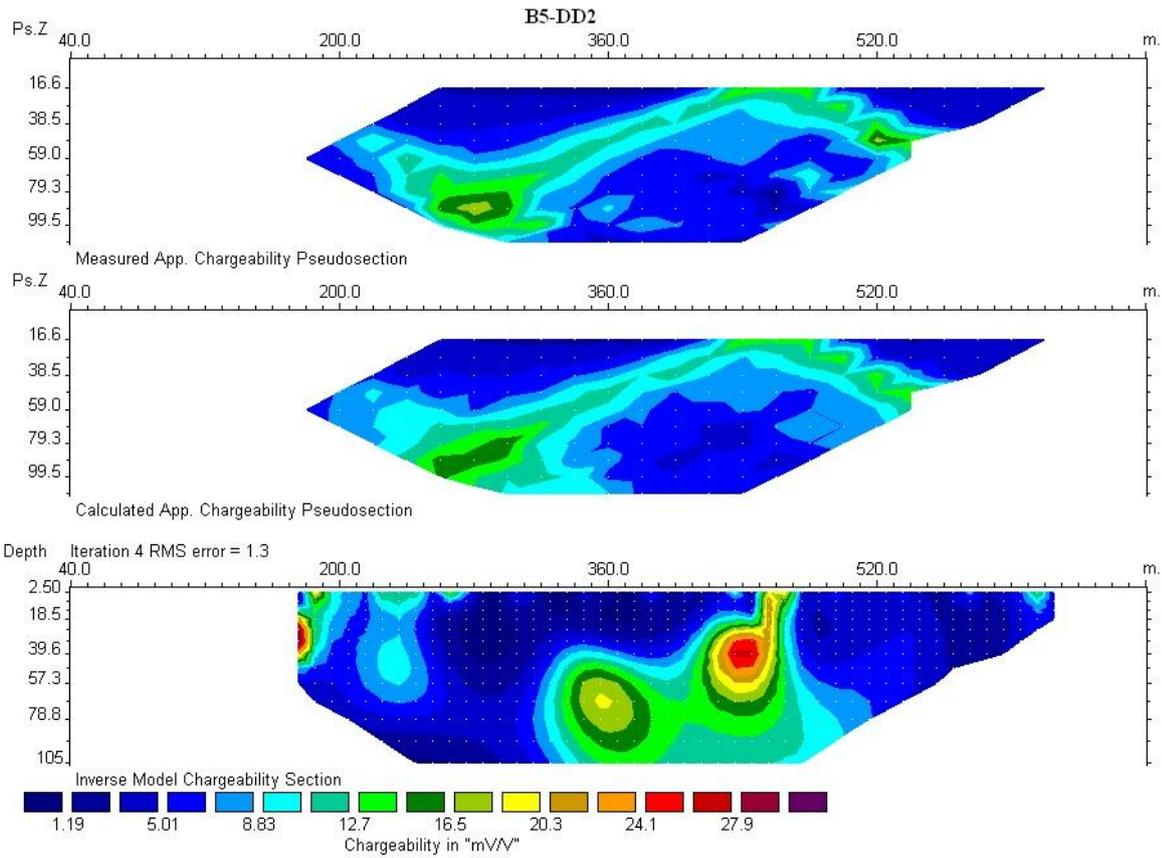
#### ۲-۷-۴ بررسی مقطع B5-DD2

موقعیت این پروفیل در شکل ۱-۴ با واژه B5-DD2 به نمایش درآمده است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و RS مربوط به این پروفیل با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۱۲-۴ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۱۲-۴ الف و ۱۲-۴ ب شبه مقاطع و مقاطع دو بعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دو بعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۱۲-۴ ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت‌ویژه به ترتیب ۱/۷ تا ۱۷/۶ میلی ولت بر ولت و ۱۲۶ تا ۹۷۳ اهم متر می‌باشد. در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. یک بی‌هنجاری رگه‌ای شکل با شیب تقریبی ۳۰ درجه نسبت به افق با مقدار بارپذیری نسبتاً بالا (طیف رنگی سبز تا قرمز) در فاصله ایستگاه‌های ۳۳۰ تا ۴۸۰ شمالی و در عمق تقریبی ۲۰ تا ۸۰ متری واقع است. این بی‌هنجاری از نظر

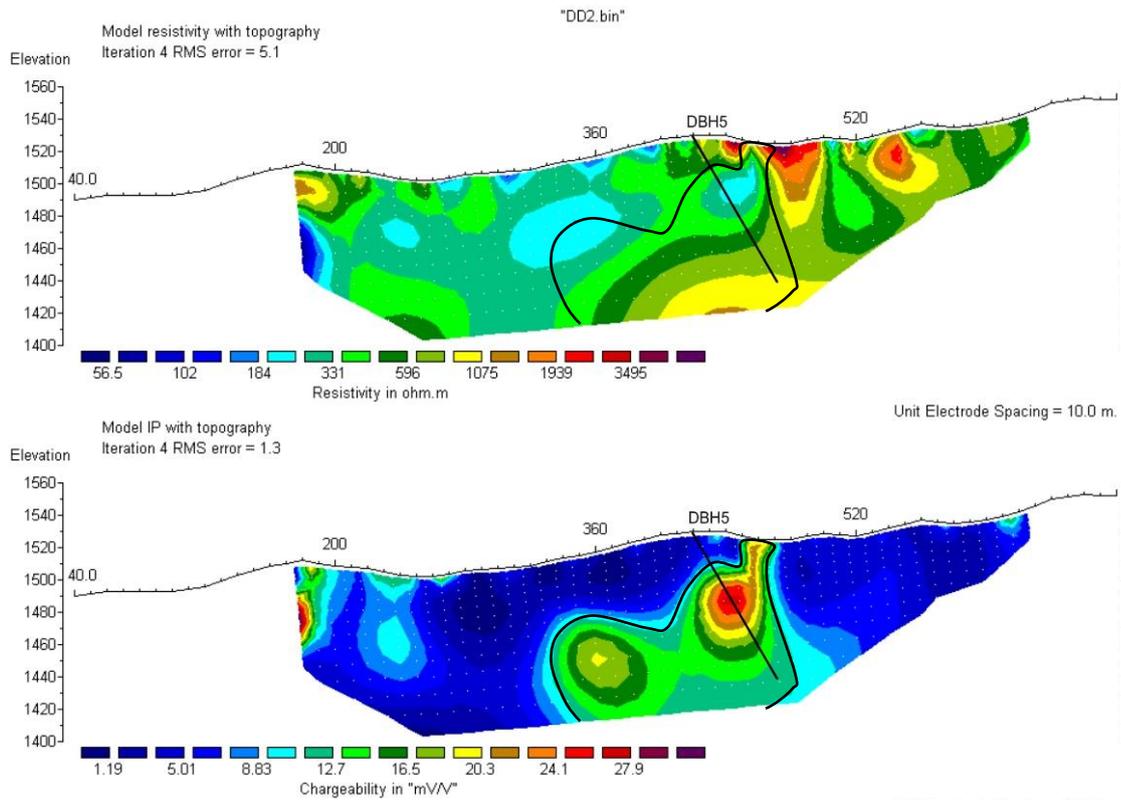
مشخصات ظاهری (شیب و گستردگی) و مقادیر عددی بارپذیری و مقاومت ویژه، از شباهت قابل توجهی با بی‌هنجاری مشاهده شده در مقطع ۱ (نقشه ۴-۱۱) برخوردار است. از آنجا که این دو پروفیل بر روی یک رگه در نظر گرفته شده است، چنین نتیجه‌ای منطقی به نظر می‌رسد. در فاصله ایستگاه‌های ۴۴۰ تا ۴۷۰ شمالی، مقادیر بارپذیری بالا (طیف رنگی زرد تا قرمز) دارای انطباق خوبی با زون با مقاومت ویژه نسبتاً پایین (۲۰۰ اهم متر) است. از این رو این زون می‌تواند از پتانسیل بالاتری برای کانی‌سازی برخوردار باشد.



نقشه ۴-۱۲-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل B5-DD2



نقشه ۴-۱۲-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B5-DD2



نقشه ۴-۱۲-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B5-DD2

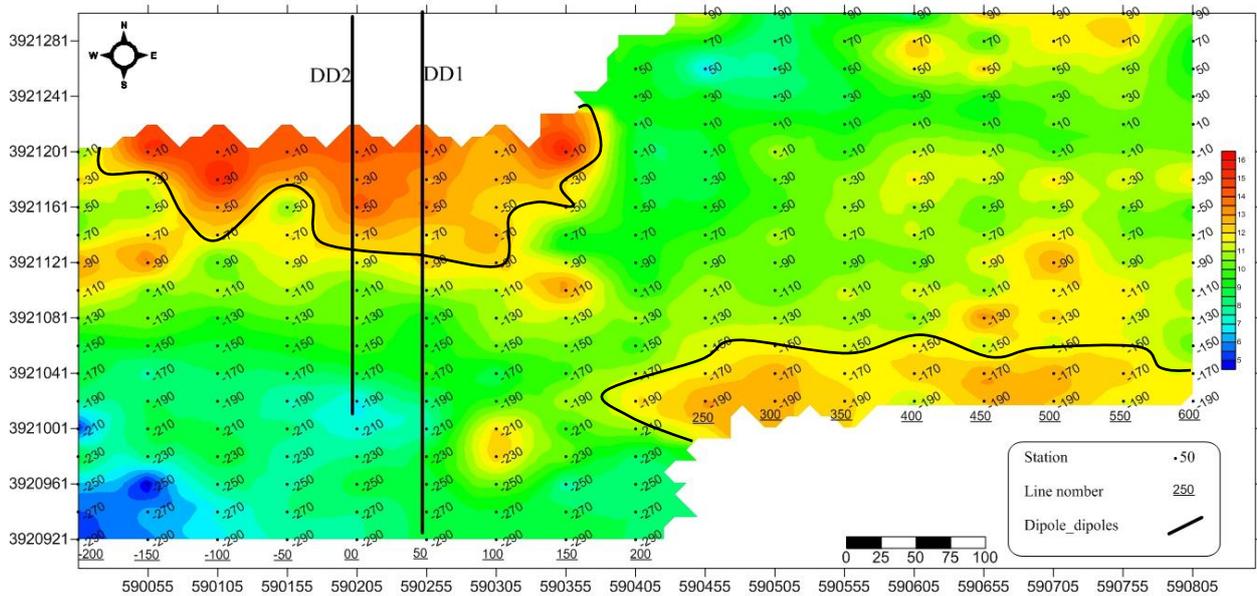
#### ۴-۸ بررسی نتایج در محدوده شماره ۶

این محدوده با آرایه مستطیلی با مشخصات  $AB=800$  متر و فواصل پروفیل‌های ۵۰ متر و  $MN=20$  متر و دو پروفیل دوقطبی- دوقطبی مورد پیمایش قرار گرفته و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. در ادامه مقادیر اندازه‌گیری شده در نقشه‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

#### ۴-۸-۱ بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۶

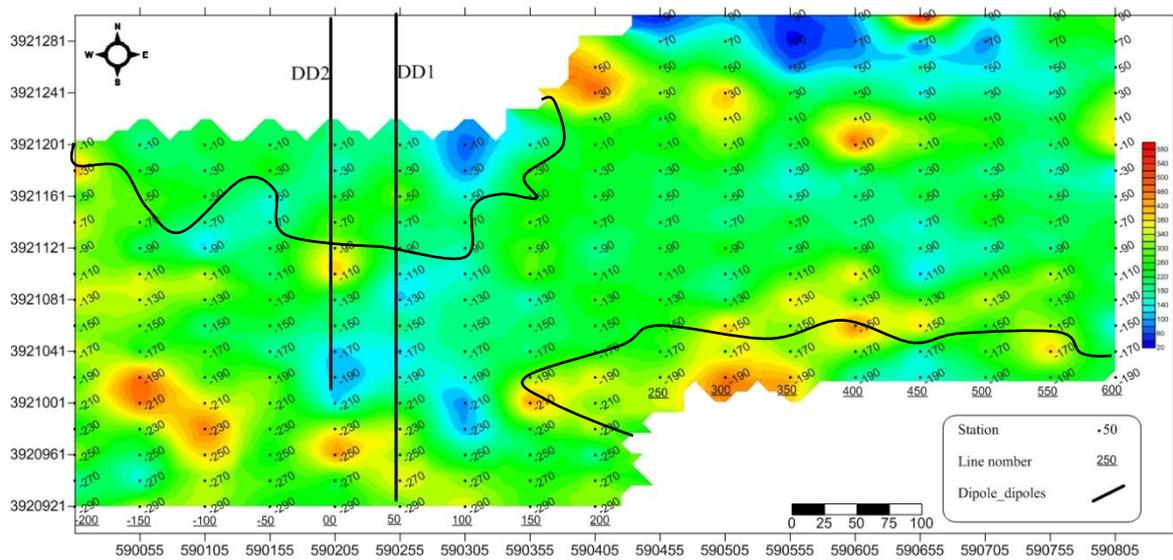
نقشه بارپذیری ظاهری محدوده شماره ۶ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۱۳ به نمایش درآمده است. در این نقشه نواحی با بارپذیری بالا که مشخصه کانه‌زایی می‌باشند با رنگ قرمز از دیگر نواحی متمایز شده‌اند. حداقل مقدار عددی بارپذیری ۴ و حداکثر مقدار عددی آن ۱۶ میلی ولت بر ولت می‌باشد. همان‌طور که از این نقشه مشاهده می‌شود، در شمال غربی محدوده واقع در فاصله پروفیل‌های ۲۰۰ تا ۱۵۰ و حد فاصل ایستگاه‌های ۱۰ تا ۹۰، از بارپذیری نسبتاً بالایی برخوردار است. همان‌طور که در این نقشه دیده می‌شود، بی‌هنجاری مزبور در شمال آرایه مستطیلی نیز محدود نشده است. همچنین در قسمت جنوب شرقی محدوده فاصله پروفیل‌های

۱۰۰ تا ۶۰۰ آرایه مستطیلی یک بی‌هنجاری با مقدار بارپذیری متوسط (طیف رنگی زرد تا نارنجی) به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری نیز در سمت جنوب توسط آرایه مستطیلی محدود نشده است.



نقشه ۴-۱۳: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۶

نقشه مقاومت ویژه ظاهری محدوده شماره ۶ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۱۴ به نمایش درآمده است. محدوده تغییرات عددی مقاومت ویژه ظاهری بین ۲۷ تا ۶۳۱ اهم متر می‌باشد. در این نقشه نواحی با مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا (طیف رنگی زرد تا قرمز) در محدوده مرکز به طرف شمال شرقی محدوده در فاصله پروفیل‌های ۱۰۰ تا ۵۵۰، منطبق بر بی‌هنجاری با IP و متوسط (طیف رنگی نارنجی تا قرمز) بر روی نقشه بارپذیری است. ولی بی‌هنجاری اول با IP نسبتاً بالا که در شمال غربی محدوده در فاصله ۲۰۰ غربی تا ۱۵۰ شرقی واقع است، منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه پایین (۲۰ تا ۲۱۰ اهم متر) می‌باشد. با توجه به شواهد کانی‌سازی در سطح به صورت مالاکیت و احتمال حضور کانی‌های سولفیدی در این ناحیه [محمدی‌ویژه، ۱۳۸۸]، این بی‌هنجاری می‌تواند از نظر کانی‌سازی با اهمیت تلقی شود از این رو به منظور بررسی‌های جزئی‌تر این بی‌هنجاری و گسترش عمقی آن دو آرایه دوقطبی-دوقطبی در این منطقه در نظر گرفته شد.



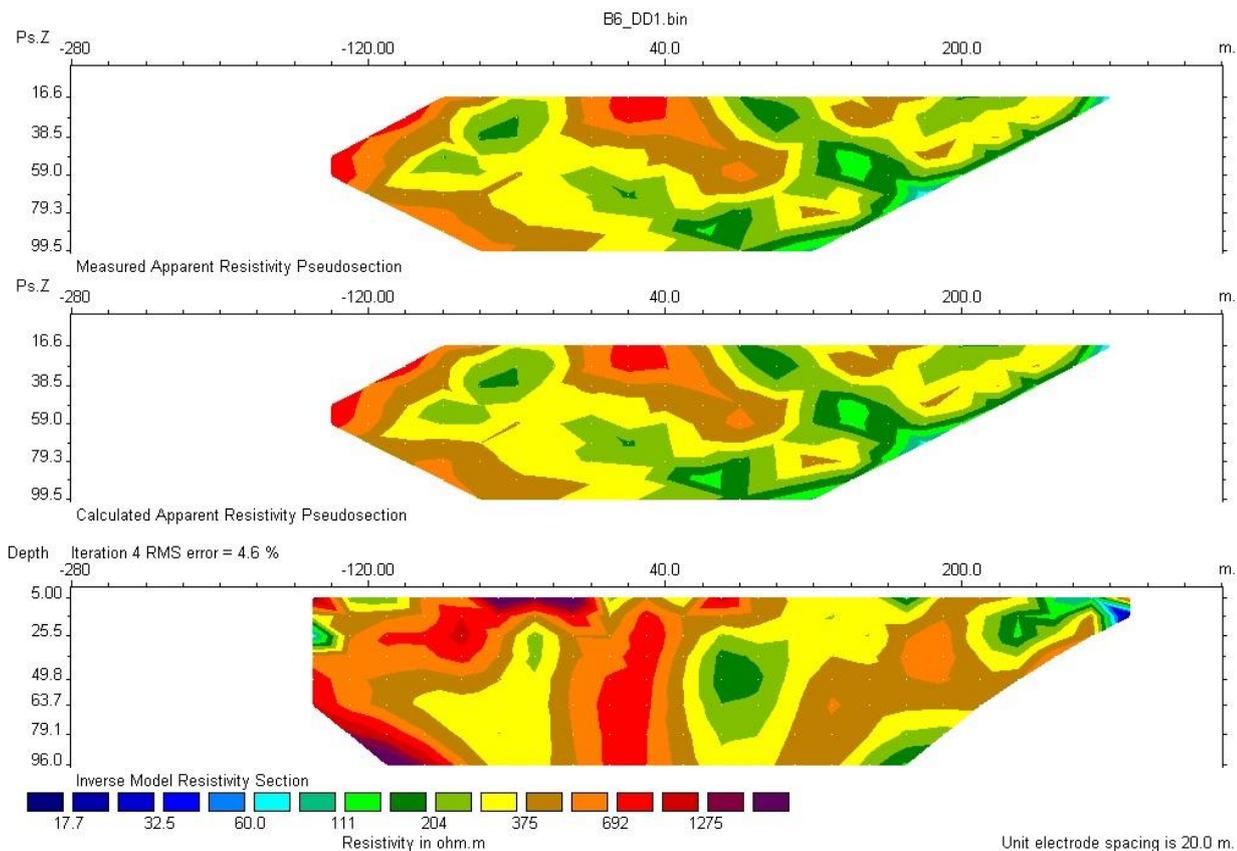
نقشه ۴-۱۴: نقشه مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۶

#### ۴-۸-۲ بررسی مقطع B6-DD1

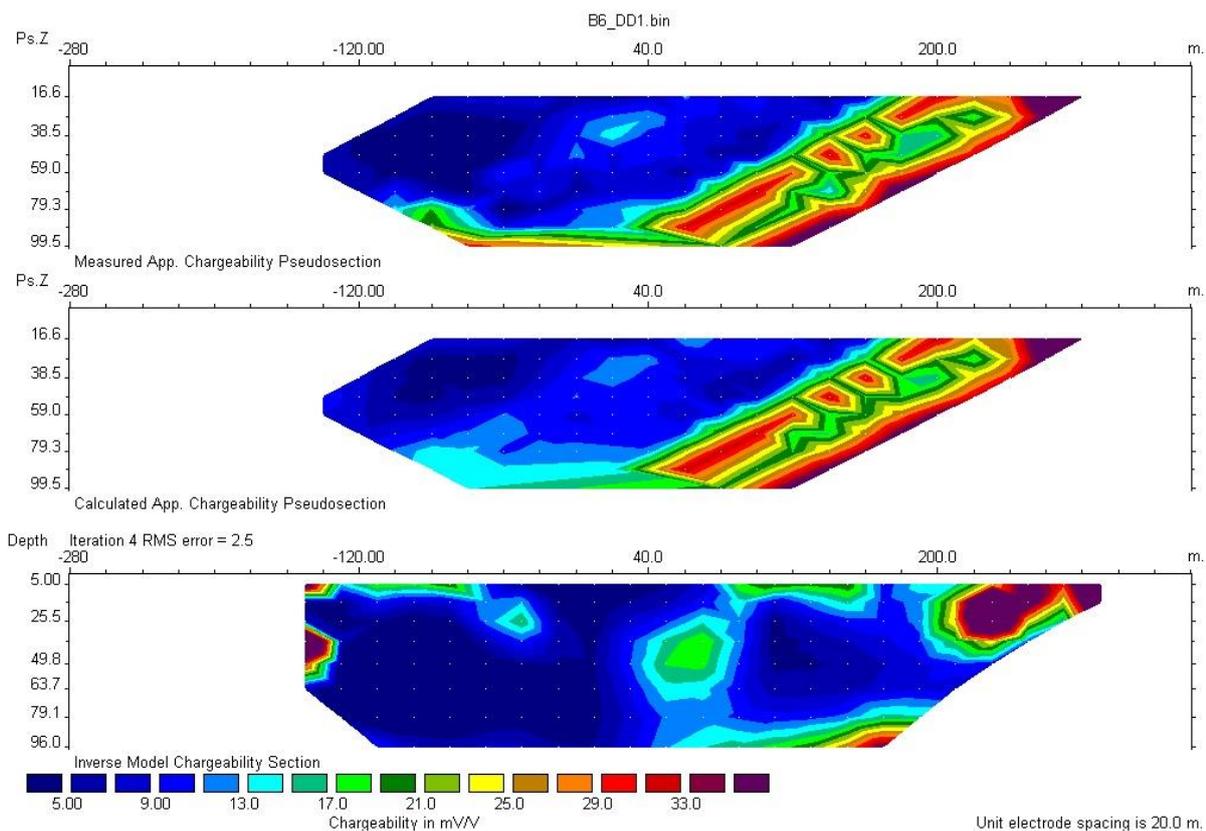
به منظور بررسی عمقی و ردیابی بی‌هنجاری واقع در نقشه بارپذیری حاصل از آرایه مستطیلی (نقشه ۴-۱۳) یک آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۴۰ متر و با پرش ۲۰ متر به طول ۴۴۰ متر بر روی پروفیل ۵۰ شرقی برداشت شد. موقعیت این پروفیل در نقشه‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ با واژه DD1 به نمایش درآمده است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت ویژه مربوط با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۱۵ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۱۵-الف و ۴-۱۵-ب شبه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۱۵-ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت ویژه به ترتیب ۱/۹ تا ۴۵/۷ میلی‌ولت بر ولت و ۶۳ تا ۹۳۱ اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. چند بی‌هنجاری در این مقطع قابل تشخیص است. بی‌هنجاری اول که در فاصله ایستگاه‌های ۱۲۰ جنوبی تا ۰ واقع است، سطحی بوده و از مقدار بارپذیری متوسطی برخوردار است. این بی‌هنجاری منطبق بر رخنمون رگه‌ای است که

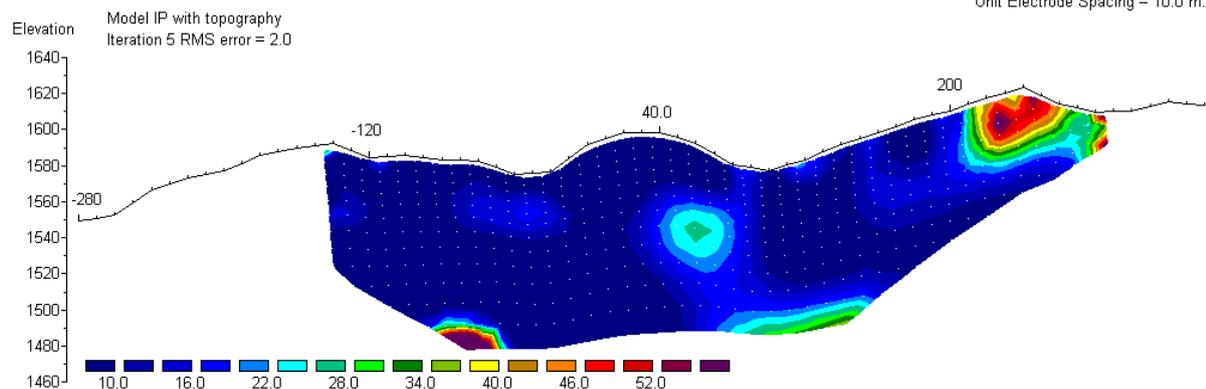
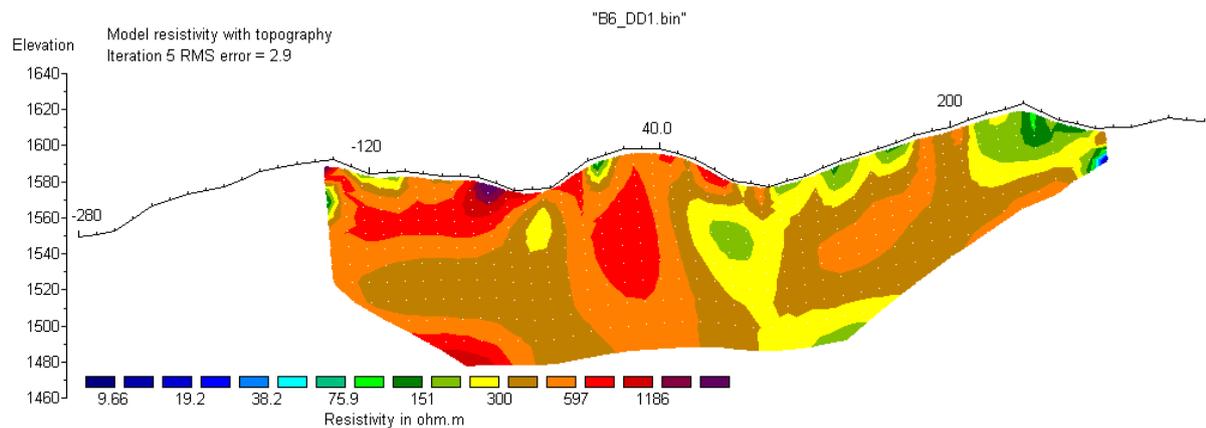
در این ناحیه واقع شده است [محمدی ویزه، ۱۳۸۸]. همان طور که دیده می شود، این بی هنجاری سطحی بوده و در عمق گسترش نیافته است. دومین بی هنجاری که در فاصله ایستگاه های ۴۰ تا ۱۶۰ شمالی واقع شده از انطباق خوبی با مناطق با مقاومت ویژه پایین (۱۰۰ تا ۳۷۵ اهم متر) برخوردار است. از آنجا که این بی هنجاری در عمق گسترش یافته است و از ابعاد بزرگ تری برخوردار است، می تواند با اهمیت تلقی شود. بی هنجاری سوم که در فاصله ایستگاه های ۲۰۰ تا ۳۰۰ شمالی واقع است از بارپذیری بسیار بالایی (بالاتر از ۳۰ میلی ولت بر ولت) برخوردار است. این بی هنجاری کاملاً منطبق بر این با مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم متر) است. این بی هنجاری ناشی از سنگ های شیستی است که در این ناحیه در سطح رخنمون دارند [محمدی ویزه، ۱۳۸۸]. هر چند که شواهدی از وجود کانی سازی در این سنگ ها مشاهده می شود، ولی از نظر کانی سازی و هدف مورد مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار نیستند.



نقشه ۴-۱۵ الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل ۵۰ شرقی B6-DD1



نقشه ۴-۱۵-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های بارپذیری برای پروفیل ۵۰ شرقی B6-DD1



نقشه ۴-۱۵-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل ۵۰ شرقی

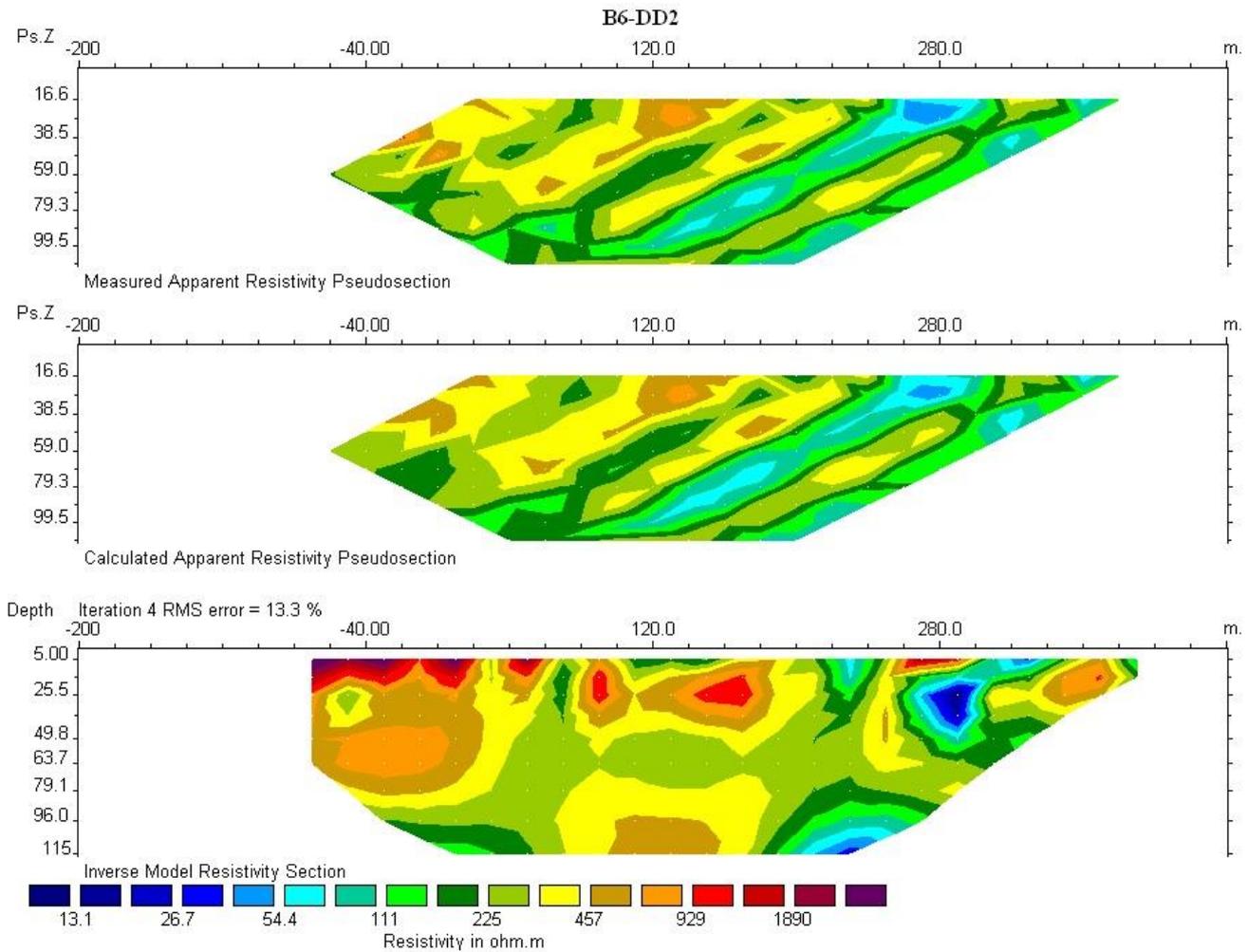
B6-DD1

#### ۳-۸-۴ بررسی مقطع B6-DD2

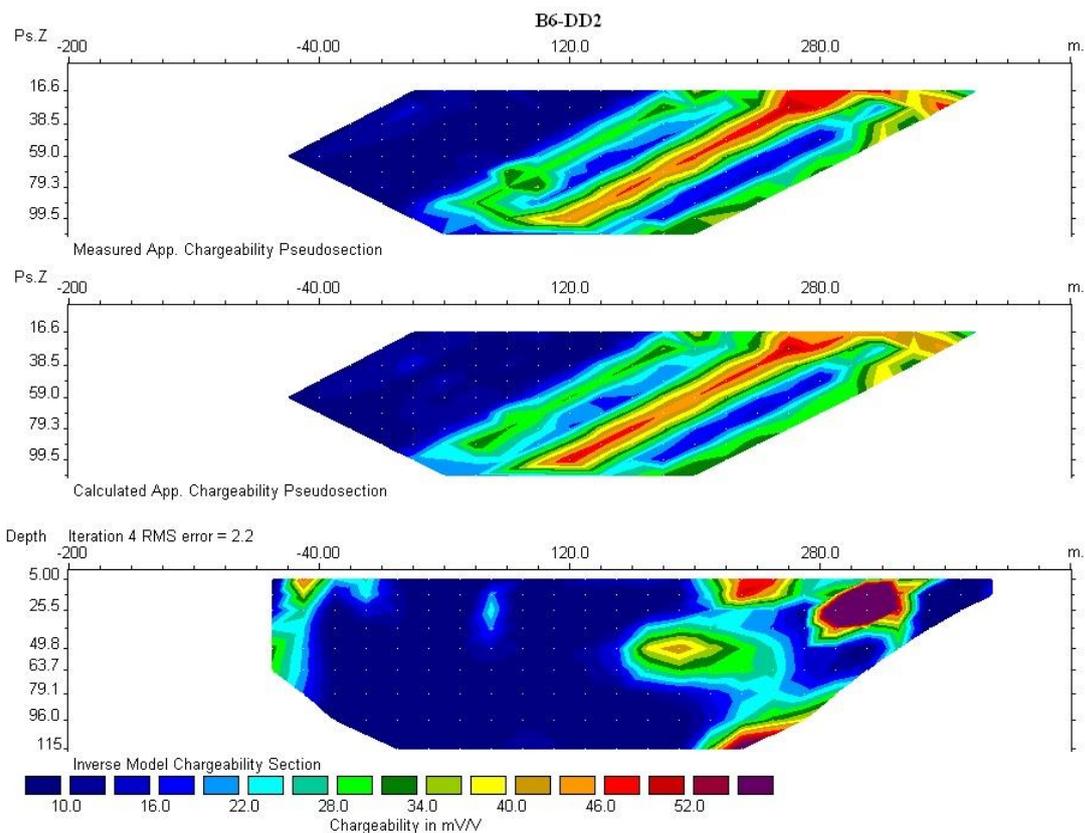
به منظور بررسی عمقی و ردیابی بی‌هنجاری واقع در نقشه بارپذیری حاصل از آرایه مستطیلی (نقشه ۴-۱۳) و همچنین نواحی شمالی محدوده مورد مطالعه یک آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۴۰ متر و با پرش ۲۰ متر بر روی پروفیل ۰۰ به طول ۴۴۰ متر برداشت شد. موقعیت این پروفیل در نقشه‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ با واژه DD2 به‌نمایش درآمده است. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت‌ویژه مربوط با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۱۶ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۱۶-الف و ۴-۱۶-ب شبه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این، مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۱۶-ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری در مقاومت‌ویژه به ترتیب ۵/۷ تا ۵۲ میلی‌ولت بر ولت و ۴۱ تا ۹۸۰ اهم متر می‌باشد.

در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. یک سری بی‌هنجاری با مقدار بارپذیری بالا (بالتر از ۳۰ میلی‌ولت بر ولت) که در عمق نیز گسترش یافته‌اند، در فاصله ایستگاه‌های ۱۶۰ تا ۳۶۰ شمالی دیده می‌شوند. این بی‌هنجاری‌ها منطبق بر نواحی با مقاومت‌ویژه پایین (کمتر از ۳۰۰ اهم متر) می‌باشند. همان‌طور که در بررسی مقطع یک نیز ذکر شد، این بی‌هنجاری‌ها در سطح منطبق بر سنگ‌های شیستی در این ناحیه می‌باشند [محمدی‌ویژه، ۱۳۸۸]. با توجه به وجود شواهد کانی‌سازی پراکنده در این سنگ‌ها و همچنین مقاومت‌ویژه پایین آن‌ها، چنین نتیجه‌ای را در مقاطع بارپذیری و مقاومت‌ویژه سبب شده‌اند. به نظر می‌رسد که این منطقه از نظر کانی‌سازی اهمیت قابل‌توجهی نداشته باشد. یک بی‌هنجاری کوچک نزدیک به سطح نیز در حد فاصل ایستگاه‌های ۶۰ تا ۸۰ شمالی در مقطع IP قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری منطبق بر نواحی با مقاومت‌ویژه پایین (حدود ۲۰۰ اهم متر) در مقطع مقاومت‌ویژه می‌باشد.

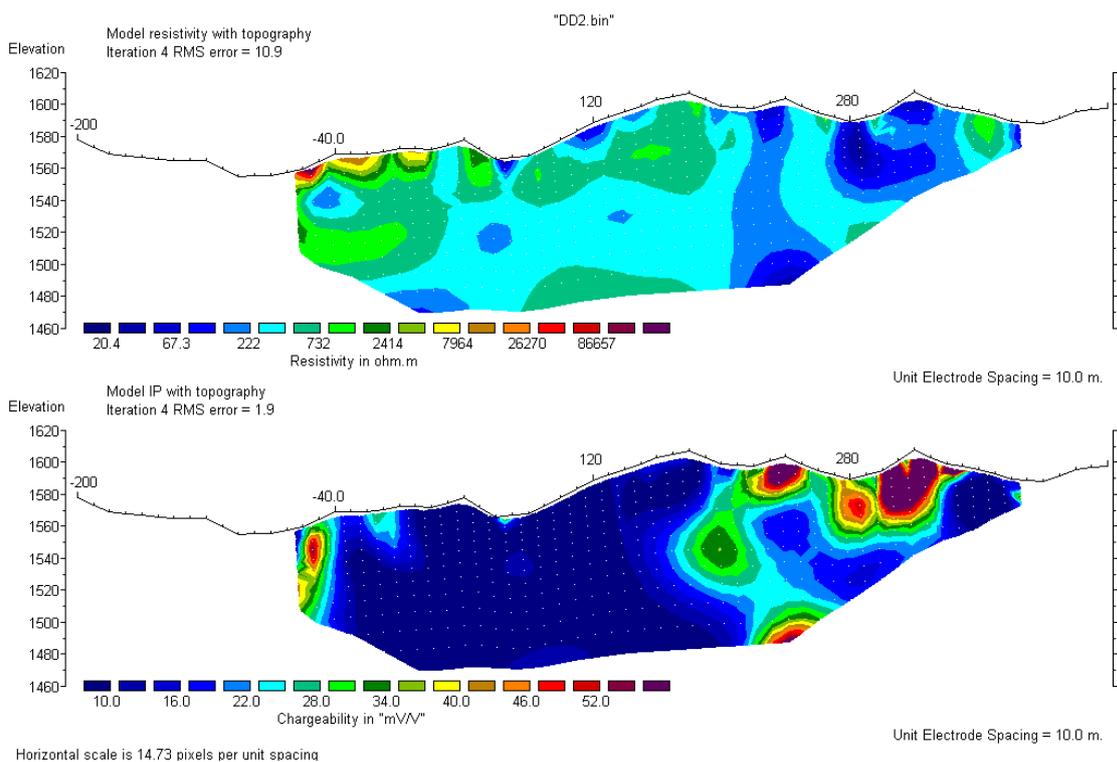
بی‌هنجاری دیگر که در فاصله ایستگاهی ۰ تا ۶۰ جنوبی واقع است، منطبق بر رخنمون رگه در این ناحیه است. این منطقه منطبق بر زون با مقاومت ویژه بالا در مقطع مقاومت ویژه است [محمدی و ویژه، ۱۳۸۸].



نقشه ۴-۱۶- الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل B6-DD2



نقشه ۱۶-۴-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری برای پروفیل B6-DD2



نقشه ۱۶-۴-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی برای پروفیل B6-DD2

## ۹-۴ بررسی نتایج در محدوده شماره ۷

### بررسی مقطع B7-DD1

به منظور بررسی عمقی رگه‌ای که در این محدوده واقع شده، یک پروفیل دوقطبی-دوقطبی در این محدوده برداشت شد. موقعیت این پروفیل در شکل ۴-۱ با واژه B7-DD1 مشخص شده است. این پروفیل با مشخصات  $AB=MN=Leap=20$  متر به طول ۴۰۰ متر و با آزمون ۱۴۴ درجه در این ناحیه در نظر گرفته شد. مقاطع مدل‌سازی شده IP و مقاومت ویژه مربوطه با نرم‌افزار Res2Dinv تهیه شده و در نقشه شماره ۴-۱۷ به نمایش درآمده است. در نقشه‌های ۴-۱۷-الف و ۴-۱۷-ب شبه مقاطع و مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل، نشان داده شده است. علاوه بر این مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح توپوگرافی در نقشه ۴-۱۷-ج آورده شده است. حداقل و حداکثر مقدار عددی بارپذیری و مقاومت ویژه به ترتیب ۰/۹ تا ۲۸/۹ میلی‌ولت بر ولت و ۷۹ تا ۸۸۶ اهم متر می‌باشد.

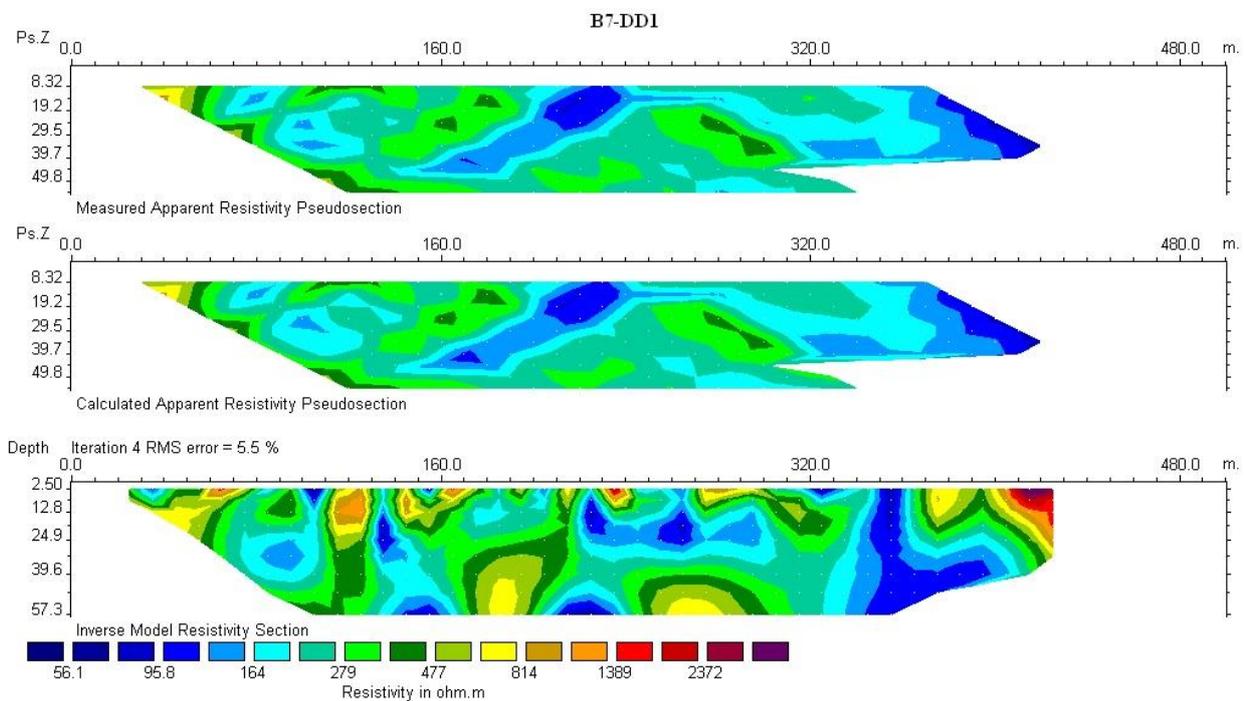
در نقشه IP محدوده بی‌هنجاری با طیف رنگی سبز تا قرمز از دیگر نواحی متمایز شده است. یک بی‌هنجاری قابل توجه در فاصله ایستگاه‌های ۲۴۰ تا ۳۳۰ شمالی قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری در نقشه مقاومت ویژه منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه پایین (۱۰۰ تا ۳۰۰ اهم متر) است. همان‌طور که در نقشه IP دیده می‌شود، این بی‌هنجاری در عمق ۵۰ متر محدود نشده و احتمال گسترش آن در عمق وجود دارد. با توجه به نوع کانی‌سازی در این ناحیه، این منطقه را می‌تواند پتانسیل خوبی برای کانی‌سازی برخوردار دانست. در فاصله ایستگاه‌های ۱۲۰ تا ۱۸۰ شمالی، شواهدی از کانی‌سازی به صورت مالاکیت در سطح مشاهده می‌شود [محمدی‌ویژه، ۱۳۸۸]. در حوالی ایستگاه ۱۲۰ شمالی نیز با فاصله‌ای در حدود ۲۰ متر از پروفیل برداشتی، یک ترانشه حفاری دیده می‌شود که شواهدی از کانی‌سازی در آن قابل تشخیص است. همان‌طور که در نقشه IP دیده می‌شود، در این نواحی چند بی‌هنجاری کوچک با طیف رنگی سبز دیده می‌شود. این

بی‌هنجاری‌ها در مقایسه با بی‌هنجاری اول از مقادیر بارپذیری پایین تری برخوردارند و به نظر می‌رسد در عمق گسترش یافته‌اند.

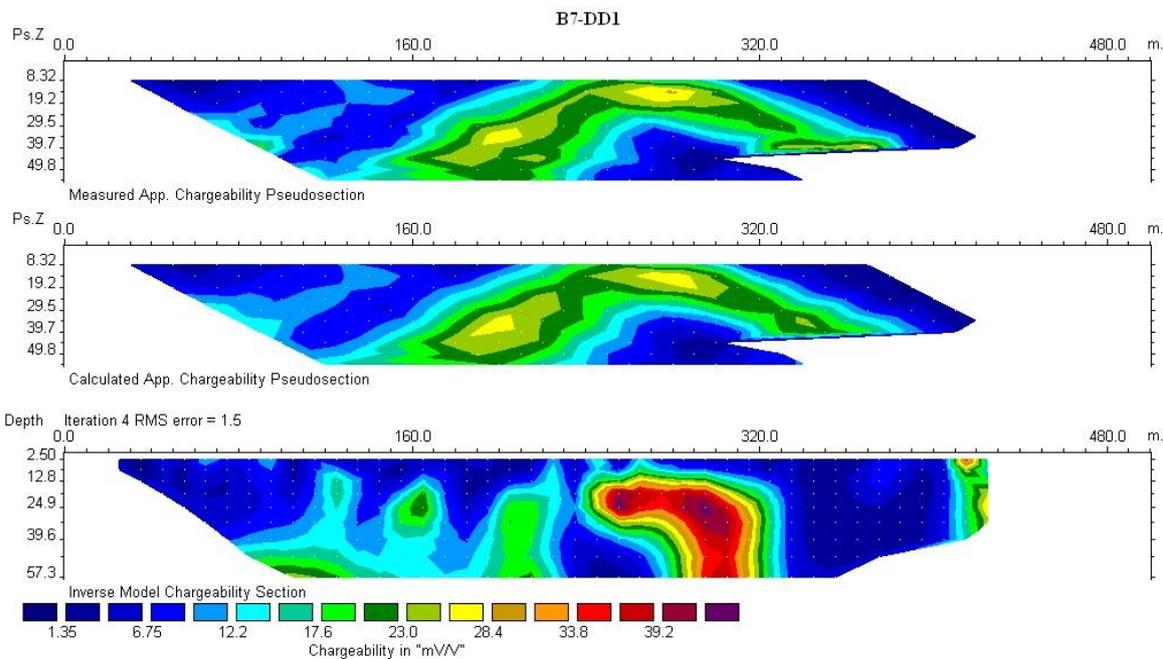
با توجه به موارد ذکر شده فوق گمانه اکتشافی بنا بر نقشه بارپذیری در این محدوده حفر گردید که اطلاعات آن به شرح زیر است.

جدول ۴-۵: مشخصات نقطه حفاری در محدوده ۷

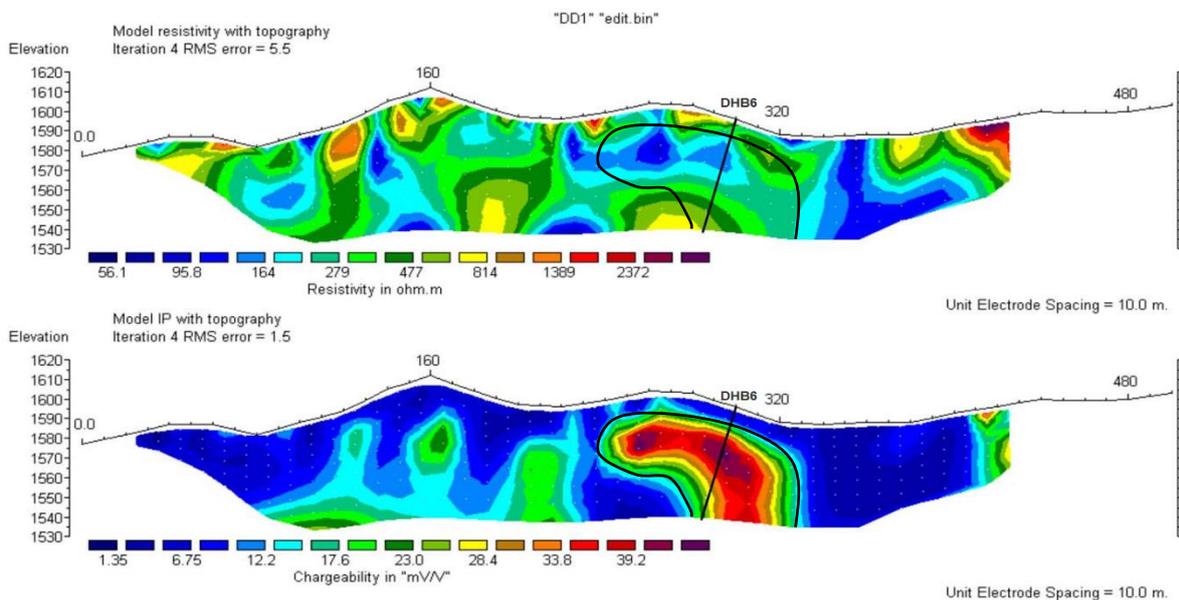
کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	عمق حفاری انجام شده
B7	DD1	DHB6	587745	3921136	دامن قر	144	75	57.15



نقشه ۴-۱۷-الف: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه پروفیل B7-DD1



نقشه ۴-۱۷-ب: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های بارپذیری پروفیل B7-DD1



نقشه ۴-۱۷-ج: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون با اعمال تصحیح توپوگرافی پروفیل B7-DD1

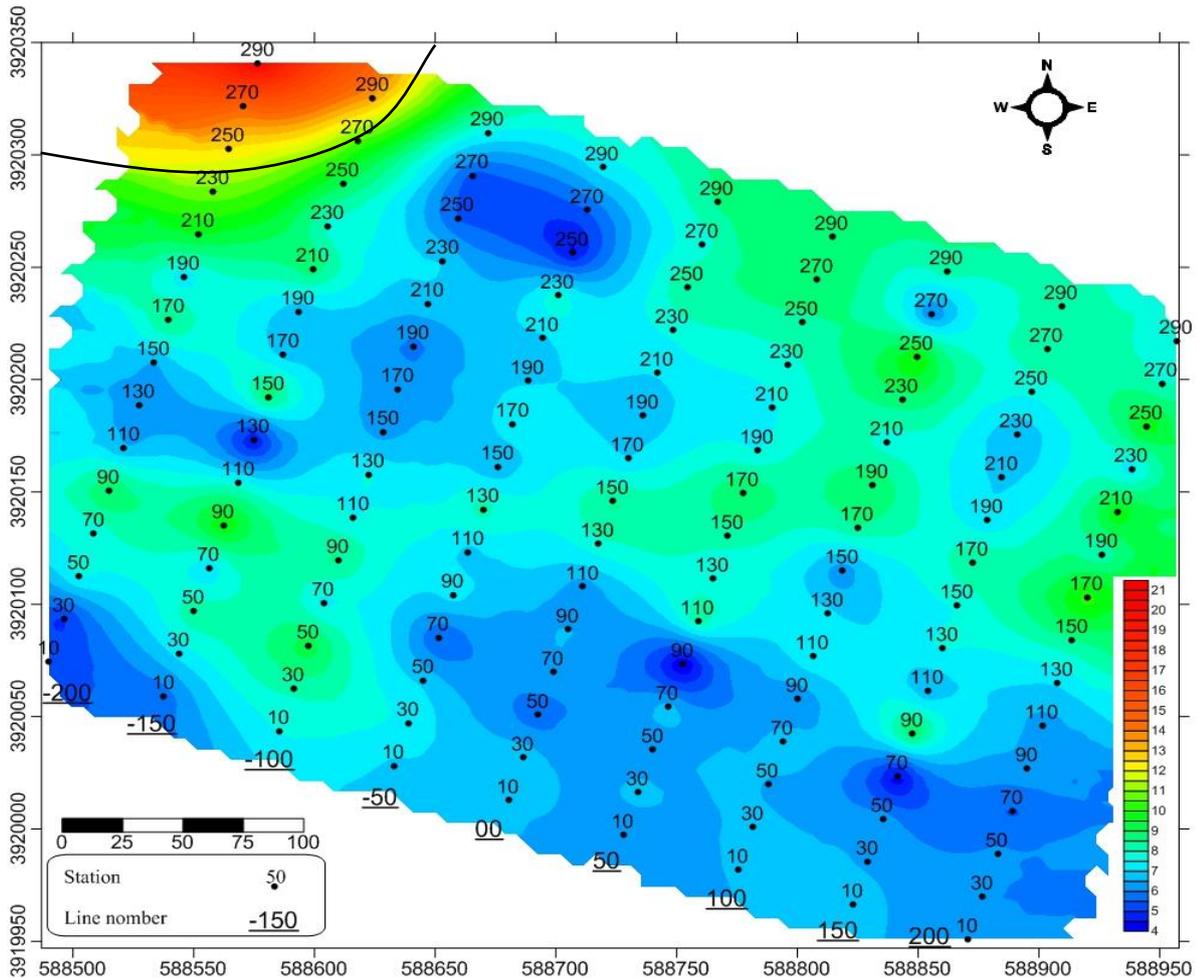
#### ۴-۱۰ بررسی نتایج در محدوده شماره ۸

این محدوده توسط یک آرایه مستطیلی با مشخصات  $AB=800$  متر و فواصل پروفیل‌های ۵۰ متر و  $MN=20$  متر مورد پیمایش قرار گرفته و پارامترهای بارپذیری ظاهری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. در ادامه

مقادیر اندازه‌گیری شده در نقشه‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

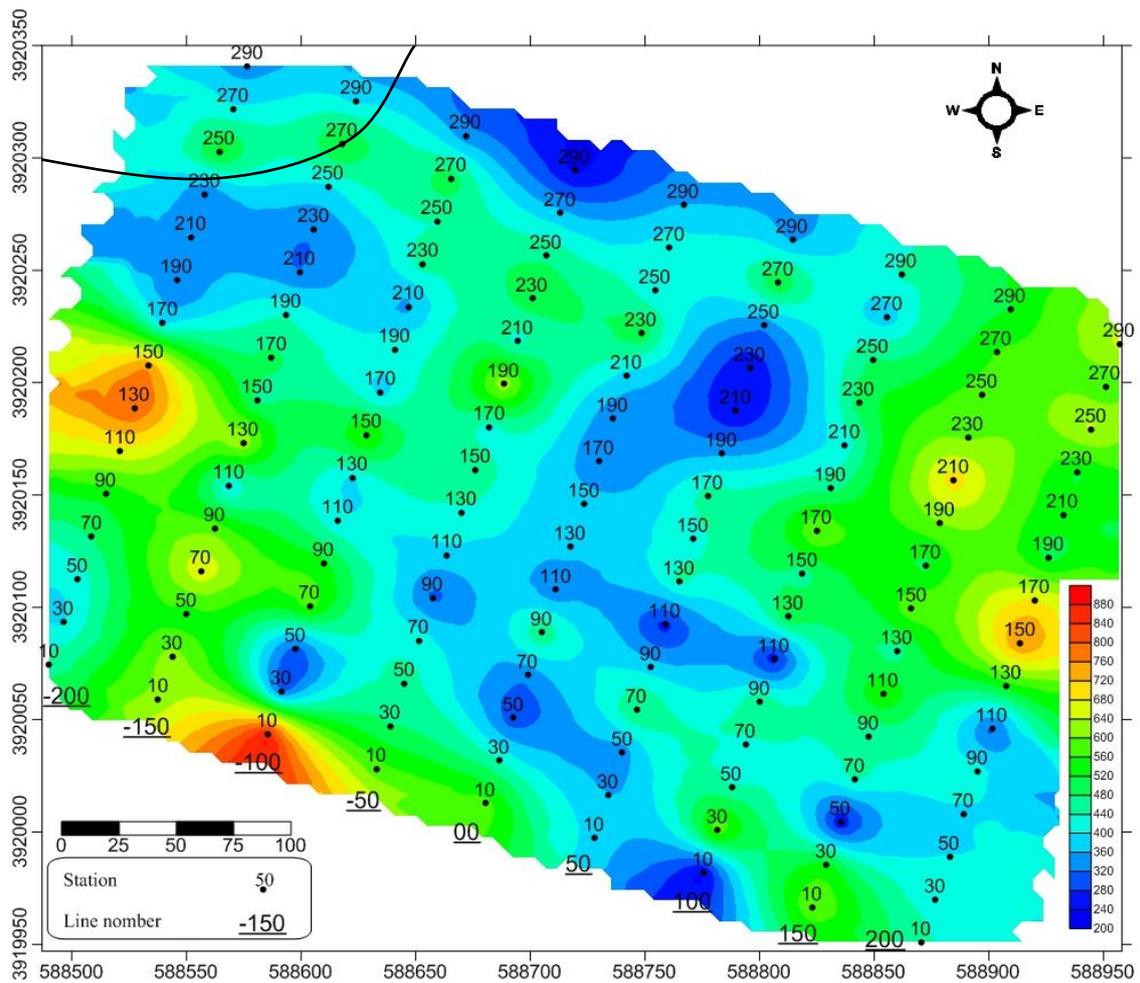
## بررسی نتایج آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸

نقشه بارپذیری ظاهری محدوده شماره ۸ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه ۴-۱۸ به‌نمایش درآمده است. در این نقشه نواحی با بارپذیری بالا که مشخصه نواحی با پتانسیل کانی‌سازی بالا می‌باشند، با رنگ قرمز از دیگر نواحی متمایز شده‌اند. حداقل مقدار عددی بارپذیری ۴ و حداکثر مقدار عددی آن ۲۱ می‌باشد. همان‌طور که در این نقشه مشاهده می‌شود، محدوده واقع در فاصله پروفیل‌های ۲۰۰ تا ۱۵۰ غربی و فاصله ایستگاه‌های ۲۵۰ تا ۲۹۰ شمالی، از بارپذیری بالایی برخوردار است. این بی‌هنجاری توسط یک آرایه مستطیلی در این ناحیه محدود نشده و همان‌طور که در نقشه ۴-۱۸ دیده می‌شود، به سمت شمال غربی محدوده مورد مطالعه گسترش می‌یابد. مقادیر بارپذیری در دیگر نقاط این محدوده از مقادیر پایین تا متوسطی (طیف رنگی آبی تا سبز) برخوردارند.



نقشه ۴-۱۸: نقشه بارپذیری ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸

نقشه مقاومت ویژه ظاهری محدوده شماره ۸ با استفاده از آرایه مستطیلی در نقشه به نمایش در آمده است. محدوده تغییرات عددی مقاومت ویژه ظاهری بین ۲۲۱ تا ۸۹۱ اهم متر می باشد. مقاومت ویژه پایین این منطقه ناشی از گسترش قابل توجه سنگ های شیستی در این ناحیه است. همان طور که در این نقشه دیده می شود، در فاصله بین پروفیل های ۲۰۰ تا ۱۵۰ غربی و ما بین ایستگاه های ۲۵۰ تا ۲۹۶ شمالی که منطبق بر بی هنجاری با IP بالا در نقشه می باشد، از مقاومت ویژه پایینی (طیف رنگی آبی تا سبز) برخوردار است.



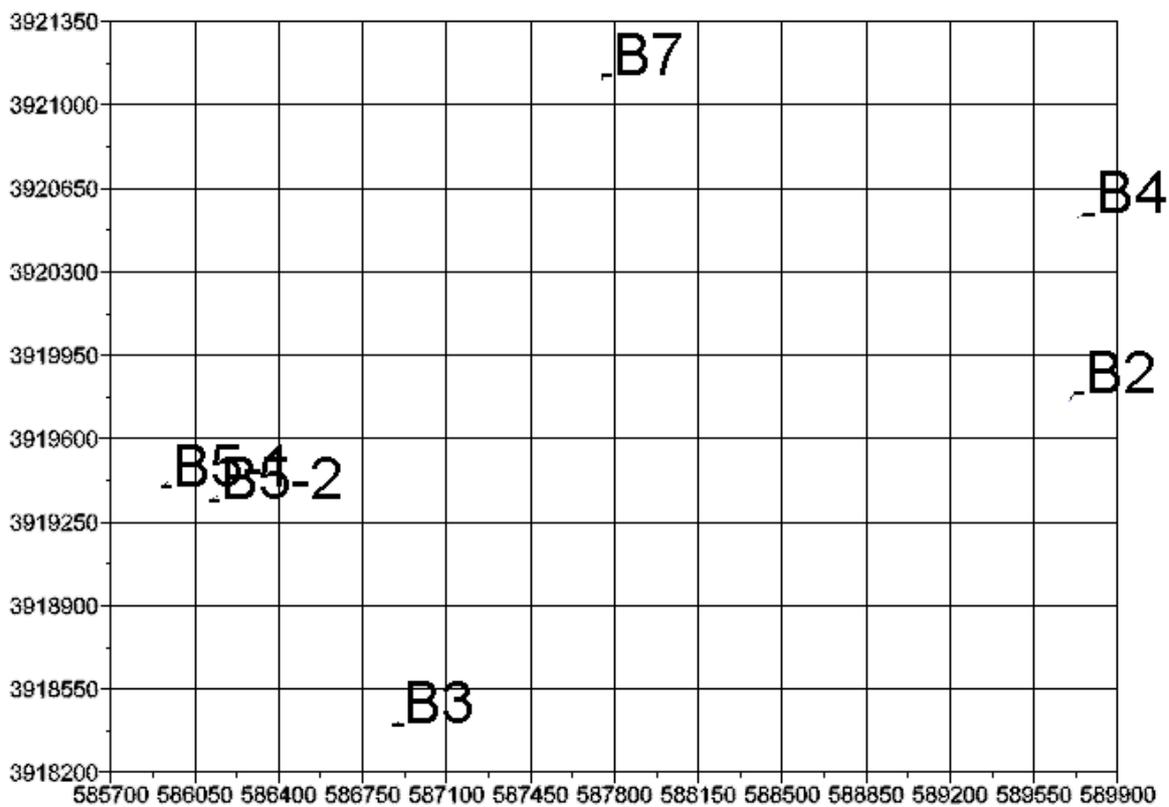
نقشه ۴-۱۹: نقشه مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده با آرایه مستطیلی در محدوده شماره ۸

#### ۴-۱۱ حفاری‌های انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه

با توجه به نتایج حاصل از برداشت، پردازش و مدل‌سازی ژئوفیزیکی که با روش IP و مقاومت ویژه در محدوده برداشت شد، بر روی ۶ پروفیل دوقطبی-دوقطبی به منظور ارزیابی وضعیت ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی مطابق مشخصات زیر حفاری صورت پذیرفت که نتایج حاصل از حفاری در این بخش بررسی خواهد شد.

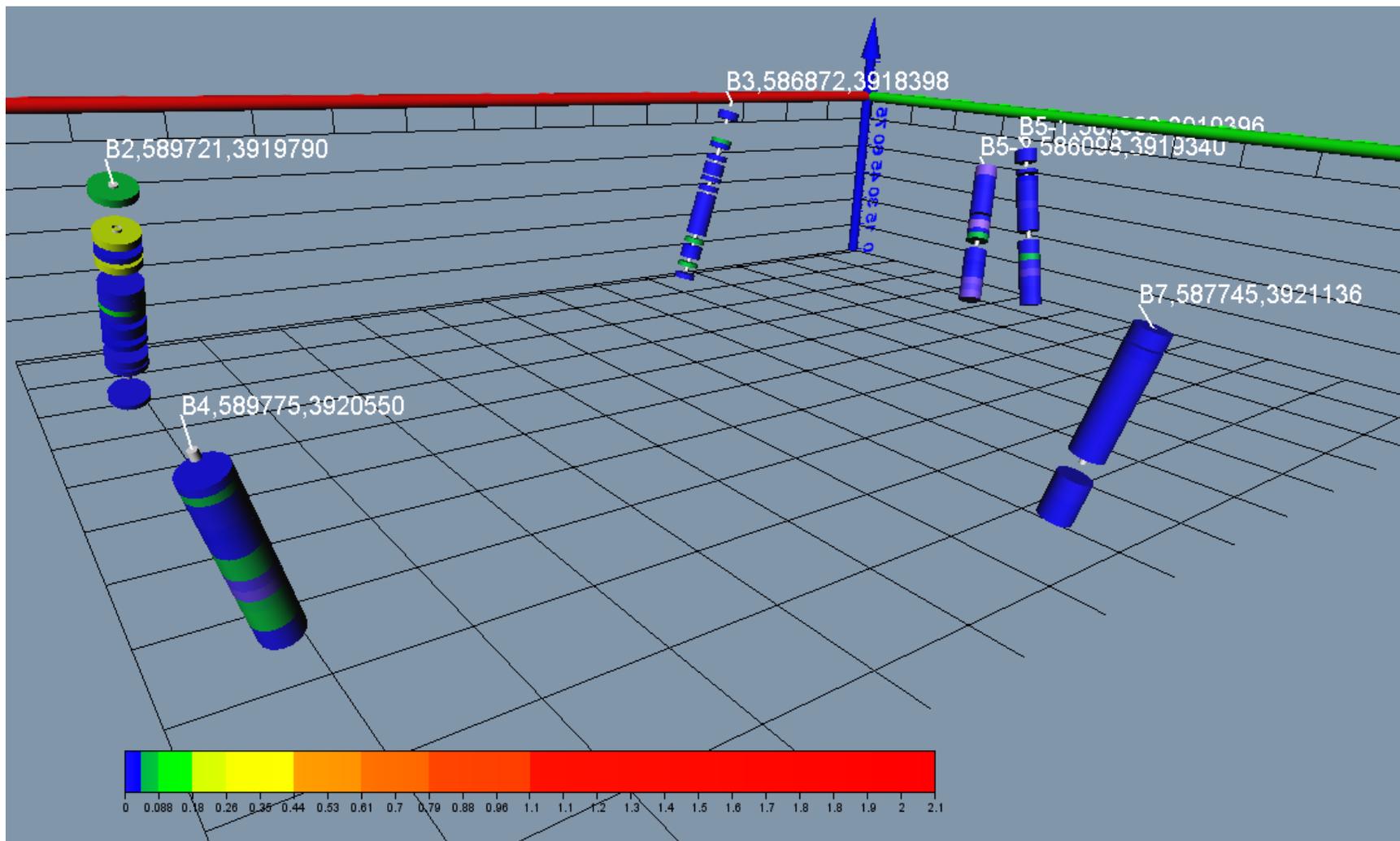
جدول ۴-۶: مشخصات نقاط حفاری صورت گرفته در منطقه

عمق حفاری انجام شده	شیب گمانه	آزیموت گمانه	نام منطقه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام گمانه	پروفیل	کد منطقه
84	60	180	زوسپاه	3919970	589721	DHB1	DD1	B2
87	75	100	کلاته رستم	3918398	586872	DHB2	DD1	B3
50	70	230	کلاسیک	3920550	589775	DHB3	DD1	B4
73.2	70	24	سربرج	3919396	585900	DHB4	DD1	B5
64.2	60	52	سربرج	3919340	586098	DHB5	DD2	B5
57.15	75	144	دامن قر	3921136	587745	DHB6	DD1	B7

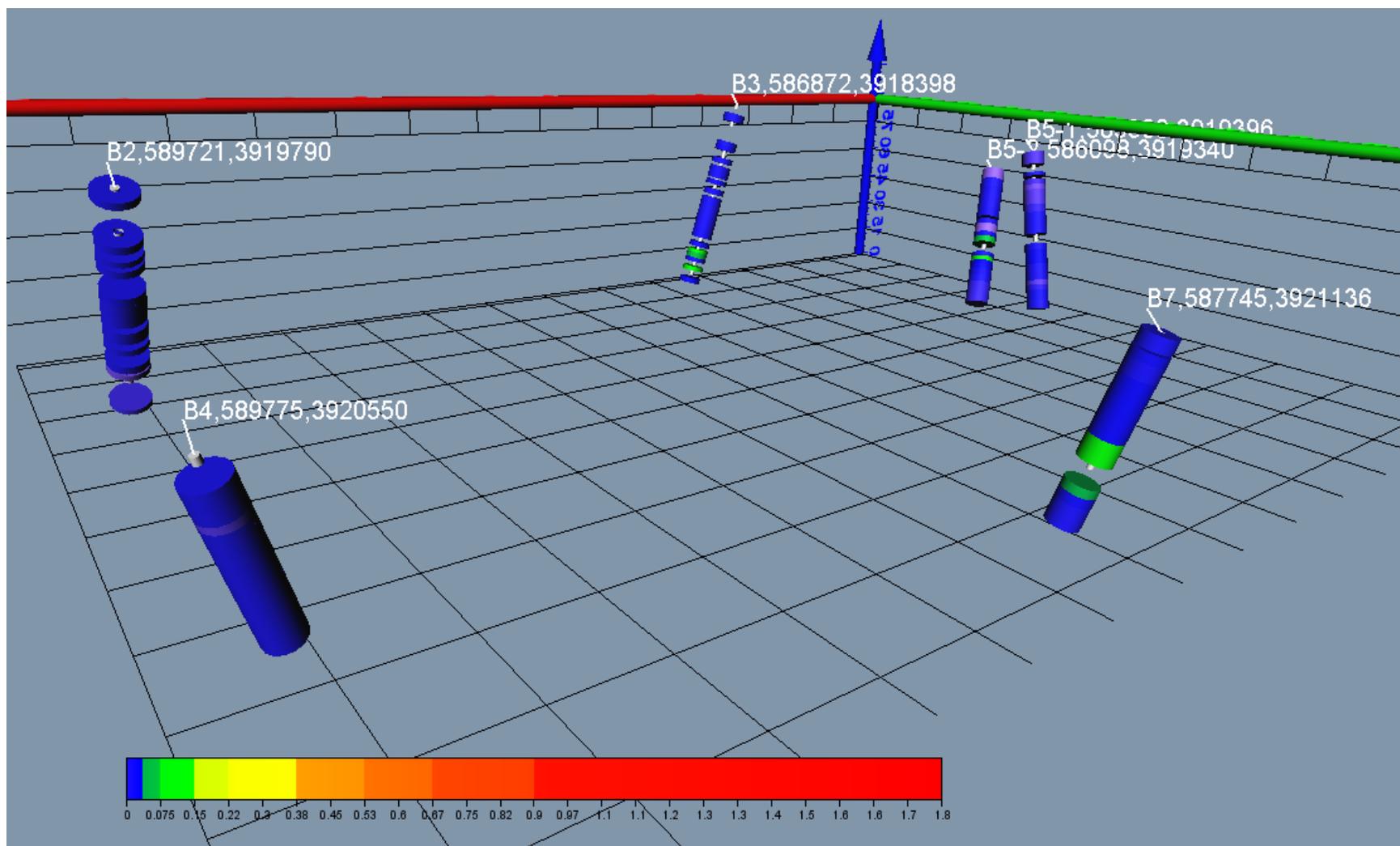


نقشه ۴-۲۰: مختصات نقاط حفاری در نرم افزار Voxler 4

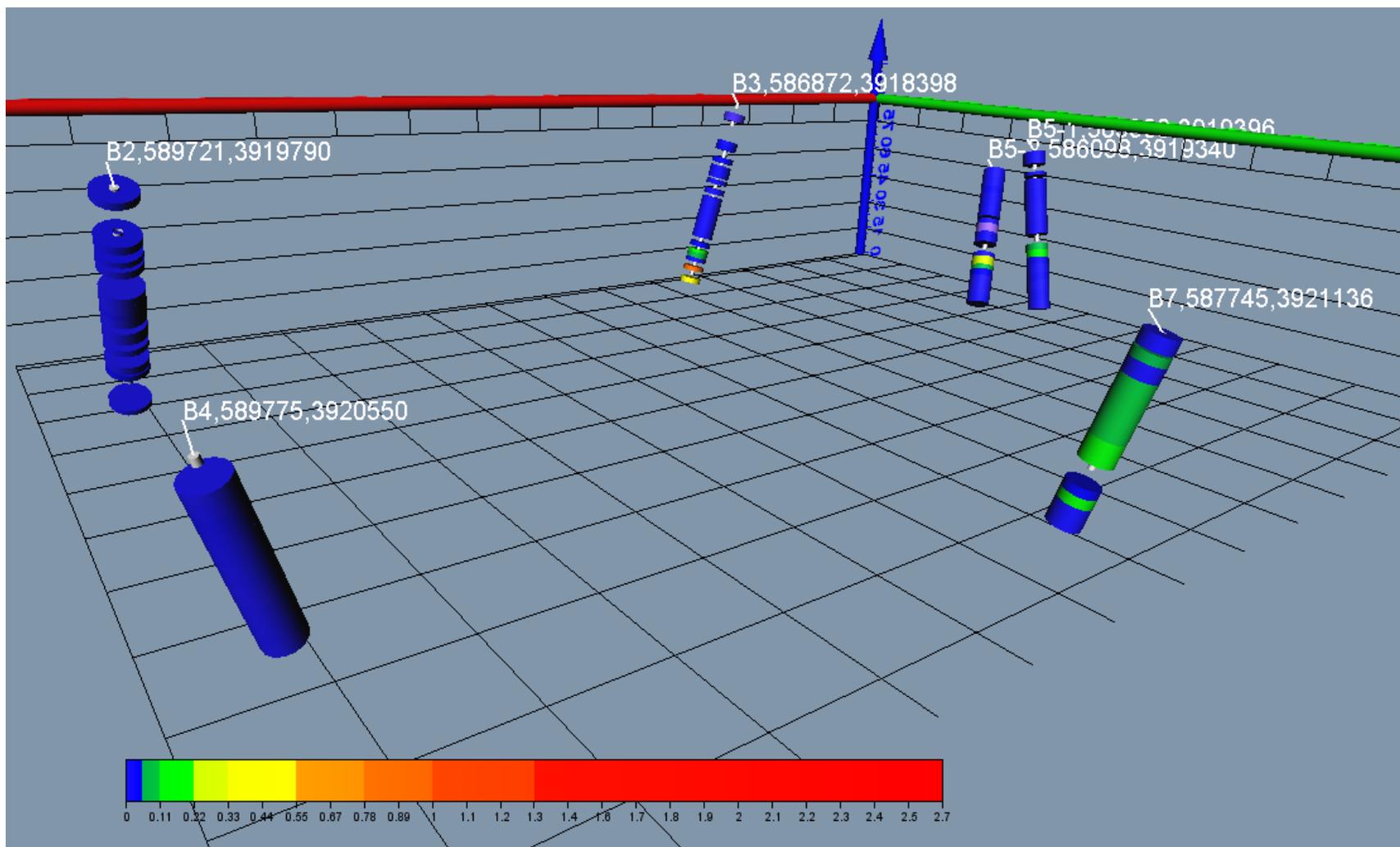
در ابتدا برای عناصر Pb، Cu، Zn و Au از حفاری‌های انجام شده در منطقه با نرم‌افزار Voxler 4 خروجی تهیه شده که شکل ۴-۲۱ کانی سازی مس، شکل ۴-۲۲ کانی سازی سرب، شکل ۴-۲۳ کانی سازی روی و شکل ۴-۲۴ کانی سازی طلا در مغزه‌های حاصل از حفاری هستند که در صفحه‌های بعدی قابل مشاهده است.



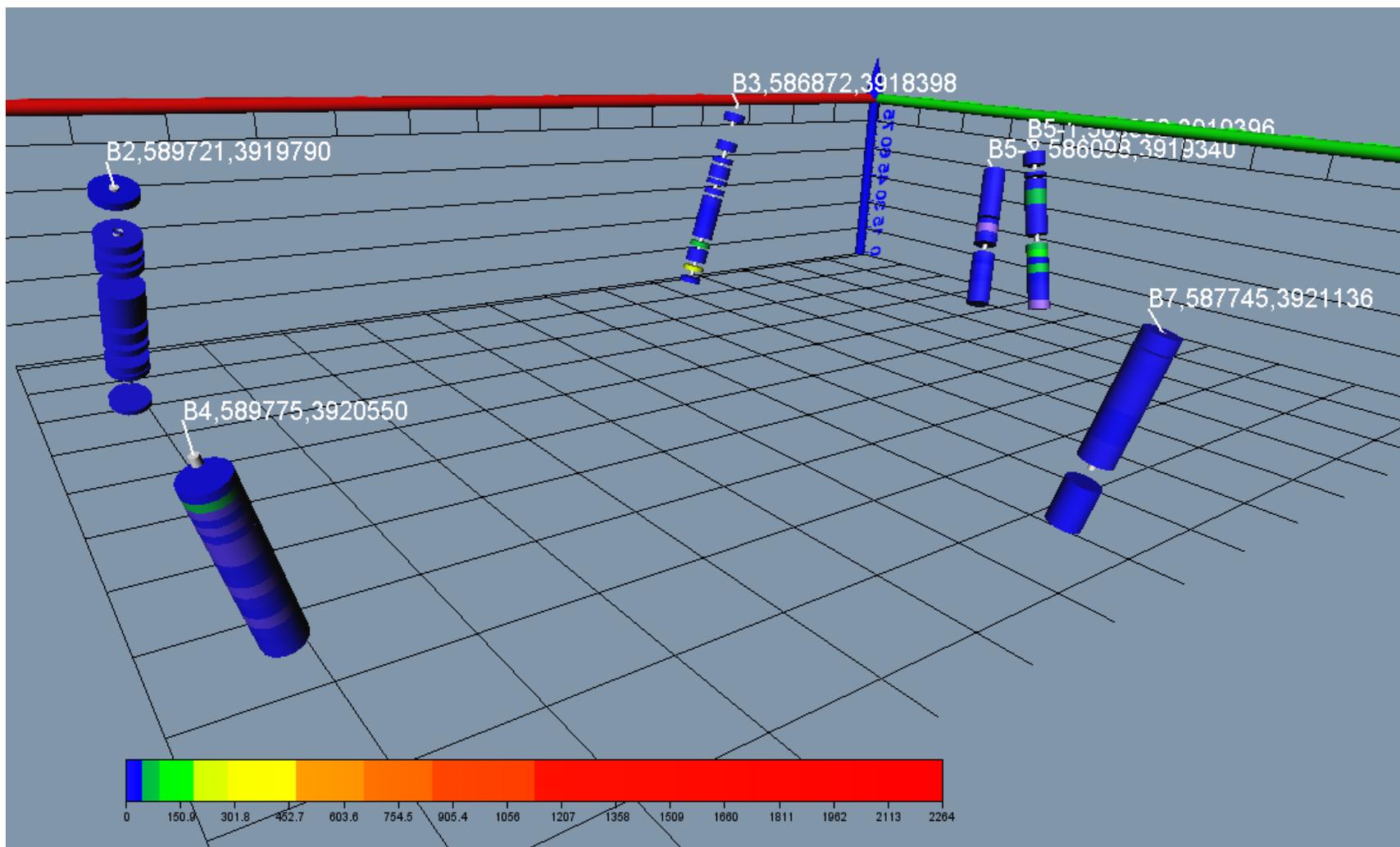
شکل ۴-۲۱: کانی‌سازی مس در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد



شکل ۴-۲۲: کانی‌سازی سرب در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد



شکل ۴-۲۳: کانی‌سازی روی در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب درصد



شکل ۴-۲۴: کانی‌سازی طلا در مغزه‌های حاصل از حفاری بر حسب pbb

مناطق حفر شده بر روی پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی

محدوده شماره ۲ آرایه دوقطبی- دوقطبی ۲ داده‌های حفاری با بی‌هنجاری IP و مقاومت ویژه مطابقت ندارد.  
محدوده شماره ۳ آرایه دوقطبی-دوقطبی ۱، محدوده شماره ۴ آرایه دوقطبی-دوقطبی ۱، محدوده شماره ۵  
آرایه دوقطبی-دوقطبی ۱ و ۲ و همچنین محدوده شماره ۷ آرایه دوقطبی-دوقطبی ۱ با برداشت‌های IP و  
مقاومت ویژه در این محدوده‌ها منطبق بوده و بی‌هنجاری‌های IP و مقاومت ویژه را تایید می‌کند.

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

برداشت داده‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به منظور اکتشاف کانه‌زایی در محدوده شمال بردسکن در استان خراسان رضوی انجام شد. تفسیر همزمان نتایج با روش‌های بیان شده، تلفیق اطلاعات و داده‌های حاصله و با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی و حفاری‌های صورت گرفته در منطقه کانی‌سازی فلزی را در این منطقه تایید نمود.

## ۵-۲ نتیجه‌گیری:

همان‌طور که از اندازه‌گیری‌های IP و مقاومت‌ویژه در این منطقه مشاهده می‌شود، کانه‌زایی در اکثر مناطق از بارپذیری بالا و همچنین مقاومت‌ویژه پایین تا متوسطی برخوردارند. این امر را می‌توان در کانی‌سازی فلزی و حضور کانی‌های سولفیدی در مناطق کانی‌سازی نسبت داد. البته در برخی نقاط به دلیل سیلیسی شدن مناطق کانی‌سازی، مقاومت‌ویژه این نواحی تا اندازه‌ای بالاتر بوده است.

از نظر زمین‌شناسی بخش اعظم محدوده مورد مطالعه مشتمل بر شیست‌های سبز همراه با لایه‌هایی از متاریوداسیت و متاریولیت با منشأ توف‌های اسیدی است که دگرگونی بسیار ضعیفی را متحمل شده‌اند. سنگ‌های شیست در برخی نقاط جزئی از محدوده عملیاتی هستند. این سنگ‌ها با توجه به خواص الکتریکی خود از مقاومت‌ویژه پایین و بارپذیری نسبتاً بالایی برخوردارند. با توجه به نوع کانی‌سازی در این منطقه، این‌گونه ساختارها جزء نوفه‌های اندازه‌گیری بوده و بایستی به خوبی مد نظر قرار گیرند. در مواردی که این سنگ‌ها و کانی‌سازی ضعیفی نیز همراه باشند (نظیر منطقه شماره ۶)، مقادیر بارپذیری بالایی (حتی بالاتر از مناطق کانه‌زایی) از خود نشان می‌دهند.

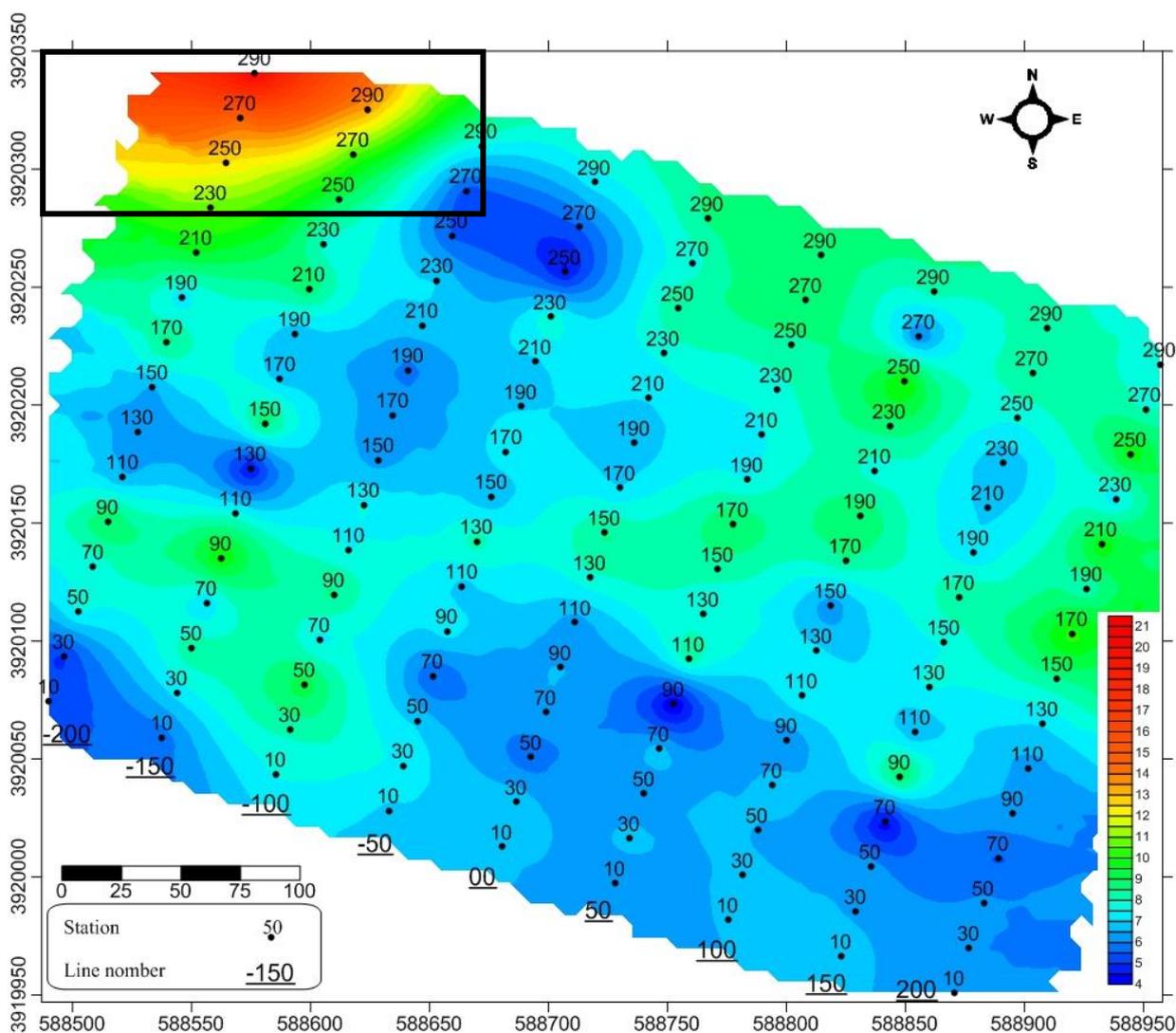
پی‌جویی ذخایر پلی‌متال با روش IP و مقاومت‌ویژه با آرایه مستطیلی نتیجه‌بخش بوده؛ در این بررسی نواحی امیدبخش با مقاومت‌ویژه نسبتاً پایین و IP بالا خود را نشان می‌دهند.

استفاده هم‌زمان از روش IP و مقاومت‌ویژه با آرایه دوقطبی-دوقطبی برای بررسی‌های عمقی در مناطق امیدبخش پلی‌متال، بسیار مناسب و قابل اطمینان می‌باشد. در مناطق امیدبخش بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه

پایین تا متوسط را نشان می‌دهد که نشان دهنده‌ی کانی‌های فلزی و سولفیدی در عمق می‌باشد. حفاری‌های صورت گرفته در این محدوده بر روی بعضی از پروفیل‌ها، بی‌هنجاری‌های تعیین شده را تأیید کرد.

### ۳-۵ پیشنهادها:

در محدوده شماره ۸ به منظور انجام مطالعات تکمیلی در این ناحیه می‌توان با طراحی یک آرایه مستطیلی در شمال غربی این محدوده، تخمینی از گسترش جانبی زون کانی‌سازی به دست آورد. در نهایت با تعیین نقاط مناسب بر روی بی‌هنجاری‌های نقشه بارپذیری آرایه مستطیلی، با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی به بررسی عمقی بی‌هنجاری‌ها پرداخته شده و نقاط مناسب برای حفاری پیشنهاد گردد.

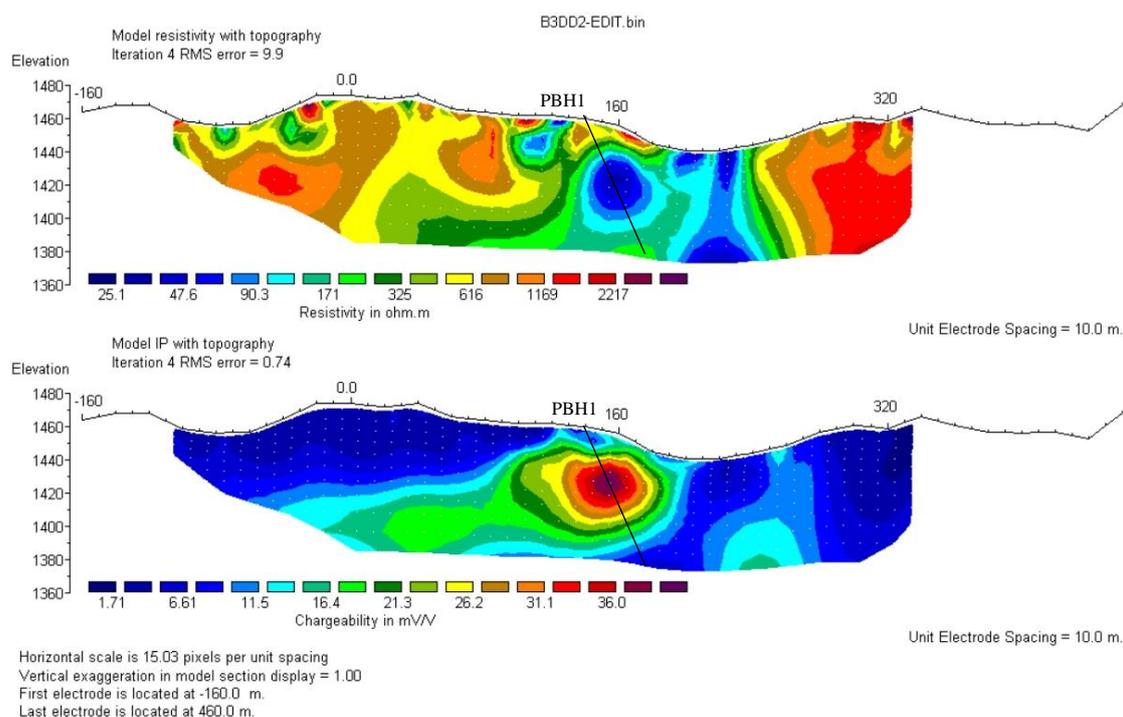


شکل ۵-۱: محدوده پیشنهاد شده برای طراحی یک آرایه مستطیلی بر روی نقشه بارپذیری در محدوده شماره ۸

پیشنهاد حفاری بر روی محدوده شماره ۳ پروفیل شماره ۲ که مشخصات نقطه پیشنهادی در جدول ۵-۱ آورده شده است. همچنین محدوده پیشنهاد شده برای حفاری بر روی مقطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون با تصحیح توپوگرافی نیز در شکل ۵-۲ قابل مشاهده است.

جدول ۵-۱: مشخصات نقطه پیشنهاد حفاری

کد منطقه	پروفیل	نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ایستگاه	آزیموت گمانه	شیب گمانه	پیشنهاد حفاری تا عمق
B3	DD2	PBH1	586912	3918442	140 شرقی	110	60	70



شکل ۵-۲: نقطه حفاری پیشنهاد شده بر روی منطقه ۳ پروفیل شماره ۲

## منابع

نوروزی غ، (۱۳۹۹)، "روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۳۷ و ۲۲۱.

صفری م، (۱۳۸۸)، "گزارش پی‌جویی برگه ۱:۲۵۰۰۰ کبودان (منطقه بردسکن)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

صفری م، (۱۳۸۹)، "معرفی کانی‌سازی‌های جدیدی از ذخایر سولفیدی توده‌ای در منطقه کبودان (شمال بردسکن) با استفاده از روش آنالیز ویژگی نقشه‌های عیار عنصری"، نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، ص ۶۶۸، مشهد.

صفری م. و اکبری مقدم م، (۱۳۸۹)، "اکتشاف ذخایر سولفیدی توده‌ای در منطقه کبودان، شمال بردسکن"، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

کریم‌پور م، (۱۳۸۹)، "کانی‌سازی ماسیوسولفید تکنار، سن‌سنجی زیرکون U-Pb و ژئوشیمی رادیویزوتوپ‌ها Sr-Nd گرانیوتئیدهای بورناورد"، هجدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ص ۸۲۲، تبریز.

Alilou S. K., Norouzi G. H., Doulati F., and Abedi M., (2014), "Application of magnetometry, electrical resistivity and induced polarization for exploration of polymetal deposits, a case study: Halab Dandi, Zanjan, Iran", In 2<sup>nd</sup> international Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAEAM), May (pp. 4-5)

Archie G. E., (1942), "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of the AIME, 146(01), 54-62.

Börner F. D., Schopper J. R., and Weller A., (1996), "Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements<sup>1</sup>" Geophysical prospecting, 44(4), 583-601.

Barker R. D., (1979), "Signal contribution sections and their use in resistivity studies", Geophysical Journal International, 59(1), 123-129.

Bery A. A., Saad R., Mohamad E. T., Jinmin M., Azwin I. N., Tan N. A., and Nordiana M. M., (2012), "Electrical resistivity and induced polarization data correlation with conductivity for iron ore exploration", The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17, 3223-3233.

Bhattacharya P.K., and Patra H.P., (1968), "Direct Current Electrical Sounding, Elsevier, Amsterdam.

Broadbent M., and Habberjam G. M., (1971), "A solution of the dipping interface problem using the square array resistivity technique", *Geophysical Prospecting*, 19(3), 321-338.

Ferdows M. S., and Ramazi H., (2015), "Application of the fractal method to determine the membership function parameter for geoelectrical data (case study: Hamyj copper deposit, Iran)", *Journal of Geophysics and Engineering*, 12(6), 909-921.

Fraser D. C., Keevil Jr N. B., and Ward S. H., (1964), "Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment", *Geophysics*, 29(5), 832-847.

GeoTomo Software (2009a) RES2DINV ver. 3.58, Geotomo Software, Penang, Malaysia.

Grant F. S., (1965), "Introduction to electrical methods", *Interpretation theory in applied geophysics*, 385-401.

Grow L. M., (1982), "Induced polarization for geophysical exploration", *The Leading Edge*, 1(1), 55-70.

Habberjam G. M., and Watkins G. E., (1967), "The reduction of lateral effects in resistivity probing", *Geophysical Prospecting*, 15(2), 221-235.

Han M. H., Shin S. W., Park S., Cho S. J., and Kim J. H. (2016), "Induced polarization imaging applied to exploration for low-sulfidation epithermal Au–Ag deposits, Seongsan mineralized district, South Korea", *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(5), 817-823.

<https://www.google.com/earth>

<https://www.gsinet.ir>

Jamali F., Arab Amiri A. R., Kamkar Rouhani A., and Bahrami A., (2021), "Modeling of Induced Polarization and Resistivity Data for Prospecting and Exploration of Polymetallic Deposit in Kaboudan Area, East of Iran", *Journal of Mining and Environment*, 12(3), 693-710.

Jin Y. A. N. G., Zhaoping L. I. U., and Long W. A. N. G., (2008), "Effectiveness of natural field induced polarization for detecting polymetallic deposits", *Earth Science Frontiers*, 15(4), 217-221.

Korvin G., (1982), "Axiomatic characterization of the general mixture rule", *Geoexploration*, 19(4), 267-276.

Gadallah M. R., and Fisher R., (2009), "Seismic Interpretation. In *Exploration Geophysics*" Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 149-221.

Merriam J. B., (2007), "Induced polarization and surface electrochemistry", *Geophysics*, 72(4), F157-F166.

- Milsom J., (2003), "Field geophysics" (Vol. 25). John Wiley and Sons.
- Mostafaie K., and Ramazi H., (2015), "Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran", *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 6(2), 2220-6663.
- Olhoeft, G. R. (1985). Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50(12), 2492-2503.
- Patella D., and Schiavone D., (1977), "Comparative Analysis of Time Domain and Frequency Domain in the Induced Polarization Prospecting METHOD", *Geophysical prospecting*, 25(3), 496-511.
- Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., and Nelson P. H. (1978), "Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP", *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- Ramazi H., and Mostafaie K., (2013), "Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration", *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8), 2961-2970.
- Reynolds J. M. (2011), "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley and Sons, Wiley- Blackwell.
- Scott J. B., (2006), "The origin of the observed low-frequency electrical polarization in sandstones", *Geophysics*, 71(5), G235-G238.
- Seigel H., Nabighian M., Parasnis D. S., and Vozoff K., (2007), "The early history of the induced polarization method", *The Leading Edge*, 26(3), 312-321.
- Shabtaie S., Bentley C. R., Blankenship D. D., Lovell J. S., and Gassett R. M., (1980), "Dome C geophysical survey", 1979–80. *Antarctic Journal of the United States*, 15(5), 2-5.
- Shabtaie S., Thyssen F., and Bentley C. R., (1982), "Deep geoelectric and radar soundings at Dome C, East Antarctica", *Annals of Glaciology*, 3, 342-342.
- Stoecklin, J., (1968), "Structural history and tectonics of Iran: a review." *AAPG bulletin*, 52(7) ,pp. 1229-1258.
- Sultan S. A., Mansour S. A., Santos F. M., and Helaly A. S., (2009), "Geophysical exploration for gold and associated minerals", case study: Wadi El Beida area, South Eastern Desert, Egypt, *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(4), 345-356.
- Szalai S., and Szarka L. (2008), "On the classification of surface geoelectric arrays", *Geophysical Prospecting*, 56(2), 159-175.
- Tavakoli S., Bauer T. E., Rasmussen T. M., Weihed P., and Elming S. Å., (2016), "Deep massive sulphide exploration using 2D and 3D geoelectrical and induced polarization data in Skellefte mining district", northern Sweden, *Geophysical Prospecting*, 64(6), 1602-1619.

Telford W. M., Geldart L. P., and Sheriff R. E., (1990), "Applied geophysics", Cambridge university press.

Timco G. W., (1979), "An analysis of the in-situ resistivity of sea ice in terms of its microstructure", *Journal of Glaciology*, 22(88), 461-471.

Ulrich C., and Slater L., (2004), "Induced polarization measurements on unsaturated", unconsolidated sands, *Geophysics*, 69(3), 762-771.

Van Nostrand R. G., and Cook K. L., (1966), "Interpretation of resistivity data (No. 499)", US Govt, Print, Off.

Weller A., Nordsiek S., and Bauerochse A., (2006), "Spectral induced polarisation—a geophysical method for archaeological prospection in peatlands", *Journal of Wetland Archaeology*, 6(1), 105-125.

Yasami N., and Ghaderi M.,(2015), "Study of copper mineralization using IP and RS geophysical methods in Chodarchay deposit", east of Zanjan.

Zohdy A.A.R., (1974), "Electrical methods, in Applications of Surface Geophysics to Groundwater Investigations", Book 2, ChapterD1, US Department of the Interior, 5–66.

Zonge K. L., and Wynn J. C., (1975), "Recent advances and applications in complex resistivity measurements", *Geophysics*, 40(5), 851-864.

## **Abstract**

Nowadays, geophysical methods are widely used in the exploration of metallic mineral deposits due to their acceptable results, low cost and high speed of implementation. Exploration activities take place on different scales, and ultimately, their focus is on areas that can potentially possess mineral deposits. The study area in the north of Kaboudan village is located in Bardeskan limit in Khorasan Razavi Province. Geologically, a significant part of the area is formed by Taknar Formation. Extensive outcrops of granodiorite and granite rocks in the west of the area as well as small outcrops of limestone, ultrabasic, tuff, andesite, radiolarite, Kerman conglomerate can be seen in the north of the area. In order to investigate the polymetallic deposits in the area, the geophysical resistivity and induction polarization (IP) methods using the rectangle electrode array in 5 rectangular zones, and also, the dipole-dipole electrode array along 9 survey lines were used in the area. The results of the electrical surveys using the rectangle array were investigated and therefore, the anomalous or conductive zones prone to metallic mineralization were detected, and then, the resistivity and IP methods using the dipole-dipole array were performed on the recognized anomalous zones. To determine the resistivity and chargeability of the subsurface structures and interpretation of the results, the obtained data acquired using the dipole-dipole array were inverted using Res2Dinv software, and as a result, two-dimensional inverse modeling resistivity and chargeability cross sections were prepared and analyzed with the help of geological information. Metallic mineralized areas having high chargeability and low to medium resistivity values were identified that indicates the presence of sulfide and non-sulfide metallic minerals in these areas. However, in some places, due to the silicification of mineralized areas, the resistivities of these areas somewhat increased. Considering the results of the IP and resistivity surveys in the area, zones 3 and 5 had higher mineralization potential than zones 2, 4, 7 and were considered the most important mineralization zones in the area. Regarding the presence of schist rocks in zones 6 and 8, IP and resistivity anomalies were due to the presence of these schist rocks in the area although there was also the evidence of mineralization in these zones, however, these zones were not considered very important from mineralization point of view.

**Key words:** Induced polarization (IP), Electrical resistivity, Poly-metallic deposits, Rectangle array, Dipole-dipole array, Bardeskan



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploration

**Exploration of poly-metallic ore deposits in north of Bardeskan  
area using modeling and interpretation of resistivity and induced  
polarization data**

**By: Mehdi Dehghanian**

Supervisors:

Dr. A. Arab-Amiri

Dr. A. Kamkar Rouhani

Advisor:

Dr. M. Mohammadi-Vizhe

January 2021