دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

تولید مدل پتانسیل معدنی بزرگ مقیاس اکتشاف ذخایر مس پورفیری بر اساس تلفیق نتایج پردازش وتفسیر داده‌های قطبش القایی، مقاومت ویژه، مغناطیس و زمین‌شناسی در محیط GIS

آمنه رئیس حسینی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر مهیار یوسفی

شهریور ماه ۱۳۹۴

شماره: ۰۶/۹۴/۱۵۷۲
تاریخ: ۹۴/۷/۲۷
ویرایش:

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آمنه رئیس حسینی به شماره دانشجویی۹۱۰۳۴۷۴ رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک تحت عنوان تولید مدل پتانسیل معدنی بزرگ مقیاس اکتشاف ذخایر مس پورفیری بر اساس تلفیق نتایج پردازش وتفسیر داده‌های قطبش القایی، مقاومت ویژه، مغناطیس و زمین‌شناسی در محیط GIS که در تاریخ ۹۴/۰۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه عالی امتیاز ۱۸/۲۵) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
۳- خوب (۱۷/۹۹ -۱۶)
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱- استادراهنما	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استادراهنما	مهیار یوسفی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	علی نجاتی کلاته	استادیار	
۴- استاد ممتحن	علیرضا عرب‌امیری	دانشیار	
۵ - استاد ممتحن	منصور ضیایی	دانشیار	

رئیس دانشکده : علیرضا عرب امیری امضاء

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

ماحصل آموخته هایم راتقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم وهرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان راسپاس نتوانم بگویم .

امروز هستی ام به امید شماست وفردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیتان رابزداید .

بوسه بر دستان پرمهرتان

تقدیر و تشکر

سپاس فراوان ایزد یکتا را که مهربانیش، یادش و همراهی پیوسته اش، همواره انگیزه من برای حرکت به سمت هدف بوده است. از زحمات و راهنمایی های اساتید گرانقدر؛ جناب آقای دکتر کامکار روحانی و جناب آقای دکتر مهیار یوسفی که کاستی های بنده را در تمامی مراحل نگارش این اثر به جان خریدند و مرا یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از کلیه ی اساتید دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود که در طی دوران کارشناسی ارشد همواره محبت و پشتیبانیشان دلگرم می کرد سپاس گزاری می نمایم. جا دارد از جناب آقای دکتر محمد رضایی و مهندس وحید جعفرزاده، که در مرحله ی پردازش داده های مغناطیسی راهنمایی خود را دریغ نکردند، کمال تشکر و قدردانی را به جا آورم.

قدردانی در خور و شایسته از مدیریت شرکت ملی صنایع مس ایران جهت در اختیار قرار دادن داده ها را دارم.

و در آخر بر خود واجب می دانم از تمامی عزیزانی که مرا در ارائه هر چه بهتر این اثر یاری نمودند تشکر کرده و دست آنها را به گرمی می فشارم.

تـعـهـد نـــامـه

اینجانب: آمنه رئیس حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته: ژئوفیزیک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: **تولید مدل پتانسیل معدنی بزرگ مقیاس اکتشاف ذخایر مس پورفیری بر اساس تلفیق نتایج پردازش وتفسیر داده‌های قطبش القایی، مقاومت ویژه، مغناطیس و زمین‌شناسی در محیط GIS**. تحت راهنمائی: دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر مهیار یوسفی متعهد می‌شوم .

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

تـاریـخ

امضای دانـشجو

مـالـکیت نـتـایـج و حق نـشر

- *کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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

باتوجه به نقش مواد معدنی در تامین نیازهای اولیه‌ی صنایع مختلف، جستجو و شناسایی آن‌ها با روش‌های کارآمد ضروری به‌نظر می‌رسد. این شناسایی که یکی از مراحل مهم در اکتشاف ذخایر معدنی، به شمار می‌رود، با استفاده از مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور یافتن مکان‌ها یا مناطقی که یک سری معیارها برای حضور ذخیره در آن‌ها صدق می‌کند، انجام می‌شود. اولین مرحله در تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل مطلوب، شناسایی داده‌های مورد نیاز برای تلفیق می‌باشد. از این رو در این پژوهش سه لایه‌ی اطلاعاتی زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوفیزیکی برای تلفیق در محیط GIS انتخاب گردید. کانسار مس پورفیری منطقه‌ی شمال شرق شهرستان اهر بر روی یکی از زون‌های تکتونیکی و فعال ایران مرکزی به‌نام زون ارومیه دختر قرار دارد. توده‌ی نفوذی کانسار در این منطقه از نوع میکروکوارتزمونزونیت- میکرومونزودیوریت است و کانی‌سازی در توده‌ی نفوذی آذرین انجام شده است؛ که همراه با آندزیت و داسیت— آندزیت است. هدف از انجام این مطالعه، تعیین محل کانسار، محدوده‌ها و پراکندگی ذخیره مس در منطقه و تعیین نقاط حفاری با تلفیق داده‌های موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. خروجی حاصل از مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نقشه‌ای خواهد بود که در آن محل حضور احتمالی ذخایر شناخته نشده، مشخص شده است. با توجه به اهمیت کانسارهای مس و قرار داشتن ایران، بر روی کمربند جهانی مس، پی‌جویی و اکتشاف مس در منطقه مورد نظر اهمیت بالایی دارد. داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در منطقه شامل ۳ پروفیل مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی و ۲۲ پروفیل مغناطیسی با فواصل برداشت ۲۰ متر و مجموع ۱۱۰۰ نقطه، در دو محدوده‌ی جداگانه با امتداد برداشت شمالی - جنوبی می‌باشد. در بخشی از این تحقیق به تفسیر نتایج حاصل از مدل‌سازی هموار دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به‌وسیله‌ی نرم افزار DCIP2D و مقاطع دو بعدی مغناطیس با استفاده از نرم‌افزار Encom PA و مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیس با استفاده از نرم‌افزار Mag3D

پرداخته شده است.

ازآنجایی که برداشت‌های ژئوفیزیکی اطلاعات مفیدی از عمق را در اختیار قرار می‌دهند، لذا مکمل خوبی برای نقشه پتانسیل مطلوب در اکتشاف اندیس‌های سطحی محسوب می‌شوند. تحلیل داده‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و داده‌های ژئوفیزیکی در این ناحیه معدنی کمک کرد تا زون‌های کانی سازی غیراقتصادی از زون‌های اقتصادی جدا شوند. هم‌چنین در راستای مدل‌سازی پتانسیل معدنی از روش امتیازدهی فازی پیوسته جهت کاهش خطا و قضاوت کارشناسی استفاده شد و در نهایت دو مدل پتانسیل مطلوب فازی گاما و ارزش مورد انتظار که برای کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی بسیار مناسب است؛ به‌دست آمدند. مدل‌پتانسیل مطلوب به دست آمده، برای منطقه‌ای با وسعت کم است که بدین‌منظور از معیارهای اکتشافی متفاوتی نسبت به مدل پتانسیل ناحیه‌ای مس پورفیری بهره گرفته شد؛ که در نهایت منجر به تعیین دو نقطه حفاری در محدوده‌ی مورد نظر شد.

کلمات کلیدی: مقاومت‌ویژه، قطبش‌القایی (IP)، مغناطیس‌سنجی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌سازی پتانسیل معدنی، مس پورفیری، منطق فازی، ارزش مورد انتظار، اهر

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

رئیس حسینی، آمنه؛ کامکار روحانی ، ابوالقاسم؛ یوسفی، مهیار ؛ مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی محدوده‌ی معدنی شمال شرق شهرستان اهر، پنجمین کنفرانس انجمن مهندسی معدن ایران، ۱۳۹۳.

رئیس حسینی، آمنه؛ کامکار روحانی ، ابوالقاسم؛ یوسفی، مهیار ؛ اکتشاف مس پورفیری با روش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در محدوده‌ی شمال شرق شهرستان اهر ، کنفرانس ملی علوم معدنی مازندران ، ۱۳۹۳.

رئیس حسینی، آمنه؛ کامکار روحانی ، ابوالقاسم؛ یوسفی، مهیار ؛ مطالعات مغناطیس‌سنجی ذخایر مس پورفیری محدوده‌ی معدنی شمال شرق شهرستان اهر ، کنفرانس ملی علوم معدنی مازندران ، ۱۳۹۳.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات ۱

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-سابقه‌ی مطالعات انجام‌شده و به‌کارگیری GISدر تلفیق داده‌ها ۴

۱-۳-تاریخچه‌ی عملیات اکتشافی انجام شده در منطقه‌ی مورد مطالعه ۵

۱-۴-ضرورت و هدف از انجام پایان‌نامه ۶

۱-۵-روش انجام تحقیق ۷

۱-۶-ساختار پایان‌نامه ۸

فصل دوم: جغرافیا و زمین‌شناسی منطقه ۱۰

۲-۱-مقدمه ۱۰

۲-۲-کانسارهای مس پورفیری ۱۱

۲-۲-۱-کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی ۱۲

۲-۲-۲-کانسارهای مس پورفیری نوع دیوریتی ۱۲

۲-۳-عوامل موثر در انتخاب محیط مناسب جهت اکتشاف کانسار مس پورفیری ۱۳

۲-۳-۱-کانی‌سازی مس پورفیری ۱۳

۲-۳-۲-گسترش و شدت دگرسانی ۱۴

۲-۳-۳-خصوصیات ژئوفیزیکی ۱۴

۲-۴-منطقه‌ی مورد مطالعه ۱۷

۲-۵-زمین‌شناسی و کانی‌سازی منطقه‌ی مورد مطالعه ۱۹
۲-۵-۱-زمین‌شناسی ناحیه‌ای ۱۹
۲-۵-۲-زمین‌شناسی محلی ۲۰
فصل سوم: مقاومت‌ویژه و قطبش القایی ۲۶
۳-۱-. مقدمه ۲۶
۳-۲-نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترها و تفسیر داده‌های مغناطیس ۲۹
۳-۲-۱-تصحیحIGRF (میدان مرجع ژئومغناطیس جهانی) ۳۰
۳-۲-۲-برگردان به قطب ۳۱
۳-۲-۳-نقشه‌ی باقی‌مانده ۳۲
۳-۲-۴-فیلتر ادامه به سمت بالا ۳۳
۳-۲-۵-سیگنال تحلیلی ۳۵
۳-۳-مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی ۳۶
۳-۳-۱-مدل مصنوعی ۳۹
۳-۳-۲-مدل‌سازی بر اساس داده‌های واقعی ۴۰
۳-۴-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۴۵
فصل چهارم: مغناطیس‌سنجی ۴۸
۴-۱-مقدمه ۴۸
۴-۲-روش مقاومت‌ویژه ۴۹
۴-۲-۱-تقسیم‌بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت‌ویژه ۵۲

۴-۲-۲-روش‌های برداشت و اندازه‌گیری داده‌های مقاومت‌ویژه ۵۳
۴-۲-۳-انتخاب آرایش الکترودی مناسب ۵۵
۴-۲-۴-آرایش دوقطبی- دوقطبی ۵۶
۴-۳-روش IP ۵۹
۴-۳-۱-منابع انرژی IP ۶۰
۴-۳-۲-قطبش غشایی ۶۱
۴-۳-۳-قطبش الکترودی ۶۱
۴-۳-۴-روش‌های اندازه‌گیری IP ۶۲
۴-۴-مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP ۶۳
۴-۴-۱-مدل‌سازی پیشرو ۶۳
۴-۴-۲-مدل‌سازی وارون ۶۴
۴-۵-برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی منطقه‌ی مورد مطالعه ۶۵
۴-۶-تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش القایی ۶۶
۴-۶-۱-تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل dd1 و dd2 ..... ۶۷
۴-۶-۲-تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل pd3 ..... ۷۱
۴-۷-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۳
فصل پنجم: مدل پتانسیل معدنی ۷۶
۵-۱-مقدمه ۷۶
۵-۲-مدل‌سازی و تهیه نقشه‌ی پتانسیل معدنی در GIS ۷۶

۵-۳-نحوه‌ی انتخاب معیارها ۷۹
۵-۳-۱-مدل مفهومی ناحیه‌ای مس پورفیری (کوچک مقیاس) ۸۰
۵-۳-۲-مدل مفهومی محلی مس پورفیری (بزرگ مقیاس) ۸۱
۵-۴-منطق فازی جهت تلفیق داده‌های اکتشافی ۸۲
۵-۴-۱-عملگر فازی " و" ۸۳
۵-۴-۲-عملگر فازی " یا " ۸۳
۵-۴-۳-حاصل‌ضرب جبری فازی: ۸۳
۵-۴-۴-عملگر فازی جمع جبری ۸۴
۵-۴-۵-عملگر فازی گاما ۸۴
۵-۵-مدل منطق فازی داده محور ۸۵
۵-۵-۱-تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته ۸۸
۵-۵-۲-تلفیق و مدل‌سازی ۹۳
۵-۶-مدل محدوده‌ی مورد مطالعه با روش مقدار مورد انتظار ۹۶
۵-۷-اولویت‌بندی مناطق امیدبخش ۹۹
۵-۸-اعتبار سنجی ۱۰۲
۵-۹-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۰۴
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۸
۶-۱-نتیجه‌گیری ۱۰۸
۶-۲-پیشنهادات ۱۰۹

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: نمایش عیار– ذخیره‌ی انواع کانسارهای مس ۱۰

شکل ۲-۲: انواع کانی‌سازی مرتبط با مس پورفیری ۱۷

شکل ۲-۳: پراکندگی زون‌های مس در ایران ۱۸

شکل ۲-۴: موقعیت منطقه‌ی معدنی مورد مطالعه ۱۸

شکل ۲-۵: ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود ۲۰

شکل ۲-۶: نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ محدوده‌ی مورد نظر ۲۴

شکل ۳-۱: نقشه‌ی آلتراسیون محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت شبکه هـای برداشـت مغنـاطیس در نواحی ۱ و ۲ ..... ۲۸

شکل ۳-۲: مدل ایده آل برای مس پورفیری و ارتباطش با پاسخ مغناطیسی. پاسخ مغناطیسی سیستم با میزان فرسایش تغییر کرده است. ۲۹

شکل ۳-۳: : نقشه‌ی تصحیح میدان کل ناحیه ۱ از مغناطیس زمین، (IGRF) ۳۰

شکل ۳-۴: نقشه‌ی تصحیح میدان کل ناحیه ۲ از مغناطیس زمین، (IGRF) ۳۱

شکل ۳-۵: نقشه‌ی حذف روند به همراه برگردان به قطب ناحیه ۱ ..... ۳۳

شکل ۳-۶: نقشه‌ی حذف روند به همراه برگردان به قطب ناحیه ۲ ..... ۳۳

شکل ۳-۷: نقشه‌ی ادامه‌ی فراسو ۱۰۰ متر ناحیه ۱ ..... ۳۴

شکل ۳-۸: نقشه‌ی ادامه‌ی فراسو ۱۰۰ متر ناحیه ۲ ..... ۳۴

شکل ۳-۹: : نقشه‌ی سیگنال تحلیلی ناحیه ۱ ..... ۳۶

شکل ۳-۱۰: : نقشه‌ی سیگنال تحلیلی ناحیه ۲ ..... ۳۶

شکل۳-۱۱: فرآیند سنجس الگوریتم توسط مدل مصنوعی مغناطیسی ۴۰

شکل ۳-۱۲: داده‌های برداشت شده در منطقه ۱ ..... ۴۱
شکل۳-۱۳: :نمایی از مدل سه بعدی منطقه ۱ که بی‌هنجاری‌های سطحی و روند مطابق با گسل در آن مشهود است ۴۲
شکل ۳-۱۴: مدل‌سازی معکوس داده‌های مغناطیس منطقه‌ی ۱ ..... ۴۲
شکل ۳-۱۵: مدل معکوس منطقه ۱ مطابقت داده شده با مدل پیشروی حاصل از معکوس که برازش خوبی با داده‌های مغناطیسی دارد.Misfit = 211 ..... ۴۳
شکل ۳-۱۶: داده‌های برداشت شده در منطقه ۲ ..... ۴۳
شکل ۳-۱۷: مدل سه بعدی معکوس منطقه ۲ که نمایی از بی‌هنجاری‌های سطحی را نشان می‌دهد. ۴۴
شکل ۳-۱۸: مدل‌سازی معکوس داده‌های مغناطیس منطقه‌ی ۲ ..... ۴۴
شکل ۳-۱۹: مدل معکوس مطابقت داده شده با مدل پیشروی حاصل از معکوس که برازش خوبی با داده‌های مغناطیسی دارد.misfit = 17 ..... ۴۵
شکل ۴-۱: توده‌ی استوانه‌ای در زیر سطح زمین ۵۰
شکل ۴-۲: نحوه‌ی توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی ۵۱
شکل ۴-۳: آرایش دوقطبی- دوقطبی ۵۶
شکل ۴-۴: مقطع دو بعدی آرایش دوقطبی- دوقطبی. ۵۷
شکل ۴-۵: مقطع حساسیت آرایش دوقطبی- دوقطبی برای مقادیر n=1, n=2, n=4, n=6 ..... ۵۸
شکل ۴-۶: نقشه‌ی گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت پروفیل‌های مقاومت‌ویژه و IP در نواحی ۱ و ۲ نسبت به موقعیت شبکه‌های مغناطیس ۶۶
شکل ۴-۷: الف) شبه‌مقطع مقاومت ویژه‌ی ظاهری پروفیلdd1 ب) مدل مقاومت ویژه ظاهری پروفیلdd1 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیل ۶۹
شکل ۴-۸: الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری پروفیلdd2 ب) مدل مقاومت ویژه‌ظاهری

پروفیل dd2 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیل dd2..... ۷۰
شکل ۴-۹: الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری پروفیل pd3 ب) مدل مقاومت ویژه‌ظاهری پروفیل pd3 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیل pd3..... ۷۲
شکل ۵-۱: فرآیند تهیه مدل پتانسیل معدنی ۷۸
شکل ۵-۲: نقشه‌ی امتیاز فازی چگالی گسل ۹۱
شکل ۵-۳: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا رگه سیلیسی (vein) ۹۱
شکل ۵-۴: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا استوک ورک ۹۲
شکل ۵-۵: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک..... ۹۲
شکل ۵-۶: نقشه‌ی امتیازات فازی مغناطیس ۹۳
شکل ۵-۷: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (و) ۹۴
شکل ۵-۸: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه های امتیاز فازی عکس فاصله تا مراکز پلی‌گون‌های دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (یا) ۹۴
شکل ۵-۹: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (ضرب)..... ۹۵
شکل ۵-۱۰: مدل پتانسیل معدنی معدنی بر اساس تلفیق نقشه های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (جمع).... ۹۵
شکل ۵-۱۱: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی فاصله‌ی عکس تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش اپراتور گامای ۰.۹ فازی.. ۹۶
شکل ۵-۱۲: مدل پتانسیل معدنی با روش ارزش مورد انتظار ۹۹
شکل۵-۱۳: مدل پتانسیل مطلوب طبقه‌بندی شده‌ی گامای فازی براساس نمودار (C-A) log_log

۱۰۱.....

شکل ۵-۱۴: مدل پتانسیل مطلوب طبقه‌بندی شده‌ی ارزش مورد انتظار براساس نمودار-C) log_log

(A_به همراه نقاط پیشنهادی برای حفاری.....۱۰۲

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مقایسه کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی با دیوریتی ۱۳

جدول ۴-۱: میانگین مقاومت‌ویژه‌ی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها. ۵۳

جدول ۴-۲: خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی ۵۶

جدول ۴-۳ بارپذیری در انواع کانی‌ها. ۶۲

جدول ۵-۱ : مقادیر s و i حاصل از تابع (۵-۱۲) براساس کمترین و بیشترین وزن فازی ۰.۰۱ و ۰.۹۹ ..... ۸۹

جدول ۶-۱: نقاط پیشنهادی برای حفاری ۱۰۹

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

با پیشرفت و توسعه‌ی سیستم‌های کامپیوتری طی چند دهه‌ی اخیر، امکاناتی برای متخصصان فراهم آمده که با ذخیره‌سازی، تحلیل، تغییر و تلفیق اطلاعات در مدت زمان کوتاهی می‌توان از آن‌ها جهت تحلیل، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع استفاده کرد. لذا استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی جهت مدیریت اطلاعات و تجزیه و تحلیل آن‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین علوم و فناوری‌های جدید در دو دهه‌ی اخیر از پیشرفت قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده است. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[1]، یک سیستم رایانه‌ای برای مدیریت داده‌های مکانی است. عامل مشخص کننده‌ای که این تکنولوژی را از سایر سیستم‌های ذخیره و بازیابی اطلاعاتی متمایز می‌کند، نحوه‌ی نگرش آن به داده‌های مکانی است. با این ویژگی، GIS به عنوان یک فناوری جدید، تبدیل به روشی پویا در تجزیه و تحلیل داده‌های کمی و کیفی و طراحی انواع تصاویر با مختصات جغرافیایی شده است [Carranza, 2008]

از طرفی اکتشاف ذخایر معدنی در یک منطقه، مستلزم تجزیه و تحلیل زمین‌شناسی است که خود در گرو انجام فرآیند ترکیب و تلفیق و مدل‌سازی داده‌های متنوع برداشت شده از آن منطقه می‌باشد. GIS به دلیل برخورداری از امکانات تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف و ایجاد ارتباط بین لایه‌های مختلف اطلاعاتی، به مهندسین معدن و زمین‌شناسان امکان می‌دهد که از طریق تلفیق و تحلیل داده‌های حاصل از منابع متفاوت و ایجاد نقشه‌های جدید در جهت اکتشاف ذخایر معدنی و تصمیم‌گیری نهایی گام بردارند [Carranza, 2008].

انباشته‌های مس پورفیری، استوک‌ورک‌هایی[2] هستند با اندازه بسیار بزرگ تا کوچک که در آن‌ها کانه‌های مس به‌صورت افشان پراکنده می‌باشند. در این کانسارها اندازه‌هایی اندک از مولیبدن، طلا و نقره‌ی قابل استحصال نیز وجود دارد. به‌طور معمول هم‌آیند عنصری مس، مولیبدن یا طلا است.

[1] -Geographic Information System (GIS)
[2] - Stocwork

در این انباشته‌ها کانه و باطله با هم مورد استخراج و بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

مس دارای پنج منبع اصلی به صورت پورفیری، رگه‌ای، ماسیوسولفید،اسکارن و رسوبی می‌باشد. مهم‌ترین کانسار از نوع نهشته‌های هیدروترمالی، کانسار پورفیری است. این نوع کانسارها با عیار پایین (٪۲- ۰.۳٪) و تناژ بالا، اغلب برای استخراج مس، مولیبدن، طلا و نقره [John, et al., 2010] مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. کانسارهای مس پورفیری به دلیل ذخیره‌ی زیاد و ناچیز بودن هزینه‌های بهره‌برداری حائز اهمیت می‌باشند. هر کانسار مدل پترولوژیکی خاص خود را دارد. بدین معنی که با سنگ‌های ویژه‌ای همراهند [کریم پور، سعادت، ۱۳۸۴]. این نهشته‌ها معمولا ارتباط نزدیکی با توده‌های نفوذی متوسط و اسیدی دارند و همه‌ی آن‌ها با هاله‌های دگرسانی[1] گرمابی وسیع سنگ میزبان همراه هستند. بسیاری از این توده‌های گرانیتوئیدی دارای کانه‌زایی مس می‌باشند [زراسوندی و لیاقت، ۱۳۸۴]؛ ولی در صورت پوشیده بودن کانسارها در زیر توده‌ها و سنگ‌های عقیم[2] ، گزینش استراتژی اکتشافی برای رسیدن به این توده‌های گرانیتوئیدی الزامی است. بنابراین اکتشافات باید بر پایه نظریات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و نمونه‌گیری از طریق حفاری باشد [خویی و همکاران، ۱۳۷۸].

کشور ایران بر روی کمربند جهانی مس قرار دارد. بزرگترین کمربند مس شناخته شده در ایران، کمربند آتش‌فشانی ارومیه- دختر است [خویی و همکاران، ۱۳۷۸].

منطقه‌ی معدنی شمال‌شرق اهر، واقع در فاصله‌ی ۴۴ کیلومتری شمال شرق شهرستان اهر و ۲۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان مشکین شهر، بخشی از ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود است؛ که در واقع در بخشی از واحد زمین‌ساختی البرز – آذربایجان که کوه‌های قره باغ و ارسباران را شامل می‌شود، قرار گرفته است.

[1] - Alteration
[2] - Barren rocks

در راستای مطالعات کانی‌سازی، مجموعا ۲۲ پروفیل ژئوفیزیکی مغناطیسی در دو محدوده و ۳ پروفیل ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه الکتریکی و قطبش‌القایی[1] (IP) در محدوده‌ی ۱ و ۲، با آرایش دوقطبی- دوقطبی برداشت شده‌است؛ که در فصل سوم و چهارم مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۱-۲- سابقه‌ی مطالعات انجام‌شده و به‌کارگیری GISدر تلفیق داده‌ها

از اواخر دهه ۸۰ میلادی از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان یکی از ابزارهای مهم تصمیم‌گیری در حوزه‌های مختلف، از جمله اکتشاف کانسارها استفاده شده‌است. GIS به دانش مدیریت و تجزیه و تحلیل اطلاعات جغرافیایی اطلاق می‌شود. GIS امکان تحلیل و پردازش لایه‌های اطلاعاتی را به صورت مجزا فراهم می‌کند و می‌تواند ارتباط بین انواع این لایه‌ها را برقرار کرده و با ترکیب آنها امکان مدل‌سازی و تحلیل نهایی را فراهم آورد. GIS از توانمندی‌های گرافیکی رایانه‌ای برای تجسم و نمایش بهره می‌جوید و اطلاعات را به دو صورت مکانی و توصیفی مورد استفاده و نمایش قرار می‌دهد؛ که معمولا بین آن‌ها ارتباط منطقی و دقیقی وجود دارد [Bonham-Carter,1994]

وقتی داده‌های مکانی به صورت مجزا و جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ روابط فضایی بین آن‌ها به آسانی آشکار نمی‌شوند. با ترکیب و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی متنوع از منابع مختلف به کمک روابط ریاضی ساده و پیچیده در GIS، مقایسه، درک و تفسیر پدیده‌های مکانی بهتر و دقیق‌تر میسر می‌گردد [Bonham-Carter,1994]

اگر در یک منطقه الگوها و شواهد مهم نسبت به سایر نواحی دارای شباهت بیشتر باشد، این منطقه به عنوان ناحیه امیدبخش معدنی معرفی می‌شود. منطق فازی از جمله مهمترین روش‌های دانش‌محور معرفی شده است. کارانزا[2] و هیل[3] (۲۰۰۱) از تئوری مجموعه‌های فازی جهت نقشه‌برداری

[1] Induced Polarization
[2] Carranza
[3] Hale

پتانسیل کانی‌زایی طلا در ناحیه باجیو در فیلیپین استفاده کردند. پروال[1] و همکاران (۲۰۰۳) مدل‌سازی فازی را برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی پیشگو جهت اکتشاف کانسارهای فلزات پایه به کار گرفتند. تنگستانی و مر[2](۲۰۰۳) از مدل‌سازی فازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانسارهای پورفیری در منطقه میدوک و رنجبر و هنرمند (۲۰۰۴) از روش طبقه بندی فازی جهت تلفیق داده‌های اکتشافی در منطقه سرچشمه استفاده کردند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۴و۲۰۱۳ ،۲۰۱۲) روش وزن‌دهی فازی پیوسته را جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده قرار دادند. یوسفی و کارانزا (۲۰۱۴) از روش ارزش مورد انتظار در تولید نقشه‌ی پتانسیل معدنی استفاده کردند. همچنین یوسفی و کارانزا (۲۰۱۵) از روش فرکتال منطقه‌ی متمرکز در تعیین آستانه کلاسه‌بندی نفشه‌ی پتانسیل معدنی استفاده کردند.

۱-۳- تاریخچه‌ی عملیات اکتشافی انجام شده در منطقه‌ی مورد مطالعه

در محدوده‌ی شمال شرق اهر به‌دلیل وجود آثار گسترده دگرسانی، منطقه به کرات توسط زمین‌شناسان خارجی و داخلی مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه در سال‌های ۱۹۴۶-۱۹۴۰ توسط زمین شناسان روسی مورد مطالعه قرار گرفت. و در فواصل سال‌های۱۹۵۲-۱۹۵۰ زمین شناسان شرکت ملی نفت ایران مطالعات مقدماتی را در منطقه انجام دادند. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور نیز نقشه های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰ اهر و ۱:۱۰۰،۰۰۰ لاهرود را تهیه نمود. همچنین در سال ۱۳۵۰ کارشناسان سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور منطقه را جهت مطالعه، بررسی و پی جویی مواد معدنی مورد بررسی قرار دادند. سایر مطالعات اکتشافی انجام شده در این محدوده به شرح زیر می باشد: [صمان کاو، ۱۳۸۶].

مهندسین مشاور ژئوداد، ۱۳۷۴، پی جویی و آثاریابی مقدماتی مواد معدنی در پهنه برگه ۱:۵۰،۰۰۰ مشیران

[1] Porwal
[2] Moore

دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۷۵، مطالعه ماگماتیسم مناطق دگرسان شده و کانی‌های سنگین در منطقه مشکین‌شهر

مهندسین مشاور ژئوداد، ۱۳۷۷، مطالعه زمین شناسی و ژئوشیمیایی ۱:۵۰۰۰ طرح پلی‌متال مشکین‌شهر، محدوده دوست بیگلو

مهندسین مشاور معدن کاو، ۱۳۷۸، اکتشافات تفصیلی در محدوده پلی متال مشکین‌شهر

مهندسین مشاور زرناب اکتشاف، ۱۳۸۱، اکتشافات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای ، منطقه شمال مشکین‌شهر

دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۸۲، مطالعه زمین‌شناسی اقتصادی اندیس طلای منطقه ساریخانلو شمال غرب مشکین‌شهر

مهندسین مشاور زرناب اکتشاف، ۱۳۸۳، اکتشافات عمومی عناصر فلزی در شمال غرب مشکین‌شهر

مهندسین مشاور زرناب اکتشاف، ۱۳۸۶، مطالعات زمین‌شناسی و آلتراسیون منطقه شمال‌شرق اهر در مقیاس ۱:۵۰۰۰

مهندسین مشاور کاوشگران ، ۱۳۸۶، مطالعات لیتوژئوشیمیایی منطقه شمال‌شرق اهر در مقیاس ۱:۵۰۰۰

۱-۴- ضرورت و هدف از انجام پایان‌نامه

با توجه به اهمیت ذخایر مس پورفیری به عنوان بزرگترین منبع تولید مس (بیش از ۶۰ درصد تولید مس دنیا) [John, et al., 2010] و نیاز روز افزون به این ماده معدنی، و از آنجا که هدف نهایی از اجرای روش‌های مختلف اکتشافی در مراحل مختلف از اکتشافات ناحیه‌ای تا محلی و بزرگ مقیاس

شناسایی زون‌های غنی شده و انتخاب نقاط حفاری به منظور دسترسی به ماده معدنی بوده است و همچنین نظر به اینکه اجرای عملیات حفاری زمان‌بر و هزینه‌بر است؛ بنابراین اگر محل حفاری‌ها درست انتخاب نشود ضمن از دست رفتن زمان و هزینه ممکن است مناطقی که به لحاظ اکتشافی دارای ارزش هستند؛ نیز از اولویت حذف شوند و همچنان تا مدت‌ها ناشناخته باقی بمانند. بنابراین اجرای تحقیقات با هدف بهبود شناسایی زون‌های غنی شده و انتخاب بهتر نقاط حفاری ضروری است. از این رو یکی از اهداف این تحقیق تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی شامل لایه‌ی ژئوفیزیکی و لایه‌ی زمین‌شناسی و دگرسانی به منظور شناسایی زون‌های غنی شده (بعضاً تعیین نقاط حفاری) و نه مناطق امید بخش است. که معرفی مناطق با پتانسیل بالا را به عنوان هدف این تحقیق، توجیه می‌کند. از دیگر اهداف این تحقیق استفاده از روش‌های جدید تخصیص وزن فازی بدون یا با حداقل قضاوت کارشناسی، مقایسه‌ی روش مغناطیس‌سنجی باروش‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در اکتشاف ذخایر مس پورفیری و تولید مدل پتانسیل معدنی در یک منطقه‌ی جدید می‌باشد.

۱-۵- روش انجام تحقیق

در مطالعه حاضر ابتدا داده‌های اولیه ژئوفیزیکی شامل قطبش‌القایی، مقاومت‌ویژه و مغناطیس جمع‌آوری شده و پردازش و تفسیر شدند. سپس همه لایه‌های قابل استفاده برای اکتشاف مس وزن‌دهی شدند. در این مرحله با توجه به مقیاس بزرگ مطالعه و کوچک بودن منطقه از اندیس‌های شناخته شده به عنوان مدل (به آن معنی که در روش داده محور استفاده می‌گردد) نمی‌توان استفاده نمود. در نتیجه روش وزن‌دهی دانش محور مدنظر می‌باشد. همچنین نظر به اینکه اخیراً روش‌هایی تولید شده که وزن فازی را بدون و یا با حداقل قضاوت کارشناسی تخصیص می‌دهد؛ از این روش‌ها استفاده می‌شود و در نهایت با استفاده از عملگرهای فازی و روش ارزش مورد انتظار تلفیق صورت می‌گیرد تا زون‌های غنی شده مشخص گردد و بتوان بر اساس آنها نقاط حفاری را انتخاب نمود.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

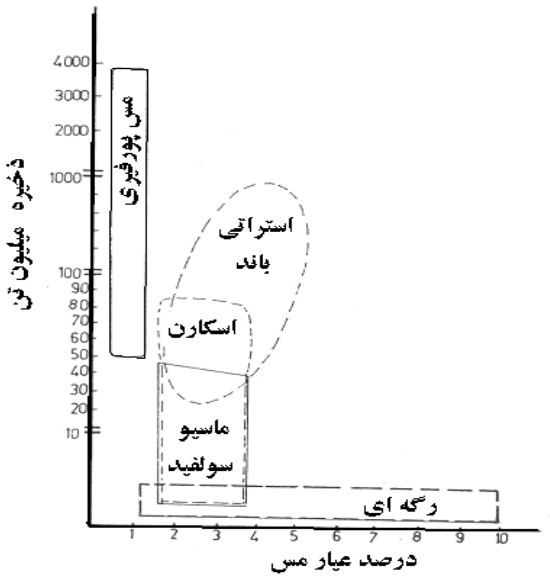
پایان‌نامه حاضر مشتمل بر شش فصل می‌باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، مروری بر کارهای انجام شده، ضرورت و روش تحقیق می‌پردازد. در فصل دوم زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه‌ی مورد مطالعه توضیح داده می‌شود. در فصل سوم پس از بیان تئوری مغناطیس، شرح تصحیحات لازم و انواع فیلترهای مورد نیاز به تفسیر مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیس پرداخته می‌شود. در فصل چهارم پس از بیان تئوری مقاومت‌ویژه و IP، به تفسیر مدل‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش القایی پرداخته می‌شود. در فصل پنجم به مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس در GIS پرداخته می‌شود و در نهایت در فصل آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه می‌گردد.

فصل دوم

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

۲-۱- مقدمه

کانسارهای مهم مس عبارتند از: مس پورفیری[1]، اسکارن‌های مس‌دار[2]، ماسیوسولفیدهای مس‌دار[3]، کانسارهای مس رسوبی استراتی‌باند[4] و ذخایر مس رگه‌ای[5]. نمودار عیار و میزان ذخیره آنها در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. کانسارهای مس پورفیری به دلیل ذخیره‌ی زیاد و ناچیز بودن هزینه‌های بهره‌برداری حائز اهمیت هستند [پایگاه ملی داده‌های علوم زمین].



شکل ۲-۱: نمایش عیار– ذخیره‌ی انواع کانسارهای مس [www.ngdir.ir].

اکتشاف ذخایر عظیم مس در دهه‌های اخیر به سبب مشخص شدن ارتباط ژنتیکی کانسارهای مس پورفیری با زون فرورانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی است. افزایش اهمیت ذخایر تیپ پورفیری به عنوان منابع جهانی مس، مولیبدن و فلزات با ارزش چون طلا، نقره، سلنیوم و تلوریم توجه بیش از حد به برنامه‌های اکتشافی این تیپ کانسارها را توجیه

[1]. Cu- Porphyry
[2]. Cu- Skarns
[3]. Cu- Massive Sulfides
[4]. Cu- Strata bond
[5]. Cu- Vein type

می‌کند .

۲-۲- کانسارهای مس پورفیری

اولین کانساری که با عیار کم و به صورت روباز مورد بهره‌برداری قرارگرفت، کانسار مس پورفیری بینگام (ایالت یوتا امریکا) در سال ۱۹۰۵ بود. تا دهه ۱۹۶۰، به دلیل این که کانسارهای مس پورفیری کشف شده در محدوده جغرافیایی امریکای شمالی وجنوبی واقع شده‌بودند، زمین‌شناسان معتقد بودند که این ذخایر در ارتباط با محدوده حرارتی لارامید (کرتاسه فوقانی- اوایل ترشیاری) هستند. تا این زمان هنوز اصطلاح پورفیری برای این ذخایر به کارگرفته نشده بود و هیچ گونه کانساری از این نوع درسایر نقاط دنیا کشف نشده و یا مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گرفت [کریم پور، سعادت، ۱۳۸۱]:

کانسارهای مس پورفیری به کانسارهایی با تناژ بالا، عیار پایین، غیر همزاد و درون زاد اطلاق می‌شود و از طریق روش‌های معدن‌کاری بزرگ مقیاس قابل بهره‌برداری می‌باشند. این کانسارها به علت پایین بودن نسبی مخارج جداسازی از سال ۱۹۰۵ مورد توجه قرار گرفته‌اند. کانسارهای مس پورفیری همراه سنگ‌های مونزونیتی، دیوریتی و گرانودیوریتی کالک آلکالن یافت می‌شوند. اصطلاح پورفیری از بافت پورفیری سنگ‌های همراه، گرفته شده و دارای ویژگی بافت استوک ورک و پراکنده ذخیره و ابعاد زیاد ذخیره (بالای ۱۰۰ میلیون تن) می‌باشند. کانسارهای مس پورفیری در کمربندهای تکتونیکی زون فرورانش حاشیه قاره‌ها[1] و جزایر قوسی[2] کشف شده‌اند. اکثر ذخایر کشف شده متعلق به دوران دوم و سوم بوده است که در کمربندهای تکتونیکی حاشیه اقیانوس آرام واقع شده‌اند [کریم پور و سعادت، ۱۳۸۱].

کانسارهای مس پورفیری را بر اساس موقعیت تکتونیکی و سنگ‌های همراه آن به دو گروه تقسیم می‌کنند

۱) کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی ۲) کانسارهای مس پورفیری نوع دیوریتی

1. Continental Margin Subduction Zones
2 .Island Arcs

۲-۲-۱- کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی

این کانسارها همراه با سنگ های مونزونیتی و گرانودیوریتی پورفیری کالک آلکالن واقع در کمربندهای تکتونیکی زون فرورانش حاشیه قاره ها کشف شده‌اند. توده های نفوذی نیمه عمیق[1] اکثرا تشکیل استوک و گاهی دایک و به ندرت تشکیل باتولیت می‌دهند [کریم پور و همکاران، ۱۳۸۴].

ماگمای کالک آلکالن که از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی زون فرورانش به وجود می‌آید، ضمن بالا آمدن به دلیل آغشتگی[2] با سنگ‌های مسیر، تغییراتی در ترکیب شیمیایی آن‌ها رخ می‌دهد. به همین دلیل مقدار سیلیس، عناصر آلکالن و مولیبدن کانسارهای مس پورفیری واقع در حاشیه قاره‌ها بیش از جزایر قوسی است و به عکس مقدار طلای کانسارهای جزایر قوسی بیشتر می‌باشد [کریم پور و همکاران، ۱۳۸۴].

۲-۲-۲- کانسارهای مس پورفیری نوع دیوریتی

کانسارهای مس پورفیری نوع دیوریتی در کمربندهای زون فرورانش جزایر قوسی همراه با سنگ‌های دیوریتی- تونالیتی کالک آلکالن کشف می‌شوند. وجود اختلاف درترکیب شیمیایی محلول ماگمایی نوع مونزونیتی و محلول ماگمایی نوع دیوریتی موجب تغییراتی در زون‌های آلتراسیون، عیار و مواد جانبی ذخیره می‌شود. در نوع دیوریتی، مقدار منیزیم، آهن و کلسیم محلول افزایش یافته ولی مقدار سیلیس، پتاسیم و سولفور کاهش می‌یابد. به دلیل پایین بودن مقدار سولفیدها، زون کوارتز- سرسیت- پیریت در نوع دیوریتی نسبتا محدود است. در سیستم نوع دیوریتی به صورت عمده دو زون پتاسیک و پروپیلیتیک یافت می‌شوند و ذخیره در زون پتاسیک و پروپیلیتیک قرار دارد. محصول جانبی این کانسارها طلاست؛ در صورتی‌که در نوع مونزونیتی محصول جانبی مولیبدن است. عیار مس در نوع دیوریتی کمتر است. مقایسه بین سیستم های نوع مونزونیتی با دیوریتی در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

1. Sub Volcanic
2. Contamination

جدول ۲-۱: مقایسه کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی با دیوریتی[www.ngdir.ir].

خصوصیات	مدل مونزونیتی	مدل دیوریتی
سنگ‌های همراه	مونزونیت، کوارتزیت مونزونیت پورفیری	دیوریت، تونالیت پورفیری
زون‌های آلتراسیون	پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک، سرسیتیک	پتاسیک، پروپیلیتیک
رگه‌های کوارتز	فراوان	کم
رگچه‌های پتاسیم فلدسپات	فراوان	کم
رگچه‌های آلبیت	کم	فراوان
مگنتیت	به مقدار کم	٪۳
درصد سولفید	۳ تا ۱۰ درصد	۲ تا ۶ درصد
نسبت کالکوپیریت/ پیریت	۳/۱ تا ۱۳/۱	۰/۸/۱ تا ¼
عیار متوسط مس (درصد)	۰/۵۵	۰/۵
عیار طلا (گرم در تن)	۰/۱>	۰/۱۵ تا ۰/۴
عیار مولیبدن (درصد)	۰/۷۱ -۰/۷۰۵	۰/۰۰۷>

۲-۳- عوامل موثر در انتخاب محیط مناسب جهت اکتشاف کانسار مس پورفیری

۲-۳-۱- کانی‌سازی مس پورفیری

کانی‌شناسی مس پورفیری (Cu+ Mo± Au):

پیریت مهم ترین سولفید این سیستم هاست. اکسیدهای آهن به صورت مگنتیت و هماتیت نیز

مشاهده می‌شوند. کالکوپیریت، مولیبدنیت و مقدار جزئی بورنیت و بـه نـدرت کالکوزیـت، مهـم‌تـرین کانسنگ مس و مولیبدن هستند.

کانی‌شناسی مس پورفیری (Cu- Au):

کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، بورنیت، کالکوزیت، مقدار جزئی گالن، اسـفالریت، تلوریـت، تتـرا هیدریت، طلا و نقره [کریم پور و همکاران، ۱۳۸۴].

۲-۳-۲- گسترش و شدت دگرسانی

گسترش و شدت زون‌های دگرسانی رابطه مستقیم با میزان ذخیـره و عیـار دارنـد. بـه هنگـام بازدید از منطقه اولین و مهمترین عـواملی کـه بایـد مـورد مطالعـه و بررسـی قـرار گیرنـد، زون‌هـای دگرسانی هستند [کریم پور، سعادت، ۱۳۸۱]

۲-۳-۳-خصوصیات ژئوفیزیکی

روش‌های ژئوفیزیکی مدرن در تمام مقیاس‌ها در اکتشاف و شناسایی کانسارهای مس پورفیری کمک می‌کنند. در مقیاس منطقه‌ای، مغناطیس هوایی، لرزه، گرانی، و تکنیک های سنجش از راه دور بینشی از ساختار گسترده پوسته و ماگمای مناطق معدنی ارائه می‌دهند. گسل‌ها، حوضه‌های رسـوبی، و بدنه‌ی سنگ‌های درونی می‌توانند توسط روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیسی ترسیم شوند، کـه بـه موجب آن چارچوب پوسته‌ای که میزبان کانسارهای مس پورفیری است، روشـن مـی‌شـود [John, et al., 2010].

تکنیک‌های ژئوفیزیک در مقیاس کانی‌سازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرنـد. ماهیـت تکـاملی مس پورفیری، مواد معدنی و خواص ژئوفیزیکی متنوعی را در نزدیکی سطح زمین متمرکـز مـی‌کنـد. توزیع مغناطیسی متنوع(جایی با مغناطیس بالا تا مکانی بدون خاصیت مغناطیسـی) در یـک کانسـار مس، بسته به نوع و شدت دگرسانی و سنگ‌شناسی تاییدی بر این موضوع است. در یک برآورد اولیـه، دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه، باعث ایجاد الگوهای فضایی قابل پیش‌بینی از

ناهنجاری‌های مغناطیسی می‌شود، که برداشت‌های هوابرد با تفکیک‌پذیری بالا و زمینی مغناطیسی به طور بالقوه می‌توانند نقشه‌ی این مناطق را ترسیم کنند، در نتیجه یک ابزار اکتشافی مفید در مقیاس کانی‌سازی را ارائه می‌دهند.[John, et al., 2010]

مناطق مس پورفیری معمولا منطبق بر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که نشان‌دهنده‌ی گسل‌های بزرگ منطقه است، هستند (مانند ذخیره مس در نزدیکی شمال شیلی [Behn and others, 2001; Gow and Walshe, 2005]، ایران مرکزی [Shahabpour, 1999]، و گینه نو [Gow and Walshe, 2005).[Berger, et al., 2008]

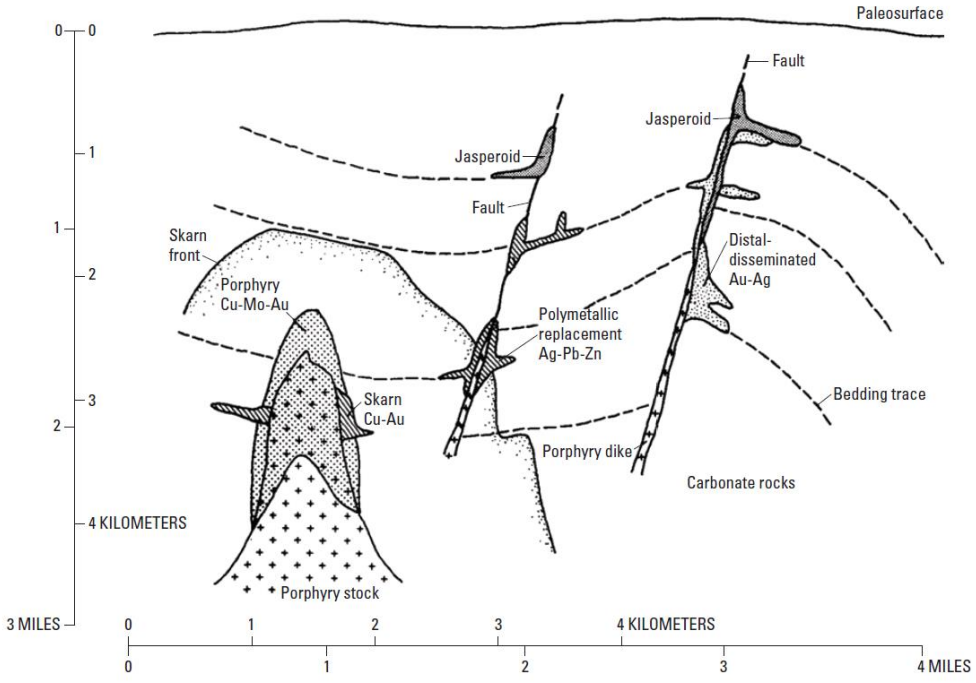
کانسارهای مس پورفیری اغلب، اما نه همیشه، با مغناطیس بالا همراه با هاله‌های دگرسانی حلقوی با مغناطیس پایین [Heithersay and Walshe, 1995; Ford, et al., 2007] ظاهر می‌شوند. به طور معمول، تنوع قابل توجهی در حساسیت مغناطیسی در سراسر سنگ دگرسان شده وجود دارد که متاثر از تخریب مگنتیت ناشی از دگرسانی فیلیک و تشکیل مگنتیت ثانویه است [Gettings, 2005] استفاده از روش مغناطیس‌سنجی به واسطه تجمع مگنتیت به صورت رگچه و پراکنده در زون پتاسیک به ویژه درمواردی که به دلیل پوشش نمی‌توان این زون را مشخص نمود، نیز مفید واقع می‌شود.

آهن و سولفید مس (پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت) معمولا در سراسر مناطق دگرسانی توزیع شده‌اند. این مواد معدنی معمولا دارای مقاومت کم قابل تشخیص با روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی هستند. از طرفی مقاومت‌ویژه‌ی کانسار به دلیل حضور کانی‌های رسی و رگه‌ی استوک ورک که به دلیل وجود شکستگی‌ها و افزایش نفوذپذیری حاوی آب بیشتری هستند، تقریبا همیشه پایین‌تر از مقاومت‌ویژه‌ی سنگ میزبان و سنگ‌های اطراف آن است [Berger, et al., 2008]. اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی معمولا با روش اندازه‌گیری IP، که نشان دهنده‌ی بارپذیری مواد موجود در پوسته است، همراه است. اندازه‌گیری قطبش القایی به طور گسترده‌ای در اکتشاف

کانسارهای مس پورفیری استفاده می‌شود [John, et al., 2010].

قطبش القایی (IP) ناهنجاری‌ها به‌طور کلی، اما نه همیشه، یک شاخص تشخیصی از کانی‌سازی اقتصادی است. در این حالت ناهنجاری IP هم با کانی‌سازی و هم با کاهش مغناطیسی مربوط به دگرسانی‌ها ارتباط دارد؛ با این حال، ناهنجاری‌های IP اغلب نشان دهنده‌ی مناطق دارای پیریت فراوان در سنگ دگرسان شده است، و واکنش کمتری در مناطق دارای کانی‌های رسی، کالکوپیریت و بورنیت نشان می‌دهد[Zonge and Wynn, 1975; Zong, et al., 2005].

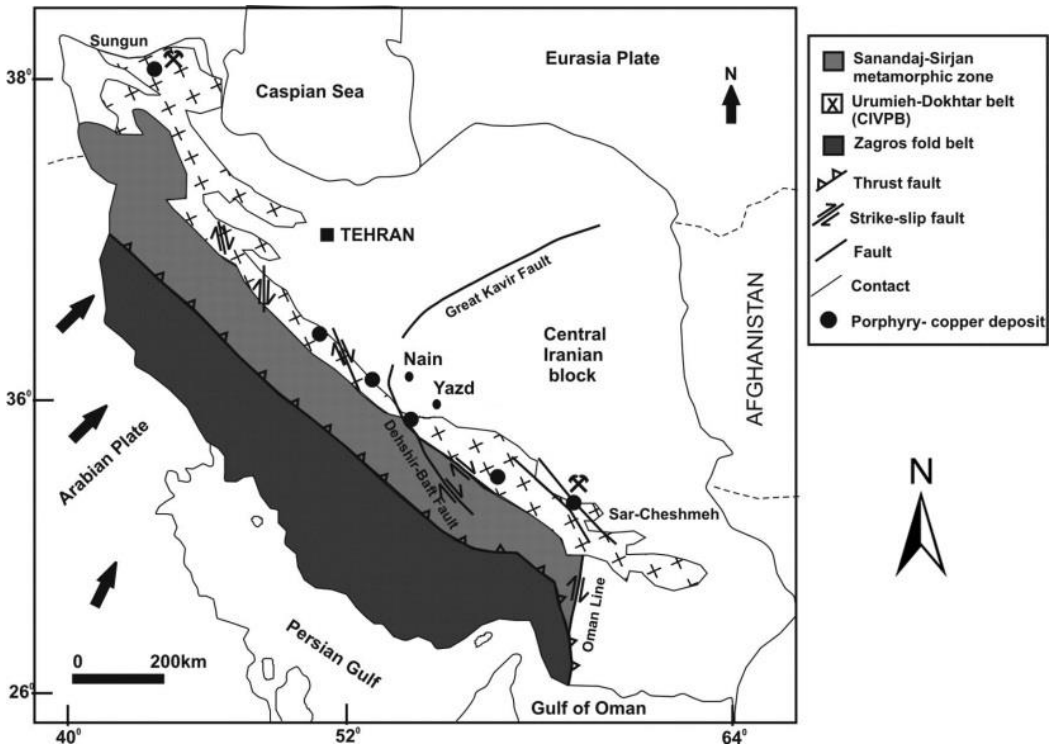
به هرحال تفسیر ژئوفیزیک ذاتا دارای عدم یکتایی است و از طرفی زمین‌شناسی نیز بسیار پیچیده است. دگرسانی گرمابی به ندرت در مناطق مشخص و پیش‌بینی شده‌ی ارائه شده توسط مدل‌های ساده (شکل ۲-۲) برای کانی‌سازی مس پورفیری یافت می‌شوند، و تکتونیسم و فرسایش حتی این سیستم کانی‌سازی را پیچیده‌تر هم می‌کنند [Seedorff, et al., 2005]. تفسیر ژئوفیزیک باید توسط اطلاعات مستقل زمین‌شناسی از جمله نقشه‌برداری، مجموعه داده‌های ژئوفیزیکی متعدد و سنگ‌شناسی زیر سطحی و اطلاعات کانی‌شناسی محدود شود.



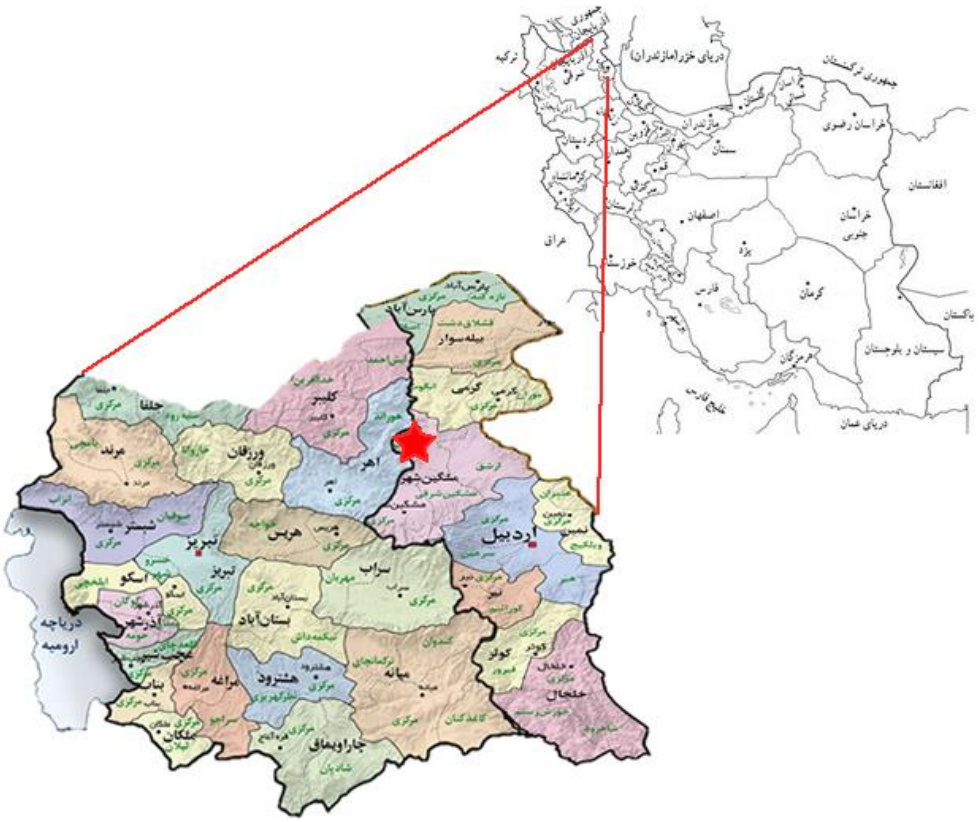
شکل ۲-۲: انواع کانی‌سازی مرتبط با مس پورفیری [Sillitoe and Bonham, 1990]

۲-۴- منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی معدنی مورد مطالعه در استان اردبیل در زون ماگمایی ارومیه- دختر شکل (۲-۳) واقع است که سنگ‌های آن به گونه‌ای شاخص، ترکیبی از دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت و سنی از ائوسن تا پلیوسن دارند. در مورد خاستگاه این سنگ‌ها اتفاق نظری وجود ندارد. گروهی از پژوهشگران آن را کمان ماگمایی و گروهی دیگر آن را کافت می‌دانند و دسته‌ای نیز کمان جزیره‌ای را باور دارند. . این محدوده که در فاصله‌ی ۴۴ کیلومتری شمال شرق شهرستان اهر و ۲۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان مشکین شهر واقع شده‌است، بخشی از ورقه‌ی ۱:۱۰۰.۰۰۰ لاهرود است که در واقع در بخشی از واحد زمین‌ساختی البرز – آذربایجان که کوه‌های قره باغ و ارسباران را شامل می‌شود، قرار گرفته است. ناحیه‌ی اهر را از نظر ساختاری و کانی‌سازی مس می‌توان زون مس‌دار سبلان نامید؛ که از نظر کانی‌سازی مس بسیار درخور توجه است و کانسارهای بسیاری از مس را در خود جای داده است. دنباله‌ی این زون در شمال، کانسارهای مس و مولیبدن ارمنستان را تشکیل داده است [صمان‌کاو، ۱۳۸۶].



شکل ۲-۳: پراکندگی زون‌های مس در ایران [قربانی، ۱۳۸۱]



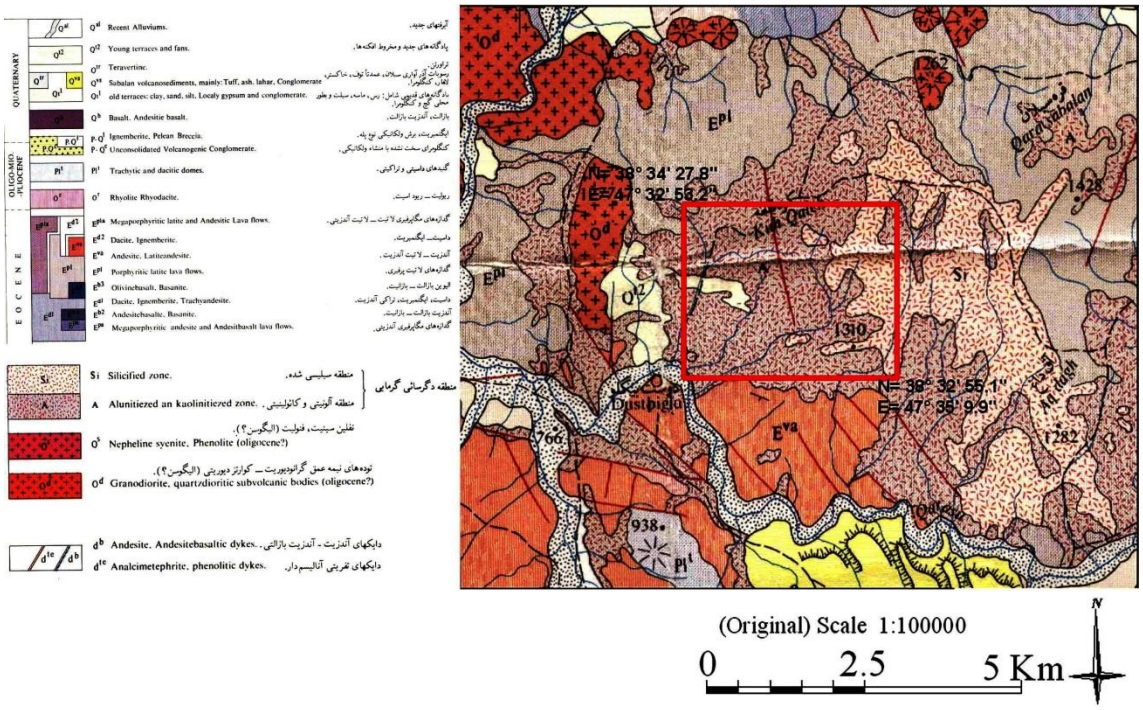
شکل ۲-۴: موقعیت منطقه‌ی معدنی مورد مطالعه [شرکت ملی صنایع مس ایران]

۲-۵- زمین‌شناسی و کانی‌سازی منطقه‌ی مورد مطالعه

۲-۵-۱-زمین‌شناسی ناحیه‌ای

ورقه‌ی لاهرود شکل (۵-۲)، در شمال خاوری چهارگوشه اهر بین طول جغرافیایی $47°,30' - 48°,00$ و عرض جغرافیایی $38°,30' - 39°,00$ واقع است. منطقه‌ای کوهستانی که روند بلندی‌ها با روند ساختمانی آن که تقریبا خاوری- باختری است؛ مطابقت دارد و تفاوت بلندا از ۴۵۰ متر (رودخانه قره‌سو) تا ۲۲۴۰ متر (کوه قراول) نشان‌دهنده‌ی گستره‌ی وسیع پستی و بلندی در منطقه است. کوه‌های شمالی- شمال‌خاوری به‌دلیل وجود رخساره‌های سست شیلی و ماسه سنگی مجموعا فرسایش یافته و سطوح صاف و هوازده‌ای را به نمایش گذاشته است. حال آن‌که نواحی باختری و مرکزی که از گدازه‌های آتش‌فشانی سخت شکل گرفته با سطوح ناهموار و ستیغ‌های بلند در مقابل

پدیده‌ی مخرب فرسایش مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. به طور کلی دو سیستم آبراهـه در منطقه حاکم است. سیستم شمالی-جنوبی که در بیشتر نقاط ورقه ۱:۱۰۰.۰۰۰زمین‌شناسـی حضـور داشته و سیستم خاوری-باختری که فقط در بخش باختری منطقه حکمفرماست و دره های عمیـق و پرشیبی را در بستر خود ایجاد نموده است[سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور].



شکل ۲-۵: ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود [شرکت صنایع ملی مس ایران]

۲-۵-۲- زمین‌شناسی محلی

نقشه زمین‌شناسی محدوده شمال شرق شهرستان اهر به وسعت ۷/۶ کیلومترمربـع در مقیـاس ۱/۵۰۰۰ تهیه شده است. این نقشه که در برگه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰.۰۰۰ (شکل ۲-۵) لاهرود واقع شده در شکل ۳-۵ نشان داده شده است [شرکت صنایع ملی مس ایران].

قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در محدوده مربوط به سنگ‌هایی با سن ائوسن است که قسـمت عمده رخنمون‌های منطقه‌ی مورد مطالعه را شامل می‌شود. در محدوده، ۶ واحد سنگی با سن ائوسـن مشاهده می‌گردد که شامل واحدهای زیر به ترتیب از قدیم به جدید می‌باشند

Eanp (آندزیت پورفیری تا داسیت)

این واحد قدیمی‌ترین واحد ائوسن می باشد، این واحد قسمت اعظم سنگ‌های منطقه را تشکیل می‌دهد و تمام قسمت مرکزی به سمت شمال و شمال غرب را می‌پوشاند.

Elt (توف شیشه ای حاوی قطعات ولکانیکی و پلوتونیکی)

این واحد فقط در قسمت جنوب شرقی محدوده رخنمون دارد.

Et (توف حاوی کریستال و شیشه)

این واحد پیروکلاستیکی در شمال و جنوب منطقه رخنمون دارد که در قسمت جنوبی از تراکم بالاتری برخوردار است .

Etb (تناوب توف و جریانهای گدازه‌ایی)

این واحد به طور گسترده در شمال غرب و جنوب غرب محدوده رخنمون دارد

Eb (بازالتهای ستونی)

این واحد با تراکم اندک در جنوب غربی و غرب منطقه پراکنده است.

Ean (آندزیت تا تراکی آندزیت)

که تنها در حاشیه جنوب غربی منطقه رخنمون دارد.

Omd, Ogd و Oqm واحدهای الیگوسنی منطقه می باشد که به ترتیب ازمیکروگرانودیوریت تا میکرودیوریت، مونزودیوریت تا مونزو گابرو و میکرو کوارتز مونزونیت تا میکرومونزو دیوریت تشکیل شده است و در قسمت اعظمی از غرب و مرکز منطقه دیده می شود.

واحدهای کوارترنر شامل واحدهای آبرفتی(Qt_1، Qt_2، Qal) است که واحد Qt_2 قسمتهایی از جنوب شرق و قسمتهای خیلی کوچکی از حاشیه شمال غرب و جنوب غرب منطقه را می‌پوشاند و واحد Qt_2 به مقدار اندک در سمت جنوب غرب منطقه مشاهده می شود. این واحد به صورت لایه‌هایی در کنار آبراهه‌های منطقه دیده می‌شود.

واحدکواترنری PLQta که شامل تراکی‌آندزیت می‌شود نیز در قسمت‌هایی از حاشیه شمالی مشاهده می‌شود.

در مجموع ۵ تیپ دگرسانی به شرح زیر در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود:

دگرسانی آرژیلیتی حد واسط

این دگرسانی در قسمت‌های زیاد از نیمه‌ی غربی منطقه دیده می‌شود و تراکم آن در واحد ائوسنی Etb شمال غرب و جنوب غرب و واحدهای الیگوسن در مرکز و غرب محدوده بسیار بالاست.

دگرسانی آرژیلیتی پیشرفته

می‌توان گفت این آلتراسیون در اکثر بخش‌های منطقه بصورت زون‌های غنی از سیلیس، زون‌های با سیلیس ضعیف و مجموعه کوارتز + سریسیت +پیروفیلیت +ژاروسیت در واحدهای سیلیسی مشاهده می‌شود.

دگرسانی فیلیک

این دگرسانی به نوع سریسیتیک و در بعضی از ذخایر به دگرسانی کوارتز ، سریسیت و پیریت نیز معروف است. این دگرسانی، بیشتر در قسمت غرب و جنوب غرب محدوده، در واحدهای ائوسنی Et ، Etb و واحدهای الیگوسن دیده می‌شود.

دگرسانی پتاسیک

کانی‌های مهم دگرسانی پتاسیک عبارتند از : فلدسپات پتاسیم ،بیوتیت و کوارتز به‌علاوه مگنتیت و کالکوپیریت. این آلتراسیون به مقدار اندک در جنوب منطقه در واحد الیگوسنی Oqm و Ogd دیده می‌شود.

دگرسانی پروپلیتیک

این زون در قسمت‌های مختلف نقشه در واحدهای مختلف دیده می‌شود ، تراکم این زون بخصوص در قسمت شمالی منطقه نسبت به سایر مناطق بیشتر است .

در محدوده مورد نظر سیلیس بصورت لچهای سیلیسی نیز دیده می شود این لچها بیشتر در قسمت شرقی و همچنین در قسمت شمال غربی با تراکم بالایی مشاهده می‌شود.

رگه[1]های سیلیسی به صورت پراکنده در تمام محدوده مشاهده می شود.

زون برشی [2]شده در قسمت شمال و جنوب محدوده به طور بسیار پراکنده در واحد Et و Elt و Eda دیده می شود.

اکسیدهای آهن[3] در کل منطقه در واحد Qt_2 دیده می شود که در شمال غربی و جنوب شرقی محدوده تراکم بیشتری دارد.

کانی پیریت (Py) در واحدهای Eanp، Et، Omz و Etb دیده شده است که در مناطق زیر از تراکم بیشتری برخوردار است :

در قسمت شمالی محدوده در واحد Et منطبق با زون دگرسانی آرژیلیتی پیشرفته و زون برشی

[1] - Vein
[2] - Berecia zone
[3] - Fe Oxide

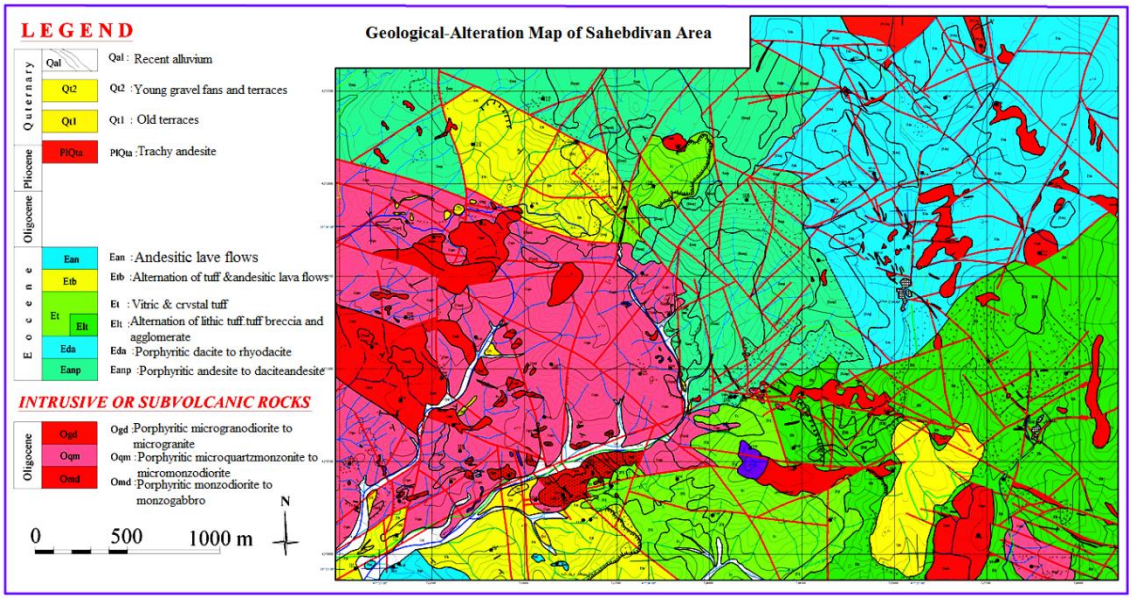
شده می‌باشد.

در واحد Omz، پیریت به سه صورت دیده می شود، در قسمت مرکزی محدوده مورد مطالعه و شمال شرقی این واحد که با دگرسانی آرژیلیتی حد واسط منطبق است ، در جنوب این واحد که با دگرسانی فیلیکی منطبق است و در قسمت غربی که پیریت همراه با ژیپس و دگرسانی آرژیلیتی پیشرفته ، در اطراف بازالت‌های ستونی دیده می‌شود که نسبت به سایرین از تراکم بالاتری برخوردار است.

در واحد Etb، پیریت به دو صورت دیده می‌شود یکی در شمال منطقه همراه با ژیپس و دگرسانی آرژیلیتی حد واسط دیگری در جنوب منطقه همراه با ژیپس (Gy) آلونیت (Al) و دگرسانی آرژیلیتی حد واسط.

ژیپس (Gy) نیز به تنهایی در جنوب واحد Ean به همراه زون سیلیسی و دگرسانی آرژیلیتی حد واسط مشاهده می‌شود.

سیستم گسل‌ها در کل محدوده از چگالی بالایی برخوردار است که اکثرا روند شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی دارند. البته گسل‌هایی با روند شرقی - غربی و شمالی - جنوبی نیز در منطقه دیده می‌شود.[صمان‌کاو، ۱۳۸۶]



شکل ۲-۶: نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ محدوده‌ی مورد نظر[شرکت ملی صنایع مس ایران]

فصل سوم

مطالعات مغناطیسی

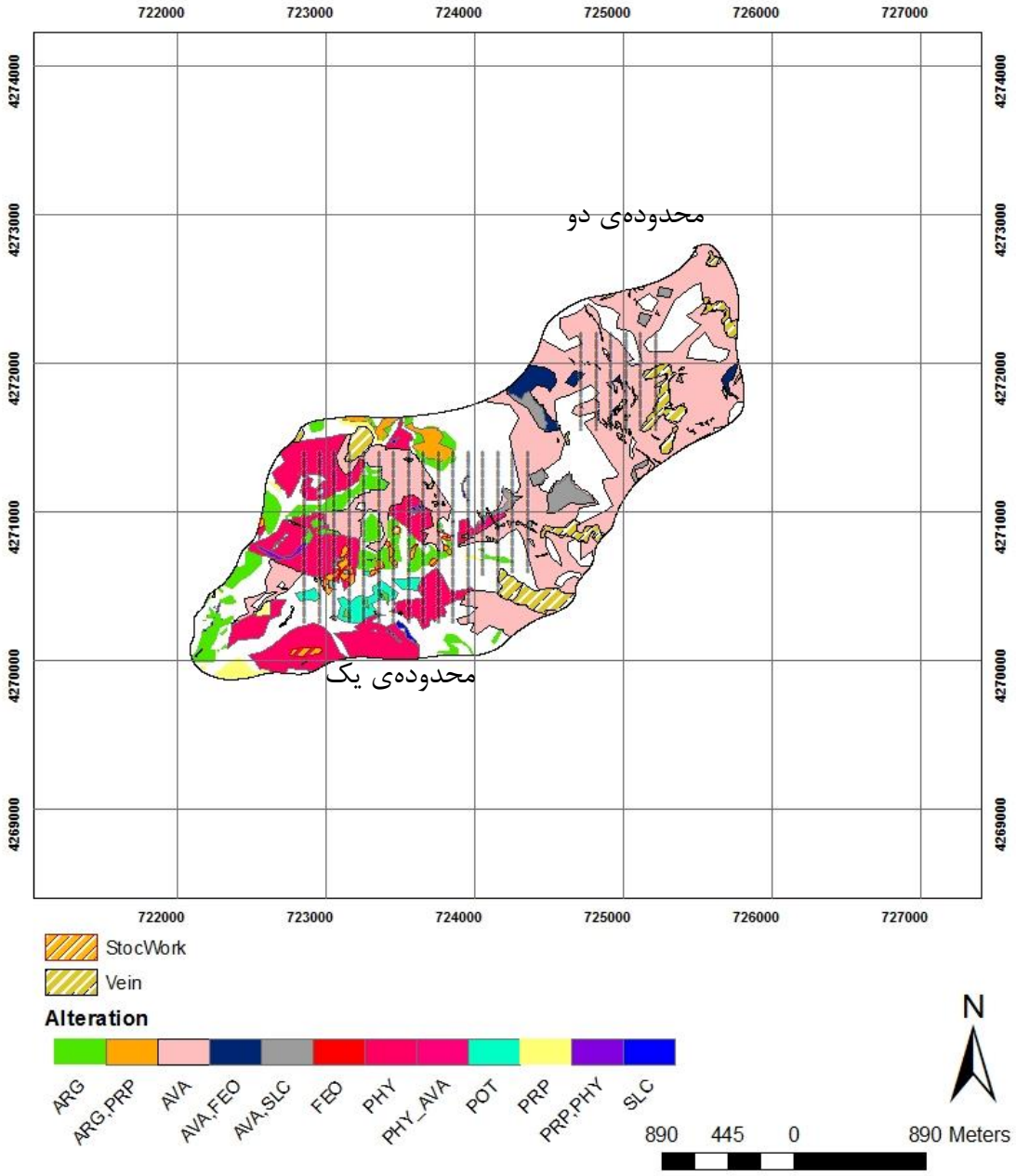
در منطقه مورد مطالعه

۳-۱- مقدمه

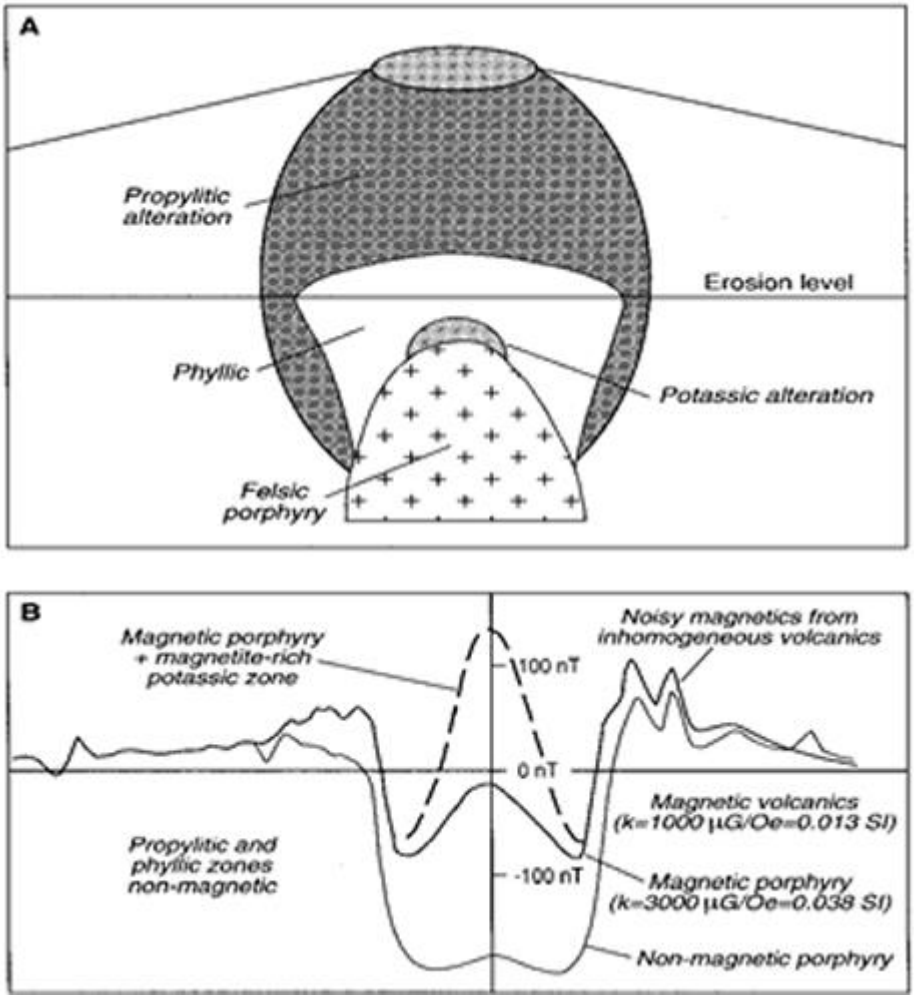
هدف از برداشت‌های مغناطیسی، جست‌وجوی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در زیر سطح زمین است. اگرچه اکثر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها به صورت مشخص غیرمغناطیس هستند، ولی انواع خاصی از سنگ‌ها دارای مقدار کافی از کانی‌های مغناطیسی‌اند که می‌توانند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی قابل توجهی تولید کنند. روش مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی است که به طور وسیع برای اکتشاف نفت و ذخایر معدنی همچون مس پورفیری [Oldenburg, et al., 1997; Thoman, et al., 2000; Ferneyhough, 2000] مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اکتشاف ذخایر معدنی، اغلب اندازه‌گیری مغناطیسی به صورت مستقیم برای پی‌جویی کانی‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما این روش برای اکتشاف کانی‌هایی که خود غیرمغناطیسی هستند، اما با کانی‌های مغناطیسی همراه هستند، نیز به کار می‌رود. با ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری که امروزه به کار گرفته می‌شود، حتی می‌توان تغییرات بسیار جزئی شدت میدان مغناطیسی که در رابطه با سنگ‌های رسوبی نزدیک سطح زمین باشند رانیز اندازه‌گیری کرد[کامکار روحانی و بیگی، ۱۳۸۸]. یکی از دلایل استفاده از خواص مغناطیسی سنگ میزبان و شبکه های نفوذی ماگمایی، تفکیک آهن بین اکسیدها و سیلیکات‌ها است [Clark, 1999]، اگر چه مواد معدنی سولفیدی مرتبط با دگرسانی گرمابی نیز از اهداف اساسی این برداشت‌ها محسوب می‌شود. در یک مدل ساده حداقل در تئوری، با افزایش ضعیف مغناطیس در زون پتاسیک، شدت کم مغناطیس بر زون سریسیتیک و افزایش تدریجی شدت مغناطیس بر زون پروپیلیتیک مواجه هستیم [Thoman and others, 2000] که از دلایل کاربرد این روش در شناسایی مس پورفیری است. بنابراین در یک جهان ایده‌آل انتظار می‌رود که بر روی مناطق دگرسانی ناهنجاری مغناطیسی به صورت یک حلقه با مرکزیت حاوی مغناطیس پایین مشاهده شود. که بر اساس نتایج مقالات متعدد، این مشخصه حلقوی با مغناطیس پایین در مرکز که شاهدی برای

وجـود ذخیـره مـس پـورفیری در ناهنجـاری مغناطیسـی اسـت در برداشـت‌هـای هـوابرد و زمینـی مغناطیس‌سنجی برداشت شده است [Thoman et al., 2000]. امـا شـکل‌هـای دیگـری نیـز از مـدل مغناطیسی مربوط به مس پورفیری وجود دارد به طور مثال فرنیهق[1] (۲۰۰۰) متوجه یـک ناهنجـاری متقارن مغناطیسی دایره‌ای شکل با مرکز حاوی مغناطیس بالا مـرتبط بـا ذخیـره مـس پـورفیری در اندونزی شد، که این افزایش خودپذیری مغناطیسی، کـاملا مـرتبط بـا ذخیـره‌ی مـس بـود. فرنیهـق (۲۰۰۰) نتیجه گرفت منبع اولیه ناهنجاری مغناطیسی، مغناطیس گرمابی مرتبط با دگرسانی پتاسیک اسـت، بنـابراین بـه عقیـده‌ی او ناهنجـاری مغناطیسـی در منطقـه‌ی مـورد نظـر بـه طـور مسـتقیم منعکس‌کننده‌ی زون دگرسانی پتاسیک مرتبط بـا ذخیـره‌ی مـس پـورفیری اسـت [Ferneyhough, 2000] یکی از اهداف تفسیر داده‌های میدان پتانسیل مغناطیسی، تعیین محل و عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌باشد. بدین منظور در منطقه مورد نظر مجموعا ۲۲ پروفیل مغنـاطیس در دو شـبکه‌ی برداشت در نواحی یک و دو برداشت شد (شکل۳-۱) و مورد بررسی قرار گرفت. فیلترهـای متعـددی برای تعیین مرزها و عمق آنومالی‌های مغناطیسی وجود دارد کـه از جملـه مـی‌تـوان روش فیلترهـای ادامه‌ی فروسو و فراسو، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، برگردان به قطب و مشتقات افقی و قـائم را نـام برد که این فیلترها روش‌های ریاضی شناخته شده‌ای هستند که بر پایه‌ی مشـتقات میـدان پتانسـیل می‌باشند. در پژوهش پیش رو از روش‌های برگردان به قطـب ، حـذف رونـد، فیلتـر ادامـه‌ی فراسـو و سیگنال تحلیلی و مدلسازی سه بعـدی داده‌هـای مغناطیسـی بـه منظـور بررسـی بـی‌هنجـاری‌هـای مغناطیسی در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است.

[1] Ferneyhough



شکل ۳-۱: نقشه‌ی آلتراسیون محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت شبکه‌های برداشت مغناطیس در نواحی ۱ و ۲



شکل ۳-۲: مدل ایده آل برای مس پورفیری و ارتباطش با پاسخ مغناطیسی. پاسخ مغناطیسی سیستم با میزان فرسایش تغییر کرده است.[Gunn and Dentith, 1997]

۳-۲- نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترها و تفسیر داده‌های مغناطیس

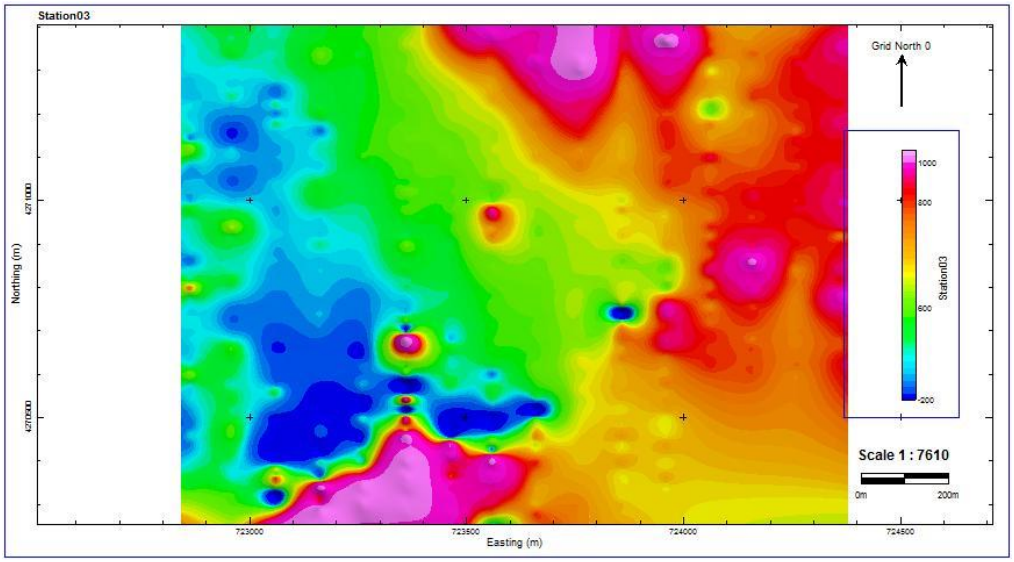
شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه به میدان مغناطیسی و پدیده مغناطیسی باقیمانده در سنگ‌ها بستگی دارد که در ارتباط با میزان کانی‌های آهن‌دار در سنگ‌ها بوده و در سنگ‌های مختلف تفاوت دارد . بنابراین سنگ‌هایی که دارای این کانی‌ها باشند شدت میدان بیشتری را نشان داده و بصورت بی هنجاری مغناطیسی نمایان می‌گردند. بدیهی است که در سنگ‌های نفوذی، کانی‌های آهن‌دار نسبت به سنگ‌های رسوبی بیشتر می‌باشند . لذا با اندازه‌گیری تغییرات کل میدان مغناطیسی علاوه بر مشخص نمودن بی هنجاری‌های مغناطیسی حاصله از تجمع کانی‌های آهن‌دار می‌توان کنتاکت و گسل‌های احتمالی را ردیابی کرد. مقادیر زاویه میل و انحراف برای منطقه‌ی مورد مطالعه بر

اساس موقعیت جغرافیایی به ترتیب ۵۷.۲ و ۵.۰۳ است.

۳-۲-۱-تصحیح IGRF[1] (میدان مرجع ژئومغناطیس جهانی)

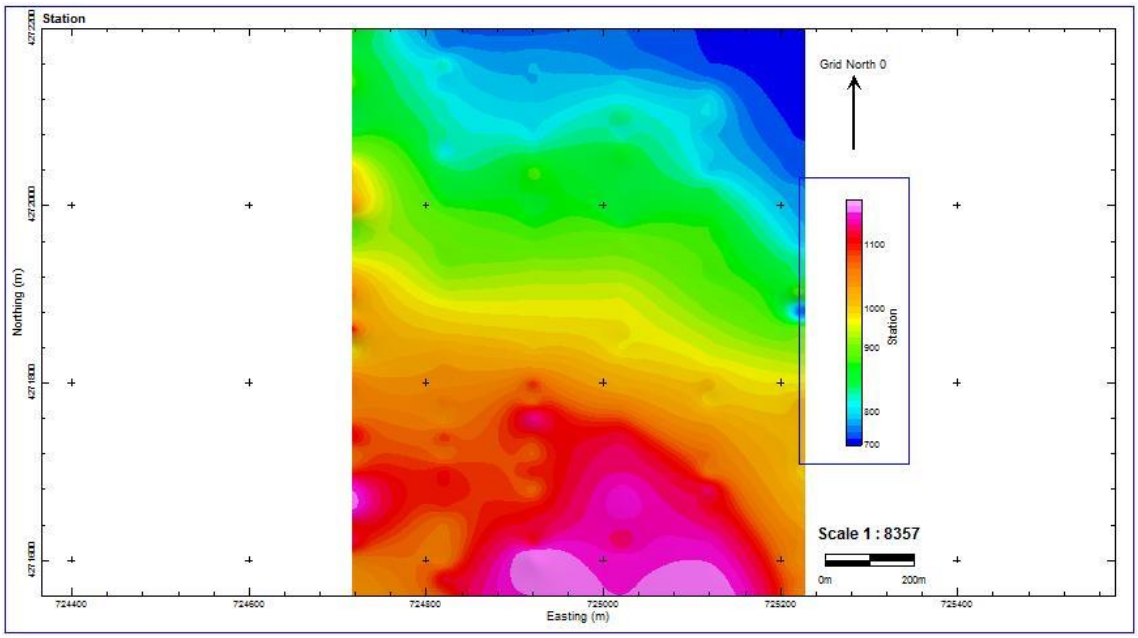
برای حذف میدان مغناطیسی ناحیه‌ای زمین، به صورت انحصاری یک مدل از میدان ناحیه‌ای زمین معروف به IGRF از داده‌ها عرضه می‌شود. مدل‌های استاندارد میدان ناحیه‌ای زمین بر اساس برداشت‌های ماهواره‌ای و زمینی است. این مدل‌ها میدان را به صورت تابعی از مکان (و زمان) برآورد می‌کند که شامل ارتفاع است. تغییرات سالانه خیلی آرام است و در زمان برداشت در نظر گرفته نمی‌شوند. داده‌های بدست آمده از سامانه‌ی ناوبری برای محاسبه‌ی IGRF به منزله‌ی تابعی از مکان، مورد استفاده قرار می‌گیرند[Luyenyk, 1997 ; کامکار روحانی و بیگی، ۱۳۸۸]

تصحیح مغناطیس باقیمانده اولین و مهم‌ترین تصحیح در پردازش داده‌ها است که اثر میدان مغناطیسی منطقه‌ای زمین را حذف می‌کند و میدان به‌جامانده، فقط میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های موجود خواهد بود. در شکل (۳-۳) و (۳-۴) نقشه‌ی پتانسیل مغناطیسی پس از اعمال تصحیح IGRF آورده شده است.



شکل ۳-۳: : نقشه‌ی تصحیح میدان کل ناحیه ۱ از مغناطیس زمین، (IGRF)

[1] International Geomagnetic Reference Field



شکل ۳-۴: نقشه‌ی تصحیح میدان کل ناحیه ۲ از مغناطیس زمین، (IGRF)

۳-۲-۲-برگردان به قطب

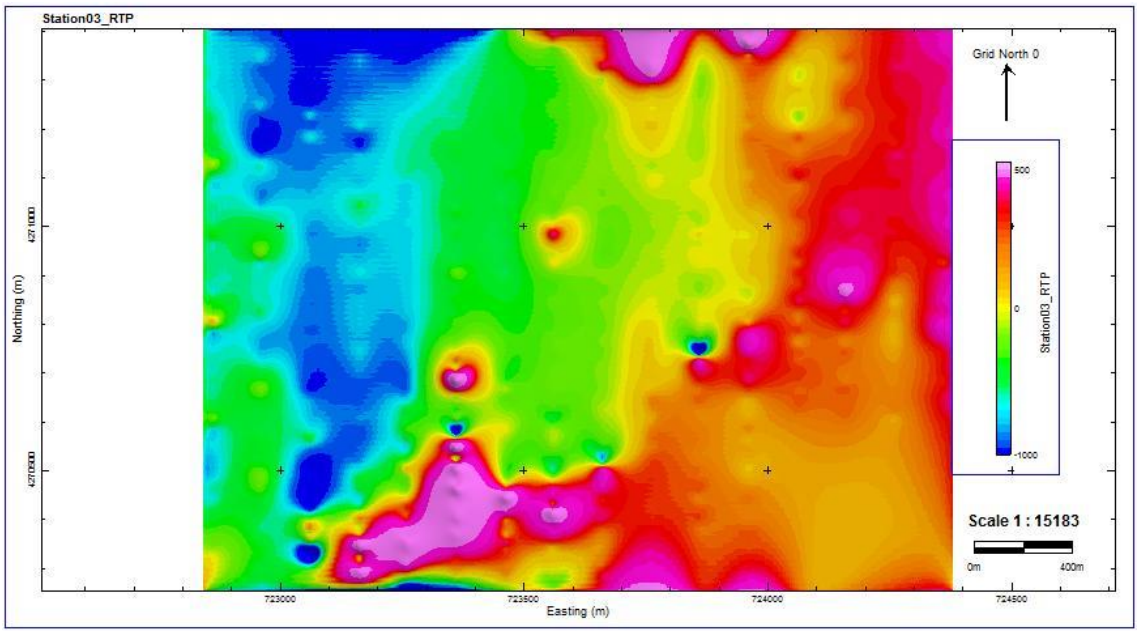
برگردان به قطب و یا هر عرض جغرافیایی دیگر، وقتی که میدان زمین متمایل باشد، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در جهت القا دارای شکل نامتقارن متناسب با منبع آن‌ها هستند، اما وقتی که میدان القایی قائم باشد، بی‌هنجاری‌های القایی مستقیماً در بالای منبع آن قرار می‌گیرند. پردازش‌های مشابهی می‌تواند برای برگردان میدان مغناطیسی بین هر دو عرض مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد. برگردان به قطب، تفسیر داده‌های مغناطیسی را خیلی راحت می کند برای اینکه در عرض‌های مغناطیسی کمتر از ۵۰ درجه ارتباط شکل بی‌هنجاری با هندسه منبع غالباً آشکار نیست. البته ذکر این نکته هم لازم است که در عرض‌های مغناطیسی کمتر از ۱۵ درجه، پردازش برگردان به قطب می‌تواند دچار مشکلاتی شود؛ به این دلیل که در این حالت پردازش تبدیل فوریه به علت نیاز به تقسیم طیف به یک جمله خیلی کوچک، ناپایدار می‌شود. خیلی از افراد از این مشکل، با محدود کردن این پردازش به عرض های مغناطیسی بزرگ‌تر از ۱۵ درجه، دوری می‌کنند. دیگران این پردازش را برای عرض‌های مغناطیسی کوچک تر از ۱۵ درجه به صورت تقریبی با اعمال دو تبدیل، که

مجموع زوایا در آن دو تبدیل، برابر با اختلاف بین عرض مغناطیسی و قطب باشد، میسر کردند[Luyenyk, 1997]. به هرحال در عرض های مغناطیسی کمتر از ۵۰ درجه، بی‌هنجاری‌هایی ایجاد می‌شود که ارتباط آن‌ها با منبعشان غیرمتقارن است و بعضاً بی‌هنجاری‌ها دارای یک کشیدگی و بیشینه‌های فرعی هستند که در بی‌هنجاری‌های قطبی اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه تفسیر آن‌ها مشکل‌تر است. بنابراین اعمال فیلتر برگردان به قطب روی داده‌های مغناطیسی در عرض های مغناطیسی کمتر از ۵۰ درجه غالباً لازم می‌شود. با اعمال فیلتر برگردان به قطب روی داده‌ها، نقشه برگردان به قطب که در آن داده‌های مغناطیسی بااستفاده از زاویه میل و زاویه انحراف مغناطیسی به قطب منتقل شده‌اند، به دست می آید [کامکار روحانی و بیگی، ۱۳۸۸].

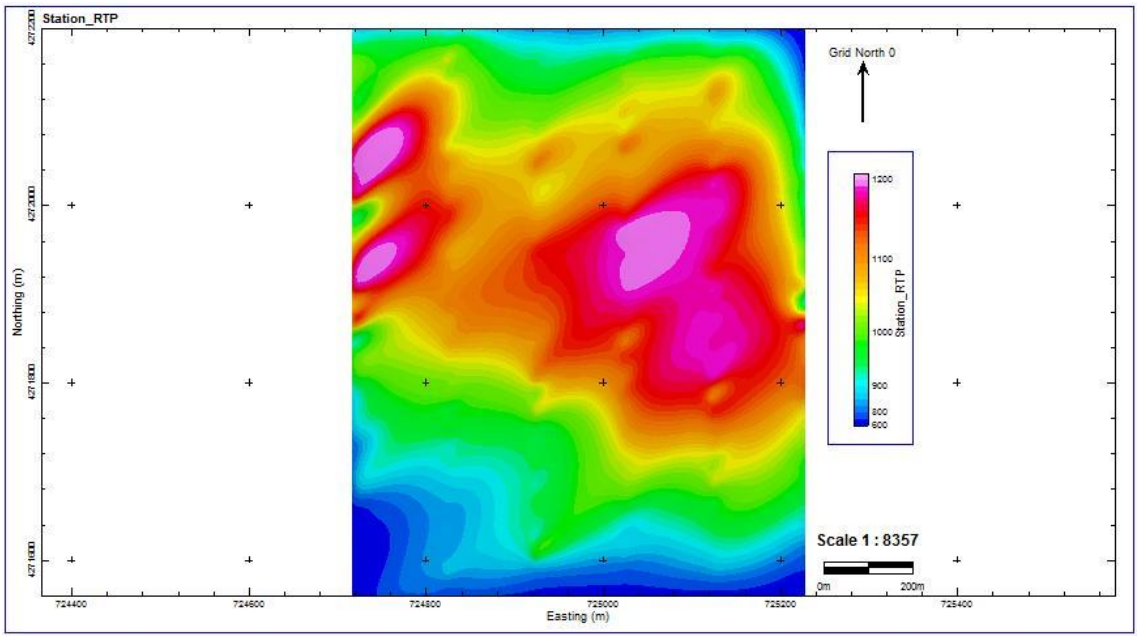
۳-۲-۳-نقشه‌ی باقی‌مانده[1]

به منظور تفکیک بی‌هنجاری‌ها باید نقشه باقی‌مانده تولید و بررسی شود. این نقشه از برازش یک سطح به صورت صفحه یا رویه و حذف یک روند از داده‌ها حاصل می‌شود که این سطح می‌تواند درجه‌ی یک، دو ، سه و یا بیشتر باشد. با بالا رفتن درجه، بی‌هنجاری‌های سطحی نمایان‌تر می‌شود این فرآیند بعد از اجرای فیلتر برگردان به قطب انجام شد که نتایج آن در شکل(۳-۵) و (۳-۶) نشان داده شده است. انتخاب درجه حذف روند بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و اطلاعات از میزان عمق کانی‌سازی صورت می‌پذیرد. در پژوهش حاضر درجه‌ی یک برای حذف بی‌هنجاری‌های محلی در نظر گرفته شد، چراکه تفاوت چندانی میان درجات مختلف حذف روند برای نشان دادن بی‌هنجاری‌های محلی، وجود نداشت.

[1] - Residual map



شکل ۳-۵: نقشه‌ی حذف روند به همراه برگردان به قطب ناحیه ۱

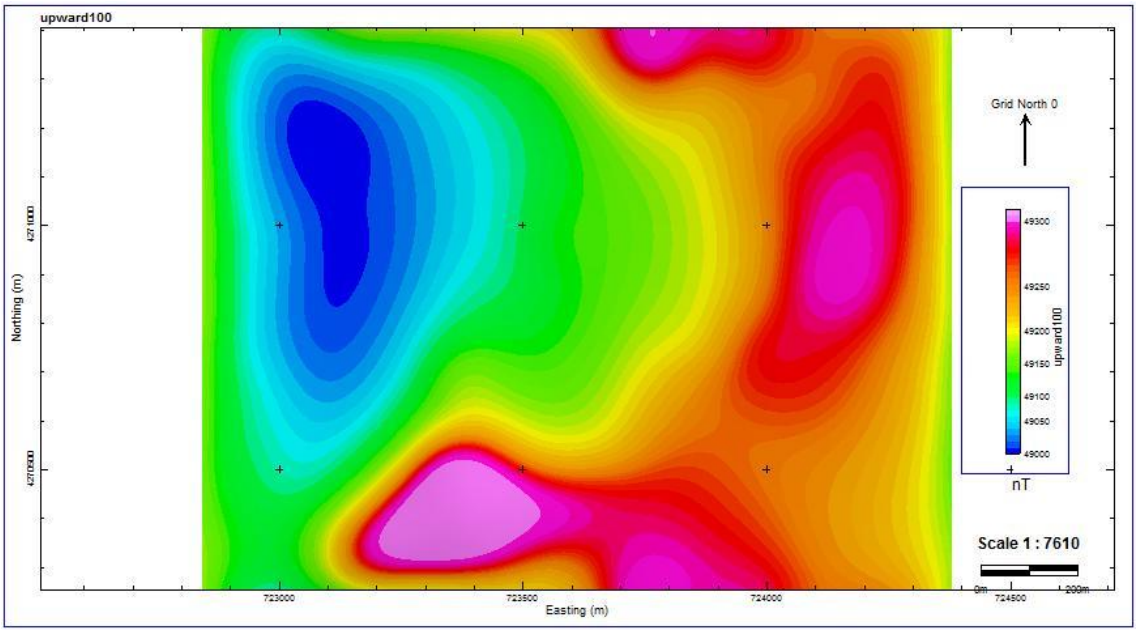


شکل ۳-۶: نقشه‌ی حذف روند به همراه برگردان به قطب ناحیه ۲

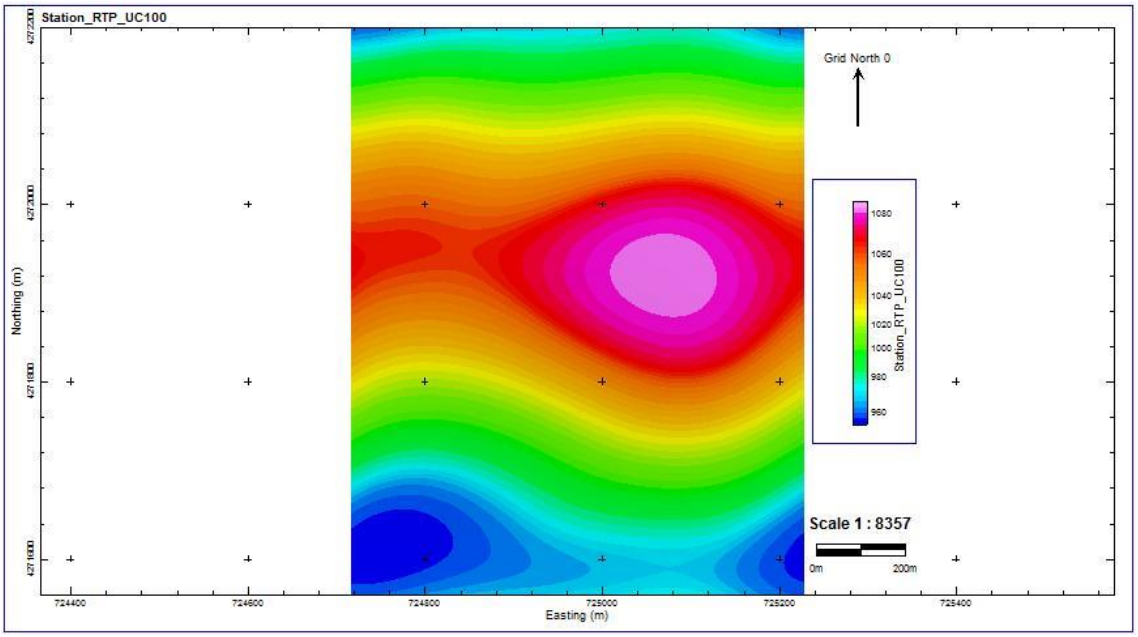
۳-۲-۴-فیلتر ادامه به سمت بالا

نقشه‌های فراسو یا ادامه به سمت بالا (شکل ۳-۷) و(۳-۸) اثر بی هنجاری‌های سطحی با فرکانس بالا را حذف، و به این طریق اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر آشکار می‌سازد [Gunn,

1996] این فیلتر تأثیر منابع محلی و کم عمق را که در نقشه‌های گرادیـان عمـودی آشـکار هسـتند، حذف می‌کند و بدین وسیله اثر بی‌هنجاری‌های عمیق، بهتر آشکار می‌شود [حیدریان شهری، ۱۳۸۸].



شکل ۳-۷: نقشه‌ی ادامه‌ی فراسو ۱۰۰ متر ناحیه ۱



شکل ۳-۸: نقشه‌ی ادامه‌ی فراسو ۱۰۰ متر ناحیه ۲

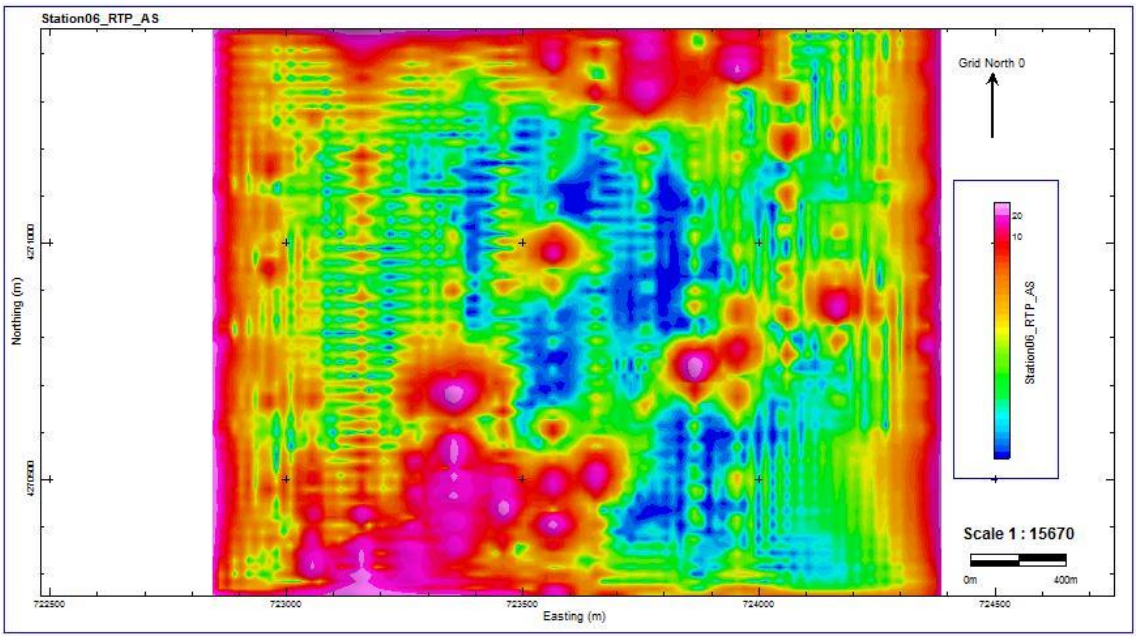
۳-۲-۵-سیگنال تحلیلی[1]

سیگنال تحلیلی تابعی است که میدان مغناطیسی را با مشتق ارتباط می‌دهد:

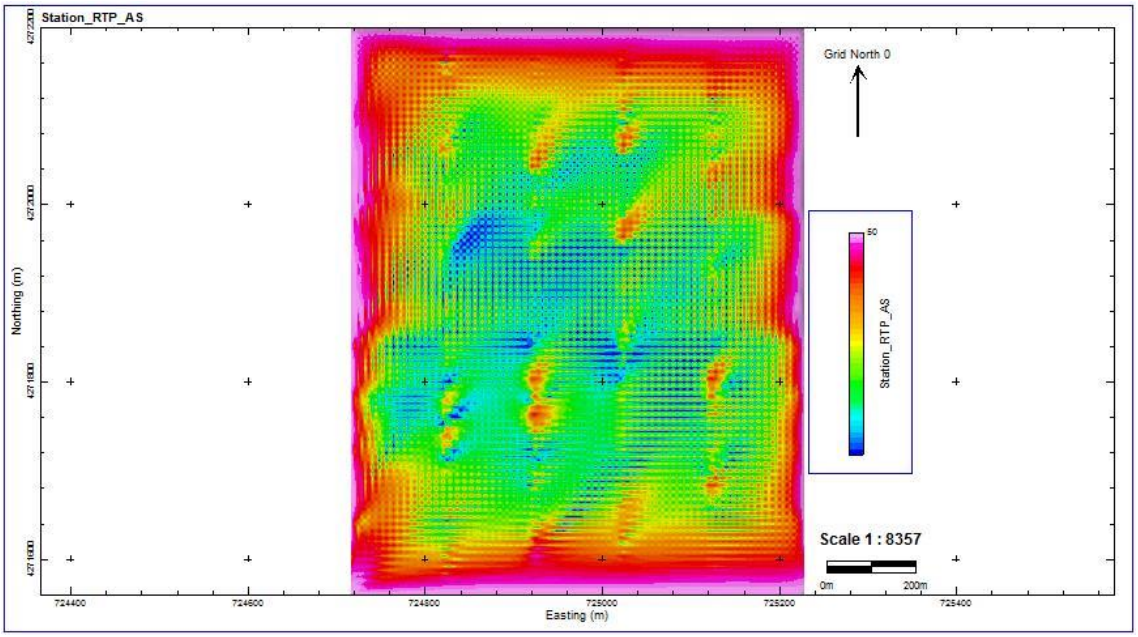
$$|A(X, Y)|=\left[(\frac{\partial m}{\partial x})^2 + (\frac{\partial m}{\partial y})^2 + (\frac{\partial m}{\partial z})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱-۳)$$

که در آن، m همان بی‌هنجاری مغناطیسی است. این تابع در زمینه‌ی تفسیر کارایی بسیار جالبی دارد. این تابع کاملاً به جهت مغناطیسی شدن و جهت میدان زمین وابسته است. این بدان معنی است که همه‌ی توده‌ها با هندسه‌ی یکسان دارای سیگنال تحلیلی یکسانی هستند. علاوه بر این، همچنان که این بیشینه‌ها متقارن هستند، مستقیماً در بالای لبه‌های توده‌های عریض و دقیقاً در بالای مرکز توده‌های باریک تشکیل می‌شوند، به این ترتیب به آسانی هندسه منبع مورد نظر تعیین می‌شود. به نظر می‌رسد که این تابع تحلیلی ابزار ارزشمندی برای تفسیر باشد. همچنین با استفاده از این تابع تحلیلی می‌توان موقعیت یک منبع مغناطیسی، بدون توجه به مغناطیس باقی‌مانده مربوط به منابع گوناگون را تعیین کرد [Dobrin and Savit, 1988]. شکل (۳-۹) و (۳-۱۰) نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهد. این شکل نشان دهنده‌ی وجود توده‌ها یا بی‌هنجاری‌های متعدد مغناطیس و بارز کننده‌ی موقعیت تقریبی لبه‌های توده‌های مغناطیسی در منطقه‌ی مورد مطالعه است.

[1] Analytic signal



شکل ۳-۹: : نقشه‌ی سیگنال تحلیلی ناحیه ۱



شکل ۳-۱۰: : نقشه‌ی سیگنال تحلیلی ناحیه ۲

۳-۳- مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی

وارون‌سازی[1] سه بعدی فرآیندی است که به موجب آن توزیع مدل سه بعدی فضایی از تغییرات

1 . Inversion

خواص فیزیکی، از یک مجموعه از نشانه‌های ژئوفیزیکی مشاهده شده، مشتق می‌شود. ناهنجاری‌های مغناطیسی به دست آمده توسط برداشت‌های مغناطیسی به صورت تغییرات خودپذیری مغناطیسی زیرسطح ترسیم می‌شوند. توزیع خصوصیات فیزیکی تعریف شده توسط وارون‌سازی میدان پتانسیل لزوما به طور مستقیم معادل مدل زمین شناسی نیستند، چرا که وارون‌سازی تغییرات چگالی و خودپذیری مغناطیسی لزوما با تغییرات سنگ شناسی سیلیکات‌ها مطابقت ندارد.

یک مسئله اساسی در ارتباط با تمام مدل‌سازی‌های معکوس گرانی یا مغناطیسی مسئله عدم یکتایی ذاتی مدل‌های مشتق شده از ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی داده‌های میدان پتانسیل است [Li and Oldenburg, 1996]. به این دلیل که تعداد داده‌های ما بسیار کمتر از تعداد پارامترهای مدل است، پس بی‌نهایت مدل می‌توان یافت که با داده‌ها مطابقت داشته‌باشند. مسئله‌ای دیگری که همگام با مشکل عدم یکتایی وجود دارد، این واقعیت است که بررسی‌های ژئوفیزیکی ناقص هستند و ممکن است حاوی نقاط دارای خطا باشند. این مسائل سبب به وجود آمدن نیاز به نوعی محدودیت در حل مسئله مدل‌سازی معکوس شده است [Bosch and McGaughey, 2001]، که از طریق گنجاندن قید زمین شناسی و ژئوفیزیکی که هدفش محدود کردن راه حل‌های مدل مشتق شده به آن‌هایی که از نظر زمین شناسی عملی می‌باشند، عمل می‌کند. قیود ممکن می‌توانند از مرزهای صرفا سطحی تعریف شده توسط نقشه برداری زمین‌شناسی، مانند تعداد محدود رخنمون‌ها تا اطلاعات گمانه که می‌تواند محدودیت دقیق عمقی را روی ویژگی‌های فیزیکی واحدهای سنگی خاص فراهم کند، باشند. قابل اطمینان‌ترین نتیجه‌ی حاصل از مدل‌سازی معکوس، مدل‌سازی است که توسط اطلاعات بیشتر و با داده‌های قابل اطمینان‌تر محدود شده باشد.

حل مسئله‌ی مدل‌سازی معکوس و گرفتن خروجی زمانی رخ می‌دهد که محاسبات به تابع هدف نزدیک شده‌باشد، به عبارتی سنگ بنای روند معکوس UBC-GIF[1]، به حداقل رساندن تفاوت

[1]. University of British Colombia geophisical inversion facility

بین خواص فیزیکی توضیح داده شده در داده‌های ورودی و خروجی است. تابع هدف مدل بـه صـورت زیر تعریف شده است[Li and Oldenburg, 1996]:

$$\phi_{m(p)}=\alpha_s \int_v w_s\{w(z)[\rho(r)-\rho_0]\}^2 \qquad (۲-۳)$$

$$+\alpha_x \int_v w_x\{\frac{\partial(x)[\rho(r)-\rho_0]}{\partial(x)}\}^2 dv$$

$$+\alpha_y \int_v w_y\{\frac{\partial(y)[\rho(r)-\rho_0]}{\partial(y)}\}^2 dv$$

$$+\alpha_z \int_v w_z\{\frac{\partial(z)[\rho(r)-\rho_0]}{\partial(z)}\}^2 dv$$

اولین پارامتر، α_s، از چهار پارامتر این معادله ، تفاوت بین مدل مرجع، mref و مدل بهبودیافته، .m و سه مولفه‌ی دیگر کنترل هموارسازی[1] مدل را در فضای X، Y، Z به عهده دارند. این چهار مولفـه بـه منظور توزیع تفاوت بین m و mref در سراسر مدل به یک اندازه گنجانده شده‌اند. این شرایط، همه از طریق مشخص کردن توابع وزن آلفا (αs به عنوان کنترل کمی و αx، αy و αz برای هموارسازی مدل در ابتدای شروع مدل‌سازی معکوس امکان‌پذیر است. این پارامترها امکان تغییر، برای رسیدن به فضای دلخـواه و مرزهـای خصوصـیات فیزیکـی مـورد نظـر را دارنـد[Li and Oldenburg, 1996, 1998; Williams, 2008]

طبق قانون نایکوئیست[2] تفکیک‌پـذیری محـدود بـه دو برابـر فاصـله‌ی ایسـتگاه‌هـای برداشـت اسـت [Williams, 2008] که بر این اساس در انتخاب اندازه سلول‌های مش تاثیر گذار است.

در حل مسائل مدل‌سازی معکوس برای رسیدن به جـواب بهینـه از روش کمتـرین مربعـات[3]

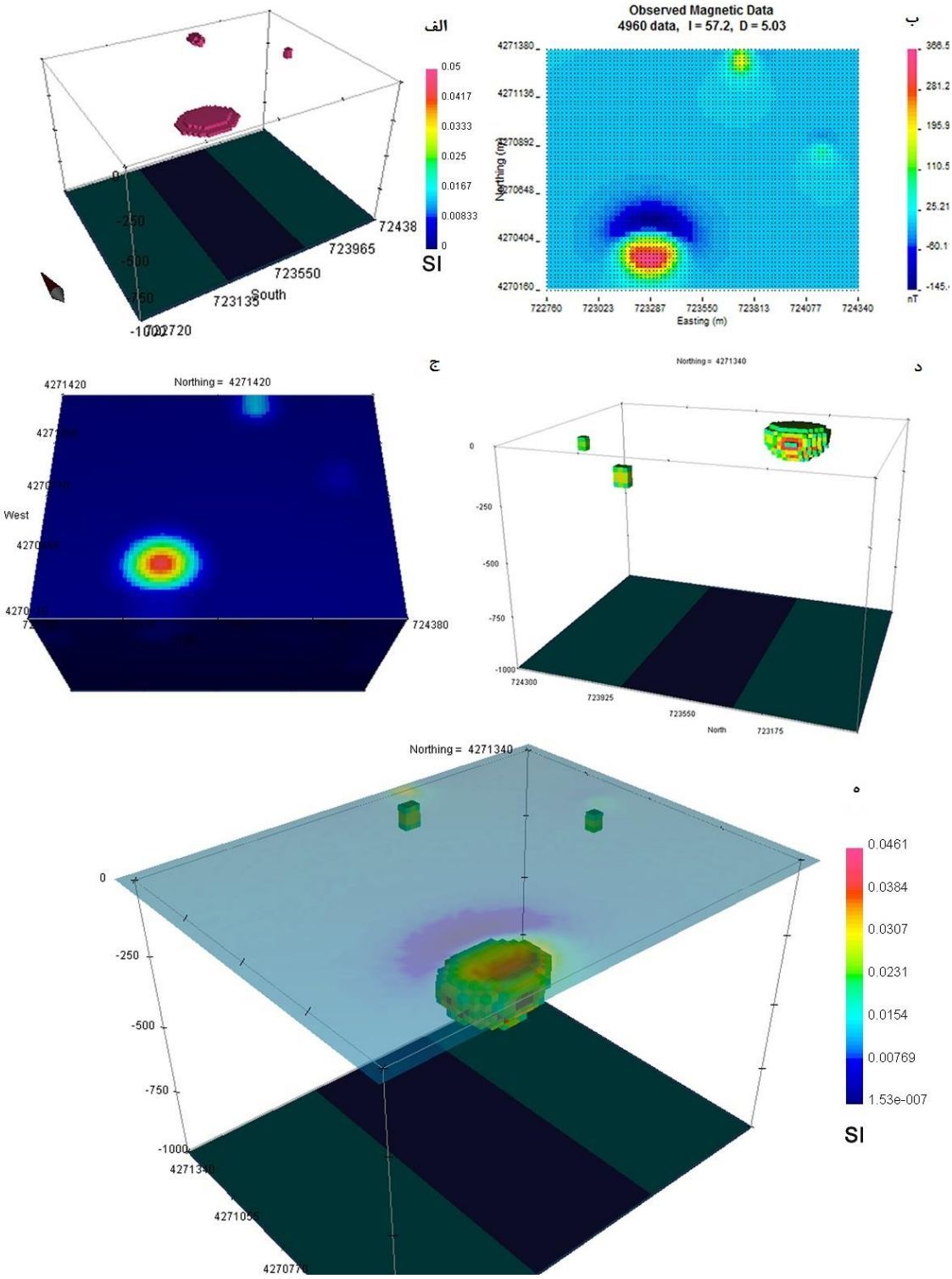
1 - Smoothness
2. Nyquist's law
3. Least Squares

استفاده می‌شود. کمترین مربعات در واقع روشی برای برازش[1] داده‌ها است. در روش کمترین مربعات، بهترین مدل برازش‌شده بر مجموعه‌ای از داده‌ها مدلی است که در آن مجموع مربع باقی مانده‌ها کمینه باشد، یعنی کمترین طول[2] را داشته باشد یا به عبارتی نرم ۲ آن حداقل شود.که بدین معنی است که misfit آن نباید از یک مقداری تجاوز کند (تعداد داده‌ها). منظور از باقی مانده‌ها، اختلاف بین داده‌ی مشاهده‌شده و مقداری است که از مدل به دست می‌آید. بنابراین مدل‌سازی در زمانی متوقف می‌شود که به این مهم دست‌یابد [Aster, 2005].

۳-۳-۱-مدل مصنوعی

جهت ارزیابی الگوریتم مدل‌سازی بر اساس بینشی که نسبت به داده‌های منطقه داریم، تعدادی بلوک با خودپذیری مغناطیسی مشخص به عنوان داده‌ی مصنوعی و به صورت مدل مصنوعی طراحی کرده، شکل (۳-۱۱-الف)سپس از مدل‌سازی پیشرو جهت تبدیل مدلمان به داده استفاده می‌کنیم، بدین‌صورت که پارامترهای مدل جهت رسیدن به داده استفاده می‌شوند. سپس از داده‌های استخراج شده شکل(۳-۱۱-ب) در جهت رسیدن به پارامترهای مدل (مدل‌سازی معکوس) استفاده می‌شود. بدین ترتیب در صورتی که مدل اولیه ما با مدل به دست آمده از مدل‌سازی معکوس شکل (۳-۱۱-ج) و (۳-۱۱-د) مطابقت داشته باشد شکل (۳-۱۱-ه) به این معنی است که مراحل را درست طی کرده و از الگوریتم درستی در جهت مدل‌سازی استفاده می‌کنیم.

1. Fit
2 . Minimum Lenght

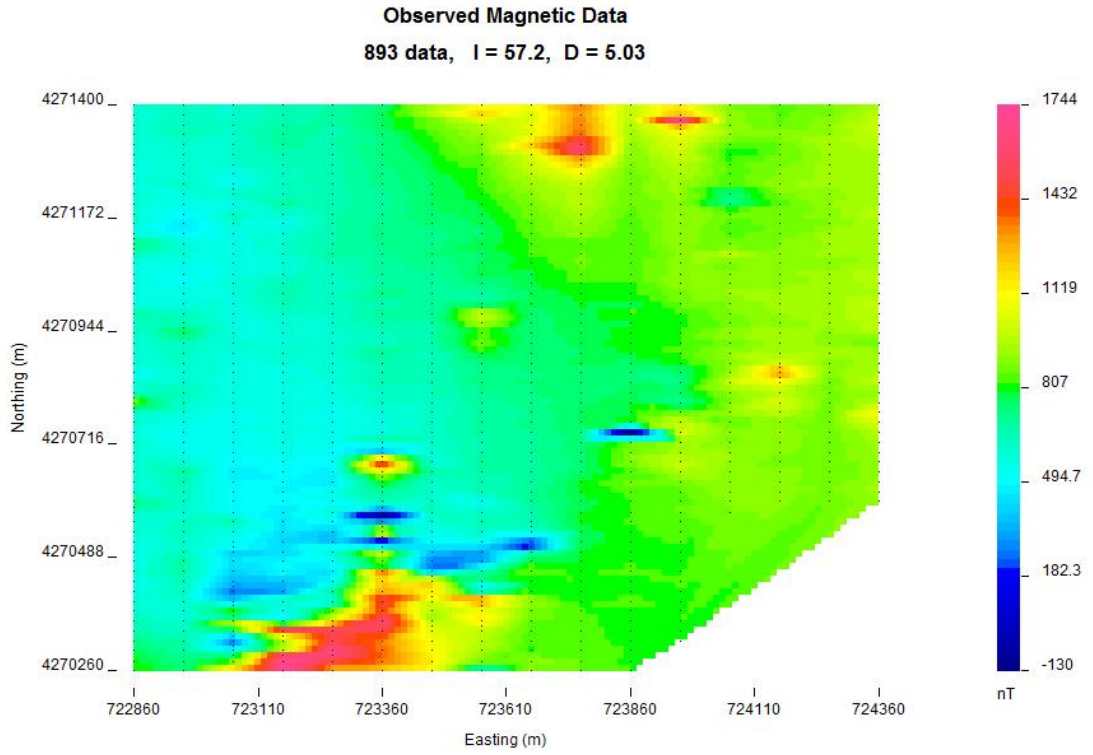


شکل۳-۱۱: فرآیند سنجس الگوریتم توسط مدل مصنوعی مغناطیسی

۳-۳-۲-مدل‌سازی بر اساس داده‌های واقعی

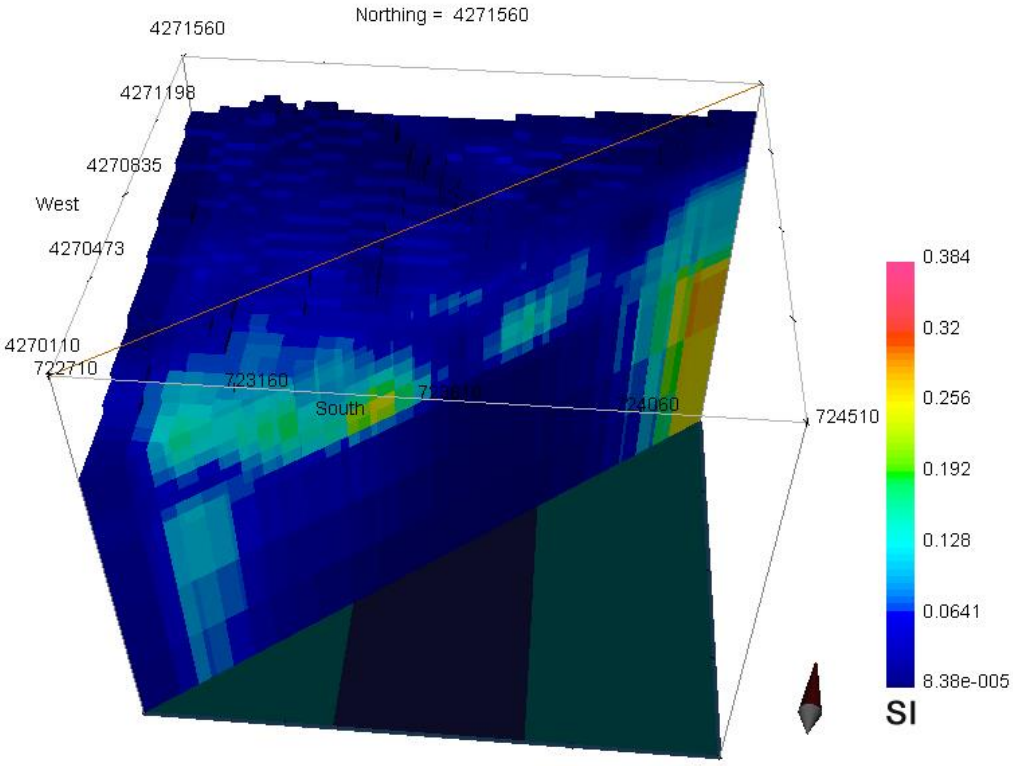
در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی مناطق یک و دو، از نرم‌افـزار

Mag3dinv که براساس الگوریتم لی و اولدنبرگ در دپارتمان ژئوفیزیک دانشگاه بریتیش کلمبیا[1] طراحی شده استفاده کردیم. به منظور دست‌یابی به بهترین نتیجه که بیشترین برازش میان داده‌های صحرایی و پارامترهای مدل است، پارامترهای هموارسازی مناسبی به نرم‌افزار داده شد که در نهایت با بیشترین برازش و misfit پایین، شکل‌های (۳-۱۳)، (۳-۱۴)، (۳-۱۵)، (۳-۱۷)، (۳-۱۸) و (۳-۱۹) بر اساس داده‌های برداشت شده شکل (۳-۱۲) و (۳-۱۶) نتیجه شده‌است. در هر یک از مناطق پس از مدل‌سازی معکوس، از مدل‌سازی پیشرو، جهت استخراج داده‌ها و مطابقت با داده‌های صحرایی استفاده شده که تطابق قابل قبولی وجود داشته است.

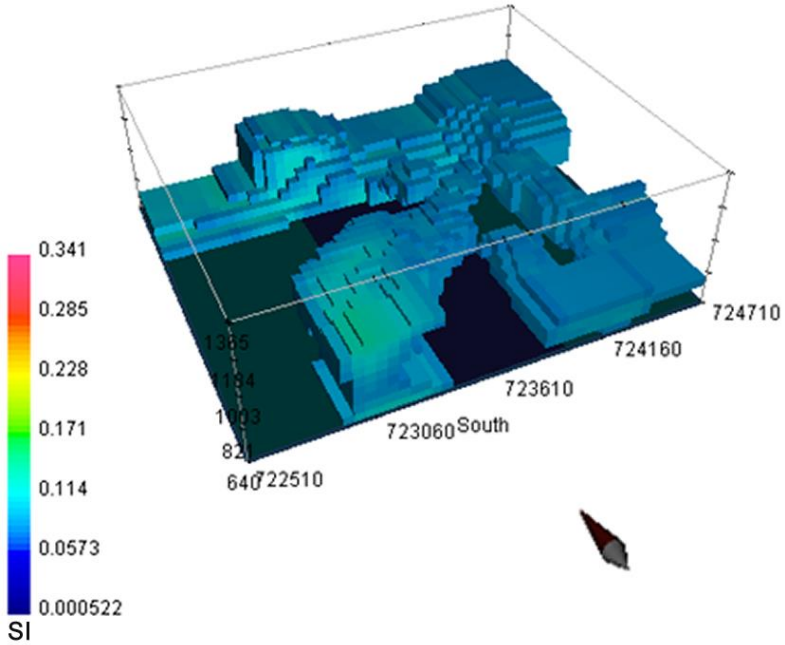


شکل ۳-۱۲: داده‌های برداشت شده در منطقه ۱

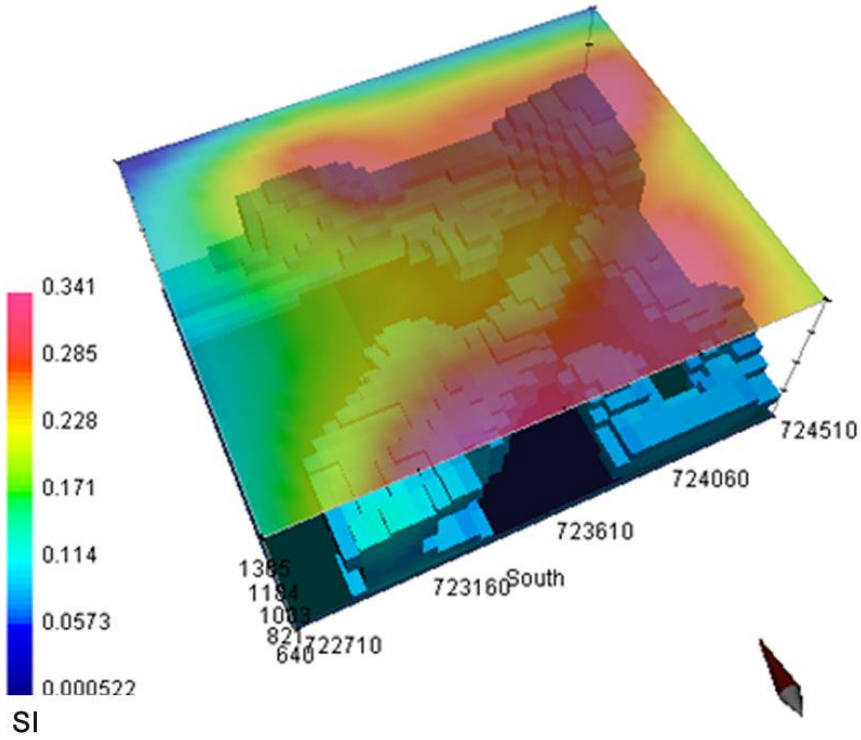
[1]- UBC



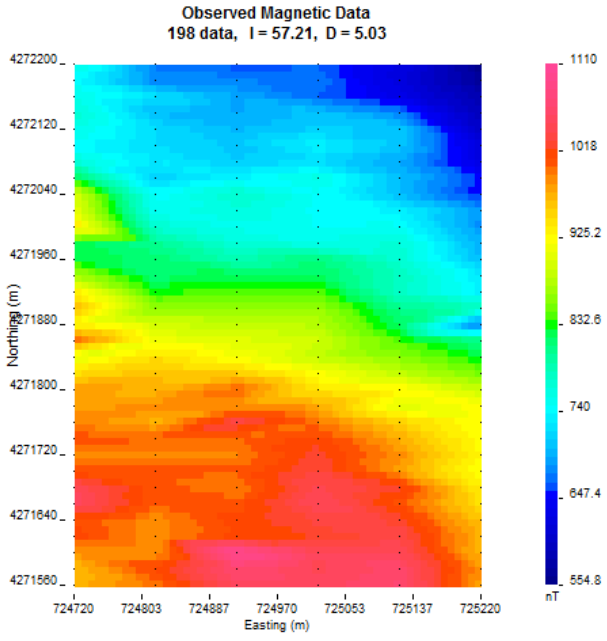
شکل۳-۱۳: :نمایی از مدل سه بعدی منطقه ۱ که بی‌هنجاری‌های سطحی و روند مطابق با گسل در آن مشهود است



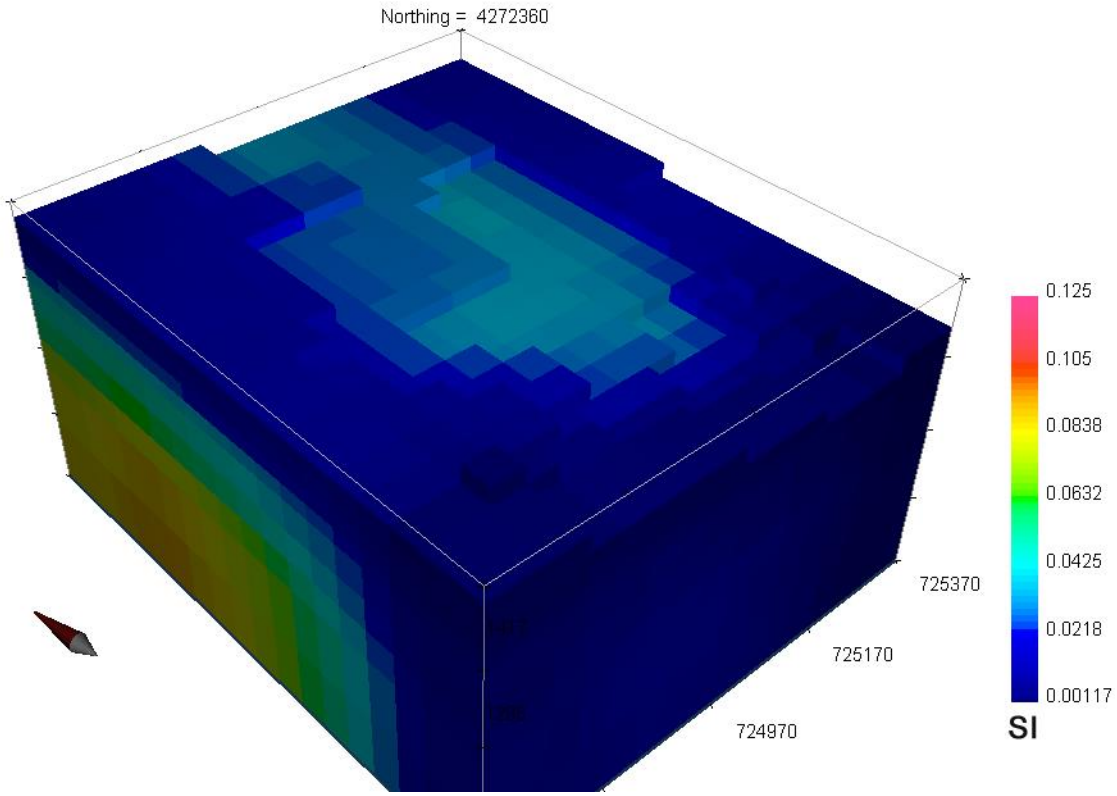
شکل ۳-۱۴: مدل‌سازی معکوس داده‌های مغناطیس منطقه‌ی ۱



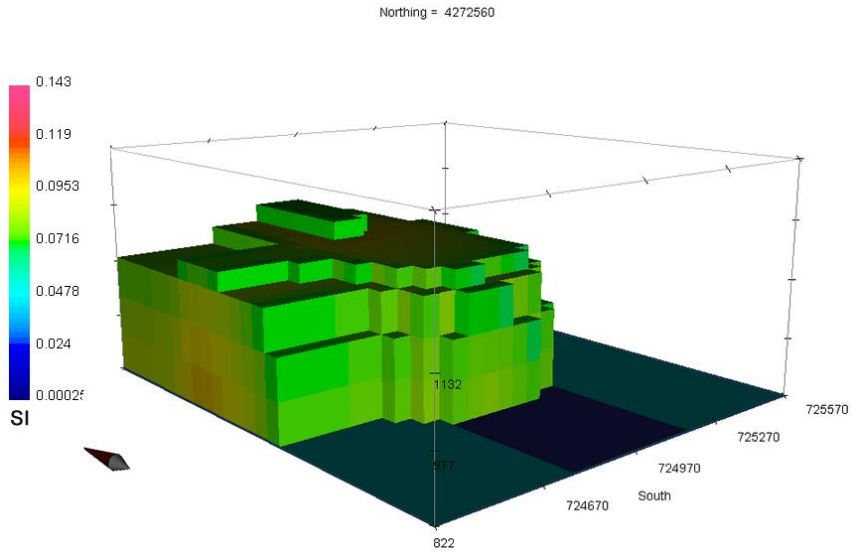
شکل ۳-۱۵: مدل معکوس منطقه ۱ مطابقت داده شده با مدل پیشروی حاصل از معکوس که برازش خوبی با داده‌های مغناطیسی دارد. Misfit = 211



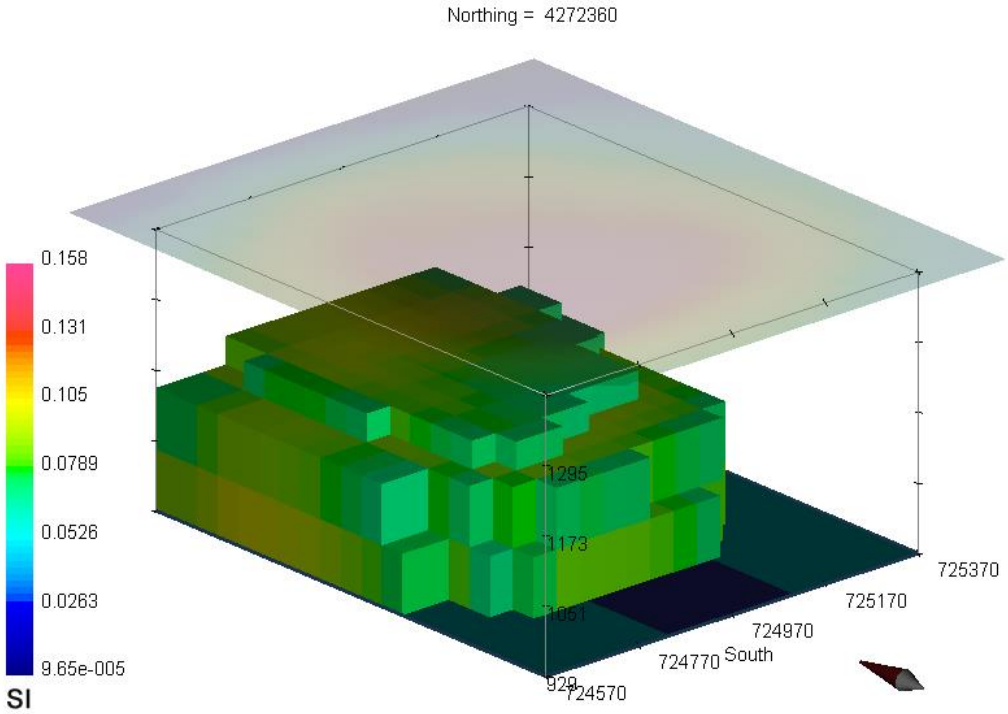
شکل ۳-۱۶: داده‌های برداشت شده در منطقه ۲



شکل ۳-۱۷: مدل سه بعدی معکوس منطقه ۲ که نمایی از بی‌هنجاری‌های سطحی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸: مدل‌سازی معکوس داده‌های مغناطیس منطقه‌ی ۲



شکل ۳-۱۹: مدل معکوس مطابقت داده شده با مدل پیشروی حاصل از معکوس که برازش خوبی با داده‌های مغناطیسی دارد. misfit = 17

۳-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در فصل حاضر پس از اعمال فیلترهای مختلف بر روی نقشه‌ی میدان کل، دید خوبی نسبت به موقعیت بی‌هنجاری مغناطیسی به‌دست آوردیم. لازم به ذکر است که در نقشه‌های مورد نظر شکل‌های (۳-۴) تا (۳-۱۰) رنگ قرمز موقعیت آنومالی مغناطیسی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج و نقشه‌های آلتراسیون و زمین‌شناسی شدت بی‌هنجاری مغناطیسی در محدوده‌ی ۱ برروی واحدهای میکروکوارتز مونزونیت تا میکرودیوریت برروی دگرسانی پتاسیک به حداکثر خود رسیده و از روند شمال شرق - جنوب غرب (گسل اصلی) برخوردار است. در محدوده‌ی ۲، به‌دلیل وجود تشکیلات داسیت و ریوداسیت، شدت میدان بالایی را نشان داده است. شدت‌های بالا در محدوده زون پتاسیک در محدوده‌ی یک می‌تواند بدلیل وجود کانی مگنتیت باشد که شدت بالایی را نشان داده است. دگرسانی آرژیلیتی و فیلیک شدت میدان متوسطی را نشان داده اند. به‌طور کلی همان‌طوریکه بر روی

تمامی نقشه‌های مربوط به منطقه ۱ ملاحظه می‌گردد، این محدوده از نقطه نظر مغناطیسی از دو بخش غربی با شدت مغناطیسی کم و بخش شرقی دارای شدت زیاد تشکیل شده است که بی هنجاری‌ها از روند شمال شرق – جنوب غرب تبعییت نموده که با نقشه زمین‌شناسی موجود تطابق کامل را نشان می‌دهدو همچنین از بررسی نقشه‌های حاصل از فیلترهای مختلف و مدل‌های سه‌بعدی ملاحظه می‌شود که روند توده‌های مغناطیسی، منطبق بر روند دگرسانی منطقه یعنی شمال شرق - جنوب غرب که از روند گسل اصلی تبعیت می‌نماید، است. بی‌هنجاری‌های بوجود آمده توسط توده‌های سطحی و عوامل پارازیتی که در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی دیده می‌شود در نقشه های گسترش رو به بالا حذف گردیده‌اند. همچنین هریک از نتایج حاصل از نقشه‌های حاصل از فیلترها و مدل‌های سه‌بعدی تایید کننده‌ی نتایج یکدیگر هستند.

فصل چهارم

بررسی های مقاومت ویژه و قطبش القایی در منطقه ی مورد مطالعه

۴-۱- مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی می‌باشند که درپی‌جوئی منابع مس پورفیری کارایی بالایی دارند [مرادزاده ، عرب امیری، ۱۳۸۲]. انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب و تعبیر و تفسیر صحیح نتایج آن مستلزم آگاهی دقیق از زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه است. اما امروزه، صرفا با به کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی نمی‌توان منابع معدنی را جستجو نمود [Robinson and Coruh, 1988]

از روش‌های ژئوفیزیکی که برای اکتشاف کانسارها به کار می‌رود می‌توان به روش‌های مغناطیس‌سنجی، روش‌های الکتریکی، الکترومغناطیسی، ثقل‌سنجی و لرزه‌نگاری اشاره نمود. انتخاب روش یا روش‌هایی برای تعیین محل یک کانسار، با طبیعت کانی‌های موجود در آن کانسار و سنگ‌های اطراف آن سروکار دارد [کریم پور و همکاران، ۱۳۸۷]. از جمله روش‌های مورد استفاده در این پژوهش روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و همچنین قطبش القایی (IP)[1] هستند که به منظور شناسایی و پتانسیل‌یابی مس در منطقه‌ی مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند.

در این فصل پس از بیان تئوری روش های مقاومت‌ویژه، IP و همچنین مدل‌سازی عددی در نرم افزار DCIP2D، به تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده می‌پردازیم.

تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی شامل مشخص کردن موقعیت مکانی، شکل و خصوصیات منبع زیر سطحی است. بعضی از دست‌یافته‌ها و روش‌های موجود برای تفسیر کمی، شامل روندهای وارون‌سازی‌اند که توزیع پارامترهای توده‌ی بی هنجار در زیر زمین را با یک تحلیل خودکار یا نیمه‌خودکار به بهترین وجه نمایش می‌دهند[Stocco, et al., 2009]. از این رو در تحقیق حاضر بررسی‌های ژئوفیزیکی به منظور ردیابی کانی‌سازی سولفوره در اعماق بیشتر و با هدف تعیین زون کانی‌سازی سولفوره و وضعیت قرارگیری توده‌های سولفوره و همچنین انباشتگی کانی‌های سولفوره

[1] - Induced polariyation

انجام می‌گیرد.

۴-۲- روش مقاومت‌ویژه

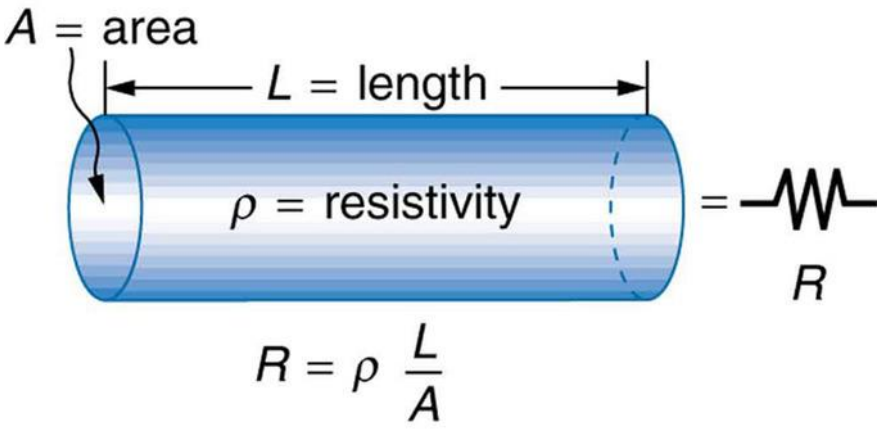
هدف از برداشت‌های الکتریکی تخمین چگونگی توزیع مقاومت‌ویژه در زیر سطح زمین به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری در روی سطح زمین می‌باشد. از این اندازه‌گیری‌ها، مقدار واقعی مقاومت‌ویژه را می‌توان به‌دست‌آورد. مقاومت‌ویژه زمین بستگی به مولفه‌های گوناگونی همچون کانی‌ها[۱]، آب محتوی[۲]، تخلخل[۳] و درجه اشباع آب[۴] در سنگ دارد. برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی برای چند دهه به منظور شناسایی آب‌های زیرزمینی، مطالعات ژئوتکنیک و معدنکاری به‌کار می‌رفته که اخیرا به منظور مطالعات زیست محیطی نیز از آن استفاده می شود [Loke, 2004].

در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی از یک چشمه‌ی الکتریکی مصنوعی، برای اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی زمین استفاده می‌شود. برای این کار، معمولا از چهار الکترود استفاده می‌شود که از دوتای آن‌ها، برای فرستادن جریان الکتریکی و از دوتای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی، استفاده می‌شود.در صورت غیرهمگن[۵] و غیرهمسانگرد[۶] بودن زمین، داده‌های حاصل از این روش، نشان دهنده‌ی مقادیر مقاومت‌ویژه‌های واقعی زمین نیستند، بلکه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مقاومت‌ویژه‌های ظاهری زیر سطح زمین می‌باشند [Loke, 2004] .

مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین را نشان می‌دهد. در مورد رسانایی مواد با مقاومت‌الکتریکی R، طول L و سطح مقطع R در زیر سطح زمین، همان‌طور که در شکل ۴-۱ دیده می‌شود؛ رابطه‌ی (۴-۱) برقرار است:

1- mineral
2- fluid content
3- prosity
4- water saturation
5-.inhomogeneous
6- anisotropy

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (۱-۴)$$



شکل ۴-۱: توده‌ی استوانه‌ای در زیر سطح زمین

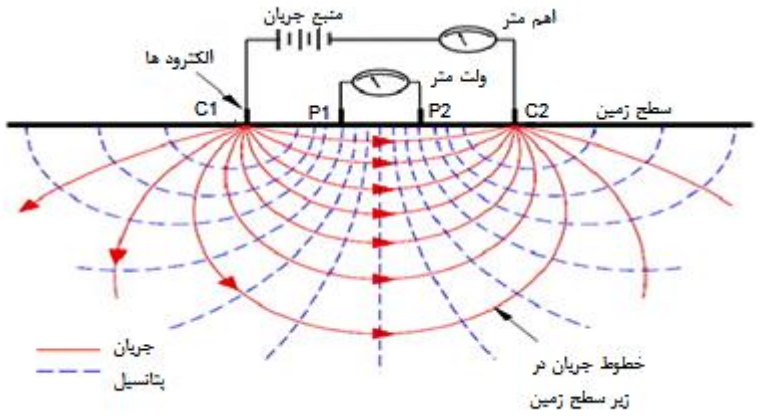
بر اساس قانون اُهم، معادله‌ی (۴-۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$\rho = \frac{\Delta V . A}{I . L} \qquad (۲-۴)$$

که در این رابطه، ρ مبین مقاومت‌ویژه الکتریکی، I جریان الکتریکی، ΔV برابر اختلاف پتانسیل و l طول استوانه فرضی می‌باشند. رابطه‌ی (۴-۲) برای تعیین مقاومت‌ویژه‌ی محیط همگن[1] و همسانگرد[2] مناسب است؛ اما برای یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد باید مقاومت‌ویژه را در هر نقطه تعیین نمود [Ozebo, et al.,2008].

در شکل ۴-۲، نمونه‌ای از یک آرایش چهارالکترودی نشان داده‌شده‌است. در این شکل، الکترودهای C1 و C2 نشان‌دهنده‌ی الکترودهای جریان و الکترودهای P1 و P2 الکترودهای پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده، بین دو الکترود پتانسیل، طبق رابطه‌ی (۴-۳) محاسبه می‌شود .

1- homogeneous
2 - isotrop



شکل ۴-۲: نحوه‌ی توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی[After Corvallis, 2000].

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi r}\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}}\right) \qquad (۳-۴)$$

که در آن $\Delta\Phi$ برابر اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، r_{C1P1} فاصله‌ی بین الکترودهای C1 و P1، r_{C2P1} فاصله‌ی بین الکترودهای C2 و P1، r_{C1P2} برابر فاصله‌ی بین الکترودهای C1 و P2 و بالاخره r_{C2P2} فاصله‌ی بین الکترودهای C2 و P2 می‌باشند.

برداشت‌های صحرایی بر روی زمین‌های غیرهمگن که مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی آن‌ها در سه جهت محورهای مختصات متغیر است، صورت می‌گیرد و هدف از این برداشت‌ها به دست آوردن اندازه‌ی مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی زمین می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌توان اندازه‌ی مقاومت‌ویژه ظاهری زمین را طبق رابطه‌ی (۴-۴) محاسبه نمود [Loke, 2004].

$$\rho_a = K\frac{\Delta\Phi}{I} \qquad (۴-۴)$$

$$K = \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}}\right) \qquad (۵-۴)$$

در این رابطه، ρ_a مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی ظاهری زمین و K ضریب هندسی[1] برای آرایش مورد

1- Geometrical factor

استفاده، خوانده می‌شود. ضریب هندسی، بستگی به چگونگی موقعیت هندسی قرارگیری چهار الکترود در هر آرایش دارد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه، معمولا مقدار مقاومت زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه‌ی بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی ظاهری به صورت رابطه‌ی (۴-۶) تعریف می‌شود [Loke, 2004; Reynolds,1997].

$$\rho_a = KR \qquad (۴-۶)$$

۴-۲-۱- تقسیم‌بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت‌ویژه

به‌طور کلی مقاومت‌ویژه‌ی سنگ‌ها عمدتا به میزان خردشدگی، درصد تخلخل و درصد شکستگی‌ها در سنگ‌ها بستگی دارد. سنگ‌های رسوبی که معمولا متخلخل بوده و دارای اشباع‌شدگی آب بالاتری می‌باشند، به‌طور معمول از مقاومت‌ویژه‌ی کمتری برخوردارند. خاک‌های رسی معمولا مقاومت‌ویژه‌ی پایین‌تری نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند؛ اما نکته قابل توجه، هم‌پوشانی مقادیر مقاومت‌ویژه‌ی سنگ‌ها و خاک‌ها می‌باشد. این امر به این دلیل است که مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی سنگ و یا نمونه‌ی خاک به عوامل دیگری مثل تخلخل، اشباع آب و غلظت نمک‌های غیرمحلول نیز وابسته می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱]. جدول ۴-۱ گستره‌ی مقاومت‌ویژه‌ی چند نوع سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: میانگین مقاومت‌ویژه‌ی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها [Telford et al., 1990].

نوع سنگ	مقاومت‌ویژهٔ الکتریکی بر حسب اُهم‌متر
کالکوسیت	10^{-4}
کالکوپیریت	$4 * 10^{-3}$
پیریت	$3 * 10^{-1}$
مولیبدنیت	۱۰
هماتیت	$3.5 * 10^{-3} - 10^{7}$
مارن	۳۰ -۷۰
رس	۱ -۱۰۰
مگنتیت	10^{-3} -۵۰
کوارتز	$4 * 10^{10} - 2 * 10^{14}$
آهک	۵۰ -۱۰۰۰۰۰۰۰
دولومیت	۳۵۰-۵۰۰۰
کلسیت	$2 * 10^{12}$
بیوتیت	$2 * 10^{2} - 10^{6}$
ماسه‌سنگ آرژیلیتی	۵۰ – ۳۰۰
شیست آرژیلیتی یا تخریب‌شده	۱۰۰ – ۳۰۰
شیست سالم	۳۰۰ – ۳۰۰۰

۴-۲-۲- روش‌های برداشت و اندازه‌گیری داده‌های مقاومت‌ویژه

داده‌های مقاومت‌ویژه به صورت یک‌بعدی، دوبعدی و هم‌چنین سه‌بعدی به‌دست می‌آیند. به طور کلی برداشت‌های یک‌بعدی مقاومت‌ویژه، برای بررسی تغییرات جانبی و عمقی به دو روش انجام می‌شود.

الف) سوندآژنی[1] ب) پروفیل‌زنی[2]

با توجه به نوع ساختار زمین‌شناسی هدف اکتشافی مورد نظر، می‌توان یکی از روش‌های سوندآژنی و پروفیل‌زنی را طراحی و برداشت کرد. در برداشت‌های دو و سه‌بعدی، تغییرات مقاومت

1- sounding
2- profiling

ویژه، هم‌زمان در جهات مختلف بررسی می‌شود. در روش سونداژزنی تغییرات عمقی و یا قائم مقاومت ویژه مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ اما در روش پروفیل‌زنی، تغییرات جانبی مقاومت ویـژه زیرسـطحی در طول یک خط پروفیل بررسی می‌شود. در روش پروفیل‌زنی، آرایش مـورد اسـتفاده و پارامترهـای آن، ثابت باقی می‌مانند و الکترودها در طول خط پروفیل جابجا می‌شوند. برای نمایش داده‌های پروفیل‌زنی محور افقی فاصله یا موقعیت ایستگاه (نقطه مرکزی آرایش الکترودی یا الکترودهـا) از نقطـه مرجـع و محور قائم، مقادیر مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. محور افقـی همـواره خطـی اسـت ولـی محـور قـائم می‌تواند خطی یا لگاریتمی باشد.

در سونداژهای ژئوالکتریک، تغییرات عمقی مقاومت‌ویژه و لایه‌بندی‌های موجـود بـا اسـتفاده از آرایش‌هایی که فاصله میان بعضی از الکترودها و یا همه آنها به طور متقارن افزایش مـی‌یابـد، بررسـی می‌شوند. مقادیر مقاومت‌ویژه با توجه به فاصله و بر روی نمودارهای لگاریتمی (هر دو محور لگاریتمی) رسم می‌شوند. اگرچه روش‌هایی برای تفسیر شیب لایه‌ها نیز پیشنهاد شده، امـا سـونداژ ژئـوالکتریکی تنها در مواقعی که فصل مشترک لایه‌ها افقی باشد؛ به خوبی جواب می‌دهد [Milson, 1989] .

در روش سونداژزنی موقعیت مرکز آرایش ثابت مانده و در هر مرحلـه، بسـته بـه نـوع آرایـش، الکترودها نسبت به محل مرکز آرایش جابجا شده و در فاصله مشخص دورتری قرار می‌گیرند. با انجام این عمل، جریان به اعماق پایین‌تر نفوذ کرده و می‌توان اطلاعاتی از لایه‌های در اعمـاق پـایین‌تـر بـه دست آورد. در روش پروفیل‌زنی موقعیت مرکز آرایش با جابجایی کل الکترودها در هـر مرحلـه تغییـر می‌کند. به این ترتیب می‌توان تغییرات جانبی لایه‌ها را در یک عمق معین بررسی کرد. از کاربردهـای مهم این روش می‌توان به اکتشاف گسل‌ها و دایک‌ها، حفرات، رودخانه‌های مدفون و دیگر ساختارهای قائم یا با شیب زیاد اشاره نمود.

در مواقعی که نیاز به تهیه مقطع یا شبه مقطع از مقاومت‌ویـژه تـوده‌هـای زیـرسـطحی اسـت، داده‌ها به صورت دو بعدی برداشت می‌شوند.

۴-۲-۳- انتخاب آرایش الکترودی مناسب

ازآنجایی که کنتورهای شبه مقاطعی که توسط آرایش‌های متفاوت در یک مدل زمین‌شناسی ثابت به دست می‌آیند می‌تواند متفاوت باشد، انتخاب آرایش الکترودی مناسب بسیار پر اهمیت است. انتخاب بهترین آرایش الکترودی برای اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی، به وضعیت ساختارهای زیر سطح زمین، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و به میزان نوفه‌ی زمینه بستگی دارد. چهار مؤلفه اصلی یک آرایش عبارتند از [Loke, 2004]:

۱) عمق نفوذ
۲) حساسیت آرایش به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی در داخل زمین
۳) پوشش افقی داده‌ها
۴) نسبت سیگنال به نوفه

برای اندازه‌گیری داده‌های مقاومت‌ویژه، آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. از متداولترین آرایش‌هایی که در روش مقاومت‌ویژه به‌کار برده می‌شوند، می‌توان به آرایش‌های ونر[۱] شلومبرژه[۲]، دوقطبی- دوقطبی[۳]، قطبی- دوقطبی[۴] و قطبی - قطبی[۵] اشاره کرد. آرایش ونر در پروفیل‌زنی، آرایش شلومبرژه در سوندژنی و آرایش دوقطبی- دوقطبی در تهیه‌ی شبه مقاطع و برداشت‌های قطبش القایی محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. جدول ۴-۲ مقایسه‌ای بین مؤلفه‌های مذکور برای چند آرایش الکترودی را به صورت تعداد * بیان می‌کند. هرچه تعداد * برای آرایشی بیشتر باشد، آرایش مذکور از نظر خصوصیت یا ویژگی مورد نظر بهتر خواهد بود.

1- Wenner
2- Schlumberger
3- Dipole- dipole
4- Pole- dipole
5- Pole- Pole

جدول ۴-۲: خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی [Samouelian et al., 2005].

	ونر	شلومبرژه	دوقطبی- دوقطبی	قطبی- قطبی	قطبی- دوقطبی
حساسیت آرایش به ساختارهای افقی	****	**	*	**	**
حساسیت آرایش به ساختارهای قائم	*	**	****	**	*
عمق نفوذ	*	**	***	****	***
پوشش افقی داده‌ها	*	**	***	****	***
نسبت سیگنال به نویز	****	***	*	****	**

۴-۲-۴-آرایش دوقطبی- دوقطبی

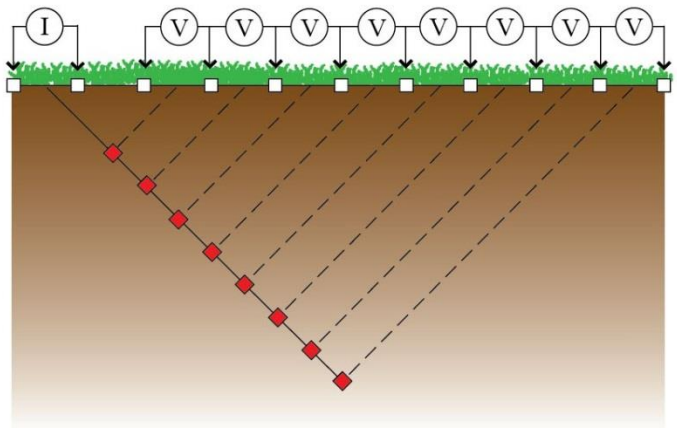
آرایش دوقطبی- دوقطبی هنوز به طور گسترده در برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش القایی به دلیل کوچک بودن مقدار جفت‌شدگی مغناطیسی که بین سیم جریان و پتانسیل رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. در شکل ۴-۳ نحوه‌ی آرایش این آرایه را مشاهده می‌نمایید، همچنین نحوه‌ی محاسبه‌ی فاکتور هندسی در معادله (۴-۷) نشان داده شده است [Loke, 2004].

شکل ۴-۳: آرایش دوقطبی- دوقطبی [Loke, 2004].

$$k = 2\pi n(n+1)(n+2)a \qquad (۴-۷)$$

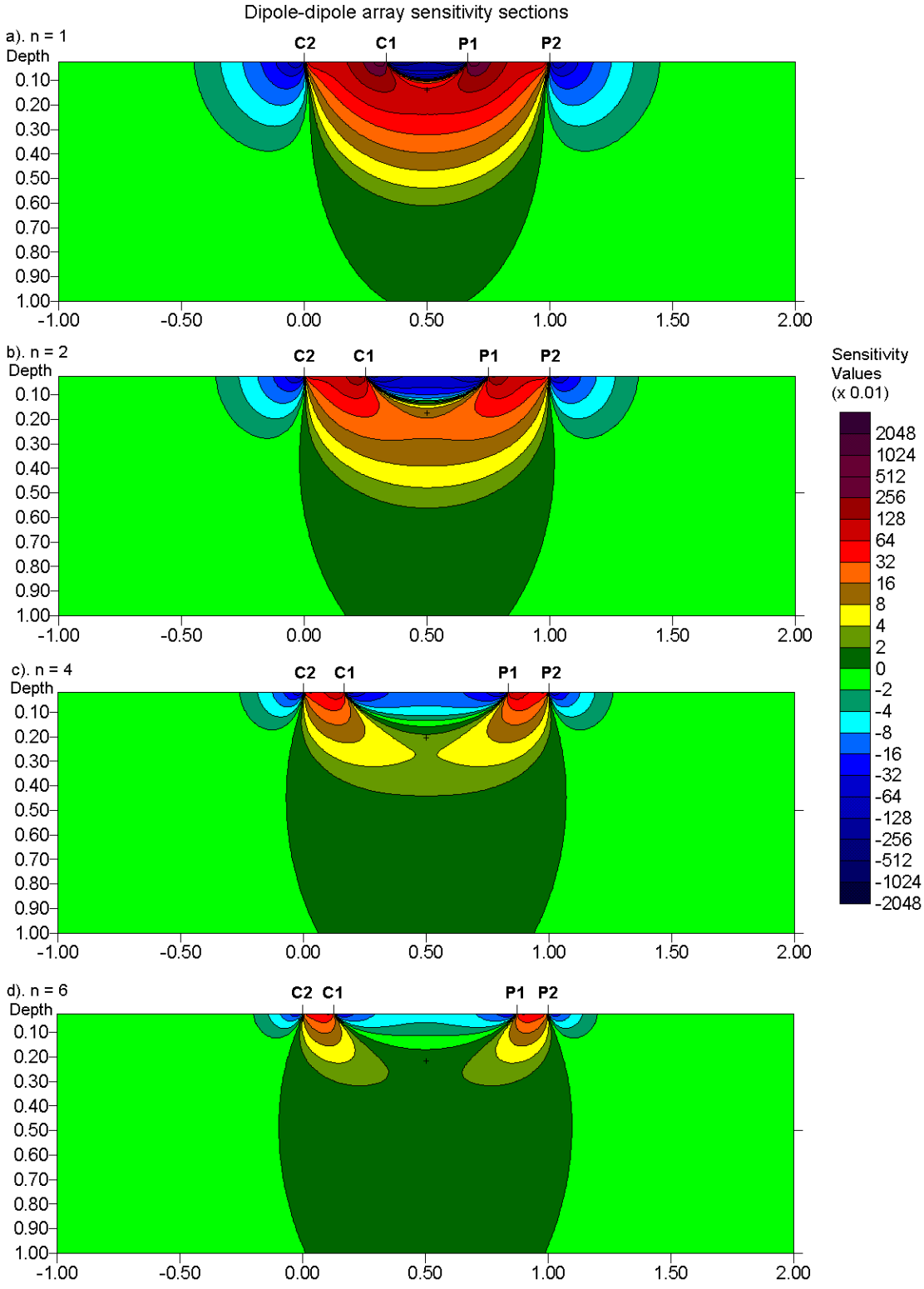
فاصله‌ی بین الکترودهای جریان c_1-c_2 برابر با مقدار a است که برابر با فاصله‌ی الکترودهای پتانسیل p_1-p_2 است. فاکتور n هم که در این آرایش اهمیت دارد برابر با نسبت فاصله‌ی بین c_1 و p_1 بر a است. برای برداشت‌های با این آرایش، a در طول برداشت ثابت می‌ماند و فاکتور n از ۱،۲،...،۶ به منظور افزایش عمق نفوذ افزایش می‌یابد. شکل ۴-۵ مقطع حساسیت را برای این آرایش

با n های مختلف نشان می‌دهد. بیشترین حساسیت معمولا مربوط به فاصله الکترودهای c_1-c_2 و-p_1 p_2 است. این بدین معنی است که بیشترین میزان حساسیت مربوط به محل الکترودهاست. بطوریکه هر چه میزان n بیشتر این تمرکز در فاصله‌ی الکترودی افزایش می‌یابد. الگوی کنتوری حساسیت برای n های بزرگتر از ۲ تقریبا به صورت عمودی در می‌آید. این آرایه نسبت به تغییرات افقی مقاومت ویژه برعکس تغییرات عمودی بسیار حساس است که این بدین معنی است که برای نقشه کردن ساختارهای عمودی مانند دایک و حفره مناسب است اما برای ساختارهای افقی همچون سیل[1] یا لایه‌های رسوبی مناسب نیست. میانگین عمق نفوذ این ارایه بستگی به فاصله الکترودی a و فاکتور n دارد، در مجموع این آرایه عمق نفوذ کمتری نسبت به آرایه‌ی ونر دارد. برای مثال به ازای n=1 عمق نفوذ برابر با ۰.۴۱۶a در مقایسه با عمق نفوذ ۰.۵۱۲a آرایش ونر نوع آلفا است. برای برداشت‌های دو بعدی این آرایه پوشش افقی داده‌ای بهتری نسبت به آرایش ونر دارد. اما از معایب این آرایه قدرت سیگنال پایین آن برای nهای بزرگ است، یک روش برای غلبه بر این مشکل این است که a را زیاد کنیم تا افت ولتاژ کمتر شود. برای استفاده‌ی موثر از این آرایه دستگاه باید حساسیت بالا و مدار حذف نویز خوبی داشته باشد و در عین حال تماس الکترود با زمین نیز باید به خوبی برقرار باشد[Loke, 2004].



شکل ۴-۴: مقطع دو بعدی آرایش دوقطبی- دوقطبی [Loke, 2004].

[1] - Sill



شکل ۴-۵: مقطع حساسیت آرایش دوقطبی- دوقطبی برای مقادیر n=1, n=2, n=4, n=6 [Loke, 2004].

در حالت کلی، در صورت استفاده از تجهیزات مناسب و تکنیک‌های درست برداشت صحرایی،

آرایش دو قطبی- دوقطبی در بسیاری از نقاط برای آشکارسازی ساختارهایی همچون حفره‌ها که تفکیک‌پذیری[1] افقی این آرایه به عنوان مزیت استفاده از آن مد نظر است، موفق عمل کرده است. همچنین در اغلب کتاب‌ها چیدمان الکترودها در این آرایه به صورت p_1-p_2 , c_1-c_2 بیان شده که منجر به ارائه‌ی مقاومت ویژه منفی می‌شود از این رو برای از بین بردن این حالت چیدمان , c_2-c_1 p_1-p_2 به کار می‌رود. [Loke, 2004].

۴-۳- روش IP

قطبش‌القایی (IP) روشی است ژئوفیزیکی که غالبا در اکتشاف فلزات پایه و تا حد کمتری در کاوش آب‌های زیرزمینی کاربرد دارد [Telford, et al., 1990].

نمایشی از روش IP را می‌توان با استفاده از یک آرایش استاندارد مقاومت‌ویژه چهار-الکترودی جریان مستقیم به‌دست آورد؛ که در آن جریان دفعتا قطع می‌شود. عموما ولتاژ در دوسر الکترودهای پتانسیل یکباره صفر نمی‌شود، بلکه پس از یک کاهش بزرگ از حالت پایدار، به آهستگی واپاشی می‌یابد. زمان این واپاشی در حدود چند ثانیه یا حتی چند دقیقه است. اگر جریان دوباره متصل شود، دامنه پتانسیل، پس از یک افزایش ناگهانی در ابتدای امر، در طول زمانی مشابه افزایش تدریجی یافته و به مقدار اولیه خود می‌رسد.

در نوعی آشکارساز IP، ولتاژ واپاشی بر حسب تابعی از زمان به طرق مختلف اندازه‌گیری می‌شود. این روش را IP حوزه- زمان می‌نامند. چون زمان افزایش تدریجی نیز محدود است، واضح است که مقاومت‌ویژه ظاهری (که در واقع یک پاگیری (مقاومت‌ظاهری) مختلط است) باید با فرکانس تغییر کند، به‌گونه‌ای که وقتی فرکانس زیاد شود، مقاومت‌ویژه ظاهری کم می‌شود. لذا اندازه‌گیری ρa در دو یا چند فرکانس متفاوت، (غالبا زیر ۱۰ هرتز)، روش دیگری از آشکارسازی را به وجود می‌آورد. این روش را IP حوزه- فرکانس می‌نامند [Telford, et al., 1990].

[1] - Resolution

ظاهرا این زمان واپاشی یا زمان افزایش تدریجی، شبیه زمان تخلیه بار یا باردار شدن یک خازن از طریق یک مقاومت معین است. ولی منحنی واپاشی در IP مثل مدار R-C نمایی نیست و همچنین شروع واپاشی از پتانسیل ساکن ماکزیمم آغاز نمی‌شود.

از آنجا که دستگاه مورد استفاده، در عین حال که پیشرفته‌تر است، کاملا شبیه دستگاه مقاومت‌ویژه است، واحدهای صحرایی IP و مقاومت‌ویژه اکثرا یکسانند و بر حسب عادت، علاوه بر اندازه‌گیری اثر IP در هر ایستگاه، مقاومت‌ویژه ظاهری نیز اندازه‌گیری می شود.[Telford, et al., 1990]

۴-۳-۱- منابع انرژی IP

اگر چه انرژی انبار شده از لحاظ نظری می‌تواند به اشکال گوناگون وجود داشته باشد، مثلا به صورت مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی، ولی مطالعات آزمایشگاهی قطبش در انواع مختلف سنگ‌ها ثابت کرده است که انرژی شیمیایی به مراتب مهمتر از سایرین است. این انبارش انرژی شیمیایی به دلایل زیر نتیجه می‌شود:

الف) تغییر تحرک یون‌ها در مایعات موجود در ساختار سنگ‌ها. ب) تغییر در رسانندگی یونی و الکترونی در جاهایی که کانی‌های فلزی وجود دارند. اثر اول به‌نام قطبش غشایی یا الکترولیتی نام دارد و اثر IP زمینه یا IP نرمال را به وجود می آورد. این اثر ممکن است در سنگ‌هایی که شامل کانی‌های فلزی نیستند، روی دهد. اثر دوم به‌نام قطبش الکترودی یا ولتاژ اضافی نامیده می‌شود. مقدار این اثر عموما بزرگتر از زمینه است و با مقدار کانی‌های فلزی در سنگ‌ها ارتباط دارد. این دو اثر توسط IP قابل تمیز از یکدیگر نیستند. به علاوه به نظر می‌آید که این اثرها مستقل از ساختار اتمی یا مولکولی در سنگ‌ها و کانی‌ها باشند، به عبارت دیگر، IP یک اثر حجمی است [Telford, et al., 1990].

۴-۳-۲- قطبش غشایی

رسانش الکترولیتی عامل غالب در بیشتر سنگ‌ها می‌باشد و وقتی فلزی وجود نداشته و فرکانس پایین است، این تنها شکل رسانش است که وجود دارد. لذا ساختار سنگ‌ها باید تا حدودی متخلخل باشند تا در جایی که کانی‌های فلزی وجود ندارند، شارش جریان را ممکن سازد. در اکثر کانی‌های سنگی مقداری بار منفی در سطح مشترک بین رویه سنگ و مایع داخل خلل و فرج وجود دارد. در نتیجه یون‌های مثبت به این سطح مشترک جذب شده و یون‌های منفی از آن دور می‌شوند. این تراکم یون ممکن است تا عمق حدود ۶ تا ۱۰ سانتیمتر در داخل مایع گسترش یابد. اگر این رقم حدود پهنای خلل و فرج باشد، وقتی یک پتانسیل جریان مستقیم به دو سر آن وصل شود، یون‌های منفی در یک طرف آن انبار شده و از طرف دیگر دور می‌شوند. در نتیجه‌ی چنین توزیع قطبیده‌ای، جریان قطع می‌شود. با برقراری مجدد جریان، یون‌ها به وضعیت اولیه برمی‌گردند؛ در حالی که این عمل در زمانی معین صورت می‌گیرد [Telford, et al., 1990].

۴-۳-۳- قطبش الکترودی

این نوع قطبش هنگامی رخ می‌دهد که در داخل سنگ مواد فلزی وجود داشته و قسمتی از عبور جریان الکترونی و قسمتی دیگر الکترونی باشد که سبب فعل و انفعال شیمیایی در سطح مشترک بین کانی و مایع می‌گردد. وقتی جریان عبور کرده تبادل الکترون بین فلز و محلول یون‌ها در سطح مشترک صورت پذیرفته، عمل الکترولیز انجام می‌شود. در شیمی فیزیک این اثر به نام ولتاژ اضافی موسوم است. چون سرعت شارش جریان در الکترولیت خیلی کندتر از داخل فلز است، انبارش یون‌ها توسط ولتاژ خارجی صورت می‌گیرد. وقتی جریان قطع شود ولتاژ باقی مانده، با پخش یون‌ها به عقب و به طرف حالت تعادل اولیه آن‌ها، واپاشی می‌یابد [Telford, et al., 1990].

کانی‌هایی که رسانای الکترونی هستند، قطبش الکترودی از خود نشان می‌دهند. این گونه کانی‌ها شامل اکثر سولفیدها (به جز اسفالریت)، برخی اکسیدها مثل مگنتیت، ایلمنیت و البته گرافیت

می باشند. البته بزرگی این قطبش الکترودی به چشمه جریان خارجی و همچنین مشخصات محیط بستگی دارد. این بزرگی با تراکم فلزی تغییر می‌کند، ولی چون پدیده سطحی است، اثر آن وقتی کانی پراکنده است بیشتر از موقعی است که توده‌ای باشد. این امر را می‌توان برترین مزیت IP تلقی کرد، زیرا سایر روش‌های الکتریکی در این‌گونه حالت‌ها به خوبی کار نمی‌کنند [Telford, et al., 1990].

جدول ۴-۳ فهرستی از انواع کانی‌ها با یک درصد در تراکم حجمی را با پاسخ‌های بارپذیری آن‌ها نشان می دهد. طول زمانی موج جریان مربعی سه ثانیه و واپاشی در طول یک ثانیه اندازه گیری شده است.

جدول ۴-۳ بارپذیری در انواع کانی‌ها [Telford et al., 1990].

کانی	میزان بارپذیری (میلی ثانیه)
پیریت	۱۳/۴
کالکوپیریت	۱۳/۲
مس	۱۲/۳
گرافیت	۱۱/۲
گالن	۹/۴
مگنتیت	۲/۲
مالاکیت	۰/۲
هماتیت	۰

۴-۳-۴- روش‌های اندازه‌گیری IP

روش‌های سوندژنی و پروفیل‌زنی در اندازه گیری‌های IP نیز به کار گرفته می‌شود، اما بیشتر از آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی استفاده می‌شود، زیرا با استفاده از این دو آرایش

می‌توان میزان جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین جریان و پتانسیل را به حداقل کاهش داد [کلاگری، ۱۳۷۱].

۴-۴- مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP

نتایج خام در اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره‌ی عمق حقیقی، ابعاد و یا توزیع خواص فیزیکی در زیرزمین بیان کنند و از طرفی هدف نهایی تمامی اکتشافات ژئوفیزیک کاربردی، رسیدن به تصویری دقیق از ویژگی‌های زیرزمینی است. اما ساختارهای واقعی اغلب خیلی پیچیده هستند. بنابراین سعی می‌شود مدل ساده‌ترکه توسط تعداد پارامترهای متناهی کنترل می شود طرح گردد [Dey, Morrison, 1979] . برای تعیین رابطه‌ی بین داده‌های صحرایی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، جهت توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی از مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی، توسط یک‌سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرالی استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود.

مدل‌سازی عددی را می‌توان به دو نوع پیشرو [1] (مستقیم) و وارون [2] (وارون) تقسیم‌بندی نمود؛ که در زیر به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. در درون تمام برنامه‌های وارون‌سازی، مدل‌سازی پیشرو نیز نهفته است.

۴-۴-۱- مدل‌سازی پیشرو

در این نوع مدل‌سازی، با وارد کردن پارامترهای یک مدل فرضی، که با داده‌های تجربی هم‌خوانی دارد، یک‌سری داده‌های تئوری منطبق بر پارامترهای مدل پیشنهادی به دست می‌آید؛ که درصورت بالا بودن جذر میانگین مربعات خطای بین این داده‌ها و داده‌های تجربی (خطای جذر میانگین مربعات)، فرآیند مدل‌سازی مجددا تکرار خواهد شد. معادله (۴-۸)، رابطه‌ی عمومی

1- Forward modeling
2-Inverse modeling

مدل‌سازی پیشرو را بیان می‌کند [Meju, 1994].

$$d = Gm \qquad (۸-۴)$$

در این رابطه، d پاسخ مدل، G تابع کرنل[1] و m بیان‌گر پارامترهای مدل است.

۴-۴-۲-مدل‌سازی وارون

فرآیند مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه، عکس مدل‌سازی پیشرو است. بدین ترتیب که در هر مرحله از تکرار، با اعمال یک سری عملیات ریاضی روی داده‌های مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری، پارامترهای فیزیکی مدل به دست می‌آید. مسائل وارون‌سازی بر خلاف مسائل پیشرو که اغلب یک مرحله‌ای و خوش‌حالت[2] هستند؛ به‌دلایل مختلف تکراری و بدحالت[3] می‌باشند. از جمله این دلایل وجود نوفه‌های زمین‌شناسی، ناقص بودن اطلاعات و خطا در اندازه‌گیری‌ها است. حل مسائل وارون مشکل و در برخی موارد غیرممکن است.

مسائل خطی به کمک معادله‌ی ماتریسی تعمیم یافته‌ی حاصل از معادله‌ی (۴-۸) به صورت معادله‌ی (۴-۹) حل می‌شود [Meju, 1994; Samouelian, et al., 2005]:

$$m = G^{-1}d \qquad (۹-۴)$$

در این پژوهش برای مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP از نرم‌افزار DCIP2D استفاده شده است. داده‌های قطبش القایی و مقاومت‌ویژه به‌دست‌آمده از به‌کارگیری آرایش‌های ونر (α, β, γ)، شلومبرژه، قطبی- قطبی، قطبی- دوقطبی و دوقطبی- دوقطبی در این نرم‌افزار قابل مدل‌سازی هستند. این نرم‌افزار بر اساس الگوریتم لی و اولدنبرگ توسط دپارتمان ژئوفیزیک دانشگاه بریتیش کلمبیا طراحی شده است.

1 -Kerenel Function
2 -Well posed
3 -Ill posed

اگر تابع هدف مدل را Φ(m) وتابع عدم برازش را برابر با Φ(d) قرار دهیم تابع(۴-۱۰) شرط رسیدن ما به جواب را تعریف می‌کند.

$$\Phi = \Phi(d) + \mu\,\Phi(m) \qquad (۱۰-۴)$$

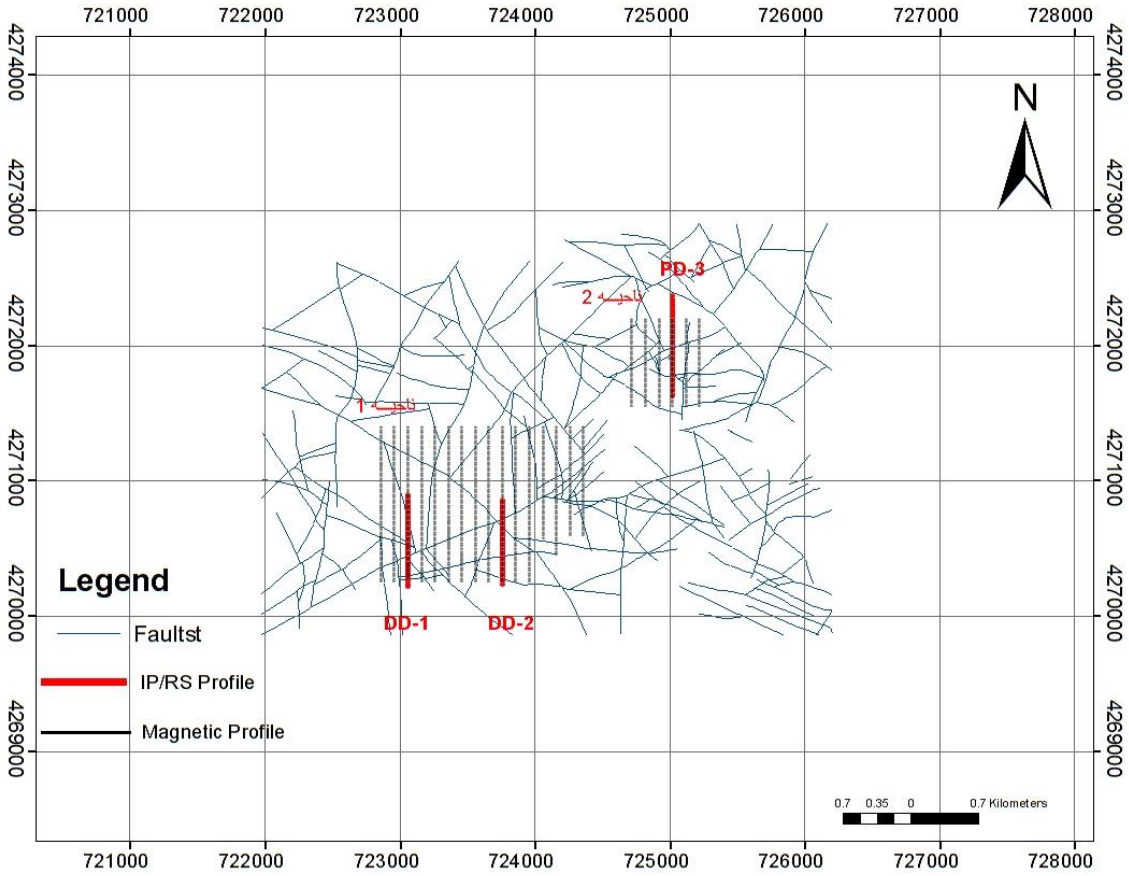
که در آن μ پارامتر منظم سازی است که با روش Chifactor محاسبه می‌شود.

در این نرم‌افزار، مدل‌سازی وارون، با روش اجزا محدود و تفاضل محدود برای تعداد بسیار بالای داده‌های صحرایی قابل انجام است. امکان تصحیح توپوگرافی روی شبکه نیز مقدور می‌باشد. در روش وارون‌سازی داده های ژئوفیزیکی، هدف ارائه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده‌های صحرایی داشته باشد. در حقیقت مدل به‌دست‌آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین‌شناسی می‌باشد. در وارون‌سازی، فرآیند تکرار پارامترهای مدل آن قدر تغییر می‌یابد تا بیشترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده‌های صحرایی حاصل گردد.

مدل به‌دست‌آمده باید با داده‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شود؛ تا صحت آن نیز از نظر زمین‌شناسی مورد تایید قرار گیرد[Loke, 2004].

۴-۵- برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی منطقه‌ی مورد مطالعه

با توجه به گسترش و روند وسیع کانی‌سازی در سطح و به منظور اخذ حداکثر اطلاعات عمقی و تغییرپذیری توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی و بارپذیری توده‌های زیرسطحی، برداشت‌های ژئوالکتریکی و IP در محدوده‌ی یک، در دو پروفیل شمال- جنوب (آزیموت صفر) به نام‌های dd1 و dd2 عمود بر واحدهای موجود زمین‌شناسی (شامل سنگ‌های نفوذی مختلف) که به فاصله‌ی ۷۰۰ متر از یکدیگر قرار گرفته اند با فواصل برداشت ۲۰ متر و در محدوده‌ی دو، در یک پروفیل شمالی- جنوبی به نام pd3 با فواصل برداشت ۲۰ متر با آرایش دوقطبی- دوقطبی طبق شکل (۴-۶) انجام شده است.



شکل ۴-۶: نقشه‌ی گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت پروفیل‌های مقاومت‌ویژه و IP در نواحی ۱ و ۲ نسبت به موقعیت شبکه‌های مغناطیس[شرکت صنایع ملی مس ایران]

۴-۶- تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش القایی

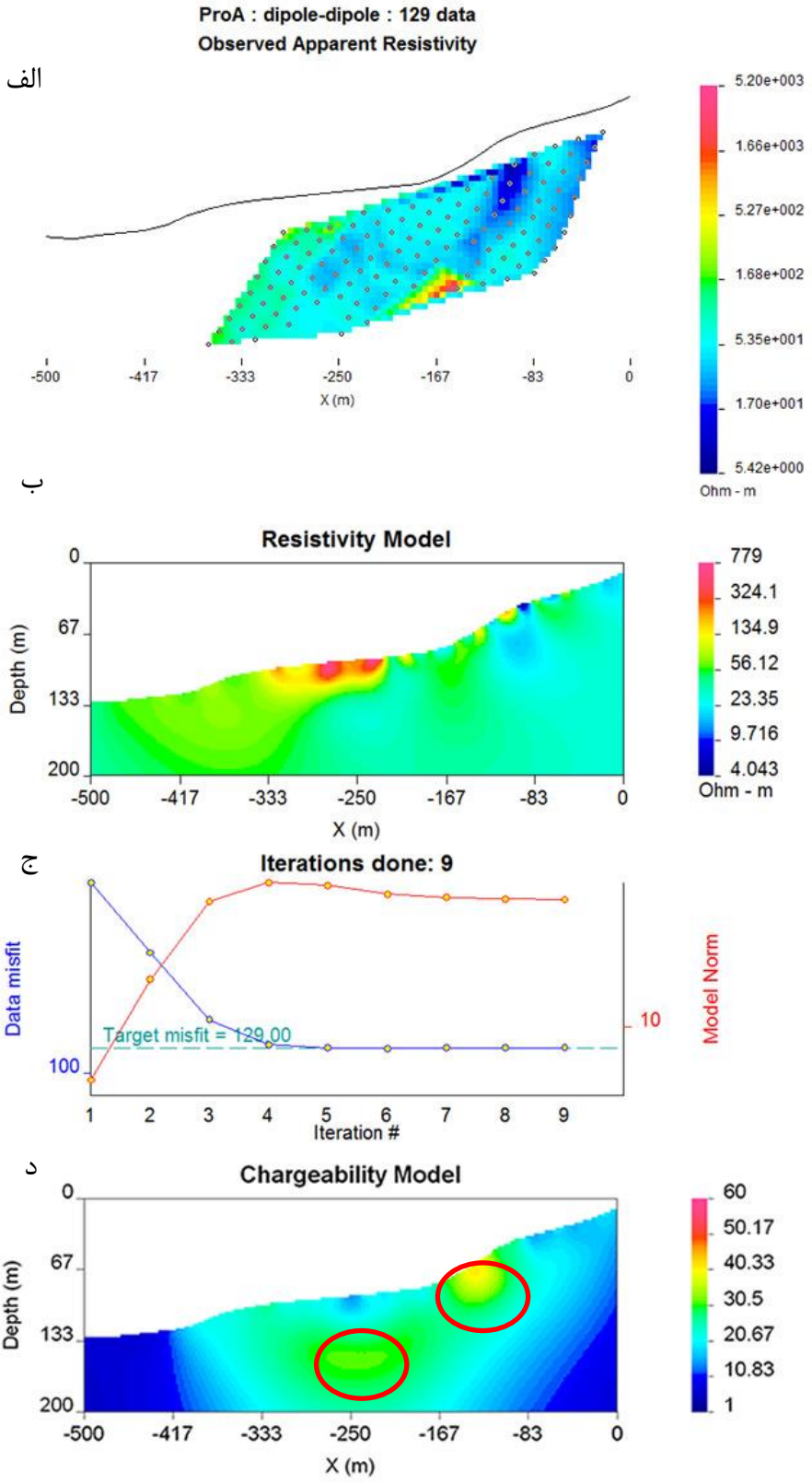
همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر گردید جنس واحدهای سنگی در محدوده‌ی مورد مطالعه میکروگرانودیوریت پورفیری، میکروگرانیت،میکروکوارتزمونزونیت پورفیری ،میکرومونزونیت، آندزیت پورفیری تا داسیت است. آهن و سولفید مس (پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت) معمولا در سراسر مناطق دگرسانی توزیع شده‌اند و این مواد معدنی معمولا دارای مقاومت کم قابل تشخیص با روش‌های الکتریکی هستند. بنابراین با توجه به اینکه جنس سنگ‌های محدوده اغلب سنگ‌های نفوذی که شدیدا دگرسان شده‌اند است، تغییرات مقاومت ظاهری درون آنها یکسان است. از طرفی طبیعت پراکنده‌ی مواد معدنی سولفیدی در سیستم پورفیری به ویژه برای روش قطبش‌القایی (IP)

مناسب است [Sinclair, 2007]. در واقع، روش IP در اصل برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری توسعه داده شد [Brant, 1966]و هنوز هم به طور معمول استفاده می‌شود .ناهنجاری‌های IP اغلب نشان دهنده‌ی مناطق دارای پیریت و کالکوپیریت که رابطه‌ی مستقیم با کانی‌سازی دارند است. بنابراین تفسیر IP و مقاومت‌ویژه می‌تواند منجر به تشخیص منبع ناهنجاری شود. [John, et al., 2010] با توجه به نوع کانه، کانسنگ و سنگ میزبان از نگاه ژئوفیزیکی انتظار می‌رود که تباین مقاومت‌ویژه و بارپذیری قابل ملاحظه‌ای بین کانسنگ و سنگ درون‌گیر وجود داشته باشد.

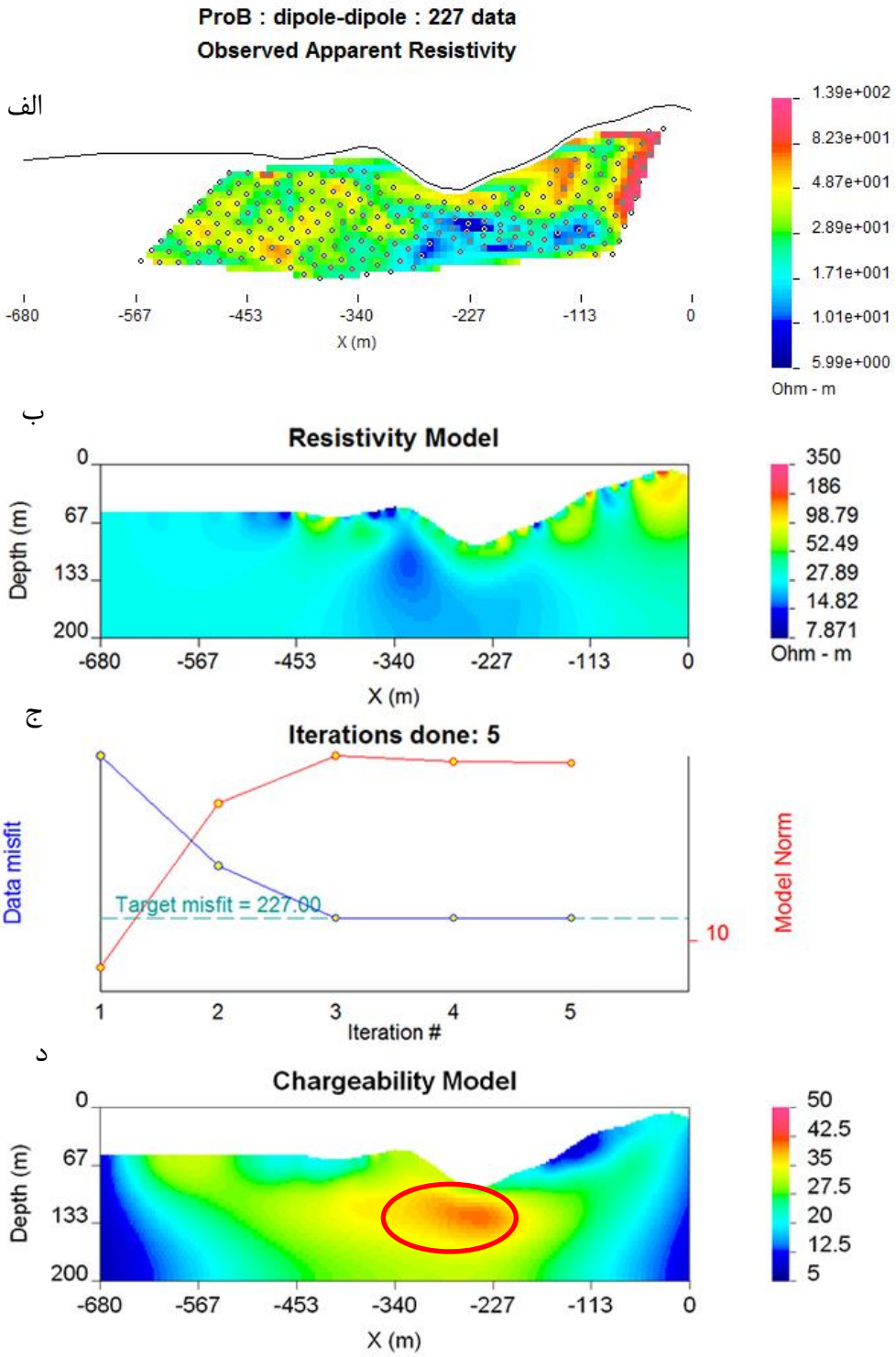
۴-۶-۱-تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل dd1 و dd2

دو پروفیل dd1 و dd2 در محدوه‌ی یک با آزیموت صفر و عمود بر تغییرات زمین‌شناسی به فاصله‌ی ۷۰۰ متر از یکدیگر و با فواصل برداشت بیست متر و پرش ۴۰ متر برداشت شدند. همان طوری که از بررسی شبه‌مقطع مقاومت ویژه‌ی ظاهری شکل (۴-۷-الف) و (۴-۸الف) و مدل مقاومت ویژه شکل (۴-۷-ب) و (۴-۸-ب) مشهود است، با توجه به مقیاس و رنگ‌های مختلف، تغییرات مقاومت ویژه در محدوده‌ی مطالعه شده مشخص گردیده است. رنگ آبی نشانگر مقاومت‌ویژه و بارپذیری کم و رنگ قرمز نشان دهنده‌ی مقاومت ویژه و بارپذیری زیاد است. از مقایسه شکل‌های (۴-۷-ب) با (۴-۷-د) و (۴-۸-ب) با (۴-۸-د) مشاهده می‌شود که همبستگی معکوس قابل قبولی بین دو مدل مقاومت ویژه و بارپذیری وجود دارد به طوری‌که درست در جایی که با کاهش مقاومت ویژه همراه است با افزایش بارپذیری مواجه هستیم. شکل‌های (۴-۷-ب و د) و (۴-۸-ب و د) درنتیجه‌ی مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی توسط نرم افزارDCIP2D به دست آمده‌اند [Oldenburg and Li, 1994]. همان‌طوریکه در نقشه مقاومت ظاهری ملاحظه می شود و مقایسه آن با محل پروفیل dd1 و dd2، و نقشه‌ی زمین‌شناسی و آلتراسیون منطقه، محل تشکیلات دگرسانی آرژیلیتی در پروفیل dd2 و دگرسانی فیلیک و پتاسیک در پروفیل dd1 دارای مقاومت ظاهری تا ۱۰۰ اهم متر می‌باشد و گسترش نسبتا زیادی را بر روی این تشکیلات نشان می‌دهد . بخش نسبتا مقاوم بر

روی بخشی از زون پتاسیک به ثبت رسیده است که با شدت بیش از ۱۰۰ اهم متر بوده که بـه علـت وجود یک لایه‌ی سیلیسی روی آن است. مقاومت‌های بین ۵- ۱۰۰ اهم متر را می‌توان در ارتبـاط بـا کانی‌سازی سولفوره محسوب نمود که ناهنجاری بارپـذیری را تائیـد مـی نمایـد، چـرا کـه معمـولا در مناطقی که تمرکزی از کانی‌های فلزی و سولفیدی وجود داشته باشد با بارپذیری زیاد و مقاومت‌ویـژه پایین مواجه هستیم، اما باید دقت داشت که این موضوع همیشه صادق نیست، مثل جـایی کـه کـانی مس‌دار در داخل زون سیلیسی باشد که در این صـورت هـر دو بـالا هسـتند [کـریم پـور و سـعادت، ۱۳۸۴]. همچنین در مدل مقاومت ویـژه‌ی ایـن دو پروفیـل در فاصـله‌ی حـدود۱۵۰ و۴۰۰ متـری از ابتدای پروفیل dd1 و فاصله‌ی ۳۴۰ متری از ابتدای پروفیل dd2 با تغییر زمینه مواجـه هسـتیم کـه مطابق با محل گسل‌های اصلی است.



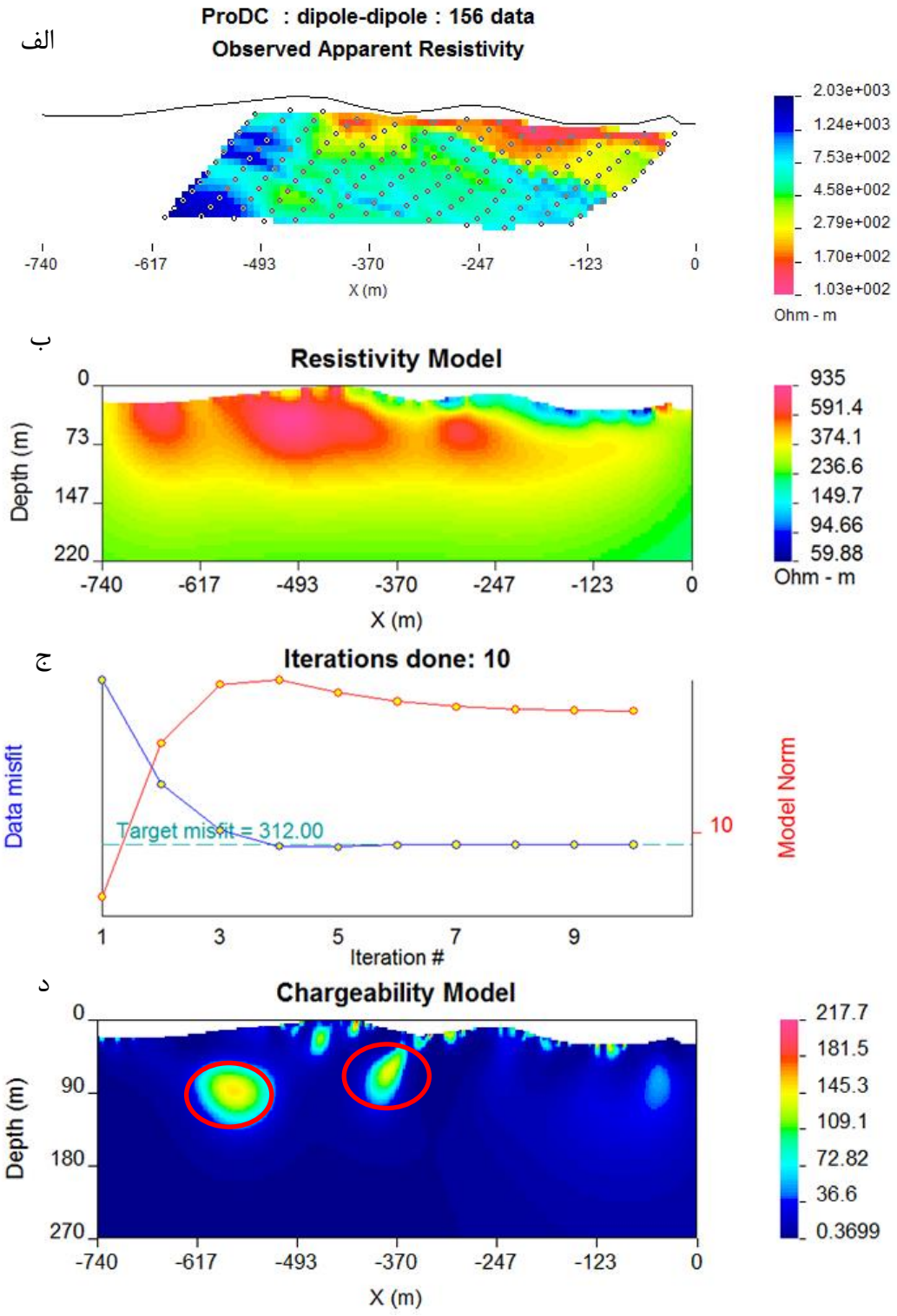
شکل ۴-۷: الف) شبه‌مقطع مقاومت ویژه‌ی ظاهری پروفیلdd1 ب) مدل مقاومت ویژه‌ظاهری پروفیلdd1 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیل



شکل ۴-۸: الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری پروفیلdd2 ب) مدل مقاومت ویژهظاهری پروفیلdd2 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیلdd2

۴-۶-۲-تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل pd3

پروفیل pd3 در محدوده‌ی دو با آزیموت صفر و عمود بر تغییرات زمین‌شناسی با فواصل برداشت بیست متر و پرش ۴۰ متر برداشت شده است. با بررسی مدل بارپذیری شکل (۴-۹-د) و مقایسه‌ی محل پروفیل‌ها با نقشه‌های زمین‌شناسی و آلتراسیون، بی‌هنجاری بارپذیری برروی واحدهای داسیت تا ریوداسیت با دگرسانی سیلیسی به ثبت رسیده است. همچنین با بررسی مدل مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی شکل (۴-۹-الف) در فاصله‌ی ۵۳ تا ۷۴ متر با کاهش مقاومت ویژه همراه هست که با بی‌هنجاری بار پذیری مطاقبت دارد. همچنین در فاصله‌ی ۳۵۸ متری با تغییر ناگهانی زمینه مواجه است که بر محل گسل اصلی منطقه منطبق است. در فواصل ۳۷۰ و ۵۷۵ متری با افزایش بارپذیری مواجه هستیم که هر چند در این نقاط کاهش مقاومت ویژه‌ی چشمگیری نداریم اما می‌توان این موضوع را به سیلیسی بودن ناحیه مورد نظر مربوط دانست.



شکل ۴-۹: الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری پروفیلpd3 ب) مدل مقاومت ویژهظاهری پروفیلpd3 ج) نمودار همگرایی مدل‌ها براساس misfit هدف د) مدل بارپذیری پروفیلpd3

۴-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

روش مقاومت‌ویژه یکی از قدیمی‌ترین روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف است. در ساده‌ترین تعریف، مقاومت (یا خاصیت رسانایی)، توانایی انتقال بار الکتریکی به شکل جریان از مقاطع زمین‌شناسی است. البته، در شرایط عملی، این خاصیت رسانایی با جریان الکتریکی که از دو طریق: الکترونیکی (الکترون های آزاد) و الکترولیت (یون‌ها)، به دست آمده بسیار پیچیده‌تر است. مقاومت پوسته توسط تزریق جریان به زمین با استفاده از آرایه‌ای از الکترودها، و سپس اندازه گیری تغییر حاصل در ولتاژ، در یک آرایه ثانویه از الکترودهای گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. نسبت ولتاژ اندازه‌گیری شده‌ی گیرنده به جریان ورودی نشان دهنده‌ی میزان مقاومت زمین، و همچنین توانایی زمین برای ذخیره بار الکتریکی است [Telford et al., 1990; Zonge et al., 2005]. بسته به نوع کابل و آرایه الکترودی امکان اندازه‌گیری مقاومت ظاهری با تفکیک‌پذیری متفاوت و در اعماق مختلف برای اهداف خاص وجود دارد. عمق بررسی بر اساس نوع آرایه و مقاومت زیر سطحی متفاوت خواهد بود. علاوه بر این، کانال‌های جریان و قطبش الکترودی، ویژگی‌های مربوط به تماس بشر با طبیعت (مانند خطوط برق، خطوط لوله، نرده های فلزی، و غیره) می‌توانند در برداشت‌های الکتریکی و نتایج‌شان تاثیر گذارند. در معکوس‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه، مقاطع مقاومت‌ویژه به عنوان تابعی از عمق نمایش داده می‌شوند[John, et al., 2010] .

قطبش‌القایی یک پدیده‌ی پیچیده است. در ساده ترین تعریف، ناهنجاری‌های IP منعکس کننده‌ی توانایی یک ماده معدنی یا سنگ به عنوان یک خازن الکتریکی هستند. در کانسارهای مس پورفیری، قوی‌ترین پاسخ IP با تغییر کوارتز سریسیت-پیریت [Thoman, et al., 2000] ارتباط دارد. به طور معمول، منطقه‌ی دگرسانی پتاسیک در هسته‌ی ذخیره دارای سولفید کمتر است، منطقه‌ی اطراف با دگرسانی سرسیتیک دارای محتوای سولفید بالاتر، از جمله پیریت، و منطقه‌ی دورتر با دگرسانی پروپلیتیک حاوی مقادیر کمی از پیریت است. بنابراین، زون سرسیتیک هدف مهم IP است.

برداشت IP اساسا استفاده از همان روش مقاومت الکتریکی است اما همراه با پارامتر های اضافی.

در پژوهش حاضر مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی با تعداد تکرار مشخص، شکل‌های (۴-۷-ج)، (۴-۸-ج) و (۴-۹-ج)، در نرم‌افزار DCIP2D انجام شد و با توجه به میزان قابل‌قبول برازش مدل‌ها به داده‌های واقعی (حدنصاب misfit برابر با تعداد داده‌هاست) و وجود رابطه‌ی معکوس قابل قبول بین مدل‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی، نتایج به منظور بررسی‌های بیشتر قابل اعتماد هستند.

فصل پنجم

مدل سازی پتانسیل معدنی مس

در منطقه ی مورد مطالعه

۵-۱- مقدمه

ترکیب و تلفیق در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به معنی هماهنگ نمودن داده‌های متفاوت از منابع مختلف است. اغلب داده‌هایی که در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند، از منابع مختلف تهیه و در قالب‌های متفاوت ذخیره می‌شوند. در محیط GIS امکاناتی فراهم شده تا بتوان داده‌های متفاوت جمع‌آوری شده را با یکدیگر مقایسه و ترکیب نمود. به علاوه هنگامی که مجموعه‌ای از داده‌های مکانی از منابع گوناگون با هم آمیخته می‌شوند، درک و تفسیر پدیده‌های مکانی نیز میسّر می‌گردد در صورتی که وقتی این داده‌ها به صورت مجزا و جداگانه در نظر گرفته شوند، روابط فضایی بین آنها به راحتی آشکار نمی‌شوند. یکی از ویژگی‌های قدرتمند GIS، توانایی ترکیب و تلفیق چندین نقشه به کمک عبارات جبری و ریاضی ساده یا پیچیده می‌باشد [یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹]. GIS به کمک اندازه‌گیری و محاسبات آماری بر روی داده‌های مکانی، مدل‌های متنوعی جهت تجزیه و تحلیل پدیده‌های مکانی ارائه می‌نماید. هدف اصلی و نهایی از انجام مطالعات به کمک GIS، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری می‌باشد. با توجه به داده‌های مکانی موجود و وجود همبستگی بین متغیرها در این داده‌ها، شرایط موجود مدل‌سازی شده و با استفاده از آن امکان تشخیص بهترین مکان جغرافیایی برای هدفی خاص، پیش‌بینی می‌شود. کاربرد و هدف نهایی GIS در اکتشاف، مدل‌سازی به منظور شناسایی و پیش‌بینی موقعیت‌های مکانی و جغرافیایی خاصی است که در آنها شرایط ویژه‌ای از نظر کانسارسازی صدق می‌کند.

در این بخش به انواع روش‌های مدل‌سازی و مراحل آماده‌سازی داده‌های مختلف اکتشافی در منطقه مورد مطالعه جهت ورود به GIS و تشریح یکی از مهمترین روش‌های مدل‌سازی برای اکتشاف و تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی مس پرداخته می‌شود.

۵-۲- مدل‌سازی و تهیه نقشه‌ی پتانسیل معدنی در GIS

یکی از توانایی‌های مهم و اصلی در GIS ترکیب لایه‌های مختلف مرتبط با علوم زمین به منظور

تهیه نقشه های پتانسیل معدنی می‌باشد که در آن مناطق مطلوب برای اکتشاف کانسارها مشخص شده است [Harris et al., 2001].

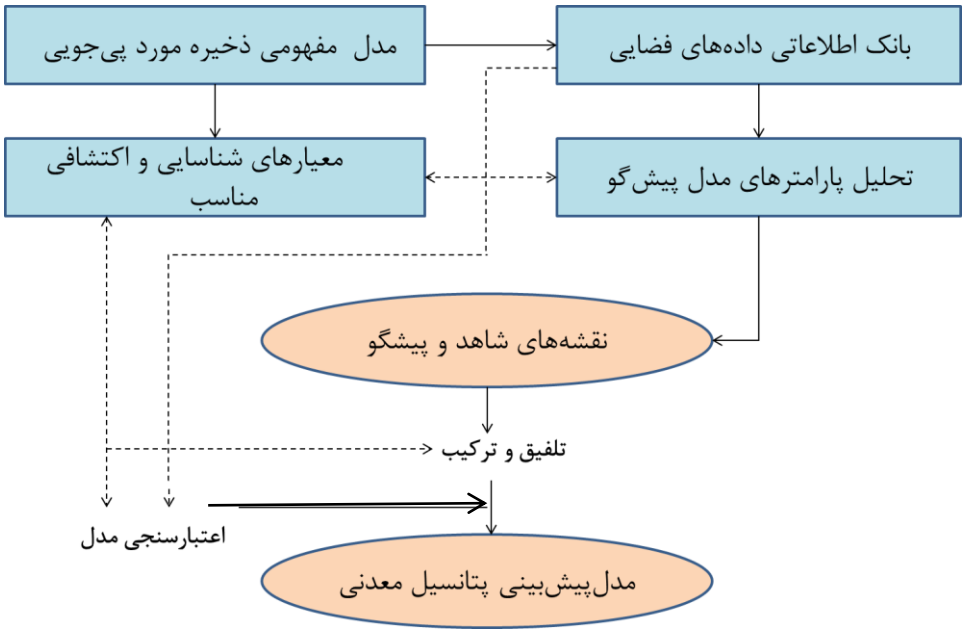
نقشه‌برداری ذخایر معدنی مستعد (MPM) [1] و ارزیابی منابع معدنی (MRA) [2] دو بخش مهم از مراحل مدل‌سازی پیشگو[3] یا پیش‌بینی کننده برای استخراج اطلاعاتی می‌باشند؛ که جهت برنامه‌ریزی‌های اساسی در اکتشاف کانسارها و توسعه منابع معدنی ضروری می‌باشند. هدف از MPM ارائه مدلی برای پیش‌بینی و یا احتمال وجود کانسارهای مورد پی‌جویی، بدون در نظر گرفتن ذخیره و عیار آن‌هاست؛ که مترادف واژه‌های پتانسیل معدنی[4] و مطلوبیت معدنی[5] می‌باشد[Bonham-Carter, 1994؛ Pan et al., 2000 ؛ Carranza, 2008 ؛ Carranza et al., 2010]. مشخص کردن مناطقی که از نظر زمین‌شناسی احتمال وجود ذخایر معدنی در آن‌جا وجود دارد و ارزیابی مقدار فلزات در این مناطق خاص زمین‌شناسی که می‌توانند تشکیل ایالات وکمربندهای فلززایی را بدهند و همچنین تخمین مقدار ذخایر ناشناخته در هر کدام از این مناطق کانی‌زایی از اهداف MRA می‌باشد. بنابراین هدف اصلی و مشترک MPM و MRA توصیف و تشریح پتانسیل مناطق مختلف زمین برای اکتشاف انواع کانسارها می‌باشد [Carranza, et al., 2010].

احتمال وجود ذخایر معدنی بستگی به وجود شواهدی دارد که در مورد ویژگی‌های کانسارهای مختلف مطرح می‌شود؛ زیرا تشکیل یک نوع کانسار بستگی به فراهم بودن شرایط مناسب و حضور شواهد مشخصی از جمله بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و شرایط خاص زمین‌شناسی دارد. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مناطق هدف، باید توجه داشت که اگر در یک مکان خاص شواهد و خصوصیات مشابه یک کانسار شناخته شده که مورد پی‌جویی می‌باشد وجود داشت، این محل باید مورد اکتشافات بعدی و دقیق‌تر قرار گیرد. همچنین اگر در یک محل الگوهای پیش‌بینی کننده و

1 -Mineral prospectivity mapping (MPM)
2 -Mineral resource assessment (MRA)
3 -Predictive modeling
4 -Mineral potential
5-Mineral favorability

شاهد بیش از محل‌های دیگر باشد؛ احتمال کانسارسازی در آن محل بیشتر است [Carranza, 2008].

مدل‌های پتانسیل معدنی با ترکیب و تحلیل شواهد به دست آمده از داده‌های اکتشافی مختلف به تعیین رتبه‌بندی نواحی امیدبخش، به منظور اکتشاف ذخایر کشف نشده می‌پردازند. مدل‌سازی پتانسیل معدنی در هر مقیاسی از شناسایی مناطق هدف، از ناحیه‌ای تا محلی، به دنبال تعیین و تعریف یک مدل ذهنی و مفهومی از کانسارهای مورد پی‌جویی، انجام می‌گیرد. تعریف یک مدل مفهومی، برای یک نوع ماده معدنی مورد اکتشاف (مثل بوکسیت)، نیازمند داده‌ها و اطلاعات موجود از انواع مختلف فرایندهای زمین‌شناسی مربوط به ذخایر معدنی هم‌نوع با ذخیره مورد پی‌جویی دارد. بنابراین مطالعه و بررسی مدل‌های این کانسارهای شناسایی شده در منطقه مطالعاتی و شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی آن‌ها بسیار مهم است [Carranza, 2008 ؛ Berger et al., 2002]. شکل (۵-۱) نمایی از فرآیند تهیه‌ی مدل پتانسیل معدنی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱: فرآیند تهیه مدل پتانسیل معدنی [After Carranza, 2008]

روش‌های استخراج الگوهای پیشگو از میان شواهد مختلف و ترکیب و تلفیق کلیه الگوهای پیشگو و همچنین روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی بسیار گسترده و متنوع می‌باشند. این روش‌ها

به دو گروه اصلی داده‌محور[1] و دانش‌محور[2] تقسیم می‌شوند. تخصیص وزن در این روش‌ها بر اساس همراهی مکانی کانسارهای همنوع با ذخایر مورد پی‌جویی بر اساس معیارهای اکتشافی صورت می‌گیرد [Harris, et al, 2001 & Bonham-carter, 1994]

در اکتشافات اولیه مواد معدنی عموماً از تلفیق نتایج روش‌های مختلف اکتشافی به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی و تعیین نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. ولی با کوچک شدن محدوده مورد مطالعه و بزرگ شدن مقیاس، به دلیل نبود روش‌های وزن‌دهی مناسب و همچنین نبود تنوع داده (از لحاظ روش‌های مختلف اکتشافی) در این مقیاس نقش تلفیق داده‌ها (با استفاده از روش‌های مدل‌سازی داده‌محور و دانش‌محور) کم‌رنگ می‌گردد که خود موجب عدم ثبات در تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب نقاط حفاری نهایی می‌گردد. علی‌رغم مسائل فوق، منطقی است که تعیین زون‌های غنی شده به منظور انتخاب نقاط حفاری در مراحل اکتشافات بزرگ مقیاس نیز بر اساس حضور هم‌زمان شواهد و معیارهای مختلف اکتشافی صورت‌گیرد. در این خصوص مسئله اساسی نحوه بررسی و مقایسه هم‌زمان نتایج روش‌های مختلف اکتشافی و تلفیق آنها به منظور تعیین نواحی هدف برای حفاری است. در تحقیق حاضر با فرض اینکه روش‌های تلفیق موجود در مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مقیاس ناحیه‌ای، همچنان قابلیت استفاده در مقیاس محلی را دارند، از این روش‌ها در وزن‌دهی، تلفیق نتایج پردازش و تفسیر داده‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و مغناطیس و در نهایت تولید یک نقشه و مدل پیشگو به منظور تعیین زون‌های غنی شده کانی‌سازی مس پورفیری و پیشنهاد نقاط حفاری استفاده شده‌است.

۵-۳- نحوه‌ی انتخاب معیارها

در عمل، کمی نمودن همراهی فضایی بین ذخایر معدنی از نوع مورد جستجو و الگوها، شواهد و منظرهای زمین‌شناسی، به خصوص در مراحل اولیه اکتشاف، بر اساس مدل‌سازی دانش‌محور، مشکل

1- Data-driven techniqes
2- Knowledge driven techniques

است. این مشکل وقتی بیش‌تر نمایان می‌شود که فقط یک نقشه زمین‌شناسی از نواحی تقریبا بکر(به اصطلاح نواحی سبز) موجود باشد که در آن‌ها ذخایر شناخته شده وجود نداشته یا تعداد آن‌ها بسیار کم باشد. علاوه بر این، اکتشاف شناسایی و اولیه عموما بیش‌تر روی نشانه‌های زمین‌شناسی وقوع ذخایر تمرکز دارند تا بر روی نوع خود ذخیره مورد انتظار. بنابراین به نقشه درآوردن مناطق امیدبخش که ممکن است برای راهنمایی در اکتشافات بیش‌تر استفاده گردد، با مسئله نحوه تولید و تلفیق مهمترین شواهد پیش‌گوی زمین‌شناسی ذخایر معدنی مورد پی‌جویی مواجه است. انتخاب اینکه کدام نوع از منظرهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد،به میزان سطح اطلاعات و تجربه در مورد انواع ذخایر احتمالی که در ناحیه مورد پی‌جویی وجود دارد، برمی‌گردد. بنابراین داشتن سطح اطلاعات و دانش خوب از ویژگی‌های عمومی ذخایر معدنی و محیط ساختمانی (زمین‌شناسی ساختمانی) آن‌ها در روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی ضروری است [Carranza, 2008]. با توجه به هدف پژوهش پیش رو که تهیه‌ی مدل پتانسیل معدنی با مقیاس بزرگ است و از انجایی که معیارهای اکتشافی که توصیفی از ذخیره هستند، براساس تغییر مقیاس منطقه عوض می‌شوند (مثلا از دگرسانی آرژیلیک در یک منطقه‌ی کوچک نمیتوان به عنوان یک معیار اکتشافی مس پروفیری استفاده کرد، چرا که قسمت اعظمی از منطقه را پوشش می‌دهد و تعیین نقاط امید بخش بر اساس آن امکان پذیر نیست.)، نیاز است بر اساس مدل مفهومی از ماده‌ی موردنظر که با تغییر مقیاس تغییر می‌کند عمل کنیم.

۵-۳-۱-مدل مفهومی ناحیه‌ای[1] مس پورفیری (کوچک مقیاس)

با توجه به مدل مفهومی مس پورفیری شکل(۲-۱) چهار زون آلتراسیون پتاسیک، پیروپیلیتیک، آرژیلیک و سرسیت در سیستم‌های مونزونیتی یافت می‌شوند..

زون پتاسیک در بخش فوقانی توده‌های نفوذی و سنگ‌های مجاور توده‌ها قرار دارد و به دلیل

[1] - Regional

این که بخشی از ذخیره مس در آن قراردارد، حائز اهمیت است. زون فیلیک در بالای زون پتاسیک قرار دارد و بخشی از ذخیره در زون سرسیت قرار دارد. زون آرژیلیک در بالای زون سرسیت واقع می‌شود و زون پیروپیلیتیک از خارج ، زون‌های یاد شده را در بر می‌گیرد. بدین صورت که از بالا به زون سرسیت- پیریت و از پایین به زون پتاسیک ختم می‌شود . این زون گسترش نسبتاً زیادی دارد و در کانسارهای بزرگ تا فاصله ۵ کیلومتری ذخیره، آثار آن یافت می‌شود. بدین‌ترتیب زون پتاسیک کوچکترین بخش را شامل می‌شود که به دلیل کوچکی بخشی که شامل می‌شود، در اکتشافات با مقیاس کوچک کاربردی ندارد، اما زون‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک که سطح زیادی از منطقه را می‌پوشانند به عنوان معیارهای اکتشافی مقیاس ناحیه‌ای استفاده می‌شوند. از دیگر معیارهای قابل استفاده در مقیاس ناحیه‌ای وجود توده‌های نفوذی است که توسط روش ژئوفیزیکی مغناطیس هوابرد با درجه تفکیک‌پذیری بالا در مناطق بزرگ قابل شناسایی می‌باشند.

۵-۳-۲-مدل مفهومی محلی[1] مس پورفیری (بزرگ مقیاس[2])

با توجه به مدل مفهومی مس پورفیری ارائه شده در فصل دو همین پژوهش و توضیحات در مورد مدل مفهومی ناحیه‌ای، ذکر این نکته ضروری است که؛ در مدل محلی و در اکتشاف در مقیاس بزرگ، معیارهای اکتشافی عوض شده و باید به دنبال نشانه‌هایی بود که خود در مقیاس بزرگ تشکیل می‌شوند. از جمله این معیارها در اکتشاف مس پورفیری نوع مونزونیتی می‌توان به دگرسانی پتاسیک، بافت استوک ورک، رگه ورگچه‌های سیلیسی و زون‌های برشی اشاره کرد، چرا که، در سیستم‌هایی که در نزدیکی سطح زمین متبلور می‌شوند، فشار بخار آب موجب انفجار و برشی شدن سنگ‌ها خواهد گردید و محلول‌های ماگمایی مواد خود را در فضای بین قطعات برشی بر جای خواهند گذاشت. از این رو برش‌های نفوذی راهنمای بسیار مناسبی برای اکتشاف می‌باشند. همچنین توده‌های

[1] - Local
[2] - Large scale

نفوذی که به شکل استوک در یکدیگر نفوذ کنند و مواد خود را در یک منطقه متمرکز سازند موجب افزایش عیار و میزان ذخیره خواهند گردید. تعداد رگچه‌های کوارتز نیز رابطه مستقیم با عیار ذخیره دارند. وجود کوارتز با بلورهای درشت در توده‌های نفوذی به عنوان نکته‌ای مثبت محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر، با توجه به اینکه در سطح کوچک انجام شده، اگر از معیارهای اکتشافی کوچک مقیاس همچون آلتراسیون‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک یا توده‌های نفوذی استفاده کنیم، از آنجایی که سطح بزرگی از منطقه را پوشانیده‌اند، به هدف خود که مشخص کردن مناطق دارای پتانسیل مطلوب به عنوان مناطق هدف برای اکتشافات بعدی است، دست نمی‌یابیم. از این رو در این سطح از معیارهای بزرگ مقیاس، همچون دگرسانی پتاسیک، بافت استوک ورک، رگه ورگچه‌های سیلیسی، گسل‌ها در مقیاس بزرگ (هرچه مقیاس بررسی بزرگ‌تر شود جزئیات بیشتری از وجود گسل‌ها را در اختیار خواهیم داشت) و برداشت ژئوفیزیکی مغناطیس زمینی بهره بردیم.

۵-۴- منطق فازی جهت تلفیق داده‌های اکتشافی

روش منطق فازی روشی است که در آن لایه‌های مختلف در سطوح مختلف، وزن دهی شده و دانش کارشناسی در آن دارای بیشترین نقش می‌باشد. در این روش، عوامل مختلف کنترل کننده کانی‌سازی از جمله سنگ میزبان، ساختارها، بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و بررسی‌های دورسنجی و کارهای قدیمی انجام شده تعیین می‌گردند و به هر لایه اطلاعاتی (عضو فازی) وزن خاصی بین صفر تا یک بسته به اهمیت آن داده می‌شود. عدد یک نشان‌دهنده درجه عضویت فازی کامل و عدد صفر نشان دهنده عدم وجود عضویت فازی می‌باشد. در بعضی از لایه‌ها، با توجه به شعاع تاثیر آنها، ممکن است تا چندین متر اطراف لایه مورد نظر با توجه به شعاع تاثیر وزن‌دهی شوند [پشنگ، ۱۳۹۱].

پنج عملگر که برای ترکیب داده‌های اکتشافی سودمند هستند، توسط آن[1] و همکاران (۱۹۹۱) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این عملگرها عبارتند از: عملگر فازی AND، عملگر فازی OR، حاصل

[1] An

ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و عملگر فازی گاما؛ [An et al., 1991].

بعد از تعیین فاکتورهای کنترل کننده کانی‌سازی، به‌وسیله عملگرهای فازی موجود که در ادامه معرفی می‌گردند، لایه های اطلاعاتی مورد نظر تلفیق می‌شوند.

۵-۴-۱-عملگر فازی " و"

این عملگر مانند عملگر AND در منطق بولین عمل می‌کند و نقشه خروجی با کوچک‌ترین مقدار عضویت فازی کنترل می‌شود و یک نتیجه محافظه کارانه از مجموعه عضویت‌ها ارائه می‌دهد .

$$\mu_{combination}=Min(\mu_A , \mu_B , \mu_C ,\dots) \qquad (۱-۵)$$

که در آن μ_A مقدار عضویت فازی برای نقشه A می‌باشد. عملیات عملگر "و" در مواقعی که دو یا چند قسمت از مدارک و شواهد، برای اثبات فرضیه‌ای باید با هم وجود داشته باشند، مناسب است [پشنگ، ۱۳۹۱].

۵-۴-۲- عملگر فازی " یا "

این عملگر نیز همانند عملگر OR در منطق بولین است و نقشه خروجی با بیشترین مقدار از مقادیر نقشه‌های ورودی کنترل می‌شود.

$$\mu_{combination}=Max(\mu_A , \mu_B , \mu_C ,\dots) \qquad (۲-۵)$$

این عملگر در برخی موارد برای تهیه نقشه‌های پتانسیل به کار می‌رود. در جاهایی که شاخص‌های مورد نظر کمیاب هستند و حضور نشانه می‌تواند برای اظهار مطلوبیت کافی باشد [پشنگ، ۱۳۹۱].

۵-۴-۳- حاصل‌ضرب جبری فازی:

این عملگر به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\mu_{combination} = \prod_i^n \mu_i \qquad (۳-۵)$$

که در آن i مشخصه و شمارنده تعداد نقشه‌ها است. چون در این تابع چندین عـدد کـوچکتر از یک در هم ضرب می‌شوند، مقدار عضویت به دست آمده همواره کوچکتر یا مساوی کوچکترین مقـدار عضویت مشترک می‌باشد. به عبارت دیگر اثر این عملگر کاهنده است [پشنگ، ۱۳۹۱].

۵-۴-۴-عملگر فازی جمع جبری

این عملگر مکمل حاصل‌ضرب جبری فازی است و به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - \mu_i) \qquad (۴-۵)$$

نتیجه خروجی همیشه بزرگتر یا مساوی بزرگترین مقدار عضویت فازی می‌باشـد و بـر عکـس عملگر فازی حاصلضرب جبری، اثر آن افزایشی است. در واقع شواهد همـدیگر را تقویـت مـی‌کننـد و تأثیر مثبت بیشتری را نسبت به حالت انفرادی خود اعمال می‌کنند [پشنگ، ۱۳۹۱].

۵-۴-۵- عملگر فازی گاما

این عملگر به صورت زیر بیان می شود :

$$\mu_{combination} = (\prod_{i=1}^{n} \mu_i)^{1-\gamma} (1 - \prod_{i=1}^{n} (1-\mu_i))^{\gamma} \qquad (۵-۵)$$

عملگر فازی گاما، ترکیبی از عملگر فازی حاصلضرب جبری و عملگر فازی حاصل جمع جبـری می‌باشد که در آن پارامتر گاما در محدوده صفر تا یک انتخاب می‌گردد. به‌طوری‌که اگر گاما یک باشد، ترکیب همان حاصل جمع جبری خواهد بود و اگر گاما صفر باشد، ترکیب مساوی حاصل ضرب جبری است. انتخاب صحیح و آگاهانه گاما، مقدارهایی در خروجی به وجود می‌آورد که نقش فزآینـده جمـع جبری فازی و نقش کاهنده ضرب جبری فازی در آن عمل می‌کند و کل مجموعه را به حالـت تعـادل می‌رساند.

به وسیله عملگر گاما تمامی مجموعه‌هایی که با عملگرهای دیگر به دست آمده‌اند با هم ترکیب و نقشه خروجی حاصل می‌شود. در پروژه‌های اکتشافی مقادیر تابع فازی گامای محاسبه شده، نشان‌دهنده‌ی محل‌های مناسب کانی‌زایی و معرف میزان ارتباط بخش‌های محتمل کانی‌سازی شده به بخش‌های مختلف منطقه خواهد بود [پشنگ، ۱۳۹۱].

لازم به ذکر است که در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پس از ایجاد پایگاه داده‌ها در مرحله‌ی پردازش اطلاعات ، اطلاعات مستخرج از پایگاه داده‌ها نظیر؛ واحدهای سنگ‌شناسی، واحدهای دگرسانی و همچنین داده‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای وارد کردن داده‌های ذکر شده با استفاده از فرآیند تلفیق، لازم است که ابتدا هر کدام از داده‌ها دسته‌بندی شده و به هر دسته امتیازی بین صفر تا یک تعلق گیرد.

۵-۵- مدل منطق فازی داده محور

تشکیل هر تیپ ذخیره معدنی به فرآیندها و ساختارهای زمین‌شناسی مشخصی وابسته است. مطالعه تفصیلی و کمی فرآیندهایی که در آن‌ها یک متغیر وابسته (کانی‌سازی) به وسیله تعدادی متغیر مستقل (گسل‌ها، توده‌های نفوذی و غیره) کنترل می‌شود، با استفاده از رگرسیون[۱] قابل اجراست. اساس روش رگرسیون لجستیکی [۲]همان رگرسیون چند متغیره معمولی است. مدل‌های رگرسیون چند متغیر می‌توانند در نقشه‌برداری پتانسیل معدنی برای شناسایی همراهی احتمالی نقاط دارای ذخایر معدنی، از نوع مشخص، به کار برده شوند. در روش رگرسیون، وزن‌ها، و میزان اهمیت الگوهای مختلف نقشه‌های شاهد بر اساس توزیع فضایی نمونه‌های آموزشی (نه قضاوت شخصی) در جاهایی که مجموعه نقاط آموزشی در دسترس هستند محاسبه می‌شود. نمونه‌های آموزشی مکان (نقاط) واقعی پدیده مورد پی‌جویی را نشان می‌دهند. رابطه کلی رگرسیون چندمتغیره در معادله (۵-۶) نشان داده شده است.

[11] - Regression
[22] - Logistic regression

$$p = a_0 + a_1 x_1 + \cdots + a_n x_n \qquad (۶-۵)$$

مسئله‌ای که در رگرسیون چندمتغیره معمولی وجود دارد این است که متغیر جواب، پیوسته بوده و بدون حد ومرز می‌باشد. بنابراین رگرسیون چند متغیره معمولی روش مناسبی برای پیش‌بینی احتمال وقوع یک رویداد دوتایی (یعنی حضور یا عدم حضور کانی‌سازی)، بر اساس ارزش‌های متغیرهای مختلف (ارزش نقشه‌های شاهد) در محل‌های مشخص و مناطق مختلف نیست. در واقع مسئله این است که در حالاتی که متغیر جواب دوتایی است (حضور یا عدم حضور)، متغیر پیش‌گوی جواب باید بین ۰ و ۱ باشد تا حالت احتمالی در نظر گرفته شود.(زیرا احتمال بین ۰ و ۱است) در حالی که در معادله رگرسیون چندمتغیره رابطه (۵-۶)، p می‌تواند هر مقداری را به خود بگیرد و مقادیر خارج از بازه ۰ و ۱ در بیان احتمالی رخدادها به کار نمی‌روند و نامناسب هستند. برای یک سلول (سلول واحد) مشخص از یک نقشه، در رابطه (۵-۶)، p احتمال حضور یک پدیده می‌باشد. X_i ها شاهد و همچنین α_i ارزش و وزن هر شاهد می‌باشد. در این حالت برای حل مشکل می‌توان از لگاریتم نسبت وقوع یک پیشامد، که لجیت[1] نامیده می‌شود، استفاده نمود و تابع لجستیکی Logit(p) را به صورت رابطه (۵-۷) تعریف نمود [Cox and Snell, 1989].

$$Logit(p) = \ln(\frac{p}{1-p}) \qquad (۷-۵)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۵-۷)، رابطه (۵-۸) به صورت زیر قابل نتیجه‌گیری است:

$$e^{Logit(p)} = \frac{p}{1-p} \qquad (۸-۵)$$

اگر در حالت لجستیکی به جای ضرایب a_i از ضرایب b_i استفاده شود، رابطه (۵-۶) می‌تواند به صورت رابطه (۵-۹) نوشته شود:

$$Logit(p) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_n x_n \qquad (۹-۵)$$

[1] - Logit

بنابراین با قرار دادن رابطه (۵-۹) در رابطه (۵-۸)، طبق روابط (۵-۱۰) و (۵-۱۱) احتمال تجربی قابل محاسبه خواهد بود:[Daneshfar et al., 2006]

$$\frac{p}{1-p} = e^{(b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_nx_n)} \qquad (۵-۱۰)$$

$$p = \frac{e^{(b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_nx_n)}}{1+e^{(b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_nx_n)}} \qquad (۵-۱۱)$$

در این حالت یعنی در رابطه (۵-۱۱)، p یک عدد احتمالی بین ۰ و ۱ خواهد بود که با استفاده از آن یک معیار خوب و احتمالی برای سنجش میزان احتمال حضور یک نوع کانی‌سازی خاص بر اساس شواهد مختلف قابل محاسبه می‌باشد. این مقدار می‌تواند به نقشه تبدیل شده و برای شناسایی مناطق امیدبخش مورد استفاده قرار گیرد.

تابع تبدیل لجستیک نقش مهمی را در بسیاری از الگوریتم‌های کلاس‌بندی و تشخیص الگو مانند آمار، شبکه‌های عصبی، یادگیری ماشین و سیستم‌های پیشرفته [Micheli-Tzanakou, 1999; Berthold and Hand, 2002; Alpaydm, 2004; Fink, 2007] ایفا کرده است [Bishop, 2006]. به طور مثال [Nykänen, et al., 2008] از نوعی از تابع لجستیک جهت عدم استفاده از داده‌های فضای گسسته در معیارهای اکتشافی مدل پتانسیل معدنی استفاده کرد. اخیرا؛ یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) تبدیل خطی و غیر خطی داده‌های مشاهده‌ای را با استفاده از تابع لجستیک مقایسه کردند و ثابت کردند که نوع غیرخطی، رابطه (۵-۱۲) در فازی‌سازی نقشه پتانسیل معدنی بهتر عمل می‌کند. تعداد زیادی توابع لجستیک وجود دارند که می‌توانند برای تبدیل داده‌ها به فضای لجستیک بر اساس حداقل و حداکثر ارزش داده‌ها و تغییرات شیب آن‌ها مورد استفاده قرار بگیرند[Theodoridis and Koutroumbas, 2006]. بر این اساس توابع لجستیک مختلف اما مناسبی برای تبدیل مقادیر شاهد به بازه‌ی [0,1] که منطق فازی MPM را حمایت می‌کند استفاده می‌شود[Carranza and Hale, 2002b; Carranza,2008; Porwal et al.,2003, 2006; Theodoridis and Koutroumbas,2006; Yousefi et al.,2012, 2013, 2014]

۵-۵-۱-تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته

برای فازی‌سازی داده‌های شاهد فضای پیوسته، ابتدا داده‌ها را تحلیل کرده و بر اساس مدل مفهومی بزرگ مقیاس مس پورفیری نقشه‌های مورد نیاز را (مانند نقشه‌ی فاصله تا دگرسانی‌های مورد نظر، نقشه‌ی چگالی گسل[1]و...)، که به عنوان عوامل ساختاری نقش کنترل کننده‌ای بر روی کانی‌سازی مس پورفیری دارند، از نقشه‌ی اصلی استخراج می‌کنیم. مقادیر پیوسته در نقشه‌های منتج شده (مانند فاکتور ارائه امتیاز چند المانی نشانه‌های ژئوشیمیایی، چگالی گسل و فاصله تا توده‌های نفوذی) [Yousefi and Carranza, 2014] بین [0,1] قرار نمی‌گیرد و بنابراین برای فازی سازی MPM مناسب نیستند. از آنجائیکه هدف اصلی MPM طبقه‌بندی مناطق؛ با اولویت دارا بودن بالاترین میزان پتانسیل مناطق هدف، برای اکتشافات بعدی، مناطق مابین و مناطق با اولویت پایین برای معدن‌کاوی است. لذا، مدل پتانسیل معدنی به عنوان یک مدل طبقه‌بندی ترسیم می‌شود. تبدیل داده‌ها (مانند سیستم دودویی[2]، ارائه به صورت چند کلاسه و فازی سازی مقادیر پیوسته) مجموعه‌ای از مقادیر با قابلیت تفکیک آسان را فراهم می‌کند که احتمال خطا را کمتر می‌کنند [Tzanakou, 1999]. تعریف یک تبدیل غیرخطی مناسب، به یک فضای جدید در مقایسه با فضای قبلی، تفسیر الگو (مثل پراکندگی الگوی المان شاخص ژئوشیمیایی) را برای مجموعه‌ای از مقادیر شاهد در MPM، ساده‌تر می‌کند .[Bishop, 2006; Yousefi et al., 2014]. براین‌اساس با تبدیل داده‌های پیوسته با استفاده از تابع سیگموئید لجستیک[3](تابع S شکل) که یک مرز تصمیم‌گیری بهینه برای کلاس‌بندی فراهم می‌کند[Bishop, 2006]، همه‌ی فضای داده‌ها را در یک فاصله محدود بین [0,1] ترسیم کردیم.

در این پژوهش، برای تبدیل چگالی گسل، فاصله از دگرسانی‌های مختلف و رگه‌ها و مقادیر مغناطیس باقیمانده به درون بازه‌ی [0,1] از تابع لجستیک زیر استفاده شده‌است [Yousefi and

[1] - Fault density
[2] - Binary
[3] - Logistic sigmoid function

[Carranza, 2014

$$F_X = \frac{1}{1+e^{-s(x-i)}} \qquad (۱۲-۵)$$

که در آن Fx امتیاز منطق فازی، X مقداری است که باید به عنوان ورودی داده شود (مانند عکس فاصله تا دگرسانی‌ها، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده) وs و i به ترتیب، شیب و نقطه‌ی خمیدگی تابع s شکل هستند، که طبق جدول(۵-۱) بر اساس بیشینه و کمینه‌ای که برای امتیاز فازی در نظر گرفته شد، به‌دست‌آمدند. همانطور که گفته شد، برای فازی‌سازی ابتدا نقشه‌های فواصل از شواهد مکانی، تولید شده، سپس برای کمک به درک بهتر از محل کانی‌سازی و تخصیص امتیاز فازی، از نقشه‌های عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک استفاده می‌کنیم، بدین صورت که کمترین فاصله از شواهد ذکر شده دارای بیشترین امتیاز فازی هستند، اما از آنجایی که در نقشه‌ی عکس فاصله، مکانی که محل قرارگیری خود عارضه است فاصله‌ی صفر دارد و معکوس آن (۱/۰) وجود ندارد با استفاده از عمگر شرطی (رابطه۵-۱۳) در نرم‌افزار ArcGis، برای محل قرارگیری عارضه نیز بالاترین امتیاز را تخصیص می‌دهیم. همچنین در رابطه با نقشه‌ی چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده نیازی به معکوس کردن نیست چراکه بالاترین ارزش در آن‌ها دارای بالاترین امتیاز فازی است.

Con(IsNull([Raster]), 0.99, [Raster]) (۱۳-۵)

جدول ۵-۱ : مقادیر s و i حاصل از تابع (۵-۱۲) براساس کمترین و بیشترین وزن فازی ۰.۰۱ و ۰.۹۹

نام لایه	کمترین مقدار (عکس فاصله(m)، چگالی گسل، مغناطیس(nT))	بیشترین مقدار (عکس فاصله(m)، چگالی گسل، مغناطیس(nT))	S	I
رگه‌ها	۰.۰۰۱۴۰	۰.۷۵۱۸۸	۱۲.۲۴۵۸	۰.۳۷۶۶
استوک ورک	۰.۰۰۱۲۲	۰.۷۵۱۸۸	۱۲.۲۴۲۹	۰.۳۷۶۵

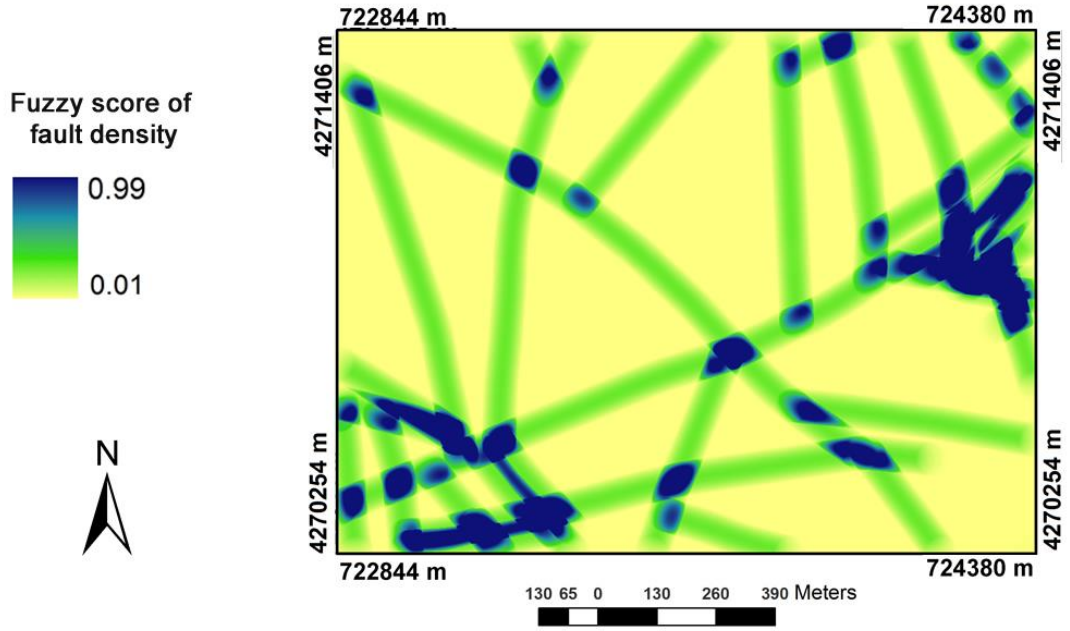
دگرسانی پتاسیک	۰.۰۰۰۸۴	۰.۷۵۱۸۸	۱۲.۲۳۶۷	۰.۳۸۰۰
مغناطیس باقیمانده	-۸۶۱.۷۶۱۹۶	۱۲۰۳.۰۸۰۰۸	۰.۰۰۴۵	۱۷۰.۶۵۹۱
چگالی گسل	۰	۰.۰۶۳۶۵	۱۴۴.۳۷۹۴	۰.۰۳۱۸

به منظور مدل‌سازی ابتدا منطقه‌ی مورد مطالعه به سلول‌های دارای سطح برابر، شبکه‌بندی می‌شود. این شبکه‌بندی برای تمام نقشه‌های شاهد باید به صورت شبیه به هم (سلول‌های هم سطح) صورت گیرد. در این پژوهش سایز سلول‌ها برای تمامی نقشه‌ها حدودا ۲ m بر اساس تابع (۵-۱۴) [Hengl, 2006] در نظر گرفته شده است.

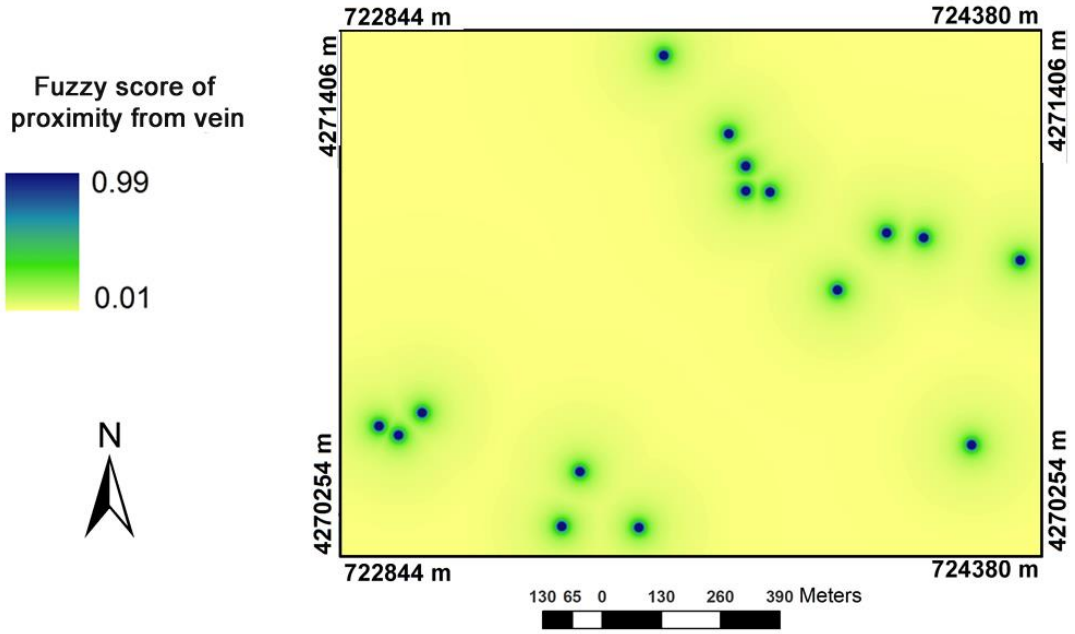
$$\text{Cell size} \geq 0.05 * \sqrt{\frac{a}{n}} \qquad (۱۴-۵)$$

که در آن a مساحت منطقه و n تعداد داده‌هاست. همچنین مدل‌های پتانسیل معدنی با روش‌های مذکور، به دلیل عدم وجود شواهد کافی در مقیاس محلی برای محدوده‌ی دو، تنها برای محدوده‌ی ۱ به‌دست آمده است. همچنین با توجه به بزرگ مقیاس بودن منطقه‌ی مورد بررسی، در نقشه‌های وزن‌دهی، عکس فواصل تا مرکز پلی‌گون[1]ها در نظر گرفته شده است.

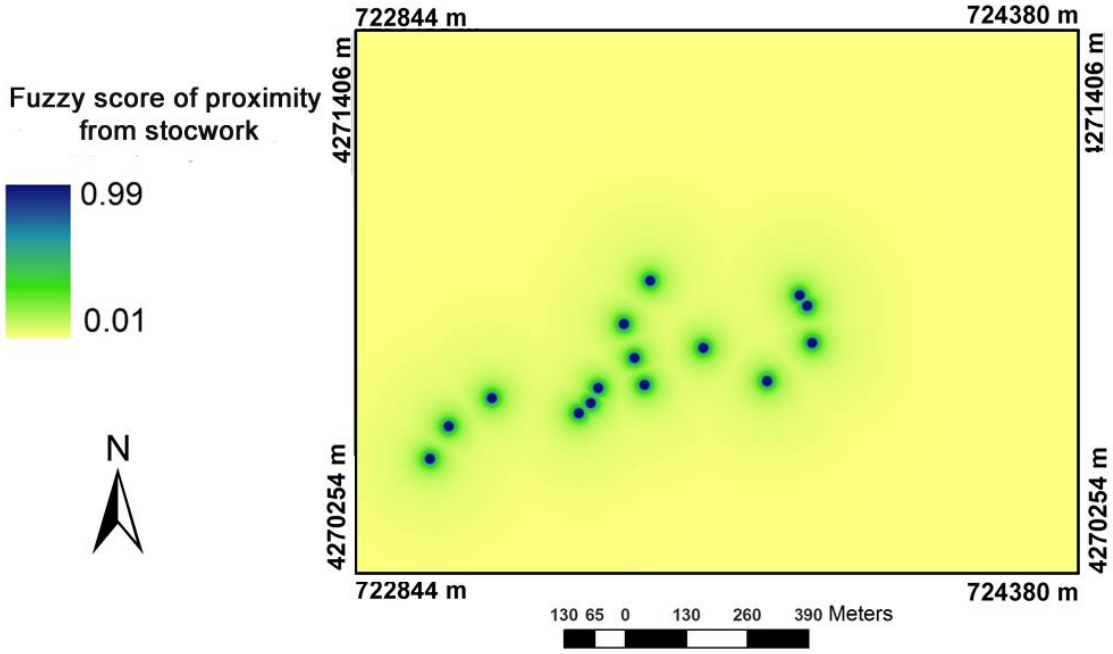
[1] - Polygon



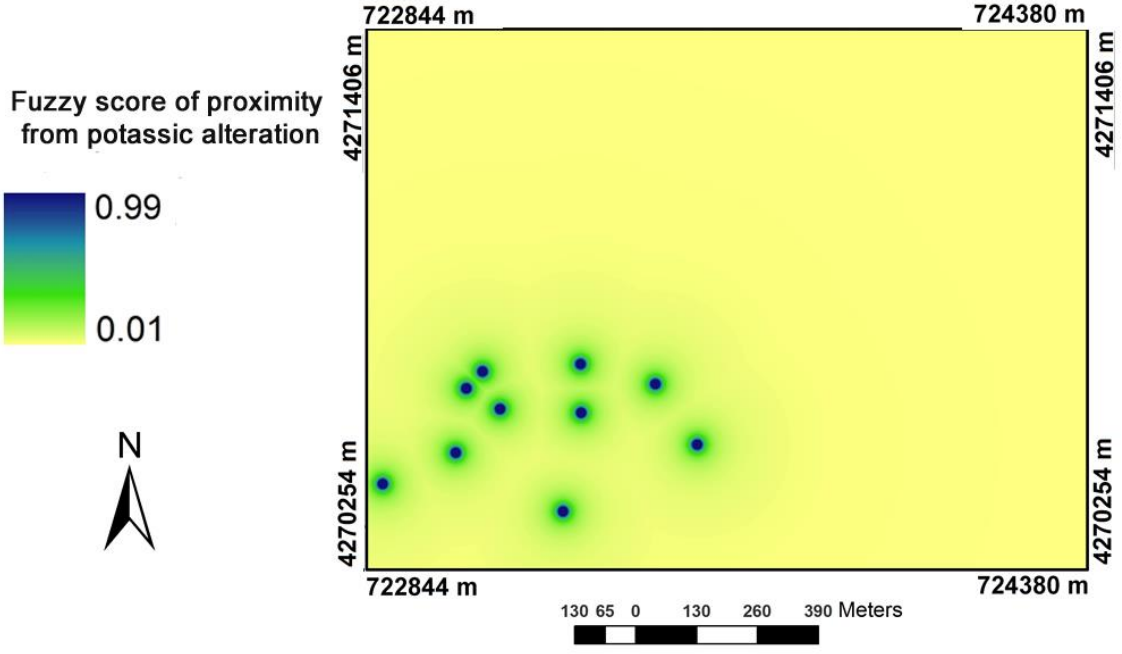
شکل ۵-۲: نقشه‌ی امتیاز فازی چگالی گسل



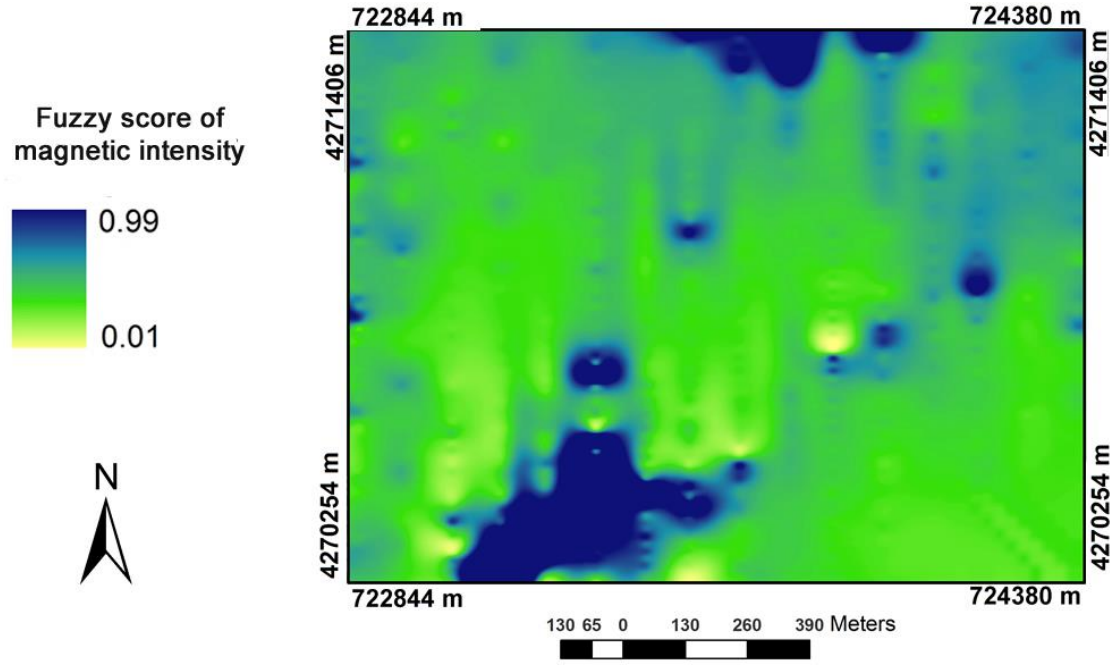
شکل ۵-۳: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا رگه سیلیسی (vein)



شکل ۵-۴: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا استوک ورک



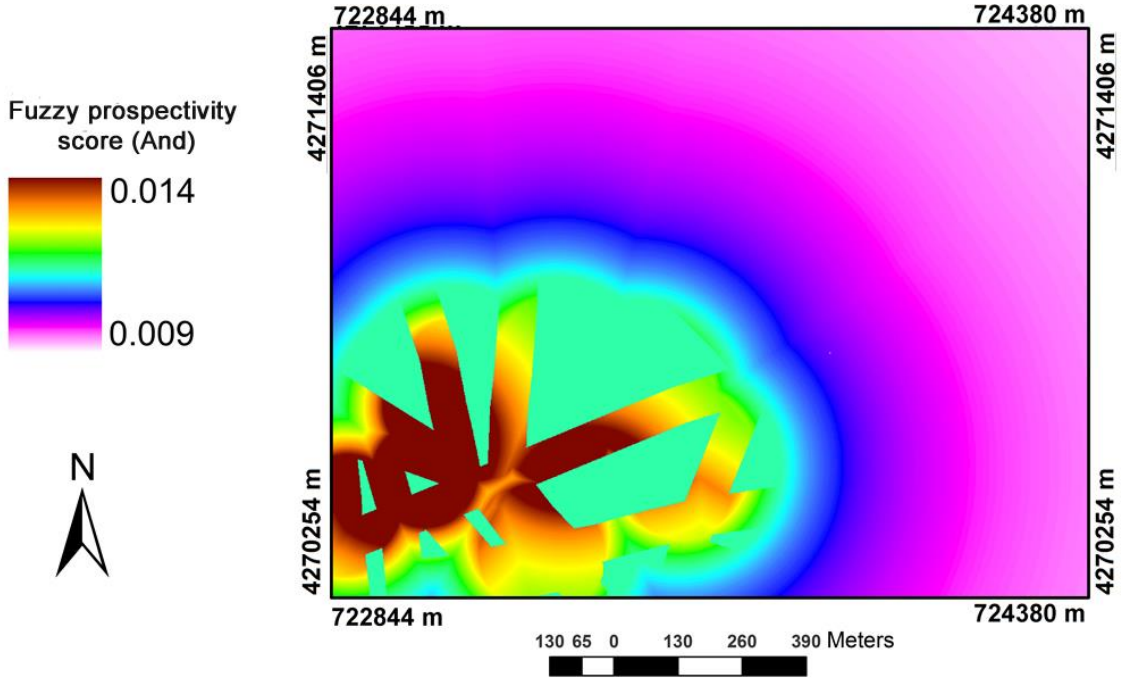
شکل ۵-۵: نقشه‌ی امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک



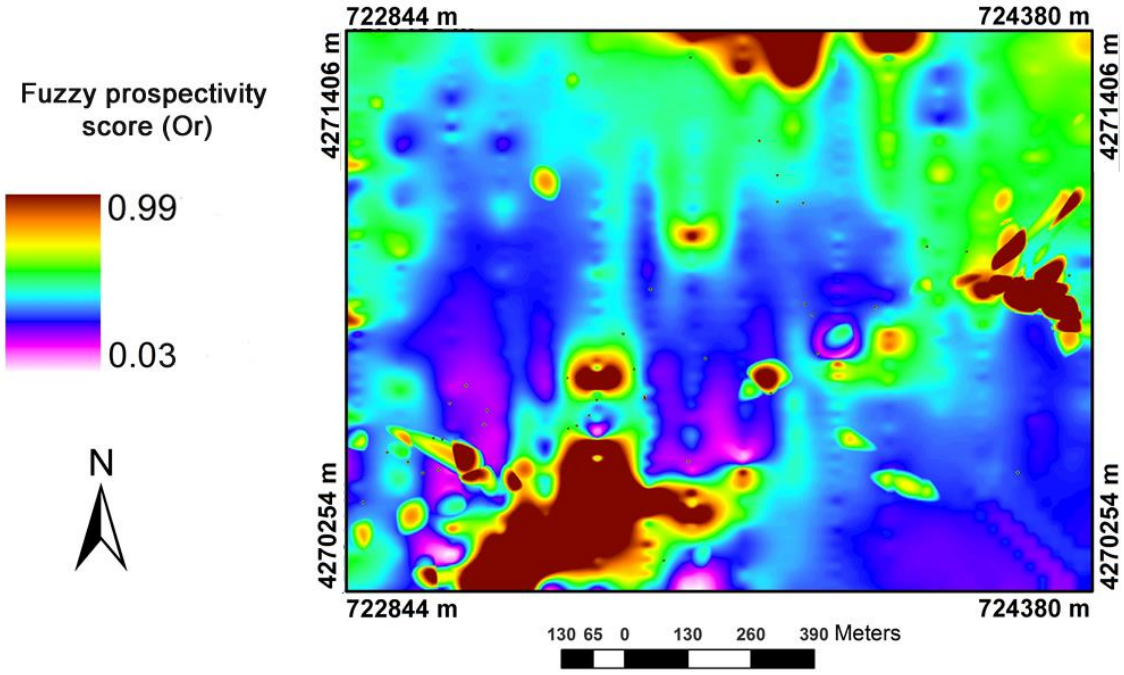
شکل ۵-۶: نقشه‌ی امتیازات فازی مغناطیس

۵-۵-۲-تلفیق و مدل‌سازی

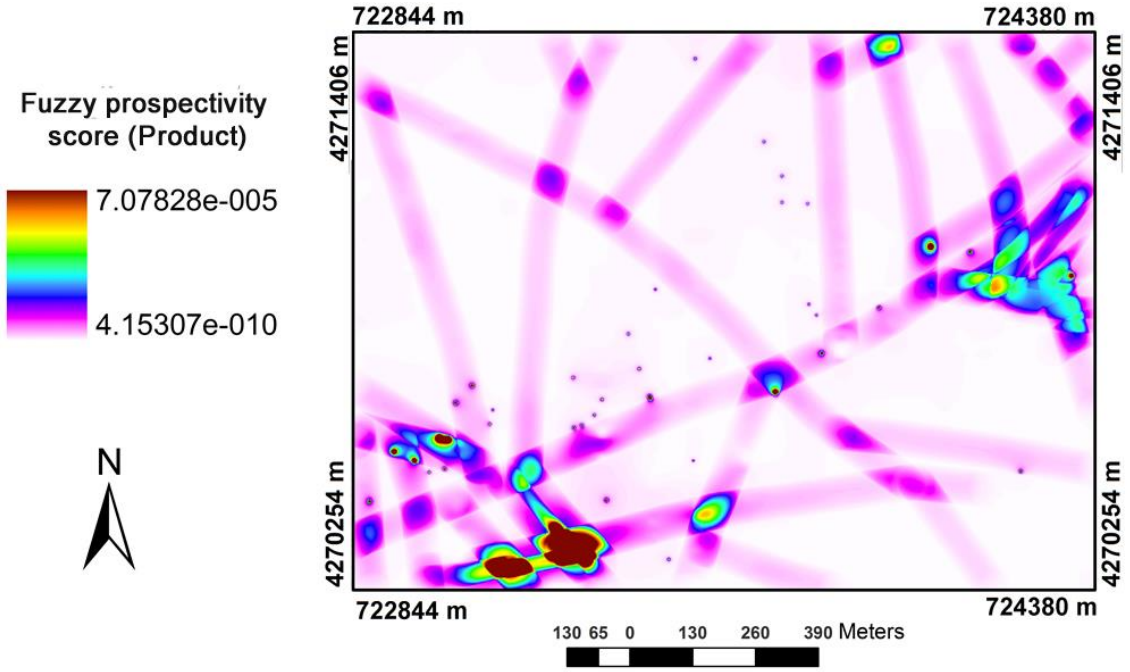
با توجه به نقشه‌های امتیاز فازی داده‌های فضای پیوسته شکل‌های (۵-۲) تا (۵-۶) به دست آمده براساس مدل مفهومی بزرگ مقیاس مس پورفیری، از اپراتورهای منطق فازی روابط (۵-۱) تا (۵-۵) جهت تلفیق نقشه‌ها و تولید مدل پتانسیل معدنی با روش منطق فازی استفاده شد که نتایج در شکل‌های (۵-۷) تا (۵-۱۱) قابل مشاهده است. با مقایسه‌ی مدل‌های ذیل بهترین نتیجه از مدل پتانسیل معدنی با استفاده از اپراتور گاما (۰.۹) شکل (۵-۱۱) به دست آمده که جهت بررسی‌های بیشتر و مقایسه با مدل به دست آمده از روش ارزش مورد انتظار شکل (۵-۱۲) از آن استفاده کردیم.



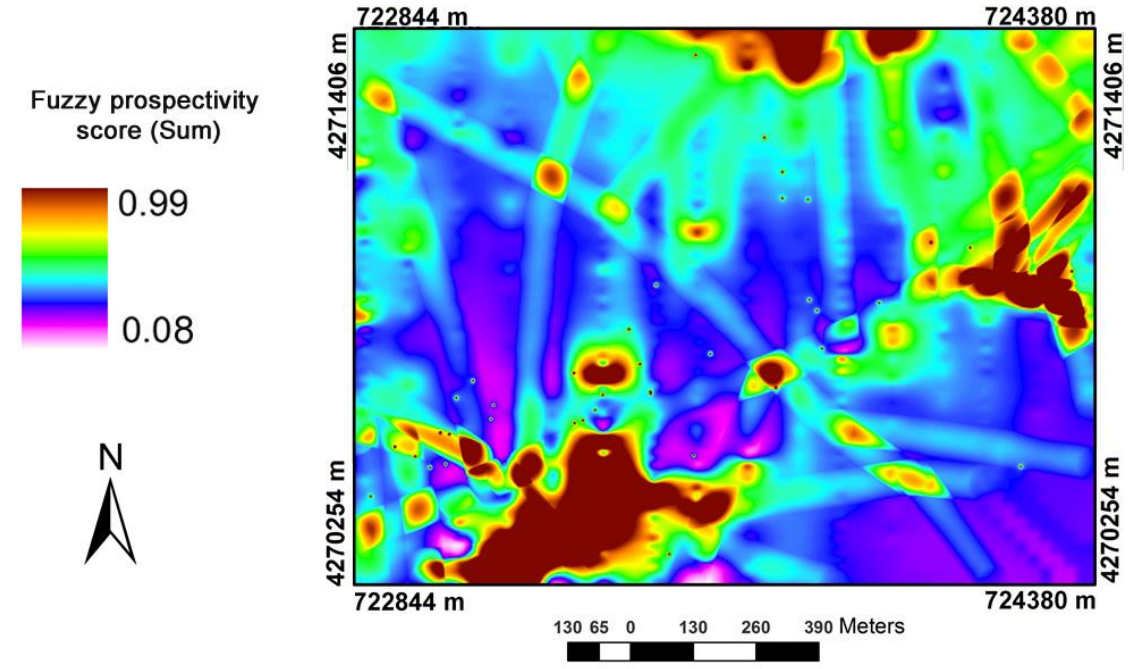
شکل ۵-۷: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (و)



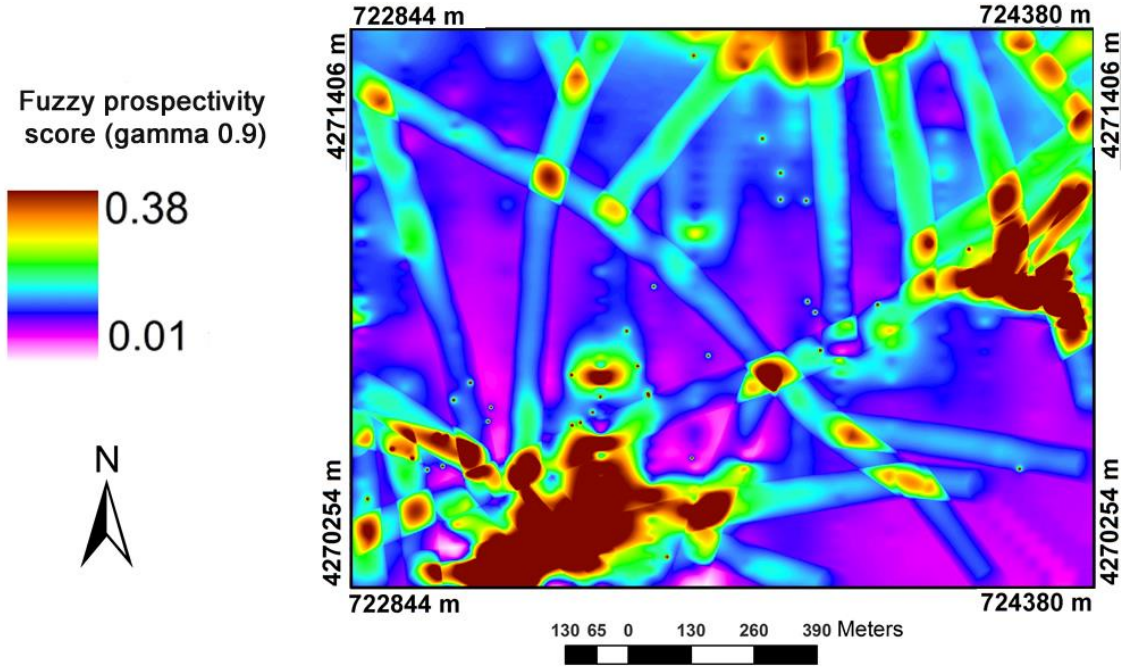
شکل ۵-۸: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی عکس فاصله تا مراکز پلی‌گون‌های دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (یا)



شکل ۵-۹: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (ضرب)



شکل ۵-۱۰: مدل پتانسیل معدنی معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی عکس فاصله تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش فازی (جمع)



شکل ۵-۱۱: مدل پتانسیل معدنی بر اساس تلفیق نقشه‌های امتیاز فازی فاصله‌ی عکس تا دگرسانی پتاسیک، رگه و استوک ورک، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده با روش اپراتور گامای ۰.۹ فازی

۵-۶- مدل محدوده‌ی مورد مطالعه با روش مقدار مورد انتظار[1]

در نظریه احتمالات، امید ریاضی، میانگین، مقدار مورد انتظار یا ارزش مورد انتظار، یک متغیر تصادفی، برابر است با مجموع حاصل‌ضرب احتمال وقوع هر یک از حالات ممکن در مقدار آن حالت. در نتیجه میانگین برابر است با مقداری که بطور متوسط از یک فرایند تصادفی با بی‌نهایت تکرار انتظار می‌رود.

امید ریاضی یک متغیر تصادفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E[X] = \int x f_X(x) dx \qquad (۱۵-۵)$$

که در آن $f_X(x)$ تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی X است. [Yaffee, 2000; Bragg, 2006].

1 . Expected Value

در نظریه‌ی تصمیم‌گیری به‌خصوص در شرایط عدم قطعیت (اینجا منظور انتخاب مناطق هدف برای اکتشافات بعدی مدل است)، روش ارزش مورد انتظار به منظور تصمیم‌گیری بهینه در مجموعه‌ای از اطلاعات ناقص استفاده می‌شود [Yousefi and Carranza, 2014] .عدم قطعیت مفهومی است که درکلیه علوم مهندسی با آن مواجه هستیم. در نظریه احتمالات؛ امید ریاضی به طور ذاتی به مقداری از متغیر تصادفی (اینجا منظور کانی‌سازی است.) اطلاق می‌شود که انتظار می‌رود یافت شود. ارزش مورد انتظار میانگین وزنی همه‌ی مقادیر محتمل است [Yaffee,2000; Bragg, 2006].

از آنجایی که منطقه‌ی مورد مطالعه در مدل پتانسیل معدنی به سلول‌های تکی تقسیم‌بندی می‌شود، تابع ارزش مورد انتظار سازگار با مدل پتانسیل معدنی [Yousefi and Carranza, 2014]، برای هر سلول یا پیکسل به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$Ep = \frac{\sum_1^n F_i I_i}{\sum_1^n F_i} \qquad (۱۶-۵)$$

که در آن Ep مقدار پتانسیل مورد مورد انتظار برای یک سلول است، I_i مقدار سلول در iامین سلول نقشه‌ی شاهد و F_i وزن فازی پیوسته‌ی به دست‌آمده از تابع لجستیک (۵-۱۲) [Yousefi and Carranza, 2014] است. در MPM هر لایه‌ی شاهد یک ماتریس به حساب می‌آید که پارامترهای ماتریس همان پیکسل‌های نقشه‌ی شاهد هستند. اگر x ماتریس m*n باشد، مقدار ارزش مورد انتظار Ep[x] به صورت ماتریس زیر تعریف می‌شود.

$$Ep[X] = E\left[\begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & & X_{2n} \\ \vdots & \vdots \ddots & & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix}\right] \qquad (۱۷-۵)$$

$$= \left[\begin{pmatrix} Ep[X_{11}] & Ep[X_{12}] & \cdots & Ep[X_{1n}] \\ Ep[X_{21}] & Ep[X_{22}] & & Ep[X_{2n}] \\ \vdots & \vdots \ddots & & \vdots \\ Ep[X_{m1}] & Ep[X_{m2}] & \cdots & Ep[X_{mn}] \end{pmatrix}\right]$$

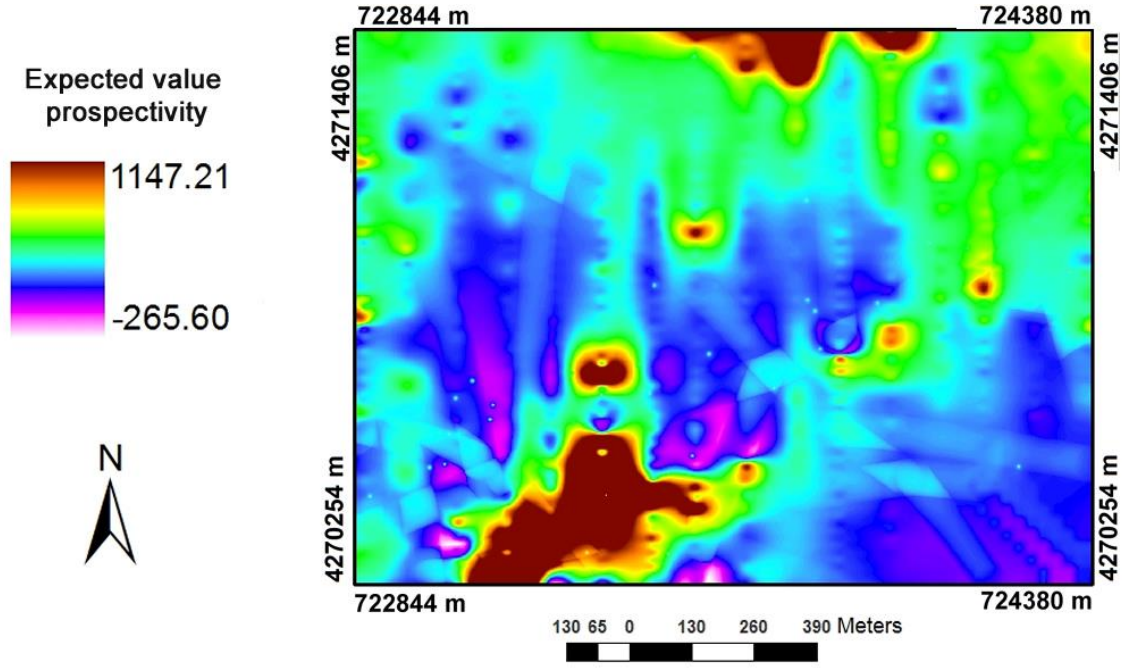
بنابراین ارزش مورد انتظار برای هر پیکسل براساس وزنش محاسبه می‌شود و در نهایت به صورت نقشه ارائه می‌شود. در پژوهش حاضر، به منظور تولید نقشه‌ی پتانسیل معدنی با روش ارزش مورد انتظار شکل (۵-۱۲)، تابع Ep برای هر پیکسل E[xkl] (k=1-m و l=1-n) به صورت تابع (۵-۱۸) [Yousefi and Carranza, 2014, 2015b] تعریف شد.

$$E_{P_{cu}-P_0} = \frac{F_{FD}I_{FD}+F_{RM}I_{RM}+F_{PA}I_{PA}+F_{SW}I_{SW}+F_VI_V}{F_{FD}+F_{RM}+F_{PA}+F_{SW}+F_V} \qquad (۱۸-۵)$$

که در آن F_n مربوط به امتیاز فازی به دست آمده از تابع (۵-۱۲) است و I_n نقشه‌ی عکس فاصله، المان‌های ژئوفیزیکی و چگالی گسل است[Yousefi and Carranza, 2014, 2015].

از نظر ریاضی، ارزش مورد انتظار به عنوان یک تابع تصمیم‌گیری چند معیاره میانگین وزنی با احتمالات و عدم قطعیت سرکار دارد [Mosher et al., 2010; Runge et al., 2011; Gupta et al., 2013]. چرا که، هر مقدار (اینجا، مقادیر مشاهده‌ای مانند چگالی گسل) در احتمال وقوعش ضرب می‌شود (اینجا، امتیاز فازی)، با هم جمع شده و سپس بر مجموع احتمالاتشان تقسیم می‌شوند (اینجا، امتیاز فازی) [Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008; Feizizadeh et al.,2014]. بنابراین احتمالی که در تابع ارزش مورد انتظار (۵-۱۸) استفاده می‌شود در اصل وزن هر سلول است که با ضرب شدن در خود سلول، موجب بهبود عملکرد تلفیق لایه‌ها می‌شود. استفاده از میانگین وزنی؛

نگرشی است که کاربرد زیادی در ترکیب اطلاعات از هر نوع پدیده‌ای، در یک مدل واحد، بـه منظـور کاهش عدم قطعیت دارد [Chen et al., 2010; Feizizadeh et al., 2014]. مانند شاخص همپوشـانی در MPM [Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008]، پهنه‌ی جغرافیـای خطـر [Feizizadeh et al., 2014] و در زمینه‌های دیگری چون چاه‌پیمایی [Mosher et al., 2010]، امور مـالی [Gupta et al., 2013]، علوم زیستی [Runge et al., 2011]. درکل رویکرد تلفیق میانگین وزنی مثل ارزش مورد انتظار به‌منظور ترکیب مقـادیر فـازی پیوسـته [Xue et al., 2008; Chen et al., 2014]، در سیسـتم فازی استفاده می‌شود [Heilpern,1992].[Yousefi and Carranza, 2014]

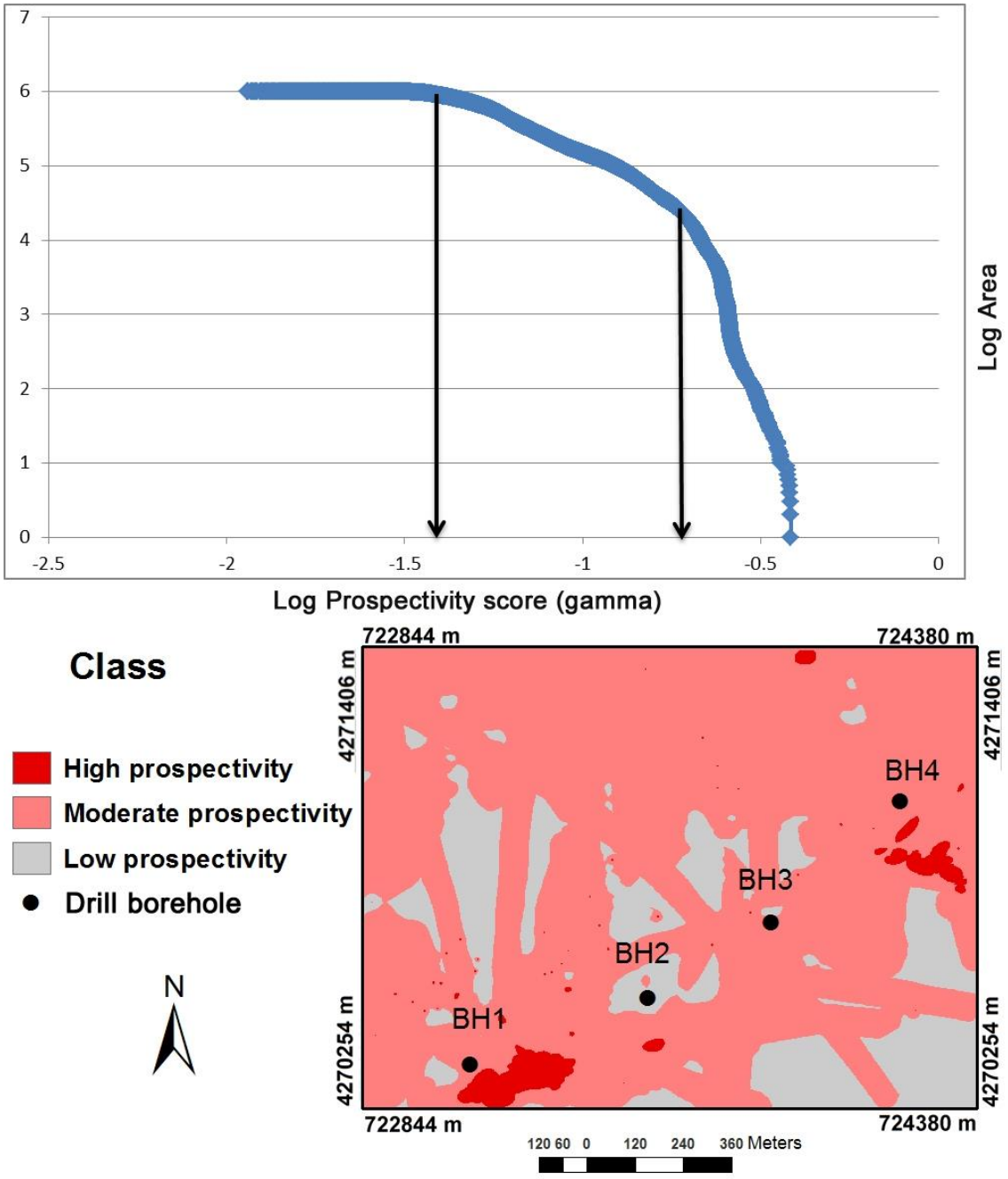


شکل ۵-۱۲: مدل پتانسیل معدنی با روش ارزش مورد انتظار

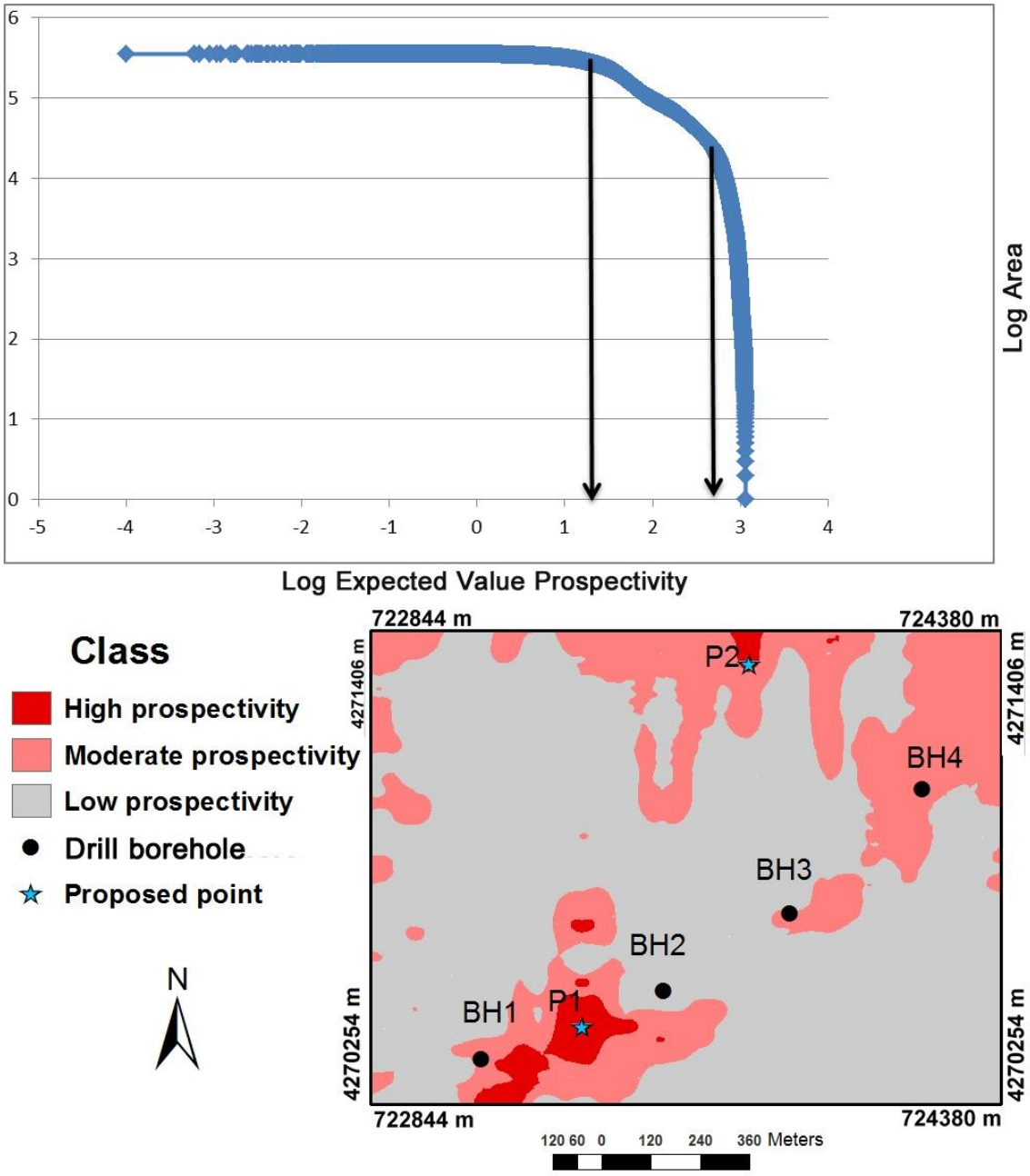
۵-۷- اولویت‌بندی مناطق امیدبخش

براساس هدف نهایی MPM که طبقه بندی مناطق با اولویت‌های مختلف برای اکتشافات بعدی است، پس از تهیه‌ی نقشه‌های پتانسیل معدنی با دو روش منطق فازی و ارزش مورد انتظار، نقشـه‌هـا در چند کلاس دسته‌بندی شدند. برای تعیین آستانه مقادیر پتانسیل جهت طبقه‌بندی مناطق مستعد

از مفاهیم فرکتال[Mandelbrot,1977, 1983; Mandelbrot et al., 1984] استفاده‌شد، چندین روش فرکتالی در زمینه طبقه‌بندی مقادیر(شواهد مکانی پتانسیل معدنی مثل آنومالی‌های شیمیایی [Cheng,1995, 1999, 2007; Carranza,2008, 2010a, 2010b]، عوامل ساختاری چون گسل [Zhao et al.,2011] و ویژگی‌های زمین‌شناسی [Ford and Blenkinsop, 2008]، موفق عمل کرده‌اند، که در تحقیق حاضر از مدل منطقه متمرکز (C-A) [Cheng, et al., 1994] استفاده شد [Yousefi and Carranza, 2014, 2015]. براین اساس هر یک از نقشه‌ها طبق مدل فرکتالی C-A به سه کلاس طبقه‌بندی شدند، شکل (۵-۱۳) و (۵-۱۴) و از آنجایی که مدل ارزش مورد انتظار به دلیل کاهش میزان عدم قطعیت نتایج بهتری را در زمینه‌ی تعیین نقاط هدف در اختیار قرار می‌دهد [Yousefi and Carranza, 2014] دو نقطه P1 و P2 در مناطق پر پتانسیل در مدل پتانسیل مطلوب به روش ارزش مورد انتظار شکل (۵-۱۴) به‌منظور حفاری جهت اکتشافات بعدی و همچنین تعیین اعتبار [Xiao et al., 2014; Constance et al., 20014; Nielsen et al., 2015] نتایج مدل‌ها پیشنهاد شد.



شکل۵-۱۳: مدل پتانسیل مطلوب طبقه‌بندی شده‌ی گامای فازی براساس نمودار log_log (C-A)



شکل ۵-۱۴: مدل پتانسیل مطلوب طبقه‌بندی شده‌ی ارزش مورد انتظار براساس نمودار(C-A) log_log
به همراه نقاط پیشنهادی برای حفاری

۵-۸- اعتبار سنجی

هر یک از روش‌های تولید الگوهای پیش‌گو و تلفیق نقشه‌های شاهد دارای خطاهای سیستماتیک مربوط به خود هستند. علاوه بر این فعل و انفعالات و تاثیر متقابل فرآیندهای زمین‌شناسی پیچیده و انواع عدم‌قطعیت‌های همراه با اکتشاف ذخایر معدنی و همچنین حضور

خطاهای پارامتری وابسته به داده‌ها، از عوامل تاثیرگذار بر مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌باشند. چنین خطاهایی نهایتا در مدل نهایی پتانسیل معدنی نمود بیشتری پیدا خواهد کرد. بنابراین اندازه‌گیری و سنجش اعتبار مدل ضروری است. هدف از تعیین اعتبار مدل‌ها، انتخاب بهترین مدل‌های پیش‌گویی پتانسیل‌معدنی می‌باشد. [یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹]

در مدل‌های کوچک مقیاس در صورتی که در یک منطقه تعدادی اندیس شناخته‌شده وجود داشته باشد اما تعداد آن‌ها برای مدل‌سازی داده‌محور کافی نباشد، از روش‌های دانش‌محور برای مدل‌سازی استفاده می‌شود در این حالت می‌توان با تولید حداقل دو مدل پیش‌بینی پتانسیل معدنی و سپس انتخاب یکی از ان‌ها که ارزش پیش‌گویی بیش‌تری را در محل ذخایر معدنی شناخته شده هم نوع ذخایر مورد پی‌جویی تولید نموده، کیفیت مدل نهایی را بهبود داد. در واقع بهترین مدل پتانسیل معدنی، عموما مدلی است که بیشترین تعداد از سلول‌های دارای چگالی احتمال بالای کانی‌سازی را در محل ذخایر معدنی شناخته شده دارد. [یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹]

در صورتی که هیچ اندیس شناخته شده‌ای در منطقه مورد مطالعه وجود نداشته باشد، تنها راه سنجش و ارزیابی مدل، کنترل مناطق دارای اولویت بالا از طریق اجرای عملیات صحرایی است. در این حالت انتخاب و طراحی بهینه مسیرهای پیمایش بسیار حائز اهمیت است و باید با توجه به موقعیت مناطق هدف و امیدبخش تولید شده و همچنین مقایسه با نقشه توپوگرافی، مسیرهای پیمایش به گونه‌ای طراحی گردد که سطح بیش‌تری از نواحی در اولویت، تحت پوشش کنترل و بازدید قرار گیرد. [یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹]

اما از آنجایی که پژوهش حاضر در مقیاس بزرگ انجام شده و در این مقیاس منطقه‌ی مورد بررسی خود یک اندیس محسوب می‌شود و هدف تعیین نقاط حفاری (و نه مناطق امیدبخش به آن شکلی که در مدل‌های ناحیه‌ای مد نظر است) است، لذا حفاری جز جدا نشدنی تعیین اعتبار مدل در این مقیاس به حساب می‌آید[Xiao et al., 2014; Payne et al., 2014; Nielsen et al., 2015].

وجود چهار گمانه BH1، BH2، BH3 وBH4 مشخص شده در شکل‌های (۵-۱۳) و (۵-۱۴) که به ترتیب دارای عیار ٪۰.۲۶، ٪۰.۱۵، ٪۰.۱۲، و ٪۰.۳۲ مس هستند، جهت ارزیابی مدل پتانسیل معدنی استفاده شد که به نظر می‌رسد در صورتی که در نقاط پیشنهادی P1 و P2 هم حفاری صورت گیرد تعداد نقاط بیشتری در ارزیابی هرچه بهتر مدل به‌کار گرفته خواهد شد.

۵-۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با توجه به بزرگ مقیاس بودن منطقه و مساحت کم و همچنین بر اساس نتایج پردازش و تفسیر لایه‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و قطبش القایی (به دلیل تعداد کم پروفیل‌ها و فاصله‌ی زیادشان از هم، امکان برون‌یابی نقشه‌ها وجود نداشت)، از پنج شاهد مکانی دگرسانی پتاسیک، استوک ورک، رگه، چگالی گسل و مغناطیس باقیمانده استفاده شده است. نقشه‌های شواهد فازی پیوسته‌ی ساخته شده برای مدل فازی و ارزش مورد انتظار در مدل پتانسیل معدنی برای دیگر روش‌های دانش‌محور مدل پتانسیل معدنی نیز کاربرد دارد که در هر کدام به‌جای روش قدیمی گسسته کردن نقشه‌ی مجاورت ویژگی‌های مورد نظر، از نقشه‌های امتیاز فازی پیوسته استفاده می‌شود. یوسفی و کارانزا (۲۰۱۴) از این روش برای مشخص کردن امتیاز فازی به کلاس‌های بی‌هنجاری‌های شیمیایی استفاده کردند، که می‌تواند به‌طور موثر برای مقادیر پیوسته‌ی امتیاز فازی داده‌های عددی (داده‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس هوابرد)، امتیاز فازی پیوسته‌ی عکس فاصله (جایی که فاصله تا منظر زمین‌شناسی خاص اهمیت دارد)، امتیاز فازی پیوسته‌ی چگالی (جایی که چگالی یک منظر خاص، مانند گسل، مد نظر است) لحاظ شود. کاربرد هریک از این موارد بر اساس مدل مفهومی ماده‌ی معدنی موردنظر تعیین می‌شود، بنابراین مدل‌مفهومی ماده‌ی مورد نظر است که راهنمای ما برای استفاده از روش تعیین مقادیر امتیاز فازی پیوسته‌ی شواهد مکانی با استفاده از تابع لجستیک است.

استفاده‌از دو روش مذکور مزایای خود را دارد، از یک طرف نیازی به گسسته کردن مقادیر

پیوسته در نقشه‌ها به عنوان شواهد مکانی در فازی‌سازی نیست، چراکه لایه‌های شواهد فازی با مقادیر عضویت فازی پیوسته تولید می‌شوند. ازآنجائیکه گسسته کردن شواهد مکانی مقادیر پیوسته فازی در نقشه‌های کلاسه شده یک اقدام سنتی در MPM به‌شمار می‌رود. بنابراین استفاده از روش‌های وزن‌دهی پیوسته [Yousefi and Carranza, 2014] اولین مزیت این روش است؛ چراکه دیگر نیازی به دسته‌بندی فواصل تا ویژگی‌های زمین‌شناسی در کلاس‌های مجاورت دلخواه در MPM نیست. در این روش امتیازدهی پیوسته، قضاوت در تخمین امتیازات شواهد مکانی، تسهیل و مشکل تخمین کلاس حل می‌شود. از سوی دیگر، عدم قطعیت ویژگی‌های زمین‌شناسی که به عنوان لایه‌های شاهد فازی استفاده می‌شوند، توسط یکپارچه‌سازی لایه‌ها با استفاده از میانگین وزنشان، کم می‌شود[Yousefi and Carranza, 2014]. در نهایت با استفاده از مدل فرکتالی جهت تعیین آستانه کلاس‌های نهایی در مدل پتانسیل، نقشه‌ها، به سه کلاس مناطق دارای پتانسیل بالا، مناطق مابین و مناطق دارای اولویت پایین معدن‌کاوی تقسیم شدند و دو نقطه جهت حفاری در مدل ارائه شده با روش ارزش مورد انتظار، پیشنهاد شد. همچنین مدل‌های به دست آمده توسط چهار گمانه ژئوشیمی اعتبارسنجی شدند.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پایان‌نامه ارائه‌ی یک نقشه پتانسیل مطلوب بزرگ مقیاس مس پورفیری در بخشی از برگه‌ی ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی شمال‌شرق اهر بود؛ که این مهم طی وزن‌دهی و تلفیق چندین لایه‌ی اطلاعاتی با روش‌های جدید ارائه شده از سال ۲۰۱۲ به بعد صورت پذیرفت. برای انجام این کار از لایه‌ی زمین‌شناسی، لایه‌ی دگرسانی، لایه‌ی مغناطیس و لایه‌ی چگالی گسل‌ها استفاده گردید.

در این فرآیند هر یک از لایه‌ها به طور جداگانه مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت که تفسیر هر یک از این لایه‌ها نیازمند مطالعات دقیق بود. در مبحث زمین‌شناسی و دگرسانی، نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه‌ی مورد مطالعه رقومی شد و با جداسازی تمام واحدهای مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری لایه‌های مرتبط تهیه گردید.

با توجه به مطالب گفته شده و مقایسه مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های آماری در فصل‌های قبل، موارد زیر را می‌توان به عنوان نتایج حاصل از این تحقیق به طور خلاصه ذکر کرد:

وجود رابطه‌ی معکوس، بین داده های مقاومت‌ویژه و IP در محدوده بالا بوده که این نتیجه را می‌توان به فلزی بودن بی هنجاری نسبت داد.

ناهنجاری بارپذیری را که مقاومت‌های بین ۲۰- ۱۰۰ اهم متر را تائید می‌نمایند می‌توان در ارتباط با کانی‌سازی سولفوره محسوب نمود.

با توجه به اینکه منطقه پوشیده از سنگ‌های نفوذی است، برداشت‌های مغناطیسی را می‌توان به عنوان روشی مناسب در تعیین محدوده‌های بی‌هنجار مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری در این منطقه به حساب آورد. بدین منظور مدل سه‌بعدی مغناطیسی دید خوبی نسبت به گسترش مغناطیس در منطقه در اختیارمان قرار داد که در جهت شناسایی مناطق کانی‌سازی موثر است.

تولید نقشه‌های امتیاز فازی پیوسته به جای روش‌های سنتی طبقه‌بندی(که به صورت گسسته انجام می‌شد و به هر کلاس یک وزن ثابت با نظر کارشناس داده می‌شد)، سبب می‌شود دیگر نیازی به

پاسخ به سوالاتی از جمله تعیین تعداد کلاس‌ها و دامنه‌ی هر کلاس از طرف کارشناس، که در نهایت منجر به افزایش خطا در مدل پتانسیل معدنی می‌شود، نباشد.

با مقایسه دو مدل پتانسیل معدنی به روش فازی گاما و ارزش مورد انتظار، نتیجه گرفته می‌شود که در روش ارزش مورد انتظار به دلیل اینکه عدم قطعیت را کاهش می‌دهد و مناطق منفی را کاملا تهی می‌کند تعیین نقاط هدف راحت‌تر صورت می‌پذیرد.

۶-۲- پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش القایی در هر دو محدوده در پروفیل‌های بیشتری انجام شود؛ تا در تهیه‌ی نقشه‌پتانسیل معدنی، جهت کاهش میزان خطا و بهتر مشخص کردن مناطق پرپتانسیل استفاده شود.

همچنین با توجه به بررسی سه نوع داده برداشت شده، نقشه‌ی زمین‌شناسی و نقشه‌ی دگرسانی و مدل پتانسیل مطلوب به دست آمده، دو نقطه برای حفاری مشخص شد که پیشنهاد می شود به منظور حصول اطمینان از نتایج این تحلیل ها و تعمیم آنها به کل محدوده‌ی مورد بررسی، حفاری در نقاط پیشنهادی صورت گیرد و از داده‌های حفاری، در مقایسه و تعدیل نتایج استفاده و سپس نقاط بیشتری برای حفاری مشخص شود.

جدول ۶-۱: نقاط پیشنهادی برای حفاری

نقاط پیشنهادی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
P1	۷۲۳۳۶۰	۴۲۷۰۴۴۲
P2	۷۲۳۷۶۶	۴۲۷۱۳۲۵

منابع

پشنگ، ع، (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد ، **"تهیه نقشه پتانسیل مطلوب ذخایر کرومیت در شمال تربت حیدریه"**، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

حیدریان شهری، م ر، (۱۳۸۴) **"مبانی اکتشافات ژئوفیزیک"**، دانشگاه فردوسی مشهد

زراسوندی ع و لیاقت س. (۱۳۸۴)، "تفکیک توده‌های پورفیری عقیم و کانه‌دار در جنوب چهارگوش خضرآباد یزد با استفاده از ژئوشیمی عناصر نادر خاکی (REE) " ، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ص ۲۹۰ تا ۲۹۹، دانشگاه تربیت معلم تهران

خویی ن ، قربانی م و تاجبخش پ، (۱۳۷۸) **" کانسار مس در ایران"** سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهران.

قربانی م، (۱۳۸۱) **" دیباچه ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران"** سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهران.

کامکار روحانی، ا و بیکی، م، (۱۳۸۸)، "پردازش و تفسیر داده های مغناطیس هوایی به منظور پی‌جویی ذخایر کرومیت در منطقه‌ی سبزوار"، **مجله‌ی فیزیک زمین و فضا**، ش۳، د ۳۵، ، ص ۱۳-۳۶

کریم پور م، سعادت س،(۱۳۸۱)، **" زمین شناسی اقتصادی کاربردی"** نشر مشهد، تهران

کریم پور م، ملک زاده آ و حیدریان م،(۱۳۸۴)**" اکتشاف ذخایر معدنی"** انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

کلاگری ع، (۱۳۷۱)، **"اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"**، انتشارات دانشگاه تبریز

مرادزاده ع، عرب امیری ع، (۱۳۸۲)، **"طرح پژوهشی مطالعات ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی منطقه معدنی بردسیر"**، دانشگاه صنعتی شاهرود.

یوسفی م، کامکار روحانی ا، (۱۳۸۹)، **"اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی"**، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر، تهران

Alpaydm E., (2004), "Introduction to Machine Learning", **The MIT Press**, Cambridge, Massachusetts

An P., Moon W., & Rencz, A. (1991). "Application of fuzzy set Theory for integration of geological", **geophysical and remote sensing data**. 93, 47-65.

Aster R C., Borchers B and Thurber C H., (2005), "**PARAMETER ESTIMATION AND INVERSE PROBLEMS**", Second Edition , Elsivier.

Behn, G., Camus, F., and Carrasco, P., (2001), "Aeromagnetic signature of porphyry copper systems in northern Chile and its geologic implications", **Economic Geology**, v. 96, p. 239–248.

Berger, B., & Drew, L. (2002). "Mineral - deposit models: new developments, In:Fabbri, A.G., Gaa, G., McCammon, R.B.(Eds), Deposit and Geoenvironmental models for Resource Exploratin and Environmental Security" **, NATO Science** Series 2,Environmental Security. 80.

Berger, B.R., Ayuso, R.A., Wynn, J.C., and Seal, R.R.,(2008), "Preliminary model of porphyry copper deposits" U.S.**Geological Survey Open-File Report** 2008–1321, 55 p.

Berthold, M., Hand, D.J., (2002). " Data Analysis, 2nd ed". **Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.**

Bishop, C. M., (2006). "Pattern Recognition and Machine Learning". Springer Science Business Media, LLC, 233 **Spring Street,** NewYork, NY10013,USA.

Bonham-carter, G. (1994). "Geographic Information System for geoscientists: Modelling with GIS". **Peramon Press**, Oxford,

Bosch, M., McGaughey, J., (2001). "Joint inversion of gravity and magnetic data under lithologic constraints".**The Leading Edge** 877–881 August.

Bragg, S.M., (2006). "Financial Analysis": A Controller's Guide. **John Wiley & Sons**, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.

Brant, A.A., (1966), "Geophysics in the exploration for Arizona porphyry deposits, in Titley", S.R., and Hicks, C.L., eds., Geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America: Tucson, **Arizona, University of Arizona Press**, p. 87–110.

Carranza, E., Hale, M. (2001). " Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines", **Natural Resources Research** 10 (2), 125-136

Carranza, E., Hale, M. (2002a). "Evidential belief functions for geologically constrained mapping of gold potential" ,Baguio district**, Ore Geology Reviews**. 22, 117-132.

Carranza, E.,Hale,M.,(2002b). "Wildcat mapping of gold potential, Baguio district, Philippines". Trans. Inst. Min. Metall. Sect.B – Appl**. EarthSci**.111,100–105.

Carranza, E. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS",Handbook of Exploration and environmental geochemistry Vol. 11. **Amsterdam: Elsevier**.

Carranza, E., (2010a). "Catchment basin modelling of stream sediment anomalies revisited:incorporation of EDA and fractal analysis".**Geochem. Explor.Environ**. Anal. 10,171–187.

Carranza, E. , (2010b). "Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geo chemical landscapes**". Geochem. Explor. Environ**., Anal.10, 171–187. -241.

Carranza, E., Sadeghi, M. (2010). "Predictive mapping of prospectivity and quantitive estimation on undiscovered VMS deposit in Skellefte district" (Sweden). 219

Chen, Y., Yu, J., Khan, S., 2010. “Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation”. **Environ. Model. Softw**. 25,1582–1591.

Chen, H., Su, L., Wang,G., Wan, S., Zhang, L., Luo, Z., 2014.” Fuzzy estimation for heat flux distribution at the slab continuous casting mold surface”. Int. J.**Therm.Sci.** 83, 80–88.

Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". J.**Geochem.Explor**.51, 109–130.

Cheng, Q.,(1995). "The perimeter-area fractal model and its application togeology". **Math. Geol**.27,69–82.

Cheng, Q.,(1999). "Multi fractality and spatial statistics. **Comput.Geosci**. 25,949–961.

Cheng, Q.,(2007). "Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposit sin Gejiu,Yunnan Province,China". **Ore Geol.Rev**.32,314–324.

Clark, D.A., French, D.H., Lackie, M.A., Schmidt, D.W., (1992), "Magnetic petrology: application of integrated magnetic and petrological techniques to geological interpretation of magnetic surveys". **Exploration Geophysics** 23, 65-68.

Clark, D.A., (1999), "Magnetic petrology of igneous intrusions—Implications for exploration and magnetic interpretation" **Exploration Geophysics**, v. 20, p. 5–26.

Corvallis, O. (2000). "DC resistivity method. Northwest Geophysical Associates", Inc.

Cox, D.R., Snell, E.J., 1989.”**Analysis of Binary Data**”, 2nd ed. Chapman and Hall, London.

Daneshfar, B., Desrochers, A. & Budkewitsch, P. (2006). ”Mineral-potential mapping for MVT deposits with Limited data sets using Landsat data and geological

evidence in the Borden Basin, Northern Baffin Island, Nunavut, Canada". **Natural Resources Research**, 15, 129–149.

Dey,A.,& Morrison, H. F. (1979). "RESISTIVITY MODELLING FOR ARBITRARILY SHAPED TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES". **Geophsical prospecting**, 106-136.

Dobrin, D. B., and Savit, C. H., (1988)," Introduction to geophysical prospecting", **Mc Graw-Hill Book Company**, New York, USA.

Feizizadeh, B., Jankowski, P., Blaschke,T.,2014." A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach formulti-criteria decision analysis". **Comput. Geosci**. 64,81–95.

Ferneyhough, A.B., (2000), "Case history study of the Batu Hijau copper-gold porphyry deposit in Indonesia", in Ellis, R.B., Irvine, R., and Fritz, F., eds., Northwest Mining Association 1998 Practical Geophysics Short Course, selected papers on CD–ROM: Spokane, Washington, **Northwest Mining Association**, paper 5, 9 p.

Fink, G.A., 2007. "Markov Models for Pattern Recognition. Springer-Verlag", **Berlin Heidelberg.**

Ford, K., Keating, P., and Thomas, M.D., 2007, "Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada—A synthesis paper of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division", **Special Publication** 5, p. 939–970.

Ford,A., Blenkinsop,T.G., (2008). "Evaluating geological complexity and complexity gradients as controls on copper mineralization", **MtIsaInlier. Aust.J.EarthSci.** 55, 13–23.

Gettings, M., 2005, "Magnetic mineralogy and models of magnetic susceptibility for altered rocks of the Stinkingwater porphyry", Wyoming, USA.

Gow, P.A., and Walshe, J.L., 2005, "The Role of pre-existing geologic

architecture in the formation of giant porphyry-related Cu +/- Au deposits—Examples from New Guinea and Chile": **Economic Geology**, v. 100, p. 819–833.

Gunn P. J. 1996, "Workshop Interpretation of aeromagnetic data". **AGSO Journal of Australain Geology & geophysics.**

Gunn, P.J. Dentith, M.C., (1997)."Magnetic responses associated with mineral deposits". **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics** 17:2:145-158. Australian Geological Survey Organisation, Canberra.

Gupta, P., Mittal, G., Mehlawat, M.K., 2013. "Expected value multi-objective portfolio rebalancing model with fuzzy parameters". **Insur.: Math. Econ**.52,190–203.

Harris, J., Wilkinson, L., Heather, K., Fumertun, S., Bernier, M., Ayer, J., et al. (2001). "Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps, a case study": **mesothermal Au in the Swayze Greenstone belt**. 10, 91-124.

Heilpern, S., 1992. "The expected value of a fuzzy number. Fuzzy Sets Syst". 47,81–86.

Heithersay, P.S., and Walshe, J.L., 1995, Endeavour 26 North—A porphyry copper-gold deposit in the late Ordovician, shoshonitic Goonumbla volcanic complex, New South Wales, Australia: **Economic Geology**, v. 90, p. 1506–1532.

Hengl, T., 2006. "Finding the right pixel size. Comput.Geosci." 32,1283–1298.

John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D., and Vikre, P.G., 2010," Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report" 2010–5070–B, 169 p.

Li, Y., Oldenburg, D., 1996. 3-D inversion of magnetic data. **Geophysics** 61, 394–408.

Loke, M. (2004). Res2dinv ver. 3.54,Manual, "**Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method**." Geotomo software.

Loke, M., & Barker, R. (1995).” Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections”. **GEOPHYSICS,** 60, 1682-1690.

Loke. (2004). Tutorial: “**2D and 3D electrical imaging surveys.”**

Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: **Economic Geology**, v. 65, p. 373–408.

Luyenyk, A. P. J., 1997, “Processing of airborne magnetic data: AGSO”, J. **Aust. Geol. Geophys**., 17, 31-38.

Mandelbrot, B.B., (1977). "**Fractals: Form, Chance, and Dimension**". Freeman, San Francisco p.365.

Mandelbrot, B.B., (1983). "**The Fractal Geometry of Nature**". Freeman, NewYork 468pp.

Mandelbrot, B.B., Passoja, D.E., Paullay, A.J., (1984). "Fractal character of fracture surfaces of metals**". Nature** 308(5961),721–722.

Meju, M. (1994).” Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice.” **United Statea of America: Society of Exploration Geophysicsts.**

Micheli-Tzanakou, E., 1999.” Supervised and unsupervised Pattern Recognition.” CRC Press LLC. Corporate Blvd., N.W., Boca Raton, Florida.

Milson, J. (1989). “**Field Geophysics**”. Geological Society of London Handbook.

Mosher, S.W., Maucec, M., Spanier,J., Badruzzaman, A., Chedester, C., Evans, M., 2010. “Expected value techniques for Monte Carlo modeling of wellogging problems”. **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res**.A613,334–341.

Nielsen. S H H, Cunningham F, Hay R, Ratington G, Stokes M, “ 3D Prospectivity modeling of oreganic gold in the Marmia Lnlier, western Australlia, **Oregeology review.**

Nykänen,V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P., Gardoll, S. J., 2008.

“Reconnaissance scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modeling for iron oxide copper–gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland”. **Aust.J. EarthSci.** 55, 25–38.

Oldenburg ,W. , Douglas, Yaoguo, Li., and Colin G. Farquharson; 1998, University of British Columbia Peter Kowalczyk, Placer Dome, Incorporated, Vancouver, British Columbia, Applications of geophysical inversions in mineral exploration

Oldenburg, D., Li, Y., 1994. “Inversion of induced polarization data” , **GEOPHYSICS** 59, 1327-1341

Oldenburg, D.W., Li, Y., and Ellis, R.G., 1997, Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit—A case history for Mt. Milligan: **Geophysics,** v. 62, p. 1419–1431.

Pan, G., & Harris, D. (2000).” Information Synthesis for Mineral Exploratin”. New york: **Oxford University Press**.

Payne, Constance, Cunningham, Fraser, Peters, Katie J,. Nielsen, Simon, Puccioni, Elisa, Wildman, Charlene, Partington, Gregor, “From 2d to 3d: prospectivity modelling in the taupo volcanic zone, new zealand”, **Ore Geology Reviews.**

Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., 2003. “Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping”. **Nat. Resour. Res**. 12, 1–25.

Porwal, A., Carranza, E. J. M., Hale, M., 2006. “A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping.” **Nat. Resour. Res**. 15,1–15.

Ranjbar, H., & Honarmand, M. (2004). “Integratin and analysis of airborn geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Centeral Iranian Volcanic Belt,using fuzzy classification”. 25, 4729-4741.

Reynolds, J. (1997). “An Introduction to applied and environmental geophysics. **England: John Wiley**.

Robinson, E. S. and Coruh, 1988, C.” Basic exploration geophysics”. **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, USA.

Runge,M.C., Converse, S. J., Lyons, J.E., 2011. “Which uncertainty? Using expert eli- citation and expected value of information to design an adaptive program”. **Biol. Conser**. 144, 1214–1223.

Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). “Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, 83, 173-193.

Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, Jr., J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A., and Barton, M.D., 2005, “Porphyry deposits—Characteristics and origin of hypogene features: Society of Economic Geologists”, **Economic Geology 100th Anniversary** Volume, p. 251–298.

Shahabpour, J. 1999, “The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone”: **Journal of Geodynamics**, v. 28, p. 237–250.

Sillitoe, R.H., and Bonham, H.F., 1990,”Sediment-hosted gold deposits—Distal products of magmatic-hydrothermal systems”: **Geology**, v. 18, p. 157–161.

Sinclair, W.D., 2007, Porphyry deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada: **Geological Association of Canada Special Publication** 5, p. 223–243.

Stocco, S., Godio, A., and Sambuelli, L., 2009, “Modelling and compact inversion of magnetic dat”a: A Matlab code**: Computers & Geosciences**, 35, 2111–2118.

Tangestani, M., & Moore, F. (2003). “Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteratin mapping a case study in Meiduk area,Kerman”,Iran. 27, 176-182.

Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). „Applied Geophysics”,. New York: **Cambridge University Press**.

Theodoridis, S., Koutroumbas, K., 2006. Pattern Recognition, 2nd ed. **Academic Press.** Elsevier, USA.

Thoman, M.W., Zonge, K.L., and Liu, D., 2000, Geophysical case history of North Silver Bell, Pima County, Arizona—A supergene-enriched porphyry copper deposit, in Ellis, R.B., Irvine, R., and Fritz, F., eds., Northwest Mining Association 1998 Practical Geophysics Short Course Selected Papers on CD-ROM: Spokane, Washington, **Northwest Mining Association**, paper 4, 42 p.

Williams, N.C., 2008. Geologically constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia. PhD thesis. University of British Columbia, Vancouver, BC. 509 p.

Xiao K, Li N, Porwal A, , Eun-Jung, Holden, Leon, Bagas, Yongjun, Lu, (2015) "GIS-based 3D Prospectivity Mapping: A Case Study of Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet, China", **Ore Geology Reviews**

Xue, F., Tang, W., Zhao, R., 2008."The expected value of a function of a fuzzy variable with acontinuous membership function". **Comput. Math. Appl**., 55;, pp. 1215–1224.

Yaffee, R.A., 2000. "Introduction to Time Series Analysis and Forecasting: With Ap- plications of SAS and SPSS". **Academic Press, Inc. San Diego**, CA, USA.

Yousefi, M., Carranza, E. J. M., (2014). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". **Computers & Geosciences**. 74,97-109.

Yousefi, M., Carranza, E. J. M., (2015a). " Geometric average of spatial evidence data layers: A GIS-based multi- criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping ". **Computers & Geosciences**. 74,97-109.

Yousefi, M., Carranza, E. J. M., (2015b). "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling". **Computers & Geosciences**, 79, 69–81

Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E. J. M., (2014). "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping". **Geochem.: Explor. Environ.** Anal. 14,45–58.

Yousefi, M., Carranza, E. J. M., Kamkar-Rouhani, 2013. "Weighted drain age catchment basin mapping of stream sediment geochemical anomalies form ineralpotential mapping". J. **Geochem. Explor**. 128,88–96.

Yousefi, M., Kamkar Rouhani, A., Carranza, E.J.M., 2012. "Geochemical mineralization probability index(GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping". J. **Geochem. Explor**. 115,24–35.

Zadeh, L.A.,(1965).Fuzzy sets**. IEEEInf**.Control8,338–353.

Zhao J., Chen S., Zuo R., Carranza E.J.M., (2011). "Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multi fractal models:vectoring towards exploration targets". **Comput.Geosci**. 37, 1958–1966.

Zonge, K.L., and Wynn, J.C., 1975," Recent advances and applications in complex resistivity measurements": **Geophysics,** v. 40, p. 851–864.

Zonge, K.L., Wynn, J.C., and Urquhart, S.A., 2005, Resistivity, induced polarization, and complex resistivity: **Society of Exploration Geophysicists Special Volume on Near Surface Geophysics**, p. 265–300.

http://www.ngdir.ir

https://en.wikipedia.org/wiki/Expected_value_of_including_uncertainty

http://www.en.wikipedia.org/wiki/Expected_value

Abstract:

Considering the role of minerals in the basic needs of various industries, searching for exploration with efficient ways seems necessary. This recognition is made using mineral potential modeling is outlined as one of the most important steps in finding areas, which possess a series of criteria for the presence of a certain type of deposit. The first step in mapping potential is identification of essential data, which required for integration. Here for integration in GIS, we used three data layers including geology, geophysics and alteration. The result of mineral potential modeling is a map in which probable locations of unknown deposits have been determined. According to the importance of copper and being Iran on the global copper belt, copper exploration in the area is very important.

Porphyry copper ore deposit located in northeast of Ahar is on one of the tectonic and active zones of central Iran called Orumieh-Dokhtar. Igneous mass of ore deposit in this area is micro quartz monzonite-mico monzo diorite type and also mineralization has been formed in igneous mass and is seen with andesite and dacite- andesite. The aim of this study is to determine the ore deposit location and dispersion. For this purpose, magnetic field surveys along 22 north-south lines with more than 1100 magnetic stations have been carried out, then for more study, the electrical resistivity and induced polarization field surveys along 3 south-north lines with using dipole-dipole array in both areas were carried out.

After acquiring the resistivity and induced polarization data and drawing the pseudo sections, inverse modeling of the data was made using DCIP2D software and mag3dinv for magnetic data, which has been presented by British Colombia University Geophysics department that works base on Oldenburg and Li algorithm.

Data integration and analysis within GIS can improve exploration and detection of mineral deposits. We applied a GIS-based analysis and geophysical data to rich and well- explored copper index, attempting to recognize the distinctive signature of such giant ore deposits. Image-based favorability mapping is a supplementary exploration tool and is only applicable to exposed deposits. On the basis of geological factors, alteration lithological and geophysics data interpretation of copper indices an exploratory model in GIS environmental presented that it will be highly applicable in

the area.

Complexities of geological processes portrayed as certain feature in a map (e.g., faults) are natural sources of uncertainties in decision-making for exploration of mineral deposits. Besides natural sources of uncertainties, knowledge-driven (e.g., fuzzy logic) mineral prospectivity mapping (MPM) is also plagued and incurs further uncertainty in subjective judgment of analyst when there is no reliable proven value of evidential scores. This paper aims for fuzzification of continuous spatial data and expected value to further improve fuzzy logic MPM because the analysis of uncertain variables can be presented in terms of their expected value to generate exploration target areas for further examination of undiscovered deposits which eventually led to the determination of the drilling point in the area.

Keyword: Porphyry Copper, Inversion, Induced polarization, Electrical resistivity, Magnetometery, Mineral Potential mapping, Expected value, Fuzzification

University of Shahrood

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Mineral Potential mapping of porphyry-Cu mineralization in large Scale based on integration of induced polarization, resistivity, magnetic and Geological data processing and interpretation results in GIS

Ameneh Rais Hosseini

Supervisor:

Dr.Aboulghasem Kamkar Rouhani

Dr.Mahyar Yousefi

September 2015