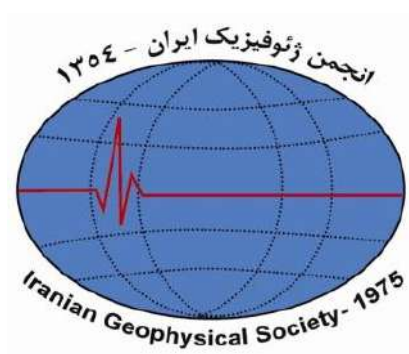


کتابچه مقالات

کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در معادن

۱۵ الی ۱۶ اسفند ماه ۱۴۰۲



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در معادن

زمان برگزاری:

۱۵ الی ۱۶ اسفندماه ۱۴۰۲

برگزارکننده:

انجمن ملی ژئوفیزیک ایران

مکان برگزاری:

مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

نمایه شده در ISC و سیویلیکا



معرفی کنفرانس

انجمن ملی ژئوفیزیک ایران در راستای هویت‌بخشی به اهداف و فعالیت‌های دانشمندان و پژوهشگران حوزه ژئوفیزیک ایران در سال ۱۳۵۴ تأسیس گردیده است.

این انجمن با همکاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مراکز علمی، دانشگاهی و سایر نهادهای دولتی مرتبط و شرکت‌های تخصصی بخش خصوصی و مهندسی مشاور ذیربط، 'اولین همایش ژئوفیزیک کاربردی در معادن' در تاریخ ۱۵ الی ۱۶ اسفندماه سال ۱۴۰۲ در تهران برگزار نموده است. محورهای کنفرانس عبارتند از:

- پیشرفت‌های نوین در روش‌های ژئوفیزیک معدنی
- ژئوفیزیک هوابرد در شناسایی پتانسیل‌های معدنی
- ژئوفیزیک پهباد در مهندسی معدن
- ژئوفیزیک در بررسی مسائل هیدروژئولوژی در معادن
- ژئوفیزیک در بررسی مسائل زمین‌شناسی مهندسی ژئوتکنیک در معادن
- نقش ژئوفیزیک در اکتشاف معادن عمیق
- ژئوفیزیک درون‌چاهی در مهندسی معدن
- هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در ژئوفیزیک اکتشافی
- وارون‌سازی سه بعدی داده‌های ژئوفیزیک
- وارون‌سازی مشترک داده‌های روش‌های مختلف ژئوفیزیک
- نقش دانش و اطلاعات زمین‌شناسی در پردازش و تفسیر داده‌های ژئوفیزیک
- روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در ژئوفیزیک معدنی
- روش رادیومتری در اکتشاف منابع معدنی
- روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیس در اکتشاف منابع معدنی
- روش IP-RS در اکتشاف و استخراج مواد معدنی
- روش لرزه‌ای در اکتشاف مواد معدنی
- ژئوفیزیک درون‌چاهی در مهندسی معدن
- روش GPR در مهندسی معدن

حامیان علمی و معنوی کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در معادن

| | | | |
|---|---|--|---|
|  <p>دانشگاه صنعتی امیرکبیر</p> |  <p>دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)</p> |  <p>دانشکده معدن دانشگاه تهران</p> |  <p>موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران</p> |
|  <p>دانشگاه شهید بهشتی مازندران</p> |  <p>دانشگاه صنعتی شاهرود</p> |  <p>دانشگاه یزد</p> |  <p>دانشگاه صنعتی سهند</p> |
|  <p>وزارت علوم، تحقیقات و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته</p> |  <p>دانشگاه شیراز</p> |  <p>انجمن زمین شناسی ایران GEOLOGICAL SOCIETY OF IRAN 1995</p> |  <p>وزارت علوم، تحقیقات و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه گاوزنگ، زنجان</p> |
|  <p>انجمن مهندسی معدن ایران Iranian Society of Mining Engineering (IRSM)</p> |  <p>EAGE</p> |  <p>باهمایش BaHamayesh.com پایگاه اطلاع رسانی همایش های کشور</p> |  <p>کنفرانس یاب www.conferenceyab.ir</p> |

حامیان مادی و معنوی کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در معادن

| | | | |
|--|--|---|---|
|  IMIDRO IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT AND RENOVATION ORGANIZATION سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران |  وزارت صنعت، معدن و تجارت سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور |  شرکت ملی صنایع مس ایران |  Dornika Pooreh Hamou |
|  Kavakaray Novin Madan |  اسکام شرکت مهندسی اکتشاف و استخراج اکتشافات معدنی کشور |  شرکت چشم زیر سطح |  پادیاب تجهیز |
|  P B پیشگام تجهیزینان |  Sabra Kay Consulting Engineers |  KGM شرکت کارآزمای معدن زمین Karazma Geo Mine |  زمین سنجش رایان |
|  انروزی توانا |  کیان کاران زمین مهندسی مشاور ژئوفیزیک |  GEOPHYSICAL INSTRUMENTS شرکت سازنده تجهیزات www.geophysicalinstruments.com geophysicalinstruments@gmail.com | |

سازمان کنفرانس

ریاست کمیته برگزاری: دکتر محمدرضا حاتمی

mrhatami@ut.ac.ir



دبیر علمی: دکتر عبدالحمید انصاری



دبیر کمیته اجرایی: مهندس مجتبی خسروی

khosravi2265@gmail.com



روابط عمومی و دبیرخانه - مهندس پریسا مهدی

nigs@ut.ac.ir



کمیته علمی:

| نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | وابستگی سازمانی |
|---|-----------|--|
| دکتر عبدالحمید انصاری | دانشیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر وحید ابراهیم زاده اردستانی | استاد | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر محمدعلی ریاحی | استاد | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر سید هانی متولی عنبران | دانشیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر رضا قناتی | استادیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر سعید وطن خواه | استادیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر منصوره منتهایی | استادیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر علی مراد زاده | استاد | دانشکده معدن ، دانشگاه تهران |
| دکتر میثم عابدی | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه تهران |
| دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی | استاد | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر حمید آقاجانی | دانشیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر امین روشندل کاهو | دانشیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر محمد رداد | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر علی نجاتی | دانشیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر سید محمد ابطحی فروشانی | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی اصفهان |
| دکتر حمزه صادقی سرخنی | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه صنعتی اصفهان |
| دکتر حسینعلی قاری | استادیار | دانشکده معدن و متالوژی ، دانشگاه یزد |
| دکتر علی میثاقی | استادیار | دانشکده علوم زمین ، دانشگاه خوارزمی |
| دکتر احسان پگاه | استادیار | دانشکده علوم زمین ، دانشگاه خوارزمی |
| دکتر غلامرضا نوروزی | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه بیرجند |
| دکتر سعید یوسفی | استادیار | دانشکده معدن ، دانشگاه بیرجند |
| دکتر عبدالرضا قدس | استاد | دانشکده علوم زمین ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان |
| دکتر حبیب رحیمی | استادیار | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |
| دکتر محمد رداد | استادیار | دانشگاه صنعتی شاهرود |
| دکتر مهدی رضایور | استاد | مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران |

| | | |
|---|----------|---|
| دانشگاه هرمزگان | استادیار | دکتر مریم رضازاده |
| پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران | دانشیار | دکتر عباس رنجبر سعادت آبادی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استاد | دکتر محمد علی ریاحی |
| دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس | استادیار | دکتر زهره سادات ریاضی راد |
| | استاد | دکتر علی اکبر سبزی پرور |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استادیار | دکتر احمد سدیدخوی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | دانشیار | دکتر قادر سرمد |
| عضو هیات علمی دانشکده زمین شناسی دانشگاه تهران. | دانشیار | دکتر عبدالله سهرابی بیدار |
| شبکه ملی شتابنگاری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی | | دکتر محمد شاهوار |
| بازنشسته سازمان سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور | | مهندس ابراهیم شاهین |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | دانشیار | دکتر الهام شعبانی |
| مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد | دانشیار | دکتر حسین صادقی |
| شرکت دانا انرژی | | دکتر احسان صالحی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | | دکتر امین عباسی |
| پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله | استاد | دکتر محمدرضا عباسی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استاد | دکتر عباسعلی علی اکبری بیدختی |
| دانشگاه هرمزگان | دانشیار | دکتر عباس غلامزاده |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | دانشیار | دکتر مرتضی فتاحی |
| دانشگاه صنعتی سهند تبریز | استادیار | دکتر رضا فلاحت |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | دانشیار | دکتر مریم قرابلو |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استادیار | دکتر رضا قناتی |
| | دانشیار | دکتر نوذر قهرمان |
| دانشگاه زنجان | دانشیار | دکتر صادق کریم یولی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استاد | دکتر علیرضا محب الحججه |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استادیار | دکتر علی مرادی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استادیار | دکتر مجید مزرعه‌فراهانی |
| دانشگاه یزد | استادیار | دکتر محمد حسین معماریان |
| پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله | سایر | دکتر رامین موقری |

| | | |
|--|----------|---------------------------------------|
| دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد | استادیار | دکتر سید مجید میررکفی |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استاد | دکتر نوریخش میرزایی |
| دانشگاه اراک | دانشیار | دکتر محمود میرزائی |
| مرکز پژوهش های علوم جوی و اقیانوسی دانشگاه شیراز | استاد | دکتر سید محمد جعفر ناظم السادات |
| دانشگاه بیرجند | استادیار | دکتر غلامرضا نوروزی |
| پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله | دانشیار | دکتر فرزاد یمینی فرد |
| مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران | استاد | دکتر مجید نبی بیدهندی |

فهرست مقالات فارسی

- ۱ مدل سازی مقاومت الکتریکی با استفاده از بهینه سازی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه.....
- ۸ تکنیک های لرزه ای در بهینه سازی اکتشاف منابع معدنی.....
- ۱۴ ضرورت شناسایی گسل های پنهان با استفاده از داده های زیرسطحی ژئوفیزیک جهت بررسی روند آنومالی های پتانسیل دار
- ۲۲ اکتشاف کانی سازی سرب به کمک روش پلاریزاسیون القایی.....
- ۲۹ مدل سازی وارون داده های ژئوفیزیکی در تصویر سازی ژئوالکتریکی کانهای طلا؛ مطالعه موردی محدوده کبودان شهرستان بردسکن
- ۳۶ مطالعات ژئوفیزیکی به روش های مغناطیسسنجی و IP/RS جهت شناسایی کانهای مس در محدوده های واقع در شهرستان گرماب، غرب نیشابور.....
- ۴۴ وارون سازی داده های مغناطیسی و مگنتوتلوریک برای پی جویی کانسارهای IOCG در کوئینزلند استرالیا.....
- ۵۲ وارون سازی مشترک مبتنی بر ساختار مغناطیسسنجی و داده های مقاومت DC از طریق گرادیان متقاطع مقید
- ۵۹ مدل سازی وارون داده های مغناطیسی و IP/RS با هدف اکتشاف کانسار مس معدن تکنار خراسان رضوی.....
- ۷۴ تلفیق داده های زمین شناسی، سنجش از دور و مغناطیسسنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن دوزخ دره و تعیین نقاط حفاری در جنوب کرمان، ایران.....
- ۸۷ نقش GPR در شناسایی مناطق متراکم در محدوده های سنگ ساختمانی.....
- ۹۵ کاهش همبستگی پارامتر های مدل GEMTip با استفاده از روابط لگاریتمی.....
- ۱۱۲ مغناطیسسنجی و اکتشاف زون کانی زایی.....
- ۱۱۷ اولویت بندی لایه های اکتشافی در پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره.....
- ۱۲۳ بررسی کانی سازی آهن در محدوده توت اردکان یزد با استفاده از روش مگنتومتري.....
- ۱۳۴ آشکارسازی اثرات توپوگرافی در مدل سازی پیشرو داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی.....
- ۱۴۸ قطبش القایی در محیط متخلخل با حضور کانه های فلزی، مطالعه موردی: معدن کوشک.....
- ۱۵۶ مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده اکتشافی مس قائن.....
- ۱۶۴ وارون سازی دوبعدی داده های ژئوالکتریک به منظور اکتشاف مس در محدوده بنوید اصفهان.....
- ۱۷۲ کاربرد تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر در تفکیک بی هنجاری محلی و ناحیه ای داده های میدان پتانسیل
- ۱۸۰ استفاده از توموگرافی انکساری لرزه ای در مدل سازی ساختار سرعت زیرسطحی.....
- ۱۸۷ ارزیابی ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانه ای از سرعت های لرزه ای و بررسی وابستگی آن به مشخصات ظاهر سطحی خاک

- ۱۹۶..... توموگرافی الکتریکی جهت تصویرسازی مرز لایه ها؛ مطالعه موردی
- ۲۰۸..... بررسی وضعیت کانیزایی هماتیت به کمک روشهای ژئوفیزیکی
- ۲۱۸..... مطالعه ژئوالکتریک معدن طلای هیرد نهبندان
- ۲۲۵..... بررسی توزیع کرومیت بر اساس داده های زمین شناسی و مغناطیس سنجی در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون
- ۲۳۱..... تفسیر و مدلسازی دادههای مقاومت ویژه الکتریکی برای اکتشاف قیر طبیعی در محدوده اکتشافی گلان استان ایلام
- ۲۳۸..... اکتشاف آب زیرزمینی در دشت زنگوان با مطالعه دادههای مقاومتیژه
- ۲۴۵..... تفکیک ساختارهای پیچیده زیرسطحی عمیق و آنالیز سرعت، با استفاده از روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل
- تحلیل میدان مغناطیسی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته برای تخمین عمق و شکل توده معدنی
- ۲۵۲.....
- ۲۶۳..... اندازه گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی به وسیله ی پهپاد
- ۲۷۱..... اکتشاف ذخایر عمیق پلی متال در سیستم های پورفیری با استفاده از روش های ژئوفیزیک
- ۲۷۶..... تفسیر خودکار بدون نظارت الگوهای بازتابی در داده های لرزه ای با روش k-means
- ۲۸۱..... یک فیلتر جدید با وضوح بالا در تشخیص لبه داده های میدان پتانسیل
- ۲۸۹..... بررسی شاخص باروری گرانیوتئیدهای شمال مکران به روش هندسی - مغناطیسی
- ۲۹۷..... اکتشاف مس با روش های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در محدوده قلعه صولی سیستان و بلوچستان
- ۳۰۷..... مغناطیس سنجی گرادیومتری با پهپاد، مطالعه موردی بر روی معدن کلکان، استان کردستان
- ۳۱۴..... کاربرد روش مقاومتیژه در شناسایی گسلهای آبرفتی (مطالعه موردی: معدن شماره ۱ گل گهر)، سیرجان
- ۳۲۱..... مطالعات زمینشناسی و مغناطیسنجی زمینی در اکتشاف ذخایر آهن انجیره زاهدان (سیستان و بلوچستان)
- ۳۲۸..... اکتشاف ماده معدنی کرومیت به روش الکترومغناطیسی بم در محدوده اکتشافی سرهنگ
- برداشت های مقاومت ویژه الکتریکی جهت تعیین خصوصیات حوضچه باطله تر معدن شماره یک گل گهر سیرجان
- ۳۳۴.....
- تحلیلی آسیب شناسانه بر برخی عوامل ایجاد کننده خطا در مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی و ارائه راهکارهایی برای کمینه کردن آن
- ۳۴۳.....
- ۳۵۳..... بررسی سازی داده های مگنتومتری با پایتون (مورد مطالعاتی: تفکیک واحدهای رسوبی پلایای طرود)
- ۳۶۵..... تحلیل داده های میکرو گرانی سنجی کانسار سرب و روی محدوده پاییز دامغان
- ۳۷۲..... مطالعات اکتشاف تکمیلی محدوده دهسلم با استفاده از روش مغناطیسنجی زمینی و تطبیق آن با کانیزایی
- ۳۸۲..... آشکارسازی حاشیه های توده کانسار در معدن شماره ۱ گل گهر با استفاده از روش فراکتال
- ۳۸۹..... استفاده از روش های فرکتال/مولتی فرکتال جهت آشکارسازی بی هنجاری های ژئوفیزیکی در محدوده ساردوئیه، استان کرمان
- ۳۹۶..... یک فیلتر جدید با وضوح بالا در تشخیص لبه داده های میدان پتانسیل
- ۴۰۴..... اکتشاف با روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه

| | |
|----------|---|
| ۴۱۱..... | ظرفیت های مدل گرانشی نوری در ژئوفیزیک |
| ۴۱۶..... | معرفی کتابخانه PYGIML (ماژول پایتون برای وارونگی و مدل سازی در ژئوفیزیک) |
| ۴۲۲..... | ظرفیت های کوانتومی در اکتشافات معدنی |
| ۴۲۹..... | مدلسازی سه بعدی داده های مغناطیسیسنجی در محدوده های اکتشافی شمال سراب |
| ۴۳۷..... | آشکارسازی گسلها در تفسیر داده های لرزه های با استفاده از یادگیری عمیق |
| ۴۴۴..... | تلفیق داده های پلاریزاسیون القایی و مغناطیسیسنجی جهت پتانسیلیابی و اکتشاف کانسارهای پورفیری |
| ۴۵۱..... | پردازش داده های مغناطیسی با روش تبدیل موجک برای محاسبه بی هنجاری محلی |
| ۴۵۹..... | کاربرد روش های لرزه ای در اکتشاف معادن |
| ۴۶۹..... | مطالعات ژئوفیزیکی به روش مغناطیسیسنجی جهت شناسایی کنهزایی مس در محدوده های واقع در شهرستان گرماب، غرب نیشابور |
| ۴۷۹..... | تخمین پلاریزاسیون القایی با استفاده از یادگیری ماشین: کاربرد در اکتشاف کانسارهای سولفیدی |
| ۴۸۷..... | بررسی روش های تخمین مرز آنومالی های مغناطیسی در توده سنگ آهن شماره ۶ گل گهر |

فهرست مقالات انگلیسی

| | |
|---|-----|
| Introducing an innovative framework for Mineral Exploration through the integration of Advanced Machine Learning Methodologies within the domain of Geophysics..... | 495 |
| IP-Rs and Magnetic Geophysical 3D Modelling of Copper Deposits; A Case Study Sheikhdar Abad Copper Deposit..... | 501 |
| Innovative passive microseismic methods in oil and gas industry | 507 |
| Time-Domain Induced Polarization Tomography Inversion..... | 516 |
| Unveiling Rock Brittleness for Mine Exploration: The Potential of Non-Destructive Seismic Methods..... | 529 |
| Assessing Slope Stability using Geoelectrical Method: A Case Study..... | 535 |

مدل سازی مقاومت الکتریکی با استفاده از بهینه سازی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

دانیال عبدالکریمی راوری^۱، اسما احمدی^۲، مریم میرحسینی^۳، نگین اشرف^۴، امیرحسین نجفآبادی پور^۵

۱- کارشناسی مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ daniyal.abdolkarimi227@eng.uk.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ asma.ahmadi@eng.uk.ac.ir

۳- دکتری حرفه ای آنستزیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان؛ m.mirhosseini@kmu.ac.ir

۴- کارشناسی مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ negin.ashraf02@gmail.com

۵- دکتری مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ najafabadipour@eng.uk.ac.ir

*نویسنده مسئول: دانیال عبدالکریمی راوری

چکیده

روش ژئوالکتریک، به عنوان یک روش مرسوم در حوزه اکتشافات آب زیرزمینی، امکان تحلیل و تفسیر ویژگی های الکتریکی زمین را فراهم می آورد. در این راستا، استفاده از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به عنوان یک ابزار قدرتمند در مدل سازی داده های ژئوالکتریک به دلیل استفاده از الگوریتم های غیرخطی که ارائه می دهد، به یکی از حیاتی ترین عناصر در زمینه اکتشافات ژئوفیزیکی تبدیل شده است. در این مطالعه، از دو بهینه ساز لونیبرگ-مارکوارت و گرادیان مزدوج برای مدل سازی مقاومت الکتریکی به منظور اکتشاف آب زیرزمینی استفاده شده است و نتایج به دست آمده از هر مدل با یکدیگر مقایسه شده اند. برای این منظور، از داده های مربوط به مقاومت الکتریکی چهار سونداژ الکتریکی در اطراف شهرستان ارزوئیه استفاده شده است. نتایج گرافیکی و آماری مقایسه مدل ها، نشان از دقت بالاتر مدل لونیبرگ-مارکوارت (ضریب همبستگی ۰.۹۹ و خطای میانگین مربعات ۱.۰۸) نسبت به مدل گرادیان مزدوج دارد.

کلمات کلیدی: مقاومت الکتریکی، یادگیری ماشین، پرسپترون چندلایه، لونیبرگ-مارکوارت، گرادیان مزدوج.

Modeling electrical resistivity using multilayer perceptron neural network optimization

Danial Abdolkarimi Ravari¹, Asma Ahmadi², Maryam Mirhosseini³, Negin Ashraf⁴, Amirhossein Najafabadipour⁵

¹Bachelor in Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman/daniyal.abdolkarimi227@eng.uk.ac.ir

²Master in Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman/asma.ahmadi@eng.uk.ac.ir

³Medical Doctor in Anesthesiology, Kerman University of Medical Sciences/m.mirhosseini@kmu.ac.ir

⁴Bachelor in Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman/negin.ashraf02@gmail.com

⁵Ph.D. in Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman/najafabadipour@eng.uk.ac.ir

*Corresponding author: Danial Abdolkarimi Ravari

ABSTRACT

The geoelectrical method, as a conventional technique in groundwater exploration, provides the opportunity to analyze and interpret the Earth's electrical resistivity characteristics. In this context, the utilization of the Multilayer Perceptron neural network method as a potent tool in geoelectrical data modeling has become a crucial element in the field of geophysical exploration, owing to the non-linear algorithms it employs. In this study, two optimizers, Levenberg-Marquardt, and Conjugate Gradient, were employed to model electrical resistivity for groundwater exploration, and the results obtained from each were compared. For this purpose, the electrical resistivity data of four electrical soundings around the city of Orzueeyeh were utilized. The graphical and statistical results of comparing the models indicate a higher accuracy of the Levenberg-Marquardt model (correlation coefficient 0.99 and mean square error 1.08) compared to the conjugate gradient model. This suggests that the Levenberg-Marquardt optimizer, with its superior performance, is more effective in modeling electrical resistivity in the context of groundwater exploration.

Keywords: Electrical Resistivity, Machine learning, Multilayer Perceptron, Levenberg Marquardt, Conjugate Gradient.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، اکتشاف منابع آب به‌وسیله روش مرسوم ژئوالکتریک با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های یادگیری ماشین اهمیت بسزایی پیدا کرده است. استفاده از این رویکرد نه تنها در بهبود دقت فرآیند اکتشاف، بلکه در کاهش هزینه‌ها و زمان مورد نیاز نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. روش ژئوالکتریک، با تحلیل داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در سطح زمین، اطلاعاتی ارزشمند از لایه‌های زیرسطحی فراهم می‌آورد. استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان یکی از اصولی‌ترین فرآیندهای هوش مصنوعی، توانمندی‌های جدیدی در تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوالکتریک ارائه کرده است. از جمله مهم‌ترین مزایای استفاده از یادگیری ماشین در این زمینه می‌توان به دقت بیشتر در تفسیر داده‌ها و افزایش سرعت پردازش اطلاعات اشاره کرد. مدل‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های ژئوالکتریک، این امکان را می‌دهند تا با مدل‌سازی مقاومت الکتریکی مناطق با پتانسیل بالای اکتشاف آب شناسایی شوند.

[۱] با استفاده از یادگیری ماشین مقاومت الکتریکی عمودی را در چاه‌های اکتشافی حفار شده در فلات قاره نروژ، ناهمسانگردی الکتریکی را آنالیز کرده‌اند. در این مطالعه از یادگیری ماشین برای پیش‌بینی ناهمسانگردی و همچنین مقاومت الکتریکی عمودی در تصویربرداری الکترومغناطیسی استفاده شده است. [۲] با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی سطح آب زیرزمینی محدوده معدن گهر زمین را پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج نشان از دقت بالای روش پرسپترون چندلایه برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ورودی مکانی و زمانی مختلف داشت. علاوه بر آن، داده‌های پرت شناسایی و همچنین آنالیز حساسیت برای متغیرهای ورودی بررسی شد. [۳] از طریق توپوگرافی مقاومت الکتریکی ادغام‌شده با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پیش‌آبخوان مورد مطالعه را بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان از دقت بالای شبکه عصبی بازگشتی برای بررسی مقاومت الکتریکی داشت. مطالعات بررسی‌شده نشان از توانمندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در حل مسائل رگرسیون دارد.

هدف در این مطالعه مدل‌سازی مقاومت الکتریکی با استفاده از روش توانمند شبکه عصبی پرسپترون چندلایه می‌باشد. همچنین برای افزایش دقت یادگیری مدل پرسپترون چندلایه از دو روش بهینه‌ساز لوبز-مارکوارت^۱ و گرادیان مزدوج^۲ استفاده شده است. بدین

¹ Levenberg-Marquardt (LM)

² Conjugate Gradient (CG)

منظور از داده‌های مقاومت الکتریکی چهار سونداژ استفاده شده است. در انتها دو روش بهینه‌ساز لونبرگ-مارکوارت و گرادیان مزدوج از نظر گرافیکی و آماری با یکدیگر بررسی شده‌اند.

روش‌های تحقیق

زمین‌شناسی منطقه

بررسی نقشه زمین‌شناسی ارزوئیه به مقیاس یکصد هزارم نشان می‌دهد موقعیت ساختاری محلی که چشمه آب گرم در آن واقع شده است محل برخورد گسل‌های متعددی با روند شمال غرب - جنوب شرق، شمالی - جنوبی و حتی شرقی - غربی است. گسل رو رانده آبگرم از محدوده ۲ کیلومتری جنوب غرب چشمه عبور می‌کند. همچنین گسل رو رانده ده شیخ تقریباً به موازات تراست آبگرم و در شرق چشمه به فاصله حدود ۴ کیلومتری آن با روند شمال غرب - جنوب شرق منطقه را از لحاظ تکتونیکی تحت تأثیر قرار داده است. گسل‌های دیگری با روند تقریبی شمالی - جنوبی و حتی شرقی - غربی در این منطقه با یکدیگر برخورد کرده‌اند و در مسیر رودخانه‌ای که در این منطقه وجود دارد به راحتی قابل تشخیص است. در شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه قابل مشاهده است.



شکل (۱): تصویر ماهواره‌ای گوگل محدوده مورد مطالعه و محل نقاط سونداژ الکتریکی.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه³

یکی از ساده‌ترین و درعین حال کارآمدترین چیدمان‌های پیشنهادی برای استفاده در مدل‌سازی عصب‌های واقعی پرسپترون چندلایه MLP می‌باشد. این شبکه‌ها شامل مجموعه‌ای از واحدهای حسی یا نورون می‌باشند که متشکل از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشند. سیگنال ورودی به مدل، در خلال شبکه و در مسیری روبه‌جلو از یک لایه به لایه دیگر منتشر می‌گردند. در این ساختار تمام نورون‌های یک لایه به تمام نورون‌های لایه بعد متصل‌اند. این چیدمان اصطلاحاً یک شبکه با اتصالات کامل را تشکیل می‌دهد. این نوع شبکه عصبی به شبکه عصبی پیش‌خور چندلایه نیز معروف است [۴].

³ Multilayer Perceptron (MLP)

الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت^۴

الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت (LM) یک تکنیک تکراری است که حداقل یک تابع چند متغیره را که به صورت مجموع مجذورهای توابع بارزش واقعی غیرخطی بیان می‌شود، تعیین می‌کند. این یک تکنیک استاندارد برای مسائل حداقل مربعات غیرخطی شده است که به طور گسترده در طیف گسترده‌ای از رشته‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. LM را می‌توان ترکیبی از تندترین کاهش ۵ و روش گاوس-نیوتن ۶ در نظر گرفت. هنگامی که راه‌حل فعلی از راه‌حل صحیح فاصله دارد، الگوریتم مانند تندترین کاهش رفتار می‌کند، اما تضمین شده که همگرا می‌شود. هنگامی که راه‌حل فعلی نزدیک به جواب صحیح باشد، به روش گاوس-نیوتنی تبدیل می‌شود [۵].

الگوریتم گرادیان مزدوج شده^۷

این الگوریتم برای آموزش شبکه عصبی MLP طوری پایه‌گذاری شده که از جستجوهای خطی زمان‌بر پرهیز کند. الگوریتم گرادیان مزدوج شده یک الگوریتم بهینه‌سازی است که در مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با کمینه‌سازی تابع هدف به کار می‌رود. رویه این الگوریتم آموزشی، به تکرارهای بیشتر برای همگرایی نسبت به بقیه الگوریتم‌های شیب توأم نیاز دارد اما از مقدار محاسبات در هر تکرار به طور محسوسی کاسته می‌شود زیرا جستجوی خطی در این روش انجام نمی‌شود [۶].

پارامترهای آماری

خطای میانگین مربعات

در ریاضیات و آمار، خطای میانگین مربعات روشی برای برآورد میزان خطاست که در واقع تفاوت بین مقادیر تخمینی و آنچه تخمین زده شده، است. این شاخص که مقداری همواره نامنفی دارد، هرچقدر مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده میزان کمتر خطاست. برای به دست آوردن خطای میانگین مربعات از یک مجموعه یا n داده می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۷]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

Y_i مقدار واقعی داده‌ها و \hat{Y}_i مقدار پیش‌بینی توسط مدل می‌باشد.

ضریب همبستگی

ضریب همبستگی یک مفهوم آماری است که اندازه‌گیری ارتباط خطی بین دو متغیر را فراهم می‌کند. این ضریب از -۱ تا ۱ ارزیابی می‌شود که ارزش -۱ نشان‌دهنده ارتباط منفی کامل، ۱ نشان‌دهنده ارتباط مثبت کامل و ۰ نشان‌دهنده عدم ارتباط خطی است [۸]. فرمول محاسبه ضریب همبستگی بین دو متغیر X و Y به صورت زیر است:

⁴ Levenberg Marquardt (LM)

⁵ steepest descent

⁶ Gauss-Newton

⁷ Conjugate Gradient (CG)

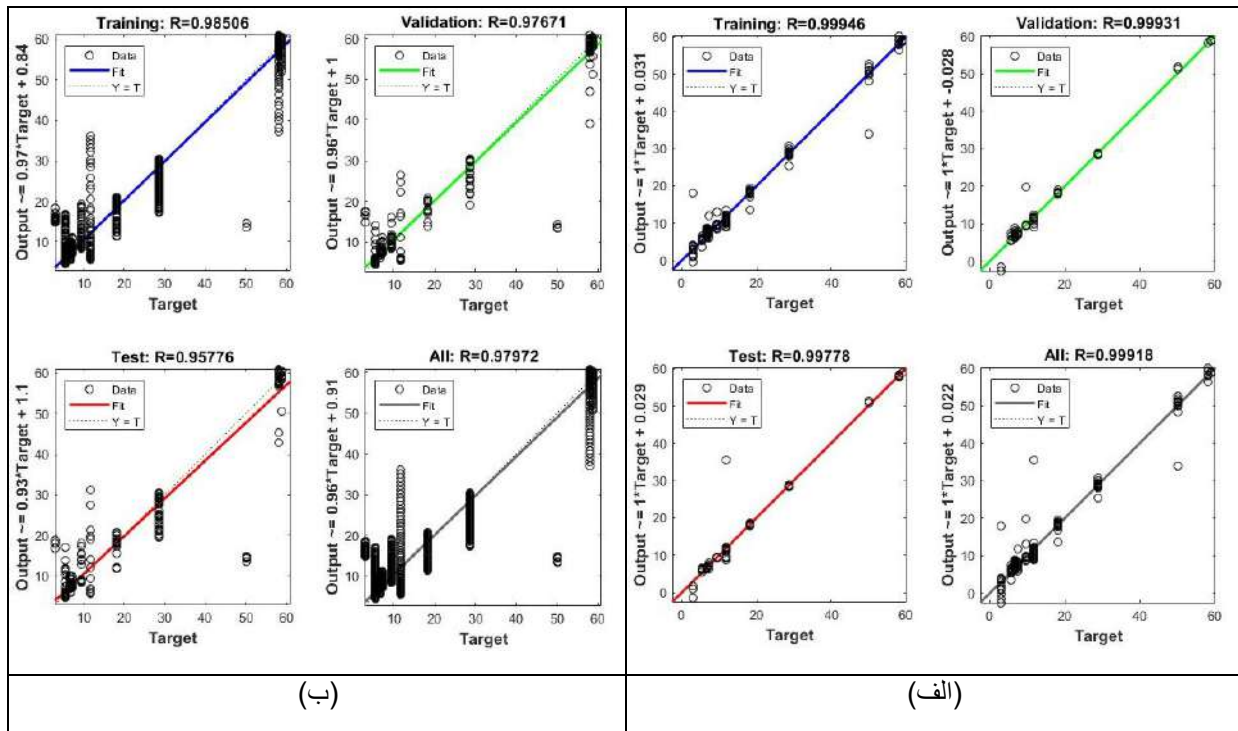
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

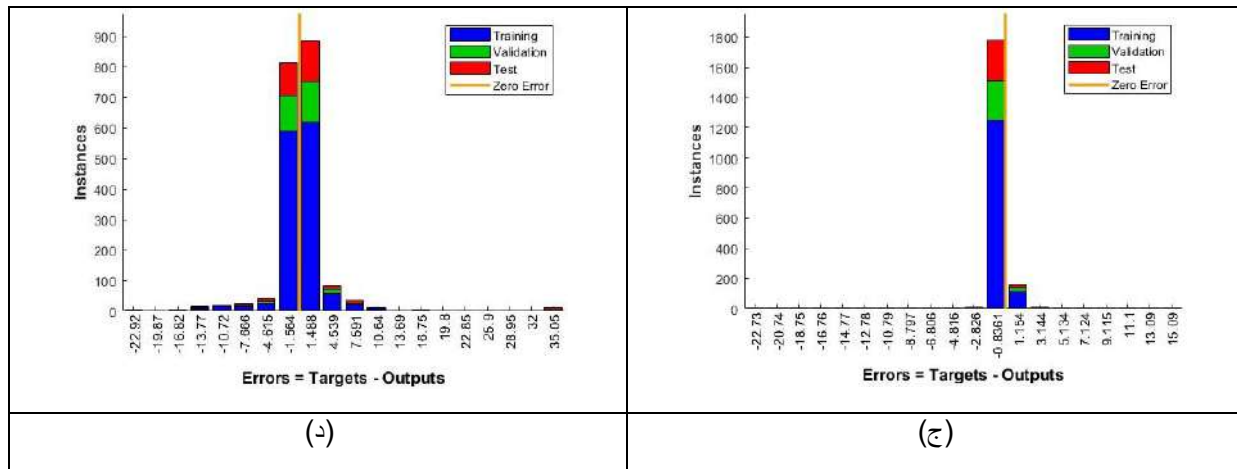
در این رابطه n تعداد نقاط داده، X_i و Y_i مقادیر متغیرها در نقطه i ام، \bar{X} و \bar{Y} میانگین مقادیر متغیرها می‌باشند.

یافته‌ها

به منظور مدل‌سازی مقاومت الکتریکی از داده‌های مختصات UTM سونداژها و عمق مقاومت الکتریکی به عنوان ورودی و مقدار مقاومت الکتریکی به عنوان خروجی در شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده است. از دو بهینه‌ساز LM و CG برای مدل‌سازی روابط بین ورودی و خروجی استفاده شده است. در مدل LM از دولایه مخفی که در لایه اول ۱۰ و در لایه دوم ۱۲ نورون بود استفاده شده است. در مدل CG از دولایه مخفی که لایه اول شامل ۲۰ و لایه دوم شامل ۲۲ نورون بود استفاده شده است. در هر دو مدل از ۷۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌ی آموزش، ۱۵٪ داده‌ها به عنوان اعتبارسنجی و ۱۵٪ داده‌ها به عنوان آزمایش استفاده شده است.

در شکل ۲ نمودار متقاطع برای داده‌های واقعی و تخمین زده شده نشان داده شده است که نمودار آبی‌رنگ برای داده‌های آموزش، نمودار سبز رنگ برای داده‌های اعتبارسنجی، نمودار قرمز رنگ برای داده‌های آزمایش و نمودار سبزرنگ برای همه داده‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب همبستگی برای هر دو مدل LM و CG بالاتر از ۰.۹۵ می‌باشد که نشان از دقت بالای هر دو مدل در هر سه داده آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش دارد. علاوه بر آن قرار گرفتن نمودار فراوانی خطا برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش در اطراف نقطه صفر نشان از دقت بالای هر دو مدل توسعه داده شده دارد.





شکل ۲. نمودار متقاطع و توزیع خطا برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش برای مدل (الف و ج) LM و (ب و د) CG.

در ادامه در جدول ۱ مقدار خطای میانگین مربعات برای دو مدل LM و CG برای سه داده آزمایش، اعتبارسنجی، آزمایش و همه داده‌ها نشان داده شده است. مقادیر کمتر و نزدیک به صفر مدل LM نشان از دقت بالاتر این مدل نسبت به مدل CG دارد.

جدول ۱. مقدار خطای میانگین مربعات برای مدل‌های LM و CG.

| مدل | خطای میانگین مربعات برای همه داده | خطای میانگین مربعات برای داده‌های آموزش | خطای میانگین مربعات برای داده‌های آزمایش | خطای میانگین مربعات برای داده‌های اعتبارسنجی |
|-----|-----------------------------------|---|--|--|
| LM | 1.08 | 0.23 | 2.29 | 3.85 |
| CG | 19.02 | 13.84 | 39.04 | 23.28 |

تفسیر نتایج

برای انجام یک ارزیابی دقیق از دقت و عملکرد مدل‌ها، نمودار متقاطع برای داده‌های واقعی و تخمین زده‌شده در شکل ۲ بالا نشان داده شده است. این تجزیه و تحلیل شامل نمایش داده‌های واقعی در برابر داده‌های تخمین زده‌شده با استفاده از مدل‌های توسعه یافته در امتداد خط $Y=T$ (خط ۴۵ درجه) است که مبدأ نمودار را قطع می‌کند. دقت مدل با میزان همسویی روند با خط واحد شیب اندازه‌گیری می‌شود. قرار گرفتن نقاط داده در امتداد خط $Y=T$ در هر سه داده آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی نشان از دقت بالای هر دو مدل دارد. علاوه بر آن در شکل ۲ پایین، نمودار توزیع خطا را برای هر داده بر اساس داده‌های واقعی و خطا (اختلاف بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده) از مدل‌های یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. تمرکز داده‌ها نزدیک به نقطه صفر، نشان‌دهنده حداقل انحراف و دقت بالا در این مدل‌ها است. در نمودار توزیع خطا، به‌طور کلی، گسترش گسترده‌تر داده‌ها که از نقطه صفر خطا منحرف می‌شوند، دقت مدل کمتری را نشان می‌دهند، در حالی که توزیع متمرکزتر در اطراف این نقطه نشان‌دهنده دقت بالاتر است. در موارد عدم دقت مدل، داده‌ها عمدتاً در سمت راست یا چپ نقطه صفر قرار می‌گیرند که به ترتیب نشان‌دهنده بیش برآورد یا کم برآورد است.

نتیجه گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که روش‌های یادگیری ماشین به دلیل استفاده از الگوریتم‌های غیرخطی دقت بالایی در حل مسائل رگرسیون دارند. مدل LM نسبت به مدل CG دقت بالاتری دارد و اغلب به دلیل سرعت همگرایی کارآمد آن مورد توجه قرار می‌گیرد. مدل LM برای مدیریت مؤثر مسائل بهینه‌سازی غیرخطی شناخته شده است و همچنین شامل مکانیسم‌هایی برای مقابله با حداقل‌های محلی در بهینه‌سازی است. در نهایت، انتخاب بین مدل LM و CG باید بر اساس آزمایش تجربی باشد؛ بنابراین می‌توان از این روش توانمند یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نقاطی که اطلاعات مقاومت الکتریکی موجود نیست، استفاده کرد. از محدودیت‌های این پژوهش، ناکافی بودن حجم داده‌های جامع و همچنین پارامترهای ورودی ناکافی است که جمع‌آوری داده‌های بیشتری را ایجاب می‌کند. تحقیقات آینده می‌تواند ترکیبی از مدل‌های جدید را برای افزایش دقت پیش‌بینی بررسی کند.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر غلامرضا کمالی برای در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر می‌شود.

مراجع

- [۱] Vereshagin, A., T. Wedberg, and A. Stefatos, *Predicting Vertical Resistivity By Machine Learning*. 2019. **2019**(1): p. 1-5.
- [۲] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, *Application of Artificial Intelligence Techniques for the Determination of Groundwater Level Using Spatio-Temporal Parameters*. ACS Omega, 2022. **7**(12): p. 10751-10764.
- [۳] Giampaolo, V., et al., *Optimization of Aquifer Monitoring through Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Integrated with Machine-Learning and Predictive Algorithms*. Applied Sciences, 2022. **12**(18): p. 9121.
- [۴] Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*. 1998: Prentice Hall PTR.
- [۵] Hagan, M.T. and M.B. Menhaj, *Training feedforward networks with the Marquardt algorithm*. IEEE transactions on Neural Networks, 1994. **5**(6): p. 989-993.
- [۶] Møller, M.F., *A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning*. Neural networks, 1993. **6**(4): p. 525-533.
- [۷] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, *The Innovative Combination of Time Series Analysis Methods for the Forecasting of Groundwater Fluctuations*. Water Resources, 2022. **49**(2): p. 283-291.
- [۸] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, *Numerical modeling, groundwater management, and evaluation of optimal water pumping rate in Gohar Zamin Iron Ore Mine (Sirjan-Iran)*. Hydrogeology, 2023. **8**(1): p. 17-33.

تکنیک‌های لرزه‌ای در بهینه‌سازی اکتشاف منابع معدنی

^۱امین صانع پور ، ^۲محمدعلی ریاحی

^{۱-۱-۱} دانشجوی کارشناسی ارشد ، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ amin.sanepour@ut.ac.ir

^۲آستاذ ، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ mariahi@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: امین صانع پور

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی امکانات استفاده از روش‌های لرزه‌ای و تأثیر آن بر اکتشاف منابع معدنی می‌پردازد. تکنیک‌های لرزه بازتابی به عنوان ابزار مؤثری برای اکتشاف فلزات پایه در نظر گرفته می‌شوند، با توجه به ویژگی‌های فیزیکی مانند سرعت موج فشارشی و چگالی مواد. این تحقیق به بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه می‌پردازد و تأکید دارد که بازتاب فرکانس بالا می‌تواند قابلیت‌های برداشت مورد نیاز را برای اهداف زمین‌شناسی مانند دایک‌ها و قابلیت‌های آشکارسازی مستقیم برای توده‌های معدنی فراهم کند. این رویکرد نوین در اکتشاف معدنی امکانات بسیاری را برای تحلیل زمین و تشخیص مستقیم کانسارها ارائه می‌دهد. با ترکیب اطلاعات ژئوفیزیکی لرزه‌ای با تحقیقات خاص در زمین‌شناسی و چاه‌نگاری، دقت در تفسیر ساختار زمین افزایش می‌یابد و توانایی تشخیص کانسارها در محیط‌های پیچیده بهبود می‌یابد. برای افزایش دقت تفسیر تصاویر لرزه‌ای در محیط‌های پیچیده، این تحقیق از داده‌های لرزه‌ای با مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق ترکیب می‌شود. این مدل‌سازی بر اساس خواص فیزیکی، زمین‌شناسی معدن و چاه‌نگاری انجام می‌شود. این رویکرد یکپارچه نشان می‌دهد که بازتاب‌های لرزه‌ای خاصی ایجاد می‌شود و از پروفیل بازتابی لرزه‌ای سطحی می‌توان برای شناسایی و ترسیم دقیق کانسارها بهره برد.

واژه‌های کلیدی: روش‌های لرزه‌ای ، منابع معدنی ، لرزه بازتابی ، داده‌های ژئوفیزیکی ، مدل‌سازی سه‌بعدی

Seismic techniques in mineral resource exploration optimization

^۲Mohammad Ali Riahi ^۱Amin Sanepour

^۱ Master's student, Institute of Geophysics / University of Tehran; amin.sanepour@ut.ac.ir

^۲Professor, Institute of Geophysics / University of Tehran; mariahi@ut.ac.ir

* Corresponding author: Amin Sanepour

Abstract

The present study explores the capabilities of seismic methods and their impact on mineral exploration. Seismic reflection techniques are considered effective tools for the detection of base metals, taking into account physical properties such as compressional wave velocity and material density. The research delves into existing studies in this field, highlighting the significance of high-frequency reflections in providing the necessary capabilities for geological objectives, including dike exploration and direct detection of mineral masses. This innovative approach in mineral exploration offers numerous opportunities for analyzing the Earth's structure and directly identifying ore deposits. By combining seismic geophysical data with specific geology and well logging, precision in interpreting geological structures improves, enhancing the ability to detect ore deposits in complex

environments. To enhance the accuracy of interpreting seismic images in intricate settings, this research integrates seismic data with precise three-dimensional modeling based on physical properties, mineralogy, and well logging. This comprehensive approach demonstrates the creation of distinctive seismic reflections, utilizing surface seismic reflection profiles to accurately identify and map ore deposits.

Keywords: Seismic methods, mineral resources, reflection seismic, geophysical data, 3D modeling

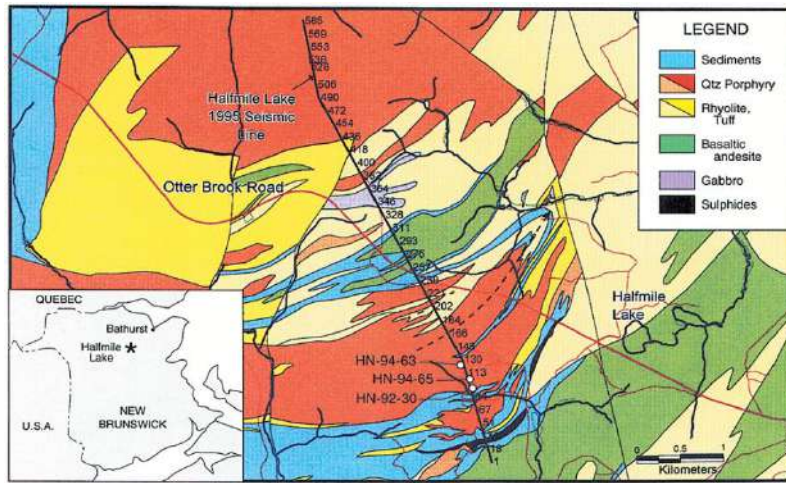
۱-۱- مقدمه

کمپ معدنی بائورست در نیوبرانزویک به عنوان محل مطالعات لرزه‌ای برای بررسی پاسخ ذخایر ماسیوسولفید ولکانوژنیک منتخب شده است. نتایج حاصل از تحقیقات در کانسار دریاچه هافمایل، بزرگترین ذخایر توسعه‌یافته در این کمپ، نمونه‌ای واضح از بازتاب یک ذخیره ماسیوسولفیدی و عوامل مرتبط با تصویربرداری این توده‌ها را ارائه می‌دهد [۳]. خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها نشان می‌دهد که توده‌های ماسیوسولفیدی در بسیاری از محیط‌های زمین‌شناسی ممکن است بازتاب‌دهنده‌های لرزه‌ای قوی باشند. نتایج یک پروفیل لرزه‌ای با فرکانس بالا در یک کانسار معدنی عمیق زیر محدوده جنوبی ساختار سادبری تایید این موضوع را فراهم می‌کند. [۲]

روش‌های تثبیت‌شده برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها که برای اکتشاف لرزه‌ای در حوضه‌های رسوبی ایجاد شده‌اند، اغلب بدون تغییر در محیط‌های سنگی سخت استفاده می‌شوند. با وجود موفقیت بزرگ در بررسی‌های شناسایی منطقه‌ای و ترسیم بلوک‌های ساختمانی اصلی پوسته، مانند بازتاب موهو و الگوهای بازتابی مرتبط با تکتونیک فشاری یا کششی، روش‌های لرزه‌ای انعکاسی، به طور عمومی در تولید تصاویر واضح از پوسته کم عمق شکست خورده‌اند. به همین دلیل، توانایی ما برای اعمال این روش‌ها یا انجام مطالعات با قدرت تفکیک بالا در مورد پوسته بلورین بالایی محدود می‌شود. یک رویکرد خوب و امیدوارکننده برای استخراج اطلاعات از داده‌های ثبت شده، شامل تجزیه و تحلیل آماری و توصیف امواج لرزه‌ای است. بسیاری از نویسندگان قوت همبستگی مهم بین ویژگی‌های فضای سرعت پوسته و همبستگی جانبی امواج لرزه‌ای سطحی را مشاهده کرده‌اند. [۱]

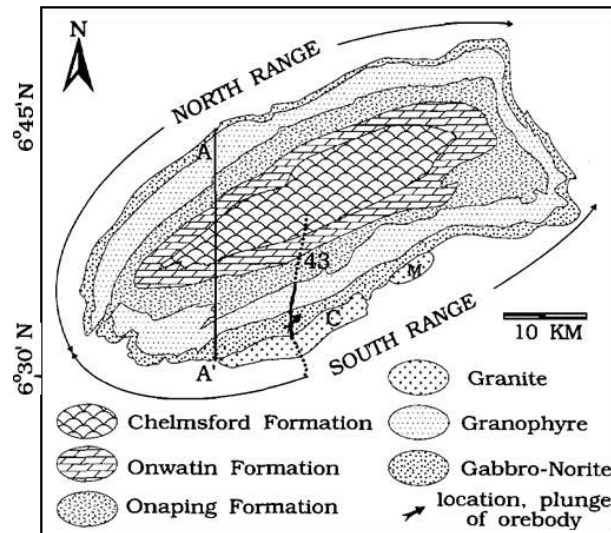
۱-۲- روش‌ها تحقیق

در کانادا کانسار دریاچه هافمایل یک ورقه سولفیدی عظیم با ضخامت متغیر از ۱ تا ۴۵ متر است که حاوی ۲۶ میلیون تن سولفید می‌باشد. در شکل ۱، نقشه زمین‌شناسی کانسار دریاچه هافمایل به‌خوبی نشان داده شده است. در مطالعاتی که در این محدوده انجام شده است، برای تعیین واحدهای سنگ‌شناسی بازتاب‌کننده با پتانسیل در دریاچه هافمایل، سرعت و چگالی در فشارهای بالا بر روی مغزه‌های برش‌خورده از ۲۸ نمونه سطحی و حفاری مغزه‌گیری اندازه‌گیری شد. این نمونه‌ها، که همه لیتولوژی سنگ‌های اصلی و سنگ میزبان را در امتداد خط لرزه‌ای نشان می‌دهند، از لحاظ سنگ‌شناسی مورد بررسی قرار گرفتند. به دلیل ناهمسانگرد بودن سنگ‌های رسوبی و دگرگونی، سرعت در بسیاری از نمونه‌ها به موازات و عمود بر بستر و لایه‌بندی اندازه‌گیری شد. تعداد کل اندازه‌گیری‌ها به ۵۳ افزایش یافت. [۳]



شکل (۱): زمین‌شناسی کانسار دریاچه هافمایل. [۳]

دو کاربرد جدید از پروفیل لرزه‌ای بازتابی در زمینه اکتشاف مواد معدنی معرفی شده‌اند. اولین کاربرد، تجزیه و تحلیل زمین، یک چارچوب منطقه‌ای و دید زمین‌شناسی را ارائه می‌دهد که با استفاده از سایر تکنیک‌های ژئوفیزیکی قابل دستیابی نیست. دومین کاربرد، تشخیص مستقیم یک کانی است که توسط پاسخ پراکندگی لرزه‌ای آن مشخص می‌شود. پروفیل‌های لرزه‌ای به دست آمده از تجزیه و تحلیل دوبعدی اطلاعات مهمی در مورد ساختار ناخالص و سامانه زمین‌شناسی منطقه‌ای فراهم می‌کنند. با این حال، ادغام این تکنیک نقشه‌برداری جدید در روش‌های اکتشاف معمولی با چالش‌ها و مشکلاتی همراه بوده است. [۲] در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساختاری سادبری در کشور کانادا مشاهده می‌شود.

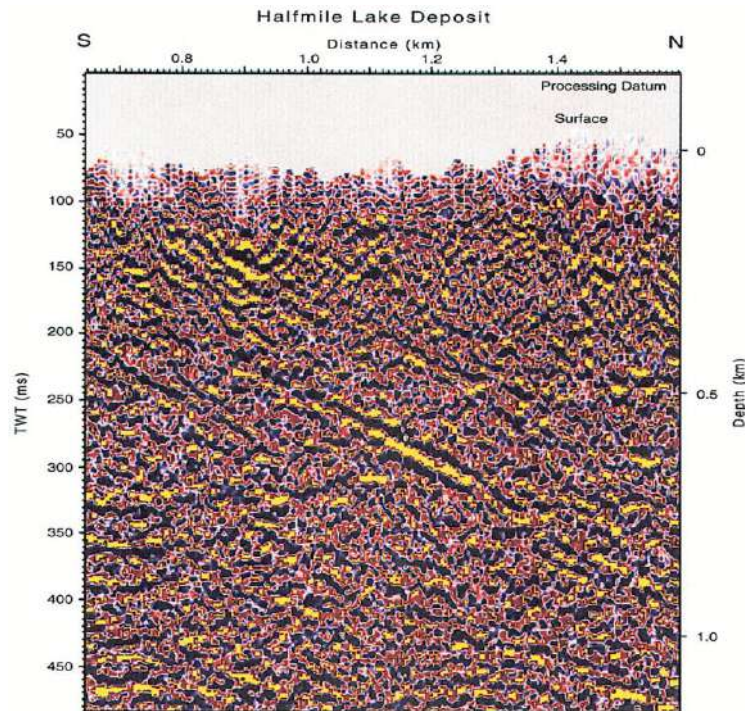


شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی ساختار سادبری. [۲]

مطالعات اخیر امکان‌سنجی نشان داده‌اند که تکنیک‌های تصویربرداری لرزه‌ای با فرکانس بالا می‌توانند با محیط سخت سنگی در شیلد کانادا سازگار باشند. در حالی که نتایج به دست آمده از این پروفیل‌های لرزه‌ای، اطلاعات دوبعدی مهمی را درباره ساختار ناخالص و موقعیت زمین‌شناسی منطقه‌ای ارائه داده‌اند. [۱]

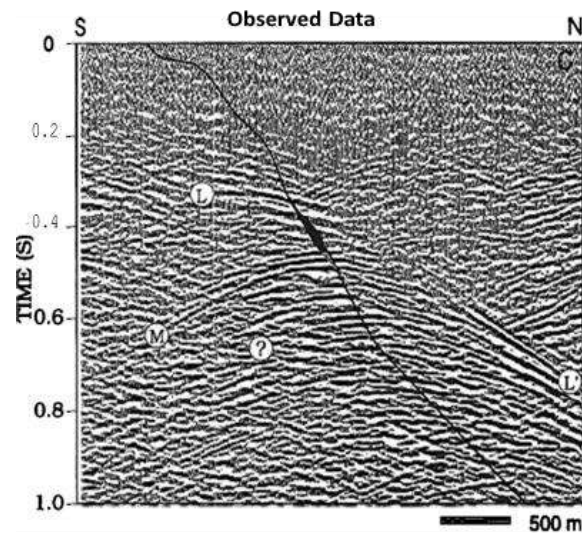
۱-۳- یافته‌ها

مطالعات انجام شده روی دریاچه هافمایل نشان داد که اگرچه شرایط انجام شات دشوار بود و رکوردهای فیلد با شور و هیاهوی زیادی همراه بودند، اما پردازش دقیق این شات‌ها شامل اصلاحات استاتیک، اسکیلینگ، استفاده از فیلتر بالاگذر، دکانولوشن، برداشت نقطه میانی مشترک (CMP)، تجزیه و تحلیل سرعت برانبارش، تضعیف نویز و پردازش پس از برانبارش تصویریکه با محل دقیق کانسار پس از مهاجرت همخوانی دارد، به وضوح نشان داده شد. [۳] شکل ۳ مقطع لرزه‌ای ۲ بعدی مولتی چنل مایگرت نشده از کانسار دریاچه هافمایل نشان می‌دهد.



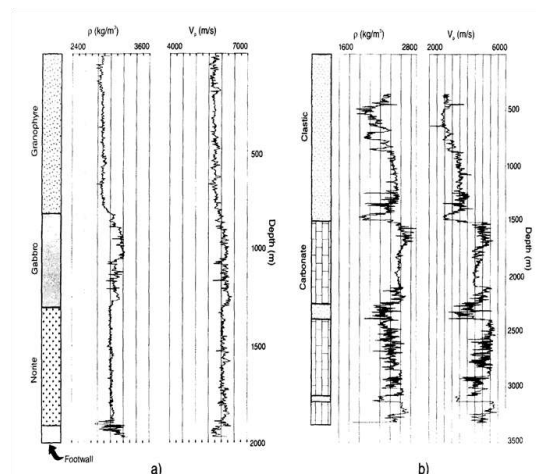
شکل (۳): مقطع لرزه‌ای ۲ بعدی مولتی چنل مایگرت نشده از کانسار دریاچه هافمایل [۳]

در بررسی مطالعه انجام شده در سادبری کشور کانادا، پروفیل لرزه‌ای بازتابی به طور ایده‌آل برای تصویربرداری از ساختارهای پیوسته جانبی مناسب می‌باشد. تشخیص و ترسیم کانسارهای نسبتاً کوچک ماسیوسولفیدی در پوسته متبلور یک چالش سه بعدی است. در شکل ۴، پاسخ لرزه‌ای دو بعدی یک ساختار زیرسطحی نمایان شده است و تأثیر ساختارهایی مانند فروافتادگی در مجموعه فرودپواره را بر روی پروفیل‌های لرزه‌ای دو بعدی به طور دلخواه ارزیابی شده است [۲]. مدل زمین‌شناسی بر اساس داده‌های گمانه، یک پایگاه داده خواص فیزیکی سنگ‌ها برای واحدهای سنگ‌شناسی اصلی، و یک پروفیل لرزه‌ای بازتابی دوبعدی در سراسر منطقه از عناصر کلیدی هستند که می‌توانند به ما کمک کنند.



شکل (۴): مقطع لرزه‌ای دو بعدی استک شده. [۲]

شکل ۵ نمودارهای چگالی و سرعت را از محدوده شمالی سادبری به تصویر می‌کشد. گمانه با عمق ۲۰۰۰ متر اطلاعاتی از گرانوفیر، گابرو، نوریت SIC و گنیس‌های درجه بالای مجموعه فرودیواره را ارائه می‌دهد و همچنین لاگ‌های چگالی و سرعت از چاه W6 نیز نمایان است. این چاه در منطقه قوس رودخانه پیس در WCSB واقع شده است. به طور کلی، چینه‌شناسی منطقه را می‌توان به دو بخش بزرگ تقسیم کرد: یک بخش پالئوزوئیک (از کامبرین تا می‌سی - سی‌پین) که از شیل‌های دریایی کربناته و تبخیری تشکیل شده است و با سرعت متوسط بالا مشخص می‌شود، و یک بخش مزوزوئیک (از تریاس تا کرتاسه) که از سنگ‌های آواری (clastic) با سرعت متوسط کم تشکیل شده است. [۱]



شکل (۵): سنگ شناسی، لاگ‌های چگالی و سرعت برداشت شده از یک گمانه در سادبری کانادا. [۱]

۱-۴- تفسیر نتایج

در بخش اول در دریاچه هافمایل کانادا، نتایج نشان دادند که ماسیوسولفیدها با استفاده از تکنیک‌های لرزه‌ای بازتابی سطحی قابل شناسایی هستند و هیچ چیز دیگری در مجاورت مستقیم این خط باعث بازتاب قوی نمی‌شود. از این رو، در دریاچه هافمایل، بازتاب‌های

لرزه‌های اطلاعات جدید نسبتاً کمی راجع به ساختار عمیق ارائه داده‌اند. با این حال، به نظر می‌رسد که این روش برای اکتشاف تقریباً ایده‌آل باشد. واضح است که ماسیوسولفیدها می‌توانند بازتاب‌های قوی در محیط‌های سنگی سخت ایجاد کنند و با استفاده از تکنیک‌های لرزه‌های بازتابی پیشرفته می‌توان آنها را شناسایی کرد. این پیامدهای مهمی هم برای اکتشاف در صنعت معدن دارد.

در بخش دوم در سادبری کانادا همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود که بخش پایینی که از توده ماده معدنی استخراج شده، باعث ایجاد یک بازتاب قوی (M) و یک پدیده پراش مانند با قوی‌ترین دامنه‌های بازتابی که نزدیک به رأس قرار دارد، می‌شود. پاسخ توده سنگ معدنی که دست‌نخورده است، به طور کاملاً متفاوت است. کنتراست امپدانس بالا بین نوریت با شیب تند و سنگ معدن باعث می‌شود که دامنه‌های بالایی از پاسخ بازتابی (L-L') به سمت آفست‌های بیشتر در جهت شیب تغییر کند و همچنین نشان می‌دهد که بازتاب‌های با دامنه بالا ناشی از ماسیوسولفیدها را می‌توان در فاصله‌ای مشاهده کرد که به طور قابل توجهی بزرگتر از اندازه واقعی کانی است. انرژی لرزه‌ای عمدتاً در جهت شیب با قوی‌ترین بازتاب‌های شیب دار به سمت شمال در حدود ۱۵۰۰ متری شمال لنز سولفیدی متمرکز شده است. این مشاهدات نیاز به دستیابی به پروفیل‌های بلند و پیوسته را در ساختارهای با شیب تند تأیید می‌کند.

در بخش سوم بررسی نشان دادند که بازتاب فرکانس بالا می‌تواند قابلیت‌های نقشه‌برداری مورد نیاز را برای اهداف زمین‌شناسی انتخاب شده مانند دایک‌ها و سیل‌ها را فراهم کند. همچنین، این بازتاب‌ها می‌توانند قابلیت‌های آشکارسازی مستقیم برای توده‌های کانسنگ‌های معدنی ماسیوسولفیدی را بهبود بخشیده و اطلاعات مهمی را در خصوص ترکیب شیمیایی و توزیع مکانی این توده‌ها ارائه دهند.

۱-۵- نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر بررسی شد که استفاده از تکنیک‌های لرزه‌های بازتابی، به ویژه بازتاب فرکانس بالا، به عنوان ابزاری قدرتمند در اکتشاف منابع معدنی، به خصوص فلزات پایه، مورد تأیید قرار می‌گیرد. مطالعات موردی در دریاچه هافمایل و سادبری کانادا نشان داده‌اند که این روش‌ها قادر به شناسایی ماسیوسولفیدها و کانسنگ‌های معدنی هستند، و توانایی تحلیل دقیق ساختار زمین و تشخیص مستقیم کانسارها را بهبود می‌بخشند. از طریق ترکیب این اطلاعات با داده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، و چاه‌نگاری، دقت در تفسیر ساختار زمین افزایش یافته و قابلیت تشخیص کانسارها در محیط‌های پیچیده تقویت شده است. در کل، این تحقیق نشان می‌دهد که رویکرد یکپارچه لرزه‌های می‌تواند امکانات بسیاری را برای اکتشاف منابع معدنی فراهم کرده و در بهبود دقت و کارایی این فرایند مؤثر باشد.

۱-۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت شورای پژوهشی دانشگاه تهران و انجمن ژئوفیزیک ایران تشکر می‌کنند.

۱-۷- مراجع

- [۱] Milkereit, B., and D. Eaton. "Imaging and interpreting the shallow crystalline crust." *Tectonophysics* 286.1-4 (1998): 5-18.
- [۲] Milkereit, Bernd, et al. "Seismic imaging of massive sulfide deposits; Part II, Reflection seismic profiling." *Economic Geology* 91.5 (1996): 829-834.
- [۳] Salisbury, Matthew H., et al. "Physical properties and seismic imaging of massive sulfides." *Geophysics* 65.6 (2000): 1882-1889.

ضرورت شناسایی گسل‌های پنهان با استفاده از داده‌های زیرسطحی ژئوفیزیک جهت بررسی روند آنومالی‌های پتانسیل‌دار

احمد کاظمی مهرنیا^۱، امید محبی^۲، زهرا محمودپور^{۳*}، اکبر شریفی^۴

۱ دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، شرکت مهندسی مشاور درنیکا پویش هامون، akmehrnia@yahoo.com

۲ کارشناسی ارشد معدن - اکتشاف، mohebbi.omid88@gmail.com

۳ کارشناسی ارشد معدن - اکتشاف، z.mahmoodpour@gmail.com

۴ کارشناس ارشد معدن - اکتشاف، مدیر اکتشاف شرکت کومه معدن پارس، akbarsharifi69@yahoo.com

* نویسنده مسئول: زهرا محمودپور

چکیده

محدوده مورد مطالعه در شمال شهرستان بردسکن و بین روستای کبودان و بیجورد (بیژورد) قرار دارد. این محدوده بخشی از زون ساختاری ایران مرکزی و زیر پهنه سبزواری، در قسمت شرقی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بردسکن و غرب ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ کاشمر قرار دارد. گسل‌ها یا ساختارهای نفوذپذیر ضمن اینکه فرصت مهاجرت سیالات کانه‌دار سرد شده را مهیا می‌نمایند، ته‌نشین شدن کانی‌ها و انجام واکنش‌های گوناگون بین سنگ دربرگیرنده و سیال کانه‌دار را نیز سبب می‌شوند؛ علاوه بر آن گاهی رفتاری متفاوت داشته و باعث قطع شدن کانی‌سازی در محدوده مورد مطالعه می‌شود. مشخصات هندسی یک کانسار متأثر از عوامل مختلفی از جمله عیار حد، فن‌آوری و کنترل‌های ساختاری می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن است تا به کارگیری اطلاعات مربوط به تکتونیک و ژئوفیزیک (برداشت مغناطیسی) به بررسی ساختارهای محدوده مورد مطالعه پرداخته و در نهایت مقایسه‌ای بین مطالعات به دست آمده و مطالعات صحرائی و حفاری انجام شود. نتیجه نهایی حاکی از آن است که در مواردی که کانی‌زایی با گسل در ارتباط باشد، در این حالت می‌توان با تلفیق خطواره‌های مغناطیسی و مطالعات تکتونیک کانی‌سازی محدوده را ردیابی نمود.

واژه‌های کلیدی: خطواره‌های مغناطیسی، ساختارهای تکتونیک، بردسکن، کانسار، گسل، ژئوفیزیک.

Necessity of identifying hidden faults using magnetometric data

To investigate the trend of potential anomalies

Ahmad Kazemi Mehrnia¹, Omid Mohebbi², Zahra Mahmoud Pour^{3*}, Akbar Sharifi⁴

1 PhD, Dornika Pooyesh Hamoon, akmehrnia@yahoo.com

2 Msc, mohebbi.omid88@gmail.com

3 Msc, z.mahmoodpour@gmail.com

3 Msc, Koumeh Mine Pars, akbarsharifi69@yahoo.com

* Corresponding author: Zahra Mahmoud Pour

ABSTRACT

The study area is located in the north of Bardeskan city, between the village of Kabudan and Bijord (Bijord). The study area is a part of the structural zone of central Iran and is part of the Sabzevar zone, in the eastern part of the 1:100,000 geological sheet of Bardskan and the western part of the 1:100,000 geological sheet of Kashmir. Faults or permeable structures lead to the migration of cold mineral fluids, in addition to this, they lead to the deposition of minerals and various reactions

between the containing rock and the mineral fluid; In addition, sometimes it behaves differently and causes mineralization to be interrupted in the study area. The geometric characteristics of a deposit are affected by various factors such as grade, technology and structural controls. In this article, an attempt is made to use the information related to tectonics and geophysics (magnetic sensing) to investigate the structures of the study area, and finally, a comparison between the obtained studies and field studies, drilling, is made. The final result shows that in cases where the mineralization is related to the fault, in this case it is possible to trace the mineralization of the range by combining magnetic lines and tectonic studies.

Keywords: Magnetic Lineament, Tectoniks structure, Bardeskan, Ore mineral, Fault, Geophysics.

۲- مقدمه

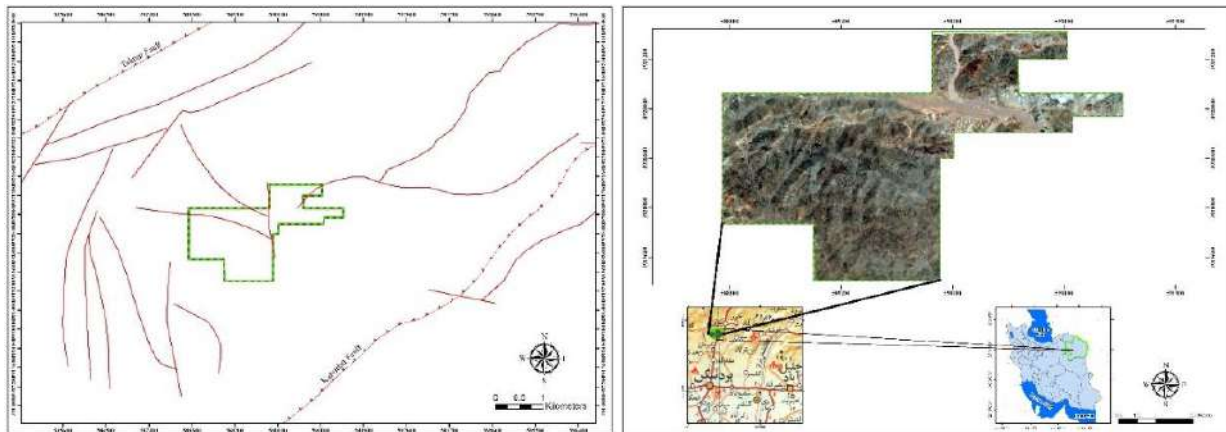
محدوده مورد مطالعه در شمال شهرستان بردسکن و بین روستای کبودان و بیجورد (بیژورد) قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت کادر محدوده-های مطالعاتی و همچنین راه دسترسی به محدوده‌ها، مشخص شده است. از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی؛ منطقه بردسکن را می‌توان در دو بخش جدای از یکدیگر بررسی کرد. آن بخش از منطقه که بالای گسل درونه قرار گرفته که کوهستانی با ریخت‌های متنوع است و بخش جنوبی گسل یاده شده به جز تپه ماهورهای جنوب‌خاوری آن که ادامه رخنمون‌های منطقه از یک کوه‌اند، فرونشستی است با بلندای میانگین ۸۵۰ متر از سطح دریا؛ که در سطحی گسترده انباشته‌های کواترنری ریخت‌هایی چون پادگانه‌های آبرفتی؛ مخروطه‌افکنه؛ کفه‌های رسی و نمکی را تشکیل داده‌اند. محدوده مورد مطالعه در بخش بالایی قرار دارد. روش مغناطیس‌سنجی برای تعیین محل گسل‌ها و مناطق خردشده و شکسته که اغلب در ارتباط با کانی‌سازی هستند، بسیار مفید واقع می‌شود [۱]. قریب در سال (۱۹۸۵) در مطالعات ژئوفیزیکی در حوزه قرادیک مصر که دارای پوشش رسوبی ضخیم است پتانسیل هیدروکربوری زیادی دارد، از روش مغناطیس‌سنجی استفاده کرده و گسترش شکستگی مهم منطقه را شرقی-غربی، غرب-شمال غرب و شرق-شمال شرق به دست آورده است [۵]. راس و مور (۱۹۸۵) برای یافتن منابع زمین‌گرمایی در ایالت یوتای آمریکا به جستجوی ساختارهای پایین افتاده گرابن و گسل پرداخته که یکی از روش‌های یافتن این ساختارها روش مغناطیسی است [۱۱]. رید و همکاران در سال (۱۹۹۰) به منظور شناسایی گسل‌های زیرسطحی دریا از روش اویلر دیکنولوشن در مغناطیس مورد استفاده قرار داده‌اند [۷]. ادبایو و همکاران در سال (۱۹۹۶)، برای بررسی ساختار زیرسطحی گسل‌ها و شکستگی‌های مهم منطقه محل احداث یک سد با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی هوایی گسل احتمالی و جهت آن را به دست آوردند [۳]. رید (۲۰۰۲) با استفاده از روش اویلر به بررسی مدل‌سازی گسل‌های با ضخامت کم با شاخص ساختاری پرداخته است [۹]. ابود و همکاران در سال (۲۰۰۵) در تحقیقی با استفاده از داده‌های مغناطیسی در منطقه ایش‌ال‌ملا، در حوضه خلیج سوئز، منطقه‌ای که دارای پتانسیل هیدروکربور است با استفاده از فیلترهای مغناطیس افقی و باندپس به بررسی گسل‌های سطحی و شناسایی گسل‌های زیرسطحی منطقه پرداخته که نتایج تحقیق با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی منطقه و نیز داده‌های گمانه‌ها تطبیق خوبی داشته است [۲]. پیلکینگتن^۸ در سال (۲۰۰۷) در تحقیقی ضمن مقایسه و معرفی روش‌های مناسب برای یافتن و به تصویر کشیدن کنتاکت‌ها، از روش‌های تبدیلات مغناطیسی نظیر؛ گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، گرادیان شبه‌گرانی، گرادیان افقی تیلت، استفاده کرده است. همچنین وی با استفاده از حداکثر گرادیان افقی توانست روند یا جهت شیب کنتاکت‌ها بیابد [۸]. ساپرامنیام و همکاران (۲۰۰۷)، در تحقیقی با هدف بررسی تکتونیکی منطقه با استفاده از میکرولرزه‌ها و خطوط‌های مغناطیسی، به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی و نیز شکستگی‌ها پرداخته‌اند [۱۳]. لوئیس (۲۰۰۸) با استفاده از روش‌های گرادیان افقی، تخمین پارمترهای آنومالی، آنالیز تحلیلی به بررسی سنگ کف منطقه پاناما پرداخته که در این راستا دو گسل بزرگ منطقه را نیز شناسایی کند [۱۲].

⁸. Pilkington

۲-۱- گسل‌های ناحیه

گسل درونه (Doruneh Fault) با گسل کویر بزرگ (Great Kavir Fault)

گسل درونه یکی از گسل‌های اصلی و سراسری ایران زمین است که گسل کویر بزرگ نیز نامیده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۱: موقعیت محدوده شمال بردسکن (الف)، موقعیت گسل‌های محدوده شمال بردسکن برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بردسکن و کاشمر (ب)

این گسل در آغاز و در نزدیکی دهشیر دارای روند تقریبی شمال باختری- جنوب خاوری در مرکز ایران است که این روند تا نائین ادامه دارد و از نائین تا نزدیکی درونه روند شمال خاوری - جنوب باختری و در منطقه درونه - بردسکن کاشمر روند خاوری - باختری دارد و در مرز افغانستان در اثر عملکرد گسل هریرود روند شمال باختری - جنوب خاوری پیدا می‌نماید. از گسل درونه هر دو حرکت راستگرد و چپگرد گزارش شده است.

گسل تکنار (Taknar Fault)

این گسل دارای روند شمال خاوری- جنوب باختری است و از نظر جغرافیایی و زمین‌شناختی به گونه‌ای است که مرز واحد بین رخنمون‌های پنجره فرسایشی تکنار و مجموعه افیولیتی - آتشفشانی حلقه افیولیتی سبزوار- تربت حیدریه - فریمان را تعیین می‌نماید.

۳- روش تحقیق

هدف از مغناطیس‌سنجی، مطالعه و بررسی زیرسطحی زمین بر اساس آنومالی‌های میدان مغناطیسی است. کره زمین به طور ذاتی دارای یک میدان مغناطیسی ضعیف می‌باشد که عمدتاً به دلیل رخداد جریان‌های همرفتی در هسته مایع زمین ایجاد می‌شود. در این مقاله و در ابتدای این بخش به توضیحی از روش‌های به کار رفته در این مقاله به صورت اجمالی پرداخته شده است. همچنین ذکر این نکته ضروریست که محدوده طی زمان‌های مختلف در طول سال برداشت شده است.

۳-۱- روش سیگنال تحلیلی- اویلر

فیلتر سیگنال تحلیلی روشی برای تخمین مرز توده است. ماکزیمم مقدار سیگنال تحلیلی بر روی لبه‌های توده قرار می‌گیرد. مزیت استفاده از این روش عدم وابستگی اندازه سیگنال تحلیلی به بردار مغناطیس شدگی توده و همچنین بردار مغناطیس زمین است. یکی از نکات این روش این است که مشتقات افقی و عمودی یک تابع پتانسیل تبدیلات هیلبرت یکدیگر هستند. سیگنال تحلیلی یا گرادبان کامل به صورت ترکیب مشتقات افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل تعریف می‌شود. مشتق افقی میدان، اثر مغناطیسی توده‌ها را به

صورت ورقه‌های هم ضخامت که توده را در برگرفته‌اند تبدیل می‌کند. به کمک یک تبدیل ساده در حوزه فرکانس یک تابع تحلیلی ارائه می‌شود که مؤلفه حقیقی آن مشتق افقی و مؤلفه مجازی آن مشتق عمودی میدان است. مؤلفه مجازی را می‌توان تبدیل هیلبرت مؤلفه حقیقی در نظر گرفت.

این روش یک روش ساده و سریع برای محاسبه مشتق عمودی از یک پروفیل را ارائه می‌کند [۱۴]. نقشه سیگنال تحلیلی حاصل برآیند مشتقات مرتبه اول میدان در جهت‌های X ، Y و Z می‌باشد. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$AS(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

در این مطالعه برای بهبود مرزهای آنومالی‌ها از تلفیق روش سیگنال تحلیلی و اوپلر استفاده شده است که در (شکل ۲- الف) آمده است.

۳-۲- فیلتر مشتق قائم

اندازه مشتق قائم در محل لبه‌های آنومالی‌های زیرسطحی صفر است و از این خاصیت برای تخمین مرز استفاده می‌شود. اگر $\varphi(x, y)$ بیانگر داده‌های میدان پتانسیل باشد، آنگاه با استفاده از خواص تابع لاپلاس می‌توان مشتق قائم داده‌های میدان پتانسیل را محاسبه کرد. بر طبق این تئوری اگر $\varphi(x, y)$ یک میدان پتانسیل باشد آنگاه $\nabla^2(\varphi) = 0$ (لاپلاس برابر صفر خواهد بود) بنابراین خواهیم داشت [۶]:

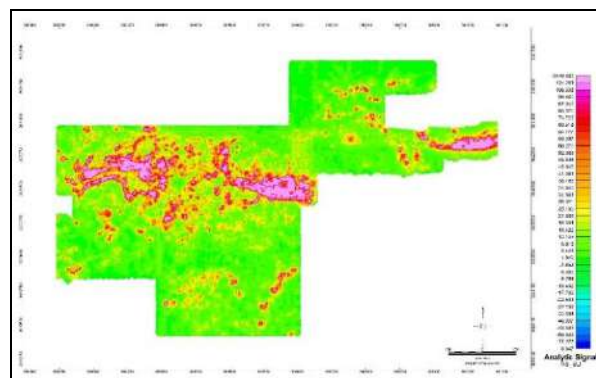
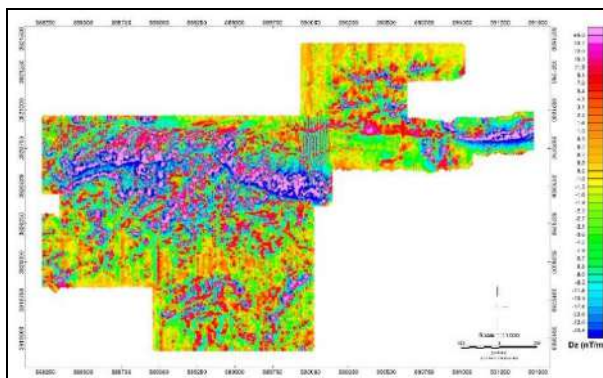
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) \quad (2)$$

به علاوه هنگامی که داده‌ها در یک سطح افقی برداشت شده باشند، میتوان تابع لاپلاس را به حوزه فوریه منتقل و سپس مشتق قائم مرتبه n داده‌های میدان پتانسیل را نیز محاسبه کرد که n می‌تواند هر مقدار حقیقی را اختیار کند [۴]:

$$\mathfrak{F}\left[\left(\frac{\partial^n \varphi}{\partial x^n}\right)\right] = |k|^n \mathfrak{F}[\varphi] \quad (3)$$

در این رابطه $K = 2\pi/\lambda$ که λ طول موج و نماد \mathfrak{F} بیانگر تبدیل فوریه می باشد.

فیلتر مشتق قائم عرض آنومالی‌ها را باریک‌تر و در نتیجه موقعیت آنومالی‌ها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند (شکل ۲- ب).



(ب)

(الف)

شکل ۲: فیلتر سیگنال تحلیلی اعمال شده بر روی محدوده اکتشافی محدوده شمال بردسکن (الف) مشتق قائم میدان مغناطیسی محدوده اکتشافی شمال بردسکن (ب)

۳-۳- تخمین مرز با استفاده از روش SED

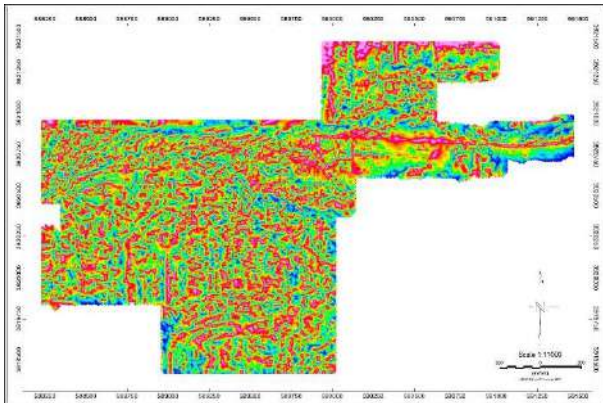
تابع تشخیص لبه منبع (Source edge detection) را از داده‌های میدان بالقوه با تجزیه و تحلیل گرادیان‌های محلی مکان‌یابی می‌کند. تابع SED مکان تغییرات جانبی ناگهانی در مغناطیس یا چگالی جرم سنگ‌های پوسته بالایی را تخمین می‌زند. روش آن شناسایی ماکزیمم‌ها در شبکه‌ای از قدرمطلق شیب افقی است. روش SED ابزار شناخته شده به‌منظور شناسایی لبه‌های تقریبی، که نماینده گسل‌های زمین‌شناسی و یا کنتاکت‌ها، از داده‌های مغناطیسی است. این روش تلفیقی از فیلترهای مختلف است و به‌صورت نرم‌افزاری کار می‌کند. پایه روش بر اساس گرادیان افقی استوار است. در این روش حداکثر مقدار گرادیان افقی بر روی لبه‌های آنومالی قرار دارد (شکل ۳-الف).

۳-۴- زاویه تیلت

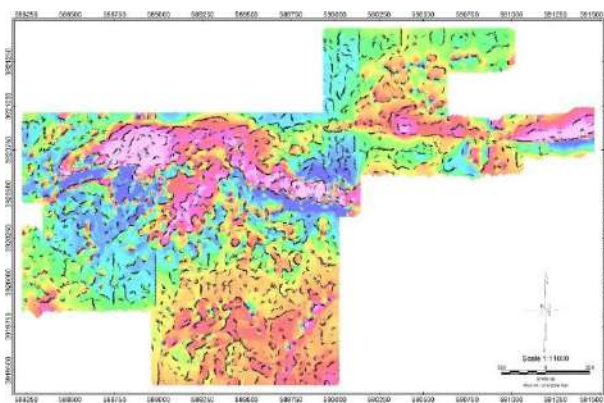
اولین فیلتر فازی، زاویه تیلت است که میلر و سینگ (۱۹۹۴) به صورت رابطه زیر معرفی کردند [۷].

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (۴)$$

کانتور صفر این فیلتر مرز توده را مشخص می‌کند؛ با این حال، این فیلتر یک فیلتر برآورد مرز نیست. برای بی‌هنجاری با تباین چگالی مثبت، مقدار زاویه کجی در بالای آنومالی مثبت است. در نزدیک لبه‌ها جایی که مشتق عمودی صفر و مشتق افقی بیشترین مقدار را دارد، مقدار زاویه کجی صفر و بیرون از منطقه آنومالی زیر سطحی، منفی است. زاویه کجی دارای گستره‌های بین ۹۰- تا ۹۰+ درجه است و نسبت به زاویه فاز سیگنال تحلیلی دارای تفسیر بسیار ساده‌تری است (شکل ۳-ب).



(ب)



(الف)

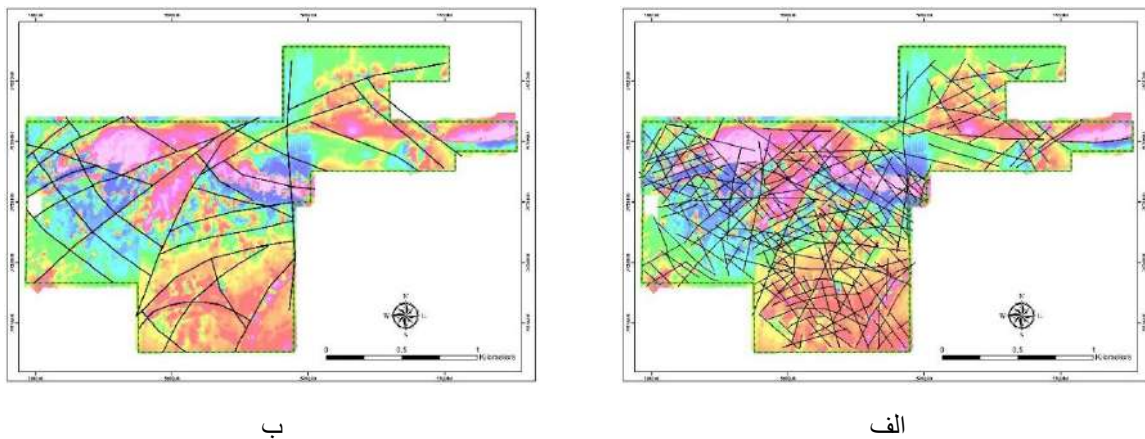
شکل ۳: (الف) مرز کنتاکت‌های به دست آمده از روش SED ، (ب) فیلتر زاویه تیلت (مشتق)

۳-۵. خطواره‌ها

خطواره ترکیبی از دو کلمه "لاین" به معنی خط و "منتوم"^۹ به معنای شبیه به است. این کلمه اولین بار به وسیله هابس برای مشخص کردن ارتباط فضایی عوارض سطح زمین ارائه شد. خطواره‌ها که اغلب شکستگی‌های اصلی در نزدیکی سطح زمین هستند، نقش مهم و انکارناپذیری در خواص و مهاجرت هیدروکربورها، سیالات معدنی و ... دارند.

۴- یافته‌ها

خطواره‌های به دست آمده از فیلترهای مختلف را در محیط ArcGIS با هم ادغام کرده (شکل ۴- الف) و در نهایت از بین آنها خطواره‌هایی که چندین بار تکرار شده و یا آنکه در عمق‌های مختلف وجود دارد به عنوان خطواره‌های اصلی انتخاب شدند (شکل ۴- ب).



شکل ۴: الف) خطواره‌های شناسایی شده از ادغام فیلترهای مختلف داده‌های ژئوفیزیکی، ب) تفکیک خطواره‌های اصلی

۵- تفسیر نتایج

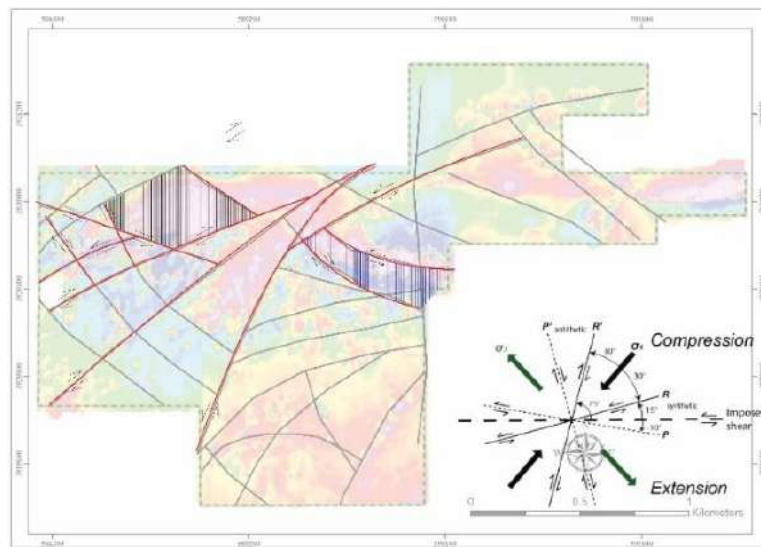
محدوده مورد بررسی از لحاظ زمین‌شناسی بین دو گسل کبودان و تکنار قرار دارد و با توجه به ماهیت معکوس بودن هر دو گسل و از آنجایی که هر دو جزو گسل‌های مهم ایران محسوب می‌شود، به نظر می‌رسد که در این بین گسل‌های دیگری باید وجود داشته باشد که در نقشه‌های مختلف با مقایسه‌های متفاوت دیده نشده است و همچنین ممکن است گسل‌های پنهان دیگری نیز در محدوده وجود داشته باشد که در عملیات‌های صحرایی قابل رؤیت نباشند. بنابراین در این مقاله به بررسی خطواره‌های مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه پرداخته و ضمن آنکه سعی شده ضرورت شناسایی این گسل‌ها را با دلایل مختلف اثبات نمود. نتایج نشان می‌دهد که در بسیاری از بخش‌های محدوده مورد مطالعه کانی‌سازی به همراه خطواره‌ها همخوانی داشته است، ضمن آنکه در برخی مناطق منجر به محدود کردن و قطع آنومالی شده است. بنابراین شناسایی منطقه بر اساس بارز شدن خطواره‌های مغناطیسی حاصل از تفسیر داده‌های مغناطیس و تمرکز مطالعات صحرایی بر روی آن کمک شایانی به حل ابهامات ساختاری و تشخیص فاز کانی‌زایی در کنترل ساختارهای منطقه دارد. داده‌های مغناطیسی پس از برداشت و تصحیحات لازم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت؛ خطواره‌ها با استفاده از فیلترهای مختلف شناسایی و مشخص گردید؛ در مرحله بعد خطواره‌های شناسایی شده در محیط ArcGIS تطبیق داده شدند. با استفاده از تقسیم‌بندی زایشی جامع که برای درزه‌های ساختاری که با گسلش یا شکستگی‌های اصلی‌تر در ارتباط هستند می‌توان محل کانی‌سازی را پیش‌بینی نمود. بر اساس شکل (شکل ۵) محدوده‌های دارای مستعد شناسایی شده است که با نتایج به دست آمده حفاری همخوانی مناسبی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده و پراکندگی نمونه‌های گرفته شده از آنالیز گمانه‌های حفر شده به نظر می‌رسد که برخی از نقاط و گمانه‌ها

⁹ Mentum

کانی‌سازی شاخصی را نشان نمی‌دهند. این در حالی است که به نظر می‌رسد، روند کانی‌سازی نشان داده شده باید نقاط بیشتری را پوشش دهد.

۶- نتیجه‌گیری کلی

تلفیق علوم‌های زمین‌شناسی در مراحل مختلف اکتشاف کار پیجویی و اکتشاف را بهتر و دقیق‌تر می‌کند، در این مقاله محدوده مورد مطالعات، با استفاده از تلفیق علوم زمین‌شناسی، تکتونیک و ژئوفیزیک مورد بررسی قرار گرفت و محدوده‌های دارای مستعد برای مراحل بعد اکتشاف به خوبی مشخص شده است. این نتایج با نتایج حفاری‌های انجام شده انطباق خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی در محدوده مورد مطالعه

۷- تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی را از شرکت معدن کومه معدن پارس، به جهت استفاده و تأمین داده‌های اکتشافی دارند.

۸- مراجع

۱. کامکار روحانی، ابولقاسم، بیکی مجید (۱۳۸۸)، پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی به‌منظور پیجویی ذخایر کرومیت در منطقه سبزوار، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵، شماره ۳، ص ۱۳-۳۴.
۲. About E., Goussev S., Hassan H., Supriyanto S., Ushijima K., (2005), Horizontal gradient and band-pass filter of aeromagnetic data image the subsurface structure; Example from Esh El Mellaha Area, Gulf of Suez, Egypt, Imaging The Future Cairo.
۳. Adebayo A., Olorunfemi M., and John S. Ojo, (1996), an integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation: Geophysics, Vol. 61, No. 2; P. 349-356, 6 Figs., 2 Tables.
۴. Baker, C., Jackson, J., Priestley, K., (1993), Earthquakes on the Kazerun Line in the Zagros Mountains of Iran: strike-slip faulting within a fold-and-thrust belt: Geophysical Journal International, v. 115, p. 41- 61.
۵. Grant, F.S. and West G.F., (1965), Interpretation Theory In Applied Geophysics. New York, Mcgraw- Hill, 397 Pp . 66.
۶. Grauch, V. J. S., Hudson, M. R., And Minor, S. A., (2000), Aeromagnetic Signatures Of Intrabasinal Faults, Albuquerque Basin, New Mexico: Implications For Layer Thickness And Magnetization, Technical Program Expanded Abstracts,
۷. Miller, H.G. and Singh, V. (1994) Potential Field Tilt a New Concept for Location of Potential Field Sources. Journal of Applied Geophysics, 32, 213-217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
۸. Regard V., Bellier O., Thomas J.-C., Bourl' Es D., Bonnet S., Abbassi M. R., Braucher R., Mercier J., Shabanian E., Soleymani Sh. and Fegghi Kh., (2005), Cumulative Right-Lateral Fault Slip Rate Across The Zagros-Makran Transfer Zone: Role Of The Minab- Zendan Fault System In Accommodating Arabia-Eurasia Convergence In Southeast Iran, Geophys. J. Int. (2005) 162, 177-203.

9. Reid, J. M., Allsop, H., Granser A. J., Millet and I. W. Somerton, (1990) Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution: Geophysics. Vol. 55, No. 1; P. 8&91. 8 Figs., 3 Tables.
10. Ross, H. P. and Moore, N. M., (1985), Geophysical Investigations Of The Cove Fort-Sulphurdale Geothermal System, Utah. Geophysics, 50, 1732-1745.
11. Safari Hojjat Ollah, Pirasteh Saeid and Biswajeet Pradhan, (2009), Upliftment Estimation Of The Zagros Transverse Fault In Iran Using Geoinformatics Technology, Remote Sens, 1, 1240-1256; Doi:10.3390/Rs1041240, ISSN 2072-4292.
12. Sella, G. F., Dixon, T. H., and Mao, A., (2002), REVEL: A Model For Recent Plate Velocities From Space Geodesy: Journal Of Geophysical Research, V. 107 (B4), ETG 11-1-11-32.
13. Subrahmanyam, A.S., Murty G. P. S., Sarma K.V.L.N.S., K. Mohana Rao, Reddy N.P.C., .M. Malleswara R., Subrahmanyam V., Suneetha P. R., Anuradha A. And Murthy K. S. R., (2007), Qualitative Assessment Of Tectonic Lineaments Over The Coastal And Innershelf Of Kakinada And Kalingapatnam, Central East Coast Of India, Journal Geological Society Of India, Vol. 69, Pp. 1328-1334.
14. Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C. (2004) New Insights into Magnetic Derivatives for Structural Mapping. The Leading Edge, 23, 116-119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>

اکتشاف کانی‌سازی سرب به کمک روش پلاریزاسیون القایی

مهدی مرادی^۱، کیوان خیر^۲، عبدالحمید انصاری^۳.

۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه دامغان () mahdimoradi2880@gmail.com

۲. دکتری مهندسی اکتشاف معدن، شرکت کارآزما معدن زمین، (keyvan.khayer@gmail.com)

۳. دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد (h.ansari@yazd.ac.ir)

چکیده

اکتشاف ژئوفیزیکی روشی برای تشخیص خواص کانی‌سازی با اندازه‌گیری مستقیم خواص فیزیکی می‌باشد. مقاومت الکتریکی (RS) و پلاریزاسیون القایی (IP) رایج‌ترین و قدیمی‌ترین زیرمجموعه اکتشافات ژئوفیزیکی هستند که برخلاف حفاری، روشی سریع، مداوم و ارزان است. RS ناشی از پارامتر اندازه‌گیری شده در بررسی‌های ژئوالکتریکی مقاومت ظاهری و روش IP مطالعه میدان‌های الکتریکی ثانویه است. این پژوهش به روش IP-RS در یک محدوده اکتشافی در منطقه خور و بیابانک با لیتولوژی عموماً شیست‌های گرافیتی به همراه رسوبات کربناته و شیل با هدف پلی‌متال و بخصوص سرب و روی صورت گرفت. تعداد ۴ پروفیل با فاصله الکترودی ده متر با آرایه پل‌دایپل برداشت گردید. با توجه به تفسیر مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری رسم شده، قسمت‌های مرتبط با کانی‌سازی و عمق توده در هر کدام از آن‌ها شرح داده شد و ۳ پروفیل جهت اطمینان از حضور کانی‌سازی سرب جهت حفاری مغزه‌گیری پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف ژئوفیزیکی، کانی‌سازی سرب، پلاریزاسیون القایی، مقاومت الکتریکی، پل‌دایپل

Exploration of lead mineralization by induction polarization method

M.Moradi¹, K.Khayer², H.Ansari³

¹M.S.c in economic geology, Damghan University, mahdimoradi2880@gmail.com

² PhD in mining exploration engineering, KarAzma Geo Mine, keyvan.khayer@gmail.com

³ Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, h.ansari@yazd.ac.ir

ABSTRACT

Geophysical exploration is a method for detecting mineralization properties by directly measuring physical properties. Electrical resistance (Rs) and induced polarization (IP) are the most common and oldest subsets of geophysical exploration, which, unlike drilling, is a fast, continuous, and inexpensive method. Rs is due to the parameter measured in the geoelectric studies of the apparent resistance and the IP method of studying the secondary electric fields. This research was carried out by IP-RS method in an exploratory area in Khor and Biabank area with lithology, generally graphite shales with carbonate and shale sediments with the aim of polymetal and especially lead and zinc. Four profiles with an electrode distance of ten meters were taken with a Pole-Dipole array. According to the interpretation of the sections of electrical resistivity and chargeability, the parts related to mineralization and bulk depth in each of them were described and 3 profiles were proposed to ensure the presence of lead mineralization for core drilling.

Keywords: Geophysical exploration, lead mineralization, induced polarization, Electrical resistance, Pole-Dipole.

۱ - مقدمه

در اکتشاف مواد معدنی، از روش‌های ژئوفیزیکی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی اجسام یا سنگ‌ها و به‌ویژه برای شناسایی تفاوت‌های بین اهداف مورد مطالعه، استفاده می‌شود. از اکتشافات ژئوفیزیکی می‌توان برای تشخیص خواص کانی سازی با اندازه‌گیری مستقیم خواص فیزیکی استفاده کرد [۱]. در اکتشاف مواد معدنی برای به دست آوردن نتایج واجد شرایط و نتایج مطمئن‌تر استفاده می‌شوند. اخیراً کاربرد اکتشافات ژئوفیزیکی به دلیل بهینه‌سازی هزینه و زمان رو به افزایش است. انتخاب روش ژئوفیزیکی برای اکتشاف ذخایر معدنی به ویژگی‌های فیزیکی هدف معدنی و موقعیت زمین شناسی سنگ‌های همراه آن و همچنین توپوگرافی آن بستگی دارد.

روش‌های ژئوفیزیک به‌ویژه روش‌های IP-RS به طور گسترده در علوم زمین از جمله اکتشافات معدنی، زمین‌شناسی مهندسی، مطالعات محیطی و غیره استفاده می‌شوند. بر خلاف حفاری، نقشه برداری IP-R سریع، مداوم و ارزان است بنابراین می‌تواند مناطق بیشتری را پوشش دهد. روش‌های ژئوفیزیک یکپارچه معمولاً مقاومت الکتریکی (RS) و پلاریزاسیون القایی (IP) رایج‌ترین و قدیمی‌ترین زیر مجموعه اکتشافات ژئوفیزیکی هستند [۲]. پارامتر اندازه‌گیری شده در بررسی‌های ژئوالکتریکی مقاومت ظاهری است که با RS نشان می‌دهند [۳]. اساس روش IP مطالعه میدان‌های الکتریکی ثانویه است که در زمین توسط جریان‌های الکتریکی ایجاد می‌شود.

آرایه‌هایی برای نقشه برداری مقاومت DC در دهه ۱۹۲۰ توسعه یافتند و بر اساس عملیات میدانی، قابلیت تفسیر و استفاده، از روش پیمایش یا سونداژ عمقی بود. اگرچه اثر قطبش القایی در دهه ۱۹۲۰ شناخته شده بود، اما تا دهه ۱۹۵۰ بود که نقشه برداری IP برای کانی‌سازی اقتصادی به طور معمول مورد استفاده قرار گرفت [۴].

۲- روش تحقیق

در این پژوهش پس از بررسی‌های زمین‌شناسی و سنجش از دور، سه قسمت مختلف از محدوده جهت انجام مطالعات ژئوفیزیکی IP-RS در نظر گرفته شد تا در صورت آشکار شدن زون‌های با بارپذیری و مقاومت ویژه مناسب، اقدام به حفر گمانه اکتشافی و بررسی مغزه‌های حفاری از نظر عیار کانی‌سازی احتمالی شود. در این مرحله تعداد ۴ خط برداشت IP-RS که همه با روش پل-دایپل با فاصله الکترودی ۱۰ متر انجام شد و داده‌های حاصله مورد پردازش و تفسیر قرار گرفت.

موقعیت و زمین‌شناسی محدوده

محدوده مورد مطالعه در حدود ۷۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان خور و بیابانک در استان اصفهان واقع شده است. در برگه زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ بیاضه قرار گرفته و لیتولوژی غالب در محدوده عمدتاً شیست، شیست‌های گرافیتی شده، شیل و رسوبات کربناته می‌باشد. کانی‌سازی عمدتاً در داخل شیست‌ها صورت گرفته است و در قسمت‌هایی از محدوده نیز در کنتاکت سنگ‌های کربناته و شیست‌ها کانی‌سازی رخ داده است.

۲-۱ برداشت و پردازش داده‌ها

نحوه چیدمان الکترودهای فرستنده و گیرنده بر روی زمین به منزله آرایه برداشت است. تکنیک‌ها و چیدمان‌های بسیار متفاوتی برای منظورهای متفاوت در روش‌های مطالعات ژئوالکتریک به کار گرفته می‌شود که در اینجا آرایه‌های دایپل-دایپل و پل-دایپل معرفی شده است.

آرایش دوقطبی-دوقطبی (دایپل-دایپل): فاصله بین دو الکترود جریان و دو الکترود پتانسیل یکسان می‌باشد. در ابتدا الکترودهای جریان قرار داده شده‌اند و پس از آن با فاصله‌ای که ضریبی از فاصله الکترودهای جریان و یا پتانسیل می‌باشد الکترودهای پتانسیل قرار گرفته‌اند. این روش دقیق‌ترین و دارای بالاترین رزولوشن در بین روش‌های اکتشافی در حوزه مقاومت ویژه به خصوص برای ساختارهای عمود و یا با

شیب تند می‌باشد. به اینصورت که و هر چه فاصله بین الکترودها افزایش یابد بر عمق مطالعه افزوده و در عین حال از رزولوشن آن کاسته می‌گردد.

آرایش قطبی-دوقطبی (پل-دایپل)؛ این نوع برداشت مشابه آرایش دوقطبی - دوقطبی بوده ولی با این تفاوت که یک الکتروده جریان در بی‌نهایت واقع می‌شود. مکان الکتروده بی‌نهایت ۵ برابر فاصله الکترودهی و به صورت عمود بر سایر الکترودها می‌باشد. بیشترین کاربرد این روش اکتشاف توده‌های عمودی در اعماق زیاد می‌باشد. روش دیگری که سبب از بین رفتن این ایراد می‌شود ترکیب این آرایش با آرایش دوقطبی - دوقطبی می‌باشد. در این پژوهش از این روش برداشت استفاده شده است.

۲-۲ تحلیل و تفسیر داده‌ها

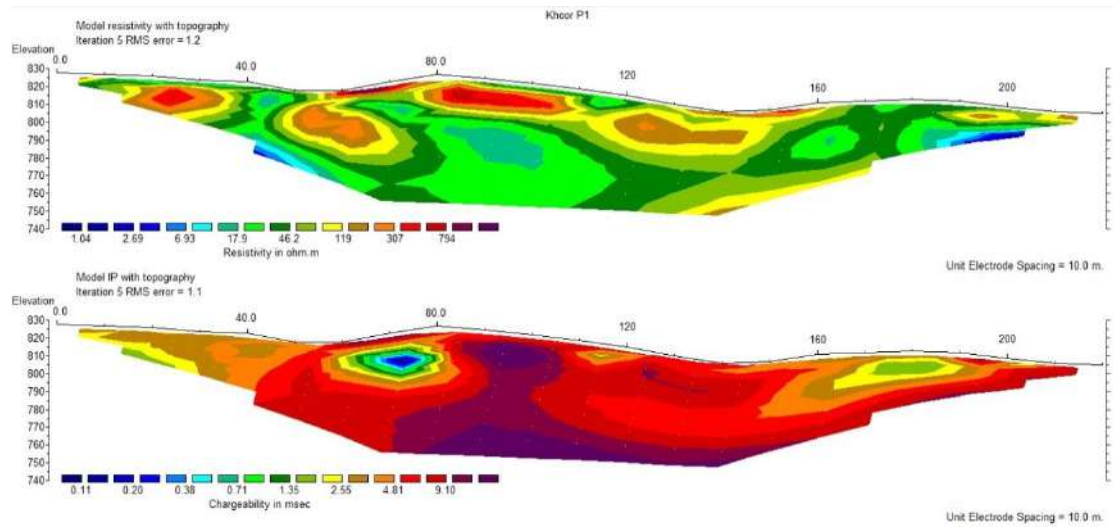
جهت تفسیر کمی داده‌های برداشت شده توسط دستگاه در این پژوهش در طول پروفیل‌ها، از روش کمترین مربعات خطا در نرم افزار Res2Dinv بهره‌گرفته شد. بدین ترتیب برای هر پروفیل دو مقطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پس از اعمال اثر توپوگرافی بر مدل‌های بلوکی، ترسیم شد.

۲-۲ مراحل پردازش IP-RS ؛

آنچه در تفسیر نتایج این محدوده بایستی توجه داشت آن است که در این محدوده دو ماده معدنی گرافیت و سرب و روی وجود دارد که هر دو دارای بارپذیری می‌باشند. جهت تفکیک این دو ماده معدنی از یکدیگر، تنها از مقادیر مقاومت ویژه آن‌ها می‌توان استفاده نمود به طوری که مقدار مقاومت ویژه مربوط به گرافیت‌ها بسیار پایین می‌باشد و تقریباً زیر ۱۰ اهم متر می‌باشد. لذا در این مطالعه با توجه به این موضوع مقاطع مربوط به هر پروفیل تفسیر شده است.

- پروفیل P1

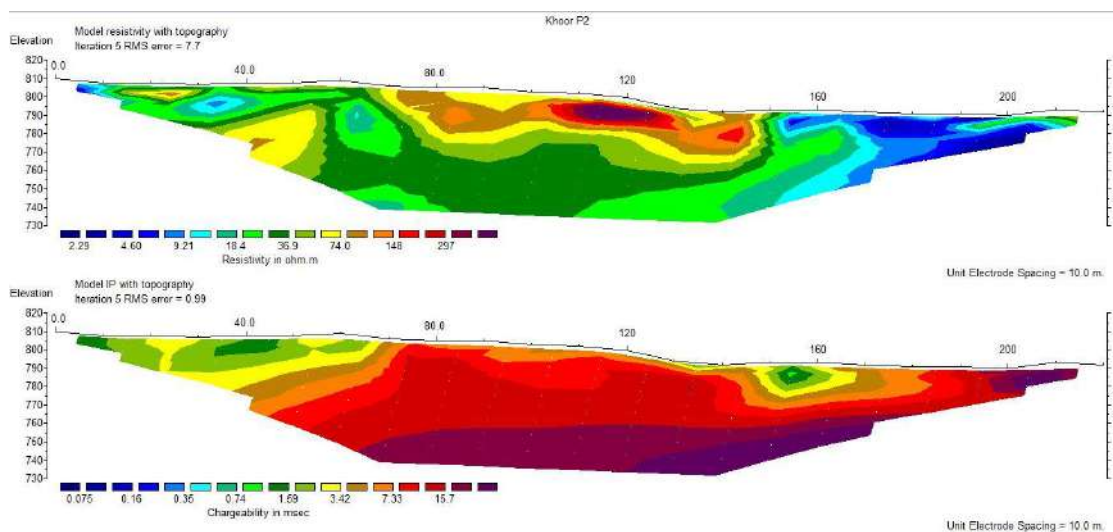
با طول ۲۲۰ متر و با راستای شمال شرقی - جنوب غرب برداشت شده است. این پروفیل، دقیقاً از بالای سینه کار باز شده در معدن عبور کرده است با فاصله الکترودهی ۱۰ متر و حداکثر عمق ثبت شده ۷۰ متر است. در شکل ۳ مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری این پروفیل نشان داده شده است. در طول این خط برداشت حداکثر مقدار بارپذیری ثبت شده ۱۴ میلی ثانیه ثبت شده است. براساس شکل در موقعیت ۷۰ الی ۱۶۰ متری از شروع پروفیل یک بی‌هنجاری در عمق حدود ۴۰ متری از سطح زمین باز شده است که دارای مقدار بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً بالا می‌باشد که می‌تواند مرتبط با کانی‌سازی سرب و روی باشد. همچنین در موقعیت ۸۵ الی ۱۱۵ متری از شروع پروفیل که دقیقاً منطبق بر بالای سینه کار باز شده در معدن می‌باشد، یک بی‌هنجاری ظاهر شده است که با توجه به رنج مقاومت ویژه آن دقیقاً مرتبط با کانی‌سازی سرب و روی می‌باشد.



شکل ۳) مقطع مقاومت ویژه و شارژاییلیته پروفیل P1

- پروفیل P₂

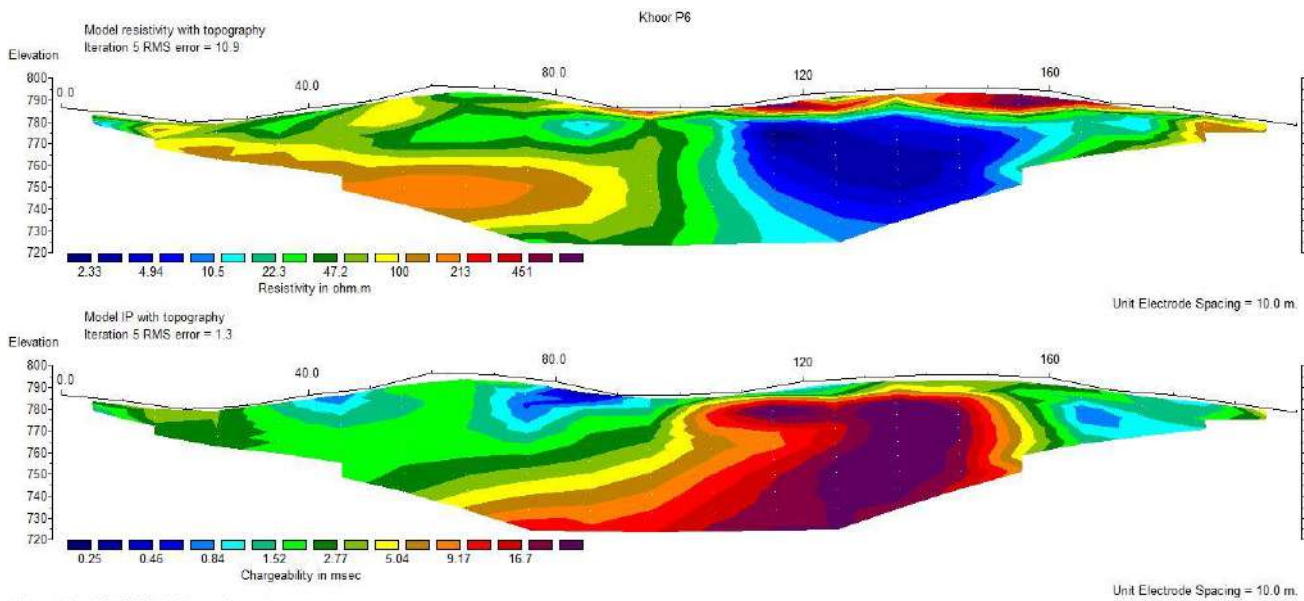
پروفیل P₂ با راستای شمال شرق- جنوب غرب برداشت شده است. طول پروفیل ۲۲۰ متر می باشد. حداکثر عمق ثبت شده در این پروفیل را می توان تا حدود ۷۰ متر در نظر گرفت. در شکل ۴ مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری مربوط به این پروفیل رسم شده است. شروع پروفیل از سمت شمال شرق محدوده می باشد. در طول این خط برداشت، حداکثر بارپذیری ثبت شده ۱۷ میلی ثانیه می باشد. همانطور که در مقطع این پروفیل مشاهده می شود در فاصله ۷۰ الی ۱۵۰ متری از شروع پروفیل در عمق کانی سازی صورت گرفته که کانی سازی تقریباً از عمق حدود ۱۵ متری از سطح زمین شروع می شود و تا ۷۰ متری ادامه یافته و هنوز بسته نشده است. مقادیر مقاومت ویژه در این بازه نسبتاً بالا می باشد که نشان دهنده ارتباط بی هنجاری ظاهر شده با کانی سازی سرب و روی می باشد. همچنین در بازه ۱۶۰ الی ۲۰۰ متری از شروع پروفیل نیز بی هنجاری دیگری ظاهر شده است که با توجه به مقدار مقاومت ویژه و بارپذیری ظاهر شده و همچنین مشاهدات سطحی مرتبط با گرافیت ها می باشد.



شکل ۴) مقطع مقاومت ویژه و شارژاییلیته پروفیل P2

- پروفیل P₃

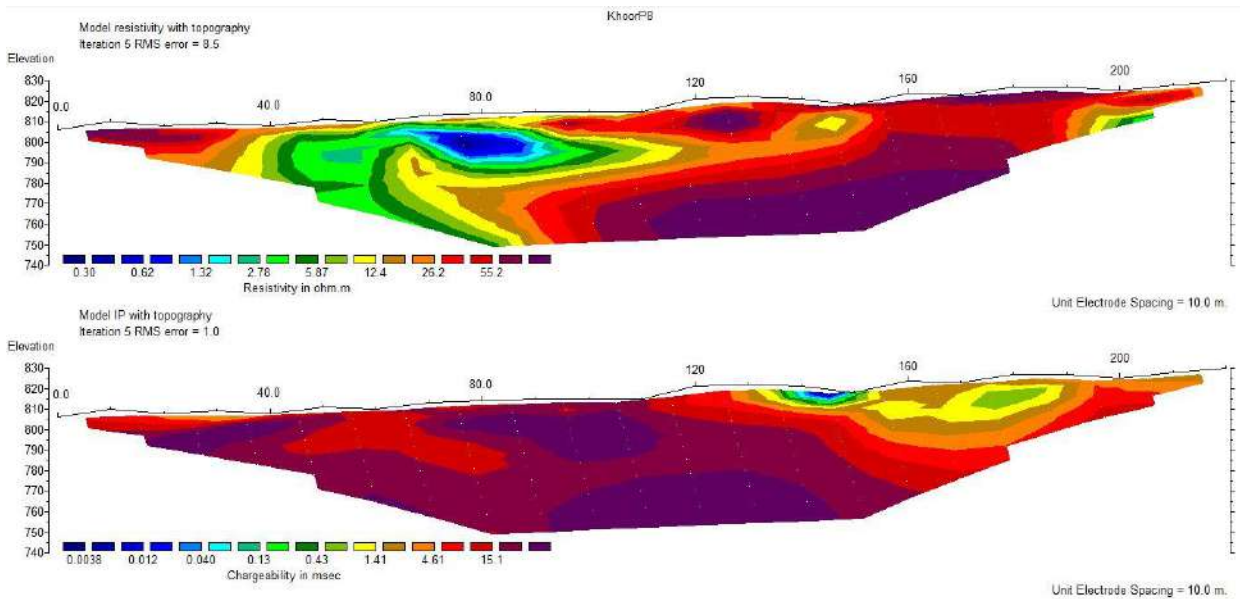
این پروفیل با جهت شمال شرق-جنوب غرب برداشت شده است. طول پروفیل ۲۰۰ متر بوده و جهت برداشت آن از جنوب غرب به شمال شرق می باشد. در شکل ۵ مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری مربوط به این پروفیل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در بازه ۱۱۰ الی ۱۶۰ متری از شروع پروفیل، یک بی هنجاری با شارژپذیری بالا و مقاومت ویژه بسیار پایین ظاهر شده است که نشان دهنده گرافیت در این قسمت از محدوده می باشد. حداکثر مقدار بارپذیری ثبت شده در این پروفیل ۱۸ میلی ثانیه می باشد.



شکل ۵) مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل P₃.

- پروفیل P₄

طول این پروفیل ۲۲۰ متر و جهت پروفیل شمالی جنوبی بوده و جهت برداشت از جنوب به شمال می باشد. در شکل ۶ مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری مربوط به این پروفیل رسم شده است. براساس شکل، در این پروفیل نیز از شروع پروفیل الی ۱۶۰ متری آن بی هنجاری وسیعی ظاهر شده است که مقدار مقاومت ویژه در طول این بازه متغیر است. با توجه به مقطع مقاومت ویژه رسم شده، در بازه صفر الی ۹۰ متری از شروع پروفیل بی هنجاری مربوط به لایه گرافیتی است و در بازه ۹۰ الی ۱۶۰ متری مربوط به کانی سازی سرب و روی می باشد. این موضوع با مشاهدات زمین شناسی سطحی نیز تطابق دارد. لذا جهت اطمینان از آن لازم در طول این پروفیل نیز حفاری اکتشافی صورت گیرد.



شکل ۶) مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل P4.

۳ - نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش IP-RS برای مطالعه بررسی وضعیت کانی‌سازی پلی‌متالی به خصوص سرب و روی در محدوده محدوده کوه دم‌دار در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان خور و بیابانک استفاده شد. لذا به این منظور تعداد ۴ پروفیل IP-RS با فاصله الکترودی ۱۰ متر برداشت شد. در این محدوده در اغلب قسمت‌های لایه‌های گرافیتی وجود دارد که این لایه‌ها نیز در مقاطع بارپذیری با مقدار بارپذیری بالایی مانند کانی‌سازی‌های سولفیدی ظاهر می‌شوند و لذا تفکیک بی‌هنجاری‌های ظاهر شده در این مقاطع پیچیده و سخت می‌باشد. تنها راه تفکیک بی‌هنجاری‌های حاصل از گرافیت و کانی‌سازی سولفیدی سرب و روی در این محدوده استفاده از مقادیر مقاومت ویژه آن‌ها می‌باشد به طوری که گرافیت‌ها دارای مقاومت ویژه بسیار پایین و کانی‌سازی سرب و روی از مقاومت ویژه نسبتاً بالاتری برخوردار می‌باشند. بر اساس پروفیل‌های برداشت شده در سه قسمت مختلف محدوده، به طور کلی محدوده از لحاظ کانی‌سازی سرب و روی از پتانسیل بالایی برخوردار است و پیشنهاد می‌شود جهت تدوین طرح استخراج مناسب فعالیت‌های اکتشافی ژئوفیزیکی و حفاری تفصیلی‌تری در این محدوده صورت گیرد.

۴ منابع

- [1]. Gadallah, Mamdouh R., and Ray Fisher. *Exploration geophysics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2]. Dahlin, Torleif, and Meng Heng Loke. "Negative apparent chargeability in time-domain induced polarisation data." *Journal of Applied Geophysics* 123 (2015): 322-332.
- [3]. Dahlin, Torleif, Christian Bernstone, and Mong Hong Loke. "A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden." *Geophysics* 67.6 (2002): 1692-1700.
- [4]. White, R. M. S., Sf Collins, and M. H. Loke. "Resistivity and IP arrays, optimised for data collection and inversion." *ASEG Extended Abstracts 2003.2* (2003): 1-4.

مدل سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی در تصویرسازی ژئوالکتریکی کانه‌زایی طلا؛ مطالعه موردی محدوده کبودان شهرستان بردسکن

سید محمد ساداتیان جویباری^۱، احمد افشار^۲، شهریار اسدی^۳، حمیدرضا رمزی^۴

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Mohammad.sadatian@aut.ac.ir

۲ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ a.afshar@aut.ac.ir

۳ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه خوارزمی؛ shehriyar.asadi@gmail.com

۴ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ramazi@aut.ac.ir

* نویسنده مسئول: احمد افشار

چکیده

محدوده اکتشافی طلای کبودان واقع در شهرستان بردسکن، استان خراسان رضوی به دلیل داشتن پتانسیل بالای مواد معدنی، مورد بررسی و مطالعات ژئوفیزیکی قرار گرفته است. برداشت‌های ژئوفیزیکی شامل مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش‌پذیری القایی برای شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی طلا استفاده شد. برای شناسایی زون‌های کانه‌دار احتمالی، ابتدا آرایه مستطیل بکار گرفته شد. سپس روی بی‌هنجاری‌های شارژپذیری مشاهده شده، پروفیل‌های ژئوالکتریکی با آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی طراحی و اجرا شد. مقاطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری با استفاده از وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های ژئوفیزیکی برداشتی، تهیه شد. به‌منظور تفسیر دقیق‌تر و استخراج ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط با کانی‌سازی، نمای سه‌بعدی مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری تهیه، و نتایج با اطلاعات گمانه‌های اکتشافی مورد بررسی و ارزیابی واقع شد. با توجه نتایج آنالیز گمانه‌های اکتشافی و مدل ژئوفیزیکی، بی‌هنجاری‌های شارژپذیری بالای ۱۸ میلی‌ولت بر ولت، سازگاری بسیار بالایی با کانه‌زایی طلا با عیار بیش از ۵ppm دارد که از این نتایج می‌توان در هدایت حفاری‌ها و در تخمین ذخیره ماده معدنی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: قطبش‌پذیری القایی، مقاومت ویژه الکتریکی، مدل‌سازی وارون، طلای کبودان.

Inversion of Geophysical Data for Geoelectrical Imaging of Gold Mineralization. Case Study: Kabudan Area, Bardaskan County, Razavi Khorasan Province

Seyed mohammad sadatian jouybari¹, Ahmad Afshar², Shahriyar asadi³, Hamidreza ramazi³

¹ Master's student, Amirkabir University of Technology; Mohammad.sadatian@aut.ac.ir

²Member of the Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology; a.afshar@aut.ac.ir

³Master of Geophysics, Kharazmi University; ; Shehriyar.asadi@gmail.com

⁴Member of the Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology; ramazi@aut.ac.ir

* Corresponding author: Ahmad Afshar

ABSTRACT

The Kabudan gold area, located in Bardaskan, Khorasan Razavi Province, Iran, has been investigated and subjected to geophysical studies due to its high mineral potential. Geophysical surveys, including electrical resistivity (RS) and induced polarization (IP), were employed to identify zones favorable for gold mineralization. Initially, a rectangular array was utilized to detect potential

mineralized zones. Subsequently, electrical profiles with dipole-dipole and pole-dipole array were designed over the observed chargeability anomalies. 2D sections of resistivity and chargeability were generated using joint inversion of the acquired IP-RS data. To achieve a more accurate interpretation and extract the geological structures associated with mineralization, 3D models of electrical resistivity and induced polarization were developed and integrated with information from exploration boreholes. The results of the exploration boreholes and the geophysical model indicate that chargeability anomalies exceeding 18 mV/V have a high correlation with gold mineralization with a grade of over 5 ppm. These findings will directly inform the design and execution of resource definition drilling programs, ultimately leading to a more accurate estimation of mineral resource potential.

Keywords: Induced polarization, electrical resistivity, inverse modeling, Kabudan gold.

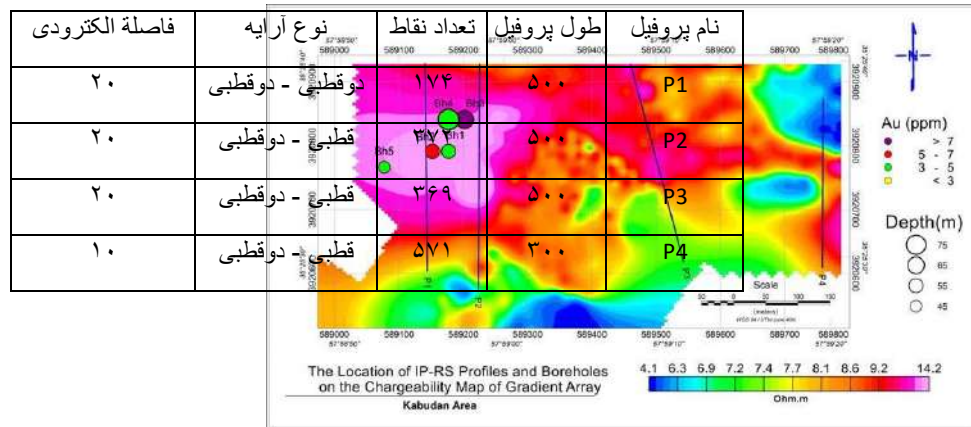
مقدمه

ژئوفیزیک، به طور کلی شامل مطالعه زمین از طریق اندازه گیری تغییرات پارامترهای فیزیکی مرتبط با تغییرات خواص فیزیکی زیرسطحی می باشد [۱]. روش های ژئوفیزیکی، از جمله پرکاربردترین روش ها در اکتشاف مواد معدنی، به ویژه کانسارهای فلزی هستند و در این میان، روش های مقاومت ویژه و قطبش القایی از جمله مهم ترین روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارهای فلزی می باشند. مطالعات متعددی در زمینه به کارگیری روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارهای فلزی صورت گرفته است. مدل سازی وارون داده های ژئوفیزیکی، برای اولین بار توسط اولدنبرگ و همکاران به صورت ترکیبی از روش ها برای کانسار مس - طلائی پورفیری ام تی میلیگان به کار برده شد [۲]. به دلیل ویژگی های خاص و مشخصی که سنگ ها و کانه های مرتبط با دگرسانی هیدروترمال وجود دارد و باتوجه به این که ویژگی های الکتریکی سنگ ها در واقع منعکس کننده نوع و درجه دگرسانی هیدروترمال است، روش های ژئوالکتریکی از جمله مهم ترین روش های ژئوفیزیکی بود که در اکتشاف این نوع کانسارها به کار گرفته و هم اکنون نیز استفاده می شود. نتایجی که از مدل سازی داده های ژئوفیزیکی به دست آمد، حاکی از ارتباط نزدیک خواص ژئوفیزیکی با کانه زایی بود و نتایج به دست آمده از مدل سازی ها نیز مدلهایی با دقت بالا بودند که در شناسایی توده سولفیدی بسیار ارزشمند واقع شدند [۶]. مدل سازی وارون داده های مغناطیسی، مقاومت ویژه و قطبش القایی برداشت شده در محدوده اکتشافی دالی در استان مرکزی، نقش مهمی در شناسایی مناطق با پتانسیل معدنی بالا در کانسار شمالی مس - طلائی پورفیری دالی ایفا نموده است [۴]. برداشت های مغناطیسی سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی در منطقه وادی الرجیتا در صحرای سینای مصر در اکتشاف کانسار مس نتایج مفیدی به همراه داشت [۳].

از این رو، وارون سازی داده های ژئوفیزیکی و مدل سازی داده ها، کمک شایانی در تصویرسازی کانسارها و شناسایی نقاط با پتانسیل بالا خواهد نمود. این امر، در بهینه سازی عملیات حفاری و به تبع آن کاهش پیامدهای زیست محیطی آن و مدیریت و کاهش هزینه ها و صرفه جویی در زمان را به دنبال خواهد داشت. هدف از مطالعه حاضر، بررسی داده های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده اکتشافی طلائی کبودان در بخش شمالی روستاهای کبودان در شهرستان بردسکن در استان خراسان رضوی، مدل سازی سه بعدی آن ها و تطابق آن با داده های به دست آمده از گمانه و نهایتاً شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای معدنی به کمک این داده ها می باشد.

زمین شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه، در شمال روستاهای کبودان در ۱۵ کیلومتری شمال شهر بردسکن از توابع استان خراسان رضوی قرار دارد (شکل ۱). برکه ۱:۲۵۰۰۰ کبودان مطابق تقسیمات زمین شناسی ساختاری ایران اشترکلین و روتنر (۱۹۶۸)، نوی (۱۳۵۵) و بربریان و کینگ (۱۹۸۱)؛ در زون ایران مرکزی، و طبق پهنه های رسوبی ساختاری آقنابتی (۱۳۸۳) در پهنه مرکزی آلپ - هیمالیا قرار دارد [۷].

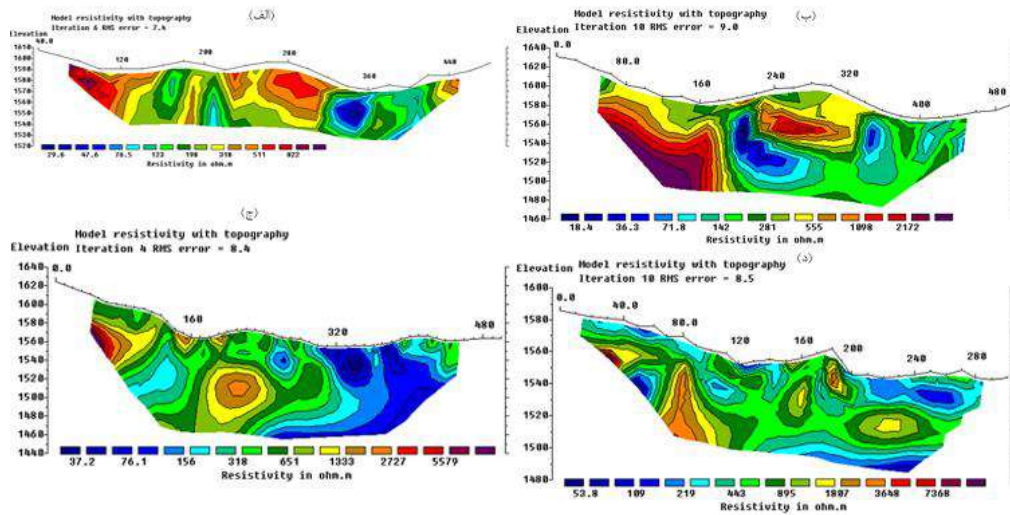


شکل ۲- پروفیل‌های برداشت‌شده روی بی‌هنجاری‌های شارژپذیری مشاهده‌شده آرایه گرادیان. به همراه گمانه‌های حفر شده و مشخصات آن‌ها.

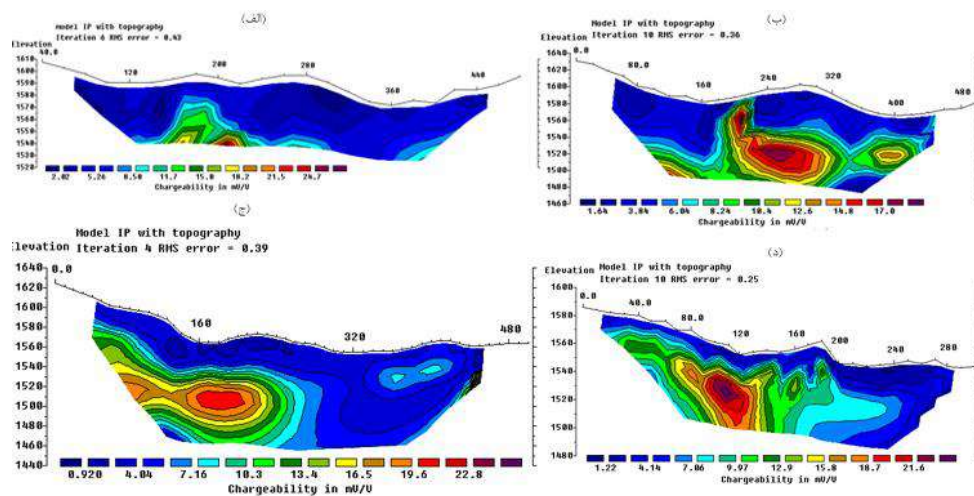
جدول ۱. مشخصات پروفیل‌های برداشت‌شده روی بی‌هنجاری‌های شارژپذیری مشاهده‌شده آرایه گرادیان.

مدل‌سازی داده‌های ژئوالکتریکی

مدل‌سازی وارون برای داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی به صورت توام برای هر یک از پروفیل‌ها انجام شد و نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. ابتدای پروفیل ۱ تا فاصله ۱۴۰ متری پروفیل، واحد ریولیت و توف اسیدی قرار دارد که مقاومت الکتریکی بالایی را نسبت به اطراف نشان می‌دهد. در فاصله ۱۶۰ الی ۲۰۰ و ۳۴۰ الی ۴۰۰ متری، شاهد وجود دو زون کم مقاومت بوده که از نشانه‌های رسانا بودن محیط است (شکل ۴- الف). باتوجه به داده‌های شارژپذیری در قسمت‌های عمقی حدفاصل ۱۶۰ الی ۲۰۰ متری از ابتدای پروفیل، این زون دارای شارژپذیری بالایی بوده و نشان‌دهنده توده و یا رگه حاوی سولفید است (شکل ۵- الف). با توجه مقطع قائم پروفیل ۲، در فاصله ۱۸۰ متری، یک مرز لیتولوژیکی مشخص است. در فواصل ۱۸۰ الی ۲۲۰ و ۳۴۰ الی ۵۰۰ متری، یک زون کم مقاومت با شارژپذیری بالا در عمق مشاهده می‌شود (شکل ۵- ب). بر اساس مشاهدات صحرایی، در ۱۴۰ متر ابتدایی پروفیل شماره ۳، ریولیت‌های با مقاومت ویژه نسبتاً بالا و حدفاصل ۱۴۰ الی ۲۰۰ متری، یک زون گسلی مشاهده شد که در مقطع مقاومت ویژه این پروفیل نیز آشکار است (شکل ۴- ج). در فاصله ۱۴۰ الی ۱۶۰ متری، یک رگه سیلیسی در سطح مشاهده شده است که به احتمال قوی مرتبط با زون گسلی است و در داده‌های مقاومت ویژه نیز یک رگه با مقاومت ویژه بالا در زیر این زون مشاهده شده است که احتمالاً مربوط به لایه سیلیسی در سطح است که توسط گسل از آن جدا شده است. شارژپذیری الکتریکی در زیر این زون بالا بوده و احتمال وجود کانه‌زایی را افزایش می‌دهد (شکل ۴- د و ۵- ج). در فاصله ۱۴۰ الی ۲۰۰ متری، رخنمونی از رگه‌های پر از سیلیس دیده می‌شود که در داده‌های مقاومت ویژه خود را نشان داده و داده‌های شارژپذیری نیز حاکی از وجود آنومالی در این قسمت است.



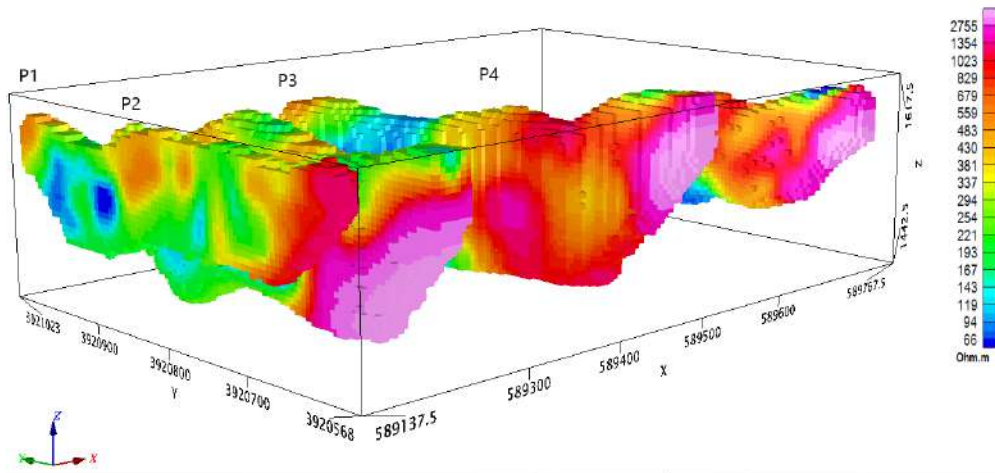
شکل ۴. شبه مقاطع داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده بر روی پروفیل‌ها.



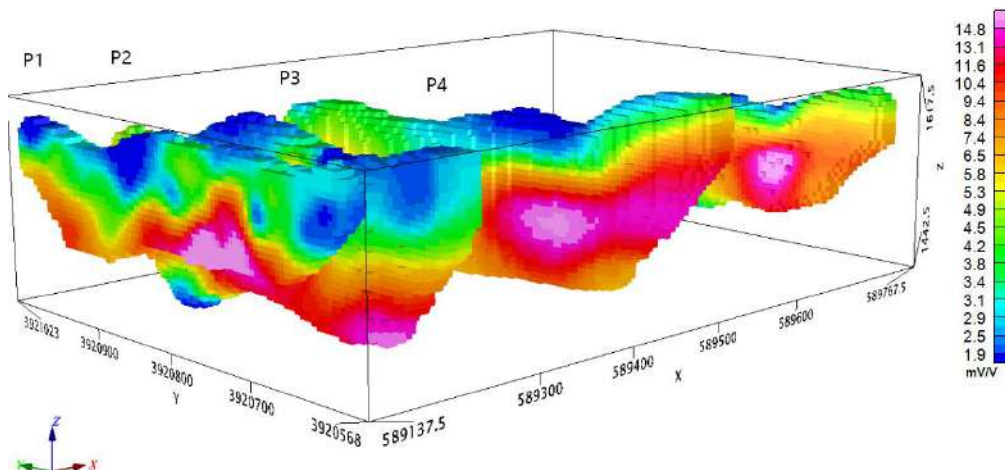
شکل ۵. شبه مقاطع داده‌های شارژپذیری برداشت شده بر روی پروفیل‌ها.

بحث

پس از وارون‌سازی دوبعدی هم‌زمان داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش‌پذیری القایی برای هر پروفیل، مدل‌های سه‌بعدی مقاومت ویژه الکتریکی (شکل ۶) و شارژپذیری (شکل ۷)، با در کنارهم قراردادن پروفیل‌ها تهیه شده است همان‌طور که ملاحظه می‌شود این مدل، دید مناسبی را برای تفسیر و نتیجه‌گیری نهایی و همچنین هدایت حفاری‌ها اکتشافی ارائه می‌دهد در تفسیر پروفیل‌ها، ابتدا از روی مقاطع شارژپذیری، بی‌هنجاری‌های مقدار بالا مشخص شد و سپس وضعیت آن روی مقاطع مقاومت ویژه دنبال شد.



شکل ۶. نمایش مدل سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل‌های برداشتی (دید از جنوب غرب)



شکل ۷. نمایش مدل سه بعدی شارژپذیری پروفیل‌های برداشتی (دید از جنوب غرب)

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده کبودان شهرستان بردسکن استان خراسان رضوی، نشان دهنده پتانسیل بالای کانی-زایی طلا در منطقه می باشد. مدل‌های دو و سه بعدی از داده‌های ژئوفیزیکی تهیه و با اطلاعات گمانه‌های اکتشافی تلفیق شد. نتایج نشان داد که بی‌هنجاری‌های شارژپذیری بالای ۱۸ میلی‌ولت بر ولت، همبستگی بالایی با کانه‌زایی طلا با عیار بیش از ۵ پی‌پی‌ام دارد. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی حفاری‌های اکتشافی و حتی تخمین ذخیره ماده معدنی با روش‌های زمین‌آماري و استفاده از متغیر شارژپذیری به عنوان متغیر ثانویه مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، از دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر و گروه مهندسی مشاور پارسی کان کاو نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشند.

مراجع

- [۱] Michael Dentith., Stephen T. Mudge; *Geophysics For the Mineral Exploration Geoscientists*, Cambridge University press, New York, 2014.
- [۲] Oldenburg, D.W., Li, Y., and Ellis, R.G., "Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan", *Geophysics*, 62, 1419-1431, 1997.
- [۳] Salem, S.M., Arafa, S.A., Ramadan, T.M., and El Sayed, A., 2013. Exploration of copper deposits in Wadi El Regeita area, Southern Sinai, Egypt, with contribution of remote sensing and geophysical data, *Arabian Journal of Geosciences*, 6(2), pp.321-335.
- [۴] مشتاقیان، کی تاش.، ابطحی فروشانی، سید محمد، اسدی هارونی، هوشنگ، حاج حیدری، محمد، جانقربان، غزل؛ **مدل‌سازی وارون داده های مغناطیسی و IP/RS با هدف اکتشاف کانسار شمالی مس - طلای پورفیری دالی**، فصلنامه‌ی علمی علوم زمین، شماره‌ی ۳ پیاپی ۱۲۵، ۷۹-۹۲، ۱۴۰۱.
- [۵] هاشمی، مهدی، رسا، ایرج، نقره ثیان، موسی؛ **ژنز کانی سازی طلا در منطقه شمال بردسکن، خراسان رضوی**، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، شماره‌ی دوم، ۱۳۸۹.
- [۶] افشار، احمد، عابدی، میثم، نوروزی، غلامحسین؛ **مدل‌سازی ژئوفیزیکی جهت تصویرسازی ژئوالکتریکی کانه‌زایی مس؛ مطالعه موردی محدوده یحیی‌آباد زنجان**، اولین کنفرانس ملی مدل‌سازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، ۱۳۹۷.
- [۷] نقشه ۱:۲۵۰۰۰ زمین‌شناسی کاشمر، سازمان زمین‌شناسی ایران.

مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی و IP/RS جهت شناسایی کانه‌زایی مس در محدوده‌ای واقع در شهرستان گرماب، غرب نیشابور

میثم مقدسی^۱، آوا نادری^۲

۱ دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ Moghadasimeysam70@gmail.com

۲ کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشگاه تهران؛ Mnaderi1100@yahoo.com

* نویسنده مسئول: میثم مقدسی، آوا نادری

چکیده فارسی

محدوده اکتشافی در فاصله ۳۷ کیلومتری غرب نیشابور و ۵ کیلومتری شهر گرماب، از توابع شهرستان فیروزه استان خراسان رضوی واقع است. از دیدگاه پهنه‌بندی ایالات زمین‌ساختی ایران، این محدوده بخشی از زون ساختاری سبزوار و در بین بلوک لوت و زون بینالود است که در خلال نفوذن متحمل ماگماتیسیم ترشیری شده‌اند. وجود رخنمون‌هایی از کانی‌سازی مس در این محدوده سبب شده تا از دیدگاه اکتشافی دارای ارزش اقتصادی تشخیص داده شود. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان داد که رگه و رگچه‌های سیلیسی کربناته دارای کربنات‌های مس و کالکوسیت مهمترین سیمای کانی‌سازی در این محدوده هستند که عمدتاً در راستای گسل‌های منطقه مخصوصاً تقاطع گسل‌های فرعی و اصلی محدوده رخنمون دارند. ساخت و بافت این رگه‌ها عمدتاً برشی، لانه‌زنبوری و توده‌ای است که همگی شواهدی از نقش سیالات گرمابی در شکل‌گیری کانی‌زایی در این محدوده می‌باشد. سنگ میزبان در این محدوده شامل تراکی‌آندزیت و آندزیت‌های مگاپورفیری است که متحمل دگرسانی‌های کلریتی، سیلیسی و کربناتی شده‌اند. در این مطالعه به بررسی وضعیت مناطق مستعد کانی‌زایی با استفاده از روش ژئوفیزیکی مگنتومتري پرداخته شده است. جهت انجام مطالعات مگنتومتري، شبکه در نظر گرفته شده دارای ابعاد ۵۰*۲۵ می‌باشد و جهت برداشت نیز به صورت شمالی - جنوبی است که در تعداد ۳۳۸۵ نقطه مورد پایش زمینی قرار گرفته است. در بررسی‌های مغناطیسی محدوده، بی‌هنجاری مغناطیسی تفکیک شده است. مشخصات این بی‌هنجاری مغناطیسی شامل شکل، ابعاد، عمق، گسترش عمقی و مقدار خودپذیری مغناطیسی این توده‌ها مشخص شده است. همچنین خطواره‌ها بر پایه مطالعات مغناطیس‌سنجی نیز ترسیم شده است که نشان خطواره‌های اصلی در این گستره به لحاظ تکتونیکی ساختار پیچیده‌ای را برای محدوده به وجود آورده‌اند. با استناد به فیلتر ادامه فراسو و تخمین عمق اویلر عمق آنومالی در بیشتر نقاط کمتر از متر می‌باشد که نیاز به حفاری اکتشافی در این بخش مهم و کارآمد خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مگنتومتري، ژئوفیزیک، نیشابور، گرماب، مس، اپی‌ترمال

Geophysical studies by magnetic and IP-RS methods to identify copper mineralization in an area in the Garmab, west of Neishabur

Meysam Moghadasi¹, Ava Naderi²

¹Ph.D. Student, Faculty of Mining, Shahrood University of Technology;
Moghadasimeysam70@gmail.com

²MSc Petrology, Tehran University; Mnaderi1100@yahoo.com

* Corresponding author: Meysam Moghadasi, Ava Naderi

ABSTRACT

The exploration area is located at a distance of 37 km west of Neishabur and 5 km from Garmab city, one of the functions of Firuzeh city, Razavi Khorasan province. From the point of view of

the zoning of the geo-structural states of Iran, this area is a part of the Sabzevar structural zone and between the Lut block and the Binalud zone, which underwent Tertiary magmatism during the Neogene. The presence of outcrops of copper mineralization in this area has caused it to be recognized as having economic value from an exploratory point of view. Geological investigations showed that carbonated silica veins and veins with copper carbonates and chalcocite are the most important mineralization features in this area, which mainly occur along the faults of the area, especially the intersection of the minor and main faults of the area. The structure and texture of these veins are mainly shear, honeycomb and mass, which are all evidences of the role of hydrothermal fluids in the formation of mineralization in this area. The host rock in this area includes trachy andesite and megaporphyry andesites that have undergone chlorite, siliceous and carbonate changes. In this study, the situation of areas prone to mineralization has been investigated using the magnetometric geophysical method. In order to carry out magnetometric studies, the considered network has dimensions of 25x50 and the direction of sampling is north-south, which has been monitored on the ground in 3385 points. In the magnetic surveys of the range, the magnetic anomaly is separated. The characteristics of this magnetic anomaly, including the shape, dimensions, depth, depth extension and the amount of magnetic self-reactivity of these masses have been determined. Also, the lineaments have been drawn based on magnetometric studies, which show that the main lineaments in this area have created a complex structure for the area in terms of tectonics. Based on Faraso's continuation filter and Euler's depth estimation, the anomaly depth is less than 40 meters in most places, which will require exploratory drilling in this important and efficient section

Keywords: Magnetometry, Geophysics, Nishabor, Garmab, Copper, Epi-Thermal

مقدمه

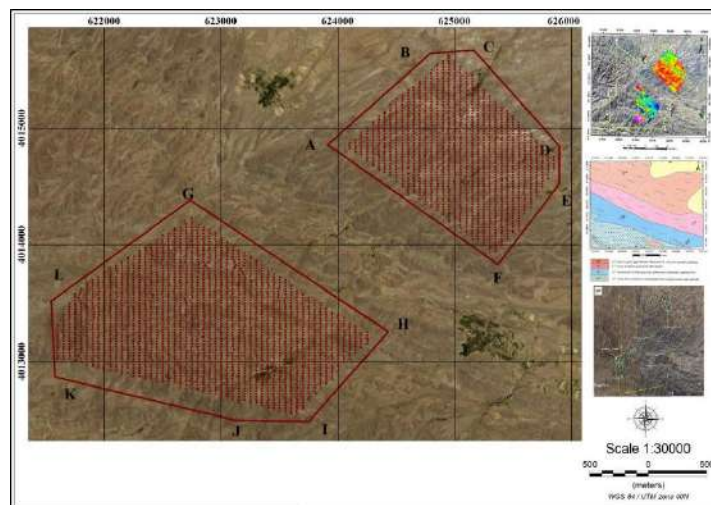
محدوده اکتشافی با مساحت تقریبی ۵.۵۳ کیلومترمربع در شمال غرب شهرستان گرماب، واقع است. راه دسترسی به این محدوده از طریق جاده قدیم نیشابور به سبزوار میسر می باشد. بدین منظور از نیشابور با طی مسافت ۴۰ کیلومتر ابتدا به روستای همت آباد و سپس گرماب می رسیم (شکل ۱). محدوده جهت اکتشاف کانسارهای غیر آهنی به عنوان هدف اصلی استفاده از روش ژئوفیزیکی مگنتومتري مورد پایش قرار گرفت، این روش به صورت معمول و استاندارد در دنیا جهت اکتشاف ساختاری در تیپ‌های پورفیری، برای شناسایی ساختارهای حلقوی زون‌های آرژیلیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد بعد از برداشت داده‌های مغناطیسی نقشه‌های اولیه تهیه و اصلاح و پردازش شدند و سپس برای مشخص شده وضعیت تغییرات و مقایسه آن با نتایج زمینی بخش‌های مهم منطقه مورد پیمایش صحرائی قرار گرفت و ارتباط آنومالی‌های ثبت شده با ساختارهای مرتبط با کانه‌زایی و ساختارهای غیر مرتبط تا حد ممکن بررسی گردید. در محدوده شواهد کانی‌زایی اپی‌ترمال را شاهد هستیم که سبب ایجاد بخش‌هایی با اختلاف میدان مغناطیسی کمتر از مقدار قابل پیش‌بینی است که به اصطلاح، سنگ‌ها خودپذیری مغناطیسی خود را تا حدی از دست داده‌اند. که این تغییرات در بخش‌های جنوبی و شمالی توده‌های مورد نظر به صورت ثانویه نیز مشاهده می‌شود که مربوط به کانی‌زایی مس می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی و مسیرهای دسترسی به محدوده

روش تحقیق

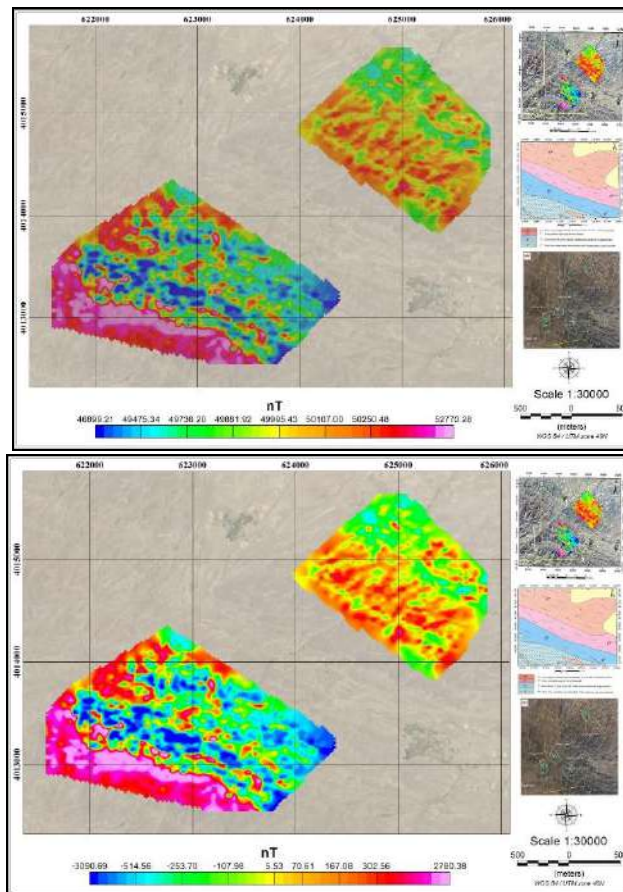
طراحی شبکه نقاط برداشت ژئوفیزیک منطقه، پس از بررسی داده‌های موجود و زمین‌شناسی و توپوگرافی انجام می‌گیرد. در طراحی برداشت باید پارامترهایی از جمله فواصل ایستگاههای برداشت، فاصله خطوط برداشت، امتداد خطوط برداشت، ارتفاع اندازه‌گیری، نوع دستگاه و غیره مشخص شوند. در این منطقه با توجه به بررسی داده‌های فوق در نهایت ۹۳ پروفیل شمالی - جنوبی با آزیموت صفر درجه، با فاصله خطوط ۵۰ متر و فاصله نقاط ۵۰ متر طراحی گردید. در شکل (۲) نیز خطوط منطبق بر تصویر ماهواره‌ای نشان داده شده است. بعد از طراحی شبکه برداشت داده‌ها، اندازه‌گیری میدان مغناطیسی با دستگاه مغناطیس سنج پروتون با دقت ۰/۱ نانوتسلا انجام گرفته است. ارتفاع سنسور مغناطیسی از سطح زمین ۲ متر می‌باشد. در این برداشت تلاش شده که فاصله نقاط برداشت به صورت میانگین ۲۵ متر باشد و در مجموع تعداد ۳۳۸۵ ایستگاه در منطقه برداشت شده است. برای کنترل کیفیت داده‌ها، قرائت‌های تکراری در نقاط برداشت انجام شده است. بعد از حصول اطمینان از صحت و تکرارپذیری قابل قبول اندازه‌گیری، مقدار اندازه‌گیری شده در دستگاه ثبت گردید. خطوط برداشت مغناطیس سنجی منطبق بر تصویر ماهواره ای در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲): خطوط برداشت مغناطیسی منطبق بر تصویر ماهواره ای محدوده در محدوده

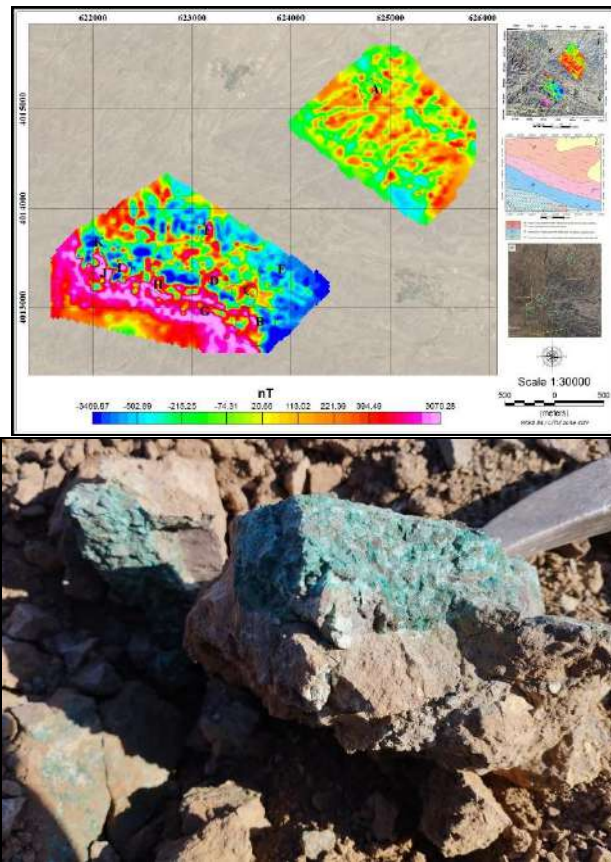
یافته‌ها و تفسیر نتایج

در بخش پردازش بعد از تصحیحات اولیه و حذف نقاط تکیه و همچنین اثرات خطی با استفاده از فیلتر ریز همترازسازی، نقشه بی-هنجاری مغناطیسی کل و نقشه بی-هنجاری مغناطیسی باقیمانده که در شکل (۳) نشان داده شده‌اند و به عنوان نقشه مبنا برای انجام تفسیر در مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۳): سمت راست نقشه بی-هنجاری مغناطیسی کل برای محدوده و سمت چپ نقشه بی-هنجاری مغناطیسی باقیمانده نهایی محدوده

طیف تغییرات میدان مغناطیسی در بازه ۵۲۷۷۰.۲۸ تا ۴۶۸۹۹.۲۱ نانوتسلا نشان داده شده است. همچنین زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی حدود ۵۵.۸۳ و ۴.۷۶ درجه می‌باشد و نقشه برگردان شده به قطب در شکل (۴) نشان داده شده است. شدت میدان مغناطیسی نسبت به نقشه بی-هنجاری باقیمانده افزایش یافته و بی-هنجاری‌ها شکل جدیدی پیدا کرده‌اند. به منظور مشخص شدن تغییرات میدان در هر کدام از مناطق انتخاب شده بعد از زمین‌شناسی چکشی محدوده از کل گرید جدا و به صورت جداگانه تفسیر شده است. در کل، بی-هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه برگردان به قطب نسبت به نقشه باقیمانده، جابجایی به سمت شمال نشان داده و تغییراتی را از نظر شکل و شدت میدان مغناطیسی داشته‌اند.

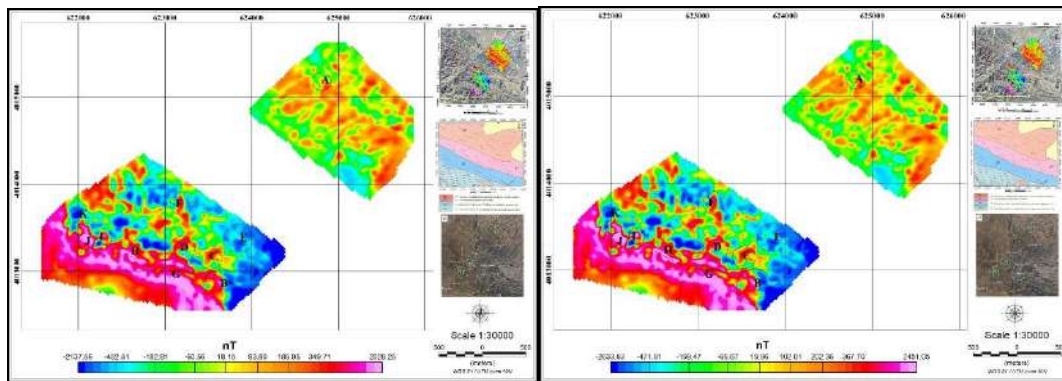


شکل (۴): سمت راست نقشه برگردان به قطب و تصویر سمت چپ از آغشتگی مالاکیت در سنگ‌های محدوده

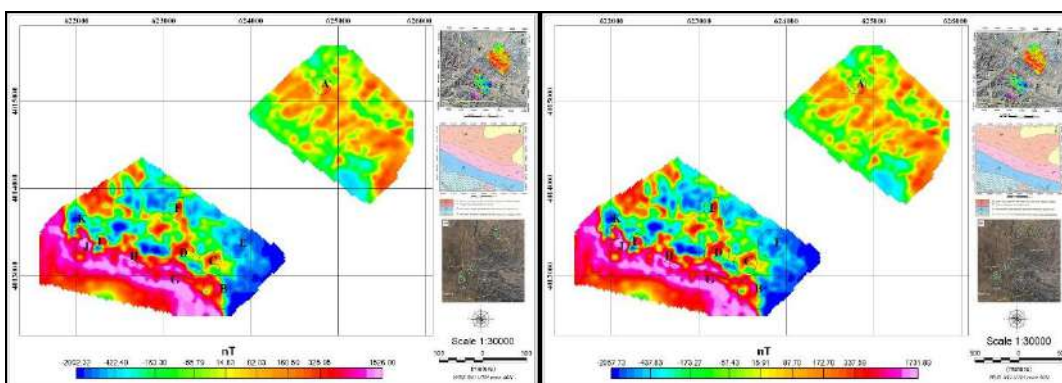
بررسی ساخت و بافت و پاراژنز رگه‌های حاوی کانی‌زایی مس، نشانگر شباهت کانی‌زایی در این محدوده به کانسارهای مس تیپ مانتو است که در منطقه نیشابور و سبزوار دارای گستردگی زیاد هستند. تغییرات در محدوده A در قسمت شمالی محدوده اکتشافی قرار دارد و در آن رگه‌های مالاکیتی در چند نقطه دارای رخنمون است که به دلیل نبود ترانسه امکان ارزیابی دقیقی از گسترش عمقی آنها میسر نیست. در این نقطه آغشتگی با مالاکیت و آزوریت در امتداد گسل درون واحد آذرآوری ائوسن روی داده است. تغییرات ثبت شده در محدوده B در قسمت جنوبی محدوده اکتشافی قرار دارد. روند مشخص شده G و H در کنار تغییرات محدوده D و C با توجه به ساختارهای مشترک در بخش B و روندهای کانی‌زایی مشاهده شده در این قسمت و ادامه توده نفوذی که انشعابی از بخش‌های جنوبی منطقه است و می‌توانند از موارد مهم در امر اکتشاف باشند.

تغییرات ثبت شده در محدوده F، نشان می‌دهد که روند توده نفوذی باتوجه به نقشه‌های تهیه شده دارای جهت شمالی-جنوبی می‌باشد که تقریباً عمود بر ساختارهای جنوبی منطقه عمل کرده است. این اختلاف جهت به همراه روندهای ضعیف شرقی-غربی اهمیت این قسمت را دوچندان کرده است. عملکرد این بخش سبب تغییراتی در مغناطیس پذیری سنگهای اطراف خود شده است. تغییرات در محدوده E روند ضعیفی هم جهت با تغییرات ثبت شده در محدوده‌های D, C, B و G است. این روند تغییرات ضعیف بادر نظر گرفتن جهت گیری یکی از اولویت های اکتشافی محسوب می‌شود. تغییرات در محدوده I, K و J که در قسمت غربی قرار دارد، در آن چند رگه و رگچه سیلیسی و کربناته آغشته با مالاکیت رخنمون دارد که این روند نیز یکی از اولویت های اکتشافی محسوب می‌شود.

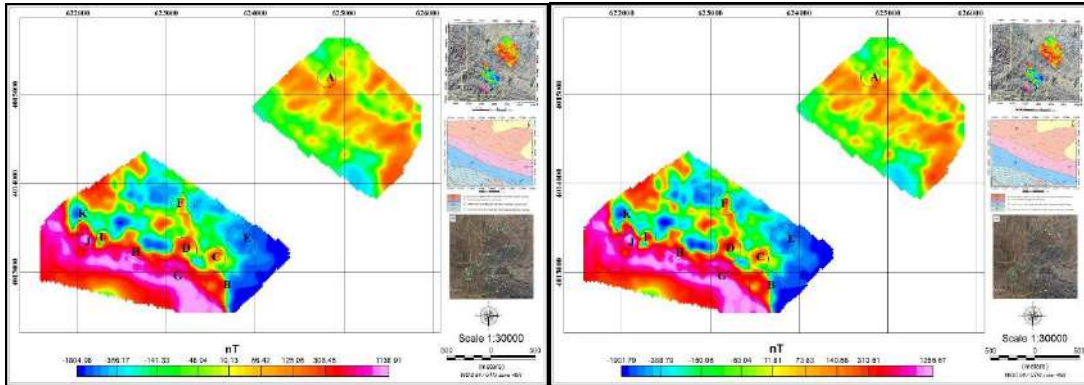
در روش تحلیلی فیلتر ادامه فراسو (شکل ۵)، داده‌های میدان پتانسیل از یک سطح مینا به روش ریاضی بر روی سطوحی دیگر در بالای سطح مینای اصلی محاسبه می‌شوند تا بدین ترتیب اثرات آنومالی‌های سطحی بر روی داده‌ها، کم رنگ‌تر گشته و اثرات آنومالی‌های عمیق‌تر تقویت گردند. و هرچه از سطح مینا دور شویم آنومالی‌های کوچک با طول موج کوتاه ضعیف شده و در نتیجه آنومالی‌های ناحیه-ای با طول موج بلند باقی می‌مانند. با استفاده از این فیلتر به راحتی می‌توان بی‌هنجاری ناشی از توده‌های بی‌هنجار نزدیک به سطح را از ساختارهای عمیق و بزرگ مقیاس منطقه‌ای جداسازی کرد. فقط نکته مهمی که در تفسیر نقشه‌های گزارش خود محدوده به چشم می‌خورد گفته شده است اثرات آنومالی مغناطیس با افزایش عمق بیشتر می‌شود که با مقایسه لجن‌د رنگی و ماهیت فیلتر ادامه فراسو با افزایش ارتفاع (شکل ۶) ما شاهد رسیدن به اثر ناحیه‌ای و ساختارهای عمیق زمین‌شناسی هستیم. در نقشه‌های ادامه فراسو به ارتفاع‌های ۵ متر تا ۳۰ متر (شکل ۷) برای محدوده نشان داده شده است. همانطور که در این نقشه‌ها دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع فیلتر ادامه فراسو، بی‌هنجاری‌های سطحی از بین رفته و بی‌هنجاری‌های عمیق بهتر نشان داده می‌شوند و در نقشه‌های ادامه فراسو ساختارهای سطحی و نوفه‌های سطحی نسبت به نقشه برگردان شده به قطب کاهش یافته است.



شکل ۵: نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۵ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۱۰ متر از نقشه برگردان شده به قطب

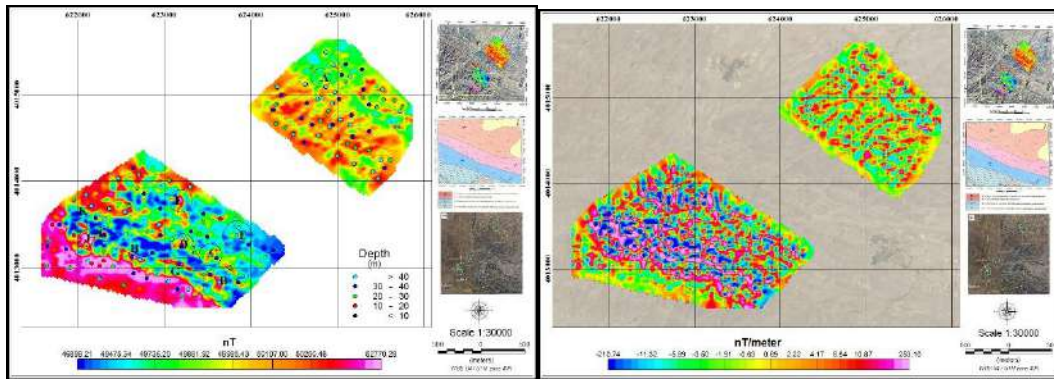


شکل ۶: نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۱۵ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰ متر از نقشه برگردان شده به قطب



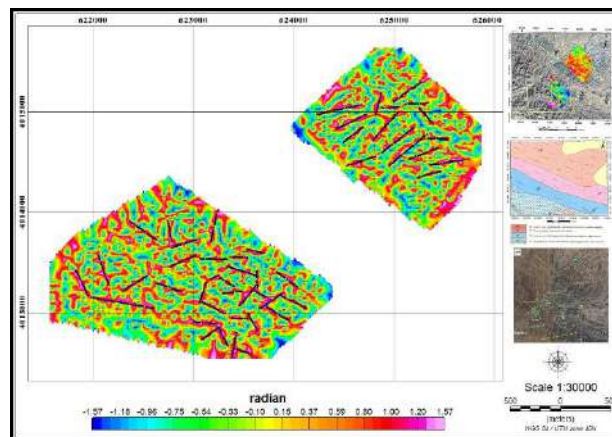
شکل (۷): نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۳۰ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۴۰ متر از نقشه برگردان شده

فیلتر گرادبان قائم اثر بی‌هنجاری‌های عمیق با فرکانس کم را حذف می‌کند و تاثیر منابع کم‌عمق با فرکانس بالا را تقویت می‌کند. این آنومالی‌های علاوه بر اثرات سطحی اثرات عمقی بارزتر را دارند که در فیلتر ادامه فراسو این مورد کاملاً مشهود است. بعد از آماده سازی شبکه داده ها و مشتقات، برای برآورد عمق منشأ بی‌هنجاری‌ها، روش اویلر روی داده‌های برداشتی مغناطیس‌سنجی زمینی محدوده اعمال شد (شکل ۸). شاخص ساختاری برابر ۱، سایز سلول گرید ۳۰ متر، اندازه پنجره تجسس ۹ و بیشترین مسافت قابل قبول نصف فاصله مورد بررسی برای محدوده در نظر گرفته شده است. همچنین خطای تخمین عمق برای این محدوده ۰.۹٪ قرار داده شده است.



شکل (۸): نقشه مشتق قائم مرتبه اول از نقشه برگردان به قطب در محدوده سمت چپ نقشه تخمین عمق اویلر محدوده

ساختارهای مغناطیسی منطقه مورد مطالعه از روندهای معناداری پیروی میکند (شکل ۹). با توجه به وابستگی فیلتر زاویه کجی به مشتق‌ها، این فیلتر می‌تواند لبه‌های مربوط به بی‌هنجاری‌ها و گسل‌ها که باعث ایجاد خطوارگی می‌شود را به خوبی مشخص کند.



شکل (۹): نقشه خطواره های مغناطیسی

نتیجه گیری

از نقشه ادامه فراسو می توان استنباط کرد که بی هنجاری مس مشخص شده دارای عمق و ریشه کمتری است اما توده آندزیت بازالتی که در قسمت جنوب غربی محدوده قرار دارد دارای عمق بالایی می باشد که کانی زایی موجود در منطقه یا ناشی از این توده است یا ناشی از نسل دیگری از زمین شناسی محدوده می باشد. و همچنین استناد به مدل سازی های صورت گرفته، تغییرات ثبت شده در این منطقه دارای منشا بسیار عمیقی نمی باشد به طوری که در برخی از مناطق عمق بالای آنومالی کمتر از ۴۰ متر تخمین زده شده است ولی برای مشخص شدن خود آنومالی نیاز به حفر ترانشه و حفاری در برخی از نقاط دارای پتانسیل می باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت مالی شرکت صنایع ذوب و فولاد کانسار رهاور شرق گستر در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

- [۱] Mayo, E. B., 1958. Lineament tectonics and some ore districts of the southwest: Mining Engineering, v. 10, pp. 1169-1175.
- [۲] Schmitt, H.A., 1966. "The porphyry copper deposits in their regional setting: In Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America", U. of Ariz. Press, p. 17-33, by S. R. Titley and C. L. Hicks.
- [۳] Heyl, A.V., 1972. The 38th parallel lineament and its relationship to ore deposits, Economic Geology 67, pp. 879-894.
- [۴] Gilluly, J., 1976. "Lineaments--ineffective guides to ore deposits" Economic Geology 71, pp. 1507-1514.
- [۵] Gilluly, J., 1977. "Lineaments--ineffective guides to ore deposits-adiscussion", Economic Geology 72, p. 1360.
- [۶] Richards, J.P., 2000. "Lineaments revisited. Society of Economic Geologists", Newsletter 25 (5), pp. 52- 50 .
- [۷] Lapointe, P., Morris, W. A., & Harding, K. L. 1986. Interpretation of magnetic susceptibility: a new approach to geophysical evaluation of the degree of rock alteration. Canadian Journal of Earth Sciences, 23(3), 393-401.
- [۸] Richards, J.P., Boyce, A.J., Pringle, M.S., 2001. Geological evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. Economic Geology 67, pp. 565-602.
- [9] Chernicoff, C.J., Richards, J.P., Zappettini, E.O., 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. Ore Geology Reviews 55, pp. 556-522

وارون سازی داده های مغناطیسی و مگنتوتلوریک برای پی جویی کانسارهای IOCG در کوئینزلند استرالیا

فراز سخائیان^۱، سید محمد ابطحی فروشانی^۲، حمزه صادقی سرخنی^۳، نادر فتحیان پور^۴

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، farazsakhia2@gmail.com

۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، smabtahi@iut.ac.ir

۳ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

۴ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، fathian@iut.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر به پی جویی ژئوفیزیکی کانسارهای IOCG مشابه با کانسار معدن مس ارنست هنری، در ایالت کوئینزلند استرالیا پرداخته است. به این منظور، دو محدوده A و B که دارای مقدار و تغییرات میدان مغناطیسی مشابه با محدوده معدن ارنست هنری بودند برای مطالعه انتخاب شدند. وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ نشان داد توده هایی با خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۱۹، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۱۱ در یکاهای SI را به ترتیب در سه محدوده معدن ارنست هنری و محدوده های A و B نشان داد. توده های محتمل برای کانی سازی از سطح تا اعماق یک تا سه کیلومتری گسترش یافته اند. سپس یک وارون سازی دو بعدی داده های مگنتوتلوریک در طول یک پروفیل برای هر یک از محدوده ها انجام شد. مقایسه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی، کاهش یافتگی مقاومت ویژه در راستای گسل های اصلی هر محدوده را نشان داد. زون های یاد شده منطبق با محل توده های نسبتاً مغناطیده ای بودند که در نتایج وارون سازی داده های مغناطیسی تشخیص داده شدند.

واژه های کلیدی: مگنتوتلوریک، مغناطیس سنجی، وارون سازی، تفسیر توام، کانسار IOCG

Inversion of magnetic and magnetotelluric data for IOCG prospecting in Queensland, Australia

Faraz Sakhaeian¹, Sayyed Mohammad Abtahi Forooshani², Hamzeh Sadeghisorkhani³, Nader Fathianpoor⁴

¹MSc Student of Exploration, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

^{2,3}Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

⁴Associate Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT

The present study deals with the geophysical exploration of IOCG deposits similar to the Ernest Henry copper mine deposit in Queensland, Australia. For this purpose, two areas, A and B, which have similar magnetic field values and changes as the Ernst Henry mine area, were selected for study. Three-dimensional inversion of magnetic data using the Li and Oldenburg algorithm showed masses with magnetic susceptibility higher than 0.019, 0.048, and 0.011 in SI units for Ernest Henry mine and A and B areas, respectively. The masses extend from one to three kilometers in depth. Then, a two-dimensional inversion of magnetotelluric data was conducted along a profile for each area. Comparing the resistivity sections of the areas showed a decrease in resistivity along the main faults. The location of the mentioned zones coincides with the relatively magnetized masses seen in the magnetic data inversion results.

Keywords: Magnetotelluric , Magnetometry , Inversion, Joint Interpretation, IOCG Deposit.

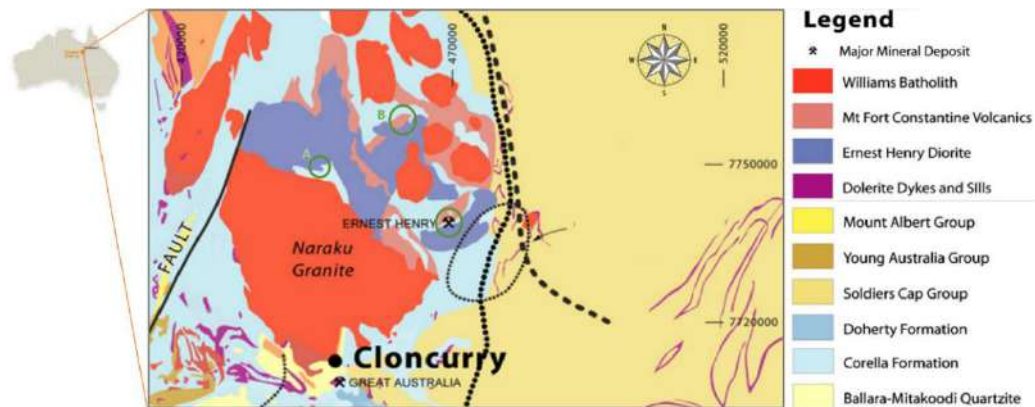
مقدمه

امروزه استفاده از تفسیر توام روش‌های ژئوفیزیکی با هدف کشف کانسارهای عمیق و نیمه عمیق مورد توجه روز افزون قرار گرفته است. از مزایای تفسیر توام روش‌های ژئوفیزیکی می‌توان به شناسایی فاکتورهای مرتبط با کانی‌سازی تیپ‌های خاص کانسارها و تعیین محل و گسترش عمقی محدوده‌های محتمل برای وجود ذخایر معدنی اشاره کرد. پژوهش‌های متعددی در زمینه تفسیر توام روش‌های ژئوفیزیکی به هدف کشف معادن و ذخائر با ارزش در سال‌های اخیر انجام گرفته‌است به عنوان مثال فو و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه جنوب استان لیائونینگ چین دو بی‌هنجاری ناشی از سنگ آهن پنهان را با کمک تفسیر توام روش‌های مغناطیس‌سنجی، روش الکترومغناطیسی گذرا و روش مگنتوتلوریک شناسایی کردند [۱]. ژیانگ و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه تننت در شمال استرالیا، داده‌های مگنتوتلوریک، مغناطیس‌سنجی و لرزه‌نگاری را برای شناسایی نواحی دارای احتمال کانی‌سازی در منطقه را مدل‌سازی و تفسیر کردند [۲]. همچنین حاج حیدری و همکاران (۲۰۲۲) با هدف تعیین محل و گسترش عمقی سنگ داغ منشاء حرارتی و گسل‌های کنترل‌کننده آن، در منطقه ژئوترمال ورتون استان اصفهان، مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی و مگنتوتلوریک در محدوده انجام دادند [۳]. محمدی و همکاران (۲۰۲۲) در مرکز بریتیش کلمبیا کانادا به کمک تفسیر توام مدل‌های چگالی، حساسیت مغناطیسی و رسانایی الکتریکی توانستند مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی مس-طلا-مولیبدن پورفیری، نقره، سرب و روی را مکان‌یابی و شناسایی کنند [۴]. تحقیقاتی که مورد اشاره قرار گرفت به طور کلی نشان می‌دهند که تفسیر توام مدل‌های به دست آمده از داده‌های مگنتوتلوریک و سایر داده‌های ژئوفیزیکی به گونه‌ای موثر به افزایش احتمال موفقیت پروژه‌های اکتشافی می‌انجامد. با این وجود، کانسارهای تیپ مس-طلا به همراه اکسید آهن (IOCG) از کانسارهایی هستند که با وجود اهمیت اقتصادی، کمتر مورد مطالعه مگنتوتلوریک و سایر روش‌های ژئوفیزیکی قرار گرفته‌اند. این کانسارها، ارتباط نزدیکی با کمپلکس‌های توده‌های نفوذی و شبکه‌های گسلی نشان می‌دهند [۵]. حضور اکسید آهن مگنتیتی در این تیپ از کانی‌سازی می‌تواند هدف مناسبی برای بکارگیری روش مغناطیس‌سنجی و مدل‌سازی خودپذیری مغناطیسی با هدف انجام اکتشافات مقدماتی و نیمه تفضیلی باشد. همین‌طور به دلیل وجود اختلاف بالای رسانایی بین زون‌های دارای کانی‌سازی و یا دگرسان شده با سنگ دیواره، می‌توان از روش‌های ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی مانند مگنتوتلوریک و ساخت مدل‌های مقاومت ویژه، برای پی‌جویی این کانسارها استفاده نمود [۵]. در این میان، کشور استرالیا از جمله کشورهایی است که به طور جدی و با انجام سرمایه‌گذاری‌های گسترده، اقدام به برداشت داده‌های مگنتوتلوریک و سایر داده‌های ژئوفیزیکی بویژه مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانسارهای IOCG در سرزمین پهناور خود نموده است و داده‌های برداشت شده را به طور رایگان در اختیار پژوهشگران از سراسر جهان قرار داده است. حال آنکه در ایران با وجود پتانسیل بالای کانی‌سازی تیپ IOCG [۶]، مطالعات ژئوفیزیکی در مورد آن‌ها بسیار محدود بوده و داده‌چندانی نیز از آن‌ها در اختیار نیست. بنابراین، با توجه به کامل بودن اطلاعات مربوط به داده‌های مگنتوتلوریک و مغناطیس‌سنجی در ایالت کوئینزلند استرالیا، از این داده‌ها به عنوان نمونه‌ای برای پژوهش و بررسی احتمال اکتشاف کانی‌سازی این تیپ در مقاله حاضر استفاده شده است. در همین راستا، این مقاله با استفاده از وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی و مگنتوتلوریک در معدن ارنست هنری، احتمال وجود کانسار IOCG در دو محدوده دیگر در ایالت کوئینزلند را مورد بررسی قرار می‌دهد.

زمین‌شناسی محدوده‌ها

معدن ارنست هنری که از معادن تیپ IOCG به شمار می‌آید، در منطقه کلانکوری در شمال ایالت کوئینزلند استرالیا واقع شده است. همچنین دو محدوده دیگر نیز در این پژوهش مورد مطالعه قرار خواهد گرفت که محدوده اول، A در ۲۴ کیلومتری غرب معدن ارنست هنری و محدوده دوم، B در ۲۱ کیلومتری شمال این معدن قرار دارد. معدن اکسید آهن - مس - طلا ارنست هنری در منطقه کلانکوری، در ردیف شرقی ماسه سنگ مونت آیزا واقع شده است. کانی‌سازی در سازند آتشفشانی مونت فورت کنستانترین میزبانی شده است، که یک توالی از سنگ‌های نیمه دگرسان شده با ماهیت فلسیک تا نیمه فلسیک (داسیت، آندزیت و بازالت) و سنگ‌های دگرگونی شده

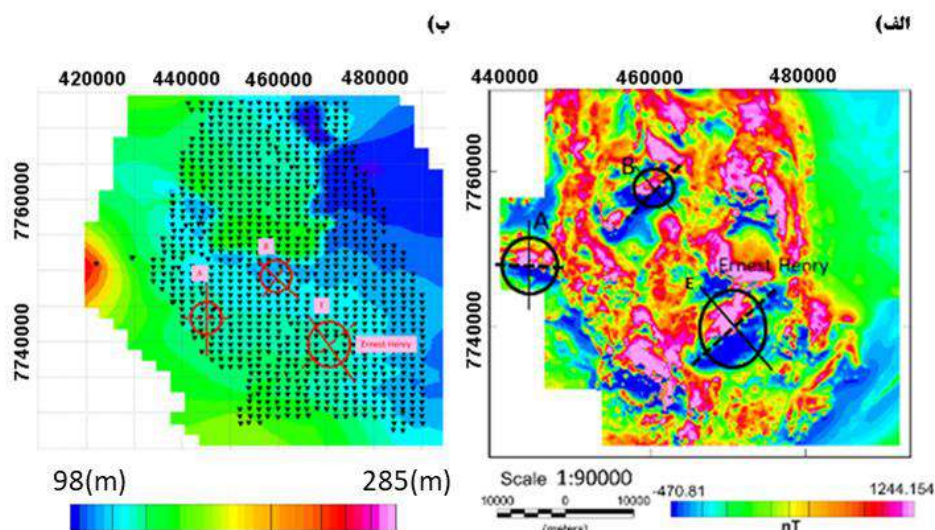
هستند. در نقشه زمین شناسی شکل ۱ می‌توان مشاهده نمود معدن ارنست هنری در سطح تماس سازند دیوریت ارنست هنری و سنگ‌های آندزیت و داسیت به همراه بیوتیت و مسکوویت مگنتیتی سازند مونت فورت کنستانتین در زمینه‌ای از سنگ‌های دگرگونی با منشا رسوبی سازند کورلا قرار گرفته است. همینطور دو محدوده A و B نیز در نقشه با دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند [۷].



شکل ۱: نقشه زمین شناسی محدوده معدن ارنست هنری و اطراف آن. محدوده‌های مورد بررسی با دایره سبز مشخص شده‌اند.

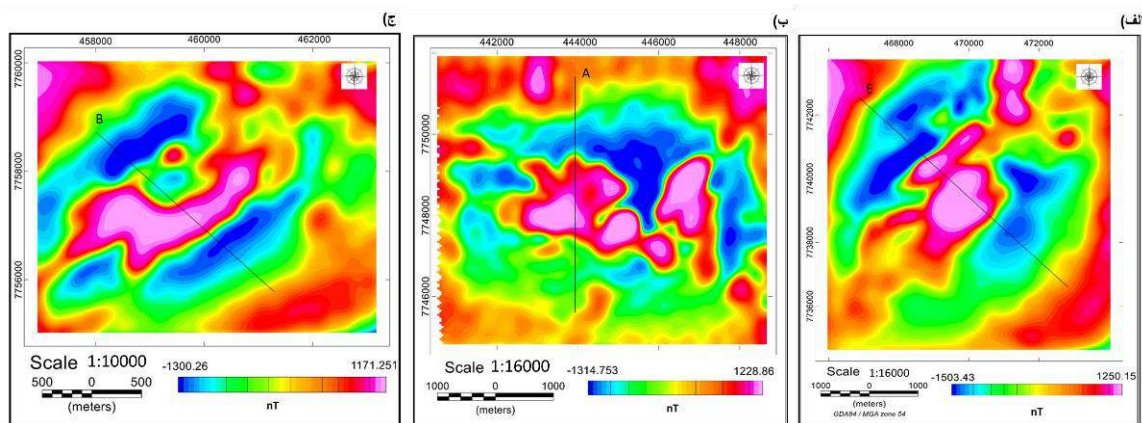
پردازش داده‌ها

در این بخش به بررسی اطلاعات مربوط به برداشت، پردازش و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی محدوده‌های مورد مطالعه می‌پردازیم. داده‌های مغناطیس منطقه مورد مطالعه توسط شرکت KEVRON GEOPHYSICS و به صورت هواپرد در جهت شمالی-جنوبی در سال ۱۹۹۲ برداشت شد [۸]. داده‌ها توسط دستگاه SCINTREX V2321 برداشت شده و فاصله نمونه‌برداری در هر پرفیل ۲۰۰ متر و فاصله پرفیل‌ها از هم نیز ۲۰۰ می‌باشد. داده‌های مگنتوتلوریک (MT) برداشت شده در محدوده‌های مورد بررسی مطالعه حاضر طی دو پروژه مجزا، یکی در سال ۲۰۱۶ و دیگری در سال ۲۰۲۰ برداشت شده‌اند [۸]. در این مطالعه توسط نرم افزار WinGLink این دو گروه داده ادغام شدند. شکل ۲ الف نقشه مقادیر مغناطیسی کل را که در نرم افزار Oasis montaj و به روش حداقل انحنای در یک شبکه بندی ۶×۶ متر درون یابی شده است را پس از حذف مقدار IGRF از داده‌ها نشان می‌دهد [۹]. شکل ۲ ب ایستگاه‌های برداشت داده‌های مگنتوتلوریک را نشان می‌دهند.



شکل ۲: نقشه داده مغناطیسی پس از حذف IGRF (الف) و ایستگاه‌های برداشت MT روی زمینه از توپوگرافی محلی (ب). محدوده معدن ارنست هنری، A و B با دایره سیاه و جهت گسل‌های ناحیه‌ای محدوده‌ها با خط چین سیاه و امتدادهای پرفیل‌های وارون سازی با خطوط مشکی ممتد مشخص شده‌اند.

در هر سه محدوده، دامنه تغییرات بی‌هنجاری مغناطیسی در حد ۱۵۰۰ نانوتسلا مشاهده می‌شود. همین امر باعث انتخاب این دو محدوده برای شروع پی‌جویی‌های مقایسه‌ای با معدن ارنست هنری که معدن شاخص منطقه است بود. اما برای دریافت اطلاعات دقیق‌تر و تفسیر بهتر نقشه‌های مغناطیسی منطقه و آماده سازی داده‌ها برای مدلسازی باید پردازش‌های مورد نیاز بر روی هر محدوده اعمال شود. پس از جداسازی سه محدوده مدنظر اثر ناحیه‌ای درجه ۳ از محدوده‌ها حذف شد [۱۰]. در ادامه برای متقارن سازی بی‌هنجاری‌ها و قرار دادن مرکز آن‌ها بر توده‌های ناهمگن فیلتر برگردان به قطب (RTP) بر داده‌ها اعمال شد [۱۱]. شکل ۳ نقشه‌های حاصل از این مرحله را برای الف- معدن ارنست هنری، ب- محدوده A و ج- محدوده B، نشان می‌دهد. خطوط مشکی جهت پروفیل‌های استفاده شده برای مقاطع مدلسازی وارون را نشان می‌دهند.

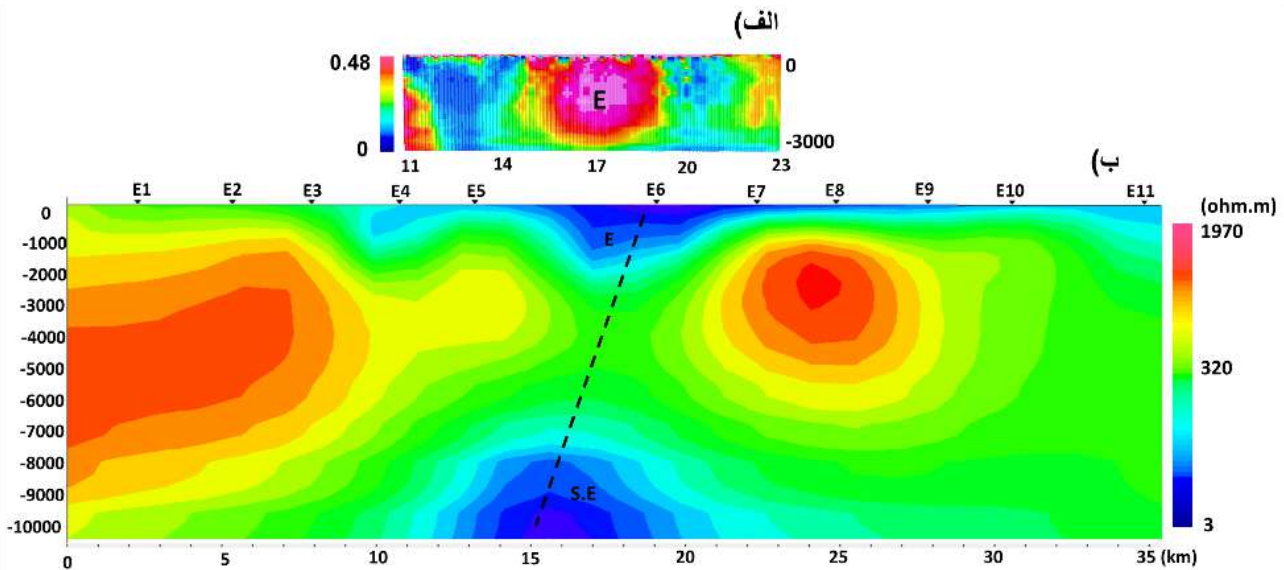


شکل ۳: الف- نقشه برگردان به قطب بی‌هنجاری مغناطیسی معدن ارنست هنری، ب- محدوده A و ج- محدوده B.

برای تعیین شکل و گسترش عمقی توده‌ها، مدلسازی سه بعدی وارون بر روی داده‌های مغناطیسی تبدیل به قطب نشده محدوده‌ها انجام شد. مدلسازی این داده‌ها توسط الگوریتم لی اولدنبرگ که یک نوع خاص از روش وارونسازی اوکام هست صورت گرفت. این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار UBC Mag3D اجرا شد [۱۲]. در این روش‌ها، زمین به بلوک‌هایی مکعب مستطیلی با عمق و ابعاد مشخص تقسیم بندی می‌شود. این بلوک بندی اصطلاحاً مش نامیده می‌شود که هدف از مدلسازی پیدا کردن مقدار مناسب برای پارامتر مجهول هر بلوک است که در این روش خودپذیری مغناطیسی پارامتر مجهول می‌باشد [۱۳]. تعداد بلوک به کار گرفته شده در مش برای معدن ارنست هنری به صورت ۱۸۲ بلوک در جهت شرقی-غربی، ۲۰۲ بلوک در جهت شمالی-جنوبی و ۶۷ بلوک در عمق انتخاب شد، همچنین برای محدوده A تعداد این بلوک‌ها به ترتیب ۲۹۰، ۲۸۳ و ۸۲ و برای محدوده B برابر ۲۲۷، ۱۸۳ و ۸۲ انتخاب گردید. با فرض خطای نمونه برداری ۱/۵ نانو تسلا برای هر سه محدوده، مدل‌های سه بعدی نهایی ساخته شده از الف) معدن ارنست هنری با ۴۳ تکرار و خطای عدم انطباق با داده‌های اندازه گیری شده (خطای RMS)، برابر ۱/۳۶، ب) محدوده A با ۵۴ تکرار و RMS برابر ۰/۸۸ و ج) محدوده B با ۴۷ تکرار و RMS برابر ۰/۹۳ بدست آمد.

وارون سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک، با استفاده از الگوریتم گرادیان مزدوج غیر خطی توسط نرم افزار WinGLink صورت گرفت [۱۴]. در این وارون سازی، مدل اولیه مقاومت ویژه به صورت زمین همگن با مقاومت ویژه ۵۰ اهم متر در نظر گرفته شد. همچنین برای تعریف ابعاد مش، از امکانات ساخت مش خودکار در نرم افزار استفاده شد و یک شبکه از بلوک‌های ظریف مکعب مستطیلی که کوچکترین بلوک‌ها در سطح و نزدیک سونداژها دارای ابعاد 100×50 متر به ترتیب در جهات افقی و قائم هستند. همچنین فاصله افقی ۲۵ کیلومتر از محدوده داده‌ها در اطراف مدلسازی برای تحقق شرایط مرزی جانبی در نظر گرفته شد. عمق مرز قائم مش نیز ۱۰ کیلومتر

لحاظ شد. درصد سطح خطای نسبی انتخاب شده برای داده‌های مقاومت ویژه و فازها برابر ۵ درصد برای تمامی سونداژها انتخاب شد. در هر سه پروفیل وارون سازی یاد شده مد $TE+TM$ بهترین پاسخ را داشت که با ۳۰ تکرار صورت گرفت. مدل‌های دو بعدی مقاومت ویژه تخمین زده شده به همراه مدل خودپذیری مغناطیسی همان پروفیل‌ها در شکل ۴ برای محدوده معدن ارنست هنری، شکل ۵ برای محدوده A و شکل ۶ برای محدوده B قابل مشاهده هستند.

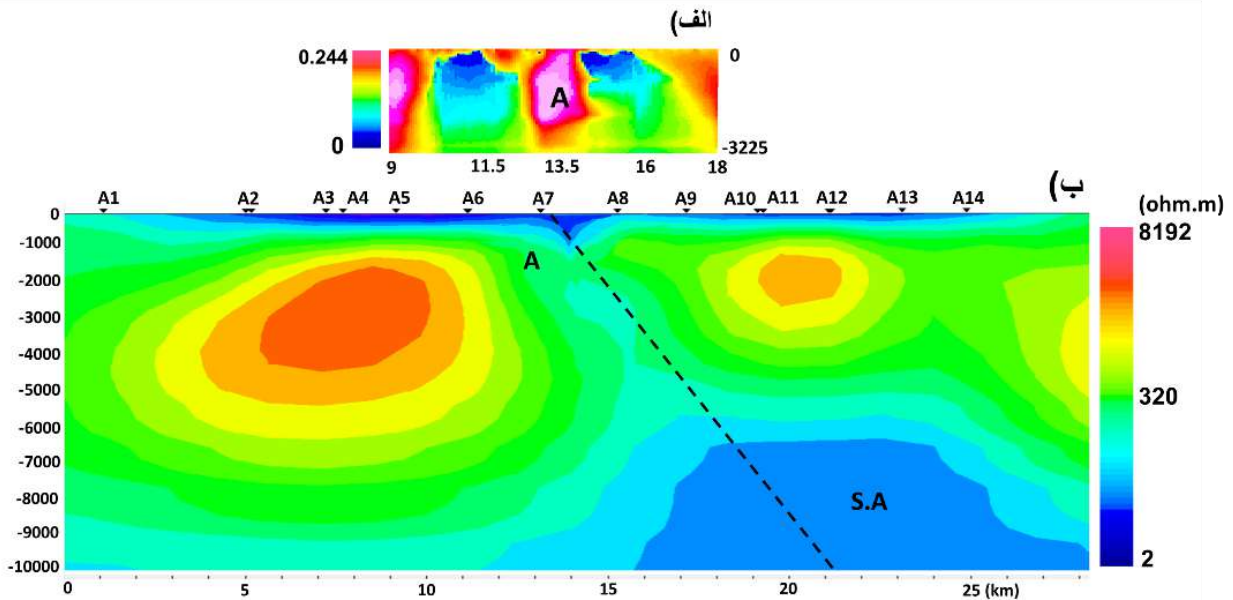


شکل ۴: مقایسه الف-مقطع مدل تخمین زده شده برای خودپذیری مغناطیسی و ب-مقاومت ویژه الکتریکی در معدن ارنست هنری.

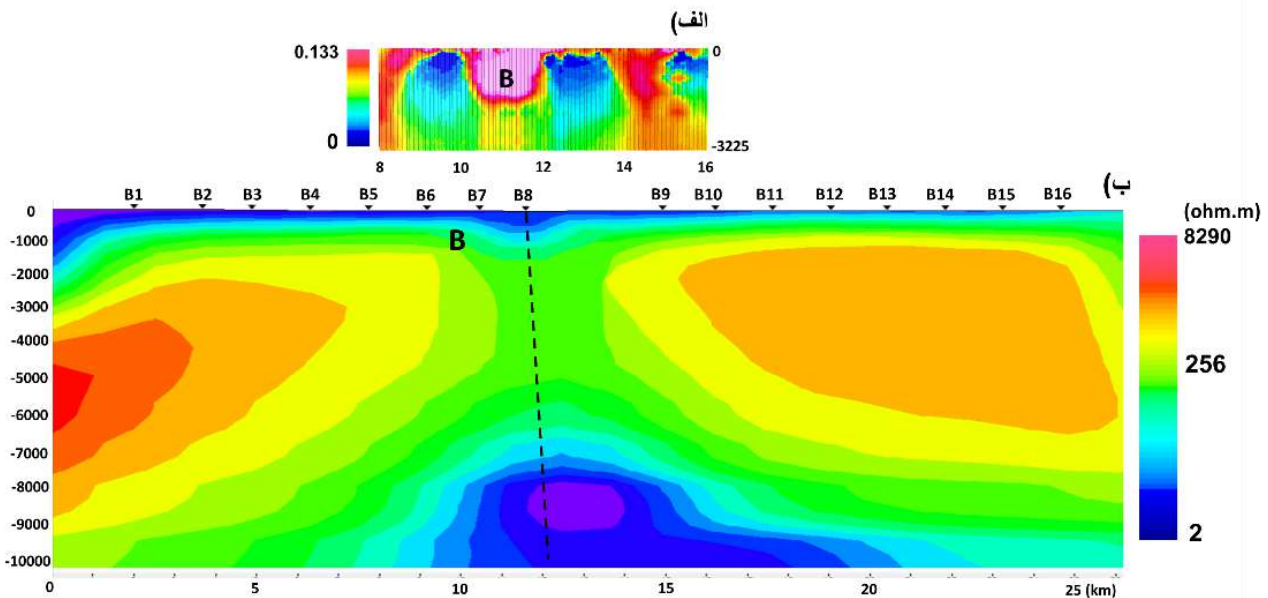
مقطع قائم خودپذیری مغناطیسی در امتداد پروفیل E برای مدل تخمین زده شده در محدوده معدن ارنست هنری، در شکل ۴-الف نشان داده شده است. در این شکل یک توده با خودپذیری بالاتر از ۰/۰۱۹ در یکاهای SI که تا عمق حدودا ۳ کیلومتری کشیده شده است را می‌توان دید. با توجه به اینکه حداکثر خودپذیری مغناطیسی سنگ دیوریت در طبیعت ۰/۰۰۲ در یکاهای SI است [۱۵]، خودپذیری بالای توده یاد شده نشانه‌ای از احتمال حضور کانی مگنتیت در این توده است. از سوی دیگر در شکل ۴-ب، مقطع E از مدل مقاومت ویژه این معدن قابل مشاهده است که می‌توان در همان مختصات و عمق، حضور توده‌ای با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم متر را که به طور قابل ملاحظه‌ای رساناتر از سنگ‌های اطرافش می‌باشد مشاهده کرد. نکته قابل توجه دیگر، انطباق بین گسل بزرگ در مقطع مدل دو بعدی مقاومت ویژه به دست آمده از وارونسازی داده‌های مگنتوتلوریک و گسل مشخص شده عمود بر امتداد پروفیل E در نقشه مغناطیسی شکل (۲-الف) است. با این وجود، انطباق دو محدوده با خودپذیری مغناطیسی و رسانایی نسبتا بالا در سمت چپ گسل یاد شده، نشان از محدوده با حضور بالای مگنتیت است. این واقعیت احتمالا نشانه تمرکز محلول‌های کانه ساز در امتداد گسل و تشکیل کانی مگنتیت در اثر محلول‌های گرمابی و آلتراسیون‌های کلسیک-آهن-قلیایی است که در دیگر کانسارهای IOCG و کانسارهای مگنتیت-آپاتیتی مشاهده می‌شود [۱۶]. با توجه به همراهی کانی‌سازی مگنتیت و کانه‌های مس در کانسارهای IOCG و حضور معدن IOCG ارنست هنری می‌توان حضور کانی سازی مس در این محدوده یا اطراف آن را تایید کرد.

شکل ۵-الف، مقطع خودپذیری مغناطیسی در محدوده A در امتداد پروفیل A را نشان می‌دهد. مطابق شکل، یک توده با خودپذیری بالاتر از ۰/۰۴۸ در یکاهای SI تا عمق ۳ کیلومتری قابل رویت است. در شکل ۵-ب نیز مدل مقاومت ویژه پروفیل A آمده است. ناحیه‌ی A که در مدل مغناطیسی نشان دهنده خودپذیری بالا است در مدل مقاومت ویژه آورده شد که تطابق قابل ملاحظه‌ای با توده‌ی رسانای A در

مدل مقاومت ویژه از خود نشان داد. همچنین همانند معدن ارنست هنری، همپوشانی نواحی رسانا و خودپذیری بالا می‌تواند نشانه‌ی مناسبی برای حضور کانسار تیپ IOCG در این محدوده باشد.



شکل ۵: مقایسه الف- مقطع مدل تخمین زده شده برای خودپذیری مغناطیسی و ب- مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده A.



شکل ۶: مقایسه الف- مقطع مدل تخمین زده شده برای خودپذیری مغناطیسی و ب- مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده B.

شکل ۶-الف، ناحیه‌ی B که خود پذیرگی مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۱۱ در یکاهای SI را در امتداد مقطع قائم B برای مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در محدوده B نشان می‌دهد. عمق توده یاد شده از عمق ۱/۲ کیلومتری تا سطح زمین تغییر می‌کند. مشابه محدوده معدن ارنست هنری و محدوده A، تطابق مناسبی بین ناحیه B با ناحیه‌ی B در مقطع مقاومت ویژه شکل ۶-ب مشاهده

می‌شود. بنابراین، مشابه محدوده معدن ارنست هنری و محدوده A، این محدوده نیز می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی حضور توده کانسار IOCG باشد. در این محدوده نیز گسل ناحیه‌ای که تقریباً با شیب نزدیک به قائم از محدوده رسانای S.B تا سطح امتداد یافته است، احتمال عبور محلول‌های گرمایی که سبب دگرسان شدن سنگ‌ها و کانی‌سازی در نزدیکی سطح زمین شده‌اند را نشان می‌دهد.

نتیجه و جمع‌بندی

در این پژوهش داده‌های مگنتومتري و مگنتوتلوريك محدوده‌ای در شمال ایالت کوئینزلند برای بررسی احتمال حضور کانسارهای مشابه با معدن ارنست هنری مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ابتدا با بررسی داده‌های مغناطیسی در محدوده ارنست هنری، دو محدوده A و B که دارای الگوی تغییرات مشابه میدان مغناطیسی بودند برای مطالعات بیشتر انتخاب شدند. مدلسازی داده‌های مگنتوتلوريك در این دو محدوده و محدوده معدن ارنست هنری، حضور توده‌های با رسانایی الکتریکی نسبتاً بالا از عمق‌های بیشتر از حدوداً ۵ کیلومتر را در محدوده‌ها نشان داد. همچنین مشخص شد که گسل‌های مشاهده شده در داده‌های مغناطیسی و مدل مقطع قائم مقاومت ویژه به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوريك، انطباق قابل توجه با هم دارند و در عمق به توده‌های رسانای یاد شده متصل می‌شوند. این گسل‌ها در ادامه مسیر خود به سوی سطح زمین، به محدوده‌ای با خودپذیری مغناطیسی و رسانایی بالا می‌رسند. وجود شباهت‌های قابل توجه بین مدل‌های ژئوفیزیکی در معدن ارنست هنری و محدوده‌های مورد بررسی، احتمال حضور کانی‌سازی IOCG مشابه معدن ارنست هنری در این دو محدوده را نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] Fu, J., Sanshi J., and Ende W. "Combined Magnetic, Transient Electromagnetic, and Magnetotelluric Methods to Detect a BIF-Type Concealed Iron Ore Body: A Case Study in Gongchangling Iron Ore Concentration Area, Southern Liaoning Province, China". *Minerals*, 10.12, 2020.
- [۲] Jiang, W. "Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia". *Geophysical Journal International* 229.3, 1628-1645, 2022.
- [۳] حاج حیدری، م. ابطی فروشانی، م. فتحیان پور، ن. توکلی هرندي، ح. مشتاقیان، ک. "تخمین ویژگی‌های زیرسطحی و ساختار منبع زمین گرمایی ورتون استان اصفهان با استفاده از داده‌های مغناطیسی و مگنتوتلوريك"، چهل و یکمین گردهمایی (همایش ملی) علوم زمین، تهران، ۱۴۰۱.
- [۴] محمدی، م.، عابدی، م.، مرادزاده، ع. "مدل‌سازی ژئوفیزیکی داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان و میدان پتانسیل در محدوده نهشته پلی‌متال آکویتی سیلور برتیش کلمبیا، کانادا". پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۱۴۰۲.
- [۵] کریم پور، م. "کانی‌سازی Cu-Au همراه با مگنتیت - اسپیکولاریت (IOCG) و مثال‌هایی از ایران"، نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، ۱۳۸۴.
- [۶] کریم پور، م.، ملکزاده شفارودی، آ.، اسفندیارپور، ا.، محمدنژاد، ا. "معدن فیروزه نیشابور: نخستین کانی‌سازی مس-طلا-اورانیم-عناصر نادر خاکی سبک نوع IOCG در ایران"، زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۳۹۰.
- [۷] Austin JR, Blenkinsop TG. "The Cloncurry Lineament: Geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa Inlier". *Precambrian Research*. 50-68. May 2008.
- [۸] Queensland Government. (n.d.). GSQ Open Data Portal, from <https://geoscience.data.qld.gov.au/data/magnetotelluric/>
- [۹] Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N., Chambodut, A., Chernova, T.A., Chulliat, A., Golovkov, V.P., Hamilton, B., Hamoudi, M. and Holme, R. "International geomagnetic reference field: the eleventh generation". *Geophysical Journal International*, 183(3), pp.1216-1230, 2010.
- [۱۰] J. M. Reynolds, "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics", vol. 2011, no. 155. 2011.
- [۱۴] Blakely, R. J. "Potential theory in gravity and magnetic application". *Cambridge university press*, 330. 1996.
- [۱۲] Li, Y., & Oldenburg, D. W. "Joint inversion of surface and three component borehole magnetic data". *GEOPHYSICS*, 65, 540-552, 2000.
- [۱۳] Li, Y. and Oldenburg, D. W., 1996, 3-D inversion of magnetic data, *Geophysics*, 61, 394-408.
- [۱۴] M. Commer and G. A. Newman, "Three-dimensional controlled-source electromagnetic and magnetotelluric joint inversion," *Geophysics. J. Int.*, vol. 178, no. 3, pp. 1305-1316, 2009.
- [۱۵] Hroudá, F., Chlupáčová, M., & Chadima, M. "The use of magnetic susceptibility of rocks in geological exploration". *Terraplus, Brno*. 2009.

[۱۶] Leão-Santos, M., Moraes, R., Li, Y., Raposo, M. I., & Zuo, B. "Hydrothermal Alteration Zones' Magnetic Susceptibility Footprints and 3D Model of Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) Mineralization, Carajás Mineral Province, Brazil". *Minerals*, 12(12), 1581. 2022.

وارون سازی مشترک مبتنی بر ساختار مغناطیس سنجی و داده‌های مقاومت DC از طریق گرادین متقاطع مقید

علی دهقان منگابادی^۱، احمد زارعان شیروانه ده^{۲*}، آینور ناصری^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران zarean@gmail.com

^۲ گروه مهندسی معدن، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران Ah.zarean@iau.ac.ir

^۱ گروه مهندسی معدن، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران aynur.nasseri80@gmail.com

* نویسنده مسئول: احمد زارعان شیروانه ده

چکیده

هنگامی که وارون سازی مجزای مجموعه داده‌های ژئوفیزیکی نمی‌تواند منجر به بازسازی مطلوب بی‌هنجاری‌های زیرسطحی شود، وارون سازی مشترک روش‌های ژئوفیزیک یکی از رایج‌ترین راه‌ها برای غلبه بر این مشکل است. وارون سازی مبتنی بر گرادین متقاطع تنها تکنیکی است که امکان اجرای وارون سازی مشترک مغناطیس‌سنجی و داده‌های مقاومت ویژه را می‌دهد. در این مقاله وارون سازی مشترک مغناطیس سنجی و مقاومت ویژه بر اساس معادلات غیرخطی انجام شده است. نرم کردن، وزن دهی در عمق و فشردگی به ترتیب به‌عنوان توابع وزن دهی مدل برای روش‌های مقاومت ویژه و مغناطیس سنجی دست‌کاری می‌شوند. وارون سازی مشترک به داده‌های مصنوعی کامل یک دایک نازک برای ارزیابی بهره‌وری آن اعمال می‌شود که نشان می‌دهد وارون سازی فردی مقاومت ویژه منجر به بازسازی ضعیف دایک نازک می‌شود، درحالی‌که مغناطیس سنجی مدل دایک را به‌خوبی بازیابی می‌کند. پس از وارون مشترک، روش مغناطیسی نقش یک قید کارآمد را از طریق گرادین متقاطع برای بهبود مدل مقاومت در مورد بازیابی رضایت‌بخش دایک نازک ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: گرادین متقاطع، مقاومت DC، وارون سازی مشترک، مغناطیس سنجی

Structural based joint inversion of magnetometry and DC resistivity data through cross-gradient constraint

Ali Dehghan Mongabadi¹, Ahmad Zarean Shirvanehdeh^{2*}, Aynur Nasseri³

¹ Department of Mining Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran,
Zarean@gmail.com

² Department of Civil Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran,
Ah.zarean@iau.ac.ir

³ Department of Mining Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran,
aynur.nasseri80@gmail.com

* Corresponding author: Ahmad Zarean Shirvanehdeh

ABSTRACT

When individual inversion of geophysical data set cannot result in desirable reconstruction of subsurface anomalies, joint inversion of geophysical methods is one of the most common ways to overcome this problem. Cross-gradient based joint inversion is the only technique allowing to execute joint inversion of magnetometry and DC resistivity data. In this paper, joint inversion of magnetometry and DC resistivity, based on nonlinear equations, is carried out. Smoothness and

product of depth weighting and compactness are manipulated as model weighting functions for DC resistivity and magnetometry methods, respectively. The joint inversion is first applied to perfect synthetic data of a thin dyke to evaluate its productivity which shows that individual inversion of DC resistivity leads to poor reconstruction of the thin dyke, while magnetometry recovers the dyke model very well. After joint procedure, magnetic method plays the role of an efficient constraint through cross-gradient to improve the resistivity model about satisfactory recovery of the thin dyke.

Keywords: Cross-gradient, DC resistivity, Joint inversion, Magnetometry.

مقدمه

ضرورت بازسازی تصاویر با وضوح بالا از بی‌هنجاری‌های زیرسطحی، ژئوفیزیکدانان را به ترکیب مجموعه‌های داده‌های ژئوفیزیکی سوق داده است، زیرا برای بسیاری از موارد افزودن اصطلاحات منظم سازی یا اطلاعات اولیه یا اعمال هر دوی آن‌ها کافی نیست. این ترکیب ممکن است با استفاده از سه روش اصلی اجرا شود: (۱) تفسیر مشترک [۵]، [۲] و [۳]، (۲) وارون‌سازی متوالی [۵]، [۶] و [۳] و وارون‌سازی مقید که ممکن است به‌عنوان تکنیک‌های وارون مقید مبتنی بر پتروفیزیک و ساختاری طبقه‌بندی شود. وارون‌سازی مشترک بر اساس شباهت‌های ساختاری با استفاده از تابع گرادیان متقاطع در طول دو دهه اخیر گسترده شده است (به‌عنوان مثال [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱] و [۱۲]). این روش ابتدا توسط گالاردو و موجو (۲۰۰۴) [۱۳] برای وارون‌سازی مشترک داده‌های لرزه‌ای و مقاومت DC ایجاد شد. از آن زمان، تابع گرادیان متقاطع برای وارون‌سازی مشترک مجموعه‌های داده‌های ژئوفیزیکی مختلف مانند مغناطیس‌تئوریک (MT) و لرزه‌ای (مانند [۱۳])، گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی [۱۴])، حوزه فرکانس الکترومغناطیسی (FDEM) و لرزه‌ای [۱۵] استفاده شده است. محدودیت گرادیان متقاطع با فرض سنجش ساختارهای زمین‌شناسی توسط روش‌های ژئوفیزیکی عمل می‌کند [۱۶]. زمانی که هر دو روش یک بهنجاری را حس کنند و یکی از آن‌ها در بازایی بهنجاری موفق باشد، آنگاه می‌تواند توانایی خود را با محدودیت گرادیان متقاطع به دیگری منتقل کند که منجر به بهبود مدل وارون دوم پس از وارون‌سازی مقید می‌شود و در نهایت تشابه ساختاری افزایش می‌یابد.

مجموعه داده‌های مقاومت DC و مغناطیس‌سنجی معمولاً باهم به‌عنوان تفسیر مشترک برای اهداف مختلف زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند ([۱۷]، [۱۸] و [۱۹]) اما ترتیب آن‌ها و مشترک وارون‌سازی یک‌بار اجرا شده است [۶]. ورفی نژاد و همکاران (۲۰۲۰) [۱۶] از محدودیت‌های گرادیان متقاطع، فشردگی و وزن برای وارون‌سازی مشترک مقاومت DC و داده‌های مغناطیسی استفاده کردند که با موفقیت در داده‌های باستان‌شناسی پمپئی اعمال شد. آن‌ها از یک معادله انتگرال خطی معرفی شده توسط Perez-Flores و همکاران (۲۰۰۱) [۲۰] برای روش مقاومت DC استفاده کردند که به شکل معادله انتگرال Fred-Holm از نوع اول مانند روش مغناطیس‌سنجی است. در این مقاله، وارون‌سازی مشترک مقاومت DC و داده‌های مغناطیسی بر اساس محدودیت گرادیان متقاطع پیاده‌سازی شده است، اما در قالب مدل‌سازی مقاومت DC از غیرخطی استفاده می‌کنیم و به‌جای فشردگی و وزن دهی عمق، از محدودیت همواری برای روش مقاومت DC استفاده می‌شود.

الگوریتم وارون مشترک

بر اساس چارچوب اصلی که توسط گالاردو و میجو (۲۰۰۴) [۷] شروع شد، وارون‌سازی مشترک دو روش ژئوفیزیک دلخواه را می‌توان از طریق محدودیت گرادیان متقاطع انجام داد. از آنجایی که مقاومت، حساسیت، چگالی و سایر خصوصیات فیزیکی با موقعیت و در هر جهت متفاوت است، گرادیان متقاطع این خواص فیزیکی می‌تواند یک محدودیت مناسب باشد. برای حالت دوبعدی، تابع گرادیان متقاطع به‌صورت ریاضی به شرح زیر است:

$$\boldsymbol{\tau} = \nabla \mathbf{m}_R(x, z) \times \nabla \mathbf{m}_M(x, z) \quad (1)$$

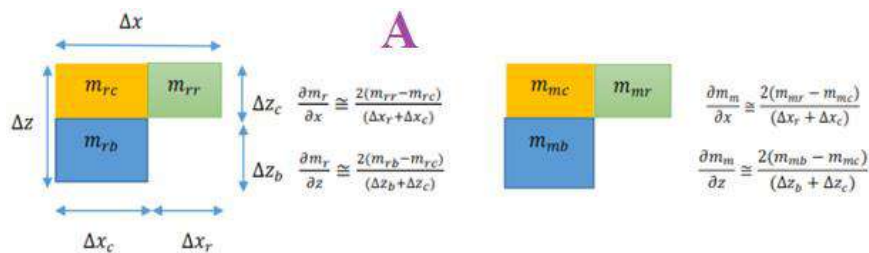
که در آن $\mathbf{m}_R(x, z)$ و $\mathbf{m}_M(x, z)$ به ترتیب بردارهای مدل برای حساسیت و مقاومت هستند $\boldsymbol{\tau}$. به وضوح به این صورت تعریف می شود:

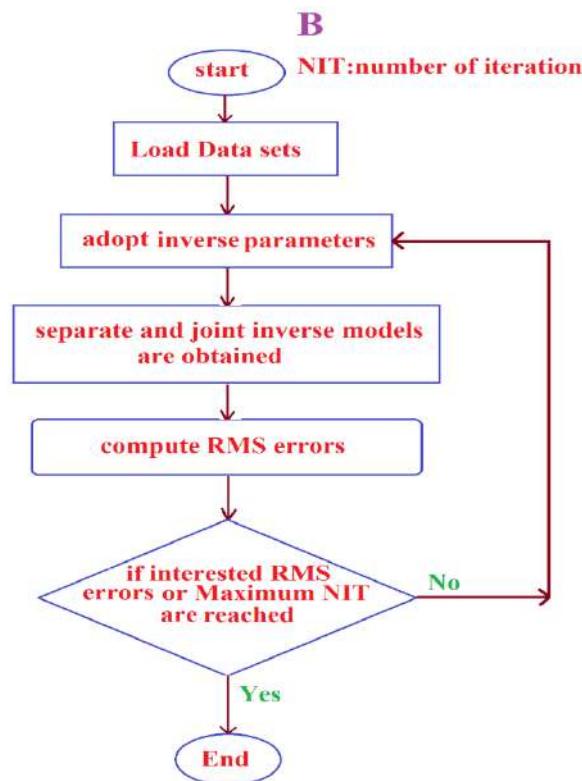
$$\boldsymbol{\tau}(x, z) = \left(\frac{\partial \mathbf{m}_R(x, z)}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{m}_M(x, z)}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \mathbf{m}_R(x, z)}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{m}_M(x, z)}{\partial z} \right) \quad (2)$$

مقادیر گرادیان متقاطع بیشتر بیانگر شباهت ساختاری کمتری بین دو مدل وارون است و بالعکس. از نظر ساختاری، یک مقدار صفر برای این تابع در هر نقطه دو معنی متفاوت دارد: (۱) حداقل یک روش هیچ بهنجاری را حس نمی کند ($\nabla m = 0$)، (۲) هر دو مدل کاملاً مشابه هستند، به این معنی که هرگونه تغییرات مکانی باید در به همین ترتیب برای هر دو مدل [۱۶]. معادله گسسته (۳) با استفاده از روش تفاضل محدود به فرمول زیر منجر می شود:

$$\boldsymbol{\tau} \cong \frac{4}{\Delta x \Delta z} (\mathbf{m}_{Rc}(\mathbf{m}_{Mb} - \mathbf{m}_{Mr}) + \mathbf{m}_{Rr}(\mathbf{m}_{Mc} - \mathbf{m}_{Mb}) + \mathbf{m}_{Rb}(\mathbf{m}_{Mr} - \mathbf{m}_{Mc})) \quad (3)$$

برای هر سلول مشخص شده (تعیین شده با زیرنویس C)، نزدیک ترین سلول های پایین و سمت راست به ترتیب با زیرنویس های r و b تعریف می شوند (شکل ۱).



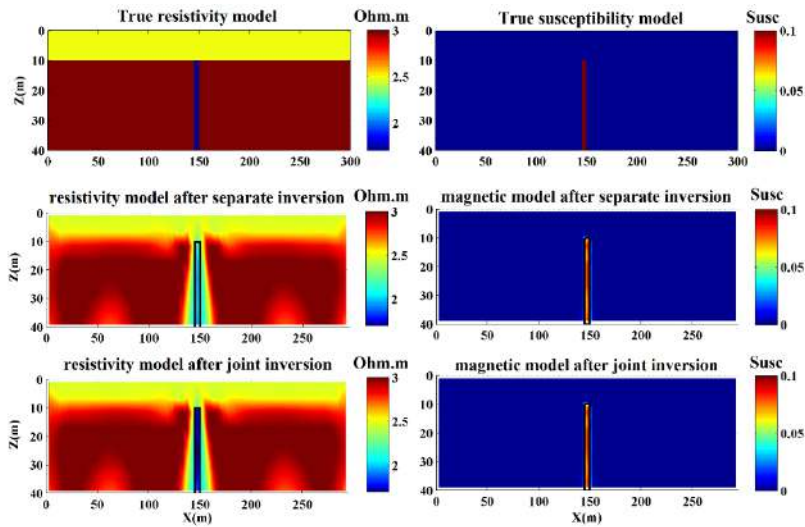


شکل ۱: الف) طرح سه سلولی برای تعیین نسخه گسسته گرادیان متقاطع، ب) نمودار جریان الگوریتم وارون سازی مشترک.

مدل سازی مصنوعی

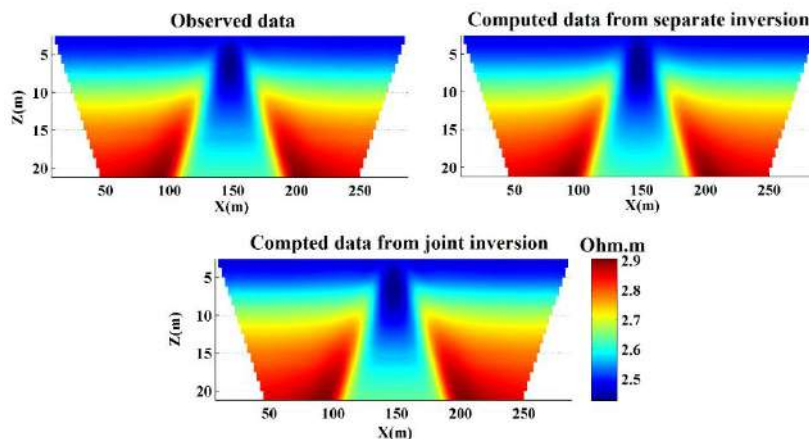
قبل از اجرای الگوریتم وارون سازی مشترک بر روی داده‌های واقعی، کارایی آن را با استفاده از مدل سازی مصنوعی بررسی می‌کنیم. از آنجایی که مورد واقعی یک دایک تقریباً نازک است که به سطح نزدیک گسترش یافته است، ما یک مدل دایک نازک را در یک محیط دولایه اتخاذ کردیم. در ابتدا، الگوریتم مشترک برای آزاد کردن داده‌های نوین پیاده‌سازی می‌شود. مدل‌های واقعی مفروض مقاومت و حساسیت در شکل ۲ نشان داده شده‌اند که برای آن‌ها مقاومت دارای پس‌زمینه لایه‌ای است اما مدل حساسیت متشکل از یک پس‌زمینه همگن است. دایک نازک رسانا با مقاومت $50 \Omega.m$ و حساسیت 0.1 توسط یک لایه مقاومتی $1000 \Omega.m$ احاطه شده است. ضخامت دایک و عمق آن تا بالا در نوبت ۵ و ۱۰ متر است.

یک مدل یکنواخت $300 \Omega.m$ و حساسیت صفر به ترتیب به عنوان مدل اولیه برای مقاومت و مغناطیس سنجی اتخاذ شده است. وارون سازی های جداگانه و مشترک تکراری به طور هم‌زمان شروع می‌شود و محدودیت گرادیان متقاطع اثرات وارون سازی جداگانه مقاومت را برای روش مغناطیسی و بالعکس منتشر می‌کند؛ بنابراین، به کارگیری تکنیک‌های وارون سازی فردی کارآمد با اجرای محدودیت‌های مناسب، نقش کلیدی دارد. مدل‌های بازسازی شده جداگانه از هر دو روش در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مدل وارون حساسیت نشان‌دهنده بازیابی چاه دایک نازک است و مقاومت می‌تواند دولایه و یک دایک ضخیم را در لایه دوم بازسازی کند که مقاومت و ضخامت آن تفاوت معنی‌داری با آن دارد. مدل واقعی با توجه به ویژگی‌های ریاضی تابع گرادیان متقاطع، سنجش زمین‌شناسی یکسان با روش‌های ژئوفیزیکی درگیر ضروری است، بنابراین، منطقی است که بینیم مغناطیس‌سنجی مدل مقاومت را برای بازیابی بهتر دایک پس از فرآیند وارون سازی مفید بهبود می‌بخشد، اما غیرممکن است. برای اینکه مقاومت برای مغناطیس سنجی برای متمایز کردن دولایه به دلیل محدودیت تابع گرادیان متقاطع مفید باشد.

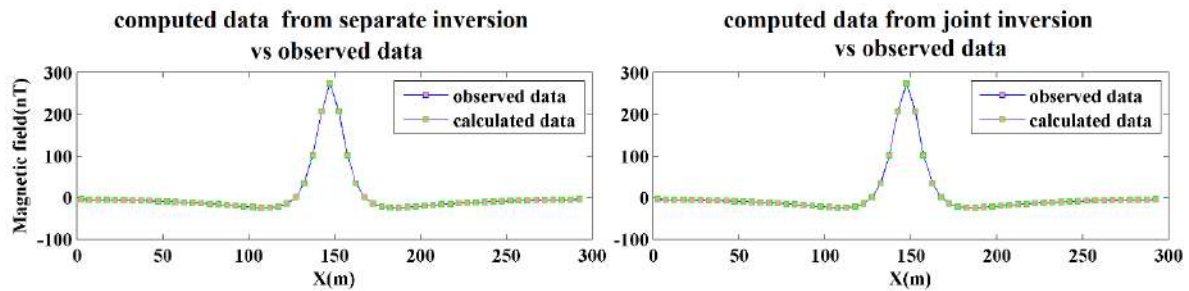


شکل ۲: مدل‌های واقعی و وارون پس از وارون سازی های جداگانه و پیوسته برای هر دو روش مقاومت DC (چپ) و مغناطیس سنجی (راست).

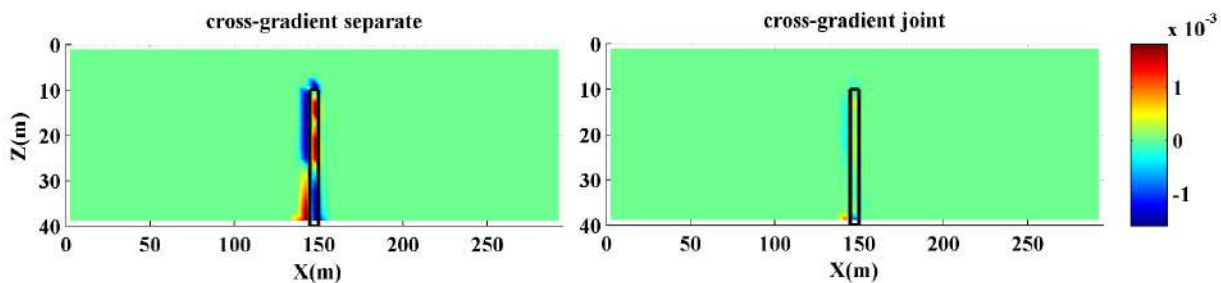
شکل ۳ شبه مقطع داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده را پس از وارون سازی های جداگانه و مشترک نشان می‌دهد. خطاهای RMS داده‌های محاسبه شده پس از وارون سازی جداگانه و مشترک به ترتیب ۱.۱۲٪ و ۱.۴۲٪ است. از آنجایی که وارون سازی مشترک شامل محدودیت بیشتری (تابع گرادیان متقاطع) نسبت به وارون سازی فردی است، ممکن است بایاس بیشتر و در نتیجه خطای RMS بزرگ‌تر مورد انتظار باشد. این موضوع در مورد روش مغناطیسی به دلیل عملکرد خنثی محدودیت گرادیان متقاطع برای انتشار اثر مقاومتی به مغناطیس سنجی پس از وارون سازی مقید تکرار نمی‌شود، بنابراین خطاهای RMS داده‌های محاسبه شده از مدل‌های وارون سازی جداگانه و مشترک یکسان و هر دو برابر با ۰.۵۸٪ است. مقادیر تابع گرادیان متقاطع پس از مدل‌سازی وارون جداگانه و مشترک در شکل ۵ نشان داده شده است که کاهش مقادیر تابع پس از فرآیند اتصال را نشان می‌دهد و این موضوع با بهبود مدل مقاومت و در نتیجه افزایش شباهت ساختاری پس از فرآیند اتصال مطابقت دارد.



شکل ۳: اندازه‌گیری و محاسبه مقاومت ظاهری پس از وارون سازی همزمان جداگانه و مشترک.



شکل ۴: داده‌های محاسبه‌شده از مدل‌های وارون سازی مجزا (چپ) و مشترک (راست) در مقابل داده‌های مشاهده‌شده.



شکل ۵: تابع گرادیان متقاطع پس از رویه‌های وارون سازی جدا (چپ) و پیوستن (راست). کاهش مقادیر تابع گرادیان متقاطع پس از وارون سازی اتصال نشان‌دهنده افزایش شباهت‌های ساختاری پس از فرآیند مشترک است

نتیجه و جمع‌بندی

محدودیت گرادیان متقاطع امکان وارون سازی مشترک داده‌های مقاومت مغناطیسی و DC را بر اساس تشابهات ساختاری فراهم می‌کند. الگوریتم وارون سازی مشترک با موفقیت در مجموعه داده‌های مصنوعی و واقعی اعمال شد و در هر دو مورد دایک‌ها به خوبی بازیابی شدند. دو ویژگی مهم تابع گرادیان متقاطع نشان داده شد: (۱) تابع گرادیان متقاطع زمانی کار می‌کند که هر دو مدل بهنجاری علاقه‌مند را مانند دایک نازک حس می‌کنند، جایی که روش مغناطیسی وارون سازی مقاومت را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد تا دایک نازک را با وضوح بسیار افزایش دهد، (۲) مزیت این تکنیک از طریق تابع گرادیان متقاطع از یک روش به روش دیگر منتشر نمی‌شود، زمانی که بهنجاری علاقه‌مند فقط با یکی از روش‌های مرتبط مانند پس‌زمینه لایه‌ای زمین‌شناسی احساس شود. مقاومت یک پس‌زمینه دولایه را حس می‌کند، اما آنچه با روش مغناطیسی حس می‌شود، چیزی بیش از یک محیط اطراف همگن نیست. به‌طور کلی، مقایسه وارون سازی جداگانه و مشترک برای موارد مصنوعی و واقعی نشان‌دهنده نتایج بهبودیافته‌تر پس از وارون سازی مقید بود و کاهش مقادیر تابع گرادیان متقاطع پس از فرآیند اتصال بیانگر افزایش تشابه ساختاری است. با توجه به ادغام تابع گرادیان متقاطع به‌عنوان یک محدودیت اضافی معرفی شده در فرآیند بازسازی مشترک، عدم تناسب داده‌های محاسبه‌شده برای مدل مشترک مقاومت بزرگ‌تر از عدم تناسب داده‌های محاسبه‌شده پس از وارون سازی جداگانه است. ناهم‌انگهی داده‌های مغناطیسی محاسبه‌شده پس از وارون سازی جداگانه و مشترک به دلیل عدم کارایی تابع گرادیان متقاطع در مورد روش مغناطیسی یکسان بود.

مراجع

- [۱] Ogaya X., J. Alcalde, Marzán I., Ledo J., Queralt P., Marcuello A., Martí D., Saura E., Carbonell R., Benjumea B., 2016. Joint interpretation of magnetotellurics, seismic, and well-log data in Hontomín (Spain). *Solid Earth*, 7, 1-15.
- [۲] Parnow, S., Oskooi, B. and Florio, G., 2021. Improved linear inversion of low induction number electromagnetic data. *Geophysical Journal International*, 224(3): 1505-1522.

- [۳] Ghari, H., Varfinezhad, R., & Parnow, S. (2023). 3D joint interpretation of potential field, geology, and well data to evaluate a salt dome in the Qarah-Aghaje area, Zanzan, NW Iran. *Near Surface Geophysics*, 21(3), 233-246.
- [۴] Milano, M., Varfinezhad, R., Bizhani, H., Moghadasi, M., Kalateh, A. N., & Baghzendani, H. (2021). Joint interpretation of magnetic and gravity data at the Golgohar mine in Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 195, 104476.
- [۵] Le, C.V.A., Harris, B., Pethick, A.M., Takougang, E.M.T., Howe, B., 2016. Semiautomatic and automatic cooperative inversion of seismic and magnetotellurics data. *Survey in Geophysics*, 37(5), 845–896.
- [۶] Varfinezhad, R., Parnow, S., Florio, G., Fedi, M., & Mohammadi Vizheh, M. (2023). DC resistivity inversion
- [۷] Gallardo, L. A., Meju, M.A., 2004. Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross gradients constraints. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 109, B03311.
- [۸] Cella, F. and Fedi, M., 2012. Inversion of potential field data using the structural index as weighting function rate decay, *Geophys. Prospect*, 60, 313-336.
- [۹] Fregoso, E., Gallardo, L.A., 2009. Cross gradients joint 3D inversion with applications to gravity and magnetic data. *Geophysics*, 74(4), 31–42.
- [۱۰] Molodtsov, D.M., Troyan, V.N., Roslov, Y.V. and Zerilli, A., 2013. Joint inversion of seismic traveltimes and magnetotellurics data with a directed structural constraint. *Geophysical Prospecting*, 61(6), 1218-1228.
- [۱۱] Bennington, N.L., Zhang, H., Thurber, C.H. and Bedrosian, P.A., 2015. Joint inversion of seismic and magnetotellurics data in the Parkfield region of California using the normalized cross-gradient constraint. *Pure and Applied Geophysics*, 172(5), 1033-1052.
- [۱۲] Joulidehsar, F., Moradzadeh, A. and Doulati Ardejani, F., 2018. An improved 3D joint inversion method of potential field data using cross-gradient constraint and LSQR method, *Pure appl. Geophys.*, 175, 4389–4409.
- [۱۳] Gallardo, L.A., Meju, M.A., 2003. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 30(13), 1658.
- [۱۴] Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2007). Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotellurics and seismic traveltime data for structural and lithological classification. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1261-1272.
- [۱۵] Hu, W., Abubakar, A., & Habashy, T. M. (2009). Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6), R99-R109.
- [۱۶] Varfinezhad, R., Oskooi, B., & Fedi, M. (2020). Joint inversion of DC resistivity and magnetic data, constrained by cross gradients, compactness and depth weighting. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 4325-4343.
- [۱۷] Karavul, C., Dedebeali, Z., Keskinsezer, A., Demirkol, A., 2010. Magnetic and electrical resistivity image survey in a buried Adramytteion ancient city in Western Anatolia, Turkey. *International Journal of Physical Sciences*, 5(6), 876-883.
- [۱۸] Al-Gami, M.A., 2011. Magnetic and DC resistivity investigation for groundwater in a complex subsurface terrain. *Arabian Journal of Geosciences* 4(3-4), 385-400.
- [۱۹] Zhang, G., Lu, Q.T., Zhang, G.B., 2018. Joint Interpretation of Geological, Magnetic, AMT, and ERT Data for Mineral Exploration in the Northeast of Inner Mongolia, China. *Pure and Applied Geophysics*, 175(3), 989-1002.
- [۲۰] Perez-Flores, M.A., Méndez-Delgado S. and Gomez-Treviño, E., 2001, Imaging low frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, 66, 1067–1081.

مدل سازی وارون داده‌های مغناطیسی و IP/RS با هدف اکتشاف کانسار مس معدن تکنار خراسان رضوی

داود رضایی^۱، علی میثاقی^۲، احمد زارعان شیروان ده^۳

^۱ کارشناس ارشد اکتشاف، شرکت دانش بنیان انرژی توانای کیش، davoodrezai72@gmail.com

^۲ استاد یار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ali.misaghi@khu.ac.ir

^۳ استاد یار دانشکده عمران، دانشگاه شبستر، zarean@gmail.com

چکیده

معدن پلی متال تکنار بخشی از یک مجموعه آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده سازند تکنار به سن اردویسین است. لیتولوژی منطقه شامل رسوبات آواری، کربنات‌ها و سنگ‌های آتشفشانی و نیمه عمیق بازیکی و اسیدی می‌باشد. کانی‌سازی به سه حالت لایه‌ای، استوک‌ورک و توده‌ای دیده می‌شود. بخش لایه‌های متشکل از لایه‌های متناوبی از پیریت، کالکوپریت، مگنتیت، اسفالریت، گالن و کلریت است. بخش توده‌ای در قسمت بالای کانی‌سازی لایه‌ای تشکیل شده و شامل بیش از ۵۰٪ مگنتیت است. با توجه به بازدهی‌های صحرائی انجام شده کانسار تکنار یک کانسار ولکانوژنیک ماسیوسولفید است. وجود مگنتیت بالا (احتمالاً نبود پیروتیت) به‌عنوان کانی دارای خاصیت مغناطیسی در کنار کانی‌های سولفیدی باعث شد تا روش مگنتومتري به‌عنوان روشی کارآمد مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به وجود کانی‌های سولفیدی در رخنمون‌های محدود، روش پلاریزاسیون القایی، روشی مناسب برای تعیین گستره کانی‌های سولفیدی است. روش مقاومت ویژه الکتریکی نیز برای ردیابی لیتولوژی، دگرسانی و کانی‌های فلزی مفید است. بعد از انجام مطالعات ژئوفیزیک به روش IP/RS علاوه بر اثبات کانی‌زایی در زون‌های برشی و رگه‌ها، احتمال وجود توده‌های نیمه عمیق نیز محتمل به نظر می‌رسد. بر اساس مطالعات مگنتومتري محدوده به ۵ زون بی‌هنجاری بالا تقسیم شد. بی‌هنجاری شدت بالا به دلیل وجود واحد مافیک و آلترامافیک و وجود کانی‌های آهن‌دار است. غالب رخنمون‌های مس به دلیل همبستگی کانی‌زایی مس و مگنتیت در زون بی‌هنجاری بالای مغناطیسی خصوصاً در زون بی‌هنجاری شماره ۱ دیده شده است. بی‌هنجاری‌های دوقطبی با شدت بالا و با طول موج بلند در این قسمت به دلیل وجود کانی‌های آهن‌دار پراکنده در کل زون است. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی مگنتومتري در زون بی‌هنجاری شماره ۱ به همراه زمین‌شناسی سطحی جهت تعیین محل پروفیل‌های IP/RS مورداستفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه و تفسیرهای ژئوفیزیکی پروفیل‌های برداشت شده و تلفیق آن‌ها با مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد مقدار بی‌هنجاری در ارتباط با کانه‌زایی سولفور متوسط تا قوی است. در این بلوک بعد از مدل‌سازی دو و سه‌بعدی دو زون با شارژپذیری بالا در غرب و شرق پروفیل‌ها قابل تفکیک است. زون بی‌هنجاری شرقی از رگه مورد بهره‌برداری شروع شده است و با شیب تند به توده‌ای نیمه‌عمیق در شرق ختم می‌شود. این بی‌هنجاری همبستگی خوبی با زون بی‌هنجاری مگنتومتري دارد. همین روند به‌طور ضعیف‌تر در زون غربی نیز دیده می‌شود. به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، ۱۶ نقطه حفاری در محل بی‌هنجارها پیشنهاد شده است.

کلیدواژه: کانی سولفیدی، ژئوفیزیک، مگنتومتري، IP/RS، آرایش قطبی-دوقطبی، تکنار

"Inverse modeling of magnetic and IP/RS data for exploring the copper " **"deposit at the Teknar mine in Khorasan Razavi**

Davood Rezaei¹, Ali Mishaghi², Ahmad Zarean³

¹ MSc of exploration, Danesh Banyan Company, Tavana Energy'

² Assistant of professor, Kharazmi University of Tehran

³ Assistant of professor, Shabestar University

The Teknar polymetallic deposit is part of a volcanic-sedimentary complex of the Teknar formation of Ordovician age. The region's lithology includes volcanic and subvolcanic rocks, as well as semi-deep acidic rocks, aversive sediments, and carbonates. The mineralization is observed in layered, stockwork, and massive forms. The layered section consists of alternating layers of pyrite, chalcopyrite, magnetite, sphalerite, galena, and chalcopyrite. The massive section at the top of the mineralization consists of over 50% magnetite. Based on field visits, the Teknar deposit is a massive-sulfide volcanic deposit. The high presence of magnetite (likely the absence of pyrrhotite) alongside sulfide minerals led to the efficient use of magnetometry as a method. Given the presence of sulfide minerals in the limited outcrops, induced polarization is a suitable method for determining the extent of sulfide minerals. The electrical resistivity method is also useful for lithological discrimination and the detection of useful metallic minerals. Geophysical studies using IP/Rs method suggest the possibility of semi-deep bodies in addition to proving mineralization in cross-cut zones and veins. The magnetic studies divided the area into 5 zones of high anomaly. The high anomalies are attributed to the presence of mafic and ultramafic units and iron-bearing minerals. The predominance of copper mineralization and magnetite in the high magnetic anomaly zones, especially in anomaly zone 1, is evident. Bipolar anomalies with high intensity and long wavelengths in this area are due to the scattered iron-bearing minerals throughout the entire zone. The results of 3D magnetometric modeling in anomaly zone 1, along with surface geology, were used to determine the location of IP/Rs profiles. The results of this study and the interpretation of the geophysical profiles, combined with geological studies, indicate a moderate to strong association between anomalies and sulfide mineralization. After modeling in two and three dimensions, two zones with high chargeability in the west and east of the profiles are distinguishable. The eastern anomaly zone starts from the exploited vein and ends with a steep slope towards a semi-deep body in the east. This anomaly shows a correlation.

Keywords: Sulfide mineral, geophysics, magnetometry, IP/RS, Teknar

۱ مقدمه

اولین بار اولدنبرگ و همکارانش مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی را به صورت ترکیبی از روش‌ها برای نهشته مس-طلا پورفیری ام تی میلیگان بکار بردند [۱]. نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های زمینی مغناطیس، مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی و همچنین الکترومغناطیس هوابرد، ارتباط نزدیک خواص ژئوفیزیکی را با این نهشته مس نشان داد. نتایج مدل‌سازی انجام شده بر روی داده‌های تلفیقی ژئوفیزیک اکتشافی، حاکی از حصول مدل‌هایی با دقت بالا در شناسایی توده‌ی سولفیدی مس در مقایسه با مقطع واقعی زمین شناسی بوده است. بنابراین وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی از جمله مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی کمک شایانی در جهت تصویرسازی نهشته‌های مس می‌نماید.

در سال‌های اخیر، در زمینه اکتشاف مس و استفاده از روش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی مطالعات فراوانی انجام شده است در ایران، در مطالعه‌ای که توسط مشتاقیان و همکاران در منطقه دالی انجام شد، روش‌های قطبش القایی، مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی به منظور بررسی ارتباط میان نواحی سولفیدی مرتبط با کانی‌سازی مس و تغییرات خودپذیری مغناطیسی موجود در منطقه استفاده شده است، نتایج این پژوهش برای محدوده شمالی دالی پتانسیل بالای کانی‌سازی مس و طلا را نشان داده است [۲].

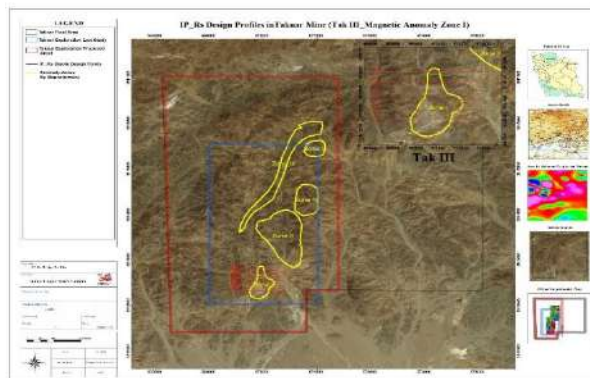
جان قربان و همکاران در محدوده کوه لهت استان اصفهان به بررسی ارتباط میان خودپذیری مغناطیسی، بارپذیری و مقاومت ویژه در منطقه پرداختند و نتایج پژوهش آنان نشان داد همبستگی بالایی بین تغییرات خودپذیری مغناطیسی در منطقه با افزایش بارپذیری و کاهش مقاومت ویژه وجود دارد [۳]. در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی از قبیل روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی احتمال وجود بی‌هنجاری‌های بارپذیر بررسی شود و سپس به کمک مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های ثبت شده در منطقه، مناطق امید بخش به منظور حفر گمان‌های اکتشافی معرفی گردد.

۱-۱ زمین‌شناسی منطقه

کانسار ماسیوسولفید تکنار بخشی از یک مجموعه آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده سازند تکنار به سن اردویسین است. لیتولوژی منطقه شامل رسوبات آواری، کربنات‌ها و سنگ‌های آتشفشانی و نیمه عمیق بازیکی و اسیدی می‌باشد [۴]. کانسار پلی‌متال تکنار دارای لایه‌بندی با سنگ همراه خود است و بدین علت به صورت سین‌ژنتیک تشکیل شده است. زون تکنار تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین در حد رخساره شیست‌های سبز قرار گرفته است و در نتیجه آن سنگ‌های پیلیتی و ساب‌آرکوز سازند تکنار به سرسیت شیست یا سرسیت-کلریت شیست تغییر یافته‌اند. کانسار تکنار در زون تکنار قرار گرفته که این زون مابین دو گسل مهم درون در جنوب و ریوش (تکنار) در شمال واقع شده است. این کانسار در چهار ناحیه به نام‌های Tak-I, Tak-II, Tak-III, Tak-IV و اخیراً (Tak V) رخنمون دارد که در واقع قسمتی از یک کانسار بزرگ هستند که در نتیجه فعالیت تکتونیکی شدید منطقه از یکدیگر جدا شده و حداقل یک کیلومتر از هم فاصله گرفته‌اند. کانی‌سازی به سه حالت لایه‌ای، استوک‌ورک و توده‌ای دیده می‌شود. بخش لایه‌ای متشکل از لایه‌های متناوبی از پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، اسفالریت، گالن و کلریت است. ضخامت لایه‌بندی از چند میلیمتر تا ۲ سانتیمتر متغیر می‌باشد. کلریت کانی سیلیکاته غالب در بخش کانی‌سازی لایه‌ای است. بخش توده‌ای در قسمت بالای کانی‌سازی لایه‌ای تشکیل شده و شامل بیش از ۵۰٪ مگنتیت است. کانی‌های اصلی آن عبارتند از: مگنتیت + پیریت + کالکوپیریت + اسفالریت ± گالن + کلریت ± کوارتز ± سرسیت ± کلسیت. پیریت و کالکوپیریت در لایه‌های تحتانی غالب‌اند و مگنتیت، اسفالریت و گالن در لایه‌های فوقانی بخش لایه‌ای و کانی‌سازی توده‌ای مشاهده می‌شوند. کانی‌سازی استوک‌ورک نیز شامل پیریت + کالکوپیریت ± مگنتیت + کوارتز + کلریت + سرسیت ± کلسیت است.

۲- روش تحقیق

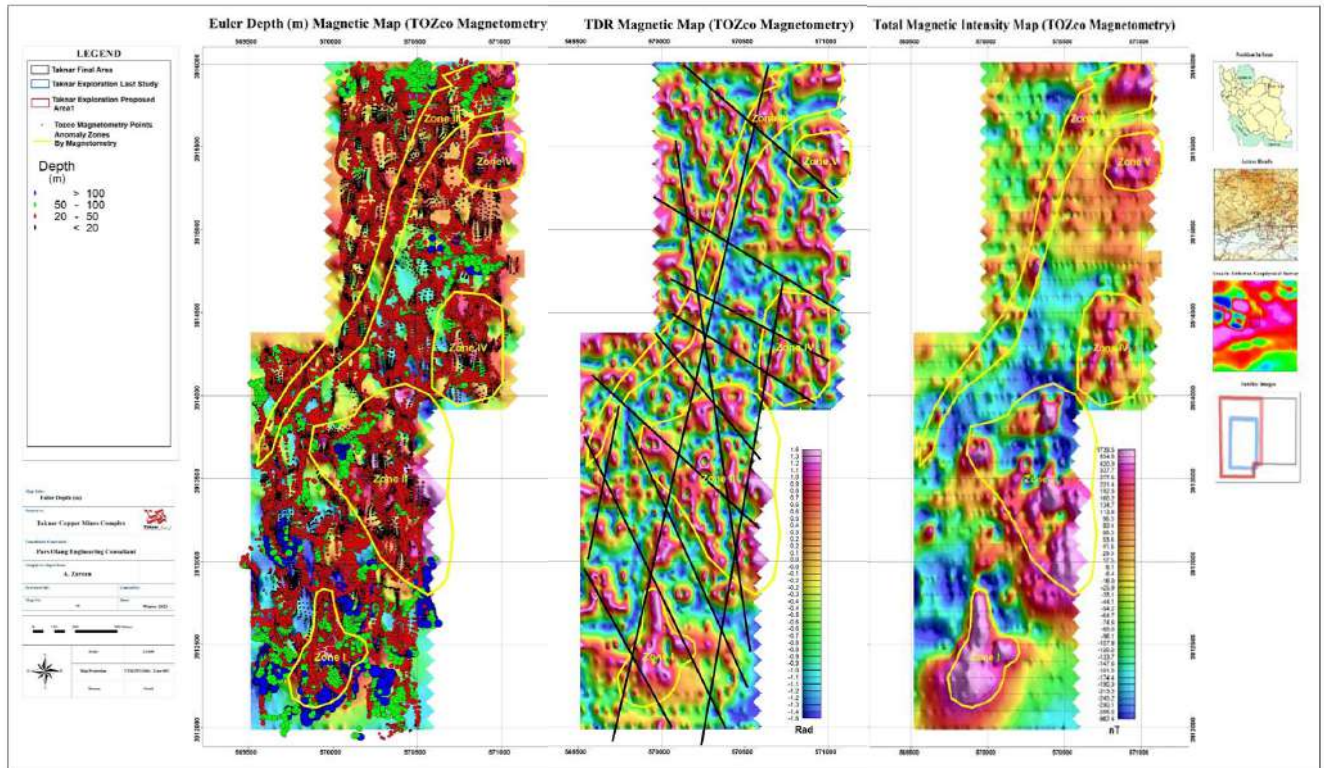
محدوده اکتشافی ژئوفیزیک تکنار با مساحت ۲۹/۹ کیلومترمربع در استان خراسان رضوی (شهرستان بردسکن) و در ۲۰ کیلومتری شمال غربی شهر بردسکن قرار دارد. در این محدوده (شکل ۱) از روش‌های مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی برای شناسایی و بررسی بی‌هنجاری‌های مرتبط با ماده معدنی استفاده شده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و نقاط برداشت مگنتومتري و IP/RS در تصوير ماهواره‌ای

۲-۱ مطالعات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس سنجی

روش‌های ژئوفیزیکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بررسی پتانسیل معدنی، نفتی، آبی و زمین‌شناختی هستند. این روش‌ها مرز تفاوت‌ها را آشکار می‌سازند، مرزها جایی هستند که یک محیط از لحاظ برخی خواص فیزیکی از محیط مجاور خود متمایز می‌شود. بر اساس تحلیل نقشه‌های مغناطیس هوابرد، بی‌هنجاری مغناطیسی با شدت نسبی زیاد در این محدوده شناسایی شده است. رخنمون‌های آهن، مس و طلا در این محدوده به‌وفور دیده می‌شود. انجام مطالعات مغناطیس‌سنجی زمینی به دلیل وضوح بالاتر نسبت به داده‌های هوابرد می‌تواند بسیاری از بی‌هنجاری‌های ناشناخته در منطقه را شناسایی و آشکار نماید. بر همین اساس، یک شبکه 100×10 متر طراحی شد و تعداد ۴۴۳۶ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شده است در این محدوده آزیموت خطوط برداشت ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. داده‌های حاصل از عملیات صحرایی ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار Geosoft مورد پردازش قرار گرفته و به‌صورت نقشه ترسیم شده است. پس از حذف IGRF (شدت میدان مغناطیسی منطقه‌ای) با توجه به هدف پژوهش، فیلترهای لازم بر روی داده‌ها اعمال شد. در نقشه برگردان به قطب پنج زون بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده می‌شود. با توجه به فیلتر ادامه فراسو بی-هنجاری‌ها در زون ۱ و ۲ و تا حدودی زون ۴ شکل خود را حفظ کرده است. بدین ترتیب می‌توان به عمیق بودن منشأ بی‌هنجاری در این سه زون پی برد. نقشه مشتق تیلت، ابزار قدرتمندی در شناسایی خطواره‌های مغناطیسی است. مقادیر صفر در نقشه مشتق زاویه تیلت تا حد زیادی منطبق بر مرز منبع آنومالی‌ها و یا موقعیت گسل‌های منطقه مورد مطالعه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، خطوط قرمز رنگ گسل‌های شناسایی شده از طریق این فیلتر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دیگر نقشه‌های مغناطیسی مانند TMI و نقشه مشتقات نیز در شناسایی این خطواره‌ها مؤثر بوده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود تعداد زیادی گسل پنهان شناسایی و به نقشه درآمده است. در این شکل سازوکار گسلی پیچیده در منطقه و ارتباط آن با آنومالی‌های معرفی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مرز زون‌های مغناطیسی ۱ و ۲ با گسل‌های تفسیر شده انطباق معناداری دارد و به نظر می‌رسد که این دو زون در اثر عملکرد گسل اصلی منطقه با روند SW-NE رخ داده است. در شکل ۲ عمق‌های به‌دست‌آمده از روش اویلر بر روی نقشه بی‌هنجاری برگردان به قطب نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، جواب‌های به‌دست‌آمده منطبق با بی‌هنجاری‌های مغناطیسی منطقه است و به‌طور غالب بیشتر عمق به‌دست‌آمده مربوط به قسمت فوقانی و یا سطوح جانبی بی‌هنجاری‌ها هست. همان‌طور که در نقشه ۲ نشان داده شده است، عمق‌های حاصل در منطقه از ۰ تا ۴۵۰ متر با میانگین کلی حدود ۷۴ متر و انحراف معیار ۲۸ متر هست که نشان‌دهنده عمق متوسط سقف منابع مغناطیسی در محدوده است. نظر به نبود رزولوشن کافی در برداشت‌های مربوط به کانی‌زایی مگنتیت تنها می‌توان تخمین اویلر را در زون شماره ۱ معتبر دانست که از عمق حدود ۵۰ متر تبعیت می‌کند.



شکل ۲: الف) نقشه برگردان به قطب ب) نقشه مغناطیسی مشتق تیلت پ) نقشه تخمین عمق اوپلر

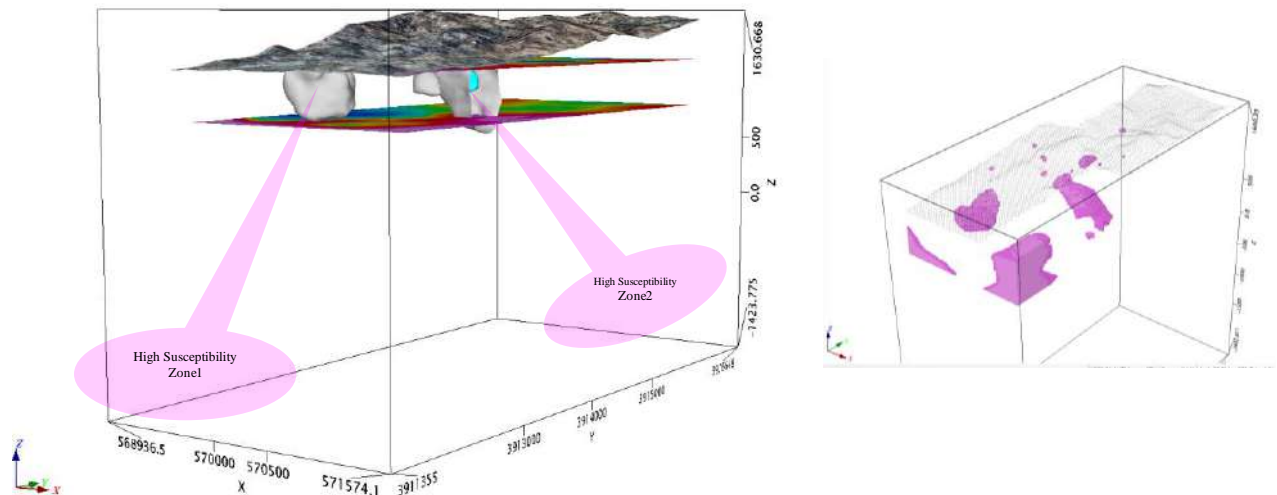
۲-۱-۲ مدل سازی سه بعدی

به منظور بررسی سه بعدی ویژگی های زمین شناختی، برگردان سه بعدی داده ها توسط الگوریتم Li and Oldenburg, (1996) نیز در قالب نرم افزار UBC Mag3D انجام شد. استفاده از این الگوریتم جهت انجام وارون سازی داده های مغناطیسی در مناطق مختلف دنیا نتایج بسیار سودمندی را ارائه داده است. با توجه به تفسیر کمی و کیفی انجام شده در قسمت های قبل مشخص شد که زون های مغناطیسی ۲ و ۳ از نقطه نظر کانه زایی آهن مورد توجه بوده و بنابراین هر کدام از این بی هنجاری ها از نظر مدل سازی سه بعدی نیز با اهمیت هستند. هدف از تفسیر منشأ های بی هنجار مغناطیسی پنهان درون زمین، به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی، شکل، هندسه و ژرفای آن ها است. به صورت کلی مدل سازی منشأ بی هنجاری های مغناطیسی را می توان یکی از مهم ترین بخش های تحلیل عددی به حساب آورد که می تواند اطلاعات ارزشمندی از بخش های پنهان توده ها در اختیار بگذارد. با توجه به ساختار کانی زایی محدوده، بی-هنجاری های مغناطیسی به دست آمده دارای دو منشأ متفاوت هستند. دسته اول بی هنجاری ها، سطحی بوده و از عمق زیادی برخوردار نیستند (زون ۳) و به دلیل وجود کانی زایی مگنتیت به وجود آمده اند. دسته دوم بی هنجاری که در زون های ۱ و ۲ دیده می شود، ضعیف تر بوده و دارای منشأ عمیق تری می باشند. احتمال ارتباط این بی هنجاری علاوه بر مگنتیت با توده ماسیوسولفاید زیاد است. بدین منظور مدل سازی در دو قسمت انجام شد. ابتدا از داده های باقیمانده برای مدل سازی سه بعدی کل محدوده استفاده شد. ابعاد سلول های انتخابی ۵۰ متر در جهت افقی و ۲۵ متر در جهت عمقی انتخاب شد. در جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی کل محدوده غربی

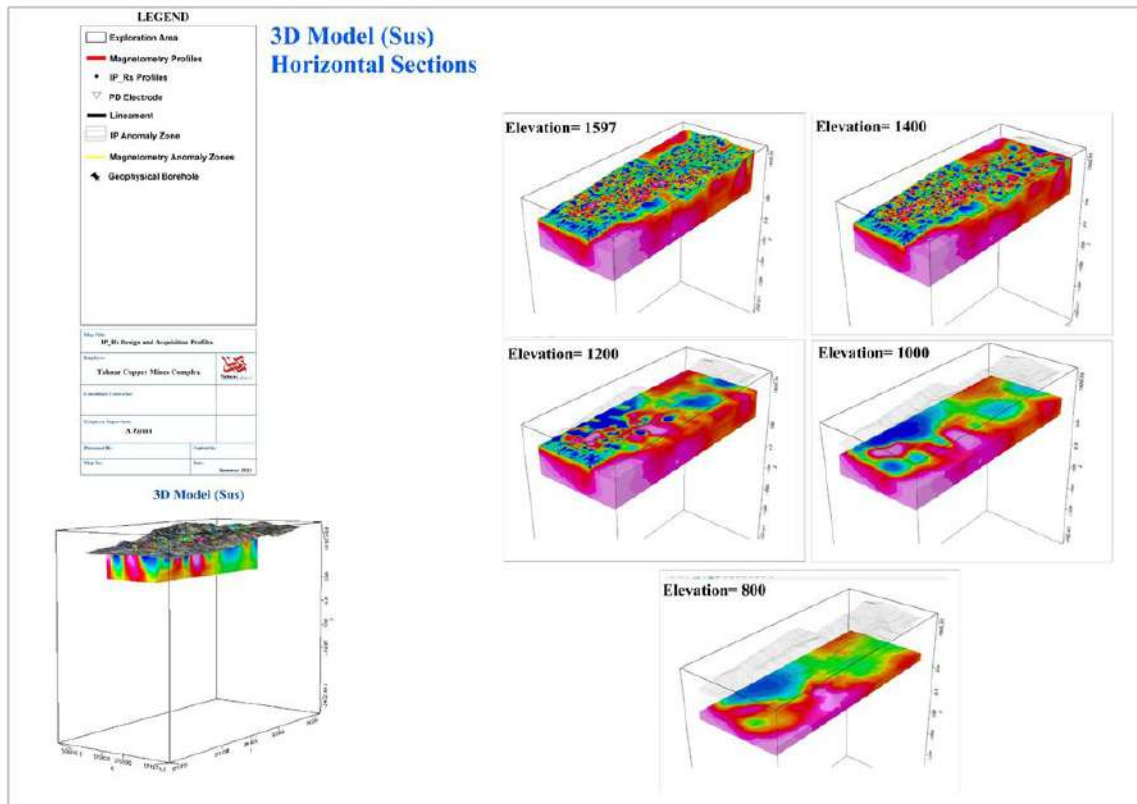
| مقادیر | پارامترها |
|--------------------------|---|
| ۵۰ متر | اندازه سلول مش |
| GCV | Mode |
| ۰-۱ | Bounds |
| ۰-۱ | Initial Model |
| ۰/۰۰۰۱، ۱/۴۴، ۱/۴۴، ۰/۶۳ | مقادیر پارامترهای طولی A_s, A_e, A_n, A_z |

با توجه به رزولوشن پایین برداشت امکان مدل سازی با رزولوشن بالا وجود نداشته و در نتیجه برای مدل سازی بی هنجاری های حاصل از کانی زایی مگنتیت از دقت کمی برخوردار هستند. در شکل ۳ تغییرات خودپذیری مغناطیسی در واحد SI به صورت سه بعدی برای دو توده حاوی مگنتیت نشان داده شده است. در این شکل مدل های خودپذیری مغناطیسی به صورت پراکنده دیده می شوند. به منظور درک و نمایش بهتر از موقعیت نواحی با مغناطیس بالاتر، موقعیت زون های مغناطیسی با مدل های سه بعدی نیز انطباق داده شده است. در شکل ۳ نتایج مدل سازی توده های با خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۱ در واحد SI نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات خودپذیری مغناطیسی در واحد SI به صورت سه بعدی (دید به سمت شمال شرق) برای محدوده غربی تکنار

در شکل ۴ نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده به همراه پنج برش افقی از بلوک مدل سازی شده نشان داده شده است. در این شکل ها نتایج مدل سازی داده ها با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبورگ را تا عمق ۸۰۰ متر از سطح زمین در کل محدوده مورد مطالعه نشان می دهد. همان طور که ذکر گردید نتایج مدل سازی به صورت بلوک هایی با ابعاد از قبل تعیین شده به عنوان نماینده خودپذیری مغناطیسی محاسبه شده، نمایش داده می شود. بدیهی است خودپذیری های بالاتر می تواند وابسته به کانی زایی های آهن و خودپذیری های متوسط مربوط به توده نفوذی های ماسیوسولفاید در منطقه باشد. با توجه به جدول خودپذیری سنگ ها و کانی ها، توده های با خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۱۴ در واحد SI به عنوان نواحی احتمالی زون ماسیوسولفاید (زون شماره ۱) در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شد؛ بنابراین همان طور که مشاهده می شود، با در نظر گرفتن این شرایط توده نسبتاً مشخصی منطبق بر زون شماره ۱ در منطقه شناسایی شده است.



شکل ۴ نتایج مدل سازی سه بعدی داده های مغناطیسی در بلوک مورد مطالعه به صورت برش های افقی

۲-۲ تلفیق داده های IP/RS و مگنتومتري

۲-۲-۱ بررسی مقاطع مدل سازی شده

با توجه به نتایج مغناطیس سنجی و زمین شناسی بی هنجاری ۱ به عنوان مستعدترین زون مس جهت اکتشافات عمیق معرفی شد. در این زون به دلیل وجود رگه های متعدد کانی زایی مس به طور اکسیدی، مطالعات سنگ شناسی و ساختاری احتمال وجود زون سولفیدی داده می شود. با توجه به محدودیت در تعداد نقاط و همزمان حصول رزولوشن و عمق بالا، ۶ پروفیل ۱۰۰۰ متری با آزیموث ۹۰ درجه برداشت شد. از آنجایی که زمین شناسی محدوده با چند گسل قطع شده، آرایش دایپل-دایپل جریان مناسبی را جهت حصول به عمق زیاد به دست نداد و بدین ترتیب از آرایش پل-دایپل با فواصل الکترودی پتانسیل ۲۰ متر به صورت رفت استفاده شد. آرایش برگشت جهت رزولوشن بالا و جانمایی دقیق بی هنجاری استفاده می شود که به دلیل نیاز به دقت بالا انجام شد. قبل از مدل سازی، تحلیل آماری روی داده های پردازش شده انجام شد. در سرتاسر این مقاطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا متوسط دیده می شود. حد زمینه در حدود 1 mV/V بوده و مقدار بیشینه بی هنجاری به 23.6 mV/V دیده می شود. پس از تحلیل آماری داده های پروفیل ها مقادیر بی هنجاری از میانگین حدود 8.2 mV/V تا 9.3 mV/V برخوردار است و انحراف معیار 2.4 mV/V تا 3.2 mV/V ، می تواند معیار مناسبی برای کانی زایی سولفور متوسط باشد. مقادیر میانه نیز تقریباً با مقادیر میانگین برابر هستند که نشان از تقارن پراکندگی داده های شارژپذیری دارد (جدول ۲). بازه مقادیر مقاومت ویژه از مقادیر بسیار پایین در حد 50 اهم-متر تا مقادیر بالای چند هزار متغیر است. با این حال مقادیر میانگین اندازه گیری شده مقاومت ویژه عموماً در حد 400 اهم-متر است.

جدول ۲ شرح و تحلیل آماری نقاط برداشت ژئوفیزیک به روش IP/RS

| Pr | IP | | | | | Rs | | | | |
|-----|-----|------|---------|-----|--------|-----|------|---------|-----|--------|
| | Min | Max | Average | STD | Median | Min | Max | Average | STD | Median |
| P01 | 1.7 | 17 | 8.2 | 2.5 | 7.6 | 8 | 2581 | 335 | 216 | 275 |
| P02 | 1.3 | 23.6 | 8.8 | 3.2 | 8.3 | 28 | 4337 | 381 | 286 | 303 |
| P03 | 2.2 | 22.1 | 9.1 | 2.4 | 9.2 | 56 | 6132 | 390 | 303 | 322 |
| P04 | 0.1 | 16.8 | 9.3 | 2.6 | 9.5 | 73 | 1604 | 436 | 224 | 385 |
| P05 | 0 | 21.1 | 9.0 | 2.7 | 8.6 | 0 | 6677 | 566 | 426 | 503 |
| P06 | 0.9 | 31.7 | 8.8 | 2.5 | 8.5 | 59 | 2155 | 444 | 263 | 408 |

۲-۲-۲ مقطع قطبی-دوقطبی PD1

این پروفیل با روند غربی-شرقی و عمود بر روند کانی زایی احتمالی توده‌ای و ساختاری محدوده برداشت شد. در شکل ۵-الف بعد از اعمال اثر توپوگرافی، وارون سازی برای تعیین مدل واقعی بی‌هنجاری انجام شده است. در این شکل هر سه مقطع مدل‌سازی شده برای خودپذیری مغناطیسی، شارژپذیری و مقاومت ویژه نشان داده شده است.

یکی از ملاک‌های انتخاب این زون برای مطالعات ژئوفیزیک به روش IP/RS، نفوذ یک زون خودپذیری مغناطیسی بالا در یک زون با خودپذیری مغناطیسی پایین هست. مقطع مدل‌سازی شده خودپذیری دوبعدی منطبق بر پروفیل‌های IP/RS در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. طیف رنگی مورد استفاده برای نمایش این مقطع از ۰ تا ۰/۰۵ است به طوری که مقادیر بی‌هنجاری (مقادیر خودپذیری پایین) با رنگ‌های گرم نمایش داده می‌شوند. نفوذ یک توده با خودپذیری مغناطیسی بالا داخل زون با مقادیر بالای خودپذیری در مرکز پروفیل کاملاً مشهود است.

در شکل ۵-ب مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. طیف رنگی برای مقادیر ۰ تا ۲۰ mv/v تنظیم شده است و همانند مقطع خودپذیری مغناطیسی، برای نمایش مقادیر بالا از رنگ‌های گرم استفاده شده است. حد زمینه در حدود ۲ mv/v بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری تا ۱۷ mv/v در پروفیل PD1 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد، توده به صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. در این میان تطابق زون بی‌هنجاری شرقی و زون خودپذیری مغناطیسی بالا قابل توجه است.

در شکل ۵-پ مقادیر مقاومت ویژه مدل‌سازی شده با طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. به منظور مقایسه این مقطع با مقطع شارژپذیری، مقادیر بالای مقاومت ویژه با رنگ‌های گرم نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۸ تا ۲۵۸۱ اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود.

در این مقطع، ۲ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود. طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری‌ها، شواهد سطحی از برونزد کانه زایی با شیب عمومی بسمت شرق مشاهده گردید.

۲-۲-۳ مقطع قطبی-دوقطبی PD2

این پروفیل با روند غربی-شرقی و عمود بر روند کانی‌زایی احتمالی توده‌ای و ساختاری محدوده برداشت شد. در شکل ۵ بعد از اعمال اثر توپوگرافی، وارون سازی برای تعیین مدل واقعی بی‌هنجاری انجام شده است. مقطع مدل‌سازی شده خودپذیری دوبعدی منطبق بر پروفیل‌های IP/RS در شکل ۵-ت نمایش داده شده است. نفوذ یک توده با خودپذیری مغناطیسی بالا داخل زون با مقادیر بالای

خودپذیری در مرکز پروفیل کاملاً مشهود است. در شکل ۵-ث مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. طیف رنگی برای مقادیر ۰ تا ۲۰ mv/v تنظیم شده است حد زمینه در حدود ۱.۳ mv/v بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به ۲۳.۶ mv/v در پروفیل PD2 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد، توده به صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. در این میان تطابق زون بی‌هنجاری شرقی و زون خودپذیری مغناطیسی بالا که شدت آن نسبت به پروفیل قبل افزایش یافته است، قابل توجه است.

در شکل ۵-ج مقادیر مقاومت ویژه مدل‌سازی شده با طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. به منظور مقایسه این مقطع با مقطع شارژپذیری، مقادیر بالای مقاومت ویژه بارنگ‌های گرم نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۲۸ تا ۴۳۳۷ اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود.

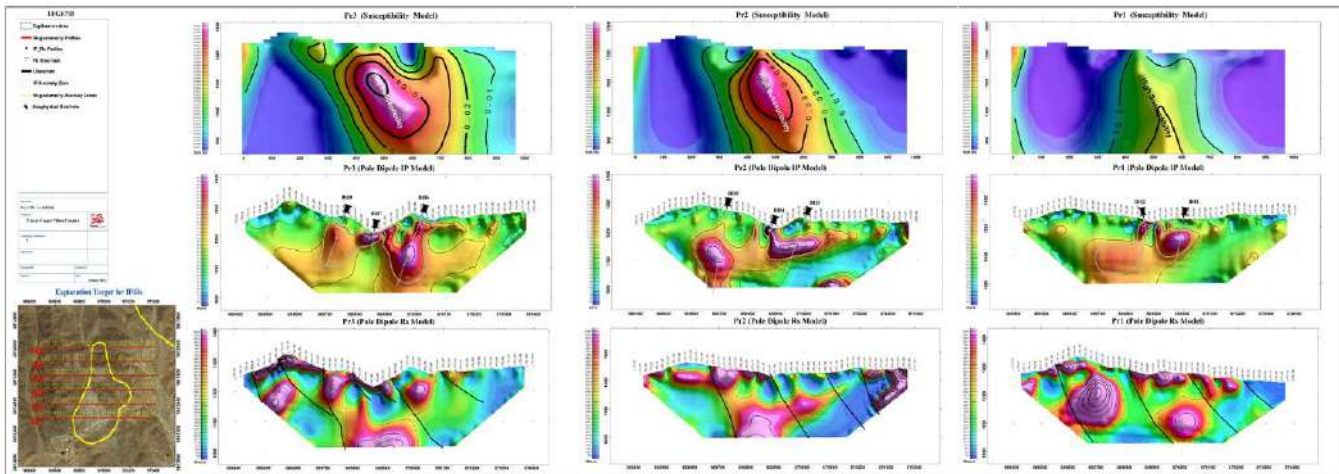
در این مقطع ۳ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود. طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری‌ها، شواهد سطحی از برونزد کانه زایی در غرب گمانه شماره ۴ مشاهده گردید. با توجه به پیوستگی ناهنجاری، تعداد دو گمانه به شماره‌های ۳ و ۴ با شیب بسمت غرب طراحی گردید. این دو گمانه در اولویت اول بایستی حفر شوند. گمانه شماره ۵ جهت کنترل ناهنجاری دوم طراحی شده و با توجه به عدم برونزد کانه زایی بهتر است در اولویت دوم حفر شود.

۴-۲-۲-۴ مقطع قطبی-دوقطبی PD3

این پروفیل با روند غربی-شرقی و عمود بر روند کانی زایی احتمالی توده‌ای و ساختاری محدوده برداشت شد. در شکل ۵ بعد از اعمال اثر توپوگرافی، وارون سازی برای تعیین مدل واقعی بی‌هنجاری انجام شده است. در این شکل هر سه مقطع مدل‌سازی شده برای خودپذیری مغناطیسی، شارژپذیری و مقاومت ویژه نشان داده شده است. مقطع مدل‌سازی شده خودپذیری دوقطبی منطبق بر پروفیل‌های IP/Rs در شکل ۵-ج نمایش داده شده است. نفوذ یک توده با خودپذیری مغناطیسی بالا داخل زون با مقادیر بالای خودپذیری کاملاً مشهود است.

در شکل ۵-ح مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود حد زمینه در حدود ۲.۲ mv/v بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به ۲۲.۱ mv/v در پروفیل PD3 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد، توده به صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. با این حال از شدت توده غربی کاسته شده است.

در شکل ۵-خ مقادیر مقاومت ویژه مدل‌سازی شده با طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۵۶ تا ۶۱۳۲ اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود. در این مقطع ۳ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود. طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری‌ها، شواهد سطحی از برونزد کانه زایی در محل گمانه شماره ۷ مشاهده گردید. با توجه به پیوستگی ناهنجاری، تعداد دو گمانه به شماره‌های ۶ و ۷ با شیب بسمت غرب طراحی گردید. این دو گمانه در اولویت اول باید حفر شوند. گمانه شماره ۸ جهت کنترل ناهنجاری دوم طراحی شده و با توجه به عدم برونزد کانه زایی بهتر است در اولویت دوم حفر شود.



شکل ۵- پروفیل مگنتومتري (شکل بالا)، مقطع مدل سازی شده برای مقادير شارژپذیری (شکل وسط)، مقطع مدل سازی شده برای مقادير مقاومت ویژه (شکل پایین) در پروفیل های PD3, PD2, PD1

۲-۵ مقطع قطبی-دوقطبی PD4

این پروفیل با روند غربی-شرقی و عمود بر روند کانی زایی احتمالی توده ای و ساختاری محدوده برداشت شد. در شکل ۶ بعد از اعمال اثر توپوگرافی، وارون سازی برای تعیین مدل واقعی بی‌هنجاری انجام شده است. نفوذ یک توده با خودپذیری مغناطیسی بالا داخل زون با مقادیر بالای خودپذیری کاملاً مشهود است. در شکل ۶-الف مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. حد زمینه در حدود 0.1 mV/V بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به 16.8 mV/V در پروفیل PD4 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد توده به صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. در شکل ۶-پ مقادیر مقاومت ویژه مدل سازی شده با طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۷۳ تا 1604 اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود. در این مقطع ۳ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود. طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری‌ها، شواهد سطحی از بروز کانه زایی در حوالی گمانه های شماره های ۹ و ۱۰ مشاهده گردید. با توجه به پیوستگی ناهنجاری، تعداد دو گمانه به شماره های ۹ و ۱۰ با شیب بسمت غرب و شرق طراحی گردید. این دو گمانه در اولویت اول باید حفر شوند. گمانه شماره ۱۱ جهت کنترل ناهنجاری دوم با شیب بسمت غرب طراحی شده و با توجه به عدم بروز کانه زایی بهتر است در اولویت دوم حفر شود.

۲-۶ مقطع قطبی-دوقطبی PD5

این پروفیل با روند غربی-شرقی و عمود بر روند کانی زایی احتمالی توده ای و ساختاری محدوده برداشت شد. در شکل ۶-ث مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. حد زمینه در حدود 1 mV/V بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به 21.1 mV/V در پروفیل PD5 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد، توده به صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. در شکل ۶-ج مقادیر مقاومت ویژه مدل سازی شده با

طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۱ تا ۶۶۷۷ اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود. در این مقطع ۲ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود.

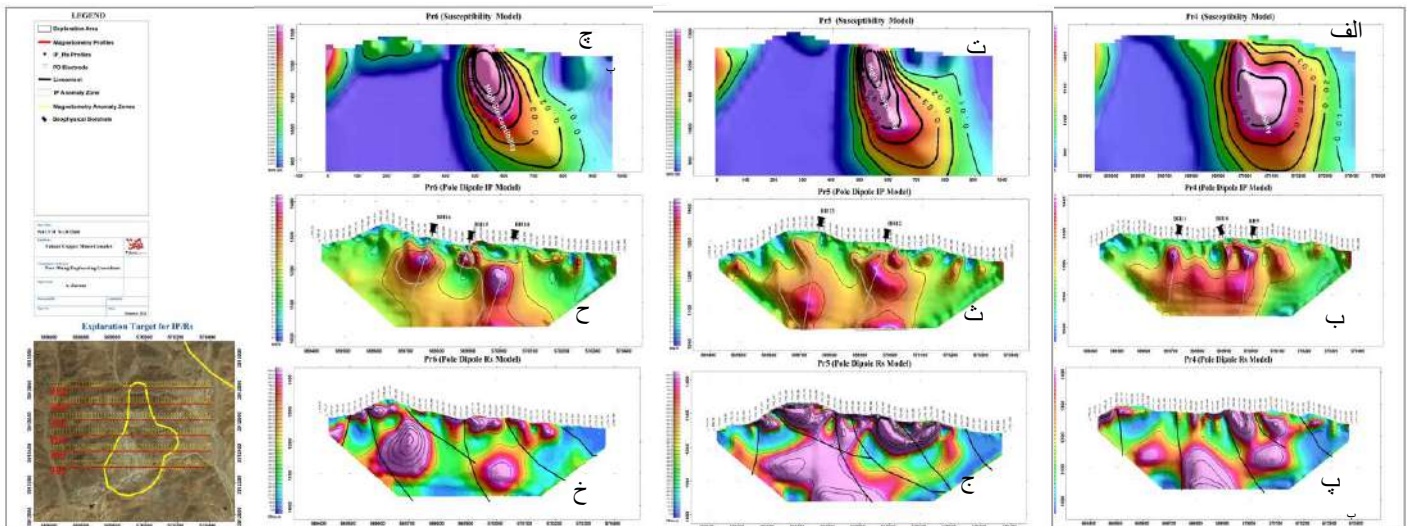
طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری ها، شواهد سطحی از بروز کانه زایی بیشتر بصورت زون اکسید مس (مالاکیت، کالکوسیت) در شکستگی ها و نیز رگچه های حاوی پیریت، کالکوپیریت، بورنیت در حوالی گمانه شماره ۱۲ مشاهده گردید.

با توجه به ادامه روند کانه زایی بسمت شمال و حضور رگه-رگچه ها، گمانه شماره ۱۲ در اولویت اول با شیب بسمت غرب طراحی گردید. گمانه شماره ۱۳ جهت کنترل ناهنجاری دوم با شیب بسمت غرب طراحی شده و با توجه به عدم بروز کانه زایی بهتر است در اولویت دوم حفر شود.

۲-۲-۷ مقطع قطبی-دوقطبی PD6

مقطع مدل‌سازی شده خودپذیری دوبعدی منطبق بر پروفیل‌های IP/RS در شکل ۶-ج نمایش داده شده است در شکل ۶-ح مقطع تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. حد زمینه در حدود ۰.۹ mv/v بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به ۳۱.۷ mv/v در پروفیل PD6 دیده می‌شود. با توجه به ساختار لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری پایین تا متوسط را می‌توان بیشتر به سنگ میزبان و بی‌هنجاری بالا را به کانی‌زایی سولفور نسبت داد. بی‌هنجاری به‌صورت توده نیمه عمیق در شرق و غرب رگه مرکزی قابل تفکیک است. در بی‌هنجاری شرقی به نظر می‌رسد، توده به‌صورت رگه در شکستگی‌ها به سطح نفوذ کرده و آثار آن نیز در زمین قابل رؤیت است. در بین دو توده بی‌هنجاری یک ساختار رگه‌ای در محل پیت برداشت مشخص شده است. در شکل ۶-خ مقادیر مقاومت ویژه مدل‌سازی شده با طیف رنگی از مقادیر ۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر نشان داده شده است. کل مقطع از مقادیر مقاومت ویژه پایین تا بالا تبعیت دارد (۵۹ تا ۲۱۵۵ اهم-متر). همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود ناهمگنی بسیار شدیدی از غرب تا شرق دیده می‌شود. در این مقطع ۳ نقطه حفاری جهت شناسایی منشأ بی‌هنجاری سطحی و عمیق پیشنهاد می‌شود. طی بازدید صحرایی بعمل آمده در محل بی‌هنجاری ها، شواهد سطحی از بروز کانه زایی بیشتر بصورت زون اکسید مس (مالاکیت، کالکوسیت) در شکستگی ها و نیز رگچه های حاوی پیریت، کالکوپیریت، بورنیت در حوالی گمانه های ۱۴ و ۱۵ مشاهده گردید.

با توجه به پیوستگی ناهنجاری، ادامه روند کانه زایی بسمت شمال و حضور رگه-رگچه ها، گمانه های شماره ۱۴ و ۱۵ در اولویت اول با شیب بسمت غرب طراحی گردید. گمانه شماره ۱۶ جهت کنترل ناهنجاری دوم با شیب بسمت غرب طراحی شده و با توجه به عدم بروز کانه زایی



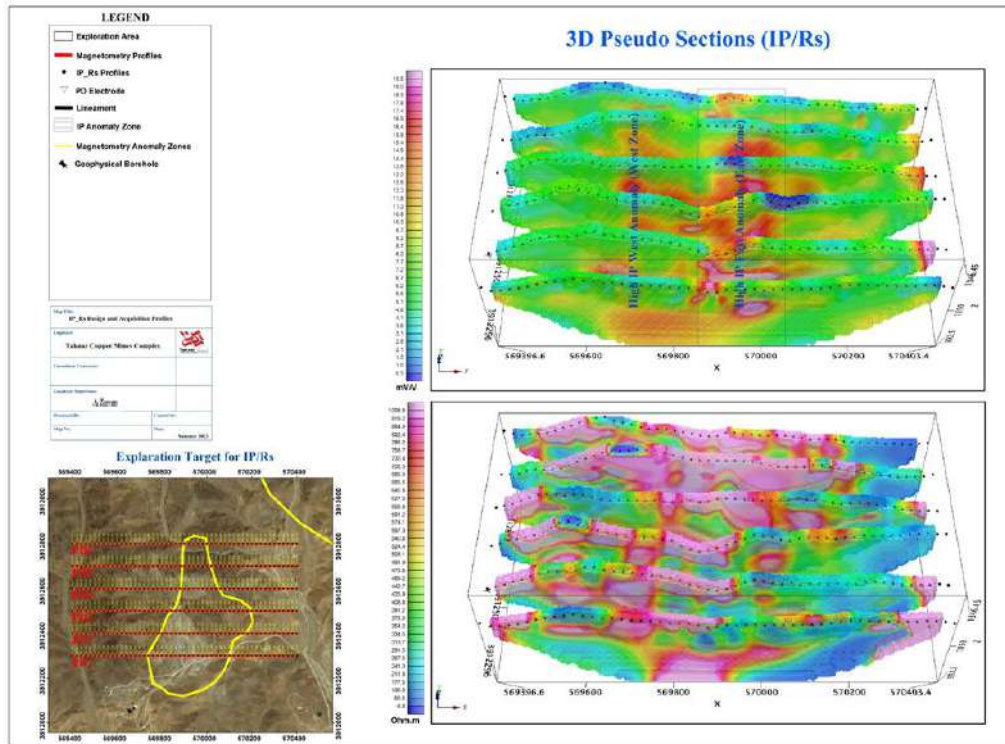
کانه زایی بهتر است در اولویت دوم حفر شود.

شکل ۶- پروفیل مگنتومتري (شکل بالا)، مقطع مدل سازی شده برای مقادير شارژ پذیری (شکل وسط)، مقطع مدل سازی شده برای مقادير مقاومت ویژه (شکل پایین) در پروفیل های الف-PD4، ب-PD5، پ-PD6

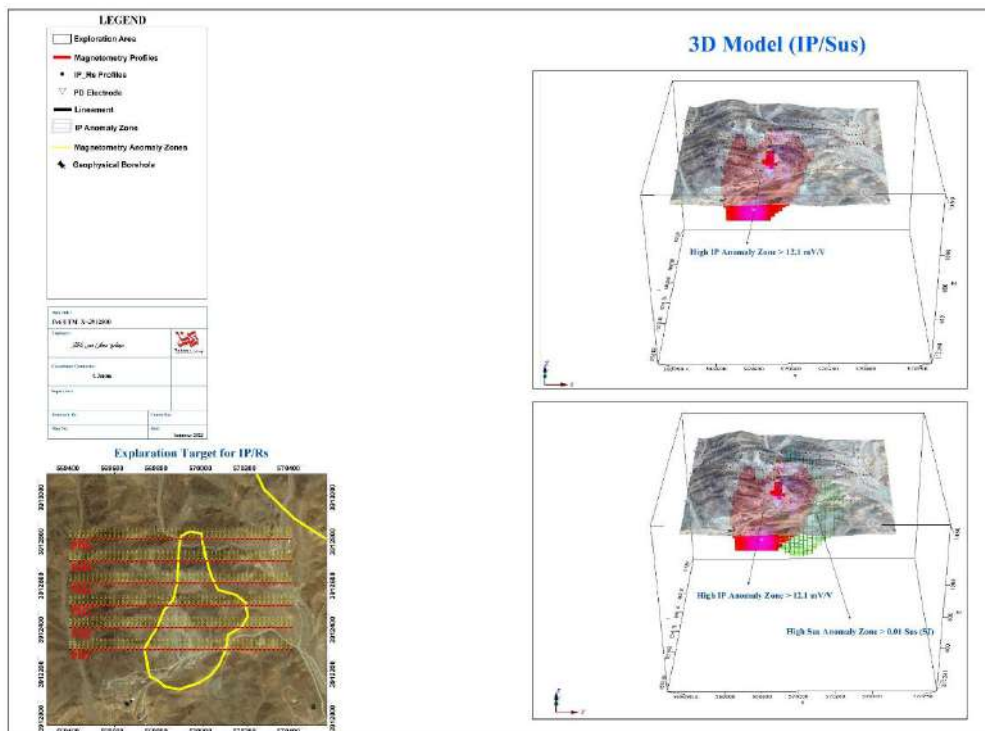
۳-۲ تلفیق مدل سه بعدی مگنتومتري و IP/RS

ابتدا مدل شبه سه بعدی با استفاده از تلفیق داده ها IP/RS توسط نرم افزار Voxel انجام شد. در شکل ۷ مدل شبه سه بعدی برای مقادير شارژ پذیری (شکل بالا) و مقادير مقاومت ویژه (شکل پایین) نمایش داده شده است. در این مدل مقادير بیشینه شارژ پذیری به 55 mv/v رسیده است. با توجه به مقادير میانگین 9.4 mv/v و انحراف معیار 4.6 mv/v برای مقادير شارژ پذیری دو زون بی هنجاری شرقی با شدت بالا و غربی با شدت متوسط به مرکزیت محل رگه در حال برداشت تفکیک گردید. در شکل ۸ مدل سازی سه بعدی مقادير خود پذیری و IP/RS نمایش داده شده است. تغییرات مقادير خود پذیری بالای 0.1 SI نمایش داده شده است. مدل سازی سه بعدی استفاده از نرم افزار Res3Dinv استفاده شد. ابتدا پروفیل های دوبعدی با هم در یک فایل تلفیق شده و در قدم بعدی مدل سازی سه بعدی انجام شد. مدل سازی سه بعدی واقعی در محدوده تکنار ۳ جمعاً با استفاده از 7000 نقطه برای دو پارامتر شارژ پذیری ظاهری برحسب میلی ولت به ولت (mv/v) و مقاومت ویژه ظاهری برحسب اهم متر ($\Omega.m$) انجام شد.

از آنجائی که مقدار میانگین بی هنجاری شارژ پذیری پس از مدل سازی، 8.9 mv/v و انحراف معیار نیز 3.3 mv/v است، در شکل ۸-الف مقادير شارژ پذیری بالای 12.2 mv/v به عنوان زون بی هنجاری نمایش داده شده است. مقدار بیشینه بی هنجاری شارژ پذیری در این زون به 27.6 mv/v رسیده است. روند بی هنجاری تقریباً جنوبی-شمالی است. طول بی هنجاری 500 متر و عرض آن به 300 متر در عمق می-رسد. در شکل ۸-ب مقادير خود پذیری مغناطیسی بالای 0.1 SI و به همراه مقادير بالای شارژ پذیری بالای 12 mv/v . نمایش داده شده است. با تلفیق دو نقشه سه بعدی خود پذیری مغناطیسی و شارژ پذیری تطابق نسبتاً خوبی بین مقادير خود پذیری مغناطیسی بالا و بی-هنجاری شارژ پذیری بالا در زون شرقی دیده می شود. به نظر می رسد در فصل مشترک این دو بی هنجاری به دلیل کانی زایی فلزی سولفور مقادير شارژ پذیری افزایش نسبی پیدا کرده ولی به دلیل عمیق بودن کانی زایی تنها سقف آن مورد شناسایی قرار گرفته است. این تطابق در زون غربی وجود ندارد. هم زمان وجود زون گسلی و رسی شدن و نفوذ سیالات گرمایی، مقاومت ویژه را در مرکز مقاطع به شدت کاهش داده است.



شکل ۷- مقطع مدل‌سازی شده شبه سه‌بعدی برای مقادیر مقاومت ویژه (شکل پایین)، مقطع مدل‌سازی شده برای مقادیر شارژپذیری (شکل بالا)



شکل ۸- الف مقطع مدل‌سازی شده سه‌بعدی برای مقادیر شارژپذیری بالا ب- مقطع مدل‌سازی شده برای مقادیر شارژپذیری و خودپذیری بالا

۳ نتیجه گیری

در مطالعه مغناطیس‌سنجی استفاده‌شده در این گزارش، مربوط به برداشت‌های محدوده غربی تکنار با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی زمینی با شبکه داده‌برداری 10×10 در محدوده‌ای به وسعت حدود ۴۳۰۰۰ هکتار است. در پروژه مذکور تعداد کل ۴۴۳۶ ایستگاه مغناطیسی برداشت شده بود. پس از انجام پردازش‌ها و تصحیحات لازم بر روی داده‌ها، نقشه‌های میدان مغناطیسی تهیه شد. پس از انجام پردازش‌ها و تصحیحات لازم بر روی داده‌ها، نقشه‌های میدان مغناطیسی تهیه شد. سپس بر اساس تفسیرهای کیفی و همچنین مدل‌سازی‌های سه‌بعدی، نتایج بسیار مهمی در منطقه آشکار شد. با توجه به زمین‌شناسی منطقه علاوه بر کانی‌زایی مگنتیت احتمال کانی‌زایی مس به صورت ماسیوسولفاید در این محدوده وجود دارد. در ادامه به مهم‌ترین این نتایج اشاره می‌شود:

بر اساس نقشه‌های میدان مغناطیسی تعداد حداقل ۵ زون بی‌هنجاری مغناطیسی (۱ تا ۵ شناسایی گردید که زون‌های بی‌هنجاری ۱ تا ۲ از نقطه نظر کانی‌سازی توده‌ای، در اولویت اول انجام ادامه اکتشافات است.

زون ۱ در جنوب واقع‌شده و منطبق بر معدن اصلی تکنار (TAK III) به دلیل وسعت و عمق زیاد مستعد کانی‌زایی مس و طلا است که نیاز به مطالعات اکتشافی بیشتر دارد.

بر اساس نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌ها و همچنین نتایج اعمال روش اویلر بر روی داده‌ها، به نظر می‌رسد عمق منشأ آنومالی‌ها در زون‌های بی‌هنجاری سطحی بوده و نهایتاً عمق ۵۰ متر دارند. مدل‌سازی سه‌بعدی نشان از مقادیر خودپذیری مغناطیسی بالا دارد که تنها به دلیل حضور کانی‌زایی مگنتیت امکان‌پذیر است.

با این حال زون بی‌هنجاری شماره ۱ پس مدل‌سازی سه‌بعدی گسترش سطحی و عمق حدود ۵۰۰ متر با مقادیر خودپذیری مغناطیسی متوسط دارد.

بر اساس تفسیر ساختاری داده‌های مغناطیسی، تعداد زیادی گسل مهم در منطقه آشکار شد. گسل‌های مغناطیسی شناسایی شده حاکی از سازوکار تکتونیکی پیچیده در منطقه است.

سپس بر اساس تفسیرهای کیفی و همچنین مدل‌سازی‌های سه‌بعدی، برداشت‌های ژئوفیزیک به روش IP/RS با تعداد ۷۰۰۰ نقطه در زون بی‌هنجاری شماره ۱ (بخش تکنار ۳) با ۶ پروفیل قطبی-دوقطبی به مساحت ۵۰۰۰ هکتار انجام شد. با توجه به زمین‌شناسی منطقه علاوه بر کانی‌زایی مگنتیت احتمال کانی‌زایی سولفیدی در این محدوده وجود دارد. در سرتاسر مقاطع این زون تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین تا بالا دیده می‌شود. حد زمینه در حدود ۱ میلی ولت بوده و مقدار بیشینه بی‌هنجاری به 55 mV/V بعد از مدل‌سازی دوبعدی دیده می‌شود. پس از تحلیل آماری داده‌های پروفیل‌ها مقادیر بی‌هنجاری از میانگین حدود 9.4 mV/V برخوردار است و انحراف معیار 4.6 mV/V ، می‌تواند معیار مناسبی برای کانی‌زایی سولفور متوسط تا قوی (کالکوپیریت و پیریت) باشد. بی‌هنجاری‌ها در مقاطع دوبعدی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول زون‌های بی‌هنجاری نیمه عمیق در شرق پروفیل‌ها است که به صورت رگه در سطح نمود دارد. این زون در تمام پروفیل‌ها و در یک طول و عمق نسبتاً مشخصی تکرار شده است. دسته دوم که به عنوان زون غربی نام‌گذاری شده است از شدت پایین‌تری برخوردار است. در زون شرقی تطابق خوبی بین زمین‌شناسی سطحی، مقادیر شارژپذیری بالا و خودپذیری مغناطیسی بالا دیده می‌شود. در حالیکه در زون غربی چنین تطابق مشخصی وجود ندارد. بعد از مدل‌سازی سه‌بعدی نیز کماکان همان نتایج قبل به دست آمد.

منابع

[1] Oldenburg, D.W., Li, Y., and Ellis, R.G., "Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case

history for Mt. Milligan”, *Geophysics*, 62, 1419-1431, 1997.

[۲]Moshtaghian, Keytash, et al. "Geophysical Data Inversion in a Gold-Rich Porphyry System: A Case Study of the Dalli Deposit, Iran." *Natural Resources Research* 32.2 (2023): 501-522.

[۳]Janghorban, G., et al. "Magnetic and IP/RS Data Inversion for Gold Prospecting at Koh-e Lakht Epithermal Deposit, Central Iran." *NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*. Vol. 2020. No. 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 2020.

[۴]Malekzadeh, A., M. H. Karimpour, and S. A. Mazaheri. "Geology, mineralization and geochemistry of Tak I, Taknar polymetal massive sulfide (Cu-Zn-Au-Ag-Pb) deposit, Khorasan-Bardaskan." *Iran J Crystallogr Mineral* 12.2 (2004): 253-272.

تلفیق داده های زمین شناسی، سنجش از دور و مغناطیس سنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن دوزخ دره و تعیین نقاط حفاری در جنوب کرمان، ایران

داود رضایی^۱، علی میثاقی^۲، مصطفی رئیسی^۳، سجاد فرهادی شاهقریه

^۱ کارشناس ارشد اکتشاف، شرکت دانش بنیان انرژی توانای کیش ، davoodrezai72@gmail.com

^۲ استاد یار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ali.misaghi@khu.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی، raissi.geo@gmail.com

^۴ کارشناس ارشد اکتشاف، شرکت دانش بنیان انرژی توانای کیش ، sajad@gmail.com@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER (Spectral Angel Mapper) و به کمک نرم افزار ENVI، مطالعات سنجش از دور به منظور شناسایی پتانسیل و حضور کانه‌سازی احتمالی آهن در گستره معدن دوزخ دره واقع در استان کرمان، انجام شد. سپس اکتشاف مقدماتی گستره‌های امیدبخش، با استفاده از روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی صورت گرفت. عملیات دورسنجی داده‌های گستره شامل مراحل پیش پردازش همانند تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر و تصحیح اتمسفری و تکنیک‌های پردازش ترکیب رنگی کاذب و در نهایت طبقه بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه برداری زاویه طیفی است. در نتیجه این فرآیند، نقشه پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی زایی آهن منطقه مورد مطالعه مشخص شد. عملیات برداشت مغناطیسی در گستره‌ای به وسعت تقریبی ۱۱/۲ کیلومتر مربع و در ۶۵۷۵ ایستگاه اندازه گیری با استفاده از دستگاه مگنتومتر پروتون انجام شده است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی نظیر اعمال تصحیحات و فیلترهای مختلف همانند برگردان به قطب، گسترش به سمت بالا تا ارتفاع‌های مختلف، فیلتر پایین گذر، فیلترهای مشتق شامل گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی، از نرم افزار Geosoft Oasis montaj استفاده شد. در نهایت به منظور بررسی روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده شده بر روی سطح، تعیین شکل تقریبی توده کانسار و تخمین عمق آن، مدل سازی وارون دو بعدی داده‌ها انجام گرفت. نتایج پژوهش حاضر از طریق تلفیق داده‌های سنجش از دور، زمین‌شناسی و مغناطیس سنجی همراه با مدل سازی وارون دو بعدی داده‌های مغناطیسی نشان می‌دهند که منطقه دوزخ دره فاریاب از نظر کانه سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است. بر اساس نقشه‌های میدان مغناطیسی تعداد حداقل ۴ زون بی‌هنجاری مغناطیسی شناسایی گردید که زون بی‌هنجاری ۱ و ۲ از نقطه نظر کانی سازی آهن، در اولویت اول انجام ادامه اکتشافات است. طول این زون با روند شمال شرقی- جنوب غربی حدود ۵۰۰ متر و ۳۵۰ بوده که نوید یک زون اقتصادی را در این بی‌هنجاری می‌دهد. دو زون بی‌هنجاری ۳ و ۴ از گسترش و عمق به مراتب کمتری نسبت به دو زون اول برخوردار هستند. بر اساس نتایج روش اوپلر بر رویداده‌ها، به نظر می‌رسد عمق سقف منشأ آنومالی‌ها در زون‌های بی‌هنجاری سطحی بوده و نهایتاً عمق ۱۰ متر دارند. منشأ بی‌هنجاری‌ها به دلیل شکل بی‌هنجاری و کمبود رخنمون سطحی مشخص نبوده ولی احتمال آهن اسکارنی با ابعاد و عمق کم در گستره بی‌هنجاری‌های مذکور وجود دارد.

کلمات کلیدی: کانی اکسیدی، ژئوفیزیک، مغناطیس سنجی، حفاری، دوزخ دره

Integration of Geological, Remote Sensing, and Magnetometry Data for Iron Ore Exploration in the Dozakh Darreh Deposit and Drillhole Targeting in South Kerman, Iran

Davood Rezaei¹, Ali Misaghi², Mostafa Raissi³, Sajad Farhadi⁴

¹ MSc of exploration, Danesh Banyan Company, Tavana Energy

² Assistant of professor, Kharazmi University of Tehran

³ MSc of Economic Geology, Shahid Beheshti University of Tehran

⁴ MSc of exploration, Danesh Banyan Company, Tavana Energy

Abstract

In this research, remote sensing studies were conducted using ASTER (Spectral Angel Mapper) sensor data and ENVI software to identify the potential and probable presence of iron mineralization in the Dozakh Darreh mine area located in Kerman province. Then, preliminary exploration of promising areas was carried out using the geophysical method of magnetometry. The remote sensing process of the area data included preprocessing steps such as geometric correction using the image-to-image method and atmospheric correction, as well as processing techniques such as false color composite and finally supervised classification using the spectral angle mapping method. As a result of this process, the map of alteration zones related to iron mineralization of the study area was determined. Magnetic surveying was carried out over an area of approximately 2.11 square kilometers and at 6575 measuring stations using a proton magnetometer. Geosoft Oasis montaj software was used to perform processing and qualitative interpretation of magnetic data such as applying various corrections and filters such as reduction to the pole, upward continuation to different heights, low-pass filter, and derivative filters including total horizontal gradient and analytic signal. Finally, in order to investigate the trend of the observed magnetic anomalies on the surface, to determine the approximate shape of the ore body and to estimate its depth, 2D inverse modeling of the data was performed. The results of this research, through the integration of remote sensing, geology and magnetometry data along with 2D inverse modeling of magnetic data, show that the Dozakh Darreh Fariyab area has high potential for iron mineralization. Based on the magnetic field maps, at least 4 magnetic anomaly zones were identified, of which anomaly zones 1 and 2 are the priority for further exploration in terms of iron mineralization. The length of this zone with a northeast-southwest trend is about 500 meters and 350 meters, which indicates an economic zone in this anomaly. Anomaly zones 3 and 4 have a much smaller extent and depth than the first two zones. Based on the results of the Euler method on the data, it seems that the depth of the roof of the anomaly source in the anomaly zones is shallow and ultimately has a depth of 10 meters. The source of the anomalies is not clear due to the shape of the anomaly and the lack of surface outcrops, but there is a possibility of iron skarn with small dimensions and depth in the extent of the mentioned anomalies.

Keywords: Oxide mineral, Geophysics, Magnetometry, Drilling, Dozakh Darreh.

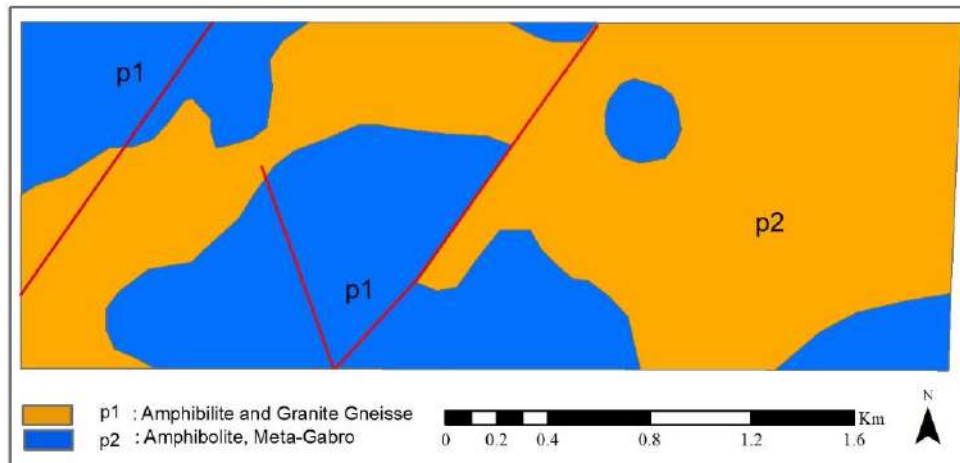
۱- مقدمه

کانسارهای آهن که ضمن هوازدگی در محیط‌های غنی از اکسیژن نزدیک سطح زمین دچار انحلال می‌شوند، تشکیل یک بیرون زدگی غنی از اکسیدها را در سطح می‌دهند که در گستره‌های بزرگ با استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌توان مرزهای مناطق دارای اکسیدهای آهن را با دقت قابل قبولی مشخص کرد. امروزه بررسی‌های دورسنجی به دلیل داشتن داده‌هایی با دید وسیع، یکپارچه و محدوده طول موجی مختلف، از بهترین روش‌ها در پی‌جویی در کانسارهای مغناطیسی شناخته می‌شوند. داده‌های ابر طیفی در برگزیده مجموعه اطلاعات غنی از بازتاب‌های الکترومغناطیسی سطحی زمین هستند. اجسام مختلف در محدوده طول موج‌های طیف الکترومغناطیسی، بسته به ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبات کانی‌شناسی و شیمی خود، امواج الکترومغناطیسی را در طول موج‌های مختلف با شدت‌های متفاوت بازتاب کرده یا جذب می‌کنند، وجود اطلاعاتی از رفتار طیفی اجسام گوناگون در طول موج‌های مختلف بر اساس

منحنی‌های شاخص بازتابندگی و جذب طیف در سنجش از دور بسیار بااهمیت است. (Gupta and Roy, 2007). به طور کلی روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان به دو گروه آمار پایه و طیف مینا تقسیم بندی کرد. در روش اول اصول پردازش بر مبنای نحوه پراکندگی فراوانی نمای مقدار پیکسلی هر باند، میانگین، میانه و مد پایه گذاری شده است. این در حالی است که در روش دوم طیف مینا از ابتدای پردازش باید الگوی طیف مرجع، مشخص باشد. پس از شناسایی مناطق مستعد مغناطیسی با سنجش از دور، مغناطیس‌سنجی به عنوان یک روش ژئوفیزیکی سریع و ارزان قیمت برای اکتشاف کانسارهای آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این روش هدف به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی و تعیین وضعیت کانسار در عمق از طریق اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در یک محدوده است (Cooper and Cowan, 2006). در سال‌های اخیر روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانسارهای مغناطیسی مگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، سیدریت، لیمونیت و گوتیت در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است مدل سازی پیشرو و وارون، ابزار تصویر سازی کانسنگ در روش مغناطیس‌سنجی هستند. به ویژه روش وارون سازی برای بررسی و تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به دفعات زیاد مورد استفاده قرار گرفته است و در موارد به کار رفته نتایج مطلوبی حاصل شده است (فاتحی و همکاران ۱۳۹۲).

۲- زمین‌شناسی

محدوده مورد بررسی در شمال شرقی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ پاگدار در محدوده جنوب باختر چهار گوش ۱:۲۵۰۰۰۰۰ سبزواری واقع شده است. بخش عمده ارتفاعات محدوده، در برگیرنده سنگ‌های دگرگونه سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک است. بلندی‌های برگه پاگدار ریخت‌های بسیار ناهمواری را پدید آورده است که گذر از آن‌ها دشوار است. این سنگ‌ها در بیشتر جاها برجستگی‌هایی را پدید آورده‌اند که بیشتر از ساخت‌های چین‌ها و گسله‌ها پیروی می‌کند، و به نظر می‌رسد بیشتر ریختارها توسط رویدادهای تکتونیکی و زمین‌ساختی پدید آمده‌اند. منطقه مورد مطالعه، از دیدگاه ساختاری جزئی از پهنه ساختاری سندنج-سیرجان است که از سمت خاور توسط گسل سبزواری غربی واقع در ورقه محمد آباد از دیگر پهنه‌ها جدا شده است و مرز جنوبی آن به وسیله گسل‌های رورانده واقع در ورقه نودز از زون ساختاری زاگرس تفکیک شده است. سنگ‌های مربوط به پالئوزوئیک بطور پراکنده و وسیع در منطقه مورد مطالعه برونزد دارند، این واحد دگرگونی از آمفیبولیت و گرانیت گنیس پدید آمده است. گنیس‌ها دارای بافت موزائیکی و از نوع ارتوگنیس است. در مقاطع نازک کوارتز و ارتوز کشیده و خرد شده می‌باشند. در این واحد بطور محلی برونزدهایی از متاگابرو مرم وجود دارند. در متاگابروها یا همان متاگابروها به علت شدت تجزیه بافت اولیه سنگ از بین رفته بطوریکه کانی‌های فلدسپات از نوع آلبیت به شدت به کلریت تغییر یافته‌اند از کانی‌های فرعی می‌توان به کوارتز، آپاتیت و نیز کانی‌های کدر اشاره نمود. واحدی دیگر به اسم آمفیبولیت و متاگابرو با رنگ ابی در نقشه مشخص شده است که بطور پراکنده رخنمون داشته و بطور هم شیب بر روی واحد شیست‌ها و میکاشیست و سنگ اهنکی دگرگونی جای گرفته است از نوع آمفیبولیت بوده و از دگرگونی گابرو پدید آمده است. در مقاطع نازک متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند می‌باشد، بلورهای بی شکل کوارتز نیز قابل رویت می‌باشند، در برخی قسمت‌ها هورنبلند به ترمولیت و اکتینولیت تغییر یافته است.



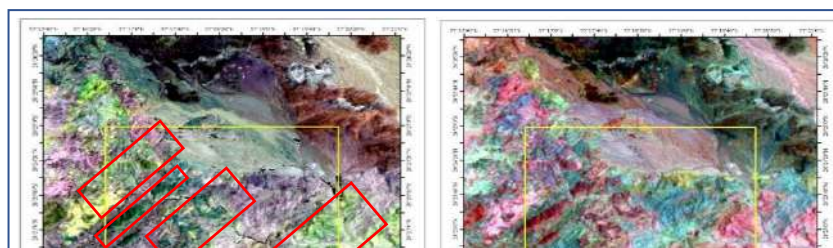
شکل ۱: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده دوزخ دره قاریاب

۳ - روش تحقیق

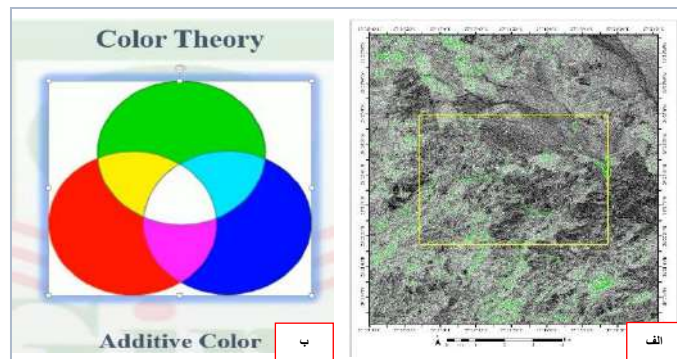
برای دست یابی به اهداف مورد نظر این پژوهش، پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه برداری‌های اولیه جهت نمونه‌های مینرالیزه و وجود کانی سازی آهن و دور سنجی با استفاده از تصاویر سنجنده استر طراحی شبکه در محدوده مورد نظر جهت برداشت‌های ژئوفیزیک به روش مگنتومتري انجام گرفت. با توجه به نقشه‌های ژئوفیزیک هوایی و نتایج ژئوشیمی یک شبکه ۱۰×۱۰ متر در این محدوده طراحی گردیده است (شکل ۶) که در برخی نقاط بی‌هنجاری با شبکه ۵×۱۰ برداشت صورت گرفته است. در این محدوده آزیموت خطوط برداشت ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. تعداد کل ایستگاه‌ها در این محدوده ۶۵۷۵ نقطه برآورد گردیده است. داده‌های حاصل از عملیات صحرایی ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار Geosoft مورد پردازش قرار گرفته و به صورت نقشه ترسیم شده است. پس از حذف IGRF (شدت میدان مغناطیسی منطقه‌ای) با توجه به هدف پژوهش، فیلترهای لازم بر روی داده‌ها اعمال شد. سرانجام با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، دورسنجی و مغناطیس‌سنجی، تفسیرها و تحلیل‌های لازم انجام شد.

۴ - بارزسازی زون‌های آلتراسیون مرتبط با کانه سازی آهن با استفاده از روش SAM بر روی تصاویر ASTER

نتایج این مطالعه نشان داد که روش SAM می‌تواند به طور موثری زون‌های آلتراسیون مرتبط با کانی‌سازی آهن را بارزسازی کند، زون‌های آلتراسیون شناسایی شده می‌تواند به عنوان راهنمای اکتشافات بیشتر در منطقه مورد مطالعه و سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد، گستردگی و موقعیت زون‌های آلتراسیون تعیین شد، به طوری که در قسمت وسیعی از غرب محدوده شاهد بارز سازی قابل توجهی از اکسیدهای آهن، مگنتیت در سطح می‌باشیم. پس از تصحیحات اتمسفری و جوی انجام شده بر روی باند تصویر استر و سپس حذف پوشش گیاهی و صفر قرار دادن مقدار آن، گرچه این پوشش گیاهی ان چنان وسیع نیست، بارز سازی‌ها در محدوده مورد نظر انجام شده است، در شکل ۲ الف نتیجه ترکیب رنگی کاذب باندهای ۴۶۸ می‌باشد که شامل بیش از ۷ نوع لیتولوژی در محدوده است، در شکل ۲ ب نتیجه ترکیب رنگی ۶۳۱ از این باند تصویر استر می‌باشد که در واقع شامل ۳ نوع آلتراسیون شاخص پروپیلیتیک با پیکسل‌های سبز رنگ و ترکیبی از آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک که به تن رنگی صورتی و بنفش می‌باشد قابل مشاهده است.

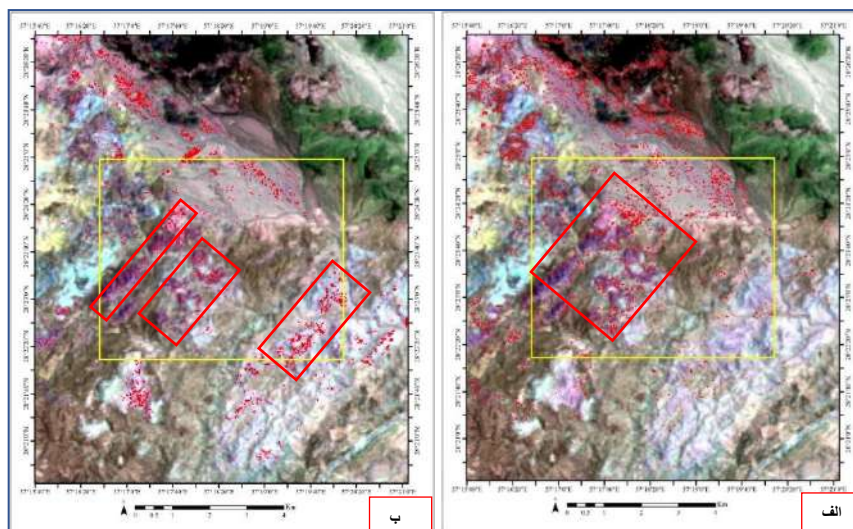


نسبت ترکیب رنگی، رنگ‌های مختلف در شکل شماره ۳-ب و حذف پوشش گیاهی در شکل ۳-الف در زیر قابل مشاهده می‌باشد:

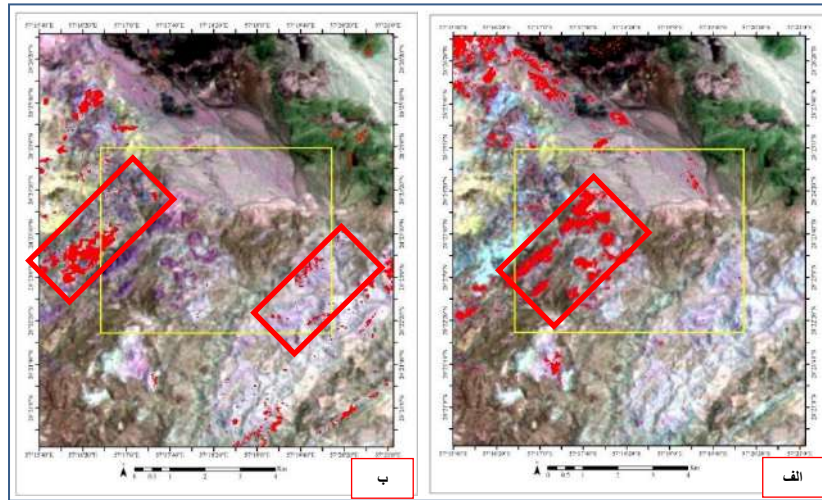


شکل ۳: الف) حذف پوشش گیاهی منطقه، ب) نمایش RGB Colour ترکیب رنگی باندهای مختلف

در تصاویر زیر بارزسازی اکسیدهای آهن و مگنتیت، هماتیت، کلریت و اپیدوت با استفاده از روش Sam بر روی پس زمینه ترکیب رنگی کاذب در زیر آورده شده است، بارز سازی ها عموماً روند شمال شرقی، جنوب غربی در محدوده دارند.

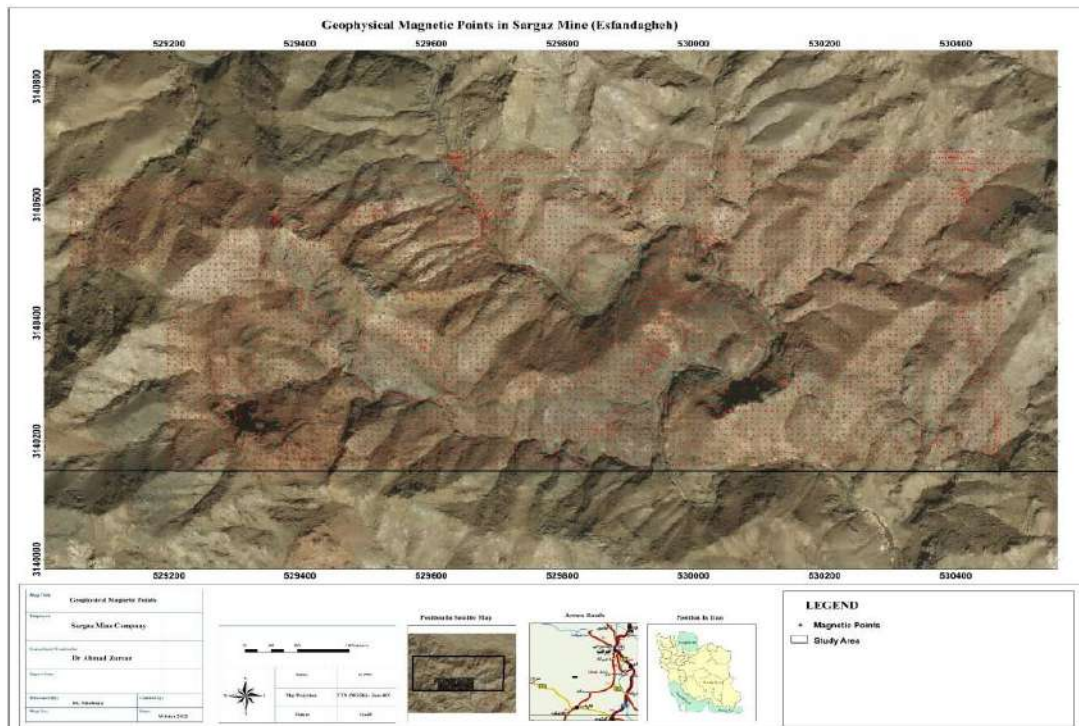


شکل ۴: شکل الف و ب به ترتیب مربوط به بارزسازی اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت)



شکل ۵: الف) بارز سازی کانه مگنتیت با پیکسل های قرمز رنگ ب) بارز سازی کانی های کلریت و اپیدوت با پیکسل های قرمز

محدوده اکتشافی ژئوفیزیک دوزخ دره با مساحت ۱۱ کیلومترمربع در استان کرمان (شهرستان فاریاب) و در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اسفندقه قرار دارد. در این محدوده (شکل ۶ و ۱) از روش های مغناطیس سنجی، برای شناسایی و بررسی بی هنجاری های مرتبط با ماده

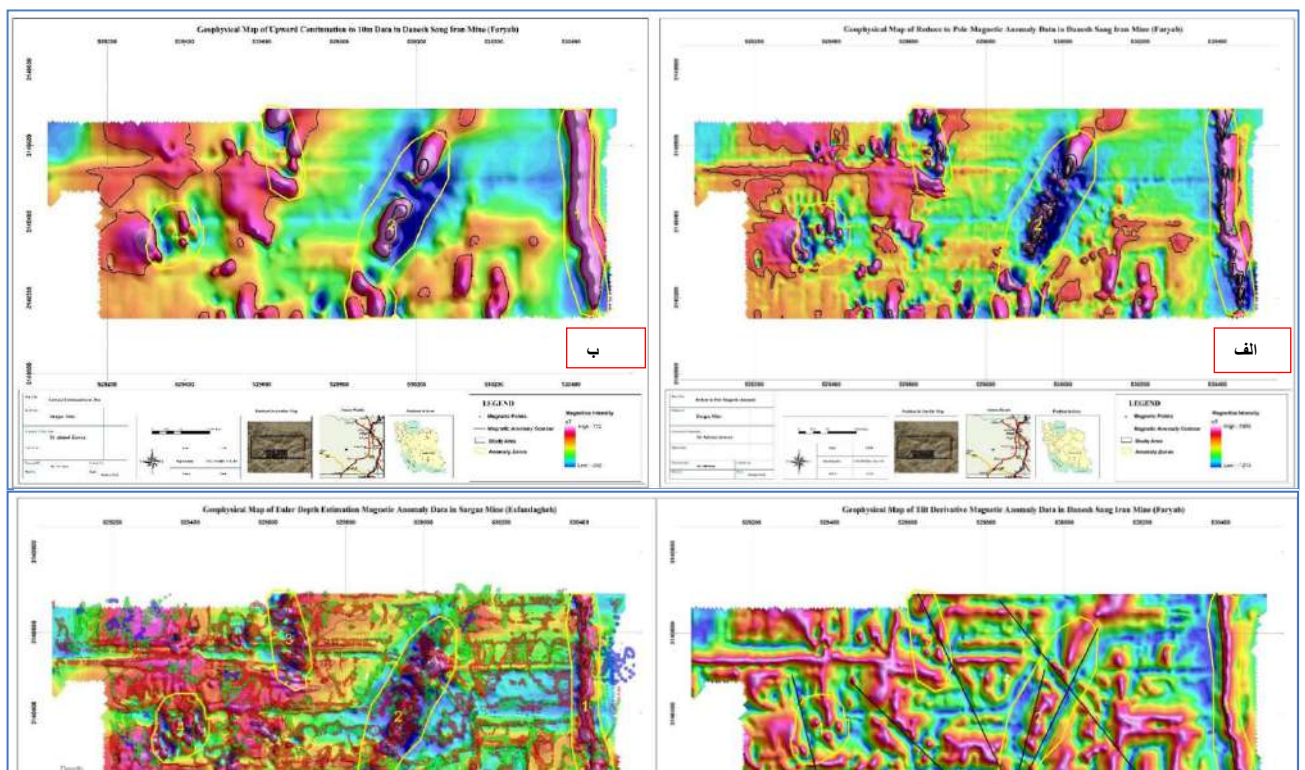


شکل ۶: موقعیت محدوده مورد مطالعه و نقاط برداشت مگنتومتري در تصوير ماهواره ای

معدنی استفاده شده است.

۵- مطالعات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس سنجی

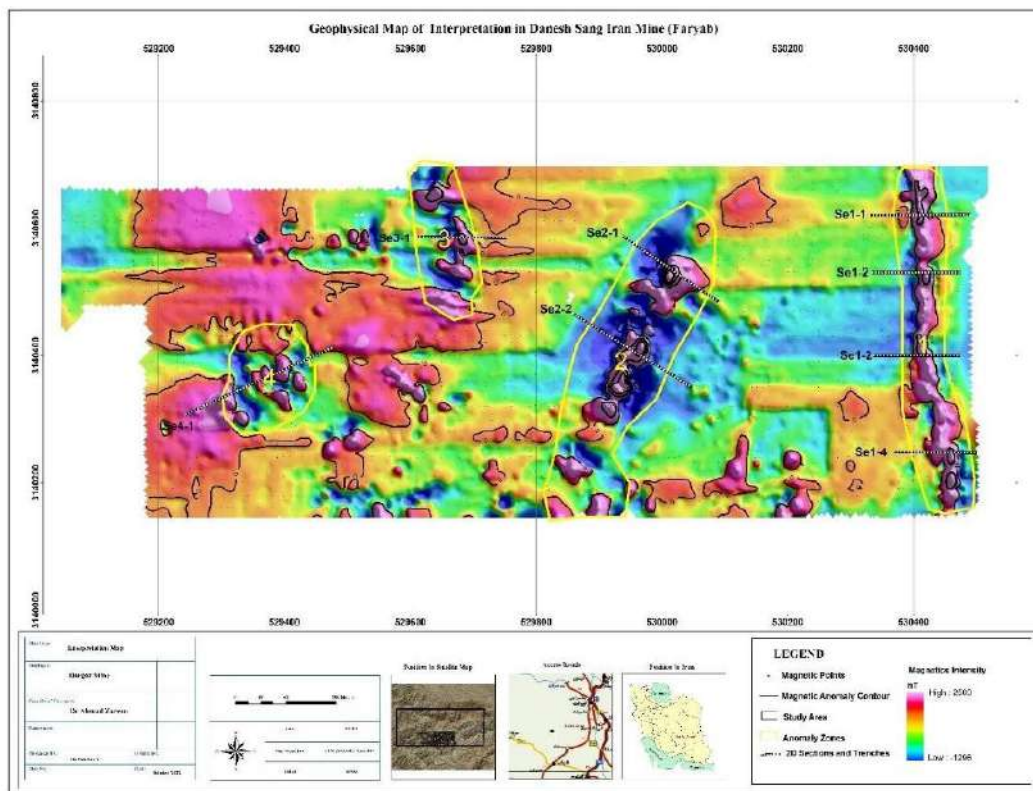
روش‌های ژئوفیزیکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بررسی پتانسیل معدنی، نفتی، آبی و زمین‌شناختی هستند. این روش‌ها مرز تفاوت‌ها را آشکار می‌سازند، مرزها جایی هستند که یک محیط از لحاظ برخی خواص فیزیکی از محیط مجاور خود متمایز می‌شود. بر اساس تحلیل نقشه‌های مغناطیس هوابرد، بی‌هنجاری مغناطیسی با شدت نسبی زیاد در این محدوده شناسایی شده است. رخنمون‌های آهن، در این محدوده به وفور دیده می‌شود. انجام مطالعات مغناطیس‌سنجی زمینی به دلیل وضوح بالاتر نسبت به داده‌های هوابرد می‌تواند بسیاری از بی‌هنجاری‌های ناشناخته در منطقه را شناسایی و آشکار نماید. بر همین اساس، یک شبکه 10×10 متر طراحی شد و تعداد ۶۵۷۵ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شده است در این محدوده آزمون خطوط برداشت ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. داده‌های حاصل از عملیات صحرایی ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار Geosoft مورد پردازش قرار گرفته و به صورت نقشه ترسیم شده است. پس از حذف IGRF (شدت میدان مغناطیسی منطقه‌ای) با توجه به هدف پژوهش، فیلترهای لازم بر روی داده‌ها اعمال شد. در نقشه برگردان به قطب ۴ زون بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده می‌شود. با توجه به فیلتر ادامه فراسوی از نقشه فراسوی ۵۰ متر به بعد، عملاً زون بی‌هنجاری ۳ و ۴ ناپدید می‌شود، که این امر نشان‌دهنده عمق کم ناهنجاری مورد نظر می‌باشند. بی‌هنجاری زون ۱ و ۲ از نقشه ادامه فراسوی ۱۰۰ متر به بعد محو شده‌اند که نشان از عمق نسبی بیشتر کانی‌زایی در این دو زون دارند. بدین ترتیب می‌توان به عمیق بودن منشأ بی‌هنجاری در این ۳ زون پی برد. نقشه مشتق تیلت، ابزار قدرتمندی در شناسایی خطواره‌های مغناطیسی است. مقادیر صفر در نقشه مشتق زاویه تیلت تا حد زیادی منطبق بر مرز منبع آنومالی‌ها و یا موقعیت گسل‌های منطقه مورد مطالعه است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، خطوط زردرنگ گسل‌های شناسایی شده از طریق این فیلتر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دیگر نقشه‌های مغناطیسی مانند TMI و نقشه مشتقات نیز در شناسایی این خطواره‌ها مؤثر بوده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تعداد ۸ گسل پنهان شناسایی و به نقشه درآمده است. در این شکل سازوکار گسلی پیچیده در منطقه و ارتباط آن با آنومالی‌های معرفی شده نشان داده شده است. به‌طور کلی دو ساختار شمال شرقی - جنوب غربی و شمال - جنوب به‌عنوان ساختار کنترلی به‌وضوح در تمام نقشه‌های گردایان دیده می‌شود. در این شکل سازوکار گسلی پیچیده در منطقه و ارتباط آن با آنومالی‌های معرفی شده نشان داده شده است. در شکل ۷ عمق‌های به‌دست‌آمده از روش اویلر بر روی نقشه بی‌هنجاری برگردان به قطب نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، جواب‌های به‌دست‌آمده منطبق با بی‌هنجاری‌های مغناطیسی منطقه است و به‌طور غالب بیشتر عمق به‌دست‌آمده مربوط به قسمت فوقانی و یا سطوح جانبی بی‌هنجاری‌ها است. همان‌طور که در نقشه ۷ نشان داده شده است، عمق‌های حاصل در منطقه از ۰ متر تا ۷۶ متر با میانگین کلی حدود ۱۲ متر و انحراف معیار ۶ متر می‌باشد که نشان‌دهنده عمق کم سقف منابع مغناطیسی در محدوده است.



شکل ۷: الف) نقشه مغناطیسی داده‌های برگردان شده به قطب در محدوده دوزخ دره ب) نقشه ادامه فراسو ۱۰ متر محدوده دوزخ دره ج) نقشه مغناطیسی مشتق تیلت د) نقشه تخمین عمق اویلر

۲-۱-۲ مدل‌سازی دو بعدی

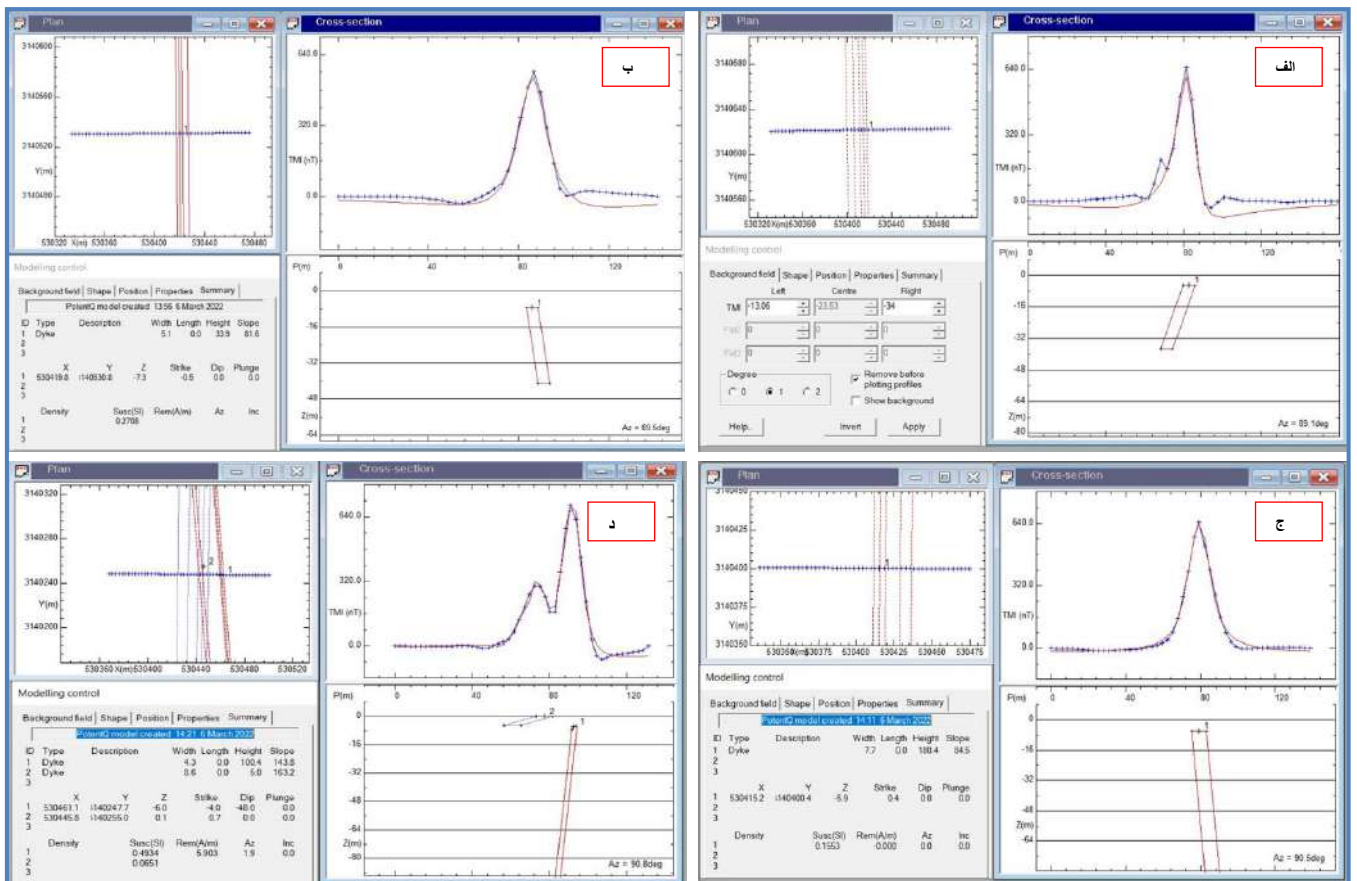
هدف از تفسیر منشأهای بی‌هنجار مغناطیسی پنهان درون زمین، به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی، شکل، هندسه و ژرفای آن‌ها است. به صورت کلی مدل‌سازی منشأ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را می‌توان یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل عددی به حساب آورد که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از بخش‌های پنهان توده‌ها در اختیار بگذارد. در مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی از دو شیوه پیشرو و وارون انجام می‌شود. در مدل‌سازی پیشرو، یک سری پارامترهای اولیه شامل، عمق، جنس توده و شکل هندسی آن، تعریف می‌شود. سپس بعضی از این پارامترهای مدل تغییر داده می‌شود تا پاسخ ناشی از آن‌ها به داده‌های واقعی، همخوانی پیدا کند. مالک همخوانی در این نوع مدل‌سازی معمولاً تجربی و برگرفته از سعی و خطا است. انجام مدل‌سازی پیشرو، نیازمند زمان زیادی می‌باشد و در مورد داده‌های زیاد و محدوده‌های بزرگ نمی‌توان از آن بهره برد. برای تسریع فرایند همخوانی و انطباق داده‌های مصنوعی به داده‌های واقعی، مدل‌سازی وارون پیشنهاد شده است. میزان همخوانی یا شباهت داده‌های مصنوعی و واقعی، توسط پارامتری به نام عدم انطباق تعیین می‌شود. وارون‌سازی داده‌ها معمولاً به دو روش پارامتریک و توزیع خواص فیزیکی، انجام می‌شود. هر دو روش مزایا و معایب خاص خود را دارد. در این گزارش از نرم‌افزاری استفاده شده که دو روش را به صورت مجزا بر رویدادهای مغناطیسی منطقه پیاده‌سازی می‌کنند. هدف این بخش از کار، دستیابی به مدل‌های خودپذیری دوبعدی و سه بعدی برای اهداف اکتشافی در منطقه است. در ادامه، مدل‌سازی دوبعدی با استفاده از



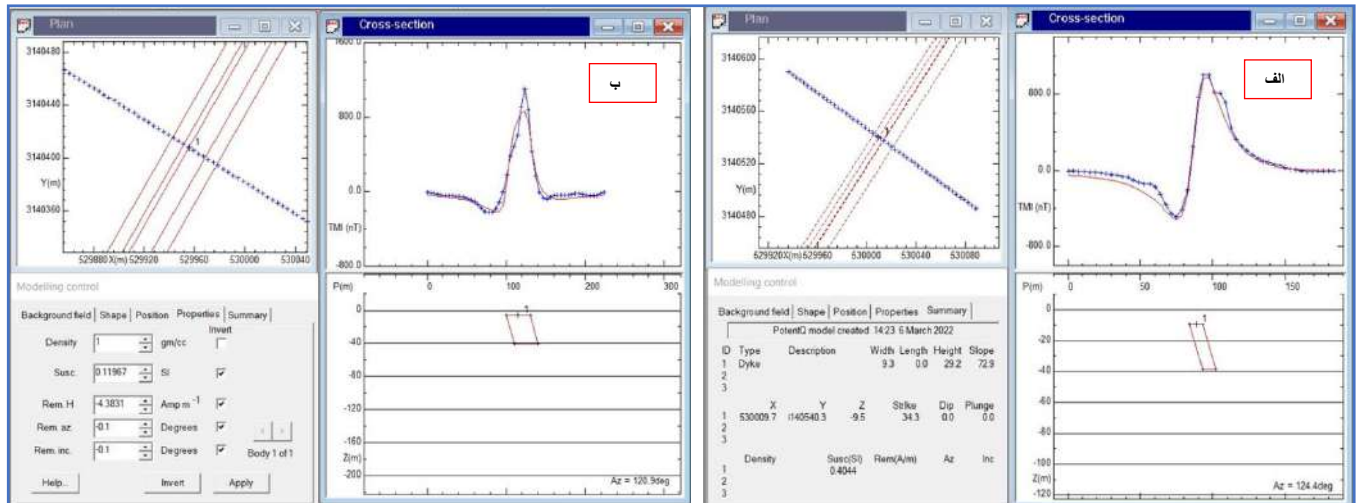
شکل ۸: رسم پروفیل‌های دوبعدی در زون‌های بی‌هنجاری در محدوده اکتشافی

نرم افزار Potent و مدل سه بعدی با استفاده از نرم افزار D3Mag مشاهده می شود. بدین منظور ابتدا برداشت های صحرایی اندازه گیری خودپذیری مغناطیسی در نمونه هایی در محدوده های بی هنجاری انجام شد.

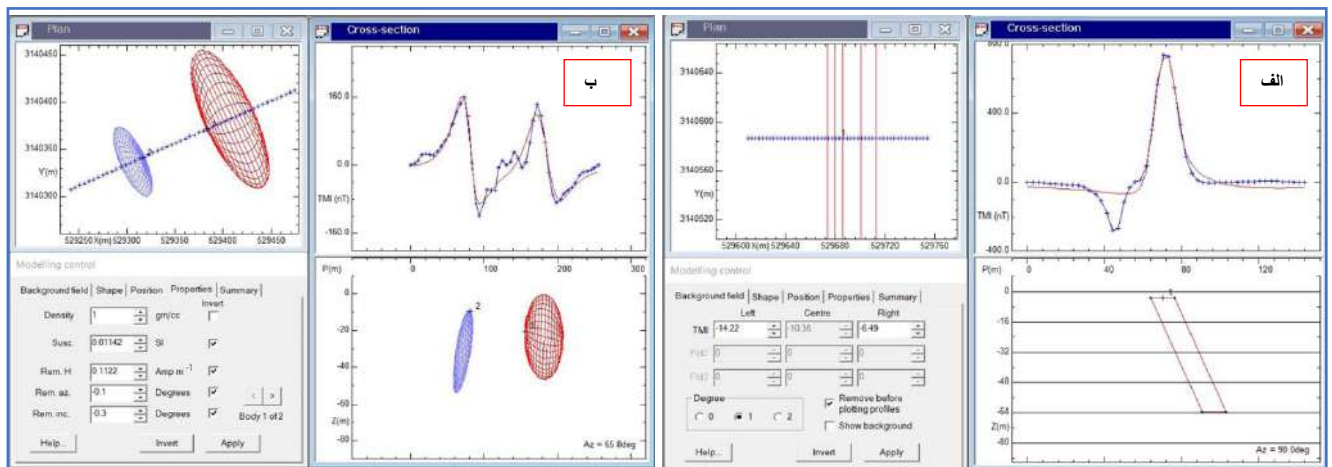
در این پروژه مدل سازی دوبعدی در زون A و بر روی ۵ مقطع شاخص انجام شده است. در شکل ۸ محل پروفیل های مورد نظر نشان داده شده است. مدل سازی های دوبعدی به ترتیب در شکل های ۹، ۱۰، ۱۱ نمایش داده شده اند. طول موج بی هنجاری در هر پروفیل بسیار متغیر بوده و به تبع آن مدل سازی توده بیضی که به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته شده است، دارای ابعاد مختلف است. ضخامت رگه از یک متر تا ۲۰ متر متغیر بوده و عمق کانی زایی نیز از چند متر تا ۱۰۰ متر متغیر است. همان طور که در نقشه بی هنجاری دیده می شود، تغییرات بسیار زیاد شکل هندسی کانی زایی، باعث پیچیدگی زیاد نقشه بی هنجاری شده است. برای مدل سازی مقادیر خودپذیری مغناطیسی نیز از مقادیر اندازه گیری شده صحرایی استفاده شده است.



شکل ۹: الف) مدل دوبعدی زون بی هنجاری ۱ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع الف، ب) مدل دوبعدی زون بی هنجاری ۱ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع ب، ج) مدل دوبعدی زون بی هنجاری ۱ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع ج، د) مدل دوبعدی زون بی هنجاری ۱ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع د).



شکل ۱: الف) مدل دوبعدی زون بی‌هنجاری ۲ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع الف)، ب) مدل دوبعدی زون بی‌هنجاری ۲ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع ب)



شکل ۱: الف) مدل دوبعدی زون بی‌هنجاری ۳ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع الف)، ب) مدل دوبعدی زون بی‌هنجاری ۴ در محدوده اکتشافی دوزخ دره (مقطع ب)

۱-۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در مطالعه مغناطیس سنجی در محدوده دوزخ دره با استفاده از مغناطیس سنجی زمینی با شبکه داده برداری ۱۰×۱۰ در محدوده‌ای به وسعت حدود ۷۰ هکتار مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط دسترسی با توپوگرافی خشن همراه بوده است. در این پروژه تعداد کل ۶۷۷۵ ایستگاه مغناطیسی برداشت شد. پس از انجام پردازش‌ها و تصحیحات لازم بر رویدادها، نقشه‌های میدان مغناطیسی تهیه شد. سپس بر اساس تفسیرهای کیفی و همچنین مدلسازی‌های دوبعدی، نتایج بسیار مهمی در منطقه آشکار شد. نقشه ۱۲ نتایج تفسیر داده‌های مغناطیسی بر روی تصویر ماهواره‌ای را ارائه می‌کند. در ادامه به مهم‌ترین این نتایج اشاره می‌شود:

- بر اساس نقشه‌های میدان مغناطیسی تعداد حداقل ۴ زون بی‌هنجاری شناسایی گردید که زون بی‌هنجاری ۱ و ۲ از نقطه نظر کانی‌سازی آهن، در اولویت اول انجام ادامه اکتشافات است. طول این زون با روند شمال شرقی - جنوب غربی حدود ۵۰۰ متر و ۳۵۰ بوده که نوید یک زون اقتصادی را در این بی‌هنجاری می‌دهد. دو زون بی‌هنجاری ۳ و ۴ از گسترش و عمق به مراتب کمتری نسبت به دو زون اول برخوردار هستند.
 - علیرغم طول زیاد بی‌هنجاری، ضخامت بی‌هنجاری کم بوده و مدلسازی‌های دوبعدی نیز این مطلب را تأیید می‌کند.
 - چندین گسل عمود بر روند بی‌هنجاری دیده می‌شود که باعث قطع شدن بی‌هنجاری و تغییر شکل آن شده است. بطوری که به دلیل پیچیدگی رفتار بی‌هنجاری امکان مدل‌سازی سه‌بعدی میسر نشد.
 - آزمایش‌های خودپذیری مغناطیسی که در محل رخنمون‌ها انجام شد، مقادیر متوسط تا بسیار بالایی نشان داد که نشان‌دهنده عیار مگنتیت بالا در این زون است.
 - بر اساس نتایج روش اویلر بر رویدادها، به نظر می‌رسد عمق سقف منشأ آنومالی‌ها در زون‌های بی‌هنجاری سطحی بوده و نهایتاً تا عمق ۱۰ متر دارند.
 - بر اساس تفسیر ساختاری داده‌های مغناطیسی، چندین گسل مهم در منطقه آشکار شد. گسل‌های مغناطیسی شناسایی شده حاکی از سازوکار تکتونیکی قوی در منطقه دارد.
 - منشأ بی‌هنجاری‌ها به دلیل شکل بی‌هنجاری و کمبود رخنمون سطحی مشخص نبوده ولی احتمال آهن اسکارنی با ابعاد و عمق کم در گستره بی‌هنجاری‌های مذکور وجود دارد.
- در مجموع ادامه عملیات اکتشاف نیمه تفضیلی و تفضیلی جهت حصول به ذخیره اقتصادی قویاً توصیه می‌شود.

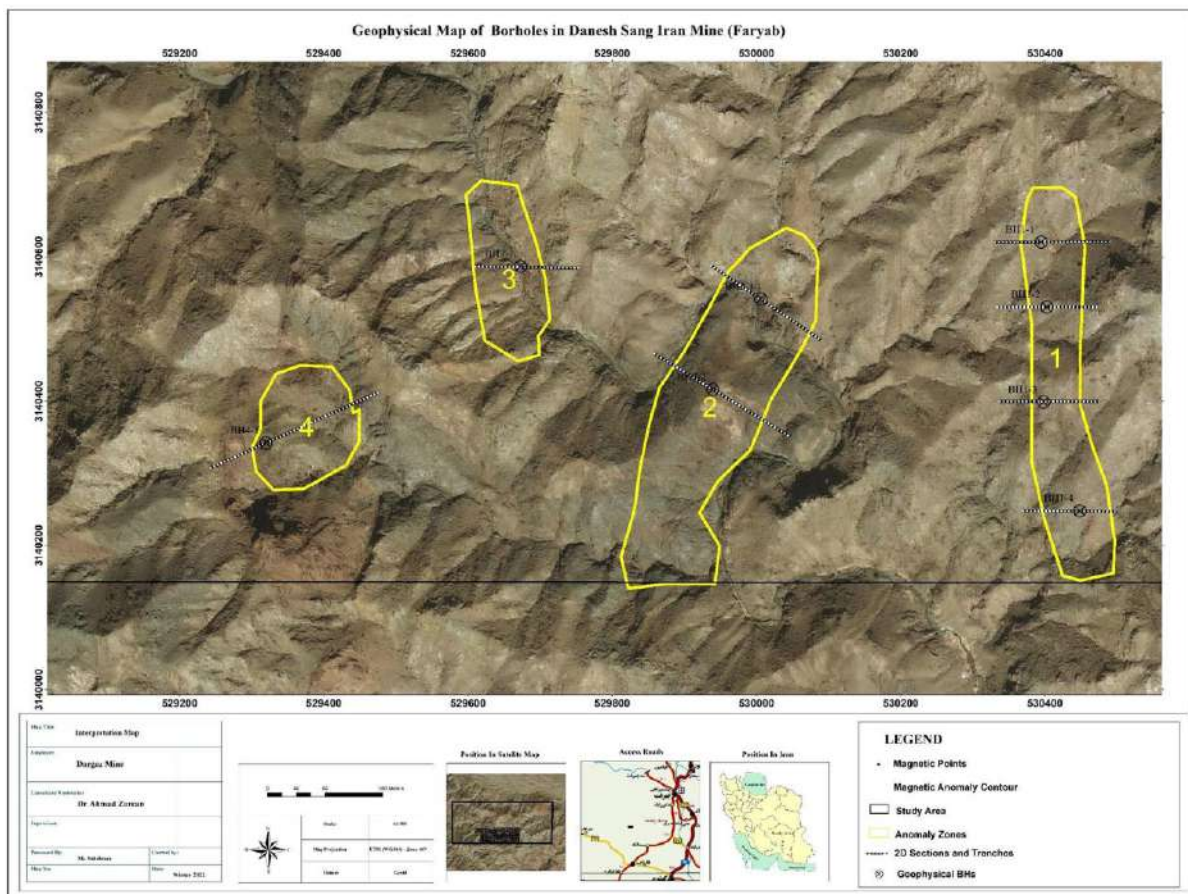
۶-۲ پیشنهادها

- شبکه برداشت برای این محدوده مناسب بوده و نیازی به برداشت با رزولوشن بالاتر نیست.
- با توجه به بسته شدن بی‌هنجاری، گسترش محدوده برداشت ژئوفیزیک الزامی به نظر می‌رسد.
- عدم وجود نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی دقیق از دقت تفسیر و مدلسازی کاسته است. با تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی سطحی (زون‌های دگرسان، واحدهای زمین‌شناسی و ...) و اطلاعات به‌دست‌آمده از ژئومگناطیس می‌توان به نتایج بسیار خوبی رسید.
- حفر ترانشه در محل‌های نشان داده شده در شکل ۱۲.
- حفر گمانه بر اساس نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۱ و شکل ۱۲) در این مرحله بایستی انجام شود تا همبستگی بی‌هنجاری با کانی‌زایی مگنتیت تأیید شود. پس از آن می‌توان نقاط حفاری تکمیلی را ارائه نمود.

جدول ۱: مختصات حفاری‌های پیشنهادی (WGS84_40S)

| Borehole | Zone | Depth | X | Y | Az | Dip | Priority |
|----------|------|-------|--------|---------|----|-----|----------|
| BH1-1 | 1 | 80 | 530395 | 3140620 | 90 | 80 | 1 |
| BH1-2 | 1 | 30 | 530403 | 3140530 | 90 | 80 | 1 |
| BH1-3 | 1 | 50 | 530399 | 3140400 | 90 | 80 | 1 |
| BH1-4 | 1 | 40 | 530449 | 3140250 | 90 | 80 | 1 |

| | | | | | | | |
|-------|---|----|--------|---------|-----|----|---|
| BH2-1 | 2 | 40 | 530006 | 3140540 | 120 | 80 | 1 |
| BH2-2 | 2 | 40 | 529940 | 3140420 | 120 | 80 | 1 |
| BH3-1 | 3 | 40 | 529673 | 3140590 | 90 | 80 | 1 |
| BH4-1 | 4 | 40 | 529320 | 3140340 | 230 | 80 | 1 |



شکل ۱۲: نمایش نقاط حفاری و زون های بی هنجاری روی تصویر ماهواره ای گوگل ارث

منابع

- راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش های مغناطیس سنجی، گرانی سنجی و لرزه نگاری در اکتشافات معدنی، نشریه شماره ۵۹۴ (۱۳۹۱)، معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی.
- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاگدار

3. Blakely, R. J., 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic Application: Cambridge University Press, 2nd edition .

4. <http://helios.fmi.fi>
5. http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/gma_calc.html
6. <http://www.geosoft.com/products/oasis-montaj/overview>
7. Hunt, C. P., Moskowitz, B. M., & Banerjee, S. K. (1995). Magnetic properties of rocks and minerals. Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants, 189-204
8. Li, Y., and D. W. Oldenburg, 1996, 3D inversion of magnetic data: Geophysics, 61, 394-408.
9. Milsom, J. (2007). Field geophysics (Vol. 25). John Wiley and Sons.
10. Miller, H., and Singh, V. 1994, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources, Journal of Applied Geophysics, 32, 213-217.
11. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1976). Keys, DA, 1976 Applied Geophysics.
12. Thompson, D. T., 1982, EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics 47, 31–37.
13. Qiu, F. Abdelsalam, M. Thakka, P. 2006, Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi Heiani suture, Southern Egypt. Journal of African Earth Sciences. 44: 169–180.

نقش GPR در شناسایی مناطق متراکم در محدوده‌های سنگ ساختمانی

مهدی مرادی^۱، کیوان خیر^۲، عبدالحمید انصاری^۳.

^۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه دامغان (mahdimoradi2880@gmail.com)

^۲. دکتری مهندسی اکتشاف معدن، شرکت کارآزما معدن زمین، (keyvan.khayer@gmail.com)

^۳. دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد (h.ansari@yazd.ac.ir)

چکیده

روش‌های ژئوفیزیکی می‌توانند مؤلفه مؤثری در بسیاری از بررسی‌های خصوصیات محیطی باشند و درک هدف تحقیق و شرایط خاص محیط یک جنبه حیاتی در انتخاب روش‌های ژئوفیزیکی است. ویژگی‌های سنگ و ترکیب شیمیایی، عواملی مانند یکنواختی، درزه و شکاف، شکستگی‌ها و... در کیفیت سنگ‌های تزئینی و ساختمانی تأثیرگذارند. رادار نفوذی زمین یک تکنیک صرفاً اکتشافی به طور گسترده در بررسی خواص سنگ، به ویژه شکستگی استفاده می‌شود. در این پژوهش ۴ پروفیل اصلی تعبیه گردید و از روش اندازه‌گیری GPR با برداشت‌های بازتابی فاصله مشترک، برای ارزیابی لایه‌های سنگ ساختمانی در محدوده اقلید با هدف شناسایی لایه بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون آنها استفاده شد. در این راستا با تفسیر مقاطع رسم شده در محیط با اعمال فیلترها، نهایتاً به بررسی لایه‌ها پرداخته شد و محل و عمق ناپیوستگی‌ها تعیین و از این رو لایه‌های دارای تراکم بالا که برای کیفیت سنگ ساختمانی و همگنی بلوک‌ها حائز اهمیت است، مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک، سنگ ساختمانی، رادار نفوذی زمین، GPR

The role of GPR in identifying dense areas in building stone areas

M.Moradi¹, K.Khayer², H.Ansari³

¹M.S.c in economic geology, Damghan University, mahdimoradi2880@gmail.com

² PhD in mining exploration engineering, KarAzma Geo Mine, keyvan.khayer@gmail.com

³Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, h.ansari@yazd.ac.ir

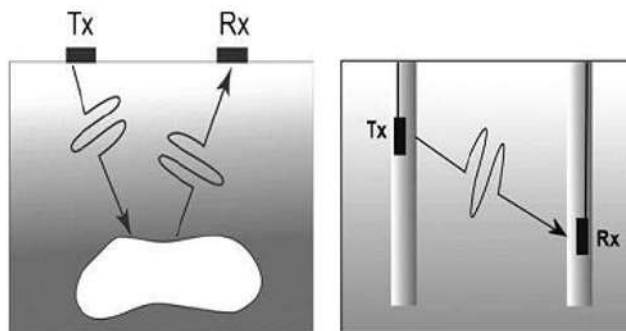
ABSTRACT

Geophysical methods can be an effective component in many studies of site properties and understanding the purpose of the research and the specific conditions of the site is a vital aspect in the selection of geophysical methods. The properties of the stone and its chemical composition, factors such as uniformity, joints and cracks, fractures, etc. affect the quality of decorative stones and facades. Ground penetration radar is a purely exploratory technique widely used in the study of rock properties, especially fractures. In this research, 4 main profiles were installed and GPR measurement method with common distance reflectance was used to evaluate the building stone layers in Eghlid area with the aim of identifying fine layers and discontinuities within them. In this regard, by interpreting the sections drawn in the environment by applying filters, the layers were finally examined and the location and depth of discontinuities were determined, and therefore high density layers that are important for the quality of building stone and homogeneity of blocks were identified.

Keywords: Geophysical, building stone, Ground penetration radar, GPR

۱ - مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی می‌توانند مؤلفه مؤثری در بسیاری از بررسی‌های خصوصیات محیطی باشند. یکی از مزایای اولیه اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیک، افزایش تراکم نمونه‌برداری فضایی است به طوری که پس‌زمینه و شرایط غیرعادی را می‌توان با دقت در اوایل بررسی شناسایی کرد. درک هدف تحقیق و شرایط خاص محیط یک جنبه حیاتی در انتخاب روش‌های ژئوفیزیکی است [۱]. صنعت سنگ ساختمانی صنعتی شدیداً پویاست که علیرغم وجود مسائل و مشکلات ایمنی و زیست محیطی، به عنوان صنعت اقتصادی مهم در دنیا به سرعت در حال رشد و توسعه است. سنگ شناسی به تنهایی تعیین‌کننده کیفیت سنگ در صنعت سنگ نیست و علاوه بر ویژگی‌های سنگ و ترکیب شیمیایی، عوامل مانند یکنواختی (درجه همگنی)، درزه و شکاف، شکستگی‌ها، حفره‌ها و فضاها، خالی، نحوه استخراج و... در کیفیت سنگ‌های تزئینی و نما تاثیرگذارند [۲]. رادار نفوذی زمین (GPR) یک تکنیک صرفاً اکتشافی با استفاده از تفسیر پروفایل‌های بازتابی به طور گسترده در بررسی خواص سنگ، به ویژه شکستگی استفاده می‌شود. شکستگی‌ها در توده سنگ ناپیوستگی‌هایی هستند که برای GPR مانند مرزهای الکترومغناطیسی عمل می‌کنند که در آن بخشی از پالس‌های رادار به سطح منعکس می‌شوند و یک پروفایل اندازه‌گیری قابل تفسیر ایجاد می‌کنند [۳]. علاوه بر این، GPR به عنوان یک تکنیک بسیار سریع و برای توده‌های زیرسطحی کم عمق است و نتایج را می‌توان بلافاصله در واحد ضبط بررسی کرد. در رایج‌ترین شکل اندازه‌گیری‌های GPR، از یک فرستنده و گیرنده که در یک نقطه ثابت قرار گرفته و برای دریافت امواج بازتابی ناشی از ساختارهای زیرسطحی، بر روی سطح حرکت داده می‌شوند، استفاده می‌شود. به طور کلی عبور موج از حجم مورد بررسی دارای کارایی مناسب‌تری است. دو روش برداشت GPR در شکل ۱ نشان داده شده است [۴].



شکل ۱) استفاده از امواج رادیویی. دو نوع اندازه‌گیری رایج: اندازه‌گیری سطحی (شکل سمت چپ) و اندازه‌گیری درون چاهی (شکل سمت راست)

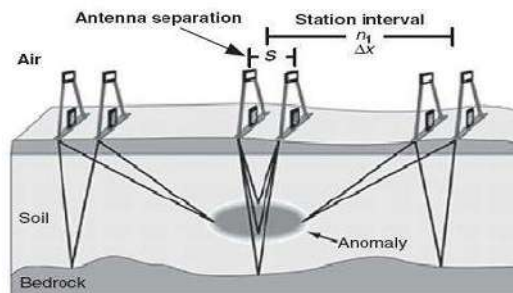
۲. روش تحقیق

در پژوهش حاضر از روش GPR برای شناسایی مناطق متراکم سنگ‌های ساختمانی محدوده اقلید یزد استفاده شد. در این راستا ۴ پروفیل اصلی تعبیه گردید و اندازه‌گیری GPR با برداشت‌های بازتابی فاصله مشترک، از یک فرستنده معمولی که در فاصله معینی از گیرنده قرار دارد صورت پذیرفت و پردازشی برای تفسیر داده‌های رادار نفوذی زمین جهت حذف نویزها زائد، بی‌ثباتی‌ها، تقویت داده‌های اصلی، انجام تصحیحات و... اعمال شد و در نهایت تفسیر نهایی پیاده سازی گشت.

۲-۱ برداشت و پردازش داده

طراحی برداشت می‌بایست با اصول اولیه نمونه برداری تطابق داشته باشد. اندازه‌گیری‌های GPR به دو بخش بازتابی و عبوری تقسیم می‌شوند. در برداشت‌های بازتابی فاصله مشترک، از یک فرستنده معمولی که در فاصله معینی از گیرنده قرار دارد استفاده می‌شود. آنتن-های فرستنده و گیرنده برای میدان ایجاد شده و ثبت شده دارای ویژگی‌های القایی معینی هستند. آنتن‌ها در یک مختصات ثابت به

کاربرده می‌شوند. (شکل ۲) هدف برداشت‌های بازتابی به نقشه در آوردن انعکاس زیرسطحی به ازای موقعیت فضایی است. منطقه تحت پوشش غالباً شامل برداشت داده‌ها روی شبکه‌ای از خطوط مستقیم است که منطقه را پوشش می‌دهد.



شکل ۲) نمایش برداشت فاصله - مشترک در طول یک خط

در برداشت‌های عبوری؛ اندازه‌گیری‌های GPR عبوری (درون گمانه‌ای) کمتر رایج است. اغلب کاربردهای آن شامل اندازه‌گیری در گمانه-ها برای مطالعات مهندسی و زیست محیطی می‌باشد. پارامترهای برداشت شامل فرکانس GPR، فواصل ایستگاهی، پنجره زمانی، فاصله زمانی نمونه برداری و فاصله گمانه‌ها می‌باشد.

۲-۲ تحلیل و تفسیر داده‌ها

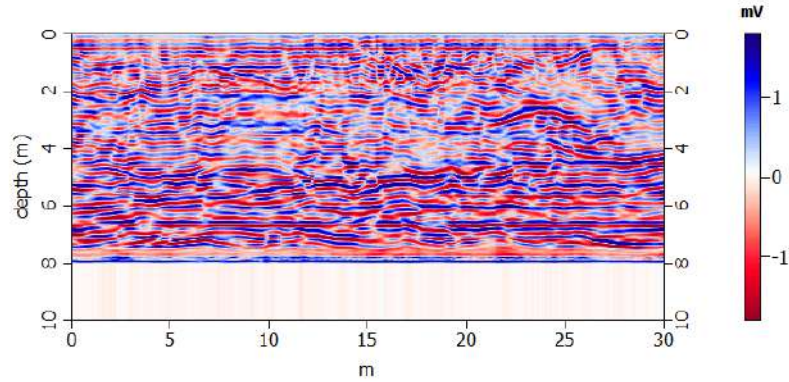
تبدیل داده‌های GPR به داده‌های کاربردی به دو صورت انجام می‌شود. در روش اول که در تمام روش‌های ژئوفیزیکی متداول است، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده GPR در یک مقطع نمایش داده شده تا محل آنومالی را تعیین نماید. در روش دوم، استخراج متغیرهای ویژگی‌های قابل سنجش موج مانند سرعت، کاهندگی یا امپدانس و سپس تبدیل این ویژگی‌ها به مقادیر کاربردی است.

۳-۲ مراحل پردازش رادار نفوذی زمین

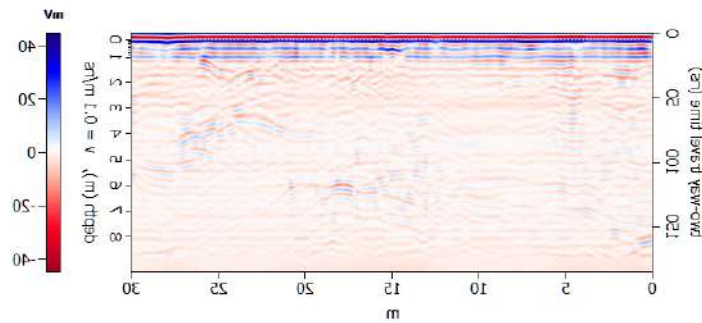
این نوع پردازش‌ها معمولاً برای داده‌های خام و بدون نیاز به اطلاعات اضافی از لایه‌های زیرین زمین به کار می‌روند و معمولاً برای تمام روش‌های جمع‌آوری داده‌ها کاربرد دارند. این پردازش‌ها معمولاً به شکل ویرایش تریس‌ها، فیلترینگ و تصحیح داده‌ها هستند که در ادامه بر روی پروفیل‌ها اشاره می‌شود.

پروفیل A ؛

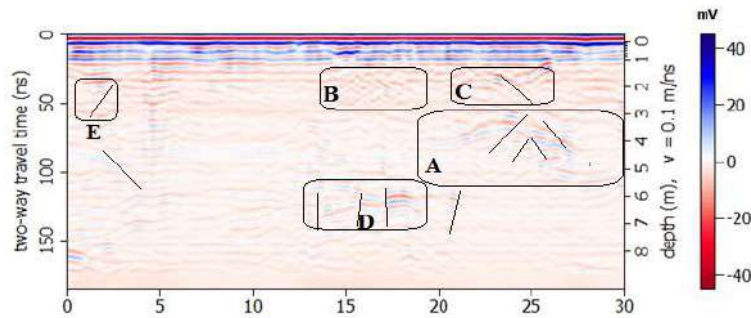
با توجه به اعمال فیلترها، محل‌های احتمالی ناهنجاری از نوع شکستگی و یا گسل خوردگی در شکل ۳ نمایش داده شده است که تفسیر آن‌ها به این شرح است؛ A نشان‌دهنده یک قسمت متراکم در بازه عمقی ۳ تا ۵ متر و فاصله ۲۰ تا ۳۰ متری پروفیل می‌باشد اما با توجه به رفلکتورهای ظاهر شده در این قسمت شکستگی‌هایی نیز مشاهده می‌شود که با خطوط سیاه رنگ نشان داده شده است. B: بهم ریختگی‌هایی در سطح رفلکتور مشاهده می‌شود که می‌تواند دلیلی بر حضور شکستگی‌های ریز در بازه عمقی ۱ تا ۳ متر در فاصله ۱۳ تا ۲۰ متری پروفیل می‌باشد. C: حضور گسل در بازه عمقی ۱ تا ۳ متر در فاصله ۲۵ متری پروفیل مشاهده می‌شود که با توجه به تغییرات رفلکتورها در ادامه خط گسل در عمق‌های پایین‌تر، به نظر می‌رسد این گسل ادامه دارد باشد. D: لایه‌ای متراکم اما گسل خورده در دو قسمت در عمق ۵/۵ الی ۷ متری در فاصله ۱۲ الی ۲۲ متری پروفیل مشاهده می‌شود که گسل‌های آن نیز با خطوط مشکی رنگ نشان داده شده‌اند. E: در این قسمت از لایه شکستگی‌های ریزی مشاهده می‌شود که احتمال بر حضور زون خورد شده دارد.



(الف)



(ب)



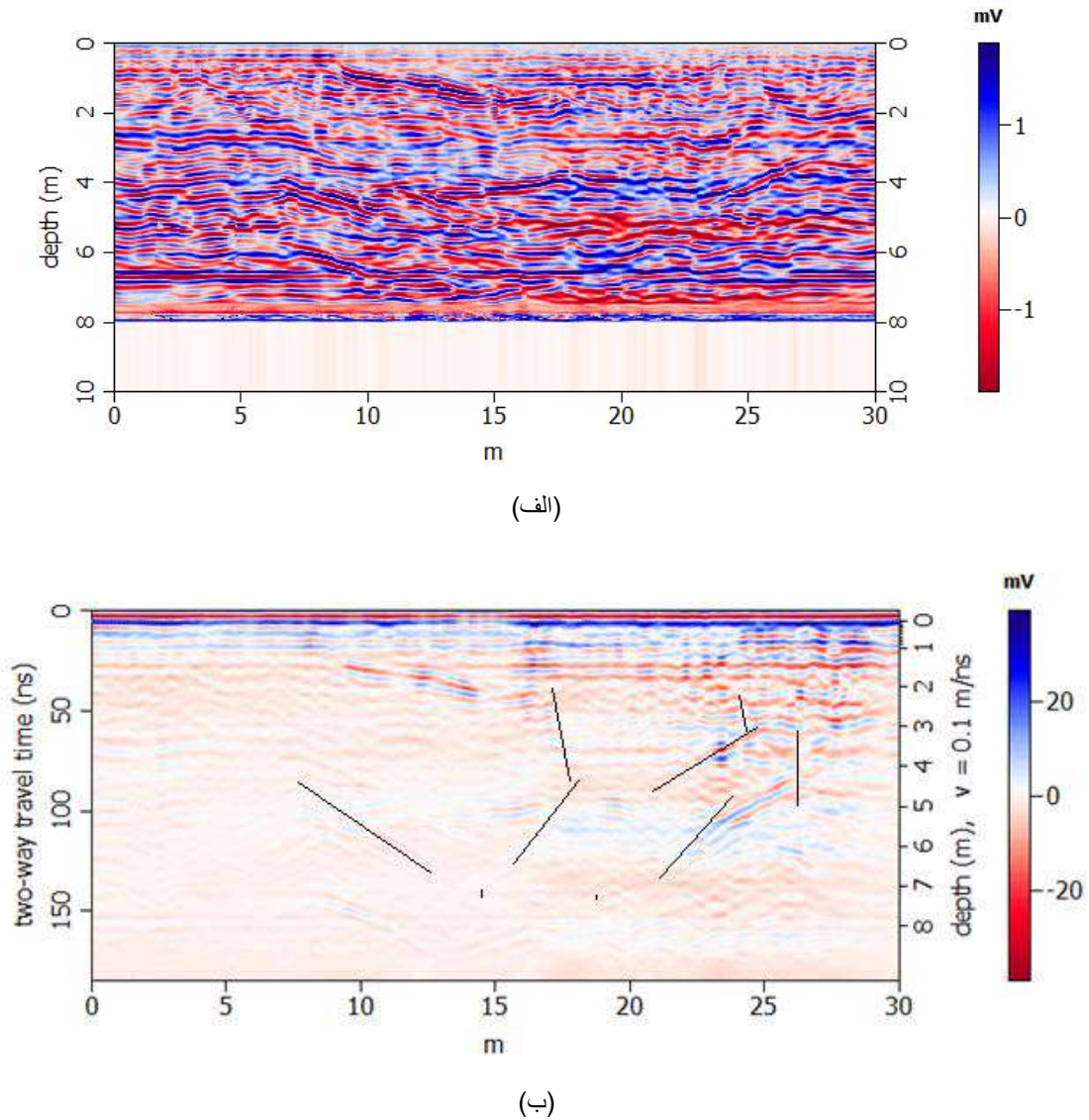
(ج)

شکل ۳ الف) اعمال migration (ب) اعمال فیلتر F-K filter (ج) محل‌های احتمالی شکستگی و گسل خوردگی در پروفیل A

پروفیل B ؛

برای این پروفیل نیز همانند پروفیل A کلیه فیلترهای اشاره شده اعمال، و در نهایت مقطع حاصل از F-K FILTER به صورت شکل ۴ به دست آمد. همانطور که در مقطع این پروفیل مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود در عمق ۱/۵ الی ۲ متری و در فاصله ۸ الی ۱۵ متری، یک لایه متراکم وجود داشته باشد که در ادامه در فاصله ۱۷ متری دچار گسل خوردگی شده است. همچنین در فاصله ۸ الی ۱۲ متری

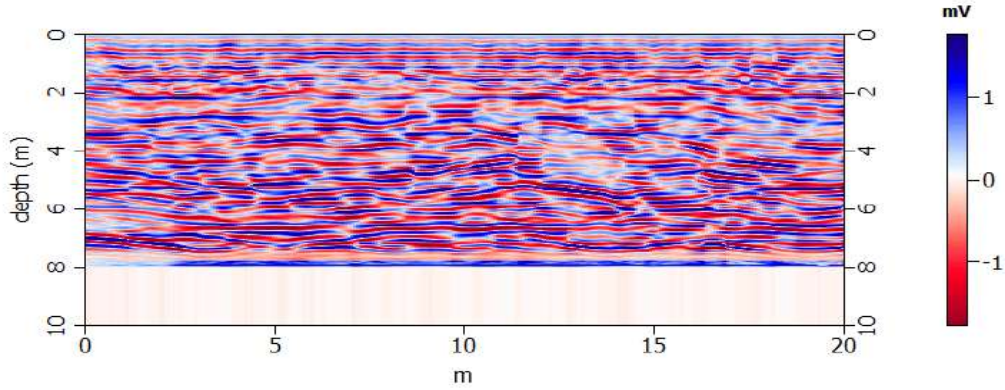
گسلی در عمق ۴ الی ۷ متری ملاحظه می‌شود. در بازه عمقی ۲ الی ۷ متری در فاصله ۲۰ الی ۲۷ متر از شروع پروفیل، زون خردشده‌ای مشاهده می‌گردد.



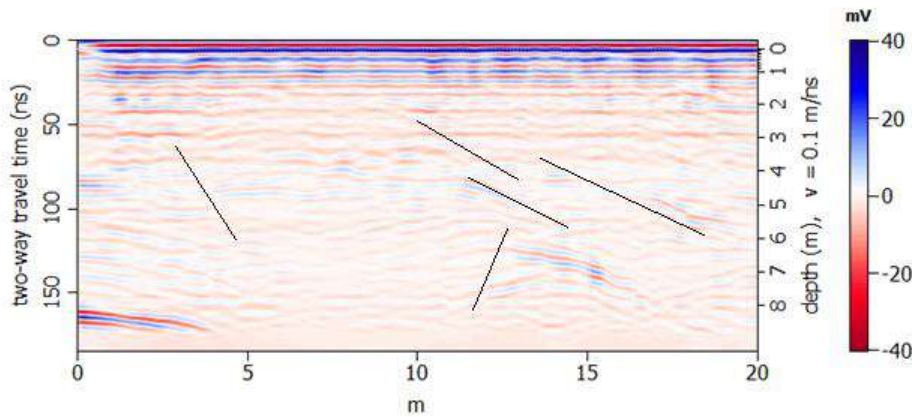
شکل ۴. الف) اعمال migration ب) اعمال فیلتر F-K filter در پروفیل B

پروفیل C ؛

برای این پروفیل نیز همانند پروفیل A کلیه فیلترهای اشاره شده اعمال، و در نهایت مقطع حاصل از F-K FILTER به صورت شکل ۵ به دست آمد. با توجه به مقطع رسم شده، شدت شکستگی در این پروفیل نسبت به سایر پروفیل‌ها کمتر است و بیشترین و بزرگترین شکستگی‌ها و گسل خوردگی‌ها مربوط به قسمت انتهایی پروفیل یعنی بازه ۱۰- الی ۲۰ متری پروفیل می‌باشد. در فاصله ۱۲ الی ۱۷ متر و عمق ۶ الی ۸ متر، رفلکتورهای قوی مشاهده می‌شود که نشان از متراکم بودن لایه در این قسمت می‌باشد.



(الف)

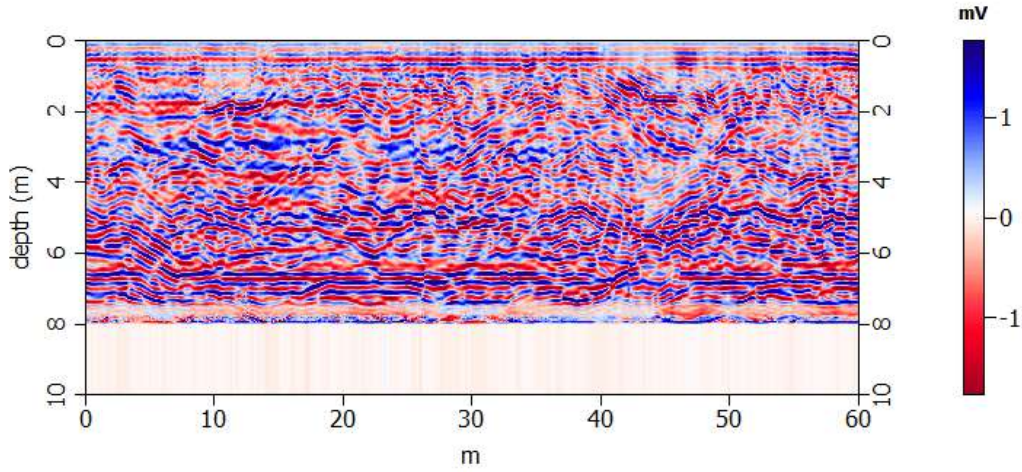


(ب)

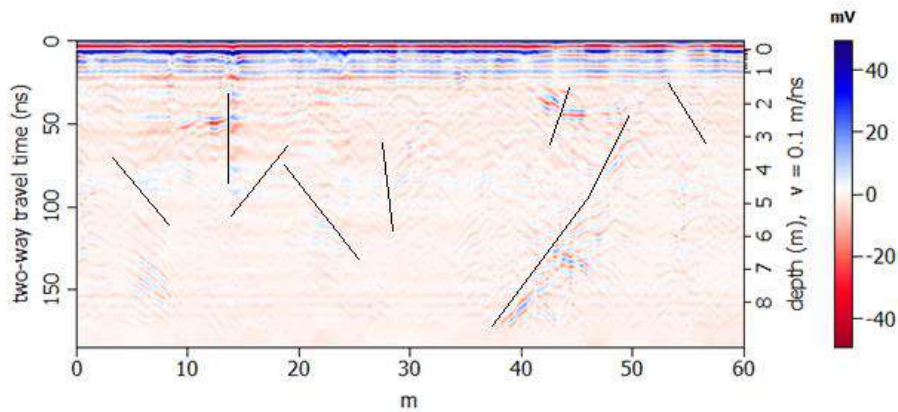
شکل ۵. الف) اعمال migration (ب) اعمال فیلتر F-K filter در پروفیل C

پروفیل D ؛

برای این پروفیل نیز همانند پروفیل A کلیه فیلترهای اشاره شده اعمال، و در نهایت مقطع حاصل از F-K FILTER به صورت شکل ۶ به دست آمد. گسل بزرگی در بازه عمقی ۲ الی ۸ متر و در فاصله ۳۸ الی ۵۰ متری مشاهده می‌شود که لایه‌ها را به شدت جابجا نموده است. با توجه به رفلکتورهای رسم شده، شدت ناهمواری در طول این پروفیل بالاست. در فاصله ۴۰ الی ۵۰ متری لایه‌ها به شدت دچار چین خوردگی است و دارای درزه و شکستگی‌های بالایی می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) اعمال migration (ب) اعمال فیلتر F-K filter در پروفیل D

۳. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش GPR برای ارزیابی لایه‌های سنگ ساختمانی در محدوده اقلید با هدف شناسایی لایه بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون آنها استفاده شد با توجه به قدرت تفکیک قابل قبول روش GPR و همچنین سرعت زیاد و سهولت برداشت، می‌توان گفت که روش GPR در بررسی و آشکارسازی اهداف زیرسطحی کم عمق مشابه حفره‌های زیرسطحی قنات‌ها و اهداف دیگری که ثابت دی الکتریک متفاوتی با محیط اطراف خود دارند، روش مناسبی است در این راستا می‌توان با استفاده از روش GPR و با تفسیر مقاطع رسم شده در محیط به شدت شکستگی‌ها، درز و شکاف، گسلها، زون های خرد شده و ... پی برد و با وجود رفلکتورهای قوی لایه‌های دارای تراکم بالا را شناسایی کرد و همانطور که در تفسیر ذکر شد با اعمال فیلترها، در نهایت به بررسی لایه‌ها پرداخته شد و محل و عمق ناپیوستگی‌ها تعیین و از این رو لایه‌های دارای تراکم بالا که برای کیفیت سنگ ساختمانی و همگنی بلوک‌ها حائز اهمیت است، مشخص گردید.

۴. منابع

[1]. Sonkamble, Sahebrao, and Subash Chandra. "GPR for earth and environmental applications: Case studies from India." *Journal of Applied Geophysics* 193 (2021): 104422.

[۲]. احمدی، ر. (۱۳۹۷). کنترل کیفیت بلوک های سنگ ساختمانی با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR). زمین شناسی مهندسی، ج ۱۲ ش ۱، ص ۱-۲۶.

[3]. Annan, A. P. "Electromagnetic principles of ground penetrating radar." *Ground penetrating radar: theory and applications* 1 (2009): 1-37.

[4]. Olhoeft, Gary R. "Selected bibliography on ground penetrating radar." *1st EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. European Association of Geoscientists & Engineers, 1988.

کاهش همبستگی پارامترهای مدل GEMTip با استفاده از روابط لگاریتمی

پرنیان جوادى شريف ۱، عليرضا عرب اميرى ۲، بهزاد تخم چى ۳، فریدون شريفى ۴

۱ دانشجو دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ javadisharifparnian@gmail.com

۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ alirezaarabamiri@yahoo.com

۳ دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ behzadtokhmechi@yahoo.com

۴ Post Doctoral Researcher, [University of Cologne](mailto:sharifi.sena@gmail.com)، sharifi.sena@gmail.com

* نویسنده مسئول: عليرضا عرب اميرى

چکیده فارسی

روش مقاومت ویژه (CR) یا قطبش القایی طیفی (SIP) می‌تواند نوع کانی‌ها یا منابع قطبش القایی را با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی کانی‌ها یا ادخال‌های قابل قطبش تشخیص دهد. برای به دست آوردن خصوصیات فیزیکی از داده‌های SIP، تئوری محیط موثر قطبش القایی (GEMTip) بر روی داده‌ها اعمال شد. برای این منظور از روش‌های معکوس سازی مختلف استفاده می‌شود که این تکنیک‌ها محدودیت‌هایی مانند هزینه محاسباتی، خطی بودن و ابعاد مسئله دارند. در اینجا یک روش معکوس سازی مبتنی بر یادگیری عمیق (DL) از طریق شبکه عصبی کانولوشن (CNN) برای تخمین پارامترهای ادخال‌های قابل قطبش از داده‌های SIP پیشنهاد شده‌است. CNN با استفاده از ۲۰۰۰۰ مجموعه داده مصنوعی که با استفاده از مدل فوروارد GEMTip تولید شده بود آموزش داده شد. در حالی که شبکه DL غیر خطی بودن را در نظر می‌گیرد با استفاده از روش تبدیلات لگاریتمی آماده سازی بر روی مجموعه داده‌های مصنوعی انجام می‌شود تا بررسی شود که چگونه غیرخطی بودن و همبستگی می‌تواند بر نتیجه تأثیر بگذارد. بمنظور راستی آزمایشی شبکه آموزش دیده داده‌های Gravian برای بازیابی پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گرفتند که مقادیر بازیابی شده با توجه به نمونه‌های مورد استفاده عملکرد خوب مدل در بازیابی پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. رویکرد پیشنهادی پارامترها را در یک مرحله تخمین می‌زند و فرآیند معکوس-سازی را ساده و سریع می‌کند.

واژه‌های کلیدی: SIP، CNN، GEMTip، CLR، LOGRatio

Decrease of GEMTip relaxation model parameter correlation using LOG-ratio method

Parnian Javadisharif¹, Ali Reza Arab Amiri^{2*}, Behzad TokhmeChi³ and Fereydoun Sharifi⁴

¹Ph.D Candidate, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, javadisharifparnian@gmail.com

²associate professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, alirezaarabamiri@yahoo.com

³associate professor Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, behzadtokhmechi@yahoo.com

⁴Post Doctoral Researcher, [University of Cologne](mailto:sharifi.sena@gmail.com), sharifi.sena@gmail.com

ABSTRACT

The complex Resistivity (CR) or Spectral Induced Polarization (SIP) approach possesses the remarkable capability of differentiating between various minerals or identifying the sources of induced polarization through the utilization of the physical characteristics of minerals or polarizable

پارامترها اثر گذار است. بنابراین؛ استفاده از روش ها و محاسبات آماری و ریاضی مرسوم برای تفسیر داده ها در فضای اقلیدسی ممکن است منجر به نتایج گمراه کننده شود (xvi، xvi).

داده های SIP اطلاعاتی در خصوص ادخال های قطبش پذیر ارائه می دهد که بمنظور دستیابی به این جزئیات با برآزش داده ها به مدل های واهلش و حل مسئله معکوس بر اساس مدل واهلش انتخابی (داده های SIP ورودی و پارامترهای مدل خروجی) میسر می باشد. (ix) روش های معکوس سازی به دو دسته اصلی (۱) روش های قطعی و (۲) روش های احتمالی تقسیم می شوند. روش قطعی می تواند پارامترها را به سرعت تخمین بزند، اما مدل های اولیه متفاوت منجر به نتایج یکسانی می شود که ناشی از مسائل غیر یکتایی است. روش های احتمالی که غیرخطی بودن مسئله را در نظر می گیرند از نظر محاسباتی گران هستند (xvii). روش های معکوس سازی احتمالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) ساده سازی شدند و سپس مدل پیشرو با داده های آموزشی جایگزین شد. استفاده از یادگیری ماشینی (ML) زمان همگرایی الگوریتم را کاهش می دهد (xix). یادگیری عمیق (DL) یک روش ML است که تایید شده برای تجزیه و تحلیل داده ها زیاد است (xx). استراتژی معکوس سازی DL مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن (CNN) برای معکوس سازی داده های الکترومغناطیسی یک بعدی استفاده شده است (xxi, xviii).

در این مطالعه؛ ارتباط بین پارامترهای مدل واهلش GEMTip و تأثیر آن بر نتایج معکوس سازی و بکاگیری شبکه عصبی در معکوس سازی داده های SIP مورد بررسی قرار است. بنابراین؛ مجموعه ای از ۲۰۰۰۰ داده مصنوعی با استفاده از مدل پیشرو GEMTIP تولید شده و پس از اعمال نویز ۱ درصدی بصورت داده های نویزی و بدون نویز مورد استفاده قرار گرفته است. موضوع عدم یکتایی به عنوان نتیجه فضای سیمپلکس پارامترها در نظر گرفته می شود. تبدیل لگاریتمی برای تبدیل پارامترها از فضای سیمپلکس به فضای اقلیدسی مورد استفاده قرار گرفته. آموزش شبکه عصبی پیچشی (CNN) با استفاده از داده های آموزشی ساخته شده در مراحل قبل در حالت های مختلف نویزی و بدون نویز و همچنین تبدیل یافته لگاریتمی و تبدیل نیافته انجام گرفته است. با توجه به عملکرد شبکه آموزش دیده، بهترین شبکه آموزش دیده انتخاب و بازیابی پارامترهای مدل با استفاده از این شبکه انجام گرفته است. نتیجه نشان می دهد که تبدیل لگاریتمی باعث کاهش همبستگی غیرخطی بین پارامترها می شود. در اینجا کاربرد شبکه DL از طریق CNN برای انجام معکوس سازی داده های SIP و استخراج ویژگی ها و پارامترها از داده ها پیشنهاد شده است. همچنین با در نظر گرفتن همبستگی پارامترها، تبدیل لگاریتمی به عنوان یک راه حل ابتکاری برای این مشکل در نظر گرفته شده است.

روش تحقیق

قطبش القایی طیفی

در روش پلاریزاسیون القایی طیفی، در طیف وسیعی از فرکانس (۰.۰۰۱ تا ۴۱۰ هرتز)، دامنه و فاز (یا جزء واقعی و فرضی) مقاومت ویژه به عنوان تابعی از فرکانس اندازه گیری می شود. اندازه گیری این دو پارامتر امکان بررسی وابستگی فرکانس را با استفاده از یک مدل واهلش مناسب فراهم می کند و با استفاده از آن اطلاعات فیزیکی ارزشمندی در مورد ناهنجاری های سنگ و زیرسطح به دست می آید. در حضور اثر پلاریزاسیون القایی، پتانسیل اندازه گیری شده در حوزه فرکانس یک پارامتر مختلط است (کمنا ۲۰۰۰). مقاومت یک عدد مختلط به شکل معادله (۱) است.

$$1 \quad \rho(\omega) = \rho_{real}(\omega) + i\rho_{imag}(\omega)$$

مدل واهلش GEMTIP

مدل GEMTIP برای مقاومت موثر ρ_e مربوط به ترکیبات چند جزئی با دانه های کروی به شکل معادله (۳) خواهد بود (xxi).

$$3 \quad \rho_e = \rho_0 \left[1 + \sum_{l=1}^N \left[f_l m_l \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega t_l)^{c_l}} \right] \right] \right]^{-1}$$

جایی که:

$$4 \quad m_l = \frac{3(\rho_0 - \rho_1)}{(2\rho_1 + \rho_0)}, \tau = \left[\frac{a_l}{2\alpha_l} (2\rho_l + \rho_0) \right]^{\frac{1}{c_l}}$$

$$5 \quad e = \frac{a_x}{a_y}, \underline{a} = \frac{a_x + a_y + a_z}{3} = \frac{(2 * e + 1)a_y}{3}$$

در این معادلات ρ_0 مقاومت ماتریس، f_i درصد حجمی هر نوع دانه، m_i بارپذیری دانه ها، a_i اندازه متوسط دانه ها، α_i ضریب قطبش پذیری هر یک از دانه ها، τ_i ثابت زمانی و c_i وابستگی فرکانس هر دانه است (XXii, ix).

تبدیل لگاریتمی

در بسیاری از مسائل، فضای نمونه گیری شامل اجزایی است که همه یا بیشتر این اجزا داده های سیمپلکس هستند. فضای سیمپلکس به صورت معادله (۶) نشان داده می شود.

$$6 \quad S^d = \{(x_1, x_2, \dots, x_d) : x_i > 0 (i = 1, 2, \dots, d), (\sum_{\{(i=1)\}^d} x_i) < 1\}$$

در این مسائل، مفهوم استقلال نقش مهمی در تحلیل های آماری دارد. از آنجایی که کار با اجزای مستقل، اندازه گیری همبستگی و عدم وجود پارامترهای کلاس توزیع در فضای S^d توسط داده های سیمپلکس ضعیف است برای تجزیه و تحلیل آماری مناسب نیستند. آپچیسون مفاهیم استقلال را در فضای سیمپلکس به منظور ایجاد ارتباط بین مفاهیم موجود و ایجاد کلاس های پارامتریک جدید را ارائه کرد (xiii).

تبدیل لگاریتم ریشه مرکزی (CLR) برای نمونه X در فضای d بعدی در قالب معادله (۷) انجام می شود.

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_D)$$

$$= \left(\log \log \left(\frac{x_1}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}} \right), \log \log \left(\frac{x_2}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}} \right), \dots, \right.$$

$$\left. \log \log \left(\frac{x_D}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}} \right) \right)$$

جایی که y_i مقدار متغیر در سیستم معمولی است. که با استفاده از تبدیل لگاریتم ریشه مرکزی محاسبه شده اند. تبدیل CLR بدلیل مستقل در نظر گرفتن پارامترها و عدم تاثیر آنها بر هم در نظر گرفته می شود.

در این مطالعه برای انجام تبدیل های لگاریتمی، از CoDaPack (بسته R برای مطالعه و کار با داده های سیمپلکس) استفاده شده است.

شبکه عصبی کانولوشن (CNN)

عملکرد شبکه های عصبی تقلید از مغز انسان است و شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) نیز از این قاعده مستثنی نیست. این شبکه های عصبی با شبیه سازی نورون ها و لایه های پردازشی، جزئیات، رگرسیون و طبقه بندی را تجزیه و تحلیل می کنند. CNN از سه لایه مهم تشکیل شده است، (۱) لایه کانولوشن، (۲) لایه ادغام و (۳) لایه کاملاً متصل ($^{XXI V}$). لایه کانولوشن: این لایه ویژگی های ورودی را با استفاده از فیلترها استخراج می کند. این لایه از مفهوم فیلتر، مرحله و لایه تشکیل شده است. عملکرد فیلترها تشکیل یک جدول ویژگی با ضرب نقطه ای یک فیلتر انتخابی در داده ها است. فیلترها را کرنل (Kernel) یا تشخیص ویژگی نیز می نامند. در این لایه با توجه به نیاز فیلتر از فیلترهای مختلفی استفاده می شود و پس از اعمال فیلترها از تابع فعال ساز استفاده می شود. پرکاربردترین تابع فعال کننده تابع RELU (واحد خطی اصلاح شده) است. Steps: تعداد مراحل فیلتر را مشخص می کند و اندازه ماتریس خروجی را کاهش می دهد. هرچه تعداد مراحل بیشتر باشد، اندازه ماتریس ویژگی ها کوچکتر و دقت کمتری دارد. اما گام های بیشتر در مورد کاهش محاسبات در نظر گرفته می شود.

لایه بندی: به منظور دقت در داده کاوی و حذف افکت مرزی با توجه به نوع موضوع گفته می شود، این فرآیند افزودن مقدار صفر (صفر padding) و افزایش توجه به داده های اصلی است.

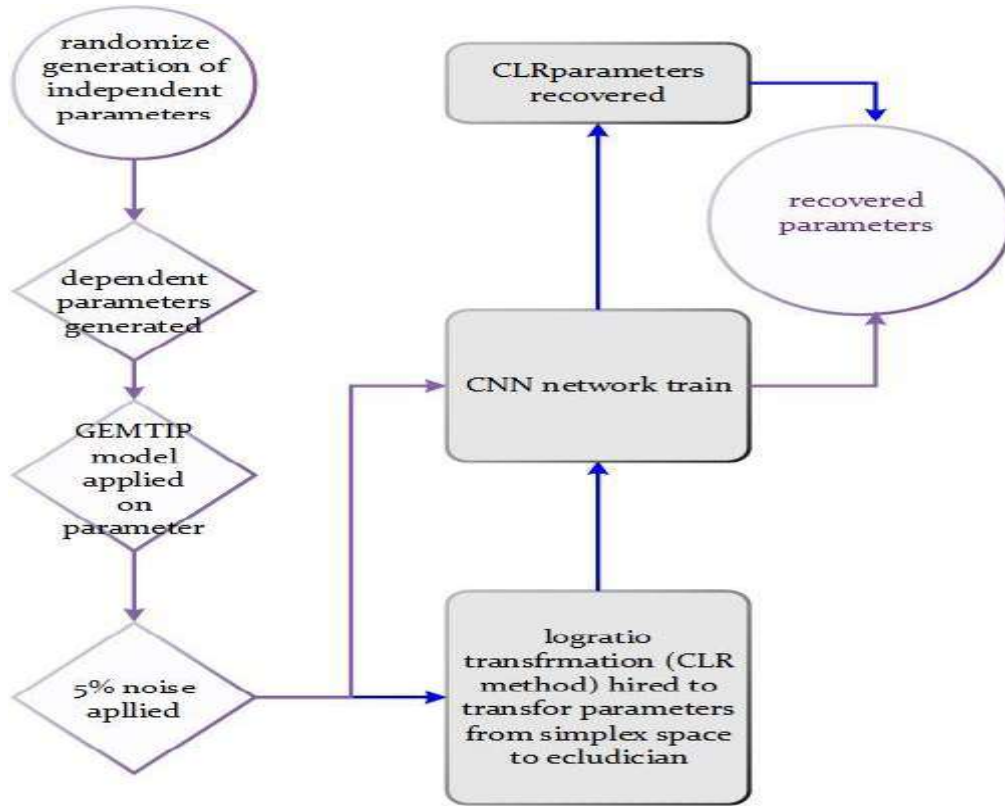
لایه pooling: در این لایه فیلتر روی جدول ویژگی اعمال می شود و مراحل به گونه ای انتخاب می شوند که هیچ همپوشانی نداشته باشد. این لایه باعث کاهش مرزها و افزایش سرعت کاهش حجم محاسبات و خلاصه ای از ویژگی های در نظر گرفته شده است. روش این لایه بر اساس حداکثر داده یا میانگین تجمیع (XXIV) است.

لایه های کاملاً متصل: برای اتصال خروجی به لایه های کاملاً متصل، فرآیند صاف کردن انجام می شود. بعد از این مرحله در مرحله بعد یک یا دو لایه کاملاً متصل به هم وصل می شوند. در نهایت خروجی کانولوشن بسته به نوع شبکه تعریف و طبقه بندی می شود و به لایه های کاملاً متصل وصل می شود تا مقدار خروجی مطابق با عملکرد فعالیت تولید شود و به این ترتیب شبکه آموزش داده می شود (XXIV).
(xviii).

محاسبات و نتایج

در این بخش، تولید داده های مصنوعی و پردازش این داده ها توضیح داده شده است. بر اساس مطالعات شبکه های عصبی حداقل به ۵۰۰۰ داده آموزشی نیاز دارند، در اینجا مجموعه ای از ۲۰۰۰۰ داده آموزشی استفاده شده است (XIX).

در این مجموعه داده، مقادیر پاسخ مدل در ۲۵ فرکانس به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته می شود. ۷۰ درصد از داده ها برای آموزش شبکه و ۳۰ درصد باقی مانده برای آزمایش (test) و اعتبارسنجی (validation) شبکه استفاده شد. این تقسیم داده ها از نظر فنی برای آموزش و بررسی عملکرد شبکه استفاده می شود.



شکل ۲ جریان نحوه اعمال روش ها بر روی داده ها

پردازش داده ها

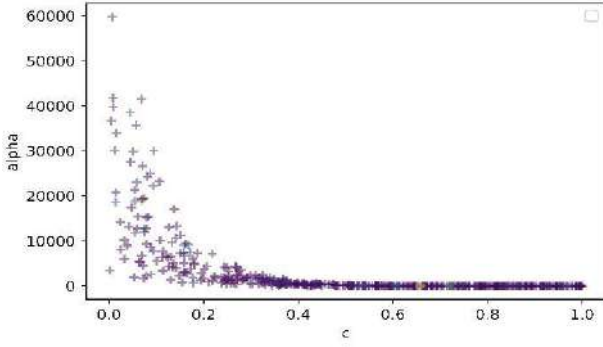
به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترها بر سایر پارامترها، جدول همبستگی پارامترها (جدول ۲) ارائه شده است. با توجه به مقادیر همبستگی جدول، اکثر پارامترها نسبت به سایر پارامترها مستقل هستند در حالی که شکل ۶ یک همبستگی غیرخطی بین این پارامترها را نشان می دهد. پانل ۱ ثابت زمانی در مقابل ضریب قطبش پذیری دانه ها را نشان می دهد. پانل ۲ ضریب قطبش پذیری دانه ها را در مقابل وابستگی فرکانس نشان می دهد. پانل ۳ ثابت زمانی در مقابل وابستگی فرکانس را نشان می دهد. پانل ۴ بیضی بودن را در مقابل اندازه متوسط دانه ها نشان می دهد. پانل ۵ ضریب قطبی پذیری دانه ها را در مقابل بارپذیری نشان می دهد. پانل ۶ وابستگی فرکانس را در مقابل قابلیت بار نشان می دهد. پانل ۷ مقاومت ماتریس را در مقابل ثابت زمانی نشان می دهد. همانطور که در تمامی این نمودارها قابل مشاهده است، رابطه بین پارامترها بصورت غیرخطی و محسوس مشاهده می شود.

جدول ۲ همبستگی بین پارامترها

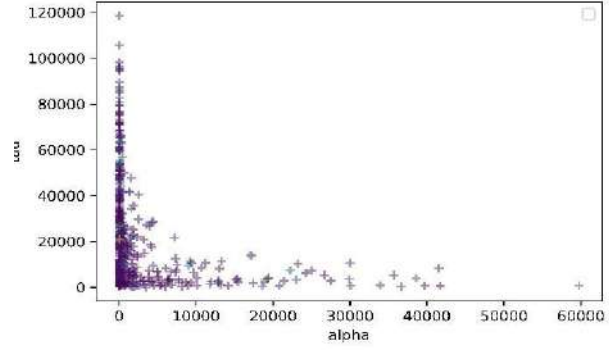
| | f | متر | ج | a1pha | تاو | Rho0 | Rhoi | آ | ه | |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| ه | 0.007 | -0.03 | 0.007 | -0.03 | -0.09 | 0.002 | 0.22 | -0.6 | 1 | ه |
| آ | -0.005 | 0.025 | -0.01 | 0.07 | 0.27 | 0.009 | -0.18 | 1 | -0.6 | آ |
| rhoi | -0.51 | -0.098 | 0.01 | -0.04 | -0.12 | -0.001 | 1 | -0.18 | 0.22 | rhoi |

| | | | | | | | | | |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| 0.0001 | 0.052 | 0.006 | 0.13 | 0.62 | 1 | -0.001 | 0.009 | 0.002 | Rho0 |
| -0.005 | 0.038 | 0.61 | -0.47 | 1 | 0.62 | -0.12 | 0.27 | -0.09 | تاو |
| 0.0095 | 0.006 | -0.98 | 1 | -0.47 | 0.13 | -0.04 | 0.07 | -0.03 | آلفا |
| -0.009 | 0.002 | 1 | -0.98 | 0.61 | 0.006 | 0.01 | -0.01 | 0.007 | ج |
| 0.043 | 1 | 0.002 | 0.006 | 0.038 | 0.052 | -0.098 | 0.025 | -0.03 | منز |
| 1 | 0.043 | -0.009 | 0.0095 | -0.005 | 0.0001 | -0.51 | -0.005 | 0.007 | f |

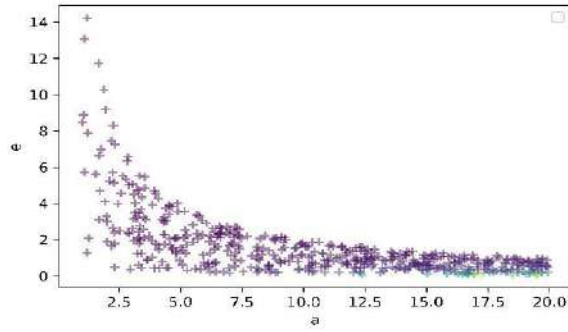
همچنین، همانطور که ادعا می شود، روش های آماری مرسوم برای فضای داده های سیمپلکس مناسب نیستند. بنابراین تبدیل CLR و تغییر فضای پارامترها باعث می شود که رابطه بین پارامترها نمایان شود.



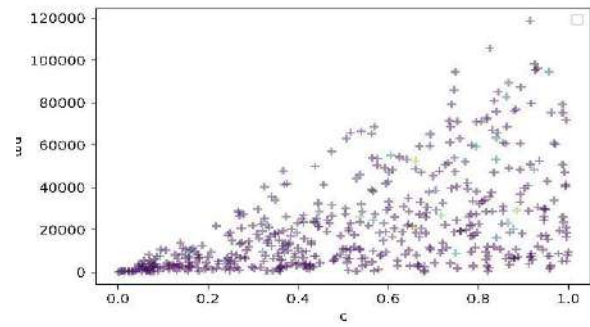
پانل ۲



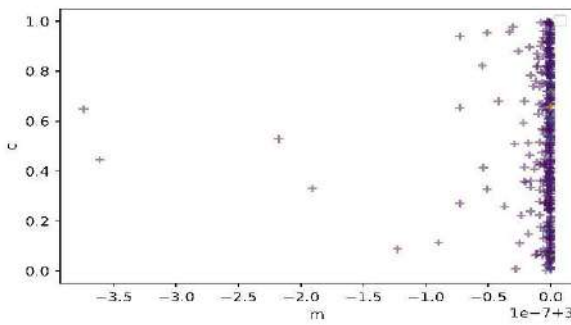
پانل ۱



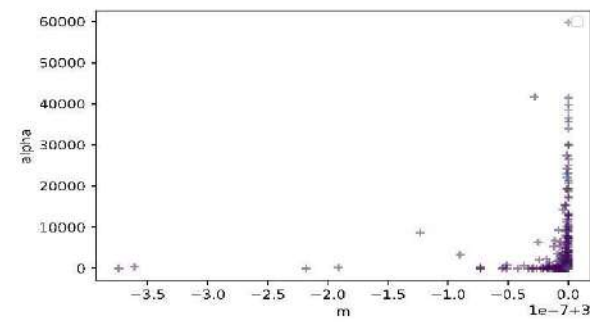
پانل ۴



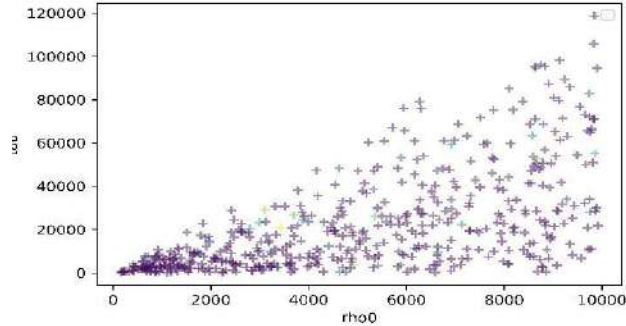
پانل ۳



پانل ۶



پانل ۵



پانل ۷

همبستگی پارامترهای مدل شکل ۷ پانل ۱ ثابت زمانی در مقابل ضریب قطبش پذیری دانه ها را نشان می دهد. پانل ۲ ضریب قطبش پذیری دانه ها را در مقابل وابستگی فرکانس نشان می دهد. پانل ۳ ثابت زمانی در مقابل وابستگی فرکانس را نشان می دهد. پانل ۴ بیضی بودن را در مقابل اندازه متوسط دانه ها نشان می دهد. پانل ۵ ضریب قطبی پذیری دانه ها را در مقابل بارپذیری نشان می دهد. پانل ۶ وابستگی فرکانس را در مقابل قابلیت بار نشان می دهد. پانل ۷ مقاومت ماتریس را در مقابل ثابت زمانی نشان می دهد.

تبدیل log-ratio

با در نظر گرفتن مسئله غیر همتابی در حل مسائل ژئوفیزیکی (Jackson and Matsu'Ura 1985) می توان استنباط کرد که مقادیر پارامترهای هر یک از این مدل ها یک سیستم بسته را تشکیل می دهند، به این معنی که این مقادیر نسبی هستند. بدین معنی که با حذف و یا اضافه شدن یک پارامتر تاثیر سایر پارامترها تغییر نمی کند. بنابراین، استفاده از روشها و محاسبات آماری و ریاضی مرسوم برای تفسیر داده های مرتبط در فضای هندسی اقلیدسی منجر به تولید نتایج اشتباه و گمراه کننده می شود (XXV). برای حل این مشکل، داده ها باید در فضای هندسی آپیسون بررسی شوند و با استفاده از عملگرها و توابع توسعه یافته در این فضا، یا با استفاده از تبدیل های لگاریتمی ریشه، مقادیر پارامترها را از سیمپلکس تبدیل کرده و بررسی در فضای اقلیدسی را امکان پذیر نمود. برای دستیابی به این هدف، با توجه به متعارف بودن راه حل دوم، از تبدیل لگاریتم ریشه استفاده می شود. برای آماده سازی پارامترها در این مرحله باید در نظر داشت که این مقادیر، نسبی هستند و جمع همه پارامترها مقدار ثابتی می شود (مثلاً ۱، ۱۰۰، ۱۰۶)، به عبارت دیگر، مجموع این ویژگی ها باید برابر با یک مقدار ثابت معین مانند ۱، ۱۰، ۱۰۰ یا... باشد. برای این منظور، تابع تبدیل زیر (معادله ۸) بر روی پارامترها اعمال می شود که جمع پارامترها را به مقدار ثابت نشان می دهد.

8

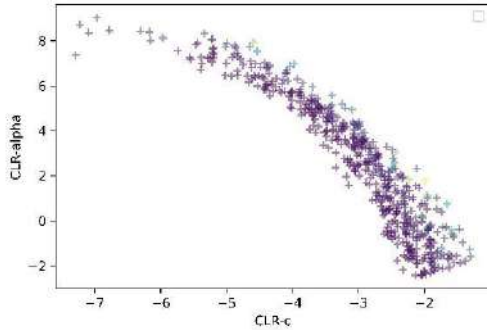
$$P_i = \frac{P_i}{\sum_{i \in N} P_i} * 100$$

در جایی که P_i پارامترهای مدل است، N تعداد کل پارامترها و P_i درصد هر مقدار پارامتر است.

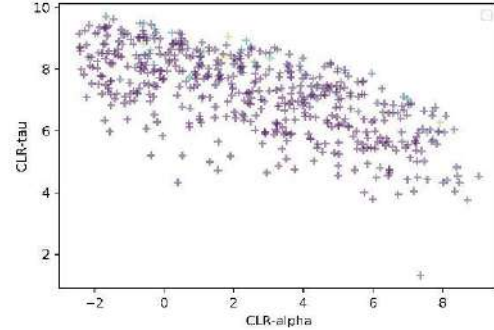
ماتریس همبستگی جدول بین پارامترهای تبدیل شده CLR^۳

| f | متر | ج | a1ph | تاو | Rho0 | Rhoi | آ | ه |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|---|
| | | | a | | | | | |
| -0.045 | -0.14 | 0.02 | -0.23 | -0.26 | -0.37 | 0.3 | -0.7 | 1 |

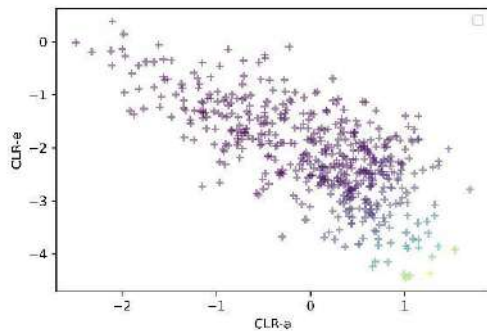
| | | | | | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|------|
| 0.16 | 0.52 | 0.19 | -0.079 | 0.23 | -0.09 | -0.23 | 1 | -0.7 | آ |
| -0.51 | -0.05 | 0.02 | -0.14 | -0.21 | -0.17 | 1 | -0.23 | 0.3 | rhoi |
| -0.13 | -0.4 | -0.043 | -0.1 | 0.57 | 1 | -0.17 | -0.09 | -0.37 | Rho0 |
| -0.04 | -0.11 | 0.68 | -0.67 | 1 | 0.57 | -0.21 | 0.23 | -0.26 | تاو |
| -0.12 | -0.42 | -0.9 | 1 | -0.67 | -0.1 | -0.14 | -0.079 | -0.23 | آلفا |
| 0.135 | 0.44 | 1 | -0.9 | 0.68 | -0.043 | 0.02 | 0.19 | 0.02 | ج |
| 0.31 | 1 | 0.44 | -0.42 | -0.11 | -0.4 | -0.05 | 0.52 | -0.14 | متر |
| 1 | 0.31 | 0.135 | -0.12 | -0.04 | -0.13 | -0.51 | 0.16 | -0.045 | f |



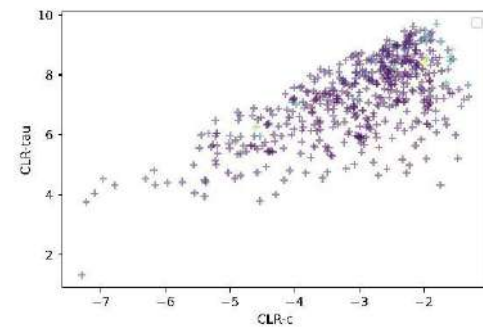
پانل ۹



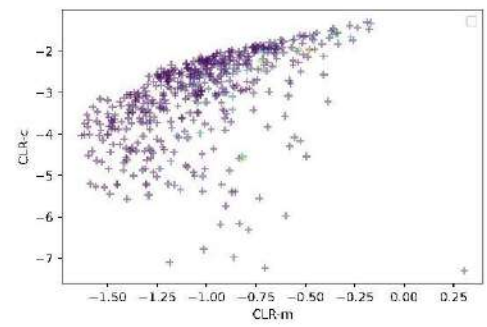
پانل ۸



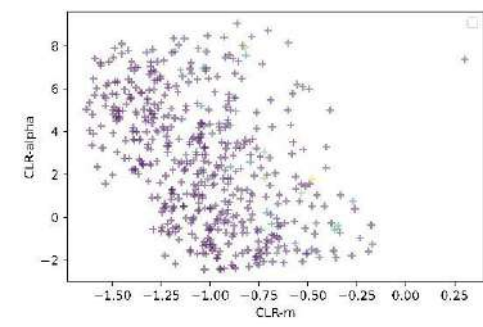
پانل ۱۱



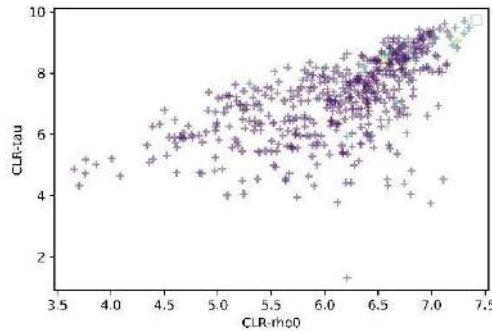
پانل ۱۰



پانل ۱۳



پانل ۱۲



پانل ۱۴

همبستگی پارامترهای مدل شکل ۱۰ پانل ۱ فرم CLR ثابت زمانی را در مقابل ضریب قطبی پذیری دانه ها از فرم CLR نشان می دهد. پانل ۲ ضریب قطبش پذیری دانه ها از فرم CLR در مقابل وابستگی فرکانس فرم CLR را نشان می دهد. پانل ۳ فرم CLR ثابت زمانی را در مقابل فرکانس وابستگی فرکانس نشان می دهد. پانل ۴ بیضی بودن فرم CLR را در مقابل اندازه متوسط دانه های فرم CLR نشان می دهد. پانل ۵ ضریب قطبی پذیری دانه های فرم CLR در مقابل بارپذیری فرم CLR را نشان می دهد. پانل ۶ وابستگی فرکانس فرم CLR در مقابل فرم CLR قابل بار را نشان می دهد. پانل ۷ مقاومت ماتریسی فرم CLR در مقابل فرم CLR ثابت زمانی را نشان می دهد.

جدول ۳ نتیجه تبدیل CLR را بر روی همبستگی پارامترها بین پارامترها نشان می دهد. تبدیل CLR فضای پارامترها را از سیمپلکس به اقلیدسی تبدیل می کند و با توجه به شکل ۷ با اعمال تبدیلات همبستگی بین پارامترها از حالت غیر خطی به فرم خطی تبدیل یافته است. پانل ۱ فرم CLR ثابت زمانی را در مقابل ضریب قطبی پذیری دانه ها از فرم CLR نشان می دهد. پانل ۲ ضریب قطبش پذیری دانه ها از فرم CLR در مقابل وابستگی فرکانس فرم CLR را نشان می دهد. پانل ۳ فرم CLR ثابت زمانی را در مقابل فرم CLR وابستگی فرکانس نشان می دهد. پانل ۴ بیضی بودن فرم CLR را در مقابل اندازه متوسط دانه های فرم CLR نشان می دهد. پانل ۵ ضریب قطبی پذیری دانه های فرم CLR در مقابل بارپذیری فرم CLR را نشان می دهد. پانل ۶ وابستگی فرکانس فرم CLR در مقابل فرم CLR قابل بار را نشان می دهد. پانل ۷ مقاومت ماتریسی فرم CLR در مقابل فرم CLR ثابت زمانی را نشان می دهد. که با توجه به این نمودار ها همبستگی از فرم غیر خطی به فرم خطی تبدیل یافته است.

معکوس سازی یادگیری عمیق

برای آموزش شبکه، از داده های مصنوعی که به صورت تصادفی تولید شده اند، استفاده شد. در مرحله پیش آموزش استانداردسازی هایی بر روی داده ها اعمال شده تا از bios بودن شبکه و آموزشها مطمئن باشیم. تعداد کل ۵۰۰۰ گام برای آماده سازی با استفاده از الگوریتم آدام در نظر گرفته شد (xxvi). الگوریتم آدام با نرخ مونتاژ سریع به طور کلی از نظر محاسباتی مؤثر بود (xxiv).

تابع هزینه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی حداقل مربعات کاهش یافته است. در مجموع ۵۰۰۰ تکرار با هدف بهینه سازی تابع هزینه سازی در نظر گرفته شده است و واحدهای اندازه گیری برای بررسی شبکه CNN با نام های MAE (میانگین مطلق خطا)، RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) در نظر گرفته شده است. این اندازه گیری مقادیر مدل (y mod) را با مقادیر مشاهده شده (y obs) با نقاط داده ۷ مقایسه می کند.

$$9 \quad MAE = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v |y_i^{obs} - y_i^{mod}|, RMSE = \sqrt{\frac{1}{v} \sum_{i=1}^v (y_i^{obs} - y_i^{mod})^2}$$

محاسبه متغیری به عنوان تابع هزینه در مرحله آموزش به ارزیابی و بررسی شبکه کمک می کند. نرخ یادگیری در واقع تعیین می کند که CNN با چه سرعتی برای حل مسئله آماده می شود. با توجه به این موضوع نرخ آموزش ناپایدار بیانگر ناکارآمدی شبکه می باشد. شکل ۱۱ نمودارها تابع هزینه را در مقابل تعداد تکرارها در مرحله آموزش نشان می دهند. خطوط قرمز و آبی به ترتیب مقدار اعتبارسنجی و آموزش را نشان می دهند.

مقایسه و بحث

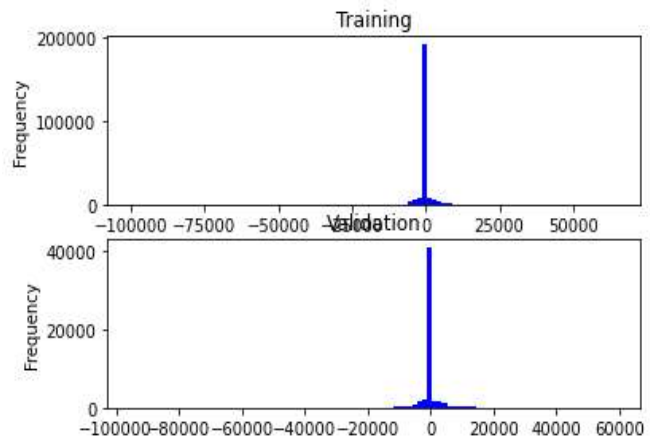
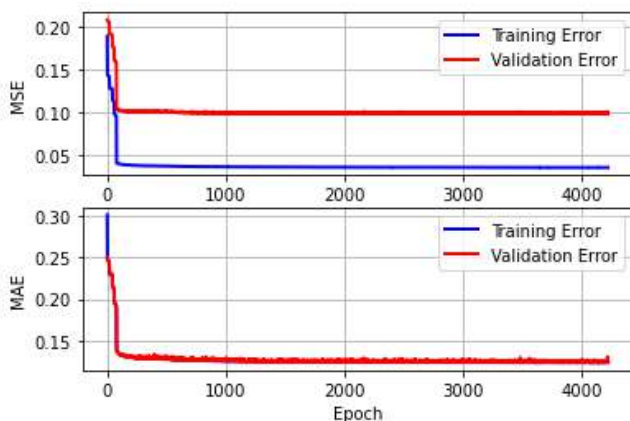
در مجموع ۲۰۰۰۰ داده مصنوعی با استفاده از مدل پیشرو GEMTIP ایجاد شد. ۷۰ درصد از این داده ها به عنوان داده های آموزشی و ۱۵ درصد به عنوان داده های آزمون و ۱۵ درصد بعنوان داده اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است.

بررسی همبستگی بین پارامترها در دو حالت داده های خام و داده های تبدیل یافته لگاریتمی (اعمال تبدیلات CLR) بیانگر تاثیر فضای سیمپلکس بر پارامترها می باشد که پس از اعمال تبدیلات لگاریتمی بررسی این پارامترها با در نظر گرفتن روابط اقلیدسی امکانپذیر می باشد. استفاده از فرم تبدیل یافته پارامترها و آموزش شبکه با این پارامترها، گام دیگری در دستیابی به پارامترهای اصلی را به مراحل معکوس سازی اضافه می کند تا مقادیر اصلی پارامترها محاسبه شود، در این مرحله با اضافه کردن یک مرحله آموزش دیگر (پارامترهای خام و پارامترهای تبدیل یافته لگاریتمی) محاسبه پارامترهای اصلی مدل امکانپذیر می شود.

شبکه CNN با یک معماری تک بعدی تعریف شده با در نظر گرفتن دو حالت داده (داده های اصلی و داده های تبدیل شده) آموزش دیده است.

بررسی تاثیر تبدیل لگاریتمی با در نظر گرفتن مقادیر MSE و MAE در تعداد تکرارها و هیستوگرام توزیع خطا اندازه گیری می شود.

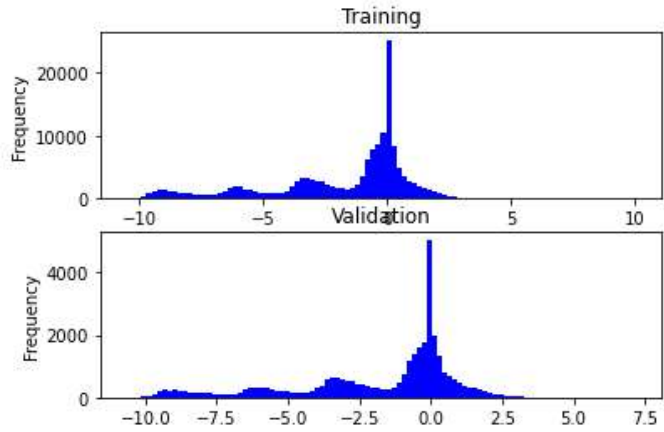
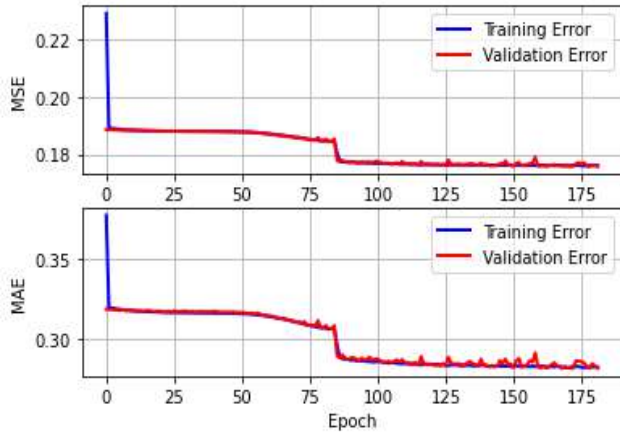
شکل ۱۱ هیستوگرام خطا را نشان می دهد. طبق این هیستوگرام، خطای آموزش و اعتبارسنجی زیاد است. شکل ۹ نتایج آموزش شبکه با داده های اصلی را نشان می دهد. مطابق شکل ۹، نرخ یادگیری شبکه کم است و زمان زیادی برای آموزش صرف شده است.



شکل ۱۲ عملکرد شبکه در طول آموزش با استفاده از RMSE (بالا). و معیارهای MAE (زیر) روی داده های اصلی. خطوط آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده خطای آموزش و اعتبارسنجی هستند.

شکل ۱۱ هیستوگرام خطاهای باقیمانده برای آموزش (بالا) و اعتبارسنجی (زیر) با استفاده از داده های اصلی

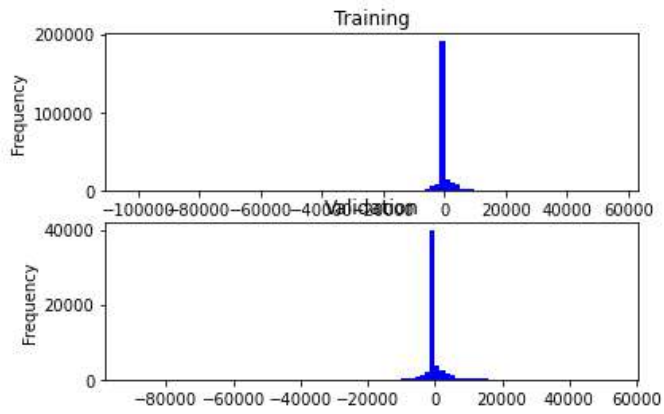
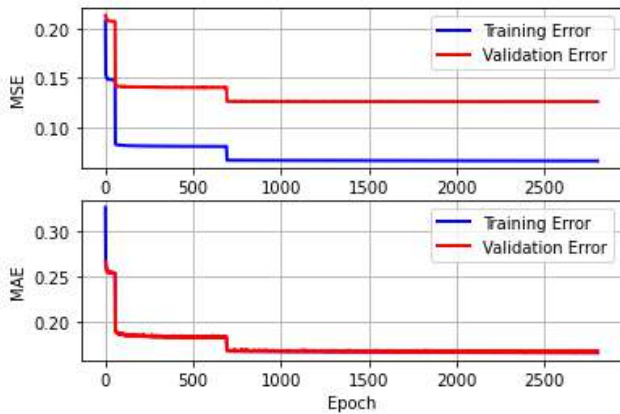
در آموزش شبکه با استفاده از داده های تبدیل شده CLR، شکل ۱۱، خطای آموزش در تعداد دفعات تکرار کمتر به یک مقدار پایدار رسیده است و همچنین توزیع خطا مطابق شکل ۱۰ کمتر از آموزش با داده های اصلی است.



شکل ۱۴ عملکرد شبکه در طول روش آموزش با استفاده از RMSE (بالا) و معیارهای MAE (زیر) روی داده های اصلی. خطوط آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده خطای آموزش و اعتبارسنجی هستند

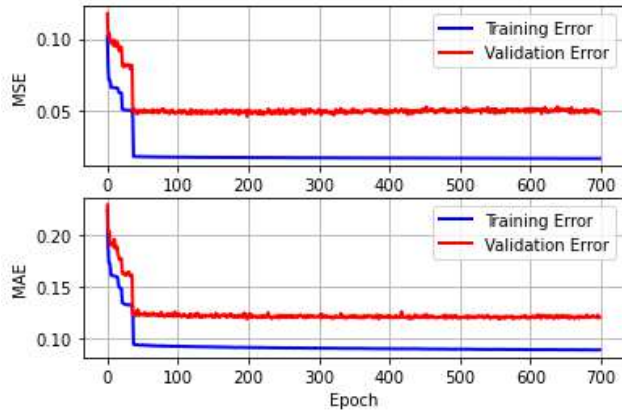
شکل ۱۳ هیستوگرام خطاهای باقیمانده برای آموزش (بالا) و اعتبارسنجی (زیر) با استفاده از داده های تبدیل شده CLR

با توجه به موارد ذکر شده، شبکه آموزش دیده با استفاده از داده های تبدیل شده برای بررسی داده های واقعی انتخاب شده است.

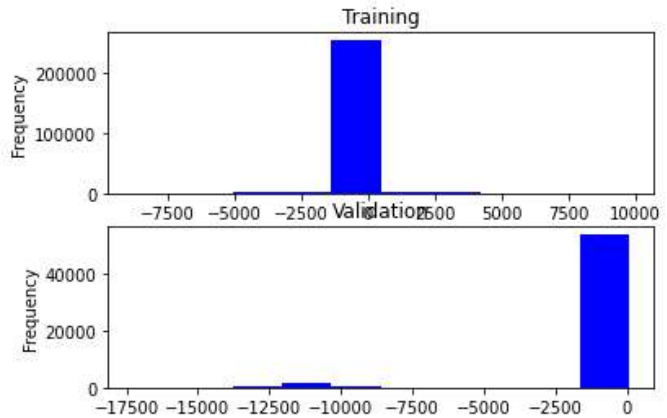


شکل ۱۴ عملکرد شبکه در طول روش آموزش با استفاده از RMSE (بالا) و معیارهای MAE (زیر) روی داده های اصلی. خطوط آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده خطای آموزش و اعتبارسنجی هستند

شکل ۱۳ هیستوگرام خطاهای باقیمانده برای آموزش (بالا) و اعتبارسنجی (زیر) با استفاده از داده های نویزی



شکل ۱۴ عملکرد شبکه در طول آموزش با استفاده از RMSE (بالا) و معیارهای MAE (زیر) روی داده های اصلی. خطوط آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده خطای آموزش و اعتبارسنجی هستند



شکل ۱۳ هیستوگرام خطاهای باقیمانده برای

آموزش (بالا) و اعتبارسنجی (زیر) با استفاده از داده های نویزی تبدیل شده CLR

بحث

استفاده از CNN در معکوس سازی با آموزش صحیح CNN همگام است، این روش هم برای مدلسازی و هم برای معکوس سازی داده ها و پارامترهای ژئوفیزیکی قابل استفاده است. در اینجا با هدف به دست آوردن پارامترهای مربوط به ضریب پلاریزاسیون القایی طیفی، شبکه برای معکوس سازی آموزش داده می شود و سپس برای بررسی عملکرد شبکه، پارامترهای مورد استفاده برای بازتولید پاسخ مدل مورد استفاده قرار می گیرد.

به طور کلی، آموزش شبکه بر اساس تعداد محدودی از عوامل قطبی است و این ساده سازی ها با هدف کاهش حجم محاسبات شبکه DL انجام می شود. از آنجایی که شبکه بر اساس ساده سازی ها آموزش داده می شود، این عامل بر فرآیند معکوس سازی تأثیر می گذارد و پارامترهای بازیابی شده به دنبال تعداد پارامترهای مورد استفاده در آموزش هستند.

از تبدیل های لگاریتمی برای تبدیل داده ها از فضای سیمپلکس به فضای اقلیدسی استفاده شده است و این امکان استفاده از داده ها را از طریق روش های آماری مرسوم فراهم می کند.

در روش DL با استفاده از CNN با توجه به ساختار شبکه و لایه های استفاده شده از پیچیدگی ورودی و خروجی شبکه می کاهد. همچنین قابل ذکر است که در مرحله آموزش شبکه نیازی به استفاده از تمامی مدل های ممکن نیست، بلکه بهتر است با داده های مناسب در محدوده مناسب پارامترهای مدل آموزش داده شود.

نتیجه

در این مقاله روش جدیدی برای معکوس کردن داده های SIP ارائه شده است. این روش پیاده سازی شبکه عصبی کانولوشن (CNN) بر روی داده ها است. در این پیاده سازی به منظور بررسی اثر فضای سیمپلکس و کاهش همبستگی پارامترها، تبدیلات لگاریتمی بر روی ورودی شبکه آموزشی انجام شده است.

این روش باعث صرفه جویی در زمان و کاهش حجم محاسبات می شود و نتایج معکوس سازی را در کوتاه ترین زمان ممکن ارائه می دهد. این قابلیت سریعتر از روشهای احتمالی و حتی روشهای مبتنی بر گرادینان است و فقط به مقدار زیادی ورودی نیاز دارد. همچنین شبکه آموزش دیده مقادیر پارامترهای مورد نظر را بدون هیچ گونه مداخله اولیه ارائه می دهد که از مشکل عدم یکتایی که در سایر روش های معکوس سازی کلاسیک رخ می دهد جلوگیری می کند. همچنین می توان از این روش در مطالعات ژئوفیزیکی و معکوس سازی ها استفاده زیادی کرد. استفاده از فرم تبدیل شده داده ها (CLR) باعث ایجاد مرحله معکوس سازی بیشتر برای تخمین پارامترهای مدل می شود.

مراجع

- [1] Goold, J. W., Cox, L. H., & Zhdanov, M. S. (2007). Spectral complex conductivity inversion of airborne electromagnetic data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007 (pp. 487-491). Society of Exploration Geophysicists.
- [1] Emond, A. M. (2007). Electromagnetic modeling of porphyry systems from the grain-scale to the deposit-scale using the generalized effective medium theory of induced polarization (Doctoral dissertation, Department of Geology and Geophysics, University of Utah).
- [1] Luo, Y., & Zhang, G. (1998). Theory and application of spectral induced polarization. Society of exploration geophysicists.
- [1] Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- [1] Sharifi, F., Arab Amiri, A. R., & Kamkar Rouhani, A. (2019). Using a combination of genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm for GEMTIP modeling of spectral-induced polarization data. *Journal of Mining and Environment*, 10(2), 493-505.
- [1] Kemna, A. (2000). Tomographic inversion of complex resistivity: Theory and application. Der Andere Verlag
- [1] Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., ... & Zimmermann, E. (2012). An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.
- [1] Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- [1] Zhdanov, M. (2008). Generalized effective-medium theory of induced polarization. *Geophysics*, 73(5), F197-F211.
- [1] Madsen, L. M., Fiandaca, G., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2017). Time-domain induced polarization—an analysis of Cole–Cole parameter resolution and correlation using Markov Chain Monte Carlo inversion. *Geophysical Journal International*, 211(3), 1341-1353.
- [1] Bérubé, C. L., Chouteau, M., Shamsipour, P., Enkin, R. J., & Olivo, G. R. (2017). Bayesian inference of spectral induced polarization parameters for laboratory complex resistivity measurements of rocks and soils. *Computers & Geosciences*, 105, 51-64.
- [1] Gurin, G., Ilyin, Y., Nilov, S., Ivanov, D., Kozlov, E., & Titov, K. (2018). Induced polarization of rocks containing pyrite: Interpretation based on X-ray computed tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 154, 50-63.
- [1] Fiandaca, G., Madsen, L. M., & Maurya, P. K. (2018). Re-parameterisations of the Cole–Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data. *Near Surface Geophysics*, 16(4), 385-399.
- [1] Ivanov, J., Miller, R. D., Xia, J., Steeples, D., & Park, C. B. (2005). The inverse problem of Refraction travel times, part I: Types of Geophysical Nonuniqueness through minimization. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 447-459.
- [1] Jackson, D. D., & Matsu'Ura, M. (1985). A Bayesian approach to nonlinear inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B1), 581-591.
- [1] Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 20(6), 621-632.
- [1] Egozcue, J. J., Pawłowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barcelo-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical geology*, 35(3), 279-300.
- [1] Moghadas, D. (2020). One-dimensional deep learning inversion of electromagnetic induction data using convolutional neural network. *Geophysical Journal International*, 222(1), 247-259.
- [1] Hansen, T. M., & Cordua, K. S. (2017). Efficient Monte Carlo sampling of inverse problems using a neural network-based forward—Applied to GPR crosshole traveltimes inversion. *Geophysical Journal International*, 211(3), 1524-1533.
- [1] Shahriari, M., Pardo, D., Kargaran, S., & Teijeiro, T. (2022). Automated machine learning for borehole resistivity measurements. *Cornell university*:2207.09849.
- [1] Chen, X., Xia, J., Pang, J., Zhou, C., & Mi, B. (2022). Deep learning inversion of Rayleigh-wave dispersion curves with geological constraints for near-surface investigations. *Geophysical Journal International*, 231(1), 1-14.

- [1] Zhdanov, M. S. (2009). New geophysical technique for mineral exploration and mineral discrimination based on electromagnetic methods. Univ. of Utah, Salt Lake City, UT (United States).
- [1] Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 44(2), 139-160.
- [1] Puzyrev, V. (2019). Deep learning electromagnetic inversion with convolutional neural networks. *Geophysical Journal International*, 218(2), 817-832.
- [1] Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 20(6), 621-632.

مغناطیس سنجی و اکتشاف زون کانی زایی

عبدالمجید فرخ پور^۱ محسن میرزایی ولدی^۲

۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز؛ Farrokhpourm3@gmail.com

۲ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، موسسه ژئوفیزیک؛ Mohsen.mirzaee@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: عبدالمجید فرخ پور

چکیده فارسی

استفاده از مغناطیس سنجی در اکتشاف ذخایر فلزی مانند سرب و روی بسیار موثر است. این روش با مقیاس های متفاوت با هدف شناسایی سنگهای میزبان، پی سنگ منطقه، وجود ساختارهای موثر و یا با هدف شناسایی زون های کانی سازی مورد استفاده قرار می گیرد. تلفیق اطلاعات مغناطیس سنجی با سایر روش های ژئوفیزیکی مانند پلاریزاسیون القایی در صورت وجود گالن و پیریت بسیار موثر بوده و از کارآمدترین روشهای ژئوفیزیک زمینی در اکتشاف سرب و روی است. در بسیاری از کانی سازی های تیپ اسکارن منیتیت به عنوان یک کانی غالب وجود دارد، بنابراین استفاده از روش مغناطیس سنجی برای تعیین مناطق اسکارنی موثر است. در این مقاله به عملیات مغناطیس سنجی با هدف شناسایی سنگهای میزبان و زون های با احتمال کانی زایی پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: مغناطیس سنجی، سرب، روی، زون کانی ساز

Abdolmajid Farrokhpour¹, Mohsen mirzaee valdi²

¹ Geophysics Ph.D Candidate , IAU Islamic Azad University/Central Tehran Faculty;
Farrokhpourm3@gmail.com

² Geophysics Ph.D Candidate, Tehran University/ Geophysics Institute; Mohsen.mirzaee@ut.ac.ir

* Corresponding author: Abdolmajid Farrokhpour

ABSTRACT

The use of magnetometry in exploration of metal deposits such as lead and zinc is very effective. This method is used in different scales with the aim of identifying host rock, foundation stone, presence of effective structures or with the aim of identifying mineralization zones. The combination of magnetometry data with other geophysical methods such as inductive polarization in the form of galena and pyrite is very effective and is one of the most efficient methods in exploration of lead and zinc . In most of the mineralization of the magnetite - skarn type as a dominant mineral, therefore , the use of magnetic surveys with the aim of identifying the host rocks and mineralization potential zones are investigated . method is effective for determination of skarn zones .in this paper , magnetometry surveys with the aim of identifying the host rocks and mineralization potential zones are investigated.

.Keywords: Magnetometry, lead, zinc, mineralization

در مغناطیس سنجی بر اساس خواص مغناطیسی بر خی سنگ ها و کانی ها پی جویی و اکتشاف دنبال می شود. [۱] در محدوده های معدنی متشکل از کانی های فلزی می توان در ابتدا با این روش محدوده معدنی با احتمال حضور آنومالی مغناطیسی را بررسی کرد و سپس با یک روش ژئوفیزیکی دیگر مانند قطبش القایی و مقاوت ویژه اکتشاف را تکمیل نمود. سنگ های مغناطیسی غالباً پلاریزاسیون خود را از میدان مغناطیسی زمین کسب می نمایند، ولی در برخی مواقع نادر مغناطیسی شدن سنگها از نوع القائی بوده و جهت و مقدار آن تماماً توسط جهت و میدان مغناطیسی وقت زمین تعیین می شود. [۲] زمانی که میدان مغناطیسی زمین تغییر کند این نوع مغناطیسی شدن نیز تغییر خواهد کرد. علاوه براین برخی دیگر از سنگ ها از خود مغناطیس باقیمانده نشان می دهند که مربوط به میدان مغناطیسی فعلی زمین نبوده، بلکه مربوط به میدان مغناطیسی گذشته زمین می باشد. اگر سنگ ها از نوع آذرین باشند جهت مغناطیسی شدن همان جهت میدان وقت زمین خواهد بود. کانی های فرومگنتیک در سنگهای آذرین در هنگام سرد شدن ماگما و یا لاوا در دمایی پایین تر از نقطه کوری (Point Curie) گشتاورهای القائی خود را در جهت میدان مغناطیسی وقت زمین قرار می دهند و اگر جهت میدان زمین تغییر نماید جهت گشتاور مغناطیس باقیمانده همواره در همان جهت اولیه باقی خواهد ماند که به آن مغناطیس باقیمانده حرارتی (Thermoremanent Mag) می گویند. گاهی نیز مواد در محیط های رسوبی خواص مغناطیسی خود را در جهت گشتاور وقت زمین قرار داده و به همان صورت در داخل رسوبات باقی می مانند و بعد از تغییر جهت میدان زمین، گشتاور مغناطیس باقیمانده آنها همان جهت اولیه میدان زمین را نشان خواهند داد که در این حالت به آن مغناطیس باقیمانده حاصل از رسوبگذاری (Depositional Remanent Mag) می گویند. مغناطیسی شدن ثانویه هنگامی پیش می آید که کانیهای مغناطیسی اولیه در اثر دباژنر و یا دگرگونی تبلور و رشد مجدد حاصل کرده و جهت مغناطیسی جدیدی برای خود اختیار نموده که همان جهت مغناطیسی وقت زمین میباشد. در این حالت به آن مغناطیس باقیمانده شیمیایی (Chemical Remanent Mag) می گویند.

۲- تئوری و روش تحقیق

کانی ها و ذرات باردار متحرک در هنگام حرکت در اطراف خود میدان مغناطیسی بوجود می آورند. برای مثال اگر جریان الکتریسیته به شدت I در داخل یک حلقه برقرارگردد سبب ایجاد دو قطبی مغناطیسی درحلقه خواهد شد. اگر حلقه دو قطبی بتواند آزادانه در فضا حرکت کند یک سطح آن به سمت قطب شمال و سطح مقابل آن در جهت قطب جنوب زمین قرار خواهد گرفت. [۳] حال اگر در داخل یک حلقه مشابه دیگر جریانی در جهت مخالف و با همان شدت عبور دهیم بلافاصله یک دوقطبی بوجود می آید منتها جای قطبها عوض خواهد شد. اتمها و یونها نیز حاوی حلقه هایی هستند که در داخل آنها ذرات باردار با سرعت زیاد حرکت می کنند. بطور کلی حلقه ها ی مغناطیسی متأثر از عوامل زیر هستند:

۱- حرکت گردشی و چرخشی پروتون ها در داخل هسته اتم ها

۲- حرکت گردشی و چرخشی الکترون ها در داخل اوربیتالها

از آنجائیکه در یک اوربیتال پر، دو الکترون در خلاف جهت یکدیگر گردش و چرخش می کنند، اثر مغناطیسی آنها خنثی میشود. از اینرو گشتاور مغناطیسی یک اتم متناسب با تعداد اوربیتالهای نیمه پر آنها میباشد. بر این اساس می توان کانی ها را به سه دسته تقسیم کرد.

۲-۱- کانی های دیا مگنتیک

کانی هایی که اتم ها و یون های آنها فاقد اوربیتال نیمه پر می باشند که توسط آهن ربا دفع می شوند. در این صورت به آنها کانی های دیا مگنتیک می گویند. رانده شدن این کانیها در میدان مغناطیسی خارجی را می توان چنین توضیح داد: وجود اوربیتال پر سبب میشود که گشتاور مغناطیسی در کانی صفر شود. [۱] اوربیتال را میتوان شبیه یک حلقه دانست که در هنگام نزدیک شدن به یک میدان

مغناطیسی خارجی، سرعت یکی از الکترونها زیاد و سرعت دیگری کاسته خواهد شد، به طوری که مجموع گشتاور مغناطیسی آن ها صفر نشده و گشتاور ایجاد شده در جهت مخالف میدان خارجی عمل کرده و سبب رانش کانی میشود.

۲-۲-کانی های پارامگنتیک

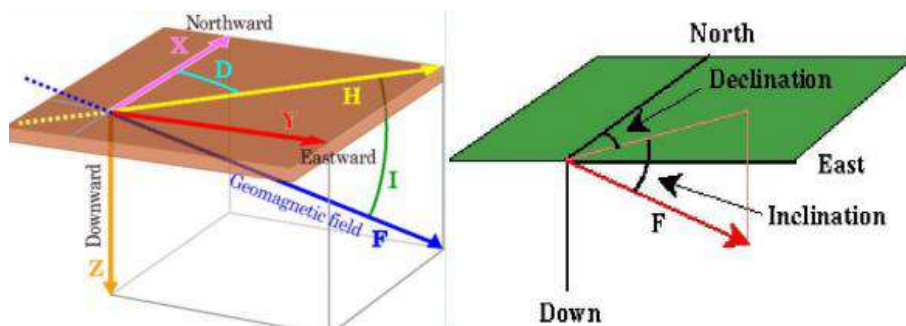
این دسته از کانی ها حاوی اوربیتال های نیمه پر می باشند، ولی گشتاور حاصل از آن ها به طور نامنظم در امتدادهای مختلف قرار گرفته اند و در نتیجه اثر مغناطیسی آنها تقریباً خنثی می شود و ظاهراً هیچ خاصیت مغناطیسی از خود نشان نمیدهند، ولی اگر این کانی ها در میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرند متناسب با شدت میدان خارجی، گشتاور میدان مغناطیسی القائی در کانی ایجاد خواهد شد. در نتیجه کانیهای پارامگنتیک به طور ضعیفی جذب میدان خارجی خواهند شد. هر چه شدت میدان خارجی بیشتر باشد شدت میدان القائی پارامگنتیک بیشتر خواهد شد.

۲-۳-کانی های فرومگنتیک

برخی از کانی ها اگر در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرند در آنها میدان مغناطیسی القائی شدیدی بوجود خواهد آمد که شدت آن میلیون ها بار بیشتر از کانیهای پارامگنتیک می باشد. به این کانیها فرومگنتیک می گویند.

۲-۴-عناصر مغناطیسی زمین

اگر یک سوزن مغناطیسی بتواند در حول یک محور از مرکز ثقلش در تمام جهات حرکت نماید می تواند خود را در هر نقطه از سطح زمین در امتداد میدان مغناطیسی زمین (B) قرار دهد. بردار مغناطیسی (B) را می توان به دو مؤلفه افقی (H) و مؤلفه قائم (Z) تجزیه نمود. زاویه بین بردارهای H و B را زاویه میل (Inclination) نامیده و آن را با I نشان می دهند. مؤلفه H را می توان به دو مؤلفه شرقی (Y) و شمالی (X) تجزیه نمود. زاویه بین X و H یا زاویه انحراف (Declination) را با حرف D نشان می دهند. [۳] در شکل زیر عناصر میدان مغناطیسی زمین بصورت شماتیک نشان داده شده است. شکل (۱)



شکل (۱): نمایی از عناصر میدان مغناطیسی زمین، زاویه انحراف و شیب میدان زمین

۵-تجهیزات مورد استفاده و نحوه برداشت های صحرائی

در این پژوهش پس از مشاهدات میدانی و در نظر گرفتن عوارض و رخنمون های سطحی و زمین شناسی پروفیل بندی و طراحی صورت گرفت. در واقع هدف از این مطالعه بررسی اولیه برای آشکار سازی محدوده و زونهایی با احتمال قوی حضور آنومالی بوده است. با توجه به توپوگرافی و وجود دره ها و تپه های متعدد و با تلفیق مشاهدات میدانی و اطلاعات مختلف زمین شناسی و تکتونیکی محدوده مناسب مشخص شد. قابل ذکر است برای دقت و حصول اطمینان بیشتر از اطلاعات دورسنجی نیز استفاده شده است.

در این مطالعه از دستگاه گرادایومتر مدل TG19-GSM ساخت کشور کانادا استفاده شده است.

از مهمترین مشخصات فنی این دستگاه می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- محدوده ثبت میدان مغناطیسی تا ۱۰۰۰۰۰ نانوتسلا

- دقت برداشت ۰.۵ ± نانوتسلا

- قدرت تفکیک ۰.۱ ±

- وزن تقریبی ۲ کیلوگرم

- دمای کارکرد ۰.۴- تا ۰.۵ درجه سانتیگراد

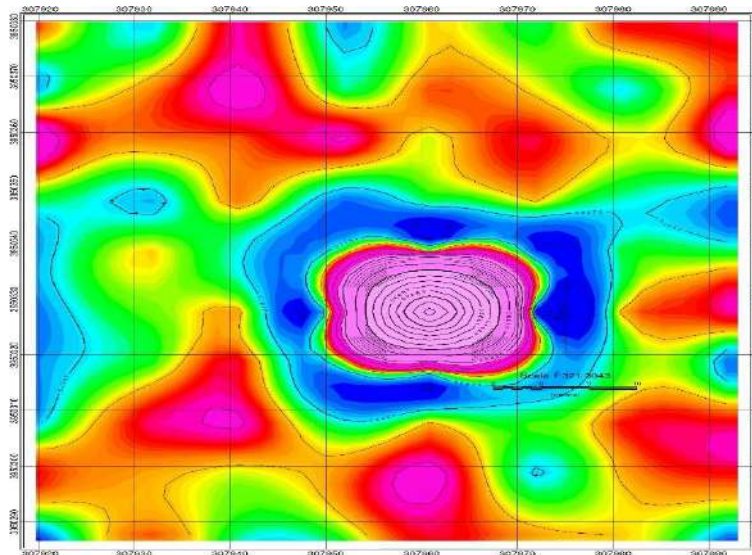
تغییرات میدان مغناطیسی زمین با طول و عرض جغرافیائی و زمان، توسط روابط محاسبات تجربی کاملی محاسبه شده است که تحت عنوان میدان های مرجع مغناطیسی بین المللی (IGRF) از آنها یاد می شود. این اطلاعات در به دست آوردن مقادیر میدان واقعی و تصحیحات ناحیه ای بسیار مناسب هستند. [۶] پارامترهای میدان مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مختصات یک نقطه از سیستم مرجع بدست آمده است. شکل (۲)

| ارتفاع متوسط (متر) | زاویه انحراف میدان زمین (درجه) | زاویه شیب میدان زمین (درجه) | شدت کلی میدان زمین (گاما) | نام پارامتر |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|
| ۹۶۰ | ۴،۲۲۰ | ۵۴،۹۷۸ | ۴۹۷۹۳ | مقدار در محدوده |

شکل (۲): پارامترهای میدان مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه

مطالعه مغناطیس سنجی با توجه به بررسی های سنجش از راه دور و شواهد سطح الرضی بر روی مناطق مستعد کانی زایی انجام شد. برداشت ها با توجه به وسعت منطقه، به صورت پیمایش انجام پذیرفت تا در صورت حصول نتایج دلخواه در ادامه به صورت شبکه بندی ادامه پیدا کند. عملیات برداشت های صحرائی در محدوده معدنی با استفاده از دستگاه گرادایومتر TG19-GSM ساخت شرکت SYSTEM GEM کانادا انجام شد. همچنین در زمان برداشت بمنظور ثبت مختصات مکانی نقاط برداشتی از یک GPS دستی (Garmin CSX60Map) استفاده گردید. جهت انجام محاسبات پردازشی و رسم نقشه های مربوطه، کلیه داده های برداشتی دستگاه و GPS به صورت منظم فایل بندی شد. در این مرحله، قرائتهای شبکه شامل شماره پروفیل، شماره ایستگاه، موقعیت بر حسب UTM، زمان و شدت کل میدان در یک بانک اطلاعاتی وارد شده است. نحوه ورود و فایل بندی اطلاعات به شکلی بوده تا قابل استفاده در برنامه های کامپیوتری برای پردازش و رسم نقشه ها باشد. برای پردازش داده ها، پس از آنکه تصحیحات مورد لزوم شامل تصحیحات

روزانه انجام شد، فایل داده های شبکه به نرم افزار GEOSOFT. OASIS MONTAJ وارد گردیده است. پس از پردازش های مربوطه، نتیجه برداشت های مگنتومتري و آنومالی ها به شکل زیر بدست آمده است. شکل (۳)



شکل (۳): نقشه شدت میدان مغناطیسی در محدوده معدنی

در شکل (۳) نقشه شدت میدان مغناطیسی با استفاده از مقادیر شدت میدان مغناطیسی کل اندازه گیری شده در محدوده آورده شده است. در بخشهای مختلف این نقشه تغییرات میدان مغناطیسی با مقادیر متفاوت بر حسب نانو تسلا ترسیم و جهت نمایش بهتر مناطق ایزومگنتیک در نقشه از مقیاس رنگی استفاده شده است. رنگ آبی میزان حداقل و رنگ قرمز میزان حداکثر تغییرات میدان مغناطیسی را که معمولاً ناشی از حضور کانیهای مغناطیسی میباشد، نشان میدهند. به عبارت دیگر شدت میدان مغناطیسی در بخشهای فاقد بی هنجاری، در رنج عددی حد زمینه قرار دارند. اما در بخشهای بی هنجار دوقطبی شدن میدان سبب ایجاد چنین اختلافی میگردد. به این مفهوم که بخشهای بی هنجار دارای بیشترین و کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی هستند که این تغییرات در رابطه با میزان مقدار کانیهای مغناطیسی و عمق آن متفاوت میباشد.

۶- نتیجه گیری

به منظور اکتشاف بخشهای دارای پتانسیل معدنی با کانی سازی احتمالی سرب و روی در منطقه مورد مطالعه عملیات مغناطیس سنجی صورت گرفت. با تلفیق نتایج مغناطیس سنجی و بررسی های سنجش از راه دور، زمین شناسی و شواهد سطح الارضی مناطق مستعد کانی زایی مشخص شدند. برداشت ها با توجه به وسعت منطقه، ابتدا به صورت پیمایش انجام پذیرفت و سپس با حصول نتایج دلخواه به صورت شبکه بندی ادامه پیدا کرد. مطالعه با استفاده از مدل نهایی حاصل از پردازش نرم افزارهای تخصصی دنبال شد و در نهایت مناطق امید بخش دارای پتانسیل احتمالی کانی زایی سرب و روی مشخص شدند.

۷-مراجع

- [۱]. تلفورد،ام. دبیلیو،جلوارت،ال.پی،شریف،ار.ای،.کیز،دی،۱۳۷۵،**ژئوفیزیک کاربردی** جلد دوم ، ترجمه: حاجب حسینی، ح.، زمردیان، ح.، انتشارات دانشگاه تهران
- [۲]. کالگری،ع.ا،۱۳۷۱،**اصول اکتشافات ژئوفیزیکی**، چاپ تابش 3-، بیاوری، م ۱۳۸۱،. تالیف: هارتمن،ه.، اصول مهندسی معدن، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران
- [۳]. رابینسون، ای. اس.و کورو، س.، ترجمه حیدریان شهری، م. ح.، ۱۳۸۴ **مبانی اکتشافات ژئوفیزیک**، چاپ دوم، دانشگاه فردوسی مشهد
- [۴]. قربانی، منصور،. تاجبخش، پیمان و خوئی، ناصر،. ۱۳۷۹ **کنسارهای سرب و روی در ایران**، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- [۵]. **گزارش اکتشافات ژئوفیزیک** در محدوده های زیارو، ده خطیب و الخی از توابع شهرستان خواف استان خراسان رضوی ، نگارنده :سیدابوالحسن رضوی،
- [6]. Parasnis, D.S; 1985, *Mining geophysics*, Elsevier Science Publisher
- [7]. Parasnis, D.S; 1986, *Principles of applied geophysics*, Chapman, Hall.

اولویت بندی لایه های اکتشافی در پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره

محمد حیاتی^۱، سیدمحمدرضا آب روشن^{۲*}

^۱ استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان؛ Hayati.m@lu.ac.ir
^{۲*} دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه کاشان؛ Mohammadrezaabroshan@grad.kashanu.ac.ir

چکیده

مهمترین مساله ای که مهندسين اکتشاف بعد از اطمینان از صحت و دقت برداشت های اکتشافی با روش های مختلف با آن روبرو هستند، کارایی روش اکتشافی داده ها برای هر منطقه معدنی خاص است. انتخاب مقدماتی مناطق امیدبخش، ریسک سرمایه گذاری را افزایش می دهد. اولویت بندی لایه های اکتشافی به منظور استفاده از نتایج آن در عملیات اکتشاف، به گونه ای که نتیجه بدست آمده قابل اطمینان و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد، یکی از چالش های مهم در اکتشاف مواد معدنی است. بدین منظور سعی می شود از روش های هوشمند و کارآمد برای ارزیابی کارایی لایه های اکتشافی در شناسایی مناطق مستعد استفاده شود. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از روش SAW به عنوان یکی از روش های تصمیم گیری چند شاخصه، ۴ لایه اکتشافی به عنوان گزینه های تصمیم بر اساس ۴ معیار دقت و قابلیت اطمینان نتایج، زمان و هزینه عملیات، تعداد داده ها و تفسیر نتایج با توجه به نظرات خبرگان و کارشناسان، به منظور پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی، اولویت بندی شوند. در ادامه پس از تعیین ماتریس تصمیم، لایه های اکتشافی اولویت بندی شدند و در نهایت لایه ژئوشیمی به عنوان مناسب ترین لایه اکتشافی برای پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی پیشنهاد شد.

واژه های کلیدی: تصمیم گیری چند معیاره، SAW، اولویت بندی لایه های اکتشافی، پتانسیل یابی مواد معدنی، کانسار سرب و روی اره گیجه رباط خمین

Prioritization of exploratory layers in the potential mapping of Robat-Arregijeh, Pb-Zn deposit, Khomein, Markazi province using multi-criteria decision-making

Mohammad Hayati¹, Mohammad Reza Abroshan^{2*}

¹ Assistant Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, Lorestan University, Hayati.m@lu.ac.ir

^{2*} PhD student in rock mechanics, Kashan University, Mohammadrezaabroshan@grad.kashanu.ac.ir

ABSTRACT

The most important problem that exploration engineers face is the efficiency of the exploration method for each specific mining area. Preliminary selection of promising areas increases investment risk. Prioritizing exploration layers in order to use its results in exploration operations, so that the obtained results are reliable and economically viable, is one of the important challenges in mineral exploration. For this purpose, it is tried to use smart and efficient methods to evaluate the effectiveness of exploration layers in identifying prone areas. In this research, it has been tried to use the SAW method as one of the multi-criteria decision making methods, 4 exploratory layers as

decision options based on 4 criteria of accuracy and reliability of results, time and cost of operation, number of data And the interpretation of the results should be prioritized according to the opinions of experts, in order to find potential mapping of Robat-Arregijeh, Pb-Zn deposit, Khomein, Markazi province. In the following, after determining the decision matrix, the exploratory layers were prioritized, and finally, the Geochemical layer was proposed as the most appropriate exploratory layer for finding the potential mapping of Robat-Arregijeh, Pb-Zn deposit.

Keywords: Multi criteria decision making, SAW, prioritization of exploration layers, Mineral potential mapping, Khomein-Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit

۱-مقدمه

در مرحله پی جویی معادن، با استفاده از اطلاعات لایه های اکتشافی دورسنجی، زمین شناسی، ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و ساختاری برای یافتن ماده معدنی مورد نظر، ابتدا باید بررسی کرد که محتمل ترین مکان برای تمرکز ماده مورد نظر کجاست و آن گاه در این محدوده، به جستجو پرداخت. به بیان دیگر، ابتدا باید ناحیه هایی را که احتمال وجود ماده معدنی در آن جا هست را مشخص کرد [۱]. هدف پی جویی تعیین محل ناهنجاری های مربوط به کانسارمی باشد، اما هدف اکتشاف تعیین حدود و ارزیابی آن ها است. از آنجا که امروزه اغلب کانسارها در سطح زمین و در معرض دید نیستند، روشهای جستجوی مستقیم باید با روش های غیر مستقیم تکمیل شوند [۲]. در این راستا استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره برای اولویت بندی نواحی مورد مطالعه و انتخاب گزینه های مناسب برای انجام عملیات اکتشافی می توان تا حد زیادی در هزینه، زمان و انرژی صرفه جویی کرد و از طرفی انتخاب بهتری انجام داد. در مطالعات اکتشافی، هدف اصلی یافتن کانسارهای معدنی جدید در محدوده مورد مطالعه است. یکی از مهمترین گام ها در اکتشاف کانسارهای معدنی مشخص کردن مناطق دارای پتانسیل (امیدبخش) است. در همین راستا، لایه های اطلاعاتی مکانی مختلف نظیر لایه های زمین شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ... از محدوده مورد مطالعه جمع آوری و پس از پردازش برای مدلسازی پتانسیل معدنی جهت یافتن مناطق امیدبخش با یکدیگر تلفیق می شوند. تحقیقات متعددی در خصوص اولویت بندی و انتخاب گزینه مناسب در حوزه های اکتشافی معادن صورت گرفته به طور مثال عابدی و همکاران از روش PROMETHEE برای اکتشاف مس استفاده کردند [۳]. پازند و هزارخانی منطقه بالقوه مس پورفیری را با استفاده از روش AHP-TOPSIS مطالعه کردند [۴]. ریاحی و همکاران جهت انتخاب مناطق امیدبخش مس پورفیری در شرق معدن مس سرچشمه از روش TOPSIS استفاده کردند [۵]. پهلوانی و همکاران برای پتانسیل یابی ماده معدنی از روش FAHP-FTOPSIS بهره جستند [۶]. در پژوهش حاضر برای کانسار سرب و روی رباط خمین به عنوان یکی از کانسارهای فلزی کوچک، چندین لایه اکتشافی، با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره SAW اولویت بندی شدند تا بهترین روش اکتشافی برای پتانسیل یابی منطقه معدنی مذکور استفاده شود. روش تصمیم گیری چند معیاره SAW توسط برخی از محققان مورد استفاده قرار گرفته است به عنوان مثال غریبی و طهری یک مدل تصمیم گیری به منظور مکان یابی کارخانه فراوری کرومیت در سیستان و بلوچستان را با روش SAW ارائه دادند [۷]. حیاتی و عطایی از روش SAW برای انتخاب ماشین حفاری مناسب برای معدن سنگ آهن سنگان استفاده کردند [۸].

۲-روش ها تحقیق

کانسار سرب و روی اره گیجه رباط در ۳۲ کیلومتری غرب و شمال غرب خمین و ۲ کیلومتری شمال روستای رباط قرار دارد. محدوده مورد مطالعه به صورت چند ضلعی نامنظمی است که سه کوه به نام های اره گیجه، تخت حسین و برآفتاب را در بر گرفته است.

به منظور تهیه لایه ژئوفیزیک، از داده های بارپذیری (IP) استفاده شده است. یکی از عوامل کنترل کننده کانی سازی در هر منطقه به ویژه در کانسارهای از نوع رگه ای و پرکننده فضاهای خالی، گسل های موجود در آن منطقه می باشند. که ممکن است کانی سازی در امتداد آن ها صورت گرفته باشد. در منطقه مورد مطالعه یکسری نمونه های سطحی از رخنمون ها و ترانشه ها برداشت شده و تجزیه

شیمیایی بر روی آن ها صورت گرفته است. با توجه به اهمیت داده های عیارسنجی، برای تهیه لایه ژئوشیمی منطقه، از تمام داده های عیارسنجی سطحی استفاده شد. زمین شناسی منطقه هم نقش مهمی در به وجود آمدن ماده معدنی دارد و شرایط تشکیل هر نوع ماده معدنی، به سنگ میزبان آن نیز بستگی دارد [۹].

یکی از روش های تصمیم گیری چند شاخصه تکنیک SAW می باشد که با محاسبه وزن شاخص ها (W) می توان به راحتی از این روش استفاده کرد. این روش برای اولین بار توسط کریمون در سال ۱۹۵۴ بیان شد. اصول مباحث پایه از چرچمن و آچوف در سال ۱۹۵۴ و کلی در سال ۱۹۷۱ گرفته شده است. برای استفاده از این روش طی مراحل زیر عمل می کنیم [۱۰].

گام اول: نرمال کردن ماتریس تصمیم گیری به روش تبدیل خطی. نحوه محاسبه معیار های مثبت و منفی به صورت زیر است:

$$(۱) r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\{x_{ij}\}}$$

$$(۲) r_{ij} = \frac{\min\{x_{ij}\}}{x_{ij}}$$

گام دوم: محاسبه امتیاز ها و مرتب کردن آن ها به صورت نزولی و تعیین اولویت ها

$$(۳) A^* = \left\{ A_i \max \sum_{j=1}^m W_j r_{ij} \right\}$$

در روش SAW مطلوبیت های محاسبه شده از ماتریس نرمال شده با هم جمع می شوند. چون همه از جنس مطلوبیت هستند پس جمع کردن آن ها مانعی ندارد.

۳- یافته ها

در این تحقیق به منظور اولویت بندی لایه های اکتشافی برای پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی ۴ روش کلی اکتشاف در منطقه طبق جدول ۱ انتخاب شدند. همچنین با مشورت از کارشناسان تخصصی ۴ معیار اصلی برای سنجش گزینه ها ارائه شده است.

جدول ۱: معیارهای مورد استفاده در اولویت بندی لایه های اکتشافی [۹]

| نماد | گزینه ها | نماد | معیارها |
|------|----------|------|----------------------------|
| A1 | بارپذیری | C1 | دقت و قابلیت اطمینان نتایج |
| A2 | گسل | C2 | زمان و هزینه عملیات |
| A3 | عیارسنجی | C3 | تعداد داده ها |
| A4 | لیتولوژی | C4 | تفسیر نتایج |

برای اولویت بندی لایه های اکتشافی، بر اساس نظر کارشناسان و همچنین مرور و بررسی تحقیقات قبلی پرسشنامه هایی تهیه شد. در ادامه با توزیع پرسشنامه ها بین کارشناسانی که در این زمینه دارای اطلاعات مناسب بودند بر اساس مقیاس ۹ کمیتی ساعتی مطابق جدول ۲ پرسشنامه ها تکمیل شدند.

جدول ۲: مقیاس ۹ کمیتی ساعتی برای امتیاز دهی به معیار ها

| تعریف | خیلی کم | کم | متوسط | زیاد | خیلی زیاد |
|--------|---------|----|-------|------|-----------|
| امتیاز | ۱ | ۳ | ۵ | ۷ | ۹ |

در ادامه ماتریس تصمیم مطابق جدول ۳ تشکیل و سپس با استفاده از روش بی مقیاس کردن خطی (روابط ۱ و ۲) بی مقیاس می شود. ماتریس تصمیم وزن دار از ضرب ضریب اهمیت هر شاخص در درایه های مربوط در ماتریس تصمیم بی مقیاس شده مطابق جدول ۴ به دست می آید. وزن نهایی گزینه ها از جمع سطرهای ماتریس تصمیم وزن دار حاصل می شود که نتایج به شرح جدول ۵ می باشد.

جدول ۳: ماتریس تصمیم (اولویت بندی لایه های اکتشافی با توجه به معیارها بر اساس نظر کارشناسان)

| | C4 | C3 | C2 | C1 | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| A1 | 10 | 9 | 5 | 10 | |
| A2 | 7 | 5 | 1 | 7 | |
| A3 | 9 | 10 | 9 | 10 | |
| A4 | 7 | 7 | 5 | 9 | |
| Wj | 1 | 0.9 | 0.5 | 1 | |

جدول ۴: ماتریس تصمیم وزن دار

| | C4 | C3 | C2 | C1 | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| A1 | 1 | 0.9 | 0.556 | 1 | |
| A2 | 0.7 | 0.5 | 0.111 | 0.7 | |
| A3 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | |
| A4 | 0.7 | 0.7 | 0.556 | 0.9 | |

جدول ۵: وزن نهایی گزینه ها

| A4 | A3 | A2 | A1 | گزینه |
|--------|-----|--------|--------|-----------|
| 2.5078 | 3.3 | 1.9056 | 3.0878 | وزن نهایی |

۴- نتیجه گیری

شناخت کامل یک کانسار مستلزم انجام یکسری عملیات برداشت داده با روش های مختلف ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، اطلاعات زمین شناسی و ... می باشد. برای پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین، از اطلاعات لایه های اکتشافی متفاوت می توان بهره جست. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از روش SAW به عنوان یکی از روش های تصمیم گیری چند شاخصه، ۴ لایه اکتشافی به عنوان گزینه های تصمیم بر اساس ۴ معیار دقت و قابلیت اطمینان نتایج، زمان و هزینه عملیات، تعداد داده ها و تفسیر نتایج با توجه به نظرات خبرگان و کارشناسان، اولویت بندی شوند. نتایج پژوهش حاکی از آن است که روش تصمیم گیری چند معیاره SAW با در نظر گرفتن تاثیر معیار های مختلف در اولویت بندی لایه های اکتشافی راهکار قابل قبولی برای یافتن مناسب ترین روش اکتشافی ذخایر معدنی باشد. در نهایت لایه ژئوشیمی به عنوان بهترین لایه اکتشافی برای پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی انتخاب شد.

مراجع

- [۱] Madani, S.H. "Mineral Exploration", *Publishing Company of textbooks (InPersian)*. 2011.
- [۲] Moon, C. J., Whateley, K.G. 2006. "Introduction to Mineral Exploration" *BLACKWELL PUBLISHING*. 2006.
- [۳] Abedi, M., Torabi, S.A., Norouzi, G.H., Hamzeh, M. and Elyasi, G.R., "PROMETHEE II: a knowledge-driven method for copper exploration". *Computers & Geosciences*, 46, pp.255-263. 2012.
- [۴] Pazand, K. and Hezarkhani, A., "Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahруд area (NW, Iran)". *Earth Science Informatics*, 8(1), pp.207-220. 2015.
- [۵] ریاحی، شکوه، فتحیان پور، نادر و طباطبایی، سیدحسن. ارائه روشی بر مبنای پهنه بندی فازی و تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس جهت انتخاب مناطق امیدبخش مس پورفیری در منطقه فلززایی شرق معدن مس سرچشمه. *زمین شناسی اقتصادی*. ۱۳۹۶.
- [۶] پهلوانی، پرهام، فراهانی، سلمان و بادپا، میعاد. پتانسیل یابی ماده معدنی گیلسونایت گیلانغرب تا قصر شیرین با مدل پیش بینی FAHP-FTOPSIS. *مهندسی منابع معدنی*، (۱)۷، ۱۹-۳۸. ۱۴۰۱.
- [۷] غریبی، خداکرم و طهری. *ارایه یک مدل ترکیبی تصمیم گیری به منظور مکان یابی کارخانه فرآوری کرومیت در استان سیستان و بلوچستان*. روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، (۱)۶، ۵۳-۶۳. ۱۳۹۵.
- [۸] حیاتی، محمد و عطایی، محمد. انتخاب ماشین حفاری مناسب با استفاده از روش های تصمیم گیری چندشاخصه، مطالعه ای موردی: معدن سنگ آهن سنگان. *مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن (ریاضی کاربردی)-دانشگاه آزاد لاهیجان*، ۱۰، (۲). ۱۳۹۲.
- [۹] احمدی، رضا، و افضل، نوشین. مدل سازی وارون داده های ژئوفیزیکی و پتانسیل یابی سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از تلفیق اطلاعات اکتشافی در سامانه اطلاعات مکانی (GIS). *یافته های نوین زمین شناسی کاربردی*، ۱۳(۲۵)، ۱۷-۳۲. ۱۳۹۸.
- [۱۰] C. Hwang, , K. Yoon, "Multiple attribute decision making methods and applications: a state of the art survey", New York: Verlag. 1981

بررسی کانی‌سازی آهن در محدوده توت اردکان یزد با استفاده از روش مگنتومتري

مجید کریمی^۱، کیوان خیر^{۲*}، عبدالحمید انصاری^۳، علی‌اکبر حسن‌نژاد^۴، قاسم عسکری^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه دامغان، Karimi1372.M@gmail.com

۲- دکتری اکتشاف معدن، شرکت کارآزما معدن زمین، k.khayer@shahroodut.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، h.ansari@yazd.ac.ir

۴- دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، hassannezhad@du.ac.ir

۵- استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، gh.askari@du.ac.ir

چکیده فارسی

با هدف بررسی وضعیت کانی‌زایی آهن در محدوده مورد مطالعه و همچنین شناسایی گسل‌های اصلی که ممکن است در امتداد آن‌ها کانی‌زایی صورت گرفته باشد، روش مگنتومتري به عنوان روش ژئوفیزیک اکتشافی در محدوده در نظر گرفته شد. به طور کلی در این محدوده سه بی‌هنجاری در شمال و جنوب غرب و جنوب شرق محدوده ثبت شده است که بر اساس پردازش‌های صورت گرفته، بی‌هنجاری ظاهر شده در شمال محدوده تا عمق حدود ۵۰ متری از سطح زمین ادامه یافته است و دو بی‌هنجاری دیگر احتمالاً تا عمق حدود ۸۰ الی ۱۰۰ متری از سطح زمین ادامه پیدا کرده‌اند که جهت اثبات این موضوع انجام حفاری‌های اکتشافی در نقاط پیشنهادی ارائه شده است. در تمامی گمانه‌های اکتشافی پیشنهاد شده، کانی‌زایی آهن تماماً قابل رویت است و سطح شروع کانی‌زایی و خاتمه آن با مدل‌های تهیه شده از داده‌های مگنتومتري تطابق بالایی دارد.

واژه‌های کلیدی: مگنتومتري، کانی‌زایی آهن، بی‌هنجاری، گسل، حفاری‌های اکتشافی

Investigating iron mineralization in Toot Ardakan area of Yazd using magnetometry method

M.Karimi, K.Khayer, A.Ansari, A.Hassan Nejad, Gh.Askari

¹Master's student in Economic Geology, Damghan University, Karimi1372.M@gmail.com

²PhD in mining exploration engineering, KarAzma Geo Mine, keyvan.khayer@gmail.com

³Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, h.ansari@yazd.ac.ir

⁴Associate Professor, Faculty of Geology, Damghan University, hassannezhad@du.ac.ir

⁵Assistant Professor, Faculty of Geology, Damghan University, gh.askari@du.ac.ir

ABSTRACT

With the aim of investigating the status of iron mineralization in the studied area and also identifying the main faults along which mineralization may have taken place, the magnetometry method was considered as an exploratory geophysical method in the area. In general, three anomalies have been recorded in the north, southwest and southeast of the range, and based on the processing, the anomaly

appeared in the north of the range has continued to a depth of about 50 meters from the surface of the earth. Two other anomalies have probably continued to a depth of about 80-100 meters from the surface of the earth, and in order to prove this, exploratory excavations have been proposed at the proposed points. In all the proposed exploratory boreholes, iron mineralization is fully visible, and the level of the beginning and end of mineralization is in high agreement with the models prepared from magnetometry data.

Keywords: Magnetometry, Iron mineralization, Anomaly, Fault, Exploratory drilling.

۱- مقدمه

ژئوفیزیک را می‌توان پلی میان فیزیک و زمین‌شناسی دانست، که از تکنیک‌ها، تئوری‌های ریاضیاتی و علوم کامپیوتر نیز بهره می‌گیرد [۱]. با بررسی داده‌های مغناطیس‌سنجی و پردازش آن‌ها می‌توان به نوع مواد در زیر سطح زمین پی برد [۲]. در اغلب اکتشافات جدید، ژئوفیزیک نقش مهمی به تصویر کشیدن ذخایر پنهان در عمق دارد [۳]. علمدار و همکاران با به کار بردن روش اویلر و سیگنال تحلیلی در سال ۱۳۹۱ عمق و مرز توده‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را در معدن سنگ آهن مرکزی مطالعه کردند [۴]. پیدایش سنگ‌های مغناطیس‌دار به ویژه مگنتیت، پی بردن به روند ساختارها و گسل‌ها و مشخص کردن منابعی که پنهان هستند و وسعت و شکل ظاهری آنها از مقصودهای اصلی به کار بردن این روش می‌باشد [۵]. روش مغناطیس‌سنجی اکتشافی یکی از زیرمجموعه‌های روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی است که بر مبنای میدان‌های فیزیکی طبیعی کره زمین استوار است. کره زمین یک ابر مغناطیس است که در پیرامون خود یک میدان مغناطیسی قوی ایجاد نموده است. میدان مغناطیسی زمین مانند تمام میدان‌های مغناطیسی دیگر یک کمیت برداری است و برای مطالعه این میدان می‌توان یک یا چند ویژگی آن را اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرارداد. برای اکتشاف توده‌های فرومغناطیس معمولاً شدت کل میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. سنگ‌های دارای کانی‌های با خودپذیری مغناطیسی متفاوت، در حضور میدان مغناطیسی زمین، مغناطیس القا شده از خود بروز می‌دهند و از روی همین خاصیت می‌توان توده‌های مغناطیسی زیر سطحی را به واسطه تغییرات ایجاد شده در میدان مغناطیس زمین اکتشاف نمود. روش مغناطیس‌سنجی در مقایسه با سایر روش‌های اکتشافی با صرف هزینه کمتر، یکی از روش‌های متداول در اکتشاف مواد معدنی به حساب می‌آید.

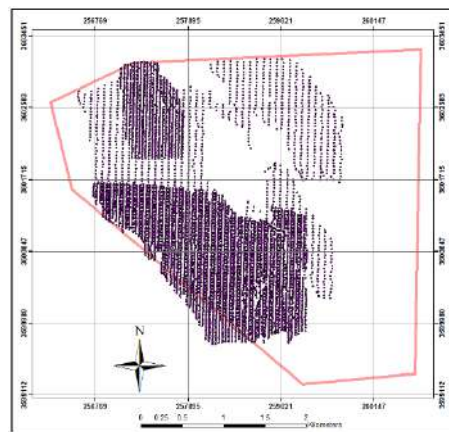
۲- روش تحقیق

روش مغناطیس‌سنجی اکتشافی یکی از زیرمجموعه‌های روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی است که بر مبنای میدان‌های فیزیکی طبیعی کره زمین استوار است. کره زمین یک ابر مغناطیس است که در پیرامون خود یک میدان مغناطیسی قوی ایجاد نموده است. میدان مغناطیسی زمین مانند تمام میدان‌های مغناطیسی دیگر یک کمیت برداری است و برای مطالعه این میدان می‌توان یک یا چند ویژگی آن را اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرارداد. برای اکتشاف توده‌های فرومغناطیس معمولاً شدت کل میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. سنگ‌های دارای کانی‌های با خودپذیری مغناطیسی متفاوت، در حضور میدان مغناطیسی زمین، مغناطیس القا شده از خود بروز می‌دهند و از روی همین خاصیت می‌توان توده‌های مغناطیسی زیر سطحی را به واسطه تغییرات ایجاد شده در میدان مغناطیس زمین اکتشاف نمود.

۳- یافته‌ها و تفسیر نتایج

شبکه برداشت اولیه طراحی شده در محدوده مورد مطالعه با ابعاد ۲۰*۴۰ متر می‌باشد به صورتی که فاصله پروفیل‌های برداشت ۴۰ متر و فاصله ایستگاه‌ها از یکدیگر ۲۰ متر می‌باشد. در حین برداشت بر اساس بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ثبت شده، در قسمت‌هایی که اختلاف

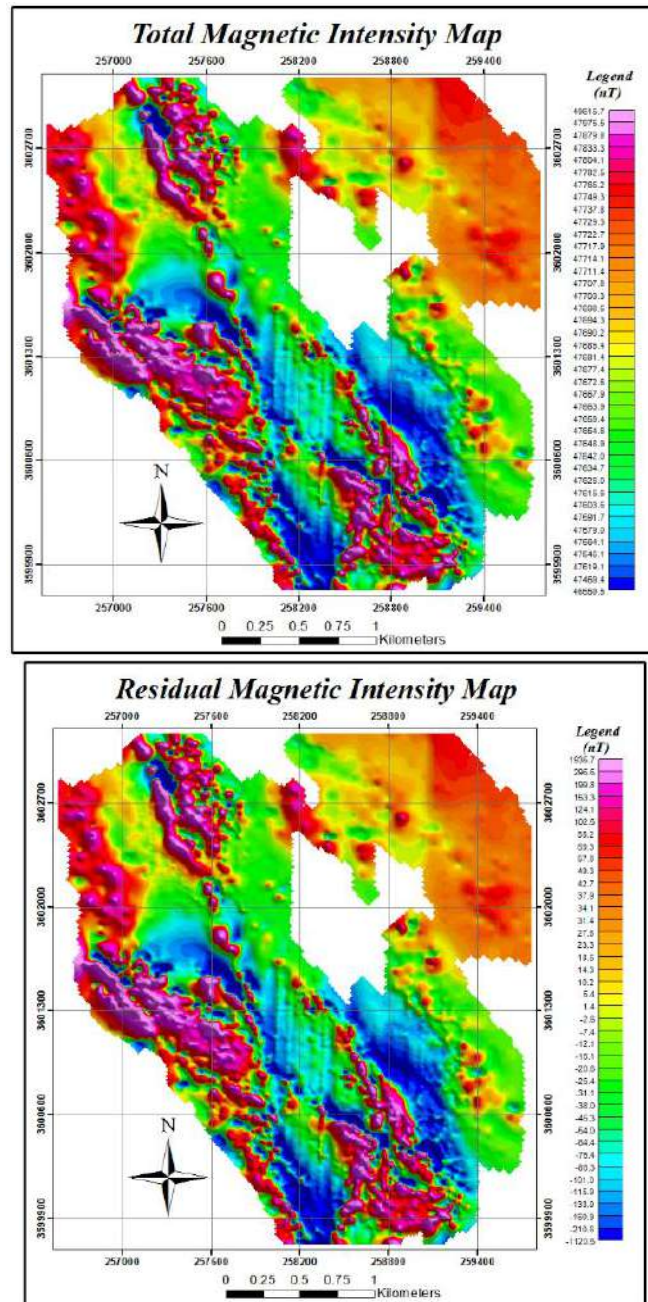
قطبین مغناطیسی افزایش پیدا کرد، شبکه برداشت به 20×10 متر تقلیل داده شد. بر این اساس در محدوده مورد مطالعه تعداد ۶۹۶۰ ایستگاه مگنتومتری برداشت گردید. برداشت‌های صورت گرفته توسط ۴ دستگاه صوت پذیرفت که سه دستگاه به صورت متحرک و یک دستگاه جهت ثبت تغییرات روزانه در ایستگاه مینا قرار داده شد. دستگاه‌های مگنتومتر استفاده شده برند GEM ساخت کشور کانادا و در مالکیت شرکت کارآزمای معدن زمین می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های برداشت شده، نسبت به محدوده ثبتي نمایش داده شده است. لازم به توضیح است در قسمت‌هایی از محدوده به دلیل شدت بالای توپوگرافی امکان برداشت داده وجود نداشت.



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های مگنتومتری برداشت شده نسبت به محدوده موردنظر.

۱-۳ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی و نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده

به کمک داده‌های برداشت شده، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی تهیه شد. تغییرات در این نقشه نشان‌دهنده برآیند میدان مغناطیسی اصل زمین و میدان‌های محلی ناشی از توده‌های مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه و یا حتی توده‌های نزدیک پیرامون آن است. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل تهیه شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. روند کلی دوقطبی مغناطیسی ثبت شده در این محدوده غالباً شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد که در قسمت‌هایی اختلاف دوقطبی مغناطیسی به حداکثر مقدار خود رسیده است. با توجه به نقشه شدت میدان مغناطیسی کل رسم شده، در این محدوده ۳ بی‌هنجاری در شمال غرب، مرکز و جنوب شرق محدوده ظاهر شده است که با توجه به شکل دوقطبی‌های ثبت شده می‌تواند مرتبط با کانی‌زایی آهن باشد. یکی از مهم‌ترین مراحل آشکارسازی بی‌هنجاری‌های محلی، حذف اثر زمینه و تهیه نقشه بی‌هنجاری باقیمانده است. جهت تهیه نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده، از مقادیر IGRF مربوط به محدوده مورد مطالعه استفاده می‌شود. مقدار IGRF در محدوده مورد مطالعه حدود 46950 نانوتسلا می‌باشد که این مقدار از مقادیر میدان مغناطیسی کل کسر و نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده تهیه شد. در شکل ۳ نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده نمایش داده شده است. مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که بی‌هنجاری مغناطیسی ظاهر شده در نقشه میدان کل، در نقشه بی‌هنجاری باقیمانده نیز بخوبی آشکار شده است.



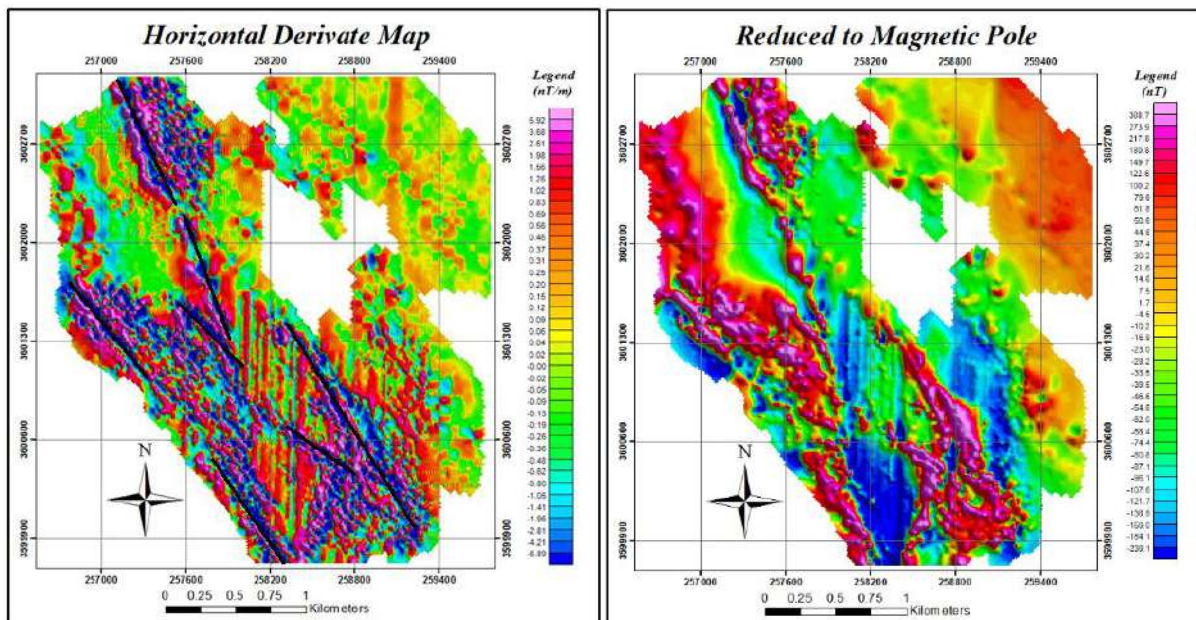
شکل (۳): نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده.

شکل (۲): نقشه شدت میدان مغناطیسی کل.

۳-۲ نقشه برگردان به قطب و نقشه گردان قائم

همان گونه که قبلاً اشاره شد، تمام بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به صورت دوقطبی هستند. میدان مغناطیسی خاصیت برداری دارد و اثر زاویه میل و انحراف مغناطیسی زمین باعث می‌شود که مقادیر ماکزیمم بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی کل دقیقاً منطبق بر توده مغناطیسی نباشد. جهت تصحیح این پارامترها از روش برگردان به قطب استفاده می‌شود با پردازش‌های ریاضی داده‌های ژئومغناطیسی می‌توان آن‌ها را به گونه‌ای ارائه نمود که به صورت تک‌قطبی درآیند. این پردازش را برگردان به قطب می‌گویند. در نقشه‌هایی که پس از فرایند تهیه می‌شوند، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به صورت تک‌قطبی آشکار خواهند شد. نقشه برگردان به قطب برای محدوده مورد مطالعه

تهیه و در شکل ۴ ارائه شده است. برتری مهم نقشه برگردان به قطب این است که محل توده بی‌هنجار در این نقشه به مراتب به محل واقعی آن‌ها نزدیک‌تر و دقیق‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بی‌هنجاری شناسایی شده در نقشه‌های قبلی در این نقشه به وضوح قابل رویت است. یکی از روش‌های حذف اثر ناحیه‌ای از داده‌های مگنتومتری، استفاده از گرادیان‌های قائم است. این عمل با مشتق‌گیری از داده‌ها در جهت قائم امکان‌پذیر است. این فرایند سبب آشکارسازی بهتر اثر توده‌های محلی در برابر عوامل ناحیه‌ای می‌شود. فرایند فوق در مورد داده‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه انجام و نقشه گرادیان اول در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود محدوده جانبی توده مولد بی‌هنجاری بهتر مشخص شده است. با توجه به شکل رسم شده روند گسل‌های اصلی در محدوده مورد مطالعه به خوبی قابل ملاحظه است که این گمان می‌رود کانی‌زایی احتمالی صورت گرفته در محدوده تحت تاثیر عملکرد این گسل‌ها می‌باشد.

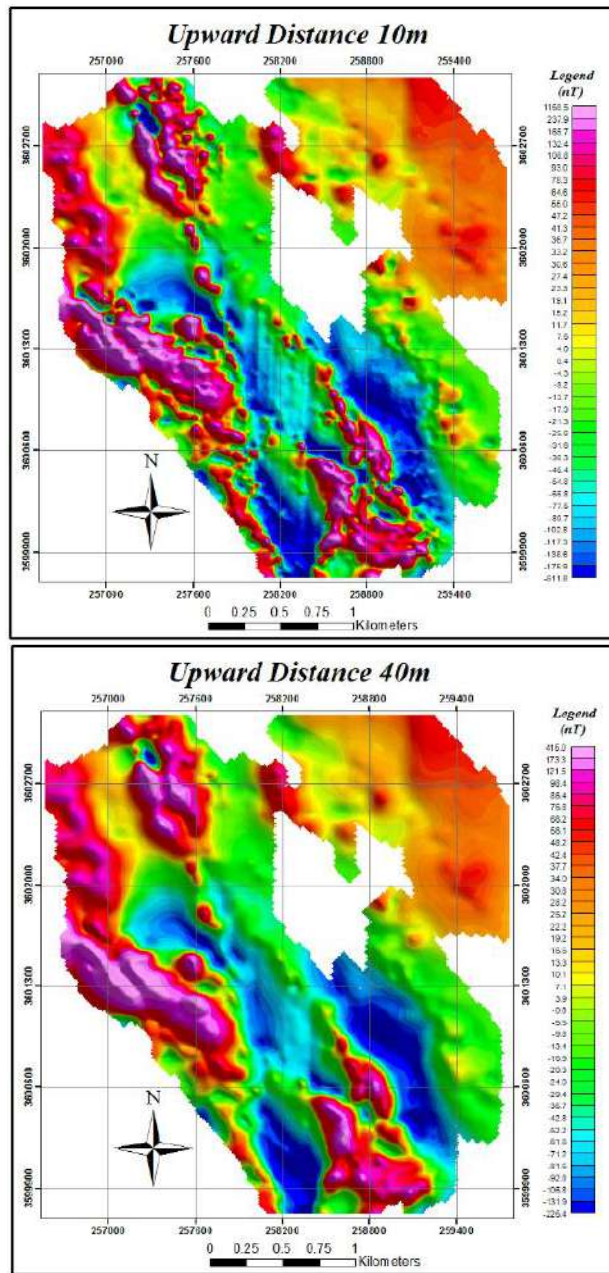


شکل (۵): نقشه گرادیان قائم.

شکل (۴): نقشه برگردان به قطب.

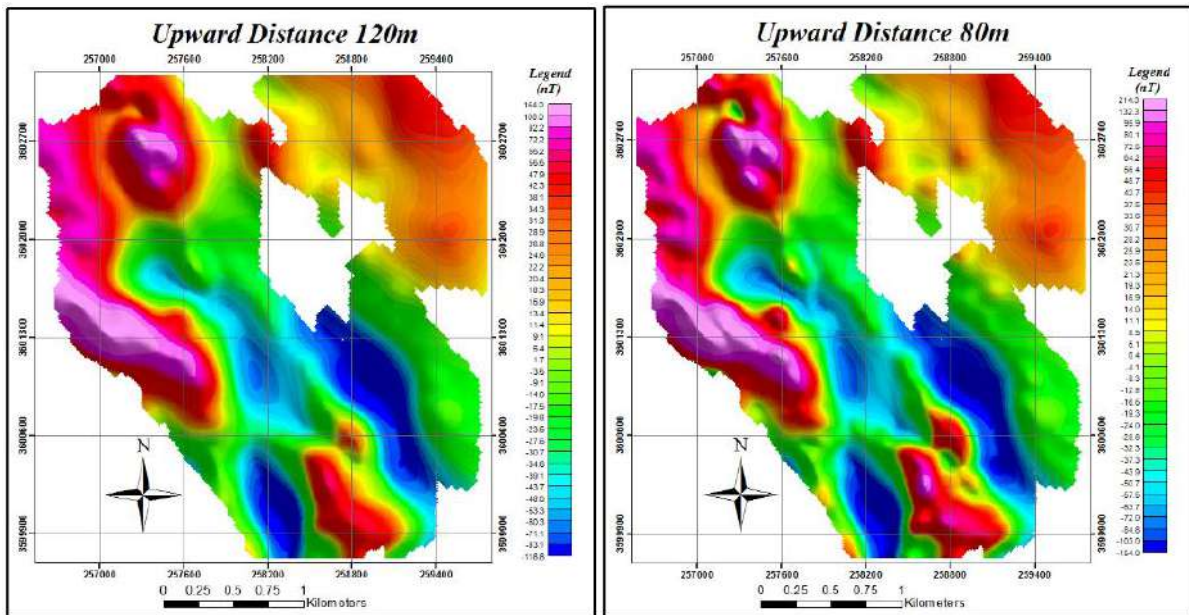
۳-۳ نقشه‌های ادامه فراسو

نقشه‌های ادامه فراسو باعث حذف اثر تغییرات توپوگرافی می‌شود. از سوی دیگر این عمل سبب حذف بی‌هنجاری‌های کوچک سطحی می‌شود و با استفاده از این پردازش می‌توان اطلاعاتی در مورد گسترش عمق توده‌های فرومغناطیسی به دست آورد. نقشه‌های ادامه فراسو برای محدوده مورد مطالعه تهیه شده است. نتایج حاصل از آن برای ارتفاعات بالای ۱۰ متر تا ۱۲۰ متر در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است. با توجه به نقشه‌های ادامه فراسو رسم شده به نظر می‌رسد حداکثر عمق آنومالی در بازه ۸۰ الی ۹۰ متری از سطح زمین می‌باشد. در نقشه ادامه فراسو ۱۲۰ متر روند ساختاری شمال غرب جنوب شرق به خوبی دیده می‌شود. همچنین بی‌هنجاری جنوب شرق همچنان به صورت دوقطبی باقیمانده است که نشان از عمیق بودن توده نفوذی در این بی‌هنجاری دارد.



شکل (۷): نقشه ادامه فراسو ۴۰ متر.

شکل (۶): نقشه ادامه فراسو ۱۰ متر.

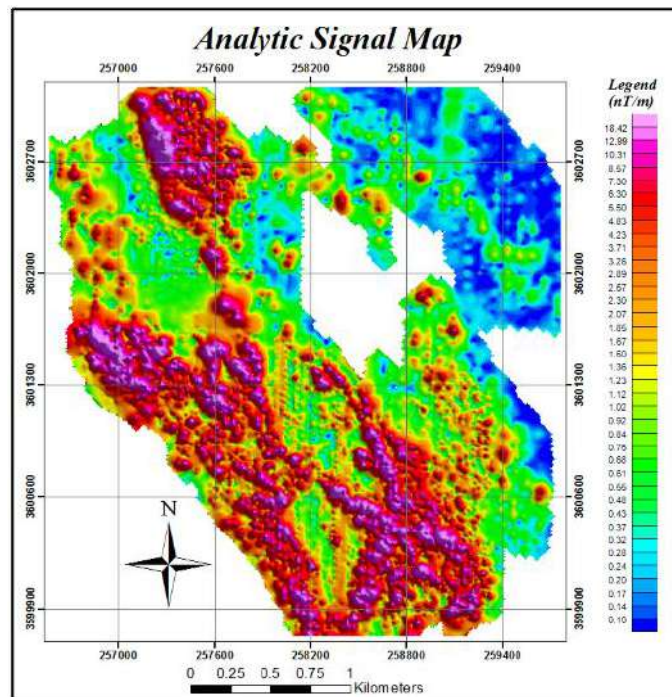


شکل (۹): نقشه ادامه فراسو ۱۲۰ متر.

شکل (۸): نقشه ادامه فراسو ۸۰ متر.

۴-۳ نقشه سیگنال تحلیلی

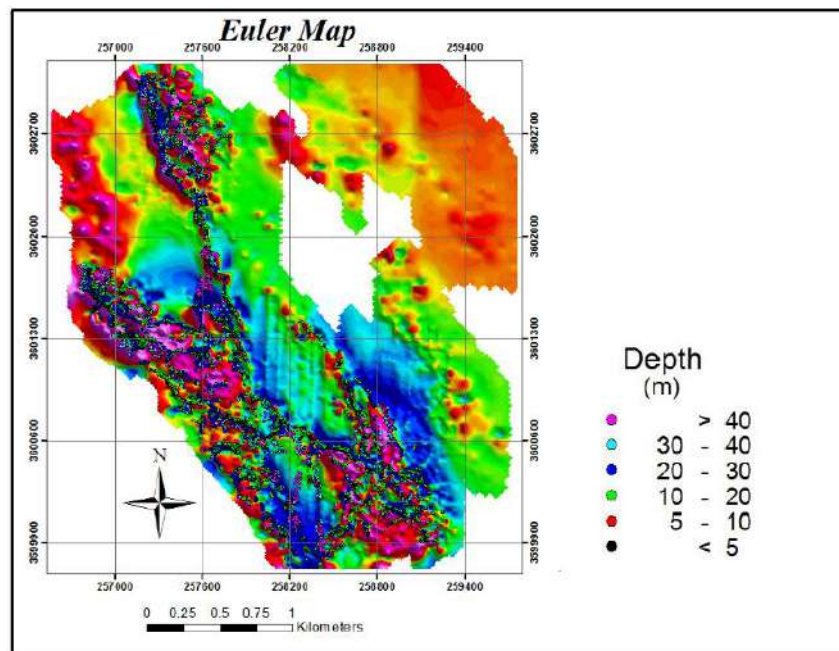
نقشه سیگنال تحلیلی برای محدوده مورد مطالعه تهیه و در شکل ۱۰ ارائه شده است. از این نقشه می‌توان برای تعیین مرز توده‌های فرومغناطیس با سنگ‌های درون‌گیر استفاده نمود. همانطور که در این نقشه مشاهده می‌شود، بی‌هنجاری‌های شناسایی شده در نقشه باقیمانده، در این نقشه نیز ظاهر شده است با این تفاوت که مرز دقیق هر بی‌هنجاری بهتر مشخص شده است و به شکل گسترش توده به خوبی تشخیص داده شده است.



شکل (۱۰): نقشه سیگنال تحلیلی.

۳-۵ تخمین عمق اوپلر

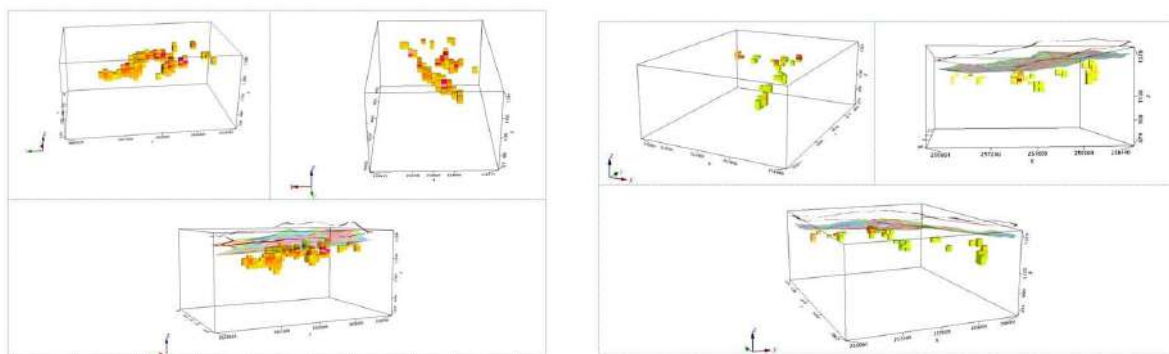
جهت تخمین عمق سطح شروع کانی‌زایی در بی‌هنجاری‌های شناسایی شده، از روش تخمین عمق اوپلر استفاده گردید. همان‌طور که در نقشه رسم شده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود عمق سطح شروع کانی‌زایی احتمالی در بی‌هنجاری مرکزی و شمال غرب، کمتر از ۱۰ متر و در بی‌هنجاری جنوب شرق ۱۰ الی ۲۰ متر قرار دارد.



شکل (۱۱): نقشه تخمین عمق اوپلر.

۳-۶ مدل‌سازی سه بعدی

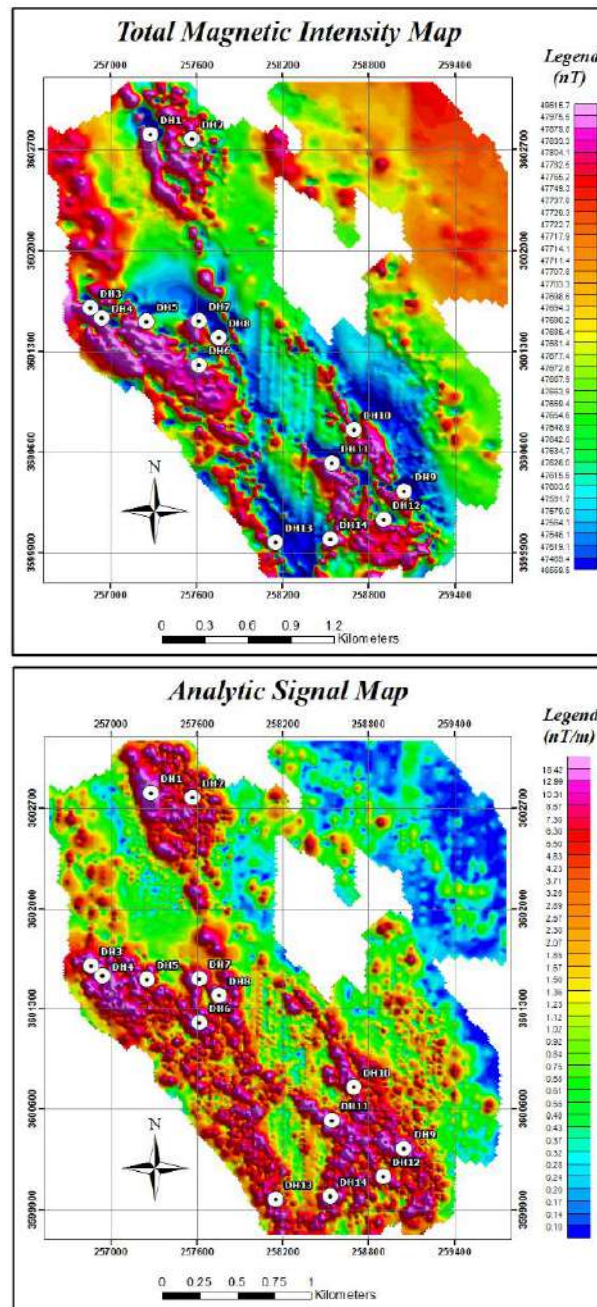
جهت مدل‌سازی سه‌بعدی شکل بی‌هنجاری‌های ظاهر شده از روش مدل‌سازی معکوس در نرم‌افزار ژئوسافت استفاده گردید. در مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته مقدار حد ضریب خودپذیری مغناطیسی ۰/۶ در واحد SI در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی صورت‌گرفته در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل (۱۲): نقشه‌های مدل‌سازی سه بعدی.

۴- نتیجه گیری

با هدف بررسی وضعیت کانی‌زایی آهن در محدوده مورد مطالعه و همچنین شناسایی گسل‌های اصلی که ممکن است در امتداد آن‌ها کانی‌زایی صورت گرفته باشد، روش مگنتومتري به عنوان روش ژئوفیزیک اکتشافی در محدوده در نظر گرفته شد. بر اساس پردازش‌های صورت گرفته، بی‌هنجاری ظاهر شده در شمال محدوده تا عمق حدود ۵۰ متری از سطح زمین ادامه یافته است و دو بی‌هنجاری دیگر احتمالاً تا عمق حدود ۸۰ الی ۱۰۰ متری از سطح زمین ادامه پیدا کرده‌اند که جهت اثبات این موضوع انجام حفاری‌های اکتشافی در نقاط پیشنهادی الزامی است. در شکل ۱۳ و ۱۴ موقعیت گمانه‌های حفاری اکتشافی پیشنهادی به ترتیب بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی کل و نقشه سیگنال تحلیلی رسم شده است.



شکل (۱۳): موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی کل
شکل (۱۴): موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی

در مرحله پایانی بر روی نقاط حفاری پیشنهاد شده حفاری اکتشافی مغزه گیری صورت گرفت. در پایان حفاری، عملیات لاگ نگاری مغزه‌های گرفته شده صورت پذیرفت. در تمامی گمانه‌های اکتشافی پیشنهاد شده، کانی‌زایی آهن تماماً قابل رویت است و سطح شروع کانی‌زایی و خاتمه آن با مدل‌های تهیه شده از داده‌های مگنتومترى تطابق بالایی دارد

مراجع

[1] Telford, O. G., Dalcanton, J. J., Williams, B. F., Bell, E. F., Dolphin, A. E., Durbin, M. J., & Choi, Y. (2020). Mass-to-light Ratios of Spatially Resolved Stellar Populations in M31. *The Astrophysical Journal*, 891(1), 32.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.[۲]

[۳] Bishop, J. R., & Lewis, R. J. G. (1992). Geophysical signatures of Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 87(3), 913-930.

[۴] علمدار، کمال، انصاری، عبدالحمید. برآورد مرز توده‌های مغناطیسی با استفاده از گرادیان افقی بی‌هنجاری شبه‌گرانی. فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، ۱۳۹۱

[۵] کریم پور، محمد حسین، ملک زاده شفارودی، آزاده، حیدریان شهری، محدرضا. **اکتشاف ذخایر معدنی**، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴. ۶۳۶.

آشکارسازی اثرات توپوگرافی در مدل سازی پیشرو داده های توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

مهدی فلاح صفری^۱، رضا قناتی^۲

۱ استادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، falahsafari@ut.ac.ir

۲ استادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، rghanati@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: مهدی فلاح صفری

چکیده

مقاطع حاصل از اندازه‌گیری‌های توپوگرافی الکتریکی متأثر از تباین خواص الکتریکی زون‌های زیر سطحی بوده، که همین موضوع باعث تفکیک آن‌ها از هم می‌شود. اما از دیگر مولفه‌های موثر در خروجی نهایی این مقاطع، می‌توان به وجود توپوگرافی اشاره کرد. از اینرو، بایستی آثار بوجود آمده در اثر توپوگرافی در روند وارون‌سازی لحاظ شود. این آثار ممکن است ناهنجاری‌های غیرواقعی را سبب شود. لذا در مقاله حاضر، جهت حل این مساله در گام نخست، این آثار در مدل‌سازی پیشرو آشکارسازی می‌شود. به این منظور، توپوگرافی با بهره‌گیری از تبدیل شواتز کریستوفر به محیط مسطح تبدیل شده و در ادامه مدل‌سازی پیشرو در محیط ۲/۵ بعدی با استفاده از روش تفاضلات محدود انجام شده است. آثار ناشی از توپوگرافی با اعمال روند ارائه شده مقاله در مدل‌سازی پیشرو بر مدل‌های مصنوعی بررسی گردید. نتایج مثال‌های عددی به وضوح اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر محاسباتی مقاومت ویژه الکتریکی در محیط‌های همگن ناهموار را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی، توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، مدل‌سازی پیشرو

Detection of topography effects in forward modeling of electrical resistivity tomography data

Mahdi Fallahsafari¹, and Reza Ghanati²

¹ Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, falahsafari@ut.ac.ir

² Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, rghanati@ut.ac.ir

* Corresponding author: Mahdi Fallahsafari

ABSTRACT

ERT data acquired from subsurface zones are influenced by variations in electrical properties, which can lead to their separation. Among the influential factors affecting the final ERT sections, topography plays a significant role. Consequently, the effects arising from topography need to be considered during the inversion process. These effects may cause non-uniform anomalies. Therefore, in this study, we address these effects in the forward modeling stage.

To achieve this, the topography is transformed into a flat environment using the Christopher-Shawatz transformation. Subsequently, forward modeling is performed in a 2.5D environment using the finite difference method. The impact of topographic effects is compared to artificial models in the inversion process. Numerical examples clearly demonstrate the discrepancies between actual and computed electrical resistivity values in homogenous.

Keywords: Electrical resistance tomography, Forward modelling, Topography.

مقدمه

روش توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) یک تکنیک ژئوفیزیکی است که به بررسی ساختارهای زیرسطحی در دو یا سه بعد می‌پردازد. این روش بر اساس تئوری جریان مستقیم الکتریکی انجام می‌شود و به طور گسترده در مسائل زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی روش ERT نسبت به روش‌های مرسوم و سنتی، بررسی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی هم به صورت جانبی (CST) و هم به صورت قائم (VES) در فضا می‌باشد. این روش به عنوان یک ابزار قدرتمند در اکتشاف ذخایر معدنی، بررسی‌های مهندسی و محیط زیست، و کاوش آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱،۲،۳،۴]. در روش ERT، با استفاده از تکنیک‌های دو بعدی و سه بعدی، تغییرات لیتولوژی زیرسطحی بر اساس تفاوت خواص الکتریکی آنها آشکارسازی می‌شود. دقت مدل‌سازی زمین ۲ و یا ۳ بعدی محاسبه شده از داده‌های صحرائی به شدت به محاسبات مدل‌سازی پیشرو در داخل الگوریتم وارون وابسته است [۵]. به علاوه، حتی اگر محاسبات مدل‌سازی پیشرو و وارون با دقت کافی انجام شود، وجود توپوگرافی آنومالی‌های زیرسطحی کاذبی را ایجاد خواهد کرد. برای تشخیص و یا تصحیح این آنومالی‌های کاذب، بایستی تأثیر توپوگرافی در روند محاسبات مدل‌سازی پیشرو لحاظ شود. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است تا تأثیر تغییرات توپوگرافی بر اندازه‌گیری‌های توموگرافی الکتریکی تشخیص داده شود و روش‌های تصحیح مؤثری برای آن ارائه شود [۶،۷،۸]. برای مدل‌سازی توپوگرافی، روش‌های ناکارآمد تصحیح خطی و وارون‌سازی ۲ بعدی مقاومت ویژه الکتریکی با ادغام توپوگرافی در روند مدل‌سازی معرفی شده‌اند [۸].

در این زمینه، روش المان محدود به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در مدل‌سازی توپوگرافی و محیط‌های پیچیده، توجه محققان را به خود جلب کرده است. مثلاً، در [۹،۱۰] مدل‌سازی محیط‌های ناهموار با استفاده از شبکه نامنظم با روش المان محدود انجام شده است. همچنین، ایجاد مش‌های بدون ساختار با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی و با کمک روش المان محدود نیز توسعه یافته است [۱۱،۱۲،۱۳]. روش حذف تکنیکی نیز برای برآورد تأثیر توپوگرافی معرفی شده است [۱۴].

با این حال، روش تفاضلات محدود با سرعت بیشتر و سادگی حل معادلات پیشرو مسائل با توپوگرافی، کاربرد محدودی دارد. در مقایسه با روش المان محدود که در مسائل با توپوگرافی کاربرد زیادی دارد، روش تفاضلات محدود کارآمدتر است [۱۵]. همچنین، در حل معادلات پیشرو، روش تفاضلات محدود با استفاده از شبکه بندی مثلثی جهت اعمال تغییرات توپوگرافی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵].

در این مقاله، مزایای روش تفاضلات محدود برای حل معادلات پیشرو مقاومت ویژه ظاهری ۲/۵ بعدی بهره‌برداری شده است. تأثیر توپوگرافی بر نتایج پاسخ زمین بر اندازه‌گیری‌ها در آرایه‌های متفاوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اعمال تأثیر توپوگرافی، از تابع تبدیل شناخته‌شده شوارتز-کریستوفر برای تبدیل مساله از صفحه W (با توپوگرافی) به صفحه Z (سطح مسطح) استفاده شده است. این تبدیل در مسائل دینامیک سیالات نیز کاربرد دارد.

با توجه به پیشرفت‌های گسترده در الگوریتم‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون‌سازی در دو و سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی در محیط‌های با توپوگرافی، این مسئله همچنان جذابیت‌های زیادی برای محققان در این زمینه دارد. مزیت این مقاله نسبت به مقالات قبلی، ارائه جزئیات دقیق فرمول‌بندی تبدیل معرفی شده با رویکرد تصویرسازی مقاومت ویژه الکتریکی است که می‌تواند برای محققان علوم زمین جذاب باشد.

در ادامه این مقاله، الگوریتم پیشرو مقاومت ویژه الکتریکی ۲/۵ بعدی در بخش دوم ارائه شده است. همچنین، تابع تبدیل معرفی شده به همراه معادلات و جزئیات کامل حل آن نیز در این بخش آورده شده است. در بخش سوم، تغییرات توپوگرافی در مدل‌های ساده و پیچیده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت، نتایج به دست آمده در بخش چهارم مورد بحث قرار گرفته‌اند.

روش‌شناسی

در این بخش، ابتدا به طور خلاصه توضیحی از مدل‌سازی پیش‌رو مقاومت ویژه ظاهری ارائه می‌دهیم. برای مطالعه جزئیات بیشتر در زمینه حل تفاضلات محدود معادل پواسون، می‌توانید مقاله [۱۷] را مطالعه کنید. در این مقاله، مقایسه‌ای بین نتایج تفاضلات محدود و حل‌های عددی در مدل‌های مسطح انجام شده است. در ادامه، ما تابع تبدیل را بر اساس تابع تبدیل شوارتز کریستوفر طراحی کرده‌ایم. محاسبات مربوط به این مقاله با استفاده از دستورات و کدهای نرم‌افزار MATLAB حل شده‌اند.

حل پیش‌رو مقاومت ویژه الکتریکی ۲/۵ بعدی

حل معادلات مدل‌سازی پیش‌رو مقاومت ویژه الکتریکی ۲/۵ بعدی از اهمیت بالایی برخوردار است. مزیت روش ۲/۵ بعدی، نمایش واقعی توزیع پتانسیل ۳ بعدی با استفاده از حل مساله ۲ بعدی با به‌کارگیری چندین عدد موج است. زمان محاسبات در این روش نسبت به حل ۳ بعدی مساله کاهش می‌یابد. محاسبات مساله پیش‌رو با استفاده از شبیه‌سازی جریان الکتریکی داخل زمین با در نظر گرفتن معادلات پواسون و شرایط مرزی معرفی‌شده در مقاله [۱۸] به صورت تفاضلات محدود انجام شده است. یکی از مزایای اصلی روش تفاضلات محدود، سرعت محاسبات آن است. توزیع پتانسیل الکتریکی ۳ بعدی ایجاد شده از چشمه (x_s, y_s, z_s) با استفاده از معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho(x, y, z)} \nabla \varphi(x, y, z) \right] = -I \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (1)$$

که $\rho(x, y, z)$ توزیع مقاومت ویژه الکتریکی، $\varphi(x, y, z)$ پتانسیل الکتریکی در محیط ۳ بعدی، I چشمه جریان الکتریکی نقطه‌ای در سطح زمین، و δ تابع ضربه است که مکان چشمه جریان را مشخص می‌کند. جهت محاسبه مشخصات ۳ بعدی چشمه، نیاز به تابع تبدیل فوریه معادله (۱) در راستای y (امتداد آنومالی) با استفاده از تبدیل کسینوسی است.

$$\tilde{\varphi}(x, k_y, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, z) \cos(k_y y) dy \quad (2)$$

که $\tilde{\varphi}$ پتانسیل در فضای فوریه و k_y عدد موج است. با به‌کارگیری تبدیل فوریه بر روی معادله (۱) خواهیم داشت

$$\frac{\partial}{\partial x} \sigma(x, z) + \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x} + k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\varphi} - \frac{\partial}{\partial z} \sigma(x, z) \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial z} = -\frac{I}{2} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \quad (3)$$

معادله (۳) به صورت عددی با به‌کارگیری شبکه بندی مستطیلی و یا مثلثی حل می‌شود. با در نظر گرفتن اصول حاکم بر معادلات و شرایط مرزی هر یک از سلول‌های گسسته‌سازی شده، میتوان مساله معادلات پیش‌رو را به صورت مجموعه‌ای از معادلات خطی به صورت زیر حل کرد.

$$\Gamma \tilde{\varphi} = \xi \quad (۴)$$

که Γ ماتریس ۵ قطری متقارن و ξ بردار چشمه است. این معادله بایستی برای $\tilde{\varphi}$ که حاوی پتانسیل تمام گره ها است، حل شود. با توجه به اسپارس بودن ماتریس Γ ، امکان محاسبات با زمان محاسباتی کم وجود دارد. در نهایت، $\tilde{\varphi}$ را می توان با به کارگیری عکس تبدیل فوریه زیر از حوزه عدد موج به حوزه فضای تبدیل کرد.

$$\varphi(x, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{\varphi}(x, k_y, z) \cos(k_y y) dk_y \quad (۵)$$

$$\varphi(x, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{\varphi}(x, k_y, z) \cos(k_y y) dk_y \quad (۵)$$

تبدیل شوارتز کریستوفر

در این مدل سازی، ما از تابع تبدیل شناخته شده شوارتز کریستوفر استفاده کرده ایم تا مدل نامسطح زمین (صفحه W) به محیطی مسطح (صفحه Z) تبدیل کنیم. سپس معادلات پیش رو مربوطه را در این فضا حل کرده ایم. در نهایت، با استفاده از عکس این تبدیل، مدل واقعی زمین ساخته می شود. یکی از مزایای این روش، زمان محاسبات کم و عدم نیاز به حافظه موقت بالا در رایانه است. حل معادلات پیش رو ۲/۵ بعدی با استفاده از روش تفاضلات محدود انجام شده است. در این روش، هر مشتق با تقریب مشتقات حل می شود و کدنویسی آن نیز ساده است.

برای اطمینان از درستی تابع گرین^{۱۰} در اندازه گیری های سطحی مقاومت ویژه الکتریکی، ضروری است داده ها بر روی سطح هموار برداشت شوند. این مساله چالشی برای شبیه سازی عددی مدل های ناهموار است. مقاله حاضر روشی کارآمد را برای محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی در سطوح ناهموار ارائه می دهد. این راه حل با استفاده از تبدیل این سطوح به سطح مسطح با بکارگیری تبدیل شوارتز کریستوفر انجام می شود.

با توجه به تعریف تبدیل شوارتز-کریستوفر، می توان یک نیم فضا را به یک صفحه چندضلعی در فضای دیگر تبدیل کرد. این تبدیل با استفاده از سیستم معادلات غیرخطی حل می شود. در زیربخش مذکور، تبدیل توضیح داده شده که کمتر در منابع ژئوفیزیک مشاهده شده است.

بر اساس تعریف تبدیل شوارتز کریستوفر، میتوان محور X و درواقع صفحه Z را به یک چندضلعی در صفحه W تبدیل کرد (شکل ۱) [۱۹ و ۲۰].

$$W = A \int_0^Z (Z - x_1)^{-\alpha_1} \dots (Z - x_n)^{-\alpha_n} dZ + B \quad (۶)$$

که A و B اعداد ثابت مختلط، x_1 تا x_n رئوس نقاط تصویر در صفحه Z با مقادیر حقیقی که همواره $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ است. پارامترهای α_1 تا α_n زوایای بیرونی رئوس در یک نیم دایره است (شکل ۱).

¹⁰ Green's function

نقاط رأسی W_1 تا W_n و زوایای α_1 تا α_n جزو معلومات مساله هستند، اما نقاط تصویر x_1 تا x_n متغیر بوده و باستی محاسبه شوند. مساله را میتوان به صورت اجزای متفاوتی بازنویسی کرد که رابطه ذیل را برآورده کند.

$$W_1 = (-1)^{-\alpha_1 - \alpha_2 \dots - \alpha_n} A \int_0^{x_1} |x_1 - x|^{-\alpha_1} |x_2 - x|^{-\alpha_2} \dots |x_n - x|^{-\alpha_n} dx + B$$

$$W_2 = W_1 + (-1)^{-\alpha_2 \dots - \alpha_n} A \int_{x_1}^{x_2} |x - x_1|^{-\alpha_1} |x_2 - x|^{-\alpha_2} \dots |x_n - x|^{-\alpha_n} dx + B \quad (7)$$

معادله (7) با تفاضل 2 رأس مجاور $|W_j - W_{j-1}|$ و $|W_{j-1} - W_{j-2}|$ حل میشود.

$$|W_j - W_{j-1}| = |A| \int_{x_{j-1}}^{x_j} \prod_{i=1}^n |x - x_i|^{-\alpha_i} dx \quad (8)$$

$$|W_{j-1} - W_{j-2}| = |A| \int_{x_{j-2}}^{x_{j-1}} \prod_{i=1}^n |x - x_i|^{-\alpha_i} dx \quad (9)$$

با تقسیم معادله (8) بر (9)، میتوان A را حذف کرد.

$$\frac{|W_{j-1} - W_{j-2}|}{|W_j - W_{j-1}|} \int_{x_{j-1}}^{x_j} \prod_{i=1}^n |x - x_i|^{-\alpha_i} dx - \int_{x_{j-2}}^{x_{j-1}} \prod_{i=1}^n |x - x_i|^{-\alpha_i} dx = 0 \quad (10)$$

حاصل کسر $|W_n - W_{n-1}|$ بر $|W_2 - W_1|$ را $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ در نظر میگیریم.

$$\frac{|W_3 - W_2|}{|W_2 - W_1|} = \lambda_2, \frac{|W_4 - W_3|}{|W_2 - W_1|} = \lambda_3, \dots, \frac{|W_n - W_{n-1}|}{|W_2 - W_1|} = \lambda_{n-1}, \quad (11)$$

جهت حل این تبدیل، نقاط ذیل به صورت ثابت فرض میشوند؛ $x_1 = 0$ به نقطه W_1 تصویر میشود. لذا $B = W_1$ خواهد بود و $x_2 = 1$ متناسب با W_2 است.

با ترکیب معادله (8) در معادله (11) سیستم معادلاتی زیر را خواهیم داشت.

$$I_2(x_3, x_4, \dots, x_n) = \lambda_2 I_1(x_3, x_4, \dots, x_n)$$

$$I_3(x_3, x_4, \dots, x_n) = \lambda_3 I_1(x_3, x_4, \dots, x_n)$$

$$\vdots$$

$$I_{n-1}(x_3, x_4, \dots, x_n) = \lambda_{n-1} I_1(x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (12)$$

که

$$I_k = (-1)^{-\alpha_1 - \alpha_2 \dots - \alpha_n} \int_{x_k}^{x_{k+1}} |x_1 - x|^{-\alpha_1} |x_2 - x|^{-\alpha_2} \dots |x_n - x|^{-\alpha_n} dx \quad (13)$$

سیستم معادلاتی فوق به صورت غیرخطی بوده و می‌بایست با استفاده از روش‌های تکراری حل شود. میتوان معادله (۱۲) بازنویسی کنیم [۲۱].

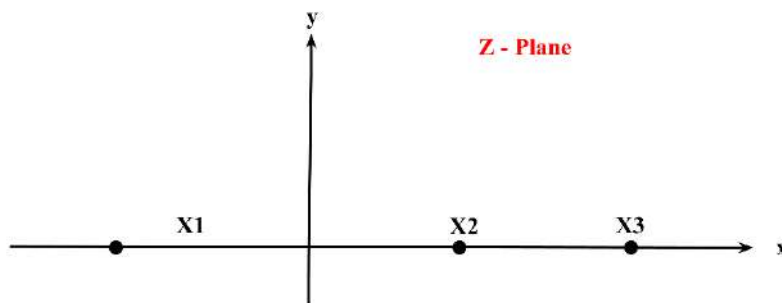
$$\begin{aligned} F_2(x_3, x_4, \dots, x_n) &= I_2 - \lambda_2 I_1 = 0 \\ F_3(x_3, x_4, \dots, x_n) &= I_3 - \lambda_3 I_1 = 0 \\ &\vdots \\ F_{n-1}(x_3, x_4, \dots, x_n) &= I_{n-1} - \lambda_{n-1} I_1 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

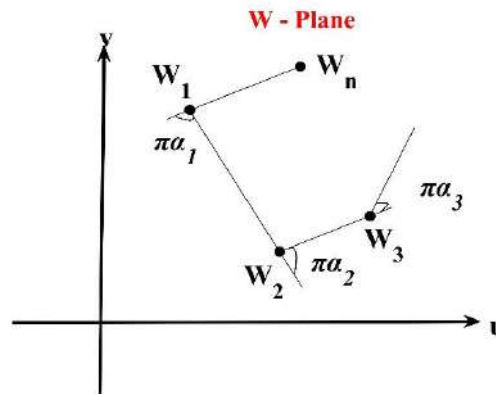
با استفاده از این معادله، به راحتی میتوان ماتریس ژاکوبین را محاسبه کرد.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_2}{\partial x_3} & \frac{\partial I_2}{\partial x_4} & \dots & \frac{\partial I_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial I_3}{\partial x_3} & \frac{\partial I_3}{\partial x_4} & \dots & \frac{\partial I_3}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial I_{n-1}}{\partial x_3} & \frac{\partial I_{n-1}}{\partial x_4} & \dots & \frac{\partial I_{n-1}}{\partial x_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial I_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial I_1}{\partial x_n} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

مقادیر تخمینی x_i با بکارگیری یک روند وارون سازی بدست می‌آیند. هر یک از تخمین‌های x_i بایستی $\partial I_k / \partial x_i$ محاسبه کند. به این منظور، فرمول مشتق ۵ نقطه‌ای لاگرانژ را میتوان جهت محاسبه $\partial I_k / \partial x_i$ به کار گرفت. پنج نقطه مورد نظر در اطراف x_i به صورت زیر تعریف میشود.

$$x_i - 2h < x_i - h < x_i < x_i + h < x_i + 2h,$$





شکل (۱): تصویر محور X و نیم فضای Z به چندضلعی مربوطه در صفحه W

که h طول هر قسمت است. با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده، $h = 0.01$ در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial I_k}{\partial x_i} \approx [I_k(x_i - 2h) - 8I_k(x_i - h) + 8I_k(x_i + h) - I_k(x_i + 2h)]/12h \quad (16)$$

که

$$I_k(x_i \pm nh) = I_k(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \Big|_{x_i=x_i \pm nh}, \quad n = 1, 2. \quad (17)$$

در نهایت، A را میتوان با استفاده از معادله (۶) محاسبه کرد. در واقع، تمام متغیرهای تبدیل شوارتز کریستوفر محاسبه میشود. الگوریتم ۱، روند این تبدیل را به صورت خلاصه وار نشان می‌دهد. علاوه بر این، با استفاده از عکس تبدیل شوارتز کریستوفر میتوان مولفه‌های صفحه Z را بدست آورد.

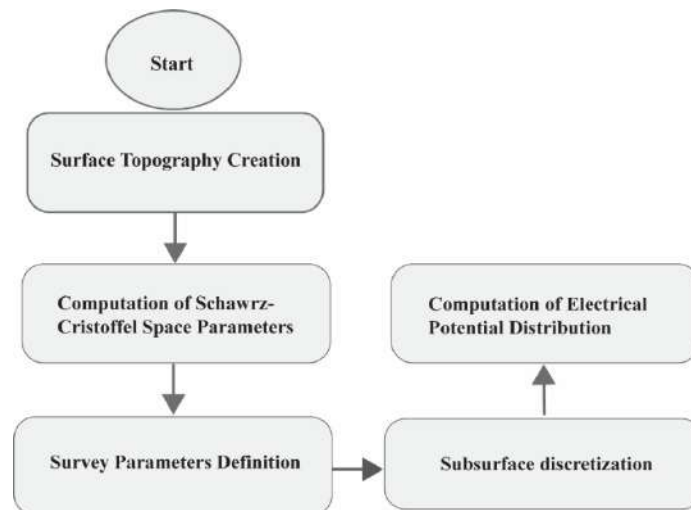
مثال‌های عددی

در این بخش، نتایج سه مدل سازی مصنوعی جهت بررسی تأثیر توپوگرافی بر مدل سازی پیشرو ارائه شده است. این سه مدل مصنوعی با استفاده از آرایه‌های متداول دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و ونر بر روی سطوح ناهموار و توزیع مقاومت ویژه الکتریکی متفاوت، شبیه سازی شده‌اند. پارامترهای گسسته سازی در تمامی مدل‌های مصنوعی یکسان در نظر گرفته شده است. شکل (۲) مراحل متفاوت ادغام مولفه‌های توپوگرافی در روند مدل سازی را نشان می‌دهد.

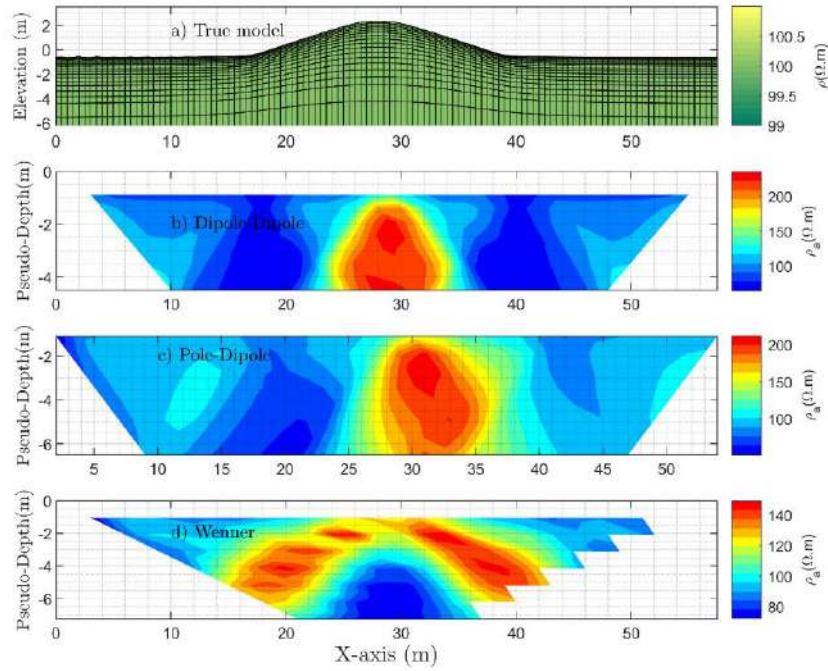
مدل ۱

اولین مدل، مدل زمین همگن با مقاومت و به الکتریکی ۱۰۰ اهم متر است. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری با بکارگیری سیستم ۴۰ الکترودی با فواصل الکترودی ۲ متر تا پرش ۸ ($n = (1 - 8)$) که n ضرایب فواصل بین گیرنده-فرستنده را مشخص میکند محاسبه شده است که در مجموع ۱۳۲ اندازه گیری در نظر گرفته می‌شود. توپوگرافی منطقه به صورت تپه متقارن در نظر گرفته شده است.

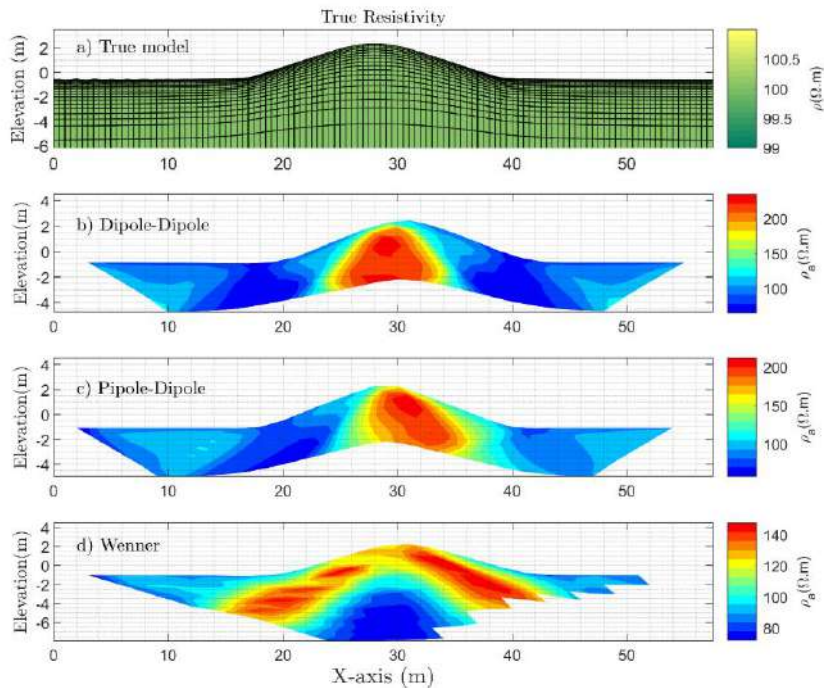
شکل ۳ نتایج مدل‌سازی پیش‌رو با آرایه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در این نتایج، آنومالی‌های رسانا و مقاومی به ترتیب در زیر دره و تپه در هر یک از برداشت‌ها دیده می‌شود. علاوه بر این، مدل مصنوعی در این مطالعه به صورت همگن در نظر گرفته شده است. تجمع جریان الکتریکی در دره و واگرایی آن در تپه در آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی باعث می‌شود که به ترتیب سطوح هم‌پتانسیل واگرا (همانند مقادیر مقاوم) و همگرا (همانند مقادیر رسانا) شوند. همچنین، آرایه ونر تأثیر به عکس آرایه‌های قطبی از توپوگرافی داشته است. در لبه مقاطع الکتریکی حاصل از سطح ناهموار مناطق با مقاومت ویژه الکتریکی پایین و بالایی به ترتیب در آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی (یا قطبی-دوقطبی) و ونر مشاهده می‌شود. جهت بهتر درک تأثیر توپوگرافی بر توزیع مقاومت ویژه ظاهری، شبه مقطع دیگری نیز آماده شده است که در آن گره‌ها با استفاده از وارون تبدیل شوارتز کریستوفر جابجا شده و متناسب با مکان واقعی آن شده است (شکل ۴). هندسه شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی در این شکل تصحیح شده است، اما مقادیر آنها ثابت مانده است. از آنجا که روش تحلیلی برای مقایسه نتایج فوق وجود ندارد، این مقایسه با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار RES2DMOD انجام شده است (شکل ۵). با مقایسه بصری، تفاوت‌های بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی بین این نتایج دیده می‌شود.



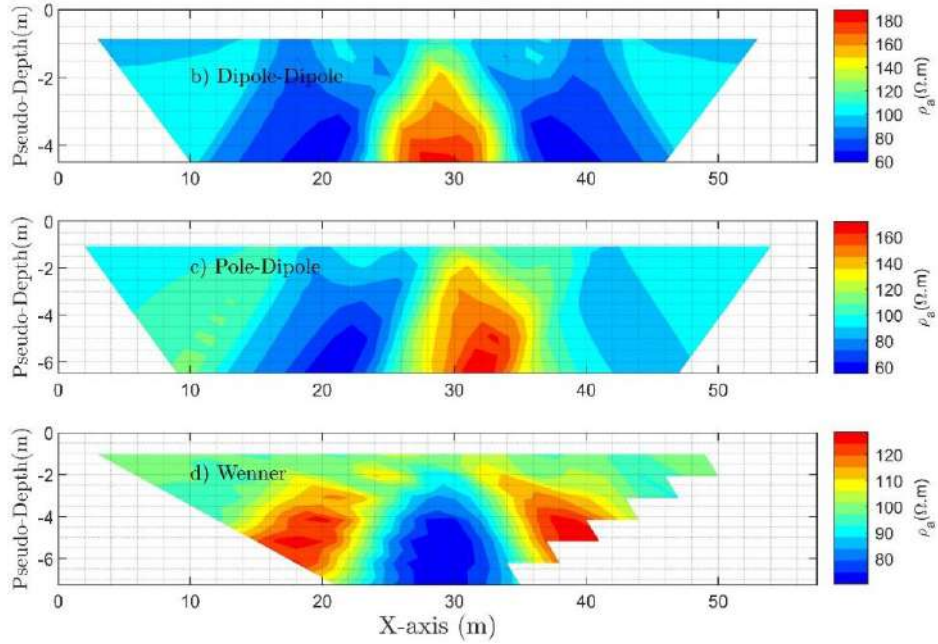
شکل (۲): فلوجارت اعمال مولفه‌های توپوگرافی در روند مدل‌سازی پیش‌رو توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی



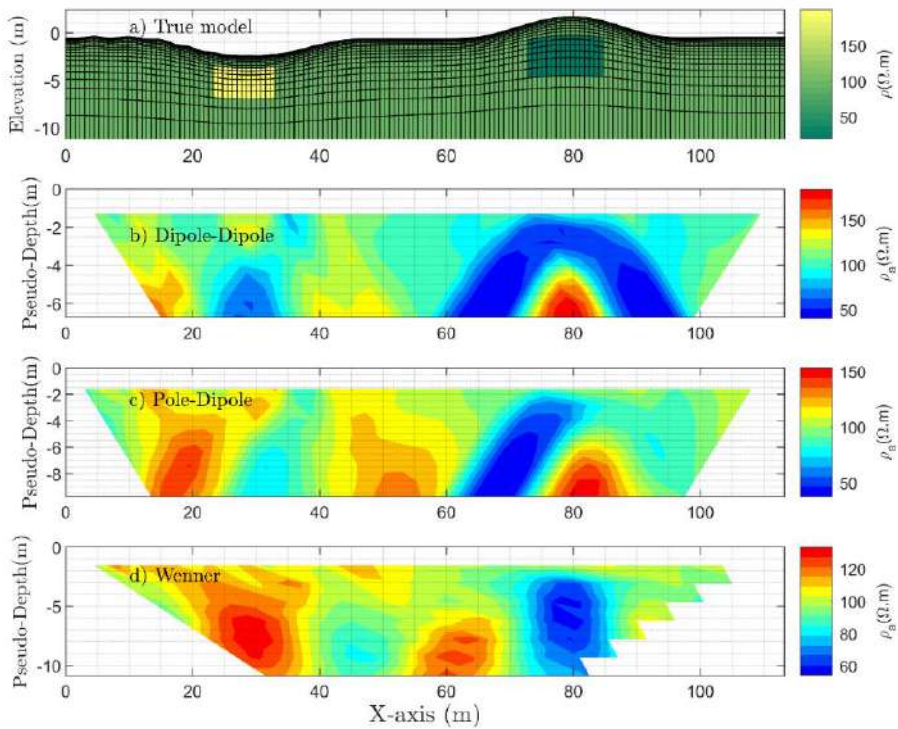
شکل (۳): شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده باز تبدیل شوارتز کریستوفر محیط ناهموار (a) با استفاده از آرایه های متفاوت (b تا d) در زیرسطح همگن با مقاومت ویژه الکتریکی ۱۰۰ اهم متر.



شکل (۴): شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مدل ۱ که با استفاده از عکس تبدیل شوارتز کریستوفر محل و مقادیر گره‌ها جابجا شده است و متناسب با محل واقعی آن نمایش داده شده است.



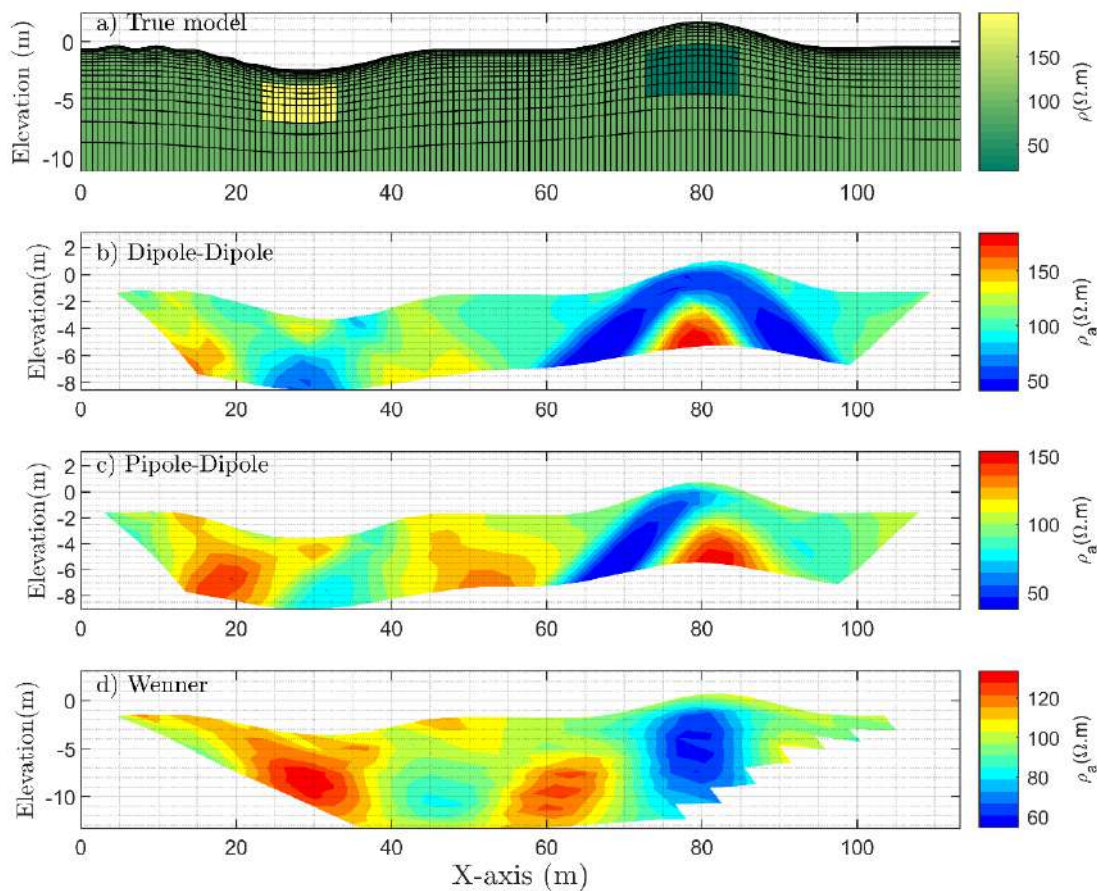
شکل (۵): شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مدل ۱ که توسط نرم افزار RES2DMOD محاسبه شده است.



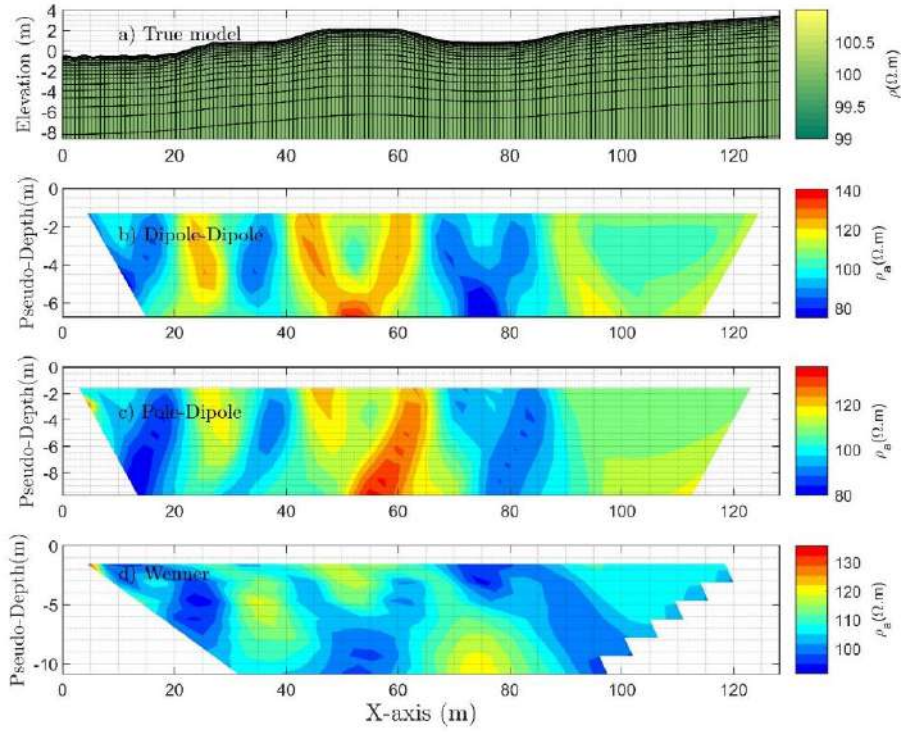
شکل (۶): شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده با استفاده از الوریتم معرفی شده در مقاله برای مدل ناهموار ۲ (a) با آرایه های الکترودی متفاوت (b) تا (d). این مدل ناهموار حاوی ۲ بلوک با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰۰ و ۲۰ اهم متر در زمینه ای با مقاومت ویژه الکتریکی ۱۰۰ اهم متر طراحی شده است.

مدل ۲

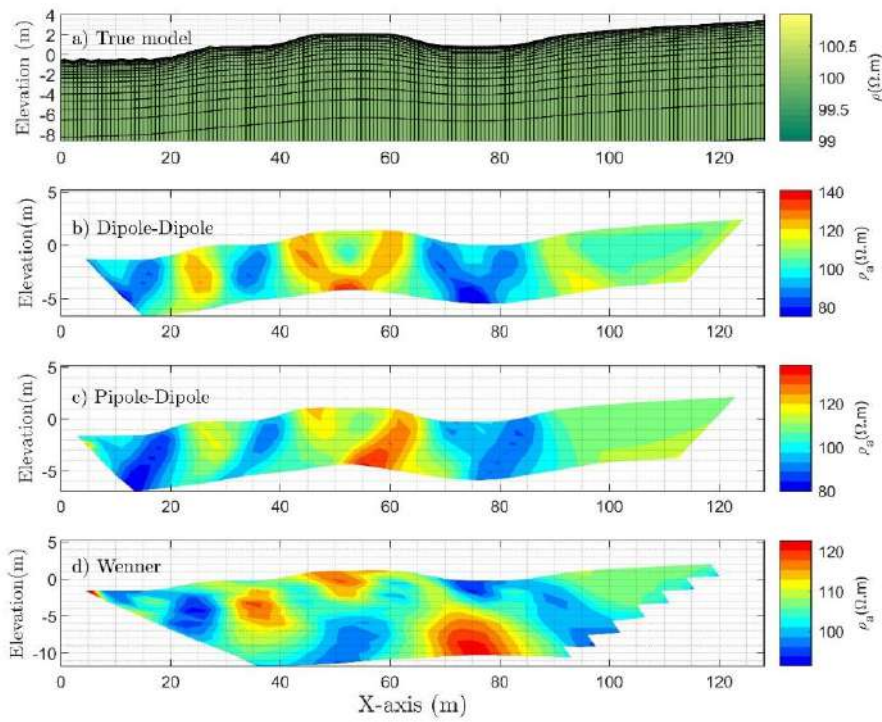
محیط شبیه‌سازی شده مدل ۲ شامل ۳ زون با مقاومت ویژه ظاهری است. این مدل در یک زمینه با مقاومت ویژه الکتریکی ۱۰۰ اهم متر فرض شده است. دو زون با مقاومت ویژه ظاهری به ترتیب ۲۰۰ (چپ) و ۲۰ (راست) اهم متر در نظر گرفته‌اند. در این مدل، زون رسانا در محل تپه و زون مقاوم در محل دره قرار دارد. اندازه‌گیری‌ها توسط ۳ آرایه با حداکثر پرش ۸، در پروفیلی به طول ۱۱۵ متر با ۴۸ الکتروده به فاصله الکترودهی ۳ متر انجام شده است. مقادیر محاسبه‌شده از مدل‌سازی پیشرو در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، اثر آنومالی‌های مقاومت ویژه الکتریکی با اثر حاصل از توپوگرافی آغشته شده است و لذا نمی‌توان به خوبی اثر زون‌های آنومالی را مشاهده کرد. با توجه به واگرایی خطوط جریان در زیر دره و همگرایی آن در زیر تپه، شبه مقاطع در آن مناطق به ترتیب مقادیر رسانا و مقاومی را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از این مدل با استفاده از تبدیل شوارتز کریستوفر با توپوگرافی یکسان با مدل در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل (۷): شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مدل ۲ که با استفاده از عکس تبدیل شوارتز کریستوفر محل و مقادیر گره‌ها جایجا شده است و متناسب با محل واقعی آن نمایش داده شده است.



شکل (۸): شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده در مدل ۳



شکل (۹): شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مدل ۳ که با استفاده از عکس تبدیل شوارتز کریستوفر محل و مقادیر گره‌ها جابجا شده است و متناسب با محل واقعی آن نمایش داده شده است.

مدل ۳

با توجه به مطالب ارائه شده، مدل‌سازی ۳ مدلی به طول ۱۳۰ متر است. در این مدل نیز، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ۳ آرایه الکترودی، فاصله الکترودی ۳ متر و حداکثر پرش ۸ محاسبه شده‌اند. شکل ۸ نمایشی از نتایج حاصل از این ۳ آرایه را نمایش می‌دهد.

همانند دو مدل دیگر، ناهمواری‌های سطحی و آنومالی‌های مقاومت ویژه ظاهری در این مدل نیز ایجاد می‌شوند. این آنومالی‌ها در برداشت‌های انجام شده در سطح هموار مشاهده نمی‌شوند. آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی نیز آشفتگی‌های مقاومت ویژه ظاهری بالا و پایینی را به ترتیب در محل تپه و دره ایجاد می‌کنند. البته نتایج حاصل از آرایه ونر رفتاری مخالف دو آرایه دیگر دارد. با افزایش تغییرات توپوگرافی، آشفتگی‌های بیشتری در اندازه‌گیری‌های توموگرافی الکتریکی به وجود می‌آید. جهت بررسی دقیق‌تر این آشفتگی‌ها، شبه مقطعی با تغییرات توپوگرافی یکسان با مدل زمین توسط تبدیل شوارتز کریستوفر تهیه شده و در شکل ۹ نمایش داده شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به مقاله مذکور، تأثیر توپوگرافی بر اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از تبدیل شوارتز کریستوفر توسط روش تفاضلات محدود در مدل‌سازی پیشرو مورد بررسی قرار گرفته است. تابع تبدیل معرفی شده با استفاده از تکنیک انتگرال‌گیری عددی حل شده است. به منظور بررسی و نمایش کارایی و راحتی استفاده از این روش در پروژه‌های عملی، سه مدل مصنوعی با آرایه‌های متداول و توپوگرافی‌های معمول ساخته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حتی در مدل‌های همگن، توپوگرافی باعث عدم ثبت دقیق مقادیر واقعی مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود. به عبارت دیگر، در شرایط سطحی مختلف و با توجه به نوع آرایه‌های برداشت، آنومالی‌های کاذب زیرسطحی ایجاد می‌شوند. به عنوان مثال، در مدل همگن و در مناطق تپه، آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی آنومالی مقاومی ایجاد می‌کنند، در حالی که در آرایه‌های ونر، آنومالی‌های رسانا در زیرسطح به وجود می‌آیند. همچنین، در مناطق دره، آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی زون رسانا را ایجاد می‌کنند. در نهایت، نشان داده شده است که آثار حاصل از آنومالی‌های رسانا و مقاوم با آثار حاصل از توپوگرافی ترکیب می‌شوند و تفکیک این آنومالی‌های زیرسطحی در شبه مقاطع عملی ممکن نیست. با توجه به اهمیت این موضوع، در پژوهش‌های آتی، تأثیر ناهمواری‌های سطحی در وارون‌سازی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] M. Loke, J. Chambers, D. Rucker, O. Kuras and P. Wilkinson, "Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 95, pp. 135-156, August 2013.
- [2] T. Günther and T. Martin, "Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 135, pp. 436-448, December 2016.
- [3] A. F. Orozco, P. Ciampi, T. Katona, M. Censini, M. Petrangeli Papini, G. P. Deidda and G. Cassiani, "Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging," *Science of The Total Environment*, vol. 768, 10 May 2021.
- [4] M. Fallahsafari and R. Ghanati, "DC Electrical Resistance Tomography Inversion," *Journal of the Earth and Space*

- Physics, vol. 47, no. 4, pp. 87-98, 5 February 2022.
- [5] C. Vachiratienchai, S. Boonchaisuk and W. Siripunvaraporn, "A hybrid finite difference–finite element method to incorporate topography for 2D direct current (DC) resistivity modeling," *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 183, no. 3-4, pp. 426-434, December 2010.
- [6] R. C. Fox, G. W. Hohmann, T. J. Killpack and L. Rijo, "Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys," *Geophysics*, vol. 45, no. 1, pp. 75-93, Jan 1980.
- [7] T. H. Holcombe and G. R. Jiracek, "Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys," *Geophysics*, vol. 49, no. 4, pp. 439-452, Apr 1984.
- [8] L. Tong and C. Yang, "Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion," *Geophysics*, vol. 55, no. 3, pp. 354-361, Mar 1990.
- [9] M.-J. Yi, J.-H. Kim, Y. Song, S.-J. Cho, S.-H. Chung and J.-H. Suh, "Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data," *Geophysical Prospecting*, vol. 49, no. 4, pp. 483-497, 2001.
- [10] Z. Bing and S. A. Greenhalgh, "Finite element three dimensional direct current resistivity modelling: accuracy and efficiency considerations," *Geophysical Journal International*, vol. 145, no. 3, p. 679–688, June 2001.
- [11] C. Rücker, T. Günther and K. Spitzer, "Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography — I. Modelling," *Geophysical Journal International*, vol. 166, no. 2, p. 495–505, August 2006.
- [12] M. Blome, H. Maurer and K. Schmidt, "Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques," *Geophysical Journal International*, vol. 176, no. 3, p. 740–752, March 2009.
- [13] Z. Ren and J. Tang, "3D direct current resistivity modeling with unstructured," *Geophysics*, vol. 75, no. 1, p. H7–H17, 2010.
- [14] S. Penz, H. Chauris, D. Donno and C. Mehl, "Resistivity modelling with topography," *Geophysical Journal International*, vol. 194, no. 3, p. 1486–1497, September 2013.
- [15] E. Erdoğan, I. Demirci and M. E. Candansayar, "Incorporating topography into 2D resistivity modeling using finite-element and finite-difference approaches," *Geophysics*, vol. 73, no. 3, p. F135–F142, May 2008.
- [16] I. Demirci, E. Erdoğan and M. E. Candansayar, "Two-dimensional inversion of direct current resistivity data incorporating topography by using finite difference techniques with triangle cells: Investigation of Kera fault zone in western Crete," *Geophysics*, vol. 77, no. 1, p. E67–E75, Jan 2012.
- [17] R. Ghanati, Y. Azadi and R. Fakhimi, "RESIP2DMODE: A MATLAB-Based 2D Resistivity and Induced Polarization Forward Modeling Software," *Iranian Journal of Geophysics*, vol. 13, no. 4, pp. 60-78, February 2020.
- [18] A. Dey and H. Morrison, "Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures," *Geophysical Prospecting*, vol. 27, no. 1, pp. 106-136, March 1979.
- [19] R. J. Spiegel, V. R. Sturdivant and T. E. Owen, "Modeling resistivity anomalies from localized voids under irregular terrain," *Geophysics*, vol. 45, no. 7, pp. 1164-1183, Jul 1980.
- [20] E. Costamagna, "On the Numerical Inversion of the Schwarz-Christoffel Conformal Transformation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 35, no. 1, pp. 35 - 40, January 1987.
- [21] J. Chuang, Q. Gui and C. Hsiung, "Numerical computation of Schwarz-Christoffel transformation for simply connected unbounded domain," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 105, no. 1, pp. 93-109, May 1993.
- [22] M. Loke, "Geotomo software," 2019. [Online]. Available: <http://geotomosoft.com/>.

قطبش القایی در محیط متخلخل با حضور کانه‌های فلزی، مطالعه‌ی موردی: معدن کوشک

سعیده احمدی^۱

ادکتری مهندسی معدن، دانشگاه یزد؛ sahadipaper@gmail.com

* نویسنده مسئول: سعیده احمدی

چکیده فارسی

پاسخ رسانایی الکتریکی مختلط (قطبش القایی) محیط متخلخل به محتوی کانی‌های مختلف مثل رس‌ها، نیمه‌رساناهایی مانند کانه‌های سولفیدی و مگنتیت، فلزاتی همچون مس و شبه‌فلزاتی نظیر گرافیت بستگی دارد. در این مطالعه به منظور بررسی پاسخ قطبش القایی در یک محیط پیچیده‌ی کانی‌زایی، اندازه‌گیری‌های حوزه‌ی فرکانس روی نمونه‌های معدن کوشک انجام شدند. این نمونه‌ها دارای محتوی شیل و کانی‌های فلزی گالن، اسفالریت و پیریت با درصد بالا هستند. همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و مقادیر کانی‌های فلزی و غیرفلزی اندازه‌گیری و مقاطع صیقلی و نازک نمونه‌ها مطالعه شدند. نتایج این بررسی نشان دادند که بارپذیری تحت تأثیر قطبش کانی‌های فلزی است، در حالی که بارپذیری نرمال به دلیل تأثیرپذیری از CEC تحت تأثیر قطبش کانی‌های رسی است. افزایش محتوی کانی‌های فلزی (بیش از ۲۲ درصد)، بارپذیری را کاهش می‌دهد و ثابت زمانی را افزایش. بنابراین مدلی مرکب از بارپذیری و ثابت زمانی برای تقریب محتوی حجمی کانی‌های فلزی در محیط متخلخل دارای درصد بالای فلز و ساختارهای غیر پراکنده مناسب‌تر از مدل‌های پیشین قطبش القایی است.

واژه‌های کلیدی: قطبش القایی، نیمه‌رسانا، رس، بارپذیری، ثابت زمانی، معدن کوشک.

Induced Polarization in Porous Media with Metallic Minerals, The Case Study of Koushk Mine

Saeide Ahmadi¹

¹Ph.D. in Mining Engineering, Yazd University; sahadipaper@gmail.com

* Corresponding author: Saeide Ahmadi

ABSTRACT

The electrical conductivity of porous media can be affected by the presence of various minerals, such as clays, semiconductors like sulfide ores and magnetite, metals like copper, and semi-metals like graphite. In this contribution, to better understand the induced polarization response of a clay-rich mineralized environment, complex conductivity measurements were conducted on samples from the Koushk mine, which contained high amounts of clay and metallic minerals like pyrite, galena, and sphalerite. The study also measured the cation exchange capacity (CEC) and the amounts of metallic and non-metallic minerals. In addition, thin and polished sections of the samples were analyzed. The results showed that the chargeability of a material is influenced by the presence of metallic minerals. In contrast, the normalized chargeability is affected by the amount of clay content, as it has a linear relationship with the CEC. Increasing the volume of metallic minerals in the sample above 22% reduces the chargeability and increases the time constant. Therefore, a model that considers chargeability and time constant is more suitable than previous IP models for estimating the volume of metallic minerals in high-grade or non-disseminated mineralization media.

Keywords: Induced Polarization, Semiconductor, Clay, Chargeability, Time Constant, Koushk Mine.

مقدمه

قطبش القایی (IP) به علم مطالعه‌ی ذخیره‌ی بار الکتریکی در محیط‌های متخلخل اشاره دارد که به طور گسترده در اکتشاف مواد معدنی از جمله انواع اکسیدها و سولفیدهای فلزی باریز به حالت افشان، رگه‌ای و مسیو به کار می‌رود. نویسندگان مرجع [۱] با استفاده از معادله‌ی ماکسول-کلازیوس-ماسوتی مدلی را برای تقریب محتوی حجمی ذرات فلزی باریز (حداکثر تا ۲۲ درصد) با استفاده از مقادیر باریز به صورت معادله‌ی (۱) ارائه کرده‌اند:

$$M = \frac{9}{2} \varphi_m + M_b \quad (1)$$

در این مدل، M باریزبری کل (Chargeability) و بدون بعد، φ_m محتوی حجمی کانی‌های فلزی باریز و M_b باریزبری زمینه شامل انواع رس‌ها، میکاها، مواد آلی، زئولیت‌ها و غیره است. در حضور ذرات فلزی و در غیاب گونه‌های اکسایش-کاهش، باریزبری زمینه عموماً خیلی کوچک و کم‌تر از ۱۰ درصد یا ۱۰۰ میلی‌ولت بر ولت است [۲-۳]. در مطالعه‌ی حاضر برای اولین بار، مدل مذکور در نمونه‌هایی با محتوی حجمی کانی‌های فلزی بیش‌تر از ۲۲ درصد بررسی شده است. در این راستا هشت نمونه‌ی دربردارنده‌ی کانی‌زایی سولفیدی پیریت، گالن و اسفالریت از معدن روی و سرب کوشک جمع‌آوری شدند و مورد مطالعه قرار گرفتند. این نمونه‌ها دارای زمینه‌ی غنی از رس و میکا هستند که حاوی مواد آلی است. وجود مقادیر بالای کانی‌های فلزی در کنار محتوی رسی قابل‌ملاحظه، ساختارهای مختلف (لایه‌ای و پراکنده) و سازوکارهای متنوع قطبش القایی (شامل قطبش رس‌ها، قطبش الکتروودی و قطبش ماکسول-وگنر)، نمونه‌های مزبور را به نمونه‌هایی جالب توجه برای مطالعه‌ی قطبش القایی تبدیل می‌کند.

روش تحقیق

نمونه‌های مورد مطالعه K6, K12, K17, K18, K19, K20, K23, K26 نام گرفتند (جدول ۱). طول نمونه‌ها از ۶/۸ تا ۱۲/۴ سانتی‌متر متفاوت است. همه‌ی نمونه‌ها دارای ساختار لایه‌ای در کنار ساختار پراکنده هستند، به جز نمونه‌های K20 و K26 که ساختارشان با بقیه متفاوت است. محتوی وزنی کانی‌های فلزی با روش XRD نیمه‌کمی اندازه‌گیری شد. محتوی حجمی کانی‌های فلزی با استفاده از محتوی وزنی آن‌ها (w_m)، چگالی کانی‌های فلزی (ρ_m) و چگالی کل نمونه (ρ_t) و با استفاده از رابطه‌ی $\varphi_m = (\rho_m / \rho_t) w_m$ محاسبه شد. بر این مبنای، محتوی حجمی نمونه‌ها بین ۰/۰۶۲ تا ۰/۵۳۳ متغیر است. درصد وزنی کانی‌های رسی/میکا در نمونه‌ها نیز با روش XRD نیمه‌کمی به دست آمد. کانی‌های رس/میکا در نمونه‌های مورد بحث، ایلیت، کلریت، مسکویت و سریسیت هستند. بیش‌ترین مقدار کانی‌های رس/میکا به ترتیب متعلق به نمونه‌های K6, K18, K12, K17 و K23 هستند و از ۲۶ تا ۱۷ درصد متغیرند. کم‌ترین مقدار این کانی‌ها به ترتیب در نمونه‌های K26, K20 و K19 دیده می‌شود و از صفر تا ۹ درصد متغیر است. کانی اصلی نمونه‌ی K26 واریسکایت است که ۸۰ درصد نمونه را شکل داده است. CEC با استفاده از کبالت هگزامین کلراید به روش مرجع [۴] محاسبه و با واحد متداول آن، یعنی میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم ($meq/100g$) (معادل با ۹۶۳/۲۰ کولن بر کیلوگرم (C/kg)) گزارش شد.

جدول (۱): مقادیر کانی‌های فلزی و غیرفلزی در نمونه‌های شیلی کانه‌دار معدن کوشک.

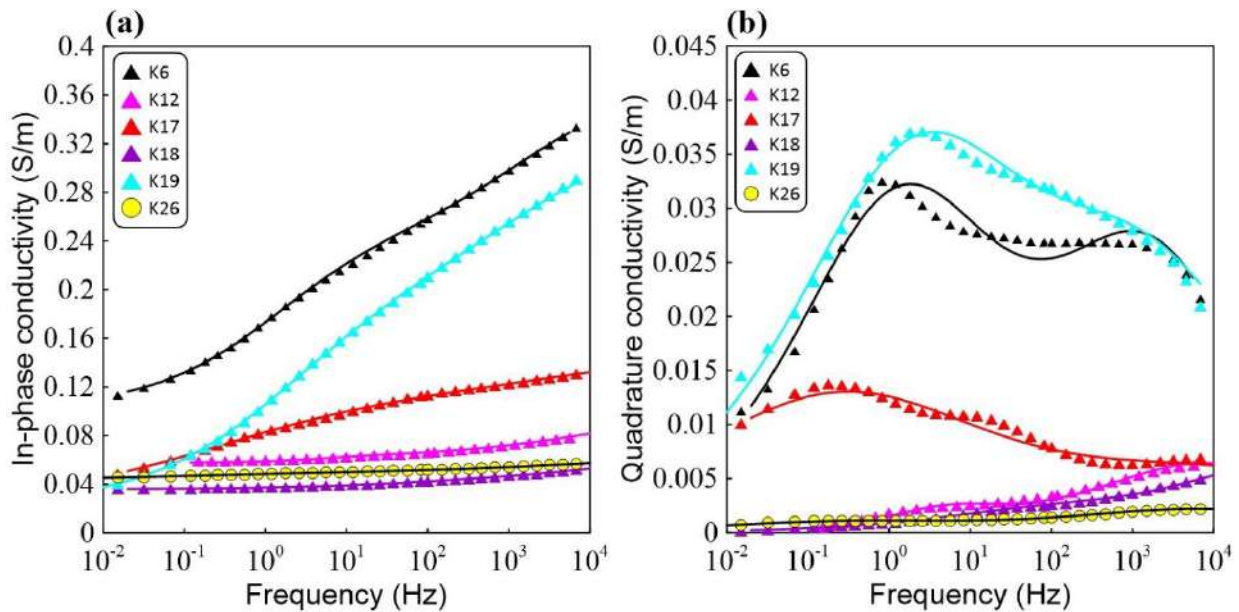
| Sample | Volume content | | Clay/mica | | CEC (meq/100gr) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|
| | Metallic minerals (%) | Metallic minerals (-) | Muscovite, Illite (%) | Chlorite (%) | |
| K6 | 16.943 | 0.169 | 22 | 4 | 5.54 |

| | | | | | |
|-----|--------|-------|----|---|------|
| K12 | 15.148 | 0.151 | 18 | 3 | 9.62 |
| K17 | 16.707 | 0.167 | 17 | 3 | 8.3 |
| K18 | 7.765 | 0.078 | 21 | 5 | 11.8 |
| K19 | 42.636 | 0.426 | 5 | 4 | 4.4 |
| K20 | 53.320 | 0.533 | 1 | 1 | 2.55 |
| K23 | 12.959 | 0.130 | 17 | 0 | 13.7 |
| K26 | 6.236 | 0.062 | 0 | 0 | 1.45 |

مؤلفه‌های رسانایی هم‌فاز (In-phase conductivity) و خارج از فاز (Quadrature conductivity) رسانایی مختلط با استفاده از داده‌های دامنه و فاز امپدانس الکتریکی مختلط محاسبه شده‌اند. فاکتور هندسی مورد استفاده برای تبدیلات دامنه و فاز امپدانس الکتریکی مختلط به رسانایی‌های هم‌فاز و خارج از فاز، از نسبت فاصله‌ی الکترودهای پتانسیل به مساحت مقطع عرضی هر نمونه به دست می‌آید. ولتاژ اعمال شده بر هر نمونه برای همه‌ی اندازه‌گیری‌ها یکسان و برابر با یک ولت در نظر گرفته شد. قبل از هر اندازه‌گیری، الکترولیتی از آب مقطر و $NaCl$ خالص در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تهیه شد. سپس نمونه به مدت دو هفته درون محفظه‌ی دربسته‌ی حاوی الکترولیت قرار گرفت تا کاملاً اشباع شود. در این خلال، رسانایی الکترولیت پایش می‌شد تا زمانی که مقدار آن بدون تغییر باقی ماند. به این ترتیب رسانایی الکترولیت در زمان اندازه‌گیری رسانایی مختلط نمونه‌ها برابر با $0/۳۶$ زمینس بر متر بود. پس از آن نمونه‌های اشباع برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی مختلط از محفظه خارج شدند [۵]. این اندازه‌گیری‌ها در طیف فرکانسی ۱۰ میلی‌هرتز تا ۴۵ کیلوهرتز، با استفاده از آرایه‌ی چهار الکترودی [۶] و امپدانس‌متر ساخت نویسندگان مرجع [۷] انجام شدند. در آرایه‌ی چهار الکترودی، از دو فیلم کربنی ابررسانا به‌عنوان الکترودهای جریان، دو الکترود پلاریزه‌نشو از جنس $Ag/AgCl$ به‌عنوان الکترودهای پتانسیل و یک محفظه‌ی نمونه استفاده می‌شود. الکترودهای جریان به دو ضلع مقابل نمونه و الکترودهای پتانسیل در وسط سطحی از نمونه چسبانده شدند که قرار بود پتانسیل روی آن اندازه گرفته شود.

یافته‌ها

داده‌های رسانایی‌های هم‌فاز و خارج از فاز مربوط به نمونه‌های کوشک در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. برای اجتناب از خطاهای همراه با فرکانس‌های خیلی بالا، از بخش فرکانس بالای داده‌های اندازه‌گیری شده (۱۰ تا ۴۵ کیلوهرتز) استفاده نشده است [۸]. یک مدل دوگانه‌ی کول-کول در حالت رسانایی (خط‌ها در شکل ۱)، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب بر داده‌های طیفی مزبور انطباق داده شده است و پارامترهای کول-کول در جدول (۲) ارائه شده‌اند. پاسخ قطبش القایی به ویژه در اکتشافات معدنی در بخش فرکانس پایین (LF در جدول ۲) طیف رسانایی مختلط قرار دارد (MI ، τI و cI). پارامترهای مدل کول-کول در فرکانس بالا (HF در جدول ۲) مربوط به قطبش ماکسول-وگنر هستند. در سنگ‌های حاوی کانه، متغیرهای M و τ ، یعنی بارپذیری و ثابت زمانی به ترتیب به عیار کانه و اندازه‌ی ذرات کانه وابسته‌اند [۹]. متغیر C نیز مقدار شیب در نمودار تمام‌لگاریتمی طیف زاویه‌ی فاز است [۱۰] و به توزیع اندازه‌ی ذرات کانه بستگی دارد [۱۱]. نمونه‌های $K20$ و $K23$ در شکل (۱) و جدول (۲) دیده نمی‌شوند؛ چراکه مدل کول-کول به خوبی بر طیف‌های رسانایی‌های هم‌فاز و خارج از فاز آن‌ها منطبق نشد. در شکل (۱) دیده می‌شود که رسانایی‌های هم‌فاز و خارج از فاز مقادیر بزرگی دارند (صفر تا $0/۴$ زمینس بر متر برای رسانایی هم‌فاز و صفر تا $0/۰۴۵$ زمینس بر متر برای رسانایی خارج از فاز) و تأثیر فلزات بر این رسانایی‌ها را نشان می‌دهند.

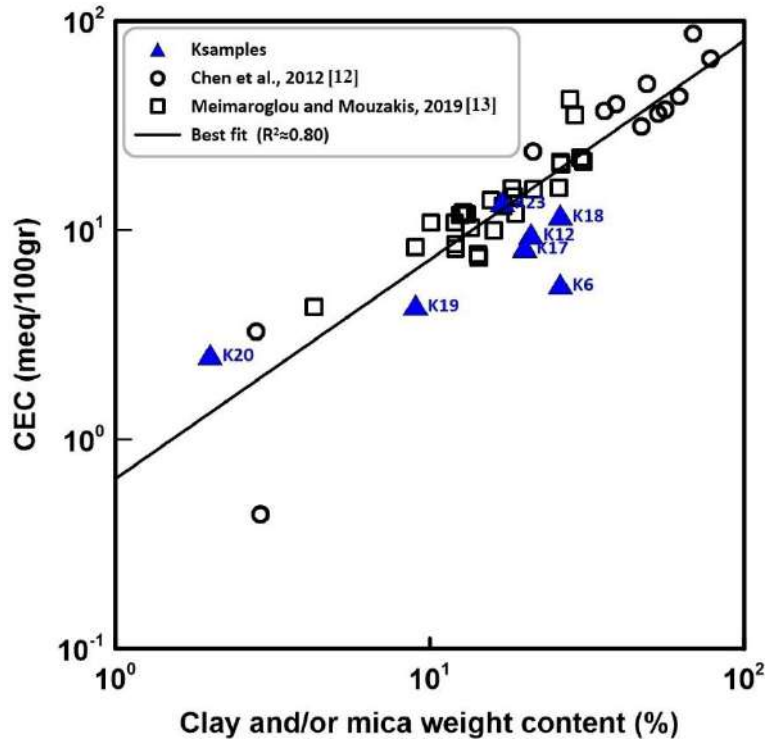


شکل (۱): طیف‌های (a) رسانایی هم‌فاز و (b) خارج از فاز برای نمونه‌های کوشک در محدوده‌ی فرکانسی ۱۰ میلی‌هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز.

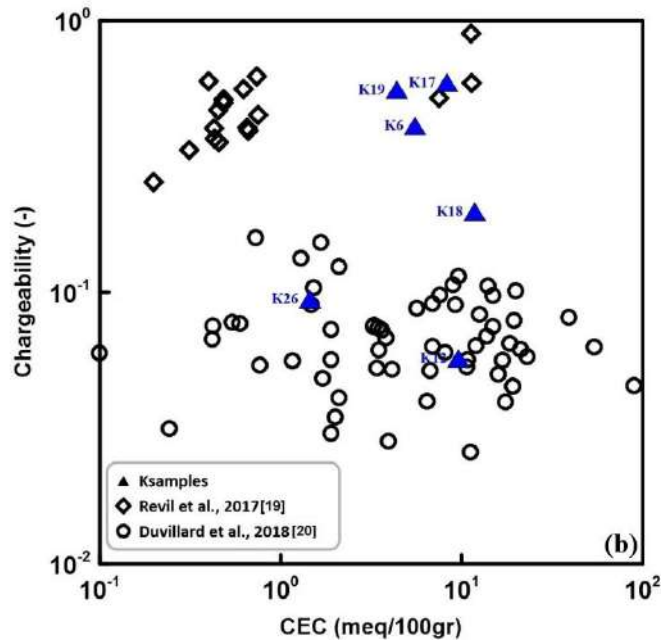
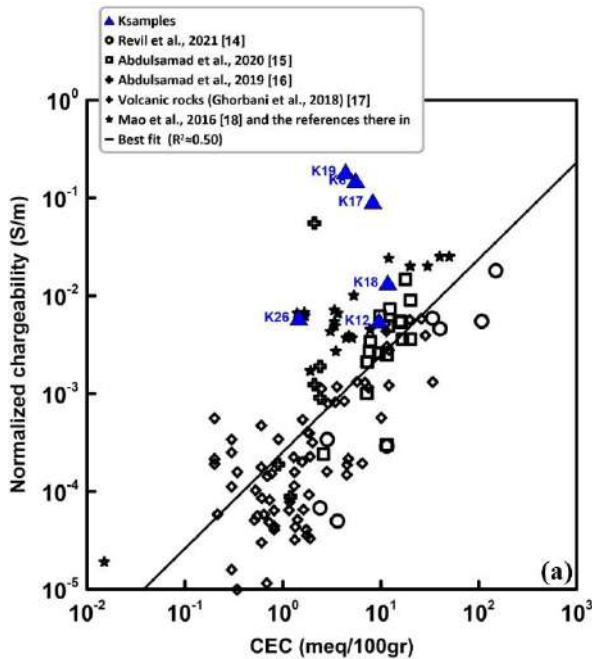
جدول (۲): پارامترهای کول-کول برای نمونه‌های کوشک. دو عبارت LF و HF به ترتیب نشان می‌دهند که پارامترهای کول-کول در فرکانس پایین (مربوط به قطبش رس‌ها و کانی‌های فلزی) یا فرکانس بالا (مربوط به قطبش ماکسول-وگنر) به دست آمده‌اند.

| Sample | σ_{∞} (S/m) | M1 (LF) | M2 (HF) | c1 (LF) | c2 (HF) | τ 1 (LF) | τ 2 (HF) | RMS (%) |
|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|---------|
| K6 | 0.36944 | 0.41055 | 0.31510 | 0.47758 | 0.50197 | 0.1192850 | 0.0000973 | 0.28672 |
| K12 | 0.09789 | 0.05706 | 0.35430 | 0.73108 | 0.45174 | 0.0305207 | 0.0000202 | 0.57357 |
| K17 | 0.15571 | 0.59087 | 0.25697 | 0.33657 | 0.31178 | 0.6511714 | 0.0000105 | 0.35869 |
| K18 | 0.06947 | 0.19788 | 0.28719 | 0.39485 | 0.59009 | 0.0010632 | 0.0000043 | 0.28733 |
| K19 | 0.33673 | 0.55624 | 0.38001 | 0.42258 | 0.41021 | 0.0830001 | 0.0000935 | 0.22838 |
| K26 | 0.06380 | 0.09440 | 0.21260 | 0.38978 | 0.38777 | 0.6086066 | 0.0000236 | 0.14126 |

در شکل (۲) رابطه‌ی مستقیم خطی بین CEC با درصد کانی‌های رس/میکا برای نمونه‌های کوشک و داده‌های برگرفته از مقالات دیگران نمایش داده شده است. پس از آن بارپذیری نرمال (Normalized chargeability) نمونه‌های کوشک با استفاده از بارپذیری و رسانایی بی‌نهایت مستخرج از مدل کول-کول محاسبه شد ($Mn = MI\sigma_{\infty}$). نمودار CEC در برابر بارپذیری نرمال و بارپذیری در شکل (۳-a, b) به تصویر کشیده شده است. در شکل‌های (۳-a) و (۳-b)، به ترتیب ارتباط مستقیم خطی CEC (و در نتیجه درصد رس/میکا) با بارپذیری نرمال و نبود رابطه بین CEC و بارپذیری دیده می‌شود.



شکل (۲): ارتباط مستقیم خطی بین مقادیر CEC با درصد وزنی کانی‌های رسی و/یا میکا در نمونه‌های کوشک و داده‌های مستخرج از متون علمی قطبش القایی. نمونه‌ی K26 کانی رسی و میکا ندارد.



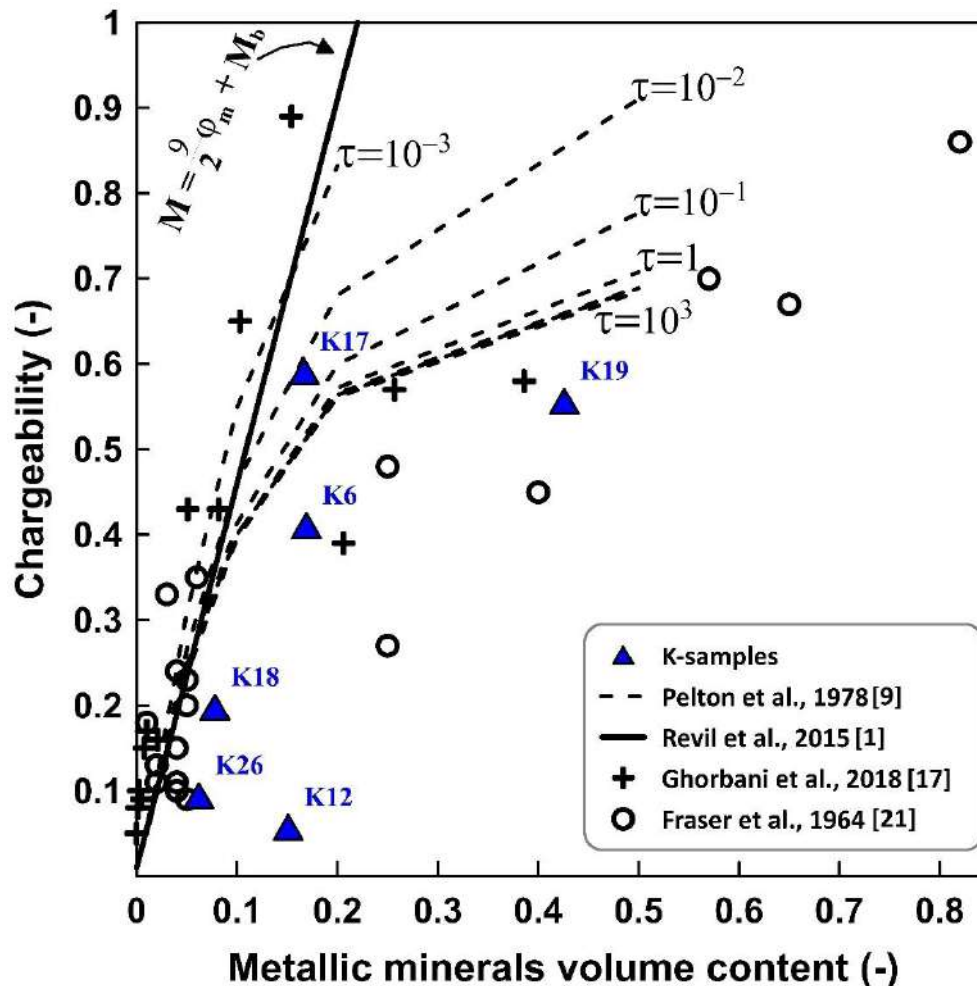
شکل (۳): (a) ارتباط خطی مستقیم بین بارپذیری نرمال و CEC. (b) ارتباط واضحی بین بارپذیری و CEC دیده نمی‌شود.

اولین مدل کمی که ارتباط بین بارپذیری و محتوی حجمی کانی‌های فلزی تا ۲۲ درصد را بیان می‌کند، توسط نویسندگان مرجع [۱] ارائه شد (معادله ۱). با این وجود مدل مذکور در محیط‌های دارای محتوی حجمی فلزی بالاتر از ۲۲ درصد و غیر افشان، به خوبی بر

داده‌های تجربی منطبق نمی‌شود. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر برای بررسی ارتباط بین بارپذیری و محتوی حجمی کانی‌های فلزی در محیط‌های اخیر، از نمونه‌های کوشک و داده‌های مستخرج از مراجع [۱۷] و [۲۱] استفاده شد. این نمونه‌ها و داده‌ها دارای محتوی حجمی کانی‌های فلزی از کم تا زیاد هستند و برای بررسی مدل مرجع [۱] در حالت تنوع درصد ذرات فلزی مناسب به شمار می‌آیند. در شکل (۴) نمودار بارپذیری در برابر محتوی حجمی ذرات فلزی ترسیم شده است. خط رسم‌شده با استفاده از معادله‌ی (۱) در این شکل مشاهده می‌شود. علاوه‌براین خط‌چین‌هایی هم در این شکل قابل مشاهده‌اند که از نمودار بارپذیری - محتوی حجمی ذرات فلزی - ثابت زمانی $M-\phi_m-\tau$ در مرجع [۹] استخراج شده‌اند. با توجه به نمودار شکل (۴)، با افزایش محتوی حجمی ذرات فلزی، بارپذیری کاهش می‌یابد، در حالی که ثابت زمانی آن‌ها در حال افزایش است.

به نظر می‌رسد کاهش بارپذیری با افزایش محتوی حجمی ذرات فلزی، به تماس و ارتباط بین ذرات فلزی و کاهش ناهمگنی محیط متخلخل و کاهش نواحی بارپذیر مربوط باشد. همچنین احتمالاً اتصال و در نتیجه بزرگ شدن ذرات فلزی در نمونه‌های کوشک، دلیل افزایش ثابت زمانی آن‌ها باشد.

در واقع با ترسیم نمودار شکل (۴) مشاهده می‌شود که مدل معادله‌ی (۱) نمی‌تواند به خوبی بر نمونه‌های دارای ذرات فلزی بیش‌تر از ۲۲ درصد انطباق یابد. به عبارت دیگر ضرایب پیشنهادی در مدل معادله‌ی (۱) برای تقریب محتوی حجمی فلزات در این قبیل نمونه‌ها مناسب نیستند. همچنین در محیط‌های دارای ذرات فلزی بیش‌تر از ۲۲ درصد، بر خلاف آنچه معادله‌ی (۱) بیان می‌کند، بارپذیری تنها به محتوی حجمی ذرات فلزی و بارپذیری مواد تشکیل‌دهنده‌ی زمینه وابسته نیست. بلکه در این محیط‌ها، برای دست‌یابی به تقریب بهتری از محتوی حجمی ذرات فلزی با استفاده از مقدار بارپذیری، لازم است مؤلفه‌ی ثابت زمانی نیز به رابطه‌ی بارپذیری - محتوی حجمی افزوده شود.



شکل (۴): نمایش تغییرات بارپذیری به عنوان تابعی از محتوی حجمی ذرات فلزی و ثابت زمانی در نمونه‌های کوشک و داده‌های مستخرج از مراجع [۱۷] و [۲۱].

نتیجه‌گیری

مشاهدات پژوهش حاضر نشان داد که پارامتر پتروفیزیکی اثرگذار بر بارپذیری، محتوی حجمی کانه‌های فلزی است. در حالی که بارپذیری نرمال به دلیل اثرپذیری از CEC ، تحت تأثیر درصد و نوع کانی‌های رسی است. بنابراین برای شناخت نواحی دارای محتوی فلزی بارپذیر باید از پارامتر بارپذیری بهره برد و به منظور تشخیص نواحی رسی و دگرسانی‌های هیدروترمالی از بارپذیری نرمال. علاوه بر این افزایش محتوی حجمی کانی‌های فلزی بارپذیر (بیشتر از ۲۲ درصد) موجب کاهش بارپذیری و افزایش ثابت زمانی می‌شود. بنابراین استفاده از مدلی مرکب از بارپذیری، محتوی حجمی ذرات فلزی، ثابت زمانی و بارپذیری مواد تشکیل‌دهنده‌ی زمینه برای تقریب محتوی حجمی کانی‌های فلزی از طریق اندازه‌گیری‌های روش قطبش القایی مناسب‌تر از مدل پیشنهادی مرجع [۱] است.

مراجع

- Revil, A., Florsch, N. and Mao, D.; "Induced polarization response of porous media with metallic particles- Part 1: A theory for disseminated semiconductors", *Geophysics*, 80(5), D525-D538.013, 2015.
- Revil, A.; "Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer", *Water Resources Research*, 48(2), W02517, 2012.
- Revil, A., Ghorbani, A., Jougnot, D. and Yven, B.; "Induced polarization of clay-rich materials- Part 1: The effect of desiccation", *Geophysics*, 88(4), 1-16, 2023.

- Ciesielski, H., Sterckeman, T., Santerne, M. and Willery, J.P.; "Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions", *Agronomie: Agriculture and Environment*, 17(1), 1-7, 1997.
- Revil, A., Qi, Y., Ghorbani, A., Soueid Ahmed, A., Ricci, T. and Labazuy, P.; "Electrical conductivity and induced polarization investigations at Krafla volcano, Iceland", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 368, 73-90, 2018d.
- Revil, A., Coperey, A., Mao, D., Abdulsamad, F., Ghorbani, A., Rossi, M. and Gasquet, D.; "Induced polarization response of porous media with metallic particles- Part 8: Influence of temperature and salinity", *Geophysics*, 83(6), E435-E456, 2018c.
- Zimmermann, E., Kemna, A., Berwix, J., Glaas, W., Munch, H. and Huisman, J.; "A high accuracy impedance spectrometer for measuring sediments with low polarizability", *Measurement Science and Technology*, 19(10), 105603, 2008.
- Wang, C. and Slater, L.D.; "Extending accurate spectral induced polarization measurements into the kHz range: modelling and removal of errors from interactions between the parasitic capacitive coupling and the sample holder", *Geophysical Journal International*, 218(2), 895-912, 2019.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R. and Nelson, P.H.; "Mineral Discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP", *Geophysics*, 43(3), 588-609, 1978.
- Major, J. and Silic, J.; "Restrictions on the use of Cole-Cole dispersion models in complex resistivity interpretation", *Geophysics*, 46, 916-931, 1981.
- Vanhala, H.; "Laboratory and field studies of environmental and exploration applications of the spectral induced polarization (SIP) method", *Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland*, 1997a.
- Chen, J., Hubbard, S.S., Williams, K.H., Flores-Orozco, A. and Kemna, A.; "Estimating the spatiotemporal distribution of geochemical parameters associated with biostimulation using spectral induced polarization data and hierarchical Bayesian models", *Water Resources Research*, 48(5), W0555, 2012.
- Meimaroglou, N. and Mouzakis, C.; "Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars. *Construction and Building Materials*", 221(3), 27-39, 2019.
- Revil, A., Qi, Y., Ghorbani, A., Gresse, M. and Thomas, D.M.; "Induced polarization of volcanic rocks. 5. Imaging the temperature field of shield volcanoes", *Geophysical Journal International*, 225(3), 1492-1509, 2021.
- Abdulsamad, F., Revil, A., Prime, N., Gnonnoue, P.Y., Plé, O. and Schmutz, M.; "Complex conductivity of rammed earth", *Engineering Geology, Elsevier*, 273, 2020.
- Abdulsamad, F., Revil, A., Ghorbani, A., Toy, V., Kirilova, M., Coperey, A., Duvillard, P.A., Ménard, G. and Ravanel, L.; "Complex Conductivity of Graphitic Schists and Sandstones", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 124(8), 8223-8249, 2019.
- Ghorbani, A., Revil, A., Coperey, A., Soueid Ahmed, A., Roque, S., Heap, M.J., Grandis, H. and Viveiros, F.; "Complex conductivity of volcanic rocks and the geophysical mapping of alteration in volcanoes", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 106-127, 2018.
- Mao, D., Revil, A. and Hinton, J.; "Induced polarization response of porous media with metallic particles- Part 4: Detection of metallic and nonmetallic targets in time-domain-induced polarization tomography", *Geophysics*, 81(4), D345-D361, 2016.
- Revil, A., Le Breton, M., Niu, Q., Wallin, E., Haskins, E. and Thomas, D. M.; "Induced polarization of volcanic rocks. 2. Influence of pore size and permeability", *Geophysical Journal International*, 208(2), 814-825, 2017f.
- Duvillard, P.A., Revil, A., Qi, Y., Soueid Ahmed, A., Coperey, A. and Ravanel, L.; "Three-Dimensional Electrical Conductivity and Induced Polarization Tomography of a Rock Glacier", [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 123(11), 9528-9554, 2018.
- Fraser, D.C., Keevil, N.B. and Ward, S.H.; "Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment", *Geophysics*. XXIX(5), 832-847, 1964.

مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده اکتشافی مس قائن

حمیدرضا رمزی^۱، سارا عذیری^۲

^۱ حمیدرضا رمزی استاد گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ramazi@aut.ac.ir
^۲ سارا عذیری دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ sara.o@aut.ac.ir
* نویسنده مسئول: سارا عذیری

چکیده فارسی

در این مقاله به بررسی مطالعات ژئوفیزیکی با روش‌های پلاریزاسیون القایی (IP) و مقاومت ویژه الکتریکی (RS) در محدوده اکتشافی قائن در استان خراسان جنوبی پرداخته شده است. در محدوده مورد مطالعه آثاری از معدن کاری‌های کهن دیده می‌شود که به احتمال قوی مربوط به کانسارهای سولفیدی به ویژه سولفیدهای مس می‌باشد. در روش‌های ژئوالکتریک آرایه‌ها نقش مهمی در میزان موفقیت برداشت‌ها دارند و هر یک برای اهداف خاصی مناسب هستند. در محدوده اکتشافی قائن، آرایه جدید (CRSP Combined Resistivity Sounding & Profiling) مورد استفاده قرار گرفت. این آرایه یک آرایه ترکیبی از گمانه‌زنی و پروفیل‌زنی الکتریکی است که می‌تواند در شرایط زمین‌شناسی مختلف به‌ویژه در پیکره‌های بی‌شکل به نتایج بسیار مفید بیانجامد. طراحی برداشت‌ها به گونه‌ای انجام شده است که افزون بر نیمرخ‌ها، بتوان نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری و شارژ ایلیته را برای ژرفای مختلف و یک نقشه هم با استفاده از برداشت‌های مستطیلی تهیه نمود. در راستای پروفیل‌های برداشت شده نیمرخ‌های شارژ ایلیته و مقاومت ویژه ظاهری تهیه شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پیکره‌های معدنی ثبت شده به صورت رگه‌های کم‌ضخامت پرشیب، دارای روند تقریباً خاوری-باختری هستند. در جهت عمق آنومالی‌ها شاخص‌تر و پرشمارتر می‌شوند به گونه‌ای که در ژرفای بیش از ۱۰۰ متری چندین آنومالی آشکار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون القایی، مقاومت ویژه الکتریکی، آرایه CRSP، محدوده اکتشافی قائن، خراسان جنوبی

Geophysical studies in the exploratory area of Copper Qain

Ramazi Hamidreza¹, Ozayri Sara²

¹ Ramazi Hamidreza, Professor of mining department, Amirkabir University of Technology ; ramazi@aut.ac.ir

² Ozayri Sara, PhD student in mining exploration engineering, Amirkabir University of Technology; sara.o@aut.ac.ir

* Corresponding author: Ozayri Sara

ABSTRACT

This paper is devoted to geophysical study in a copper explanatory area, located in Gain district, North Khorasan province, Iran. Some traces of copper minerals were observed in this study. The goal of this study has been detection of the probable mineralized bodies, so the electrical methods of Ip and Rs were applied. Electrodes arrays play important roles in Ip and Rs methods. Concerning depth and shapes of the probable mineral bodies, a new electrodes array so called CRSP (Combined Resistivity Sounding and Profiling) was used. This array is very suitable for detecting geological bodies with complicated shapes, in deferent geological situations. It is possible to have sounding data, as well as profiling ones, simultaneously, by using this array. There for, the obtained data provides to compile Ip and Rs sections along the surveyed profiles, sounding curves, as well as Ip and Rs maps for various depths. The mentioned sections and maps were compiled for the Ghain area. Interpretation of the compiled sections and maps, leads to detect some copper mineralized bodies in the area. It looks that

these bodies have win Shape, low thickness, and high dip angle. The quality and quantity of the mineralized bodies increases due to depth increment.

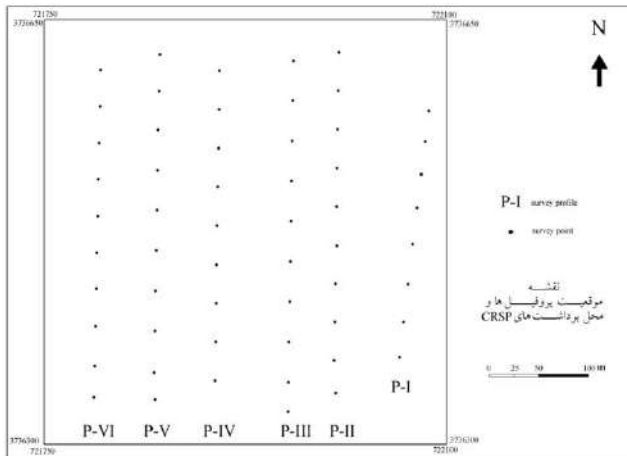
Keywords: Induced Polarization (IP), Resistivity (Rs), CRSP array, Copper deposit, Ghain, Iran

مقدمه

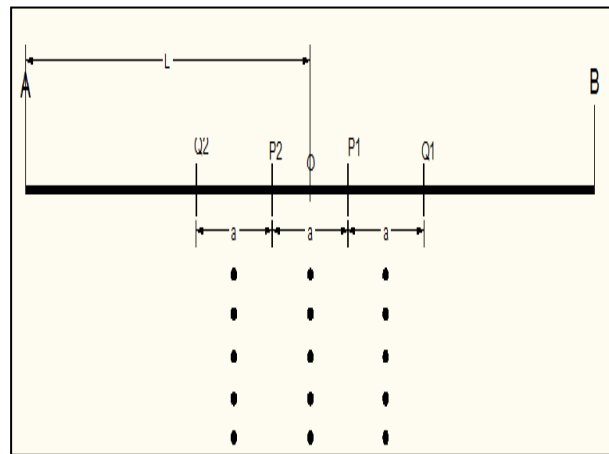
روش‌های ژئوالکتریکی ابزار مفیدی در اکتشاف منابع معدنی فلزی و غیرفلزی هستند. اگرچه استفاده از روش‌های الکتریکی یک کار معمول در صنعت اکتشاف است، اما تنوع و پیچیدگی ذخایر معدنی، تفسیرهای ژئوفیزیکی را چالش برانگیز و جالب می‌کند [۱]. اولین مطالعات IP/RS در ایران در سال ۱۹۴۶ انجام شده است. در بیشتر یافته‌های جدید، ژئوفیزیک نقش به‌سزایی در اکتشاف ذخایر پنهان در عمق دارد [۲]. روش‌های ژئوالکتریکی از متدهای گوناگونی تشکیل شده است. در این روش‌ها از میدان‌های موجود طبیعی زمین و همچنین از تزریق میدان‌های مصنوعی استفاده می‌شود [۳]. روش IP- RS در سطح ملی و بین‌المللی برای اکتشاف کانی‌سازی‌های نوع پورفیری، مانند کانساری های مس سرچشمه، ماهرآباد، توپیندا و کانسارهای شرق ویکتوریا مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. در روش‌های ژئوالکتریکی، آرایه‌ها نقش مهمی در میزان موفقیت برداشت‌ها دارند و هر یک برای اهداف خاصی مناسب هستند. در محدوده اکتشافی قائن از آرایه CRSP استفاده شده است. این آرایه ترکیب گمانه‌زنی الکتریکی و پروفیل‌زنی به‌طور هم‌زمان و با فواصل دلخواه است. این آرایه پاسخ بسیار مناسبی برای اکتشاف‌های میناتوری (با مقیاس و دقت بالا) دارد و به‌ویژه برای پیکره‌های بی‌شکل مناسب می‌باشد [۵]. آرایه CRSP هم تغییرات در عمق و هم تغییرات جانبی را به‌طور هم‌زمان بررسی می‌کند. اندازه‌گیری‌ها در این آرایه به‌گونه‌ای است که رسم نمودار گمانه الکتریکی و تهیه نیمرخ پیوسته مقاومت ویژه، به‌طور هم‌زمان امکان‌پذیر است [۶]. مهم‌ترین ره‌آورد استفاده از این آرایه، داده‌های مترامی است که از آن‌ها می‌توان برای تهیه نیمرخ‌ها و نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش‌پذیری استفاده کرد. نکته مهم در استفاده از این آرایه به‌دست آوردن داده‌ها به صورت پیوسته در طول پروفیل و در ژرفا خواهد بود. به عبارت دیگر هیچ گونه گپ (عدم پوشش) در طول پروفیل و در ژرفا وجود نخواهد داشت [۷]. با برداشت هر ایستگاه در این آرایه، سه گمانه الکتریکی به‌طور هم‌زمان تا ژرفای مورد نظر برداشت می‌شود. سپس می‌توان برداشت‌ها را در ایستگاه بعد که در ادامه ایستگاه قبل است، انجام داد.

روش‌های تحقیق

برای مطالعه پیکره‌های معدنی که به شکل دایک‌ها، رگه‌ها، زون‌ها و لایه نازک و پرشیب هستند و ویژگی‌های الکتریکی آن‌ها با سنگ درون‌گیر متفاوت است، معمولاً از ترکیب روش‌های ژئوالکتریکی استفاده می‌شود [۶]. اگر این پیکره‌ها دارای ویژگی قطبش‌پذیری باشند برداشت هم‌زمان IP و RS می‌تواند به نتایج ارزنده‌ای بینجامد [۵]. در این مطالعه از روش‌های RS و IP در حوزه زمان استفاده شده است. به این منظور محدوده مورد مطالعه به مستطیل‌های مناسب تقسیم و در هر مستطیل پنج پروفیل با فواصل نقاط اندازه‌گیری روی پروفیل‌ها ۲۰ متر (فواصل الکترودهای گیرنده نیز ۲۰ متر بوده است) برداشت شد. افزون بر برداشت‌های فوق شش پروفیل با راستای تقریباً شمالی- جنوبی که کم و بیش عمود بر روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی است با استفاده از آرایه CRSP طراحی شد. طراحی این پروفیل‌ها به گونه‌ای انجام شده که یک پوشش کامل در طول پروفیل از داده‌ها به دست آید. فواصل نقاط اندازه‌گیری در طول پروفیل ۱۰ متر می‌باشد. از داده‌های حاصل افزون بر تهیه نیمرخ‌های مقاومت ویژه و شارژ ابیلیته، در ۴ ژرفای مختلف ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ متری، نقشه‌های RS و IP تهیه شده است. از سوی دیگر نیمرخ‌های IP و RS با فواصل داده برداری ۱۰ متر در جهت ژرفا و ۱۰ متر در راستای افق تهیه شده است. محل پروفیل‌های برداشت شده در شکل ۲ ارائه شده است.



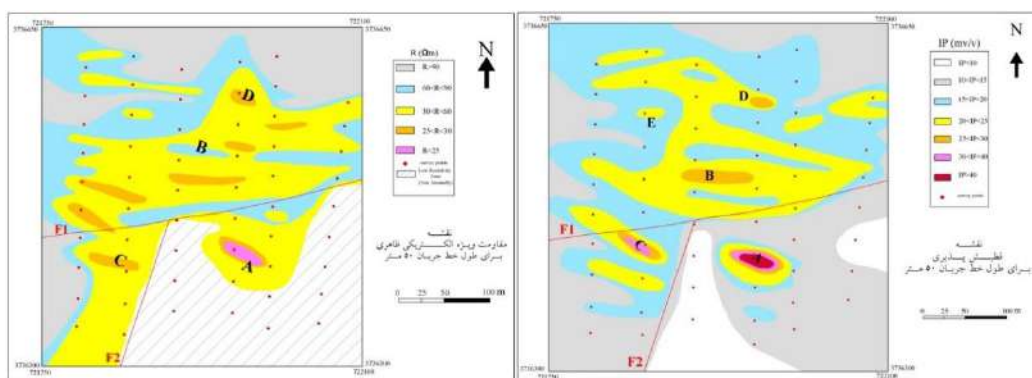
شکل (۲): محل پروفیل‌های برداشت شده



شکل (۱): آرایه CRSP

یافته‌ها

پس از انجام پردازش‌های مقدماتی با استفاده از نتایج حاصل، نیمرخ‌ها و نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی و شارژ اِبیلیته تهیه شد. همانگونه که اشاره شد طراحی برداشت‌ها به گونه‌ای انجام شده است که بتوان نقشه مقاومت ویژه ظاهری و چهار نقشه برای شارژ اِبیلیته ژرفاهای مختلف و یک نقشه هم با استفاده از برداشت‌های مستطیلی تهیه شده شود (شکل‌های ۳ الی ۵). رنگ آمیزی نیمرخ‌های IP و RS به گونه‌ای انجام شده است که محدوده‌های آنومالی در هر دو به یک رنگ نمایش داده شده باشند. نتایج حاصل از این نیمرخ‌ها نیز ارائه شده است (شکل‌های ۶ و ۷). نکات اشاره شده در مورد رنگ‌آمیزی نقشه‌ها در نیمرخ‌ها هم اعمال شده‌اند. محدوده‌های آنومالی در روی نیمرخ‌ها هم مشخص شده‌اند.

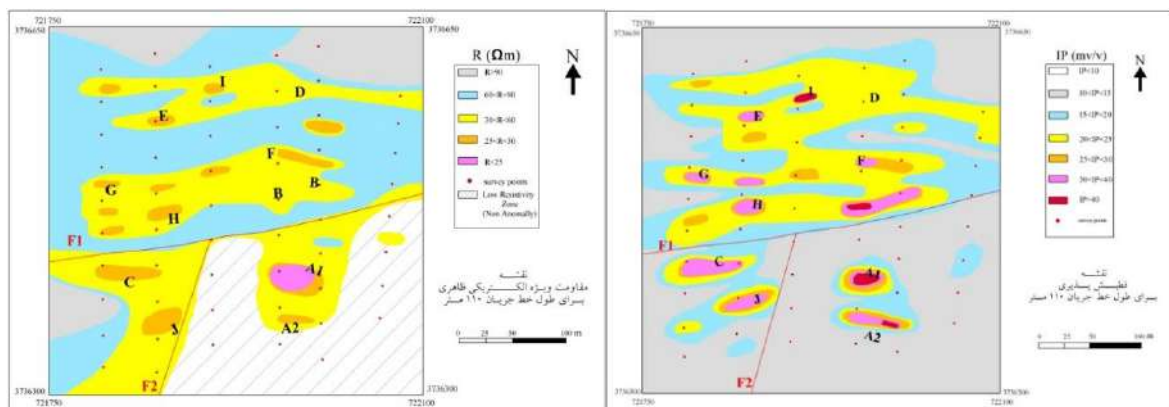


شکل (۳): نقشه مقاومت الکتریکی و قطبش پذیری برای طول خط جریان ۵۰ متر بهتر تیب از چپ به راست

ژرفای مؤثر در این نقشه (شکل ۳) می‌تواند تا ۲۵ متر برسد. ولی به طور معمول کمتر از ۲۵ متر است. میزان زمینه فعلی قطبش پذیری در محدوده مورد مطالعه را می‌توان حدود ۲٪ در نظر گرفت. با توجه به این زمینه می‌توان گفت که چند محدوده دارای آنومالی وجود دارد که وسیع‌ترین آنها در مرکز محدوده مورد مطالعه قرار دارد. ولی در داخل این محدوده بی‌هنجار زون‌های کوچکی وجود دارد که میزان قطبش پذیری در آنها کمتر از مقدار زمینه است. بررسی دقیق‌تر این نقشه و تلفیق آن با شرایط زمین شناسی به این نتیجه می‌انجامد که پیکره‌های معدنی بصورت رگه‌های نازک هستند که کشیدگی آنها عموماً دارای روند خاوری-باختری است. به هر حال مهم‌ترین

آنومالی در این نقشه در نقطه A (شکل ۳) ثبت شده است. که میزان آن بیش از ۶ درصد است و بر روی یک کند و کاو کهن نسبتاً بزرگ قرار گرفته است. افزون بر این آنومالی در نقاط D, C, B و E نیز چهار آنومالی دیگر ثبت شده که میزان آنها کمتر از نقطه A است. ضمناً به احتمال قوی گسل F1 با روند تقریباً خاوری-باختری و گسل F2 با روند تقریباً شمالی-جنوبی در این محدوده وجود دارد که تأثیر آنها در نقشه‌ها قابل ردیابی است. (شکل ۳). نتایج حاصل از برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی با طول خط جریان ۵۰ متر در شکل (۳) ارائه شده است. محل بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه قطبش‌پذیری یعنی نقاط A, B, C, در این نقشه نیز نمایان شده‌اند. در محدوده‌های A, B, C و E مقاومت ویژه با بی‌هنجاری IP کاملاً همخوانی دارد. گسل‌های F1 و F2 نیز که در نقشه قطبش‌پذیری قابل شناسایی بودند در این نقشه نیز باید توجه نمود که عملکرد این گسل‌ها باعث شده که گوشه جنوب خاوری محدوده بسوی پائین حرکت نماید و زمینه مقاومت ویژه الکتریکی در این محدوده نسبت به محدوده بالایی به شدت کاهش یابد از این رو محدوده که مقاومت ویژه الکتریکی آن کمتر از ۳۰ اهم متر است گرچه از نظر مقاومت ویژه یک آنومالی محسوب می‌شود ولی از نظر ماده معدنی آنومالی نیست به عبارت دیگر در این محدوده که با راهنمای Low Resistivity, Non-Anomaly نمایه شده است ماده معدنی وجود ندارد.

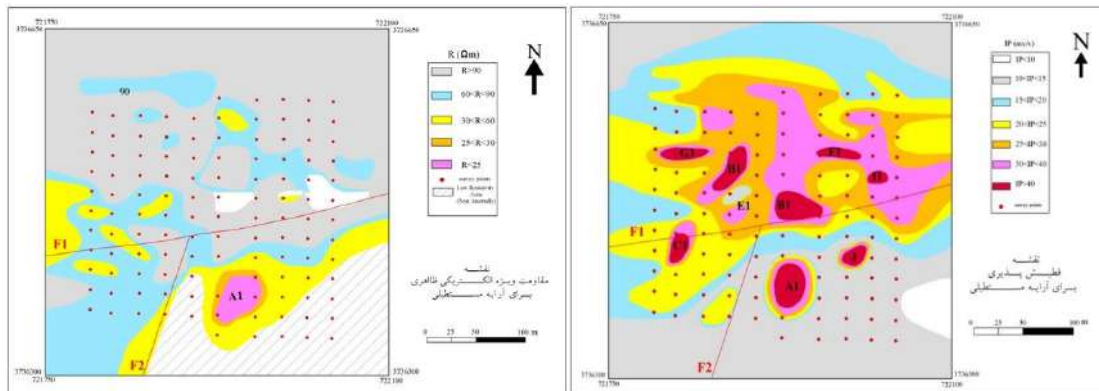
نقشه قطبش‌پذیری برای طول خط جریان ۱۱۰ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود گسل‌های F1 و F2 در این نقشه نیز قابل شناسایی هستند و آنومالی‌های A, B, C هم مانند نقشه‌های قبلی ثبت شده‌اند. به نظر می‌رسد که آنومالی کوچک دیگری در جنوب آنومالی A نیز نمایان شده است. آنومالی D در این نقشه محو شده و بنظر می‌رسد که این آنومالی تا ژرفای افزون بر ۵۰ متر گسترش نداشته باشد. آنومالی‌های E, F, G و H در این نقشه هم نمایان شده‌اند و افزون بر آنها آنومالی‌های I و J هم ثبت شده اند که در نقشه‌های قبلی وجود ندارند. ژرفای برخورد به این آنومالی‌ها قاعدتاً باید افزون بر ۵۰ متر باشد. نقشه مقاومت ویژه الکتریکی طول خط جریان ۱۱۰ در شکل ۴ می‌باشد. آنومالی‌های نمایان شده در این نقشه که با حروف A تا J نشان داده شده‌اند تا حد خوبی با آنومالی‌های نقشه قطبش‌پذیری هماهنگی دارند و باید اشاره نمود که افزون بر این آنومالی‌ها، در نقاط دیگر نیز آنومالی‌های کوچکی ثبت شده که همگی در شکل ارائه شده‌اند. زون با مقاومت ویژه الکتریکی کم واقع در جنوب خاوری محدوده مورد مطالعه در این نقشه نیز به روشنی دیده می‌شود. همانگونه که اشاره شد این مقاومت کم ربطی به وجود ماده معدنی ندارد.



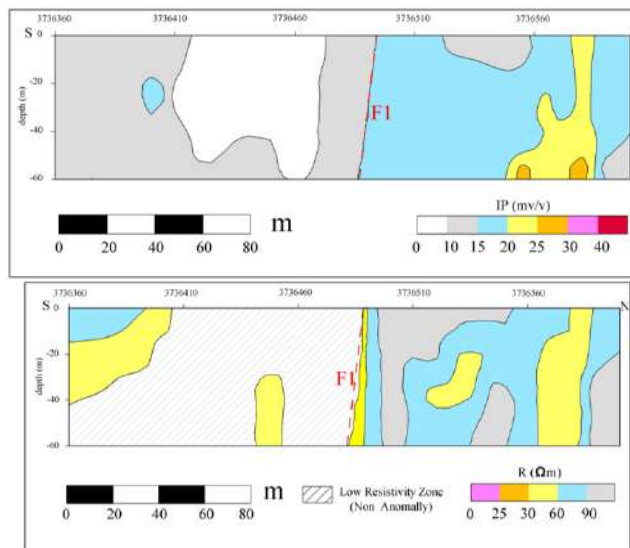
شکل (۴): نقشه مقاومت الکتریکی و قطبش پذیری برای طول خط جریان ۱۱۰ متر به ترتیب از چپ به راست

نقشه قطبش‌پذیری برای طول خط جریان ۱۱۰ در شکل ۴ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود گسل‌های F1 و F2 در این نقشه نیز قابل شناسایی هستند و آنومالی‌های A, B, C هم مانند نقشه‌های قبلی ثبت شده‌اند. به نظر می‌رسد که آنومالی کوچک دیگری در جنوب آنومالی A نیز نمایان شده است. آنومالی D در این نقشه محو شده و بنظر می‌رسد که این آنومالی تا ژرفای افزون بر ۵۰ متر گسترش نداشته باشد. آنومالی‌های E, F, G و H در این نقشه هم نمایان شده‌اند و افزون بر آنها آنومالی‌های I و J هم ثبت شده اند که در نقشه‌های قبلی وجود ندارند. ژرفای برخورد به این آنومالی‌ها قاعدتاً باید افزون بر ۵۰ متر باشد. نقشه مقاومت ویژه الکتریکی طول خط

جریان ۱۱۰ در شکل ۴ می‌باشد. آنومالی‌های نمایان شده در این نقشه که با حروف A تا J نشان داده شده‌اند تا حد خوبی با آنومالی‌های نقشه قطبش‌پذیری هماهنگی دارند و باید اشاره نمود که افزون بر این آنومالی‌ها، در نقاط دیگر نیز آنومالی‌های کوچکی ثبت شده که همگی در شکل ارائه شده‌اند. زون با مقاومت ویژه الکتریکی کم واقع در جنوب خاوری محدوده مورد مطالعه در این نقشه نیز به روشنی دیده می‌شود. همانگونه که اشاره شد این مقاومت کم ربطی به وجود ماده معدنی ندارد.



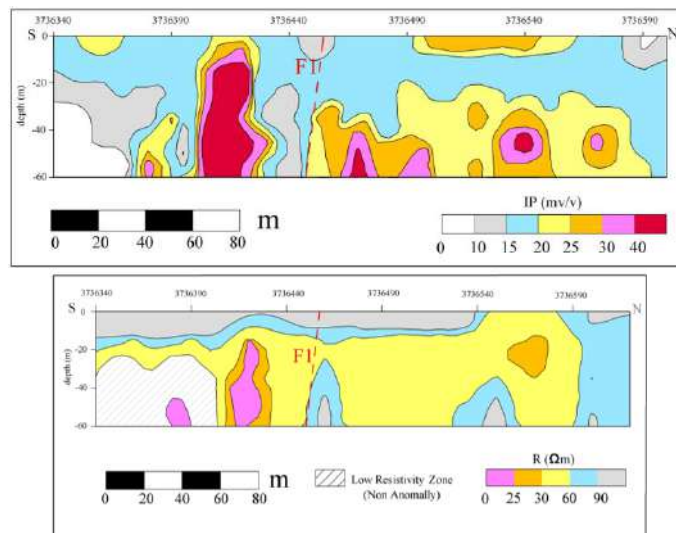
شکل (۵): نقشه مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش پذیری القایی حاصل از برداشت‌ها با آرایه مستطیلی به ترتیب از چپ به راست



شکل (۶): نیمرخ مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و قطبش‌پذیری در راستای پروفیل I به ترتیب از چپ به راست

نیمرخ‌ها در راستای پروفیل I در کناره خاوری محدوده مورد مطالعه و برای تغییرات قطبش‌پذیری و مقاومت ویژه الکتریکی تهیه شده است (شکل ۶). همانگونه که در شکل دیده می‌شود میزان قطبش‌پذیری در این نیمرخ در حد زمینه محلی و یا کمتر از آن است و آنومالی در خور توجهی در آن دیده نمی‌شود. نیمرخ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری نیز آورده شده است. همانگونه که دیده می‌شود هماهنگی بین تغییرات قطبش‌پذیری و مقاومت ویژه در قسمت شمالی نیمرخ‌ها چشمگیر است ولی در بخش جنوبی یک زون با مقاومت ویژه کم وجود دارد که مربوط به وجود پیکره‌های معدنی نیست. بلکه همانگونه که در تفسیر نقشه‌ها اشاره شد میزان زمینه

مقاومت ویژه الکتریکی در این زون که در جنوب گسل F1 و خاور گسل F2 قرار گرفته، به حد چشمگیری کمتر از زونهای دیگر محدوده مورد مطالعه است.



شکل (۷): نمیرخ مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و قطبش پذیری در راستای پروفیل III به ترتیب از چپ به راست

این نیمرخها در راستای پروفیل شماره III تهیه شده که دارای روند شمالی جنوبی است و از محل یک کند و کاو کهن که بزرگترین کند و کاو در محدوده است، می‌گذرد. نتایج حاصل از برداشت‌های قطبش پذیری القایی و برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی ارائه شده است (شکل ۷). همانگونه که در این شکلها مشاهده می‌شود در راستای خط برداشت شماره III چند آنومالی وجود دارد که مهمترین آنها آنومالی A است که از ژرفای نسبتاً کم شروع تا ژرفای افزون بر ۶۰ متر گسترش دارد. نتایج حاصل از برداشت‌های مستطیلی نشان می‌دهد که این آنومالی تا ژرفای بالاتر از ۱۰۰ هم گسترش دارد و در جهت عمق گسترش بیشتری نیز پیدا می‌کند و حتی می‌توان گفت که یک پیکره معدنی دیگر در جنوب آن وجود دارد که در نیمرخها به علامت A1 نمایه شده است. آنومالیهای B، F و D که در نقشهها به آنها اشاره شد در این نیمرخها نیز کم و بیش نمایان شده‌اند. زون کم مقاومت بدون آنومالی معدنی در جنوب نیمرخ مقاومت ویژه الکتریکی نیز دیده می‌شود. باید توجه نمود که قسمت‌های سطحی این زون (ژرفای کمتر از ۲۰ متر) به علت وجود رطوبت کم دارای مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً زیادی است.

تفسیر نتایج

با توجه به مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده و با لحاظ نمودن مسائل زمین‌شناسی، ریخت‌زمین‌شناسی، توپوگرافی و کانی‌شناسی می‌توان نتایج برداشت‌ها، پردازش‌ها و تفسیر داده‌ها را به این صورت خلاصه نمود. در مجموع به داده‌ها و نتایج حاصل از روش قطبش‌پذیری می‌توان اعتماد بیشتری نمود. از این رو در تفسیرها به نقشه‌ها و نیمرخ‌های حاصل از این روش وزن و اهمیت بیشتری داده شده است. در محدوده دو گسل وجود دارد. یکی دارای روند تقریباً خاوری-باختری است و در نقشه‌ها و نیمرخها با علامت F1 و دیگری که یک گسل احتمالی است دارای روند تقریباً شمالی-جنوبی است و در نقشه‌ها با علامت F2 نمایه شده است. زون جنوب خاوری محدوده مورد مطالعه که از شمال به گسل F1 و از باختر به گسل F2 محدود شده است، یک زون با مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً کم است. به عبارت دیگر زمینه مقاومت ویژه الکتریکی در این زون به مراتب کمتر از بقیه نقاط محدوده است. از این روی نمی‌توان کل این محدوده را به عنوان یک آنومالی معدنی در نظر گرفت. البته در این زون نیز پیکره‌های معدنی A و A1 وجود دارد که در نقشه‌ها و نیمرخها نشان داده

شده‌اند. به نظر می‌رسد که بهترین گزینه برای تعیین مقدار زمینه قطبش‌پذیری القایی، میزان ۲۰ میلی ولت بر ولت می‌باشد. از این رو محدوده‌هایی که میزان IP در آنها بیش از ۲۰ باشد دارای مقادیر بیشتر از زمینه محلی هستند. ولی در محدوده‌های پر عیار میزان IP به بیش از ۳۰ و حتی در مواردی به ۵۰ تا ۶۰ میلی ولت بر ولت می‌رسد ولی متأسفانه این محدوده‌ها کم شمار بوده و دارای گسترش کمی هستند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پیکره‌های معدنی به صورت رگه‌های کم‌ضخامت دارای روند تقریباً خاوری و پر شیب هستند. با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که در جهت عمق آنومالی‌ها شاخص‌تر و پرشمارتر می‌شوند به گونه‌ای که در ژرفای بیش از ۱۰۰ متری چندین آنومالی آشکار می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتیجه مطالعات انجام داده در این محدوده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- روش‌های IP & Rs و همچنین آرایه CRSP روش‌ها و آرایه مناسبی برای این مطالعات بوده اند و پیکره‌های کانی سازی شده به خوبی ثبت شده‌اند.
- بی‌هنجاری‌های ثبت شده هم در نقشه‌ها و هم در نیمرخ‌ها از لحاظ کمی و کیفی درخور اهمیت هستند و در جهت عمق گسترش بیشتر و کیفیت بهتری دارند.
- در محدوده دو ناپیوستگی ثبت شده که احتمالاً گسل هستند که در گسترش بی‌هنجاری‌ها و مرزهای آن نقش دارند.

نتیجه و جمع بندی

- مهم‌ترین برتری‌های استفاده از این آرایه CRSP به شرح زیر است:
- یک پوشش کامل در طول پروفیل از داده‌ها بدست می‌آید.
- ژرفای نفوذ جریان در این آرایه، چند برابر آرایه‌های مشابه از جمله دایپل- دایپل است و اختلاف پتانسیل ثبت شده در پرش دهم تقریباً ۱۰ برابر است (ضریب آرایه ۱/۰ است)، و دقت داده‌ها به همین نسبت افزایش می‌یابد.
- داده‌های حاصل، داده‌های مورد نیاز برای رسم نمودار گمانه‌های الکتریکی را تامین می‌کند.
- داده‌های حاصل امکان تهیه نیمرخ‌های RS و IP در راستای پروفیل را با دقت مورد نیاز فراهم می‌کند.
- افزون بر برآورد شارژ ابیلیته و مقاومت ویژه ظاهری می‌توان مقاومت ویژه حقیقی را در نقاط و ژرفاهای مختلف بدست آورد.
- در صورت وجود چند پروفیل در یک محدوده می‌توان نقشه‌های هم‌مقاومت و شارژ ابیلیته را برای طول خط جریان‌های مختلف تهیه نمود.
- شناسایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و پیکره‌ها در این روش به مراتب عملی‌تر از روش‌های دیگر است.

مراجع

- [۱] Mashhadi, S. R., Ramazi, H. "The application of resistivity and induced polarization methods in identification of skarn alteration haloes: A case study in the Qale-Alimoradkhan Area". (Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 23(3)), 363-368. 2018.
- [2] Bishop, J. R., Lewis, R. J. G. "Geophysical signatures of Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits". (Economic Geology, 87(3)), 913-930. 1992.
- [۳] Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. Applied geophysics. Cambridge university press. 1990.
- [۴] مهدوی، ا. کریم‌پور، م.ح. حیدریان شهری، م. ر. ملک‌زاده شفاوروی، آ. "زمین‌شیمی و تفکیک توده‌های نفوذی، ارتباط آن‌ها با کانی‌سازی و تفسیر داده‌های IP/RS در منطقه اکتشافی گزو". مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۸، ص ۱۰-۲، ۱۳۹۲.
- [۵] Ramazi, H., Mostafaie, K. "Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit

exploration". (Arabian Journal of Geosciences, 6), 2961-2970. 2013.

[۶] Mostafaie, K., Ramazi, H. "Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran". (Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 6(2)), 2220-6663. 2015.

[۷] Amini, A., Ramazi, H. "Anomaly enhancement in 2D electrical resistivity imaging method using a residual resistivity technique". (Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116(2)), 161-168. 2016.

وارون‌سازی دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک به منظور اکتشاف مس در محدوده بنوید اصفهان

مینا امیرنیا^۱، علیرضا عرب‌امیری^{۲*}، محمد فیلبندی کاشکولی^۳

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود minaamirnia91@gmail.com

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود alirezaarabamiri@yahoo.com

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، kashkoulimohammad@gmail.com

* نویسنده مسئول: علیرضا عرب‌امیری

چکیده فارسی

محدوده معدنی موضوع این تحقیق که به اختصار محدوده اکتشافی بنوید نامیده می‌شود، به مساحت ۵۰ هکتار در شرق استان اصفهان و تقریباً در ۱۳ کیلومتری جنوب روستای بنوید از توابع شهرستان نائین واقع شده است. در این محدوده اکتشافی شواهدی از کانی‌سازی مس، در فازهای اکسید (مالاکیت) و سولفید (کالکوپیریت) در واحدهای ولکانیکی دیده می‌شود؛ که همین موضوع انگیزه مطالعات بیشتر در محدوده را فراهم می‌کند. با توجه به مشاهده رخنمون‌های سطحی از کانی‌سازی در محدوده معدنی بنوید؛ با هدف اکتشاف مس و کانی‌های همراه و به منظور بررسی امکان وجود زون‌های بی‌هنجار قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه ظاهری مرتبط با کانی‌سازی کانی‌های سولفیدی مطالعات الکتریک به روش IP/Res در نه پروفیل برداشت شده است. هدف از اجرای مطالعات ژئوفیزیکی به روش IP/Res در این محدوده بررسی احتمال وجود بی‌هنجاری‌های قطبش‌القایی می‌باشد. در این مطالعه وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی با استفاده از نرم‌افزار ResIPY انجام شده است. نتیجه حاصل از مدل‌سازی منجر به تعیین یک منطقه کانی‌سازی احتمالی شده است، که پیشنهاد محل انجام حفاری مغزه‌گیری آن‌ها داده شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، مقاومت‌ویژه، قطبش‌القایی، کانی‌سازی، مس، بنوید

Two-dimensional inversion of geoelectric data for the purpose of copper exploration in Benvid area of Isfahan

Mina Amirnia¹, Alireza Arab-Amiri^{2*} and Mohammad Filbandi Kashkoul³

¹ Master Student, Shahrood University of Technology, Department of mining, petroleum and geophysics; minaamirnia1@gmail.com

² Associate professor, Shahrood University of Technology, Department of mining, petroleum and geophysics; alirezaarabamiri@yahoo.com

³ PhD student Shahrood University of Technology, Department of mining, petroleum and geophysics; kashkoulimohammad@gmail.com

* Corresponding author: Alireza Arab-Amiri

ABSTRACT

The subject of this research, referred to as the Benvid exploration area, is located in the east of Isfahan, South of Nain city and approximately 13 km south of Benvid village. In this exploration area, evidence of copper mineralization in oxide (malachite) and sulfide (chalcopyrite) phases is observed in volcanic units. This observation serves as the motivation for further studies in the area. Considering the outcrops in the Benvid area, the aim of this study is to explore copper and associated minerals and to investigate the possibility of anomalous polarization zones and apparent resistivity associated with sulfide mineralization. Electrical studies using the IP/Res method were conducted along two profiles. The goal of geophysical studies using the IP/Res method in this area is to investigate the possibility of polarization anomalies. Two-dimensional modeling has been done using ResIPY software. The result

of the modeling has led to the determination of one possible mineralization areas, which are suggested as the location for core drilling.

Keywords: Modeling, Resistivity, Polarization, Mineralization, Copper, Benvid

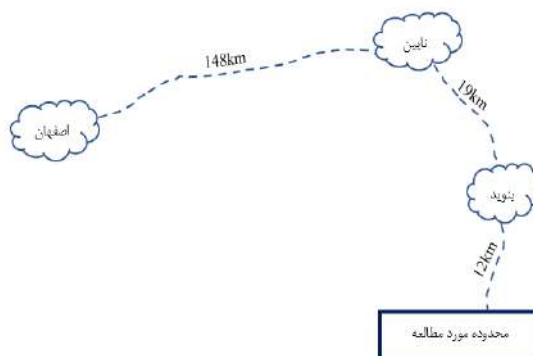
۱- مقدمه

با توجه به نقش مواد معدنی در تامین نیازهای اولیهی مختلف، جستجوی آن‌ها با روش‌های کارآمد ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به همراه اطلاعات زمین‌شناسی می‌تواند به گردآوری اطلاعات اکتشافی قابل اعتمادتری منجر شود [۱]. روش‌های ژئوفیزیکی، یکی از روش‌های اکتشافی غیرمخرب هستند که به طور غیرمستقیم به بررسی بی‌هنجاری‌های زیر سطحی پرداخته و نسبت به روش‌هایی مثل حفاری ارزان‌تر هستند [۲]. روش‌های ژئوالکتریک، یکی از انواع روش‌های ژئوفیزیکی هستند؛ که بر مبنای مطالعه ویژگی‌های الکتریکی زمین ایجاد شده‌اند [۳]. روش قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه، دو روش مهم در این دسته هستند که برای شناسایی گستره‌های کانی‌سازی سولفیدی بسیار کارآمد هستند. در زون‌های کانی‌سازی مس نیز این دو روش کارایی بالایی دارند. با توجه به کارایی بالای روش‌های ژئوالکتریک در شناسایی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی، ترکیب نتایج این روش‌ها و استفاده همزمان از آن‌ها، می‌تواند به شکلی کارآمد در شناسایی اهداف مورد نظر در اکتشافات معدنی مورد استفاده قرار گیرد [۴].

۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی

بنوید روستایی، از توابع شهرستان نائین است و دارای دو بخش مجزاء به نام‌های بنوید علیا و بنوید سفلی می‌باشد، محدوده اکتشافی بنوید، به مساحت ۵۰ هکتار در شرق استان اصفهان، جنوب شهرستان نائین و تقریباً در ۱۳ کیلومتری جنوب روستای بنوید واقع شده است [۵].

مسیر دسترسی به این محدوده، از طریق جاده آسفالته اصفهان-نائین پس از عبور از روستای بنوید با پیمودن مسیر جاده خاکی حدود ۱۲ کیلومتر در راستای جنوب به ضلع غربی محدوده میسر می‌گردد (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه دارای ارتفاعات نیمه خشن و بخش جنوبی و غرب به صورت دشت و آبرفت می‌باشد.



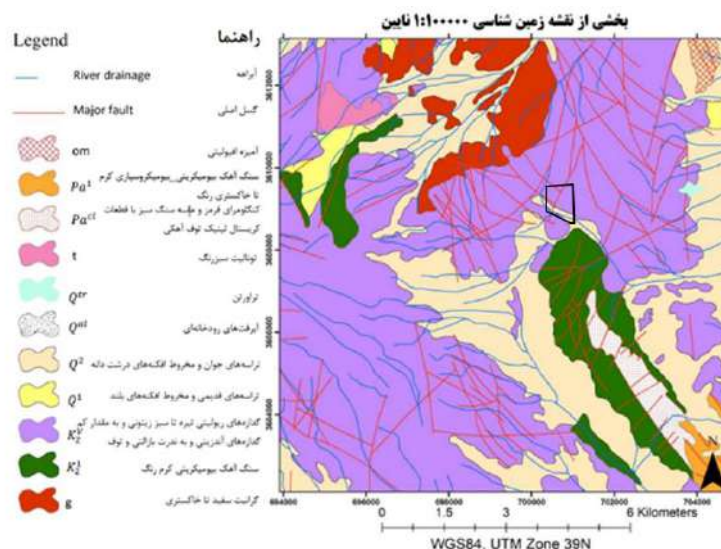
شکل (۶): راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه.

۳- سوابق مطالعات و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

تاکنون تحقیقات فراوانی در ناحیه نایین (شرق اصفهان)، در ارتباط با واحدهای ولکانیک و کانه‌زایی‌های متنوع صورت گرفته است. محدوده مورد اکتشاف در بخش جنوب غربی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نایین قرار دارد (شکل ۲). با توجه به نقشه زمین‌شناسی بخش اصلی رخنمون‌های سنگی این منطقه عبارتند از گدازه‌های ریولیتی تیره و گدازه‌های آندزیتی و به ندرت بازالتی و توف با سن کرتاسه بالایی (K_2^v) و تراسه‌های جوان با مخروط افکنه‌های دانه درشت با سن کواترنر (Q^2) می‌باشد [۶].

محدوده اکتشافی بنوید از نظر موقعیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختاری در بخش میانی نوار ماگمایی ارومیه-دختر در شرق استان اصفهان می‌باشد [۷]. از منظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران، این زون مانند دیگر کمان‌های ماگمایی حاشیه قاره آند (آمریکای جنوبی) و کردیلرا (آمریکای شمالی)، میزبان کانسارهای مس پورفیری و دیگر کانسارها از جمله طلا، آهن و مولیبدن می‌باشد [۸،۹]. فعالیت آتشفشانی-نفوذی در این زون از دوره زمانی ائوسن آغاز شد؛ در طول این دوره توده‌های پلوتونیک-مزوزوئیک پسین و پالئوژن درون سنگ‌های رسوبی کرتاسه نفوذ کرده‌اند [۹].

از نظر سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های پیروکلاستیک، دیوریت، گابرو، تراکی آندزیت، داسیت، و توف می‌باشد. این سنگ‌ها توسط توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی با سن الیگومیوسن قطع شده‌اند. در این ناحیه ساختاری، توده‌های گرانیتوئیدی که همراه با کانسارهای مس پورفیری هستند، به نوع کالک آلکالن و شبه آداکیتی تعلق دارند. این توده‌ها باعث ایجاد کانسارهای مس در مناطقی همچون سرچشمه، دالی، میدوک، سونگون، پرکام، دره زرشک، علی‌آباد و مس ایرانیان شده‌اند [۹،۱۰].



شکل ۷: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه [۱۱،۱۲]

۴- روش‌های ژئوفیزیکی مناسب

برای اکتشاف مناطق کانی‌سازی، ترکیب گسترده‌ای از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده می‌شود، از جمله روش‌های مورد استفاده می‌توان مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی (IP\Res) را نام برد [۱۳]. روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی (IP\Res) اطلاعات بیشتری از ویژگی‌های الکتریکی زیرسطحی فراهم می‌کنند؛ همچنین می‌توانند در تشخیص معدن‌های سولفیدی یا اکسیدی به کار روند [۱۴]. روش‌های الکتریکی قابلیت اندازه‌گیری قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه را دارا هستند؛ و می‌توانند به طریق کارآمدی در کشف مناطق کانی‌سازی مس مورد استفاده قرارگیرند. این ترکیب از روش‌ها به همراه یکدیگر، تصویر جامعی از ویژگی‌های زیرسطحی منطقه را ارائه می‌دهد و به

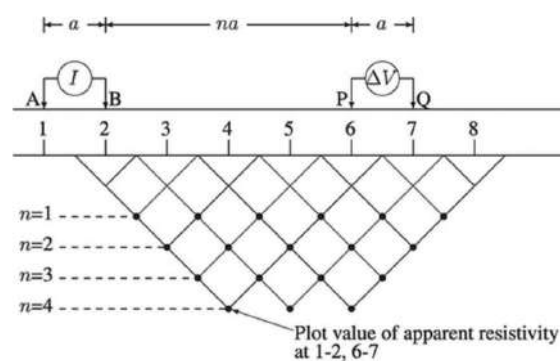
بهترین شکل ممکن در فرآیند اکتشاف و تعیین پتانسیل معدنی موقعیت مورد نظر کمک می‌کند. در محدوده معدنی بنوید با هدف اکتشاف مس و کانی‌های همراه به منظور بررسی امکان وجود زون‌های بی‌هنجار قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه ظاهری مرتبط با کانی‌سازی کانی‌های سولفیدی مطالعات ژئوفیزیکی به روش (IP\Res) در امتداد نُه پروفیل برداشت شده است.

۵- طراحی آرایش الکترودی و شبکه برداشت

برداشت‌های ژئوفیزیکی قابل اجرا در تمام مراحل اکتشافی از شناسایی تا تفصیلی می‌باشد. انتخاب آرایش الکترودها به عوامل مختلفی وابسته است. هدف اصلی دستیابی به بهترین آرایش الکترودی است؛ که با در نظر گرفتن تمام شرایط مرتبط با کار صورت می‌گیرد. آرایش دوقطبی-دوقطبی با توجه به اینکه اثر کوبلینگ الکترومغناطیسی در آن نسبت به روش‌های الکترودی دیگر، کمترین مقدار را داراست؛ انتخاب شده است. علاوه بر این، آرایش دوقطبی-دوقطبی به عنوان یک روش الکترودی، از نظر عملکرد و کیفیت اطلاعات به دلیل کاهش نویزهای محیطی و کمتر شدن اثرات جانبی مورد توجه است. این روش اغلب در مطالعات ژئوفیزیکی با هدف تفسیر دقیق و دقیق‌ترین اطلاعات مربوط به زیرسطحی کره زمین به کار می‌رود. این آرایه به علت کوچک بودن مقدار جفت‌شدگی مغناطیسی که بین سیم جریان و پتانسیل رخ می‌دهد، بیشترین عمق نفوذ، قدرت تفکیک جانبی و قائم خوب و بهترین مشخصه آن، قدرت تفکیک برای اهداف قائم باریک استفاده می‌شود، عیب این آرایه قدرت سیگنال پایین در مقایسه با آرایه مستطیلی و آرایه قطبی-دوقطبی می‌باشد [۱۵]. (شکل ۳) نمایش شماتیک از آرایه دوقطبی-دوقطبی با رسم شکل شبه مقطع را به ما نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل دیده می‌شود فواصل بین جفت الکترودهای جریان و پتانسیل برابر مقدار ثابت a می‌باشد. فاکتور n هم که در این آرایش اهمیت دارد برابر فاصله بین $P1$ و $C1$ بر a است. برای برداشت با این آرایش a در طول برداشت ثابت می‌ماند و مقدار n از ۸، ۱۰، ۱۲، ... به منظور افزایش عمق نفوذ افزایش می‌یابد. یکی از راه‌کارهای غلبه بر سیگنال بسیار پایین این آرایه برای مقادیر بالای n افزایش فاصله a بین هر یک از دوقطبی‌های جریان و پتانسیل برای کاهش افت پتانسیل، زمانی که طول کلی این آرایه برای افزایش عمق اکتشاف افزایش می‌یابد، می‌باشد. در صورت لزوم، اندازه‌گیری‌ها می‌توانند با مقادیر بیشتر فاصله جفت الکترودهای جریان یا پتانسیل و مقادیر مختلف n تکرار شوند n ‌های بزرگتر اطلاعات از اعماق بیشتری به ما می‌دهد [۱۶].

این آرایه نسبت به تغییرات افقی مقاومت‌ویژه برعکس تغییرات عمودی بسیار حساس است که این بدین معنی است که برای نقشه کردن ساختارهایی مانند دایک و حفره که عمودی هستند مناسب است، اما برای ساختارهای افقی مانند سیل یا لایه‌های رسوبی مناسب نیست. میانگین عمق نفوذ این آرایه بستگی به فاصله الکترودی a و فاکتور n دارد، در مجموع این آرایه عمق نفوذ کمتری نسبت به آرایه ونر دارد.



شکل ۸: نمایش شماتیک از آرایه دوقطبی-دوقطبی و شبه‌مقطع آن.

این روش به دلیل مزایایی که ارائه می‌دهد، به ویژه در محدوده اکتشافی، شواهدی از کانی‌سازی مس در فازهای اکسید (مالاکیت) و سولفید (کالکوپیریت) در واحدهای ولکانیکی را نمایان می‌سازد. برای شناسایی محدوده‌های مستعد، مطالعات مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی (IP\Res) در این منطقه با آرایش دوقطبی-دوقطبی در امتداد نه پروفیل با فواصل الکترودهای ۲۰ و ۴۰ متر برداشت گردید. در ادامه به علت محدودیت تنها نتایج یک پروفیل در این مطالعه آورده شده است [۱۷]. شکل چهار تمامی ایستگاه‌های برداشت را بر روی تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث [۱۸] نشان می‌دهد.

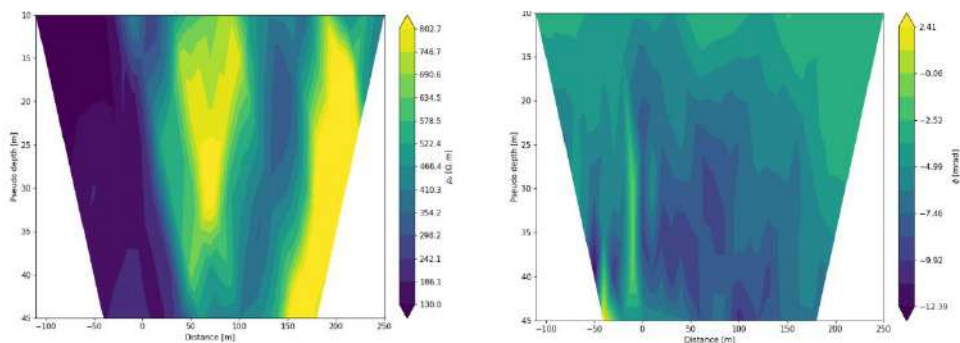


شکل ۹: نمایش ایستگاه‌های برداشت شده بر روی تصویر ماهواره‌ای [۱۹]

۶- ارائه داده‌های خام

قبل از اینکه هیچ عملیات فیلترگذاری و آماده‌سازی خاصی بر روی داده‌های برداشت شده اولیه انجام شود؛ شبه مقاطع منطبق بر پروفیل‌های مربوط به مقادیر قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه ظاهری به طور جداگانه ارائه می‌شود. (شکل ۵) [۱۹].

همان طور که در شکل پنج مشخص است شبه مقطع قطبش‌القایی یک زون بی‌هنجار را در عمق نشان می‌دهد در حالی که در شبه مقطع مقاومت‌ویژه دو زون بی‌هنجار در شرق و مرکز پروفیل مشاهده می‌شود. از آنجایی که شبه مقاطع ارائه شده تنها یک دید کلی از محل یا محل‌های کانی‌سازی را ارائه می‌دهند، ضروری است که کل داده‌های خام پس از اعمال تصحیحات لازم برای کاهش تأثیرات توپوگرافی و حذف داده‌های ناکارآمد، مدل‌سازی شوند. این اقدام به منظور به دست آوردن تصویر دقیق‌تری از گسترش جانبی و عمقی زون‌های کانی‌سازی انجام می‌شود. بنابراین، تصمیم‌گیری‌ها باید بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های دقیق‌تر و بدون تأثیرات زائد در نظر گرفته شوند.



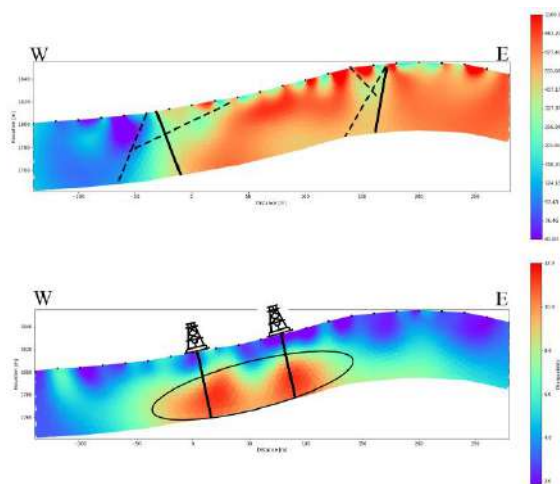
شکل ۱۰: شبه مقاطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه (چپ) و قطبش‌القایی (راست-به صورت فاز) پروفیل مورد مطالعه.

۷- مدل سازی داده ها

از آنجایی که شبه مقاطع ارائه شده تنها یک دید کلی از محل یا محل های کانی سازی را ارائه می دهند، ضروری است که کل داده های خام پس از اعمال تصحیحات لازم برای کاهش تأثیرات توپوگرافی و حذف داده های ناکارآمد، مدل سازی شوند. این اقدام به منظور به دست آوردن تصویر دقیق تری از گسترش جانبی و عمقی زون های کانی سازی انجام می شود. بنابراین، تصمیم گیری ها باید بر اساس نتایج مدل سازی های دقیق تر و بدون تأثیرات زائد در نظر گرفته شوند. وارون سازی داده های مقاومت ویژه و IP به کمک نرم افزار ResIPy [۲۰] انجام می شود. این نرم افزار یک مدل فیزیکی از زمین به ما می دهد که با شرایط زمین شناسی انطباق دارد. این نرم افزار از کدهای خانواده R2 [۲۱] برای مدلسازی پیشرو و وارون استفاده می کند. این کدها یک راه حل مدل های پیشرو و وارون برای جریان جاری (Current flow) در محیط های دوبعدی و سه بعدی مثلثی و چهارضلعی (Quadrilateral) است. راه حل وارون بر اساس یک تابع هدف منظم ترکیب شده با حداقل مربعات وزنی (یک راه حل از نوع آکام) است که در [۲۱] تعریف شده است. الکترودها را می توان روی سطح زمین یا در گمانه ها قرار داد. با توجه به مش های مثلثی توپوگرافی دقیقی می توان برای مدلسازی ایجاد کرد. در این پژوهش، تفسیر و مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی به همراه توپوگرافی، با استفاده از نرم افزار ذکر شده صورت گرفته است.

۸- تعبیر و تفسیر نتایج مدل سازی ها

پروفیل مورد مطالعه به طول ۴۲۰ متر با روند شرقی-غربی و آرایش دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۲۰ متر و با عمق نفوذ تقریبی ۶۰ متر و تقریباً عمود بر راستای لیتولوژی کلی و همچنین روند رخنمون های محدوده می باشد. شکل شش مقاطع حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی را برای پروفیل مورد مطالعه نشان می دهد. در مقطع قطبش القایی یک زون بی هنجار با شارژ ابلیته تقریبی ۱۲ میلی ولت بر ولت در زیر ایستگاه های +۹۰ و +۱۰ در مرکز پروفیل دیده می شود که با یک پلیگون مشخص شده است. این بی هنجاری از نظر ژئوفیزیکی حائز اهمیت است. برای این بی هنجاری در مقطع مقاومت ویژه نمی توان مقادیر مشخصی تبیین کرد و مقادیر مقاومت ویژه از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر تغییر می کند. در مقطع مقاومت ویژه، گسل ها و کنتاکت ها به ترتیب با خطوط مشکلی خط چین و توپر نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تغییرات مقاومت ویژه و قطبش القایی در امتداد پروفیل مورد مطالعه.

۹- نتیجه گیری و پیشنهادات

همان طور که گفته شد هدف از اجرای مطالعات ژئوفیزیکی به روش IP/Res در این محدوده بررسی احتمال وجود بی‌هنجاری‌های شارژاییلیته می‌باشد. با توجه به افزایش مقادیر شارژاییلیته احتمال وجود کانی‌های سولفیدی به خصوص پیریت و کالکوپیریت در محدوده وجود دارد و نتایج حاصل از عملیات ژئوفیزیکی نشان از پتانسیل نسبی کانه‌زایی مس به صورت رگه‌ای در محدوده بنوید دارد لذا جهت بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها پیشنهاد می‌شود پروفیل‌های بیشتری برداشت شود. قابل ذکر است با توجه به قرارگیری معدن مس پورفیری ایرانیان در شرق محدوده می‌توان با تکمیل اکتشافات به وجود تیپ مس پورفیری در عمق نیز امیدوار بود. جهت بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های ثبت شده نقاط حفاری پیشنهادی در پروفیل مورد مطالعه در ایستگاه ۰ از سطح تا عمق ۴۵ متری و ایستگاه ۸۰ از سطح تا عمق ۵۰ متری می‌باشد.

مراجع

- [1] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., "Applied Geophysics". Cambridge University Press, pp 522-539, 1990.
- [2] Loke M.H. and Barker R.D., "Practical techniques for 3D resistivity survey and data inversion. Geo physical prospecting", 44(3), pp, 499-523, 1996.
- [۳] کلاگری، علی؛ اصول اکتشافات ژئوفیزیک، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، ص ۱۸۰، ۱۳۷۱.
- [۴] افشار، ا.، عابدی، م. و نوروزی، غ.م.، - مدل‌سازی ژئوفیزیکی جهت تصویرسازی ژئوالکتریکی کانه‌زایی مس؛ مطالعه موردی محدوده یحیی‌آباد زنجان، کنفرانس ملی مدل‌سازی در مهندسی معدن، صص. ۳۷ تا ۴۵، ۱۳۹۷.
- [۵] نادری، علی، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه به منظور اکتشاف مس در منطقه بنوید"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۹.
- [۶] کریم‌پور م، محمد حسین، سعادت، سعید، زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی، ویرایش دوم. نشر مشهد، ۱۳۸۱.
- [۷] نبوی، محمد حسین، "دییاجه‌ای بر زمین شناسی ایران". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۱۰۹، ۱۳۵۵.
- [۸] شهاب‌پور، جمشید، "زمین‌شناسی اقتصادی"، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۲.
- [۹] اشتوکالین و هوبر، "بررسی مقدمات زمین‌شناسی در لوت مرکزی، شرق ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۴۰.
- [10] Berberian, M. & King, G., - "Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran". Canadian Journal of Earth Science, 18, 210-265, 1981.
- [۱۱] علانی‌مه‌آبادی، سینا، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نایین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۱۳۸۳.
- [12] www.esri.com
- [13] Reynolds, J.M."An Introduction to Applied and Environmental Geophysics John Willy and Sons Ltd, 1988.
- [14] Paterson N.R., and Hallof p.,G., "Gold metallogeny and exp;oration Geophysical exploration for gold", Springer, 1991.
- [۱۵] نوروزی غ، (۱۳۹۲)، "روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۳۵۷.
- [16] Zhou, J., A. Revil, M. Karaoulis, D. Hale, J. Doetsch, and S. Cuttler" Imageguided inversion of electrical resistivity data", Geophys. J. Int. 197, 1, 292- 309, 2014.
- [۱۷] عرب‌امیری، علیرضا، تعبیر و تفسیر و مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی اندیس معدنی پاینده، ۱۳۸۲.
- [18] www.google earth.com
- [19] Saneiyani, S., Blanchy, G., Boyd, J. & Binley, A. pyR2: an opensource standalone graphical user interface for inversion of electrical resistivity and induced polarization measurements. SAGEEP, 2019.
- [20] Blanchy, G., Saneiyani, S., Boyd, J., McLachlan, P., and Binley, A., "ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling", Computers & geoscience, 137, 2020.

- [21] Binley, A. and L. Slater, “Resistivity and Induced Polarization. Theory and Applications to the Near-Surface”
Cambridge University Press, 388pp, 2020.

کاربرد تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر در تفکیک بی‌هنجاری محلی و ناحیه‌ای داده‌های میدان پتانسیل

امین روشندل کاهو^۱، رسول انوری^۲

^۱دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ roshandel@shahroodut.ac.ir
^۲فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ rasoulanvarias93@gmail.com
* نویسنده مسئول: امین روشندل کاهو

چکیده فارسی

پایه و مبنای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل و به خصوص گرانی‌سنجی تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی است. بیشتر روش‌های متداول تفکیک بی‌هنجاری‌ها مبتنی بر جداسازی مولفه‌های طیفی بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای از یکدیگر می‌باشند. رتبه ماتریس مسیر به دست آمده از داده میدان پتانسیل ارتباط مستقیم و نظیر به نظیر با دامنه مولفه‌های طیفی داده دارند. بنابراین، می‌توان بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در داده‌های گرانی‌سنجی را با استفاده از تخمین رتبه - پایین ماتریس مسیر تفکیک کرد. در این مقاله به منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در داده‌های گرانی‌سنجی، الگوریتم تحلیل طیفی مقادیر تکین برای تخمین رتبه - پایین ماتریس مسیر استفاده شد. نتایج حاصل از مدل داده مصنوعی و واقعی و مقایسه آن با روش‌های متداول فیلتر داده‌مبنا، برازش چندجمله‌ای و ادامه فراسو نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش با دقت بالا در شرایط زمین‌شناسی پیچیده جایگزین روش‌های متداول شود.

واژه‌های کلیدی: تفکیک بی‌هنجاری، تحلیل طیفی مقادیر تکین، ماتریس رتبه - پایین، ماتریس مسیر

The Application of Singular Spectral Analysis of Trajectory Matrix in Residual and Regional Anomaly Separation of Potential Field Data

Amin Roshandel Kahoo¹, Rasoul Anvari²

¹Associate Professor, Shahrood University of Technology; roshandel@shahroodut.ac.ir

²MSc graduated, Shahrood University of Technology; rasoulanvarias93@gmail.com

* Corresponding author: Amin Roshandel Kahoo

ABSTRACT

The basis of potential field data interpretation and especially gravimetry is the separation of regional and residual anomalies. Most of the common methods of separation of anomalies are based on separating the spectral components of residual and regional anomalies from each other. The rank of the trajectory matrix obtained from the potential field data is directly related to the spectral components of the data. Therefore, it is possible to separate regional and residual anomalies in the gravity data using the estimation of low-rank component of the trajectory matrix. In this paper, in order to separate regional and residual anomalies in gravity data, singular spectral analysis (SSA) algorithm was employed to estimate the low-rank component of the trajectory matrix. The obtained results of the synthetic and real data and comparison them with the results of the common methods e.g. matched filter, polynomial fitting and upward continuation showed that the proposed method can

be considered as alternative high-precision method for anomaly separation in complex geological conditions.

Keywords: Anomaly Separation, Singular Spectrum Analysis, Low-Rank Matrix, Trajectory Matrix

مقدمه

داده‌های اندازه‌گیری شده در مطالعات میدان پتانسیل حاصل برهم‌نهی بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی ناشی از منابع با عمق‌های مختلف است. بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای با منشاء ساختارهای عمیق بخش طول موج‌های بلند (عدد موج‌های کوچک) و بی‌هنجاری‌های محلی با منشاء ساختارهای سطحی بخش طول موج‌های کوتاه (عدد موج‌های بزرگ) میدان کل اندازه‌گیری شده را تشکیل می‌دهند [۱]. بنابراین، یکی از مهمترین مراحل پردازش داده‌های میدان پتانسیل، تفکیک بی‌هنجاری ناحیه‌ای از بی‌هنجاری محلی است که معمولاً در حوزه مکان یا در حوزه عدد موج انجام می‌شود [۲]. روش‌هایی نظیر میانگین‌گیری متحرک، برازش چند جمله‌ای و حداقل انحراف از جمله روش‌های شناخته شده در حوزه مکان و روش‌هایی نظیر فیلترهای ساده عدد موج، فیلتر داده مینا، فیلتر ترجیحی و فیلتر وینر از جمله روش‌های متداول حوزه عدد موج برای تفکیک بی‌هنجاری هستند [۳]. علیرغم معرفی روش‌های متعدد برای تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در داده‌های میدان پتانسیل، هنوز تفکیک دقیق بی‌هنجاری، یکی از چالش‌های تفسیر و پردازش داده‌های میدان پتانسیل است. روش‌های حوزه عدد موج نسبت به روش‌های حوزه مکان از عملکرد بهتری برخوردار هستند و به همین دلیل متداول‌تر و پرکاربردتر هستند. البته همپوشانی طیفی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی بر عملکرد روش‌های تفکیک حوزه عدد موج تأثیر منفی دارد و سبب کاهش دقت این روش‌ها می‌شود.

روش تخمین ماتریس رتبه - پایین، یکی از روش‌های متداول تضعیف نوفه داده‌های لرزه‌ای هستند. حضور نوفه تصادفی در سیگنال لرزه‌ای سبب افزایش رتبه ماتریس معنادار حاصل از سیگنال لرزه‌ای می‌شود که به طور ذاتی در حالت بدون نوفه رتبه - پایین است. بنابراین، به کمک روش تخمین مولفه رتبه - پایین می‌توان نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای را کاهش داد [۴]. تحقیقات نشان داده است که رتبه ماتریس مسیر محاسبه شده از داده‌های میدان پتانسیل به عمق منشاء بی‌هنجاری بستگی دارد. به عبارت دیگر، با افزایش عمق منشاء بی‌هنجاری میدان پتانسیل، رتبه ماتریس مسیر کاهش می‌یابد [۵، ۶]. بنابراین، می‌توان از روش تخمین رتبه - پایین ماتریس مسیر برای تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در داده‌های میدان پتانسیل استفاده نمود. در این مقاله، از روش تحلیل طیفی مقادیر تکین برای کاهش رتبه ماتریس مسیر حاصل از داده‌های گرانی به منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در مدل مصنوعی و واقعی استفاده می‌شود.

روش تحقیق

ماتریس مسیر

روش تحلیل طیفی مقادیر تکین، یک روش تخمین طیفی غیر پارامتریک است. در این روش، به منظور تخمین اطلاعات طیفی یک سیگنال، ابتدا ماتریس کوواریانس - تاخیر، C_X ، مطابق رابطه (۱) بایستی محاسبه شود.

$$C_X = \frac{1}{L} T^T T \quad (1)$$

که T ماتریس مسیر بلوکی است و بالانویس T بیانگر عملگر ترانپوز است. برای بی‌هنجاری بوگه دو بعدی به صورت $G = [g_{MN}] \in \mathbb{R}^{p \times q}$ که درایه ردیف M و ستون N از ماتریس بی‌هنجاری بوگه G باشد، ماتریس مسیر H_l برای ستون l -ام ماتریس بی‌هنجاری بوگه با طول پنجره $K = [(p+1)/2]$ [بیانگر جزء صحیح است]، به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۷]. ماتریس مسیر برای سیگنال‌های دو بعدی را می‌توان برای هر سطر یا ستون سیگنال محاسبه نمود و از کنار هم قرار دادن

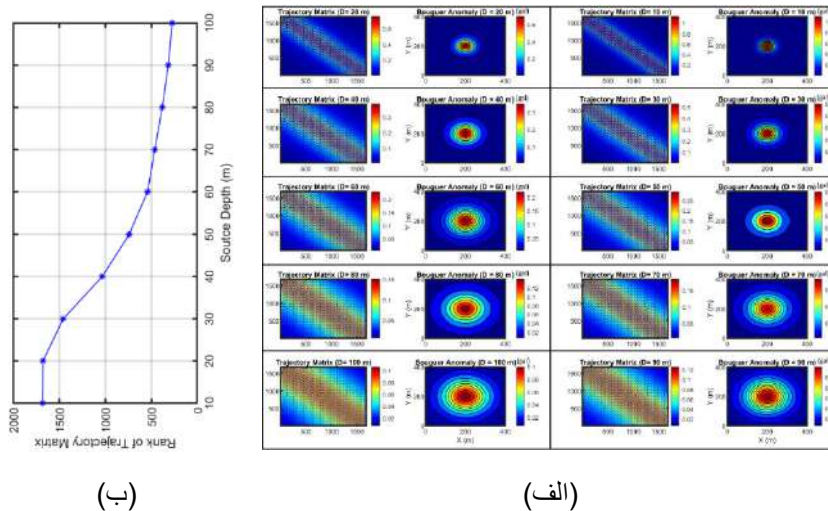
ماتریس‌های مسیر هر سطر یا ستون به صورت بلوکی، ماتریس مسیر بلوکی را مطابق رابطه (۳) با طول پنجره $L = [(q + 1)/2]$ به دست آورد.

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} g_{1l} & g_{2l} & \cdots & g_{(p-K+1)l} \\ g_{2l} & g_{3l} & \cdots & g_{(p-K+2)l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{Kl} & g_{(K+1)l} & \cdots & g_{pl} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_2 & \cdots & \mathbf{H}_{q-L+1} \\ \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_3 & \cdots & \mathbf{H}_{q-L+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_L & \mathbf{H}_{L+1} & \cdots & \mathbf{H}_q \end{bmatrix} \quad (۳)$$

رتبه ماتریس مسیر و عمق منشاء بی‌هنجاری

رتبه یک ماتریس برابر با بیشینه تعداد سطرها یا ستون‌های مستقل خطی آن گفته می‌شود. به راحتی می‌توان با یک مثال ساده نشان داد که بین عمق منشاء بی‌هنجاری و رتبه ماتریس مسیر یک ارتباط معکوس وجود دارد. برای این منظور، یک بی‌هنجاری مصنوعی به شکل مکعب مربع با ابعاد ۵۰ متر و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان منشاء تولید کننده بی‌هنجاری گرانی بوگه انتخاب گردید که عمق بالای مکعب مورد نظر به صورت متغیر از ۱۰ متر تا ۱۰۰ متر با گام ۱۰ متر در نظر گرفته شد. بی‌هنجاری بوگه مصنوعی و ماتریس مسیر برای مدل با عمق‌های مختلف در محدوده با ابعاد 400×400 متر با فاصله شبکه‌بندی پنج متر محاسبه شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق منشاء بی‌هنجاری ضمن گسترش جانبی بی‌هنجاری بوگه تولید شده، پخش شدگی مقادیر ماتریس مسیر حول قطر فرعی بیشتر می‌شود و مطابق شکل ۱- (ب) رتبه ماتریس مسیر کاهش می‌یابد.



شکل ۱: (الف) بی‌هنجاری بوگه برای یک بی‌هنجاری به شکل مکعب مربع با ابعاد ۵۰ متر و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با عمق‌های مختلف ۱۰ تا ۱۰۰ متر با گام افزایش ۱۰ متر به همراه ماتریس مسیر هر کدام. (ب) رتبه ماتریس مسیر بر حسب عمق.

یانگ و هوا [۹] نشان دادند که رتبه ماتریس مسیر با تعداد مولفه‌های عدد موج بی‌هنجاری میدان پتانسیل برابر است. بنابراین، هنگامی که تعداد مولفه‌های معنی دار عدد موج کوچک باشد، رتبه ماتریس مسیر پایین خواهد بود. به عبارت دیگر، مولفه رتبه - پایین ماتریس

مسیر مربوط به بی‌هنجاری ناحیه‌ای است. روش تحلیل طیفی مقادیر تکین یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین مولفه رتبه - پایین ماتریس می‌باشد که در ژئوفیزیک بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

روش تحلیل طیفی مقادیر تکین بر کاهش رتبه

اگر تقریب رتبه k از ماتریس مسیر \mathbf{T} به صورت $\mathbf{T}^{(r)}$ نشان داده شود، می‌توان آن را از حل مساله بهینه‌سازی $\min_{\mathbf{T}^{(r)}} (\|\mathbf{T} - \mathbf{T}^{(r)}\|_F^2)$ به دست آورد [۱۰] که $\|\cdot\|_F$ بیانگر نرم فریبینوس است. مطابق قضیه ایکارت - یانگ پاسخ مساله بهینه‌سازی بر اساس تجزیه مقادیر تکین به صورت رابطه $\mathbf{T}^{(r)} = \sum_{i=1}^r \sigma_i U_i V_i^T = \sum_{i=1}^r \mathbf{T}_i$ به دست می‌آید که \mathbf{T}_i به عنوان i -امین ماتریس پایه یا ویژه تصویر i -ام ماتریس مسیر مربوط به مقدار تکین σ_i است. U_i و V_i به ترتیب بردارهای تکین چپ و راست ماتریس مسیر هستند. الگوریتم شکل ۲ جهت تفکیک بی‌هنجاری‌ها در داده‌های گرانی دو بعدی بر مبنای تحلیل طیفی مقادیر تکین پیشنهاد می‌شود که در آن، مقدار r تنها پارامتر مهم برای تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای از یکدیگر با استفاده از تخمین رتبه - پایین ماتریس مسیر است و بایستی مقدار بهینه آن تعیین شود.

$$\mathbf{G} = [g_{mn}] \in \mathbb{R}^{p \times q} \text{ و بعدی دو بوگه دو بعدی}$$

- ۱- محاسبه ماتریس‌های هنکل با استفاده از رابطه (۲).
- ۲- محاسبه ماتریس مسیر با استفاده از رابطه (۳).
- ۳- اعمال تجزیه مقادیر تکین بر روی ماتریس مسیر و محاسبه سه‌گانه‌های تکین (σ_i, U_i, V_i) و تولید ویژه تصاویر مربوطه با استفاده از $\mathbf{T}_i = \sigma_i U_i V_i^T$.
- ۴- تخمین مقدار بهینه رتبه r برای تخمین رتبه پایین ماتریس مسیر.
- ۵- محاسبه تقریب رتبه r ماتریس مسیر با استفاده از رابطه (۱۰) و مقدار بهینه r به دست آمده از مرحله ۴.
- ۶- میانگین‌گیری در راستای قطر اصلی در تقریب رتبه پایین ماتریس مسیر برای بازسازی بی‌هنجاری گرانی ناشی از منشاء با عمق مورد نظر.

خروجی: بی‌هنجاری گرانی ناشی از منشاء با عمق مورد نظر

شکل (۲): الگوریتم تفکیک بی‌هنجاری ناحیه‌ای و محلی به روش تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر.

تعیین رتبه بهینه برای تقریب رتبه پایین ماتریس مسیر

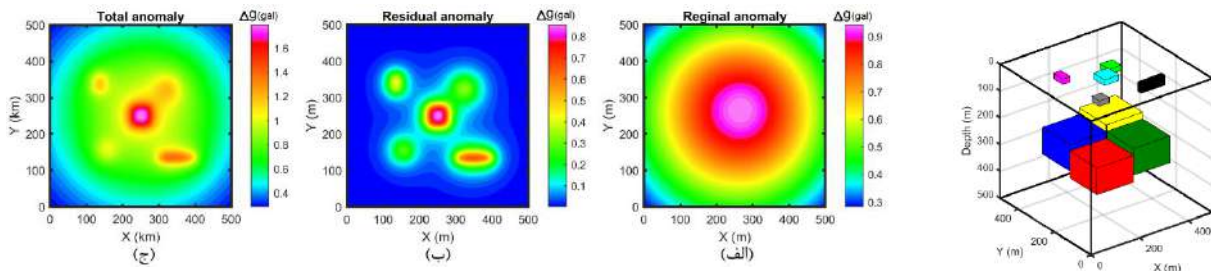
بر اساس تئوری تجزیه مقادیر تکین، می‌توان ماتریس مسیر را مطابق رابطه $\mathbf{T} = \sum_{i=1}^J \sigma_i U_i V_i^T = \sum_{i=1}^J \mathbf{T}_i$ تجزیه نمود که رتبه ویژه تصویر \mathbf{T}_i برابر با یک است و مربوط به سه‌گانه تکین (σ_i, U_i, V_i) است. در واقع مقدار تکین i -ام، σ_i ، میزان مشارکت نسبی ویژه تصویر \mathbf{T}_i را در ماتریس مسیر نهایی بیان می‌کند. برای بیان کمی میزان مشارکت ویژه تصاویر مختلف در ساخت ماتریس مسیر، کمیت مشارکت جمعی با کمک مقادیر تکین به صورت $\sum_{j=1}^i \sigma_j^2 / \sum_{i=1}^J \sigma_i^2$ می‌توان تعریف نمود [۱۱]. از آنجایی که بی‌هنجاری ناحیه‌ای به عنوان مولفه اصلی، نقش بیشتری در ساخت ماتریس مسیر دارد، حال می‌توان به صورت بصری، رتبه‌ای (مقدار تکینی) که به عنوان نقطه تا شدگی (آرنج) نمودار مشارکت جمعی است را به عنوان رتبه بهینه برای تقریب رتبه پایین ماتریس مسیر استفاده نمود. در این نقطه آرنجی، روند افزایش سریع مشارکت جمعی به یکباره یک روند افزایش تدریجی تغییر می‌کند که حاکی از تغییر عمق منشاء بی‌هنجاری است.

نتایج

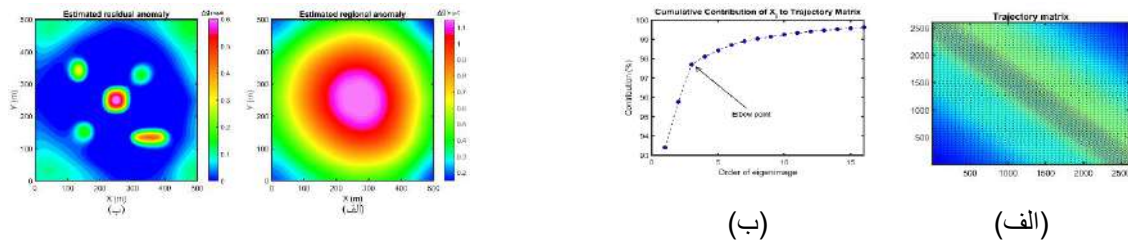
به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای در داده‌های گرانی، یک مدل مصنوعی پیچیده با ۹ بلوک به صورت شکل ۳ برای تولید بی‌هنجاری بوگه در نظر گرفته شد که مشخصات فیزیکی و هندسی آن در جدول ۲ آورده شده است. چهار بلوک به شماره‌های ۱ تا ۴ به عنوان منشاء عمیق تولید بی‌هنجاری ناحیه‌ای و پنج بلوک به شماره‌های ۵ تا ۹ به عنوان منشاء سطحی بی‌هنجاری محلی در نظر گرفته شده‌اند. تولید بی‌هنجاری در یک شبکه 101×101 با فاصله ایستگاهی ۵ متر در دو راستای محور X و Y انجام شد. شکل ۴ بی‌هنجاری گرانی محلی، ناحیه‌ای و کل را برای مدل مصنوعی نشان می‌دهد. به منظور تفکیک بی‌هنجاری ناحیه‌ای و محلی از یکدیگر، ابتدا بر اساس الگوریتم پیشنهادی، ماتریس مسیر برای بی‌هنجاری بوگه مطابق رابطه (۳) محاسبه شد و سپس مشارکت تجمعی ۱۶ ویژه تصویر اول مطابق رابطه (۶) به دست آمد که در شکل ۵ نشان داده شده است. با بررسی نمودار مشارکت تجمعی ۱۶ ویژه تصویر اول ماتریس مسیر می‌توان دید که سه ویژه تصویر اول سهم حدود ۹۷/۷ درصد از ماتریس مسیر را تشکیل داده‌اند. با بررسی نمودار مشارکت تجمعی می‌توان دید که نقطه آرنجی این نمودار در ویژه تصویر سوم اتفاق افتاده است. در واقع ویژه تصویر شماره سه محل تغییر روند درصد مشارکت تجمعی است. بنابراین، مقدار عدد سه به عنوان رتبه بهینه برای کاهش رتبه ماتریس مسیر در روش تحلیل طیفی مقادیر تکین در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶، بی‌هنجاری ناحیه‌ای محلی و ناحیه‌ای تخمین زده شده از روش تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر با استفاده از رتبه بهینه ۳ نشان داده شده است. به منظور مقایسه الگوریتم پیشنهادی با روش‌های متداول تفکیک بی‌هنجاری، نتایج روش فیلتر داده مینا، برازش چندجمله‌ای با درجه ۲ و ادامه فراسو با ازای ارتفاع مبنای ۱۰ و ۲۰ محاسبه و در شکل ۷ نشان داده شده است. در جدول ۲ مقدار ضریب همبستگی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای تخمین زده شده و بی‌هنجاری ناحیه‌ای واقعی در شکل ۴-الف) به منظور مقایسه کمی کارایی روش‌های مذکور آورده شده است. با مقایسه کیفی و کمی نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد روش تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر در مقایسه با سه روش دیگر عملکرد بهتری داشته است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی و هندسی مدل مصنوعی در نظر گرفته شده برای تولید بی‌هنجاری گرانی.

| رنگ بلوک | قرمز | آبی | سبز تیره | زرد | خاکستری | سبز روشن | صورتی | سیاه | فیروزه‌ای |
|---|------|-----|----------|-----|---------|----------|-------|------|-----------|
| چگالی بلوک (gr/cm^3) | ۱/۵ | ۱/۵ | ۱/۵ | ۱/۵ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ |
| اندازه بلوک در راستای محور X بر حسب متر | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۴۰ | ۵۰ | ۳۰ | ۱۰۰ | ۶۰ |
| اندازه بلوک در راستای محور Y بر حسب متر | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵۰ | ۴۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۲۰ | ۶۰ |
| ضخامت بلوک بر حسب متر | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۳۵ | ۲۰ |
| فاصله مرکز بلوک در راستای محور X نسبت به مبدأ | ۱۷۵ | ۱۷۵ | ۳۲۵ | ۳۲۵ | ۱۵۵ | ۳۲۵ | ۱۳۵ | ۳۵۰ | ۲۵۰ |
| فاصله مرکز بلوک در راستای محور Y نسبت به مبدأ | ۱۷۵ | ۳۲۵ | ۱۷۵ | ۳۲۵ | ۱۵۵ | ۳۲۵ | ۳۴۰ | ۱۳۵ | ۲۵۰ |
| عمق بالای بلوک بر حسب متر | ۲۵۰ | ۲۲۵ | ۲۲۵ | ۲۰۰ | ۲۵ | ۳۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ |

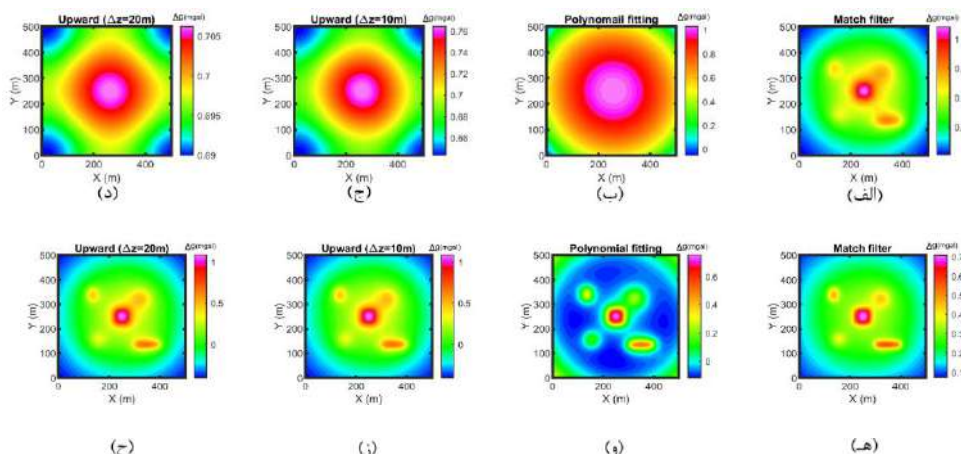


شکل (۳): مدل مصنوعی. شکل (۴): بی‌هنجاری گرانی تولید شده برای مدل مصنوعی شکل ۳ بی‌هنجاری ناحیه‌ای برای بلوک‌های ۱ تا ۴، (ب) بی‌هنجاری محلی برای بلوک‌های ۵ تا ۹ و (ج) برای تمام بلوک‌های ۱ تا ۹.



شکل (۵): ماتریس مسیر برای بی‌هنجاری کل شکل ۴- (ج) و (ب) نمودار مشارکت جمعی ۱۶ ویژه تصویر اول ماتریس مسیر.

شکل (۶): بی‌هنجاری (الف) ناحیه‌ای و (ب) محلی تخمین زده شده به روش تحلیل طیفی مقادیر تکین و مقدار بهینه رتبه ۳.



شکل (۷): بی‌هنجاری ناحیه‌ای و محلی تخمین زده شده به روش (الف) و (ه) فیلتر داده‌مینا، (ب) و (و) برازش چندجمله‌ای درجه ۲، (ج) و (ز) ادامه فراسو به ازای ارتفاع ۱۰ متری و (د) و (ح) ادامه فراسو به ازای ارتفاع ۲۰ متری.

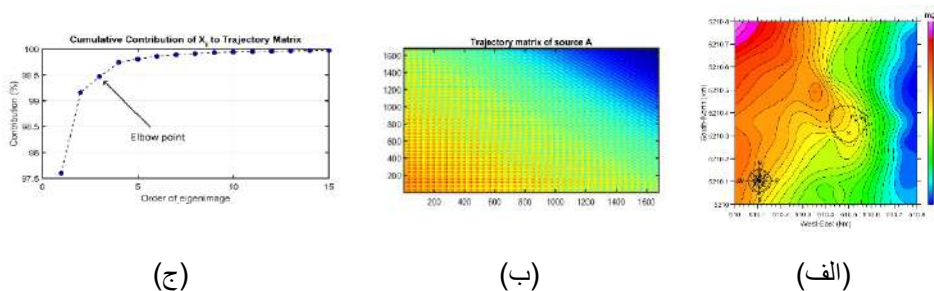
جدول (۲): مقدار ضریب همبستگی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای تخمین زده شده و بی‌هنجاری واقعی شکل ۱۱- (الف).

| روش | تحلیل طیفی مقادیر تکین | فیلتر داده‌مبنا | برازش درجه ۲ | ادامه فراسو با ارتفاع ۱۰ | ادامه فراسو با ارتفاع ۲۰ |
|--------------|------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| ضریب همبستگی | ۹۹/۲۸ | ۹۴/۷۱ | ۹۷/۴۶ | ۹۸/۲۱ | ۹۷/۴۴ |

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در جداسازی بی‌هنجاری ناحیه‌ای و محلی در داده‌های واقعی، بی‌هنجاری گرانی بوگه مربوط به کانسار دیدا در شمال شرقی کشور چین انتخاب گردید که در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس گزارش‌ها و حفاری‌های صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه دو کانسار آهن مجزا در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند. کانسار O1 دارای تباين گرانی و مغناطیسی بیشتری با محیط دربرگیرنده نسبت به کانسار O2 می‌باشد. به همین دلیل کانسار آهن O2 در حضور بی‌هنجاری ناحیه‌ای در بی‌هنجاری بوگه کل در شکل ۸ قابل تشخیص نیست. نقطه چین سیاه در مرکز شکل، گسترش جانبی کانسار آهن O2 موجود در منطقه را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حفاری در دو محل که با ستاره‌های سیاه و به نام‌های C1 و C2 در شکل نشان داده شده‌اند، وجود کانسار آهن O2 را تایید کرده است [۱۲]. به منظور انجام فرایند تفکیک بی‌هنجاری ماتریس مسیر و مشارکت تجمعی ۱۵ ویژه تصویر اول ماتریس مسیر محاسبه گردید که در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس نمودار مشارکت تجمعی مقدار رتبه بهینه ماتریس مسیر برای کاهش رتبه برابر با سه در نظر گرفته شد. بی‌هنجاری محلی حاصل از روش تحلیل طیفی مقادیر تکین، فیلتر داده‌مبنا، برازش چندجمله‌ای و ادامه فراسو در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پس حذف اثر بی‌هنجاری ناحیه‌ای تخمین زده شده به روش تحلیل طیفی مقادیر تکین، اثر کانسار آهن O2 در بی‌هنجاری محلی به خوبی آشکار شده است. مطابق انتظار، کانسار آهن O1 که دارای تباين گرانی و مغناطیس قوی‌تری نسبت به کانسار آهن O2 است، در بی‌هنجاری محلی با شدت بیشتری نمایان شده است.

نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله روش نوینی بر مبنای الگوریتم تحلیل طیفی مقادیر تکین معرفی شد و کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های متداول برازش چندجمله‌ای و فیلتر داده مبنا روی داده مصنوعی و داده میدانی مورد بررسی قرار گرفت. از تحلیل خروجی‌های به دست آمده در داده‌های مصنوعی و میدانی می‌توان روش تحلیل طیفی مقادیر تکین ماتریس مسیر را به عنوان یک روش جایگزین روش‌های متداول برای تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای در نظر گرفت تا با افزایش دقت تفکیک بی‌هنجاری، دقت مدل‌سازی را نیز افزایش داد.

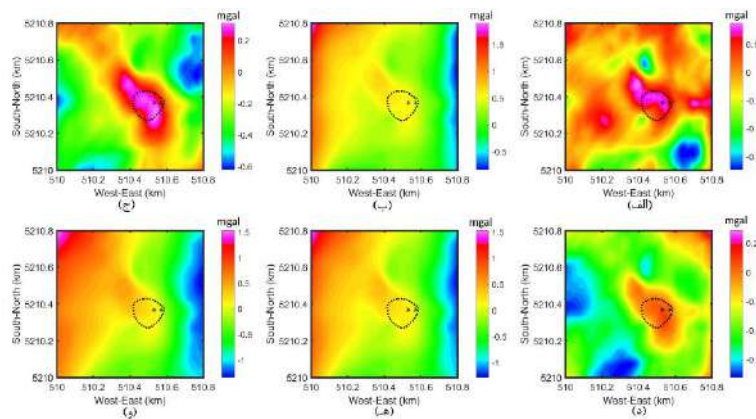


(ج)

(ب)

(الف)

شکل (۸): (الف) بی‌هنجاری گرانی بوگه مربوط به دو کانسار آهن O1 و O2 دیدا در شمال شرقی کشور چین. (ب) ماتریس مسیر و (ج) میزان مشارکت تجمعی تعداد ۱۵ ویژه تصویر اول ماتریس مسیر.



شکل (۹): بی‌هنجاری محلی تخمین زده شده به روش (الف) تحلیل طیفی مقادیر تکین با رتبه سه، (ب) فیلتر داده‌مبنا، (ج) و (د) برازش چندجمله‌ای درجه ۱ و ۲ و (ه) و (و) ادامه فراسو به ازای ارتفاع ۱۰ و ۲۰ متری.

مراجع

- [1] D. Zhu, H. Li, T. Liu, L. Fu, and S. Zhang, "Low-rank matrix decomposition method for potential field data separation," *Geophysics*, vol. 85, no. 1, pp. G1-G16, 2020.
- [2] K. S. Kumar, R. Rajesh, and R. K. Tiwari, "Regional and residual gravity anomaly separation using the singular spectrum analysis-based low pass filtering: a case study from Nagpur, Maharashtra, India," *Exploration Geophysics*, vol. 49, no. 3, pp. 398-408, 2018.
- [3] M. Dentith and S. T. Mudge, *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press, 2014.
- [4] R. Anvari, M. A. N. Siahsar, S. Gholtaishi, A. R. Kahoo, and M. Mohammadi, "Seismic random noise attenuation using synchrosqueezed wavelet transform and low-rank signal matrix approximation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 11, pp. 6574-6581, 2017.
- [5] N. Golyandina and A. Zhigljavsky, "Singular spectrum analysis for time series: Introduction to this special issue," *Statistics and its Interface*, vol. 3, no. 3, pp. 255-258, 2010.
- [6] R. Rajesh, K. Satish Kumar, and R. Tiwari, "Regional and residual gravity anomaly separation using singular spectrum based frequency filtering methods: A case study of shallow subsurface modeling from Nagpur, India," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 177, pp. 977-990, 2020.
- [7] J. De Klerk, "Adapting the singular spectrum analysis trajectory matrix technique to identify multiple additive time-series outliers," *Studies in Economics and Econometrics*, vol. 39, no. 3, pp. 25-47, 2015.
- [8] Y. Hua, "Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil," 1992.
- [9] H. H. Yang and Y. Hua, "On rank of block Hankel matrix for 2-D frequency detection and estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 4, pp. 1046-1048, 1996.
- [10] V. Oropeza and M. Sacchi, "Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis," *Geophysics*, vol. 76, no. 3, pp. V25-V32, 2011.
- [11] C. Downs and S. Jazayeri, "Resolution enhancement of deconvolved ground penetrating radar images using singular value decomposition," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 193, p. 104401, 2021.
- [12] J. Wang, X. Meng, and F. Li, "A computation scheme based on field attenuation rate for improving regional-residual separation of potential field data set," *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 117-126, 2020.

استفاده از توموگرافی انکساری لرزه‌ای در مدل‌سازی ساختار سرعت زیرسطحی

۱. جواد داودی ۲. احسان پگاه ۳. علی میثاقی

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛
j.davoudi.52@gmail.com

۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ e.pegah@khu.ac.ir

۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ ali.misaghi@khu.ac.ir

* نویسنده مسئول: احسان پگاه

چکیده فارسی

یکی از اهداف روش ژئوفیزیکی لرزه‌ای انکساری ارائه تصویری صحیح از ساختار و تغییرات سرعت انتشار امواج در لایه‌های زمین و در نتیجه ارزیابی پارامترها و ویژگی‌های زیرسطحی می‌باشد. از آنجایی که شناسایی ساختارهای زیرسطحی و توصیف خصوصیات منتسب به آنها با استفاده از دیگر روش‌های از جمله تکنیک‌های مخرب درون گمانه‌ای کاری ساده نبوده و زمان و هزینه زیادی را می‌طلبد، امروزه ترجیح بر استفاده از روش‌های غیر مخرب از جمله توموگرافی انکساری لرزه‌ای است. این روش یکی از تکنیک‌های موثر و کاربردی در شناسایی وضعیت هندسی لایه‌ها، مدل لایه‌بندی و همچنین ارزیابی الگوی تغییرات سرعت در آنها می‌باشد. در این مطالعه، ابتدا داده‌های لرزه‌ای متعلق به منطقه‌ای واقع در شرق کشور با پیاده‌سازی مجموعه‌ای از پروفیل‌های صحرائی غیر مخرب انکساری گردآوری شدند. سپس، سیگنال‌های به‌دست آمده مورد پردازش و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا الگوی تغییرات سرعت‌های امواج P و S، مدل لایه‌بندی و ضخامت هر لایه در ناحیه مدنظر مشخص گردد. همچنین، از تلفیق سرعت‌های به‌دست آمده با معادلات موجود در نظریه کشسانی، گستره‌ای از دیگر پارامترهای مهندسی محاسبه و ارائه شدند که از اهمیت شایانی در مطالعات اکتشافی معادن برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی انکساری لرزه‌ای، سرعت موج P، سرعت موج S، مدل لایه‌بندی، ضرایب کشسانی

Application of seismic refraction tomography in subsurface velocity modeling

Javad Davoudi¹, Ehsan Pegah², Ali Misaghi³

¹M.Sc. student in Geophysics, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; j.davoudi.52@gmail.com

²Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; e.pegah@khu.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; ali.misaghi@khu.ac.ir

* Corresponding author: Ehsan Pegah

ABSTRACT

One of the main targets of geophysical seismic refraction methods is giving a precise image of seismic velocity variations across the earth layers for figuring out the underground properties. Since, the characterizing subsurface structures and subsequently determining their attributed particularities using destructive borehole techniques is not a popular procedure due to their time-consumption and

financial problems, the non-destructive seismic refraction methods are being used nowadays as the proper alternative solutions. This technique is an effective and applied method for identifying the geometrical situation of layers, layering model and the regime of velocity variations in which. In this study, the seismic information relating to an area in eastern Iran was firstly collected using a set of seismic refraction profiles in field. The acquired data were processed and analyzed to yield the P- and S-wave velocities coupled with the layering and thickness of each layer. Likewise, by integrating the resulting velocity values and the equations from theory of elasticity, a series of other engineering parameters were also calculated, which are of great significance in mining exploratory studies.

Keywords: Seismic refraction tomography, P-wave velocity, S-wave velocity, Layering model, Elastic coefficients

۱- مقدمه

امروزه تلاش برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی و دستیابی به منابع زیرسطحی گسترش وسیعی پیدا کرده است و از آنجا که اکثر ذخایر معدنی مدفون در زیرسطح زمین، بوسیله یک روباره پوشیده شده‌اند و اطلاعات زمین‌شناسی فقط مربوط به ساختارهای سطحی می‌باشد و هیچ اطلاعاتی از ساختارهای زیرسطحی نمی‌دهد، میتوان این ذخایر را از طریق خواصی که آنها را از محیط اطراف متمایز می‌نماید، کشف کرد. در صورتی که تفاوت خواص فیزیکی بین ماده معدنی و سنگ درونگیر آن وجود داشته باشد؛ می‌توان از ژئوفیزیک سطحی برای کشف ماده معدنی مربوطه استفاده کرد و ژئوفیزیک یکی از ابزارهای شناسایی این ساختارها است. ژئوفیزیک یا فیزیک زمین، میان رشته ای بین علوم مهندسی معدن، زمین‌شناسی و فیزیک است که به مطالعه زمین با روش‌های کمی فیزیکی می‌پردازد. باباجان و همکاران [۱] در تحقیقاتی جامع به توصیف مصالح زمینی و کیفیت سنگ‌های رسوبی آتشفشانی در منطقه تراپزون ترکیه پرداختند. آنها بیان داشتند که آگاهی کامل از ویژگی‌های مهندسی ستون خاک و سنگ مستقر در محل ساختگاه، اولین گام اساسی در راستای فعالیت‌های ساختمانی می‌باشد. پگاه و همکاران [۲] روشی کارآمد را بر مبنای رویکردی غیرمخرب به منظور تعیین زاویه اصطکاک داخلی در رسوبات غیراشباع خاک‌های دانه‌ای ارائه دادند. آنها بیان داشتند که این متغیر از مهمترین پارامترهای ژئوتکنیکی می‌باشد که حصول صحیح و دقیق آن از الزامات اساسی در مسیر تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی ساختگاه است.

در نگاهی جامع، مطالعات ژئوتکنیکی در برگزیده پیمایش‌های صحرائی به منظور نمونه‌برداری از خاک ساختگاه و متعاقب آن انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های گردآوری شده می‌باشد. اما نباید فراموش نمود که پیامدهای نامطلوب حاصل از عملیات حفاری، ایجاد دست‌خوردگی در ساختار طبیعی خاک بالاخص در خاک‌های دانه‌ای، تخریب محیط زیست، صرف زمان طولانی و تحمیل هزینه‌های گزاف همگی از نقاط ضعف موجود در مسیر استفاده از آزمون‌های ژئوتکنیکی متداول می‌باشند [۳]. بر همین اساس، تلاش در راستای ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی ساختگاه بر مبنای روش‌هایی بهینه که عاری از معایب مذکور بوده امری کاملاً مهم و ضروری به نظر می‌رسد. در این ارتباط، تکیه بر رویکردهای لرزه‌ای غیرمخرب که به نوبه خود در بر گیرنده روش‌هایی دقیق و معتبر می‌باشند، می‌تواند نتایج صحیح و کاملاً قابل اعتمادی را برای بسیاری از ویژگی‌های ژئومکانیکی مصالح خاک و سنگ تحت شرایط طبیعی درجا به دست آورند [۴] [۵] [۶]. این روش‌ها کاملاً سازگار با محیط زیست بوده و استفاده از آنها بدون نیاز به آزمون‌های زمان‌بر آزمایشگاهی و گمانه‌ای بسیار مقرون به صرفه و اقتصادی می‌باشد. به طور کلی، با توجه به مطالب ذکر شده از روش توموگرافی انکساری لرزه‌ای به عنوان یک تکنیک غیرمخرب و کارآمد به منظور استنتاج مدل‌های توزیع سرعت‌ها در این تحقیق استفاده شد.

۲- روش تحقیق

به منظور ارزیابی ساختار سرعت زیرسطحی مورد مطالعه در این تحقیق از روش توموگرافی انکساری لرزه‌ای که به عنوان یک تکنیک مدرن و با قابلیت‌های بسیار در تصویربرداری زیرسطحی شناخته می‌شود استفاده می‌گردد. این روش از دقیق‌ترین و محبوب‌ترین

تکنیک‌های ژئوفیزیکی امروزی در تعیین مدل تغییرات سرعت انتشار امواج و شناسایی مقادیر کمی این پارامتر در طول و عرض لایه‌های زمین می‌باشد. روش توموگرافی انکساری لرزه‌ای یک تکنیک مبتنی بر مدل‌سازی وارون می‌باشد که برای تصویربرداری دقیق از توزیع سرعت امواج در سرتاسر رسوبات خاک با قدرت وضوح و تفکیک پذیری بالا کاملاً مناسب است. بر مبنای این تکنیک، امکان بدست آوردن الگوی تغییرات پیوسته سرعت در عرض یک شبکه تعریف شده برای هر پروفیل لرزه‌ای انکساری با خصوصیات هندسی و گسترش دلخواه به راحتی مقدور می‌گردد. روش توموگرافی انکساری لرزه‌ای بر مبنای شبکه‌بندی فضای موجود میان نقاط چشمه و گیرنده استوار است بدین ترتیب که ناحیه زیر سطحی را به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته و با تقسیم آن به تعدادی از سلول‌ها، به هر یک مقدار ثابتی از سرعت را اختصاص می‌دهد (شکل ۱).

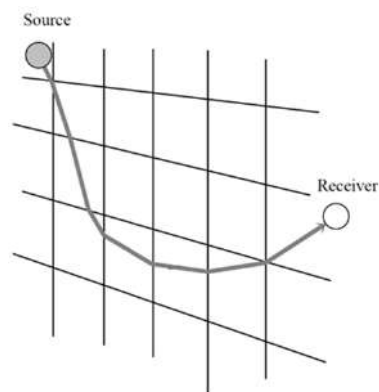
در ادامه، روش مدل‌سازی پیشرو به کار گرفته خواهد شد، فرآیند ردیابی پرتو بین چشمه‌ها و گیرنده‌ها به صورت تکرار شونده در مدل مفروض انجام می‌گیرد. بر مبنای الگوریتم طراحی شده، نمودارهای زمان-مسافت محاسبه شده با منحنی‌های نظیر مشاهده شده که از واقعیت استنتاج شده‌اند، مقایسه می‌گردند تا موجبات اصلاح و بهبود مدل اولیه را فراهم کنند. این فرایند تا زمانی که یک مقدار قابل قبول برای خطای جذر میانگین مربع‌ها میان نمودارهای محاسبه شده و مشاهده شده بدست آید، تکرار می‌گردد.

به طور کلی، مراحل مرتبط با روش انجام این تحقیق را می‌توان در قالب موارد زیر مطرح نمود:

۱- اجرای عملیات لرزه‌نگاری انکساری به واسطه طراحی خطوط لرزه‌ای برداشت امواج P و S و پیاده‌سازی آنها در منطقه مورد نظر به منظور گردآوری و ثبت گستره کاملی از انواع سیگنال‌های لرزه‌ای در قالب دسته‌های چشمه امواج P و S.

۲- قرائت و بازخوانی داده‌های خام گردآوری شده توسط بسته نرم‌افزاری معتبر و شناخته شده SeisImager/2D که به عنوان محصولی حرفه‌ای از شرکت ژئومتریکس دارای نقشی برجسته در تصویربرداری لرزه‌ای از مشخصات سرعتی ساختارهای زیرسطحی می‌باشد. پس از بازخوانی دسته‌های شات و اعمال هندسه برداشت بر روی داده‌ها، سیگنال‌های لرزه‌ای پردازش شده و با تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از منحنی‌های زمان-مسافت، در راستای مشخص‌سازی الگوی تغییرات و شناسایی مقادیر کمی سرعت‌ها اقدام می‌گردد. لازم به ذکر است که این هدف به واسطه انتخاب دقیق و عاری از خطای نخستین زمان‌های رسید (First arrival time picking) و متعاقباً استخراج مقاطع دو بعدی توزیع سرعت برای هر یک از امواج P و S (P- and S-wave 2D seismic velocity sections) در ناحیه زیرین منتسب به هر پروفیل لرزه‌ای قابل حصول می‌باشد.

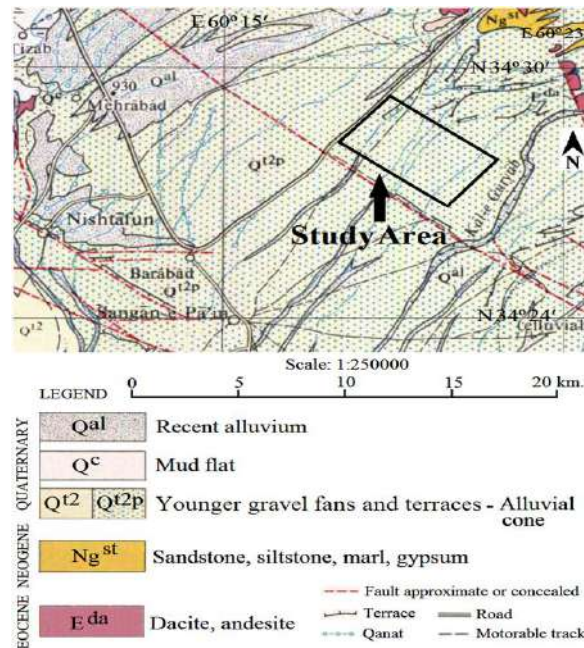
۳- استفاده از مقاطع سرعتی بدست آمده در تعیین گستره‌ای از اطلاعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی شامل مدل لایه‌بندی زمین، هندسه چینش، گسترش لایه‌ها و محاسبه برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی از جمله نسبت پواسون و مدول یانگ.



شکل (۱): نمایشی معمول از تقسیم بندی محیط زیر سطحی واقع در میان چشمه و گیرنده با ایجاد شبکه‌ای از سلول‌های توموگرافی

۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه ناحیه‌ای به وسعت تقریبی ۱۵ کیلومتر مربع را شامل شده و در جنوب استان خراسان رضوی در شرق کشور واقع گردیده است. ساختار سطحی منطقه مورد نظر متشکل از یک دشت هموار می‌باشد، این ناحیه از مخروطه افکنه‌ها و تراس‌های جوان پوشیده شده است که منتج از انباشتگی پیوسته کانی‌های آهن و مصالح خاکی با منشا آتشفشانی در دوره زمین‌شناسی کواترنری می‌باشند (شکل ۲). بر مبنای اطلاعات بدست آمده از پیمایش‌های زمین‌شناسی، مصالح سطحی عمدتاً متشکل از ترکیب ماسه ریز تا درشت و شن ریز با مقدار کمی لای در برخی از نقاط می‌باشند. منطقه زیرسطحی مورد مطالعه یک محیط همگن، همسانگرد و بدون اشباع از آب می‌باشد.



شکل (۲): موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از سایت سازمان زمین‌شناسی ایران)

۴- یافته‌ها و نتایج حاصل

در این مطالعه طول هر پروفیل ۶۹ متر بود، با استفاده از ۹ پروفیل شکست لرزه‌ای با شماره‌گذاری مختلف، سرعت‌های موج طولی و برشی ارزیابی شده و با استفاده از توموگرافی مدل سرعت زیرسطحی مدل‌سازی شد. به طور کلی، بخش توموگرافی لرزه‌ای نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه شامل سه لایه می‌باشد، سرعت موج طولی در لایه اول در حدود ۷۵۰-۸۰۰ متر بر ثانیه، لایه دوم ۸۵۰-۹۰۰ و لایه سوم حدود ۱۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین سرعت موج برشی در لایه اول حدود ۴۰۰ متر بر ثانیه، لایه دوم ۵۰۰ متر بر ثانیه و لایه سوم حدود ۶۵۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

ضمنا با داشتن مقادیر سرعت‌ها و با استفاده از (۱) و (۲) کمیت‌های نسبت پواسون و مدول یانگ برای هر پروفیل و هر لایه محاسبه گردید که مقادیر میانگین آنها در جدول (۱) آورده شده است. همچنین مواد زمین‌شناسی سطحی عمدتاً خاک‌های دانه‌ای، از ماسه تا شن، در واقع مخلوطی از ماسه ریز تا درشت و شن ریز می‌باشد که در برخی نواحی دارای مقدار کمی سیلت بوده که توسط جریان رودخانه از ارتفاعات اطراف به منطقه سرازیر شده است.

کمیت‌های نسبت پواسون و مدول یانگ نیز با استفاده از (۱) و (۲) محاسبه شدند.

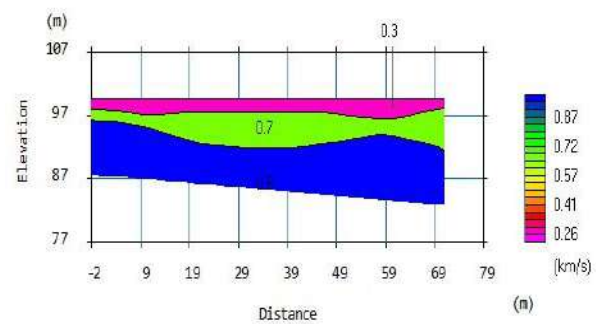
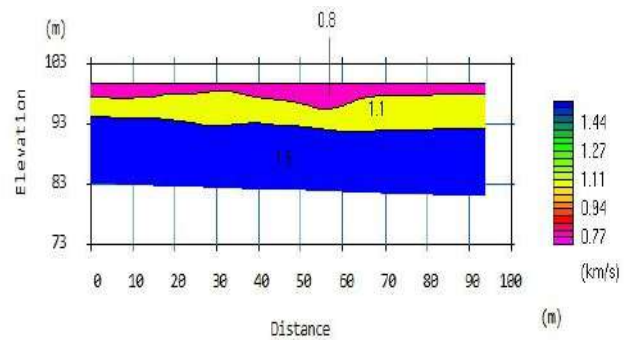
$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{v_P}{v_S} \right)^2 - 1} \right) \quad (1)$$

$$E = \rho \frac{3v_P^2 - 4v_S^2}{\left(\frac{v_P}{v_S} \right)^2 - 1} \quad (2)$$

که در آنها E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، ρ چگالی لایه، V_P سرعت موج طولی (موج P) و V_S سرعت موج برشی (موج S) می‌باشند.

جدول (۱): شامل میانگین سرعت لایه‌ها بر حسب متر بر ثانیه، نسبت پواسون، و مدول یانگ بر حسب مگا پاسکال

| شماره لایه‌ها | E | ν | V_S | V_P | ضخامت لایه |
|---------------|------|-------|-------|-------|------------|
| اول | ۸۶۰ | ۰/۲۷ | ۴۰۰ | ۷۵۰ | ۳ متر |
| دوم | ۱۸۵۸ | ۰/۲۶ | ۵۰۰ | ۸۵۰ | ۶ متر |
| سوم | ۳۱۶۹ | ۰/۲۶ | ۶۵۰ | ۱۰۰۰ | ۱۵ متر |



(الف)

(ب)

شکل (۳): (الف) تصویر توزیع سرعت موج S و مدل لایه‌بندی زیرسطحی در محل پروفیل شماره ۲۳ با استفاده از روش توموگرافی لرزه‌ای؛ (ب) تصویر توزیع سرعت موج P و مدل لایه‌بندی زیرسطحی در محل پروفیل شماره ۱۳ با استفاده از روش توموگرافی لرزه‌ای

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس پروفیل‌های سرعت بدست آمده، مدل تغییرات و به طور کلی توزیع سرعت امواج در ساختارهای زیرسطحی، الگوی لایه‌بندی زمین شامل موقعیت هندسی، نحوه قرارگیری، ضخامت و مرز جدایش لایه‌ها به طور مطلوب آنگونه که نیاز بود و انتظار می‌رفت مدل‌سازی شدند. همچنین مقادیر میانگین سرعت‌های لرزه‌ای برای هر لایه محاسبه گردید و به محدوده عمقی مربوط به ضخامت لایه مورد نظر نسبت داده شد. بر مبنای اطلاعات از پیش موجود حاصل از حفر گمانه‌ها و ارزیابی‌های زمین‌شناسی، مدل لایه‌بندی به‌دست آمده در این مطالعه به طور مناسب با الگوی حاصل از برداشت‌های گمانه‌ای مطابقت خوبی داشت که بیانگر کارایی و دقت قابل قبول حاصل از روش توموگرافی لرزه‌ای می‌باشد. این روش به واسطه بهره‌مندی از دقت کافی و غیر مخرب بودن دارای مزایایی از جمله عدم آسیب به محیط زیست، اتمام در کوتاه‌ترین زمان ممکن و به تبع کم هزینه بودن می‌باشد، که می‌تواند به عنوان رویکردی مناسب جایگزین روش‌های سنتی مخرب گردد که کماکان در اجرای پروژه‌های اکتشافی در مطالعات مهندسی معدن استفاده می‌شوند.

۶- مراجع

- [1] Babacan, A. E., Gelisli, K., Tweeton, D., 2018. Refraction and amplitude attenuation tomography for bedrock characterization: Trabzon case (Turkey), Engineering Geology, 245, 344-355.
[2] Pegah, E., Liu, H., 2020. Evaluating the over consolidation ratios and peak friction angles of granular soil deposits using noninvasive seismic surveying, Acta Geotechnica, 15, 3193-3209.

- [3] Pegah, E., Liu, H., 2016. Application of near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves for geotechnical site characterizations: A case study, *Engineering Geology*, 208, 100-113.
- [4] Bery A. A., 2013. High resolution in seismic refraction tomography for environmental study, *International Journal of Geosciences*, 4, 792-796.
- [5] Michael, L., Rucker, P. E., 2006. Integration seismic refraction and surface wave data collection and interpretation for geotechnical site characterization, *Geophysics 2006: Conference on Applied Geophysics*, Missouri, USA.
- [6] Yilmaz, O., 2015. *Engineering Seismology with Application to Geotechnical Engineering*, 1st Edition. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, USA.

ارزیابی ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای از سرعت‌های لرزه‌ای و بررسی وابستگی آن به مشخصات ظاهر سطحی خاک

۱، فریده طلایی فیروزجایی، ۲، احسان پگاه، ۳، علی میثاقی

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛

talaeefaride@gmail.com

۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ e.pegah@khu.ac.ir

۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ ali.misaghi@khu.ac.ir

* نویسنده مسئول: احسان پگاه

چکیده فارسی

ناهمسانگردی ساختار بافتی دارای سهمی اساسی در الگوی تغییرات مقادیر منتسب به درجه ناهمسانگردی ضرایب کشسانی خاک می‌باشد. هدف این مطالعه، تعیین این ناهمسانگردی در خاک‌های دانه‌ای و بررسی وابستگی آن به مشخصات دانه‌بندی و ذرات خاک می‌باشد. بدین منظور، با فرض وجود ناهمسانگردی متقاطع در محیط خاک، ضرایب کشسانی حاصل از ۱۶۰ آزمون آزمایشگاهی بر روی ۷ نمونه متفاوت از ۵ نوع خاک ماسه‌ای مختلف که از اندازه‌گیری سرعت‌های لرزه‌ای بدست آمده بودند همراه با ویژگی‌های دانه‌بندی، اندازه، شکل و وزن ذرات، از مقالات معتبر گردآوری شدند. بر مبنای یک معادله تجربی، داده‌های کشسانی گردآوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌ها محاسبه شدند. در انتها، با اجرای یک سری از تحلیل‌های رگرسیونی ساده و چندگانه، همبستگی میان این نسبت و مشخصات دانه‌بندی و ذرات خاک بررسی شده و روابط تجربی حاکم بر آنها استخراج گردیدند.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های دانه‌ای، ناهمسانگردی ساختار بافتی، ناهمسانگردی سفتی برشی، ویژگی‌های دانه‌بندی، خصوصیات ذرات خاک

Evaluating fabric anisotropy in granular soils from seismic velocities and examination of its dependency on surface appearance soil characteristics

Farideh Talae Firozjaee¹, Ehsan Pegah², Ali Misaghi³

¹M.Sc. in Geophysics, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; talaeefaride@gmail.com

²Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; e.pegah@khu.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; ali.misaghi@khu.ac.ir

* Corresponding author: Ehsan Pegah

ABSTRACT

The fabric anisotropy has a main role in variations model of degree of anisotropy resulting from various elastic soil coefficients in different directions and planes. The aim of this study is to determine this anisotropy in granular soils through investigating its dependency on grading and soil particles characteristics. To this end, by assuming cross-anisotropy in the soil medium, the elastic coefficients resulting from 160 laboratory tests on 7 different samples of 5 various sandy soils, which in turn were

obtained from the measurement of seismic velocities, were collected along with their corresponding grading, shape and weighting characteristics from literature. The acquired data were analyzed based on an experimental well-known equation to calculate the values of fabric anisotropy ratio in soils. In the end, by performing a series of simple and multiple regression analyses, the potential correlations between this ratio and the grading and soil particles characteristics were investigated to finally obtain a series of empirical relations expressing that as the functions of the characteristics.

Keywords: Granular soils, Fabric anisotropy, Shear stiffness anisotropy, Grading characteristics, Soil particles properties

مقدمه

تعیین دقیق ویژگی‌های کشسانی ناهمسانگرد در خاک‌های دانه‌ای، یکی از موضوعات بسیار مهم در کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک خاک و زمین‌شناسی مهندسی می‌باشد. این ناهمسانگردی در محیط خاک عمدتاً به دو دلیل ناهمسانگردی ناشی از ساختار بافتی خاک (soil fabric)، که در حین فرآیند رسوبگذاری طبیعی در صحرا یا آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه ایجاد می‌شود، و ناهمسانگردی موجود در حالت تنش درجا، وابسته می‌باشد. تعیین درجه ناهمسانگردی سفتی برشی در انواع خاک‌های دانه‌ای و چسبیده به سبکی دقیق، سریع و اقتصادی به گونه‌ای که سازگار با محیط زیست باشد، همواره یکی از چالش‌های موجود بر سر راه مهندسی ژئوتکنیک بوده است. عموماً اندازه‌گیری چنین نسبتی با استفاده از روش‌های خاص آزمایشگاهی تحت شرایط پیچیده که بعضاً همراه با عدم قطعیت نسبتاً بالا در نتایج است، صورت می‌پذیرد. از این‌روست که در این مطالعه تلاش شده است، تا با ارائه روابط مفید برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی برحسب مشخصات دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک، تعیین نسبت ناهمسانگردی برشی بر مبنای یک فرآیند صحیح، سریع، غیر مخرب و مقرون به صرفه انجام پذیرد. محاسبه‌ی درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک و به دنبال آن تعیین بزرگی مدول‌های کشسانی دارای نقشی حیاتی در طراحی انواع فونداسیون و تجزیه و تحلیل طیف وسیعی از مسائل مرتبط با کاربردهای مهندسی می‌باشند [۱] [۲] [۳].

شی و همکاران [۴]، ازائوی و دیندو [۵]، لی و استوک [۶] و کووانو و جاردین [۷] با انجام تحقیقات گسترده بر روی خاک‌های دانه‌ای با فرض وجود ناهمسانگردی متقاطع (cross-anisotropy) در محیط خاک، ضمن اندازه‌گیری پارامترهای کشسانی، وجود این نوع از ناهمسانگردی را در خاک‌های دانه‌ای تأیید نمودند. گو و همکاران [۸] نیز به محاسبه نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های چسبیده و اهمیت این نسبت در تعیین درجه ناهمسانگردی برشی پرداختند. با این وجود، تا کنون هیچ تلاشی در عمل به منظور ارزیابی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین، نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به عنوان یافته‌هایی نوین که دربرگیرنده روابطی کاربردی در حیطه مرتبط با خاک‌های دانه‌ای خواهند بود در نظر گرفت. به طور کلی، در این مقاله دو هدف اصلی دنبال می‌شود. هدف اول، تعیین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در طیف متنوعی از خاک‌های دانه‌ای گوناگون می‌باشد. هدف دوم، ارزیابی وابستگی درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی به مشخصات دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک می‌باشد. جهت دستیابی به اهداف ذکر شده، با فرض وجود ناهمسانگردی متقاطع در محیط خاک، طیف وسیعی از داده‌های مورد نیاز از مقالات و متون معتبر گردآوری شده و یک پایگاه داده جامع ایجاد گردید. این داده‌ها شامل مقادیر متغیرهای کشسانی، پارامترهای استخراج شده از منحنی دانه‌بندی و ویژگی ذرات مربوط به ۷ نمونه مختلف از ۵ نوع خاک دانه‌ای گوناگون متعلق به نقاط مختلف در دنیا می‌باشند. لازم به ذکر است که شیوه محاسبه داده‌های کشسانی بر پایه اندازه‌گیری مستقیم سرعت‌های لرزه‌ای در محیط خاک و جایگذاری آنها در معادلات حاصل از نظریه کشسانی ناهمسانگرد متقاطع استوار می‌باشد. همچنین به منظور اطمینان از حضور در محدوده رفتاری کاملاً کشسان، کلیه مقادیر پارامترهای گردآوری شده تنها از مطالعات صورت گرفته در سطوح کرنشی کوچک (کمتر از 10^{-6}) استخراج گردیدند. بر مبنای یک معادله تجربی مشهور و با استفاده از یک روش پیشنهادی، اطلاعات کشسانی گردآوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای مورد مطالعه شناسایی شوند. نسبت‌های بدست آمده سپس

در مقابل پارامترهای بیان کننده مشخصات دانه بندی و ذرات خاک ترسیم شدند تا سطح وابستگی این نسبت به ویژگی های مذکور تعیین گردد. در انتها، با اجرای یک سری از تحلیل های رگرسیونی ساده و چندگانه، نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در قالب روابطی تجربی بر حسب خواص دانه بندی و ذرات خاک ارائه گردید. با استفاده از معادلات بدست آمده، تعیین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی و به تبع آن ناهمسانگردی سفتی برشی در خاک های دانه ای تنها بر اساس خصوصیات ظاهری خاک که به سهولت قابل اندازه گیری هستند مقدور می گردد. به بیان دیگر، بر پایه راهکار ارائه شده در این مقاله می توان نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در محیط خاک را بدون دستخوردگی و نیاز به انجام آزمایشات پرهزینه و زمانبر در روندی کاملاً مقرون به صرفه و با دقتی مطلوب برآورد نمود.

خاک های مورد مطالعه

در این مقاله، ۷ نمونه از ۵ نوع خاک دانه ای مختلف شامل ماسه ی کنیا (Kenya sand)، ماسه ی تیسینو (Ticino sand)، ماسه ی توپورا (Toyoura sand) و ماسه ی رودخانه هام (Ham river sand) به همراه ماسه هوستون (Hostun sand) که به سه روش مختلف ریزش هوایی (p)، ریزش هوایی و ارتعاش (p+v) و ریزش هوایی و کوبش (p+t) بازسازی شده است، مورد ارزیابی قرار گرفت. برخی از خصوصیات هر یک از خاک های ذکر شده در جدول (۱) نشان داده شده است [۹] [۱۰] [۱۱] [۱۲].

مدل کشسانی ناهمسانگردی متقاطع

یکی از فرضیات مورد نظر در این پژوهش، برقراری مدل ناهمسانگردی متقاطع (همسانگرد عرضی) در خاک های دانه ای است که از آن به طور گسترده برای شناسایی ویژگی های ژئوتکنیکی استفاده می شود. در مدل ناهمسانگرد متقاطع سطح بستر خاک که معمولاً افقی در نظر گرفته می شود، صفحه ای همسانگرد می باشد، در این صفحه خصوصیات مکانیکی خاک در کلیه جهات یکسان است. در حالی که خصوصیات اندازه گیری شده در راستای عمود بر صفحه افقی، مقادیری مختلف را نشان می دهد، که بیانگر رفتار ناهمسان خاک در صفحات افقی و قائم است. بر طبق اصول ارائه شده در نظریه کشسانی، روابط مشخصه تنش- کرنش در یک توده خاک ناهمسانگرد متقاطع را می توان با استفاده از قانون عمومی هوک و بر مبنای هفت ضریب کشسانی مختلف به صورت (۱) نشان داد [۱۳]:

جدول (۱): برخی از خصوصیات شاخص ماسه های کنیا، تیسینو، توپورا، رودخانه هام و هوستون

| نام خاک | C_c | G_s | S | D_{max} (mm) |
|------------------|-------|-------|-------|----------------|
| ماسه کنیا | ۰/۸۲ | ۲/۷۸۵ | - | ۰/۵ |
| ماسه تیسینو | ۰/۹۳ | ۲/۶۹ | ۰/۷۳۲ | ۰/۸۵ |
| ماسه توپورا | ۰/۹ | ۲/۶۴ | ۰/۷۴۳ | ۰/۳۶ |
| ماسه رودخانه هام | ۰/۹۹ | ۲/۶۶ | ۰/۷۰۵ | ۰/۶ |
| ماسه هوستون | ۱/۰۶ | ۲/۶۵ | ۰/۷۲۳ | ۰/۹ |

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه E_h و E_v به ترتیب بیانگر مدول‌های یانگ در جهات قائم و افقی بوده؛ و ν_{hh} ، ν_{hv} ، ν_{vh} نشان دهنده نسبت‌های پواسون به صورت ν_{ij} برای بارگذاری اعمال شده در جهت i و تغییر شکل وابسته به آن در جهت j می‌باشند. علاوه بر این، G_{vh} (یا G_{hv}) نیز به ترتیب بیان کننده مدول‌های برشی در صفحات قائم و افقی خاک می‌باشند. متغیرهای $\Delta \varepsilon_x$ ، $\Delta \varepsilon_y$ و $\Delta \varepsilon_z$ نیز نشان دهنده تغییرات کرنش‌های نرمال متناسب با تغییرات تنش‌های نرمال $\Delta \sigma_x$ ، $\Delta \sigma_y$ و $\Delta \sigma_z$ ؛ و متغیرهای $\Delta \gamma_{xy}$ ، $\Delta \gamma_{yz}$ و $\Delta \gamma_{zx}$ بیان کننده تغییرات کرنش‌های برشی در مقابل تنش‌های برشی $\Delta \tau_{xy}$ ، $\Delta \tau_{yz}$ و $\Delta \tau_{zx}$ هستند. این هفت پارامتر الاستیک بر مبنای (۲)، (۳) و (۴) که برگرفته از نظریه کشسانی می‌باشند با یکدیگر در ارتباط هستند به طوری که تنها پنج عدد از آنها در عمل مستقل می‌باشند:

$$G_{vh} = G_{hv} \quad (2)$$

$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \quad (3)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + \nu_{hh})} \quad (4)$$

۴- روش تحقیق و یافته‌ها

۴-۱- ناهمسانگردی ساختار بافتی

ساختار بافتی خاک به نظم هندسی قرارگیری ذرات خاک نسبت به یکدیگر، شامل توزیع هندسی فضاهای خالی اشاره دارد، که در واقع افشا کننده ساختار اسکلتی موجود در توده خاک می‌باشد [۱۴]. از آنجایی که ذرات ماسه، شکل هندسی منظمی ندارند؛ بنابراین، در هنگام رسوب‌گذاری بافت ناهمسانگرد در نهشته‌های رسوبی آن‌ها ایجاد می‌گردد. این ویژگی رسوبی منجر به ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های ماسه‌ای شده که به طور خودبه‌خود تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خواص آنها ایجاد می‌کند [۴]. ناهمسانگردی موجود در پارامترهای کشسانی و شدت آن، که به عنوان درجه یا نسبت ناهمسانگردی شناخته می‌شود، به طور مستقیم در ارتباطی تنگاتنگ با خصوصیات ساختار بافتی خاک قرار دارند. به بیان دیگر، تأثیر ناهمسانگردی ساختار بافتی بر مقادیر سفتی خاک در جهات و صفحات مختلف به حدی برجسته است که دارای سهمی بنیادین در الگوی تغییرات مقادیر منتسب به درجه ناهمسانگردی سفتی می‌باشد [۸]

[۴]. بنابراین، ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک را می‌توان به عنوان مشخصه‌ای قابل اطمینان برای ارزیابی نسبت ناهمسانگردی ضرایب کشسانی خاک در نظر گرفت.

۲-۴- تعیین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای

با استخراج داده‌ها از مقالات معتبر بین‌المللی و ایجاد یک پایگاه داده‌ی جامع، مدول‌های برشی در نمونه‌های خاک همراه با دیگر اطلاعات مربوط به وضعیت تنش و نسبت تخلخل متناظر بکار گرفته شدند تا پس از پیاده‌سازی در (۵) و (۶) (روابط منتسب به مدل تنش منفصل)، که مدول‌های برشی را برحسب تابعی از این اطلاعات و ثابت‌های ماده بیان می‌کند، مؤلفه‌های ناهمسانگرد ساختار بافتی خاک محاسبه گردند:

$$G_{vh} = A_{vh} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)^{n_{vh}} \quad (5)$$

$$G_{hh} = A_{hh} F(e) P_a \left[\left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right]^{n_{hh}} \quad (6)$$

در این روابط، ثابت‌های A_{vh} و A_{hh} به ترتیب مؤلفه‌های ناهمسانگرد ساختار بافتی خاک در صفحات قائم و افقی می‌باشند. عبارت $F(e)$ نیز تابع نسبت تخلخل و P_a فشار مرجع (۱۰۰ kPa) می‌باشد. همچنین تنش‌های σ'_v و σ'_h به ترتیب معرف تنش مؤثر عمودی و تنش مؤثر افقی، و ثابت‌های n_{vh} و n_{hh} نیز توان‌های وابسته به تنش‌های متناظر هستند. لازم به ذکر است که مدل تنش منفصل یک مدل دقیق و بسیار محبوب بوده که به گستردگی در کاربردهای مرتبط با ارزیابی مقادیر سفتی برشی توسط محققین استفاده می‌شود [۲] [۱۵].

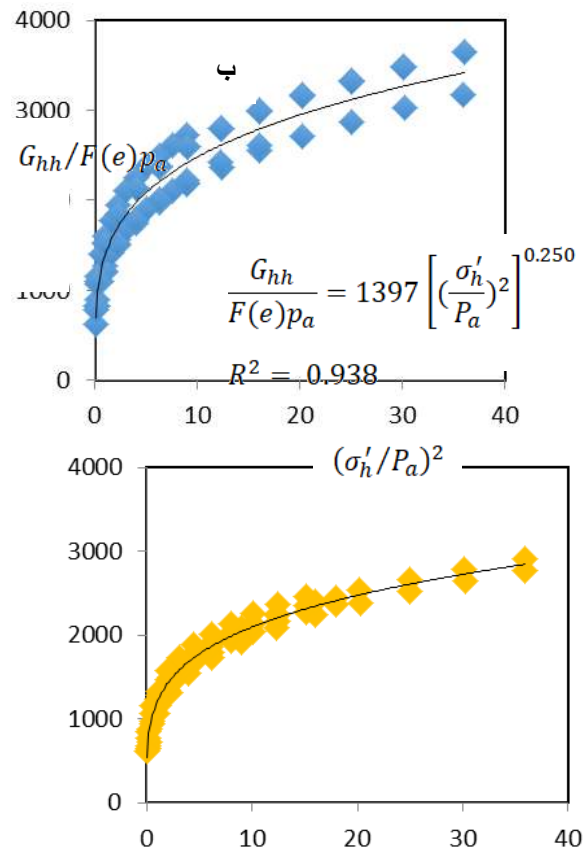
در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون ساده بر روی زوج داده‌های $\frac{G_{vh}}{F(e)P_a} = \left(\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)^{n_{vh}}$ و $\frac{G_{hh}}{F(e)P_a} = \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^{2n_{hh}}$ از روابط (۵) و (۶) مؤلفه‌های افقی و قائم ناهمسانگردی ساختار بافتی تعیین می‌گردد. از تقسیم مؤلفه‌های محاسبه شده، می‌توان گستره‌ی مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی را در خاک‌های مورد مطالعه بدست آورد. شکل (۱) برازش منحنی بر روی داده‌های ماسه‌ی کنیا را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از برازش منحنی شامل تعداد نقاط داده‌ی سهیم در تحلیل رگرسیون (N)، ضریب تعیین (R^2)، مؤلفه‌های ناهمسانگردی ساختار بافتی و نسبت آن $\left(\frac{A_{hh}}{A_{vh}} \right)$ برای هریک از خاک‌های دانه‌ای در جدول (۲) نشان داده شده است.

الف

$$G_{vh}/F(e)p_a$$

$$\frac{G_{vh}}{F(e)p_a} = 1209 \left(\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)^{0.239}$$

$$\sigma'_v \sigma'_h / P_a^2$$



شکل (۱): برازش منحنی بر روی زوج داده‌های (الف) $\frac{G_{vh}}{F(e)p_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2}$ ؛ و (ب) $\frac{G_{hh}}{F(e)p_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2$ در ماسه کنیا

با توجه به مقادیر مؤلفه‌های ناهمسانگردی ساختار بافتی حاصل از تحلیل رگرسیون انجام شده، مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه خاک‌های ذکر شده، مقدار ناهمسانگردی ساختار بافتی در صفحه افقی بیشتر از اندازه آن در صفحه قائم می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به حضور ذرات بیشتر که با محور طولانی‌تر خود، در جهت افقی رسوب‌گذاری کرده‌اند دانست. این خصیصه، سبب حرکت سریع‌تر امواج کشسانی در جهت افقی و ایجاد بافت قوی‌تر در این جهت شده است [۱۲].

۳-۴- بررسی وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی به مشخصات دانه‌بندی و ذرات خاک

از مهمترین اهداف مورد پیگیری در این مطالعه، ارزیابی وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی به خصوصیات دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک و ارائه روابط سودمند برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی بر حسب این ویژگی‌ها می‌باشد تا زین پس محاسبه نسبت ناهمسانگردی برشی بر مبنای یک راهبرد صحیح، سریع و مقرون به صرفه انجام پذیرد. برای این منظور، پس از جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده، با انجام تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه خطی به روی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک در مقابل پارامترهای دانه‌بندی و مشخصات دانه‌ها، همبستگی بین آنها بررسی شد.

جدول (۲): مقادیر مؤلفه‌ها و نسبت ناهمسانگردی فابریکی، ضریب تعیین و تعداد نقاط داده‌ی سهیم در تحلیل رگرسیون

| نوع خاک | N | A_{hh} | A_{vh} | A_{hh}/A_{vh} | R^2 |
|---------|---|----------|----------|-----------------|-------|
|---------|---|----------|----------|-----------------|-------|

| | | | | | |
|------|-------|--------|--------|----|-------------------|
| ۰/۹۵ | ۱/۱۴۰ | ۱۲۰۹/۴ | ۱۳۹۷ | ۶۸ | ماسه کنیا |
| ۰/۹۸ | ۱/۱۷۰ | ۶۶۷/۰۶ | ۷۸۰/۵۲ | ۲۶ | ماسه تسینو |
| ۰/۹۹ | ۱/۳۶ | ۹۹۷/۷۷ | ۱۳۵۷/۱ | ۵ | ماسه تیورا |
| ۰/۹۹ | ۱/۰۶۵ | ۷۳۹/۹۲ | ۷۸۸/۱۵ | ۱۸ | ماسه رودخانه هام |
| ۰/۹۵ | ۱/۱۸۵ | ۳۱۷/۶۹ | ۳۷۶/۵۹ | ۲۰ | ماسه هوستون (p) |
| ۰/۸۱ | ۱/۲۰۴ | ۳۱۴/۳۷ | ۳۷۸/۴۸ | ۱۵ | ماسه هوستون (p+v) |
| ۰/۸۵ | ۱/۱۲۶ | ۲۹۷/۷۷ | ۳۳۵/۳۸ | ۱۶ | ماسه هوستون (p+t) |

در گام نخست، با اعمال تحلیل رگرسیون ساده همانطور که در (۷)، (۸) و (۹) مشهود است، همبستگی ناچیزی بین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی و متغیرهای D_{max} ، C_c و G_s مشاهده می‌شود که مقدار ضریب R^2 تأییدی بر این مدعاست. در حالی که مقدار نسبتاً قوی ضریب R^2 در (۱۰) همبستگی بالایی را بین این نسبت و پارامتر S پیش‌بینی می‌کند.

$$A_{hh}/A_{vh} = 1.136D_{max}^{-0.093}; R^2 = 0.199; N = 7 \quad (۷)$$

$$A_{hh}/A_{vh} = 1.170C_c^{-0.145}; R^2 = 0.036; N = 7 \quad (۸)$$

$$A_{hh}/A_{vh} = 3.754G_s^{-1.18}; R^2 = 0.085; N = 7 \quad (۹)$$

$$A_{hh}/A_{vh} = 4.683S^{4.279}; R^2 = 0.808; N = 6 \quad (۱۰)$$

با انجام تحلیل رگرسیون چندگانه خطی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS بین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای مشخصات خاک بعنوان متغیرهای مستقل در مقیاس لگاریتمی، اطلاعات استخراج شده مورد بررسی قرار گرفت و براساس یافته‌های حاصل، نسبت به تأیید/رد و تفسیر آنها اقدام گردیده است. بر این اساس، در گام نخست با ورود متغیرها در نرم‌افزار، وجود یا عدم وجود همبستگی خطی بین متغیرها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با روش گام‌به‌گام (Stepwise method) در نرم افزار مذکور، نتایج حاصل از اجرای دستورات و محاسبات مربوط به برآورد پارامترهای مدل توسط نرم‌افزار، استخراج گردیده و در جدول (۳) نشان داده شده است که B و sig به ترتیب معرف میانگین ضریب رگرسیونی و سطح معنی‌داری (احتمال خطا) می‌باشند.

جدول (۳): ضریب و سطح معنی‌داری حاصل از تحلیل رگرسیون چند متغیری به سبک گام‌به‌گام

| متغیرهای مستقل | B | sig |
|----------------|-------|-------|
| مقدار ثابت | ./۶۶۵ | ۰/۰۱۵ |
| S | ۴/۱۶۹ | ۰/۰۱۸ |
| C_c | - | ۰/۹۲۷ |
| G_s | - | ۰/۳۴۸ |
| D_{max} | - | ۰/۱۵۰ |
| $R^2 = ۰/۸۸$ | | |

همان‌طور که انتظار می‌رفت، فقط متغیر K به دلیل کمتر بودن سطح معنی داری آن از احتمال خطای در نظر گرفته شده برای این آزمون (۰/۰۵) در مدل گام‌به‌گام وارد شده است و سایر متغیرهای مستقل به دلیل داشتن رابطه‌ی خطی با متغیر کرویت یا نداشتن همبستگی مطلوب با نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی، از مدل کنار گذاشته شده‌اند. لذا می‌توان مدل نظری را بر اساس متغیر پیشگوی کرویت به صورت (۱۱) ایجاد کرد:

$$\frac{A_{hh}}{A_{hh}} = 4.51S^{4.169}; R^2 = 0.88; N = 6 \quad (11)$$

مقدار بالای R^2 در (۱۱) بیانگر وجود یک ارتباط منطقی بین میانگین کرویت دانه‌های خاک و نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی آن می‌باشد. در ضمن، وجود اختلاف ناچیز بین ضرایب (۱۰) و (۱۱) که هر دو تابعی از K می‌باشند، می‌تواند ناشی از اعمال روابط لگاریتمی در تحلیل رگرسیون چندگانه و همچنین تفاوت الگوریتم بکار رفته توسط دو نرم‌افزار مختلف در استخراج اطلاعات باشد.

۵- نتیجه‌گیری

- از مقایسه مقادیر مؤلفه‌های ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک در صفحات افقی و قائم، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که خاک‌های دانه‌ای ساختار بافتی قوی‌تری را در جهت افقی نسبت به جهت عمودی دارا می‌باشند.
- جهت ارزیابی وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی خاک به مشخصات دانه‌بندی و ذرات آن، در گام نخست با انجام تحلیل رگرسیون ساده، مشاهده گردید که متغیر کرویت (S) بیشترین و پارامترهای ضریب دانه‌بندی (G_c)، چگالی ویژه (G_g) و بیشینه قطر (D_{max}) ذرات خاک به ترتیب کمترین تاثیر را بر این نسبت دارا می‌باشند. در نهایت، با اجرای تحلیل رگرسیون چندگانه خطی بر روی داده‌ها، مدل نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی تنها بر اساس پارامتر کرویت ارائه گردید.
- یافته‌های حاصل، سازگار با محیط زیست بوده و استفاده از آنها بدون نیاز به آزمون‌های زمان‌بر و پرهزینه آزمایشگاهی، بسیار مقرون به صرفه و اقتصادی می‌باشد. لذا می‌تواند به عنوان یک شاخص سودمند برای مهندسیین زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در طراحی انواع سازه‌ها بر روی لایه‌های خاک یا درون محیط‌های خاکی به کار روند.

مراجع

- [۱] Das, B. M., Ramana, G. V., "Principles of Soil Dynamics, 2nd Edition," Cengage Learning, Stamford, USA, 2011.
- [۲] Ku, T., Mayne, P. W., "Profiling of K_0 lateral stress coefficient in soils using paired directional G_0 ratios," Journal of Applied Geophysics, 94, 15-21, 2013a.
- [۳] Ku, T., Mayne, P. W., "Yield stress history evaluated from paired in-situ shear moduli of different modes," Engineering Geology, 152, 122-132, 2013b.
- [۴] Shi, J., Haegeman, W., Cnudde, V., "Anisotropic small-strain stiffness of calcareous sand affected by sample preparation, particle characteristic and gradation," Geotechnique, 71, 4, 305-319, 2021.
- [۵] Ezaoui, A., Di Benedetto, H., "Experimental measurements of the global anisotropic elastic behaviour of dry Hostun sand during triaxial tests, and effect of sample preparation," Geotechnique, 59, 7, 621-635, 2009.
- [۶] Lee, S.H.H., Stokoe, K.H., "Investigation of low-amplitude shear wave velocity in anisotropic material," Rep. No. GR86-06, Civil Engineering Dept., University of Texas, Austin, Tex, 1986.
- [۷] Kuwano, R., Jardine, R.J., "On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains," Geotechnique 52 (10), 727-749, 2002.

- [^۸]Gu, X. Q., Li, Y., Hu, J., Shi, Z., Liang, F., Huang, M., “Elastic shear stiffness and fabric anisotropy of natural clays,” *Acta Geotechnica*, 17, 3229-3243, 2022.
- [^۹]Fioravante, V., Giretti, D., Jamiolkowski, M., “Small strain stiffness of carbonate Kenya Sand,” *Engineering Geology*, 161, 65-80, 2013.
- [^{۱۰}]Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., O’Neill, D. A., “Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand,” *Geotechnique*, 46, 1, 115-131, 1996.
- [^{۱۱}]Pegah, E., Liu, H., Gu, X. Q., Gholami, A., “A semi-analytical approach for efficient calculation of drained cross-anisotropic elastic moduli in saturated granular soils from undrained attributes,” *Computers and Geotechnics*, 148, 104794, 2022.
- [^{۱۲}]Dutta, T. T., Otsubo, M., Kuwano, R., Sato, T., “Estimating multidirectional stiffness of soil using planer piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus,” *soil and foundation*, 60, 1269-1286, 2020.
- [^{۱۳}]Pegah, E., Liu, H., Gholami, A., “Estimating drained cross-anisotropic elastic parameters in saturated clays using the undrained properties,” *Engineering Geology*, 293, 106340, 2021.
- [^{۱۴}]Das, B. M., Sobhan, K., “Principles of Geotechnical Engineering, 4th Edition,” Cengage Learning, Stamford, USA, 2014.
- [^{۱۵}]Ku, T., Subramanian, S., Moon, S. W., Jung, J., “Stress dependency of shear wave velocity measurements in soils,” *Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, 143, 2, 04016092, 2017.

توموگرافی الکتریکی جهت تصویرسازی مرز لایه ها؛ مطالعه موردی

مرتضی عزیزلو^۱، رضا قناتی^۲

^۱کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mortezaazizlu8@gmail.com

^۲استادیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، rghanati@ut.ac.ir

چکیده

مطالعه مرز بین رخساره‌ها و لایه‌ها با دانه بندی نزدیک به هم و دارای چین خوردگی‌های بالا از مسائل ژئوفیزیکی چالش‌برانگیز است. توموگرافی الکتریکی (ERT)، به عنوان یکی از موثرترین رهیافت‌های ژئوفیزیکی برای به نقشه در آوردن لایه‌های زیرسطحی بر اساس تباین رسانندگی ویژه مواد قلمداد می‌شود. اندازه‌گیری‌های دوبعدی با هدف بررسی تغییرات جانبی و عمقی کمیت‌های فیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری مصالح زیر سطحی انجام می‌شود. در مواردی که تباین رسانندگی رولایه و سنگ بستر کم باشد تعیین دقیق این مرز با کمک روش‌های ژئوالکتریکی با عدم قطعیت بالایی روبه‌رو است. در این مطالعه، به بررسی کارایی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی از طریق برداشت چندین پروفیل موازی با هدف تصویرسازی مرز رولایه و سنگ بستر پرداخته می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده از آرایه‌های برداشت شده، بخش‌های شارژپذیر می‌توانند در ارتباط با زون شیلی و نیز آهک‌های مارنی حاوی پیریت باشد. همچنین به دلیل نزدیکی مقادیر شارژپذیری رولایه با دانه بندی در حد رس و سنگ کف آهکی با میان لایه‌های شیلی و مارنی، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی به عنوان عامل اصلی جهت تفکیک لایه‌های زیرسطحی از یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. برای تفسیر بهتر مدل‌های بدست آمده از داده‌های برداشت شده (ERT)، از اطلاعات زمین‌شناسی و همچنین گمانه‌های حفاری موجود در منطقه برای صحت‌سنجی مقاطع ژئوالکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس مدل‌های منتج شده از داده‌های ژئوالکتریکی می‌توان نتیجه گرفت که بررسی‌های ژئوفیزیکی (توموگرافی الکتریکی)، به خوبی توانسته فروافتادگی موجود در منطقه مورد مطالعه و همچنین مرز رولایه و سنگ بستر را با توجه به محدودیت‌های تفکیک پذیری تا حد قابل قبولی به تصویر درآورد و نتایج امید بخشی را در این مطالعات ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، پلاریزاسیون القائی، مرز رولایه و سنگ بستر، سد خاکی

Electrical tomography to visualize the boundary of layers: a case study

Morteza Azizlou¹, Reza ghanati¹

¹Morteza Azizlou, Institute of Geophysics, University of Tehran; mortezaazizlu8@gmail.com

¹Reza Ghanati, Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran; rghanati@ut.ac.ir

ABSTRACT

Studying the boundaries between surfaces and layers by close-grading in a high-fold sedimentary environment is a challenging geophysical issue. In cases where the conductivity difference between the surface and the bedrock is small, the exact determination of this boundary with the help of geoelectrical methods is faced with high uncertainty. In this study, the efficiency of electrical resistivity tomography and induced polarization was investigated by taking several parallel profiles with the aim

of imaging the boundary between bedrock and bedrock. According to the results obtained from the inversion of the field measurements, rechargeable sections can be ascribed to the Chilean region as well as marl limestone containing pyrite. Also, due to the proximity of rechargeable surfaces with granulation in the clay and calcareous floor between the Chilean and Marl layers, the change in electrical resistivity is considered as the main factor separating the subsurface layers from each other. To better interpret the models obtained from the collected data electrical Resistivity Tomography (ERT) Geological data as well as borehole information are used to validate the geo-electrical sections. Based on the models obtained from geo-electrical data, it can be concluded that geophysical studies (electrical tomography) due to resolution differences are able to successfully determine the subsidence in the study area as well as the boundary between bed and bedrock possible. Demonstrate acceptance and present promising results in these studies.

Keywords: Tomography of specific electrical resistance (ERT), induced polarization, Roulay boundary and bedrock.

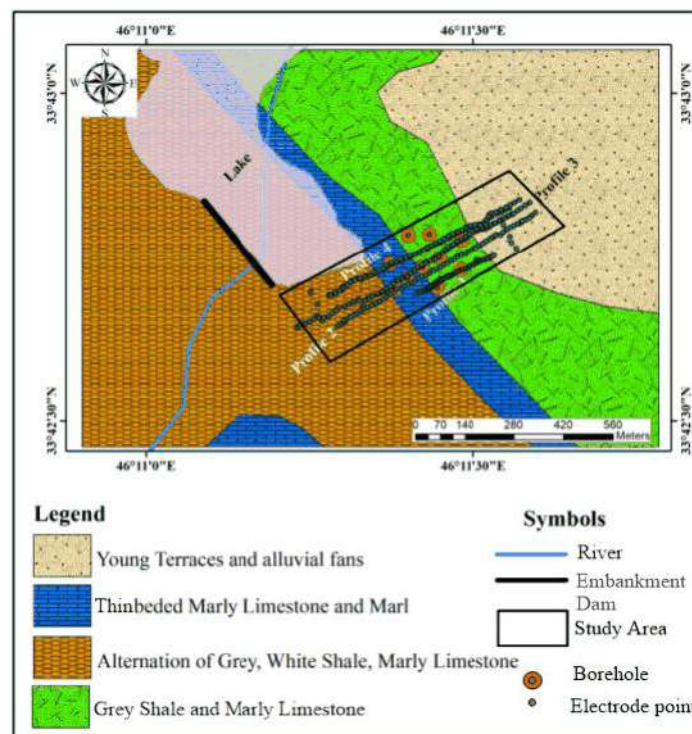
مقدمه

مطالعات ژئوفیزیکی با اهداف متفاوت مثل معادن، سدها، نیروگاهها، تونل‌های انتقال آب و غیره به یک امر ضروری تبدیل شده است. در این بین با افزایش روزافزون تعداد معادن باید از جهات مختلفی همچون اقتصادی، علمی، زیست محیطی، سیاسی و ... بررسی شود و بهترین مکان برای نقاط حفاری را ارائه داد. برآورد قابل اعتماد از تماس بین رسوبات و سنگ بستر برای کشف حجم رسوبات بسیار مهم است [1]. ساختارهای زمین‌شناسی دارای پیچیدگی‌های خاص خود هستند که با مطالعات قبل حفاری در معادن و یا احداث سازه‌های مهندسی می‌توان سرعت برداشت و یا ساخت آنها را از لحاظ زمانی بالا برد و هزینه‌های اضافی را کاهش داد. قبل از شروع حفاری و یا ساخت این نوع ساختگاهها باید مطالعات کاملی از جمله مطالعات میدانی زمین‌شناسی، مطالعات ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی انجام گیرد تا اطلاعات لازم را برای احداث این سازه‌ها را در اختیار مهندسين قرار گیرد [3]. روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی به منظور مطالعات حفاری معادن و ساختگاه سدهای خاکی مانند روش‌های لرزه‌ای [4,5,6]، الکترومغناطیسی [7,8]، ژئوالکتریکی [9,10] و پتانسیل خودزا [11,12,13] مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی شامل مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی (IP) به دلیل سرعت بالای برداشت، هزینه کم و امکان تفکیک بهتر لایه‌های زیرسطحی با رسانندگی‌های متفاوت، مورد توجه بیشتر جامعه ژئوفیزیک قرار گرفته است. هرچند در مواردی که تباین رسانندگی مصالح زیرسطحی کم باشد، استفاده از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی با عدم قطعیت همراه است. برای رفع این مشکل، استفاده هم‌زمان از داده‌های پلاریزاسیون القائی در تصویرسازی لایه‌های زیرسطحی باعث افزایش قطعیت در تفسیر نتایج می‌گردد. توموگرافی الکتریکی (مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی) برای تعیین توزیع مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری مصالح زیرسطحی بکار گرفته می‌شود. این مقادیر از طریق اندازه‌گیری‌های سطحی که پتانسیل ایجاد شده در اثر تزریق جریان به زمین را به دست می‌آورد حاصل می‌شود. جریان الکتریکی با استفاده از الکترودهای فرستنده به زمین تزریق می‌شود و مقدار پتانسیل با استفاده از ترکیب جفت الکترودهای دیگر نمونه برداری می‌شود [14]. مطالعات ژئوفیزیکی سازه‌های مهندسی از جمله سدهای خاکی قبل از احداث منجر به شناسایی زون‌های گسله، بررسی وضعیت هیدروژئولوژی منطقه، تفکیک لایه‌ها و نیز تعیین کیفی توده سنگ در زون‌های ناپایدار ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. به همین منظور برداشت‌های ژئوفیزیکی در محل سد شهدای استان ایلام باهدف تعیین مرز رولایه و سنگ بستر و بررسی وضعیت هیدروژئولوژی محدوده تکیه گاه چپ سد انجام گرفت. اهداف اصلی این مطالعات شامل تعیین وضعیت کلی رولایه نسبت به سنگ بستر، تصویر سازی هندسی سنگ بستر و شناسایی قسمت-هایی از سنگ بستر که تحت تاثیر شرایط مختلف زمین شناسی فرسایش یافته می‌شود. چالش اصلی این مطالعه ژئوفیزیکی، تباین کم رسانندگی بین رولایه با دانه بندی در حد رس و سنگ کف متشکل از آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن می‌باشد. در واقع، سوالی که

مطرح می‌شود این است که آیا روش‌های ژئوالکتریکی در چنین شرایط زمین‌شناسی قادر به افتراق مناسب مرز رولایه از سنگ کف هستند؟ باتوجه به وسعت منطقه و اهداف در نظر گرفته شده، مطالعات براساس اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی بنا نهاده شد. برداشت‌های صحرائی در قالب چهار پروفیل تقریباً موازی (باتوجه به شرایط توپوگرافی منطقه) و با طول‌های نسبتاً متفاوت و از طریق آرایه قطبی-دوقطبی به صورت پیشرو و معکوس انجام شد. همچنین نتایج مدلسازی ژئوفیزیکی منتج شده از برداشت‌های صحرائی از طریق داده‌های گمانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که قسمتی از سنگ بستر تکیه گاه چپ سد در اثر شرایط محیطی فرسایش یافته که در آینده و با افزایش سطح تراز مخزن احتمال فرار آب از این قسمت تکیه گاه سد وجود دارد. در ادامه به بررسی شرایط زمین‌شناسی منطقه، نحوی برداشت داده‌های صحرائی، مدلسازی و تفسیر نتایج پرداخته می‌شود. در بخش انتهایی نیز نتایج مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

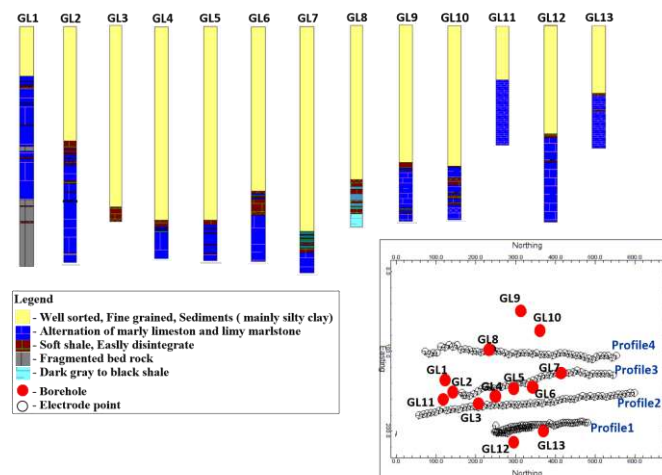
منطقه مورد مطالعه در غرب ایران، استان ایلام و با مختصات جغرافیایی "36' 05' 39" و "25' 14' 58" واقع شده است. منطقه مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی در زون زاگرس چین خورده قرار دارد. این زون در جنوب غربی ایران با روند جنوب شرقی-شمال غربی قرار دارد. مرز شرقی این زون جزء گسل میناب محسوب می‌گردد. در سمت شرق زون زاگرس به صورت شرقی-غربی در آمده که احتمالاً متاثر از فعالیت گسل راست لغز میناب می‌باشد ولی در سمت غرب روند زون مزبور بطور مشخص جنوب شرقی-شمال غربی می‌گردد. باتوجه به واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه انتظار می‌رود که سنگ کف محدوده مورد مطالعه متشکل از لایه‌های چین خورده با تشکیلات آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن و نیز دانه‌های پیریت ثانویه باشد. البته این مورد بعداً توسط اطلاعات منتج شده از گمانه‌های حفاری تایید شد. وجود پیریت ثانویه در لایه بندی سنگ بستر احتمالاً باعث افزایش پاسخ پلاریزاسیون القائی نسبت به رولایه و در نتیجه افتراق بهتر مرز سنگ بستر و رولایه را فراهم می‌آورد.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با موقعیت پروفیل‌ها و محل گمانه‌های اکتشافی (برای جزئیات بیشتر از وضعیت پروفیل‌ها و گمانه‌ها به شکل ۲ مراجعه شود).

گمانه‌ها

به منظور بررسی بهتر تغییرات لیتولوژی از سطح تا عمق تعداد ۱۳ گمانه حفاری در محدوده مورد مطالعه در یک شبکه غیرمنظم برداشت شده است. نتایج حاصل از گمانه‌ها همراه با موقعیت آنها نسبت به وضعیت پروفیل‌ها در شکل ۲، نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود بخش عمده رولایه را ماسه دانه ریز به همراه رس و شیل تشکیل می‌دهد که درصد رس در گمانه‌ها و همچنین نسبت به عمق در هر یک از آنها متفاوت است و سنگ بستر نیز تنوایی از شیل، آهک و آهک مارنی می‌باشد.



شکل ۲. لیتولوژی حاصل از گمانه‌ها و موقعیت آنها نسبت به پروفیل‌ها و محل الکترودها. براساس نتایج حاصل از مغزه‌های بدست آمده از گمانه‌ها، رولایه غالباً متشکل از رسوبات دانه ریز در حد رس و سیلت است و سنگ بستر محدوده شامل آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن.

برداشت صحرائی و تفسیر نتایج

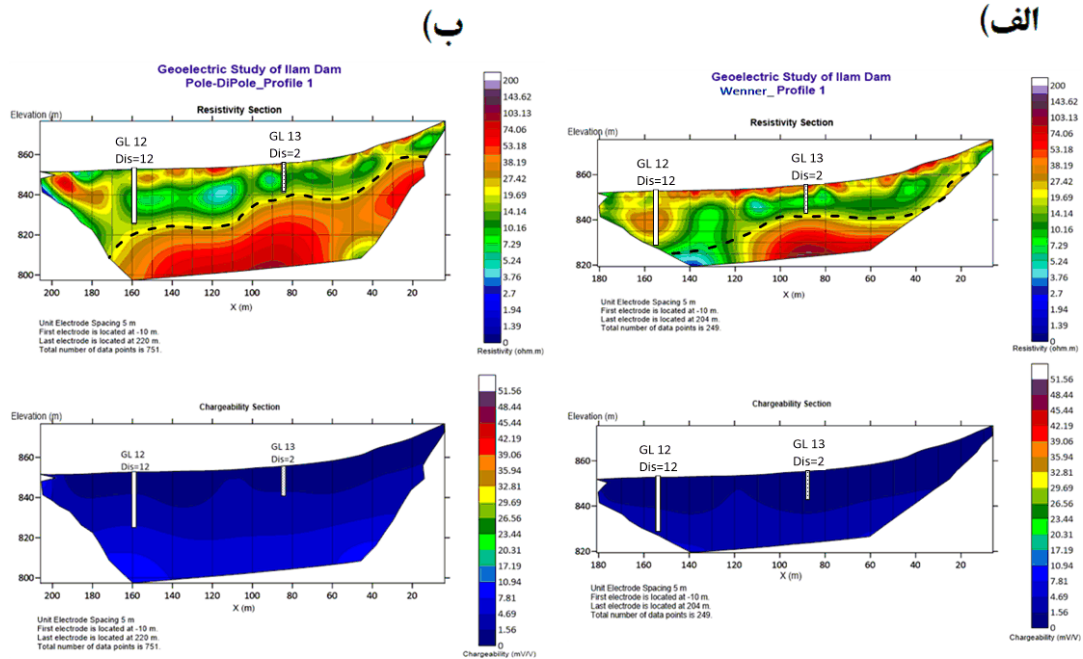
باتوجه به وسعت و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، تعداد چهار پروفیل عمود بر محور چین خوردگی منطقه طراحی شد. امتداد و موقعیت پروفیل‌ها در شکل ۳، نشان داده شده است. از آنجایی که هدف اصلی این مطالعات تعیین مرز سنگ بستر و رولایه می‌باشد، قاعدتاً استفاده از آرایه ونر به دلیل حساسیت بیشتر (نسبت به آرایه‌های الکترودی دیگر) به ساختارهای افقی توصیه می‌شود. اما برداشت آرایه ونر از لحاظ لجستیکی زمان بر بوده و همچنین امکان دستیابی به عمق پایینتر باتوجه به فاصله الکترودی در نظر گرفته شده وجود نداشت. لذا ابتدا در مسیر پروفیل اول باتوجه به ضخامت کم رولایه و دسترسی به اطلاعات گمانه‌های اکتشافی در نزدیکی امتداد خط برداشت، دو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پروفیل فاصله الکترودی ۵ متر و طول مسیر حدود ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد. جهت مقایسه بهتر، مقاطع وارون شده حاصل از دو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی در شکل ۴، نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود تغییرات مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی مربوط به رولایه در هر دو مقطع حدود زیادی یکسان است. همچنین هر دو آرایه مرز سنگ بستر را به خوبی نمایش می‌دهند، هرچند به دلیل عمق نفوذ کمتر آرایه ونر و ضخامت بستر رولایه در انتهای پروفیل (سمت چپ مقطع) موقعیت سنگ بستر به خوبی نشان داده نمی‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که آرایه قطبی-

دوقطبی در عین حالیکه عمق نفوذ بیشتری نسبت به آرایه ونر دارد، با دقت مناسبی مرز رولایه و سنگ بستر را تخمین زده است. این نتایج توسط گمانه‌های حفاری شده GL12 و GL13 در نزدیکی محل پروفیل مورد تایید می‌باشد.



شکل ۳. الف) عکس هوایی از منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری کمیت‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی و محل گمانه‌ها در نزدیکی پروفیل‌ها، ب) تصویر مخزن سد و توپوگرافی محل برداشت (شمالی شرقی- جنوب غربی)، پ) امتداد پروفیل‌ها در محل تکیه گاه چپ سد و وضعیت توپوگرافی محل برداشت (شمالی - جنوبی).

براساس نتایج منتج شده از برداشت‌های مرحله اول، مابقی پروفیل‌ها (یعنی پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴) با استفاده از آرایه قطبی-دوقطبی و با فاصله الکترودی ۱۰ و ۱۲ متر برداشت شد. مجموعاً در پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۷۶۷، ۸۵۵ و ۶۵۳ داده مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی اندازه‌گیری شد. آرایه قطبی-دوقطبی، یک آرایه نامتقارن است و مقطع نهایی حاصل از این آرایه باعث جا به جایی ساختارهای زیر سطحی می‌شود، جهت جبران این مشکل، داده‌ها هم به صورت پیشرو و هم بصورت معکوس برداشت شد بطوریکه تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در هر پروفیل دو برابر تعداد معمول گردید. فاصله الکترودی در این پروفیل‌ها به دلایلی همچون تغییر ضخامت رولایه در منطقه و نیاز به عمق کاوش بیشتر جهت دسترسی به سنگ بستر و تفکیک پذیری مناسب مقاطع، متغیر انتخاب شده است. طول خطوط برداشت و فاصله هر یک از پروفیل‌ها نسبت به یکدیگر بر اساس شرایط توپوگرافی و عارضه‌های زمین شناسی منطقه و همچنین دسترسی به اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری شده در امتداد پروفیل‌ها در نظر گرفته شد.

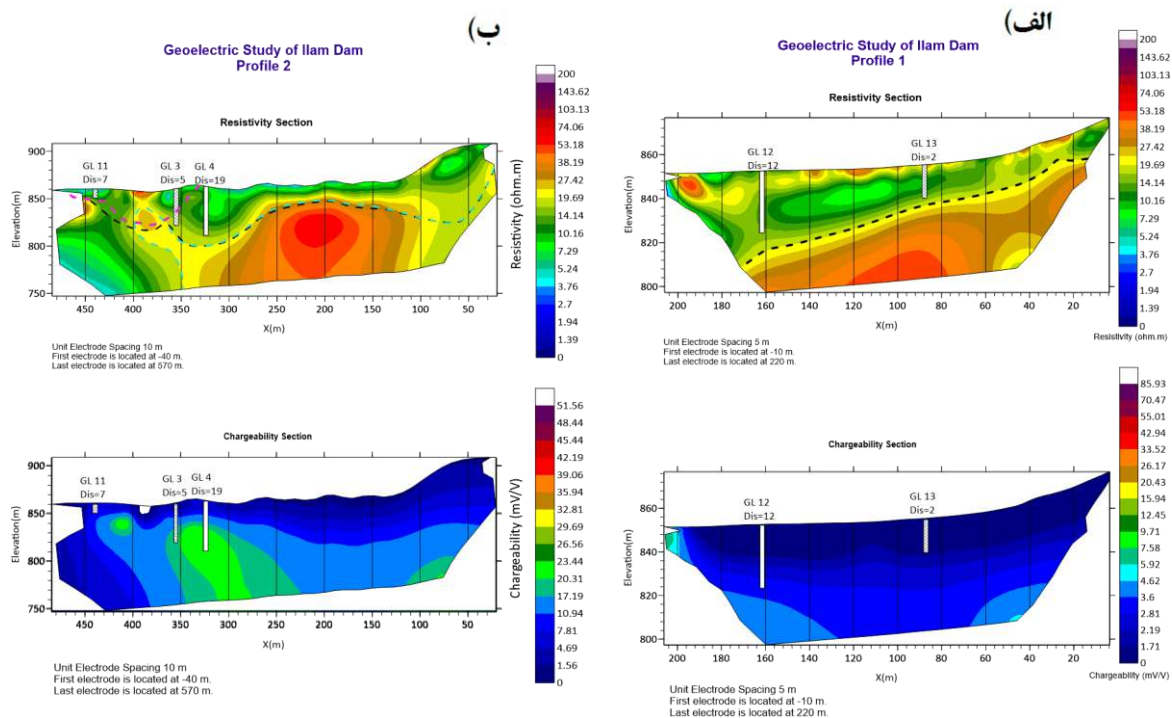


شکل ۴. مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القائی (پایین) مربوط به پروفیل اول: الف) آرایه ونر ، ب) آرایه قطبی-دوقطبی همراه با موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده پروفیل. خط چین مرز تخمینی رولایه و سنگ بستر را نمایش می‌دهد. در عین حالیکه مقاطع منتج شده از هر آرایه تغییرات نسبتاً مشابهی از کمیت‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی در رولایه و سنگ بستر را نشان می‌دهند، اما به دلیل عمق نفوذ بیشتر آرایه قطبی-دوقطبی این مرز در انتهای پروفیل (سمت چپ) نسبت به آرایه ونر بهتر تخمین زده می‌شود.

اندازه‌گیری‌های صحرائی توسط گیرنده GRx8 شرکت GDD و یک دستگاه فرستنده مدل TSQ-3 ساخت شرکت Scintrex و یک دستگاه ژنراتور برق با توان ۳۶۰۰ W انجام شد. قبل از برداشت داده‌ها، جهت افزایش کیفیت اندازه‌گیری‌ها، مقاومت الکتریکی تماسی بین الکترودها و زمین بررسی شد و مقدار مناسب برای مقاومت الکتریکی تماسی حدود ۵ کیلو اهم در نظر گرفته شد و در محل الکترودها با مقاومت الکتریکی تماسی بیشتر، از محلول آب نمک استفاده شد. همچنین توقف تکرار اندازه‌گیری‌ها در هر ایستگاه براساس کنترل مقدار انحراف معیار پارامترهای فیزیکی ثبت شده در نظر گرفته شد. پاسخ‌های ولتاژ در هر نقطه اندازه‌گیری از طریق تزریق جریان الکتریکی به مدت ۴ ثانیه به زمین ثبت شد. پس از پردازش داده‌ها و حذف اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی با نسبت سیگنال به نوفه پایین، به منظور تهیه مقطعی از توزیع کمیت‌های ژئوالکتریکی لایه‌های زیرسطحی، داده‌ها وارون سازی می‌شود. در این مطالعه از نرم افزار Res2DInv جهت مدلسازی وارون [15] استفاده می‌شود. باتوجه به توپوگرافی منطقه از روش المان محدود به منظور افزایش دقت مدلسازی فیزیکی (پیشرو) در حین وارون سازی بهره گرفته شد. همچنین مولفه‌های وارون سازی مانند تعداد تکرار، قیود فیزیکی و مقدار شروع کننده پارامترهای منظم سازی، براساس اطلاعات اولیه تنظیم می‌شود. وارون سازی براساس الگوریتم گوس-نیوتن و با بهنگام کردن ماتریس حساسیت در تکرار انجام می‌گیرد.

ابتدا نتایج وارون سازی داده‌های برداشت شده در پروفیل ۱، براساس تلفیق اندازه‌گیری‌های آرایه ونر و قطبی-دوقطبی نمایش داده می‌شود. بیشتر در شکل ۴، نتایج وارون سازی داده‌های منتج شده از آرایه‌های ونر و قطبی-دوقطبی به صورت مجزا نمایش داده شد. با هدف افزایش تفکیک پذیری مدل‌های وارون، شکل ۵-الف) نتایج وارون سازی مدل‌های ژئوالکتریکی حاصل از تلفیق هر دو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود استفاده همزمان از داده‌های هر دو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی مدلی با تفکیک پذیری بالاتر و نزدیک تر به واقعیت زمین حاصل می‌شود. مرز رولایه تخمینی با سنگ بستر به صورت خط چین نمایش داده می‌شود. با توجه به

ضخامت رولایه در امتداد پروفیل ۱ انتظار می‌رود که رطوبت سنگ کف نسبت به پروفیل‌های دیگر بیشتر و در نتیجه میزان مقاومت ویژه متوسط سنگ کف پایین‌تر باشد. بر همین اساس مقدار ۲۰ اهم-متر به عنوان مرز تفکیک رولایه و سنگ کف در نظر گرفته شد. بر اساس مقطع پلاریزاسیون القائی، مقدار متوسط IP برای رولایه حدود ۲ میلی ولت بر ولت و این مقدار برای سنگ بستر حدود ۴ میلی ولت بر ولت تخمین زده می‌شود. مرز تخمینی با توجه به تغییرات پلاریزاسیون القائی مطابقت مناسبی با گمانه شماره GL13 که نزدیک به خط پروفیل است، دارد. هر چند مرز تخمینی در مقطع پلاریزاسیون در فاصله حدود ۱۶۰ متری با اطلاعات گمانه GL12 تفاوت دارد، احتمالاً این اختلاف به خاطر فاصله حدود ۱۲ متری این گمانه از محل پروفیل است. همانطور که پیشتر بیان شد به دلیل وجود میان لایه‌های شیل و مارن در سنگ کف و نیز دانه بندی رس و سیلت در رولایه، تباین کافی جهت تخمین مناسب مرز دو محیط از طریق مقطع پلاریزاسیون القائی وجود ندارد. این نکته شایان ذکر است که گمانه‌های حفاری شده در محدوده پروفیل‌های ژئوالکتریکی بر روی مقاطع به صورت ستون‌های به رنگ سفید هاشور خورده و بدون هاشور نمایش داده می‌شود. جهت تطابق مقاطع با نتایج گمانه‌های حفاری سعی شده از گمانه‌ها با کمترین فاصله از پروفیل‌ها استفاده شود. طول این ستون‌ها متناسب با عمق سنگ بستر در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. ستون‌های هاشور خورده معرف گمانه‌های نزدیک به پروفیل و ستون‌های بدون هاشور معرف گمانه‌های دور از خط پروفیل می‌باشد. همچنین فاصله گمانه‌ها از محل پروفیل‌ها بر روی مقاطع نیز مشخص شده است.



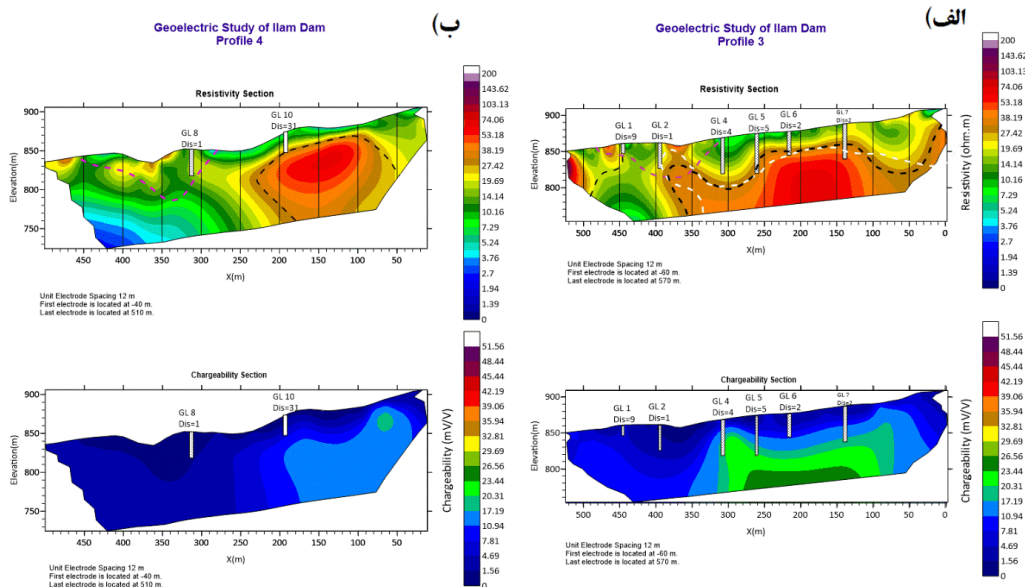
شکل ۵. مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القائی (پایین) همراه با موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده پروفیل‌ها الف) مقاطع حاصل از پروفیل اول و تعیین مرز رولایه و سنگ بستر (خط چین سیاه) از تلفیق داده‌های حاصل از آرایه‌های ورن و قطبی-دوقطبی، ب) مقاطع حاصل از پروفیل دوم و تعیین مرز رولایه و سنگ بستر منتج شده از مدل مقاومت ویژه (خط چین آبی کم رنگ) و مدل پلاریزاسیون القائی (خط چین ارغوانی) و نمایش نهایی مرز سنگ بستر با رولایه منتج شده از تلفیق مقاطع مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی (خط چین سیاه).

نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های پروفیل دوم در شکل ۵-ب) نمایش داده می‌شود. براساس اطلاعات زمین‌شناسی، جنس رسوبات زیر سطحی در محدوده سمت راست پروفیل عمدتاً متشکل از سنگ آهک مارنی و محدوده سمت چپ حاوی شیل می‌باشد، از اینرو دو مقدار متفاوت از مقاومت ویژه جهت تفکیک رولایه از سنگ کف در دو قسمت پروفیل در نظر گرفته می‌شود. در این پروفیل عمق مورد بررسی

حدود ۱۱۰ متر می‌باشد. با توجه به مقطع مقاومت ویژه الکتریکی، رولایه همچون پروفیل ۱ با مقاومت ویژه متوسط ۱۳ اهم-متر و سنگ بستر با مقاومت ویژه متوسط ۴۰ اهم-متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به صورت خط چین در مقطع مقاومت ویژه نمایش داده شده است. در این مقطع دو زون با مقاومت ویژه بالا دیده می‌شود. زون اولی (از سمت راست پروفیل) مربوط به مرکز طاقدیس و زون دوم نشان دهنده یک چین خوابیده است. در مقطع مقاومت ویژه الکتریکی در حدود متر ۴۰۰ تا ۴۴۰ متر مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت ویژه نسبت به مرکز پروفیل با مقاومت ویژه بالا (سنگ آهک مارنی) مقدار کمتری را نشان می‌دهد. با توجه به بازه تغییرات مقاومت ویژه در این محدوده، این قسمت از پروفیل احتمالاً خالی از سنگ بستر آهکی است و میتوان آن را به سنگ بستر شیلی نسبت داد. به دلیل نزدیکی پاسخ‌های IP رولایه و سنگ بستر شیلی در انتهای پروفیل، تعیین مرز سنگ بستر از رولایه مشکل است. بنابراین جهت تعیین مرز در این قسمت مقطع از اطلاعات IP پروفیل سوم که به موازات پروفیل دوم در فاصله حدود ۲۰ متر قرار گرفته است استفاده می‌شود (مراجعه به شکل ۶-الف). در طول این مقطع ۲ ناحیه اصلی با مقاومت ویژه بالا (حدوداً ۵۵ اهم-متر) در فاصله ۰ تا ۳۸۰ متری، و با مقاومت ویژه پایین (حدوداً ۱۶ اهم-متر) در فاصله ۳۸۰ تا ۴۹۰ متری مشاهده می‌شود. زون با مقاومت ویژه بالا را می‌توان به سنگ آهک و زون مقاومت ویژه پایین را میتوان به وجود لایه شیلی نسبت داد. به نظر می‌رسد در حد فاصل ۳۸۰ تا ۴۸۰ متری مقدار مقاومت ویژه با افزایش محتوای آب (زون اشباع) از سطح تا عمق مقطع کاهش می‌یابد.

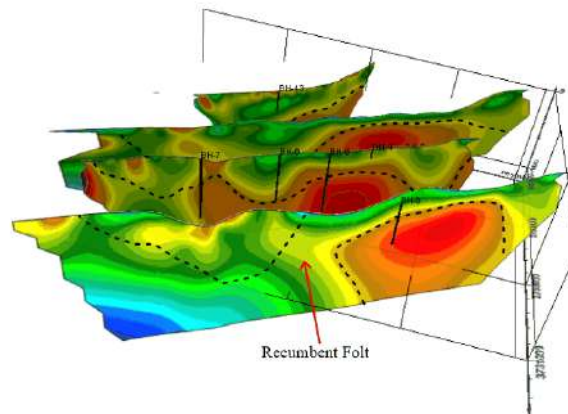
براساس اطلاعات بدست آمده از مغزه‌های حفاری، ساختگاه سد گلال حاوی دانه‌های پیریت رسوبی در توالی سنگ آهک‌های رسی می‌باشد. کانی پیریت در صورتی که در معرض هوا و یا جریان آب‌های زیر زمینی قرار گیرد بسرعت هوازده شده و برنگ قرمز اکسید آهن در سطح سنگ‌ها و یا در امتداد درزه‌ها مشاهده می‌شود. در این منطقه، سنگ آهک رسی بدلیل ریزدانه بودن و دربر داشتن کانی‌های رسی از نفوذ پذیری پایینی برخوردار بوده و بنابراین پیریت بطور عمده در آنها بصورت کاملاً سالم و هوازده وجود دارد. پیریت تقریباً در همه محیط‌های زمین‌شناسی از جمله رسوبی، آذرین و دگرگونی و همچنین رگه‌های گرمایی تشکیل می‌شود. این کانی یکی از سازنده‌های مهم سنگ‌های رسوبی بویژه سنگ آهک، ماسه سنگ و سیلت استون‌های کربناتی و شیل‌ها است. بخش عمده‌ای از پیریت موجود در رسوبات و سنگ‌های رسوبی بصورت اوتیزن در محیط‌های رسوبی و یا دیباژنتیک اولیه که در هنگام تبدیل رسوب به سنگ بوجود می‌آید. با توجه به این توضیحات، پاسخ IP نسبتاً بالاتر در سنگ بستر منطقه نسبت به رولایه وجود دانه‌های پراکنده پیریت در رسوبات آهکی ساختگاه سد است. مقاطع ژئوالکتریکی منتج شده از وارون سازی اندازه‌گیری‌های پروفیل سوم در شکل ۶-الف) نمایش داده می‌شود. با توجه به مقطع مقاومت ویژه الکتریکی، رولایه مانند پروفیل اول با مقاومت ویژه متوسط ۱۴ اهم-متر و سنگ بستر با مقاومت ویژه متوسط ۳۹ اهم متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به صورت خط چین در مقطع مقاومت ویژه نمایش داده شده است (شکل ۶-الف). با مقایسه عمق سنگ بستر بدست آمده از مقطع مقاومت ویژه الکتریکی (خط چین آبی) و اطلاعات گمانه‌ها تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. همانطور که پیشتر هم بیان شد احتمال اینکه مقطع زمین‌شناسی تا حدودی متفاوت از مقطع ژئوالکتریک باشد دور از ذهن نیست به این دلیل که مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و نیز پلاریزاسیون القائی متأثر از دانه بندی، جنس، رطوبت، تخلخل و تراوایی می‌باشد، لذا تفاوت بین مقاطع ژئوالکتریکی و زمین‌شناسی محتمل است. با بررسی جزئی‌تر نتایج حفاری مشاهده می‌شود که با افزایش عمق حفاری میزان محتوای رس کاهش و دانه بندی از رس به گراول تغییر می‌یابد. در واقع این افزایش دانه بندی خود را با افزایش مقادیر مقاومت ویژه بر روی مقطع نشان می‌دهد. این روند در گمانه‌های GL5، GL6 و GL7 مشاهده می‌شود. برای مقایسه روند تغییرات مرز رولایه بدست آمده در پروفیل سوم با مرز رولایه منتج شده از پروفیل دوم، خط چین سفید که نشان دهنده این مرز در پروفیل دوم است در پروفیل شماره سوم نیز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات مقاومت ویژه تقریباً یکسان است. همچنین زون نشان داده شده با مقاومت ویژه نسبتاً بالا در محدوده ۳۶۰ متری مربوط به یک چین خوابیده می‌باشد که این ساختار زمین‌شناسی در پروفیل شماره دوم نیز قابل مشاهده بود. همچنین براساس مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی در فاصله دو گمانه GL1 و GL2 سنگ کف از نوع آهکی وجود ندارد. از طرفی با توجه به بازه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در این محدوده، احتمال وجود رسوباتی از جنس شیل می‌باشد. و به علاوه با کمک نتایج منتج شده از مقطع IP مرز رولایه حد فاصل ۳۱۰ تا

۴۵۰ متر (GL1 تا GL4) توسط خط چین ارغوانی مشخص شده است (شکل ۶-الف). پروفیل چهارم به طول ۵۵۰ متر در حداکثر فاصله تقریبی ۵۵ متر از پروفیل شماره ۳ و به موازات آن با استفاده از آرایه قطبی-دوقطبی برداشت شده است. در این پروفیل عمق کاوش حدود ۱۱۰ متر می‌باشد. نتایج مدلسازی وارون این پروفیل شامل مقاطع مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی در شکل ۶-ب) نشان داده می‌شود. در طول این مقطع، دو ناحیه اصلی با مقاومت ویژه بالا (حدوداً ۵۵ اهم-متر) در فاصله ۵۰ تا ۲۲۰ متری، و با مقاومت ویژه پایین (حدوداً ۱۰ اهم-متر) در فاصله ۲۲۰ متر تا انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. زون با مقاومت ویژه بالا را می‌توان به سنگ بستر آهکی و زون با مقاومت ویژه پایین را می‌توان به وجود لایه شیلی نسبت داد. به نظر می‌رسد در حد فاصله ۲۲۰ متر تا ۵۰۰ متری مقدار مقاومت ویژه با افزایش محتوای آب (زون اشباع) از سطح تا عمق مقطع کاهش می‌یابد. با توجه به مقطع مقاومت ویژه الکتریکی، رولایه مانند پروفیل ۱ با مقاومت ویژه متوسط ۸ اهم-متر و سنگ بستر با مقاومت ویژه متوسط ۳۵ اهم-متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به صورت خط چین سیاه در مقطع مقاومت ویژه نمایش داده شده است. با توجه به مقطع IP مرز رولایه با سنگ کف در متر ۲۸۰ تا ۴۵۰ متری بوسیله خط چین ارغوانی نشان داده می‌شود. در رابطه با حد فاصله بین گمانه‌های GL1 و GL2 در پروفیل شماره ۳ و نیز حد فاصل ۴۰۰ تا ۴۵۰ متری در پروفیل شماره ۲، تفسیر ژئوفیزیکی بر اساس مقاطع بدست آمده می‌باشد (شکل ۶-ب)، زون‌های مذکور پاسخ‌های مقاومت ویژه پایینی دارند که از لحاظ تفسیر زمین‌شناسی و با توجه به لایه‌بندی منطقه احتمال وجود لایه‌های شیلی و یا حتی زون گسله وجود دارد. اما بر اساس ضخامت زیاد این محدوده (حدود ۵۰ متر) شباهت بیشتری به لایه‌های شیلی نشان می‌دهد و این احتمال قوی‌تر است. علاوه بر آن، هیچگونه گسل و یا برش گسلی متناسب، که توانایی ایجاد چنان جابجایی نسبتاً بزرگی را داشته باشد، در محدوده مورد نظر مشاهده نشده است.



شکل ۶. مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القائی (پایین) همراه با موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده پروفیل‌ها، الف) مقاطع حاصل از پروفیل سوم و تعیین مرز رولایه و سنگ بستر (خط چین سیاه) با استفاده از مدل مقاومت ویژه و مدل پلاریزاسیون القائی (خط چین ارغوانی)، همچنین جهت بررسی و مقایسه بهتر روند تغییرات سنگ بستر در دو پروفیل دوم و سوم (خط چین سفید مرز) تعیین شده در پروفیل دوم را نشان می‌دهد ب) مقاطع حاصل از پروفیل چهارم همراه با موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده پروفیل و مرز سنگ بستر منتج شده از مدل مقاومت ویژه (خط چین مشکی) و پلاریزاسیون القائی (خط چین ارغوانی).

همانطور که پیشتر بیان شد یکی از اهداف این مطالعه تعیین تغییرات جانبی سنگ بستر و تصویر سازی قسمت‌هایی از سنگ کف در تکیه گاه چپ سد دچار فرسایش شده و امکان ایجاد مسیری برای فرار آب در صورت بالا آمدن سطح تراز مخزن سد فراهم می‌آورد. این فرو افتادگی در تکیه گاه سمت چپ بر روی مقاطع حاصل از پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴ قابل مشاهده است. فرو افتادگی در مقطع مقاومت ویژه پروفیل ۲ (شکل ۵-ب) در حد فاصل ۲۷۰ تا ۳۸۰ متری قابل مشاهده است. این عارضه زمین شناسی در مقطع مقاومت ویژه پروفیل ۳ (شکل ۶-الف) در حد فاصل ۲۵۰ تا ۳۵۰ متری نشان داده می‌شود و در مقطع پروفیل ۴ (شکل ۶-ب) در وسط پروفیل و در فاصله ۲۹۰ تا ۴۵۰ متری دیده می‌شود. مقایسه‌ای از نتایج تخمین عمق سنگ بستر حاصل از مطالعات ژئوالکتریکی و داده‌های حفاری در جدول ۱ ارائه شده است. با هدف نمایش بهتر از تغییرات ساختارهای زیر سطحی (مانند چین خوابیده و هندسه ساختگاه تکیه گاه سمت چپ) در منطقه مورد مطالعه، نمایشی سه بعدی از مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی در شکل ۷ ارائه می‌شود. همچنین مرز نهائی سنگ بستر منتج شده از تلفیق مقاطع مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی و نیز تخمینی از روند فروافتادگی سنگ بستر در نمایش سه بعدی نشان داده می‌شود.



شکل ۱۰. نمایش سه بعدی از مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی منتج شده از پروفیل‌های صحرایی همراه با موقعیت گمانه‌ها در امتداد پروفیل‌ها.

البته در پروفیل ۳ و گمانه‌های GL5، GL6 و GL7 اختلاف بیشتری بین ضخامت‌های تخمینی مشاهده می‌شود. از آنجا که نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریکی به پارامترهایی مانند رطوبت، دانه‌بندی و جنس وابسته است و براساس اطلاعات گمانه‌ها با افزایش عمق حفاری میزان محتوای رس کاهش و دانه‌بندی از رس به گراول تغییر می‌یابد و این افزایش دانه‌بندی خود را با افزایش مقادیر پارامتر مقاومت ویژه الکتریکی بر روی مقطع نشان می‌دهد، بنابراین میتوان استنباط کرد که اختلاف‌های مورد نظر متأثر از این عارضه طبیعی است. با این وجود روند کلی تغییرات ضخامت رولایه در همه مقاطع از روند زمین شناسی و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی تبعیت می‌کند.

جدول ۱ مقایسه داده‌های حاصل از برداشت ژئوالکتریکی و گمانه‌های حفاری شده

| شماره پروفیل | عمق سنگ بستر حاصل از مقاطع ژئوالکتریکی (m) | عمق سنگ بستر حاصل از مغزه‌گیری (m) | فاصله گمانه از پروفیل (m) | اختلاف عمق حاصل از دو روش (m) |
|--------------|--|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| P1 | 28 | 36 | 12 | 8 |
| P1 | 15 | 17 | 2 | 2 |
| P2 | 15 | 10 | 7 | 5 |

| | | | | |
|----|----|----|----|-----------|
| 7 | 5 | 39 | 46 | P2 |
| 10 | 19 | 52 | 62 | P2 |
| 3 | 9 | 14 | 17 | P3 |
| 7 | 1 | 35 | 42 | P3 |
| 17 | 4 | 49 | 66 | P3 |
| 9 | 5 | 55 | 46 | P3 |
| 5 | 2 | 33 | 28 | P3 |
| 19 | 2 | 49 | 30 | P3 |
| 5 | 1 | 35 | 40 | P4 |
| 2 | 31 | 27 | 25 | P4 |

نتایج

مقاله حاضر به بررسی توانایی توموگرافی ژئوالکتریکی با هدف تخمین مرز رولایه و سنگ بستر و نیز تصویر سازی تغییرات جانبی ساختگاه سد در تکیه گاه چپ سد شهدای ایلام می‌پردازد. چالش اصلی این مطالعه ژئوفیزیکی تبیین کم رسانندگی بین رولایه با دانه بندی در حد رس و سنگ کف متشکل از آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن می‌باشد. باتوجه به وسعت منطقه و اهداف در نظر گرفته شده، مطالعات براساس اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی بنا نهاده شد. برداشت‌های صحرائی در قالب چهار پروفیل تقریباً موازی (با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه) و با طول‌های نسبتاً متفاوت و از طریق آرایه قطبی-دوقطبی به صورت پیشرو و معکوس انجام شد. هرچند که با توجه به هدف اصلی این مطالعه یعنی تخمین مرز سنگ بستر، استفاده از آرایه ونر به دلیل حساسیت بیشتر به ساختارهای افقی ترجیح داده می‌شود، اما بررسی‌های ما نشان داد که نتایج مقاطع وارون شده حاصل از آرایه ونر و آرایه قطبی-دوقطبی تفاوت چندانی از نظر تفکیک پذیری افقی وجود ندارد و از طرف دیگر عمق نفوذ بیشتر آرایه قطبی-دوقطبی امکان بررسی بیشتر ساختارهای عمیق را فراهم می‌آورد. مدل‌های منتج شده از وارون سازی داده‌های صحرائی نشان می‌دهد که مرز تخمینی رولایه و سنگ بستر تطابق مناسبی با روند کلی زمین شناسی منطقه و نیز داده‌های بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی در نزدیکی مسیر پروفیل‌ها وجود دارد. هرچند تفاوت‌هایی در عمق سنگ بستر برآورد شده از مقاطع ژئوالکتریکی و اطلاعات گمانه‌ها مشاهده شد که این تفاوت ناشی تغییر میزان محتوای رس و کاهش دانه‌بندی از رس به گراول از سطح تا عمق می‌باشد. این افزایش دانه‌بندی خود را با افزایش مقادیر پارامتر مقاومت ویژه الکتریکی بر روی مقاطع نمایان می‌کند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که اختلاف‌های مورد نظر متأثر از این عارضه طبیعی است. بر اساس جنس مصالح سنگ بستر در ابتدا و انتهای پروفیل‌ها که به ترتیب متشکل از آهک مارنی و شیل می‌باشد و نیز از آنجا که انتظار پاسخ‌های IP بالا به عنوان یک آنومالی و به منظور تفکیک رولایه از سنگ بستر در قسمت راست پروفیل-ها وجود ندارد، بنابراین در قسمت راست مقاطع جهت تعیین مرز رولایه تاکید بر روی مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی شده است و از مقاطع پلاریزاسیون القائی جهت تعیین مرز سنگ بستر شیلی در سمت چپ مقاطع بهره برده شده است. بررسی مقاطع ژئوالکتریکی همچنین نشان می‌دهد که قسمتهایی از سنگ بستر در تکیه گاه چپ سد دچار فرسایش شده و امکان ایجاد مسیری برای فرار آب در صورت بالا آمدن سطح تراز مخزن سد فراهم می‌آورد. بنابراین نیاز به اقدامات پیشگیرانه جهت رفع این مشکل قبل از فرسایش رولایه و در نتیجه ایجاد معبری برای خروج آب در تکیه گاه چپ سد وجود دارد. این مطالعات نشان داد که استفاده همزمان از اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی در صورت انتخاب مناسب پارامترهای برداشت (مانند آرایه الکترودی بهینه و فاصله الکترودی مناسب)، پردازش دقیق داده‌های ثبت شده و وارون سازی صحیح داده‌ها، امکان تخمین مناسبی از تغییرات مرز سنگ بستر حتی در شرایطی که تبیین کافی بین رولایه و سنگ بستر وجود ندارد مهیا می‌کند.

مراجع

- [1] Mwakanyamale, E. K., Brown, S. E., Theuerkauf, E. j., 2020. Delineating spatial distribution and thickness of unconsolidated sand along the southwest Lake Michigan shoreline using TEM and ERT geophysical methods, *Journal of Great Lakes Research*, 46, 1544-58.
- [2] Tomas, T., Gupta, B., Carlos, F., 2000. *Supply chain management: Theory and Systems*, Academic Press, Tehran, 54-63.
- [3] Danielsen, B., Tofleif, D., 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsas Tunnel, Sweden: *Engineering Geology*, 107, 118-129.
- [4] Ding, C., Weiwei, J., 2016. *Application of Geophysical Methods in Tunnel Exploration*.
- [5] Planès, T., Mooney, M. A., Rittgers, J. B. R., Parekh, M. L., Snieder, R., 2016. Time-lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise, *Géotechnique* 66(4), 301-312.
- [6] Liu, P., Wang, K., Wang, Q., 2021. Data acquisition method and the effectiveness of multichannel analysis of surface waves for defect detections on small earthen dams, *Arab Journal of Applied Geophysics*, 14, 631.
- [7] Benes, V., Tesaf, M., Boukalová, Z., 2011. Repeated geophysical measurements of the basic principle of the GMS methodology used to inspect the condition of flood control dikes, *River Basin Management*, 25-27.
- [8] Perri, M. T., Boaga, J., Bersan, S., Cassiani, G., Cola, S., Deiana, R., Simonini, P., Patti, S., 2014. River embankment characterization: the joint use of geophysical and geotechnical techniques, *Journal of Applied Geophysics*, 110, 5-22.
- [9] Lin, C. P., Hung, Y. C., Wu, P. L., Yu, Z. H., 2014. Performance of 2-D ERT in investigation of abnormal seepage: a case study at the Hsin Shan earth dam in Taiwan, *Journal of Environ Engineering Geophysics*, 19(2), 101-112.
- [10] Revil, A., and Florsch, N., 2010. Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media, *Journal of Applied Geophysics* 181, 1480-1498.
- [11] Ikard, S. J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A., Mooney, M., 2014. Characterization of focused seepage through an earthfill dam using geoelectrical methods, *Groundwater*, 52(6), 952-965.
- [12] Sentenac, P., Jones, G., Zielinski, M., Tarantino, A., 2013. An approach for the geophysical assessment of fissuring of estuary and river flood embankments: validation against two case studies in England and Scotland, *Environ Earth*, 69(6), 1939-1949.
- [13] Sentenac, P., Benes, V., Budinski, V., Keenan, H., Baron, R., 2017. Post flooding damage assessment of a historical pond and earth dam by non-invasive geophysical techniques, *Journal of Applied Geophysics*, 146, 138-148.
- [14] Loke, M. H., chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B., 2013. Recent developments indirect current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156.
- [15] Loke, M. H., Alfouzan, F. A., and Nawawi, M. N. M., 2007. Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys, *ASEG Extended abstracts*, 1, 1-4.

بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت به کمک روش‌های ژئوفیزیکی

*کیوان خیر^۱، عبدالحمید انصاری^۲.

۱. دکتری مهندسی اکتشاف معدن، شرکت کارآزما معدن زمین، (keyvan.khayer@gmail.com)

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد (h.ansari@yazd.ac.ir)

چکیده

یکی از کانی‌های پر اهمیت در استحصال آهن، کانی هماتیت می‌باشد. با توجه به خصوصیات فیزیکی این کانی، از یک روش اکتشاف مشخص جهت شناسایی و بررسی شکل هندسی آن وجود ندارد و هر روش اکتشافی در تعیین بخشی از خصوصیات کانی‌زایی موثر است. در این مطالعه از سه روش مگنتومتري، پلازیزاسیون القایی و گراویمتری جهت بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت در معدن سنگ آهن عقدا استفاده گردید. روش مگنتومتري با هدف شناسایی موقعیت توده‌های نفوذی، تفکیک لیتولوژی و شناسایی موقعیت احتمالی گسل‌ها استفاده شد. بر اساس نتایج مطالعات مگنتومتري موقعیت پروفیل‌ها IP-RS شناسایی و طراحی گردید. بر اساس نتایج IP-RS صورت گرفته موقعیت زون‌هایی که در آن‌ها احتمال کانی‌زایی وجود دارد شناسایی و محدوده مطالعات گراویمتری طراحی و برداشت گردید. با ترکیب نتایج به دست آمده از مطالعات گراویمتری، مگنتومتري و IP-RS، مدل سه بعدی از شکل کانی‌زایی هماتیت تهیه گردید.

واژه‌های کلیدی: هماتیت، مگنتومتري، پلازیزاسیون القایی، گراویمتری.

Investigation of hematite mineralization using geophysical methods

K.Khayer¹, H.Ansari²

¹ PhD in mining exploration engineering, KarAzma Geo Mine, keyvan.khayer@gmail.com

²Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, h.ansari@yazd.ac.ir

ABSTRACT

One of the most important minerals in iron extraction is hematite. According to the physical characteristics of this mineral, there is no specific exploration method to identify and check its geometric shape, and each exploration method is effective in determining part of the mineralization characteristics. In this study, three methods of magnetometry, IP-RS and gravimetry were used to investigate the mineralization status of hematite in Aghda iron ore mine. Magnetometry method was used with the purpose of identifying the position of volcanic masses, lithology separation and identifying the possible position of faults. Based on the results of magnetometry studies, the position of IP-RS profiles was identified and designed. Based on the results of IP-RS, the location of the zones where there is a possibility of mineralization was identified and the range of gravimetry studies was designed and selected. By combining the results obtained from gravimetry, magnetometry and IP-RS studies, a three-dimensional model of hematite mineralization was prepared.

Keywords: hematite, magnetometry, IP-RS, gravimetry.

مقدمه

هماتیت یکی از فراوان‌ترین مواد معدنی در سطح زمین و در پوسته کم عمق است. این محصول یک اکسید آهن با ترکیب شیمیایی Fe_2O_3 محسوب می‌شود. هماتیت یک کانی سنگ‌ساز رایج است که در سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین در نقاط مختلف جهان یافت

می‌گردد. هماتیت به عنوان یک کانی اولیه و به عنوان یک محصول دگرسانی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی یافت می‌شود. این کانی در طی تمایز یک ماگما متبلور می‌شود و یا از سیالات گرمایی که از میان توده سنگی حرکت می‌کنند رسوب می‌کند. همچنین می‌تواند در زمانی که ماگمای داغ با سنگ‌های مجاور واکنش نشان می‌دهند، در طول دگرگونی صورت گرفته، تشکیل گردد.

جهت اکتشاف کانی‌زایی هماتیت از روش‌های مختلف اکتشافی همچون ژئوشیمی و ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. با توجه به خواص فیزیکی هماتیت، هیچ یک از روش‌های ژئوفیزیکی به تنهایی توانایی شناسایی و بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت در یک محدوده اکتشافی را ندارد و لازم است از دو یا چند روش ژئوفیزیکی به صورت همزمان استفاده شود. در سال ۲۰۱۳ تالگو و همکارانش با استفاده از روش‌های مگنتومتری و مقاومت‌ویژه به اکتشاف کانی‌زایی هماتیت در محدوده‌ای واقع در ترکیه پرداختند [۱]. در سال ۲۰۱۵ آنتون و همکاران روش IP-RS را به عنوان یک روش موثر و مقرون به صرفه در شناسایی کانی‌زایی هماتیت معرفی نمودند [۲]. در سال ۲۰۱۶ پدرو و همکاران با استفاده از دو روش لرزه‌نگاری انکساری و مقاومت‌ویژه الکتریکی به اکتشاف کانی‌زایی هماتیت در محدوده‌ای در برزیل پرداختند [۳]. در سال ۲۰۱۸ کریستین و همکارانش با استفاده از سه روش مگنتومتری، گراویمتری و پتانسیل خودزا به مدل‌سازی کانی‌زایی هماتیت در منطقه‌ای واقع در شیلی پرداختند [۴]. ایتکن و همکاران با ترکیب اطلاعات مگنتومتری هواپرد و مطالعات زمین‌شناسی انجام شده در یک معدن هماتیت به بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت پرداختند [۵]. در سال ۲۰۲۰ عابدی با وارون‌سازی معکوس داده‌های دو روش مگنتومتری و گراویمتری به مدل‌سازی کانی‌زایی هماتیت محدوده شواز ایران پرداخت [۶]. در سال ۲۰۲۲ جعفرلو و همکاران با استفاده از داده‌های مگنتومتری و رادیومتری به بررسی کانی‌زایی هماتیت و مگنتیت محدوده‌ای در سورک یزد ایران پرداختند [۷].

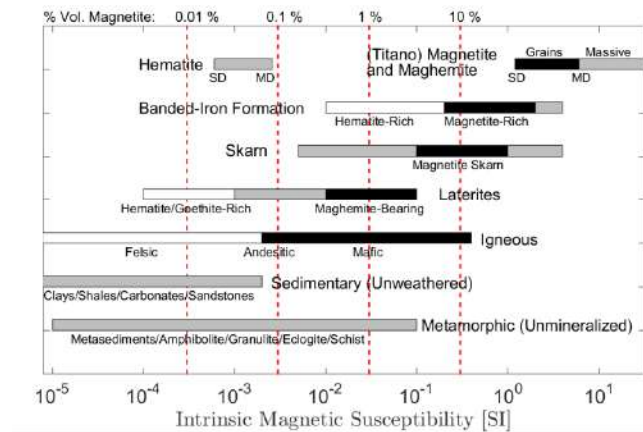
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به خصوصیات فیزیکی سنگ هماتیت، تنها یک روش ژئوفیزیکی در شناسایی وضعیت کانی‌زایی پاسخگو موثر نخواهد بود و هر روش اطلاعات مشخصی از آن ماده معدنی را در اختیار قرار می‌دهد. لذا جهت اکتشاف دقیق کانی‌زایی نیاز به تلفیق اطلاعات دو یا چند روش می‌باشد. در مطالعاتی که تا کنون صورت گرفته است، از روش‌های مگنتومتری، گراویمتری، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی به صورت جداگانه و یا نهایتاً ترکیب دو روش استفاده شده است. در این مطالعه با هدف شناسایی کانی‌زایی هماتیت در معدن سنگ آهن عقدا، با تلفیق نتایج سه روش مگنتومتری، گراویمتری و IP-RS پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

ژئوفیزیک یا زمین فیزیک، از مباحث علوم طبیعی است که به بررسی فرآیندها و خواص فیزیکی زمین و محیط اطراف آن با استفاده از روش‌های کمی می‌پردازد. از جمله روش‌های ژئوفیزیکی متداول در اکتشاف معدن می‌توان به روش‌های مگنتومتری، گراویمتری، مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی اشاره نمود که متناسب با هدف اکتشاف یک یا چند روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه جهت بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت از سه روش مگنتومتری، IP-RS و گراویمتری استفاده شده است که در ادامه به توضیح مختصر هر یک از روش‌های اشاره شده پرداخته شده است.

روش مگنتومتری اکتشافی یکی از زیرمجموعه‌های روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی می‌باشد که بر مبنای میدان‌های فیزیکی طبیعی کره زمین استوار است. برای اکتشاف توده‌های فرومغناطیس معمولاً شدت کل میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. سنگ‌های دارای کانی‌های با خودپذیری مغناطیسی متفاوت، در حضور میدان مغناطیسی زمین، مغناطیس‌القاه شده از خود بروز می‌دهند و از روی همین خاصیت می‌توان توده‌های مغناطیسی زیر سطحی را به واسطه تغییرات ایجاد شده در میدان مغناطیس زمین اکتشاف نمود. از جمله کاربردهای روش مگنتومتری می‌توان به اکتشاف کانسارهای آهن، کرومیت، شناسایی توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی‌های سولفیدی، شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و گسل‌ها به عنوان عامل کنترل‌کننده کانی‌زایی اشاره نمود. سنگ‌ها به دلیل دارا بودن کانی‌هایی با خاصیت خودپذیری مغناطیسی متفاوت، دارای شدت میدان مغناطیسی متفاوت می‌باشند. کانی‌هماتیت خود به تنهایی از شدت میدان

مغناطیسی بالایی برخوردار نمی باشد اما بسته به کانی ها و عناصر همراه خود ممکن است در نقشه های شدت میدان مغناطیسی کل به صورت دوقطبی های مغناطیسی ظاهر شوند. در شکل ۱ نمودار تغییرات ضریب خودپذیری مغناطیسی مربوط به برخی از سنگ ها نمایش داده شده است.



شکل ۱. شدت خودپذیری مغناطیسی سنگ های مختلف.

روش پلاریزاسیون القایی یکی از مجموعه روش های ژئوفیزیکی اکتشافی است که کاربرد گسترده ای در اکتشاف مواد معدنی دارد. این روش از جمله روش های ژئوالکتریکی است که با استفاده از میدان های فیزیکی که به صورت مصنوعی در زمین ایجاد می شوند، به کار گرفته می شود. روش پلاریزاسیون القایی به اختصار IP نامیده می شود. مهم ترین کاربرد این روش در اکتشاف مواد معدنی به ویژه کانسارهای فلزی، چند فلزی و اکثر سولفیدهاست. از جمله پارامترهای اثرگذار بر روی پدیده قطبش القایی می توان به ابعاد پیکره معدنی، نوع کانی ها، مقدار عیار و چونگی توزیع مواد رسانا، مقاومت کانی های جداکننده و توزیع و حجم نسبی کانی های رسی اشاره نمود. در میان پارامترهای اشاره شده نوع کانی های موجود در سنگ عامل موثر در شدت مقدار بارپذیری می باشد. در جدول ۲ مقدار بارپذیری القایی در برخی از سنگ ها و کانی ها ارائه شده است. همانطور که در جدول مشاهده می شود مقدار بارپذیری کانی هماتیت به تنهایی در حد ۱ الی ۲ میلی ثانیه می باشد. همچنین از مقدار مقاومت ویژه متوسط برخوردار می باشد.

جدول ۲. مقدار بارپذیری سنگ ها و کانی ها

| Materials | Chargeability (ms) |
|----------------------|--------------------|
| Groundwater | 0 |
| Alluvium | 1-4 |
| Gravels | 3-9 |
| Precambrian Volcanic | 8-20 |
| Schists | 5-20 |
| Sandstone | 3-12 |
| Quartzite | 5-12 |

| | |
|--------------|-------|
| Pyrite | 10-15 |
| Galena | 3-5 |
| Hematite | 1-2 |
| Cooper | 12-15 |
| Bornite | 6-10 |
| Chalcopyrite | 8-12 |

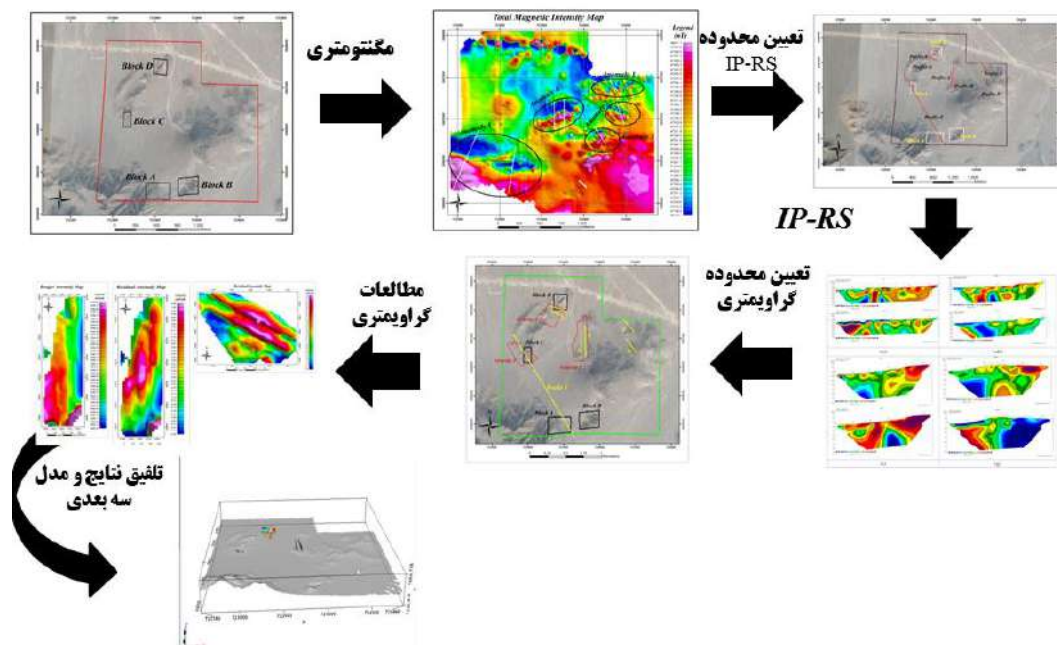
برداشت‌های گراویمتری شامل اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانی زمین می‌باشد. هدف، تعیین توده‌های با چگالی کمتر و یا بیشتر نسبت به محیط اطراف می‌باشد. حاصل تفسیر نتایج گرانی، تعیین چگالی سنگ‌ها و در نتیجه ساختارهای زمین‌شناسی و جنس سنگ‌هاست. معمولاً روش گراویمتری در اکتشاف مواد معدنی بعنوان یک روش ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش گراویمتری شتاب جاذبه زمین در ایستگاه‌های گراویمتری اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. واحد شتاب جاذبه زمین گال (Gal) می‌باشد. هر گال (Gal) معادل یک سانتیمتر بر مجذور ثانیه است. با توجه به تغییرات مکانی ناچیز شتاب جاذبه زمین در عمل از واحد میلی گال (mGal) استفاده می‌شود. با توجه به تاثیر عوامل مختلف بر روی شتاب جاذبه زمین لازم است تا در عملیات گراویمتری تاثیر عوامل مختلف به جز چگالی سازندهای زیرسطحی از مقادیر اندازه‌گیری شده شتاب جاذبه زمین کم شود. اگر در هر نقطه مقدار شتاب جاذبه اندازه‌گیری تصحیح شده از مقدار شتاب جاذبه نظری (محاسبه شده) کسر شود می‌توان در مورد وجود و یا عدم وجود بی‌هنجاری گرانی در آن نقطه قضاوت نمود. لازمه تفسیر صحیح داده‌های گراویمتری، انجام دقیق تصحیحات مربوط به آن می‌باشد. هماتیت‌ها به دلیل حضور آهن در ساختار خود از وزن مخصوص بالاتری نسبت به سنگ‌های دربردارنده خود برخوردار می‌باشد و لذا در مطالعات گراویمتری به صورت زون‌هایی با شدت بالا ظاهر می‌شود. در جدول ۳ مقادیر وزن مخصوص برخی از کانی‌ها ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر وزن مخصوص برخی از کانی‌ها

| Mineral | Density |
|---------------------|---------|
| <u>Apatite</u> | 3.1-3.2 |
| <u>Biotite Mica</u> | 2.8-3.4 |
| <u>Calcite</u> | 2.71 |
| <u>Chlorite</u> | 2.6-3.3 |
| Copper | 8.9 |
| Graphite | 2.23 |
| <u>Gypsum</u> | 2.3-2.4 |
| Halite | 2.16 |
| <u>Hematite</u> | 5.26 |
| <u>Kaolinite</u> | 2.6 |

| Mineral | Density |
|------------------|---------|
| <u>Magnetite</u> | 5.18 |

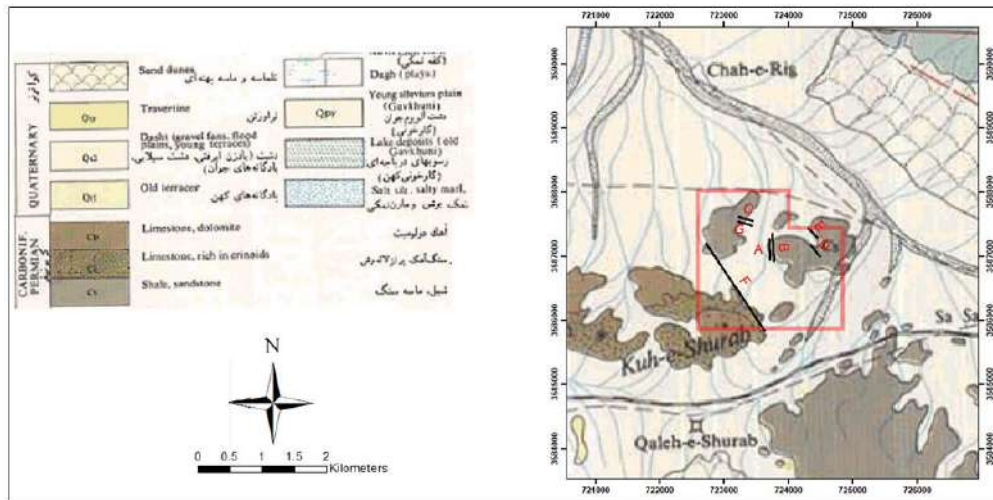
با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد هر یک از روش‌های مگنتومتری، IP-RS و گراویمتری، عدم توانایی تنها یک روش در بررسی وضعیت کانی‌زایی هماتیت به خوبی مشهود است و هر کدام از روش‌ها به طور نسبی در مورد وجود یا عدم وجود کانی‌زایی هماتیت در یک محدوده می‌تواند کمک کننده باشد. لذا در این مطالعه با ترکیب نتایج هر سه روش مگنتومتری، IP-RS و گراویمتری به مدل‌سازی سه‌بعدی کانی‌زایی هماتیت در محدوده مورد مطالعه پرداخته شده است. در شکل ۲ روند مطالعاتی صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۲. روند مطالعات اکتشافی صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه.

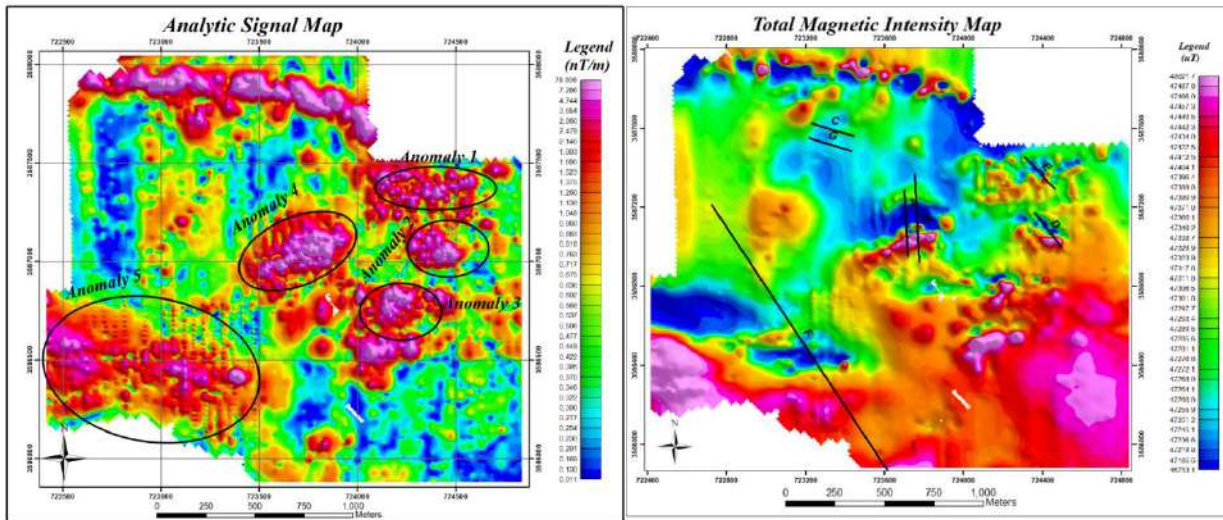
۳- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در فاصله حدود ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان عقدا استان یزد قرار گرفته است. به لحاظ زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سرو بالا قرار گرفته است که در شکل ۳ موقعیت آن بر روی برکه زمین‌شناسی مذکور نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، لیتولوژی غالب در این محدوده شیل، ماسه‌سنگ و سنگ‌های کربناته مربوط به دوران کربونیفر می‌باشد. قسمت عمده‌ای از محدوده توسط رسوبات آبرفتی عهد حاضر پوشیده شده است. بر اساس مشاهدات صحرایی صورت گرفته، کانی‌زایی هماتیت عمدتاً در کنتاکت لیتولوژی‌ها صورت گرفته است که غالباً کانی همراه آن باریت می‌باشد.



شکل ۳. موقعیت محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سرو بالا.

در مرحله اول مطالعات مگنتومتری صورت گرفت. هدف از انجام مطالعات مگنتومتری تفکیک لیتولوژی و شناسایی گسل‌های پنهان محدوده و همچنین بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط داده‌های مگنتومتری با موقعیت زون‌های کانی‌زایی شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه بوده است. بر این اساس در شکل ۴ الف نقشه شدت میدان مغناطیسی کل در محدوده مورد مطالعه و در شکل ۴ ب نقشه سیگنال تحلیلی تهیه شده از آن نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، یک روند دوقطبی شمال‌شرق-جنوب‌غرب در سرتاسر محدوده ظاهر شده است که در مرکز محدوده تحت تاثیر گسلی این دوقطبی کمی جابجا شده است. همچنین در قسمت‌های شرقی محدوده نیز دوقطبی‌هایی ظاهر شده اند، که ممکن است در موقعیت این دوقطبی‌ها کانی‌زایی صورت پذیرفته باشد. جهت بررسی این موضوع و تکمیل اطلاعات اکتشافی از زمین‌شناسی منطقه و نحوه قرارگیری لایه‌های زمین‌شناسی نسبت به یکدیگر و شناسایی دقیق‌تر گسل‌های موثر در کانی‌زایی، پروفیل‌های IP-RS طراحی و برداشت گردید. خطوط مشکی رنگ رسم شده در شکل ۴ الف موقعیت پروفیل‌های IP-RS برداشت شده را نمایش می‌دهد.



(ب)

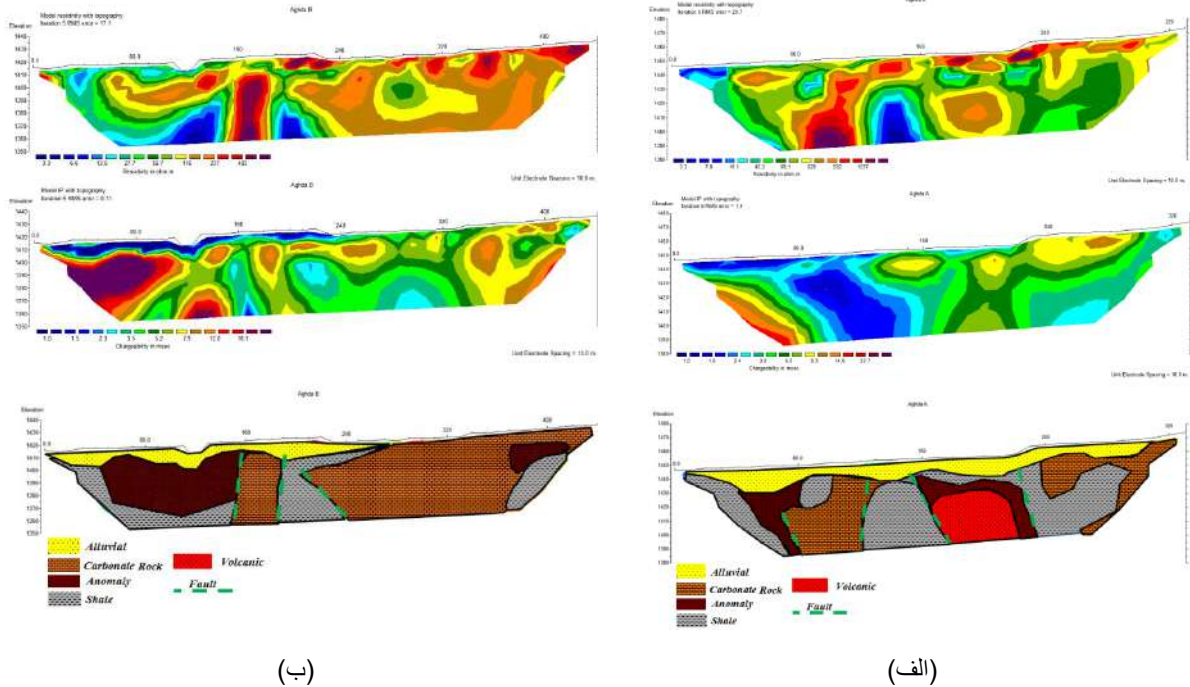
(الف)

شکل ۴ الف) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل. خطوط مشکی رنگ موقعیت پروفیل‌های IP-RS برداشت شده در محدوده را نمایش می‌دهد (ب) نقشه سیگنال تحلیلی. بیضی‌های سیاه موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را نمایش می‌دهد.

همانطور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، در مرکز محدوده یک دوقطبی مغناطیسی ظاهر شده است که احتمالاً این دوقطبی مغناطیسی نشان از حضور یک توده نفوذی ولکانیکی در زیر آبرفت می‌باشد و ممکن است در راستای این توده کانی‌زایی مورد نظر اتفاق افتاده باشد. لذا بر این اساس دو پروفیل IP-RS با نام‌های A و B به صورت عمود بر دوقطبی ظاهر شده برداشت گردید.

در مرحله دوم مطالعات IP-RS با هدف شناسایی دقیق‌تر گسل‌ها و همچنین شناسایی زون‌های احتمالی کانی‌زایی هماتیت صورت پذیرفت. در شکل ۵ الف مقطع مقاومت‌ویژه، بارپذیری و زمین‌شناسی به دست آمده از داده‌های IP-RS مربوط به پروفیل A رسم شده است. سازندهای کربناته در مقاطع مقاومت‌ویژه با مقاومت‌ویژه متوسط رو به بالا و بارپذیری پایین ظاهر می‌شوند. این در حالی است شیل‌ها رفتاری کاملاً عکس کربناته‌ها دارند به این صورت که با مقاومت‌ویژه پایین و بارپذیری بالا ظاهر می‌شوند. در صورتی که در کنتاکت این دو لیتولوژی کانی‌زایی صورت گرفته باشد، به صورت زونی با مقاومت‌ویژه متوسط و بارپذیری حدود ۱ الی ۲ میلی‌ثانیه از زمینه بالاتر ظاهر می‌شود که در این محدوده می‌توان گفت در بازه ۵ الی ۷ میلی‌ثانیه می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در موقعیت ۱۲۰ متری از شروع پروفیل، یک زون گسله ظاهر شده است که تحت تاثیر آن دولیتولوژی شیل و آهک در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. اما در این قسمت از پروفیل آثاری از حضور کانی‌زایی مشاهده نمی‌شود. در موقعیت حدود ۶۰ متری از شروع پروفیل، کنتاکت دیگری از دو لیتولوژی شیل و آهک مشاهده می‌شود که در بین آن‌ها تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری در بازه مرتبط با کانی‌زایی است و احتمال حضور کانی‌زایی در این قسمت از پروفیل وجود دارد. در بازه ۱۶۰ الی ۲۰۰ متری از شروع پروفیل، یک توده نفوذی تشخیص داده می‌شود که به لحاظ موقعیتی در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل نیز در مرکز دوقطبی ظاهر شده قرار دارد. تحت تاثیر این توده نفوذی در بالای آن احتمالاً کانی‌زایی صورت گرفته است. پروفیل دیگری که در زون شماره ۲ برداشت شده است، پروفیل B می‌باشد، روند تغییرات در طول ای پروفیل مشابه پروفیل A می‌باشد. در شکل ۵ ب مقطع مقاومت‌ویژه، بارپذیری و زمین‌شناسی تهیه شده از این پروفیل رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در موقعیت صفر الی ۸۰ متری از شروع پروفیل در مقطع بارپذیری بی‌هنجاری ظاهر شده است که این بی‌هنجاری مرتبط با شیل‌های سیاه‌رنگ می‌باشد. در موقعیت ۱۲۰ متری از شروع پروفیل یک زون با بارپذیری ۵ الی ۷ میلی‌ثانیه ظاهر شده است که این زون در راستای بی‌هنجاری ظاهر شده در پروفیل C می‌باشد. در قسمت انتهایی پروفیل مقدار مقاومت‌ویژه بسیار بالا ظاهر شده است که این زون مربوط به سازندهای کربناته می‌باشد. در کنتاکت دو سازند

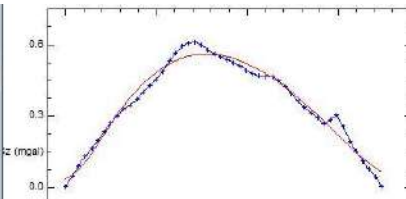
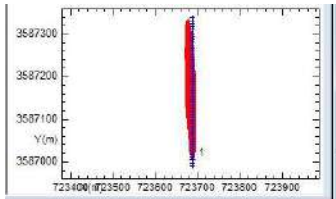
کربناته و شیلی، در دو موقعیت ۸۰ الی ۱۳۰ متر و همچنین در ۳۸۰ الی ۴۱۰ متری از شروع پروفیل تغییرات رنج بارپذیری و مقاومت ویژه با توجه به موقعیت کنتاکت‌ها، می‌تواند مرتبط با کانی‌زایی هماتیت باشد.



شکل ۵ الف) مقطع مقاومت‌ویژه، بارپذیری و زمین‌شناسی پروفیل A (ب) مقطع مقاومت‌ویژه، بارپذیری و زمین‌شناسی پروفیل B.

بر اساس نتایج به دست آمده از دو مرحله مگنتومتري و IP-RS صورت گرفته، محدوده مناسب جهت انجام مطالعات گراویمتری مشخص و برداشت گردید. داده‌های برداشت شده، مورد پردازش قرار گرفته و تصحیح‌های لازم در مورد آنها انجام شده است. پس از گذراندن سطح درجه ۲ از داده‌های آنومالی بوگه، نقشه آنومالی باقیمانده گرانی تهیه گردید. در شکل ۶ الف نقشه آنومالی باقیمانده گرانی مربوط به به این زون رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود یک زون High در مرکز محدوده برداشت شده ظاهر شده است. به لحاظ موقعیتی زون High ظاهر شده منطبق با موقعیت زون‌هایی است که در مطالعات IP-RS به عنوان زون محتمل کانی‌زایی در نظر گرفته شده است. علت این موضوع می‌تواند به دلیل حضور توده نفوذی در این زون باشد که در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل نیز این توده به شکل دوقطبی ظاهر شده است. در قسمت جنوب شرق محدوده نقشه آنومالی باقیمانده یک زون با High شدگی بالا ظاهر شده است که این زون منطبق با زون بی‌هنجار قسمت پایانی پروفیل B می‌باشد. لذا به طور کلی می‌توان گفت نتایج به دست آمده از هر سه مرحله کاملاً با یکدیگر تطابق باشد و تایید کننده همدیگر می‌باشند.

در امتداد دو پروفیل نمایش داده شده بر روی نقشه آنومالی باقیمانده شکل ۶ الف، مدل‌سازی دوبعدی صورت گرفت. که نتایج آن در شکل ۷ ب نمایش داده شده است. همانطور که در هر دو مدل مشاهده می‌شود حداکثر عمق تعیین شده در مدل‌ها حدود ۴۵ متر می‌باشد که با نتایج به دست آمده از مراحل قبل کاملاً تطابق دارد.

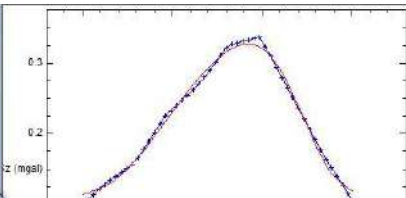
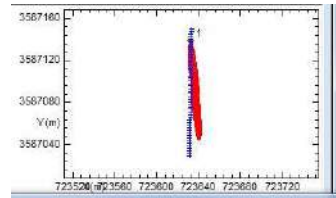
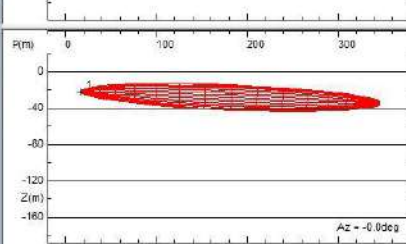


Modelling control

| ID | Type | Description | Width | Length | Height | Slope |
|----|-----------|-------------|-------|--------|--------|-------|
| 1 | Ellipsoid | | 27 | 23 | 333 | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

| | X | Y | Z | Strike | Dip | Plunge |
|---|--------|---------|-----|--------|-------|--------|
| 1 | 723699 | 3587096 | -22 | -90.4 | -87.8 | -1.5 |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

| | Density | Susc(SI) | Rem(V/m) | Az | Inc |
|---|---------|----------|----------|----|-----|
| 1 | 2.700 | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |

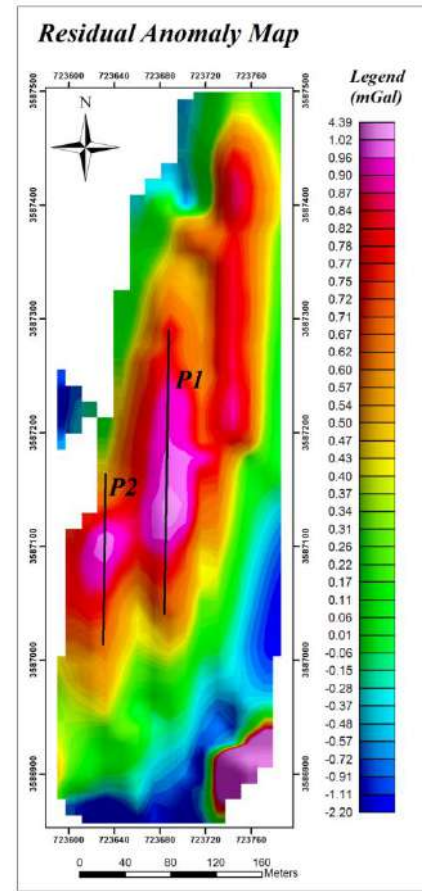
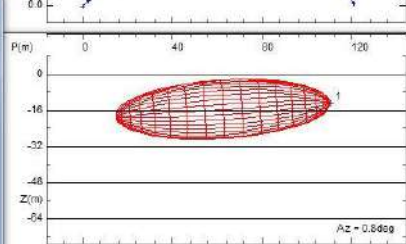


Modelling control

| ID | Type | Description | Width | Length | Height | Slope |
|----|-----------|-------------|-------|--------|--------|-------|
| 1 | Ellipsoid | | 26.1 | 7.9 | 96.4 | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

| | X | Y | Z | Strike | Dip | Plunge |
|---|----------|-----------|-------|--------|------|--------|
| 1 | 723632.2 | 3587139.2 | -12.7 | 91.8 | 88.5 | 3.3 |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

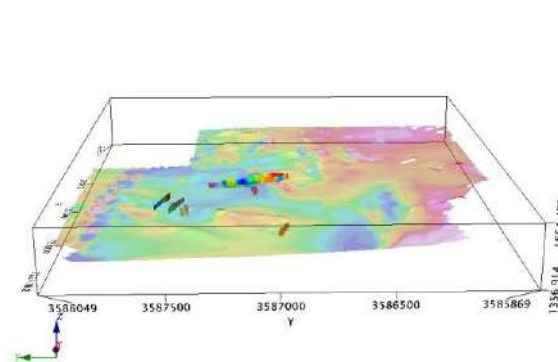
| | Density | Susc(SI) | Rem(V/m) | Az | Inc |
|---|---------|----------|----------|------|------|
| 1 | 2.700 | | -0.000 | -0.1 | -0.1 |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |



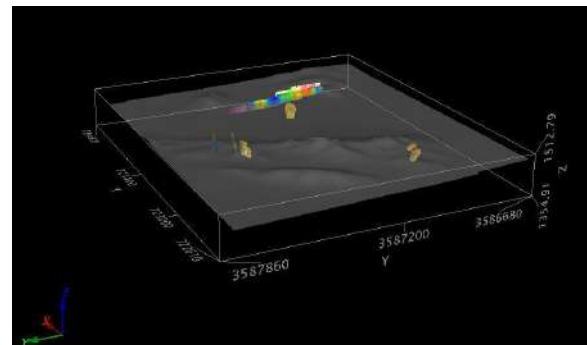
(ب)

(الف)

شکل ۶ الف) نقشه آنومالی باقیمانده و موقعیت پروفیل‌های در نظر گرفته شده جهت مدلسازی دو بعدی (ب) مدل دو بعدی تهیه شده از داده‌های گراویمتری. با تلفیق داده‌های به دست آمده از هر سه مرحله مدل سه بعدی مربوط به کانی‌زایی هماتیت تهیه گردید که نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. در تهیه مدل سه بعدی مقدار حد اختلاف وزن مخصوص ۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷. مدل سه بعدی از کانی‌زایی احتمالی.

۴- نتیجه گیری

محدوده مورد مطالعه در فاصله حدود ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان عقدا استان یزد قرار گرفته است. به لحاظ معدنی پتانسیل سنگ آهن هماتیت را داشته و در حال حاضر در چهار بلوک استخراجی فعالیت دارد. محدوده مورد مطالعه به لحاظ زمین شناسی متشکل از سنگ-های کربناته که عمدتاً آهک می باشد و سنگ های شیلی می باشد و بخش اعظمی از محدوده پوشیده از رسوبات آبرفتی می باشد. با هدف بررسی وضعیت کانی زایی هماتیت در سایر قسمت های محدوده و شناسایی پتانسیل های جدید کانی زایی، از سه روش ژئوفیزیکی مگنتومتري، IP-RS و گراویمتری استفاده گردید. هدف از انجام مطالعات مگنتومتري، شناسایی موقعیت توده های نفوذی احتمالی، موقعیت احتمالی کانی زایی (در صورتی که همراه خود درصدی FeO داشته باشد)، شناسایی موقعیت گسل های اصلی در محدوده و تفکیک لیتولوژی می باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از این روش، آنومالی هایی به صورت دوقطبی مغناطیسی ظاهر شده اند و ممکن است مرتبط با کانی زایی و یا حضور توده نفوذی در آن قسمت ها باشد. همچنین موقعیت گسل های اصلی در محدوده شناسایی گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات مگنتومتري و مشاهدات زمین شناسی، پروفیل های IP-RS طراحی و برداشت گردید. هدف از مطالعات IP-RS شناسایی موقعیت حدودی کانی زایی هماتیت و ارزیابی آنومالی های ظاهر شده در مطالعات مگنتومتري بوده است. بر اساس مطالعات IP-RS زون های پتانسیل دار انتخاب گردید که به منظور بررسی شکل بی هنجاری ها و ارزیابی گسترش طولی و عمقی آن ها روش گراویمتری صورت پذیرفت. بر اساس پردازش ها و مدلسازی های صورت گرفته، بی هنجاری های شناسایی شده و تا عمق حدود ۵۰ متری از سطح زمین ادامه یافته است که جهت اطمینان از نتایج به دست آمده و بهینه سازی مدل های موجود، لازم است در نقاطی حفاری اکتشافی صورت پذیرد.

مراجع

- [1] Gönenç, Tolga, et al. "Geophysical Investigation of the Hematite Zones in Koçarlı-Demirtepe (Aydın/Turkey)." *Arabian Journal for Science and Engineering* 38 (2013): 1841-1849.
- [2] Kopic, Anton, and Shahriar Javadipour. "Resistivity and Induction polarization technique for mapping hematite rich areas in Iran." *ASEG Extended Abstracts* 2015.1 (2015): 1-4.
- [3] Nogueira, Pedro Vencovsky, et al. "Study of iron deposit using seismic refraction and resistivity in Carajás Mineral Province, Brazil." *Journal of Applied Geophysics* 133 (2016): 116-122.
- [4] Christiansen, Rodolfo, et al. "Exploration of Iron ore deposits in Patagonia. Insights from gravity, magnetic and SP modelling." *Geophysical Prospecting* 66.9 (2018): 1751-1763.
- [5] Waele, Bert De, et al. "From a Mining Mindset to Regional Discovery: A Case Study for Hematite Iron Ore Exploration in Mauritania." *ASEG Extended Abstracts* 2019.1 (2019): 1-3.
- [6] Abedi, Maysam. "A focused and constrained 2D inversion of potential field geophysical data through Delaunay triangulation, a case study for iron-bearing targeting at the Shavaz deposit in Iran." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 309 (2020): 106604.

مطالعه ژئوالکتریک معدن طلای هیرد نهبندان

امیرحسین ضیاء^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوالکتریک دانشگاه تهران؛ amirhosseinzia@ut.ac.ir

چکیده فارسی

بارش کم و پتانسیل کم منابع آبی در مناطق کویری سبب شده است که همواره تامین آب معدنی که در این مناطق قرار دارند یکی از چالش‌های بزرگ پیش روی بهره‌برداران باشد. معدن طلای هیرد در یکی از خشک‌ترین مناطق ایران در استان خراسان جنوبی قرار گرفته است. حجم عملیات اکتشافی قابل توجهی در آن صورت گرفته است.

برای تعیین منطقه مستعد برای حفر گمانه ۳۸ سونداژ ژئوالکتریک با آرایش شلومبرگر با طول خط جریان حداکثر ۱۰۰۰ متر برداشت گردید. این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار IPI2WIN مورد تفسیر قرار گرفت بر اساس نتایج حاصل از این مطالعات منطقه شرق سرچاه شور در دشت سمن آباد که در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری معدن قرار داشته بهترین محل جهت حفر گمانه تشخیص داده شد. این گمانه در عمق ۹۱/۳۰ متری به آب و تا عمق مجاز ۱۴۰ متر حفاری گردید. بر اساس نتایج حاصل از آزمون پمپاژ پتانسیل آبدی ۵۴ لیتر در ثانیه به ازای ۱۲/۵۳ متر افت اندازه‌گیری گردید هدایت الکتریکی (EC) آب بین ۴۴۰۰ تا ۴۸۰۰ میکروموس بر سانتیمتر، PH بین ۷/۳۷ تا ۷/۴ و دمای آن بین ۱۷ تا ۱۸ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. با توجه به کمیت و کیفیت مناسب آب در این منطقه در صورت اجرای خط انتقال آب مورد نیاز معدن در دراز مدت تامین خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: ژئوالکتریک، طلای هیرد، نهبندان

Geoelectrical study of Hird gold mine in Nahbandan

Amirhossein Zia¹

1-Master's student in Geoelectricity, University of Tehran; amirhosseinzia@ut.ac.ir

ABSTRACT

The low rainfall and the low potential of water resources in desert areas have always caused the supply of water to the mines located in these areas to be one of the big challenges facing the operators. Hird gold mine is located in one of the driest areas of Iran in South Khorasan province. A significant amount of exploration has been carried out in it.

To determine the potential area for borehole drilling, 38 geoelectric soundings with a Schlumberger arrangement with a flow line length of up to 1000 meters were taken. These data were interpreted using IPI2WIN software. Based on the results of these studies, the area east of Sarchah Shoor in the Saman Abad Plain, which is located at a distance of about 30 km from the mine, was determined to be the best place for drilling boreholes. This borehole was drilled at a depth of 91.30 meters into the water and up to the allowed depth of 140 meters. Based on the results of the pumping test, the water potential of the well was 54 liters per second per 12.53 meters, the electrical conductivity (EC) of the water was between 4400 and 4800 micromhos/cm, the pH was between 7.37 and 7.4 and its temperature was between 17 to 18 degrees Celsius was measured. Due to the adequate quantity and

quality of water in this area, if the water transmission line is implemented, it will supply the mine in the long term.

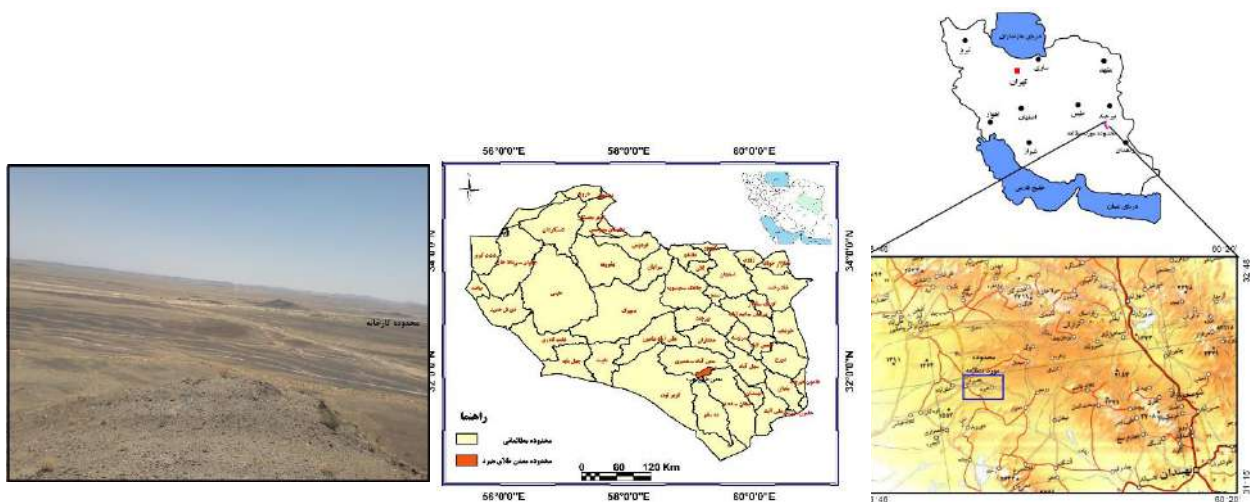
Keywords: Geoelectric, Hird gold mine, Nehbandan

مقدمه

محدوده معدن طلای هیرد در جنوب شرق ایران در استان خراسان جنوبی در فاصله حدود ۱۶۰ کیلومتری جنوب شهر بیرجند مرکز این استان و ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب شهر نهبندان واقع شده است. این منطقه بین ۳' ۵۸° تا ۳۳' ۵۹° طول جغرافیایی و ۵' ۳۱° تا ۳۲° عرض جغرافیایی می‌باشد. دسترسی به این محدوده از طریق جاده آسفالتی بیرجند-خوسف-معدن قلعه زری امکان‌پذیر است. نزدیکترین روستاهای دارای سکنه به این محدوده معدنی بصیران و هیرد می‌باشند (شکل ۱).

در استان خراسان جنوبی ۴۴ محدوده مطالعاتی قرار دارد که از این تعداد ۲۵ محدوده از نظر توسعه منابع آب ممنوعه می‌باشد. معدن طلای هیرد در محدوده مطالعاتی ممنوعه دشت سمن آباد واقع شده است. محدوده‌های مطالعاتی اطراف این منطقه، محدوده ممنوعه دهنو-میغان، محدوده آزاد ده‌سلم و محدوده کویر لوت می‌باشد که این محدوده‌ها جهت تامین آب معدن مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۲).

منطقه مورد بررسی در حاشیه کویر لوت واقع شده است. بیشتر رخنمون سنگی منطقه را سنگ‌های آذرین (ولکانیک‌ها) تشکیل داده است. در بیشتر این رخنمون‌ها به شکل مدور و تپه ماهور دیده می‌شوند. حدواسط این ارتفاعات را رسوبات آبرفتی دانه درشت تا متوسط پوشانده است که به سمت خروجی حوضه اندازه آنها کاهش پیدا می‌کند. رخنمون سنگی در وسط رسوبات آبرفتی (دشت‌ها) دیده می‌شوند که نشان‌دهنده بالآمدگی سنگ کف و ضخامت کم آبرفت در بیشتر این مناطق می‌باشد (شکل ۳). شیب عمومی منطقه در محدوده کارخانه و معدن از شمال شرق به سمت جنوب غرب می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل (۳): رخنمون واحدهای سنگی ولکانیکی در وسط دشت در محدوده کارخانه

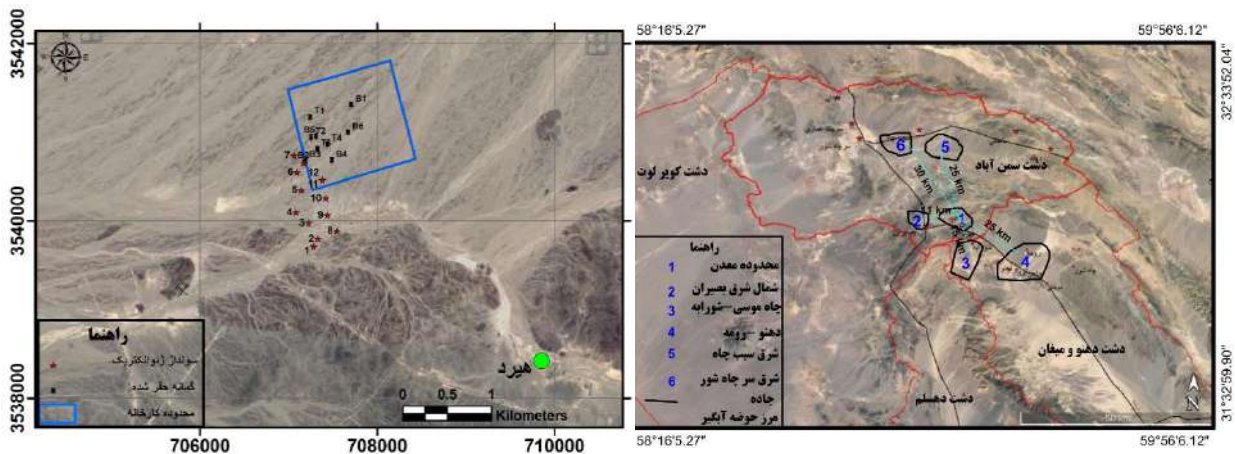


شکل (۲): موقعیت معدن طلای هیرد در محدوده‌های مطالعاتی خراسان جنوبی

روش انجام تحقیق

پس از بررسی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی، تجزیه و تحلیل خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه از جمله پراکنش وضعیت آبدهی قنات‌ها، چشمه‌ها و تغییرات خصوصیات فیزیکیوشیمیایی و بازدید صحرایی، ۶ منطقه که احتمال وجود آب وجود داشتند، برای مطالعه دقیق‌تر در اولویت مطالعات ژئوالکتریک قرار گرفتند (شکل ۴). مبنای این اولویت‌ها فاصله از معدن و پتانسیل آبی آنها می‌باشد.

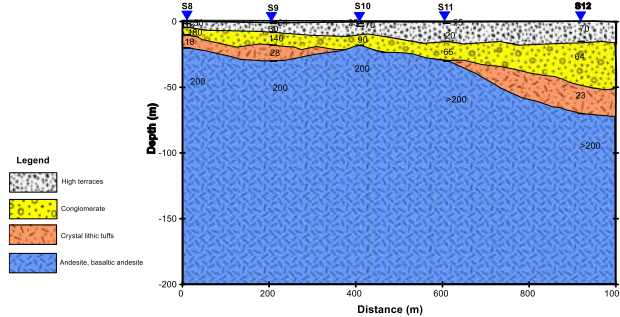
در این مطالعه ۳۸ سونداژ ژئوالکتریک به روش آرایش شلومبرژر با فاصله خط جریان حداکثر تا ۱۰۰۰ متر برداشت گردیدند. با تفسیر این سونداژها به روش جزء به جزء و نرم افزار IPI2win بهترین محل از نظر پتانسیل آبی مشخص گردید.



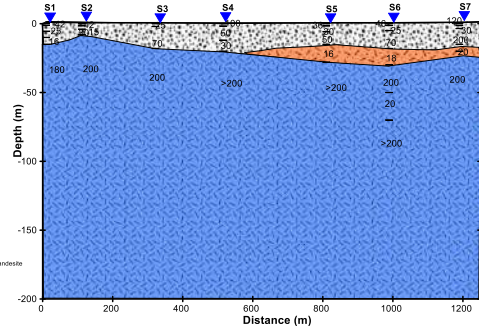
شکل (۵): موقعیت سونداژهای ژئوالکتریک در محدوده کارخانه

شکل (۴): موقعیت و مناطق اولویت‌دار مطالعه شده

اولویت ۱ محدوده معدن و کارخانه : در این منطقه تعداد ۱۲ سونداژ ژئوالکتریک به فاصله ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر از همدیگر در قالب دو پروفیل با آرایه شلومبرژه برداشت گردید. موقعیت سونداژهای برداشت شده در شکل ۵ آورده شده است. نتایج حاصل از تفسیر داده‌ها نشان دهنده بالا بودن سنگ کف و عدم تشکیل آبخوان در این محدوده می‌باشند (شکل ۶ و ۷) محدوده های ۲ تا ۵ نیز فاقد پتانسیل آبی تشخیص داده شده‌اند.

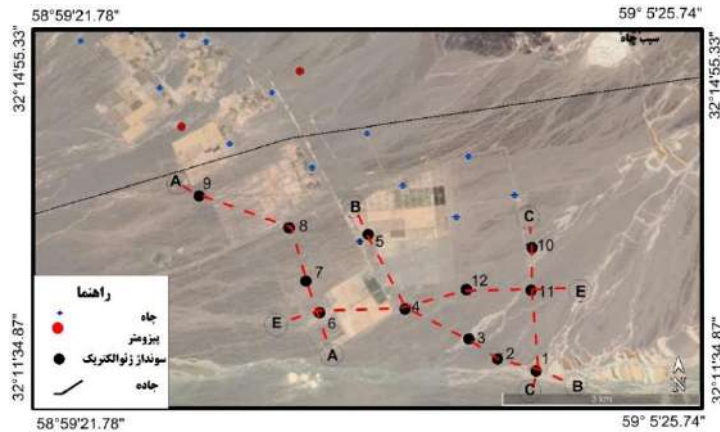


شکل (۷): نقشه مقطع ژئوالکتریک پروفیل B



شکل (۶): نقشه مقطع ژئوالکتریک پروفیل A

با توجه عدم تامین آب در ۵ گزینہ بالا، ۱۲ سونداژ در منطقه شرق سرچاه شور در دشت سمن آباد برداشت گردید (شکل ۸). نتایج حاصل از تفسیر آنها در ادامه آورده شده است.



شکل (۸): موقعیت سونداژهای برداشت شده در منطقه سرچاه شور

۳-۱- مقطع و شبه مقطع پروفیل A

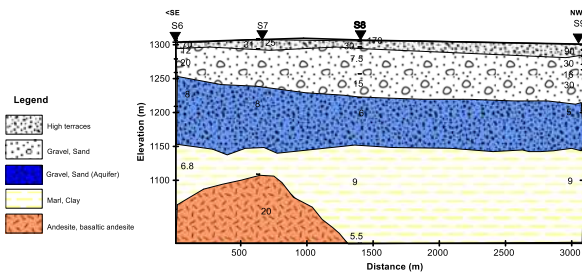
این پروفیل شامل ۴ سونداژ به طول ۳۳۰۰ متر در راستای جنوب شرق - شمال غرب برداشت شده است. در این شبه مقطع مقدار مقاومت ویژه ظاهری در همه سونداژها نسبت به عمق کاهش می‌یابد. که نشان دهنده برخورد به سنگ کف دانه ریزی مارنی و کیفیت نامطلوب آب می‌باشد (شکل ۹).

در مقطع ژئوالکتریک A مقاومت لایه سطحی بین ۳۰ تا ۱۷۰ اهم متر به ضخامت ۳ متر می‌باشد، که درشت دانه می‌باشند.

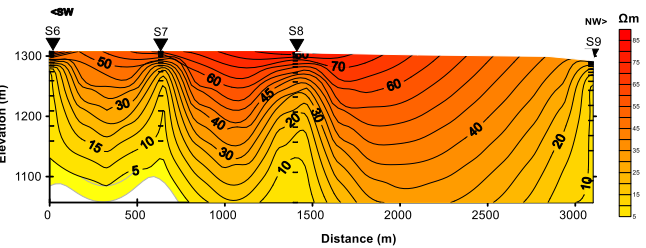
رسوبات آبرفتی خشک دارای مقاومت ۱۶ تا ۱۳۰ اهم متر می‌باشد، که بین ۲۰ تا ۴۰ متر ضخامت آن تغییر می‌کند. مقدار ضخامت به سمت شمال شرق افزایش پیدا می‌کند.

لایه آبدار دارای مقاومت ۵ تا ۸ اهم متر تغییر می‌نماید و دارای آب با کیفیت پائین می‌باشند.

سنگ کف دارای مقاومت بین ۵ تا ۹ اهم متر بوده و از رسوبات دانه ریز مارنی تشکیل شده است عمق برخورد به سنگ کف بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر تغییر می نماید (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): مقطع ژئوالکتریک پروفیل A در شرق سرچاه شور



شکل (۹): شبه مقطع ظاهری پروفیل A در شرق سرچاه شور

۲-۳- مقطع و شبه مقطع پروفیل B

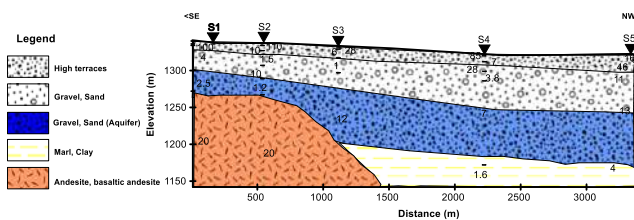
این پروفیل شامل ۵ سونداژ به طول ۳۵۰۰ متر در راستای جنوب شرق - شمال غرب برداشت شده است. در این شبه مقطع مقدار مقاومت ویژه ظاهری در همه سونداژها نسبت به عمق کاهش می یابد. در سونداژهای ۱ تا ۳ در عمق کاهش مقاومت در عمق کمتری صورت گرفته است که نشان دهنده بالاتر بودن سنگ کف در این منطقه می باشد (شکل ۱۱).

در مقطع ژئوالکتریک B مقاومت لایه سطحی بین ۱۶ تا ۱۱۰ اهم متر به ضخامت ۳ متر می باشد.

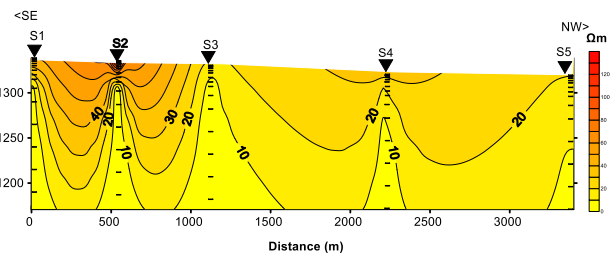
رسوبات آبرفتی خشک دارای مقاومت ۴ تا ۱۱ اهم متر می باشد، که بین ۴۰ تا ۷۰ متر ضخامت آن تغییر می کند. مقدار ضخامت آبرفت به سمت شمال غرب افزایش پیدا می کند.

لایه آبدار مقاومت ۷ تا ۱۲ اهم متر می باشد که ضخامت در راستای شمال غرب افزایش نشان می دهد.

سنگ کف در سونداژهای ۱ تا ۳ ولکانیک و در سونداژهای ۴ و ۵ مارن می باشد. عمق برخورد به سنگ در راستای شمال غرب افزایش و به ۱۵۰ متر می رسد (شکل ۱۲).



شکل (۱۲): مقطع ژئوالکتریک پروفیل B در شرق سرچاه شور



شکل (۱۱): شبه مقطع ظاهری پروفیل B در شرق سرچاه شور

۳-۲- مقطع و شبه مقطع پروفیل C

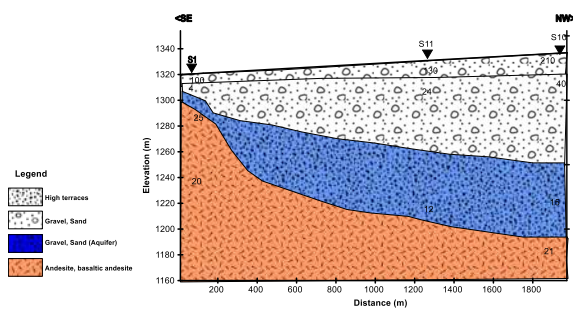
این پروفیل شامل ۳ سونداژ به طول ۲۰۰۰ متر در راستای جنوب شرق-شمال غرب برداشت شده است. در این شبه مقطع مقدار مقاومت ویژه ظاهری در همه سونداژها نسبت به عمق کاهش می‌یابد این کاهش عمق در سونداژهای ۱۰ و ۱۱ در عمق بیشتری اتفاق می‌افتد که نشان دهنده عمق بیشتر سنگ کف در این منطقه می‌باشد (شکل ۱۳).

در مقطع ژئوالکتریک C مقاومت لایه سطحی بین ۱۰۰ تا ۲۱۰ اهم متر به ضخامت ۳ متر می‌باشد.

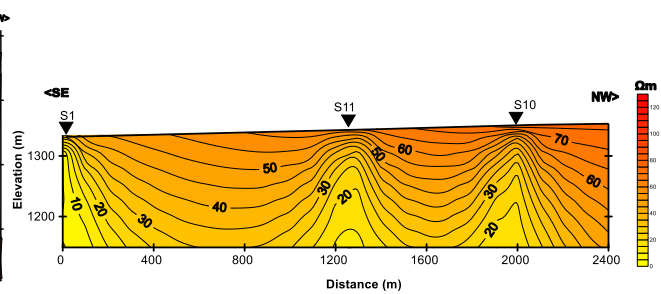
رسوبات آبرفتی خشک دارای مقاومت ۴ تا ۱۴۰ اهم متر می‌باشد، که بین ۴۰ تا ۷۰ متر ضخامت آن تغییر می‌کند. مقدار ضخامت به سمت شمال غرب افزایش پیدا می‌کند.

لایه آبدار مقاومت ۱۲ تا ۱۵ اهم متر می‌باشد و ضخامت آن در راستای شمال غرب افزایش نشان می‌دهد.

سنگ کف در سونداژهای ولکانیکی بوده و دارای مقاومت ۲۰ تا ۲۵ اهم متر می‌باشد. عمق برخورد به سنگ در راستای جنوب شرق به شمال غرب افزایش و به حدود ۱۵۰ متر می‌رسد (شکل ۱۴).



شکل (۱۴): مقطع ژئوالکتریک پروفیل C در شرق سرچاه شور



شکل (۱۳): شبه مقطع ظاهری پروفیل C در شرق سرچاه شور

۴- نتیجه و جمع‌بندی

اطلاعات حاصل از چاه‌های حفر شده و بررسی‌های زمین‌شناسی صحرائی، مطالعات ژئوالکتریک نشان می‌دهد که به دلیل شیب زیاد، بالا بودن سنگ کف و عدم تغذیه لایه آبدار در محدوده احداث کارخانه فرآوری تشکیل نگردیده است. ضخامت آبرفت در این محدوده حداکثر ۱۷۵ متر می‌باشد و آبرفت از رسوبات متوسط تا درشت دانه تشکیل شده است. سطح آب زیرزمینی بین ۴۵ تا ۹۰ متر قرار دارد. هدایت الکتریکی آب (EC) در این منطقه بین ۳۵۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر تغییر می‌کند. کیفیت آب در این منطقه نسبت به بقیه نقاط مطلوب‌تر است.

بهترین نقطه جهت حفر گمانه در این منطقه سونداژ ۱۰ پیشنهاد گردید. چاه حفر شده در این نقطه در عمق ۹۱ متری به آب برخورد نمود و تا عمق ۱۴۰ متر حفاری گردید آزمون پمپاژ این چاه نشان دهند پتانسیل آبی ۴۳ لیتر در ثانیه به ازای ۱۲/۵۳ متر افت سطح ایستابی که تایید کننده نتایج حاصل از مطالعات ژئوالکتریک می‌باشد.

تقدیر و تشکر

از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و شرکت آبادراهان پارس جهت تامین منابع مالی این تحقیق قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [۶] گزارش مطالعات تامین آب معدن طلای هیرد ۱۳۹۹ شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران
- [۷] گزارش تمدید ممنوعیت دشت دهنو- میغان، ۱۳۸۹، شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی
- [۳] نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور

بررسی توزیع کرومیت بر اساس داده های زمین شناسی و مغناطیس سنجی در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون

زهرا سهرنی

کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، zahra.sohroni@ut.ac.ir

چکیده

حضور کرومیت در کمپلکس های افیولیتی بیانگر منابع ارزشمند این کانسنگ است که بررسی های ژئوفیزیکی در اکتشاف این ماده معدنی می تواند نقش به سزایی ایفا نماید. از آنجایی که کرومیت آنومالی مغناطیسی بارزی در بررسی های مغناطیس سنجی از خود به نمایش نمی گذارد، در این مطالعه روش غیر مستقیم بررسی اختلاف سیگنال در کرومیت و سنگ دربرگیرنده برای اکتشاف این ماده مورد استفاده قرار گرفت. از اینرو با طراحی شبکه برداشت مغناطیس سنجی در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون واقع در جنوب محدوده معدنی آهن اسمالون با وسعت ۷۸ کیلومتر مربع بالغ بر ۳۱ هزار داده مغناطیس سنجی برداشت شد. با تهیه نقشه های مربوط و تفسیر نقشه های زمین شناسی و شدت میدان مغناطیسی در این ناحیه پراکندگی و موقعیت نسبی ماده معدنی کرومیت مشخص شد.

واژه های کلیدی: کرومیت، مغناطیس سنجی، اسمالون

Investigation of chromite distribution based on geological and magnetic data in the exploration area of southern Smaloon.

Zahra sohroni

Master of Geophysics, University of Tehran Institute of Geophysics; Zahra.sohroni@ut.ac.ir

ABSTRACT

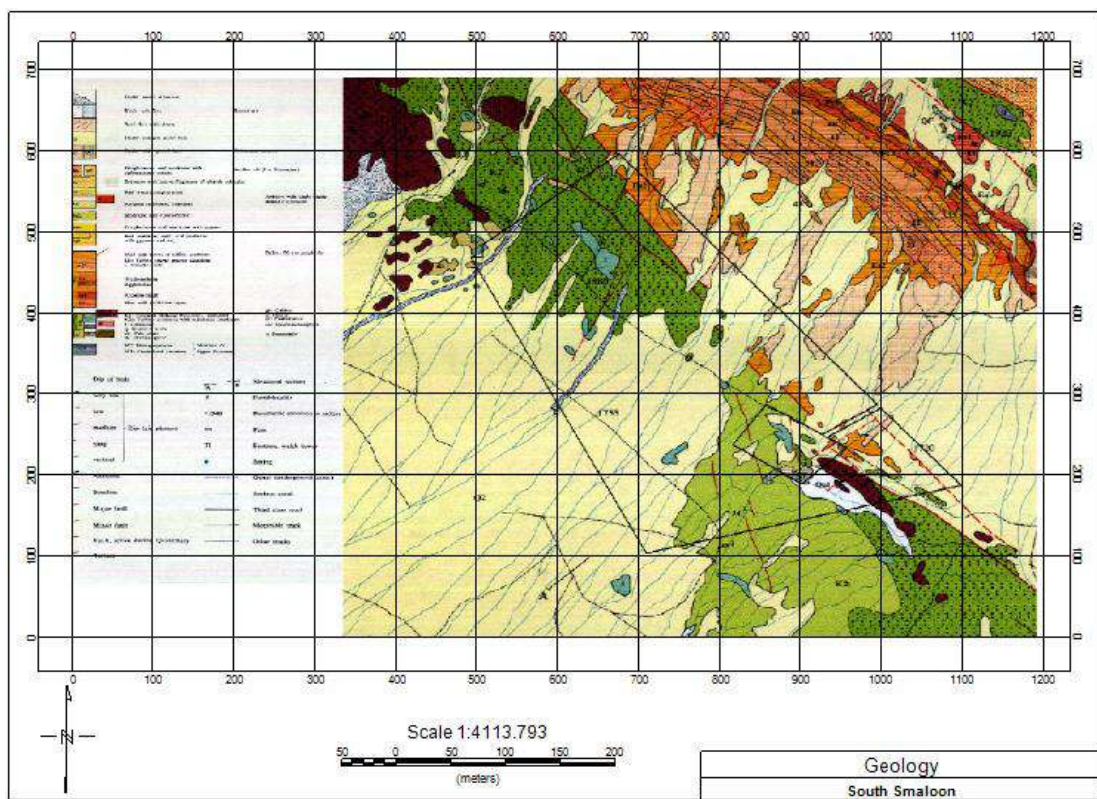
The presence of chromite in ophiolite complexes indicates valuable resources in this ore deposit, and geophysical investigations can play a significant role in exploring this mineral. Since chromite does not exhibit prominent magnetic anomalies in magnetic surveys, an indirect method of comparing signal differences in chromite and host rock was used in this study for exploring this mineral. In this regard, a magnetic survey network was designed in the exploration area of South Esmaloon, located in the southern part of the Esmaloon iron ore mining area, covering an area of over 78 square kilometers, where more than 31,000 magnetic data points were collected. By preparing relevant maps and interpreting geological and magnetic field intensity maps in this area, the distribution and relative position of chromite mineral deposits were determined.

Keywords: Chromite, magnetic survey, South Esmaloon

مقدمه

کرومیت، یک منبع مهم برای کروم است که در صنایع مختلفی از جمله صنعت فولاد، ساخت نیکروم و صنایع رنگ و پوشش کاربرد دارد. در صنعت فولاد، کروم برای ایجاد سختی، استحکام و مقاومت شیمیایی در فولاد مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین، در ساخت نیکروم که یک آلیاژ از آهن و نیکل است و برای ساخت واحدهای گرمایشی مقاوم در برابر دمای بالا، سایش، خوردگی و اکسیداسیون استفاده می شود، نیز کاربرد دارد. کرومیت، یک ماده معدنی است که عموماً در سنگ های گوشته یافت می شود. سنگ های میزبان اصلی کرومیت

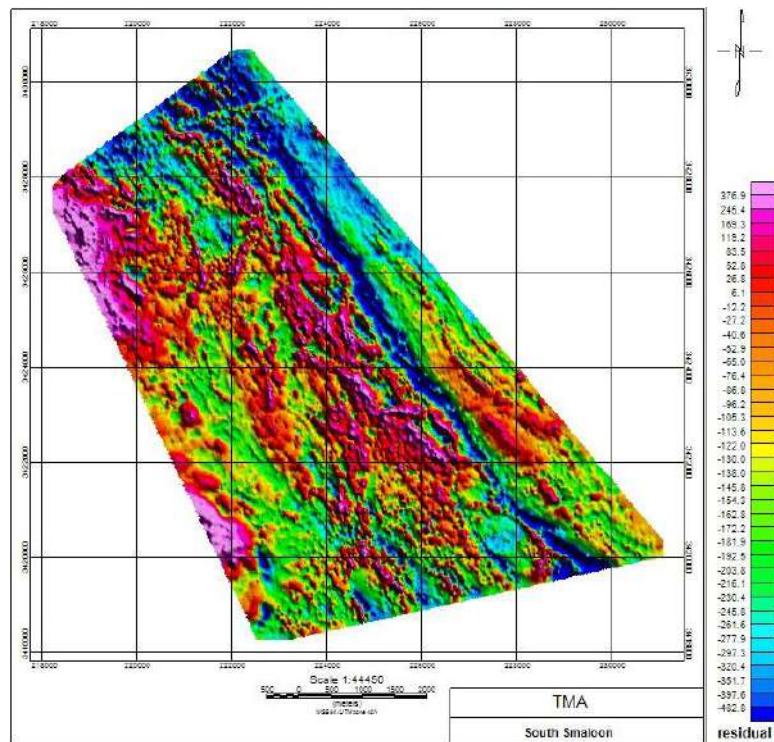
شامل سرپانتینیت پریدوتیت، هارزبورژیت و دونیت تجمعی هستند (روبرتز، ۱۹۸۸). با توجه به اهمیت اقتصادی کرومیت، شناخت دقیق تر از چگونگی تشکیل و مکان‌یابی این ماده معدنی می‌تواند به بهبود فرایندهای اکتشاف و استخراج کمک کند. نظر به اینکه کانسنگ کرومیت غالباً به صورت لنزهای عدسی و رگه‌ایی در سنگ‌های میزان هارزبورژیت و دونیت شکل می‌گیرند می‌توان با کمک گرفتن از روش های مغناطیس سنجی، مقاوت ویژه برای اکتشاف این ماده معدنی بهره برد (رجب زاده و آل سعدي، ۱۳۹۴). با توجه به موقعیت زمین شناسی محدوده مطالعه، احتمال حضور کانسنگ کرومیت در محدوده مورد توجه قرار گرفت. در ادامه با عملیات برداشت داده های مغناطیس سنجی تلاش در تعیین موقعیت و نحوه پراکندگی کرومیت در این ناحیه صورت پذیرفت و با استفاده از خواص مغناطیسی سنگ های میزان این ماده معدنی و بررسی میزان اختلاف شدت سیگنال در کرومیت و سنگ دربرگیرنده حضور کرومیت (پرور و همکاران، ۲۰۱۷) در محدوده مورد نظر را مورد بررسی قرار داده شد. منطقه مورد مطالعه در شمال غرب شهر مروست و در بین دو زون ایران مرکزی و سندانج - سیرجان قرار دارد. از لحاظ زمین شناسی منطقه با مجموعه افیولیتی خیر-مروست که بخشی از افیولیت های درونی ایران محسوب می شوند در ارتباط است (قربانی، ۱۳۸۱). مجموعه های افیولیتی ایران در اکثر موارد به شدت خرد شده و به هم ریخته اند. بنابراین محلول های هیدروترمال آن ها را به راحتی تحت تأثیر قرار می دهند و شدیداً دگرسان می کنند که در پاره ای از موارد ارزش اقتصادی نیز به همراه دارند. ضخامت این سنگها حدود ۵ الی ۷ کیلومتر است که در مناطقی مانند شمال مروست، غرب خیر و جنوب شرق مسجد ابوالفضل رخنمون هایی با ضخامت زیاد دارند و معمولاً در سرتاسر مناطق مورد مطالعه توده های کوچک و بزرگ آنها قابل مشاهده است. در این توالی بخش اعظم برونزد ها را هارزبورژیت ها تشکیل می دهند و دونیتها بصورت عدسی هائی در داخل هارزبورژیت ها قرار دارند (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل ۱: نقشه زمین شناسی محدوده اکتشافی جنوب اسمالون برگرفته از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ کمبود سازمان زمین شناسی ایران

مطالعات مغناطیس‌سنجی در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون

شبکه برداشت داده های مغناطیسی در محدوده جنوب اسمالون با شبکه ۲۵×۱۰۰ متر طراحی شد و در مساحتی معادل ۷۸ کیلومتر مربع اجرا گردید. در مجموعه در این محدوده از تعداد ۳۱۸۱۸ ایستگاه داده برداشت شد. شکل ۲ شدت کل میدان مغناطیسی را نشان می دهد. مقدار میانگین شدت میدان IGRF در محدوده مورد مطالعه ۴۷۰۶۶ نانوتسلا و شدت میدان مغناطیسی در منطقه بین ۴۵۷۸۹ تا ۴۸۶۱۱ نانوتسلا در نوسان است. با توجه به شرایط زمین شناسی منطقه تشخیص خطواره‌های مغناطیسی به اکتشاف لنزهای کرومیت در محدوده کمک شایانی می‌کند (بلکلی، ۱۹۹۶). با توجه به این که واحدهای هارزبورژیت و دونیت حاضر در منطقه نسبت به سرپانتیت ها و کرومیت خواص مغناطیسی بیشتری دارد، لذا با توجه به همراهی کرومیت با هارزبورژیت و دونیت ها، شناسایی آنومالی‌های مغناطیسی منتسب به این سنگ ها ما را به اکتشاف توده های کرومیت شکل گرفته راهنمایی می کند.

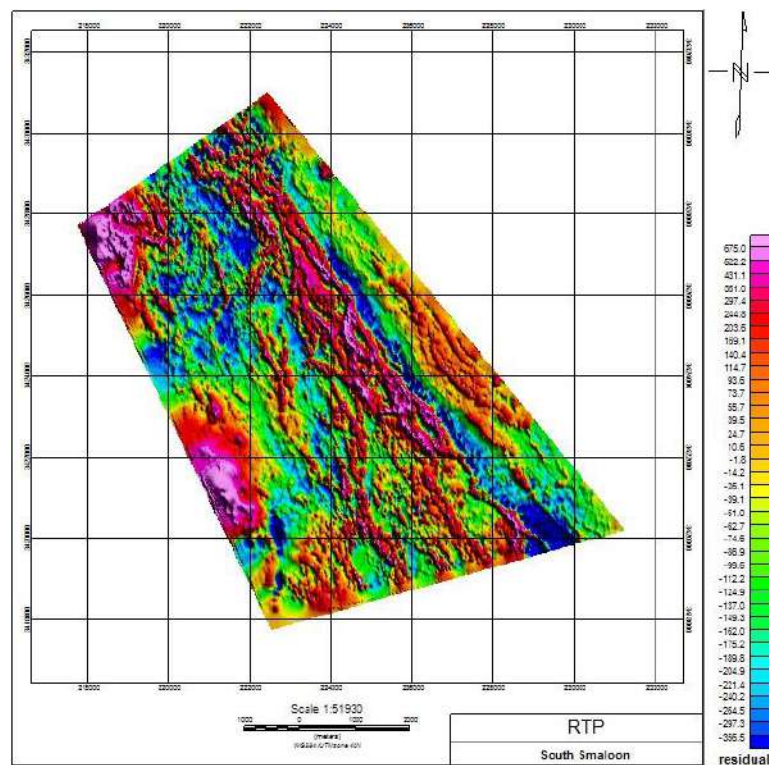


شکل شماره ۲: نقشه شدت میدان مغناطیسی آنومالی

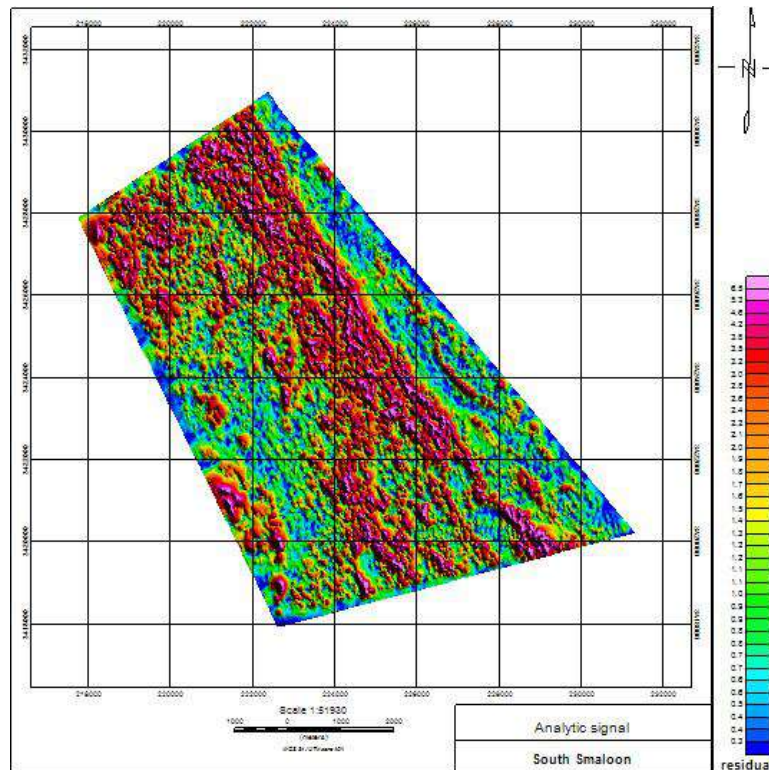
مقدار میانگین شدت میدان IGRF در محدوده مورد مطالعه ۴۷۰۶۶ نانوتسلا و شدت میدان مغناطیسی در منطقه بین ۴۵۷۸۹ تا ۴۸۶۱۱ نانوتسلا در نوسان است. به طور کلی ماهیت بسیاری از آنومالی های مغناطیسی دو قطبی است و منشا ایجاد کننده آنومالی ها بسته به هندسه منشا حدودا در وسط این دو قطب قرار می گیرد. این پدیده یکی از عوامل پیچیدگی تفسیر نقشه های میدان مغناطیسی کل می باشد که صرفا داده های شدت میدان مغناطیسی کل در یک منطقه می باشد و تحلیل و تفسیر این داده ها می تواند گمراه کننده باشد. این موضوع به ویژه زمانی اهمیت پیدا میکند که چندین توده با ابعاد و ماهیت مغناطیسی متفاوت در عمق های متفاوت وجود داشته باشند و یا اینکه منطقه به لحاظ تکتونیکی پیچیده باشد.

از آنجایی که شکل آنومالی های به دست آمده در داده های میدان کل تابعی از هندسه، جهت میدان مغناطیسی عمق و خودپذیری مغناطیسی سنگ های پوسته بوده و در بسیاری موارد می تواند بسیار پیچیده باشد، لذا از فیلتر برگردان به قطب به عنوان یک روش ریاضیاتی برای سادگی در تفسیر نقشه های مغناطیسی استفاده می گردد. این فیلتر آنومالی های حاصل از میدان مغناطیسی کل را با

استفاده از پارامترهای IGRF و زوایای انحراف و میل میدان مغناطیسی به قطب شمال منتقل می کند، یعنی جایی که میدان مغناطیسی قائم بوده و بنابراین هر آنومالی به صورت قائم بر روی توده مولد میدان مغناطیسی قرار میگیرد. به عبارتی ساده تر اعمال این فیلتر باعث می شود که قطب مثبت رشد کرده و درست در بالای منشا ایجاد کننده خود قرار گرفته و قطب منفی تحلیل رفته و حواشی آنومالی مهاجرت کند. جهت بارزسازی و جداسازی بی هنجاری و ساختارهای مغناطیسی در عمق از ابزار فیلترینگ ادامه فراسو مورد استفاده قرار گرفت که با افزایش ارتفاع این فیلتر آنومالی های سطحی از بین می روند و بی هنجاریهای عمیق بارز می گردند. همچنین برای نشان دادن مکان مقادیر بیشینه بر روی لبه یا محل بی هنجاری های مغناطیسی از فیلتر سیگنال تحلیلی استفاده شد. فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی نقشه های ادامه فراسوی ۱۰ و ۲۰ متر اعمال شده است تا هر چه بهتر از اثرگذاری عوامل سطحی بر تفسیر بی هنجاری مغناطیسی جلوگیری شود.



شکل شماره ۳: نقشه برگردان به قطب



شکل شماره ۴: نقشه سیگنال تحلیلی

نتیجه و جمع‌بندی

برداشت‌های مغناطیسی با شبکه ۲۵ در ۱۰۰ متر پوشش مناسبی را از نظر تعیین وضعیت ناهنجاری‌های مغناطیسی در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون فراهم ساخته است. تعداد ایستگاه‌های برداشت در این مطالعه بالغ بر ۳۱ هزار عدد می‌باشد. نتایج مطالعه مغناطیسی - سنجی انجام شده در محدوده اکتشافی جنوب اسمالون، موقعیت کانی‌سازی کرومیت را به خوبی نشان می‌دهد. در قسمت شرق محدوده در راستای گسل اصلی حاضر در منطقه با روند شمالغربی-جنوبغربی بی‌هنجاری امتداد یافته است. این ناهنجاری شامل تعدادی آنومالی مثبت نزمانند می‌باشد. در قسمت غربی

محدوده دو ناهنجاری بزرگ مقیاس مشاهده شد که برای تفسیر دقیقتر بایست شبکه برداشت به سوی غرب گسترش یابد و پس از تهیه نقشه‌های مربوطه تحلیل مربوط به حضور کانی‌سازی ماده معدنی احتمالی آهن صورت پذیرد. بارزسازی موقعیت لنزهای کرومیت به صورت غیر مستقیم به واسطه تفسیر آنومالی‌های مثبت رخ داده در مناطقی که واحد سنگی حاضر در منطقه را عموماً هارزبورژیت و دونیت تشکیل داده است انجام شده است. به واسطه مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته و همچنین دانش به آنکه، کرومیت همراه با سنگ‌های ذکر شده در بالا یافت می‌شود، در نهایت حضور لنزهای کرومیت پی برده شد.

تقدیر و تشکر

در نهایت از همکاری مدیران و کارشناسان شرکت آپادانا کاوش ایرانیان در برداشت داده‌های مغناطیسی سنجی کمال امتنان و تشکر را دارم.

مراجع

- سلطان محمدی، اعظم، خلعتبری، مرتضی، رهگشای، محمد، ۱۳۸۹، ژئوشیمی و پتروژنز توالی پوسته ای مجموعه افیولیتی خبر - مروست شمال باختری شهر یابک، مجله دانشگاه تهران، جلد سی و ششم
- رجب زاده، محمدعلی؛ آل سعدی، فاطمه؛ مطالعه کانه زایی سولفیدی در سنگ های الترامافیک مجموعه افیولیتی فاریاب، جنوب کرمان، مجله زمین شناسی اقتصادی، تهران، ۱۳۹۴.
- قربانی، م.، ۱۳۸۱ **دبیاچه ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران**، انتشارات آری زمین
- Blakely, R. J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press.
- Frasheri, A., Lubonja, L. and Alikaj, P., 1995. On the application of geophysics in the exploration for copper and chrome ores in Albania. *Geophysical prospecting*, 43(6): 743–757. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00278.x>
- Mosier DL, Singer DA, Moring BC, Galloway JP (2012) Podiform chromite deposits—database and grade and tonnage models. US Geological Survey Scientific Investigations, Report
- KiyavashParvar, AlexanderBraun, Daniellayton-Matthews, and MichaelBurns. 2018. UAV magnetometry for chromite exploration in the Samail ophiolite sequence, Oman. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 6(1): 57-69. <https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0015>
- Roberts S (1988) Ophiolitic chromitite formation: a marginal basin phenomenon? *Econ Geol.* <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.5.1034>

تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برای اکتشاف قیر طبیعی در محدوده اکتشافی گلان استان ایلام

مجتبی بابایی^۱، حمید آقاجانی^۲

^۱ استادیار، مجتبی بابایی، گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران؛ m_babaei@iauh.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، گروه مهندسی اکتشاف و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران؛ haghajani@shahroodut.ac.ir

چکیده

قیر طبیعی (بیتومین) یکی از منابع معدنی در استان ایلام و کرمانشاه در غرب کشور است. برای اکتشاف وضعیت زیرسطحی این ماده معدنی در منطقه گلان از توابع شهرستان مهران استان ایلام از روش مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی استفاده شده است. برای تصویربرداری مقاومتی دوبعدی، داده‌های ژئوالکتریکی با استفاده از آرایش الکترودی دو قطبی-دوقطبی روی پنج پروفیل در راستای شمال شرقی- جنوب غربی عمود بر روند کلی امتداد ماده معدنی و واحدهای سنگی برداشت شد. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهد که لایه‌بندی سازندها در منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر عوامل تکتونیکی تغییراتی زیادی را در امتداد و شیب لایه‌ها در نقاط مختلف به وجود آورده است و جنس واحدهای سنگی عمدتاً از سنگ گچ و سیلت استون بوده است و محدوده‌هایی هم از نوع مارن و رس می‌باشند که در مقاطع مقاومت ویژه دارای مقاومت کمتری هستند. محدوده‌های دارای تغییرات شدید مقاومتی تحت نفوذ بیتومین قرار گرفته که عمدتاً به صورت مجموعه‌ای از رگه‌های نازک لایه ناخالص می‌باشد. پراکندگی زون‌های بیتومین‌دار و عدم خلوص آن که عمدتاً به صورت رگه‌های کم ضخامت و به صورت ناخالص در گچ و مارن است، نشان از نبود حجم قابل توجه و متمرکز این ماده معدنی در منطقه مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: قیر طبیعی، ژئوالکتریک، آرایه دو قطبی-دوقطبی، مقاومت ویژه، منطقه گلان، ایلام

Mojtaba Babaei¹, Hamid Aghajani²

¹ Assistant Professor, Mojtaba Babaei, Department of Geophysics, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

² Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Department of Mineral Exploration and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* Corresponding author: Mojtaba Babaei

ABSTRACT

Natural bitumen is one of the mineral resources in the province of Ilam and Kermanshah in the west of the country. Two-dimensional electrical resistivity method has been used to explore the subsurface condition of this mineral in Golan area of Mehran, Ilam province. For 2D resistivity imaging, geoelectrical data were collected using a double-dipole electrode array on five profiles in the northeast-southwest direction perpendicular to the general trend of mineral matter and rock units. Geological studies show that the layering of the formations in the studied area under the influence of tectonic factors has caused many changes in the length and slope of the layers in different places, and the rock units are mainly made of gypsum and siltstone. There are also ranges of marl and clay types, which have lower resistance in terms of special resistance. Areas with strong changes in resistance are

under the influence of bitumen, which is mainly in the form of a set of thin veins of the impurity layer. The dispersion of bituminous zones and its lack of purity, which is mainly in the form of thin streaks and impurity in chalk and marl, shows the lack of significant and concentrated volume of this mineral in the studied area

Keywords: Natural bitumen, Geoelectric, Dipole-dipole array, electrical resistivity, Golan region, Ilam.

مقدمه

به کارگیری قیر طبیعی و چشمه نفتی، پیشینه‌ای کهن دارد. از دیرباز در جنوب باختر ایران، قیر طبیعی برای مصرف سوخت و درمان بیماری‌ها به کار رفته است. این ماده از مشتقات نفت خام بوده که در اثر راه‌یابی به سطح زمین (یا نزدیکی سطح زمین) و جای‌گیری در یک فضای مناسب و خشک شدن به وجود می‌آید. در واقع قیر طبیعی یک ماده هیدروکربنی سنگین است که به گروه‌های مختلفی مانند قیر پیرو آسفالتی، پیرو قیر غیرآسفالتی، آسفالتیت‌ها و غیره طبقه‌بندی شده است. قیر طبیعی یکی از باکیفیت‌ترین قیرهایی است که از نظر درجه خلوص و طول عمر از نظر مایع، نیمه جامد و جامد مشاهده می‌شود. ذخایر قیر طبیعی در کمربندهای فعال و رورانده فراوان بوده و برونزد آنها در حوضه‌های غیرفعال از نظر زمین ساختی نادر است. برونزدهای قیر طبیعی بیشتر در محل ناپیوستگی و دگرشیب‌ها ممکن است ظاهر می‌شوند. هنگامی که مواد هیدروکربنی از محل انباشت خود در مخزن آزاد شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند، در سطح زمین و یا نزدیکی آن، دچار تغییراتی می‌شوند که سرانجام ترکیب شیمیایی و فیزیکی آنها را تغییر می‌دهد. این ماده هیدروکربنی در نزدیکی سطح زمین به صورت چشمه‌های آسفالتی و یا به اشکال دیگر تحت اثر فشارهای هیدرواستاتیکی مخازن نفتی تجمع یافته و پس از انجام فرآیند پلیمریزاسیون، معادن قیر را تشکیل می‌دهد. این ماده در ارتباط تنگاتنگی با مخازن نفتی موجود در منطقه است، یعنی در هنگام جابجایی یا مهاجرت نفت از مکانی به مکان دیگر قسمتی از آن جدا شده و به صورت رگه‌ها، عدسی‌ها و غیره باقی می‌ماند.

در دو دهه گذشته، تلاش‌های فراوانی برای اکتشاف قیر صورت گرفته است [۱، ۲]. تعداد انگشت شماری از کشورها دارای معادن قیر طبیعی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به کانادا، عراق، استرالیا، روسیه و ونزوئلا اشاره کرد. در ایران، معادن قیر معدنی استان‌های کرمانشاه، (قصر شیرین نواحی نفت شهر، گیلان غرب)، ایلام (سومار، نواحی نفت شهر، مهران، دهلران)، خوزستان (نواحی بهبهان و رامهرمز)، همراه با سازندهای گچساران، تله زنگ و آسماری دیده می‌شود. در حال حاضر با ارزش‌ترین ماده معدنی استان ایلام بیتومین و خلوص این ماده معدنی بیش از ۷۰ درصد است. بیتومین‌های استان ایلام از نوع گیلسونیت است. به دلیل اشتغال‌زایی این ماده معدنی در استان ایلام، توجه به اکتشافات تفصیلی و انجام عملیات تحقیقاتی روی این ماده معدنی در مناطق مستعد با روند شمال غرب - جنوب شرق استان امری ضروری است.

امروزه بهترین روش برای مطالعات زیرزمینی و اکتشافات معدنی، بدون آسیب‌های زیست محیطی، مطالعات ژئوفیزیکی است. یکی از روش‌های کارآمد ژئوفیزیکی برای اکتشاف این ماده معدنی، توموگرافی الکتریکی یا تصویربرداری الکتریکی در دو بعد با روش برداشت داده‌های ژئوالکتریکی است [۳]. توموگرافی یا توموگرافی مقاومت ظاهری الکتریکی، تکنیکی ژئوفیزیکی است که سازه‌های زیرزمینی را در دو یا سه بعدی به نقشه در می‌آورد. استفاده از مقاومت الکتریکی برای تصویربرداری از توزیع قیر در سطح زیرین به تباین ویژگی‌های الکتریکی رسوبات حاوی قیر و محیط اطراف آن وابسته است [۴] به دلیل رسانایی کم قیر، محیط رسوبی میزبان مقاومت الکتریکی بالاتری دارد. از این رو، اندازه‌گیری‌های مقاومت الکتریکی یک رویکرد مؤثر برای مطالعه توزیع تراوش قیر در محیط ارائه می‌کند. اوموسانیا و همکاران، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی مناطق تراوش قیر را با استفاده از آرایش الکتروودی ونر و شلومبرگر انجام دادند و نشان دادند که قیر دارای مقادیر مقاومت الکتریکی نسبتاً بالایی در مقایسه با واحدهای سنگ‌شناسی اطراف است [۵]. مشهدی و همکاران، از روش الکتریکی و با آرایش دو-دوقطبی برای آشکارسازی بتومین در گیلان غرب استفاده کردند [۶]. تکنیک‌های چاه‌نگاری و تکنیک‌های شکست و بازتابی لرزه‌ای کم عمق برای تعیین اثر چینه‌شناسی بر تشکیل تراوش قیر به کار رفته است [۷].

استان ایلام بخشی از پهنه ساختاری - رسوبی زاگرس است که به لحاظ ویژگی‌های رسوبی حاکم بر آن، پدیده‌های ماگماتیسم و متامورفیسم و فرایندهای ناشی از آن‌ها که عموماً از عوامل کانه‌زا فلزی هستند، وجود ندارند. از همین رو، ذخایر معدنی فلزی استان بسیار ناچیز است. ذخایر غیرفلزی استان هم چندان غنی نیست و به انباشته‌هایی از سنگ گچ، سنگ، آهک، دولومیت، بیتومین و سنگ ساختمانی محدود است. سازند کنگلومرای بختیاری یکی از گسترده‌ترین واحدهای چینه‌شناسی در استان ایلام است که گستره‌های وسیعی، به ویژه بخش محوری ناودیس‌ها را شامل می‌شود. بعد از این سازند، واحدهای سنگی کواترنری است که از نوع نهشته‌های آبرفتی جوان بوده و با گستردگی زیاد، پوشش رویی دشت‌های استان (مهران، دهلران، دشت عباس) را تشکیل می‌دهند. با ارزش‌ترین ماده معدنی استان در حال حاضر بیتومین و خلوص این ماده معدنی بیش از ۷۰ درصد است. بیتومین‌های استان ایلام از نوع گیلسونیت است. به دلیل اشتغال‌زایی این ماده معدنی در استان ایلام، توجه به اکتشافات تفصیلی این ماده معدنی بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

روش تحقیق

در ژئوالکترونیک برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی آرایش‌های الکترونی متعددی معرفی شده است که انتخاب هر یک این آرایش‌ها برای مطالعه بی‌هنجاری به ویژگی‌های هندسی و فیزیکی محیط میزبان و بی‌هنجاری مورد مطالعه بستگی دارد. در مطالعات ژئوالکترونیک، آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی، و نر و شلومبرگر بیشترین استفاده را دارند. داده‌های جمع‌آوری‌شده آرایش دوقطبی-دوقطبی به تغییرات افقی نسبت به تغییرات قائم حساسیت بیشتری دارند و نسبت به آرایش‌های نر و شلومبرگر عمق کاوش کمتری دارند [۸]. در این مقاله با در نظر گرفتن اهداف مطالعه و شرایط زمین‌شناسی منطقه از روش پروفیل‌زنی دوقطبی-دوقطبی که از آرایش‌های مهم و کاربردی ژئوالکترونیک است استفاده شده است.

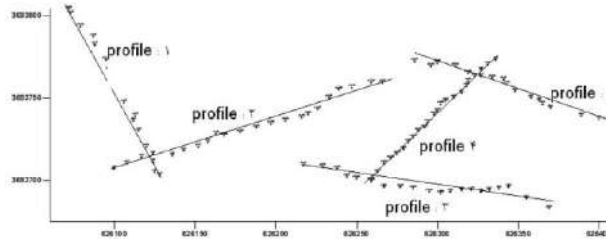
یافته‌ها

محدوده مورد مطالعه در استان ایلام و در جنوب غربی شهرستان مهران در روستای گلان در فاصله ۴۵ کیلومتری از مرکز استان قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}, 26', 00''$ تا $33^{\circ}, 23', 00''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ}, 20', 00''$ تا $46^{\circ}, 14', 00''$ شرقی واقع است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



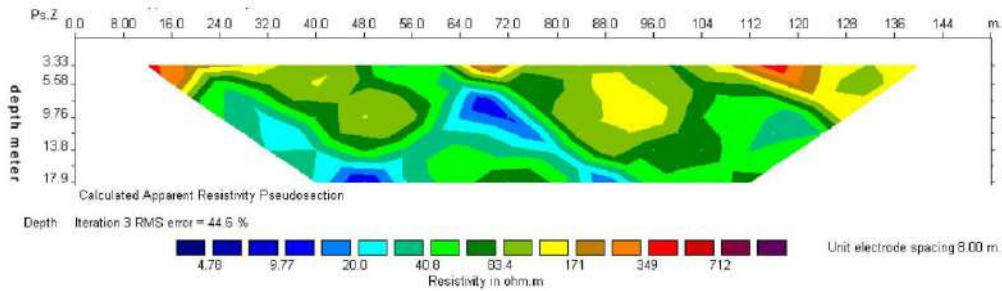
شکل ۱۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه

با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، عملیات برداشت داده‌ها با آرایش دوقطبی-دوقطبی در ۵ پروفیل انجام شد. فواصل نقاط از ۵ تا ۸ متر متغیر است. مختصات UTM نقاط و همچنین موقعیت پروفیل‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است:

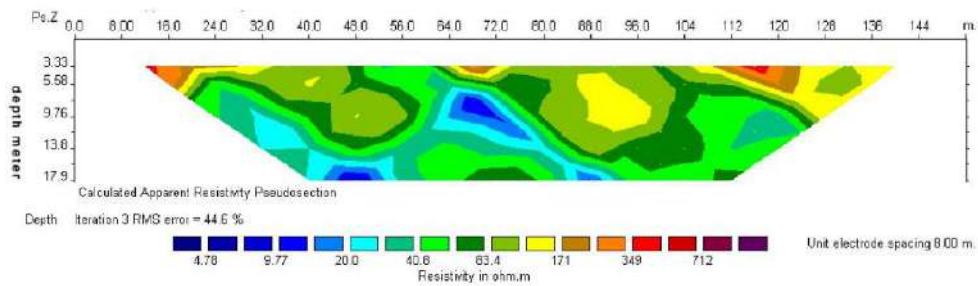


شکل ۱۳: موقعیت پروفیل‌ها و نقاط برداشت

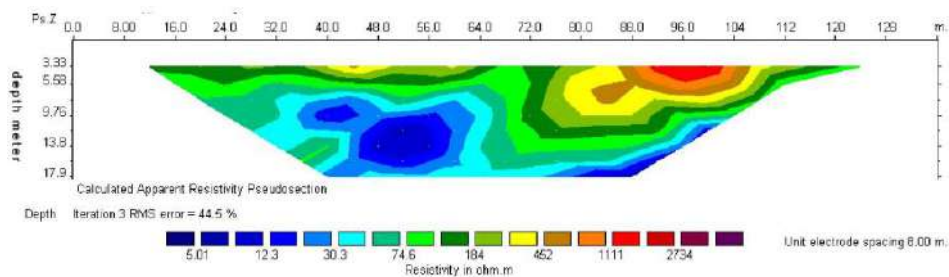
پس از برداشت و تصحیحات میدانی بر اساس مشاهدات، داده‌ها پردازش شدند. به این منظور از استفاده از نرم‌افزارهای *Res2Dinv*، *winsev*، *Res3d* و *ipi* با روش‌های وارون و پیشرو، داده‌ها پردازش، نتایج با هم مقایسه و مجدداً پردازش و تصحیح شدند. برای نمونه، مقاطع شبه مقاومت ویژه برای پروفیل‌های ۱، ۳ و ۵ در شکل (۳) آورده شده‌اند:



الف



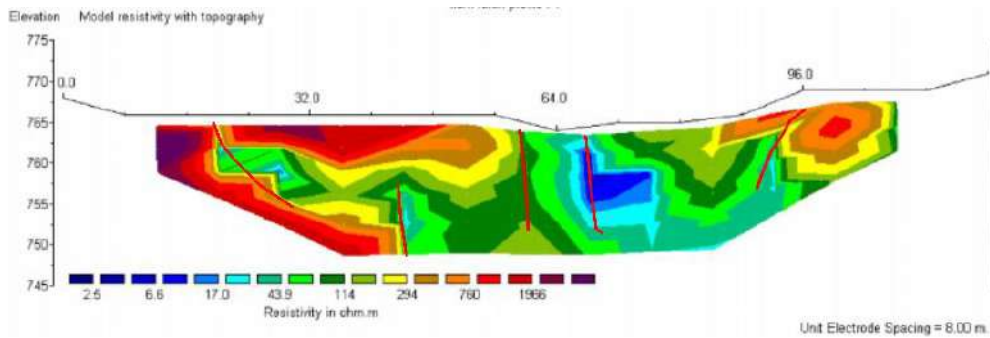
ب



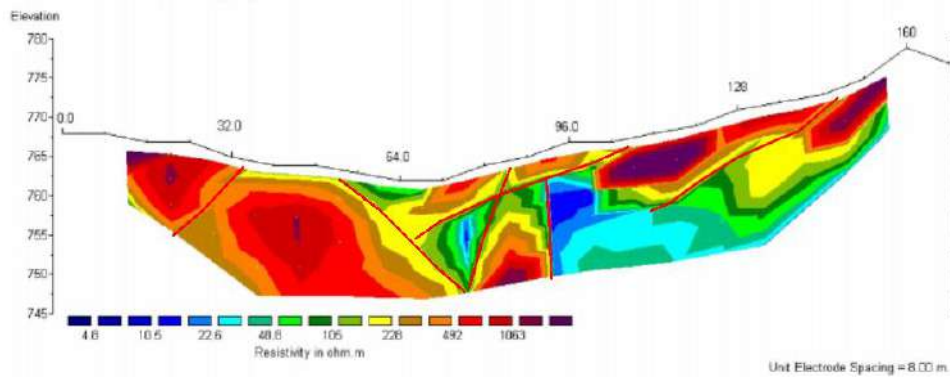
پ

شکل ۳. مقاطع شبه مقاومت ظاهری برای، الف- پروفیل ۱، ب- پروفیل ۳ و پ- پروفیل ۵

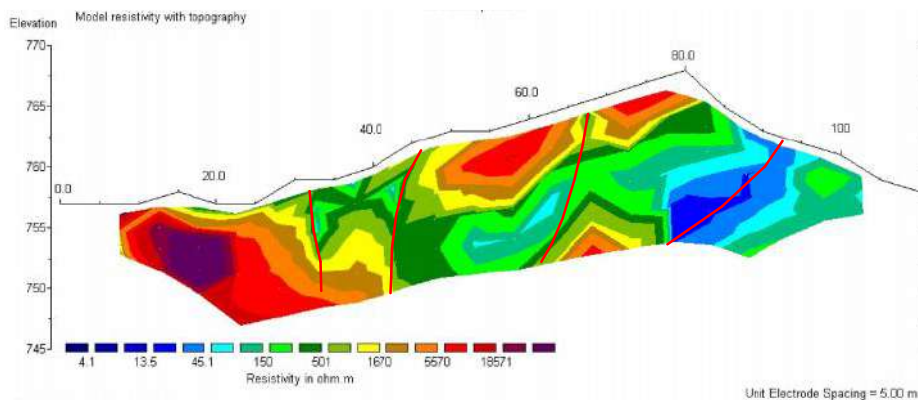
همان طور که در شبه مقاطع دیده می‌شود، پروفیل‌ها یک توالی از لایه‌ها با مقاومت‌های ویژه کم و زیاد را به نمایش می‌گذارند که حاکی از تغییر جنس لایه‌ها در مقاطع مختلف می‌باشد. مقاطع مقاومت‌های ویژه اطلاعات خوبی در مورد نحوه تغییر مقاومت ویژه در اختیار قرار می‌دهد و به خوبی می‌توان تغییرات مقاومت ویژه لایه‌ها در محل پروفیل مورد نظر را مشاهده نمود. ۵ مقطع مقاومت ویژه مربوط به پروفیل‌های برداشت شده با روش دو-دوقطبی تهیه گردید که ۴ مورد از آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها با وارون-سازی داده‌ها، مقاومت ویژه بخش‌های مختلف در هر مقطع نشان داده شده‌اند. در هر یک از مقاطع گسل‌هایی دیده می‌شود که با توجه به شواهد زمین‌شناسی، وجود بیتومین در محل گسل‌ها محتمل است.

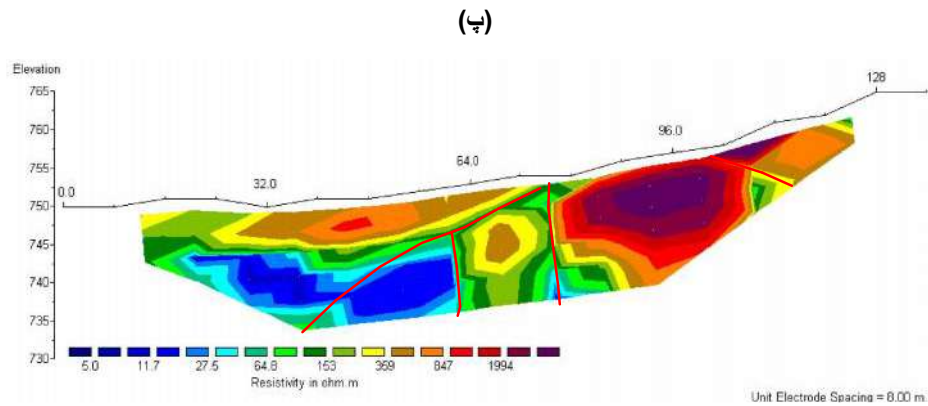


(الف)



(ب)





(ت)

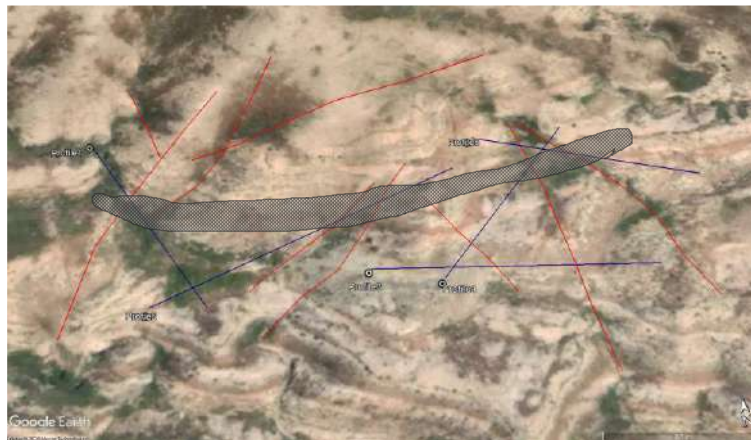
شکل ۴: مقاطع مقاومت ویژه برای، الف- پروفیل ۱، ب- پروفیل ۲، پ- پروفیل ۴ و ت- پروفیل ۵. محور قائم، ارتفاع نقاط از نقطه مرجع انتخابی بر حسب متر را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) محدوده های مقاوم که با رنگ قرمز دیده می‌شوند عمدتاً از جنس ژئیس و سیلت استون و محدوده های کم مقاومت تر عمدتاً از نوع مارن و رس می‌باشند. همچنین محدوده‌هایی که به صورت تغییرات شدید مقاومتی در این مقاطع دیده می‌شوند احتمالاً مناطقی است که تحت نفوذ بیتومین قرار گرفته و عمدتاً مجموعه‌ای از رگه‌های نازک لایه ناخالص می‌باشد.

تفسیر نتایج

محدوده مورد مطالعه کلاً روی تشکیلات کواترنر و میوسن و عمدتاً گچساران واقع شده است که از نظر لیتولوژی از نوع رسوبات تبخیری و تناوبی از مارن و آنهیدریت و رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای می‌باشد. لایه‌بندی تشکیلات عمدتاً شیب‌دار بوده و تحت تاثیر عوامل تکتونیکی دارای تغییراتی در امتداد و شیب در نقاط مختلف می‌باشد ولی روند عمومی امتداد لایه ها در این حوضه شمال غربی - جنوب شرقی تا شرقی غربی می‌باشد.

پس از پردازش داده‌ها و تبدیل پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری به مقاومت ویژه واقعی و تلفیق با اطلاعات اولیه و داده‌های زمین‌شناسی منطقه تفسیر اطلاعات انجام شد و در نتیجه آن، مقاطع زمین‌شناسی به دست آمد. در شکل (۵) پنج پروفیل برداشت داده بر روی نقشه ماهواره‌ای انطباق و با خطوط آبی نشان داده شده‌اند. با استفاده از نقشه‌های مقاومت ویژه شکل‌های (۴) محل گسل‌ها معلوم و با خطوط قرمز نمایش داده شده‌اند. در منطقه سیاه رنگ نشان داده شده در بخش میانی نقشه شکل (۵) که محل تقاطع گسل‌هاست وجود بیتومین محتمل است.



شکل ۵: نقشه ماهواره‌ای از محل برداشت داده‌ها و جانشانی پروفیل‌های اجرا شده (خطوط آبی) و گسل‌ها (خطوط قرمز)

با توجه نتایج بدست آمده چنین استنباط می‌شود که رگه‌های نفوذی بیتومین بصورت پراکنده در محدوده‌های سست شده و در محل گسل‌ها بالا آمده‌اند. به نظر می‌رسد ضخامت سازند گچساران در این محدوده کاهش یافته و یا تحت تاثیر عوامل تکتونیکی دچار گسست-های ضعیفی شده و همین امر سبب شده مواد آلی واقع در تشکیلات آسماری و شهپازان که تحت فشار بوده از این مناطق سست بالا بیاید ولی نوع زون‌های بیتومین دار و عدم خلوص آن که عمدتاً بصورت رگه‌های کم ضخامت و بصورت ناخالص در گچ و مارن است نشان از عدم تکمیل این فرآیند دارد.

نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی رگه‌های ضخیم و خالص قابل توجهی در این محدوده ردیابی نشده است. با توجه به محل گسل‌های معلوم شده از نقشه‌های مقاومت ویژه، پراکندگی این رگه‌های نازک و عدم خلوص آنها نشان از عدم وجود میزان قابل توجه و متمرکز این ماده معدنی دارد.

مراجع

1. Odunaike, R., et al., *Geophysical mapping of the occurrence of shallow oil sands in Idiopopo at Okitipupa area, South-western Nigeria*. African Journal of Environmental Science and Technology, 2010. **4**(1).
2. Rahman Talukder, A., et al., *Natural hydrocarbon seepage on the continental slope to the east of Mississippi Canyon in the northern Gulf of Mexico*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013. **14**(6): p. 1940-1956.
3. Binley, A. and L. Slater, *Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface earth*. 2020: Cambridge University Press.
4. Blondel, A., et al., *Temporal evolution of the geoelectrical response on a hydrocarbon contaminated site*. Journal of Applied Geophysics, 2014. **103**: p. 161-171.
5. Akinmosin, A., et al., *Characterization of a bitumen seepage in Eastern Dahomey Basin, SW, Nigeria*. Adv Appl Sci Res, 2012. **3**(4): p. 2078-2089.
6. Mashhadi, S.R., K. Mostafaei, and H. Ramazi, *Improving bitumen detection in resistivity surveys by using induced polarisation data*. Exploration Geophysics, 2018. **49**(5): p. 762-774.
7. Enu, E., *Textural characteristics of the Nigerian tar sands*. Sedimentary geology, 1985. **44**(1-2): p. 65-81.
8. Loke, M.H., *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. 2004.

اکتشاف آب زیرزمینی در دشت زنگوان با مطالعه داده‌های مقاومت‌ویژه

ابوالفضل جمشیدی^۱، ساسان فتاحی^۲

^۱ کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه رازی؛ abolfazljamshidi73@yahoo.com

^۲ دانشجوی دکترا ژئوفیزیک، دانشگاه تهران؛ Sasanfatahi@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: ابوالفضل جمشیدی

چکیده فارسی

یکی از بهترین روش‌های شناسایی ذخایر آب زیرزمینی بدون ایجاد تأثیرات مخرب زیست محیطی، به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی است. از میان روش‌های ژئوفیزیکی، روش مقاومت ویژه الکتریکی با صرف هزینه کم و دقت قابل قبول می‌تواند نقش مهمی در اکتشافات آب‌های زیرزمینی داشته باشد. روش مقاومت ویژه با آرایش شلومبرژه مرسوم‌ترین و کاربردی‌ترین روش ژئوفیزیکی در مطالعات اکتشاف آب‌های زیرزمینی است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، دشت زنگوان از توابع شهرستان سروان واقع در استان ایلام می‌باشد. هدف از انجام مطالعه ژئوالکتریکی در این دشت بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی در منطقه بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری با استفاده از آرایش شلومبرژه و تعیین بهترین محل برای حفر چاه جهت بهره برداری آب زیرزمینی بوده است.

در این دشت ۷۳ سونداژ الکتریکی در امتداد ۱۰ پروفیل با آرایه شلومبرژه برداشت شده است، که با استفاده از داده‌های مقاومت-ویژه حاصل از اندازه‌گیری‌های صحرائی نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه ظاهری توسط نرم‌افزار ژئوسافت رسم شدند و همچنین به کمک روش‌های معکوس‌سازی یک‌بعدی، دوبعدی و شبه سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D مقاطع ژئوالکتریک برای هر پروفیل بدست آمد. در نهایت با تفسیر نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری، مقاطع مقاومت ویژه ظاهری، مقاطع ژئوالکتریک و با در نظر گرفتن زمین شناسی منطقه مورد مطالعه مناسب‌ترین محل برای حفر چاه پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، مقاومت ویژه ظاهری، آرایش شلومبرژه، دشت زنگوان.

Groundwater exploration in Zangovan Plain by studying resistivity data

Abolfazl Jamshidi¹, Sasan Fatahi²

¹MS of Geophysics, Razi University; abolfazljamshidi73@yahoo.com

²PhD Geophysics Student, Tehran University; Sasanfatahi@ut.ac.ir

* Corresponding author: Abolfazl Jamshidi

ABSTRACT

Geophysical methods are the best techniques to identify and explore groundwater reserves without destructive environmental impacts. Among these methods, electrical resistivity with low cost and acceptable accuracy can play important roles in groundwater exploration. The electrical resistivity method with the Schlumberger arrangement is known as the most common and the most practical geophysical method in groundwater exploration studies. Accordingly, a site investigation was performed in Zangovan plain of Sirvan city located in the Ilam province. The purpose of the geoelectrical study in this plain was to investigate the groundwater status based on the values of apparent electrical resistivity measured using the Schlumberger arrangement, as well as to determine the best location for drilling the wells toward the groundwater exploitations.

In this plain, 73 electrical soundings were carried out along ten profiles with Schlumberger arrangement, which were drawn based on the apparent resistivity data obtained from site

investigations by GeoSoft software. Besides, the geoelectric sections for each of the profiles were obtained by 1-dimensional, 2-dimensional and 3-dimensional pseudo inversion methods using ZondRes2D software. Finally, the most suitable places for drilling wells were suggested based on the interpretation of the apparent resistivity maps, apparent resistivity sections, geoelectric sections, as well as considering the geological location of the study area.

Keywords: Groundwaters, Apparent resistivity, Schlumberger arrangement, Zangovan plain.

مقدمه

دسترسی به منابع زیرزمینی اعم از نفت، گاز، آب، فلزات و غیر فلزات از دیرباز، مورد توجه انسان بوده و پی جویی آن‌ها، نیازمند روش‌های علمی و تجربی است. امروزه تقاضای جامعه نسبت به مصرف آب تازه و قابل شرب روز به روز افزایش می‌یابد، به همان ترتیب اکتشاف آب‌های زیرزمینی نیز، برای افراد و صنایع اهمیت پیدا می‌کند. منابع آب زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی که امکان آلودگی آن‌ها رو به رشد است پاک‌تر هستند. با توجه به قرار گرفتن عمده بخش‌های ایران در نواحی خشک و بیابانی، مقدار بارندگی و حجم آب‌های ایران کم است و ریزش جوی نیز به طور یکنواخت در تمام مناطق آن صورت نمی‌گیرد. از این‌رو با توجه به محدودیت منابع آب و توزیع فصلی نامناسب بارندگی بایستی منابع آب‌های موجود سطحی و زیرزمینی را به خوبی شناسایی و مطالعه کرده و با برنامه‌ریزی دقیق، بهره‌برداری صحیح‌تری از آن‌ها صورت گیرد.

روش‌های ژئوفیزیکی، یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین روش‌هایی هستند که به طور قابل توجهی گسترش یافته‌اند. تکنیک‌های ژئوفیزیکی کلید یافتن آب‌های زیرزمینی‌اند. ترکیب‌های مختلف کانی‌ها یا ذرات خاک، انواع متفاوتی از سنگ و خاک را به وجود می‌آورد که دارای مقاومت الکتریکی مخصوص به خود هستند. روش مقاومت ویژه الکتریکی یکی از مهمترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای اندازه‌گیری مقاومت یاد شده به کار می‌رود [۱].

ایده اکتشاف مواد معدنی با کمک اندازه‌گیری‌های الکتریکی در حدود سال‌های ۱۸۰۰ ارائه شد، اما کاربرد عملی و نتیجه بخش این روش حدود یک قرن بعد میسر گردید. روش‌های الکتریکی که با تزریق جریان الکتریکی به زمین انجام می‌پذیرند، برای اکتشاف مواد معدنی و همچنین آب‌های زیرزمینی کاربرد گسترده‌ای دارند [۲]. یکی از مشهورترین آرایش‌های مقاومت‌ویژه، آرایش شلومبرژه است. استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی توسط گنراد شلومبرژه در اوایل قرن بیستم و با بسط و استفاده از معادلات ماکسول به جهان معرفی شد [۳]. داوودآبادی‌فراهانی و آقاجانی [۴] به اکتشاف آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند و به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل آب‌های زیرزمینی، افزون بر اینکه سرعت کار را افزایش می‌دهد هزینه‌های اکتشاف را نیز کاهش می‌دهد. اومه و همکارانش [۵] اکتشاف آب را در جنوب شرقی نیجریه با استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی به انجام رساندند. حبیب الله نوروزی و همکارانش [۶] با استفاده از روش مقاومت ویژه اکتشاف آب را در منطقه قوشه دامغان انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که لایه‌های آبدار با مقاومت ویژه بالاتر از ۴۰ اهم‌متر، از آب زیرزمینی با کیفیت مناسب برخوردارند و هرچه این مقاومت ویژه بیشتر شود به کیفیت آن افزوده می‌شود. همچنین احمدی و همکارانش [۷] آب‌های زیرزمینی را در مناطق کارستی جنوب کوه‌دشت در استان لرستان با به کارگیری روش‌های سنجش از دور و مقاومت ویژه تشخیص دادند. نتایج این پژوهش استفاده تلفیقی از سنجش از دور و GIS را در بهبود تفسیر داده‌های ژئوالکتریک و هیدروژئولوژی در تعیین پتانسیل آب زیرزمینی کارست را به خوبی مشخص ساخته است.

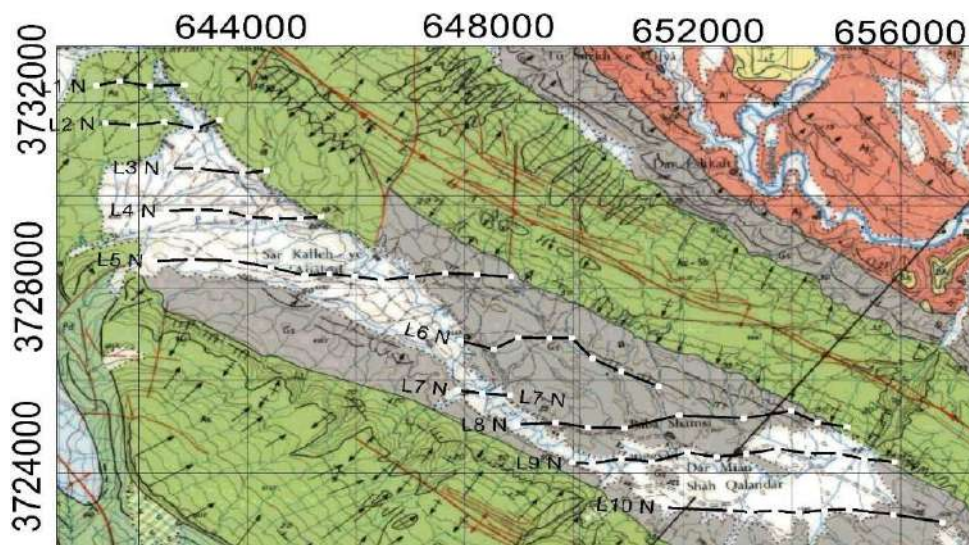
به‌طور کلی طرز کار روش‌های مقاومت‌ویژه این است که جریان مستقیم را به وسیله یک جفت الکترود (الکترودهای جریان) به داخل زمین تزریق کرده و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود دیگر (الکترودهای پتانسیل) را در نقاط گوناگون اندازه‌گیری می‌کنند. این اندازه-

گیری‌ها به صورت توزیع مقاومت‌ویژه در زیر سطح تبدیل می‌شوند. در واقع اساس این روش بر این اصل استوار است که پتانسیل الکتریکی اندازه‌گیری شده در اطراف الکترودهای جریان تحت تاثیر مقاومت الکتریکی مواد زیر سطحی قرار می‌گیرد [۸].

در این پژوهش که هدف اصلی آن بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت زنگوان است، از داده‌هایی که قبلاً توسط سازمان آب منطقه‌ای ایلام در این دشت برداشت و ثبت شده‌اند استفاده شده‌است. پس از ورود داده‌ها و مختصات نقاط به نرم افزار، نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری و مقاطع هم مقاومت ویژه ظاهری رسم شده‌اند همچنین سونداژها توسط نرم‌افزار پردازش و بهترین مدل چند لایه برای منحنی صحرایی ارائه گردیده و سپس توسط نرم افزار، مقاطع ژئوالکتریک رسم شده‌اند. در این حالت با استفاده از نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری، مقاطع ژئوالکتریک و کمک گرفتن از اطلاعات زمین‌شناسی منطقه می‌توان به مناطق مستعد برای اکتشاف آب زیر زمینی پی برد. در نهایت محل احتمالی حفر چاه و عمق حفاری پیشنهاد شده است. کاربرد نتایج این پژوهش می‌تواند کاهش هزینه‌ها برای سازمان‌ها یا کشاورزانی باشد که نیاز به حفر چاه دارند. در این حالت، قبل از هزینه کردن و دست به حفاری زدن، می‌توان مناطق آب دار و فاقد آب را تفکیک کرده و آگاهانه اکتشاف را انجام داد.

روش‌ها تحقیق

محدوده مورد مطالعه دشت زنگوان در شهرستان سیروان واقع در استان ایلام است و با توجه به شیب توپوگرافی از شمال غرب تا جنوب شرق امتداد یافته است. بخش اعظم دشت بین دو کوه که به موازات هم کشیده شده‌اند، قرار گرفته است. عرض دشت در تمام طول آن تقریباً ثابت است، از میان دشت و در راستای طول آن یک رودخانه دائمی جریان دارد. شکل (۱) نقشه زمین شناسی دشت زنگوان را نشان می‌دهد. مطابق نقشه که موقعیت پروفیل‌های برداشت شده بر روی آن نیز مشخص است، بخش عمده عملیات صحرایی بر روی سازند گچساران و آبرفت برداشت شده است. ناحیه شمال دشت مشرف به سازند آسماری - شهبازان و ناحیه جنوب دشت به سازند آسماری می‌رسد.



شکل (۱۴): محدوده پروفیل‌ها و محل سونداژها در عملیات صحرایی دشت زنگوان. برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پالگانه

به منظور بررسی منابع آب زیرزمینی در دشت زنگوان، در میان روش‌های ژئوفیزیکی، از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی استفاده شده است. در این روش اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه با آرایش شلومبرژه صورت گرفته است، که به منظور تعیین گستره تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی لایه‌های آبرفتی و سنگ کف در محل دشت زنگوان و همچنین تفکیک لایه‌های زیرزمینی براساس مقاومت‌ویژه الکتریکی آن‌ها، تعداد ۷۳ سونداژ الکتریکی با طول فرستنده جریان (AB) تا حداکثر ۲۰۰۰ متر بر روی ۱۰ خط برداشت به نام‌های L1 تا L10 برداشت شده است.

داده‌های برداشت شده در واقع مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری هستند. با رسم نقشه‌های حاصل از این داده‌ها به صورت کیفی اطلاعات مفیدی در اختیار ما قرار می‌گیرد. همچنین به منظور تهیه تصویری از توزیع مقاومت‌ویژه واقعی زیرسطحی، باید به وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه پرداخت، که با استفاده از نرم‌افزارهای وارون‌سازی می‌توان مقاطع مقاومت‌ویژه را بدست آورد. سپس به کمک نقشه‌های هم-مقاومت‌ویژه ظاهری و همچنین مقاطع مقاومت‌ویژه می‌توان به تفسیر درستی از ویژگی‌ها و لایه‌های زیرزمینی برسیم.

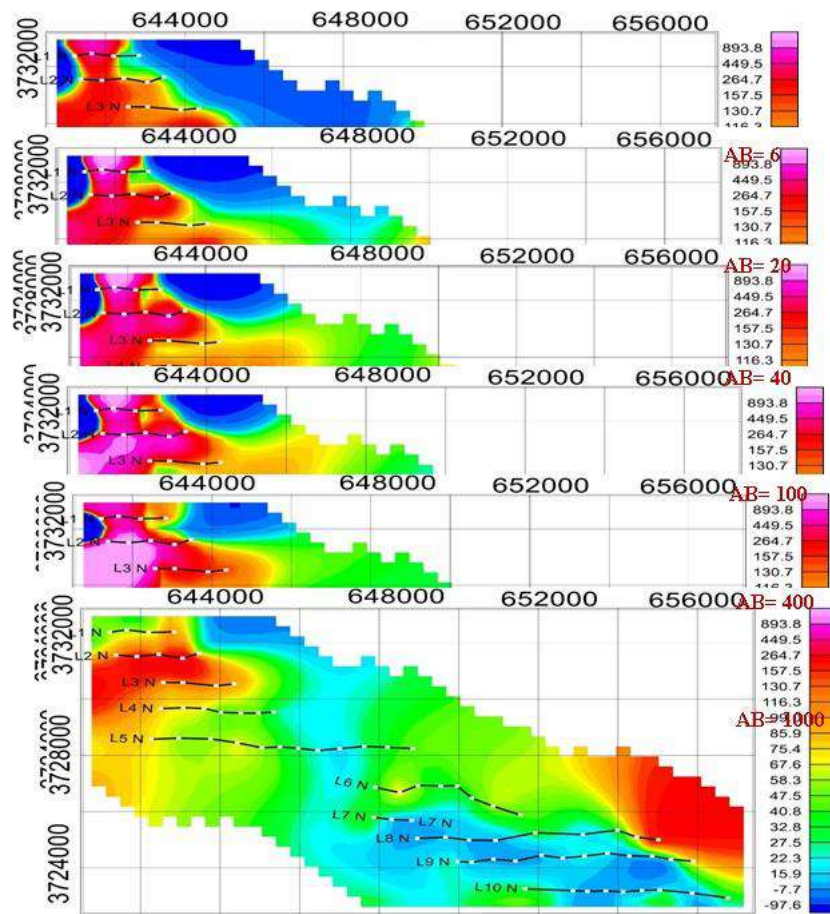
برای تهیه نقشه‌ها (مقطع‌های افقی هم مقاومت‌ویژه ظاهری) مقدار مقاومت‌ویژه اندازه‌گیری شده برای طول AB مورد نظر در محل هر سونداژ که دقیقاً منطبق بر مرکز آرایش است، منظور شده است. سپس پربندهای (منحنی‌های هم مقدار) مقاومت‌ویژه ظاهری رسم شدند. در هر نقشه می‌توان چگونگی روند تغییرات مقاومت‌ویژه برای عمق ظاهری را، در سطح منطقه مشاهده کرد. از مقایسه نقشه‌های هم مقاومت‌ویژه ظاهری برای طول‌های مختلف می‌توان به چگونگی روند تغییرات مقاومت‌ویژه با عمق ظاهری به گونه‌ای کیفی نیز پی‌برد. این نقشه‌ها که با استفاده از نرم افزار ژئوسافت تهیه شده‌اند، از مقیاس رنگی برای جداکردن زون‌هایی با گستره مقاومت‌ویژه متفاوت استفاده شده است.

مقطع‌های هم مقاومت‌ویژه الکتریکی نشان دهنده نحوه تغییرات مقاومت‌ویژه در صفحه‌های قائمی است که از امتداد پروفیل‌های برداشت می‌گذرند. مقطع مقاومت‌ویژه برشی از سطح تا عمق مشخصی، از یک پروفیل است. مقاطع شبه عمق یک تصویری تقریبی از توزیع مقاومت‌ویژه، ساختارهای زیر سطحی ارائه می‌دهند. در واقع به منظور بررسی تغییرات عمقی مقاومت‌ویژه زمین در یک امتداد مشخص که معمولاً با ویژگی‌های زمین‌شناسی لایه‌ها مطابقت دارد، مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی تهیه می‌شوند. مقاطع مقاومت‌ویژه‌ای که در اینجا بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D رسم شده‌اند. این نرم‌افزار مقاطع یک‌بعدی و دوبعدی را بدست می‌دهد. این مقاطع براساس مقاومت‌ویژه حقیقی لایه‌ها رسم شده‌اند. در حقیقت توزیع مقاومت‌های ویژه در امتداد هر مقطع حاصل وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری تمامی سونداژها در امتداد یک پروفیل می‌باشد. در مقاطع رسم شده محور افقی منطبق با امتداد پروفیل و نشان دهنده فواصل و محور عمودی عمق را نشان می‌دهد. در این مقطع‌ها از مقیاس رنگی برای جداکردن مناطق با گستره مقاومت‌ویژه متفاوت استفاده شده است.

۸-۱- یافته‌ها

در این مطالعه ۶ نقشه (مقطع افقی هم مقاومت‌ویژه ظاهری) برای طول‌های AB برابر ۶، ۲۰، ۴۰، ۱۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ متر آمده است. در این مطالعه برای آنکه از کثرت شکل‌ها جلوگیری شود همه شکل‌ها را روی هم از بالا به پایین بطور موازی به شکل شبه سه بعدی ارائه شده است. به این صورت روند کلی توزیع مقاومت‌های ویژه در روی مقاطع افقی بهتر قابل رویت و تفسیر خواهند بود و می‌توانیم روندهای عمقی و افقی آنها را مقایسه نماییم.

در این نقشه‌ها که با استفاده از داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری حاصل شده‌اند، مقاومت‌ویژه کم با رنگ آبی، متوسط با رنگ‌های سبز و زرد و مقاومت‌ویژه‌های بالاتر با رنگ‌های قرمز و بنفش قابل مشاهده هستند (شکل ۲).

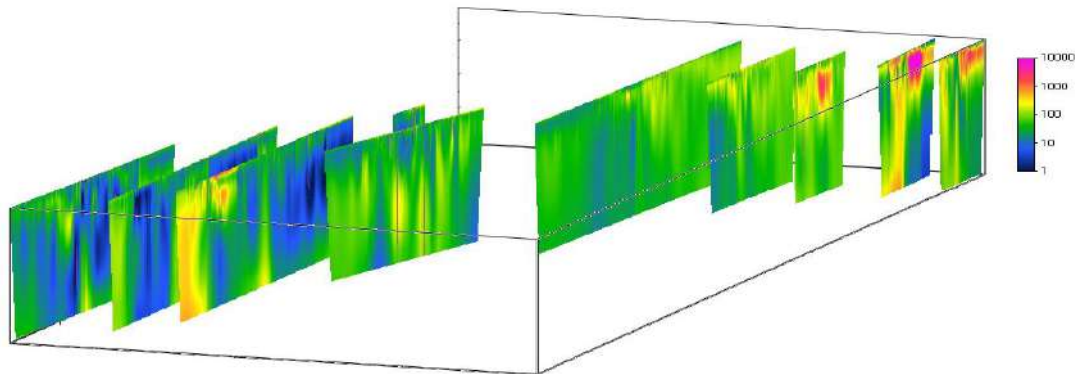


شکل (۲): تغییر مقاومت ویژه ظاهری با فاصله الکترودی (تصویر شبه سه بعدی)

حضور رنگ‌های آبی و سبز در جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه که نشان از پایین بودن مقاومت ویژه در این نواحی است، می‌تواند گویای دانه‌ریز بودن رسوبات آبرفتی در این ناحیه باشد. هر چه به سمت شمال غربی و اطراف منطقه می‌رویم شاهد افزایش مقاومت ویژه با حضور رنگ‌های نارنجی، قرمز و بنفش هستیم. همان‌طور که در شکل بالا مشخص است با افزایش فاصله الکترودی، کاهش گستردگی رنگ بنفش و قرمز در ناحیه شمال غربی منطقه مشاهده می‌شود، که حاکی از پایین آمدن مقدار مقاومت ویژه در این قسمت است. اما همچنان ناحیه شمال غربی در مقایسه با سایر نواحی دشت از بالاترین مقدار مقاومت ویژه برخوردار است. که می‌تواند به علت درشت دانه‌تر شدن مواد و حضور سنگ کف آسماری در شمال غربی ناحیه باشد. آنچه که تاکنون از بررسی نقشه‌ها بدست آمده، مقاومت ویژه پایین در قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه بوده، که احتمال توزیع سفره‌های آب‌های زیرزمینی را در این مناطق نشان می‌دهد.

در این مطالعه از میان کلیه سونداژهای الکتریکی برداشت شده ۱۰ مقطع اصلی با روند عمومی غربی و شرقی به نام‌های L1 تا L10 تهیه شده است. پروفیل‌ها تقریباً به موازات هم و دارای راستای غربی-شرقی هستند. برداشت‌ها از پروفیل شماره ۱ (L1) در شمال غربی شروع شده و تا پروفیل شماره ۱۰ (L10) در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه ادامه پیدا کرده است. در شکل (۳) به منظور مقایسه بهتر مقاطع باهم، تصویر مقاطع موجود در یک شکل آمده است که به راحتی می‌توان ناحیه‌های دارای مقاومت ویژه کم تا زیاد را در تمام پروفیل‌ها مشخص کرد. با توجه به این شکل مقادیر مقاومت ویژه پایین و کمتر از ۱۰ اهم-متر، که با رنگ آبی مشخص است در طول

پروفیل‌های L9 و L10 و همچنین نیمه غربی پروفیل L8 به خوبی نمایان است. مقادیر با مقاومت ویژه زیاد و بیشتر از ۱۰۰۰ اهم-متر که با رنگ بنفش مشخص است از سطح تا عمق‌های کم از پروفیل‌های L1، L2، L3 و همچنین در ناحیه سطحی واقع در شرق پروفیل L8 به چشم می‌خورد. رنگ سبز که نماینگر مقاومت ویژه متوسط و رو به پایین است در اکثر پروفیل‌ها مشاهده می‌شود که در پروفیل‌های L4 و L5 به خوبی دیده می‌شود.



شکل (۳): نمای شبه سه بعدی از مقاطع مقاومت ویژه (نمایی از مقطع پروفیل‌های L1 (سمت راست تصویر) تا L10 (سمت چپ تصویر))

تفسیر نتایج

در این مطالعه همانند مطالعه‌ای که حبیب‌الله نوروزی و همکارانش [۶] در رابطه با اکتشاف آب زیرزمینی در منطقه قوشه دامغان انجام دادند نتایج مشابهی دریافت شد. اما در اینجا با ایجاد شکل‌های شبه سه‌بعدی دید بهتر و در نتیجه مقایسه بهتری می‌توان صورت داد. که در نتیجه‌گیری‌های دقیق‌تر به ما کمک می‌کند. نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری مبین چگونگی توزیع مواد در داخل رسوبات آبرفتی و سنگ کف است. نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در ۴۰۰ و $AB=100$ بیشتر نشانگر ریز دانه بودن و یا درشت دانه بودن رسوبات است که بیشتر در جنوب و جنوب شرقی ریز دانه هر چه به شمال غرب میرود درشت دانه تر می‌شود. در نقشه $AB=1000$ بیشتر جنس سنگ کف است که تأثیرگذار می‌باشد که در جنوب شرقی بیشتر تحت تأثیر گچساران مقاومت پایین و در شمال غرب تحت تأثیر آسماری مقاومت بالا دارد.

مدل یک‌بعدی اطلاعات بسیار خوبی در اختیار ما قرار می‌دهد اما مدل دو بعدی اطلاعات بهتر و دقیق‌تری ارائه می‌دهد. مدل یک بعدی بیشتر جهت شناسایی به ما کمک می‌کند و اطلاعات محدودی از ساختارهای پیچیده زیرسطحی را نتیجه می‌دهد. برای نتیجه‌گیری و تفسیر بهتر از ساختارهای زیرسطحی باید مدل سازی دو بعدی نیز انجام داد. با مقایسه مقاطع یک بعدی و دو بعدی حاصل از داده‌های دشت زنگوان، مشاهده می‌شود که عمق، گسترش، شکل و ضخامت توده‌ها در مقطع دو بعدی بهتر مشخص شده و مناطق دارای اختلاف مقاومت ویژه را بهتر نمایان می‌کند.

بطور کلی مقایسه تمام مقاطع موید این مطلب است که در جنوب شرقی منطقه در سطح و عمق شاهد مقاومت‌های کمتری نسبت به نواحی شمالی‌تر می‌باشیم. که می‌تواند به علت ریز دانه‌تر بودن مواد و سازند گچساران باشد. نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری نشان می‌دهند که سیر تغذیه سفره آب زیرزمینی دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی می‌باشد. همچنین ضخامت مناسب رسوبات آبرفتی در ناحیه جنوب غربی و مخصوصاً در محل سونداژ L5-10 محل مناسبی برای حفر چاه با عمق حدود ۴۰ متر است که به دلیل وجود سازند گچساران به عنوان سنگ کف، حفر چاه با عمق بیشتر منطقی به نظر نمی‌رسد. همچنین در محل L4-5 چاهی به عمق ۱۵۰ متر به

منظور شناسایی زون احتمالاً آبدار مربوط به رسوبات آبرفتی (Q2) و زون آهک آسماری نابرجا (AS)L حفر گردد. قابل ذکر است که نمونه‌ها باید به ازای هر ۳ متر حفاری چک شود و به محض برخورد به سطح آب، نمونه آب به ازای هر ۳ متر حفاری از نظر کیفیت چک شود. همچنین به محض برخورد به سازند مارنی از جنس گچساران (Gs) عملیات متوقف گردد.

نتیجه‌گیری کلی

در مناطقی که به دنبال محل مناسب جهت حفر چاه برای تامین آب هستیم، به منظور تعیین نقاط دقیق پس از مطالعه یک بعدی و مشخص کردن نقاط با پتانسیل مناسب، باید از مدل دو بعدی و در نتیجه آن شبه سه‌بعدی برای مطالعه جزئی‌تر استفاده کنیم. با توجه به تعبیر و تفسیر نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری، مقاطع هم مقاومت ویژه ظاهری و مقاطع ژئوالکتریک و با در نظر گرفتن زمین شناسی منطقه می‌توان گفت مناسب‌ترین محل برای حفر چاه محل سونداژهای L10-5 و L4-5 می‌باشد.

تقدیر و تشکر

از شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام برای در اختیار نهادن داده‌های برداشت شده در دشت زنگوان کمال تقدیر و تشکر را داریم. همچنین از زحمات استاد فرزانه جناب آقای دکتر فرزاد شیرزادی تبار که در این راه ما را راهنمایی کردند، کمال سپاسگزاری را داریم.

مراجع

- [۱] آریامنش، محمد، احمدی، سعیده: **ژئوالکتریک**، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران، ۱۳۹۱.
- [۲] Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A.; *Applied Geophysics*, Cambridge University press, New York, 1990.
- [۳] Reynolds, J. M.; *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2th Ed, John Wiley & Sons, Chichester, 2011.
- [۹] Davoodabadi Farahani, M., Aghajani, H., "Identification of Potential Groundwater Zones Using RS and GIS", UCT Journal of Research in Science, Engineering and Technology, 1(4), pp. 4-6, 2013.
- [۵] Umeh, V.O., Ezech, C.C., Okonkwo, A.C., "Groundwater Exploration of Lokpaukwu, Abia State Southeastern Nigeria, Using Electrical Resistivity Method", International Research Journal of Geology and Mining, 4(3), pp. 76-83, 2014.
- [۶] نوروزی، حبیب‌الله، کامکار روحانی، ابوالقاسم، عرب امیری، علیرضا، رحیمیان، مهدی؛ **اکتشاف آب زیرزمینی توسط روش مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه قوشه دامغان**، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۰۷-۲۱۱، ۱۳۹۳.
- [۷] احمدی، فرشاد، علیجانی، فرشاد، ناصری، حمیدرضا؛ **کاربرد روش‌های سنجش از دور و ژئوالکتریک در اکتشاف آب‌های زیرزمینی مناطق کارستی جنوب کوه‌دشت، لرستان**، مجله هیدروژئولوژی، ۲(۲)، ۲۹-۴۳، ۱۳۹۶.
- [۸] Milsom, J., and Eriksen, A. ; *Field Geophysics*, 4th Ed., John Wiley & Sons, 2011.

تفکیک ساختارهای پیچیده زیرسطحی عمیق و آنالیز سرعت، با استفاده از روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل

علیرضا صدوقی^۱، هاشم شاهسونی^۲

۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان؛ sadoughmine.alireza@gmail.com

۲ اعضای هیئت علمی، دانشگاه کاشان؛ h.shahsavani@uok.ac.ir

* علیرضا صدوقی

چکیده فارسی

تفکیک لایه‌های زیرسطحی و مرز لایه‌ها و محل ناودیس‌ها، تاقدیس‌ها و گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها و تغییر شیب لایه‌ها در عمق بالا و تشخیص پیوستگی حوادث، برانبارش بهتر مقاطع، همواره از مسائل مهم و مورد بحث در فرآیند پردازش می‌باشند. بر این اساس با عملکرد صحیح و دقت بالای تفکیک ساختارهای زیرسطحی، قابلیت دست یافتن به توانایی‌های بهتر روش و سرعت مطلوب از بازتابنده‌های زیرسطحی نمایان می‌شود. عملکرد برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل که بسط داده شده عملگر نقطه میانی مشترک است، توانایی این را دارد که حتی در صورت کاهش تعداد لرزه‌نگاشت‌های گروه‌های نقطه میانی مشترک، از گروه‌های نقطه میانی مشترک مجاور برای تفکیک ساختارهای زیرسطحی و تخمین سرعت استفاده کند. در این پژوهش امکان تفکیک ساختارهای پیچیده زیرسطحی با استفاده از روش پیشنهادی در نرم افزار منبع باز سائزمیک یونیکس تحت سیستم عامل لینوکس به خوبی انجام شده است و در نهایت با داشتن دقت بالا، تحلیل سرعت نیز انجام پذیرفته است. با استفاده از روش مذکور با انجام تفکیک دقیق لایه‌ها و مقاطع زیرسطحی، تفکیک ساختارهای پیچیده و در نهایت آنالیز سرعت انجام می‌شود. مقایسه نتایج به دست آمده از چند روش به خوبی نشان می‌دهد در روش پیشنهادی با توجه به تکنیک خاص پردازش انجام گرفته و تمرکز بیشتر بر روی پراش‌دهنده‌ها، حتی با کاهش تعداد لرزه‌نگاشت‌ها باز هم توانایی تفکیک بهتر و تعیین محل دقیق‌تر بازتابنده و در نهایت مقدار سرعت آن وجود دارد. این در حالی است که در روش معمول، این امکان به خوبی وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: برانبارش، سطح پراش مشترک، تفکیک ساختار پیچیده، تحلیل سرعت.

Separation Of Deep Complex Subsurface Structures and Velocity Analysis, Using Model-Based Common Diffraction Surface Stack Operator

Alireza Sadooghi¹, Hashem Shahsavani²

¹PhD student, University of Kashan, sadoughmine.alireza@gmail.com

²Associate Professor, University of Kurdistan, h.shahsavani@uok.ac.ir

* Alireza Sadooghi

ABSTRACT

Dismantling this superficial thing, its place, its place of worship, its sanctification, washing it, its cleanliness, changing its gray hair in depth of mind, and diagnosing recent events, with a few clips, Important issues Search resource for your favorite text. This is essential by making a correct response and being careful with whatever surface area you choose to dismantle it. You can use the device to turn on the device with a little delay and velocity, which is required if the surface is not removed. When making a joint space on the surface of a common area built around the middle, this is how you

can create a common midpoint, so wait until you see a complete picture of the size of the area where you can discuss this point. As a result, this is a common midpoint adjacent to each other for disassembly. I will choose this button and guess how quickly it will be used. There is no possibility of disassembling the selected hardware device using a hardware device to remove the seismic unix power source under a Linux operating system that has a bad effect on it. This is the most accurate thing, analyzing the velocity of the song's performance. By using the instructions mentioned above, the precise disassembly of verses and superficial syllables, the disassembly of the most precise ones, and at the end of the annals, the velocity analysis is not desired. Measuring the results of using a special technique to adjust the position of the room and position it on the surface of the room, even with a small number of rices. I missed it so I couldn't disassemble it with this and setting the exact location of the minute and at the end of the velocity limit when there is a data. However, in the usual method, this possibility does not exist well.

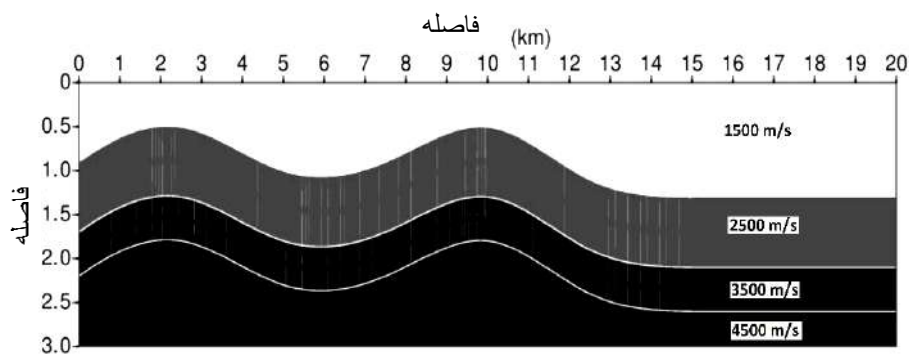
Keywords: Stacking, Common Diffraction Surface Stack, Separation of Complex Structure, Velocity Analysis

مقدمه

به تصویر کشیدن جزئیات بیشتر ساختارهای زیرسطحی، هدف تحقیقات در پژوهشگاه‌های دانشگاهی و صنعت نفت و گاز و معادن است که در نهایت به مفسر کمک می‌کند تا موقعیت کاوش و استخراج ذخایر را با تخمین دقیق‌تری تعیین کرد. برانبارش نقطه میانی مشترک، به خاطر توانایی آن در جداسازی سیگنال از نوفه‌هایی که دارای فرکانس یکسان هستند؛ مهم‌ترین مرحله در پردازش داده است که توسط ماین در سال ۱۹۶۲ مطرح شد [۱]. در ادامه به منظور حذف تأخیر زمان رسید امواج و حذف اثر دورافت، از تصحیح برونراند نرمال استفاده شد. این تصحیح، در صورتی که بازتابنده‌ها شیب‌دار بوده و یا دارای شیب‌های مخالف باشند به خوبی عمل نکرده و پردازش صحیحی صورت نمی‌پذیرد، بنابراین برای رفع این مشکل از یک مرحله پردازشی دیگری به نام تصحیح برونراند شیب استفاده می‌شود. ایلماز در سال ۱۹۸۰، تصحیح برونراند شیب را برای غلبه بر مسئله‌ی شیب‌های متداخل پیشنهاد کرد [۲]. با این وجود باز هم در نواحی که تغییرات جانبی شدید سرعت وجود دارد، اعمال تصحیح برونراند شیب قادر به حل مسئله تداخل شیب‌ها نخواهد بود. رابطه بین روش آنالیز سرعت برانبارش و روش سطح بازتاب مشترک به وسیله هر توک و همکارانش در سال ۲۰۰۷ تشریح گردیده است [۳]. در چنین حالتی در نظر گرفتن فقط یک عملگر برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر به منظور شبیه‌سازی این مقطع که شامل تمامی حوادث لرزه‌ای، بازتابنده‌ها و منحنی‌های پراش باشد دیگر کافی نیست. برای در نظر گرفتن چنین تداخل شیب‌هایی، پیشنهاد شد تا به جای یک عملگر، تعداد محدودی عملگر به منظور برانبارش برای یک نمونه از مقطع دورافت صفر در نظر گرفته شود [۴-۶] مشکل بزرگ روش پیشنهاد شده در نداشتن یک معیار برای مشخص کردن نقاطی که دارای تداخل شیب می‌باشند و همچنین تعیین تعداد حوادث لرزه‌ای که در یک نمونه از مقطع دورافت صفر شرکت داشته‌اند می‌باشد. برای به‌دست آوردن مقطع برانبارش شده‌ای که شامل تمامی حوادث لرزه‌ای تداخل شده در یکدیگر باشد، سلیمانی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با ترکیب مفهوم روش سطح برانبارش بازتاب مشترک و تصحیح برونراند شیب [۷]، به‌جای در نظر گرفتن فقط یک عملگر و یا تعداد محدودی عملگر برانبارش، بازه پیوسته‌ای از شیب‌ها را به منظور برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر در نظر گرفتند [۸]. آنها عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک را به منظور آشکارسازی بیشتر هذلولی‌های پراش، تبدیل به عملگر برانبارش سطح پراش مشترک که در ارتباط با یک نقطه پراش عمقی است، استفاده نمودند [۱۲]. روش برانبارش سطح پراش مشترک به صورت موفقیت‌آمیزی بر روی داده‌های زمینی پیاده‌سازی شده است [۹]. به دلیل زمان‌بر بودن، روش را تبدیل به یک روش آزمایشگاهی و پژوهشی کرده است. به منظور کاربردی نمودن روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل با تکیه بر تکنیک دنبال کردن پرتو و تمرکز بر روی پراش-دهنده‌ها معرفی شده [۱۰، ۱۱] و بر روی داده مصنوعی سیگزی توای (Sigsbee2a) [۱۱] و داده زمینی در کشور آلمان [۱۰، ۱۱] به صورت بسیار موفقیت‌آمیزی پیاده‌سازی گردیده است.

روش تحقیق

برای تهیه مقاطع طیف سرعت داده‌های مصنوعی ابتدا مدل مصنوعی با استفاده از نرم افزار سائیزمیک یونیکس^{۱۱}، تحت سیستم عامل لینوکس و با استفاده از کدهای نوشته شده ساخته شده است. این مدل سرعت مصنوعی ساخته شده که در شکل ۱، نشان داده شده است دارای چهار لایه است که هر کدام از لایه‌ها سرعت متفاوتی دارند. سرعت لایه‌ها به طور معمول و به ترتیب از سطح به عمق افزایش می‌یابد. طول پروفیل برداشت ۲۰ کیلومتر و عمق مدل مورد نظر شش کیلومتر است. سرعت در لایه اول ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، در لایه دوم ۲۵۰۰ متر بر ثانیه، در لایه سوم ۳۵۰۰ متر بر ثانیه و در لایه چهارم ۴۵۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد که با افزایش عمق، سرعت نیز افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۵: مدل سرعت مصنوعی ایجاد شده در نرم افزار سائیزمیک یونیکس.

آنالیز سرعت با استفاده از روش معمول نقطه میانی مشترک و روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل بر روی داده‌های مصنوعی انجام شده است. قبل از مقایسه طیف‌های سرعت به دست آمده از دو روش، توانایی و صحت عملکرد روش پیشنهادی در آشکار سازی بازتابنده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این کار مدل سرعتی با مشخصات خاص و تغییرات سرعت، در نظر گرفته شده است. در ادامه با توجه به مشخصات برداشت داده از روی مدل مدنظر برای داده‌های مصنوعی، روش پیشنهادی بر روی این داده‌ها پیاده‌سازی شده است. با توجه به قابلیت‌های روش پیشنهادی، پس از برداشت داده از مدل تهیه شده به شکل مصنوعی، توانایی روش پیشنهادی در عملکرد یا رد عملکرد روش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱: متغیرهای به کار برده شده در برداشت لرزه‌ای داده‌های مصنوعی.

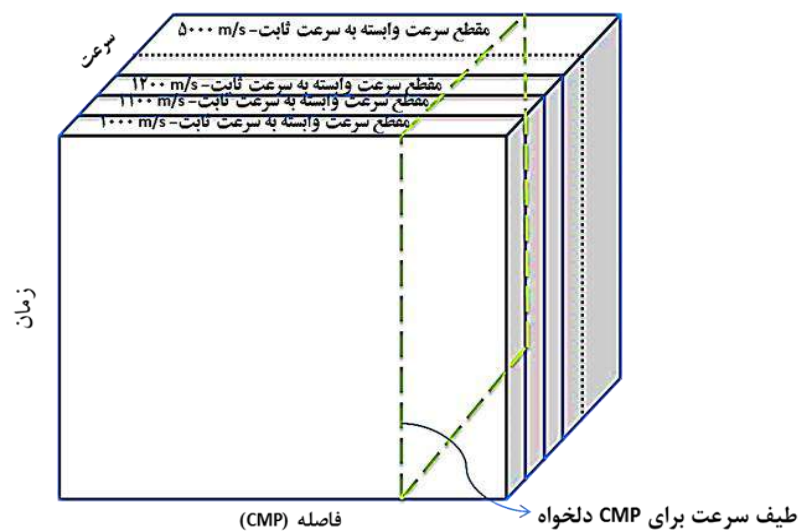
| ردیف | پارامتر | فاصله | واحد |
|------|------------------------------|-------|-------|
| ۱ | فاصله بین انفجارها | 50 | متر |
| ۲ | فاصله بین ژئوفون‌ها | 50 | متر |
| ۳ | تعداد انفجارها | 282 | تعداد |
| ۴ | تعداد ژئوفون‌ها در هر برداشت | 60 | تعداد |

¹¹ . Seismic Unix

| | | | |
|-------|-------|---------------------------------------|----|
| تعداد | 33840 | تعداد کل ردهای برداشت شده | ۵ |
| تعداد | 680 | تعداد گروه‌های نقطه میانی مشترک | ۶ |
| متر | 25 | فاصله گروه‌های نقطه میانی مشترک از هم | ۷ |
| متر | 2975 | مختصات اولین انفجار | ۸ |
| متر | 17025 | مختصات آخرین انفجار | ۹ |
| متر | 0/0 | مختصات اولین ژئوفون | ۱۰ |
| متر | 20000 | مختصات آخرین ژئوفون | ۱۱ |

روش پیشنهادی بر روی یک خط از داده‌های لرزه‌ای دو بعدی که قبلاً به روش نقطه میانی مشترک پردازش شده‌اند، پیاده‌سازی شده است تا امکان مقایسه سرعت‌های برانبارش به‌دست آمده امکان پذیر باشد. شکل زیر طیف سرعت در روش پیشنهادی برای گروه نقطه میانی شماره ۱۰۰ را نشان می‌دهد که دارای ۵۰ عدد لرزه‌نگاشت است.

با به‌دست آوردن مقاطع همدوسی برای تمام سرعت‌های ثابت از روش پیشنهادی و کنار هم گذاشتن این مقاطع (شکل ۲)، طیف سرعت کلی حاصل از روش پیشنهادی به‌دست آمده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است مقاطع همدوسی به‌دست آمده برای تمام سرعت‌های ثابت و برای تمام زمان‌های برداشت کنار هم قرار داده شده است. با انتخاب یک نقطه میانی مشترک دلخواه طیف سرعت آن نقطه میانی مشترک در روش پیشنهادی آشکار می‌شود. جهت مقایسه طیف سرعت حاصل از روش پیشنهادی با طیف سرعت روش معمول، یک نقطه میانی مشترک دلخواه را در روش پیشنهادی انتخاب کرده (شکل ۲) و با همان نقطه میانی مشترک در روش معمول مقایسه می‌شود. به ازای هر مدل سرعت ثابت، زاویه خروج موج و مقطع همدوسی به‌دست آورده می‌شود. حال با انتخاب یک گروه نقطه میانی مشترک از مقاطع همدوسی به‌دست آمده، می‌توان طیف سرعت گروه نقطه میانی مشترک دلخواه را تعیین نمود.



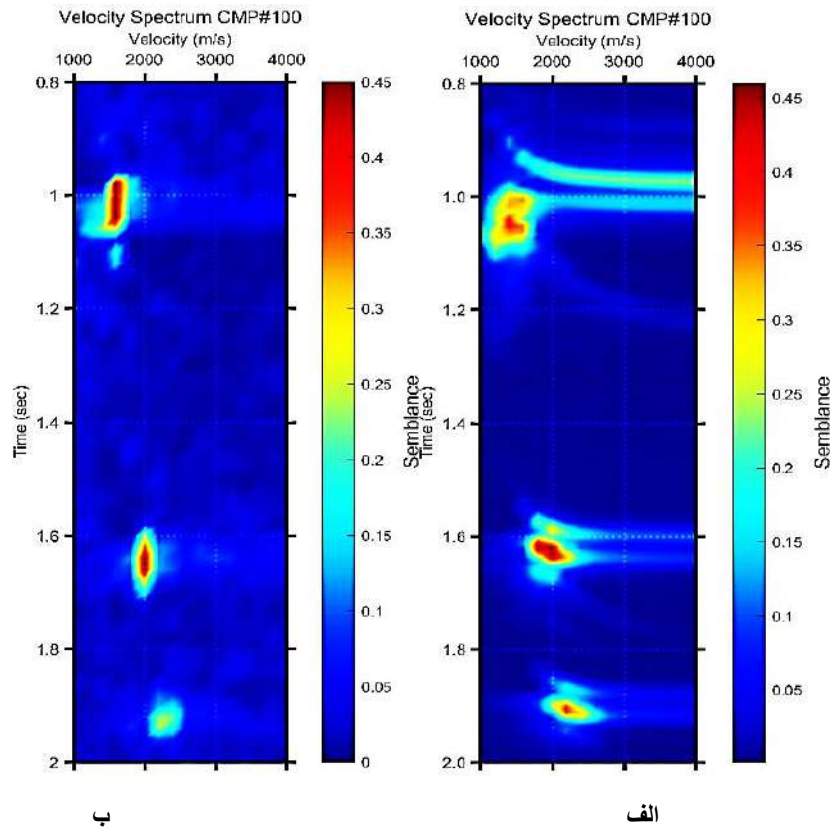
شکل ۱۶: نحوه به دست آوردن طیف سرعت از روی مقاطع همدوسی به دست آمده از روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.

یافته‌ها

در ابتدا نکته مهم در اثبات عملکرد و توانایی روش پیشنهادی در آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی، مقایسه طیف سرعت به دست آمده از این روش با مدل ابتدایی تهیه شده است. یعنی برای اثبات عملکرد روش معرفی شده، طیف سرعت به دست آمده از این روش با مدل ابتدایی تهیه شده مقایسه می‌شود. چرا که طیف سرعت به دست آمده بایستی بتواند حداقل لایه‌های موجود در مدل را آشکارسازی کند تا در مرحله بعد بتوان در مورد روش پیشنهادی بحث کرد و به مقایسه آن با روش‌های دیگر پرداخت. در این روش با توجه به بررسی صورت گرفته، مدل ابتدایی تهیه شده دارای سه لایه است. در شکل ۲ الف، مشاهده می‌شود که در طیف سرعت به دست آمده در روش پیشنهادی سه بازتابنده به خوبی آشکارسازی شده است. کاملاً واضح است که این سه بازتابنده مربوط به هر سه لایه موجود در مدل ابتدایی است چرا که سرعت نمایش داده شده در آن برای هر بازتابنده، همان سرعت لایه مورد نظر در مدل اولیه است. با توجه به طیف سرعت در روش پیشنهادی برای نقطه میانی مشترک بررسی شده، توانایی روش پیشنهادی به خوبی اثبات می‌شود. به عبارت دیگر به تعداد لایه‌های موجود در مدل ابتدایی در طیف سرعت به دست آمده بازتابنده موجود است. هر کدام از بازتابنده‌ها ی به دست آمده در طیف سرعت، مربوط به زمان و سرعت خاصی بوده که از این لحاظ مطابقت خوبی با مدل اولیه دارد. مطابق شکل بازتابنده‌ها با زمینه نوفه پایینی آشکار شده است که هر سه بازتابنده به خوبی قابل مشاهده و تفکیک است. در نهایت می‌توان با استفاده از زمان مورد نظر، عمق هر بازتابنده را نیز تعیین نمود.

در ادامه بررسی مقاطع طیف سرعت برای روش معمول و روش پیشنهادی، توانایی روش پیشنهادی در اثبات یا رد عملکرد آن بیشتر آشکار شده به طوری که با مقایسه طیف سرعت حاصل از دو روش، به خصوص زمانی که تعداد لرزه نگاشت‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند می‌توان هر شبیه‌ای را در مورد عملکرد و توانایی روش پیشنهادی به خوبی برطرف نمود.

شکل ۲ الف، طیف سرعت در روش پیشنهادی برای گروه نقطه میانی شماره ۱۰۰ را نشان می‌دهد که دارای ۵۰ عدد لرزه‌نگاشت است. در ادامه طیف سرعت حاصل از روش پیشنهادی، با طیف سرعت به دست آمده از روش معمول (شکل ۲ ب) برای همان گروه نقطه میانی مشترک مقایسه شده است.



شکل ۱۷: الف) مقطع طیف سرعت حاصل از روش پیشنهادی، ب) مقطع طیف سرعت حاصل از روش معمول.

مطابق شکل، طیف سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی دارای زمینه نوفه بسیار پایین تری نسبت به طیف سرعت به دست آمده از روش معمول است. هر چند بازتابنده اول در روش پیشنهادی به دلیل بزرگتر بودن عملگر برانبارش، کشیدگی پیدا کرده و دارای میزان همدوسی کمتری نسبت به روش معمول است؛ اما با افزایش زمان، بازتابنده‌های عمیق تر دارای همدوسی بیشتری هستند. به عبارت دیگر روش پیشنهادی می‌تواند بازتابنده‌های عمقی را بهتر از روش‌های معمول آشکارسازی نماید. با کاهش تعداد لرزه‌نگاشت‌ها در یک گروه نقطه میانی مشترک، توانایی‌های روش پیشنهادی آشکارتر می‌گردد. با افزایش زمان در روش پیشنهادی، بازتابنده‌های عمیق تر دارای همدوسی بیشتری می‌شوند که این خود از قابلیت‌های این روش است. روش پیشنهادی می‌تواند بازتابنده‌های عمقی را بهتر از روش‌های معمول آشکارسازی نماید و با کاهش تعداد لرزه‌نگاشت‌ها در یک گروه نقطه میانی مشترک، توانایی‌های روش پیشنهادی در به دست آوردن طیف سرعت بیشتر است.

تفسیر نتایج

طیف سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی دارای زمینه نوفه بسیار پایین تری نسبت به طیف سرعت به دست آمده از روش معمول است. هر چند بازتابنده اول در روش پیشنهادی به دلیل بزرگتر بودن عملگر برانبارش، کشیدگی پیدا کرده و دارای میزان همدوسی کمتری نسبت به روش معمول است اما با افزایش زمان، بازتابنده‌های عمیق تر دارای همدوسی بیشتری هستند. به عبارت دیگر روش پیشنهادی می‌تواند بازتابنده‌های عمقی را بهتر از روش‌های معمول آشکارسازی نماید. با کاهش تعداد لرزه‌نگاشت‌ها در یک گروه نقطه میانی مشترک،

توانایی‌های روش پیشنهادی آشکارتر می‌گردد. بنابراین، طیف سرعت به‌دست آمده از روش پیشنهادی دارای زمینه نوفه بسیار پایین‌تری نسبت به روش معمول است.

نتیجه‌گیری کلی

در واقع با معرفی ایده عملگر برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل، استراتژی جدیدی در مبحث شناسایی دقیق و پیچیده ساختارهای زیرسطحی و تحلیل سرعت ارائه شد. ماهیت و روش کار برای اثبات توانایی عملگر جدید سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل در تحلیل سرعت داده‌های لرزه‌ای به این صورت بود که یک سری داده‌های مصنوعی با مقایسه روش‌های قبلی و برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج تحلیل در روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل و روش معمول مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شد. روش پیشنهادی مقطع طیف سرعت بهینه‌تری دارد و بازتابنده‌های بیشتری را نسبت به روش معمول آشکار کرده است. روش معمول در آشکارسازی بعضی از بازتابنده‌ها به خصوص زمانی که تعداد لرزه‌نگاشت‌ها کاهش می‌یابد ناتوان است. لزوم بررسی بیشتر موضوع معرفی شده، اثبات توانایی روش در آشکارسازی مقاطع لرزه‌ای و صحت عملکرد طیف سرعت به‌دست آمده است که در مورد آن بحث شد.

تقدیر و تشکر

با تشکر از استاد ارجمند جناب آقای دکتر شاهسونی ضمن راهنمایی ارزشمند ایشان در انجام این پژوهش؛ همچنین ضمن تشکر از انجمن معکوس سازی امواج لرزه‌ای.

مراجع

- [1]Mayne, W.H., Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Geophysics*, ۱۹۶۲. ۲۷(۶): p. ۹۲۷-۹۳۸
- [2]Yilmaz, O. and J.F. Claerbout, Prestack partial migration. *Geophysics*, ۱۹۸۰. ۴۵(۱۲): p. ۱۷۵۳-۱۷۷۹
- [3]Hertweck, T., J. Schleicher, and J. Mann, Data stacking beyond CMP. *The Leading Edge*, ۲۰۰۷. ۲۶(۷): p. ۸۱۸-۸۲۷
- [4]Mann, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips: ۷۱st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, ۱۸۸۶-۱۸۸۹, doi: ۱۰.۱۱۱۶۵۰/۱۰.۱۱۹۰. ۲۰۰۱. Abstract.
- [5]Mann, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips: ۶۳rd Annual International Conference and Exhibition, EAGE. in Extended Abstracts. ۲۰۰۱
- [6]Mann, J., Extensions and applications of the common-reflection-surface stack method. ۲۰۰۲, Karlsruhe, Univ., Diss., ۲۰۰۲
- [7]Hale, D., Dip moveout processing. ۱۹۹۱: Society of Exploration Geophysicists.
- [8]Soleimani, M., et al. Solving the problem of conflicting dips in common-reflection-surface (CRS) stack. in Shiraz ۲۰۰۹-۱st EAGE International Petroleum Conference and Exhibition. ۲۰۰۹. European Association of Geoscientists & Engineers.
۹. تصویرسازی لرزه‌ای در کمربندهای رورانده با ساختار پیچیده با نشانگرهای جنبشی میدان موج. *مجله ژئوفیزیک ایران*, ۲۰۱۶. [۹]et al. ۲۰۱۶. ۹۵-۱۱۶. (۴)۷p.
- [10]Shahsavani, H. et al. A model-based approach to the common-diffraction-surface stack. in ۷۳rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC ۲۰۱۱. ۲۰۱۱. European Association of Geoscientists & Engineers.
- [11]Shahsavani, H., et al. A model-based approach to the Common-Diffraction-Surface Stack method—a synthetic case study. in ۱۲th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. ۲۰۱۱. European Association of Geoscientists & Engineers.
- [۱۲]. سلیمانی منفرد، م. (۱۳۸۸). "برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مساله تداخل شیب‌ها"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

تحلیل میدان مغناطیسی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته برای تخمین عمق و شکل توده معدنی

مهديه حیدری^۱، میرستار مشین چی اصل^{۲*}، محمود مهرآموز^۳، رضا حیدری^۴

۱دپارتمان علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران؛ mahdieh_heidari90@yahoo.com

۲*دپارتمان علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران m.meshinchi@srbiau.ac.ir

۳دپارتمان علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران m.mehramooz@srbiau.ac.ir

۴دپارتمان علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران r.heidari@srbiau.ac.ir

* نویسنده مسئول: میرستار مشین چی اصل

چکیده

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت با عنوان روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته تشریح و از آن برای مدل سازی وارون میدان مغناطیسی دو بعدی استفاده شده است. این الگوریتم قادر است تا پارامترهای عمق، فاکتور شکل، ضریب دامنه، زاویه میل مغناطیسی و مختصات نقطه مبدا را برآورد نماید. برای بررسی کارایی این روش، میدان مغناطیسی مربوط به یک مدل مصنوعی، با و بدون نوفه تصادفی اضافه شده، مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی توانایی تخمین پارامترهای مدل، با دقت بالا و قابل قبول را دارا می‌باشد. بر همین اساس، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته برای تحلیل میدان مغناطیسی محدوده مطالعاتی در منطقه ایله واقع در شهرستان تایباد استفاده گردید. منطقه مورد مطالعه از نظر منابع آهنی بسیار غنی می‌باشد. تخمین صورت گرفته برای محدوده مطالعاتی عمق مرکز توده مدفون را در حدود ۱۱۴/۹ متر و شکل تقریبی آن را بر اساس مقدار فاکتور شکل محاسبه شده، یعنی ۱/۷۶، به استوانه افقی شباهت داده است. عمق بدست آمده با عمق میانگین بدست آمده از حفاری‌های صورت گرفته در منطقه، یعنی ۱۰۳/۲ متر مطابقت قابل قبولی دارد.

کلمات کلیدی: ایله، بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته، میدان مغناطیسی

Magnetic field analysis using an improved global particle swarm optimization algorithm to estimate mineral mass depth and shape

Heidari M.¹, Meshinchi Asl M.^{2*}, Mehramuz M.³, Heidari R.⁴

Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; ¹ mahdieh_heidari90@yahoo.com

^{2*}Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; m.meshinchi@srbiau.ac.ir

³Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; m.mehramooz@srbiau.ac.ir

⁴Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; r.heidari@srbiau.ac.ir

* Corresponding author: Mir satar Meshinchi Asl

ABSTRACT

In this paper, the optimization algorithm based on the population as improved global particle swarm optimization is described and used for inverse modeling of two-dimensional magnetic field data. This algorithm is able to estimate the parameters of depth, shape factor, amplitude coefficient, magnetic inclination angle and origin point coordinates. To evaluate the efficiency of this method, the magnetic field of an artificial model was analyzed, with and without added random noise. The results suggest that the proposed algorithm is capable of model parameter estimation with high accuracy. Accordingly, the improved global particle swarm optimization algorithm was used to analyze the magnetic field of the study area in the Ile region in Iran located in Taybad city. The study area is very rich in terms of iron resources. The estimate for the study area is that the depth of the buried mass center is about 114.9 m and its approximate shape is similar to a horizontal cylinder based on the calculated shape factor value which is 1.76. The calculated depth is an acceptable match with the average depth of drillings: 103.2 m.

Keywords :Ile, Improved global particle swarm optimization, Magnetic field

۱-مقدمه

یکی از اهداف بسیار مهم در تفسیر داده مغناطیس‌سنجی، تعیین ویژگی‌هایی مانند اندازه، شکل و موقعیت انواع مختلف انواع ساختارهای زیرسطحی برای اهداف مختلف مانند اکتشاف، معدن و مطالعات زمین شناسی زیرسطحی می باشد. ساختارهای زمین شناختی زیرسطحی را می‌تواند بوسیله داده مغناطیس بطور قابل قبولی بصورت اشکال ساده هندسی مانند کره، استوانه یا ساختارهای صفحه ای مدل سازی نمود. پارامترهایی که شکل و موقعیت مدل‌های هندسی را کنترل می‌کنند، مانند عمق، طول و شعاع محاسبه می شوند و پارامترهایی که برای یک مدل بهترین میدان مغناطیسی را منتج می‌کنند بعنوان بهترین مدل در نظر گرفته می شود. تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی بطور قابل ملاحظه‌ای در مناطق اکتشافی با اهداف زیر سطحی مهم می‌باشد (نبیقیان و همکاران، ۲۰۰۵؛ عبدالرحمن و همکاران، ۲۰۰۹؛ اکینچی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین روش مغناطیس‌سنجی را می‌توان در اکتشاف هیدروکربنی (ابوبکر و همکاران، ۲۰۱۵)، اکتشاف معدن (عبدالرحمن و همکاران، ۲۰۱۶)، در کاربردهای مهندسی (دونگ و همکاران، ۲۰۰۷) و در تحقیق‌های آب زیرزمینی (آرافا و همکاران، ۲۰۱۵) بکار برد. همچنین در دو دهه اخیر، روش‌های بهینه‌سازی کلی در بسیاری از زمینه‌ها استفاده شده است، بطوریکه بعنوان یک گزینه برای این روش‌های وارون ساز ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مانند الگوریتم ژنتیک (بوسچتی و همکاران، ۱۹۹۷؛ کافان، ۲۰۱۷) و بهینه سازی ازدحام ذرات (وان دن برگ و انگلبرجت، ۲۰۰۴؛ عیسی و الحسین، ۲۰۱۷b، اسحق زاده و حاجیان، ۲۰۲۱). روش PSO در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت ارائه داده شد. از این روش و نیز روش‌های بهبود یافته آن بیشتر در شاخه‌های هوش مصنوعی و کامپیوتر استفاده شده است. در چند سال اخیر، روش بهینه سازی ازدحام ذرات PSO در شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک مورد استفاده قرار گرفته است (مونتریوسانتو، ۲۰۱۰؛ توش مالانی، ۲۰۱۳؛ سینگ و بیسواس، ۲۰۱۶؛ سینگ و سینگ، ۲۰۱۷؛ عیسی و الحسین، ۲۰۱۷؛ عیسی و الحسین، ۲۰۱۸؛ اسحق زاده و صاحباری، ۲۰۲۰؛ اسحق زاده و حاجیان، ۲۰۲۱).

۲-روش تحقیق

با توجه به عبدالرحمن و عیسی (۲۰۱۵)، جملات بی‌هنجاری مغناطیسی افقی، عمودی و شدت کل مدل‌های کروی، استوانه افقی، صفحه باریک و محل‌های تماس زمین شناختی بصورت زیر تعریف می‌شوند بطوریکه در معادله ۱، Z عمق مرکز توده، α مختصات مکان داده برداری، K ضریب دامنه، θ پارامتر زاویه میل و q فاکتور شکل می باشند. فاکتور شکل برای کره، استوانه افقی و صفحه باریک بترتیب ۲/۵، ۲ و ۱ می‌باشد که این مقادیر بترتیب معادل با ضریب ساختاری اوپلر ۳، ۲ و ۱ هستند. تعریف زاویه میل θ برای مولفه‌های میدان-های مختلف و چشمه‌های گوناگون، فرق می‌کند (گی، ۱۹۶۳؛ استندلی، ۱۹۷۷؛ پراکاسا راتو و همکاران، ۱۹۸۶؛ پراکاسا راتو و سابراهمنیان، ۱۹۸۸).

$$T(x_i, z) = K \frac{AZ^2 + B(x_i - x_0) + C(x_i - x_0)^2}{((x_i - x_0)^2 + Z^2)^q}, \quad A = \begin{Bmatrix} 3\sin^2\theta - 1 \\ 2\sin\theta \\ -\cos\theta \\ \cos\theta \\ \cos\theta/z \end{Bmatrix}, \quad B = \begin{Bmatrix} -3z \sin 2\theta \\ -3z \cos\theta \\ -3z \sin\theta \\ 2z \sin\theta \\ -\sin\theta \end{Bmatrix}, \quad C = \begin{Bmatrix} 3\cos^2\theta - 1 \\ -\sin\theta \\ 2\cos\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

۱-۲- بهینه سازی ازدحام ذرات

الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های تکامل یافته هوش مصنوعی، مبتنی بر هوش جمعی است که بر اساس روند تکاملی ذرات موجود در یک دسته به منظور رسیدن به هدف بهینه طراحی شده است. در سال ۱۹۹۵ ابرهارت و کنیدی برای اولین بار PSO را به عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه سازی تابعی مطرح نمودند. در الگوریتم PSO استاندارد، هر ذره i (پارامتر مورد بررسی) دارای دو قسمت اصلی شامل موقعیت فعلی ذره (x_i) (مقدار پارامتر) و سرعت فعلی ذره (v_i) (سرعت تغییر مقدار پارامتر) است. موقعیت بعدی هر ذره در فضای جستجو با موقعیت فعلی و سرعت بعدی آن تعیین می‌شود.

سرعت بعدی هر ذره با استفاده از چهار عامل اصلی یعنی موقعیت فعلی ذره، سرعت فعلی ذره، بهترین موقعیت ذره که تاکنون تجربه شده است و در حافظه آن ذخیره شده ($pbest$) و بهترین موقعیت در میان ذرات گروه که در حکم تجربه گروهی یاد می‌شود ($gbest$)، تعیین می‌شود. با توجه به تعاریف ذکر شده، سرعت بعدی هر ذره (پارامتر مدل) i با رابطه زیر بیان می‌شود (سویلا و همکاران، ۲۰۰۷):

$$v_i(t+1) = Wv_i(t) + c_1 \text{rand}(pbest(t) - x_i(t)) + c_2 \text{rand}(gbest(t) - x_i(t)) \quad (2)$$

W ضریب وزن اینرسی است که اثر سرعت در مرحله (تکرار) قبل را کنترل می‌کند. c_1, c_2 ضرایب شتاب یا ضرایب یادگیری فردی و گروهی ذره می‌باشند. دستور rand عددی تصادفی در بازه صفر و یک تولید می‌کند. $v_i(t)$ سرعت ذره (پارامتر) i ام در تکرار t و $x_i(t)$ مقدار ذره (پارامتر) i ام در تکرار t است. با تعیین سرعت بعدی هر ذره، موقعیت بعدی (مقدار پارامتر) آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (3)$$

۳- یافته ها

۱-۳- بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته

در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO برای افزایش سرعت همگرایی و به حداقل رساندن گیرافتادن در بهینه‌های محلی سرعت تغییر هر پارامتر را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$v_{i,j}^{k+1} = A[1 + (r \times \delta)] \quad A = \left[wv_{i,j}^k + c_1 r_{1,j}^k \frac{(p_{i,pbest}^k - m_{i,j}^k)}{rms-1} + c_2 r_{2,j}^k \frac{(p_{i,gbest}^k - m_{i,j}^k)}{rms} \right] \quad (4)$$

که در آنها rms خطای مغناطیس مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، $v_{i,j}^{k+1}$ سرعت موجود در تکرار k ام و $m_{i,j}^k$ موقعیت در تکرار k ام می‌باشد. در الگوریتم IGPSO برای مقدار سرعت $v_{i,j}^{k+1}$ نیز یک حد بالا در نظر می‌گیریم. اگر مقدار A از حدود تعریف شده بیشتر یا کمتر شد،

مقدار دلتای δ بترتیب برابر ۱ و ۱- در نظر گرفته می شود، در غیر اینصورت مقدار دلتا صفر فرض می شود. Γ یک عدد رندوم بین ۰ و ۱ است. همچنین در الگوریتم پیشنهادی، ضرایب شتاب را بصورت پویا در نظر می گیریم. بطوریکه:

$$(۵) \quad c_1 = 2.5 - \frac{0.5t_{it}}{T_{max}}$$

$$(۶) \quad c_2 = 1.5 + \frac{0.5t_{it}}{T_{max}}$$

t_{it} تکرار فعلی و T_{max} تعداد بیشینه تکرار است. مقدار $c_1 + c_2$ همواره کوچکتر یا مساوی ۴ می باشد.

همچنین ضریب وزن اینرسی بصورت زیر تغییر می کند:

$$w_{k+1} = (w_{max} - w_{min}) - (rand() - 0.5)2w_{mean}$$

$$If \ w_{k+1} < w_{min} \rightarrow w_{k+1} = w_{min}$$

$$If \ w_{k+1} > w_{max} \rightarrow w_{k+1} = w_{max} \quad 0 < w_{max}, w_{min} < 1 \quad (7)$$

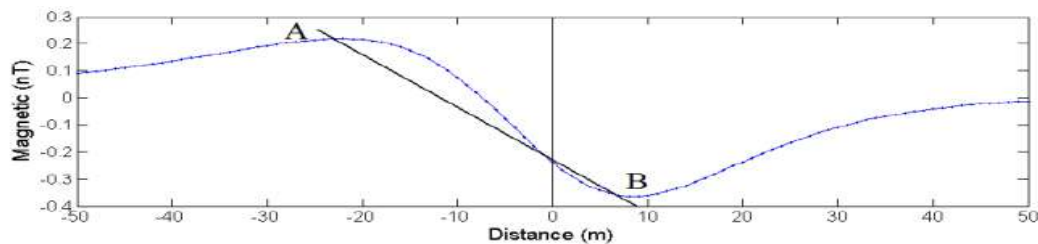
w_{min} حد پائین وزن، w_{max} حد بالای وزن، w_{mean} میانگین وزن و $rand()$ یک عدد رندوم بین ۰ و یک است. همانطور که از روابط بالا مشخص است، با تمهیدات در نظر گرفته شده با افزایش تعداد تکرار، c_1 کاهش می یابد. c_1 ضریب $pbest$ یا بهترین موقعیتی که ذره تاکنون تجربه کرده است. پس جستجو بصورت محلی است و با کاهش c_1 ، جستجوی محلی (local) هم کاهش می یابد. همچنین وجود ضریب rms^{-1} باعث بهبود جستجوی محلی می شود. از طرفی با افزایش تعداد تکرار، c_2 افزایش می یابد. c_2 ضریب $gbest$ یا بهترین موقعیت کل ذرات است. پس جستجو بصورت سراسری (global) انجام می شود. در نهایت با افزایش تعداد تکرار، توانایی جستجو بصورت سراسری افزایش می یابد و به یافتن بهینگی سراسری کمک خواهد کرد. برای جمله سوم معادله ۳-۷، ضریب rms باعث بهبود جستجوی سراسری می شود. با استفاده از تغییرات اعمال شده در الگوریتم PSO، می توان الگوریتم PSO را بهبود داده و مشکلات آن را برطرف کرده و به جواب اصلی که بهینگی سراسری (مطلق) است، دست یافت. لازم است که این توضیح داده شود که مقدار سرعت، در واقع یک مقدار عددی کوچک (مثبت یا منفی) می باشد که در هر تکرار به مقدار بدست آمده برای پارامترهای در تکرار قبلی، جمع یا تفریق می شود. با توجه به اینکه الگوریتم IGPSO برای بهینه سازی پارامترهای مجهول مدل، بصورت تکراری عمل کرده و در هر تکرار اثر میدان مغناطیسی مطابق با پارامترهای محاسبه شده برای مدل در آن تکرار، محاسبه و مقدار خطای بین داده های مغناطیس محاسبه ای و مشاهده ای (برداشت شده) برآورد می شود. مقدار خطا بین داده های مغناطیسی محاسبه ای و مشاهده ای از رابطه زیر بدست می آید. که در آن T_i^o مغناطیس مشاهده ای (برداشت شده) و T_i^c مغناطیس محاسبه ای می باشد.

$$Q = \frac{2 \sum_i^N |T_i^o - T_i^c|}{\sum_i^N |T_i^o - T_i^c| + \sum_i^N |T_i^o + T_i^c|} \quad (۸)$$

۴-تفسیر نتایج

۴-۱-مدلسازی مصنوعی

شکل ۱ میدان مغناطیسی افقی مربوط به یک مدل کروی مصنوعی واقع در عمق ۳۰ متری که مرکز آن منطبق با مبدا پروفیل برداشت داده (یعنی $X_0 = 0$) است را نشان می‌دهد. زاویه میل مغناطیسی ۵۰ درجه و ضریب دامنه 10000 nT در نظر گرفته شده است. طول پروفیل برداشت داده مغناطیسی ۱۰۰ متر، فاصله داده برداری یک متر و مقدار میدان مغناطیسی در نقطه مبدا 0.2381 نانو تسلا می‌باشد. مقادیر اولیه فرض شده برای پارامترهای این مدل در جدول ۱ آورده شده است. اگرچه نقطه مبدا در مدل مصنوعی مشخص و از قبل تعریف شده است، با این حال برای مشخص کردن نقطه مبدا، از روش استندلی (۱۹۹۷) نیز می‌توان استفاده نمود که برای پروفیل برداشت میدان مغناطیسی واقعی بسیار کارا می‌باشد. در این روش، بیشترین و کمترین مقدار داده مغناطیسی در راستای پروفیل را به هم وصل می‌نماییم (خط AB در شکل ۱). نقطه برخورد این خط با منحنی تغییرات میدان مغناطیسی را می‌توان بعنوان مبدا پروفیل در نظر گرفت.



شکل (۱): میدان مغناطیسی افقی مربوط به یک مدل کروی مصنوعی

برای مدل سازی با روش الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO صد مدل اولیه با توجه به گستره در نظر گرفته شده برای پارامترهای عمق، زاویه میل مغناطیسی، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل تولید می‌شود (جدول ۱). در هر تکرار مقدار پارامترها تغییر کرده و برای متغیرهای جدید میدان مغناطیسی محاسبه می‌گردد و خطای بین میدان مغناطیسی محاسبه شده و برداشت شده تعیین می‌شود. تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای هر بار اجرای برنامه ۸۰ تکرار است که مقادیر نهایی بدست آمده برای هر پارامتر ذخیره می‌گردد. نمودار فراوانی برای هر پارامتر ترسیم شده و میانگین بازه‌ای که دارای بیشترین جواب می‌باشد بعنوان مقدار نهایی آن پارامتر در نظر گرفته خواهد شد.

شکل ۲ الف تا ۲ هـ نمودار فراوانی متناظر با مقادیر بدست آمده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های اخیر بیشترین مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل بترتیب در بازه‌های $30/5$ تا $31/5$ متر، 10200 تا 10600 نانو تسلا، $0/25$ تا $0/75$ متر، $48/5$ تا $49/5$ درجه و $2/3$ تا $2/5$ قرار دارند. بر اساس روش میانگین گیری، بترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل مقادیر ۳۱ متر، $10500/8$ نانو تسلا، $49/36$ درجه، $0/515$ متر و $2/44$ حاصل شده است (جدول ۱). شکل ۳ الف میدان مغناطیسی تئوری و نیز میدان مغناطیسی تولید شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته و شکل ۳ ب اختلاف بین میدان مغناطیسی تئوری و نیز میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقاط اندازه گیری متناظر را نشان می‌دهد.

جدول ۱: گستره در نظر گرفته شده برای پارامترهای مدل مصنوعی و نتایج بدست آمده از الگوریتم IGPSO

| پارامتر | عمق (z) (متر) | ضریب دامنه (nT) | زاویه میل (درجه) (θ) | نقطه مبدا | فاکتور شکل | خطا (misfit) |
|---------|---------------|-----------------|-------------------------------|-----------|------------|--------------|
|---------|---------------|-----------------|-------------------------------|-----------|------------|--------------|

| | | | | | | |
|--------|-----------|---------|----------|---------------|----------|--------------|
| | | (متر) | | | | |
| - | ۲/۵ | ۰ | ۵۰ | ۱۰۰۰۰ | ۳۰ | مقادیر اولیه |
| - | ۳۰ تا ۰/۵ | ۵ تا -۵ | ۴۵ تا ۵۵ | ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ | ۲۵ تا ۳۵ | گستره |
| ۰/۰۴۴۲ | ۲/۴۴ | -۰/۵۱۵ | ۴۹/۳۶ | ۱۰۵۰۰/۸ | ۳۱ | بدون نوفه |
| ۰/۱۰۵۵ | ۲/۴۴ | -۱/۱۹ | ۵۰/۳۲ | ۹۶۶۶/۸ | ۳۰/۵۶ | نوفه دار |

خطای بدست آمده بین میدان مغناطیسی تئوری و میدان مغناطیسی محاسبه شده بر اساس مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مدل، ۰/۰۴۴۲ می‌باشد. برای بررسی کارایی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته در حضور نوفه، به میدان مغناطیسی تئوری مقدار نوفه تصادفی بر اساس رابطه زیر اضافه گردید (عبدالرحمن و عیسی، ۲۰۱۵):

$$T_{noise}(x_i) = T(x_i) + K(rand(i) - 0.5) \quad (9)$$

که در معادله اخیر، $T_{noise}(x_i)$ میدان مغناطیسی نوفه دار در نقطه x_i ، k یک عدد ثابت که دامنه و بزرگی نوفه را تعیین می‌کند (که برای این مدل ۰/۰۵ می‌باشد) که به بزرگی دامنه میدان مغناطیسی وابسته است و $rand$ یک عدد رندوم بین صفر و یک می‌باشد. بر اساس روش میانگین گیری، بترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل مقادیر ۳۰/۵۶ متر، ۹۶۶۶/۸ نانوتسلا، -۱/۱۹ متر، ۵۱/۳۲ درجه و ۲/۴۴ حاصل شده است (جدول ۱). شکل ۵ الف میدان مغناطیسی تئوری نوفه دار و نیز میدان مغناطیسی تولید شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته و شکل ۵ ب اختلاف بین میدان مغناطیسی تئوری نوفه دار و نیز میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقاط اندازه گیری متناظر را نشان می‌دهد. خطای بدست آمده بین میدان مغناطیسی تئوری نوفه دار و میدان مغناطیسی محاسبه شده بر اساس مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مدل، ۰/۱۰۵۵ می‌باشد. با توجه به جدول ۱، خطای بین مقادیر فرض شده اولیه و مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل برای میدان مغناطیسی بدون نوفه بترتیب ۱ متر، ۵۰/۸ نانوتسلا، -۰/۵۱۵ متر، ۰/۶۴ درجه و ۰/۰۶ و برای میدان مغناطیسی آغشته به نوفه بترتیب ۰/۵۶ متر، ۳۳۳/۲ نانوتسلا، -۱/۱۹ متر، ۰/۳۲ درجه و ۰/۰۶ می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از وارون سازی میدان مغناطیسی تئوری، بدون نوفه و نیز در حضور نوفه، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته را می‌توان روشی موثر و با عملکردی قابل قبول در تحلیل میدان‌های مغناطیسی بحساب آورد.

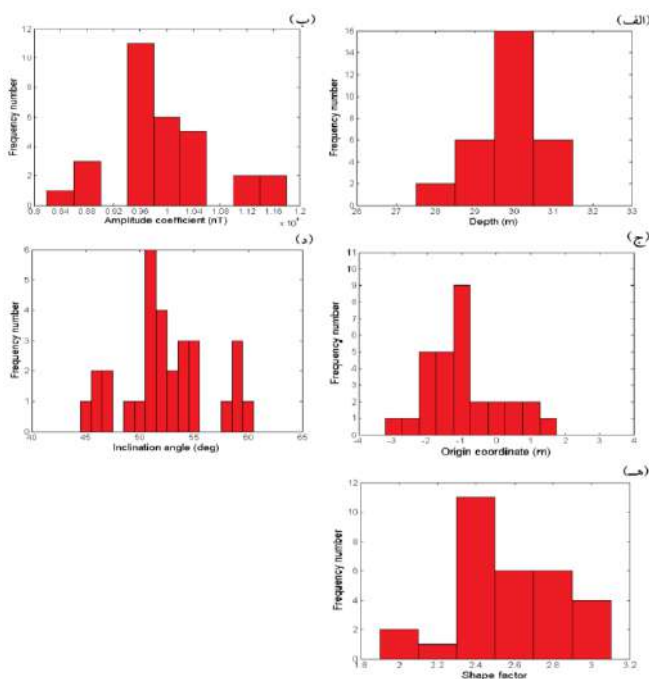
۲-۴-مدلسازی داده واقعی

محدوده مورد مطالعه در استان خراسان رضوی، شهرستان تایباد و روستایی به نام ایله قرار دارد. در این محدوده، فواصل پروفیل‌ها ۲۰*۵۰ متر در جهت شمال- جنوب انتخاب شد.

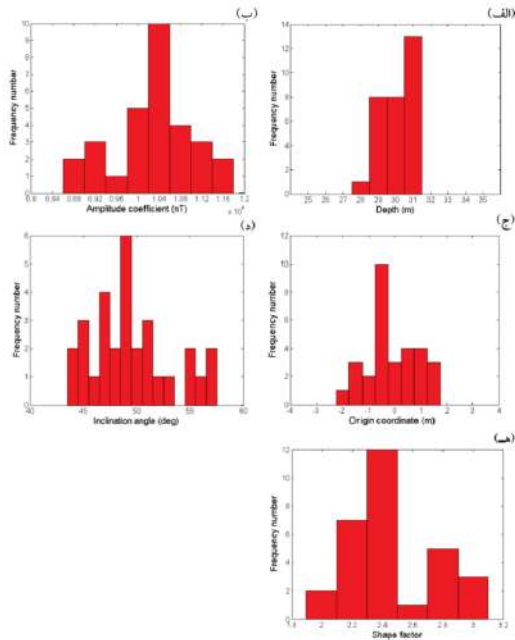
برای مدلسازی چشمه بی‌هنجاری مغناطیسی با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته، پروفیل BB' به طول ۷۱۰ متر مطابق شکل ۶ بر روی اثر میدان مغناطیسی چشمه بی‌هنجاری در نرم افزار ژئوسافت زده شد. داده برداری در ۷۲ نقطه با فاصله ۱۰ متر انجام گردید. شکل ۷ تغییرات میدان مغناطیسی در راستای پروفیل BB' را نشان می‌دهد. مختصات نقطه مبدا بر اساس روش استنلی (۱۹۷۷)، یعنی محل برخورد خط EF که کمترین و بیشترین مقدار میدان مغناطیسی در راستای پروفیل BB' را بهم وصل می‌کند با منحنی تغییرات میدان مغناطیسی، نقطه ۳۱۰ متر می‌باشد.

برای مدلسازی با روش الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO ۱۲۰ مدل اولیه با توجه به گستره در نظر گرفته شده برای پارامترهای ساختاری عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل که بر اساس اطلاعات زمین شناسی انتخاب شده‌اند، تولید می‌شود (جدول ۲). همانطور که قبل ذکر شد، برنامه در هر تکرار بررسی می‌کند که مقدار پارامترهای محاسبه شده از مقادیر بهینه و کمینه تعریف شده در جدول ۲ تخطی نکند. کمترین خطای در نظر گرفته شده برای توقف تکرار بر اساس تابع هدف (معادله ۹) ۰/۱ می‌باشد. تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای هر بار اجرای برنامه ۲۰ تکرار است که مقادیر نهایی بدست آمده برای هر پارامتر ذخیره می‌گردد. برای تحلیل میدان مغناطیسی منطقه ایله، کد نوشته شده در متلب برای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO برای ۵۰ تکرار مستقل اجرا می‌شود. بنابراین در پایان اجرای کد، برای هر متغیر ۵۰ مقدار محاسبه شده وجود خواهد داشت. مشابه مدل‌های مصنوعی بررسی شده، نمودار فراوانی برای هر پارامتر ترسیم شده و میانگین مقادیر بازه‌ای که بیشترین جواب‌ها در آن گستره واقع شده است، بعنوان مقدار نهایی آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود. نمودار فراوانی متناظر با مقادیر بدست آمده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل در شکل ۸ الف تا ۸ هـ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، بیشترین مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل بترتیب در بازه‌های ۱۱۲/۵ تا ۱۱۷/۵ متر، ۱۹۵۰۰۰ تا ۲۰۵۰۰۰ نانوتسلا، ۳۱۵ تا ۳۲۵ متر، ۵۷/۵ تا ۶۲/۵ درجه، و ۱/۷ تا ۱/۸ قرار دارند. همانطور که قبلاً نیز ذکر شده است، میانگین مقادیر واقع در این بازه‌ها بعنوان مقادیر نهایی برای پارامترهای ساختار مدفون در نظر گرفته می‌شوند که بترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل ۱۱۴/۹ متر، ۲۰۱۴۵۰ نانوتسلا، ۳۱۶/۴ متر، ۶۰/۲ درجه و ۱/۷۶ می‌باشند (جدول ۲).

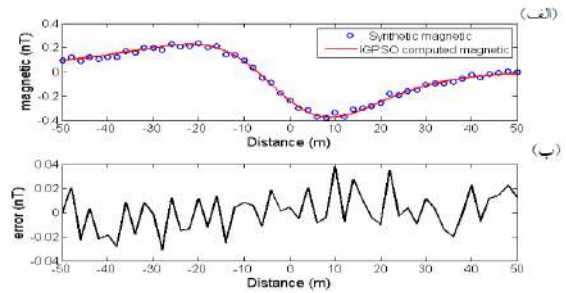
شکل ۹ الف میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده (مشاهده ای) و نیز میدان مغناطیسی محاسبه شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO و شکل ۹ ب اختلاف بین میدان مغناطیسی مشاهده‌ای و نیز میدان مغناطیسی محاسبه‌ای در نقاط اندازه‌گیری متناظر را نشان می‌دهد. خطای بدست آمده بین میدان مغناطیسی مشاهده‌ای و میدان مغناطیسی محاسبه‌ای بر اساس مقادیر بدست آمده برای پارامترهای ساختاری، ۰/۲۶ می‌باشد. براساس مقدار فاکتور شکل تخمین زده شده، شکل توده زیر سطحی از نظر هندسی به استوانه افقی نزدیک تر است. همچنین مقدار مختصات مبدا بدست آمده با روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته، ۳۱۶/۵ متر است که با مقدار بدست آمده از روش استنلی (۱۹۷۷)، یعنی ۳۱۰ متر، مطابقت قابل قبولی دارد.



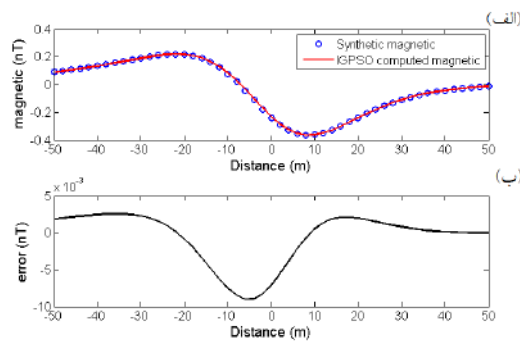
شکل (۴): نمودار فراوانی با مقادیر بدست آمده برای پارامترهای الف (عمق، ب) ضریب دامنه، ج) مختصات نقطه مبدا، د) زاویه میل و ه) فاکتور شکل با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته برای داده مغناطیسی تئوری نوفه‌دار



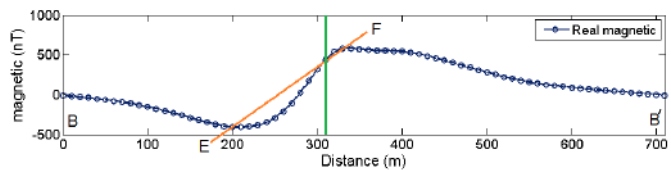
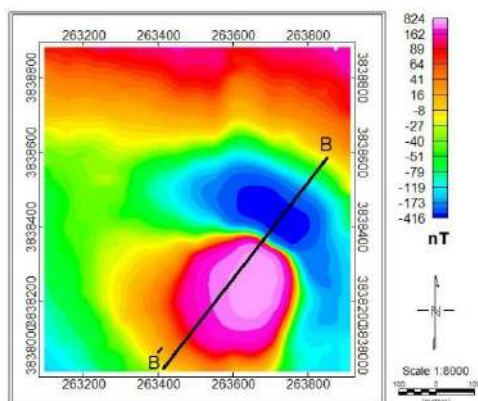
شکل (۲): نمودار فراوانی متناظر با مقادیر بدست آمده برای پارامترهای الف (عمق، ب) ضریب دامنه، ج) مختصات نقطه مبدأ، د) زاویه میل و ه) فاکتور شکل با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته برای داده مغناطیسی تئوری بدون نوفه



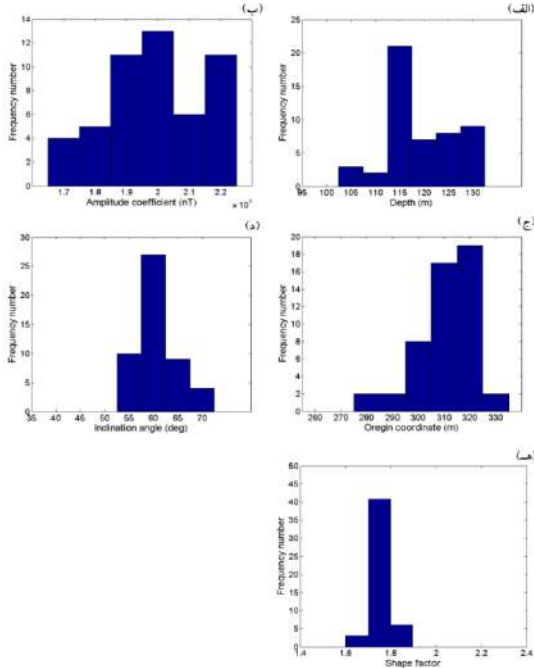
شکل (۳): الف) میدان مغناطیسی تئوری و نیز میدان مغناطیسی تولید شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته، ب) اختلاف بین میدان مغناطیسی تئوری و نیز میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقاط اندازه گیری متناظر



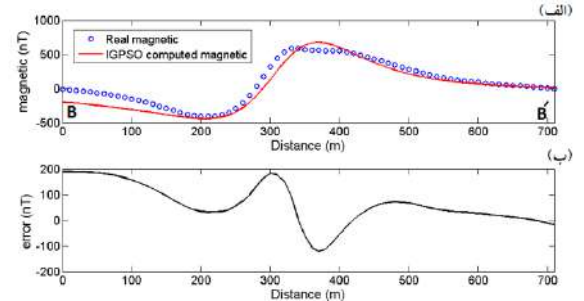
شکل (۴): الف) میدان مغناطیسی تئوری نوفه دار و نیز میدان مغناطیسی تولید شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته، ب) اختلاف بین میدان مغناطیسی تئوری نوفه دار و نیز میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقاط اندازه گیری متناظر



شکل (۷): تغییرات میدان مغناطیسی در راستای پروفیل **BB'**



شکل (۸): نمودار فراوانی متناظر با مقادیر بدست آمده برای محدوده ایله



شکل (۹): الف) میدان مغناطیسی اندازه گیری شده و میدان مغناطیسی محاسبه شده با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته (ب) اختلاف بین میدان مغناطیسی مشاهده ای و نیز میدان مغناطیسی محاسبه ای در نقاط اندازه گیری متناظر

جدول ۲: گستره در نظر گرفته شده و مقادیر بدست آمده از تحلیل میدان مغناطیسی منطقه ایله

| خطا (misfit) | فاکتور شکل | نقطه مبدا (متر) | زاویه میل (درجه) (θ) | ضریب دامنه (nT) | عمق (Z) (متر) | پارامتر |
|--------------|------------|-----------------|-------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| - | ۰/۵ تا ۳ | ۲۰۰ تا ۴۰۰ | ۸۰ تا ۳۰ | ۱۰۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰۰ | ۱۴۰ تا ۷۰ | گستره |
| - | ۱/۸ تا ۱/۷ | ۳۱۵ تا ۳۲۵ | ۶۲/۵ تا ۵۷/۵ | ۱۹۵۰۰۰ تا ۲۰۵۰۰۰ | ۱۱۲/۵ تا ۱۱۷/۵ | گستره بیشینه |
| ۰/۲۶ | ۱/۷۶ | ۳۱۶/۴ | ۶۰/۲ | ۲۰۱۴۵۰ | ۱۱۴/۹ | مقادیر محاسبه شده |

۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته که عملکرد آن بر اساس تعریف جمعیت اولیه می باشد، برای مدل سازی وارون داده مغناطیسی استفاده شده است. این روش قادر است تا میدان های مغناطیسی که به قطب یا استوا منتقل نشده اند را با دقت قابل قبولی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد، مشروط بر اینکه مقادیر پارامترهای ساختار زیرسطحی که شامل عمق، ضریب دامنه، مختصات نقطه مبدا، زاویه میل و فاکتور شکل می باشند، در گستره عددی فرض شده اولیه برای پارامترهای مدل که برای تولید جمعیت اولیه (مدل های اولیه مختلف) مورد استفاده واقع می شوند، قرار داشته باشند. نتایج بدست آمده از مدل سازی داده مصنوعی نشان می دهد که روش بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته قادر است تا با دقت قابل قبولی پارامترهای مدل را تخمین بزند. با توجه به

عملکرد خوب این روش در تحلیل داده مغناطیسی تئوری، در حضور و عدم نوفه، از آن در مدلسازی وارون میدان مغناطیسی دو بعدی محدوده مطالعاتی واقع در روستای ایله استفاده شد. میدان مغناطیسی محاسبه شده بر اساس پارامترهای تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته، با روند تغییرات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده در راستای پروفیل برداشت داده، مطابقت بسیار خوبی داشته، بطوریکه خطای برابر ۰/۲۶ را نشان می دهد. عمق تخمین زده شده با الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته برای مرکز توده ۱۱۴/۹ متر بوده که این عمق با عمق میانگینی که برای مرکز توده مدفون با استفاده از حفاری بدست آمده است، یعنی ۱۰۳/۲ متر تطابق قابل قبولی دارد.

۶-منابع

- [1]Abdelrahman, E. M., & Essa, K. S. (2015) A new method for depth and shape determinations from magnetic data. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 439–460.
- [2]Abdelrahman, E. M., Essa, K. S., El-Araby, T., & Abo-Ezz, E. R. (2016). Depth and shape solutions from second moving average residual magnetic anomalies. *Exploration Geophysics*, 47, 58–66.
- [3]Abdelrahman, E. M., Soliman, K. S., El-Araby, T. M., Abo-Ezz, E. R., & Essa, K. S. (2009). A least-squares standard deviation method to interpret magnetic anomalies due to thin dikes. *Near Surface Geophysics*, 7, 41–46.
- [4]Abubakar, R., Muxworthy, A. R., Sephton, M. A., Southern, P., Watson, J. S., Fraser, A. J., et al. (2015). Formation of magnetic minerals at hydrocarbon-generation conditions. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 509–519.
- [5]Al-Garni, M. A. (2011). Magnetic and DC resistivity investigation for groundwater in a complex subsurface terrain. *Arabian Journal of Geosciences*, 4, 385–400.
- [6]Araffa, S. A. S., Helaly, A. S., Khozium, A., Lala, A. M. S., Soliman, S. A., & Hassan, N. M. (2015). Delineating groundwater and subsurface structures by using 2D resistivity, gravity and 3D magnetic data interpretation around Cairo-Belbies Desert road, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 4, 134–146.
- [7]Boschetti, F., Denith, M. C., & List, R. D. (1997). Inversion of potential field data by genetic algorithms. *Geophysical Prospecting*, 45, 461–478.
- [8]Dong, P., Fan, J. L., Liu, C. H., Chen, G. W., Wang, L. S., Sun, B., et al. (2007). Magnetic anomaly characteristics out of reinforcement cage in cast-in situ pile. *Progress in Geophysics*, 22(5), 1660–1665. (in Chinese).
- [9]Ekinci, Y. L., Balkaya, C. S., Eren, A., Kaya, M. A., & Lightfoot, C. S. (2014). Geomagnetic and geoelectrical prospection for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine City in Midwestern Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11, 015012.
- [10]Eshaghzadeh A, Hajian A (2021) .2-D gravity inverse modelling of anticlinal structure using improved particle swarm optimization (IPSO). *Arabian Journal of Geosciences* 14(1378).
- [11]Eshaghzadeh A, Hajian A (2020) Multivariable Modified Teaching Learning Based Optimization (MM-TLBO) Algorithm for Inverse Modeling of Residual Gravity Anomaly Generated by Simple Geometric Shapes. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 25(4):463-476.
- [12]Essa KS, Elhussein M (2018) Gravity Data Interpretation Using Different New Algorithms: A Comparative Study. *Gravity-Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect, Licensee InTech*.
- [13]Essa KS, Elhussein M (2018) PSO (Particle Swarm Optimization) for Interpretation of Magnetic Anomalies Caused by Simple Geometrical Structures. *Pure Appl Geophys* 175: 3539–3553.
- [14]Essa, K. S., & Elhussein, M. (2017b). 2D dipping dike magnetic data interpretation using a robust particle swarm optimization. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, Discuss*.
- [15]Kaftan, I. (2017). Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm. *Acta Geophysica*, 65, 627–634.
- [16]Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks* 4: 1942–1948.
- [17]Monteiro Santos FA (2010) Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization. *Computers & Geosciences* 36: 1185–1190.
- [18]Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., et al. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33–61.
- [19]Pallero JLG, Fernández-Martínez JL, Bonvalot S, Fudym O (2015) Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization. *Journal of Applied Geophysics* 116: 180–191.
- [20]Roshan R, Singh UK (2017) Inversion of residual gravity anomalies using PSO. *Geosci Instrum Method Data* 6, 71–79.

- [21]Singh A, Biswas A (2016) Application of global particle swarm optimization for inversion of residual gravity anomalies over geological bodies with idealized geometries. *Natural Resources Research* 25: 297–314.
- [22]Singh KK, Singh UK (2017) Application of particle swarm optimization for gravity inversion of 2.5-D sedimentary basins using variable density contrast. *Geosci Instrum Method Data Syst* 6: 193–198.
- [23]Toushmalani R (2013) Comparison result of inversion of gravity data of a fault by particle swarm optimization and Levenberg–Marquardt methods. *SpringerPlus* 2: 462.

اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی به‌وسیله‌ی پهپاد

سارا عذیری^۱، هاشم شاهسونی^۲

۱ سارا عذیری دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ sara.o@aut.ac.ir

۲ هاشم شاهسونی دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان؛ h.shahsavani@uok.ac.ir

* نویسنده مسئول: سارا عذیری

چکیده فارسی

مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که به صورت گسترده‌ای به منظور پی‌جویی موادمعدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های حسگرهای مورد استفاده در این روش به گونه‌ای است که می‌توان برداشت‌های مغناطیس‌سنجی را به صورت هوایی نیز انجام داد. اخیراً حسگرهای میکرو الکترومکانیکی (ممز) معرفی شده‌اند که بسیار سبک هستند و اندازه کوچکی دارند. این حسگرها مصرف انرژی بسیار پایینی داشته و حساسیت قابل قبولی دارند. به این ترتیب برای نصب بر روی پهپاد به منظور اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان مغناطیسی بسیار مناسب هستند. در صورتی که میدان مغناطیسی زمین با استفاده از چهار حسگر برداری، در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شود آنگاه می‌توان ماتریس تانسور کامل میدان مغناطیسی زمین، که شامل مشتقات جهتی در تمام نقاط است و دارای نه درایه می‌باشد را در هر نقطه از امتداد پروفیل مورد نظر به دست آورد. در این پژوهش چهار حسگر ممز با آرایش صلیبی تنظیم و به‌وسیله‌ی طناب از پهپاد آویزان شده‌اند. سپس، هم‌زمان با برداشت زمینی با استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون، برداشت با استفاده از پهپاد بر روی پنج پروفیل انجام شده است. در پایان ماتریس تانسور کامل برای تمام داده‌ها در امتداد پروفیل برداشت به دست آورده شد. نتایج به دست آورده شده نشان می‌دهد که برداشت توسط حسگرهای ممز به روش تانسور کامل گرادیان مغناطیسی باعث تولید نقشه‌های مغناطیسی با قدرت تفکیک بالایی نسبت به روش معمول اندازه‌گیری با استفاده از یک حسگر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی، حسگر ممز، مگنتومتر پروتون

Full magnetic field gradient survey by unmanned aerial vehicle (UAV)

Ozayri Sara¹, Shahsavani Hashem²

¹Ozayri Sara PhD student in mining exploration engineering, Amirkabir University of Technology;
sara.o@aut.ac.ir

²Shahsavani Hashem, Associate Professor Department of Mining Engineering, University of Kurdistan;
h.shahsavani@uok.ac.ir

* Corresponding author: Ozayri Sara

ABSTRACT

Magnetometry is one of the geophysical methods that is widely used to search for minerals. The characteristics of the sensors used in this method are such that magneto metric measurements can also

be taken in the air. Recently, sensors of the Mems type have been introduced, which are very light and have a small size. These sensors have very low energy consumption and acceptable sensitivity. In this way, they are very suitable for installation on the UAV to measure the full tensor of the magnetic gradient. If the earth's magnetic field is measured in three perpendicular directions using four vector sensors, then the full tensor matrix of the earth's magnetic field, which includes directional derivatives at all points and has nine levels, can be obtained at any point along the desired profile. Gained. In this research, four MEMS sensors are arranged in a cross arrangement and hung from the drone by a rope. Then, at the same time as the ground survey using a proton magnetometer, the survey using a drone has been carried out on five profiles. At the end, the full tensor matrix was obtained for all the data along the harvesting profile. The obtained results show that the collection by MEMS sensors using the tensor-complete magnetic gradient method produces magnetic maps with high resolution compared to the usual measurement method using a single sensor.

Keywords: UAV, full magnetic field gradient tensor, MEMS sensor, proton magnetometer

مقدمه

اخیراً استفاده از پهپاد در زمینه برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد مورد توجه ژئوفیزیکدانان قرار گرفته است. یکی از مشکلات عمده در زمینه مغناطیس‌سنجی با استفاده از پهپاد، ساختار مغناطیس‌سنج‌ها می‌باشد که اغلب اندازه بزرگ، وزن زیاد و مصرف انرژی بالایی دارند [۱]. حسگرهای ممز کوچک و سبک هستند، و مصرف انرژی کم، وضوح و دقت نسبی بالایی دارند [۲]. این حسگرها به دلیل ویژگی‌های ذکر شده، برای استفاده در مغناطیس‌سنجی هوابرد بسیار مناسب می‌باشند. حسگرهای ممز برداری هستند، اما آرایش به شکل فول تانسور سبب می‌شود که چرخش حسگرها تأثیر چندانی روی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی نداشته باشد. این حسگرها به دلیل وزن کمی که دارند، مصرف باتری پهپاد را کاهش داده و در نتیجه باعث افزایش زمان مداومت پرواز خواهند شد. این موضوع باعث کاهش هزینه و افزایش سرعت عملیات برداشت می‌شود. این مگنتومترها در مقایسه با مگنتومتر پروتون، بسیار ارزان قیمت، سبک و کوچک می‌باشند [۳]. شاید اولین آزمایش‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد به وسیله پهپادهایی از سری آنت- پلین یک و دو^{۱۲} باشد که در هفدهم- هجدهم نوامبر سال ۲۰۰۳ میلادی در منطقه‌ای نزدیک شهر کاگوشیما^{۱۳} در ژاپن به پرواز در آمدند [۴]. تلاش‌های بسیار زیاد در خور توجه‌ای به منظور استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد در دهه گذشته انجام گرفته است [۵]. بررسی‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد توسط پهپاد شکاف بین مغناطیس‌سنجی هوابرد سنتی و برداشت به روش زمینی را پر می‌کند [۶]. حسگرهای ممز به دلیل ویژگی‌های خاص ذکر شده، برای برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد، توسط پهپاد مناسب هستند. در این پژوهش از مغناطیس‌سنج پروتون و به کار گیری حسگرهای ممز توسط پهپاد به عنوان یک ابزار کارآمد در برداشت‌های ژئوفیزیکی، در مرحله پی‌جویی و اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی استفاده شده است.

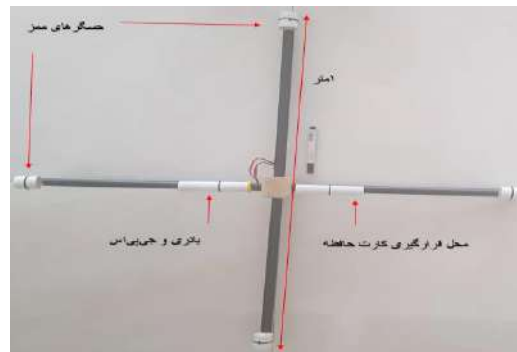
روش‌های تحقیق

در این مطالعه ابتدا نتایج حاصل از برداشت زمینی توسط مگنتومتر پروتون با نتایج حاصل از برداشت هوایی توسط حسگرهای ممز مقایسه شدند. سپس، با استفاده از چهار حسگر ممز ماتریس تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی زمین اندازه‌گیری شد (شکل ۱). حسگرهای ممز به صورت صلیبی (مقاطع) چیده شده‌اند. به منظور استقامت کافی و نیز سبکی لازم از دو عدد لوله فیبر کربن که به صورت عمود بر هم قرار گرفته‌اند استفاده شد. به منظور کاهش حداکثری چرخش حسگرها از چهار عدد ریسمان نازک و سبک استفاده شد که از یک سمت به دولوله فیبر کربن عمود بر هم و از یک سمت به پهپاد متصل شده بودند (شکل ۲). آویزان کردن حسگرها از پهپاد به دلیل از

¹²- Ant-plane 1 & 2

¹³- Kagoshima

بین بردن یا کاهش اثرات ناشی از نوفه موتورهای پهپاد می‌باشد. این فاصله معمولاً ۳ متر و بیشتر می‌باشد. در این تحقیق ابتدا برداشت‌هایی با فواصل مختلف از پهپاد بدون ملخ توسط حسگرها انجام شد تا میزان نوفه موتور پهپاد بر روی حسگر به دست آورده شود. نتایج نشان داد در فاصله بیشتر از ۱.۵ متر هیچ اثری از نوفه حاصل از موتورها بر روی حسگر وجود ندارد. برای اطمینان خاطر عدد ۲.۵ متر انتخاب شد. برداشت هوایی بر روی پروفیل‌هایی که از قبل طراحی شده‌اند، انجام شده است. برداشت توسط حسگرهای ممز به صورت پیوسته و با فرکانس ۱ هرتز می‌باشد. تعداد نمونه‌های برداشت شده توسط حسگر ممز ۸۲۵۷ عدد، فاصله‌ی^۴ بین نمونه‌ها ۱۲ سانتی‌متر، فاصله حسگرها تا زمین ۲ متر و فاصله‌ی حسگرها تا پهپاد ۲.۵ متر است.



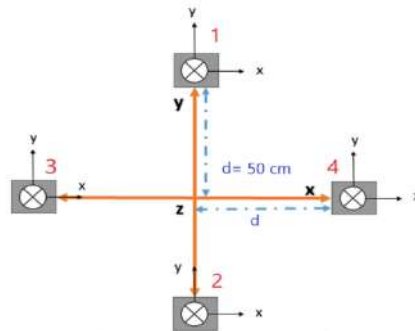
شکل (۱): سیستم تانسور گرادیان میدان مغناطیسی و اجزای آن



شکل (۲): آرایش صلیبی حسگرهای ممز آویزان شده از پهپاد

مگنتومتر پروتون چندین سال مورد استفاده کاربران قرار گرفته و صحت، درستی و دقت آن ثابت شده است. به همین منظور، برای اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی ابتدا نتایج به دست آمده از حسگر ممز که به صورت هواپرد برداشت شد با نتایج حاصل از مغناطیس‌سنج پروتون مقایسه و صحت‌سنجی شد، تا پاسخ نتایج تانسور نیز قابل قبول باشد.

ساختار آرایه تأثیر زیادی در طراحی کلی سیستم دارد. سیستم این مطالعه که از چهار حسگر ممز با آرایش متقاطع استفاده شده است، کمترین میزان خطا را دارد. (شکل ۳).



شکل (۳): آرایه حسگرهای ممز برای تشکیل تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی

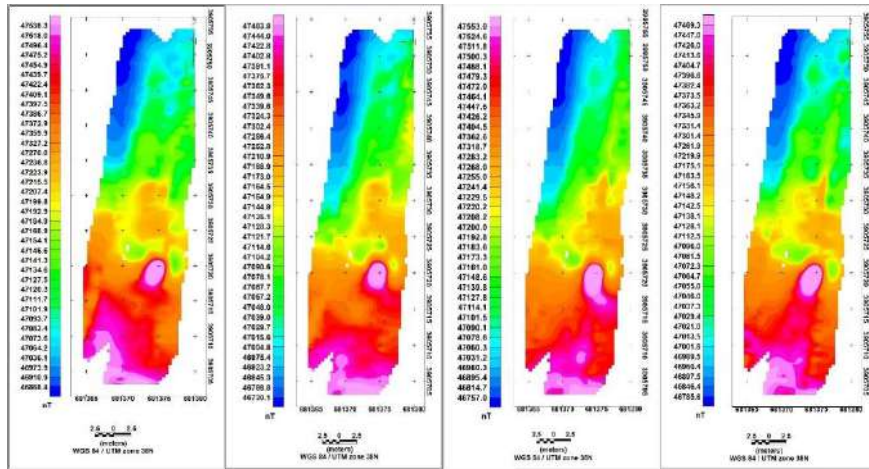
برای ساختار آرایه حسگرها، تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی G در این مطالعه به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$G = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{yx} & B_{zx} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{zy} \\ B_{xz} & B_{yz} & B_{zz} \end{bmatrix}$$

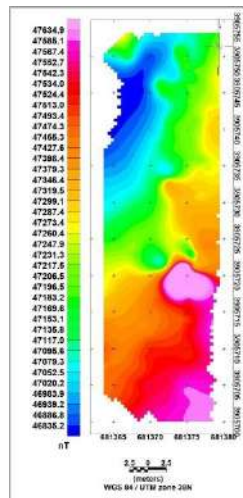
$$= \begin{bmatrix} \frac{S_{4x} - S_{3x}}{d} & \frac{S_{1x} - S_{2x}}{d} & \frac{S_{4z} - S_{3z}}{d} \\ \frac{S_{4y} - S_{3y}}{d} & \frac{S_{1y} - S_{2y}}{d} & \frac{S_{1z} - S_{2z}}{d} \\ \frac{S_{4z} - S_{3z}}{d} & \frac{S_{1z} - S_{2z}}{d} & \frac{-(S_{4x} - S_{3x}) - (S_{1y} - S_{2y})}{d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

یافته‌ها

نقشه‌های به‌دست آمده با استفاده از حسگرهایی که روی پهپاد نصب شده بودند تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند. این موضوع نشان دهنده قابلیت اطمینان به پاسخ حسگرها و تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده از این نوع از حسگرها می‌باشد (شکل ۴). علاوه بر این‌ها، حسگرها به‌خوبی محل بی‌هنجاری را مشخص کرده‌اند و تا حد زیادی دوقطبی حاصل از بی‌هنجاری آشکار شده‌است و انطباق خوبی با داده‌های مغناطیس‌سنج پروتون دارند (شکل ۵).

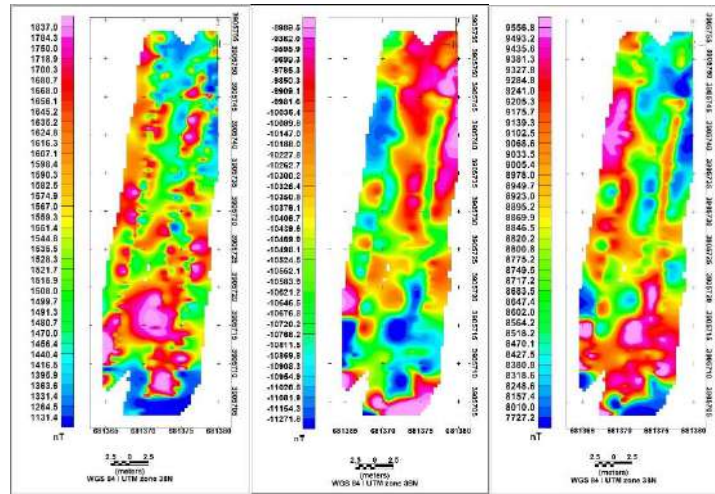


شکل (۴): نقشه‌های شدت میدان مغناطیس کل زمین توسط حسگرهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب از چپ به راست

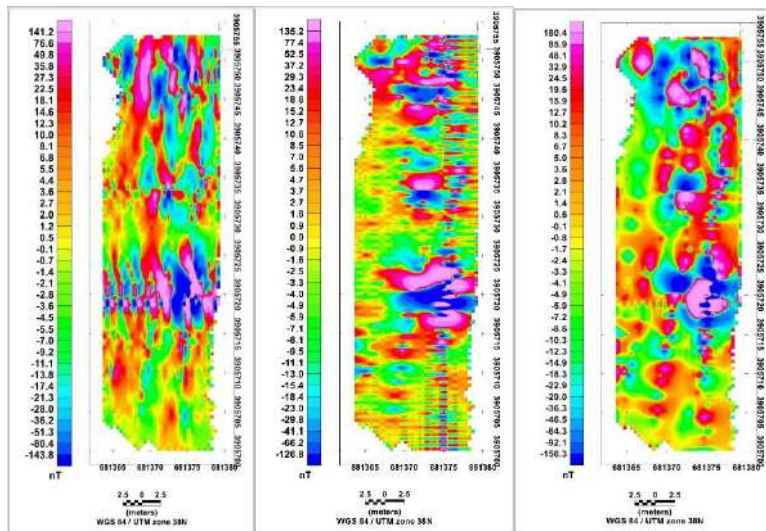


شکل (۵): نقشه شدت مغناطیسی محدوده برداشت توسط مگنتومتر پروتون

با توجه به این انطباق می‌توان امیدوار بود که مشتقات سوئی به‌دست آمده از حسگرها دقیق‌تر از مشتقات سوئی به‌دست آمده از داده‌های مغناطیس‌سنج پروتون باشد که تنها به‌صورت ریاضی به‌دست آورده می‌شوند. برای این منظور مشتقات سوئی که مؤلفه‌های ماتریس کامل میدان مغناطیسی هستند به‌دست آورده شده است. در شکل‌های زیر مشتق سوئی B_{xx} ، B_{yy} و B_{zz} نشان داده شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان به این نتیجه رسید که از نظر نویز زمینه و داده‌های به‌دست آمده، مقاطع به‌دست آمده با گرادیان بسیار صاف‌تر از مقاطع به‌دست آمده از طریق مشتق‌گیری ریاضی هستند.



شکل (۶): نقشه مؤلفه‌ی XX ، YY و ZZ تانسور کامل گرادیان مغناطیسی به ترتیب از چپ به راست



شکل (۷): نقشه مشتق B_{XX} ، B_{YY} و B_{ZZ} توسط مگنتومتر پروتون به ترتیب از چپ به راست

در تحقیقات قبلی انجام شده برای اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی، چهار سنسور ممز با شکل هندسی متقاطع تنظیم شد. برداشت با دو دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون و حسگرهای ممزه‌زمان باهم انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که برداشت گرادیومتری با استفاده از حسگرهای ممز باعث بهبود نقشه‌های مغناطیس‌سنجی از نظر افزایش قدرت تفکیک، سهولت در برداشت از نظر زمان، هزینه و اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در مناطقی که میزان شدت بالا است، شده و با توجه به نتایج مطلوب حاصل از حسگرها، نقشه‌های تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی برای محدوده‌ی برداشت ترسیم شد [۷]. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات قبلی و همچنین نتایج حاصل از این مطالعه و مقایسه نقشه‌های مشتق حسگرهای ممز با نقشه‌های شدت میدان کل توسط این حسگرها، می‌توان به این نتیجه رسید که در نقشه‌های مشتق کناره‌های آنومالی آشکارتر شده است و قدرت تفکیک‌کنندگی نیز افزایش یافته است.

تفسیر نتایج

مراحل پردازش و تفسیر داده‌های میدان مغناطیسی زمین در ژئوفیزیک بسیار مهم است. اوسیسمنتاژ نرم‌افزاری از شرکت ژئوسافت برای اهداف اکتشافی زمین‌شناسی است، که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور پردازش داده‌های مغناطیس‌سنج پروتون ابتدا بایستی داده‌های برداشت شده را از مغناطیس‌سنج به رایانه منتقل کرد. ستون‌های مورد استفاده در این پژوهش، مربوط به عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و بزرگای میدان مغناطیسی هستند. ستون‌های دیگر داده که حاوی اطلاعاتی نظیر ساعت برداشت، کیفیت سیگنال برداشت و یا تعداد ماهواره‌هایی که GPS از آن‌ها برای تعیین مختصات جغرافیایی استفاده کرده است استفاده نشده است. به این ترتیب داده‌های مغناطیس‌سنج پروتون که بر روی ۵ پروفیل برداشت شده بودن و تعداد آن‌ها ۲۳۷ بود در یک فایل اکسل ذخیره شده و سپس در نرم‌افزار اوسیسمنتاژ بارگذاری شدند. بعد از بارگذاری و ایجاد پایگاه داده در نرم‌افزار اوسیسمنتاژ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی محدوده مورد مطالعه به دست آورده شد.

به منظور پردازش داده‌های حسگرهای ممز ابتدا بایستی داده‌های برداشت شده را از کارت حافظه به رایانه منتقل کرد. داده‌های حسگرهای ممز که تعداد آن‌ها ۸۲۵۷ بود در فایل اکسل ذخیره شد و سپس در نرم‌افزار اوسیسمنتاژ پردازش شدند. پس از بارگذاری و ایجاد پایگاه داده در نرم‌افزار مربوطه و انجام پردازش‌های لازم بر روی داده‌های برداشت شده توسط حسگرهای ممز به صورت هواپرد، نقشه‌های حاصل از چهار حسگر ممز به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری کلی

هدف از این پژوهش اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی توسط حسگرهای ممز به روش هواپرد است. پاسخ میدان مغناطیسی کل به دست آمده از حسگرها مانند پاسخ به دست آمده از مگنتومتر پروتون است. از آنجایی که مشتق به دست آمده با استفاده از دو حسگر که در فاصله‌ای حدود ۱ متر از همدیگر دارند و اندازه‌گیری به صورت هم‌زمان انجام شده است قطعاً از مشتق‌گیری ریاضی بهتر می‌باشد، هر چند با مشتق‌گیری از روی داده‌های برداشت شده با یک حسگر برداری نیز، می‌توان تانسور میدان مغناطیسی را در جهتی که مشتق گرفته می‌شود افزایش داد، اما تانسور به دست آمده از داده‌های گرادیمتری دقیق‌تر می‌باشند. نتایج تحقیق نشان داد که حسگرهای ممز عملکرد قابل قبولی نسبت به اندازه‌گیری مگنتومتر پروتون داشته‌اند.

نتیجه و جمع‌بندی

به طور کلی نتایج حاصل به این صورت است که، برداشت توسط پهپاد بسیار سریع است، حسگرهای ممز توسط پهپاد سبک و قابل حمل می‌باشند، حسگرهای ممز نسبت به مگنتومتر پروتون ارزان هستند، این حسگرها نسبت به مگنتومتر پروتون نتایج بهتری ارائه می‌دهند، اندازه‌گیری ماتریس تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی و افزایش قدرت تفکیک‌کنندگی توسط حسگرهای ممز، و در نهایت مشخص شدن بهتر حاشیه‌ی ناهنجاری.

مراجع

- [۱] شاهسونی، ه. ملکی جهان، پ. "معرفی سنسور ممز در مگنتومتری". اولین همایش بین‌المللی پژوهش و پیشرفت در علوم زمین. ص: ۴ - ۱، ۱۳۹۶.
- [۲] Regoli, L. H., Moldwin, M. B., Pellioni, M., Bronner, B., Hite, K., Sheinker, A., & Ponder, B. M. "Investigation of a low-cost magneto-inductive magnetometer for space science applications", (Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 7(1)), 129-142. 2018.
- [۳] شاهسونی، ه. ملکی جهان، پ. "مقایسه داده‌های مگنتومتر پروتون و مگنتومتر ممز". اولین همایش بین‌المللی پژوهش و پیشرفت در علوم زمین: شیراز، ۱۳۹۳.
- [۴] Funaki, M., Higashino, S.I., Sakanaka, S., Iwata, N., Nakamura, N., Hirasawa, N., Obara, N., Kuwabara, M. "Small unmanned aerial vehicles for aer magnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica", (Polar Science 8), 342-356. 2014

[۵] Hashimoto, T., Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Yoshimoto, M., Suzuki, E. "Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae volcano, northern Japan", (Exploration Geophysics 45), 37-42. 2014

[۶] Cunningham M. "Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems", Master of Science thesis, (Earth Sciences, Carleton University). 1-156. 2016

[۷] عبداللہی، س. شاهشونی، هاشم. "اندازه گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی با استفاده از حسگرهای ممز". بیستمین کنفرانس ژئوفیزیک. ص ۶-۱، ۱۴۰۱.

اکتشاف ذخایر عمیق پلی متال در سیستم های پورفیری با استفاده از روش های ژئوفیزیک

علی رضانی

Exploration of deep polymetallic deposits in porphyry systems using geophysical methods

چکیده

ژئوفیزیک اکتشافی روشی ارزان، سریع و کارآمد برای شناخت عوارض زیر سطحی است. برای تفسیر کارآمد داده های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارها، ابتدا باید شناخت کاملی از مدل کانسار و ویژگیهای زمین شناسی از قبیل سنگ های میزبان، آلتراسیون ها و کانی شناسی آن کانسار داشت. در این پژوهش با توجه به شواهد کانی سازی عمومی کانسارهای مس - طلائی پورفیری نظیر آلتراسیون های آرژیلیک، پروپلیتیک و سرسیت همچنین حضور استوک ورک های کانی های کالکوپیریت و پیریت، شرایط برای رخداد یک کانی سازی پورفیری آماده است. از این رو داده های ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی عمیق مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل غنی شدگی کانی مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک و تهی شدگی آن در زون دگرسانی پروپلیتیک و سرسیت، روش مغناطیس سنجی روشی کارآمد برای زون بندی دگرسانی های مختلف در کانسارهای مس - طلائی پورفیری است. همچنین با توجه به وجود کانی های سولفیدی به صورت افشان، روش پلاریزاسیون القایی، روشی مناسب برای تعیین گستره کانیهای سولفیدی است.

واژه های کلیدی: مغناطیس سنجی، پلاریزاسیون القایی و مقاومت الکتریکی، کانسارهای مس - طلائی پورفیری، زون دگرسانی

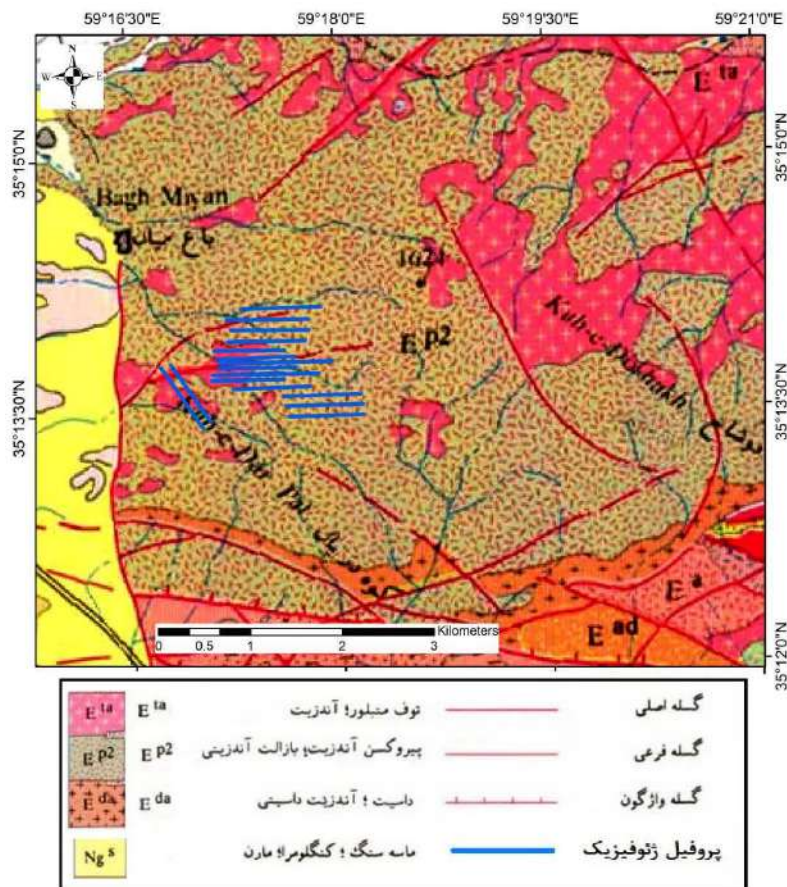
مقدمه

امروزه روش های ژئوفیزیکی کاربردهای گسترده ای در اکتشاف کانسارهای پور فیری دارند.

(Clark, 2014; Dentith and Mudge, 2014; Holden et al., 2011; Hoschke, 2011; and Holliday Cooke, 2007) روش های ژئوفیزیکی برای شناسایی و تعیین ویژگی های کانسارهای مس پورفیری استفاده می شوند. در مقیاس ناحیه ای، مغناطیس هوابرد، گرانی سنجی و رادیومتری تصویر و اطلاعات کلی از ساختارهای بزرگ مقیاس و محیط های ماگمایی مرتبط با کانی زایی سیستم های پورفیری را فراهم می کنند. زون های گسلی، زون های دگرسان و توده های نفوذی را می توان با استفاده از روش های گراویتی و مغناطیس سنجی هوابرد به نقشه درآورد. روش های ژئوفیزیکی همچنین در مقیاس محلی نیز استفاده می شوند. خواص فیزیکی کانی ها و آلتراسیون های مرتبط با کانسارهای پورفیری در نزدیک سطح زمین بسیار متغیر است. به عنوان مثال، توزیع محتوای مگنتیت درون یک کانسار پورفیری بر اساس نوع و شدت دگرسانی و سنگ منشأ و یا سنگ میزبان از فراوان تا عدم حضور متغیر است. بنابراین با استفاده از داده های مغناطیس هوابرد و زمینی با دقت بالا می توان زون های دگرسانی مختلف را شناسایی کرد.

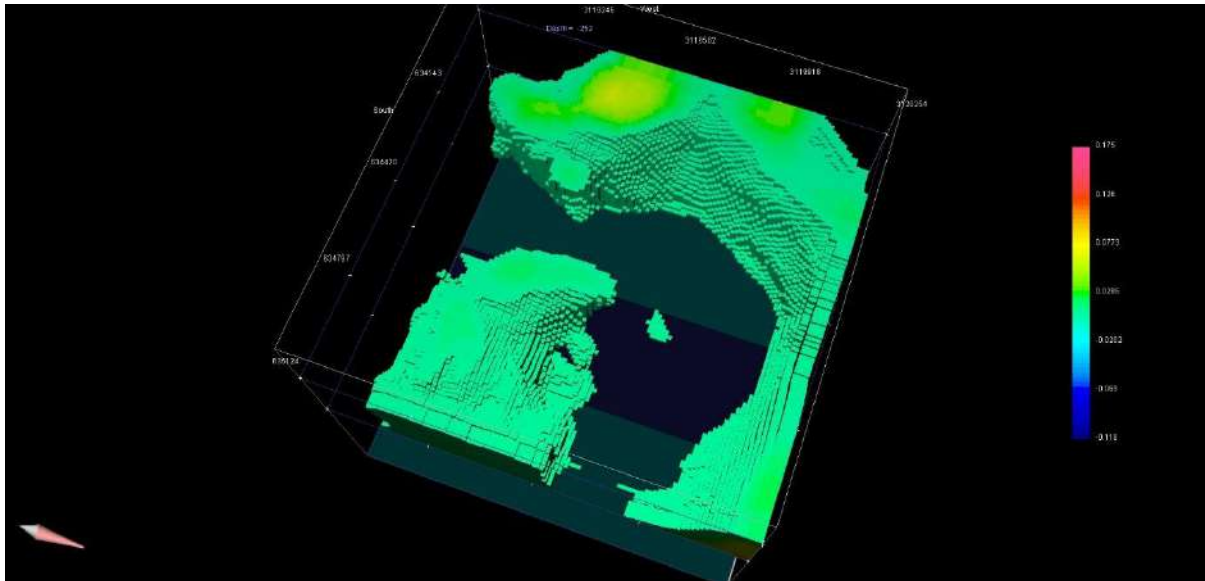
مغناطیس سنجی

منطقه مطالعاتی در شمال شرق ایران و در موقعیت شمال گسل درونه واقع شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی عمدتاً آندزیتی - داسیتی است (شکل ۱). این لیتولوژی‌ها پذیرفتاری مغناطیسی نسبتاً بالایی دارند. در منطقه مطالعاتی آلتراسیون‌های آرژیلیک، پروپلیتیک، سرسیت با گسترش حلقوی تیپیک یک سیستم پورفیری مشاهده می‌شود.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

رخداد دگرسانی‌های مرتبط با سیستم کانی‌سازی پورفیری (به غیر از دگرسانی پتاسیک) معمولاً منجر به دی‌مغناطیس شدن سنگ می‌شود. از این رو با توجه به پذیرفتاری مغناطیسی نسبتاً بالای محیط میزبان، داده‌های مغناطیس سنجی می‌توانند محدوده زون دگرسان را مشخص کنند. در محدوده مطالعاتی برداشت مغناطیس سنجی زمینی در محدوده امیدبخش انجام شد. پردازش و تفسیر اولیه دیتا و تهیه نقشه‌های متعارف میدان و در نهایت مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیس سنجی انجام شد (شکل ۲).



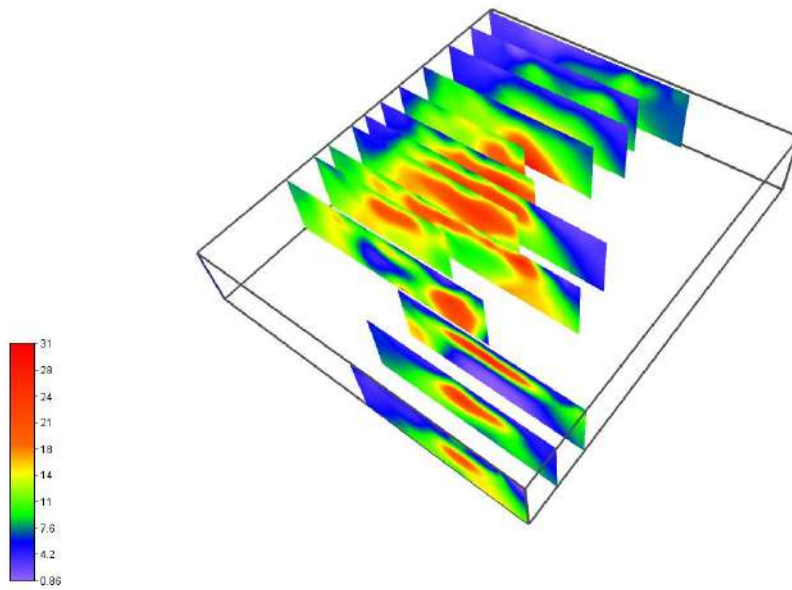
شکل ۲: مدل سه بعدی مغناطیس سنجی محدوده مطالعاتی

مدل سه بعدی یک رینگ از سنگ‌های فرش و غیر دگرسان را نشان می‌دهد که فضایی با پذیرفتاری مغناطیسی پایین را در بر گرفته‌اند. این محدوده با توجه به شواهد سطحی منطبق بر زون‌های دگرسانی است. این مدل تا عمق حدود ۵۰۰ متر وضعیت محیط احتمالی کانی‌سازی را مدل کرده است.

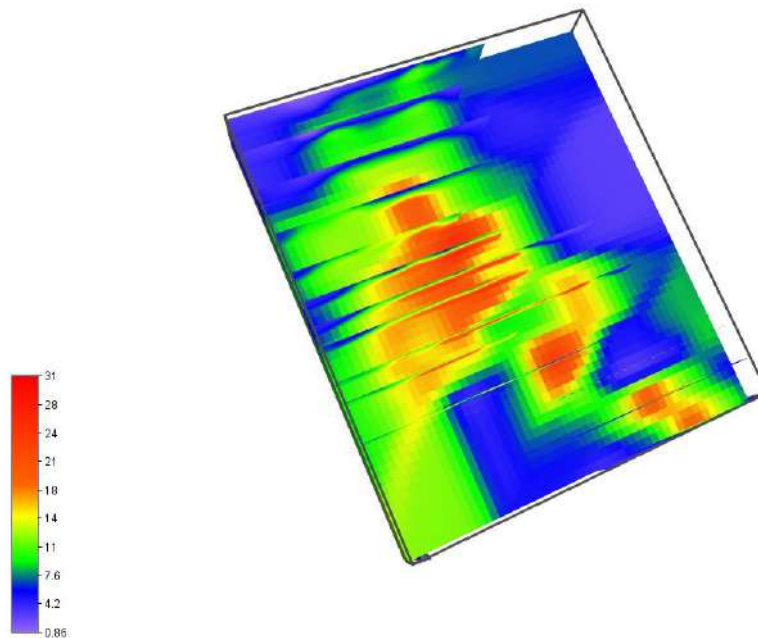
مطالعات IP&RS

مطالعات قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی روی سیستم‌های کانی‌سازی پورفیری، معمولاً با هدف تعیین زون‌های سولفیدی (با استفاده از مقطع‌های بارپذیری) و تفکیک قسمت‌های مختلف سیستم آلتراسیون (با استفاده از اطلاعات مقاومت الکتریکی) انجام می‌شود. در این مطالعه تمرکز روی تحلیل زون‌های بارپذیر و پیشنهاد حفاری است. توجه به وجود زون آلتراسیون آرژیلیک پیشرفته در منطقه تایید می‌کند که معدن در افق‌های بالایی سیستم پورفیری احتمالی قرار دارد. از این رو باید مطالعات IP&RS با عمق نسبتاً بالا انجام شود. طراحی اولیه با هدف عمق کاوش ۴۰۰ متر انجام شد. پروفیل‌ها روی زون امید بخش حاصل از مطالعات مگنتومتری طراحی و برداشت شدند. مدل فنی مقاطع بارپذیری در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین یک سکشن افقی از مدل سه بعدی بارپذیری در عمق ۳۰۰ متر در شکل ۴ نشان داده شده است.

یک آنومالی بارپذیر، در موقعیت زون دی‌مگنتایز شده مشاهده می‌شود. این آنومالی دارای بیشینه اعداد بارپذیری ۲۵ تا ۳۰ میلی ولت بر ولت است که برای یک زون سولفیدی اقتصادی، رنج مناسبی هستند. آنومالی‌های بارپذیر در یک سیستم پورفیری می‌توانند مربوط به زون سولفیدی ناشی از استوک ورک‌های حاوی کانی‌های سولفیدی، زون‌های دگرسانی پروپلیتیک، سرسیت، پتاسیک یا سوپرژن باشد. همه این زون‌ها می‌توانند دارای کانی‌سازی اقتصادی باشند یا نباشند. تحلیل کامل این سیستم پورفیری با استفاده از تلفیق دیتای مقاومت الکتریکی با هدف تفکیک زون‌های مختلف دگرسانی و تعیین موقعیت احتمالی زون سوپرژن انجام شده است.



شکل ۳: مدل فنیسی بارپذیری محدوده اکتشافی تا عمق ۴۰۰ متر



شکل ۴: سکشن افقی مدل بلوکی بارپذیری محدوده مطالعاتی در عمق ۳۰۰ متر

یک شبکه حفاری اکتشافی روی این سیستم طراحی و اجرا شده است. حفاری‌ها با دقت بالایی خروجی مدل‌های ژئوفیزیک بویژه مدل‌های بارپذیری و مقاومت الکتریکی را تایید می‌کنند. تصاویر برخی از مغزه‌های به دست آمده و دارای کانی‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: تعدادی از مغزه‌های حفاری دارای کانی‌سازی در محدوده مطالعاتی

بحث و نتیجه گیری

سیستم‌های پورفیری معمولاً بخش بزرگی از نیاز مواد معدنی فلزی دنیا را تامین می‌کنند. روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی و IP&RS

تفسیر خودکار بدون نظارت الگوهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای با روش k-means

پوران‌دخت سلطانی^۱، امین روشندل کاهو^۲، حمید حسن پور^۳

^۱ دانشجوی دکترای اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود Poorandokht.soltani@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود roshandel@shahroodut.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شاهرود h.hasanpour@shahroodut.ac.ir

چکیده

اکتشافات لرزه‌ای به عنوان بهترین روش پی‌جویی ذخایر هیدروکربنی، مستلزم تفسیر ساختارهای زیرسطحی و تعیین خواص ساختاری و چینه‌ای آن‌ها از طریق پردازش، تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای است. مدل زمین‌شناسی هرگز منحصر به فرد نیست و تا حد زیادی به انتخاب و نظر مفسر بر اساس اطلاعات لرزه‌ای بستگی دارد. نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان ابزار اصلی در تفسیر کمی داده‌های لرزه‌ای هستند که در تفسیر ساختاری و چینه‌ای با آشکارسازی اطلاعات پنهان کمک شایانی می‌نمایند. اما، تعیین ساختارهای زیرسطحی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تحلیل اطلاعات نشانگرهای مختلف توسط شخص مفسر کار بسیار زمان‌بر می‌باشد که می‌تواند همراه با عدم قطعیت بسیار زیاد به واسطه دخالت سلیقه شخص مفسر نیز باشد. به همین دلیل، رویکرد جایگزین برای این فرآیند، استفاده از الگوریتم‌های خودکار بر اساس نشانگرهای لرزه‌ای متعددی است که برای شناسایی هدف از داده لرزه‌ای استخراج شده‌اند. در این مقاله، با هدف شناسایی الگوهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای دو بعدی از روش‌های بدون نظارت استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نشانگرهای لرزه‌ای، انتخاب ویژگی، قطعه‌بندی تصویر، روش k-means.

Unsupervised automatic interpretation of reflection patterns in seismic data using the k-means method.

Poorandokht Soltani¹, Amin Roshandel Kahoo¹, Hamid Hasanpour²

¹ FACULTY OF MINING, PETROLEUM AND GEOPHYSICS ENGINEERING, SHAHROOD UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SHAHROOD, IRAN.

² FACULTY OF COMPUTER ENGINEERING, SHAHROOD UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SHAHROOD, IRAN.

ABSTRACT

Seismic exploration is considered the most effective method for hydrocarbon reservoir detection, requiring the interpretation of subsurface structures and determination of their structural and mineral properties through seismic data processing and analysis. Geological models are not universally unique and depend to a large extent on the interpreter's selection and opinion based on seismic information. Seismic attributes serve as the primary tools in quantitative seismic data interpretation, aiding significantly in structural and mineralogical interpretation by detecting hidden information. However, determining subsurface structures in seismic data through the analysis of various attributes by an interpreter is a highly time-consuming process that can be accompanied by a high level of uncertainty due to the interpreter's subjective involvement.

For this reason, an alternative approach to this process is the use of automatic algorithms based on multiple seismic attributes for identifying targets extracted from seismic data. In this article, with the

aim of identifying reflection patterns in two-dimensional seismic data, unsupervised methods are employed.

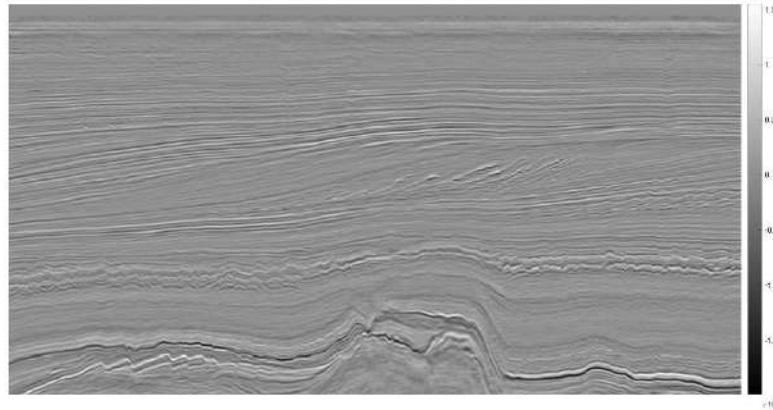
Keywords: Seismic attributes, Feature Selection, Image Segmentation, k-means Method.

۱-مقدمه

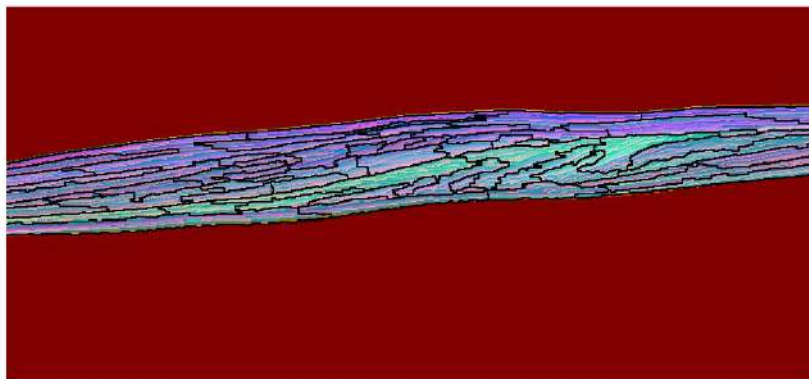
اکتشاف ژئوفیزیکی می‌تواند به عنوان جستجو برای رسوبات تجاری از مواد معدنی مفید، از جمله هیدروکربن‌ها تعریف شود [۱]. به عنوان یک فرآیند اساسی در اکتشاف، تفسیر لرزه‌ای شامل شناسایی اطلاعات زمین‌شناسی از طریق پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای می‌شود [۲]. به طور معمول، تعداد نشانگرهای تولید شده برای تفسیر مقطع لرزه‌ای زیاد است [۳]، که ممکن است مقدار زیادی از داده‌ها را تولید کند که می‌تواند برای یک هدف خاص اضافی یا غیرضروری باشد. علاوه بر این، ویژگی‌های لرزه‌ای ممکن است به برخی از ویژگی‌های زیرسطحی مرتبط بازیابی کمک کنند. به عنوان مثال، دامنه میانگین مربع امواج برای تعیین نشانگرهای هیدروکربن مستقیم [۲] یا ویژگی‌های هندسی برای شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها [۴] استفاده شود. به عنوان نتیجه، پیشنهاد می‌شود که تحلیل چند ویژگی اجرا شود تا نتیجه تفسیر بهبود یابد. برای وظایف دسته بندی نشانگرهای لرزه‌ای، بسیاری از مدل‌های یادگیری ماشین نظارت شده، مانند ماشین بردار پشتیبان (SVM) [۵]، درخت‌های تصمیم [۶]، شبکه‌های عصبی چندلایه (MLP) یا شبکه‌های عصبی همگانی [۷، ۸] بررسی شده‌اند. این انواع الگوریتم‌ها برچسب‌های از پیش تعریف شده (نتیجه تفسیر انسانی از داده‌های لرزه‌ای) را برای آموزش مدل‌ها استفاده می‌کنند و توانایی تشخیص برچسب در یک مجموعه داده داده‌ها را بهینه‌سازی می‌کنند. به این ترتیب، موفقیت آنها به برچسب‌های داده‌های لرزه‌ای و بنابراین به عملکرد کلی تفسیر کننده وابسته است. مدل‌های یادگیری ماشین بدون نظارت، به عکس العمل، یک دسته از الگوریتم‌ها هستند که بدون هیچ ارجاع یا برچسبی، الگوها و روابط مخفی در داده‌ها را کشف می‌کنند. استفاده از چنین الگوهای الگوریتمی می‌تواند روابط جدیدی بین ویژگی‌های لرزه‌ای که قبل از این شناخته نشده‌اند را شناسایی کند و کمک کند تا تفسیر دقیق‌تری ایجاد شود. حجم عظیمی از داده‌های لرزه‌ای و عدم وجود برچسب در اکتشاف جدید [۹] از مزایای اعمال این مدل‌ها است.

2- روش تحقیق

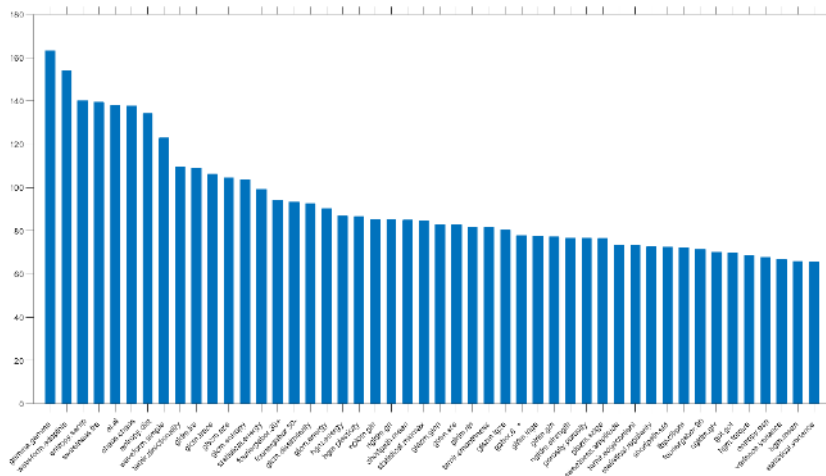
با هدف شناسایی الگوهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای دو بعدی از روش‌های بدون نظارت استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا، مجموعه‌ای از نشانگرهای لرزه‌ای از جمله نشانگرهای بافتی جدید برای آشکارسازی الگوهای بازتابی از داده لرزه‌ای استخراج می‌شوند. این مجموعه نشانگر انتخابی بر روی مقطع لرزه‌ای (شکل ۱) که قطعه‌بندی و سوپرپیکسل شده اعمال می‌شود (شکل ۲). این قطعه بندی توسط روش تبدیل آب پخشان انجام می‌شود به این صورت که دامنه گرادیان یک تصویر را به عنوان سطح توپوگرافی در نظر می‌گیرد. پیکسل‌هایی که بیشترین مقدار دامنه گرادیان را دارند، به خطوط watershed نگاشت می‌شوند که این خطوط نمایانگر مرز نواحی خواهند بود. آب در هر ناحیه، که توسط خطوط watershed محصور شده‌است، شروع به بالا آمدن می‌کند تا به سطح مینیمم محلی برسد. پیکسل‌هایی که آب در آنها به سطح مینیمم محلی می‌رسد، یک بخش را مشخص می‌کنند به عبارت دیگر شباهت پیکسل و منطقه یافت می‌شود. برای هر پیکسل شناسایی شده، ناحیه ای که پیکسل باید به آن تعلق داشته باشد محاسبه می‌شود [۱۰]. سپس با استفاده از روش‌های انتخاب ویژگی بدون نظارت زیرمجموعه‌ای از مجموعه کل نشانگرهای لرزه‌ای مستخرج از داده لرزه‌ای انتخاب می‌شوند [۱۱] (شکل ۳) و ویژگی‌های دارای اهمیت بیشتر برای هر سوپرپیکسل در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. مقطع لرزه‌ای مورد مطالعه

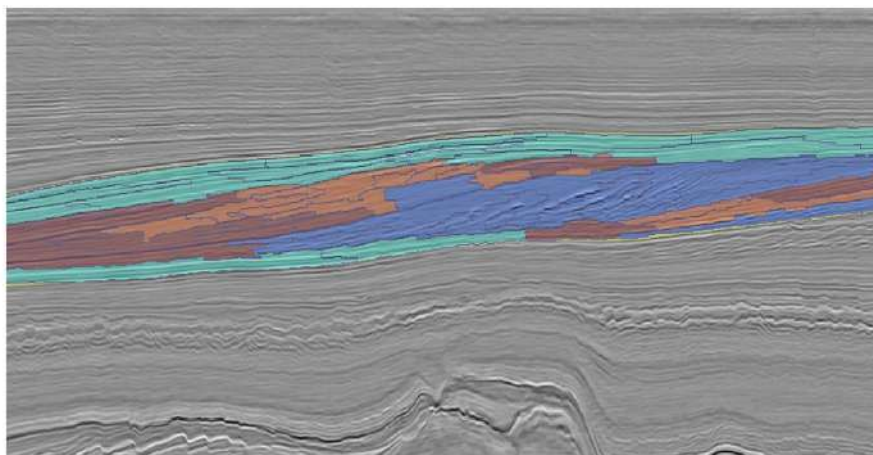


شکل ۲. مقطع لرزه‌ای قطعه بندی با روش تبدیل آب پخشان



شکل ۳. مجموعه کل نشانگرهای لرزه‌ای که با روش انتخاب ویژگی بدون نظارت مرتب شده است.

روش‌های خوشه‌بندی K_means به منظور شناسایی الگوهای بازتابی در مقاطع لرزه‌ای استفاده می‌شود (شکل ۴). K_means یکی از محبوب‌ترین روش‌های مبتنی بر پارتیشن است. این مجموعه داده را به k زیرمجموعه مجزا تقسیم می‌کند. الگوریتم به تنظیم انتساب اشیاء به نزدیکترین میانگین خوشه فعلی ادامه می‌دهد تا زمانی که انتساب جدیدی از اشیاء به خوشه‌ها انجام نشود. یکی از مزایای این الگوریتم سادگی آن است. چندین ایراد نیز دارد. از آنجایی که با فواصل مربع کار می‌کند، به نقاط پرت نیز حساس است [۱۲].



شکل ۴. مقطع لرزه‌ای خوشه بندی شده.

3- بحث و نتیجه‌گیری

در این کار، توسعه یک روش مبتنی بر یادگیری بدون نظارت برای پردازش داده‌های لرزه‌ای ارائه شده است. روش پیشنهادی می‌تواند با تولید یک تفسیر اولیه بدون هیچ برچسبی، به صورت قابل توجهی زمان مورد نیاز برای پایان دادن به فرآیند تفسیر را کاهش دهد. علاوه بر این، چهره‌های حاصل از این روش با ویژگی‌های لیتولوژیکی مرتبط هستند، که یک تفسیر قوی ایجاد می‌کند که می‌تواند در فرآیند تصمیم‌گیری فعالیت اکتشاف هیدروکربن کمک کند.

4- مراجع

1. Sheriff, R.E., *Encyclopedic dictionary of applied geophysics*. 2002: Society of exploration geophysicists.
2. Onajite, E., *Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration*. 2013: Elsevier.
3. Barnes, A.E., *Redundant and useless seismic attributes*. *Geophysics*, 2007. **72**(3): p. P33-P38.
4. Roden, R., T. Smith, and D. Sacrey, *Geologic pattern recognition from seismic attributes: Principal component analysis and self-organizing maps*. *Interpretation*, 2015. **3**(4): p. SAE59-SAE83.
5. Wrona, T., et al., *Seismic facies analysis using machine learning*. *Geophysics*, 2018. **83**(5): p. O83-O95.
6. Li, D., et al., *Seismic structure interpretation based on machine learning: A case study in coal mining*. *Interpretation*, 2019. **7**(3): p. SE69-SE79.
7. Celecia, A., et al., *Unsupervised Machine Learning Applied to Seismic Interpretation: Towards an Unsupervised Automated Interpretation Tool*. *Sensors*, 2021. **21**(19): p. 6347.
8. Chevotarese, D.S., et al. *Efficient classification of seismic textures*. in *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2018. IEEE.
9. Hajizadeh, Y., *Machine learning in oil and gas; a SWOT analysis approach*. *Journal of Petroleum*

- Science and Engineering, 2019. **176**: p. 661-663.
10. Sarma, R. and Y.K. Gupta. *A comparative study of new and existing segmentation techniques*. in *IOP conference series: materials science and engineering*. 2021. IOP Publishing.
 11. Abedinzadeh Torghabeh, F., Y. Modaresnia, and S.A. Hosseini, *Auto-UFSTool: An Automatic Unsupervised Feature Selection Toolbox for MATLAB*. *Journal of AI and Data Mining*, 2023.
 12. Di, H., Z. Wang, and G. AlRegib. *Seismic fault detection from post-stack amplitude by convolutional neural networks*. in *80th EAGE Conference and Exhibition 2018*. 2018. European Association of Geoscientists & Engineers.

یک فیلتر جدید با وضوح بالا در تشخیص لبه داده های میدان پتانسیل

پوراندهخت سلطانی^{۱*}، امین روشندل کاهو^۲، حمیدرضا باغزندانی^۳

۱. دانشجوی دکترای اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود Poorandokht.soltani@gmail.com

۲. دکترای ژئوفیزیک لرزه شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود roshandel@shahroodut.ac.ir

۳. دانشجوی دکترای اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود roshandel@shahroodut.ac.ir

چکیده

تشخیص لبه های یک منبع یک چالش معمول در تجزیه و تحلیل میدان های پتانسیل است. با این حال، روش های تشخیص لبه مشکلات خاص خود را، همچون پاسخ های با حساسیت کم به تغییرات ناچیز در دامنه های ضعیف و تخمین کمتر از حد بر روی اوج ها در گرادیان یا تخمین بیش از حد بر روی حاشیه ها را دارند. در این مقاله، یک رویکرد جدید با استفاده از تابع آرکسینوس نسبت گرادیان عمودی به مجموع گرادیان کل دامنه گرادیان افقی معرفی می شود تا حاشیه های منبع را شناسایی کند. اعتبار این روش بر روی داده های مصنوعی و واقعی آزمایش شده و نتایج تشخیص لبه با نتایج دیگر مقایسه می شوند. فیلتر پیشنهادی نتایج با دقت و وضوح بالاتری ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: تشخیص لبه، داده میدان پتانسیل، تابع آرکسینوس.

A new high resolution filter in edge detection of potential field data

Poorandokht Soltani^{1*}, Amin Roshandel Kahoo², Hamidreza Baghzendani³

¹Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; Poorandokht.soltani@gmail.com

²Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; roshandel@shahroodut.ac.ir

³Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; roshandel@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

Detecting the edges of a source is a common challenge in the analysis of potential fields. However, edge detection methods have their own problems, such as low sensitivity responses to small changes in weak amplitudes and underestimation on peaks in the gradient or overestimation on geobody. In this paper, a new approach is introduced using the arcsine function of the ratio of the vertical gradient to the sum of the gradients of the total horizontal gradient domain to identify source geobody. The validity of this method is tested on artificial and real data and the edge detection results are compared with other results. The proposed filter provides results with higher accuracy and resolution.

Keywords: Edge detection, potential field data, arcsine function.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه میدان پتانسیل ناهنجاری‌های کوچک در هر دو میدان گرانش و مغناطیسی اطراف یک منطقه و ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی و منطقه‌ای را ثبت می‌کند، روش گرانشی بر اساس تفاوت چگالی بین انواع سنگ‌ها استوار است. بنابراین، فیلدهای ناهنجر به عنوان تغییرات معدنی یا ساختار زمین‌شناسی به صورت کیفی تفسیر می‌شوند. روش مغناطیسی بر اساس تغییرات جانبی در حساسیت مغناطیسی سنگ‌ها که ناهنجرها در فیلد مغناطیسی طبیعی زمین ایجاد می‌کنند، استوار است [1]. تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (شامل ناهنجرهای گرانشی و مغناطیسی) معمولاً با استفاده از روش‌های ریاضی انجام می‌شود تا ساختارهای زیرزمینی که منبع ناهنجرها هستند، بررسی شود [2]. یکی از اهداف اساسی در تفسیر میدان پتانسیل، تعیین پارامترهای هندسی چگالی و ساختارهای مغناطیسی مانند عمق و لبه‌ها است [3]. داشتن اطلاعات از لبه‌های منبع میدان پتانسیل نقش مهمی در اکتشاف منابع معدنی دارد. بنابراین، کارایی فیلترهای تشخیص لبه نیازمند تعیین دقیق موقعیت‌های افقی منابع عامل است. انواعی از روش‌ها بر مبنای گرادیان‌های میدان برای خط‌کشی لبه‌های منبع توسعه یافته‌اند [4]. گرادیان افقی یک روش محبوب برای برجسته کردن مرزهای منابع گرانشی و مغناطیسی است [5]. Bournas and Bake [6] نشان دادند که استفاده از مقادیر بیشینه گرادیان افقی کل می‌تواند لبه‌های منبع را خط‌کشی کند. [7] Cella, Fedi and Florio مشتقات مرتبه بالا برای افزایش وضوح نتایج تشخیص لبه استفاده کردند. با این حال، معایب این روش‌ها این است که نمی‌توانند دامنه‌های ناهنجرها را که از جسم‌هایی در عمق‌های مختلف ایجاد شده است، هموار کنند [8]. در سال‌های اخیر، علاقه زیادی به توسعه روش‌های مبتنی بر فاز با توانایی تولید نتایج متعادل شده وجود دارد. Miller and Singh [9] نشان دادند که استفاده از تابع آرکتانژانت نسبت گرادیان عمودی به گرادیان افقی دامنه، که زاویه تلت نامیده می‌شود، می‌تواند به طور همزمان دامنه‌های بزرگ و کوچک را هموار کند. Verduzco, Fairhead [10] پیشنهاد دادند که محاسبه دامنه گرادیان زاویه تلت می‌تواند به بهبود وضوح نتایج تشخیص لبه کمک کند. Wijns, Perez and Kowalczyk [11] یک تکنیک جدید مبتنی بر فاز به نام نقشه تتا معرفی کردند که از نسبت دامنه گرادیان کل به دامنه گرادیان افقی برای نرمال‌سازی تصاویر داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌کند. Cooper and Cowan [12] توصیه کردند که از نسبت دامنه گرادیان افقی به مقدار مطلق گرادیان عمودی برای مشخص کردن ویژگی‌های دامنه کمتر استفاده شود. یک فیلتر تشخیص لبه دیگر، بر اساس نسبت انحراف معیار پنجره‌ای از مشتقات میدان پتانسیل، توسط Cooper and Cowan [13] توسعه داده شد تا دامنه‌های بزرگ و کوچک را هموار کند. Ferreira, de Souza [14] پیشنهاد دادند که از زاویه تیلت گرادیان افقی برای تعادل سیگنال‌ها از ساختارهای کم‌عمق و عمیق استفاده شود. Yuan and Yu [15] فیلترهای جدیدی بر اساس گرادیان کل جهت افقی و گرادیان کل جهت افقی مرتبه دوم معرفی کردند تا روش گرادیان کل را بهبود بخشند.

در این تحقیق، یک فیلتر جدید برای تشخیص لبه معرفی شده است تا مرزهای منابع گرانشی و مغناطیسی را مشخص کند. این فیلتر پایه‌ای بر روی بخش واقعی یک تابع آرکسینوس از نسبت گرادیان عمودی به گرادیان کل دامنه فیلد گرادیان افقی بنیان‌گذاری شده است. کارایی آن از طریق استفاده از داده‌های مصنوعی و همچنین داده‌های واقعی ارزیابی شده است.

2- روش تحقیق

اولین فیلتر مبتنی بر فاز توسط Miller and Singh [9] به نام زاویه شیب معرفی شد. (θ) که مشتق عمودی را با استفاده از شیب افقی کل نرمال می‌کند. که به صورت زیر تعریف می‌شود که F_x, F_y, F_z گرادیان‌های داده میدان پتانسیل F به ترتیب در راستای x, y, z هستند. در اینجا، نسبت شیب عمودی به افقی عدم وابستگی زاویه تیلت در دامنه ناهنجاری را تضمین می‌کند. برخی از آرککوسینوس یا آرکسینوس نسبت مشتقات داده‌های میدان پتانسیل برای متعادل کردن دامنه ناهنجاری‌های قوی و ضعیف به طور همزمان استفاده کردند [16].

$$TA = \text{atan} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (1)$$

Ferreira, de Souza [۱۴] F را در رابطه شماره (۱) با شیب افقی کل جایگزین کرد تا لبه ها را واضح تر نشان دهد. رابطه شماره (۱) به صورت زیر بازنویسی شد که HGA کل دامنه شیب افقی میدان پتانسیل F است. HGA_x ، HGA_y و HGA_z گرادیان های x، y و z هستند.

$$TAHG = \text{atan} \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2}} \right), \quad HGA = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2)$$

در اینجا، ما یک رویکرد مشابه را تعریف می کنیم که مبتنی بر تابع آرکسینوس نسبت عمودی به شیب کل HGA است که می توان به صورت بیان کرد:

$$EHGA_0 = \text{asin} \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2 + HGA_z^2}} \right) \quad (3)$$

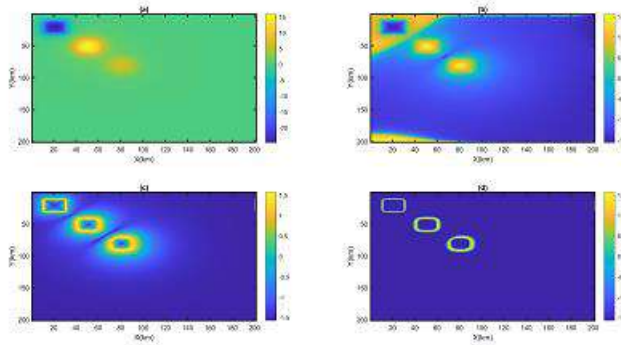
مشخص شد که استفاده از بخش واقعی نسخه بهبودیافته فیلتر $EHGA_0$ لبه های بدنه را بهتر از فیلترهای $TAHG$ و $EHGA_0$ ترسیم می کند، که k یک عدد واقعی مثبت است که توسط مفسر انتخاب می شود.

$$EHGA = R \left(\text{asin} \left(k \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2 + HGA_z^2}} - 1 \right) + 1 \right) \right) \quad (4)$$

۳- داده مصنوعی

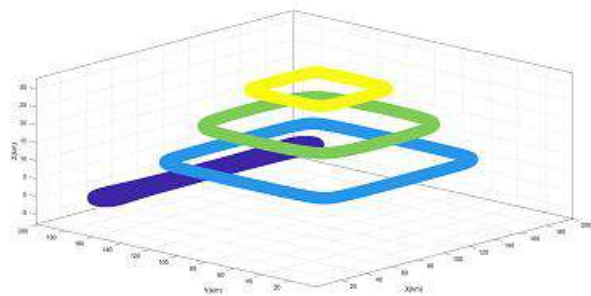
در این مقاله، ما اثربخشی متد EHGA را از طریق داده های مغناطیسی ارزیابی می کنیم و نتایج را با آنچه از روش های محبوب مانند گرادیان کل (TG) و زاویه تیلت افقی دامنه (TAHG) به دست می آید، مقایسه می کنیم. مثال اول یک مدل را در نظر می گیریم که شامل سه مربع با اندازه های ۲۰ در ۲۰ است (شکل ۱). برای آزمایش وابستگی روش ها به عمق ساختارهای زیرسطحی، منابع M1، M2 و M3 در عمق های مختلف قرار دارند. عمق ابتدایی اجسام M1، M2 و M3 به ترتیب ۱، ۵ و ۷ کیلومتر است. چگالی هر سه منبع به ترتیب ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ است. ناهنجارهای مغناطیسی ناشی از مدل بر روی یک شبکه با ۲۰۱ در ۲۰۱ نقطه با فاصله مربعی ۱ کیلومتر محاسبه شد. داده های مصنوعی در شکل 1(a)، نشان داده شده است و شکل 1(b) نتیجه به دست آمده از استفاده از روش TG را نشان می دهد. می توان دید که روش TG نمی تواند دامنه های پاسخ سیگنال از منابع کم عمق و عمیق را هموار کند. این روش می تواند لبه های بدن کم عمق تر (M1) را به وضوح ترسیم کند، اما پاسخ از بدنه های عمیق تر M2 و M3 مات است. شکل 1(b) لبه ها را نشان می دهد که با استفاده از روش TA ترسیم شده اند. این روش با صفر کردن های TA، لبه های منبع را نشان می دهد، اما پاسخ ها در لبه ها کم به نظر می آیند. شکل ۱ (c) لبه ها را نشان می دهد که با استفاده از روش TAHG ترسیم شده اند. در اینجا، این روش تمام لبه ها را بدون هیچ مرز غلطی نشان می دهد، با این حال، حاشیه در اطراف لبه ها وسیع است. شکل 1(d) لبه ها را نشان می دهد که با استفاده از روش EHGA ترسیم شده اند. همانطور که از این شکل مشخص است، این روش نه تنها می تواند جلوی تولید برخی مرزهای غلط را

بگیرد، بلکه لبه‌های با وضوح بالاتری نسبت به روش‌های مقایسه‌شده تولید می‌کند. علاوه بر این، نتیجه نشان می‌دهد که این روش کمترین وابستگی به عمق منبع دارد.

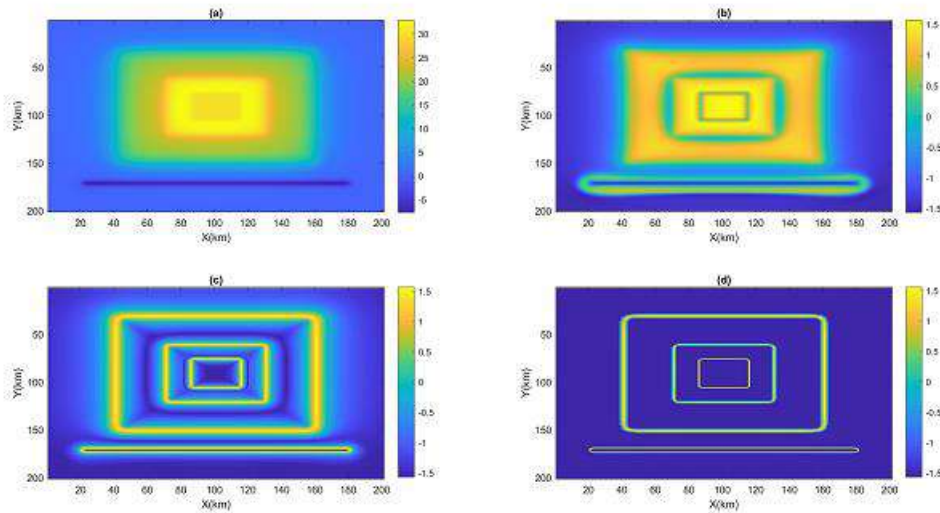


شکل ۱. مثال اول ناهنجاری‌های مغناطیسی مصنوعی ناشی از سه مربع مغناطیسی (a)، (b) TA، (c) TAHG و (d) EHGA.

در مثال دوم، یک مدل گرانشی پیچیده را در نظر می‌گیریم که شامل یک منبع مستطیلی نازک ($G1$) و سه منبع مستطیلی ترکیبی در عمق‌های مختلف $G2$ ، $G3$ و $G4$ است (شکل ۲). پارامترهای مدل در جدول ۱ آورده شده‌اند. ناهنجار گرانشی نظری ناشی از مدل بر روی یک شبکه 201×201 با فاصله مربعی ۱ کیلومتر محاسبه شد و در شکل ۳ (a) نشان داده شده است. شکل ۳ (b) نتیجه به‌دست‌آمده از اعمال روش TA بر داده‌های گرانشی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، دامنه‌های سیگنال از منابع کم‌عمق و عمیق به خوبی هموار شده‌اند، اما مرزهای غلط در اطراف منابع $G1$ و $G3$ ایجاد کرده است. شکل ۳ (c, d) نتیجه به‌دست‌آمده از اعمال روش TAHG و EHGA بر داده‌های گرانشی در شکل ۳ (a) را به ترتیب نشان می‌دهد. آشکار است که هر دو روش بسیار مؤثر در تعادل دامنه‌های سیگنال از منابع کم‌عمق و عمیق هستند. استفاده از این روش‌ها می‌تواند جلوی تولید برخی از مرزهای غلط را بگیرد. با این حال، لازم به ذکر است که EHGA نشان می‌دهد که قله‌ها در اطراف لبه‌ها نسبت به TAHG با وضوح بیشتری قرار دارند.



شکل ۲. نمای سه‌بعدی از مدل گرانشی.



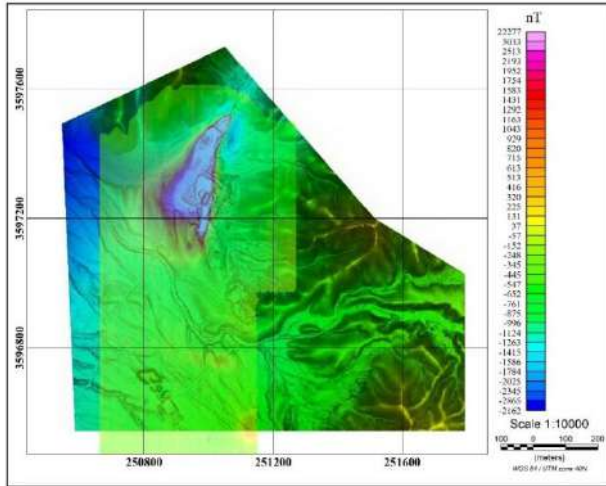
شکل ۳. مثال دوم ناهنجاری های گرانیتی مصنوعی ناشی از چهار مستطیل (a), (b) TA, (c) TAHG و (d) EHGA.

جدول ۱. پارامترهای مدل گرانیتی

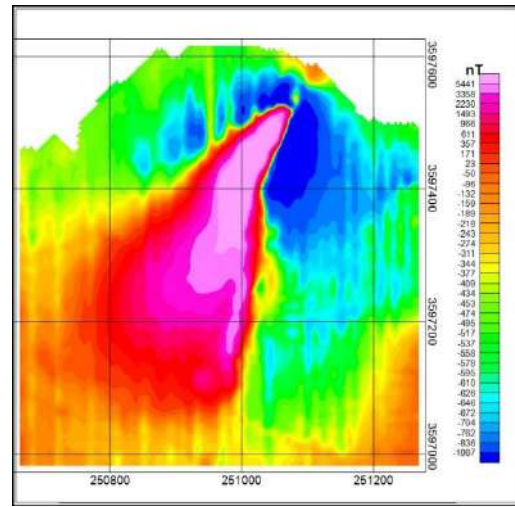
| $G4$ | $G3$ | $G2$ | $G1$ | پارامترهای مدل |
|------|------|------|------|----------------------|
| ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | مرکز مختصات x (km) |
| ۹۰ | ۹۰ | ۹۰ | ۱۷۰ | مرکز مختصات y (km) |
| ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۴ | ضخامت (km) |
| ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۱۶۰ | طول (km) |
| ۱ | ۳ | ۳ | ۲ | ارتفاع (km) |
| -۰.۱ | ۰.۱ | ۰.۲ | -۰.۲ | چگالی |

۴- داده واقعی

در این بخش، ما تأثیر روش EHGA را از طریق داده‌های مغناطیس از منطقه اردکان، یزد را ارزیابی می‌کنیم و نتایج را با سایر فیلترها همانند داده‌های مصنوعی مقایسه می‌کنیم. منطقه مورد مطالعه تقریباً ۲ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که در ۳۰ کیلومتری شمال شرق اردکان قرار دارد. این منطقه توسط واحدهای کوارتز پورفیری و گرانیت پوشانده شده است. در محدوده با شبکه ۱۰ در ۱۰ برداشت مغناطیس صورت گرفته است و پس از انجام تصحیحات نقشه برگردان به قطب آن در شکل ۵ نشان داده شده است که آنومالی آهن در قسمت شمالی آن مشخص و حداکثر ۵۴۴۱ نانوتسلا اختلاف میدان مغناطیسی در آن وجود دارد. شکل ۶ محدوده برداشت را بر روی نقشه توپوگرافی نشان می‌دهد.

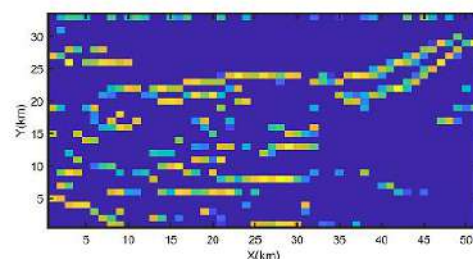
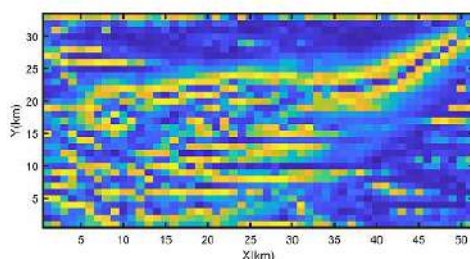
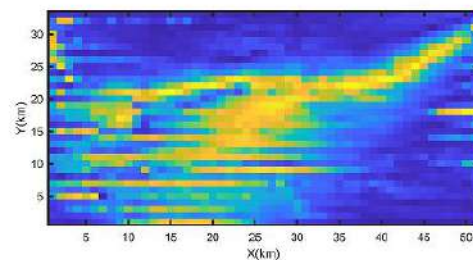
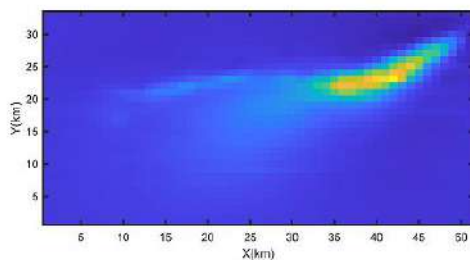


شکل ۶. نقشه محدوده بر روی نقشه توپوگرافی



شکل 5. نقشه برگردان به قطب محدوده

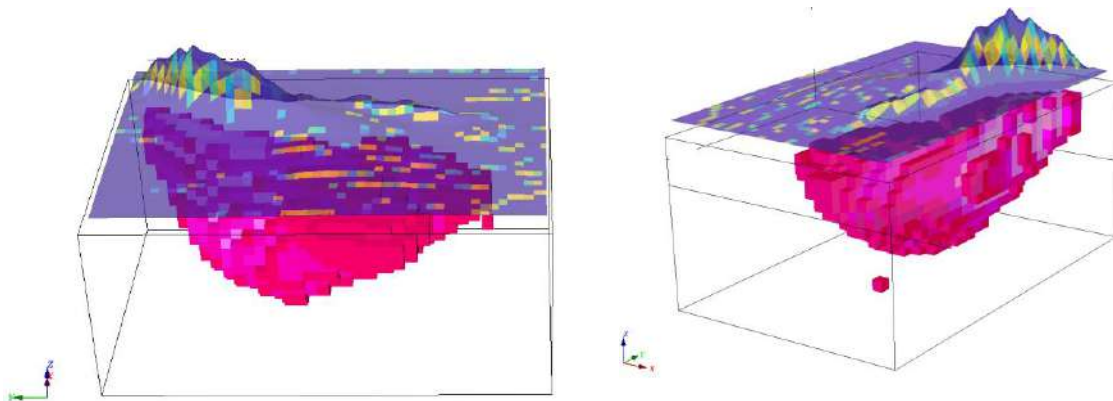
شکل 9 به صورت شماتیک و سه بعدی آنومالی مغناطیسی را نمایش می دهد که همانطور که نتیجه حاصل از استفاده از روش TA بر داده RTP در شکل ۱۰ (a) را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، ناهنجاریهای نقشه TA قلههای تیزی برای ویژگیهای زمین شناسی نمی آورند. شکل 10 (c,d) نتایج حاصل از اعمال روشهای TAHG و EHGA بر داده RTP در شکل 9 (a) را نشان می دهد. هر دو نقشه EHGA و TAHG ویژگیهای زمین شناسی را به وضوح تر از سایر روشها نشان می دهند. با این حال، نتیجه EHGA دارای رزولوشن بالاتری برای تعیین لبههای منابع مغناطیسی جغرافیایی منطقه نسبت به نتایج TAHG و دیگر روشها است. دیده می شود که ناهنجاریهای مغناطیسی می توانند به وضوح به عنوان ساختارهای خطی پیوسته در نقشه EHGA تفسیر شوند. این روش می تواند بسیاری از ویژگیهای زمین شناسی را که توسط روشهای TA تعیین نمی شوند، شناسایی کند. علاوه بر این، EHGA تصویری با رزولوشن بالاتر دارد.



شکل ۷. آنومالی مغناطیسی در محدوده اردکان از نقشه برگردان به قطب بعد از انجام تصحیحات (a), (b) TA, (c) TAHG, (d) EHGA.

۵- بحث و نتیجه گیری

برای ارزیابی نتیجه کار در این مقاله خروجی حاصل از روش لبه یابی با مدلسازی صورت گرفته به کمک داده های مغناطیسی و همچنین چند حفاری صورت گرفته در این معدن مقایسه شده و نتایج در حد قابل قبولی با شرایط واقعی زمین هم خوانی دارد.



شکل ۸. خروجی حاصل از روش لبه یابی با مدلسازی صورت گرفته به کمک داده های مغناطیسی

در این مقاله یک روش نوآورانه به نام EGHA برای تعیین مرزهای منابع مغناطیسی و گرانیتهی ارائه داده ایم. این روش بر اساس نسبت گرادیان عمودی به گرادیان کل دامنه گرادیان افقی و بخش واقعی تابع آرکسینوس می باشد. کارایی این روش پیشنهادی بر روی داده های مغناطیسی و گرانیتهی مصنوعی و همچنین داده های واقعی مغناطیسی منطقه اثبات شده است. نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده از برخی از روش های محبوب مانند گرادیان کل و زاویه تیلت افقی دامنه (TAHG) مقایسه شده اند. برای مثال های مصنوعی، روش EGHA تنها از تولید مرزهای غیر صحیح جلوگیری می کند، بلکه مرزهای با وضوح بالاتری نسبت به سایر روش ها ایجاد می کند. علاوه بر این، نتایج نشان می دهند که این روش کمتر به عمق منبع وابسته است. با استفاده از داده های آنومالی ژئومغناطیسی RTP به عنوان یک نمونه، روش EHGA دقت و پاسخ های واضح تری برای مرزهای منابع مغناطیسی منطقه نسبت به سایر تشخیص کننده های مرز ارائه می دهد. نتایج همچنین نشان می دهند که بسیاری از روندها جهت های اصلی تکتونیکی در منطقه را منعکس می کنند.

۶- مراجع

۱. Hinze, W.J., et al., *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. 2013: Cambridge University Press.
۲. Pham, L.T., et al., *MagB_inv: a high performance Matlab program for estimating the magnetic basement relief by inverting magnetic anomalies*. Computers & Geosciences, 2020. **134**: p. 104347.
۳. Eldosouky, A.M., M. Abdelkareem, and S.O. Elkhateeb, *Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt*. Journal of African Earth Sciences, 2017. **130**: p. 28-37.
۴. Oksum, E., M.N. Dolmaz, and L.T. Pham, *Inverting gravity anomalies over the Burdur sedimentary basin, SW Turkey*. Acta Geodaetica et Geophysica, 2019. **54**: p. ۴۴۵-۴۶۰.
۵. Roest, W.R., J. Verhoef, and M. Pilkington, *Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal*. Geophysics, 1992. **57**(1): p. 116-125.
۶. Bournas, N. and H. Bake, *Interpretation of magnetic anomalies using the horizontal gradient analytic*

- signal. 2001.
۷. Cella, F., M. Fedi, and G. Florio, *Toward a full multiscale approach to interpret potential fields*. Geophysical Prospecting, 2009. **57**(4): p. 543-557.
 ۸. Eldosouky, A.M., et al., *A comparative study of THG, AS, TA, Theta, TDX and LTHG techniques for improving source boundaries detection of magnetic data using synthetic models: A case study from G. Um Monqul, North Eastern Desert, Egypt*. Journal of African earth sciences, 2020. **170**: p. 103940.
 ۹. Miller, H.G. and V. Singh, *Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources*. Journal of applied Geophysics, 1994. **32**(2-3): p. 213-217.
 ۱۰. Verduzco, B., et al., *New insights into magnetic derivatives for structural mapping*. The leading edge, 2004. **23**(2): p. 116-119.
 ۱۱. Wijns, C., C. Perez, and P. Kowalczyk, *Theta map: Edge detection in magnetic data*. Geophysics, 2005. **70**(4): p. L39-L43.
 ۱۲. Cooper, G. and D. Cowan, *Enhancing potential field data using filters based on the local phase*. Computers & Geosciences, 2006. **32** : (۱۰) p. 1585-1591.
 ۱۳. Cooper, G.R. and D.R. Cowan, *Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics*. Geophysics, 2008. **73**(3): p. H1-H4.
 ۱۴. Ferreira, F.J., et al., *Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle*. Geophysics, 2013. **78**(3): p. J33-J41.
 ۱۵. Yuan, Y. and Q. Yu, *Edge detection in potential-field gradient tensor data by use of improved horizontal analytical signal methods*. Pure and Applied Geophysics, 2015. **172**(2): p. 461-472.
 ۱۶. Ma, G., *Edge detection of potential field data using improved local phase filter*. Exploration Geophysics, 2013. **44**(1): p. 36-41.

بررسی شاخص باروری گرانیتوئیدهای شمال مکران به روش هندسی - مغناطیسی

سید رضا مهرنیا

دانشیار دانشگاه بین المللی امام خمینی^(ع)؛ srmehrnia@ikiu.ac.ir

چکیده فارسی

داده های مغناطیس هوایی، کاربرد وسیعی در پی جویی و اکتشاف ذخایر معدنی دارند. یکی از عوامل تعیین کننده شدت و توزیع بی هنجاری های مغناطیسی، تغییر زاویه فرورانش صفحات برخوردی با همگرایی ضعیف است. مراحل اولیه فرورانش مکران از مصادیق همگرایی ضعیف بین دو پوسته قاره ای و اقیانوسی است. لذا خمینگی مغناطیسی شمال مکران، علاوه بر محتوای کانی ها، متأثر از پارامترهای هندسی صفحه فرورونده بوده و تنوع رخساره های ماگمایی تابع دینامیک فرورانش است. در این تحقیق از خمینگی پربندهای مغناطیسی برای مقایسه تغییرات دینامیکی متناظر با همگرایی صفحات عربی - اوراسیایی استفاده گردید تا نحوه جایگزینی گرانیتوئیدهای شمال مکران و شاخص باروری آنها را از دیدگاه اکتشافی بررسی نماید. نتایج موید وجود خمینگی های موضعی در نقشه مغناطیس هوایی مکران هستند و تغییرات زاویه ای پایداری را نشان می دهند که به لحاظ مکانی با مرز صفحات مطابقت دارد. این یافته نشان می دهد که در کمربند افیولیتی شمال مکران، علاوه بر نفوذ گرانیتوئیدهای نابرجا، احتمال تشکیل انواع رخساره های ترکیبی با شاخص باروری قابل قبول افزایش یافته و شناسایی آنها مستلزم انجام اکتشافات ژئوفیزیک سطحی به روش منظم است.

واژه های کلیدی: اکتشافات معدنی، روش هندسی - مغناطیسی، شمال مکران، گرانیتوئیدهای بارور.

Investigating the Fertility Index of North Makran Granitoids by G-M Method

Seyed Reza Mehrnia

Associate Prof. at Imam Khomeini International University; srmehrnia@ikiu.ac.ir

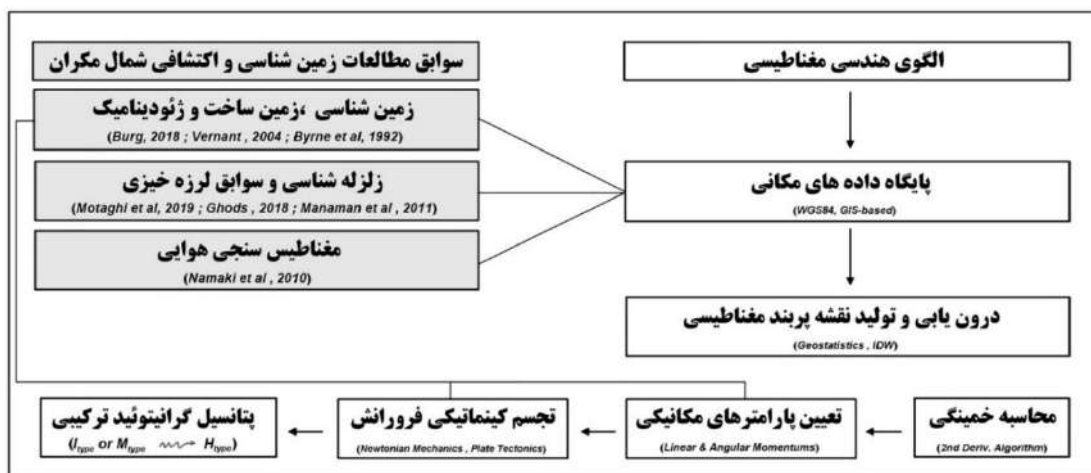
ABSTRACT

Aeromagnetic data are widely used in prospecting and exploration of mineral deposits. One of the criteria determine the intensity and distribution of magnetic anomalies is changing in the slope angle of subduction within low marginal convergency. The initial phases of Makran subduction zone have clear evidence of low convergency between oceanic-continental plates. Therefore, the magnetic curvature of North Makran, in addition to the content of minerals, is influenced by the geometric parameters of the subducting slab, and the variety of magmatic facies is a function of the dynamics of the convergent plates. In this research, the curvature of the magnetic contours has been used to compare the dynamic changes corresponding to the convergency of the Arabian-Eurasian plates to investigate the replacement of the North Makran granitoids and their fertility index from an exploratory perspective. The results indicate there are some local curvatures in Makran aeromagnetic map, which have stable angular changes and spatially occurred at the boundary of plates. It is realize that in the ophiolitic belt of north of Makran, in addition to the intrusion of allochthonous granitoids, the potential of hybride types with favourite fertility index has increased and require landsurvey geophysics using systematic profiling and measurments.

Keywords: Mineral Explorations, G-M Method, North of Makran, Fertile Granitoids.

مقدمه

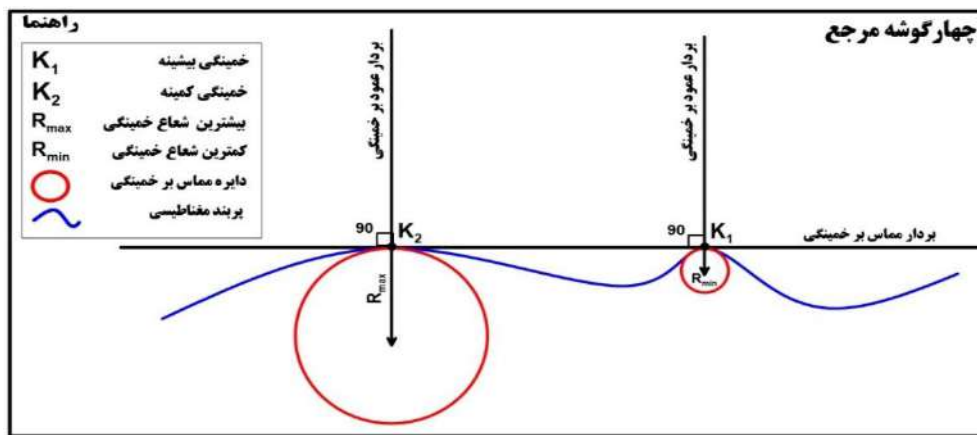
گرانیتوئیدها، توده های نفوذی شبه گرانیتی هستند که به دلیل محتوای کانی ها، حجم قابل توجه سیال کانه دار و فراوانی کمپلکس های کوردیناسی، منشا ذخایر معدنی مس، مولیبدن، سرب، روی، قلع، تنگستن و طلا هستند [۱]. شاخص باروری گرانیتوئیدها به متغیرهای ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و عوامل ژئودینامیکی بستگی دارد [۲]. عوامل منجر به ماگماتیسم شبه گرانیتی، در رژیم های تکتونیکی مخرب بیش از انواع سازنده است [۳]. ناحیه فرورانش مکران، تنها الگوی زمین ساخت صفحه ای در جنوب شرقی فلات ایران است که نشان دهنده همگرایی جزبی و معنادار بین صفحات قاره ای (مکران) و اقیانوسی (پلیت عربی) می باشد. بر اساس یافته های زمین شناسی [۴]. ژئوفیزیکی [۵]، مسافت اثر فرورانش مکران بیش از ۴۰۰ کیلومتر است و از جنوب به شمال موجب تشکیل منشور برافزایشی، نفوذ افیولیت ها و پیدایش مخروط های آتشفشانی بزمان و تفتان شده است. بررسی های بعمل آمده در زمینه توزیع و ترکیب گرانیتوئیدهای مکران، حاکی از وجود آداکیت های شمال مکران و پیدایش نفوذی های کم عمق با ترکیب ماگمای حدواسط در بزمان است [۶]. از دیدگاه زمین شناسی، گرانیتوئیدهای شمال مکران متعلق به ژوراسیک هستند و ارتباط معناداری با ذوب بخشی صفحه فرورونده و تشکیل کمان آتشفشانی مکران ندارند [۴]. اگرچه به نظر می رسد که توان معدنی آداکیت های این ناحیه متغیر بوده و تابع تغییرات شیب فرورانش منطقه است. تاکنون خاستگاه و تنوع گرانیتوئیدهای شمال مکران از منظر زمین شناسی [۴]، زمین ساختی [۷] و ژئودینامیکی [۸] بررسی شده است. اما با توجه به جایگاه نقشه های مغناطیس هوایی در شناسایی نواحی امیدبخش معدنی [۹]، الگوی زایشی گرانیتوئیدهای شمال مکران بر اساس ملاحظات هندسی- مغناطیسی بازبینی و تکمیل شده است (نوآوری تحقیق). طبق الگوی جدید، علاوه بر گرانیتوئیدهای نایر جای دورکان (ژوراسیک)، پیدایش محدود انواع ترکیبی (هیبریدی) متشکل از رخساره های کوهزایی و غیر کوهزایی دور از انتظار نیست. بدین ترتیب با فرض وجود چنین توده هایی، شاخص باروری افیولیت های شمال مکران افزایش یافته و شناسایی مناطق امیدبخش معدنی شامل طیف وسیعی از ذخایر فلزی و غیرفلزی در اولویت خواهد بود. در شکل ۱، مراحل انجام تحقیق، ذیل بررسی سوابق و معرفی الگوی هندسی- مغناطیسی شمال مکران آمده است. کاربرد خمینگی مغناطیسی در تحلیل فرورانش شمال مکران است و سازوکار گسیختگی پوسته و احتمال تشکیل گرانیتوئیدهای ترکیبی را از منظر کینماتیکی توجیه می نماید.



شکل (۱): مراحل دستیابی به الگوی هندسی- مغناطیسی گرانیتوئیدهای ترکیبی در شمال مکران

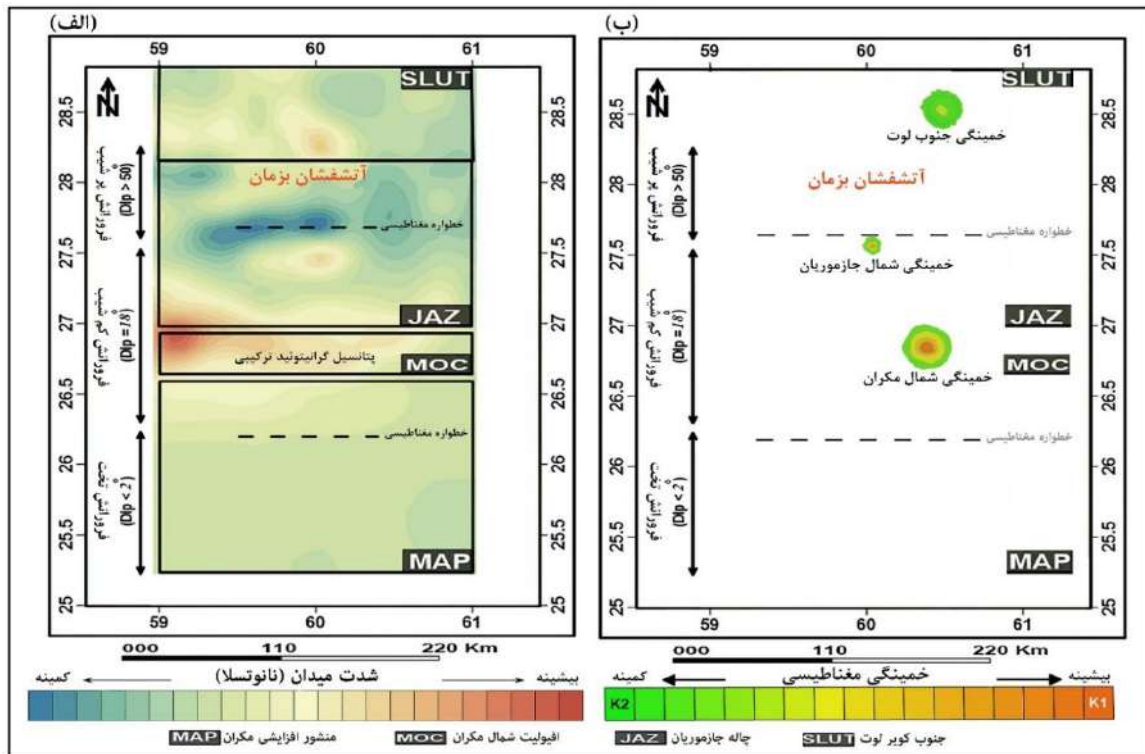
روش تحقیق

در این تحقیق از اصول مکانیک نیوتنی و یافته های ژئوفیزیکی برای بررسی کمربند افیولیتی شمال مکران و شاخص باروری گرانیتوئیدهای آن استفاده شده است. تشکیل پایگاه داده های مکانی، اولین مرحله تحقیق است که در محیط GIS صورت گرفت. در ادامه از تغییرات شدت میدان مغناطیسی برای تهیه نقشه پربندی (تحت ArcMap) و تعیین خمینگی مغناطیسی (تحت Surfer) استفاده گردید. این شاخص بیانگر تغییر مولفه های مغناطیسی در فضای کارترین است. مطابق شکل ۲، چنانچه توزیع میدان در سطح مرجع هندسی باشد، خمینگی های K_1 (بیشینه) و K_2 (کمینه) به ترتیب در کوچکترین (R_{min}) و بزرگترین (R_{max}) دایره های مماس بر خطوط پربندی افزایش می گردند.



شکل (۲): مولفه های هندسی متناظر با الگوی خمینگی مغناطیسی

در خلال فرورانش، مکان مولفه های مغناطیسی با زمان جابجا می شود و آثار این جابجایی به شکل خمینگی (قطعات خمینه در سطح توزیع نقشه مغناطیسی) مشاهده می گردد. در فرورانش قاره ای - اقیانوسی (مانند برخورد صفحات عربی - اوراسیایی در مکران)، اختلاف معناداری بین محتوای مغناطیسی صفحات وجود دارد. لذا مولفه های خمینگی (K_1 و K_2)، برآورد کننده نا اریبی از تحولات ژئودینامیکی هستند و برای دستیابی به الگوی زایشی - مکانی متناسب با توده های نفوذی (نظیر ارزیابی شاخص باروری گرانیتوئیدهای شمال مکران) بکار می روند [۹]. با توجه به مطالب ذکر شده، درون یابی تغییرات شدت میدان مغناطیسی و خمینگی حاصل از سطوح پربندی، به ترتیب توسط الگوریتم های وزن گذاری در فواصل معکوس (IDW) و مشتق مماسی (Tangential Derivative)، انجام و مطابق شکل ۳ ارائه شده اند.



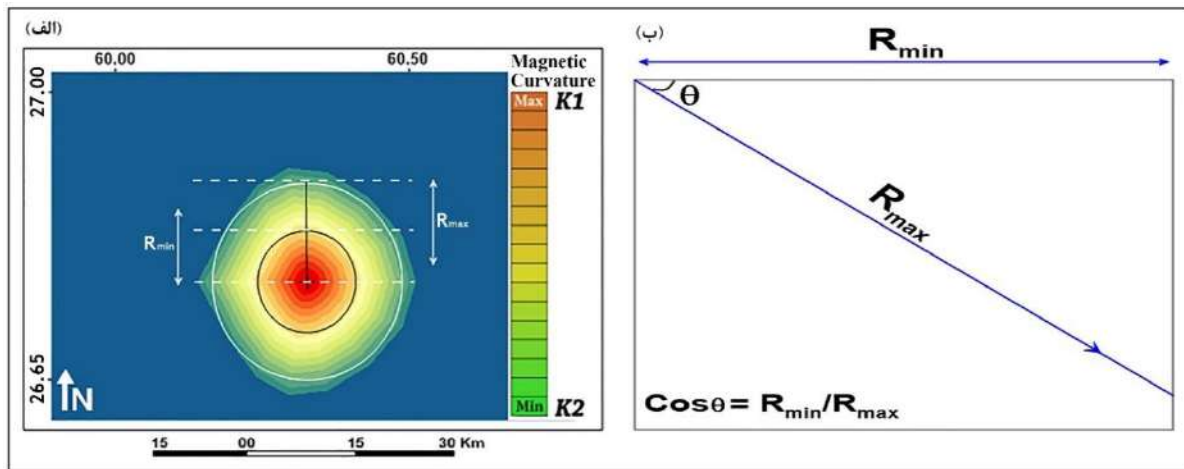
شکل (۳): نقشه پربندی تغییرات شدت میدان مغناطیسی هواپرد (الف) و خمینگی متناظر با آن (ب) در ناحیه مکران، جنوب شرقی ایران

شکل ۳-الف، تغییرات مولفه کلی شدت میدان مغناطیسی مکران تا جنوب لوت را پس از اعمال تصحیحات و درون یابی با روش های زمین آماری نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می گردد، جنوب مکران دارای زمینه مغناطیسی متوسط با تغییرات جزئی است [۹]. اما با حرکت به شمال، تغییرات مغناطیسی شدیدتر شده و با مکان هندسی کمر بند افیولیتی مطابقت دارد. با توجه به گرادیان های مغناطیسی و شواهد زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۴]، دو فابریک خطی متمایز تحت عنوان خطواره های مغناطیسی شمال مکران و شمال جازموریان شناسایی و بعنوان نشانه هایی از تغییر شیب فروانش (کم شیب به پرشیب) درج شده اند.

در شکل ۳-ب، خمینگی های متناظر با خطوط پربندی (شکل ۳-الف) برای نواحی شمال مکران، شمال جازموریان و جنوب لوت معرفی شده اند. با توجه به قالب بندی داده های مغناطیسی [۹]، محاسبات خمینگی بر حسب دسی مال درجه و طبق دستورالعمل مشتق بردارهای مماسی (زیرمنوی Surfer\Calculus) انجام شده است. چنانچه ملاحظه می گردد، ناحیه بندی کاملی از تغییرات خمینگی (K_1 تا K_2) در شمال مکران مشاهده می شود که بیانگر توزیع منظم گرادیان های مغناطیسی در خلال فروانش کم شیب پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قاره ای است.

یافته ها

یافته های تحقیق مبتنی بر تحلیل هندسی خمینگی های مغناطیسی هستند. در شکل ۴، تغییرات محلی خمینگی بیشینه به کمینه (الف) و رابطه شعاع اثر آنها (ب) ملاحظه می گردد. همچنین بین شعاع اثر خمینگی های بیشینه (R_{min}) و کمینه (R_{max}) شمال مکران، رابطه ۱ برقرار است.



شکل (۴): الف-رابطه بین شعاع های کمینه و بیشینه در الگوی هندسی خمینگی مغناطیسی، ب- نمایش هندسی تغییر زاویه خمینگی.

$$\theta = \text{ArcCos}\theta = \text{Arc} \frac{R_{\min}}{R_{\max}} = 18/27 \quad (1)$$

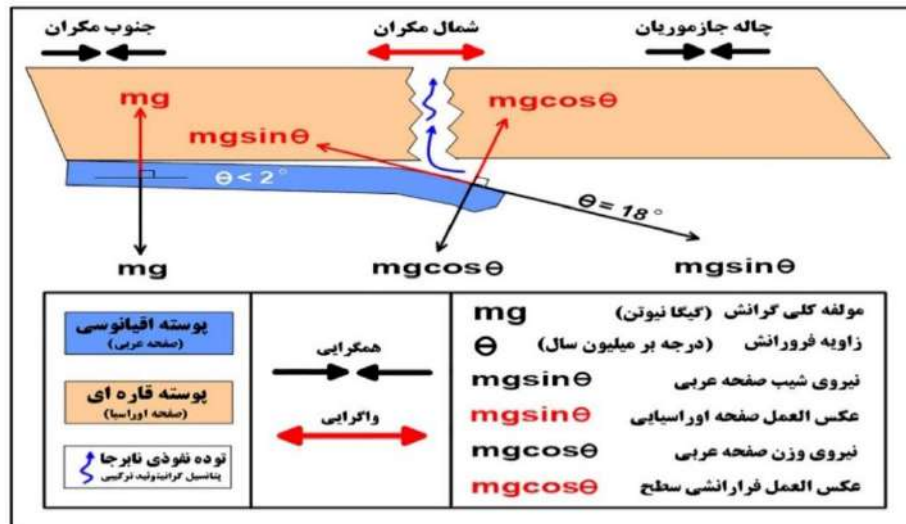
در رابطه (۱)، منظور از θ ، زاویه بین بردار خمینگی بیشینه و کمینه است. عبارت $\text{ArcCos}\theta$ ، برگردان کسینوس زاویه بین بردارهای خمینگی و R_{\min} و R_{\max} به ترتیب کمینه و بیشینه شعاع اثر خمینگی هستند که بر حسب مقیاس نقشه برآورد شده اند. شکل ۴-الف، تغییرات منظم خمینگی در خلال فرارانش پوسته عربی است و مکان هندسی افیولیت ها را نشان می دهد. دوران مغناطیسی در خلال تغییر زاویه فرورانش مکران رخ داده و موجب بازتوزیع نیروهای تنش و بازتنش شده است. شکل ۴-ب، بیانگر الگوی هندسی توزیع بردارهای خمینگی است، زاویه بین بردارها با مولفه های حرکت دورانی متناسب است. زاویه فرورانش، $18/27$ درجه است که طبق جدول ۱، با نتایج توموگرافی امواج عرضی [۱۰] مطابقت دارد.

جدول (۲): پارامترهای فرورانش قاره ای- اقیانوسی مکران [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

| جهت دوران صفحه عربی | سرعت خطی (میلیمتر/سال) | سرعت زاویه ای (درجه/میلیون سال) | زاویه فرورانش (درجه) | مکان/موقعیت | فاز فرورانش |
|---------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------|-------------|
| خلاف عقربه ساعت | ۶/۲۱ | ۰/۵۹۱ | ۱ تا ۱/۵ | مکران جنوبی | تخت |
| خلاف عقربه ساعت | ۶/۳۹ | ۰/۵۹۱ | ۱۵ تا ۱۸ | مکران شمالی | کم شیب |
| خلاف عقربه ساعت | ۷/۴۱ | ۰/۵۹۱ | ۵۰ تا ۵۲ | شمال جازموریان | پر شیب |

طبق این جدول، در ۲۰ میلیون سال گذشته، سرعت زاویه ای دوران پوسته عربی نسبت به صفحه اوراسیایی ثابت بوده [۱۱]، در حالی که سرعت خطی آن از جنوب به شمال افزایش یافته است [۱۲]. از آنجا که همگرایی صفحات عربی- اوراسیایی بین ۲۸ تا ۳۳ میلیمتر در سال است [۱۲]، لذا چنین به نظر می رسد که فرآیند فرورانش موجب قفل شدگی و استحاله انرژی شده باشد و بر اساس چنین سازوکاری، گرانتوئیدهای شمال مکران، فاقد شاخص باروری متناسب با ذخایر ماگمایی تفریق شده هستند. اما با توجه به گرادیان های مغناطیسی (شکل ۳) و شاخص خمینگی شمال مکران (شکل ۴)، تغییر زاویه فرورانش این ناحیه، موجب انتقال انرژی مکانیکی به عمق گوشته گردیده و تغییرات مناظر با فاز کم شیب را بوجود آورده است. بنابراین نحوه توزیع خمینگی ها با فرضیه استحاله انرژی مکانیکی

در تعارض است؛ زیرا مطابق شکل ۵، بردار تنش شمال مکران به دو مولفه $mg\cos\theta$ و $mg\sin\theta$ تجزیه می گردد و نیروی عکس العمل صفحه اوراسیایی، عامل گسیختگی پوسته و فرارانش افیولیت ها به سطح فرسایش کنونی است. تکوین و تداوم فاز گسیختگی برای تفریق ماگما ضرورت دارد و شاخص باروری توده های نفوذی را افزایش می دهد.



شکل (۵): کینماتیک فرورانش و فرارانش پوسته عربی در کمر بند افیولیتی-گرانیتوئیدی شمال مکران

این شکل نشان می دهد که در جنوب مکران، برآیند همگرایی صفحات عربی- اوراسیایی، از نوع فشاری و بدون ماگماتیسم است. چنین نیرویی موجب افزایش ضخامت رسوبات فلیشی شده و منشور برافزایشی ستبری را بوجود آورده است [۴]. اما با حرکت به شمال، نیروی عکس العمل اوراسیایی بر نیروی همگرایی اولیه غلبه نموده و در نقطه عطف تغییر شیب فرورانش (از ۱/۲ درجه به ۱۸ درجه)، موجب گسیختگی و فرارانش افیولیت ها گردیده است. بدین ترتیب شمال مکران متحمل واگرایی زمین ساختی شده و نیروهای $mg\sin\theta$ و $mg\cos\theta$ به ترتیب موجب فرورانش و فرارانش صفحه اقیانوسی شده اند. نتیجه فرارانش شمال مکران، تشکیل کمر بند افیولیتی حاوی گرانیتوئیدهایی با ترکیب فرومنیزین و با خواص مغناطیسی بالا می باشد. اغلب این توده ها نابرجا هستند و شاخص باروری ضعیفی دارند، اما با توجه به گسیختگی شمال مکران (شکل ۵)، از ظرفیت نسبی برای تشکیل آداکیت ها با رخساره پلاژیوگرانیت و آثار دگرسانی- دگرزهادی لیستونیتی برخوردارند [۶].

تفسیر نتایج

بر اساس نتایج بدست آمده از خمینگی مغناطیسی شمال مکران و مقایسه آن با پارامترهای هندسی منتج از همگرایی صفحات عربی- اوراسیایی، احتمال تشکیل گرانیتوئیدهای ترکیبی در حین فرارانش توده های نابرجا وجود دارد. از آنجا که گرانیتوئیدهای ترکیبی دارای پتانسیل ذخایر گرمایی هستند، لذا انتظار می رود که واکنش های صفحه اوراسیایی، زمینه افت فشار موضعی و تشکیل کمپلکس های کوردیناسی را در متن افیولیت های منطقه فراهم نموده و شاخص باروری آداکیت ها را افزایش داده باشد. تاکنون شواهد متعددی از وجود گرانیتوئیدهای مینرالیزه با ترکیب غالب لیستونیت و پلاژیوگرانیت از افیولیت های شمال مکران گزارش شده که موید نقش عوامل مکانیکی در افزایش شاخص باروری توده های نفوذی منطقه است. الگوی هندسی- مغناطیسی این تحقیق نشان می دهد که گرانیتوئیدهای شمال مکران محدود به انواع نابرجا نیستند و احتمال تشکیل گونه های ترکیبی (هیبریدی) با توانایی جابجایی و نهشت ذخایر معدنی وجود دارد. مزیت این الگو، تبیین پیش فرض هایی برای بازبینی سازوکار فرورانش مکران و پیش بینی وجود گرانیتوئیدهای

تفریق یافته بر اساس نشانه هایی از تغییر شیب همگرایی در نقشه های مغناطیس هوایی است. اما مانند بسیاری از الگوهای اکتشافی نیازمند دستیابی به اطلاعات مکانی منسجم و منظم است تا صحت و سقم رابطه خمینگی با تشکیل گرانیتوئیدهای بارور را بررسی نماید.

نتیجه گیری و پیشنهادات

- الگوی هندسی - مغناطیسی فرورانش مکران با استناد بر محاسبات خمینگی و بر اساس مفاهیم فیزیک نیوتنی تبیین شده است.
- خمینگی مغناطیسی شمال مکران با تغییر زاویه فرورانش این ناحیه مطابقت دارد و بیانگر انتقال انرژی مکانیکی به عمق گوشته است. فرایند انتقال انرژی موجب کاهش تنش های سطحی در انتهای منشور مکران شده و عامل روراندگی گسل های منطقه است.
- اغلب گرانیتوئیدهای شمال مکران منسوب به ژوراسیک هستند و بطور ناهمگام شکل گرفته اند. لذا شاخص باروری آنها تابع ترکیبات پوسته قاره ای قبل از فرورانش بوده و به دلیل تحمل درجات مختلفی از دگرگونی، برای اکتشافات معدنی اولویت ندارند.
- گسیختگی شمال مکران نشان دهنده انتقال انرژی در حین تغییر فاز فرورانش است. یعنی تحولاتی در مرز صفحات رخ داده که موجب گسیختگی پوسته و وارونگی تنش گردیده است. فابریک چین خوردگی منقطع، از نشانه های وارونگی همگرایی در ناحیه مورد مطالعه می باشد. وجود رخساره های گرمایی نظیر لیستونیت ها و پلاژیوگرانیت ها، احتمال ماگماتیسیم ترکیبی با شاخص باروری قابل قبول را افزایش می دهد. لذا اکتشافات سیستماتیک شامل سنجش میدان های ثقلی، مغناطیسی، الکترومغناطیسی و امواج لرزه ای پیشنهاد می گردند.

مراجع

- [۱] Barbarin, B. 1999. "A Review of the relationships between Granitoid types, their Origins and their Geodynamic Environments", Lithos, Elsevier, 46, 605-629, 1999.
- [۲] Castro, A., Moreno-Ventas, I., de la Rosa, J.D. "H-type granitoids: a proposed revision of granite-type classification & nomenclature", Earth-Science Reviews, 31, 237-253. 1991.
- [۳] Gutscher, M., Maury, R., Eissen, J., Bourdon, E. "Can Slab Melting be caused by Slab Subduct?" Geology, 28(6), 535-538, . 2000.
- [۴] Burg, J.-P., "Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation" Earth-Science Reviews, Elsevier, 185, 1210-1231, 2018.
- [۵] Motaghi, K., Shabaniyan, E., Nozad-Khalil, T., 2020. "Deep structure of the western coast of the Makran subduction zone, SE Iran", Tectonophysics, Elsevier, 776, 2020.
- [۶] Hunziker, D., Burg, JP., Bouilhol, P. and Von Quatd, A. "Jurassic Rifting at the Eurasian Tethys Margin: Geochemical & geochronological constraints from granitoids of North Makran", Tectonics, American Geophysical Union (AGU), 571-593, 2015.
- [۷] McCall, G.J.H., "Geotectonic history of Makran and adjacent areas of southern Iran" J. Asian Earth Sci. 15 (6), 517-531.1997.
- [۸] Saccani, E., Delavari, M., Dolati, A., Marroni, M., Pandolfi, L., Chiari, M., Barbero, E., "EW insights into the geodynamics of Neo-Tethys in the Makran area: evidence from age and petrology of ophiolites", Gondwana Res. 62, 306-327. 2018.
- [۹] Namaki, L., Gholami, A., and HafiziE, M.A. "Edge-preserved 2-D inversion of magnetic data: an application to the Makran arc-trench complex", Geophysics Journal International, 184, 1058-1068, 2011.
- [۱۰] Manaman, N.S., Shomali, H., Koyi, H., "New constraints on upper-mantle S-velocity structure and crustal thickness of the Iranian plateau using partitioned waveform inversion" Geophys. J. Int. 184, 247-267, 2011.
- [۱۱] Argus, D.F., Gordon, R.G., Heflin, M., Ma, Ch., Eanes, R., Willis, P., Peltier, W. and Owen, S. "The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's center from space geodesy" Geophys. J. Int. 180, 913-960, 2010.

[۱۲] Frohling, E. & Szeliga, W., “GPS constraints on interplate locking within the MSZ” Geophys. J. Int. 205, 67-76, 2016.

اکتشاف مس با روش های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در محدوده قلعه صولی سیستان و بلوچستان

آزاده آگاه^۱، میلاد صباغی^{۲*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان؛ agah_eng@eng.usb.ac.ir
^۲ دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان؛ Miladsabbaghi313@gmail.com
* نویسنده مسئول: نام نویسنده مسئول

چکیده فارسی

مقاومت الکتریکی و پلاریزاسیون القایی دو روشی هستند که در مرحله اکتشافات تفصیلی جهت شناسایی محل های کانی سازی سولفیدی و فلزی زیرسطحی مورد استفاده قرار می گیرند. جهت اکتشاف بهینه، باید عملیات اکتشافی به صورت سیستماتیک انجام شده و داده های برداشت شده با بهره گیری از روش های نوین مدلسازی و تفسیر شوند. محدوده مس قلعه صولی که از مرکز استان سیستان و بلوچستان حدود ۷۸ کیلومتر فاصله دارد با استفاده از روشهای پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه با آرایش قطبی-دوقطبی جهت اطلاع از موقعیت دقیق کانسار مزبور در عمق و تعیین عوامل زمین شناسی زیرسطحی مختلف از قبیل کنتاکت ها و گسلها مورد بررسی قرار گرفت. داده های حاصل از عملیات صحرایی ژئوفیزیکی به روش IP/Rs با استفاده از نرم افزارهای Oasis montaj و Res2DInv مورد پردازش قرار گرفته که به صورت مقاطع دوبعدی ترسیم شده اند. نتایج مدلسازی منجر به شناسایی محدوده کانی سازی شد.

واژه های کلیدی: پلاریزاسیون القایی، مقاومت ویژه، مدلسازی، اکتشاف مس

Copper exploration with induced polarization and resistivity methods in the area of Qale Suoli in Sistan and Baluchestan

Azadeh Agah¹, Milad Sabbaghi^{2*}

¹ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, University of Sistan and Baluchestan;
agah_eng@eng.usb.ac.ir

² Undergraduate students, Department of Mining Engineering, University of Sistan and Baluchestan;
Miladsabbaghi313@gmail.com

* Corresponding author: Name

ABSTRACT

Resistivity and induced polarization are two methods that are used in the detailed exploration phase to identify subsurface metal and sulfide mineralization sites. For optimal exploration, exploratory operations should be carried out systematically and the collected data should be modeled and interpreted using modern methods. Qala Souli copper area, which is about 78 km away from the center of Sistan and Baluchestan province, using induction polarization and resistivity methods with polar-dipole arrangement to know the exact location of the deposit in depth and determine various subsurface geological factors such as contacts and errors were investigated. The data obtained from geophysical field operations were processed using the IP/Rs method using Oasis montaj and

Res2DInv software, which were drawn as two-dimensional sections. The modeling results led to the identification of the mineralization area.

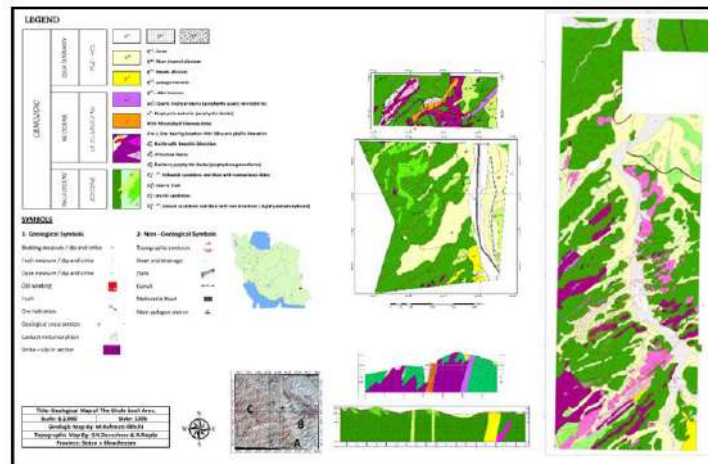
Keywords: Induced polarization, resistivity, modeling, copper exploration.

۱- مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی در جستجو و اکتشاف منابع معدنی، به‌ویژه برای منابع عمیق‌تر که با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی سطحی به راحتی قابل شناسایی نیستند، بسیار کارآمد هستند [۱]. این روش‌ها اطلاعات قابل اعتماد و مقرون به صرفه‌ای را ارائه می‌دهند و ریسک‌های سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهند و به ارزیابی منابع و قابلیت اقتصادی آنها کمک می‌کنند [۲]. روش‌های ژئوالکتریک، زیرمجموعه‌ای از روش‌های ژئوفیزیکی اکتشافی، در تشخیص ساختارهای زیرسطحی بر اساس تفاوت در خواص الکتریکی مواد اهمیت ویژه‌ای دارند. آنها غیر مخرب و غیر تهاجمی هستند و امکان به دست آوردن طیف گسترده‌ای از اطلاعات را فراهم می‌کنند. روش‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی (IP) معمولاً از روش‌های ژئوالکتریک استفاده می‌شود. روش مقاومت ویژه به شناسایی مناطق رسانا در اجسام نارسانا کمک می‌کند، در حالی که روش IP برای تشخیص کانی‌های سولفیدی، به ویژه سولفیدهای پراکنده قدرتمند است. اندازه‌گیری IP را می‌توان در حوزه زمان یا فرکانس با ظرفیت بار و ضریب فلز به عنوان متغیرهای اندازه‌گیری مربوطه انجام داد [۳-۶].

۲- زمین‌شناسی منطقه

زمین‌شناسی محدوده، پوششی از رسوبات فلیشی شرق ایران می‌باشد که فعالیت‌های آذرین در آن به صورت دایک و استوک با حجم وسیعی موجبات دگورگونی و دگرسانی سنگ میزبان را فراهم نموده است. دگورگونی پیش آمده به صورت محلی و غالباً در تماس با توده‌های آذرین در غالب هورنفلسی شدن و به‌طور خفیف‌تر اسکارنی شدن به چشم می‌خورد و حضور کانی‌های شاخص این دگرسانی‌ها نظیر گارنت، اپیدوت و مجموع کانی‌های آلتره مؤید این واقعیت می‌باشد. فعالیت توده‌های آذرین در چند بازه زمانی رخ داده است، بطوریکه توده‌های نفوذی با ترکیب داسیت پورفیری در فازهای نخست در سنگ میزبان رسوبی جایگزین شده، سپس فعالیت‌های هیدروترمالی در سیستم‌های شکستگی تزریق و موجبات تشکیل ماده معدنی مس-طلا با گانگ سیلیس را به فرم رگه‌ای و استوک ورک فراهم نموده است. در گامه‌های پایانی دایک‌های مافیک (آندزیت-آندزی بازالت) در محدوده تزریق شده است. این دایکها جوان‌ترین فاز، فاقد کانی‌سازی و سالم می‌باشند و تا حدودی دگرسانی پروپلیتیک از خود نشان می‌دهند. تزریق‌های دایک‌های فوق‌الذکر، موجب تمرکز و تغلیظ کانی‌سازی در حاشیه خود شده است. این پدیده در ترانشه‌های حفر شده به خوبی مشاهده می‌گردد. فعالیت‌های هیدروترمالی نیز در یک نسل خلاصه نشده و فاز سیلیسی حاوی مس-طلا قدیمی‌تر و در نسل‌های بعدی سیلیس حاوی پیریت و اکسید آهن با عیار مس-طلای ناچیز غالباً در همراهی با دایکهای مافیک و در حاشیه آنها در محدوده تشکیل شده است. همچنین گسترش آلتراسیون نیز در روند گسلها و شکستگی‌های محدوده به صورت توسعه کانی‌های اکسید و هیدروکسیدهای آهن و توسعه کانی‌های رسی در غالب آلتراسیون آرژیلیک مشاهده می‌گردد. توسعه این دگرسانی در روندهای خطی و با روند عمومی NE-SW نشان از ثانویه بودن این دگرسانی می‌باشد. به غیر از این دگرسانی، دگرسانی دیگری نظیر پتاسیک و فلیک نیز در محدوده وجود دارد که مرتبط با توده‌های نفوذی محدوده بوده است.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی ۱/۲۰۰۰ محدوده اکتشافی

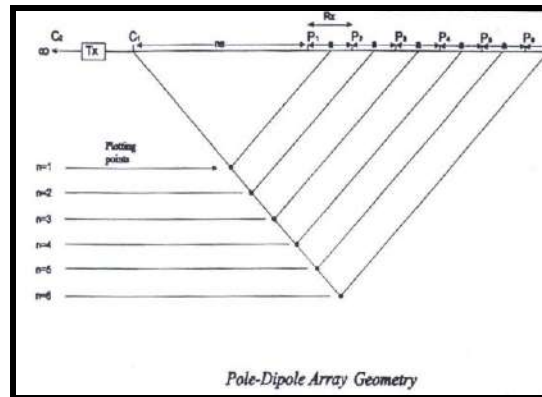
۲- مطالعات ژئوفیزیک به روش IP/Rs

۲-۱- طراحی شبکه برداشت و انتخاب آرایش مناسب

پروژه اکتشافی یک مجموعه فعالیتهای علمی و فنی است که برای کشف ذخایر معدنی با طبیعت غیر قابل تجدید صورت می‌گیرد. در تمامی عملیات اکتشافی یکی از نیازهای اساسی تعیین محل دقیق پروفیل‌های اندازه‌گیری می‌باشد که می‌بایست پروفیل‌ها عمود بر روند کانی زایی در نظر گرفته شود تا بتوان جواب بهتری از وضعیت و شکل زون آلتزه را به دست آورد. در این منطقه جهت بررسی کانه زایی سولفور در اعماق تقریبی تا ۲۰۰ متر از روش پلاریزاسیون القایی (IP/Rs) با آرایش قطبی-دوقطبی استفاده شده است که بطوراختصار به شرح آن می‌پردازیم.

۲-۲- آرایش قطبی-دوقطبی

در این نوع آرایش الکترودهای جریان و پتانسیل به ترتیب C1-C2-P1-P2 در یک راستا قرار داشته و همیشه الکترودهای پتانسیل-P1 خارج از فاصله الکترودهای C1-C2 واقع می‌شوند. بدین ترتیب که یکی از الکترودهای جریان را در بی نهایت قرار داده و الکترودهای دیگر یعنی C2 حرکت می‌کند و با حرکت دادن C2 و P1 و P2 در طول پروفیل به فاصله مساوی اندازه‌گیری برای عمق‌های متفاوت انجام می‌گیرد. فاصله بین نزدیکترین الکترودهای جریان و پتانسیل برابر NA و $(N=4,3,2,1,0, \dots)$ بوده و عمق هر اندازه‌گیری برابر $(N+0.5) \times A/2$ خواهد بود. در هر اندازه‌گیری عدد قرائت شده برای نقطه‌ای در محل تلاقی خطوطی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد پروفیل P1-P2 و از نقطه C2 رسم می‌شود، منظور می‌گردد. تصویر (۲) این شبه مقطع را نشان می‌دهد.



تصویر ۲- آرایش قطبی - دوقطبی

۳- یافته‌ها

۳-۱- بررسی نتایج IP/Rs

پروفیل‌های PD-1 و PD-2 در راستای جنوب شرق - شمال غرب با آزیموت ۳۱۵ درجه، پروفیل PD-3 با آزیموت ۴۵ درجه و پروفیل PD-4 با آزیموت ۳۳۵ درجه مورد برداشت قرار گرفته است. فاصله الکترودهای پتانسیل و جریان در این آرایش ۲۰ متر و تعداد پرش‌های الکترودهای پتانسیل در هر نقطه جریان، حداکثر $n=24$ و حداقل $n=2$ بوده است. مختصات شروع و انتهای پروفیل‌ها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مختصات پروفیل‌های قطبی - دوقطبی در محدوده قلعه صولی

| شماره پروفیل | مختصات ابتدای مقطع | | مختصات انتهای مقطع | | طول | آزیموت درجه | فاصله الکترودهای پتانسیل از هم | تعداد پرش الکترودهای پتانسیل در هر نقطه | تعداد نقاط |
|--------------|--------------------|---------|--------------------|---------|-----|-------------|--------------------------------|---|------------|
| | X | Y | X | Y | | | | | |
| PD-1 | ۲۹۰۵۲۹ | ۳۱۸۷۱۷۷ | ۲۹۰۱۰۳ | ۳۱۸۷۶۰۰ | ۵۶۰ | ۳۱۵ | ۲۰ | حداقل ۲ و حداکثر ۲۴ | ۴۱۰ |
| PD-2 | ۲۹۰۴۷۸ | ۳۱۸۷۱۵۱ | ۲۹۰۰۵۴ | ۳۱۸۷۵۷۵ | ۴۸۰ | ۳۱۵ | ۲۰ | حداقل ۲ و حداکثر ۲۴ | ۳۶۵ |
| PD-3 | ۲۸۹۹۸۷ | ۳۱۸۷۲۴۸ | ۲۹۰۳۸۳ | ۳۱۸۷۶۴۴ | ۵۲۰ | ۴۵ | ۲۰ | حداقل ۲ و حداکثر ۲۴ | ۳۵۸ |
| PD-4 | ۲۸۸۷۴۵ | ۳۱۸۸۳۹۰ | ۲۸۸۵۷۴ | ۳۱۸۸۶۶۰ | ۶۰۰ | ۳۳۵ | ۲۰ | حداقل ۲ و حداکثر ۲۴ | ۳۹۴ |

در این بخش، یافته‌های مطالعه به ترتیب ارائه شود. ابتدا نتایج اعتبارسنجی و پس از آن نتایج به ترتیب از کل به جزء ارائه گردد. در ارائه نتایج سعی شود بین تعداد جداول و نمودارها تعادل برقرار باشد. استفاده از سه یا چهار جدول و به همین تعداد نمودار توصیه می‌شود. فرمت کلیه جداول بر اساس جدول (۱) تهیه شوند. از تکرار نتایج در چند جدول، نمودار و متن خودداری فرمایید.

۴- تفسیر نتایج

۴-۱- بررسی مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-1 الی PD-4

پروفیل‌های PD-1 و PD-2 در راستای جنوب شرق-شمال غرب، عمود بر روند کانی زایی و پروفیل PD-3 در راستای جنوب غرب-شمال شرق و پروفیل PD-4 در راستای جنوب شرق-شمال غرب با فواصل الکترودی ۲۰ متر طراحی و تعداد پرش‌ها در هر نقطه جریان حداقل $n=2$ و حداکثر $n=24$ بوده و تا اعماق تقریبی ۲۲۰ متر اندازه گیری شده است. تعداد نقاط برداشت بر روی این پروفیلها به ۱۵۲۷ نقطه IP/RS می‌رسد.

الف- خصوصیات فنی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-1 (محدوده A)

پروفیل PD-1 به طول تقریبی ۵۶۰ متر با فواصل الکترودی ۲۰ متر و تعداد پرشها حداکثر $n=24$ از مختصات مبدأ ۳۱۸۷۱۷۷، ۲۹۰۵۲۹ اندازه گیری IP/RS انجام گرفت. تعداد نقاط اندازه گیری بر روی این پروفیل به ۴۱۰ نقطه IP/RS می‌رسد و همانطوریکه از بررسی این پروفیل ملاحظه می‌گردد دو زون بی هنجاری بارپذیری تأیید می‌گردد (تصویر ۳).

زون A:

این زون از زیر مختصات ۳۱۸۷۱۷۷، ۲۹۰۵۲۹ تا مختصات ۳۱۸۷۳۴۶، ۲۹۰۳۵۹ به ثبت رسیده و در عمق گسترش زیادی دارد. شیب این زون به سمت جنوب شرق متمایل می‌باشد. این زون بر روی رگه و رگچه های سیلیسی حاوی کانی زایی مس و طلا به ثبت رسیده و در عمق، شدت بارپذیری بالایی را نشان داده است. این زون بی هنجاری با مشخصه Zone A بر روی مدل بارپذیری جانمایی شده و از نزدیکی سطح زمین در حدود ۳۰ متری شروع و تا عمق تقریبی ۱۵۰ متر ادامه دارد. شدت‌های بیش از ۷۰-۶۵ msec که در بخش میانی مدل ملاحظه می‌گردد می‌تواند ناشی از تراکم بالای پیریت و یا شیل پیریت دار باشد. بنابراین می‌توان شدت‌های کمتر از آن را به کانی زایی کالکوپیریت نسبت داد. صحت این ادعا با بررسی مدل مقاومت ویژه، همانگونه که ملاحظه می‌شود شدت‌های بارپذیری کمتر از msec ۷۰-۶۵ بر روی بخش مقاوم که بر روی مدل مقاومت ویژه با رنگ قرمز تا بنفش نشان داده شده، منطبق است. احتمالاً بخش مقاوم می‌تواند تأثیر رگه و رگچه های سیلیسی موجود در محدوده باشد که در بررسی‌های میدانی این امر به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. حال آنکه بخش میانی با شدت‌های بارپذیری بیش از msec ۷۰-۶۵ بر روی بخش هادی به ثبت رسیده است که می‌تواند در ارتباط با وفور کانی زایی پیریت و یا شیل پیریت دار باشد. جهت بررسی صحت تعبیر و تفسیرهای انجام شده حفر دو گمانه با الویت بر روی بی هنجاری‌های به ثبت رسیده پیشنهاد می‌گردد که محل گمانه‌ها بر روی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه با مشخصه GSBH-01 و GSBH-02 جانمایی شده است.

زون B:

این زون از زیر مختصات ۳۱۸۷۲۷۶، ۲۹۰۴۳۰ شروع و تا مختصات ۳۱۸۷۳۱۸، ۲۹۰۳۸۷ به ثبت رسیده و در عمق گسترش چندانی را نشان نمی‌دهد. این زون بی هنجاری با مشخصه Zone B بر روی مدل بارپذیری جانمایی شده و از نزدیکی سطح زمین در حدود ۶۰ متری شروع و تا عمق ۸۸ متری ادامه دارد. این زون در مدل مقاومت ویژه با بخش هادی (۱۵۰-۲۰۰ اهم متر) منطبق است.

ب- خصوصیات فنی مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-2 (محدوده A)

این پروفیل به طول تقریبی ۵۰۰ متر و به موازات پروفیل قبلی و در همان راستا از سمت جنوب شرق به سمت شمال غرب اندازه گیری شده است. تعداد نقاط اندازه گیری شده بر روی این پروفیل ۳۶۵ نقطه IP/RS می باشد. از بررسی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-2 همانند پروفیل قبلی دو زون بی هنجاری بارپذیری تأیید می گردد (تصویر ۴).

زون A:

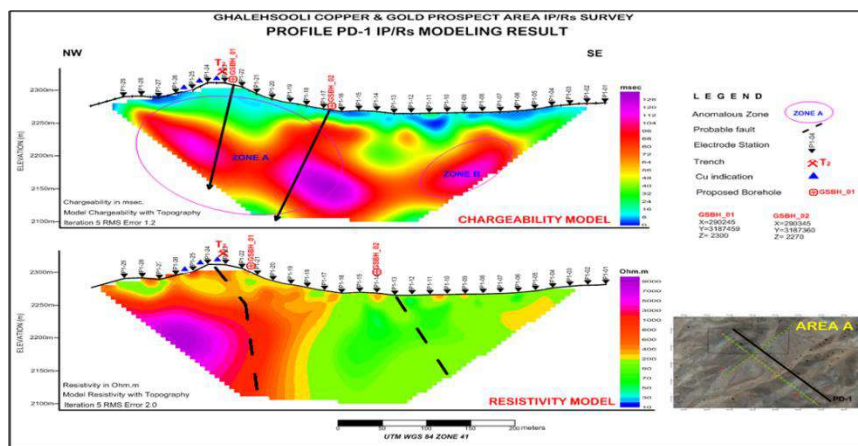
این زون با خصوصیات فنی مشابه پروفیل PD-1 و با شدت بارپذیری کمتر از پروفیل ۱ بین مختصات ۳۱۸۷۴۷۶, ۲۹۰۱۵۳ - ۳۱۸۷۳۲۰, ۲۹۰۳۰۸ به ثبت رسیده است. شیب زون بی هنجاری بر روی این مدل تقریباً قائم و کمی متمایل به سمت جنوب شرق است. بی هنجاری بارپذیری از نزدیکی سطح زمین و در فاصله حدود ۲۸ متری شروع شده و تا عمق تقریبی ۱۵۰ متر گسترش دارد. همانگونه که ملاحظه می گردد بخشی از بی هنجاری بارپذیری با شدت ۵۰-۴۰ msec واقع در شمال غرب مقطع منطبق بر بخش مقاوم بوده است و بخش های با شدت بارپذیری بیش از ۵۵ msec بر روی مدل مقاومت ویژه با بخش هادی منطبق است. همانگونه که از بررسی مدل مقاومت ویژه ملاحظه می گردد بخش مقاوم بر روی رگه و رگچه های سیلیسی حاوی کانی زایی مس و طلا به ثبت رسیده است.

شایان ذکر است نتایج IP/RS به خوبی توانسته واحدهای زمین شناسی را تفکیک نماید. جهت بررسی ادامه کانی زایی در این پروفیل نیز حفر حداقل یک گمانه پیشنهاد می گردد. محل گمانه با مشخصه GSBH-03

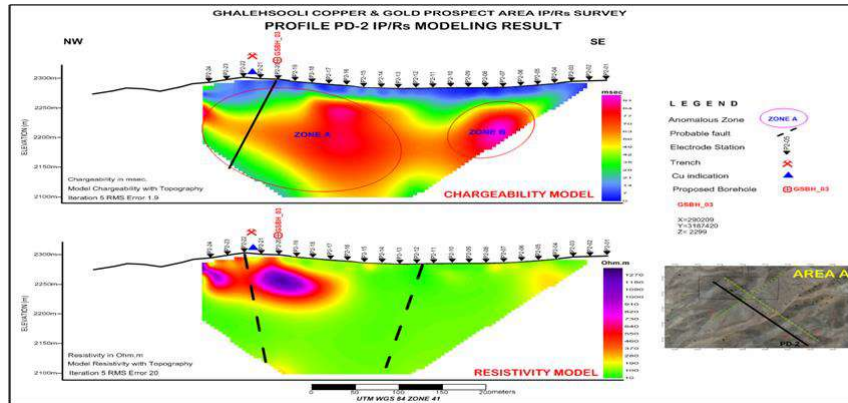
بر روی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه جانمایی شده است. در صورت اخذ نتایج مثبت از گمانه شماره ۲ پروفیل PD-1، می توان گمانه دیگری بر روی زون B، حفاری نمود.

زون B:

این زون با خصوصیات مشابه زون B در پروفیل ۱ از زیر مختصات ۳۱۸۷۲۰۷, ۲۹۰۴۲۱ شروع و تا زیر مختصات ۳۱۸۷۴۲۰, ۲۹۰۲۰۹ ادامه دارد. شدت بارپذیری آن به بیش از ۶۰ msec می رسد و از ۴۰ متری سطح زمین شروع و تا عمق گسترش زیادی نشان می دهد. در مدل مقاومت ویژه این زون با بخش هادی (۱۰۰-۱۵۰ اهم متر) منطبق است. در صورت مثبت بودن نتایج گمانه GSBH-02، می توان گمانه ای بر روی این زون پیشنهاد نمود تا ماهیت این بی هنجاری مشخص گردد.



تصویر ۳- مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه منطبق بر پروفیل PD-1



تصویر ۴- مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه منطبق بر پروفیل

پ- خصوصیات فنی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-3 (محدوده A)

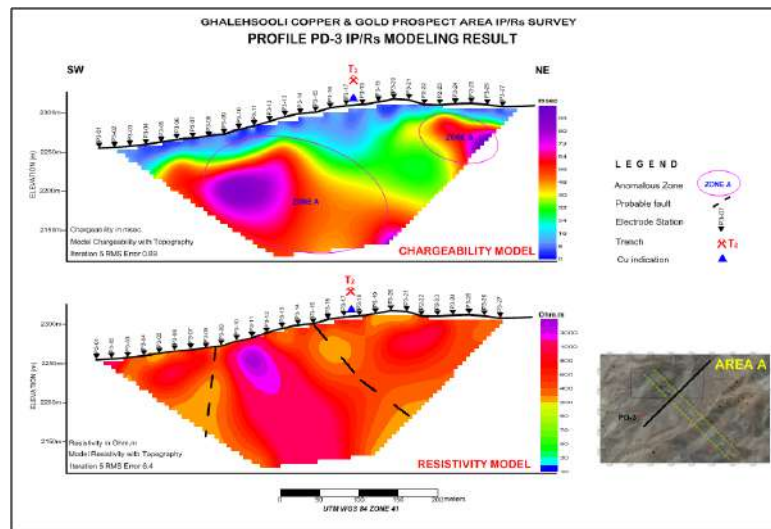
از آنجائیکه روند اصلی کانی زایی در محدوده اکتشافی شمال شرق-جنوب غرب N(۴۵-۵۵) بوده منتهی در مناطق پرعبار این محدوده، روندهای دیگری با آزیموت N(۳۳۰-۳۱۵) نیز مشاهده می‌گردد. پروفیل PD-3 به موازات کانی زایی با روند N(۴۵) طراحی گردید. دلیل انتخاب این پروفیل، بررسی امتداد کانی زایی و وجود یا عدم وجود کانی زایی در دایک‌هایی با روند شمال غرب - جنوب شرق بوده است. این پروفیل به طول ۵۲۰ متر و با فواصل الکترودی ۲۰ متر طراحی و برداشت گردید. از بررسی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-3، ۲ زون بی‌هنجاری با خصوصیات فنی یکسان تأیید می‌گردد. تعداد نقاط اندازه‌گیری شده در این پروفیل ۳۵۸ نقطه IP/Rs می‌باشد (تصویر ۵).

زون A:

این زون (زون اصلی) در عمق تقریبی ۲۵ متری از نزدیکی سطح زمین شروع شده و در عمق از گسترش زیادی برخوردار می‌باشد. شدت‌های بارپذیری بر روی این زون بین ۶۰۰ msec-۴۵۰ msec به ثبت رسیده است. کانی زایی کالکوپیریت همراه با پیریت می‌تواند بر روی این زون تشکیل شده باشد. با بررسی مدل مقاومت ویژه، بی‌هنجاری زون A بر روی بخش مقاوم که احتمالاً می‌تواند شدت‌های بالا در ارتباط تنگاتنگ با رگه و رگچه‌های سیلیسی همراه با کانی زایی مس و طلا باشد، قرار گرفته است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد شیب بی‌هنجاری در عمق نیز تقریباً قائم و کمی به سمت شمال شرق متمایل می‌باشد. این زون با وسعت و گسترش زیاد از مختصات ۳۱۸۷۳۶۱، ۲۹۰۱۰۰ شروع و تا مختصات ۳۱۸۷۵۳۱، ۲۹۰۲۷۰ ادامه دارد. جهت بررسی این زون، پیشنهاد می‌گردد تعداد ۲ پروفیل IP/Rs دیگر عمود بر روند کانی زایی بر روی این زون انجام گیرد.

زون B:

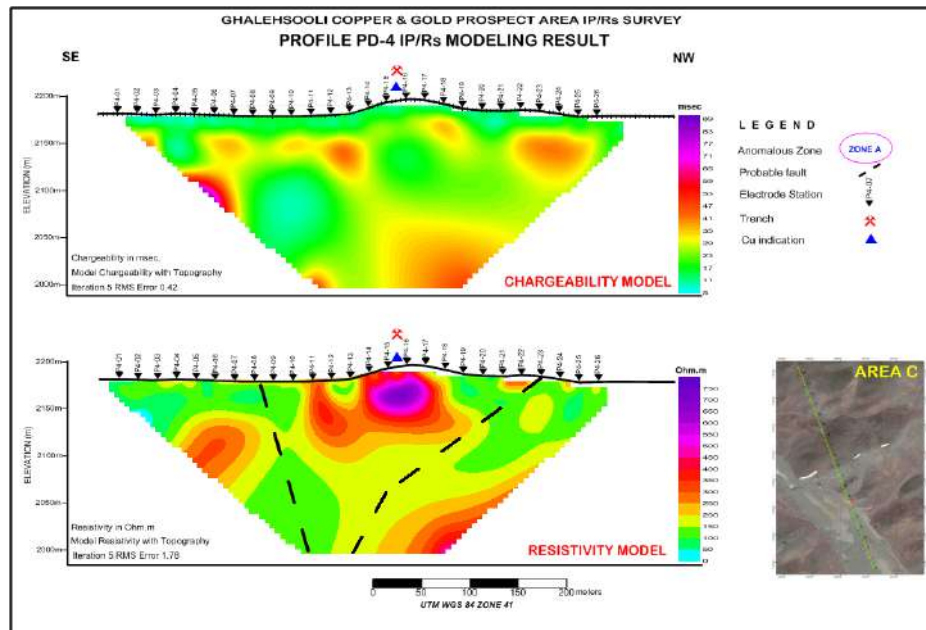
این زون در زیر مختصات ۳۱۸۷۳۰۴، ۲۹۰۰۴۴ با وسعت کمتر و شدت بارپذیری بیش از msec ۵۰۰ به ثبت رسیده و گسترش و امتداد آن نیز به دلیل محدودیت در نقاط برداشتی کنترل نشده است. در مدل مقاومت ویژه نیز این زون با بخش مقاوم منطبق است لذا جهت بررسی ماهیت این زون، ادامه عملیات تا بسته شدن بی‌هنجاری پیشنهاد می‌گردد.



تصویر ۵- مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه منطبق بر پروفیل PD -

ت- خصوصیات فنی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-4 (محدوده C)

این پروفیل جهت بررسی کانی زایی مس در محدوده C با آرموت ۳۳۵ درجه و از سمت جنوب غرب - شمال شرق اندازه گیری شده است. این پروفیل به طول ۵۰۰ متر و فاصله ایستگاه‌های برداشت ۲۰ بوده است. از بررسی مدل بارپذیری و مقاومت ویژه پروفیل PD-4، تعدادی بی هنجاری بارپذیری عدسی شکل با شدت یکسان (۳۵-۴۵ msec) در نزدیکی سطح مشاهده می‌گردد. در زیر مختصات ۳۱۸۸۷۰۹، ۲۸۸۶۲۸ یک زون بی هنجاری با خصوصیات فنی شدت بارپذیری و مقاومت ویژه متوسط تأیید می‌گردد که احتمالاً از اهمیت بالایی برخوردار است. این زون بی هنجاری از عمق تقریبی ۱۲۰ متری از سطح زمین به ثبت رسیده و در عمق به دلیل محدوده بودن نقاط برداشت در محدوده از سوی کارفرما کنترل نشده است. شیب احتمالی این زون در عمق به سمت شمال غرب است (شکل ۶). بیشترین شدت مقاومت ویژه (بخش مقاوم) در نزدیکی سطح در زیر مختصات ۳۱۸۸۶۳۴، ۲۸۸۶۵۶ الی ۳۱۸۸۷۰۹، ۲۸۸۶۲۸ به ثبت رسیده که می‌تواند حائز اهمیت باشد. تعداد نقاط برداشت IP/RS بر روی این پروفیل به ۳۹۴ نقطه رسیده است.



تصویر ۶- مدل سازی بارپذیری و مقاومت ویژه منطبق بر پروفیل PD-4

۵- نتیجه گیری کلی

نتایج مطالعات ژئوفیزیک انجام شده به روش IP/Rs با آرایش قطبی-دوقطبی بر روی ۴ پروفیل، با استفاده از نرم افزار Res2DINV مدل سازی شده و به صورت مقاطع تهیه گردیده است. مجموع نقاط اندازه گیری شده IP/Rs در دو محدوده A و C، مجموعاً ۱۵۲۷ نقطه می باشد. با توجه به عملیات صحرائی و پردازش داده ها با نرم افزارهای ژئوفیزیکی فوق الذکر، مشخص گردید که روش IP/Rs به نحو مطلوب توانسته کانی زایی سولفوری را ردیابی کند. در اکثر مدل های IP شدت های بارپذیری بین ۶۰۰ msec-۴۰۰ msec بر روی رگ و رگچه های سیلیسی حاوی کانی زایی مس و طلا به ثبت رسیده است. این موضوع در بررسی های میدانی مورد تأیید قرار گرفته است. در محل بی هنجاری های با شدت های ۶۰۰ msec-۴۰۰ msec، مقاومت ویژه بر روی بخش مقاوم منطبق می باشد. بی هنجاری های با شدت بیش از ۶۰۰ msec همراه با مقاومت ویژه کم (۱۵۰-۱۰۰ اهم متر) می تواند در ارتباط با کانی سازی توام با تراکم پیریت و یا در ارتباط با شیل پیریت دار بوده باشد. به طور کلی شیب بی هنجاری های بارپذیری به ثبت رسیده تقریباً قائم و کمی به سمت جنوب شرق متمایل است. بی هنجاری بارپذیری عموماً از نزدیکی سطح زمین شروع و تا عمق گسترش دارند. مقاومت ویژه با شدت زیاد می تواند در رابطه با تراکم رگه و رگچه های سیلیسی باشد. بر اساس نتایج ژئوفیزیک، محدوده A از نقطه نظر کانی زایی مس و طلا حائز اهمیت می باشد.

مراجع

- [1] Mizunaga, H., "Non-destructive Testing and Geophysical Exploration". M & M Zairyu Rikigaku Kanfarensu, 2022, doi: 10.1299/jsmemm.2022.gs0213.
- [2] Wang, Zh., Feng, G., Qiao, Y., Xiong, Y., "Geophysical exploration technology and its application research". 2022, doi: 10.1117/12.2627324.

- [3] Harvey, T.V., "Minerals geophysics. Preview", 2022, doi: 10.1080/14432471.2022.2127676.
- [4] Moreira, C. A., Stanfoca, M. F., Borssatto, C. K., "Analysis of the potential application of geophysical survey (induced polarization and DC resistivity) to a long-term mine planning in a sulfide deposit". Arabian Journal of Geosciences, 2020, doi: 10.1007/S12517-020-06096-X.
- [5] Kharisov, T. F., Mel'nik, V. V., Kharisova, O. D., Zamjatin, A. L., "Geophysical research of the rock massif in underground mine conditions", 2020, doi: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.
- [6] Egbelehulu, P., Mallam, A., Abdulsalam, N. N., Adewumi, T., "A Review of Electrical Methods as A Worthy Tool for Mineral Exploration". 2020, doi: 10.2478/PJG-2020-0011.

مغناطیس سنجی گرادیمتری با پهپاد، مطالعه موردی بر روی معدن کلکان، استان کردستان

هاشم شاهسونی^۱، سارا عذیری^۲، افشین شیخ اسماعیلی^۳

^۱هاشم شاهسونی، دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان؛ h.shahsavani@uok.ac.ir

^۲سارا عذیری دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ sara.o@aut.ac.ir

^۳افشین شیخ اسماعیلی، دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه کردستان؛ afshin.esmaili@yahoo.com

* نویسنده مسئول: هاشم شاهسونی

چکیده فارسی

پهپادها مزایای قابل توجه نسبت به هواپیماهای سرنشین دار سنتی دارند. این مزایا شامل ایمنی زیاد، هزینه عملیاتی کم و پرواز در ارتفاع کمتر می باشد. با توجه به این مزایا حسگرهای مغناطیسی نیز به گونه ای توسعه داده شده اند تا امکان نصب آن ها بر روی پهپادها فراهم گردد. با این حال، مغناطیس سنج های موجود، با چالش هایی همچون وزن زیاد، هزینه زیاد و مصرف بالای انرژی مواجه هستند. این چالش ها هنگامی آشکارتر می شوند که از گرادیمتری هوایی مغناطیسی استفاده شود. زیرا در این صورت بایستی حداقل با دو حسگر به اندازه گیری انجام شود. به منظور پاسخ به این محدودیت، در این مطالعه پیشنهاد شده است تا حسگرهای ممز با ویژگی های هزینه کم، وزن سبک و مصرف انرژی کم با قدرت تفکیک قابل قبول بر روی یک پهپاد نصب گردد. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، یک برداشت بر روی معدن آهن کلکان واقع شده در استان کردستان انجام شده است. سپس نتایج گرادیمتری بدست آمده با داده های حاصل از یکی از حسگرهای نصب شده روی پهپاد مقایسه شده است. این تجزیه و تحلیل مقایسه ای نشان می دهد که استفاده از یک آرایه گرادیمتری منجر به افزایش گرادایان های حاصل از ناهنجاری های مغناطیسی می شود. به طور مثال گرادایان اندازه گیری های مغناطیسی بر روی یک پروفیل انتخابی در این مطالعه به اندازه ۱۰ نانوتسلا بر متر، در جهت قائم نسبت به گرادایان به دست آمده از روش مشتق گیری ریاضی از داده های یک حسگر افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: پهپاد، گرادایان میدان مغناطیسی، گرادیمتری، حسگر ممز، مگنتومتر پروتون

Magnetic Gradiometry Survey with Drone: A Case Study on Kalkan Iron Ore Mine, Kurdistan Province

Shahsavani Hashem¹, Sheykhesmailie Afshin², Ozayri Sara³

¹Shahsavani Hashem, Associate Professor, Department of Mining, University of Kurdistan; h.shahsavani@uok.ac.ir

²Afshin Sheykhesmailie, Graduated with an MSc in Mining Exploration, University of Kurdistan, afshin.esmaili@yahoo.com;

³Ozayri Sara PhD student in mining exploration engineering, Amirkabir University of Technology; sara.o@aut.ac.ir

* Corresponding author: Hashem Shahsavani

ABSTRACT

Drones have considerable advantages over traditional manned aircraft. These advantages include high safety, low operational costs, and the ability to fly at lower altitudes. Given these benefits, magnetic sensors have also been developed to be installed on drones. However, existing magnetometers face challenges such as high weight, high cost, and high energy consumption. These challenges become more apparent when using aerial magnetic gradiometry, as it requires a minimum of two sensors for measurement. To address these limitations, this study proposes the installation of MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) sensors with features of low cost, lightweight, and low

energy consumption with acceptable resolution on a drone. To evaluate the performance of the proposed method, a survey was conducted on the iron ore deposits in Kurdistan province. Subsequently, the gradientometry results were compared with data obtained from one of the sensors installed on the drone. This comparative analysis indicates that using a gradient array increases the gradient of the magnetic anomalies. For instance, the gradient measurements on a profile in this study increased by 10 nanoTesla per meter, perpendicular to the gradients obtained from mathematical differentiation of data from a single sensor in the vertical direction.

Keywords: UAV, magnetic field gradient, Gradiometry, MEMS sensor, proton magnetometer

مقدمه

حدود یک قرن از زمان ظهور اولین وسیله پرنده بدون سرنشین یا پهپاد گذشته است. این پهپاد برای اهداف نظامی طراحی شده بود [1]. در سال های بعد پهپادها با کاربردهای غیر نظامی توسعه داده شدند. ژئوفیزیک دانان نیز از پهپادها در مطالعات گرانی سنجی [۲]، [۳] اکتشاف لرزه ای [۴]، [۵]، و برداشت های الکترومغناطیسی [۶]، [۷] استفاده نموده اند.

استفاده از پهپادها برای مغناطیس سنجی هوایی مزایای بسیار زیادی دارد. از آن جمله می توان به کاهش خطرات جانی، هزینه های نگهداری و عملیاتی کم، سیستم موقعیت یابی دقیق و قدرت تفکیک بالاتر به سبب پرواز در ارتفاع کمتر را نام برد [۸]. ژنگ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ مروری جامع بر استفاده از پهپادها به منظور برداشت های هوایی مغناطیسی انجام داده اند [۹].

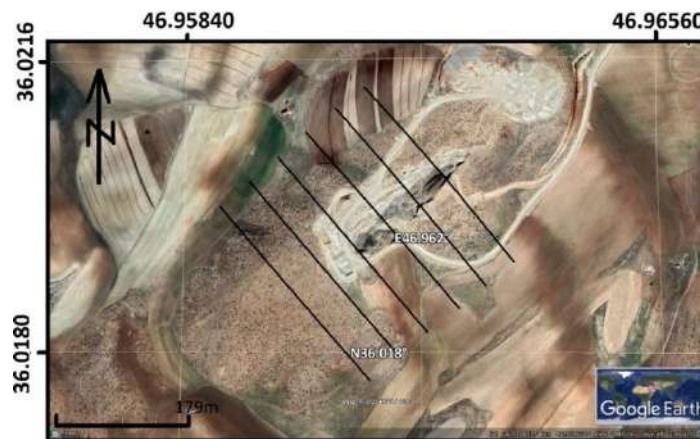
یکی از مشکلات استفاده از پهپاد در برداشت های مغناطیس سنجی، سنگین بودن مغناطیس سنج های نصب شد روی آن ها می باشد. توصیه می شود که مغناطیس سنج نصب شده بر روی یک پهپاد وزنی کمتر از ۳۰۰ گرم داشته باشد [10]. هر چند پهپادها قابلیت حمل مغناطیس سنجی هایی با وزن بیشتر از ۳۰۰ گرم را دارا هستند، به عنوان مثال تاک و همکارانش در سال ۲۰۱۹ از یک مغناطیس سنج با وزن تقریب یک کیلوگرم استفاده نمودند [۱۱] یا ماله میر و همکارانش در سال ۲۰۱۷ یک مغناطیس سنج پروتون را که وزنی بیشتر از دو کیلوگرم داشت را بر روی یک پهپاد نصب نمودند [۱۲]. با این حال نصب مغناطیس سنج های سنگین به طور قابل توجهی زمان پرواز پهپاد را کاهش می دهد. این مساله در برداشت های مغناطیس سنجی با پهپادها، به ویژه زمانی که نصب همزمان دو حسگر بر روی یک پهپاد لازم است [13]، چالش برانگیزتر می شود.

اخیراً حسگرهای سامانه میکرو الکترو مکانیکی یا ممز توسعه داده شده است که توجه زیادی را به خود جلب نموده. این حسگرها که در ابتدا برای ناوبری و تعیین شمال مغناطیسی توسعه داده شده بودند کاربرد آن ها بعداً در حوزه های دیگر علوم نیز مورد استقبال قرار گرفته است. در این مقاله دو حسگر ممز سبک بر روی یک پهپاد هگزاکوپتر کوچک نصب شده و سپس اندازه گیری گرادیان های عمودی در امتداد چند پروفیل انجام شده است. گرادیان میدان مغناطیسی زمین در جهت قائم به دست آمده از این آزمایش با گرادیان قائم محاسبه شده از مشتق گیری ریاضی در جهت قائم داده های یک حسگر (حسگر پایینی) با یکدیگر مقایسه شده اند.

روش های تحقیق

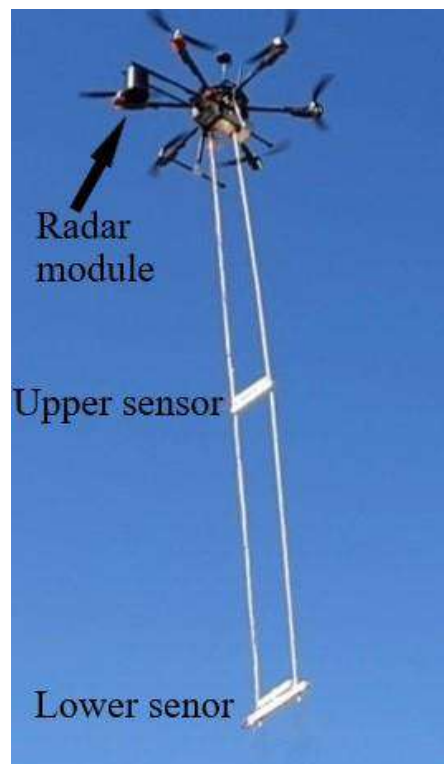
به منظور تست حسگر مغناطیسی ممز، بایستی محلی بدون نوفه های مغناطیسی حاصل از فعالیت های معدنی را انتخاب نمود. ماشین آلات ثابت معدنکاری مانند دستگاه های حفاری پاسخ های مغناطیسی قابل پیش بینی بر روی داده های برداشت شده دارند. اما ماشین آلات متحرک مانند کامیون ها یا بولدوزرها نوفه های تصادفی را به داده وارد می کنند. از این رو در این مطالعه یک ذخیره تازه اکتشاف شده مگنتیت انتخاب شده است. این ذخیره فلزی در ۲۰ کیلومتری شهر دیواندره در نزدیکی روستای قلعه روتله در استان کردستان واقع شده است.

تعداد و طول پروفیل‌ها برداشت به گونه ای انتخاب شده اند تا بی هنجاری و زمینه به طور کامل برداشت گردد. از این رو طول پروفیل های برداشت، فاصله خط پرواز و ارتفاع پرواز پهنپاد به ترتیب ۳۰۰ متر، ۵۰ متر و ۶ متر تعیین شده اند. این پروفیل ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱). پروفیل های برداشت در محدوده مورد مطالعه

برداشت ها با استفاده از یک پهنپاد شش موتوره که به یک کنترل گر پرواز متن باز به نام پیکس هاوک مجهز شده انجام شده است. به منظور ثابت نگه داشتن فاصله تا سطح زمین در طول پروفیل پرواز از یک ماژول رادار استفاده شده است. لطفاً به شکل ۲ مراجعه فرمایید.



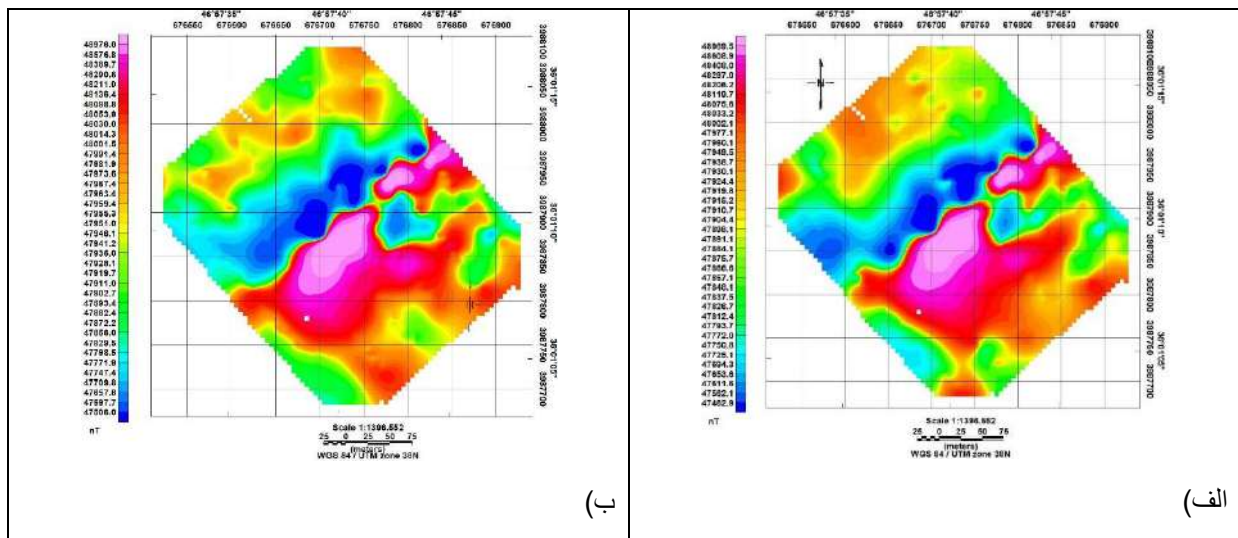
شکل (۲). پهنپاد چند موتوره به همراه فاصله یاب لیزی و دو حسگر که به وسیله دو رشته طناب از آن آویزان شده اند حین پرواز

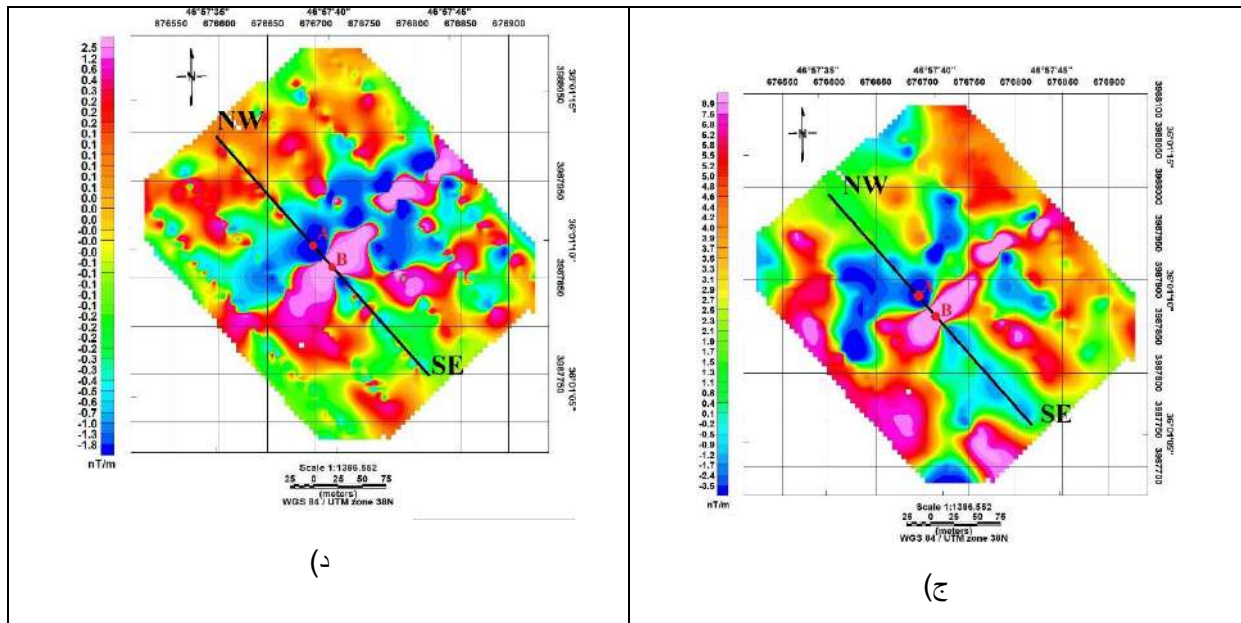
حسگرها از پهپاد با استفاده از دو کابل سه متری آویزان شده اند تا نوفه مغناطیسی حاصل از موتورهای بدون جاروبک بر روی حسگر حذف گردد. حسگرها شدت میدان مغناطیسی را در سه جهت عمود بر یکدیگر قرائت کرده و آن ها را در یک کارت حافظه ذخیره می کنند. بعد از برداشت پردازش اولیه داده ها انجام شده و شدت کل میدان مغناطیسی برای هر یک از حسگرها قابل محاسبه است.

یافته‌ها

پس از انجام برداشت، داده‌های جمع‌آوری شده در یک فایل متنی در کارت حافظه SD ذخیره شد و به یک کامپیوتر انتقال داده شده است. این فایل متنی شامل ۱۲ ستون است: شدت مغناطیسی در سه جهت عمود بر یکدیگر برای حسگر اول و همین‌طور برای حسگر دوم، همچنین طول و عرض جغرافیایی، تعداد ماهواره‌ها، تاریخ، زمان و ارتفاع اندازه‌گیری شده.

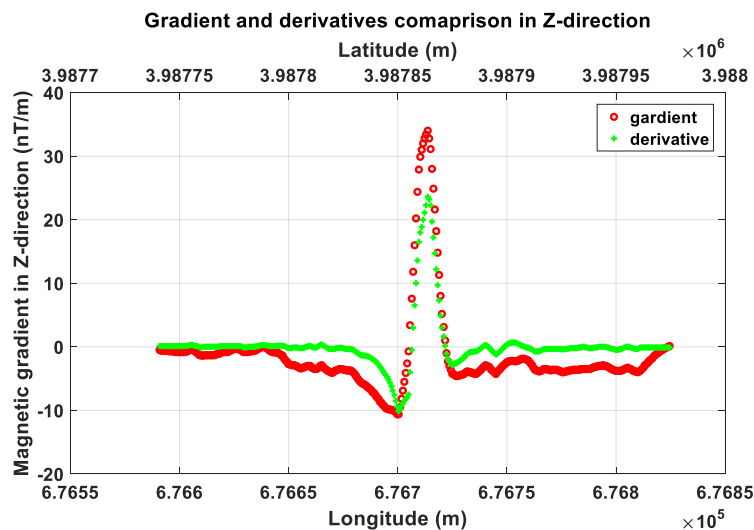
پس از پیش‌پردازش داده‌های برداشت شده، مانند حذف نوفه‌ها و تقسیم داده به خطوط پروفیل جدا از هم، داده‌ها با استفاده از روش کمینه‌سازی منحنی شبکه شده اند. در شکل ۳ شدت مغناطیسی کل برای حسگر پایین، حسگر بالا و گرادیان در جهت قائم (تفاضل حسگر پایینی و بالایی تقسیم بر فاصله آن‌ها) را نشان می‌دهند. تصحیحات روزانه به داده اعمال نشده‌اند، زیرا مدت برداشت داده تنها حدود دو ساعت بوده است و تغییرات روزانه قابل اغماض می‌باشند.





شکل (۳). نقشه شدت میدان کل (الف) حسگر بالایی (ب) حسگر پایینی (ج) اختلاف دوحسگر تقسیم بر فاصله آن ها (گرادیان در جهت قائم) (د) گرادیان قائم بدست آمده با مشتق گیری ریاضی از داده های حسگر پایینی

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است روش گرادیومتری، شکل ۳ مقادیری گرادیان بزرگ تری نسب به مشتق گیری سویی (با استفاده از داده های یک حسگر)، شکل ۳ را بدست می دهد. این مطلب را می توان با مقایسه بازه تغییرات گرادیان نشان داده شده روی راهنمای رنگی این دو نقشه دریافت. به منظور بررسی دقیق تر موضوع یک پروفیل در امتداد جنوب شرقی-شمال غربی همان طور که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است انتخاب شده است. شکل (۴) مقایسه مقادیر بدست آمده از روش گرادیومتری و مقادیر بدست آمده از مشتق گیری ریاضی در جهت قائم که روی داده های حسگر پایینی پیاده شده است را نشان می دهد.



شکل (۴). مقایسه مقادیر بدست آمده از روش گرادیومتری و مقادیر بدست آمده از مشتق گیری ریاضی در جهت قائم که روی داده های حسگر پایینی پیاده شده است را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است بر روی بی هنجاری مقادیر کمینه بدست آمده از روش گرادایومتری و مشتق ریاضی در جهت قائم (پایه سازی شده روی داده های حسگر پایینی) در مختصات ۶۷۶۷۱۲ شرقی و ۳۹۸۷۸۵۲ شمالی به ترتیب برابر ۱۲/۳- و ۹/۸- نانوتسلا بر متر می باشد. همچنین مقادیر بیشینه بدست آمده از روش گرادایومتری و مشتق ریاضی در جهت قائم (پایه سازی شده روی داده های حسگر پایینی) روی بی هنجاری در مختصات ۶۷۶۷۸۱ شرقی و ۳۹۸۷۹۳۳ شمالی به ترتیب برابر ۳۴/۴ و ۲۳/۹ نانوتسلا بر متر می باشند. به عبارت دیگر بر روی بی هنجاری فاصله بین کمینه و بیشینه برای روش گرادایومتری ۴۶/۷ نانوتسلا بر متر و برای روش مشتق گیری ریاضی برابر ۳۳/۷ نانوتسلا بر متر در جهت قائم می باشد. این موضوع نشان دهنده آن است که روش گرادایومتری گرادایان شدیدتری را ثبت نموده است.

نتیجه گیری

با توسعه پهپادها برای انجام برداشت های هوایی مغناطیس سنجی، سنسورهای مغناطیس سنج نیز توسعه یافته و به طور ویژه برای نصب بر روی پهپادها سازگار شده اند. با این حال، اگرچه این سنسورها کوچک و سبک شده اند، برای برداشت به شیوه گرادایومتری هنوز مناسب نیستند. زیرا برای برداشت های مغناطیس سنجی گرادایومتری نیاز به نصب دو حسگر بر روی پهپاد است.

در این مطالعه ابتدا دو حسگر ممز که اساساً به منظور ناوبری توسعه یافته اند بر روی یک پهپاد چند موتوره نصب شده است. این دو حسگر با یک طناب به طول سه متر از پهپاد آویزان شدند تا نوفه های مغناطیسی حاصل از موتور بدون جاروبک پهپاد را بر روی حسگرها کاهش دهد. در مرحله بعد برداشت هایی بر روی یک ذخیره فلزی انجام شد. سپس گرادایان میدان مغناطیسی به دو روش، یعنی روش مشق گیری ریاضی در جهت قائم برای داده های حسگر پایینی نصب شده روی پهپاد و دیگری به روش گرادایومتری، یعنی کم کردن مقادیر اندازه گیری شده حسگر پایینی از حسگر بالایی تقسیم بر فاصله بین آن دو، محاسبه شد. نتایج نشان داد بر روی بی هنجاری روش گرادایومتری مقدار گرادایان را حدود ۱۰ نانو تسلا بر متر بیشتر ثبت نموده است که نشان دهنده توانایی بیشتر روش گرادایومتری در آشکارسازی گرادایان میدان مغناطیسی نسبت به مشتق گیری ریاضی است.

نصب دو حسگر بر روی یک پهپاد، هرچند هر یک از آن ها وزن اندکی داشته باشند، باعث کاهش زمان پرواز نسبت به نصب یک حسگر می شود. همچنین در ارتفاع بالا گرادایان مغناطیسی زمین کاهش می یابد و اندازه گیری گرادایان های کم به وسیله حسگرهای ممز که حساسیت کمتری نسبت به دیگر حسگرهای سنتی مورد استفاده در مغناطیس سنجی دارند دشوار خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می شود تا حد امکان پهپاد مجهز به این حسگرها در صورت برداشت به صورت گرادایومتری، نزدیک سطح زمین پرواز کنند.

مراجع

- [1] K. Anderson and K. J. Gaston, "Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology," *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. doi: 10.1890/120150.
- [2] G. Grover et al., "World's First Fixed Wing UAV Gravity Data Collection Flight. Less cost & less carbon," in Second EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles, European Association of Geoscientists & Engineers, Nov. 2021, pp. 1-3. doi: 10.3997/2214-4609.2021629003.
- [3] K. Luo et al., "First unmanned aerial vehicle airborne gravimetry based on the CH-4 UAV in China," *J Appl Geophy*, vol. 206, p. 104835, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2022.104835.
- [4] Z. Ma, R. Qian, Y. Wang, J. Zhang, X. Liu, and J. Ling, "UAV source: A new economical and environmentally friendly source for seismic exploration in complex areas," *J Appl Geophy*, vol. 204, p. 104719, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2022.104719.

- [5] R. Stewart, L. Chang, S. Sudarshan, A. Becker, and L. Huang, "An unmanned aerial vehicle with vibration sensing ability (seismic drone)," in SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016, Society of Exploration Geophysicists, Sep. 2016, pp. 225–229. doi: 10.1190/segam2016-13973407.1.
- [6] T. Bjerg, E. L. S. da Silva, and A. Døssing, "Investigation of UAV Noise Reduction for Electromagnetic Induction Surveying," in NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, European Association of Geoscientists & Engineers, Dec. 2020, pp. 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.202020149.
- [7] A. Parshin et al., "Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting-the next stage in applied UAV-geophysics," Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 5, pp. 1–26, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11052060.
- [8] D. Porras, J. Carrasco, P. Carrasco, S. Alfageme, D. Gonzalez-Aguilera, and R. Lopez Guijarro, "Drone Magnetometry in Mining Research. An Application in the Study of Triassic Cu–Co–Ni Mineralizations in the Estancias Mountain Range, Almería (Spain)," Drones, vol. 5, no. 4, p. 151, Dec. 2021, doi: 10.3390/drones5040151.
- [9] Y. Zheng, S. Li, K. Xing, and X. Zhang, "Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: A review on platform selection and interference suppression," Drones, vol. 5, no. 3. MDPI, Sep. 01, 2021. doi: 10.3390/drones5030093.
- [10] S. Cherkasov and D. Kapshtan, "Unmanned Aerial Systems for Magnetic Survey," in Drones - Applications, InTech, 2018, pp. 135–148. doi: 10.5772/intechopen.73003.
- [11] L. Tuck, C. Samson, C. Polowick, and J. Laliberté, "Real-time compensation of magnetic data acquired by a single-rotor unmanned aircraft system," Geophys Prospect, vol. 67, no. 6, pp. 1637–1651, Jul. 2019, doi: 10.1111/1365-2478.12800.
- [12] A. Malehmir et al., "The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden," The Leading Edge, vol. 36, no. 7, pp. 552–557, Jul. 2017, doi: 10.1190/tle36070552.1.
- [13] S. Luoma and X. Zhou, "Construction of a Fluxgate Magnetic Gradiometer for Integration with an Unmanned Aircraft System," Remote Sens (Basel), vol. 12, no. 16, p. 2551, Aug. 2020, doi: 10.3390/rs12162551.

کاربرد روش مقاومت ویژه در شناسایی گسل های آبرفتی (مطالعه موردی: معدن شماره ۱ گل گهر)، سیرجان

صادق مقدم^۱، علیرضا گودرزی^۲، محمد امیری حسینی^۳، سید مرتضی سجادیان^۳ و محمد کشاورز^۴.

۱دکتری ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، sadegh136789@yahoo.com

۲دانشیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته ماهان، کرمان، Goudarzi.kgut@gmail.com

۳مجمع صنعتی و معدنی گل گهر سیرجان، کرمان.

۴استادیار بخش زمین شناسی دانشگاه پیام نور، زنجان.

* نویسنده مسئول: صادق مقدم

چکیده فارسی

به منظور بررسی قابلیت روش مقاومت ویژه الکتریکی در شناسایی ناپیوستگی های پنهان موجود در ساختار آبرفتی معدن شماره یک گل گهر سیرجان، پروفیل های دوبعدی با توان تفکیک پذیری بالا از لایه های زیرسطحی با تفکیک پذیری مطلوب تا عمق حدود ۴۰ متری توسط آرایه ونر-شلومبرژه در پله های سوم تا پنجم قسمت جنوب غربی معدن، تهیه شده است. طراحی عمق برداشت توسط این روش، وابسته به پیش بینی های اولیه از عمق شکستگی ها در محدوده مورد مطالعه و همچنین حفظ توان تفکیک پذیری صورت گرفته است؛ با استناد به مقادیر مقاومتی بر روی پله ها، لایه آبرفتی خشک دانه ریز تا متوسط در قسمت غربی و دانه درشت در قسمت جنوبی محدوده مورد مطالعه دارای مقاومت ۲۰-۳۳ اهم متر، آبرفت همراه میان لایه های کنگومرایی با افزایش رطوبت با مقاومت ۱۰-۲۰ اهم متر و مقاومت لایه آبدار حاوی املاح با مقاومت ۱-۶ اهم متر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این با مقایسه مقاطع مقاومت ویژه و نقشه گسل های موجود تهیه شده توسط بخش اکتشاف مجتمع صنعتی معدنی گل گهر، انطباق قابل قبولی میان نتایج وجود داشته است.

واژه های کلیدی: روش مقاومت ویژه الکتریکی، گسل، معدن گل گهر، سیرجان.

Application of electrical resistivity method in identification of alluvial faults (case study: Gol Gohar Mine No. 1), Sirjan

Sadegh Moghaddam¹, Alireza Goudarzi², Mohammad Amiri Hoseini³ and Sed Morteza Sajjadian³

¹PhD of Geophysics, Geophysics Institute of Tehran University; Sadegh136789@yahoo.com.

² Associate professor of Geophysics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

³ Exploration department of Gol-Ghar Mineral Industrial Company, Kerman, Iran.

⁴ Payam noor university, Zanjan, Iran.

* Corresponding author: Sadegh Moghaddam

Abstract

In order to investigate the capability of the electrical resistivity method in identifying the hidden discontinuities and faults in the alluvial structure of the No. 1 Gol-Ghor Sirjan mine, two-dimensional profiles with high resolving power of the subsurface layers with optimal resolution up to a depth of about 40 meters by the Wenner-Schlumberger array in The third to fifth ramps of the southwestern part of have been carried out and the resistivity sections of these profiles have been prepared. The design of the depth of this method is dependent on the initial predictions of the depth of the fractures in the studied area and also maintaining the resolution power. Based on the resistivity values, the fine-

to medium-grained dry alluvial layer in the western part and the coarse-grained in the southern part of the studied area have a resistivity of 20-330 Ohm-meter, alluvium along with conglomerate interlayers with increasing humidity with a resistivity of 10-20 Ohm-meters and the resistivity of the aqueous layer containing solutes with a resistivity of 1-6 ohm meters. In addition, by comparing the resistivity sections and the existing fault map prepared by the exploration department of Gol-Ghar Mineral Industrial Company, there has been an acceptable agreement between the results.

Keywords: Electrical resistivity method, Fault, Gol-Ghor mine, Sirjan.

مقدمه

مجمع سنگ آهن گل گهر در استان کرمان و در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سیرجان قرار گرفته است. این منطقه توسط آبرفت های عهد حاضر پوشیده شده و سنگ های دوره پالئوزوئیک که قدیمی ترین مجموعه دگرگونی منطقه را تشکیل می دهند، کمپلکس گل گهر را در خود جای داده اند. وجود شکستگی ها و گسله های موجود در دیواره معادن این مجتمع صنعتی می تواند به عنوان یکی از مهم ترین مخاطرات هرگونه برداشت و حفاری، مورد توجه قرار بگیرد؛ از طرفی شناسایی این گسل ها می تواند رهیافتی کاربردی در خصوص ارتباط ساختاری بین این معادن تلقی شود. بسیاری از گسل های فعال بر روی نقشه های زمین شناسی، ساختاری و یا تکتونیکی قدیمی، به طور کامل پیاده نشده اند؛ علاوه بر این، رخنمون واحدهای گسل خورده ممکن است در سطح برش آبراهه ها، سطح لغزش یافته یا برش جاده و حفاری مشخص گردد؛ همچنین ممکن است واحدهای زمین شناسی که در مجاورت گسل قرار دارند دچار خردشدگی، شکاف خوردگی، کج شدگی و یا روان گرایی شوند؛ لذا هدف از این مطالعه، تخمین دقیقی از وضعیت زیرسطحی و میزان دقت روش ژئوفیزیکی در راستای شناسایی ناپیوستگی ها در کل معادن بوده است.

بخش اصلی واحدهای زمین شناسی سازنده معدن شماره ۱ گل گهر از یک واحد رسوبی درشت دانه با تراکم متوسط تشکیل شده است. این واحد رسوبی با رنگ خاکستری و عموماً از نوع سنی، بطور متوسط تا عمق ۵۰ الی ۷۰ متر از بخش غربی دیواره معدن را پوشانده است. در زیر این واحد رسوبی درشت دانه، یک واحد درشت دانه قدیمی تر قرار گرفته است که میزان رس و مارن این واحد بیشتر از واحد فوقانی است. میان لایه های گچی و ریزدانه نیز در این واحد رسوبی قابل مشاهده است. ضخامت این واحد رسوبی بیش از ۳۰ متر برآورد می شود. دو واحد رسوبی فوق الذکر بر روی سازندهای قدیمی تر شامل واحد مارنی، واحد آهکی و واحد شیستی قرار گرفته اند که این واحدها در بخش غربی معدن شماره ۱، به شدت تحت تاثیر گسلی با امتداد تقریباً شرقی-غربی قرار گرفته اند. در منتهی الیه بخش جنوبی معدن نیز، رخنمون واحد شیستی قابل مشاهده است. شکل (۱) نمایی از محدوده برداشت های ژئوفیزیکی را نشان می دهد.



شکل (۱): نمایی از عملکرد میان لایه رسی در تراوش آب از دیواره جنوبی معدن شماره ۱ در محدوده برداشت‌های ژئوفیزیکی.

روش مقاومت‌ویژه الکتریکی بر اساس خاصیت فیزیکی هدایت‌الکتریکی زمین عمل می‌کند. با توجه به این‌که لایه‌های زمین به واسطه اختلاف جنس مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها، معمولاً مقاومت‌های ویژه الکتریکی متفاوتی دارند، با استفاده از روش ژئوالکتریک می‌توان لایه‌های زمین را از نظر مقاومت‌الکتریکی‌شان از یکدیگر تفکیک نمود. به منظور تبدیل مقادیر مقاومت‌ویژه به ساختارهای زمین‌شناسی، آگاهی از مقادیر مقاومت‌ویژه مربوط به انواع مختلف مواد زیرسطحی و زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه، الزامی است. مقادیر مقاومت‌ویژه مربوط به برخی سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد شیمیایی مختلف در جدول (۱) ارائه شده است [۱].

جدول (۱): مقاومت‌ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی [۱].

| مقاومت ویژه (اهم‌متر) | مصالح | مقاومت ویژه (اهم‌متر) | مصالح |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ۲۰-۱۰۰۰۰ | سینیت - توفانهای آتش‌فشانی | ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ | شن و ماسه خشک |
| ۳۰۰-۱۰۰ | شیست آرژیلیتی یا تخریب شده | ۵۰-۵۰۰ | شن و ماسه اشباع از آب شیرین |
| ۰/۵- ۵ | شیست گرافیتی | ۰/۵- ۵ | شن و ماسه اشباع از آب شور |
| ۳۰۰-۱۰۰۰۰ | لاوا | ۲-۲۰ | خاک رس |
| ۳۰۰۰-۳۰۰ | شیست سالم | ۲۰-۱۰۰ | مارن |

به‌طور کلی، فرایندهای زمین‌شناسی بر روی مقدار مقاومت‌ویژه سنگ‌ها تأثیر می‌گذارند. انحلال، گسلش، برش و هوازدگی معمولاً باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سیالات شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت‌ویژه می‌گردند. رسوب کربنات کلسیم و سیلیس باعث کاهش تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری نسبت به سیالات و بنابراین باعث افزایش مقاومت‌ویژه می‌شود. سخت‌شدگی در اثر تراکم و یا دگرگونی،

باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش مقاومت ویژه می‌شود. نفوذ آب‌های شور، باعث حضور یون‌های بیش‌تر برای هدایت جریان و کاهش مقاومت ویژه می‌شود [۲].
براین اساس، قبل از گسیختگی زمین می‌توان مناطق مستعد ناپیوستگی را با روش‌های مقاومت ویژه مشخص کرد. علت استفاده از روش ژئوالکتریک، قدرت تفکیک بالای این روش برای شناسایی لایه‌های آبدار در گستره شکستگی است که موضوعی مهم در تسریع حرکت آب زیرزمینی است؛ در بسیاری از شرایط زمین‌شناسی، برداشت‌های دوبعدی به روش مقاومت ویژه می‌تواند نتایج مفیدی را به دست دهد که متمم و تکمیل‌کننده نتایج به دست آمده با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی است. این برداشت‌ها از طریق آرایه‌های مختلف و با اهداف متفاوت انجام می‌گیرد که در هر یک از این آرایه‌ها، نوع چیدمان الکترودهای جریان و پتانسیل متفاوت است. آرایه‌هایی که بیشترین کاربرد را در برداشت‌های توموگرافی دارند شامل ونر-شلومبرژه و دو قطبی-دو قطبی می‌باشند که در این مطالعات به منظور دستیابی به وضعیت لایه‌بندی و گسلش در هر پروفیل بر روی پله‌ها، از روش ونرشلومبرژه استفاده شده است.

روش تحقیق

باتوجه به حساسیت‌های این تحقیق و نیز اهمیت قابلیت روش مقاومت ویژه در شناسایی گسلش‌های پنهان در محیط آبرفتی موجود بر روی منطقه، پروفیل‌های دوبعدی با توان تفکیک‌پذیری بالا از لایه‌های زیرسطحی با تفکیک‌پذیری مطلوب تا عمق حدوداً ۴۰ متری برداشت و مقاطع مقاومت این پروفیل‌ها تهیه گردیده است. طراحی عمق برداشت توسط این روش، وابسته به پیش‌بینی‌های اولیه از عمق شکستگی‌ها در سایت، همچنین حفظ توان تفکیک‌پذیری مقاطع دوبعدی (با افزایش فاصله الکترودی، عمق برداشت توسط این روش بیشتر می‌شود؛ اما توان تفکیک‌پذیری لایه‌ها در مقاطع به طور معکوس کاهش می‌یابد) و پوشش وضعیت تکتونیکی در پله‌ها صورت گرفته است. در شکل (۲) نمایی از برداشت صحرائی و همچنین موقعیت پروفیل‌ها در گوگل‌ارث، نمایش داده شده است.

شکل (۳) نتایج معکوس‌سازی داده‌های صحرائی پروفیل برداشتی بر روی پله سوم توسط نرم‌افزار Res2D.inv را نشان می‌دهد. این پروفیل به طول ۹۹۰ متر با فواصل ایستگاهی ۱۰ متر حاصل از ۹ پروفیل ۱۹۰ متری در جهت تقریبی شرق به غرب در عمق حدود ۶۰ متری از سطح زمین برداشت شده است. به دلیل قرارگیری ابتدای پروفیل بر روی لایه سنگی، مقاومت حقیقی حاصل در ۲۰۰ متر ابتدایی پروفیل در سطح و عمق نشان داده شده در مقطع، بیشتر از سایر نقاط در این برداشت می‌باشد. مقاومت ویژه برداشتی حاصل از این مقطع بین ۱ تا ۱۷۰ اهم‌متر متغیر می‌باشد که این تغییرات به دلیل تغییرات لایه‌بندی و دانه‌بندی متفاوت مصالح آبرفتی در مسیر شکستگی‌ها و حضور آب می‌باشد. این تغییرات در فاصله ۴۸۰ تا ۷۵۰ متری از ابتدای پروفیل در عمق، کمترین مقادیر مقاومتی را متأثر از حضور آب دارای املاح، به خود اختصاص داده است. گسل‌های احتمالی در این مقطع با خط مشکی بر روی مقطع مدل‌سازی نمایش داده شده است. گسل‌های شناسایی شده توسط تیم اکتشافی مجتمع صنعتی و معدنی گل‌گهر در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. با مقایسه این نقشه و ناپیوستگی‌های شناسایی شده توسط روش مقاومت ویژه در شکل (۴-ب) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج روش مقاومت ویژه انطباق قابل‌قبولی با نقشه جامع فنی معدن داشته است. علاوه بر این پس از بررسی‌های صورت گرفته بر روی نقشه ناپیوستگی‌های روش مقاومت ویژه مشخص شد که گسل F2-5 که در شکل (۴) نشان داده شده است، مسبب تغییر مسیر جریان آب به پشت دیواره در بخش جنوبی شده است و از سوی دیگر گسل F3-20 مسبب قطع لایه کنگلومرای و بالا آمدن لایه سنگی در بخش جنوبی معدن بوده است.



(ب)



(الف)

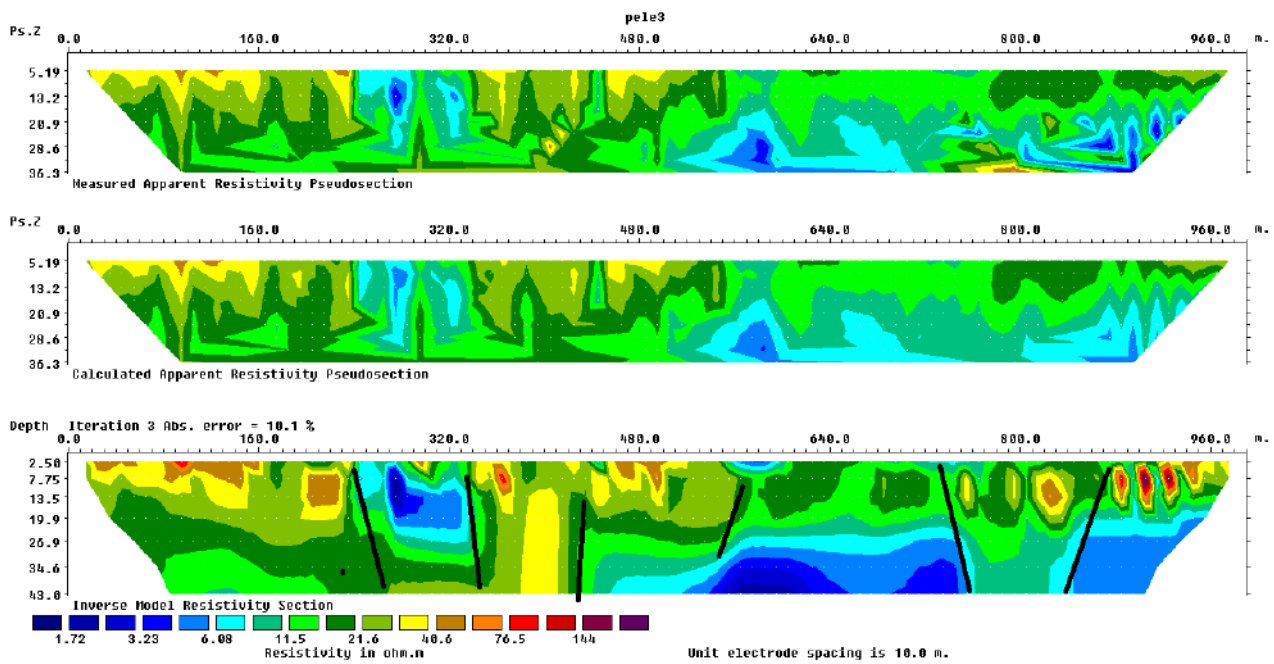


(د)



(ج)

شکل (۲): الف: نمایش از برداشت روش مقاومت ویژه دوبعدی و (ب): موقعیت پروفیل‌ها در گوگل ارث در پله سوم، (ج): پله چهارم و (د): پله پنجم.



————— Fault Zone

نتیجه گیری کلی

ادامه معدن کاری به ویژه در رمپ‌های انتهایی معادن به دلیل وجود شکستگی‌ها که عمدتاً به خاطر شارش آب که منشأ سست‌شدگی است، می‌تواند مخاطره آمیز باشد؛ از این رو شناسایی و تعیین این مناطق می‌تواند نسبت به حفظ جان و همچنین ایجاد امنیت سرمایه-گذاری، کمک شایان توجهی کند به نحوی که با در نظر گرفتن ملاحظات آتی در مناطق مورد مطالعه اعم از تعیین استراتژی برداشت و یا تغییر شیوه معدن کاری، تحقق این امر میسر است. نظر به پیچیدگی‌های ساختاری در شکل‌گیری زمین به ویژه در معادن که عمدتاً کانی‌سازی در زون‌های گسلی منطقه صورت می‌پذیرد، ضروری است که روش‌های استاندارد مبتنی بر پیشرفت‌های نوین بر اساس زمین شناسی منطقه همواره مد نظر قرار بگیرد. این پیشرفت‌ها می‌تواند در سه فاز برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی تحول‌آفرین باشد. در این طرح مشخص شد که روش مقاومت‌ویژه الکتریکی که از چشمه‌های توان پایین استفاده می‌کند، علی‌رغم محدودیت‌های موجود بر روی رمپ‌ها، زون‌های سست و آبدار در کنار شکستگی‌ها و همچنین ناپیوستگی‌های موجود را به خوبی نمایش می‌دهد؛ لذا این روش می‌تواند در تعیین ابعاد و هندسه لغزش دیواره‌ها به عنوان روشی کارآمد توسط پژوهش‌گران مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [۱] Loke M.H., Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys, pp 1-4, 1999.
- [۲] Ward S.H., Resistivity and Induced Polarization Methods, Soc. of Explor Geophys, Vol.1, pp. 147-189, 1990.

مطالعات زمین‌شناسی و مغناطیس‌سنجی زمینی در اکتشاف ذخایر آهن انجیره زاهدان (سیستان و بلوچستان)

صادق مقدم^۱، رضا احسانی^۲

۱دکتری ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، sadegh136789@yahoo.com

۲کارشناس ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، rehsani67@gmail.com

* نویسنده مسئول: رضا احسانی.

چکیده فارسی

محدوده مورد مطالعه در انجیره زاهدان و در بخش کوچکی از شمال غرب برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیاسترگی می‌باشد که تنوعی از واحدهای سنگی با گستره سنی دوران دوم تا سوم زمین‌شناسی در حوالی این محدوده رخنمون دارند. به منظور بررسی مناطق مستعد کانی‌سازی آهن، ابتدا نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین‌شناسی از این محدوده تهیه شد؛ براساس یافته‌های زمین‌شناسی، ساختار فراگیر در سطح این محدوده شامل واحدهای الترامافیک با ترکیب هارزبورژیت تا دونیت می‌باشد و رگچه‌هایی از مگنتیت داخل واحدهای الترامافیک شناسایی شده است. با استفاده از پردازش و تفسیر ۱۰۰۰ داده ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی زمینی با فواصل خطوط برداشت ۲۰ متر و نقاط اندازه‌گیری ۱۰ و ۵ متر و سپس رسم نقشه‌های شدت کل، برگردان به قطب، سیگنال تحلیلی، ادامه فراسو و تلفیق نقشه نهایی با لایه‌های اطلاعاتی نقشه زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه، مناطق دارای پتانسیل کانه‌زایی معرفی شدند. در نهایت به منظور بررسی روند تغییرات عمقی بخش‌های کانه‌دار، پیشنهاد انجام چهار عملیات حفاری با روش مغزه‌گیری در اولویت اکتشافی داده شده است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی مگنتیت، زمین‌شناسی، مغناطیس‌سنجی.

Geology and magnetic survey on Anjireh Iron Ore deposit, Sistan and Baloochestan province

Sadegh Moghaddam¹, Reza Ehsani²

¹PhD of Geophysics, Geophysics Institute of Tehran University; Sadegh136789@yahoo.com.

²Master of science in mining exploration, Shahrood university ; rehsani67@gmail.com.

* Corresponding author: Reza Ehsani

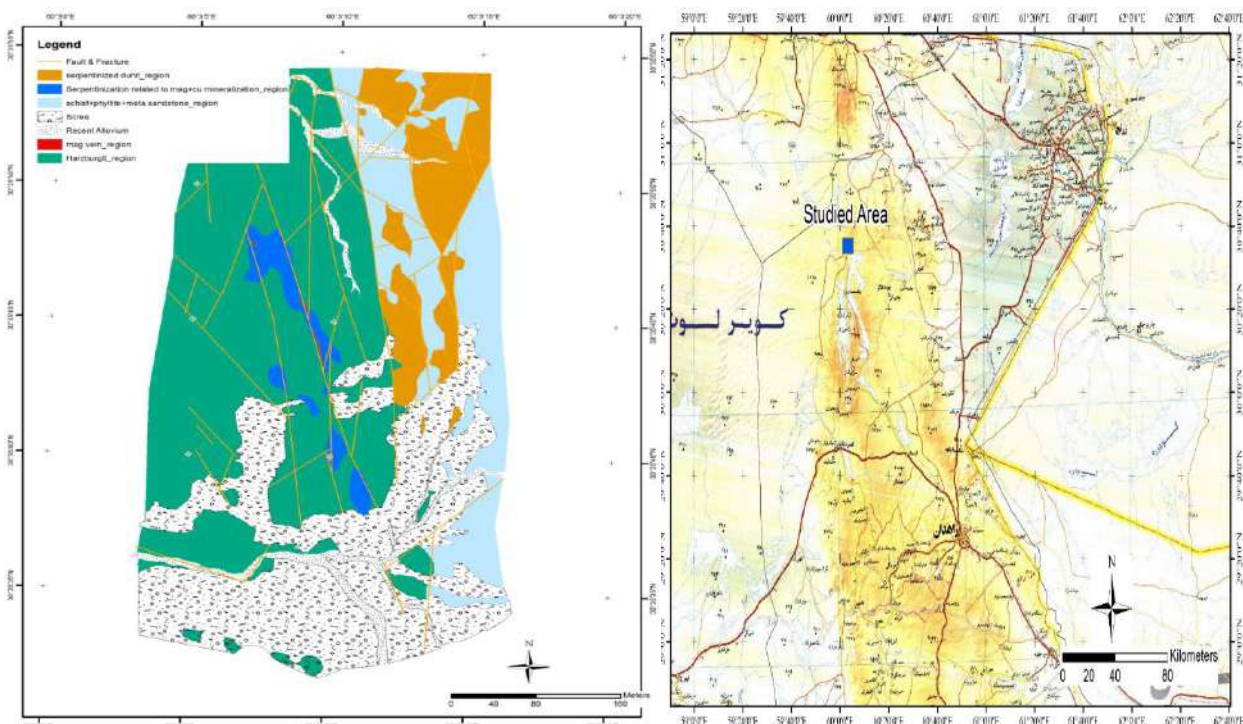
ABSTRACT

The study area is in Anjireh in Zahedan and is in a small part of the north-west of the 1:100000 sheet of Siasetergi, where a variety of rock units with the age range of the second to third geological period are outcrops around this area. In order to investigate areas prone to iron mineralization, first a 1:1000 geological map of this area was prepared. Based on the geological findings, the overall structure includes ultramafic units with the composition of harzburgite to dunite, and veins of magnetite have been seen inside the ultramafic units. Using processing and interpretation of 1000 data ground magnetic survey with line space of 20 meters and 10 and 5 meters of measurement points, and then preparing maps of the total magnetic intensity, reduce to pole, analytical signal and upward continuation maps, with geological and tectonic maps, areas with mineralization potential were introduced. Finally, in order to investigate the process of depth changes of ore-bearing sections, it was suggested to carry out four drilling operations with coring method in exploratory priority.

Keywords: Iron mineralization, Geology, Magnetic survey.

مقدمه

روش مغناطیس‌سنجی به عنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشد که در زمینه‌های مختلف اکتشافی و به‌ویژه در اکتشاف ذخایر آهن مطرح می‌باشد. برداشت و تفسیر صحیحی از این داده‌های ژئوفیزیکی و تلفیق آن با سایر داده‌های اکتشافی می‌تواند علاوه بر جلوگیری از رسیدن به نتایج غیرواقعی، اطلاعات ارزشمندی را در خصوص موقعیت، عمق و گستردگی بخش‌های پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگران قرار دهد [۱]. در این پژوهش نیز با هدف دستیابی به مناطق تجمع کانسار آهن با گستره و عمق مشخص، اقدام به برداشت‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیک شده است. محدوده مطالعاتی انجیره از نظر تقسیمات کشوری در استان سیستان و بلوچستان و در ۹۰ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان نصرت‌آباد قرار می‌گیرد. شکل ۱-الف نمایی از نقشه موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده انجیره را نشان می‌دهد. محدوده اکتشافی مذکور به لحاظ زمین‌شناسی در بخش کوچکی از قسمت غرب برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ دریاچه هامون و همچنین در شمال‌غربی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیاسترگی قرار می‌گیرد. مورفولوژی منطقه در بیشتر قسمت‌های عملیات مغناطیس‌سنجی، تپه ماهوری تا نیمه کوهستانی است. شکل ۱-ب نیز نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از محدوده با مقیاس ۱:۱۰۰۰ را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه لیتولوژی فراگیر در سطح محدوده برداشت ژئوفیزیک عبارتست از رخنمون یک واحد ملانژ افیولیتی بصورت بلوک‌های سرپانتینیته شده از سنگ‌های اولترامافیک (واحد CM). بر اساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ دریاچه هامون واحد مذکور دارای امتداد تقریبی شمال-جنوب می‌باشد و سن کرتاسه را دارد؛ در بخش شرقی محدوده عملیات ژئوفیزیک واحدهای دیگری از مجموعه سکانس افیولیتی با پریدوتیت (واحد pd) و همچنین رسوبات فلیش تکتونیزه (واحد ph) دیده می‌شود که دارای امتداد شمال-جنوب و به موازات واحد CM است و دارای سن کرتاسه می‌باشد.



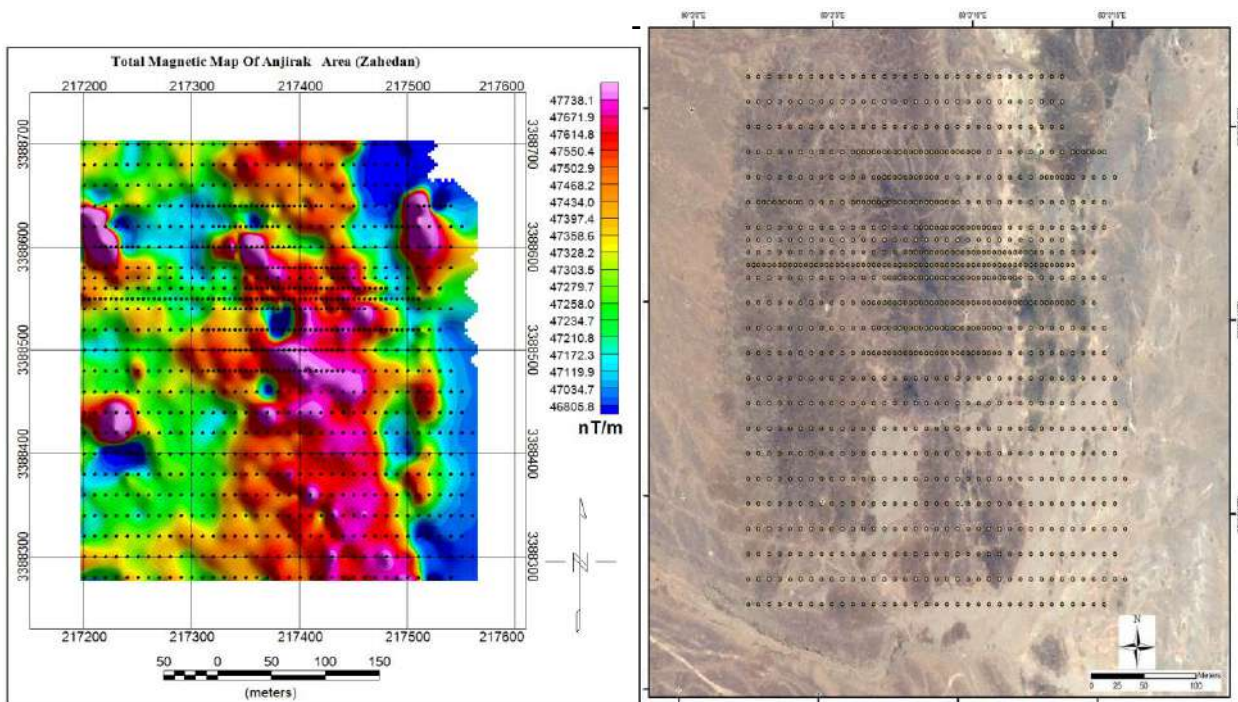
(ب)

(الف)

شکل (۱): الف: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و ب: نقشه زمین‌شناسی تهیه شده در مقیاس ۱:۱۰۰۰ از محدوده مورد مطالعه.

پردازش داده‌های ژئوفیزیکی

برداشت‌های روش مغناطیس‌سنجی در سطح یک محدوده چهارگوش و در قالب ۱۰۰۰ نقطه اندازه‌گیری به انجام رسیده است. این برداشت‌ها شامل ۲۴ پروفیل با امتداد شرقی-غربی و با استفاده از شبکه برداشت ۲۰ متر در ۵ یا ۱۰ متر در شرایط آرام مغناطیسی با استفاده از دستگاه مگنتومتر پروتون بوده است. در شکل ۲-الف، شبکه برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی در سطح محدوده انجیره نشان داده شده است. به‌منظور محاسبات پردازشی و رسم نقشه‌های موردنیاز، کلیه داده‌های برداشتی به صورت منظم فایل‌بندی شده است. قرائت‌های شبکه شامل شماره پروفیل، شماره ایستگاه، موقعیت برحسب UTM، زمان و شدت کل میدان در یک بانک اطلاعاتی می‌باشد و پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Geosoft، Modelvision و Arcmap صورت پذیرفته است. ارتفاع متوسط محدوده مورد مطالعه ۱۳۶۹ متر از سطح دریا، زاویه انحراف و شیب میدان مغناطیسی به ترتیب ۱.۹۸ و ۴۶.۸ درجه و شدت کل میدان مغناطیسی مرجع ۴۷۱۷۱ نانوتسلا می‌باشد. در شکل ۲-ب نقشه شدت میدان مغناطیسی (TM) محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. در این نقشه موقعیت شش بی‌هنجاری با شدت متوسط تا بالا و اختلاف قطبین حدود ۳۶۰۰ نانوتسلا نسبت به حد زمینه دیده می‌شود. بی-هنجاری اول که دارای بیشترین گستره سطحی می‌باشد، در بخش مرکزی نقشه و بصورت یک روند تقریبی شمال به جنوب قابل مشاهده می‌باشد. میزان پاسخ مغناطیسی در برخی قسمت‌های این بی‌هنجاری و به‌ویژه در مرکزهای مختصات $33^{\circ}88'40''N$ و $21^{\circ}36'0''E$ و همچنین $33^{\circ}88'48''N$ ، $21^{\circ}40'0''E$ بصورت موضعی افزایش نشان می‌دهد و لذا بیشترین پاسخ مغناطیسی در بخش مرکزی دیده می‌شود. در مورد باقی بی‌هنجاری‌های ملاحظه شده در این نقشه می‌توان اختلاف قطبین حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰۰ نانوتسلا را به هر یک نسبت داد.



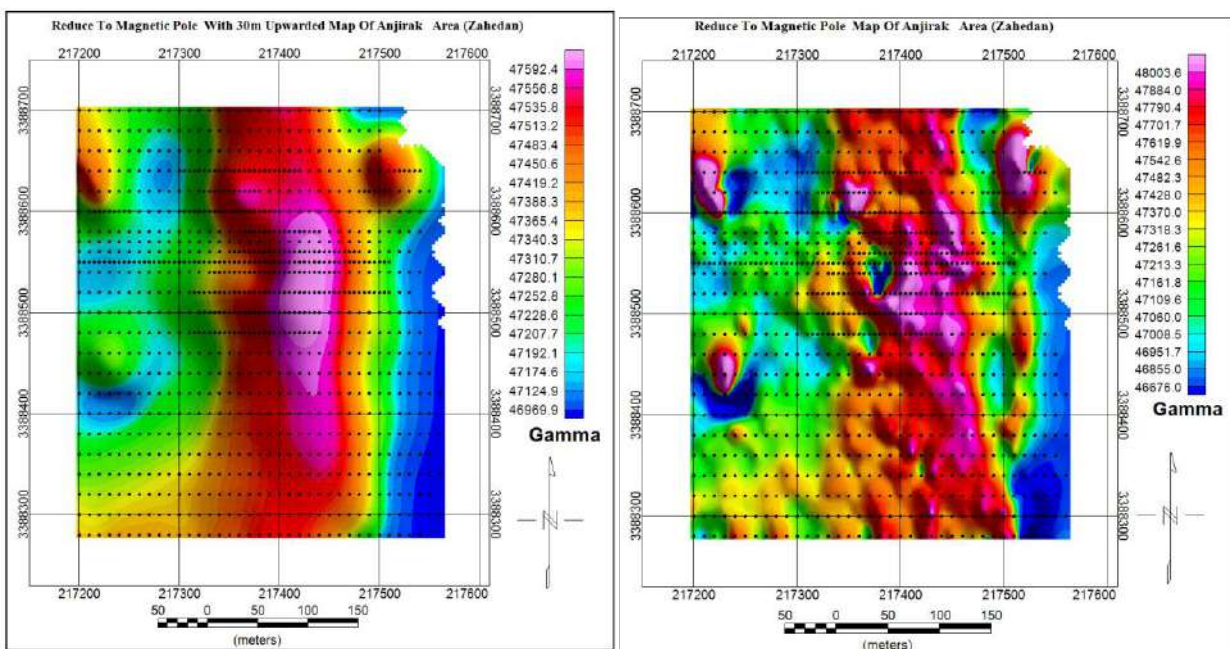
(ب)

(الف)

شکل (۲): الف: شبکه برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی و (ب): نقشه شدت میدان مغناطیسی محدوده مورد مطالعه.

در ادامه موقعیت بی‌هنجاری‌های شناسایی شده در سطح محدوده انجیره بوضوح در نقشه برگردان به قطب مغناطیسی (RTP) در شکل ۳-الف تهیه شده است. نکته شاخص در بررسی این نقشه انطباق نسبی بین موقعیت بی‌هنجاری نقشه RTP با نقشه TM برقرار است که

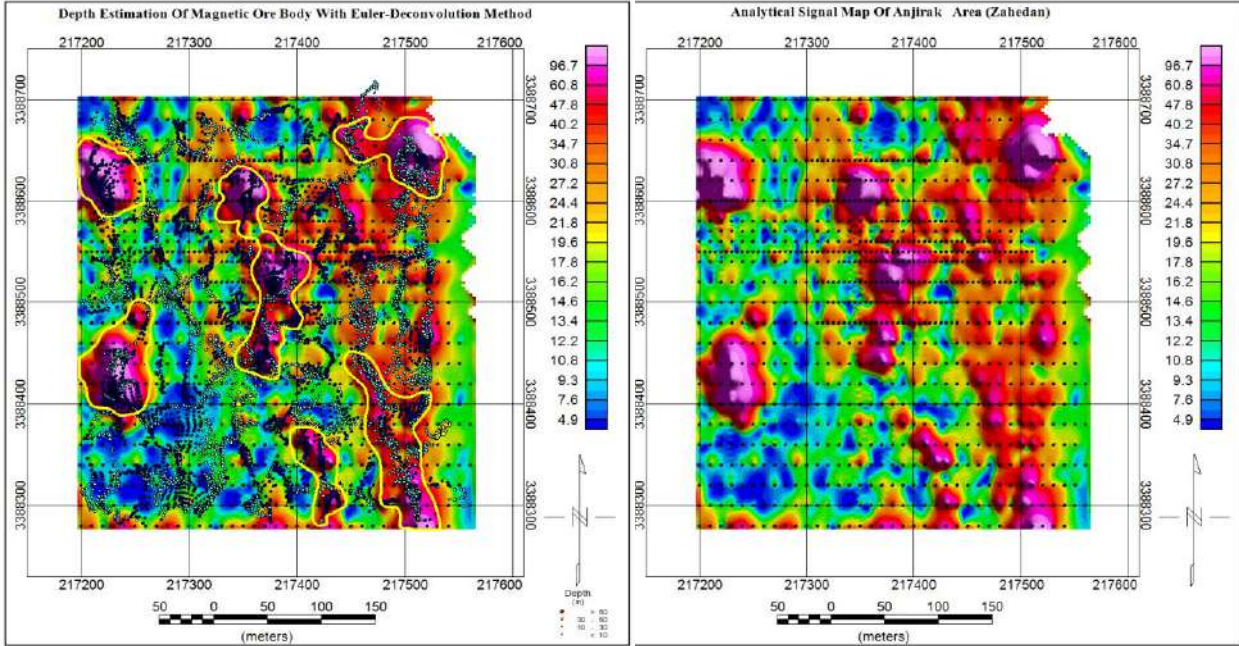
می تواند ناشی از شیب کم ماده مغناطیسی مسبب بی هنجاری باشد. موقعیت بی هنجاری مرکزی (شکل ۳-ب) با اعمال فیلتر ادامه فراسو در ۳۰ متر نیز برجسته تر می شود. در مورد بی هنجاری های دیگر، موقعیت مناطق مذکور کمی به سمت قسمت های شمالی متمایل شده است. دلیل این موضوع می تواند ناشی از انطباق نسبی قطب توده های مغناطیسی مسبب این بی هنجاری ها با موقعیت نسبی رخنمون ماده مغناطیسی در نظر گرفته شود. نقشه سیگنال تحلیلی بر اساس ریشه دوم جمع توان دوم گرادایانه ای قائم و افقی میدان مغناطیسی تهیه شده است. این نقشه ها امکان تطابق بهتر لبه های آنومالی مغناطیسی را با محدوده محیطی کانسار به نمایش می گذارد که بدین ترتیب گسترش طولی و عرضی کانسار را روی سطح زمین با دقت بیشتری نسبت به نقشه آنومالی مغناطیسی نشان می دهد. با توجه به حساسیت نسبی بیشتر نقشه سیگنال تحلیلی (تهیه شده در شکل ۴-الف) به وضعیت زمین شناسی هر محدوده می توان انتظار داشت که موقعیت بی هنجاری ها در سطح محدوده، تا حد زیادی توسط واحدهای سنگ چینه ای کنترل شده باشند؛ در حقیقت می توان انتظار رخداد تیپ کانی سازی مغناطیسی در داخل یک واحد سنگی خاص و به بیانی استراتاباند را از نظر زمین شناسی اقتصادی برای این محدوده پیشنهاد نمود. بر اساس مطالعات زمین شناسی سطحی انجام شده در سطح این محدوده که در قالب تهیه نقشه زمین شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰ به انجام رسید، رخنمون به نسبت گسترده واحدهای اولترامافیک در این محدوده جلب نظر می کند؛ علاوه بر این در بیشتر این واحدهای سنگی تشکیل کانه مغناطیسی مگنتیت بصورت ثقلی و اولیه مورد انتظار می باشد؛ به عبارت دیگر تشکیل این تیپ کانی سازی در اثر وزن مخصوص به نسبت بالای مگنتیت و همزمان با رسوب کانی های به نسبت چگال تر و سرشار از آهن و منیزیم (فرومنیزین) می باشد؛ این رسوب های ثقلی در برخی قسمت ها می توانند عیار به نسبت بالایی داشته و بصورت افق هایی از آهن نمایان شوند که مهمترین مثال از این تیپ را می توان کانسار بوشولد در آفریقا در نظر گرفت. در هر صورت و بر اساس نقشه سیگنال تحلیلی تهیه شده برای این محدوده، میزان پاسخ مغناطیسی به نسبت بالای اندازه گیری شده در بی هنجاری های این محدوده قابل مشاهده می باشد. از این رو انتظار حضور مناطقی با عیار به نسبت بالایی از کانی مغناطیسی محتمل می باشد. بر اساس نتایج تخمین عمق با استفاده از روش اولر-دی کانولوشن (در شکل ۴-ب) در بیشتر قسمت های محدوده زون مغناطیسی تا اعماق ۳۰-۱۰ متر ادامه پیدا کرده است. در حقیقت نتایج تخمین عمق حکایت از حضور مناطق سطحی و در مواردی پرعیار دارد که به صورت بخش هایی پراکنده در قسمت های مختلف محدوده انجیره قابل شناسایی می باشد؛ با یان وجود مطالعات تکمیلی در قالب مشاهدات صحرایی و برداشت های زمین شناسی و همچنین حفر و برداشت ترانسه های اکتشافی در بخش های مشکوک می تواند تا حد زیادی روشنگر وضعیت اکتشافی این محدوده باشد.



(ب)

(الف)

شکل (۳): الف: نقشه برگردان به قطب و (ب): نقشه ادامه فراسو ۳۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه.

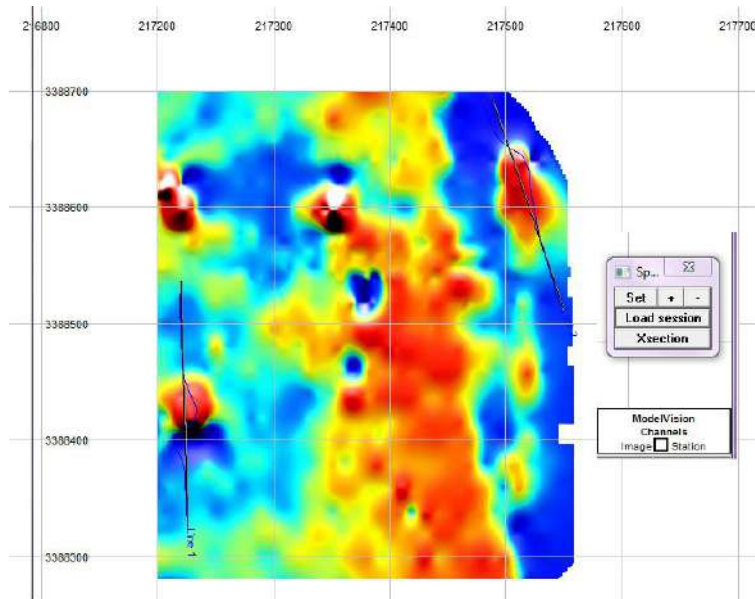


(ب)

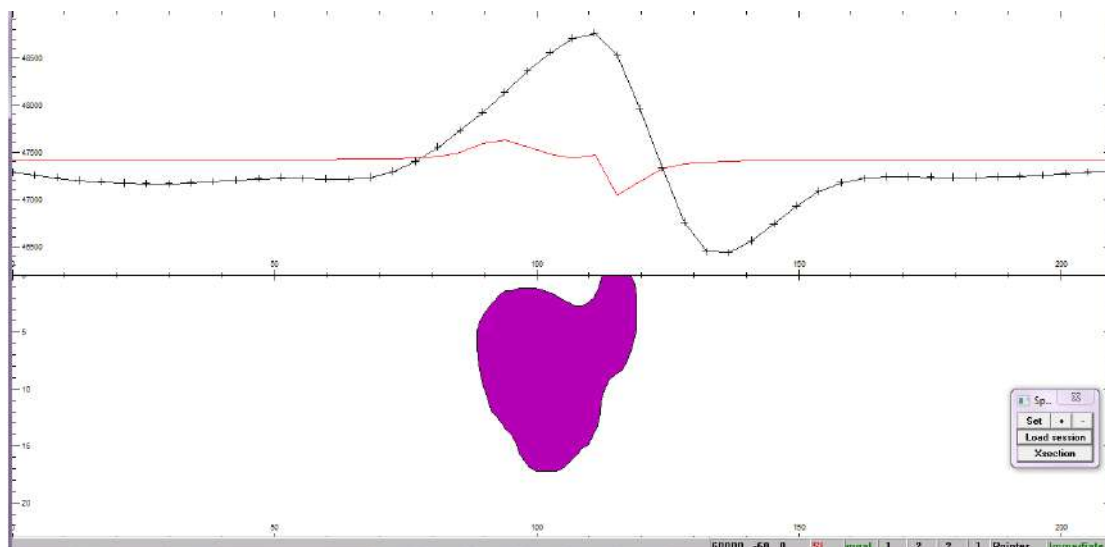
(الف)

شکل (۴): الف: نقشه سیگنال تحلیلی بر روی نقشه برگردان به قطب و (ب): تخمین عمق به روش اویلر بر روی نقشه سیگنال تحلیلی محدوده مورد مطالعه.

مدل‌سازی روش مغناطیس‌سنجی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و داشتن اطلاعات شکل توده نتایج مفیدی را ارائه می‌دهد. در واقع مدل‌سازی و چگونگی قرارگیری تقریبی ناهنجاری‌های مغناطیسی می‌تواند برای تعیین بهتر محل حفاری‌های اکتشافی با توجه به وضعیت قرارگیری توده مفید باشد و به مراحل اکتشافات تکمیلی کمک کند [۲]. مدل‌سازی 2D به روش تالوانی به دلیل سادگی از دیرباز در تحلیل‌های روش مغناطیس‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مغناطیسی دو کانسار منطقه و موقعیت این نیمرخ‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در انتخاب این دو نیمرخ سعی گردید که موقعیت آنها عمود بر بی‌هنجاری‌های اصلی این محدوده یعنی زون‌های شماره چهار و شش بوده و بدین ترتیب امکان تصمیم‌گیری در مورد وضعیت تغییرات تحت‌الارضی مناطق کانه‌دار مغناطیسی در عمق امکانپذیر گردد. جهت انجام عملیات مدل‌سازی دوبعدی داده‌ها در محدوده اکتشافی، در اولین مرحله و با هدف کوچک کردن جامعه آماری تمامی داده‌ها بر مبنای میزان خودپذیری مغناطیسی پایه ۴۶۰۰۰ نانوتسلا نرمالایز شدند. در ادامه مدل‌های تهیه شده برای نیمرخ اول (L-1) در شکل ۶ نشان داده شده است.

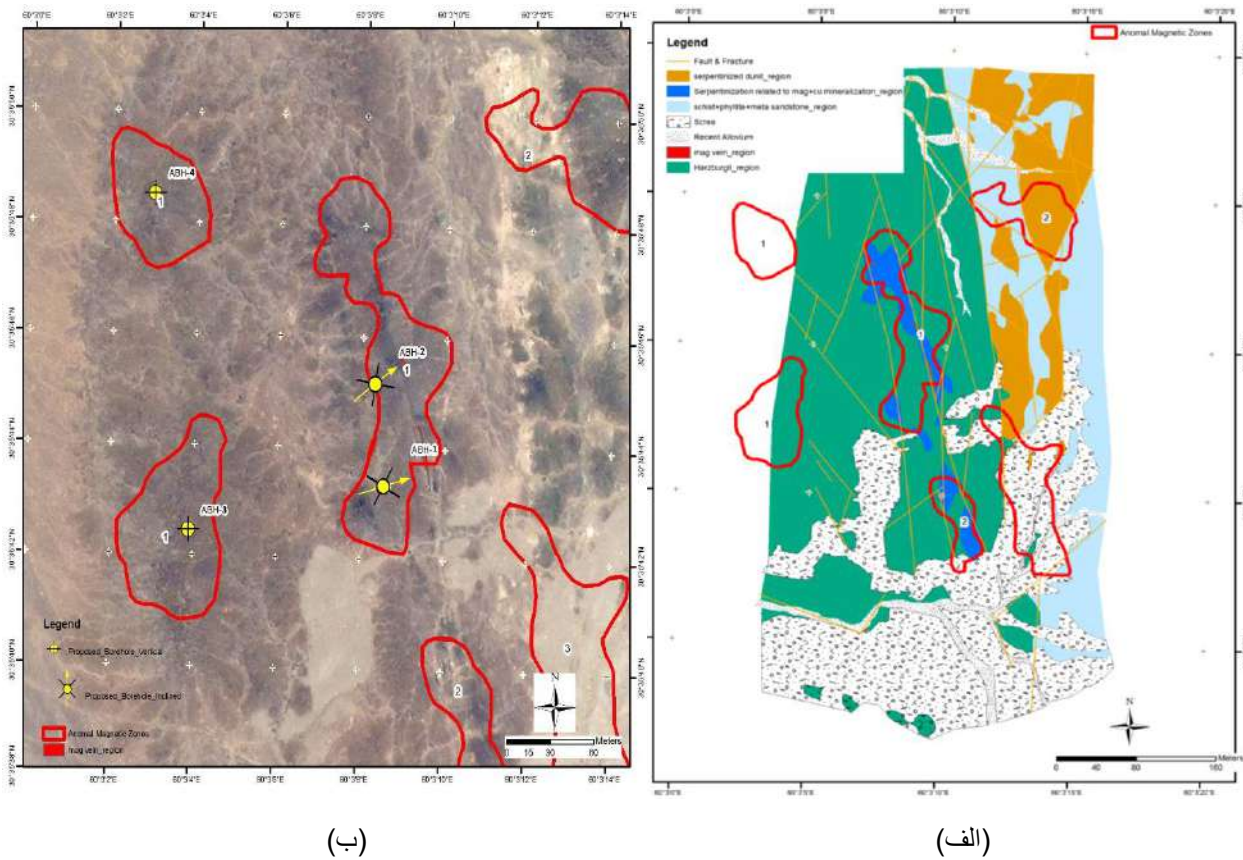


شکل (۵): الف: نقشه موقعیت دو پروفیل انتخاب شده جهت عملیات مدل سازی دوبعدی در محدوده انجیره بر روی نقشه شدت میدان کلی.



شکل (۶): الف: مدل دوبعدی پیشرو در امتداد پروفیل L-1

در شکل (۷-الف) نقشه موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شناسایی شده در سطح محدوده بر روی نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ در محدوده انجیره دیده می‌شود. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، انطباق قابل قبولی بین موقعیت رخنمون‌های بی‌هنجار مغناطیسی با واحدهای اولترامافیک در این محدوده وجود دارد؛ همچنین بخشی از واحد هارزبورژیت در بخش مرکزی محدوده که بشدت سرپانتینی شده، بیشترین پتانسیل اکتشافی را از نظر حضور مناطق بی‌هنجار مغناطیسی را از خود نشان می‌دهد، به طوری که رخنمون اصلی بی‌هنجاری مرکزی در سطح محدوده نیز منطبق بر رخنمون همین واحد می‌شود. به منظور بررسی روند تغییرات عمقی مناطق کانه‌دار مگنتیتی در سطح محدوده انجیره و با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوفیزیک با روش مغناطیس‌سنجی پیشنهاد انجام چهار عملیات حفاری با روش مغزه‌گیری مطابق با شکل (۷-ب) داده شده است.



شکل (۷): الف: نقشه موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر روی نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ و (ب): موقعیت گمانه‌های پیشنهادی بر روی نقشه گوگل ارث.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و نقشه‌های ژئوفیزیکی تهیه شده در منطقه مورد مطالعه برای تعیین مناطق دارای پتانسیل کانه‌سازی فلزی، شش بی‌هنجاری در محدوده اکتشافی انجیره معرفی شد. لیتولوژی فراگیر در سطح این محدوده شامل واحدهای اولترامافیک با ترکیب هارزبورژیت تا دونیت می‌باشد و همچنین رگچه‌هایی از مگنتیت به صورت محدود داخل این واحدهای اولترامافیک شناسایی شده است؛ علاوه بر این فرآیند دگرسانی سرپانتینی شدن نیز بصورت گسترده‌ای واحدهای اولترامافیک را تحت تاثیر قرار داده است. در نهایت با توجه به شواهد قابل قبول سنگ آهن و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، قابلیت ادامه معدنکاری برای سنگ آهن در منطقه وجود داشته و چهار گمانه اکتشافی برای ناحیه مذکور پیشنهاد شد.

مراجع

[۱] Calagari, A.A., Principals of geophysics exploration. Tabeesh press, Tabriz, 588 pp, 1992.

[۲] صامتی، ب.، ضیاشریفی، ا.، جعفری، م.، درویش زاده، ع.؛ معرفی مناطق بی‌هنجاری کانی سازی آهن بر پایه داده های ژئوفیزیکی در محدوده فراش، استان کرمان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۷، ص ۲۴۰-۲۳۳، ۱۳۹۷.

اکتشاف ماده معدنی کرومیت به روش الکترومغناطیسی بَم در محدوده اکتشافی سرهنگ

مریم نوروزی^۱، علی بستانی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، noroozi.maryam@ut.ac.ir

^۲ مدیر عامل، گروه فناوری بَم، a.bostani@bem-tech.com

* نویسنده مسئول: مریم نوروزی

چکیده فارسی

در این مطالعه با تلفیق اطلاعات مربوط به ژئوفیزیک به روش بَم، زمین شناسی و دور سنجی به اکتشاف ماده معدنی کرومیت در محدوده اکتشافی سرهنگ واقع در استان خراسان رضوی پرداختیم. ماده معدنی کرومیت در این محدوده از نوع تیپ آلپی (توده های عدسی شکل) بوده که در غشایی از دونیت و هارزبورژیت قرار دارند. در اکتشاف به روش بَم معادلات موج الکترومغناطیسی با در نظر گرفتن پارامتر ضریب دی الکتریک حل می شود و در نتیجه دقت بالاتری در جداسازی لایه های زیرسطحی به دست می دهد. با توجه به اینکه در این روش همزمان پارامترهای مقاومت الکتریکی و ضریب دی الکتریک بررسی می شوند و از آن جایی که مقدار مقاومت الکتریکی کرومیت و دونیت مقادیر نزدیک به هم دارند، برای تمیز داده این دو کانی از هم از پارامتر ضریب دی الکتریک استفاده کرده ایم، که در واقع این موضوع وجه تمایز و برتری این روش نسبت به سایر روش های ژئوفیزیکی می باشد. در ادامه تلفیق نتایج به دست آمده از اکتشاف با خروجی های مربوط به لاگ های حفاری مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت بالای ۸۰ درصد خروجی های حاصل از مراحل اکتشاف با خروجی مربوط به لاگ های حفاری منطبق بود.

واژه های کلیدی: روش الکترومغناطیسی، ضریب دی الکتریک، ماده معدنی کرومیت، روش بَم

Exploration of Chromite by BEM electromagnetic method in the exploratory area of Sarhang

Maryam Noroozi¹, Ali Bostani²

¹Phd student, University/ Institute of Geophysics University of Tehran, noroozi.maryam@ut.ac.ir

²CEO, BEM Group, a.bostani@bem-tech.com

* Corresponding author: Maryam Noroozi

ABSTRACT

In this study, by combining information related to geophysics using BEM method, geology and remote sensing, we explored the chromite in Sarhang exploration area located in Razavi Khorasan province. The chromite in this area is of alpine type (lenticular masses) which are located in a membrane of dunite and harzburgite. In BEM exploration, the electromagnetic wave equations are solved by considering the dielectric coefficient parameter, and as a result, it gives higher accuracy in separating the subsurface layers. Considering that in this method, the electrical resistance parameters and the dielectric coefficient are checked at the same time, and since the electrical resistance values of chromite and dunite are close to each other, the dielectric coefficient parameter was used to separate the data of these two minerals. In fact, this is the difference and superiority of this method compared to other geophysical methods. In the following, the results obtained from the exploration were

compared with the outputs of the drilling logs. Finally, more than 80% of the outputs from the exploration stages were consistent with the outputs of the drilling logs.

Keywords: Electromagnetic method, dielectric coefficient, chromite mineral, BEM method.

مقدمه

روش های ژئوفیزیکی از جمله روش های پر کاربرد موجود در اکتشاف غیرمستقیم معادن، نفت، گاز، آب و همچنین کارهای مهندسی می باشد. بسیاری از اکتشافات کانی های اقتصادی با استفاده از روش های ژئوفیزیکی غیر لرزه ای مانند ژئوالکتریک، مغناطیس سنجی، الکترومغناطیس و گرانی سنجی صورت می گیرد. در این میان روش های الکترومغناطیس پس از روش مغناطیس سنجی متداول ترین روش ها در اکتشافات معدنی به حساب می آیند. امروزه روش های مختلف الکترومغناطیسی علاوه بر اکتشافات معدنی جهت اکتشاف و تعیین آلودگی منابع آب زیرزمینی و غیره نیز به کار میروند. این روش ها به دلیل تنوع سیستم ها و قابلیت هایی چون سرعت بالای برداشت و قیمت مناسب، با سرعت زیادی در حال توسعه می باشند. [۱]

اساس روش های الکترومغناطیسی، ایجاد و ارسال میدان الکترومغناطیس توسط یک فرستنده به درون زمین و ایجاد جریان های گردابی و دریافت و ثبت میدان های الکترومغناطیس ثانویه القایی در رسانای مدفون، به وسیله یک گیرنده در بالای زمین می باشد. در نهایت با استفاده از پارامتر های الکترومغناطیسی به دست آمده می توان به اطلاعات ارزشمندی از زمین شامل ویژگی های فیزیکی، لیتولوژیکی و محتوای زمین مورد مطالعه دست یافت. میدان های الکترومغناطیس درون زمین متأثر از سه ویژگی اساسی محیط انتشار شامل رسانندگی یا مقاومت ویژه الکتریکی، گذردهی دی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی، دچار تغییرات می شوند. رسانندگی الکتریکی را می توان پر کاربردترین پارامتر فیزیکی زمین از دیدگاه اکتشافات ژئوفیزیکی با روش های الکتریکی و الکترو مغناطیسی نامید. مرتبه بزرگی این پارامتر بر خلاف دیگر پارامترهای ژئوفیزیکی مانند سرعت موج صوتی، چگالی و قابلیت مغناطیس شوندگی در بازه وسیعی از تغییرات قرار دارد. [۲]

در این مقاله روش بم [۳] بر مبنای تئوری الکترومغناطیس ارائه می شود. این روش که تحت عنوان روش الکترومغناطیسی در حوضه فرکانس با محدوده فرکانسی وسیع اطلاق میشود، علاوه بر مؤثر بودن در شناسایی اهداف رسانا، ضعف روش های حاضر الکترومغناطیسی در شناسایی اهداف نارسانا را پوشش می دهد. در این روش، امواج الکترومغناطیس با فرکانس های مختلف در بازه ۱۰۰ هرتز تا ۴۰ کیلو هرتز می باشند که فرستنده می تواند وابسته به شرایط محلی و نیاز فرکانسهای بالاتر و یا پایین تر از این بازه را نیز به زمین ارسال نماید. ویژگی های الکترومغناطیسی زمین، موج الکترومغناطیسی اولیه را تحت تأثیر قرار داده و به صورت بارزی بر روی موج الکترومغناطیسی ثانویه یا القایی مشخص می شود. این اثرات شامل تغییرات دامنه، فاز، پهنای باند فرکانسی، پوش موج و فرکانس موج ارسالی می باشد. موج الکترومغناطیسی ثانویه توسط دستگاه گیرنده ثبت می شود. تفاوت این روش با سایر روش ها در این است که با یکبار داده برداری و پردازش امواج ثبت شده، اطلاعات مربوط به پارامترهای مقاومت ویژه، ضریب دی الکتریک و شیفت فرکانسی به صورت همزمان به دست می آید.

روش تحقیق

روش بم که تحت عنوان روش الکترومغناطیسی در حوضه فرکانس با محدوده فرکانسی وسیع اطلاق میشود علاوه بر مؤثر بودن در شناسایی اهداف رسانا، ضعف روش های حاضر الکترومغناطیسی در شناسایی اهداف نارسانا را پوشش می دهد. برای تعیین ویژگیهای دی الکتریک مواد تشکیل دهنده یا همان لایه های زمین، لازم است یک میدان متغیر (با تغییرات مشخص) را به سطح زمین بتابانیم و تغییرات وابسته به آن را اندازه گیری کنیم. برای این کار یک میدان مغناطیسی با توان و بزرگی متوسط (حدود ۵۰۰ وات و ۰.۵ تسلا) را با

کمک امواج الکترومغناطیسی در فرکانس های مختلف در یک بازه فرکانسی به سطح زمین می تابانیم. از تغییرات ایجاد شده در فاز و شدت موج بازتابی، میزان رسانندگی الکتریکی متوسط به دست می آید. همچنین انتظار می رود که با توجه به لایه های متفاوت از دی الکتریک ها شیفتهای فرکانسی متفاوت متعدد (بیش از یک شیفته) مشاهده شود. می توان لایه های مختلف زمین (یا حوزه های دی الکتریک متفاوت) را به صورت خازن های با فاصله متغیر و سری در نظر گرفت که با این حساب مقدار ضریب دی الکتریک مجموع از رابطه زیر قابل محاسبه است [۴]:

$$(۱) \quad \frac{1}{\varepsilon} = \sum_i \frac{1}{\varepsilon_i}$$

که با کمک آن ضریب دی الکتریک متوسط قابل محاسبه است. ضریب دی الکتریک ε_i برابر با $\varepsilon_i = \varepsilon_0(1 + \chi_i)$ در نظر گرفته می شود. که در آن، χ_i پذیرفتاری الکتریکی ماده می باشد و به میدان قطبیده وابسته است.

از طرف دیگر خود ε_i از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$(۲) \quad \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1}{\omega' - z} d\omega'$$

که خود یک انتگرال مختلط است که در آن ε ضریب دی الکتریک ω فرکانس و z هر نقطه دلخواه داخل محیط مسیر انتگرال گیری است و با استفاده از قضیه کوشی و بسط دو جمله ای به صورت یک سری قابل بسط است. اگر $\varepsilon(\omega)$ را برای کل محیط برابر ε متوسط در نظر بگیریم و ملاحظات ابعادی (لزوم یکسان بودن جنس دوطرف تساوی از نظر کمیت های فیزیکی) نیز در نظر گرفته شود، می توان به یک رابطه برای توصیف شیفتهای فرکانسی در واحد سطح دست یافت و آن عبارت است از:

$$(۳) \quad \Delta_i \omega \approx \frac{h_i^4 \ln \omega}{\mu_0 \varepsilon \omega^2 \delta_i^4}$$

که اگر بخواهیم نسبت $\frac{h}{\delta}$ را محاسبه کنیم خواهیم داشت

$$(۴) \quad \frac{h_i}{\delta_i} \approx \sqrt[4]{\frac{\mu_0 \varepsilon \omega^2 \Delta_i \omega}{\ln \omega}}$$

از مشابهت با مدل وایت [۵] برای داده های هوایی الکترومغناطیسی می توان حدس زد که برای لایه های زیر سطحی همچنان تابعیت میدانهای الکترومغناطیسی از نوع توابع بسل نوع اول مرتبه صفر و یک است با این تفاوت که پارامترهای داده های هوایی با کمک روابط فوق با پارامترهای اولین لایه زیرسطحی و ضریب گذردهی الکتریکی میانگین برای زمین جایگزین میشود که برای مدلسازی روش ما می توان از این مدل بر اساس تقریب های ماندری [۶] استفاده کرد. در این مدل برای تعیین لایه ها میتوان تنها اولین شیفته را در نظر گرفت و با توجه به آن که هر فرکانس عمق نفوذ متفاوتی را دارا میباشد از روی اختلاف اساسی که در شکل نمودارهای شیفته به دست می آید تعداد لایه ها و مقاومت ویژه آنها را حدس زد. از طرف دیگر میتوان به صورت بسیار ساده عمل کرد و علاوه بر اولین شیفته حاصل از موج ارسالی شیفتهای بعدی نزدیک را نیز در نظر گرفت. در این حالت نسبت دامنه ها و نسبت مقادیر $\frac{h_i}{\delta_i}$ میتواند مدلی کیفی از لایههای زیرسطحی را ارائه دهد. که در نتیجه آن نسبت ε_i ها به دست می آید و با کمک رابطه (۱) میتوان برای محاسبه مقدار ε_i ها یک رابطه بازگشتی به دست آورد.

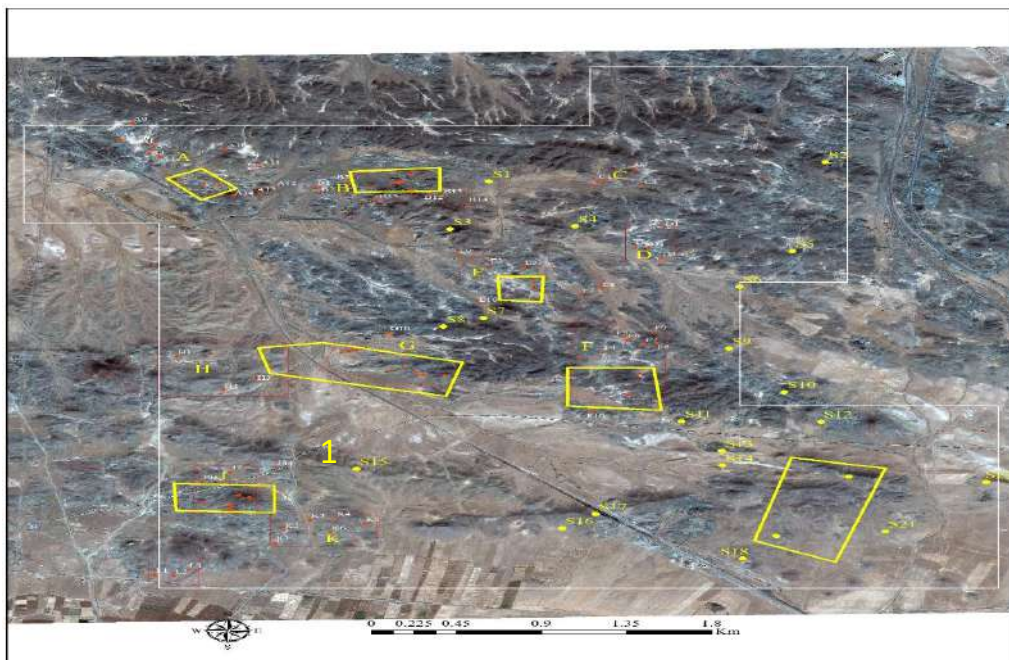
نمایی از دستگاه گیرنده و فرستنده BEM در شکل ۱ آمده است. این دستگاه با توجه به اینکه به صورت کوله پشتی می باشد به راحتی می تواند به وسیله کاربر حمل شود و در مکان هایی که برا ماشین عبور مشکل می باشد به وسیله انسان می تواند به راحتی حمل شود.



شکل (۱): نمایی از دستگاه BEM و داده برداری در فیلد

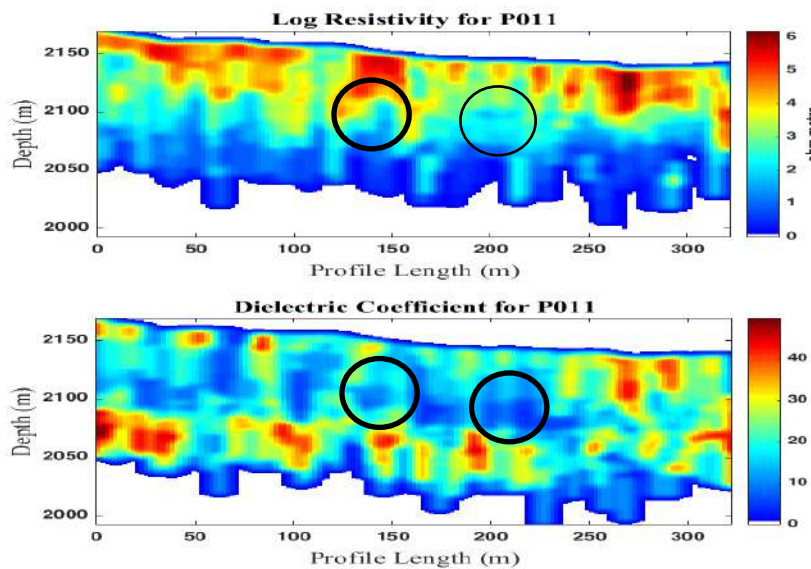
مطالعه موردی

محدوده اکتشافی سرهنگ در استان خراسان رضوی در داخل زون افیولیتی حد فاصل تربت حیدریه تا سبزوار قرار گرفته و عمدتاً از واحدهای الترامافیک، آمیزه رنگین و سنگ های بازالتی (در جنوب محدوده) همراه با واحدهای دیگر در رخنمون های کوچکتر تشکیل شده است. برای اجرای پیجویی ابتدا تصاویر ماهواره ای مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه بررسی های زمین شناسی و تهیه نقشه های زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰ انجام شد. در نهایت برداشت داده های ژئوفیزیکی به روش پیم صورت گرفت. شکل ۲ نقشه طراحی شده بر اساس تلفیق خروجی های دورسنجی، زمین شناسی و آنومالی های ژئوفیزیکی می باشد. کادراهای زرد رنگ معرف محدوده های امید بخش می باشد.



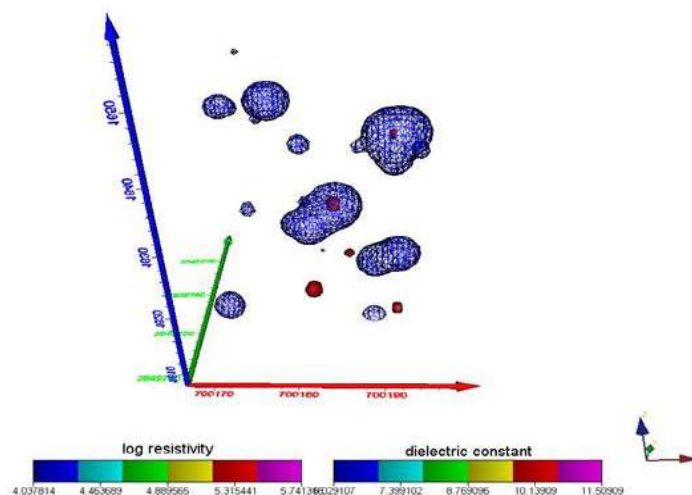
شکل (۲): نقشه طراحی شده بر اساس تلفیق خروجی های دورسنجی، زمین شناسی و آنومالی های ژئوفیزیکی

محدوده مشخص شده 1 یکی از مناطق امید یخش می باشد. خروجی مربوط به یکی از پروفیل های برداشت شده ژئوفیزیکی در این محدوده در شکل ۳ آمده است. همچنین نتایج آنالیز نمونه های برداشت شده در این محدوده در جدول ۱ آمده است. همچنین مدل سازی سه بعدی مربوط به محدوده که به وسیله نرم افزار وکسلر تهیه شده است، در شکل ۴ آمده است.



شکل (۳): مقطع مقاومت ویژه (بالا) و ضریب دی الکتریک (پایین) برای یکی از پروفیل های برداشتی در محدوده

در شکل ۳ محدوده هایی که به صورت غلاف هایی که غلاف بیرونی دارای لگاریتم مقاومت ویژه ۱.۵ الی ۲ و غلاف بیرونی دارای لگاریتم مقاومت ویژه ۳ الی ۳.۵ و به طور همزمان غلاف بیرونی دارای مقدار ضریب دی الکتریک بالای ۱۵ و غلاف درونی دارای مقدار ضریب دی الکتریک زیر ۱۱ باشد، محدوده دارای پتانسیل می باشد. همان طور که از مقطع فوق مشخص است، دو عدسی با طول حدود ۲۰ متر و پهنای ۱۰ متر با مشخصات ذکر شده برای ماده معدنی کرومیت مطابقت دارد. از طرفی با توجه به عرض ۵ متری پوشش دستگاه BEM ، می توان یک شعاع تاثیر ۵ متری برای آن ها در نظر گرفت که در نهایت دو عدسی حجمی معادل ۱۴۰۰ متر مکعب را شامل می شوند.

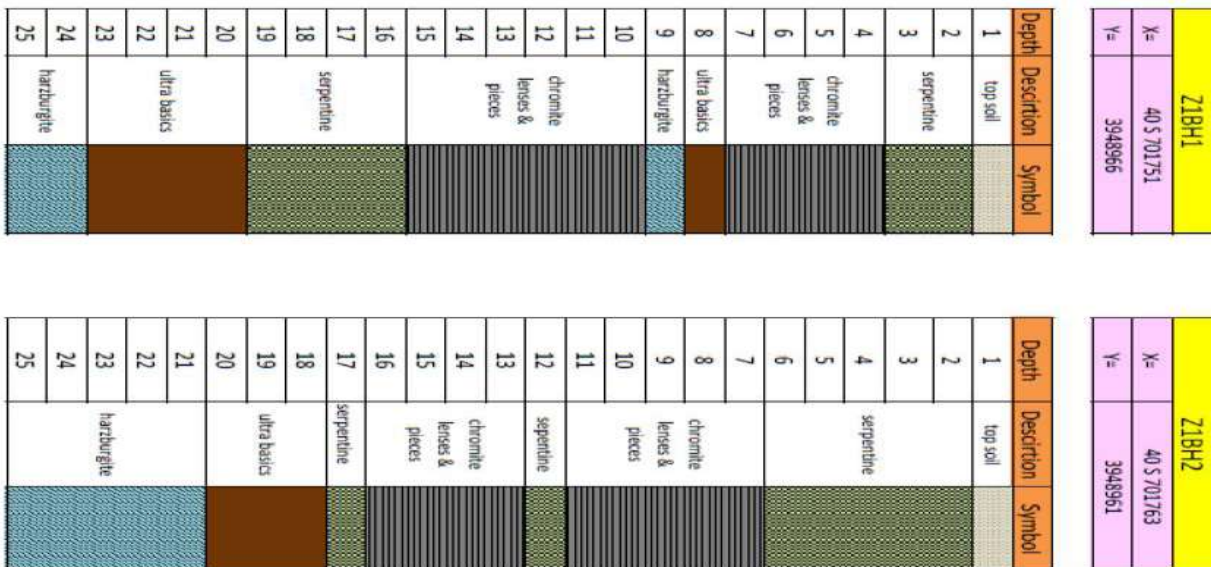


شکل (۴): مدل سازی سه بعدی محدوده ۱ سرهنگ

جدول (۱): نتایج آنالیز نمونه های برداشت شده در محدوده امید بخش ۱ محدوده سرهنگ

| SampleNo | SiO2 | Al2O3 | BaO | CaO | Fe2O3 | K2O | MgO | MnO | Na2O | P2O5 | SO3 | TiO2 | Cr2O3 | LOI |
|----------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Unit | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| DL | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.50 | 0.05 |
| 00-S1-1A | 39.76 | 0.40 | < | 0.27 | 7.72 | < | 37.84 | 0.06 | < | < | < | < | 0.53 | 13.01 |
| 00-S1-3A | 5.84 | 7.95 | < | 0.53 | 18.69 | < | 14.16 | 0.22 | < | < | < | 0.11 | 50.95 | 1.40 |
| 00-S1-4A | 10.01 | 14.71 | < | 0.81 | 16.74 | < | 18.20 | 0.21 | < | < | < | 0.13 | 35.53 | 3.47 |

همان طور که در جدول ۱ مشخص است در سه نمونه برداشت شده احتمال وجود کانی کرومیت بالا بوده است. لاگ حفاری مربوط به موقعیتی که مربوط به پروفیل ترسیم شده در شکل ۳ می باشد، در شکل ۵ آمده است.



شکل (۵): نمودار زمین شناسی لاگ های حفاری شده در محدوده ۱ سرهنگ

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از روش بـم برای اکتشاف ماده معدنی کرومیت استفاده شد. نتایج حاصل از تلفیق روش های دورسنجی، زمین شناسی و ژئوفیزیکی در نهایت با خروجی های مربوط به لاگ حفاری مقایسه گردید. همان طور که از خروجی های به دست آمده در بخش های قبل پیداست، داشتن همزمان پارامترهای مقاومت ویژه، ضریب دی الکتریک و مولفه های فازی در روش ژئوفیزیکی بـم کمک شایانی به کشف ماده معدنی کروم کرده است چرا که ماده معدنی کرومیت و سنگ میزبان آن دارای مقاومت ویژه ای نزدیک به هم بوده ولی ضریب دی الکتریک متفاوتی را دارا هستند لذا تمیز دادن کروم از سنگ میزبان به وسیله پارامتر ضریب دی الکتریک کمک شایانی به اکتشاف این ماده معدنی با ارزش می کند.

مراجع

- [۱] Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons.
[۲] Zhdanov, M.S., 2009, Geophysical electromagnetic theory and methods, Elsevier Science.
[۳] Bostani, Ali, 2020. BEM, Broadband Electromagnetic Smart Method, phenomenology, theory, applications, Mineral Exploration Symposium 2020, 17-18 September
[۴] Jackson, J.D., 1999, Classical electrodynamics, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.R
[۵] Wait, J. R., 1982, Geo-Electromagnetism, Academic Press.
[۶] Mundry, E., 1984, On the interpretation of airborne electromagnetic data for the twolayer- case, Geophys. Prosp., 32, 336-346.

برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی جهت تعیین خصوصیات حوضچه باطله تر معدن شماره یک گل گهر سیرجان

احسان اکبری^{۱*}، سمانه محمدیان^۲

۱. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ javan2015@gmail.com
۲. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ samaneh.mohamadian75@gmail.com

چکیده

امروزه دفع باطله‌های معدن کاری، با توجه به حجم زیاد، مشکل مهمی به حساب می‌آید، به صورتی که، با توجه به طبیعت خاص باطله‌ها، حجم آن‌ها از مواد زائد صنعتی و خانگی بیشتر می‌باشد. این مطالعه نتایج توصیف حوضچه معدن سنگ آهن گل گهر در منطقه سیرجان را ارائه می‌کند. هدف اصلی تعیین ضخامت باطله بوده است. توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) امکان تعیین هندسه کلی پایه حوضچه و ضخامت باطله معدن را فراهم کرده است. برداشت توموگرافی ویژه الکتریکی بر روی ۹ پروفیل ۱۶۸ متری با فاصله الکترودی ۸ متر و آرایه الکترودی ونر-شلومبرژه و برداشت‌های سونداژزنی الکتریکی قائم با حداکثر فاصله بین الکترودهای جریان که برابر با ۱۴۰ متر بود، بر روی ۲ سونداژ در سد باطله انجام گرفت. کنتراست مقاومت ویژه قوی بین مواد پرکننده و سنگ بستر به اندازه کافی بالاست که مرز بین باطله و سنگ بستر را به وضوح مشخص کند. مقادیر مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۵ اهم متر) باطله را مشخص کرده، درحالی که مقادیر مقاومت ویژه بالای ۱۳ اهم-متر مربوط به سنگ بستر می‌باشد و افزایش مقاومت ویژه به صورت تدریجی صورت می‌گیرد که می‌تواند ناشی از کاهش تدریجی رطوبت یا تغییر خواص باطله در عمق باشد. ضخامت حوضچه باطله در نزدیکی دیواره کمتر از وسط حوضچه است، که به دلیل عدم وجود ژئوممبرین در کف حوضچه و خاکبرداری یک منطقه وسیع برای انباشت باطله می‌باشد. باطله‌های کارخانه فرآوری گل گهر مواد ریزدانه‌ای در حد ذرات سیلت و ماسه می‌باشند که حوضچه باطله مورد مطالعه ضخامت حدود ۲۵ تا ۳۰ متر دارد.

واژه‌های کلیدی: سنگ آهن گل گهر، ضخامت باطله، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، سونداژ زنی الکتریکی قائم، حوضچه باطله.

Electrical Resistivity Surveys to Characterize the Wet Tailings Pond of Gol-e-Gohar Sirjan Mine No.1 Processing Plant

Ehsan Akbari^{1*}, Samaneh Mohammadian²

¹ M. Sc. of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, javan2015@gmail.com.

² M. Sc. of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, samaneh.mohamadian75@gmail.com.

ABSTRACT

Nowadays, the disposal of mining wastes is considered be an important problem due to large volume, so that due to special nature of wastes, their volume is more than industrial and household waste materials. This study presents the results of describing basin of Gol-e-Gohar iron ore mine in Sirjan. Main goal was to determine the thickness of tailings. Electrical resistivity tomography (ERT) has made it possible to determine the general geometry of base the pond and the thickness of mine tailings. Special electric tomography was taken on 9 profiles of 168 meters with electrode distance 8 meters and Wenner-Schlumberger electrode array, vertical electrical soundings were taken with maximum distance between current electrodes that was equal to 140 meters, on 2 soundings in tailings dam. Strong resistivity contrast between fill material and bedrock is high enough to clearly define the boundary between tailings and bedrock. Low specific resistance values (less than 5 Ohm-meter) indicate tailings, while specific resistance values above 13 Ohm-meter are related to bedrock and specific resistance increases gradually, which can be caused by from gradual decrease of humidity or change of tailings properties in depth. The thickness of tailings pond near wall is less than the middle of pond, which is due to the absence of geomembrane on bottom of pond and excavation of large area for accumulation of tailings. Tailings of Golgohar processing plant are fine-grained materials to extent of silt and sand particles, and tailings pond under study has thickness of about 25 to 30 meters.

Keywords: Gol-Ghar iron ore, tailings thickness, special electric resistance tomography, vertical electric probing, tailings pond.

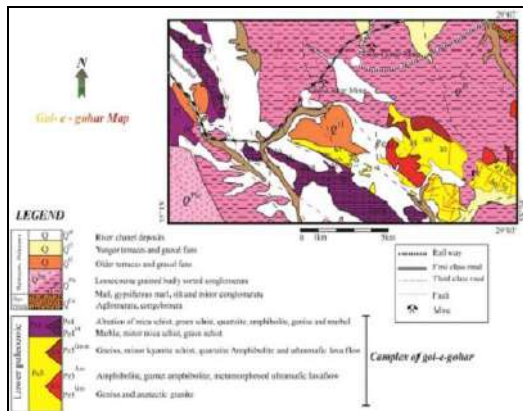
مقدمه

باطله‌های همراه مواد معدنی طی مراحل مختلف خردایش و پر عیار سازی جدا می‌گردند و معمولاً در محلی کم و بیش نزدیک به معدن انباشته می‌شوند. عمده ترین روش دفع باطله‌ها، حمل و ته‌نشین سازی آن‌ها بصورت پالپ می‌باشد، بایستی اطراف محل ته‌نشینی حد و مرزهایی باشد که مانع از گسترش باطله‌ها به خارج از ناحیه تعیین شده بشود. حوضچه‌های باطله (Tailings dams) به همین دلیل ساخته شده و در صورت امکان از باطله‌ها برای ساخت استفاده می‌شود [۱].

علم ژئوفیزیک، جزو روش‌های غیر مستقیم مطالعه زمین محسوب شده و روش‌های الکتریکی ژئوفیزیکی، با توجه به سرعت بالا، کاهش هزینه‌ها و غیر تهاجمی بودن این روش‌ها در بررسی‌های زیست محیطی ناشی از باطله‌های معدنی، اخیراً مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش‌ها می‌توانند جایگزین اقتصادی برای برنامه‌های گران قیمت حفاری و نمونه برداری در تعیین ضخامت حوضچه‌های باطله باشند. ژئوفیزیک را می‌توان برای تولید اطلاعات سطح زیرین یک منطقه بزرگ در چارچوب زمانی معقول و روشی مقرون به صرفه به کار برد [۲].

زمین شناسی معدن سنگ آهن گل گهر

ناحیه معدنی گل گهر در ۵۰ کیلومتری جنوب غرب سیرجان در استان کرمان و در لبه شرقی زون ساندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱). در این منطقه، سنگ‌های تشکیل دهنده به صورت کمپلکس دگرگونی شامل فیلیت، شیست، آمفیبولیت، گنیس و مارن است که همراه گرانیت در منطقه مشاهده می‌شود. همه واحدهای سنگی، در پالئوزوئیک بالایی و مزوزوئیک پایینی چین خورده و دگرگون شده‌اند. در بخش جنوبی، سازندهای مزوزوئیک و رسوبات دوران سوم وجود دارد. واحدهای سنگی آمیزه رنگی (colored melange) شامل سنگ‌های فوق بازی، رادیولاریت، شیل و سنگ آهک که توسط شکستگی‌های فراوان در هم آمیخته شده‌اند می‌شود. زون آتشفشانی سیرجان وابسته به دوران سوم است که بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی نیمه اسیدی همراه با سنگ‌های رسوبی تشکیل شده است [۳] (شکل ۲).



شکل ۱۹: بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ گل گهر [۴].



شکل ۱۸: موقعیت معدن گل گهر و راههای ارتباطی آن [۲].

منطقه مورد مطالعه

معدن سنگ آهن گل گهر، در حال حاضر با تولید بیش از ۱۵ میلیون تن کنسانتره و تولید سالیانه بیش از ۳۰ میلیون تن، موجب تولید مقدار قابل توجهی باطله حین بهره برداری شده که در حوضچه‌های باطله داخل معدن انباشت می‌شود. حوضچه (باطله‌ها ذرات ریزدانه در حد سیلت و ماسه می‌باشند) مورد مطالعه با مساحت ۴۲۰۰۰۰ متر مربع (۷۴۰ × ۵۷۰ متر) در قسمت شمالی معدن واقع شده که به منظور بررسی مشخصات ضخامت، حوضچه باطله‌تر خطوط شماره ۵، ۶ و ۷ کارخانه فرآوری، از مطالعات ژئوفیزیکی (روش ژئوالکتریک) استفاده شده است.

روش تحقیق

مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی بسته به خواص فیزیکی و شیمیایی (بافت، شوری، محتوای آب، دما، pH و نوع فلزات) متفاوت است. با توجه به رطوبت بالای باطله‌ها، شرایط خاص منطقه مورد مطالعه (دانه ریز بودن مواد باطله، عدم وجود ژئوممبرین در کف حوضچه‌ها، احتمال نفوذ باطله‌ها به بستر حوضچه، وجود فلزات مختلف و به طور خاص آهن در باطله‌ها) و حساسیت روش ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی به میزان رطوبت، این روش جهت تعیین عمق حوضچه استفاده شده است. در این تحقیق برداشت داده‌های ژئوفیزیکی حوضچه‌های باطله از روش مقاومت ویژه و آرایش الکترودی و نر-شلومبرژه (Wenner-Schlumberger) استفاده شده است.

برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی

انجام برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی به یکی از دو صورت کلی سونداژنی قائم الکتریکی یا پروفیل زنی الکتریکی امکان پذیر می‌باشد. امکان انتخاب هر کدام از این روش‌ها به هدف مورد مطالعه بستگی دارد [۵].

روش‌های اندازه گیری مورد استفاده به ۳ دسته شامل سونداژنی الکتریکی قائم (Vertical Electrical Sounding) برای تعیین تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق، برداشت‌های پروفیل زنی مقاومت ویژه برای آشکارسازی تغییرات جانبی و تصویر برداری مقاومت ویژه (توموگرافی الکتریکی) به منظور شناخت چند بعدی مقاومت ویژه الکتریکی، تقسیم بندی می‌شوند.

مدل سازی

فرآیند مدل سازی داده‌های ژئوفیزیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این فرآیند داده‌های خام بدست آمده در مرحله برداشت، به نتیجه قابل تفسیر و بررسی تبدیل می‌شود. در روش مدل سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه ضخامت و مقاومت لایه‌های زیرسطحی تخمین زده می‌شود.

در حالت کلی فرآیند مدل سازی به دو دسته مدل سازی پیشرو (Forward Modelling) که در این روش، زمین و پراکندگی مقاومت ویژه در قسمت‌های مختلف آن موجود است و داده‌ها و منحنی‌های مورد نیاز از این مدل زمین بدست می‌آید، به عبارت بهتر از زمین به منحنی مقاومت ویژه رسیده می‌شود و مدل سازی معکوس (Inverse Modelling) که بر خلاف مدل سازی مستقیم با استفاده از داده‌های بدست آمده، فرآیند تخمین مدل زمین انجام می‌گیرد تقسیم بندی می‌شود.

اندازه گیری مقاومت ویژه

اندازه گیری‌های مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه به دو گروه مطالعات آزمایشگاهی و اندازه گیری‌های صحرایی اختصاص یافت که مطالعات آزمایشگاهی شامل اندازه گیری رطوبت و مقاومت ویژه توسط خاک جمع آوری شده از منطقه مورد مطالعه در چهار دسته نمونه خاک حوضچه باطله خطوط ۵، ۶ و ۷ معدن شماره یک، در کنار گمانه‌های ۱، ۲ و ۳ از سطح و عمق حوضچه می‌شود. همچنین اندازه گیری صحرایی نیز به برداشت‌های ژئوالکتریک در منطقه مورد مطالعه اختصاص یافت.

اندازه گیری رطوبت

میزان رطوبت خاک با استفاده از دو روش دستگاه رطوبت سنج مدل MA 35 و دستگاه آون (Oven) به شرح زیر مورد اندازه گیری قرار گرفت:

۱. با استفاده از دستگاه رطوبت سنج مدل MA 35 (شکل ۳الف) در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۷ دقیقه میزان رطوبت نمونه‌ها اندازه گیری شد.
۲. ابتدا وزن نمونه مرطوب اندازه گیری و نمونه در دستگاه آون (شکل ۳ب) خشک شد، سپس وزن نمونه‌های خشک اندازه گیری و با استفاده از (رابطه ۱: درصد رطوبت بر مبنای وزن تر) میزان رطوبت محاسبه شد.

$$\frac{M_w - M_d}{M_w} * 100 \quad \begin{matrix} M_w = & \text{وزن تر} \\ M_d = & \text{وزن خشک} \end{matrix} \quad (1)$$



شکل ۲۰: الف) دستگاه رطوبت سنج مدل MA 35 (ب) دستگاه آون

اندازه گیری مقاومت ویژه

اندازه گیری‌های مقاومت ویژه با استفاده از دستگاه RS-888 آرایه الکترودی ونر و فواصل الکترودی مختلف در آزمایشگاه انجام شد (شکل ۴).

برداشت های ژئوالکتریک منطقه مورد مطالعه

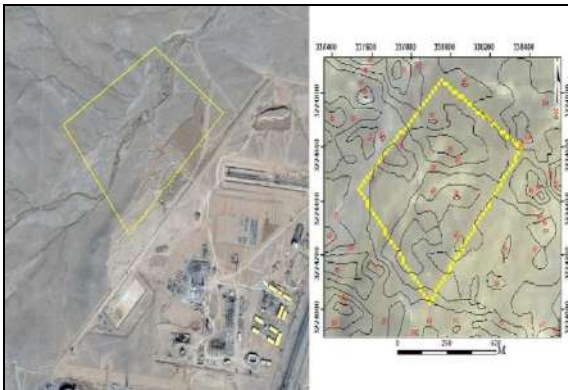
برای بررسی ضخامت باطله، پروفیل زنی و سونداژ زنی الکتریکی توسط دستگاه RS-888 (شکل ۴) و آرایه الکترودی ونر-شلومبرژه (فاکتورهای عمق، توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، قدرت تفکیک پذیری جانبی و حساسیت به اهداف مورد مطالعه، جهت انتخاب نوع آرایه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و به دلیل حائز اهمیت بودن تغییرات افقی و عمودی منطقه این نوع آرایه انتخاب شده است) اجرا شد. عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی به دو روش پروفیل زنی و سونداژ زنی یا تلفیقی از هر دو روش انجام گرفته است. برداشت‌های پروفیل زنی بر روی ۳ پروفیل ۱۷۲ متری و ۳ پروفیل ۳۴۴ متری با فاصله الکترودی ۸ متر (شکل ۵) و برداشت‌های سونداژ زنی (تعداد ۲ ایستگاه سونداژ) با حداکثر فاصله بین الکترودهای جریان برابر با ۱۴۰ متر در نزدیکی گمانه ۲ و ۳ در سد باطله انجام گرفت (شکل ۶).



شکل ۲۲: نمایش پروفیل‌های برداشت شده در گوگل ارث



شکل ۲۱: دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه RS-888



شکل ۲۴: نمایی از سد باطله معدن قبل از گود برداری



شکل ۲۳: نمایش سونداژهای برداشت شده در گوگل ارث

از برداشت‌های پروفیل زنی مقاومت ویژه می‌توان برای آشکارسازی تغییرات جانبی در زمین شناسی منطقه (به عنوان مثال، حضور دره-های مدفون و تعیین گسل‌های عمودی) استفاده کرد. پروفیل‌های برداشت داده‌ها باید در راستای عمود بر امتداد گسل‌ها و ساختارهای مورد نظر باشد که در این تحقیق طراحی پروفیل‌ها، عمود بر ساختارهای موجود انجام شده است.

یافته‌ها و تفسیر نتایج

نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

این نتایج طبق جدول ۱ نشان دهنده رابطه همزمان کاهش میزان رطوبت و افزایش میزان مقاومت ویژه (رابطه معکوس) بوده که عکس این رابطه نیز برقرار می‌باشد.

جدول ۱: نتایج میزان رطوبت و مقاومت ویژه آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده سد باطله خط ۵، ۶ و ۷

| ردیف | نوع نمونه | درصد رطوبت (بر اساس دستگاه رطوبت سنج) | درصد رطوبت (بر اساس رابطه ۱) | $\rho(\Omega m)$ |
|------|---------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------|
| ۱ | گمانه ۱ (سطح) | 11.45 | 10.29 | 6.5 |

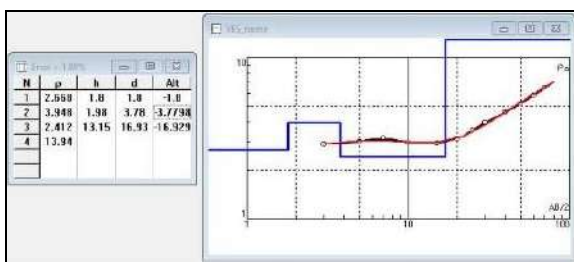
| | | | | |
|---|----------------------------|-------|-------|------|
| ۲ | گمانه ۲ (عمق تقریبی ۲ متر) | 7.14 | 8.49 | 10.2 |
| ۳ | گمانه ۲ (سطح) | 8.78 | 9.47 | 14.4 |
| ۴ | گمانه ۳ (سطح) | 16.55 | 17.06 | 4.7 |

نتایج برداشت‌های سونداژ زنی

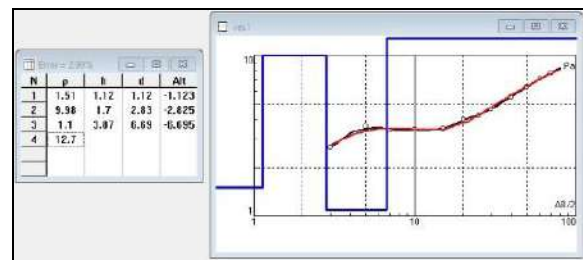
هدف اصلی برداشت‌های سونداژ زنی تعیین تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق بوده است که نتایج بررسی دو ایستگاه در مجموع نشان دهنده افزایش و کاهش مقدار مقاومت ویژه وابسته به ویژگی‌های باطله و سنگ بستر می‌باشد. هر دو سونداژ در نزدیک دیواره‌های حوضچه می‌باشند و ضخامت کمی از باطله را نشان می‌دهند. سونداژ ۱ در نزدیکی گمانه ۲ و سونداژ ۲ در نزدیکی گمانه ۳ برداشت شد.

سونداژ شماره ۱: بررسی ایستگاه شماره ۱ نشان دهنده تغییرات زیاد مقاومت ویژه به دلیل خشک بودن باطله در سطح بوده و تا عمق ۳ متری این روند ادامه دارد که پس از آن به دلیل وجود باطله مرطوب در این قسمت کاهش مقاومت ویژه صورت گرفته که تا عمق حدوداً ۸ متری ادامه داشته و پس از برخورد به سنگ بستر با مقاومت ویژه بالا، افزایش شدید مقاومت ویژه رخ می‌دهد. بعد از عمق حدود ۷ متر، این میزان به حدود ۱۲ الی ۱۳ اهم متر افزایش یافته که می‌تواند ناشی از تغییر خواص و کاهش شدید رطوبت باطله‌ها یا به تعبیر دیگر ناشی از تاثیر کف حوضچه باطله در داده‌ها باشد (شکل ۸).

سونداژ شماره ۲: بررسی نمودار ایستگاه شماره ۲ حاکی از افزایش مقاومت ویژه تا عمق ۴ متری به دلیل خشک بودن سطح منطقه و از این عمق تا حدود ۱۷ متر کاهش مقاومت ویژه به دلیل وجود رطوبت، سپس افزایش مقاومت ویژه به دلیل برخورد به سنگ بستر می‌باشد. پس از عمق ۱۷ متری، این میزان به حدود ۱۲ الی ۱۳ اهم متر افزایش یافته که می‌تواند ناشی از تغییر خواص و کاهش شدید رطوبت باطله‌ها یا به تعبیر دیگر ناشی از تاثیر کف حوضچه باطله در داده‌ها باشد. در این سونداژ ۴ لایه قابل مشاهده است (شکل ۹).



شکل ۲۶: نمودار مقاومت ویژه ظاهری ایستگاه شماره ۲



شکل ۲۵: نمودار مقاومت ویژه ظاهری ایستگاه شماره ۱

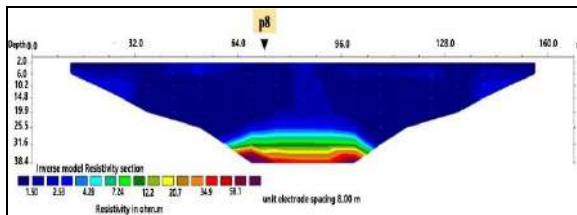
نتایج برداشت‌های پروفیل زنی

پس از آماده سازی داده‌ها و حذف داده‌های پرت، برای تهیه شبه مقاطع مقاومت ویژه، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده، وارد نرم افزار RES2DINV شد. به منظور تفسیر کمی داده‌ها، از عملیات مدل سازی معکوس با روش کمترین مربعات خطا استفاده شد و همچنین برای کاهش خطای مدلسازی به مقدار قابل قبول، مقادیر داده‌های پرت در پروفیل‌ها حذف و عمل مدل سازی معکوس مجدد انجام شد.

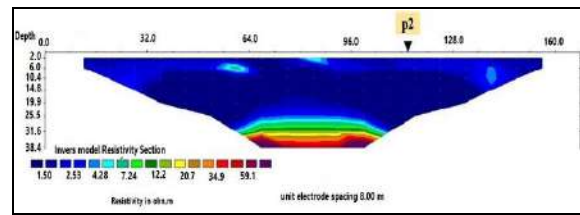
- در پروفیل ۱ (شکل ۱۰) لایه با مقاومت کمتر از ۵ اهم متر مشاهده شده که باطله است و بعلاوه ریزدانه بودن و رطوبت مقاومت ویژه

کمی دارد، تا عمق حدود ۳۰ متری مقاومت ویژه به بیش از ۱۲ الی ۱۳ اهم متر افزایش یافته که سنگ بستر را نشان می‌دهد. افزایش کم مقاومت ویژه در نزدیکی سطح زمین بعلت خشک بودن سطح باطله می‌باشد. این پروفیل در فاصله ۱۱۳ متری پروفیل ۲ را قطع کرده که در نقطه تقاطع نتایج مشابهی قابل مشاهده می‌باشد.

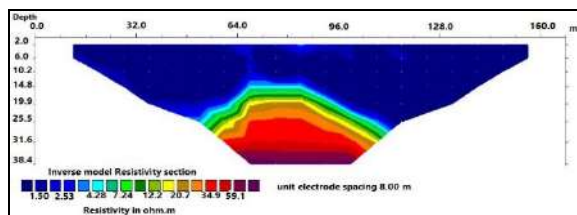
- پروفیل ۴ (شکل ۱۱) متشکل از دو لایه است، لایه‌ای با مقاومت ویژه حدود ۵ اهم متر مربوط به باطله و مقاومت ویژه بالاتر که سنگ بستر می‌باشد. این پروفیل در امتداد پروفیل ۳ است، که انتهای پروفیل ۳ با ابتدای پروفیل ۴ بایستی به یکدیگر منطبق باشد و همچنین پروفیل ۴ در فاصله ۷۲ متری پروفیل ۸ را قطع می‌کند که در این نقطه دو پروفیل بر هم منطبق می‌باشند.
- در پروفیل ۸ (شکل ۱۲) بعلت نزدیک شدن به دیواره ضخامت باطله کاهش یافته و رطوبت سطح حوضچه باطله نسبت به پروفیل‌های دیگر نسبتاً بیشتر است.
- پروفیل ۹ (شکل ۱۳) در نزدیکی دیواره حوضچه می‌باشد که در عمق تقریبی ۲۵ متری به سنگ بستر رسیده است که نشان می‌دهد ضخامت ویژه حوضچه باطله در وسط بیشتر از دیواره می‌باشد.
- نتایج مدل‌سازی دیگر پروفیل‌های باقی مانده با پروفیل‌های شرح داده شده مشابه می‌باشد. بدین صورت که پروفیل‌های شماره ۱ و ۲، پروفیل‌های شماره ۳ و ۴ و پروفیل‌های شماره ۵، ۶، ۷ و ۹ مشابه یکدیگر می‌باشند.



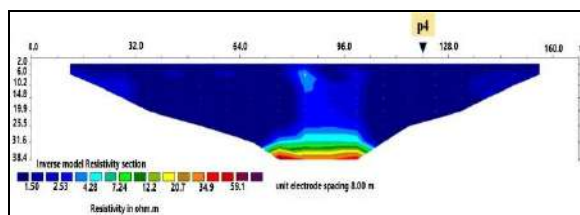
شکل ۲۸: مقطع مدل‌سازی شده پروفیل ۴



شکل ۲۷: مقطع مدل‌سازی شده پروفیل ۱



شکل ۳۰: مقطع مدل‌سازی شده پروفیل ۹



شکل ۲۹: مقطع مدل‌سازی شده پروفیل ۸

نتایج مدل‌سازی‌های مستقیم، ضخامت لایه باطله در تمامی پروفیل‌ها را حدود ۲۵ الی ۳۰ متر نشان می‌دهد که می‌تواند به مشخص کردن مرز بین باطله و سنگ بستر در اطلاعات حاصل از برداشت صحرایی بدست آمده جهت تفسیر داده‌ها کمک کند. تعداد ۹ مقطع مقاومتی بدست آمده از حوضچه باطله داده‌های پروفیل ۱ تا ۷ (پروفیل‌ها وسط حوضچه قرار دارند) معمولاً توزیع‌های مقاومت ویژه مشابهی در عمق حدود ۳۰ متر را نشان می‌دهند که نسبت به دیواره عمیق‌تر می‌باشد. لایه با مقاومت ویژه کمتر از ۵ اهم متر مربوط به باطله است و در عمق حدود ۳۰ متری مقاومت ویژه به بیش از ۱۳ اهم متر افزایش می‌یابد که نمایان کننده سنگ بستر می‌باشد. در عوض، افزایش مقاومت ویژه در نزدیک سطح زمین به دلیل خشک بودن سطح باطله می‌باشد.

در پروفیل ۸ ضخامت باطله بعثت نزدیکی به دیواره کاهش یافته و در این قسمت از حوضچه باطله رطوبت در سطح نسبت به پروفیل‌های دیگر بیشتر شده و مقاومت ویژه بالایی که روی سطح به دلیل خشک بودن خاک دیده می‌شود کمتر شده است.

پروفیل ۹ در نزدیکی دیواره حوضچه می‌باشد که در عمق تقریبی ۲۵ متری به سنگ بستر رسیده است که نشان می‌دهد ضخامت ویژه حوضچه در وسط بیشتر از دیواره آن می‌باشد. بطور کلی پروفیل‌های برداشت شده در نزدیکی دیواره‌های حوضچه باطله بررسی‌ها نشان دهنده ضخامت کمتری نسبت به پروفیل‌های وسط حوضچه می‌باشند.

نتیجه گیری کلی

طبیعتاً روش‌های مختلفی برای جمع آوری داده در رابطه با زیر سطح غیر قابل دسترس زمین موجود می‌باشد. مسلماً مشاهدات مستقیم رسوبات و سنگ‌ها بهترین روش انتخابی بوده، اما معمولاً این امر به ندرت در مقیاس مطالعاتی وسیع امکان پذیر است. علاوه بر این، بررسی یک منطقه با استفاده از تعداد بی شمار گمانه حفر شده در یک شبکه منظم نیز با توجه به هزینه‌های هنگفت، متداول و مقرون به صرفه نیست. اگرچه حفر گمانه‌های اکتشافی یکی از راه‌های مستقیم به دست آوردن اطلاعات زیرزمینی دقیق به حساب می‌آید، اما همانطور که اشاره شد، عملیات حفاری پرهزینه است و تنها اطلاعاتی را در مناطق جداگانه برداشت فراهم می‌آورد. در مقابل یکی از راه‌های متداول برای کسب اطلاعات زیرسطحی، انجام اندازه‌گیری‌های فیزیکی در سطح زمین و تعیین زمین شناسی زیرسطحی با استفاده از این داده‌هاست. برداشت‌های ژئوفیزیکی وسیله‌ای سریع و ارزان برای بدست آوردن اطلاعات پیوسته زیرسطحی می‌باشند. در این تحقیق به دلیل تفاوت در مقاومت ویژه مواد باطله و سنگ بستر از روش مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. مدل سازی‌های انجام شده و نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که کنتراست مقاومت ویژه قوی‌ای بین مواد پرکننده و سنگ بستر به اندازه کافی بالا وجود دارد که مرز بین باطله و سنگ بستر را به وضوح مشخص کند. مقادیر مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۵ اهم متر) مشخص کننده باطله بوده، در حالی که مقادیر مقاومت ویژه بالای ۱۳ اهم متر مربوط به سنگ بستر می‌باشد. ضخامت باطله در نزدیکی دیواره حوضچه کمتر از وسط حوضچه می‌باشد. باطله‌های کارخانه فرآوری معدن گل گهر سیرجان مواد ریزدانه‌ای در حد ذرات سیلت و ماسه می‌باشند که ضخامت حوضچه باطله حدوداً بین ۲۵ الی ۳۰ متر را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که به دلیل نبود ژئومبیرین مناسب در کف حوضچه ممکن است منجر به ترکیب احتمالی مواد باطله با رسوبات متخلخل در کف حوضچه شود، در نتیجه یک انتقال تدریجی از باطله به رسوبات طبیعی صورت می‌گیرد. بهتر است برای دستیابی به بهترین تفسیر ممکن، از داده‌های کنترلی (مانند داده‌های حاصل از گمانه‌های حفاری)، یک روش ژئوفیزیکی دیگر و یا همچنین می‌توان از برداشت یک پروفیل در خارج از حوضچه باطله که مشابه با بستر حوضچه باشد استفاده کرد.

مراجع

- [۱]. Mainali, G. (2006). "Monitoring of tailings dams with geophysical methods" (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- [۲]. اسدی، ع، ۱۳۹۷، بررسی و شبیه سازی زیرسطحی دیواره شمالی معدن شماره یک به منظور شناسایی گسل‌های پنهان و مرز لایه‌ها.
- [۳]. حلاجی، ا، ۱۳۷۰. مطالعه کانی شناسی عناصر کمیاب و منشا کانسار آهن گل گهر (سیرجان-کرمان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، ۲۵۴ص.
- [۴]. سبزه‌ای، م، ۱۳۷۴. نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی گل گهر، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی ایران.
- [۵]. حجت، آ، رنجبر، ح، ۱۳۹۰، اصول ژئوالکترونیک کاربردی.

تحلیلی آسیب شناسانه بر برخی عوامل ایجاد کننده خطا در مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی و ارائه راهکارهایی برای کمینه کردن آن

محسن مقدسی^{۱*}؛ حسین مقدسی^۱

۱ کارشناس ارشد ژئوفیزیک (گرایش ژئوالکتریک) از دانشگاه تهران و کارشناس مسئول ژئوفیزیک اکتشافی، شرکت مهندسی ژرفاب کاوش

info@jarfabkavosh.ir

* نویسنده مسئول: محسن مقدسی

چکیده

در سالهای اخیر برداشت های ژئوالکتریک دوبعدی به یکی از روش های متداول و مرسوم در مطالعات اکتشاف معادن، اکتشاف منابع آب زیرزمینی، مطالعات ژئوفیزیک مهندسی، باستان شناسی و ... تبدیل شده است. لیکن بر حسب بازخوردهای حاصل شده، در پاره ای از موارد این مطالعات نتوانسته به نتیجه مطلوب و مورد انتظار برسد و گاه نتایج به دست آمده فاصله معناداری با واقعیت های به دست آمده از مطالعات مستقیم نظیر حفاری و ... داشته است. در این مقاله سعی می شود به تحلیل جامعی از عوامل ایجاد کننده خطا در مطالعات دوبعدی ژئوالکتریک پرداخته شود و از سوی دیگر با بیان راهکارهایی میزان و شدت خطاهای مورد بحث را کمینه کرد. در این مقاله از فایل تحلیلی-آموزشی **Loke** پدیدآورنده نرم افزار **RES2DINV** که در حال حاضر عمده تحلیل، پردازش و برگردان داده های ژئوالکتریک توسط این نرم افزار صورت می پذیرد، استفاده شده است. و همچنین سعی شده با شناخت ملاموس و شهودی نسبت به ایجاد عوامل خطا، راهکارهای اجرایی برای حذف عوامل خطا ارائه گردد.

واژه های کلیدی: دایپل-دایپل، پل-دایپل، ژئوالکتریک، مقاومت ویژه الکتریکی، شارژپذیری، RES2DINV

Analysis on some common and neglected factors causing errors in two-dimensional geoelectrical studies and providing solutions for minimizing it

Mohsen Moghaddasi¹; Hosein Moghaddasi
info@jarfabkavosh.ir

* Corresponding author: Mohsen Moghaddasi

ABSTRACT

In recent years, two-dimensional geoelectrical surveys have become one of the common and conventional methods in mineral exploration, groundwater resources investigations, engineering geophysics, archeology, etc. However in some cases, these studies could not reach the targeted and expected results, and sometimes the geophysical results obtained have had a significant distance from the results obtained from direct studies such as drilling, etc.. In this article, authors try to comprehensively analyze some factors that cause errors in two-dimensional geoelectrical studies, and on the other hand, state some solutions for minimizing the amount and severity of the discussed errors. In this article, a tutorial file of Dr. Loke, the developer of the RES2DINV software has been used, which currently geophysicists mainly use this software for analyzing, processing, and inverting geoelectrical data. Also, it has been tried to provide practical solutions for minimising the error factors

by a deep understanding of the source and mechanism of error factors. Also, based on the authors' experience an optimal approach will be presented.

Keywords: dipole-dipole, pole-dipole, geoelectric, electrical resistivity, chargeability, RES2DINV

۱ مقدمه

روش ژئوالکتریک همانند سایر روش های ژئوفیزیکی دارای محدودیت های ذاتی نظیر عدم یکتایی جواب، تفکیک پذیری پایین علی الخصوص با افزایش عمق کاوش و ... است. که طبیعتاً بخشی از آنها به فیزیک موضوع برمی گردد و اجتناب ناپذیر است. لیکن بعضی از خطاهای ایجاد شده و به تبع آن نتایج غیر قابل استناد بدست آمده، بدین علت است که فهم جامع و عمیقی نسبت به آرایه های برداشت ژئوالکتریک و نحوه برداشت آنها از طرف بعضی مجریان وجود ندارد. به عنوان مثال در برداشت های ژئوالکتریک دو بعدی قرائت هایی با فاکتور n که مبین نسبت فاصله بین جفت الکتروود جریان و پتانسیل و فاصله الکتروودی است در آرایه هایی نظیر دایپل-دایپل، پل-دایپل و ... تا اعدادی گاه ۱۵، ۲۰ و حتی بیشتر برداشت می گردد که در این مقاله با تحلیل فنی بیان می گردد که این داده ها، غیر قابل استناد بوده و حتی داده های صحیح برداشت شده در n های پایین تر را در حین فرآیند برگردان (Inversion) تحت تاثیر قرار داده و مقطع نهایی به دست آمده غیر قابل تطابق با واقعیت زمین است. در نهایت با تحلیل صورت گرفته و درک مفهومی و شهودی موضوع راهکارهایی برای کمینه کردن این خطای رایج، ارائه می گردد.

۲ بیان صورت مسئله

قبل از ورود به بحث ابتدا برای آشنایی خوانندگان محترم ابتدا به صورت شماتیک آرایه دایپل-دایپل و پل-دایپل نمایش داده میشود و فاکتور n معرفی می گردد:



شکل ۱: نمایی از آرایه پل-دایپل (سمت راست) و دایپل-دایپل (سمت چپ)

در حقیقت مطابق شکل فاکتور n مبین نسبت فاصله بین جفت الکتروود جریان و پتانسیل و فاصله الکتروودی (a) می باشد. نویسندگان این مقاله در سالیان فعالیت خود مشاهده کرده اند که در پروژه های مطالعات ژئوالکتریک دو بعدی در داخل کشور، فاکتور n تا مقادیر بالایی حتی تا ۲۰-۱۵ قرائت میشود. گاه از بعضی از مجریان وقتی سوال می شود، ایشان بیان می دارند که با توجه به استفاده از ژنراتور و بالا بودن سیگنال به نویز پس قاعدتاً داده به دست آمده قابل استناد است. لیکن در این مقاله با دلایل زیر اثبات میشود که در محیط واقعی، قرائت های صورت گرفته با مقادیر n بالای ۶ (یا نهایتاً ۸) قابل استناد نیستند و بالا بودن شدت سیگنال تاثیری بر روی قابل استناد بودن داده ندارد. در حقیقت ممکن است داده به دست آمده از لحاظ دقت و تکرارپذیری درست باشد، لیکن داده مناسبی برای انجام فرآیند Inversion نمی باشد.

نرم افزار RES2DINV از اصلی ترین نرم افزار های مورد استفاده برای برگردان داده های ژئوالکتریک دو بعدی بوده که پدیدآورنده این نرم افزار Loke می باشد. Loke فایل آموزشی تحلیلی (Tutorial) با عنوان: 2-D and 3-D electrical imaging survey ارائه نموده است. بسیاری موارد فنی مربوط به مطالعات ژئوالکتریک که ایشان بر اساس آن نرم افزار را طراحی کرده را در این فایل آموزشی بیان نموده است و با ذکر دلایل فنی به محدودیت ها و پیش شرط هایی که میبایست برای برداشت هر آرایه در نظر داشت، اشاره کرده است. این فایل مرتباً از سال ۱۹۹۶ تاکنون بازنگری شده و نسخه نهایی آن مربوط به سال ۲۰۲۳ میباشد. بدیهی است تحلیل داده های

ژئوالکتریک بدون فهم کامل این موضوعات امکانپذیر نیست. حال در اینجا با بهره گیری از محتوای این فایل آموزشی، به بررسی دو آرایه متداول در مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی می پردازیم:

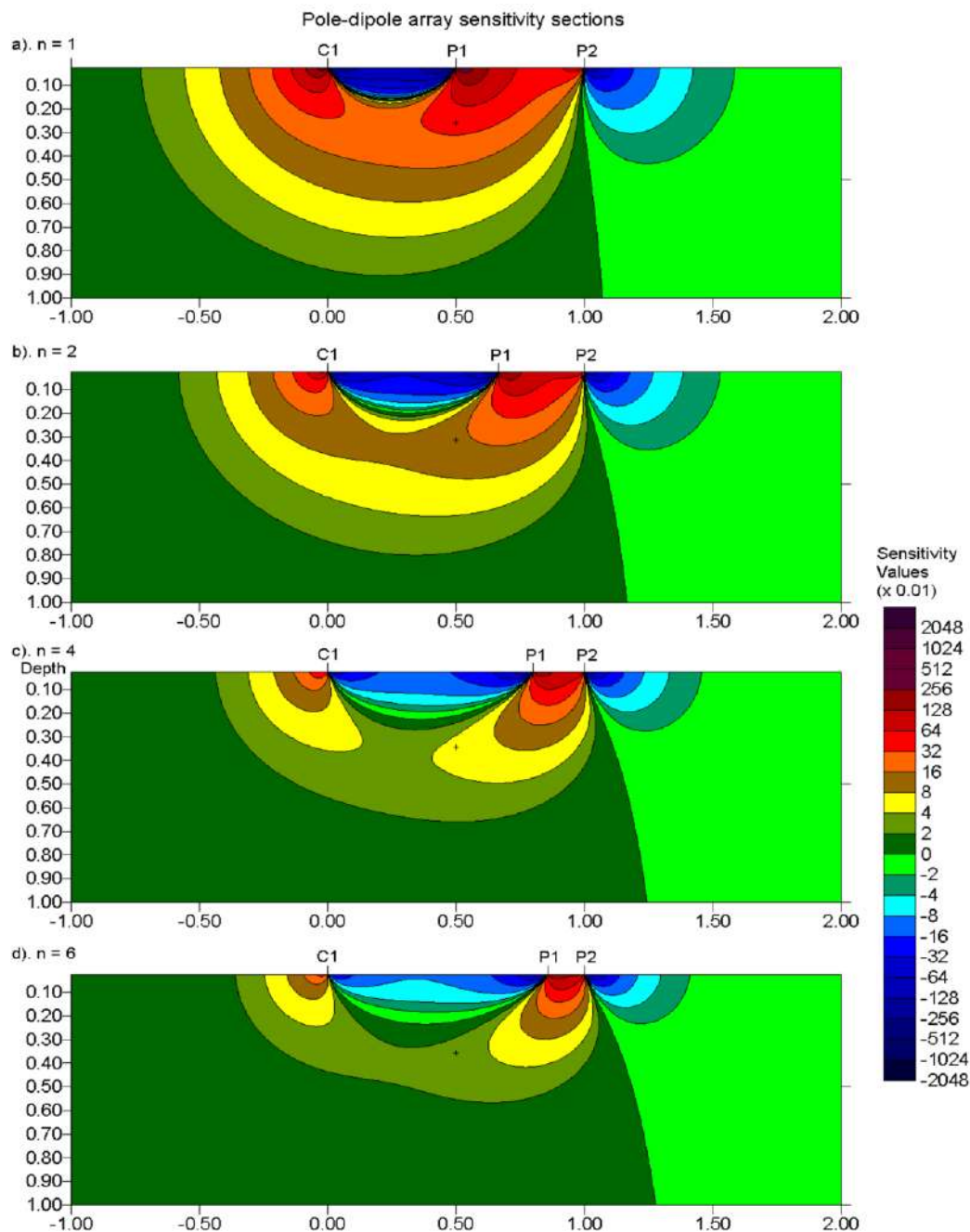
۱-۲ آرایه پل-دایپل

یکی از رایج ترین آرایه ها برای برداشت دوبعدی آرایه پل-دایپل است که آرایه ای نامتقارن بوده و نسبت سیگنال به نویز بالاتری نسبت به آرایه دایپل-دایپل داشته و کمتر تحت تاثیر جریانات تلوریک قرار می گیرد و برای مطالعات IP/RS از آن به صورت رایج استفاده می شود. این آرایه مانند دیگر آرایه ها، از مزیت ها و محدودیت های خاص خودش برخوردار است. لیکن سوال اصلی این است که برای برداشت با آرایه پل-دایپل می توان حداکثر تا چند پرش (n) اقدام نمود؟

لیکن قبل از ورود به مبحث برای درک بهتر موضوع به معرفی موضوعی مهم در در مطالعات ژئوالکتریک به نام تابع حساسیت (Sensitivity Function) می پردازیم.

تابع حساسیت به بررسی میزان حساسیت و تاثیرگذاری هر نقطه از فضای نیم صفحه زیر زمین بر روی مقدار مقاومت ویژه ظاهری قرائت شده می پردازد. با استفاده از این تابع می توان مقطع حساسیت (Sensitivity Section) در راستای خط چینش الکترودها برای هر آرایه الکترودی به صورت جداگانه محاسبه و ترسیم نمود. در توضیح این مقاطع می توان گفت که هر چه تابع حساسیت در یک نقطه از مقطع مقدار بیشتری داشته باشد آن نقطه تاثیر بیشتری در مقدار مقاومت ویژه ظاهری قرائت شده خواهد داشت. با استفاده از این مقاطع می توان آرایش های الکترودی مناسب برای برداشت های یک بعدی و دوبعدی مطالعات ژئوالکتریک را در شرایط مختلف زمین شناسی تشخیص داد.

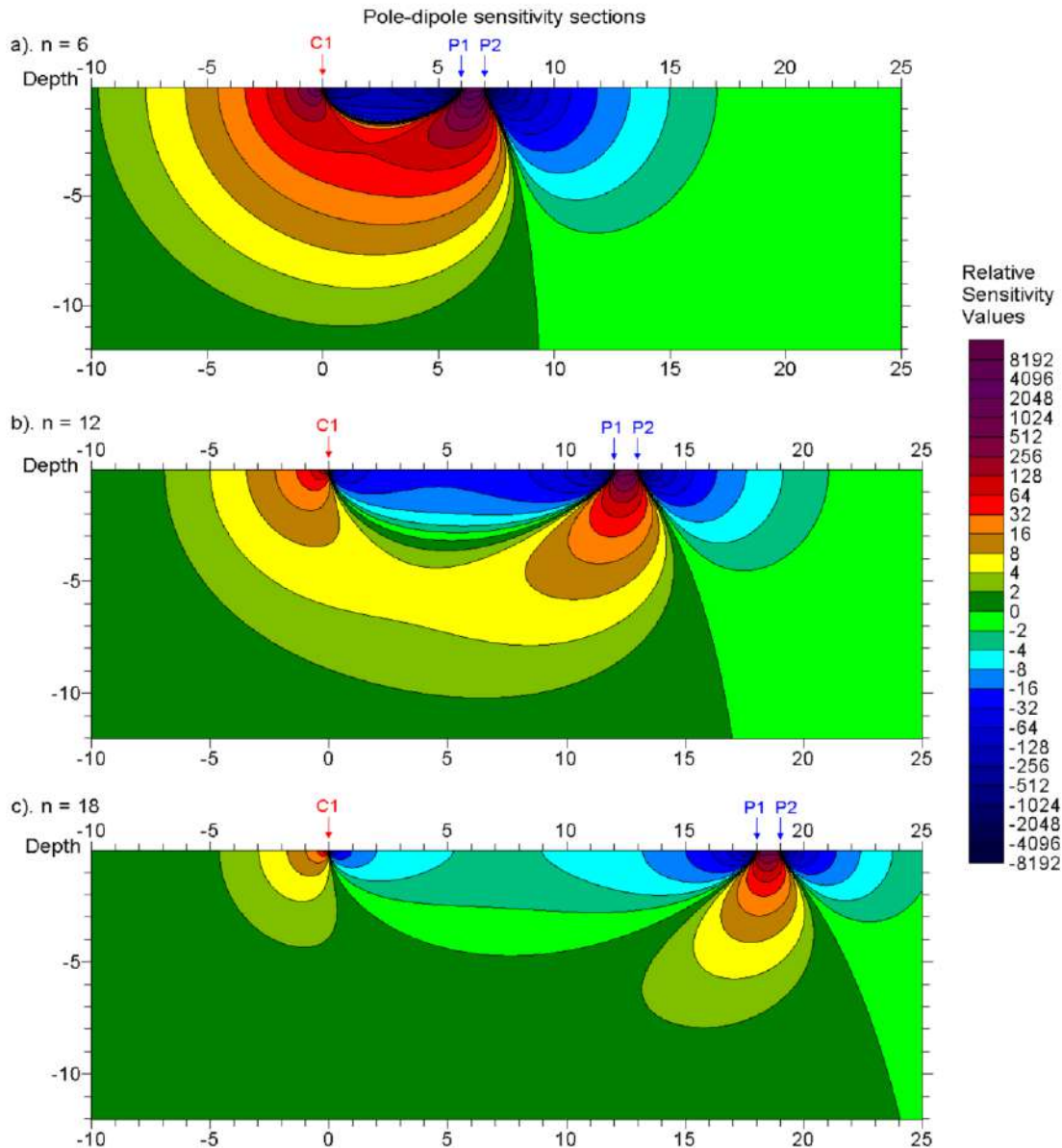
برای انجام برداشت های ژئوالکتریک بهترین چینش الکترودها در حالتی است که توزیع همگونی از مقدار تابع حساسیت در فضای نیم صفحه زمین وجود داشته باشد. هر چه این توزیع ناهمگون تر باشد و به عنوان مثال متمرکز در زیر جفت الکتروود جریان یا پتانسیل باشد، از هدف مطلوب فاصله گرفته ایم. به زبان ساده در چنین شرایطی یک ناحیه هر چند کوچک با مقدار بالای حساسیت، تاثیر زیادی روی داده قرائت شده می گذارد و نیاز به فرایندهای برگردان که ذاتا دارای عدم قطعیت بوده را بالا می برد. در شکل زیر مقاطع حساسیت مربوط به آرایه پل-دایپل ارائه شده است.



شکل ۲: مقاطع حساسیت آرایه پل-دایپل برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶

با بررسی این مقاطع مشخص می شود که هر چه مقدار n افزایش می یابد نواحی بیشینه حساسیت (یعنی نواحی که بیشترین تاثیر را بر روی داده قرائت شده دارند)، به سمت جفت الکتروود پتانسیل P1-P2 و تک الکتروود جریان C1 متمایل می شوند. یعنی به عنوان مثال اگر در زیر جفت الکتروود پتانسیل P1-P2 نویز هایی نظیر ناهمگنی های سطحی، مقاومت تماسی بالا، توپوگرافی خشن و ... وجود داشته باشد، این شرایط بی هنجاری کاذبی ایجاد می کند که به وجود یه توده بی هنجار عمیق در مرکز آرایه نسبت داده می شود در صورتی که این بی هنجاری در اثر وجود یک توده سطحی کوچک و یا نویز در زیر جفت الکتروود پتانسیل ایجاد شده است. همچنین با بررسی مقاطع

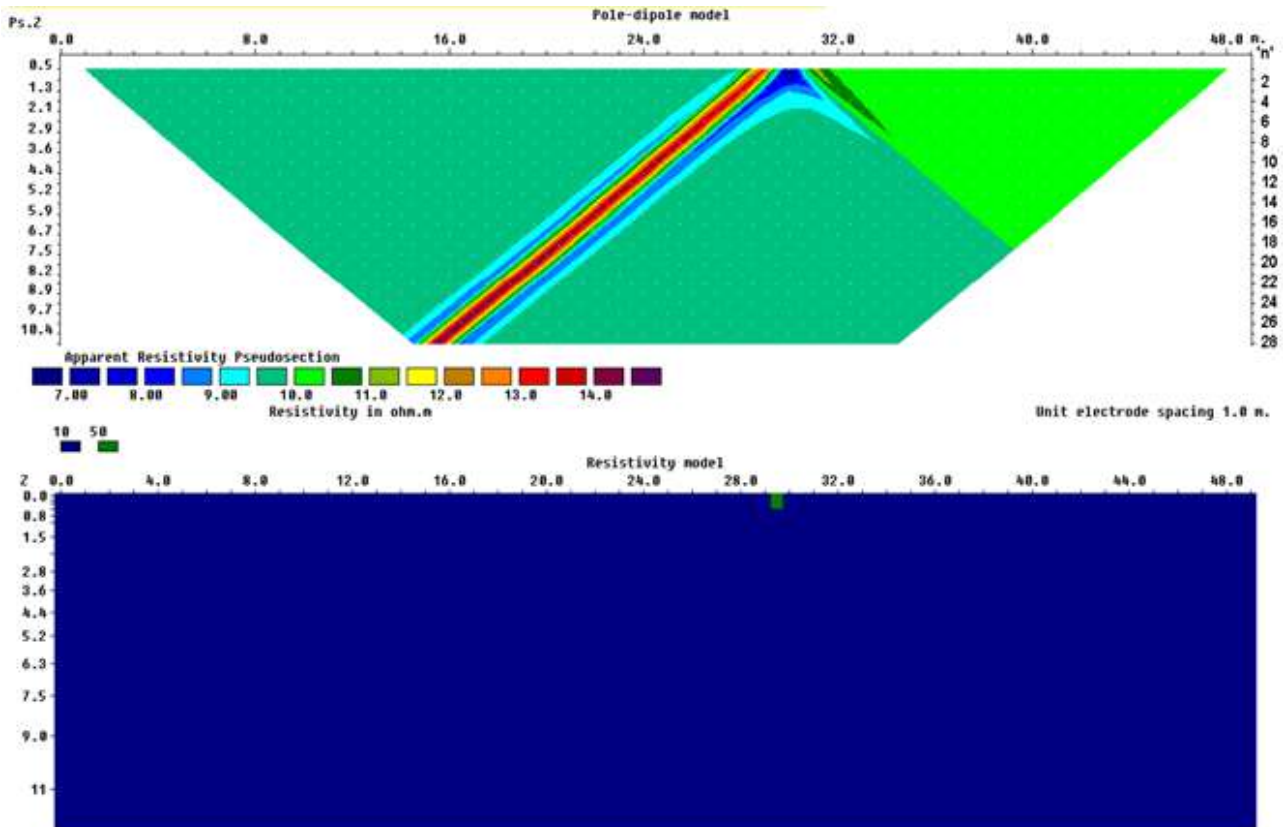
حساسیت این آرایه در مقادیر n بالا، مشاهده می شود محلی در مرکز آرایه که داده برداشت شده به این محل نسبت داده می شود، مقدار تابع حساسیت بسیار پایینی داشته و به عبارتی تاثیر بسیار کمی در مقدار مقاومت ویژه ظاهری یا شارژپذیری قرائت شده داشته که این باعث گمراهی در تحلیل نتایج می شود.



شکل ۳: مقاطع حساسیت آرایه پل-دایپل برای n های ۶، ۱۲ و ۱۸

در شکل زیر به صورت واضح نمایش داده شده است که در شبه مقاطعی که برداشت ها تا مقادیر n بالایی انجام شده است، بی هنجاری مقاومت ویژه ظاهری به خاطر بلوک سطحی کوچک با مقاومت الکتریکی متفاوت از زمینه تا چه حد کل مقطع را تحت تاثیر منفی خود قرار می دهد. در حقیقت در این شبه مقطع n تا عدد ۲۸ برداشت شده است. این شبه مقطع با استفاده از مدلسازی صورت گرفته توسط نرم افزار Res2dmod رسم شده است.

همانگونه که ملاحظه می فرمایید حتی در n های بالا که با هدف نفوذ به اعماق بالا برداشت انجام می شود، اثر کاذب این بی هنجاری قابل رویت است. و در حقیقت این بی هنجاری کاذب در عمل می تواند بی هنجاری های واقعی را مخفی (Mask) کند.

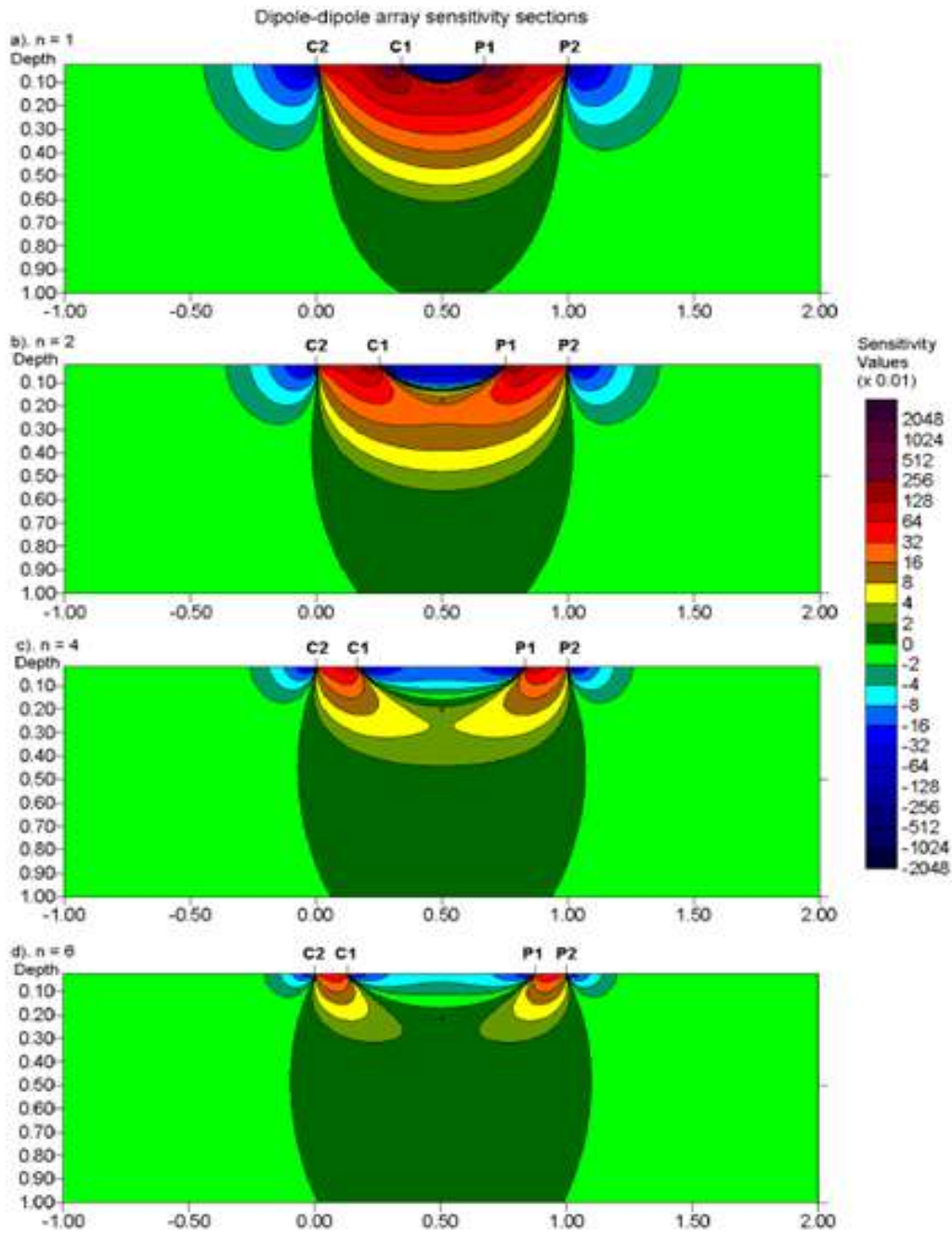


شکل ۴: مثالی از شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده با آرایه پل-دایپل با مقادیر n بالا. ملاحظه می فرمایید که مقدار بی هنجاری با افزایش n بیشتر می شود که علت این امر همان حساسیت به بی هنجاری های سطحی بین جفت الکتروود پتانسیل است.

۲-۲ آرایه دایپل-دایپل

یکی دیگر از رایج ترین آرایه ها برای برداشت دوبعدی آرایه دایپل-دایپل است که آرایه ای متقارن بوده و شدت القای الکترومغناطیس (EM Coupling) کمتری دارد این آرایه هم از مزیت ها و محدودیت های خاص خودش برخوردار است لیکن سوال اصلی این است که برای برداشت با آرایه دایپل-دایپل می توان حداکثر تا چند پرش (n) اقدام نمود؟

برای تحلیل موضوع ابتدا مقاطع حساسیت مربوط به آرایه دایپل-دایپل برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶ نمایش داده میشود.



شکل ۵: مقاطع حساسیت آرایه دایپل-دایپل برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶

با تحلیل این مقاطع استنباط می شود که در این آرایه هم با افزایش n ، نواحی با مقادیر بالای حساسیت، متمایل به نواحی سطحی زیر جفت الکترودهای جریان C2-C1 و پتانسیل P1-P2 می شوند. یعنی به عنوان مثال اگر در محل جفت الکتروود پتانسیل و جریان، نویزهایی نظیر بی هنجاری های سطحی، مقاومت تماسی بالا، توپوگرافی خشن و ... حضور داشته باشد اثر آن به عنوان یک بی هنجاری با شدت بالا در مقطع نمایان می شود. همچنین با بررسی مقاطع حساسیت این آرایه در مقادیر n بالا، مشاهده می شود محلی در مرکز آرایه که داده برداشت شده به این محل نسبت داده می شود، مقدار تابع حساسیت بسیار پایینی داشته و به عبارتی تاثیر بسیار کمی در مقدار مقاومت ویژه ظاهری یا شارژپذیری قرائت شده داشته که این باعث گمراهی در تحلیل نتایج می شود.

حال با تحلیل های صورت گرفته، مشخص می شود که تا چه حد برداشت ها و قرائت های با n بالا داده های کاذب و غیر قابل استناد به مفسر می دهد. از سوی دیگر به علت اینکه این داده ها وارد نرم افزار شده و نرم افزار به صورت یکپارچه اقدام به انجام عمل برگردان (Inversion) روی آن می نماید، حتی داده های صحیح برداشت شده با n های پایین هم در فرایند برگردان دچار اعوجاج شده و مقطع غیر قابل استنادی حاصل می گردد.

بر حسب تجربیات نگارندگان این مقاله تحلیل های بیان شده از اصلی ترین عوامل شکست نتایج حاصل از مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی چه به صورت مقاومت ویژه (RS) و چه (IP/RS) می باشد.

۳ ارائه راهکار برای کمینه کردن خطاهای بیان شده

بر اساس تحلیل فوق، Loke به عنوان پدید آورنده نرم افزار Res2dinv، بیشینه n مجاز برای آرایه دایپل-دایپل را ۶ و برای پل-دایپل را ۸-۶ بیان می کند. هر چند به نظر نگارندگان این مقاله حتی به این مقادیر هم باید با دیده احتیاط نگریست. در حقیقت و در عالم واقع و به خصوص در برداشت های IP/RS عوامل متعددی منشا نویز هستند که به دلیل وجود این نویزها، الزاما به صورت نرم افزاری و با اعمال ابزار ریاضی نظیر عملیات برگردان (Inversion)، نمی توان شبه مقاطع را به واقعیت زمین برگرداند. در حقیقت توپوگرافی های خشن، وجود مقاومت تماسی بالا به خصوص در مناطق خشک ایران و ... همگی عوامل موجود و اجتناب ناپذیری در مطالعات IP/RS هستند که در برداشت ها با n بالاتر، اثر نامطلوب این عوامل بیشتر می شود. این موضوع باعث می شود نتایج مطالعات در برداشت های با تعداد n های بیان شده مذکور هم تحت تاثیر منفی این عوامل قرار گیرد. همچنین به منظور به حداقل رساندن اثر نامطلوب توپوگرافی بر روی نتایج، می بایست حتی المقدور راستای برداشت پروفیل ها به گونه ای انتخاب شود که کمترین میزان توپوگرافی در مسیر برداشت پروفیل وجود داشته باشد.

یکی از مواردی که ممکن است برای مجریان عملیات ژئوالکتریک دوبعدی غیر اتوماتیک مهم باشد این است که ممکن است ایشان با برداشت های n با تعداد بالا، تعداد قرائتی که در روز انجام می دهند را افزایش دهند و نفع اقتصادی بیشتری حاصل کنند یعنی با یک بار تزریق جریان چندین برداشت را انجام دهند که طبیعتا صرفه اقتصادی پروژه ها را بالا می برد. لیکن این موضوع باعث ایجاد نتایج منفی و غیر قابل استناد از مطالعات ژئوالکتریک می شود.

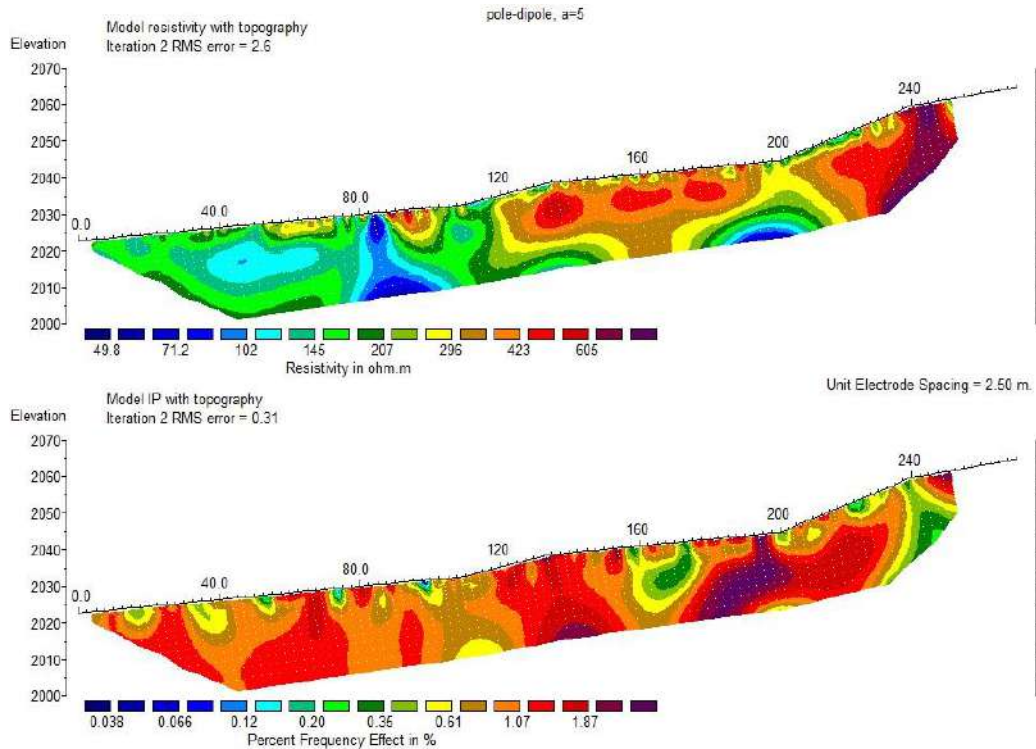
در حقیقت همانگونه که ذکر شد بسیاری از مجریان مطالعات ژئوالکتریک با ظن اینکه می توان با افزایش شدت جریان و به تبع آن افزایش شدت سیگنال، برداشت های تکرار پذیر و صحیح انجام دهند، اقدام به برداشت های با n های بالا (حتی بالاتر از ۱۱۵) می نمایند، لیکن با بیان مطالب فوق مشخص می گردد که نتایج حاصل از این داده ها به هیچ وجه قابل استناد نیستند.

۴ بهینه ترین روش برای برداشت های ژئوالکتریک دو بعدی

با توجه به موارد بیان شده مشاهده می شود که بهترین روش برداشت های ژئوالکتریک در حالتی است که برداشت ها در حالت $n=1$ انجام شده و برای افزایش عمق کاوش، فاصله الکترودی (a) به تدریج افزایش یابد. در حقیقت مطلوبترین حالت مقطع حساسیت، بیشترین مقدار سیگنال به نویز، کمترین تاثیر نویزها و بی هنجاری های سطحی در حالت $n=1$ رخ می دهد.

در صورتیکه از تجهیزات ژئوالکتریک چندالکتروود (Multielectrode) با برداشت اتوماتیک استفاده شود، برداشت به این روش بسیار راحت بوده و می توان این کار را به آسانی انجام داد. در حالتی که برای برداشت های دو بعدی از تجهیزات غیر اتوماتیک استفاده شود، برای جابجایی محل الکترودها می توان از سوئیچ باکس استفاده نمود. استفاده از سوئیچ باکس سرعت عملیات برداشت را افزایش خواهد داد.

ممکن است برداشت های ژئوالکتریک با این روش ($n=1$ و افزایش متناوب فاصله الکترودی)، سرعت عملیات را کاهش داده و از لحاظ اقتصادی برای مجریان صرفه کمتری داشته باشد لیکن نتایج مطالعات ژئوالکتریک انجام شده با این روش قابل استنادتر بوده و تغییر دید منفی بعضی از کارفرمایان نسبت به نتیجه بخش بودن آن را به همراه خواهد داشت. نگارندگان این مقاله برداشت به این روش را با تجهیزات سوئیچ باکس در یکی از پروژه ها به انجام رسانده و اجرایی بودن آن و کیفیت داده ها مورد تایید قرار گرفت (شکل زیر).



شکل ۶: مثال موردی از مقاطع نهایی مقاومت ویژه و قطبش القایی (IP) با اعمال توپوگرافی که با روش پیشنهادی برداشت شده است.

همانگونه که ملاحظه میفرمایید مقدار خطای RMS (که به عنوان مهم ترین معیار ارزیابی صحت مطالعات می باشد)، در مقاطع نمایش داده شده که با $n=1$ برداشت شده اند، پایین بوده که نمایانگر برازش مناسب مدل نرم افزاری با داده های صحرائی و نتیجتاً صحت و دقت داده های برداشتی است.

نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد با نگاه تحلیلی و منطبق بر نتایج به دست آمده از مدل سازی های صورت گرفته و همچنین تحلیل های میدانی نگارندگان، نوعی آسیب شناسی نسبت به دلایل عدم موفقیت بعضی از مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی ارائه گردد. در حقیقت با بیان دلایلی که باعث بروز خطا در برداشت های با مقادیر n بالا می شود، سعی شد برای خواننده دید جامعی از علل ایجاد خطا در مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی حاصل گردد. نهایتاً نتیجه گیری شد که بیشینه مجاز و قابل استناد برای n در آرایه دایپل-دایپل عدد ۶ و برای پل-دایپل عددی بین ۶-۸ می باشد و بیان شد که به خاطر وجود منابع نویز، به این اعداد هم می بایست با دید محتاطانه نگریست و بسا حتی مقدار n را برای مطالعات ژئوالکتریک دوبعدی، کمتر از مقادیر بیان شده در نظر گرفت تا بتوان نتایج مستند و صحیحی حاصل نمود.

نهایتاً روش بهینه ای که بهترین نتایج از آن حاصل می گردد، پیشنهاد شد و تحلیل شد که با ورود تکنولوژی های جدیدتر نظیر تجهیزات اتوماتیک برداشت های ژئوالکتریک و همچنین سوئیچ باکس می توان روش بهینه مذکور را راحت تر اجرایی نمود.

مراجع

- [۱] Loke, M. H. (1996-2023). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- [۲] صمدی لطیف، ۱۳۹۱، مبنای ژئوفیزیک کاربردی، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه خوارزمی.
- [۳] Meju, M.A., 1986, Geophysical data analysis: Understanding inverse problem theory and practice, SEG, P 1-130.
- [۱۰] Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff R. E., 1998, Applied geophysics, second edition, Cambridge university press.
- [۱۱] Milsom, J. & Eriksen, A., 2011, Field geophysics, 4th Edition, Wiley press
- [۵] نوروزی، غلامحسین؛ ژئوفیزیک اکتشافی، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۹۲.

بصری سازی داده های مگنتومتري با پایتون (مورد مطالعاتی: تفکیک واحدهای رسوبی پلايای طرود)

دکتر خلیل رضایی^{۱،۱۵}، مهدی فرمهینی فراهانی^۲

۱ دانشیار رسوب شناسی دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران khalil.rezaei@khu.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی زمین شناسی دانشگاه خوارزمی mahdifarmahini@khu.ac.ir

چکیده فارسی

بصری سازی داده ها به صورت گرافیکی امریست که درک اطلاعات را آسان تر می کند و حقایق را راحت تر نمایان می کند. این روش برای اکثر علوم که نیازمند روش های نوآورانه برای ارائه اطلاعات پیچیده با مقیاس بزرگ هستند مفید می باشد. ظهور گرافیک های کامپیوتری بصری سازی مدرن را شکل داده است. استفاده از زبان های برنامه نویسی برای بصری سازی داده ها بسیار رایج است. با وجود زبان های برنامه نویسی سطح بالا بصری سازی داده ها راحت تر از همیشه شده است. در این مقاله با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون داده های مگنتومتري منطقه به منظور تفکیک واحدهای رسوبی مورد مطالعه قرار می دهیم.

واژه های کلیدی: مگنتومتري، خور و بیابانک، طرود، رسوب شناسی، علوم داده

Visualization of magnetometric data with Python (Case study: Segregation sedimentary units of Torud Playa)

Khalil Rezaei¹, Mahdi Framahini Farahani²

¹Associate Professor, Kharazmi University; khalil.rezaei@khu.ac.ir

²Undergraduate Student, Kharazmi University; mahdifarmahini@khu.ac.ir

ABSTRACT

Visualizing data graphically is something that makes it easier to understand the information and shows the facts more easily. This method is useful for most sciences that require innovative methods to provide large-scale complex information. The emergence of computer graphics has shaped modern visualization. It is very common to use programming languages for data visualization. With the existence of high-level programming languages, data visualization has become easier than ever. In this article, using Python programming language, we study the magnetometric data of the region in order to separate the sedimentary units.

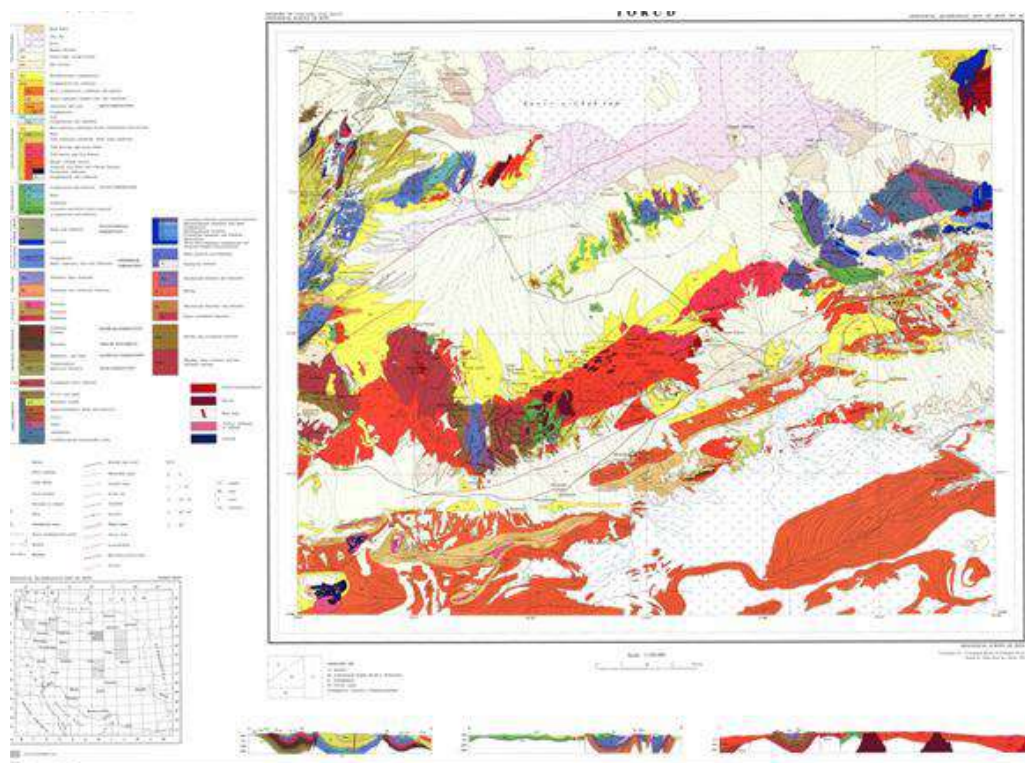
Keywords: Magnetometry, Torud, Sedimentology, Data Science

مقدمه

در جهان امروز اهمیت منابع زیرزمینی بر هیچ کس پوشیده نیست. کشورهایی که سرشار از این گونه منابع هستند و خود اقدام به استخراج این منابع می کنند تبدیل به قطب صنعتی شده اند. اکتشاف این منابع نیازمند روش هایی کارا، دقیق و کم هزینه است که می توان در علم ژئوفیزیک به جستجوی چنین روش هایی پرداخت. ژئوفیزیک، علم مطالعه زمین و ساختارهای متنوع آن با استفاده از روش های مختلف فیزیکی می باشد. تقاضای مداوم و فزاینده انواع فلزات و افزایش خیلی زیاد و مصرف نفت و گاز طبیعی در طول پنجاه سال گذشته باعث توسعه بسیاری از تکنیک های ژئوفیزیکی با دقت های زیاد برای آشکارسازی و نقشه برداری نهشته ها و ساختارهای غیر قابل رؤیت شد. توسعه وسایل الکترونیکی در تجهیزات صحرایی و کاربرد وسیع رایانه ها در تحلیل داده های ژئوفیزیکی به ویژه در دهه اخیر بسیار گسترده بوده است. چون اکثر نهشته های کانی در زیر سطح زمین قرار دارد، آشکارسازی آن ها به ویژگی هایی بستگی دارد که آن ها را از محیط اطراف متمایز می سازد. روش هایی بر مبنای خواص کشسانی سنگ ها توسعه پیدا کرد که توسط آن ها می توان ساختارهای مربوط به نفت و گاز نظیر گسل ها، طاق دیس ها و ناودیس ها را هر چند که در عمق هزاران فوت در زیر زمین قرار داشته باشند تعیین کرد. تغییرات محلی ویژگی های فیزیکی زمین اطلاعاتی را در مورد طبیعت ساختارهای زیرزمینی برای ژئوفیزیکدانان فراهم می آورند که آن ها را در تعیین محل های مناسب برای جستجوی نهشته های کانی یاری می کند. بر حسب اینکه با چه نوع ساختمان زمین شناسی روبه رو هستیم و از چه ویژگی فیزیکی یا هندسی جهت آشکارسازی ساختارهای زیر سطحی استفاده می نماییم، رهیافت ما در مطالعه خواص زمین متفاوت خواهد بود. در نتیجه بر اساس نوع خاصیت فیزیکی مورد مطالعه می توان گرایش های مختلف ژئوفیزیک را به چندین گروه تقسیم بندی نمود که در بین روش های موجود روش گرانی و مغناطیسی هر دو میدان پتانسیلی بوده و دارای میدان های پایسته می باشند و نیز هر دو میدان دارای منشأ درونی هستند. [1]

۲. منطقه مورد مطالعاتی

طرود که در دشت کویر جای دارد، یکی از روستاهای شهرستان شاهرود در استان سمنان است. مختصات جغرافیایی آن مربوط به ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه و ۴۰ ثانیه شمالی و ۵۵ درجه و ۰۰ دقیقه و ۵۵ ثانیه می باشد. در بخش شرقی این کمربند به شکل غالب از واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی و توده های نفوذی و دایک های سنوزوئیک تشکیل شده است و در بخش غربی شاهد واحدهای رسوبی مرتبط با ادوار مختلف زمین شناسی با گسترش قابل توجهی هستیم.



شکل (۱) نقشه زمین‌شناسی منطقه طرود با مقیاس 1/250000

روش‌ها تحقیق

مغناطیس‌سنجی

مطالعه خاصیت مغناطیسی زمین از جمله قدیمی‌ترین شاخه‌های ژئوفیزیک است. علم مغناطیس از مشاهده اینکه برخی سنگ‌ها تکه‌های آهن را جذب می‌کنند سرچشمه گرفت. واژه مغناطیس از ماگنیزیا، منطقه‌ای در آسیای صغیر (اولین محلی که این سنگ در آنجا پیدا شد) گرفته شده است. زمین به‌عنوان یک آهنربای بزرگ است که اثر آن بر عقربه‌های قطب‌نما از زمان‌های قدیم شناخته شده است. آثار میدان مغناطیسی نیز از همان زمانی که آثار مغناطیسی برای اولین بار مشاهده گردید شناخته شده می‌باشد. از سه قرن پیش مشخص شده بود که زمین به‌صورت یک مغناطیس بزرگ و تاندازه‌ای نامنظم رفتار می‌کند. بررسی‌های علمی سر ویلیام (۱۵۴۰) در مورد خاصیت مغناطیسی زمین و نظریه نیوتن در مورد گرانش را می‌توان شروع علم ژئوفیزیک دانست. گیلبرت نشان داد که میدان مغناطیسی زمین هم‌ارز یک مغناطیس ماندگار است که در راستای عموداً شمالی- جنوبی و در نزدیکی محور چرخش زمین قرار گرفته است. [2, 4] بطور مشخص مغناطیس سنگ‌ها ناشی از ترکیب مغناطیس القایی و بازماند موجود در آنهاست. آنومالی‌های مغناطیسی یا در اثر فرآیندهای اولیه (آتش‌فشانی یا رسوبی) و یا در اثر فرآیندهای ثانویه مانند آلتراسیونها ایجاد می‌شوند که هر دوی این‌ها موجب تولید یا از بین رفتن کانی‌های مغناطیسی در محیط می‌شوند. روش اکتشافی مغناطیسی به‌صورت پی‌جویی سیگنال مغناطیسی مرتبط با ماده معدنی و یا سایر سنگ‌های همراه کانه‌زایی است که می‌تواند به‌عنوان یک روش مستقیم برای اکتشاف کانسارهای حاوی مگنتیت مورد استفاده قرار گیرد. [3] قدم ابتدایی در کاربرد ژئوفیزیک به‌منظور جستجوی کانی‌ها احتمالاً در سال ۱۸۴۳ برداشته شد. در

این زمان فن ورده (Von Wrede) خاطرنشان کرد که تئودولیت مغناطیسی که لامن (Lamon) برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین بکار می‌برد، ممکن است برای کشف کانی‌های مغناطیسی نیز بکار رود. با این وجود، این نظر تا انتشار کتاب پروفیسور رابرت تالن (Robert Thalen) در سال ۱۸۷۹ تحت عنوان اکتشاف ذخایر فلزی توسط روش‌های مغناطیسی، کاربردی پیدا نکرد. مغناطیس‌سنج تالن - تیبرگ (Thalen-Tiberg) که در سوئد ساخته شد، بعداً دستگاه تامسون - تالن (Thomson-Thalen) وسیله‌هایی برای تعیین محل، امتداد، شیب و عمق زیرسطحی دایک‌های مغناطیسی بودند.

زبان برنامه‌نویسی پایتون

پایتون که یک زبان برنامه‌نویسی مائولار و سطح بالا است. [6] مائولار بودن آن به ما کمک می‌کند تا بتوانیم از کتابخانه‌های موجود و توسعه داده شده در آن استفاده کنیم. در این پژوهش تلاش بر آن شده است تا با بهره‌گیری از بسته‌های NumPy, SciPy و Matplotlib فرایندهای محاسبات علمی و بصری سازی داده‌های مگنتومتر صحت بگیرد. زبان‌های سطح بالا مجهز به قابلیت تجدید یا انتزاع هستند. این زبان‌ها کاملاً خوانا هستند و مشابه زبان‌های انسانی است. متغیرها، اشیاء، روال‌ها و حلقه‌ها همگی اجزای مهمی هستند که زبان‌های سطح بالا را تشکیل می‌دهند. زبان اسمبلی تقریباً یک تناظر یک به یکی بین دستورهای خود و دستورهای کد ماشین دارد. به همین علت می‌توان ده‌ها دستور را با یک دستور فراخوانی کرد و همین سبب می‌شود که عملکرد کندتری داشته باشند.

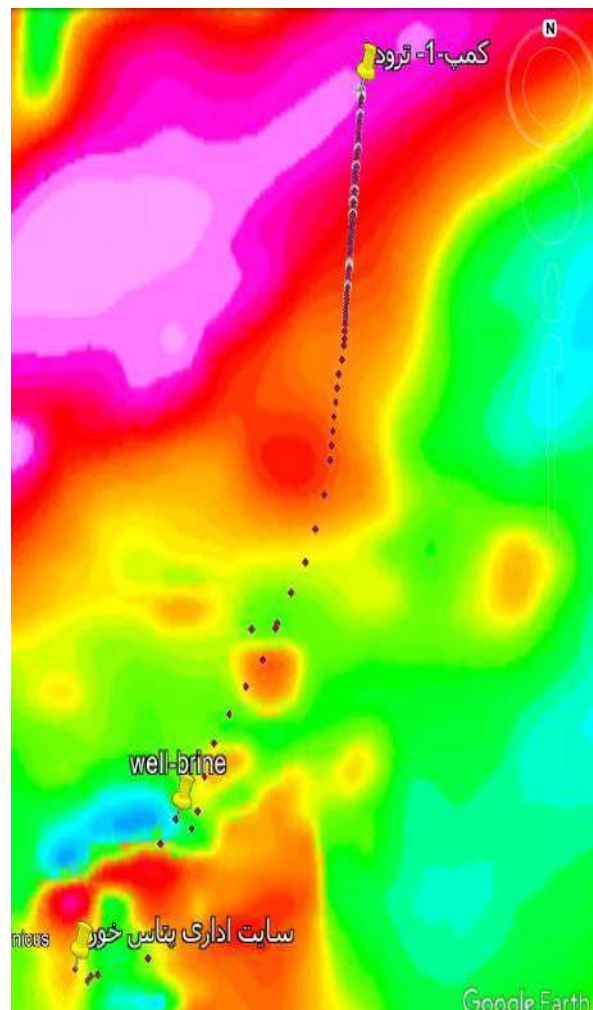
بصری‌سازی داده‌ها

انسان‌ها از دیرباز با بصری‌سازی پیام‌ها یا اطلاعات آنچه را که در دسترس نبود را برای عامه مردم قابل فهم می‌کردند. [7] بصری‌سازی داده‌ها به صورت گرافیکی امری مهم در علوم کامپیوتر است که درک اطلاعات را آسان‌تر می‌کند و حقایق را راحت‌تر نمایان می‌کند. این روش برای اکثر علوم که نیازمند روش‌های نوآورانه برای ارائه اطلاعات پیچیده با مقیاس بزرگ هستند مفید می‌باشد. ظهور گرافیک‌های کامپیوتری بصری‌سازی مدرن را شکل داده است. استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی برای بصری‌سازی داده‌ها بسیار رایج است. سازمان‌ها هر روز داده‌های مختلفی تولید می‌کنند و همین امر سبب شده که حجم داده‌های موجود در بستر وب افزایش پیدا کند و به همین علت بسیاری از افراد فعال در حوزه علوم داده کاوش و استفاده از این داده‌ها دشوار گردد. توانایی بصری‌سازی داده‌ها بای تحقیقات علمی بسیار مهم است. امروزه می‌توان از رایانه‌ها به منظور پردازش داده‌ها گوناگون با حجم زیاد استفاده کرد. بصری‌سازی داده‌ها، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا تجزیه و تحلیل‌ها را به صورت بصری ببینند و درک داده‌ها برایشان آسان می‌شود. این سبب می‌شود تا بتوانند الگوها را کشف کنند اطلاعات را درک کنند و نظر خود را شکل دهند. [8] در زبان برنامه‌نویسی پایتون نیز بسته‌های متعددی من جمله Seaborn و Matplotlib به منظور انجام کارهای بصری‌سازی داده توسعه داده شده‌اند.

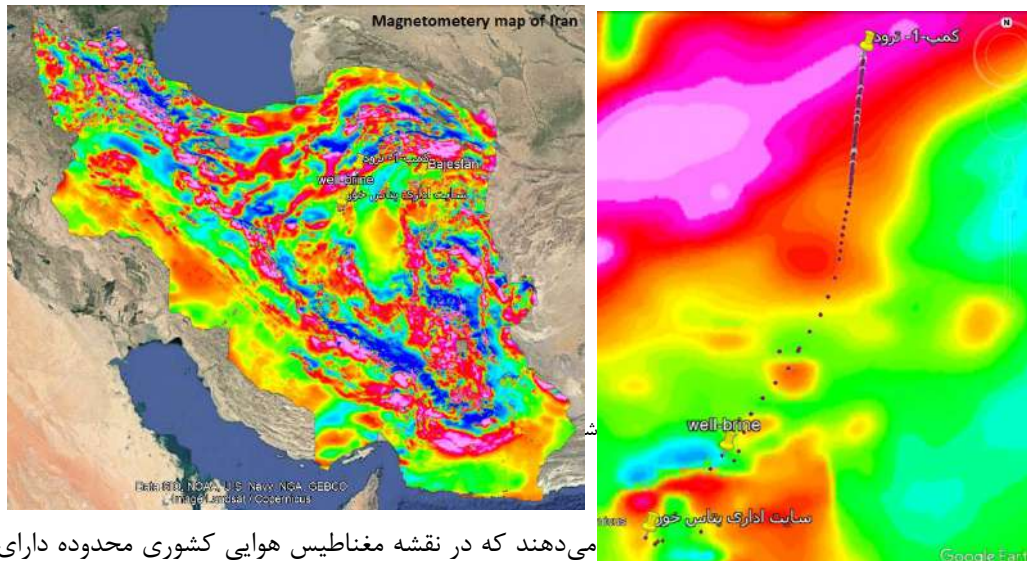
طراحی برداشت‌ها در محدوده

طراحی شبکه نقاط برداشت منطقه اکتشافی ژئوفیزیک معمولاً پس از بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی و توپوگرافی انجام می‌گیرد. اهمیت طراحی شبکه برداشت در این است که با طراحی و برداشت دقیق می‌توان باعث افزایش صحت مراحل بعدی، یعنی پردازش و تحلیل و تفسیر شد. البته لازم به ذکر است که علاوه بر مسائل فنی، مدیریت زمان و هزینه را نیز باید مورد توجه قرارداد. همچنین در طراحی شبکه باید ابتدا هدف از برداشت را تعیین کرد چراکه طراحی باید متناسب با میزان دقت و جزییات مورد نیاز از داده‌ها انجام شود. در طراحی شبکه برداشت باید پارامترهایی از جمله فواصل ایستگاه‌های برداشت،

فاصله خطوط برداشت، امتداد خطوط برداشت، ارتفاع اندازه‌گیری، نوع دستگاه و غیره مشخص شوند. بر اساس تحلیل نقشه‌های مغناطیس هوابرد، آنومالی مغناطیسی با شدت زیاد در ابتدای این محدوده یعنی کمپ ۱- ترود شده در تروید شناسایی شده است (شکل ۲ و ۳). انجام مطالعات مغناطیس‌سنجی زمینی به دلیل وضوح بالاتر نسبت به داده‌های هوابرد می‌تواند بسیاری از آنومالی‌های احتمالی ناشناخته در منطقه را شناسایی و آشکار نماید. بر همین اساس با توجه به نکات مهم ذکر شده در بخش اصول طراحی شبکه برداشت مغناطیس‌سنجی، یک مسیر بسیار طویل در این محدوده طراحی گردیده است تا تمامی تنوع لیتولوژیهای سطحی را در بر بگیرد و شاید بتواند تفکیکی بین این واحدها انجام دهد (شکل ۴ و ۵). در این مرحله تعداد کل ایستگاه‌ها در این محدوده ۳۴۷ نقطه بود. این برداشتها در یک مسیر طولانی ۱۵۰ کیلومتری بصورت هر ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و نیز در ۸ زون جداگانه بصورت متراکم و در فواصل نزدیک بهم و با مد نظر قراردادن تغییرات لیتولوژی سطح زمین در طول یک تا ۳ پروفیل انجام شد. با انجام اندازه‌گیری‌های شدت کل میدان مغناطیسی در عملیات اکتشافی، تغییرات شدت کل میدان هر ناحیه مشخص شده و بر اساس بررسی داده‌ها، نقشه‌های مختلفی تهیه و پارامترهای متفاوتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل (۲) محدوده موردنظر جهت برداشت نقاط مگنتومتري در محدوده تروید



شکل ۱: نقشه مغناطیسی هوایی محدوده دارای مقادیر بالای شدت میدان مغناطیسی در محدوده کمپ طرود بوده و به سمت جنوب و کارخانه پتاس خور این مقادیر کاهش می-یابند.

یافته‌ها

به منظور بصری‌سازی داده‌های برداشت شده کد زیر را در محیط Jupyter Lab وارد می‌کنیم:

```
import pandas as pd

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.interpolate import griddata

file_path = r'E:/Magnetometry/mag1+2.xlsx'

data = pd.read_excel(file_path)

x = data['x']

y = data['y']

mag = data['n']

grid_x, grid_y = np.meshgrid(np.linspace(min(x), max(x), 100), np.linspace(min(y), max(y), 100))

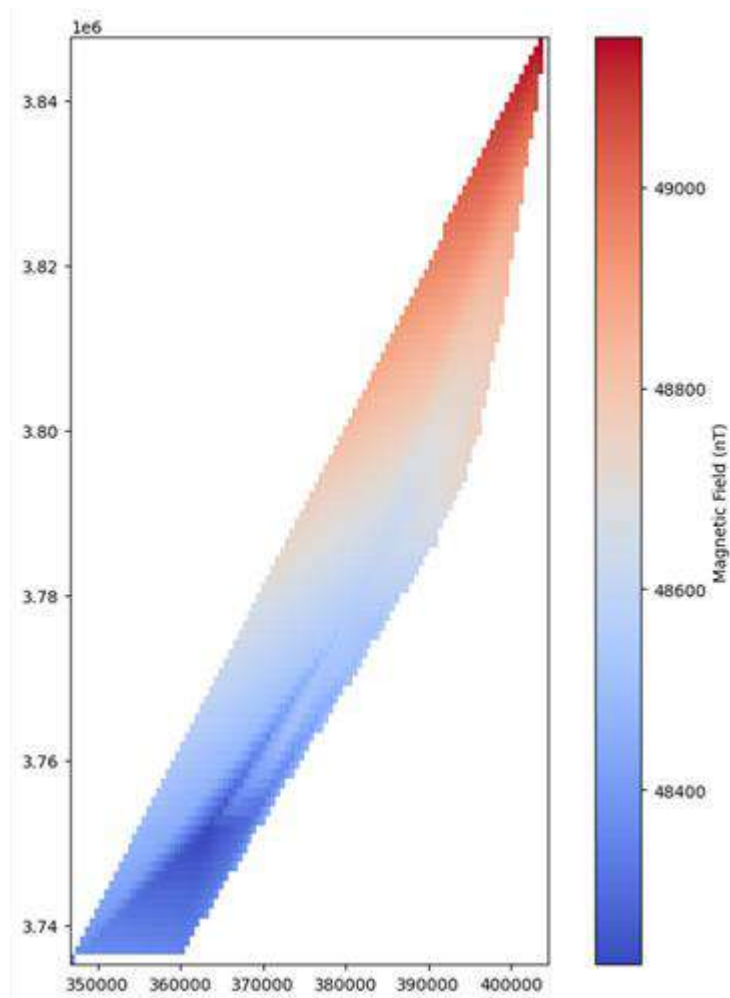
grid_mag = griddata((x, y), mag, (grid_x, grid_y), method='linear')

plt.figure(figsize=(10, 10))

plt.imshow(grid_mag, extent=(min(x), max(x), min(y), max(y)), origin='lower', cmap='coolwarm')

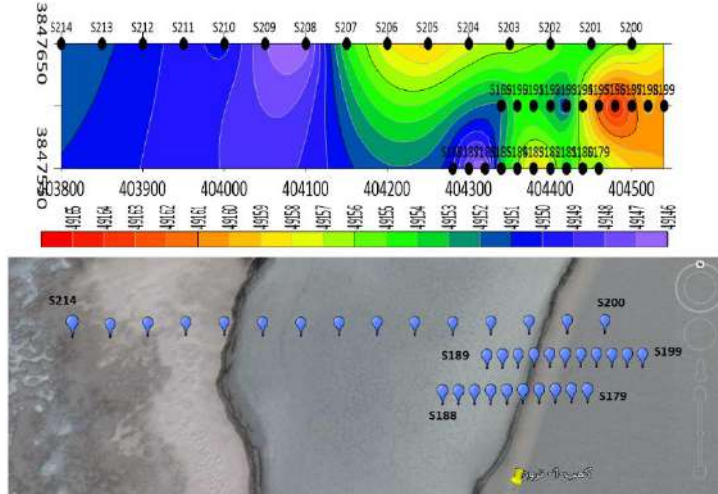
plt.colorbar(label='Magnetic Field (nT)')
```

ماژول‌های مورد نیاز را فراخوانی می‌کنیم. با کمک دستورهایی فوق فایل اکسل داده‌های برداشت شده منطقه مورد مطالعه را به سیستم معرفی می‌کنیم. سه متغیر X, Y و mag را تعریف می‌کنیم و برای هر یک از آن‌ها اعداد موجود در ستون‌های اکسل را تعریف می‌کنیم. ابتدا داده‌های مربوط به ستون‌های X و Y را با کمک دستور meshgrid() در یک صفحه تعریف می‌کنیم و سپس فواصل خالی آن‌ها را با کمک ابزار درون‌یابی پر می‌کنیم و سپس داده‌های مرتبط با مگنتومتری را مجدداً به سیستم تعریف کرده و برای آن‌ها نیز درون‌یابی می‌کنیم. سپس با استفاده از اسگریپت فوق تصویر حاصل را نمایش می‌دهیم. شکل ۴ تصویر نمای کلی از داده‌های برداشت شده است. [5]



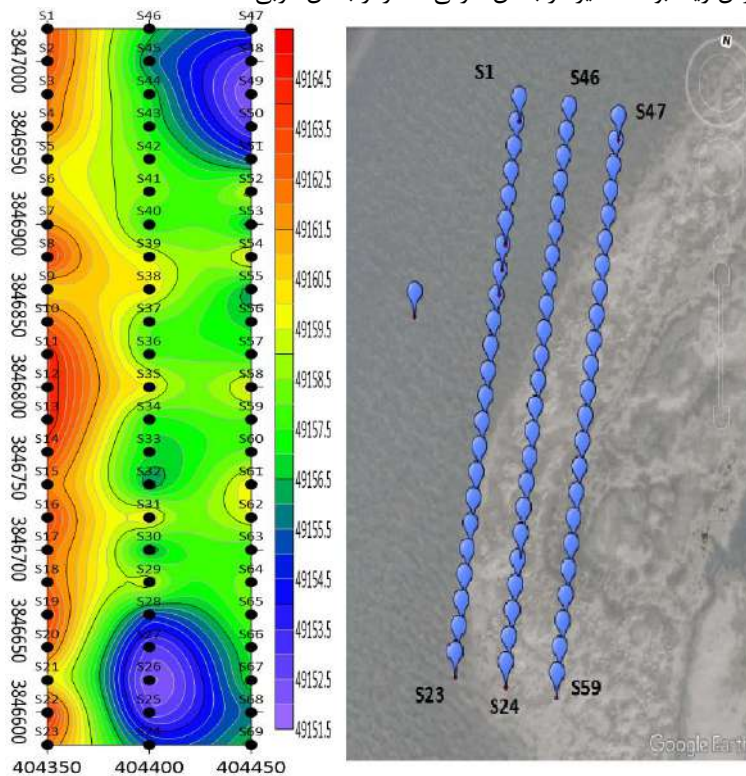
شکل (۴) تصویر بصری‌سازی شده داده‌های مگنتومتری با کمک پایتون

شکل شماره ۵ نشان می دهد که در محل کمپ بخش شرقی و دارای رس سطحی مقادیر بالاتری را نسبت به بخش غربی و پوشیده از نمک دارا می باشد.



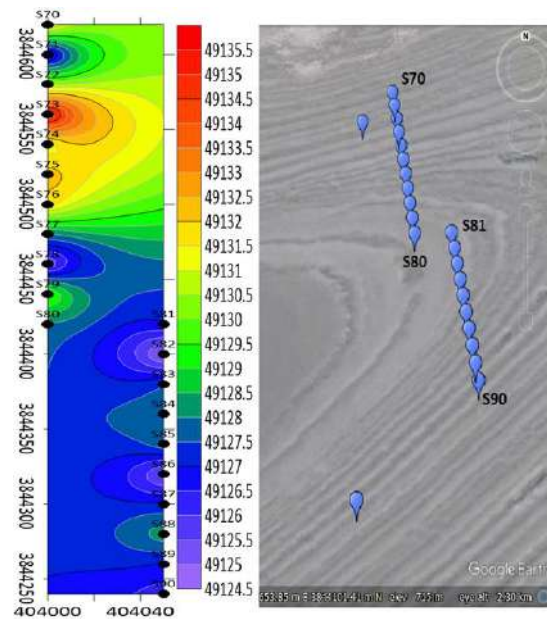
شکل (۵) نقشه تغییرات مقادیر شدت میدان مغناطیسی برداشت شده در محدوده کمپ طرود

در زون اول (شکل شماره ۶) یعنی در فاصله حدود ۵۰۰ متری از کمپ، ۴۷ نقطه در طول سه پروفیل برداشت شد. بخش شرقی پوشیده از نمک و در غرب رس زیاد بود. مقادیر در بخش شرقی کمتر از بخش غربی هستند



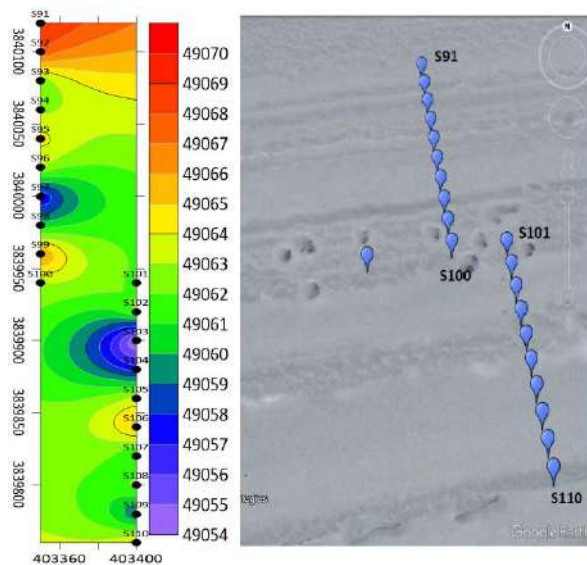
شکل (۶) نقشه تغییرات مقادیر برداشت شده شدت میدان مغناطیسی در محدوده زون اول

در منطقه یا زون شماره دو (شکل ۷) یک سری لایه‌های متناوب و چین خورده نمک و رس وجود دارند که حالت شبه جریان‌ی نشان می‌دهند. در این زون اگرچه از شمال به جنوب مقادیر شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابند اما تغییرات نقطه ای بوده و تنها ۱۰ نانوتسلا نوسان دارند.



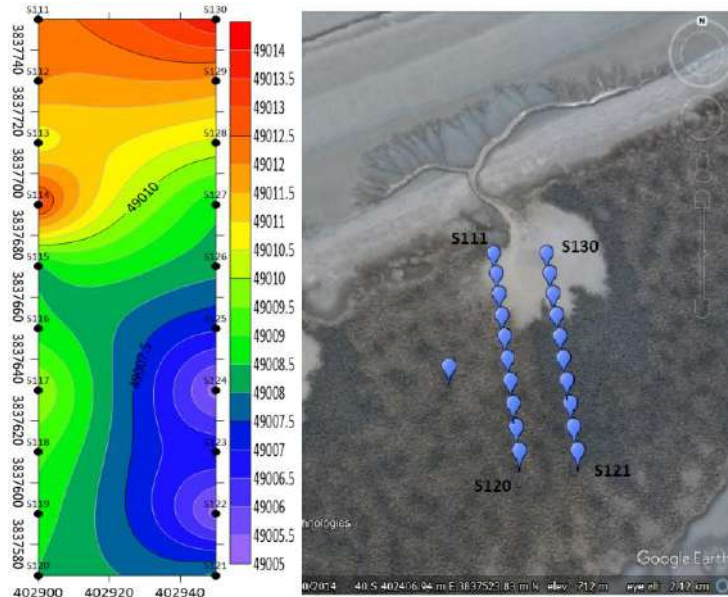
شکل (۷) نقشه تغییرات مقادیر برداشت‌شده شدت میدان مغناطیسی در محدوده زون دوم

در زون سوم (شکل ۸) نیز همین حالت وجود دارد و بجز یک تغییر جزئی نمی‌توان یک الگوی مشخص را تعیین نمود. در میانه این زون سینک هول‌های متعددی دیده می‌شود و همچنین وجود گسل در این محدوده دور از انتظار نیست.



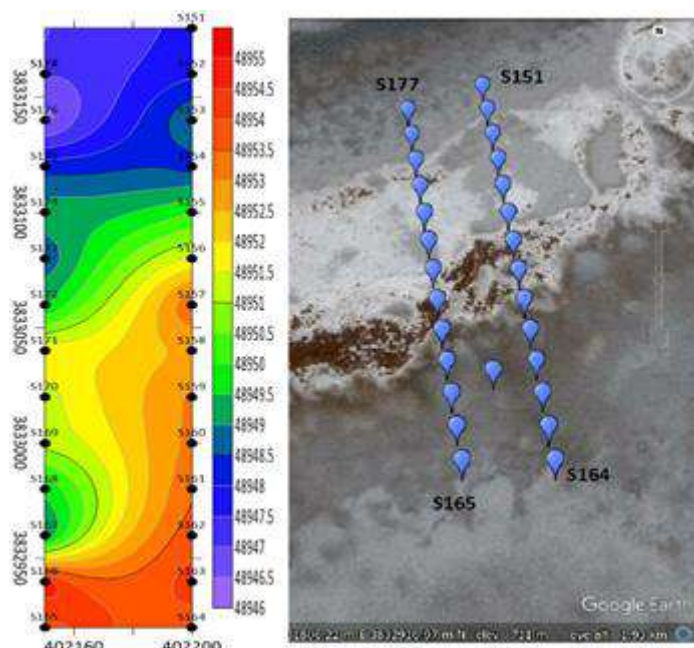
شکل (۸) نقشه تغییرات مقادیر برداشت‌شده شدت میدان مغناطیسی در محدوده زون سوم

در زون شماره ۴ (شکل ۹) مجدداً به خوبی می‌توان تفکیک دو زون رسی و نمکی را مشاهده نمود. بخش شمالی دارای رس بیشتر و مقادیر بالاتر شدت میدان مغناطیسی بوده در مقایسه با نمک‌های بخش جنوبی می‌باشد.



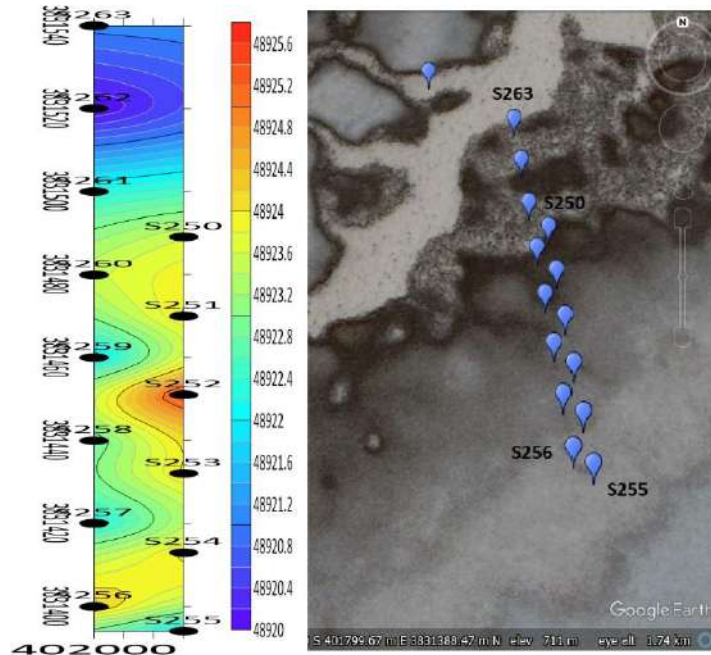
شکل (۹) نقشه تغییرات مقادیر برداشت‌شده شدت میدان مغناطیسی در محدوده زون چهارم

در شکل شماره ۱۰ یعنی زون پنجم نیز سه محدوده مشخص نمکی در وسط و رسی در شمال و جنوب دیده می‌شوند. بخش رسی مقادیر نسبتاً بالاتری را از نظر شدت میدان مغناطیسی دارا هستند



شکل (۱۰) نقشه تغییرات مقادیر شدت میدان مغناطیسی برداشت شده در محدوده زون پنجم

در زون ششم (شکل ۱۱) نیز بخش شمالی حاوی نمک بیشتری نسبت به جنوب است و مقادیر پایین تری را هم نشان می دهد.

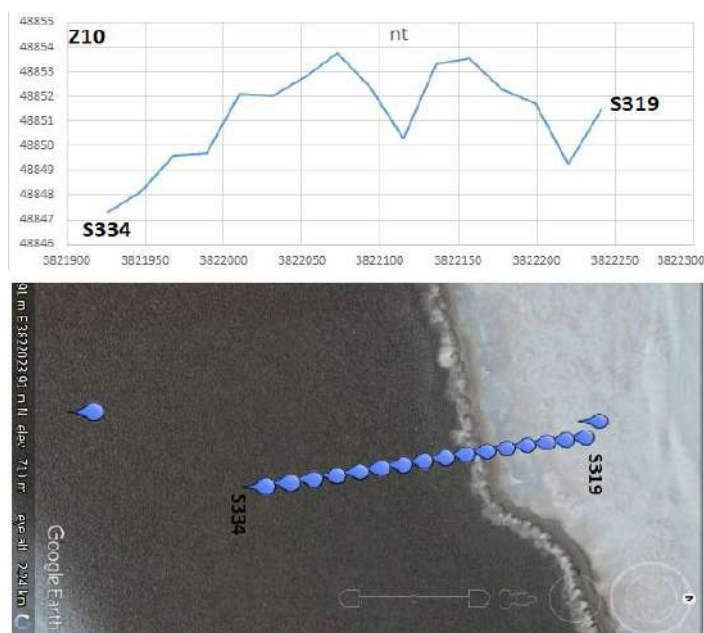


شکل (۱۱) نقشه تغییرات مقادیر برداشت شده شدت میدان مغناطیسی در محدوده زون ششم

در دو زون هفتم و هشتم بدلیل اینکه تنها در یک خط نقاط برداشت شده بودند و امکان ترسیم نقشه وجود نداشت لذا با دو نمودار تغییرات مقادیر نمایش داده شده اند. (شکل های ۱۲ و ۱۳). بصورت تقریبی در این دو زون افت مقادیر شدت میدان مغناطیسی با برخورد به نمک ها در مقایسه با رس ها قابل استنباط است. در محل مرز این واحدها هم تغییرات شدیدی اتفاق می افتد.



شکل (۱۲) نقشه تغییرات مقادیر شدت میدان مغناطیسی برداشت شده در محدوده زون هفتم



شکل (۱۳) نقشه تغییرات مقادیر شدت میدان مغناطیسی برداشت شده در محدوده زون هشتم

نتیجه گیری کلی

بعنوان نتیجه گیری می توان بیان نمود که پایتون عملکرد خوبی در بصری سازی و درون یابی داده های مکانی دارد. همچنین روش مگنتومتری قابلیت تفکیک تقریبی واحدهای مختلف رسوبی نمکی و رسی را دارا می باشد و می تواند برای مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد. احتمالاً دلیل این امر وجود کانی های دارای عناصر فرومنیتیت نظیر آهن، منیزیم و ... در کانی های رسی در مقایسه با کانی های تبخیری و نمکی می باشد. احتمال دیگری که می توان مدنظر قرار داد این است که در زیر واحدهای تبخیری و رسوبی سنگ بستری با شدت میدان مغناطیسی بالایی وجود دارد که این امر بر انجام مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری های اکتشافی عمیق تاکید می کند.

مراجع

۱. راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش های مغناطیس سنجی، گرانی سنجی و لرزه نگاری در اکتشافات معدنی، نشریه شماره ۵۹۴ (۱۳۹۱)، معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی.
2. Beiki M., 2010. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. *Geophysics*, 75, 6, I59-I74.
3. Campbell, W. C., 1997, Introduction to geomagnetic fields: Cambridge University Press.
4. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1976). Keys, DA, 1976 Applied Geophysics.
5. Farmahini Farahani, M. (2023). aradfarahani/Magnetometry: Magnetometry (v0.1.0alpha). Zenodo.
6. Petrelli, M. (2021). Introduction to Python in Earth Science Data Analysis: From Descriptive Statistics to Machine Learning. Springer Nature.
7. J. L. V. Sancho, J. C. Dominguez, and B. E. M. Ochoa, "An approach to the taxonomy of data visualization," *Revista Latina de Comunicacion Social*, vol. 69, 2014, pp. 486-507
۸. Sadiku, M., Shadare, A. E., Musa, S. M., Akujuobi, C. M., & Perry, R. (2016). Data visualization. *International Journal of Engineering Research And Advanced Technology (IJERAT)*, 2(12), 11-16.

تحلیل داده های میکرو گرانی سنجی کانسار سرب و روی محدوده پاییز دامغان

حمید آقاجانی^۱، معین شریفی^۲، سارا مومنی پور^۳

^۱دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ haghajani@shahroodut.ac.ir

^۲دانشجوی دکتری، دانشکده صنعتی شاهرود؛ moien.sharifi1@gmail.com

^۳کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه تهران؛ momenipour.sara@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: دکتر حمید آقاجانی

چکیده فارسی

بکارگیری روش های غیرمخرب ژئوفیزیکی در مراحل اولیه اکتشافی بدون ایجاد آلودگیهای زیست محیطی مهم و در اکتشاف ذخایر فلزی مرسوم و از اهمیت خاصی برخوردار است. مبنای روش گرانی سنجی، اختلاف وزن مخصوص مواد معدنی و سنگ های اطراف است که سبب می شود شتاب جاذبه در سطح زمین و در بالای ماده مزبور از شتاب عادی جاذبه بیشتر و یا کمتر گردد (بسته به اینکه وزن مخصوص ماده معدنی از سنگ های اطراف بیشتر یا کمتر باشد). در این حالت گفته می شود که ناحیه مزبور، دارای آنومالی مثبت یا منفی است. این تحقیق به منظور تعیین مناطق امیدبخش معدنی سرب و روی در محدوده پاییز دامغان انجام شده است. هدف از آن برنامه ریزی برای استخراج و تهیه یک طرح بهره برداری علمی و سیستماتیک برای استخراج ماده معدنی در محدوده بوده تا توده های آنومالی در این محدوده مشخص شود.

واژه های کلیدی: سرب و روی، سرب و روی پاییز، گرانی سنجی، میکرو گرانی سنجی

Microgravimetric analyzes of lead and zinc deposits in Damghan's autumn range.

Hamid Aghajani¹, Moein Sharifi², Sara Momenipour³

¹ Associate Professor of the Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics; Shahrood University of Technology; haghajani@shahroodut.ac.ir

² PhD student, Shahrood University of Technology, moien.sharifi1@gmail.com

³ MSc in Economic Geology, University of Tehran, momenipour.sara@ut.ac.ir

* Corresponding author: Dr. Hamid Aghajani

ABSTRACT

The use of non-destructive geophysical methods in the early stages of exploration without causing significant environmental pollution is customary and of particular importance in the exploration of metal deposits. The basis of the gravimetric method is the difference in the specific gravity of the mineral material and the surrounding rocks, which causes the acceleration of gravity on the surface of the earth and above the mentioned material to be greater or less than the normal acceleration of gravity (depending on whether the specific gravity of the mineral material is the surrounding stones are more or less). In this case, it is said that the mentioned area has a positive or negative anomaly. This research was carried out in order to determine promising lead and zinc mining areas in the Damghan Valley. Its purpose is to plan for extraction and to prepare a scientific and systematic exploitation plan for the extraction of mineral matter in the area in order to determine possible anomalous masses in this area.

Keywords: Lead and zinc, lead and zinc fall, hydrometry, microgravimetry

مقدمه

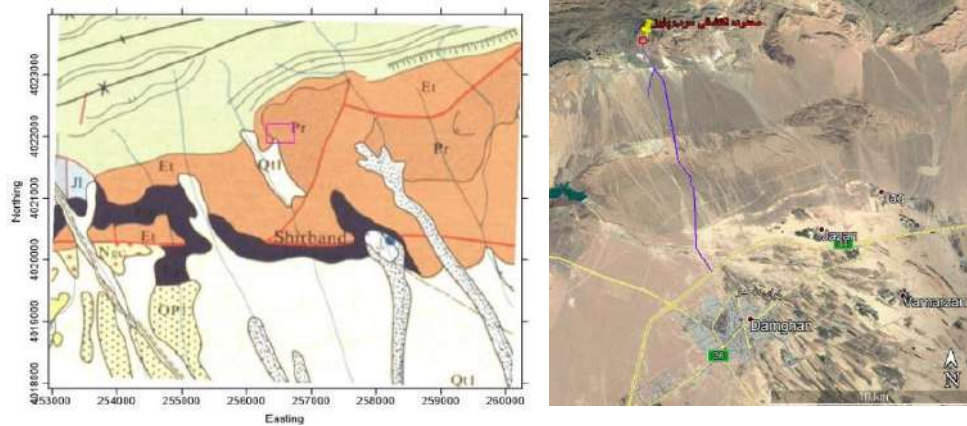
عمده معادن و ذخایر سطحی مواد معدنی در کشور یا از قبل توسط گذشتگان استفاده شده و یا در حال حاضر در حال بهره‌برداری هستند. لذا لزوم شناخت مواد معدنی در اعماق بیشتر مورد توجه پژوهشگران و معدنکاران هست. پس باید از روشهایی استفاده کرد که بتوان این گونه ذخایر را که بعضاً در سطح زمین علامت یا نشانه‌ای ندارند، شناسایی و کشف نمود. به این منظور از روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده در اکتشاف مواد معدنی استفاده می‌شود. در این روش‌ها نسبت به روشهای مستقیم مثل حفاری که هزینه زیادی را به‌همراه دارد، با هزینه و زمان کم نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد در عین حال دوستدار محیط زیست بوده، مخرب نبوده یا تخریب کمی به همراه خواهد داشت (Selly et al., 2005). روش میکرو گرانی سنجی یک روش کارآمد به جهت اکتشاف کانه‌های با مقدار وزن مخصوص بالا می‌باشد. برداشت‌های گرانی‌سنجی شامل اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانی زمین می‌باشد. هدف استفاده از این روش، تعیین توده‌های با چگالی کمتر و یا بیشتر نسبت به محیط اطراف می‌باشد. اصل تفسیر نتایج گرانی، تعیین چگالی سنگ‌ها و در نتیجه ساختارهای زمین‌شناسی و جنس سنگ‌ها است. معمولاً روش گرانی‌سنجی در اکتشاف مواد معدنی به عنوان یک روش ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته این روش در اکتشافات ترکیبی فلزات پایه، برای تعیین دقیق امتداد آنومالی‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی کاربرد دارد. معمولاً در تقسیم‌بندی کلی ژئوفیزیک، روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به عنوان روش‌های پتانسیل شناخته می‌شوند.

با اندازه‌گیری شتاب جاذبه، می‌توان تا حدودی به جنس مواد موجود در زیر ایستگاه اندازه‌گیری پی برد. هدف پیمایش‌های گرانی-سنجی (گراویمتری) بررسی ساختارهای زمین‌شناسی زیرزمینی است که بر اساس آنومالی‌های (بی‌هنجاری‌های) موجود در میدان گرانشی زمین (میدان جاذبه زمین) در اثر تغییر چگالی سنگ‌های زیرین سطح زمین ایجاد می‌گردد. معمولاً سنگ‌هایی که نسبت به سنگ‌های اطراف خود چگالی بیشتری دارند (وزن مخصوص)، میدان گرانشی زمین روی آن‌ها بیشتر است؛ در مقابل سنگ‌هایی که چگالی کمتری دارند، کمبود نیروی گرانی زمین روی آن‌ها قابل تشخیص است و مثبت می‌شود.

به منظور اکتشاف کانسار سرب و روی پاییز دامغان در محدوده اکتشافی براساس اطلاعات زمین‌شناسی، شبکه برداشت داده در ۱۰ پروفیل با راستای شمال غربی-جنوب شرقی با فواصل متفاوت و با تعداد نقاط مشخص روی هر پروفیل با فاصله ۵ متر طراحی شد به طوری که محدوده مورد نظر را پوشش دهد.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده اکتشافی

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی دامغان با مختصات عرض جغرافیایی ۳۶.۳۱۲ تا ۳۶.۳۱۴ شمالی و طول جغرافیایی ۵۴.۲۸ تا ۵۴.۲۹ شرقی در زون ۴۰ شمالی سیستم تصویری UTM واقع شده است. در شکل (۱-۲) محدوده اکتشافی با رنگ قرمز در ایندکس نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران دیده می‌شود. براساس اطلاعات موجود در سازمان صنعت، معدن و تجارت استان سمنان، به طور کلی معادن سرب و روی این ناحیه، در شمال تا شمال غرب دامغان (دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز) جای دارند. دسترسی به معادن و کانسارهای این ناحیه با استفاده از جاده دامغان-کلاته، جاده دامغان-چشمه علی-چهارده و جاده دامغان-تویه دروار امکان‌پذیر است. این ناحیه دارای هوای به نسبت معتدل و خشک است.



شکل (۱): نقشه راه های دسترسی به محدوده (راست) و نقشه زمین شناسی محدوده (چپ) بر اساس نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ دامغان

بر اساس اطلاعات زمین شناسی برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ دامغان در محدوده مورد نظر تنها واحد زمین شناسی سازند آهکی مربوط به دوره پرمین، سازند دورود با سن پرمین زیرین، با دگر شیبی بر روی سازند جیروود جای می گیرد. به همراه سنگهای پرمین، به گونه ای محلی، سنگ های آتش فشانی و آذرآواری آندزیتی نیز یافت می شود. محیط رسوبگذاری بدون تغییر خاصی ثابت مانده و شرایط تشکیل دولومیت ضخیم لایه و آهک ورمیکوله (سازند الیکا)، تا اواخر تریاس فراهم بوده است.

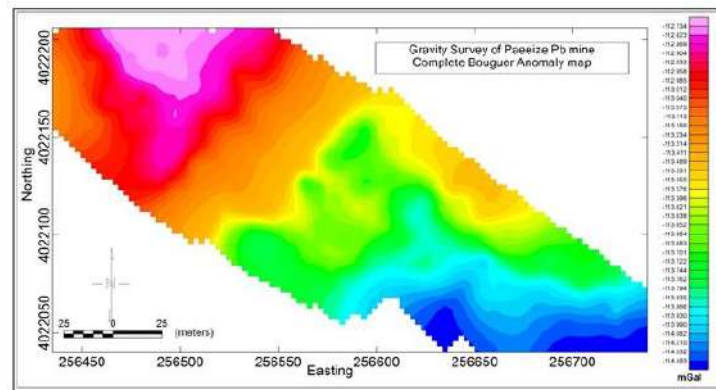
۳- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از روش گرانی سنجی تلاش بر اکتشاف ماده معدنی سرب شده است که در روش گرانی سنجی با استفاده از اختلاف وزن مخصوص و مقدار گرانش امتداد و عمق ماده معدنی قابل شناسایی می باشد، در این روش ژئوفیزیکی، مراحل طراحی شبکه، برداشت، پیش پردازش و پردازش داده ها انجام شده است سپس برای بررسی کمی، مدلسازی روی داده ها صورت گرفته است. براساس اطلاعات زمین شناسی، شبکه برداشت داده در ۱۰ پروفیل با راستای شمال غربی-جنوب شرقی با فواصل متفاوت و با تعداد نقاط مشخص روی هر پروفیل با فاصله ۵ متر طراحی شد به طوری که محدوده مورد نظر را پوشش دهد، پس از طراحی شبکه برداشت، به منظور اجرای بهینه و مناسب عملیات گرانی سنجی ابتدا تیم اکتشافی با یک دستگاه GPS سه فرکانسه ایستگاه های مورد نظر را روی زمین پیاده و با اسپری و سنگ چینی ایستگاه مشخص و برداشت گرانی و موقعیت کلیه ایستگاه های مورد نظر را روی زمین تعیین شد، برای شروع عملیات برداشت گرانی، ابتدا دستگاه گرانی سنج طی دو مرحله کالیبراسیون استاتیکی و دینامیکی تنظیم گردید. قرائت روزانه ایستگاه ها به وسیله دستگاه گرانی سنج CG5 انجام شد.

۴- اعمال تصحیحات و ترسیم نقشه آنومالی گرانی بوگه

با عنایت به این موضوع که در داده های اندازه گیری شده در شبکه های برداشت به علت تغییر شتاب گرانی متناسب با تغییرات عرض جغرافیایی، مقادیر اندازه گیری با هم یکسان نبوده و علت اختلاف در عرض جغرافیایی، ناشی از شتاب جاذبه زمین است که از دو مؤلفه جرم زمین و مؤلفه دیگر یعنی شتاب حاصل از نیروی گریز از مرکز زمین است. با توجه به اینکه منطقه برداشت در یک شبکه بوده است، تصحیح عرض جغرافیایی برای داده ها اعمال شد و سپس با توجه به اینکه عامل فاصله بین دو جرم در قانون نیوتن از عوامل تاثیرگذار در مقدار شتاب وارده است لذا براساس تغییر فاصله ایستگاه اندازه گیری نسبت به سطح مبنای ژئوئید یا سطح آبهای آزاد مقدار گرانی ثبت شده متفاوت است. به این منظور همه نقاط اندازه گیری بر مبنای سطح ارتفاعی مشخص سنجیده و قیاس می شوند. برای اینکار لازم است که مقدار گرانی اندازه گیری شده در فاصله ارتفاعی بالاتر یا پایین تر از سطح ژئوئید براساس رابطه مشخص به دست آید. لذا مقادیر تصحیح

ارتفاعی (مجموع تصحیح هوای آزاد و تخته بوگه) کلیه نقاط برداشتی محاسبه شد. سپس آنومالی گرانی بوگه ساده برای همه نقاط محاسبه شد.

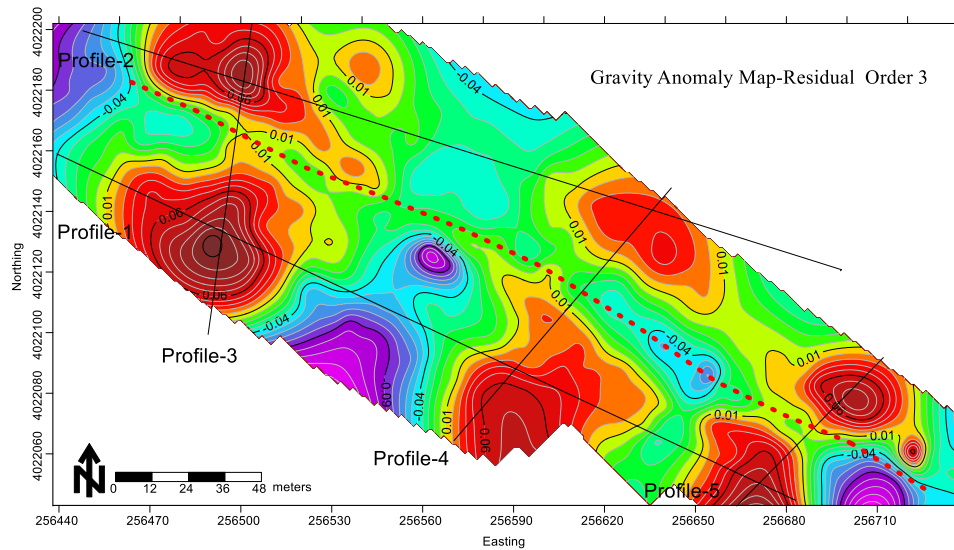


شکل (۲): نقشه آنومالی بوگه کامل محدوده اکتشافی پاییز دامغان

آنومالی بوگه ساده، اختلاف چگالی اجرام آنومال را نسبت به چگالی متوسط منطقه نشان می‌دهد و به شکل توپوگرافی بستگی ندارد پس باید تصحیحات توپوگرافی نیز بر داده‌ها اعمال گردد که پس از انجام تصحیحات اولیه داده‌های گرانی سنجی، عامل جرمی از جمله عوامل تأثیرگذار بر روی داده‌های قرائت شده است که بخشی از آن‌ها به وسیله اثر تخته بوگه تصحیح شده است ولی این اثر با لحاظ نمودن شرایط یکسان جرمی و ارتفاعی برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقاط نمی‌تواند اثر کاهشی ناشی از وجود توپوگرافی کوه یا دره را از روی داده‌های برداشتی حذف نماید. لذا از تصحیح توپوگرافی استفاده شد. به این ترتیب که برای محاسبه اثر توپوگرافی ارتفاعات جرم دار نقاط دور یا نزدیک به نقاط ایستگاهی از دو نقشه رقومی ارتفاعی استفاده شده است. از نقشه توپوگرافی بزرگ مقیاس که در حین عملیات گرانی سنجی به وسیله دوربین توتال استیشن و دستگاه جی‌پی‌اس لایکا تهیه شده است، برای تعیین اثر نزدیک توپوگرافی و از مدل رقومی ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری کشور برای تعیین اثر دور استفاده شد. پس از محاسبه اثر توپوگرافی روی داده‌های گرانی و افزودن به مقادیر گرانی بوگه ساده، مقادیر آنومالی بوگه کامل که شتاب گرانی ناشی از اثرات کلیه توده‌ها و ساختمان‌های زیرسطحی است، برای هر ایستگاه محاسبه و نقشه آن رسم شد (شکل ۲).

۵- اعمال فیلترها و ترسیم نقشه‌های روند سطح

یکی از انعطاف پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی می‌باشد. در این روش، میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای بوسیله روش کمترین مربعات یا روش اورتونرمال تقریب زده می‌شود. این روش براساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد (Unwin, 1978; Miller, 1956). در این روش بر داده‌های گرانی مشاهده‌ای سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی زمین‌شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد. از درجه روند سطحی بیشتر برای همپوشانی بین مقادیر سطح مزبور و مقادیر داده‌های مشاهده‌ای در شرایط پیچیده‌تر زمین‌شناسی استفاده می‌شود. هر چه درجه روند سطحی بیشتر باشد، امکان دسترسی به سطحی که بیشترین مناسبت و یا تطابق را با مقادیر مشاهده شده داشته باشد بیشتر خواهد بود، بنابراین روند ایده‌آل برای یک پروسه تفکیک، همان آنومالی است. برای تفکیک آنومالی‌های محلی از آنومالی‌های ناحیه‌ای در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Geosoft بر روی آنومالی گرانی بوگه از فیلتر روند سطحی جمله‌ای با درجه‌های متفاوت اعمال شد و نتیجه آنومالی باقی مانده بوگه با مرتبه سوم در (شکل ۳) نشان داده شده است.

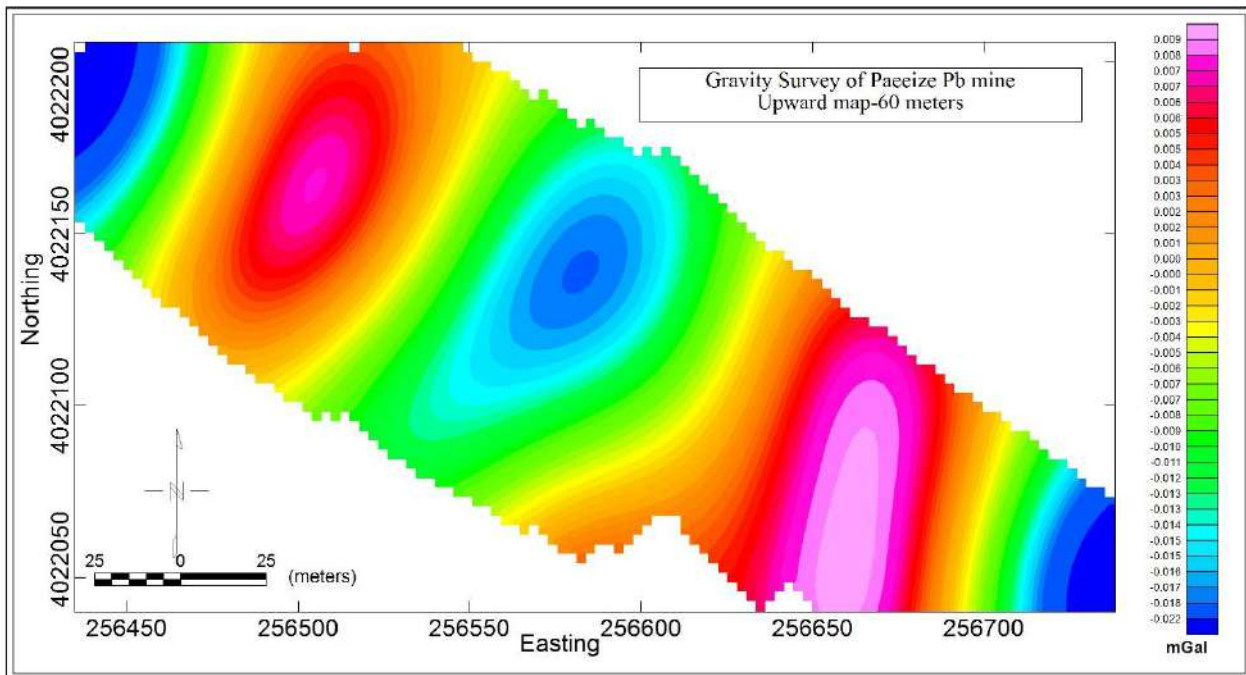


شکل (۳): نقشه آنومالی گرانی باقی مانده حاصل از فیلتر روند سطح مرتبه سوم

۶- اعمال فیلتر گسترش میدان گرانی به سمت بالا

یکی از روش‌های تفکیک آنومالی میدان پتانسیل گسترش به سمت بالا می‌باشد با کاربرد این روش تأثیرات سطحی حذف شده و تأثیرات عمیق به وضوح مشخص می‌شود. در این روش داده‌های میدان پتانسیل از یک سطح مبنا به طریق ریاضی بر روی سطوح تراز در بالای سطح مبنای اصلی تصویر می‌شوند. عمل گسترش به سمت بالا یک نوع هموارسازی می‌باشد. به منظور بررسی بیشتر داده‌های گرانی و مقایسه نتایج روش تفکیک روند سطح، از روش تبدیل میدان گرانی به سمت بالا در ارتفاع‌های مختلفی از ۱۰ تا ۲۰۰ متری نیز بر روی داده‌های آنومالی بوگه اعمال شد و نتیجه بررسی در هر ارتفاعی به صورت نقشه تبدیل میدان به سمت بالا رسم شد.

نقشه‌های حاصل از این روش در ارتفاع‌های بیش از ۴۰ متری تغییر چندانی در ظاهر نمودار نشان نمی‌دهد و این موضوع بیانگر این مطلب است که توده‌های آنومال از ریشه بالایی برخوردار نبوده و جزء توده‌های سطحی محسوب می‌شوند و عمده تغییرات روی نقشه‌ها مشابه هم بوده و نشان دهنده آنومالی‌های طول موج بلند و عمیق هستند.



شکل (۴): نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۶۰ متر

۸-مدل سازی وارون

وارون سازی تکنیکی ریاضی است که به صورت خودکار خصوصیات و پارامترهای فیزیکی سیستم مورد مطالعه را از داده‌های برداشت شده با وارد کردن اطلاعات اولیه با کمک روش‌ها و عملگرهای ریاضی بازسازی می‌کند. یکی از روش‌های متداول برای رسیدن به مدل وارون، کمینه کردن تابع هدف تیخونوف است که از یک تابع عدم برازش و یک تابع پایدارساز تشکیل شده است.

$$p^{\alpha}(\mathbf{m}) = \phi(\mathbf{m}) + \alpha s(\mathbf{m}) \quad (1)$$

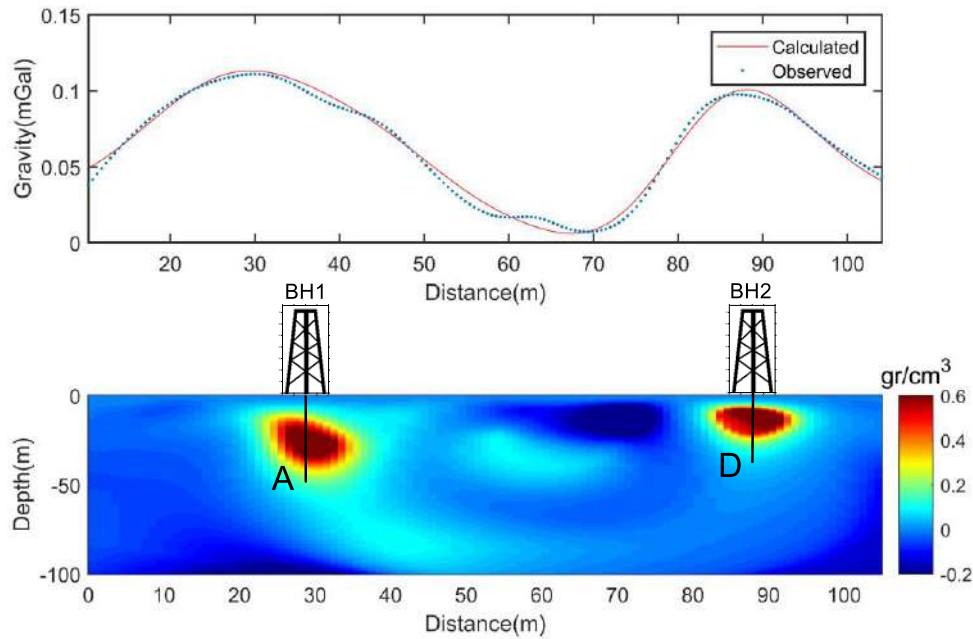
تابع عدم برازش $\phi(\mathbf{m})$ ، وظیفه برازش داده‌های مشاهده‌ای با داده‌های محاسبه شده از پارامترهای مدل را دارد. تابع پایدارساز $s(\mathbf{m})$ ، تابعی است که ویژگی‌های مدل را وارد فرآیند وارون‌سازی می‌کند، در واقع اطلاعات اولیه درباره مدل با استفاده از تابع پایدارساز به مدل وارد می‌شود [۸]. مدل سازی وارون متمرکز سه بعدی بر روی نقشه باقی‌مانده گرانی (شکل ۵) اعمال و نتایج آن به صورت مقاطع عرضی و قائم تهیه شد.

پس از انجام مدل سازی وارون روی داده های گرویتی در راستای پروفیل های مختلف وضعیت آنومالی به لحاظ گسترش عمقی روی پروفیل ها مشخص شد و با توجه به اینکه پروفیل شمال غربی محدوده آنومالی های بهتری را نشان داده مقطع عمقی این پروفیل در شکل (۵) ارائه شده است.

۹-نتیجه گیری

براساس بررسی‌های صورت گرفته و تهیه نقشه آنومالی‌ها به روشهای مختلف کیفی مثل روش روند سطح، گسترش میدان به سمت بالا، محل های آنومال به لحاظ وجود تمرکز چگالی بالا ناشی از کانی زایی احتمالی در محدوده دیده می شود که در نقشه های مختلف ارائه

شد. همان طور که پیشتر اشاره شد، نتایج مدلسازی دوبعدی داده های گرانی و بررسی مقاطع حاصل و نیز نتایج حاصل از مطالعات کیفی داده ها، نشان می دهد که آنومالیهای A و D در رگه شمال غربی ارزش بیشتر برای مطالعات دارند.



شکل (۵): مقطع عرضی حاصل از نتیجه مدل سازی وارون داده های گرانی در راستای پروفیل سه در محدوده اکتشافی

مراجع

- [۱] آقاجانی، ح و رضایی محمد. ۱۳۹۸، مطالعات اکتشافی گرانی سنجی در محدوده اکتشافی ده بید فارس جهت اکتشاف سرب و باریتین، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۲] آقاجانی، ح. ۱۳۹۱، انجام پیمایش و مطالعات ثقل سنجی در محدوده اکتشافی کرومیت شرق سبزوار، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۳] آقاجانی، ح و نجاتی کلاته، ع. ۱۳۹۲، مطالعات گرانی سنجی در محدوده اکتشافی منگنز چشمه سفید جنوب سبزوار، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۴] Albora, A. M., Ucan, O. N., Ozmen, A., Ozkan, T., 2001, Separation of Bouguer anomaly map using cellular neural network, *Journal of Applied Geophysics*, 129–142.
- [۵] Amin, Y., 1985, On the least-squares residual anomaly determination, *Geophysics*, 50, 473-480
- [۶] Agocs, W. B., 1951, Least-square residual anomaly determination, *Geophysics*, 16, 686-696
- [۷] Bergeron, C.J., Morris, T.L. and Ioup, J.W. (1990) "Upward and Downward Continuation of Airborne Electromagnetic Data", *SEG 60th Annual International Meeting*, pp 696–699.
- [۸] Portniaguine, O. and Michael S. Zhdanov, M. S., 2002, 3D magnetic inversion with data compression and image focusing, *Geophysics*, 67(5):1532–1541.

مطالعات اکتشاف تکمیلی محدوده دهسلم با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی زمینی و تطبیق آن با کانی‌سازی

اکبر جعفرآذری خزینه^۱، منصور شعبانی^۲، رزگار فرامرزی^۳، محمدرضا حداد طهرانی^۴، احمد افشار^۵

۱ دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، کارشناس دفتر فنی شرکت نوباب کانسار؛ ajafarazari@gmail.com

۲ مدیر عامل شرکت نوباب کانسار؛ shabanimansour45@gmail.com

۳ مدیر پروژه شرکت نوباب کانسار؛ RZ_63@yahoo.com

۴ مدیر اکتشاف شرکت توسعه صنعتی معدنی مهاده؛ Tehrani.mine@gmail.com

۵ استادیار گروه آموزشی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن؛ aafshar.m@gmail.com

* نویسنده مسئول: اکبر جعفر آذری خزینه

چکیده

در این مقاله به بررسی مطالعات اکتشاف تکمیلی محدوده دهسلم با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی پرداخته شده است. پس از بررسی‌های اولیه، براساس طراحی‌های انجام شده عملیات صحرایی انجام شد. داده‌های برداشت شده مورد بازبینی و پردازش اولیه قرار گرفتند. برای پردازش و تحلیل داده‌ها از نرم افزار Oasis Montaj استفاده شد. با استفاده از این نرم افزار تصحیحات و فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها اعمال گردید. تصحیح روزانه و تصحیح IGRF اعمال شده و مقادیر مغناطیس بازماند برای داده‌ها محاسبه شد. نقشه تبدیل به قطب و استوای مغناطیسی، نقشه‌های مشتق قائم درجه اول میدان مغناطیسی و نقشه سیگنال تحلیلی برای داده‌ها تهیه شد. براساس نقشه‌های تهیه شده، آنومالی‌های موجود شناسایی شدند. سپس شدت، گسترش و مرز تقریبی آنومالی‌ها مشخص گردید. براساس نتایج به دست آمده برای ادامه مراحل اکتشاف پیشنهاد حفاری ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف، آهن، مغناطیس‌سنجی، Oasis Montaj، محدوده دهسلم.

Supplementary Exploration Studies of Dehsalm area using Magnetic Survey Method & correlation of them with Mineralization

Haddad Akbar Jafarazari Khazineh¹, Mansur Shabani², Rezgar Faramarzi³, Mohammad-reza Tehrani⁴, Ahmad Afshar⁵

¹Ph.D. Student of Engineering Geology, Department Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Senior Technical Office Specialist of Nowyab Kansar Company. Email Address: ajafarazari@gmail.com

²Chief Executive Officer of Nowyab Kansar Company. Email Address: shabanimansour45@gmail.com

RZ_63@yahoo.com of Nowyab Kansar Company. Email Address: ³Project Manager

⁴Exploration Manager of Mehad Company. Email Address: Tehrani.mine@gmail.com

at Amirkabir University of Technology Rock Mechanics Department of Mining Engineering ⁵Assistant Professor (Tehran Polytechnic). Email Address: aafshar.m@gmail.com

Abstract

This paper is devoted to supplementary exploration studies of Dehsalm area using magnetic method. After primary field geological and topographical observations, the field measurements were

designed and field operations were carried out. Surveyed data has been processed and reviewed. Oasis Montaj software were used, for processing and data analysis. Corrections and various filters were applied on the data, by using this software. Daily and IGRF corrections was done, and residual values was calculated. Reduced to the pole (RTP) and reduced to the Equator (RTE) map, pseudo gravity, First Vertical Derivative (FVD) and analytical signal maps has been prepared. According to the prepared maps, an anomaly was identified. Then the intensity, spread and approximate boundary of the anomaly was determined. Finally, some suggestions were presented for additional measurements to get enough data in the area. Based on the obtained results, a borehole was proposed to continue the exploration process.

Keywords: Exploration, Iron, Magnetic method, Oasis Montaj, Dehsalm area.

مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات اکتشافی، از روش‌های غیرمستقیم محسوب می‌شوند، که در صورت بکارگیری اصولی آن‌ها می‌توان هزینه‌های اکتشافی را کاهش داد. یکی از استفاده‌های عمده ژئوفیزیک، هدفمند کردن شبکه حفاری‌های اکتشافی است که بدین ترتیب می‌تواند نقش ارزنده‌ای در کاهش هزینه و افزایش سرعت عملیات اکتشافی داشته باشد. اولین کسانی که خاصیت مغناطیسی را درک کردند چینی‌ها بودند [۱].

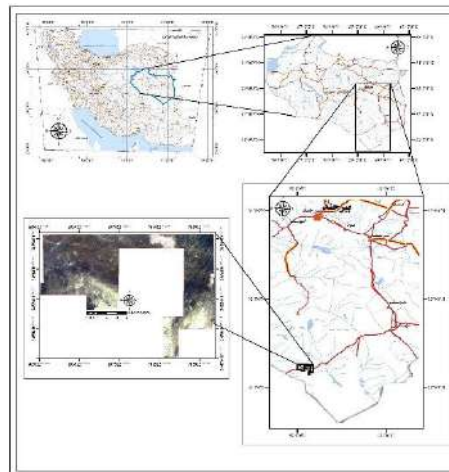
مغناطیس‌سنجی تکنیکی نسبتاً کم‌هزینه، سریع و یکی از روش‌های پرکاربرد ژئوفیزیکی است. این روش در مطالعات زمین‌شناسی، تکتونیک، اکتشاف منابع معدنی و نیز منابع نفت و گاز به طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شود. در زمینه تکتونیک و زمین‌ساختی، کیلارو و همکاران در سال ۲۰۱۳ از این روش برای شناسایی ساختار تکتونیک پوخته زمین در شرق هند بهره برده‌اند [۲].

ژنگوفان و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای شناسایی کانسارهای BIF منطقه آنتشان واقع در شمال شرق چین [۳] آلتا و همکاران در سال ۲۰۱۳ به منظور شناسایی کمپلکس بازی-بازی فوق ناحیه گویاس برزیل [۴]، همچنین در سال ۲۰۱۲ برای مطالعه کمپلکس مروود انگنهو در مرکز برزیل [۴] از این روش استفاده کرده‌اند. البته این روش سال‌ها است که در زمینه اکتشاف منابع مغناطیسی، خصوصاً منابع آهن مگنتیتی در سراسر جهان استفاده می‌شود. در این پروژه با توجه به پوشیدگی محدوده با رسوبات بادی و آبرفتی، هدف از اکتشاف مغناطیس‌سنجی، اثبات وجود یا عدم وجود ناهنجاری ژئومغناطیس مرتبط با کانی‌زائی و شناسایی آنومالی‌های مغناطیسی در منطقه جهت بررسی‌های تفصیلی و تکمیلی با توجه به مطالعات سنجش از دور، زمین‌شناسی و پی‌جویی می‌باشد.

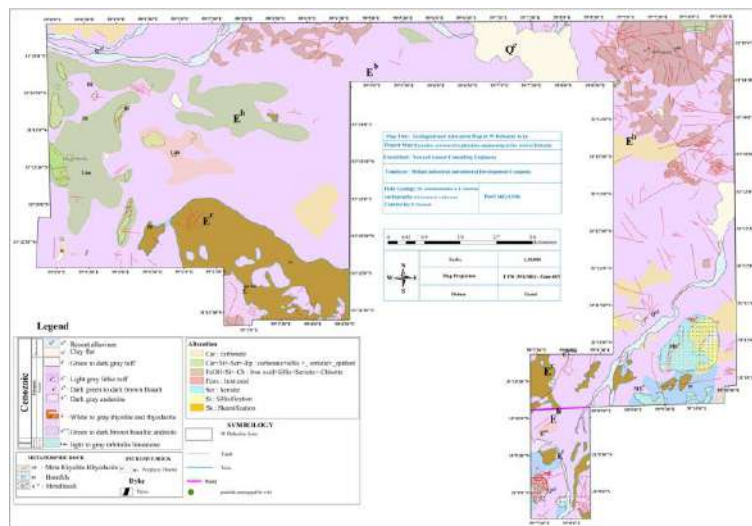
موقعیت و زمین‌شناسی محدوده دهسلم

به لحاظ جغرافیایی، محدوده اکتشافی غرب دهسلم در بخش جنوبی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ دهسلم (چاهوک) به شماره NH-40-4 و بخش غربی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دهسلم به شماره ۷۸۵۲ قرار گرفته‌است. این محدوده با مساحت ۹۵.۲۰۱۹ کیلومتر مربع و با مختصات جغرافیایی شکل (۱) در زون زمین‌ساختی شرق ایران واقع شده‌است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده دهسلم شامل واحد آهک اربیتولین‌دار به سن کرتاسه، واحدهای آتشفشانی به سن ائوسن، توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق جوان‌تر (الیگوسن-میوسن؟)، واحد هورنفلس، بخش اسکارنی، تعدادی دایک با ترکیب اسیدی تا بازیک، تعدادی رگه سیلیسی و سیلیسی-کربناتی و رسوبات بادی می‌باشند. در شکل (۲) نقشه زمین‌شناسی محدوده دهسلم در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ آورده شده‌است. دگرسانی‌های رخ داده در محدوده اکتشافی غرب دهسلم در چند گروه مختلف جای می‌گیرند که شامل: ۱- دگرسانی کربناتی ۲- دگرسانی کربناتی+سیلیسی+سریسیتی+پیدوتی ۳- دگرسانی اکسید و هیدروکسید آهنی+سیلیسی+کلریتی ۴- دگرسانی اکسید و هیدروکسید آهنی ۵- دگرسانی سریسیتی ۶- دگرسانی سیلیسی ۷- دگرسانی اسکارنی می‌باشند. شدت و نوع دگرسانی‌های رخ داده در بخش‌های مختلف محدوده متفاوت است (شکل (۲)).

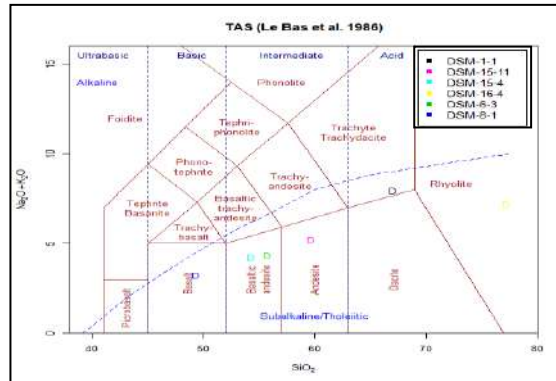
براساس نمودار لوپاس و همکاران (۱۹۸۶) شکل (۳)، نمونه‌های موجود در محدوده ریولیت، تراکیت تا تراکی-داسیت، آندزیت، آندزی بازالت و بازالت قرار می‌گیرند. همچنین از نظر سری‌های ماگمایی نیز این نمونه‌ها در محدوده سری ماگمایی ساب‌آلکانن تا تولییتی قرار می‌گیرند. در این مطالعه برای شناسایی مناطق دگرسانی از نسبت باندهی ۴/۵ تصاویر ماهواره‌ای استر استفاده شده است (شکل (۴)). شکل (۵) نماهایی از واحدهای سنگ‌شناسی، دگرسانی، رگه و رگچه‌های سیلیسی و کربناتی در محدوده اکتشافی دهسلم را نشان می‌دهد.



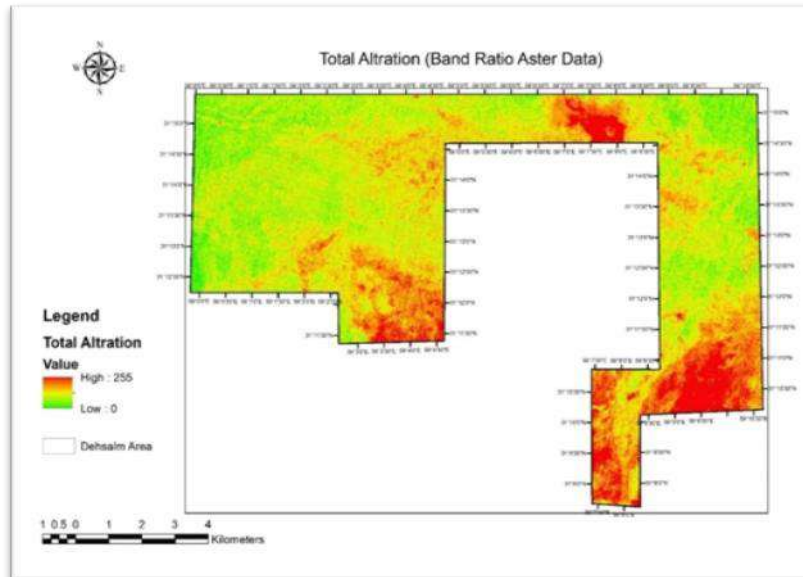
شکل (۱): موقعیت محدوده غرب دهسلم بر روی نقشه راه‌های ایران



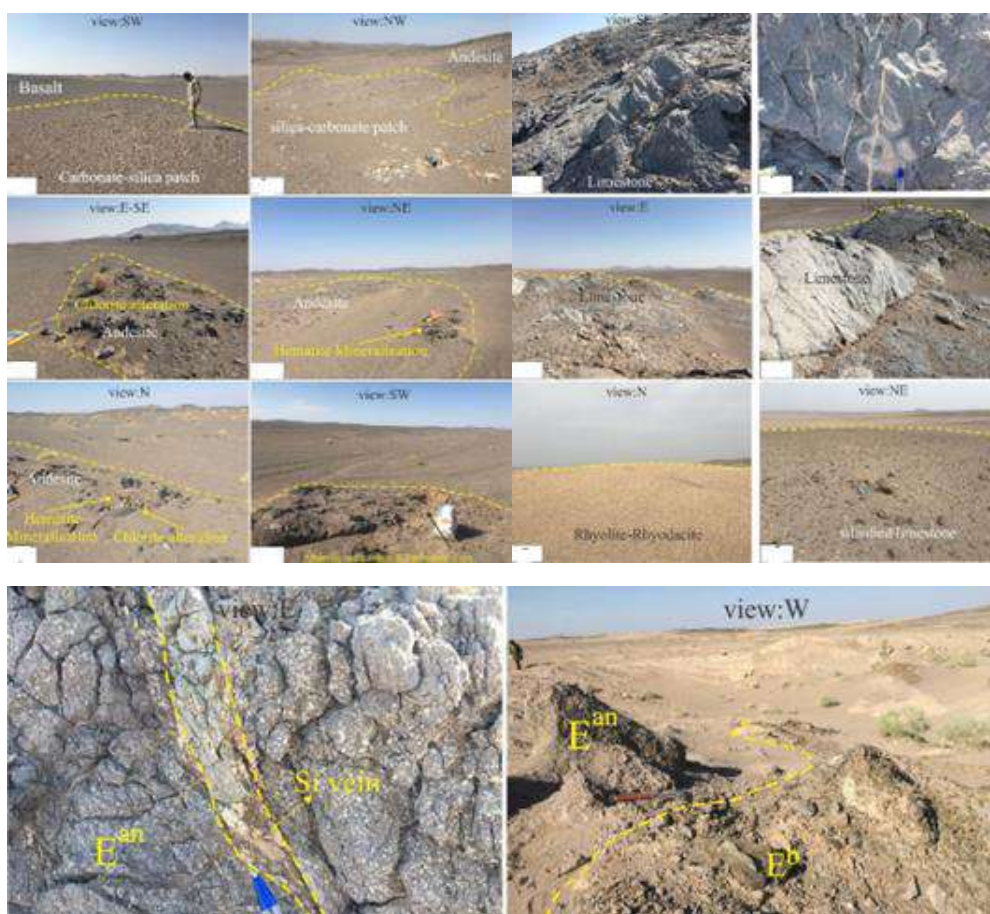
شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی ۱:۲۰۰۰۰ محدوده اکتشافی غرب دهسلم



شکل (۳): نمودار TAS نقل از لوباس و همکاران (۱۹۸۶) و موقعیت نمونه ها بر روی آن.



شکل (۴): شناسایی مناطق دگرسانی با استفاده از نسبت باندی ۴/۵.



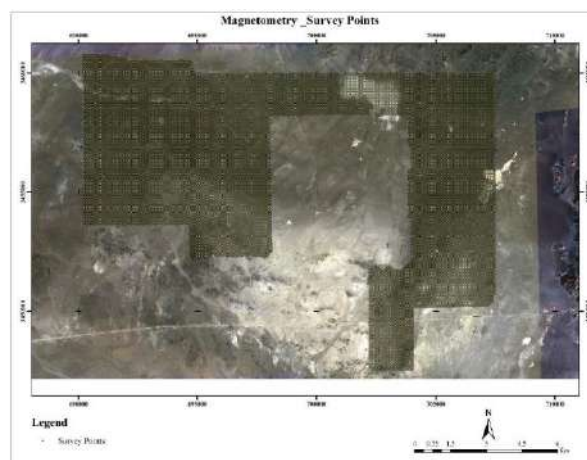
شکل (۵): نماهایی از واحدهای سنگ‌شناسی، دگرسانی، رگه و رگچه‌های سیلیسی و کربناتی در محدوده اکتشافی دهسلم.

روش‌ها تحقیق

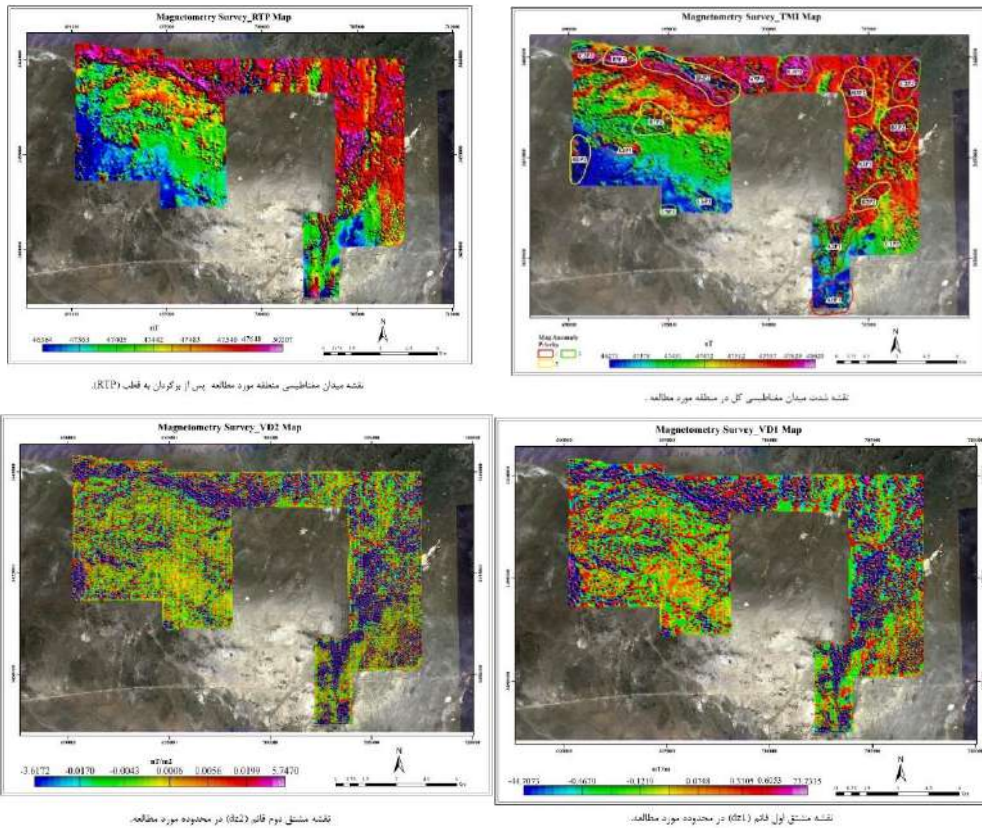
بررسی داده‌های مغناطیس‌سنجی

با توجه به پتانسیل غنی موجود در این منطقه جهت اکتشاف مواد معدنی و نقش واحدهای زمین‌شناسی، توده‌های نفوذی، شکستگی و گسلش در تمرکز کانی‌زائی، برداشت ژئوفیزیک به‌روش مغناطیس‌سنجی جهت اکتشاف این منطقه آغاز گردید. به منظور پوشش دادن کل محدوده، طراحی شبکه برداشت در محیط نرم افزار ژئوسافت با فاصله پروفیلی- ایستگاهی ۶۰ در ۲۰ متر و ۱۰۰ در ۵۰ متر انجام شد. طبق برنامه ریزی و طراحی شبکه برداشت اولیه در این مرحله از عملیات صحرایی تعداد ۳۳۵۴۴ ایستگاه مغناطیس‌سنجی توسط سه دستگاه مگنتومتر در طول ۲۴ روز کاری برداشت شد. به منظور تصحیح تاثیرات ناشی از تغییر میدان کل مغناطیسی زمین و تشخیص طوفان‌های احتمالی خورشیدی در تمام طول مدت برداشت، از یک دستگاه مگنتومتر به عنوان بیس، در نقطه‌ای ثابت در وسط محدوده به منظور اندازه‌گیری و ثبت تغییرات میدان مغناطیسی زمین در هر ۳ دقیقه استفاده گردید. شکل (۶) موقعیت ایستگاه‌های برداشت شده را نشان می‌دهد. همانطور که می‌دانیم، داده‌های خام ژئوفیزیکی برای آماده شدن جهت تفسیرها، باید پردازش و تصحیح شوند. باید بر حسب نیاز فیلترهای خاصی را اعمال کنیم تا بتوان نقشه‌های نهایی آنومالی مغناطیسی را تهیه و سپس تفسیر کنیم. فیلترهای متفاوتی وجود دارند که تفسیر داده‌ها را آسان‌تر می‌کنند و گاهی اطلاعات بیشتری را در اختیار مفسر قرار می‌دهند. برای پردازش و تحلیل داده‌ها از نرم افزار Oasis Montaj استفاده شد. با استفاده از این نرم افزار تصحیحات و فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها اعمال گردید.

تصحیح روزانه و تصحیح IGRF اعمال شده و مقادیر مغناطیس بازماند برای داده‌ها محاسبه شد. نقشه تبدیل به قطب و استوای مغناطیسی، نقشه‌های مشتق قائم درجه اول میدان مغناطیسی و نقشه سیگنال تحلیلی برای داده‌ها تهیه شد. در تفسیر نقشه‌های منطقه دو روش کیفی و کمی بکار گرفته شد. در روش کیفی با استفاده از نقشه‌های مغناطیسی از جمله نقشه شدت کل میدان، نقشه مشتق قائم، نقشه ادامه فراس و میدان مغناطیسی از لحاظ شدت و ضعف بررسی می‌شود و گسترش جانبی و عمق نسبی بیهنجاری‌ها و گسل-های احتمالی مشخص می‌گردد و مناطق مهم از نظر اکتشاف تشخیص داده می‌شود. در روش کمی، ناهنجاری‌های مورد توجه بصورت عددی مورد محاسبه قرار می‌گیرد و مشخصات ناهنجاری از قبیل عمق، جنس (خودپذیری مغناطیسی) و شکل شیب و گسترش در صورت وجود سایر اطلاعات اکتشافی بررسی می‌گردد.



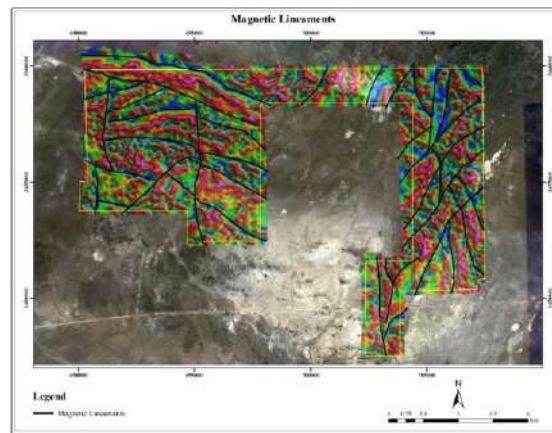
شکل (۶): موقعیت ایستگاه‌های برداشت شده



شکل (۷): نقشه میدان مغناطیسی کل، نقشه میدان مغناطیسی منطقه پس از برگرداندن به قطب، نقشه مشتق اول و نقشه مشتق دوم

شناسایی خطواره‌های مغناطیسی

اولین فیلتری که برای شناسایی دقیق‌تر آنومالی‌ها گسترش داده شد فیلتر زاویه‌ای تیلت بود که نسبت مشتق قائم به اندازه مطلق مشتق افقی میدان است. زاویه‌ی تیلت یک مشتق بهنجار شده براساس نسبت مشتق قائم به مشتق افقی از میدان است. در شکل (۸) نقشه زاویه تیلت ناحیه مورد مطالعه به منظور شناسایی دقیق‌تر ساختار خطی با اعمال فیلتر زاویه تیلت بروی داده‌ها حاصل گردید. در این شکل خطوط مشکی رنگ خطواره‌های شناسایی در این منطقه به کمک تلفیق نتایج مغناطیس‌سنجی و نقشه‌های ماهواره‌ای می‌باشد. به نظر می‌رسد در محل تقاطع خطواره‌ها تمرکز کانی‌زائی بالا بوده و این خطوط آنومالی مغناطیسی را کنترل می‌نمایند. در قسمت‌های جنوب شرق محدوده در ناحیه با شدت میدان مغناطیسی پایین خطواره‌های مغناطیسی دارای روند مشخصی بوده که کنترل کننده ساختاری این ناحیه می‌باشند.



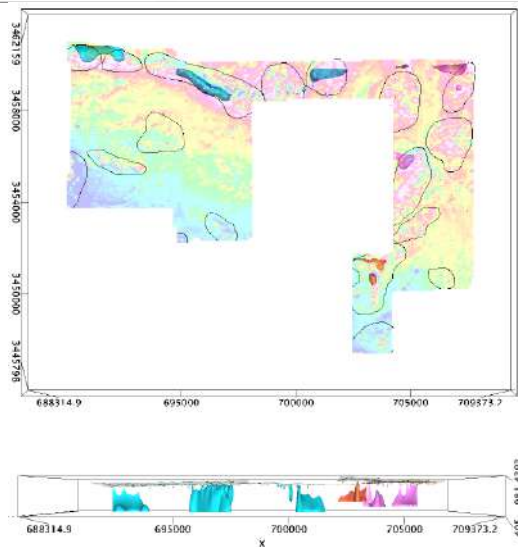
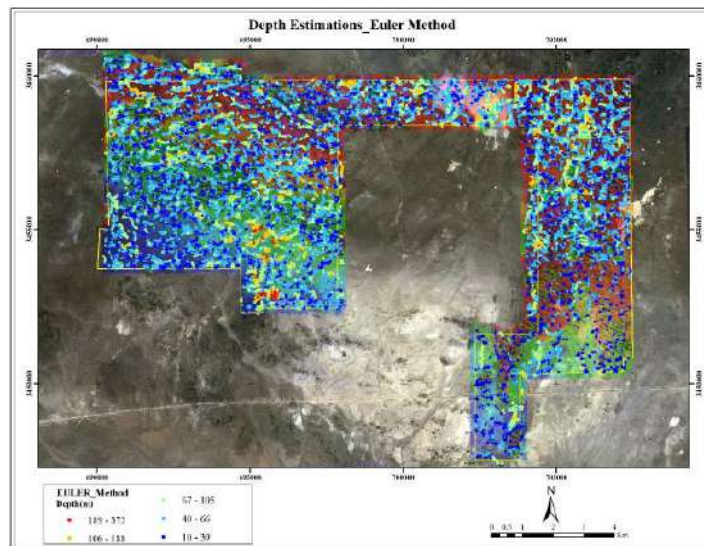
شکل (۸): نقشه‌های زاویه تیلت به همراه خطوط مشکی رنگ که خطواره های مغناطیسی شناسایی شده می‌باشند.

نتیجه و جمع‌بندی

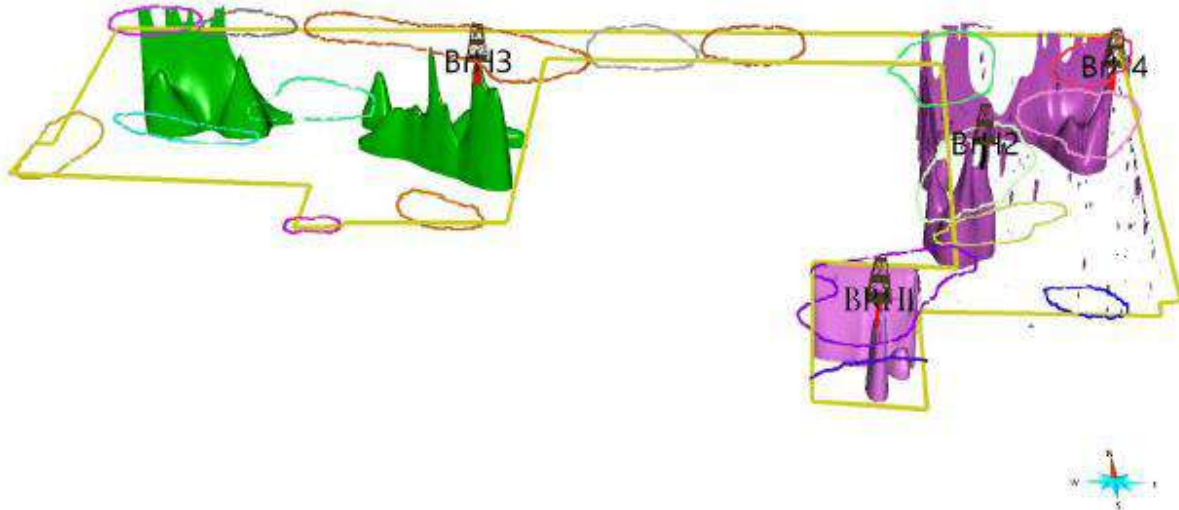
عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی به منظور شناسایی واحدهای زمین شناسی، ساختاری، توده‌های نفوذی و تعیین آنومالی‌های ژئوفیزیکی در محدوده اکتشافی غرب ده‌سلم اجرا گردید. پس از برداشت داده و انجام تصحیحات لازم با به‌کارگیری چندین فیلتر متداول در روش‌های پتانسیل، اطلاعات لازم برای تفسیر منطقه از داده‌ها استخراج گردید. هرکدام از فیلترها با اعمال تغییراتی بر روی فاز و دامنه داده‌ها، ساختار فرکانسی داده‌ها را تغییر می‌دهند. با برگردان داده‌ها به حوزه مکان می‌توان اثر تغییرات حاصل را مشاهده نمود. بنابراین می‌توان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری زیر را از برداشت مگنتومتري انجام شده در این منطقه ارائه نمود: - بیشینه اختلاف شدت میدان مغناطیسی در این محدوده ۱۹۰۰ نانو تسلا بوده است. این تغییرات از حیث کانی‌زایی حائز اهمیت است. - طبق نتایج کیفی و کمی بدست آمده از تعبیر و تفسیر نقشه‌های مختلف، ۱۸ پلیگون محتمل‌تر جهت بازدید اکتشافی طبق نقشه شکل (۹) ارائه می‌گردد. - آنومالی‌های مغناطیسی تفسیر شده بروی ناحیه با بیشینه شدت میدان مغناطیسی (قرمز رنگ) مرتبط با کانی‌های آهن‌دار موجود در محدوده می‌باشند. از طرفی خطواره‌های مغناطیسی به خوبی با این نواحی انطباق دارند. به نظر می‌رسد در امتداد این آنومالی‌ها قطع شدگی‌هایی، در اثر فعالیت گسل‌های متقاطع، رخ داده است. - نتایج تخمین عمق به روش اوپلر در این محدوده نشان‌دهنده عمق حداقل ۱۰ متر برای آنومالی‌ها می‌باشد. بیشینه عمق ۳۷۰ متر می‌باشد (شکل (۱۰)). میانگین عمقی آنومالی‌های مغناطیسی در این محدوده در حدود ۵۰ متر می‌باشد. - با مقایسه نقشه آنومالی‌های سطحی شکل (۹) با نتایج حاصل از مدلسازی شکل (۱۱) استنباط می‌شود اکثر آنومالی‌های سطحی حاصل از مطالعه کیفی نقشه‌ها ریشه‌دار بوده و در ارتباط با منشا عمقی خود می‌باشند. در واقع نتایج حاصل از دو تفسیر کیفی و کمی منطبق برهم بوده که این بیانگر صحت نتایج حاصل می‌باشد. با توجه به اهمیت واحدهای ساختاری و نتایج حاصل از آنومالی‌های مغناطیسی که از لحاظ کانی‌زایی سولفیدی هم حائز اهمیت می‌باشند، انجام عملیات قطبش القایی- مقاومت ویژه به منظور به شکل درآوردن ماده معدنی سولفیدی در جهت عمقی در این منطقه در ادامه عملیات اکتشافی پیشنهاد می‌شود. در نهایت با تلفیق اطلاعات حاصله از سنجش از دور، پی‌جویی و مطالعات زمین‌شناسی با تفسیر دیتاهای حاصل از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی بر روی مقطع سه بعدی مدلسازی شده به همراه نمایش محدوده‌های مستعد پیشنهاد گردید (شکل (۱۱)).



شکل (۹): نقشه شدت میدان مغناطیسی به همراه تارگت های سطحی، آنومالی های مغناطیسی و خطواره ها



شکل (۱۰): نمایش نقاط تخمین عمق به روش اویلر بر روی نقشه TMI
شکل (۱۱): نمایش توده های حاصل از مدل سازی صورت گرفته توسط نرم افزار VPmg



شکل (۱۱): موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی بر روی مقطع سه بعدی مدلسازی شده به همراه نمایش محدوده‌های مستعد

مراجع

- [۱۲] Sharma, P. V. (1987). Magnetic method applied to mineral exploration. *Ore geology reviews*, 2(4), 323-357.
- [۲] KILARU, Suman; GOUD, Bandaru Karunakar; RAO, Vijay Kumar. Crustal structure of the western Indian shield: Model based on regional gravity and magnetic data. *Geoscience Frontiers*, 2013, 4.6: 717-728.
- [۳] FAN, Zhengguo, et al. A study of iron deposits in the Anshan area, China based on interactive inversion technique of gravity and magnetic anomalies. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 618-627.
- [۴] DUTRA, Alanna C.; MARANGONI, Yara R.; JUNQUEIRA-BROD, Tereza C. Investigation of the Goiás Alkaline Province, Central Brazil: Application of gravity and magnetic methods. *Journal of South American Earth Sciences*, 2012, 33.1: 43-55.

آشکارسازی حاشیه های توده کانسار در معدن شماره ۱ گل گهر با استفاده از روش فراکتال

احمد پورشمس الدین مطلق، حجت اله رنجبر

۱ دانشجوی دکتری اکتشاف مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ Pourshams@eng.uk.ac.ir

۲ استاد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ h.ranjbar@uk.ac.ir

* نویسنده مسئول: احمد پورشمس الدین مطلق

چکیده

در محیط های دارای سنگ آهن، کان سنگ های مختلفی مانند مگنتیت، هماتیت، ژاروسیت، گوتیت، لیمونیت و ... حضور دارند که هر یک دارای ویژگی فیزیکی مختص خود می باشند. به منظور بارسازی این کانسنگ ها از روش های ژئوفیزیکی متعددی از جمله مغناطیس سنجی و گرانی سنجی می توان استفاده کرد. تعیین حاشیه کانی زائی از مهمترین کارها در اکتشاف معادن و در نتیجه در پردازش داده های ژئوفیزیکی است. در این پژوهش از داده های مغناطیس سنجی برداشت شده زمینی جهت تعیین مرز توده معدنی در کانسار سنگ آهن معدن شماره ۱ گل گهر با استفاده از روش فراکتال استفاده شده است. معدن شماره ۱ گل گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غربی شهر سیرجان، در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان قرار دارد. به منظور اعتبارسنجی نتایج و یافته ها از لاگ های زمین شناسی بیش از ۵۰۰ حلقه گمانه اکتشافی حفاری شده در معدن شماره ۱ استفاده شد. گمانه های با حداقل ضخامت ۱۰ متر سنگ آهن مشخص شدند و لاگ آنها با نتایج حاصل از مدل فراکتال مقایسه شد. مدل فراکتال نتیجه قابل قبولی را بدست داده است و با نتایج گمانه های حفاری منطبق است.

واژه های کلیدی: فراکتال، مغناطیس سنجی، مرز کانسار، گل گهر

Determining the ore body boundaries in the Gol Gohar mine 1, using fractal method

Ahmad Pourshamsoddin Motlagh¹, Hojjatollah Ranjbar²

¹ Ph. D. student of mineral exploration, Department of mining engineering, Shahid Bahonar University of Kerman. Email address (Pourshams@eng.uk.ac.ir)

² Professor, Department of mining engineering, Shahid Bahonar University of Kerman. Email address (h.ranjbar@uk.ac.ir)

* Corresponding author: Ahmad Pourshamsoddin Motlagh

ABSTRACT

The ores that contain iron ore, various types of minerals like magnetite, hematite, jarosite, limonite etc., are present and each of which has its own unique physical properties. In order to characterise these minerals, various geophysical methods including magnetometry and gravity measurements can be applied. Determining the ore boundary is one of the most important task in the mineral exploration and the processing of resulting data. In this research, fractal method used to determine the boundary of the ore body from the magnetic data of Gol-e-Gohar magnetic anomaly No 1 (Mine No. 1) which is located in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, 55 kms southwest of Sirjan City. In order to validate

the results, lithological logs of more than 500 exploratory boreholes drilled in mine No. 1 were used. Boreholes with a minimum thickness of 10 meters of iron ore were determined and their logs were compared with the results obtained from the fractal model. Fractal model has produced an acceptable result and it is consistent with the results of drilled boreholes.

Keywords: Fractal, Magnetometry, Ore boundary, Gol-e-Gohar mine

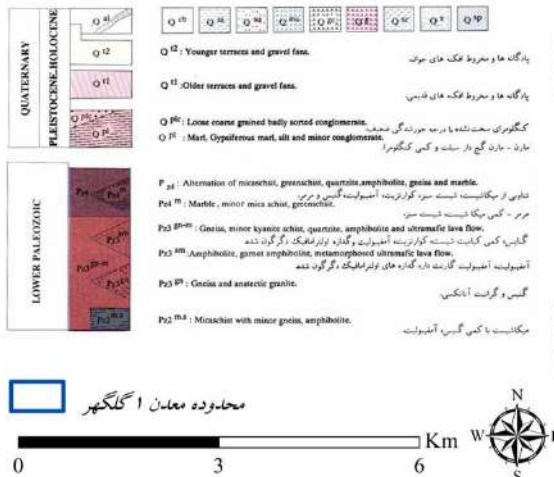
مقدمه

در محیط های دارای سنگ آهن، کانسنگ های مختلفی مانند مگنتیت، هماتیت، ژاروسیت، گوتیت، لیمونیت و ... حضور دارند که هر یک دارای ویژگی فیزیکی مختص خود می باشند. داده های مغناطیس سنجی دارای قابلیت بارزسازی این کانسنگ ها، به خصوص مگنتیت می باشد. به منظور بارزسازی این کانسنگ ها از روش های ژئوفیزیکی متعددی از جمله مغناطیس سنجی و گرانی سنجی می توان استفاده کرد. تعیین حاشیه کانی زانی از مهمترین کارها در اکتشاف معادن و در نتیجه در پردازش داده های ژئوفیزیکی است. روش های مبتنی بر هندسه فراکتال یکی از بهترین روش ها در جدایش بی هنجاری ها از زمینه است [۱]، [۲]. روش فراکتال عیار- مساحت (C-A) نخستین بار توسط چنگ و همکاران (۱۹۹۴) برای جدا کردن جوامع بی هنجار ژئوشیمیایی از زمینه ارائه شده است [۳]. این مدل نه تنها برای جدایش بی هنجاری های ژئوشیمیایی، بلکه برای جدایش بی هنجاری های ژئوفیزیکی نیز به کار گرفته شده است [۴]، [۵]، [۶]. هدف از انجام این تحقیق، بارزسازی مرز بین کانسار و واحدهای میزبان، با استفاده از روش فراکتال، در کانسار سنگ آهن معدن شماره ۱ گل گهر است. همچنین در این تحقیق از داده های مغناطیس سنجی برداشت شده توسط شرکت بئوگراد (۱۹۷۵) استفاده شد.

زمین شناسی منطقه

معدن شماره ۱ گل گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غربی شهر سیرجان، در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان قرار دارد و در گوشه جنوب شرقی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی گل گهر جای گرفته است. زمین شناسی این ناحیه بیشتر از سنگ های دگرگونی مجموعه گل گهر، شامل تناوبی از انواع میکاشیست، آمفیبولیت، کوارتز شیست و گنایس تشکیل شده است. از واحدهای دیگر تشکیل دهنده این ناحیه، مجموعه کرسفید شامل تناوب مرمر و شیست و سپس سنگ های رسوبی مزوزوئیک و آبرفت های مربوط به دوران کواترنری است [۷]. در شکل (۱)، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گل گهر نشان داده شده است.

Legend



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه گل گهر (اقتباس از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گل گهر).

روش تحقیق

یکی از روش‌های اصلی جهت اکتشاف کانسارهای آهن به خصوص از نوع مگنتیتی، روش مغناطیس سنجی است. کاربرد روش مغناطیس سنجی در اکتشاف سنگ آهن در مطالعات متعددی استفاده شده است [۸]، [۹]. فراکتال نیز یک مفهوم ریاضی است که به شکل‌هایی اشاره می‌کند که خودشبه‌بندی در مقیاس‌های مختلف دارند. یکی از کاربردهای روش فراکتال، جدایش مناطق بی‌هنجار ژئوفیزیکی از زمینه است که توسط پژوهشگران متعددی استفاده شده است [۴]، [۵]، [۶]. در این تحقیق از داده‌های مغناطیس سنجی برداشت شده توسط شرکت بئوگراد استفاده شد. داده‌ها به صورت نقشه‌های کانتوری در اختیار قرار گرفت و تصحیحات روزانه و سایر تصحیحات لازم از قبل روی آنها انجام شده است. به منظور پردازش داده‌ها، ابتدا به صورت رقومی درآمد و سپس نقشه‌های شدت مغناطیس کل و باقیمانده مغناطیسی به دست آمد. سپس نقشه برگردان به قطب مغناطیسی تهیه و در نهایت با انجام روش فراکتال، محدوده کانی زائی و مرزهای آن شناسایی شد.

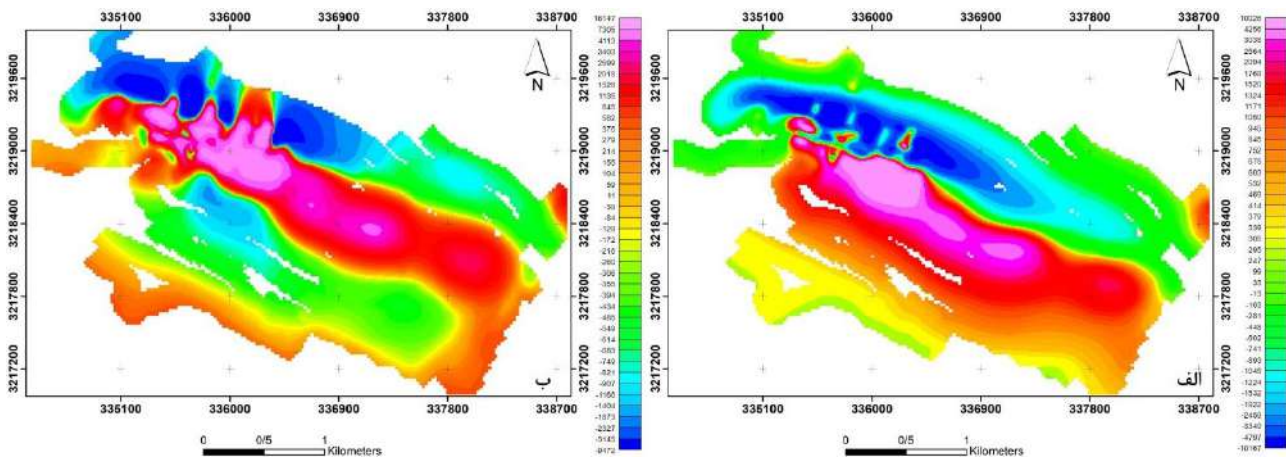
یافته‌ها

نقشه شدت میدان کل مغناطیسی حاصل از داده‌های مغناطیس سنجی زمینی به دست آمد. پس از حذف اثر میدان کل زمین، نقشه مغناطیس باقیمانده نیز محاسبه شد. نتایج بیانگر تغییرات ۲۰۰۰۰ نانوتسلایی در محدوده معدن شماره ۱ است. سپس به منظور تک قطبی نشان دادن، میدان مغناطیسی، از فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی با لحاظ پارامترهای جدول (۱) استفاده شد. در شکل (۲) نیز نقشه‌های مغناطیس باقیمانده و برگردان به قطب مغناطیسی نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه نقشه برگردان به قطب مغناطیسی.

| | |
|-----------|----------|
| Latitude | 29/083 N |
| Longitude | 55/300 E |

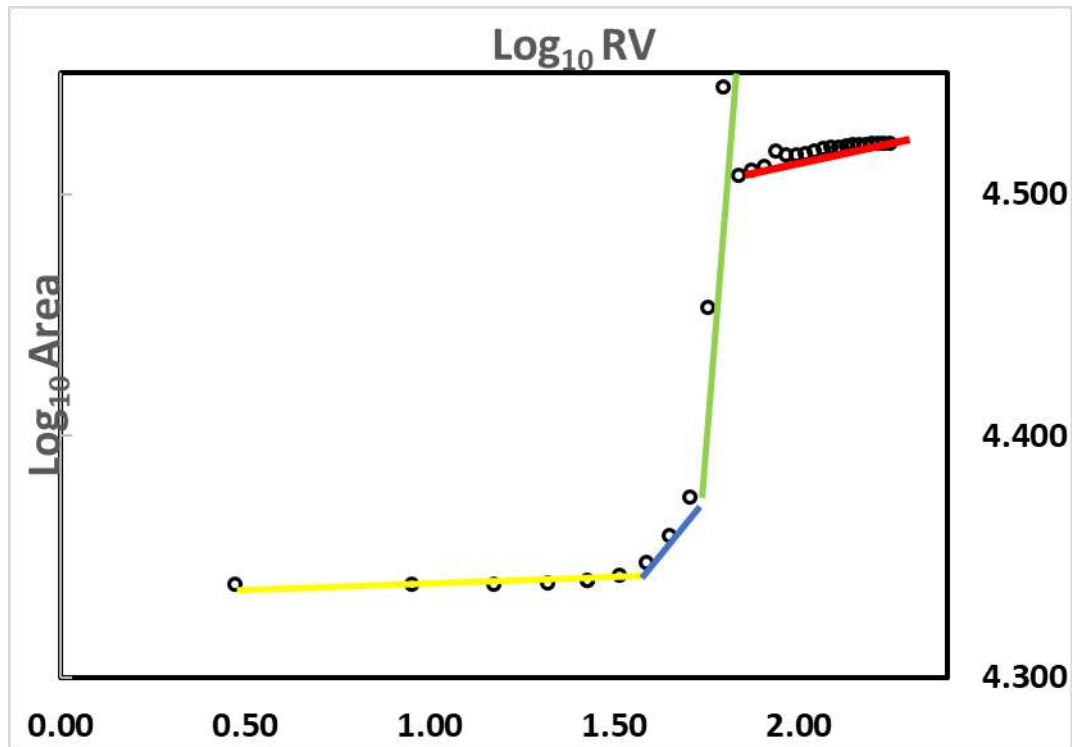
| | |
|---------------------|----------|
| Altitude | 1730 m |
| Year | 1975 |
| Inclination | 43/776 ° |
| Diclination | 1/848 ° |
| Total Intensity (F) | 45048 nT |



شکل ۲- نقشه‌های مغناطیس سنجی معدن ۱ گل‌گهر. الف- نقشه مغناطیس باقیمانده، ب- نقشه برگردان به قطب مغناطیسی.

کاربرد روش فراکتال RV-A

در این مقاله، با الهام از مدل فراکتال C-A، مدل فراکتال $RV^{16}-A$ برای جداسازی بخش بی‌هنجار نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیس سنجی زمینی از زمینه استفاده شد. بر اساس مقادیر شدت مغناطیسی، نمودارهای لگاریتمی $RV-A$ تولید شد و سپس جمعیت‌های مختلف زمینه و بی‌هنجار، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، جدا شد. خطوط مستقیم متناظر شده به نقاط در نمودارهای لگاریتمی، یک رابطه توان بین مساحت و مقادیر حد آستانه‌ای پیکسل‌ها در یک گستره مشخص نشان می‌دهد. نمودار لگاریتمی $RV-A$ نشان می‌دهد که یک طبیعت چند فراکتالی در این منطقه حاکم است. در شکل (۳) خط قرمز متناظر شده بیانگر محدوده کانی زائی است که از سنگ‌های دربرگیرنده تفکیک شده است.



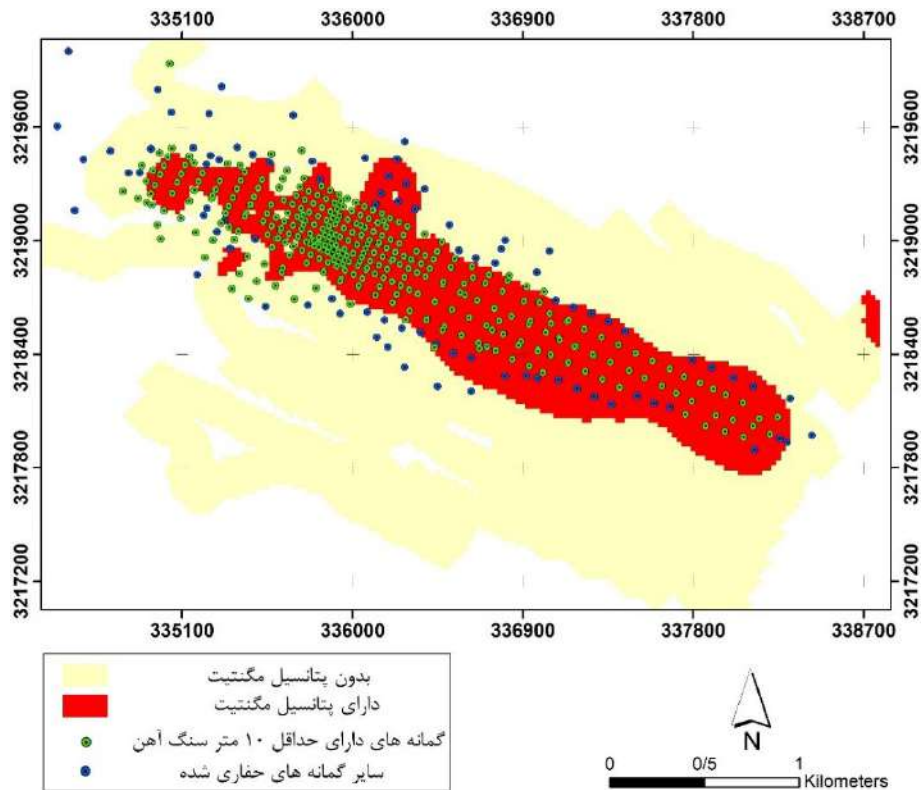
شکل ۳- نمودار لگاریتمی RV-A؛ جهت تعیین وسعت و حاشیه‌های کانی زائی در معدن شماره ۱ گل‌گهر (خط قرمز نشان دهنده مناطق دارای کانی زائی است).

اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج و یافته‌ها از لاگ‌های زمین شناسی بیش از ۵۰۰ حلقه گمانه اکتشافی حفاری شده در معدن شماره ۱ استفاده شد. عمق این گمانه‌ها از ۳۰ تا ۷۰۰ متر متغیر است و گمانه‌های با حداقل ضخامت ۱۰ متر سنگ آهن مشخص شدند و لاگ آنها با نتایج حاصل از مدل فراکتال مقایسه شد. در شکل (۴)، موقعیت مکانی گمانه‌های حفاری شده نشان داده شده است.

بحث

هدف از انجام این تحقیق، شناسایی محدوده کانی زائی و حاشیه‌های آن در معدن شماره ۱ گل‌گهر با استفاده از مدل فراکتال است. به این منظور جهت شناسایی محدوده کانی زائی مگنتیت از داده‌های مغناطیس سنجی زمینی که توسط شرکت بئوگراد برداشت شده‌اند استفاده شد. نقشه‌های باقیمانده مغناطیسی و برگردان به قطب تهیه شدند و در نهایت با استفاده از نقشه برگردان به قطب مغناطیسی و مدل فراکتال، محدوده کانی زائی و مرز آن با سایر واحدهای دربرگیرنده مشخص شد. در بخش غربی بعضی از قسمت‌های دارای سنگ آهن با استفاده از مدل فراکتال به خوبی تفکیک نشده است که علت آن وجود صرفاً کانی زائی هماتیت در این بخش‌ها است و در بخش جنوب شرقی معدن نیز بعضی از قسمت‌هایی که با استفاده از مدل فراکتال دارای پتانسیل سنگ آهن مگنتیتی شناخته شده است؛ در لاگ گمانه‌های حفاری شده در این بخش ماده معدنی مشاهده نشده است. با توجه به عمیق‌تر بودن ماده معدنی در ناحیه گل‌گهر، در صورت حفاری گمانه‌های عمیق‌تر، احتمال ماده معدنی در این بخش‌ها نیز وجود دارد. در قسمت‌های شمال و مرکز محدوده مدل فراکتال نتیجه قابل قبولی را بدست داده است و با نتایج گمانه‌های حفاری انطباق دارد. به طور کلی با بکارگیری مدل فراکتال، مناطق دارای کانی زائی به درستی از واحدهای دربرگیرنده آنها تفکیک شده است.



شکل ۴- نقشه حاصل از تعیین محدوده کانسار با استفاده از روش فراکتال.

نتیجه گیری

با استفاده از روش فراکتال وسعت و مرز کانی زائی سنگ آهن به خوبی نمایش داده شده است. در نتیجه می توان از مدل فراکتال در پردازش داده های مغناطیس سنجی جهت تعیین مرز کانسار، بهره برد.

مراجع

- [1] Ahmadfaraj, M., Mirmohammadi, M., and Afzal, P., "Application of fractal modeling and PCA method for hydrothermal alteration mapping in the Saveh area (Central Iran) based on ASTER multispectral data", International Journal of Mining and Geo-engineering, 50(1), pp. 37-48, 2016.
- [2] Shahriari, H., Ranjbar, H., Honarmand, M. and Carranza, E.J.M., "Selection of less biased threshold angles for SAM classification using the real value-area fractal technique". Resource Geology, 64(4), pp. 301-315, 2014.
- [3] Cheng, Q., Agterberg, F.P., and Ballantyne, S.B., "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". Journal of Geochemical exploration, 51(2), pp. 109-130, 1994.
- [4] Chen, Guoxiong, and Qiuming Cheng. "Fractal-based wavelet filter for separating geophysical or geochemical anomalies from background", Mathematical Geosciences, 50.3, pp. 249 – 272, 2018.
- [5] Luzhao CHEN, Wanhua ZHU, Peilin WU, Chunjiao FEI, Guangyou FANG. "Magnetic Anomaly Detection Algorithm Based on Fractal Features in Geomagnetic Background[J]", Journal of Electronics & Information Technology, 41(2), pp. 332-340, 2019 (Chinese).
- [6] An, B., Zeng, Z., Yan, Z., Zhang, D., Yu, C., Zhao, Y., & Du, Y., "A Novel Approach to Edge Detection for a Gravity Anomaly Based on Fractal Surface Variance Statistics of Fractal Geometry", Applied Sciences, 12(16), 8172. 2022.
- [7] Sabzehi, M., Gol Gohar geological map 1:100000, Geological survey of Iran, Tehran, 1997.
- [8] LIU, J. X., LIU, H. P., Rong, L. I. U., XUE, J. Q., LI, Y. H., & Fang, W. A. N. G., "Application of aeromagnetic survey to mineral exploration of Jinping, Yunnan, China by using multirotor UAV", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 33.5, pp. 1550-1558, 2023.
- [9] Zhou, W., Xiong, S., Yan, J., Meng, Z., & Lin, B., "Metallogenic targets detection by improved joint gravity and

magnetic 3d euler deconvolution methods—a case study in luzong ore concentrating area”, Acta Geophysica, pp. 1-20, 2024.

استفاده از روش‌های فرکتال/مولتی فرکتال جهت آشکارسازی بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی در محدوده ساردوئیه، استان کرمان

سارینا اکبری^۱، حمیدرضا رمزی^۲، رضا قزلباش^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن؛ sarinaakbari@aut.ac.ir

^۲استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن؛ ramazi@aut.ac.ir

^۳استادیار، دانشگاه تهران، دانشکده فنی؛ r.ghezelbash@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: سارینا اکبری

چکیده فارسی

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های ژئوفیزیک هوابرد در پیجویی‌های معدنی، به خصوص در مقیاس‌های منطقه‌ای با رخنمون‌های سنگی محدود و شرایط ژئولوژیکی پیچیده که در منطقه حاکم است، محبوبیت یافته‌اند. از آنجاییکه شرایط فوق می‌تواند باعث بروز خطا در نتایج به دست آمده شود، برای رفع این مشکل، ادغام روش‌هایی با داده‌های ژئوفیزیکی منجر به نتایج قابل اعتمادتر می‌شود. در این پژوهش، روش‌های مختلفی بر روی داده‌های مغناطیسی و رادیومتری هوابرد اعمال شد تا مناطق مطلوب برای کانی‌سازی مس در منطقه ساردوئیه، جنوب شرق ایران، شناسایی شوند. بر اساس منحنی‌های نرخ موفقیت، مشخص شد که روش وزنی مولتی فرکتال معکوس فاصله (MIDW) عملکرد بسیار بهتری در برجسته کردن ناهنجاری‌های اصلی و محلی نسبت به روش وزنی معکوس فاصله (IDW) معمولی داشت. به عبارت دیگر نتایج نشان‌دهنده برتری روش درونیایی مولتی فرکتالی نسبت به روش‌های درونیایی سنتی از نظر دقت و توانایی در بارزسازی آنومالی‌های کوچک و محلی است. علاوه بر این، نتایج حاصل از آن با واقعیت‌های ژئولوژیکی در منطقه سازگارتر بوده و احتمالاً با مناطق کانی‌زایی مس شناخته شده مرتبط هستند. بنابراین، می‌توان از آن برای تحقیقات مشابه و همچنین مطالعات مقیاس بزرگتر در منطقه ساردوئیه و نیز سایر مناطق با شرایط مشابه استفاده کرد. همچنین، ادغام نقشه‌های ژئوفیزیکی مبتنی بر فرکتال حاصل از این تحقیق با داده‌های اکتشافی دیگر مانند داده‌های ژئولوژیکی، ژئوشیمیایی و تغییرات هیدروترمال برای تولید مدل‌های پیشگوی کانی‌زایی می‌تواند نتایج بسیار خوبی به همراه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک، مغناطیس هوابرد، رادیومتری، مولتی فرکتال.

Using Fractal and Multifractal Methods to Reveal Geophysical Anomalies in Sardouyeh District, Kerman, Iran

Sarina Akbari¹, Hamidreza Ramazi², Reza Ghezelbash³

¹Ph.D candidate, Amirkabir university of technology/Institute of mining engineering;
sarinaakbari@aut.ac.ir

² Full professor, Amirkabir university of technology/Institute of mining engineering; ramazi@aut.ac.ir

³ Assistant professor, Thran university/ College of engineering ; r.ghezelbash@ut.ac.ir

* Corresponding author: Sarina Akbari

ABSTRACT

In recent decades, airborne geophysical technologies have been increasingly used in mineral prospecting, especially in regions with limited rock outcrops and complex geological conditions. These complexities can introduce errors to the results obtained from these technologies. To address

this, certain methodologies have been incorporated into the processing of geophysical data, resulting in more reliable outcomes. In this research, various methods were applied to airborne magnetometric and radiometric data to identify areas in the Sardouyeh district, SE Iran, that are favorable for copper mineralization. Based on success-rate curves, it was found that the Multifractal Inverse Distance Weighting (MIDW) method had a far better performance in highlighting the main anomalies than the ordinary Inverse Distance Weighting (IDW) method. In other words, the results show the superiority of the multifractal interpolation method over traditional one in terms of accuracy and ability to highlight small and local anomalies. In addition, the results obtained from it are more consistent with the geological facts in the region and are probably related to known copper mineralization areas. Therefore, it can be used for similar researchs and larger scale studies in Sardouyeh region as well as other regions with similar conditions. Also, the integration of fractal-based geophysical maps derived from this research with other exploratory data such as geological, geochemical and hydrothermal changes data to produce predictive models of mineralization can bring very good results.

Keywords: Geophysics, Aeromagnetic, Radiometry, Multifractal.

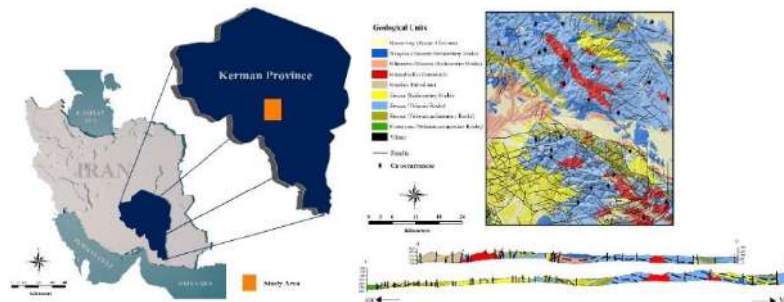
مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی هوابرد در کاوش معدنی در مقیاس منطقه‌ای بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، به خصوص در مکان‌هایی که رخنمون سنگ‌های مرتبط با کانی‌سازی محدود است [26]. آن‌ها می‌توانند در یک دوره زمانی کوتاه یک منطقه بزرگ را با دقت بالا پوشش داده، زمان را صرفه‌جویی کرده و هزینه‌های بزرگ کاوش را کاهش دهند [30] [21] [3] این پژوهش بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد و رادیومتری تمرکز دارد، که به طور معمول برای تفسیرهای زمین‌شناسی، پی‌جویی معدنی و شناسایی فرایندهای ساختاری و ژئولوژیکی استفاده می‌شوند [29] [27] [25] [24] [23] [13] [12]. این داده‌ها می‌توانند در پژوهش‌های پیشرفته مورد استفاده قرار گیرند، مانند مدل‌سازی پتانسیل معدنی مبتنی بر GIS [17] [7] [2] [1]. در این راستا چالش اصلی جداسازی محتوای بی‌هنجار از مقادیر زمینه است [4]. تکنیک‌های متنوعی برای این منظور استفاده می‌شوند، از روش‌های آماری ساده تا روش‌های پیچیده فرکتال و چندفرکتالی [11]. با این حال، مدل‌های درون‌یابی زمین آماری ممکن است ناهنجاری‌ها را هموار کنند، و منجر به از دست دادن اهداف مهم کاوش شود [18]. روش‌های فرکتال و چندفرکتالی، که توزیع فضایی داده‌ها و شکل هندسی ناهنجاری‌ها را در نظر می‌گیرند، برای جداسازی کلاس‌های ناهنجاری و زمینه بسیار کارآمدتر هستند [22] [18]. این روش‌ها در مطالعات ژئوشیمیایی زیادی برای جداسازی جمعیت‌های ناهنجار بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی استفاده شده‌اند، اما آن‌ها برای جداسازی ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی، به خصوص داده‌های ژئوفیزیکی هوابرد منطقه‌ای، کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [16] [15] [14]. جنبه اصلی نوآوری این مقاله، مقایسه روش درون‌یابی معمول و روش درون‌یابی مولتی فرکتالی برای جداسازی ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی مرتبط با داده‌های مغناطیس هوابرد و رادیومتری جمع‌آوری شده از منطقه ساردوئیه، استان کرمان، ایران است. هدف اصلی این مطالعه، استفاده از روش درون‌یابی معمولی و روش درون‌یابی چند فرکتالی به عنوان تکنیک‌های جداسازی و مقایسه کارایی آن‌ها با استفاده از منحنی‌های نرخ موفقیت برای شناسایی مناطق پستی‌گویی کانی‌سازی Cu (عمدتاً سیستم‌های پورفیری و اسکارن) با هدف معرفی هدف‌های کاوش جدید است. در نهایت ارزیابی کمی ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی (مغناطیس و رادیومتری هوابرد) حاصل از دو روش یاد شده استفاده از یک معیار معتبر به نام شاخص چگالی نرمال‌شده (Nd) انجام شد [19].

محدوده مورد مطالعه

منطقه مطالعه، ورقه ساردوئیه، در استان کرمان، جنوب شرق ایران، درون نوار ماگمایی ارومیه-دختر (UDMB) قرار دارد (شکل ۱). این منطقه به دلیل دارا بودن کانی‌سازی مس بسیار شناخته شده است. طبق شکل شماره ۲ ژئولوژی منطقه شامل کالرملاژ کرتاسه بالایی به عنوان قدیمی‌ترین واحدهای سنگی، سازندهای اتوسن، و رسوبات نئوژن جوان‌تر است. معادن مس در سراسر منطقه به طور گسترده‌ای

پراکنده هستند، بیشتر آن‌ها به طور ژنتیکی و فضایی با سیستم‌های پورفیری مرتبط می‌باشند. رگه‌های کانی‌سازی بیشتر در ساختارهای آتشفشانی ائوسن واقع شده‌اند که در طول گسل‌های بسیار سیلیسی شده تشکیل شده‌اند.



شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (۱): موقعیت محدوده مورد مطالعه شکل

مواد و روش‌ها

داده‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده در این مطالعه، شامل داده‌های مغناطیسی و رادیومتری هوابرد، با استفاده از یک مغناطیس‌سنج بخار سزیم جمع‌آوری شده‌اند. جمع‌آوری داده‌ها در یک شبکه منظم با خطوط پرواز با روند شمال-جنوب، با فاصله ۱ کیلومتری از یکدیگر انجام شده است. ارتفاع پرواز ۱۲۰ متر بالای سطح دریا و سرعت هواپیما بین ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر در ساعت بوده است. ده خوانش به طور مداوم هر ثانیه انجام شده و در مجموع، ۶۸،۱۰۸ نقطه در این منطقه با فاصله حدود ۲۰۰ متری بین نقاط اندازه‌گیری شده است. پس از اعمال تصحیحات لازم و آماده‌سازی داده‌ها، روش‌های مورد استفاده جهت ارزیابی این داده‌ها و درونیایی و در نهایت تولید نقشه‌های پیشگوی مناطق مستعد کانی‌سازی مس، روش درونیایی معمول و روش درونیایی مولتی فرکتالی می‌باشند.

روش درونیایی وزنی معکوس فاصله (IDW) و مولتی فرکتالی درونیایی فاصله معکوس وزنی (MIDW)

روش درونیایی وزنی معکوس فاصله (IDW) یکی از ابزارهای رایج پردازش‌های زمین‌شناسی برای درونیایی داده است [6]. این روش یک تکنیک میانگین متحرک وزن دار است که در آن درونیایی بیشتر تحت تأثیر مقادیر شواهد همسایه نسبت به مقادیر شواهد دور است [9]. با این حال، این تکنیک ویژگی‌های محلی داده‌ها را در نظر نمی‌گیرد، که می‌تواند منجر به هموار کردن داده‌ها و عدم تولید همه داده‌های بیرونی در طول درونیایی شود. برای غلبه بر این نقائص، مدل چندفرکتال وزنی معکوس فاصله (MIDW) پیشنهاد شده، که در آن همبستگی فضایی بین داده‌ها، ساختارهای محلی، و مقادیر سینگولار محلی به طور همزمان در نظر گرفته شده است. این تکنیک می‌تواند ناهنجاری‌های محلی را در طول درونیایی حفظ کند، که برای جداسازی ناهنجاری‌ها از مقادیر زمینه، به خصوص در مسائل پیچیده، بسیار موثر است [19].

رابطه میانگین متحرک وزن دار تکنیک MIDW به شرح زیر است [10]:

$$\rho(\varepsilon_1) = \varepsilon_1^{\alpha(x_0)-2} \sum_{\Omega(x_0,1)} \omega(\|x_0 - x\|)Z(x) \quad (1)$$

که در آن $\Omega(x_0,1)$ اندازه پنجره، ω وزن تابع میانگین متحرک، $\alpha(x_0)$ مقدار شاخص تک‌فرکتال محلی در مکان x_0 است. روش MIDW قادر است مقادیر سینگولاریتی را علاوه بر در نظر گرفتن روابط فضایی در نظر بگیرد. در این رابطه، وقتی $\alpha(x_0)$ برابر با ۲

باشد، X در مقادیر پس‌زمینه قرار دارد و هیچ سینگلاریتی وجود ندارد و بنابراین، نتایج این روش همانند سایر روش‌های میانگین وزنی است. با این حال، اگر X_0 در مکانی با مقادیر بالا (یعنی، مناطق غنی شدگی) قرار داشته باشد و مقدار α کمتر از ۲ باشد ($\alpha(X_0) < 2$)، نتایج این روش بیشتر از روش‌های میانگین وزنی معمولی خواهد بود. به همین ترتیب، وقتی $\alpha(X_0) > 2$ و X_0 در مقادیر پایین قرار دارد (یعنی، مناطق تهی شدگی)، نتیجه روش معمولاً کمتر از نتایج میانگین وزنی معمولی است.

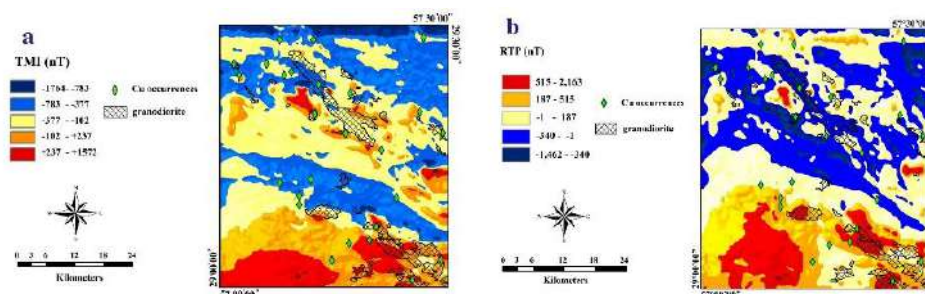
روش RTP

در این مطالعه همچنین از روش کاهش به قطب (RTP) استفاده شده است، که زمانی که با یک میدان مغناطیسی کار می‌کنیم، استفاده می‌شود. این روش به چالش تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی پرداخته است، که به شدت تحت تأثیر انحراف و کجی میدان ژئومغناطیسی است [27]. روش RTP، که اولین بار توسط بارانوف (۱۹۵۷) پیشنهاد شده، با یک انحراف ۴۴.۶ درجه و یک کجی ۱.۸۶ درجه با استفاده از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj 8.4 اعمال شده است. لازم به ذکر است که تمام پردازش‌های بعدی بر روی نقشه RTP انجام شده است (شکل ۳).

یافته‌ها

نتایج روش درونیابی وزنی معکوس فاصله (IDW) و مولتی فرکتالی درونیابی فاصله معکوس وزنی (MIDW)

در این مطالعه، ابتدا روش درونیابی معمولی، یعنی وزنی معکوس فاصله (IDW)، بر روی داده‌های مغناطیسی هوابرد و رادیومتریک اعمال شد (شکل ۴). این روش بر اساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطه تخمینی انجام می‌شود، که بر اساس فاصله معکوس وزن‌دهی می‌شوند. ناهنجاری مغناطیسی عمدتاً در قسمت مرکزی، شرقی و جنوب شرقی منطقه ظاهر شده است، که از نظر ژئولوژیکی تا حدودی با رخنمون‌های گرانودیوریت به عنوان واحدهای سنگی اصلی مرتبط با مس در منطقه سازگار است. اما یک ناهنجاری مغناطیسی قوی در قسمت جنوب غربی منطقه مشاهده شده است که به نظر نمی‌رسد با کانی‌سازی مس ارتباط داشته باشد. برای رفع مشکلات ناشی از روش‌های درونیابی معمولی مانند IDW، روش چندفرکتالی وزنی معکوس فاصله (MIDW) اعمال شد (شکل ۵). این رویکرد می‌تواند به طور واضح مقادیر آنومال اولیه را برجسته کند و تا حدودی اثر زمینه را کاهش دهد، به طوری که ناهنجاری‌های اصلی بیشتر برجسته هستند و مرز واضح‌تری با زمینه دارند.

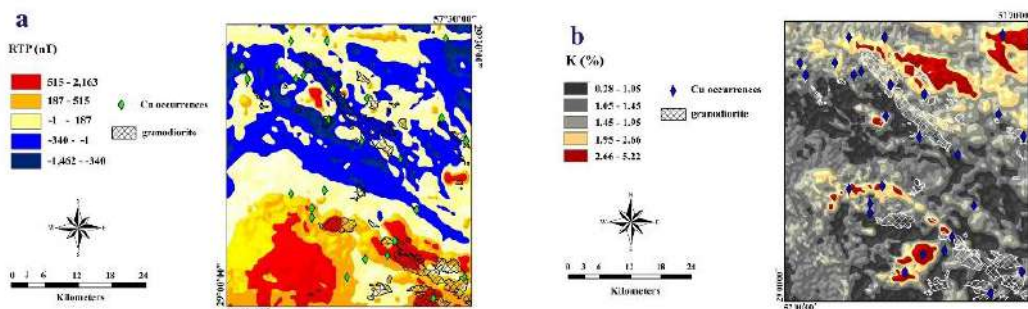


شکل (۳): (a) نقشه مقادیر میدان مغناطیس کل (b) نقشه میدان مغناطیسی برگردان به قطب

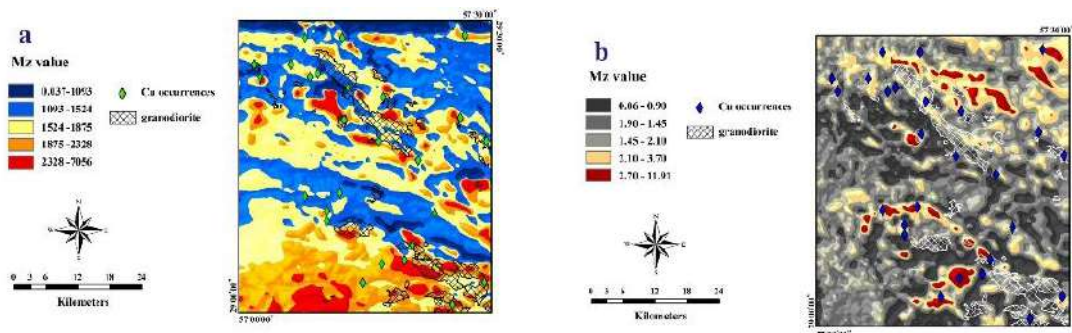
ارزیابی کمی نتایج با استفاده از منحنی نرخ موفقیت

عملکرد مدل‌ها با استفاده از منحنی نرخ موفقیت مقایسه شد، یک تکنیک اعتبارسنجی قابل اعتماد که به طور کمی دقت مدل‌سازی را با در نظر گرفتن مکان و تعداد اندیس‌های مس شناخته شده بر روی جمعیت‌های ناهنجاری و زمینه اندازه‌گیری می‌کند. اگر منحنی نرخ موفقیت مدل نهایی بالاتر از خط قطری قرار گیرد، نشان دهنده همبستگی فضایی بالا بین مدل‌های پیش‌بینی و کانی‌سازی متناظر در

منطقه مطالعه می‌باشد. این نمودار می‌تواند برای تعیین دقت مدل و کارایی تکنیک، و مقایسه رویکردهای مختلف استفاده شود. در این مطالعه، منحنی نرخ موفقیت برای ارزیابی کمی عملکرد مدل‌های ژئوفیزیکی منتج از تکنیک‌های درون‌یابی معمولی و مولتی فرکتالی استفاده اعمال شد (شکل ۶). هرچه فاصله مثبت هر منحنی مدل از خط اندازه‌گیری بیشتر باشد، کارایی و عملکرد آن بیشتر است. برای هر دو داده مغناطیسی و رادیومتریک، فاصله منحنی نرخ موفقیت حاصل از مدل MIDW از خط قطری قابل توجه‌تر از منحنی‌های مربوط به مدل دیگر است.

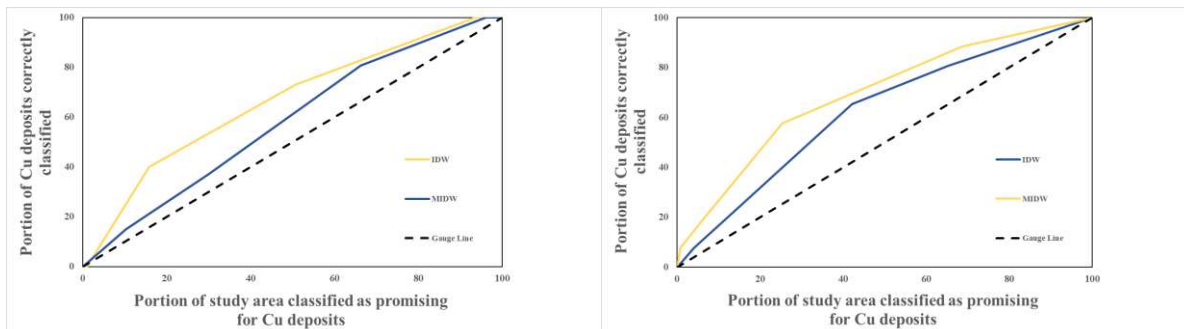


شکل (۴): نقشه‌های ژئوفیزیکی حاصل از تکنیک IDW برای (الف) داده‌های مغناطیسی و (ب) داده‌های رادیومتریک



شکل (۵): نقشه‌های ژئوفیزیکی حاصل از تکنیک MIDW برای (الف) داده‌های مغناطیسی و (ب) داده‌های رادیومتریک

این بدین معنی است که مدل مولتی فرکتالی می‌تواند با موفقیت مناطق پیشگوی مرتبط با کانی‌سازی مس در منطقه ساردوئیه را تصویرسازی کند و برای آشکارسازی ردهای ناهنجاری ژئوفیزیکی بهترین عملکرد را داشته باشد. علاوه بر این کلاس‌های ناهنجاری مطلوب مغناطیسی و رادیومتریک حاصل، به شدت با وقوع اندیس‌های معدنی Cu شناخته شده و توده‌های نفوذی گرانودیوریت مرتبط هستند.



شکل (۶): منحنی‌های نرخ موفقیت مدل‌های حاصل از تکنیک‌های IDW و MIDW برای داده‌های مغناطیسی (چپ) و رادیومتریک (راست)

تفسیر نتایج

در مطالعات مقیاس منطقه‌ای-محلی در محیط‌های ژئولوژیکی پیچیده، استفاده از روش‌های ژئوفیزیک هوابرد بدون کمک از روش‌های بهینه‌ساز (روش‌های مولتی فرکتالی) می‌تواند منجر به نتایج نادرست شود و ناهنجاری‌های ضعیف و محلی را توسط پس‌زمینه قوی پنهان کند [16] [15] [14] برای به دست آوردن یافته‌های رضایت‌بخش، ضروری است که داده‌های ژئوفیزیک با استفاده از روش‌های مناسب‌تر مانند رویکردهای فرکتال و چندفرکتال تحلیل شود.

نتایج نشان داد که هر دو استراتژی قادر به بهبود پاسخ‌های مدل‌های ژئوفیزیک بودند. نسبت به IDW معمولی، روش MIDW چندفرکتال در هر دو نوع داده ژئوفیزیک نتایج بهتری ارائه داد. ناهنجاری‌های ضعیف و محلی جدید به خوبی در هر دو نقشه رادیومتریک و مغناطیسی تعریف شده و مرزها شارپ شده‌اند. منحنی‌های نرخ موفقیت آماده شده برای دو روش نیز یافته‌ها را تأیید کردند و روش درونیایی مولتی فرکتالی به عنوان روش جداسازی موثرتری برای شناسایی ناهنجاری‌های ضعیف و محلی درون محیط‌های ژئولوژیکی پیچیده در نظر گرفته شد. به طور خلاصه، بر اساس نتایج، روش درونیایی چندفرکتالی قابل اعتمادتر است زیرا نتایج حاصل از آن با واقعیت‌های ژئولوژیکی در منطقه سازگارتر بوده و احتمالاً با مناطق کانی‌زایی مس شناخته شده مرتبط هستند. بنابراین، می‌توان از آن برای تحقیقات مشابه و همچنین مطالعات مقیاس بزرگتر در منطقه ساردوئیه و نیز سایر مناطق با شرایط مشابه استفاده کرد. علاوه بر این، ادغام نقشه‌های ژئوفیزیک مبتنی بر فرکتال حاصل از این تحقیق با داده‌های اکتشافی دیگر مانند داده‌های ژئولوژیکی، ژئوشیمیایی و تغییرات هیدروترمال برای تولید مدل‌های پیشگوی کانی‌زایی می‌تواند نتایج بسیار خوبی به همراه داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاکی از آن است که روش درونیایی مولتی فرکتالی چندین مزیت نسبت به روش‌های درونیایی سنتی دارد:

- **حفظ ناهنجاری‌های محلی:** روش‌های درونیایی سنتی، اغلب ناهنجاری‌های محلی را هموار می‌کنند، که می‌تواند منجر به از دست دادن اطلاعات ارزشمند شود. در مقابل، روش کریجینگ چندفرکتالی قادر به حفظ ناهنجاری‌های محلی است و نمایش دقیق‌تری از داده‌ها را فراهم می‌کند.
- **در نظر گرفتن روابط فضایی:** بر خلاف روش‌های سنتی، روش کریجینگ چندفرکتالی روابط فضایی بین نقاط داده را در نظر می‌گیرد.
- **دقت بهبود یافته:** روش کریجینگ چندفرکتالی نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های درونیایی سنتی ارائه می‌دهد. این مورد به خصوص زمانی مشهود است که با شرایط ژئولوژیکی پیچیده سر و کار داریم.
- **کارایی در برجسته کردن مناطق چشم‌انداز:** روش درونیایی چندفرکتالی عملکرد برتری در آشکارسازی ردپای ناهنجاری‌های ژئوفیزیک و تصویرسازی مناطق چشم‌انداز مرتبط با کانی‌سازی مس نشان داده است که آن را به یک ابزار قدرتمند برای کاوش و تحقیقات آینده مبدل می‌کند.

مراجع

- [1] Abedi, M., Torabi, S.A., Norouzi, G.H. and Hamzeh, M., (2012). ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping. *Journal of applied geophysics*, 87, pp.9-18.
- [2] Akbari, S., & Ramazi, H. (2023). Application of AHP-SWOT and geophysical methods to develop a reasonable planning for Zagheh tourist destination considering environmental criteria. *International Journal of Environmental Science*, 8.
- [3] Ali, M. Y., Fairhead, J. D., Green, C. M., & Noufal, A. (2017). Basement structure of the United Arab Emirates derived from an analysis of regional gravity and aeromagnetic database. *Tectonophysics*, 712, 503-522.
- [4] Bai J, Porwal A, Hart C, Ford A, Yu L (2010) Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan China. *J Geochem Explor* 104(1):1-11.

- [5] Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudogravimetric anomalies. *Geophysics* 22, 359-383.
- [6] Bartier, P. M., & Keller, C. P. (1996). Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers & Geosciences*, 22(7), 795-799.
- [7] Chen, X., Xu, R., Zheng, Y., Jiang, X., & Du, W. (2018). Identifying potential Au-Pb-Ag mineralization in SE Shuangkoushan, North Qaidam, Western China: combined log-ratio approach and singularity mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 189, 109-121.
- [8] Cheng, Q. (2008). Modeling local scaling properties for multiscale mapping. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 525-532.
- [9] Cheng, Q., (1999). Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 65(3), pp.175-194.
- [10] Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., (2000). Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9(1), pp.43-52.
- [11] Cooper, G.R.J., (2003). Feature detection using sun shading. *Computers & Geosciences* 29, 941-948.
- [12] Fedi, M., & Florio, G. (2001). Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. *Geophysical prospecting*, 49(1), 40-58.
- [13] Ferdows, M. S., & Ramazi, H. (2015b). Application of the fractal method to determine the membership function parameter for geoelectrical data (case study: Hamyj copper deposit, Iran). *Journal of Geophysics and Engineering*, 12(6), 909-921.
- [14] Ferdows, M. S., & Ramazi, H. (2016). Performing the power spectrum-area method to separate anomaly from background for induced polarization data: (a case study; Hamyj copper deposit, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 9(10), 1-8.
- [15] Ferdows, M. S., & Ramazi, H. R. (2015a). Application of the singularity mapping technique to identify local anomalies by polarization data (a case study: Hamyj Copper Deposit, Iran). *Acta Geodaetica et Geophysica*, 50(3), 365-374.
- [16] Forson, E. D., Menyeh, A., & Wemegah, D. D. (2021). Mapping lithological units, structural lineaments and alteration zones in the Southern Kibi-Winneba belt of Ghana using integrated geophysical and remote sensing datasets. *Ore Geology Reviews*, 137, 104271.
- [17] Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A. (2018a). Comparison of U-spatial statistics and C-A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), pp.180-191.
- [18] Ghezelbash, R., & Maghsoudi, A. (2018b). A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11), 275.
- [19] Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., & Daviran, M. (2019a). Combination of multifractal geostatistical interpolation and spectrum-area (S-A) fractal model for Cu-Au geochemical prospects in Feizabad district, NE Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(5), 1-14.
- [20] Gonçalves, B. F., & Sampaio, E. E. (2013). Interpretation of airborne and ground magnetic and gamma-ray spectrometry data in prospecting for base metals in the central-north part of the Itabuna-Salvador-Curaçá Block, Bahia, Brazil Interpretation of Mag-Gama data. *Interpretation*, 1(1), T85-T100.
- [21] Kalantari, M., Ghezelbash, S., Ghezelbash, R., & Yaghmaei, B. (2020). Developing a fractal model for spatial mapping of crime hotspots. *European Journal on Criminal Policy and Research*, 26, 571-591.
- [22] Liu, Y., Xia, Q., & Cheng, Q. (2021). Aeromagnetic and geochemical signatures in the Chinese Western Tianshan: Implications for tectonic setting and mineral exploration. *Natural Resources Research*, 30(5), 3165-3195.
- [23] Valenta, R. K., Jessell, M. W., Jung, G., & Bartlett, J. (1992). Geophysical interpretation and modelling of three-dimensional structure in the Duchess area, Mount Isa, Australia. *Exploration Geophysics*, 23(2), 393-400.
- [24] Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., & Mackenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The leading edge*, 23(2), 116-119.
- [25] Wang, J., & Meng, X. (2019). An aeromagnetic investigation of the Dapai deposit in Fujian Province, South China: Structural and mining implications. *Ore Geology Reviews*, 112, 103061.
- [26] Wijns, C., Perez, C., & Kowalczyk, P. (2005). Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70(4), L39-L43.
- [27] Zhang, P., Du, J., Wang, Z., Yang, M., & Chen, C. (2022). Extraction, evaluation and replacement techniques of long wavelength components from compiled regional aeromagnetic anomaly data. *Chinese Journal of Geophysics*, (7), 2595-2612.

یک فیلتر جدید با وضوح بالا در تشخیص لبه داده های میدان پتانسیل

پوراندهخت سلطانی^{۱*}، امین روشندل کاهو^۲، حمیدرضا باغزندانی^۳

۱. دانشجوی دکترای اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود Poorandokht.soltani@gmail.com

۲. دکترای ژئوفیزیک لرزه شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود roshandel@shahroodut.ac.ir

۳. دانشجوی دکترای اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود hbaghzendani@yahoo.com

چکیده

در برخی از کانی زایی های آهن به علت ارتباط کانی زایی با ساختارهای خطی و هزینه بر بودن هر نقطه حفاری انجام شده، تشخیص گسترش کانی زایی تا حدود قابل قبول می تواند ریسک حفاری های مورد نظر را در این سیستم کانی زایی تا حدود زیادی کاهش دهد به همین علت همواره استفاده از فیلترهای تعیین لبه و فیلترهای مشتق محور که به نویز های محیطی کمترین حساسیت را داشته باشد از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. تشخیص لبه های یک منبع یک چالش معمول در تجزیه و تحلیل میدان های پتانسیل است. با این حال، روش های تشخیص لبه مشکلات خاص خود را، همچون پاسخ های با حساسیت کم به تغییرات ناچیز در دامنه های ضعیف و تخمین کمتر از حد بر روی اوج ها در گرادیان یا تخمین بیش از حد بر روی حاشیه ها را دارند. در این مقاله، یک رویکرد جدید با استفاده از تابع آرکسینوس نسبت گرادیان عمودی به مجموع گرادیان کل دامنه گرادیان افقی معرفی می شود تا حاشیه های منبع را شناسایی کند. اعتبار این روش بر روی داده های مصنوعی و واقعی آزمایش شده و نتایج تشخیص لبه با نتایج دیگر مقایسه می شوند. فیلتر پیشنهادی نتایج با دقت و وضوح بالاتری ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: تشخیص لبه، داده میدان پتانسیل، تابع آرکسینوس.

A new high resolution filter in edge detection of potential field data

Poorandokht Soltani^{1*}, Amin Roshandel Kahoo², Hamidreza Baghzendani³

¹Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; Poorandokht.soltani@gmail.com

²Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; roshandel@shahroodut.ac.ir

³Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; roshandel@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

In some iron mineralization, due to the connection of mineralization with linear structures and the high cost of each drilling point, detecting the expansion of mineralization to an acceptable extent can greatly reduce the risk of the intended drilling in this mineralization system. For this reason, it is always important to use edge-determining filters and derivative-based filters that are least sensitive to environmental noise. Detecting the edges of a source is a common challenge in the analysis of potential fields. However, edge detection methods have their own problems, such as low sensitivity responses to small changes in weak amplitudes and underestimation on peaks in the gradient or overestimation on geobody. In this paper, a new approach is introduced using the arcsine function of the ratio of the vertical gradient to the sum of the gradients of the total horizontal gradient domain to identify source geobody. The validity of this method is tested on artificial and real data and the edge

detection results are compared with other results. The proposed filter provides results with higher accuracy and resolution.

Keywords: Edge detection, potential field data, arcsine function.

۱-مقدمه

با توجه به اینکه میدان پتانسیل ناهنجاری‌های کوچک در هر دو میدان گرانش و مغناطیسی اطراف یک منطقه و ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی و منطقه‌ای را ثبت می‌کند، روش گرانشی بر اساس تفاوت چگالی بین انواع سنگ‌ها استوار است. بنابراین، فیلدهای ناهنجار به عنوان تغییرات معدنی یا ساختار زمین‌شناسی به صورت کیفی تفسیر می‌شوند. روش مغناطیسی بر اساس تغییرات جانبی در حساسیت مغناطیسی سنگ‌ها که ناهنجارها در فیلد مغناطیسی طبیعی زمین ایجاد می‌کنند، استوار است [1]. تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (شامل ناهنجاری‌های گرانشی و مغناطیسی) معمولاً با استفاده از روش‌های ریاضی انجام می‌شود تا ساختارهای زیرزمینی که منبع ناهنجارها هستند، بررسی شود [2]. یکی از اهداف اساسی در تفسیر میدان پتانسیل، تعیین پارامترهای هندسی چگالی و ساختارهای مغناطیسی مانند عمق و لبه‌ها است [3]. داشتن اطلاعات از لبه‌های منبع میدان پتانسیل نقش مهمی در اکتشاف منابع معدنی دارد. بنابراین، کارایی فیلترهای تشخیص لبه نیازمند تعیین دقیق موقعیت‌های افقی منابع عامل است. انواعی از روش‌ها بر مبنای گرادیان‌های میدان برای خط‌کشی لبه‌های منبع توسعه یافته‌اند [4]. گرادیان افقی یک روش محبوب برای برجسته کردن مرزهای منابع گرانشی و مغناطیسی است [5]. Bournas and Bake [6] نشان دادند که استفاده از مقادیر بیشینه گرادیان افقی کل می‌تواند لبه‌های منبع را خط‌کشی کند. [7] Cella, Fedi and Florio مشتقات مرتبه بالا برای افزایش وضوح نتایج تشخیص لبه استفاده کردند. با این حال، معایب این روش‌ها این است که نمی‌توانند دامنه‌های ناهنجارها را که از جسم‌هایی در عمق‌های مختلف ایجاد شده است، هموار کنند [8]. در سال‌های اخیر، علاقه زیادی به توسعه روش‌های مبتنی بر فاز با توانایی تولید نتایج متعادل شده وجود دارد. Miller and Singh [9] نشان دادند که استفاده از تابع آرکتانژانت نسبت گرادیان عمودی به گرادیان افقی دامنه، که زاویه تلت نامیده می‌شود، می‌تواند به طور همزمان دامنه‌های بزرگ و کوچک را هموار کند. Verduzco, Fairhead [10] پیشنهاد دادند که محاسبه دامنه گرادیان زاویه تلت می‌تواند به بهبود وضوح نتایج تشخیص لبه کمک کند. Wijns, Perez and Kowalczyk [11] یک تکنیک جدید مبتنی بر فاز به نام نقشه تتا معرفی کردند که از نسبت دامنه گرادیان کل به دامنه گرادیان افقی برای نرمال‌سازی تصاویر داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌کند. Cooper and Cowan [12] توصیه کردند که از نسبت دامنه گرادیان افقی به مقدار مطلق گرادیان عمودی برای مشخص کردن ویژگی‌های دامنه کمتر استفاده شود. یک فیلتر تشخیص لبه دیگر، بر اساس نسبت انحراف معیار پنجره‌ای از مشتقات میدان پتانسیل، توسط Cooper and Cowan [13] توسعه داده شد تا دامنه‌های بزرگ و کوچک را هموار کند. Ferreira, de Souza [14] پیشنهاد دادند که از زاویه تیلت گرادیان افقی برای تعادل سیگنال‌ها از ساختارهای کم‌عمق و عمیق استفاده شود. Yuan and Yu [15] فیلترهای جدیدی بر اساس گرادیان کل جهت افقی و گرادیان کل جهت افقی مرتبه دوم معرفی کردند تا روش گرادیان کل را بهبود بخشند.

در این تحقیق، یک فیلتر جدید برای تشخیص لبه معرفی شده است تا مرزهای منابع گرانشی و مغناطیسی را مشخص کند. این فیلتر پایه‌ای بر روی بخش واقعی یک تابع آرکسینوس از نسبت گرادیان عمودی به گرادیان کل دامنه فیلد گرادیان افقی بنیان‌گذاری شده است. کارایی آن از طریق استفاده از داده‌های مصنوعی و همچنین داده‌های واقعی ارزیابی شده است.

2- روش تحقیق

اولین فیلتر مبتنی بر فاز توسط Miller and Singh [9] به نام زاویه شیب معرفی شد. (θ) که مشتق عمودی را با استفاده از شیب افقی کل نرمال می‌کند. که به صورت زیر تعریف می‌شود که F_x, F_y, F_z گرادیان‌های داده میدان پتانسیل F به ترتیب در راستای $x, y,$ و z هستند. در اینجا، نسبت شیب عمودی به افقی عدم وابستگی زاویه تیلت در دامنه ناهنجاری را تضمین می‌کند. برخی از

آرکوسینوس یا آرکسینوس نسبت مشتقات داده های میدان پتانسیل برای متعادل کردن دامنه ناهنجاری های قوی و ضعیف به طور همزمان استفاده کردند [۱۶].

$$TA = \text{atan} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (1)$$

Ferreira, de Souza [۱۴] را در رابطه شماره (۱) با شیب افقی کل جایگزین کرد تا لبه ها را واضح تر نشان دهد. رابطه شماره (۱) به صورت زیر بازنویسی شد که HGA کل دامنه شیب افقی میدان پتانسیل F است. HGA_x ، HGA_y و HGA_z گرادیان های x ، y و z هستند.

$$TAHG = \text{atan} \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2}} \right), \quad HGA = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2)$$

در اینجا، ما یک رویکرد مشابه را تعریف می کنیم که مبتنی بر تابع آرکسینوس نسبت عمودی به شیب کل HGA است که می توان به صورت بیان کرد:

$$EHGA_0 = \text{asin} \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2 + HGA_z^2}} \right) \quad (3)$$

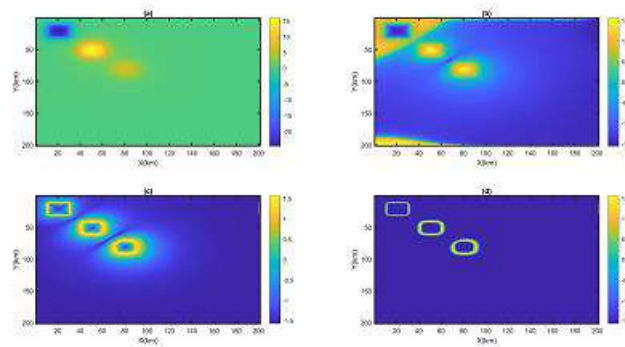
مشخص شد که استفاده از بخش واقعی نسخه بهبودیافته فیلتر $EHGA_0$ لبه های بدنه را بهتر از فیلترهای $TAHG$ و $EHGA_0$ ترسیم می کند، که k یک عدد واقعی مثبت است که توسط مفسر انتخاب می شود.

$$EHGA = R \left(\text{asin} \left(k \left(\frac{HGA_z}{\sqrt{HGA_x^2 + HGA_y^2 + HGA_z^2}} - 1 \right) + 1 \right) \right) \quad (4)$$

۳- داده مصنوعی

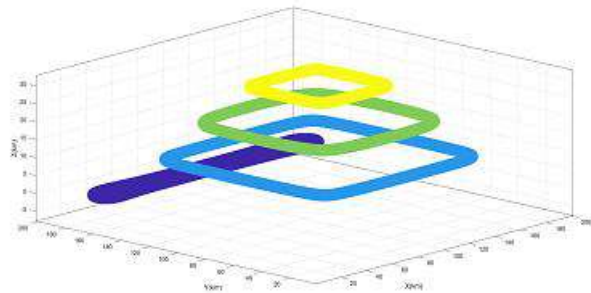
در این مقاله، ما اثربخشی متد EHGA را از طریق داده های مغناطیسی ارزیابی می کنیم و نتایج را با آنچه از روش های محبوب مانند گرادیان کل (TG) و زاویه تیلت افقی دامنه (TAHG) به دست می آید، مقایسه می کنیم. مثال اول یک مدل را در نظر می گیرد که شامل سه مربع با اندازه های ۲۰ در ۲۰ است (شکل ۱). برای آزمایش وابستگی روش ها به عمق ساختارهای زیرسطحی، منابع $M1$ ، $M2$ و $M3$ در عمق های مختلف قرار دارند. عمق ابتدایی اجسام $M1$ ، $M2$ و $M3$ به ترتیب ۱، ۵ و ۷ کیلومتر است. چگالی هر سه منبع به ترتیب ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ است. ناهنجاری های مغناطیسی ناشی از مدل بر روی یک شبکه با ۲۰۱ در ۲۰۱ نقطه با فاصله مربعی ۱ کیلومتر محاسبه شد. داده های مصنوعی در شکل 1(a)، نشان داده شده است و شکل 1(b) نتیجه به دست آمده از استفاده از روش TG را نشان می دهد. می توان دید که روش TG نمی تواند دامنه های پاسخ سیگنال از منابع کم عمق و عمیق را هموار کند. این روش می تواند لبه های بدن کم عمق تر ($M1$) را به وضوح ترسیم کند، اما پاسخ از بدنه های عمیق تر $M2$ و $M3$ مات است. شکل 1(b) لبه ها را نشان می دهد که با استفاده از روش TA ترسیم شده اند. این روش با صفر کردن های TA، لبه های منبع را نشان می دهد، اما پاسخ ها در لبه ها

کم به نظر می‌آیند. شکل ۱ (c) لبه‌ها را نشان می‌دهد که با استفاده از روش TAHG ترسیم شده‌اند. در اینجا، این روش تمام لبه‌ها را بدون هیچ مرز غلطی نشان می‌دهد، با این حال، حاشیه در اطراف لبه‌ها وسیع است. شکل (d) 1 لبه‌ها را نشان می‌دهد که با استفاده از روش EHGA ترسیم شده‌اند. همانطور که از این شکل مشخص است، این روش نه تنها می‌تواند جلوی تولید برخی مرزهای غلط را بگیرد، بلکه لبه‌های با وضوح بالاتری نسبت به روش‌های مقایسه‌شده تولید می‌کند. علاوه بر این، نتیجه نشان می‌دهد که این روش کمترین وابستگی به عمق منبع دارد.

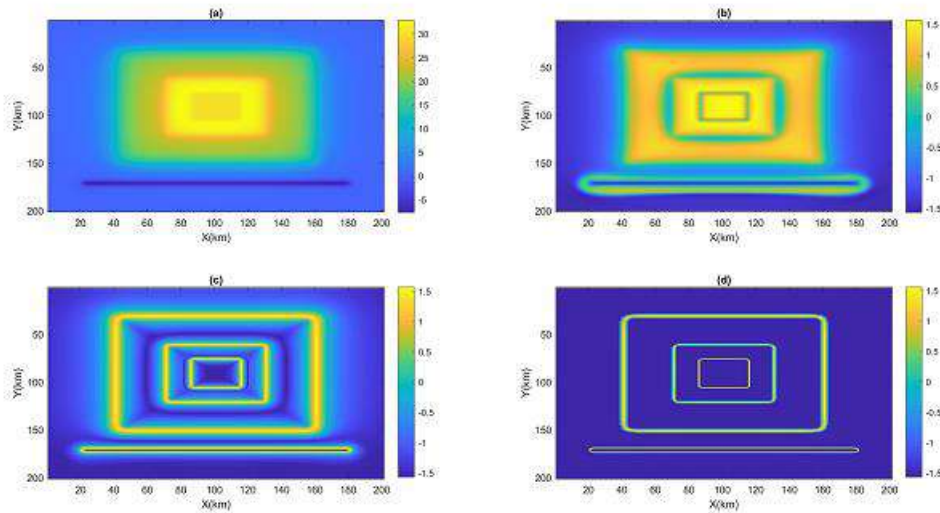


شکل 1. مثال اول ناهنجاری‌های مغناطیسی مصنوعی ناشی از سه مربع مغناطیسی (a)، (b) TA، (c) TAHG و (d) EHGA.

در مثال دوم، یک مدل گرانشی پیچیده را در نظر می‌گیریم که شامل یک منبع مستطیلی نازک (G1) و سه منبع مستطیلی ترکیبی در عمق‌های مختلف G2، G3 و G4 است (شکل ۲). پارامترهای مدل در جدول ۱ آورده شده‌اند. ناهنجار گرانشی نظری ناشی از مدل بر روی یک شبکه ۲۰۱ در ۲۰۱ با فاصله مربعی ۱ کیلومتر محاسبه شد و در شکل ۳ (a) نشان داده شده است. شکل ۳ (b) نتیجه به‌دست‌آمده از اعمال روش TA بر داده‌های گرانشی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، دامنه‌های سیگنال از منابع کم‌عمق و عمیق به خوبی هموار شده‌اند، اما مرزهای غلط در اطراف منابع G1 و G3 ایجاد کرده است. شکل ۳ (c, d) نتیجه به‌دست‌آمده از اعمال روش TAHG و EHGA بر داده‌های گرانشی در شکل ۳ (a) را به ترتیب نشان می‌دهد. آشکار است که هر دو روش بسیار مؤثر در تعادل دامنه‌های سیگنال از منابع کم‌عمق و عمیق هستند. استفاده از این روش‌ها می‌تواند جلوی تولید برخی از مرزهای غلط را بگیرد. با این حال، لازم به ذکر است که EHGA نشان می‌دهد که قله‌ها در اطراف لبه‌ها نسبت به TAHG با وضوح بیشتری قرار دارند.



شکل ۲. نمای سه‌بعدی از مدل گرانشی.



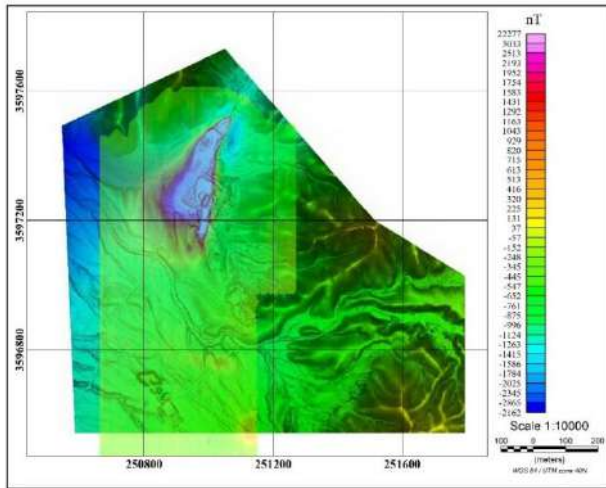
شکل ۳. مثال دوم ناهنجاری های گرانیتی مصنوعی ناشی از چهار مستطیل (a), (b)TAHG, (c)TAHG و (d)EHGA.

جدول ۱. پارامترهای مدل گرانیتی

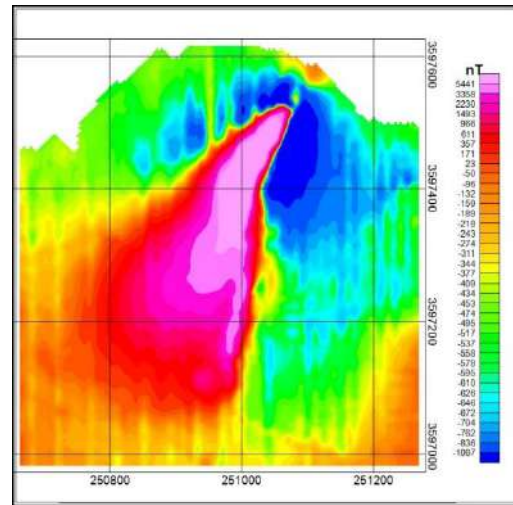
| $G4$ | $G3$ | $G2$ | $G1$ | پارامترهای مدل |
|------|------|------|------|----------------------|
| ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | مرکز مختصات x (km) |
| ۹۰ | ۹۰ | ۹۰ | ۱۷۰ | مرکز مختصات y (km) |
| ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۴ | ضخامت (km) |
| ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۱۶۰ | طول (km) |
| ۱ | ۳ | ۳ | ۲ | ارتفاع (km) |
| -۰.۱ | ۰.۱ | ۰.۲ | -۰.۲ | چگالی |

۴- داده واقعی

در این بخش، ما تأثیر روش EHGA را از طریق داده‌های مغناطیس از منطقه اردکان، یزد را ارزیابی می‌کنیم و نتایج را با سایر فیلترها همانند داده‌های مصنوعی مقایسه می‌کنیم. منطقه مورد مطالعه تقریباً ۲ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که در ۳۰ کیلومتری شمال شرق اردکان قرار دارد. این منطقه توسط واحدهای کوارتز پورفیری و گرانیت پوشانده شده است. در محدوده با شبکه ۱۰ در ۱۰ برداشت مغناطیس صورت گرفته است و پس از انجام تصحیحات نقشه برگردان به قطب آن در شکل ۵ نشان داده شده است که آنومالی آهن در قسمت شمالی آن مشخص و حداکثر ۵۴۴۱ نانوتسلا اختلاف میدان مغناطیسی در آن وجود دارد. شکل ۶ محدوده برداشت را بر روی نقشه توپوگرافی نشان می‌دهد.

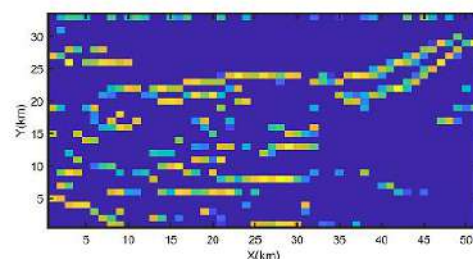
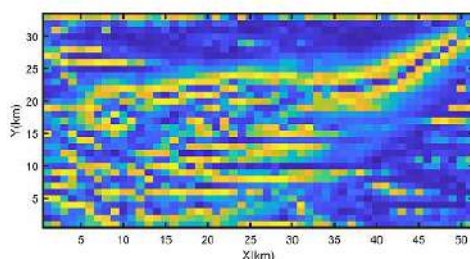
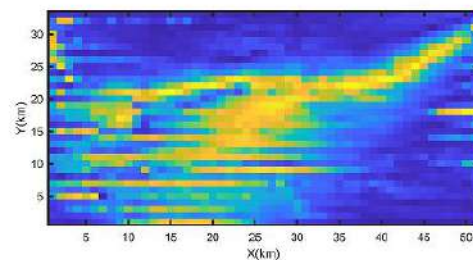
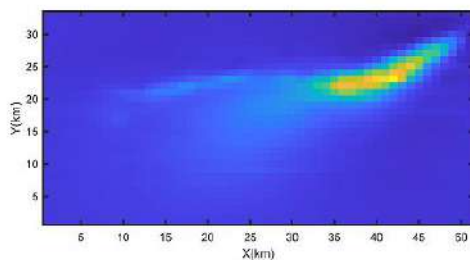


شکل ۶. نقشه محدوده بر روی نقشه توپوگرافی



شکل 5. نقشه برگردان به قطب محدوده

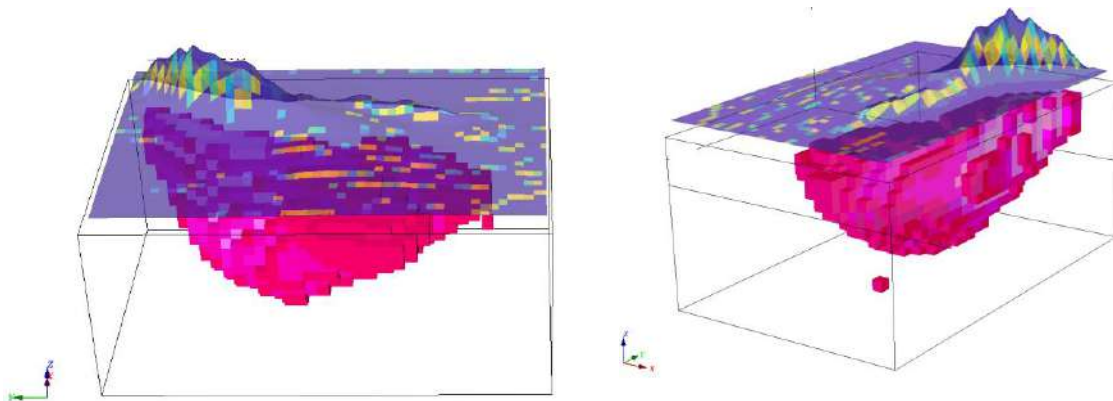
شکل 9 به صورت شماتیک و سه بعدی آنومالی مغناطیسی را نمایش می دهد که همانطور که نتیجه حاصل از استفاده از روش TA بر داده RTP در شکل ۱۰ (a) را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، ناهنجاریهای نقشه TA قله های تیزی برای ویژگی های زمین شناسی نمی آورند. شکل 10 (c,d) نتایج حاصل از اعمال روش های TAHG و EHGA بر داده RTP در شکل 9 (a) را نشان می دهد. هر دو نقشه TAHG و EHGA ویژگی های زمین شناسی را به وضوح تر از سایر روش ها نشان می دهند. با این حال، نتیجه EHGA دارای رزولوشن بالاتری برای تعیین لبه های منابع مغناطیسی جغرافیایی منطقه نسبت به نتایج TAHG و دیگر روش ها است. دیده می شود که ناهنجاریهای مغناطیسی می توانند به وضوح به عنوان ساختارهای خطی پیوسته در نقشه EHGA تفسیر شوند. این روش می تواند بسیاری از ویژگی های زمین شناسی را که توسط روش های TA تعیین نمی شوند، شناسایی کند. علاوه بر این، EHGA تصویری با رزولوشن بالاتر دارد.



شکل ۷. آنومالی مغناطیسی در محدوده اردکان از نقشه برگردان به قطب بعد از انجام تصحیحات (a)، (b) TA، (c) TAHG و (d) EHGA.

۵- بحث و نتیجه گیری

برای ارزیابی نتیجه کار در این مقاله خروجی حاصل از روش لبه یابی با مدلسازی صورت گرفته به کمک داده های مغناطیسی و همچنین چند حفاری صورت گرفته در این معدن مقایسه شده و نتایج در حد قابل قبولی با شرایط واقعی زمین هم خوانی دارد.



شکل ۸. خروجی حاصل از روش لبه یابی با مدلسازی صورت گرفته به کمک داده های مغناطیسی

در این مقاله یک روش نوآورانه به نام EGHA برای تعیین مرزهای منابع مغناطیسی و گرانیتهی ارائه داده ایم. این روش بر اساس نسبت گرادیان عمودی به گرادیان کل دامنه گرادیان افقی و بخش واقعی تابع آرکسینوس می باشد. کارایی این روش پیشنهادی بر روی داده های مغناطیسی و گرانیتهی مصنوعی و همچنین داده های واقعی مغناطیسی منطقه اثبات شده است. نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده از برخی از روش های محبوب مانند گرادیان کل و زاویه تیلت افقی دامنه (TAHG) مقایسه شده اند. برای مثال های مصنوعی، روش EGHA نتایج آنها از تولید مرزهای غیر صحیح جلوگیری می کند، بلکه مرزهای با وضوح بالاتری نسبت به سایر روش ها ایجاد می کند. علاوه بر این، نتایج نشان می دهند که این روش کمتر به عمق منبع وابسته است. با استفاده از داده های آنومالی ژئومغناطیسی RTP به عنوان یک نمونه، روش EHGA دقت و پاسخ های واضح تری برای مرزهای منابع مغناطیسی منطقه نسبت به سایر تشخیص کننده های مرز ارائه می دهد. نتایج همچنین نشان می دهند که بسیاری از روندها جهت های اصلی تکتونیکی در منطقه را منعکس می کنند.

۶- مراجع

۱. Hinze, W.J., et al., *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. 2013: Cambridge University Press.
۲. Pham, L.T., et al., *MagB_inv: a high performance Matlab program for estimating the magnetic basement relief by inverting magnetic anomalies*. Computers & Geosciences, 2020. **134**: p. 104347.
۳. Eldosouky, A.M., M. Abdelkareem, and S.O. Elkhatieb, *Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt*. Journal of African Earth Sciences, 2017. **130**: p. 28-37.
۴. Oksum, E., M.N. Dolmaz, and L.T. Pham, *Inverting gravity anomalies over the Burdur sedimentary basin, SW Turkey*. Acta Geodaetica et Geophysica, 2019. **54**: p. ۴۴۵-۴۶۰.
۵. Roest, W.R., J. Verhoef, and M. Pilkington, *Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal*. Geophysics, 1992. **57**(1): p. 116-125.
۶. Bournas, N. and H. Bake, *Interpretation of magnetic anomalies using the horizontal gradient analytic*

- signal. 2001.
۷. Cella, F., M. Fedi, and G. Florio, *Toward a full multiscale approach to interpret potential fields*. Geophysical Prospecting, 2009. **57**(4): p. 543-557.
 ۸. Eldosouky, A.M., et al., *A comparative study of THG, AS, TA, Theta, TDX and LTHG techniques for improving source boundaries detection of magnetic data using synthetic models: A case study from G. Um Monqul, North Eastern Desert, Egypt*. Journal of African earth sciences, 2020. **170**: p. 103940.
 ۹. Miller, H.G. and V. Singh, *Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources*. Journal of applied Geophysics, 1994. **32**(2-3): p. 213-217.
 ۱۰. Verduzco, B., et al., *New insights into magnetic derivatives for structural mapping*. The leading edge, 2004. **23**(2): p. 116-119.
 ۱۱. Wijns, C., C. Perez, and P. Kowalczyk, *Theta map: Edge detection in magnetic data*. Geophysics, 2005. **70**(4): p. L39-L43.
 ۱۲. Cooper, G. and D. Cowan, *Enhancing potential field data using filters based on the local phase*. Computers & Geosciences, 2006. **32** : (۱۰) p. 1585-1591.
 ۱۳. Cooper, G.R. and D.R. Cowan, *Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics*. Geophysics, 2008. **73**(3): p. H1-H4.
 ۱۴. Ferreira, F.J., et al., *Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle*. Geophysics, 2013. **78**(3): p. J33-J41.
 ۱۵. Yuan, Y. and Q. Yu, *Edge detection in potential-field gradient tensor data by use of improved horizontal analytical signal methods*. Pure and Applied Geophysics, 2015. **172**(2): p. 461-472.
 ۱۶. Ma, G., *Edge detection of potential field data using improved local phase filter*. Exploration Geophysics, 2013. **44**(1): p. 36-41.

اکتشاف با روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه

محسن میرزایی ولدی^۱، عبدالمجید فرخ پور^۲

۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، موسسه ژئوفیزیک؛ Mohsen.mirzaee@ut.ac.ir

۲ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز؛ Farrokhpourm3@gmail.com

* نویسنده مسئول: محسن میرزایی ولدی

چکیده فارسی

به منظور اکتشاف بخشهای دارای پتانسیل معدنی با کانی سازی احتمالی سرب و روی، مطالعات ژئوفیزیک به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه و بر اساس بررسی پارامترهای فیزیکی شامل شارژپذیری و مقاومت ویژه الکتریکی انجام شد. از اینرو محدوده معدن شبکه بندی شد و با استفاده از آرایش دایپل-دایپل (دوقطبی-دوقطبی) پروفیلهایی با طولهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات با استفاده از مدل‌های نهایی حاصل از معکوس سازی داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی و به کمک نرم افزار تخصصی Res2Dinv مورد بررسی قرار گرفت. پس از تهیه مقاطع ژئوفیزیکی و تفسیر آنها، مناطق امید بخش دارای پتانسیل احتمالی کانی زایی سرب و روی مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: قطبش القایی، مقاومت ویژه، شارژپذیری، دایپل-دایپل، مقاطع ژئوفیزیکی.

Mohsen mirzaee valdi¹, Abdolmajid Farrokhpour²

¹ Geophysics Ph.D Candidate, Tehran University/ Geophysics Institute; Mohsen.mirzaee@ut.ac.ir

² Geophysics Ph.D Candidate , IAU Islamic Azad University/Central Tehran Faculty;
Farrokhpourm3@gmail.com

* Corresponding author: Mohsen mirzaee Valdi

ABSTRACT

In order to explore areas with mineral potential with possible mineralization of lead and zinc, geophysical studies were carried out by the method of induced polarization and specific resistance. Therefore, the mining area was gridded and using dipole-dipole profiles with different lengths were examined. The studies were analyzed using the final models resulting from the inversion of the data of induced polarization and specific electrical resistance and with the help of Res2Dinv specialized software. After preparation of geophysical sections and their interpretation, promising areas with possible lead and zinc mineralization potential were determined.

Keywords: induced polarization, specific resistance, chargeability, dipole-dipole, geophysical sections.

مقدمه

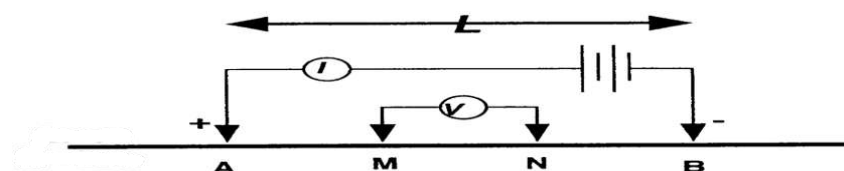
قطبش القایی و مقاومت ویژه از خواص فیزیکی ترکیبات سیال و کانسارهای فلزی و غیرفلزی مدفون در زمین است. از نظر تاریخی شولومبرژه اولین کسی بود که اثر IP را بطور جامع شرح داد (۱۹۲۰). سپس مطالعاتی توسط برانت و همکاران (Brant et.al 1964) انجام شد. در ابتدا توانایی این روش در اکتشافات زیر سطحی به اثبات رسید و معلوم شد که قطبش ایجاد شده بخاطر حضور توده های کانی، بعنوان یکی از خواص مواد زیر سطح قابل اندازه گیری و تفسیر است. در روش مقاومت ویژه جریانهای الکتریکی مصنوعی توسط دو الکتروود به زمین تزریق می شود و اختلاف پتانسیل تولید شده بین دو نقطه در سطح زمین اندازه گیری می شود. انحراف از شکل اختلاف پتانسیل های قابل انتظار در مورد زون های همگن، اطلاعاتی در مورد شکل و خواص الکتریکی ناهمگونی های زیر سطحی ارائه می دهد. [4] مقاومت ویژه ی یک ماده به عنوان مقاومت ویژه یک متر مکعب از آن ماده برحسب اهم متر تعریف می شود و در سنگها دارای تغییرات زیادی است. قطبش القایی یا اثر IP یک پدیده الکتریکی است که بصورت یک پاسخ ولتاژ تاخیری در مواد زمین مشاهده میشود. گرچه اثر IP بصورت بیشینه در مجاورت توده هایی متشکل از کانیهای با جلای فلزی مشاهده می شود، با وجود این، ارتباط دقیق بین پاسخ IP و مقدار کانی سازی پیچیده است.

تئوری و روش تحقیق

برداشت IP خیلی شبیه به برداشت مقاومت ویژه (RS) است، علاوه وسایل ثبت IP بطور همزمان مقاومت الکتریکی را نیز ثبت می کنند. در این پروژه نیز برداشت ها بطور همزمان انجام شده است. در اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی، جریان الکتریکی مستقیم توسط دو الکتروود جریان (A,B) به درون زمین فرستاده می شود و اختلاف پتانسیل حاصل بین دو الکتروود پتانسیل (M,N) در زمین اندازه گیری می شود. [1] شکل ۱. مقاومت ویژه از فرمول $R=K.V/I$ محاسبه می گردد که در این فرمول V اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده، I شدت جریان تزریق شده به زمین و K ضریب ژئومتری آرایش مورد استفاده است. [5] اگرچه برای هر آرایش می توان فرمول آن را بیان کرد، ولی فرمول کلی محاسبه این ضریب بصورت معادله (۱) می باشد.

$$(1) \quad K = 2\pi \cdot \frac{1}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

که در آن AM, AN, BM, BN فاصله میان الکتروودهای جریان و ولتاژ می باشند.



شکل ۱- اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین با الکتروودهای جریان و ولتاژ

وقتی زمین همگن (یکنواخت) باشد مقاومت ویژه محاسبه شده براساس این معادله ثابت بوده و مستقل از فاصله الکترودها خواهد بود ولی اگر ناهمگنی زیر سطحی موجود باشد مقاومت ویژه با موقعیت نسبی الکترودها تغییر می کند و هر مقدار محاسبه شده به عنوان مقاومت ویژه ظاهری (a) نامیده شده و تابعی از شکل ناهمگنی مربوطه خواهد بود. [2] کانی‌های خاصی مانند فلزات طبیعی و گرافیت از طریق عبور الکترون‌ها، جریان الکتریکی را هدایت می کنند، اما بیشتر کانی‌های تشکیل دهنده سنگها غیر قابل نفوذ بوده و جریان الکتریکی اغلب از طریق یونهای آب موجود در خلل و فرج سنگ انتقال می یابد. بنابراین بیشتر سنگها الکتریسیته را بطریق الکترولیتی هدایت میکنند تا از طریق الکترونیکی، و این بدان معناست که تخلخل عمده ترین کنترل کننده ی مقاومت سنگ بوده و علاوه بر آن میزان آب درون خلل و فرج و مقاومت الکتریکی آب نیز در این جهت نقش اصلی را ایفا می کنند و در حد وسیعی مقاومت ویژه سنگ را تغییر می دهند. بر این اساس هم پوشی قابل ملاحظه ای بین مقاومت ویژه الکتریکی انواع مختلف سنگها وجود دارد و در نتیجه مشخص کردن نوع سنگها تنها براساس داده های مقاومت سنجی امکان پذیر نمی باشد و حتما باید عوامل فوق را مد نظر قرار داد. [3] هنگامیکه جریان الکتریکی از نوع مستقیم DC و یا متناوب AC با فرکانس خیلی کم حدود ۰/۱ هرتز به زمین فرستاده شود انرژی الکتریکی در داخل سنگها بر اساس فرایندهای یونی ذخیره می شود. IP منعکس کننده خواصی از مواد زیر سطحی است که قادر به نگهداری و انباشت شارژ الکتریکی اند. در نتیجه توزیع مجدد یونها در سطح بینابینی فلز-الکترولیت و غیر فلز-الکترولیت و تحت تاثیر جریان الکتریکی قطبش ایجاد می شود. به محض قطع جریان یونها به شرایط تعادل اولیه قبل از وصل جریان بر می گردند. این بازگشت به حالت تعادل معادل با یک جریان پسماند است (مانند تخلیه یک خازن) و بعنوان منبع زیرزمینی پاسخ IP شناخته می شود. روش IP دامنه این قطبش را مورد اندازه گیری قرار میدهد.

پلاریزاسیون غشایی یا غیر فلزی

عبور جریان الکتریکی از داخل اغلب سنگها توسط الکترولیت‌های موجود در خلل و فرج آنها صورت میگیرد. اغلب در مواردی نظیر وسعت زیاد زمین کانیهای تشکیل دهنده سنگها دارای بار منفی در سطح تماس خود با سیال موجود در حفرات می باشند و در نتیجه یونهای مثبت را بطرف خود جلب می کنند. تجمع یونهای مثبت در مجاورت سطح کانیها معمولا قشری به ضخامت یک دهم میکرون بوجود می آورد. اگر ضخامت این قشر در حدود قطر روزنه های ارتباطی حفرات باشد، باعث جلوگیری از تحرک یونها (حاصله از جریان تزریقی) در سیال خواهد شد. در نتیجه یونهای مثبت و منفی در دو طرف سد ایجاد شده تجمع پیدا خواهند کرد و تعادل قشرهای مثبت و منفی در سطح کانیها بر هم خواهد خورد. بعد از گذشت زمانی اندک یک تعادل جدید پدید خواهد آمد. حال اگر ولتاژ تزریقی ناگهان قطع شود، بعد از مدت زمانی کوتاه، یونها دوباره به محل اولیه خود باز میگردند و سبب ایجاد ولتاژ رو به زوال IP میشوند. شکل ۳. این نوع IP در زمین های رسی و سنگهایی که درصد ناچیزی از کانیهای رسی در آنها پخش شده باشد دیده می شود و بدین جهت در مورد اکتشاف آب و نواحی رسی این روش نیز می تواند کمک شایانی انجام دهد. این نوع IP با افزایش شوری الکترولیت های موجود در حفرات، کاهش خواهد یافت. از آنجا که در حین اندازه گیری نمی توان اثر پلاریزاسیون غشایی را از پلاریزاسیون فلزی تشخیص داد، پلاریزاسیون غشایی در اکتشاف ذخایر معدنی فلزی پارازیت محسوب می شود. برای تشخیص وجود پلاریزاسیون مربوط به رس ها باید از زمین شناسی منطقه مورد مطالعه هم کمک گرفت و یا با روش های ویژه، پلاریزاسیون الکترودی فلزی را از پلاریزاسیون غشایی تمیز داد.

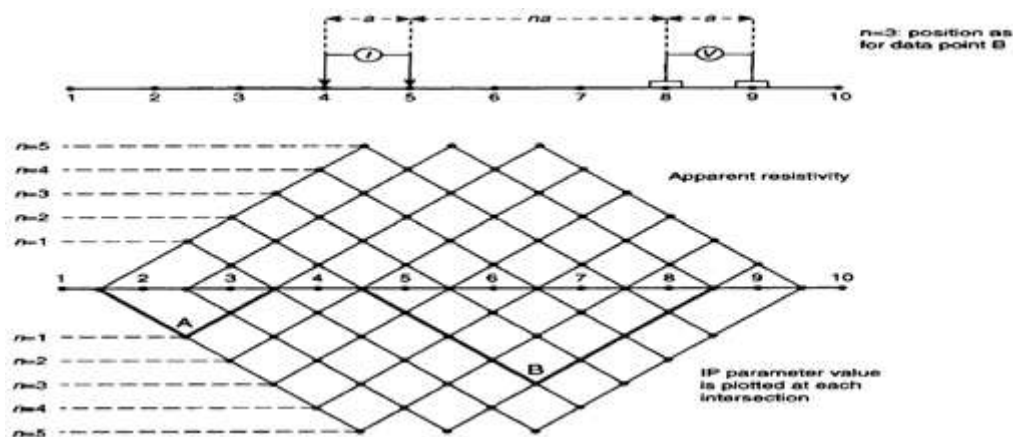
پلاریزاسیون الکترودی یا فلزی

وقتی کانیهای فلزی در سنگ حضور داشته باشند، هدایت جریان الکتریکی بصورت الکترونیکی نیز صورت می گیرد. با تزریق جریان الکتریکی به داخل سنگ، ذرات فلزی رسانا (بعلت هدایت الکترونیکی) پلاریزه شده و در نتیجه سبب جلب یونهای مثبت و منفی موجود

در سیال در اطراف خود خواهند شد. البته در این حالت ممکن است همزمان عبور جریان الکتریکی توسط الکترولیت های موجود در خلل و فرج آنها نیز صورت پذیرد. هرگاه جریان الکتریکی فرستاده به داخل زمین بطور ناگهانی قطع شود یون ها به آهستگی پراکنده شده و بسوی تعادل پیش می رود که سبب پیدایش ولتاژ ضعیف و رو به زوال IP می شود.

آرایش دایپل - دایپل در عملیات صحرائی

منظور از آرایش (آرایه) نحوه چیدمان الکترودهای فرستنده و گیرنده روی زمین است. تکنیکها و چیدمانهای مختلفی برای اهداف متفاوت در مطالعات ژئوالکتریک و پلاریزاسیون القایی بکار گرفته میشود. در این پژوهش از آرایه دایپل - دایپل (دوقطبی - دوقطبی) استفاده شده است. از این نوع آرایش برای مطالعه و بررسی تغییرات و گسترش آنومالی (بیهنجاری) در عمق و بدست آوردن شبه مقطعی از IP&RS و همچنین مدلهای ژئوفیزیکی در مسیر یک پروفیل استفاده میشود. در این نوع آرایش هر چهار الکترود A, B, M, N در امتداد یک پروفیل قرار داشته و عملاً فاصله الکترودهای فرستنده AB مساوی فاصله الکترودهای گیرنده MN است ($AB=MN=a$). در هر اندازه گیری الکترودهای AB ثابت بوده و الکترودهای MN در امتداد پروفیل حرکت می کند، در نتیجه اندازه گیری برای عمق های مختلف انجام می گیرد. [۱] فاصله بین نزدیکترین الکترودهای جریان پتانسیل برابر na ($n=1,2,3,\dots$) و عمق هر اندازه گیری برابر $(n+1)a/2$ خواهد بود و عدد اندازه گیری شده برای نقطه ای به محل تلاقی دو خط با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح زمین که از وسط AB, MN رسم شده نسبت داده می شود. به این ترتیب همان طور که در شکل ۵ دیده می شود از مجموع نقاط اندازه گیری شده با این روش شبه مقطعی از شارژ پذیری IP و مقاومت ویژه ظاهری RS در امتداد یک پروفیل بدست خواهد آمد. شکل ۲



شکل ۲ - برداشت و ترسیم داده های IP&RS با استفاده از آرایه دایپل - دایپل به ازای $n=3$ (Reynolds, 1997).

تجهیزات مورد استفاده در محدوده اکتشافی

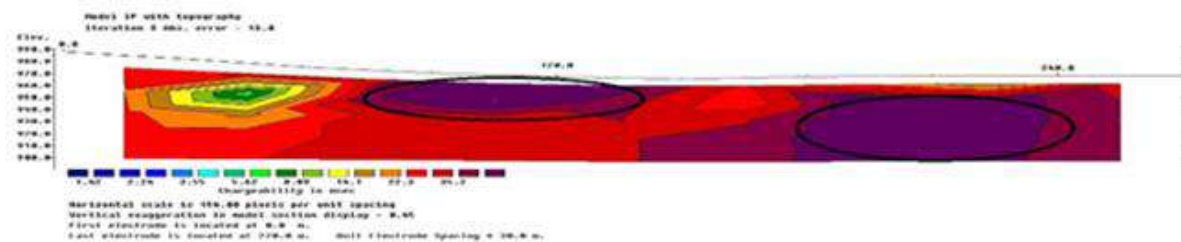
دستگاههای استفاده شده در محدوده مورد مطالعه عبارتند از: الف) موتور برق بنزینی جهت تولید برق ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز ب) دستگاه فرستنده جریان INNOVEX که قادر است برق ۲۲۰ ولت حاصل از موتور برق را به حالت زمان - حوزه ای (Time Domain)

تبدیل نموده طوریکه ولتاژ خروجی آن تا حداکثر ۴۸۰۰ ولت قابل افزایش خواهد بود. دستگاه فرستنده بگونه ای تنظیم شد که جریان پالسی شکل را به مدت ۲ ثانیه به الکترودهای A و B فرستاده و بعد از آن پس از ۲ ثانیه تاخیر جهت جریان را عوض کرده و مجدداً چرخه را ادامه دهد. ضمناً میزان شدت جریان برقرار شده بین الکترودهای A و B نیز توسط صفحه دیجیتالی موجود بر روی دستگاه با دقت میلی آمپر (mA) نشان داده می شود، که در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری مورد استفاده قرار می گیرد. دستگاه گیرنده بکار گرفته شده در محدوده نیز از نوع INNOVEX با دقت تفکیک بالاست، که یکی از پیشرفته ترین گیرنده ها محسوب می شود. مهمترین مشخصات این دستگاه عبارتند از (بر اساس راهنمای گیرنده):

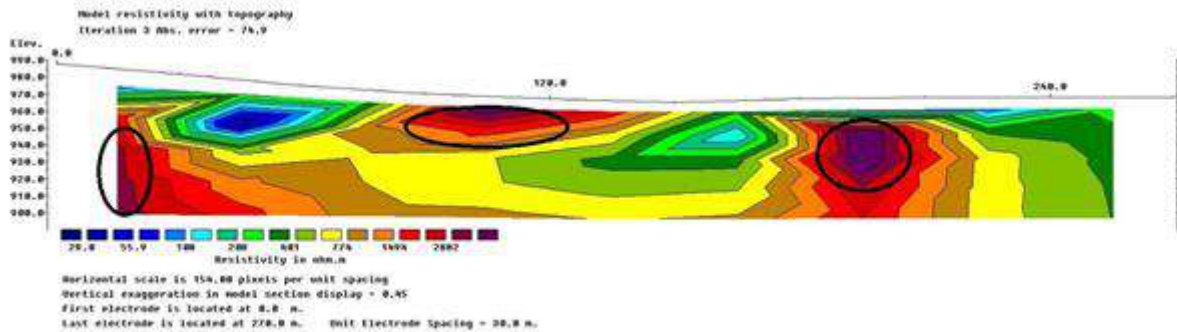
- دو باند ورودی پتانسیل.
- تعیین مقاومت الکتریکی هر الکترود پتانسیل قبل از شروع اندازه گیری که بدین ترتیب قطع ارتباط یا اتصال ضعیف الکترودها با زمین به آسانی قابل ردگیری است.
- امکان تنظیم تعداد دفعات اندازه گیری در هر ایستگاه.
- امکان مشاهده پارازیتها و نوفه های احتمالی اعمال شده بر هر الکترود هنگام اندازه گیری و رفع بخش اعظم این نوفه ها به منظور کسب اعداد دقیق قبل از ذخیره نمودن اطلاعات.
- داشتن حافظه و امکان ذخیره سازی تمامی اطلاعات و سپس انتقال آنها به رایانه.
- سرعت عمل و دقت بسیار بالا و صرفه جویی چشمگیر در میزان کارکرد موتور برق و ترانس.

نتایج دو بعدی و تفسیر مقاطع

نتایج مطالعات انجام شده بصورت مقاطع ژئوفیزیکی برای داده های پلاریزاسیون القائی و مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از معکوس سازی داده ها به کمک نرم افزار تخصصی Res2Dinv ارائه شده است. Res2Dinv نرم افزاری است که مدل دو بعدی پلاریزاسیون القائی و مقاومت ویژه الکتریکی را برای برداشت های زیرسطحی با استفاده از برداشت داده ها ایجاد مینماید و یک برنامه تحت ویندوز است. در این نرم افزار، مدلسازی معکوس با روش بهینه سازی کمترین مربعات غیر خطی و تصحیح توپوگرافی بر اساس روش المان محدود انجام می شود. به دلیل ماهیت روش المان محدود، امکان انطباق شبکه بندی ها بر روی سطح توپوگرافی واقعی وجود دارد. این روش قادر است مستقیماً توپوگرافی ناهموار را با مدل معکوس تلفیق نماید، لذا پس از انجام آن نیازی به استفاده از یک روش تصحیح توپوگرافی جداگانه نیست (لوک، ۲۰۰۴). چهار مقطع IP&RS به همراه تفسیر آنها که مربوط به دو پروفیل طولی است در ذیل آورده شده است. شکل های ۳ الی ۶



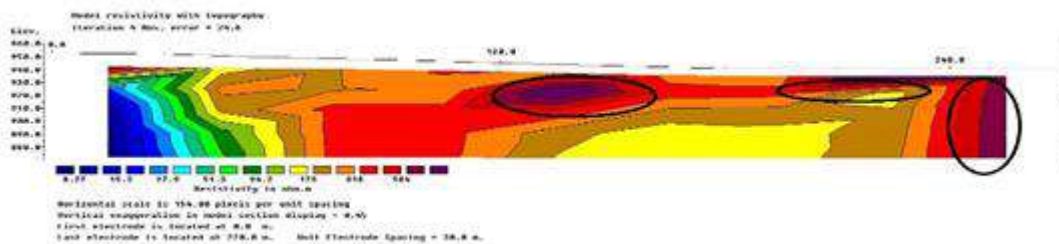
شکل ۳-مقطع ژئوفیزیکی پس از معکوس سازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی با نرم افزار - مقطع مقاومت ویژه (RS)



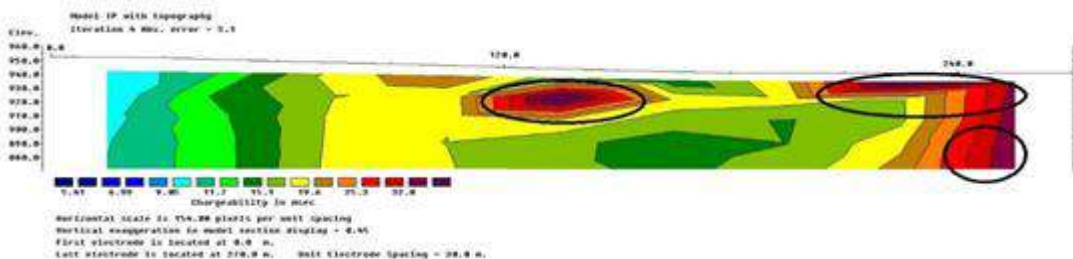
شکل ۴-مقطع ژئوفیزیکی پس از معکوس سازی مقادیر پلاریزاسیون القایی با نرم افزار-مقطع قطبش القایی (IP)

تفسیر مقاطع ۳ و ۴

در این پروفیل تغییرات ساختاری زمین مانند شکستگی مشهود نیست. تقریباً تمام طول پروفیل رسانایی پایینی دارد و رسانایی نسبتاً بالا در فواصل ایستگاهی اولیه را می‌توان به واحدهای آلتزه شده سطحی نسبت داد، بنابراین زمین از منظر مقاومت الکتریکی همگن و یکنواخت است. نتایج بدست آمده از مقادیر شارژ ایلیتی (IP) و تطابق آن با مقاومت ویژه (RS) حکایت از وجود سه بخش حائز اهمیت در این پروفیل دارد (بیضی‌ها). در این بخشها میزان شارژپذیری بیش از سایر بخشها است و با آنومالی ملاحظه شده در مدل سازی مقاومت ویژه همخوانی دارند. شارژپذیری بالا در بی هنجاری شماره ۱ در فواصل ایستگاهی حدوداً ۱۰ تا ۲۰ متری از مبدا مختصات و عمق متوسط ۵۰ متر شروع شده و به صورت عمقی ادامه می‌یابد. در عمق پایین تر از ۸۰ متر گسترش این بی هنجاری بسمت فاصله ایستگاهی ۶۰ متری از مبدا مشهود است. بی هنجاری شماره ۲ در فواصل ایستگاهی حدوداً ۹۰ تا ۱۴۰ متری و عمق چند متری سطح زمین تا عمق متوسط ۵۰ مشاهده می‌شود. آنچه بیشتر از همه چشمگیر است وجود بی هنجاری نسبتاً بزرگ شماره ۳ است. شارژپذیری این بی هنجاری در فواصل ایستگاهی حدوداً ۱۴۰ متری تا ۲۵۰ متری از مبدا مختصات در عمق تقریباً ۱۰-۱۵ متری سطح شروع شده و به صورت عمقی ادامه می‌یابد. پهنای آنومالی با توجه به فواصل پروفیلها و میانبایی بین پروفیلهای موازی ۵۰ متر، سطح مقطع آنومالی ۱۰۰۰ مترمربع و حجم آنومالی ۶۰۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود.



شکل ۵-مقطع ژئوفیزیکی پس از معکوس سازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی با نرم افزار-مقطع مقاومت ویژه (RS)



شکل ۶-مقطع ژئوفیزیکی پس از معکوس سازی مقادیر پلاریزاسیون القایی با نرم افزار-مقطع قطبش القایی (IP)

تفسیر مقاطع ۵ و ۶

مقدار پایین مقاومت ویژه در بخش ابتدایی پروفیل را می توان به واحدهای آلتزه شده نسبت داد. افزایش مقادیر شارژ ابیلیتی (IP) حکایت از وجود دو بخش حایز اهمیت در این پروفیل دارد. بی هنجاری شماره ۱ در فواصل ایستگاهی حدودا ۱۲۰ تا ۱۵۰ متری و در عمق متوسط ۴۰ متری و بی هنجاری شماره ۲ در فواصل ایستگاهی حدودا ۲۰۰ تا ۲۵۰ متری است که از حدودا چند متری سطح شروع شده و پس از فاصله ایستگاهی ۲۴۰ متری به صورت عمقی ادامه دارد. در این دو بخش میزان شارژ ابیلیتی (IP) بیش از سایر بخشها می-باشد و با آنومالی ملاحظه شده در مدل سازی مقاومت ویژه (RS) همخوانی دارد. پهنای آنومالی با توجه به فواصل پروفیل ها و میانجایی بین پروفیلهای موازی ۵۰ متر، سطح مقطع آنومالی ۱۰۰۰ متر مربع و حجم آنومالی ۵۰۰۰ متر مکعب برآورد می شود.

نتیجه گیری و پیشنهادات.

قطبش القایی و مقاومت ویژه (IP&RS) از روشهای ژئوفیزیکی اکتشاف مواد معدنی بخصوص ذخایر فلزی است. پس از بازدید اولیه و مشاهدات صحرایی و با توجه به شواهد و آثار کاننسازی سرب و روی در محدوده، آرایش دوقطبی-دوقطبی در تعدادی پروفیل ژئوفیزیکی مورد برداشت قرار گرفت. با تهیه مقاطع ژئوفیزیکی و تفسیر آنها، مناطق امید بخش دارای پتانسیل احتمالی کانی زایی سرب و روی مشخص شد. در مواردی نظیر وسعت زیاد زمین و یا توپوگرافی شدید منطقه (بدلیل وجود دره ها و تپه های فراوان) قبل از عملیات (IP&RS) بررسی های مگنتومتري پیشنهاد می گردد.

منابع

- [۱] ادوین اس، رلبینسون، کیت کورو، ۱۳۹۵، مبانی اکتشافات ژئوفیزیک، مترجم، محمد رضا حیدریان شهری، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۲] -کلاگری، ع.ا.، ۱۳۷۱، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، چاپ تابش.
- [۳] -کیما قلم، جعفر، ۱۳۶۱، روش IP و کاربرد آن در اکتشاف معادن فلزی، گزارش سازمان زمین شناسی کشور.
- [3]-Geotomo Software , Res2dinv-ver 3.51 , User manual October 2001.
- [4]-Parasnis, D.S; 1985, Mining geophysics, Elsevier Science Publisher.
- [5]-Slater, LD; Lesmes, D; 2001. The induced polarization method, Department of Geosciences, University of Missouri, Kansas city, U.S.A.x
- [6] Sumner, J.S , 1978. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific, Amsrerdam, 277pp.

ظرفیت های مدل گرانشی نوری در ژئوفیزیک

^۱جواد دلیر، ^۲محمدعلی ریاحی، ^۳اصغر صادقی شاهرودی، ^۴امحمد حسن سلیمانی

*^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ javad.dalir@ut.ac.ir

^۲استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ mariahi@ut.ac.ir

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ asghar.sadeghish@ut.ac.ir

^۴کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ mh.soleimani@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: جواد دلیر

مدل گرانشی اپتیکی یک چارچوب نظری جدید است که پتانسیل متحول کردن درک ما از درون زمین، پویایی آن و جایگاه آن در جهان هستی را دارد. این مدل می تواند با بررسی و کاوش درونی زمین به روش هایی که با روش های موجود امکان پذیر نیست، به ما در آشکار ساختن ساختارهای مخفی مانند ستون های عمیق گوشته یا ناهمواری های مرز هسته-گوشته کمک کند. همچنین می توان از آن برای بهبود درک ما از جزر و مد و چرخش زمین، و همچنین برای بررسی مکانیزم زمین لرزه ها و فوران های آتشفشانی استفاده کرد. این مدل قابلیت اعمال شدن به سایر سیارات و قمرها را نیز دارد و حتی می تواند به ما در درک رازهای ماده تاریک و انرژی تاریک کمک کند. با این حال، قبل از اینکه بتوان از پتانسیل کامل این مدل استفاده کرد، چندین چالش باید مورد توجه قرار گیرد. این چالش ها شامل نیاز به توسعه بیشتر نظری و همچنین نیاز به پیشرفت های فناوری برای امکان تشخیص و اندازه گیری اثرات پیش بینی شده گرانش اپتیکی هستند.

واژه های کلیدی: گرانش، اپتیکی، کاوش زمین

Potentials of optical gravity model in geophysics

^{1*}Javad Dalir, ²Mohammad Ali Riahi, ³Asghar Sadeghi Shahroodi, ⁴Mohammad Hassan Soleimani

¹Master's student, Institute of Geophysics / University of Tehran; javad.dalir@ut.ac.ir

²Professor, Institute of Geophysics / University of Tehran; mariahi@ut.ac.ir

³ Master's students, Institute of Geophysics / University of Tehran; asghar.sadeghish@ut.ac.ir

⁴Master's degree, Institute of Geophysics / University of Tehran; mh.soleimani@ut.ac.ir

Corresponding Author: Javad Dalir

ABSTRACT

The optical gravity model is a new theoretical framework that has the potential to transform our understanding of the Earth's interior, dynamics, and its place in the universe. This model can help us explore Earth's internal structure in ways that are currently impossible with existing methods. It can reveal hidden structures such as deep mantle plumes or irregularities in the core-mantle boundary. Additionally, the model can assist us in improving our understanding of Earth's tides, rotations, and mechanics of earthquakes and volcanic eruptions.

Not only can this model be applied to other planets and moons, but it may also help us comprehend the mysteries of dark matter and dark energy. However, before we can unlock the full potential of this model, there are several challenges we need to address. These include the need for further theoretical

development and technological advancements to detect and measure the predicted optical gravity effects.

Keywords: gravity, optical, probe Earth's interior

مقدمه

با وجود موفقیت‌های قابل توجه، نظریه نسبیت عام همچنان از دنیای فیزیک کوانتومی مجزا است. به عنوان مثال، هنوز نشان داده نشده است که به تبادل گراویتون‌های بین جرم‌ها در یک نظریه موفق گرانش کوانتومی قابل تقلیل باشد. در عوض، خمیدگی فضا-زمان اغلب به تنهایی به عنوان تنها عامل تعیین کننده چگونگی حرکت ماده تحت تأثیر گرانش به تصویر کشیده می‌شود. یکی از روش‌های بالقوه برای پل زدن بین نسبیت عام و گرانش کوانتومی در تشابه نوری-مکانیکی در نسبیت عام نهفته است. [۲] این تشابه، که به زمان ادینگتون برمی‌گردد، انحراف نوری ناشی از نسبیت را به عنوان چیزی شبیه به شکست نور در یک محیط با شیب چگالی و ضریب شکست متغیر نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر، این تشابه نوری توجه بیشتری را به خود جلب کرده و در زمینه‌های مختلفی از جمله محاسبات دقیق عدسی گرانشی، مدل‌سازی فوتون‌ها و ذرات در مدارهای سیاره‌ای و حتی شبیه‌سازی به دام انداختن نور در نزدیکی سیاهچاله‌ها به کار رفته است. برخی از محققان پیشنهاد کرده‌اند که این محیط نوری می‌تواند یک محیط قطبیده واقعی باشد و حتی در خود گرانش نقش داشته باشد. برخی مدل‌ها پیشنهاد می‌کنند که گرانش از خلاء با ضریب شکست رو به افزایش در طول زمان ناشی می‌شود. با استفاده از بیان آبراهام برای تکانه نوری، پیشنهاد شده است که گرانش می‌تواند از طریق کاهش تدریجی تکانه و انرژی فوتون به یک محیط نوری کیهانی ایجاد شود. این مدل نشان می‌دهد که گرانش با فشار دادن موثر جرم‌ها به وسیله فوتون‌ها به وجود می‌آید و انرژی از دست رفته به طور بالقوه به جذب گرانشی هدایت می‌شود. با این حال، آزمایش‌هایی با استفاده از تابش مایکروویو کیهانی (CMB) نشان داده‌اند که مگر در صورت وجود فرضیات اضافی، این تابش برای ایجاد گرانش، ضعیف است.

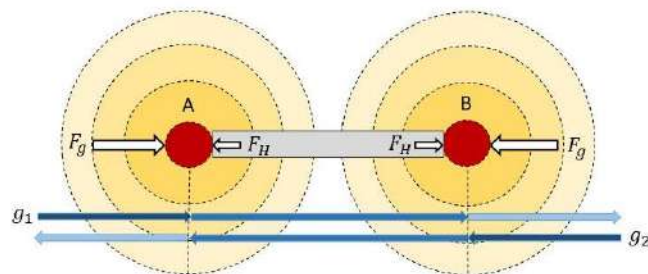
رویکرد جایگزین، انرژی پتانسیل گرانشی خود را به عنوان نیروی محرک گرانش با استفاده از تشابه نوری در نظر می‌گیرد. در این سناریو، با انبساط فضا-زمان با جابجایی قرمز-هابل، به نظر می‌رسد چاه‌های پتانسیل گرانشی اطراف جرم‌ها کاهش می‌یابند. انرژی از دست رفته از فوتون‌ها و معیار فضا-زمان در طول انبساط به طور بالقوه می‌تواند به جذب گرانشی هدایت شود. به طور مشابه، در چارچوب گرانش کوانتومی، انبساط فضا-زمان ممکن است انرژی گراویتون‌های جاسازی شده را کاهش دهد و انرژی از دست رفته دوباره به سمت گرانش هدایت شود. شواهد زیادی از تبدیل انرژی پتانسیل گرانشی به سایر اشکال انرژی تحت جابجایی قرمز-هابل وجود دارد. علاوه بر این، امکان خدمت گراویتون‌ها به عنوان محیط نوری کیهانی و عامل محرک گرانش را بررسی می‌کند و پیشنهاد می‌کند که گراویتون‌ها، مانند فوتون‌ها، می‌توانند در یک محیط نوری کیهانی شکسته شوند و منجر به پس‌زمینه گراویتونی یکنواخت و کم انرژی مشابه تابش مایکروویو کیهانی (CMB) شوند.

در حالی که جابجایی قرمز-هابل به طور کلی با انبساط فضا-زمان مرتبط است [۲]، یک سوال مهم این است که انرژی از دست رفته از فوتون‌ها، گراویتون‌ها و امواج گرانشی کجا می‌رود. یک احتمال این است که گرانش را به وجود می‌آورد. از زمان ادینگتون مشخص شده است که انحراف نور نسبیتی را می‌توان به عنوان یک شبه شکست نور از طریق محیطی با گرادیان چگالی و ضریب شکست متغیر مدل کرد. اکنون محیط نوری فضا-زمان را به عنوان یک مزدوج گراویتون واقعی که همه جرم‌ها را به هم مرتبط می‌کند، مدل می‌کنیم. فرض بر این است که گراویتون‌ها در سیستم‌های جرمی محلی در حالت‌های کوانتومی منسجمی سازمان‌دهی می‌شوند که با ذرات درون ساختارهای فضا-زمان همپوشانی دارند. با این حال، با جابجایی قرمز-هابل، گراویتون‌ها طول موج‌های بلندتری پیدا می‌کنند زیرا به حالت‌های کمتر منسجم منتقل می‌شوند. با فرض اینکه تکانه و انرژی از دست رفته از گراویتون‌ها به ذرات قابل انتقال است، تبادل متقابل توسط جرم‌ها باعث ایجاد یک نیروی جذاب با اندازه مطابق گرانش می‌شود. گرانش می‌تواند با از دست دادن تدریجی تکانه

فوتون و انرژی به یک محیط نوری کیهانی ایجاد شود. این استدلال به این شرط بستگی دارد که پوشش محیط اطراف یک جرم باید از نظر فیزیکی به آن جرم متصل باشد، به طوری که پوشش و جرم همیشه می توانند با هم هماهنگ باشند، حتی با سرعت های نسبی.

روش تحقیق

ذره فرضی رد و بدل شده بین جرم ها گراویتون است. با فرض وجود گراویتون ها، جریان های گراویتون هایی که بین توده های جهان مرئی مبادله می شوند، بلافاصله یک محیط کیهانی را تشکیل می دهند. برای اینکه این یک محیط نوری باشد، به سادگی نیاز است که گراویتون ها حداقل برخی از خواص فوتون ها یا فوتون های مجازی را داشته باشند. سپس گراویتون ها می توانند هم به عنوان محیط و هم به عنوان پیام در گرانش و فیزیک کوانتوم عمل کنند. گراویتون ها اطلاعاتی را در مورد ذراتی که از آنها سرچشمه می گیرند، مانند سرعت، قطبش و اسپین خود حمل می کنند. برای همبستگی با نسبیت عام، انرژی درون جریان گراویتون که دو ذره را به هم متصل می کند باید برابر با انرژی پتانسیل گرانشی متقابل ذرات باشد [۳]. همه امواج، از جمله فوتون ها و دیگر گراویتون ها، [۴] در این فضا زمان گراویتون شکسته می شوند. فوتون ها و گراویتون ها سپس انرژی و تکانه را به پوشش های فضا زمان مرتبط با هر جرم از جهان مرئی منتقل می کنند. شاخص کیهانی شکست فضا زمان را می توان با استفاده از قیاس نوری-مکانیکی محاسبه کرد و سپس برای یافتن نرخ از دست رفتن انرژی و تکانه استفاده کرد. به نظر می رسد که همه امواج، از جمله گراویتون ها، انرژی و تکانه خود را با سرعت مشخص شده توسط ثابت هابل، یا حدود $2 \times 10^{-18} \text{sec}^{-1}$ به طور جزئی از دست می دهند. این به ما امکان می دهد ضریب جذب ماده را به گراویتون ها تخمین بزنیم. پس از آن، نیروی نیوتنی و یک مقدار صحیح برای ثابت گرانشی G را می توان استخراج کرد.



شکل (۳۱) گرانش نوری و نیروی هابل. گراویتون ها از بخش های دور دست کیهان حرکت خود را در برابر پوشش های فضا زمان گراویتون که روی دو جرم محلی ثابت شده اند از دست می دهند. سپس توده ها در اثر گرانش به هم رانده می شوند. در اجسام متراکم گرانش توسط نیروی هابل کاهش

می یابد. [۲] (Matthew R. Edwards)

فرآیند ساده در شکل ۱ نشان داده شده است. دو گراویتون $g1$ و $g2$ از منابع دور (فلش های آبی) از دو ذره محلی A و B (کره های قرمز) عبور می کنند که هر کدام توسط گرادیان های چگالی فضا زمان (دایره های زرد) احاطه شده اند. گراویتون $g1$ ابتدا از A عبور می کند و تکانه را به پوشش فضا زمان اطراف A می فرستد و باعث می شود A به سمت B رانده شود. بنابراین وقتی از B عبور می کند ضعیف تر است و بنابراین حرکت کمتری را به B نسبت به A منتقل می کند. برعکس گراویتون $g2$ تکانه بیشتر به B نسبت به A انتقال می دهد. نتیجه خالص این است که A و B در گرانش به هم جذب می شوند (فلش های سفید بزرگ).

شکل ۱ برای دو فوتون نیز برقرار است زیرا در فرض اولیه بسیاری از ویژگی های فوتون و گراویتون را مشابه دانستیم. مدل گرانش نوری پیشنهاد می کند که گرانش از برهمکنش نور با یک محیط نوری کیهانی ناشی می شود. از دیدگاه کلاسیکی این محیط مشابه نحوه

تعامل نور با شیشه یا آب است که مسیر آن را خم می کند و تکانه را منتقل می کند. در مورد گرانش، برهمکنش بسیار ضعیف تر خواهد بود، اما اثر تجمعی نور از سراسر جهان می تواند عامل نیروی گرانشی مشاهده شده باشد. در حقیقت از دست دادن انرژی فوتون و تکانه به یک محیط نوری کیهانی منجر به یک مدل گرانشی ساده شد. یک فوتون در مسیر خود در فضا به طور جداگانه با پوشش محیط نوری اطراف هر جرم مجزا تماس می گیرد و تکانه و انرژی خود را از دست می دهد. از آنجایی که هر پوشش جرم، تکانه کمتری نسبت به پوشش جرم قبل، از فوتون به دست می آورد، این دو جرم به هم جذب میشوند.

یافته‌ها

مطالعه ساختارهای زیرسطحی با استفاده از انکسار و انعکاس امواج نوری در محیط‌های مختلف، اطلاعاتی درباره ساختارهای زیرسطحی زمین مانند گسل‌ها، حفره‌ها و منابع آب را فراهم می کند. این روش دقت و وضوح تصویربرداری زیرسطحی را در مقایسه با روش‌های سنتی مانند لرزه‌نگاری افزایش می دهد. پایش تغییرات پوسته زمین با اندازه‌گیری تغییرات در میدان‌های نوری، حرکات پوسته زمین مانند فرونشست، بالا آمدگی و لرزش را رصد می کند و به پیش‌بینی و مدیریت بلایای طبیعی مانند زلزله و سونامی کمک می کند. کاوش منابع معدنی از دیگر کاربردهای این روش است. با استفاده از حساسیت روش گرانش نوری به تغییرات در خواص فیزیکی مواد، می توان به اکتشاف ذخایر معدنی جدید و پایش معادن موجود پرداخت. این روش علاوه بر کارآمد بودن، سازگار با محیط زیست است. همچنین، مطالعات یخچال‌ها و صفحات یخی نیز با اندازه‌گیری تغییرات در ضخامت و حرکت یخچال‌ها و صفحات یخی، به درک بهتر از تغییرات آب و هوایی و افزایش سطح آب دریا کمک می کند. این اطلاعات ارزشمندی را برای مدل‌سازی تغییرات آب و هوایی و پیش‌بینی پیامدهای آن ارائه می دهد.

مزایا:

- ۱- دقت بالا: روش گرانش نوری اطلاعات دقیق و قابل اعتمادی درباره ساختار و خواص فیزیکی زمین ارائه می دهد و به تصمیم‌گیری بهتر در زمینه‌های مختلف مانند مهندسی عمران، اکتشاف منابع و مدیریت بلایای طبیعی کمک می کند.
- ۲- وضوح بالا: تصاویر و داده‌های حاصل از روش گرانش نوری دارای وضوح بالایی هستند که به تفسیر دقیق‌تر پدیده‌های ژئوفیزیکی کمک می کند و امکان مطالعه جزئیات ساختارهای زیرسطحی و تغییرات پوسته زمین را فراهم می کند.
- ۳- قابلیت انعطاف‌پذیری: روش گرانش نوری را می توان در طیف وسیعی از کاربردهای ژئوفیزیکی از جمله اکتشاف، پایش و تحقیقات علمی به کار برد و روشی تطبیق‌پذیر برای مطالعه پدیده‌های مختلف ژئوفیزیکی در شرایط مختلف ارائه می دهد.
- ۴- هزینه مقرون به صرفه: در مقایسه با روش‌های سنتی مانند لرزه‌نگاری، روش گرانش نوری روشی ارزان‌تر و مقرون به صرفه‌تر است و امکان انجام مطالعات ژئوفیزیکی گسترده‌تر و با جزئیات بیشتر را فراهم می کند.

محدودیت‌ها:

- ۱- نیاز به تجهیزات تخصصی: برای انجام مطالعات گرانش نوری به تجهیزات تخصصی و گران‌قیمت نیاز است و ممکن است در همه مناطق و شرایط قابل استفاده نباشد.
- ۲- نیاز به تخصص: برای تفسیر داده‌های حاصل از روش گرانش نوری به تخصص و دانش تخصصی در زمینه ژئوفیزیک و اپتیک نیاز است و ممکن است در دسترس همه نباشد.
- ۳- تأثیر شرایط محیطی: شرایط محیطی مانند آب و هوا و وجود موانع می تواند بر دقت و کارایی روش گرانش نوری تأثیر بگذارد و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و انجام مطالعات اولیه دارد.

تفسیر نتایج

با نگاه کلی به این روش، می‌توان نتیجه گرفت که گرانش نوری در اکتشاف منابع معدنی، پایش معادن، اکتشاف آب‌های زیرزمینی، و اکتشاف منابع نفت و گاز می‌تواند موثر باشد. تشخیص و تفکیک کانی‌ها با استفاده از حساسیت این روش به تغییرات در خواص اپتیکی مواد، امکان پیشرفت‌های دقیق در تشخیص و تفکیک کانی‌های مختلف را فراهم می‌کند. این امر به اکتشاف دقیق‌تر و بهینه‌تر ذخایر معدنی کمک می‌کند. به علاوه، تحلیل دقیق ترازوی این تغییرات می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج منابع معدنی کمک کند. تشخیص سفره‌های آب زیرزمینی از دیگر کاربردهای روش گرانش نوری است. این روش امکان اندازه‌گیری و تحلیل خواص اپتیکی آب زیرزمینی را می‌دهد، که به تعیین موقعیت و عمق دقیق سفره‌های آب زیرزمینی کمک می‌کند. این اطلاعات اهمیت بسیاری در مدیریت منابع آب و جلوگیری از خشکسالی دارد. تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها که احتمال وجود منابع نفت و گاز در آنها بیشتر است، از دیگر مزایای روش گرانش نوری است. این اطلاعات می‌توانند به اکتشاف دقیق‌تر و کارآمدتر مخازن نفت و گاز منجر شوند. همچنین، پایش مخازن و نظارت بر تغییرات در فشار و سیالیت آنها از دیگر کاربردهای مهم این روش است. این اطلاعات به بهترین شکل مدیریت مخازن و افزایش راندمان تولید کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از مدل گرانش نوری در ژئوفیزیک هنوز نظری است و تا حد زیادی ناشناخته است، اما پیامدهای بالقوه آن جالب است. درک عمیق‌تر برهم‌کنش گرانش با ماده می‌تواند به مدل‌های دقیق‌تری از نکتونیک صفحه، زلزله و سایر پدیده‌های زمین‌شناسی منجر شود همچنین مدل گرانش نوری به طور بالقوه می‌تواند توضیحی جایگزین برای برخی آنومالی‌های گرانشی ارائه دهد که منجر به مدل‌های چگالی دقیق‌تر می‌شود. با مقایسه مدل‌های به دست آمده از نسبیت عام و رویکرد نوری، ممکن است بینشی در مورد محدودیت‌های هر یک به دست آوریم و درک خود را از درون زمین اصلاح کنیم. با این وجود بعید است که مدل نوری به طور کامل جایگزین روش‌های ژئوفیزیکی باشد. واقع بینانه تر، ممکن است به تکنیک‌های سنتی مانند روش‌های لرزه‌ای یا اندازه‌گیری‌های گرانشی کمک کند. با ترکیب داده‌ها از رویکردهای مختلف، می‌توانیم درک جامع‌تری از ساختار و فرآیندهای زمین به دست آوریم.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت شورای پژوهشی دانشگاه تهران و انجمن ژئوفیزیک ایران تشکر می‌کنند.

مراجع

- [۱] A.S. Eddington, Space, Time and Gravitation, Cambridge University Press, Cambridge, 1920, p. 109
- [۲] Matthew R. Edwards, Optical gravity in a graviton spacetime
- [۳] J. Overduin, H.-J. Fahr, Vacuum energy and the economical universe, Found. Phys. Lett. 16 (2003), 199-125.
- [۴] M.R. Edwards, Gravity from refraction of CMB photons using the optical-mechanical analogy in general relativity, Astrophys. Space Sci. 351 (2014) 401-406
- [۵] Soleimani, M., & Bagheri, M. (2023). Utilization of Quantum Science Capacity in Geophysical Studies. The 20th Iran Geophysics Conference.
- [۶] Soleimani, M., Riahi, M. A., Rahimi, M., (2024). Application of the Quantum Circuits in Geophysical Studies. The 6th Applied Geophysics Conference in Iran's Oil Exploration.

معرفی کتابخانه PYGIML (ماژول پایتون برای وارونگی و مدل سازی در ژئوفیزیک)

^۱ اصغر صادقی شاهرودی ، ^۲ دکتر وحید ابراهیم زاده اردستانی
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ؛ asghar.sadeghish@ut.ac.ir
^۲ استاد ، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ؛ ebrahimz@ut.ac.ir
^{*} نویسنده مسئول : دکتر وحید ابراهیم زاده اردستانی

چکیده

PyGIMLi [1] یک پلتفرم چندمنظوره برای مدل سازی و وارونگی روش های مختلف ژئوفیزیکی از جمله گرانشی ، رارائه می دهد که پژوهشگران و متخصصان را قادر می سازد تا از طریق تحلیل داده های گرانشی، به دستاوردهای ارزشمندی در مورد ساختارها و ویژگی های زیرسطحی دست یابند. ادغام آن با پایتون، گردش کار روان، سفارشی سازی و قابلیت برقراری ارتباط با سایر ابزارهای ژئوفیزیکی را تسهیل می کند و آن را به منبع ارزشمندی برای پیشبرد تحقیقات و فعالیت های اکتشافی ژئوفیزیکی تبدیل می کند .

واژه های کلیدی: مدل سازی ، وارون سازی ، گرانشی ، اکتشافی .

Introducing the PYGIML library (the Python module for Inversion and Modelling in Geophysics)

Asghar sadeghi shahroodi ¹, Vahid E. Ardestani ²

¹MSc student , Institute of Geophysics, University of Tehran , asghar.sadeghish@ut.ac.ir

^{2*} Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran; ebrahimz@ut.ac.ir

*Corresponding author: Dr.Vahid E. Ardestani

ABSTRACT

PyGIMLi is a versatile platform for modeling and inverting various geophysical methods, including gravity, enabling researchers and specialists to achieve valuable insights into subsurface structures and properties through the analysis of gravity data. Its integration with Python facilitates fluid workflows, customization, and interoperability with other geophysical tools, making it a valuable resource for advancing geophysical research and exploration activities.

Keywords: modeling, inversion, gravity, exploration.

مقدمه

Pygimli^{۱۷} یک کتابخانه متن باز پایتون است که برای مدل سازی و معکوس سازی ژئوفیزیکی طراحی شده است و بر روی ارائه ابزارهایی برای شبیه سازی های دو بعدی و سه بعدی و معکوس سازی روش های مختلف ژئوفیزیکی تمرکز دارد. یکی از کاربردهای برجسته Pygimli در مدل سازی و معکوس سازی گرانش سه بعدی است، جایی که یک پلتفرم همه کاره برای مشخص کردن دقیق توزیع چگالی زیرسطحی بر اساس اندازه گیری های میدان گرانشی ارائه می دهد. مدل سازی و معکوس سازی گرانشی تکنیک های

¹⁷ Python Library for Inversion and Modelling in Geophysics

ضروری در ژئوفیزیک هستند که در زمینه های مختلفی از جمله اکتشاف مواد معدنی، مشخصه سازی مخازن نفت، مطالعات محیط زیست و نقشه برداری زمین شناسی مورد استفاده قرار می گیرند. [2]

مدل سازی گرانشی شامل شبیه سازی میدان گرانشی ایجاد شده توسط تغییرات چگالی زیرسطحی است. این ناهنجاری های چگالی می تواند ناشی از ساختارهای زمین شناسی مانند گسل ها، چین خوردگی ها، ذخایر معدنی یا تغییرات در لیتولوژی باشد. با شبیه سازی پاسخ گرانشی چنین ساختارهای زیرسطحی، ژئوفیزیکدانان می توانند اطلاعات ارزشمندی در مورد توزیع و خواص ویژگی های زمین شناسی به دست آورند.

از سوی دیگر، معکوس سازی فرآیندی است که به صورت تکراری یک مدل از توزیع چگالی زیرسطحی را برای بهترین تناسب با داده های گرانشی مشاهده شده اصلاح می کند. این بهینه سازی تکراری به دنبال به حداقل رساندن عدم تناسب بین مقادیر گرانشی محاسبه شده و مشاهده شده است و در نتیجه نمایش دقیق تری از زیرسطح را ارائه می دهد. در معکوس سازی گرانشی سه بعدی، چالش در مدیریت کارآمد حجم زیادی از داده ها و هندسه های پیچیده ساختارهای زمین شناسی نهفته است.

Pygimli با ارائه یک رابط کاربری کاربرپسند همراه با الگوریتم های عددی قدرتمند، فرآیند مدل سازی و معکوس سازی گرانشی سه بعدی را ساده می کند. این نرم افزار طیف وسیعی از قابلیت ها را ارائه می دهد، از جمله تولید مش، مدل سازی رو به جلو، پردازش داده ها، الگوریتم های معکوس سازی و ابزارهای تجسمی. با Pygimli، پژوهشگران و متخصصان می توانند به سرعت داده های گرانشی را نمونه اولیه، شبیه سازی و معکوس سازی کنند، که منجر به درک بهتری از ساختارها و خواص زمین شناسی زیرسطحی می شود. که در این مقاله به بررسی مدل مصنوعی گرانی میپردازیم .

روش ها تحقیق

pyGIMLi به شما امکان مدل سازی و وارون سازی را می دهد. در این کتابخانه، می توانید مدل های مختلفی را ایجاد کرده و با داده های واقعی این مدل ها را بهینه سازی کنید.

مدل سازی:

با استفاده از المان های محدود و توابع پایه خطی و درجه دوم، می توانید مدلهایی را در حوزه های ۱ بعدی، ۲ بعدی و ۳ بعدی ایجاد کنید که این مدل ها امکان نمایش توزیع مختلف پارامترها در فضای مکانی را می دهند. [3]

وارون سازی:

با استفاده از داده های واقعی و مدلهایی که ساخته شده اند، پارامترهای مدل را از داده ها بازیابی می کند. این فرآیند وارون سازی به طور پیش فرض با استفاده از روش گاوس-نیوتن تعمیم یافته انجام می شود.

"سطح فیزیک" مجموعه ای از کلاس ها است که برای حل یک کار شبیه سازی یا پیش رو در یک رشته خاص ژئوفیزیکی، از "سطح معادلات" استفاده می کند یا محاسبات مناسب را به کار می گیرد. به عبارت دیگر، این بخش از کتابخانه pyGIMLi شامل ابزارهایی است که می توانند با استفاده از معادلات ریاضی یا انجام محاسبات مرتبط، مسائل شبیه سازی یا تحلیل را برای حوزه های مختلف ژئوفیزیک حل کنند. هر کدام از این ابزارها با عنوان یک "کلاس" شناخته می شوند و برای یک رشته خاص ژئوفیزیک، مانند اکتشاف مواد معدنی یا مدل سازی میدان های گرانشی، طراحی شده اند. در این بخش، ما توزیع پارامترها در فضای گسسته را با استفاده از عملگر

پیشرو¹⁸ که به صورت $F=(\mathbf{m}(\mathbf{r}, t))$ تعریف می‌شود، مدل می‌کنیم. این توزیع شامل مجموعه‌ای از پارامترها هست که $\mathbf{m} = \{m_j\}$ با $j = 1 \dots M$ تعداد مدل پارامتر هست، $\mathbf{d} = \{d_i\}$ بردار داده هاست که $i = 1 \dots N$ تعداد بردار داده میباشد. هدف اصلی ما در اینجا این است که با محاسبات عددی مناسب، پاسخ مورد نظر را به دست آوریم. توجه داشته باشید که نیاز به گسسته‌سازی مکانی یا زمانی ممکن است در وارون‌سازی متفاوت باشد و از نیازهای عددی برای مدل‌سازی دقیق ممکن است متمایز باشد. به همین دلیل، ابزارهای درون‌یابی و برون‌یابی را ارائه می‌دهد تا بتوانید پارامترها را از یک شبکه به شبکه دیگر نگاشت داشته باشد، همچنین متد ساخت ماتریس ژاکوبین¹⁹ به شما امکان محاسبه ورودی‌های ماتریس ژاکوبین را می‌دهد [4]:

$$\mathbf{J}(\mathbf{m}) = \frac{\partial \mathcal{F}(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} = \{J_{i,j}\} \text{ with } J_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \quad (1)$$

این ممکن است برای معکوس‌سازی لازم باشد، اما چون به مسئله مدل‌سازی وابسته است، بخشی از اپراتور پیش‌بینی می‌شود. تابع "ساخت ماتریس ژاکوبی" با یک رویکرد تولید ماتریس ژاکوبی مخصوص به روش مشخص مفید است. با این حال، اگر این تابع پیاده‌سازی نشده باشد، کلاس پایه "مدل پایه"²⁰ یک مکانیزم پیش‌فرض موازی‌سازی شده برای پر کردن مقادیر ماتریس ژاکوبی (\mathbf{J}) با استفاده از رویکرد اختلاف محدود فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، محاسبات پیشرو با تغییرات در پارامترهای مدل تکرار می‌شوند.

در واقع، تابع "ساخت ماتریس ژاکوبی" به شما امکان محاسبه ماتریس ژاکوبی را با توجه به مدل و روش مدل‌سازی خاصی که در حال استفاده است، می‌دهد. اگر این تابع پیاده‌سازی نشده باشد، مکانیزم موازی‌سازی پیش‌فرض "مدل پایه" برای تولید مقادیر ماتریس ژاکوبی با استفاده از تغییرات پارامترهای مدل به کار می‌رود. این امر به شما این امکان را می‌دهد که بدون نیاز به پیاده‌سازی تابع "ساخت ماتریس ژاکوبی"، مدل‌سازی و وارون‌سازی را انجام دهید.

قوانین و رویکردهای وارون‌سازی در واقعیت به انواع مختلفی از حل مسائل وارون‌سازی مرتبط با ژئوفیزیک اشاره می‌کنند. این رویکردها ممکن است شامل استراتژی‌های منظم‌سازی خاص، فرمول‌های جایگزین برای مسائل وارون‌سازی یا الگوریتم‌های متنوعی باشند که توسط اپراتورها یا کلاس‌های مدیریتی ارائه شده، مقداردهی اولیه می‌شوند.

روش وارون‌سازی گوس-نیوتن یک قاعده وارون‌سازی پیش‌فرض بر مبنای روش گوس-نیوتن عمومی است و با هر نوع عملگر پیش‌بینی داده‌ای که ارائه می‌شود، سازگاری دارد. این به این معنی است که می‌توان از این روش برای مسائل مختلف در زمینه‌های مختلف فیزیکی استفاده کرد. در واقع، مسئله وارون‌سازی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که تلاش می‌کند تا با کمینه کردن عدم تطابق داده‌ها و رعایت محدودیت‌های مدل، به تطابق بهتری برسد [5].

$$\|\mathbf{W}_d(\mathcal{F}(\mathbf{m}) - \mathbf{d})\|_r^2 + \lambda \|\mathbf{W}_m(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|_r^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

باید توجه داشت که محدودیت‌های نابرابری را در کمینه‌سازی لحاظ نمی‌شود، اما از تبدیل‌ها برای محدود کردن پارامترها به محدوده‌های معقول استفاده می‌شود. ماتریس وزن داده، \mathbf{W}_d ، حاوی خطاهای داده وارون است، در حالی که ماتریس محدودیت مدل، \mathbf{W}_m ، مشخص می‌کننده محدوده پارامترهای مدل است. \mathbf{m}_0 یک مدل مرجع است. عامل بی‌بعد λ تاثیر ترم تنظیم را مقیاس می‌کند. متدهای متعددی برای تنظیم وجود دارد، از جمله انواع مختلفی از میرایی و ترکیب اپراتورها. روش‌های موجود به انعطاف‌پذیری برای محدود کردن پارامترهای مدل یا بخش‌های زیرسطحی می‌پردازند، اما همچنین می‌توانند با توابع خود توسعه یابند. استفاده از روش گوس-نیوتن برای کمینه‌سازی به به‌روزرسانی مدل Δm^k در مرحله k^{th} انجام می‌شود [6].

¹⁸ forward operator

¹⁹ createJacobian

²⁰ Modelling Base

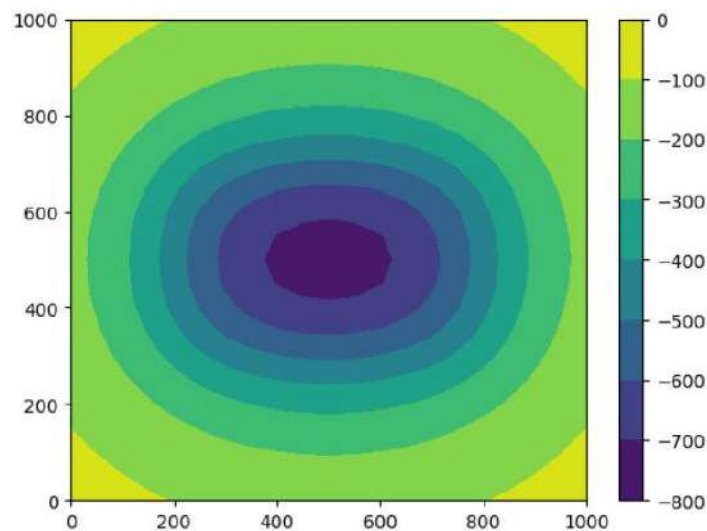
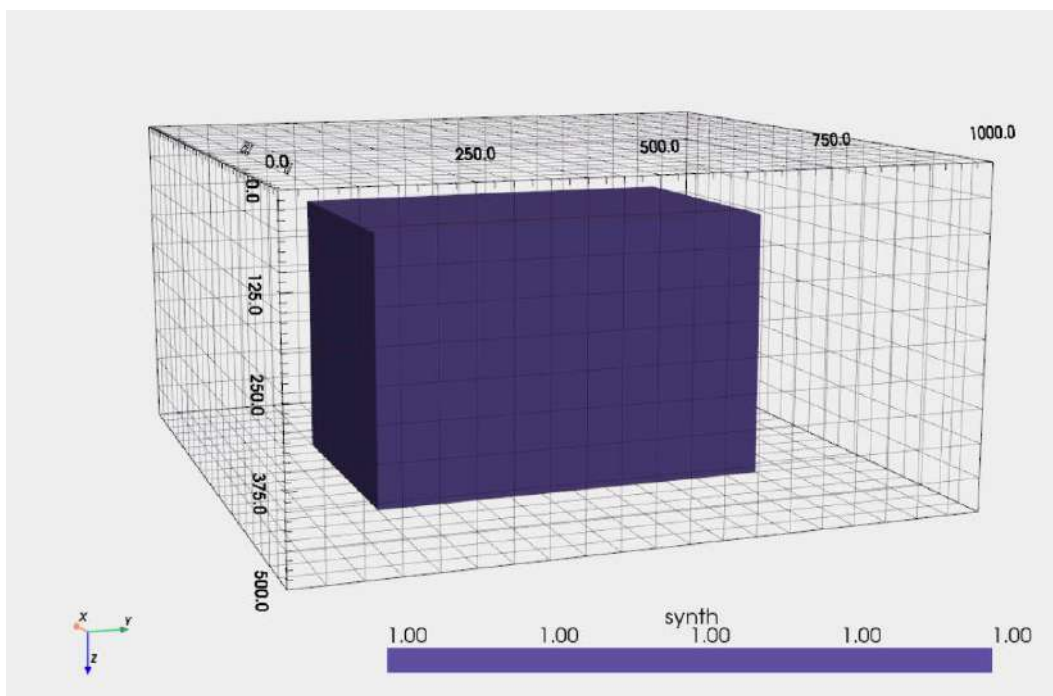
$$(J^T W_d^T W_d J + \lambda W_m^T W_m) \Delta m^k = J^T W_d^T W_d (\Delta d^k) - \lambda W_m^T W_m (m^k - m^0)$$

$$\Delta d^k = d - \mathcal{F}(m^k) \text{ and } \Delta m^k = m^k - m^{k-1}$$

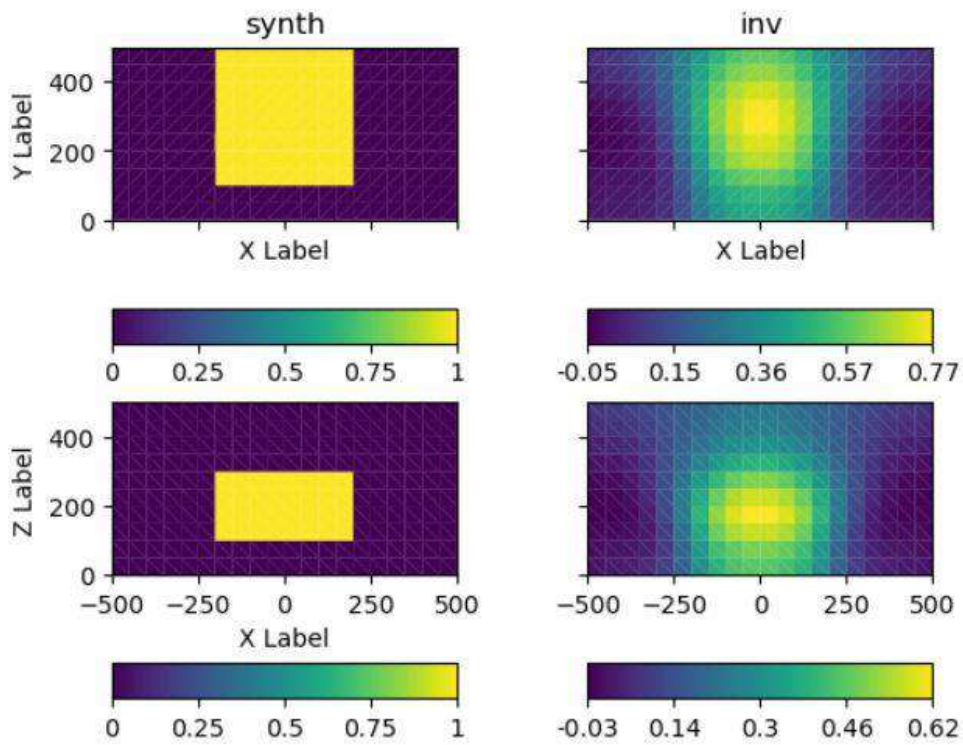
با استفاده از یک حل کننده مربعات کمینه ترکیبی متقابل، مسئله حل می شود. تمام ماتریس های فرمول وارون سازی می توانند به صورت مستقیم از پایتون دسترسی داده شده و این امکان را برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و دقت و همچنین طراحی فراهم می کند.

یافته ها

ما قصد داریم مدل را بر اساس این ماژول، با استفاده از تابع وزن دهی عمق، بسازیم. داده های مصنوعی ایجاد کنیم و وارون سازی را انجام دهیم. در این مدل ما یک شبکه ایجاد می کنیم و مدل خود را که یک مستطیل در عمق ۲۵ متر، درون شبکه قرار می دهیم و به ترتیب خود مش به عنوان یک قاب سیمی نشان داده می شود، ناهنجاری به صورت نمودار سطحی با استفاده از فیلتر آستانه ترسیم می شود. برای محاسبه میدان کل، را با استفاده از تنظیمات میدان کل (IGRF) تعریف می کنیم. سپس بعد از آن شروع به وارون سازی می کنیم و خروجی مدل مصنوعی و وارون سازی برای مشاهده بهتر عمق، یک برش افقی و برش قائم ایجاد می کنیم.



شکل (۲) اندازه گیری میدان کل آنومالی (IGRF)



شکل (۳) برش افقی و عمودی داده مصنوعی در سمت چپ و سمت راست وارون سازی برش های برای نمایش بهتر عمق

تفسیر نتایج

با توجه به شکل های خروجی مشاهده شده متوجه این میشویم که عمق چگالی های آنومالی ها را بهتر تخمین میزند و میتوانیم برای مدل سازی ساختارهای زیرزمینی را بررسی و به صورت سه بعدی تصویرسازی کنید، این اطلاعات می توانند در تشخیص و شناسایی لایه های سنگی، ساختارهای کربناته، و دیگر ویژگی های زمین شناسی مفید باشد.

نتیجه گیری کلی

استفاده از ماژول PyGIMLi برای تحلیل داده‌های گرانشی و مدل‌سازی سه‌بعدی اطلاعات بسیار مفیدی ارائه می‌دهد که می‌تواند به محققان و مهندسان در مختلف زمینه‌ها کمک کند. یک نتیجه کلی از استفاده از این ماژول می‌تواند عبارت باشد از:

PyGIMLi به کاربران امکان می‌دهد تا با استفاده از ابزارها و الگوریتم‌های پیشرفته‌ای که ارائه می‌شود، داده‌های گرانشی را به صورت دقیق تحلیل کرده و مدل‌های سه‌بعدی از ساختار زیرزمینی را تولید کنند. این اطلاعات می‌توانند در زمینه‌های مختلفی از جمله زمین‌شناسی، مخزن‌شناسی، مهندسی زمین، معدن‌کاری، حفاری نفت و گاز، و مطالعات محیطی استفاده شوند و به تصمیم‌گیری‌های موثرتر و بهینه‌تر در این زمینه‌ها کمک کنند. به طور خلاصه، PyGIMLi با ارائه امکانات پیشرفته و انعطاف‌پذیری، به محققان اجازه می‌دهد تا به تحلیل دقیق‌تری از داده‌های گرانشی بپردازند و نتایجی که برای تصمیم‌گیری‌های مهم در زمینه‌های مختلف لازم است، بدست آورند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت شورای پژوهشی دانشگاه تهران و انجمن ژئوفیزیک ایران تشکر می‌کنند.

مراجع

- [1] pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics / Carsten Rücker a., Thomas Günther b., Florian M. Wagner
- [2] Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D., 2015. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resour. Res.* 51, 3837–3866. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017016>
- [3] Davis, T.A., 2006. *Direct Methods for Sparse Linear Systems*. SIAM. Dlugosch, R., Günther, T., Müller-Petke, M., Yaramanci, U., 2014. Two-dimensional distribution of relaxation time and water content from surface nuclear magnetic resonance. *Near Surf. Geophys.* 12, 231–241. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2013062>
- [4] Guyer, J.E., Wheeler, D., Warren, J.A., 2009. FiPy: partial differential equations with Python. *Comput. Sci. Eng.* 11, 6–15. <http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2009.52>
- [5] Loewer, M., Igel, J., Wagner, N., 2016. Spectral decomposition of soil electrical and dielectric losses and prediction of in situ GPR performance. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 9, 212–230. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2015.2424152>
- [6] Park, S.K., Van, G.P., 1991. Inversion of pole-pole data for 3-d resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 951–960. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443128>

ظرفیت های کوانتومی در اکتشافات معدنی

*^۱ محمدحسن سلیمانی ، ^۲ محمدعلی ریاحی ، ^۳ جواد دلیر ، ^۴ اصغرصادقی شاهرودی

*^۱ کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ mh.soleimani@ut.ac.ir

^۲ استاد ، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ mariahi@ut.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ javad.dalir@ut.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ asghar.sadeghish@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: محمدحسن سلیمانی

چکیده

در این تحقیق، به کاربرد قابلیت های کوانتومی در اکتشاف معدن می پردازیم. استفاده از کامپیوترهای کوانتومی و الگوریتم های مرتبط، امکان انجام محاسبات پیچیده و جستجوهای بهره برداری سریع را در علوم زمین، به خصوص در اکتشاف معدنی، فراهم می کند. قابلیت های منحصر به فرد کیوبیت ها در سرعت و پیچیدگی، این امکان را می دهند که محدودیت های سیستم های کلاسیک را برطرف کند و داده های زمین شناسی را با دقت و سرعت بالا تحلیل کنند. در این تحقیق ظرفیت های کوانتومی مختلفی از جمله: تداخل کوانتومی در پهبادها، مدارهای کوانتومی، نقشه برداری کوانتومی، استفاده از دستگاه های ابرسانایی تداخلی کوانتومی که می توانند به عنوان مغناطیس سنج حساس عمل کنند و حسگرهای کوانتومی معرفی می شوند. با پیشرفت فناوری کوانتومی، امیدواریم که بتوانیم از قابلیت های کوانتومی در اکتشاف معدن بهره برداری کنیم و نتایج قابل توجهی را در این حوزه به دست آوریم. برای دستیابی به این هدف، نیازمند تحقیقات بیشتر و اختصاص منابع مالی مناسب به این تحقیقات هستیم.

واژه های کلیدی: تداخل کوانتومی، اکتشاف معدنی، مدار های کوانتومی، مغناطیس سنج، کیوبیت، فناوری کوانتومی

Quantum Capabilities in Mineral Exploration

¹* Mohammad Hassan Soleimani, ² Mohammad Ali Riahi, ³ Javad Dalir, ⁴ Asghar Sadeghi Shahroodi

¹* Master's degree, Institute of Geophysics / University of Tehran; mh.soleimani@ut.ac.ir

² Professor, Institute of Geophysics / University of Tehran; mariahi@ut.ac.ir

³ Master's student, Institute of Geophysics / University of Tehran; javad.dalir@ut.ac.ir

⁴ master's students, Institute of Geophysics / University of Tehran; asghar.sadeghish@ut.ac.ir

* Corresponding Author: Mohammad Hassan Soleimani

ABSTRACT

Our research delves into the possible uses of quantum technology in mineral exploration. By utilizing quantum computers and algorithms, we can carry out complex computations and swift searches in earth sciences, specifically in mineral exploration. The remarkable capabilities of qubits in terms of speed and complexity allow us to overcome the limitations of classical systems, making it possible to analyze geological data precisely and quickly. Our study examines various quantum capacities such as quantum interference in drones, quantum circuits, quantum mapping, and the use of quantum interference-based superconducting devices that can act as sensitive magnetometers. We also introduce quantum sensors. With the progress of quantum technology, we hope to tap into quantum

capabilities in mineral exploration and achieve substantial results in this field. To achieve this goal, further research and appropriate financial resources are essential.

Keywords: Quantum interference, mineral exploration, quantum circuits, magnetometer, qubit, quantum technology

مقدمه

با توجه به اهمیت فلزات گرانبها و سایر منابع زیرزمینی و سختی یافتن ذخایر در عمق کم، اکتشاف این منابع در عمقها بیشتر اهمیت پیدا کرده است. در اینجا، تداخل کوانتومی به عنوان یک کاربرد می‌تواند با بررسی طبیعت موج در ذرات زیراتمی، فتون، و دوگانگی نور، مفاهیم مهمی را مورد بررسی قرار دهد. [۲] مدارهای کوانتومی نیز می‌توانند به پیشرفت‌های بنیادین در صنایع مختلف، به ویژه در اکتشاف منابع معدنی و بهبود کیفیت و امنیت داده‌های ژئوفیزیکی، کمک کنند. روش‌های سنتی ما را با محدودیت‌هایی رو به رو کرده است که لازم است به کاربرد فناوری‌های نو و جدید توجه جدی داشته باشیم [۴،۶،۷]، در حال حاضر، نقشه‌برداری معدنی به صورت متداول بر روی سیستم‌های کلاسیک با استفاده از نرم‌افزارهای معمول انجام می‌شود. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی منجر به تحلیل سریع‌تر و دقیق‌تر داده‌ها شده است. با توجه به پیشرفت‌های حاصله در زمینه محاسبات کوانتومی، این تکنولوژی قابلیت تحول در حوزه اکتشافات معدنی را داراست. [۱]

یکی از حوزه‌هایی که به سرعت در حال پیشرفت است، تحقیق بر روی حسگرهای کوانتومی در زمینه فناوری کوانتومی است. یکی از این نوع حسگرها دستگاه‌های تداخل کوانتومی (SQUID) هستند. استفاده از حسگرهای کوانتومی نیز در دستگاه‌های گرانش‌سنج به کار رفته که منجر به نتایج خوبی شده است. [۸،۶] این موارد می‌توانند در پیشرفت علم ژئوفیزیک و ایجاد افق‌های جدید در صنعت مؤثر باشند. از این رو، توجه به این موضوع بسیار مهم است. این پیشرفت‌ها نه تنها از نظر فنی مهم هستند، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز بسیار اهمیت دارد، زیرا منجر به بهینه‌سازی و توسعه اکتشاف منابع معدنی خواهد شد.

روش‌ها تحقیق

تداخل کوانتومی در پهپادها:

بررسی‌های آکاش گوپتا در طراحی وسیله نقلیه بدون سرنشین هواپرد (پهپاد) مجهز به کاربردهای تداخل کوانتومی نقش مهمی در دستیابی به داده‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق برای ناوبری و مطالعات ژئوفیزیکی ایفا می‌کند. داده‌ها های ژئوفیزیکی پس از واحد جمع‌آوری به مرکز پردازش منتقل شده و برای تجزیه و تحلیل به طرح‌های سه بعدی برسی می‌شوند. با این وجود، پهپادهای کوانتومی قادر به جمع‌آوری داده‌ها با دقت بالاتر و با سرعت بیشتری هستند. استفاده از محاسبات کوانتومی در یک پهپاد به این امکان می‌دهد که داده‌های با سرعت ودقت بالا پردازش کرده و سپس به مدل‌های سه بعدی برای تجزیه و تحلیل بیشتر منتقل کند. این قابلیت می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر و سریع‌تر اطلاعات زمین‌شناسی کمک کند و در مقایسه با روش‌های سنتی، امکانات بیشتری در جمع‌آوری و پردازش داده‌ها ارائه دهد. این تکنولوژی می‌تواند تاثیر مثبتی بر علم ژئوفیزیک، به خصوص در زمینه‌های ناوبری داشته باشد و باعث پیشرفت در دستیابی به اطلاعات دقیق و بهبود کارایی در تحلیل داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی شود.

مدارهای کوانتومی

تحقیقات انجام شده در زمینه مدارهای کوانتومی نشان می‌دهد که استفاده از این مدارها می‌تواند منجر به تحلیل دقیق‌تر داده و مدل‌سازی با سرعت بالا شود. با بهره‌مندی از ویژگی‌های برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کیوبیتها، مدارهای کوانتومی قادر به انجام محاسبات

پیچیده هستند که با سیستم‌های کلاسیک قابل مقایسه نیستند. این فناوری همچنین می‌تواند به امنیت داده‌های ژئوفیزیکی اضافه کند. مطالعات جدید نشان می‌دهند که مدارهای کوانتومی به طبقه‌بندی رخساره‌های چاه نیز پرداخته‌اند. این نقشه‌برداری دقیق از رخساره‌ها به محققان این امکان را می‌دهد که بهبودهای چشمگیری در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی داشته باشند شروع انقلاب مدارهای کوانتومی ممکن است این توانایی را فراهم کند که در مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها به شدت قدرتمند ظاهر شوند. این مدارها می‌توانند منجر به اکتشاف منابع معدنی با دقت بسیار بالا و سرعت بسیار بالا شوند. این پیشرفت‌ها می‌توانند تاثیر چشمگیری بر صنایع استخراج معدن و اکتشافات زمین‌شناسی داشته باشند.

نقشه‌برداری کوانتومی

در اینجا، یک مسئله آینده‌نگری معدنی با استفاده از روش‌های عددی مطرح می‌شود. در این فرایند، اطلاعات مختلفی که معمولاً به صورت داده‌های GIS ارائه می‌شوند، با استفاده از روش‌هایی مانند وزن شواهد (WofE) تلفیق می‌شوند. نتیجه این تلفیق، یک نقشه موضوعی جامع است که احتمال یا میزان مطلوبیت مناطق برای معدنی خاصی را نشان می‌دهد. هدف اصلی این تلفیق، شناسایی مناطقی با احتمال بالا برای حاوی کالای معدنی مورد نظر است. گروور در سال ۱۹۹۶ به مطالعه و ارائه زمینه محاسبات کوانتومی پرداخت. در یک مرور اولیه، او از رویکرد ضدشهودی در محاسبات کوانتومی گفت و تجربیات خود را با استفاده از یک مدار ۲ کیوبیتی مستندسازی کرد. محدودیت‌های مرتبط با استفاده از این روش برای ساخت یک نقشه آینده‌نگری معدنی مورد بحث قرار گرفت.

استراتژی گروور در جستجوی کوانتومی را می‌توان با عنوان "یافتن یک سوزن در انبار کاه" توصیف کرد. او از اصل برهم‌نهی برای بهبود سرعت جستجو در یک پایگاه داده فرضی استفاده کرد. این پایگاه داده نمایانگر اطلاعات بدون ساختاری بود، به این معنی که هیچ ترتیب خاصی در آن وجود نداشت. در یک پایگاه داده کلاسیک، اطلاعات با دو فیلد نشان داده می‌شوند. این تفاوت‌ها و محدودیت‌ها در ساخت یک مدل آینده‌نگری معدنی با استفاده از این رویکرد مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع توسعه سیستم‌های کوانتومی می‌تواند در به تصویر کشیدن نتایج تاثیر اساسی بگذارد. کامپیوترهای کوانتومی (QC) به عنوان یک جایگزین نوآورانه و پیشرفته در حل مسائل عددی پیشنهاد می‌شوند. این انواع کامپیوترها از کارایی بیشتری نسبت به هم‌تایان کلاسیک برخوردارند. یکی از جذابیت‌های اصلی QCها، قابلیت دستکاری ذرات زیر اتمی برای ذخیره اطلاعات و انجام محاسبات با استفاده از قوانین مکانیک کوانتومی است. تلاش‌هایی در زمینه توسعه نرم‌افزار و کاربردهای مختلف این فناوری، از جمله ژئوفیزیک، ادامه دارد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد QCها، برهم‌نهی نامیده می‌شود، که توانایی آنها در حل مسائل ترکیبی با استفاده از این ویژگی را نشان می‌دهد.

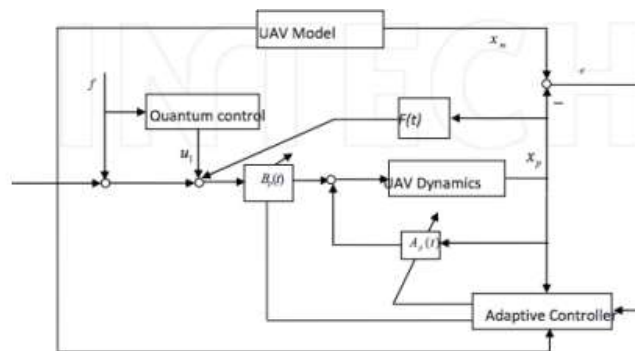
حسگرهای کوانتومی

حوزه حسگرهای کوانتومی می‌تواند تحولات جدیدی در علم اکتشاف منابع معدنی ایجاد کند. خصوصیات حالت‌های کوانتومی، به عنوان مثال اسپین الکترون، این امکان را فراهم می‌کنند که تغییرات بسیار کوچک در گرانش و مغناطیس را تشخیص داده و بهره‌وری بیشتری در اکتشاف منابع معدنی به دست آورد. این ویژگی‌ها طیف وسیعی از کاربردها را در اختیار محققان قرار می‌دهند و می‌توانند به دست آوردن دید واضحتری از ویژگی‌های زیرسطحی زمین کمک کنند. این ابتکارات ممکن است در بهبود فرآیندهای اکتشاف و استخراج منابع معدنی با دقت و کارایی بیشتر تاثیر گذار باشند. انرژی پتانسیل گرانشی هر ابر الکترونی بر رفتار موج آن تاثیر گذار است. اگر یک ابر زمان بیشتری را در حابت بالاتر بگذرانند، نوسان کمتری نشان می‌دهد نسبت به ابرهایی که در حالت‌های پایه می‌مانند. وقتی این ابرها دوباره ترکیب می‌شوند و به هم تداخل می‌کنند، نسبت انرژی آنها تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات با استفاده از پرتو لیزر به ما اطلاعات درباره قدرت گرانش را می‌دهد. حسگرهای گرانشی کوانتومی، مانند تداخل‌سنج اتمی، با بهبود برنامه‌های حوزه گرانشی، قابلیت تشخیص میدان گرانشی را از طریق کنترل چگالی ماده بهبود می‌بخشند.

یکی از حوزه‌های فناوری کوانتومی که به سرعت در حال پیشرفت است، زمینه ژئوفیزیک می‌باشد. انتظار می‌رود که این فناوری‌ها در آینده در زمینه‌هایی مانند ژئوفیزیک به کار گیری شوند. پیشرفت‌های چشمگیری در این حوزه رخ داده‌اند که توجه به آن‌ها ضروری است. یکی از این پیشرفت‌ها، در دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابرسانا (SQUID) و مغناطیس‌سنج‌های هوابرد است. استفاده از این فناوری مغناطیس‌سنج، امکان استفاده از آن در روش‌های مغناطیسی همراه با روش‌های الکترومغناطیسی مانند مغناطیسی فرکانس صوتی غیرفعال یا نیمه فعال را فراهم می‌سازد. در این روش هوابرد، از فرستنده‌های فعال مانند منابع دوقطبی زمینی دراز بهره می‌برد. سیگنال‌های متناظر در حوزه فرکانس از یکدیگر جدا می‌شوند. علاوه بر ابزارهای هوابرد، مغناطیس‌سنج‌های کوانتومی نیز با استفاده از گیرنده‌های مبتنی بر SQUID در روش الکترومغناطیسی گذرای زمینی عمل می‌کنند. این فناوری که بیش از یک دهه است در حال استفاده تجاری قرار دارد، به اکتشافات متعددی در زمینه اکتشاف منابع معدنی منجر شده است. مغناطیس‌سنج‌های جدید با پمپ نوری نیز به عنوان ابزارهای جدید در اکتشافات ژئوفیزیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

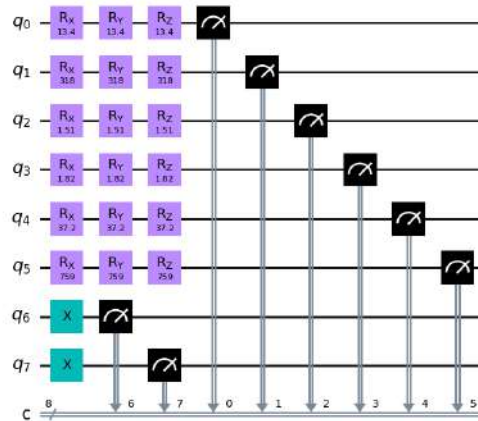
یافته‌ها

در این بخش، به بررسی هر یک از مواردی که قبلاً ذکر شده پرداخته و برای هر مورد، نمونه‌های مطالعاتی که در آن حوزه انجام شده است را ارائه می‌کنیم. یکی از مطالعات جالب در زمینه تداخل کوانتومی در پهپادها، تحت عنوان "طرح آکاش گوپتا" است که یک قانون کنترل یکپارچه برای کنترل کانال‌های طولانی و جانبی سیستم کنترل پرواز پهپاد را طراحی کرده است. این مطالعه از حالت بیت کوانتومی و تکنیک کنترل کوانتومی برای بهبود عملکرد سیستم استفاده می‌کند. ماژول کنترل کوانتومی در این تحقیق از سه بیت کوانتومی برای توصیف حالت‌ها و کنترل‌ها استفاده می‌کند. شکل ۱ ماژول کنترل کوانتومی پهپاد را نشان می‌دهد. [۲] این تحقیقات و مطالعات تداخل کوانتومی در پهپادها نشان می‌دهند که استفاده از فناوری‌های کوانتومی می‌تواند در بهبود کنترل و عملکرد پهپادها تأثیرگذار باشد.



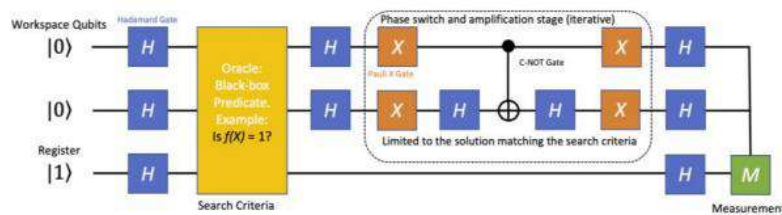
شکل (۱): ماژول کنترل کوانتومی. [۲]

مدارهای کوانتومی که می‌توانند نقش اساسی در صنعت‌ها مختلف ایفا کنند یک مدار طراحی شده در مطالعه موردی که برای طبقه بندی رخساره‌های چاه استفاده شده است که عملکرد خوبی داشته است. در این مدار از ۶ کیوبیت برای رمزنگاری ویژگی‌ها و ۲ کیوبیت برای برجسپ استفاده کرده بودند. [۷] در شکل ۲ طرح کلی مدار کوانتومی مشاهده می‌کنید.



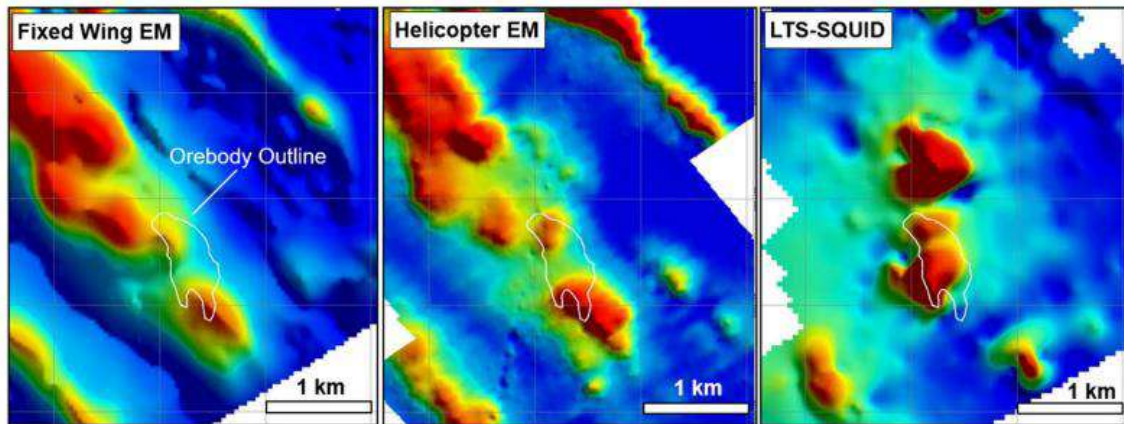
شکل (۲): مدار کوانتومی دارای ۳ دروازه کوانتومی. [۷]

در ادامه پیاده‌سازی گروور نشان می‌دهد که اطلاعات کلاسیک به راحتی به کیوبیت‌ها منتقل نمی‌شوند و این محدودیت‌ها باعث مشکلات در پایه‌های داده‌های کلاسیک-کوانتومی می‌شود. محدودیت‌های قالب نیز باعث محدود شدن نوع ورودی به حالت‌های مختلف می‌شود، که این موضوع توسعه الگوریتم‌های مختلف را دشوار می‌سازد. این تحقیق به نظر می‌رسد که الگوریتم گروور قادر است به حل تعداد محدودی از مسائل ترکیبی بپردازد. [۱] همچنین، آزمایش دومین استراتژی که به طبقه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین متصل است، انجام شد. این استراتژی، با تلافی کوانتوم کامپیوتینگ و هوش مصنوعی در طول دو دهه گذشته، به تحقیقات بیشتر در زمینه ترکیب این دو حوزه منجر شده است. در شکل ۳ جزئیات مدار اصلاح شده گروور را مشاهده می‌کنید.



شکل (۳): جزئیات مدار کوانتومی گروور. [۱]

تحقیقات جدید در زمینه حسگرهای کوانتومی نشان می‌دهد که حسگرهای جدید با ویژگی‌های خاص و عملکردی منحصر به فرد، می‌توانند تأثیرات قابل توجهی در علم اکتشاف مواد معدنی داشته باشند. در یک مطالعه اخیر در سایت Ludvika در سوئد، از ابزار QAMT با استفاده از مغناطیس‌سنج برداری مبتنی بر SQUID با پهنای باند وسیع و دامنه دینامیکی بالا استفاده شده است. این ابزار با هدف استفاده در روش‌های AFMAG یا DESMEX نیمه هواردا ارائه شده است. استفاده از گرادومتر مغناطیسی تانسور کامل QMAGT به تصویربرداری ناهنجاری‌های مغناطیسی کمک می‌کند و نشان می‌دهد که این حسگرها می‌توانند بهبود مشخصات فضایی و مغناطیسی حسگرها را فراهم کنند و نشانه‌های ماندگاری ارائه دهند. مقایسه کیفی شبکه‌های Tau در سیستم‌های AEM و LTS SQUID در شکل ۴ مشخص است. [۸] شبکه LTS SQUID Tau مقادیر بسیار بالاتری را نشان می‌دهد که به طور مرتبط با سولفیدهای عظیم و چاه‌های معدنی روی می‌باشد، که این به تحلیل دقیق داده‌های مرتبط با سنگ‌ها و فیلیت‌سیسته آنها کمک می‌کند.



شکل (۴): مقایسه کیفی شبکه‌های Tau سیستم‌های AEM و LTS SQUID. [۱]

آزمایشی انجام شده توسط هالینسکی و همکارانش بر روی حسگر کوانتومی، توانستند تشخیص دهند که آیا حسگر می‌تواند یک گذرگاه زیرزمینی در محوطه دانشگاه بیرمنگام را تشخیص دهد یا خیر. تونل بتنی این تحقیق ۲ در ۲ متری بود و در زیر جاده‌ای بین دو ساختمان چند طبقه قرار داشت. حسگر کوانتومی میدان گرانشی محلی را هر ۰.۵ متر در امتداد یک خط ۸.۵ متری که از روی تونل عبور میکرد اندازه‌گیری کرد نتایج نهایی حاصل از این آزمایش با پیش‌بینی‌های یک شبیه‌سازی رایانه‌ای که سیگنال گرانشی تونل را بر اساس ساختار آن و سایر عواملی که ممکن بودند بر میدان گرانشی محلی تأثیر بگذارند تطابق داشتند. بر اساس حساسیت دستگاه در این آزمایش، مشخص شد که این حسگر می‌تواند به طور قابل اعتماد میدان گرانش را در هر نقطه از تونل در کمتر از دو دقیقه اندازه‌گیری کند. این باعث می‌شود که زمان مورد نیاز برای این حسگر، تقریباً یک دهم زمان مورد نیاز برای حسگرهای گرانشی سنتی باشد. [۳]

تفسیر نتایج

این مطالعات نشان می‌دهند که تکنولوژی کوانتومی در حوزه‌های مختلف، از جمله کنترل پهبادهای، طبقه‌بندی رخساره‌های چاه، حسگرهای کوانتومی و اندازه‌گیری میدان گرانشی، می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و نوآوری ایفا کند. در زمینه کنترل پهبادهای، مطالعه طرح آکاش گوپتا بهبود قابل توجهی در کنترل پرواز پهباد با استفاده از تکنیک‌های کوانتومی نشان داده است. این بهبودها به کمک حالت بیت کوانتومی و تکنیک‌های کنترل مبتنی بر کوانتوم، به عملکرد بهتر و کارایی بالاتر در پهبادهای منجر شده است. در زمینه طبقه‌بندی رخساره‌های چاه، استفاده از مدارهای کوانتومی به منظور رمزنگاری ویژگی‌ها و برجسب‌گذاری، نشانگر امکانات بالای این تکنولوژی در حل مسائل پیچیده و دقیق در زمینه ژئوفیزیکی و اکتشاف منابع معدنی کمک میکند. در زمینه حسگرهای کوانتومی، مطالعه‌ها حاکی از این است که حسگرها با قابلیت‌ها و عملکردهای منحصر به فرد می‌توانند تأثیرات قابل توجهی در علم اکتشاف مواد معدنی داشته باشند. استفاده از ابزارهایی مانند QAMT با استفاده از مغناطیس‌سنج برداری مبتنی بر SQUID، نشانگر قدرت این حسگرها در تصویربرداری ناهنجاری‌های مغناطیسی با دقت و وضوح بالا است. آزمایش انجام شده بر روی حسگر کوانتومی جهت اندازه‌گیری میدان گرانشی نیز نشان داده است که این حسگرها با حساسیت بالا و زمان اندازه‌گیری کمتر، به طور قابل اعتماد میدان گرانش را اندازه‌گیری کرده و در کاربردهای زیرزمینی با کارایی بالاتری نسبت به حسگرهای سنتی عمل می‌کنند. به طور کلی، این مطالعات نشان می‌دهند که ظرفیت‌های کوانتومی کوانتومی به عنوان یک فناوری نوین، در حل چالش‌ها و بهبود عملکرد در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی مؤثر واقع می‌شود. این پیشرفت‌ها با استفاده از تکنولوژی‌های کوانتومی، به عنوان یک ابزار پیشرفته و قدرتمند در حل مسائل پیچیده و ایجاد نوآوری در علوم مختلف، به نظر می‌رسد.

نتیجه گیری کلی

با توجه به پیشرفت‌های حاصله در حوزه کوانتومی و کاربردهای آن در اکتشاف معدن، مشاهده می‌شود که تکنولوژی کوانتومی می‌تواند نقش مهمی در بهبود فرآیندهای اکتشاف معدن و تحلیل دقیق داده‌های زمین‌شناسی ایفا کند. از قابلیت‌های کوانتومی چون تداخل، مدارهای کوانتومی، حسگرهای کوانتومی و دستگاه‌های تداخل کوانتومی می‌توان بهره‌مند شد تا محدودیت‌های سیستم‌های کلاسیک در این حوزه را برطرف کنیم. این تحقیقات نه تنها ارتقاء علمی و فناوری را ترویج می‌دهند بلکه به بهبود اقتصاد و بهینه‌سازی فرآیندهای اکتشاف منابع معدنی نیز کمک خواهند کرد. این جهت پژوهش‌ها نیازمند تحقیقات بیشتر و اختصاص منابع مالی مناسب است تا بتوانیم از ظرفیت‌های کوانتومی در اکتشاف معدن بهره‌مند شویم و به نتایج برجسته‌تری در این حوزه دست پیدا کنیم.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت شورای پژوهشی دانشگاه تهران و انجمن ژئوفیزیک ایران تشکر می‌کنند.

مراجع

- [۱] FELTRIN, L., and M. BERTELLI.(2019) "Quantum-based mineral prospectivity mapping."
- [۲] Gupta, Aakash. "Applying Quantum Interference in UAVs to Provide Smart Geophysical Mineral Exploration and Exploitation." Am. Res. J. Mech. Autom. Eng. 1.1 (2015): 1-30.
- [۳] Kaushik, A., et al. "Quantum sensing for gravitational cartography." (2021).
- [۴] Rahimi, M., Riahi, M. A., (2022). Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield. Journal of Applied Geophysics 201(4):104640. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104640Place, Year of Publish.
- [۵] Soleimani , M., & Bagheri , M . (2023). Utilization of Quantum Science Capacity in Geophysical Studies. The 20th Iran Geophysics Conference.
- [۶] Soleimani , M., Riahi, M. A., Bagheri , M, Rahimi, M., et al. Classification of rock facies using deep convolutional neural network, 16 June 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3046109/v1>]
- [۷] Soleimani , M., Riahi, M. A., Rahimi, M., (2024). Application of the Quantum Circuits in Geophysical Studies. The 6th Applied Geophysics Conference in Iran's Oil Exploration.
- [۸] Stolz, Ronny, et al. "SQUIDS for magnetic and electromagnetic methods in mineral exploration." Mineral Economics 35.3-4 (2022) 467-494.

مدل سازی سه بعدی داده های مغناطیس سنجی در محدوده ی اکتشافی شمال سراب

مهشید ابطی^۱، میثم مقدسی^۲، حمیدرضا باغزندانی^۳، یاسر دهبان^۴

۱ عضو هیات مدیره، مهندسین مشاور صحراکاو؛ mahshidabtahi@gmail.com

۲ دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ moghadasimeysam70@Gmail.com

۳ دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ hbaghzendani@yahoo.com

۴ دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ dehban.yaser70@gmail.com

* نویسنده مسئول: مهشید ابطی، میثم مقدسی

چکیده فارسی

در این مقاله با استفاده از الگوریتم محاسبه پارامتر منظم سازی به روش اعتبارسنجی تعمیم یافته متقاطع (GCV) مدل سازی سه بعدی داده های مغناطیس سنجی به منظور ارائه یک روش کارآمد در تفسیر داده های مغناطیس سنجی پرداخته شده است. پس از ارزیابی این الگوریتم بر روی مدل مصنوعی، آن را بر روی داده های واقعی برداشت شده در محدوده اکتشافی سپی سنگ در شمال شهرستان سراب استان کردستان ارزیابی و بررسی شده است. نهایتاً پارامترهای محاسبه شده در نرم افزار متلب را به صورت یک پایگاه داده در نرم افزار Oasis Montaj وارد نموده و مدل نهایی از داده های واقعی گرفته شده است.

واژه های کلیدی: مدل سازی سه بعدی، مغناطیس سنجی، پارامتر منظم سازی

3D modeling of magnetic data in the exploratory area of North Sarab

Mahshid Abtahi¹, Meysam Moghadasi², Hamidreza Baghzendani³, Yaser Dehban⁴

¹Member of board, Sahrakav consulting engineers; mahshidabtahi@gmail.com

² PhD Student, Shahrood University of Technology; moghadasimeysam70@Gmail.com

³ PhD Student, Shahrood University of Technology; hbaghzendani@yahoo.com

⁴ PhD Student, Shahrood University of Technology; dehban.yaser70@gmail.com

* Corresponding author: Name

ABSTRACT

In this paper, using the regularization parameter estimation algorithm by the generalized cross-validation (GCV) method, three-dimensional modeling of magnetic data in order to provide an efficient method in data interpretation. After evaluating this algorithm on the synthetic model, it has been evaluated and checked on the real data collected in the Sepisang exploration area in the north of Sarab city of Kurdistan province. Finally, the parameters calculated in MATLAB software were entered as a database in Oasis Montaj software and the final model was taken from real data.

Keywords: 3D modeling, magnetometry, regularization parameter.

مقدمه

مغناطیس‌سنجی، یکی از قدیمی‌ترین شاخه‌های ژئوفیزیک می‌باشد و عملاً سرآغازی بر ژئوفیزیک کاربردی است. اندازه‌گیری‌های صحرائی این روش در مقایسه با اغلب روش‌های ژئوفیزیکی راحت‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر می‌باشد. روش مغناطیس‌سنجی در اکتشاف مواد معدنی، مطالعات تکتونیکی، شناسایی خطوط لوله، مطالعات باستان‌شناسایی و اکتشاف نفت کاربرد فراوانی دارد [1]- [2].

مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل یکی از مهمترین مراحل در تفسیر میدان ناشی از این داده‌ها می‌باشد. روش‌های مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل به دو دسته مدل‌سازی مستقیم (یا مدل‌سازی پیشرو) و مدل‌سازی وارون تقسیم‌بندی می‌شود [3]. در مدل‌سازی مستقیم با در نظر گرفتن یک مدل اولیه به عنوان چشمه، منطبق بر واقعیت‌های زمین‌شناسی وجود یک بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شود. بی‌هنجاری ناشی از مدل، محاسبه شده و با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌شود. در نهایت پارامترهای مدل (خصوصیات فیزیکی توده‌های زیرسطحی) را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که بی‌هنجاری حاصل از داده‌های محاسبه شده از مدل اولیه با داده‌های واقعی بهترین برازش را داشته باشد [3]. اما در مدل‌سازی وارون پارامترهای مدل در سیستم مورد مطالعه مستقیماً با آنالیز داده‌های مشاهده‌ای با استفاده از مجموعه‌ای از عملگرها محاسبه می‌شود. خصوصیات فیزیکی در سیستم مورد مطالعه مستقیماً با آنالیز داده‌های مشاهده‌ای و برازش مدل ریاضی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل در روند وارون‌سازی به دست می‌آید [4].

لی و اولدنبرگ (۱۹۹۶) با مطالعه و بررسی روش‌های کاربردی در مدل‌سازی وارون به وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی با استفاده از الگوریتم کمینه‌سازی یک تابع هدف سراسری پرداختند و یک روش تعمیم‌یافته برای وارون‌سازی هموار داده‌های مغناطیس بر اساس منظم‌سازی تیخونوف و آرسنین ارائه کردند [5]. ژادونوف و پورنایتگوتن (۱۹۹۹) به گسترش و توسعه روش وارون‌سازی منظم‌سازی شده در مقایسه با تصاویر تمرکز یافته بر اساس تئوری تیخونوف پرداختند. در این روش مشابه روش لی و الدنبرگ (۱۹۹۶) یک تابع هدف از دو قسمت تشکیل شده کمینه می‌شود. قسمت اول این تابع هدف بیانگر عدم برازش داده‌ها محاسبه‌ای و مشاهده‌ای و قسمت دوم شامل یک تابع پایدار کننده و است که قید فشردگی را بر مدل اعمال می‌نماید [6].

الدنبرگ و لی (۲۰۰۵) از روش‌های منحنی L (L Curve)، اصل اختلاف (Discrepancy Principle) و اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV) (Generalized cross Validation) برای تعیین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی هموار داده‌های میدان پتانسیل استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که با استفاده از روش (GCV) می‌توان به مقدار پارامتر منظم‌سازی مناسب نزدیک شد و تا حدودی سطح نوفه موجود در داده‌ها را تخمین زد و در نهایت با استفاده از روش اصل اختلاف به پارامتر منظم‌سازی مناسب رسید [7]. وطنخواه و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه و برآورد پارامتر منظم‌سازی در مسائل فرو برآورد با توجه به اصل اختلاف و کاربرد آن در وارون‌سازی دوبعدی داده‌های میدان گرانی پرداختند [8]. وطنخواه و همکاران (۲۰۱۵) به کاربرد روش اصل اختلاف و روش تخمینگر ناریب ریسک احتمالی در تخمین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی متمرکز سه‌بعدی داده‌های گرانی پرداختند [9]. رضایی و همکاران (۲۰۱۶) روش وارون‌سازی در فضای داده با قید پراکندگی را برای وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی همراه با قید کران بالا و پایین پارامترهای فیزیکی مدل توسعه دادند [10]. رضایی و معظم (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن یک تابع مجازات برای اعمال قید کران از روش گاوس نیوتن و استفاده از روش منظم‌سازی تطبیقی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی به مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس پرداختند [11].

در این پژوهش روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV) در محاسبه و تخمین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی سه‌بعدی هموار داده‌های مغناطیس‌سنجی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا با کدنویسی در فضای متلب روش وارون‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از محاسبه پارامتر منظم‌سازی به روش (GCV) و اعمال آن بر روی مدل مصنوعی به ارزیابی این روش پرداخته خواهد شد. سپس با اعمال داده‌های واقعی به ارزیابی و اعتبارسنجی این روش پرداخته می‌شود.

یافته‌ها

یکی از روش‌های پرکاربرد برای حل مسائل وارون، روش منظم‌سازی تیخونوف است. در این روش برای حل مسائل وارون‌سازی خطی می‌توان یک تابع هدف را کمینه کرد که این تابع هدف وابسته به داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده می‌باشد و به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [7].

$$\phi(m) = \phi_a + \beta \phi_m \quad (1)$$

عبارت ϕ_a را میتوان تابع عدم برازش بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه‌ای در نظر گرفت.

$$\phi_a = \|Gm - d^{obs}\|_2 \quad (2)$$

همچنین عبارت ϕ_m در رابطه (۱) عبارت منظم‌ساز نامیده می‌شود و همچنین پارامتر β را پارامتر منظم‌سازی نامیده می‌شود. رابطه (۱) را می‌توان به شکل زیر نشان داد [12]:

$$\min \|Gm - d^{obs}\|_2^2 + \beta \|m\|_2^2 \quad (3)$$

روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV)

یکی از روش‌های رایج در انتخاب پارامتر منظم‌سازی روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV) است [13]-[14]-[15]. در این روش فرض بر این است که جواب مناسب برای یک مسئله وارون‌سازی، جوابی است که بی‌جهت به هیچ داده‌ای حساس نیست. یعنی با استفاده از مدل حاصل از حل مسئله وارون می‌توان یک داده را تخمین زد حتی اگر آن داده برای محاسبه مدل به کار گرفته نشده باشد. به همین دلیل از نام اعتبارسنجی برای این روش استفاده می‌شود. در روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته مقدار پارامتر منظم‌سازی (β)، مقداری است که بتوان تمام داده‌ها را با استفاده از مدل حاصل از حل مسئله وارون با مقداری بهینه پارامتر منظم‌سازی به بهترین شکل تخمین زد.

در این روش برای انجام محاسبات ابتدا یک مقدار برای β فرض می‌شود. سپس N امین داده دلخواه از داده‌ها حذف می‌شود و بردار داده‌ها به شکل d_n^{obs} بازنویسی می‌شود. وارون‌سازی بردار داده‌های جدید با کمینه کردن تابع هدف در رابطه (۱) انجام می‌شود. اگر بردار ρ_n^β جواب مسئله وارون باشد، مقدار داده حذف شده (d_n^{pred})، با استفاده از مدل ایجاد شده تخمین زده می‌شود. اختلاف بین داده تخمین زده شده و داده اندازه‌گیری شده در تابع اعتبارسنجی ($CV(\beta)$) انباشته می‌شود. اگر فرآیند ذکر شده برای تمام مقادیر $n=1, \dots, N$ انجام شود، می‌توان نوشت:

$$CV(\beta) = \sum_{n=1}^N (d_n^{pred} - d_n^{obs})^2 \quad (4)$$

با تکرار فرآیند فوق برای مقادیر β دیگر، منحنی اعتبارسنجی به‌عنوان تابعی از β محاسبه می‌شود. نقطه کمینه تابع اعتبارسنجی، مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی β محسوب می‌شود. اگر روش اعتبارسنجی را به‌گونه‌ای بیان کنیم که برای حذف هر داده نیازی به حل صریح مسئله وارون نباشد، در این صورت به آن روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV) گفته می‌شود [14]. اخیراً این تابع بصورت زیر بیان شده است [15].

$$GCV(\beta) = \frac{\|G\rho - d^{obs}\|_2^2}{\{N - \text{trace}(C_\beta)\}^2} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، مقدار C_{β} از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_{\beta} = G(G^T G + \beta L^T L)^{-1} G^T \quad (۶)$$

در صورت زیاد بودن تعداد پارامترهای مدل، محاسبه جمع قطر اصلی ماتریس C_{β} (رد ماتریس C_{β}) در رابطه (۶) به صورت مستقیم دشوار است. بنابراین می توان از روش تخمین گر تصادفی رد هاجینسون برای محاسبه رد ماتریس C_{β} استفاده کرد [16]. در این روش رد ماتریس C_{β} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{trace}(C(\beta)) = u^T C_{\beta} u \quad (۷)$$

که در آن $u \in R^{N \times 1}$ یک بردار تصادفی که از اعداد ۱ و -۱ تشکیل شده است و احتمال وقوع هر یک از آن ۰/۵ است. بنابراین در صورتی که تعداد پارامترهای مدل زیاد باشد، تابع اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته (GCV) بصورت زیر قابل محاسبه است:

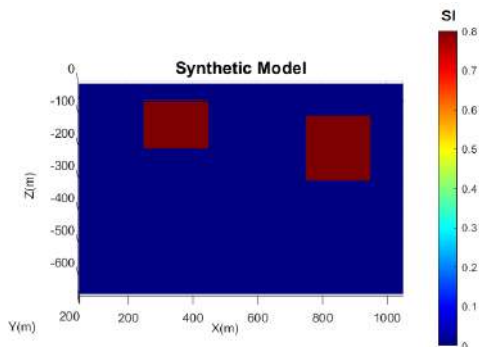
$$GCV(\beta) = \frac{\|G_{\rho} - d^{obs}\|^2}{\{N - (u^T C_{\beta} u)\}^2} \quad (۸)$$

داده های حاصل از مدل به دست آمده با پارامتر منظم سازی انتخاب شده از روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته گاهی اوقات بر داده های مشاهده ای بیش برآزش دارد. همچنین در برخی مواقع تابع اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته، مقدار کمینه مطلق ندارد. در نتیجه دو یا چند مقدار به عنوان پارامتر منظم سازی بهینه انتخاب می شود. به هر حال در بیشتر اوقات این روش خوب عمل می کند. این روش یک روش آماری است و اگر تعداد داده ها بیشتر شود خوب عمل می کند و در کل بهتر است تعداد داده ها ۳۰ عدد یا بیشتر باشد [7].

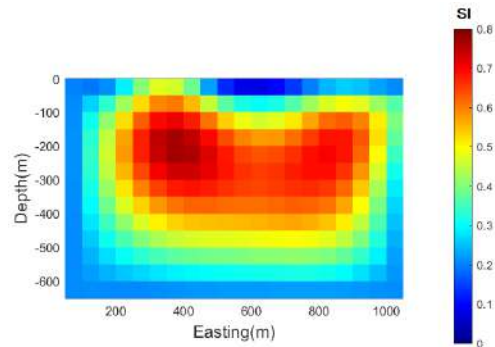
تفسیر نتایج

مدل مصنوعی:

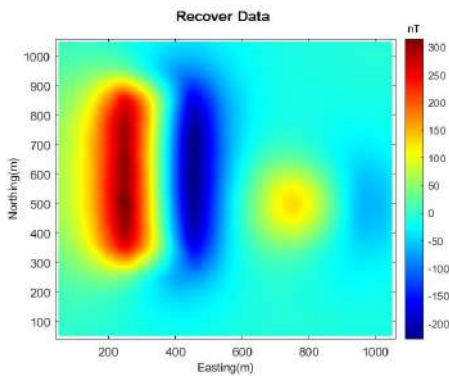
به منظور ارزیابی روش ارائه شده در بخش قبل، وارون سازی داده های حاصل از یک مدل مصنوعی با استفاده از این روش انجام می شود. مدل مصنوعی استفاده شده در این پژوهش دو مکعب است؛ که سطح بالایی یکی از آنها در عمق ۵۰ متری و دیگری در عمق ۱۰۰ متری قرار دارد و تا سطح پایینی ۳۰۰ متری از سطح زمین امتداد یافته است. همچنین اختلاف مغناطیس پذیری مدل طراحی شده با محیط اطراف ۰/۸ در واحد (SI) در نظر گرفته شده است. زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی به ترتیب ۴۵ و صفر درجه در نظر گرفته شده است. ابعاد فرضی شبکه برداشت ۵۰ متر می باشد و تعداد سلول های مکعبی این مدل $20 \times 20 \times 13 = 5200$ است. ابتدا داده های حاصل از این مدل مصنوعی تولید و سپس ۵ درصد نوفه تصادفی به این داده ها اضافه می شود.



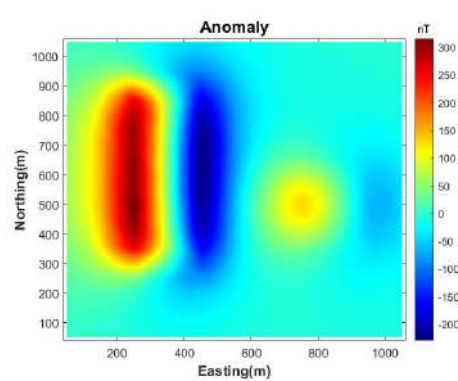
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

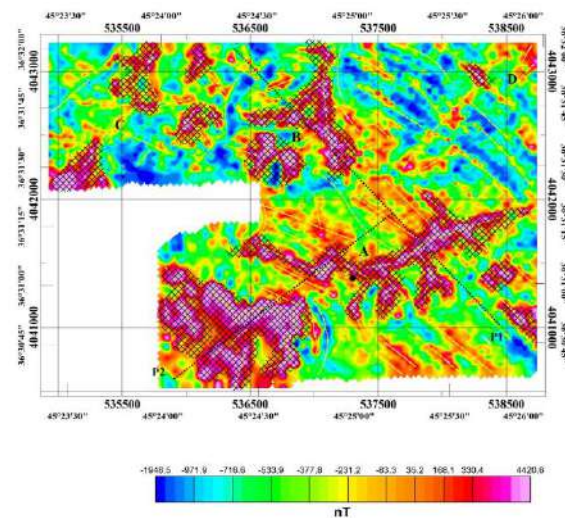
شکل-۱: شکل شماتیک و مدل سازی انجام شده بر روی مدل مصنوعی (الف-ب)، داده‌های حاصل از مدل مصنوعی (ج)، داده‌های بازتولید شده در فرآیند وارون‌سازی

در نهایت وارون‌سازی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی با استفاده از محاسبه پارامتر منظم‌سازی به روش GCV انجام گرفت. مقدار پارامتر منظم‌سازی در این مدل مصنوعی برابر $(3/62 \times 10^3)$ و عدم‌برازش برابر ۴۹ می‌باشد. با توجه به تعداد داده‌ها که ۴۰۰ عدد می‌باشد، مقدار پارامتر عدم‌برازش قابل قبول می‌باشد.

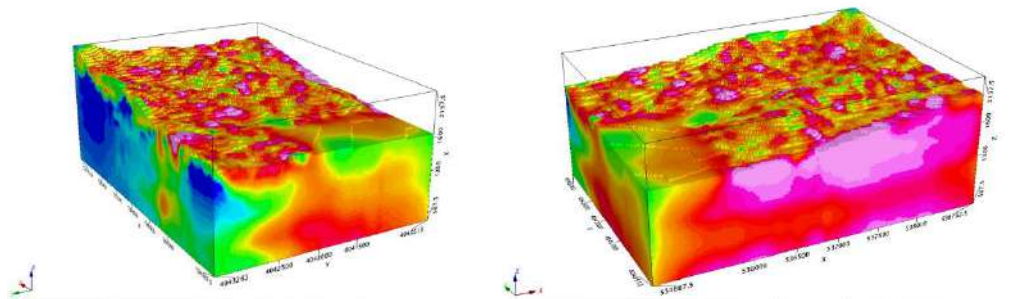
داده‌های واقعی:

در محدوده سپی‌سنگ، واقع در شمال شهرستان سراب استان کردستان، کانی‌سازی آهن به صورت رگه ای وجود دارد. کانی‌زایی در این محدوده به صورت رگه‌ای و تحت کنترل ساختارها و گسل‌خوردگی در محدوده می‌باشد. مهمترین روند کان‌زایی موجود در منطقه در قسمت مرز شرقی محدوده مشاهده شده است. انجام عملیات ژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی جهت تعیین گستره و روند نواحی دارای خاصیت خودپذیری مغناطیسی بالا در صورت وجود، همچون توده های مدفون و ساختارهای خطی بوده است. در عملیات مغناطیس‌سنجی در این محدوده تعداد ۷۵۳۸ نقطه در قالب ۷۵ پروفیل با روند شمالی-جنوبی، با فواصل ۵۰ متری، و فواصل ایستگاهی ۲۰ و ۵۰ متری برداشت شده است. پس از انجام هم‌ترازسازی و حذف داده های نوفه دار بازه داده های برداشتی در محدوده ۴۶۴۰۲ تا ۵۱۸۶۵ نانوتسلا قرار گرفتند. پس از انجام تصحیحات روزانه و IGRF محدوده آنومالی باقی مانده در بازه ۱۹۳۰- تا ۳۵۳۶ نانوتسلا می باشد. با اعمال فیلترهای متعدد و انجام مراحل پردازشی نقشه‌های مورد نیاز برای تفسیر نتایج مغناطیس‌سنجی ایجاد گردیدند. که بر اساس آنها

نقشه ساختارهای مغناطیسی محدوده به دست آمد. بر همین اساس بی‌هنجاری‌های ثبت شده در محدوده مورد مطالعه به چهار دسته‌ی A, B, C و D طبقه‌بندی و اولویت‌گذاری شده است. عمق بی‌هنجاری‌ها با روش اویلر بین ۵ تا ۵۷ متر متغیر بوده و میانگین آن ۱۴ متر است. تغییرات ثبت شده دارای روند‌های خطی که از شیب‌توزیته پیروی می‌کند. و تغییرات ثبت شده نیز با توجه به مدل‌سازی و فیلتر ادامه فراسو دارای عمق بسیار پایینی است. و نهایتاً تا ۳۰ متر بیشتر ادامه ندارد. مدل‌سازی صورت گرفته ابتدا در فضای متلب با الگوریتم بالا انجام گرفته است. برای ایجاد یک دید بصری مطلوب پارامترهای خودپذیری محاسبه شده در فضای متلب در نرم‌افزار ژئوسافت با استفاده از توپوگرافی منطقه ترسیم شده است.

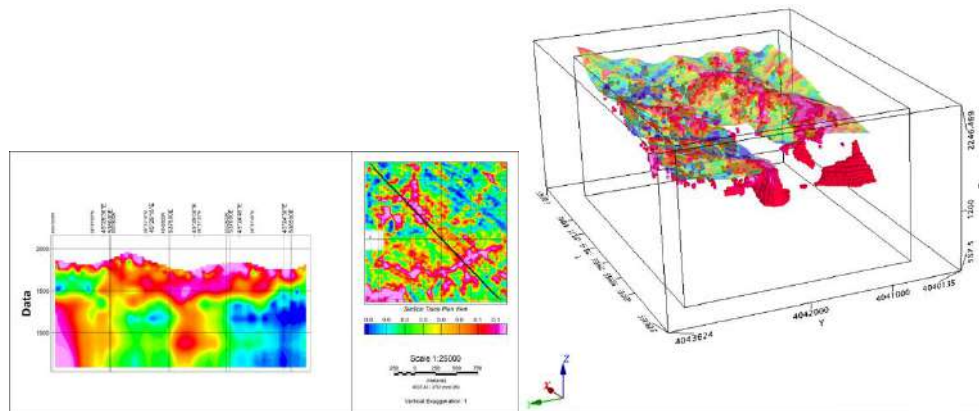


شکل-۲: نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل در محدوده سی‌سنگ استان کردستان



(الف)

(ب)



(ج)

(د)

شکل-۳: مدل سازی سه بعدی داده های مغناطیس سنجی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

نتیجه گیری کلی

ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش بر روی داده های مصنوعی و داده های واقعی پاسخ مناسبی با توجه به مفروضات اولیه در مدل مصنوعی و شواهد زمین شناسی در داده های واقعی نشان می دهد. لازم به ذکر است که این الگوریتم در ترکیب با سایر نرم افزارها ژئوفیزیکی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است و پاسخ مطلوبی را به مفسر نشان می دهد.

مراجع

- [1]- Nabighian, M. N., V. J. S. Grauch, R. O. Hansen, T. R. LaFehr, Y. Li, J. W. Peirce, J. D. Phillips, and M. E. Ruder, (2005), "The historical development of the magnetic method in exploration", *Geophysics*, 70, 6, pp.33ND.
- [2]- Reynolds, J. M., (1997). "An introduction to applied and environmental geophysics", Vol 1, first edition, John Wiley & Sons, UK. Pp.750.
- [3]- Blakely, R. J., (1996), "Potential theory in gravity and magnetic applications", Vol 1, Cambridge University Press, UK, pp.441.
- [4]- Meju, M. A. (1994), "Geophysical data analysis: Understanding inverse problem theory and practice" Vol 6, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, US, pp.296.
- [5]- Li, Y., and Oldenburg, D. W., (1996), "3-D inversion of magnetic data", *Geophysics*, 61, 2, pp.394
- [6]- Portniaguine, O., and Zhdanov, M. S., (1999), "Focusing geophysical inversion images", *Geophysics*, 64, pp.874.
- [7]- Oldenburg, D. W., and Li, Y. (2005). "Inversion for applied geophysics: A tutorial," pp89-150, in: "Near-surface geophysics", Butler, D. K., SEG, Investigations in Geophysics, US.
- [8]- Vatankhah, S., Renaut, R. A., and Ardestani, V. E., (2014), "Regularization parameter estimation for underdetermined problems by the χ^2 principle with application to 2D focusing gravity inversion", *Inverse Prob.*, 30, 8, pp.85002
- [9]- Vatankhah, S., Ardestani, V. E., and Renaut, R. A., (2015), "Application of the χ^2 principle and unbiased predictive risk estimator for determining the regularization parameter in 3-D focusing gravity inversion", *Geophys. J. Int.*, 200, 1, pp.265.
- [10]- Rezaie, M., Moradzadeh, A., & Nejadi Kalate, A. (2016). "3D gravity data-space inversion with sparseness and bound constraints". *Journal of Mining and Environment*, 8(2), 227-235.
- [11]- Rezaie, M., & Moazam, S. (2017). "A new method for 3-D magnetic data inversion with physical bound". *Journal of Mining and Environment*, 8(3), 501-510.

- [12]- Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C. H., (2013), "Parameter estimation and inverse problems" , second edition, Academic Press, US, pp.360.
- [13]- Wahba, G., (1990), "Spline models for observational data" , Vol 59, Siam, US, pp.167.
- [14]- Golub, G. H., Heath, M., and Wahba, G., (1979), "Generalized cross-validation as a method for choosing a good ridge parameter" , Technometrics, 21, 2, pp.215.
- [15]- Golub, G. H., and Von Matt, U., (1997), "Generalized cross-validation for large-scale problems" . J. Comp. Graph. Stat., 6, 1, pp.1.
- [16]- Hutchinson, M.F., (1990), "A stochastic estimator of the trace of the influence matrix for Laplacian smoothing splines" , Commun. Stat. Simul. Comput., 19, pp.443.

آشکارسازی گسل‌ها در تفسیر داده‌های لرزه‌ای با استفاده از یادگیری عمیق

۱ امیر حیدری، ۲ حمید آقاجانی، ۳ مهرداد سلیمانی منفرد، ۴ محمد علی ریاحی

کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، heydari.amir1991@gmail.com

۲ دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، haghajani@shahroodut.ac.ir

۳ دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mssoleimani@shahroodut.ac.ir

۴ استاد تمام، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: امیر حیدری

چکیده فارسی

گسل‌ها ساختارهای زمین شناسی ویژه‌ای هستند که در بخش بالایی پوسته زمین در اثر دگرشکلی‌های شکننده ایجاد می‌شوند. تهیه نقشه گسل‌ها در یک منطقه نقش اساسی و یک مسئله حیاتی در پیش بینی توزیع و اندازه منابع طبیعی و یا کاهش ریسک مرتبط با مخاطرات زمین دارد. روش مرسوم برای تهیه این نقشه‌ها بر روی داده‌های لرزه‌ای استفاده از نیروی انسانی برای تشخیص ناپیوستگی‌های مربوطی است، اما بدلیل حجم بالای داده‌های امروزی و همچنین وجود خطای احتمالی در این فرآیند روش‌های تشخیصی خودکار چشم انداز بهتری را ارائه می‌کنند. از برخی نشانگرهای لرزه‌ای می‌توان تا حدودی برای تشخیص این ناپیوستگی‌ها در مقاطع لرزه‌ای استفاده کرد، با این حال روشی جامع‌تر با دقت بالاتر نیاز است تا انجام این فرآیند به طور کامل خودکار انجام شود. بدین منظور بسیاری از مطالعات ظرفیت استفاده از یادگیری ماشین در حل این مسئله را بررسی و ارزیابی کرده‌اند. در این پژوهش از روش یادگیری عمیق و شبکه عصبی همایختی به طور به خصوص ماشین U-net جهت آشکار سازی این ناپیوستگی‌ها بهره برده شده است. شبکه U-net اولین بار در تصویر سازی داده‌های بیومدیکال استفاده شده است و پس از موفقیت آمیز بودن این روش، در علوم دیگر مانند ژئوفیزیک نیز کاربرد بسیاری پیدا کرده است. در این پژوهش از داده‌ی F3 دریای شمال استفاده شده است. در ابتدا ماشین U-net را با استفاده از مجموعه داده آموزشی آموزش داده سپس به بررسی عملکرد و دقت آن می‌پردازیم و در نهایت از این ماشین برای تهیه نقشه گسل‌ها در مقاطع لرزه‌ای استفاده کرده و نتایج نشان داده شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که این ماشین توانایی خوبی در تشخیص این گسل‌ها دارد.

کلید واژه: یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، U-net، شناسایی گسل

Fault Detection Seismic Data Interpretation Based on Deep learning

Amir Heidari¹, Hamid Aghajani², Mehrdad Soleimani Monfared³, MohammadAli Riahi⁴

¹Master's of Geophysics, Shahrood University of technology; heydari.amir1991@gmail.com *

² Associate Professor Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering; Shahrood University of technology; haghajani@shahroodut.ac.ir

³Associate Professor Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering; Shahrood University of technology; mssoleimani@shahroodut.ac.ir

⁴Full Professor; Institute of Geophysics; University of Tehran; mariahi@ut.ac.ir

Corresponding author: Amir Heidari

ABSTRACT

Faults are special geological structures that form in the upper part of the Earth's crust due to brittle deformations. Creating a map of faults in a region plays a fundamental role and is a vital issue in predicting the distribution and size of natural resources or reducing the risks associated with Earth hazards. The traditional method for preparing these maps relies on seismic data and human expertise to identify relevant discontinuities. However, due to the high volume of today's data and potential errors in this process, automated methods provide a better perspective. Some seismic indicators can be used to some extent to detect these discontinuities in seismic sections. Nevertheless, a more comprehensive and accurate approach is required for the complete automation of this process. To this end, many studies have investigated and evaluated the potential use of machine learning capacity in solving this problem. In this research, a deep learning method and a specifically designed machine U-net network have been employed for detecting these discontinuities. The U-net network was first used in biomedical data imaging and, after its successful application in this field, found widespread use in other sciences such as geophysics. In this study, the F3 North Sea dataset was utilized. Initially, the U-net machine was trained using a training dataset, and then its performance and accuracy were examined. Finally, this machine was used to generate fault maps in seismic sections, and the results demonstrated that this machine has good capabilities in detecting these faults.

Keywords: Machine learning, Deep learning, U-net, Fault detection

مقدمه

گسل به شکستگی ناشی از حرکت دو صفحه سنگی در امتداد صفحه شکستگی گفته می‌شود، که منجر به آزاد شدن انرژی زیادی می‌شود و اغلب زمین‌لرزه را ایجاد می‌کند. آشکارسازی گسل‌ها اهمیت زیادی در پیش‌بینی توزیع منابع طبیعی زمین مانند ذخایر نفت و گاز دارد [۱،۲،۳]. روش‌های مختلفی برای یافتن گسل‌ها وجود دارد، از جمله استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای که الگوهای شکستگی‌ها را نشان می‌دهند. تصویر لرزه‌ای نقشی مهم در شناسایی ساختار زیرسطح زمین دارد. با استفاده از امواج لرزه‌ای، تصویر لرزه‌ای از زیر سطح زمین به دست می‌آید. گسل‌ها، به عنوان ساختارهای زمین‌شناسی، اثراتی مهم در انتقال هیدروکربن و تعیین خصوصیات مخزن نفت و گاز دارند [۴]. یافتن و نقشه‌برداری از گسل‌ها اهمیت زیادی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای و اکتشافات لرزه‌ای دارد. از این نقشه‌ها برای بررسی خطرات طبیعی مانند زلزله و آتشفشانی نیز استفاده می‌شود. روش‌های سنتی نقشه‌برداری گسل‌ها زمان‌بر هستند؛ اما الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به ویژه شبکه U-Net، توانمندی بالایی در آشکارسازی گسل‌ها از داده‌های لرزه‌ای دارند. در این تحقیق، یک ماشین U-Net توسعه داده شده است که با پیاده‌سازی و آموزش آن بر روی داده‌های لرزه‌ای واقعی، توانایی دقیق در تشخیص ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهد.

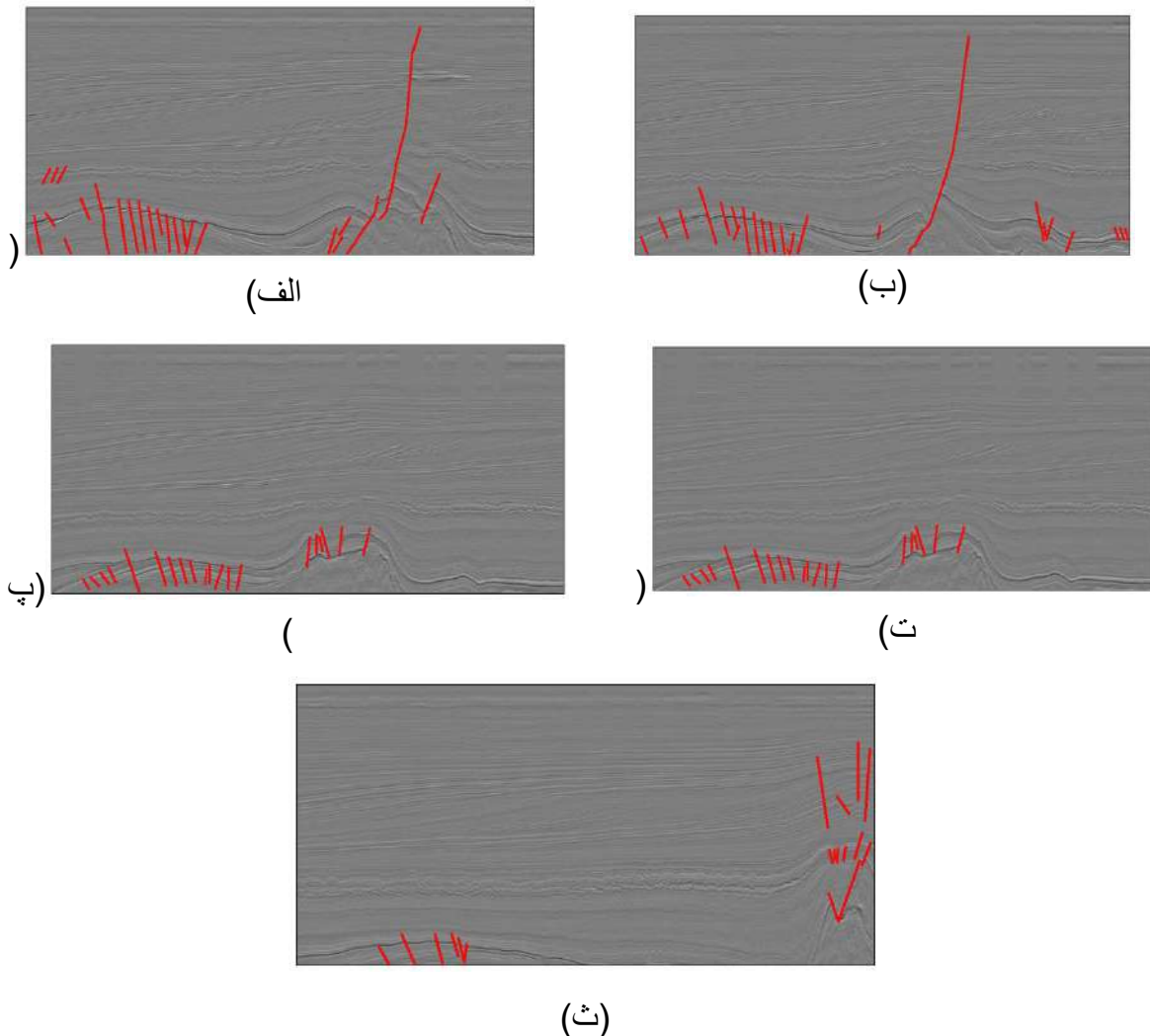
ماشین U-net

نقشه برداری از گسل‌ها در تصاویر لرزه‌ای را میتوان به عنوان یک نوع الگوریتم خوشه بندی تصویر در نظر گرفت که در این صورت، مدل شبکه U-Net برای این هدف مناسب است. شبکه U-net [۵،۶] اولین بار در تصویر سازی داده‌های بیومدیکال استفاده شده است و پس از موفقیت آمیز بودن این روش، در علوم دیگر مانند ژئوفیزیک نیز کاربرد بسیاری پیدا کرده است [۷]. را میتوان به دو بخش تقسیم بندی کرد، که بخش اول شامل شبکه عصبی هم‌اخیتی معمولی است. شبکه U-Net از دو مسیر انقباضی و انبساطی تشکیل شده است. مسیر انقباضی در واقع به شکل یک شبکه هم‌امیختی است، که در آن فیلترهایی با ابعاد مختلف اعمال می‌شود. این بخش وظیفه‌ی کاهش ابعاد تصویر و استخراج ویژگی‌های مهم از تصویر را دارد. برای این کار از لایه‌های هم‌امیختی استفاده می‌شود. لایه‌های هم‌امیختی وظیفه استخراج ویژگی‌های مختلف از تصویر را برعهده دارند. در ادامه از تابع فعال ساز Relu پس از هر لایه استفاده می‌شود. این سه بخش در کنار یکدیگر یک نمونه برداری کاهنده را ایجاد می‌کنند. در مسیر انبساطی برخلاف مسیر انقباضی، از نمونه بردار افزایشنده استفاده می‌شود. در این مسیر نیز از لایه‌های هم‌امیختی با تابع فعال‌سازی استفاده Relu می‌شود. این بخش به بازیابی ابعاد اطلاعات به تصویر اولیه و تشکیل تصویر نهایی می‌پردازد. این بخش نقش اصلی در بازیابی جزئیات تصویر از اطلاعات فشرده‌شده در بخش انقباضی را دارد. از لایه‌های ترانهاد هم‌امیختی برای بازیابی ابعاد استفاده می‌شود.

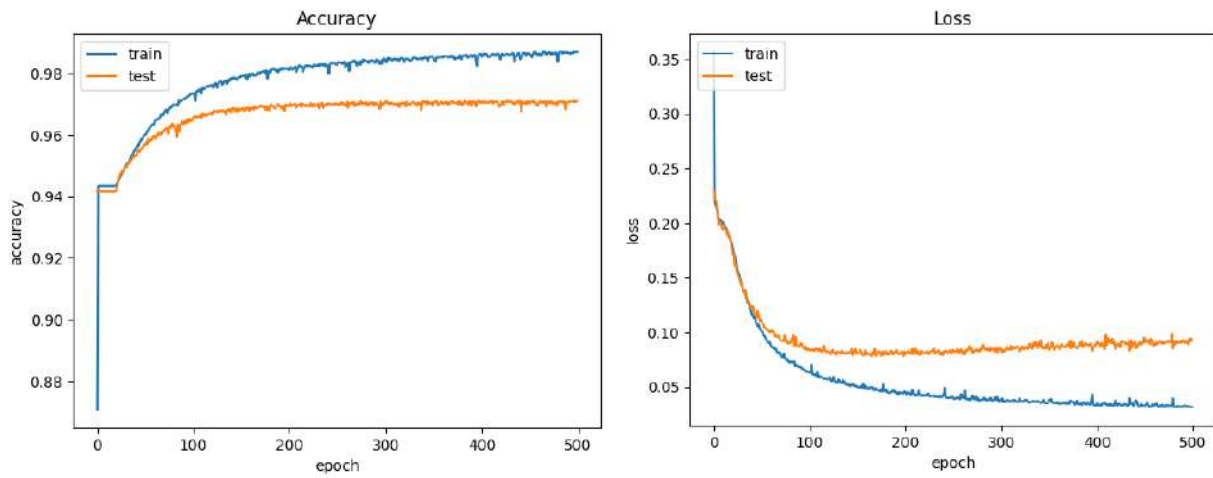
آموزش ماشین

در این پژوهش از داده‌ی از پیش پردازش شده با قابلیت دانلود رایگان از طریق وبسایت (<https://terrانبیس.com/datainfo/F3>) (Demo-2020) استفاده شده است. این داده لرزه‌ای مربوط به عملیاتی دریایی در دریای شمال، هلند به مختصات (N 54° 52' 0.86" E 4° 48' 47.07") می‌باشد که در سال ۱۹۸۷ انجام شده است. این داده به طور کلی دارای نوفه زیادی است بنابراین به آن فیلتر median dip-steered اعمال شده است. پنج مقطع inline از این مجموعه داده انتخاب و به صورت دستی محل شکستگی‌ها با رنگ قرمز مشخص شده است (شکل ۱-۳).

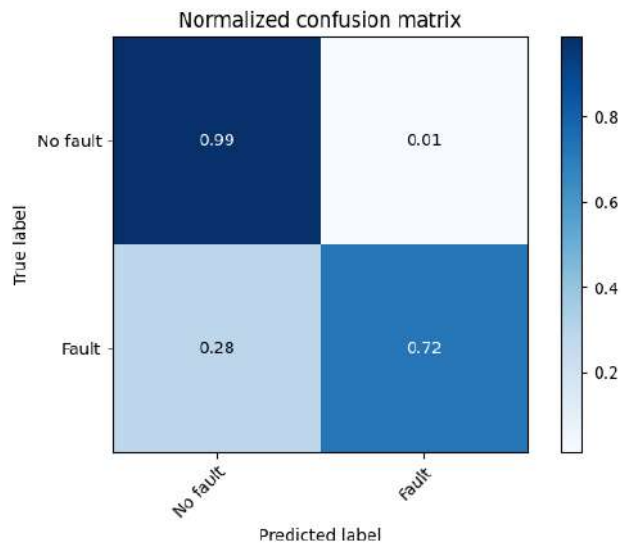
با استفاده از کتابخانه Tensorflow و Keras ماشین U-net متشکل از سه لایه انقباضی و سه لایه انبساطی به همراه یک لایه max pooling با تابع فعال سازی Relu ایجاد شده است. تعداد داده آموزشی و ۱۰۰۰ داده ارزیابی با ابعاد ۶۴ در ۶۴ پیکسل آماده سازی و در نهایت با ۵۰۰ تکرار ماشین توسط الگوریتم ADAM آموزش داده شد. در نهایت با توجه داده ارزیابی، ماتریس پیچیدگی به صورت زیر استخراج شده است. در شکل (۳-۲) نشان داده شده است که ماشین به خوبی می تواند محل هایی که شکستگی دیده نمی شود را شناسایی کند (با دقت ۹۹ درصد)، و همچنین دارای دقت صحت ۷۲ درصدی از سایر مناطقی که به عنوان شکستگی و گسلش شناسایی می کند، می باشد. شکل (۳-۳) نشان دهنده کاهش مقدار خطا در طول پروسه آموزش این ماشین در طی ۵۰۰ تکرار می باشد که به خوبی نمایانگر قدرت این ماشین در بهینه شدن و آموزش دیدن توسط داده های آموزشی است.



شکل ۳-۱. به ترتیب inline (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰، (پ) ۳۰۰، (ت) ۴۰۰ و (ث) ۵۰۰ در مجموعه داده. رنگ قرمز نشان دهنده محل انتخاب شده به عنوان شکستگی ها است.

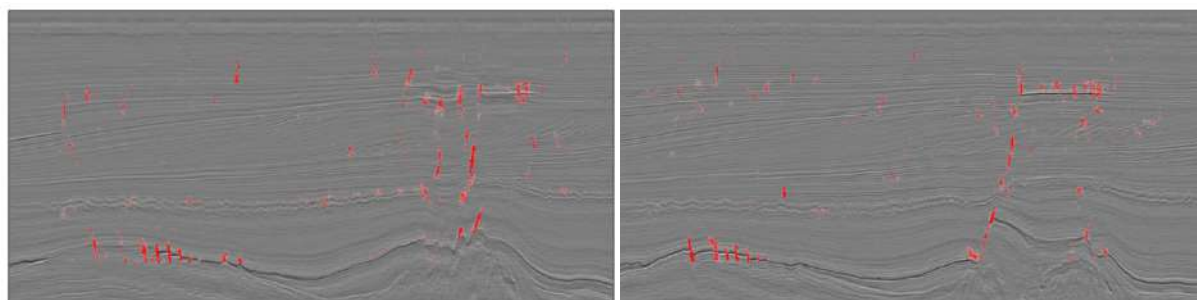


شکل ۳-۳. نمایش نرخ همگرایی و خطای ماشین در هنگام آموزش در ۵۰۰ تکرار.



شکل ۳-۲. نمایش ماتریس پیچیدگی پس از آموزش ماشین که نشان دهنده دقت بالای این ماشین در تشخیص شکستگی‌ها در مقطع لرزه‌ای می‌باشد.

در نهایت برای نشان دادن توانایی پیش بینی ماشین، آن را بر روی روی *inline* شماره ۵۰ و ۱۱۵۰ از این داده سه بعدی اعمال کرده که خروجی نهایی آن در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است این ماشین توانسته به خوبی شکستگی‌های مقطع را به خوبی تشخیص دهد.



(ب)

(الف)

شکل ۴-۳. اعمال پیش بینی ماشین روی ۵۰ inline و روی ۱۵۰ inline ام.

همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. ماشین به خوبی توانسته است تا شکستگی‌های واضح در مدل (قسمت پایین چپ و بخش مرکزی به سمت راست) در مقطع را به خوبی شناسایی کند. از آنجا که با توجه به ماتریس پیچیدگی (شکل ۲-۳) هنوز جای ارتقا برای دقت ماشین وجود دارد، میتوان نمود این موضوع را هم در انتخاب محل‌های شکستگی پراکنده در مقطع مشاهده کرد که در برخی نقاط به صورت جزئی و کم‌رنگ ماشین مواردی را به عنوان شکستگی در مقطع تشخیص داده که ناصحیح می‌باشند. با این حال میتوان گفت ماشین به خوبی توانسته هم‌ه‌ی ناپیوستگی‌ها در مقطع را تشخیص دهد که همین کار را برای نیروی انسانی که قصد نمایان کردن این محل‌ها را دارد بسیار ساده‌تر می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

همانطور که در سال‌های اخیر در تحقیقات بسیاری نشان داده شده است، استفاده از ابزار یادگیری ماشین می‌تواند جایگزین بسیاری از کارهای صنعتی و علمی شود. در این تحقیق نیز از ماشین یادگیری عمیق هم‌امیختی با عنوان U-net استفاده شد که با اعمال آن روی مقاطع داده‌های منطقه دریای شمال در هلند، توانستیم محل شکستگی‌ها و گسل‌ها را شناسایی کرده و نمایش دهیم. برای این کار به آماده کردن داده آموزشی نیاز است که با میبایست به صورتی دستی و با دقت بالا انجام شود تا در نهایت ماشین بتواند به خوبی آموزش ببیند. خروجی ماشین در این تحقیق نقشه محل شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها را به خوبی در مقطع تشخیص داده است. از آنجایی که هدف این پژوهش با تصاویر مقاطع لرزه ای است بنابراین ماشین هم‌امیختی یک گزینه مناسب است زیرا این نوع ماشین‌ها با استفاده از عملگر هم‌امیخت می‌توانند گوشه‌ها و الگوهای تصاویر را تشخیص دهند و بدنبال هدف به خصوص ما که در اینجا شناسایی ناپیوستگی‌ها روی مقطع هست بپردازند. ماشین U-net به خوبی توانست نقشه ناپیوستگی‌ها را با دقت بالایی بدست آورد.

مراجع

[۱] Richards, F.L., Richardson, N.J., Bond, C.E., Cowgill, M., 2015. Interpretational variability of structural traps: implications for exploration risk and volume uncertainty. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 421 (1), 7-27. <http://dx.doi.org/10.1144/SP421.13>.

[۲] Fossen, H., 2010. Structural Geology. Cambridge University Press, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511777806>.

[۳] Lisle, R., 2004. Geological Structures and Maps: A Practical Guide. p. 106.

- [۴] Lu, X.; Wang, Y.; Yang, D.; Wang, X. Characterization of paleo-karst reservoir and faulted karst reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin, China. *Adv. Geo-Energy Res.* 2020, 4, 339–348.
- [۵] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015a). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image computing and computer assisted intervention* (pp. 234–241). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- [۶] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015b). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In N. Navab, J. Hornegger, W. Wells, & A. Frangi (Eds.), *International Conference on Medical image computing and computerassisted intervention-MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 9351, pp. 234–241). Cham: Springer.
- [۷] Huang, Jiayuan, and Robert L. Nowack. "Machine learning using U-net convolutional neural networks for the imaging of sparse seismic data." *Pure and Applied Geophysics* 177.6 (2020): 2685-2700.

تلفیق داده‌های پلاریزاسیون القایی و مغناطیسی‌سنجی جهت پتانسیل‌یابی و اکتشاف کانسارهای پورفیری

محمد رسول نیک بخش^۱، حامد شمس‌الدینی^۲، مهرداد سبزی شهربابک^۳ و محسن بحرینی

۱ دکتری ژئوفیزیک، شرکت سنگ آهن گهر زمین، مدیریت اکتشاف و توسعه معادن، Nikbakhsh87.2@gmail.com

۲ کارشناس ارشد معدن، شرکت سنگ آهن گهر زمین، مدیریت اکتشاف و توسعه معادن، hamed.shams1987@gmail.com

۳ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، شرکت سنگ آهن گهر زمین، مدیریت اکتشاف و توسعه معادن، mehرداد_madan@yahoo.com

۴ کارشناس ارشد معدن، شرکت سنگ آهن گهر زمین، مدیریت اکتشاف و توسعه معادن، mohsen.bahreini@gmail.com

* نویسنده مسئول: محمد رسول نیک بخش

چکیده فارسی

پی‌جویی و اکتشاف ذخایر معدنی، مستلزم شناسایی مناطق هدف می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان روش‌های غیرمستقیم و با صرف هزینه و زمان کم جهت پی‌جویی و اکتشاف ذخایر معدنی به کار برده می‌شوند. این روش‌ها با توجه به صرف هزینه و زمان کم روش‌هایی مناسب به منظور پی‌جویی و اکتشاف ذخایر معدنی می‌باشند. تلفیق دو روش پلاریزاسیون (قطبش) القایی (IP) مغناطیس‌سنجی روشی کارآمد برای شناسایی کانیه‌های سولفیدی و فلزی، مخصوصاً سولفیدهای پراکنده و عمیق است. با توجه به هدف پژوهش که تعیین محدوده کانی‌سازی در منطقه سر جنگل جیرفت واقع در استان کرمان می‌باشد؛ برای دسترسی به نتایج نزدیک‌تر به واقعیت و تفسیری دقیق، از تلفیق روش IP و روش‌های مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی استفاده می‌شود. برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه با استفاده از آرایش قطبی - دوقطبی صورت گرفت. علت انتخاب این آرایه، بالا بودن عمق نفوذ (نسبت به آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی) و حساسیت کم‌تر آن به نوفه‌های تلوریک و جفت‌شدگی الکترومغناطیس می‌باشد. برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه در طول ۵ پروفیل موازی در راستای شمال غربی - جنوب شرقی با فواصل الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ متر انجام شد. مدل‌سازی وارون دو بعدی داده‌های IP و مقاومت ویژه با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv انجام شد. برداشت مغناطیس‌سنجی در این منطقه به عنوان روشی غیرمستقیم انجام شد. برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی در طول ۳۱ پروفیل موازی با فواصل ایستگاهی ۱۰ متر و فواصل پروفیلی ۴۰ متر صورت گرفت. بعد از برداشت داده‌ها به تصحیح و پردازش و اعمال فیلترهای مختلف مغناطیس‌سنجی برای تعیین بی‌هنجاری پرداخته می‌شود. از جمله فیلترهایی که جهت تخمین مرز، تفکیک بی‌هنجاری و جداسازی میدان مغناطیسی ناحیه‌ای از محلی، بر روی داده‌ها اعمال می‌شود می‌توان به فیلتر برگردان به قطب، ادامه فروسو، ادامه فراسو، مشتق قائم مرتبه اول، سیگنال تحلیلی، فیلتر روند سطحی و مشتق افقی اشاره کرد. به دلیل تأثیر ساختار زمین‌شناسی بر شدت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده، به مدل‌سازی سه بعدی داده‌ها پرداخته شد. فرآیند مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی توسط نرم‌افزار Mag3D مدل‌سازی شده است. با توجه به نتایج مدل‌سازی و تفسیر برداشت‌های IP، مقاومت ویژه، مغناطیس‌سنجی اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوشیمی پیشنهاد نقاط حفاری جهت صحت‌سنجی وجود کانسار پورفیری مس طلا در محدوده ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون القایی، مغناطیس‌سنجی، کانسارهای پورفیری.

Integration of Induced Polarization and Magnetic Data for Prospecting and Exploration of Porphyry Deposits

Mehرداد Sabzi¹ and Mohsen bahreini¹ و Mohammad Rasool Nibakhsh¹, Hamed Shamsoddini¹

¹ Exploration and mining development management, Gohar Zamin mining and industrial company

* Corresponding author: Mohammad Rasool Nikbaksh

ABSTRACT

The Prospecting and exploration of mineral deposits requires the identification of target areas. Geophysical methods are used as indirect methods with low cost and time to find and explore mineral deposits, these methods are suitable methods for finding and exploring mineral deposits due to low cost and time. They are mineral. The combination of two methods of induction polarization (IP) magnetometry is an efficient method to identify sulfide and metallic minerals, especially diffuse and deep sulfides. According to the purpose of the research, which is to determine the scope of mineralization in the Sir Jangal Jiroft area located in Kerman province; In order to reach the results closer to reality and accurate interpretation, the combination of IP method and specific resistance and magnetometry methods is used. IP and specific resistance data were collected using polar-dipolar arrangement. The reason for choosing this array is its high penetration depth (compared to bipolar-dipole arrays) and its less sensitivity to telluric noises and electromagnetic coupling. IP and specific resistance data were collected along 5 parallel profiles in the northwest-southeast direction with electrode distances of 20, 40 and 80 meters. Two-dimensional inverse modeling of IP data and specific resistance was done using Res2dinv software. Magnetometry was taken in this area as an indirect method. Magnetometric data was collected along 31 parallel profiles with station intervals of 10 meters and profile intervals of 40 meters. After collecting the data, correction and processing and application of different magnetometric filters are done to determine the abnormality. Among the filters that are applied to the data in order to estimate the boundary, to separate anomalies and to separate the magnetic field of a region from the local one, we can include the filter of return to the pole, continuous continuation, continuous continuation, vertical derivative of the first order, analytical signal, filter Surface trend and horizontal derivative pointed out. Due to the influence of the geological structure on the measured magnetic field intensity, three-dimensional modeling of the data was done. The magnetic data modeling process is modeled by Mag3D software. According to the results of modeling and interpretation of IP, specific resistance, magnetometry, geological and geochemical information, drilling points were proposed to verify the presence of copper-gold porphyry deposit in the area.

Keywords: induction polarization, magnetometry, porphyry deposit.

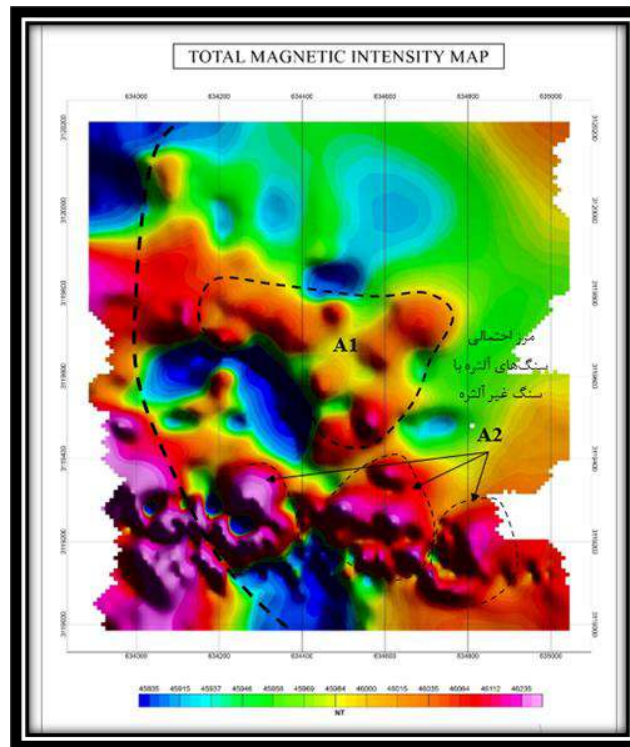
مقدمه

مواد معدنی توسط محلول‌ها و آب‌های مختلفی از جمله آب‌های ماگمایی، آب‌های سطحی، آب‌های اقیانوسی، آب‌های دگرگونی و آب‌های فسیلی حمل میشوند. آب‌های سطحی و آب‌های ماگمایی از اهمیت زیادی برخوردارند. حمل مواد معدنی توسط این آب‌ها و به صورت کمپلکس‌های مختلف مانند کمپلکس‌های کلریدی، بی سولفیدی، بی کربناته و ... انجام می‌شود. شرایط محیطی مختلف در یک ناحیه به ناپایدار شدن برخی از این کمپلکس‌ها که حمل فلز خاصی را برعهده دارند میانجامد و همین امر سبب می‌گردد که زونبندی ژئوشیمیایی خاصی در کانسار بوجود آید. هدف شناخت و معرفی مناطق امید بخش می‌باشد. برای نیل به این اهداف، از اطلاعات ژئوفیزیکی، زمینشناسی و اطلاعات ماهواره ای می‌توان بهره برد. و با بررسی و تحلیل اطلاعات حاصل از مناطق امید بخش را شناسایی و معرفی کرد [۱]. مطالعات ژئوفیزیک بر روی توده‌های معدنی که خاصیت مغناطیسی ندارند عمدتاً با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک انجام می‌شود. یکی از تواناترین روش‌ها در محدوده ژئوالکتریک، روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی است [۲]. روش توموگرافی الکتریکی با استفاده از آرایش‌های الکترونی مختلفی انجام می‌شود، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آرایش الکترونی دوقطبی- دوقطبی در مطالعه ناهمگنی و ناهمسانگردی منطقه‌ای بسیار توانا است [۳]. حساسیت این آرایش الکترونی به ناهمگنی‌ها باعث می‌شود از این آرایش در توموگرافی

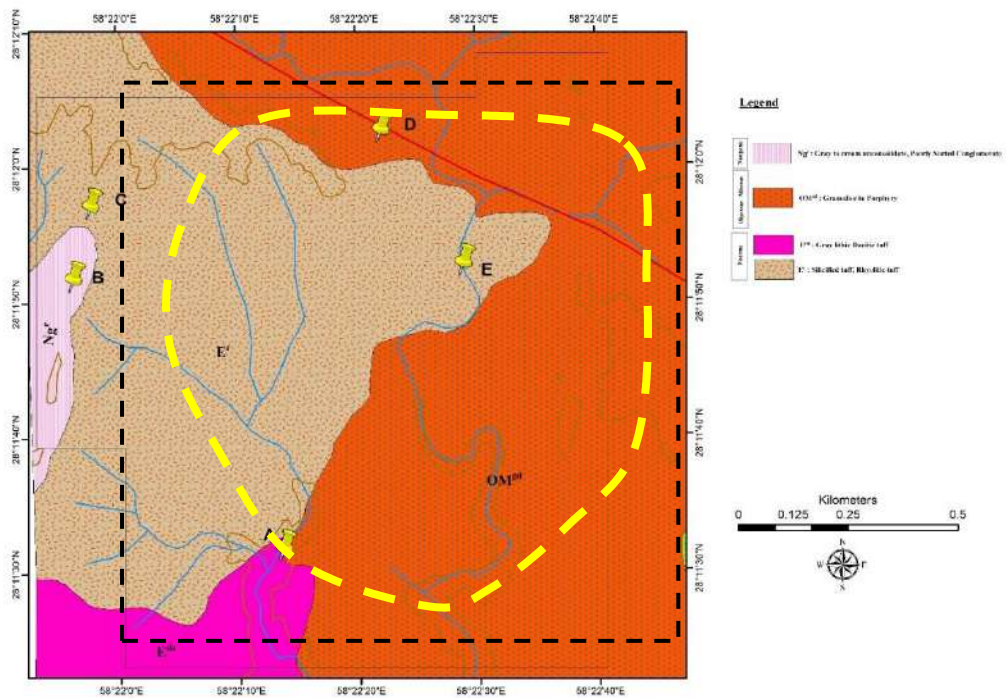
الکتریکی برای مطالعه زون‌های ناپایدار استفاده شود. در مواردی که نیاز به عمق کاوش بالا وجود دارد، می‌توان از آرایش الکترودی ونر- شلومبرگر نیز استفاده کرد. این آرایش الکترودی نسبت سیگنال به نویز و توان سیگنال بالایی داشته و می‌تواند در شرایط سخت مانند زمین‌های خشک و با مقاومت الکتریکی بالا، عمق نفوذ قابل قبولی داشته باشد [۴]. این تحقیق اکتشاف پتانسیل‌های معدنی در محدوده ای واقع در پهنه جبال بارز با استفاده از تلفیق روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی و پلاریزاسیون القایی می‌باشد.

روش تحقیق

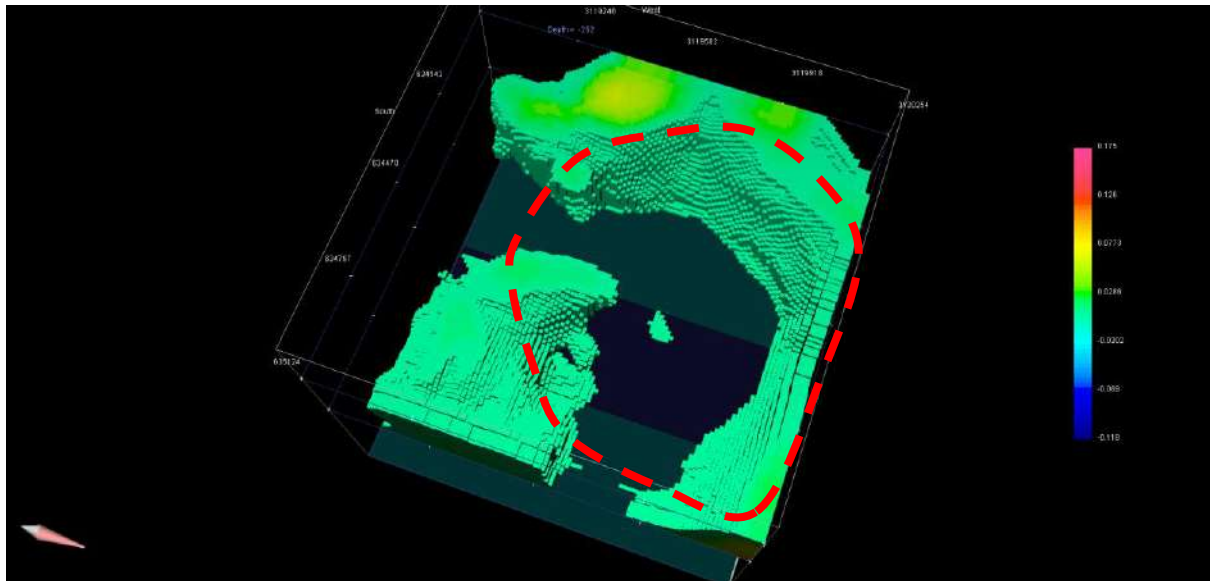
نقشه شدت میدان کل با اعمال تصحیحات اولیه در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور رسیدن به نقشه با سطح نویز پایین‌تر از فیلترهای گوناگونی استفاده می‌شود. در این مطالعه از فیلترهای باند پس و میکرولولینگ به منظور حذف نوفه‌های با فرکانس بالا استفاده شده است. کلیات تحلیل مغناطیس‌سنجی با استفاده از این تصویر قابل بررسی است. بررسی و طبقه‌بندی آنومالی‌های شدت میدان نشان می‌دهند که زمینه اصلی نقشه شدت میدان کل، آنومالی منفی و شدت پایین مغناطیسی است. آنومالی منفی میدان در این محدوده احتمالاً مربوط به سنگ‌های آلتزه و غیر مغناطیس شده می‌باشد. یک آنومالی نسبتاً پیوسته شدت بالای میدان مغناطیسی در حاشیه غربی نقشه مشاهده می‌شود. این آنومالی احتمالاً مرز لیتولوژی‌های فرش با سنگ‌های آلتزه است. در این مطالعه تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱/۵۰۰۰، آنومالی چکینگ ژئوشیمی و نتایج مطالعات IP&RS انجام شد. نقشه زمین‌شناسی و محدوده سایت مغناطیس‌سنجی در شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهد که در قسمت‌های شرقی، جنوب شرقی و شمال شرقی سایت مگنتومتری، گرانودیوریت پورفیری رخنمون دارد. در عمده قسمت‌های مرکزی، غربی، شمال غربی و جنوب غربی نقشه، توف‌های سیلیسی-ریولیتی مشاهده می‌شوند. مدل نهایی مگنتومتری یک رینگ از لیتولوژی‌هایی با پذیرفتاری مغناطیسی ۰.۰۱ تا حدود ۰.۱۷ را نشان می‌دهد که یک محدوده با پذیرفتاری پایین را احاطه کرده‌اند (شکل ۳). این رنج پذیرفتاری مغناطیسی بر گرانودیوریت غیر دگرسان انطباق دارد. نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهد که در قسمت‌های مرکزی، غربی، جنوب غربی و شمال غربی سایت مغناطیس‌سنجی توف‌های ریولیتی وجود دارند. بازدیدهای میدانی نیز تایید کننده پوشش گسترده توف‌ها هستند. در عین حال در موقعیت داخل رینگ، پنجره‌هایی از فرسایش توف و رخنمون ریولیت‌های آلتزه مشاهده شد. به دلیل مقیاس نقشه، این عوارض روی نقشه ۱/۵۰۰۰ مشاهده نمی‌شوند. این احتمال وجود دارد که توف‌های ریولیتی روی پی‌سنگ گرانودیوریتی منطقه قرار گرفته‌اند و آنچه مدل مغناطیس‌سنجی نشان می‌دهد مربوط به سنگ گرانودیوریتی است. پی‌سنگ گرانودیوریتی در زیر توف ریولیتی قرار گرفته و وقوع سیستم کانی‌سازی پورفیری باعث دگرسان شدن فضای داخل رینگ شده است.



شکل (۱): نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده مطالعاتی

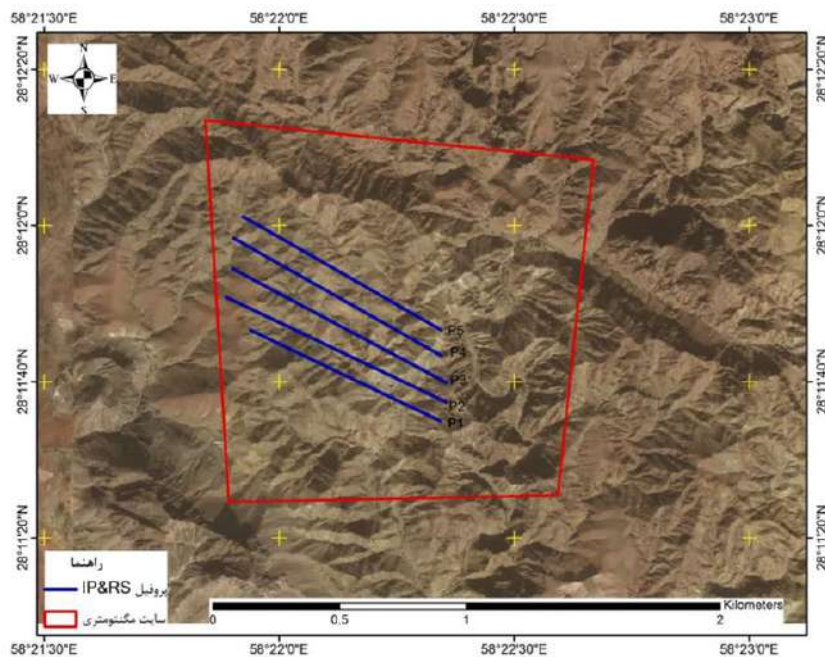


شکل (۲): محدوده برداشت مگنتومتري (خط چین سیاه رنگ) و محدوده سنگهای غیر دگرسان (خط چین زرد رنگ) روی نقشه زمین شناسی ۱/۵۰۰۰ منطقه



شکل (۳): سکنش افقی در عمق ۲۵۲ متر. خط چین قرمز رنگ مرز گرانودیوریت غیردگرسان را نشان می‌دهد

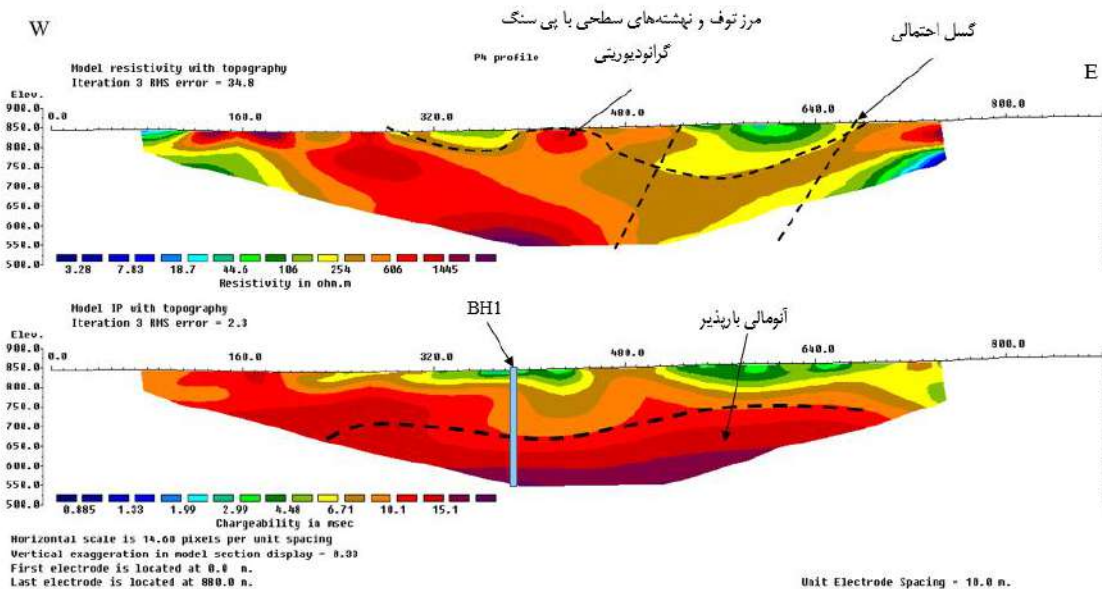
برداشت ژئوالکتریک در این محدوده به روش توموگرافی الکتریکی و بارپذیری (IP&RS) با استفاده از آرایش الکتریکی پل-دایپل در مجموع حدود ۷ روز به طول انجامید. در محدوده تعداد ۲۲۵۰ نقطه، برداشت IP&RS انجام شد. فاصله نقاط و پروفیل‌ها به نحوی تعیین شد که دقت مطالعات جهت تعیین دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها افزایش یابد. به طوری که فاصله الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ متر و فاصله پروفیل‌ها ۷۰ تا ۸۰ متر انتخاب شد. طول پروفیل‌ها در محدوده بین ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ متر متغییر است. موقعیت پروفیل‌های IP&RS روی تصویر هوایی محدوده مورد مطالعه در شکل (۴): نشان داده شده است.



شکل (۴): سکنش افقی در عمق ۲۵۲ متر. خط چین قرمز رنگ مرز گرانودیوریت غیردگرسان را نشان می‌دهد

تفسیر نتایج

مقطع مقاومت الکتریکی نشان دهنده یک زمینه با مقاومت الکتریکی بالا (بین ۳۰۰ تا ۱۷۰۰ اهم متر) است که مرتبط با سنگ گرانودیوریتی محدوده مطالعاتی است. در داخل سنگ میزبان زون‌های با مقاومت الکتریکی پایین مشاهده می‌شود که احتمالاً مربوط به زون‌های گسلی است. در سطح زمین نواحی با مقاومت الکتریکی پایین مشاهده می‌شود که مرتبط با رسوبات سطحی، توف‌های ریولیتی و زون آلتراسیون آرژلیک است. روی مقطع بارپذیری، یک آنومالی بارپذیر اصلی از عمق‌های بالاتر از ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر به تدریج مشاهده می‌شود. موقعیت این آنومالی بر سنگ‌های گرانودیوریتی منطبق است. رنج اعداد بارپذیری بین ۱۲ تا کمتر از ۱۷ میلی ولت بر ولت است که آنومالی بارپذیری به حساب می‌آیند. روی مقطع پروفیل شماره ۴، زون بارپذیر تا عمق مشاهده این مقطع (حدود ۳۵۰ متر) گسترش داشته و آنومالی بسته نمی‌شود (شکل ۵). مجموع اطلاعات زمین شناسی و ژئوفیزیک به دست آمده نشان می‌دهد که احتمالاً آنومالی بارپذیری مشاهده شده مربوط به افق‌های بالای یک سیستم پورفیری می‌باشد.



شکل (۵): مقطع مقاومت الکتریکی و بارپذیری حاصل از معکوس سازی داده‌های IP&RS پروفیل شماره ۴

نتیجه‌گیری کلی

از آنجائی که عملیات حفاری یکی از پرهزینه ترین بخش‌های مطالعات اکتشافی بوده و زمان قابل توجهی را بخود اختصاص می دهد؛ لذا تعیین نقاط بهینه حفاری به منظور کاهش ریسک عملیات اکتشاف تفصیلی یکی از نیازهای اساسی در هر محدوده خاص محسوب می - شود. برای غلبه براین مشکل؛ تهیه نقشه پتانسیل معدنی و مدلسازی آن با استفاده از داده‌های موجود گامی تعیین کننده است. برای تولید نقشه پتانسیل معدنی تشخیص فاکتورهای مؤثر بر کانی‌سازی و نیز انتخاب یک روش تلفیق، دو مرحله مهم و حساس می‌باشند. در این مسیر در اختیار داشتن فناوری مناسب برای مدیریت داده‌ها و اطلاعات اکتشافی می‌تواند در سرعت تولید و دقیق نقشه پتانسیل معدنی نقش کلیدی را ایفاء نماید. بطوری که بدون چنین فناوری تعیین مکان‌های مناسب جهت حفاری دشوار خواهد بود. در مرحله بعدی مطالعات مغناطیس سنجی شواهد وجود یک محدوده شدت پایین مغناطیسی مرتبط با سنگ‌های آلتزه را تایید کرد. همچنین

شواهد آنومالی مثبت میدان مبنی بر احتمال وجود آلتراسیون پتاسیک در عمق‌های بالا، مشاهده شد. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که سنگ‌های گرانودیوریت چهره غالب زمین‌شناسی منطقه است. این لیتولوژی‌ها در شرایط عادی، مقاومت الکتریکی بالا و بارپذیری پایین دارند. در صورتی که آنومالی بارپذیری در داخل این سنگ میزبان مشاهده شود، می‌توان این آنومالی را مرتبط با زون‌های سولفیدی یک سیستم کانی‌سازی پورفیری طلا-مس دانست. روی مقاطع مقاومت الکتریکی و بارپذیری سایت مطالعاتی، آنومالی‌های نسبتاً بارپذیر در موقعیت سنگ‌های گرانودیوریت محدوده مشاهده می‌شود. شدت آنومالی بارپذیری بین ۱۰ تا ۱۸ میلی‌ولت بر ولت متغیر است. این میزان آنومالی IP می‌تواند برای افق‌های بالای یک سیستم پورفیری کافی باشد. آنومالی بارپذیری از عمق‌های تقریبی ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر به تدریج شروع شده و با افزایش عمق، اعداد بارپذیری افزایش می‌یابند. با توجه به حداکثر عمق حدود ۳۵۰ متری مقاطع بارپذیری، آنومالی‌ها باز بوده و در عمق گسترش دارند.

مراجع

- [۱] Porwal, A., Das, R. D., Chaudhary, B., Gonzalez-Alvarez, I. and Kreuzer, O., - Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. *Ore Geology Reviews*. 2014
- [۲] Asadi, H. H., Sansoleimani, A., Fatehi, M. and Carranza, E. J. M., - An AHP-TOPSIS Predictive Model for District-Scale Mapping of Porphyry Cu-Au Potential: A Case Study from Salafchegan Area (Central Iran). *Natural Resources Research*, 1-13. 2016
- [۳] Yousefi, M. and Carranza, E.J.M.,. Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping. *Computers and Geosciences*, v. 83, p. 72-79, 2015
- [۴] El Monsef H. A.: GIS Analysis System for Investigating Sulphide Mineralization in South Sinai, Egypt, *Surveying and Land information Science*. 64. 4.: 243-251. 2004

پردازش داده‌های مغناطیسی با روش تبدیل موجک برای محاسبه بی‌هنجاری محلی

حسین نصیری حقیقی^۱، حمزه صادقی سرخنی^۲، سید محمد ابطحی فروشانی^۲

^۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، h.nasiri@mi.iut.ac.ir

^۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

^۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، smabtahi@iut.ac.ir

چکیده فارسی

تبدیل موجک یک تکنیک پردازش سیگنال است که با موفقیت در علوم و کاربردهای مهندسی مختلف، از جمله پردازش داده‌های ژئوفیزیکی پیاده‌سازی شده است. این تکنیک همچنین پردازش داده‌های مغناطیسی و در نتیجه دقت و دقت تفسیر داده‌ها را بهبود می‌بخشد. این تحقیق به بررسی قابلیت تبدیل موجک در حذف بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای و نوفه تصادفی داده‌های مغناطیسی می‌پردازد. به این منظور، ابتدا پاسخ میدان مغناطیسی از یک مدل مصنوعی محاسبه شد و یک چند جمله‌ای مرتبه ۴ به عنوان یک اثر ناحیه‌ای و یک نوفه تصادفی با انحراف استاندارد ۱۰۰ نانوتسلا به آن اضافه شد. در مرحله بعد، اجرای روش تبدیل موجک جزئیات مرتبط با اثرات ناحیه‌ای و نوفه در داده‌های مصنوعی را حذف کرد. سیگنال بازسازی شده با پاسخ میدان مغناطیسی خالص از مدل مصنوعی همبستگی قوی دارد. همچنین، داده‌های اندازه‌گیری شده در یک منطقه اکتشافی با اکسیدهای آهن کم عیار از طریق این تکنیک پردازش شده و داده‌های باقیمانده برای تخمین مدل خودپذیری مغناطیسی زیرسطحی وارون سازی شدند. خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده یک همبستگی فضایی قوی با عبارهای بالاتر آهن در امتداد گمانه‌های اکتشافی حفر شده در منطقه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، پردازش داده‌های مغناطیسی، پردازش سیگنال، اثر ناحیه‌ای، نوفه تصادفی

Magnetic data processing via wavelet transformation for computation of the local anomaly

Hossein Nasirihaghighi¹, Hamzeh Sadeghisorkhani², Sayyed Mohammad Abtahi Forooshani²

¹Msc Student, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology; h.nasiri@mi.iut.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology; hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology; smabtahi@iut.ac.ir

ABSTRACT

The wavelet transformation is a signal processing technique successfully implemented in miscellaneous sciences and engineering applications, including geophysical data processing. The technique also improves the processing of magnetic data and, consequently, the accuracy and precision of data interpretation. This research investigates the capability of the wavelet transformation in removing regional anomalies and random noise of magnetic data. In this regard, first, the magnetic field response from a synthetic model was computed, and a 4th-order polynomial as a regional effect

and a random noise with a standard deviation of 100 nT was added to it. Next, implementing the wavelet transformation technique eliminated the details correlated with regional effects and the noise in synthetic data. The reconstructed signal strongly correlates with the pure magnetic field from the synthetic model. Also, measured data in an exploration area with low-grade iron oxides were processed via the technique, and the residual data were inverted to estimate the subsurface magnetic susceptibility model. The estimated magnetic susceptibility showed a strong spatial correlation with the higher iron grades along the exploratory boreholes drilled in the area.

Keywords: Wavelet transformation, Magnetic data Processing, Signal Processing, Regional Effect, Random Noise.

مقدمه

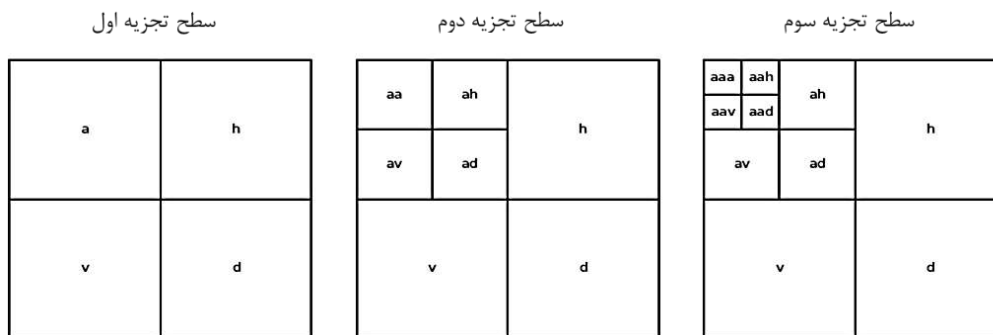
تبدیل موجک در ژئوفیزیک از اوایل دهه ۱۹۸۰ در بررسی داده‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان پیشرفت‌های ریاضی قابل توجهی در نظریه موجک، مجموعه‌ای از کاربردها را در زمینه‌های مختلف امکان‌پذیر کرده است. در ژئوفیزیک، تبدیل موجک برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های غیرایستا که حاوی ویژگی‌های چند مقیاسی هستند، تشخیص تکینگی‌ها و موارد بسیار دیگر مورد استفاده قرار گرفته است [۱].

همچنین با توجه به کاهش ذخایر معدنی و نیاز گسترده صنایع مختلف به مواد معدنی به ویژه فلزات، استفاده و بهره‌برداری از کانسارهای با عیار پایین و کوچک نیز دارای صرفه اقتصادی شده است. پایین بودن عیار این کانسارها باعث سخت بودن اکتشاف آنها با روش‌های معمول می‌گردد. از سوی دیگر ریسک و هزینه بالای فعالیت‌های اکتشافی مانند حفر گمانه، نیاز استفاده از روش‌های غیر مستقیم اکتشافی مانند روش‌های ژئوفیزیکی را افزایش داده است. افزایش دقت و صحت تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی یکی از ضرورت‌های شناسایی کانسارهایی با عیار پایین و کوچک است. استفاده از تبدیل موجک می‌تواند در پردازش نقشه‌های میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده به ویژه میدان مغناطیسی کانسارهای با عیار پایین بسیار کارآمد باشد. از این رو استفاده از تبدیل موجک به تدریج در پی‌جویی‌های مغناطیسی نیز به کار گرفته شد. در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار از تبدیل موجک برای آنالیز آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی استفاده شد. استفاده از این روش باعث تفسیر دقیق‌تر پدیده‌های گرانی و مغناطیسی و یافتن ساختارهای در مختلف داده‌های گرانی و مغناطیسی شد [۲]. از تحلیل داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی برای شناسایی گسل‌های احتمالی در منطقه سینوپ ترکیه در سال ۲۰۱۱ استفاده شد. در این مطالعه از روش‌های تبدیل موجک گسسته و دیکانولوشن اوپلر روی داده‌های تبدیل به قطب شده استفاده شد که ویژگی‌های ساختاری زیر سطحی منطقه، به ویژه گسل‌های موجود با دقت خوبی شناسایی شد [۳]. در سال‌های اخیر نیز یک روش برای آشکار سازی مزره‌های توده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی توسط دژودی و همکاران ارائه شده است [۴].

مقاله پیش رو به بررسی ارائه روشی برای تجزیه و تحلیل چند مقیاسی موجک و بررسی قابلیت آن در جداسازی بی‌هنجاری محلی از اثرات ناحیه‌ای و حذف نوفه‌ها می‌پردازد. مطالعه حاضر با در نظر گرفتن این حقیقت که عدم حذف اثر ناحیه‌ای از داده‌های مغناطیسی و امکان تشخیص محل توده‌های بی‌هنجاری محلی را سخت و یا غیر ممکن می‌کند [۵]، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین در ادامه نشان داده می‌شود که وارون سازی بی‌هنجاری محلی به دست آمده از این روابط انطباق خوبی با حضور کانه زایی مگنتیت در محدوده‌های اکتشافی دارد.

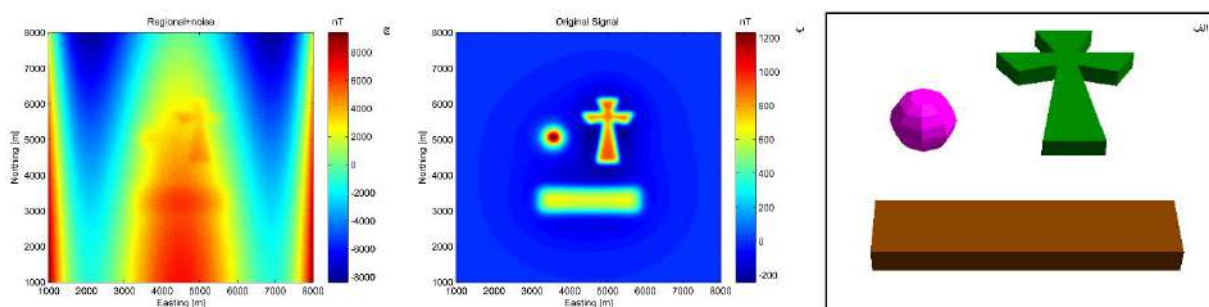
روش شناسی پژوهش

تبدیل موجک گسسته به صورت دنباله‌ای از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر برای تجزیه سیگنال به زیرباندهای فرکانسی عمل می‌کند. تجزیه سیگنال از کوچکترین مقیاس شروع شده و در هر مرحله تجزیه، مقیاس دو برابر می‌شود. بنابراین در سطوح ابتدایی تجزیه، عدد موج‌های بزرگتر به عنوان جزئیات (Details) تفکیک می‌شود و هرچه سطوح تجزیه بالاتر می‌رود فرکانس‌های با طول موج بزرگتر و عدد موج کوچکتر به عنوان تقریب (Approximation) از تصویر استخراج می‌شود. در هر مرحله تجزیه متوالی تعداد نمونه‌های موجود در تصویر سیگنال نصف می‌شود و این روند تا جایی ادامه می‌یابد که ابعاد در تقریب باقی مانده از طول تابع موجک کوچکتر شود (شکل ۱). پس از تجزیه، جزئیات غیر مطلوب حذف و با اجزا باقیمانده، تصویر بازسازی می‌شود که نتیجه آن یک تصویر بدون اثرات ناخواسته است.



شکل (۱): نحوه تجزیه یک سیگنال در سه سطح [۶]

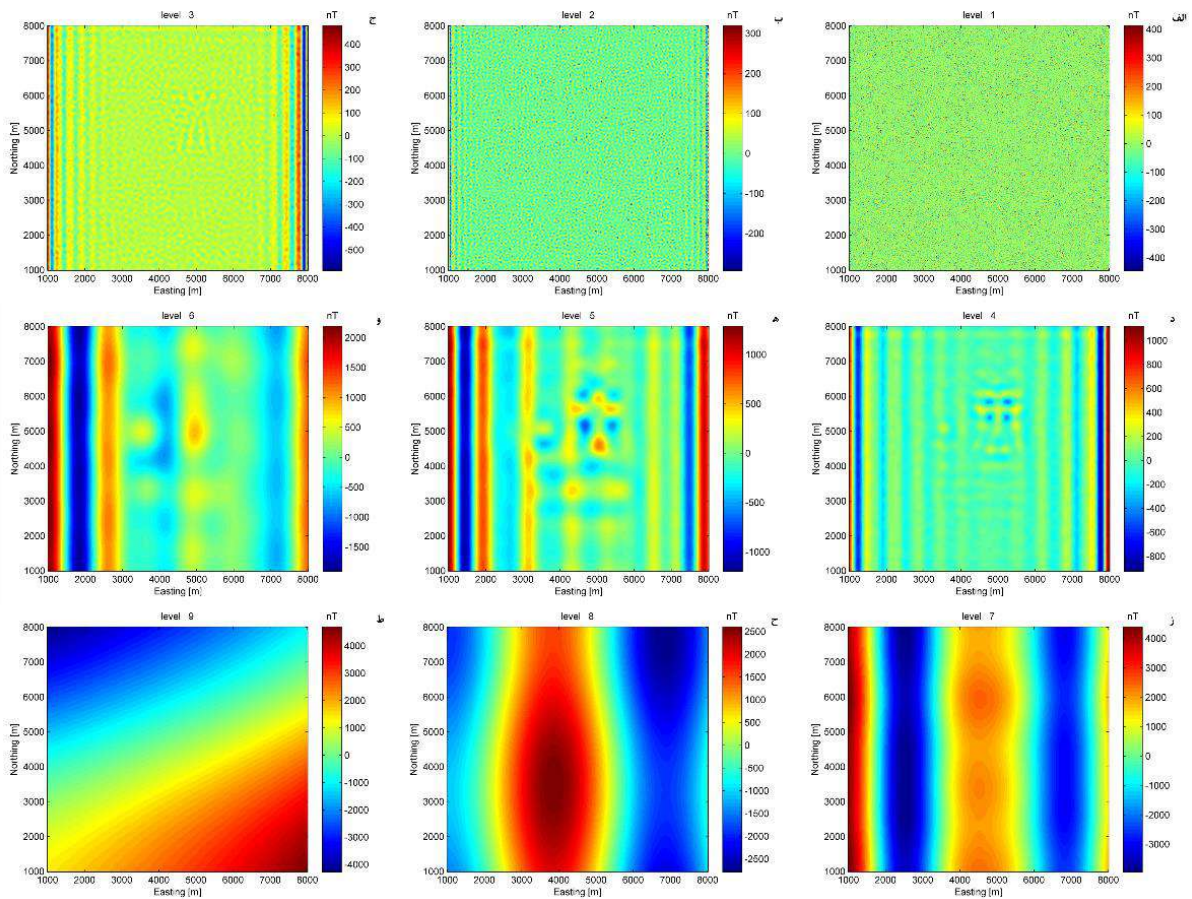
از تحلیل چندسطحی تبدیل موجک می‌توان برای حذف نوفه‌ها و اثر ناحیه‌ای در برداشت‌های مغناطیسی استفاده کرد. برای بررسی این موضوع، ابتدا یک مدل مصنوعی خودپذیری مغناطیسی دارای سه توده با خودپذیری‌های مختلف در نرم‌افزار Modelvision طراحی شده (شکل ۲ الف) و پاسخ شدت میدان مغناطیسی آن در سطح زمین محاسبه گردید (شکل ۲ ب). سپس یک اثر ناحیه‌ای با درجه ۴ و همچنین یک نوفه تصادفی با انحراف معیار ۱۰۰ نانوتسلا به این میدان اضافه شد (شکل ۲ ج).



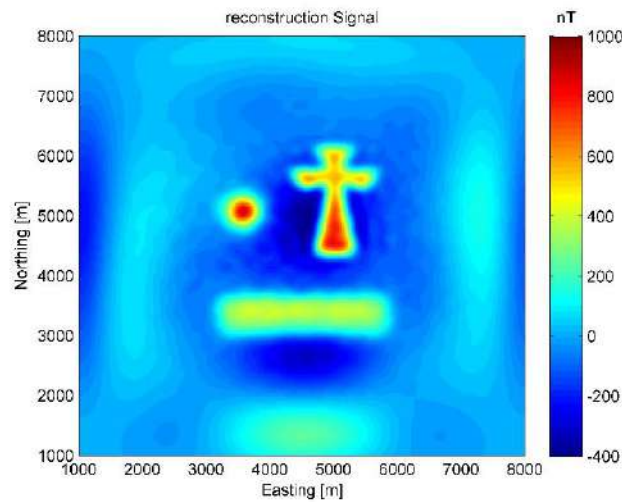
شکل (۲): شکل مدل سه بعدی مصنوعی (الف)، نقشه شدت میدان مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی (ب) و داده مصنوعی نهایی پس از اضافه شدن نوفه و اثر ناحیه‌ای به داده شکل ب (ج)

در ادامه، برای حذف اثر ناحیه‌ای و نوفه از داده مصنوعی (شکل ۲ ب)، آن را با استفاده از تبدیل موجک به ۹ سطح تجزیه مختلف استفاده می‌کنیم (شکل ۳). با حذف جزئیات ۲ سطح ابتدایی (شکل‌های ۳ الف و ۳ ب) که مربوط به عدد موج‌های بزرگ نوفه و تقریب‌های ۴ سطح آخر (شکل‌های ۳ و ۳ ط) که مربوط به اثر ناحیه‌ای است و بازسازی سطوح باقیمانده، اثرات ناخواسته تا حد زیاد و مطلوبی از

داده‌ها حذف می‌گردد. شکل ۴، نتیجه بازسازی سیگنال با استفاده از تقریب سطح ۵ و جزئیات سطوح ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. مقایسه اشکال ۲ و ۴ قابلیت آنالیز چندسطحی تبدیل موجک برای جداسازی بی‌هنجاری‌ها از نوفه‌های تصادفی و سیستماتیک (اثر ناحیه‌ای) نشان می‌دهد.



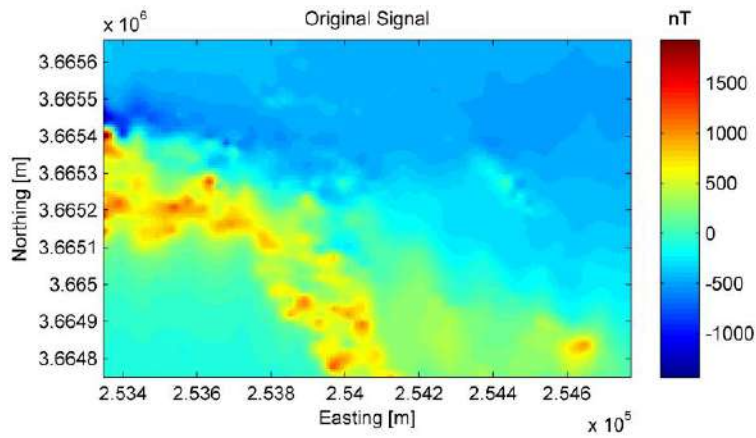
شکل (۳): سطوح تبدیل موجک داده مصنوعی همراه با اثر ناحیه‌ای و نوفه.



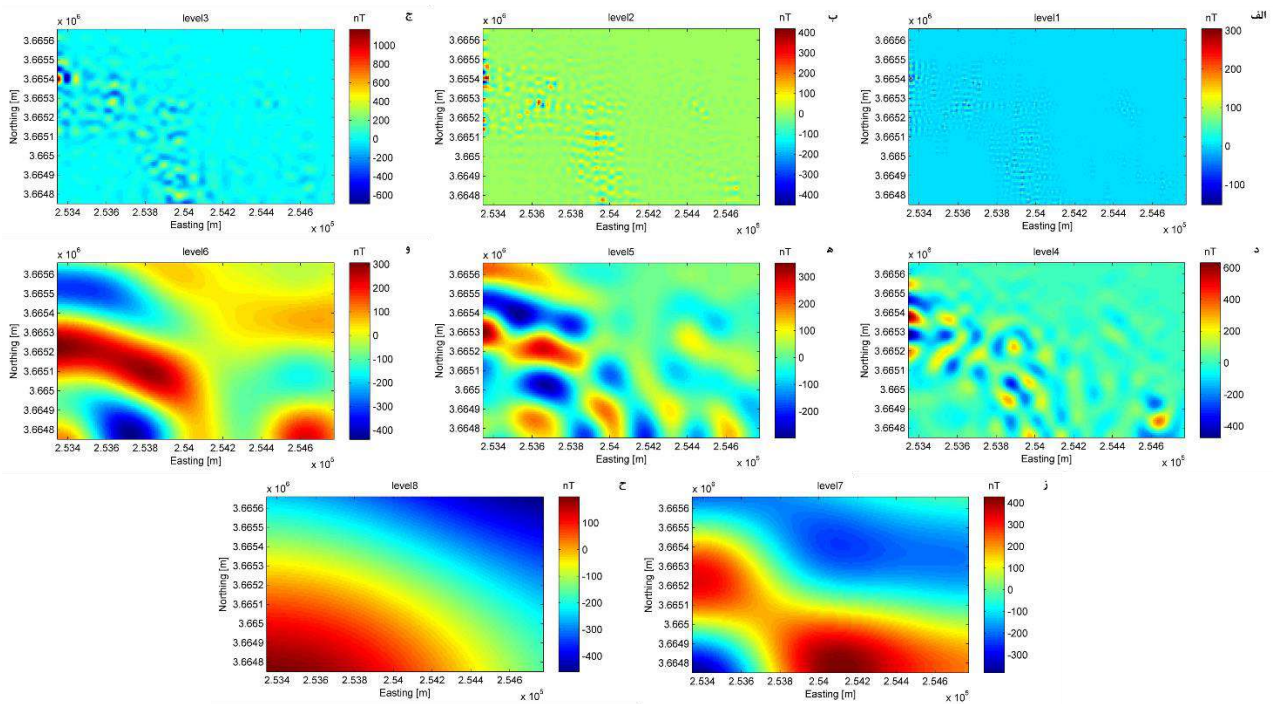
شکل (۴): سیگنال بازسازی شده با حفظ سطوح ۳، ۴ و ۵ تبدیل موجک.

برای بررسی عملکرد تبدیل موجک بر روی داده های واقعی، روش ارائه شده بر روی داده های مغناطیسی محدوده اکتشافی چاه پلنگی بکار گرفته شد. این محدوده در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری جنوب شهرستان چوپانان در استان اصفهان قرار دارد. داده ها بر روی یک شبکه منظم در امتداد شمالی-جنوبی با فواصل ۲۰ در ۴۰ متر به منظور اکتشاف کانسار آهن برداشت شده است. این داده ها با پیمانکاری شرکت کوشا معدن و برای اهداف اکتشافی شرکت فولاد مبارکه در سال ۱۴۰۰ برداشته شده اند. تصحیحات اولیه مانند تصحیحات شبانه روزی توسط شرکت برداشت کننده بر روی داده ها اعمال شده است.

برای انجام تصحیحات و پردازش های مورد نیاز روی داده ها، ابتداتصحیح حذف میدان مرجع ژئومغناطیس جهانی (IGRF) بر داده ها اعمال شد. لازم به ذکر است که شدت میدان مغناطیسی در زمان برداشت داده ها ۴۷۸۸۰ نانوتسلا، زاویه میل ۵۱.۶۷ درجه و زاویه انحراف به اندازه ۴.۰۵ درجه بوده است. شکل ۵ نقشه میدان مغناطیسی کل را بعد از حذف شدت میدان مغناطیسی IGRF نشان می دهد. پس از حذف مقدار شدت میدان مغناطیسی IGRF از داده ها، تنها میدان ناشی از کلیه توده های موجود در محدوده به دست می آید. میدان باقیمانده مجموع میدان مغناطیسی ناشی از توده ها و آنومالی های کوچک و نزدیک به سطح و توده های بزرگ و عمیق تر می باشد. در این مطالعه اکتشافی، میدان مغناطیسی ناشی از توده های عمیق که طول موجی بزرگتر از کانی سازی دارند، اثر ناحیه ای و پدیده های با طول موج کوچک و پدیده های سطحی، نوفه محسوب می شوند. در ادامه، با تحلیل چندسطحی تبدیل موجک به تفکیک آنومالی های محلی و ناحیه ای پرداخته و اثر نوفه های تصادفی و با عدد موج های بزرگ را نیز کاهش می دهیم. برای این کار با توجه به تعداد نمونه های موجود به ۸ سطح برای تجزیه نیاز است. شکل ۶ کلیه سطوح تجزیه نقشه میدان مغناطیسی را نشان می دهد.



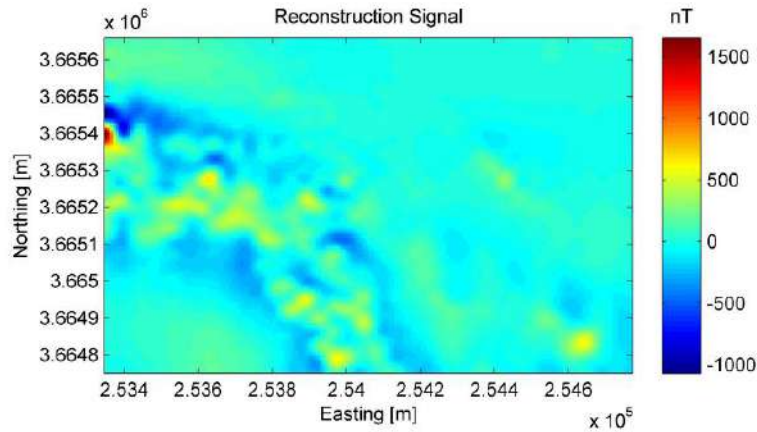
شکل (۵): نقشه شدت میدان مغناطیسی کل محدوده چاه‌پلنگی پس از حذف IGRF.



شکل (۶): سطوح تبدیل موجک داده مغناطیسی محدوده چاه‌پلنگی.

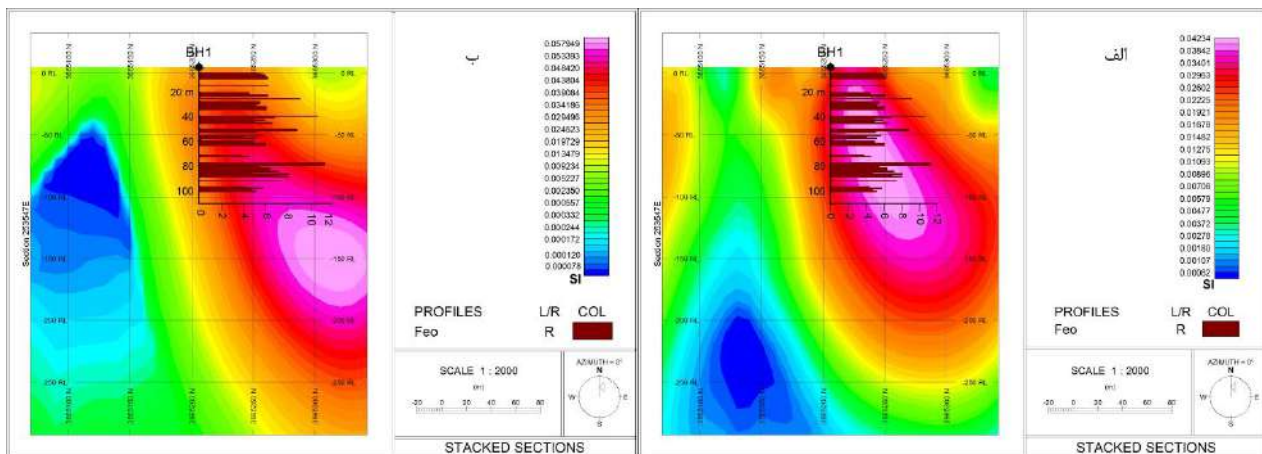
با حذف جزئیات سطح اول به عنوان نوفه تصادفی (شکل ۶ الف) و تقریب‌های چهار سطح آخر (شکل‌های ۶ ه تا ۶) به عنوان اثر ناحیه‌ای و بازسازی سطوح باقیمانده، شکل ۷ بدست می‌آید. با مقایسه اشکال ۵ و ۷ می‌توان دریافت که توده‌های با شدت بالا (بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانوتسلا) که از سمت غرب محدوده به سمت جنوب آن کشیده شده است، به عنوان اثر ناحیه‌ای تضعیف شده است. در شکل ۷ تنها

توده‌های منفردی که دارای طول موج پایین تری هستند باقیمانده است که به خوبی نماینده کانی سازی کوچک محلی در این محدوده می‌باشد که با واقعیت‌های زمین شناسی محدوده مطابقت دارد.



شکل (۷): سیگنال بازسازی شده با حفظ سطوح ۲، ۳ و ۴ داده‌های مغناطیسی محدوده چاه‌پلنگی.

برای مقایسه نتیجه روش ارائه شده با تبدیل موجک با روش‌های معمول حذف اثر ناحیه‌ای، مدلسازی وارون با استفاده از داده‌های سیگنال بازسازی شده محدوده چاه‌پلنگی (شکل ۷) و داده‌ای که با فیلتر روند درجه سوم مورد پردازش قرار گرفته است، انجام گردید. در شکل ۸ مقاطع قائم خودپذیری مغناطیسی حاصل از این دو نوع وارون سازی در امتداد یک گمانه حفر شده در محدوده نشان داده شده است. در شکل ۸ و در امتداد این گمانه عیار آهن اندازه‌گیری شده به صورت میله‌ای به نمایش گذاشته شده است. توده با خودپذیری بالا که از وارون سازی بی‌هنجاری باقیمانده در تبدیل موجک پردازش شده به دست آمده است در عمق کمتری واقع شده و تطابق بهتری با عیار آهن در گمانه از خود نشان می‌دهد.



شکل (۸): مقطع قائم مدل خودپذیری مغناطیسی با استفاده از داده های الف) پردازش شده با تبدیل موجک و ب) پردازش با فیلتر روند درجه سوم. همچنین عیار آهن در گمانه به صورت میله‌ای و به درصد نشان داده شده است.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش برای حذف اثر ناحیه‌ای و نوفه تصادفی با استفاده از آنالیز چندسطحی تبدیل موجک ارائه گردید. این روش بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی محدوده اکتشافی چاه‌پلنگی اعمال شد که توانست به تضعیف اثر ناحیه‌ای و نوفه بپردازد و بی‌هنجاری

محلی را با دقت مناسب بازسازی کند. در داده‌های مصنوعی روش ارائه شده توانست در حضور یک اثر ناحیه‌ای شدید و نوفه تصادفی به آشکارسازی آنومالی موجود در داده‌ها بپردازد. در داده‌های واقعی نیز وارون سازی بی‌هنجاری استخراج شده با استفاده از روش تبدیل موجک ارائه شده، به ساخت یک مدل خودپذیری مغناطیسی با صحت و دقت بیشتر منجر شد.

تطابق خوب نتایج حاصله در شناسایی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در حضور یک اثر ناحیه‌ای قوی با واقعیت‌های زمین شناسی، قابلیت استفاده این روش را برای پردازش داده‌های مغناطیسی ناشی از کانسارهای کم عیار و کوچک نشان می‌دهد. همچنین از این روش می‌توان برای شناسایی بی‌هنجاری‌های کوچک، ناشی از کانی سازی ضعیف که دارای شدت میدان مغناطیسی پایینی هستند بهره جست.

تقدیر و تشکر

داده‌های مغناطیسی این پژوهش توسط شرکت فولاد مبارکه اصفهان در اختیار نویسندگان قرار گرفته است. در اینجا جا دارد از شرکت فولاد مبارکه و حمایت‌های مدیریت محترم اکتشافات و ارزیابی مواد معدنی این شرکت تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

- [۱۳] Kumar, Praveen, and Efi Foufoula-Georgiou. "Wavelet analysis for geophysical applications." *Reviews of geophysics*, No. 35, pp. 385-412, 1997.
- [۱۴] Moreau, Frédérique, Dominique Gibert, Matthias Holschneider, and Ginette Saracco. "Wavelet analysis of potential fields." *Inverse problems*, No. 13, p. 165, 1997.
- [۳] Oruç, B. Ü. L. E. N. T., and H. H. Selim. "Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform." *Journal of Applied Geophysics*, No. 74, pp. 194-204, 2011.
- [۴] Dwivedi, Divyanshu, and Ashutosh Chamoli. "Source edge detection of potential field data using wavelet decomposition." *Pure and Applied Geophysics*, No. 178, pp. 919-938, 2021.
- [۵] Fedi, Maurizio, and Tatiana Quarta. "Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies." *Geophysical prospecting*, No. 46, pp. 507-525, 1998.
- [۶] Gloaguen, E., Dimitrakopoulos, R., "Two dimensional conditional simulation based on the wavelet decomposition of training images", *Math. Geosci*, No. 41, pp. 679-701, 2009.

کاربرد روش های لرزه ای در اکتشاف معادن

محمد علی خداقلی^۱

ادانشجوی دکتری لرزه شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران khodaghali.ali.m@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: محمد علی خداقلی

چکیده فارسی

با توجه به میزان کاهش ذخایر معدنی کم عمق به ناچار باید به اکتشاف و بهره برداری از اعماق توجه کرده و به دنبال فناوری هایی باشیم که کارایی فعالیت های معدنی در اعماق را ارتقا دهد. برای رسیدن به این هدف روش های لرزه ای می توانند بسیار مفید باشند. روش های لرزه ای می توانند تصاویری با وضوح بالا از ساختارهای زمین شناسی دربرگیرنده ی نهشته های معدنی در اعماق زیاد ارائه دهند که سایر روش های ژئوفیزیکی قادر به شناسایی آن ها نیستند. در این مقاله چند مورد از کمک ها و پیشرفت هایی که روش های لرزه ای در صنعت معدن انجام داده اند مرور می شود که شامل استفاده از داده برداری لرزه ای سطحی^۱ و داده های پتروفیزیکی برای مدلسازی لرزه ای است.

واژه های کلیدی: روش های لرزه ای، اکتشاف معدن، اکتشاف عمیق، داده های پتروفیزیکی

Application of Seismic Methods in Mining Exploration

Mohammad Ali Khodagholi¹

¹ PhD Candidate of Exploration Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran,
khodaghali.ali.m@ut.ac.ir

* Corresponding author: Mohammad Ali Khodagholi

ABSTRACT

Due to the reduction of shallow mineral reserves, we must pay attention to the exploration and exploitation of the depths and look for technologies that improve the efficiency of mining activities in the depths. To achieve this goal, seismic methods can be very useful. Seismic methods can provide high-resolution images of geological structures containing mineral deposits at great depths that other geophysical methods are unable to detect. This article reviews some of the contributions and advances that seismic methods have made in the mining industry, which includes the use of surface seismic survey and petrophysical data for seismic modeling.

Keywords: Seismic methods, Mining Exploration, Deep Exploration, Perophysical data.

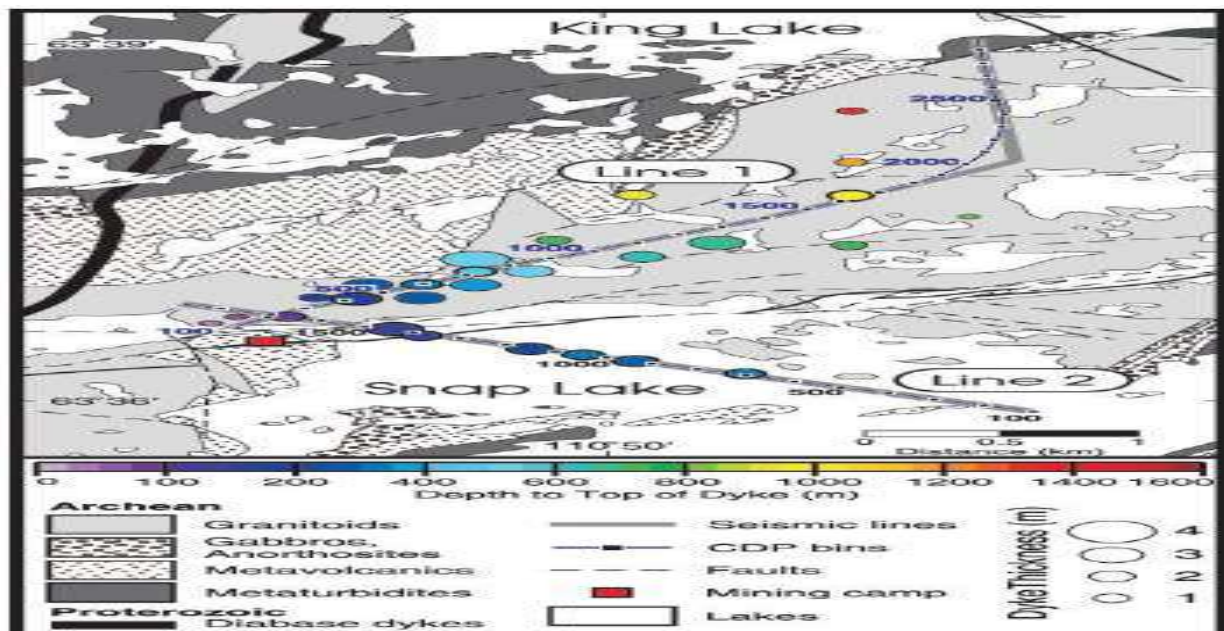
۱. مقدمه

اگر بتوان به وضوح زیر یک محدوده معدنی^{۲۲} را مشاهده کرد و مکان دقیق و مسیر گسترش منابع را ترسیم کرد هزینه ها کاهش چشمگیری داشته و بازده بالا می رود. در فعالیت های معدنی برای به دست آوردن تصویر زیرسطحی از روش های ژئوفیزیکی مختلفی استفاده می شود. روش های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی به طور معمول در اکتشاف و ترسیم منابع معدنی در عمق های کم استفاده می شوند. با این حال تنها روشی که عمق نفوذ زیادی داشته و می تواند تصاویری با وضوح بالا از اعماق ارائه دهد روش لرزه بازتابی^{۲۳} است. البته توانایی و کارایی این روش برای اکتشاف و طراحی معادن از مدت ها پیش شناخته شده بود [1-5] ولی به دلیل اینکه فعالیت های معدنی اغلب در عمق های کم انجام می شد روش های ژئوفیزیکی غیر لرزه ای^{۲۴} مورد استفاده قرار می گرفتند. اما با توجه به روند کنونی و نیاز به اکتشاف و بهره برداری از منابع معدنی عمیق، روش های لرزه ای مجدداً مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آن ها در فعالیت های معدنی افزایش یافته است. در این مقاله مروری خواهد شد بر کاربرد روش های لرزه ای در اکتشاف نهشته های معدنی.

۲. مروری بر برخی مطالعات روش های لرزه ای در اکتشاف معادن

۲-۱. تصویرسازی لرزه ای دایک های کیمبرلیت الماس ساز^{۲۵}

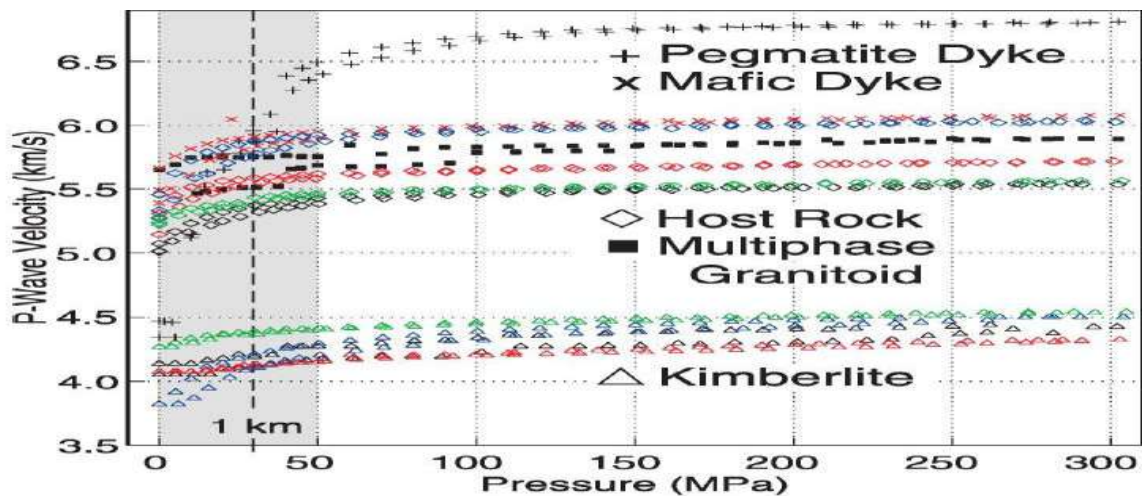
اکتشاف ژئوفیزیکی ذخایر کیمبرلیت معمولاً شامل بررسی های هوابرد میدان پتانسیل است که برای شناسایی لوله های عمودی دارای رخنمون مناسب است اما در آشکار کردن دایک ها و سیل^{۲۶} های نازک تقریباً افقی ناتوان هستند. بنابراین یک مطالعه ی امکان سنجی برای روش لرزه ای روی دایک های الماس ساز معدن Snap Lake در شمال غربی کانادا انجام شده است. در شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه به همراه خطوط داده برداری لرزه ای دو بعدی و محل چاه ها نشان داده شده است.



Mine Site²²
Seismic reflection²³
Non-Seismic Methods²⁴
Seismic imaging of Diamondiferous Kimberlite Dykes²⁵
Sill²⁶

شکل (۱): محل خطوط داده برداری لرزه ای و چاه ها روی نقشه زمین شناسی منطقه

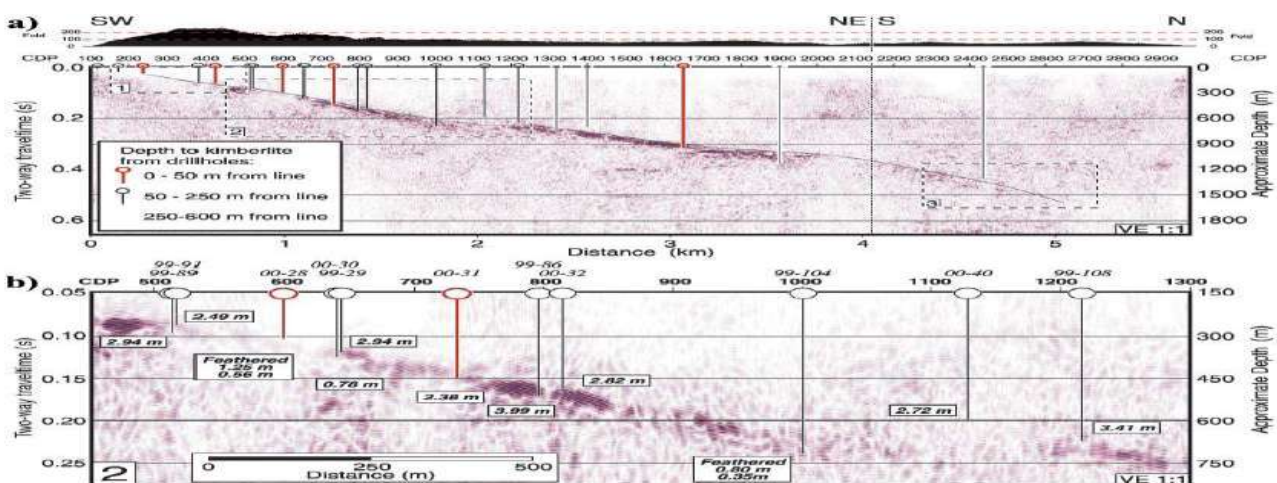
در این شکل عمق هر چاه تا بالای دایک کیمبرلیت با رنگ های مختلف نشان داده شده همچنین قطر هر چاه نیز ضخامت دایک در محل چاه را نشان می دهد. شیب دایک از ۵ تا ۳۰ درجه و ضخامت آن نیز از ۰/۵ تا ۴ متر متغیر است. سرعت موج P و چگالی با استفاده از مغزه ها محاسبه شده است. در شکل ۲ نمودار سرعت موج P بر حسب فشار برای دایک های مختلف و سنگ میزبان نشان داده شده است.



شکل (۲): سرعت موج P بر حسب فشار برای نمونه های سنگی مختلف

در این شکل نوع سنگ با اشکال مختلف و نمونه های مختلف برای یک سنگ خاص نیز با رنگ های مختلف نشان داده شده است. توجه به شکل سرعت موج P در کیمبرلیت کمتر از سایر انواع سنگ ها بوده و چگالی آن نیز کمتر می باشد در نتیجه تباین مقاومت صوتی خوبی بین دایک کیمبرلیت و سنگ میزبان وجود خواهد داشت.

در شکل ۳ مقطع لرزه ای پس از برانبارش^{۳۷} مربوط به خط برداشت ۱ نشان داده شده است.



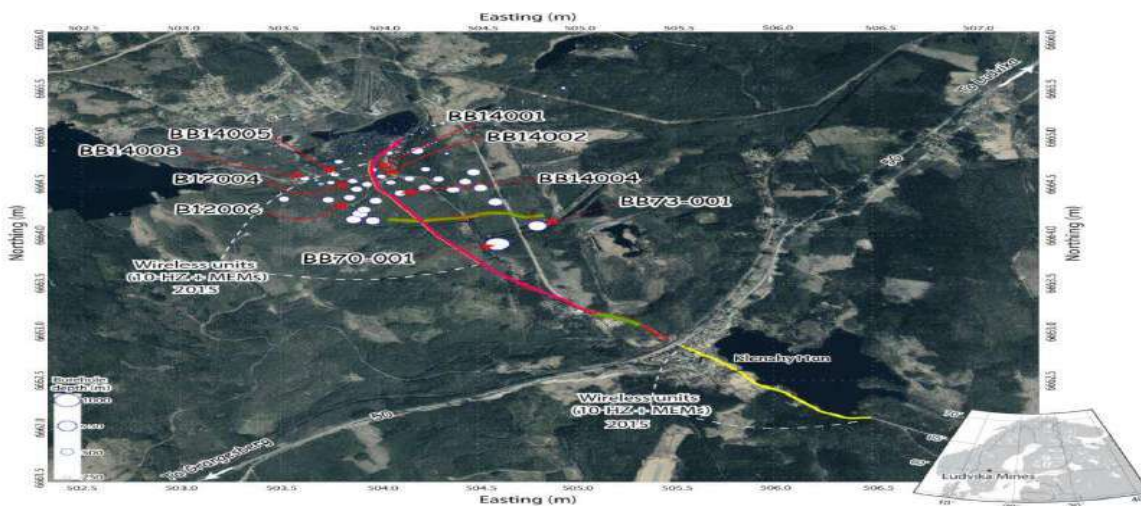
CMP Stacked Section^{۳۷}

شکل (۳): مقطع لرزه ای پس از برانبارش (بالا) و نمای بزرگنمایی شده باکس شماره ۲ در مقطع (پایین)

در این شکل بازتاب های قوی دیده می شود که با توجه به داده های چاه خط سیاه رنگ بازتاب های حاصل از بالای دایک کیمبرلیت است. در تصویر پایین نیز باکس شماره ۲ بزرگنمایی شده است که ضخامت دایک در محل چاه ها مشخص شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده می توان نتیجه گرفت که روش لرزه بازتابی ابزار مفیدی برای شناسایی توده های نفوذی نازک مانند دایک ها است [6].

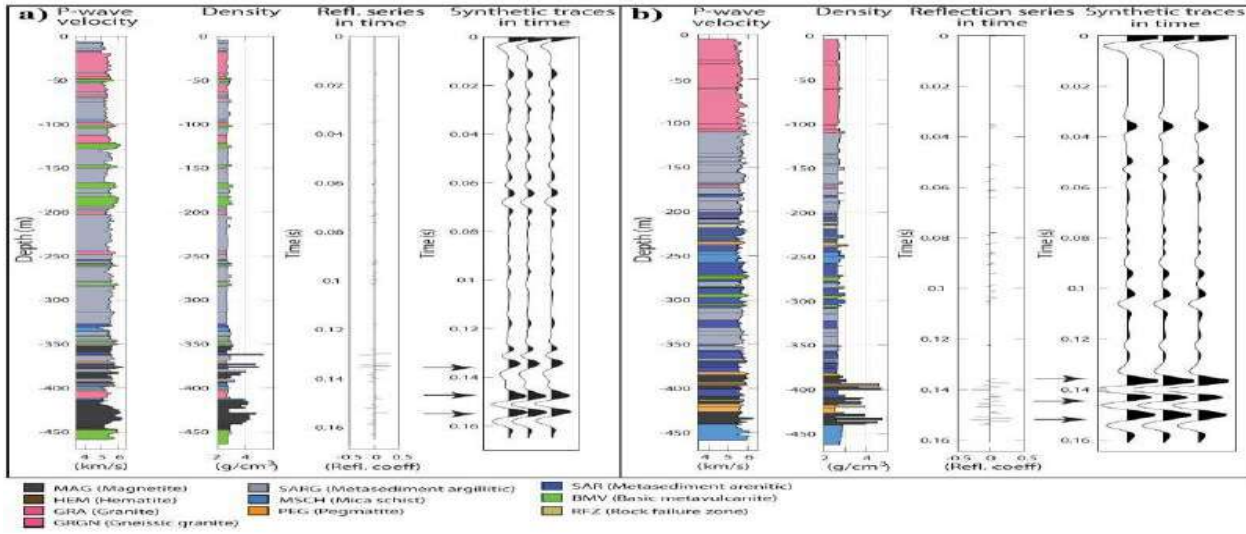
۲-۲. شناسایی کانی سازی عمیق اکسید آهن با استفاده از روش لرزه بازتابی^{۲۸}

در این پژوهش معدن Ludvika در سوئد که بخاطر رسوبات حاوی اکسید آهن شناخته شده است با استفاده از روش لرزه بازتابی به منظور شناسایی گسترش کانی سازی اکسید آهن مطالعه شده است. در شکل ۴ تصویری از منطقه و محل خطوط برداشت داده لرزه ای دو بعدی و چاه ها نشان داده شده است.



شکل (۴): تصویر منطقه مورد مطالعه و محل خطوط لرزه ای و چاه ها

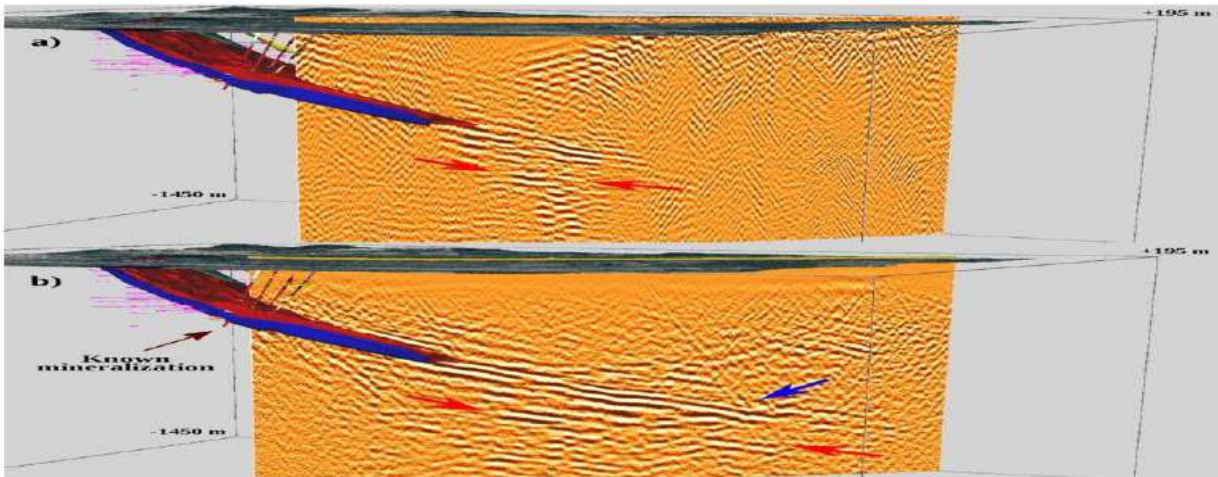
در شکل ۵ نگارهای صوتی و چگالی و داده لرزه ای مصنوعی متناظر با آن ها در محل دو چاه نشان داده شده است.



شکل (۵): نگارهای صوتی و چگالی در محل دو چاه و داده لرزه ای متناظر با آن ها

با استفاده از داده های چاه کانی سازی اکسید آهن در عمق های ۴۰۰ تا ۴۵۰ متری رخ می دهد که داده لرزه ای مصنوعی نیز بازتاب های قوی در این محدوده را نشان می دهد.

در شکل ۶ نمایش سه بعدی بخشی از مقاطع لرزه ای خطوط برداشت به همراه افق های کانی سازی اکسید آهن شناخته شده نشان داده شده است.

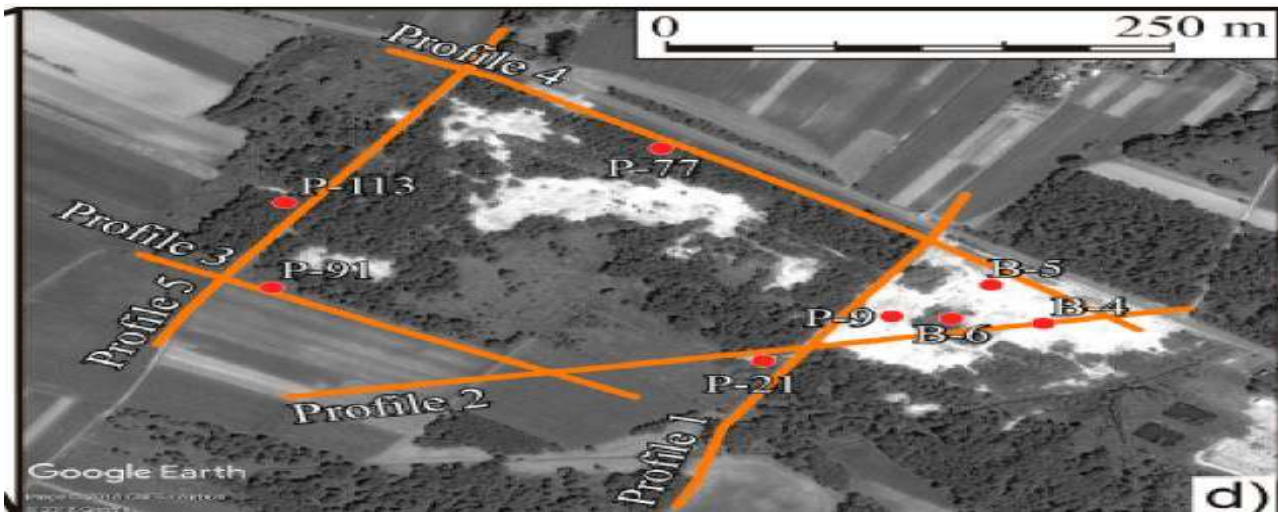


شکل (۶): نمایش سه بعدی مقاطع لرزه ای به همراه افق های کانی سازی شناخته شده

بازتاب های قوی در این تصویر مسیر گسترش عمیق تر کانی سازی را نشان می دهد (فلش آبی). همچنین بازتاب های قوی پایین تر نیز منابع بالقوه ای را زیر منابع شناخته شده نشان می دهد (فلش قرمز) [7].

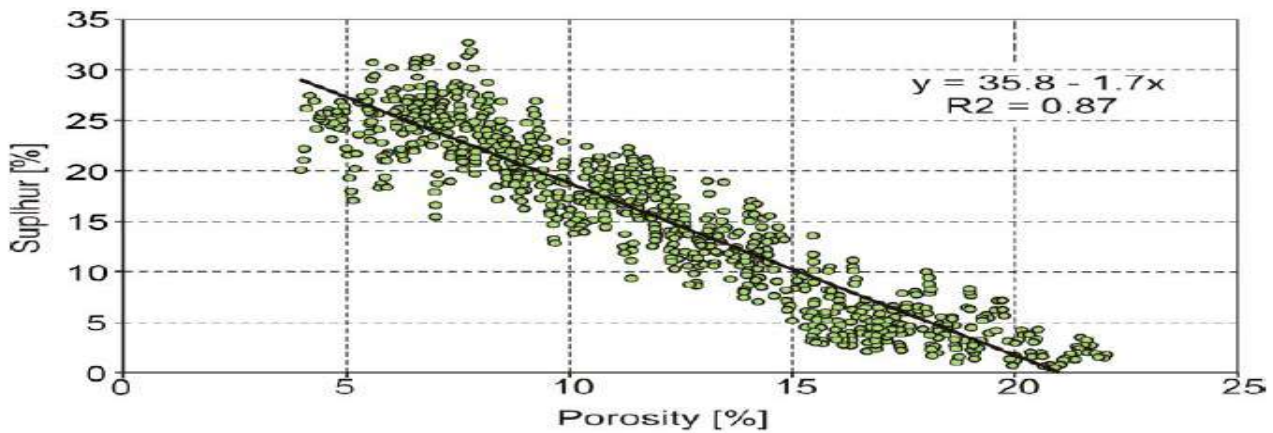
۲-۳. وارون سازی همزمان داده لرزه ای برای تصویرسازی کربنات های گوگرد دار^{۲۹}

در این پژوهش از داده لرزه ای برای تصویرسازی سازند تبخیری میوسن^{۳۰} که حاوی کانه ی گوگرد^{۳۱} است استفاده شده است. ناحیه معدنی مورد مطالعه در جنوب شرقی لهستان است که رسوبات دارای کانه ی گوگرد به صورت لایه ای در یک بازه کربناته شامل سنگ آهک، سنگ آهک مارنی و مارن قرار دارد. در این مطالعه از پنج خط برداشت داده لرزه ای دو بعدی و داده های چاه استفاده شده که در شکل ۷ محل آن ها در منطقه نشان داده شده است.



شکل(۷): محل خطوط داده برداری لرزه ای(خطوط نارنجی) و چاه ها(دایره های قرمز) در منطقه

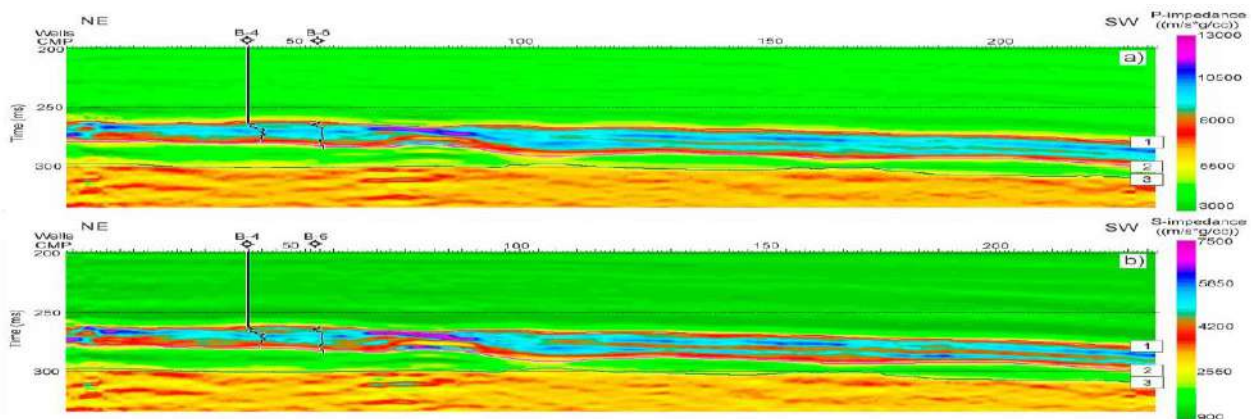
با استفاده از داده های چاه ها یک رابطه تجربی خطی بین کانی سازی کانه گوگرد و تخلخل برای سنگ های کربناته به دست آمده است که در شکل ۸ دیده می شود.



Simultaneous inversion of seismic data for imaging of sulfurized carbonates^{۲۹}
Miocene evaporitic formation^{۳۰}
Sulfure ore^{۳۱}

شکل (۸): رابطه خطی تجربی بین تخلخل و میزان کانی سازی گوگرد در سنگ های کربناته منطقه

با توجه به شکل در می یابیم که با افزایش میزان کانی سازی گوگرد، تخلخل کاهش می یابد. در واقع کانه گوگرد جایگزین آب شور در فضاهای خالی می شود. بنابراین افزایش میزان کانی سازی باعث افزایش سرعت موج، چگالی و افزایش مدول های کشسانی می شود. وارون سازی همزمان فرآیندی است که در آن داده های پیش از برانبارش^{۳۲} مستقیماً به منظور تعیین مقاومت های صوتی امواج P و S و چگالی استفاده می شوند. در شکل ۹ مقاومت های صوتی به دست آمده نشان داده شده است.

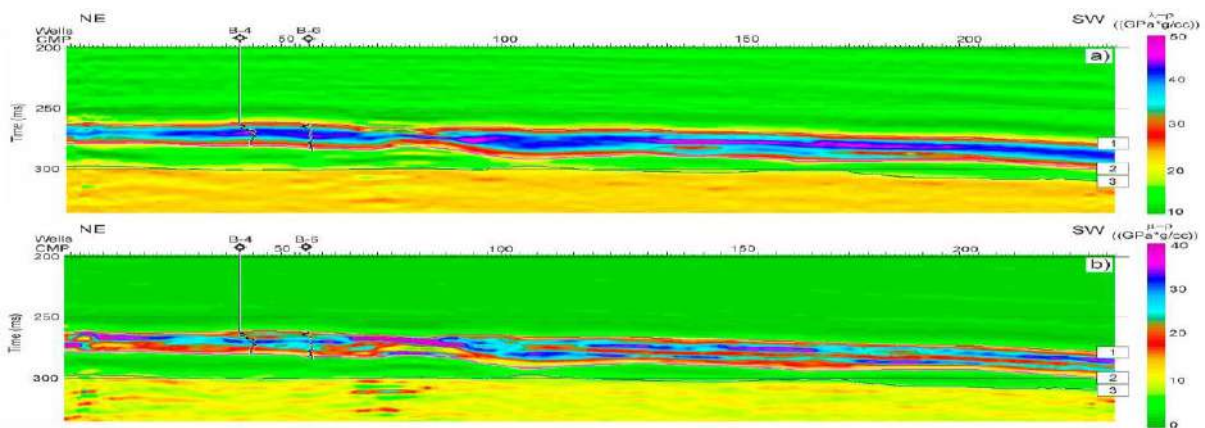


شکل (۹): داده های مقاومت صوتی برای موج P (بالا) و موج S (پایین)

با توجه به شکل ۹ محدوده سازند کربناته حاوی کانه گوگرد با مقادیر بالای مقاومت صوتی مشخص می شود. افق های ۱ و ۲ بالا و پایین این سازند کربناته و افق ۳ بالای سازند زیرین را نشان می دهد.

در بررسی رسوبات کربناته ضریب لامه^{۳۳} و مدول برشی^{۳۴} پارامترهای مهمی هستند زیرا این به تغییرات تخلخل و سنگ شناسی بسیار حساس هستند. ضریب لامه معیاری از تراکم ناپذیری و مدول برشی نیز معیاری از سختی سنگ است. بنابراین هرچه مقادیر این دو پارامتر بیشتر باشد یعنی تخلخل کمتر است. برای محاسبه این دو پارامتر از مقاومت های صوتی استفاده شده است. در شکل ۱۰ مقادیر به دست آمده برای این دو پارامتر نشان داده شده است.

^{۳۲} Pre-stack gathers
^{۳۳} Lamé constant
^{۳۴} shear modulus.

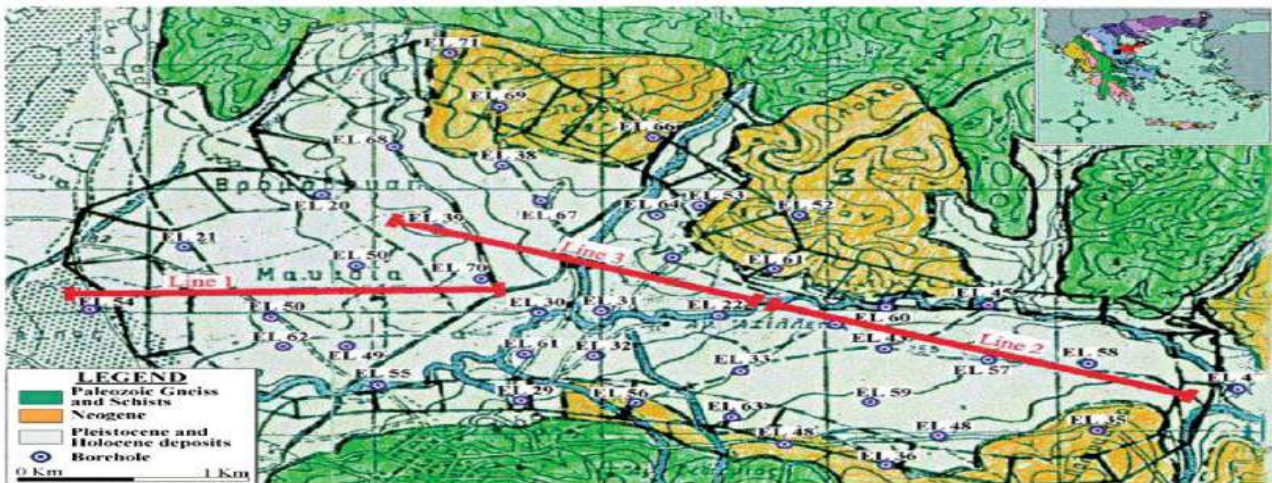


شکل (۱۰): مقادیر ضریب لامه (بالا) و مدول برشی (پایین)

مقادیر بالای ضریب لامه و مدول برشی نیز محدوده ی کربناته های گوگردار را به خوبی مشخص می کند. با توجه به نتایج بدست آمده در می یابیم که با استفاده از داده لرزه ای می توان رسوبات حاوی کانه گوگرد را با دقت بسیار خوبی شناسایی کرد [8].

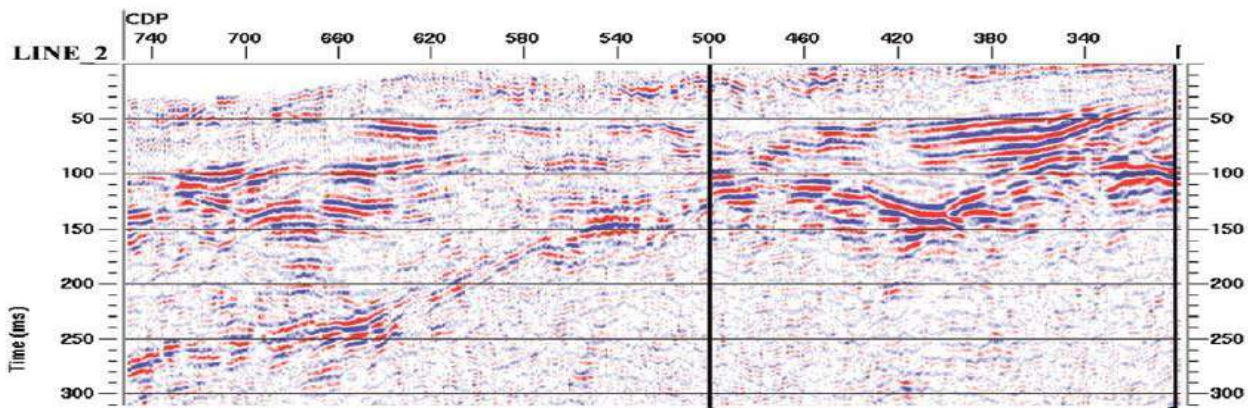
۴-۲. ارزیابی معدن زغالسنگ با استفاده از داده لرزه ای^{۳۰}

در این پژوهش از داده لرزه ای و داده چاه به منظور ارزیابی دقیق حوضه زغالسنگ Domenico در یونان استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از ترسیم ساختار زغالسنگ و پیدا کردن گسل هایی که روی رگه زغالسنگ تاثیر می گذارند. در شکل ۱۱ نقشه منطقه و محل خطوط داده برداری لرزه ای دو بعدی و چاه ها نشان داده شده است.



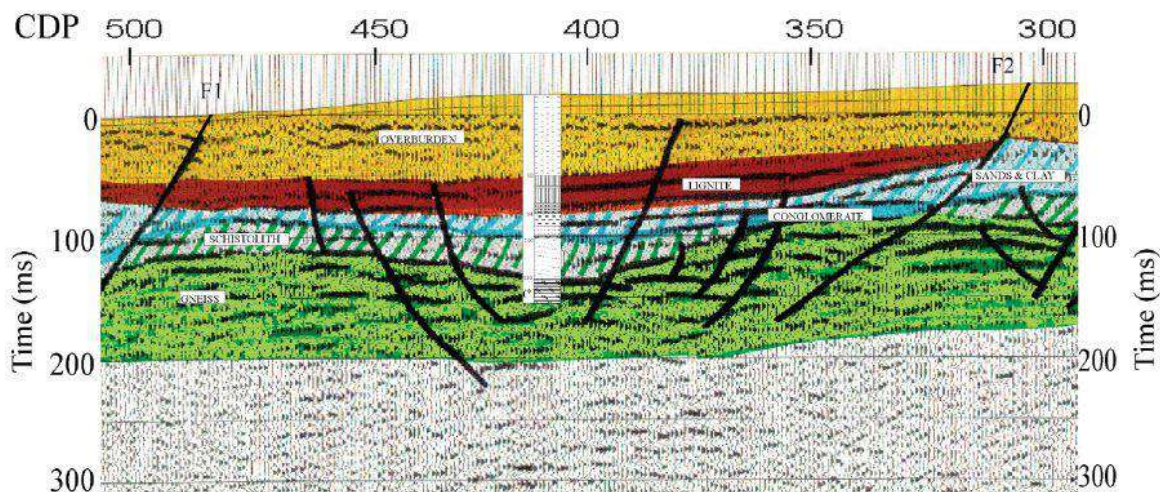
شکل (۱۱): نقشه زمین شناسی منطقه و محل خطوط داده برداری لرزه ای و چاه ها

در شکل ۱۲ مقطع لرزه ای خط برداشت ۲ نشان داده شده است که بر روی آن بازتاب های قوی و همدوس قابل مشاهده است.



شکل (۱۲): مقطع لرزه ای خط برداشت ۲

در شکل ۱۳ بخش سمت راست شکل ۱۲ که به کمک داده های چاه تفسیر شده است نشان داده شده.



شکل (۱۳): بخش سمت راست تفسیر شده شکل ۱۲

با توجه به شکل ۱۳ در می یابیم که بازتاب های قوی حاصل از زغالسنگ و گنیس^{۳۶} است که به کمک این بازتاب ها می توان گسترش زغالسنگ را در جاهایی که داده چاه وجود ندارد شناسایی کرد. پیوستگی بازتاب ها نیز توسط گسل هایی مختل شده است. با توجه به این نتایج در می یابیم که به کمک داده لرزه ای می توان لایه های زغالسنگ را به خوبی ارزیابی کرد [9].

۳. نتیجه گیری

در این پژوهش مواردی از کاربردهای روش های لرزه ای در اکتشافات معدنی بیان شد و در تمام موارد ذکر شده روش های لرزه ای نتایج دقیق و قابل قبولی ارائه کردند. در واقع روش های لرزه ای به دلیل عمق نفوذ زیاد و وضوح بالا ابزار بسیار مهمی است برای اکتشافات و ارزیابی های عمیق جایی که سایر روش های ژئوفیزیکی فاقد نفوذ یا وضوح مورد نیاز هستند.

^{۳۶} gneiss

۴. منابع و مأخذ

1. Elliot, Charles L. "Some applications of seismic refraction techniques in mining exploration." (1967).
2. Reid, A. B., L. G. Polome, and B. W. Greene. "Ultra-high resolution reflection seismics in chromite detection." In *49th Annual International Meeting. New Orleans: SEG*. 1979.
3. Kehrman, Robert F. *Development of a Shallow-penetration Acoustic Reflection Technique for Mining Geology*. The Systems, 1977.
4. Ruskey, F. "High-resolution seismic methods for hard rock mining: In Premining investigations for hardrock mines." In *Proc. US Bureau of Mines Technology Transfer Seminar Denver*, pp. 4-28. 1981.
5. Mair, J. A., and A. G. Green. "High-resolution seismic reflection profiles reveal fracture zones within a 'homogeneous' granite batholith." *Nature* 294, no. 5840 (1981): 439-442.
6. Hammer, Philip TC, Ron M. Clowes, and Kumar Ramachandran. "High-resolution seismic reflection imaging of a thin, diamondiferous kimberlite dyke." *Geophysics* 69, no. 5 (2004): 1143-1154.
7. Markovic, M., G. Maries, A. Malehmir, E. Bäckström, M. Schön, J. Jakobsson, and P. Marsden. "Deep targeting iron-oxide mineralization using reflection seismic method: a case study from the Ludvika mines of Sweden." In *2nd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers, 2018.
8. Cichostępski, Kamil, Jerzy Dec, and Anna Kwietniak. "Simultaneous inversion of shallow seismic data for imaging of sulfurized carbonates." *Minerals* 9, no. 4 (2019): 203.
9. Tselentis, G-Akis, and Paraskevas Paraskevopoulos. "Application of a high-resolution seismic investigation in a Greek coal mine." *Geophysics* 67, no. 1 (2002): 50-59.

مطالعات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی جهت شناسایی کانه‌زایی مس در محدوده‌های واقع در شهرستان گرماب، غرب نیشابور

میثم مقدسی^۱، آوا نادری^۲

^۱دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ Moghadasimeysam70@gmail.com

^۲کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشگاه تهران؛ Mnaderi1100@yahoo.com

* نویسنده مسئول: میثم مقدسی، آوا نادری

چکیده فارسی

محدوده اکتشافی در فاصله ۳۷ کیلومتری غرب نیشابور و ۵ کیلومتری شهر گرماب، از توابع شهرستان فیروزه استان خراسان رضوی واقع است. از دیدگاه پهنه‌بندی ایالات زمین‌ساختی ایران، این محدوده بخشی از زون ساختاری سبزوار و در بین بلوک لوت و زون بینالود است که در خلال نوژن متحمل ماگماتیسم ترشیری شده‌اند. وجود رخنمون‌هایی از کانی‌سازی مس در این محدوده سبب شده تا از دیدگاه اکتشافی دارای ارزش اقتصادی تشخیص داده شود. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان داد که رگه و رگچه‌های سیلیسی کربناته دارای کربنات‌های مس و کالکوسیت مهمترین سیمای کانی‌سازی در این محدوده هستند که عمدتاً در راستای گسل‌های منطقه مخصوصاً تقاطع گسل‌های فرعی و اصلی محدوده رخنمون دارند. ساخت و بافت این رگه‌ها عمدتاً برشی، لانه‌زنبوری و توده‌ای است که همگی شواهدی از نقش سیالات گرمایی در شکل‌گیری کانی‌زایی در این محدوده می‌باشد. سنگ میزبان در این محدوده شامل تراکی‌آندزیت و آندزیت‌های مگاپورفیری است که متحمل دگرسانی‌های کلریتی، سیلیسی و کربناتی شده‌اند. در این مطالعه به بررسی وضعیت مناطق مستعد کانی‌زایی با استفاده از روش ژئوفیزیکی مگنتومتري پرداخته شده است. جهت انجام مطالعات مگنتومتري، شبکه در نظر گرفته شده دارای ابعاد ۲۵*۵۰ می‌باشد و جهت برداشت نیز به صورت شمالی - جنوبی است که در تعداد ۳۳۸۵ نقطه مورد پایش زمینی قرار گرفته است. در بررسی‌های مغناطیسی محدوده، بی‌هنجاری مغناطیسی تفکیک شده است. مشخصات این بی‌هنجاری مغناطیسی شامل شکل، ابعاد، عمق، گسترش عمقی و مقدار خودپذیری مغناطیسی این توده‌ها مشخص شده است. همچنین خطواره‌ها بر پایه مطالعات مغناطیس‌سنجی نیز ترسیم شده است که نشان خطواره‌های اصلی در این گستره به لحاظ تکتونیکی ساختار پیچیده‌ای را برای محدوده به وجود آورده‌اند. با استناد به فیلتر ادامه فراسو و تخمین عمق اویلر عمق آنومالی در بیشتر نقاط کمتر از متر می‌باشد که نیاز به حفاری اکتشافی در این بخش مهم و کارآمد خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مگنتومتري، ژئوفیزیک، نیشابور، گرماب، مس، اپی‌ترمال

Geophysical studies by magnetic method to identify Copper mineralization in an area in the Garmab, west of Neishabur

Meysam Moghadasi¹, Ava Naderi²

¹Ph.D. Student, Faculty of Mining, Shahrood University of Technology;
Moghadasimeysam70@gmail.com

²MSc Petrology, Tehran University; Mnaderi1100@yahoo.com

* Corresponding author: Meysam Moghadasi, Ava Naderi

ABSTRACT

The exploration area is located at a distance of 37 km west of Neishabur and 5 km from Garmab city, one of the functions of Firuzeh city, Razavi Khorasan province. From the point of view of the zoning of the geo-structural states of Iran, this area is a part of the Sabzevar structural zone and between the Lut block and the Binalud zone, which underwent Tertiary magmatism during the Neogene. The presence of outcrops of copper mineralization in this area has caused it to be recognized as having economic value from an exploratory point of view. Geological investigations showed that carbonated silica veins and veins with copper carbonates and chalcocite are the most important mineralization features in this area, which mainly occur along the faults of the area, especially the intersection of the minor and main faults of the area. The structure and texture of these veins are mainly shear, honeycomb and mass, which are all evidences of the role of hydrothermal fluids in the formation of mineralization in this area. The host rock in this area includes trachy andesite and megaporphyry andesites that have undergone chlorite, siliceous and carbonate changes. In this study, the situation of areas prone to mineralization has been investigated using the magnetometric geophysical method. In order to carry out magnetometric studies, the considered network has dimensions of 25x50 and the direction of sampling is north-south, which has been monitored on the ground in 3385 points. In the magnetic surveys of the range, the magnetic anomaly is separated. The characteristics of this magnetic anomaly, including the shape, dimensions, depth, depth extension and the amount of magnetic self-reactivity of these masses have been determined. Also, the lineaments have been drawn based on magnetometric studies, which show that the main lineaments in this area have created a complex structure for the area in terms of tectonics. Based on Faraso's continuation filter and Euler's depth estimation, the anomaly depth is less than 40 meters in most places, which will require exploratory drilling in this important and efficient section

Keywords: Magnetometry, Geophysics, Nishabor, Garmab, Copper, Epi-Thermal

مقدمه

محدوده اکتشافی با مساحت تقریبی ۵.۵۳ کیلومترمربع در شمال غرب شهرستان گرماب، واقع است. این محدوده اکتشافی از نظر زمین-شناسی در ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد واقع شده است. راه دسترسی به این محدوده از طریق جاده قدیم نیشابور به سبزوار میسر می‌باشد. بدین منظور از نیشابور با طی مسافت ۴۰ کیلومتر ابتدا به روستای همت آباد و سپس گرماب می‌رسیم (شکل ۱). محدوده جهت اکتشاف کانسارهای غیر آهنی به عنوان هدف اصلی استفاده از روش ژئوفیزیکی مگنتومتري مورد پایش قرار گرفت، این روش به صورت معمول و استاندارد در دنیا جهت اکتشاف ساختاری در تیپ‌های پورفیری، برای شناسایی ساختارهای حلقوی زون‌های آرژیلیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد بعد از برداشت داده‌های مغناطیسی نقشه‌های اولیه تهیه و اصلاح و پردازش شدند و سپس برای مشخص شده وضعیت تغییرات و مقایسه آن با نتایج زمینی بخش‌های مهم منطقه مورد پیمایش صحرایی قرار گرفت و ارتباط آنومالی‌های ثبت شده با ساختارهای مرتبط با کانه‌زایی و ساختارهای غیر مرتبط تا حد ممکن بررسی گردید. در محدوده شواهد کانی‌زایی اپی‌ترمال را شاهد هستیم که سبب ایجاد بخش‌هایی با اختلاف میدان مغناطیسی کمتر از مقدار قابل پیش‌بینی است که به اصطلاح، سنگ‌ها خودپذیری مغناطیسی خود را تا حدی از دست داده‌اند. که این تغییرات در بخش‌های جنوبی و شمالی توده‌های مورد نظر به صورت ثانویه نیز مشاهده می‌شود که مربوط به کانی‌زایی مس می‌باشد. بطور کلی داده‌های مغناطیس‌سنجی اطلاعات مفیدی را از توزیع مغناطیس‌پذیری سنگ‌ها در پوسته زمین در مقیاس کوچک و بزرگ ارائه می‌دهد. الگوهای مغناطیسی ابزار مناسبی برای بررسی و مطالعه سنگ‌شناسی، مناطق دگرگونی و دگرسانی‌های هیدروترمال و همچنین تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی نظیر گسل‌ها، دایک‌ها، شکستگی‌ها که به کنترل عبور ماگما و سیالات هیدروترمال همراه با کانی‌سازی می‌باشد، است. در گذشته مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌است از:

مایو (۱۹۵۸) جزء اولین کسانی بود که رابطه بین خطواره‌ها و پتانسیل معدنی را بررسی کرد و قرارگیری ذخایر در محل تلاقی و بر روی خطواره‌ها را مورد بررسی قرار داد [1]. بر همین اساس محققان دیگری همچون اشمیت (۱۹۶۶)، هیل (۱۹۷۲)، جیلولی (۱۹۷۶ و ۱۹۷۷) و ریچارد (۲۰۰۰)، خطواره‌ها را به‌عنوان یک نشانه برای تعیین محل نهشته‌های معدنی معرفی کردند [2,3,4,5,6]. لاپونته و همکاران (۱۹۸۵)، با استفاده از مطالعه و تفسیر خودپذیری مغناطیسی واحدهای سنگی در منطقه آنتاریو کانادا، به روشی جدید در تعیین درجه میزان دگرسانی در واحدهای سنگی پرداختند [7]. ریچارد و همکاران (۲۰۰۱) و چرنیکوف و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های مختلف تصاویر ماهواره‌ای، مغناطیس‌سنجی هوابرد و نقشه‌های زمین‌شناسی به استخراج خطواره‌ها پرداخته و جایگاه و ارتباط ذخایر را با خطواره‌ها مشخص ساخته‌اند [8, 9]. در این مطالعه از روش مغناطیس‌سنجی به‌منظور شناسایی پدیده‌های ساختمانی و بررسی ارتباط منشأ کانی‌سازی با توده‌های نفوذی، نتیجه مطالعات بیانگر وجود تطابق خوب بین خطواره‌های گسلی شناسایی شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی و مسیرهای دسترسی به محدوده

روش تحقیق

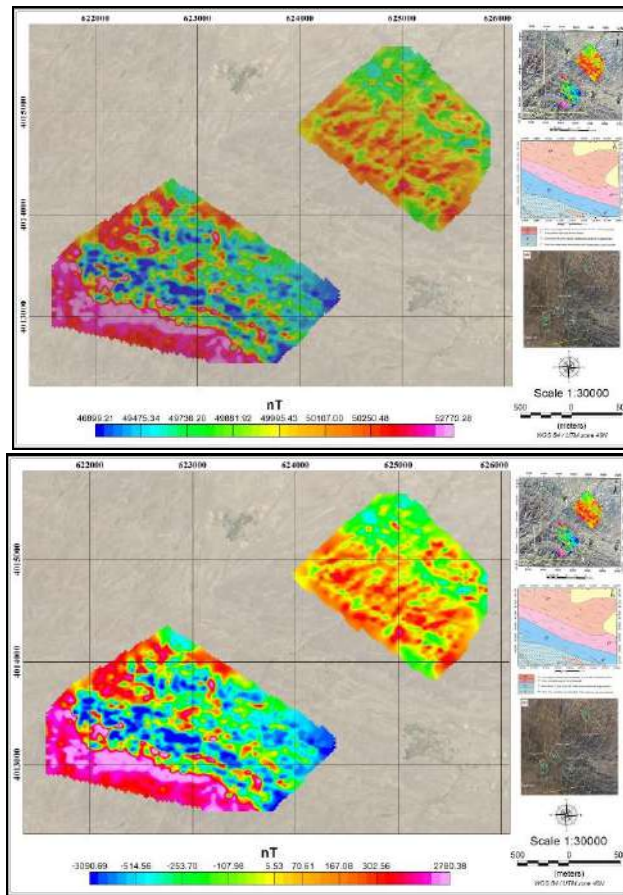
طراحی شبکه نقاط برداشت ژئوفیزیک منطقه، پس از بررسی داده‌های موجود و زمین‌شناسی و توپوگرافی انجام می‌گیرد. در طراحی برداشت باید پارامترهایی از جمله فواصل ایستگاههای برداشت، فاصله خطوط برداشت، امتداد خطوط برداشت، ارتفاع اندازه‌گیری، نوع دستگاه و غیره مشخص شوند. در این منطقه با توجه به بررسی داده‌های فوق در نهایت ۹۳ پروفیل شمالی - جنوبی با آزیموت صفر درجه، با فاصله خطوط ۵۰ متر و فاصله نقاط ۵۰ متر طراحی گردید. در شکل (۲) نیز خطوط منطبق بر تصویر ماهواره‌ای نشان داده شده است. بعد از طراحی شبکه برداشت داده‌ها، اندازه‌گیری میدان مغناطیسی با دستگاه مغناطیس سنج پروتون با دقت ۰/۱ نانوتسلا انجام گرفته است. ارتفاع سنسور مغناطیسی از سطح زمین ۲ متر می‌باشد. در این برداشت تلاش شده که فاصله نقاط برداشت به صورت میانگین ۲۵ متر باشد و در مجموع تعداد ۳۳۸۵ ایستگاه در منطقه برداشت شده است. برای کنترل کیفیت داده‌ها، قرائت‌های تکراری در نقاط برداشت انجام شده است. بعد از حصول اطمینان از صحت و تکرارپذیری قابل قبول اندازه‌گیری، مقدار اندازه‌گیری شده در دستگاه ثبت گردید. خطوط برداشت مغناطیس سنجی منطبق بر تصویر ماهواره‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲): خطوط برداشت مغناطیسی منطبق بر تصویر ماهواره ای محدوده در محدوده

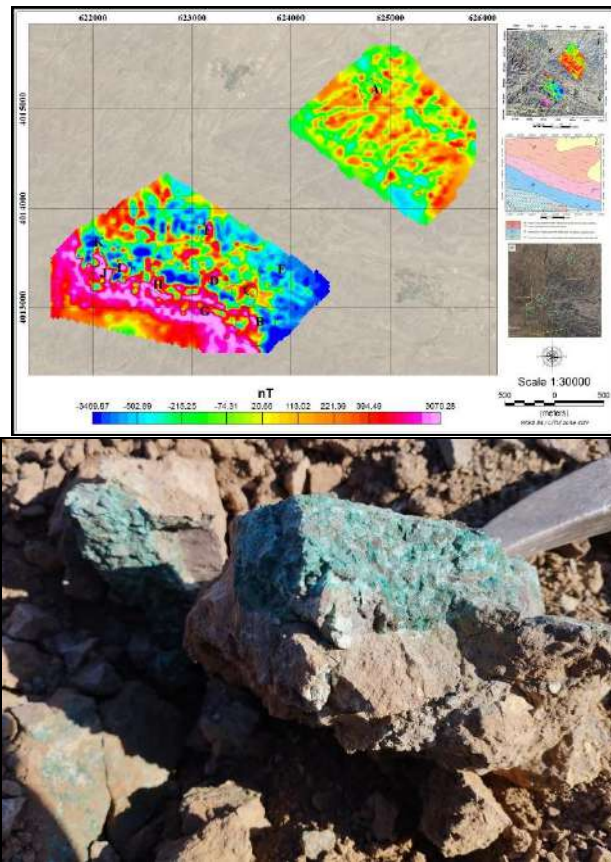
یافته‌ها و تفسیر نتایج

در بخش پردازش بعد از تصحیحات اولیه و حذف نقاط تکینه و همچنین اثرات خطی با استفاده از فیلتر ریز همتراسازی، نقشه بی-هنجاری مغناطیسی کل و نقشه بی-هنجاری مغناطیسی باقیمانده که در شکل (۳) نشان داده شده‌اند و به عنوان نقشه مبنا برای انجام تفسیر در مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۳): سمت راست نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی کل برای محدوده و سمت چپ نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی باقیمانده نهایی محدوده

طیف تغییرات میدان مغناطیسی در بازه ۵۲۷۷۰.۲۸ تا ۴۶۸۹۹.۲۱ نانوتسلا نشان داده شده است. همچنین زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی حدود ۵۵.۸۳ و ۴.۷۶ درجه می‌باشد و نقشه برگردان شده به قطب در شکل (۴) نشان داده شده است. شدت میدان مغناطیسی نسبت به نقشه بی‌هنجاری باقیمانده افزایش یافته و بی‌هنجاری‌ها شکل جدیدی پیدا کرده‌اند. به منظور مشخص شدن تغییرات میدان در هر کدام از مناطق انتخاب شده بعد از زمین‌شناسی چکشی محدوده از کل گرید جدا و به صورت جداگانه تفسیر شده است. در کل، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه برگردان به قطب نسبت به نقشه باقیمانده، جابجایی به سمت شمال نشان داده و تغییراتی را از نظر شکل و شدت میدان مغناطیسی داشته‌اند.

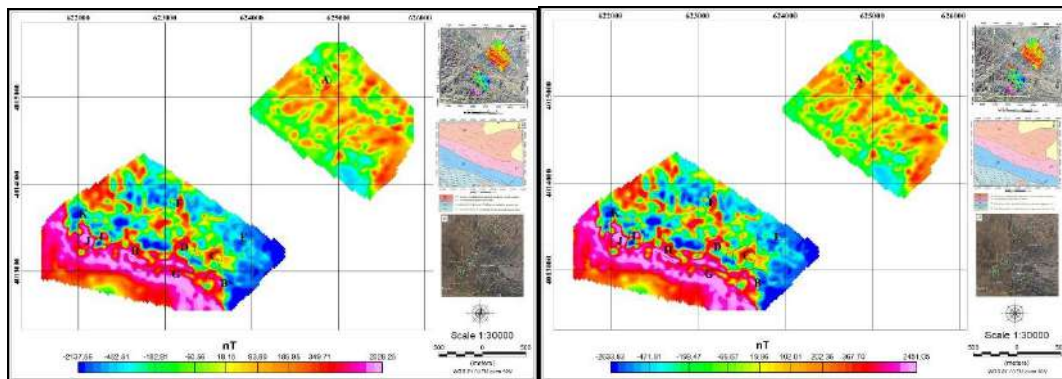


شکل (۴): سمت راست نقشه برگردان به قطب و تصویر سمت چپ از آغشتگی مالاکیته در سنگ‌های محدوده

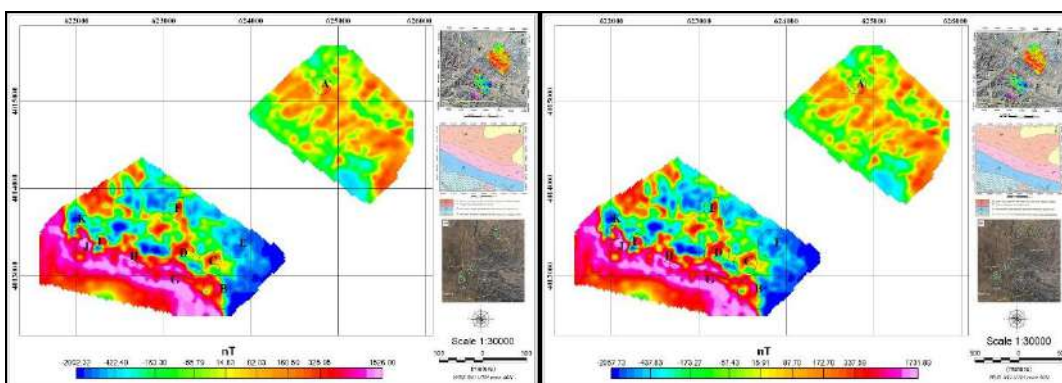
بررسی ساخت و بافت و پاراژنز رگه‌های حاوی کانی‌زایی مس، نشانگر شباهت کانی‌زایی در این محدوده به کانسارهای مس تیپ مانتو است که در منطقه نیشابور و سبزوار دارای گستردگی زیاد هستند. تغییرات در محدوده A در قسمت شمالی محدوده اکتشافی قرار دارد و در آن رگه‌های مالاکیته در چند نقطه دارای رخنمون است که به دلیل نبود ترانسه امکان ارزیابی دقیقی از گسترش عمقی آنها میسر نیست. در این نقطه آغشتگی با مالاکیته و آزوریت در امتداد گسل درون واحد آذرآوری ائوسن روی داده است. تغییرات ثبت شده در محدوده B در قسمت جنوبی محدوده اکتشافی قرار دارد. روند مشخص شده G و H در کنار تغییرات محدوده D و C با توجه به ساختارهای مشترک در بخش B و روندهای کانی‌زایی مشاهده شده در این قسمت و ادامه توده نفوذی که انشعابی از بخش‌های جنوبی منطقه است و می‌توانند از موارد مهم در امر اکتشاف باشند.

تغییرات ثبت شده در محدوده F، نشان می‌دهد که روند توده نفوذی باتوجه به نقشه‌های تهیه شده دارای جهت شمالی-جنوبی می‌باشد که تقریباً عمود بر ساختارهای جنوبی منطقه عمل کرده است. این اختلاف جهت به همراه روندهای ضعیف شرقی-غربی اهمیت این قسمت را دوچندان کرده است. عملکرد این بخش سبب تغییراتی در مغناطیس پذیری سنگهای اطراف خود شده است. تغییرات در محدوده E روند ضعیفی هم جهت با تغییرات ثبت شده در محدوده‌های D, C, B و G است. این روند تغییرات ضعیف بادر نظر گرفتن جهت گیری یکی از اولویت های اکتشافی محسوب می‌شود. تغییرات در محدوده I, K و J که در قسمت غربی قرار دارد، در آن چند رگه و رگچه سیلیسی و کربناته آغشته با مالاکیته رخنمون دارد که این روند نیز یکی از اولویت های اکتشافی محسوب می‌شود.

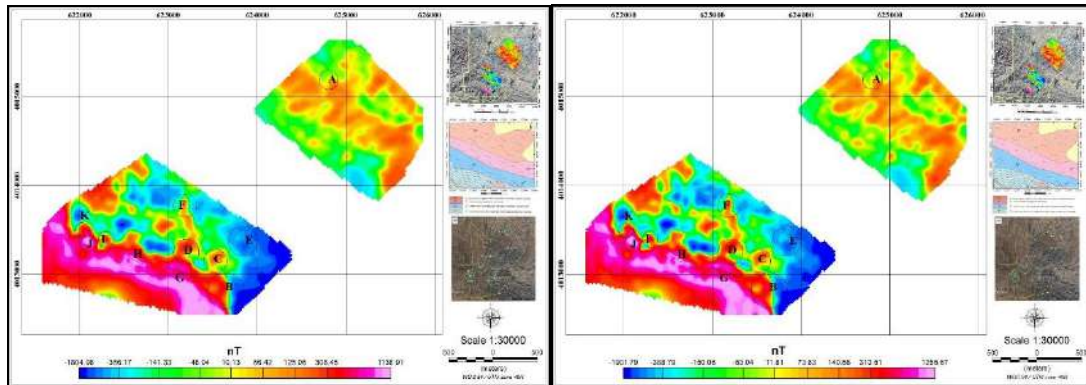
در روش تحلیلی فیلتر ادامه فراسو (شکل ۵)، داده‌های میدان پتانسیل از یک سطح مینا به روش ریاضی بر روی سطوحی دیگر در بالای سطح مینای اصلی محاسبه می‌شوند تا بدین ترتیب اثرات آنومالی‌های سطحی بر روی داده‌ها، کم رنگ‌تر گشته و اثرات آنومالی‌های عمیق‌تر تقویت گردند. و هرچه از سطح مینا دور شویم آنومالی‌های کوچک با طول موج کوتاه ضعیف شده و در نتیجه آنومالی‌های ناحیه-ای با طول موج بلند باقی می‌مانند. با استفاده از این فیلتر به راحتی می‌توان بی‌هنجاری ناشی از توده‌های بی‌هنجار نزدیک به سطح را از ساختارهای عمیق و بزرگ مقیاس منطقه‌ای جداسازی کرد. فقط نکته مهمی که در تفسیر نقشه‌های گزارش خود محدوده به چشم می‌خورد گفته شده است اثرات آنومالی مغناطیس با افزایش عمق بیشتر می‌شود که با مقایسه لجن‌د رنگی و ماهیت فیلتر ادامه فراسو با افزایش ارتفاع (شکل ۶) ما شاهد رسیدن به اثر ناحیه‌ای و ساختارهای عمیق زمین‌شناسی هستیم. در نقشه‌های ادامه فراسو به ارتفاع‌های ۵ متر تا ۳۰ متر (شکل ۷) برای محدوده نشان داده شده است. همانطور که در این نقشه‌ها دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع فیلتر ادامه فراسو، بی‌هنجاری‌های سطحی از بین رفته و بی‌هنجاری‌های عمیق بهتر نشان داده می‌شوند و در نقشه‌های ادامه فراسو ساختارهای سطحی و نوفه‌های سطحی نسبت به نقشه برگردان شده به قطب کاهش یافته است.



شکل ۵): نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۵ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۱۰ متر از نقشه برگردان شده به قطب

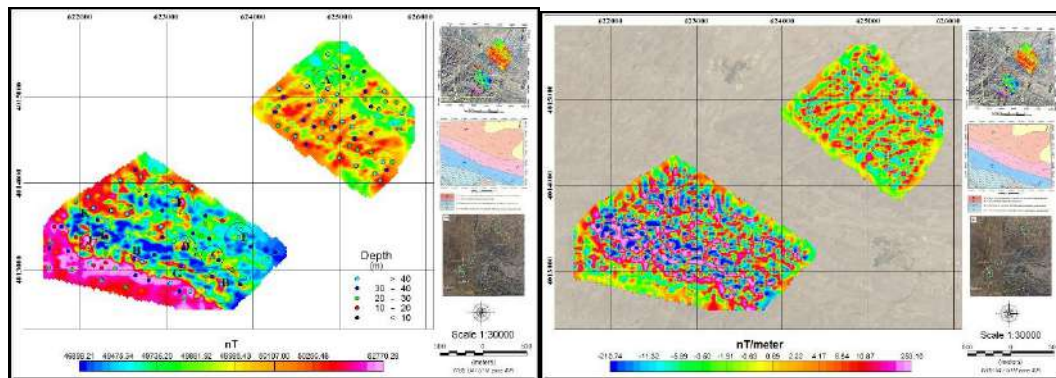


شکل ۶): نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۱۵ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰ متر از نقشه برگردان شده به قطب



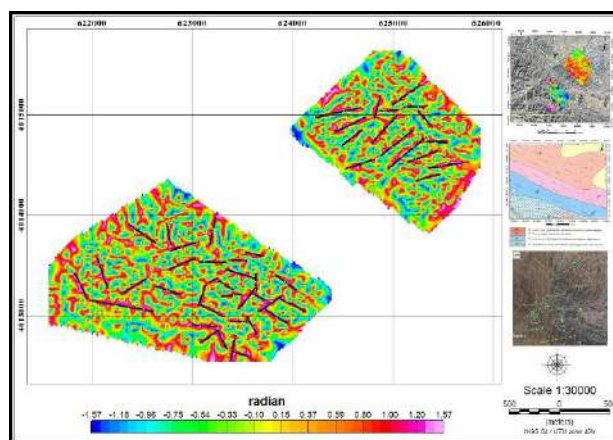
شکل (۷): نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۳۰ متر از نقشه برگردان شده و سمت چپ نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۴۰ متر از نقشه برگردان شده

فیلتر گرادبان قائم اثر بی‌هنجاری‌های عمیق با فرکانس کم را حذف می‌کند و تاثیر منابع کم‌عمق با فرکانس بالا را تقویت می‌کند. این آنومالی‌های علاوه بر اثرات سطحی اثرات عمقی بارزتر را دارند که در فیلتر ادامه فراسو این مورد کاملاً مشهود است. بعد از آماده سازی شبکه داده‌ها و مشتقات، برای برآورد عمق منشأ بی‌هنجاری‌ها، روش اویلر روی داده‌های برداشتی مغناطیس‌سنجی زمینی محدوده اعمال شد (شکل ۸). شاخص ساختاری برابر ۱، سایز سلول گرید ۳۰ متر، اندازه پنجره تجسس ۹ و بیشترین مسافت قابل قبول نصف فاصله مورد بررسی برای محدوده در نظر گرفته شده است. همچنین خطای تخمین عمق برای این محدوده ۰.۹٪ قرار داده شده است.



شکل (۸): نقشه مشتق قائم مرتبه اول از نقشه برگردان به قطب در محدوده سمت چپ نقشه تخمین عمق اویلر محدوده

ساختارهای مغناطیسی منطقه مورد مطالعه از روندهای معناداری پیروی میکند (شکل ۹). با توجه به وابستگی فیلتر زاویه کجی به مشتق‌ها، این فیلتر می‌تواند لبه‌های مربوط به بی‌هنجاری‌ها و گسل‌ها که باعث ایجاد خطوارگی می‌شود را به خوبی مشخص کند.



شکل (۹): نقشه خطواره های مغناطیسی

نتیجه گیری

از نقشه ادامه فراسو می توان استنباط کرد که بی هنجاری مس مشخص شده دارای عمق و ریشه کمتری است اما توده آندزیت بازالتی که در قسمت جنوب غربی محدوده قرار دارد دارای عمق بالایی می باشد که کانی زایی موجود در منطقه یا ناشی از این توده است یا ناشی از نسل دیگری از زمین شناسی محدوده می باشد. و همچنین استناد به مدل سازی های صورت گرفته، تغییرات ثبت شده در این منطقه دارای منشا بسیار عمیقی نمی باشد به طوری که در برخی از مناطق عمق بالای آنومالی کمتر از ۴۰ متر تخمین زده شده است ولی برای مشخص شدن خود آنومالی نیاز به حفر ترانشه و حفاری در برخی از نقاط دارای پتانسیل می باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت مالی شرکت صنایع ذوب و فولاد کانسار رهاور شرق گستر در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

- [1]. Mayo, E. B., 1958. Lineament tectonics and some ore districts of the southwest: Mining Engineering, v. 10, pp. 1169-1175.
- [2]. Schmitt, H.A., 1966. "The porphyry copper deposits in their regional setting: In Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America", U. of Ariz. Press, p. 17-33, by S. R. Titley and C. L. Hicks.
- [3]. Heyl, A.V., 1972. The 38th parallel lineament and its relationship to ore deposits, Economic Geology 67, pp. 879-894.
- [4]. Gilluly, J., 1976. "Lineaments--ineffective guides to ore deposits" Economic Geology 71, pp. 1507-1514.
- [5]. Gilluly, J., 1977. "Lineaments--ineffective guides to ore deposits-adiscussion", Economic Geology 72, p. 1360.
- [6]. Richards, J.P., 2000. "Lineaments revisited. Society of Economic Geologists", Newsletter 25 (5), pp. 52– 50.
- [7]. Lapointe, P., Morris, W. A., & Harding, K. L. 1986. Interpretation of magnetic susceptibility: a new approach to geophysical evaluation of the degree of rock alteration. Canadian Journal of Earth Sciences, 23(3), 393-401.
- [8]. Richards, J.P., Boyce, A.J., Pringle, M.S., 2001. Geological evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. Economic Geology 67, pp. 565–602.
- [9]. Chernicoff, C.J., Richards, J.P., Zappettini, E.O., 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. Ore Geology Reviews 55, pp. 556–522.

تخمین پلاریزاسیون القایی با استفاده از یادگیری ماشین: کاربرد در اکتشاف کانسارهای سولفیدی

زهرا ضیاءالدینی^۱، محمدرسول نیک بخش^۲، مریم میرحسینی^۳، امیرحسین نجفآبادی پور^۴

^۱ کارشناسی مهندسی برق، دانشگاه بیرجند؛ zhrziya.1999@gmail.com

^۲ دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات؛ nikbakhsh87.2@gmail.com

^۳ دکتری حرفه‌ای آنستزیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان؛ m.mirhosseini@kmu.ac.ir

^۴ دکتری مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ najafabadipour@eng.uk.ac.ir

*نویسنده مسئول: زهرا ضیاءالدینی

چکیده فارسی

اکتشاف معادن مس به دلیل اهمیت استراتژیک مس به عنوان یک فلز با اهمیت از جمله فرآیندهای حیاتی در صنعت معدن و فلزات است. در این راستا، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته و نوآورانه برای اکتشاف معادن مس مهم و ضروری است. یکی از راهکارهای مدرن و موثر در بهبود عملکرد اکتشاف، استفاده از روش‌های پلاریزاسیون القایی به همراه تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌باشد. در این مطالعه از دو روش توانمند شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی رگرسیون عمومی برای تخمین پلاریزاسیون القایی استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های مقاومت الکتریکی و پلاریزاسیون القایی هفت پروفیل در اطراف شهر مشهد استفاده شده است. نتایج گرافیکی و آماری مقایسه مدل‌ها، نشان از دقت بالای هر دو مدل توسعه یافته با مقدار ضریب همبستگی بالای ۰/۹۷ و خطای جذر میانگین مربعات کمتر از ۱/۳ دارد.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون القایی، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، شبکه عصبی رگرسیون عمومی، اکتشاف کانسارهای سولفیدی.

Determination of Induced Polarization using Machine Learning Methods: Exploration Application in Sulfide Deposits

Zahra Ziaadini¹, Mohammad Rasool Nikbakhsh², Maryam Mirhosseini³, Amirhossein Najafabadipour⁴

¹ Bachelor of Mining Engineering, University of Birjand/zhrziya.1999@gmail.com

² PhD in Geophysics, Islamic Azad University Science and Research Branch/nikbakhsh87.2@gmail.com

³ Medical Doctor in Anesthesiology, Kerman University of Medical Sciences/m.mirhosseini@kmu.ac.ir

⁴ PhD in Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman/najafabadipour@eng.uk.ac.ir

*Corresponding author: Zahra Ziaadini

ABSTRACT

The exploration of copper mines is one of the vital processes in the mining and metals industry due to the strategic importance of copper as a significant metal. In this regard, it is important and necessary to use advanced and innovative techniques for the exploration of copper mines. One of the modern

and effective ways to improve exploration performance is the use of induction polarization methods along with machine learning techniques. In this study, two powerful methods, Radial Basis Functions neural networks, and General Regression neural networks, have been used to estimate induced polarization. For this purpose, electrical resistivity and induced polarization data from seven profiles around the city of Mashhad have been used. The graphical and statistical results of the comparison of the models show the high accuracy of both models, with a correlation coefficient value above 0.97 and a root mean square error less than 1.3 for both developed models.

Keywords: Induced Polarization, Radial Basis Functions Neural Network, General Regression Neural Network, Sulfide Deposits Exploration.

مقدمه

اکتشاف و استخراج معادن فلزی، به ویژه مس، از جمله چالش‌های مهم در علم زمین‌شناسی و صنعت معدن محسوب می‌شود. با توجه به افزایش نیازهای جهانی به فلزات با اهمیت بالا، توسعه روش‌های نوین و دقیق برای اکتشاف مس ضروری است. یکی از روش‌های موثر و کارآمد در این زمینه، تحلیل پلاریزاسیون القایی است که به کمک تغییرات الکتریکی مواد زمینه به اثرات میدان‌های القایی می‌پردازد. اما با گسترش فناوری یادگیری ماشین، امکان بهینه‌سازی و دقت بیشتر در تحلیل‌های پلاریزاسیون القایی برای اکتشاف مس به دست آمده است. بهره‌گیری از این روش‌های نوین در تحلیل پلاریزاسیون القایی نه تنها می‌تواند به دقت و اعتبار بیشتر در اکتشاف مس منجر گردد، بلکه نیز امکان کاهش هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای فرآیند اکتشاف را بهبود بخشد. با توجه به پیچیدگی و تغییرات گسترده در خصوصیات الکتریکی مواد زمینه، استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به تحلیل بهتر و دقیق‌تر داده‌ها و افزایش کارایی در اکتشاف معادن مس منجر گردد. شبکه‌های عصبی با ساختارهای متفاوت از جمله ابزارهای یادگیری ماشین برای حل مسائل رگرسیون می‌باشند.

[۱] کاربرد یادگیری ماشین در پردازش داده‌های ژئوفیزیکی را بررسی کردند. نتایج نشان از کاهش زمان پردازش داده‌ها و همچنین افزایش دقت شبکه به ۹۰٪ داشت. علاوه بر آن رویکرد پردازش خودکار، زمان پردازش را به شدت کاهش داده و سازگاری با داده‌های ژئوفیزیکی را افزایش داده است. [۲] از روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رسانایی الکتریکی سنگ‌های اشباع از آب شور استفاده کردند. روش گرادیان تقویت شده نسبت به پرسپترون چند لایه قوی‌تر و سریع‌تر بوده و با پارامترهای بهینه، ضریب همبستگی بالای ۰/۹۶ را برای مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی دارد. [۳] از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی چاه‌های نفت استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های جنگل تصادفی و درخت تصمیم می‌توانند با دقت بالا مقاومت الکتریکی را پیش‌بینی کنند. مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل درخت تصمیم دقت بیشتری داشته و به عنوان جایگزین کم‌هزینه برای تخمین مقاومت چاه در چاه‌های نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۴] با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین مقاومت الکتریکی در حین حفاری چاه‌های نفت را با دقت بالا پیش‌بینی کردند. نتایج نشان از دقت بالای روش‌های یادگیری ماشین نسبت به روش‌های سنتی داشت.

هدف در این مطالعه تخمین پلاریزاسیون القایی با استفاده از روش‌های توانمند شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی رگرسیون عمومی می‌باشد. در این مطالعه از داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت الکتریکی هفت پروفیل ژئوالکتریک استفاده شده است. به منظور مقایسه دو مدل یادگیری ماشین از مقایسه گرافیکی و آماری استفاده شده است. در ادامه در بخش روش‌ها شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی رگرسیون عمومی معرفی می‌شوند. در بخش یافته‌ها و تفسیر نتایج از نظر گرافیکی و آماری دو روش مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه می‌شوند و در بخش آخر هم نتیجه‌گیری مطالعه ارائه شده است.

روش‌های تحقیق

زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در اطراف شهر مشهد قرار گرفته است که یکی از شهرهای مهم ایران و مرکز استان خراسان رضوی است. شهر مشهد از دیدگاه ساختار زمینی و جغرافیایی حاشیه جنوبی دشت خراسان واقع شده است. سنگ‌های مربوط به دوران‌های زمین‌شناسی مختلف در این منطقه وجود دارد که شامل سنگ‌های رسوبی، آذرین، و متاباروفیک است. علاوه بر آن، در برخی از مناطق ممکن است سنگ‌های آذرین نظیر گرانیت یا آندزیت نیز یافت شود. در اطراف مشهد، منابع آب زیرزمینی و رودخانه‌ها وجود دارند که نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و شهری دارند. همچنین، معادن مختلف این منطقه منجر به منابع اقتصادی مهمی در این محدوده شده است. در اطراف شهر مشهد مناطق متنوع معدنی ایران قرار دارند که دارای معادن مس مهمی است، به عنوان نمونه معدن مس آذرشهر که ذخایر قابل توجهی از مس، مولیبدن، طلا و نقره دارد. این معادن، علاوه بر ارتقاء اقتصاد منطقه از طریق ایجاد فرصت‌های شغلی، نقش بسزایی در تأمین مواد اولیه برای صنایع مختلف از جمله صنایع فلزی، الکترونیک و ساخت و ساز ایفا می‌کنند. تصویر ماهواره‌ای گوگل محدوده مورد مطالعه به همراه نقاط برداشت پروفیل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): تصویر ماهواره‌ای گوگل محدوده مورد مطالعه به همراه محل پروفیل‌های برداشت شده.

شبکه عصبی رگرسیون عمومی

شبکه عصبی رگرسیون عمومی برای مسائل رگرسیون با ارتباطات پیچیده و غیرخطی مناسب است [۵]. این شبکه با اختصاص یک نورون به هر داده آموزشی و استفاده از حافظه محلی برای هر نمونه، به خوبی در مدل‌سازی ارتباطات پیچیده و ساختار داده‌های پیچیده عمل می‌کند. به دلیل ساختار ساده و کارایی در تقریب توابع پیچیده و همچنین امکان آموزش سریع مناسب برای مسائل رگرسیون است. مدل شبکه عصبی رگرسیون عمومی برای هر نمونه آموزشی \vec{x} ، اطلاعات لایه حافظه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_i = \exp\left(\frac{\|X - X_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

که G_i : میانگین وزن‌دهی شده برای نمونه i است، X : ورودی مدل (داده جدید) است، X_i : ورودی نمونه i از داده‌های آموزشی و σ : پارامتر پهنای تابع گاوسی (تابع هسته) است. خروجی شبکه عصبی رگرسیون عمومی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (2)$$

که \hat{Y} : خروجی مدل برای ورودی X است، Y_i : خروجی مربوط به نمونه i است و N : تعداد نمونه‌های آموزشی است. در این معادلات، توابع گاوسی بر اساس فاصله اقلیدسی میان ورودی و نمونه‌های آموزشی وزن‌دهی می‌شوند. این وزن‌دهی شده توسط لایه وزن‌دهی انجام می‌شود و سپس میانگین وزن‌دهی شده از خروجی نورون‌های حافظه به عنوان خروجی مدل محاسبه می‌گردد.

شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی

شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی یک نوع شبکه عصبی مصنوعی است که از تابع پایه شعاعی به عنوان تابع فعال‌سازی در لایه‌های مخفی استفاده می‌کند [۶]. این شبکه‌ها عمدتاً برای مسائل تقریب تابع، دسته‌بندی، یادگیری الگو، و تقریب سریع داده‌ها به کار می‌روند. الگوهای داده‌ها با استفاده از تابع پایه شعاعی مدل می‌شوند. شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی به طور کلی با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\hat{f}(X) = \sum_{i=0}^K \omega_i \varphi(\|X - C_i\|, \sigma_i) \quad (3)$$

در اینجا، $\hat{f}(X)$: خروجی مدل برای ورودی X است، K : تعداد تابع پایه شعاعی در مدل است، ω_i : وزن مربوط به هر تابع پایه شعاعی است، $\varphi(\|X - C_i\|, \sigma_i)$: تابع پایه شعاعی است که معمولاً از تابع گاوسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi(r, \sigma) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

که r : فاصله اقلیدسی بین ورودی X و نقطه مرکزی C_i است، σ_i : پارامتر پهنای تابع گاوسی مرتبط با هر تابع پایه شعاعی است. در رابطه (۴)، مقدار φ بر اساس فاصله اقلیدسی به صورت یک تابع گاوسی از نمونه‌های مرکزی C_i به نمونه‌های ورودی محاسبه می‌شود. وزن‌ها ω_i با استفاده از روش‌های یادگیری مانند الگوریتم‌های گرادینانی تنظیم می‌شوند تا مدل بهترین تقریب را از داده‌های آموزش ارائه دهد.

خطای جذر میانگین مربعات

خطای جذر میانگین مربعات از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در مسائل پیش‌بینی و رگرسیون هستند [۷]. این معیارها برای اندازه‌گیری فاصله بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی در داده‌های آزمون یا اعتبارسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً هر چقدر که مقدار این متغیر آماری کمتر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری دارد. خطای جذر میانگین مربعات از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (5)$$

در اینجا، n تعداد نمونه‌ها یا مشاهدات است، Y_i : مقدار واقعی متغیر وابسته برای نمونه i است، \hat{Y}_i : مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل برای نمونه i است. خطای جذر میانگین مربعات از اهمیت خطاها بر اساس مقدار واقعی آنها استفاده می‌کند و خطاهای بزرگتر باعث افزایش وزن در معیار می‌شوند. این خاصیت آن را به عنوان یک معیار حساس به خطا و مفید در مواردی که اهمیت نمونه‌هایی با مقادیر بزرگتر بیشتر است، می‌کند.

ضریب همبستگی

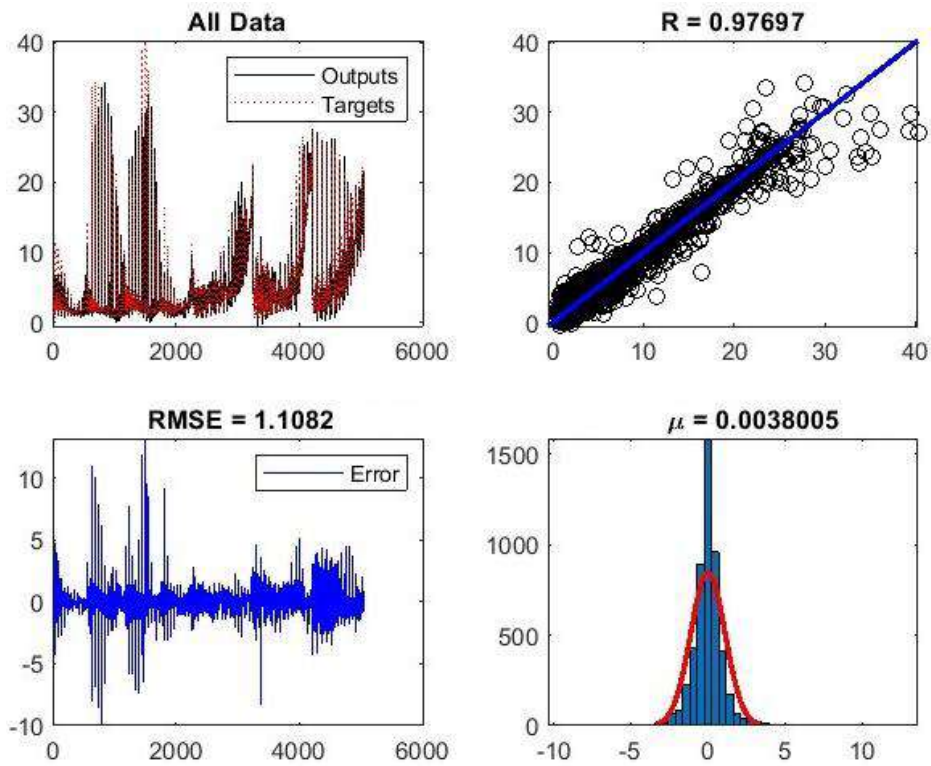
ضریب همبستگی یک معیار آماری است که میزان ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند [۸]. رابطه محاسبه ضریب همبستگی بین دو متغیر X و Y به صورت زیر است:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

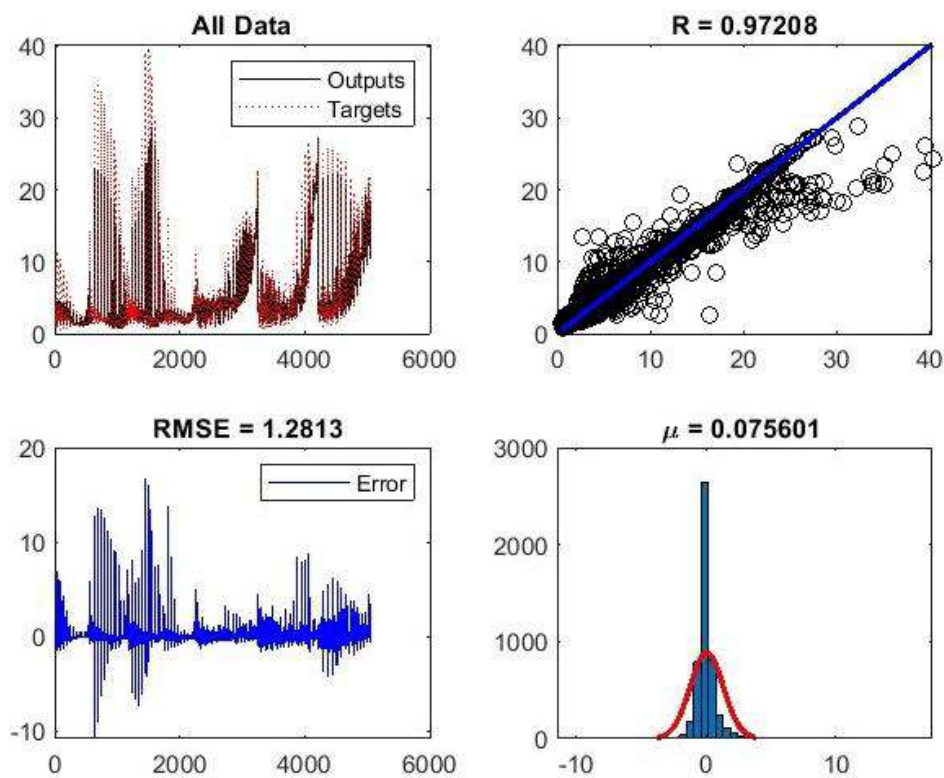
که R نشان‌دهنده ضریب همبستگی است، n : تعداد نقاط داده است، X_i و Y_i مقادیر متغیرهای X و Y برای نقطه i از داده‌ها هستند، \bar{X} و \bar{Y} نشان‌دهنده میانگین مقادیر X و Y هستند. مقدار ضریب همبستگی به ازای r بین -1 و 1 خواهد بود، که مقدار صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی است. اگر r به سمت 1 حرکت کند، این نشان‌دهنده یک همبستگی مثبت و قوی‌تر است، در حالی که اگر به سمت -1 حرکت کند، این نشان‌دهنده یک همبستگی منفی و قوی‌تر است.

یافته‌ها

به منظور تخمین میزان پلاریزاسیون القایی از داده‌های مختصات UTM پروفیل‌ها، عمق، جابه‌جایی در راستای پروفیل‌ها و مقاومت ویژه الکتریکی به عنوان ورودی و مقدار پلاریزاسیون القایی به عنوان خروجی روش‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. در شکل ۲ پارامترهای آماری تخمین پلاریزاسیون القایی با استفاده از روش شبکه عصبی تابع پایه شعاعی نشان داده شده است. توزیع داده‌های تخمین زده شده در نزدیکی خط $Y=X$ ، مقدار ضریب همبستگی (R) بالاتر از 0.97 ، مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) حدود $1/1$ ، مقدار میانگین خطا (μ) حدود 0.03 می‌باشد که تمامی این پارامترهای آماری نشان از دقت بالای مدل شبکه عصبی تابع پایه شعاعی دارد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، توزیع داده‌های مدل شبکه عصبی رگرسیون عمومی نیز در نزدیکی خط $Y=X$ می‌باشد. علاوه بر آن مقدار ضریب همبستگی بالاتر از 0.97 ، مقدار خطای جذر میانگین مربعات حدود $1/28$ ، مقدار میانگین خطا 0.07 می‌باشد که نشان از دقت بالای مدل شبکه عصبی رگرسیون عمومی نیز دارد.



شکل (۲): نتایج آماری تخمین پارامترهای القایی با استفاده از روش شبکه عصبی تابع پایه شعاعی.



شکل (۳): نتایج آماری تخمین پلاریزاسیون القایی با استفاده از روش شبکه عصبی رگرسیون عمومی.

تفسیر نتایج

در شکل‌های ۲ و ۳ بالا سمت چپ مقدار داده واقعی به همراه داده تخمین زده شده با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین مشاهده می‌شود. علاوه بر آن در شکل‌های ۲ و ۳ بالا سمت راست برای انجام یک ارزیابی دقیق‌تر از دقت و عملکرد مدل‌ها، نمودار متقاطع برای داده‌های واقعی و تخمین زده شده را برای هر داده نشان می‌دهد. این تجزیه و تحلیل شامل نمایش داده‌های واقعی در برابر داده‌های تخمین زده شده مدل توسعه یافته در امتداد خط $Y=X$ (خط ۴۵ درجه) است که مبدا نمودار را قطع می‌کند. دقت مدل با میزان همسویی روند با خط واحد شیب اندازه‌گیری می‌شود. در شکل‌های ۲ و ۳ پایین سمت چپ، نمودار توزیع خطا را برای هر داده بر اساس داده‌های واقعی و خطا (اختلاف بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده) از مدل‌های یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. تمرکز داده‌ها نزدیک به خط صفر خطا در نمودار نشان دهنده حداقل انحراف و دقت بالا در این مدل‌ها است. در نمودار توزیع خطا، به طور کلی، گسترش گسترده‌تر داده‌ها که از خط صفر خطا منحرف می‌شوند، دقت مدل کمتری را نشان می‌دهند، در حالی که توزیع متمرکزتر در اطراف این خط نشان دهنده دقت بالاتر است. در موارد عدم دقت مدل قابل توجه، داده‌ها عمدتاً در بالای یا زیر خط صفر خطا قرار می‌گیرند که به ترتیب نشان دهنده بیش برآزش یا کم برآزش است. در شکل‌های ۲ و ۳ پایین سمت راست، مقدار و فراوانی خطا رسم شده است که هر چقدر مقدار میانگین نزدیک به صفر باشد نشان از دقت بالاتر مدل دارد.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در تخمین پلاریزاسیون القایی برای اکتشاف کانسارهای سولفیدی ارتقاء قابل توجهی در دقت و بهره‌وری فرآیند اکتشاف به همراه دارد. این روش‌ها، به واسطه توانایی آن‌ها در مدل‌سازی الگوهای پیچیده داده‌های پلاریزاسیون القایی و تعامل با متغیرهای زمین‌شناسی زیرسطحی، اطلاعات دقیقی را از ساختارهای زیرزمینی معادن مس استخراج می‌کنند. از طرفی، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، امکان بهبود مدل‌های پیش‌بینی را فراهم می‌سازند و به تصحیح دقیق‌تر مقادیر پلاریزاسیون القایی می‌پردازند. این امر به عنوان یک ابزار مؤثر در بهینه‌سازی فرآیند اکتشاف، موجب افزایش اعتماد به داده‌ها و کاهش هزینه و زمان مورد نیاز برای اکتشاف معادن مس می‌شود. به طور کلی، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی پلاریزاسیون القایی برای اکتشاف معادن مس، نه تنها به بهبود دقت در تصویربرداری زیرسطحی کمک می‌کند بلکه در بهره‌وری و افزایش کارایی فرآیند اکتشاف نقش بسزایی ایفا می‌کند.

مراجع

- [۱] Barfod, A.S., L. Lévy, and J.J. Larsen, *Automatic processing of time domain induced polarization data using supervised artificial neural networks*. Geophysical Journal International, 2021. **224**(1): p. 312-325.
- [۲] Nguyen-Sy, T., et al., *Predicting the electrical conductivity of brine-saturated rocks using machine learning methods*. Journal of Applied Geophysics, 2021. **184**: p. 104238.
- [۳] Al-Fakih, A., et al., *Estimating electrical resistivity from logging data for oil wells using machine learning*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2023. **13**(6): p. 1453-1461.
- [۴] Xu, Y., et al., *Borehole resistivity measurement modeling using machine-learning techniques*. Petrophysics, 2018. **59**(06): p. 778-785.
- [۵] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, *Application of Artificial Intelligence Techniques for the Determination of Groundwater Level Using Spatio-Temporal Parameters*. ACS Omega, 2022. **7**(12): p. 10751-10764.
- [۶] Broomhead, D.S. and D. Lowe, *Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks*. Royal Signals and Radar Establishment Malvern (United Kingdom). No. RSRE-MEMO-4148, 1988: p.

1-34.

- [۷] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, *The Innovative Combination of Time Series Analysis Methods for the Forecasting of Groundwater Fluctuations*. Water Resources, 2022. **49**(2): p. 283-291.
- [۸] Najafabadipour, A., G. Kamali, and H. Nezamabadi-pour, Numerical modeling, groundwater management, and evaluation of optimal water pumping rate in Gohar Zamin Iron Ore Mine (Sirjan-Iran). Hydrogeology, 2023. 8(1): p. 17-33.

بررسی روش‌های تخمین مرز آنومالی‌های مغناطیسی در توده سنگ‌آهن شماره ۶ گل‌گهر

عبدالله عزام احمدی^۱، عبدالحمید انصاری^{۲*} و سید حسین مجتهدزاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه یزد؛ abd.ezam@gmail.com

^۲ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد؛ h.ansari@yazd.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، hmojtahed@yazd.ac.ir
* نویسنده مسئول: عبدالحمید انصاری

چکیده فارسی

آنومالی شماره ۶ منطقه معدنی گل‌گهر در ۵۰ کیلومتری شهر سیرجان واقع شده است. برداشت‌های مغناطیسی در این محدوده با شبکه منظم ۲۰*۵۰ متر در محدوده‌ایی به مساحت ۴.۲ کیلومترمربع برداشت شده است. تغییرات شدت میدان مغناطیسی در این محدوده پس از حذف مقدار IGRF، حدود ۴۰۰۰ نانوتسلا است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌های مغناطیسی و نیز بر اساس نتایج حاصل از ۳۳ حلقه گمانه اکتشافی مغزه‌گیری توده مگنتیتی بسیار بزرگی از عمق حدود ۴۷۰ متری سطح زمین وجود دارد که تا عمق حدودی ۸۰۰ متر ادامه دارد. با هدف تخمین مرزهای آنومالی‌های احتمالی در این مطالعه از روش‌های سیگنال تحلیلی، گرادیان قائم و زاویه تیلت استفاده شده است. با بررسی هر یک از این روش‌ها و با توجه به نتایج حفاری‌های مغزه‌گیری موجود در این محدوده مشخص شد که روش زاویه تیلت مرز توده‌های آنومالی احتمالی را نسبت به روش‌های گرادیان قائم و روش سیگنال تحلیلی بهتر تخمین زده است.

واژه‌های کلیدی: تخمین مرز آنومالی‌ها، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، گرادیان قائم، توده شماره ۶ گل‌گهر

Investigating the methods of estimating the boundary of possible anomalies in the anomaly of 6 mining areas of Golgohar

Abdullah Ezam Ahmady¹, Abdul Hamid Ansari², Sayed Hossen Mojtahedzadeh³

¹ PhD student of mining exploration at Yazd University; abd.ezam@gmail.com

² Member of the Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University; h.ansari@yazd.ac.ir

³ Member of the Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University; hmojtahed@yazd.ac.ir

* Corresponding author: Abdul Hamid Ansari

ABSTRACT

The Anomaly No. 6 of Golgohar mining area is located 50 km from Sirjan city. Magnetic measurements in this area are about 7250 points with a regular grid of 20 x 50 meters in an area of about 4.2 square kilometers, and the variations in the residual magnetic field intensity in this area is about 4000 nanotesla. Analytical signal, vertical gradient and tilt angle methods have been used to estimate the boundaries of possible anomalies in this area. By investigation each of these methods, considering the existing drilling points in this area, it was determined that the best method for estimating the boundary of possible anomalous masses is the tilt angle method, because out of the total of 29 excavated points in this area, 20 of them hit the border of possible anomalous masses. While it has decreased to 14 points in the vertical gradient method and to 7 points in the analytical signal method; Therefore, the best method for estimating the boundary of possible anomalies is the tilt angle filter method.

Keywords: Boundary estimation of possible anomalies, analytical signal, tilt angle and vertical gradient.

مقدمه

ژئوفیزیک یکی از روش‌های کشف پدیده‌های فیزیکی زمین می‌باشد. این پدیده‌های فیزیکی در عمق‌های مختلفی قرار گرفته اند که برای بدست آوردن موقعیت دقیق آنومالی‌های ناشی از این پدیده‌های ژئوفیزیکی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این زمینه می‌توان به روش‌های سیگنال تحلیلی، مشتق زاویه تیلت، مشتقات جهتی و قایم اشاره کرد. تا به حال مطالعات زیادی در این مورد صورت گرفته که به طور نمونه به چند مورد از این تحقیق‌ها یادآوری اشاره می‌شود. هسو و همکاران در سال (۱۹۹۶) با استفاده از خطوط کلی مرزهای زمین شناسی با ردیابی حداکثر دامنه یک سیگنال تحلیلی تقویت شده متشکل از مقادیر مشتق عمودی مرتبه n دو شیب افقی و یک گرادیان عمودی بدست آورده است. فیدی و فلورینو (۲۰۰۱) توسط روش مشتق افقی افزایش یافته توانسته مرزهای منابع مغناطیسی و گرانشی را تعیین کند. این روش با گرفتن مشتق افقی از مجموع مشتقات عمودی با ترتیب افزایشی بدست می‌آید. لای، ل و همکاران در سال (۲۰۱۴) برای به دست آوردن همزمان وسعت و عمق افقی ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی، از فیلترهای تشخیص مرز نرمال شده استفاده کرده که عملکرد تشخیص لبه را در اعماق مختلف و حداکثرهایی که با محل منبع مطابقت دارد، بررسی کرده است. پیریز آگویر و همکاران (۲۰۲۱) با نقشه‌برداری دقیق، برش‌های زمین‌شناسی و یک بررسی ژئوفیزیکی را با استفاده از داده‌های مغناطیسی و گرانشی برای مدل‌سازی مرز مدفون بین بلوک‌های پوسته انجام داده است. تجزیه و تحلیل کیفی ناهنجاری‌های مغناطیسی و گرانشی به منظور تعیین مرز پوسته توسط روش طیف توان و Gym-Sys انجام شده و در نتیجه یک خطواره ساختاری منطقه‌ای به نام گسل Las Norias بدست آمده است. حسینی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش سیگنال تحلیلی و مشتقات آن روی داده‌های مغناطیسی و گرانی در منطقه‌ی شرقی جزیره قشم توانسته پنج ناهنجاری را در این منطقه بدست بیاورد و مرزهای بین آنها را از هم جدا کنند.

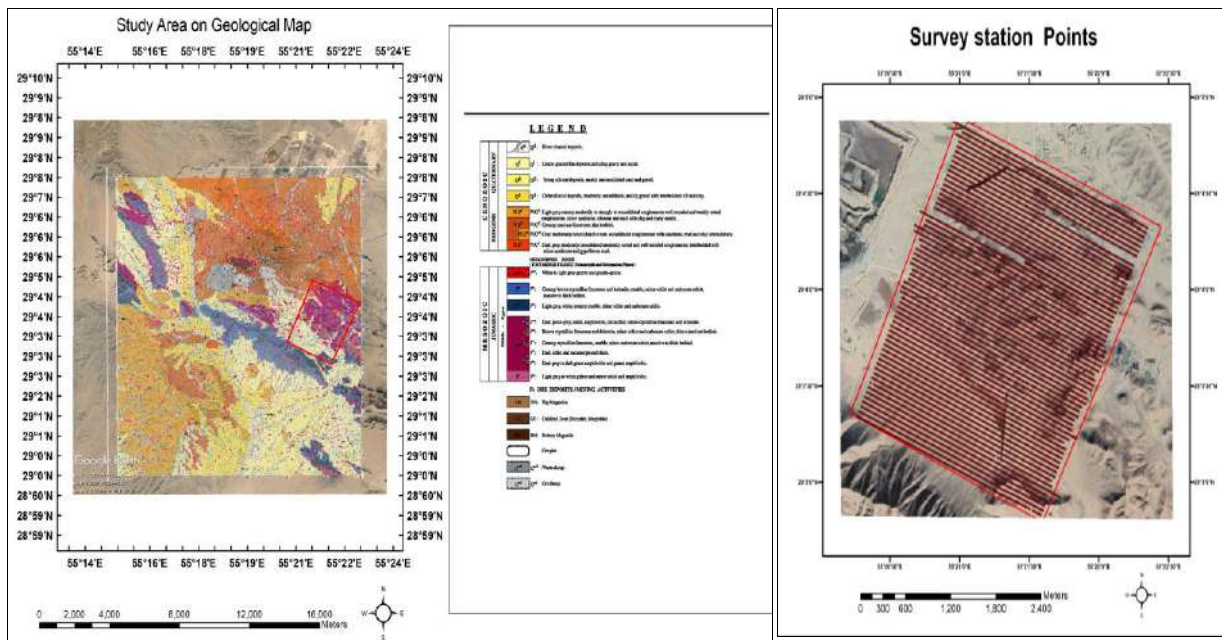
در این تحقیق تلاش شده با استفاده از روش سیگنال تحلیلی، مشتق قائم و فیلتر زاویه تیلت مرز توده سبب شونده آنومالی شماره ۶ گل‌گهر مشخص شود و با توجه به وجود نتایج حفاری‌های مغزه‌گیری بر روی این آنومالی، کارایی روش‌های مذکور در تخمین مرز آنومالی‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

روش تحقیق

روش‌های استفاده شده در این تحقیق روش سیگنال تحلیلی، مشتق قائم و فیلتر زاویه تیلت است. سیگنال تحلیلی ترکیبی از مشتقات افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل تعریف می‌شود. مشتق افقی میدان، اثر مغناطیسی توده‌ها به صورت ورقه‌های هم ضخامت که توده را در بر گرفته اند به کمک یک تبدیل ساده در حوضه فرکانس تبدیل کرده و یک تابع تحلیلی ارائه می‌شود که مولفه حقیقی آن مشتق افقی و مولفه مجازی آن مشتق عمودی میدان است. مولفه مجازی را می‌توان تبدیل هیلبرت مولفه حقیقی در نظر گرفت. این روش یک روش ساده و سریع برای محاسبه مشتق عمودی از یک پروفیل را ارائه می‌کند. به‌منظور حذف تأثیرات ناحیه‌ای و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از مشتق قائم درجه اول استفاده می‌گردد. به این دلیل که مشتق قائم درجه اول مقادیر فرکانس بالا را نسبت به انواع فرکانس پایین بیشتر افزایش می‌دهد، بنابراین تأثیرات طول موج بزرگ مربوط به منابع ناحیه‌ای عمیق بر روی بی‌هنجاری‌های کوچک حذف خواهند شد. فیلتر زاویه تیلت نسبت مشتق قائم به مشتق افقی میدان پتانسیل برگردان به قطب است. این فیلتر با فرض اینکه میدان باقی‌مانده مغناطیسی وجود ندارد روی داده‌ها میدان پتانسیل اعمال شده‌است. مقدار زاویه تیلت روی توده مثبت، روی لبه‌های توده نزدیک به صفر و یا صفر و بیرون از توده منفی است [11].

تفسیر نتایج و یافته ها

محدوده مورد مطالعه در بین آنومالی‌های شماره ۴ و ۶ معدن گل‌گهر واقع شده‌است. مطالعات اولیه مگنتومتري توسط شرکت مهندسين کوشا معدن جهت شناسایی ابعاد آنومالی در این منطقه صورت گرفته است. طراحی پروفیل‌ها و نقاط برداشت در محدوده، به صورت شبکه منظم با پروفیل‌های ۲۰ X ۵۰ یعنی فاصله بین دو پروفیل مجاور ۵۰ متر و فاصله بین دو نقطه برداشت ۲۰ متر در امتداد شمال‌غرب - جنوب‌شرق انتخاب شده‌است. موقعیت ایستگاه‌های برداشت‌شده در محدوده با نقاط قرمز رنگ در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. در شکل (۲) نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ گل‌گهر آورده شده‌است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود لیتولوژی غالب در محدوده مورد مطالعه آهک، دولومیت، آمفیبولیت و شیست‌های حاوی کوارتزیت، مسکویت و بیوتیت می‌باشند. زمین‌شناسی این محدوده مرتبط با دوران پالئوزوئیک و مزوزوئیک می‌باشد [۳].



شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ محدوده‌ی گل‌گهر که آنومالی ۶ این محدوده با کادر قرمز در
شمال غربی آنومالی (۶) ایستگاه (۱): مطالعه شکل (۱): ایستگاه
های مگنتومتري در محدوده مورد مطالعه شکل (۱): ایستگاه
(آنومالی ۶)
شرق محدوده نشان داده شده است [۱] و [۲].

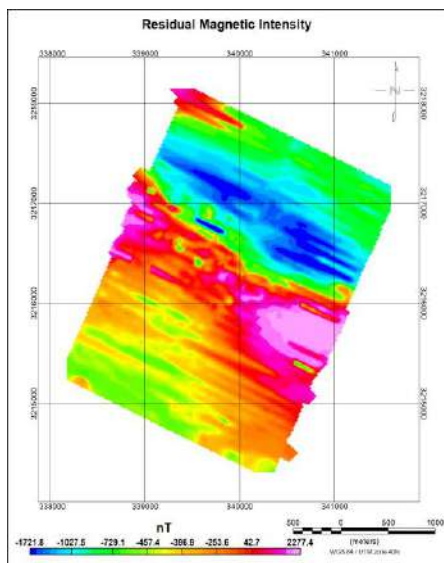
نقشه شدت کل میدان مغناطیسی و نقشه مغناطیس باقی‌مانده

با توجه به داده‌های حاصل، نقشه شدت میدان مغناطیسی کل تهیه شده‌است. در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل محدوده، یک دو قطبی در جهت جنوب شرقی - شمال غربی تقریباً در وسط محدوده دیده می‌شود. در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی آشکار شده می‌تواند به عوامل متعددی مانند: تفاوت در خودپذیری مغناطیسی، تغییرات در عمق قرارگیری توده‌ها، شیب قرارگیری توده‌ها و یا هم لیتولوژی نسبت داده شود. طبق مطالعات انجام‌شده در محدود این تغییرات مغناطیسی نشان دهنده اثر ناشی از توده‌های مغناطیسی مگنتیتی محلی است.

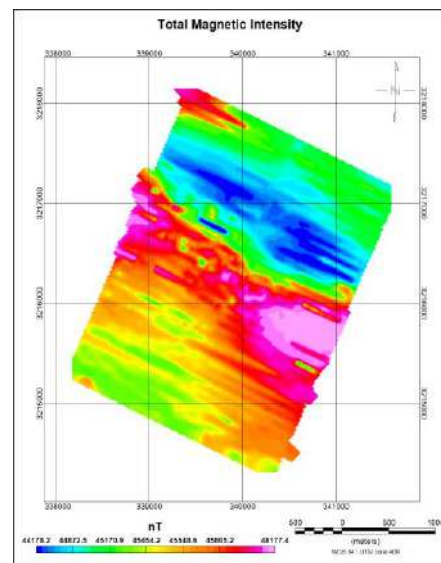
حداکثر مقدار شدت میدان مغناطیسی ثبت شده در محدوده مورد مطالعه بعد از حذف داده‌های خارج از ردیف به ترتیب ۴۴۱۷۸ و ۴۸۱۷۷ نانوتسلا می‌باشد که در شکل (۳) قابل مشاهده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، بیشترین تغییرات مغناطیسی در جهت

شمال غربی - جنوب شرقی ظاهر شده است. در این نقشه یک دوقطبی تقریباً در وسط محدوده دیده شده که این دوقطبی مرتبط با توده شماره ۶ گل گهر می باشد.

بعد از بدست آوردن نقشه‌ی شدت کل میدان مغناطیسی یکی از مهم ترین مراحل آشکارسازی بی‌هنجاری‌های محلی، حذف اثر زمینه (شدت میدان زمین) و تهیه نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده است. از این رو لازم است میزان زمینه که بر اساس نقشه IGRF حدود ۴۵۹۰۰ نانوتسلا می باشد، در هر نقشه مشخص و اثر آن از روی اندازه‌گیری‌ها حذف شود. از نقشه مرجع میدان مغناطیسی محلی (IGRF) برای تعیین ویژگی‌های میدان اصلی زمین در محدوده مورد مطالعه استفاده شد و بر اساس آن نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده تهیه و در شکل (۴) آورده شده است. برای تهیه این نقشه تغییرات روند میدان مرجع به‌ویژه در راستای شمال اعمال شده است. حداقل و حداکثر مقدار شدت میدان مغناطیسی باقی مانده در محدوده مورد مطالعه بعد از حذف میدان مغناطیسی زمین (مرجع) به ترتیب ۱۷۲۱- و ۲۲۷۷ نانوتسلا می باشد. مقایسه نقشه شدت میدان مغناطیسی کل و نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی مانده نشان می دهد که روندهای ظاهر شده در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل، در نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده نیز به خوبی آشکار شده است. تفاوت میان اختلاف بیشترین و کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی باقی مانده حدود ۴۰۰۰ نانوتسلا است و بر اساس تجارب وجود چنین تغییرات میدان مغناطیسی در آنومالی‌ها ظاهر شده نشان دهنده وجود توده‌های مگنتیتی می باشد.



شکل (۴): نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی مانده



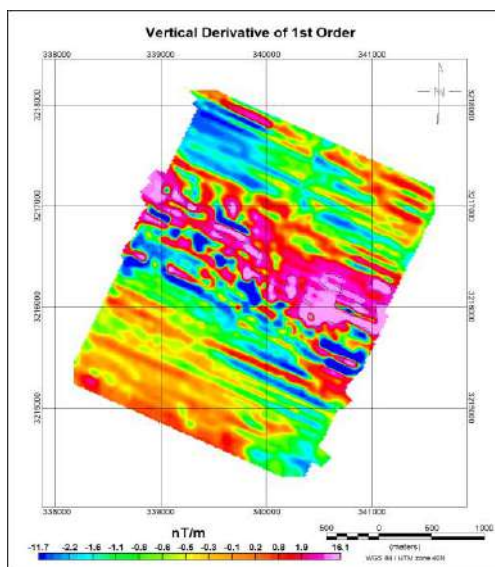
شکل (۳): نقشه شدت کل میدان مغناطیسی

تخمین مرز آنومالی‌های محدوده با استفاده از روش سیگنال تحلیلی و مشتق قائم

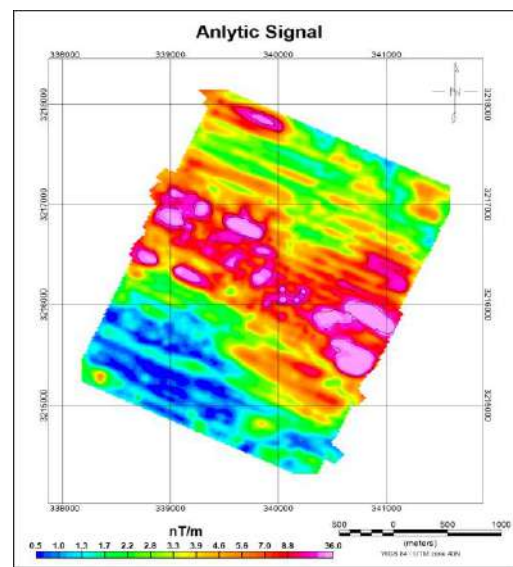
همانطور که در روش انجام تحقیق یاد آوی شد نقشه سیگنال تحلیلی با استفاده از مشتقات جهتی و قائم برای محدوده‌ی مورد مطالعه بدست آمده است که در شکل (۵) نمایش داده شده است. از این نقشه می توان برای تعیین مرز توده‌های فرو مغناطیس با سنگ‌های درون گیر استفاده نمود. همانطور که قبلاً ذکر شد بیشینه سیگنال تحلیلی بر روی توده ایجاد کننده آنومالی قرار می گیرد و بر لبه‌های توده مقدار سیگنال تحلیلی صفر و یا خیلی نزدیک به صفر می شود، در حالیکه بیرون از توده مقدار سیگنال تحلیلی منفی می شود.

فرآیند مشتق قائم در مورد داده‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه انجام و نقشه گرادیان اول در شکل (۶) ارائه شده است. قسمت‌هایی که در نقشه مشتق قائم با نوارهای مشکی مرز بندی شده اند محل‌ها یا مرزهای احتمالی توده‌های ایجاد کننده آنومالی‌های مغناطیسی می باشند. بر اساس اطلاعات مگنتومتري، شواهد وجود توده‌های ایجاد کننده آنومالی بیشتر در آن قسمت‌ها وجود دارد که در

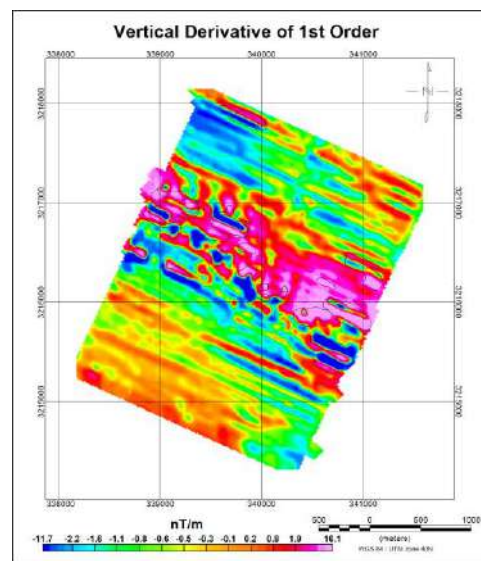
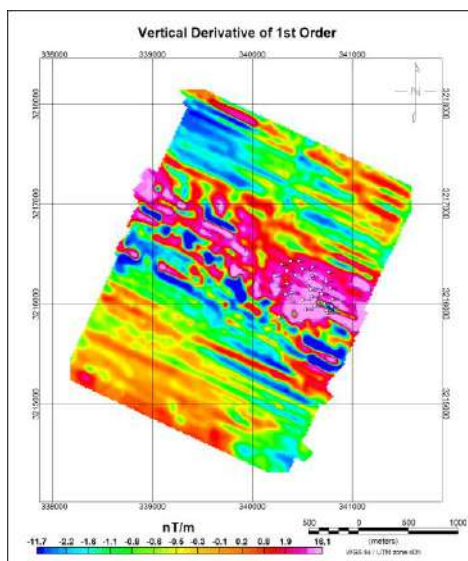
آن تغییرات خود را به صورت دوقطبی‌ها در نقشه مشتق قائم نشان داده‌اند. در صورت مقایسه نمودن نقشه سیگنال تحلیلی با نقشه مشتق قائم، دیده می‌شود که محل‌های تخمین شده برای وجود توده‌های مغناطیسی بر روی آنومالی‌ها تا حدودی زیاد با هم یکسان است. جابه‌جا شدن موقعیت آنومالی‌ها به سمت جنوب در نقشه سیگنال تحلیلی نیز قابل ملاحظه است. اگر مرزهای تخمین شده روی نقشه سیگنال تحلیلی را بر روی نقشه مشتق قائم نشان دهیم دیده می‌شود که در نقشه سیگنال تحلیلی آنومالی‌ها کمی به سمت جنوب کشیده شده‌اند (شکل ۷). با در نظر گرفتن حفاری‌های انجام شده در محدوده و دست یابی به توده معدنی می‌توان گفت روش مشتق قائم نسبت به روش سیگنال تحلیلی مرز را بهتر تخمین زده است. چون تعداد حفاری‌های رسیده به توده معدنی در مرزهای تخمین شده بر روی نقشه مشتق قائم بیشتر است (شکل ۸).



شکل (۴): نقشه گرادیان قائم مرتبه اول اعمال شده بر روی نقشه برگردان به قطب، اندیشه‌ها با نوارهای مشکی رنگ نشان داده‌مرز تخمین شده احتمالی توده



شکل (۵): نقشه سیگنالی تحلیلی اعمال شده روی شدت میدان مغناطیسی باقیمانده.



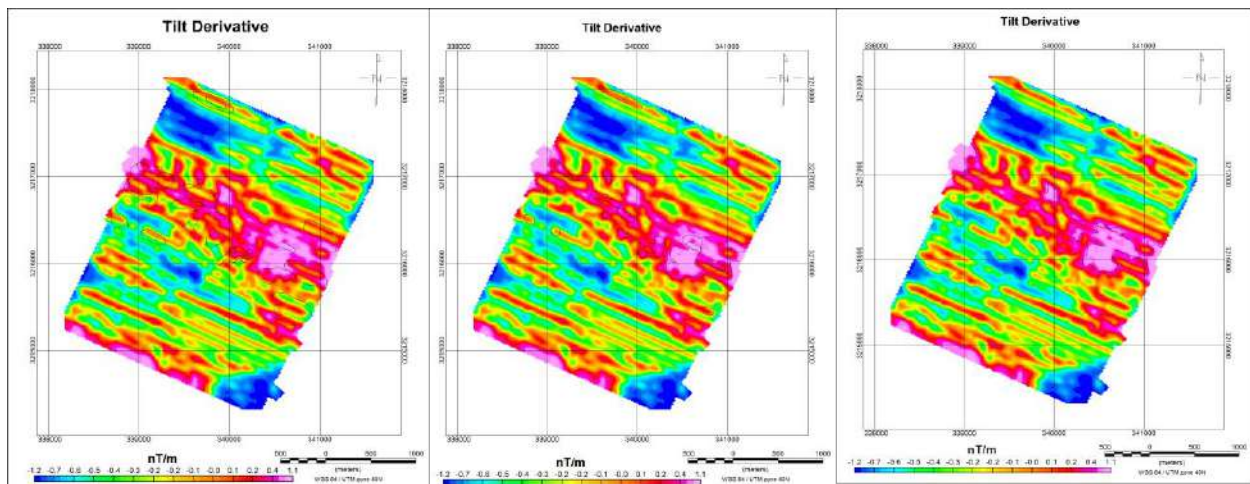
شکل (۸): نقشه گرادیان قائم، مرزهای تخمین شده با نوارهای مشکی و نقاط اند. شده‌های سفید رنگ نشان داده با دایره‌حفری

شکل (۷): نقشه مشتق قائم، مرزهای تخمین شده با نوارهای مشکی در نقشه سیگنال تحلیلی صورت گرفته است.

تخمین مرز آنومالی‌های محدوده با استفاده از روش زاویه تیلت

در شکل (۹) نقشه زاویه تیلت نشان داده شده است و مرزهای احتمال توده‌های مغناطیسی ایجاد کننده آنومالی با نوارهای مشکی رنگ مشخص شده است. با مقایسه کردن مرزهای تخمین زده شده به روش زاویه تیلت یا شیب و روش مشتق قائم، دیده می‌شود که هر دو روش محل‌های تقریباً یکسان را برای محدوده توده‌های ایجاد کننده آنومالی‌ها تخمین نموده است. با این تفاوت که روش زاویه تیلت مرز توده‌ها را کمی به سمت شمال کشانده است (شکل ۱۰). اگر تخمین مرز به روش زاویه تیلت و روش سیگنال تحلیلی با هم مقایسه شوند دیده می‌شود که تخمین مرز بر روی نقشه سیگنال تحلیلی با نقشه زاویه تیلت جابجایی خیلی زیاد در تخمین محل‌های توده‌های ایجاد کننده آنومالی دارد (شکل ۱۱).

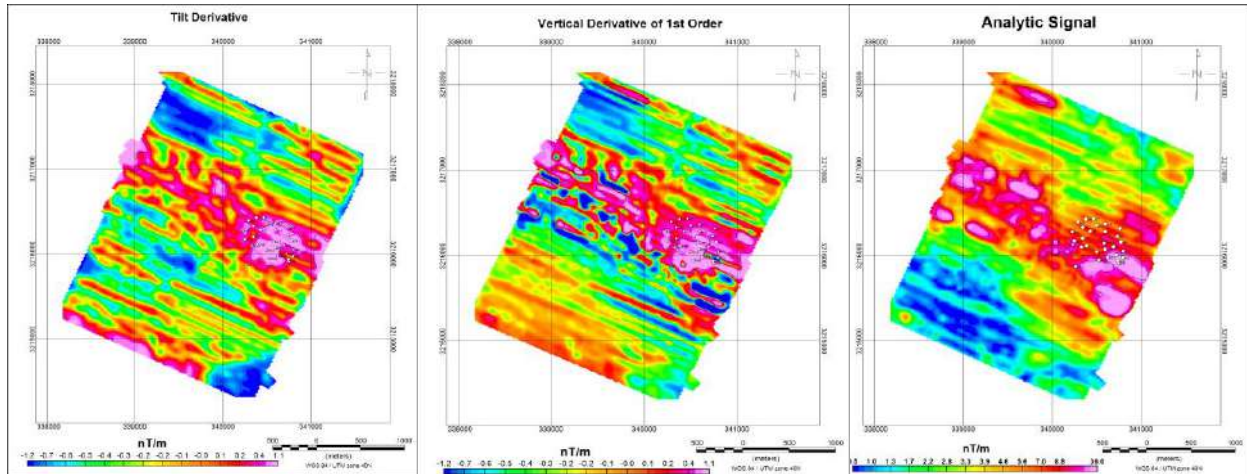
برای مقایسه نمودن چگونگی و اعتبار سنجی تخمین مرز به روش‌های ذکر شده از موقعیت حفاری‌های انجام شده در محدوده استفاده شد. با توجه به حفاری‌های انجام شده روی محدوده، مرزهای تخمین شده به روش زاویه تیلت هماهنگی بهتری با مرزهای واقعی توده سنگ آهن دارد. همانطور که ذکر شد در محدوده مورد مطالعه تعداد ۳۳ حلقه حفاری صورت گرفته است. از حفاری‌های انجام شده در محدوده، حفاری‌های شماره w1, w16, w33 و w12 به ماده معدنی برخورد نکرده است و در بقیه حفاری‌ها ماده معدنی به دست آمده است. با توجه به حفاری‌های انجام شده و مرز تخمین زده شده روی نقشه سیگنال تحلیلی دیده می‌شود که سیگنال تحلیلی نتوانسته مرز کامل توده‌ها را مشخص نماید. از جمله ۲۹ حفاری انجام شده تنها ۷ حفاری برخورد کرده به توده، بر روی مرز تخمین شده به روش سیگنال تحلیلی بوده است (شکل ۱۲). به این اساس مرز تخمین زده شده به روش سیگنال تحلیلی کوچک‌تر از مرز منبع آنومالی است. همچنان با در نظر گرفتن مرز تخمین زده شده روی نقشه گرادیان قائم مرتبه اول و حفاری‌های انجام شده دیده می‌شود که از جمله ۲۹ نقطه حفاری برخورد کرده به توده معدنی حدود ۱۴ نقطه حفاری در مرز تخمین شده به این روش قرار گرفته است (شکل ۱۳). ولی در نقشه زاویه تیلت تعداد حفاری‌های برخورد کرده به توده معدنی بر روی مزر تخمین شده بیشتر از حفاری‌های قرار گرفته بر روی نقشه سیگنال تحلیلی و مشتق قائم مرتبه اول می‌باشد. حفاری‌های برخورد کرده به توده معدنی واقع شده بر روی مرزهای تخمین شده در نقشه زاویه تیلت حدوداً ۲۰ حفاری از جمله ۲۹ حفاری می‌باشد (شکل ۱۴). از مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تخمین محل توده‌های ایجاد کننده آنومالی‌ها با محل‌های حفاری شده در محدوده می‌توان نتیجه گرفت که روش تخمین مزر زاویه تیلت، نسبت به دو روش دیگر، سیگنال تحلیلی و مشتق قائم، توانسته موقعیت توده‌ها را بهتر و دقیق‌تر تشخیص دهد.



شکل (۱۱): نقشه زاویه تیلت با مرز تخمین شده برای شده توده بر روی نقشه سیگنال تحلیلی انجام

شکل (۱۰): نقشه زاویه تیلت، مرزهای تخمین شده بر روی نقشه مشتق قائم با نوارهای مشکی رنگ صورت گرفته است.

شکل (۹): نقشه زاویه تیلت، مرزهای تخمین شده های ایجاد کننده آنومالی با نوارهای مشکی برای توده است. شده رنگ نشان داده



شکل (۱۴): نقشه زاویه تیلت با نقاط حفاری؛ های مغناطیسی با نوارهای های احتمالی توده محل های سفید رنگ نشان مشکی و نقاط حفاری با دایره اند. شده داده

شکل (۱۳): نقشه مشتق قائم با نقاط حفاری؛ های مغناطیسی با نوارهای مشکی و احتمالی توده اند. شده های سفید رنگ نشان داده نقاط حفاری با دایره

شکل (۱۲): نقشه سیگنال تحلیلی با نقاط حفاری؛ های مغناطیسی با نوارهای های احتمالی توده محل های سفید رنگ نشان مشکی و نقاط حفاری با دایره اند. شده داده

نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی کارایی روش های مختلف تخمین مرز آنومالی های مغناطیسی شامل روش های سیگنال تحلیلی، مشتق قائم و زاویه تیلت بر روی داده های مغناطیس سنجی آنومالی شماره ۶ گل گهر بوده است. برای رسیدن به هدف تعیین شده سه روش تخمین مرز آنومالی مورد بررسی قرار گرفت. نقشه بدست آمده از روش سیگنال تحلیلی و مقایسه ی آن با نتایج چاه های مغزه گیری، مشخص شد که از ۲۹ نقطه ی حفاری شده تنها ۷ حلقه چاه در داخل محدوده های بدست آمده با این روش قرار گرفته است. در بررسی روش گرادیان قائم مشخص شد از جمله ۲۹ نقطه ی حفاری شده، تنها ۱۴ حفاری در داخل مرزهای بدست آمده از این روش واقع شده است. با رسم نقشه ی زاویه تیلت مشخص شد از جمله ۲۹ نقطه حفاری تعداد ۲۰ حلقه گمانه در داخل مرزهای بدست آمده از این روش قرار گرفته است. لذا در این محدوده روش زاویه تیلت کارایی بهتری داشته است. لازم به ذکر است در مجموع به علت قرار گرفتن توده مولد آنومالی مغناطیسی در اعماق بسیار زیاد (حدود ۴۷۰ متر) روش های تخمین مرز، محدوده آنومالی را بخوبی آشکار نکرده اند.

مراجع

- [۱۵] سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ گل گهر، ۱۳۹۲.
- [۲] سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ نیریز، ۱۳۶۴.
- [۳] قربانی منصور، زمین شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه های معدنی ایران، انتشارات آربین زمین، ۱۳۸۷.
- [۴] کریم پور محمدحسین، ملک زاده آزاده و حیدریان محمدرضا، اکتشاف ذخایر معدنی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.

[۵] Fedi, M., & Florio, G. (2001). Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. *Geophysical prospecting*, 49(1), 40-58.

[۶] Hsu, S. K., Sibuet, J. C., & Shyu, C. T. (1996). High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics*, 61(2), 373-386.

- [۷] Hosseini, S. A., Khah, N. K. F., Kianoush, P., Afzal, P., Shakiba, S., & Jamshidi, E. (2023). Boundaries Determination in Potential Field Anomaly Utilizing Analytical Signal Filtering and its Vertical Derivative in Qeshm Island SE Iran. *Results in Geophysical Sciences*, 14, 100053.
- [۸] Li, L. L., Han, L. G., & Huang, D. N. (2014). Normalized edge detection, and the horizontal extent and depth of geophysical anomalies. *Applied Geophysics*, 11(2), 149-157.
- [۹] Li, Q., & Cheng, Q. (2006). VisualAnomaly: A GIS-based multifractal method for geochemical and geophysical anomaly separation in Walsh domain. *Computers & geosciences*, 32(5), 663-672.
- [۱۰] Pérez-Aguirre, X. J., Chávez-Cabello, G., Ramírez-Peña, C. F., Méndez-Delgado, S., & Romero-de la Cruz, O. M. (2021). Geophysical modeling of the crustal boundary between the Central and Oaxaquia terranes in northern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103288.
- [۱۱] Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R., & Ravat, D. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1-L10.
- [۱۲] Pal, S. K., Vaish, J., Kumar, S., & Bharti, A. K. (2016). Coal fire mapping of East Basuria Colliery, Jharia coalfield using vertical derivative technique of magnetic data. *Journal of Earth System Science*, 125, 165-178.

Introducing an innovative framework for Mineral Exploration through the integration of Advanced Machine Learning Methodologies within the domain of Geophysics

Sara Momenipour, Nima Dolatabadi

Master in Science Economic Geology, momenipour.sara@ut.ac.ir

Master in Science Geophysics, n_dolatabadi@ut.ac.ir

ABSTRACT

This study focuses on the challenges faced by mineral exploration in Iran and proposes the integration of Python programming and machine learning to overcome these challenges. It explores the complexities of geological and topographical mapping, remote sensing applications, geophysics, and core drilling. Python libraries like GDAL, GeoPandas, Spectral Python, OpenCV, ObsPy, and GeoMagPy are highlighted for their ability to automate and enhance various aspects of mineral exploration. The study emphasizes the importance of accurate geological mapping and the potential of deep learning methods in analyzing remote sensing data. It also discusses the application of joint inversion techniques for interpreting exploration data and improving the understanding of magnetotelluric data. Despite challenges related to insufficient data and a shortage of specialists, the adoption of Python programming and machine learning techniques can lead to significant advancements in mineral exploration in Iran, fostering economic development and job creation in the mining sector.

KEYWORDS: PYTHON, MINERAL, EXPLORATION, ML

INTRODUCTION

The pursuit of mineral exploration in the intricate topography of Iran unfolds as a multifaceted and intricate endeavor, besieged by challenges that permeate various phases of the exploration continuum. This comprehensive inquiry meticulously directs its attention towards the intricate complexities and predicaments endemic to both the methodological frameworks employed and the data acquisition processes within the expansive domain of Mineral Exploration and Geophysics in Iran. From the elaborate intricacies embedded in Geological and Topographical mapping to the nuanced subtleties inherent in Remote Sensing (RS) applications, exemplified through sophisticated tools such as ENVI, to the formidable challenges presented by the intricacies of Geophysical studies, this research undertakes the arduous task of unraveling the manifold impediments that substantially impede the efficacy and precision of mineral exploration practices in our country. In the pursuit of elucidating these challenges, our scholarly endeavor aspires to contribute profound insights, thereby fostering the refinement of mineral exploration methodologies within the Iranian context. By proffering potential solutions, this research endeavors to chart a course for significant advancements in the overarching field of geophysics, further enriching the scientific discourse in this specialized domain. Effective utilization of subterranean and surface assets is contingent upon meticulous exploration and extraction strategizing. Leveraging advanced technology amplifies the inherent value of products derived from natural resources. Recognizing the escalating demand for raw materials and metallic elements in the

country underscores the crucial nature of identifying, extracting, and processing valuable metal ores. Furthermore, investing in the mining sector emerges as a pivotal contributor to job creation and economic development in any given region.

METHODS

In this paper we are taking the issues into account as a purpose to introduce a better unified solution at hand. To reduce systematic and human error it is a good opportunity to integrate open source development while machine learning methods can be implemented as a tool to construct a better platform for this very end. There is always a high risk when human takes hand in data gathering such as data generation and augmentation due to low resources that is always an issue to mineral exploration.

Geological and Topographical Mapping

Geological and topographical mapping traditionally entails labor-intensive manual data collection and analysis, which not only consumes substantial time but is also susceptible to errors. However, by harnessing the capabilities of Python libraries such as GDAL and GeoPandas, the mapping process can be significantly expedited and enhanced. GDAL facilitates the reading and manipulation of geospatial data, while GeoPandas extends the functionalities of Pandas for geospatial analysis. These libraries automate intricate tasks such as data extraction, transformation, and visualization, thereby mitigating the need for extensive manual intervention and minimizing potential discrepancies. By integrating Python, GDAL, and GeoPandas, researchers can streamline their workflows, saving valuable time and achieving greater precision in geological and topographical mapping, thereby facilitating improved comprehension and management of geospatial features.

Remote Sensing (RS)

The conventional practice of remote sensing entails the utilization of specialized software like ENVI (Environment for Visualizing Images) for analyzing and processing remote sensing data. However, recent advancements in technology and the increasing prominence of Python programming language have revolutionized remote sensing approaches. Python, with libraries such as Spectral Python (SPy) and OpenCV, offers faster and more reliable alternatives. SPy facilitates spectral analysis by providing a range of functions for manipulating hyperspectral data within the Python environment. OpenCV, initially developed for computer vision, is now widely employed for processing satellite imagery in remote sensing. By leveraging Python and these libraries, remote sensing tasks can be accomplished more efficiently, with automation, batch processing, and seamless integration with other Python libraries, enhancing the field of remote sensing research and practice.

Geophysics and GeoMagnetism

Python, along with its libraries such as ObsPy and GeoMagPy, has revolutionized geophysics and geomagnetism in mineral exploration. Traditionally, software tools like MATLAB and GeoSoft have been widely used for analyzing geophysical and geomagnetic data. However, Python provides a faster and more reliable alternative. ObsPy, an open-source Python library, offers a comprehensive set of functionalities for seismology, allowing for easy processing, analysis, and visualization of seismic data. With ObsPy, geoscientists can efficiently read, write, and manipulate seismic data, apply data filtering techniques, and perform event detection. Similarly, GeoMagPy specializes in processing and analyzing geomagnetic data, providing tools for data downloading, diurnal variation correction, and magnetic anomaly mapping. By leveraging Python and its libraries, mineral exploration professionals can benefit from enhanced speed, reliability, and flexibility. Python's efficient execution and the availability of optimized libraries ensure faster data processing and analysis, enabling geoscientists to make informed decisions more quickly. Moreover, the reliability and robustness of Python libraries

like ObsPy and GeoMagPy, which have been extensively used and tested by a community of experts, ensure accurate results in mineral exploration. Additionally, Python's simplicity and readability make it easy to write and modify code, providing flexibility for geoscientists to tailor their algorithms and workflows to suit their specific needs. Overall, the adoption of Python-based approaches not only enhances traditional methods but also opens up new possibilities for innovation, ultimately improving the efficiency and effectiveness of mineral exploration endeavors.

Core Drilling and Logging

To comprehend the mineral composition at significant depths, ascertain reserves, and delineate the distribution of mineral grades across diverse horizons during detailed exploration, a crucial aspect of deep excavation involves the utilization of positive outcomes derived from geophysical operations and surface activities. This is manifested through deep excavations employing small cross-sectional dimensions, specifically core drilling. At this juncture, several core drilling operations are conducted, strategically considering the drilling network, to penetrate the targeted deposit effectively.

Following the establishment of the drilling site and the transportation of drilling machinery, the drilling process is executed under the supervision of the technical officer overseeing exploration operations. This entails the insertion, retrieval, and documentation of drilling logs and the creation of a stratigraphic column chart. Subsequently, cores are sampled from various depths within the deposit.

In conjunction with mineralogy, X-ray diffraction, and subsurface petrography studies, the requisite number of core samples obtained from exploratory drilling boreholes are extracted and dispatched to the laboratory for comprehensive analysis.

The potential for minimizing errors, whether human or machine-induced, at each stage of these procedures could facilitate the adoption of modern methodologies, such as Python programming. This could enable the establishment of regular data networking accessible to organizations, mineral exploration companies, and scientific research institutions in the foreseeable future, including within academic environment.

Results

In the field of mineral exploration, one of the key steps is the localization of geological features associated with target mineralization through the use of geological maps. These maps incorporate various elements such as lithological units, alteration types, structures, and indicator minerals. The accurate delineation of these features plays a crucial role in successful exploration efforts (Brimhall et al., 2005; Ninomiya et al., 2005; Rowan et al., 2006; Gad and Kusky, 2007; Beiranvand Pour et al., 2019a).

The advancement of remote sensing technology, coupled with the availability of large and diverse datasets, has opened up new opportunities and challenges in mineral exploration. With the emergence of big data, conventional algorithms and models face limitations in handling the vast amount of information. This necessitates the development of advanced techniques for data acquisition, preparation, analysis, and interpretation. Deep learning methods have shown great promise in effectively identifying target features and discovering minerals through the analysis of remote sensing data. These techniques have the potential to improve the mapping of geological target features in both small and large-scale studies, contributing to the overall success of mineral exploration (shirmard et al., 2022).

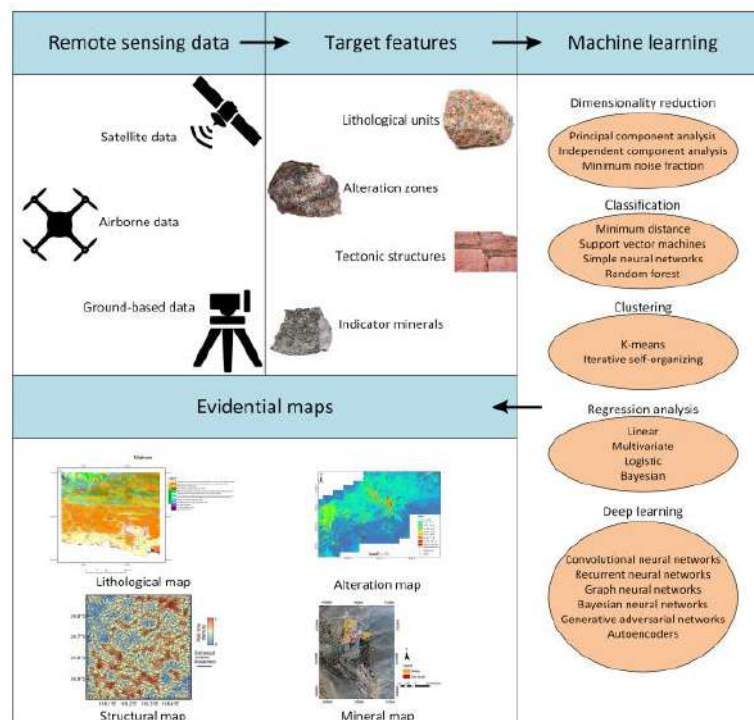


Figure 1, Workflow of using the combination of remote sensing data and machine learning methods for creating evidential maps. (shirmard et al., 2022).

In addition to remote sensing, the field of geosciences benefits greatly from other sources of spatial information, such as gravity and magnetotelluric (MT) data. These data sources offer wide coverage, high efficiency, and cost-effectiveness, making them popular in resource exploration. Joint inversion, a technique that combines multiple geophysical data sets, is commonly employed in the comprehensive interpretation of exploration data. However, there is a need for further research and application of joint inversion techniques to gravity gradiometry data and other geophysical data to enhance their effectiveness in mineral exploration (Zhang et al., 2019).

Another critical aspect of mineral exploration is the processing of MT data. The acquisition of MT data can be challenging due to the unavailability of noise-free locations. In many cases, compromises are made in site selection, leading to data collection from noisy environments. Therefore, improving the understanding of noise sources and developing advanced processing approaches are crucial in handling MT data effectively (Ajithabh and Patro, 2023).

Discussion

Due to the fact that the stages of exploration encompass identification, prospecting, general and detailed investigations, it necessitates meticulous differentiation. The utilization and implementation of diverse Python methodologies, coupled with the amalgamation of all acquired data throughout these phases, have the potential to furnish us with a meticulous and lucid perspective in order to facilitate programmatic planning and subsequent mining procedures.

Considering all factors, utilizing Python development as a means of implementation poses significant challenges due to insufficient data and a dearth of specialists in the corresponding domain. The

analysis of geomagnetic data is evidently intricate; however, a recent investigation suggests that the perceived complexity may not be as daunting as previously believed. Commencing in 2022, the advent of machine learning models facilitates the rapid generation of geological maps through the analysis of remotely sensed data, minimizing the temporal aspect. Nevertheless, it is important to acknowledge that users still exert considerable influence throughout this process, making machine learning a viable option to undertake the primary role of automating the preprocessing of mineral exploration data.

Table1, a review over some beneficial parameters in softwares vs python

| Aspect / Package | ArcGIS | GDAL | ENVI | Spectral Python (SPy) | MATLAB | ObsPy | Geosoft | GeomagPy |
|------------------|-------------|---------------|----------|-----------------------|-------------|----------|----------|----------|
| Cost | Paid | Free and Open | Paid | Free and Open | Paid | Free | Paid | Free |
| Resource Usage | High | Moderate | Moderate | Low | High | Low | High | Low |
| Global Usage | Widely used | Widely used | Moderate | Moderate | Widely used | Moderate | Moderate | Low |
| Scalability | High | High | Moderate | Moderate | High | Low | High | Low |
| Flexibility | Moderate | High | High | High | High | Low | Moderate | High |

CONCLUSION

In conclusion, the pursuit of mineral exploration and geophysics in Iran presents numerous challenges that hinder the efficacy and precision of the exploration process. However, by embracing advanced technologies and methodologies, such as Python programming and machine learning, significant advancements can be made in overcoming these challenges.

The integration of open source development and machine learning methods offers potential solutions to improve data acquisition, analysis, and interpretation. By leveraging Python libraries, such as GDAL, GeoPandas, Spectral Python, OpenCV, ObsPy, and GeoMagPy, researchers and professionals in mineral exploration can streamline their workflows, save time, and achieve greater precision in geological mapping, remote sensing analysis, and geophysical studies.

Furthermore, the paper highlights the importance of accurate geological mapping, the potential of deep learning methods in analyzing remote sensing data, and the application of joint inversion techniques to enhance the interpretation of exploration data. These advancements can contribute to the success of mineral exploration by effectively identifying target features, discovering minerals, and improving the mapping of geological target features.

Despite challenges related to insufficient data and a shortage of specialists, the adoption of Python programming and machine learning techniques shows promise in automating data preprocessing and generating geological maps more efficiently. By addressing these challenges and embracing innovative approaches, the mineral exploration industry in Iran can benefit from improved methodologies, enhanced efficiency, and increased precision.

In conclusion, the integration of advanced technologies and methodologies, specifically the utilization of Python programming and machine learning, has the potential to revolutionize mineral exploration and geophysics in Iran, leading to significant advancements in the field and fostering economic development and job creation in the mining sector.

REFERENCES

1. Ajithabh, K. S., & Patro, P. K. (2023). SigMT: An open-source Python package for magnetotelluric data processing. *Computers & Geosciences*, 171, 105270.
2. Beiranvand Pour, A., Hashim, M., Hong, J.K., Park, Y., 2019a. Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: North-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula. *Ore Geology Reviews* 108, 112–133. doi:10.1016/j.oregeorev.2017.07.018

3. Bergstra, J., Yamins, D., Cox, D. D. (2013) Making a Science of Model Search: Hyperparameter Optimization in Hundreds of Dimensions for Vision Architectures. TProc. of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML 2013), June 2013, pp. I-115 to I-23.
4. Brimhall, G.H., Dilles, J.H., Proffett, J.M., 2005. The Role of Geologic Mapping in Mineral Exploration. doi:10.5382/SP.12.11.
5. Ellefsen, K.L.; Lock, J.T.; Settle, B.; Karsten, C.A.; Parker, I. Applications of FLIKA, a Python-based image processing and analysis platform, for studying local events of cellular calcium signaling. *Biochim. Biophys. Acta (BBA) Mol. Cell Res.* 2019, 1866, 1171–1179.
6. GDAL/OGR contributors (2024). GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open Source Geospatial Foundation. URL <https://gdal.org> DOI: 10.5281/zenodo.5884351
7. Kelsey Jordahl, Joris Van den Bossche, Martin Fleischmann, Jacob Wasserman, James McBride, Jeffrey Gerard, ... François Leblanc. (2020, July 15). *geopandas/geopandas: v0.8.1 (Version v0.8.1)*. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>
8. Lemenkova, P., & Debeir, O. (2022). Satellite Image Processing by Python and R Using Landsat 9 OLI/TIRS and SRTM DEM Data on Côte d'Ivoire, West Africa. *Journal of imaging*, 8(12), 317.
9. Ninomiya, Y., Fu, B., Cudahy, T.J., 2005. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sensing of Environment* 99, 127–139. doi:10.1016/j.rse.2005.06.009
10. Rowan, L.C., Schmidt, R.G., Mars, J.C., 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 104, 74–87. doi:10.1016/j.rse.2006.05.014.
11. Shimard, H., Farahbakhsh, E., Müller, R. D., & Chandra, R. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112750.
12. Van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D., Yager, N., ... & Yu, T. (2014). *scikit-image: image processing in Python*. *PeerJ*, 2, e453.
13. Vos, K.; Splinter, K.D.; Harley, M.D.; Simmons, J.A.; Turner, I.L. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environ. Model. Softw.* 2019, 122, 104528
14. Zhang, R., & Li, T. (2019). Joint inversion of 2D gravity gradiometry and magnetotelluric data in mineral exploration. *Minerals*, 9(9), 541.

IP-Rs and Magnetic Geophysical 3D Modelling of Copper Deposits; A Case Study Sheikhdar Abad Copper Deposit

Saeed Kazem Aliluo^{1-2*}, Maysam Abedi¹, Gholam-Hossein Norouzi¹, Reza Faghieh²

¹ School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Mineaz Co. Geophysical Exploration and Core Drilling Company

*s.k.alilou@gmail.com

ABSTRACT

An efficient method in exploration of sulfide minerals (i.e. copper deposits) is the application of different geophysical methods like magnetic surveys, geoelectrical techniques including the induced polarization (IP) and the electrical resistivity (Rs). As 2D geophysical modelling presents an image of anomalies in depth, but for detail imaging of anomalies it is not as efficient as 3D modelling. 3D modelling of Magnetic and IP-Rs surveys results present accurate view of anomalies and facilitates borehole suggestion for detail exploration. In this paper, three-dimensional modeling of geophysical surveys of Sheikhdar Abad has been prepared. According to sulfide type of this deposit and paragenesis of copper and iron, after different exploration studies such as, geochemistry, geology, and areal magnetometry, 3D modelling of magnetic surveys was created from 2D section profile modelling and also 8 IP-Rs profiles have been surveyed in north – south direction, then their 3D modelling result have been compared to 3D magnetic modelling and 3 boreholes results.

KEYWORDS: 3D Modelling, IP-Rs, Magnetic, Geophysical Exploration, Copper Deposits

INTRODUCTION

Three-dimensional modeling of geophysical data is one of the most important challenges in geophysical analysis. The most important factor in this challenge is the accuracy of modeling which could be different in each method [1]. In this paper, it was tried to apply a simple method for modeling of Magnetic and IP-RS data. The modelling method for magnetic surveys was performed according to 2D models of Potent software and 8 IP-Rs profiles were surveyed and after topography correlation and 2D modelling with finite difference method, the results were export and have been modeled in three dimensions by Voxler.

GEOGRAPHICAL LOCATION AND THE GEOLOGY OF THE AREA

The exact location of Sheikhdar Abad Area is in 16th km, South West of Mianeh and 160th km of Tabriz, NW of Iran. Study area contains lithology units of Eocene and Miocene [2]. Different exploration studies such as geochemistry, geology, and areal magnetometry have been done in this area. According to studies, this area includes high potential of Copper and Iron, therefore detail exploration methods such as Magnetic and IP-Rs geophysical studies must be done in this area to optimize borehole location. The main mineralogy type of deposit is sulphide copper minerals. Sheikhdar Abad Area is located in north west of Iran, East Azerbaijan province and south west of Mianeh. In Figure (1), access roads and the location of Sheikhdar Abad area have been shown in geology map of Mianeh.

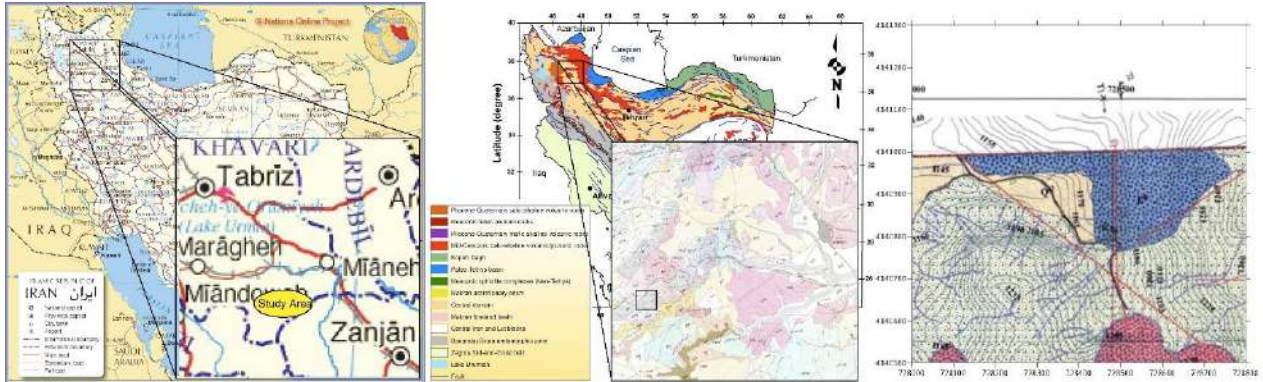


Figure 1. Location and Geology Map of Sheikhdar Abad Area [3]

METHODOLOGY

Results of geological and geochemical studies in Sheikhdar Abad occurrence, shows the efficient mineralization potential to form copper-iron deposits in this area. According to the characteristics of such ore mineralization, prevalent geophysical method in detection of alterations is magnetic surveys and sulfide minerals is the induced polarization (IP) and electrical resistivity (Rs) [3]. Since this deposit simultaneously consisting of Cu-Fe, to detect the iron mineralization and alterations related to copper mineralization, magnetometry surveys is used as primary geophysical data and then 2D electrical profiling involving IP and Rs were survived jointly for detail depth information of sulfides.

To detect the approximate trend of mineralization, the study area covered by a IP-Rs surveys over a region (X=1100 m & Y=1500 m). The distances of stations were chosen 100 m from west to east. All electrode spaces (currents and potentials) were chosen 30 m and are surveyed from south to north. In Figure (2) [2] the location of IP-Rs Profiles has been shown on total magnetic intensity map of the area.

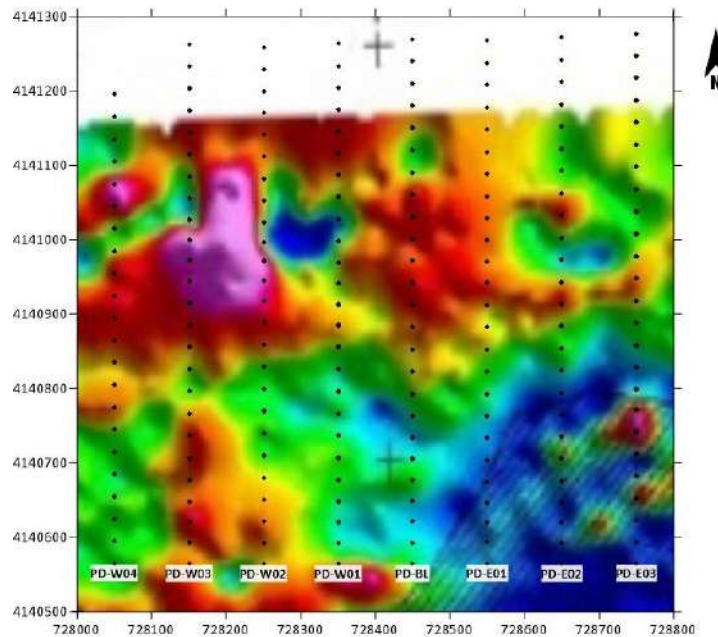


Figure 2. Location of IP-Rs Profiles on RTP Map

ANALYSIS OF MAGNETIC AND IP-RS DATA

After detection of the main trend of mineralization, 50 2D section model was created in magnetic data by using Potent software. In 2D modelling of magnetic data basic geological parameters of area such as depth, trends and susceptibility of minerals were inserted in softwares. Finally 21 2D models were exported from mag surveys. In Figure (3) 2D model of one of the sections which is located on IP-Rs PD-BL is shown. As mentioned, 8 IP-Rs profiles designed and surveyed in this area. According to main trend of mineralization which is in E-W direction, the IP-Rs profiles are conducted in North-South direction, in pole-dipole array, the dipole distance is 30 m, while profiles distance is 100 m, and maximum penetration depth is 150 m [4]. At the first step, 2D modelling of surveyed profiles have been performed. In this paper all surveyed data have been 2D inverted. The algorithm of 2D inversion is based on finite difference method and also using topography correlation. the 2D modelling result then exported to spatial data with UTM coordinates in x, y and z directions to be modelled in 3D [5].

The three-dimensional inversions show exceptional closeness to the revised geology, and are able to provide an understanding of the lateral variations in the physical characteristics of the conductive and chargeable units [6]. After correction of the output data from the 2D models, each spatial data is assigned for its coordinate and then 3D modelling created by using the kriging interpolation method, for all Magnetic, IP and Rs data. In Figure (4) Total IP-Rs profiles and 3D models for all Magnetic, IP and Rs data is shown. According to the mineralization characteristics of Sheikhdar Abad copper deposit, high IP data, high magnetic and low resistive are the effect of sulphide minerals such as chalcopyrite, pyrite and etc.

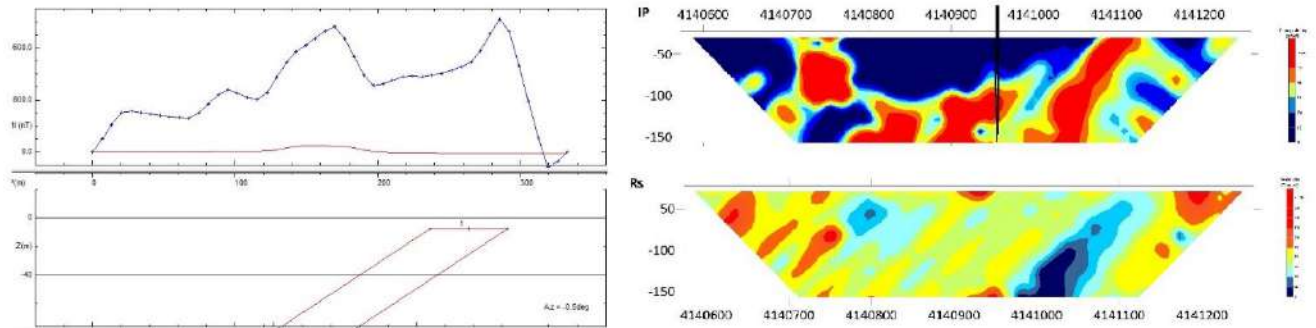


Figure 3. 3D Models for Mag Data (left) and IP-Rs Section (Right), PD-BL.

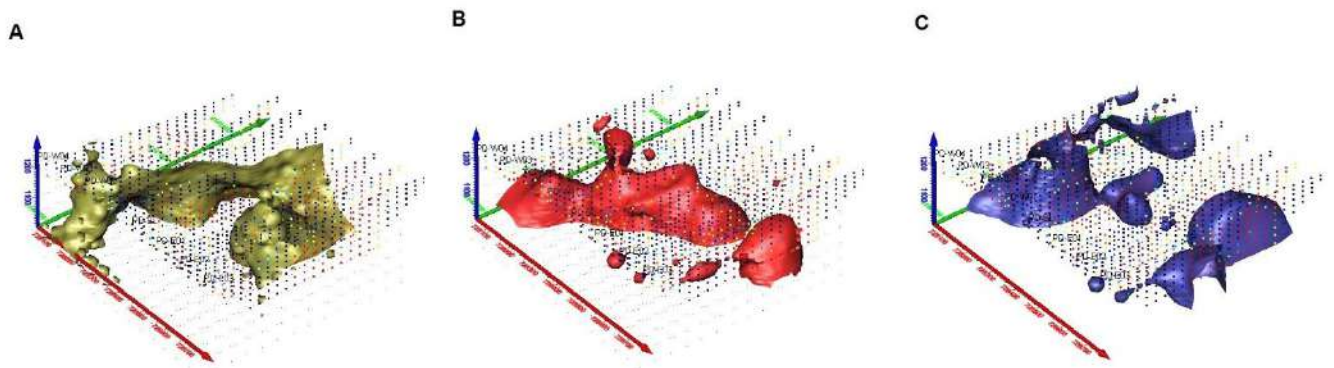


Figure 4. 3D map geophysical data, A) high magnetic B) high IP C) low Rs

CORRELLATION OF 3D MODELLING WITH BOREHOLE RESULTS

In order to carry out further studies in this area and to provide a grade estimation model, according to the results of the 3D IP-Rs model, 10 exploratory boreholes have been suggested, out of which 3 boreholes at various depths from 80 to 200 meters were drilled and graded. In Figure (5) the analyzed grade estimation of borehole BH-3 is shown. As it obvious, very high IP are related to pyrite while normal high IP data ranged 20 to 30 are exactly correlated to sulphide copper minerals such as chalcopyrite and etc.

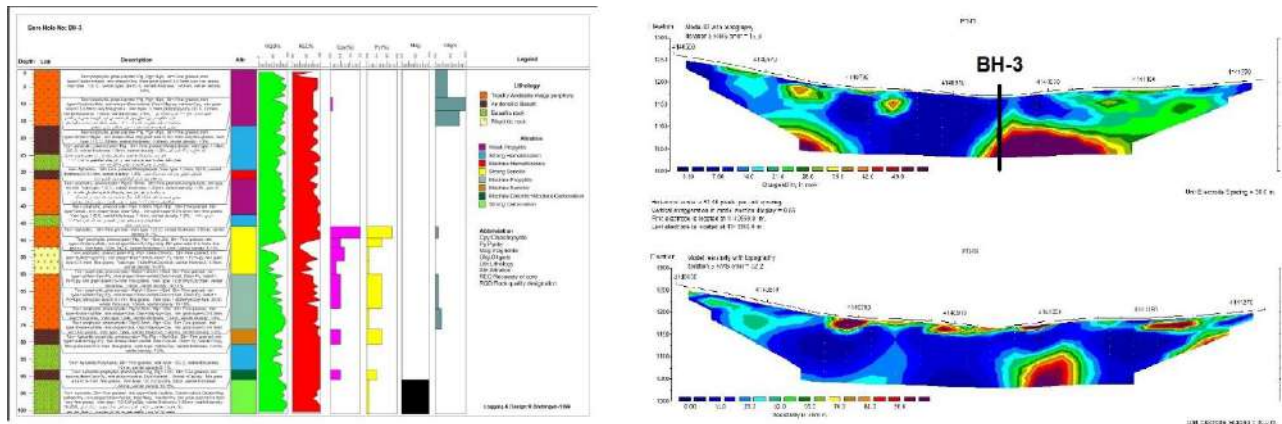


Figure 5. Analyzed grade of BH-3 correlated to IP-Rs geophysical result

CONCLUSIONS

The Magnetic and IP-Rs geophysical surveys have been performed to investigate the subsurface mineralization in the Sheikhdar Abad deposit. Due to the wide extent and paragenesis of copper and iron mineralization in this area, and the conditions of rock mass such as carbonates, 3D modelling of geophysical data is required. A 3D geophysical model provides a better understanding of subsurface anomalies and detection of mineralization zones. For this area, the 3D geophysical model is derived from the output of 2D models for all Magnetic, IP and Rs Data.

For the validation of 3D geophysical model, the results of 3 exploratory wells are used. Analyzed grades of copper and iron have been used to IP-Rs geophysical results. It could be said that the creation of a 3D geophysical model in copper deposits gives a better understanding of sub-surface anomalies to detect mineralization and optimization of the suggested boreholes locations.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank to MINEAZ Co. (Maadan Jouyan Azar Zamin) for supporting geophysical equipment to survey and gather IP-Rs and Magnetic data and also boreholes data and the publication of these results. Authors are also greatly thankful to Kasra Zanganeh Parsian the owner and employer of Sheikhdar Abad deposit.

REFERENCES

1. Kazem Alilou, S., Norouzi, GH. And Dowlati, F., Abedi, M., IP-Rs Geophysical 3D Modelling of Cu-Fe Skarns; A Case Study Ghalandar Skarn Deposit. 18th Iranian Geophysical Conference. Tehran (Iran) May, 2018.
2. Kazem Alilou, S., Induced Polarization and Electrical Resistivity geophysical report of Sheikhdar Abad copper deposit. Mineaz Co. June 2020.
3. Kazem Alilou, S., Application of Fuzzy decision making approach in 2D mineral potential mapping and its comparison with 3D magnetic geophysical presentation in Ghalandar Zone, West Azarbaijan province of Iran, Master of Science Thesis, Mining Engineering – Mineral Exploration, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. March 2015.
4. Babaei, M. Abedi, M. Norouzi, Gh.H. and Kazem Alilou, S., Geostatistical Modeling of Electrical Resistivity Tomography for Imaging Porphyry Cu Mineralization in Takht-e-Gonbad Deposit, Iran. Journal of Mining and Environment (JME), Vol. 19, No. 1, 2020.
5. Li, Y., Oldenburg, D, W, 3-D inversion of induced polarization data, GEOPHYSICS, VOL. 65, NO. 6 (NOVEMBER-DECEMBER 2000); P. 1931–1945.

6. Rutley, A., Oldenburg, D. W., Shekhtman, R., 2D and 3D IP/Rs inversion for the interpretation of Isa style targets. ASEG 15th Geophysical Conference and Exhibition, Brisbane, Australia. August 2001

Innovative passive microseismic methods in oil and gas industry

M. Hosseini¹, D. Kiani Golshoori², A. Songhori³, H. Rahimi⁴

Ph.D. student of Geophysics - seismology, University of Tehran, marezahosseyni@ut.ac.ir

Petroleum PhD student, Naft Abadan University, dkianigolshoori@gmail.com

Postgraduate Student, the Abdus Salem International Center for Theoretical Physics (ICTP), Earth System Physics Section, Trieste, Italy, Songhori@ictp.it

Professor, Department of Seismology, University of Tehran, rahimih@ut.ac.ir

ABSTRACT

Passive microseismic surveys have some fascinating applications, especially in the fields of geophysics and seismology. By deploying passive sensors, scientists can gather data on the subtle vibrations and movements within the Earth's crust, helping to understand seismic hazards and improve earthquake prediction models. Another significant application is in the exploration of subsurface structures, particularly in the oil and gas industry. Passive microseismic monitoring is employed to detect and locate microseismic events generated during hydraulic fracturing (fracking) processes. The method of low-frequency seismic sounding (LFSS) is based on analyzing spectral properties of low-frequency (1-10 Hz) natural seismic background, changing above oil deposits. The effect of change in the low-frequency range of natural microseismic background above oil and gas deposits has been known since the 1990s and it has been observed in various oil and gas regions.

KEYWORDS: MSM, AMBIENT NOISE, LOW-FREQUENCY, PASSIVE SEISMIC, OIL

INTRODUCTION

Low-frequency seismic sounding (LFSS) relies on the analysis of spectral properties found within the natural seismic background, specifically in the 1-10 Hz frequency range, which undergoes variations above oil deposits. The phenomenon of alterations in the low-frequency spectrum of the natural microseismic background above oil and gas reserves has been recognized since the 1990s and has been documented in diverse oil and gas regions [1].

In 2005, the creators of the LFSS technique proposed a theory suggesting that unusual peaks in the spectrum are resonant in nature. Every layered geological medium possesses its distinct frequency characteristics, and the presence of oil and gas deposits adds an extra layer of contrast to the cross-section, leading to alterations in the configuration of the spectral peaks (Figure 1) [2]. The shift is attributed to the fact that hydrocarbon deposits induce abnormal reflections of low-frequency (1-5 Hz) longitudinal waves [3].

In exploration operations on hydrocarbon reserves, microseismic survey based on method (LFSS) has several features such as predicting oil and gas prospects, determining hydrocarbon deposits, and identifying non-structural hydrocarbon deposits. Microseismic surveys based on technique (LFSS) include a wide range of operations such as field observations, full-wave numerical simulation, and data interpretation and processing (Figure 2) [4].

It is well known that rocks in fault areas have elastic properties that generate local amplifications of the horizontal ground motion during earthquakes. Fault zones are generally characterized by a highly fractured low-velocity belt (damage zone) that may be hundreds of meters wide, bounded by higher-velocity material (host rock) that can extend for some kilometers [5].

MSM is based on the application of the Earth's natural microseismic field, in which the vertical component is predominantly specified by the Rayleigh waves' contribution. When solving the inverse problems, there is used a fast procedure of inverse of the spatial distribution of microseismic field measured spectral intensities into geological medium depth cross-section. The mentioned procedure is founded on the general physical theory and is acknowledged in the series of field experiments, and according to the results of calculations using digital models.

As a result of work fulfillment, depth cross-sections shall be presented along profile observation lines, enabling the establishment of the absence or availability, location, and orientation of the Earth crust linear disjunctions.

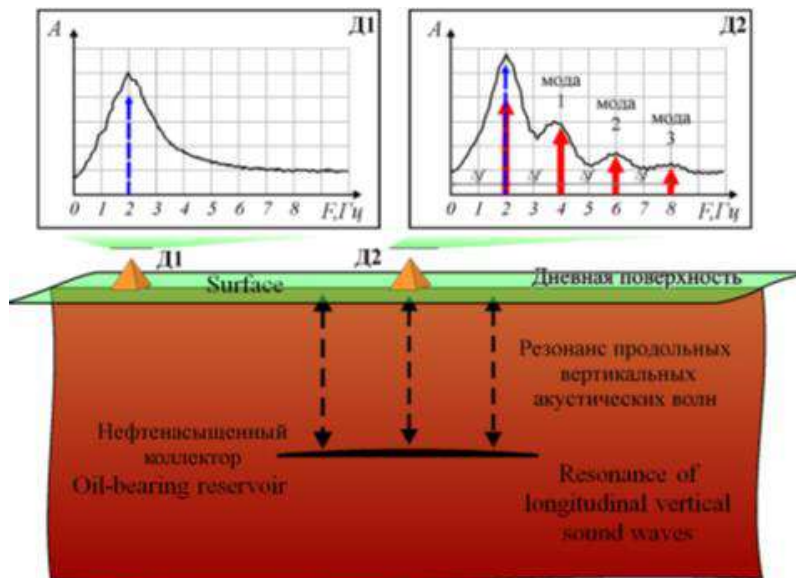


Figure 1: Changes in the spectrum structure of the hydrocarbon deposit based on the model of a geological geophysical cross-section in the form of homogeneous half-space [4].

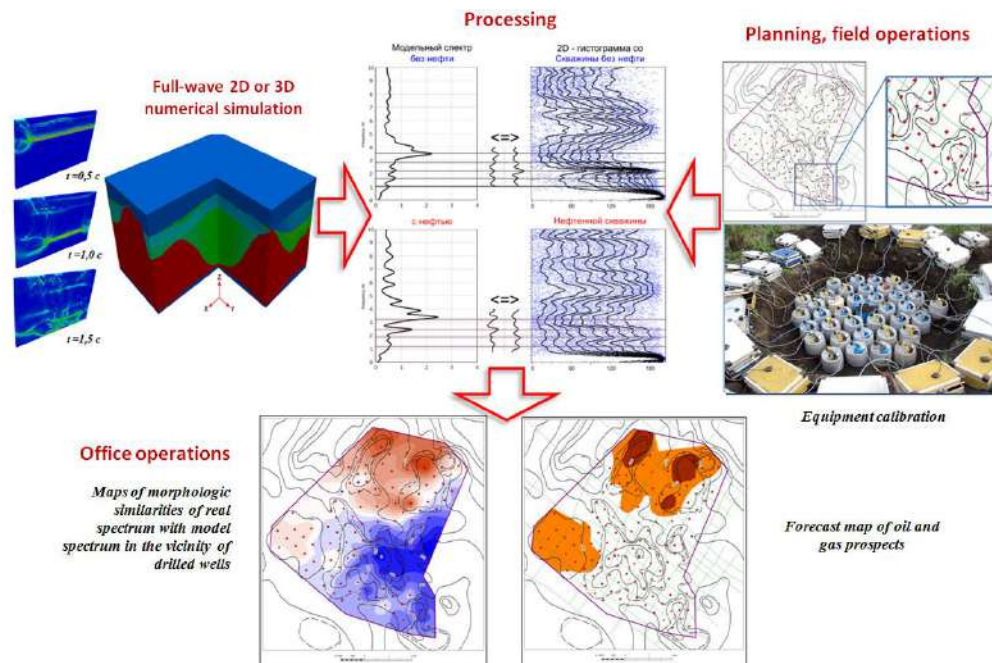


Figure 2: Stages of microseismic surveys based on the LFSS technique [4].

METHOD

MSM MAIN APPROACH

For studying deep structure peculiarities, we used the microseismic-sounding method. This method is based on the fact that crustal heterogeneities distort the spectrum of the low-frequency microseismic field in their vicinity; to be precise, on the Earth's surface, spectral amplitudes of a certain frequency f decrease above high-velocity heterogeneities and, vice versa, increase above low-velocity ones. The frequency f is connected with the depth of heterogeneity H and with the velocity of Rayleigh fundamental mode $VR(f)$ by the formula $H \approx 0.4VR(f)/f$ [14, 12].

The method is implemented under the assumption that the vertical component of the microseismic field is predominantly determined by the contribution of the fundamental Rayleigh modes. The problem of the method's precision and resolution was solved by the authors experimentally and on the basis of numerical simulation. The experimental estimates on test objects indicate that error in reconstruction of vertical boundaries of large velocity heterogeneities can reach 4% of sounding wavelength, or 8% of heterogeneity bedding depth. Error in reconstruction of horizontal boundaries for large heterogeneities is estimated by the same values. The problem of object classification (small or large) was solved on the basis of numerical simulation. It has been shown that if the sizes of heterogeneities exceed the Rayleigh wavelength 1.5 times or more, then illumination of heterogeneities by microseismic waves from all directions allows researchers to reconstruct vertical and horizontal boundaries quite precisely (in absence of measurement errors). Such heterogeneities are considered large [6, 7, 8, 9,11].

The position of "gravity centers" for small heterogeneities (with sizes less than the Fresnel zone of the corresponding Rayleigh wave) in horizontal and depth plans also can be reconstructed precisely, with

no dependence on the ratio between heterogeneity size and wavelength. However, in this case, the form of inclusions is seen as a generalized cloud with sizes comparable to the Fresnel zone. Two small heterogeneities with the distance between them being less than the Fresnel zone are seen as a united gravity center, but they begin to separate visually if the distance between them is 20% of the sounding wavelength and more [13, 14].

The suggested method does not allow absolute values of seismic wave velocities to be estimated but outlines the boundaries of an object, similar to the reflection method in the seismic survey. Analogous to the reflection method, the resulting image may “migrate” in depth depending on the velocity model set for the studied area. Due to its relative character, the method is effective in complex with other geophysical methods, or in the case of interpolation. The technique for this method has been elaborated and tested in model calculations and a series of experimental studies. It allows us to determine the deep structure of complex geological objects based on utilizing the background microseismic field [10,11,15].

DISCUSSION

The MSM method is essentially sensitive to velocity variations due to the relative changes in amplitude spectrum to the reference station along the profile, and areas with lower relative velocity will have higher spectral amplitude ratios. Since the velocity variations in the study area in addition to the crushed zones and faults may depend on the lithology. Therefore, for each profile (Case Study), the possibility of correlating observed anomalies with lithology and faults in the area should be investigated using existing geological maps and cross-sections.

REFERENCES

- [1] Grafov, B.M., Arutyunov, S.L., Kazarinov, V.E., Kuznetsov, O.L., Sirotinsky, Y.V., Suntsov, A.E., "Analysis of geoaoustic radiation of low-frequency deposits when using ANCHAR technique", *Geophysics*, vol. 5, pp. 24-28, 1996.
- [2] Biriartsev, E.V., Biriartsev, I.N., Plotnikova, I.R., Khabibulin, N.Y., Shabalin, E.V., "The analysis of microseisms spectrum at prospecting of oil reservoir on Republic Tatarstan", EAGE Conference, Saint Petersburg, Russia, 2006.
- [3] Ryzhov, V.A., Ryzhov, N.Y., Shabalin, E.V., Biriartsev, I.R., Sharapov, I.R., "Features of passive low-frequency seismics", *EAGE Conference, Gelendzhik*, Russia, 2013.
- [4] Sharapov, I.R., Shabalin, N.Y., Biriartsev, E.V., Feofilov, S.A., Ryzhov, V.A., "Innovative passive microseismic methods in oil and gas industry - application experience in Russia", 2015.
- [5] Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., et al., "The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review", *Earth-Science Reviews*, vol. 79, no. 3-4, pp. 205-227, 2006.
- [6] Gorbatikov, A., Larin, N., et al., "The microseismic sounding method: Application for the study of the buried diatreme structure", *Doklady Earth Sciences, Springer*, 2009.
- [7] Gorbatikov, A., Montesinos, F., et al., "New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from low-frequency microseismic sounding: An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis", *Surveys in Geophysics*, vol. 34, no. 4, pp. 463-489, 2013.
- [8] Gorbatikov, A., Nikolaev, A., et al., "Microseismic Sounding Technology Development for Engineering Applications", *2014 International Conference on Engineering and Telecommunication, IEEE*.
- [9] Gorbatikov, A., Ovsyuchenko, A., et al., "The structure of the Vladikavkaz Fault Zone based on the study utilizing a complex of geological-geophysical methods", *Seismic Instruments*, vol. 47, no. 4, pp. 307-313, 2011.
- [10] Gorbatikov, A., Stepanova, M.Y., "Statistical characteristics and stationarity properties of low-frequency seismic signals", *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 44, no. 1, pp. 50-59, 2008.

- [11] Kalinina, A., Ammosov, S., et al., "Microseismic identification of geological and tectonic structures in the Komjatice Depression (Western Carpathians)", *Geologica Carpathica*, vol. 60, no. 4, pp. 331-338, 2009.
- [12] Rogozhin, E., Gorbatikov, A., et al., "Deep structure and volcanic activity of Mount Elbrus and a portion of the Elbrus–Tyrnyauz valley: Geological and geophysical data", *Doklady Earth Sciences*, Springer, 2016.
- [13] Sobisevich, A., Zhostkov, R., "Taking into Account the Influence of Relief in the Method of Microseismic Sounding", *Doklady Earth Sciences*, Springer, 2018.
- [14] Yanovskaya, T., "On the theory of the microseismic sounding method", *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 53, no. 6, pp. 819-824, 2017.
- [15] Gorbatikov, A., Stepanova, M.Y., et al., "Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium", *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 44, no. 7, pp. 577-592, 2008.

Reducing Uncertainty in Probabilistic surface displacement hazard analysis in Iran, Case Study: North Tabriz fault

M. Hosseini¹, A. Songhori², H. Rahimi³

Ph.D. student of Geophysics - seismology, University of Tehran, marezahosseyeni@ut.ac.ir

Postgraduate Student, the Abdus Salem International Center for Theoretical Physics (ICTP), Earth System Physics Section, Trieste, Italy, Songhori@ictp.it

Professor, Department of Seismology, University of Tehran, rahimih@ut.ac.ir

ABSTRACT

The probabilistic fault displacement hazard analysis is one of the newest methods of estimating the amount of probabilistic displacement in fault surface rupture areas. Estimating the hazard caused by surface ruptures in strike-slip faults in Iran is important due to possible hazards such as the destruction of urban areas. In our previous study, we estimated the possible displacement and the exceedance rate for different scenarios for principle displacements. In the next step, we are looking to enter the geometrical parameters of the source such as dip, depth, and rake. According to the observation of aerial photos and field studies of surface rupture, the amount and level of hazard on the hanging wall and the footwall are not the same. In our previous study on the Tabriz fault, the amount of possible displacement on the hanging wall and the footwall was found to be equal, which is an assumption far from reality. Presenting a mathematical relationship through observed displacement values in strike-slip faults in Iran is our next goal.

KEYWORDS: NORTH TABRIZ FAULT, PFDHA, SURFACE RUPTURE, UNCERTAINTY.

INTRODUCTION

Reducing earthquake losses and damage requires predicting the amplitude and location of ground movements and possible surface displacements in the future. Fault displacement hazard assessments are based on empirical relationships obtained using historical seismic rupture data. These relationships evaluate the probability of co-seismic surface slip of ruptures on the fault (primary) and outside the fault (distributed) for different magnitudes and distances to the causal fault. In addition, these relationships make it possible to predict the extent of fault slip on or near the active fault [1].

The north Tabriz fault is one of the components of this right-lateral strike-slip system, which has not had a major earthquake during the last two centuries. Among the many historical earthquakes in the Tabriz region, only two devastating earthquakes in 1042 and 1721 with a magnitude of $M_s \sim 7.3$ and one in 1780 with a magnitude of $M_s \sim 7.4$ were associated with a surface rupture along the north Tabriz fault [2]. The 1721 and 1780AD earthquakes had at least 50 and 60 km of surface rupture (about 40 km overlap), respectively.

A method for estimating the probabilistic fault displacement hazard for strike-slip faults in the world has been presented and mapped due to the impact of fault displacement hazard on the fault trace type and the complexity of this effect and hazard of fault displacement for strike-slip faults studied by

Petersen et al. (2011). Principal displacements are considered primary ruptures that occur on or within a few meters of the active fault [3].

Due to the passage of the north Tabriz fault through the city of Tabriz (Fig. 1), the probabilistic displacement has been estimated and a 2D map is explored and probabilistic fault displacement for two given scenarios ($M_w \sim 7.7$ within 645 years and $M_w \sim 7.3$ within 300 years) by considering 5% in 50 years have been obtained (Fig. 2).

For the north Tabriz fault, due to the devastating large historical earthquakes and the possible rupture hazard of the north Tabriz fault in the future, using the probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA) method is essential.

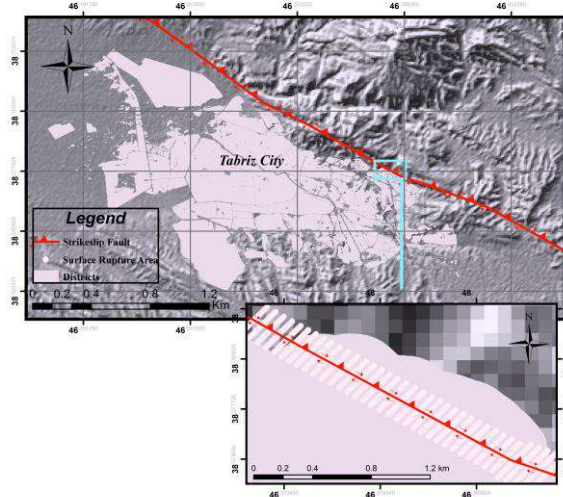
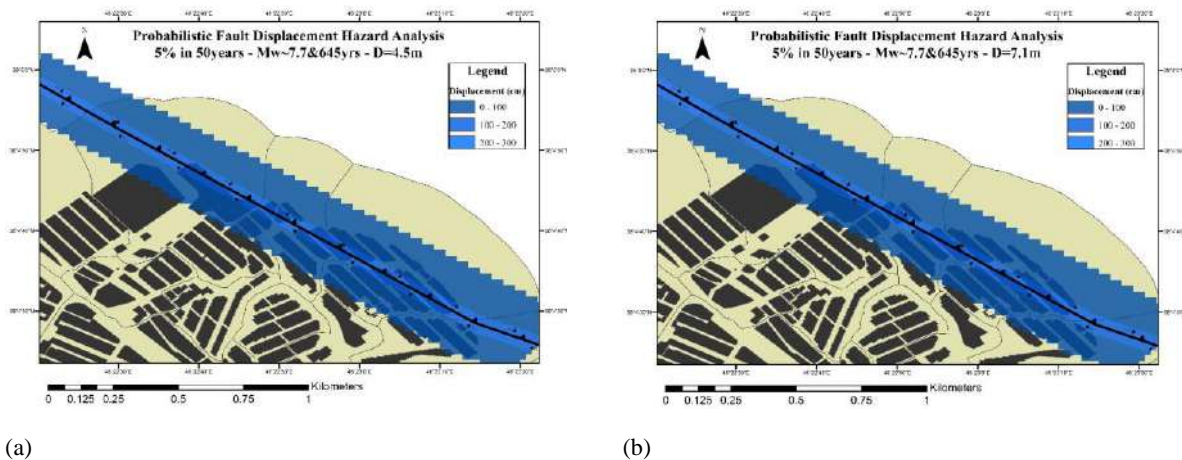


Figure 1. The north Tabriz fault and its vicinity to the populated Tabriz city that even a part of this fault passes through the town. The probabilistic displacement area in Tabriz city is shown, assuming a simple fault trace (due to the lack of sufficient instrument data); these possible displacements can be seen up to a distance of ± 150 meters from the fault trace in the future [4].



(a)

(b)

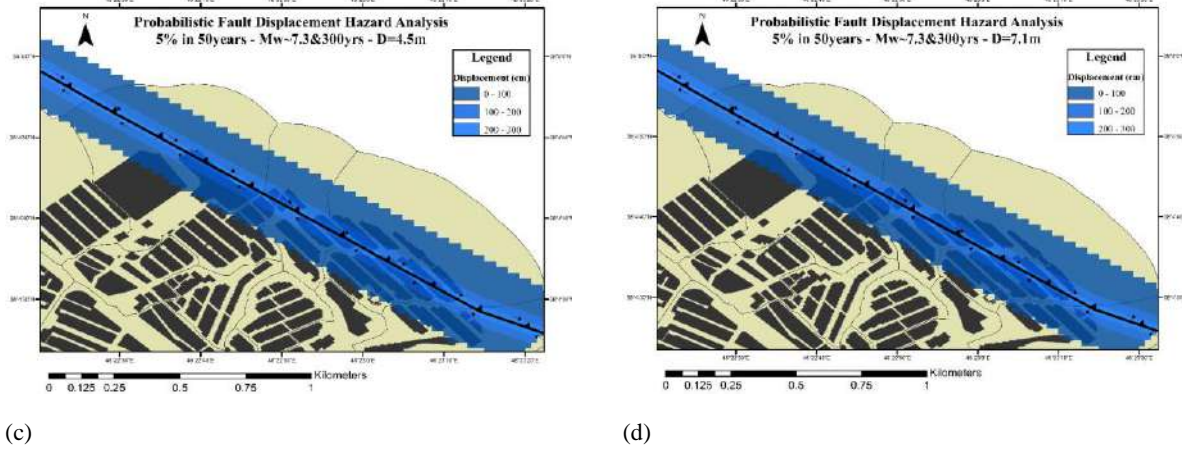


Figure 2. Probability Displacement of 5% in 50, a) Mw~7.7 and return period of 645yrs for D=4.5m, b) Mw~7.7 and return period of 645yrs for D=7.1m, c) Mw~7.3 and return period of 300yrs for D=4.5m and d) Mw~7.3 and return period of 300yrs for D=7.1m [4].

METHOD

Probabilistic seismic hazard analysis has been used since its development in the late 1960s and early 1970s to assess shaking hazards and establish seismic design parameters [5]. A method for analyzing the hazard of probabilistic fault displacement was introduced in two approaches of earthquake and displacement [6].

The exceedance rate of probabilistic displacement due to the principal fault (on the fault) [3]:

$$\lambda(D \geq D_0)_{xyz} = \int_{m,s} f_{M,S}(m,s) P[sr \neq 0|m] * \int_r P[D \neq 0|z, sr \neq 0] * P[D \geq D_0|l/L, m, D \neq 0] f_R(r) dr dms \tag{1}$$

The magnitude of the earthquake is indicated by (m) in (1), and to assess the displacement hazard due to fault rupture, these probability density functions describe displacement potential due to earthquakes on or near a rupture [3].

DISCUSSION

The lack of large instrumental earthquakes in northwestern Iran leads to more significant epistemic uncertainty in the obtained values. Despite following the Petersen et al. (2011) study which has been associated with favorable properties such as fault mapping accuracy, and a survey of various fitting models, we mention some weaknesses here.

1. The geometry of the causal fault is not considered, so the characteristics of the source, such as dip, depth, and rake, are not used, which will increase the uncertainty in calculating numerical values.
2. The attenuation relationships used for this hazard analysis are also taken from a minimal database that has used only 22 historical and instrumental earthquakes in the world.

REFERENCES

- [1]. Baize, S., Nurminen, F., Sarmiento, A., Dawson, T., Takao, M., Scotti, O., Azuma, T., Boncio, P., Champenois, J., Cinti, F.R., & Civico, R. (2020). A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses. *Seismol. Res. Lett.*, 91, 499-520. <https://doi.org/10.1785/0220190144>
- [2]. Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabaniyan, E., Abbassi, M.R., Fegghi, K., & Solaymani, S. (2003). Paleearthquakes and slip rates of the North Tabriz Fault, NW Iran: Preliminary results. *Ann. Geophys-Italy.*, 46(5), 903-916. <https://doi.org/10.4401/ag-3461>
- [3]. Petersen, M.D., Dawson, T.E., Chen, R., Cao, T., Wills, C.J., Schwartz, D.P., & Frankel, A.D. (2011). Fault displacement hazard for strike-slip faults. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(2), 805-825. <https://doi.org/10.1785/0120100035>
- [4]. Hosseini, M., & Rahimi, H. (2022). Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis for the North Tabriz Fault. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 3571-3583.
- [5]. Cornell, B.Y.C.A. (1968). Owing to the uncertainty in the number, sizes, and locations of future earthquakes, it is appropriate that engineers express seismic risk, as design winds or floods are, in terms of return periods. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- [6]. Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A.R., Ake, J.P., Slemmons, D.B., & Toro, G.R. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra.*, 19, 191-219. <https://doi.org/10.1193/1.1542891>

Time-Domain Induced Polarization Tomography Inversion

Seyyed Sajjad Pourhashemi³⁷, Reza Ghanati³⁸

Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Induced polarization (IP) tomography measurements as a near-surface geophysical method can provide information about the degree of chargeability of subsurface materials, and are commonly used in mineral exploration, engineering studies as well as in environmental investigations. The purpose of these measurements is to obtain the distribution of polarizability characteristics inside an object, generally below the surface, at the boundary of the object, or outside the area in question. The result of such measurements can be mathematically modeled for the specific polarizability properties by the solution of Poisson's equation restricted by appropriate boundary conditions. In this paper, we focus on the importance of simulating induced-polarization responses and retrieving chargeability distributions in geo-materials to enhance the characterization of subsurface structures. We present the methods for forward modeling and nonlinear inversion of induced-polarization measurements. To this end, in the first step, Poisson's equation for a two-dimensional ground with arbitrary distribution of conductivity is solved using the finite difference numerical method and in the next step, based on the existing relations between conductivity and chargeability (Siegel's formulation), the apparent induced polarization response is calculated. Finally, we solve the nonlinear chargeability inversion problem following a nonlinear apparent resistivity inversion. This is achieved by imposing physical constraints to prevent the estimation of unrealistic model parameters, using a Newton-based optimization method. To evaluate the efficiency of the proposed methodology, we utilized the proposed algorithm to a simulated example and a real data set. Our numerical results show that the algorithm reliably represents the main features and structure of the Earth's subsurface in terms of the resistivity and chargeability models. All the algorithms presented in this paper have written in the MATLAB programming language.

KEYWORDS: FINITE DIFFERENCE, NEWTON-BASED METHOD, NONLINEAR INVERSION, POISSON'S EQUATION, TIME DOMAIN INDUCED POLARIZATION.

INTRODUCTION

Historically, induced polarization tomography measurements as a non-invasive and near-surface geophysical method have been widely used for exploring metallic ore deposits. However, in recent years, it has been increasingly utilized in a wide range of engineering and environmental applications. Induced polarization measurements are performed in two different time and frequency domains. Depending on the type of signal injected to the ground, there is a difference in the type of response recorded. Naturally, in the frequency domain we would face more information from measurements and due to the existence of more interpretive parameters, the uncertainty in modeling and interpretation of subsurface structures decreases. Frequency domain surveys, conducted at specific

³⁷ se.pourhashemi@ut.ac.ir

³⁸ rgghanati@ut.ac.ir

frequencies, can be time-consuming and costly, and equipment availability may be limited. Hence, due to the project's time sensitivity, time domain surveys are typically preferred. A review of the induced-polarization method can be found in [1-3]. Besides advances in foundational comprehension of induced polarization phenomena, the TDIP tomography method has shown growing progress and significant developments in many fields of research from forward modeling to inversion in recent years. Early inversion algorithms parameterized the ground model into blocks with low numbers, and maintained the same for inversions [4-6]. Systems of overdetermined equations were solved and convergence of the algorithm were judged solely on the basis of misfit. But due to the complexity of the structure of the electrical conductivity of the earth, the display of several blocks does not adequately show the actual distribution of this physical property. This problem can be solved for a large extent of model parameters by discretizing the terrain to a large number of blocks, and solution of the inversion problem as an optimization process, where a model objective function is minimized with relatively sufficient fit to the data. The very first effort to model the effect of the presence of chargeable material on the effective resistivity was based on the study of [7]. Following the model presented by [7], [8] proposed a two-step inversion approach to retrieve a chargeability model. Their method was based on a DC resistivity inversion at the first step, and at the second step, assuming that the DC resistivity inversion estimates the effective resistivity model instead of the intrinsic resistivity model, the chargeability model is inverted. [9] suggested a 2D inversion of induced polarization data in specular cross-section tomography experiments. [10] presented an approximate inversion of the induced polarization data which is valid for low resistivity contrasts. Later, [11] extended this approach to 3D inversion of induced polarization data. [12] developed a computationally simpler method based on a low-contrast (resistivity and chargeability) approximation. However, this approach has now diminished in value due to subsequent computational advancements. [13] developed a software for time-lapse two-and three-dimensional induced polarization data. Despite progress in application of TDIP method, the principles behind inversion of resistivity and induced-polarization data have not really changed over recent years.

In this paper, [7] and the algorithm proposed by [8], we present a two-step inversion of induced-polarization data in which the resistivity data are first inverted and at the second step the polarizability model is recovered using a non-linear chargeability inversion. In the non-linear inversion, the non-linearity of the underlying problem is linearized using a sensitivity matrix containing partial derivatives of measurements with respect to model parameters. The most obvious way to determine those entries is the application of the forward matrix method which is rather time-consuming [13].

In the following, we first provide the theory and mathematical formulation of the DC resistivity and induced polarization forward modeling. Next, we present a non-linear inversion method under the spatial smoothness constraints aimed at retrieving resistivity and chargeability models. We then evaluate the efficiency of our approach using both synthetic and field data sets of induced polarization. We end the paper with conclusions.

METHODOLOGY

Induced polarization measurements are usually accompanied with the direct current resistivity measurements. The merit of utilizing induced polarization method alongside pure direct current lies in the difficulty of detecting the resistivity signature caused by disseminated chargeable material. The chargeability signature resolved by the induced polarization method may be strong and relatively independent of the geometry of the resistivity structure. When subjecting the ground to an external

field, in the specific form of direct current (low-frequency current), the potential experiences a rapid and sudden increase in the absence of chargeability referred to as the instantaneous potential (V_{∞}). This increase is followed by a gradual and exponential growth until it reaches a steady and constant value. This final value, which is utilized to determine the apparent resistivity, is commonly referred to as the primary potential (V_p). When the electrical field is interrupted, there is an initial sharp drop in potential, known as the secondary potential (V_s), which then decreases exponentially as the charges return to their initial state. This subsequent potential change is influenced by the polarizability characteristic of the earth. However, in real data, it is not feasible to measure the secondary potential because it corresponds to the moment of current transmission. Therefore, it cannot be practically measured and is solely defined theoretically in the context of forward modeling relations [8].

[7] first defined the principle concept of chargeability as a physical property and demonstrated that the induced polarization response (η_a) is influenced by the subsurface distribution of intrinsic chargeability. Building upon the work of [7] the induced polarization response of a uniform earth with the intrinsic conductivity σ_{∞} and intrinsic chargeability η is expressed as

$$\eta_a = \frac{f_{dc}(\sigma_{\infty}(1 - \eta)) - f_{dc}(\sigma_{\infty})}{f_{dc}(\sigma_{\infty}(1 - \eta))} \quad (1)$$

where f_{dc} stands for the direct current resistivity forward operator. It is noteworthy that the terms $f_{dc}(\sigma_{\infty}(1 - \eta))$ and $f_{dc}(\sigma_{\infty})$ are proportional to the primary potential (V_p) and the secondary potential (V_s), respectively. Equation 1 reveals that the apparent chargeability is computed based on two consecutive applications of the resistivity forward operator for two conductivity models, that is, $\sigma_{\infty}(1 - \eta)$ and σ_{∞} . The forward modeling of electrical potential due to an arbitrary conductivity distribution and for a point source is expressed in terms of Poisson's equation [14].

$$-\nabla \cdot (\sigma_{\infty} \nabla V_{\infty}) = I \delta(r - r_s) \quad (2)$$

where V_{∞} is the potential that is measured in the absence of chargeability, I indicates the injected current, r_s is the position of the point sources of the current electrode, and δ is the Dirac delta function.

Assuming \vec{E} is the external field, the applied current density vector is $\vec{j} = \sigma_{\infty} \vec{E}$. The vector $\vec{j}(1 - \eta)$ plays the role of \vec{j} when there is a distribution of dipoles. Therefore, the total current density at the time of existence of dipoles in the ground with chargeability is equal to $\sigma_{\infty}(1 - \eta)\vec{E}$, and the net effect is to reduce σ_{∞} by factor $(1 - \eta)$. Using Siegel relations, the ground chargeability effects are

simulated by employing the forward operator of the DC resistivity f_{dc} with effective conductivity

$$\sigma_{\eta} = \sigma_{\infty}(1 - \eta), [7]:$$

$$V_{\eta} = f_{dc}[\sigma_{\infty}(1 - \eta)] \quad (3)$$

Insertion Equation 3 into Equation 2 yields:

$$-\nabla \cdot (\sigma_{\infty} (1 - \eta) \nabla V_{\eta}) = -I \delta(r - r_s) \quad (4)$$

INVERSION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY DATA

The inverse problem of electrical resistivity tomography (ERT) data is formulated as a nonlinear problem and is usually solved in an iterative process that applies a forward modeling for arbitrary resistivity distribution. The relationship between the observed data and model parameters is defined as:

$$\mathbf{d} = \mathbf{f}(\mathbf{m}) \quad (5)$$

By linearizing Equation 5 using a first-order Taylor expansion, we have

$$\Delta \mathbf{d} = \nabla \mathbf{f}(\mathbf{m}) \Delta \mathbf{m} \quad (6)$$

In these equations, $\mathbf{d} \in \mathcal{R}^{m \times 1}$ is the observed data, $\mathbf{m} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ is the model parameters (here, \mathbf{m} includes subsurface conductivity distribution), $\mathbf{f}(\mathbf{m}) \in \mathcal{R}^{m \times n}$ is the non-linear forward operator, $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})$ is a vector of the difference between observed and theoretical data, $\nabla \mathbf{f}(\mathbf{m})$ is a sensitivity matrix that represents the changes in the response of the forward modeling to changes in the model parameters with elements $J_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j}$, and $\Delta \mathbf{m}$ is a model correction (perturbation) vector.

In the inversion process, we seek to minimize the difference between observed and theoretical data using the following cost function: a measure of the goodness of fit between the data and the model parameters, accounting for noise [16]:

$$\Phi_{\mathbf{d}} = \min ||W_{\mathbf{d}}(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))||_{l_2}^2. \quad (7)$$

The process of solving most of geophysical inverse problems is often highly unstable, so that the smallest changes in measurements can lead to large variations in the estimated model. The ERT nonlinear inversion problem is also inherently ill-posed resulting in non-unique estimates of the model parameters. To numerically solve the inverse problem we must consider data fidelity, model residual, and physical constraints to reduce instability of the inversion and the size/dimension of the model space to increase the chance of obtaining a geologically meaningful model. To that end, we form a

weighted sum of the data fidelity Φ_d and the stabilizer function Φ_m using a weighting factor α , and find the solution which minimizes the objective function as given by

$$\Psi(\mathbf{m}, \alpha) = \min(\Phi_d + \alpha\Phi_m) = \min\|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))\|_{l_2}^2 + \alpha\|\mathbf{W}_m(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{apr})\|_{l_2}^2, \quad (8)$$

where α is the damping factor, \mathbf{W}_d represents the data weighting matrix, comprised of the inverse of the data error, assuming that the noise for each experiment is independently and normally distributed, $\mathbf{W}_m = a_h \mathbf{D}_h^T \mathbf{D}_h + b_h \mathbf{D}_V^T \mathbf{D}_V$ is the model constraint matrix and the positive coefficients $a_h = 1$ and $b_h = 0.5$ are used to promote heightened smoothness in either of horizontal and vertical directions, and m_{apr} is the prior model. It is worth mentioning that different norms (l_p) can be used for misfit and regularization terms. When using the l_2 norm for misfit, all the data is given equal weight, leading the algorithm to be influenced by noise that falls outside the desired range. This can result in a suboptimal fit. On the other hand, when the l_1 norm is employed, the algorithm becomes less susceptible to noise; however, from a mathematical and derivational standpoint, it presents a more complex solution. Hence, utilizing the l_2 norm is preferred because it simplifies the mathematical calculations in the context of misfit. The choice of which norm to use in the regularization term depends on the geological conditions and the specific model requirements. In models where we are seeking sharp or sparse representations, the l_1 norm is employed. Conversely, in models using the l_2 norm we aim to obtain smoother and more continuous estimations [16].

By linearization using the Taylor expansion and replacing the first and second terms of the expansion, one obtains

$$\min \|\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}) - \nabla \mathbf{f}(\mathbf{m}) \Delta \mathbf{m}\|_{l_2}^2 + \alpha \|\mathbf{W}_m(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{apr} + \Delta \mathbf{m})\|_{l_2}^2. \quad (9)$$

By taking the derivative of the objective function with respect to $\Delta \mathbf{m}$ and solving the objective function produces the following iterative numerical method, i.e.

$$\Delta \mathbf{m} = \left(\mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J}(\mathbf{m}^k) + \alpha (a_h \mathbf{D}_h^T \mathbf{D}_h + b_h \mathbf{D}_V^T \mathbf{D}_V) \right)^{-1} \left(\mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \alpha (a_h \mathbf{D}_h^T \mathbf{D}_h + b_h \mathbf{D}_V^T \mathbf{D}_V) (\mathbf{m}^{k-1} - \mathbf{m}_{apr}) \right), \quad (10)$$

where \mathbf{J}^T is the transpose of jacobian matrix \mathbf{J} , k shows the k -th iteration of the inversion process, $\Delta \mathbf{m}^{k+1}$ is a search direction at the k -th iteration. The Jacobian matrix or sensitivity function is computed through a highly efficient numerical method, employing a forward matrix calculation within the context of 2.5D finite-difference electrical resistivity forward modeling. $\Delta \mathbf{d} = [\log \mathbf{d} - \log \mathbf{f}(\mathbf{m})]$ to ensure the positivity of the updated conductivity values. At each iteration, the algorithm is calculated by solving the objective function for $\Delta \mathbf{m}$ and the model is updated using $\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \mu \Delta \mathbf{m}$. Furthermore, before the model is updated, using line-search algorithm, the step length μ is determined aimed at averting the iteration divergence. The minimization process is executed with a range of α values, with the objective of selecting the optimal α that results in the smoothest model while maintaining the misfit Φ_d at the desired level. The motivation behind pursuing a smoother model lies in the intention to avoid being misled by non-essential features that may appear in the model but are not crucial for accurately aligning with noisy

measurements. In essence, among the myriad potential solutions (i.e., those adequately fitting the observations within a specified tolerance), our goal is to identify the simplest model—requiring the fewest unnecessary features not demanded by the observed data. This approach is commonly known as Occam's inversion, which involves a two-step inversion process. In the initial step, the emphasis is on minimizing the misfit function within a specified tolerance (i.e., $\chi^2 = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))\|_{l_2}^2/m$, m is the size of the data vector, moves close to one) across a range of regularization parameters. Subsequently, in the second step, the minimization of the objective function persists while maintaining the misfit function at the desired level. Moreover, the iterative process is governed by three stopping criteria; 1) the reduced- χ^2 score ($(\Phi_d/m) < 1$), 2) the root mean square error (RMS = $(100 \times \sqrt{m}^{-1} \|\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}^{k-1})\|_{l_2} < \varepsilon$, $\varepsilon = 4\%$) where m is the length of data, and 3) the number of maximum iteration is exceeded. In other words, if one of these criteria is met, the iterative process is terminated [16].

INVERSION OF TIME-DOMAIN INDUCED POLARIZATION DATA

Reference [8] developed three time-domain induced polarization inversion methods. All methods are based on the chargeability perturbation model according to [7], and they recover a resistivity and a chargeability model after twice implementation of inversion. The first implementation aims to recover a resistivity model, while the second implementation is used to retrieve a chargeability model. The first method, as proposed by [8], involves solving a linear inverse problem under the assumption that the amount of chargeability is small. The second algorithm estimates the chargeability model after two resistivity inversions of perturbed resistivity models. Finally, the third method, which solves a nonlinear problem, includes the most accurate theoretical framework for inversion of induced polarization data. One of the advantages of this method is that it does not require that the chargeability to be small, and it uses a similar algorithm for inversion of resistivity data and induced polarization. Hence, we follow the third induced polarization inversion strategy proposed by [8]. The objective function in the inversion algorithm is expressed as follows:

$$\Delta\eta = \left(J_{IP}(\eta^k)^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d J_{IP}(\eta^k) + \alpha(a_h \mathbf{D}_h^T \mathbf{D}_h + b_h \mathbf{D}_V^T \mathbf{D}_V) + \lambda \mathbf{W}_p \right)^{-1} \quad (11)$$

$$\left(J_{IP}(\eta^k)^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta\mathbf{d} - \alpha(a_h \mathbf{D}_h^T \mathbf{D}_h + b_h \mathbf{D}_V^T \mathbf{D}_V) \eta^{k-1} - \lambda \mathbf{W}_p \eta^{k-1} \right),$$

where J_{IP} is the induced polarization sensitivity matrix as a function of the conductivity obtained from the direct current resistivity inversion, λ is a large positive value (e.g., $\lambda = 10^5$) which penalizes the negative chargeability values, $\mathbf{W}_p = \text{diag}(u(-\eta))$ ($u(x)$ is the step function) displays a diagonal matrix with values of zero or one $\Delta\mathbf{d} = (\eta_a - \eta_{cal})$ is the residual vector.

The inversion begins with a uniform chargeability model (η^0) derived from the geometric mean of the apparent chargeability data as the starting model. The induced polarization sensitivity matrix (J_{IP}) is updated at each iteration. The Jacobian matrix represents the variation of the observational data to the parameters of the model:

$$J_{IP}^{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} \quad (12)$$

and

$$d_i = \eta_\alpha = \frac{V_\eta^i - V_\infty^i}{V_\eta^i} \quad (13)$$

By taking the derivative of apparent chargeability with respect to η_j we have:

$$\frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} = \frac{V_\infty^i}{(V_\eta^i)^2} \frac{\partial V_\eta^i}{\partial \eta_j} \quad (14)$$

Now we only need to calculate $\frac{\partial V_\eta^i}{\partial \eta_j}$. By inserting $\sigma_\eta = \sigma_\infty(1 - \eta)$ as the conductivity that generates the potential V_η into Equation 14, we get

$$\frac{\partial V_\eta^i}{\partial \eta_j} = -\sigma_\infty^j \frac{\partial V_\eta^i}{\partial \sigma_\infty^j} \equiv -\sigma_\infty^j J_{ij}, \quad (15)$$

is a scaled value of the sensitivity for a resistivity problem. σ_∞ and $J_{ij}(\sigma_\infty)$ are the intrinsic conductivity or background

conductivity and the sensitivity matrix derived from the inversion of direct current resistivity inversion from the first step, respectively. The final Jacobian reads

$$J_{IP}^{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} = -\sigma_\infty^j \frac{V_\sigma^i}{(V_\eta^i)^2} J_{ij}. \quad (16)$$

SYNTHETIC MODEL

In this context, the simulated data from the two synthetic models are produced using RESIP2DMODE, an open-source MATLAB code specifically crafted for 2.5D forward modeling of resistivity and induced polarization data [17].

The apparent electrical resistivity and induced polarization responses of the synthetic model are simulated using a linear dipole-dipole setup, with measurements taken from position 0 up to 420 m and a fixed electrode spacing of 10 m at up to 8 levels (n=1-8, where n indicates the number of receiver-transmitter dipole separations). This results in a total of 132 measurements. For the 2.5-D forward modeling, we partition the model into a series of rectangular cells, where the width of the working-area cells matches the unit electrode spacing, and the depth of the cells logarithmically increases in the vertical direction. To better emulate real-world field conditions, we introduce

perturbations into the forward modeling responses, encompassing both apparent resistivity and apparent chargeability data. These perturbations involve the addition of 2% uncorrelated Gaussian-distributed noise with a zero mean, and the magnitude of the noise varies depending on each data point.

The synthetic model, comprises three structures, resembling the inclined vein structures, situated at varying depths beneath the surface. These bodies are embedded within a homogeneous medium characterized by a resistivity of 1000 $\Omega\cdot m$ and a chargeability of 1 mV/V, as illustrated in Figure 1. Table 1 provides details regarding the geo-electrical parameters relevant to Example 1. Throughout the inversion process, lower and upper bounding constraints for resistivity values are established as $[\rho^{low} = 0, \rho^{upper} = 5000] \Omega m$ for synthetic example. Figures 2(a) displays the apparent resistivity and chargeability pseudo-sections, which has been affected by noise. The pseudo-sections do not allow for the accurate identification of the true subsurface structures in terms of geometry and physical properties. Following the strategy proposed for the inversion of apparent resistivity and chargeability data sets, Figures 2(c) show the inverted sections of resistivity and chargeability. In these figures, it is evident that the primary features and structures of the synthetic model are accurately replicated, and no significant undesirable features (artifacts) are observed in the inverted resistivity and chargeability tomograms. Additionally, the top and bottom surfaces of the three structures are clearly resolved in the resistivity section. However, the lower boundary of the third structure (medium 4) is not accurately recovered. In both resistivity and chargeability inversions, the inversion algorithms converge after 20 and 5 iterations, respectively. The root mean square (RMS) data misfit error values for the resistivity and chargeability inversions are 5.32% and 2.4%, respectively.

Table 1. Synthetic geo-electric parameters.

| Number | Region | $\rho(\Omega m)$ | $\eta(mv/v)$ |
|--------|-------------|------------------|--------------|
| 1 | Background | 1000 | 1 |
| 2 | Structure 2 | 200 | 15 |
| 3 | Structure 3 | 100 | 50 |
| 4 | Structure 4 | 10 | 100 |

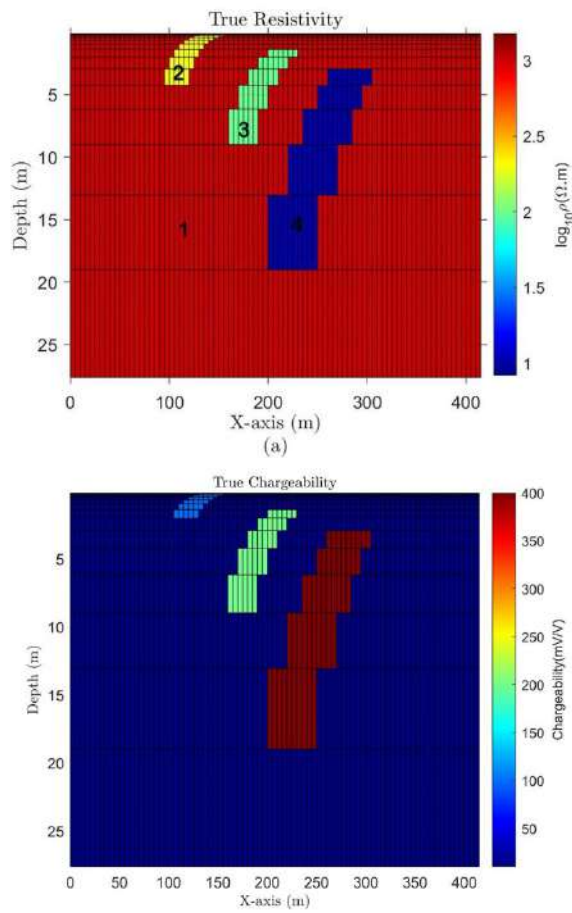


Figure 1. Representation of a) true resistivity and b) true chargeability sections associated with synthetic example containing four different mediums

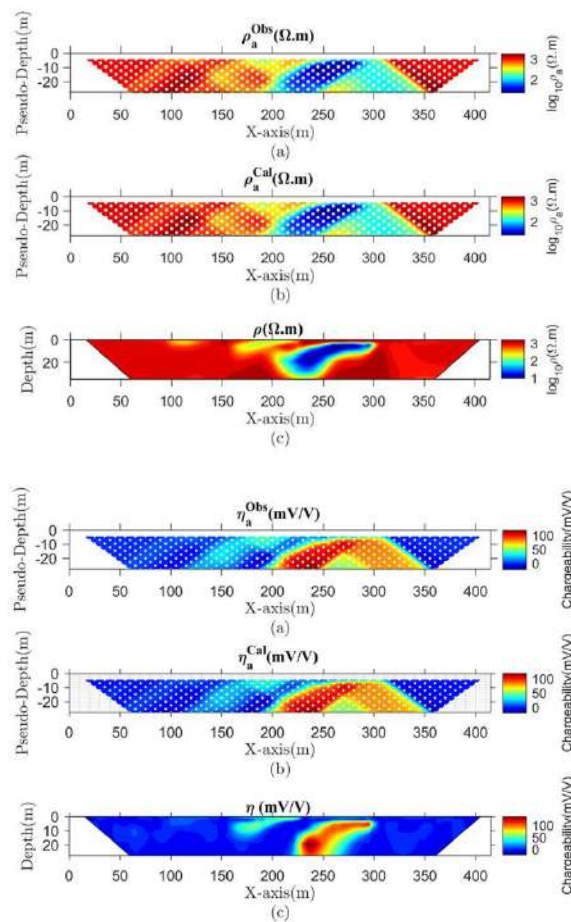


Figure 2. a) Observed apparent resistivity and chargeability pseudo-section, b) calculated apparent resistivity and chargeability pseudo-section, and c) inverted section of resistivity and chargeability for the synthetic model shown in Figure 1.

FIELD EXAMPLE

The study area is situated in the Nikuiyeh region in Qazvin province, Northwest Iran. Geoelectrical measurements, including resistivity and induced polarization tomography methods, were conducted for the exploration of epithermal gold deposits. The study area spans approximately 6.2 Km² in Takestan city, west of the Qaqazan district, and is located about 1.5 km southeast of Nikuiyeh village. In field surveys within the study area, the dipole-dipole array was used. In order to cover the area, a total of 20 dipole-dipole profiles with electrode spacing of 20 m up to 8 levels were deployed over a one-square-kilometer area. The general procedure for the survey involves initially establishing a baseline as a reference line, typically aligned parallel to the outcrop of the mineral or, more generally, parallel to the appearance of anomalies on the ground. Measurements were then taken perpendicular to this line, essentially perpendicular to the trend of the mineralization zone.

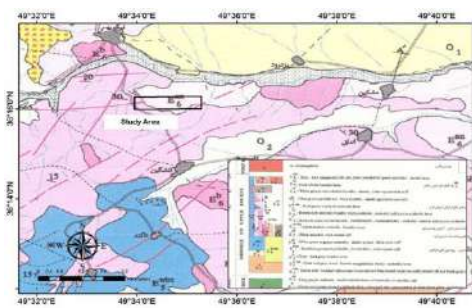


Figure 3. Geology map of the study area, 1:100000. The study area is displayed by a black rectangular.

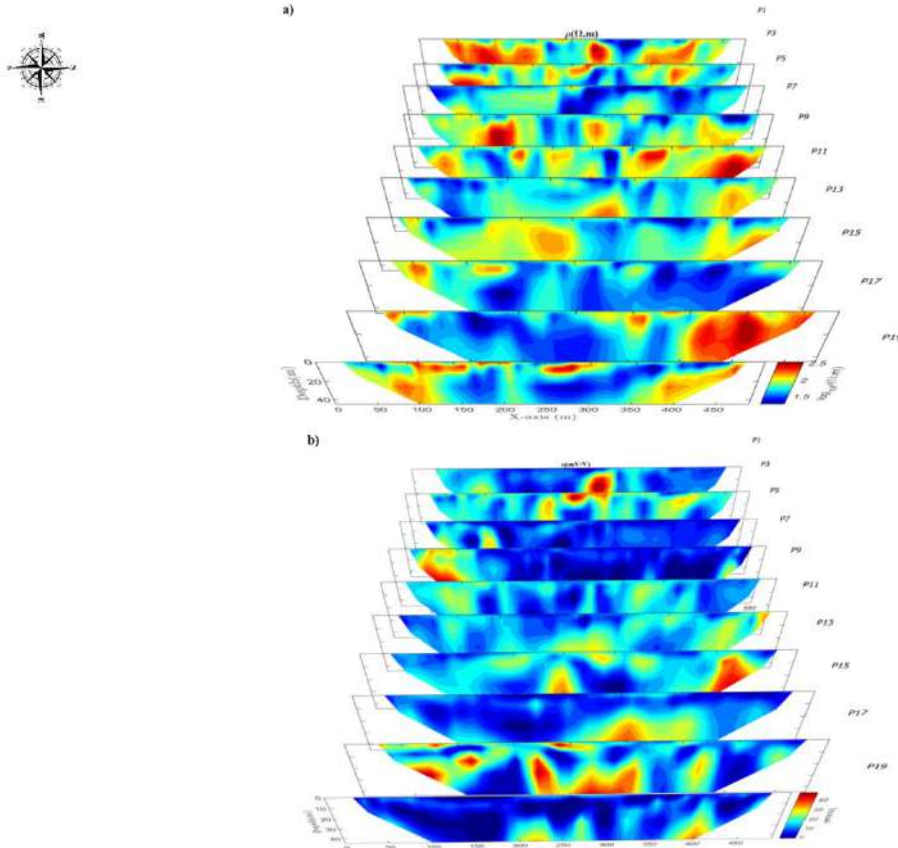


Figure 4. A 3D representation of a) resistivity and b) chargeability sections. Note that for the purpose of representation, only 10 inverted sections are displayed

Figures 4(a) and 4(b) show a three-dimensional representation of the inversion results of the apparent resistivity and induced polarization data associated with 10 profiles.

We also provide a comparison of the resistivity and chargeability tomograms inverted by the commercial software (Geotomo Res2DInv ver. 4.9.18, [18]), for profile 10 of field data, in Figure 3. Visually comparing the resulting tomograms, it is evident that there is a trivial difference between the resistivity and chargeability models obtained from our algorithm and the commercial software.

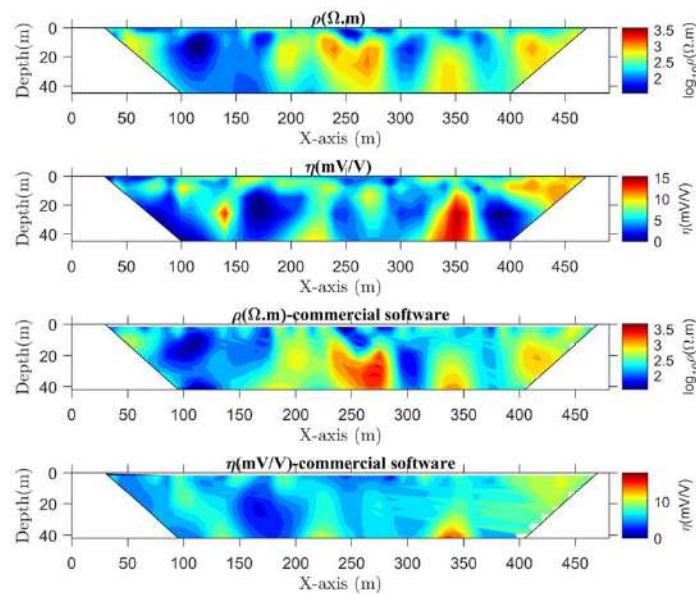


Figure 9. Resistivity and chargeability sections obtained using the proposed algorithm, (a),(b) and the commercial software, (c),(d) (Geotomo Res2DInv ver. 4.9.18), profile 10

CONCLUSION

Given the significance of the inversion process in ensuring a reliable imaging of subsurface features in chargeability models, this paper concentrates on the inversion of time-domain induced polarization data. We introduce a two-step approach for the inversion of induced polarization data. In the first step, the resistivity data undergo inversion, and in the second step, a nonlinear chargeability inversion is employed to retrieve the polarizability model. In this nonlinear inversion, the inherent nonlinearity of the problem is addressed through linearization using a sensitivity matrix consisting of partial derivatives of measurements concerning model parameters. To evaluate the efficiency and precision of our developed induced polarization inversion code package, which encompasses the forward modeling algorithm, sensitivity matrix computation, and inversion algorithm, we conducted tests using synthetic data examples and real field data. The numerical outcomes revealed that the presented inversion algorithm consistently delivers reliable inversion results, faithfully capturing the essential characteristics and structures of the models while avoiding the generation of spurious effects. In essence, beyond the theoretical aspects outlined in this paper, the primary contribution of this study lies in its ability to enhance the resolution of subsurface structures in terms of resistivity and chargeability distribution via a smoothness-constrained inversion approach, all the while preventing the introduction of extraneous features (artifacts) into the inverted models

REFERENCES

- [1] Sumner, J. S. (1976). Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier: Amsterdam.
- [2] Bertin, J., & Loeb, J. (1976). Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization. Volume I: Presentation and Application of the IP Method, Case Histories. Gebrüder Borntraeger: Berlin.
- [3] Fink, J. B., McAlister, E. O., Sternberg, B. K., Wieduwilt, W. G. & Ward, S. H. (1990). Induced polarization: applications and case histories Investigations in Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. DOI: 10.1190/1.9781560802594.

- [4] Pelton, W. H., Rijo, L., & Swift, J. R. (1978). Inversion of two-dimensional resistivity and induced polarization data. *Geophysics*, 43(4), 681-904.
- [5] Sasaki, Y. (1982). Automatic interpretation of induced polarization data over two-dimensional structures. *Memories of the Faculty of Engineering, Kyudshu University*, 42, 59-74.
- [7] Seigel, H. O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24, 547-565.
- [8] Oldenburg, D. W. & Li, Y. (1994). Inversion of induced polarization data, *Geophysics*, 59(9), 1327-1341.
- [9] La Brecque, D. J. (1991). IP tomography. 61st Annual International Meeting SEG, Expanded Abstracts, 413-416.
- [10] Hohmann, G. W. (1990). Three dimensional IP models. *Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists*.
- [11] Beard, L. P., Hohmann, G. W., & Tripp, A. C. (1996). Fast resistivity/IP inversion using a low-contrast approximation. *Geophysics*, 61(1), pp. 169-179
- [12] Li, Y., & Oldenburg, D. W. (2000). 3-D inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 65(6), 1931-1945.
- [13] Karaoulis, M., Revil, A., Tsourlos, P., Werkema, D. D., & Minsley, B. J. (2013). IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography. *Computers & Geosciences*, 54, 164-170.
- [14] Ghanati, R., & Fallahsafari, M. (2022). Fréchet derivatives calculation for electrical resistivity imaging using forward matrix method. *Iranian Journal of Geophysics*, 15(4), 153-163.
- [15] Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, 27, 1020-1036.
- [16] Fallahsafari, M., & Ghanati, R. (2022). DC Electrical Resistance Tomography Inversion. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(4).
- [17] Ghanati, R., Azadi, Y., & Fakhimi, R. (2020). RESIP2DMODE: A MATLAB-Based 2D Resistivity and Induced Polarization Forward Modeling Software. *Iranian Journal of Geophysics*, 13(4), 60-78.
- [18] Loke, M. (2019). Geotomo software, [Online]. Available: <http://geotomosoft.com/>.

Unveiling Rock Brittleness for Mine Exploration: The Potential of Non-Destructive Seismic Methods

Amir Jamasb, Ali Riyahi

PhD student, Institute of Geophysics, University of Tehran;

jamasb@ut.ac.ir Professor, Institute of Geophysics, University of

Tehran, Iran:mariahi@ut.ac.ir

ABSTRACT

Rock brittleness, a crucial property in industry, significantly impacts drilling, hydraulic fracturing, reservoir performance, and the mining industry. Seismic methods offer valuable tools for estimating brittleness across vast areas, leveraging the strong correlation between brittleness and elastic properties like Young's modulus and Poisson's ratio.

These non-destructive approaches provide large-scale characterization, real-time data acquisition, and cost-effectiveness compared to traditional methods.

.KEYWORDS: ROCK BRITTLENESS; ELASTIC PROPERTIES; SEISMIC METHODS; NON-DESTRUCTIVE

1- INTRODUCTION

Rock brittleness is a crucial property in the field of geomechanics, particularly in the context of oil, gas, and mine exploration and production. Brittle rocks tend to break or fracture more easily than ductile rocks, and this characteristic has significant implications for drilling, hydraulic fracturing, and reservoir performance [1].

In order to accurately predict the behavior of rock formations, it is essential to have a reliable measure of rock brittleness. One common approach is to use the brittleness index, which is a quantitative measure of a rock's brittleness. The brittleness index (BI) is a fraction of the mineral composition of rock [2].

Another important concept related to rock brittleness is the brittleness average (BA). This is the average brittleness value for a given rock formation and defines its relation to the elastic properties of the rock [2].

In this article, we will provide a summary of rock brittleness, including its definition, importance, and measurement. We will also discuss the use of seismic methods for estimating rock brittleness, including the different seismic methods that

can be used and the advantages of using these methods.

It is important to note that this article is intended to serve as a summary of the topic and will provide a broad overview of the key concepts and considerations.

2- UNDERSTANDING ROCK BRITTLENESS

Rock brittleness is a measure of a rock's ability to withstand deformation without breaking or fracturing. Brittle rocks tend to break or fracture more easily than ductile rocks, which can deform and flow under stress [3].

There are several factors that can influence rock brittleness, including mineral composition, porosity, and pore pressure [2]. For example, rocks that contain high levels of quartz and/or calcite tend to be more brittle, while rocks with high clay

content tend to be more ductile. Similarly, rocks with low porosity and high pore pressure tend to be more brittle.

In the context of oil and gas exploration and production, rock brittleness is an important property because it can affect drilling, hydraulic fracturing, and reservoir performance [4]. For example, brittle rocks are more likely to fracture and create conduits for fluid flow, which can improve the efficiency of hydraulic fracturing and increase production. On the other hand, ductile rocks may not fracture as easily, which can make drilling more challenging and reduce the

effectiveness of hydraulic fracturing.

To accurately predict the behavior of rock formations, it is essential to have a reliable measure of rock brittleness. The brittleness of rock has been defined in different ways. Jarvie defines the brittleness index (BI) as a fraction of the mineral composition of the rock, while Grieser and Bray define the brittleness average (BA) as purely related to the elastic properties of the rock [2]. As mineral composition of rock defines its brittleness, the number of fractions of most brittle mineral impacts on the rock's brittleness. Brittleness index (BI) is formulated as:

$$\frac{Qz}{BI_{Jarvie}} = Qz + Ca + Cly \quad (1)$$

where Qz, Ca, and Cly are the fractional quartz content, calcite content, and clay content, respectively.

For wells that are located where the composition of mineral can be properly determined, the BI can be calculated. However, away from the well, the BI is difficult to be estimated due to the difficulties in predicting the mineral content distribution. Hence, it is still difficult to use this technique to estimate brittleness three-dimensionally, because of the challenge in estimating mineral content from seismic data.

Grieser and Bray proposed the use of brittleness average (BA) to express the brittleness of the rock. Brittleness average is calculated based on elastic properties, i.e., normalized Poisson's ratio and Young's modulus. By using this relation, estimation of brittleness in a wider area is possible. Both Young's modulus and Poisson's ratio can be derived from seismic data through seismic inversion. Hence, using this technique the brittleness of rock in terms of BA can be estimated from seismic data.

Young's modulus (E), representing the stiffness of the rock, can be defined in terms of bulk modulus (κ) and Poisson's ratio (σ) as:

$$E = -3\kappa(1 - 2\sigma) \quad (2)$$

On the other hand, Poisson's ratio can be derived from P-wave (V_p) and S-wave (V_s) velocities:

$$\sigma = \frac{Vp^2 - Vs^2}{2Vp^2 - 2Vs^2} \quad (3)$$

By substituting Eq. (3) in Eq. (2), the Young modulus is expressed as:

$$E = \rho Vs^2 \frac{(3Vp^2 - 4Vs^2)}{Vp^2 - Vs^2} \quad (4)$$

Hence, the brittleness average (BA) is expressed in Rick's relation:

$$BA = \frac{1}{2} \left(\frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + \frac{PR - PR_{max}}{PR_{min} - PR_{max}} \right) \times 100 \quad (5)$$

where E_{min} and E_{max} are the minimum and maximum Young's modulus and PR_{min} and PR_{max} are the minimum and maximum Poisson's ratio.

In the next section, we will discuss the use of seismic methods for estimating rock brittleness, including the different seismic methods that can be used and the advantages of using these methods.

3- THE RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC METHODS AND ROCK BRITTLENESS

Rock brittleness, how easily it fractures, is closely linked to its stiffness and internal strength, which are reflected in its elastic properties like Young's modulus and Poisson's ratio [5]. These elastic properties are precisely the ones that seismic waves interact with and are measured during seismic surveys. This strong connection between rock brittleness and the seismic response makes seismic methods a valuable tool for estimating brittleness across large areas, providing crucial information for oil and gas exploration, geological hazard assessment, and even engineering projects.

There are several seismic methods that can be used to estimate rock brittleness, including:

1. Seismic Amplitude Versus Offset (AVO) analysis examines how the strength of reflected sound waves changes with recording distance in seismic surveys. Since rock brittleness is linked to its elastic properties, which directly affect how sound waves travel through it, AVO can be used like a fingerprint [6]. By analyzing how the reflected wave strength changes with distance, AVO can reveal variations in these elastic properties. This allows geoscientists to indirectly estimate how easily rock will fracture (its brittleness) across a surveyed area, providing valuable information for oil and gas exploration, hazard assessment, and engineering projects.

2. Beyond the traditional elastic properties, the quality factor (Q) of both P-waves (compressional) and S-waves (shear) can offer valuable insights into rock brittleness [7]. Q represents the energy dissipation within the rock during wave propagation, with higher Q indicating lower energy loss and potentially stiffer, more brittle formations. By analyzing the ratio of P-wave Q (Q_p) to S-wave Q (Q_s), scientists can gain a more nuanced understanding of the internal fracturing and fluid saturation, both of which influence brittleness. Rocks with high Q_p/Q_s ratios often exhibit greater brittleness, making this approach a valuable tool for identifying potential sweet spots in unconventional oil and gas reservoirs, where fracturing is crucial for efficient extraction.

3. Seismic inversion and rock physics models work together like a detective duo to crack the

case of rock brittleness [5]. Here's the process:

I. Seismic Inversion: Imagine a powerful magnifying glass for seismic data. Seismic inversion takes the raw seismic reflection data and uses sophisticated algorithms to "invert" it, revealing the actual elastic properties of the rock layers underground. This provides us with crucial information like P-wave velocity (V_p), S-wave velocity (V_s), and density.

II. Rock Physics Models: These models act as translators, connecting the elastic properties obtained from inversion to the rock's brittleness. They use established relationships between these properties and brittleness. Different models exist, each with its strengths and limitations, depending on the rock type and geological setting. Common models utilize Young's modulus, Poisson's ratio, or combinations like the Brittleness Index derived from V_p , V_s , and density.

III. Brittleness Calculation: With the elastic properties from inversion and the chosen rock physics model in hand, scientists can calculate a numerical value representing the rock's brittleness. This value helps create maps and identify zones with varying degrees of brittleness across the surveyed area.

This integrated approach provides a more robust estimation of rock brittleness compared to relying solely on seismic data or qualitative interpretations. It allows geoscientists to make informed decisions in various fields, from pinpointing sweet spots for hydrocarbon exploration to assessing geological hazards.

The use of seismic methods for estimating rock brittleness has several advantages. First, seismic data can provide information about the physical properties of rocks over a large area, making it possible to obtain a detailed and comprehensive picture of the subsurface. Second, seismic methods are non-destructive, which means that they do not require drilling or other invasive techniques. Third, seismic methods can provide information about the subsurface in real-time, allowing for rapid and efficient data collection.

It is important to note that seismic methods are not the only way to estimate rock brittleness, and they may not always be the most appropriate or accurate method. Other methods, such as core analysis and logging while drilling, can also be used to measure rock brittleness. However, seismic methods can provide valuable complementary information and can be particularly useful for characterizing large areas or for making predictions about the subsurface in areas where data is limited.

4- ADVANTAGES OF USING SEISMIC METHODS FOR ESTIMATING ROCK BRITTLENESS

There are several advantages to using seismic methods for estimating rock brittleness:

1. Large-scale characterization: Seismic methods can provide information about the physical properties of rocks over a large area, making it possible to obtain a detailed and comprehensive picture of the subsurface. This is particularly useful for characterizing large or complex rock formations where drilling a well to obtain core samples may not be feasible or practical.

2. Non-destructive: Seismic methods are non-destructive, which means that they do not require drilling or other invasive techniques. This is an important advantage, as it allows for the collection of data without disturbing the subsurface or altering the properties of the rocks.

3. Real-time data collection: Seismic methods can provide information about the subsurface

in real-time, allowing for rapid and efficient data collection. This is particularly useful for making decisions about drilling or hydraulic fracturing operations, as it allows for the collection of data in a timely manner.

4. Complementary information: Seismic methods can provide complementary information to other methods, such as core analysis and logging while drilling. By combining data from multiple sources, it is possible to obtain a more complete and accurate picture of the subsurface.

5. Cost-effective: Seismic methods can be a cost-effective way to obtain information about the subsurface. While the initial cost of acquiring seismic data can be high, the ability to characterize large areas in a single survey can make seismic methods more cost-effective in the long run.

It is important to note that seismic methods are not the only way to estimate rock brittleness, and they may not always be the most appropriate or accurate method. Other methods, such as core analysis and logging while drilling, can also be used to measure rock brittleness. However, seismic methods can provide valuable complementary information and can be particularly useful for characterizing large areas or for making predictions about the subsurface in areas where data is limited.

5- CONCLUSION

Rock brittleness is an important property in the oil, gas, and mine industry, as it can affect drilling, hydraulic fracturing, and reservoir performance. Seismic methods can be used to estimate rock brittleness, and there are several seismic methods that can be used for this purpose, including Seismic AVO analysis, seismic and rock physics model and seismic inversion and q factor analysis.

The use of seismic methods for estimating rock brittleness has several advantages, including the ability to provide large-scale characterization, the ability to collect data non-destructively, the ability to collect data in real-time, the ability to provide complementary information, and the ability to be cost-effective.

While seismic methods are not the only way to estimate rock brittleness, they can provide valuable information and can be particularly useful for characterizing large areas or for making predictions about the subsurface in areas where data is limited.

In order to accurately estimate rock brittleness, it is important to consider multiple factors, including mineral composition, porosity, pore pressure, and stress regime. By using a combination of methods and considering multiple factors, it is possible to obtain a more complete and accurate picture of rock brittleness.

REFERENCES

1. Dong, W., Z. Wang, and L. Wang, *Brittleness Evaluation Method of Shale Gas Reservoir Based on Acoustic P- wave and S-wave Testing of Rock Samples and Its Logging Application*. Applied Geophysics, 2023: p. 1-9.
2. Grieser, W. and J. Bray, *Identification of Production Potential in Unconventional Reservoirs*. 2007.
3. Meng, F., L.N.Y. Wong, and H. Zhou, *Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review*. Journal of rock mechanics and geotechnical Engineering, 2021. **13**(1): p. 221-247.

4. Parvizi, H., et al., *Evaluation of heterogeneity impact on hydraulic fracturing performance*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. **154**: p. 344-353.
5. Hermana, M., D.P. Ghosh, and C.W. Sum, *Elastic-Based Brittleness Estimation from Seismic Inversion*, in *Exploitation of Unconventional Oil and Gas Resources-Hydraulic Fracturing and Other Recovery and Assessment Techniques*. 2019, IntechOpen.
6. Wu, H., et al., *Brittleness index calculation and evaluation for CBM reservoirs based on AVO simultaneous inversion*. Journal of Applied Geophysics, 2016. **134**: p. 191-198.
7. Wang, L., et al., *Quantitative seismic interpretation of rock brittleness based on statistical rock physics*. Geophysics, 2019. **84**(4): p. IM63-IM75.

Assessing Slope Stability using Geoelectrical Method: A Case Study

Ruhollah Faridi¹, Reza Ghanati¹

University of Tehran, Institute of Geophysics r.faridi@ut.ac.ir

University of Tehran, Institute of Geophysics rghanati@ut.ac.ir

ABSTRACT

Slope stability is crucial in geological engineering. Unstable slopes can lead to destructive landslides and significant losses. Traditional methods for assessing slope stability, such as lab tests and trenching, are costly. Geophysical techniques, specifically geoelectrics, offer a cost-effective alternative for evaluating subsurface structures.

This study illustrates the effectiveness of geoelectrical methods in slope stability analysis through a case study. These methods serve as a complementary approach to laboratory tests, offering valuable information for the assessment of slope stability. The resistivity section derived from the example dataset demonstrates that the landslide-prone area is detected as a low-resistivity anomaly, attributed to a clay layer.

KEYWORDS: Slope Stability, Geoelectrics, Geophysics, Resistivity

INTRODUCTION

A slope is a land area characterized by differing elevations due to the influence of gravity. The higher sections tend to move downwards causing the ground to collapse [1]. Slope stabilization holds significant importance in a range of critical infrastructure, including embankment dams, road slopes, railways, and open-pit mines. It serves as a fundamental component in determining the resistance of soil or rock against mass movements. Neglecting slope stability can lead to hazardous landslides. Maintaining slope stability involves skillfully managing the conflicting forces that act against the occurrence of landslides and fractures. As noninvasive geophysical tools, geoelectrical methods offer valuable insights into landslide-prone areas. This paper presents a field example showcasing the efficacy of electrical resistivity tomography measurements in evaluating slope stability associated with a landslide-prone area.

SLOPE STABILITY ANALYSIS

The main challenge in slope stability lies in effectively balancing the counteracting forces against landslide hazards and ruptures. Various factors contribute to slope instability and its occurrences [2]. To effectively prevent slope ruptures and facilitate restoration, it is crucial to identify the causes and determine the specific location of the rupture plane. This can be accomplished through the utilization of advanced slope stability method and field-based assessment methods. An important criteria to estimate the slope stability level is the minimum factor of safety (FOS), which is obtained by dividing the shear strength (s) by the equilibrium shear stress (τ).

$$FOS = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

The larger FOS, the more stable the slope is. In order to determine FOS and the mechanical characteristics of the slope such as stress and strain, information and data acquisition is obligatory, as its deficiency reduces the accuracy and reliability of modeling. Data acquisition can be obtained through different methods. The conventional and direct approach for data acquisition is drilling and sampling, while the use of geophysics or non-destructive techniques is considered as indirect methods. The geophysical methods offer various merits including cost-effectiveness compared to drilling and direct methods. Additionally, it can determine subsurface layers and different physical properties of the soil. It also can provide accurate insight into the identification of the type of soil or rock between two data points and the stratigraphy of the area.

Geophysical measurements have certain limitations in their application. Firstly, resolution diminishes with depth, rendering the obtained data less precise as the subsurface is probed deeper. Secondly, the issue of non-uniqueness arises, necessitating the validation of results, as multiple interpretations can be derived from the collected data. Additionally, reliance on indirect subsurface data rather than direct geotechnical features poses a challenge. These challenges were highlighted by Telford et al [3]. However, there is potential for improvement. By incorporating geological and geotechnical data into the analysis, these limitations can be mitigated [4].

The prevalent geophysical methods in slope stability analysis are seismic, geoelectric, electromagnetic, gravimetry, and magnetometry. Seismic methods can be classified based on direct and indirect determination of mechanical parameters and the internal structure of the slope. For example, seismic methods measure the velocity of elastic waves (seismic or acoustic) in the Earth's subsurface, providing valuable insights into Young's modulus and other mechanical parameters. Widespread seismic methods in slope stability include seismic refraction, multichannel analysis of surface waves (MASW), horizontal to vertical spectral ratio (HVSr), and Seismic Ambient noise [5].

On the other hand, the microgravity method deals with changes in the density of subsurface materials, making it another direct approach to determine mechanical parameters of soil and rock. Nevertheless, geoelectric, electromagnetic, and magnetometry methods provide parameters that are indirectly related to mechanical parameters. However, by using geological and lithological data, they can offer valuable insights into determining soil and rock mechanical parameters. Therefore, these methods are considered indirect methods of determining mechanical parameters. Table 1 displays different geophysical methods and their associated physical parameters [3].

Table 2 different geophysical methods and their associated physical parameters(Telford et al., 1990)

| Geophysical method | physical parameter |
|--------------------|-------------------------|
| Gravimetry | Density |
| Magnetometry | magnetic susceptibility |

| | |
|----------------------------|---|
| Seismic refraction | Elastic modulus, density |
| Seismic reflection | Elastic modulus, density |
| Direct current Resistivity | Resistivity |
| Spontaneous potential | Electrical Potential difference |
| Induction polarization | Resistivity, Chargeability |
| Electromagnetism(EM) | Conductivity (resistivity), inductance (self-induction coefficient), permittivity |

When it comes to determining mechanical parameters, seismic methods are generally preferred over electromagnetic and electrical methods, as indicated in Table 1. However, it is important to consider various factors that can hinder the effectiveness of seismic methods. These factors comprise folds, fractures, irregularities in Earth's layers, anisotropy, attenuation and absorption of energy in the environment. Additional challenges arise from phenomena like energy loss due to reflection, refraction, and diffraction, and changes in wave type at interfaces [6]. These complexities may necessitate the utilization of alternative geophysical methods for more accurate results.

Moreover, one crucial aspect to evaluate for slope stability is the decrease in the factor of safety (FOS), as it directly contributes to slope failure. The decline in FOS can be attributed to two main factors: a decrease in shear strength and an increase in shear stress tolerated by the slope [7]. Table 2 provides further insights into the multitude of factors that can lead to a reduction in FOS, discussed by LeBow [8].

Table 3 Factors that leads to Slope Failure [8]

| Decreases Shear Strength: | Increases Shear Stress: |
|---|--|
| Increased pore pressure | Loads at the top of the slope |
| Soil cracking | Water pressure in cracks at the top of the slope |
| Swelling in clays | Increase in soil weight due to increased water content |
| Development of slickensides | Excavation at the bottom of the slope |
| Decomposition of clayey rock fills | Drop in water level at the base of the slope |
| Creep under sustained loads | Earthquake shaking |
| Leaching | |
| Brittle soils undergoing strain softening | |

Weathering

Cyclic loading

The table outlines two broad categories: factors that decrease shear strength and factors that increase shear stress. In terms of detecting these factors, seismic methods have proven effective, given their capacity to determine mechanical properties. However, certain factors mentioned in Table 2, such as water pressure in cracks at the top of the slope, increase in soil weight due to increased water content, and drop in water level at the base of the slope, can be identified using the electrical resistivity parameter. Nevertheless, it is important to note that there is a need to explore the applicability of the electrical resistivity parameter for other factors mentioned in Table 2, which will be further discussed.

Changes in electrical resistivity serve as an indicator for various factors, including lithological and subsurface changes [9]. It is worth noting that there is no correlation between electrical resistivity and the amount of FOS. Additionally, geoelectrics plays a significant role in the realm of slope stability, particularly in the three-dimensional and four-dimensional monitoring of slopes [10]. Through this approach, it becomes possible to diagnose the internal structure of the slope, determine soil type, evaluate water content and porosity, estimate the depth of groundwater, and identify the path of water seepage.

Geoelectrics can provide valuable insights into above mentioned factors that affects slope stability as follows:

Increased pore pressure: Changes in pore pressure, which are influenced by hydraulic conductivity and hydraulic conditions at the interface, can have a significant impact on slope stability [11]. Modifying the interface can trigger changes in pore pressure and shear stress, thereby affecting the stability of the slope [11]. These variations in pore pressure are primarily caused by fluctuations in water content. The geoelectrics method reliably measures these changes.

Soil failure: Rain-induced soil failure increases hydraulic conductivity and leads to slope instability. Geoelectrical methods are capable of detecting deep soil failure [12]

Swelling in clays: Clay, a common slope soil component, is fine-grained and has a high surface area, enabling it to absorb water and swell. This moisture absorption weakens the clay's resistance and contributes to slope failure. Consequently, the identification of clay assumes paramount importance in addressing slope stability concerns. The negatively charged and chargeable surface of clay minerals renders the induction polarization (IP) method an effective means of detecting the membrane or non-metallic polarization exhibited by clay substances. Through this method, the presence of clay can be accurately discerned.

Moreover, Ground Penetration Radar (GPR) can also be used to detect clay by assessing the water content and the attenuation of GPR waves. Both IP and GPR are invaluable tools for clay identification and assessing slope stability.

Development of slickensides: Geoelectrics has been employed to determine the mechanism and causes of slickensides in slopes [9, 13]

Decomposition of clayey rock fills: The induction polarization (IP) method can be utilized to detect the extent of clay and detect decomposition in clayey rock fills. Additionally, the GPR method can identify clay erosion in rock masses.

In addition, to determine the shear stress parameter in equation (1), the shear wave velocity is required. when shear wave velocity data is unavailable, it can be estimated using corresponding seismic wave velocity and electrical resistivity values, as shown in Table 3. By obtaining the value of electrical resistivity, the material type can be identified, and its shear wave velocity can subsequently be determined.

Table 3. Materials and their corresponding seismic wave velocity and electrical Resistivity values [3]

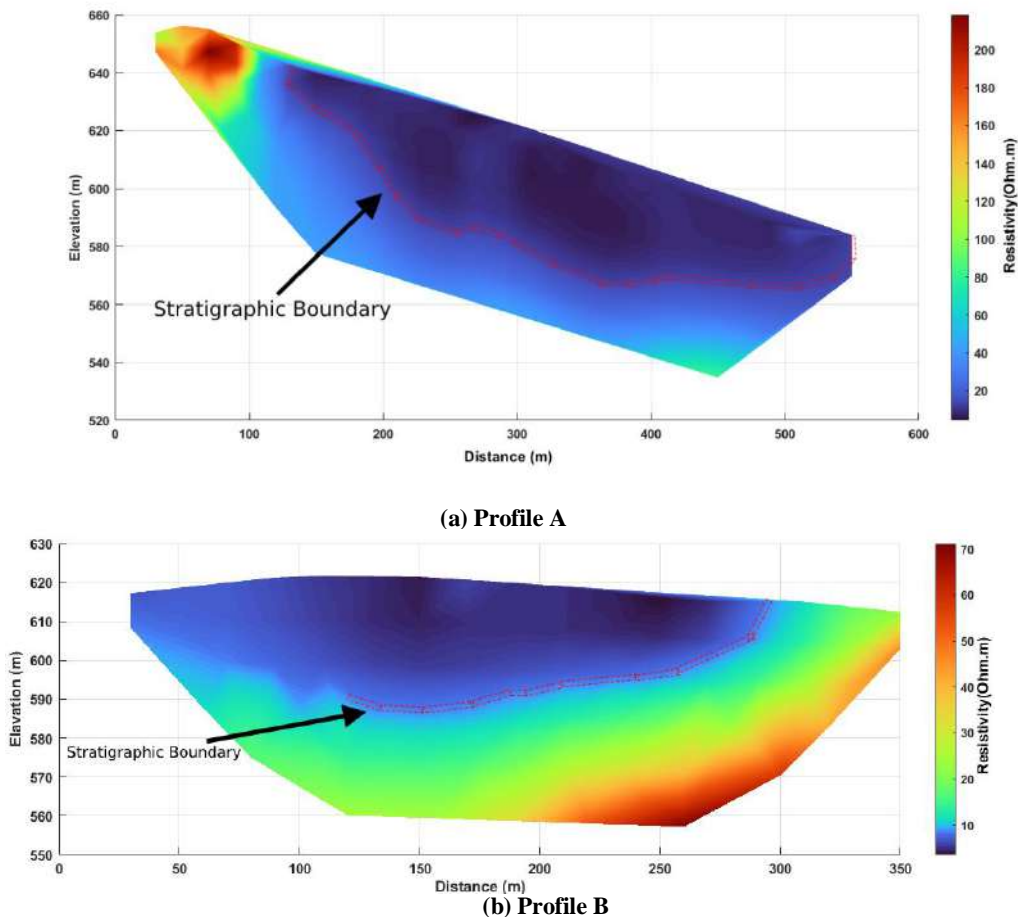
| Material | Seismic(m/s) | Resistivity (Ohm-m) |
|---------------------------------|--------------|--------------------------|
| Igneous/Metamorphic | | |
| Granite | 4580-5800 | $5 \times 10^3 - 10^3$ |
| Weathered Granite | 305-610 | $1 - 10^2$ |
| Basalt | 5400-6400 | $10^3 - 10^6$ |
| Quartz | | $10^3 - 2 \times 10^6$ |
| Marble | | $10^2 - 2.5 \times 10^3$ |
| Schist | | $20 - 10^4$ |
| Sediments | | |
| Sandstone | 1830-3970 | $8 - 4 \times 10^3$ |
| Conglomerate | | $2 \times 10^3 - 10^4$ |
| Shale | 2750-4270 | $20 - 2 \times 10^3$ |
| Limestone | 2140-6100 | $50 - 4 \times 10^2$ |
| Unconsolidated sediments | | |
| Clay | 915-2750 | 1-100 |
| Alluvium | 500-2000 | 10-800 |
| Marl | | 1-70 |
| Clay(wet) | | 20 |
| Ground water | | |
| Fresh water | 1430-1680 | 10-100 |
| Salt water | 1460-1530 | 0.2 |

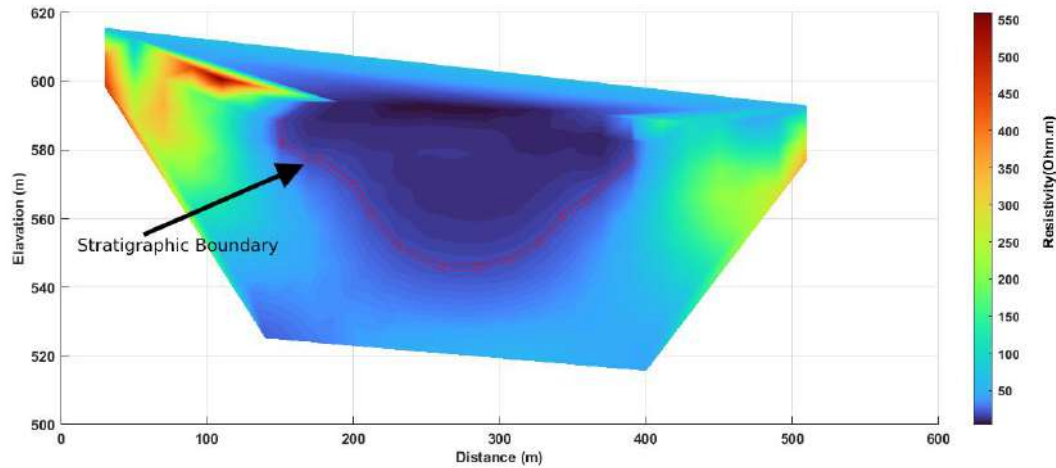
FIELD EXAMPLE

Electrical resistivity tomography data were collected on the Carmine slope, located west of the town of Tricarico in the Basilicata Region of the Southern Apennines, Italy [11]. Geoelectrical surveys were performed to detect the boundary between the calcarenite bedrock and the overlying clay .

Inverse modeling of the observed data are conducted using Matlab Software, focusing on three selected profiles in Fig.1. The geoelectric sections clearly delineate stratigraphic boundaries and highlight potential landslide zones. The approach for detecting stratigraphic boundaries depends on the contrast between conductive and resistive zones. Wet clay exhibits much lower resistivity values compared to dry clay layer and calcarenite bedrock.

Fig.1(a) A Profile (b) B Profile (c) C Profile





(c) C Profile C

Figure 1. Representation of the inverted resistivity sections corresponding to profiles A, B, and C.

ACKNOWLEDGMENT

We express our sincere appreciation to Angella Perrone for generously providing us with the geophysical data.

REFERENCES

- [1] Jie Dong, Mingsheng Liao, Qiang Xu, Lu Zhang, Minggao Tang, Jianya Gong, Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin, *Engineering Geology*, Volume 240, 2018, Pages 95-109
- [2] Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1970). *Introductory soil mechanics and foundations*. New York: MacMillan Publishing.
- [3] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 770 pp.
- [4] Pazzi, V., Tanteri, L., Bilocchi, G., D'Ambrosio, M., Caselli, A., & Fanti, R. (2016) H/V measurements as an effective tool for the reliable detection of landslide slip surfaces: Case studies of castagnola (la spezia, italy) and roccalbegna (grosseto, italy). *Physics and Chemistry of the Earth*, 98, 136-153
- [5] Hussain, Y.; Cardenas-Soto, M.; Martino, S.; Moreira, C.; Borges, W.; Hamza, O.; Prado, R.; Uagoda, R.; Rodríguez-Rebolledo, J.; Silva, R.C.; Martínez-Carvajal, H (2019) Multiple Geophysical Techniques for Investigation and Monitoring of Sobradinho Landslide, Brazil. *Sustainability*, 11, 6672.
- [6] Hack, R. (2000) Geophysics For Slope Stability. *Surveys in Geophysics* 21, 423-448. Doi:10.1023/A:1006797126800
- [7] Duncan, M.J. & Wright, S.G. (2005). *Soil strength and slope stability*. New Jersey: John Wiley and Sons, INC
- [8] LeBow, V. (2019). Influence of pressure fluctuations distribution on local heat transfer on flat surface impinged by turbulent free jet. *Proceedings of International Thermal Science Seminar II, Bled, June 13.-16.2004*.
- [9] Danneels, G., Bourdeau, C., Torgoev, I., Havenith, H.B. (2008) Geophysical investigation and dynamic modelling of unstable slopes: case-study of Kainama (Kyrgyzstan) *Geophysical Journal International*, 175(1), Pages 17-34,
- [10] Chambers, J.E., Meldrum, P.I., Wilkinson, P.B., Gunn, D.A., Kuras, O., Wragg, J., C MUNRO Munro, C. (2011) Geophysical-geotechnical sensor networks for slope stability monitoring, *Geoelectric Monitoring*, 117
- [11] Perrone A, Vassallo A, Lapenna R, Di Maio, C. V (2008) Pore water pressures and slope stability: a joint geophysical and geotechnical analysis. *Journal of Geophysics and Engineering* 5 (3), 323-337
- [12] Suryo, E.N., Chaminda G., Trigunaryah, B., Mochtar, I.B., & Soemitro, R. (2011) Application of

electrical resistivity method to detect deep cracks in unsaturated residual soil slope." Proceedings of AP-UNSAT: 5th Asia-Pasific Conference on Unsaturated Soils. Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD) Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Kasetsart University, Thailand.

- [13] Cervantes, B., Aleš Poláček, A., Jaroslav Ryšávka, J. (2012) Contribution of electrical resistivity tomography applied to the slope deformation survey in Lidečko. *GeoScience Engineering* [online] 58(2), 7-15.

- [i] Goold, J. W., Cox, L. H., & Zhdanov, M. S. (2007). Spectral complex conductivity inversion of airborne electromagnetic data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007 (pp. 487-491). Society of Exploration Geophysicists.
- [ii] Emond, A. M. (2007). Electromagnetic modeling of porphyry systems from the grain-scale to the deposit-scale using the generalized effective medium theory of induced polarization (Doctoral dissertation, Department of Geology and Geophysics, University of Utah).
- [iii] Luo, Y., & Zhang, G. (1998). Theory and application of spectral induced polarization. Society of exploration geophysicists.
- [iv] Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- [v] Sharifi, F., Arab Amiri, A. R., & Kamkar Rouhani, A. (2019). Using a combination of genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm for GEMTIP modeling of spectral-induced polarization data. *Journal of Mining and Environment*, 10(2), 493-505.
- [vi] Kemna, A. (2000). Tomographic inversion of complex resistivity: Theory and application. Der Andere Verlag
- [vii] Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., ... & Zimmermann, E. (2012). An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.
- [viii] Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- [ix] Zhdanov, M. (2008). Generalized effective-medium theory of induced polarization. *Geophysics*, 73(5), F197-F211.
- [x] Madsen, L. M., Fiandaca, G., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2017). Time-domain induced polarization—an analysis of Cole–Cole parameter resolution and correlation using Markov Chain Monte Carlo inversion. *Geophysical Journal International*, 211(3), 1341-1353.
- [xi] Bérubé, C. L., Chouteau, M., Shamsipour, P., Enkin, R. J., & Olivo, G. R. (2017). Bayesian inference of spectral induced polarization parameters for laboratory complex resistivity measurements of rocks and soils. *Computers & Geosciences*, 105, 51-64.
- [xii] Gurin, G., Ilyin, Y., Nilov, S., Ivanov, D., Kozlov, E., & Titov, K. (2018). Induced polarization of rocks containing pyrite: Interpretation based on X-ray computed tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 154, 50-63.
- [xiii] Fiandaca, G., Madsen, L. M., & Maurya, P. K. (2018). Re-parameterisations of the Cole–Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data. *Near Surface Geophysics*, 16(4), 385-399.
- [xiv] Ivanov, J., Miller, R. D., Xia, J., Steeples, D., & Park, C. B. (2005). The inverse problem of Refraction travel times, part I: Types of Geophysical Nonuniqueness through minimization. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 447-459.
- [xv] Jackson, D. D., & Matsu'Ura, M. (1985). A Bayesian approach to nonlinear inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B1), 581-591.
- [xvi] Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 20(6), 621-632.
- [xvii] Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barcelo-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical geology*, 35(3), 279-300.
- [xviii] Moghadas, D. (2020). One-dimensional deep learning inversion of electromagnetic induction data using convolutional neural network. *Geophysical Journal International*, 222(1), 247-259.
- [xix] Hansen, T. M., & Cordua, K. S. (2017). Efficient Monte Carlo sampling of inverse problems using a neural network-based forward—Applied to GPR crosshole traveltime inversion. *Geophysical Journal International*, 211(3), 1524-1533.
- [xx] Shahriari, M., Pardo, D., Kargaran, S., & Teijeiro, T. (2022). Automated machine learning for borehole resistivity measurements. *Cornel university*:2207.09849.
- [xxi] Chen, X., Xia, J., Pang, J., Zhou, C., & Mi, B. (2022). Deep learning inversion of Rayleigh-wave dispersion curves with geological constraints for near-surface investigations. *Geophysical Journal International*, 231(1), 1-14.
- [xxii] Zhdanov, M. S. (2009). New geophysical technique for mineral exploration and mineral discrimination based on electromagnetic methods. Univ. of Utah, Salt Lake City, UT (United States).
- [xxiii] Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 44(2), 139-160.
- [xxiv] Puzyrev, V. (2019). Deep learning electromagnetic inversion with convolutional neural networks. *Geophysical Journal International*, 218(2), 817-832.
- [xxv] Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with

outliers. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 20(6), 621-632.
[xxvi] Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. Cornell university:1412.6980.