



مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران

سیامند فتحی بایزیدآباد^۱، علیرضا عربامیری^{۲*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲ و اندیشه علی مرادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار، دانشکده معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۱

* نویسنده مسئول مکاتبات: alirezaarabamiri@yahoo.com

واژگان کلیدی

چکیده

استر

نقشه بردار زاویه طیفی

پیش‌بینی خطی باند

قطبش القایی

مقاومت ویژه

طلای زرشوران

پیدایش و گسترش ابزارهای پیشرفته سنجش از دور و ژئوفیزیک در زمینه اکتشاف منابع معدنی در دهه‌های اخیر، ناشی از اهمیت این صنعت است. در این پژوهش، از تصاویر سنجنده استر (ASTER) و داده‌های ژئوالکتریک به منظور پی‌جویی ماده معدنی طلا به‌طور غیرمستقیم، پهنه‌بندی نواحی دگرسانی و تحلیل سیستم حاکم بر کانه‌زایی منطقه و شناسایی بخش‌های پنهان کانی‌زایی در محدوده معدن طلای زرشوران در شمال شهرستان تکاب در استان آذربایجان غربی، استفاده شد. به این منظور از انواع روش‌های پردازش تصویر مانند نسبت‌گیری باندها (Band Ratio)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، روش پیش‌بینی خطی باند (LS-Fit)، روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) و روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت (ML) روی تصاویر ASTER، به‌منظور پهنه‌بندی نواحی دگرسانی استفاده شد. همچنین عملیات برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه، در طول ۱۷ پروفیل موازی با آرایش قطبی-دوقطبی (Pole-dipole) برای شناسایی محل‌های پنهان کانی‌سازی طلا در عمق در محدوده انجام شد. داده‌های برداشتی با مدل‌سازی معکوس دوبعدی و سه‌بعدی هموار، مدل‌سازی شدند؛ که نتایج حاصل از آن‌ها به کمک اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری‌های انجام‌شده در منطقه منجر به شناسایی زون‌های کانی‌سازی طلا و تعیین وضعیت کانسار به‌صورت سه‌بعدی شد. به‌طورکلی و با توجه به بررسی‌های صحرایی و همچنین مقایسه نتایج حفاری تعدادی از گمانه‌های اکتشافی و حدود تغییرات مقاومت ویژه و شارژپذیری در مقاطع می‌توان گفت که شدت شارژپذیری تقریباً در تمامی پروفیل‌ها قابل‌قبول بوده و مطالعات ژئوفیزیک به روش قطبش‌القایی و مقاومت ویژه در این محدوده واحدهای زمین‌شناسی موجود را کامل از هم تفکیک کرده و اطلاعات مفیدی از شرایط عمقی محدوده در اختیار گذاشته است؛ که در مطالعات اکتشافی آینده بسیار مؤثر خواهد بود. در حالت کلی زون کانی‌سازی موجود در قسمت میانی محدوده گسترده شده و تا آخرین پروفیل برداشت‌شده ادامه پیدا کرده است؛ که نواحی با بارپذیری بالا در بین واحدهای آهکی مستعد مطالعات تفصیلی‌تر هستند. درنهایت نقاط بهینه جهت حفاری اکتشافی پیشنهاد گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از تصاویر دورسنجی و ژئوفیزیک می‌تواند به بهبود نتایج حاصل کمک کند. به همین دلیل استفاده از روش‌های یادشده برای دسترسی به نتایج مناسب‌تر و با دقت بیشتر و برای انطباق نتایج داده‌ها با هم ضروری به نظر می‌رسد.

۱- مقدمه

یکی از روش‌های رایج در اکتشافات معدنی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای است. سنجش‌ازدور به‌عنوان تکنولوژی و علمی تعریف می‌شود که به‌وسیله آن، می‌توان بدون تماس مستقیم با سطح زمین، معمولاً در طول موج‌های بین ۰/۴ میکرومتر تا حدود ۱ متر، مشخصه‌های طیفی یک شیء یا پدیده سطحی را تعیین، اندازه‌گیری یا تجزیه و تحلیل نمود. اجسام مختلف در محدوده طول موج‌های طیف الکترومغناطیسی، بسته به ویژگی‌های فیزیکی و ترکیب کانی‌شناسی و شیمی خود، امواج الکترومغناطیس را در طول موج‌های مختلف با شدت‌های متفاوت منعکس و یا جذب می‌کنند. داشتن اطلاعاتی از رفتار طیفی اجسام در طول موج‌های گوناگون، بر اساس منحنی‌های شاخص بازتابندگی و جذب طیف، در سنجش‌ازدور از اهمیت زیادی برخوردار است (Gupta, 2003). در سنجش‌ازدور، امواج الکترومغناطیسی پس از برخورد با پدیده‌های مختلف زمین بازتاب یافته و به‌وسیله سنجنده‌ها ثبت و سپس مورد بررسی قرار می‌گیرند. با استفاده از این تفاوت‌های بازتابندگی طیفی اجسام، می‌توان انواع سازندهای زمین‌شناسی را به‌وسیله سنجش‌ازدور چند طیفی از یکدیگر تفکیک نمود. همچنین علم و فناوری سنجش‌ازدور در سایر شاخه‌های علوم و مهندسی همچون زمین‌شناسی، معدن، عمران، کشاورزی، آب‌شناسی، هواشناسی و محیط‌زیست کاربردهای بسیاری پیدا کرده است (نجفیان، ۱۳۸۹).

امروزه به علت پنهان بودن ذخایر معدنی به‌کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف ضروری است. دریافت پاسخ مستقیم ژئوفیزیکی از کانی طلا به دلیل عیار پایین آن ممکن نیست، با این حال وجود نشانه‌های غیرمستقیم برای مثال ارتباط طلا با یک سنگ میزبان خاص، لایه شاخص (Bed Marker) و یا ساخت‌هایی که وجود دارند، می‌تواند پاسخ ژئوفیزیکی غیرمستقیمی به ما بدهد. به عنوان مثال مقاومت ویژه الکتریکی بالا بر اثر همراهی طلا با زون‌های سیلیکاته یا IP بالا بر اثر همراهی طلا با پیریت و... همه مثال‌هایی از پاسخ غیرمستقیم ژئوفیزیکی طلا است (Doyle, 1990). در سطح جهانی نمونه‌های فراوانی از استفاده IP و مقاومت ویژه در ایندکس مجلات SEG و ASEG می‌توان یافت (Willocks et al & Haydon et al, 1999). از جمله مطالعات ژئوفیزیکی در زمینه اکتشاف طلا می‌توان به اکتشافات طلا در ایالت گانزو (Gansu) در چین با استفاده از روش IP و مقاومت ویژه الکتریکی در سال ۲۰۰۰ توسط ژو (Guo) و همکاران (Guo et al, 2000)، استفاده از روش IP، VLF و HLEM برای اکتشاف طلا در کمربند مرکزی لاپلند گرین ستون (CLGB) در منطقه ایزوکوتکو (Iso- Kuotko) در سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی در فنلاند در سال ۲۰۰۰ توسط سلمیرینه و تورونن (Salmirinne and Turunen, 2000) و اکتشاف کانسار طلا و نقره در منطقه

Julietta واقع در کمربند Chukotka-Okhotsk در روسیه با استفاده از روش IP در حوزه زمان در سال ۲۰۱۵ توسط گورین و همکاران (Gurin, 2015) اشاره کرد. اولین مطالعات IP و مقاومت ویژه در ایران به سال ۱۹۴۶ برمی‌گردد. تقریباً بر روی تمامی معادن فلزی شناخته‌شده ایران روش IP و مقاومت ویژه انجام شده است. به‌طور مثال می‌توان به تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) محدوده معدنی طلای هیرد بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی (عسکری و همکاران، ۱۳۹۱)، اکتشاف ژئوفیزیکی کانی‌سازی مس-طلا پورفیری ماهرآباد، شرق ایران (ملک‌زاده شفاوردی و همکاران، ۱۳۸۸) و تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مطالعات ژئوفیزیکی IP/RS کانسار ماهر- شمال غرب ده‌سلم (گورابجیری‌پور و مبشری، ۱۳۹۳) اشاره کرد. در اکثر یافته‌های جدید، ژئوفیزیک نقش مؤثری در اکتشاف و نمایش ذخایر پنهان در عمق دارد (Bishop et al, 1992). با به‌کارگیری و تفسیر داده‌های ژئوفیزیک به همراه اطلاعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی می‌توان نقاط مناسب برای حفاری را پیشنهاد نمود و سپس با تلفیق این اطلاعات، عمق، شکل و اندازه ذخیره کانسار را ارزیابی و تخمین زد.

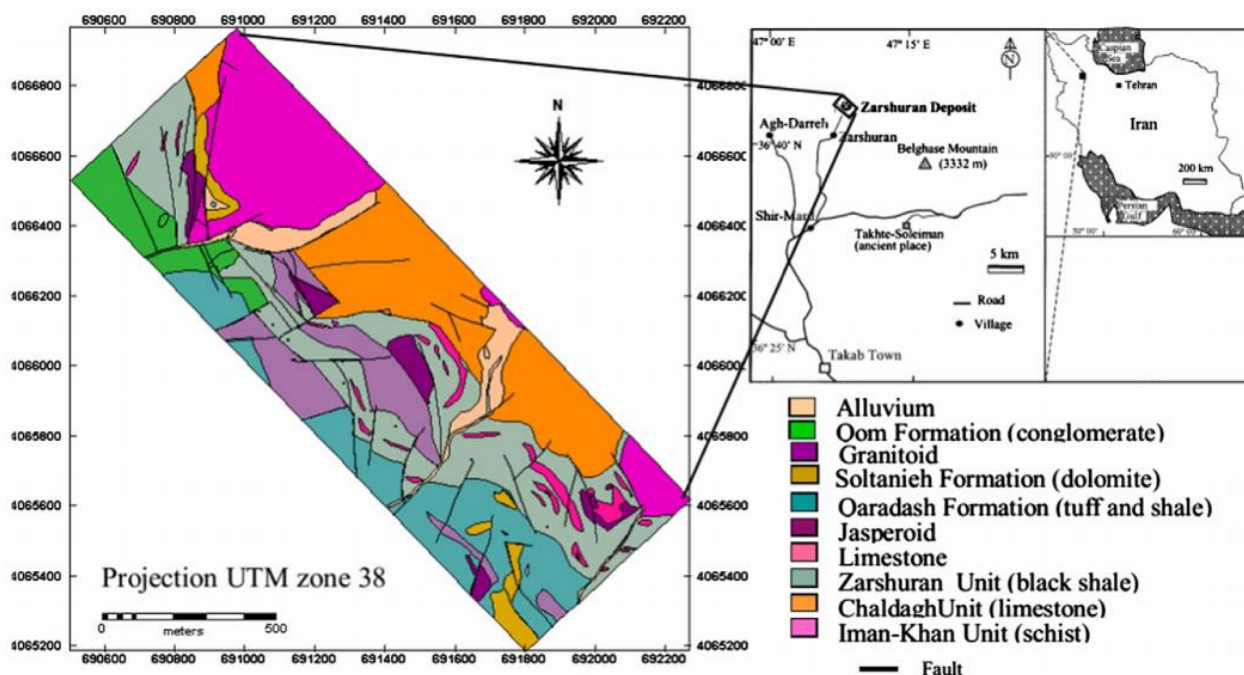
معدن طلای زرشوران در ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان تکاب در کنار روستای زرشوران قرار گرفته است (شکل ۱). محدوده معدنی زرشوران در ارتفاعات تاقدیس ایمان خان است؛ که ارتفاع متوسط آن از سطح دریاهای آزاد، حدود ۲۳۰۰ متر است. زون‌های دگرسانی در منطقه اکتشافی طلای زرشوران شامل زون‌های سیلیسی، سریستی-آرژیلیتی و آلونیتی است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و حفاری‌های انجام‌شده سه واحد اصلی در این منطقه وجود دارد. این واحدها دارای امتداد شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بوده و دارای شیب تقریباً ۴۵ درجه‌ای به سمت جنوب غرب می‌باشند و به ترتیب از بالا به پایین عبارت‌اند از: الف) واحد زرشوران که دارای تناوبی از میکا شیست‌های سیاه، سنگ آهک صورتی تا قهوه‌ای، توف‌های آهکی ماسه‌ای، شیل‌های توفی و شیل‌هایی همراه با دولومیت تا دولومیت‌های آهکی است ب) واحد چالداغ که غالباً دارای توده سنگ‌های آهکی است و ج) واحد ایمان‌خان که معادل سازند کهر بوده و دارای تناوبی از شیست‌های سبز و لایه‌های آهکی است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER و با به‌کارگیری روش‌های دورسنجی شامل پردازش و تفسیر بصری و تحلیل‌های طیفی مختلف با نرم‌افزار ENVI که روی داده‌های ASTER انجام پذیرفت، پهنه‌های دگرسانی در ارتباط با کانی‌زایی طلا در منطقه مشخص گردید. در مرحله بعد، پروفیل‌های ژئوفیزیکی IP و مقاومت ویژه بر روی محدوده‌ای که بر اساس نتایج حاصل از

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

این مقاله اولین مقاله در زمینه اکتشاف طلا در محدوده زرشوران با استفاده از روش‌های دورسنجی و ژئوفیزیک است و با توجه به اینکه در این مقاله از روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت (Maximum likelihood classification) برای مشخص کردن واحدهای سنگی در ارتباط با کانی‌زایی طلا استفاده شده است، نوآوری مقاله در جای خود محرز می‌گردد.

سنجش از دور به عنوان مناطق دارای کانی‌سازی طلا در سطح معرفی شده بود، طراحی و پیاده‌سازی شد. سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های IP و مقاومت ویژه با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی به دست آمده از مغزه‌های حفاری مورد تفسیر قرار گرفته و در نهایت محل‌های مناسب برای حفاری پیشنهاد شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی کانسار طلای زرشوران (Asadi harooni, 2000).

نفوذی دیوریتی، گرانودیوریتی و گرانیتی، سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی الیگومیوسن و نهشته‌های جوان پلیوسن و کواترن است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

۳- زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

محدوده معدنی زرشوران قسمتی از یال جنوب غربی تاقدیس موجود در برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ تخت سلیمان بوده که عمدتاً شامل ارتفاعات متوالی در کنار دره‌های تقریباً عمیق V شکل است. محدوده طرح، تحت تأثیر تکتونیک منطقه، عملکرد سیالات کانی‌ساز هیدروترمال و نیز فعالیت‌های ولکانیک که عمدتاً به صورت یک توده بزرگ کوارتز پورفیری تا ریولیتی در محدوده رخنمون دارد، درهم ریختگی شدید پیدا کرده و در کنار این عوامل، فرسایش شدید توده‌های سنگی و ایجاد لایه‌های ضخیم خاک و نیز وجود پوشش گیاهی وسیع، عملاً سطح بسیاری از رخنمون‌های منطقه را پوشانده است. به لحاظ سنی چنین برمی‌آید که مجموعه شیست‌های ایمان خان، آهک‌های چالداغ، واحد شیل سیاه (زرشوران) و نیز واحد آهک

۲- زمین‌شناسی عمومی

کانسار زرشوران در قسمت مرکزی برگه تکاب-شاهین‌دژ قرار داشته و بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی ساختاری ایران، بخشی از زون البرز-آذربایجان است. همچنین بر اساس نقشه زمین‌ساخت ایران در قلمرو ایران مرکزی و جزئی از کمربند ارومیه-دختر (تبریز-بزمان) در نظر گرفته شده است. پی‌سنگ پرکامبرین پسین، رخنمون غالب ناحیه زرشوران را تشکیل می‌دهد و از کربنات‌ها و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا متوسط تشکیل شده که با یک دگرشیبی مشخص توسط لایه‌های قرمز الیگومیوسن پوشیده می‌شوند. این منطقه بیش‌تر از سنگ‌های دگرگونی شیست، مرمر، گنایس و آمفیبولیت تشکیل شده است؛ که با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در بخش میانی محدوده موردنظر، بلندترین ارتفاعات را شکل می‌دهند. به طور کلی ردیف چینه‌ای سنگ‌ها در منطقه مورد بررسی به ترتیب از پایین به بالا شامل سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، سنگ‌های رسوبی پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین و کامبرین-اردویسین، سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک، توده‌های

فنجی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.

زمین‌شناسی و اکتشافی طراحی و ساخته شده است، با داشتن قدرت تفکیک طیفی مناسب در محدوده فروسرخ بازتابی که بیشتر کانی‌ها در آن دارای نمودار جذب طیفی هستند، امکان تفکیک انواع دگرسانی‌ها را فراهم کرده است. افزون بر آن، این سنجنده با داشتن پنج باند طیفی در محدوده فروسرخ حرارت، تنها سنجنده Multi Thermal به شمار می‌آید؛ که تفکیک واحدهای سنگی و استخراج پهنه‌های دگرسانی با استفاده از آن امکان‌پذیر است (شکل ۳). در این مطالعه از یک برگ داده استر که از نوع Level_1T و با شماره AST_L1T_00307142000080516_20150410090900_932 03.HDR:ID و مربوط به تاریخ ۲۰۰۳ است، استفاده شد.

۴-۲- داده‌های ژئوفیزیک

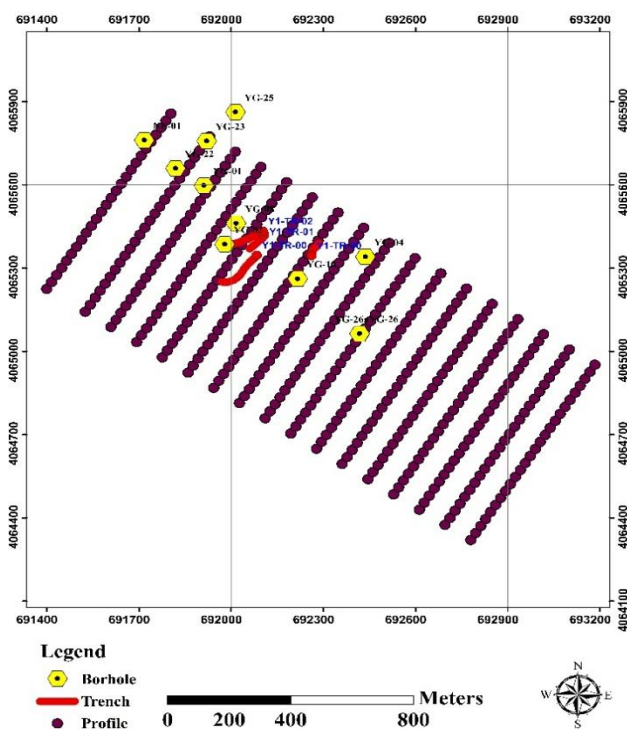
در این پژوهش به منظور برداشت داده‌های صحرایی ژئوالکتریک، با توجه به شواهد و اطلاعات دورسنجی و زمین‌شناسی موجود، شبکه‌ای مستطیلی با ابعاد 750×1650 متر و با آرایش قطبی-دوقطبی (Pole-dipole) در ۴۴۲ ایستگاه برداشت و در قالب ۱۷ پروفیل موازی با یکدیگر (شکل ۲)، عمود بر امتداد ساختارهای زمین‌شناسی در جهت شمال‌شرق-جنوب غرب، به فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر (به‌جز پروفیل ۱ و ۲ که با فاصله ۱۵۰ متری از همدیگر قرار گرفته‌اند)، برای دو پارامتر قطبش‌القایی برحسب میلی‌ثانیه و مقاومت ویژه ظاهری برحسب اهم‌متر (مجموعاً ۳۳۱۵ نقطه) اندازه‌گیری شد. هر یک از این پروفیل‌ها دارای فاصله الکترودی ۳۰ متر و گام ۱ تا ۱۰ برای الکترودهای پتانسیل می‌باشند.

ریکریستالیزه موجود در منطقه مربوط به پرکامبرین بوده که توسط نیرویی بالابرنده به سمت بالا آپلیفت شده باشند و روی آن‌ها را واحدهای جوان با سن نئوژن و با یک نبود چینه‌ای طولانی‌مدت پوشانده باشند. ضخامت تمامی لایه‌ها خصوصاً واحدهای قدیمی‌تر، تحت تأثیر تکتونیک منطقه و عملکرد گسل‌های عمیق موجود در محدوده، فرسایش لایه‌های سنگی و نیز شیب و امتداد لایه‌ها و چین‌مان آن‌ها با توپوگرافی محدوده، در قسمت‌های مختلف تغییر پیدا کرده است. به عنوان مثال واحد زرشوران به نظر در سمت جنوب شرق دارای گسترش بیشتری است که این به دلیل عملکرد گسل‌های شیب‌لغز موجود در این واحد است که آن را به سمت پایین کشیده و بر ضخامت ظاهری آن افزوده‌اند. محدوده طرح با تأثیر آب‌های جوی و فرور، تزریق توده نفوذی کوارتز پورفیری و نیز عملکرد فازهای کانی‌زایی در محل‌های مختلف دچار دگرسانی شده که با شدت و ضعف‌های متفاوت خصوصاً در حوالی ماده معدنی رخنمون پیدا کرده‌اند (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

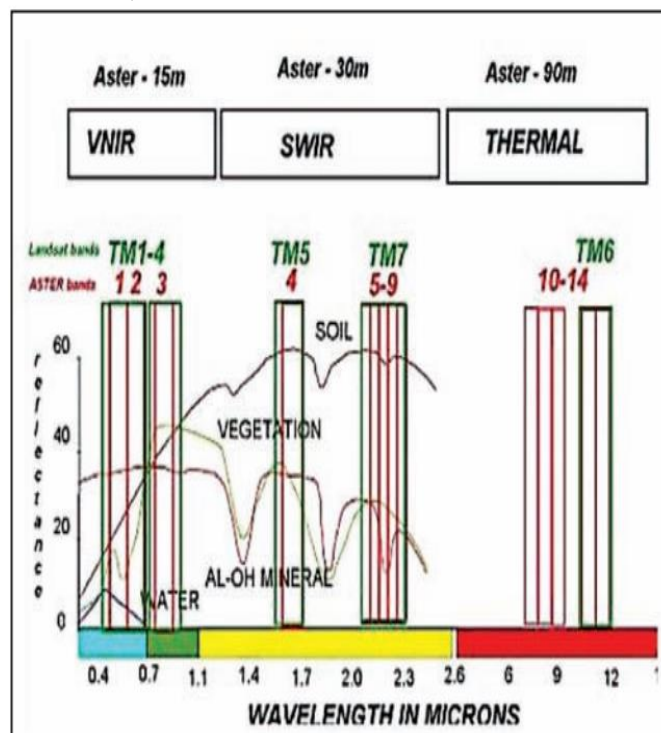
۴- داده‌های مورد استفاده

۴-۱- داده‌های ASTER

سنجنده ASTER که در سال ۱۹۹۹ روی ماهواره ترا (TERRA) نصب شد، با داشتن قدرت تفکیک مکانی و طیفی به نسبت مناسب، تأثیرات چشمگیری بر مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی گذاشته است و با دارا بودن سنجنده‌های تخصصی که بر پایه نیازهای



شکل ۲: موقعیت پروفیل‌های برداشت‌شده و گمانه‌های حفرشده در منطقه نسبت به هم.



شکل ۳: ویژگی‌های طیفی سنجنده ASTER (Yetkin, 2003).

می‌یابند، بیشتر تحت تأثیر اثرات اتمسفر قرار می‌گیرند و تصحیح اتمسفریک تصاویر امری ضروری است. این امر در مورد تصاویر ASTER که قدرت تفکیک طیفی نسبتاً بالاتری در مقایسه با تصاویر ETM دارند نیز مصداق دارد. از آنجایی که امکان حذف کامل خطای رادیومتریک و ایجاد یک تصویر بازتابی (Reflectance Image) دقیق مستلزم در اختیار داشتن پارامترهای محیطی و جوی زیادی است و این اطلاعات در مورد تصویر ASTER مورد استفاده در اختیار نبود؛ لذا به منظور بارزسازی عوارض طیفی از روش بازتابش متوسط نسبی داخلی (IARR) برای نرمالیزه کردن تصاویر، با استفاده از یک طیف میانگین برگه استفاده گردید. در این روش طیف میانگین برای برگه ورودی محاسبه شده و این طیف به عنوان طیف مرجع استفاده می‌گردد. سپس این طیف بر هر پیکسل تقسیم می‌شود و در نهایت طیف ظاهری پیکسل به دست می‌آید (نجفیان و همکاران، ۱۳۹۰).

ب) پردازش داده‌ها

در پردازش‌های بصری با توجه به ویژگی‌های تصویر می‌توان عوارض مختلف را استخراج کرد؛ درحالی که در پردازش رقومی الگوی مورد نیاز به عنوان یک الگوی نمونه در نرم‌افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور خودکار این الگو در همه بخش‌های تصویر شناسایی می‌شود. با تلفیق این دو روش، عوارض موردنظر با دقت بیشتری از تصاویر ماهواره‌ای قابل تشخیص هستند. روش‌های رقومی پردازش تصاویر ماهواره‌ای عبارت‌اند از: نسبت‌گیری باندها، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و

۵- مطالعات سنجش‌ازدور

۵-۱- روش‌های پژوهش

در تصاویر سنجش‌ازدور، پردازش روی تصاویر به منظور استخراج ۲ دسته اطلاعات صورت می‌گیرد که شامل اطلاعات گسسته و پیوسته است. به طور کلی عملیات اصلی پردازش روی تصاویر در دو قالب کلی رده‌بندی (Classification) و مدل‌سازی (Modeling) قرار می‌گیرند. عملیات حسابی از روش‌های مرسوم در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. در میان ۴ عمل اصلی از عملگرهای تفریق و تقسیم استفاده بیشتری می‌شود. در خیلی از موارد به جای تقسیم معمولی، از نسبت عادی شده باندها استفاده می‌شود. تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا PCA نیز از روش‌های شناخته شده در تحلیل تصاویر سنجش‌ازدور به شمار می‌رود. در کنار استفاده از روش‌های یادشده، در این پژوهش از روش‌های مختلف تجزیه طیفی همچون Spectral Angle Maximum، (LS-Fit) Linear Band Prediction، Mapping، likelihood classification و از داده‌های ASTER برای پهنه‌بندی دگرسانی‌ها استفاده شد. تمام عملیات پردازش و تفسیر تصاویر با نرم‌افزار دورسنجی ENVI5.0 انجام شد.

الف) پیش‌پردازش داده‌ها

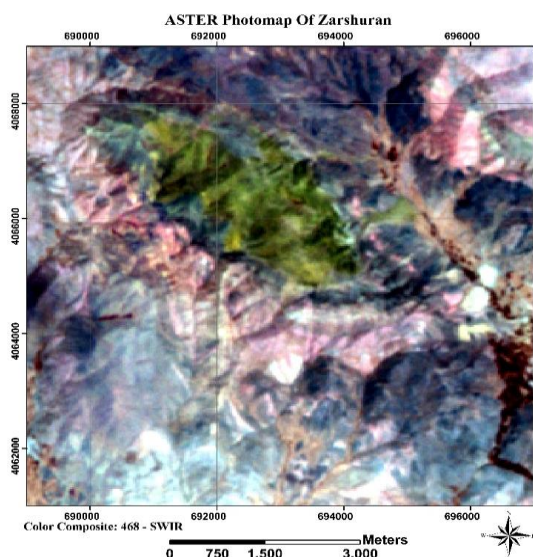
در این مطالعه از داده‌های ASTER سطح 1T برداشت شده در سال ۲۰۰۳ که تصحیحات هندسی در زون UTM38 با مبنای ارتفاعی WGS-84 بر روی آن صورت گرفته بود، استفاده گردید. به همان میزانی که تصاویر ماهواره‌ای به قدرت تفکیک طیفی بالاتر ارتقا

فتحی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶. با ایجاد تصاویر ترکیب رنگی کاذب از راه ترکیب باندهای مختلف و با تفسیر بصری این تصاویر به دست آمده که از روش های متداول در شناسایی مناطق دگرسانی است استفاده شد و همچنین با تهیه تصاویر رنگی مجازی از طریق تعیین ضریب شاخص بهینه (Optimum Index Factor) و روش نسبت گیری باندها و با تعبیر و تفسیر این تصاویر، مناطق دگرسانی در محدوده مورد نظر مشخص شد (شکل های ۴ تا ۷).

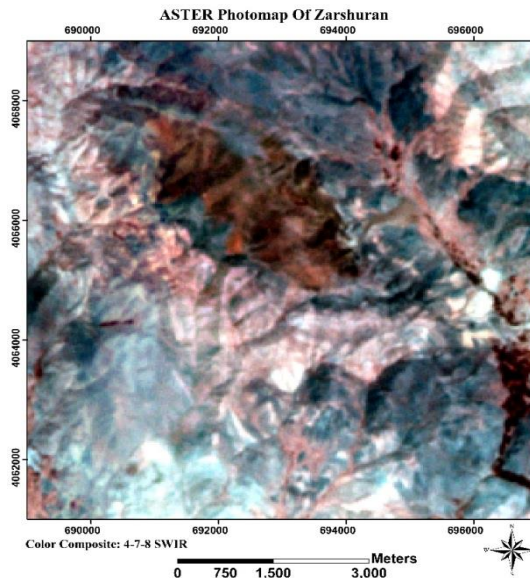
تجزیه طیفی که انتخاب این روش ها بر پایه نوع اطلاعات مورد درخواست برای استخراج داده ها از تصاویر صورت می گیرد. اطلاعات استخراج شده از تصاویر ماهواره ای سنجنده ASTER در این پژوهش شامل استخراج مناطق دگرسانی و پهنه بندی آن هاست که برای استخراج این لایه ها از روش های نسبت گیری باندها، تجزیه مؤلفه های اصلی و تجزیه طیفی تصاویر استفاده شد.

ج) تفسیر و استخراج اطلاعات لایه دگرسانی

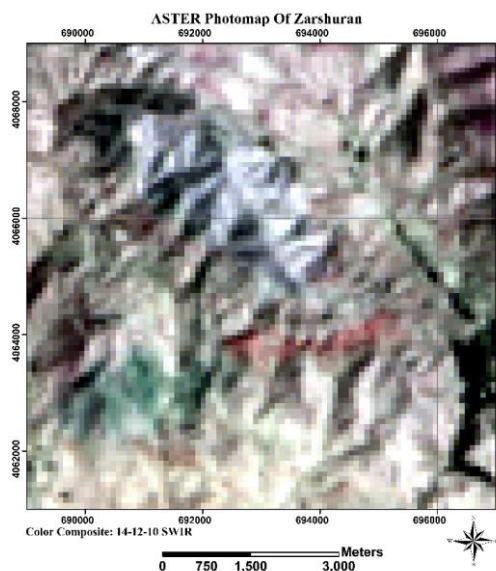
در این مرحله ابتدا برای بررسی دگرسانی ها به این صورت کار شد که



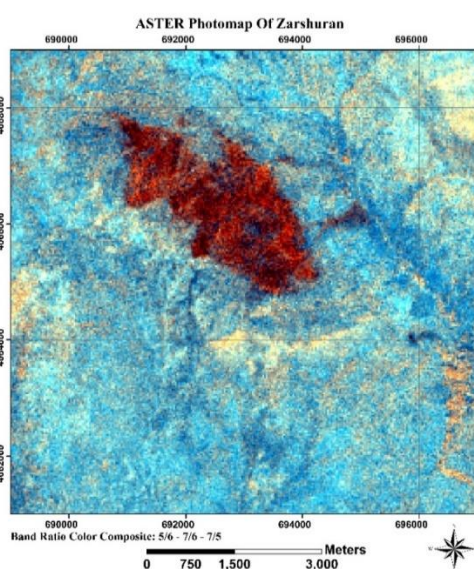
شکل ۶: مناطق دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز لجنی در تصویر حاصل از باندهای SWIR. 4, 6, 8



شکل ۴: ترکیب رنگی ۴۷۸ حاصل از "OIF" (مناطق دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ قهوه ای سوخته مشاهده می شود).



شکل ۷: مناطق دگرسانی سیلیسی به رنگ قرمز در تصویر حاصل از باندهای TIR, 10, 12, 14.



شکل ۵: ترکیب رنگی نسبت باندی RGB:5/6-7/6-7/5 سنجنده ASTER که در آن مناطق دگرسانی آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته به رنگ زرد مایل به خاکستری دیده می شود.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

از باندهای مناسب، استفاده شد؛ به عنوان نمونه برای تفکیک پهنه‌های دگرسانی نوع آرژلیک و آرژلیک پیشرفته، از باندهای ۱، ۴، ۶ و ۷ که نتایج مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۱، ۴، ۶ و ۷ در جدول ۱ آمده است و برای تفکیک دگرسانی پروپلیتیک از باندهای ۳، ۵، ۸ و ۹ که نتایج مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۳، ۵، ۸ و ۹ در جدول ۲ آمده است، استفاده شد. تصویر ترکیب رنگی مجازی (RGB) حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی انتخابی (PC1، -PC3-t1، -PC4-t1) در شکل ۸ نشان داده شده است؛ که در آن دگرسانی آرژلیک به رنگ نارنجی و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز دیده می‌شود.

جدول ۱: مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۱، ۴، ۶ و ۷.

Eigenvector	Band1	Band4	Band6	Band7
PC1	-0.995	0.095	-0.002	0.024
PC2	0.095	0.994	0.003	0.033
PC3	-0.001	-0.004	0.999	0.041
PC4	0.021	-0.035	-0.041	0.998

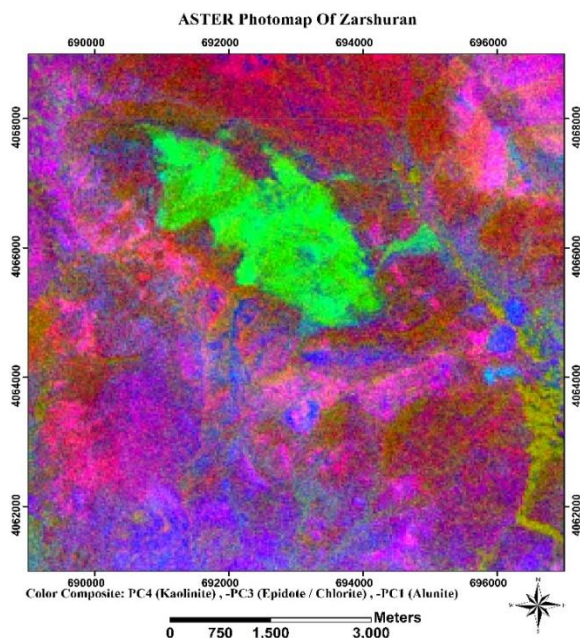
جدول ۲: مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۳، ۵، ۸ و ۹.

Eigenvector	Band3	Band5	Band8	Band9
PC1	0.994	0.016	-0.057	0.090
PC2	0.012	-0.999	-0.019	0.036
PC3	0.070	-0.024	0.986	-0.148
PC4	0.080	-0.031	-0.155	-0.984

۵-۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis-PCA)

روش مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های مفید شناخته‌شده است و قابلیت استخراج اطلاعات مناسب برای تفکیک پهنه‌های دگرسانی را دارد. اهداف بسیاری از به‌کارگیری این روش مدنظر است مانند کاهش ابعاد داده‌ها، کشف تغییرات در تصاویر چند زمانه و آشکار کردن پدیده‌های خاص. در این روش داده‌ها یا باندها در فضای جدیدی قرار می‌گیرند و مؤلفه‌های جدید جایگزین باندها و یا مؤلفه‌های پیشین هستند. در این فضای جدید هرکدام از این مؤلفه‌های جدید، ترکیبی خطی از باندهای پیشین هستند و در این فضای جدید همبستگی میان باندها از بین می‌رود و باندهای مستقلی ایجاد می‌شوند. روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی به دو دسته تقسیم می‌شود: الف) روش مؤلفه‌های استاندارد (PCA استاندارد)؛ که در این روش از تمامی باندهای اطلاعاتی استفاده می‌شود و ب) روش مؤلفه‌های اصلی جهت یافته انتخابی (Feature-Orientated Principle Component Selection).

روش مؤلفه‌های اصلی جهت یافته انتخابی، روشی تجربی است که توسط کروسا (Crosta) معرفی شد و به همین دلیل بیشتر با این نام شناخته می‌شود (Crosta et al., 1989). در این روش به جای استفاده از همه باندها، باندهای خاصی را جدا و عمل PCA روی آن انجام می‌شود، سپس پدیده مورد نظر در مؤلفه ویژه‌ای آشکارتر از دیگر پدیده‌ها می‌شود. برای تجزیه و تحلیل در این روش



شکل ۸: ترکیب رنگی مجازی حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PC1، -PC3-t1، -PC4-t1) که در آن دگرسانی آرژلیک به رنگ نارنجی و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز روشن دیده می‌شود.

فتحی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.

۵-۳- روش پیش‌بینی خطی باند با استفاده از برازش

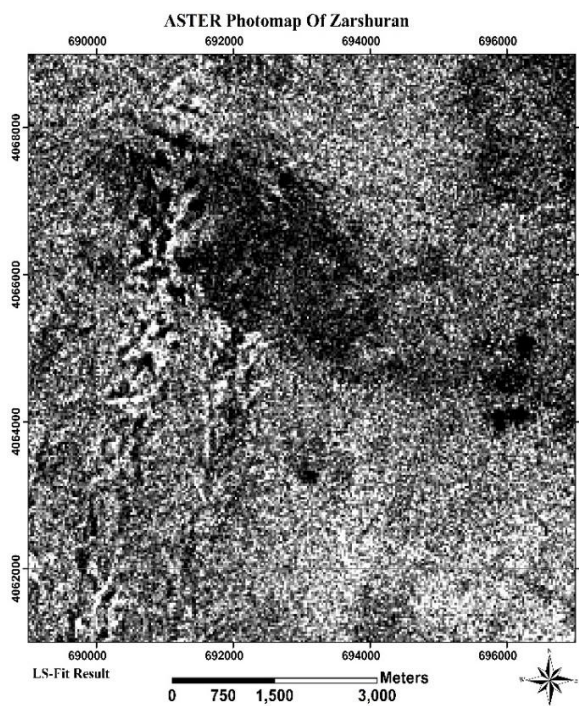
کمترین مربعات (LS-Fit)

به منظور تفسیر و استخراج پهنه‌های دگرسانی با دقت بالا در محدوده مورد مطالعه از روش پیش‌بینی خطی باند با استفاده از برازش کمترین مربعات (LS-Fit) استفاده شد؛ این روش به تخمین یک باند بر اساس ترکیب خطی باندهای دیگر می‌پردازد. این روش با این فرض است که باندهای به کار گرفته شده به عنوان مقادیر ورودی می‌توانند رفتار سایر باندها را به صورت یک عبارت خطی بیان کنند. این مقدار در واقع باند پیش‌گویی شونده (باند مدل) نامیده شده و به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود (شبانکاره، ۱۳۸۶). طبیعتاً بعضی کانی‌های خاص اثرهای انعکاسی خود را تنها در یک باند خاص نشان می‌دهند. لذا میان مقادیر محاسبه شده آن‌ها توسط روش کمترین مربعات و مقادیر واقعی اختلاف مشاهده می‌شود که این اختلاف باقی‌مانده (Residual) نامیده شده و به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود. روش کمترین مربعات بر اساس مقادیر باقی‌مانده اقدام به استخراج مناطق حاوی کانی‌های موردنظر می‌نماید. نتایج حاصل از این روش برای مشخص کردن مناطق دگرسانی آرژلیک، پروپلیتیک و اکسیدهای آهن در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است.

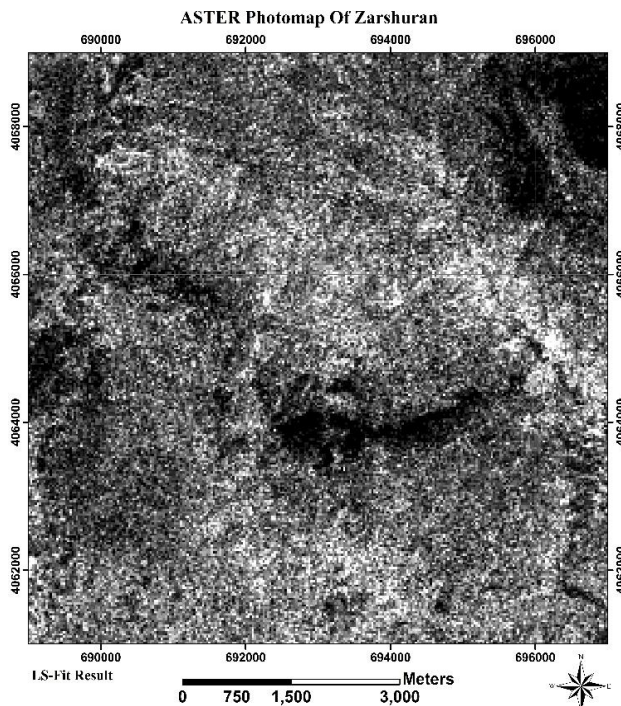
۵-۴- نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

روش نقشه‌بردار زاویه طیفی اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط کروز و همکاران به کار برده شد. این روش بر اساس مشابهت بین طیف کانی

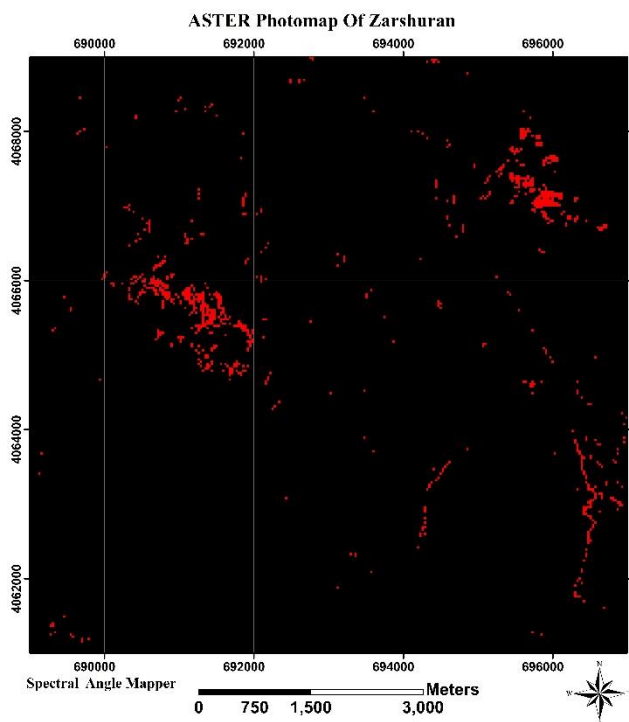
مرجع و طیف کانی مورد آزمایش برای کانی‌های کائولینیت و مسکوویت انجام گرفت. شباهت بین طیف مرجع و طیف پیکسل، به وسیله محاسبه زاویه بین طیف‌ها ارزیابی می‌شود. طیف‌ها به شکل بردارهایی در یک فضای چندبعدی (که ابعاد فضا بستگی به تعداد باندها دارد) در نظر گرفته می‌شوند. زاویه بین طیف بازتابی مرجع و طیف بازتابیده از سطح پیکسل‌ها به عنوان معیار مشابهت ارائه می‌شود. این روش نسبت به اثرات سپیدایی و روشنایی متفاوت خواهد بود و تحت تأثیر عوامل روشنایی خورشید نیست، زیرا زاویه بین دو بردار مستقل از طول آن‌هاست. در تصویر حاصل از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی، هر پیکسل نمایش‌دهنده میزان اختلاف بازتاب در طیف‌های تفکیکی الگوی طیفی بازتابیده از سطح با الگوی طیفی مرجع است. این اختلاف الگوی طیفی به صورت زاویه‌ای و در مقیاس رادیان، در بازه بین 0 تا $\pi/2$ نمایش داده می‌شود (Kruse et al, 1993; Van der Meer et al, 2003). خروجی روش نقشه‌بردار زاویه طیفی، تخمینی کیفی از مشابهت طیف موردنظر با هر طیف مرجع ارائه می‌دهد. در خروجی حاصل از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی، پیکسل روشن‌تر معادل زاویه بزرگ‌تر و نشان از اختلاف بیشتر طیف مورد مطالعه با طیف مرجع و پیکسل تاریک‌تر معادل زاویه کوچک‌تر و نماد مشابهت بیشتر طیف‌ها است. نتایج و تصویر-نقشه نگاشت کانی این روش در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است.



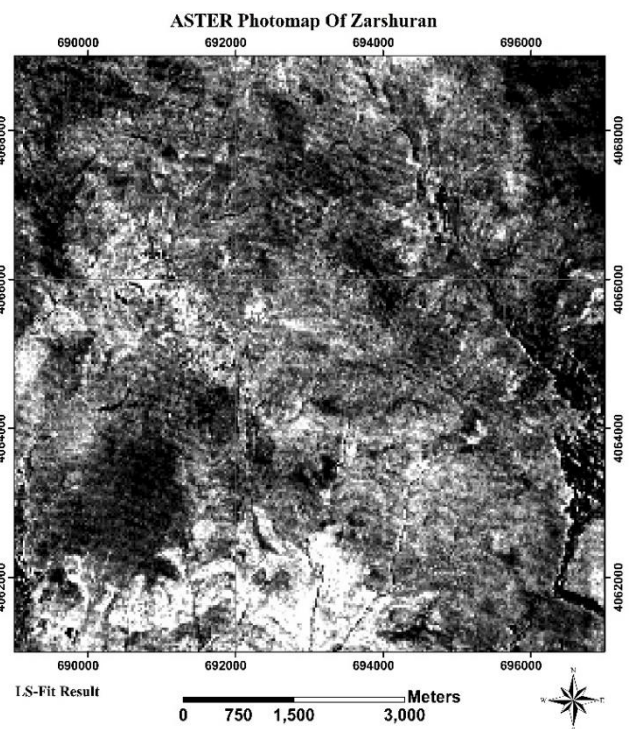
شکل ۱۰: تصویر حاصل از روش برازش کمترین مربعات (پیکسل‌های تیره مناطق دگرسانی پروپلیتیک را نشان می‌دهند).



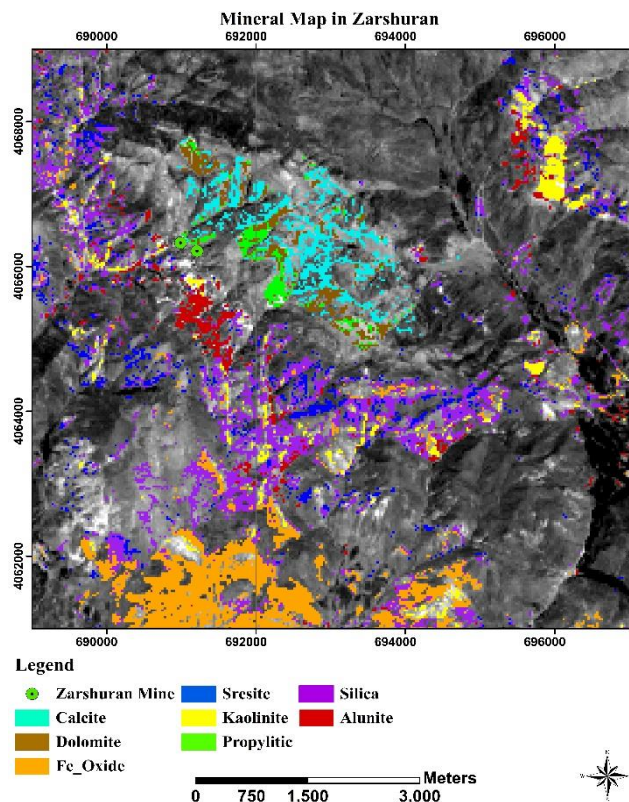
شکل ۹: تصویر حاصل از روش برازش کمترین مربعات (پیکسل‌های تیره مناطق دگرسانی آرژلیک را نشان می‌دهند).



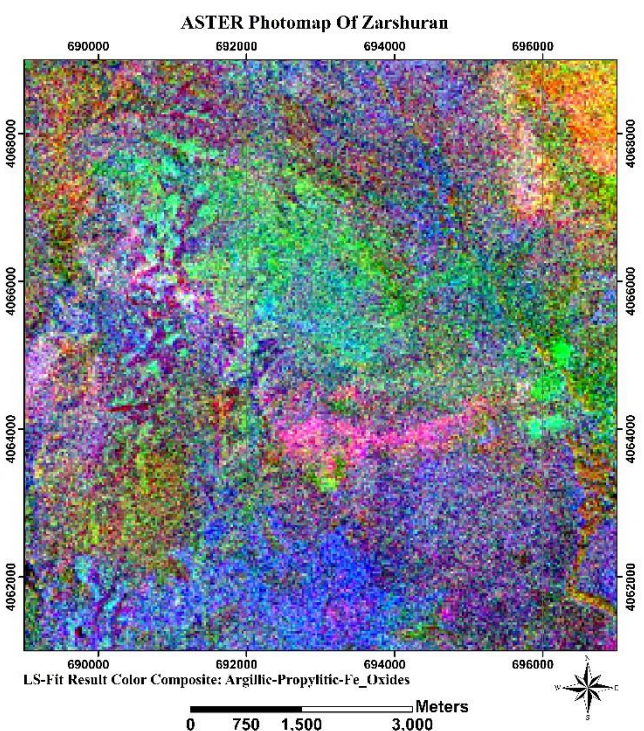
شکل ۱۳: تصویر حاصل از روش SAM (پیکسل‌های قرمز مناطق دگرسانی آرژلیک را نشان می‌دهند).



شکل ۱۱: تصویر حاصل از روش برازش کمترین مربعات (پیکسل‌های روشن اکسیدهای آهن را نشان می‌دهند).



شکل ۱۴: نقشه نگاشت کانی‌های استخراج‌شده از تصویر ASTER با استفاده از روش SAM.

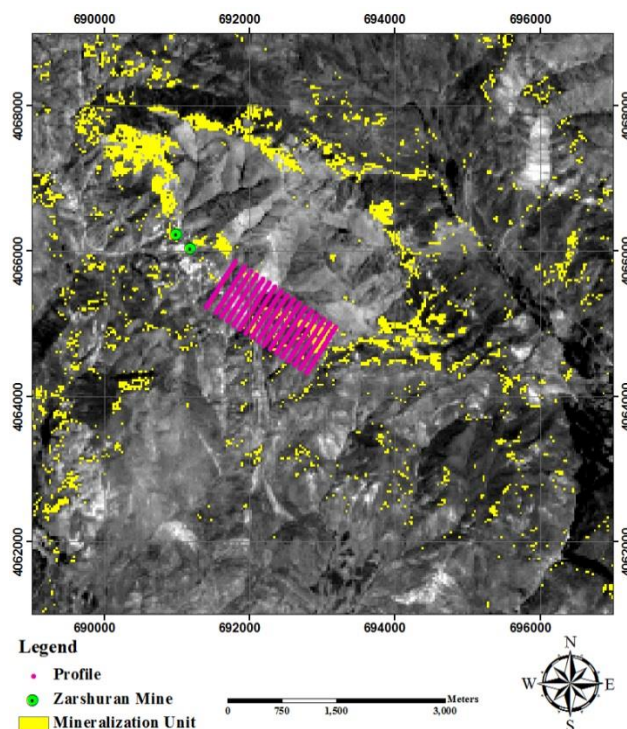


شکل ۱۲: تصویر ترکیب رنگی (LS-Fit6, LS-Fit8, -LS-) RGB: Fit2 حاصل از روش برازش کمترین مربعات (دگرسانی‌های هیدروکسیل به صورت پیکسل‌های زرد و نارنجی مشخص شده‌اند).

فتحی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.

۵-۵- روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت (Maximum likelihood classification)

یکی از روش‌های آماری معروف، انعطاف‌پذیر و قابل مدیریت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی بیشترین شباهت است که جزء روش‌های بر اساس پیکسل قرار می‌گیرد. در این روش اصول کار بر اساس محاسبه مقدار احتمال انتساب یک پیکسل به یک کلاس خاص است و کلاسی که بیشترین احتمال را دارا است به پیکسل تعلق می‌گیرد. در این روش از تئوری احتمالات بیزین (Bayesian probability theory) برای محاسبه احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های گوناگون استفاده می‌شود. در این حالت برای توزیع داده‌ها از فرض توزیع نرمال چندبعدی استفاده می‌گردد، بدین معنی که هیستوگرام داده‌ها دارای توزیع نرمال است. این روش برای هر باند مقادیر میانگین و انحراف معیار را محاسبه می‌کند و همبستگی یا کواریانس بین باندها را نیز در نظر می‌گیرد (Lillesand and Kiefer, 1994). در شکل ۱۵ واحد سنگ‌شناختی حاوی کانی‌زایی طلا حاصل از طبقه‌بندی بیشترین شباهت تفکیک شده و همراه با پروفیل‌های ژئوفیزیکی در منطقه، به‌صورت جداگانه نشان داده شده است.



شکل ۱۵: واحد سنگی حاوی کانی‌زایی طلا همراه با موقعیت قرارگیری پروفیل‌های ژئوفیزیکی در منطقه.

۷- دگرسانی

۱-۷- دگرسانی سیلیسی

می‌شود و سیلیس آزادشده از زون سرپسیتی و آرژیلیک به‌صورت محلول در سطح و گاهی در مسیر با سنگ‌ها واکنش می‌دهد و آن‌ها را سیلیسی می‌کند؛ که در واقع این خود نوعی متاسوماتیزم است و رنگ کلی سنگ دربرگیرنده را به سمت روشن پیش می‌برد. در

دگرسانی سیلیسی در کانسارهای هیدروترمال به‌صورت جریان‌ی، برشی و جانشینی یافت شده و در بالای سیستم گرمایی واقع

۷-۳- دگرسانی آلونیتی

از دگرسانی‌های مهمی که در محدوده رخنمون داشته دگرسانی آلونیتی است. کانی‌های مهم این نوع دگرسانی عبارت‌اند از: آلونیت، کوارتز، کلسدون، اپال و کانی‌های فرعی آن کائولینیت، سیرسیت، ژاروسیت، پیریت و همتایت است. محلول‌های گرمابی غنی از سولفات در شرایط اکسیدان و در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب هیدرولیز سنگ‌های غنی از Al و K شده و در نتیجه آلونیت تشکیل می‌گردد. آلونیت در بخش فوقانی کانسارهای اپی‌ترمال یافت می‌شود. افزایش غلظت SO₄ عامل مهم و اساسی برای تشکیل آلونیت است. کاهش درجه حرارت محدوده تشکیل آلونیت را گسترش می‌دهد. نظر به اینکه در زون آلونیت سیستم مربوطه اشباع از سیلیس است بنابراین بلورهای سیلیس کریپتوکریستالین می‌توانند تشکیل شوند. دگرسانی آلونیت در اکثر کانسارهای طلا و نقره نوع اپی‌ترمال یافت می‌شود. این زون از بالا به زون سیلیسی و از اطراف و پایین به زون آرژیلیتی محدود می‌شود. به همین دلیل راهنمای خوبی جهت اکتشاف کانسارهای طلا و نقره نوع اپی‌ترمال است. در صورتی که غلظت آهن در محلول بالا رود به‌جای آلونیت، ژاروسیت تشکیل می‌گردد. در کانسار زرشوران این زون در بالای منطقه معدن زرشوران و تقریباً در کنتاکت بین آهک‌های روشن و تیره چالداغ مطالعه گردیده است. در این کنتاکت، میان لایه‌های ماسه‌ای واجد فلدسپات‌ها وجود دارد که احتمالاً با تأثیر سیالات هیدروترمال و چرخش آن در بین این میان لایه‌ها، این دگرسانی را به وجود آورده است. از مشخصات مهم آن وجود توده‌های کریپتوکریستالین ژاسپروئید در آن است که با کائولینیت و ایلیت همراه است (شکل ۱۶) (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

کانسار زرشوران نیز گسترده‌ترین دگرسانی از نوع سیلیسی است که به‌خصوص در زون مینرالیزه واحد شیلی و آهکی زرشوران حائز اهمیت است. در اینجا عمدتاً سنگ به‌صورت برشی سیلیسی‌شده است و در بعضی نقاط با کانی‌زایی باریت همراه است. در سنگ آهک‌های کریستالیزه واحد چالداغ در امتداد شکستگی‌ها، سنگ‌های آهکی سیلیسی‌شده‌اند و حتی در بعضی مناطق بافت اولیه سنگ کاملاً حفظ گردیده است که نشان‌دهنده جاننشینی سیلیس به‌جای کربنات کلسیم است. در بعضی نقاط توده‌های ژئودی از بلورهای کوارتز دیده می‌شود که عمدتاً در امتداد گسل وجود داشته که به مرور زمان در اطراف آن پراکنده شده و سطح زیادی را پوشش داده‌اند. علاوه بر این در قسمت‌هایی که تحت عنوان دگرسانی آلونیتی معرفی شده است نیز بلورهای درشت و زیبایی از سیلیس را می‌توان مشاهده نمود (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

۷-۲- دگرسانی سیرسیتی-آرژیلیتی

در کانسار زرشوران این زون از کوارتز دانه‌ریز، ایلیت، کائولینیت و سیرسیت تشکیل شده است. در زون غنی شده سولفیدی مهم‌ترین دگرسانی پس از دگرسانی سیلیسی از نوع سیرسیتی-آرژیلیتی است و حتی در قسمت‌هایی در درجه اول اهمیت قرار دارد. زون دگرسانی سیرسیتی-آرژیلیتی در کانسار زرشوران حاوی کربن آزاد است که رنگ سنگ را خاکستری تا سیاه می‌کند. این کربن به احتمال زیاد مربوط به سنگ اولیه و از نوع آلی است. در واحد کربناتی دگرسانی عمدتاً از نوع سیلیسی بوده و دگرسانی نوع سیرسیتی-آرژیلیتی ناچیز است. این حالت‌های دگرسانی در تمام طول کمربند که سنگ میزبان آهک و شیل سیاه است دیده می‌شود (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).



شکل ۱۶: نمایی از گسترش دگرسانی آلونیتی در بالای زون کانی زایی.

۸- کانی سازی

کانی سازی طلا در کانسار زرشوران از جهات مختلفی مشابه کانسار اپی ترمال پراکنده در سنگ های رسوبی و به خصوص کربناته (تیپ کارلین) است. طلا یا به صورت بسیار دانه ریز در کانسار پراکنده بوده و میزان آرسنیک و سولفید در کانسار بسیار بالا است و یا با کربن آلی موجود در واحد زرشوران تشکیل کمپلکس طلا-کربن آلی داده که دارای عیار بالایی نیز است. کانی سازی در این کانسار به سه شکل رگه ای (در زون های سیلیسی)، لایه ای (در آهک کربن دار زرشوران و آهک با رگچه های زرنیخ چالداغ) و توده ای (در محدوده مرکزی معدن زرنیخ) دیده می شود. در کل شباهت های فراوانی بین کانسار زرشوران و کانسارهای تیپ کارلین وجود دارد؛ که می توان آن را از نوع کارلین توصیف کرد. در زیر به عنوان نمونه برخی از این شباهت ها آورده شده است:

۱) در هر دو نوع کانسار، سنگ میزبان از نوع رسوبی و کربناته بوده و همراه با شیل و دولومیت است. ۲) در هر دو نوع، گسل های با شیب زیاد از کنترل کننده های مهم کانسار می باشند. ۳) در کانسارهای تیپ کارلین تمرکز بالایی از سولفیدهای آرسنیک وجود دارد که این تمرکز را می توان به وضوح خصوصاً در تونل های زرنیخ در حال استخراج معدن زرشوران مشاهده نمود. ۴) در کانسار زرشوران بر طبق گزارش های قبلی مانند تیپ کارلین، به صورت ذرات ریز فلزی و یا درگیر در شبکه مولکولی، رالگار و اورپیمنت وجود دارد. ۵) کلیه کانسارهای تیپ کارلین مانند زرشوران دارای تمرکز بالایی از جیوه، آنتیموان، تالیوم و انواع گسترده ای از کانی های سولفیدی و سولفات های هستند. ۶) مطالعات کانی شناسی وجود کانی گچلیت را در کانسار زرشوران نشان داده است که مشابه کانسار گچل از کانسارهای تیپ کارلین است. ۷) در کانسارهای تیپ کارلین مشابه کانسار زرشوران، کانی آرسنو پیریت کمیاب بوده و در عوض کانی پیریت به وفور دیده می شود که حاوی مقادیری پیرویت است. ۸) آثار فعالیت های چشمه های آب گرم که عامل انتقال و ته نشینست کمپلکس های فلزی و طلا دار در کانسارهای تیپ کارلین تعیین گردیده است، نیز در کانسار زرشوران حضور گسترده ای دارد.

کانی های همراه طلا عبارت اند از: اورپیمنت، رالگار، استیبینیت، اسفالریت، گالن، گچلیت، سینیابر و کانی های مس دار و گانگ کانسار عبارت است از کوارتز، فلورین، باریت و کلسیت (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴).

۹- مطالعات ژئوفیزیک

روش های الکتریکی یکی از مهم ترین زیرمجموعه های روش های ژئوفیزیک اکتشافی هستند؛ که بر مبنای مطالعه میدان های الکتریکی زمین یا ویژگی های الکتریکی پیکره های زمین شناسی و معدنی

استوارند. قطبش القایی (IP) یکی از روش های معمول و کارآمد در تشخیص کانی های سولفیدی و فلزی است. اندازه گیری های IP معمولاً در حوزه زمان یا فرکانس صورت می گیرند و بارپذیری، معمول ترین متغیر در اندازه گیری حوزه زمان محسوب می شود. از آنجاکه مقاومت ویژه نیز از ویژگی های ذاتی سنگ و تشکیلات مختلف به شمار رفته و در شناخت وضعیت ساختاری و زمین شناسی منطقه مورد نیاز است، به عنوان روش مکمل IP در اکتشاف ذخایر فلزی به کار گرفته می شود (Mikhail, 1994). در بررسی های ژئوفیزیکی به منظور افزایش دقت و حصول نتایج با صحت بالاتر، از ترکیب چند روش استفاده می شود. از این رو، برداشت های مقاومت سنجی و IP به وسیله آرایش قطبی-دوقطبی که پوشش افقی نسبی خوبی دارد و سیگنال آن قوی است و به نوبه های تلوریک حساس نیست (Mostafaie et al, 2009)، در منطقه مورد مطالعه و نیز مدل سازی روی آن ها صورت گرفته است. برای این منظور تعداد هفده پروفیل قطبی-دوقطبی در راستای عمود بر آنومالی های شبکه برداشت، طراحی شد (شکل ۲). وارون سازی هموار داده های پروفیل های مورد نظر با استفاده از نرم افزار Res2dinv صورت گرفت. در این روش وارون سازی زمین به تعدادی بلوک مستطیل شکل با مقاومت ویژه ثابت برای هر بلوک تقسیم می شود. به دلیل آنکه تأثیر بلوک های عمیق بر روند وارون سازی، نسبت به بلوک های سطحی کمتر است، ضخامت بلوک های نزدیک به سطح کمتر از بلوک های عمیق در نظر گرفته می شود (Loke, 2002). این نرم افزار با به حداقل رساندن خطای RMS (جذر میانگین مربعات) بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده به یک مدل فیزیکی از زمین می رسد؛ که با شرایط زمین شناسی انطباق دارد. این مدل ها در واقع نمایش دوبعدی مقاومت ویژه و قطبش القایی هستند. در نهایت، مقایسه و تطبیق نتایج حاصل از این بررسی ها باعث افزایش دقت تفسیر تحقیقات ژئوفیزیکی صورت گرفته در محدوده می شود.

فرایند مدل سازی معکوس سه بعدی، علاوه بر اینکه تفسیری جزئی تر از هندسه ساختارهای زمین شناسی در عمق و ارتباط آن ها ارائه می دهد؛ اطلاعات اساسی درباره مکان و جهت این ساختارها نیز نمایان می کند. همچنین این مدل ها می توانند برای پیش بینی پتانسیل معدنی و ارزیابی منابع معدنی مفید واقع شوند. مدل سازی های سه بعدی کاذب به دو صورت امکان پذیر است: درونیایی داده های پروفیل های موازی و وارون سازی داده های برداشت سه بعدی؛ که در این مطالعه از روش اول استفاده شده است.

در این پژوهش برای مدل سازی سه بعدی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و IP از نرم افزار Res3dinv استفاده شده است و نتایج حاصله در نرم افزار Rock Works و Voxler به نمایش درآمده است. در نرم افزار Res3dinv به منظور مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه اندازه گیری شده از روش کمترین مربعات هموار مقید شده استفاده می شود. برای حل مسئله وارون سازی

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

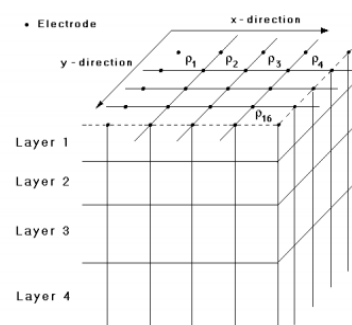
خصوصیات دستگاه برداشت ژئوالکتریک مورد استفاده شرح داده شده است. لازم به ذکر است که الکتروود دور در فاصله حدود ۱۵۰۰ متری از ابتدای پروفیل و در جهت عکس برداشت پروفیل قرار داده شده است.

گیرنده از نوع Scintrex IPR12 و با مشخصات زیر بوده است: (۱) ورودی: ۱ تا ۸ کانال (۲) شدت ورودی: ۱۵ مگا اهم (۳) SP: کنترل خودکار (۴) ولتاژ ورودی: ۵۰ میکرو ولت تا ۱۴ ولت (۵) دامنه بارپذیری: ۰ تا ۳۰۰ میلی ولت بر ولت (۶) دقت قرائت اختلاف پتانسیل، SP و بارپذیری: ۱۰ میکرو ولت برای اختلاف پتانسیل، -۱ میلی ولت برای SP و ۰/۰۱ میلی ولت بر ولت برای بارپذیری (۷) دقت واقعی برای قرائت تمامی پارامترها: کمتر از ۱ درصد (۸) زمان انتگرال‌گیری اختلاف پتانسیل: ۸۰ درصد زمان واقعی (۹) برنامه انتقال بارپذیری: انتخاب پالس‌های ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ ثانیه.

پروفیل ۱ (شکل ۱۸): پروفیل ۱ شمالی‌ترین پروفیل محدوده است. فاصله نقاط برداشت در این پروفیل ۳۰ متر و طول پروفیل در حدود ۷۲۰ متر است. در بخش غربی این پروفیل با توجه به سنگ‌شناسی محدوده، تناوبی از سنگ آهک، سنگ آهک‌های دولومیتی و میکا شایست مشاهده می‌شود؛ که مقادیر بالای مقاومت ویژه در ابتدای پروفیل می‌تواند ناشی از سنگ‌های مقاوم حاکم بر منطقه باشد. بر روی نقشه قطبش‌لقایی این پروفیل حداکثر مقادیر بارپذیری با رنگ بنفش نشان داده شده است. مقادیر بالای بارپذیری در ابتدای پروفیل می‌تواند ناشی از شیل‌های منطقه باشد؛ اما بی‌هنجاری‌ای که در فاصله تقریبی ۵۲۰ متری از ابتدای پروفیل قرار دارد احتمالاً در ارتباط با زون کانی‌سازی موجود در منطقه است. عمق تقریبی این بی‌هنجاری از ۵۰ متری شروع شده و تا ۱۰۰ متری ادامه پیدا می‌کند.

پروفیل ۱۰ (شکل ۱۹): در نقشه بارپذیری این پروفیل در قسمت‌های ابتدایی نواحی با بارپذیری بالایی مشاهده می‌شود؛ که همخوانی مناسبی با مقاومت ویژه بالای مشاهده شده در محدوده دارد و احتمالاً در ارتباط با لیتولوژی واحد زرشوران موجود در محدوده است. یک بی‌هنجاری در فاصله ۴۶۰ متری از ابتدای پروفیل از سطح تا عمق بالای ۱۵۰ متری وجود دارد که به احتمال زیاد در ارتباط با واحدهای مینرالیزه موجود در زیر آهک‌ها است. مقادیر بالای مقاومت ویژه نیز که در نقشه مقاومت ویژه این پروفیل مشاهده می‌شود به احتمال زیاد مرتبط با واحدهای آهکی موجود در واحد زرشوران است.

داده‌ها و پارامتری کردن مدل، ساختار زیرسطحی مدل موردنظر به چندین لایه تقسیم‌بندی شده و هر لایه نیز به تعدادی بلوک‌های مکعب مستطیل شکل که هریک از آن‌ها دارای مقاومت ویژه متفاوت ولی مجهول هستند تقسیم می‌شود (شکل ۱۷). با تقسیم این سلول‌ها به اجزای کوچک‌تر، تعداد پارامترهای مدل و نیز زمان موردنیاز برای وارون‌سازی این دسته از داده‌ها به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی وارون هدف این است تا مقاومت ویژه هر یک از سلول‌های مدل به طریقی تعیین شوند که پاسخ مدل در تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه باشد. این برنامه برای مدل‌سازی، روش کمترین مربعات و روش گاوس-نیوتن را به کار می‌برد. محاسبات عددی در این نرم‌افزار با روش‌های تفاوت‌های محدود و اجزای محدود صورت می‌گیرد. در روش کمترین مجموع مربعات در هر بار تکرار، برخلاف روش گاوس-نیوتن، ماتریس ژاکوبین ساخته نمی‌شود، بلکه ماتریس قبلی تصحیح می‌شود. این روش ده مرتبه سریع‌تر است و حافظه رایانه‌ای کمتری را برای محاسبات به خود اختصاص می‌دهد (Loke, 2002).

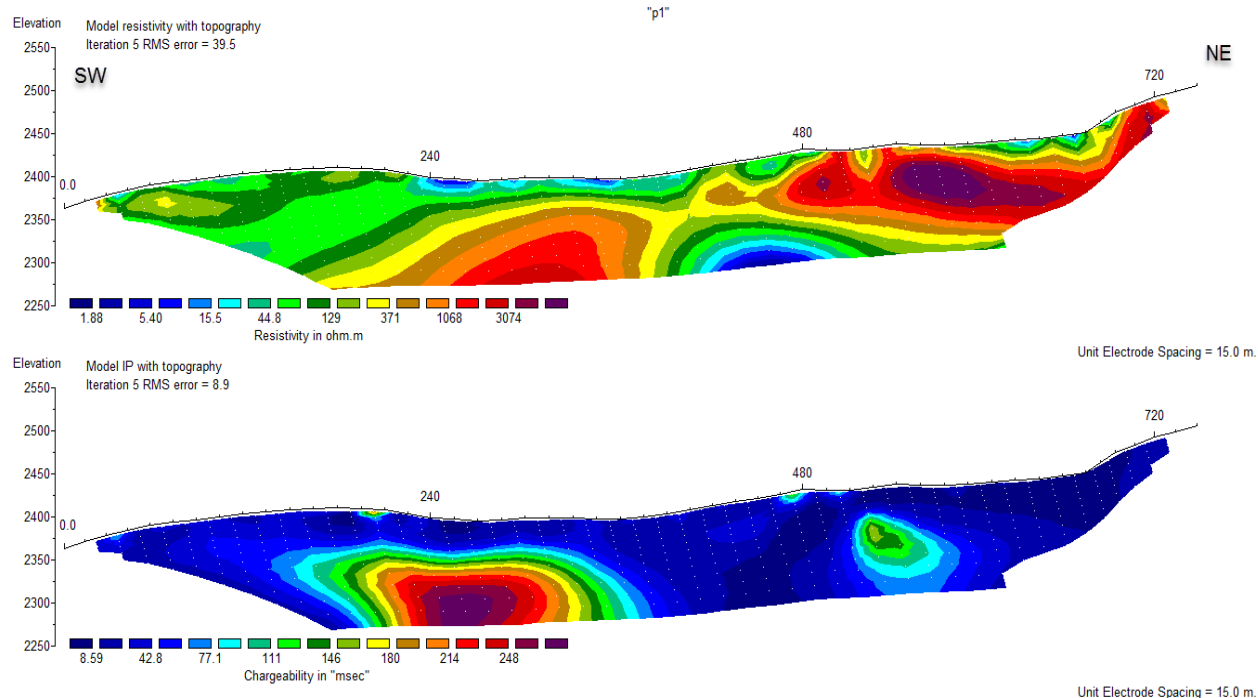


شکل ۱۷: مدل سه‌بعدی زیر سطح زمین که توسط نرم‌افزار Res3dinv به تعدادی لایه و بلوک‌های مکعبی شکل با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت تقسیم می‌شود (Loke, 2002).

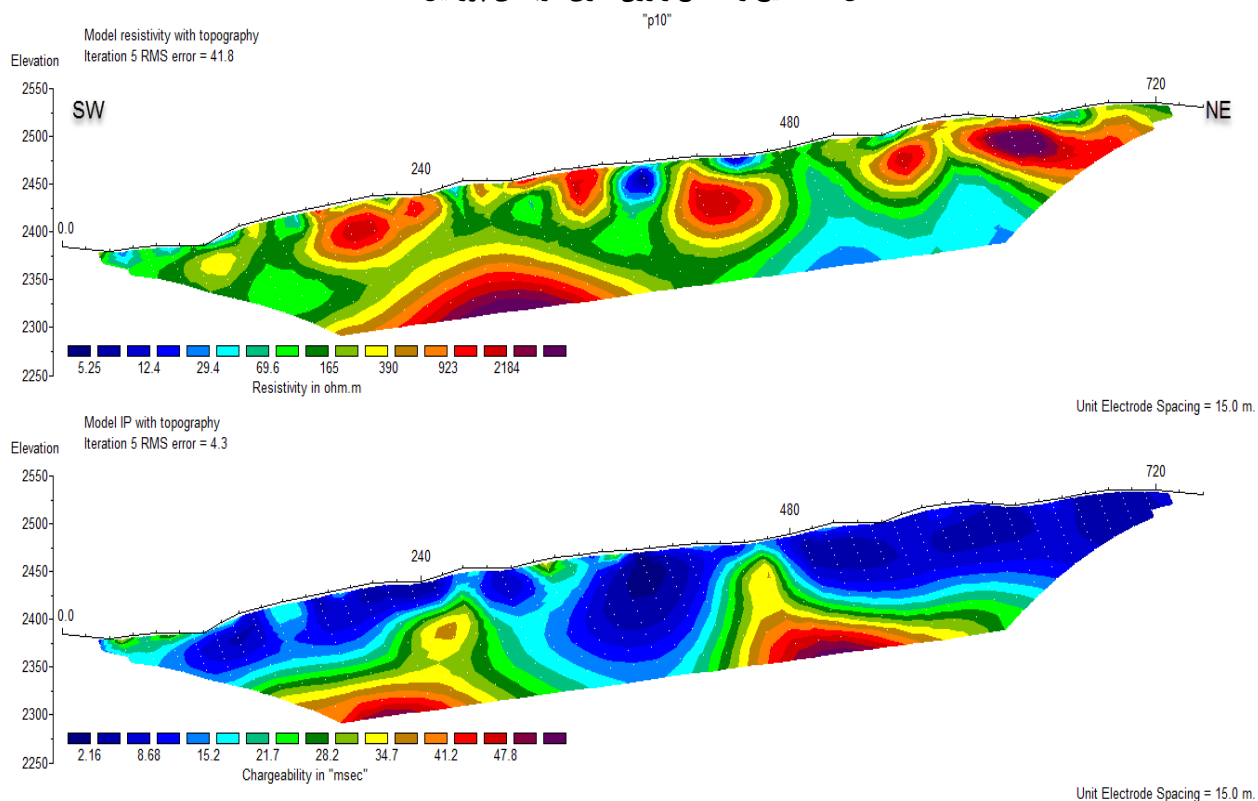
۱۰- تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی IP و مقاومت ویژه

برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی انجام شد؛ که به دلیل رعایت اختصار، تنها نتایج مربوط به دو پروفیل در این مقاله بررسی شده است. تجهیزات برداشت شامل یک دستگاه گیرنده IP و مقاومت ویژه Scintrex IPR12 ساخت کشور کانادا، فرستنده P-V 800 ولتی و ژنراتور ۳ کیلوواتی بود. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مقاطع وارون‌سازی دوبعدی پروفیل ۱ و ۱۰ را نشان می‌دهند. همچنین در زیر به اختصار چند مورد از

فنجی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.



شکل ۱۸: نتایج و مقاطع وارون سازی دوبعدی پروفیل ۱.



شکل ۱۹: نتایج و مقاطع وارون سازی دوبعدی پروفیل ۱۰.

قطبش القایی نیز حاکی از وجود یک آنومالی با شارپذیری متوسط به بالا در قسمت های انتهایی پروفیل ها هستند. این آنومالی را می توان به کانی زایی طلا در مرز بین واحد زرشوران و واحد آهکی چالداغ نسبت داد.

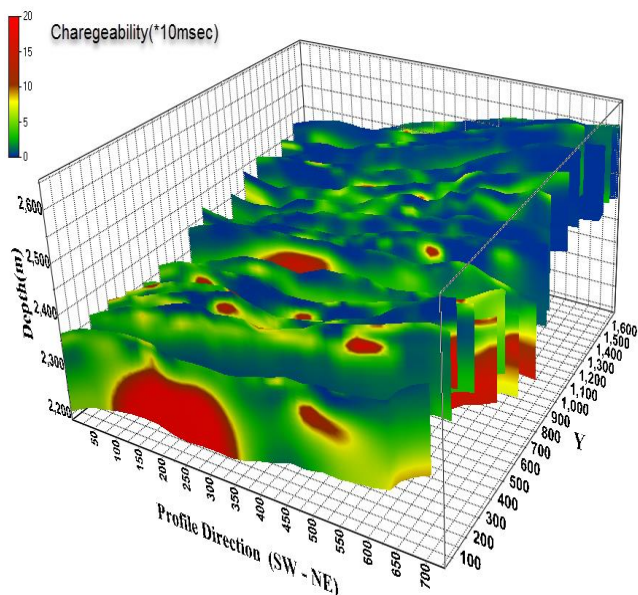
نمایش پروفیل های دوبعدی در کنار هم می تواند شمای بهتری از روند تغییرات آنومالی ارائه نماید. شکل های ۲۰ و ۲۱ این مقاطع را نمایش می دهند. همان طور که مشاهده می شود، بخش های ابتدایی عمده پروفیل ها از مقاومت ویژه بالایی برخوردار است. مقاطع

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

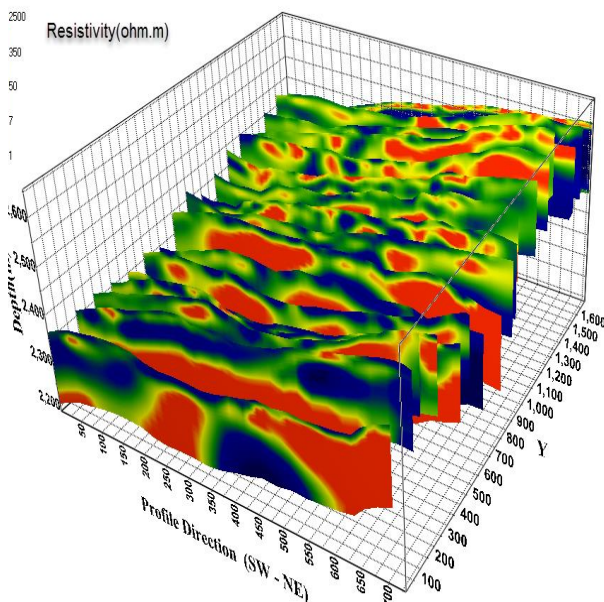
نواحی با IP نسبتاً بالا است. در تمامی مقاطع، بخش‌های با IP نسبتاً بالا از ایستگاه ۴۰۶۵۰۹۸ تا ایستگاه ۴۰۶۵۵۷۳ از $x = 691400$ شروع شده و تا $x = 692361$ ادامه پیدا کرده است. چنین به نظر می‌رسد که بیش‌ترین تمرکز ماده معدنی بین ایستگاه $x = 691400$ و ایستگاه $x = 692361$ باشد.

شکل‌های ۳۰ تا ۳۳ نمایش سه‌بعدی داده‌های IP و مقاومت ویژه را که با استفاده از نرم‌افزارهای Voxler و Rock Works انجام شده است، نشان می‌دهند (موقعیت شمال برای خروجی هر دو نرم‌افزار یکسان است). همان‌طور که از روی این شکل‌ها نیز مشاهده می‌شود قسمت‌هایی که IP نسبتاً بالایی دارند بر قسمت‌هایی که میزان مقاومت ویژه آن‌ها متوسط به پایین است منطبق می‌باشند و این درواقع همان زون مینرالیزه را نشان می‌دهد. به‌عبارتی دیگر نتایج حاصل از نرم‌افزار Voxler و Rock Work به‌خوبی تغییرات شارژپذیری و مقاومت ویژه را به‌صورت سه‌بعدی در زیر سطح زمین نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های ۳۴ و ۳۵ دو نمونه از مقطع‌های افقی زده‌شده در عمق ۸۰ و ۱۰۰ متری را بر روی مدل‌سازی دوبعدی داده‌های قطبش‌القایی نشان می‌دهند. با توجه به این مقاطع نیز می‌توان تا حدودی امتداد کانی‌سازی را در عمق‌های مختلف شناسایی کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات بارپذیری نسب به عمق به‌صورت بارزی در این مقاطع آشکار شده‌اند، به طوری که با افزایش عمق مقدار بارپذیری افزایش پیدا کرده است؛ که می‌تواند در ارتباط با افزایش حجم، عیار و پراکندگی بیشتر کانی‌سازی باشد.

مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی در شکل‌های ۲۲ تا ۲۹ نشان داده شده است؛ و درنهایت برای نمایش بهتر نتایج سه‌بعدی و دید بهتری از روند کانی‌زایی زیرسطحی از نرم‌افزار Voxler و Rock Works استفاده گردید (شکل ۳۰ تا ۳۳). همان‌طور که در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های اندازه‌گیری شده به‌صورت یازده مقطع افقی مقاومت ویژه و قطبش‌القایی در بازه‌های متفاوت عمقی آورده شده است. با توجه به شکل ۲۲ و ۲۳ می‌توان ملاحظه نمود که بخش‌های با مقادیر IP نسبتاً بالا (که اغلب در مجاورت و یا بر روی بخش‌های با مقاومت ویژه متوسط به پایین قرار گرفته‌اند)، از سطح تا عمق ادامه یافته است. با مقایسه مقطع‌های افقی مقاومت ویژه و قطبش‌القایی می‌توان دریافت، بخش‌هایی که بارپذیری متوسط تا زیاد و مقاومت ویژه متوسطی دارند (که با توجه به ماهیت ماده معدنی و زون مینرالیزه موجود در مرز بین واحد زرشوران و واحد چالداغ، ویژگی شاخص برای مناطق هدف محسوب می‌شود) بر هم منطبق بوده و احتمالاً جزو مناطق محتمل کانی‌سازی و اهداف اکتشافی به شمار می‌آیند. همچنین با توجه به مقاطع به‌دست‌آمده در شکل ۲۴ و ۲۵، نواحی با مقاومت ویژه بالا که با رنگ‌های زرد تا قهوه‌ای تیره در بخش‌های ابتدایی و مرکزی هر مقطع وجود دارد به‌احتمال زیاد ناشی از سنگ‌های نارسنایی همچون آهک در منطقه است که با افزایش عمق بر شدت آن‌ها افزوده شده است. شکل‌های ۲۶ تا ۲۹ نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی را به‌صورت مقاطع قائم در جهت y نشان می‌دهند. در این مقاطع حضور نواحی با مقاومت ویژه متوسط به پایین منطبق بر

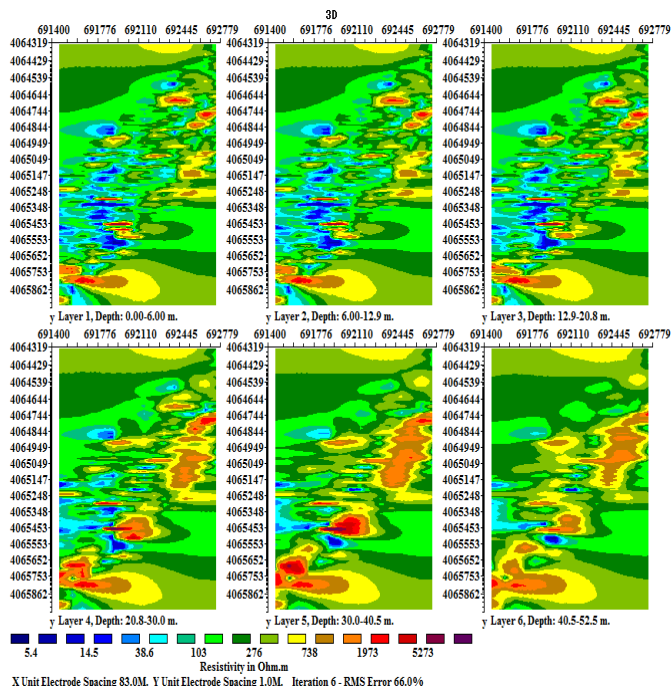


شکل ۲۱: نمایش ۲/۵ بعدی مقاطع قطبش‌القایی با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D.

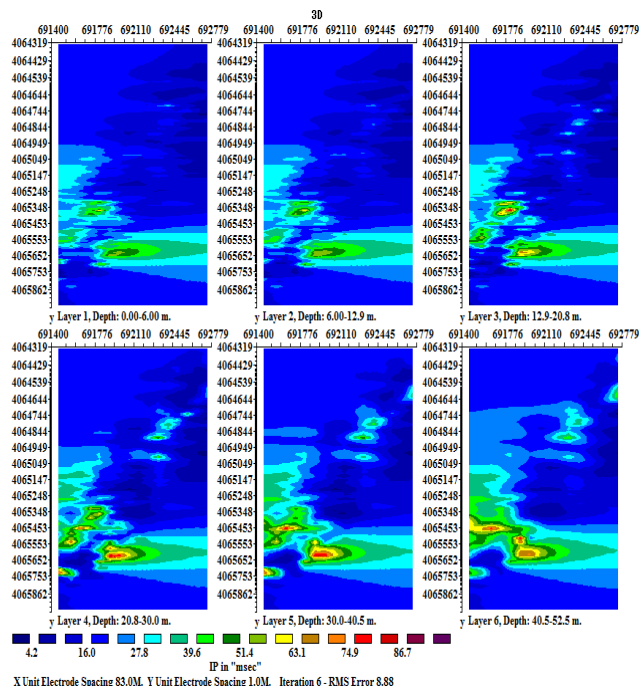


شکل ۲۰: نمایش ۲/۵ بعدی مقاطع مقاومت ویژه با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D.

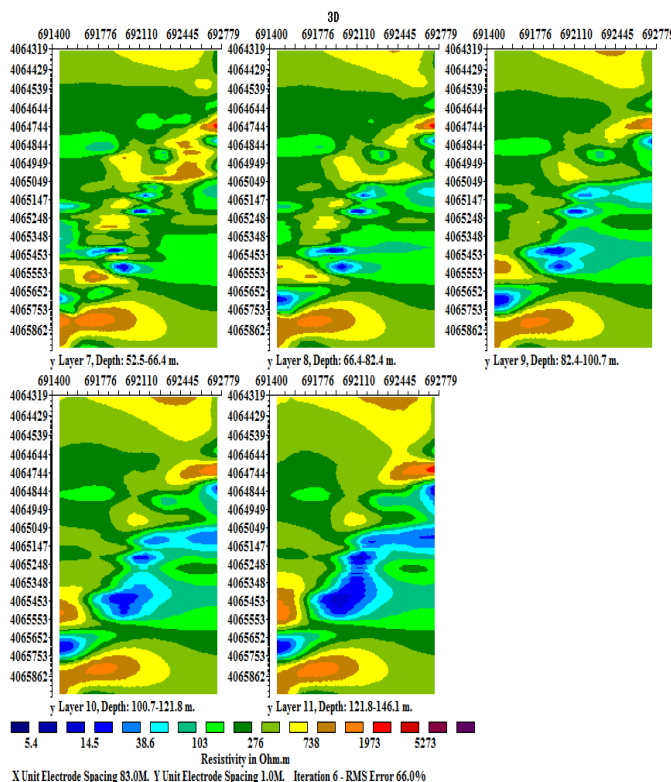
فتمی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.



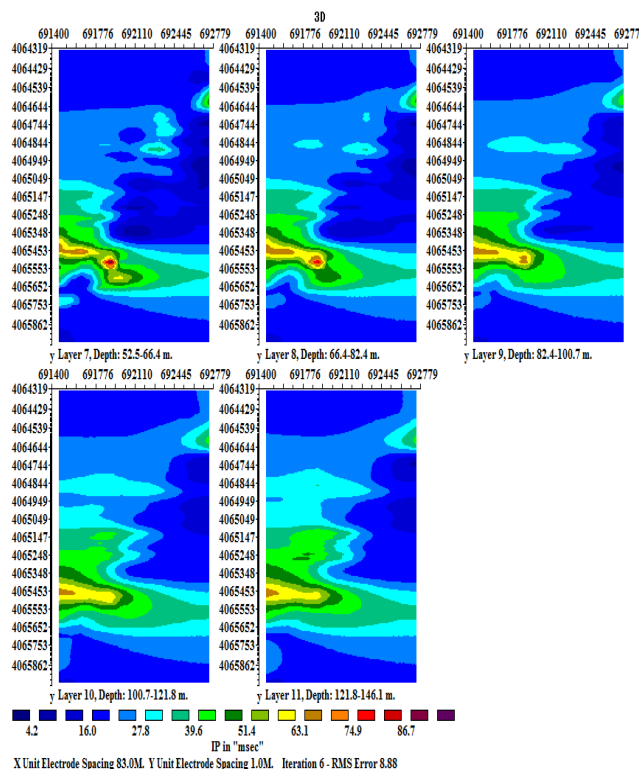
شکل ۲۴: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی مقاومت ویژه (از سطح تا عمق ۵۲/۵ متر).



شکل ۲۲: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی قطبش القایی (از سطح تا عمق ۵۲/۵ متر).

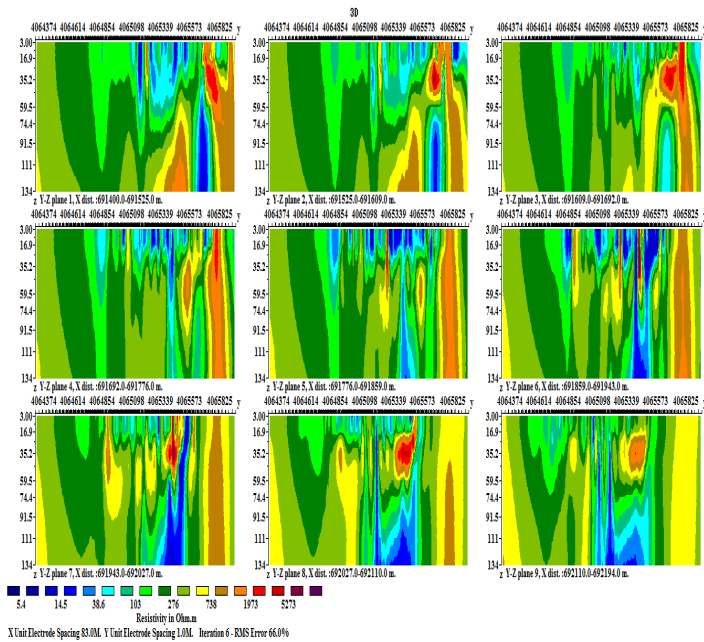


شکل ۲۵: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی مقاومت ویژه (از عمق ۵۲/۵ متر تا عمق ۱۴۶/۱ متر).

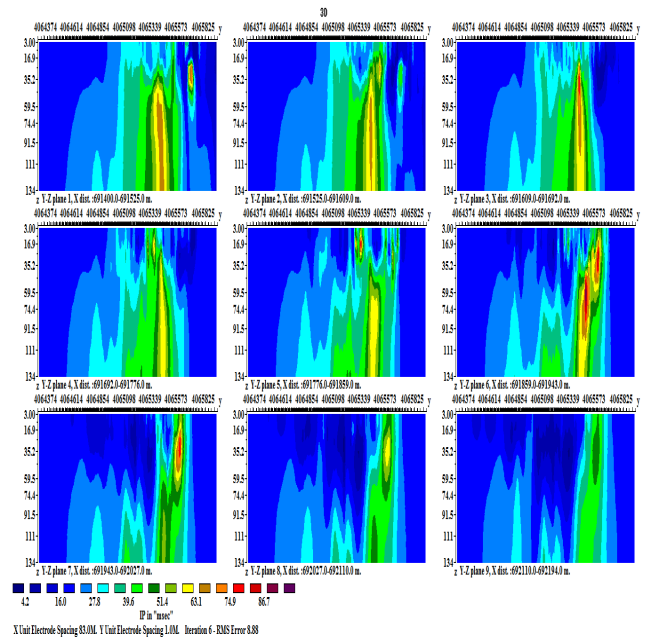


شکل ۲۳: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی قطبش القایی (از عمق ۵۲/۵ متر تا عمق ۱۴۶/۱ متر).

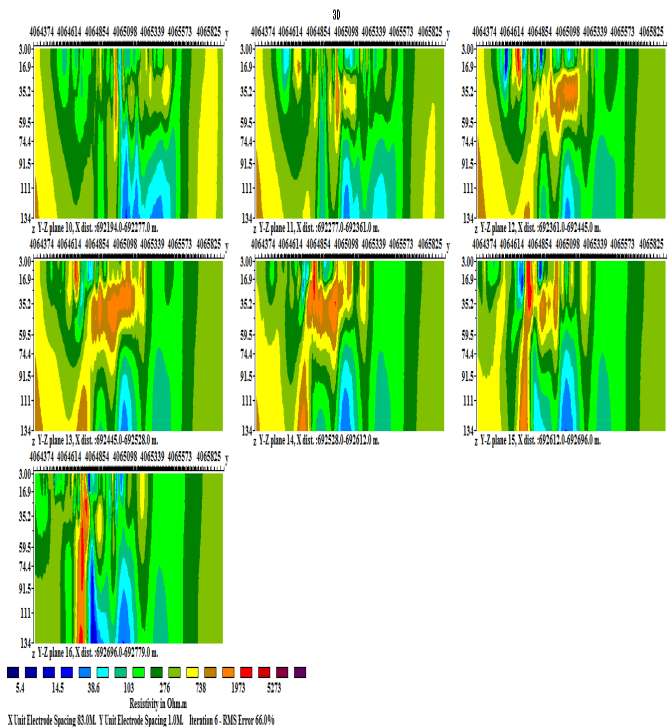
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.



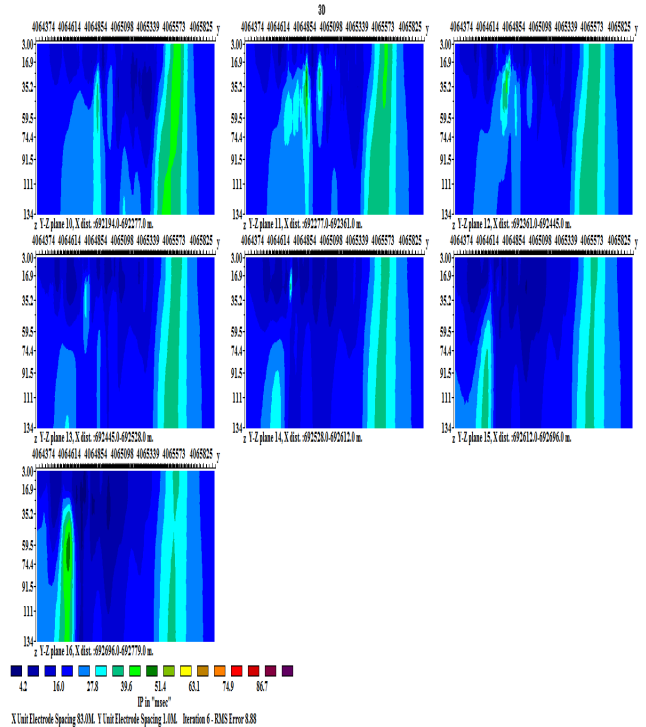
شکل ۲۸: مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی با نرم افزار Res3dinv از ایستگاه $x=691400$ تا ایستگاه $x=692194$.



شکل ۲۶: مقاطع قائم قطبش القایی (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی با نرم افزار Res3dinv از ایستگاه $x=691400$ تا ایستگاه $x=692194$.



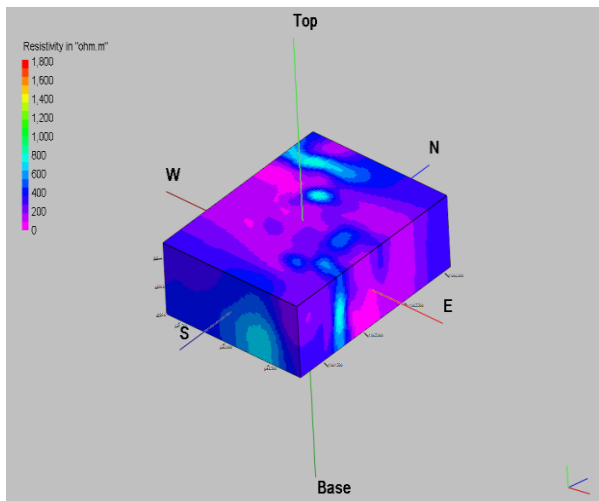
شکل ۲۹: مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی با نرم افزار Res3dinv از ایستگاه $x=692194$ تا ایستگاه $x=692779$.



شکل ۲۷: مقاطع قائم قطبش القایی (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی با نرم افزار Res3dinv از ایستگاه $x=692194$ تا ایستگاه $x=692779$.

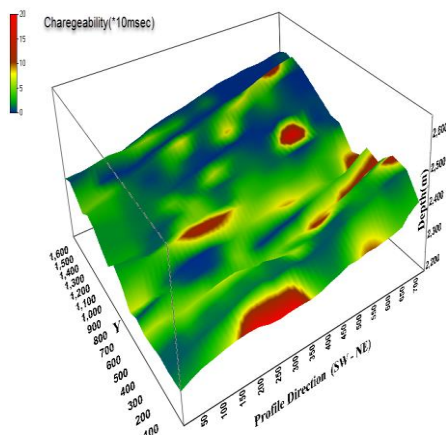
فنجی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.

.Rock Works

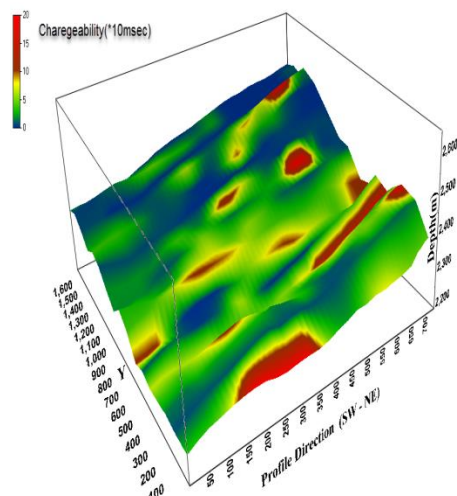


شکل ۳۳: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه توسط نرم افزار

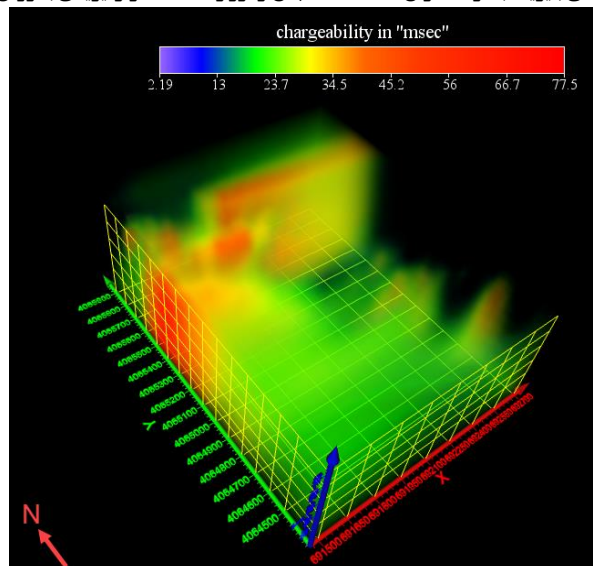
.Rock Works



شکل ۳۴: مقطع افقی زده شده بر روی مدل سازی دوبعدی داده‌های قطبش القایی در عمق ۸۰ متری.

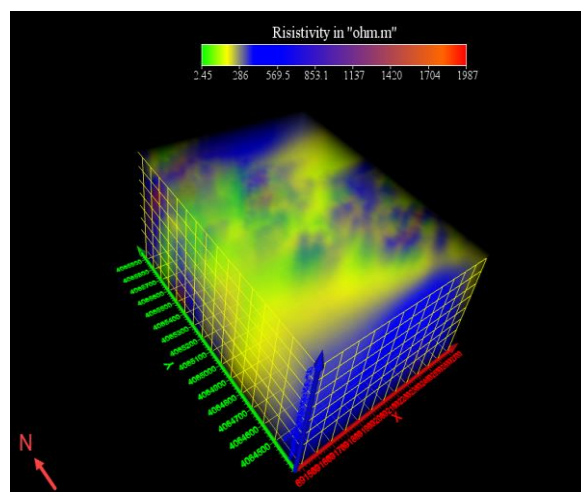


شکل ۳۵: مقطع افقی زده شده بر روی مدل سازی دوبعدی در عمق



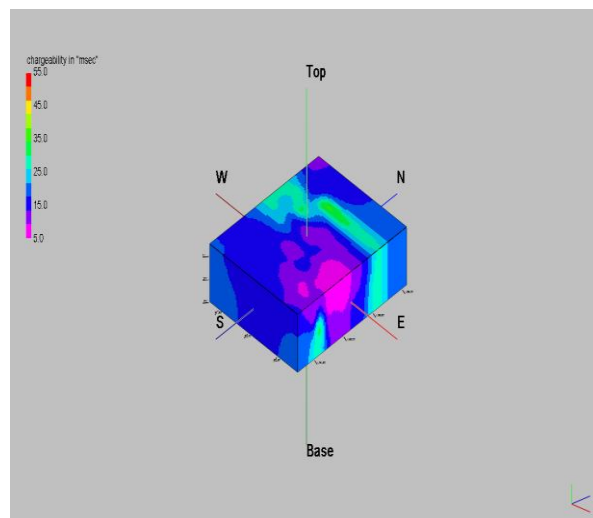
شکل ۳۰: نمایش سه بعدی داده‌های قطبش القایی توسط نرم افزار

.Voxler



شکل ۳۱: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه توسط نرم افزار

.Voxler



شکل ۳۲: نمایش سه بعدی داده‌های قطبش القایی توسط نرم افزار

۱۱- ترسیم نمودار گمانه اکتشافی

بر اساس مطالعات دورسنجی، مشاهدات سطحی و برداشت‌های ژئوفیزیکی، ۲ نقطه جهت حفاری در منطقه پیشنهاد شد (جدول ۳). پس از مطالعه دقیق نتایج آنالیز و لیتولوژی دو نمونه از گمانه‌های حفاری‌شده در منطقه، نمودار این گمانه‌ها ترسیم شد (شکل ۳۶ و ۳۷) و در نهایت همخوانی نتایج ژئوفیزیک با نمودارهای ترسیم‌شده مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو گمانه انطباق خوبی بین نتایج ژئوفیزیک و گسترش کانی‌سازی فلزی موجود در منطقه وجود دارد. در مناطقی که انطباق چندانی بین نتایج ژئوفیزیک و حفاری وجود ندارد به احتمال زیاد ناشی از پیریت‌های موجود در کانی‌سازی است. بر اساس نتایج آنالیز ژئوشیمیایی در گمانه NE_01 دو بازه ۰ تا ۱۶ متری و ۵۶ تا ۶۴ متری دارای بیشترین میزان ناهنجاری کانی‌سازی طلا و سایر عناصر می‌باشند. در گمانه YG_26A در متراژ ۴۰ تا ۱۵۰ متری بیشترین ناهنجاری ژئوشیمیایی قرار دارد که تصدیق‌کننده مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی در عمق مذکور هستند. لیتولوژی غالب این دو گمانه شامل سنگ آهک مربوط به واحد چالداغ موجود در منطقه و به مقدار کمتر ماسه‌سنگ‌های موجود در واحد زرشوران است.

جدول ۳: موقعیت و مشخصات نقاط حفاری در منطقه (UTM_

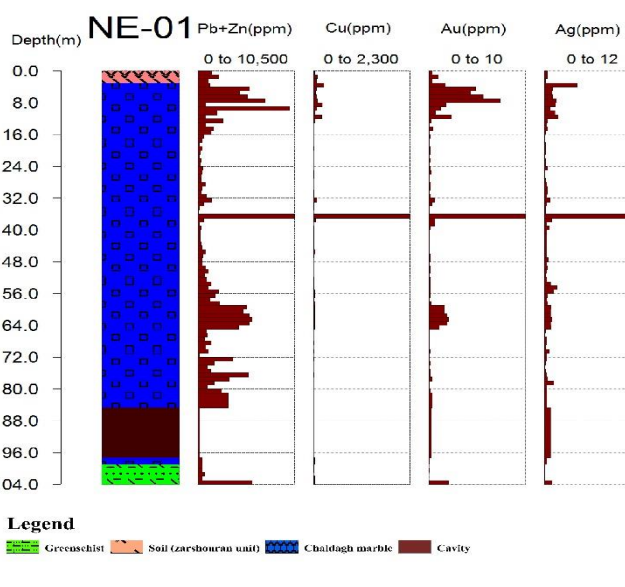
WGS1984_Zone 38N).

Name	X	Y	Azimuth	Slope	Depth(m)
BH_0	69168	406566	0	90	130
BH_1	69244	406509	0	90	150

شکل ۳۷: نمودار ترسیم‌شده گمانه YG_26A.

۱۲- نتیجه‌گیری

از آنجاکه نواحی دگرسانی گرمابی می‌توانند ارتباط نزدیکی با مناطق کانی‌سازی داشته باشند، بر این پایه تفکیک محدوده‌های دگرسانی می‌تواند کلیدی برای پی‌جویی مواد معدنی با مقیاس ناحیه‌ای باشد. دگرسانی، فرایندهای پیچیده تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی و بافتی و حاصل از واکنش سیال‌های داغ با سنگ‌های دربرگیرنده است و عبور این سیال‌ها از واحدهای یادشده سبب تغییرات مهم و چشمگیری می‌شود که با توجه به ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی این مناطق دگرسانی قابل تفکیک در تصاویر ماهواره‌ای است. چراکه در طی فرایند دگرسانی مجموعه زیادی از کانی‌ها به وجود می‌آید که از مهم‌ترین این کانی‌ها می‌توان به کانی‌های با بنیان OH اشاره کرد. هدف اصلی از این پژوهش پردازش تصاویر سنجنده ASTER به منظور پهنه‌بندی نواحی دگرسانی و اعتبارسنجی این نتایج با مشاهدات زمینی و همچنین انجام عملیات IP و مقاومت ویژه، مدل‌سازی و در نهایت، تفسیر داده‌ها به منظور یافتن محل‌های دقیق، شیب و امتداد کانی‌سازی در محدوده مورد مطالعه بود؛ که با استفاده از سنجنش‌ازدور و روش‌های پردازش تصویر تا حدودی دگرسانی‌های منطقه شناسایی شد (شکل ۴ تا ۱۴).



شکل ۳۶: نمودار ترسیم‌شده گمانه NE_01.

فتحی بایزیدآباد و همکاران، مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران، صفحات ۹۱-۱۰۶.

داده‌های ژئوفیزیکی بر روی تعدادی پروفیل عمود بر پروفیل‌های برداشت‌شده صورت گیرد تا بتوان مدل‌سازی سه‌بعدی واقعی بر روی پروفیل‌ها نیز انجام داد. با توجه به اینکه مقادیر بارپذیری در پروفیل‌های برداشت‌شده می‌تواند ناشی از کانی‌های رسی و یا کانی‌های فلزی موجود در منطقه باشد، لذا پیشنهاد می‌شود نمونه‌های برداشت‌شده از حفاری‌های انجام‌شده در منطقه، مورد آنالیز XRD قرار گیرند تا میزان و نوع کانی‌های رسی و فلزی تعیین گردد؛ تا بتوان در وهله اول نتایج مدل‌سازی داده‌های IP را به صورت دقیق‌تری تفسیر کرد و تطابق بیشتری با آنومالی‌های ژئوفیزیکی ایجاد کرد

۱۳- منابع

شبانکاره، م.، ۱۳۸۶، تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی زون متالوژنی کاشان-نائین در محیط GIS با استفاده از شبکه عصبی- فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

عسکری، ع.، کریم‌پور، م.ح.، مظاهری، س.ا. و ملک‌زاده شفارودی، آ.، ۱۳۹۱، تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) محدوده معدنی طلای هیرد بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی، مجله علوم زمین، ۹۴، ۲۳۵-۲۴۶.

گورابجیری‌پور، آ. و مباشری، م.، ۱۳۹۳، تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مطالعات ژئوفیزیکی IP/RS کانسار ماهور- شمال غرب دهسلم، بلوک لوت، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۲، ۳۰۷-۳۲۵.

ملک‌زاده شفارودی، آ.، حیدریان شهری، م. و کریم‌پور، م.، ۱۳۸۸، کانی‌سازی و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP/RS و مغناطیس‌سنجی زمینی در محدوده MA_I و اطراف آن، منطقه اکتشافی مس- طلا پورفیری ماهرآباد، شرق ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۱، ۱-۱۷.

مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱، گزارش تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ زرشوران، ارائه شده به سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران.

مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۴، گزارش پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی در اطراف معدن زرشوران، ارائه‌شده به سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران.

نجفیان، ط.، ۱۳۸۹، نقشه‌برداری از کانی‌های مناطق دگرسان شده منطقه سرچشمه استان کرمان با استفاده از داده‌های چند طیفی و ابر طیفی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن، گرایش اکتشاف، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

به‌طورکلی و با توجه به حدود تغییرات مقاومت ویژه و شارژپذیری در مقاطع می‌توان گفت که شدت شارژپذیری تقریباً در تمامی پروفیل‌ها قابل‌قبول بوده و ژئوفیزیک به روش قطبش‌القایی و مقاومت ویژه در مورد کانی‌سازی در این محدوده مناسب است. همان‌طوری که در تفسیر پروفیل‌ها نیز اشاره شد، در تفسیر مطالعات ژئوفیزیک در این منطقه سعی بر شناسایی نواحی با بارپذیری نسبتاً بالا در واحدهای کانی‌سازی آهکی است؛ که در پروفیل‌ها نیز این موضوع نشان داده شد. بر اساس مطالعات انجام‌شده در این منطقه، واحد زرشوران مستعد کانی‌سازی نبوده و زون کانی‌سازی غالباً در بین توده آهکی با واحد زرشوران قرار دارد. در هرکدام از واحدهای موجود در منطقه شرایط همبستگی داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت ویژه متفاوت است. در واحد زرشوران معمولاً نواحی با بارپذیری بسیار بالایی مشاهده می‌شود که این نواحی دارای مقدار مقاومت ویژه حد واسط تا بالایی هستند؛ اما در نواحی کانه‌دار موجود در زون چالداغ که یک زون آهکی است آنومالی دارای بارپذیری متوسط تا زیادی بوده و بیشینه مقاومت ویژه در این نواحی مشاهده می‌شود. وجود سیلیس داخل واحد چالداغ در برخی موارد باعث ایجاد تغییرات در نقشه‌ها و مدل‌های مقاومت ویژه شده است. همچنین با توجه به بررسی نقشه‌ها و مدل‌ها و نتایج وارون‌سازی، در حالت کلی مقدار زمینه مقاومت ویژه واحد چالداغ بیشتر از واحد زرشوران است. در نقاط انتهایی آخرین پروفیل‌های برداشت‌شده نیز که دارای واحد ایمان خان بوده، در برخی مواقع بارپذیری بالایی از خود نشان می‌دهد که غالباً دارای مقاومت ویژه بالایی به‌ویژه در نواحی سطحی هستند. با توجه به خاصیت سنگ‌های شیل و شیست که غالباً در واحد زرشوران قرار دارند؛ این نواحی بارپذیری بالایی از خود نشان داده‌اند؛ که احتمالاً در ارتباط با محدوده کانی‌سازی نیست و نباید به‌عنوان زون کانه‌دار تفسیر شوند. واحدهای شیستی و همچنین برخی نواحی از توده‌های آهکی و نیز لایه‌های تراورتن باعث شده‌اند که مقاومت ویژه در اکثر پروفیل‌ها زیاد باشد. با توجه به بررسی‌های صحرائی و همچنین مقایسه نتایج حفاری تعدادی از گمانه‌های اکتشافی، مطالعات ژئوفیزیک به روش قطبش‌القایی و مقاومت ویژه در این محدوده واحدهای زمین‌شناسی را کامل از هم تفکیک نموده و اطلاعات مفیدی از شرایط عمقی محدوده در اختیار گذاشته است؛ که در مطالعات اکتشافی آینده و همچنین تعیین نقاط بهینه حفاری بسیار مؤثر خواهد بود. در حالت کلی زون کانی‌سازی موجود در قسمت میانی محدوده گسترده شده و تا آخرین پروفیل برداشت‌شده ادامه پیدا کرده است؛ که نواحی با بارپذیری بالا در بین واحدهای آهکی مستعد مطالعات تفصیلی‌تر هستند. با توجه به اینکه در بخش‌های پایانی پروفیل‌های انتهایی، آنومالی در برخی از پروفیل‌ها باز مانده است لذا پیشنهاد می‌شود عملیات ژئوفیزیک در نقاط انتهایی این پروفیل‌ها جهت بستن آنومالی‌ها صورت گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای داشتن دیدی بهتر از روند کانی‌زایی، برداشت

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. and Goetz, A.F.H., 1993, The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data, Remote Sensing of Environment, Special issue on AVIRIS, 44, 145-163.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W., 1994, Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd edition, New York, pp. 650-675.
- Loke, M.H., 2002, RES3DINV ver. 2.11 for Windows 95/98 & NT-Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least squares method.
- Loughlin, W.P., 1991, Principal Component Analysis for Alteration Mapping, Photogram metric Engineering & Remote Sensing, 27 (9), 1163 - 1169.
- Mikhail, Z.S., 1994, The geoelectrical methods in geophysical exploration, Elsevier, 873 P.
- Mostafaie, K., Nowrouzi, G.H., Askari, M.S. and Shiva, M., 2009, Statistical analysis and RS & IP Geophysical data modeling for Hameeh mining index, First conference of economic geology association of Iran, Ferdowsi University of Mashhad.
- Salmirinne, H. and Turunen, P., 2007, Ground Geophysical Characteristics of Gold Targets in the Central Lapland Greenstone Belt, Geological Survey of Finland, Special Paper, 44, 209-223.
- Van der Meer, F.D. and De Jong, S.M., 2003, Imaging spectrometry basic principles and prospective applications, Vol. 4, Springer Science & Business Media.
- Willocks, A.J. and Moore, D.H., 1999, Geology and geophysical exploration of base metals in Victoria, geology survey of Victoria Report 119, Australian Society of Exploration Geophysics special publication, 11, 1-22.
- نجفیان، ط.، رنجبر، ح. و فتحیان پور، ن.، ۱۳۹۰، بررسی قدرت تفکیک آلتراسیون‌های مرتبط با کانسارهای مس پورفیری با استفاده از تجمع طیفی داده‌های ALI و ASTER، اولین کنگره‌ی جهانی مس، تهران، صفحات ۱۰۹-۱۲۰.
- نوروزی، غ.ج. و غلامی، س.، ۱۳۸۴، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP-RS,M) در محل اندیس معدنی سوناجیل، نشریه دانشکده فنی، ۲، ۲۵۳-۲۶۵.
- Asadi Harooni, H., 2000, The Zarshuran gold deposit model applied in a mineral exploration GIS in Iran, Ph.D.Thesis, Delft university, The Netherlands.
- Bishop, J.R. and Lewis, R.J.G., 1992, Geophysical signatures of Australian volcanic hosted Massive sulfide deposits, Economic Geology, N 87, 913-930.
- Crosta, A. and Moore, J., 1989, Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain, Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference, Remote sensing for exploration geology, pp. 1173-1187.
- Doyle, H.A., 1990, Geophysical exploration for gold-A review, Geophysics, 55 (2), 134-146.
- Guo, W., Dentith, M. and Zhao, Y., 2000, Geophysical exploration in the Xi-Cheng lead-zinc orefield Gansu Province, China, Exploration Geophysics, 31, 243-247.
- Gurin, G.V., Tarasov, A.V., Il'in, Y.T. and Titov, K.V., 2015, Application of the Debye decomposition approach to analysis of induced-polarization profiling data (Julietta gold-silver deposit, Magadan Region), Russian Geology and Geophysics, 56, 1757-1771.
- Haydon, S.J., 1999, Geophysical and exploration of the volcanic hosted massive sulphide prospect near Wickliffe, western Victoria, Australian Society of Exploration Geophysics special publication, 11, 67-80.

Remote sensing studies and geophysical exploration using IP and resistivity methods in Zarshuran gold mining area, northwest of Iran

Siamand Fathi Bayazidabad¹, Alireza Arab-Amiri^{2*}, Abolghasem Kamkar-Rouhani² and Andisheh Alimoradi³

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, School of Mines, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 15 May 2017; Accepted: 2 July 2017

Corresponding author: alirezaarabamiri@yahoo.com

Keywords

ASTER
Spectral Angle Mapping
Linear Band Prediction
Induced Polarization
Resistivity
Zarshuran Gold Area

Extended Abstract

Summary

In this study, processing and interpretation methods in remote sensing such as visual and spectral analysis have been performed on the ASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) data from Zarshuran gold area, and as a result, the alteration zones in the area have been identified. Then, the results of two-dimensional and three-dimensional modeling of Induced Polarization (IP) and resistivity data, using geological information, alteration and mineralization from the core drilling have been interpreted.

Eventually, optimal locations for exploratory drilling have been proposed.

Introduction

Development of advanced tools in remote sensing and geophysical exploration during recent decades indicates the necessity and importance of these tools in industry. In this paper, ASTER sensor imagery and geoelectrical data have been used in order to determine alteration zones, analyze mineralization system and identify the hidden mineralization in Zarshuran gold mine located in the north of the city of Takab, northwest of Iran. For this purpose, a variety of image processing methods are used. IP and resistivity methods have an important role for exploration of metallic ore deposits. To achieve good results from these methods as well as minimizing the noise in the study area, it is necessary to select appropriate electrode array type for carrying out IP and resistivity surveys. For this purpose, IP and resistivity field operations over 17 parallel survey lines using the pole-dipole array have been made to identify the location of gold mineralization in the area.

Methodology and Approaches

In order to identify alteration zones, image processing methods such as BR (band ratio), PCA (principal component analysis), LS-Fit (linear band prediction) and SAM (spectral angle mapping) using ENVI software were applied on the ASTER images from the study area. After collecting IP and resistivity data in the area, two-dimensional and three-dimensional smooth inverse modeling were carried out on the data using Res2dinv and Res3dinv software packages, and for better visualization, the results were demonstrated in Voxler and Rock Works software packages.

Results and Conclusions

Identification of alteration zones in the study area using remote sensing and image processing methods, and interpretation of the geophysical inverse modeling results using geological and drilling information in the area have been led to the identification of gold mineralized zones or deposits in three-dimensional form. Eventually, based on the whole results, optimal locations for exploratory drilling have been proposed. An outcome of this research is that applying both the remote sensing and geophysics data can be led to improve the accuracy of the results. As the obtained geophysical anomalies at the end of some survey lines have been open, therefore, it is suggested to continue geophysical operations at the end of these survey lines. For better display of gold mineralization, it is also recommended to carry out geophysical operations on a number of survey lines perpendicular to main parallel survey lines. As the acquired considerable IP values in the study area can be due to metallic minerals as well as clay minerals, therefore, it is recommended that some samples be taken from drillings or excavations in the area, and then, to be analyzed by x-ray diffraction (XRD) equipment to determine the amount and type of possible metallic or clay minerals in the samples.