



## مدل سازی ژئوفیزیکی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان و میدان پتانسیل در محدوده نهشته پلی متال اکوییتی سیلور برتیش کلمبیا، کانادا

مهدی محمدی<sup>۱</sup>؛ میثم عابدی<sup>۱\*</sup>؛ علی مرادزاده<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

\* نویسنده مسئول مکاتبات: MaysamAbedi@ut.ac.ir

### چکیده

هدف از این تحقیق، مکان یابی و شناسایی مناطق با پتانسیل بالای کانی سازی در منطقه اکوییتی سیلور در مرکز برتیش کلمبیا، کانادا بود. به همین منظور مدل های چگالی، حساسیت مغناطیسی و رسانایی الکتریکی به کمک مدل سازی وارون داده های هوا برد در این منطقه تولید شدند. هدف از این کار ایجاد مدل هایی با خواص فیزیکی سه بعدی مفید است که می توانند مستقیماً در اکتشافات منطقه ای برای شناسایی مناطق امید بخش بر اساس معیارهای مختلف اکتشاف استفاده شوند. محدوده مورد مطالعه یک ذخیره سولفیدی با سنگ میزبان آتشفشانی می باشد که با فعالیت های نفوذی مرتبط است و از سنگ های رسوبی، آذر آواری و آتشفشانی به علاوه توده های نفوذی که توسط جریان های آندزیتی تا بازالتی جوان تر و برش های جریانی که مربوط به دوران ژوراسیک فوقانی تا کرتاسه هستند، تشکیل شده است. در سال ۲۰۰۸ و ابتدا بنا به درخواست انجمن علوم زمین برتیش کلمبیا برداشت گرانی سنجی با استفاده از سیستم برداشت SGL AIRGrav G2-7 و در ادامه فعالیت اکتشافی برداشت هوا برد الکترومغناطیس و مغناطیس سنجی توسط سیستم پروازی Aero quest به طور هم زمان، صورت پذیرفت. در انتهای برداشت در طی ۳ پروفیل برای داده های گرانی سنجی تعداد ۳۹۸ قرائت و تعداد ۲۶ پروفیل داده الکترومغناطیس و مغناطیس سنجی با تعداد ۳۶۸۶۰ قرائت بدست آمد. مدل سازی سه بعدی میدان پتانسیل با استفاده از الگوریتم وارون سازی لی و اولدنبورگ و با استفاده از کدهای وارون سازی UBCGIF و UBCGIF MAG3D و GRAV3D صورت پذیرفت. برای مدل سازی داده های الکترومغناطیسی از نرم افزار EM Flow که به عنوان یک ابزار تفسیر سریع و نیمه خودکار برای وارن سازی یک بعدی داده های الکترومغناطیسی هوا برد طراحی شده است، استفاده گردید. برای اینکه مدل های ژئوفیزیکی سه بعدی به طور مؤثر برای تفسیر و هدف یابی اکتشاف مورد استفاده قرار گیرند، به درک خوبی از ویژگی های فیزیکی هدف اکتشافی نیاز است که می تواند به زمین شناسی و فرآیندهای زمین شناسی مرتبط باشد. برای منطقه مورد مطالعه، با توجه به مشاهدات زمین شناسی سطحی حاصل از مطالعات سنگ شناسی و ژئوشیمیایی، نتایج وارون سازی سه بعدی داده های هوا برد گرانی، مغناطیس و نتایج حاصل از مدل سازی یک بعدی داده های الکترومغناطیس جهت ساخت یک مدل زمین شناسی مشترک برای شناسایی اهداف معدنی بر روی یک پروفیل به صورت هم زمان به نمایش در آمدند. در نهایت یک زون امید بخش با تباین چگالی و رسانایی الکتریکی بالاتر نسبت به محیط در برگیرنده شناسایی گردید. ضخامت این قسمت بین ۳۰ تا ۶۰ متر است و تا عمق حدود ۲۰۰ متری از سطح زمین ادامه دارد. این زون با توجه به پیشینه زمین شناسی موجود و مطالعات ژئوشیمیایی، به احتمال زیاد با کانه زایی مس-طلا-مولیبدن پورفیری، نقره، سرب و روی در ارتباط است.

### واژگان کلیدی

وارون سازی ژئوفیزیکی  
ژئوفیزیک هوا برد  
چگالی  
حساسیت مغناطیسی  
رسانایی الکتریکی  
اکوییتی سیلور  
پلی متال

## ۱- مقدمه

هدف نهایی در روش‌های ژئوفیزیکی، شناسایی هرچه دقیق‌تر خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی است. برای دست‌یابی به این هدف، مدل‌سازی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی، از موفق‌ترین روش‌های تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی است؛ که نتیجه آن، پیدا کردن درک صحیح‌تر از ساختارهای زیرسطحی همچون شکل، عمق، گسترش جانبی و کشیدگی عمقی منبع زیر سطحی می‌باشد. مشخص شدن این پارامترها، تأثیر مستقیم و بسزایی در تصمیم‌گیری‌های بعدی دارد؛ که می‌تواند در مدیریت هزینه‌ها و معدنکاری، مؤثر واقع گردد (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌های حاصل از وارون‌سازی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی که ویژگی‌های فیزیکی زمین را بازتابی می‌کنند، ممکن است به طور مستقیم کانی‌سازی را نشان دهند یا ساختارهای مرتبط را ترسیم کنند. در هر دو مورد آن‌ها کمک‌های ارزنده‌ای برای اکتشاف مواد معدنی هستند و اطلاعاتی را فراهم می‌کنند که قبلاً فقط از روی نقشه‌های داده بدست می‌آمدند (Oldenburg et al., 1998). با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی ذخایر معدنی و جزییات خیره‌کننده‌ای که توسط این مدل‌ها در اختیار تیم‌های پژوهشی و اکتشافی قرار می‌گیرد، جنبه‌های ناپیدا و جالبی از شناسایی هرچه دقیق‌تر ساختارهای زیرسطحی این ذخایر آشکار می‌شود (عبداللهی شریف و همکاران، ۱۳۸۹).

یکی از روش‌های پرکاربرد ژئوفیزیک، ژئوفیزیک هوابرد است که در این روش نواحی با وسعت بالا با سرعت قابل قبولی برداشت می‌شوند (Oldenburg et al., 1998). در مقایسه با روش‌های زمینی، تکنیک‌های هوابرد دستیابی سریع به داده‌ها را در مقیاسی مناسب برای بسیاری از روش‌های ژئوفیزیکی فراهم می‌کنند. روش‌های هوابرد برای پی‌جویی در مناطقی که از نظر تئوری قابل دسترسی هستند اما دارای موانع اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و زیست محیطی هستند، سودمند است (Murthy, 2007). سه روش ژئوفیزیکی اصلی که به صورت هوابرد انجام می‌شوند عبارتند از: روش مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس و رادئومتریک در حالی که روش چهارم، یعنی گرانی‌سنجی، نیز در دهه‌های گذشته به یک روش قابل قبول تبدیل شده‌است (Dransfield, 2011). مبنای هر روش ژئوفیزیکی، شناسایی صحیح تباین‌های ناشی از خصوصیات مختلف ژئوفیزیکی اهداف مورد نظر می‌باشد (Telford et al., 1990). در کارهای اکتشافی معدنی به ندرت اتفاق می‌افتد که یک روش ژئوفیزیکی واحد بتواند همه اطلاعات زمین‌شناسی مورد نیاز در اکتشاف را فراهم کند. از طرفی هنگامی که ارزیابی سریع یک منطقه مورد نیاز است، مهم این است که بتوان همزمان با استفاده از چندین تکنیک ژئوفیزیکی، داده جمع‌آوری کرد (Dransfield, 2011). در بسیاری از موارد اکتشاف مواد معدنی، برای کاهش عدم قطعیت تفسیر و مدل‌سازی داده‌های متنوع ژئوفیزیکی، تلفیق و ادغام چندین روش ژئوفیزیکی مفید واقع خواهد شد (Ramazi and Mostafaie, 2013؛ فنبری و همکاران ۱۳۹۹).

نهشته‌های پلی‌متال دارای پیچیدگی‌های ژنری و ساختاری زیادی هستند. بنابراین اکتشاف این نوع کانسارها علاوه بر آنکه قدری مشکل است، زمان‌بر و پرهزینه نیز می‌باشد. از آنجا که هر یک از روش‌های اکتشافی دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد، بنابراین برای

اکتشاف نهشته‌های پلی‌متال، از چند روش اکتشافی مختلف استفاده شده و در نهایت از تلفیق آن‌ها، پتانسیل‌های کانی‌سازی، استنتاج می‌شود. بکارگیری روش‌های ژئوفیزیکی مناسب، گام نخست و تصمیم‌بهرینه در راستای اکتشاف این نوع کانسارها می‌باشد. کاربرد بررسی‌های ژئوفیزیکی هوابرد در اکتشاف نهشته‌های پلی‌متال در طول زمان به اثبات رسیده است که روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیس و میدان پتانسیل (مغناطیس و گرانی) مفیدترین روش‌ها برای اکتشاف بخش‌های پنهان کانی‌سازی، در این نوع نهشته‌ها هستند (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴). پس با ادغام این روش‌ها با یکدیگر می‌توان تا حدود زیادی ویژگی‌های زیرسطحی را برای اکتشاف منابع معدنی مدل‌سازی و شبیه‌سازی کرد و برای تسهیل این رویکرد، اکنون سیستم‌های دارای چند سنسور که قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان داده‌های الکترومغناطیس و میدان پتانسیل (گرانش و مغناطیس) هستند، در حال استفاده می‌باشد (Zhdanov, 2007).

استفاده از روش‌های تلفیقی ژئوفیزیک هوابرد می‌تواند مناطق وسیعی را با وضوح لازم برای اکتشاف کانسارهای معدنی تحت پوشش اقتصادی قرار دهد. این روش‌ها به کشف صدها کانسار معدنی در سراسر جهان کمک کرده است (Zhdanov et al., 2018). از جمله این موارد می‌توان به اکتشاف کیمبرلیت با استفاده از ژئوفیزیک هوابرد در کانادا منطقه ایکاتی مرکزی (Rajagopalan et al., 2007)، شناسایی مناطق مستعد کانه‌زایی توسط مدل‌سازی تلفیقی در منطقه دریاچه بیگستون در کانادا (Mahmoodi and Maxeiner, 2019)، تجزیه و تحلیل پتانسیل منطقه برای اکتشاف منابع طبیعی در عربستان سعودی از طریق مدل-سازی سه‌بعدی تلفیقی داده‌های ژئوفیزیکی هوابرد (Zhdanov et al., 2018) و شناسایی مناطق مستعد کانه‌زایی طلا و پیریت در کارولینای جنوبی (Alarifi et al., 2018)، اشاره نمود.

هدف اصلی پژوهش حاضر، وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی برای نهشته پلی‌متال اکوییتی سیلور (Equity Silver) می‌باشد. این نهشته تقریباً در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر هوستون در مرکز برتیش کلمبیا، کانادا واقع شده است. تعیین مناطق امیدبخش معدنی در منطقه با استفاده از تفسیر نتایج حاصل از وارون‌سازی کلیه داده‌های ژئوفیزیکی، از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. تعیین نحوه گسترش فضایی، اندازه و ابعاد، حجم و میزان ذخیره قابل استحصال یک کانسار، مستلزم شناخت کامل آن است و این امر نیز نیازمند مدل‌سازی با استفاده از کلیه اطلاعات اکتشافی موجود می‌باشد. در سایه بکارگیری چند روش ژئوفیزیکی و تفسیر همزمان نتایج آنها با یکدیگر می‌توان محدوده و گسترش جانبی و عمقی کانسار و در نتیجه نحوه گسترش فضایی آن را تعیین نمود. این گام اساسی منجر به پیشنهاد موقعیت بهینه حفاری‌ها و شناخت کامل کانسار جهت دست‌یابی به ذخیره کانه می‌باشد. در پژوهش حاضر با بکارگیری داده‌های حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیس حوزه زمان و میدان پتانسیل، نتایج حاصل از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های میدان پتانسیل و وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان برای تولید مدل‌های سه‌بعدی خواص فیزیکی و ترکیب نتایج وارون‌سازی در یک مدل زمین‌شناسی مشترک برای

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۳، ۱۴۰۱.

می‌باشند. در ادامه فعالیت اکتشافی از ۲۹ ژوئیه تا ۲۳ اکتبر ۲۰۰۸، به طور هم‌زمان برداشت هوابرد الکترومغناطیس و مغناطیس‌سنجی توسط سیستم پروازی Aero quest با فاصله خطوط پروازی ۲۰۰ متر و ارتفاع تقریبی ۶۰ متر از سطح زمین در جهت شرقی-غربی صورت پذیرفت. در انتهای برداشت تعداد ۲۶ پروفیل داده الکترومغناطیس و مغناطیس‌سنجی با تعداد ۳۶۸۶۰ قرائت بدست آمد. داده‌های مغناطیسی توسط مغناطیس‌سنج بخار سزیم با حساسیت ۰/۰۰۱ نانوتسلا (nT) با سرعت نمونه‌گیری ۰/۱ ثانیه برداشت شده است و برداشت داده‌های الکترومغناطیس با سیستم Aero TEM III، در حوزه زمان و با استفاده از شکل موج مثلثی و یک فرستنده متقارن در زمان پالس ۱/۷۱ میلی ثانیه و فرکانس پایه ۹۰ هرتز صورت پذیرفته است.

در نهایت داده‌های میدان پتانسیل و الکترومغناطیس با هدف تعیین توزیع‌های سه‌بعدی چگالی، حساسیت مغناطیسی و هدایت الکتریکی به دست آمد. این ویژگی‌های فیزیکی را می‌توان برحسب سنگ‌شناسی و یا فرآیندهای زمین‌شناسی تفسیر کرد و توزیع هندسی آن‌ها می‌تواند به ترسیم ساختارهای زمین‌شناسی کمک کند و به عنوان کمکی برای تعیین کانی‌سازی و انتخاب مکان‌های مناسب برای حفاری استفاده شود.

### ۳- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

اکویته سیلور، واقع در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی هوستون، در مرکز برتیش کلمبیا، کانادا واقع شده است. این محدوده یک ذخیره سولفیدی با سنگ میزبان آتشفشانی است که با فعالیت‌های نفوذی مرتبط است. چشم انداز اصلی (به طور محلی به عنوان چشم انداز (توالی) گوسلی (Goosley prospect) نامیده می‌شود) در سال ۱۹۶۷ در نتیجه بررسی‌های ژئوشیمیایی منطقه‌ای انجام شده توسط شرکت اکتشافی کینکو (Kennco Exploration (Western) Ltd) کشف گردید. بررسی‌های بیشتر تا سال ۱۹۷۹ و انجام مطالعات سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی در سال ۲۰۰۷ در منطقه وجود دو زون معدنی منطقه اصلی (Main zone) و منطقه دنباله جنوبی (Southern Tail zone) را به صورت مجزا از هم تأیید کرد که در شکل ۱ قسمت ب بر روی نقشه زمین‌شناسی به رنگ قرمز روشن قابل مشاهده است (Alldrick and Lin, 2007). این محدوده از سنگ‌های رسوبی، آذرآواری و آتشفشانی به‌علاوه توده‌های نفوذی که توسط جریان‌های آندزیتی تا بازالتی جوان‌تر و برش‌های جریان‌های مربوط به دوران ژوراسیک فوقانی تا کرتاسه هستند، تشکیل شده است. یک توده کوارتز-مونزونیت با سن تقریبی ۵۸ میلیون سال و یک مجموعه گابرو-مونزونیت با سن تقریبی ۴۹ میلیون سال در توالی گوسلی که دارای امتداد شمال شرقی و با شیب ملایم تا متوسط به سمت غرب می‌باشد، قابل مشاهده است. این توالی از سه واحد چینه‌شناسی تشکیل شده است. یک واحد آواری زیرین از کنگلومرای پایه، چرت و آرژیلیت تشکیل شده است. یک واحد آذرآواری میانی متشکل از توالی ناهمگن

تجزیه و تحلیل زمین‌شناسی و شناسایی مناطق مستعد کانه‌زایی در منطقه صورت پذیرفت. در ادامه نتایج حاصل از این وارون‌سازی را بررسی خواهیم کرد.

لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده در این تحقیق برای اولین بار است که به‌منظور انجام مدل‌سازی وارون مورد استفاده قرار می‌گیرد و سابقه‌ای از انجام مطالعاتی که قبلاً بر روی این داده‌ها صورت گرفته باشد، در دسترس نیست.

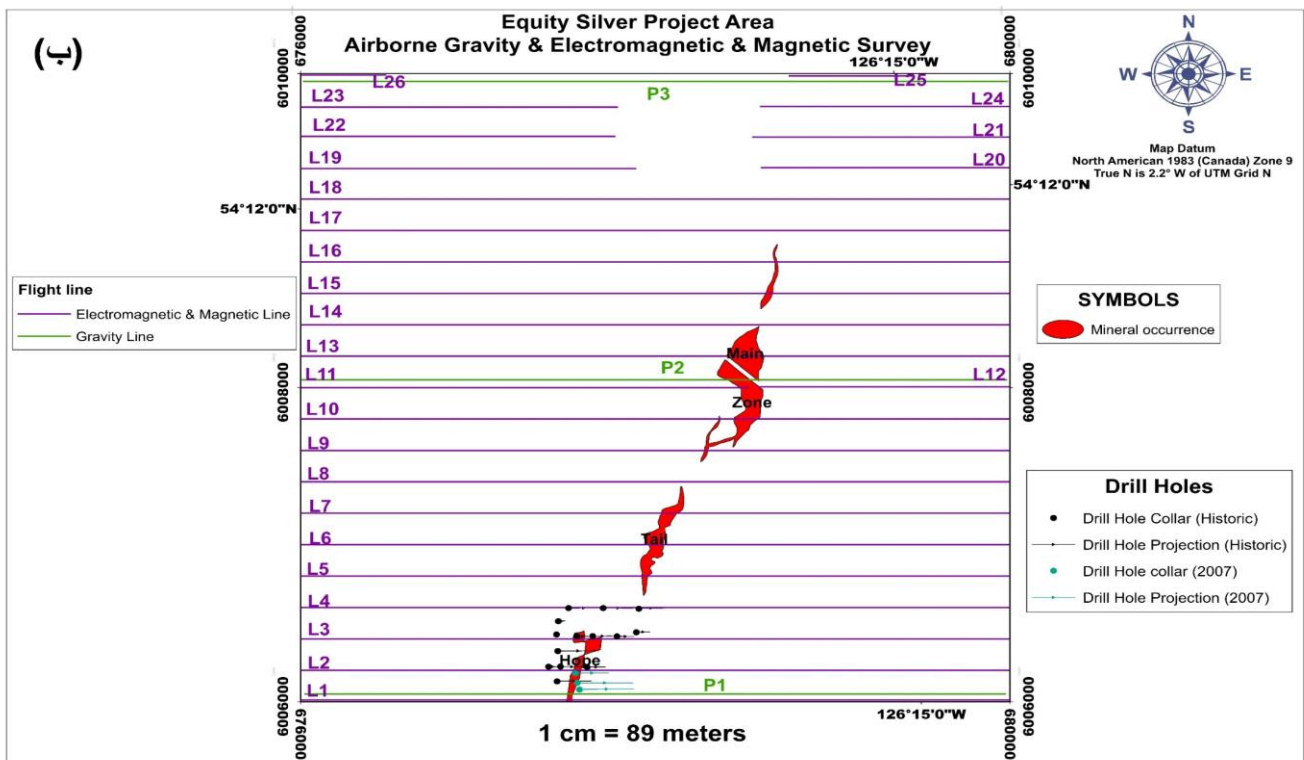
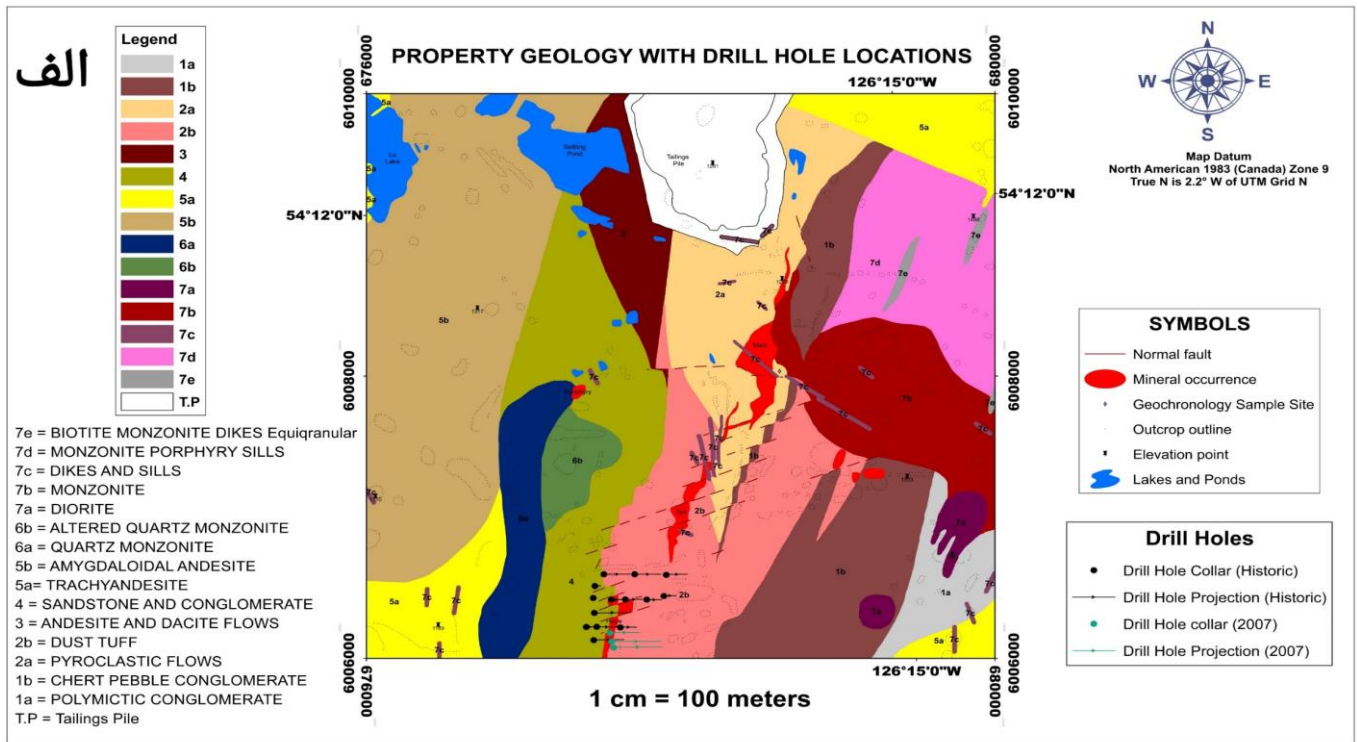
### ۲- روش تحقیق

داده‌های ژئوفیزیک هوابرد در مقیاس ناحیه‌ای برداشت می‌شوند و اغلب به‌عنوان ابزاری برای شناسایی تغییرات جانبی لیتولوژی و مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی استفاده می‌شوند. از آنجایی که استفاده از یک پارامتر ژئوفیزیکی برای رسیدن به هدف مشخص می‌تواند دارای عدم قطعیت بالایی باشد، می‌توان با استفاده از تفسیر هم‌زمان چند داده ژئوفیزیکی این عدم قطعیت را تا حدود زیادی کاهش داد (شادمان و همکاران، ۱۳۹۱). منطقه مورد مطالعه (اکویته سیلور)، دارای ابعاد ۴۰۰۰ متر در ۴۰۰۰ متر می‌باشد و با توجه به فعالیت‌های اکتشافی و معدن-کاری که در گذشته در نزدیکی منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است و منجر به کشف و شناسایی کانی‌سازی مس، طلا، نقره، مس-مولیبدن پورفیری، سرب و روی شده است، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه از پتانسیل بسیار خوبی جهت انجام فعالیت‌های اکتشافی برخوردار است (Cyr et al., 1984). از این رو و به منظور شناسایی مناطق با پتانسیل کانه‌زایی جدید، برداشت‌های هوابرد میدان پتانسیل و الکترومغناطیس حوزه زمان در منطقه انجام پذیرفت (Quest West, 2008-2009).

ابتدا شرکت ژئوفیزیکی سندر (Sander Geophysics Limited)، با توجه به درخواست انجمن علوم زمین برتیش کلمبیا، کانادا (Geoscience British Columbia Society)، برای انجام اکتشافات ناحیه‌ای از ۸ مه تا ۱۶ ژوئیه ۲۰۰۸، برداشت هوابرد گرانی‌سنجی را با فاصله خطوط پروازی ۲۰۰۰ متر و در جهت شرقی-غربی و با ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح زمین، تکمیل نمود. در مجموع در منطقه مورد مطالعه سه پروفیل داده گرانی‌سنجی با تعداد ۳۹۸ قرائت بدست آمد. سرعت نمونه‌گیری ۰/۱ ثانیه (فاصله تقریباً ۲۵ متری نقاط برداشت از یکدیگر با توجه به سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت هواپیما) است. سیستم مورد استفاده برای برداشت داده‌های گرانی‌سنجی SGL AIRGrav G2-7 می‌باشد که این سیستم از یک سکوی اینرسی تنظیم شده استفاده می‌کند. این سکو از سه شتاب‌سنج متعامد پشتیبانی می‌کند که مستقل از مانور هواپیما، در فضای اینرسی ثابت باقی می‌ماند و امکان اصلاح دقیق اثرات حرکت هواپیما را فراهم می‌کند. هم‌زمان با برداشت داده‌های گرانی‌سنجی تصحیحات مورد نیاز نیز بر روی این داده‌ها اعمال شده است. این تصحیحات عبارتند از: تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه، تصحیح توپوگرافی، تصحیح عرض جغرافیایی و تصحیح اتوش. در نهایت داده‌های به دست آمده بدون نیاز به تصحیحات خاصی برای پردازش قابل استفاده

در یک باند کوارتز، رودوکروزیت و باریت همراه با طلا در این توالی وجود دارد که با مجموعه تغییرات آرژیلیک پیشرفته رسوب کرده‌اند. پالس اصلی کانی‌سازی و دگرسانی گرمابی در حدود ۵۸ میلیون سال و یک رویداد معدنی جوان‌تر در حدود ۴۹ میلیون سال قبل است.

خاکستر و غبار توف، برش و بقایای آذرآواری است. این واحد میزبان کانسارهای اصلی مواد معدنی در معدن اِکویتی سیلور است. یک واحد فوقانی آتشفشانی-رسوبی که متشکل از توف، ماسه سنگ و کنگلومرا است (Cyr et al., 1984). سولفیدهای مس-نقره-آنتیموان شامل پیریت، اسفالریت، آرسنوپیریت همراه با کالکوپیریت، گالن، تتراندریت، و تنانتیت



شکل ۱: الف) نقشه زمین‌شناسی منطقه اِکویتی سیلور (باز ترسیم شده از Brown, 2009) ب) موقعیت خطوط برداشت داده‌های ژئوفیزیکی و زون‌های مرتبط با کانه‌زایی

در شرق منطقه مجموعه‌ای از دایک‌های آندزیتی به عرض ۰.۵ تا ۱۵ متر، کل توالی را قطع می‌کند. دایک‌ها از نوع پورفیری با خاصیت

باشد، پاسخ مدل‌های وارون تطابق خوبی با داده‌های مشاهده شده نشان می‌دهند.

در شکل ۳ داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان در شش کانال زمانی مختلف هنگام قطع جریان (Off-Time) قابل مشاهده است که نشان‌دهنده تغییرات رسانایی در لایه‌های زیرسطحی در منطقه بررسی است. رسم نقشه برای کانال‌های زمانی مختلف با توجه به این واقعیت که افزایش زمان اطلاعات مربوط به اعماق بیشتر را فراهم می‌کند، موقعیت زیرسطحی و موقعیت رساناهای مختلف زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. از این رو و با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان تا حدودی گسترش عمقی لایه‌های زیرسطحی را مشخص نمود. بدین صورت و همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد، نقشه‌های مربوط به کانال‌های زمانی آخر، نشان دهنده پاسخ دریافتی در اعماق بیشتر است.

#### ۴-۱- وارون‌سازی داده‌های میدان پتانسیل

مدل‌سازی ژئوفیزیکی با استفاده از پارامترسازی زمین انجام شده است که از سلول‌ها یا لایه‌های بسیار دقیق گسسته استفاده می‌کند که هر یک دارای مقدار خاصیت فیزیکی ثابتی هستند. مدل‌های سه‌بعدی دارای شبکه‌ای از سلول‌های با اندازه منظم هستند که مطابق با وسعت جانبی داده‌ها است. سلول‌های مکعبی با ابعاد فزاینده که از شرق، غرب، شمال، جنوب و به صورت عمودی به سمت پایین امتداد می‌یابد، حجم مورد استفاده در وارون‌سازی را تکمیل می‌کند. پارامترهای مش بر اساس مشخصات و سیستم برداشت و به اندازه کافی کوچک ساخته شده‌اند تا خطاهای مدل‌سازی به دلیل گسسته‌سازی را کاهش دهند و همچنین به اندازه‌های کوچک نیستند تا نظم اضافی در مسئله وارون ایجاد کنند.

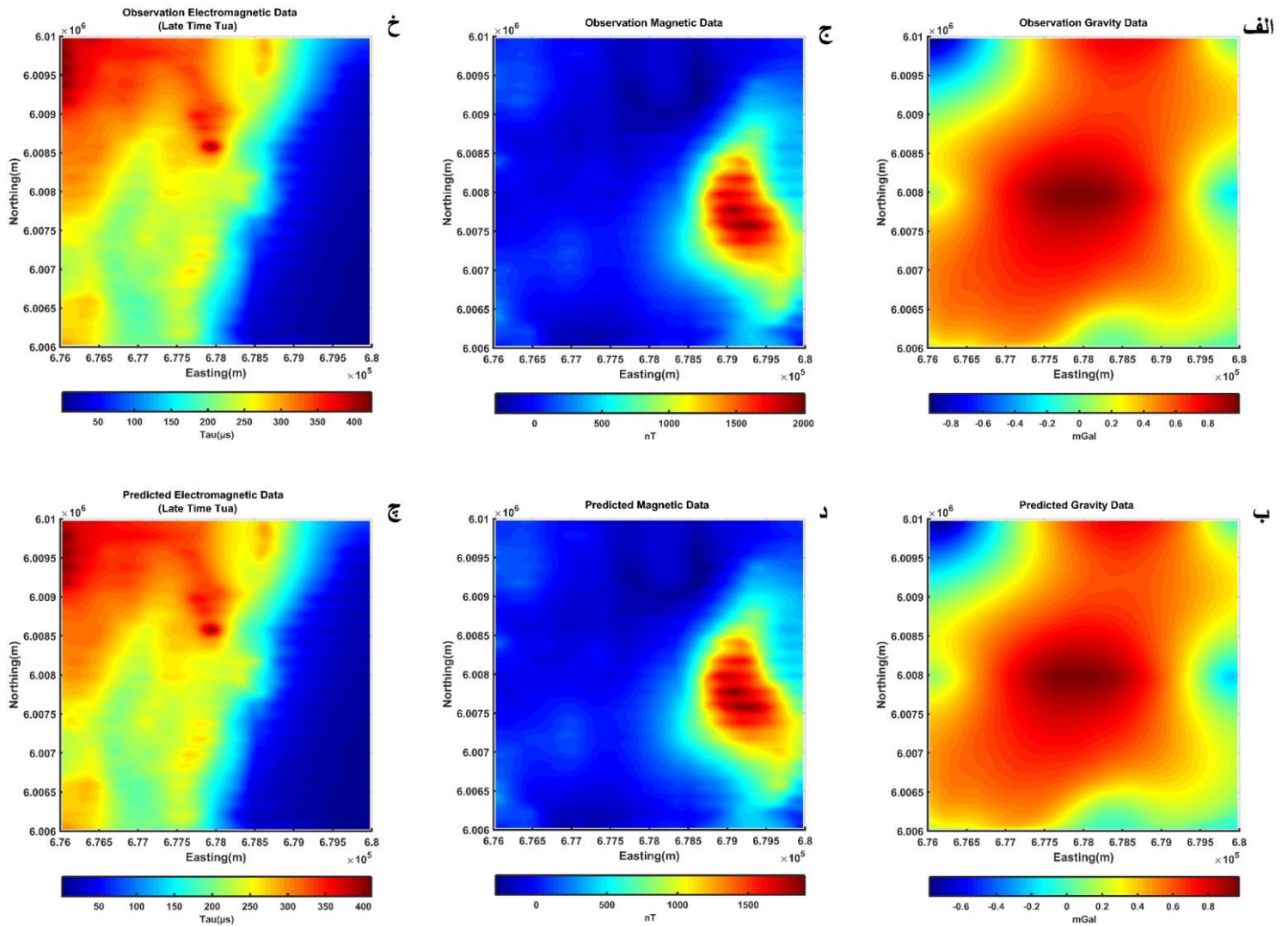
هر دو مدل تباین چگالی و حساسیت مغناطیسی از مش سه‌بعدی یکسانی با تعداد سلول  $256000 = 40 \times 80 \times 80$  و با ابعاد  $25 \times 50 \times 50$  متر استفاده می‌کنند، بنابراین با توجه به ابعاد برابر مدل‌های بدست آمده می‌توان ارزیابی مستقیمی بین مدل‌های تباین چگالی و حساسیت مغناطیسی انجام داد. این نمایش از مدل‌هایی با خواص مختلف فیزیکی (به طور کلی ویژگی‌های مختلف زمین) امکان تجزیه و تحلیل سه‌بعدی کمی از نتایج مدل‌سازی را فراهم می‌کند. همچنین یک انحراف استاندارد (عدم قطعیت) برای اهداف مدل‌سازی وارون به داده‌ها اختصاص داده می‌شود. انحراف استاندارد، تخمینی از همه منابع احتمالی عدم قطعیت داده را نشان می‌دهد، از جمله: میزان حساسیت حسگر، خطای ارتفاع سنج، عدم قطعیت‌های مدل‌سازی (نمایش توپوگرافی در مدل یا منابع کوچکی که نمی‌توانند در گسسته‌سازی در نظر گرفته شوند). برای ایجاد مدل سه‌بعدی حساسیت مغناطیسی از مقادیر زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب برابر با  $20/46$  و  $74/51$  درجه و میزان شدت میدان ناحیه‌ای  $57254$  نانوتسلا (nT) استفاده گردید. و برای تهیه مدل سه-بعدی تباین چگالی، از داده‌های تصحیح شده استفاده شد.

مغناطیسی و دارای شیب متوسط به سمت غرب هستند و با چینه‌شناسی ناسازگار هستند. دایک‌ها چینه‌شناسی را احتمالاً در امتداد یک روند شمال شرقی به صورت مورب برش می‌دهند. تنوع سنگ‌شناسی و پراکندگی چینه‌شناسی را می‌توان در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱-الف) به خوبی مشاهده نمود. کانی‌سازی مس-نقره-طلا در معدن اِکویتی سیلور احتمالاً به صورت اپی‌ژنتیکی است و ممکن است مربوط به کوارتز-مونزونیت پالئوسن باشد. اعتقاد بر این است که کانی‌سازی اصلی در اِکویتی سیلور نقره است. با این حال، پس از سیزده سال استخراج معدن، منشا ژنتیکی کانی‌سازی هنوز نامشخص و مورد بحث است (Panteleyev, 1995). معدن اِکویتی سیلور بزرگترین معدن تولید کننده نقره در بریتیش کلمبیا بود که در ژانویه ۱۹۹۴ پس از ۱۳ سال برداشت به صورت روباز و زیرزمینی، عملیات معدن کاری در آن متوقف گردید. در مدت زمان فعالیت این معدن در مجموع  $33/8$  میلیون تن کانسنگ با عیار  $0/4$  درصد مس،  $64/9$  گرم در تن نقره و  $0/46$  گرم در تن طلا استخراج شد.

#### ۴-۲- وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی

در این پروژه مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های میدان پتانسیل و الکترومغناطیس حوزه زمان برای منطقه اِکویتی سیلور انجام شده است. هدف از این کار ایجاد مدل‌هایی با خواص فیزیکی سه‌بعدی مفید است که می‌توانند مستقیماً در اکتشافات منطقه‌ای برای شناسایی مناطق امید بخش بر اساس معیارهای مختلف اکتشاف استفاده شوند. این کار با استفاده از وارون‌سازی ویژگی‌های فیزیکی برای تعیین توزیع‌های سه-بعدی تباین چگالی، حساسیت مغناطیسی، و هدایت الکتریکی برای منطقه‌ای واقع در مرکز بریتیش کلمبیا، انجام می‌شود. به منظور انجام فرآیند مدل‌سازی از مجموعه برنامه‌های مدل‌سازی وارون ژئوفیزیکی (Geophysical Inversion facility) دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC-GIF) استفاده گردید. این نرم‌افزارها عبارتند از: Li and GRAV3D (Oldenburg, 1998) MAG3D (Li and Oldenburg, 1996) و EM FLOW (Macnae et al., 1998). باتوجه به بالا بودن حجم تئوری وارون‌سازی این روش‌ها، برای آشنایی بیشتر با مفاهیم وارون‌سازی می‌توان به مقالات اشاره شده در مقابل هر کدام از نرم‌افزارها، رجوع کرد. این بخش نتایج وارون‌سازی را در دو بخش شرح می‌دهد. بخش اول مدل‌سازی وارون سه‌بعدی میدان پتانسیل را نشان می‌دهد و در بخش دوم بعد از انجام وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس، نمایشی از مدل رسانایی الکتریکی به صورت سه‌بعدی از کنار هم قرار گرفتن نتایج حاصل از وارون‌سازی یک‌بعدی، قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که توپوگرافی در تمام مراحل وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و وارون‌سازی توسط اطلاعات زمین‌شناسی یا خواص فیزیکی محدود نمی‌شوند. در شکل ۲ داده‌های پیش‌بینی شده همراه با مشاهدات واقعی برای مقایسه نشان شده است. همانطور که به خوبی قابل مشاهده می-





شکل ۲: داده‌های ژئوفیزیکی در محدوده مورد نظر. سطر اول، داده‌های مشاهده‌ای (الف) گرانی، (ج) مغناطیس و (خ) شیب افت و سطر دوم پاسخ مدل وارون برای داده‌های (ب) گرانی، (د) مغناطیس و (چ) شیب افت.

در این محدوده و مرتبط با ذخایر مس و طلای پورفیری و یا سولفیدهای مس، نقره و مولیبدن باشد.

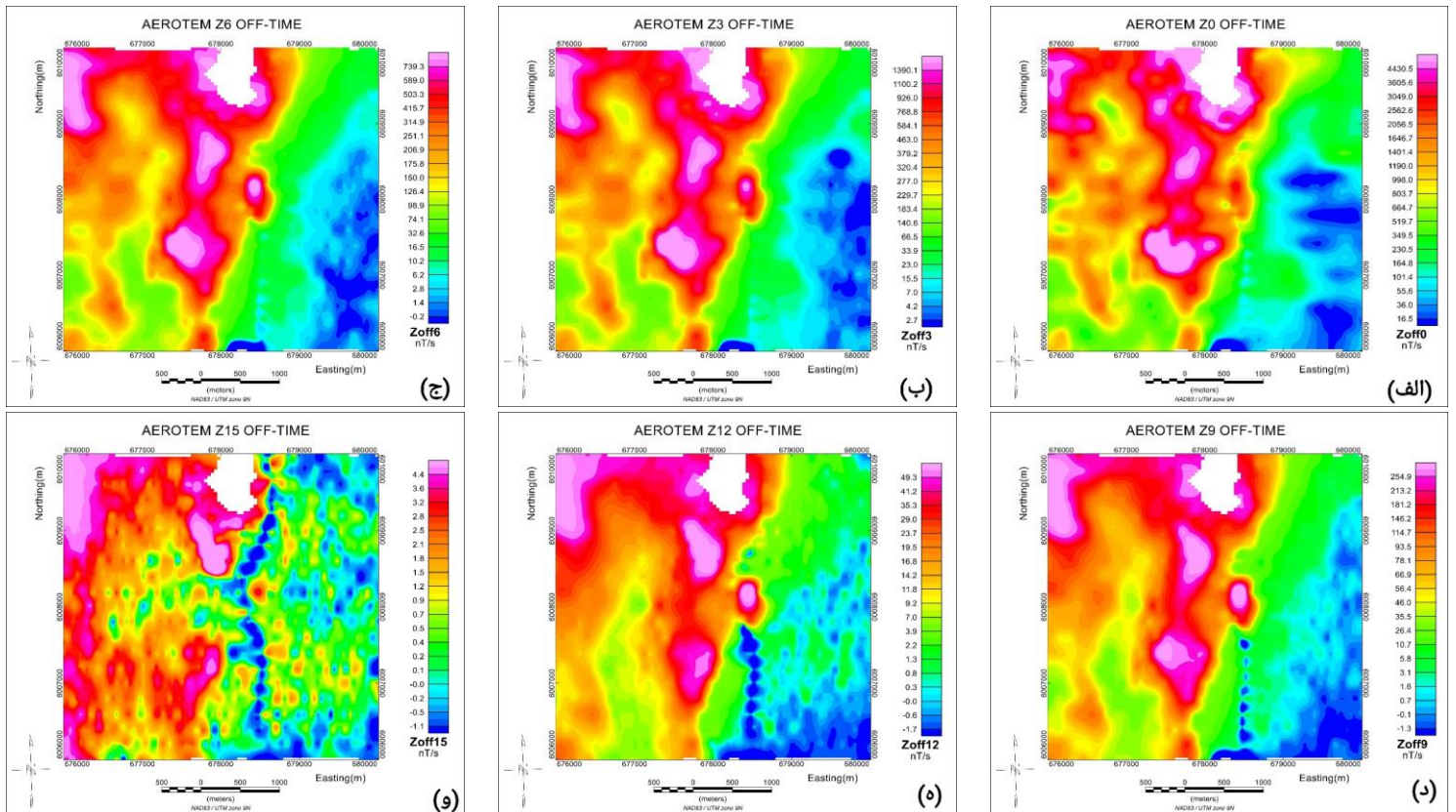
#### ۴-۲- وارون‌سازی داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان

داده‌های هوابرد الکترومغناطیس حوزه زمان همزمان با داده‌های مغناطیسی هوابرد در طول ۲۶ پروفیل برداشت شد که شامل ۳۶۸۶۰ قرائت است. ورودی‌های نرم‌افزار EM Flow برای بررسی داده‌های حوزه زمان شامل داده‌های الکترومغناطیس هوابرد حوزه زمان برای هر کانال زمانی ( $Z_{off}$ )، عدم قطعیت داده‌ها، موقعیت و ارتفاع فرستنده و گیرنده، شکل موج فرستنده و اطلاعات سیستم (به‌عنوان مثال فرکانس پایه، ارتفاع از سطح زمین و سرعت نمونه برداری) است. خروجی‌های نرم‌افزار عبارتند از: یک مدل رسانایی الکتریکی یک‌بعدی کاملاً گسسته برای هر خط برداشت، داده‌های پیش‌بینی شده و تعدادی معیار که می‌تواند برای

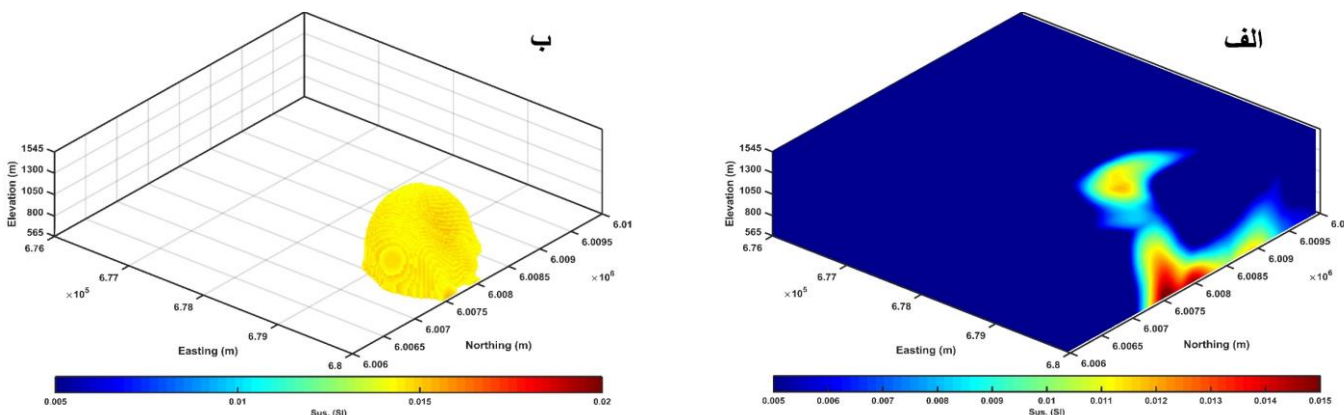
شکل ۴ نتایج مدل‌سازی وارون حساسیت مغناطیسی را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری ناشی از مدل‌سازی حساسیت مغناطیسی، در شرق محدوده قابل مشاهده است. این ناحیه دقیقاً منطبق بر سنگ‌های مونزونیتی و توده‌های نفوذی منطقه است. این میزان حساسیت مغناطیسی بیشتر می‌تواند ناشی از دایک‌های نفوذی باشد که بعد از انجام فرآیند کانه‌زایی، در سنگ‌های آذرآواری غنی از سولفید نفوذ کرده و در اثر دگرسانی باعث افزایش میزان مگنتیت این ناحیه شده است (Brown, 2009). از این داده‌ها می‌توان برای تعیین مناطق دگرسانی مغناطیسی استفاده نمود. در شکل ۵ نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون تباین چگالی قابل مشاهده است. بی‌هنجاری تباین چگالی منطبق بر زون معدنی منطقه اصلی (Main zone) است. با توجه به این نکته که این زون میزبان کانسارهای اصلی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت چگالی بیشتر این ناحیه نسبت به محیط اطراف می‌تواند ناشی از کانه‌زایی

نرم‌افزار EM Flow شامل تبدیل داده‌های ورودی به معادله‌های ثابت زمانی (دامنه tau) است. برای انجام این کار باید یک برآورد از ثابت‌های زمانی نظری که از روی اطلاعات سیستم برداشت الکترومغناطیس بدست می‌آید، محاسبه شود. این فرآیند تخمین سخت‌ترین جنبه مدل‌سازی در EM Flow است. زیرا تصاویر رسانایی عمقی (CDI) به ثابت‌های زمانی انتخاب شده برای تبدیل بستگی دارد. از طرف دیگر، شکل موج فرستنده (در مورد بررسی دامنه زمان) باید به طور دقیق با استفاده از دامنه اندازه-گیری شده در برابر زمان تعریف شود و فرکانس یا نیم‌دوره شکل موج فرستنده نیز باید شناخته شود.

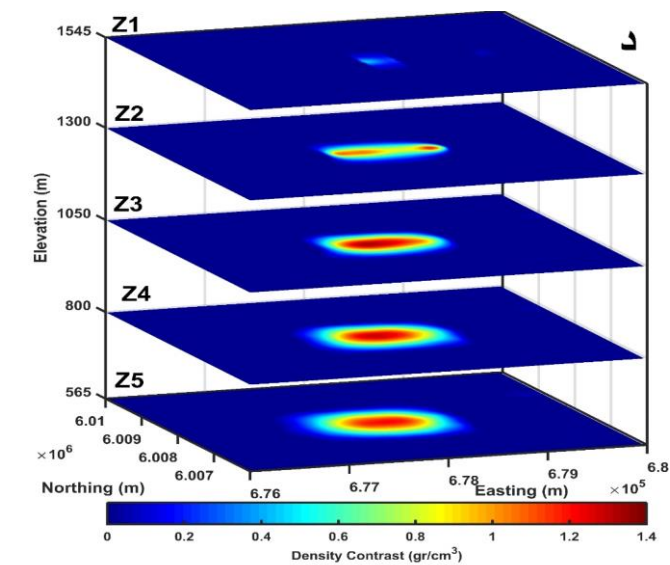
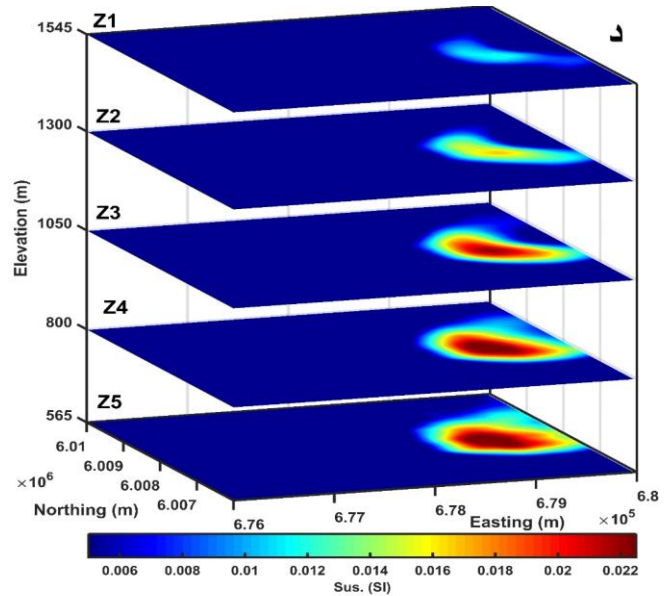
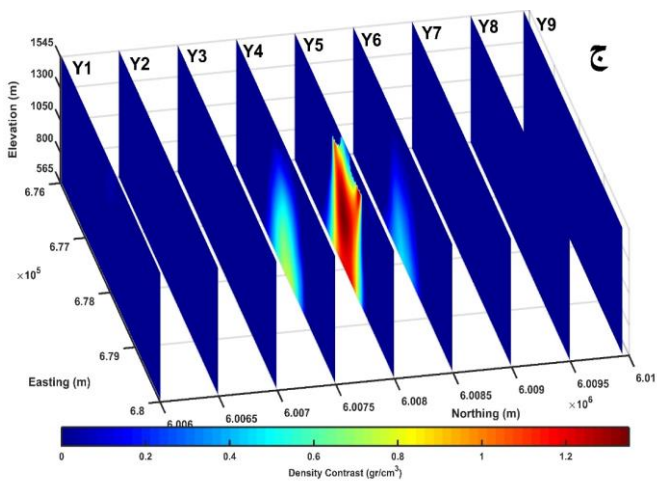
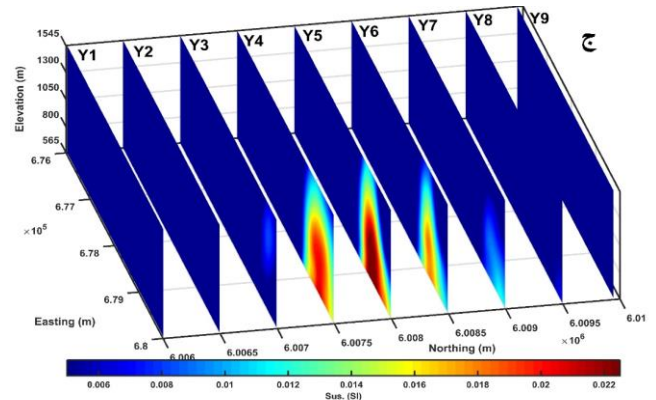
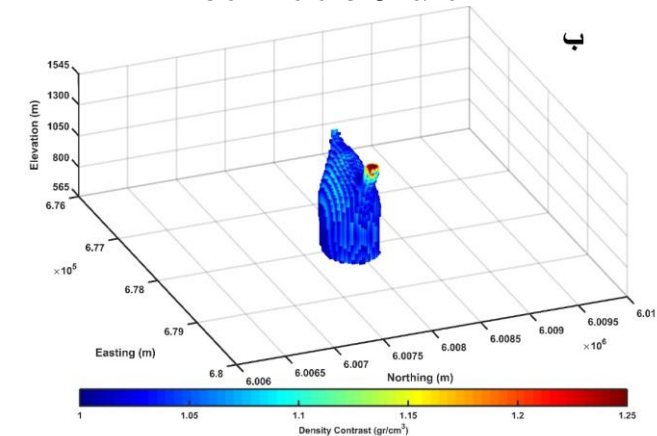
ارزیابی کیفیت نتایج وارون‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. تبدیل داده‌های ورودی به نتایج قابل اطمینان شامل تبدیل داده‌ها در محدوده ثابت‌های زمانی (taus) است. ثابت‌های زمانی در ژئوفیزیک پارامتری است که رسانایی زیرسطحی را به رفتار میدان الکترومغناطیسی گذرا مرتبط می‌کند و از شکل موج و مشخصات هندسه سیستم الکترومغناطیس تخمین زده می‌شوند. در شکل ۶ یک طرح کلی از شکل موج فرستنده، مشخصات کانال‌های زمانی قطع جریان و نیم‌دوره شکل موج فرستنده را مشاهده می‌کنیم که برای انجام فرآیند وارون‌سازی نیاز هست تا این موارد به شکل دقیق به نرم‌افزار معرفی گردد. زیرا روش اصلی پردازش



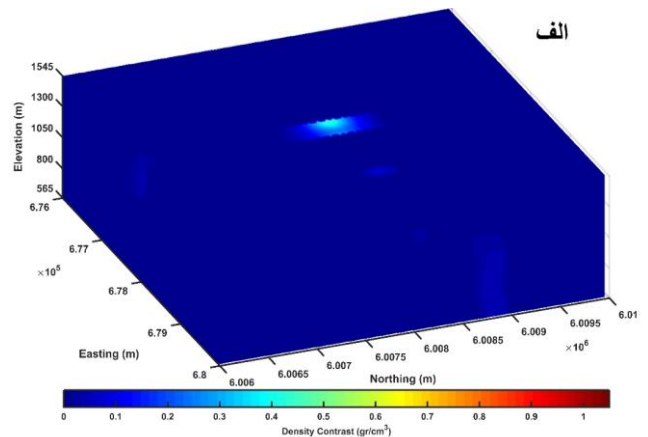
شکل ۳: داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان هنگام قطع جریان در شش کانال زمانی Zoff0 (الف)، Zoff3 (ب)، Zoff6 (ج)، Zoff9 (د)، Zoff12 (ه)، Zoff15 (و).



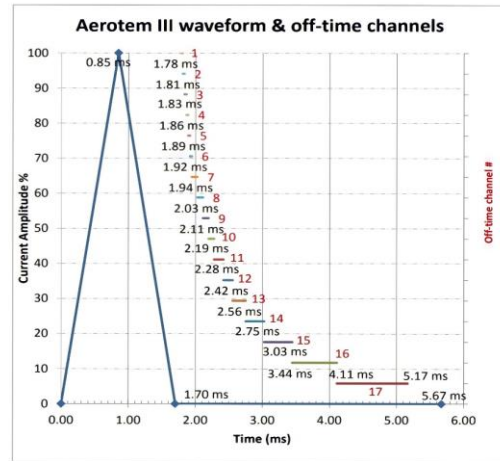
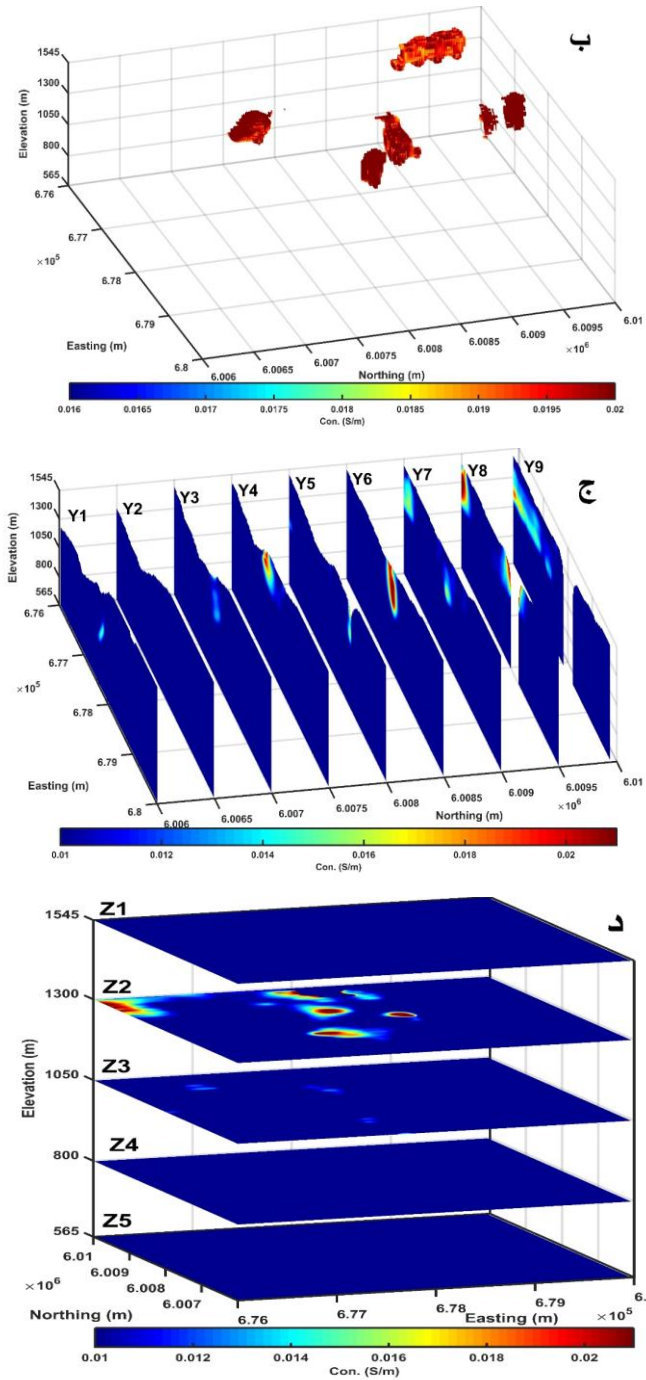




شکل ۴: نمایش سه‌بعدی مدل خودپذیری مغناطیسی (الف)، نمایش سه‌بعدی مدل خودپذیری مغناطیسی با حد آستانه 0.014 SI (ب)، برش‌هایی از مدل در امتداد پروفیل‌های Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9 (ج)، برش‌هایی از مدل در ارتفاع‌های ۸۰۰، ۱۰۵۰، ۱۳۰۰، ۱۵۴۵، ۱۸۰۰ و ۵۶۵ متر (د).

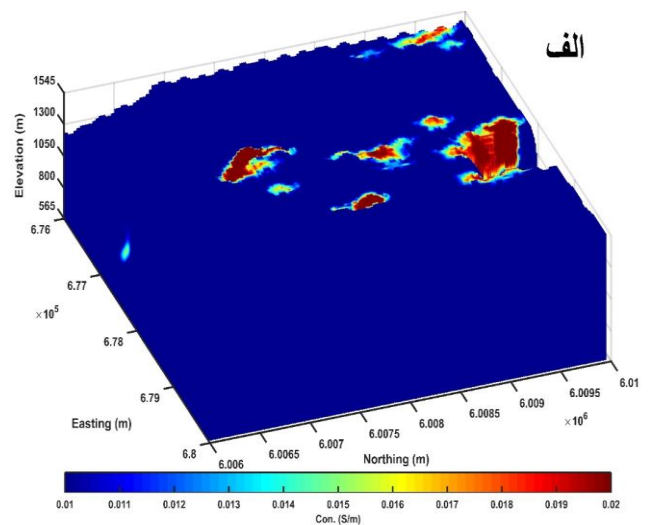


شکل ۵: نمایش سه‌بعدی مدل تباین چگالی (الف)، نمایش سه‌بعدی مدل تباین چگالی با حد آستانه 0.99 gr/cm³ (ب)، برش‌هایی از مدل در امتداد پروفیل‌های Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9 (ج)، برش‌هایی از مدل در ارتفاع‌های ۸۰۰، ۱۰۵۰، ۱۳۰۰، ۱۵۴۵، ۱۸۰۰ و ۵۶۵ متر (د). به دلیل فاصله زیاد خطوط برداشت داده‌های گرانی و آلیازینگ سیگنال‌ها (در جهت عمود بر امتداد پروفیل‌های برداشتی)، وارون‌سازی داده‌ها مطلوب نبوده و مدل تباین چگالی از عدم قطعیت بالایی برخوردار است.



شکل ۶: شماتیک شکل موج فرستنده (Garrie, 2009)

به دلیل حجم بالای محاسباتی روش های مدل سازی داده های الکترومغناطیس، وارون سازی یک بعدی و درون یابی مدل با قیود جانبی هم چنان در مرکز توجه محققین ژئوفیزیک قرار دارد (Auken et al., 2005; Wisén et al., 2005; Abedi et al., 2013, 2015, 2018). همچنین تغییر ارتفاع پرواز روی داده های ژئوفیزیکی بخصوص الکترومغناطیس تأثیر بسزایی دارد (Ghari et al., 2020); که در این پژوهش از داده های اصلاح شده استفاده شده است. در شکل ۷-الف نتایج حاصل از مدل سازی وارون داده های الکترومغناطیس را مشاهده می کنیم که به صورت سه بعدی از کنار هم قرار گرفتن مدل های حاصل از وارون سازی یک بعدی تشکیل شده است. همچنین برش هایی از مدل در عمق های مختلف (۷-د) و در راستاهای شرقی-غربی قابل مشاهده است (۷-ج).



شکل ۷: نمایش سه بعدی مدل رسانایی الکتریکی بعد از وارون سازی یک بعدی (الف)، نمایش سه بعدی مدل رسانایی الکتریکی با حد آستانه  $0.0185 \text{ S/m}$  (ب)، برش هایی از مدل در امتداد پروفیل های  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8, Y_9$  (ج)، برش هایی از مدل در ارتفاع های  $1545, 1300, 1050, 800, 565$  متر (د).

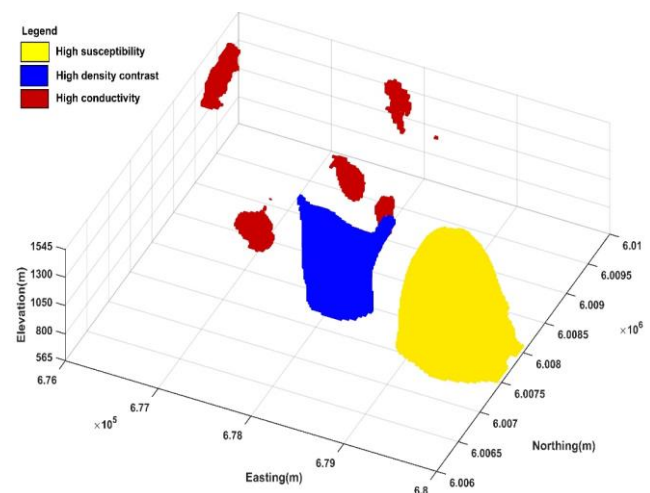
از روی مدل رسانایی الکتریکی بدست آمده می توان نتیجه گرفت که مناطق با رسانایی بالا می تواند ناشی از وجود فلزات پایه باشد و با توجه به منطقه وسیعی که توسط برداشت هوابرد پوشش داده شده است، زمین شناسی منطقه که در آن مناطق غیرعادی جستجو می شود، اغلب به طور قابل توجهی متفاوت است. از نظر بررسی داده های الکترومغناطیسی

## ۵- تفسیر زمین‌شناسی نهشته پلی‌متال

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی شامل دو مرحله است. ابتدا داده‌ها باید بر حسب توزیع ویژگی فیزیکی مربوطه تفسیر شوند. سپس این مدل را می‌توان از نظر زمین‌شناسی (ساختارها، کانی‌ها، دگرسانی، نوع سنگ و غیره) تفسیر کرد. برای اینکه مدل‌های ژئوفیزیکی سه‌بعدی به طور مؤثر برای تفسیر و هدف‌یابی اکتشاف مورد استفاده قرار گیرند، به درک خوبی از ویژگی‌های فیزیکی هدف اکتشاف نیاز است که می‌تواند به زمین‌شناسی و فرآیندهای زمین‌شناسی مرتبط باشد. محدود کردن تعداد ویژگی‌های زیرسطحی برای مدل‌سازی زمین‌شناسی سه‌بعدی در منطقه حاوی ذخایر معدنی پلی‌متال مهم است. برای منطقه مورد مطالعه، مشاهدات زمین‌شناسی سطحی، نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های هواورد گرانی، مغناطیس و نتایج حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس جهت ساخت یک مدل زمین‌شناسی مشترک برای شناسایی اهداف معدنی بر روی یک پروفیل به صورت همزمان به نمایش در آمدند. شکل ۹ مقادیر تباین چگالی، حساسیت مغناطیسی، رسانایی الکتریکی و زمین‌شناسی احتمالی در امتداد پروفیل Y<sub>5</sub> را به صورت دو بعدی نشان می‌دهد.

در شکل ۹-الف مقادیر بالای تباین چگالی در سطح با Main zone (توالی ناهمگن خاکستر و غبار توف، برش و بقایای آذرآواری) و همچنین در عمق با جریان‌های آذرآواری در ارتباط است. در شکل ۹-ب حساسیت مغناطیسی بالا با توده مونزونیتی و دایک‌های نفوذی منطقه که باعث افزایش میزان مگنتیت در سنگ‌های میزبان خود در نتیجه فرآیند دگرسانی شده‌اند، در ارتباط است که مدل، شکل این توده تا عمق را به خوبی تصویر کرده است. شکل ۹-ج نشان از رسانایی بالا منطقه Main zone نسبت با سنگ‌های اطراف می‌باشد که می‌تواند نشان دهنده وجود فلزات پایه در این منطقه باشد. شکل ۹-د مدل زمین‌شناسی احتمالی را نشان می‌دهد که در آن می‌توان به خوبی مشاهده نمود که دو ویژگی ژئوفیزیکی تباین چگالی (به رنگ فیروزه‌ای) و رسانایی الکتریکی (قسمت سبز رنگ) تا عمق حدود ۲۰۰ متری از سطح زمین دارای همپوشانی هستند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که زون اصلی کانه‌زایی منطبق بر منطقه Main zone است و این منطقه از پتانسیل بالای کانه‌زایی مس-طلا-مولیبدین پورفیری و همچنین نقره، سرب و روی است. در شکل ۹-د حساسیت مغناطیسی به رنگ قرمز تیره نشان داده شده است. از آن جایی که کانه‌سازی منطقه به صورت اپی‌ژنتیک صورت گرفته است، لذا می‌توان این نتیجه را گرفت که حساسیت مغناطیسی بالا نیز می‌تواند با کانه‌زایی در ارتباط باشد. اما به این دلیل که در این ناحیه تنها بی-هنجاری حساسیت مغناطیسی نشان داده شده است و اثری از بی-هنجاری‌های تباین چگالی یا رسانایی الکتریکی وجود ندارد، احتمال کانه‌زایی فلزی در این منطقه کم می‌باشد. همچنین برای مناطقی که با رنگ آبی تیره در شکل ۹-د قابل مشاهده می‌باشد، با توجه به تنوع چینه‌شناسی در طول پروفیل مورد بررسی (شکل ۱) نمی‌توان این منطقه

این بدان معناست که هدایت الکتریکی پس‌زمینه منطقه بررسی در حال تغییر است. مدل رسانایی الکتریکی یک محصول اکتشافی مفید است زیرا تغییرات جانبی رسانایی را نشان می‌دهد که می‌تواند راهنمایی برای اکتشافات عمیق‌تر باشد. بعد از اتمام فرآیند مدل‌سازی، برای تفسیر بهتر نتایج و همچنین نحوه پراکندگی ناهنجاری‌های منطقه، مدل‌های ژئوفیزیکی خودپذیری مغناطیسی، تباین چگالی و رسانایی الکتریکی در محدوده آنومالی ژئوفیزیکی در شکل ۸ بطور همزمان نمایش داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، توده زرد رنگ مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی، توده آبی رنگ متعلق به بی‌هنجاری گرانشی و توده قرمز مربوط به مناطق با رسانایی بالاتر نسبت به محیط اطراف می‌باشد.



شکل ۸: نمایش همزمان مدل‌های ژئوفیزیکی خودپذیری مغناطیسی، تباین چگالی و رسانایی الکتریکی در محدوده آنومالی ژئوفیزیکی. حدود آستانه به ترتیب  $0.0185 \text{ S/m}$  و  $0.014 \text{ SI}$  ،  $0.99 \text{ gr/cm}^3$  می‌باشد.

تهیه یک مدل زمین‌شناسی احتمالی دوبعدی بر روی یک پروفیل و بررسی عمقی این مدل، برای شناسایی مناطق با پتانسیل بالا برای کانه‌زایی پلی‌متال و تعیین خصوصیات هندسی دقیق‌تر از کانه‌زایی احتمالی، در مناطقی که هر سه مدل تهیه شده ارتباط نزدیکی داشته یا اینکه با یکدیگر همپوشانی دارند، یک ابزار مناسب برای تفسیر دقیق‌تر نتایج حاصل از وارون‌سازی است. با توجه به این موضوع و همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، بهترین مکان برای تهیه مدل زمین‌شناسی احتمالی، در راستای Y<sub>5</sub> می‌باشد که دو مدل تباین چگالی و رسانایی الکتریکی با یکدیگر همپوشانی دارند و مدل حساسیت مغناطیسی در فاصله کمی از این دو مدل قرار دارد. در ادامه و در بخش تفسیر زمین‌شناسی نهشته پلی‌متال، این مدل و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است.



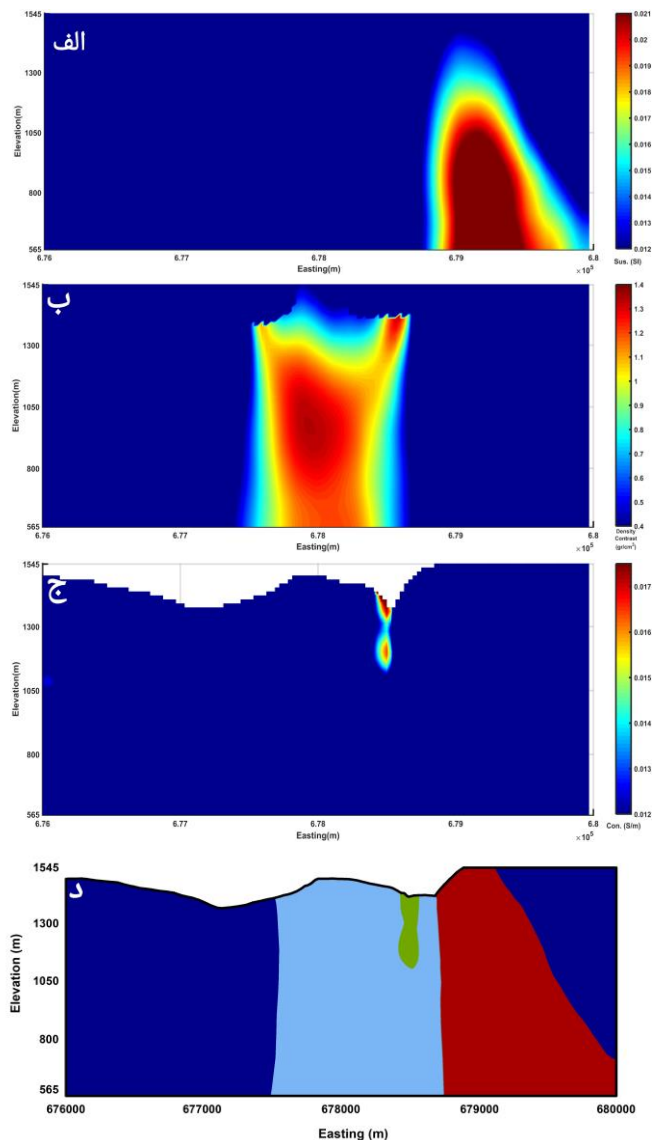
های ژئوفیزیکی را نشان می‌دهد و با استفاده از نتایج حاصل از شکل ۱۰ نیز می‌توان منطقه اصلی کانه‌زایی را شناسایی نمود.

#### ۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پروژه، مکان‌یابی و شناسایی مناطق مرتبط با کانی‌سازی پلی‌متال در منطقه اِکویتی سیلور در مرکز برتیش کلمبیا، کانادا بود. به همین منظور مدل‌سازی‌های وارون تباین چگالی، حساسیت مغناطیسی و رسانایی الکتریکی بر روی داده‌های هوابرد برای منطقه تولید شدند. این مدل‌ها به تجسم، تفسیر و تحلیل کمی داده‌ها برای انجام فعالیت‌های اکتشافی در منطقه کمک می‌کنند. مدل‌های حاصل از داده‌های میدان پتانسیل را می‌توان در زمین‌شناسی به منظور کمک به تعریف ساختارهای بزرگ و نفوذی تفسیر کرد و مدل رسانایی الکتریکی، به عنوان پارامتری جانبی برای برآورد تخمین عمق بررسی بدست آمد. از آنجا که نرم‌افزارهای مدل‌سازی وارون ژئوفیزیکی تلاش می‌کنند ساده‌ترین مدل‌هایی را بیابند که با داده‌ها مطابقت دارند، از این رو با توجه به نتایج بدست آمده، امیدوار هستیم مدل‌های ارائه شده به خوبی توانسته باشند ویژگی‌های زیرسطحی را منعکس کرده باشند.

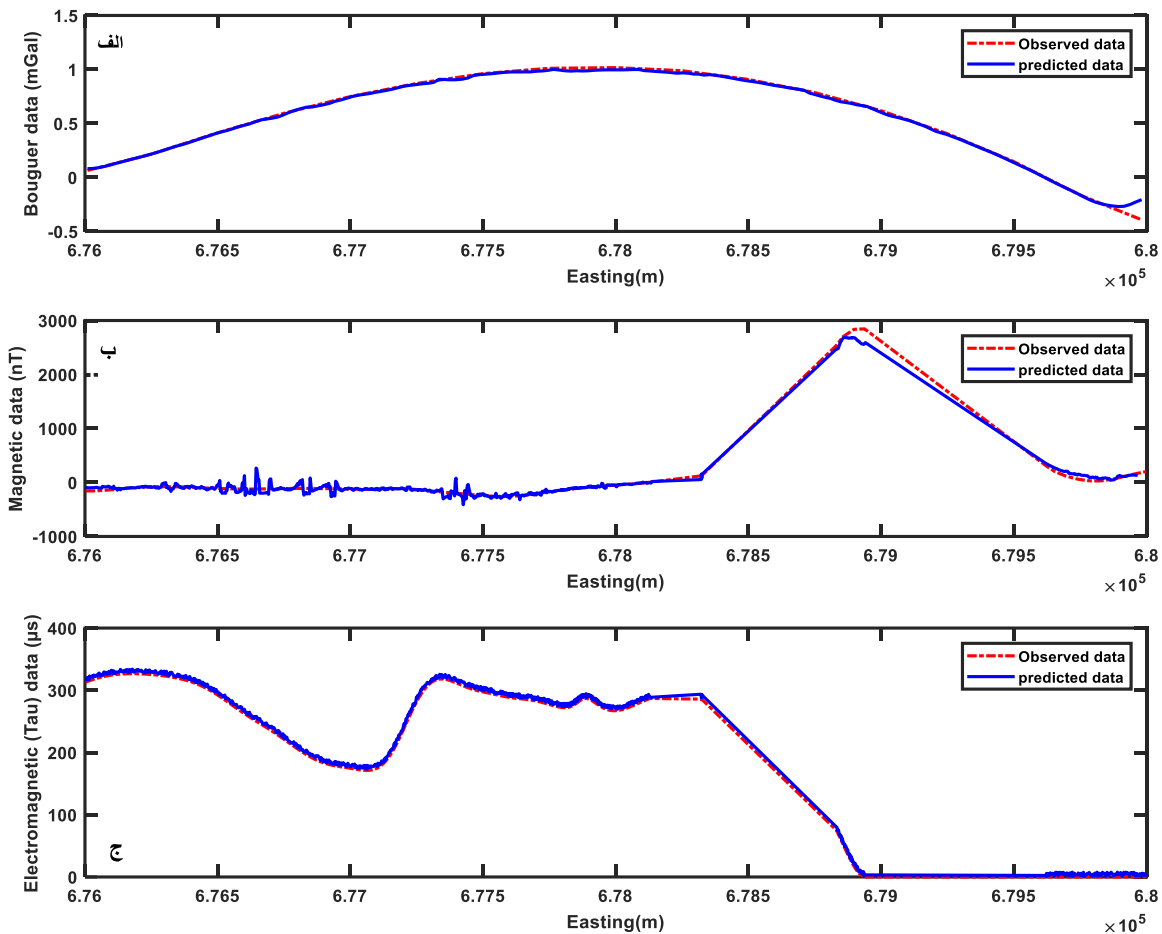
اهمیت فعالیت صورت گرفته در این مطالعه بدین صورت است که با انجام وارون‌سازی تلفیقی موفق شدیم زون اصلی کانه‌زایی که با دو خصوصیت ژئوفیزیکی تباین چگالی بالا ( $1.2 \text{ gr/cm}^3$ ) و رسانایی زیاد ( $0.02 \text{ S/m}$ ) مشخص گردید را شناسایی کنیم. این زون با توجه به پیشینه زمین‌شناسی موجود، به احتمال زیاد با کانه‌زایی مس-طلا-مولیبدن پورفیری، نقره، سرب و روی در ارتباط است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی می‌توان گفت توده مورد نظر ضخامتی بین ۳۰ تا ۶۰ متر داشته و تا عمق حدود ۲۰۰ متری از سطح زمین ادامه دارد. همچنین در قسمت شرقی منطقه لایه‌ای با حساسیت مغناطیسی بالا وجود دارد که در این منطقه اثری از بی‌هنجاری‌های تباین چگالی یا رسانایی الکتریکی نیست. پس به احتمال زیاد این قسمت با کانه‌زایی ارتباطی نداشته و مدل مغناطیسی ساخته شده احتمالاً به خاطر سنگ‌های اولترامافیک با درجه مغناطیسی بالا است که می‌تواند به مونزونیت و جریان‌های آندزیتی اختصاص داده شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که تفسیر همزمان مدل‌های تباین چگالی، حساسیت مغناطیسی و رسانایی الکتریکی می‌تواند کمک بزرگی برای شناسایی مناطق امید بخش باشد. در تحقیق حاضر با ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه (Brown, 2009; Alldrick and Lin, 2007; Cyr et al., 1984) با مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های گرانی، مغناطیسی و الکترومغناطیس موفق به شناسایی منطقه‌ای امید بخش در محدوده مورد مطالعه شدیم. لذا می‌توان از این روش در مناطق مشابه از این روش برای ارزیابی اهداف اکتشافی خصوصاً نهشته‌های پلی‌متال استفاده نمود.

را به یک نوع خاصی از سنگ‌های منطقه مرتبط دانست و این ناحیه ترکیبی از سنگ‌های مختلف در منطقه است. در غرب منطقه واحد سنگی آندزیتی، پس از آن ماسه سنگ و کنگلومرا، در نزدیکی بی‌هنجاری گرانی توف و در قسمت شرقی نیز لایه‌های رسوبی متنوع قرار دارد.



شکل ۹: مدل زمین‌شناسی (د) مستخرج از مدل‌های ژئوفیزیکی تباین خودپذیری مغناطیسی (ناشی از باقیمانده شدت کل مغناطیسی) (الف)، تباین چگالی (ب) و رسانایی الکتریکی (ج) در امتداد پروفیل Y5.

در شکل ۱۰ بی‌هنجاری ژئوفیزیکی مشاهده و پیش‌بینی شده در امتداد پروفیل Y5 برای داده‌های (الف) گرانی، (ب) مغناطیسی و (ج) الکترومغناطیس قابل مشاهده است. فرآیند وارون‌سازی، نتایج حاصل از داده‌های مشاهده شده را به میزان مناسبی پیش‌بینی می‌کند که با خطاهای اختصاص داده شده در داده‌ها توجیه می‌شود. رفتار این مدل‌ها با مدل‌های ترسیم شده در شکل ۹، تطابق دارد و به خوبی بی‌هنجاری-



شکل ۱۰: بی‌هنجاری ژئوفیزیکی مشاهده و پیش‌بینی شده در امتداد پروفیل  $Y_5$  برای داده (الف) گرانی، (ب) مغناطیسی (تغییرات شدت مغناطیس مربوط به باقیمانده شدت کل است) و (ج) الکترومغناطیس. لازم به ذکر است که داده‌های مشاهده‌ای مغناطیسی و الکترومغناطیسی نمایش داده شده در این شکل، مربوط به قبل از اعمال تصحیحات مورد نیاز بر روی این داده‌ها می‌باشد و به منظور انجام فرآیند مدل‌سازی، تصحیحات لازم بر روی داده‌ها صورت پذیرفته است. از جمله این تصحیحات می‌توان به تصحیح اثر توپوگرافی و تغییرات ارتفاع پرواز بر روی این داده‌ها اشاره نمود.

## ۷- منابع

- زمین شناسی اقتصادی ایران، صفحه ۵۹-۵۱.
- قنبری، ه.، عرب‌امیری، ع.، ابراهیمی، س.، مهری، م.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در محدوده‌های اکتشافی شریف آباد، شمال غرب بردسکن، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۲۳-۱۳.
- نوروزی، غ. و غلامی، س.، ۱۳۸۴، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, RS, M) در محل اندیس معدنی مس سوناجیل، نشریه دانشکده فنی، شماره ۲، جلد ۳۹، ص ۲۵۳ تا ۲۶۵.
- Abedi, M, Norouzi, Gh.H, Fathianpour, N & Gholami, A, 2015, Geological structure imaging from airborne electromagnetic and magnetic data, a case study in Kalat-e-Reshm area, Iran, Arabian Journal of Geosciences 8, 425-435.
- Abedi, M, Norouzi, Gh.H, Fathianpour, N & Gholami, A, جعفر زاده، و.، نجاتی کلاته، ع.، و آقاجانی، ح.، ۱۳۹۴، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های گرانی سنجی با روش لی-اولدنبورگ، کتابخانه دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شادمان، م.، تخم‌چی، ب. و خیراللهی، ح.، ۱۳۹۱، کاربرد خوشه بندی در نقشه‌های شبه زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوابردی، علوم مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره شانزدهم، صفحه ۱۲-۱.
- عبداللهی شریف، ج.، امام علی پور، ع.، علی پور، ع.، و مختاریان اصل، م.، ۱۳۸۹، جایگاه مدل‌سازی سه‌بعدی ذخایر معدنی در بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی، تعیین ذخیره و ژنز آن‌ها (با بررسی موردی بر روی گروهی از ذخایر سنگ تزئینی استان آذربایجان غربی).



- Sb), in Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal, Lefebvre, D.V. and Ray, G.E., Editors, British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment, Open File 1995-20, pages 79-82.
- Rajagopalan, S.H., Carlson, J. and Wit, D., 2007, Kimberlite exploration using integrated airborne geophysics, ASEG Extended Abstracts, 1, 1-5.
- Ramazi, H. and Mostafaie, K., 2013, Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration. *Arabian Journal of Geosciences*. 6 (8): 2961-2970.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*. Cambridge. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1180/minmag.1982.046.341.32>.
- Wisén, R., Auken, E., Dahlin, T., 2005. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surface Geophysics*. 3 (2): 71-79.
- Zhdanov, M.S., Alfouzan, F.A., Cox, L., Alotaibi, A., Alyousif, M., Sunwall, D. and Endo, M., 2018, Large-Scale 3D Modeling and Inversion of Multiphysics Airborne Geophysical Data: A Case Study from the Arabian Shield, Saudi Arabia, *Minerals*.
- Zhdanov, M.S., New Advances in Regularized Inversion and Imaging of Gravity, Magnetic, and Electromagnetic Data, Consortium for Electromagnetic Modeling and Inversion, University of Utah, Salt Lake City, EGM 2007 International Workshop.
- 2013, Approximate resistivity and susceptibility mapping from airborne electromagnetic and magnetic data, a case study for a geologically plausible porphyre copper unit in Iran. *Journal of Mining & Environment*. 4 (2): 133-146.
- Abedi, M., Fournier, D., Devriese, S.G.R. & Oldenburg, D.W., 2018, Integrated inversion of airborne geophysics over a structural geological unit: A case study for delineation of a porphyry copper zone in Iran. *Journal of Applied Geophysics*. 152: 188-202.
- Alarifi, S.S., Kellogg, J.N. and Ibrahim, E., 2018, Gravity, aeromagnetic and electromagnetic study of the gold and pyrite mineralized zones in the Haile Mine area, Kershaw, South Carolina, *Journal of Applied Geophysics*.
- Alldrick, D., Lin, M., (2007); *Geology of the Equity Silver Area, central B.C.*; B.C. Geological Survey, Open File 2007-9.
- Auken, E., Christiansen, A.V., Jacobsen, B.H., Foged, N., Sørensen, K.I., 2005. Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting*. 53 (4): 497-506.
- Brown, R.F., 2009, *GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL TECHNICAL REPORT On The SILVER HOPE PROPERTY For FINLAY MINERALS LTD.*
- Cyr, J.B., Pease, R.B. and Schroeter, T.G., 1984, *Geology and Mineralization at Equity Silver Mine*, *Economic Geology*, Volume 79, pages 947-968.
- Dransfield, M., Airborne gravity gradiometry—the state of the art, Redistribution subject to SEG license.
- Garrie, D., 2009, Report on a Helicopter-Borne AeroTEM System Electromagnetic & Magnetic Survey, Quest West, Central B.C., Canada.
- Ghari, H., Oskooi, B., Bastani, M., 2020, Multi-Line 1D Inversion of Frequency-Domain Helicopter-Born Electromagnetic Data with Weighted 3D smoothness Regularization: A Case Study from North Iran. *Pure and Applied Geophysics*. 177 (11), 5299-5323.
- Li Y. and Oldenburg D.W., 1996, 3-D inversion of magnetic data. *GEOPHYSICS*, VOL. 61, NO. 2, P. 394-408, 18 FIGS.
- Li Y. and Oldenburg D.W., 1998, 3-D inversion of gravity data. *GEOPHYSICS*, VOL. 63, NO. 1, P. 109-119, 14 FIGS.
- Murthy, B.S.R., 2007, Airborne Geophysics and the Indian Scenario, *J. Ind. Geophys. Union* Vol.11, No.1, pp.1-28.
- Macnae, J., King, A., Stolz, N., Osmakoff, A. and Blaha, A., 1998, Fast AEM data processing and inversion. *Explor. Geophys.* 29. 163-169. <https://doi.org/10.1071/EG998163>.
- Mahmoodi, O. and Maxeiner, R.O., 2019, Processing of Airborne Magnetic, Electromagnetic and Gravity Gradiometry Data for the Bigstone Lake Area, East-central Saskatchewan, *Miscellaneous Report 2019-4.2*, Paper A-4, 12p.
- Oldenburg, D.W., Li, Y. and Farquharson, C.G., 1998, Applications of geophysical inversions in mineral exploration. *University of British Columbia, GEOPHYSICS*, The Leading Edge 17 (4), 461-465.
- Panteleyev, A., 1995, Subvolcanic Cu-Au-Ag (As-