

وارون‌سازی سریع داده‌های الکترومغناطیسی حوزه بسامد هلیکوپتری برای شناسایی بی‌هنجاری سولفید توده‌ای طلا دار منطقه باریکا در آذربایجان غربی، ایران

محسن شادمان^۱، علیرضا عرب‌امیری^۲، حسن خیرالهی^۳ و داود رجبی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و نفت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۱۷

چکیده

داده‌های الکترومغناطیسی حوزه بسامد به دلیل سرعت بالای برداشت و وضوح مناسب برای ژرفاهای نه‌چندان زیاد، در کاربردهای گوناگونی مانند اکتشاف آب و مواد معدنی، زیست محیطی و شناسایی مصنوعات بشری مدفون شده استفاده می‌شود. در وارون‌سازی این داده‌ها به مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای آن‌ها در نظر گرفتن تقریبی مناسب، از روش‌های وارون‌سازی بسیار سریع‌تری نسبت به روش‌های وارون‌سازی با تکرار استفاده کرد؛ که در برخی منابع با نام روش‌های تبدیل یا روش‌های وارون‌سازی سریع نام برده می‌شوند. منطقه مورد مطالعه در باختر برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت در استان آذربایجان غربی قرار گرفته است و طی مطالعات ژئوشیمیایی و لیتوژئوشیمیایی به عنوان یک بی‌هنجاری طلا-سرب معرفی شده است. این پهنه طلا دار با توجه به مطالعات زمین‌شناسی طی دو مرحله تشکیل پهنه سولفید توده‌ای و تأثیر دگرگونی ناشی از پهنه برشی روی آن غنی شده است. در این مقاله ضمن معرفی الگوریتم‌های وارون‌سازی سریع، از الگوریتم اصلاح شده سیمون استفاده و نقشه‌های توزیع مقاومت ویژه الکتریکی برای بسامدهای مختلف سامانه برداشت تهیه شده است و سپس با در نظر گرفتن ویژگی‌های نوع کانی‌سازی، زمین‌شناسی منطقه، تفسیر مناسب از نقشه‌های توزیع مقاومت ویژه الکتریکی صورت گرفته است. با استفاده از این روش‌ها، محدوده‌های پهنه برشی و محل‌های کانی‌سازی احتمالی برای بررسی‌های بیشتر تشخیص داده شد. افزون بر این به نظر می‌رسد که توزیع مقاومت الکتریکی حاصل از بسامد ۷۲۰۰ هرتز با میانگین ژرفای ۶۰ متر نشان می‌دهد که مرز میان لایه آهک کرتاسه و متاولکانیک کرتاسه در ژرفا نسبت به سطح، تغییرات سریعی دارد که می‌توان با بررسی‌های صحرائی درستی نقشه زمین‌شناسی را نیز بررسی کرد.

کلیدواژه‌ها: وارون‌سازی سریع، الکترومغناطیسی هلیکوپتری، سولفید توده‌ای، باریکا، ایران.

*نویسنده مسئول: علیرضا عرب‌امیری

E-mail: alirezaarabamiri@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ باریکا در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت - شمال سقر - میان طول‌های جغرافیایی ۳۷' ۴۵° و ۴۱' ۴۵° و عرض‌های جغرافیایی ۰۹' ۳۶° و ۱۲' ۳۶° قرار دارد. این برکه از سال ۱۳۷۸ با انجام مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای به عنوان بی‌هنجاری با اولویت درجه اول در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت مورد توجه قرار گرفت. نوع کانی‌سازی آنومالی باریکا در مطالعات زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ به عنوان یک ذخیره سولفید توده‌ای با پتانسیل به نسبت بالای طلا شناخته شده است. کانه‌زایی اصلی طلا-نقره (فلزات پایه و باریت) در این برکه، در ۳۰۰ متری جنوب روستای باریکا رخ داده است و هم‌اکنون باریت آن در حال استخراج است (Silva & Pires, 2003).

با معرفی این آنومالی، برداشت‌های ژئوفیزیک هوایی با استفاده از دستگاه دیگهم (DIGHEM) با وضوح بالا در بخش‌هایی از برکه آلوت انجام شد و داده‌های مغناطیسی سنجی با دو سنسور، طیف‌سنجی پرتو گاما و الکترومغناطیسی با پنج بسامد به‌طور هم‌زمان برداشت شد. این داده‌ها پس از انجام تصحیحات مختلف برای پردازش و تهیه نقشه‌های مختلف آماده شدند. از آنجا که کانی‌سازی سولفید توده‌ای یکی از بهترین اهداف در برداشت‌های الکترومغناطیسی است (Nabighian, 1987)، با استفاده از روش‌های مختلف وارون‌سازی سریع داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری حوزه بسامد (HEM)، از جمله روش سیمون، نقشه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی برای بسامدهای مورد استفاده در سیم‌پیچ هم‌سطح افقی تهیه شد و سپس این نقشه‌ها نسبت به اکتشاف مناطق با سولفید بالا و بی‌هنجاری‌های مرتبط با سولفیدهای توده‌ای تفسیر شدند. کدهای وارون‌سازی با استفاده از مقالات موجود در نرم‌افزار متلب تهیه شد و پیش از به‌کارگیری روی داده‌های واقعی، نتایج وارون‌سازی روی

داده‌های مصنوعی با استفاده از روش‌های مختلف مطالعه شده است. مطالعه این داده‌ها و تعیین ارتباط آنها با کانی‌سازی می‌تواند در تعیین محدوده‌هایی که رفتار ژئوفیزیکی یکسانی دارند؛ به عنوان نواحی امیدبخش برای مطالعات زمینی و دقیق‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

۲- وارون‌سازی سریع داده‌های HEM

در حالت کلی، وارون‌سازی داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری را می‌توان به منظور محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای به دو گروه تقسیم کرد:

(۱) روش‌های وارون‌سازی با تکرار (۲) روش‌های وارون‌سازی با استفاده از تبدیل یا روش‌های وارون‌سازی سریع. بازده محاسباتی روش‌های دوم در برابر روش‌های اول بسیار بهتر ولی پاسخ روش‌های اول دقیق‌تر است. از آنجا که تعیین مقدار اولیه مناسب در روش‌های وارون‌سازی با تکرار اهمیت بسیاری دارد؛ از روش‌های دوم می‌توان به عنوان مقدار اولیه در ورودی روش‌های وارون‌سازی با تکرار استفاده کرد؛ تا زمان رسیدن به جواب پایانی، کمتر و پاسخ دقیق‌تر شود؛ که این موضوع اهمیت روش‌های وارون‌سازی سریع را آشکار می‌کند (Siemon et al., 2009).

در این روش‌ها با فرض زمین به‌صورت لایه‌ای، متغیرهای مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و ژرفای ظاهری (متغیرهای نیم‌فضا) با استفاده از میدان مغناطیسی ثانویه اندازه‌گیری شده توسط سنسور محاسبه می‌شود. برای این مهم، الگوریتم‌های متفاوتی وجود دارد؛ ولی در همه این روش‌ها مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و ژرفای ظاهری به عنوان مقدار اولیه استفاده می‌شود. روش محاسبه این متغیرها توسط Huang & Fraser (2000) تشریح شده است.

۳-۲. حل عددی انتگرال ماندری

روش فیلترهای دیجیتالی گوپتاسارما-سینگ به دلیل بازده بالای محاسبات و دقت در محاسبه انتگرال مسئله مدل‌سازی پیشرو، برای محاسبه میدان مغناطیس ثانویه مدل‌های مشخص استفاده شده است. برای محاسبه انتگرال Z با کمک فیلتر دیجیتال خطی ۵ متغیر تعریف می‌شود: ضرایب W_i ، مقادیر طول که به ازای آن تابع هسته محاسبه می‌شود، u_i ، شیفت، s فاصله نمونه برداری، a و متغیر r که در الکترومغناطیس هواربند فاصله سیم پیچ‌ها است. در این صورت روابط برای محاسبه انتگرال عبارتست از (Guptasarma & Singh, 1997):

$$\lambda_i = \frac{1}{r} \times 10^{(a+(i-1)s)} \quad , \quad i=1, 2, \dots, n \quad , \quad Z = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n K(\lambda_i) W_i \quad (2)$$

نتایج مدل‌سازی پیشرو برای زمین چهار لایه با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰۰، ۱۰۰، ۵، ۱۰۰۰ اهم متر و سبزی‌های ۲۰، ۳۰، ۱۰ با استفاده از فیلتر دیجیتالی مورد استفاده در این مقاله، روش گوپتاسارما-سینگ، برای یک مدل مصنوعی با نتایج مدل‌سازی پیشرو (Siemon et al. (2009) مقایسه شده و در جدول ۱ آمده است. در این مدل‌سازی ارتفاع پرواز و فاصله سیم پیچ‌ها به ترتیب برابر ۳۰ و ۸ متر و Q و R بخش موهومی و حقیقی پاسخ زمین است. BGR (LT)، BGR (FHT)، BGR (with a_0) و BGR (without a_0) به ترتیب روش مدل‌سازی پیشرو با استفاده از ضرایب تبدیل لاپلاس، تبدیل هنکل سریع، فیلترهای دیجیتالی گوپتا-سینگ با در نظر گرفتن a_0 و بدون در نظر گرفتن آن هستند. همان‌گونه که دیده می‌شود، نتایج پاسخ روش گوپتاسارما-سینگ، هم با در نظر گرفتن متغیر a_0 و هم بدون آن، در بسامدهای پایین از ۳۸۷ تا ۸۲۲۵ هرتز با پاسخ‌های انستیتو بی‌جی آر تفاوتی در حد دهم ppm دارند؛ ولی در بسامدهای بالا اختلاف نتایج به ویژه برای بخش حقیقی پاسخ میدان مغناطیسی ثانویه زمین محسوس است؛ که با در نظر گرفتن متغیر a_0 در رابطه انتگرال هنکل، پاسخ روش گوپتاسارما-سینگ با نتایج انستیتو بی‌جی آر یکسان است؛ که به دلیل تأثیر مقاومت الکتریکی هوا در بسامدهای بالا بر میدان مغناطیسی ثانویه زمین است.

۳-۳. نتایج وارون‌سازی برای مدل‌های مصنوعی

نتایج وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری با استفاده از ۴ الگوریتمی که توضیح مختصر آن آورده شد، برای ۱۶ بسامد در بازه ۲۲۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلوهرتز برای دو مدل مصنوعی (a) زمین دولایه: مقاومت الکتریکی لایه اول و دوم به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ اهم متر و سبزی‌های ۴۰ متر و (b) زمین چهارلایه: مقاومت الکتریکی لایه‌ها از اول تا چهارم ۵۰، ۱۰۰۰، ۱ و ۱۰۰۰ اهم متر و سبزی‌های لایه اول تا سوم به ترتیب ۱۰، ۴۰ و ۵ متر، به دست آمده و در شکل ۱ به صورت منحنی‌های سونداژ رسم شده است. البته برای روش هوانگ-فریزر با توجه به نظر ایشان، از بازه بسامدی ۲۲۰ تا ۱۱۵۰۰۰ هرتز استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی پیشرو برای حالت سیم پیچ هم صفحه افقی محاسبه شده است. به منظور تعیین توانایی هر روش در جدایش و شناسایی مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌ها، نتایج وارون‌سازی به‌طور خلاصه برای مدل‌های مصنوعی در جدول ۳ آمده است.

برای مدل زمین دو لایه با رولایه مقاوم، همه روش‌ها پاسخ‌های بسیار خوبی ارائه دادند و توانستند زمین را به خوبی شناسایی کنند. در این میان، روش هوانگ-فریزر و روش نیلت-بوستیک دقیق‌ترین پاسخ‌ها را به ترتیب برای مقاومت ویژه الکتریکی لایه اول و دوم به دست آورده‌اند. روش بهبود یافته سیمون، نسبت به دیگر روش‌ها از لایه‌های سطحی و روش هوانگ-فریزر از لایه‌های ژرف‌تر اطلاعات بیشتری داده‌اند. برای مدل زمین چهارلایه، روش سیمون مقاومت ویژه الکتریکی سطحی‌ترین لایه را نسبت به دیگر روش‌ها دقیق‌تر محاسبه کرده است و بیشترین اطلاعات را از سطح تهیه می‌کند که به نظر می‌رسد روش قوی‌تری نسبت به دیگر روش‌ها در شناسایی بخش‌های سطحی تر زمین است. از سوی دیگر، روش

پس از تهیه متغیرهای نیم‌فضا، می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های زیر مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای به ازای هر بسامد را محاسبه کرد.

– **روش سیمون:** در این روش، مقاومت ویژه الکتریکی برابر با مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری در نظر گرفته می‌شود ($\rho = \rho_a$) و ژرفای متناظر این مقاومت ویژه الکتریکی برابر $z_p^* = d_a + 251/65 \sqrt{\rho_a / f}$ (Siemon, 2001). وی در مقالات بعدی خود روشی بهبود یافته‌ای برای محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی ارائه کرده است (Sengpiel & Siemon, 2000).

– **روش هوانگ و فریزر:** این روش از دیفرانسیل‌گیری نسبت به ژرفا برای محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفا استفاده می‌کند و متغیر ژرفای مؤثر نقشی کلیدی در محاسبات این روش دارد. این روش در محدوده بسامدی ۲۲۰ هرتز تا ۱۱۵ کیلوهرتز قابل اجراست (Huang & Fraser, 1996).

– **روش نیلت-بوستیک:** این روش که برای داده‌های مگنتوتلوریک به کار می‌رود، توسط Siemon & Sengpiel (1997) با انجام تغییراتی برای وارون‌سازی داده‌های HEM نیز به کار رفت. برخلاف روش پیش، از دیفرانسیل‌گیری نسبت به بسامد در محاسبات استفاده می‌شود و ژرفای مربوط نیز با استفاده از رابطه $Z_p^* = d_a + 355/88 \sqrt{\rho_a / f}$ (Jones, 1983) محاسبه می‌شود.

– **روش اشموکر:** این روش را (Schmucker (1971 ارائه کرد و نخستین بار برای داده‌های مگنتوتلوریک به کار گرفته شد. هر چند از کلیات فرمولاسیون این روش می‌توان برای وارون‌سازی داده‌های HEM نیز استفاده کرد. در این روش ابتدا با توجه به مقدار ژرفای ظاهری، مؤلفه فاز محاسبه شده و سپس با توجه به آن، ضریبی برای مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به دست می‌آید که از آن می‌توان مقاومت ویژه الکتریکی را به دست آورد (Huang & Fraser, 2000).

۳-۳ بررسی نتایج وارون‌سازی برای مدل‌های مصنوعی

مطالعه نتایج وارون‌سازی روی مدل‌های مصنوعی زمین می‌تواند در تفسیر هر چه بهتر مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی داده‌های واقعی مفید باشد. از این رو پیش از پرداختن به تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی منطقه مورد مطالعه، نتایج وارون‌سازی روی مدل‌های مصنوعی بررسی می‌شود. به همین منظور، ابتدا به‌طور مختصر نتایج مدل‌سازی پیشرو روش الکترومغناطیس برای تولید پاسخ زمین برای یک مدل مشخص با استفاده از روش فیلتر دیجیتالی گوپتاسارما-سینگ مطالعه می‌شود.

۳-۱. مدل‌سازی پیشرو

برای تولید پاسخ‌های یک مدل که همه اطلاعات مورد نیاز آن موجود است؛ لازم است تا یک انتگرال در حوزه عدد موج محاسبه شود. این انتگرال که از نوع انتگرال هنکل (Hankel) است، با استفاده از متغیرهای معلوم برای انواع آرایه‌های سیم پیچ حل می‌شود. پاسخ میدان ثانویه بهنجار شده برای حالت سیم پیچ‌های هم صفحه افقی (HCP) با فاصله افقی r میان جفت سیم پیچ گیرنده-فرستنده و ارتفاع h_i (ارتفاع پرواز) روی زمین نیم‌فضای (n-1) لایه‌ای افقی با مقاومت‌های ρ_i ($i=2,3,\dots,n$) و سبزی‌های h_i ($i=2,3,\dots,n-1$) و بسامد زاویه‌ای $\omega=2\pi f$ به صورت زیر نوشته می‌شود (Mundry, 1983):

$$Z = r^2 \int_0^\infty \lambda R_1 e^{-2\alpha_0 h_1} \frac{\lambda^2}{\alpha_0} r J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{(\lambda^2 + \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 + \frac{i\omega \mu_0}{\rho_0})}$$

در این رابطه J_0 تابع بسل نوع اول و درجه صفر است. متغیر R_1 ضریب بازتاب مختلطی است که از مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و سبزی‌های لایه‌های زمین به دست می‌آید. همچنین $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ نفوذپذیری مغناطیسی در هوای آزاد، $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ As/Vm ثابت دی الکتریکی هوا و $\rho_0 > 10^8 \Omega.m$ مقاومت ویژه الکتریکی هواست.

اهم‌تر و ۳۳ تا ۹۶ متر است. همچنین از نقشه‌ها مشخص است که توزیع مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از بسامد ۷۲۰۰ هرتز که ژرفای بیشتری نسبت به بسامد ۵۶۰۰۰ هرتز دارد؛ از یکنواختی بیشتری برخوردار است که می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله تأثیر نوفه‌های سطحی بر بسامدهای بالا یا وجود عوامل مختلف زمین‌شناسی مانند دگرسانی‌ها، وجود درز و شکاف زیاد و هوازدگی در ژرفاهای کم رخ دهد.

۶- تفسیر نقشه‌های مقاومت ویژه الکتریکی

از داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری با توجه به سرعت زیاد برداشت و دقت بالای روش‌های پردازش می‌توان در کاربردهای گوناگون همچون مسائل محیط زیستی و گسترش آلودگی در زمین (Hammack et al., 2003)، اکتشاف منابع آب (Hodges & Beattie, 2008)، اکتشاف مواد معدنی (Silva & Pires, 2003) و ... استفاده کرد. افزون بر این سامانه برداشت هلیکوپتری دیگم به منظور اکتشاف ذخیره سولفید توده‌ای در منطقه‌ای واقع در باختر هند استفاده شده است؛ که با استفاده از وارون‌سازی این داده‌ها، شکل و ژرفای کانسار با دقت بالایی به دست آمده است (Hammack et al., 2003).

کانه‌زایی طلا- نقره (فلزات پایه- باریت) در منطقه باریکا از نوع سولفید توده‌ای ولکانوژن طلا دار است؛ که در بخش بالایی آتشفشانی‌های اسیدی ریولیتی قرار دارد و به صورت عدسی‌های کوچک و بزرگ و هم‌روند با برگوارگی پهنه برشی دیده می‌شود. بر پایه برداشت‌های زمین‌شناسی، رخنمون کانه‌زایی در محدوده‌ای به وسعت ۲۰۰ در ۱۰۰ متر در ترانشه بزرگ ناشی از فعالیت‌های استخراجی معدن باریت به خوبی دیده می‌شود. عدسی‌های باریتی که بزرگ‌ترین آنها ۶۰ متر طول و حدود ۱۰ متر ستبرای دارند، در بخش بالایی محدوده کانه‌زایی دیده می‌شوند. به‌طور کلی کانه‌زایی در منطقه باریکا، از پایین به بالا در سه پهنه دیده می‌شود: الف) پهنه سیلیسی سولفیددار: گسترش این پهنه به صورت عدسی‌های کشیده است که در کمربند پایین پهنه غنی از سولفید دیده می‌شود. این پهنه در محدوده معدن باریت ستبرای ۵۰ متر و طولی بیش از ۱۰۰ متر دارد؛ ب) پهنه غنی از سولفید و سولفوسالت: دارای حدود ۵۰ متر طول و ستبرای ۳ متر و در بخش شمال باختری معدن باریت است؛ ج) پهنه کانسنگ باریتی. بخش توف ریولیتی آهن‌دار قرار دارد که حدود ۳۰ تا ۴۰ متر ستبرای دارد. اکسیدهای آهن به صورت پراکنده و رگچه‌ای همراه با کوارتز و سرسیت در این واحد دیده می‌شود (Silva & Pires, 2003).

محدوده پهنه‌های برشی به دلیل کانه‌دار بودن و وجود رگچه‌های سولفیدی و دگرسان شده، به‌ویژه پهنه‌های برشی باریکا و شمولا، توسط هر دو بسامد و هر دو روش در نقشه‌های مقاومت ویژه الکتریکی، به صورت محدوده‌های رساناتر نسبت به اطراف، تطابق خوبی با محدوده‌های موجود روی نقشه زمین‌شناسی دارد و از آنجا که کانی‌سازی در این پهنه رخ داده است و اهمیت ویژه‌ای در این منطقه دارد؛ می‌توان با توجه به الگوی مقاومت ویژه الکتریکی این پهنه، محدوده‌های دیگری را به عنوان پهنه برشی کانی‌زایی معرفی کرد. میان دو روش سیمون و هوانگ، روش هوانگ برای بسامد ۷۲۰۰ هرتز، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی بیشتری را نسبت به روش سیمون در همین بسامد نشان می‌دهد؛ که به دلیل ژرفای نفوذ بیشتر روش هوانگ است. با توجه به این نکته به نظر می‌رسد در صورت وجود پهنه برشی در ژرفاهای زیاد، بخش سولفیددار و آرژیلیکی (به راهنمای نقشه زمین‌شناسی در شکل ۲ توجه شود) با مقاومت ویژه الکتریکی کم در ژرفایی کمتر از ۸۰ متر قرار دارد.

نکته دارای اهمیتی که باید به آن توجه داشت، الگوی تغییر مقاومت ویژه الکتریکی در کل منطقه مورد بررسی است؛ که به نوع واحد سنگی برمی‌گردد. این مطلب برای تعیین واحدهای مناسب برای تشکیل نوع خاصی از کانی‌سازی بسیار مهم است. با توجه به این که نقشه ۱:۱۰۰۰۰ موجود تنها بر پایه سن واحدها، کل منطقه را کراتاسه در نظر گرفته است، از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده

هوانگ- فریزر در شناسایی مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های دوم، سوم و چهارم پاسخ‌های نزدیک به مدل را تولید کرده است. تغییرات سریع این روش در مرزهای مدل‌های مصنوعی یکی از نکات قابل توجه این روش است که می‌تواند به تعیین مرز لایه‌ها کمک زیادی کند.

در کل با توجه به پاسخ الگوریتم‌های وارون‌سازی سریع داده‌های الکترومغناطیسی حوزه بسامد به مدل‌های مصنوعی این گونه به نظر می‌رسد که الگوریتم (Huang & Fraser, 1996) جزو بهترین روش‌ها به شمار می‌رود؛ ولی وضوح نزدیک به سطح این روش کم است. در حالی که روش سیمون بهبود یافته بهترین نتایج را در شناسایی لایه اول دارد. با این حال الگوریتم سیمون بهبود یافته نسبت به روش‌های دیگر ژرفای نفوذ کمتری دارد. روش غیر دیفرانسیلی اشموکر، جواب‌هایی نزدیک به روش سیمون دارد؛ ولی میان این دو روش، روش سیمون پاسخ‌های بهتری می‌دهد. از همین رو از دو روش سیمون بهبود یافته و هوانگ- فریزر برای تهیه نقشه توزیع مقاومت الکتریکی داده‌های واقعی استفاده شد.

۴- زمین‌شناسی باریکا

برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ باریکا (شکل ۲) در پایانه شمال باختری پهنه ساختاری سندج- سیرجان قرار گرفته است. واحدهای گسترش یافته در این منطقه یک سری سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی زیر دریایی با سن کراتاسه است؛ که از نظر ترکیب سنگ‌شناختی بیشترین حجم آن لاتیت- آندزیت، تراکی آندزیت، لاتیت- آندزیت کوارتزارد و سنگ‌های بازیک اسپیلیتی شده به همراه یک سری واحدهای رسوبی مانند آهک و شیل است. تغییرات بافتی بخش آتشفشانی زیاد بوده و حتی بخش‌های توفی تا توف برشی را می‌توان دید (Omran & Khabaziyan, 2003). واحدهای آتشفشانی- رسوبی کراتاسه همه منطقه باریکا را پوشش داده و در بخش‌های مختلف تحت تأثیر پهنه‌های برشی شکنده- شکل پذیر با روند شمالی شمال باختری- جنوبی جنوب خاوری در منطقه باریکا دیده می‌شوند. پهنه برشی باریکا با طولی بیش از ۳ کیلومتر، اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین پهنه برشی منطقه باریکا بوده و معدن باریت به همراه کانه‌زایی مربوط در این پهنه قرار گرفته است. این محدوده به عنوان یکی از پهنه‌های برشی خاور سردشت معرفی شده است (Mohajel, 2004).

۵- نقشه مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفا

با توجه به نتایج به دست آمده از وارون‌سازی یک‌بعدی مدل‌های مصنوعی زمین، به نظر می‌رسد که استفاده از نتایج وارون‌سازی روش‌های سیمون بهبود یافته و هوانگ- فریزر به صورت ترکیبی می‌تواند اطلاعات بیشتری ارائه کند. بنابراین با استفاده از این دو روش برای داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری حوزه بسامد سامانه دیگم در منطقه باریکا، نقشه‌های توزیع مقاومت ویژه الکتریکی برای دو بسامد ۷۲۰۰ و ۵۶۰۰۰ هرتز سیم پیچ هم‌صفحه افقی تهیه شد که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. برای تهیه این نقشه‌ها، در محدوده مورد مطالعه از ۵۴۰۲۷ نقطه داده‌های ۲۹ خط پرواز با فاصله ۲۰۰ متر و روند شمال خاوری- جنوب باختری استفاده شده است و مساحتی حدود ۳۳ کیلومترمربع را دربر می‌گیرد. پس از تهیه مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای متناظر با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب، شبکه این مقادیر با استفاده از روش کمترین انحنا (Minimum Curvature) و ابعاد شبکه ۸۰ متر تهیه شد. برای بسامد ۵۶۰۰۰ هرتز با استفاده از روش هوانگ و فریزر بازه مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای به دست آمده زمین به ترتیب میان ۹۰ تا ۱۶۵۵ اهم‌متر و ۲۷ تا ۷۰ متر و برای روش سیمون میان ۵۶ تا ۱۴۰۳ اهم‌متر و ۱۹ تا ۵۱ متر به دست آمد. برای بسامد ۷۲۰۰ هرتز نیز بازه مقادیر مقاومت الکتریکی و ژرفا برای روش هوانگ و فریزر به ترتیب برابر ۲۷ تا ۱۹۲۵ اهم‌متر و ۷۲ تا ۲۰۳ متر و برای روش سیمون ۳۸ تا ۴۴۹۰

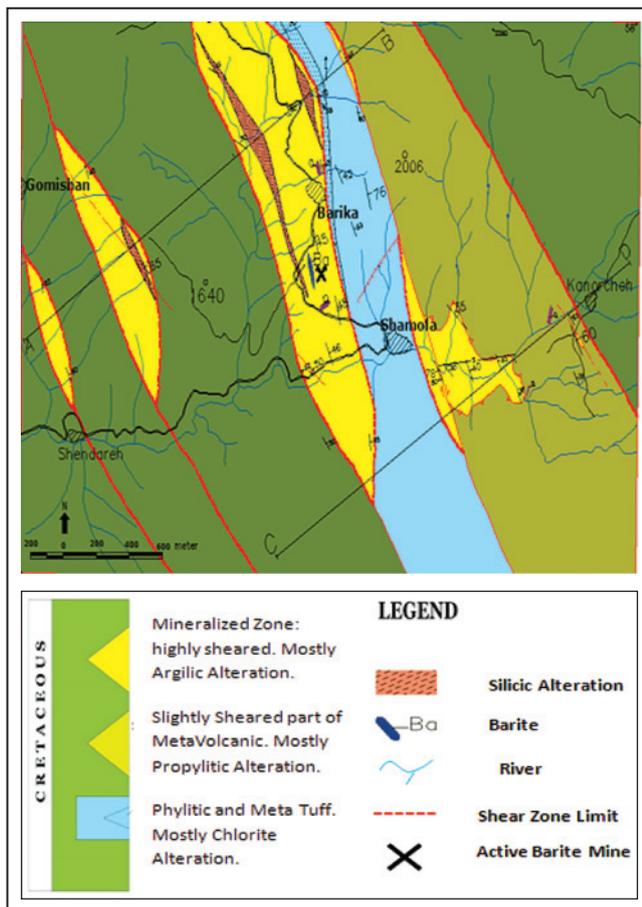
سطحی و هوانگ- فریزر نتایج درست‌تری از تغییرات ژرفایی نشان دادند. در محدوده با مقاومت ویژه الکتریکی بالای نقشه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی، محدوده‌هایی با مقاومت الکتریکی پایین قرار دارند و از آنجا که طبق نقشه ۱:۱۰۰۰۰ زمین‌شناسی آلوت، این محدوده‌ها همگی در یک سنگ بستر قرار دارند؛ برای تفسیر کیفی این بی‌هنجاری‌ها از نقشه ۱:۱۰۰۰۰ باریکا استفاده و دیده شد که بی‌هنجاری با مقاومت الکتریکی پایین در نزدیکی روستاهای باریکا و شمولا دقیقاً با پهنه برشی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰ باریکا انطباق دارد که این موضوع احتمالاً به دلیل وجود رگه‌های کوارتز سولفیدداری است که در کل این پهنه پراکنده است.

افزون بر این، با توجه به توزیع مقاومت ویژه الکتریکی و ترکیب سنگی در محدوده روستای باریکا در نقشه ۱:۱۰۰۰۰ آلوت، میان این دو نقشه در بخش‌هایی همخوانی وجود ندارد؛ که این امر با توجه به شیب لایه‌ها در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ باریکا، احتمالاً به دلیل حضور لایه آهک کرتاسه با مقاومت الکتریکی به نسبت پایین‌تر از متاولکانیک کرتاسه است.

در پایان پیشنهاد می‌شود با حفر شمار محدودی گمانه در منطقه و مطالعه ستون زمین‌شناسی آن با مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی، تفسیر دقیق‌تری از منطقه به دست آید؛ تا اطلاعات آن به دیگر نواحی با رفتار مشابه ژئوفیزیکی تعمیم داده و مناطق امیدبخش با دقت بیشتری معرفی شود.

سپاسگزاری

نگارندگان، از مسئولان محترم سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای همکاری در ارائه داده‌های مختلف مورد نیاز این مقاله سپاسگزاری می‌کنند.



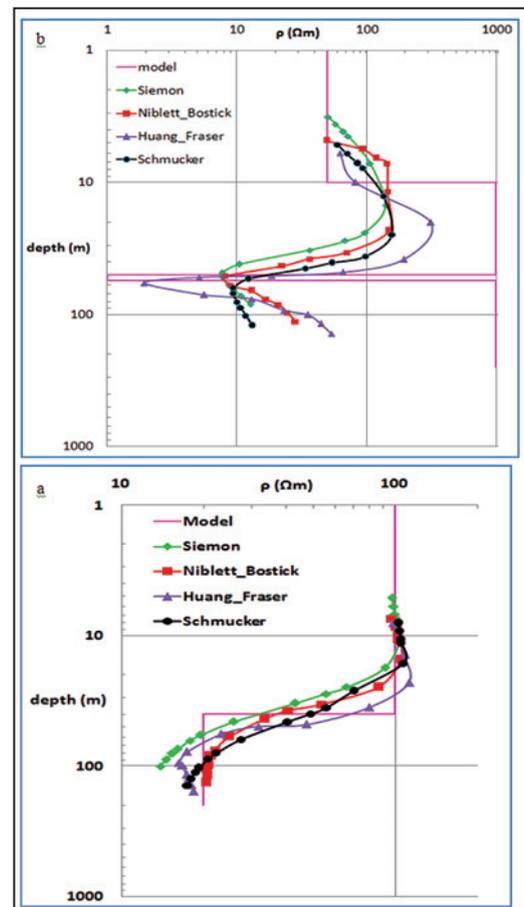
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ باریکا به همراه محدوده برشی با کانی‌سازی به نسبت فراوان (محدوده رنگ زرد) (Omrani & Khabaziyan, 2003).

است (شکل ۵) (Omrani & Khabaziyan, 2003). در کنار نقشه زمین‌شناسی، نقشه مقاومت ویژه الکتریکی برای بسامد ۷۲۰۰ هرتز روش سیمون بهبود یافته نیز قرار داده و مرز واحد متاولکانیک کرتاسه با آهک کرتاسه روی این نقشه با خط چین مشکی آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۵ می‌توان دید، الگوی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در کل نقشه با تغییرات سنگ‌شناختی روی نقشه زمین‌شناسی یکسان نیست؛ که این موضوع می‌تواند به دلایل مختلفی مانند تغییر سریع واحدهای یادشده در ژرفای کمتر از ۱۰۰ متر در بخش متاولکانیک به واحد آهکی، وجود پهنه‌های برشی به مراتب بزرگ‌تر از محدوده‌های مشخص شده در نقشه شکل ۲ در بخش باختری محدوده مورد مطالعه و یا تغییر تدریجی سنگ‌شناختی در محل برخورد دو واحد باشد. به نظر می‌رسد با توجه به گستردگی محدوده‌ایی که با نقشه زمین‌شناسی تطابق ندارد و همچنین شیب چیره واحدهای سنگی منطقه - ۴۵ درجه با آزیموت ۹۰ درجه - در ژرفای کمتر از ۵۰ متر لایه آهک کرتاسه زیر لایه متاولکانیک کرتاسه قرار می‌گیرد.

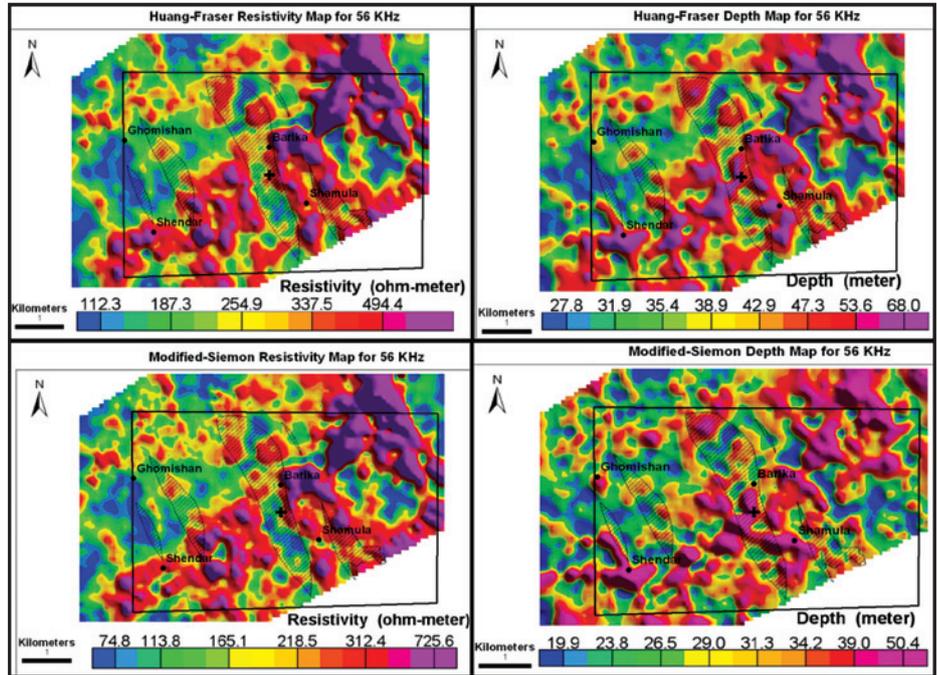
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های مختلف وارون‌سازی سریع داده‌های الکترومغناطیس حوزه بسامد مطالعه و نتایج آنها برای مدل‌های مصنوعی مختلف با یکدیگر مقایسه شد. از همین رو با توجه به دقت و درستی روش‌های استفاده شده در محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای مرتبط با آن، دو روش سیمون اصلاح شده و هوانگ- فریزر به عنوان روش‌های مورد استفاده روی داده‌های واقعی به کارگرفته شدند؛ که روش سیمون اصلاح شده نتایج بهتری از تغییرات

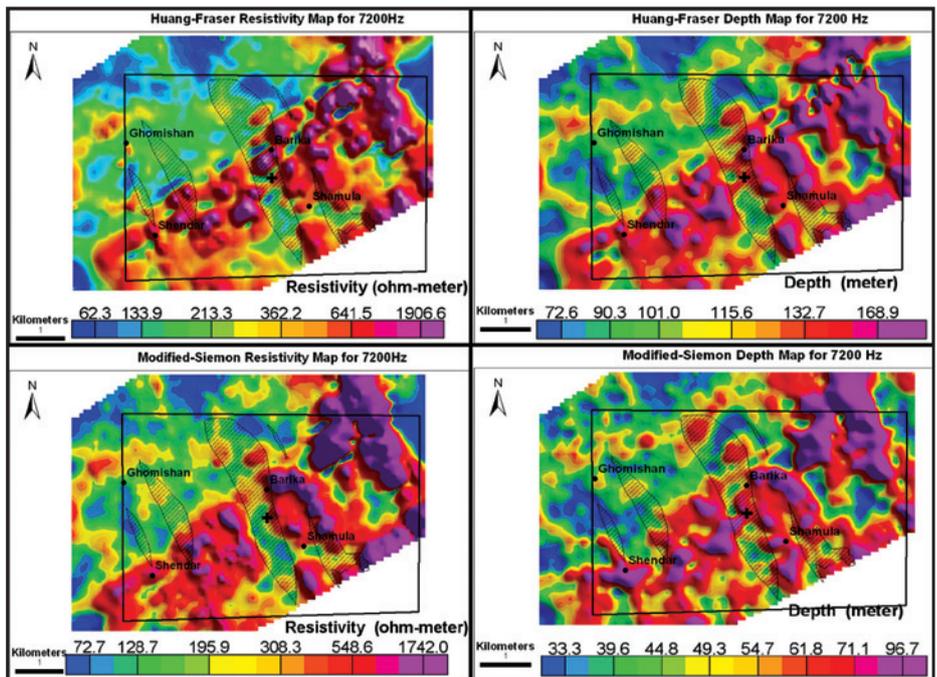


شکل ۱- منحنی‌های مقاومت ویژه الکتریکی- ژرفا برای دو مدل مصنوعی زمین: (a) مدل زمین دو لایه؛ (b) مدل زمین ۴ لایه.

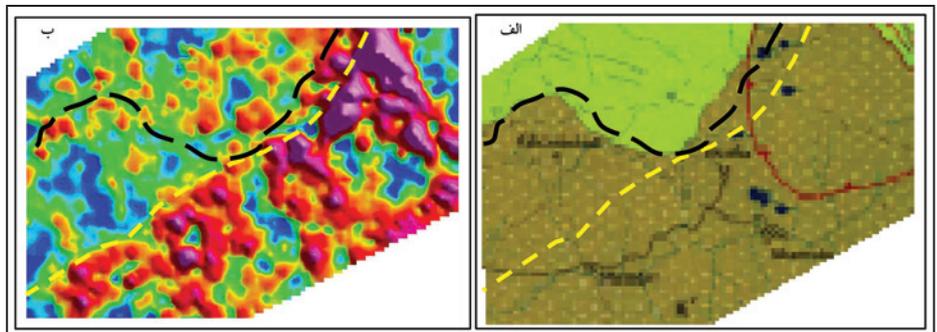
شکل ۳- نقشه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی بسامد ۵۶۰۰۰ هرتز برای روش‌های مختلف. محدوده مستطیلی سیاه رنگ، محدوده نقشه زمین‌شناسی شکل (۲)، علامت + محل معدن باریت و کانسنگ سولفید توده‌ای و محدوده‌های هاشور خورده پهنه بُرشی است.



شکل ۴- نقشه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی بسامد ۷۲۰۰ هرتز برای روش‌های مختلف. محدوده مستطیلی سیاه رنگ، محدوده نقشه زمین‌شناسی شکل (۲)، علامت + محل معدن باریت و کانسنگ سولفید توده‌ای و محدوده‌های هاشور خورده پهنه بُرشی است.



شکل ۵- الف) بخشی از نقشه زمین‌شناسی Omrani & Khabaziyan, ۱:۱۰۰۰۰۰ آلود (2003)؛ واحد آهک کرتاسه به رنگ سبز و واحد متاولکانیک کرتاسه به رنگ قهوه‌ای نمایش داده شده است؛ ب) نقشه مقاومت ویژه الکتریکی بسامد ۷۲۰۰ هرتز روش سیمون. خط چین زرد رنگ مرز مقاومت ویژه الکتریکی بسامد ۷۲۰۰ هرتز و خط چین مشکی مرز واحدهای آهک کرتاسه و متاولکانیک کرتاسه را نشان می‌دهد.



جدول ۱- نتایج مدل‌سازی پیش‌رو برای زمین چهار لایه با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰۰، ۱۰۰، ۵ و ۱۰۰۰ اهم‌متر و ستبراهای ۲۰، ۳۰، ۱۰. ارتفاع پرواز و فاصله سیم‌پیچ‌ها به ترتیب برابر ۳۰ و ۸ متر و Q و R بخش موهومی و حقیقی پاسخ زمین است.

f (Hz)	BGR (LT)		BGR (FHT)		Gupta-without α_0		Gupta-with α_0	
	Q (ppm)	R (ppm)	Q (ppm)	R (ppm)	Q (ppm)	R (ppm)	Q (ppm)	R (ppm)
387	68.62	21.77	68.36	21.8	68.3	21.8	68.36	21.80
1820	164.4	129.1	164.4	129.1	164.3	129.1	164.36	129.11
8225	291.5	280.4	291.5	280.4	291.4	280.3	291.46	280.43
41550	747.6	734.8	747.4	734.7	746.3	731.9	747.46	734.96
133200	1052	1509	1047	1506	1038.8	1469.4	1046.80	1506.1

جدول ۲- خلاصه نتایج وارون‌سازی و مقایسه روش‌ها در جدایش و شناسایی ژرفا و مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌ها. علامت (-) درون جدول به این معنی است که روش قابلیت شناسایی ندارد. همچنین سلول خاکستری در هر ردیف نشان‌دهنده بهترین پاسخ برای آن ویژگی از لایه است.

مدل دولایه با رولایه مقاوم ۱۰۰ اهم‌متر و ستبرای ۴۰ متر روی لایه هادی با $\rho=20 \Omega m$				
روش اشموکر	روش هوانگ- فریزر (۹۶)	روش نیبلت- بوستیک	روش سیمون بهبود یافته	
۱۰۲/۶	۹۷/۸	۹۵/۴	۹۷/۱	مقاومت ویژه الکتریکی لایه اول
۱۷/۴	۱۸/۳	۲۰/۴	۱۳/۹	مقاومت ویژه الکتریکی لایه دوم
۸	۸	۷/۴	۵/۱	کمینه ژرفای شناسایی
۱۴۲	۱۵۷/۳	۱۳۳/۹	۱۰۰/۴	بیشینه ژرفای شناسایی
مدل چهارلایه با مقاومت ویژه الکتریکی $\rho=[50 \ 1000 \ 1 \ 1000]$ بر حسب Ωm و ستبرای $t=[10 \ 40 \ 5]$ بر حسب متر				
روش اشموکر	روش هوانگ- فریزر	روش نیبلت- بوستیک	روش سیمون بهبود یافته	
۵۹/۸	۶۲/۸	۴۹/۳	۵۰/۵	مقاومت ویژه الکتریکی لایه اول
۱۵۶	۳۱۴	۱۴۹	۱۴۱	مقاومت ویژه الکتریکی لایه دوم
۹/۴	۱/۹	۸/۱	۷/۶	مقاومت ویژه الکتریکی لایه سوم
۱۳/۱	۵۳/۷	۲۸/۹	۱۳	مقاومت ویژه الکتریکی لایه چهارم
۵/۲	۶	۴/۸	۳/۲	کمینه ژرفای شناسایی
۱۲۰/۹	۱۳۹/۵	۱۱۳/۷	۸۴	بیشینه ژرفای شناسایی

References

- Guptasarma, D. & Singh, B., 1997- New Digital Linear Filters for Hankel J0 and J1 Transforms, Geophysical Prospecting, Vol., 45,
- Hammack, R. W., Love, E. I. & Veloski, G. A., 2003- Using Helicopter Electromagnetic Surveys to Identify Environmental Problems at Coal Mines, Mine Water and Environmental, No. 22, pp: 80-84.
- Hodges, G. & Beattie, D., 2008- Comparison of HeliGeotem and Dighem^v over the Maimon Massive Sulfide Deposit, Short Paper, 10th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition.
- Huang, H. & Fraser, D. C., 1996- The Differential Parameter Method for Multi frequency Airborne Resistivity Mapping, Geophysics, Vol. 61, P: 100_109.
- Huang, H. & Fraser, D. C., 2000- Airborne Resistivity and Susceptibility Mapping in Magnetically Polarizable Areas, Geophysics, Vol. 65, No. 2, pp: 502- 511.
- Jones, A. G., 1983- On the Equivalence of the Niblet and Bostick transformations in the magneto telluric Method. Journal of Geophysics, 25, P: 998_ 1008.
- Mohajel, M., 2004- geological and structural report of study zones of Alut Project, Geological Survey of Iran.
- Mundry, E., 1983- On the Interpretation of Airborne Electromagnetic Data for the Two_ layer Case, Geophysical Prospecting 32, pp: 336 _ 346.
- Nabighian, M. N., 1987- Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Applications Part A and Part B, Society of Exploration Geophysicists.
- Omrani, A. & Khabaziyan, R., 2003- Geology Report for Alut 1:100,000 scale Sheet, Geology Survey of Iran.
- Schmucker, U., 1971- Neue Rechenmethoden zur Tiefen-sondierung. In: Weidelt, P. (Ed., Protokoll uber das Kolloquium Ardmagnetische Tiefen-sondierung in Rothenberge, University of Gotingen, pp. 1-39.
- Sengpiel, K. P. & Siemon, B., 2000- Advanced Inversion Methods for Airborne Electromagnetic Exploration, Geophysics, Vol. 65, No. 6, pp: 1983-1992.
- Siemon, B. & Sengpiel, K. P., 1997- Helicopter-borne electromagnetic groundwater exploration survey in the Kuiseb Dune Area, Central Namib Desert, in: Proceedings of SAGA Conference 97, Swakopmund, Namibia, pp. 137-142.
- Siemon, B., 2001- Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data, Journal of Applied Geophysics 46, PP: 65- 76.
- Siemon, B., Auken, E. & Christensen, A. V., 2009- Laterally constrained inversion of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data, Journal of Applied Geophysics, Vol. 67, No.3, pp: 259-268.
- Silva, M. A. & Pires, A. C., 2003- Application of Airborne Geophysical Data to Mineral Exploration in the Uneven Exposed Terrains of the Rio Das Velhas Greenstone Belt, Revista Brasileira de Geociencias, Vol. 333, No. 2, pp: 17-28.

Inversion of Frequency Domain Helicopter Electromagnetic Data for Recognizing Gold Enriched Massive Sulfide Anomaly in Barika Area, West Azerbaijan, Iran

M. Shademan ¹, A. R. Arab-Amiri ^{2*}, H. Kheyrollahi ³ & D. Rajabi ⁴

¹M. Sc., Faculty of Mining and Petroleum Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

³ Ph.D. Student, Amirkabir University of Technology, Tehran; Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Student, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2011 November 27

Accepted: 2014 April 06

Abstract

Frequency Domain Electromagnetic surveys are being used for various applications like mineral and water exploration, environmental hazards and buried human-made materials because of its resolution and fast acquisition for low depth targets. Resistivity and its depth for each frequency could be calculated in a simpler approach and shorter time than Iterative Inversion Method, Called Straight or Fast Inversion Methods, by assuming earth as a homogeneous half space. Barika's Anomaly situated in Alut Geology 1:100,000 sheets in west Azerbaijan is studied in order to prospect gold_ lead mineralization which has been detected in systematic geochemical and litho-geochemical surveys. In this paper we studied different Fast Inversion algorithms for synthetic data then applied the best method for real data. Resistivity distribution for each frequency produced and appropriate interpretation according to geology acquired. The results showed that there is a good correlation between low resistivity and shear zones. Also geology map can be modified with higher frequency resistivity.

Keywords: Fast Inversion, Helicopter-Borne Electromagnetic, Massive sulfide, Barika, Iran.

For Persian Version see pages 197 to 202

*Corresponding author: A. R. Arab-Amiri; E-mail: alirezaarabamiri@yahoo.com