چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علـوم زمیـــن
The 42nd National
Geosciences Congress
www.geoconf.ir

کارآیی روش مگنتوتلوریک در اکتشافات منابع معدنی عمیق مطالعه موردی: معدن باثورست (Bathurst) حاوی توده های سولفیدی عمیق در کشور کانادا

ابوالفضل خالدی سردشتی[۱]، غلامعباس فنایی خیرآباد [۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، akhaledi@gmail.com

[۲] استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، afanaee@birjandut.ac.ir

چکیده

پیشرفت در فناوری‌های مختلف همواره به سایر تلاش‌های اکتشافی ما نیز کمک کرده است و به طور ویژه موجب کاهش زمان اجرای عملیات اکتشافی و افزایش دقت کاوش در اعماق زیاد گردیده است. با این حال، استفاده از روشهای مکمل اما پر هرینه مانند حفاری برای دستیابی به اطلاعات دقیق از گستره ماده معدنی در عمق نیز تاکنون بسیار مؤثر بوده است و غالبا اطلاعات مفیدی را ارایه می نماید. از سوی دیگر انجام یک عملیات اکتشافی موفق دشوار است و مسلماً در شرایط فعلی که ذخایر کشف نشده معدنی به احتمال زیاد در اعماق بیشتر نیز تشکیل شده است، انجام عملیات های پیجویی عمیق بسیار دشوارتر است. ریسک مالی عملیات های حفاری برای اکتشاف منابع عمیق، نیاز به دانش فنی بالا در معدنکاری زیرزمینی و بحث های محیط زیستی، در حال حاضر مانع از توسعه اکتشافات عمیق در اکثر کشورها شده است. آگاهی از قابلیت و امکان تهیه تصاویر از عمق حدود ۱۵۰۰ متر برای پارامترهای هدفی مانند توزیع مقاومت ویژه الکتریکی زیر سطحی می تواند به نهادینه شدن انجام کاوش های عمیق در اکتشاف کانسارهای معدنی از جهات مختلف موثر واقع شود. در این مقاله برای بیان اهمیت و امکان کاوش عمیق جهت دستیابی و تعیین محل کانسار, عمق توده معدنی و شکل تقریبی آن به بررسی قابلیت بالای روش مگنتلوریک نه تنها در تشخیص محدوده ماده معدنی بلکه برای ترسیم سایر پارامترهای طراحی استخراج معدن در اعماق قابل استخراج، پرداخته است. هر چند این توسعه معادن در عمق به جای توسعه سطحی و افزودن بر تعداد معادن سطحی، نهایتا از منظر زیست محیطی نیز بسیار می تواند مورد اهمیت باشد زیرا از تعداد عملیات های معدنکاری پراکنده کاسته می شود و عملیاتهای معدنکاری آسیب کمتری بر محیط زیست خواهد داشت. مدل مقاومت ویژه ارایه شده از معدن باثورست (Bathurst) درکشور کانادا با استفاده از مدلسازی داده های فرکانس کوتاه به روش مگنتوتلوریک و تا عمق حدود ۱۴۰۰ متر انجام شده است.

واژه‌های کلیدی

مگنتوتلوریک، اکتشاف، منابع معدنی عمیق، الکترومغناطیس، معدنکاری

۱. مقدمه

کاربرد روش مگنتوتلوریک در اکتشافات مواد معدنی تاکنون موضوع تعداد زیادی مقاله و همایش علمی بوده است که این نوشتار به سبب انگیزه نویسندگان جهت مرور و ذکر برخی از نتایج حاصل از کاربرد موفق این روش در امکان شناسایی و اکتشاف ذخایر بزرگ معدنی بوده است[۱]. بیشتر کارهای دانشگاهی بر روی توسعه روش های مدل‌سازی، وارون سازی و پردازش داده‌ها جهت کاوش در اعماق زیاد بوده است. اما در صنعت بر روی توسعه سیستم دستگاه های برداشت داده، کالیبراسیون سیستم و طراحی سنسور جدید و توصیف سیستم‌های توسعه‌یافته برای اکتشاف بهتر با این روش فعالیتهای زیادی انجام شده است. تاریخچه نسبتا طولانی از مواردی که استفاده از روش های الکترومغناطیس (EM) برای کشف مستقیم ذخایر معدنی یا نقشه برداری از زمین شناسی، توسط شرکت های معدنی گزارش شده است [۲]. از سال ۲۰۰۸، سرعت توسعه سیستم های اکتشاف هوابرد نیز بسیار افزایش یافته است. زیرا روش های با چشمه طبیعی تنها قادر به تشخیص تباین رسانایی بسیار بزرگ هستند و آشکارساز خوبی برای ذخایر معدنی کوچک نیستند. در حال حاضر برای ذخایر بزرگ مقیاس معدنی با گسترش عمقی زیاد، روش مگنوتتلوریک (MT) جهت تعیین ساختار رسانایی با استفاده از ثبت سری زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌شود ([۳]؛ [۴]؛ [۵]).

چشمه فرستنده در روش مگنتوتلوریک از سیگنال‌هایی رعد و برق و یا سیگنال های فرکانس پایین تر ناشی از مگنتوسفر و جریان‌های یونسفری منشا می‌گیرند و این گستردگی چشمه باعث می شود که روش های مگنتوتلوریک (MT) به ویژه برای بررسی های عمقی مناسب باشند.

قابلیت پیجویی ذخایر معدنی نهشته تا عمق حدود ۲۰۰۰ متر و در موارد متعددی عملیات های صحرایی گزارش شده برای اکتشاف ذخایر مس، طلا، سرب، نقره و روی در مدل های هدایت الکتریکی محاسبه شده از داده های مگنتوتلوریک، لبه‌های بالایی زون‌های کانی‌سازی رسانا نیز به تصویر کشیده می‌شوند و با وضوح بسیار بیشتر از لبه های پایین تر بررسی کانی سازی عمیق تر احتمالی را آشکار می کند[۶].

این یک کاربرد شناخته شده از روش های الکترومغناطیس القایی وبه ویژه روش مگنتوتلوریک است که شناسایی اهداف و ساختارهای زمین شناسی فلزی و رسانا را پوشش می دهد اما مشکل اصلی برای وجود ساختار زمین‌شناسی در زیر رسوبات معدنی رسانا یا به طور کلی روباره رسانا در هنگام ثبت سیگنال های مگنتوتلوریک و راهیابی سیگنال به عمق زیاد است زیرا این ساختارهای رسانا سبب تضعیف شدید دامنه سیگنال ورودی می شوند و لذا تسلط در حذف این اثرات جانبی نقش تعیین کننده ای بر نتایج مدلسازی ها به این روش خواهند داشت [۷].

۲. تصویربرداری از اعماق زیاد به روش مگنتلوریک

روش های الکترومغناطیسی (EM) در دهه ۱۹۲۰ توسعه یافته اند و در ابتدا برای اکتشاف مواد معدنی به کار گرفته شده اند. در سال های اخیر نیز توسعه روش‌های اکتشافات مواد معدنی یک کاربرد صنعتی خاص از روش های الکترومغناطیسی بوده است.

تعیین هدایت الکتریکی زیرسطحی (معکوس مقاومت ویژه الکتریکی) با یک روش الکترومغناطیسی با منبع طبیعی که شامل اندازه گیری سطح تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی متعامد سیگنال های الکترومغناطیسی طبیعی است به روش مگنتوتلوریک قابل انجام است ([۸]; [۹]). با توجه به تباین رسانایی قوی در مرز هوا و زمین، میدان های الکترومغناطیسی القایی، بدون توجه به زاویه تابش، دچار شکست شده و به صورت عمودی در داخل زمین منتشر می شوند.

اساساً در داخل زمین در یک فاصله مشخص که عمق پوست نامیده می شود و در آن فاصله دامنه موج الکترومغناطیس فرودی به مقدار ۱/e مقدار اولیه دامنه خود می رسد را بیان می کند که از رابطه ۱ برآورد می شود:

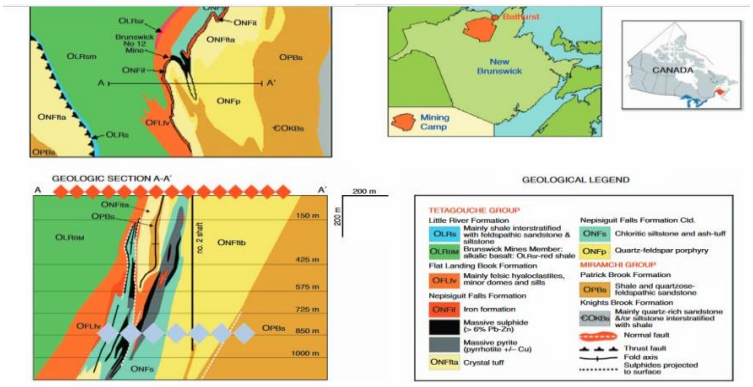
$$\text{depth Skin} = 100\sqrt{\rho}/f \quad \text{(عمق پوست)} \qquad (۱)$$

ρ مقاومت ویژه الکتریکی

f فرکانس سیگنال مگنتوتلوریک

۱.۲. مطالعه موردی: ذخایر عمیق سولفیدی معدن باثورست (Bathurst) درکشور کانادا

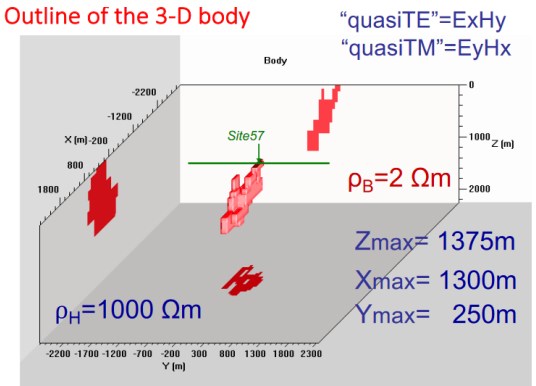
برای اثبات کارآمدی روش مگنتوتلوریک در اکتشاف منابع معدنی عمیق، نتایج حاصل از کاربرد موفقیت آمیز روش مگنتوتلوریک توسط خانم کوئیرالت و همکاران ایشان [۱] که بر مبنای پایگاه داده حاوی اطلاعات زمین شناسی و ژئوفیزیک از کمپ معدن باتورست (Bathurst) در کشور کانادا جهت مدل سازی تا اعماق حدود ۱۵۰۰ متر بوده است، در این مقاله آورده شده است. این معدن فلزی یکی از بزرگترین ذخایر عظیم نهشته های سولفیدی در منطقه باتورست کشور کانادا می باشد. در حال حاضر نتیجه بسیاری از مطالعات و مدل سازی پیشرو و معکوس دو بعدی و سه بعدی به روش مگنتوتلوریک در چند معدن فلزی منتشر شده است. در ادامه نمایش کاملی از مدل سه بعدی طراحی شده و نتایج مدلسازی دو بعدی در امتداد یک پروفیل انتخابی در محدوده مورد مطالعه ارائه شده است. شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و مقطع AA’ جهت مدلسازی دو بعدی ماده معدنی در امتداد آن و به صورت عمقی را نشان می دهد. مناطق با ساختار زمین شناسی مختلف و توزیع مقاومت ویژه متفاوت مربوط به سنگ های میزبان در مقطع عمقی در امتداد پروفیل ترسیم شده است.



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه و مقطع عمقی در جهت پروفیل AA’ جهت مدلسازی دوبعدی و سه بعدی پیشرو[۱۰].

۲.۲. پاسخ الکترومغناطیسی پیشرو مدل سه بعدی طراحی شده

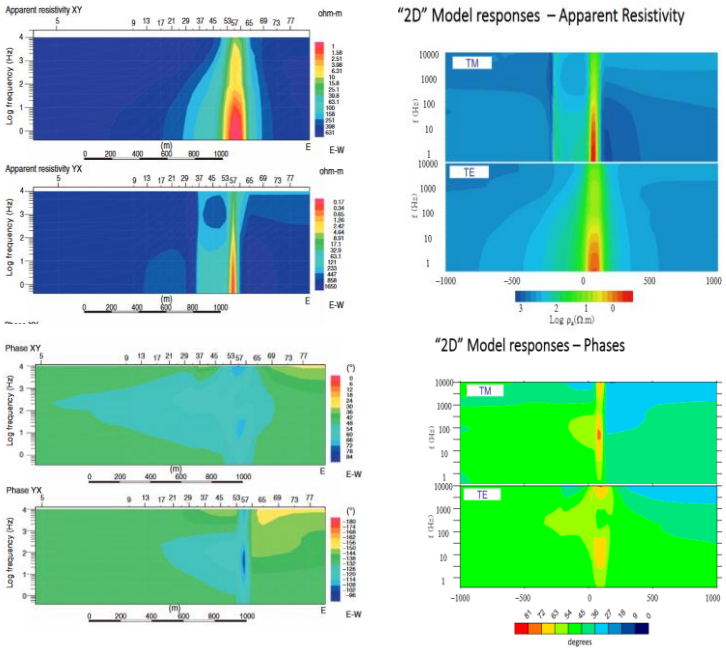
مقدار رسانایی الکتریکی محیط، عمق توده معدنی، ضخامت روباره در محل ایستگاه و محدودیت های محاسباتی مدل مصنوعی (شکل ۲) برای محاسبه پاسخ پیشرو در تعداد یازده فرکانس هدف بین ۱۰۰۰۰ تا ۰.۰۴ هرتز بوده که پاسخ مدل در آنها طبق محاسبه مشخصات مدلسازی جدول ۱ انجام شده است.



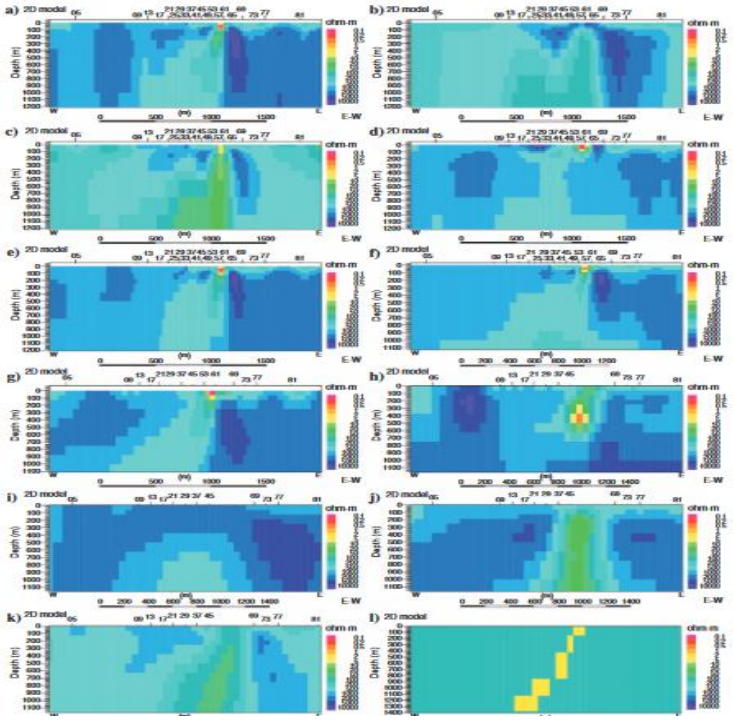
Model[3]	Sites and frequency band	Data inverted	Iterations	rms misfit
A	22 sites, spacing 50 m over the body All 11 frequencies (10,000–0.04 Hz)	All	66	4.85
B	As for model A	Phases only	28	1.2
C	As for model A	YX only	62	1.43
D	As for model A	XY only	19	9.56
E	Sites and spacing as for model A Frequencies above 10 Hz only	All	49	3.98
F	Sites and spacing as for model A Frequencies above 100 Hz only	All	53	2.85
G	16 sites, spacing 100 m over the body All frequencies	All	76	4.59
H	14 sites (excluding those over the body) All frequencies	All	86	3.76
I	As for model H	Phases only	9	0.99
J	As for model H	XY	29	5.64
K	As for model H	YX	67	1.09

شکل ۲. مدل سه بعدی طراحی شده و مورد استفاده در محاسبات پیشرو (سمت چپ) . جدول ۱ مربوط به سایر مشخصات مدلسازی های دوبعدی برای مدل A تا K در امتداد پروفیل AA’ (سمت راست) و مکان سایت ۵۷ نیز نشان داده شده است[۱].

ابعاد اصلی مدل عبارتند از: عمق تا قاعده، ۱۳۷۵ متر; زاویه شیب ۸۰ درجه؛ حداکثر عرض در جهت X ۱۳۰۰ متر و در جهت Y شرقی-غربی ۲۵۰ متر. نتایج مدل سازی دوبعدی (مدلهای A تا K) به همراه داده وپاسخ مدل ها در شکل ۳ نمایش داده شده است[۱۱].



شکل۳. (الف) داده و پاسخ مدل برای مدهای TE و TM مقاومت ویژه درامتداد پروفیل انتخابی 'AA (بالا) داده و پاسخ مدل برای مدهای TE و TM فاز مدل درامتداد پروفیل انتخابی 'AA (پایین)



شکل۳. (ب) مدلهای دو بعدی داده های مگنتوتلوریک تا عمق حدود ۱۴۰۰ متر در امتداد پروفیل انتخابی 'AA .
شرایط مدلسازی های مختلف (مدلهای A تا K) بر اساس جدول۱ و برای ترکیب مدهای TE و TM [۱].

وارون سازی دوبعدی بر روی ترکیب داده‌های مد TE و TM انجام شده است. داده های فاز و مقاومت ویژه با استفاده از فرکانس های مختلف ذکر شده در جدول ۱ استفاده شده است. تمام مدل های دو بعدی (مدلهای A تا K) به صورت جداگانه در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. مدل های ارائه شده در اینجا حاصل معکوس سازی دو بعدی داده های با ماهیت سه بعدی و در امتداد پروفیل انتخابی است که از سایت ۵۷ عبور می کند. همخوانی پاسخ های مدل ۳ بعدی مصنوعی طراحی شده با داده های واقعی و مجموعه پاسخ های مدل سازی دو بعدی دارای یک میزان قابل قبول از خطای عدم برازش(rms) می باشد که متناسب با قید های آماری با مجموع خطاهای ۲۰٪ در مقاومت ویژه ظاهری و ۲.۸ درجه در میزان فاز امپدانس بوده است[۱].

۳. نتیجه گیری

این مقاله به بیان کارایی روش مگنتوتلوریک برای مدلسازی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در اعماق زیاد برای ذخیره معدنی باتورست (Bathurst) در کشور کانادا می پردازد که در مقالات و گزارش های موجود به عنوان یک مثال عملی در انجام موفق اکتشاف کانسارهای فلزی عمقی می باشد. نتایج ارایه شده زمینه را برای استفاده از روش مگنتوتلوریک به عنوان یک روش کارآمد در این نوع کاوش های عمیق فراهم می‌کند. تهیه نقشه توزیع هدایت الکتریکی از اعماق زیاد و شناسایی اهداف معدنی عمیق به روش مگنتوتلوریک ممکن است در نگاه نخست از نظر لجستیکی یا هزینه تامین دستگاهی اولیه تا حد زیادی قابل دفاع نباشد اما تهیه ملزومات انجام صحیح این روش می تواند جایگزین هزینه های سنگین حفاری های اکتشافی فعلی انجام شده در اعماق باشد. لذا پیشنهاد برنامه ریزی جهت استفاده از این روش در اکتشاف منابع معدنی عمیق می تواند فواید بسیاری از جمله توسعه معدنکاری زیر زمینی و کاستن از اثرات زیست محیطی ناشی از تعدد معادن سطحی باشد. دستیابی به توده های عظیم ذخایرمعدنی دررده های جهانی مشابه معدن مس سرچشمه و سنگ آهن سنگان خواف می تواند منجر به افزایش درآمد سرانه ملی در حوزه معدن نیز گردد. در ارایه نتایج این مطالعه موردی به مدل سازی یک توده سولفیدی رسانای مدفون حاوی انواع مواد معدنی تا اعماق حدود ۱۴۰۰ متر پرداخته شد و لذا قرار گرفتن روش مگنتوتلوریک به عنوان یک روش پیشنهادی کارآمد در زنجیره اکتشاف مواد معدنی برای فعالان حوزه اکتشاف معدن، نیازمند اجرای عملی این روش و انتشار نتایج آن جهت نهادینه شدن آن در آینده می باشد.

منابع

[1] Queralt, P., Jones, A., and Ledo, J., 2007. Electromagnetic imaging of a complex ore body: 3D forward modeling, sensitivity tests, and down-mine measurements, GEOPHYSICS, VOL. 72, NO. 2; P. F85–F95

[2] Zhang, P., A. King, and D. Watts, 1998. Using magnetotellurics for mineral exploration: 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 776–779.

[3] Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method, In: Nabighian, chap 8, pp 641–711

[4] Berdichevsky MN., Dmitriev VI., 2008. Models and methods of magnetotellurics. Springer, Berlin

[5] Chave AD., Jones AG., 2012. The Magnetotelluric method: theory and practice. Cambridge University Press, Cambridge

[6] Bedrosian PA., 2007. MT+, integrating magnetotellurics to determine Earth structure, physical state, and processes. Survey in Geophysics 28(2):121–167

[7] Jones AG.,1999. Imaging the continental upper mantle using electromagnetic methods. Lithos (48)57–80

[8] Tikhonov AN.,1950. On the determination of the electric characteristics of deep layers of the Earth's crust. Dokl Akad Nauk SSSR 73:295–297

[9] Cagniard L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. Geophysics 18:605–635

[10] Thomas, M. D., J. A. Walker, P. Keating, R. Shives, F. Kiss, and W. D. Good fellow, 2000, Geophysical atlas of massive sulphide signatures, Bathurst Mining Camp, New Brunswick, CD-ROM version: Geological Survey of Canada Open File D3887.

[11] Mackie, R. L., J. T. Smith, and T. R. Madden, 1994, Three-dimensional electromagnetic modeling using finite differences equations: The magnetotelluric example, Radio Science, 29, 923–935.