

بررسی اثرات توپوگرافی در برداشت‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری حوزه فرکانس

حسینعلی قاری^۱، بهروز اسکویی^۲ و مهرداد باستانی^۳

^۱دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، h.a.ghari@ut.ac.ir

^۲دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، boskooi@ut.ac.ir

^۳دانشیار، سازمان زمین شناسی سوئد، افسالا، سوئد، mehrdad.bastani@sgu.se

چکیده

بسیاری از برداشت‌های الکترومغناطیس هلی کوپتری حوزه فرکانس در مناطق کوهستانی انجام می‌شود. بنابراین بررسی اثر تغییرات توپوگرافی سطحی بر روی پاسخ الکترومغناطیس و نتایج معکوس‌سازی امری لازم محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر، توپوگرافی با استفاده از روش المان محدود دو و نیم‌بعدی شبیه‌سازی و سپس معکوس‌سازی شده است. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تپه، ناهنجاری با مقاومت ویژه الکتریکی بالا تولید می‌کند، اما پای تپه، جایی که شیب تغییر می‌کند، منجر به ناهنجاری با مقاومت ویژه پایین می‌شود؛ برعکس، نوعی ناهنجاری با مقاومت ویژه کم پاسخ طبیعی است که از داده‌ها بر روی دره حاصل می‌شود. همچنین، اطراف دره‌ها باعث انحراف مقاومت ویژه به سمت مقادیر بالا می‌شود. بنابراین، اعمال توپوگرافی در روند مدل‌سازی و معکوس‌سازی این نوع داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در نهایت با استفاده از مدل مصنوعی دارای توپوگرافی سطحی، اثربخشی رویکرد پیشنهادی برای ارزیابی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی از طریق داده‌های الکترومغناطیس اثبات شده است.

واژه‌های کلیدی: الکترومغناطیس هلی کوپتری حوزه فرکانس، اثرات توپوگرافی، روش المان محدود دو و نیم بعدی، ساختار مقاومت ویژه دو بعدی.

Evaluation of topographic effects in frequency-domain helicopter-borne electromagnetics surveys

Hossein Ali Ghari¹, Behrooz Oskooi² and Mehrdad Bastani³

¹Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran (h.a.ghari@ut.ac.ir)

²Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran (boskooi@ut.ac.ir)

³Geological Survey of Sweden, Uppsala, Sweden (mehrdad.bastani@sgu.se)

Abstract

Since the responses in frequency-domain helicopter-borne electromagnetic (FDHEM) are affected by topographic variations, especially in mountainous terrains, few number of improvements have taken into account certain surface elevation variations along the survey to damp EM response perturbations caused by the surface geometry. We simulate the response to topography using a 2.5-D finite element method. Modelling illustrates a hill produces a high-resistivity anomaly, while the foot where the slope inclination in the hill changes leads to a low-resistivity anomaly; conversely, it seems that low-resistivity anomaly is a natural response that is elicited from the data are obtained over the valley. Moreover, valley sides causes high-resistivity anomaly. It is therefore necessary to include topography in the modelling and inversion procedure to recover resistivity model with true surface features of earth. The example of a topographical field FDHEM data inversion shows the efficacy of the presented approach to appraise the subsurface resistivity structure.

Keywords: Frequency-domain helicopter-borne electromagnetic, topography effects, 2.5-D finite element method, 2-D resistivity structure.

۱ مقدمه

برداشت الکترومغناطیسی هلی کوپتر حوزه فرکانس به عنوان یکی از روش‌های اکتشافات ژئوفیزیکی مهم در زمینه‌های پی جویی مواد معدنی، اکتشاف منابع آب زیرزمینی، پایش محیط زیست و غیره به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که برداشت‌ها اغلب در مناطق کوهستانی با ناهمواری‌های بزرگ انجام می‌شود، که می‌تواند باعث تاثیر شدیدی بر پاسخ

الکترومغناطیس هوابرد شود، نادیده گرفتن هندسه سطح زمین ممکن است به اشتباهات قابل توجهی در تفسیر داده‌های FDHEM می‌انجامد. به ویژه در کاربردهای ژئوتکنیکی FDHEM که تباین مقاومت ویژه بین واحدهای زمین‌شناسی همیشه بالا نیست، در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی در تفسیر ضروری‌تر به نظر می‌رسد (ساساکی و ناکازاتو، ۲۰۰۳). لیو و بکر در سال ۱۹۹۲ با روش المان مرزی، اثر توپوگرافی بر الکترومغناطیسی هوابرد حوزه فرکانس را شبیه‌سازی کردند. ساساکی و ناکازاتو در ۲۰۰۳، از طریق محاسبات تفاضل محدود در سه بعد تأثیر توپوگرافی را بر روی نتایج داده‌های مشاهده شده‌ای اعمال کردند.

در پژوهش حاضر، ابتدا یک روش المان محدود 2.5-D (FEM) توصیف می‌شود که قادر به شبیه‌سازی هندسه زمین 2-D دارای توپوگرافی است. سپس نشان داده می‌شود که چگونه توپوگرافی بر تفسیر داده‌های FDHEM اثر می‌گذارد. در نهایت، یک روش معکوس‌سازی 2.5-D ارائه می‌شود که شامل برنامه مدل‌سازی پیشرو FEM است که توپوگرافی دقیقاً وارد فرایند مدل‌سازی می‌شود.

۲ روش تحقیق

مدل‌سازی پیشرو

مدل‌سازی پیشروی که در فرایند معکوس‌سازی این پژوهش، استفاده می‌شود، حل معادلات ماکسول برای میدان ثانویه از طریق روش المان محدود 2.5-D در حوزه فرکانس است. با فرض این که مدل در جهت y همگن است، این سیستم معادله در 2.5-D با پیروی از روش میتسوهاتا و همکاران (۲۰۰۲) حل شده است. برای به دست آوردن نتایج دقیق، حدود ۳۰ عدد موج باید نمونه‌برداری شوند. میدان اولیه در حوزه مکان محاسبه می‌شود و سپس از طریق تبدیل فوریه وارد حوزه عدد موج می‌شود. در اینجا یک الگوریتم مش‌بندی مثلثی مبتنی بر روش Ruppert's Delauney توسعه یافته است که چگالی مش را به عنوان تابع عمق پوستی کنترل می‌کند، از این‌رو، چگالی مش تابع فرکانس و مقاومت ویژه است. در این مقاله، برای جلوگیری از اثرات مرزی باید دامنه مرزی تا حدود ۱۰ کیلومتر اضافه شود. برای مطالعه بیشتر می‌توان به مقاله اسکویی و همکاران (۱۳۹۶) مراجعه کرد.

طرح شبکه‌بندی سازگار برای مدل توپوگرافی

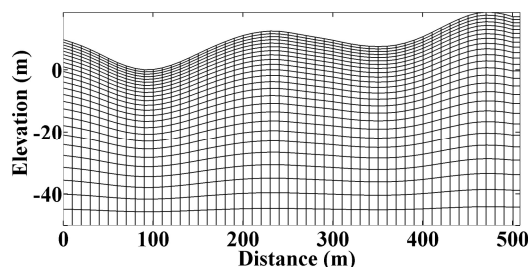
برای معکوس‌سازی 2.5-D فضای زیر زمین شبکه‌بندی می‌شود که مقاومت ویژه در هر سلول از این شبکه ثابت است. از این رو برای تفسیر دقیق، همان‌طور که در شکل (۱) مشخص شده است، در این مقاله نوعی گسسته‌سازی مستطیلی انجام شده است که گره‌ها در زیرسطح زمین به صورت قائم‌طوری جابه‌جا می‌شوند که از توپوگرافی سطح زمین تبعیت کنند. بنابراین با افزایش عمق میزان جابه‌جایی این گره‌ها از حالت افقی کاهش می‌یابد به طوری که در عمق کافی بزرگ گره‌ها اصلاً جابه‌جا نمی‌شوند. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثر توپوگرافی با عمق میرا شده است. حال، به‌منظور جبران اتلاف رزلوشن داده‌ها، که از خاصیت میرایی موج EM می‌آید، ضخامت هر سلول با عمق افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی توپوگرافی و مشاهده اثر آن

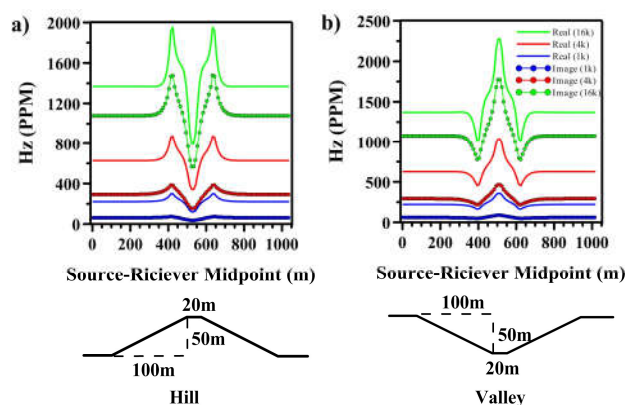
در این قسمت تأثیر توپوگرافی در پاسخ FDHEM، بر اساس مدل‌های توپوگرافی موجود در پایین شکل (۲) مطالعه می‌شود. این مدل شامل نیم‌فضای همگن با سطح توپوگرافی و مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم-متر می‌باشد. توپوگرافی در مدل‌ها شامل یک تپه و یک دره می‌شود که با زاویه ۲۶.۶ درجه شیب‌دار شده است. بالای شکل (۲) پاسخ‌های FDHEM مدل‌ها برای پیچه با پیکربندی هم‌صفحه افقی در فرکانس‌های ۱، ۴، و ۱۶ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. نقاط با ارتفاع پرواز ۳۰ متر بالاتر از سطح زمین و فاصله ۱۰ متر از منبع برداشت شده‌اند. توپوگرافی در بالا و پای تپه و دره اثرات قابل توجهی دارد و با افزایش فرکانس، تشدید می‌گردد. در شکل (۲) افزایش مقادیر میدان مغناطیسی بر اساس PPM نشان از کاهش مقاومت ویژه الکتریکی دارد و کاهش مقادیر میدان دلالت بر افزایش مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی می‌دهد.

به‌منظور مشاهده بهتر تأثیرگذاری توپوگرافی، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در شکل (۳) محاسبه شده‌اند. این مدل‌سازی اثبات می‌کند که تپه ناهنجاری با مقاومت ویژه بالا تولید می‌کند، در حالیکه پای تپه، جایی که شیب تغییر می‌کند، منجر به

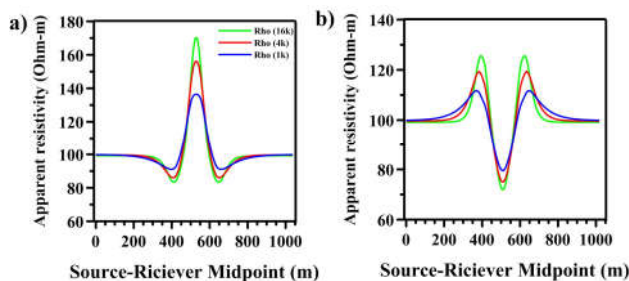
ناهنجاری با مقاومت ویژه پایین می‌شود؛ برعکس، به‌نظر می‌رسد که نوعی ناهنجاری با مقاومت ویژه کم پاسخی است که از داده‌های بر روی دره حاصل می‌شود. اطراف دره نیز باعث انحراف مقاومت ویژه به سمت مقادیر بالا می‌شود.



شکل ۱. شماتیک مدل شبکه‌بندی شده با توپوگرافی به صورت مستطیل. در شبکه‌های موجود در مدل، برای مطابقت با توپوگرافی واقعی، دچار تحریف شده‌اند که میزان جابه‌جایی گره‌های زیر سطح موجود در آنها به تدریج با عمق کاهش می‌یابد.



شکل ۲. (a) پاسخ FDHEM حاصل از یک تپه و (b) دره موجود در پایین شکل.



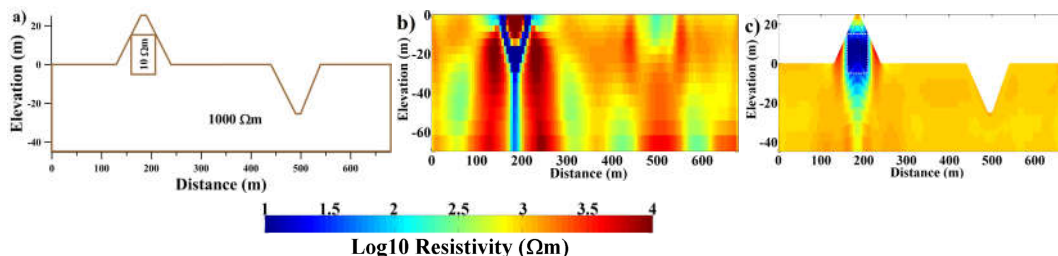
شکل ۳. پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری مربوط به پاسخ میدان مغناطیسی در شکل (۲) است.

مدل‌سازی معکوس:

با اعمال کد پیشرو المان محدود 2.5-D، که قادر هست هر توپوگرافی دلخواهی را مدل کند، در مسئله معکوس‌سازی می‌توان پاسخ‌های FDHEM حاصل از زمینی با توپوگرافی شدید را به درستی تفسیر کرد. در این تحقیق، روش معکوس‌سازی رویکرد کمترین مربعات خطای لونبرگ-مارکوآرت منظم‌سازی شده را دنبال می‌کند (اکن و کریستینسن، ۲۰۰۴). برای مطالعه بیشتر می‌توان به مقاله اسکویی و همکاران (۱۳۹۶) مراجعه کرد.

این روش معکوس‌سازی 2.5-D بر روی داده‌های تولید شده از مدل موجود شکل (۴-ا) ارزیابی شده است. فرکانس‌های مورد استفاده ۱، ۲.۷، ۷.۴ و ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد. این پاسخ‌های میدان مغناطیسی برای سیستم هم‌محور قائم با ارتفاع ۲۰ متر و فاصله لوپ ۸ متر محاسبه شده‌اند، البته با افزودن نویز تصادفی گوسین با انحراف استاندارد ۵ درصد مقدار داده‌ها. مقاومت

ویژه برای شروع فرایند معکوس سازی ۱۰۰ اهم-متر است. نتیجه‌ی این معکوس سازی با فرض یک زمین مسطح در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، مصنوعات ناشی از اثرات توپوگرافی شناسایی دقیق موقعیت و مقدار مقاومت ویژه هدف رسانا را دشوار می‌سازد. معکوس سازی پاسخها با اعمال مدل زمین واقعی به همراه توپوگرافی جسم رسانا را نسبتاً دقیق بازایی می‌کند و کمتر تحت تاثیر مصنوعات حاصل از اثرات توپوگرافی قرار گرفته است (شکل ۴-ج).



شکل ۴. (a) مدلی که برای تولید پاسخهای مصنوعی FDHEM جهت نشان دادن اثر توپوگرافی استفاده می‌شود، (b) مقطع مقاومت ویژه حاصل از معکوس سازی 2.5-D با فرض یک زمین مسطح، (c) مقطع مقاومت ویژه حاصل از معکوس سازی 2.5-D برای مدل زمین دارای توپوگرافی.

۳ نتیجه‌گیری

نتایج مدل سازی نشان داده است که اثرات توپوگرافی می‌تواند پاسخ FDHEM را تحت تاثیر قرار دهد و در واقع تفسیر ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی را پیچیده تر کند. همچنین اثبات شده است که فرایند معکوس سازی از طریق مدل-های زمین مسطح اثرات ساختار مقاومت ویژه واقعی را در توپوگرافی‌های شدید به اندازه کافی دقیق نشان نمی‌دهند. در اینجا یک روش معکوس سازی 2.5-D پیشنهاد و اجرا شده است که قادر به برآورد نسبتاً دقیق مدل مقاومت ویژه الکتریکی شامل توپوگرافی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از گروه Geosurvey موسسه تحقیقاتی NGI نروژ به خاطر در اختیار گذاشتن کد ngi25em تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

اسکویی، ب، قاری، ح.ع، باستانی، م، ۱۳۹۶، برآورد ساختار رسانایی زمین از طریق معکوس سازی دو و نیم‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس: سی و ششمین گردهمایی و سومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران، ایران.

Auken, E. & Christiansen, A.V., 2004, Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data: *Geophysics*, **69**, 752-761.

Liu, G. and Becker, A., 1990, Two-dimensional mapping of sea-ice keels with airborne electromagnetics: *Geophysics*, **55**, 239-248.

Mitsuhashi, Y., Uchida, T. and Amano, H., 2002, 2.5-D inversion of frequency-domain electromagnetic data generated by a grounded-wire source: *Geophysics*, **67**, 1753-1768 .

Sasaki, Y. and Nakazato, H., 2003, Topographic effects in frequency-domain helicopter-borne electromagnetics: *Exploration Geophysics*, **34**, 24-28.