



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دوره اول، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۵۳ تا ۶۴

Vol. 1, No. 1, autumn 2016, pp. 53-64



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

مدلسازی معکوس سه بعدی داده‌های میکروگرانی به منظور شناسایی حفریات معدنی

فرزاد غلامیان^{۱*}، حمید آقاجانی^۲، محمود میرزایی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (گرانی سنجی)، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک

(دریافت ۱۳۹۴/۰۴/۰۶، پذیرش ۱۳۹۴/۰۶/۱۴)

چکیده

یکی از موثرترین روش‌های شناسایی ساختارهای زیرسطحی مانند تونل، گسل خوردگی، نهشته‌های معدنی با اختلاف چگالی مناسب، به ویژه در مناطقی با توپوگرافی خشن و تکتونیک شدید، روش گرانی‌سنجی است. ارایه یک مدل مناسب برای تفسیر بهتر آنومالی پس از انجام و پردازش داده‌های گرانی، بسیار سودمند است. مدلسازی معکوس یکی از کارآمدترین روش‌های تفسیری داده‌های میدان پتانسیل است و در این راستا روش‌های متعددی ارایه شده است. در این مقاله از روش معکوس‌سازی سه بعدی کاماچو برای مدلسازی داده‌های میدان گرانی در یک محدوده معدنی استفاده شده است. محدوده مورد مطالعه شامل یک تونل معدنی برای دسترسی به زغال سنگ و یک تونل دنباله‌رو است که داخل لایه زغالی حفر شده است. نتایج حاصل از مدلسازی، عمق و راستای تونل‌های معدنی، حفاری‌های سطحی و لایه زغال دار را تا حد قابل قبولی نشان می‌دهد که با مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرائی مطابقت خوبی دارد.

کلمات کلیدی

گرانی‌سنجی، مدلسازی معکوس، معدن زغال سنگ، حفریات معدنی، ده‌ملا-شاهرود.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: fgholamian@gmail.com

۱- مقدمه

ساختارهای زیرسطحی مانند حفرات کارستی درون سنگ‌های کربناته، تونل‌های معدنی و راه، رگه‌ها و نهشته‌های معدنی با اختلاف چگالی مناسب، حفرات و اتاقک‌های باستان‌شناسی از جمله مواردی هستند که مورد توجه پژوهشگران حوزه معدن و علوم زمین قرار دارد. شناسایی و تعیین موقعیت چنین ساختارهایی بدون استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی بسیار سخت و پرهزینه است. به همین منظور، در ابتدای فعالیت‌های اکتشافی از روش‌های ژئوفیزیکی برای شناسایی اینگونه ساختارها می‌توان بهره برد. یکی از مناسب‌ترین روش‌های تعیین چنین پدیده‌هایی، به ویژه در مناطقی با توپوگرافی ناهموار و سخت، استفاده از روش گرانی‌سنجی است [۱،۲]. فچکلویز [۳] از داده‌های گرانی‌سنجی در مناطق معدنی و شهری برای تعیین حفره‌های زیرسطحی استفاده کرد که نتایج حاصله، نقش بسیار مهمی در این حیطه دارد. باتلر [۲] با استفاده از روش گرانی‌سنجی توانست در حوزه مهندسی، حفرات زیرسطحی را شناسایی کند. کاستن و همکاران [۴] از داده‌های گرانی برای شناسایی نهشته‌های زغال‌دار و لایه زغال‌سنگ در عمق ۱۰۳۰ و ۱۰۹۰ متری استفاده کردند. گرنتر و همکاران [۵] با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری کم عمق، لایه‌های زغال‌سنگ را با دقت خوبی تعیین کردند. اردستانی [۶،۷] توانست زون‌های کارستی یک منطقه کوهستانی در شمال شرقی ایران را به منظور ساختن سد و همچنین حفره‌های زیرسطحی اطراف سد کارون را با دقت بالایی به کمک داده‌های میکروگرانی‌شناسایی و مدلسازی کند. اردستانی [۸] از داده‌های میکروگرانی برای شناسایی ماده معدنی منگنز استفاده کرد و توانست تا حد بسیار مطلوبی آن را مدلسازی و تعیین ذخیره کند.

هدف عمده اکثر مطالعات گرانی‌سنجی، شناسایی ساختارها، حدود گسترش سطحی و عمقی به ویژه در کارهای اکتشافی است. در این راستا پس از برداشت، تصحیح و پردازش و حذف اثرات آنومالی ناحیه‌ای، مقدار آنومالی باقیمانده به دست می‌آید که برای تفسیر این داده‌ها از مدلسازی مستقیم و معکوس استفاده می‌شود. بنابراین تعیین پارامترهای هندسی ساختار مربوطه، از مهمترین اهداف در مدلسازی است. مدلسازی به فرآیند شبیه‌سازی آنومالی مشاهده‌ای به وسیله یک آنومالی محاسبه‌ای با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی از یک مدل فرضی در زیرزمین و

تخمین پارامترهای هندسی و فیزیکی آن آنومالی اطلاق می‌شود [۹]. در روش مستقیم یک مدل اولیه بر طبق اطلاعات زمین‌شناسی و یا ژئوفیزیکی تهیه می‌شود. سپس مقدار گرانی این مدل محاسبه و با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف حاصل از برآزش داده‌های مدل و مشاهده‌ای ناچیز باشد، مدل انتخابی به عنوان منشا تولید آنومالی انتخاب می‌شود. در غیر این صورت با تغییر پارامترهای هندسی و یا فیزیکی مدل، سعی می‌شود تا برآزش بهتر و مناسب‌تر به دست آید. در روش معکوس، با استفاده از داده‌های مربوط به آنومالی مشاهده‌ای و یک مدل اولیه و بر اساس اصول منطقی پذیرفته شده، به تخمین پارامترهای مدل پرداخته می‌شود [۱۰].

برای حل مسایل معکوس، دو رویکرد خطی و غیرخطی وجود دارد که با توجه به آنومالی مورد نظر قابل استفاده‌اند. در روش معکوس‌سازی خطی، آن‌دسته از پارامترهای مدل که دارای رابطه خطی با پارامترهای داده‌ها هستند در معادلات مربوطه حل می‌شوند. در رویکرد غیرخطی، رابطه بین پارامترهای مدل با پارامترهای داده‌ها غیرخطی است که در ابتدا با روش‌های خطی‌سازی (به عنوان مثال بسط تیلور) به معادلات خطی تبدیل شده و سپس مساله معکوس‌سازی حل می‌شود و یا اینکه از روش‌های بهینه‌سازی فراگیر استفاده می‌شود [۱۰].

تکنیک‌های گوناگونی برای انجام محاسبات مدلسازی معکوس توسط پژوهشگران ارایه شده است که هر کدام با استفاده از یک الگوی عددی خاص، فرآیند معکوس‌سازی را انجام می‌دهند. لی و اولدنبگ [۱۱] با تقسیم سطح زیرزمین به بلوک‌های راست گوشه و با چگالی ثابت مدلسازی را انجام دادند. گومز و همکاران [۱۲] با استفاده از الگوریتم پارکر و اولدنبگ که مبنای روش آن‌ها تعیین چگالی بلوک‌ها بود، به صورت رابط گرافیکی در محیط متلب مدلسازی خطی را انجام دادند. الیویرا و همکاران [۱۳] با مقید سازی چگالی و عمق بالای مدل و استفاده از منحنی جرم آنومال تخمین‌زده شده نهایی در مقابل داده‌های غیر متجانس با محیط، عمق پایین آنومالی را به خوبی تخمین زدند و مدل نهایی را ارایه دادند. ژادانو و کوکس [۱۴] با ارایه روش معکوس‌سازی مولتی‌تری توانستند تونل زیرسطحی را که دارای اختلاف چگالی با محیط اطراف خود بود، مدلسازی کنند.

شمسی‌پور و همکاران [۱۵] یک روش معکوس‌سازی برای داده‌های میدان پتانسیل ارایه دادند و توانستند به وسیله

مانده v_i از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\Delta g_i = \sum_{j \in J^+} a_{ij} \Delta \rho_j^+ + \sum_{j \in J^-} a_{ij} \Delta \rho_j^- + \delta g_{reg} + \delta g_{top} + v_i, \quad (1)$$

$i = 1, \dots, n,$

که در آن a_{ij} جاذبه گرانی قائم سلول متوازی‌السطوح پایه انتخاب شده زام ($j = 1, \dots, m,$) با چگالی واحد در ایستگاه مشاهده‌ای نام طبق رابطه (۲۱)؛ $\Delta \rho_0^+$ ، $\Delta \rho_0^-$ اختلاف-های چگالی تعیین شده برای سلول زام؛ J^+ ، J^- شاخص‌هایی برای پر کردن سلول‌ها با اختلاف‌های چگالی مثبت و منفی که هندسه توده آنومالی را با یک رابطه غیرخطی بیان می‌کند.

$$a_{ij} = -G \begin{bmatrix} x \ln(y + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}) \\ + y \ln(x + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}) \\ + z \arctan(z(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} x^{-1} y^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2^j - x_i \\ v_2^j - y_i \\ w_2^j - z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^j - x_i \\ v_1^j - y_i \\ w_1^j - z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta g_{reg} = g_0 + g_x(x_i - x_M) + g_y(y_i - y_M) \quad (3)$$

$i = 1, \dots, n,$

$$\delta g_{top} = \delta \rho_T C_i. \quad (4)$$

δg_{reg} رابطه ۳، δg_{top} رابطه ۴ عبارت‌های اختیاری

برای اصلاح داده‌ها (روند منطقه‌ای خطی و تصحیح توپوگرافی اضافی) می‌باشند که در آن:

G ثابت گرانش جهانی؛

x_i ، y_i و z_i مختصات فضایی سطوح سلول زام موازی با بردارهای پایه؛

u_1^j ، u_2^j محدوده مختصات x؛

v_1^j ، v_2^j محدوده مختصات y؛

w_1^j ، w_2^j محدوده مختصات z؛

g_0 ، g_x و g_y پارامترهای روند منطقه‌ای گرانی؛

x_M و y_M مختصات متوسط گیری شده؛

C_i ضریب متداول برای تصحیح توپوگرافی؛

$\delta \rho_T$ مقدار اضافی اختیاری نسبت به چگالی توپوگرافی

اولیه [۱۸].

دو مشکل اساسی که در روش‌های مدلسازی معکوس

آن نهشته معدنی سولفید در کانادا را مدلسازی کنند.

در این مقاله از روش معکوس‌سازی خطی کاماچو و همکاران [۱۶] و بسته کد Growth2.0 در محیط Fortran برای مدلسازی تونل لایه زغالی محدوده معدنی زغال‌سنگ در منطقه معدنی ده‌ملا در شاهرود و نیز سوله نیم‌استوانه زیرسطحی منطقه نوادا امریکا برای تعیین پارامترهای توده آنومال استفاده شده است.

۲- روش معکوس‌سازی

در روش کاماچو سطح زیرزمین به M سلول متوازی-السطوح تقسیم‌بندی می‌شود. به هر کدام از این سلول‌ها طی فرآیند "رشد" و با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده، یک مقدار چگالی تخصیص می‌یابد. در این روش، شبکه برداشت داده‌های مشاهده‌ای ممکن است یک شبکه منظم و یا نامنظم باشد. همچنین اختلافات چگالی مثبت و منفی و یک مقدار روند منطقه‌ای به طور همزمان در فرآیند رشد به دست می‌آیند که از مزایای استفاده از این روش است. در این روش از ماتریس ژاکوبین و معکوس‌سازی ماتریس‌ها استفاده نمی‌شود. اطلاعات پایه‌ای و اساسی این روش توسط کاماچو و همکاران [۱۷، ۱۸] ارایه و توسط افرادی مانند گاتسمن [۱۹] توسعه داده شده است. کاماچو و همکاران [۱۶] حالت انتخاب دستی و یا خودکار پارامترهای اصلی این روش را تعریف و روابط آن را بهبود بخشیدند که در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شود.

در این روش تعداد n داده گرانی در یک شبکه نامنظم (یا منظم) منظور می‌شود که (x_i, y_i, z_i) و $i=1, \dots, n$ مختصات سطحی (مختصات UTM) و P_i ارتفاع‌های ایستگاه‌های گرانی و Δg_i داده‌های گرانی مربوطه است. عدم قطعیت گوسی داده‌ها با استفاده از ماتریس کواریانس Q_D [۲۰] جایی که عناصر $q_{ij} = 0$ برای $i \neq j$ و $q_{ii} = e_i^2$ برای $i=1, \dots, n$ به عنوان انحراف استاندارد مقادیر گرانی، تعیین می‌شود. برای انجام مدل‌سازی، فضای زیرسطحی موجود در یک محدوده به m شبکه سلولی سه-بعدی تقسیم می‌شود که با اختلاف‌های چگالی $\Delta \rho_0^+$ و $\Delta \rho_0^-$ (مقادیر یکتا برای مدل نهایی و یا مقادیر محلی بر طبق یک معیار خاص) در طول مدلسازی تکمیل می‌شوند.

رابطه وابسته به داده‌های اندازه‌گیری شده (Δg_i) در n ایستگاه (x_i, y_i, z_i) با پارامترهای مدلسازی و مقادیر باقی-

فضای مدل، امکان بررسی رشد سلول به سلول برای گسترش مدل آنومال مدنظر قرار می‌گیرد. در نتیجه در هر مرحله سلول‌های خالی طبق یک روش معین با اختلاف چگالی از قبل تعیین شده، بررسی می‌شوند. شرط برازش مناسب در هر مرحله به وسیله فاکتور مقیاس (شرایط مدل تکمیل نشده را برای رسیدن به یک مقدار گرانی مناسب و مدل کامل مورد بررسی قرار می‌دهد) بررسی تا سلول مناسب انتخاب شود.

برای مثال، در مرحله $(k+1)$ ام فرآیند رشد، تعداد k سلول با اختلاف چگالی مثبت و منفی محاسبه شده و تکمیل می‌شوند. مقادیر گرانی حاصل از مدلسازی با رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$\Delta g_i^c = \Delta g_i^0 + \sum_{j_k^+} A_{ij} \Delta \rho_j^+ + \sum_{j_k^-} A_{ij} \Delta \rho_j^-, \quad (6)$$

که در آن J_k^+ ، J_k^- مجموعه عبارت وابسته به سلول‌های اصلاح شده قبلی است. سپس فرآیند در میان k - m سلول باقی‌مانده به جستجو برای پر کردن یک منشور جدید و متراکم‌سازی مدل می‌پردازد. به این منظور برای هر سلول خالی ژام و J_k^+ ، J_k^- ، رابطه ۷ در نظر گرفته می‌شود:

$$\Delta g_i - (\Delta g_i^c + A_{ij} \Delta \rho_j) f - \delta g_{reg} - \delta g_{top} = v_i \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

که در آن $\Delta \rho_j$ شامل مقادیر $\Delta \rho_0^+$ ، $\Delta \rho_0^-$ ؛ $f \geq 1$ ضریب مقیاس برای برازش آنومالی‌های مدلسازی شده $(\Delta g_i^c + A_{ij} \Delta \rho_j)$ با آنومالی‌های مشاهده‌ای است. مقادیر تعیین شده مثبت و منفی برای رسیدن به یک شرایط کمینه مناسب، طبق معادله (و با اضافه شدن فاکتور مقیاس f به آن، برای تخمین اختلاف چگالی اضافی $\Delta \rho_j$ پیاپی بررسی می‌شوند. پارامترهای ناشناخته f ، g_0 ، g_x ، g_y و δp_T در معادلات (، و (برای یک معیار کمینه‌سازی مرکب مطابق با مرحله $(k+1)$ ام طبق رابطه ۸ تنظیم می‌شوند:

$$v^T Q_D^{-1} v + \lambda f^2 m^T Q_M^{-1} m = \min, \quad (8)$$

که در آن بردار جواب m شامل سلول‌های تکمیل شده ما قبل و مقدار چگالی $\Delta \rho_j$ است که مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۴]. برای محاسبه مقادیر باقی‌مانده v_i که وابسته به عبارت‌های انتخاب شده $\Delta \rho_j$ هستند، بار دیگر معادله قبل

وجود دارد، عدم یکتایی جواب و درجه آزادی سیستم غیرخطی داده‌ها است. مساله اول به دلیل وجود مدل‌های مختلفی است که ممکن است برازش خوبی با داده‌های واقعی داشته باشند [۲۲] که برای حل این مشکل می‌توان از اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و همچنین از تکنیک‌های آماری برای بهبود داده‌های واقعی کم‌دقت استفاده کرد. در اینجا از روش معکوس‌سازی کمترین مربعات که به عنوان ترکیبی از داده‌های قابل مشاهده با عدم قطعیت گوسی و اطلاعات مدل ارایه شده به وسیله مدل قبلی m_{prev} که عدم قطعیت گوسی را در خود دارد، استفاده شده است. به منظور انتخاب یک راه حل مطلوب و با ارزش، در میان بی‌نهایت راه حل ممکن برای معکوس‌سازی داده‌ها، یک رابطه کمینه‌سازی بر اساس برازش مدل (به روش کمترین مربعات) و هموارسازی آن (جرم آنومالی‌های نهایی) ارایه شده است (رابطه ۵).

$$v^T Q_D^{-1} v + \lambda m^T Q_M^{-1} m = \min, \quad (5)$$

که در آن:

$m = (\Delta \rho_1, \dots, \Delta \rho_m)^T$ مقادیر اختلاف چگالی تعیین شده برای m سلول از مدل (علامت T نشان‌دهنده ترانهاده است)؛

$v = (v_1, \dots, v_n)^T$ بردار مقادیر باقی‌مانده برای n نقطه داده؛

Q_D ماتریس کواریانس اولیه برای عدم قطعیت داده‌های گرانی؛

Q_M ماتریس کواریانس اولیه برای عدم قطعیت پارامترهای مدل؛

λ ضریب بدون بعد برای برقراری توازن بین برازش و هموارسازی مدل می‌باشند [۱۸].

در خصوص حل مساله تعداد درجه‌های آزادی زیاد برای توصیف مدل، می‌توان از یک روش جستجوگر استفاده کرد. رنه [۲۳] یک روش اکتشافی برای تکمیل مدل ارایه داده است که بر خلاف بررسی هر توزیع چگالی ممکن برای تکمیل یک مدل کامل، از تمامی امکانات مختلف برای بررسی و تکمیل یک سلول در هر مرحله از فرآیند رشد و ساختن مدل از نقطه اولیه استفاده می‌کند. کاماچو [۱۶] با بهبود روش رنه [۲۳] از یک رشد همگن تقریبی با سلول‌های اضافی برای توسعه مناسب ساختار تنظیم شده قبلی مدل استفاده کرده است که در آن به جای ادامه جستجوی تمام

که در آن f ضریب مقیاس ($f \geq 1$) در مرحله k ام فرآیند رشد است (رابطه ۷). برای مقادیر کم پارامتر همگنی، اختلاف چگالی در مرزهای مدل به طور آنی تغییر می‌کند (مقادیر به دست آمده اختلاف چگالی نزدیک به مقادیر پیش فرض تعیین شده باقی می‌مانند) که این خاصیت برای مدلسازی ساختارهایی مانند گسل خردگی، تونل و حفريات مناسب است. انتخاب مقادیر بالا سبب کم شدن تغییرات تدریجی و آرام اختلاف چگالی (بر اساس الگوی کاهشی پارامتر f) در نقاط مرزی مدل در فرآیند مدلسازی می‌شود. تعیین مناسب ضریب تعادل در روند مدلسازی بسیار اهمیت دارد. با توجه به کیفیت داده‌های برداشت شده و عامل نوفه، اگر این مقدار کم لحاظ شود، حاصل یک مدل پیچیده خواهد بود که علت آن برآزش بالای پارامترهای مدل با داده‌های برداشت شده است که در نتیجه باعث مدلسازی نوفه‌های موجود در داده‌ها می‌شود و اگر مقداری بالا برای ضریب تعادل در نظر گرفته شود، برآزش داده‌ها کم و هموارسازی آن بالا می‌رود و یک مدل نسبتاً ساده تولید می‌شود. در نتیجه انتخاب مناسب این دو پارامتر در بهینه‌سازی مدل نقشی بسیار اساسی دارد.

۳- مدلسازی مصنوعی

به منظور بررسی توانمندی روش کامپو در معکوس-سازی ساختارهایی مانند تونل، از مدل مصنوعی دو منشور افقی متوازی‌السطوح با استفاده از رابطه پارکر [۲۵] در محیط متلب استفاده شد. پارامترهای هندسی و فیزیکی استفاده شده برای تولید داده‌های مدل مصنوعی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و فیزیکی مدل مصنوعی

منشور	عمق بالا (m)	عمق پایین (m)	ابعاد (m)	اختلاف چگالی (gr/cm^3)
۱	۱۰	۲۵	۱۵×۱۵×۵۰	-۱
۲	۲۰	۳۵	۱۵×۱۵×۵۰	-۲

با محاسبه رابطه پارکر در یک شبکه ۲/۵ در ۵/۵ متر، تعداد ۴۰۰ داده گرانی به دست آمد و سپس نقشه بوگه آن تهیه شد (شکل ۱).

حل می‌شود. سپس مقدار خطای عدم برآزش e_j^2 به عنوان معیاری برای متناسب بودن منشور λ ام و اختلاف چگالی اختیار شده، از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$e_j^2 = v^T Q_D^{-1} v + \lambda f^2 m^T Q_M^{-1} m \quad (9)$$

در واقع در مرحله $(k+1)$ ، احتمالات مدل برای هر یک از منشورهای بدون تغییر و همچنین برای اختلاف‌های چگالی منفی یا مثبت جستجو می‌شود و سپس منشور λ ام با یک اختلاف چگالی که از مقدار کمینه e_j^2 به دست می‌آید، انتخاب شده و سبب رشد مدل می‌شود. تاثیر مقدار این سلول به مقادیر مدل شده Δg_i^C اضافه می‌شود.

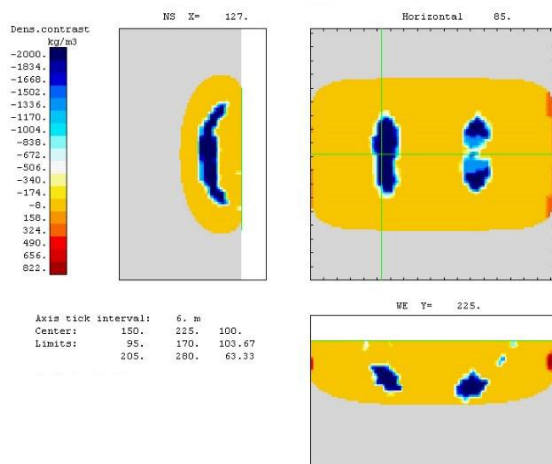
در هر مرتبه تکرار، بهترین مدل برآزش داده شده برای رشد آنومالی با رابطه کمینه‌سازی (۴) به عنوان گسترش مناسب انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی که تمامی سلول‌ها مورد جستجو قرار گیرند و مقدار ضریب مقیاس به یک همگرا شود و همچنین پارامترهای g_x ، g_y ، g_0 و $\delta \rho_T$ به مقادیر نسبتاً پایداری برسند، ادامه می‌یابد. در نهایت مدل مورد نظر ساخته می‌شود. روش معکوس‌سازی کامپو و همکاران [۱۶] شامل تکنیک‌ها و مزایای قابل توجهی است، از جمله:

- ۱- مدلسازی همزمان داده‌ها با اختلاف چگالی مثبت و منفی،
- ۲- انتخاب خودکار و دستی پارامتر تعادل و هموارسازی مدل،
- ۳- شناسایی و تعیین رفتار داده‌های خارج از روند مدلسازی،
- ۴- انتخاب خودکار و دستی حداقل و حداکثر اختلاف چگالی،
- ۵- انتخاب مد افزایش رو به پایین اختلاف چگالی در مدل‌سازی‌های لایه‌ای،
- ۶- انتخاب خودکار مقدار تصحیح اثرات توپوگرافی.

دو نکته قابل توجه در روش معکوس‌سازی کامپو و همکاران [۱۶] انتخاب صحیح پارامتر همگنی، α ، ($0 \leq \alpha \leq 1$) برای الگوی انتقال اختلاف چگالی در سرتاسر مرز مدلسازی و پارامتر تعادل بین برآزش و هموارسازی مدل است. ضریب همگنی بر روی اختلاف‌های چگالی اولیه ($\Delta \rho_0^-$ ، $\Delta \rho_0^+$) که به صورت پیش فرض تعیین شده و در مسیر رشد مدل کاهش می‌یابد، طبق روابط ۱۰ و ۱۱ تاثیر می‌گذارد.

$$\Delta \rho^- = \Delta \rho_0^- (1 - e^{(1-f_k)/\alpha}), \quad (10)$$

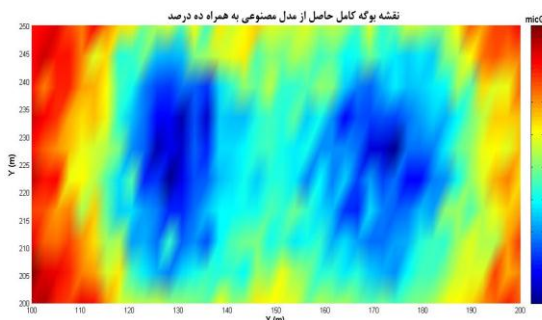
$$\Delta \rho^+ = \Delta \rho_0^+ (1 - e^{(1-f_k)/\alpha}), \quad (11)$$



شکل ۳: نتیجه مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با نوفه دو درصد در مقاطع افقی ۸۵ متر (عمق ۱۵ متر)، قائم شمالی- جنوبی در طول ۱۲۷ متر و قائم شرقی- غربی در عرض ۲۲۵ متر

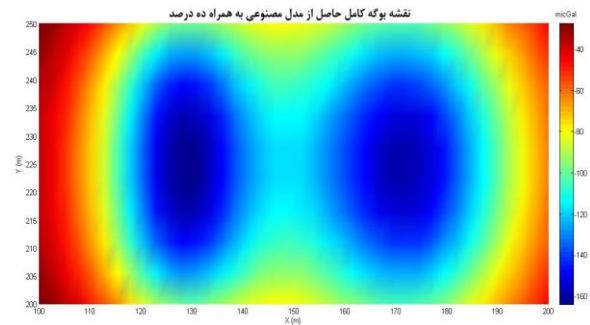
۳-۲- مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با اعمال نوفه ده درصد

با اضافه کردن درصد نوفه بالاتر به داده‌های مصنوعی و افزایش خطا می‌توان معیار دقیق‌تری از نتیجه معکوس‌سازی کسب کرد. به همین منظور پس از اعمال نوفه ده درصد، داده‌های بوگه کامل مدل مصنوعی مجدد محاسبه و نقشه آن رسم شد (شکل ۴).



شکل ۴: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی با اعمال ده درصد نوفه

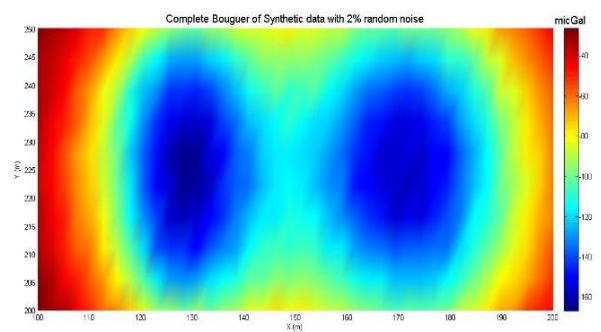
با شبکه‌بندی سطح زیرمحدوده به منشورهای متوازی-السطوح همانند بخش قبل تعداد ۴۰۰۰۰ بلوک به دست آمد. محدوده اختلاف چگالی اولیه ۲۰۰۰- و ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب همگنی مقدار ۰/۱ و به دلیل نوفه بالاتر و پرهیز از مدل‌سازی آن، پارامتر برازش- هموارسازی ۳۵ در نظر گرفته شد. با انجام معکوس‌سازی، مدل نهایی با خطای ۰/۱۴ میلی‌گال تهیه شد (شکل ۵).



شکل ۱: نقشه بوگه کامل حاصل از مدل مصنوعی

۳-۱- مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با اعمال نوفه دو درصد

داده‌های برداشت شده صحرائی همواره دارای عوامل مزاحم نوفه که ناشی از خطای انسانی و ابزاری و همچنین عوامل محیطی (باد، رعد و برق و حرکت افراد و وسایل نقلیه و نظایر آن) است. به همین دلیل برای انجام مدل‌سازی مصنوعی به داده‌ها نوفه تصادفی اضافه می‌شود که در این بخش دو درصد نوفه تصادفی به داده‌های محاسبه شده اضافه شد (شکل ۲).



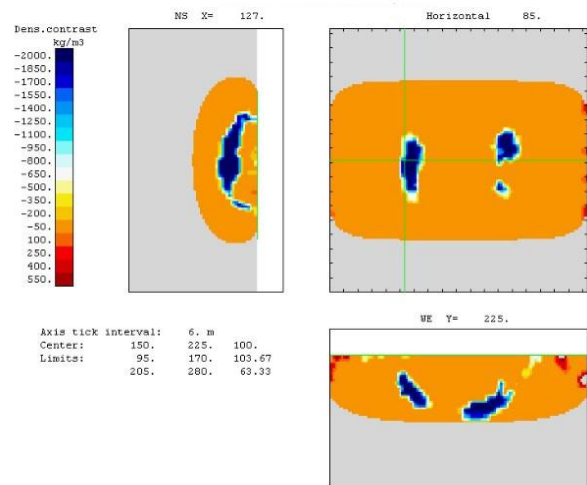
شکل ۲: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی با اعمال دو درصد نوفه

به منظور انجام وارون‌سازی داده‌های مصنوعی سطح زیر محدوده به منشورهای متوازی‌السطوح با حداقل طول ۱/۵ متر تقسیم‌بندی شد که در نتیجه تعداد ۴۰۰۰۰ منشور برای شروع مدل‌سازی به دست آمد. محدوده اختلاف چگالی اولیه ۲۰۰۰- و ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نزدیک به مقدار واقعی آن انتخاب شد. مقدار ضریب همگنی به جهت مدل‌سازی به شکل بارز و صریح، ۰/۱ انتخاب شد. با توجه به نوفه دو درصد، برای آن که مدل نهایی به مدل مصنوعی (مدل واقعی) نزدیک‌تر باشد، مقدار پارامتر برازش- هموارسازی ۲۰ در نظر گرفته شد. پس از تعیین مقادیر اولیه، فرآیند وارون‌سازی صورت گرفت و مدل نهایی با خطای ۰/۱۵ میلی‌گال به دست آمد (شکل ۳).

آمده از مدلسازی با نوفه دو درصد، دو منشور از نظر راستا، عمق و ابعاد تا حد قابل قبولی مشخص و تعیین شدند. در خصوص مدل ساخته شده با داده‌های مصنوعی نوفه ده درصد، راستای دو منشور تا حدودی تعیین شد اما به دلیل نوفه موجود ابعاد منشورها دچار تغییر شده و در ابتدا و انتهای آن‌ها کشیدگی به سمت سطح دیده می‌شود. عمق تخمینی برای منشور اول و دوم با خطایی در حدود دو متر به ترتیب ۸ متر و ۱۷ متر به دست آمد.

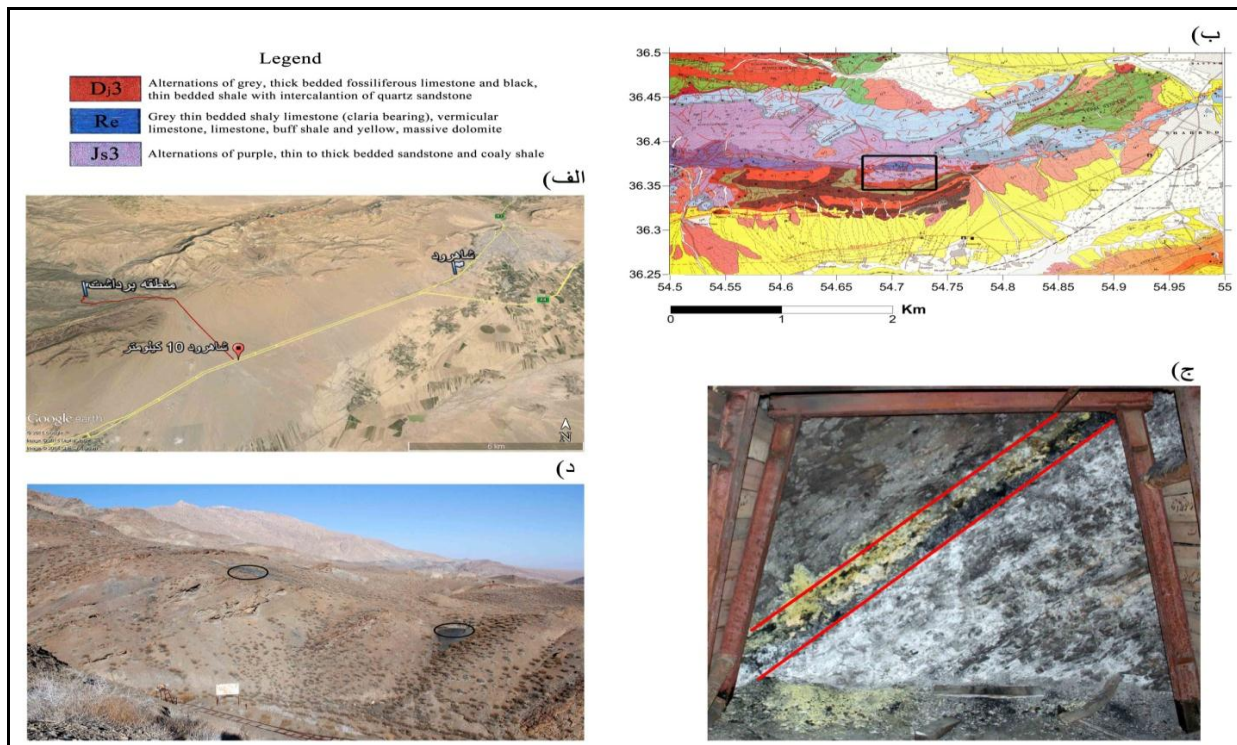
۴- داده‌های گرانی محدوده معدنی دهملا

محدوده مورد مطالعه بخشی از تونل معدنی دسترسی برای زغال‌سنگ در منطقه دهملا (البرز شرقی) است که در ۲۰ کیلومتری شهر شاهرود قرار دارد (شکل ۶- الف). از نظر زمین‌شناسی، واحدهای سنگی در این منطقه مربوط به سازند شمشک است [۲۶] که تناوبی از لای سنگ، ماسه-سنگ و شیل با میان لایه‌هایی از زغال‌سنگ با امتداد تقریبی شرقی- غربی و شیب به سمت شمال دارند (شکل ۶- ب، ج). تونل اصلی مورد بحث یک تونل عمود بر لایه زغال است که و به سمت شمال حفر شده و پس از طول ۴۰ متر از آن

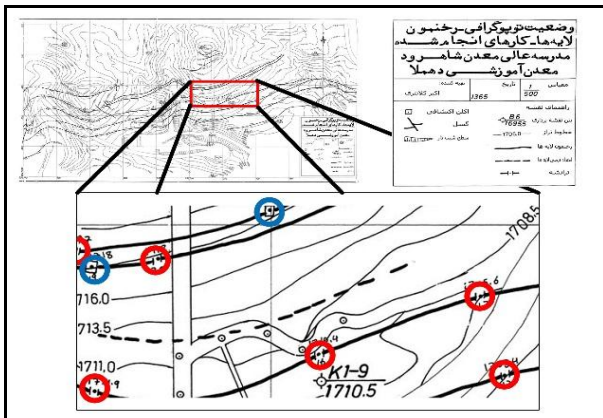


شکل ۵: نتیجه مدلسازی داده‌های مصنوعی با نوفه ده درصد در مقاطع افقی ۸۵ متر (عمق ۱۵ متر)، قائم شمالی- جنوبی در طول ۱۲۷ متر و قائم شرقی- غربی در عرض ۲۲۵ متر

نتایج حاصل از مدلسازی مصنوعی نشان می‌دهد که انتخاب مقدار ۰/۱ برای پارامتر همگنی سبب می‌شود تا مدل‌های به دست آمده کاملاً بارز و متمرکز باشند که این مساله از خصوصیات مفید این روش است. با توجه به نتایج به دست



شکل ۶: الف- مسیر دسترسی به محدوده مورد مطالعه. ب- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی-آموزشی زغال‌سنگ دهملا. ج- نمایی از لایه زغال سنگ شیب‌دار در انتهای تونل انشعابی دنباله‌رو، د- توالی لایه‌های لای سنگ، ماسه‌سنگ، زغال‌سنگ و شیل و همچنین محل دوپل‌های حفر شده در سطح زمین



شکل ۷: نقشه موقعیت تونل‌ها، لایه‌بندی و ترانشه‌ها در محدوده مورد مطالعه

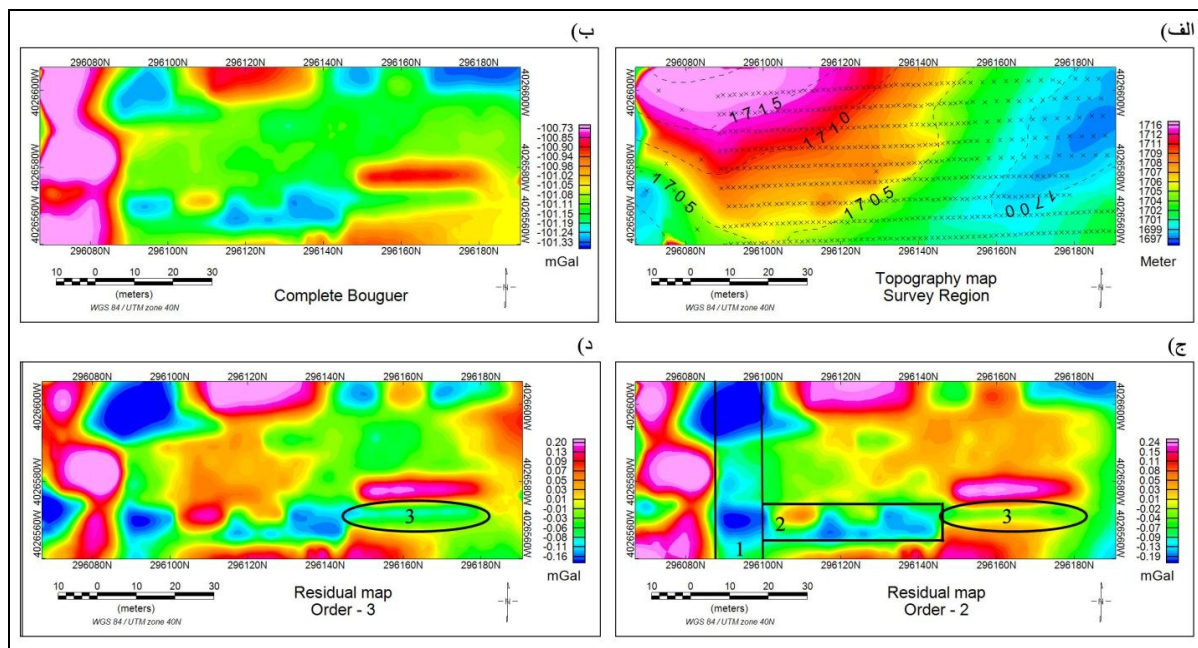
نقشه DEM با دقت ۳۰ متر استفاده شد. رانه دستگاه با انتخاب یک ایستگاه مبنا گرانی که مقدار مطلق آن نیز در دسترس بود، طی قرائت‌های متوالی دو ساعت یکبار تصحیح و پس از مطلق‌سازی داده‌های گرانی نسبی اندازه‌گیری شد. با انجام تصحیحات عرض جغرافیایی، هوای آزاد، بوگه و توپوگرافی، نقشه آنومالی بوگه کامل تهیه و با جداسازی روند منطقه‌ای از محلی به روش روند سطحی از مرتبه دوم و سوم در نرم‌افزار ژئوسافت، نقشه باقی‌مانده گرانی تهیه و ترسیم شد (شکل ۸- ب، ج، د).

یک انشعاب تقریباً شرقی-غربی به سمت شرق (دنباله‌رو زغال‌سنگ) حفر شده است (شکل ۶- ج). همچنین بر روی سطح زمین دوپل‌هایی برای استخراج لایه زغال‌سنگ و تهویه حفر شده است (شکل ۶- د).

از آنجا که محدوده معدنی زغال‌سنگ دهملا، یک سایت آموزشی است، نقشه توپوگرافی، لایه‌بندی و همچنین موقعیت تونل‌ها و ترانشه‌ها در زمان احداث مشخص و ترسیم شده است (شکل ۷).

برداشت داده‌های گرانی با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 (با دقت یک میکروگال) در یک شبکه منظم با ۹ نیم‌رخ عمود بر امتداد تونل اصلی که به فاصله ۵ متری از هم قرار داشته، انجام گرفته است، به طوری که بر روی هر یک از نیم‌رخ‌ها حداکثر به تعداد ۶۰ ایستگاه با فاصله ۱/۵ متری برداشت شده است. (شکل ۸- الف).

برای افزایش دقت کار چندین نقطه کمکی نیز برداشت شد که در مجموع تعداد ۵۴۶ نقطه گرانی به دست آمد. مختصات نقاط برداشت و توپوگرافی محدوده با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن تهیه و نقشه‌برداری شد. چگالی متوسط منطقه با توجه به لایه‌بندی‌های شیل، ماسه‌سنگ، لای سنگ و زغال در حدود ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب لحاظ شد. برای تصحیح توپوگرافی زون دور از



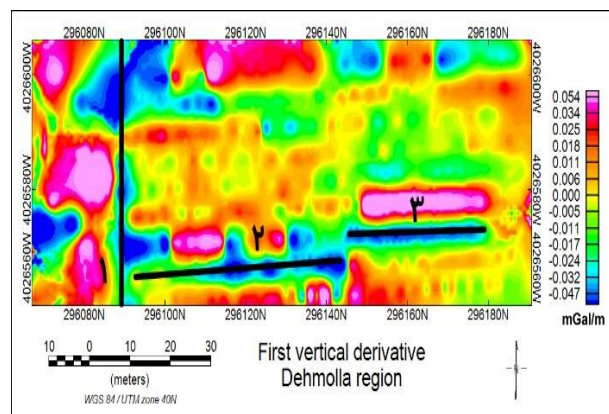
شکل ۸: نقشه توپوگرافی منطقه برداشت و مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری. ب- نقشه بوگه کامل. ج- نقشه آنومالی محلی از درجه دوم. د- نقشه آنومالی محلی از درجه سوم

۵- مدلسازی معکوس داده‌های گرانی محدوده مورد مطالعه

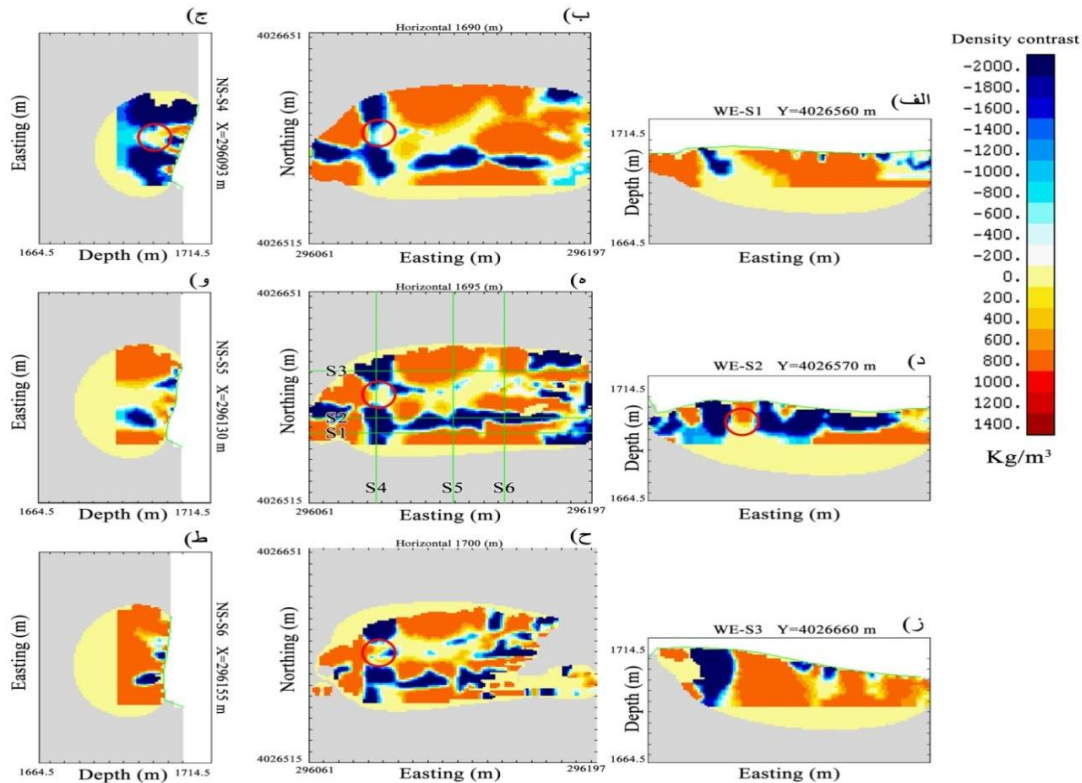
برای مدلسازی معکوس داده‌ها در این محدوده، حداقل و حداکثر اختلاف اولیه چگالی ۲۰۰۰- و ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب فرض شد و با لحاظ کردن ساختار تونل و دوپل-های حفاری شده، ضرایب مرتبط با برازش- هموارسازی و همگنی مورد نیاز به ترتیب ۳۰ و ۰/۱ منظور شد. همچنین حداکثر عمق لازم برای شبکه‌بندی سطح زیر زمین برای مدلسازی ۲۵ متر (ارتفاع ۱۶۸۵ متر نسبت به ارتفاع متوسط سطح زمین در ۱۷۱۰ متر) و اندازه سلول‌های متوازی السطوح یک تا سه متر (از سطح زمین تا عمق ۲۵ متر) انتخاب شد و بر این اساس محدوده به ۹۰۸۹ بلوک تقسیم-بندی و مدلسازی در حالت سیستماتیک انجام گرفت. پس از انجام مدلسازی وارون بر روی داده‌های گرانی محدوده مورد نظر، نتایج به صورت مقاطع افقی و قائم ارائه شد (شکل ۱۰). مطابق شکل ۱۰- ب، ه ج، بخشی از سلول‌ها با اختلاف چگالی مثبت و بخش بیشتر آن با اختلاف چگالی منفی نمایش داده شده است که مطابق با آنومالی گرانی باقیمانده محدوده مورد نظر است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که عمق تخمینی تونل اصلی که در امتداد شمال- جنوب است در مقاطع مختلف در بازه ۱۰ تا ۲۰ متر نسبت به سطح شیب‌دار زمین برآورد شده است که تایید کننده عمق واقعی تونل (مشاهدات صحرایی) است. این موضوع تایید کننده نتیجه مناسب مدلسازی در این بخش است، هرچند با وجود تعداد حفریات معدنی در این محدوده، اثر تداخلی روی نتایج مدلسازی نیز محوشدگی نتیجه مدلسازی در این بخش شده است (محدوده وجود داشته است. یکی از این موارد، وجود اثر گرانی بالا در میانه امتداد تونل است که به علت اختلاف چگالی بالا سبب محوشدگی نتیجه مدلسازی در این بخش شده است (محدوده قرمز رنگ شکل ۱۰- ه). چنین مساله- ای نیز در مدلسازی تونل فرعی به دلیل وجود ترانشه دیده می‌شود (محدوده قرمز رنگ، شکل ۱۰- د). تونل فرعی یک تونل دنباله - رو است و درون لایه زغال سنگ حفر شده است که وجود لایه زغالی با چگالی پایین در مقایسه با لایه‌های شیل و ماسه سنگ باعث کشیدگی و پهن‌شدگی نتیجه مدلسازی در این بخش شده است (شکل ۱۰- ب، د). برای نمایش مناسب‌تر اثر دوپل‌ها و ترانشه‌ها بر روی مدلسازی، سه مقطع قائم در ابتدا، انتها و در طول تونل اصلی تهیه شد که در آن‌ها محل عوامل با اختلاف چگالی پایین به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۱۰- ج، د، ز). خطای مدلسازی

به منظور شناسایی و بارزسازی بهتر مرز و راستای تونل، از فیلتر گرادیان اول قائم به دلیل حساسیت کمتر آن به نوفه معدنی، دوپل‌های حفر شده و لایه زغال‌دار است و اینگونه ساختارها دارای اختلاف چگالی منفی نسبت به زمینه اطراف خود هستند. در نتیجه محل‌های کم‌چگال آبی رنگ موقعیت این آثار را نشان می‌دهند.

در شکل ۹، با مختصات طولی ۲۹۶۰۹۰ متر (خط مشکی شماره یک) راستا، مرز تونل اصلی تعیین شده است. در این راستا دو آنومالی با اختلاف چگالی منفی بالا در ابتدا و انتهای تونل مشاهده می‌شود (شکل ۸- ج). این دو آنومالی انطباق بسیار خوبی با دوپل‌های حفاری شده در این ناحیه از منطقه دارند. همچنین در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۵۶۷ متر و از طول ۲۹۶۰۹۰ تا ۲۹۶۱۴۴ متر (خط مشکی شماره دو در شکل ۹) راستای تونل فرعی با دقت خوبی شناسایی شد، اما به دلیل مسیر منحنی شکل آن و وجود حفاری‌های سطحی، مرز دقیق آن به دست نیامد. در قسمت ابتدایی تونل فرعی نیز یک دوپل وجود دارد که اثر آن در نقشه باقیمانده مشخص شده است. از آنجا که تونل فرعی یک تونل دنباله‌رو و درون لایه زغال‌دار حفر شده است (شکل ۶- ج)، در مختصات عرضی ۴۰۲۶۵۷۰ متر و طول ۲۹۶۱۴۴ تا ۲۹۶۱۷۴ متر (خط مشکی شماره سه در شکل ۹)، یک ناحیه باریک کم چگال دیده می‌شود که با توجه تونل دنباله‌رو حفر شده و توالی لایه‌بندی‌های شیل، زغال، لای سنگ و ماسه-سنگ (سازند شمشک) می‌توان نتیجه گرفت که این ناحیه ادامه لایه زغال‌دار باشد (شکل ۷). پس از بررسی آنومالی‌های مربوطه، داده‌های نقشه آنومالی محلی در قالب مناسب برای انجام مدلسازی معکوس تهیه شد.



شکل ۹: نقشه فیلتر مشتق اول قائم محدوده تونل دهملا؛ خطوط مشکی راستای تونل اصلی، فرعی و رگه زغال‌دار است



شکل ۱۰: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی ده‌ملا: الف- مقطع قائم در عرض‌های جغرافیایی ۴۰۲۶۵۶۰ متر؛ عمق ابتدای تونل در حدود ۱۰ متر محاسبه شده است. ب- مقطع افقی در ارتفاع ۱۶۹۰ متری (عمق ۲۰ متری). ج- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۰۹۳ متر. د- مقطع قائم در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۵۷۰ متر. ه- مقطع افقی در ارتفاع ۱۶۹۵ متری (عمق ۱۵ متری). و- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۱۳۰ متر. ز- مقطع قائم در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۶۶۰ متر. ح- مقطع افقی در ارتفاع ۱۷۰۰ متری (عمق ۱۰ متری- بالای تونل). ط- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۱۵۵ متر. فاصله بین خط نشان‌ها ۷ متر است

وجود می‌آورد، اما نتایج راستای تونل عمود بر امتداد لایه (اصلی) و تونل دنباله‌رو (فرعی) و نیز موقعیت دوپل‌های حفاری شده و لایه زغال‌سنگ در انتهای تونل فرعی را تا حد قابل قبولی نشان داده است. انتخاب مناسب پارامترهای اولیه برای معکوس‌سازی به روش کاماچو در مسیر مدل‌سازی بسیار مهم است و در این زمینه اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های حفاری مفید هستند. برای مدل‌سازی تونل معدنی ده‌ملا به دلیل ویژگی این نوع ساختار، مقادیر همگنی و برازش- هموارسازی به ترتیب ۰/۱ و ۳۰ (حالت بهینه برای این مطالعه) انتخاب شد.

۷- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از دانشگاه شاهرود و همه افرادی که در تسهیل و عملی شدن برداشت‌های صحرائی همکاری داشته‌اند، قدردانی و تشکر کنند.

با توجه به پیچیدگی‌های یاد شده در حدود ۰/۱۲۱ میلی‌گال محاسبه شد.

۶- نتیجه‌گیری

با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی می‌توان ساختارهای زیرسطحی مانند حفره‌ها، تونل‌ها و همچنین مواد معدنی (رگه‌ای، لایه‌ای و توده‌ای) با اختلاف چگالی مناسب را شناسایی و مدل‌سازی کرد. در این مقاله با استفاده از داده‌های میکروگرانی و روش معکوس‌سازی سه‌بعدی کاماچو، تونل‌های معدنی موجود در محوطه اردوگاه آموزشی دانشگاه شاهرود (دهملا) و لایه زغال‌دار مدل‌سازی و تفسیر شد. نتایج حاصل نشان داد که تونل معدنی ده‌ملا در عمق تقریبی ۱۰ تا ۲۰ متر نسبت به سطح شیب‌دار زمین قرار دارد که با مشاهدات صحرائی تطابق بالایی نشان می‌دهد از آنجا که محدوده مورد نظر به لحاظ حفریات، پیچیدگی‌های خاصی در مدل‌سازی به

۸- مراجع

- by Parker–Oldenburg's algorithm". *Computers & Geosciences*, 31(4): 513-520.
- [13] Oliveira Jr, V. C., and Barbosa, V. C. (2011). "Radial gravity inversion constrained by total anomalous mass excess for retrieving 3D bodies". The Society of Exploration Geophysicists (SEG), Annual Meeting, 18-23 September, San Antonio, Texas.
- [14] Zhdanov, M. S., and Cox, L. H. (2013). "Multinary Inversion for Tunnel Detection". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5): 1100-1103.
- [15] Shamsipour, P., Marcotte, D., and Chouteau, M. (2012). "3D stochastic joint inversion of gravity and magnetic data". *Journal of Applied Geophysics*, 79: 27-37.
- [16] Camacho, A. G., Fernández, J., and Gottsmann, J. (2011). "The 3-D gravity inversion package GROWTH2. 0 and its application to Tenerife Island, Spain". *Computers & Geosciences*, 37(4): 621-633.
- [17] Camacho, A. G., Montesinos, F. G., and Vieira, R. (2000). "Gravity inversion by means of growing bodies". *Geophysics*, 65(1): 95-101.
- [18] Camacho, A. G., Montesinos, F. G., and Vieira, R. (2002). "A 3-D gravity inversion tool based on exploration of model possibilities". *Computers & Geosciences*, 28(2): 191-204.
- [19] Gottsmann, J., Camacho, A. G., Martí, J., Wooller, L., Fernández, J., Garcia, A., and Rymer, H. (2008). "Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from new gravity data: Implications for its evolution and recent reactivation". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(3): 212-230.
- [20] Tarantola, A. (1988). "The Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation". Elsevier, Amsterdam, pp. 613.
- [21] Pick, M., Picha, J., and Vyskocil, V. (1973). "Theory of the Earth's gravitational field". Elsevier, Amsterdam, New York, pp. 538.
- [22] Al-Chalabi, M. (1971). "Some studies relating to nonuniqueness in gravity and magnetic inverse problems". *Geophysics*, 36(5): 835-855.
- [23] Rene, R. M. (1986). "Gravity inversion using open, reject, and 'shape-of-anomaly' fill criteria". *Geophysics*, 51(4): 988-994.
- [24] Camacho, A. G., Nunes, J. C., Ortiz, E., França, Z., and Vieira, R. (2007). "Gravimetric determination of an intrusive complex under the Island of Faial (Azores):
- [1] Franklin, A. G., Patrick, D. M., Butler, D. K., StrOhm, W. E., and Hynes-Griffin, M. E. (1980). "Sitting of Nuclear Facilities in Karst Terrains and other Areas Susceptible to Ground Collapse", U.S. Army Engineers Waterway Experiment Station Vicksburg Miss. Prepared for U.S Nuclear Regulatory Commission NUREG Report CR-2062. Nuclear Regulatory Commission.
- [2] Butler, D. K. (1984). "Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities". *Geophysics*, 49(7): 1084-1096.
- [3] Fajkiewicz, Z. J. (1976). "Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropomorphic form". *Geophysics*, 41: 1016-1030.
- [4] Casten, U., and Fajkiewicz, Z. (1993). "Induced gravity anomalies and rock-burst risk in coal mines: a case history". *Geophysical Prospecting*, 41(1): 1-13.
- [5] Gaertner, H., Seitz, R., Petzold, H., and Schubert, H. (1991). "Shallow seismic and gravimetric exploration of brown coal-A review". The European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 53rd Meeting, 26-30 May, Florence.
- [6] Ardestani, V. E. (2008). "Modelling the karst zones in a dam site through micro-gravity data". *Exploration Geophysics*, 39(4): 204-209.
- [7] Ardestani, V. E. (2013). "Detecting, delineating and modeling the connected solution cavities in a dam site via microgravity data". *Acta Geodaetica et Geophysica*, 48(2): 123-138.
- [8] Ardestani, V. E. (2015). "Detecting, modelling and reserve estimating of manganese ore bodies via microgravity data". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(1): 19-30.
- [9] Hinze, W. J. (1990). "The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies". *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 1: 75-126.
- [10] Menke, W. (2012). "Geophysical data analysis: discrete inverse theory". Academic press, Third Edition, 45: 330.
- [11] Li, Y., and Oldenburg, D. W. (1998). "3-D inversion of gravity data". *Geophysics*, 63(1): 109-119.
- [12] Gómez-Ortiz, D., and Agarwal, B. N. (2005). "3DINVER. M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface

Astronomical Society, 31: 447-455.

some methodological improvements". Geophysical Journal International, 171(1): 478-494.

[۲۶] اعراب، فاطمه؛ امیدی، پرویز؛ طاهری، عزیزالله؛ ۱۳۹۰، "دگرریختی کواترنری در باختر شاهرود (البرز خاوری)"، علوم زمین، ۲۰(۸۰)، ص ۸۹-۹۴.

[25] Parker, R. (1972). "The rapid calculation of potential anomalies". Geophysical Journal of the Royal

^۱ Global optimization