

برگردان داده‌های میکروگرانی برداشت‌شده در اطراف سد سیاه‌پیشه برای تعیین ساختارهای زیرسطحی در مسیر ساخت یک تونل

مریم چگنی^۱، محمود میرزایی^{۲*}، مجتبی بابایی^۳ و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۴

۱. کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم دانشگاه اراک، ایران

۳. استادیار، گروه ژئوفیزیک، واحد تویسرکان، دانشگاه آزاد اسلامی، تویسرکان، ایران

۴. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۴/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۶/۳/۲)

چکیده

میکروگرانی یک روش ژئوفیزیکی است که به‌طور فزاینده‌ای برای بررسی‌های محیطی و ژئوتکنیکی به کار می‌رود. اندازه‌گیری‌های میکروگرانی به تغییرات چگالی زیرسطحی پاسخ می‌دهد و روشی غیرمخرب برای شناسایی و تشخیص ناهمگونی‌های زیرسطحی است. مواد زیرسطحی گوناگون چگالی‌های جرمی متفاوتی دارند؛ بنابراین برداشت‌های میکروگرانی، با جمع‌آوری اندازه‌گیری‌های سطحی میدان گرانی زمین، نواحی شامل ناهنجاری‌ها یا تباین‌های جرم حجمی را جستجو و کاوش می‌نماید.

هدف از این پژوهش تفسیر داده‌های میکروگرانی برداشت‌شده در قسمت کوچکی از محل احداث سد تلمبه‌ای سیاه‌پیشه در شمال ایران، جهت تعیین کیفیت و نوع ساختار تشکیلات زیرسطحی در محل حفر تونلی است که به محدوده ریزشی برخورد کرده است. بعد از پردازش و تصحیحات جزرومد، رانه و هوای آزاد و بوگه و توپوگرافی، بی‌هنجاری بوگه محاسبه شده است. با استفاده از برازش چندجمله‌ای‌های متعامد و بهنجار با داده‌های بی‌هنجاری‌های گرانی بوگه به‌دست‌آمده، آثار گرانی منطقه‌ای برآورد و سپس بی‌هنجاری‌های باقیمانده محاسبه شدند. سه بی‌هنجاری منفی در نقشه گرانی باقیمانده شناسایی شده است. داده‌های گرانی این بی‌هنجاری‌ها با روش معکوس‌سازی سه‌بعدی، با به‌کار بردن نرم‌افزار گروت ۲ مدل‌سازی شده‌اند. نتایج حاصل از برگردان‌سازی داده‌ها، توزیع تباین چگالی بی‌هنجاری‌های جرمی سه‌بعدی بوده است که از آن‌ها برش‌هایی افقی و مقاطع عمودی، به موازات محورهای سه‌گانه مختصات کارتزین، انتخاب و به تصویر کشیده شده‌اند. سپس این توزیع تباین چگالی‌های جرمی ترسیم شده در مقاطع سه‌گانه با استفاده از اطلاعات میدانی زمین‌شناسی و یک گمانه به ساختارهای مختلف زمین‌شناسی زیرسطحی نسبت داده شده‌اند. در روی مقاطع، نواحی بی‌هنجار با چگالی کم، به تشکیلات آهکی خردشده، هوازده و احتمالاً شامل آب نسبت داده شده است. این نواحی به علت نفوذپذیری و تراکم کم از مناطق آسیب‌پذیر و ریزشی در حفره‌های تونل تشخیص داده می‌شوند. نواحی شناسایی‌شده با تباین چگالی جرمی بیشتر در روی مقاطع، به وجود سنگ‌های آهکی متراکم یا سایر تشکیلات مقاوم‌تر مثل آذرین نفوذی، با آسیب‌پذیری و خطر ریزش کمتر در ایجاد سازه تونل، نسبت داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری گرانی، تباین چگالی، تراکم، تونل، معکوس‌سازی سه‌بعدی، میکروگرانی.

۱. مقدمه

داول، (۲۰۰۲). گرانی‌سنجی اغلب یک روش مهم استفاده‌شده در پروژه‌های ژئوفیزیکی جهت شناسایی حفره‌ها و نواحی ضعیف زیرسطحی است (بنهام و پیرینگل، ۲۰۱۱؛ بیشاپ و همکاران، ۱۹۹۷؛ باتلر، ۱۹۸۴؛ دبگلیا و همکاران، ۲۰۰۶؛ ریباکو و همکاران، ۲۰۰۱). نتایج پروژه‌های گرانی نشان داده است که اغلب می‌توان معادن متروکه قدیمی را شناسایی کرد. این استدلال برای سقف راهروها و دالان‌های قدیمی که به تدریج فروریخته‌اند، به‌طوری که فضای خالی به طرف

حفره‌ها، فضاهای خالی و تشکیلات سست و تراوا از نظر نفوذ آب می‌توانند در کاربردهای ژئوتکنیکی و محیطی مخاطره‌آمیز باشند. روش‌های ژئوفیزیکی یک ابزار اقتصادی، غیرمخرب و سریع برای کشف اهداف مذکور هستند. وجود یک حفره حالت فیزیکی زیرسطحی را تغییر می‌دهد و می‌تواند با به کار بردن روش‌های ژئوفیزیکی مناسب کشف شود؛ اگر تباین خواص فیزیکی به اندازه کافی بزرگ باشد و عارضه‌های زیرسطحی اندازه مناسب داشته باشند (مک

سطح در حال جابه‌جایی باشد، قابل بیان است. به علاوه، نواحی دگرریخت شده در تشکیلات زیرسطحی در اطراف فضا‌های خالی در معادن متروکه نیز می‌تواند منشأ یک چشمه از بی‌هنجاری گرانی منفی باشد که توسط برداشت‌های داده‌های گرانی شناسایی گردد (بلچا و مرلینا، ۲۰۰۱). همچنین روش میکروگرانی یکی از مؤثرترین روش‌های ژئوفیزیک است که توانایی کاوش و شناسایی حفره‌ها و راهروهای زیر زمینی را دارد (باتلر، ۱۹۸۰). یک برداشت میکروگرانی می‌تواند شامل اندازه‌گیری‌های گرانی در نقاط مجزا در روی سطح زمین باشد. تغییرات مکانی گرانی ناشی از بی‌هنجاری‌های گرانی زیرسطحی بوده که مربوط به عارضه‌هایی است که دارای تباين جرم‌حجمی باشند (تل فورد و همکاران، ۱۹۷۶؛ سیگل، ۱۹۹۵). روش‌های میکروگرانی اغلب برای کاوش حفره‌ها و تونل‌های زیرسطحی به کار می‌روند (یول و همکاران، ۱۹۹۷؛ باتلر، ۱۹۸۴؛ هینز، ۱۹۹۰؛ کیس و زابو، ۲۰۰۵؛ برنستون و استایل، ۲۰۰۶؛ کافمن و دهان، ۲۰۰۷). شباهت معقولی بین فرایند شناسایی حفرات و معادن متروکه با استفاده از روش‌های گرانی وجود دارد (بسنون و همکاران، ۲۰۰۳). پردازش و تصحیحات استاندارد داده‌های گرانی مثل تصحیحات جابه‌جایی و کشند، هوای آزاد و بوگه، زمینگان و ...، جداسازی منطقه‌ای، محلی و فیلتر کردن و روش‌های برجسته‌سازی (نبیقیان و همکاران، ۲۰۰۵) گام‌های مهم قبل از تفسیر نهایی داده‌ها هستند.

طراحی یک شبکه برداشت داده‌های گرانی براساس مطالعات زمین‌شناسی و سایر اطلاعات، برداشتی قابل انعطاف و بدون صرف زمان زیاد برای جمع‌آوری داده‌ها را فراهم می‌آورد. پردازش داده‌های گرانی جمع‌آوری شده، نقش بسیار مهم در کشف بی‌هنجاری موردعلاقه ایفا می‌کند. علاوه براین، معکوس‌سازی یا برگردان داده‌های گرانی پردازش شده، خصوصاً وقتی زمین‌شناسی محیط مورد مطالعه پیچیده نباشد و اطلاعات کمکی وجود داشته باشد، روشی معقول برای تفسیر داده‌هاست. به کار بردن روش معکوس‌سازی

اغلب اطلاعات بسیار مفیدی درباره موقعیت توده بی‌هنجار زیرسطحی فراهم می‌آورد. روش‌های متنوعی برای معکوس‌سازی داده‌های بی‌هنجار گرانی وجود دارد که انتخاب این روش‌ها به هدف مورد مطالعه در برداشت داده‌های گرانی بستگی دارد. بنابراین گاه با آزمایش روش‌های مختلف معکوس‌سازی روی داده‌ها می‌توان روش مناسب برای برگردان‌سازی یا تفسیر داده‌ها را شناسایی کرد.

یک روش مناسب برای معکوس‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی با الهام از کار رنه (۱۹۸۶) است که براساس فرایند رشد و کاوش ریاضی فضای مدل برای تعیین تباين جرم‌حجمی ارائه شده است (کاماچو و همکاران، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲). روش مذکور یک روش معکوس‌سازی است که قادر است برای کاربران در یک حالت تقریباً خودکار، یک مدل سه‌بعدی از بی‌هنجاری‌های جرم‌حجمی زیرسطحی براساس برگردان داده‌های بی‌هنجاری گرانی ارائه کند.

در برنامه معکوس‌سازی مذکور بر خلاف سایر روش‌های معکوس‌سازی دیگر، به محاسبه وارون یا معکوس یک ماتریس طی فرایند معکوس‌سازی نیاز نیست. زیرا محاسبه معکوس یک ماتریس در فرایند معکوس‌سازی داده‌ها به دلیل بدشرط بودن ماتریس، ناشی از تعدد پارامترهای مدل و خطاهای موجود در داده‌های برداشت شده، مشکل و زمان‌بر است. علاوه بر این به کارگیری روش معکوس‌سازی مذکور سبب کاهش حجم حافظه به کار رفته در مقایسه با روش‌های دیگر خواهد شد. به هر حال حافظه به کار رفته به تعداد داده‌های به کار رفته و پارامترهایی بستگی دارد که جسم بی‌هنجار را تقریب می‌سازد. این برنامه خود مرکب از برنامه‌ای برای محاسبه اثر جاذبه سلول‌های تعریف شده با جرم حجمی معین برای مدل یا محاسبه مدل مستقیم است که در هر دوره تغییراتی را خواهد داشت و اثر این تغییرات، محاسبه می‌شود و با داده‌های مشاهده شده مقایسه می‌گردد. در نهایت اگر برازش معقول بین داده‌های گرانی محاسبه شده حاصل از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده با تعریف مقدار آستانه‌ای مناسب فراهم

(۲۰۰۰، ۲۰۰۲، ۲۰۱۱) ارائه شده است که در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شود.

در این روش تعداد n داده گرانگی در یک شبکه نامنظم (یا منظم) در نظر گرفته می‌شود که (x_i, y_i, z_i) و $i=1, \dots, n$ مختصات سطحی و ارتفاع‌های ایستگاه‌های گرانگی و Δg_i بی‌هنجاری داده‌های گرانگی مربوطه هستند. عدم قطعیت گوسی داده‌ها با استفاده از ماتریس کواریانس Q_D با ابعاد $n \times n$ جایی که معمولاً عناصر $q_{ij}=0$ برای $i \neq j$ و $q_{ii} = e_i^2$ برای $i=1, \dots, n$ به عنوان واریانس مقادیر گرانگی هستند، تعیین می‌شود. برای مدل‌سازی، فضای زیرسطحی موجود در یک محدوده به m شبکه سلولی سه‌بعدی تقسیم‌بندی می‌شود که با تباین‌های چگالی $\Delta \rho_0^+$ و $\Delta \rho_0^-$ در طول مدل‌سازی تکمیل می‌شوند. رابطه وابسته به داده‌های اندازه‌گیری شده (Δg_i) در n ایستگاه (z_i) (x_i, y_i) با پارامترهای مدل‌سازی و مقادیر باقی‌مانده v_i از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (کاماچو، ۲۰۱۱):

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

که در آن a_{ij} جاذبه گرانگی قائم سلول متوازی‌السطوح پایه انتخاب شده j ام، $(j = 1, \dots, m)$ با چگالی واحد در ایستگاه مشاهده‌ای i ام طبق رابطه ۲؛ $\Delta \rho_0^+$ ، $\Delta \rho_0^-$ تباین‌های چگالی تعیین‌شده برای سلول j ام؛ l و l^- شاخص‌هایی برای پُر کردن سلول‌ها با تباین‌های چگالی مثبت و منفی که هندسه توده بی‌هنجاری را با یک رابطه غیرخطی بیان می‌کند؛ δg_{reg} (رابطه ۳)، δg_{top} (رابطه ۴) عبارت‌های اختیاری برای اصلاح داده‌ها (روند منطقه خطی و تصحیح توپوگرافی اضافی) هستند.

گردد، فرایند تکراری معکوس‌سازی متوقف و مدل نهایی که شامل بی‌هنجاری‌های چگالی جرمی است، حاصل خواهد شد.

در این تحقیق براساس روش معکوس‌سازی سه‌بعدی ارائه‌شده توسط کاماچو و همکاران (۲۰۰۰، ۲۰۰۲، ۲۰۱۱) فرایند معکوس‌سازی برای داده‌های برداشت‌شده گرانگی در بخشی از محل احداث سد تلمبه‌ای سیاه‌بیشه که در مسیر حفر تونل است، برای حصول یک مدل شامل توزیع بی‌هنجاری‌های چگالی جرمی صورت گرفته است. سپس با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و یک گمانه حفاری‌شده در محل برداشت داده‌های گرانگی مذکور، توزیع‌های بی‌هنجاری چگالی جرمی زیرسطحی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی، به ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت که مناسب یا آسیب‌پذیر در ایجاد سازه حفر تونل هستند، نسبت داده شده‌اند.

۲. روش تحقیق

در روش کاماچو سطح زیرزمین به m سلول متوازی‌السطوح تقسیم‌بندی می‌شود. برای هر کدام از این سلول‌ها طی فرایند «رشد» و با توجه به داده‌های اندازه‌گیری‌شده، یک مقدار چگالی تخصیص می‌یابد. در این روش شبکه برداشت داده‌های مشاهده‌ای می‌تواند شبکه‌ای منظم یا نامنظم باشد. همچنین اختلافات چگالی مثبت و منفی و یک مقدار روند منطقه‌ای، همزمان در فرایند رشد محاسبه می‌شوند و به دست می‌آیند که از مزایای استفاده از این روش است. همچنین در این روش از ماتریس ژاکوبین و وارون‌سازی ماتریس‌ها استفاده نمی‌شود. اطلاعات پایه‌ای و اساسی این روش توسط کاماچو و همکاران

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

نشان‌دهنده ترانواده 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 و λ ضریب بدون بُعد برای برقراری توازن بین برازش داده‌های اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده و هموارسازی مدل هستند (کاماچو و همکاران، ۲۰۰۲).

در خصوص حل مسأله تعداد درجه‌های آزادی زیاد برای توصیف مدل، می‌توان از یک روش جستجوگر استفاده کرد. رنه (۱۹۸۶) یک روش اکتشافی برای تکمیل مدل ارائه 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 فرایند رشد و ساختن مدل از نقطه اولیه استفاده می‌کند. کاماچو (۲۰۱۱) با بهبود روش رنه (۱۹۸۶) از یک رشد همگن تقریبی با سلول‌های اضافی برای توسعه مناسب ساختار تنظیم‌شده قبلی مدل استفاده کرده است که در آن به جای ادامه جستجوی تمام فضای مدل، امکان بررسی رشد سلول به سلول برای گسترش مدل بی‌هنگار مدنظر قرار می‌گیرد. در نتیجه در هر مرحله سلول‌های خالی طبق یک روش معین با تباین چگالی از قبل تعیین شده، بررسی می‌شوند. شرط برازش مناسب در هر مرحله توسط فاکتور مقیاس (فاکتوری که شرایط مدل تکمیل نشده را برای رسیدن به یک مقدار گرانی مناسب و مدل کامل بررسی می‌کند) بررسی می‌شود تا سلول مناسب انتخاب شود.

برای مثال، در مرحله $(k+1)$ ام فرایند رشد، تعداد k سلول با تباین چگالی مثبت و منفی محاسبه شده و تکمیل می‌شوند. مقادیر گرانی حاصل از مدل‌سازی با رابطه زیر 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 اصلاح‌شده قبلی است. سپس فرایند در میان $k-m$ سلول باقی‌مانده به جستجو برای پُر کردن یک منشور جدید و متراکم‌سازی مدل می‌پردازد. به این

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

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

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

در رابطه بالا G ثابت گرانش جهانی؛ x_i و y_i مختصات فضایی سطوح سلول J ام 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_x ، g_0 و g_y پارامترهای روند منطقه‌ای گرانی؛ x_M ، y_M مختصات متوسط‌گیری شده؛ C_i ضریب متداول برای تصحیح توپوگرافی و $\delta \rho_T$ مقدار اضافی اختیاری نسبت به چگالی توپوگرافی اولیه هستند (کاماچو و همکاران، ۲۰۰۲).

دو مشکل اساسی که در روش‌های مدل‌سازی با روش معکوس‌سازی وجود دارد، عدم یکتایی جواب و درجه آزادی سیستم غیرخطی داده‌ها است. مسأله اول به دلیل وجود مدل‌های مختلفی است که برازش خوبی با داده‌های واقعی داشته باشند 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 با ضابطه حداقل مربعات که به عنوان ترکیبی از داده‌های قابل مشاهده با عدم قطعیت گوسی (داده‌شده توسط یک ماتریس کواریانس Q_D) و اطلاعات مدل ارائه‌شده به وسیله مدل قبلی m_{prev} که عدم قطعیت گوسی را در خود دارد (داده‌شده توسط یک ماتریس کواریانس Q_M) استفاده شده است. به منظور انتخاب راه‌حلی مطلوب و با ارزش، در میان بی‌نهایت راه‌حل ممکن برای معکوس‌سازی داده‌ها، یک رابطه کمینه‌سازی (رابطه ۵) بر اساس برازش پاسخ مدل (برازش حداقل مربعات) و هموارسازی آن (جرم بی‌هنگاری‌های نهایی) ارائه شده است.

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

که در آن $m = (\Delta \rho_1, \dots, \Delta \rho_m)^T$ مقادیر تباین چگالی‌ها، تعیین شده برای m سلول از مدل (علامت T

در هر مرتبه تکرار، بهترین مدل برازش داده شده برای رشد بی‌هنجاری با رابطه کمیته‌سازی رابطه (۸) به عنوان گسترش مناسب انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی که تمامی سلول‌ها مورد جستجو قرار بگیرند و مقدار ضریب فاکتور به عدد یک همگرا شود و همچنین پارامترهای g_0 ، g_x ، g_y و $\delta\rho_T$ به مقادیر نسبتاً پایداری برسند، ادامه می‌یابد و در نهایت مدل مورد نظر ساخته می‌شود. روش معکوس‌سازی کاماچو و همکاران (۲۰۱۱) شامل تکنیک‌ها و مزایای قابل توجهی است؛ از جمله: ۱- مدل‌سازی همزمان داده‌ها با تباین 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 تباین چگالی، ۵- انتخاب مد افزایش رو به پایین تباین چگالی در مدل‌سازی‌های لایه‌ای، ۶- انتخاب خودکار مقدار تصحیح اثرات توپوگرافی.

دو نکته قابل توجه در روش وارون‌سازی مذکور انتخاب صحیح پارامتر همگنی ($0 \leq \alpha \leq 1$) برای الگوی انتقال تباین چگالی در سرتاسر مرز مدل‌سازی و پارامتر تعادل بین برازش و هموارسازی مدل است. برای مقادیر کم پارامتر همگنی، تباین چگالی در مرزهای مدل به طور آنی تغییر می‌کند که این خاصیت برای مدل‌سازی ساختارهایی مانند گسل خردگی، تونل و حفرات مناسب است. انتخاب مقادیر بالا سبب تغییرات تدریجی و آرام تباین چگالی در نقاط مرزی مدل در فرایند مدل‌سازی می‌شود. تعیین مناسب ضریب تعادل در روند مدل‌سازی بسیار اهمیت دارد. با توجه به کیفیت داده‌های برداشت‌شده و عامل نوفه، اگر این مقدار کم لحاظ گردد، حاصل یک مدل پیچیده خواهد بود که علت آن برازش بالای پارامترهای مدل با داده‌های برداشت شده است که در نتیجه باعث مدل‌سازی نوفه‌های موجود در داده‌ها می‌گردد و اگر مقداری بالا برای ضریب تعادل (λ) در نظر گرفته شود، برازش داده‌ها کم و هموارسازی آن زیاد می‌شود و یک مدل نسبتاً ساده تولید می‌شود. در نتیجه انتخاب مناسب این دو پارامتر در بهینه‌سازی مدل نقشی بسیار اساسی دارند.

منظور برای هر سلول خالی J_k^+ و J_k^- ، $j \notin J_k^+$ ، رابطه زیر 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 فاکتور برای برازش بی‌هنجاری‌های مدل‌سازی شده ($\Delta g_i^c + A_{ij} \Delta \rho_j$) با بی‌هنجاری‌های مشاهده‌ای است. مقادیر تعیین‌شده مثبت و منفی برای رسیدن به شرایط کمیته مناسب بر طبق معادله ۵ و با اضافه شدن فاکتور مقیاس f به آن جهت تخمین تباین چگالی اضافی $\Delta \rho_j$ پیاپی بررسی می‌شوند. پارامترهای ناشناخته f ، g_0 ، g_x ، g_y و $\delta\rho_T$ در معادلات ۳، ۴ و ۷ برای یک معیار کمیته‌سازی مرکب مطابق با مرحله (k+1)م طبق رابطه زیر 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 تکمیل‌شده ما قبل و مقدار چگالی $\Delta \rho_j$ است که بررسی می‌شود (کاماچو و همکاران، ۲۰۰۷). برای محاسبه مقادیر باقی‌مانده v_i که وابسته به عبارت‌های انتخاب‌شده $\Delta \rho_j$ هستند، بار دیگر معادله قبل حل می‌شود. سپس مقدار خطای عدم برازش e_j^2 به عنوان معیاری برای متناسب‌بودن منشور J_k^+ و تباین چگالی اختیارشده، از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

درواقع در مرحله $(k+1)$ ، احتمالات مدل برای هر یک از منشورهای بدون تغییر و همچنین برای تباین‌های چگالی منفی یا مثبت جستجو می‌شود و سپس منشور J_k^+ م با یک تباین چگالی که از مقدار کمیته e_j^2 به دست می‌آید، انتخاب و سبب رشد مدل می‌شود. تأثیر مقدار این سلول به مقادیر مدل‌شده Δg_i^c اضافه می‌گردد. در رابطه بالا λ ضریب تعادل بین جمله عدم برازش داده‌های محاسبه‌شده و اندازه‌گیری (جمله اول) و نقش پیچیدگی یا سادگی مدل (جمله دوم) است.

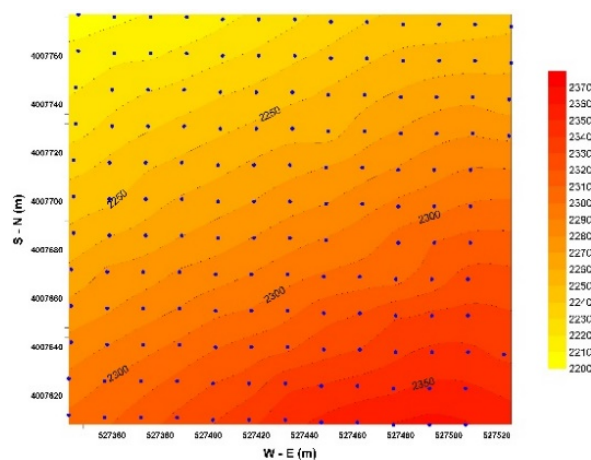
۳. موقعیت و زمین‌شناسی منطقه

محل مورد نظر برای مطالعات میکروگرانی‌سنجی، قسمت کوچکی از ناحیه در نظر گرفته شده برای احداث سد تلمبه‌ای سیاه‌بیشه در شمال کشور است. این نقاط در روی یک تونل مورب که به محدوده ریزشی برخورد کرده است، قرار دارند. محدوده مورد نظر جزئی از رشته کوه‌های البرز است که بیشتر تشکیلات زمین‌شناسی آن مربوط به سنگ‌های آهکی سازند الیکا و سنگ‌های ماسه سنگی، شیلی و دولومیتی سازند شمشک است. در سایت مورد نظر واحد سنگ آهکی در کنار آذرین‌های نفوذی دیده می‌شود که به شدت تحت تأثیر درز و شکاف‌ها و گسل‌های ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی قرار گرفته است. برداشت‌های

میکروگرانی‌سنجی در بالای منطقه ریزشی و روی ۱۳ پروفیل با فواصل ۱۵ متری و با همین فاصله برای نقاط برداشت، به منظور تعیین حفرات احتمالی و تعیین ساختار زیرسطحی زیر آن انجام پذیرفته است. تعداد نقاط برداشت شده ۱۴۸ نقطه گرانی قرائت شده است. چگالی متوسط منطقه با استفاده از روش نلتون و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تخمین زده شده است. موقعیت نقاط برداشت شده بر روی نقشه گوگل ارت در شکل ۱-ا قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود ارتفاع نقاط برداشت از سطح دریا از حدود ۲۲۰۰ تا حدود ۲۳۷۰ متر است.



(الف)



Topography map

(ب)

شکل ۱. الف: موقعیت ایستگاه‌های گرانی روی نقشه گوگل ارت. ب: نقشه توپوگرافی منطقه، که نقاط برداشت‌شده گرانی روی آن مشخص شده است. (خطوط پربندی بر حسب ارتفاع از سطح دریا است).

۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

همان‌طور که در شکل خطوط پربندی‌شده ارتفاعی مشاهده می‌شود، شیب زمین در محدوده برداشت داده‌ها از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی است و اختلاف ارتفاع بین بلندترین و کمترین نقطه در ناحیه مورد مطالعه حدود ۱۷۰ متر است.

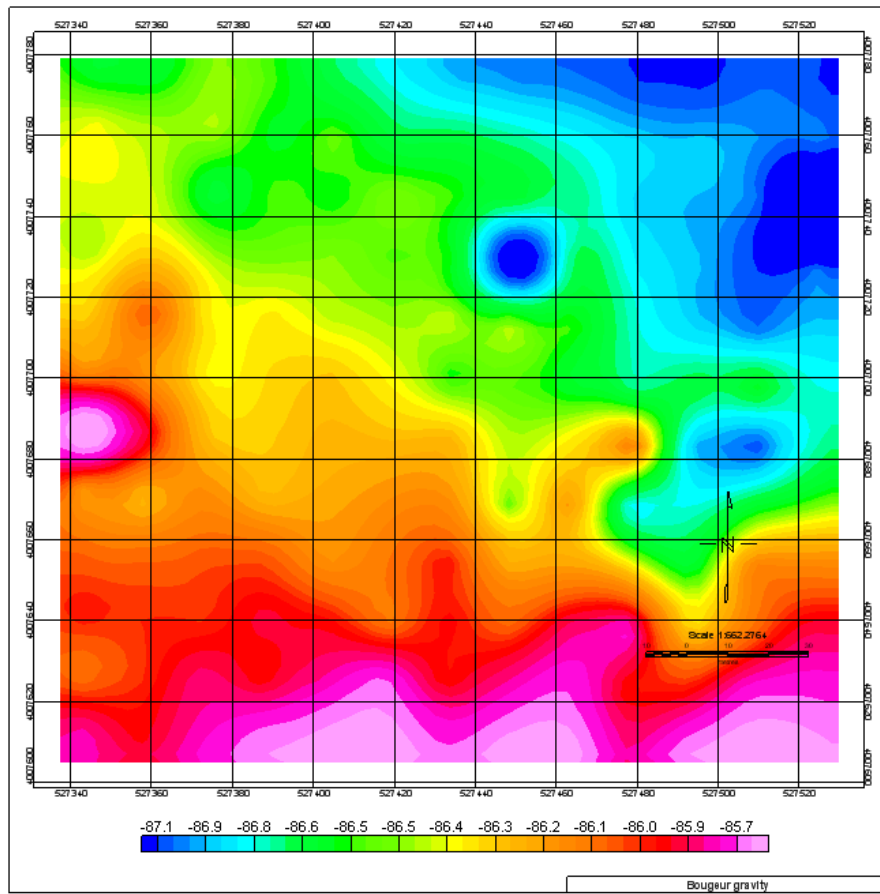
برای تعیین مناسب‌ترین چگالی برای تصحیحات داده‌های گرانی اندازه‌گیری‌شده، روش نتلتون در نظر گرفته شده است. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از زمین‌شناسی منطقه، محدوده‌های چگالی از ۲ تا ۲/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای اجرای تصحیحات منظور شده است. پس از تصحیحات با این محدوده‌های چگالی، هموارترین پروفیل گرانی بوگه توسط چگالی ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب ایجاد شده است که بنابراین داده‌های گرانی با این چگالی تصحیح شده‌اند.

با اجرای تصحیحات هوای آزاد، بوگه و توپوگرافی روی داده‌های گرانی برداشت‌شده، داده‌های گرانی بوگه محاسبه شده‌اند که نقشه پربندی گرانی بوگه داده‌ها در ناحیه مذکور در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای آن‌که آثارگرانی ساختارهای عمیق مقیاس از داده‌های گرانی بوگه جدا شوند، داده‌های مذکور به کمک برنامه نوشته‌شده با چندجمله‌ای‌های متعامد و بهنجار که توابعی مستقل هستند، برازش داده شده تا داده‌های روند منطقه‌ای محاسبه شوند. علت انتخاب چندجمله‌ای‌های مذکور به جای چندجمله‌ای‌های معمولی آن است که معادلاتی که از آن‌ها برای محاسبه ضرایب روند شکل می‌گیرد، بدشرایط نخواهند بود و قدرت همگرایی این روش در مقایسه با تقریب کمترین مربعات بیشتر خواهد بود؛ بنابراین روش مذکور توانمندتر از روش معمول کمترین مربعات برای محاسبه ضرایب روند است (سارما و دیگران، ۱۹۹۰). چندجمله‌ای‌های متعامد در دو بعد با روش گرام - اشمیت (Gram-Schmidt) برای یک‌سری از چندجمله‌ای‌ها فراهم خواهد شد.

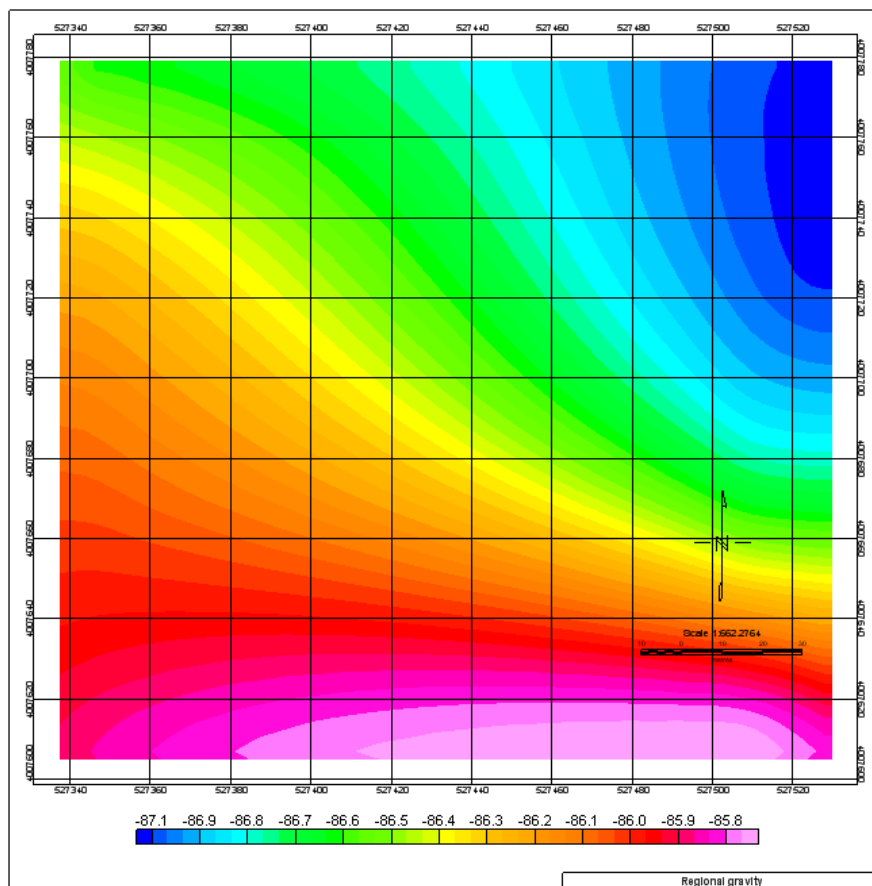
انتخاب تعداد و مرتبه چند جمله‌ای‌های متعامد و بهنجار در برنامه، با به‌کاربردن تحلیل آماری آزمایش F (F test) صورت گرفته است (سارما و دیگران، ۱۹۹۰). با توجه به تحلیل آماری مذکور در برنامه نوشته‌شده فرتن، چندجمله‌ای مرتبه سه برای محاسبه آثار روند منطقه‌ای در نظر گرفته شده است. زیرا در نظر گرفتن مرتبه‌های بالاتر از چند جمله‌ای‌های متعامد و بهنجار در فرایند محاسبه آثار منطقه‌ای، تأثیر ناچیزی در برازش سطح حاصل با داده‌های اندازه‌گیری داشته است؛ بنابراین انتخاب جمله‌ای متعامد و بهنجار تا مرتبه سوم در برنامه مناسب تشخیص داده شده است. پس از محاسبه اثر گرانی منطقه‌ای برای تمام نقاط برداشت‌شده با استفاده از برنامه مذکور، نقشه پربندی آن‌ها در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است که روندی تقریباً شمال شرقی - جنوب غربی را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه اثر گرانی منطقه‌ای برای هر ایستگاه این اثر از گرانی بوگه هر ایستگاه کم شده است، به‌طوری که اثر باقی‌مانده در شکل ۴ به نمایش درآمده‌اند. در روی شکل مذکور، سه بی‌هنجاری منفی گرانی برجسته قابل تشخیص است. در شکل مذکور دو بی‌هنجاری کوچک‌تر منفی در قسمت بالای نقشه و یک بی‌هنجاری منفی بزرگ‌تر در پایین نقشه با رنگ‌های آبی تیره مشاهده می‌شوند.

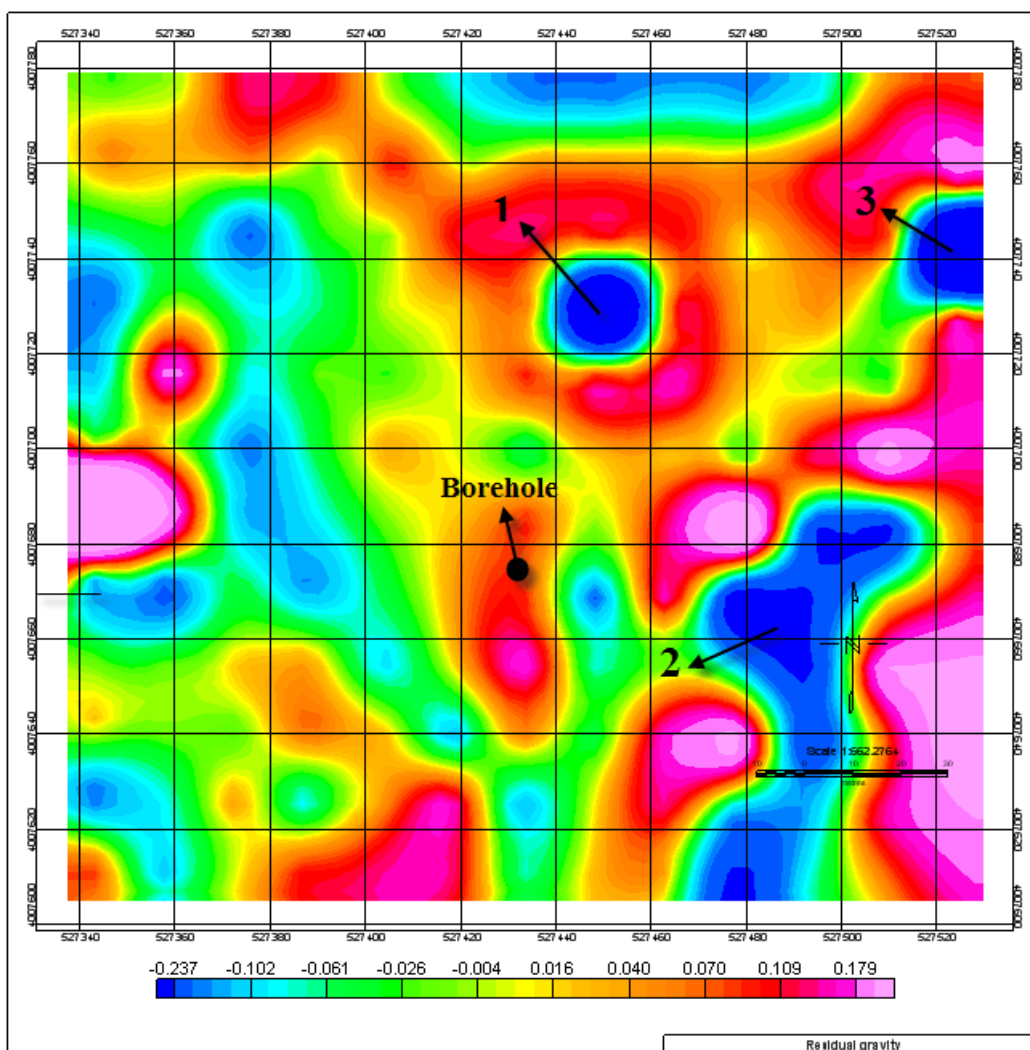
از روی نقشه بی‌هنجاری گرانی باقیمانده، موقعیت بی‌هنجاری‌های مورد نظر مشخص شده و مختصات مراکز آن‌ها در جدول ۱ درج گردیده است. همچنین در شکل ۴ یعنی روی نقشه پربندی‌شده اثر گرانی باقیمانده، محل گمانه اکتشافی نیز مشخص شده است. این گمانه تا عمق ۱۲۴ متر حفاری شده و شیب آن حدود ۳۰ درجه است. جنس تشکیلات این گمانه، تا عمق حدود ۱۰۰ متر از آهک و دولومیت متراکم و بعد از آن به‌صورت تناوبی از لایه‌های نازک شیل و ماسه‌سنگ خردشده گزارش شده است.



شکل ۲. نقشه پربندی گرانی بوگه برحسب میلی گال در ناحیه مورد مطالعه.



شکل ۳. نقشه پربندی اثر گرانی منطقه‌ای برحسب میلی گال که روند آن از شمال شرقی به جنوب غربی است.



شکل ۴. نقشه پربندی اثر گرانی باقیمانده برجسب میلی‌گال که بی‌هنجاری‌های منفی و مثبت به وضوح روی آن مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مختصات مراکز سه بی‌هنجاری بارز و گمانه اکتشافی در روی نقشه گرانی باقیمانده.

عنوان	X(UTM)	Y (UTM)	Altitude(m)
شماره (۱)	۵۲۷۴۵۰	۴۰۰۷۷۲۹	۲۲۵۴
شماره (۲)	۵۲۷۴۶۳	۴۰۰۷۶۵۶	۲۳۲۰
شماره (۳)	۵۲۷۵۲۵	۴۰۰۷۷۴۲	۲۲۶۰
گمانه	۵۲۷۴۲۵	۴۰۰۷۶۷۵	۲۲۶۴

معکوس‌سازی شده‌اند.

در شروع برنامه، محدوده تباین چگالی‌ها ± 400 کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار $\alpha=0.2$ انتخاب گردیده‌اند. باید اشاره شود که پارامتر α در فرایند معکوس‌سازی داده‌ها یک مقدار مثبت است که مقدار آن می‌تواند بین صفر و یک انتخاب شود. مقدار آن می‌تواند نشان از الگویی باشد که گذار تباین چگالی را

۵. تحلیل نتایج حاصل از معکوس‌سازی داده‌های

گرانی

برای آنکه داده‌های بی‌هنجاری‌های گرانی باقیمانده به‌دست‌آمده بتوانند به توزیع‌های چگالی برگردانده شوند، با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی شرح داده شده (GROWTH 2.0) طی فرایندی که شامل دوره‌های تکرار مختلف است، برگردان یا

ساختارها با تباین چگالی‌های مثبت و منفی با رنگ‌های مختلف مشخص شده‌اند. در حقیقت توزیع تباین چگالی‌ها، روی مقاطع مذکور حاصل از مدل نهایی بهینه‌شده هستند. در پایان فرایند معکوس‌سازی مقدار ضریب λ برابر $35/6$ بوده است. تباین چگالی‌های به‌دست‌آمده از معکوس‌سازی در مدل نهایی در محدوده ± 527 کیلوگرم بر متر مکعب توزیع شده‌اند. اطلاعات به‌دست‌آمده از چاه گمانه که جنس ساختار را در اعماق مختلف در آن نشان می‌دهد و همچنین اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، کمک کرده تا بتوان تباین چگالی‌های مختلف توزیع‌شده روی برش‌ها و مقاطع را به تشکیلات مختلف سنگی نسبت داد. حال به تفسیر توزیع تباین چگالی‌های توزیع شده در روی برش‌های افقی و مقاطع قائم انتخاب‌شده می‌پردازیم.

۵-۱. تفسیر برش‌های افقی

برش‌های افقی حاصل از توزیع تباین چگالی‌ها که در ارتفاع‌های مختلف از سطح دریا ترسیم شده‌اند در شکل‌های زیر به تصویر کشیده شده‌اند. در این برش ناحیه‌های با تباین چگالی مثبت بالا با رنگ صورتی کم‌رنگ و نواحی با تباین چگالی منفی با رنگ بنفش مشخص شده‌اند. ارتفاع ایستگاه‌های اندازه‌گیری نیز نسبت به سطح دریا اندازه‌گیری شده‌اند؛ بنابراین ارتفاع آن‌ها در حقیقت سطح زمین را در محل اندازه‌گیری نشان می‌دهند. از این رو در روی برش‌های افقی مذکور موقعیت نقاط اندازه‌گیری همراه با ارتفاع آن‌ها نشان داده شده‌اند تا بتوان ضخامت تشکیلات از محل برش‌های افقی مذکور تا سطح زمین را به صورت کمی مشاهده کرد.

اولین برش افقی که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع تباین چگالی‌هایی را نشان می‌دهد که در ارتفاع ۲۲۸۰ متر از سطح دریا قرار دارند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در کنار هم مشاهده می‌شوند. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، نواحی نشان داده شده با رنگ بنفش و

در امتداد مرزهای جسم بی‌هنجار به سمت مرکز آن تعیین می‌کند. برای مقادیر کم α تباین چگالی در مرز جسم بی‌هنجار تند و ناگهانی تغییر می‌کند و به سمت مرکز آن کاهش می‌یابد؛ در حالی که برای مقادیر بزرگ‌تر α تباین چگالی به طرف مرکز جسم بی‌هنجار افزایش و به طرف پیرامون و جوانب جسم یا مرزها کاهش می‌یابد.

همچنین در فرایند معکوس‌سازی مقدار اولیه λ برابر ۱۵ انتخاب گردیده است. مدل ابتدایی مرکب از ۴۶۴۷ سلول بوده است. برای به‌دست‌آوردن مدلی با دقت بهتر و مرکب از تعداد سلول‌های بیشتر که بتواند اطلاعات بیشتری در مورد هندسه جسم بی‌هنجار را فراهم آورد، فرایند معکوس‌سازی بارها تکرار شده است. نهایتاً پس از فرایندهای تکراری، مدل نهایی به‌دست‌آمده شامل ۹۴۱۸ سلول با طول جانبی ۶ متر بوده است.

برای نمایش توزیع تباین چگالی‌های به‌دست‌آمده، ناشی از برگردان داده‌های بی‌هنجاری گرانی با روش معکوس‌سازی شرح داده شده، مقاطع و برش‌هایی از تباین‌های مذکور در موقعیت‌ها و عمق‌های مختلف تهیه شده است که تنها چند نمونه برجسته از آن‌ها در اینجا نمایش داده و بررسی خواهد شد. با استفاده از مقادیر مثبت و منفی تباین چگالی‌های به‌دست‌آمده در روی برش‌های مختلف افقی (در عمق‌های مختلف) و عمودی (در موقعیت‌های مختلف طولی و عرضی) عمق و جنس ساختارها و تشکیلات زیرسطحی ناحیه برداشت‌شده شناسایی گردیده است. در برش‌های افقی و مقاطع عرضی توزیع تباین چگالی‌های به‌دست‌آمده به توجه به مقادیرشان، به ساختارهای مختلف با جنس‌های مختلف با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و گمانه اکتشافی حفاری شده، نسبت داده شده‌اند.

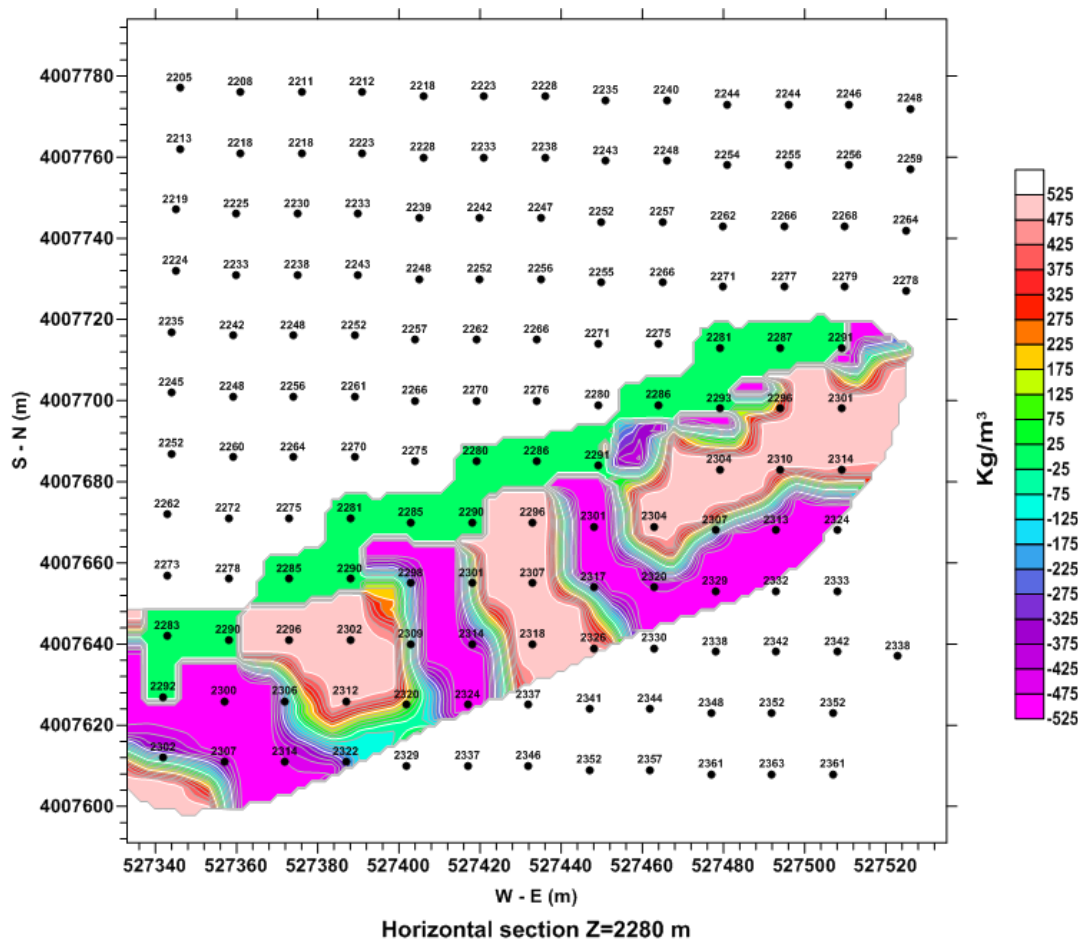
برش‌های افقی و مقاطع عمودی حاصل می‌توانند بینشی در مورد معماری و ساختار تشکیلات زیرسطحی ناحیه برداشت‌شده با توجه به توزیع مقادیر تباین چگالی‌شان و اطلاعات زمین‌شناسی موجود در ناحیه، در عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف فراهم آورند. در این برش‌ها

شامل توزیع تباین چگالی‌های پربندی‌شده شوند. علت قرارنگرفتن این نواحی تحت تأثیر مدل‌سازی، زیاد بودن ضخامت تشکیلات زیرآنها در مقایسه با ارتفاع برش و عمق مؤثر مدل‌سازی با توجه به فاصله ایستگاه‌ها و پروفیل‌هاست. با توجه به فواصل نقاط اندازه‌گیری (۱۵ متر) و ابعاد طولی و عرضی کم شبکه داده‌های برداشت‌شده، به نظر می‌رسد عمق مؤثر تشکیلات زیرسطحی در مدل‌سازی محدود باشد. بنابراین همان‌طور که روی این برش و سایر برش‌ها و مقاطع مشاهده خواهد شد، عمق متأثر از داده‌ها در مدل‌سازی، حدود ۵۰ متر خواهد بود. با توجه به شیب‌دار بودن ناحیه برداشت داده‌ها، از جنوب شرقی به سمت شمال غربی با اختلاف ارتفاعی حدود ۱۷۰ متر (شکل ۱) باید انتظار داشت که تشکیلاتی با ارتفاع تقریباً بیشتر از ۵۰ متر نسبت به ارتفاع برش مذکور، تحت تأثیر مدل‌سازی قرار نگیرند (یعنی نواحی پایین‌دست ناحیه پربندی‌شده به سمت جنوب شرقی). بنابراین در این برش و سایر برش‌ها این گونه نواحی به رنگ سفید مشاهده می‌شوند، یعنی نواحی‌ای که تحت تأثیر مدل‌سازی داده‌های بی‌هنجاری گرانی برداشت‌شده قرار نمی‌گیرند.

در روی مقاطع، نواحی‌ای را که مقادیر تباین چگالی‌هایشان ناگهان تغییر می‌کند، از منفی به مثبت یا بالعکس، یعنی مرز بین پربندهایی که با رنگ‌های بنفش و کرم نشان داده شده‌اند، می‌توان به محل ناپیوستگی تشکیلات سنگی آهکی خورد شده و کارستی و تشکیلات آهکی متراکم و آذرین نسبت داد که به صورت متناوب در این مقطع و سایر مقاطع مشاهده خواهند شد. در حقیقت تغییر توزیع ناگهانی تباین چگالی‌های مشاهده شده روی مقاطع، صحت گسل خورده بودن تشکیلات و تناوبی بودن آنها را که شامل تشکیلات آهکی و آذرین است به وضوح نشان می‌دهد.

تقریباً با حداکثر تباین چگالی منفی را می‌توان به تشکیلات آهکی نسبت داد. این نواحی خورد شده و دارای درز و شکاف هستند و از نظر کیفیت تراکم سنگی درجه پایینی دارند و از این رو در حفر سازه تونل مشکلاتی را از نظر ریزشی ایجاد می‌کنند. ناحیه‌های متضاد با این نواحی را که دارای حداکثر تباین چگالی مثبت (مشخص شده با رنگ صورتی کم‌رنگ) هستند، به صورت متناوب در بین نواحی با تباین حداکثر چگالی منفی می‌توان در این برش مشاهده کرد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به دست آمده، این نواحی را می‌توان به تشکیلات آهکی متراکم یا آذرین نفوذی نسبت داد که از نظر تراکم سنگی کیفیت بهتری در مقایسه با تشکیلات آهکی خورده شده و کارستی که تباین چگالی منفی دارند، نشان می‌دهند. در این برش همانند سایر مقاطع یا برش‌هایی که بعداً مشاهده خواهد شد، نواحی‌ای مشاهده می‌شوند که تحت تأثیر توزیع تباین چگالی‌ها حاصل از مدل‌سازی داده‌ها قرار نگرفته‌اند و به رنگ سفید دیده می‌شوند. نواحی سفیدرنگی که در بالای بخش پربندی‌شده توزیع تباین چگالی‌ها حاصل از مدل‌سازی، با ارتفاعات مختلف مشاهده می‌شوند (در بخش شمال غربی) در ارتفاعاتی از سطح دریا قرار دارند که ارتفاع آنها کمتر از ارتفاع برش مذکور است (نسبت به سطح دریا)؛ به عبارت دیگر بالای برش قرار گرفته‌اند و بالطبع شامل تشکیلات سنگی نمی‌شوند و بنابراین تحت تأثیر مدل‌سازی داده‌ها قرار نگرفته‌اند.

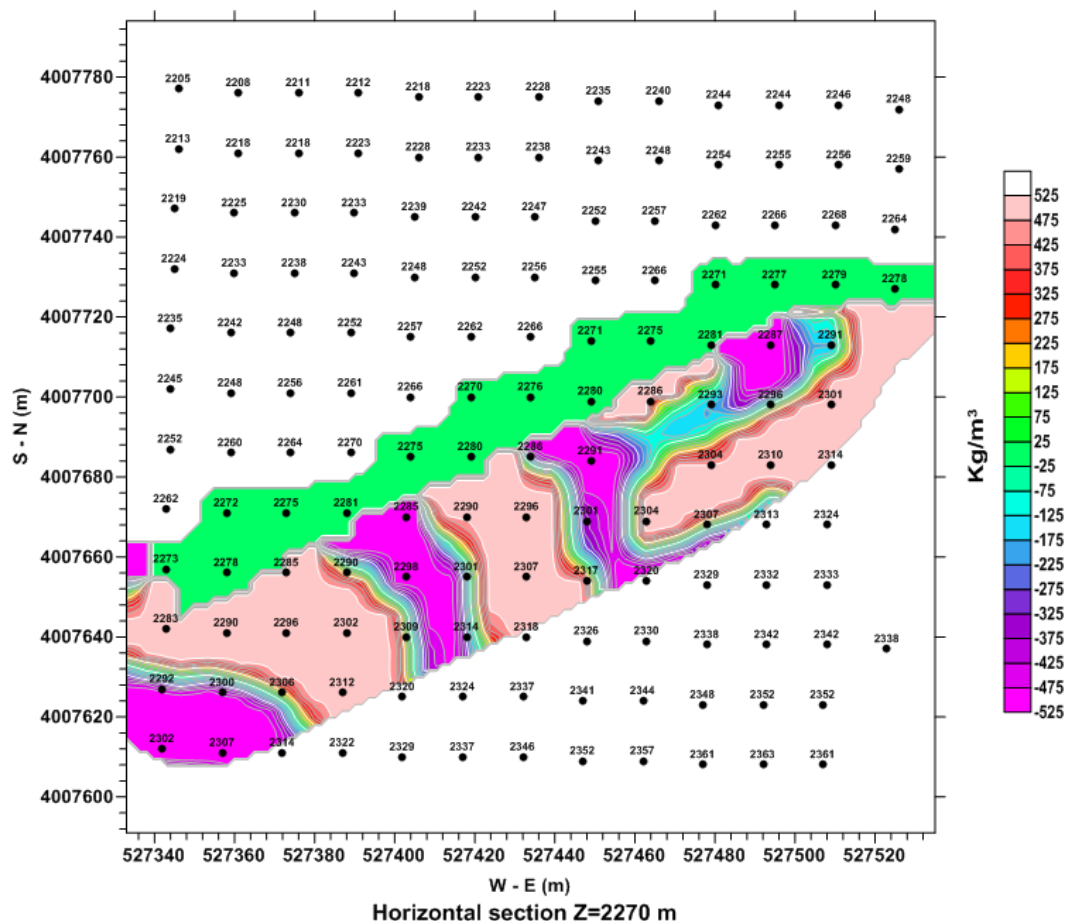
نواحی سفیدرنگی که در بخش پایینی توزیع تباین چگالی‌های پربندی‌شده در برش مشاهده می‌شود (در بخش جنوب شرقی) شامل ایستگاه‌های اندازه‌گیری است (سطح زمین) که ارتفاع آنها نسبت به سطح دریا بیشتر از ارتفاع برش مذکور است و به نظر می‌رسد تشکیلات زیر ایستگاه‌های اندازه‌گیری ناحیه مذکور باید تحت تأثیر مدل‌سازی داده‌ها قرار می‌گرفته‌اند، یعنی



شکل ۵. برش افقی از توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در ارتفاع ۲۲۸۰ متر از سطح دریا.

انتخاب سوم از برش‌های به‌دست‌آمده افقی، در ارتفاع ۲۲۴۰ متر از سطح دریا قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، حوزه پربندی‌شده شامل توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در مقایسه با سایر مقاطع قبلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، به سمت شمال غرب جابه‌جا شده است (ناشی از اختلاف ارتفاع و جهت شیب ناحیه مورد مطالعه). در مقطع مذکور سه ناحیه با حداکثر تباین چگالی منفی (نواحی با رنگ بنفش) به‌صورت متناوب بین نواحی با حداکثر تباین چگالی مثبت (نواحی با رنگ صورتی کم‌رنگ) دیده می‌شوند. دو ناحیه بالایی با تباین چگالی‌های منفی بیشتر متأثر از آثار بی‌هنجاری‌های گرانی منفی نشان داده شده در شکل ۴ با شماره‌های ۱ و ۳ است. مثل مقاطع قبلی می‌توان نواحی کم‌چگال را به تشکیلات آهکی خورده شده و کارستی و نواحی پُرچگال را به تشکیلات آهکی متراکم و آذرین نفوذی نسبت داد. مرز بین این تشکیلات را نیز می‌توان ناشی از گسل خوردگی دانست.

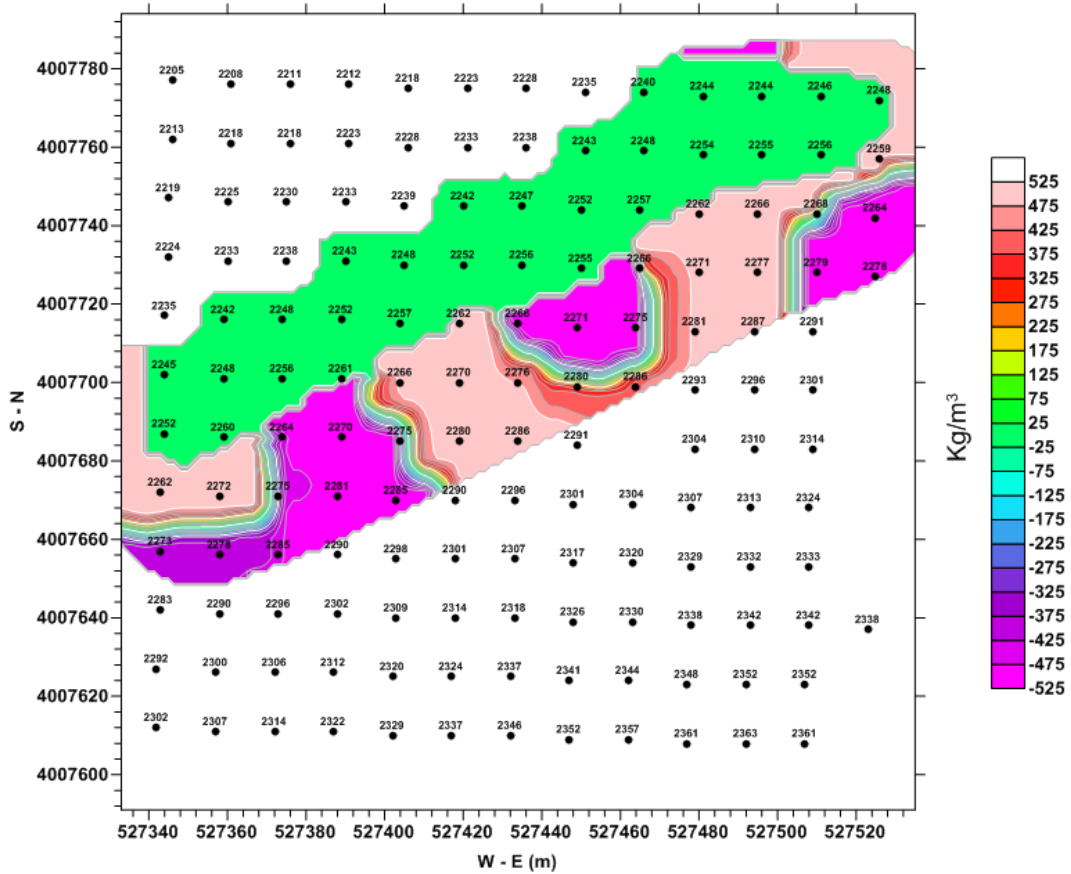
برش افقی انتخابی دوم برشی است که در ارتفاع ۲۲۷۰ متر از سطح دریا قرار دارد. چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در این برش مثل برش قبل، نواحی شامل تباین چگالی‌های حداکثری منفی (رنگ‌های بنفش) به‌صورت متناوب و تقریباً در همان محل‌ها بین نواحی شامل تباین چگالی‌های حداکثری مثبت (رنگ‌های صورتی کم‌رنگ) مشاهده می‌گردند. نواحی کم‌چگال با تراکم سنگی پایین را می‌توان مثل برش قبل به آهک‌های خورده شده (آسیب‌پذیر در سازه حفر تونل) و نواحی با چگالی بالا را به تشکیلات آهکی متراکم و آذرین با تراکم سنگی بالا نسبت داد. بالطبع مرز بین این نواحی سنگی با جنس‌ها و تباین‌های چگالی متفاوت را می‌توان ناشی از نواحی گسل‌خورده دانست. لازم به ذکر است که ناحیه نوارگونه پربندی‌شده (ناحیه تحت تأثیر مدل‌سازی) در مقایسه با برش قبل کمی به سمت بالا یا به سمت جنوب غربی جابه‌جا شده است که ناشی از اختلاف ارتفاع و شیب موجود در منطقه است.



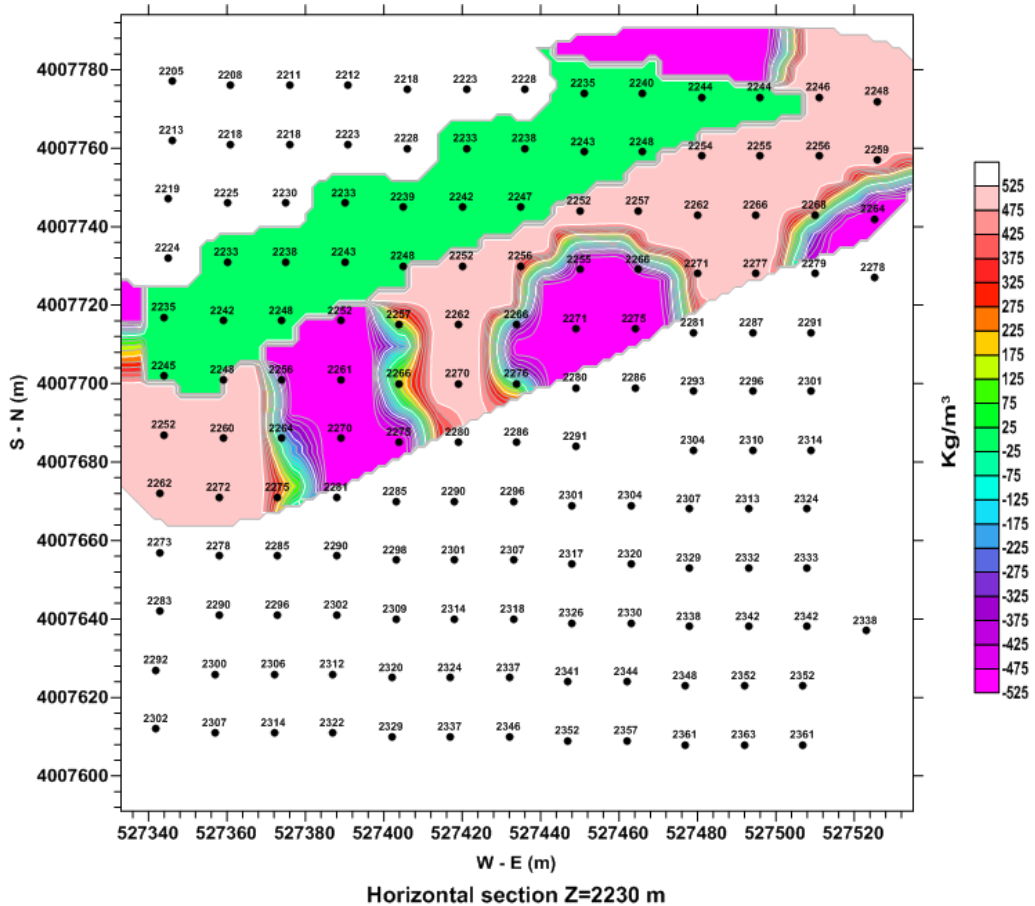
شکل ۶. برش افقی از توزیع تباين چگالی‌های مثبت و منفي در ارتفاع ۲۲۷۰ متر از سطح دریا.

تشکیلات آهکی متراکم و آذرین نفوذی دانست و مرز آن‌ها را به گسل خوردگی تشکیلات مذکور نسبت داد. به علت محدودیت فضا بقیه برش‌های افقی تولیدشده ناشی از برگردان داده‌های گرانی بی‌هنجاری نشان داده نمی‌شوند. این برش‌ها در ارتفاعات کمتر یا بیشتری از سطح دریا در مقایسه با برش‌های قبلی قرار دارند. طبق روندی که در برش‌های قبلی مشاهده شد با کاهش ارتفاع از سطح دریا باید انتظار داشت که ناحیه نوارگونه، شامل خطوط پربندی توزیع تباين چگالی‌ها به تدریج به سمت شمال غربی یا جنوب شرقی جابه‌جا شوند و با توجه به نقشه بی‌هنجاری‌های گرانی نشان داده شده در شکل ۴ انتظار داریم نواحی متناوب شامل توزیع تباين چگالی‌های منفي و مثبت در مقایسه با برش‌های قبلی کاهش یافته و شکل توزیع و گسترش آن‌ها نیز تغییر کند؛ البته این پدیده در مورد برش‌های نشان داده‌نشده که در ارتفاع بیشتر از ۲۲۸۰ متر از سطح دریا قرار دارند نیز صادق خواهد بود.

برش چهارم افقی انتخابی که در شکل ۸ نمایش داده شده است، در ارتفاع ۲۲۳۰ متر از سطح دریا قرار دارد. با مقایسه این برش با برش قبلی، مشاهده می‌شود که سه ناحیه با تباين چگالی‌های منفي مشاهده شده تقریباً در محل‌های قبلی برش قبلی قرار دارند که به صورت متناوب بین همان نواحی با تباين چگالی‌های مثبت قرار گرفته‌اند. شکل خطوط پربندی این نواحی کم‌چگال و پرچگال به گونه‌ای است که اگر در کنار برش قبلی قرار گیرند، آن‌ها را تکمیل کرده و به صورت پربندهای بسته در می‌آیند. لازم به ذکر است که ناحیه نوارگونه توزیع تباين چگالی‌های پربندی شده در این برش در مقایسه با برش قبلی کمی به سمت شمال غرب، ناشی از شیب و اختلاف ارتفاع، جابه‌جا شده است که باید این چنین باشد. همان‌طور که در تفسیر برش‌های قبلی نیز اشاره گردید، نواحی کم‌چگال شامل تباين چگالی‌های منفي را می‌توان ناشی از تشکیلات آهکی خوردشده و کارستی، نواحی با تباين چگالی‌های مثبت را ناشی از



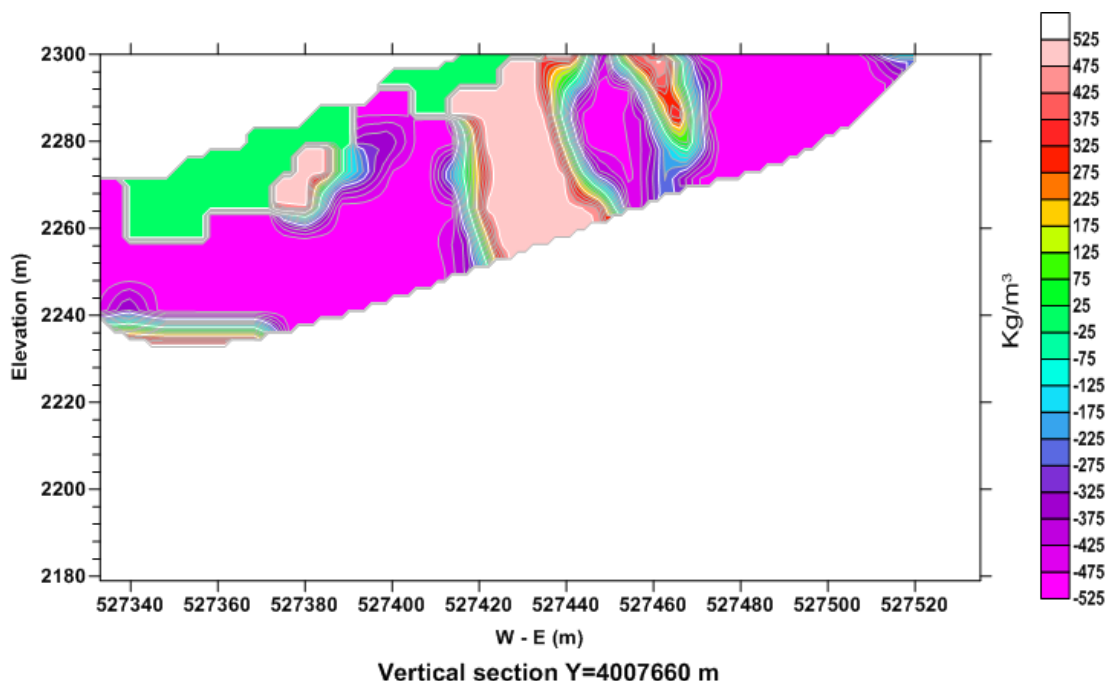
شکل ۷. برش افقی از توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در ارتفاع ۲۲۴۰ متر از سطح دریا.



شکل ۸. برش افقی از توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در ارتفاع ۲۲۳۰ متر از سطح دریا.

بررسی قرار گرفتند، توزیع تباين چگالی‌ها تحت تأثیر مدل‌سازی به‌صورت نوآرمانند است که به‌صورت شیب‌دار در راستای شمال-شرقی به جنوب-غربی در ارتفاعات مختلف از سطح دریا توزیع شده‌اند. علت شیب‌دار بودن آن است که ارتفاع ایستگاه‌های اندازه‌گیری از شرق به غرب کاهش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد نواحی سفیدرنگ مشاهده‌شده در این مقطع را که تحت پوشش توزیع تباين‌های چگالی پربندی‌شده قرار نگرفتند، می‌توان ناشی از اختلاف ارتفاع بین نقاط اندازه‌گیری با توجه به شیب ناحیه برداشت‌شده دانست (شکل ۱) که با توجه به عمق مؤثر داده‌ها تحت تأثیر معکوس‌سازی قرار نگرفته‌اند. همان‌طور که در مقطع مذکور مشاهده می‌شود یک ناحیه با تباين چگالی مثبت (صورتی کم‌رنگ) بین دو ناحیه با تباين چگالی منفی (بنفش‌رنگ) قرار گرفته است. مثل قبل می‌توان ناحیه با تباين چگالی مثبت را به تشکیلات آذرین نفوذی و آهک‌های متراکم و نواحی با تباين چگالی‌های منفی را به تشکیلات آهکی خوردشده و مرز بین آن‌ها را به گسل خوردگی نسبت داد. ارتفاع توزیع تباين چگالی‌ها در این مقطع از حدود ۲۲۳۰ متر تا ۲۳۰۰ متر متغیر بوده و ضخامت تشکیلات سنگی تحت پوشش مدل‌سازی حدود ۵۰ متر است.

۲-۵. تفسیر مقاطع عمودی (در راستای محور Xها)
 حال به بررسی مقاطع عمودی که در راستای محور Xها یا در امتداد غربی-شرقی قرار دارند، پرداخته می‌شود. در این مقاطع توزیع تباين چگالی‌های جرمی در امتداد غربی-شرقی از سطح زمین تا عمق معینی که حدود ۵۰ متر است، بررسی می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد حداکثر عمق مدل حاصل از معکوس‌سازی داده‌های بی‌هنجاری گرانی، به فاصله بین ایستگاه‌ها و ابعاد شبکه برداشت‌شده بستگی دارد که به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار انتخاب می‌گردد. مقاطع زیادی در این راستا با استفاده از نتایج معکوس‌سازی تهیه شده است که از بین آن‌ها تعدادی محدود برای تفسیر انتخاب شده‌اند. اولین مقطع عرضی با مختصه $y=4007660 m$ است که با مراجعه به نقشه بی‌هنجاری‌های گرانی (شکل ۴) مشاهده می‌شود که باید بخش قسمت شرقی آن تحت تأثیر بخشی از بی‌هنجاری شماره ۱ در فرایند معکوس‌سازی داده‌ها قرار گرفته باشد. این مقطع در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، توزیع تباين چگالی‌های جرمی در راستای غربی-شرقی در ارتفاعات متفاوت از سطح دریا قابل مشاهده است. همانند برش‌های افقی که در بخش قبل مورد بحث و



شکل ۹. مقطع قائم از توزیع تباين چگالی‌های مثبت و منفی در راستای غربی-شرقی در موقعیت افقی $y=4007660 m$.

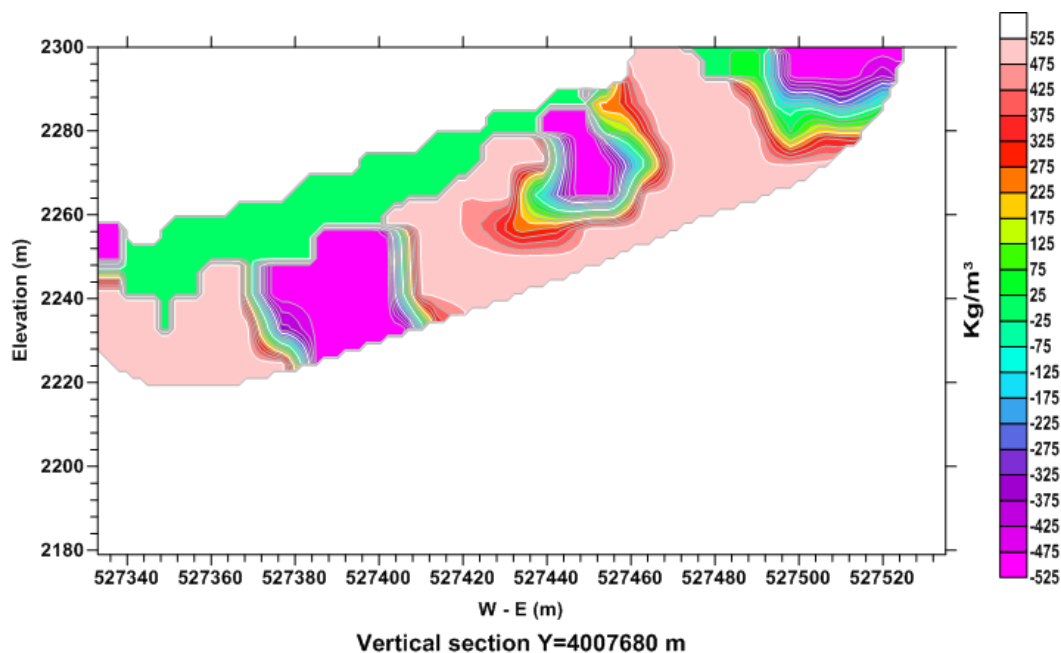
تشکیلات آهکی خوردشده باشد، به تناوب بین نواحی با تباین چگالی‌های مثبت (نواحی صورتی کم‌رنگ) که متأثر از تشکیلات آذرین نفوذی و آهکی متراکم هستند، قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که این بی‌هنجاری‌های جرمی در عمق‌های متفاوت قرار گرفته‌اند.

۳-۵. تفسیر مقاطع عمودی (در راستای محور Yها)

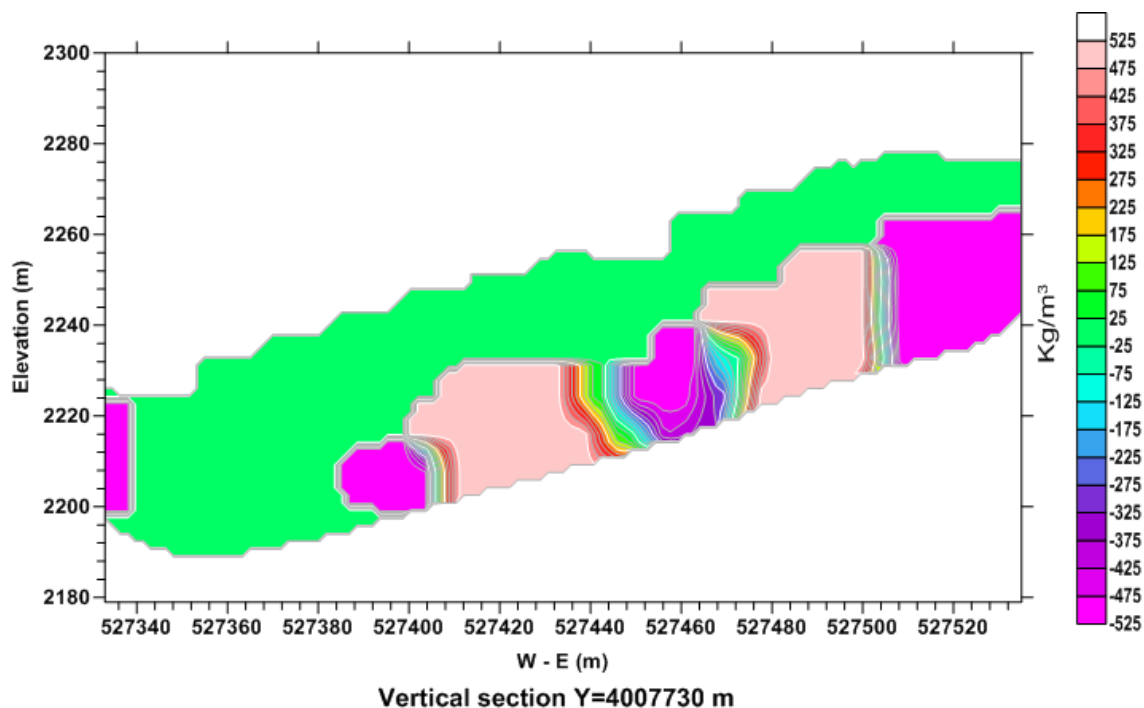
در این بخش مقاطع عمودی انتخاب و بررسی می‌شوند که موازی محور Yها یا در راستای جنوب - شمال قرار دارند. به عبارت دیگر مقاطع توزیع تباین چگالی‌ها در صفحات قائم که موازی راستای جنوب - شمال هستند، در موقعیت‌های مختلف روی محور X انتخاب و تفسیر می‌شوند. بدیهی است که توزیع تباین چگالی‌ها در روی این مقاطع حاصل معکوس‌سازی داده‌های بی‌هنجارگرانی است که در شکل ۴ نمایش داده شده و چند بی‌هنجاری منفی شاخص روی آن مشخص گردیده است. این بی‌هنجاری‌ها مربوط به تشکیلات سازندی خوردشده و کم‌تراکم هستند که می‌توانند در هنگام ساخت سازه تونل مشکلاتی ایجاد کنند. حال به دلیل فضای محدود تعدادی از آن‌ها انتخاب و تحلیل می‌شوند.

مقطع دوم انتخابی در راستای غربی - شرقی دارای مختصه $y=4007680$ m است که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. این مقطع توزیع تباین چگالی‌ها را از ارتفاع حدود ۲۲۲۰ متر از سطح دریا تا ارتفاع ۲۳۰۰ متر تحت پوشش قرار داده است. در این مقطع نواحی با ابعاد نسبتاً کوچک از تباین چگالی‌های منفی (رنگ‌های بنفش) به صورت متناوب بین نواحی وسیع‌تری از تباین چگالی‌های مثبت (صورتی کم‌رنگ) قرار گرفته‌اند که آن را به ترتیب به تشکیلات آهکی خورد شده و آذرین نفوذی و تشکیلات آهکی متراکم می‌توان نسبت داد. در این مقطع نواحی گسل‌خورده نیز در مرز این نواحی هستند.

سومین مقطع برگزیده شده در راستای شرقی - غربی در مختصه $y=4007730$ m است. در این مقطع تباین چگالی‌ها از ارتفاع حدود ۲۲۷۰ متر ۲۱۹۰ متر از سطح دریا توزیع شده‌اند (شکل ۱۱). بخشی از نواحی با تباین چگالی‌های منفی (در قسمت شرقی و تقریباً مرکزی) که با رنگ بنفش قابل مشاهده‌اند، می‌تواند ناشی از تأثیر بی‌هنجاری‌های گرانی شماره‌های ۳ و ۱ باشد که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند؛ البته یک ناحیه کوچک با تباین چگالی منفی نیز در قسمت تقریباً غربی مشاهده می‌شود. این نواحی که می‌تواند ناشی از



شکل ۱۰. مقطع قائم از توزیع تباین چگالی‌های مثبت و منفی در راستای غربی - شرقی در موقعیت افقی $y=4007680$ m.

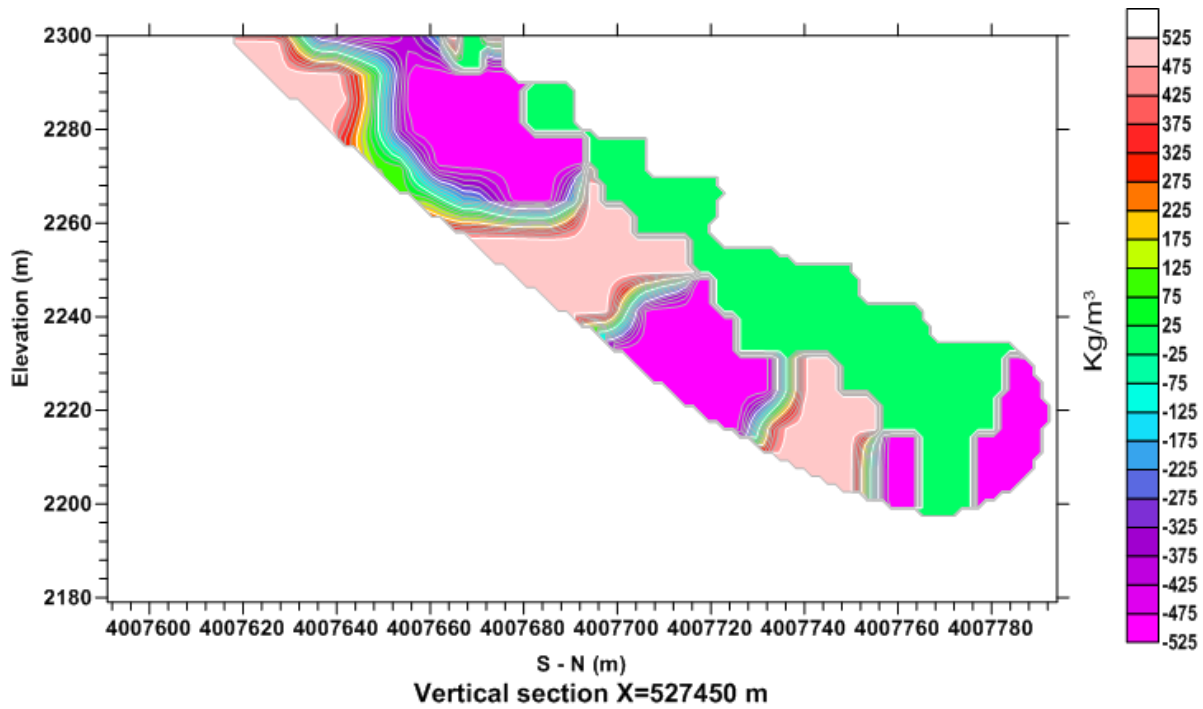


شکل ۱۱. مقطع قائم از توزیع تباين چگالی‌های مثبت و منفي در راستای غربی - شرقی در موقعیت افقی $y=4007730$ m

تشکیلات سنگی آهکی خورده‌شده و آسیب‌پذیر در مقابل سازه‌ساخت تونل است. مثل سایر مقاطع توزیع تباين چگالی نوامانند است که در راستای شمال - غربی، جنوب شرقی با ضخامت حدود ۵۰ متر که عمق مؤثر مدل‌سازی بوده است، جهت‌مند شده است.

دومین مقطع عمودی توزیع تباين چگالی‌های جرمی به موازات محور y ها در موقعیت افقی $x=527490$ m برگزیده شده است (شکل ۱۳) که از محل بی‌هنجاری گرانی شماره ۲ (شکل ۴) عبور می‌کند. شاخص‌ترین بی‌هنجاری جرمی منفي که در موقعیت 4007660 متر قرار دارد، مربوط به اثر بی‌هنجاری گرانی شماره ۲ مشخص‌شده در شکل ۴ است. این بی‌هنجاری جرمی منفي از ارتفاع ۲۳۰۰ متر تا ۲۲۵۰ متر قرار دارد، یعنی ضخامت آن حدود ۵۰ متر است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، اثر این بی‌هنجاری منفي مرتبط به تشکیلات سنگی آهکی خردشده با تراکم ضعیف است. بعد از این بی‌هنجاری منفي شاخص، بی‌هنجاری مثبت بزرگ به‌صورت کشیده مشاهده می‌گردد که تا ارتفاع ۲۲۱۰ متر ادامه می‌یابد و نشان از وجود سنگ‌های آذرین نفوذی یا آهکی با تراکم بالا دارد.

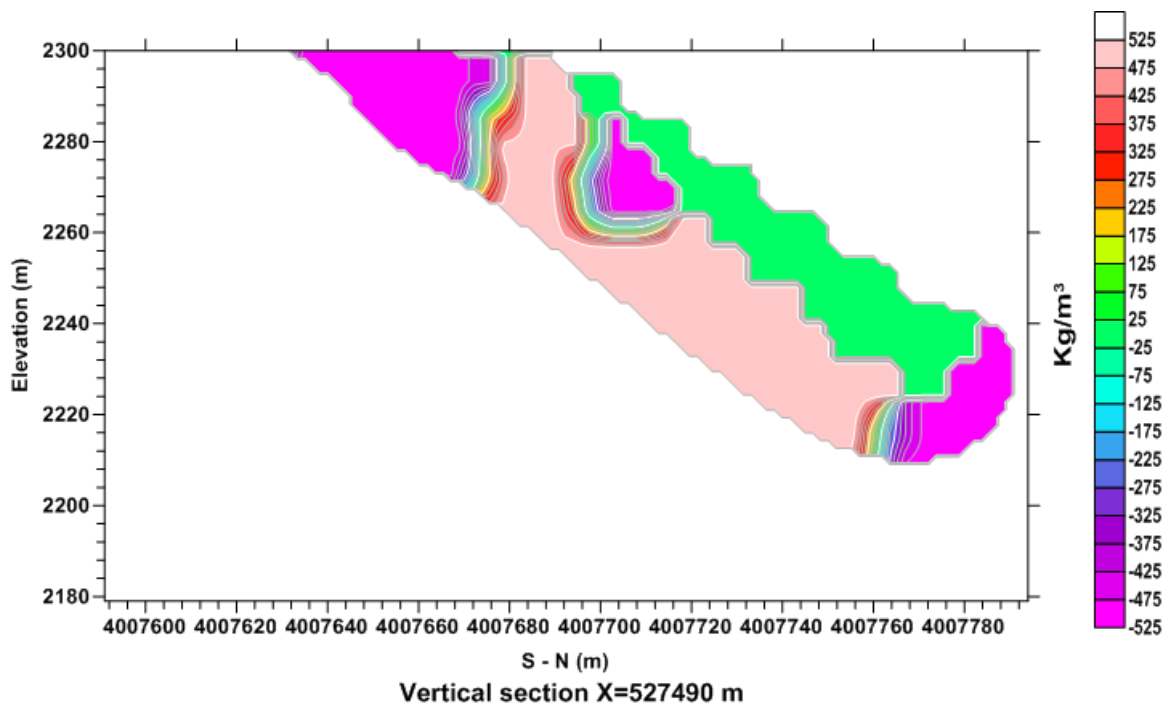
اولین مقطع عمودی انتخابی از این سری در موقعیت افقی $x=527450$ m است (شکل ۱۲) که از محل بی‌هنجاری‌های منفي اصلی و فرعی عبور می‌کند؛ یکی از آنها بی‌هنجاری شماره ۱ است که در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این مقطع تباين چگالی‌های منفي و مثبت از ارتفاع ۲۳۰۰ متر تا ۲۲۰۰ متر توزیع شده‌اند. همان‌طور که در سایر مقاطع مشاهده شد، این توزیع به‌صورت تناوبی از تباين‌های چگالی منفي و مثبت در این بازه ارتفاعی و در موقعیت‌های مختلف افقی دیده می‌شوند. نواحی با تباين چگالی مثبت (رنگ‌های صورتی کم‌رنگ) را به تشکیلات سنگی با تراکم بیشتر مثل آذرین نفوذی و تشکیلات آهکی متراکم و نواحی با تباين چگالی منفي (رنگ‌های بنفش) را به تشکیلات سنگی با تراکم ضعیف‌تر مثل آهک‌های خورده‌شده، هوازده، شامل درز و شکاف و احتمالاً شامل آب می‌توان نسبت داد. محل تماس این نواحی با تشکیلات سنگی متفاوت مناطق گسل خورده است. اثر بی‌هنجاری گرانی شماره ۱ (شکل ۴) تقریباً در موقعیت 4007730 متر در راستای جنوب - شمال به‌صورت یک ناحیه با چگالی منفي (رنگ بنفش) قابل رؤیت است که تقریباً در ارتفاع ۲۲۳۰ متر واقع شده است و نشان‌دهنده



شکل ۱۲. مقطع قائم از توزیع تباين چگالي‌های مثبت و منفي در راستای جنوبي - شمالي در موقعیت افقی $x=527450$ m.

جنس آهک‌های خورد شده است؛ البته ناحیه‌ای که در این شکل به رنگ سبز مشاهده می‌شود و تباين چگالی بسیار کمی دارد- چگالی مطلق آن در حد چگالی سنگ‌های زمینه است- ممکن است ناشی از تشکیلات سازند شمشک، متشکل از ماسه سنگ و آهک باشد.

در انتهای این مقطع یعنی در ارتفاع ۲۲۱۰ متر، ناحیه‌ای کوچک‌تر با تباين چگالی منفي رؤیت می‌شود که مربوط به بی‌هنجاری گرانی در انتهای بخش شمالی ناحیه مورد مطالعه در این موقعیت افقی است که بالطبع ناشی از تشکیلات سنگی با تراکم ضعیف‌تر یعنی از



شکل ۱۳. مقطع قائم از توزیع تباين چگالي‌های مثبت و منفي در راستای جنوبي - شمالي در موقعیت افقی $x=527490$ m.

۶. نتیجه‌گیری

و مقاطع قائم مشخص شد که عمق تأثیر داده از سطح زمین با توجه به فاصله ایستگاه‌ها و پروفیل‌های برداشت‌شده حدود ۵۰ متر است؛ یعنی ضخامت تشکیلات شناسایی شده زیرسطحی در مدل حاصل از معکوس‌سازی داده‌ها، حدود ۵۰ متر است. علاوه بر این در تمام برش‌ها و مقاطع مشخص گردید که وسعت ناحیه تحت تأثیر مدل‌سازی به صورت یک پهنه نوارگونه با راستای جنوب-غربی، شمال-شرقی است که این ناشی از شیب ناحیه برداشت داده‌ها و عمق تأثیر محدود داده‌ها یعنی حدود ۵۰ متر است. همچنین در روی برش‌ها و مقاطع مشاهده گردید که این پهنه نوارگونه توزیع تباین چگالی‌ها، در روی هر برش و مقطع موقعیت خاصی دارد؛ به طوری که اگر برش‌ها و مقاطع در کنار هم قرار گیرند حرکت این پهنه در راستای شیب یعنی از جنوب - شرقی به سمت شمال غربی خواهد بود.

در نتیجه با این مطالعه، نواحی آسیب‌پذیر یعنی نواحی با تباین چگالی‌های پایین (منفی) که به سنگ‌های آهکی خورده‌شده و کارستی نسبت داده شده‌اند، شناسایی گردیدند. این نواحی به علت کیفیت سنگی پایین می‌توانند مشکلاتی در حفر سازه تونل ایجاد کنند زیرا نواحی شناسایی‌شده مذکور می‌توانند ریزشی و نفوذپذیر در مقابل آب باشند که این خود می‌تواند مشکلاتی را در ساخت سازه تونل ایجاد نماید و بنابراین در این مورد باید تمهیدات مناسب برای ایجاد سازه تونل در این ناحیه در نظر گرفته شود.

در مقابل این تشکیلات سنگی دارای کیفیت تراکمی پایین نواحی با تباین چگالی بالا (مثبت) که به تشکیلات آهکی متراکم یا آذرین نفوذی نسبت داده شده‌اند، شناسایی شدند. این نواحی چون دارای تراکم و کیفیت سنگی خوبی هستند، برای حفر سازه تونل مناسب‌تر بوده و کمتر مشکلاتی مثل خطر ریزش یا نفوذ آب ایجاد خواهند کرد.

هدف اصلی در این تحقیق برگردان داده‌های برداشت‌شده میکروگرانی در منطقه مذکور برای آشکارسازی مکان‌های آسیب‌پذیر در حفر تونل در این ناحیه بوده است؛ بنابراین روشی انتخاب شد تا بتواند به‌طور مطلوبی با روش برگردان‌سازی داده‌های برداشت‌شده، توزیع‌های جرمی بی‌هنجار مرتبط با جنس ساختارهای زیرسطحی را شناسایی کند. برای این منظور برای آنکه به‌خوبی آثار منطقه‌ای یا عمیق‌تر از داده‌ها حذف شوند، تصمیم گرفته شد از روش کارای برازش چند جمله‌ای‌های متعامد و بهنجار که توابعی مستقل هستند در حذف آثار منطقه‌ای در داده‌ها استفاده شود. با برازش چند جمله‌ای‌های متعامد مرتبه سوم تا سه جمله با داده‌ها، به‌خوبی آثار ناخواسته از آن‌ها حذف گردید و سپس داده‌های حذف روندشده در فرایند معکوس مشارکت داده شدند. پس از معکوس‌سازی داده‌های بی‌هنجاری گرانی به‌دست‌آمده، توزیع تباین چگالی‌های جرمی در یک فضای معین سه‌بعدی زیرسطحی برآورد شدند و سپس برای نمایش این توزیع تباین جرم حجمی‌های سه‌بعدی، از برش‌ها در عمق‌های مختلف و مقاطع در موقعیت‌های مختلف افقی استفاده شد.

در روی برش‌های افقی در عمق‌های مختلف، نواحی با تباین چگالی‌های مثبت با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به سنگ‌های با تراکم بالا از جنس آهک و آذرین نفوذی و نواحی کم‌چگال‌تر با تباین چگالی‌های منفی به سنگ‌های با تراکم پایین از جنس آهک‌های خورده‌شده شامل درز و شکاف و کارستی نسبت داده شد. مرز بین این تشکیلات یعنی نواحی‌ای که تباین چگالی‌های جرمی ناگهان تغییر می‌کردند، به نواحی گسل‌خورده نسبت داده شد؛ البته همین نواحی با نگاهی دیگر در روی مقاطع قائم در موقعیت‌های مختلف افقی شناسایی گردیدند. لازم به ذکر است که در روی برش‌های افقی

مراجع

- Banham, S. G. and Pringle, J. K., 2011, Geophysical and intrusive site investigations to detect an abandoned coal-mine access shaft, Apedale, Staffordshire, UK. *Near Surface Geophysics* 9, doi: 10.3997/1873-0604.2011028.
- Benson, R., Kaufmann, R., Yuhr, L. and Hopkins, R., 2003, Locating and characterizing abandoned mines using microgravity. *Geophysical Technologies For Detecting Underground Coal Mine Voids Forum*, 28–30 July, Lexington, Kentucky, USA, Expanded Abstracts.
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S. J. and Ferguson, N. S., 1997. The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments, Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications*, 12, 153-166.
- Blecha, V. and Mrlina, J., 2001, Microgravity prospecting for the voids in an abandoned coal-working field. *Proceedings of 7th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Birmingham, UK.
- Branston, M. W. and Styles, P., 2006, Site characterization and assessment using the microgravity technique: A case history, *Near Surface Geophysics* 4, 377–385.
- Butler, D. K., 1980, Microgravimetric techniques for geotechnical applications. *Miscellaneous Paper GL-80-13*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- Butler, D. K., 1984, Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, *Geophysics* 49, 1084–1096.
- Camacho, A. G., Ferná'ndez, J. and Gottsmann, J., 2011, The 3- D gravity inversion package GROWTH 2.0 and its application to TenerifeIsland, Spain, *Computers & Geosciences* 37, 621–633.
- 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, 191–204.
- Camacho, A. G., Montesinos, F. G. and Vieira, R., 2000, A 3-D gravity inversion by means of growing bodies, *Geophysics* 65, 95–101.
- Camacho, A. G., Nunes, J. C., Ortiz, E., Franca, Z. and Vieira, R., 2007, Gravimetric determination of an intrusive complex under the island of Faial (Azores). Some methodological improvements. *Geophysical Journal International* 171, 478–494.
- Debeglia, N., Bitri, A. and Thierry, P., 2006, Karst investigations using microgravity and MASW, Application to Orléans, France, *Near Surface Geophysics* 4, 215-225.
- Hinze, W. J. 1990, The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics: Investigations in Geophysics*, No. 5, Vol. 1 (ed. S.H. Ward), pp. 75–126. SEG.
- Kaufmann, R. D. and DeHan, R. S., 2007, Microgravity mapping of karst conduits within the Woodville Karst Plain of North Florida, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '07)*, Denver, Colorado, USA, Expanded Abstracts, 1517–1526.
- Kis, L. and Szabo, Z., 2005, Microgravimetric investigations for shallow depth cavity detection, 11th Near Surface meeting, Palermo, Italy, Expanded Abstracts, P025.
- McDowell, P. W., 2002, *Geophysics in Engineering Investigations*, Geological Society Publishing House.
- Nabighian, M., Ander, M., Grauch, V., Hansen, R., LaFehr, R., Li, Y., Pearson, W., Peirce, W., Phillips, J. and Ruder, M., 2005, Historical development of the gravity method in exploration, *Geophysics* 70, 63–89.
- Renee, R. M., 1986, Gravity inversion using open, reject, and “shape-of-anomaly” fill criteria, *Geophysics* 51(4), 988-994.
- Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L. and Rotstein, Y., 2001, Cave detection and 4-D monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea, *The Leading Edge* 20, 896–900.
- Sarma, D. D. and Selvaraj, J. B., 1990, Two dimensional orthonormal trend surfaces for processing. *Computer & Geosciences* Vol. 16, No. 7, 897-909.
- Seigel, H. O., 1995, *High Precision Gravity Survey Guide*. Scintrex Ltd.
- Yule, D. E., Sharp, M. K. and Butler, D. K., 1997, Microgravity investigations of foundation conditions, *Geophysics* 63, 95–103.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.

Inversion of microgravity data around Siah Bisheh dam, for determination of subsurface structures in a tunnel construction path

Chegeni, M.¹, Mirzaei, M.^{2*}, Babaei, M.³ and Ardestani, E. V.⁴

1. M.Sc. in Geophysics, Department of Geophysics, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

2. Associate Professor, Department of Physics, Faculty of science, Arak University, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geophysics, Tuyserkan Branch, Islamic Azad University, Tuyserkan, Iran

4. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 26 Apr 2016, Accepted: 23 May 2017)

Summary

The gravity method is one of the geophysical tools used for geological, engineering and environmental investigations where the detection of geological boundaries, cavities, subsurface karstic features, subsoil irregularities, or landfills are essential. In higher accuracy measurements, the microgravity method has been widely and successfully used for locating and monitoring subsurface materials.

Since microgravity methods measure gravity variations at the surface, they are directly influenced by the density distribution in the subsurface and particularly by the presence of formation material, which may create a mass deficit relative to the density of the surrounding terrain. In many cases, deep or small-scale heterogeneities generating low-amplitude anomalies can be detected and the reliability of further interpretation requires highly accurate measurements which are carefully corrected for any quantifiable disturbing effects. The main purpose of the research, that was conducted in small part of a dam site, is to determine the quality and type of subsurface structures in location of tunnel construction. Study area for collecting microgravity data was located at a small part, considered for construction of Siah Bisheh dam, road Tehran to Chalous. Position of microgravity stations were over a tunnel path which in some parts encountered with collapsing structures. The study area was part of Alborz Mountains. Geology formation (Shemshak formation), consisting of lime beds together with igneous rocks which are severely affected by fractures. Data were collected along 13 profiles with separating distance of 15 m. The stations distance and number of data were 15 m and 148 respectively. Bouguer gravity anomaly was calculated after making corrections such as earth tide, free air, Bouguer, topography and terrain effects. The regional effect obtained using a program that is written in FORTRAN to fit orthogonal and orthonormal polynomials on the observed data and then residuals were estimated. Three negative anomalies were distinguishable in residual gravity map. Data of these anomalies are modeled with a 3-D inversion approach using GROWTH 2.0 software. The GROWTH 2.0 is an inversion tool which enables the user to obtain, in a nearly automatic and non-subjective mode, a 3D model of the subsurface density anomalies based on the observed gravity anomaly data. The current version of the tool has been developed from an earlier code (Camacho et al., 2002). In a nearly automatic approach, the software provides a 3-D model informing on the location and shape of the main structural building blocks of the subsurface structures. Then densities contrast of these anomalies was estimated. Result of the inversion was a 3-D distribution of densities contrast. To show this distribution of the densities contrast, the horizontal and vertical sections at different depth and different horizontal positions were selected and interpreted. From these sections it is indicated that the effective depth of the data, for identifying martial of subsurface structures from the inversion, is about 50 m. In the sections, areas with low densitig contrasts are related to the fractured limestone and those with high contrast ones are related to the compact limestone or igneous rocks. Existence of igneous and lime rocks that have more density and compactness, increase the quality of the structures in the path of the tunnel construction. Areas including fractured limestone, with lower density, decrease the quality of the structure and increase the risk of water permeability and collapsing in the path of the tunnel construction. Thus by interpreting of the results of the microgravity data inversion, areas with high and low compactness and good and bad quality rocks for tunnel construction are recognized, those are related to the fractured or karstic limestone and limestone and igneous rocks. Also boundaries of these formations where densitig contrasts vary suddenly, are related to the existence of faults.

Keywords: Microgravity, Gravity anomaly, 3-D inversion, Contrast density, tunnel, compactness.