

مطالعه حوزه رسوبی شمال غرب ایران با استفاده از مدل سازی سه بعدی داده‌های گرانی‌سنجی

مجتبی توکلی^۱ و علی نجاتی کلاته^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه

صنعتی شاهرود، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۲

چکیده

مدل سازی وارون داده‌های گرانی، یکی از جالب‌ترین ابزارهای عددی به منظور به دست آوردن تصاویر سه بعدی از ساختارهای زمین‌شناسی است. در این مقاله از مدل سازی وارون غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی جهت تعیین توپوگرافی سه بعدی سنگ بستر استفاده می‌شود. در فرآیند مدل سازی سه بعدی آنومالی‌های گرانی، یک سنگ بستر عموماً به وسیله یک سری از بلوک‌های راست گوشه کنارهم چیده شده، مدل شده و سپس ضخامت آن‌ها محاسبه می‌شود. الگوریتم تهیه شده بر مبنای روش تجزیه مقادیر تکین، طی تکرارهای مختلف با مقایسه داده‌های واقعی و داده‌های مدل تعدیل یافته، مدل اولیه را بهبود می‌دهد. به منظور نشان دادن کارایی زیربرنامه‌های کامپیوتری ارائه شده، ابتدا مدل سازی وارون برای داده‌های مصنوعی بدون نوفه و حاوی نوفه صورت گرفت. در پایان مدل سازی روی قسمتی از داده‌های گرانی‌سنجی ناحیه مغان در شمال غربی ایران انجام شد. حوضه رسوبی مغان به علت نزدیکی به مناطق نفت خیز باکو و ضخامت زیاد سنگ‌های رسوبی جهت اکتشافات هیدروکربوری مورد توجه می‌باشد. یک فاکتور مهم در بحث اکتشاف نفت و گاز، بررسی سنگ‌های رسوبی به ویژه از لحاظ ضخامت می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه هدف پیدا کردن ضخامت رسوبات یا به عبارت دیگر مرز میان سازند اجاق قشلاق و سنگ بستر غیر رسوبی است که نتایج با واقعیات زمین‌شناسی، مقاطع لرزه‌ای و مطالعات گرانی‌سنجی قبلی هم‌خوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: داده‌های گرانی‌سنجی، توپوگرافی سنگ بستر، مدل سازی وارون، تکرار، روش تجزیه مقادیر تکین، زیربرنامه.

مقدمه

زمین‌شناسی است. مدل سازی زمین و ساختارهای زمین‌شناسی مورد مطالعه، می‌توانند یک تفسیر جامع و ایده‌آل باشند. به دلیل ماهیت ذاتی میدان پتانسیل، وارون سازی داده‌ها در گرانی‌سنجی، جوابی یکتا ندارد، اما

هدف نهایی در گرانی‌سنجی مانند دیگر روش‌های ژئوفیزیکی، تفسیر و تعیین خصوصیات ساختارهای

* نویسنده مرتبط: nejati@shahroodut.ac.ir

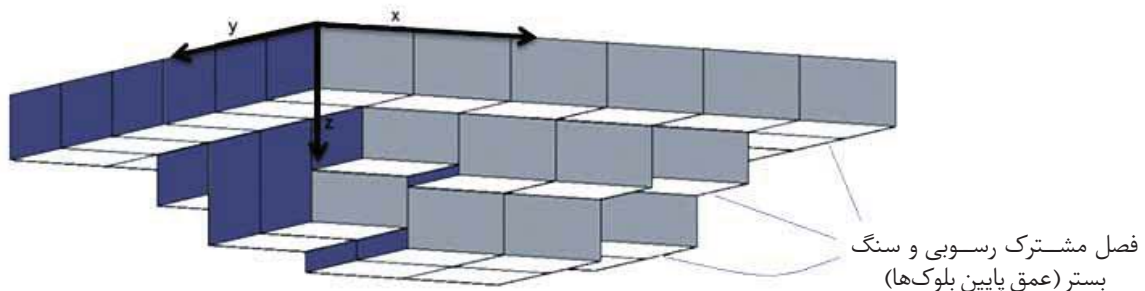
می‌شوند. به این ترتیب آنومالی گرانی ناشی از این ساختار در هر نقطه، عبارت است از مجموع اثرات همه بلوک‌ها در آن نقطه. در نتیجه مسأله وارون تعیین توپوگرافی سنگ بستر به مسأله وارون تعیین ضخامت بلوک‌ها به‌عنوان پارامترهای مدل تبدیل می‌شود. از طرفی میدان گرانی ناشی از یک بلوک بستگی غیرخطی به ضخامت آن دارد، بنابراین مسأله پیش‌رو غیرخطی می‌باشد و با استفاده از روش تجزیه مقادیر تکین حل می‌شود. روش تجزیه مقادیر تکین از نظر ریاضی روشی قوی و پایدار می‌باشد و بنابراین روشی محبوب در بین ژئوفیزیک‌دانان است (Meju, 1994).

ساختار مدل، روش وارون‌سازی و الگوریتم

در این مطالعه در واقع حوزه رسوبی روی سنگ بستر مدل می‌شود، به این ترتیب که ضخامت بلوک‌ها، عمق تا سنگ بستر است. یعنی عمق پایین هر بلوک روی فصل مشترک حوزه رسوبی و سنگ بستر می‌باشد. بنا به اصل برهم‌نهی، بی‌هنجاری گرانی در هر نقطه را می‌توان به‌صورت مجموع اثر بلوک‌های راست‌گوشه در نظر گرفت. مدل زمین‌شناسی حوزه رسوبی در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱ به‌منظور تشکیل ساختار مورد نظر، بلوک‌های راست‌گوشه در یک سیستم مختصات کارترین با محور Z رو به پایین مشخص می‌شوند. ابعاد افقی بلوک‌های مکعبی برابر با ابعاد شبکه‌بندی است به‌طوری‌که در زیر هر یک از نقاط مشاهده آنومالی، یک بلوک قرار دارد. پایین بلوک‌ها منطبق با فصل مشترک سنگ بستر و رسوبات روی آن می‌باشد. برنامه وارون‌سازی در این تحقیق، عمق پایین هر کدام از بلوک‌ها را محاسبه می‌کند.

با داشتن اطلاعات اولیه مانند اطلاعات زمین‌شناسی، عمق تخمینی و یا تباین چگالی می‌توان جواب‌ها را محدود کرد. پرکاربردترین مدل‌های هندسی ریاضی برای مدل‌سازی دوبعدی سنگ بستر عبارتند از مدل جمع منشوری دو بعدی (Bott (1960) و مدل دو بعدی نامنظم تالوانی (Talwani et al., 1959). مدل‌های هندسی ریاضی برای مدل‌سازی سه بعدی سنگ بستر عبارتند از مدل سه بعدی نامنظم تالوانی (Talwani and Ewing, 1960)، و مدل جمع منشوری سه بعدی (Plouff, 1976). با مدل جمع منشوری سه بعدی نه تنها وارون‌سازی آنومالی‌های گرانی سریع‌تر بوده بلکه عاری از مشکلات مربوط به مدل تالوانی خواهد بود (Rao et al., 1999). Li et al., (1998). روش به‌منظور وارون‌سازی سه بعدی داده‌های گرانی‌سنجی ارائه کردند. در روش اول، ابتدا با استفاده از رابطه پواسون داده‌های گرانی تبدیل به داده‌های شبه مغناطیسی شده و سپس از یک الگوریتم وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. در روش دوم، مستقیماً از الگوریتم وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی استفاده می‌شود. البته در هر دو الگوریتم، زمین یا به‌عبارتی حوزه رسوبی توسط تعداد زیادی از بلوک‌های راست‌گوشه با چگالی ثابت مدل می‌شود. در مورد ترکیب داده‌های گرانی با دیگر داده‌های ژئوفیزیکی، Gallardo-Delgado et al., (2003) الگوریتمی به‌منظور وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیسی ارائه کردند. ایشان نیز از بلوک‌های راست‌گوشه در سه بعد به‌منظور مدل‌سازی استفاده کردند.

در این مطالعه، ابتدا رسوبات روی سنگ بستر به یک سری از بلوک‌های راست‌گوشه با چگالی ثابت تقسیم



شکل ۱. مدل زمین‌شناسی حوزه رسوبی توسط مجموعه‌ای از بلوک‌های راست‌گوشه

با قرار دادن $y_i = d_i - f_i(\mathbf{m}^0)$ ،

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A}, \quad (6)$$

که \mathbf{A} ماتریس مشتقات جزئی و δ تغییر در پارامترهای مدل به فرم ماتریسی در زیر آمده‌اند؛

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial m_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial m_p} \end{pmatrix}_{n \times p} \quad \text{و} \quad \delta = [\delta m_1 \dots \delta m_p]^T_{1 \times p}$$

δ ای مد نظر است که تابع هدف زیر را مینیمم کند؛

$$\mathbf{q} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \sum_{i=1}^n \mathbf{e}_i^2 = (\mathbf{y}^T - \delta^T \mathbf{A}^T)(\mathbf{y} - \mathbf{A} \delta) \\ = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{A} \delta + \delta^T \mathbf{A}^T \delta \mathbf{A} \quad (7)$$

با محاسبه مشتق \mathbf{q} نسبت به δ و برابر با صفر قرار دادن آن، جواب کمترین مربعات عادی به دست می‌آید (Meju, 1994):

$$\delta = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y}, \quad (8)$$

معادله ۸ جواب روش کمترین مربعات است. مشکل این روش آن است که چنانچه ویژه‌مقادیر ماتریس $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ کوچک باشند، اولاً تغییر در پارامترهای مدل، δ ، بزرگ شده و فرض خطی بودن در استفاده از بسط تیلور صحیح نیست، ثانیاً در محاسبه وارون ماتریس $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ ، این ماتریس بدرفتار خواهد بود. به منظور جلوگیری از این مشکل از روش تجزیه مقادیر تکین استفاده می‌کنیم. رابطه اساسی روش تجزیه مقادیر تکین به صورت زیر قابل بیان است (Meju, 1994)

$$\delta = \mathbf{V} \Lambda^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{y}, \quad (9)$$

که \mathbf{V} ویژه بردارهای فضای داده‌ها، \mathbf{U} ویژه بردارهای فضای پارامترها و \mathbf{A} ماتریس ویژه مقادیر ماتریس \mathbf{A} می‌باشند. برای مدل‌سازی، برنامه وارون‌سازی تهیه شد که از روابط بالا استفاده می‌کند. ورودی برنامه وارون‌سازی شامل مختصات نقاط مشاهده‌ای روی یک شبکه منظم برداشت، بی‌هنجاری گرانی در این نقاط، عمق اولیه بلوک‌ها و تباین چگالی بلوک‌ها با سنگ بستر می‌باشد. ساختار

مولفه قائم جاذبه گرانش، آنچه که گرانی‌سنج اندازه می‌گیرد، ناشی از یک بلوک راست‌گوشه با ابعاد x_1 تا x_2 ، y_1 تا y_2 و z_1 تا z_2 در مبدأ مختصات به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Plouff, 1976):

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left\{ z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - \right. \\ \left. x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right\}, \quad (1)$$

که γ ثابت جهانی گرانش، ρ چگالی بلوک، $\mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k}$ و $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ در وارون‌سازی غیرخطی بایستی مشتق‌گیری نسبت به پارامترهای مدل انجام شود. با توجه به این که پارامترهای مدل در اینجا عمق بلوک‌ها می‌باشند، مشتق‌گیری از رابطه ۱ نسبت به z_k رابطه ۲ را نتیجه می‌دهد.

$$\frac{\delta g}{\delta z_k} = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \mu_{ijk} \left\{ \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}^2} \right. \\ \left. - \frac{x_i y_j z_k (R_{ijk}^2 + z_k^2)}{[(z_k R_{ijk})^2 + (x_i y_j)^2]} - \frac{x_i z_k}{R_{ijk} (R_{ijk} + y_j)} - \frac{y_j z_k}{R_{ijk} (R_{ijk} + x_i)} \right\}, \quad (2)$$

فرض کنید \mathbf{f} تابعی از P پارامتر $j=1, 2, \dots, p$ و m_j باشد. برای راحتی، پارامترها به عنوان مولفه‌های بردار \mathbf{m} در نظر گرفته می‌شوند. در واقع \mathbf{f} پاسخ مدل به ازای P پارامتر m_j می‌باشد و چنانچه d_i داده‌های مشاهده‌ای به ازای P پارامتر m_j باشد، داریم؛

$$d_i \approx f_i(\mathbf{m}), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

اختلاف این دو به این صورت تعریف می‌شود؛

$$\mathbf{e}_i = d_i - f_i(\mathbf{m}), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

با توجه به این که در این مطالعه \mathbf{f} یک تابع غیرخطی از پارامترهای مدل (ضخامت بلوک‌های راست‌گوشه) می‌باشد، به منظور خطی کردن از بسط تیلور آن حول یک مدل اولیه استفاده می‌شود؛

$$f_i(\mathbf{m}) = f_i(\mathbf{m}^0) + \sum_{j=1}^p \frac{\partial f_i}{\partial m_j} (m_j - m_j^0), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i^{obs} - d_i^{pre})^2}{n}}, \quad (11)$$

که n تعداد داده‌ها، d_i^{obs} داده‌های مشاهده‌ای و d_i^{pre} داده‌های پیش‌بینی شده می‌باشد.

وارون سازی داده‌های مصنوعی

به‌منظور نشان دادن کارایی برنامه‌های ذکر شده، در ادامه دو مثال مصنوعی آمده است. در هر دو مثال از یک شبکه $10 \times 15 \text{ km}^2$ از داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده شده است. تباین چگالی بین رسوبات و سنگ بستر 1 g/cm^3 در نظر گرفته شده است. فرض شده است که داده‌های گرانی‌سنجی به فواصل 1 کیلومتر در یک شبکه مستطیلی قرار دارند. همان‌طور که ذکر شد در زیر هر نقطه برداشت یک بلوک قرار دارد، بنابراین بلوک‌ها با ابعاد افقی $1 \times 1 \text{ km}^2$ در یک شبکه $10 \times 15 \text{ km}^2$ گسترده شده‌اند. در ادامه وارون‌سازی‌ها، کیفیت و دقت نتایج به‌دست آمده با ارائه خطای RMS، ماتریس تحلیل داده‌ها و ماتریس تحلیل پارامترهای مدل بررسی شد.

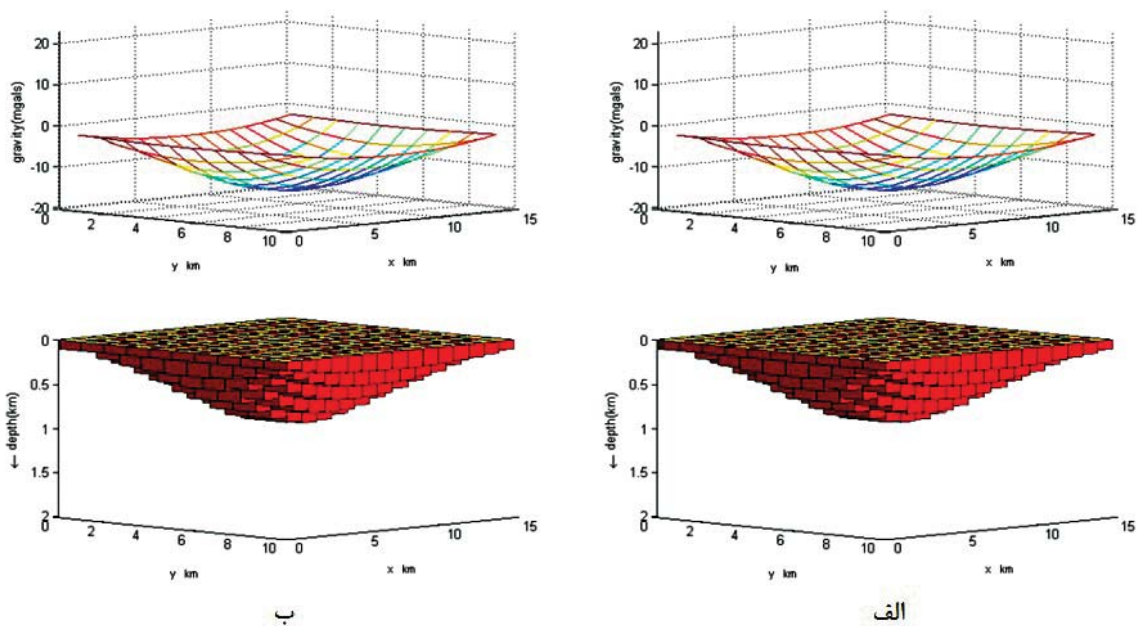
مدل مصنوعی بدون نوفه در شکل ۲-الف و نتیجه مدل‌سازی وارون روی آن در شکل ۲-ب آمده است. در شکل ۲-ج میزان خطای RMS در تکرارهای مختلف آورده شده است. در ادامه نتیجه وارون‌سازی برای یک مدل مصنوعی با هفت درصد نوفه بررسی شد. مدل مصنوعی حاوی هفت درصد نوفه و نتایج کامل برنامه وارون‌سازی روی آن در شکل‌های ۳-الف، ۳-ب و ۳-ج آمده است. نتایج به‌دست آمده برای مدل‌های مصنوعی بدون نوفه و حاوی نوفه تأیید کننده صحت الگوریتم و برنامه‌های رایانه‌ای ارائه شده است.

حوضه رسوبی در زیر شبکه برداشت با یک سری بلوک‌های کنار هم چیده شده مدل‌سازی می‌شود، به‌طوری‌که ابعاد افقی بلوک‌ها برابر بوده و هر کدام از آن‌ها زیر یک نقطه بی‌هنجاری قرار دارد. برنامه وارون‌سازی از دو زیر برنامه اصلی تشکیل شده است و در یک روند تکراری، عمق پایینی بلوک‌ها که عبارت از فصل مشترک سنگ بستر و رسوبات روی آن می‌باشد، را دست می‌دهد. در اینجا پارامترهای مدل عبارتند از عمق پایینی بلوک‌ها و با توجه به این‌که در روی هر بلوک یک نقطه مشاهده داریم، تعداد داده‌ها و پارامترهای مدل با هم برابرند، $n = p$. چنانچه \mathbf{m}^0 مدل اولیه و \mathbf{m}^k مدل اولیه تعدیل یافته بعد از k تکرار باشند، فرمول الگوریتم تکرار شونده به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

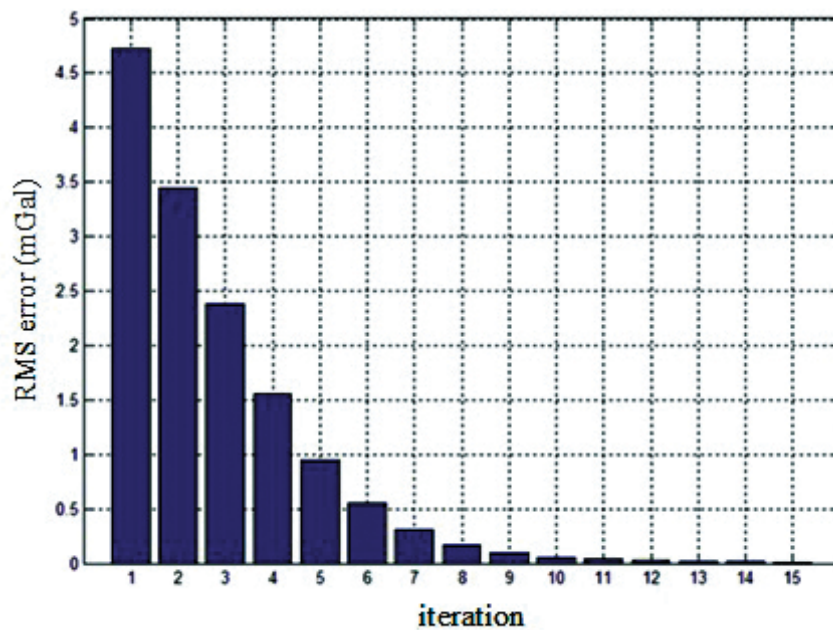
$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + V \Lambda^{-1} U^T \mathbf{y}, \quad (10)$$

که $\mathbf{m}^k = \mathbf{m}^0 + \delta^1 + \delta^2 + \dots + \delta^{k-1} + \delta^k$. الگوریتم برنامه؛ اول زیر برنامه FORGRAV3D.m پاسخ گرانی ناشی از مدل اولیه را با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌کند و از آنجا بردار \mathbf{y} یعنی اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و پاسخ گرانی ناشی از مدل اولیه به‌دست می‌آید. دوم زیر برنامه JACOBIANGRAV3D.m با استفاده از رابطه ۲ ماتریس مشتقات جزئی را محاسبه می‌کند. سوم با استفاده از رابطه ۹ بهترین تغییر در پارامترهای مدل، δ ، به‌دست آمده و مطابق رابطه ۱۰ با پارامترهای مدل اولیه جمع جبری می‌شود. حال مدل تعدیل یافته به‌عنوان مدل اولیه در مرحله اول قرار داده شده و بقیه مراحل تا رسیدن به یک همگرایی قابل قبول دنبال می‌شود. همگرایی مطلوب زمانی رخ می‌دهد که خطای RMS ناشی از اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های گرانی ناشی از مدل تعدیل یافته با نظر مفسر از حد معینی کمتر باشد. خطای RMS به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛

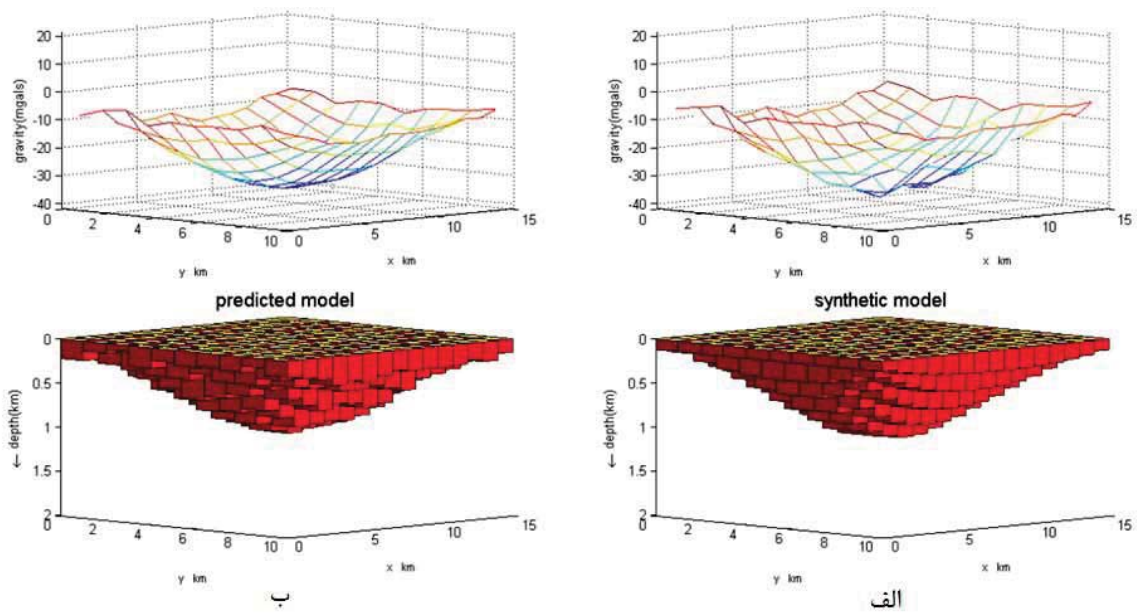
مجتبی توکلی و علی نجاتی کلانه



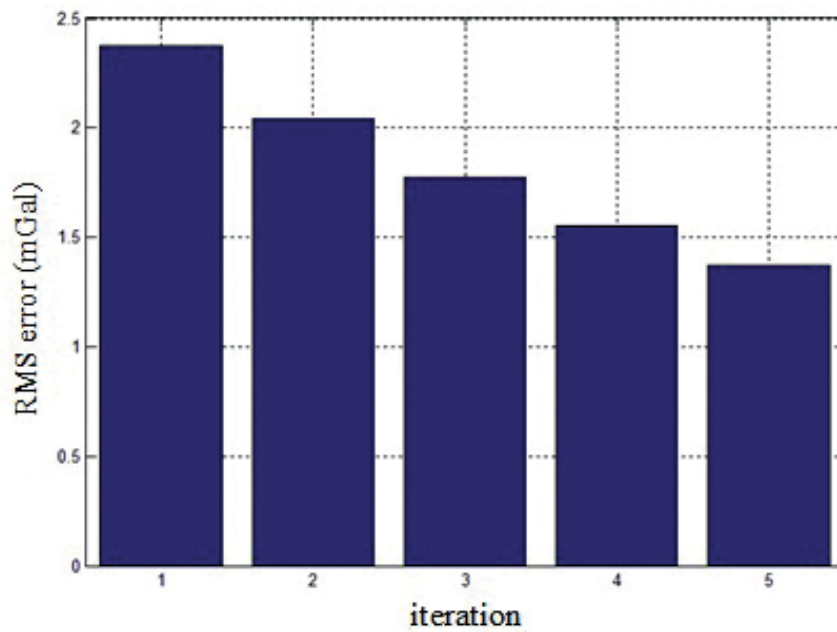
شکل ۲. الف) مدل مصنوعی بدون نوفه یک حوضه رسوبی و بی‌هنجاری گرانی ناشی از آن، ب) نتیجه مدل‌سازی وارون برای مدل مصنوعی بدون نوفه و بی‌هنجاری گرانی پیش‌بینی شده



شکل ۲. ج) میزان خطای RMS در هر تکرار برای مدل مصنوعی بدون نوفه



شکل ۳. الف) مدل مصنوعی و بی‌هنجاری گرانی ناشی از آن به اضافه ۷ درصد نوفه، ب) نتیجه مدل‌سازی وارون برای مدل مصنوعی با نوفه ۷ درصد



شکل ۳. ج) میزان خطای RMS در هر تکرار برای مدل مصنوعی با نوفه ۷ درصد

وارون سازی داده‌های واقعی

به‌منظور مدل‌سازی داده‌های واقعی گرانی‌سنجی قسمتی از داده‌های برداشت شده توسط شرکت ملی نفت ایران، مربوط به حوضه رسوبی مغان استفاده شده است. حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران و در قسمت غربی دریای خزر قرار گرفته است. این حوضه مشترک بین ایران و جمهوری آذربایجان است. بخش واقع در ایران با وسعت ۶۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال استان اردبیل واقع است و رود مرزی ارس از شمال غربی آن می‌گذرد.

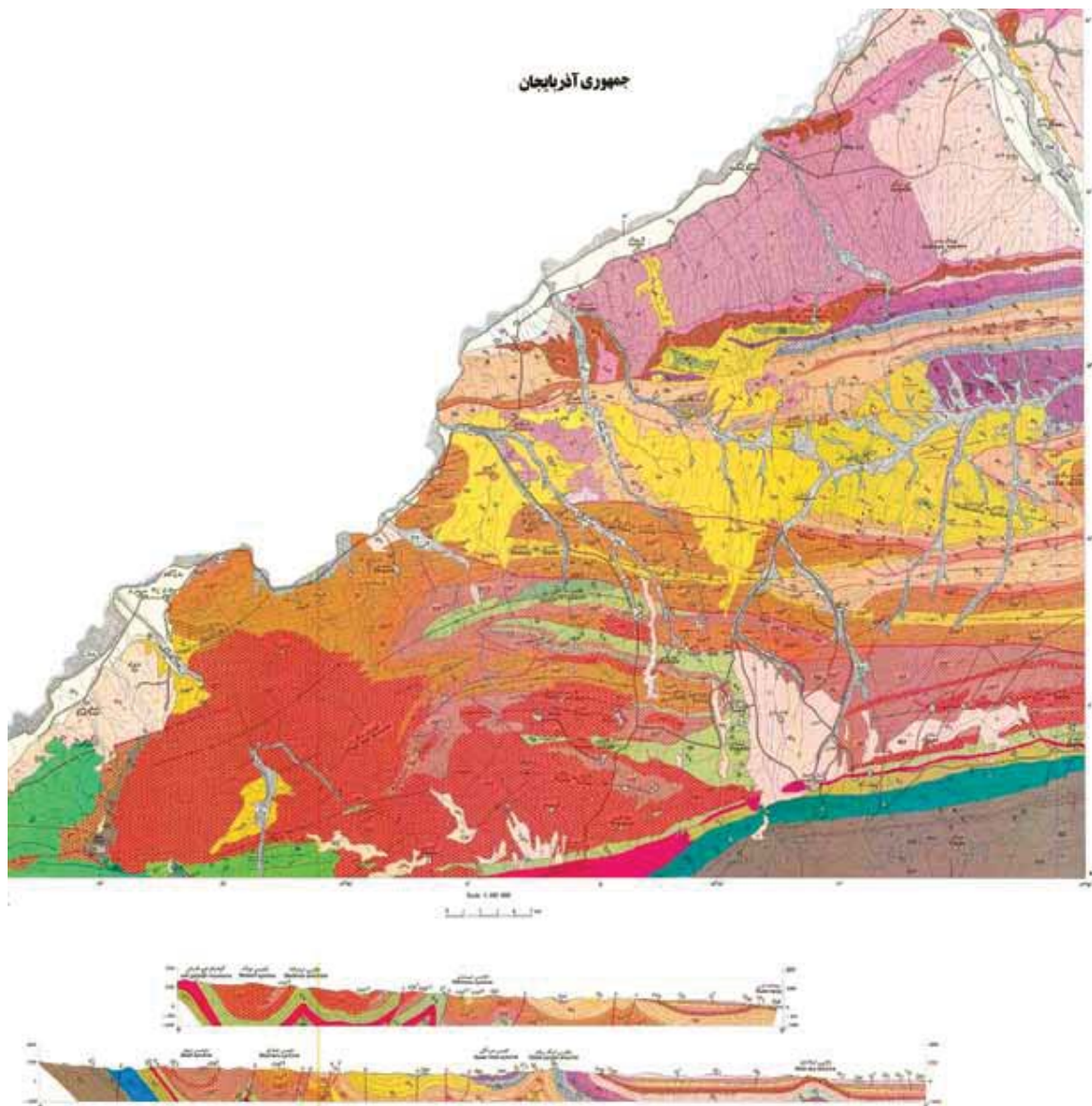
نیمه شمالی منطقه دشت و نیمه جنوبی از تپه ماهورهای رشته‌کوه‌های جنوبی تشکیل شده است. حوضه رسوبی مغان به‌علت نزدیکی به مناطق نفت‌خیز باکو و ضخامت زیاد سنگ‌های رسوبی، در اکتشافات هیدروکربوری مورد توجه واقع شده است. عملیات اکتشاف ژئوفیزیکی در این حوضه رسوبی از سال ۱۳۴۰ شروع شده و نتیجه آن‌ها کشف میدان‌های نفتی ارتاداغ و قیردره بوده است. در سال‌های اخیر با توجه به نیاز روزافزون منابع هیدروکربوری این ناحیه مورد توجه واقع شده است و مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و لرزه‌نگاری در این ناحیه انجام شده است. در ادامه از مقاطع لرزه‌نگاری موجود و دیگر مطالعات گرانی‌سنجی به‌منظور مقایسه نتایج استفاده خواهد شد.

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی و براساس تقسیم‌بندی‌های انجام شده، استان آذربایجان شرقی از دو بخش ساختاری تشکیل شده است. بخش غربی و جنوب غربی آن دنباله پلاتفرم پالئوزوئیک ایران مرکزی و البرز غربی است که این بخش شامل کوه‌های بزگوش-سهند و ارتفاعات شمال تبریز (کوه‌های میشو و مرو) و ارتفاعات غرب جلفا است. بخش شمال شرق آذربایجان ظاهراً فاقد رخساره‌های پلاتفرمی پالئوزوئیک شبیه سایر قسمت‌های ایران بوده و رخساره‌های فلیش مزوزوئیک در آن گسترده‌تری زیادی داشته و در بخشی نیز رخساره رسوبات ترشیری از ویژگی خاصی برخوردار است. این بخش حوضه رسوبی دشت مغان و ارتفاعات اطراف اهر را تشکیل می‌دهد. در منطقه دشت مغان به‌علت رخنمون سنگ‌های ترشیری و جوان‌تر، از

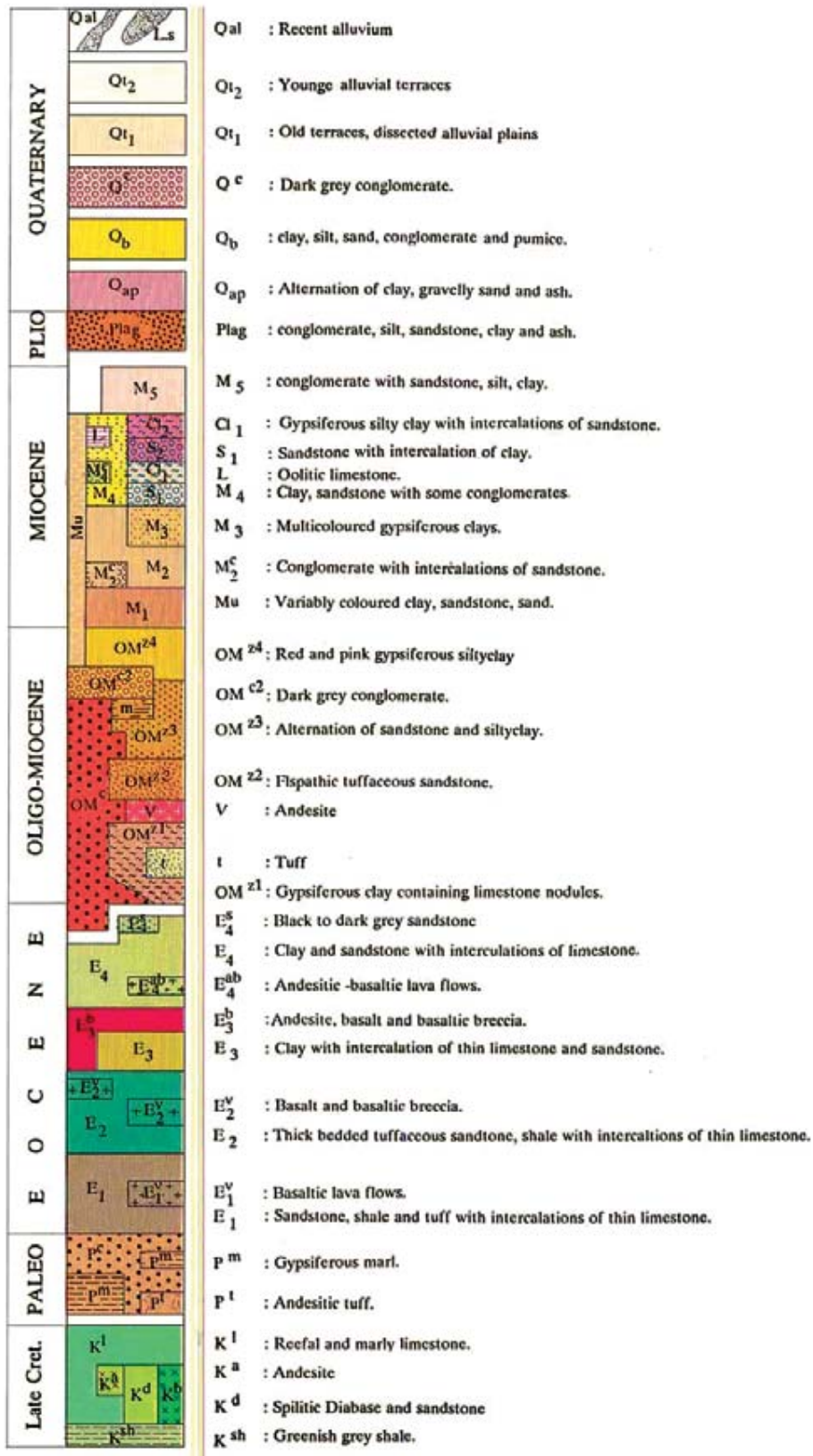
سنگ‌های دوران دوم و قدیمی‌تر اطلاعات چندانی در دست نیست. در اواخر کرتاسه و اوائل پالئوسن، چین‌خوردگی در مقیاس وسیعی در شمال ایران به‌وقوع پیوسته که به‌نظر می‌رسد منطقه دشت مغان نیز تحت تاثیر این چین‌خوردگی واقع شده است و سنگ‌های ترشیری به‌صورت دگرشیبی بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. این دگرشیبی در غرب دشت مغان توسط مقاطع لرزه‌نگاری نیز تأیید شده است.

از دوران پره‌کامبرین سنگ‌ها و سازندهایی که بیشتر از انواع دگرگونه و رسوبی هستند در نقاطی مانند کوه‌های میشو و مرو، کوه‌های جنوب مراغه و میان‌دوآب و کوه‌های شمال صوفیان و مرند و غیره رخنمون دارند. سنگ‌ها و سازندهای دوران دیرینه‌زیستی بیشتر از انواع سنگ‌های رسوبی و آذرین درونی هستند که تقریباً در تمامی کوه‌های این استان به‌ویژه کوه‌های مروداغی و میشوداغی، صوفیان و بخش‌هایی از شمال مرند دیده می‌شوند. در دوران نوزیستی سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی به‌ویژه بیرونی و آذرآواری مانند انواع توف‌ها و برش‌های ولکانیکی پهنه‌های وسیعی از این استان را زیر پوشش قرار داده‌اند. مجموعه هم‌تافت‌های ولکانیکی سهند و سبلان و قافلانکوه (سنگ‌های آذرین بیرونی) و همچنین بسیاری از توده‌های نفوذی مانند توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی واقع در شمال این استان (مانند گرانیت اردوباد) از جمله سنگ‌های این دوران هستند.

نقشه زمین‌شناسی منطقه مغان در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای روشن شدن جزئیات، راهنمای نقشه به صورت مجزا در شکل ۵ آمده است. کهن‌ترین نهشته‌های منطقه مربوط به کرتاسه پسین می‌باشد که از شیل، سنگ‌های آتشفشانی و آهک تشکیل شده است. ردیفی از توف، مارن‌های ژیبس‌دار و کنگلومرا به‌صورت دگرشیبی بر روی سنگ‌های کرتاسه قرار گرفته‌اند که به دوران پالئوسن نسبت داده می‌شوند. نهشته‌های ائوسن از مجموعه سنگ‌های رسوبی تخریبی، آذرآواری و گدازه با ترکیب بازیک متوسط تشکیل شده‌اند. این نهشته‌ها به‌صورت دگرشیبی بر روی سنگ‌های پالئوسن قرار گرفته‌اند و بیشتر در بخش جنوبی منطقه گسترش یافته‌اند. از ویژگی‌های این رسوبات وجود آثار گیاهی فراوان است که در اغلب رسوبات ائوسن دیده می‌شود.



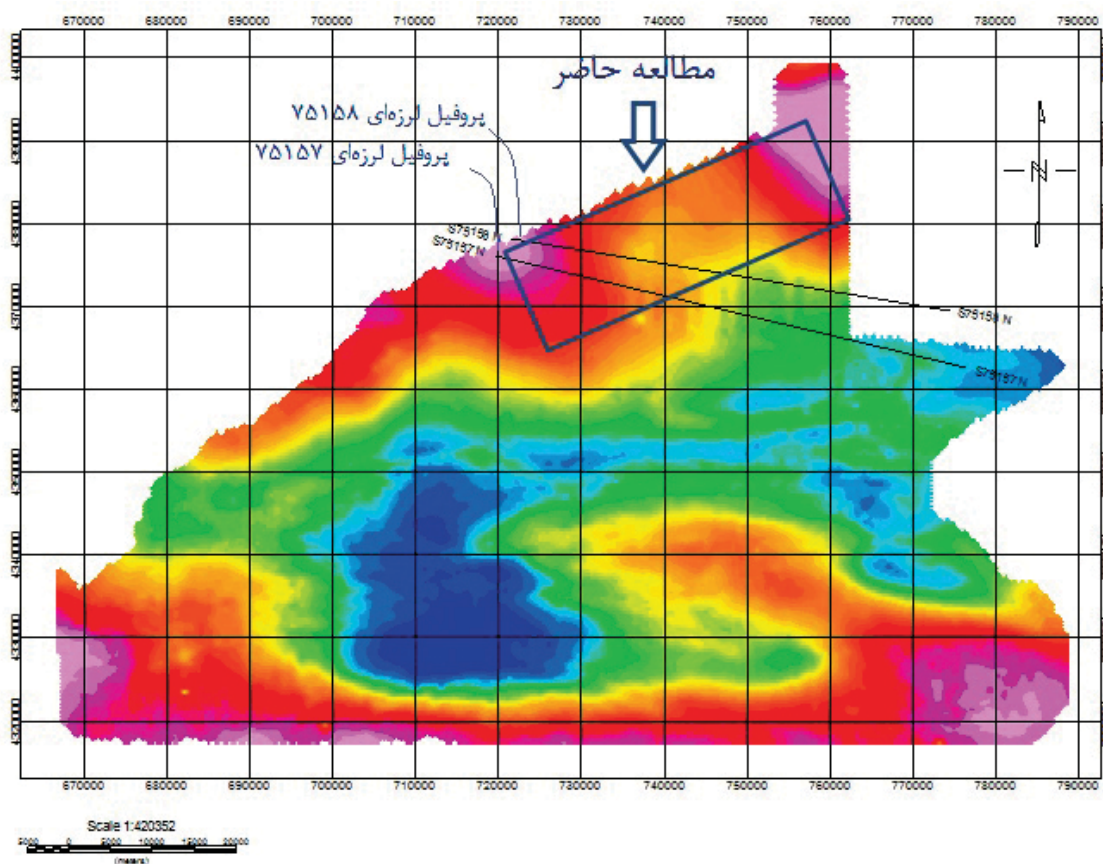
شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی دشت مغان (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، سال ۱۳۷۹)



شکل ۵. راهنمای نقشه زمین‌شناسی دشت مغان (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، سال ۱۳۷۹)

مقاومت در برابر فرسایش مرتفع و ناهموار باقی مانده‌اند. این سنگ‌ها اغلب از سنگ‌های ولکانیکی، آذرآواری ائوسن و آهک‌های کرتاسه تشکیل شده‌اند. این بخش در مقایسه با مساحت کل منطقه بخش بزرگی را نمی‌پوشاند. بخش دوم شامل برجستگی‌های بخش شمالی و مرکزی که بیشتر از ری، مارن و رسوبات ریزدانه تشکیل شده است. این برجستگی‌ها کم ارتفاع بوده و به صورت مرتع یا زمین کشاورزی در منطقه دیده می‌شود.

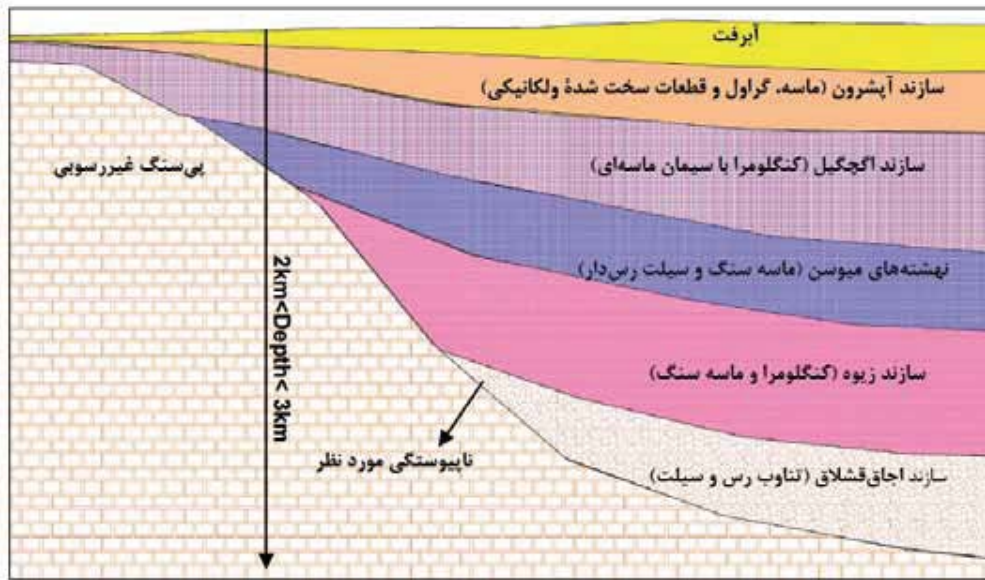
واحدهای الیگوسن - میوسن به حوضه پاراتتیس نسبت داده می‌شوند و با دگرشیبی خفیف بر روی سایر رسوبات قرار گرفته‌اند. نهشته‌های زمان پلیوسن که آن‌ها را معادل با سازند آقچه‌گیل از کشور آذربایجان می‌دانند با دگرشیبی مشخص روی سنگ‌های پلیوسن پسین نشسته‌اند که در نهایت توسط رسوبات کواترن پوشیده شده‌اند. از نقطه نظر ریخت‌شناسی دو منظر کاملاً متمایز در منطقه دیده می‌شود: ارتفاعات غربی و جنوبی به علت



شکل ۶. نقشه باقی‌مانده گرانی ناحیه مغان، منطقه مورد مطالعه و پروفیل‌های لرزه‌ای مشخص شده‌اند

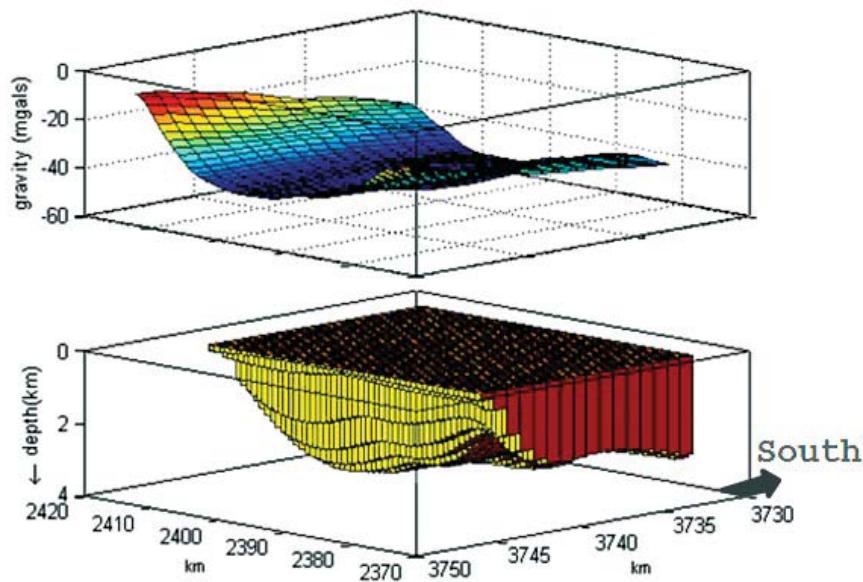
بین این افق آذری و افق‌های رسوبی بالای آن عامل به وجود آمدن آنومالی‌های گرانی بوده به طوری که عمق این افق به عنوان هدف در این مطالعه بوده است. به بیان دیگر هدف پیدا کردن مرز میان سازند اجاق‌قشلاق و سنگ بستر غیر رسوبی در شکل ۷ می‌باشد.

مطالعه حاضر بر روی منطقه‌ای به وسعت ۴۸۰ کیلومتر مربع در شمال ناحیه مغان، شکل ۶، انجام شد. در شکل ۷ یک مقطع زمین‌شناسی تقریبی در این منطقه آمده است. افقی که به احتمال زیاد معرف بالای کرتاسه است، تقریباً در تمام خطوط لرزه‌نگاری قابل مشاهده است. تباین چگالی



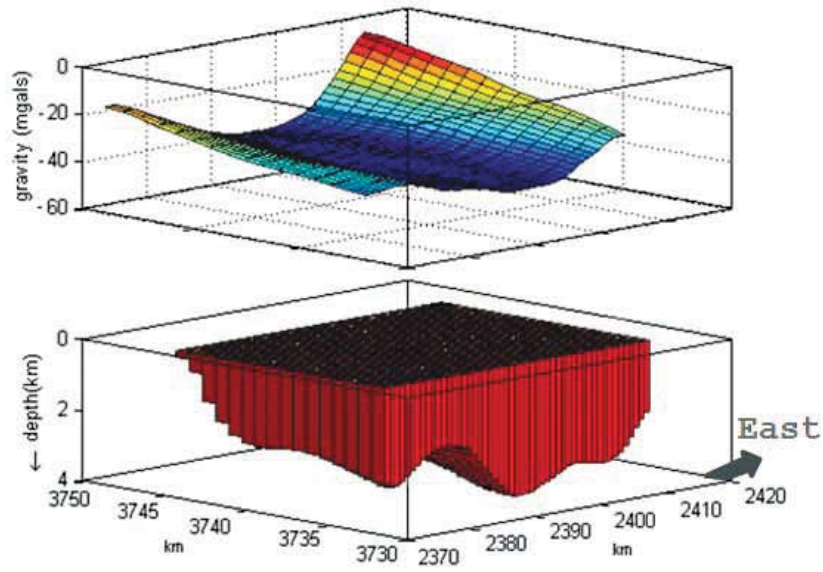
شکل ۷. یک مقطع زمین‌شناسی شماتیک تقریبی در منطقه مورد مطالعه

داده‌های استفاده شده در این مطالعه، داده‌های تصحیح شده بوگه در محل ایستگاه‌های برداشت بودند. نتایج وارون‌سازی داده‌های این منطقه در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب آمده است. برنامه پس از ۱۸ تکرار به همگرایی بالایی رسید، $RMS = 1.8 \text{ mGals}$. خطای RMS ناشی از وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی مغان در شکل ۹ آمده است.



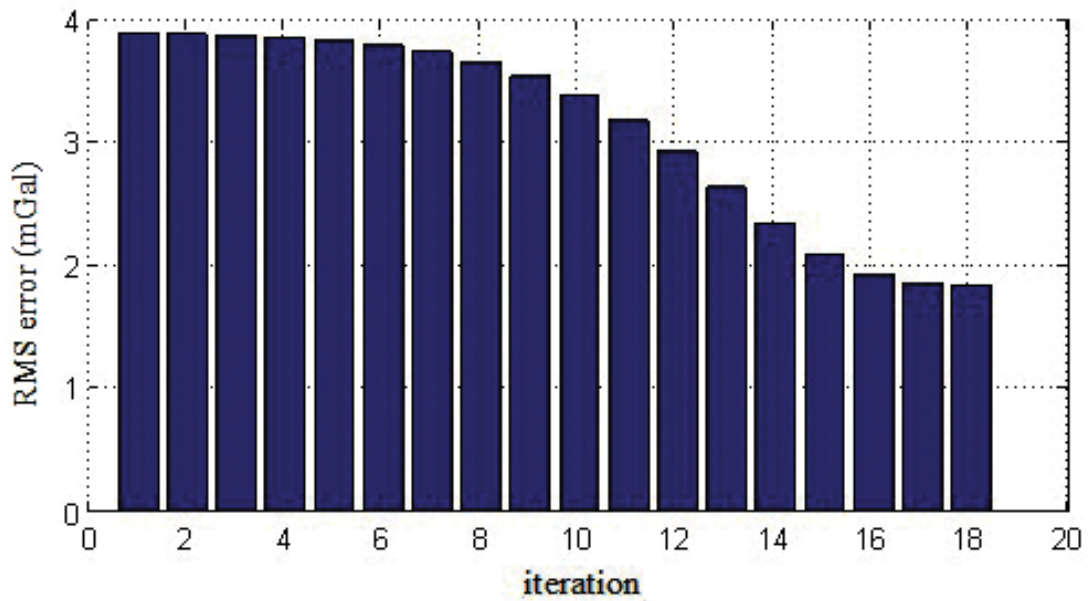
الف) چشم انداز جنوب شرق

شکل ۸. الف) چشم‌انداز جنوب شرق از نتیجه وارون‌سازی سه بعدی برای داده‌های گرانی‌سنجی مغان. روند تغییر ضخامت رسوبات نزدیک به پروفیل‌های لرزه‌ای می‌باشد (نجاتی کلاته و همکاران ۱۳۸۸)



ب) چشم انداز شمال شرق

شکل ۸. ب) چشم انداز شمال شرق از نتیجه وارون سازی سه بعدی برای داده های گرانی سنجی مغان. روند تغییر ضخامت رسوبات نزدیک به پروفیل های لرزه ای می باشد (نجاتی کلاته و همکاران، ۱۳۸۸)



شکل ۹. میزان خطای RMS در هر تکرار در وارون سازی داده های گرانی سنجی مغان

- Bott, M. H. P., 1960. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 3, 63 - 67.
- Gallardo-Delgado, L. A., Perez-Flores, M. A., and Gomez-Trevino E., 2003. A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data: *Geophysics*, 68,3, 949-959.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998. 3-D inversion of gravity data: *Geophysics*, 63 (1), 109-119.
- Meju, M. A., 1994. *Geophysical Data Analysis Understanding Inverse Problem Theory and Practice: The Society of Exploration Geophysicist*, 280.
- Menke, W., 1989. *Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory: Academic Press, Inc*, 278.
- Plouff, D., 1976. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections: *Geophysics*, 41, 727-741, 280.
- Rao, P. R., Swamy, K. V., Murthy, R. I. V., 1999. Inversion of gravity anomalies of three-dimensional density interfaces: *Computers and Geosciences*, 25, 887-896.
- Talwani, M., and Ewing, M., 1960. Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape: *Geophysics*, 25, 203-225.
- Talwani, M., Worzel, J. and Ladisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: *Journal of Geophysical Research*, 64,1, 49-59.

نتیجه‌گیری

بنا به گزارش ژئوفیزیکی این ناحیه (فاضلی و همکاران، ۱۳۸۱) از پروفیل ۷۵۱۵۸ نتیجه می‌شود که سنگ بستر در شرق در عمق ۳۷۵۰ متر و در غرب در عمق ۷۸۰ متر قرار می‌گیرد و نتیجه به دست آمده در این مطالعه عمق متوسط ۳۸۰۰ متر در شرق و ۶۰۰ متر در غرب را برای سنگ بستر به دست می‌دهد. با مقایسه مقاطع لرزه‌نگاری روی پروفیل‌های ۷۵۱۵۷ و ۷۵۱۵۸ و نتایج مدل‌سازی دوبعدی داده‌های گرانی‌سنجی (نجاتی کلاته و همکاران، ۱۳۸۸) با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر مشاهده می‌شود مدل به دست آمده برای سنگ بستر دقت قابل قبولی دارد (شکل ۸-الف و شکل ۸-ب رسوبات بالای سنگ بستر را نشان می‌دهند). بطوری‌که نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی و سه‌بعدی و مقاطع لرزه‌نگاری روند یکسانی از توپوگرافی سنگ بستر را نشان می‌دهند.

چنانچه از داده‌های چاه و دیگر اطلاعات ژئوفیزیکی مانند داده‌های مغناطیسی موجود استفاده شود می‌توان مدل‌سازی وارون سه بعدی سنگ بستر را به صورت مقید و با دقت بالاتری انجام داد.

تقدیر و تشکر

از مدیریت اکتشاف شرکت نفت، آقایان مهندس مجتبی محمدو خراسانی و مهندس شهاب قمی به خاطر حمایت‌های بی‌دریغشان در انجام این تحقیق علمی کمال تشکر و امتنان را داریم.

منابع

- فاضلی، س. م.، پیرویان، غ.، عاصی، ح.، ۱۳۸۱، تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی مغان: شرکت ملی نفت ایران.
- نجاتی کلاته، ع.، ابراهیم زاده اردستانی، و.، شاهین، ا.، متولی عنبران، س. ه.، قمی، ش.، جوان، ا.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی وارون دو بعدی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی منطقه مغان با استفاده از روش مارکوارت-لونیگ: مجله علوم زمین، ۱۹ (۷۴)، ۱۳-۲۰.