

## استفاده از روش اجزاء محدود به منظور تفسیر داده‌های گرانی در دشت چابهار

عبدالرحیم عسکری<sup>۱\*</sup> و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه فیزیک دانشگاه تربیت معلم سبزوار، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۷، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۱)

### چکیده

بر پایه اکثر مقالات منتشر شده، کاربرد روش اجزاء محدود، صرفاً شامل به‌کارگیری تعدادی گره، روی محیط یک نقشه راست‌گوشه گرانی برای محاسبه بی‌هنجاری منطقه‌ای است. خلاصه‌ای از این روش در متن توصیف شده است. بی‌هنجاری‌های گرانی همواره شامل اثرات کل ناحیه مورد بررسی و فراتر از آن است. منحصربه‌فرد نبودن مدل‌سازی میدان پتانسیل، ممکن است به نتایج تفسیری بسیار متفاوتی منتهی شود. روش اجزاء محدود که مدت‌ها در تفسیر میدان پتانسیل به کار می‌رفته است، حل مسائل پیچیده را به‌راحتی و با دقت برای ما ممکن می‌سازد. در روش اجزاء محدود، ابتدا، باید اجزاء را تعیین کنیم. سپس، برای مشخص ساختن مرز منطقه‌ای که باید مسئله موردنظر در آنجا مورد بررسی قرار گیرد، تصمیم‌گیری کنیم. در این مقاله بی‌هنجاری گرانی بوگه در منطقه چابهار به این روش مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: روش اجزاء‌های محدود، جدایش منطقه‌ای باقی‌مانده، دشت چابهار، عمق موهو

## Interpretation of gravity data using the finite element method in the Chabahar Plain

Abdolrahim Askari<sup>1\*</sup> and Vahid Ebrahimzadeh Ardestani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tarbiat Moallem University of Sabzevar, Iran  
<sup>2</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 06 September 2010, accepted: 28 June 2011, available online: 20 February 2012)

### Summary

In view of the numerous publications, there is clear interest in the application of the Finite Element Method (FEM) to compute the regional gravity anomaly involving only 8 nodes on the periphery of a rectangular map. Geophysical data processing methods, such as trend analysis, analytical continuation and filtering can reveal the general structural properties of a region. Although, there were improvements in distinguishing the regional and residual gravity anomalies, no progress has been made in trend analysis, filtering or analytical continuation methods. With improvements in scientific computing, high degree trend analysis and filtering methods have been used more efficiently for 2-D data. On the other hand, computed regional anomalies still contain residual anomaly effects. For this reason, the finite element method (FEM) might be used to eliminate the residual anomaly

\*Corresponding author:

r.askaree@sttu.ac.ir

\*نگارنده رابط:

effects on the regional anomalies. A brief description of the theory of FEM is presented for the sake of completeness.

The gravity map in real space is superimposed by a weighted sum of discrete gravity values at eight stations coinciding with the eight nodes of a second-order iso-parametric element to compute the regional anomalies on the finite elements in the FEM application. For each node coordinate and field variable, the element can be defined by the same shape functions. Due to this feature, it could be named an isoparametric element. The observed gravity values for each node are obtained from the map. The non-dimensional reference plane, which is related to the real plane, was described by using the shape function to perform an easy computation. Eight observed gravity values on quadratic isoparametric elements, which were superimposed onto the gravity map, are needed to compute regional anomalies. Other observed gravity data are unnecessary.

Gravity anomalies always include the total effects (combination of the structures which have different densities and depths) of the study area and beyond. Moreover, the well-known non-uniqueness of potential field modeling may lead to very different interpretation results. FEM is here applied in order to determine the regional anomalies. The method has advantages over the traditional methods. For instance, only a few observation points on a Bouguer gravity map are needed to compute the regional gravity anomaly. The FEM can be applied for any size of gravity map. In addition, it will be shown that the computed regional anomaly contains minimal residual anomaly effects.

The FEM, which has been used in potential field interpretation for decades, allows complex problems to be solved easily and accurately. The first step of FEM is to identify the elements and then to identify the boundary of the solution space. In this step, the solution space is divided into elements. After determination of the geometrical structure of the solution space, the most suitable elements should be selected for this geometrical structure. The agreement between the geometry and the elements is quite important for the convergence to the best possible solution. FEM has been successfully applied to different modeling problems in the scientific world including in geophysics for decades. In this study, it was used to distinguish the regional and residual anomalies by using the necessary shape functions. These shape functions play quite an important role in changing the reference plane. After the method was applied, it was seen that it produced better results than those produced by the existing traditional methods. In addition to that, fewer gravity values were needed. For instance, only eight nodes with the shape functions were used to compute the regional anomaly.

**Key words:** Finite element method; regional-residual separation, Chabahar; depth of Moho

## ۱ مقدمه

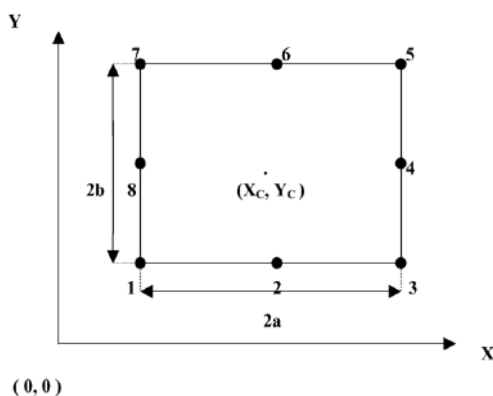
یعنی اکتشاف‌های معدنی، ژئوفیزیک‌دان علاقه‌مند به دانستن سهم منابع کم‌عمق است (باقی‌مانده‌ها)، این حالت وقتی مسئله مورد بررسی مربوط به ویژه‌گی‌های عمقی باشد، برعکس می‌شود (به نقشه در آوردن ناپیوستگی‌های موهو). در این حالت باقی‌مانده‌ها نوفه محسوب می‌شوند. بنابر این تصویرسازی بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای و باقی‌مانده از داده‌های گرانی مشاهده‌ای، مستلزم مقدار زیادی کار

روش اجزاء محدود برای حذف اثر بی‌هنجاری باقی‌مانده از بی‌هنجاری منطقه‌ای به کار می‌رود. اندازه‌گیری‌های گرانی در نقاط مشاهده‌ای، شامل تغییرات جانبی در لایه‌های با عمق‌های متفاوت نیز می‌شود. هدف یک ژئوفیزیک‌دان به تصویر در آوردن این اثرات موجود در لایه‌های گوناگون است. در معمولی‌ترین این حالت‌ها،

شد، استفاده از این روش، نتایج بهتری نسبت به روش‌های سنتی موجود به دست داده است. مطابق مقاله مالیک و شارما، بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای با رابطه زیر داده می‌شود:

$$g(x, y) = \sum_i N_i(x, y) g_i, i = 1, \dots, 8. \quad (1)$$

که در آن،  $N_i(x, y)$  نشان‌دهنده توابع وزنی و  $g_i$ ، مقادیر گرانی در گره‌ها است. شکل ۱ اجزاء چهار گوشه‌ای را که دارای هشت گره در صفحه  $(x, y)$  است، نشان می‌دهد. در این شکل  $(x_c, y_c)$  مرکز اجزاء را نشان می‌دهد. فضای نقشه واقعی با ابعاد واقعی آن برای طول و عرض‌اش، به فضای بدون بُعد  $(\xi, \eta)$  تبدیل می‌شود. در شکل ۲، اجزاء چهار گوشه با هشت گره روی آن در صفحه بدون بُعد  $(\xi, \eta)$ ، ملاحظه می‌شود. از مختصات این صفحه بدون بُعد  $(\xi, \eta)$ ، برای محاسبه توابع وزنی استفاده می‌شود. شکل توابع وزنی اجزاء هشت گره‌ای باروابط زیر داده می‌شود (هینتون و اون، ۱۹۸۵).



شکل ۱. اجزاء هشت گره‌ای چهار گوشه در صفحه  $x-y$  (مالیک و شارما، ۱۹۹۹).

برای گره‌های گوشه‌ها:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) \quad i = 1, 3, 5, 7 \quad (2)$$

تجربی و داشتن دانش زمین‌شناسی محلی است. دربرین (۱۹۷۶) نتیجه گرفت که حذف اثر ناحیه‌ای یکی از دو مسئله اصلی در تفاسیر گرانی است، مسئله دیگر به دست آوردن اطلاعات از بی‌هنجاری باقی‌مانده مربوط به ساختار و توزیع چگالی منابع است.

میدان مشاهده‌ای در هر نقطه عموماً عبارت است از مجموع جاذبه گرانشی همه منابع قرار گرفته در زیر و همسایگی آن نقطه. مفسر علاقه‌مند به جداسازی بی‌هنجاری ناشی از منابع معینی است؛ که اغلب مبهم‌اند. این ابهام ناشی از نبود یکتایی جواب است (روی، ۱۹۶۲؛ اسکیل، ۱۹۶۷). در پایان قرن بیستم، مالیک و شارما (۱۹۹۹) روش اجزاء محدود را برای محاسبه بی‌هنجاری منطقه‌ای عرضه کردند. در این روش بی‌هنجاری منطقه‌ای محاسبه می‌شود، که این کار با مجموع مقادیر گسسته گرانی وزن داده شده در هشت ایستگاه پیرامون ناحیه مورد بررسی، به دست آمده است. از نظر چندین مقاله منتشر شده مثل: هاینزه و همکاران (۲۰۰۶)، واسانتی و مالیک (۲۰۰۵)، واسانتی و مالیک (۲۰۰۶)، واسانتی و همکاران (۲۰۰۶) کافتان و همکاران (۲۰۰۵)، کانن و مالیک (۲۰۰۳)، روش FEM، روش بسیار خوبی در جداسازی اثرات بی‌هنجاری منطقه‌ای و باقی‌مانده است. هدف از این تحقیق استفاده از روش اجزاء محدود در تعبیر و تفسیر داده‌های گرانی در دشت چابهار است.

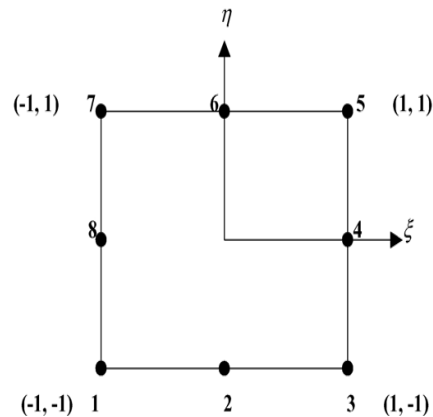
## ۲ نظریهٔ روش اجزاء محدود

چندین دهه است که روش اجزاء محدود برای حل مسئله‌های گوناگون مدل‌سازی در ژئوفیزیک، با موفقیت به کار گرفته شده است. در این تحقیق برای جداسازی بی‌هنجاریهای منطقه‌ای و باقی‌مانده، این روش با استفاده از توابع وزنی که نقش مهمی در تعیین بی‌هنجاری منطقه‌ای دارند به کار برده شده است. همان‌طور که در مقدمه اشاره

برای گره‌های میانی:

$$N_i = \frac{\xi_i^2}{2}(1 + \xi_i \eta)(1 - \eta^2) \quad i = 2, 4, 6, 8 \quad (۳)$$

$$+ \frac{\eta_i^2}{2}(1 + \eta \eta_i)(1 - \eta^2)$$



شکل ۲. اجزاء چهارگوشه با هشت گره روی آن در صفحه بدون بُعد

( $\xi, \eta$ )، (مالیک و شارما، ۱۹۹۹).

### ۳ چگونگی اعمال روش اجزاء محدود

برای اعمال روش اجزاء محدود، از برنامه رایانه‌ای، آگاروال و سریواستراوا (۲۰۱۰)، استفاده شده است. این روش برای بی‌هنجاری گرانی بوگه در منطقه چابهار اعمال شده است. این منطقه محدود به عرض جغرافیایی  $\phi = 25^\circ.20'$  تا  $\phi = 25^\circ.45'$  و طول جغرافیایی  $\lambda = 59^\circ.50'$  تا  $\lambda = 60^\circ.55'$  است. فواصل روی محور طولی و عرضی در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶، نسبت به مبدا  $\phi = 25^\circ.20'$  و  $\lambda = 59^\circ.50'$ ، در نظر گرفته شده‌اند. نقشه گرانی بوگه از روی بی‌هنجاریهای بوگه در این ناحیه، با ایجاد یک شبکه ۱۲۸ در ۱۲۸ نقطه‌ای به روش درون‌یابی رقمی‌کننده (دیجیتایز) و استخراج شد، (عسکری، ۱۳۷۳).

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، یک جزء هشت‌گره‌ای راست‌گوشه روی ناهنجاری موجود در ناحیه مستطیل‌شکل، روی نقشه گرانی بوگه، انتخاب شده است. برای هر گره مقادیر گرانی خوانده می‌شود و سپس به فضای بدون بُعد ( $\xi, \eta$ ) انتقال می‌یابد. بعد از این،

بی‌هنجاری منطقه‌ای برای هر گره با استفاده از معادله (۱) در فضای ( $\xi, \eta$ ) محاسبه می‌شود.

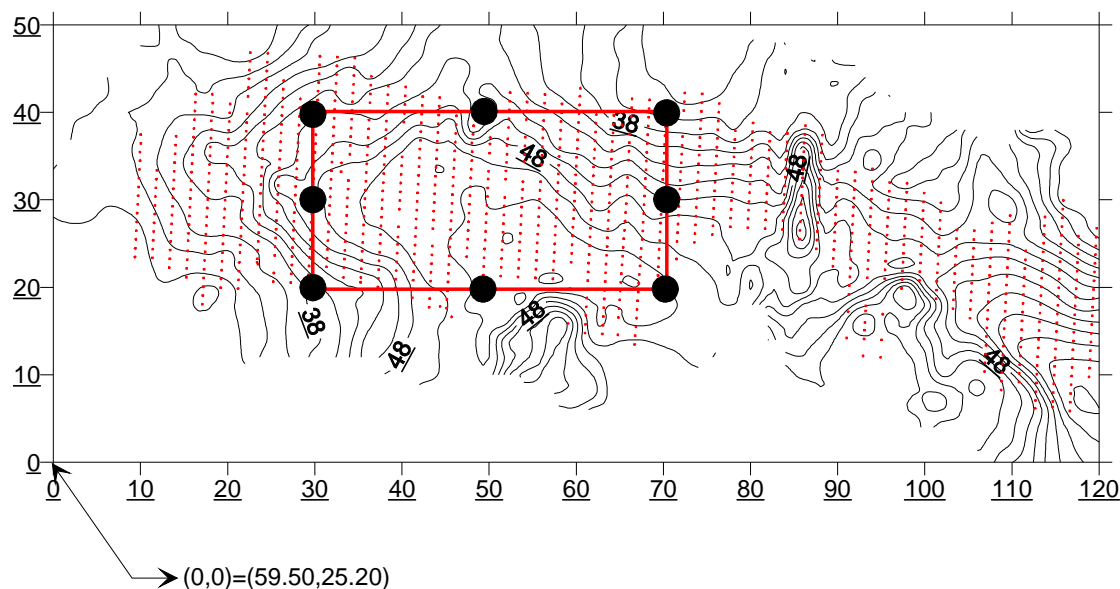
نگارندگان، منطقه مشخص شده در شکل ۳ نقشه گرانی بوگه را، با استفاده از روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داده‌اند. بی‌هنجاری منطقه‌ای و باقی‌مانده محاسبه شده به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، محور اصلی بی‌هنجاری، روند جنوب شرقی-شمال غربی دارد. نظر به اینکه صفحه ایران از شمال و جنوب با صفحه‌های اوراسیا و عربی، تحت فشار است، همچنین با توجه به روند لرزه‌خیزی در این منطقه، نکته فوق کاملاً قابل توجیه است (مختاری و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به اینکه خطوط میزان گرانی در شکل ۴ در ناحیه وسط نسبت به خطوط کناری، مثبت‌تر هستند، می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌های چگال‌تر فاصله کمتری با سطح زمین دارند. این بی‌هنجاری می‌تواند دلیلی بر وجود قله تاقدیسی باشد، که به نزدیک سطح زمین آورده شده است.

### ۴ تعیین عمق موهو

روش مورد استفاده برای برگردان‌سازی، روش پارکر (۱۹۷۲) و الدنیرگ (۱۹۷۴) است. با معلوم بودن تباين چگالی و عمق متوسط موهو، عمق موهو با استفاده از طرح پارکر که براساس تبدیل فوریه بی‌هنجاری‌های گرانی است، به دست می‌آید (عسکری و همکاران، ۲۰۰۸). با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس به روش فوق، نسبت به محاسبه عمق موهو در این ناحیه از روی داده‌های نقشه بی‌هنجاری منطقه‌ای اقدام شد. نتایج حاصل در شکل ۶ مشهود است. این شکل، نتایج کاربرد روش معکوس را برای تباين چگالی ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نشان می‌دهد. بیشترین عمق موهو ۲۳/۶۲ کیلومتر و کمترین عمق آن ۲۰/۵۶ کیلو متر است. این مقدار با مقادیر محاسبه شده مختاری و همکاران (۲۰۰۴) و دهقانی و

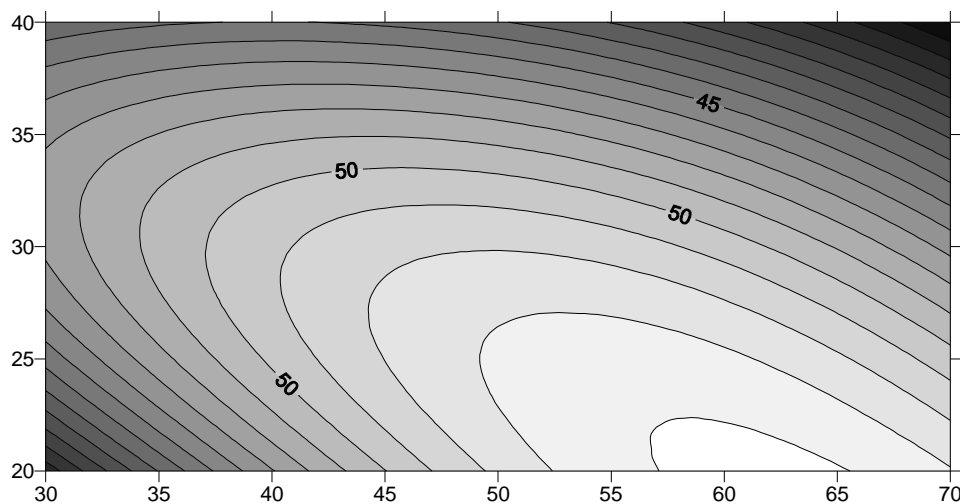
که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، با روند لرزه‌خیزی که در این منطقه وجود دارد، کاملاً در توافق است (مختاری و همکاران، ۲۰۰۴).

ماکریس (۱۹۸۳)، در توافق است. دهقانی و ماکریس عمق موهو را در این ناحیه، زیر ۲۵ کیلومتر محاسبه کرده‌اند. در شکل ۷ عمق موهو که مختاری و همکاران تعیین کرده‌اند، نشان داده شده است. روند شرقی - غربی

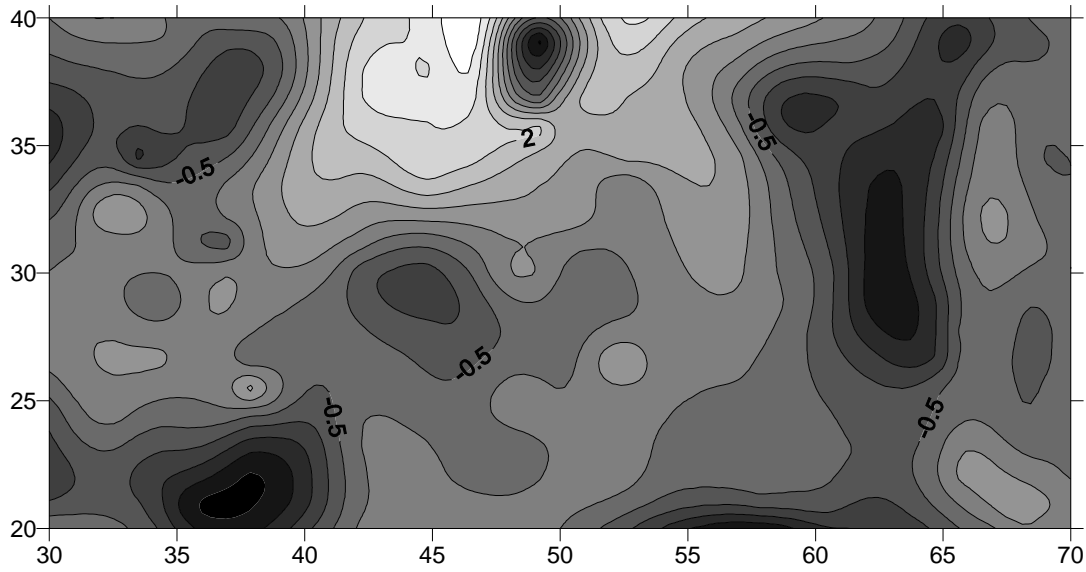


شکل ۳. نقشه گرانی بوگه مشاهده‌ای در منطقه مورد بررسی نقاط ریز سرخ‌رنگ موقعیت ایستگاه‌های مشاهده‌ای است، مبدا (0, 0) منطبق بر

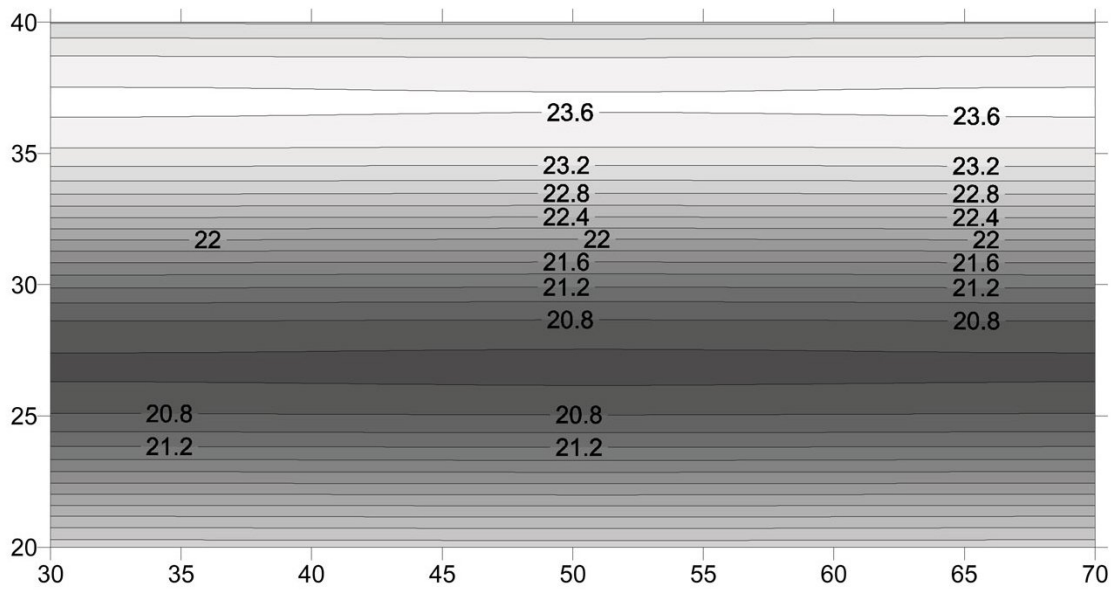
شکل ۳. نقشه گرانی بوگه مشاهده‌ای در منطقه مورد بررسی نقاط ریز سرخ‌رنگ موقعیت ایستگاه‌های مشاهده‌ای است، مبدا (0, 0) منطبق بر  $\lambda = 59^{\circ}.50'$  و  $\phi = 25^{\circ}.20'$  است. اعداد روی محور طولی و عرضی برحسب کیلومتر هستند. فواصل بین خطوط میزان ۲ میلی‌گال است. دایره‌های توپو روی مستطیل، موقعیت هشت گره استفاده شده برای محاسبه بی‌هنجاری منطقه‌ای در روش اجزاء محدود را نشان می‌دهد.



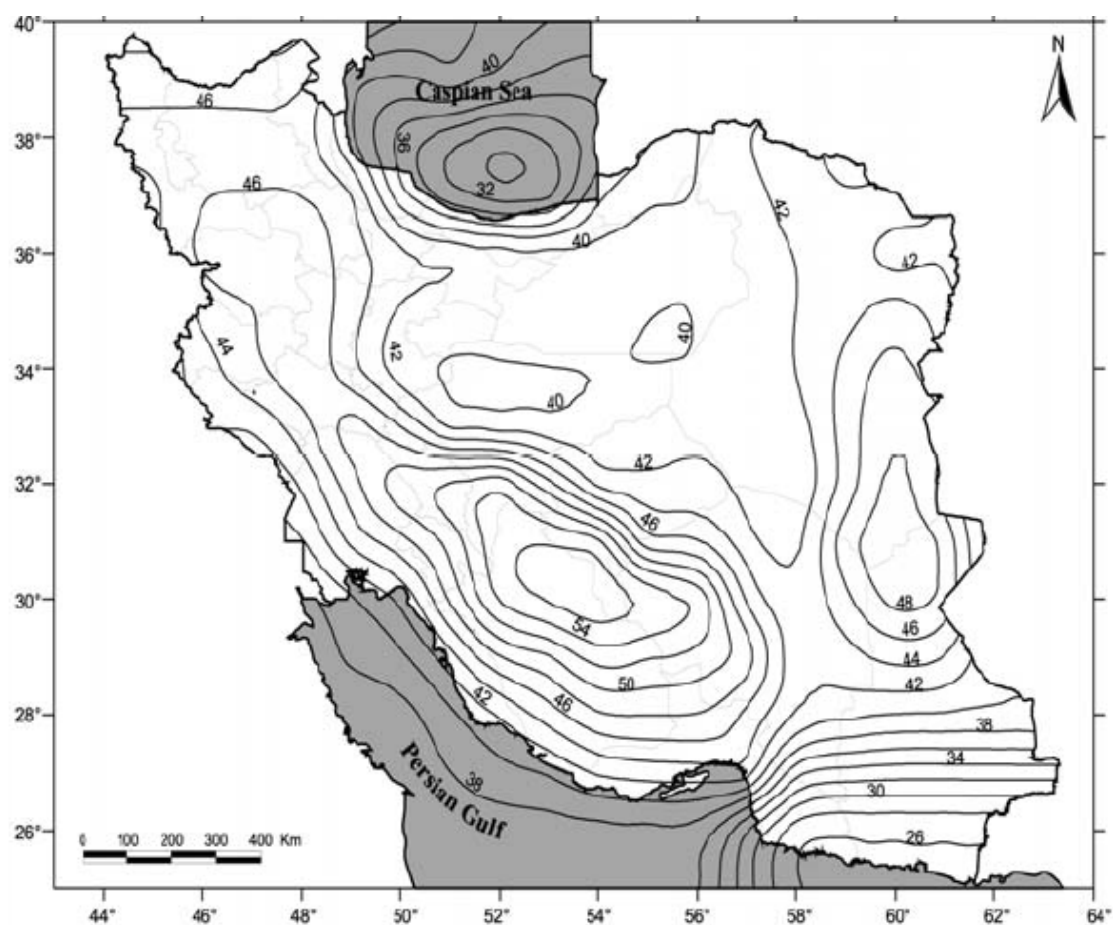
شکل ۴. نقشه گرانی منطقه‌ای حاصل از روش (FEM)، فواصل بین خطوط ۲ میلی‌گال است. اعداد روی محور طولی و عرضی برحسب کیلومتر است.



شکل ۵. نقشه گرانی باقی مانده حاصل از روش (FEM)، فواصل بین خطوط ۰/۵ میلی گال است. اعداد روی محور طولی و عرضی برحسب کیلومتر است.



شکل ۶. عمق موهو در ناحیه مورد بررسی حاصل از روش معکوس بی‌هنجاری منطقه‌ای، فواصل بین خطوط میزان ۰/۲ کیلومتر است. اعداد روی محور طولی و عرضی برحسب کیلومتر است.



شکل ۷. تعیین عمق موهو در ایران با روش لرزه‌ای (مختاری و همکاران، ۲۰۰۴).

## ۵ نتیجه‌گیری

به دلیل خاصیت غیر یکتا بودن جواب در مسائل گرانی، روش‌های گرانی در مرحله تفسیر همیشه با مقداری مشکل مواجه هستند. واضح است که مسئله جدایش ناهنجاری باقی‌مانده و منطقه‌ای، به تجربه و ابتکار مفسر بستگی دارد. بنابراین مسئله جداسازی در روش‌های معکوس داده‌های گرانی، تحت تاثیر ابهامی غیر قابل حل است؛ مگر آنکه با روش‌های خاصی عمل جداسازی صورت پذیرد. تعبیر و تفسیر بی‌هنجاری‌های گرانی هرگز منحصر به فرد نیست، البته روش‌هایی ابداع شده که کمک زیادی به محدود کردن این اثر غیر یکتایی کرده و توانسته‌اند از بی‌نهایت جواب، آنهایی را انتخاب کنند که از نظر زمین‌شناسی یا طبیعت معقول باشند. در این تحقیق از روش اجزاء محدود

برای به دست آوردن بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای، استفاده شده است. در این روش از توابع وزنی برای محاسبه ناهنجاری گرانی منطقه‌ای استفاده می‌شود. از بی‌هنجاری منطقه‌ای برای برآورد عمق موهو در ناحیه مورد بررسی، به منظور برگردان‌سازی، استفاده شده است. تحلیل نقشه گرانی بوگه در شکل ۳ احتمال وجود تاقدیسی را که می‌تواند به مثابه یک تله نفتی تلقی شود، نشان می‌دهد. وجود بی‌هنجاری مثبت کلی در منطقه به دلیل وجود پوسته اقیانوسی در منطقه است. این بی‌هنجاری باعث افزایش گرانی به صورت مثبت شده است. با توجه به شکل ۶ عمق موهو به سمت شمال ناحیه مورد بررسی، افزایش می‌یابد که با تحقیق‌های دیگران در توافق است، (مختاری و همکاران، ۲۰۰۴). شرایط مطلوب برای توسعه

- Dobrin, M. B., 1976, Introduction to geophysical prospecting: McGraw Hill, New York 630pp.
- Hinton, E., and Owen, D. R. J., 1985, An introduction to finite element computations: Pine Ridge Press Ltd., Swansea, UK400pp.
- Hinze, W., Coakley, B., Hildenbrand, T., Keller, G. R., Li, X., Plouff, D., Ravat, D., and Webring, M., 2006, Reply to discussion on new standards for reducing gravity data: the North American gravity data base 'by Hinze, W.J. et al., *Geophysics*, **71**, X32-X33.
- Kaftan, I., Salk, M., and Suri, C., 2005, Application of the finite element method to gravity data case study: western Turkey: *Journal of Geodynamics*, **39**, 431-443.
- Kannan, S., and Mallick, K., 2003, Accurate regional-residual separation by finite element approach, Bouguer gravity of Precambrian mineral prospect in northwestern Ontario: *FirstBreak*, **21**, 39-42.
- Mallick, K., and Sharma, K. K., 1999, A finite element method for computation of the regional gravity anomaly: *Geophysics*, **64**, 461-469.
- Mokhtari, M., Farahbod, A., Lindholm, C., Alahyarkhani, M., and Bungum, H., 2004, An approach to a comprehensive Moho depth map and crust and upper mantle velocity model for Iran: *Iranian Int. J. Sci.*, **5**(2), 223-244.
- Oldenburg, D., 1974, The inversion and interpretation of gravity anomalies: *Geophysics*, **39**, 526-536.
- Parker, R., 1972, The rapid calculation of potential anomalies: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **31**, 447-455.
- Roy, A., 1962, Ambiguity in geophysical interpretation: *Geophysics*, **27**, 90-99.
- Skeels, D. C., 1967, What is residual gravity?: *Geophysics*, **32**, 872-876.
- Vasanthi, A., and Mallick, K., 2005, Bouguer gravity modeling of central Cuddapah basin: *Journal of the Geological Society of India*, **66**, 171-184.
- Vasanthi, A., and Mallick, K., 2006, Bouguer gravity modeling of Kaladgi-Badami basin, Karnataka: *Journal of the Geological Society of India*, **68**, 937-945.
- Vasanthi, A., Sharma, K. K., Mallick, K., 2006, Discussion on "new standards for reducing gravity data: The North American gravity data base" by Hinze, W. J. et al., 2005: *Geophysics*, **70**, J25-J32. *Geophysics*, **71**, X31-X32.
- یک روش این است که اعتبار جهانی داشته باشد. تحلیل اجزاء محدود به گونه‌ای است که نیاز به فرض رابطه تجربی یا یک مدل فیزیکی برای محاسبه بی‌هنجاری منطقه‌ای ندارد. همچنین نیازی به محاسبه بی‌هنجاری‌های مربوط به توپوگرافی منطقه‌ای و ایزوستازی نیست. علاوه بر این، به فرض کردن چگالی یکنواخت برای پوسته در مناطق بزرگ نیز نیازی نیست. این اطلاعات به طور ضمنی در بی‌هنجاری گرانی بوگه وجود دارد. در نهایت، روش اجزاء محدود خاص یک منطقه نیست. حذف سه گام برای محاسبه منطقه‌ای و بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده باعث می‌شود که روش اجزاء محدود منحصر به فرد باشد. در این روش از توابع وزنی برای محاسبه بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای، استفاده می‌شود. در صورت نبود تحقیقات کافی در منطقه مورد بررسی، که امکان اختصاص دادن پارامترهای فیزیکی برای روش‌های دیگر از جمله روش‌های مغناطیسی و لرزه‌ای وجود ندارد، این روش را با اعتماد بیشتری می‌توان مورد استفاده قرار داد.

#### منابع

- عسکری، ع. ر.، ۱۳۷۳، گرانی‌سنجی دشت چابهار و مقایسه آن با تشکیلات زمین‌شناسی منطقه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Askari, A., Ardestani, V. E., and Ardalani, A. A., 2008, Determining sediment thickness in the Oman Gulf using free air anomaly through satellite altimetry observation: *Journal of the Earth and Space Physics*, **34**(2), 97-106.
- Agarwal, B., and Srivastava, S., 2010, A fortran program to implement the method of finite elements to compute regional and residual anomalies from gravity data: *Computers and Geosciences*, **36**, 848-852.
- Dehghani, G. A., and Makris, J., 1983, The gravity field and crustal structure of Iran, In: *Geodynamics project (geotraverse) in Iran: Geological Survey of Iran, Rep.*, **51**, 51-68.