

## بررسی قابلیت روش اجزاء محدود در جداسازی بی‌هنجاری‌های گرانی ساختمان‌های نفتی

فرامرز دولتی ارده جانی<sup>۱</sup>، علی مرادزاده<sup>۲\*</sup>، محمد یعقوبی‌پور<sup>۳</sup> و سیدهاشم طباطبایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد ژئوفیزیک، بخش اکتشافات ژئوفیزیک، شرکت ملی نفت ایران

(دریافت: ۸۶۹۵، پذیرش نهایی: ۸۹۷۲۸)

### چکیده

استفاده از روش‌های مناسب تفکیک بی‌هنجاری‌ها در تعیین وضعیت دقیق ساختمانی تله‌های نفتی یکی از مسائل مهم در تفسیر داده‌های گرانی است. اگرچه روش‌های متداول تفکیک بی‌هنجاری‌ها از قبیل مشتقات اول و دوم، گسترش بی‌هنجاری‌ها به سمت بالا و پایین، متوسط‌گیری وزنی و روند سطحی طی سالیان متمادی به‌منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های گرانی در اکتشاف منابع نفتی و کانسارها به کار گرفته شده است با این حال ضرورت استفاده از روش‌های جدید در تفسیر داده‌های گرانی هنوز احساس می‌شود. در این مقاله از توانمندی‌های روش عددی اجزاء محدود به منظور حذف اثرات ناحیه‌ای داده‌های گرانی منطقه دهنو استان فارس استفاده می‌شود. برای برآورد گرانی ناحیه‌ای، از اِلمان‌های چهار گره‌ای، هشت گره‌ای با تابع درون‌یاب درجه دو و اِلمان دوازده گره‌ای با تابع درون‌یاب درجه سه استفاده شد. محاسبات مورد نیاز در فضای بدون بُعد  $17-C$ ، در فاصله  $1-$  و  $1$  صورت گرفت و سپس مجدداً به فضای واقعی  $ص-ص$  برگردانده شد. با استفاده از روش‌های متداول، قابلیت و توانمندی، روش اجزاء محدود در جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی مورد ارزیابی قرار گرفت. نقشه باقی‌مانده حاصل از روش اجزاء محدود دو بی‌هنجاری تاقدیسی و سه بی‌هنجاری ناودیسی را مشخص کرد. بی‌هنجاری‌های تاقدیسی منطبق بر ساختمان دهنو هستند. نتایج حاصل از روش اجزاء محدود در تطابق نسبتاً خوبی با نتایج سایر روش‌های تفکیک بی‌هنجاری‌ها است که این موضوع خود قابلیت استفاده از روش اجزاء محدود را برای حذف اثرات ناحیه‌ای از مقادیر گرانی برداشت شده به اثبات می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: داده‌های گرانی، تفکیک بی‌هنجاری‌ها، منطقه دهنو، تله نفتی، اجزاء محدود

## A study of the capability of the finite element method in gravity anomalies separation of oil traps

Doulati Ardejani, F.<sup>1</sup>, Moradzadeh, A.<sup>2</sup>, Yaghobipour, M.<sup>3</sup> and Tabatabaie, S. H.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Faculty of Mining and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mining and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

<sup>3</sup> M.Sc. in Mining Engineering, Faculty of Mining and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>4</sup> M.Sc. in Geophysics, NIOC 8<sup>th</sup> Buildings Yaghma Alley Jumhoori Ave. Tehran P.O.Box 1863

(Received: 26 Nov 2007, Accepted: 20 Oct 2010)

### Abstract

This paper attempts to investigate the capability of the numerical finite element method for the removal of the regional effects from the observed gravity data from the Dehnow anticline.

\*نگارنده رابط: تلفن: ۰۲۷۳ - ۳۳۹۵۵۰۹ دورنگار: ۰۲۷۳ - ۳۳۹۵۵۰۹ E-mail: amorzadeh@shahroodut.ac.ir

From a geological point of view, the Dehnow area is a part of the Fars sedimentary basin south-east Iran. The Khamy formation and Bangestan group are the oldest geological structures in the area that have outcrops. Younger structures consist of Aghajary, Mokhtari, Mishan, Gachsaran and Asmary. The dominant structural trend in the area is northwest-southeast. The Dehnow anticline is located between the Hendurabi and Razak faults. These faults are almost perpendicular to the Dehnow anticline. The presence of these two series of perpendicular faults has been well proved by the detailed geological investigations carried out in the area. The first type of the faults with a northwest-southeast direction has formed oil seeps due to the extension of these types of faults to the dipper layers. The second types of faults in the salt layers of the Hormoz formation at the base of the Dehnow anticline may be related to the salt intrusion. The evidence of the salt outcrops can be recognized at two points from the Dehnow anticline.

The Dehnow anticline is surrounded by Ashkenan, Ahal, Boochir, Hamiran, Hashniz and Kemeshck towns. The Tabnack gas structure is located in the west of this district. The anticline can be accessed through Asalouie-Bandarlengeh and Lamard-Ashkenan- Gavbandy roads. The area has a very harsh topography with numerous mountains and valleys. The region is very warm and wet in the summer. It has a mild winter.

A careful geological study of the area, a detail investigation of structural features such as faults associated with the Dehnow anticline and application of the proper geophysical techniques and other exploration methods is necessary to investigate its subsurface extension and to further identify salt plug intrusion into this anticline. Furthermore, the information obtained by the various exploration techniques can help to design a cost management program related to any further investigation in the area.

The gravity method has been used in the past in many applications related to petroleum exploration studies as a way of investigating oil traps and exploring the impact of faults and intrusions in particular salt into such geological structures. This method together with other geophysical methods including magnetic and Magnetotelluric (MT) have been used in the study area to achieve the above objectives.

Anomaly separation using appropriate techniques is noted to be an important stage in the interpretation of gravity data in order to accurately detect the subsurface oil traps. The literature review has shown that despite the conventional separation methods such as first and second vertical derivatives, upward and downward continuations, weighting average and trend surface analysis that have been used during the past few decades in the separation of gravity anomalies in the exploration of oils and ore deposits, the application of the finite element method related to anomaly separation has not been widely reported so far. Using new techniques in the regional-residual anomalies separation of the observed gravity data is a crucial demand in gravity interpretation.

In this paper, the finite element approximation method was used to remove regional effects from the measured gravity data of the Dehnow anticline. For regional gravity approximation, four nodes element, eight nodes isoparametric quadratic element and twelve nodes cubic element were used. The necessary computations were performed on a non-dimensional  $\xi-\eta$  space, ranging between -1 and 1 and subsequently translated to the real x-y space.

The capability of the finite element method in regional-residual separation of the gravity data was evaluated using the conventional separation techniques including the trend surface method. The residual map obtained using the finite element method

indicates the presence of two anticlines and three syncline structures with a northwest – southeast strike. The anticlines identify the Dehnow structure. The results of the finite element method are in close agreement with those results obtained from the conventional methods; confirming that the finite element approximation technique is a capable method for computation of the regional gravity anomaly free from residual effects.

**Key words:** Gravity data, anomaly separation, Dehno area, oil trap, finite element

## ۱ مقدمه

بی‌هنجاری‌ها دارای ضعف‌هایی به شرح زیر هستند. در اکثر این روش‌ها فرض شده تا محدوده مورد بررسی به صورت شبکه‌های مربعی یا مستطیلی باشند. به علاوه به هنگام اعمال این فیلترها مجموعه‌ای از داده‌ها از چهار گوشه نقشه از بین می‌روند. به علاوه، استفاده از این فیلترها در بعضی موارد به داده‌های برداشت شده نوفه اضافه می‌کند. در روش متوسط‌گیری وزنی انتخاب یک شعاع مناسب برای محاسبه اثر ناحیه‌ای بسیار دشوار است. در اکثر موارد بی‌هنجاری‌های مجاور مجزا همپوشانی دارند و یا یک بی‌هنجاری ممکن است به صورت بی‌هنجاری‌های مجزا از هم تفسیر شود. در روش روند سطحی نیز رسیدن به یک سطح روند ایدئال مشکل است. مهم‌تر از همه اینکه در اکثر روش‌های فیلترسازی از همه داده‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه مقادیر گرانی ناحیه‌ای استفاده می‌شود و علاوه بر آن به کمک برنامه‌های رایانه‌ای از چند جمله‌ای با مرتبه بسیار بالا برای برازش بر داده استفاده می‌شود و این امر سبب می‌شود تا اثرات ناحیه‌ای محاسبه شده به لحاظ نظری به احتمال زیاد نتواند کاملاً عاری از اثرات محلی یا باقی‌مانده باشد (مالیک و شارما، ۱۹۹۹). از این رو نتایج حاصل در این موارد نمی‌تواند زیاد دقیق باشد و بدین سبب معمولاً برای تفکیک بی‌هنجاری‌ها، همه این فیلترها مورد استفاده قرار می‌گیرند و نتایج با هم مقایسه می‌شوند (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵). به سبب ضعف‌های موجود، استفاده از روش‌های جدید مثل روش اجزاء محدود برای تفکیک بی‌هنجاری‌ها احساس می‌شود.

هدف اصلی تحقیقات ژئوفیزیکی در اکتشافات نفتی، پی‌بردن به وجود تله‌های نفتی است. بعضی از نفتگیرهای ساختمانی مانند تاق‌دیس‌ها در سطح رخنمون دارند. ولی در غالب موارد این ساختمان‌ها کاملاً رسوبات پوشیده شده‌اند و فقط با تحقیقات ژئوفیزیکی می‌توان به وجود این نفت‌گیرها پی‌برد. در این میان روش گرانی‌سنجی نقش بسیار مهمی در تشخیص این تله‌ها ایفا می‌کند. اگر داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده به درستی تفسیر شوند می‌تواند اطلاعات سودمندی در مورد وضعیت ساختمانی تله‌های نفتی فراهم کنند.

یکی از مسائل مهم در تفسیر داده‌های گرانی حذف اثرات ناحیه‌ای (منطقه‌ای) از داده‌های گرانی برداشت شده است؛ که هدف عملیات اکتشافی نیستند. با حذف این اثرات، بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده (محلی) که مربوط به ساختمان‌های زیر سطحی کم‌عمق‌تر هستند، با وضوح بیشتر نمایان می‌شوند. به همین دلیل داده‌های برداشت شده پس از تصحیحات لازم باید با انتخاب فیلترهای مناسب به مولفه‌های ناحیه‌ای و باقی‌مانده تفکیک شوند (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴). انتخاب فیلتر مناسب که پاسخگوی نیازهای وضعیت زمین‌شناسی هر منطقه باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تفکیک داده‌های گرانی از فیلترهای گوناگونی استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش‌های تفکیک بی‌هنجاری‌ها شامل روش‌های مشتقات اول و دوم، گسترش بی‌هنجاری‌ها به سمت بالا و پایین، متوسط‌گیری وزنی و روش روند سطحی است (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۱). روش‌های اشاره شده به منظور تفکیک

جزء یا اِلمان با شکل دلخواه تقسیم و گره‌های فرضی ایجاد می‌شود. برای هر اِلمان یک تابع تقریبی  $\bar{u}$  با ضرایب مجهول از مقادیر پارامترهای گرهی (منظور از پارامترهای گرهی مقدار تابع یا مشتقات آن در گره مفروض است) در نظر گرفته می‌شود که به آنها توابع درون‌یاب (Interpolate) اِلمان گویند (ردی، ۱۹۹۳).

این روش محاسبه اثر ناحیه‌ای داده‌های گرانی، براساس مفهوم و خصوصیات توابع شکل هر اِلمان که در روش اجزاء محدود به کار می‌رود، استوار است. برای حل معادلات دیفرانسیل با روش عددی اجزاء محدود، متغیرهای پیوسته در هر نقطه داخل اِلمان - خطی، مربعی (درجه ۲) یا مکعبی (درجه ۳) با جمع وزنی (weighted sum) مقادیر گره‌ای مجزا،  $g_i$ ، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) g_i \quad (1)$$

که در آن:

$N_i(x, y)$  = توابع شکل که همانند توابع وزنی عمل می‌کنند

$n$  = تعداد گره‌ها در اِلمان

$g(x, y)$  = بی‌هنجاری ناحیه‌ای گرانی داخل اِلمان در نقطه‌ای با مختصات  $x$  و  $y$  است.

از آنجا که هر اِلمان می‌تواند دارای شکل، اندازه و خواص مختص به خود باشد، تعجبی ندارد که این روش توانایی‌های بسیار خوبی در خصوص بررسی مسائل مربوط به خاصیت ناهمگونی مواد، هندسه نامنظم و شرایط پیچیده داشته باشد. اگر چه در اکثر موارد به‌منظور حل مسائل فقط از یک نوع اِلمان به‌خصوص استفاده می‌شود ولی از ترکیب اِلمان‌های متفاوت نیز می‌توان استفاده کرد.

انتخاب توابع درون‌یاب مهم‌ترین کار این روش است. یک تابع درون‌یاب مناسب، به همگرایی خیلی خوب در سطح انتخابی منجر می‌شود. برعکس انتخاب غلط آن

روش اجزاء محدود روشی عددی برای حل تقریبی بسیاری از مسائل مهندسی است. استفاده از این روش در کاوش‌های ژئوفیزیکی، خصوصاً روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی غالباً در مدل‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده خلاصه می‌شود (کافتن و همکاران، ۲۰۰۳). با توجه به قابلیت و انعطاف‌پذیری خوب روش اجزاء محدود در حل مسائل مهندسی دو محقق هندی (مالیک، ۱۹۹۱؛ مالیک و شارما، ۱۹۹۷؛ ۱۹۹۹) اولین بار از آن جهت محاسبه اثر ناحیه‌ای داده‌های گرانی در مقیاس محدود استفاده کردند و روشن ساختند که نتایج به دست آمده امیدوارکننده است.

با توجه به اینکه جداسازی بی‌هنجاریها اهمیت زیادی در مدل‌سازی و شناسایی آنها دارد، لذا در این تحقیق بر آن شدیم که نظریه مطرح‌شده محققان هندی را مورد بررسی بیشتری قرار دهیم، روش را اولین بار روی داده‌های گرانی منطقه‌ای در ایران پیاده کنیم و کارایی این روش را در کاربردهای عملی مورد بررسی بیشتر قرار دهیم.

در این کار تحقیقی برای آشکارسازی بهتر تله‌های نفتی منطقه دهنو فارس، نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه با استفاده از روش عددی اجزاء محدود مورد تفکیک قرار گرفت و پس از محاسبه اثر ناحیه‌ای، نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده تهیه شد.

در ادامه نتایج به دست آمده با این روش با نتایج حاصل از فیلترهای روند سطحی، متوسط‌گیری وزن‌دار و مشتق قائم که به کمک نرم‌افزار Modelvison Pro (شرکت فناوری انکام، ۲۰۰۳) تهیه شده‌اند، مقایسه می‌شوند تا قابلیت‌های روش اجزاء محدود در این موارد بیشتر بررسی شود.

## ۲ نظریه روش

برای استفاده از روش مورد نظر به‌منظور تفکیک بی‌هنجاری‌ها، نقشه بی‌هنجاری بوگه به تعداد محدودی

ب- باید توجه کرد که انتخاب محلِ اِلمان حاکم بر منطقه خیلی مهم است. اندازه ابعاد اِلمان نیز به یکنواختی و پراکنده نبودن داده‌های برداشت شده بستگی دارد. این مقدار می‌تواند از ۱/۵ کیلومتر که حداقل ابعاد شبکه برداشت داده‌ها و یا بیشتر تا اندازه ابعاد کل سطح منطقه باشد.

ج- با توجه به انتخاب تعداد گره‌ها یعنی نوع اِلمان (درجه دو یا سه) و با استفاده از توابع شکل مناسب، اثر ناحیه‌ای به کمک فرمولی که برای اِلمان تعریف می‌شود، قابل محاسبه است.

د- اثرات حاصل با داده‌های گرانی برداشت شده مقایسه و از اختلاف آنها، اثر باقی‌مانده محاسبه می‌شود.

## ۲-۲ اِلمان در مختصات مینا و مختصات واقعی

برای آنکه فرایند درون‌یابی آسان‌تر صورت گیرد، مقادیر اندازه‌گیری شده داده‌های ژئوفیزیکی را که عملاً در فضای واقعی (real space)  $x_i$  و  $y_i$  است، به فضای مینا (reference space) انتقال می‌دهیم.

اصول انتقال مختصات گره‌های اِلمان در فضاهای مینا و واقعی در شکل ۱ نشان داده شده است. مختصات هشت گره عملاً در فضای واقعی  $x_i$  و  $y_i$  قرار دارد که  $i=1,2,\dots,8$  است. امکان انتقال فضای واقعی  $x-y$  به فضای مینای  $\xi-\eta$  به آسانی امکان‌پذیر است. فضای مینای  $\xi-\eta$ ، با مختصات بدون بُعد  $\xi$  و  $\eta$  تعریف می‌شود که دارای اندازه‌ای حدود [۱ -۱] است.

چنین تغییر مختصاتی سبب می‌شود تا (مالیک و شارما، ۱۹۹۹):

- روش محاسبه ساده‌تر شود.

- وزن‌ها را بدون هیچ‌گونه ابهامی برحسب توابع شکل تعریف کند.

- فضای نقشه را با هر اندازه پوشش دهد.

منجر به واگرایی یا همگرایی ضعیف در منطقه می‌شود و گاهی اوقات نیز همگرایی به جواب‌های غلط می‌انجامد. از دیدگاه عملی نیز باید توابعی را به کار گرفت که در صورت امکان به لحاظ جبری ساده باشند. یک تابع درون‌یاب به دو صورت داده می‌شود:

- یک چندجمله‌ای ساده با ضرایب نامعینی که متعاقباً به پارامترهای گرهی مرتبط می‌شوند.

- مستقیماً برحسب توابع شکل و پارامترهای گرهی، که مقدار تابع و یا مشتقات آن را در گره موردنظر برابر یک و در سایر گره‌ها مساوی صفر قرار می‌دهد.

بدین ترتیب هر متغیر وابسته در اِلمان، با توابع شکل مناسب تقریب زده می‌شود که با معلوم بودن تابع تقریبی درون‌یاب  $\bar{u}$  برحسب پارامترهای گرهی اِلمان، معادلات فرمول‌بندی و استخراج می‌شوند. با معلوم بودن تابع تقریبی درون‌یاب  $\bar{u}$  برحسب پارامترهای گرهی اِلمان می‌توان به شبیه‌سازی درونی اِلمان یا به اصطلاح درون‌یابی پرداخت. داده‌های حاصل همان داده‌های مربوط به اثرات ناحیه‌ای است.

## ۲-۱ اِلمان‌های ایزوپارامتریک

با توجه به اینکه داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده در سطح زمین پیوستگی ندارند، نمی‌توان بین آنها معادلات دیفرانسیلی تعریف کرد. بنابراین باید محدوده‌ای (سطحی) که داده‌های گرانی از آن برداشت شده را به اِلمان‌هایی تقسیم کرد و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی، داده‌های مربوط به درون هر اِلمان را به دست آورد و در نهایت با استفاده از داده‌های حاصل شده از کل اِلمان‌ها، اثر ناحیه‌ای را شبیه‌سازی کرد. به این منظور برای حل یک اِلمان از یک منطقه، به شکل زیر عمل می‌شود:

الف- یک اِلمان چهارضلعی با چهار، هشت، دوازده و یا بیست گره انتخاب می‌شود؛ طوری که روی هر ضلع اِلمان به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ۶ گره قرار گیرد.

$\xi, \eta$  = مختصات گره‌های المان

با توجه به رابطه ۳ برای همه گره‌های یک المان می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} g_1 &= c_1 + c_2 \xi_1 + c_3 \xi_1^2 + c_4 \eta_1 + c_5 \xi_1 \eta_1 + c_6 \eta_1^2 + c_7 \xi_1^2 \eta_1 + c_8 \xi_1 \eta_1^2 \\ g_2 &= c_1 + c_2 \xi_2 + c_3 \xi_2^2 + c_4 \eta_2 + c_5 \xi_2 \eta_2 + c_6 \eta_2^2 + c_7 \xi_2^2 \eta_2 + c_8 \xi_2 \eta_2^2 \\ g_3 &= c_1 + c_2 \xi_3 + c_3 \xi_3^2 + c_4 \eta_3 + c_5 \xi_3 \eta_3 + c_6 \eta_3^2 + c_7 \xi_3^2 \eta_3 + c_8 \xi_3 \eta_3^2 \\ g_4 &= c_1 + c_2 \xi_4 + c_3 \xi_4^2 + c_4 \eta_4 + c_5 \xi_4 \eta_4 + c_6 \eta_4^2 + c_7 \xi_4^2 \eta_4 + c_8 \xi_4 \eta_4^2 \\ g_5 &= c_1 + c_2 \xi_5 + c_3 \xi_5^2 + c_4 \eta_5 + c_5 \xi_5 \eta_5 + c_6 \eta_5^2 + c_7 \xi_5^2 \eta_5 + c_8 \xi_5 \eta_5^2 \\ g_6 &= c_1 + c_2 \xi_6 + c_3 \xi_6^2 + c_4 \eta_6 + c_5 \xi_6 \eta_6 + c_6 \eta_6^2 + c_7 \xi_6^2 \eta_6 + c_8 \xi_6 \eta_6^2 \\ g_7 &= c_1 + c_2 \xi_7 + c_3 \xi_7^2 + c_4 \eta_7 + c_5 \xi_7 \eta_7 + c_6 \eta_7^2 + c_7 \xi_7^2 \eta_7 + c_8 \xi_7 \eta_7^2 \\ g_8 &= c_1 + c_2 \xi_8 + c_3 \xi_8^2 + c_4 \eta_8 + c_5 \xi_8 \eta_8 + c_6 \eta_8^2 + c_7 \xi_8^2 \eta_8 + c_8 \xi_8 \eta_8^2 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن  $g_i$  گرانی ناحیه‌ای هر گره ( $i=1,2,\dots,8$ ) است.

مجموعه معادلات ۴ را می‌توان به شکل یک ماتریس نوشت:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \\ g_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \xi_1^2 & \eta_1 & \xi_1 \eta_1 & \eta_1^2 & \xi_1^2 \eta_1 & \xi_1 \eta_1^2 \\ 1 & \xi_2 & \xi_2^2 & \eta_2 & \xi_2 \eta_2 & \eta_2^2 & \xi_2^2 \eta_2 & \xi_2 \eta_2^2 \\ 1 & \xi_3 & \xi_3^2 & \eta_3 & \xi_3 \eta_3 & \eta_3^2 & \xi_3^2 \eta_3 & \xi_3 \eta_3^2 \\ 1 & \xi_4 & \xi_4^2 & \eta_4 & \xi_4 \eta_4 & \eta_4^2 & \xi_4^2 \eta_4 & \xi_4 \eta_4^2 \\ 1 & \xi_5 & \xi_5^2 & \eta_5 & \xi_5 \eta_5 & \eta_5^2 & \xi_5^2 \eta_5 & \xi_5 \eta_5^2 \\ 1 & \xi_6 & \xi_6^2 & \eta_6 & \xi_6 \eta_6 & \eta_6^2 & \xi_6^2 \eta_6 & \xi_6 \eta_6^2 \\ 1 & \xi_7 & \xi_7^2 & \eta_7 & \xi_7 \eta_7 & \eta_7^2 & \xi_7^2 \eta_7 & \xi_7 \eta_7^2 \\ 1 & \xi_8 & \xi_8^2 & \eta_8 & \xi_8 \eta_8 & \eta_8^2 & \xi_8^2 \eta_8 & \xi_8 \eta_8^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \end{bmatrix}$$

یا:

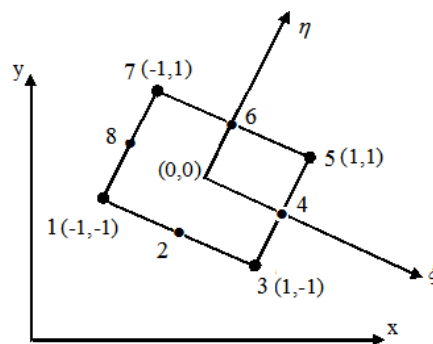
$$[g] = [A][c] \quad (5)$$

ضرایب مجهول چندجمله‌ای ( $C_{i=1,2,\dots,8}$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[c] = [A]^{-1}[g] \quad (6)$$

و یا اینکه با در نظر گرفتن توابع شکل  $N_i(\xi, \eta)$ ، رابطه زیر را می‌توان برای محاسبه مقدار گرانی ناحیه‌ای هر نقطه داخل المان نوشت:

$$g(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) g_i \quad (7)$$



شکل ۱. المان هشت گرهی: مختصات مبنا  $(\xi, \eta)$ ، مختصات واقعی  $(x, y)$  (پیندر و فریند، ۱۹۷۲).

### ۳-۲ توابع شکل

توابع شکل در گره‌های ۱ تا ۸ در فضای مبنا (شکل ۱) و برحسب مختصات بدون بُعد  $\xi$  و  $\eta$  به صورت زیر هستند (چیونگ و یئو، ۱۹۷۹):

$$\begin{aligned} N_i(\xi, \eta) &= (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(\xi \xi_i + \eta \eta_i - 1)/4 \quad i=1,3,5,7 \\ N_i(\xi, \eta) &= (1 - \xi^2)(1 + \eta \eta_i)/2 \quad i=2,6 \\ N_i(\xi, \eta) &= (1 + \xi \xi_i)(1 - \eta^2)/2 \quad i=4,8 \end{aligned} \quad (2)$$

معادلات فوق شرایط زیر را تأمین می‌کنند:

- تابع شکل  $N_i(\xi, \eta)$  در  $i$  امین گره برابر یک و در سایر گره‌ها برابر صفر است.

$$\sum N_i(\xi, \eta) = 1 -$$

### ۴-۲ اثر ناحیه‌ای گرانی - متغیر صحرائی

اثر ناحیه‌ای گرانی در یک نقطه دلخواه  $(\xi, \eta)$  در فضای مبنا، با در نظر گرفتن یک المان هشت گره‌ای، یک چندجمله‌ای از مرتبه دوم به صورت زیر خواهد بود (مالیک و شارما، ۱۹۹۹):

$$g = c_1 + c_2 \xi + c_3 \xi^2 + c_4 \eta + c_5 \xi \eta + c_6 \eta^2 + c_7 \xi^2 \eta + c_8 \xi \eta^2 \quad (3)$$

که در آن:

$$g = \text{گرانی ناحیه‌ای}$$

$$C_{i=1,2,\dots,8} = \text{ثابت‌های چندجمله‌ای}$$

## ۲-۵ انتقال مختصات

گرانی ناحیه‌ای محاسبه شده در مختصات  $(\xi, \eta)$  باید برای استفاده در مراحل بعدی به مختصات واقعی  $(x, y)$  برگردانده شود. این انتقال مختصات را می‌توان به صورت زیر عملی کرد:

$$\begin{aligned} x(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^8 M_i(\xi, \eta) x_i \\ y(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^8 M_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن برای المان‌های ایزوپارامتری، مقدار  $M_i$  همان مقدار  $N_i$  را دارد و  $x_i$  و  $y_i$  نیز بیان‌کننده مختصات گره‌ها در فضای واقعی‌اند. المان‌هایی که در آن متغیر صحرایی و مختصات از توابع شکل یکسان استفاده می‌کنند، به المان‌های ایزوپارامتریک معروف‌اند. استفاده از چنین المان‌هایی باعث افزایش دقت در محاسبات می‌شود (مالیک و شارما، ۱۹۹۹).

ضرایب چندجمله‌ای حاصل برای المانی با هشت گره در نظر گرفته شده است که برای به دست آوردن آنها از یک معادله درجه دو استفاده می‌شود. در صورتی که از المان بیست‌گره‌ای استفاده شود، از معادله درجه سه برای درون‌یابی داخل المان استفاده می‌شود (مالیک و شارما، ۱۹۹۹).

دقت در این روش بستگی به دو عامل مهم نوع المان (چهارگره‌ای، هشت‌گره‌ای، ...) و محل المان در فضای مورد بررسی دارد. مقدار گرانی در گره‌ها برای تقریب اثر ناحیه‌ای بسیار مهم است.

## ۲-۶ نحوه به‌کارگیری روش اجزاء محدود

برای محاسبه اثر ناحیه‌ای گرانی به روش اجزاء محدود، مراحل زیر دنبال می‌شود:

- ابتدا منطقه مورد بررسی المان‌بندی می‌شود.

- یک المان انتخاب می‌شود.

- موقعیت و مقادیر گره‌های المان انتخابی تعیین می‌شود. در اینجا فرض بر این است که نقاط انتخابی که المان از آنها می‌گذرد در حکم نقاط مبنا هستند.

- با استفاده از یک برنامه تهیه شده در محیط نرم‌افزار Matlab، داده‌های برداشت شده‌ای که در داخل این المان واقع‌اند، تعیین می‌شود.

- به کمک داده‌های گره‌های المان انتخابی و به روش عددی اجزاء محدود و برنامه رایانه‌ای تهیه شده در محیط نرم‌افزار Matlab، مقدار اثر ناحیه‌ای گرانی در همان نقاط محاسبه می‌شود.

- مراحل قبل روی سایر المان‌ها نیز اجرا می‌شوند تا اثر ناحیه‌ای کل حاصل شود.

- اثرات گرانی ناحیه‌ای حاصل از روش اجزاء محدود از مقدار گرانی برداشت شده کسر می‌شود تا مقدار گرانی باقی‌مانده حاصل شود.

از آنجا که در روش اجزاء محدود فقط از مقادیر گرانی اندازه‌گیری شده و یا درون‌یابی شده ۴، ۸، ۱۲ و یا ۲۰ نقطه روی المان چهارضلعی برای محاسبه اثرات ناحیه‌ای استفاده می‌شود بنابراین معادلات درجه دوم و یا حداکثر درجه سوم قادر به برآورد خوب اثرات ناحیه‌ای است و خطای ناشی از به‌کارگیری چندجمله‌ای با مراتب بسیار بالا که در سایر روش‌های تفکیک بی‌هنجاری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد حذف می‌شود و همچنین ساختارهای کم‌عمق (اثرات محلی) تاثیر کم و یا ناچیزی در محاسبات اثر ناحیه‌ای دارند. این مسئله به‌مثابه مزیتی برای روش اجزاء محدود نسبت به سایر روش‌ها مطرح است و علاوه بر آن محاسبه اثرات گرانی در این روش مستقل از هرگونه آگاهی در مورد شکل و عمق ساختارهای مورد بررسی است (مالیک و شارما، ۱۹۹۷).

## ۳ بررسی موردی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در این مقاله، به‌منظور

سال ۱۳۸۲ در ۵۷۹ ایستگاه برداشت شد طباطبائی، (۱۳۸۳).  
شکل ۲ نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه را با فواصل خطوط  
تراز ۲ میلی‌گال نشان می‌دهد.

این نقشه وضعیت ساختمانی منطقه را به صورت یک  
بی‌هنجاری مثبت (ساختمان تاقدیسی) با روند شمال غربی  
- جنوب شرقی مشخص می‌کند که اختلاف گرادیان این  
بی‌هنجاری مثبت حدود ۲۵+ میلی‌گال است. شیب در دو  
دامنه ساختمان مورد بحث، زیاد است.

۲-۳ استفاده از روش اجزاء محدود برای محاسبه اثر  
ناحیه‌ای منطقه دهنو

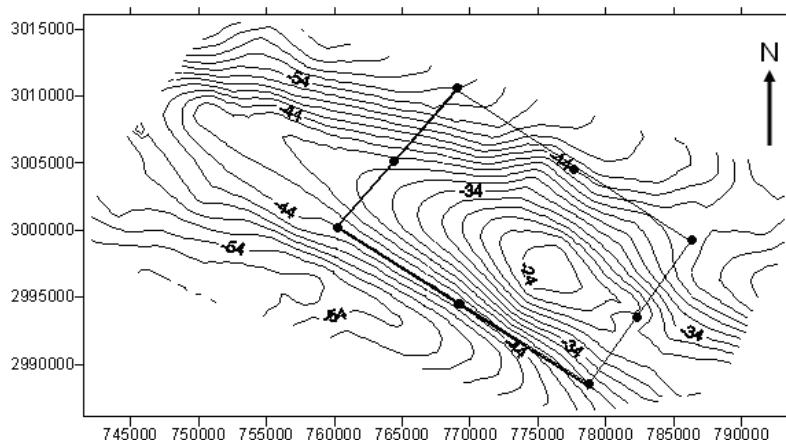
برای استفاده از روش پیش گفته، یک المان روی نقشه  
بی‌هنجاری بوگه منطقه انتخاب شد (شکل ۲). فرایند  
درون‌یابی روی المان ذکر شده با تعداد گره‌های متفاوت  
(چهار گره‌ای، هشت گره‌ای، دوازده گره‌ای) امتحان شد.  
انتخاب المان پیش گفته به گونه‌ای صورت گرفت که  
تغییرات گرانی در گره‌ها آرام باشد. شکل ۳ فرایند  
تفکیک بی‌هنجاری‌ها به روش اجزاء محدود هشت  
گره‌ای را نشان می‌دهد. پس از محاسبه گرانی ناحیه‌ای  
(شکل ۳-ب) برای المان مورد بحث با روش ذکر شده،  
نقشه گرانی باقی‌مانده (شکل ۳-ج) آن محاسبه شد. نقشه  
باقی‌مانده حاصل بخشی از تاقدیس دهنو با روند شمال  
غربی - جنوب شرقی را نشان می‌دهد.

بررسی قابلیت و توانمندی روش عددی اجزاء محدود در  
آشکارسازی تله‌های هیدروکربوری تاقدیسی شکل در  
ناحیه دهنو فارس، که در حال حاضر از اولویت اکتشافی  
خاصی برخوردار است، نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه مورد  
تفکیک قرار گرفت و پس از محاسبه اثر ناحیه‌ای، نقشه  
بی‌هنجاری باقی‌مانده تهیه شد که در زیر مورد بررسی قرار  
می‌گیرد.

### ۱-۳ زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه

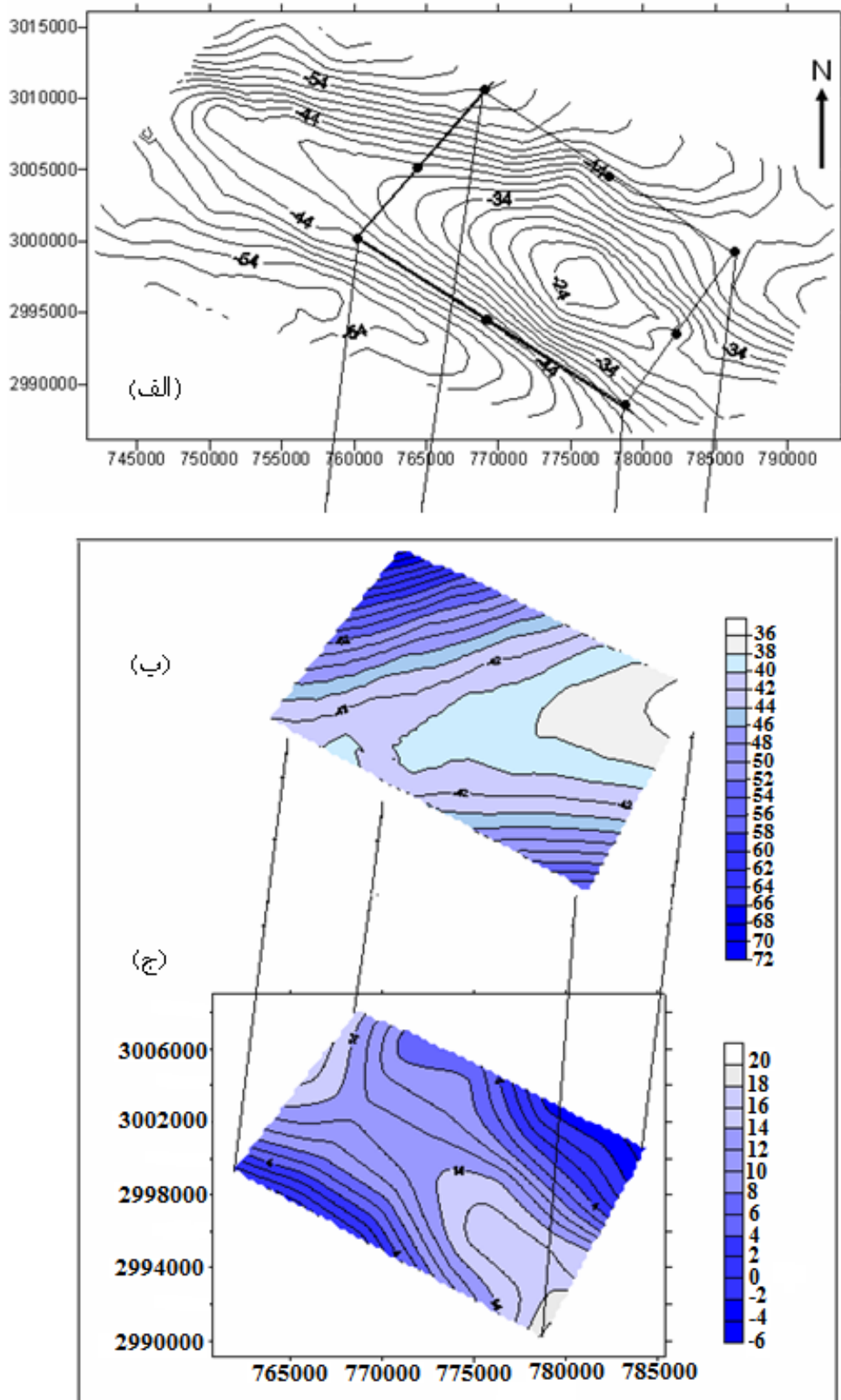
منطقه مورد بررسی از نظر زمین‌شناسی جزء حوزه رسوبی  
فارس است. از نظر جغرافیایی، به شهر اشکنان و اهل از  
شمال، به بوجیر، حمیران و هشتیز از جنوب و از غرب به  
ساختمان گازی تابناک محدود می‌شود. دسترسی به منطقه  
از راه بندرعباس و بندر لنگه به اشکنان و هم از راه بندر  
عسلویه و گاوبندی به اشکنان امکان‌پذیر است. منطقه  
توپوگرافی شدیدی دارد. قدیمی‌ترین سازندهای موجود  
در منطقه، سازند خامی و گروه بنگستان هستند. سازندهای  
جوان‌تر شامل آغاچاری، مختاری، میشان، گچساران و  
آسماری‌اند. روند ساختاری عمومی منطقه شمال غرب -  
جنوب شرق است.

برای تعیین وضعیت توپوگرافی زیرسطحی ساختمان  
دهنو و ارزیابی اهمیت آنها از نظر پتانسیل هیدروکربوری،  
عملیات گرانی‌سنجی از سوی شرکت ملی نفت ایران در



شکل ۲. نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه دهنو همراه با المان هشت‌گره‌ای.



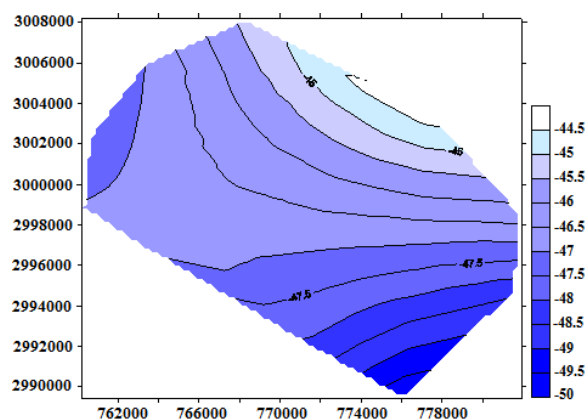
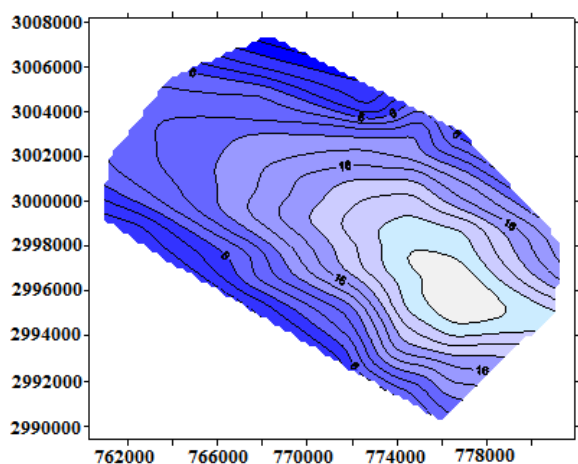


شکل ۳. تفکیک بی‌هنجاری‌ها به روش اجزاء محدود هشت گره‌ای: الف- نقشه بی‌هنجاری بوگه، ب- نقشه گرانیتی ناحیه‌ای، ج- نقشه گرانیتی باقی‌مانده.

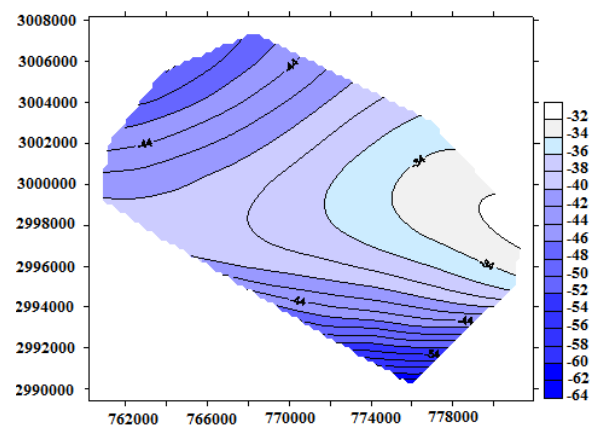
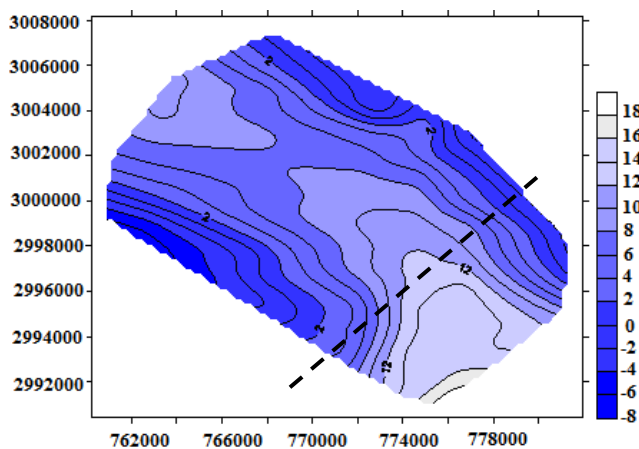
و روش‌گیری نیز طی تحقیقات جداگانه‌ای استفاده شد (دولتی اردجانی و همکاران، ۱۳۸۳؛ دولتی اردجانی و همکاران، ۱۳۸۵؛ مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵). مقایسه نتایج حاصل از روش اجزاء محدود با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، داده‌های لرزهای موجود و همچنین مقایسه نتایج حاصل از سایر روش‌های تفکیک بی‌هنجاری‌ها که پیش‌تر ذکر شد، گویای دقت خوب روش اجزاء محدود به خصوص وقتی تعداد گره‌ها به دوازده افزایش می‌یابد، است.

در شکل‌های ۴ و ۵ نقشه‌های گرانی ناحیه‌ای و گرانی باقی‌مانده حاصل از روش اجزاء محدود چهارگره‌ای و دوازده‌گره‌ای برای المان مشخص شده در شکل ۲ آمده است. شکل‌ها نشان می‌دهند که هرچه تعداد گره‌ها برای المان انتخابی بیشتر باشد، نتایج حاصل از درونیابی همگن‌تر خواهد بود.

به منظور بررسی دقت روش اجزاء محدود در تفکیک بی‌هنجاری‌های گرانی، از دیگر روش‌های تفکیک بی‌هنجاری‌ها از جمله روند سطحی با درجات متفاوت، مشتقات قائم، گسترش بی‌هنجاری‌ها به سمت بالا و پایین



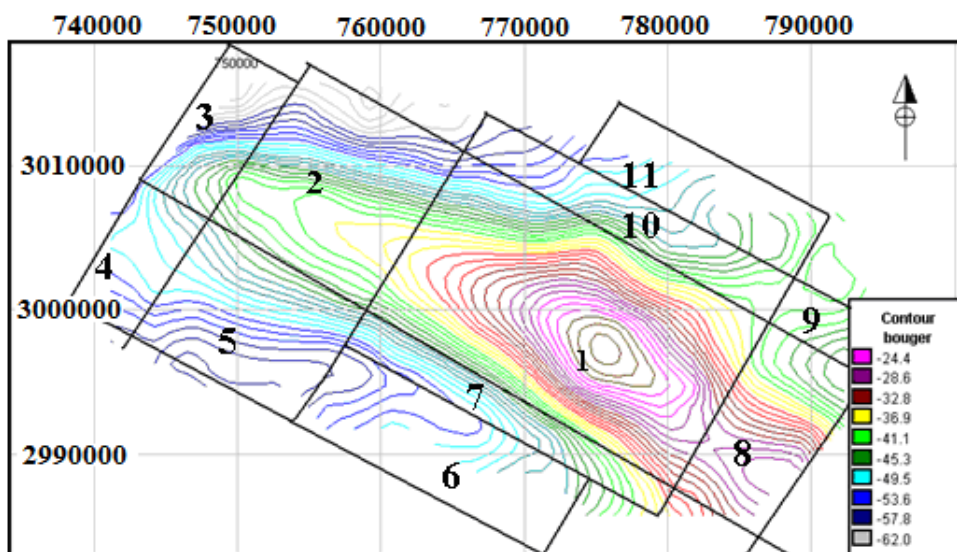
شکل ۴. نقشه گرانی ناحیه‌ای (سمت راست) و گرانی باقی‌مانده (سمت چپ) حاصل از روش اجزاء محدود چهارگره‌ای.



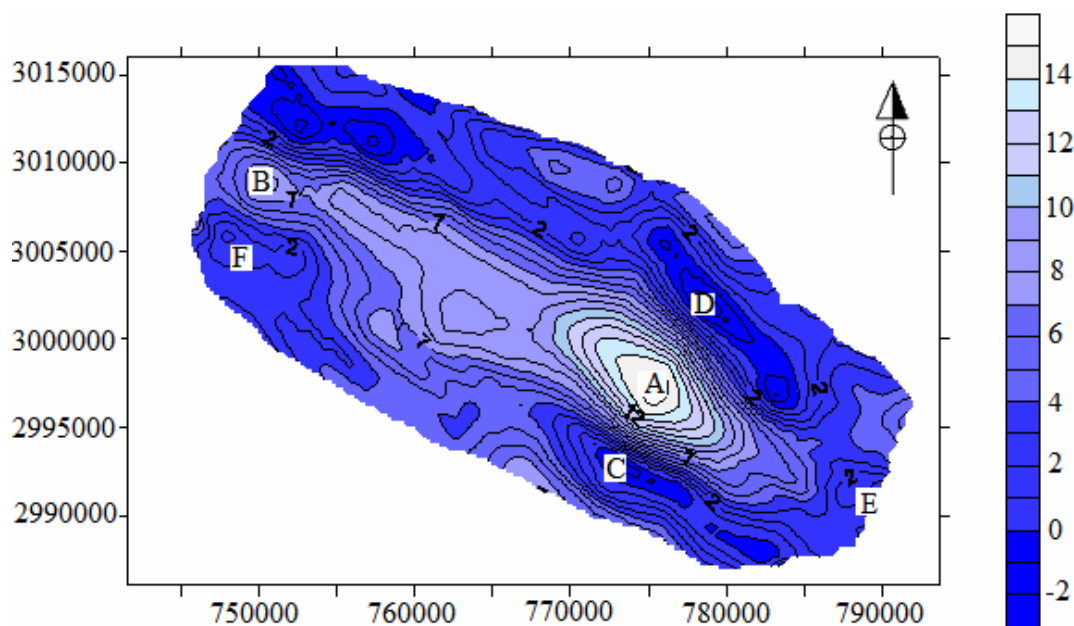
شکل ۵. نقشه گرانی ناحیه‌ای (سمت راست) و گرانی باقی‌مانده (سمت چپ) حاصل از روش اجزاء محدود دوازدهگره‌ای.

تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۶). سپس با توجه به ویژگی درونیابی در روش اجزاء محدود، اثرات ناحیه‌ای در درون هر ایمن برآورد می‌شود. پس از محاسبه اثرات ناحیه‌ای کلیه گره‌های ایمن‌ها، نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده منطقه تهیه شد که در شکل ۷ نشان داده شده است.

موارد گفته شده فقط درخصوص یک ایمن مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه نقشه باقی‌مانده از کل منطقه لازم است تا ایمن‌های دیگری نیز انتخاب شود تا وضعیت ساختاری منطقه به درستی نمایان شود. به همین منظور سطح منطقه به نحو مناسب ایمن‌بندی می‌شود. با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و داده‌های گرانی برداشت شده، منطقه به ۱۱ ایمن با ابعاد متفاوت



شکل ۶. ایمن‌بندی منطقه دهنو به منظور محاسبه گرانی باقی‌مانده با روش اجزاء محدود.



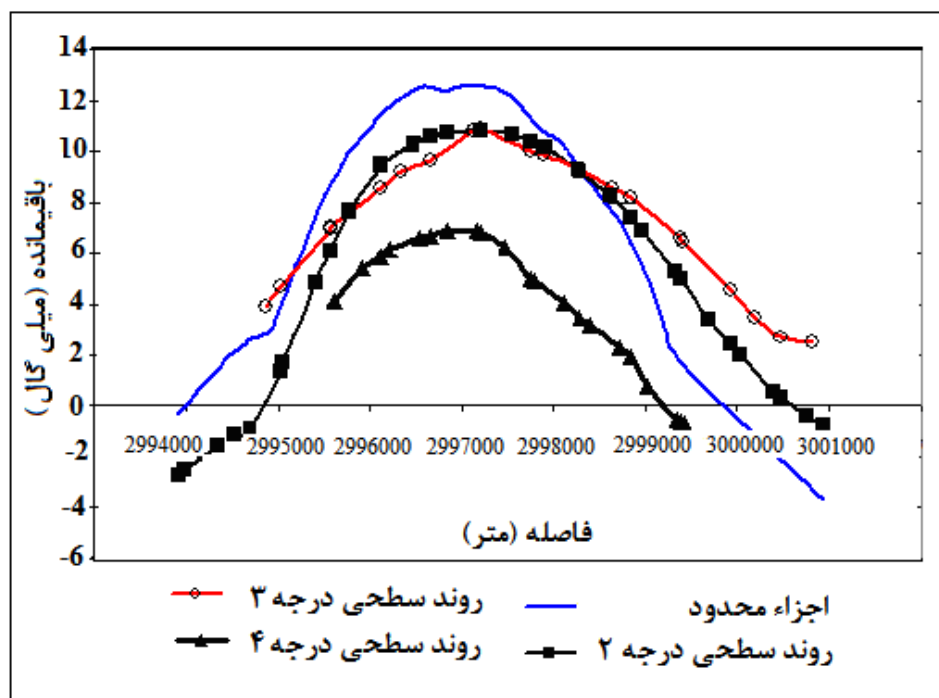
شکل ۷. نقشه گرانی باقی‌مانده منطقه دهنو با استفاده از روش اجزاء محدود.

همان گونه که در شکل ۷ ملاحظه می شود، وضعیت ساختاری منطقه دهنو با تعدادی بی هنجاری مشخص شده است. به طوری که روی این نقشه بی هنجاری های A و B مثبت یا ساختمان تاقدیسی است و بی هنجاری های C و D ساختمان های ناودیسی هستند. ساختمان ها با روند شمال غرب- جنوب شرق مشخص می شوند که روند ساختمانی پیش گفته مطابق نقشه زمین شناسی منطقه است. تعدادی بی هنجاری نیمه بسته نیز در گوشه های نقشه ملاحظه می شود که در بین آنها به نظر می رسد که بی هنجاری های نیمه بسته E در شرق منطقه و F در غرب منطقه در ادامه تشکیلات زمین شناسی باشند که در بخش های یاد شده دارای رخنمون هستند.

گرانی باقی مانده در محدوده بی هنجاری A (شکل ۷) دارای شدت زیادی است که بیانگر رخنمون این ساختمان تاقدیسی در سطح زمین است. این واقعیت منطبق بر شواهد زمین شناسی منطقه است. همچنین این بی هنجاری در سطح وسیع تری نسبت به بقیه بی هنجاری ها قرار دارد و با

دامنه های پُرشیب مشخص می شود.

در این قسمت با توجه به محل نیمرخ خط چین شده در شکل ۵، مقایسه ای از نتایج حاصل از روش اجزاء محدود و روند سطحی با درجه های متفاوت در تفکیک بی هنجاری ها صورت می گیرد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، روش اجزاء محدود مطابق انتظار با یک اختلاف گرادیان بیشتر تاقدیس دهنو را مشخص می سازد. این بدان دلیل است که روش پیش گفته در صورتی که از نظر انتخاب محل ایمن ها و تعداد گره های ایمن ها به درستی اعمال شود، اثرات ناحیه ای گرانی را به گونه ای بر آورد می کند که کمتر متاثر از اثرات ساختارهای محلی زمین شناسی باشد. در نتیجه تفاضل بین گرانی ناحیه ای و داده های گرانی اندازه گیری شده بزرگ تر خواهد بود. این نتیجه در راستای همان انتظاری است که برای این روش قبلاً مطرح شده است و این مطلب امتیاز روش اجزای محدود را نسبت به دیگر روش های استفاده شده در جداسازی بی هنجاری ها نشان می دهد.



شکل ۸. مقایسه گرانی باقی مانده روش های روند سطحی با درجات متفاوت و اجزاء محدود در نیمرخ انتخابی (نشان داده شده در شکل ۵) روی ایمن ۱.

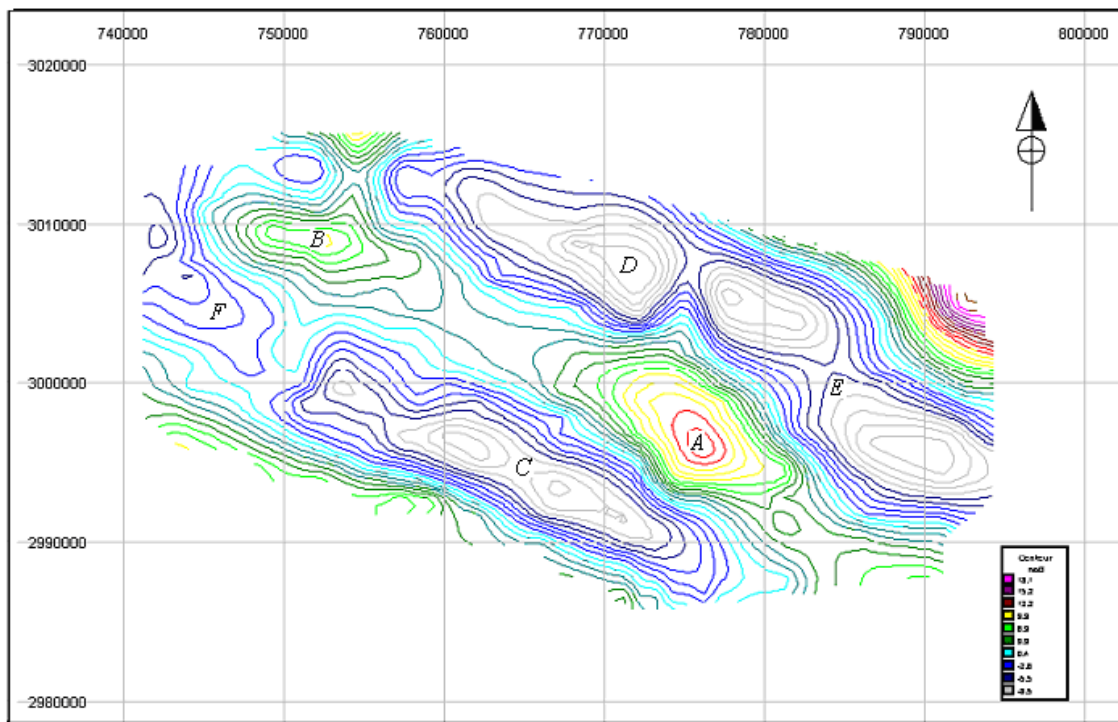
روش‌ها است، این است که شکل ۷ مربوط به روش اجزاء محدود با نرم‌افزار دیگری تهیه شده و هموارسازی کمتری در کانتورهای بی‌هنجاری باقی‌مانده صورت گرفته است.

#### ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این تحقیق، از روش عددی اجزاء محدود به منظور محاسبه اثرات ناحیه‌ای داده‌های گرانی منطقه دهنو استفاده شد. برای برآورد بهترین مقادیر گرانی باقی‌مانده حاصل مربوط به ساختارهای زیرسطحی از المان‌های چهار، هشت و دوازده گره‌ای استفاده شد تا در مقایسه با سایر روش‌های جداسازی بی‌هنجاری‌ها و شواهد زمین‌شناسی موجود، مناسب‌ترین نقشه باقی‌مانده حاصل شود. در این تحقیق نتایج مهم زیر به دست آمد:

- نتایج نشان داد که با افزایش تعداد گره‌های المان از چهار به دوازده، گرانی ناحیه‌ای برآوردی، کمتر با ساختارهای مفید مربوط به تله‌های نفتی همراه است.

در خاتمه برای ارزیابی صحت عملکرد روش اجزاء محدود در جداسازی بی‌هنجاری‌ها، نتیجه این روش را با نتیجه حاصل از روش روند سطحی برای داده‌های کل منطقه مورد بررسی که با نرم‌افزار Modelvision Pro حاصل شده است، مدنظر قرار می‌دهیم. یک بررسی و مقایسه اجمالی بین نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده روش اجزاء محدود (شکل ۷) و نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده روش روند سطحی با درجه ۳ (شکل ۹) نشان می‌دهد که نتایج این دو روش در مشخص ساختن تاقدیس دهنو (بخش میانی نقشه‌ها) تطابق مناسبی دارند ولی در قسمت‌های جانبی کمی متفاوت‌اند. علاوه بر این، چنین مقایسه‌ای بین نتایج روش اجزاء محدود و نتایج دیگر روش‌های جداسازی بی‌هنجاری‌ها مثل روش‌های گریفین، مشتق اول و روند سطحی با درجات متفاوت (دولتی ارده جانی و همکاران، ۱۳۸۳) صورت گرفت و تطابق قابل قبولی به دست آمد. ذکر این نکته ضروری است که علت آنکه نقشه باقی‌مانده روش اجزاء محدود کمی متفاوت از نقشه‌های سایر



شکل ۹. نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده گرانی به روش ارتونرمال (روند ۳) - منطقه دهنو.

به منزله بی‌هنجاری بوگه برآورد کنیم و در محاسبه اثر منطقه‌ای آن داده‌ها را مورد استفاده قرار دهیم. در نهایت پیشنهاد می‌شود که روش مورد نظر در این تحقیق در کنار سایر روش‌های جداسازی بی‌هنجاری‌ها در اکتشاف تله‌های نفتی و کانسارها استفاده شود تا از مزایا و توانمندی‌های آن بیشتر بهره‌مند شویم.

#### تشکر و قدردانی

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از بخش غیرلرزه‌ای شرکت ملی نفت ایران اخذ شده است که لازم است در این زمینه از مساعدت‌ها و زحمات آقای مهندس خراسانی، رئیس محترم اداره ژئوفیزیک بخش اکتشاف شرکت ملی نفت ایران صمیمانه تشکر و قدردانی شود.

#### منابع

- دولتی ارده‌جانی، ف.، مرادزاده، ع.، یعقوبی پور، م.، طباطبایی رئیسی، س. ه. و محمدو خراسانی، م.، ۱۳۸۳، بررسی وضعیت ساختمانی تله‌های نفتی منطقه دهنو به کمک تفسیر داده‌های گرانی: مجموعه مقالات دومین همایش ژئوفیزیک اکتشافی ایران، انجمن ملی ژئوفیزیک ایران، ۱۱-۱۳.
- دولتی ارده‌جانی، ف.، مرادزاده، ع.، طباطبایی، س. ه.، یعقوبی پور، م.، عرب امیری، ع.، ۱۳۸۵، بررسی احتمال نفوذ گنبد نمکی در تاقدیس نفتی دهنو به کمک تکنیک گسترش آنومالی‌های گرانی به سمت پایین: اولین کنگره مهندسی نفت ایران (صنایع بالا دستی نفت)، تهران، مجموعه مقالات، صفحه ۲۹، مقاله شماره ۱۹۴ روی CD.
- طباطبایی، س. ه.، ۱۳۸۳، گزارش تعبیر و تفسیر گرانی و مغناطیس‌سنجی و مگنتوتلوریک طاقدیس دهنو، گزارش ژئوفیزیکی ۲۰۳۸، شرکت ملی نفت ایران، ۳۳ ص.

- نقشه باقی‌مانده روش اجزاء محدود به خوبی توانست وضعیت تاقدیس دهنو (بی‌هنجاری A، شکل ۷) را از نظر گستردگی، امتداد و شیب دامنه‌ها توجیه کند. علاوه بر آن، مقایسه نتایج حاصل از روش اجزاء محدود با نتایج به دست آمده از روش روند سطحی با درجه ۳، صحت نتایج و توانمندی زیاد این روش را در به دست آوردن نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده مربوط به تله‌های نفتی نشان می‌دهد.

- آگاهی از وضعیت زمین‌شناسی منطقه سبب انتخاب مناسب محل‌المان‌ها و گره‌های روی آنها می‌شود.

- به کارگیری روش اجزاء محدود و فرمول‌بندی آن در مقایسه با سایر روش‌های موجود برای جداسازی بی‌هنجاری‌های گرانی آسان است و نتایج قابل اعتمادی را فراهم می‌سازد.

- چون محاسبات مربوط به روش اجزاء محدود در یک دستگاه مختصات بدون بُعد و ساده صورت می‌گیرد، این امر به راحتی محاسبات می‌انجامد.

- به دلیل اینکه در روش اجزاء محدود فقط از داده‌های گرانی مشاهده‌ای که در محل گره‌های المان‌ها قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود، لذا این روش برای برآورد گرانی ناحیه‌ای مناطق غیر قابل دسترس از قبیل باتلاق‌ها، دریاچه‌ها، مناطق شهری و مناطق با توپوگرافی تند بسیار مناسب است. منظور اینکه ممکن است در بخشی از منطقه عملیاتی امکان برداشت داده‌ها به هر دلیلی وجود نداشته باشد. برای کاربرد روش‌های متداول جداسازی بی‌هنجاری‌ها نیاز به ایجاد یک شبکه منظم حاوی داده‌های گرانی بوگه در نقاط گره‌ای است که معمولاً برای آن دسته از نقاط گره‌ای که در آن داده‌ها به دلیل مشکلات برداشت نشده‌اند، تقریب زده می‌شوند و ممکن است دقت مناسبی نداشته باشند. ولی در روش اجزاء محدود، المان‌بندی طوری صورت می‌گیرد که منطقه برداشت نشده ذکر شده در داخل المان قرار گیرد. بنابر این برای محاسبه اثر ناحیه‌ای حتمی، نیازی نیست تا داده‌هایی را

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، آگاه، آ. و طباطبایی، س.ه.، ۱۳۸۴، اکتشاف تله‌های هیدروکربوری طبس با روش جدید وارونه‌سازی سه‌بُعدی داده‌های گرانی. مجله تحقیقاتی فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۱، شماره ۲، ص ۲۳-۳۴

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، یعقوبی پور، م.، محمدو خراسانی، م.، ۱۳۸۵، مدل‌سازی دو بُعدی معکوس پارامتری داده‌های گرانی منطقه نفتی دهنو. عرضه شده در اولین کنگره مهندسی نفت ایران (صنایع بالادستی نفت)، تهران، مجموعه مقالات، صفحه ۲۸، مقاله شماره ۱۹۶ روی CD.

Cheung, Y. K. and Yeo, M. F., 1979, A practical introduction to finite element analysis: Pitman.

Encom Technology Pty Ltd, 2003, The 3D workbench for magnetics and gravity interpretation: Reference Manual.

Kaftan, I., Salk, M. and Sari, C., 2003, Application of finite element method on a 2-D gravity data in western. European Geophysical Society Geophysical Research Abstracts, **5**, 13918.

Mallick, K., 1991, Application of finite element method for separation of residual gravity anomaly and ore estimation: Proceedings of Indian Geophysical Union, **26**, 141-146.

Mallick, K. and Sharma, K. K., 1997, Computation of regional gravity anomaly – A novel approach: Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.), **106**, 55-59

Mallick, K. and Sharma, K. K., 1999, A finite element method for computation of the regional gravity anomaly: Geophys., **64**(2), 461-469.

Pinder, G. F. and Frind, E. O., 1972, Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis: Water Resour. Res., **8**(1), 108-120.

Reddy, J. N., 1993, Finite element Method. McGraw-Hill, Inc.

Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E., 1991, Geophysics. Cambridge University Press.