

## استفاده از روش تبدیل گسسته موجک برای محاسبه گرانی باقی مانده و مقایسه آن با روش های گرینین و برازش چندجمله ای

مهرداد علی مرادیان<sup>۱\*</sup>، حسین زمردیان<sup>۲</sup> و آرش متشرعی<sup>۳</sup>

۱ مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، ایران

۲ استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۰/۷، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۲/۲۴)

### چکیده

از آنجاکه در داده های گرانی، اثر منطقه ای حاصل تغییرات آرام چگالی سنگ های زیر منطقه مورد جست و جو و یا حاصل وجود یک چشمه بزرگ گرانی در اعماق زمین و یا در دوردست است، لذا، کندی آهنگ تغییرات اثر منطقه ای نسبت به اثر محلی بارزترین خصوصیت آن است به طوری که در همه روش های کمی موجود مانند روش های متوسط گیری ساده و وزن دار، گرینین و برازش چندجمله ای و مانند آن، برای شناخت و جدا کردن اثر منطقه ای، به نحوی از این یکنواختی و کندی آهنگ استفاده شده است. این مقاله با استفاده از ویژگی تبدیل گسسته موجک در تحلیل سیگنال ها و کندی آهنگ تغییرات اثر منطقه ای نسبت به اثر محلی، اثر منطقه ای به منزله برآوردی از سیگنال به دست آمده است. سپس اثر محلی به دست آمده با این روش، با اثرات محلی حاصل از اعمال روش های دیگر مقایسه شده است و توانایی بالای روش تبدیلات موجک در تفکیک اثرات محلی و منطقه ای، نسبت به سایر روش ها مشخص شده است. در این مقایسه روشن شده است که با روش تبدیل گسسته موجک تغییرات دامنه گرانی باقی مانده کمتر و کاربرد آن برای تفسیرهای ژئوفیزیکی مناسب تر است.

واژه های کلیدی: میدان گرانی، اثر منطقه ای، گرانی باقی مانده، تبدیل گسسته موجک، جداسازی

## Separation of the gravity anomaly using discrete wavelet analysis and comparing to other classical methods

Alimoradiyan, M.<sup>1</sup>, Zomorrodian, H.<sup>2</sup> and Motasharrie, A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lecturer, Islamic Azad University of Ilam, Iran

<sup>2</sup> Professor, Islamic Azad University, Research and Science Branch, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Islamic Azad University of Chaloos, Iran

(Received: 27 Dec 2008, Accepted: 15 March 2011)

### Abstract

Geophysical data are always affected by different sources of anomaly. These sources are classified in to three groups: first group is relatively deep sources commonly called as regional effects, second group is near surface sources or local effects and third group is high frequency noises. The only common way to separate the anomaly is separation with respect to the signal frequency. There are several classical techniques in the literature such as polynomial fitting, Griffin method, moving average methods and frequency domain filtering methods.

In this paper a method based on discrete wavelet filtering has been applied. Discrete wavelet is calculated using MATLAB tool box based on rebio6.8 wavelet mother kernel. Discrete wavelet transform decomposes the signal into two parts low frequency (with approximation) and high frequency (whit details). The detail part can be also decomposed

in to two or more parts based on the building block frequencies of the signal.

Sphere forward modeling is applied to test the algorithm of the separation method. Synthetic data is calculated assuming two spheres buried at two different depths. White noise with frequency equivalent to sampling interval is added to the synthetic data. The mentioned separation method shows appropriate result in comparison with other separating methods. One of the advantages of the method is automatic denoising process that can be applied during the procedure.

The method has also been applied for real dataset in a salt dome structure located at a station about 25 kilometers from the city of Ghom. The dataset is affected by two different geological sources: a deep fault structure represented as low frequency and a salt dome represented as high frequency in Bouguer gravity map of the region. Bouguer anomaly map of the region represents mixed effect of both structures. The separation process has been prepared comparatively successful. It has been compared to other separating methods. The results obtained from this comparison are:

- 1- The regional effect due to fault structure is clearly represented and can be applied separately for inversion process. Correspondingly the local effect is separated and presented in residual anomaly map and can be used in inversion modeling.
- 2- The high frequency noise effect is strongly attenuated during the process automatically.

**Key words:** Regional gravity, Residual gravity, Wavelet transform, Separation, Polynomial fitting

## ۱ مقدمه

داده‌های خام اولیه، تصحیحات گرانی شامل تصحیح بوگه، تصحیح هوای آزاد، رانه ومانند آن صورت می‌گیرد. هر عملیاتی که به منظور جداسازی اثرات گرانی محلی و منطقه‌ای صورت می‌گیرد روی داده‌هایی است که تصحیحات پیش‌گفته قبلاً روی آنها صورت گرفته است. این روند مستقل از روشی است که به منظور محاسبه اثر محلی در نظر گرفته شده است. بنابراین در اندازه‌گیری گرانی باقی‌مانده هر نقطه، چگونگی محاسبه اثر منطقه‌ای مبین روش به کار گرفته شده است.

### ۳ روش‌های محاسبه اثر محلی

#### ۱-۳ روش گریفین

در این روش اثر منطقه‌ای از میانگین‌گیری نقاط مجاور به ایستگاه مشاهده محاسبه می‌شود. گریفین انتگرال خطی (گریفین، ۱۹۴۹)

$$Z = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) d\theta \quad (2)$$

را با میانگین‌گیری مقادیر مشاهده شده گرانی برای نقاط

استفاده از روش‌های جداسازی اثر منطقه‌ای از داده‌های گرانی، می‌تواند به آشکارسازی بی‌هنجاری‌های گرانی که هدف نهایی اندازه‌گیری‌های گرانی در ژئوفیزیک اکتشافی است بیانجامد. در این مقاله روش‌های جداسازی گریفین و برازش چندجمله‌ای روی داده‌های مصنوعی و حقیقی به کار گرفته شده و نتایج آنها با نتایج حاصل از تبدیل گسسته موجک مقایسه شده است. قسمت اعظم کار، که مربوط است به کشف آهنگ تغییرات اثر منطقه‌ای، در روش‌های پیش‌گفته متفاوت است ولی محاسبه گرانی باقی‌مانده در همه روش‌ها به این صورت به انجام می‌رسد.

$$R = G - Z \quad (1)$$

که در آن R گرانی باقی‌مانده، Z اثر منطقه‌ای و G گرانی مشاهده شده است.

#### ۲ اندازه‌گیری

در اکتشاف به روش گرانی‌سنجی، پس از برداشت

در آن است. این اثر منطقه‌ای معرفی شده، به نوع موجک، تعداد دفعات برآورد، تعداد نمونه برداری بالارونده و نیم‌رخ‌های انتخاب شده در سطح دو بُعدی بستگی دارد (علی مرادیان، ۱۳۸۵).

۳-۴ برآورد اثر منطقه‌ای در داده‌های گرانی با استفاده از روش تبدیلات گسسته موجک

هدف از عملیات تجزیه و بازسازی سیگنال این است که با تغییر نوع موجک به کار رفته در عملیات تجزیه و نیز تغییر در تعداد مراحل نمونه برداری، برآورد مطلوبی از سیگنال اصلی به دست آید. همان‌طور که گفته شد اگر منحنی نیم‌رخ گرانی را به منزله یک سیگنال زمان - دامنه در نظر بگیریم، سیگنال برآورد آن همان اثر منطقه‌ای در آن نیم‌رخ است که بعد از محاسبه درست آن، اثر محلی مورد جست‌وجو در آن نیم‌رخ به راحتی به دست می‌آید. علاوه بر نوع موجک به کار گرفته شده، تعداد تکرار تفکیک نیز در برآورد درست اثر منطقه‌ای مؤثر است. باید توجه داشت که در تجزیه درختی، چنانچه سیگنال اصلی  $n$  مرتبه تجزیه شود، سیگنال  $cA_n$  نیز باید  $n$  بار بازسازی شود تا بتوان از آن در حکم اثر منطقه‌ای استفاده کرد. به عبارتی دیگر، در این نوع از محاسبه اثر منطقه‌ای، از منحنی نیم‌رخ گرانی که با استفاده از تجزیه درختی موجک صورت می‌گیرد، باید تعداد دفعات عملیات (idwt) با تعداد دفعات عملیات (dwt) برابر باشد. تکرار این روند در همه نیم‌رخ‌های افقی و عمودی موجود، به محاسبه اثر منطقه‌ای و سپس اثر محلی در سه بعد منجر می‌شود (علی مرادیان، ۱۳۸۵).

۳-۵ موجک به کار رفته در عملیات تجزیه و ترکیب نیم‌رخ گرانی

در نرم‌افزار متلب و در جعبه‌افزار تعبیه شده برای موجک‌ها، چندین خانواده از موجک‌های کارآمد و مفید

واقع در فاصله معین  $\Gamma$  از ایستگاه به صورت زیر محاسبه نمود (گریفین، ۱۹۴۹).

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i(r) \quad (۳)$$

۳-۲ روش برازش چندجمله‌ای

در این روش اثر منطقه‌ای بوسیله یک چندجمله‌ای از درجه  $n$  ام که با استفاده از روش کمترین مربعات به داده‌های گرانی برازش داده شده است، محاسبه می‌شود. بسامد بی‌هنجاری اثر منطقه‌ای به درجه به کار رفته در چندجمله‌ای بستگی دارد (عبدالرحمن، ۱۹۸۵).

$$Z = Ax^n + By^n + Cx^{n-1}y + Dx^{n-2}y^2 + \dots + Kx + Ly + M \quad (۴)$$

$A, B, C, \dots, M$  ضرایب چندجمله‌ای هستند که با استفاده از روش کمترین مربعات تعیین می‌شوند.

۳-۳ روش تبدیلات گسسته موجک

موجک‌ها تابع‌های ریاضی‌اند که اطلاعات را به اجزای بسامدی گوناگون تقسیم می‌کنند و سپس تحلیل متناظر با مقیاس آن قسمت، برای هر یک از اجزا صورت می‌گیرد. در تحلیل پارامترهای فیزیکی، این تابع‌ها نسبت به روش فوریه مزایای بیشتری دارند. به خصوص زمانی که تابع دارای ناپوستگی یا نقاط تیز باشد، این مزیت نمود بیشتری دارد. در واقع ترکیب این تابع‌ها برای بیان سایر تابع‌ها و داده‌ها از ترکیب تابع‌های سینوسی و کسینوسی فوریه عملی‌تر، کارسازتر و گسترده‌تر است.

در حالی که در روش فوریه با فرض تناوبی بودن تابع می‌توان آن را به بسامدهای گوناگون تجزیه کرد، در روش تبدیلات موجک، تجزیه هر تابع غیرتناوبی و با هر شکلی با کمترین خطا میسر است. در روش تبدیل گسسته موجک یک بُعدی، مقیاس بزرگ بی‌هنجاری بوگه در یک نیم‌رخ خاص، در واقع نماینده اثر منطقه‌ای نهفته شده

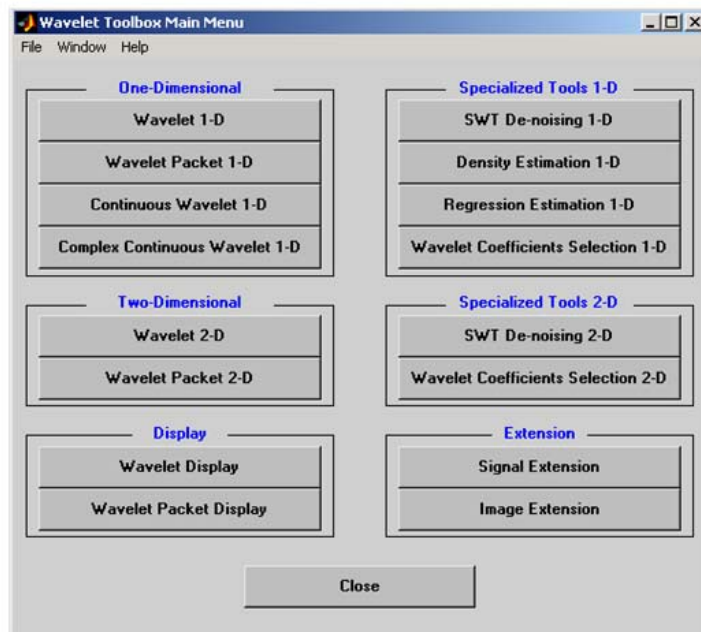
گرانی به دست آید (علی مرادیان، ۱۳۸۵).

ضمن پرهیز از ذکر اسامی همه موجک‌های شناخته شده، نمایش شکل‌ها و ذکر خصوصیات و تشریح عملکرد آنها، در اینجا به موجک rbio6.8 (دابیچز، ۱۹۹۴) که یکی از مناسب‌ترین موجک‌ها برای پردازش مورد نظر است اشاره می‌شود. به کارگیری این موجک و نیز اجرای عملیات تجزیه و بازسازی منحنی نیم‌رخ گرانی به تعداد ۴ مرحله، نتیجه اجرای مکرر عملیات آزمون و خطا با استفاده از همه موجک‌ها در یک الی ده مرحله تجزیه و بازسازی منحنی نیم‌رخ گرانی است (علی مرادیان، ۱۳۸۵).

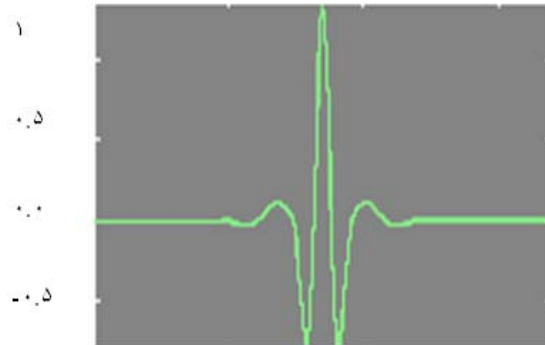
موجک rbio6.8 (شکل ۲) دارای چنین خصوصیتی است: تقریباً متقارن، دارای تبدیلات پیوسته و گسسته، بیان ساده، قدرت محاسباتی زیاد و متعامد (دابیچز، ۱۹۹۴). برای اجرای عملیات نمونه برداری پایین‌رونده و بالارونده روی نیم‌رخ‌های افقی و عمودی موجود در داده‌های گرانی مصنوعی و واقعی، از موجک rbio6.8 در ۴ مرحله استفاده شده است.

گنجانده شده است. برای دیدن این موجک‌ها می‌توان به منوی اصلی جعبه‌افزار موجک رفت و با انتخاب کلید نمایش موجک‌ها، منوی مربوط را باز و در قسمت بالا و سمت راست، یک خانواده از موجک‌ها را انتخاب کرد. با انتخاب کلید نمایش، شکل موجک و فیلترهای مربوط به آن ظاهر می‌شود. برای دسترسی به اطلاعات بیشتر، می‌توان کلید سمت راست را کلیک کرد (شکل ۱).

برای جدایش اثرات محلی و منطقه‌ای در گستره‌ای به مساحت تقریبی ۵۰ الی ۲۵۰ کیلومتر مربع (مانند محدوده‌ای که گنبد نمکی قم در آن قرار دارد) و متناسب با بی‌هنجاری‌های طبیعی و مورد انتظاری که روش گرانی‌سنجی می‌تواند برای کشف آنها به کار رود، موجک‌های گوناگونی در عملیات نمونه برداری پایین‌رونده و بالارونده به کار گرفته شده‌اند. در این روش‌های آزمون و خطا، ضمن اینکه نوع موجک تغییر داده شده، تعداد مراحل تجزیه و بازسازی نیز از یک تا ده مرحله تغییر داده شده است تا بهترین موجک و مناسب‌ترین مرحله برای تجزیه و بازسازی منحنی نیم‌رخ



شکل ۱. پنجره مربوط به موجک در جعبه‌افزار نرم‌افزار متلب.



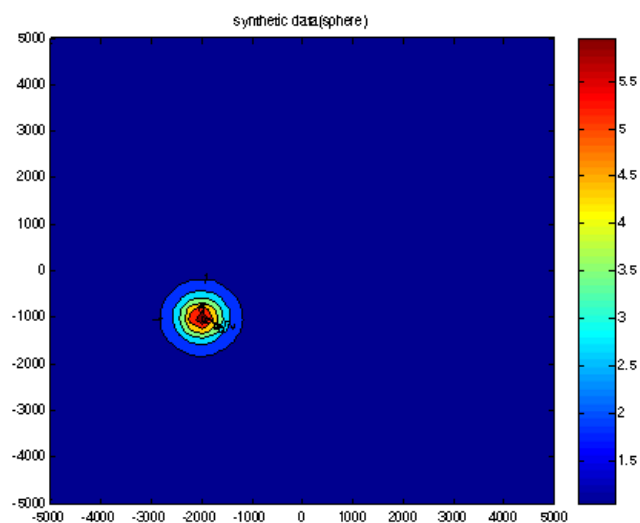
شکل ۲. موجک rbio6.8 (دابیچز، ۱۹۹۴).

شده‌اند. به جمع این داده‌های مصنوعی نوفه‌هایی نیز با دامنه ۱ میلی‌گال اضافه شده است تا داده‌های مصنوعی مشاهده‌ای به دست آیند (شکل ۵). در همه شکل‌ها، واحد طول و عرض منطقه برداشت متر و واحد شتاب گرانی میلی‌گال است. ضمناً فاصله خطوط شبکه یک متر است و از نرم‌افزار surfer برای شبکه‌بندی استفاده شده است. در شکل ۳ موقعیت اثر محلی مصنوعی در گستره مربع شکلی با اضلاع ۱۰ کیلومتر، نشان داده شده است. در این شکل موقعیت تصویر مرکز کره روی سطح را می‌توان به صورت (۱۰۰۰- و ۲۰۰۰-) نشان داد. حداکثر اختلاف گرانی به وجود آمده ۵ میلی‌گال است.

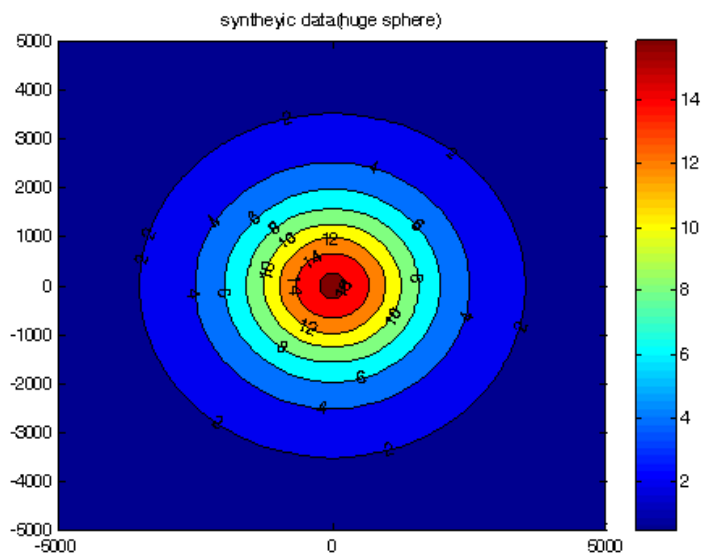
#### ۴ بحث روی اثر محلی به دست آمده با روش‌های گریفین، برازش چندجمله‌ای و تبدیل گسسته موجک

##### ۱-۴ داده‌های مصنوعی

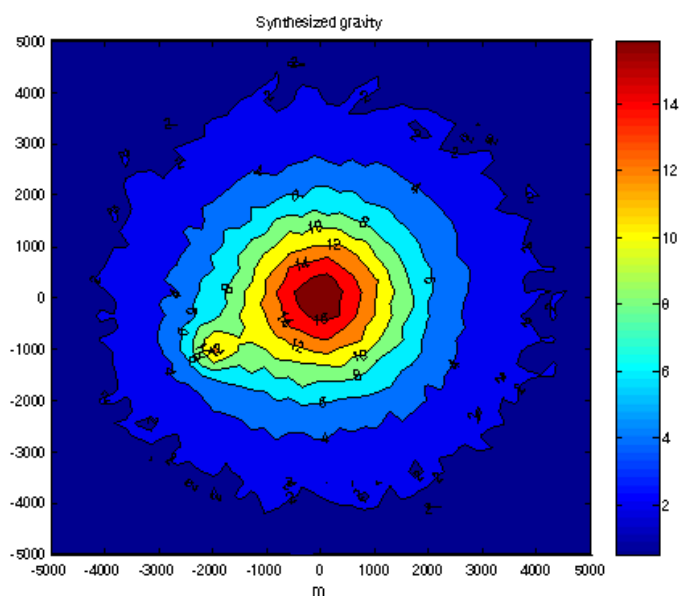
برای دستیابی به اثر محلی مصنوعی، از اثر گرانی حاصل از وجود کره‌ای به شعاع ۵۰۰ متر و در عمق ۵۰۰ متری با چگالی  $\rho = 500 \frac{kg}{m^3}$  استفاده شده است (شکل ۳) و برای اثر منطقه‌ای مصنوعی، از اثر گرانی کره‌ای به شعاع ۱۵۰۰ متر و در عمق ۲۰۰۰ متری با چگالی  $\rho = 700 \frac{kg}{m^3}$  استفاده شده است (شکل ۴). به کمک نرم‌افزار متلب مقادیر گرانی در نقاط گوناگون شبکه محاسبه و با هم جمع



شکل ۳. اثر محلی مصنوعی حاصل کره‌ای در عمق ۵۰۰ متری با شعاع ۵۰۰ متر و چگالی  $\rho = 500 \frac{kg}{m^3}$  شتاب گرانی برحسب میلی‌گال \_مسافت برحسب متر.



شکل ۴. اثر منطقه‌ای مصنوعی حاصل کره‌ای در عمق ۲۰۰۰ متری با شعاع ۱۵۰۰ متر و چگالی  $\rho = 700 \frac{kg}{m^3}$  شتاب گرانی برحسب میلیگال - مسافت برحسب متر.



شکل ۵. اثر حاصل از جمع اثرات محلی مصنوعی و منطقه‌ای مصنوعی و نوفه‌هایی با دامنه ۱ میلی‌گال (داده‌های مصنوعی). شتاب گرانی برحسب میلی‌گال - مسافت برحسب متر.

بعد از جمع کردن اثرات محلی و مصنوعی در هر نقطه از شبکه، نوفه‌هایی نیز با حداکثر دامنه ۱ میلی‌گال به جمع این اثرات اضافه شده است تا داده‌های مشاهده‌ای مصنوعی به دست آیند. شکل ۵ در واقع منحنی پربندی داده‌های مشاهده‌ای مصنوعی است. از آنجاکه تصاویر

شکل ۴ نیز موقعیت اثر منطقه‌ای مصنوعی را در همان گستره مربع‌شکل نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت تصویر مرکز کره روی سطح را می‌توان به صورت (۰ و ۰) نشان داد. حداکثر اختلاف گرانی به وجود آمده ۱۶ میلی‌گال است.

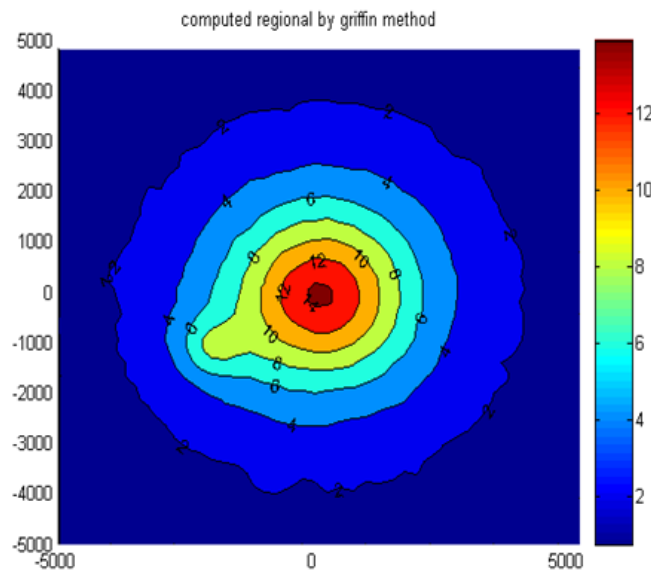
علاوه بر آن، نوفه‌های نامعمولی در شکل به دست آمده برای اثر محلی دیده می‌شود که با اثر محلی منظور شده ابتدایی، تفاوت فاحشی دارد.

شکل ۸ اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای را نشان می‌دهد. چون اثر منطقه‌ای منظور شده در این مثال متقارن و حاصل یک کره بزرگ است و در روش برازش چندجمله‌ای از روش کمترین مربعات (که نوعی میانگین‌گیری است) استفاده می‌شود، دامنه تغییرات گرانی اثر منطقه‌ای محاسبه شده با این روش، از دامنه تغییرات گرانی اثر منطقه‌ای منظور شده خیلی کوچک‌تر است. از آنجا که با درجات مرسوم چندجمله‌ای، اثر منطقه‌ای همواره به صورت یک منحنی با شیبی ملایم است، لذا نه تنها دامنه تغییرات، بلکه شکل اثر منطقه‌ای محاسبه شده نیز، با شکل اثر منطقه‌ای منظور شده متفاوت است. این محاسبه نادرست اثر منطقه‌ای باعث شده است که شکل منحنی پربندی اثر محلی محاسبه شده، تقریباً به همان شکل منحنی پربندی داده‌های مشاهده‌ای باشد و تفکیک قابل ملاحظه‌ای بین آنها صورت نگیرد (شکل ۷).

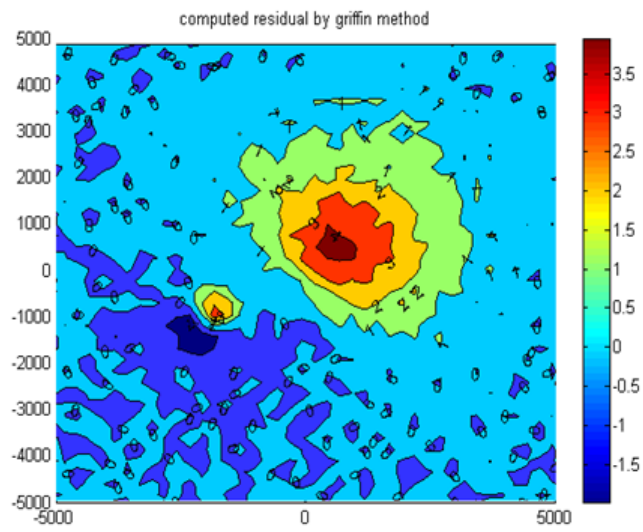
مرکز دو کره بزرگ و کوچک در سطح بر هم منطبق نیستند و به اندازه کافی از هم دورند و از طرفی نوفه‌ها دارای مقادیر کتره‌ای هستند و احتمال اینکه بیشترین مقدار نوفه که ۱ میلی‌گال است در نقطه (۰،۰) رخ دهد خیلی کم است، در این منحنی نیز حداکثر اختلاف گرانی به وجود آمده به مانند شکل ۴ در حدود ۱۶ میلی‌گال است.

در شکل ۶ که اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش گریفین را نشان می‌دهد، هر چند که دامنه تغییرات مقدار گرانی تقریباً مشابه دامنه تغییرات مقدار گرانی اثر منطقه‌ای مصنوعی است (حدوداً ۱۴ میلی‌گال) ولی به خوبی مشخص است که این روش نتوانسته است اثر منطقه‌ای را بگونه‌ای حساب کند که مستقل از اثر محلی باشد، در نتیجه مقداری از اثر محلی در شکل دیده می‌شود.

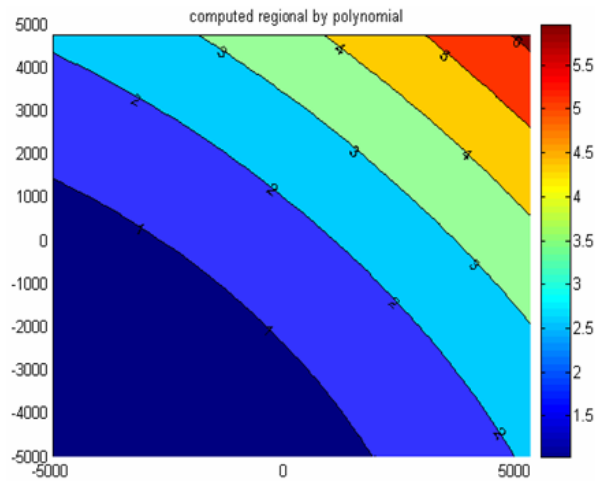
با استفاده از این اثر گرانی منطقه‌ای و رابطه یک، شکل ۷ به دست آمده است که اثر محلی با روش گریفین محاسبه شده است. در این شکل کل دامنه تغییرات از ۲- تا ۴ میلی‌گال است ولی تغییرات گرانی در محل حضور اثر محلی از ۰ تا ۳ میلی‌گال بیشتر نیست در حالی که دامنه تغییرات اثر محلی منظور شده از ۱ تا ۶ میلی‌گال است.



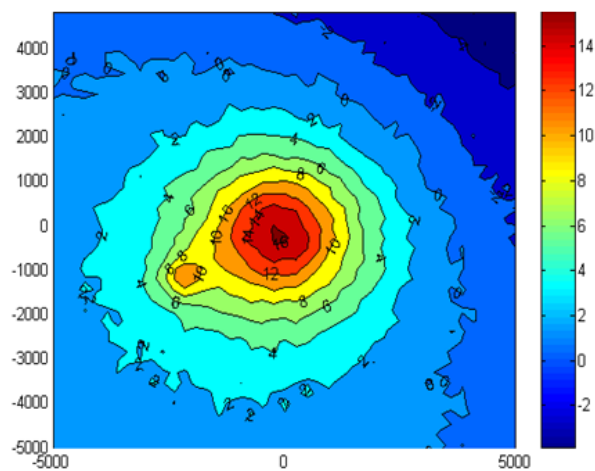
شکل ۶. اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش گریفین. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال \_ مسافت برحسب متر.



شکل ۷. اثر محلی محاسبه شده با روش گریفین. شتاب گرانی برحسب میلی گال\_مسافت برحسب متر.



شکل ۸. اثر منطقه ای محاسبه شده با استفاده از روش چندجمله‌ای درجه سه، شتاب گرانی برحسب میلی گال\_مسافت برحسب متر.



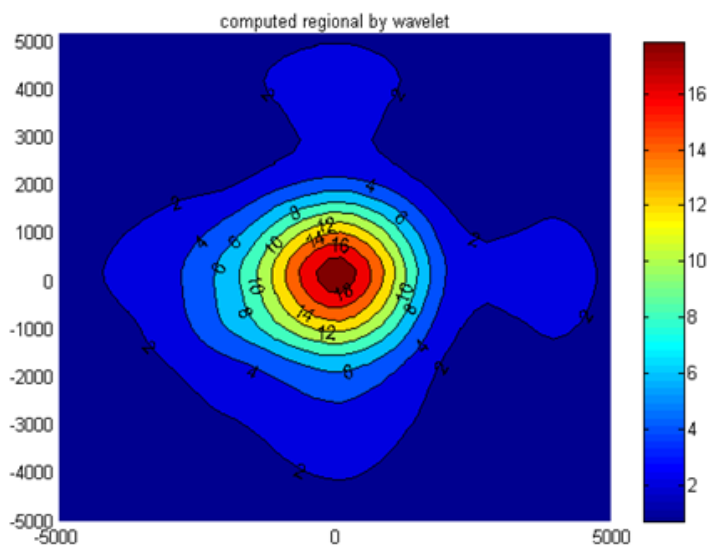
شکل ۹. اثر محلی محاسبه شده با استفاده از روش چندجمله‌ای درجه سه، شتاب گرانی برحسب میلی گال\_مسافت برحسب متر.



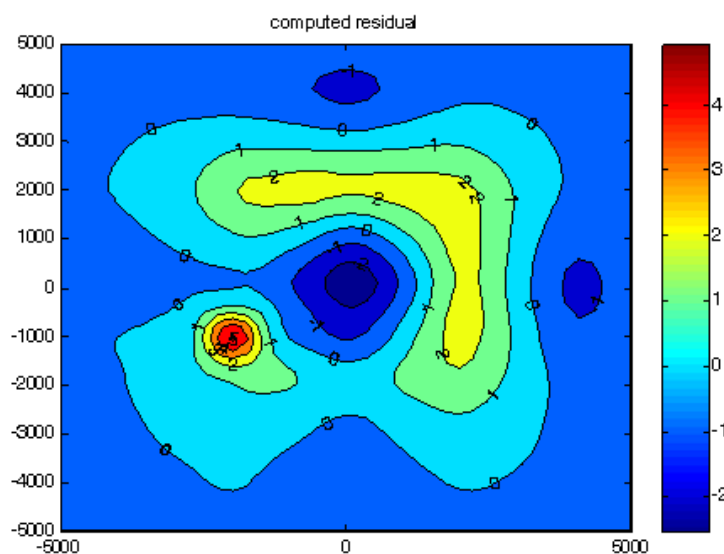
برای همه نقاط حدود ۳- تا ۵ میلی گال است ولی از آنجا که دامنه تغییرات ۳- تا ۰ (رنگ‌های آبی پُررنگ و آبی کم‌رنگ) فقط برای نوفه‌ها به دست آمده است می‌توان گفت که دامنه تغییرات گرانی برای اثر محلی حدود ۰ تا ۵ میلی گال است و نسبت به دامنه تغییرات اثر محلی منظور شده که حدود ۱ تا ۶ میلی گال است تفاوت فاحشی ندارد و شکل به دست آمده نیز تقریباً بر شکل اثر محلی منظور شده منطبق است.

در شکل ۱۰ که اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش تبدیل گسسته موجک را نشان می‌دهد (با استفاده از موجک  $rbio6.8$  و ۴ بار عملیات تجزیه)، دامنه تغییرات گرانی حدود ۱ تا ۱۸ میلی گال است که نسبت به دامنه تغییرات اثر منطقه‌ای منظور شده (حدود ۰ تا ۱۶ میلی گال) تفاوت فاحشی ندارد و شکل به دست آمده نیز تقریباً بر شکل اثر منطقه‌ای منظور شده منطبق است.

در شکل ۱۱ که اثر محلی محاسبه شده با روش تبدیل گسسته موجک را نشان می‌دهد، دامنه تغییرات گرانی



شکل ۱۰. اثر منطقه ای محاسبه شده با روش تبدیلات موجک. شتاب گرانی برحسب میلی گال \_مسافت برحسب متر.



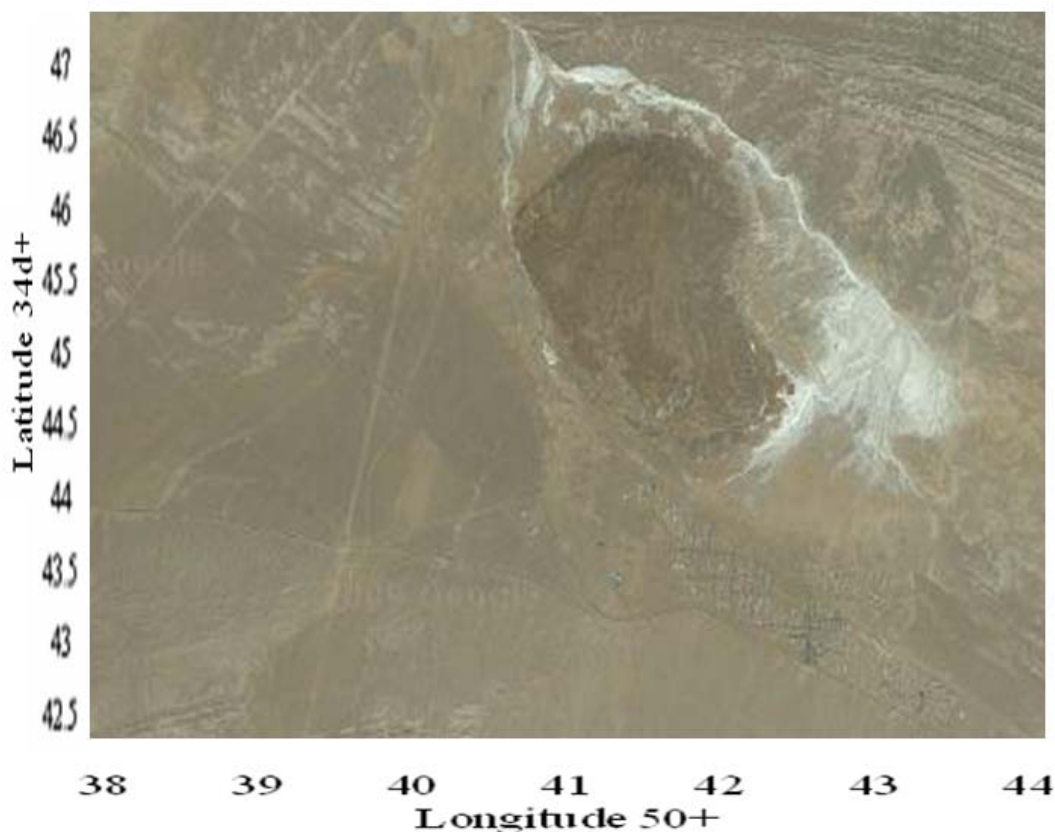
شکل ۱۱. اثر محلی محاسبه شده با روش تبدیلات موجک. شتاب گرانی برحسب میلی گال \_مسافت برحسب متر.

لازم به ذکر است که در مثال فوق، اثرات محلی و منطقه‌ای تا حدی به صورت نامتعارف و پیچیده انتخاب شده بود تا توانایی برتر روش تبدیل گسسته موجک نسبت به سایر روش‌ها بیشتر آشکار شود؛ به طوری که در این مثال، اثرات محلی و منطقه‌ای محاسبه شده با روش‌های گریفین و برازش چندجمله‌ای، تقریباً هیچ شباهتی به اثرات محلی و منطقه‌ای منظور شده نداشتند. در طبیعت نیز اگر چنانچه عامل و یا عوامل به وجود آورنده اثر منطقه‌ای، به علت تعدد و یا فاصله کم آنها از محل اندازه‌گیری، باعث شوند تا اثر منطقه‌ای رفتار چندان یکنواخت و ایدئالی نداشته باشد، توانایی برتر روش تبدیلات گسسته موجک، باعث می‌شود که خطای محاسبه اثر منطقه‌ای و متعاقب آن خطای محاسبه خطای اثر محلی، از دیگر

روش‌ها کمتر باشد.

#### ۲-۴ داده‌های حقیقی

داده‌های حقیقی به کار رفته در این مقاله از اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی گنبد نمکی قم استخراج شده است (طالبیان، ۱۳۵۶). این گنبد در ۲۵ کیلومتری شمال غربی شهر قم و در مسیر جاده قم - ساوه قرار دارد. گنبد نمکی قم محدوده‌ای به وسعت  $6/5$  کیلومترمربع و به ارتفاع حدود ۲۸۵ متر را می‌پوشاند و حجمی برابر ۴۵۶ کیلومتر مکعب را در بالای سطح زمین دربر می‌گیرد. در تصویر ماهواره‌ای (شکل ۱۲)، رنگ کوه نمک تیره‌تر از دیگر عوارض زمین‌شناسی است.

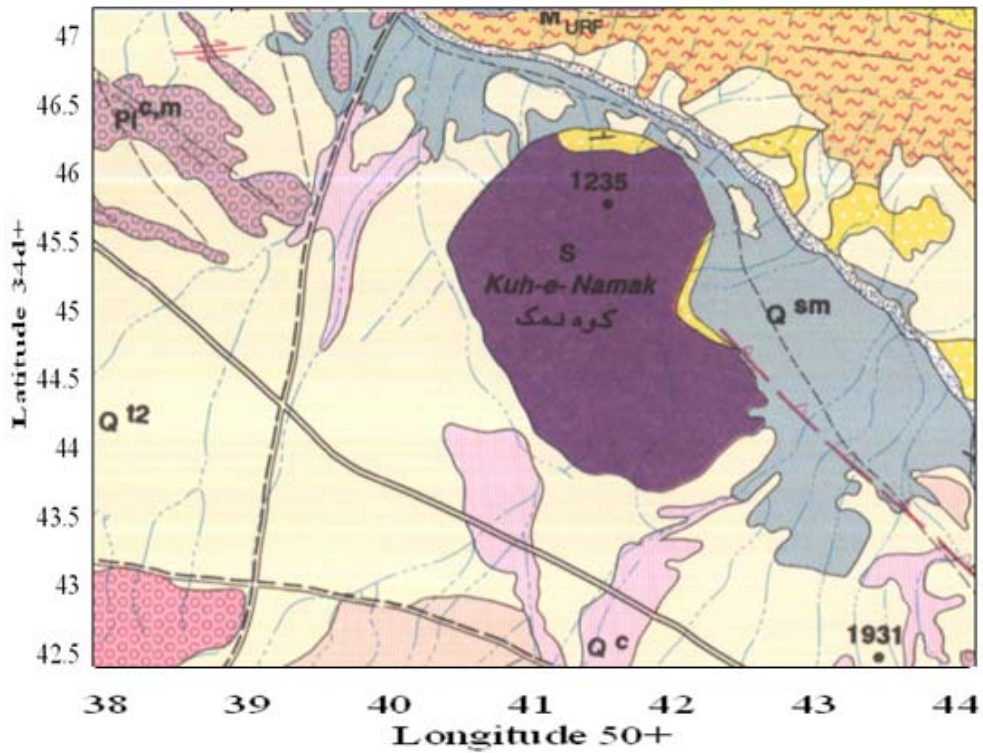


شکل ۱۲. تصویر ماهواره‌ای منطقه؛ گنبد نمکی در شمال شرقی تصویر (در غرب شهرستان قم) سمت شرق گنبد دارای ساختار سنگی و سمت غرب دارای ساختار رسوبی است (<http://www.earthgoogle.com>).

مختصات نقاط از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس  $\frac{1}{50000}$  استخراج و ارتفاع نقاط با دستگاه از روش‌های فشارسنجی تعیین شده است.

جزئیات ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی نیز، در نقشه زمین‌شناسی آن منطقه در شکل ۱۳ به نمایش در آمده است. لازم به ذکر است که طول و عرض جغرافیایی نشان داده شده در این تصاویر، دقیقاً از نقشه‌های موجود استحصال شده است.

منطقه مورد بررسی در محدوده  $34^{\circ}42'$  تا  $34^{\circ}47'$  عرض جغرافیایی و  $50^{\circ}38'$  تا  $50^{\circ}44'$  طول جغرافیایی و وسعت ۱۵۰ کیلومتر مربع است. ۲۵۵ ایستگاه اندازه‌گیری گرانی با چگالی تقریبی سه ایستگاه در هر کیلومتر مربع مورد استفاده قرار گرفته است. برای گرانی مرجع در شبکه نقاط، از مقدار گرانی مطلق ایستگاه موجود در فرودگاه مهرآباد استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی با یک دستگاه گرانی‌سنج لاگوست-رمبرگ به شماره G Nr.296 صورت گرفته است.



شکل ۱۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه (سازمان زمین‌شناسی کشور).

۳۴°۴۷' ادامه دارد (حدوداً ۱۰ کیلومتر است).

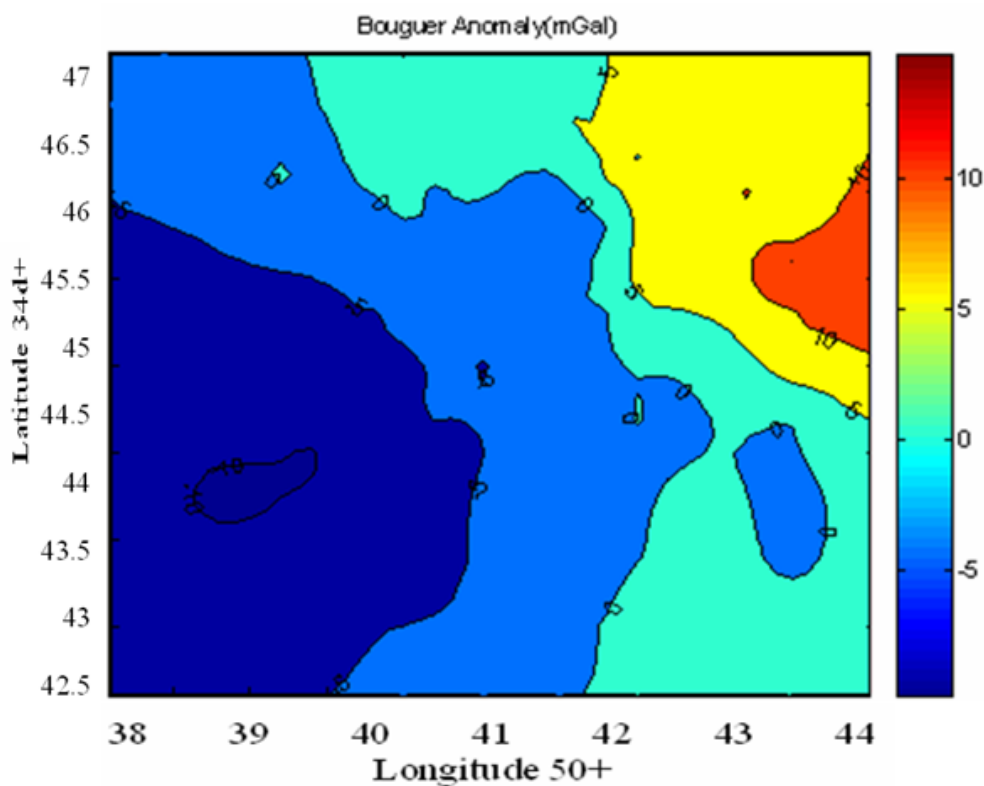
#### ۴-۲-۱ محاسبه اثر محلی با استفاده از روش‌های

#### گریفین و برازش چندجمله‌ای

شکل ۱۵ اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش گریفین است. برای محاسبه اثر منطقه‌ای هر نقطه، از میانگین وزن دار ۸ نقطه اطراف آن استفاده شده است. دامنه تغییرات گرانی از ۸- تا ۱۰+ است و با استفاده از این اثر گرانی منطقه‌ای و رابطه یک، شکل ۱۶ به دست آمده است که اثر محلی محاسبه شده با روش گریفین است. در این شکل کل دامنه تغییرات از ۴- تا ۵ میلی‌گال است و از شکل پیدا است که اثر منطقه‌ای که به صورت کاهش میدان از سمت شمال شرق به جنوب غرب بوده، به طور کامل حذف نشده است. در نتیجه این روش نتوانسته است در حد قابل قبولی، اثرات محلی و منطقه‌ای را از هم تفکیک کند.

به‌طور کلی در تصویر ماهواره‌ای و نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مشخص است که این منطقه تحت تاثیر دو ساختار زمین‌شناسی متفاوت قرار دارد. در بخش شرقی گنبد، ساختار زمین‌شناسی به صورت سنگی (رسوبی میوسن سازند قم) و در سمت غربی رسوبات کوارتزر هستند. تاثیر این ساختار زمین‌شناسی که به صورت افزایش مقدار گرانی از جنوب غربی به شمال شرقی است، در نقشه گرانی بوگه منطقه (شکل ۱۴) قابل رؤیت است.

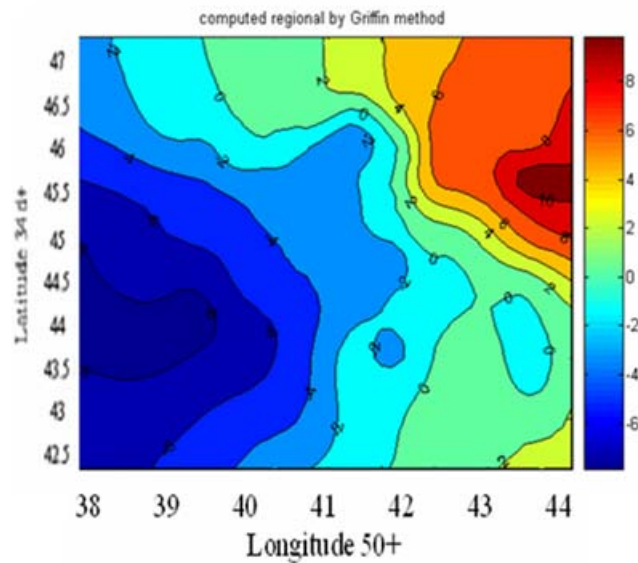
شکل ۱۴ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی را با طول و عرض جغرافیایی مربوط نشان می‌دهد. دامنه تغییرات گرانی در کل داده‌ها از ۱۰- تا ۱۵ میلی‌گال است. در این شکل طول جغرافیایی منطقه تقریباً از ۵۰°۳۸' تا ۵۰°۴۴' درازا دارد (حدود ۱۳ کیلومتر است) و عرض جغرافیایی منطقه نیز تقریباً از ۳۴°۴۲' تا



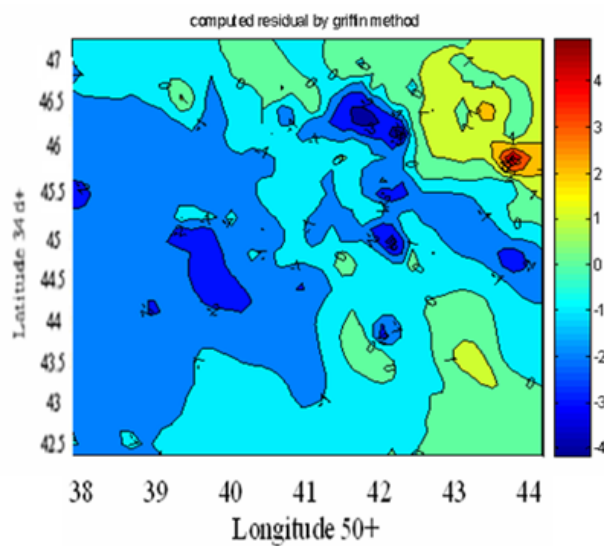
شکل ۱۴. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و گرانی بوگه کامل آن با استفاده نرم افزار surfer و براساس داده‌های برداشت شده طالبیان (۱۳۵۶).

است. در این شکل کل دامنه تغییرات از ۴- تا ۶ میلی گال است و از شکل پیداست که، اثر منطقه‌ای که به صورت کاهش میدان از سمت شمال شرق به جنوب غرب بوده است، حذف شده است. با صرف نظر از حضور نوفه‌ها می‌توان گفت این شکل سطح صافی را نمایش می‌دهد که تنها فرو رفتگی موجود در آن اثر گنبد نمکی است و می‌توان از آن برای مدل‌سازی استفاده کرد.

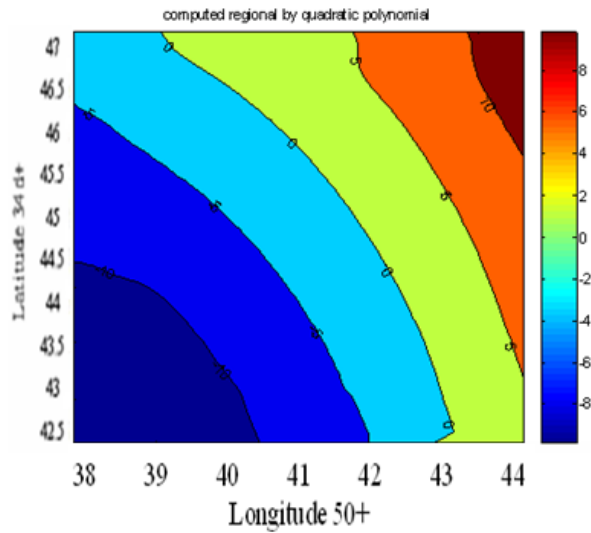
شکل ۱۷ اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای است. اثر منطقه‌ای نشان داده شده در این شکل، با برازش چندجمله‌ای درجه دو (quadratic) به کل داده‌ها و به کمک روش کمترین مربعات به دست آمده است. دامنه تغییرات گرانی از ۱۰- تا ۱۰ میلی گال است و با استفاده از این اثر، گرانی منطقه‌ای و رابطه یک، شکل ۱۸ به دست آمده است که اثر محلی محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه ۲



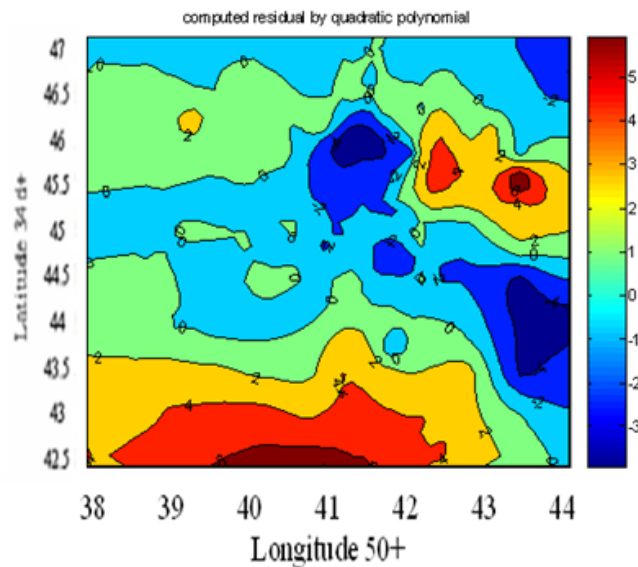
شکل ۱۵. اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش گریفین. شتاب گرانی برحسب میلی گال.



شکل ۱۶. اثر محلی محاسبه شده با روش گریفین. شتاب گرانی برحسب میلی گال.



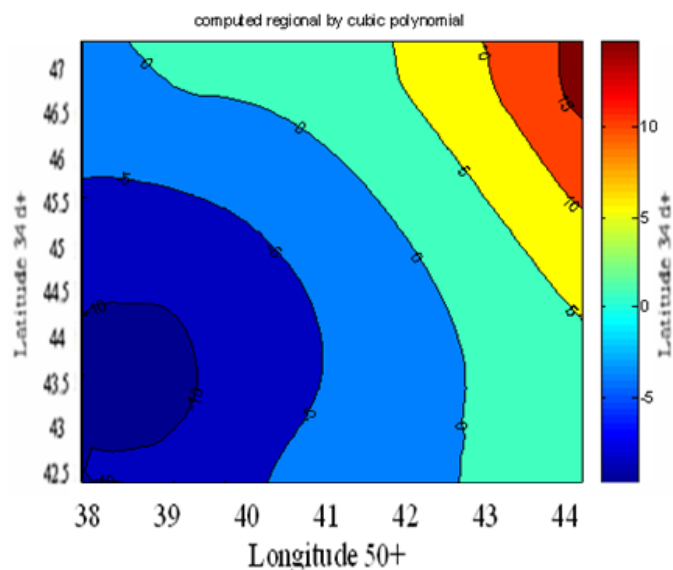
شکل ۱۷. اثر منطقه ای محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه دو. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.



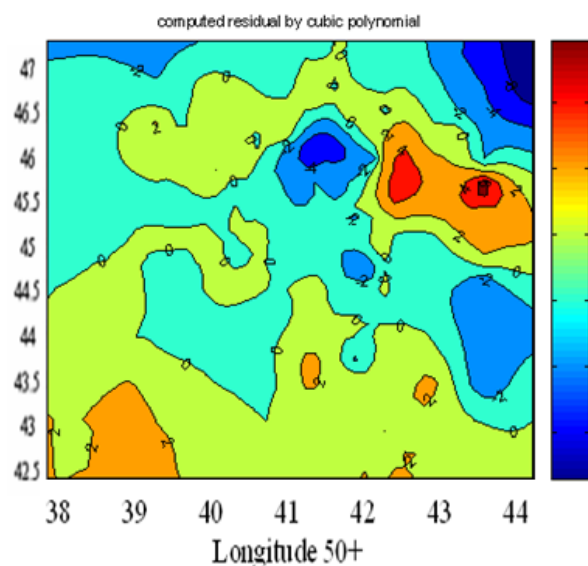
شکل ۱۸. اثر محلی محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه دو. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.

دامنه تغییرات از ۸- تا ۶ میلی‌گال است و از شکل پیداست که، اثر منطقه‌ای که به صورت کاهش میدان از سمت شمال شرق به جنوب غرب بوده است، حذف شده است. لذا با صرف نظر از حضور نوفه‌ها می‌توان گفت این شکل نیز سطح صافی را نمایش می‌دهد که تنها فرو رفتگی موجود در آن اثر گنبد نمکی است و می‌توان از آن برای مدل سازی استفاده کرد.

شکل ۱۹ نیز اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای را نشان می‌دهد با این تفاوت که اثر منطقه‌ای با برازش کردن چندجمله‌ای درجه ۳ (cubic) به دست آمده است. دامنه تغییرات گرانی از ۱۰- تا ۱۵ میلی‌گال است با استفاده از این اثر گرانی منطقه‌ای و رابطه یک، شکل ۲۰ به دست می‌آید که اثر محلی محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه ۳ است. در این شکل کل



شکل ۱۹- اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه سه. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.



شکل ۲۰. اثر محلی محاسبه شده با روش برازش چندجمله‌ای درجه سه شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.

باشد که باعث کاهش قابل ملاحظه دامنه اثر محلی شود. در نتیجه چنانچه به علت تعدد و یا فاصله کم عامل و یا عوامل به وجود آورنده اثر منطقه‌ای از محل اندازه‌گیری‌ها، اثر منطقه‌ای رفتار چندان یکنواخت و ایده‌آلی نداشته باشد، ازدیاد درجات چندجمله‌ای باعث کاهش دامنه گرانی در محل حضور اثر محلی، و افزایش دامنه نوفه در مناطق دیگر می‌شود. بدیهی است که همواره

استفاده نا مناسب از درجات بالای چندجمله‌ای در روش برازش چندجمله‌ای، باعث ازدیاد تعداد نوفه‌ها و بزرگی دامنه آنها در اثر محلی خواهد شد. حتی ممکن است دامنه تغییرات این نوفه‌ها از تغییرات دامنه گرانی بی‌هنجاری مورد مطالعه بیشتر باشد. هرچند که انعطاف پذیری (flexibility) چندجمله‌ای با افزایش درجه آن بیشتر می‌شود ولی این انعطاف در برازش نباید به حدی

همواره در مسیر دو نیم‌رخ عمود بر هم واقع است و منحنی اثر منطقه‌ای هر نیم‌رخ دارای گرانی منحصربه‌فرد است، لذا برای محاسبه اثر منطقه‌ای مختص هر نقطه از شبکه، از میانگین اثرات منطقه‌ای آن نقطه در دو نیم‌رخ عمود بر هم استفاده شده است (علی‌مرادیان، ۱۳۸۵).

در شکل ۱۴ که اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش تبدیل گسسته موجک را نشان می‌دهد، دامنه تغییرات گرانی تقریباً مشابه اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش‌های گریفین و برازش چندجمله‌ای و حدود ۱۰- تا ۱۰ میلی‌گال است. در این روش نیز به‌مانند روش‌های گریفین و برازش چندجمله‌ای، جهت افزایش مقدار گرانی نقاط در اثر منطقه‌ای، از جنوب غربی به شمال شرقی است ولی شکل پربندهای اثر منطقه‌ای به‌دست آمده با این روش، با شکل پربندهای اثر منطقه‌ای حاصل از روش‌های پیش‌گفته متفاوت است.

۴-۲-۳ بحث کیفی علت تفاوت شکل پربندهای اثر منطقه‌ای در روش‌های گریفین، برازش چندجمله‌ای و تبدیلات گسسته موجک

در محاسبه اثر منطقه‌ای با روش گریفین، اثر منطقه‌ای محاسبه شده برای هر نقطه به نقاط پیرامون آن بستگی دارد، بنابراین در این روش ضمن اینکه اثر منطقه‌ای به شعاع میانگین‌گیری بستگی دارد، همواره خطای محاسبه اثر منطقه‌ای، در محل حضور بی‌هنجاری بیشتر است. به‌عبارتی می‌توان گفت که در این روش، اثر منطقه‌ای محاسبه شده، بیش از سایر روش‌ها به بی‌هنجاری مورد جست‌وجو وابسته است.

در محاسبه اثر منطقه‌ای با روش برازش چندجمله‌ای که به کمک روش کمترین مربعات صورت می‌گیرد، ضرایب چندجمله‌ای براساس مقدار گرانی همه نقاط موجود محاسبه می‌شود، لذا می‌توان گفت که اثر منطقه‌ای محاسبه شده برای هر نقطه، به همه نقاط موجود بستگی

انتخاب دقیق درجه چندجمله‌ای، به‌نظر مفسر وابسته است و مفسر همواره با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، نتایج سایر روش‌های ژئوفیزیکی، تجربیات خود و مانند آن، درجه چندجمله‌ای را مشخص می‌کند.

در جدا کردن اثرات محلی و منطقه‌ای داده‌های گنبد نمکی قم با استفاده از روش برازش چندجمله‌ای درجه سه، تفکیک واضح‌تری از اثر محلی به‌دست آمده و مقدار محسوسی از دامنه اثر محلی حذف نشده است. درضمن انعطاف بیشتر این نوع چندجمله‌ای در برازش به کل داده‌ها باعث شده است که دامنه نوفه‌های به‌وجود آمده در اثر محلی، از دامنه اثر گرانی ناهنجاری مورد جست‌وجو، خیلی کوچک‌تر باشد، لذا به‌نظر می‌رسد که با این درجه از چندجمله‌ای، تفکیک مناسب‌تری صورت گرفته است و شکل منحنی اثر محلی در محل حضور گنبد نمکی دارای اطلاعات دقیق‌تری است.

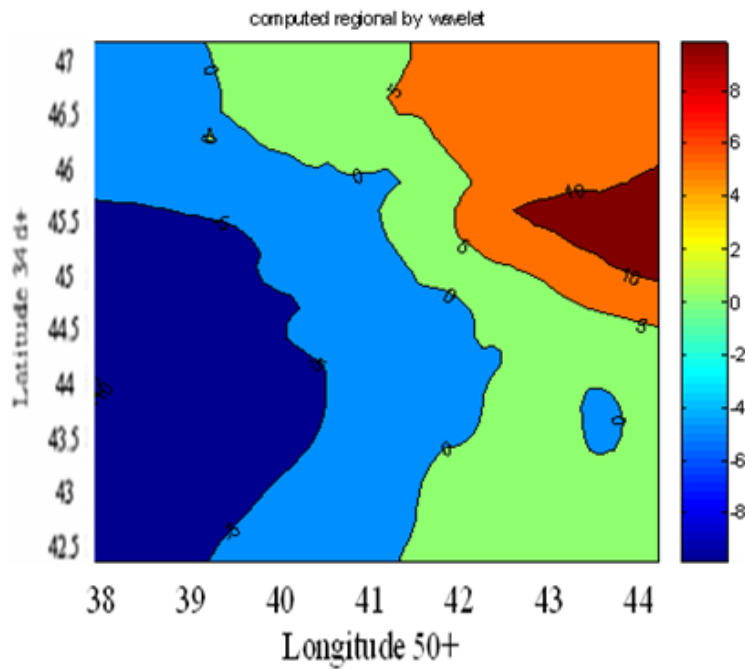
۴-۲-۲ محاسبه اثر محلی با استفاده از روش تبدیل گسسته موجک

برای محاسبه اثر محلی با استفاده از این روش، در ابتدا اثر منطقه‌ای با استفاده از همه نیم‌رخ‌های عمودی و افقی موجود در داده‌های حقیقی، محاسبه شده است (شکل ۲۱). در این روش نیز اثر محلی پس از محاسبه اثر منطقه‌ای و با استفاده از رابطه شماره یک به‌دست آمده است (شکل ۲۲). تعداد نیم‌رخ‌های افقی استفاده شده ۳۸ مورد و تعداد نیم‌رخ‌های عمودی استفاده شده ۵۰ مورد است. برای اجرای چند عملیات نمونه‌برداری پایین‌رونده و بالارونده روی نیم‌رخ‌های افقی و عمودی موجود در داده‌های گرانی گنبد نمکی قم، از موجک  $rbio6.8$  استفاده شده است. تعداد مراحل تجزیه و بازسازی ۴ مرحله بوده است. لازم به ذکر است که در اینجا نیز جزئیات عملیات همان موارد توضیح داده شده در بخش ۳-۴ است و از آنجا که هر نقطه از شبکه داده‌های حقیقی،

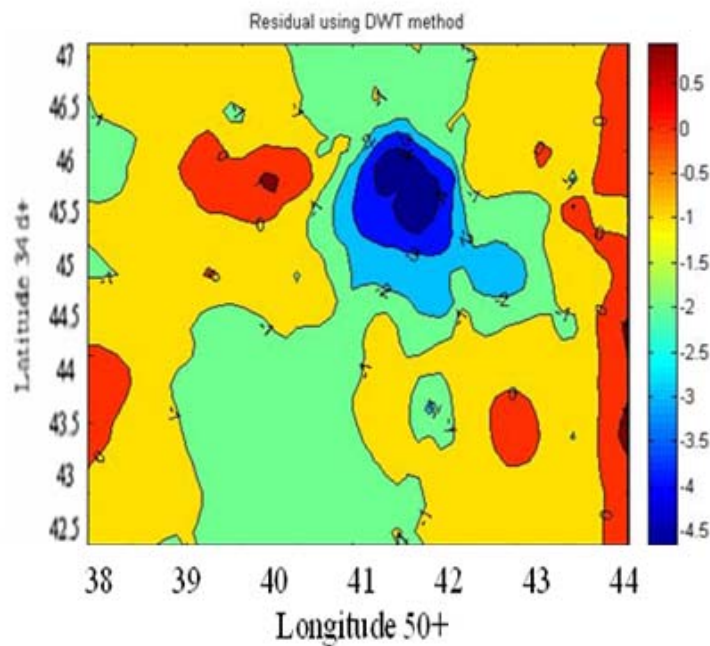


اثر منطقه‌ای به دست آمده با اثر منطقه‌ای واقعی تطابق بیشتری داشته باشد و در نهایت، بعد از به کارگیری رابطه یک، اثر محلی محاسبه شده نیز دقت بیشتری داشته باشد.

دارد. این وابستگی اثر منطقه‌ای محاسبه شده به مقدار گرانی همه نقاط موجود، سبب شده است که حساسیت اثر منطقه‌ای محاسبه شده به بی‌هنجاری مورد جست‌وجو در این روش، نسبت به روش گریفین کاهش پیدا کند و



شکل ۲۱. اثر منطقه‌ای محاسبه شده با روش تبدیل گسسته موجک. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.



شکل ۲۲. اثر محلی محاسبه شده با روش تبدیل گسسته موجک. شتاب گرانی برحسب میلی‌گال.

علاوه بر اینکه در بخش‌های ۳-۴ و ۴-۳ (به منزله یک بحث کیفی)، با بررسی جزئیات چگونگی عملکرد روش تبدیلات گسسته موجک برای به دست آوردن اثر منطقه‌ای، اثبات شد که فن به کاررفته در این روش می‌تواند دقیق‌تر از سایر روش‌های گفته شده باشد، مقایسه نمودارهای حاصل از داده‌های مصنوعی (بخش ۴-۱) نیز در حکم یک بحث کمی ثابت کرد که کمیت‌های به دست آمده به مثابه اثرات محلی و منطقه‌ای در روش تبدیلات گسسته موجک، همخوانی بیشتری با مجهولات مصنوعی دارند.

در شکل ۲۲ که تصویر محاسبه شده اثر محلی بر اساس داده‌های واقعی گنبد نمکی قم است، دیده می‌شود که کل دامنه تغییرات گرانی از ۴.۵- تا ۱+ میلی‌گال است و در شکل پیدا است که اثر منطقه‌ای؛ که به صورت کاهش میدان از سمت شمال شرق به جنوب غرب است، کاملاً حذف شده است. با صرف نظر از حضور نوفه‌ها می‌توان گفت که این شکل، سطح صافی را نمایش می‌دهد که اثر گنبد نمکی به صورت کاهش میدان، تنها فرورفتگی موجود آن است و می‌توان از آن برای مدل‌سازی استفاده کرد. همان‌طور که در این شکل پیدا است، دامنه تغییرات گرانی اثر محلی با استفاده از روش تبدیل گسسته موجک، به حدود نصف دامنه تغییرات گرانی اثر محلی با استفاده از روش‌های گریفین و برازش چندجمله‌ای کاهش یافته است. به عبارتی در مقایسه با اثرهای محلی محاسبه شده با روش‌های گریفین و برازش چندجمله‌ای، این اثر محلی دارای دامنه محدودتری است و آشکارسازی بی‌هنجاری ناشی از گنبد نمکی با آن، بسیار مطلوب‌تر است.

تطابق منحنی‌های اثر محلی به دست آمده از روش‌های گفته شده، با واقعیت‌های زمین‌شناسی موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهد که نمودارهای اثرات محلی و منطقه‌ای حاصل از به کارگیری روش تبدیلات گسسته موجک، به واقعیت‌های زمین‌شناسی

از آنجا که در محاسبه اثر منطقه‌ای با استفاده از روش تبدیل گسسته موجک، از نیم‌رخ‌های افقی و عمودی استفاده شده است، و در بسیاری از نقاط، نیم‌رخ‌های مربوط شامل نقاط روی بی‌هنجاری نمی‌شوند، حساسیت اثر منطقه‌ای محاسبه شده به حضور بی‌هنجاری کاهش می‌یابد. حتی اگر یکی از نیم‌رخ‌های عمودی یا افقی شامل نقاط روی بی‌هنجاری باشد، میانگین منظور شده برای اثر منطقه‌ای آن نقطه باعث می‌شود که حضور بی‌هنجاری، تاثیر کمتری در محاسبه اثر منطقه‌ای آن نقطه داشته باشد. حتی در محاسبه اثر منطقه‌ای نقاط روی بی‌هنجاری، دخیل کردن هم‌زمان نیم‌رخ‌های عمودی و افقی موجب دقت بیشتری در محاسبه اثر منطقه‌ای آن نقاط می‌شود.

علاوه بر مزایای گفته شده روش تبدیل گسسته موجک، کارایی موجک  $rbio6.8$  در برآورد درست اثر منطقه‌ای در ۴ مرحله نمونه‌برداری پایین‌رونده و بالا‌رونده، سبب شده است که در همه نیم‌رخ‌های عمودی و افقی، سیگنال برآورد محاسبه شده برآورد درستی از اثر منطقه‌ای در آن نیم‌رخ به دست دهد (شکل ۲۲).

#### ۴-۲-۴ بحث کمی براساس نتایج به دست آمده

از آنجا که نمودارهای نشان داده شده در این مقاله با رایانه و با کمک نرم‌افزار متلب و براساس عدد و رقم‌های حاصل از کاربرد نرم‌افزارهای طراحی شده به دست آمده‌اند (علی‌مرادیان، ۱۳۸۵) در نتیجه این نمودارها بازتاب گرافیکی کمیت‌ها هستند و هرگونه مقایسه آنها با یکدیگر در واقع مقایسه‌ای کمی است. به عبارتی دیگر، کیفیت، شکل و چگونگی تصاویر به دست آمده برای اثرات محلی و منطقه‌ای محاسبه شده، کاملاً بر اعداد و مقادیر استوارند و مقایسه منحنی‌های به دست آمده برای داده‌های مصنوعی و یا داده‌های حقیقی کاملاً یک بحث کمی است.

نیم‌رخ‌های افقی، عمودی و یا ترکیبی از آنها برای تعریف بهینه اثر منطقه‌ای استفاده کند.

ز) به‌مانند سایر روش‌های جدایش، در روش جدایش اثرات محلی و منطقه‌ای به کمک تبدیل گسسته موجک نیز، اطلاع از وضعیت زمین‌شناسی منطقه در انتخاب درست اثر منطقه‌ای و در نهایت انتخاب درست اثر محلی، نقش سازنده‌ای دارد.

#### منابع

طالبیان، م.، ۱۳۵۶، تعیین نقشه بوگه بی‌هنجاری گرانی گنبد نمکی قم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

علی‌مرادیان، م.، ۱۳۸۵، جدا کردن میدان گرانی منطقه‌ای و باقی‌مانده با روش برازش چندجمله‌ای و تبدیلات پیوسته و گسسته موجک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان.

Abdelrahman, E. M., 1985, On the least – squares residual anomaly determination, *Geophysics* **50**(3), 473-480.

Amara, G., 2004, An Introduction to Wavelets, Istituto di Fisica dello spazio Interplanetario.

Dubechies, M., 1994, Ten lectures on wavelets, CBMS, 198-202, 254-256.

Griffin, W. R., 1949, Residual gravity in theory and practice, *Geophysics* **14**, 39-58.

نزدیک‌تر هستند بنابراین همان‌طور که به‌کارگیری داده‌های مصنوعی کارایی بیشتر روش تبدیلات گسسته موجک را ثابت کرد، به‌کارگیری داده‌های واقعی نیز دقت و برتری این روش را به اثبات رساند.

#### ۵ نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از کاربرد داده‌های حقیقی و مصنوعی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

الف) روش برازش چندجمله‌ای به درجه چندجمله‌ای وابسته است و به‌طوری‌که در شکل‌های ۱۹ و ۲۱ مشخص است، دامنه تغییرات وسیع است و تحت تاثیر نقاط خارج از محدوده قرار دارد.

ب) روش گریفین به شعاع میانگین‌گیری وابسته است.

ج) روش تبدیل گسسته موجک، روشی هدایت‌شدنی است که با کمک آن، اثر محلی با دقت و ظرافت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌آید، چراکه در این روش، شکل موجک برآورد می‌شود و مفسر می‌تواند بسامد بی‌هنجاری منطقه‌ای را تعیین کند.

د) چنانچه عامل و یا عوامل به وجود آورنده اثر منطقه‌ای، به‌علت تعدد و یا فاصله کم آنها از محل اندازه‌گیری‌ها، باعث شوند که اثر منطقه‌ای رفتار چندان یکنواخت و ایدئالی نداشته باشد، تغییر درجات چندجمله‌ای کفاف جدایش کامل اثر محلی را نخواهد داد و این به‌علت ماهیت چندجمله‌ای است.

ه) روش گریفین سبب تشدید نوفه می‌شود که در نتیجه‌گیری‌های نهایی، عاملی گمراه‌کننده است.

و) انعطاف‌پذیری موجک‌ها، برآوردهای خوبی را در روش به‌کاررفته، در تعریف اثر منطقه‌ای به دست می‌دهد. علاوه بر توانایی برتر روش تبدیلات موجک در جدایش اثرات محلی و منطقه‌ای، در این روش مفسر می‌تواند از