

Bouguer and terrain corrections in one step through forward modeling using open source resources in Python

E. Ardestani, V.¹  | Khaleghi yalehgonbadi, M.¹ 

1. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: ebrahimz@ut.ac.ir

(Received: 14 March 2023, Revised: 20 May 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

In standard gravimetric correction methods, after the raw gravity data sets were corrected for drift, tide, latitude, and free-air effects to obtain free air anomalies, the effect of the mass between the reference surface and ground surface is eliminated in two steps including Bouguer and terrain corrections. But this study removes this effect in one step through the forward modeling method. To do this, two things are necessary for finding more accurate answers. First, how is the underground discretization, and to what extent a network of Digital Terrain Model (DTM) is available? Quad tree mesh accessible in Simulation and Parameter Estimation in Geophysics (SimPEG) is a very accurate and advanced meshing algorithm to discretize subsurface based on our requirements. This meshing system can choose the size of cells in the desired locations. Hence, using this flexible discretization, it is possible to define the smaller cells in borders, near the topographic region, which helps a for more precise answers. Having a dense DTM, the SRTM GeoTiff pictures are downloaded from USGS Earth explorer with 1 arc-second (90 m) resolution (<https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>), and then height information is extracted from these pictures through GeoToolkit (<http://toolkit.geosci.xyz>) script. Assuming a flat geoid for our study area, topography is extracted from the SRTM and the pictures are interpolated to estimate the elevation at the gravity observation points.

The gravity effect of the model space (the space between the reference surface and topography) is computed via numerical forward modeling assuming a constant density (2.67 gr/cm^3). This procedure is done by the Simulation module in SimPEG and is considered as the Bouguer and terrain corrections simultaneously. These corrections are subtracted from the free-air anomalies, which yields the complete Bouguer anomaly.

This method is powerful in contrast to other standard methods. In standard methods, Bouguer correction considers Bouguer slab approximation. Therefore, accuracy is lost. Also, in large-scale problems, curvature correction becomes necessary. Also, terrain correction for removing the effects of the mass between the lowlands and heights of the region is inevitable. Terrain correction considers two approximations. First, it uses average height. Hence this procedure has a low precision. Secondly it divides the surrounding area into three zones (near, middle, and far) and computes the effects of middle and far zones with lower precision. Therefore, it decreases the accuracy of the results.

The mentioned method is tested on 399 ground gravity data with a grid spacing of about 5 km prepared by the National Cartographical Center of Iran (NCC) in an area of about 200 km in 200 km located in parts of Central Zagros and Central Iran. The results obtained from this one-stage correction method are more accurate and less complicated in doing compared to the results of the usual procedure. Because in this method, we have no simplifying assumptions such as infinite Bouguer slab in Bouguer correction or using relative heights in terrain correction that exist in standard methods.

Keywords: Bouguer correction, topography correction, quad tree mesh, forward modeling, SimPEG.

Cite this article: E. Ardestani, V., & Khaleghi yalehgonbadi, M. (2024). Bouguer and terrain corrections in one step through forward modeling using open source resources in Python. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 113-124. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356457.1007507>

E-mail: (1) khaleghi.m90@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356457.1007507>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تصحیح بوگه و توپوگرافی در یک مرحله از طریق مدل‌سازی پیشرو با استفاده از منابع متن باز در پایتون

وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۱ | منصوره خالقی یله گنبدی^۱

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ebrahimz@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۳۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۳/۱۶)

چکیده

در این تحقیق برای به‌دست آوردن آنومالی بوگه کامل برخلاف روش معمول در تصحیح داده‌ها که در آن حذف اثرات جرم موجود بین سطح مینا و سطح توپوگرافی در یک فرایند گرانی‌سنجی در دو مرحله شامل تصحیح بوگه و تصحیح زمینگان انجام می‌شود، این فرایند به‌صورت تک‌مرحله‌ای انجام می‌شود. بدین‌منظور ابتدا حجم محصور بین سطح مینا و سطح زمین با استفاده از روش مش‌بندی کواد تری (Quad tree mesh) موجود در پایگاه شبیه‌سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک (SimPEG) که امکان تعریف سلول‌های کوچک در نواحی مرزی و در نتیجه دقت بالا در پوشش توپوگرافی را دارد، گسسته می‌شود. سپس داده‌های ارتفاعی منطقه مورد مطالعه که از تصاویر SRTM Geo TIFF موجود در پایگاه USGS Earth explore با قدرت تفکیک یک آرک ثانیه (۹۰ متر) استخراج شده‌اند، با توجه به مش‌بندی صورت گرفته برای موقعیت مراکز مش‌ها درون‌یابی می‌شوند. پس از آن اثر گرانی جرم با استفاده از مدل‌سازی پیشرو توسط ماژول شبیه‌سازی (Simulation) تعبیه شده در پایگاه شبیه‌سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک محاسبه شده و برای حصول آنومالی بوگه کامل از مقادیر آنومالی هوای آزاد کم می‌شود. روش مذکور روی منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر در ۲۰۰ کیلومتر واقع در بخش‌هایی از زاگرس مرکزی و ایران مرکزی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. اختلاف نتایج به‌دست آمده از روش تک‌مرحله‌ای در مقایسه با روش استاندارد بین منفی ۰/۴۸ تا مثبت ۰/۶۴ میلی‌گال است که رقم قابل‌توجهی است. با توجه به محدودیت‌ها و خطاهای ناشی از فرضیات ساده‌کننده در روش استاندارد مانند خطای ناشی از انحناى زمین، استفاده از ارتفاع متوسط به‌جای ارتفاع واقعی در هر نقطه و فرض تختی بی‌نهایت بوگه نتایج به‌دست آمده از روش تک‌مرحله‌ای قابل‌توجهی است.

واژه‌های کلیدی: تصحیح بوگه، تصحیح توپوگرافی، کواد تری مش، مدل‌سازی پیشرو، SimPEG.

۱. مقدمه

دستگاه گرانی‌سنج در اثر جابه‌جایی از یک نقطه برداشت داده به نقطه دیگر، حذف اثر تغییرات ارتفاعی نقاط برداشت داده، حذف اثر افزایش گرانی در اثر چرخش زمین و برآمدگی‌های استوایی در شبکه‌هایی که گسترش شمالی-جنوبی آنها به گونه‌ای است که در عرض‌های جغرافیایی متفاوتی قرار می‌گیرند، حذف اثر جرم بین نقطه برداشت داده تا ژئوئید معادل تخته بوگه (گرکنز، ۱۹۸۹) و در نهایت حذف اثر جرم باقی‌مانده بین تخته بوگه و سطح توپوگرافی (تلفورد و همکاران، ۱۹۷۶) انجام می‌شود. همچنین برای شرایطی که برداشت داده

به‌طور معمول پس از طرح یک مسئله ژئوفیزیکی مراحل طراحی شبکه، برداشت داده، تصحیح داده، پردازش داده و تفسیر داده به‌ترتیب اجرا می‌شوند. در روش گرانی‌سنجی در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی مرحله تصحیح داده‌ها طولانی‌تر و در عین حال حساس‌تر نیز هست. تصحیح داده‌ها در روش گرانی‌سنجی شامل تصحیحات کشند، رانه، هوای آزاد، عرض جغرافیایی، بوگه و زمینگان است. این تصحیحات به‌ترتیب به‌منظور رفع اثرات گرانش ماه بر داده‌های گرانی (گرکنز، ۱۹۸۹) در بازه زمانی برداشت داده، بر هم خوردن تنظیمات

استناد: ابراهیم‌زاده اردستانی، وحید و خالقی یله گنبدی، منصوره (۱۴۰۳). تصحیح بوگه و توپوگرافی در یک مرحله از طریق مدل‌سازی پیشرو با استفاده از منابع متن باز در پایتون.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰، (۱)، ۱۱۳-۱۲۴. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356145.1007506>

رایانامه: khaleghi.m90@gmail.com (۱)



در روش هیفورد و بوئی (۱۹۱۲) برای اصلاحات زمین با دقت بالا تا فاصله حدود ۲۲ کیلومتری از ایستگاه گرانشی ایجاد کرد، استفاده عملی به صورت گسترده از تصحیح زمینگان در بررسی‌های گرانشی صورت گرفت. در نهایت روش‌های متعددی برای انجام تصحیح زمینگان ارائه شد که با توجه به ابعاد منطقه مورد مطالعه و میزان دقتی که مدنظر است، یکی از این روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش زون‌بندی (کین، ۱۹۶۲) در پروژه‌هایی که به دقت بالا نیاز دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش اطراف نقطه قرائت گرانی به زون‌های نزدیک، میانه و دور تقسیم شده و اثر گرانی هر یک از این زون‌ها با استفاده از روابط فیزیکی محاسبه می‌شوند. روش تبدیل فوریه سریع برای محاسبه زمینگان در مناطق وسیع و حصول نتایج با سرعت بالا توسط سیدریس (۱۹۸۵) معرفی شد. برای شرایطی چون اهداف زمین‌شناسی که دقت‌های بالا چندان مدنظر نیست از روشی تحت‌عنوان جدول هامر (هامر، ۱۹۳۹) استفاده می‌شود که در آن دوایر متحدالمرکزی اطراف نقطه قرائت گرانی در نظر گرفته می‌شوند که توسط خطوط شعاعی به قطاع‌هایی تقسیم می‌شوند. مقادیر تصحیح برای این قطاع‌ها به‌طور مستقیم از جدول هامر که اکنون حدود هفتاد سال از عمر آن می‌گذرد، قابل استخراج است.

علاوه‌بر روش‌های مذکور که عمدتاً ترسیمی هستند، روش‌های دیگری مبتنی بر محاسبات کامپیوتری نیز ارائه شدند (بوت، ۱۹۵۹؛ بلیز و فرلند، ۱۹۸۴). همچنین با ظهور کامپیوترهای مدرن تصحیح زمینگان را می‌توان از طریق یک مدل زمین دیجیتال (DTM) (کوئیل، ۱۹۹۰؛ رولین، ۱۹۹۰) یا از طریق تطبیق توپوگرافی با مجموعه‌ای از توابع گوسی پایه (هررا-بارینتوس و فرناندز، ۱۹۹۱) و یا حتی خیلی سریع‌تر با استفاده از روش‌های فوریه (پارکر، ۱۹۹۶) انجام داد.

در این تحقیق برای انجام دو تصحیح بوگه و توپوگرافی، اثر گرانی ناحیه بین نقطه برداشت گرانی و سطح مبنا با استفاده از مدل‌سازی پیشرو محاسبه می‌شود. بدین‌منظور

ضمن حرکت انجام می‌شود تصحیح دیگری به نام اتوش (گرکنز، ۱۹۸۹) برای رفع اثرات حرکتی که در اثر نیروی کوریولیس بر گرانی سنج در برداشت‌های دریایی و هوایی وارد می‌شود، ضروری می‌شود. در مورد برداشت‌های بزرگ مقیاس نیز حذف اثرات منطقه‌ای با استفاده از تصحیح ایزوستازی یک الزام است. از طرفی برای پروژه‌هایی با مقیاس کوچک که در مناطق شهری انجام می‌شود، تصحیح عوارض مصنوعی نیز به‌منظور رفع اثر ساختمان‌ها در داده‌ها انجام می‌شود. بنابراین تمیز کردن داده‌ها از اثرات مختلف در گرانی‌سنجی از یک‌سو فرایندی طولانی و زمانبر بوده و از سوی دیگر به دلیل آن‌که خطایی کوچک در هر یک از مراحل تصحیح داده‌ها می‌تواند اثر بزرگی بر پاسخ‌ها داشته باشد، دقت در انجام هر یک از مراحل آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه یافتن روش‌هایی ساده‌تر و در عین حال دقیق‌تر کمک بزرگی برای بهبود نتایج کلی در یک فرایند گرانی‌سنجی خواهد بود.

در حالت رایج و استاندارد هر یک از مراحل تصحیح داده که پیش‌تر بدان اشاره شد در یک مرحله مجزا انجام می‌شود. در مورد تصحیح بوگه و زمینگان نیز همین‌طور است. برای انجام تصحیح بوگه یک صفحه همگن با گسترش نامحدود و با ضخامتی برابر با ارتفاع نقطه قرائت گرانی در نظر گرفته می‌شود و اثر گرانی این صفحه محاسبه می‌شود.

از آنجاکه تصحیح بوگه به تنهایی قادر به حذف اثرات تمامی جرم موجود بین سطح مبنا و نقطه قرائت گرانی نیست و تنها اثر جرم تخته بوگه را محاسبه می‌کند برای حذف اثر جرم بین پستی و بلندی‌های باقی‌مانده از تصحیح زمینگان استفاده می‌شود. تصحیح زمینگان برای اولین بار توسط هیفورد و بوئی (۱۹۱۲) در فرایند تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی در ایالات متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفت. این‌که چگونه امکان برآورد تصحیح زمینگان وجود دارد توسط ژودزیست‌هایی چون کاسینی و همکاران (۱۹۳۷)، بولارد (۱۹۳۶) و لامبرت (۱۹۳۰) مورد بررسی قرار گرفت. پس از تغییراتی که هامر (۱۹۳۹)

اثر جرم موجود بین سطح مبنا و سطح توپوگرافی محاسبه شده و سپس از آنومالی هوای آزاد کسر شود.

۱-۲-۲. تصحیح تخته بوگه و زمینگان دو مرحله‌ای در روش‌های معمول تصحیح بوگه و تصحیح زمینگان در دو مرحله صورت می‌گیرد. در این صورت برای انجام تصحیح بوگه یک صفحه همگن با گسترش افقی نامحدود و با ضخامتی برابر با ارتفاع نقطه قرائت گرانی در نظر گرفته می‌شود و اثر گرانی این صفحه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (گرکنز، ۱۹۸۹):

$$g_{sb} = \pm 2\pi\gamma\rho h \quad (3)$$

که در آن γ ثابت جهانی گرانش، h ضخامت صفحه و ρ چگالی صفحه است.

در ادامه برای رفع اثر زمینگان با توجه به نوع مسئله‌ای که با آن روبه‌رو هستیم (ابعاد منطقه مورد مطالعه، میزان تراکم داده‌ها و یا دقتی که مدنظر است)، یکی از روش‌های موجود برای تصحیح زمینگان انتخاب می‌شود. به‌طور مثال می‌توان با استفاده از نرم افزار ژئوسافت (Geosoft) که تصحیح توپوگرافی را بر پایه تئوری ارائه شده توسط کین (۱۹۶۲) و نگی (۱۹۶۶) انجام می‌دهد، محاسبه کرد.

۲-۲-۲. تصحیح بوگه و زمینگان یک مرحله‌ای در روش تک‌مرحله‌ای فرایند دو تصحیح بوگه و زمینگان به‌منظور رفع اثر تمامی جرم موجود بین نقطه مشاهده‌ای و سطح مبنا تنها در یک مرحله با استفاده از انتگرال نیوتن محاسبه می‌شود. در واقع اثر گرانی جرم واقع در زیر سطح توپوگرافی با استفاده از مدل‌سازی پیشرو به‌دست می‌آید. قوانین حاکم بر ارتباط بین داده‌های گرانی در سطح و چگالی زیرسطحی (مدل‌سازی پیشرو) مطابق روابط زیر است (بلکلی، ۱۹۹۶):

$$g_i = \gamma \int_z \int_y \int_x \rho \frac{z}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} dx dy dz \quad (4)$$

رابطه (۴) مؤلفه عمودی جاذبه گرانشی را در حالت سه بعدی نشان می‌دهد که در آن γ ثابت جهانی گرانش، ρ چگالی و x ، y و z فاصله شعاعی در آنومالی تا نقطه مشاهده هستند.

برای گسسته‌سازی زیر سطح از روش مش‌بندی کواد تری که انعطاف بالایی در تعیین سلول‌ها در نقاط دلخواه دارد، استفاده می‌شود. بنابراین با استفاده از این روش از یک‌سو فرض صفحه بی‌نهایت در محاسبه تصحیح بوگه که منجر به کاهش دقت محاسبات می‌شود، ضرورتی ندارد و از سوی دیگر با معرفی سلول‌های کوچک در نواحی مرزی به دقت بالاتری در تعیین اثر گرانی سلول‌ها دست می‌یابیم، ضمن این‌که تمامی مراحل دو تصحیح فوق‌الذکر در یک مرحله انجام می‌شود.

۲. روش‌شناسی

۱-۲. محاسبه آنومالی هوای آزاد

فرایند انجام تصحیحات گرانی‌سنجی همان‌طور که در مقدمه نیز بدان اشاره شد با تصحیحات رانه و کشند روی داده‌های خام آغاز می‌شود. پس از آن تصحیح هوای آزاد با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$\Delta g_{FA} = \pm 0.3086 * h \quad (1)$$

در این رابطه h ارتفاع نقطه مشاهده از سطح مبنا است. علامت مثبت در این رابطه برای نقاط مشاهده واقع در بالای سطح مبنا و علامت منفی برای نقاط در زیر سطح مبنا انتخاب می‌شوند.

گام بعدی حذف اثر عرض جغرافیایی روی داده‌هاست. به این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$\frac{\Delta g_L}{\Delta S} = \quad (2)$$

$\pm 0.811 \sin(2\varphi)$
که در آن Δg_L تصحیح عرض جغرافیایی، ΔS فاصله از ایستگاه مبنا و φ عرض جغرافیایی ایستگاه مبنا است. حذف اثرات عرض جغرافیایی و هوای آزاد از داده‌هایی که مراحل تصحیح کشند و رانه را پشت سر گذاشته‌اند، آنومالی هوای آزاد را می‌دهد.

۲-۲. محاسبه آنومالی بوگه کامل

در این مرحله برای محاسبه آنومالی بوگه کامل ابتدا باید

کوادتری موجود در پایگاه شبیه‌سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک که توسط دیویس و همکاران (۲۰۱۰) معرفی شده است، استفاده می‌شود.

در نهایت آنومالی بوگه کامل با کم کردن مقادیر تصحیح توپوگرافی منتج شده از مدل‌سازی گرانی پیشرو از آنومالی‌های هوای آزاد به دست می‌آیند.

مدل‌سازی پیشرو که تئوری آن به صورت مختصر ارائه شد، در پایگاه شبیه‌سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک به صورت ماژولی با عنوان شبیه‌سازی (Simulation) موجود است و در این مقاله از ماژول مذکور به منظور تعیین اثر گرانی جرم زیرسطح توپوگرافی استفاده شده است.

۳. مطالعه موردی

۳-۱. منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه و ۵۱ درجه و ۳۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۸ دقیقه و ۳۴ درجه و ۵۴ دقیقه قرار دارد. این منطقه که با کادر مشکی در شکل ۱ مشخص شده است، شامل بخش‌هایی از زاگرس مرکزی و ایران مرکزی است.

کمر بند کوهزایی زاگرس به عنوان بخش میانی رشته کوه آلپ-همالیا و در فصل مشترک دو قاره اوراسیا و گندوانا در جنوب و جنوب غرب فلات ایران واقع شده است. کوهزایی زاگرس یک کمر بند کوهزایی فعال و جوان است که در نتیجه سه واقعه ژئوتکتونیک متوالی تفسیر می‌شود (علوی، ۱۹۹۴). این کمر بند شامل سه منطقه موازی مشخص است (کمر بند ماگمایی ارومیه دختر، زون سندج-سیرجان و کمر بند چین و گسل خورده زاگرس). در شکل ۱ مناطق مذکور نمایش داده شده‌اند.

با توجه به این که داده برداری در سطح به صورت گسسته انجام می‌شود، همچنین به دلیل محدودیت‌های رایانه‌ای در محاسبه روابط انتگرالی پیوسته، انتگرال رابطه (۴) بر اساس تقسیم‌بندی زیر سطح به اشکال هندسی ساده به صورت گسسته در می‌آید. حل عددی این انتگرال برای گسسته‌سازی زیر سطح به صورت سلول‌های مکعبی توسط پلوف (۱۹۷۶) به صورت زیر ارائه شده است:

$$g_i = G \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \rho_j \mu_{ijk} \left[z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (5)$$

که در آن

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$$

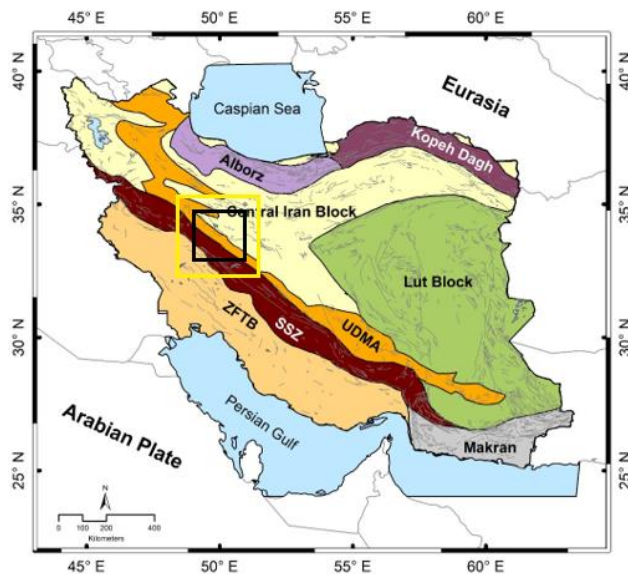
و

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$$

سمت راست رابطه (۵) اثر گرانی زامین سلول (مکعب) در آمین نقطه مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. این بخش بدون در نظر گرفتن ماتریس چگالی تحت عنوان ماتریس کرنل (G_{ij}) شناخته می‌شود. اثر گرانی تمامی سلول‌ها (N سلول) در نقطه مشاهده‌ای آم در فرم ماتریسی به صورت زیر است:

$$g_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} \rho_j \quad (6)$$

بنابراین رابطه پلوف این امکان را فراهم می‌کند که زیر سطح را به صورت سلول‌های مکعبی در نظر بگیریم و با توجه به رابطه (۶) اثر گرانی ناشی از تمامی سلول‌ها را در هر نقطه مشاهده‌ای محاسبه کنیم. از آنجا که یکی از فاکتورهای مهم در گسسته‌سازی انتخاب ابعاد و تعداد سلول‌های زیرسطحی است، گام بعدی استفاده از شیوه‌ای مناسب برای طراحی سلول‌های زیرسطحی است که بتواند پوشش مناسبی از تمام نقاط به ویژه نقاط مرزی (زیر سطح توپوگرافی) داشته باشد. در این تحقیق از روش مش‌بندی



شکل ۱. نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه‌ای ایران شامل کمر بند چین و گسل خورده زاگرس (ZFTB)، زون سندج-سیرجان (SSZ)، کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) و سایر ساختارها. کادر سیاه منطقه مورد مطالعه و کادر زرد محدوده داده‌های توپوگرافی را نشان می‌دهد.

کمر بند چین و گسل خورده زاگرس به عنوان بخش خارجی و کم تنش کوهزایی زاگرس با گسترشی تقریباً به طول ۲۰۰۰ کیلومتر و پهنای تقریبی ۳۰۰ کیلومتر بخش‌هایی از جنوب شرقی ترکیه، شمال سوریه، شمال شرقی عراق و غرب و جنوب ایران را در بر می‌گیرد. این کمر بند با داشتن میداین عظیم هیدروکربنی از پربارترین کمر بندهای چین و گسل خورده در جهان به شمار می‌آیند.

زون ایران مرکزی به عنوان ناحیه‌ای مثلثی شکل بین رشته کوه‌های البرز و کپه داغ در شمال و رشته کوه‌های زاگرس و مکران در غرب و جنوب شناخته می‌شود. پوسته ایران مرکزی قبل از این که بعد از باز شدن نئوتتیس در زمان تریاس به بخشی از اوراسیا تبدیل شود، بخشی از آفریقا بوده است. این میکروپلیت سابق، که در دوران پیش از پالئوزوئیک تشکیل شده است، هیچ نشانه‌ای از کوهزایی واریسکان نشان نمی‌دهد (دلایوه و همکاران، ۱۹۸۱). این بلوک توسط گسل‌های پوسته‌ای (گسل‌های کویر بزرگ، ناین بافت و هرپرود) به چند بلوک تقسیم شده است. این بلوک‌ها از شرق به غرب عبارت‌اند از بلوک لوت، بلوک طیس و بلوک یزد (بربریان و بربریان، ۱۹۸۱). این بلوک‌ها از گندوانا در پالئوزوئیک پسین جدا

کمان ماگمایی ارومیه دختر با پهنای تقریبی ۵۰ کیلومتر از سنگ‌های نفوذی و بیرونی به سن ائوسن-کواترنری تشکیل شده است (علوی، ۱۹۹۴). برخورد صفحه عربی با صفحه حاشیه قاره‌ای ایران مرکزی به عنوان این کمان را به وجود آورده است. فعالیت‌های آتشفشانی و نیز گسلش تراستی به سمت شمال شرقی از دلایل افزایش ضخامت پوسته قاره‌ای در این منطقه عنوان می‌شوند.

زون سندج-سیرجان در جنوب غربی کمان ماگمایی ارومیه دختر قرار دارد (استوکلین، ۱۹۶۸). پهنای این زون بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر بوده و روندهای ساختاری موازی با سایر عناصر کوهزایی زاگرس دارد. قسمت شمال شرقی زون شامل یک سری فرورفتگی‌های کشیده است که به موازات مرز جنوب غربی کمان ماگمایی ارومیه-دختر به خوبی توسعه یافته‌اند. به سمت جنوب غربی، همراه با افزایش ارتفاع، آنومالی‌های منفی بوگه و عمق موهو (دهقانی و مکریس، ۱۹۸۴؛ اسنایدر و برزنگی، ۱۹۸۶) نشان‌دهنده افزایش تا ۱۵ کیلومتر در مقایسه با ضخامت متوسط پوسته (۴۰ کیلومتر) است. این افزایش ضخامت پوسته به احتمال زیاد در نتیجه انباشتن ورقه‌های تراستی است که توالی‌های سنگی مختلفی را از قسمت شمال شرقی زون به سمت جنوب غربی آن منتقل کرده است.

اطلاعات ارتفاعی از تصاویر دانلودشده SRTM Geo Tiff موجود در وب‌سایت USGS Earth Explorer به نشانی (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) با استفاده از اسکریپت‌های Geotoolkit (Geophysical Toolkit for Geologists) موجود در سایت (<http://toolkit.geosci.xyz>) استخراج شده‌اند. داده‌های توپوگرافی استخراج شده منطقه‌ای وسیع‌تر از منطقه تحت مطالعه را پوشش می‌دهند. مربع زرد در شکل ۱ محدوده انتخاب شده برای استخراج ارتفاعات را نشان می‌دهد. قدرت تفکیک ارتفاع سطح زمین در این فایل‌ها یک آرک ثانیه معادل ۹۰ متر است. توپوگرافی حاصل از این داده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

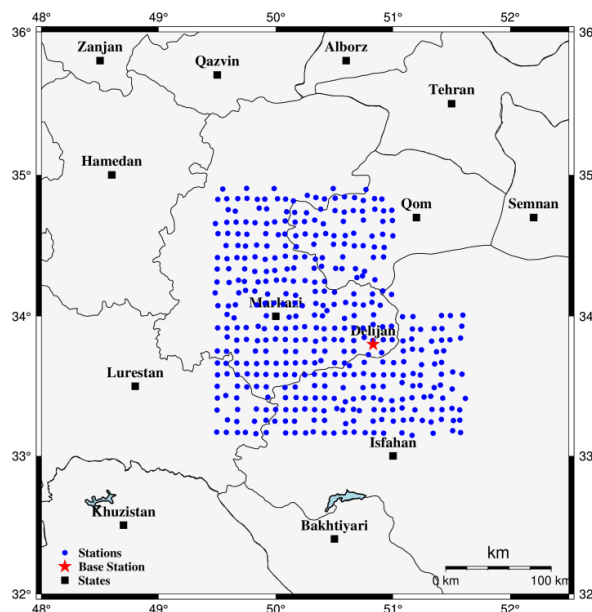
۳-۳. نتایج و بحث

گسسته‌سازی زیر سطح با استفاده از روش کواد تری در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی با استفاده از روش دو مرحله‌ای توسط سازمان نقشه‌برداری ایران در اختیار ما قرار گرفته و در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از روش تک‌مرحله‌ای روی همان داده‌ها در شکل ۶ آورده شده است.

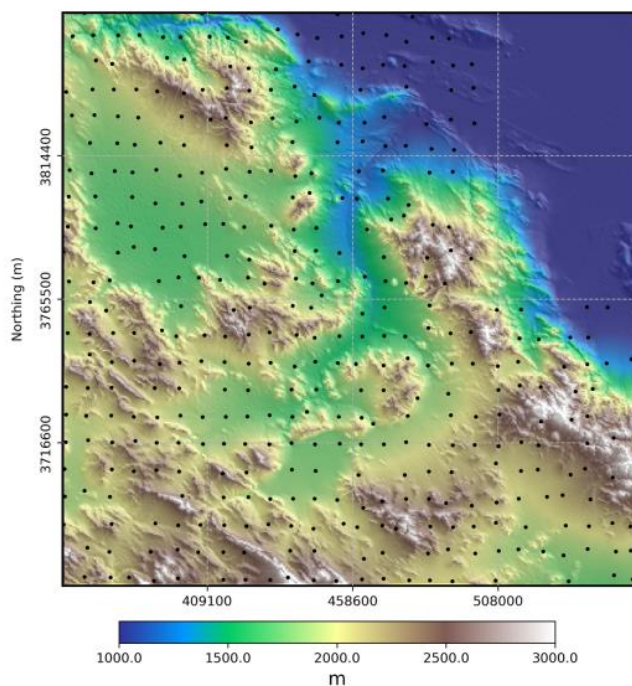
شدند، و در مزوزوئیک به اوراسیا اضافه شدند (زانچی و همکاران، ۲۰۰۹). بر خلاف نواحی اطراف، بخش غربی ایران مرکزی توسط حوضه‌های در حال فرونشست پوشیده شده و تا حد زیادی لرزه‌خیز است و بنابراین به‌عنوان یک بلوک سخت رفتار می‌کند (آلن و همکاران، ۲۰۰۴؛ گست و همکاران، ۲۰۰۷؛ جکسون و همکاران، ۱۹۹۵).

۲-۳. داده‌های مورد استفاده

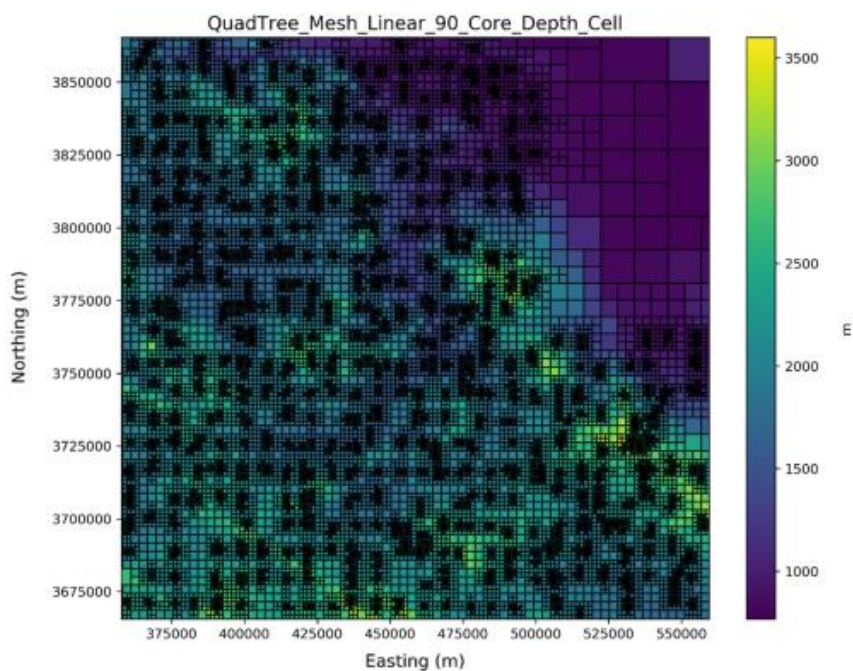
دو مجموعه داده شامل داده‌های گرانی‌سنجی و داده‌های ارتفاعی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های گرانی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از گرانی‌سنج CG5 و توسط سازمان نقشه‌برداری ملی (NCC) تهیه شده‌اند. شبکه گرانی‌سنجی شامل ۳۹۹ داده است که منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر در ۲۰۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد. فواصل نمونه‌برداری در حدود ۵ کیلومتر است و داده‌های ایستگاه مینا که توسط مرکز نقشه‌برداری ایران در دلیجان مستقر شده است، به‌عنوان گرانی مطلق مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲). مختصات نقاط با محاسبات مثلثاتی از طریق پلان‌سنجی و ارتفاع‌سنجی با دقت ۰/۰۳ متر به‌دست آمده‌اند.



شکل ۲. موقعیت شبکه داده‌های گرانی. ایستگاه مینا (دلیجان) با ستاره مشخص شده است.



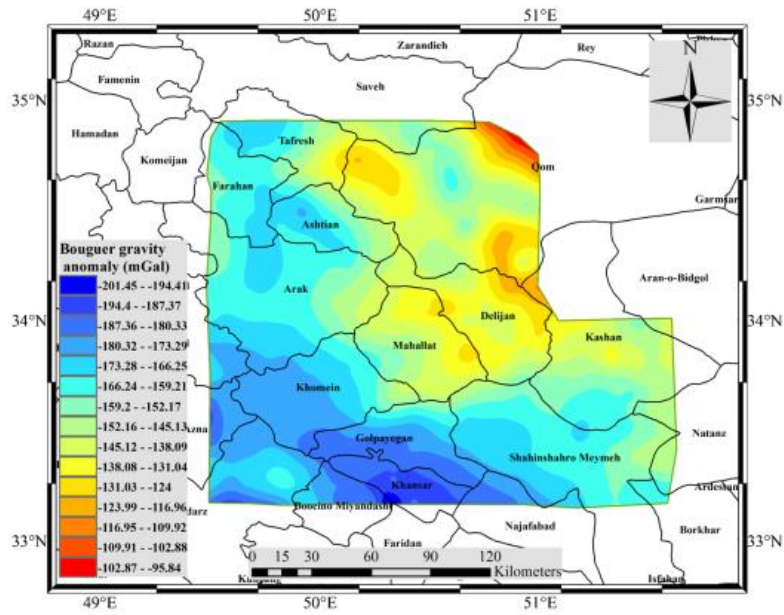
شکل ۳. نقشه توپوگرافی با استفاده از داده‌های ارتفاعی استخراج شده از تصاویر SRTM.



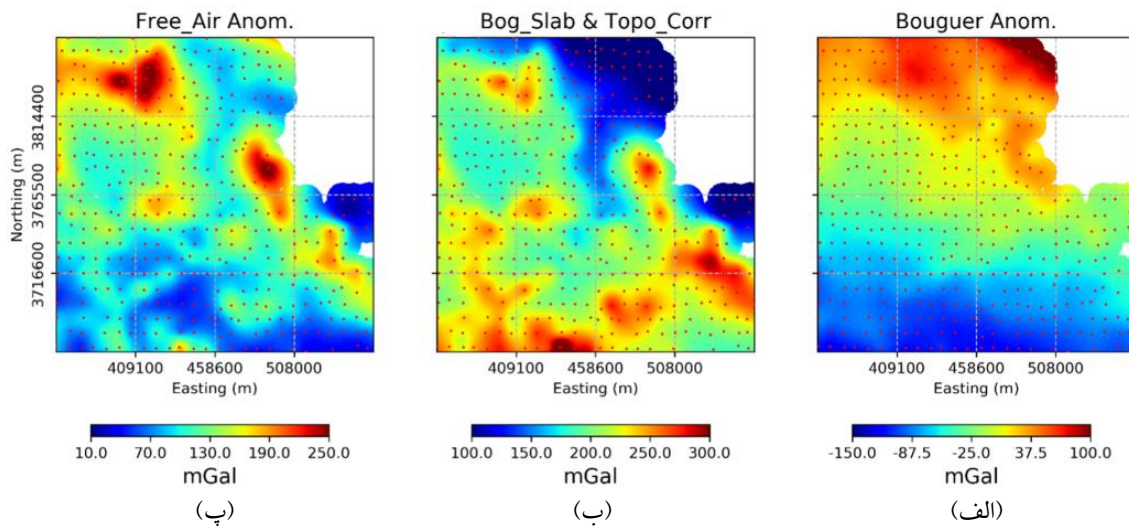
شکل ۴. کوادتری مش.

درون‌یابی شده‌اند.
 - برای محاسبه اثر گرانی بین نقطه مشاهده و سطح مبنا،
 سطح ژئوئید هموار در نظر گرفته شده است.
 - مقدار چگالی محصور بین نقطه مشاهده و سطح مبنا
 ثابت و معادل $2/67^{gr}/cm^3$ فرض شده است.

برای انجام روش تک‌مرحله‌ای چند نکته و فرض در نظر
 گرفته شده است که در ادامه می‌آید:
 - از آنجاکه داده‌های ارتفاعی استخراج شده از تصاویر
 SRTM Geo TIFF کاملاً بر نقاط مشاهده‌ای در منطقه
 مورد مطالعه منطبق نیستند، این داده‌ها برای انطباق



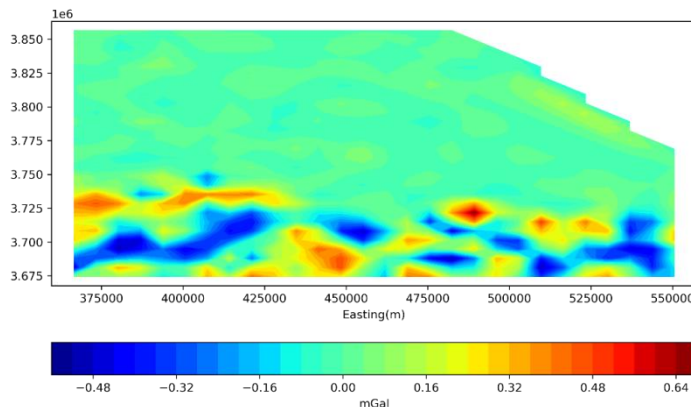
شکل ۵. نقشه بی هنجاری بوگه دریافت شده از سازمان نقشه برداری ایران.



شکل ۶. نتایج روش تصحیح تک مرحله ای. (الف) آنومالی بوگه کامل، (ب) تصحیح بوگه و توپوگرافی و (پ) آنومالی هوای آزاد.

استاندارد و روش تک مرحله ای دیده می شود. این تفاوت ها به صورت کمی در شکل ۷ نشان داده شده اند.

همان طور که در شکل های ۵ و ۶ مشخص است تفاوت هایی در نتایج تصحیحات گرانی سنجی به روش



شکل ۷. اختلاف نتایج به دست آمده از روش تصحیح تک مرحله ای و روش استاندارد.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود مقدار اختلاف نتایج از دو روش بین منفی ۰/۴۸ تا مثبت ۰/۶۴ میلی‌گال است. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از چند عامل باشد. ساده‌سازی مسئله با در نظر گرفتن فرضیات در تئوری‌های مورد استفاده یکی از این عوامل است. یکی از فرضیات مهم در نظر گرفته شده در تصحیح بوگه در روش استاندارد، فرض تخته بی‌نهایت بوگه است. این فرض از یک سو چون اثر گرانی جرم موجود بین نقطه مشاهده تا سطح دریا‌های آزاد یا همان سطح مبنا را معادل اثر گرانی تخته بوگه (صفحه‌ای افقی با طول و عرض بی‌نهایت) در نظر می‌گیرد، ساده‌سازی فرض شده از دقت و اعتبار نتایج می‌کاهد. همچنین در مقیاس‌های بزرگ با توجه به انحناى زمین، در صورت استفاده از روش تک‌مرحله‌ای نیاز به تصحیح انحنا نیز ضروری می‌شود. از سوی دیگر با توجه به این که در روابط نظری، زمین را هموار در نظر می‌گیرد، روش کاملی برای حذف اثر جرم موجود بین سطح زمین تا سطح مبنا نبوده و نیاز به تصحیح زمینگان را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. بنابراین می‌بایست مرحله دیگری برای تصحیح پستی بلندی‌های منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شود.

در تصحیح زمینگان به‌طور معمول برای محاسبه اثر پستی و بلندی‌های محدوده اطراف نقطه قرائت گرانی، تا ۲۰ کیلومتری اطراف هر نقطه را مش‌بندی می‌کنند. سپس این محدوده را به زون‌های نزدیک، میانه و دور تقسیم کرده و در ادامه برای محاسبه اثر هر زون از الگوریتم متفاوتی استفاده می‌کنند. در روش مش‌بندی به‌طور معمول اثر زون‌های میانه و دور با فرض این که تأثیر کمتری در توپوگرافی دارند با حساسیت پایین‌تری محاسبه می‌شود. همچنین ارتفاع مورد استفاده در این الگوریتم‌ها ارتفاع متوسط در هر زون است؛ بنابراین در روش‌های استاندارد دو تقریب در نظر گرفته می‌شود؛ اولی محاسبه اثر زون‌های میانه و دور با حساسیت پایین‌تر و دومی استفاده از ارتفاع متوسط به جای ارتفاع مطلق در زون‌ها. در نتیجه این تقریب‌ها هر کدام به نوبه خود در کاهش دقت نتایج مؤثرند.

این درحالی‌است که در روش تک‌مرحله‌ای اثر جرم موجود بین سطح مشاهده و سطح مبنا تنها در یک مرحله از طریق انتگرال نیوتن محاسبه می‌شود که همان‌طور که در بخش روش‌شناسی بدان اشاره شد، برای این منظور از روشی بسیار پیشرفته و انعطاف‌پذیر برای گسسته‌سازی زیر سطح استفاده می‌شود (کوادتری مش) که می‌تواند با دقت بالا اثر تمامی جرم مؤثر را محاسبه کند. از طرفی با استفاده از اطلاعات ارتفاعی در دسترس که قدرت تفکیک آنها به اندازه قابل ملاحظه‌ای بالاست و نیز الگوریتم پیشرفته شبیه‌سازی که قدرت محاسباتی بالایی دارد، نیازی نیست که از ارتفاع متوسط به‌جای ارتفاع مطلق نقاط استفاده کرد.

بنابراین روش تصحیح تک‌مرحله‌ای از یک سو با استفاده داده‌های ارتفاعی با دقت و قدرت تفکیک بالا و از سوی دیگر با حذف تقریب‌ها و فرضیات ساده‌کننده و استفاده از گسسته‌سازی بسیار دقیق در تعیین اثر گرانی جرم محصور بین سطح توپوگرافی و سطح مبنا می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند در هر فرایند گرانی‌سنجی برای به‌دست آوردن آنومالی بوگه کامل مورد استفاده قرار گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

از آنجا که تصحیحات گرانی‌سنجی در میان سایر روش‌های ژئوفیزیکی فرایندی با تعداد مراحل زیاد است، نوع روش به کار رفته در هر یک از مراحل آن می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج کلی مطالعه گرانی‌سنجی داشته باشد. بنابراین انتخاب روش‌های دقیق‌تر و استفاده از داده‌های معتبرتر از لحاظ کیفیت و کمیت و نیز حذف تقریب‌ها و فرضیات ساده‌کننده در روش مورد استفاده می‌تواند نتایج دقیق‌تری به‌همراه داشته باشد. در این تحقیق تصحیحات بوگه و توپوگرافی در یک فرایند تک‌مرحله‌ای با استفاده از ماژولی تحت‌عنوان شبیه‌سازی موجود در SimPEG محاسبه شد. سه مزیت اصلی این روش این است که اولاً فرایند تصحیح بوگه و توپوگرافی تنها در یک مرحله

وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

از سازمان نقشه‌برداری ملی (NCC) بابت در اختیار گذاشتن داده‌های گرانی‌سنجی مورد استفاده در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Alavi, M. (1994). Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran. New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229, 211–238.
- Allen, M. B. Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates *Tectonics*, 23, TC2008, doi: 10.1029/2003TC001530.
- Berberian, F., & Berberian, M. (1981). Tectono-plutonic episodes in Iran. In: Gupta HK and Delany FM (eds) Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. *American Geophysical Union Geodynamics*, Series 3, 5-32.
- Blais, J.A.R., & Ferland, R. (1984): Optimization in gravimetric terrain corrections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 505–515.
- Bott, M.H.P. (1959). The use of electronic digital computers for the evaluation of gravimetric terrain corrections. *Geophysical Prospecting*, 7, 46–54.
- Blakely, R. J. (1996). Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, *Cambridge University Press, Cambridge*.
- Cassinis, G., Dore, P., & Ballarin, S. (1937). Tavole fondamentali per la riduzione dei valori osservati della gravità.
- Cogbill, A.H. (1990). Gravity terrain corrections calculated using digital elevation models. *Geophysics*, 55, 102–106.
- Davis K., Kass, M. A., & Li Y. (2010). Rapid gravity and gravity gradiometry terrain correction via adaptive quadtree mesh discretization, *SEG Denver Annual meeting*.
- Dehghani, G., & Makris J. (1984). The gravity field and crustal structure of Iran, *Neues Jahrb, Geol. Palaeontol. Abh.*, 168, 215–229.
- Delaloye, M., Jenny J., & Stampfli G. (1981) K-Ar dating in the eastern Elburz (Iran), *Tectonophysics*, 79, T27-T36.
- Gerkens J. C. d. A. (1989). *Foundation of Exploration Geophysics*.
- Guest B., Guest A., and Axen G. (2007). Late Tertiary tectonic evolution of northern Iran: A case for simple crustal folding, *Global Planet. Change*, 58(1–4), 435–453, DOI:10.1016/j.gloplacha.2007.02.014.
- Hammer, S. (1939). Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, 4(3), 184–194.
- Hayford, J.F., & Bowie, W. (1912). The Effect of Topography and Isostatic Compensation upon the Intensity of Gravity. U.S.
- Herrera-Barrientos, J., & Fernandez, R. (1991). Gravity terrain using Gaussian surfaces. *Geophysics*, 56, 724–730.
- Jackson J., Haines J., & Holt W. (1995). The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran, *J. Geophysics. Res.*, 100(B8), 15205–15219, DOI: 10.1029/95JB01294.
- Kane, M. F. (1962). A comprehensive system of terrain correction using a digital computer: *Geophysics*, 27(4), 455–462.
- Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics*, 31(2), 362–371.
- Parker, R.L. (1996). Improved Fourier terrain correction: Part II. *Geophysics*, 61, 365–372.
- Pluff, D. (1976). Gravity and Magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections, *Geophysics*, 41, 727–741.
- Rollin, K.E. (1990). Terrain corrections for gravity stations using a Digital Terrain Model. *British Geological Survey Technical Report WKr89r8*.
- Sideris M.G. A. (1985). Fast Fourier Transform Method for computing terrain correction. *Manuscripta Geodaetica*. 10, 66–73.
- Snyder D. B., & Barazangi M. (1986). Deep crustal structure and flexure of the Arabian plate beneath the Zagros collisional mountain belt as inferred from gravity observations, *Tectonics*, 5(3), 361–373, DOI:10.1029/TC005i003p00361.
- Stöcklin J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. *Amer Assoc Petroleum Geol Bull*, 52 (7), 1229–1258.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A. (1976). Applied geophysics: *Cambridge Univ. Press, Cambridge*, 860 p.

Zanchi, A., Zanchetta S., Garzanti E., Balini M., Berra F., Mattei M., & Muttoni G. (2009). The Cimmerian evolution of the Naxhlak–Anarak area, central Iran, and its bearing for the

reconstruction of the history of the Eurasian margin, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 312, 261–286, DOI:10.1144/SP312.13.