

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

مشخصات نویسنده‌گان

ردیف	نام و نام خانوادگی	وابستگی سازمانی
۱	وحید ابراهیم زاده اردستانی	استاد/فیزیک زمین/ژئوفیزیک/تهران/ایران
۲	منصوره خالقی یله گنبدی	دانشجوی دکتری / فیزیک زمین/ژئوفیزیک/تهران/ایران

### چکیده

در این تحقیق برای به دست آوردن آنومالی بوگه کامل برخلاف روش معمول در تصحیح داده‌ها که در آن حذف اثرات جرم موجود بین سطح مبنای سطح توپوگرافی در یک فرآیند گرانی سنجی در دو مرحله شامل تصحیح بوگه و تصحیح زمینگان انجام می‌شود، این فرآیند به صورت تک مرحله‌ای انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا حجم محصور بین سطح مبنای سطح زمین با استفاده از روش مش بنده کواد تری (Quad tree mesh) موجود در پایگاه شبیه سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک (SimPEG) که امکان تعریف سلولهای کوچک در نواحی مرزی و در نتیجه دقت بالا در پوشش توپوگرافی را دارد، گستته 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 مش بنده صورت گرفته برای موقعیت مراکز مش‌ها درونیابی می‌شوند. پس از آن اثر گرانی جرم با استفاده از مدلسازی پیشرو توسط مازول شبیه سازی (Simulation) تعییه شده در پایگاه شبیه سازی 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 به دست آمده از روش تک مرحله‌ای در مقایسه با روش استاندارد بین منفی  $0/48$  تا مثبت  $0/64$  میلی‌گال است که رقم قابل توجهی است. با توجه به محدودیت‌ها و خطاهای ناشی از فرضیات ساده کننده در روش استاندارد مانند خطای ناشی از انحنای زمین، استفاده از ارتفاع متوسط به جای ارتفاع واقعی در هر نقطه و فرض تخته‌بی نهایت بوگه نتایج به دست آمده از روش تک مرحله‌ای قابل توجیه است.

**واژگان کلیدی:** تصحیح بوگه، تصحیح توپوگرافی، کواد تری مش، مدلسازی پیشرو، SimPEG

به طور معمول پس از طرح یک مساله ژئوفیزیکی مراحل طراحی شبکه، برداشت داده، تصحیح داده، پردازش داده و تفسیر داده به ترتیب اجرا می شوند. در روش گرانی سنجی در مقایسه با سایر روش های ژئوفیزیکی مرحله تصحیح داده ها طولانی تر و در عین حال حساس تر نیز هست. تصحیح داده ها در روش گرانی سنجی شامل تصحیحات کشنده، رانه، هوای آزاد، عرض جغرافیایی، بوگه و زمینگان است. این تصحیحات به ترتیب به منظور رفع اثرات گرانش ماه بر داده های گرانی (گرکنر، ۱۹۸۹) در بازه زمانی برداشت داده، بر هم خوردن تنظیمات دستگاه گرانی سنج در اثر جابه جایی از یک نقطه برداشت داده به نقطه دیگر، حذف اثر تغییرات ارتفاعی نقاط برداشت داده (لامبرت، ۱۹۳۰)، حذف اثر افزایش گرانی در اثر چرخش زمین و برآمدگی های استوایی در شبکه هایی که گسترش شمالی-جنوبی آن ها به گونه ای است که در عرض های جغرافیایی متفاوتی قرار می گیرند، حذف اثر جرم بین نقطه برداشت داده تا ژئوئید معادل تخته بوگه (گرکنر، ۱۹۸۹) و درنهایت حذف اثر جرم باقیمانده بین تخته بوگه و سطح توپوگرافی (تلفورد، ۱۹۷۶) انجام می شود. همچنین برای شرایطی که برداشت داده ضمن حرکت انجام می شود تصحیح دیگری به نام اتووش (گرکنر، ۱۹۸۹) برای رفع اثرات حرکتی که در اثر نیروی کوریولیس بر گرانی سنج در برداشت های دریایی و هوایی وارد می شود، ضروری می شود. در مورد برداشت های بزرگ مقیاس نیز حذف اثرات منطقه ای با استفاده از تصحیح ایزوستازی یک الزام است. از طرفی برای پروژه هایی با مقیاس کوچک که در مناطق شهری انجام می شود، تصحیح عوارض مصنوعی نیز به منظور رفع اثر ساختمان ها در داده ها انجام می شود. بنابراین تمیز کردن داده ها از اثرات مختلف در گرانی سنجی از یک سو فرآیندی طولانی و زمانبر بوده و از سوی دیگر به دلیل آنکه خطایی کوچک در هر یک از مراحل تصحیح داده ها می تواند اثر بزرگی بر پاسخ ها داشته باشد، دقت در انجام هر یک از مراحل آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه یافتن روش هایی ساده تر و در عین حال دقیق تر کمک بزرگی برای بهبود نتایج کلی در یک فرآیند گرانی سنجی خواهد بود.

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

از آنجا که تصحیح بوگه به تنها یی قادر به حذف اثرات تمامی جرم موجود بین سطح مبنا و نقطه قرائت گرانی نیست و تنها اثر جرم تخته بوگه را محاسبه می کند برای حذف اثر جرم بین پستی و بلندی های باقیمانده از تصحیح زمینگان استفاده می شود. تصحیح زمینگان برای اولین بار توسط هیفورد و بوئی (۱۹۱۲) در فرآیند تفسیر داده های گرانی سنگی در ایالات متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفت. اینکه چگونه امکان برآورد تصحیح زمینگان وجود دارد توسط ژئودزیست هایی چون کاسینی (۱۹۳۷)، بولارد (۱۹۳۶) و لامبرت (۱۹۳۰) مورد بررسی قرار گرفت. پس از تغییراتی که هامر (۱۹۳۹) 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 بررسی های گرانشی صورت گرفت. در نهایت روش های متعددی برای انجام تصحیح زمینگان ارایه شد که با توجه به ابعاد منطقه مورد مطالعه و میزان دقیقی که مدنظر است، یکی از این روش ها مورد استفاده قرار می گیرد.

روش زون بندی (کین، ۱۹۶۲) در پژوهه هایی که به دقت بالا نیاز دارند مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش اطراف نقطه قرائت گرانی به زون های نزدیک، میانه و دور تقسیم شده و اثر گرانی هریک از این زون ها با استفاده از روابط فیزیکی محاسبه می شوند. 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 زمین شناسی که دقت های بالا چندان مدنظر نیست از روشی تحت عنوان جدول هامر (هامر، ۱۹۳۹) استفاده می شود که در آن دوایر متحدمراکزی اطراف نقطه قرائت گرانی در نظر گرفته می شوند که توسط خطوط شعاعی به قطاع هایی تقسیم می شوند. مقادیر تصحیح برای این قطاع ها به طور مستقیم از جدولی به نام هامر که اکنون حدود هفتاد سال از عمر آن می گذرد، قابل استخراج است.

علاوه بر روش های مذکور که عمدتاً ترسیمی هستند، روش های دیگری مبتنی بر محاسبات کامپیوتری نیز ارایه شدند (بوت ۱۹۵۹؛ بلیز و فرلند ۱۹۸۴). همچنین با ظهور کامپیوتراهای مدرن تصحیح زمینگان را می توان از طریق یک مدل زمین دیجیتال (DTM) (کوییل ۱۹۹۰؛ رولین، ۱۹۹۰) یا از طریق تطبیق توپوگرافی با مجموعه ای از توابع گوسی پایه (هررا-بارینتوس و فرناندز، ۱۹۹۱) و یا حتی خیلی سریعتر با استفاده از روش های 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 می شود. بدین منظور برای گستته سازی زیر سطح از روش مش بندی کواد تری که انعطاف بالایی در تعیین سلول ها در نقاط دلخواه دارد، استفاده می شود. بنابراین با استفاده از این روش از یک سو فرض صفحه بی نهایت در محاسبه تصحیح بوگه که

منجر به کاهش دقت محاسبات می شد، ضرورتی ندارد و از سوی دیگر با معرفی سلول های کوچک در نواحی مرزی به دقت بالاتری در تعیین اثر گرانی سلول ها دست می باییم، ضمن اینکه تمامی مراحل دو تصحیح فوق الذکر در یک مرحله انجام می شود.

## 2-روش شناسی

### 1-محاسبه آنومالی هوای آزاد

فرآیند انجام تصحیحات گرانی سنجی همانظور که در مقدمه نیز بدان اشاره شد با تصحیحات رانه و کشنید روی داده های خام آغاز می شود. پس از آن تصحیح هوای آزاد با استفاده از رابطه زیر انجام می شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

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

در این رابطه  $h$  ارتفاع نقطه مشاهده از سطح مینا است. علامت مثبت در این رابطه برای نقاط مشاهده واقع در بالای سطح مینا و علامت منفی برای نقاط در زیر سطح مینا انتخاب می شوند.

گام بعدی حذف اثر عرض جغرافیایی روی داده هاست. به این منظور از رابطه زیر استفاده می شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$\frac{\Delta g_L}{\Delta S} = \pm 0.811 \sin(2\varphi) \quad (2)$$

که در آن  $\Delta g_L$  تصحیح عرض جغرافیایی،  $\Delta S$  فاصله از ایستگاه مینا و  $\varphi$  عرض جغرافیایی ایستگاه مینا است.

حذف اثرات عرض جغرافیایی و هوای آزاد از داده هایی که مراحل تصحیح کشنید و رانه را پشت سر گذاشته اند، آنومالی هوای آزاد را می دهد.

### 2-محاسبه آنومالی بوگه کامل

در این مرحله برای محاسبه آنومالی بوگه کامل ابتدا باید اثر جرم موجود بین سطح مینا و سطح توپوگرافی محاسبه شده و سپس از آنومالی هوای آزاد کسر شود.

#### 1-تصحیح تخته بوگه و زمینگان دو مرحله ای

در روش های معمول تصحیح بوگه و تصحیح زمینگان در دو مرحله صورت می گیرد. در این صورت برای انجام تصحیح بوگه یک صفحه همگن با گسترش افقی نامحدود و با ضخامتی برابر با ارتفاع نقطه فرائت گرانی در نظر گرفته می شود و اثر گرانی این صفحه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود (گرکتر، ۱۹۹۶):

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

که در آن  $\gamma$  ثابت جهانی گرانش،  $h$  ضخامت صفحه و  $\rho$  چگالی صفحه است.

در ادامه برای رفع اثر زمینگان با توجه به نوع مساله ای که با آن روبرو هستیم (بعد منطقه مورد مطالعه، میزان تراکم داده ها و یا دقیقی که مدنظر است)، یکی از روش های موجود برای تصحیح زمینگان انتخاب می شود. به طور مثال می توان با استفاده از نرم افزار ژئوسافت (Geosoft) که تصحیح توپوگرافی را بر پایه تئوری ارایه شده توسط کین (۱۹۶۲) و نگی (۱۹۶۶) انجام می دهد، محاسبه کرد.

## ۲-۲-۲ تصحیح بوگه و زمینگان یک مرحله ای

در روش تک مرحله ای فرآیند دو تصحیح بوگه و زمینگان به منظور رفع اثر تمامی جرم موجود بین نقطه مشاهده ای و سطح مانا تنها در یک مرحله با استفاده از انتگرال نیوتون محاسبه می شود. در واقع اثر گرانی جرم واقع در زیر سطح توپوگرافی با استفاده از مدلسازی پیشرو به دست می آید. قوانین حاکم بر ارتباط بین داده های گرانی در سطح و چگالی زیرسطحی (مدلسازی پیشرو) مطابق روابط زیر است (بلکلی، ۱۹۹۶):

$$g_i = \gamma \int_z \int_y \int_x \rho \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dy dz \quad (5)$$

رابطه (۵) مولفه عمودی جاذبه گرانشی را در حالت سه بعدی نشان می دهد که در آن  $\gamma$  ثابت جهانی گرانش،  $\rho$  چگالی و  $x$ ,  $y$  و  $z$  فاصله شعاعی در آنومالی تا نقطه مشاهده هستند.

با توجه به اینکه داده برداری در سطح به صورت گستته انجام می شود، همچنین به دلیل محدودیت های رایانه ای در محاسبه روابط انتگرالی پیوسته، انتگرال رابطه (۵) بر اساس تقسیم بندی زیر سطح به اشکال هندسی ساده به صورت گستته در می آید. حل عددی این انتگرال برای گستته سازی زیر سطح به صورت سلول های مکعبی توسط پلوف (۱۹۷۶) به صورت زیر ارایه شده است:

$$g_i = G \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \rho_j \mu_{ijk} \left[ z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_i) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (6)$$

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 (۶) اثر گرانی زامین سلول (مکعب) در آمین نقطه مشاهده ای را نشان می دهد. این بخش بدون در نظر گرفتن ماتریس چگالی تحت عنوان ماتریس کرنل ( $G_{ij}$ ) شناخته می شود. اثر گرانی تمامی سلول ها (N سلول) در نقطه مشاهده ای آم در فرم ماتریسی به صورت زیر است:

$$g_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} \rho_j \quad (7)$$

بنابراین رابطه پلوف این امکان را فراهم می کند که زیر سطح را به صورت سلول های مکعبی در نظر بگیریم و با توجه به رابطه (7) اثر گرانی ناشی از تمامی سلول ها را در هر نقطه مشاهده ای محاسبه کنیم. از آنجا که یکی از فاکتورهای مهم در گستاخ انتخاب بعد و تعداد سلول های زیرسطحی است، گام بعدی استفاده از شیوه ای مناسب برای طراحی سلول های زیرسطحی است که بتواند پوشش مناسبی از تمام نقاط به ویژه نقاط مرزی (زیر سطح توپوگرافی) داشته باشد. در این تحقیق از روش مش بنده کوادتری موجود در پایگاه شبیه سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک که توسط دیویس و همکاران (۲۰۱۰) معرفی شده است، استفاده می شود.

در نهایت آنومالی بوگه کامل با کم کردن مقادیر تصحیح توپوگرافی (منتج شده از مدلسازی گرانی پیشرو) از آنومالی های هوای آزاد به دست می آیند.

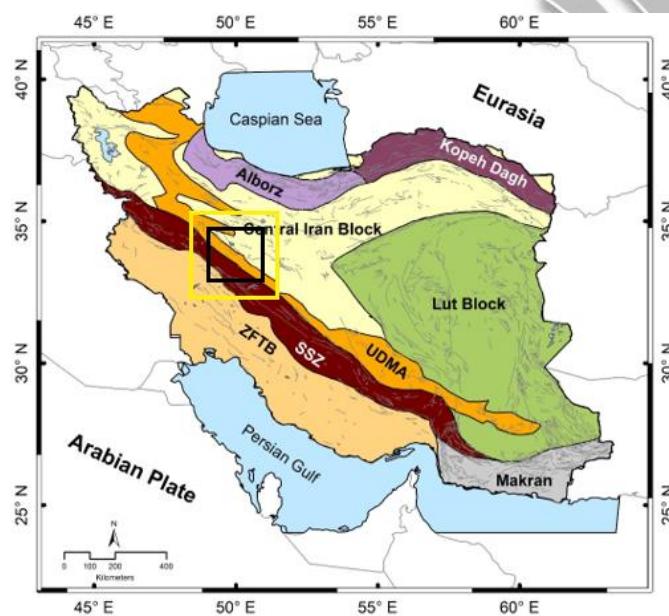
مدلسازی پیشرو که تئوری آن به صورت مختصر ارایه شد، در پایگاه شبیه سازی و تخمین پارامتر در ژئوفیزیک به صورت مأذولی با عنوان شبیه سازی (Simulation) موجود است و در این مقاله از مأذول مذکور به منظور تعیین اثر گرانی جرم زیرسطح توپوگرافی استفاده شده است.

### 3- مطالعه موردی

#### ۱-۳ 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 بخش هایی از زاگرس مرکزی و ایران مرکزی است.

کمریند کوهزایی زاگرس به عنوان بخش میانی رشته کوه آلب-هیمالیا و در فصل مشترک دو قاره اوراسیا و گندوانا در جنوب و جنوب غرب فلات ایران واقع شده است. کوهزایی زاگرس یک کمریند کوهزایی فعال و جوان است که در نتیجه سه واقعه ژئوتکتونیکی متوالی تفسیر می شود (علوی، ۱۹۹۴). این کمریند شامل سه منطقه موازی مشخص است (کمریند ماگمایی ارومیه دختر، زون سنتدج - سیرجان و کمریند چین و گسل خورده زاگرس). در شکل (۱) مناطق مذکور نمایش داده شده اند.



شکل ۱. نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه‌ای ایران شامل کمریند چین و گسل خورده زاگرس (ZFTB)، زون سنتدج-سیرجان (SSZ)، کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) و سایر ساختارها. کادر سیاه منطقه مورد مطالعه و کادر زرد محدوده داده های توپوگرافی را نشان می دهد.

کمان ماگمایی ارومیه دختر با پهنه‌ای تقریبی ۵۰ کیلومتر از سنگهای نفوذی و بیرونی به سن اوسن - کواترنری تشکیل شده است (علوی، ۱۹۹۴). برخورد صفحه عربی با صفحه حاشیه قاره ای ایران مرکزی به عنوان این کمان را به وجود آورده است. فعالیت های آتشفسانی و نیز گسلش تراستی به سمت شمال شرقی از دلایل افزایش ضخامت پوسته قاره ای در این منطقه عنوان می شوند.

زون سنتدج - سرجان در جنوب غربی کمان ماگمایی ارومیه دختر قرار دارد (استوکلین، ۱۹۶۸). پهنه‌ای 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 فرورفتگی

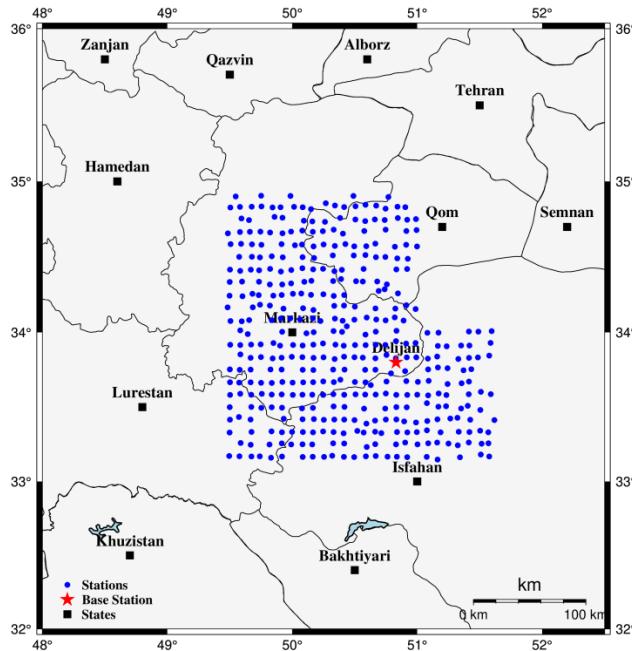
های کشیده است که به موازات مرز جنوب غربی کمان مانگامایی ارومیه-دختر به خوبی توسعه یافته اند. به سمت جنوب غربی، همراه با افزایش ارتفاع، آنومالی های منفی بوگه و عمق موهو (دهقانی و مکریس، ۱۹۸۳؛ اسنایدر و برزنگی، ۱۹۸۶) نشان دهنده افزایش تا ۱۵ کیلومتر در مقایسه با ضخامت متوسط پوسته (۴۰ کیلومتر) است. این افزایش ضخامت پوسته به احتمال زیاد در نتیجه انباشتن ورقه های تراستی است که توالی های سنگی مختلفی را از قسمت شمال شرقی زون به قسمت جنوب غربی آن منتقل کرده است.

کمربند چین و گسل خورده زاگرس به عنوان بخش خارجی و کم تنش کوهزایی زاگرس با گسترشی تقریباً به طول ۲۰۰۰ کیلومتر و پهنهای تقریبی ۳۰۰ کیلومتر بخش هایی از جنوب شرقی ترکیه، شمال سوریه، شمال شرقی عراق و غرب و جنوب ایران را در بر می گیرد. این کمربند با داشتن میادین عظیم هیدروکربنی از پربارترین کمربندهای چین و گسل خورده در جهان به شمار می آیند.

زون ایران مرکزی به عنوان ناحیه ای مثالی شکل بین رشته کوه های البرز و کپه داغ در شمال و رشته کوه های زاگرس و مکران در غرب و جنوب شناخته می شود. پوسته ایران مرکزی قبل از اینکه بعد از باز شدن نئوتیس 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 نشانه ای از کوهزایی واریسکان نشان نمی دهد (دلالویه و همکاران، ۱۹۸۱). این بلوک توسط گسل های پوسته ای (گسل های کویر بزرگ، نایین بافت و هریرود) به چند بلوک تقسیم شده است. این بلوک ها از شرق به غرب عبارتند از بلوک لوت، بلوک طبس و بلوک یزد (بربریان و همکاران، ۱۹۸۱). این بلوک ها از گندوانا در پالئوزوئیک پسین جدا شدند، و در مژوزوئیک به اوراسیا اضافه شدند (زانچی، ۲۰۰۹). برخلاف نواحی اطراف، بخش غربی ایران مرکزی توسط حوضه های در حال فرونشت پوشیده شده و تا حد زیادی لرزه خیز است و بنابراین به عنوان یک بلوک سخت رفتار می کند (آلن و همکاران، ۲۰۰۴؛ گست و همکاران، ۲۰۰۷؛ جکسون و همکاران، ۱۹۹۵).

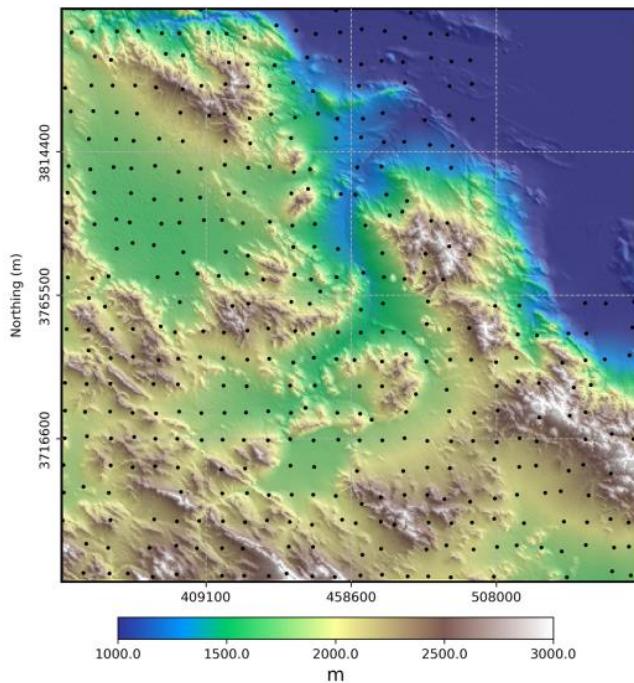
## ۲-۳ داده های مورد استفاده

دو مجموعه داده شامل داده های گرانی سنجی و داده های ارتفاعی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. داده های گرانی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از گرانی سنج CG5 و توسط سازمان نقشه برداری ملی (NCC) تهیه شده اند. شبکه گرانی سنجی شامل ۳۹۹ داده است که منطقه ای به وسعت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر در ۲۰۰ کیلومتر را پوشش می دهد. فواصل نمونه برداری در حدود ۵ کیلومتر است و داده های ایستگاه مینا که توسط مرکز نقشه برداری ایران در دلیجان مستقر شده است، به عنوان گرانی مطلق مورد استفاده قرار می گیرند (شکل ۲). مختصات نقاط با محاسبات مثلثاتی از طریق پلان سنجی و ارتفاع سنجی با دقت  $0.003$  متر به دست آمده اند.



شکل ۲. موقعیت شبکه داده های گرانی، ایستگاه مبنا (دلیجان) با ستاره مشخص شده است.

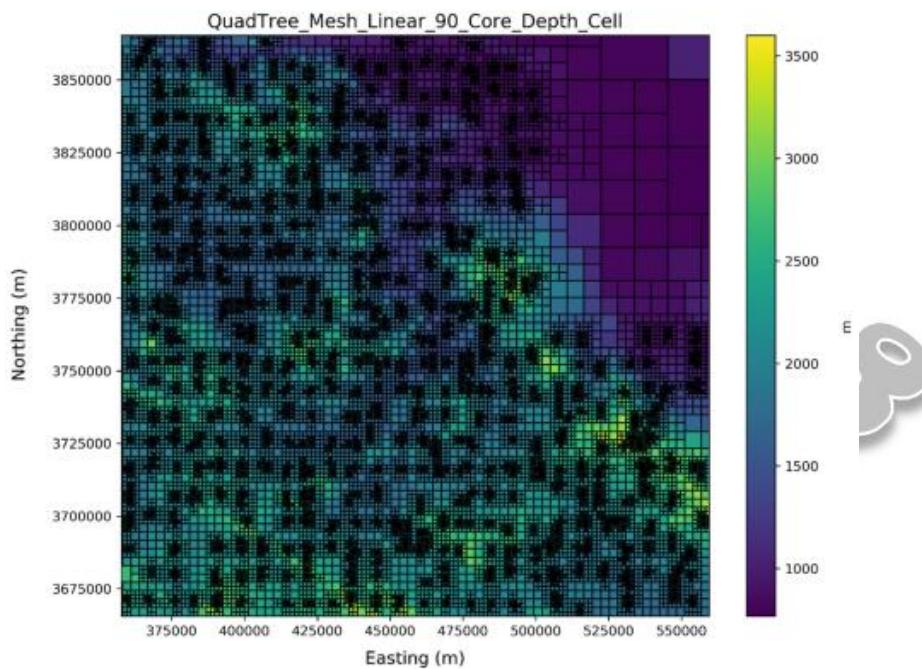
اطلاعات ارتفاعی از تصاویر دانلود شده SRTM Geo Tiff موجود در وب سایت USGS Earth Explorer به نشانی (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) با استفاده از اسکریپت های (Geophysical Toolkit for Geologists) موجود در سایت (<http://toolkit.geosci.xyz>) استخراج شده اند. داده های توپوگرافی استخراج شده منطقه ای وسیع تر از منطقه تحت مطالعه را پوشش می دهند. مربع زرد در شکل (۱) محدوده انتخاب شده برای استخراج ارتفاعات را نشان می دهد. قدرت تفکیک ارتفاع سطح زمین در این فایل ها یک آرک ثانیه معادل ۹۰ متر است. توپوگرافی حاصل از این داده ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



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

### ۳-۳ بحث و بررسی نتایج

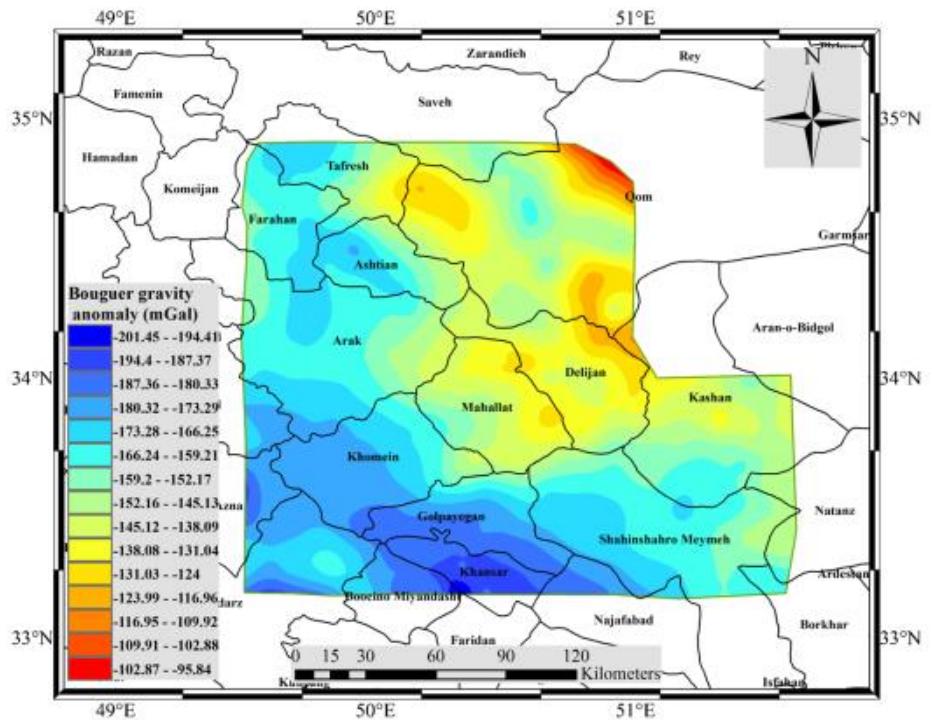
گستته سازی زیر سطح با استفاده از روش کواد تری در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از تصحیح داده های گرانی سنگی با استفاده از روش دو مرحله ای توسط سازمان نقشه برداری ایران در اختیار ما قرار گرفته و در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از روش تک مرحله ای روی همان داده ها در شکل (۶) آورده شده است.



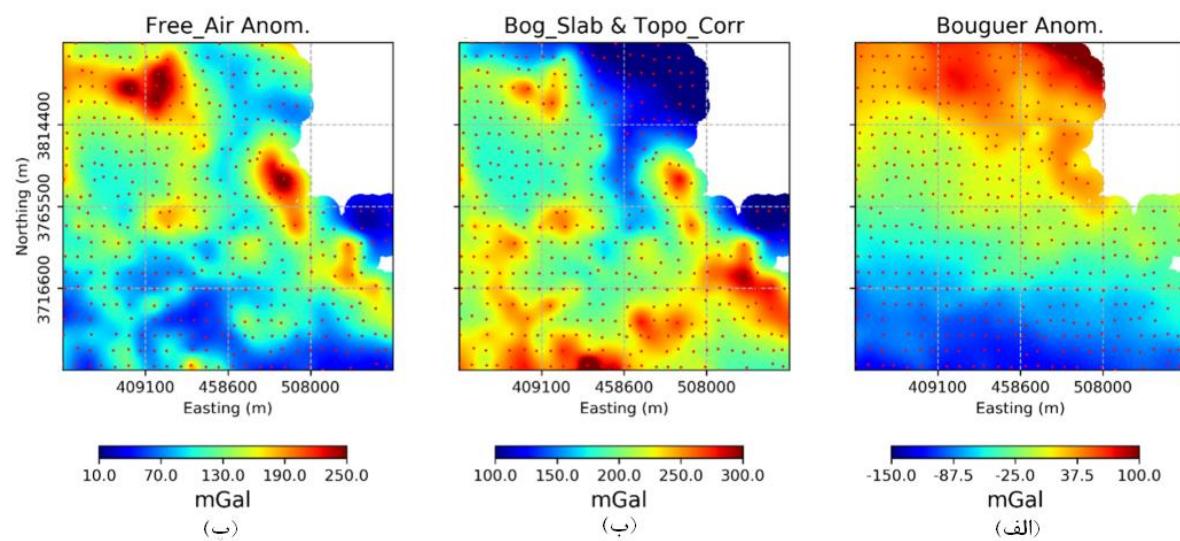
شکل ۴. کوادتری مش

برای انجام روش تک مرحله ای چند نکته و فرض در نظر گرفته شده است که در ادامه می آید:

- از آنجا که داده های ارتفاعی استخراج شده از تصاویر SRTM Geo TIFF کاملا بر نقاط مشاهده ای در منطقه مورد مطالعه منطبق نیستند، این داده ها برای انطباق درونیابی شده اند.
- برای محاسبه اثر گرانی بین نقطه مشاهده و سطح مینا، سطح ژئوئید هموار در نظر گرفته شده است.
- مقدار چگالی محصور بین نقطه مشاهده و سطح مینا ثابت و معادل  $2/67^{gr}/cm^3$  فرض شده است.

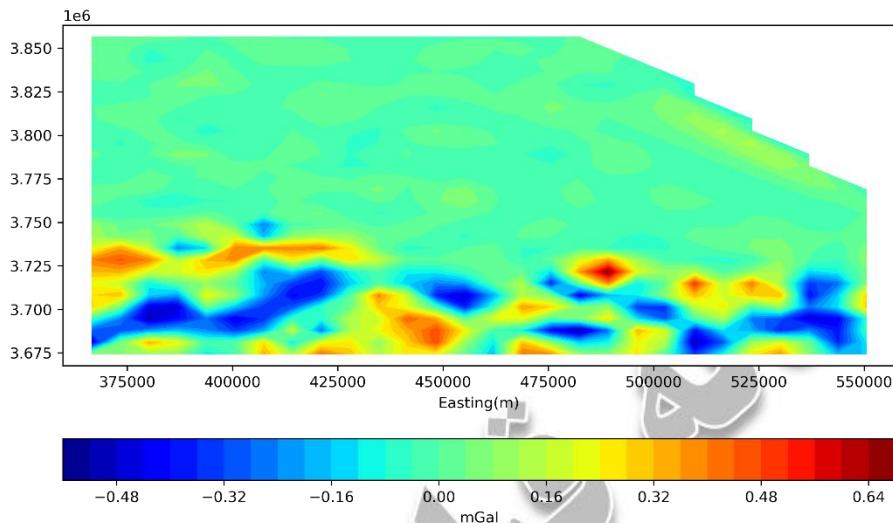


شکل ۵. نقشه بی هنجاری بوگه دریافت شده از سازمان نقشه برداری ایران



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

همان طور که در شکل های (۵) و (۶) مشخص است تفاوت هایی در نتایج تصحیحات گرانی سنجی به روش استاندارد و روش تک مرحله ای دیده می شود. این تفاوت ها به صورت کمی در شکل (۷) نشان داده شده اند.



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

همانطور که در شکل (۷) دیده می شود مقدار اختلاف نتایج از دو روش بین منفی  $-0.48$  تا مثبت  $0.64$  میلی گال است. این تفاوت ها می توانند ناشی از چند عامل باشد. ساده سازی مساله با درنظر گرفتن فرضیات در تئوری های مورد استفاده یکی از این عوامل است. یکی از فرضیات مهم درنظر گرفته شده در تصحیح بوگه در روش استاندارد، فرض تخته بی نهایت بوگه است. این فرض از یک سو چون اثر گرانی جرم موجود بین نقطه مشاهده تا سطح دریاهای آزاد یا همان سطح مبنای را معادل اثر گرانی تخته بوگه (صفحه ای افقی با طول و عرض بی نهایت) درنظر می گیرد، ساده سازی فرض شده از دقت و اعتبار نتایج می کاهد. همچنین در مقیاس های بزرگ با توجه به انحنای زمین، در صورت استفاده از روش تک مرحله ای نیاز به تصحیح انحنا نیز ضروری می شود. از سوی دیگر با توجه به اینکه در روابط تئوری، زمین را هموار درنظر می گیرد، روش کاملی برای حذف اثر جرم موجود بین سطح زمین تا سطح مبنای نبوده و نیاز به تصحیح زمینگان را اجتناب ناپذیر می سازد. بنابراین می بایست مرحله دیگری برای تصحیح پستی بلندی های منطقه مورد مطالعه درنظر گرفته شود.

در تصحیح زمینگان به طور معمول برای محاسبه اثر پستی و بلندی های محدوده اطراف نقطه قرائت گرانی، تا ۲۰ کیلومتری اطراف هر نقطه را مش بندی می کنند. سپس این محدوده را به زون های نزدیک، میانه و دور تقسیم کرده و در ادامه برای محاسبه اثر هر زون از الگوریتم متفاوتی استفاده می کنند. در روش مش بندی به طور معمول اثر زون های میانه و دور با فرض اینکه تاثیر کمتری در توپوگرافی دارند با حساسیت پایین تری محاسبه می شود. همچنین ارتفاع مورد استفاده در این الگوریتم ها ارتفاع متوسط در هر زون

است. بنابراین در روش های استاندارد دو تقریب در نظر گرفته می شود؛ اولی محاسبه اثر زون های میانه و دور با حساسیت پایین تر و دومی استفاده از ارتفاع متوسط به جای ارتفاع مطلق در زون ها. درنتیجه این تقریب ها هر کدام به نوبه خود در کاهش دقت نتایج موثرند.

این درحالی است که در روش تک مرحله ای اثر جرم موجود بین سطح مشاهده و سطح مبنا تنها در یک مرحله از طریق انتگرال نیوتون محاسبه می شود که همان طور که در بخش روش شناسی بدان اشاره شد، برای این منظور از روشی بسیار پیشرفته و انعطاف پذیر برای گستته سازی زیر سطح استفاده می شود (کوادتری مش) که می تواند با دقت بالا اثر تمامی جرم موثر را محاسبه کند. از طرفی با استفاده از اطلاعات ارتفاعی در دسترس که قدرت تفکیک آن ها به اندازه قابل ملاحظه ای بالاست و نیز الگوریتم پیشرفته شبیه سازی که قدرت محاسباتی بالایی دارد، نیازی نیست که از ارتفاع متوسط به جای ارتفاع مطلق نقاط استفاده کرد.

بنابراین روش تصحیح تک مرحله ای از یک سو با استفاده داده های ارتفاعی با دقت و قدرت تفکیک بالا و از سوی دیگر با حذف تقریب ها و فرضیات ساده کننده و استفاده از گستته سازی بسیار دقیق در تعیین اثر گرانی جرم محصور بین سطح توپوگرافی و سطح مبنا می تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در هر فرآیند گرانی سنجی برای به دست آوردن آنومالی بوگه کامل مورد استفاده قرار گیرد.

#### 4- نتیجه گیری

از آنجا که تصحیحات گرانی سنجی در میان سایر روش های ژئوفیزیکی فرآیندی با تعداد مراحل زیاد است، نوع روش به کار رفته در هر یک از مراحل آن می تواند تاثیر زیادی بر نتایج کلی مطالعه گرانی سنجی داشته باشد. بنابراین انتخاب روش های دقیق تر و استفاده از داده های معتبرتر از لحاظ کیفیت و کمیت و نیز حذف تقریب ها و فرضیات ساده کننده در روش مورد استفاده می تواند نتایج دقیق تری به همراه داشته باشد. در این تحقیق تصحیحات بوگه و توپوگرافی در یک فرآیند تک مرحله ای با استفاده از مازوی تخت عنوان شیوه سازی موجود در SimPEG محاسبه شد. سه مزیت اصلی این روش این است که اولاً فرآیند تصحیح بوگه و توپوگرافی تنها در یک مرحله صورت گرفته است، دوماً روش مش بندی کواد تری مورد استفاده برای گستته سازی زیر سطح به دلیل آنکه امکان تعریف سلول هایی با ابعاد دلخواه را دارد، در بازیابی زیر سطح توپوگرافی بسیار خوب عمل کرده و دیگر نیاز نیست از فرآیندهای پیچیده تصحیح زمینگان که تقریب های زیادی را درنظر می گیرد، استفاده کرد و سوماً در این روش فرض تخته بی نهایت بوگه در فرآیند تصحیح دو مرحله ای که دقت فرآیند تصحیح را کاهش می داد، وجود ندارد.

## تشکر و قدردانی

از سازمان نقشه برداری ملی (NCC) بابت در اختیار گذاشتن داده های گرانی سنگی مورد استفاده در این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

## منابع

- Alavi, M. (1994). Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran. New data and interpretations. *Tectonophysics*, v. 229, p. 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 HKand DelanyFM (eds) Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. *American Geophysical Union Geodynamics Series* 3 pp 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.
- Cockett R., Kang S., Heagy L. J., Pidlisecky A., Oldenburg D.W. (2015). SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers & Geosciences*.
- 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*, v.79, p. 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., and Holt W. (1995). The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran, *J. Geophysics. Res.*, 100(B8), 15,205–15,219, DOI: 10.1029/95JB01294.
- Kane, M. F. (1962). A comprehensive system of terrain correction using a digital computer: *Geophysics*, v. 27, no. 4, p. 455-462.

- Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics*, vol. 31,no2.
- 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, 727-41.
- 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 Nakhvak-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.

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

### Summary

In standard gravimetric correction methods, after the raw gravity data sets are 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 mitigated 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 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 to obtain more precise answers. Having a dense DTM, the SRTM GeoTiff pictures 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 extracted from the SRTM pictures is 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<sup>3</sup>). This procedure is done by the Simulation module in SimPEG (<https://simpeg.xyz/>) 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 with 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, use average height. Hence the procedure does with low precision. Second, divide the surrounding area into three zones (near, middle, and far) and computes the effects of middle and far zones with lower precision leading to the reduction of the accuracy of the results.

The proposed 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 quantitative difference between the one-stage correction method and the standard method is -0.48 to +0.64 mGal.** This difference is due to that in one-stage method we have no simplifying assumptions such as infinite Bouguer slab in Bouguer correction or using relative heights in terrain correction that there is in the standard methods. Therefore, the results obtained from this one-stage correction method are more accurate in results and less complicated in running compared to the results of the usual procedure

**Key words:** Bouguer correction, topography correction, quad tree mesh, forward modeling, SimPEG.

