



## تولید برنامه‌های رایانه‌ای برای تصحیح توپوگرافی اطلاعات ژئومغناطیسی و گرانی

محمد احسان حکمتیان\*

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۱۳-۱۴۳۹۹۵، تهران-ایران

**چکیده:** در راستای تهیه‌ی اطلاعات ژئومغناطیسی و گرانی تصحیح شده از نظر توپوگرافی و قرارداد آن‌ها (که برای اکتشاف منابع معدنی از جمله اورانیم استفاده می‌شوند) بر روی یک سطح مسطح، به طراحی و تولید دو برنامه‌ی رایانه‌ای اقدام شد. با این کار می‌توان برآورد عمق کانسار (مثلاً کانسار اورانیم) نسبت به سطح زمین را دقیق‌تر انجام داد. این برنامه‌های رایانه‌ای عبارت‌اند از: Pinit و Unev2fla به زبان فرترن نوشته شده‌اند. روش‌های متعارف ادامه به طرف بالا و یا ادامه به طرف پایین برای انتقال اطلاعات از یک سطح مسطح به سطح مسطح دیگر به کار می‌روند و برای هم ارتفاع کردن اطلاعات مناسب نمی‌باشند. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای انتقال اطلاعات از یک سطح نامنظم به یک سطح مسطح از آن بهره برد استفاده از سری تیلور است که در طراحی و تولید این برنامه‌های رایانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. طراحی و تولید این برنامه‌ها که ثمره‌ی این پژوهش بوده‌اند می‌توانند از این به بعد در پروژه‌های کاربردی ژئوفیزیکی برای بالا بردن دقت تعیین عمق مورد استفاده قرار گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌های رایانه‌ای، سطح نامنظم، سطح مسطح، اطلاعات ژئومغناطیسی و گرانی

## Design and Production of Softwares for Transferring the Geomagnetic and Gravity Data from Uneven Surface to a Flat one for Better Deep Exploration

M.E. Hekmatian\*

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box:143995-1113, Tehran-Iran

**Abstract:** In order to transfer the geomagnetic and gravity data which are used in exploration of ore including uranium from an uneven surface (the surface of the earth) to a flat one, new designed softwares are introduced. By these softwares a better depth estimation of ores is provided. These softwares are Pinit and Unev2fla. The language used in producing these softwares is Fortran. The common upward and downward continuation methods are for transferring the data from a flat surface to another flat one, and are not useful for transferring the data from an uneven surface to a flat one. One of the methods that can be used in this regard is using Taylor series which are used as the algorithms of the softwares. Design and production of the present softwares, which are the results of this research, can be used in practical geophysics for a better depth estimation.

**Keywords:** Softwares, Uneven Surface, Flat Surface, Geomagnetic and Gravity Data

\*email: mhekmatian@aeoi.org.ir





## ۱- مقدمه

ولی همان‌طور که بیان شد باید عملیات خاصی صورت بگیرد که فقط یک ادامه به طرف بالای معمولی نمی‌باشد بلکه ادامه به طرف بالا باید برای چندین ارتفاع صورت پذیرد و بعد برای هر نقطه بسته به این که به کدام ارتفاع بخواهد برود، از نقاط مربوط درون‌یابی شود که این روش به روش صفحه‌ی شطرنج معروف است [۳]. (علت اختصاص این نام شبیه بودن این کار به قرار گرفتن تعداد زیادی صفحه‌ی شطرنج یکی در بالای دیگری است). البته این کار می‌تواند با محاسبه‌ی انتگرال ادامه به طرف بالا برای هر نقطه به صورت جدا از هم انجام شود. یعنی برای هر نقطه، ادامه به طرف بالای متفاوتی انجام می‌شود که البته کاری پیچیده خواهد بود. مسئله‌ی انتقال اطلاعات از سطوح نامنظم به نامنظم و در مجموع انتقال‌های دلخواه از سطوح دلخواه به سطوح دلخواه دیگر، کاری است که برای آن الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده است. مثلاً عده‌ای مسئله را به صورت یک مسئله معکوس پی‌گیری کرده‌اند و خواسته‌اند آن را بدین گونه حل کنند و عده‌ای از روش منابع هم ارز استفاده کرده‌اند و عده‌ای هم از تخمین سری تیلور بهره برده‌اند. در نرم‌افزارهای طراحی شده از روش اخیر استفاده شده است.

## ۲-۲ تخمین با استفاده از سری تیلور (الگوریتم برنامه‌های رایانه‌ای Pinit و Unev2fla).

سری تیلور از مشتقات یک تابع در یک نقطه‌ی مشاهده استفاده و مقادیر آن تابع را در نقاط بیرونی، برون‌یابی می‌کند. از سری تیلور هم چنین می‌توان برای محاسبه‌ی میدان پتانسیل در نقاط دور از سطح مشاهده استفاده کرد.

ابتدا شرایطی را در نظر می‌گیریم که در آن، میدان پتانسیل  $U(x, y, z_0)$  بر روی یک سطح مسطح اندازه‌گیری شده باشد. در این صورت میدان پتانسیل روی یک سطح نامنظم،  $U(x, y, z)$ ، با استفاده از سری تیلور به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$U(x, y, z) = U(x, y, z_0) + (z - z_0) \frac{\partial}{\partial z} U(x, y, z_0) + \frac{(z - z_0)^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} U(x, y, z_0) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} U(x, y, z_0) \quad (2)$$

کار بسیار مهم تفسیر کمی اطلاعات ژئومغناطیسی و گرانی بر مبنای اطلاعاتی است که از سطح زمین جمع‌آوری می‌شوند. ولی سطح زمین یک سطح ناهموار و دارای پستی و بلندی‌های زیادی می‌باشد، بنابراین عمق کانسارهای معدنی در هر نقطه شدیداً به توپوگرافی سطحی وابسته است. حتی در صورت منظم بودن شکل کانسار و مسطح بودن سطح بالایی کانسار (که در عمق زمین قرار دارد)، باز هم عمق سطح بالایی آن وابستگی کامل به توپوگرافی سطحی پیدا می‌کند. لذا قبل از تفسیر کمی، اگر بتوانیم اطلاعات سطحی را از یک سطح نامنظم به یک سطح مسطح انتقال دهیم، در این صورت بررسی‌های تفسیری بهتر و دقیق‌تر انجام خواهد شد.

برای رسیدن به این هدف بهتر است با استفاده از روش‌های عددی و رایانه‌ای مناسب نرم‌افزارهایی را طراحی و تولید نمود که بتوانند این کار پیچیده‌ی علمی را انجام دهند. در این راستا، روش‌های علمی استفاده از معکوس‌سازی‌های ویژه، استفاده از منابع هم ارز و یا استفاده از تخمین سری تیلور می‌توانند مفید باشند و روش‌های عددی و رایانه‌ای تکرار در این زمینه سودمند هستند. در این کار پژوهشی روش تخمین سری تیلور همراه با روش تکرار مبنای طراحی و تولید نرم‌افزارهای Pinit و Unev2fla به زبان فرترن بوده است.

## ۲- تنوری و الگوریتم برنامه‌های طراحی شده

### ۱-۲ جابه‌جایی اطلاعات ژئومغناطیسی و گرانی بین سطوح مختلف

در رابطه با جابه‌جایی اطلاعات مغناطیسی و گرانی، و میدان‌های پتانسیل، همه‌ی ژئوفیزیک‌دان‌ها با واژه‌های آشنای ادامه به طرف بالا و ادامه به طرف پایین برخورد داشته‌اند، ولی در هر دو مورد، انتقال اطلاعات از یک سطح مسطح به سطح مسطح دیگر می‌باشد. اما مسئله‌ی انتقال از یک سطح مسطح به یک سطح نامنظم و بالعکس و همچنین انتقال اطلاعات از یک سطح نامنظم به سطح نامنظم دیگر با روش‌های مذکور امکان‌پذیر نمی‌باشند. انتقال اطلاعات از یک سطح مسطح به یک سطح نامنظم توسط رابطه‌ی ادامه به طرف بالا به شکل زیر، امکان‌پذیر است [۱، ۲ و ۳]:

$$U(x, y, z - \Delta Z) = \frac{\Delta Z}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U(x', y', z_0) dx' dy'}{((x - x')^2 + (y - y')^2 + \Delta z^2)^{3/2}} \quad (1)$$



تکرارهای کم‌تری لازم خواهد بود. کردل و گراوچ بر اساس یک سری تجارب به این نتیجه رسیدند که برآورد اولیه می‌تواند با این فرض که  $U(x, y, z)$  بر روی یک سطح مسطح اندازه‌گیری شده است، بر اساس معادله‌ی (۲) به دست آید [۳]. در واقع الگوریتم اصلی در برنامه‌ی رایانه‌ای Pinit رابطه‌ی (۲) می‌باشد که برآورد اولیه با انتقال اطلاعات از یک سطح نامنظم به یک سطح مسطح در ارتفاع متوسط آن سطح نامنظم با برنامه‌ی Pinit به دست می‌آید. الگوریتم اصلی در برنامه‌ی Unev2fla رابطه‌ی (۴) است.

### ۳-۲ مشتق‌گیری از داده‌های مغناطیسی یا گرانی

در این جا بهتر است اشاره‌ای داشته باشیم به مشتق‌گیری از داده‌های مغناطیسی (و یا گرانی) که به عنوان ورودی مورد نیاز هستند. برای راحتی کار مشتق‌گیری از داده‌های مغناطیسی، می‌توان آن‌ها را به حوضه‌ی فوریه برد و عملیات مشتق‌گیری را بر روی آن‌ها انجام داد، سپس با تبدیل فوریه‌ی معکوس به حوضه‌ی اولیه خود برگرداند. در مورد داده‌های مغناطیسی و گرانی در تبدیل فوریه از حوضه‌ی فاصله (طول موج) به حوضه‌ی عکس فاصله (عدد موج) می‌رویم و در تبدیل معکوس فوریه به حوضه‌ی فاصله (طول موج) برمی‌گردیم. رابطه‌ی کلی تبدیل فوریه‌ی یک تابع نامتناوب به صورت زیر است

$$F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ikx} dx \quad (5)$$

که در آن،  $k$  عدد موج و  $x$  طول موج می‌باشد، و تبدیل معکوس فوریه هم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k) e^{+ikx} dk \quad (6)$$

در تبدیل فوریه، مشتق‌گیری فقط بسته به مرتبه‌ی مشتق تابع  $F(k)$  در  $(ik)$  به توان مرتبه‌ی مشتق ضرب می‌شود، یعنی اگر تبدیل فوریه  $f(x)$  تابع  $F(k)$  باشد در این صورت تبدیل فوریه  $\frac{d^n f(x)}{dx^n}$  برابر  $F(k) (ik)^n$  است. عملیات مشتق‌گیری در حوضه‌ی فوریه بسیار راحت‌تر است و پس از مشتق‌گیری به حوضه‌ی اولیه باز می‌گردیم.

کردل و گراوچ مشاهده کردند که هم‌گرایی معادله‌ی (۲) به سریع‌ترین حالت ممکن وقتی اتفاق می‌افتد که  $z_0$  در میانه‌ی مقادیر  $z(x, y)$  باشد. حل معادله‌ی (۲) احتیاج به مشتقات عمودی میدان اندازه‌گیری شده دارد، و این‌ها را می‌توان با استفاده از حوضه‌ی فوریه به دست آورد [۳].

کردل و گراوچ این را دریافتند که سه جمله‌ی اول معادله‌ی (۲) برای به دست آوردن نتایج قابل قبول کافی است. این معادله برای ادامه از یک سطح مسطح به یک سطح نامسطح مناسب است [۴]. ولی حالت مشکل‌تر، ادامه از یک سطح نامسطح به یک سطح مسطح است که این کار ممکن است با تغییر جمله‌بندی معادله‌ی (۲) صورت پذیرد. به این ترتیب که با جدا کردن جمله‌ی اول جمع سمت راست معادله‌ی (۲) و بازآرایی آن این کار انجام می‌پذیرد

$$U(x, y, z_0) = U(x, y, z) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} U(x, y, z_0) \quad (3)$$

$U(x, y, z_0)$  در هر دو طرف معادله‌ی (۲) ظاهر می‌شود و این بدان معنی است که مجهول موردنظر، به عنوان معلوم معادله هم ظاهر می‌شود. در این شرایط از روش تکرار می‌توان برای حل مسئله استفاده کرد، یعنی با یک برآورد اولیه برای  $U(x, y, z_0)$  حل معادله شروع می‌شود و در هر مرحله از آن، مقدار جدیدی برای  $U(x, y, z_0)$  به دست می‌آید که به عنوان مقدار اولیه‌ی مرحله‌ی بعدی به کار می‌رود و این کار تا جایی ادامه می‌یابد که  $U(x, y, z_0)$  محاسبه شده به حد کافی به مقدار واقعی نزدیک باشد. امتحان درست بودن مقدار نهایی  $U(x, y, z_0)$  به دست آمده این است که با آن بتوان به کمک معادله‌ی (۲) مقدار  $U(x, y, z_0)$  را به دست آورد. بنابراین به طور کلی می‌توان نوشت

$$U(x, y, z)^{(i+1)} = U(x, y, z) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} U(x, y, z_0) \quad (4)$$

در این عملیات تکرار، یک نکته‌ی حایز اهمیت آن است که برآورد اولیه برای  $U(x, y, z_0)$  را چگونه باید انتخاب کرد؟ چنان چه برآورد اولیه به خوبی انتخاب شود در این صورت



کمک برنامه‌ی Pinit، مقادیر مغناطیسی از سطح نامنظم توپوگرافی به سطح مسطح در ارتفاع متوسط ۹۹۵ متر انتقال داده شد که این یک نقشه‌ی برآورد اولیه برای شروع کار بود. سپس این نقشه‌ی برآورد اولیه به منظور هموارتر شدن اطلاعات به ارتفاع ۱۹۹۵ متر منتقل شد که این کار با عملیات ادامه به طرف بالای معمول انجام گردید. سپس از این برآورد اولیه‌ی هموار شده مشتق اول تا سوم به دست آمد و به وسیله آن‌ها نه فقط به صورت برآورد بلکه به صورت دقیق‌تری با استفاده از برنامه‌ی Unev2fla اطلاعات از سطح نامنظم توپوگرافی به سطح مسطح ۱۹۹۵ متری رسانده شد. سپس باز هم برای هموارتر شدن اطلاعات، بر روی نتیجه‌ی به دست آمده، ۵۰ متر دیگر عملیات ادامه به طرف بالا صورت گرفت که بدین وسیله اطلاعات مغناطیسی از سطح نامنظم توپوگرافی به سطح مسطح ۲۰۴۵ متری رسید که از تمام توپوگرافی محلی منطقه (۰ تا ۱۸۳۵ متر) بالاتر است. با این کار اطلاعات به دست آمده در یک سطح مسطح قرار گرفتند و از این به بعد اگر مورد تفسیر کمی قرار گیرند، در محاسبات، عمق نسبت به این سطح مسطح به دست می‌آید و ارتفاع این سطح از هر نقطه از سطح زمین هم مشخص است. پس عمق واقعی نسبت به سطح نامنظم توپوگرافی را می‌توان به دست آورد.

در ادامه هشت نقشه با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ آمده است که با شماره‌های ۱ تا ۸ مشخص شده‌اند. در هر هشت نقشه مقادیر کم تا زیاد با رنگ بنفش تا قرمز نشان داده شده است.

شکل ۱ نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی است که از میدان کلی زمین کم شده است و فقط نشان‌گر تغییرات مغناطیسی ناشی از عوارض پوسته‌ای زمین است و به همین جهت از شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده نام برده شده است. در این نقشه مقادیر بر روی سطح ناهموار واقعی زمین قرار دارند.

شکل ۲ نقشه‌ی توپوگرافی محلی است، به این معنی که از تمام مقادیر ارتفاع کم‌ترین ارتفاع موجود چهار گوش نقشه (یعنی ۱۷۷۶ از سطح دریا) کم شده، و در نتیجه نام نقشه‌ی توپوگرافی محلی برای آن در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ همان شکل ۱ است که در آن اطلاعات مغناطیسی به یک سطح مسطح به ارتفاع ۲۰۴۵ متر محلی (با توجه به ارتفاعات محلی شکل ۲) انتقال داده شده‌اند و اگر ارتفاع سطح مسطح نامبرده از سطح دریا را بخواهیم، برابر ۳۸۲۱ متر می‌باشد یعنی (۱۷۷۶ + ۲۰۴۵).

در ارتباط با تبدیل فوریه‌ی مشتق عمودی باید گفت که مشتق عمودی تابع  $\phi(x, y, z)$  به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(x, y, z) - \phi(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z} \quad (7)$$

حال اگر تبدیل فوریه را بر تساوی بالا اعمال کنیم، داریم

$$F\left[\frac{\partial \phi}{\partial z}\right] = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{F[\phi] - F[\phi]e^{-k|\Delta z|}}{\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-k|\Delta z|}}{\Delta z} F[\phi] = |k| F[\phi] \quad (8)$$

به طریقی مشابه می‌توان تبدیل فوریه‌ی مشتق عمودی مرتبه‌ی  $n$  ام را به دست آورد که برابر است با

$$F\left[\frac{\partial^n \phi}{\partial z^n}\right] = |k|^n F[\phi] \quad (9)$$

### ۳- روش کار، نمونه‌ی عملیات و بحث و نتیجه‌گیری

به عنوان یک مثال عملی، محدوده‌ی ورقه‌ی نقشه‌برداری با نام گوربالا به شماره‌ی III ۷۵۴۸ (که در حالت استاندارد مقیاس آن ۱:۵۰,۰۰۰ است ولی در این جا به خاطر قرار گرفتن در ورقه‌ی A4 با مقیاس دیگری ارایه می‌گردد) انتخاب شد تا عملیات انتقال اطلاعات از سطح توپوگرافی نامنظم مربوط، به یک سطح مسطح بر روی این ورقه انجام شود. اطلاعات ژئومغناطیسی و اطلاعات توپوگرافی مربوط به ورقه‌ی مذکور از فایل‌های مخزن اطلاعات ژئوفیزیک هوایی موجود در سازمان انرژی اتمی ایران استخراج شد.

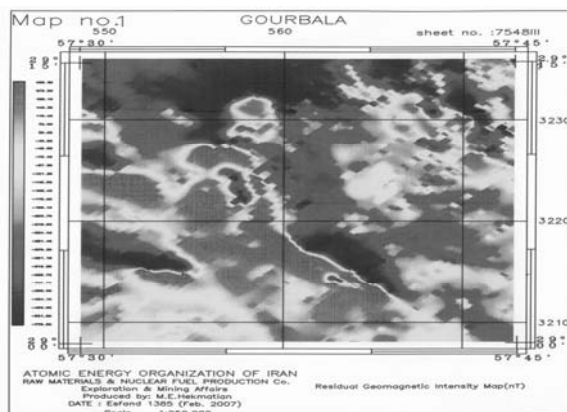
در بررسی اطلاعات توپوگرافی مربوط معلوم شد ارتفاع کمینه در محدوده‌ی مذکور نسبت به سطح دریا ۱۷۷۶ متر و ارتفاع بیشینه ۳۶۱۱ متر است، بنابراین از همه‌ی مقادیر توپوگرافی ۱۷۷۶ کسر شد که در نتیجه محدوده‌ی تغییرات ارتفاع از صفر تا ۱۸۳۵ متر شد و با فرض توزیع لاگ نرمال، ارتفاع متوسط برابر ۹۹۵,۰۸ متر تعیین گردید که به تقریب برابر ۹۹۵ متر در نظر گرفته شد.

در این شرایط پس از تهیه‌ی مشتقات مرتبه‌ی اول تا پنجم فایل داده‌های مغناطیسی با استفاده از فایل‌های داده‌های مغناطیسی، توپوگرافی و ۵ مشتق مرتبه‌ی اول تا پنجم به

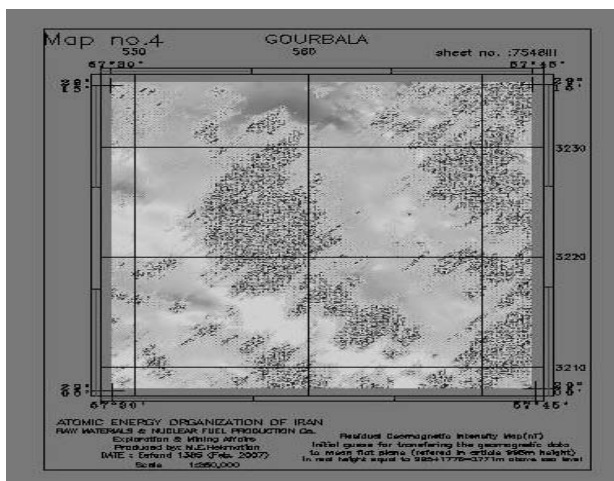


در پایان باید گفت که این روش تصحیح اطلاعات، تقریبی است و در آن فقط از ۳ جمله‌ی سری نامحدود تیلور استفاده شده است و هم‌چنین برآورد اولیه با فرض این‌که سری تیلور برای انتقال اطلاعات از سطح نامنظم به سطح هم‌قابل استفاده می‌باشد به دست آمده است. همه‌ی این موارد باعث می‌شود که این روش یک روش تقریبی به حساب آید که البته می‌توان آن را در آینده بهینه کرد. لازم به یادآوری است که شکل‌های ۴ تا ۸ نقشه‌هایی هستند که به صورت حد واسط ساخته شده‌اند و توضیحات مربوط به هر کدام در زیرنویس آن‌ها آمده است. شکل ۴ نقشه برآورد اولیه است. نحوه‌ی تهیه‌ی این نقشه قبلاً بیان شده است. شکل ۵ همان شکل شماره ۴ است که ۱۰۰۰ متر به طرف بالا ادامه داده شده است. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ هم نقش‌های مشتق عمودی اول تا سوم شکل ۵ می‌باشند.

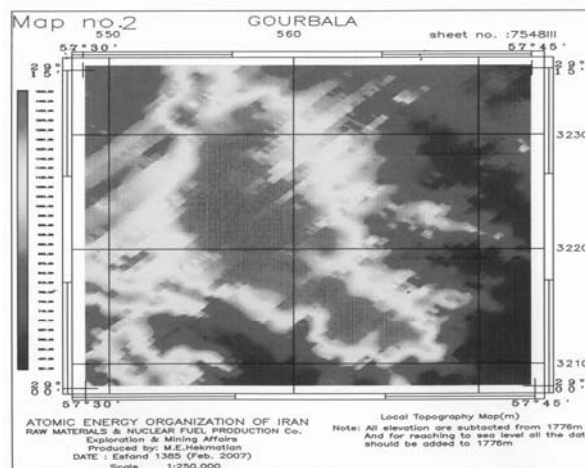
شکل ۳ نقشه‌ای است که اطلاعات آن بر روی یک سطح مسطح می‌باشد و این همان چیزی است که ما به دنبال آن بودیم. البته با توجه به کمبود اطلاعات جانبی در لبه‌های نقشه، اطلاعات لبه‌های نقشه دارای خطای بیش‌تری می‌باشند.



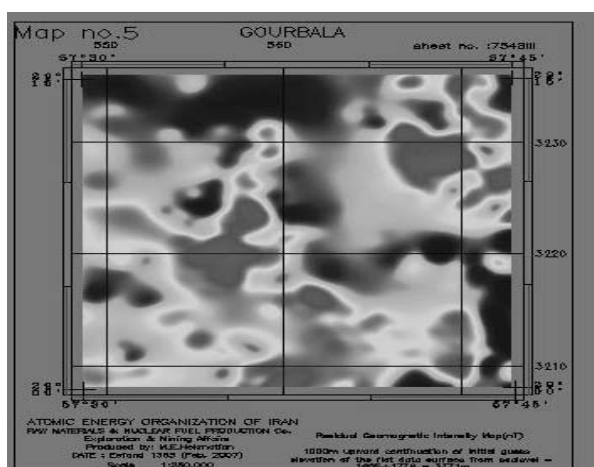
شکل ۱- نقشه‌ی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده.



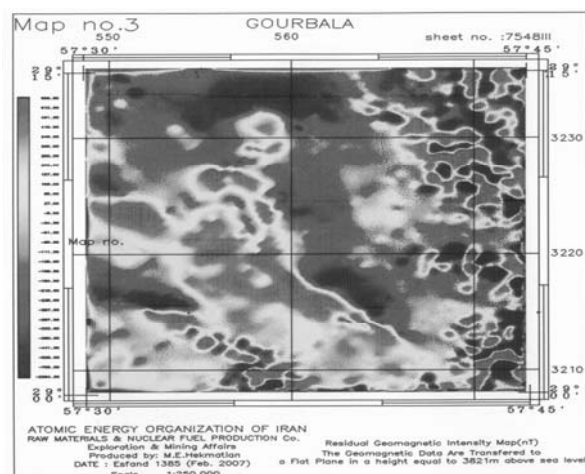
شکل ۴- نقشه‌ی برآورد اولیه‌ی انتقال داده‌های ژئومغناطیسی به یک سطح مسطح در ارتفاع ۲۷۱ متری از سطح دریا، بر گرفته از نقشه‌ی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده مربوط به شکل ۱.



شکل ۲- نقشه‌ی توپوگرافی محلی (توجه: از تمام ارتفاعات، ۱۷۷۶ متر کم شده است).



شکل ۵- نقشه‌ی ادامه یافته به طرف بالا به میزان ۱۰۰۰ متر از نقشه‌ی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده مربوط به شکل ۴.



شکل ۳- نقشه‌ی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده که به یک سطح مسطح در ارتفاع ۲۸۲۱ متری از سطح دریا منتقل شده‌اند.

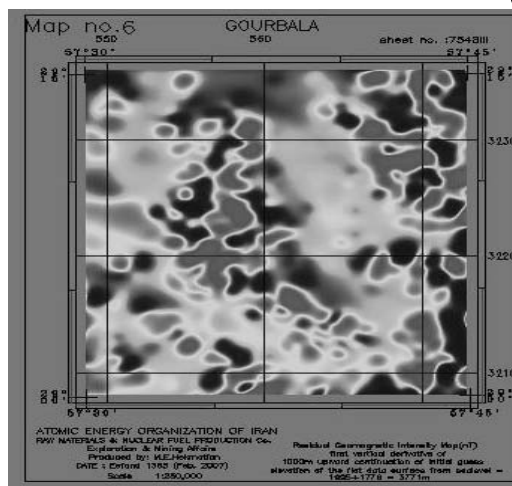


## تشکر و قدردانی

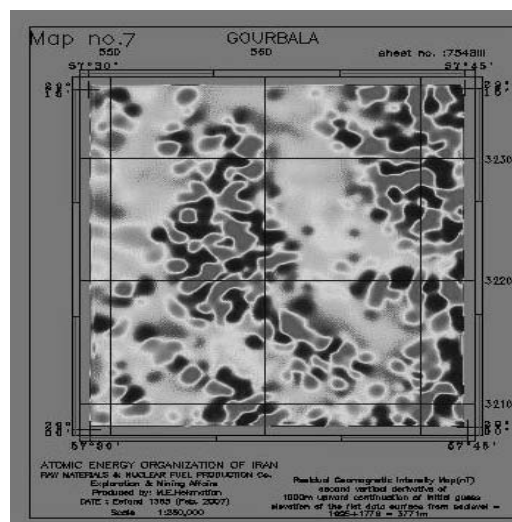
بدین وسیله از کلیه کسانی که مرا در انجام این کار یاری داده‌اند به ویژه از سرکار خانم شهبازی تشکر و قدردانی می‌شود.

## References:

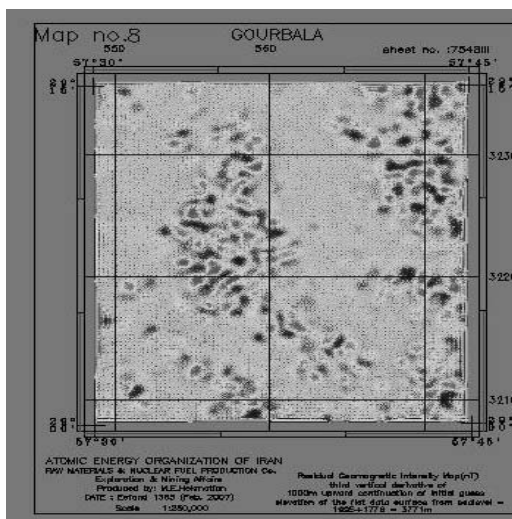
- 1- م.ا. حکمتیان، "طراحی و تولید نرم‌افزارهایی برای انتقال اطلاعات مغناطیسی و گرانی‌سنجی از یک سطح نامنظم به یک سطح مسطح و نرم‌افزاری برای تفسیر کمی دو بعدی منابع زیر سطحی گرانی‌سنجی با شکل دلخواه"، گزارش پژوهشی شماره ۱۵-۸۵، مدیریت دفتر اکتشاف و استخراج، شرکت تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران بهار (۱۳۸۵).
- 2- م.ا. حکمتیان، "طراحی و تولید چند نرم‌افزار ژئوفیزیکی و کاربرد آن در ژئومغناطیس و گرانی‌سنجی"، گزارش پژوهشی و آموزشی ۱۳-۸۴، مدیریت دفتر اکتشاف و استخراج، شرکت تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، پاییز (۱۳۸۴).
- 3- R.J. Blakely, "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications," Cambridge University Press (1996).
- 4- L. Cordell and V.J.S. Grauch, "Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the san Juan basin, New Mexico," in the Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps, William J. Hinze (ed.), 181-97, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, Ok (1985).



شکل ۶- نقشه مشتق اول عمودی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده مربوط به شکل شماره ۵.



شکل ۷- نقشه مشتق دوم عمودی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده مربوط به شکل شماره ۵.



شکل ۸- نقشه مشتق سوم عمودی شدت ژئومغناطیسی باقی‌مانده مربوط به شکل شماره ۵.