

تعیین هندسه سنگ‌بستر با استفاده از وارون‌سازی غیرخطی دوبعدی داده‌های گرانی‌سنجی

سیدهانی متولی‌عنبران^{۱*} و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، ایران

(دریافت: ۸۵/۱۲/۱۵، پذیرش نهایی: ۸۶/۱۰/۲۵)

چکیده

در این مقاله مدل‌سازی وارون غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی به منظور تعیین هندسه سنگ‌بستر مورد نظر صورت گرفته است به طوری که با کمترین اطلاعات اولیه زمین‌شناسی، بهترین ساختار نزدیک به واقعیت زمین‌شناسی را نتیجه دهد. در روش ارائه شده هندسه سنگ‌بستر با مجموعه‌ای از منشورهای کنارهم چیده شده تقریب زده می‌شود و در نهایت طول این منشورها است که عمق سنگ‌بستر را به دست می‌دهد.

در الگوریتم تهیه شده، از روند تکرار غیرخطی برای شبیه‌سازی هندسه سنگ‌بستر استفاده می‌شود. در گام اول با استفاده از یک تقریب مناسب و با استفاده از روش‌های استاندارد، مسئله غیرخطی به یک مسئله‌ای خطی تبدیل می‌شود. در گام دوم با استفاده از همه اطلاعات اولیه، مدل طراحی و به اصطلاح پارامتری می‌شود. در گام بعدی یک مدل اولیه منطبق بر همه فرضیات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی پیشنهاد می‌شود و با استفاده از آنالیز عددی، ماتریس‌های مشتقات جزئی برای مدل محاسبه می‌شود. روند وارون‌سازی بر مبنای روش مارکوارت-لونیبرگ، در تکرارهای متفاوت با توجه به میزان تطابق بین داده‌های واقعی و محاسبه‌ای، مدل اولیه را بهبود می‌بخشد. در این روند از خطی‌سازی مدل، با آنالیز عددی در نزدیکی مدل اولیه و محاسبه مجدد ماتریس مشتقات جزئی استفاده می‌شود تا بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌ای ایجاد شود.

به منظور نشان دادن قابلیت این روش، مدل‌سازی برای داده‌های مصنوعی با نوفه و بدون نوفه برای اعماق کم و زیاد صورت گرفته است. داده‌های واقعی مورد استفاده، داده‌های میکروگرانی‌سنجی مربوط به عملیات حفر تونل ادامه خط یک متروی تهران است که نتایج حاصل از آن با واقعیت زمین‌شناسی منطقه تطابق بسیار مناسبی دارد.

واژه‌های کلیدی: گرانی‌سنجی، مدل‌سازی وارون، سنگ‌بستر

Determination of basement geometry using 2-D nonlinear inversion of the gravity data

Motavalli Anbaran, H¹. and Ardestani, E. V².

¹M.Sc. student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran and Center of Excellence in Survey Engineering and Disaster Management, Tehran, Iran

(Received: 6 March 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Inverse modeling is one of the most elegant geophysical tools for obtaining 2-D and 3-D images of geological structure.

Determination of the geometry of bedrock, by nonlinear inverse modeling of gravity data, is the aim of this paper.

The algorithm uses a nonlinear iterative procedure for simulation of bedrock geometry. At the first step, the nonlinear problem changes to a linear problem by a proper approximation and standard method. The second step is the parameterization of the model. Finally, an initial model is suggested on the basis of geological and geophysical assumption and using the numerical analysis, the Jacobean matrix is calculated. The inversion will improve the initial model in each iteration, considering the differences between observed and calculated gravity anomalies, based on Levenberg-Marquardt's method.

The usual practice of inverting gravity anomalies of two-dimensional bodies is to replace their cross sections by an n-sided polygon and to determine the locations of the vertices that best explain the observed anomalies. The initial coordinates of the vertices are assigned and later modified iteratively so as to minimize the differences between the observed and calculated anomalies. The estimation of the initial values is a separate and indeed a critical exercise. This selection determines the convergent solution to the problem. It seems that inversion schemes replacing the two-dimensional bodies by a series of juxtaposing prisms, instead of a polygonal cross section, do not require any a priori calculation of the initial values of the parameters that define the outline of the body. This paper presents such an inversion scheme for determining the density surface such as the basement topography above an assigned depth Z and density contrast σ .

The method does not require input of initial values of any other parameters. It is also applicable for determining structure with a flat top or a flat bottom.

The program determines depths to the top of the basement surface below each point of gravity anomaly along a profile.

The practical effectiveness of this method is demonstrated by the inversion of synthetic and real examples. The real data is acquired over the site of the construction of a new line of the Tehran underground railway.

Finally the results are compared with the geological information.

Key words: Gravity, Inverse Modeling, Basement

۱ مقدمه

منشورهای کنار هم چیده شده با پهنای یکسان تقریب زده می‌شود، در حالی که در روش چندضلعی تالوانی و همکاران (۱۹۵۹) مقطع حوزه رسوبی را با یک n ضلعی تقریب می‌زنند. در اکثر الگوریتم‌هایی که از این دو روش هندسی بهره می‌برند، فرض می‌شود که چگالی حوزه بالای سنگ بستر ثابت است و به‌طور کلی یک چگالی ثابت به مدل نسبت داده می‌شود (مورگان و گرانت (۱۹۶۳)، با تاچارایا و ناولیو (۱۹۷۵). چاکراواری و همکاران (۲۰۰۱) و چاکراواری و ساندارااجان (۲۰۰۵) گومز-ارتیز و بی‌گو (۲۰۰۵) و جیانزونگ و همکاران (۲۰۰۱) نیز از توابع

محاسبه عمق سنگ‌بستر در حوضه‌های رسوبی تمرینی کلاسیک در اکتشافات منطقه‌ای و هیدروکربنی است. توصیف ابهامات مربوط به تفسیر داده‌های گرانی از سوی روی (۱۹۶۲) و راماراو و مورتی (۱۹۷۸) سرانجام به این نتیجه منجر شد که برای غلبه بر این ابهامات می‌توان از یک شکل هندسی ریاضی با تباین چگالی معین استفاده کرد. از جمله پر کاربردترین مدل‌های هندسی ریاضی برای مدل‌سازی سنگ‌بستر، یکی مدل جمع منشوری بوت (۱۹۶۰) و دیگری مدل چند ضلعی تالوانی و همکاران (۱۹۵۹) است. در روش تفسیری بوت (۱۹۶۰)، مقطع حوزه رسوبی با مجموعه‌ای از

اطلاعات ورودی بیشتری از جمله بیشینه و کمینه عمق سنگ‌بستر که از داده‌های چاه و یا اطلاعات زمین‌شناسی منطقه حاصل شده را نیز وارد کنیم تا همگرایی جواب تسهیل شود.

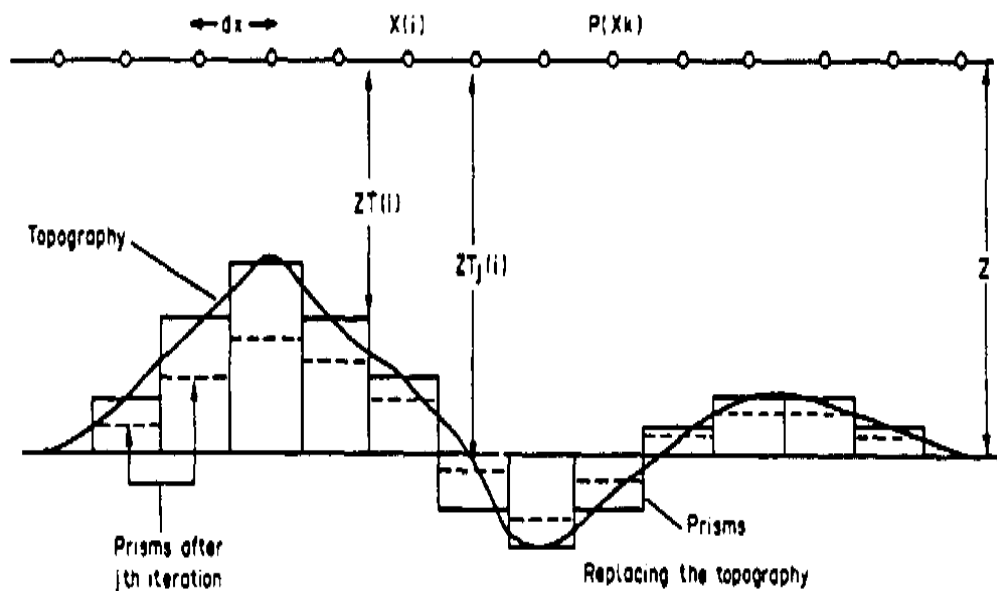
در این روش عمق بالای سنگ‌بستر در زیر هر نقطه بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای در طول نما (پروفیل) تعیین می‌شود. از آنجا که بی‌هنجاری‌های گرانی دارای مولفه‌هایی از اثرات منطقه‌ای است، بی‌هنجاری منطقه‌ای نیز باید تعیین شود.

ورودی شامل بی‌هنجاری گرانی، Δg ، با فواصل یکسان روی یک نما و عمق Z مربوط به ساختار یا سطح تغییر چگالی مورد بررسی و تباین چگالی σ است. ساختار سنگ‌بستر با مجموعه‌ای از منشورهای کنار هم چیده شده معادل‌سازی می‌شود (شکل ۱). هر کدام از منشورها زیر یک نقطه بی‌هنجاری قرار دارند و در نهایت عمق مربوط به بالای این منشورها (ZT) تعیین می‌شود. فرض می‌شود نمای بی‌هنجاری کاملاً ساختار را پوشش می‌دهد، بنابراین ابتدا و انتهای نما بی‌هنجاری آزادانه صفر می‌شود.

سه‌موی، هذلولوی و نمایی برای تغییرات چگالی در رسوبات در حوضه‌های زمان و بسامد و مدل‌های ۲، ۲/۵ و ۳ بعدی بهره برده‌اند. در نهایت الگوریتم مارکوارت (۱۹۶۳) برای حل مسئله وارون جهت پیدا کردن مقدار عمق بستر حوزه رسوبی از آنومالی گرانی مشاهده‌ای استفاده شده است.

۲ نظریه روش مورد استفاده در تهیه الگوریتم رایانه‌ای

با تأملی بر روش‌های گوناگون در مدل‌سازی سنگ‌بستر خواهیم دید که هر کدام از آنها محاسن و معایبی دارند و با توجه به اطلاعات اولیه و داده‌های ورودی، که در اختیار مفسر قرار دارد و نوع مدل‌سازی مورد نظر، می‌توان یکی از آنها را انتخاب کرد. آنچه که مشخص است، در حالت کلی، روش انتخاب شده در این مقاله این مزیت را دارد که اطلاعات ورودی متعددی نمی‌خواهد، تفسیر کماکان خودکار است و فقط به داده‌های گرانی و یک تباین چگالی بین سنگ‌بستر و رسوبات بالای آن نیاز است. در صورتی که بخواهیم جوابی بهتر و مطمئن‌تر به دست بیاوریم، می‌توانیم



شکل ۱. توپوگرافی سنگ‌بستر و مدل‌سازی آن با منشورهای دوبعدی (مورتی و رامارو، ۱۹۹۳).

به طوری که dx فاصله ایستگاه‌ها، $ZT(i)$ عمق بالایی سنگ‌بستر در زیر i امین ایستگاه و G ثابت جهانی گرانی است.

شایان توجه است که:

$$[F_k(z)]_{ZT(i)}^z = -[F_k(z)]_z^{ZT(i)} \quad (۳)$$

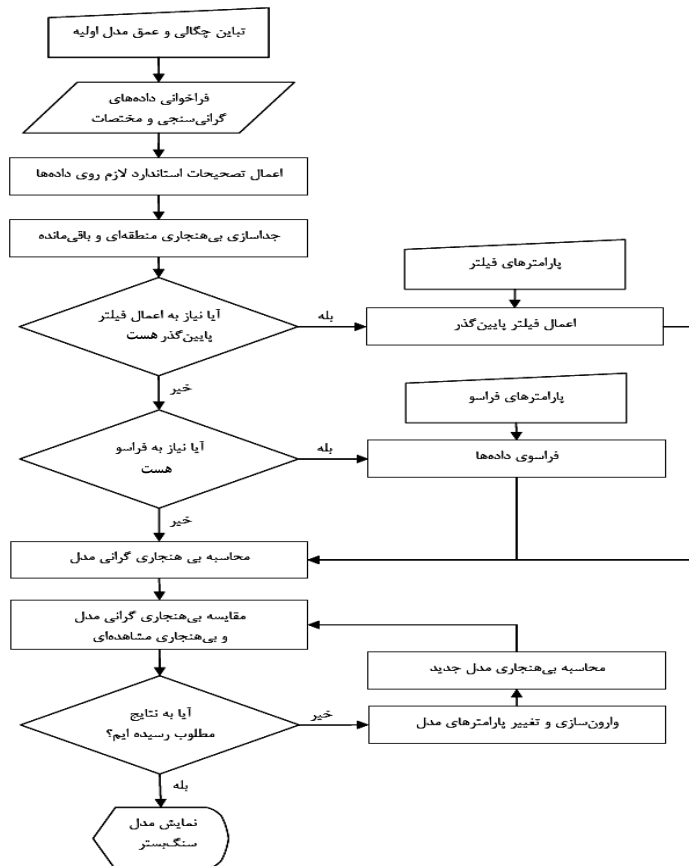
یعنی اثر گرانی یک منشور در زیر عمق میانگین $(ZT(i) > Z)$ دارای علامتی مخالف با اثر گرانی منشوری است که بالای عمق میانگین $(ZT(i) < Z)$ قرار دارد. بنابراین تفاوت علامت، در سهم گرانی جسم قرار گرفته در زیر یا بالای عمق میانگین به طور خودکار در فرایند تفسیر وارد می‌شود. با توجه به مباحث ارائه شده، روندنمای رایانه‌ای تهیه شده در زیر آمده است.

بی‌هنجاری گرانی $\Delta g(k) = \Delta g(x_k)$ در هر نقطه $P(x_k)$ ، را که نتیجه سطح دارای ساختار منشوری است (شکل ۱)، می‌توان طبق معادله اثر گرانی یک دایک (رااو و مورتی، ۱۹۷۸) بیان کرد:

$$\Delta g(k) = \sum_{i=2}^{N-1} [F_k(z)]_{ZT(i)}^z + Ax_k + B \quad (۱)$$

$$F_k(z) = 2G\sigma \left\{ z \left[\arctan \left(\frac{x_k + \frac{dx}{2}}{z} \right) - \arctan \left(\frac{x_k - \frac{dx}{2}}{z} \right) \right] \dots \right. \\ \left. + 0.5 \left[\left(\frac{x_k + \frac{dx}{2}}{z} \right) \text{Ln} \left(\left(x_k + \frac{dx}{2} \right)^2 + z^2 \right) \right. \right. \\ \left. \left. \left(x_k - \frac{dx}{2} \right) \text{Ln} \left(\left(x_k - \frac{dx}{2} \right)^2 + z^2 \right) \right] \right\}$$

(۲)



روندنمای برنامه رایانه‌ای.

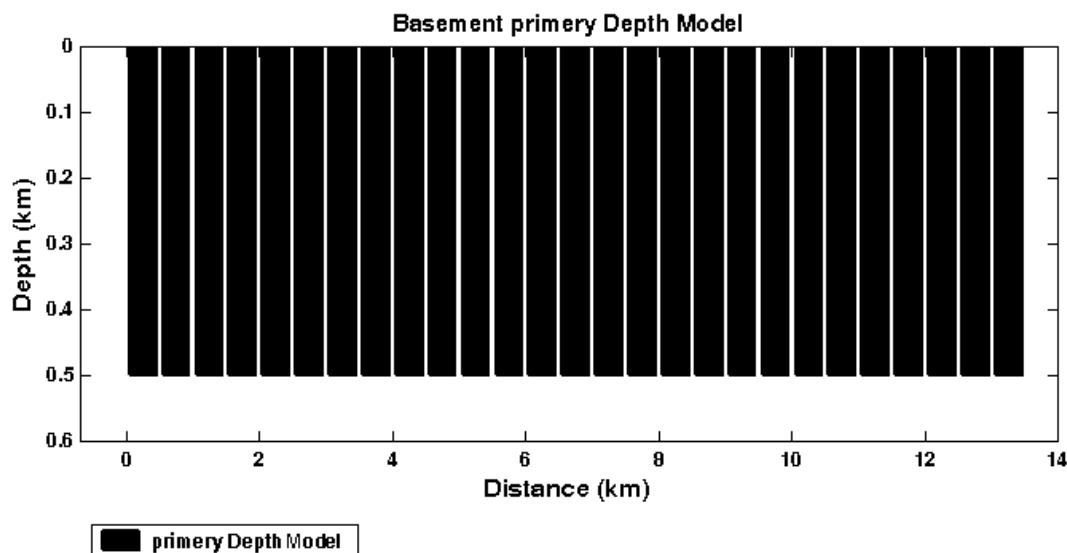
عمق سنگ‌بستر اولیه برای شروع برنامه، عمق برآورد ۵۰۰ متر است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. برنامه پس از ۱۴ تکرار به همگرایی زیادی می‌رسد. در شکل ۳ تفاوت بین گرانی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای که از خطای $RMS = 613/75$ در تکرار اول به خطایی در حدود $RMS = 9/7135 \times 10^{-28}$ در تکرار چهاردهم می‌رسد نشان داده شده است که نشان از تطبیق بسیار زیاد و همگرایی برنامه دارد: خطای RMS همان ریشه میانگین مربعات (root mean square) است. مدل سنگ‌بستر مصنوعی و مدل محاسبه‌ای در شکل ۴ قابل ملاحظه‌اند. در شکل ۵ می‌توان ماتریس‌های تحلیل پارامترهای مدل و ماتریس تحلیل داده‌ها را نیز مشاهده کرد که باتوجه به قطری بودن ماتریس‌ها از دقت مناسب داده‌ها و پارامترهای حاصل حکایت دارد. در نهایت و در شکل ۶، نمودار سه‌بعدی خطای RMS مربوط به ۱۴ تکرار مشاهده می‌شود.

۳ بررسی توانایی برنامه رایانه‌ای با مدل‌های مصنوعی سنگ‌بستر

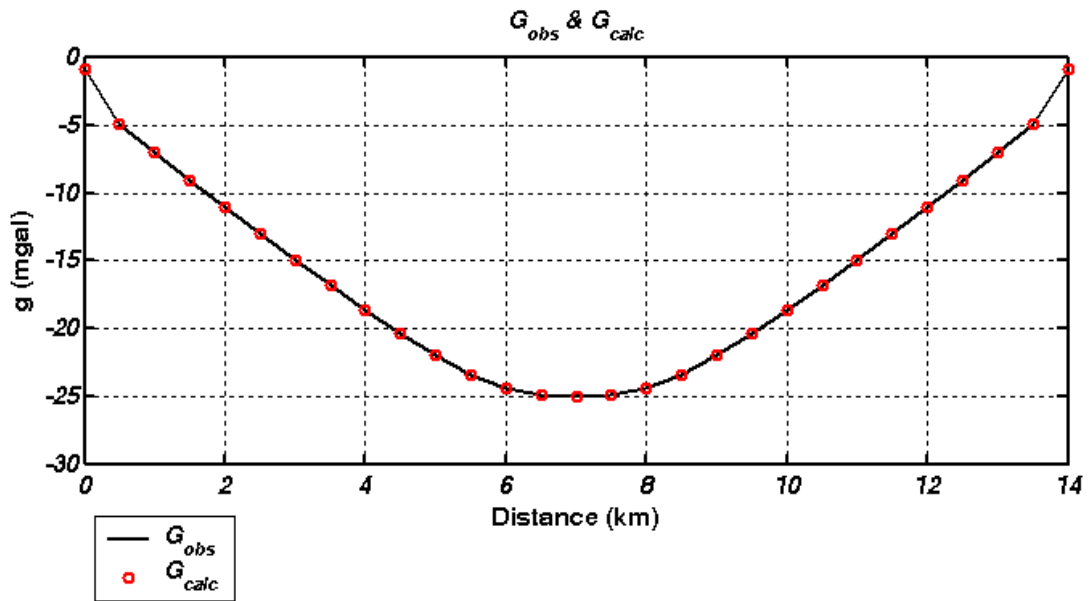
۱-۳ مدل مصنوعی اول- بدون نوفه

اولین مدل مصنوعی به کار رفته، سنگ‌بستری دوبعدی به طول ۱۴ کیلومتر است که شکلی کاملاً ساده دارد و با شیب تقریباً ثابتی به عمق بیشینه ۶۵۰ متر می‌رسد. در این مدل فرض شده است که داده‌های گرانی سنجی به فاصله‌های مساوی ۵۰۰ متر روی یک نما به تعداد ۲۹ نقطه برداشت شده باشد. در ابتدا با استفاده از برنامه‌ای پیشرو، اثر گرانی این مدل به دست می‌آید و سپس با برنامه رایانه‌ای وارون، از این داده‌های مصنوعی به مدل سنگ‌بستر می‌رسیم.

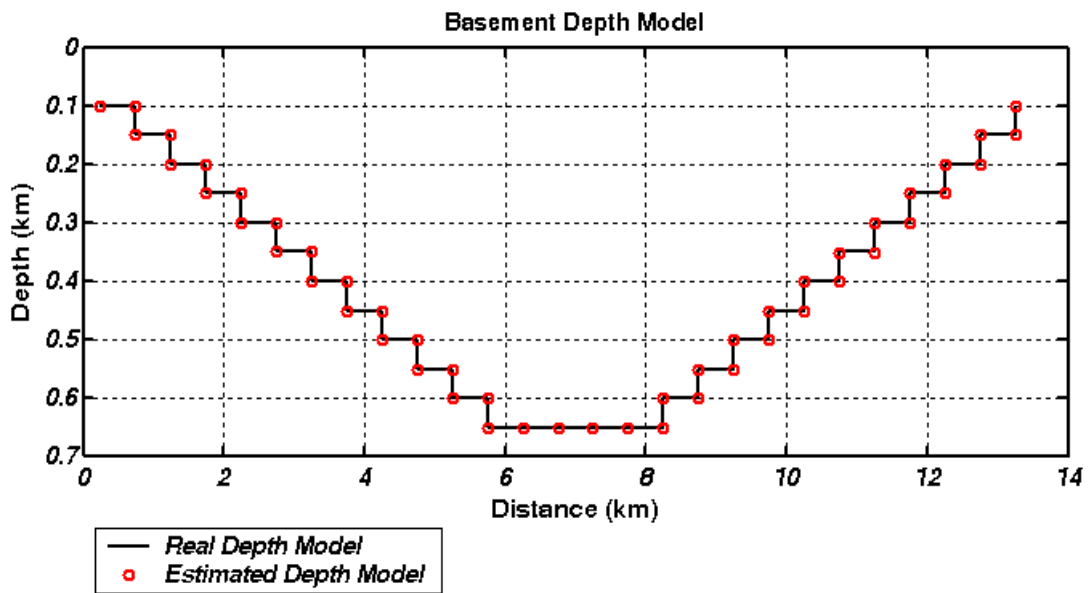
برای استفاده از برنامه نیاز به یک تباین چگالی داریم که فرض ما وجود تباین چگالی $\Delta\rho = -1000 \text{ gr cm}^{-3}$ است و چون مدل‌سازی براساس شیب‌سازی سنگ‌بستر با مجموعه مکعب‌های کنار هم چیده شده صورت می‌گیرد، فرض شده که تعداد بلوک‌ها ۲۷ عدد است.



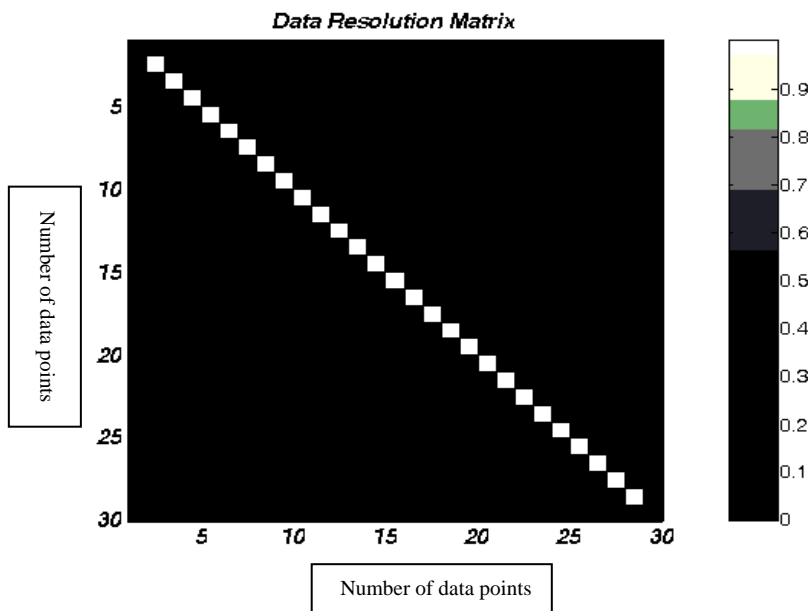
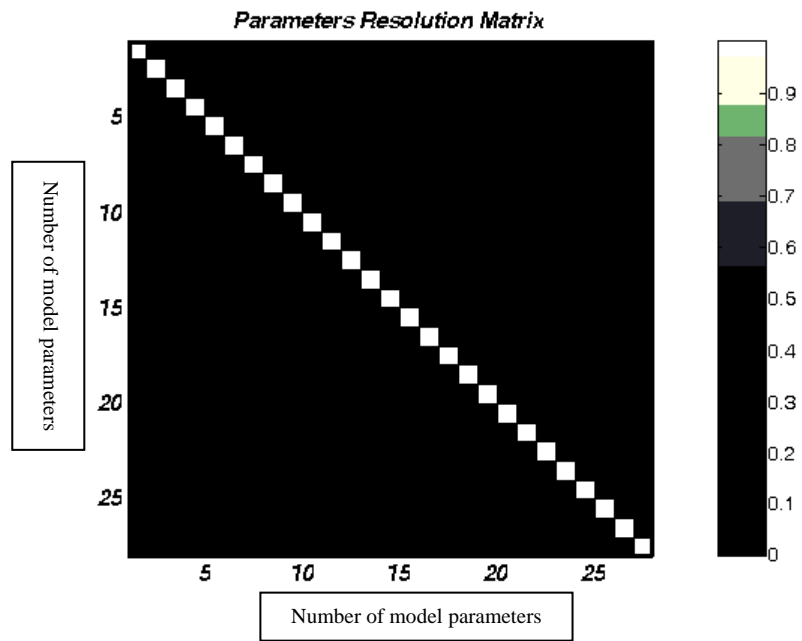
شکل ۲. مدل فرضی اولیه برای شروع وارون‌سازی.



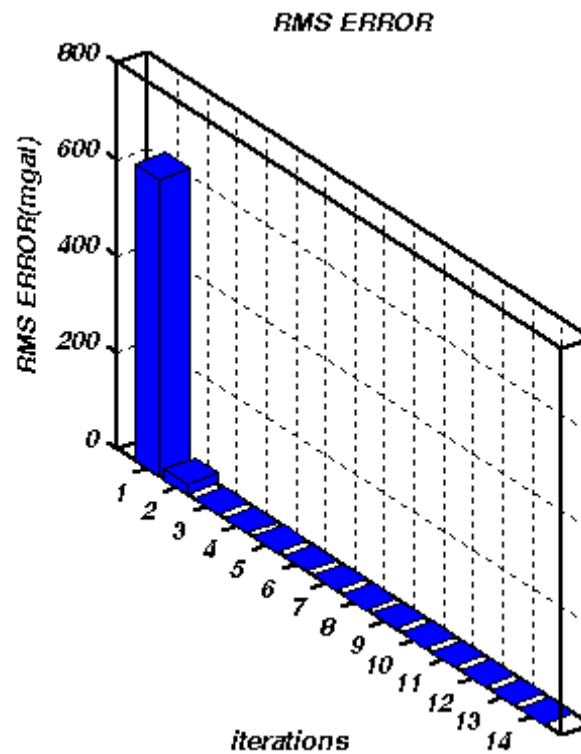
شکل ۳. گرانی محاسبه شده و مشاهده شده در تکرار چهاردهم.



شکل ۴. هندسه سنگ‌بستر مصنوعی و برآورد شده پس از چهارده تکرار.



شکل ۵. ماتریس‌های تحلیل پارامترهای مدل و داده در تکرار چهاردهم.



شکل ۶. تغییرات خطای ریشه میانگین مجذور در تکرارهای متفاوت وارون‌سازی.

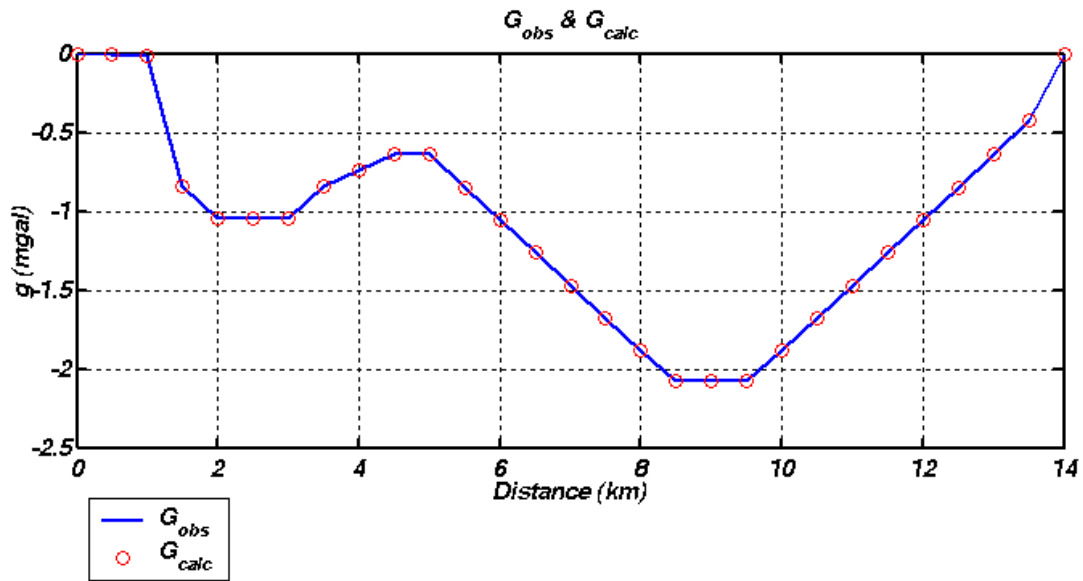
۲-۳ مدل مصنوعی دوم- بدون نوفه

در این بخش یک مدل مصنوعی و کم‌عمق معرفی می‌شود تا توانایی برنامه در تعیین مرز لایه‌های رسوبی کم‌عمق نیز بررسی شود و اطمینان حاصل کنیم که چنانچه هدف، تعیین مرز لایه‌های کم‌عمق باشد (همان‌طور که در داده‌های واقعی دیده خواهد شد) بتوان به نتایج حاصل از برنامه اعتماد کرد. عمق‌های بیشینه در این مدل ۲۵ متر و ۵۰ متر است. در این حالت نیز جواب‌ها همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود بسیار رضایت‌بخش‌اند. شایان توجه است که بهترین جواب پس از ۱۲ تکرار حاصل شده است و خطای $RMS = 126/5$ در تکرار اول به $RMS = 5/0.772 \times 10^{-31}$ در تکرار

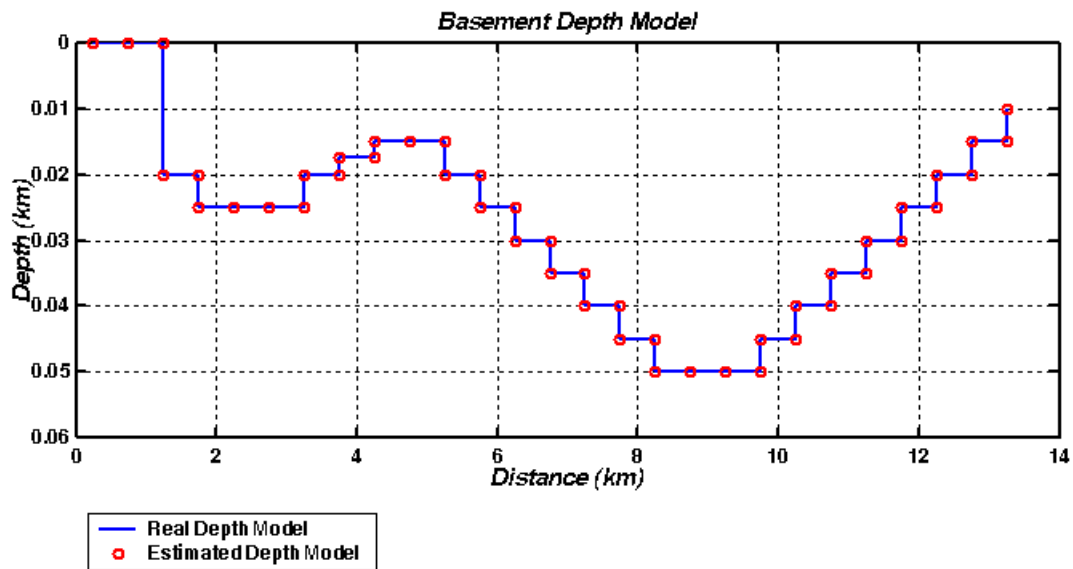
دوازدهم رسیده است.

۳-۳ مدل مصنوعی سوم- با نوفه

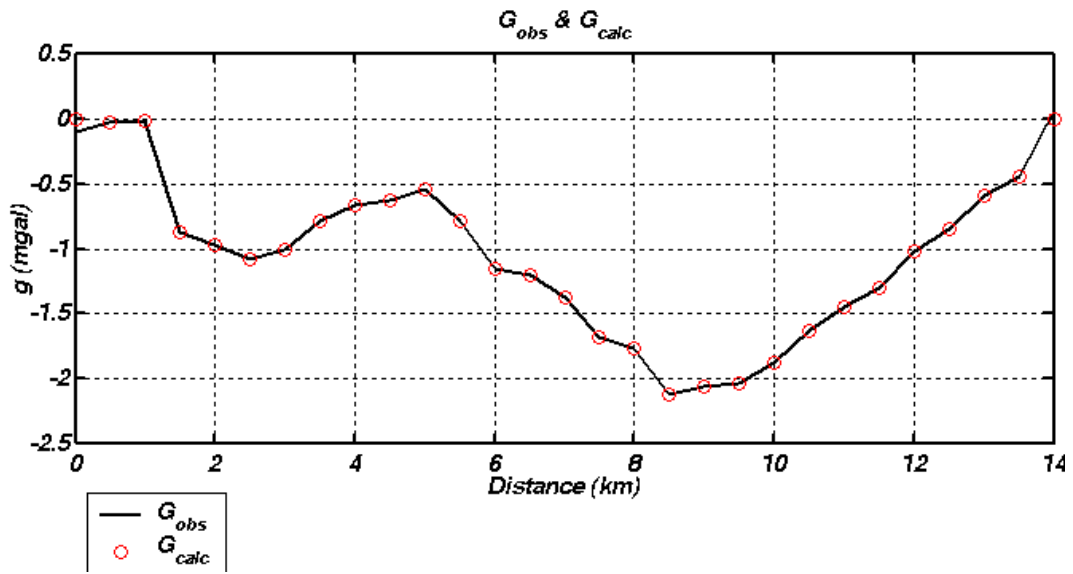
به منظور تعیین اثر نوفه بر اجرا و نتایج حاصل از برنامه، به اعمال نوفه تصادفی روی داده‌های مدل مصنوعی دوم اقدام شده است و همان‌طور که در شکل‌های ۹ الی ۱۱ مشاهده می‌شود نتایج بسیار رضایت‌بخش است. لازم به ذکر است که نوفه اعمال شده نسبت به نوفه تصادفی، تا ۲۰۰ برابر دقت دستگاه برداشت داده است. شایان توجه است در این مدل بهترین جواب در تکرار چهارم حاصل شده است، به نحوی که خطای $RMS = 128/0.9$ در تکرار اول به $RMS = 0/0.079488$ در تکرار چهارم رسیده است.



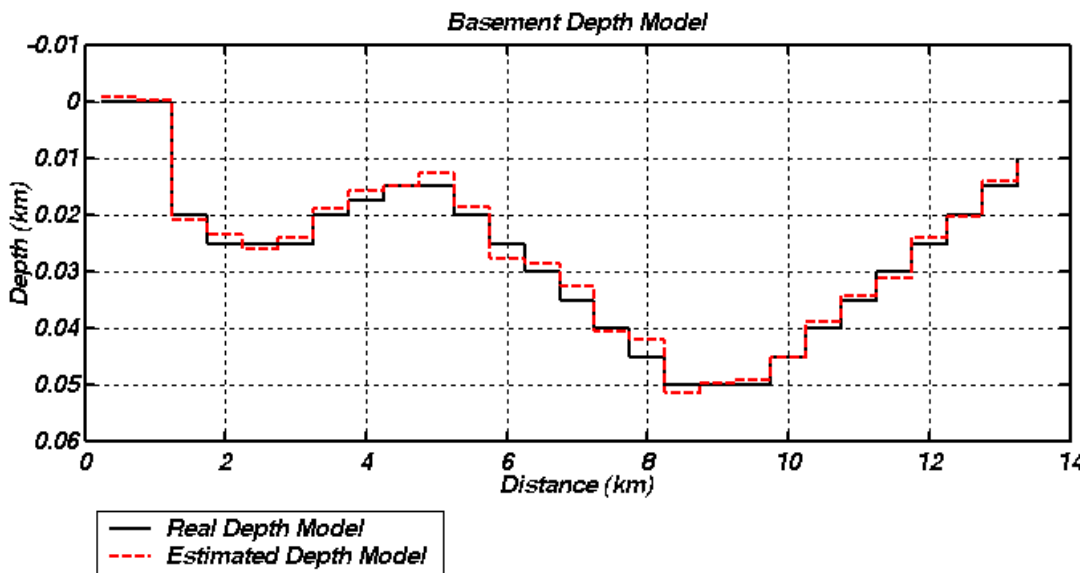
شکل ۷. گرانی محاسبه شده و مشاهده شده در تکرار دوازدهم.



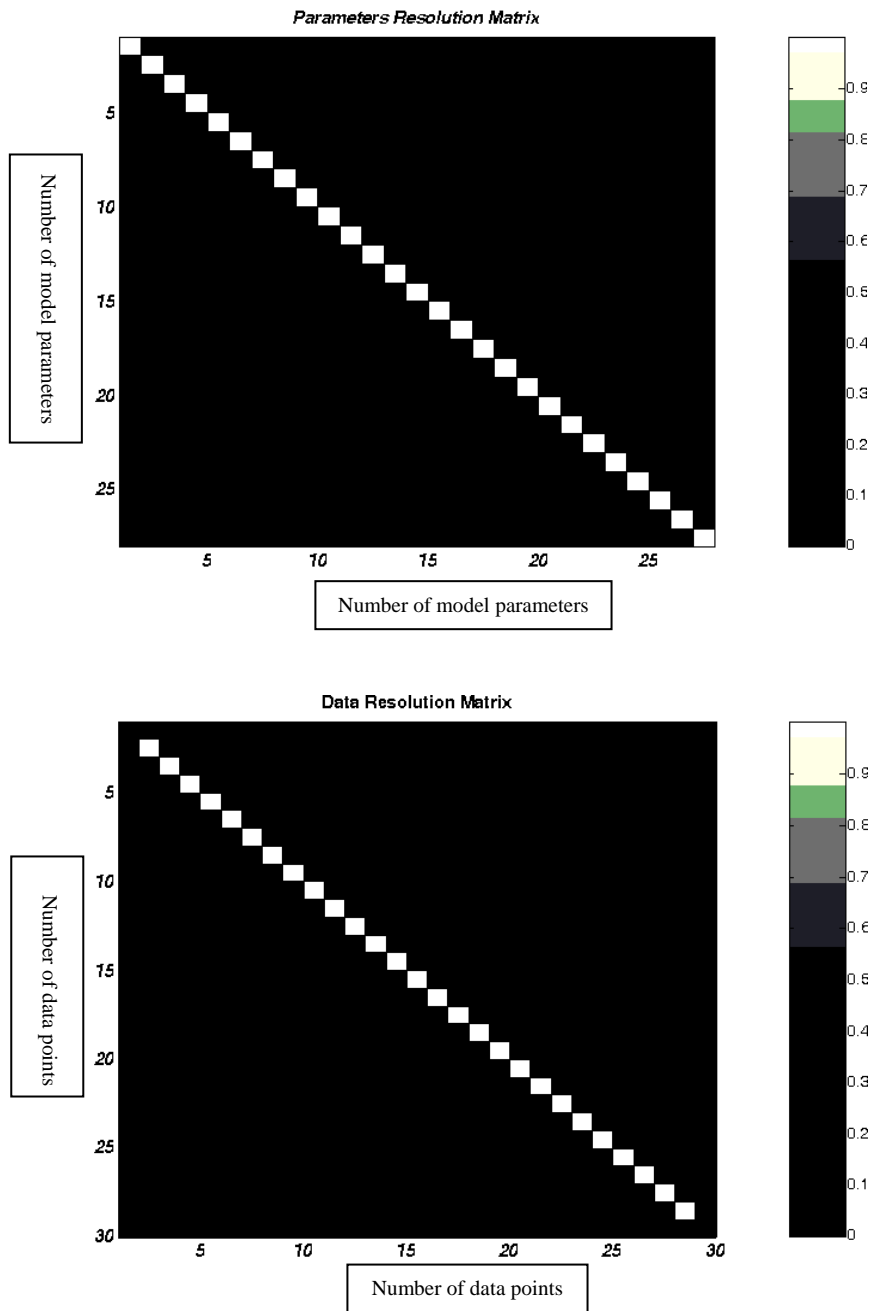
شکل ۸. هندسه سنگ‌بستر مصنوعی و برآورد شده پس از دوازده تکرار.



شکل ۹. گرانی محاسبه شده و مشاهده شده در تکرار چهارم.



شکل ۱۰. هندسه سنگ بستر مصنوعی و برآورد شده پس از چهار تکرار.



شکل ۱۱. ماتریس تحلیل پارامترهای مدل و داده در تکرار چهارم.

تهران واقع در خیابان شریعتی از حد فاصل تقاطع خیابان میرداماد تا میدان تجریش است که بخش گرانی‌سنجی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برداشت کرده است.

۴ مدل‌سازی واقعی داده‌های گرانی‌سنجی داده‌های واقعی مربوط به دو نمای موازی L و R برداشت میکروگرانی‌سنجی از محل احداث ادامه خط یک متروی

فاصله دو نمای موازی حدود ۵۰ متر است.

۲-۴ زمین‌شناسی منطقه

سایت مورد نظر روی رسوب‌های آبرفتی تهران قرار دارد.

این رسوب‌ها به ترتیب از بالا به پایین عبارت‌اند از:

- لایه خاک رویی.
- آبرفت‌های تهران (C): همگن و متشکل از قلوه‌سنگ، شن و ماسه و سیلت که با حرکت به سمت جنوب تبدیل به لایه‌های ماسه‌ای-سیلتي می‌شود. این رسوب‌ها عمدتاً دارای لایه‌بندی افقی‌اند.

۱-۴ موقعیت جغرافیایی منطقه

محل مورد نظر برای بررسی میکروگرانی‌سنجی، مسیر در نظر گرفته شده برای حفر تونل مربوط به ادامه خط شماره ۱ مترو تهران، از تقاطع خیابان میرداماد و شریعتی به سمت شمال تا میدان تجریش به مختصات نقطه شروع در تقاطع میرداماد-شریعتی $35/76$ درجه شمالی و $51/45$ درجه شرقی است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. نقشه جغرافیایی منطقه.

تقریبی ۵۰ متر و نقاط برداشت به فاصله ۱۵-۱۰ متر است که اولی با نام اختصاری L و دومی با نام اختصاری R خوانده می‌شود. نمای L شامل ۳۷۷ نقطه برداشت و به طول ۵۵۷۱/۳ متر است و نمای R دربردارنده ۳۶۶ نقطه برداشت و به طول ۵۶۱۸ متر است.

۴-۴ تعیین مرز لایه A در زیرنمای L

در شکل ۱۳ منحنی بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای با خط ممتد و منحنی بی‌هنجاری گرانی پس از اعمال تصحیح لازم با نقطه‌چین ملاحظه می‌شود. برنامه رایانه‌ای پس از ۱۰ تکرار به همگرایی مطلوب با $RMS = 0.011867$ رسید و نمودار منحنی‌های بی‌هنجاری گرانی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود تطابق خوبی دارد. مدل سنگ‌بستر برای مرز لایه A در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، همان‌طور که روشن است، مرز لایه A در ابتدای نما، از حدود ۵ الی ۱۰ متر به حدود ۴۰ متر و در عمیق‌ترین منطقه که حد فاصل ۴ تا ۵ کیلومتری نما است، به حدود ۸۰ متر می‌رسد که با داده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مطابقت دارد. برای تعیین دقت و کیفیت جواب‌های حاصل، ماتریس تحلیل پارامترهای مدل و ماتریس تحلیل داده در شکل ۱۶ محاسبه شده‌اند.

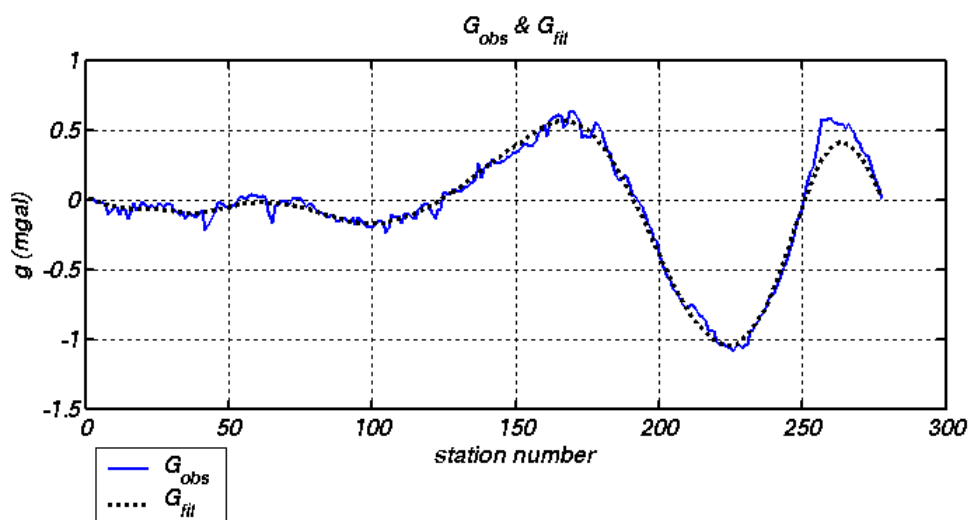
- آبرفت‌های ناهمگن شمال تهران (B): رسوب‌های سخت نشده و ناهمگن - مخلوطی از قلوه سنگ، شن و ماسه، سیلت و رس به همراه بلوک‌های درشت و پراکنده و حتی تخته سنگ.

- آبرفت‌های هزار دره (A): کنگلومرای همگنی از قلوه سنگ، شن و ماسه است که فضای بین دانه‌های آن را سیلت و رس پر کرده است. از مشخصات این سازند می‌توان به لایه‌بندی منظم و شیب زیاد لایه‌ها، سیمانی شدن خوب و تخلخل بسیار کم در جهت عمود بر لایه‌ها اشاره کرد.

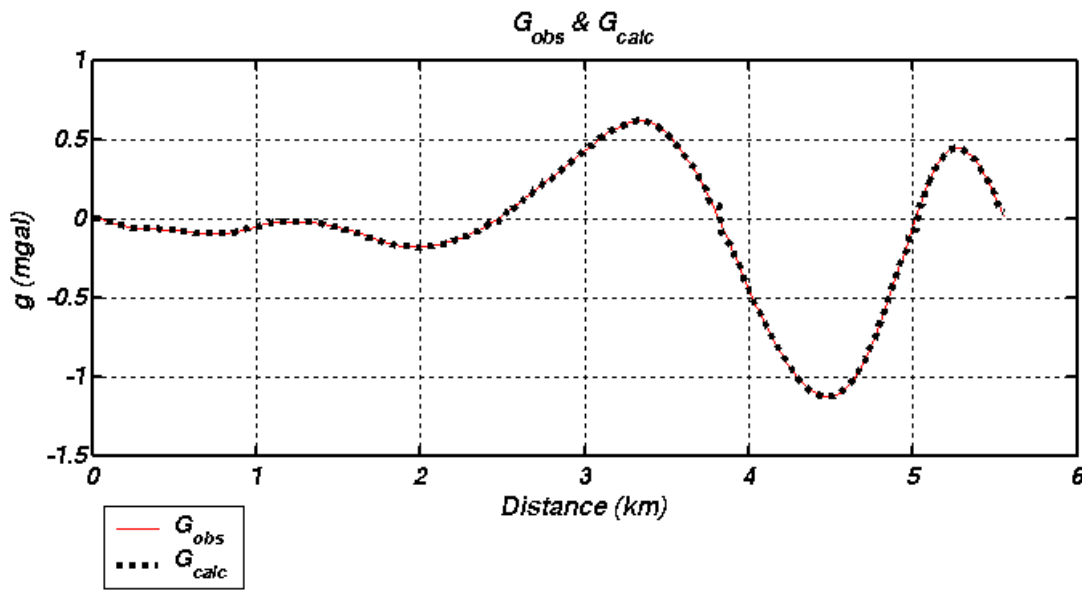
طبق گزارش‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، ضخامت آبرفت‌های C کمتر از ۵ متر و آبرفت‌های B حداکثر تا عمق ۱۷-۱۳ متر ادامه دارد و از آن به بعد به آبرفت‌های هزار دره A بر می‌خوریم. لازم به ذکر است که هدف این طرح، تعیین مرز لایه A با لایه‌های B و C است که تباین چگالی فرضی آن $\Delta\rho = -40.0 \text{ grcm}^{-3}$ در نظر گرفته شده است.

۳-۴ عملیات میدانی

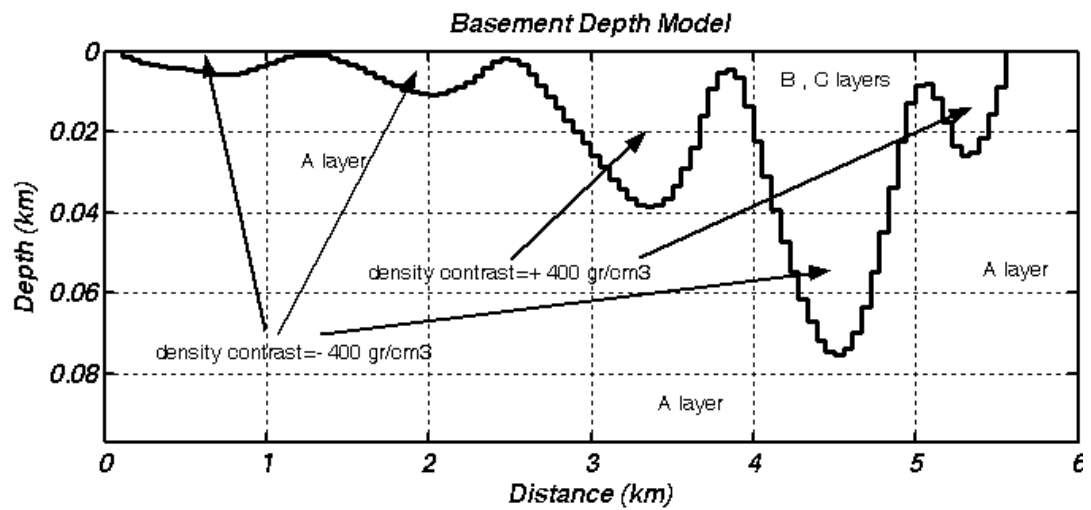
برداشت‌های میکروگرانی‌سنجی در طول دو نمای موازی جنوب به شمال در دو طرف خیابان شریعتی به فاصله



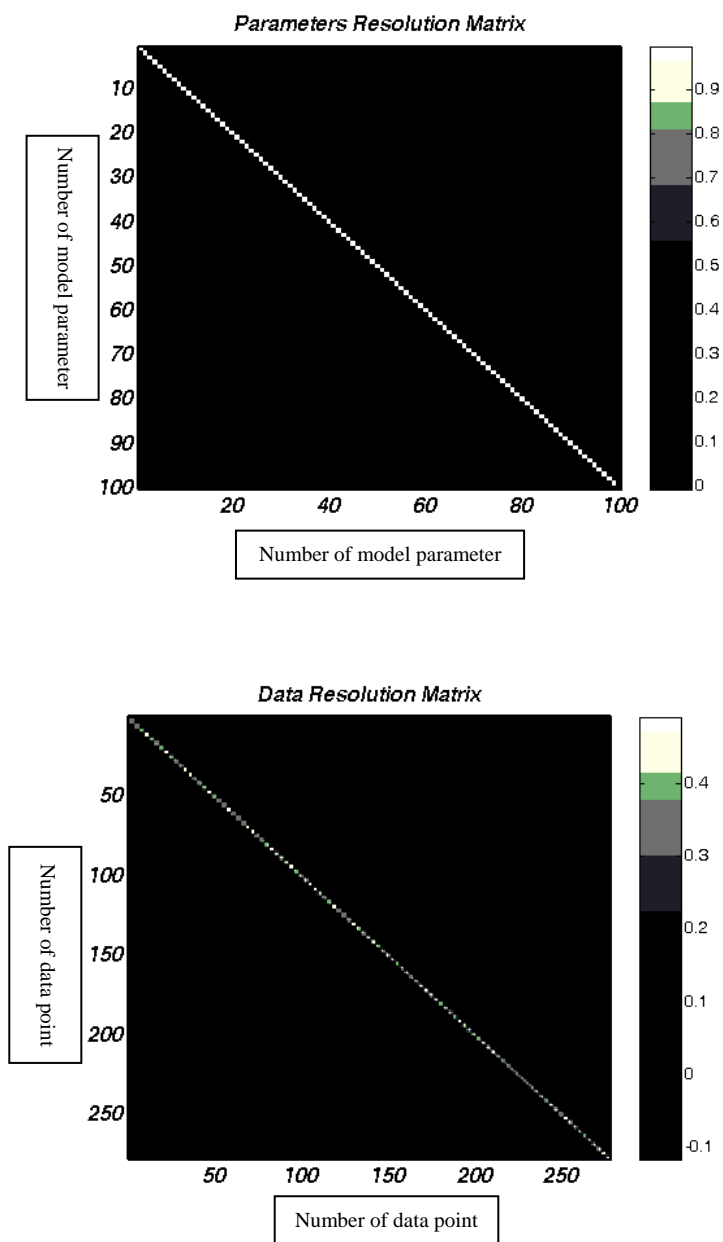
شکل ۱۳. بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده قبل و بعد از تصحیح لازم برای نمای L.



شکل ۱۴. بی‌هنجاری مشاهده شده و محاسبه شده در تکرار دهم وارون‌سازی نمای L.



شکل ۱۵. هندسه سنگ‌بستر مدل‌سازی شده پس از ۱۰ تکرار در زیر نمای L.

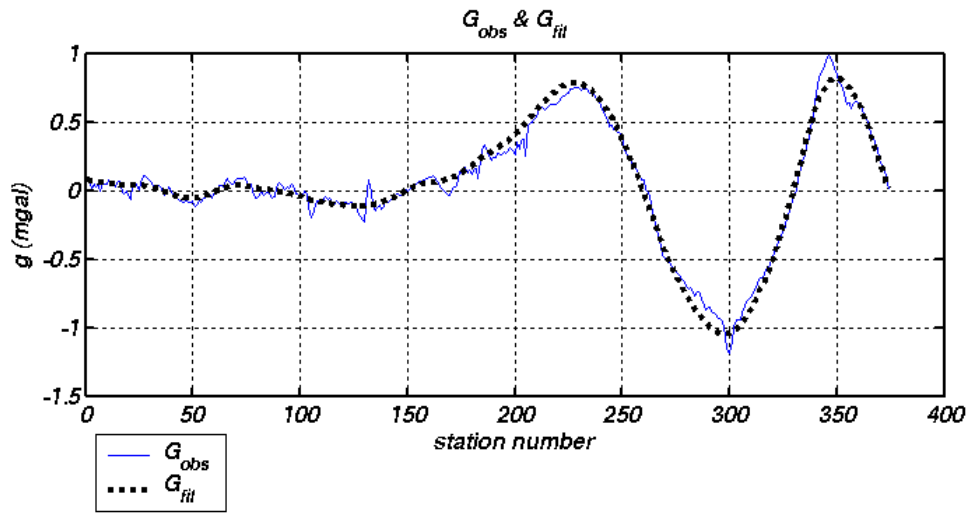


شکل ۱۶. ماتریس تحلیل داده و پارامترهای مدل پس از ۱۰ تکرار برای نمای L.

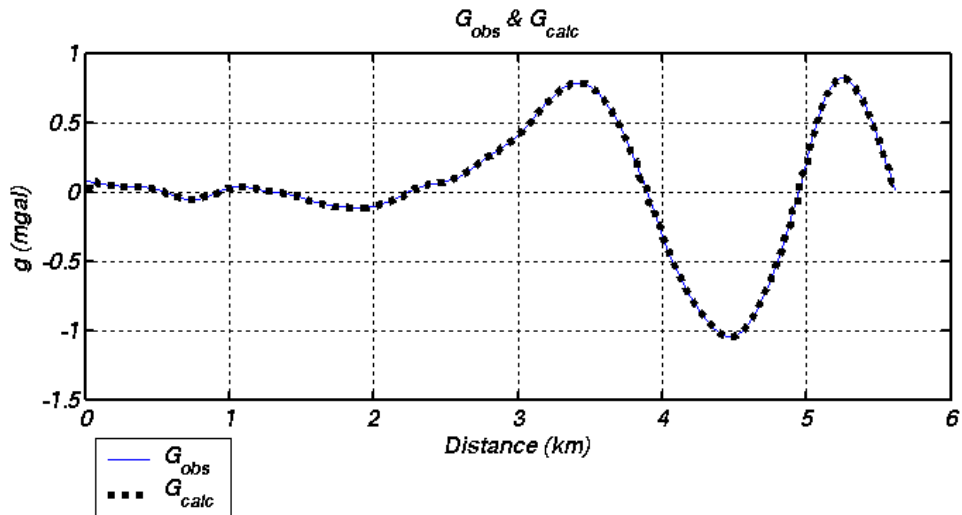
۴-۵ تعیین مرز لایه A در زیر نمای R

آوردده شده است. در این وارون‌سازی نیز برنامه پس از ۹ تکرار به همگرایی مطلوب با $RMS = 0.02082$ رسیده است.

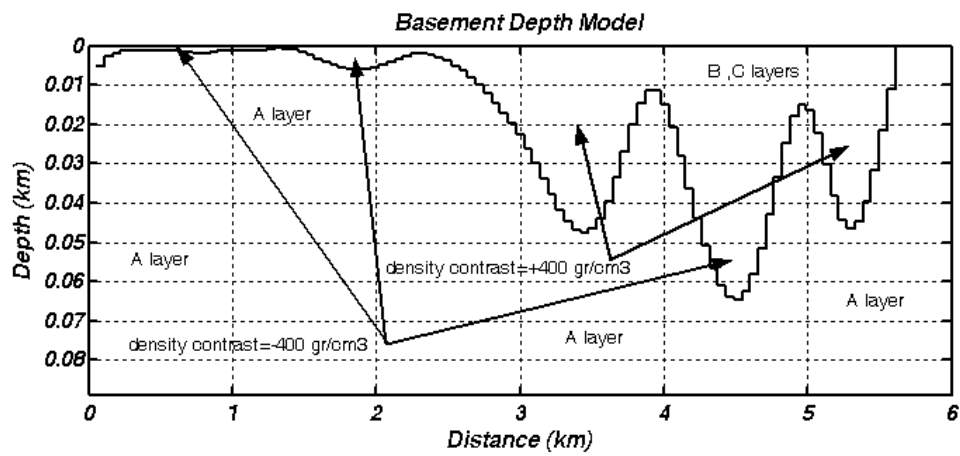
فرایندی که در بخش ۴-۴ برای نمای L ذکر شد، دقیقاً به منظور بررسی مرز لایه A در زیر نمای R صورت گرفته است که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ است.



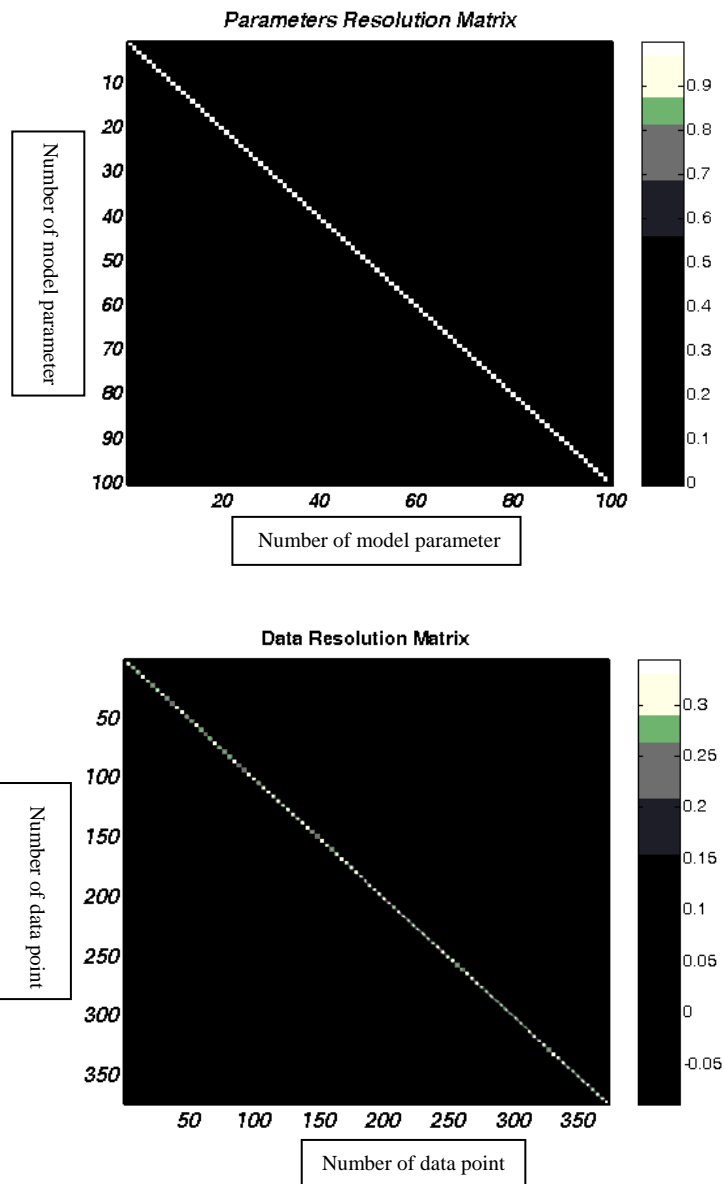
شکل ۱۷. بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده قبل و بعد از تصحیح لازم برای نمای R.



شکل ۱۸. بی‌هنجاری مشاهده شده و محاسبه شده در تکرار نهم وارون‌سازی نمای R.



شکل ۱۹. هندسه سنگ‌بستر مدل‌سازی شده پس از ۹ تکرار در زیر نمای R.



شکل ۲۰. ماتریس تحلیل داده و پارامترهای مدل پس از ۹ تکرار برای نمای R.

۵ نتیجه‌گیری

پل‌های معلق است. طرح راهکارهای مناسب، کم‌هزینه و سهل در به انجام رساندن دقیق این مقوله، از اهداف دانشمندان علوم زمین است. از آنجا که بین سنگ‌بستر و لایه‌های بالایی همواره تباین چگالی وجود دارد، در نتیجه، گرانی‌سنجی که فلسفه وجودی آن مرتبط با وجود تغییرات چگالی

تعیین هندسه سنگ‌بستر و در کنار آن تعیین مرز لایه‌های دارای تباین چگالی و در اعماق متفاوت، امروزه جزو اهداف حیاتی در بسیاری از طرح‌های عمرانی و زیربنایی از جمله احداث بناهای عظیم، تونل‌های زیرزمینی برای انتقال آب یا قطارهای زیرزمینی و یا محل احداث دکل

مهندس سعید سلیمی، کارشناسان باتجربه بخش گرانی سنجی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران که زحمت برداشت داده‌های واقعی را برعهده داشته‌اند کمال تشکر و قدردانی دارند.

منابع

- Bhattacharya, B. K., and Navolio, M. E., 1975, Digital convolution for computing gravity and magnetic anomalies due to arbitrary bodies: *Geophysics*, **40**, 981-992.
- Bott, M. H. P., 1960, The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophysical: J. Roy. Astron. Soc.*, **3**, 63-67.
- Chakravarthi, V., Singh, S. B., and Ashok Babu, G., 2001, INVER2DBASE-A program to compute basement depths of density interfaces above which the density contrast varies with depth. *Comput. Geosci.*, **27**, 1127-1133.
- Chakravarthi, V., and Sundararajan, N., 2005, Gravity modeling of 2^{1/2}-D sedimentary basin-a case of variable density contrast: *Comput. Geosci.*, **31**, 820-827.
- Gomez-Ortiz, D., and Bhigu, N., 2005, 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm: *Comput. Geosci.*, **31**, 513-520.
- Jianzhong, Z., Benshan, Z., Xixiang, Z., and Yun, D., 2001, Gravity anomalies of 2-d bodies with variable density contrast: *Geophysics.*, **66**, 809-813.
- Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters: *J. Sac. Indust. Appl. Math.*, **II**, 431-441.
- Menke, W., 1989, *Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory*, Academic Press, Inc.
- Morgan, N. A., and Grant, F. S., 1963, High speed calculation of gravity and magnetic profiles across two-dimensional bodies having an arbitrary cross-section: *Geophys. Prospect.*, **11**, 10-15.
- Murthy, I. V. R., and Rao, S. J., 1989, A fortran 77 program for inverting gravity anomalies of two-dimensional basement structures: *Comput. Geosci.*, **15**, 1149-1156.
- Murthy, I. V. R., and Rama Rao, P., 1993, Inversion of gravity and magnetic anomalies of two-dimensional polygonal cross-sections: *Comput. Geosci.*, **19**, 1213-1228.

است، می‌تواند کمک شایانی به تعیین هندسه سنگ‌بستر کند.

در این مقاله نویسندگان از روش دوبعدی تعیین هندسه سنگ‌بستر با فرض تباین چگالی ثابت و شبیه‌سازی آن با مجموعه‌ای از منشورهای دوبعدی کنار هم چیده شده، که در یک فرایند وارون‌سازی غیرخطی و در مجموعه‌ای از تکرارهای هدایت شده، عمق سنگ‌بستر را به‌دست می‌دهد، بهره برده‌اند.

برنامه رایانه‌ای روی داده‌های مصنوعی و واقعی آزمایش شد و جواب‌های حاصل نتایج رضایت‌بخشی داشتند. ورودی‌های برنامه فقط شامل مقدار عددی تباین چگالی $\Delta\rho$ و مقادیر اندازه‌گیری داده‌های گرانی‌سنجی است که کمترین ورودی در بین کلیه روش‌های حاضر است. همان‌طور که ملاحظه شد، برنامه با انواع مدل‌های سنگ‌بستر ساده، عمیق و کم‌عمق، نتایج خوبی را در بر داشت. به‌طور کلی می‌توان گفت نه فقط سنگ‌بستر، بلکه مرز هر دو لایه که دارای تباین چگالی باشند را می‌توان با این برنامه تعیین کرد. در مورد مدل اولیه ورودی به برنامه وارون‌سازی نیز مشاهده شد، علیرغم اینکه در همه مدل‌های مصنوعی عمیق، عمق ثابتی داده شده ولی نتیجه خوبی به‌دست آمده که خود پایداری برنامه را در مقابل مدل اولیه می‌رساند، در حالی که در دیگر روش‌ها که مدل اولیه را به‌صورت یک چند ضلعی، با تعیین رأس آن وارد می‌کنند یک ناپایداری شدید به نحوه تعیین این مرزها مشاهده می‌شود. از آنجا که برنامه تهیه شده در این تحقیق محدودیتی در تعداد داده‌های ورودی ندارد، یک مرز پیوسته در کل طول نمای پنج کیلومتری را به نمایش گذاشته است که دید بصری بهتری به مفسر علوم زمین می‌دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آقایان مهندس وهاب شعراباف‌شعار و

- Rao, B. S. R., and Murthy. I. V. R., 1978, Gravity and magnetic methods of prospecting: Arnold-Heinemann (India) Pvt. Ltd., AB,9 Safdar jang Enclave. New Delhi, 390 p.
- Roy, A., 1962, Ambiguity in geophysical interpretations: Geophysics., **27**(1), 90-99.
- Talwani, M., Worzel, J., and Ladisman, M., 1959, Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: J. Geophys. Res., **64**, 49-59.