

تعیین عمق سنگ بستر با استفاده از روش گرانی‌سنجی در منطقه جنوب زاگرس

آرش متشرعی^۱ و حسین زمردیان^۲

^۱ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد، واحد نوشهر و چالوس، ایران

^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (e-mail: hzomorod@ut.ac.ir)

(دریافت: ۸۵/۰۸/۲۸، پذیرش نهایی: ۸۶/۰۸/۰۶)

چکیده

گرانی‌سنجی روش موثر و نسبتاً ارزانی برای برآورد ضخامت حوزه رسوبی و عمق سنگ بستر است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های گرانی موجود در جنوب زاگرس و روش وارون تکراری صفحه نامحدود (Jachens, et al., 1990) ضخامت حوزه رسوبی که روی یک ناودیس که خود مابین دو تاقدیس قرار گرفته برآورد شده است. برای آزمایش صحت و کارآمدی روش داده‌های مصنوعی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی مورد آزمایش قرار گرفته است. برای برآورد چگالی و ناحیه‌بندی منطقه به لحاظ چگالی از تحلیل مقاطع تلتون استفاده شده است. عمق برآورد شده با این روش به لحاظ زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی تا حدی مورد تایید است.

کلیدواژه‌ها: گرانی‌سنجی، عمق سنگ بستر

۱ مقدمه

برآورد عمق سنگ بستر یکی از هدف‌های مهم ژئوفیزیک است که کاربرد بسیاری در مهندسی و اکتشافات دارد. برای مثال در سدسازی برای طراحی پی و ساختار سازه سد عامل با اهمیتی است. تعیین عمق سنگ بستر و در نتیجه تعیین حوزه‌های رسوبی در برآورد خطر زمین‌لرزه نیز نقش زیادی دارد چرا که حوضه‌های رسوبی می‌توانند با به دام انداختن امواج سطحی سبب افزایش بزرگی و طولانی شدن مدت زمین‌لرزه شوند.

روش صفحه نامحدود نخستین بار (Bott, 1960) برای برآورد شکل‌های دوبعدی حوزه‌های رسوبی به کار گرفته شد. الگوریتم روش را (Cordell, 1968) با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فترن تنظیم کرد. همچنین روش وارون‌سازی گرانی تکراری برای تعیین عمق نهشته‌های سنوزوئیک در جنوب غرب نوادا و جنوب شرق کالیفرنیا را (Blakely et. al, 1998) به کار برد.

۲ روش تحقیق

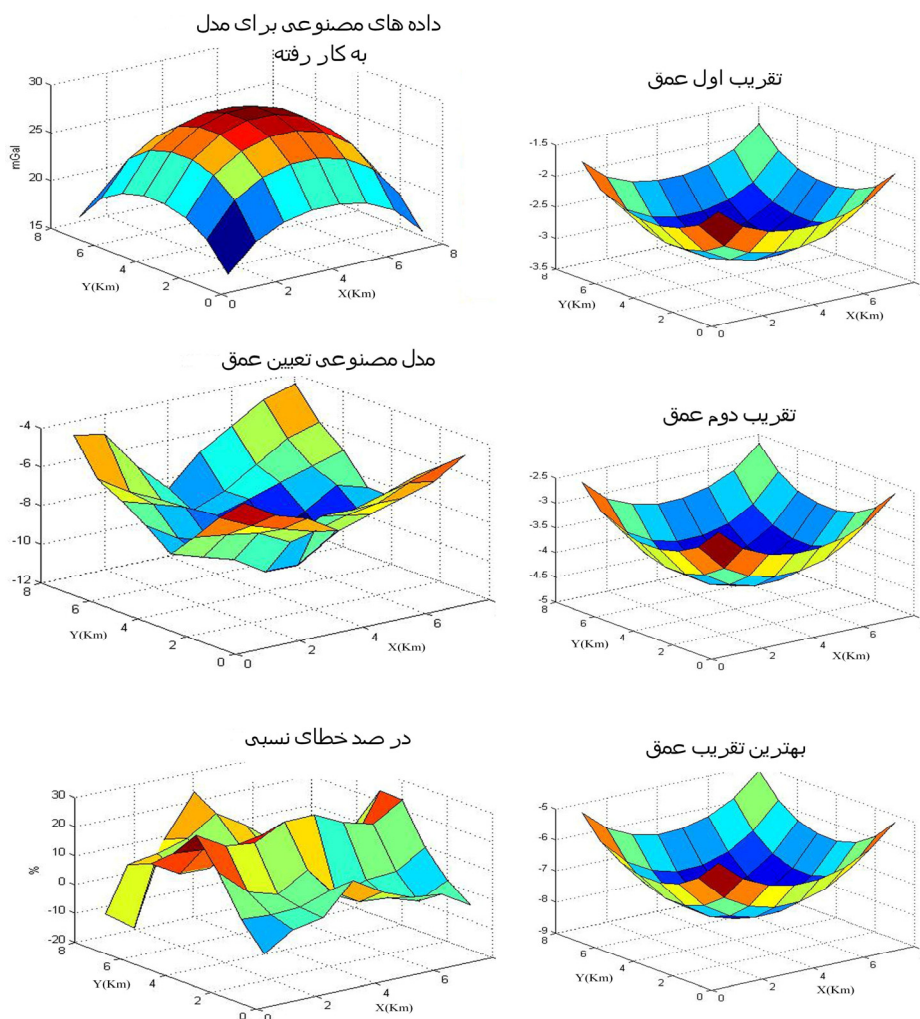
تقریب اول ساختار با استفاده از رابطه صفحه بوگه به دست می‌آید. میدان گرانی این مدل اولیه محاسبه می‌شود و برای نقاط شبکه تفاضل گرانی محاسبه از گرانی مشاهده شده برای بهبود مدل اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد و به این ترتیب تقریب دومی برای مدل ساختار به دست می‌آید. این فرایند به صورت تکراری ادامه می‌یابد تا تطابق قابل قبولی میان میدان گرانی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده حاصل شود. به طور خلاصه الگوریتم روش شامل چهار گام است:

۱- برآورد ضخامت اولیه برای هر نقطه از شبکه با استفاده

از رابطه صفحه تخت بوگه $\delta g_B = 2\pi G \rho t$ بنابراین

$$t_0 = \frac{\delta g_B}{2\pi G \rho} \quad (1)$$

که در آن t_0 ضخامت اولیه و ρ تباین چگالی، G ثابت گرانشی است.



شکل ۱ الف. نتایج مدل مصنوعی برای تعیین عمق حالت سه بعدی.

که باید به ضخامت اولیه افزوده شود.
 ۳- فرایند تکرار تا زمانی که C_t به سمت صفر میل کند، ادامه می‌یابد.
 برای آزمون قابلیت الگوریتم مزبور برای مدل‌سازی ۳ بعدی از مدلی مصنوعی استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۱-الف نشان داده شده است. تباین چگالی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. چنانچه ملاحظه می‌شود بیشترین در صد خطا (۲۰٪) در نقاطی اتفاق می‌افتد که تغییر در ضخامت بلوک سریع باشد (که البته به جز در گسلش‌ها، در حوزه‌های آبرفتی کمتر اتفاق می‌افتد). در حقیقت گرانی محاسباتی حالت پیوستگی بیشتری دارد و

۲- محاسبه اثر گرانشی منشور قائم (مربوط به گام ۱) با استفاده از رابطه زیر (Forsberg, 1984)

$$g = G\rho((x \ln(y+r) + y \ln(x-r) -$$
 (۲)

$$z \tan^{-1} \left(\frac{xy}{zr} \right) \frac{x^2}{x_1^2} \frac{y^2}{y_1^2} \frac{z^2}{z_1^2}$$

که در آن x و y مختصات افقی نقطه مشاهده و منشور قائم به $[x_1 : x_2]$ ، $[y_1 : y_2]$ و $[z_1 : z_2]$ محدود است.

$$C_g = g_{\text{محاسبه}} - g_{\text{مشاهده}}$$
 (۳)

تفاضل گرانی مشاهده شده از گرانی محاسبه شده

۲- محاسبه مقدار تصحیح

$$C_t = \frac{C_g}{2\pi G\rho}$$
 (۴)

نتلتون روی مقاطع و رسم نقشه پربندی چگالی سطحی، منطقه از لحاظ چگالی به سه زون زیر تقسیم شده است.

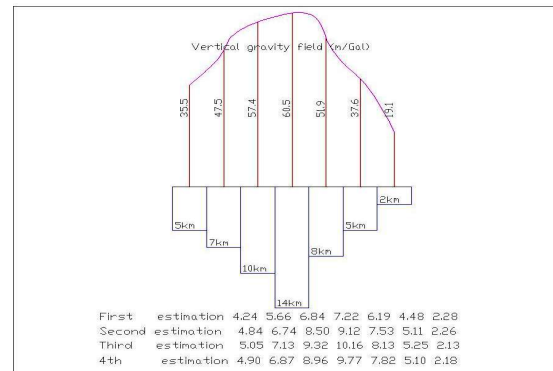
زون کم چگال که در آن تغییرات چگالی بین ۳/۲ تا ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب است.

۱- زون چگالی متوسط که در آن تغییرات چگالی بین ۲/۶ تا ۲/۸ گرم بر سانتی متر مکعب است.

۲- زون پرچگال زیاد که در آن تغییرات چگالی بیش از ۲/۸ گرم بر سانتی متر مکعب است.

این زون بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

به نظر می رسد زون با چگالی سطحی کم در نتیجه وجود نهشته های آبرفتی کواترنری در این بخش است. (نقشه زمین شناسی و تصویر ماهواره ای این موضوع را تایید می کند) و سایر زون ها که بر سطح تاقدیس و ارتفاعات تاقدیس واقع شده، به سبب تراکم سنگها و سازندها قدیمی تر دارای چگالی سطحی بیشتری اند. تصحیحات زمینگان با استفاده از الگوی هامر محاسبه شده است و نقشه بی هنجاری بوگه با استفاده از چگالی ۳ زون ذکر شده در شکل ۶ آورده شده است. با استفاده از برازش چند جمله ای درجه ۳ جداسازی میدان ناحیه ای از محلی صورت گرفته است و نقشه بی هنجاری باقی مانده در شکل ۷ نمایش شده است. از نقشه زمین شناسی شکل ۹ (نقشه زمین شناسی به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ از منطقه زاگرس) مشخص است که حوزه رسوبی روی یک ساخت ناودیزی که خود مابین دو تاقدیس واقع شده است قرار دارد. (توالی لایه های زمین شناسی در مقطع راندگی زاگرس (شکل ۸) روند لایه بندی تاقدیسی را تایید می کند.) به لحاظ زمین شناسی چون سازندهای قدیمی تر در وسط کوه قرار دارند، بنابراین ساخت مزبور یک ساخت تاقدیسی است. بر مبنای تحلیل نتلتون چگالی حوزه رسوبی به طور متوسط ۴۵/۲ تعیین شده و چگالی سنگ بستر زیرین معادل چگالی واقع در زون متوسط معادل ۷/۲ برآورد شده است که با نقشه زمین شناسی نیز

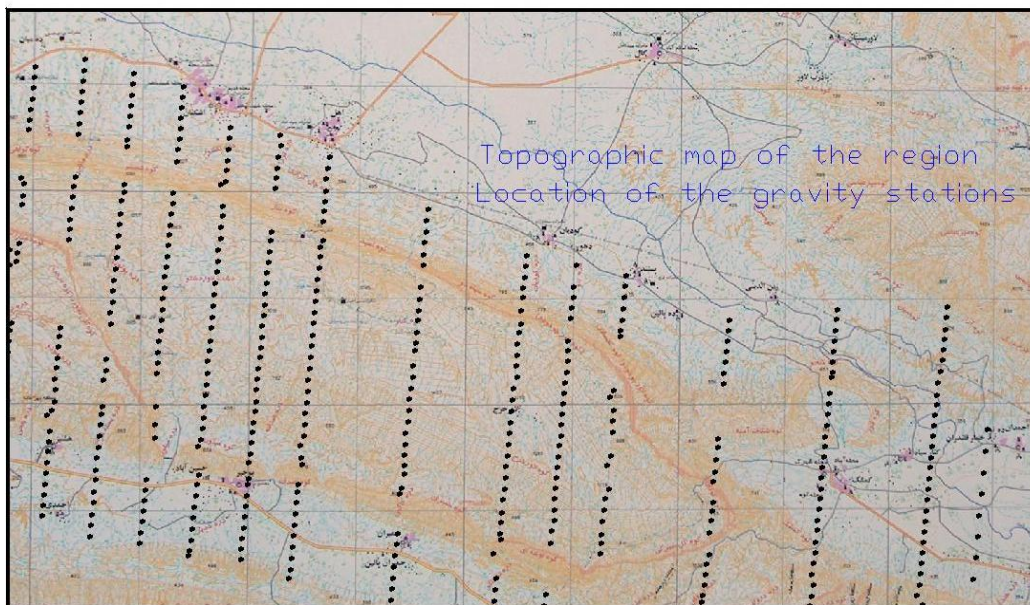


شکل ۱. نتایج مدل مصنوعی برای تعیین عمق حالت دوبعدی.

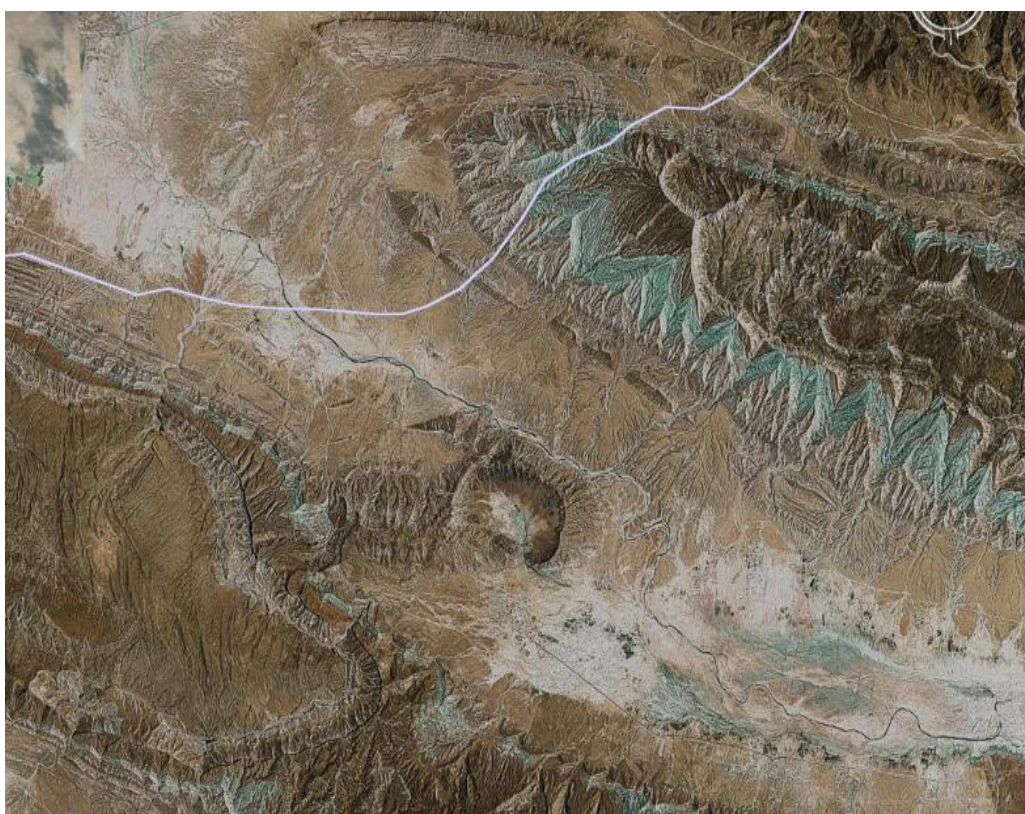
اساسا این روش نسبت به تغییرات سریع ضخامت حساسیت کمتری دارد. همچنین الگوریتم مزبور برای روش دوبعدی نیز مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۱-ب). تباین چگالی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. در این حالت نیز چهارمین ستون دارای تغییرات سریع ضخامت، نتایج ضعیف تری به دست می دهد.

۳ کاربرد داده های حقیقی

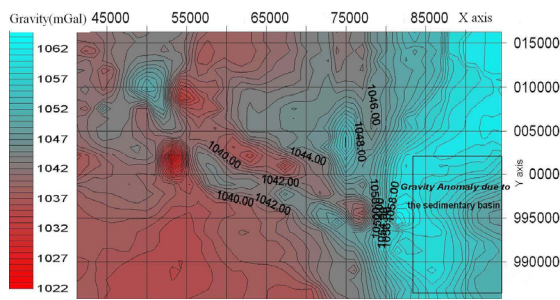
منطقه مورد بررسی در جنوب زاگرس واقع است و گسترش آن ۲۰ کیلومتر شمالی جنوبی و ۴۰ کیلومتر شرقی غربی است. موقعیت ایستگاه های اندازه گیری گرانی و پروفیل های برداشت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. تصویر ماهواره منطقه مورد بررسی در شکل ۳ قابل رویت است. برای برآورد چگالی میانگین سطحی و اعمال تصحیح بوگه، تحلیل مقطع های نتلتون بر روی داده های گرانی صورت گرفت. در شکل ۴ نمونه ای از مقاطع مزبور نمایش داده شده است. پروفیل های گرانی با چگالی های گوناگون در شکل ۴-ب و مقطع توپوگرافی در شکل ۴-الف نمایش داده شده است. ضریب همبستگی بین پروفیل های بوگه و مقطع ارتفاعی با استفاده از نرم افزار اکسل محاسبه شد، کمترین ضریب همبستگی، معیار انتخاب بهترین چگالی بوده است. پس از اعمال تحلیل



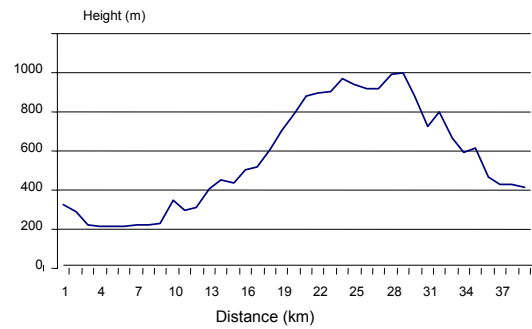
شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های گرانی سنجی روی نقشه توپوگرافی (برداشت‌ها به صورت مقاطع شمالی جنوبی است).



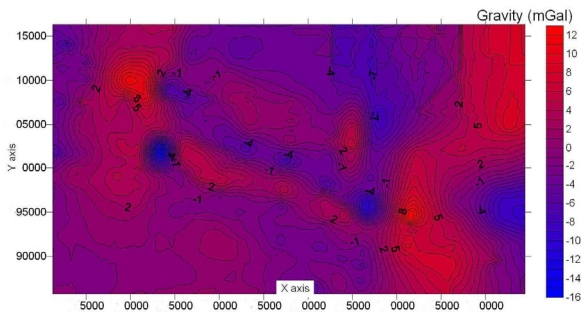
شکل ۳. تصویر ماهواره‌ای منطقه.



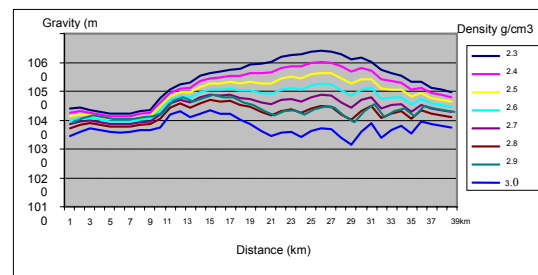
شکل ۶. بی‌هنجاری بوگه با استفاده از چگالی سطحی گوناگون.



شکل ۴ الف. نمونه‌ای از مقطع توپوگرافی.



شکل ۷. بی‌هنجاری باقی‌مانده با استفاده از برازش چند جمله‌ای درجه سه.

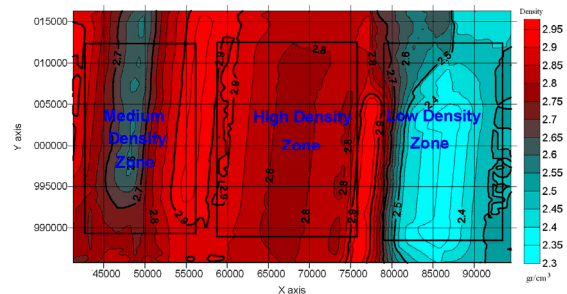


شکل ۴ ب. پروفیل ننتون (تصحیح تخته بوگه با چگالی متغیر).

پس از تکرار سوم در شکل ۱۳ و اختلاف بین گرانی محاسبه شده و گرانی مشاهده شده در شکل ۱۴ آورده شده است. به منظور بررسی میزان هم‌خوانی بین گرانی محاسباتی و مشاهداتی و کیفیت برازش داده‌های گرانی محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفته است (جدول‌های ۱ تا ۳). جدول شماره ۳ آزمون T-student برای آزمایش همبستگی بین دو نمونه با نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. با توجه به این که سطح زیر نمودار تابع توزیع مزبور کوچک‌تر از ۰/۰۵ است، بنابراین فرض H_0 (مبنی بر استقلال دو نمونه آماری) رد می‌شود و همبستگی دو دسته آماری مورد تایید قرار می‌گیرد.

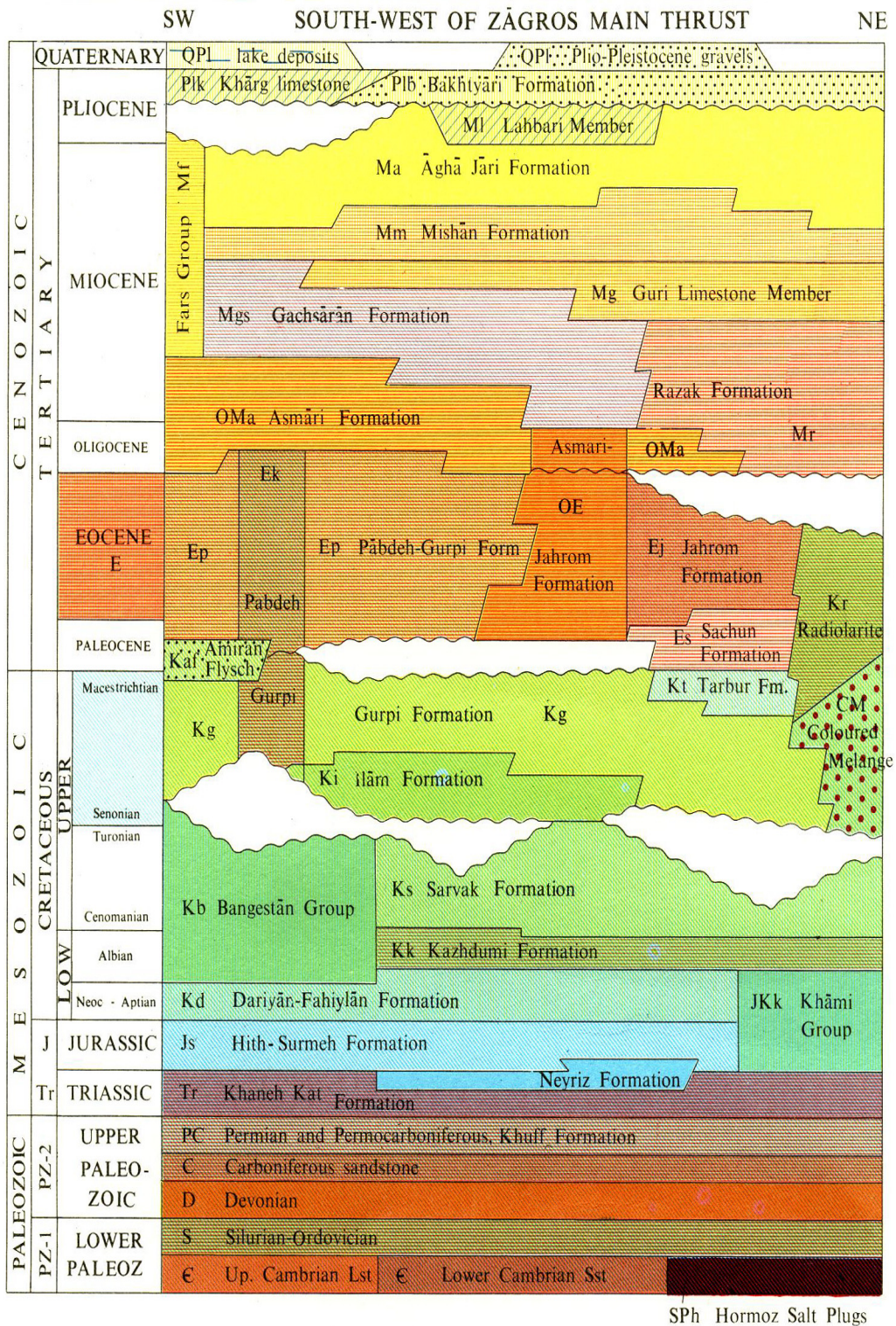
جدول ۱. اطلاعات آماری دو نمونه.

خطای میانگین استاندارد	انحراف معیار	تعداد	میانگین	زوج نمونه
۰.۳۱۲۵	۴.۱۹۲۸	۱۸۰	-۴.۰۷۹۱	گرانی مشاهده شده
۰.۳۱۵۱	۴.۲۲۷۲	۱۸۰	-۴.۱۱۸۰	گرانی محاسبه شده

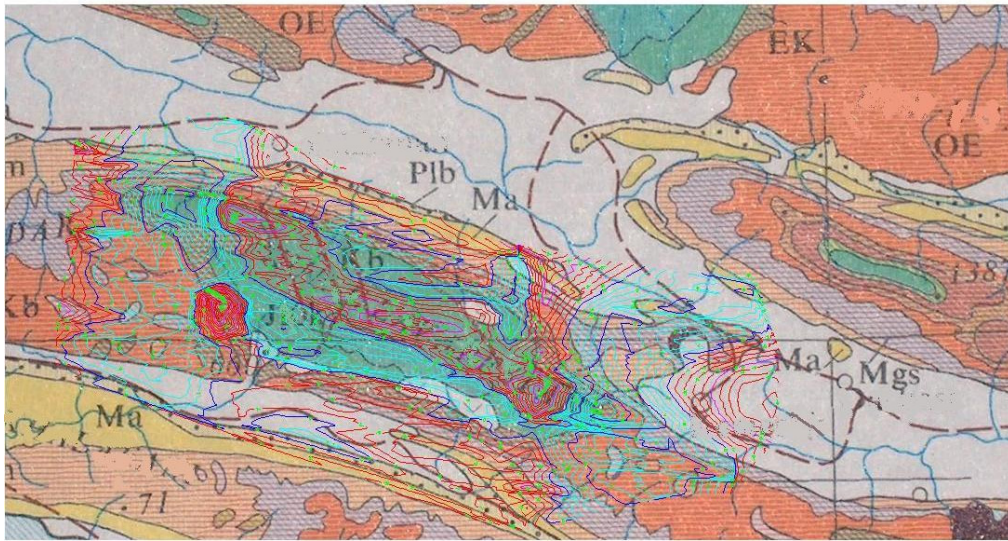


شکل ۵. نقشه تغییرات چگالی سطحی با استفاده از تحلیل مقاطع ننتون.

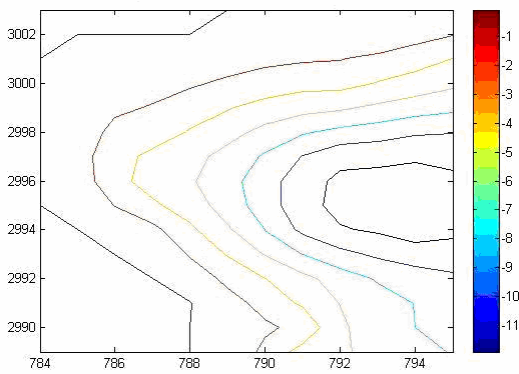
مطابقت دارد. بنابراین تباین چگالی بین حوزه رسوبی و سنگ بستر ۲۵/۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به بی‌هنجاری گرانی به دست آمده و نقشه زمین‌شناسی مدلی فرضی برای منطقه پیشنهاد شده که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. عمق رسوبات، با استفاده از روش صفحه نامحدود برآورد شده است. بیشینه عمق سنگ بستر برابر ۲/۱ کیلومتر محاسبه شده است (شکل ۱۰). نقشه گرانی باقیمانده اطراف حوزه رسوبی در شکل ۱۲ نشان داده شده است (این نقشه بخشی از نقشه گرانی بوگه است که بر منطقه رسوبی منطبق است). میدان گرانی محاسبه شده



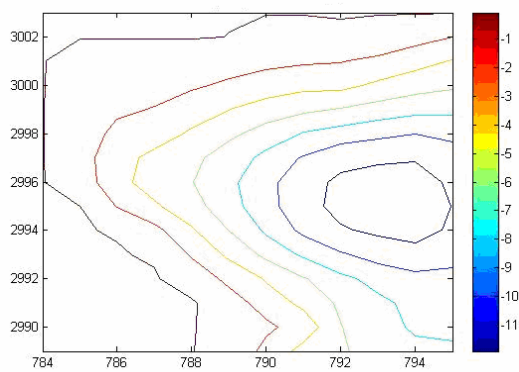
شکل ۸ مقطع راندگی اصلی زاگرس.



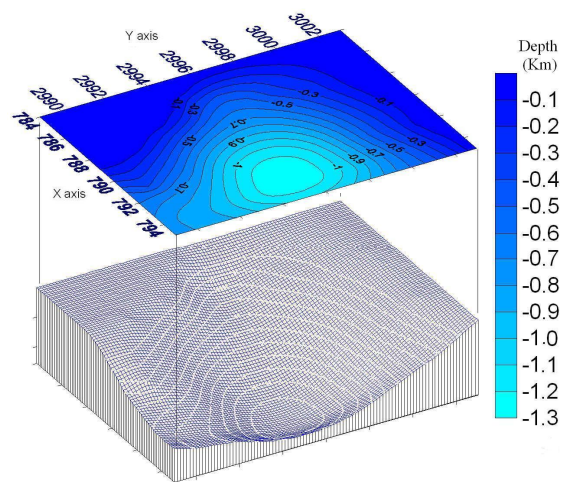
شکل ۹. نقشه زمین‌شناسی منطقه (خطوط پربندی بی‌هنجاری باقی‌مانده گرانیت است).



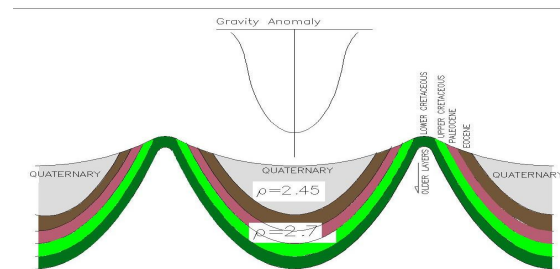
شکل ۱۲. گرانیت مشاهده شده در اطراف حوزه رسوبی.



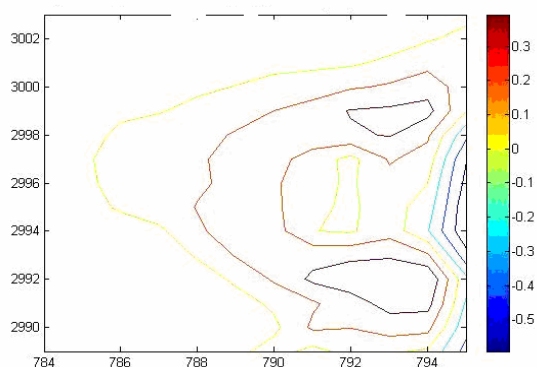
شکل ۱۳. گرانیت محاسباتی در تکرار سوم.



شکل ۱۰. برآورد عمق رسوبات آبرفتی بر مبنای روش تخته نامحدود بیشینه عمق ۲/۱ کیلومتر.



شکل ۱۱. مدل فرضی زمین‌شناسی منطقه شکل ۱۲ گرانیت باقی‌مانده اطراف حوزه رسوبی.



شکل ۱۴. اختلاف بین گرانی محاسباتی و مشاهداتی در تکرار سوم.

جدول ۲. همبستگی بین دو نمونه.

	تعداد	ضریب همبستگی	Sig.
گرانی مشاهده شده و گرانی محاسبه شده	180	.999	.0001

۴ نتیجه گیری و پیشنهادات

چنانچه مشاهده می شود (شکل های ۱۴ و ۱۵) بیشترین اختلاف بین گرانی مشاهده با گرانی محاسبه شده در سمت راست منطقه و کمتر از ۰/۵ میلی گال معادل خطای

جدول ۳. تست همخوانی زوج نمونه (آزمون استیودنت).

		متوسط اختلاف زوج نمونه	انحراف معیار اختلاف زوج نمونه	خطای متوسط استاندارد زوج نمونه	بازه اطمینان ۹۵٪ برای اختلاف زوج نمونه	t	df	Sig. (2- tailed)	
زوج نمونه	گرانی مشاهده شده و گرانی محاسبه شده	3.887E-02	.2088	1.556E-02	8.160E-03 سطح بالا	6.958E-02 سطح پایین	2.498	179	.013

برای چگالی، از نتایج حاصل از تحلیل نلتون استفاده شده است که دقت کمتری برای تعیین چگالی دارد (البته دارای مزیت یکپارچگی بیشتر است). در صورت دسترسی به اطلاعات چگالی، از گمانه ها نتایج بهتری حاصل می شود.

اگرچه روش صفحه نامحدود برای تعیین ضخامت لایه، روشی نسبتاً قدیمی است ولی هنوز هم از بهترین و موثرترین روش ها در برآورد ضخامت بی هنجاری های لایه ای به شمار می رود. نظر به این که بهبود مدل پوسته فلات ایران دارای اهمیت بسیاری است (نظیر تعیین موقعیت دقیق زمین لرزه ها و مطالعات لرزه زمین ساخت)، بدین منظور استفاده از این روش با کاربرد داده های گرانی موجود در بانک جهانی (BGI) و داده های جدید تهیه شده سازمان نقشه برداری کشور پیشنهاد می شود.

نسبی ۰/۴۵٪ است (به دلیل امتداد حوزه رسوبی به سمت شرق و انفصال داده های میدان گرانی در این منطقه خطا افزایش می یابد). محاسبات آماری همبستگی مناسبی بین گرانی محاسبه شده و گرانی مشاهده شده نشان می دهد. عمق محاسبه شده با شواهد توپوگرافی و ژئومورفولوژی تطابق خوبی دارد، اختلاف ارتفاع حدود ۸۰۰ متر از سطح رسوبات تا قله تاقدیس و همچنین همخوانی شیب سنگ بستر با شیب چین خوردگی تا حدی نتایج برآورد عمق را تایید می کند. در مقایسه با تحقیقات سایر محققان نظیر بلیکلی، جاجنس و مورینگ نقطه قوت تحقیقات مزبور استفاده از اطلاعات دقیق تر چگالی حاصل از چاه ها است (در این تحقیقات چگالی به صورت تابع متغیر با عمق در نظر گرفته شده است). از طرفی به سبب نبود دسترسی به اطلاعات درون گمانه ای

- Cordell, L. and Henderson, R. G., 1968, Iterative three-dimensional solution of gravity anomaly data using a digital computer, *Geophysics*, **33**, 596-601
- Foresberg, R., 1984, A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling, Report no 355, Department of Geodesic Science and survey, Ohio State University, Columbus, OH, 129 pp.
- Jachens, R. C. and Moring, B. C., 1990, Maps of thickness of Cenozoic deposits and isostatic residual gravity over basement in Nevada: U. S. Geol. Surv. Open-File Report 90-404.
- Plouff, D. 1992, Bouguer gravity anomaly and isostatic residual gravity maps of the Reno 1 & deg; by 2 & deg; quadrangle, Nevada and California: U. S. Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF-2154-E.

تشکر و قدردانی

از همهٔ سازمان‌ها و افرادی که با پیشنهادات سازنده و یا فراهم آوردن داده‌ها این پژوهش را یاری داده‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنیم.

منابع

- Blakely, R. J., Hachens, R. C., Calzia, J. P. and Langenheim, V. E., 1998, Cenozoic basins of the Death Valley extended terrane as reflected in regional-scale gravity anomalies, in Wright, L. A. and Troxel, B. W., Eds., Cenozoic basins of the Death Valley region, *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 333, 44 p.
- Bott, M. H. P. 1960, The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **3**, 63-7.