

مدل سازی مستقیم گرانی در زون فرورانش تونگا

الهام پورطرقی^۱، عبدالرضا قدس^۲، مجید عباسی^۳، علی هاشمی^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشگاه زنجان، elhampourtoroghi@znu.ac.ir
^۲دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، aghods@iasbs.ac.ir
^۳استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه زنجان، madjid.abbasi@znu.ac.ir
^۴دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، alhashemi@iasbs.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، سیگنال گرانی فرورانش تونگا در امتداد یک پروفیل شرقی-غربی عمود بر درازگودال، مورد مطالعه قرار گرفت تا نحوه توزیع چگالی اجرام بررسی گردد. با استفاده از مدل گرانی ماهواره‌ای EIGEN-6S4(v2)، مدل سازی مستقیم سیگنال گرانی انجام گرفت و با توجه به قیده‌های ژئودینامیکی، دمایی و دیگر قیده‌های حاصل از مطالعات توموگرافی لرزه‌ای، بهترین مدل ممکن برای توزیع چگالی محاسبه شد. شیب صفحه فرورونده با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری محاسبه گردید. با در نظر گرفتن تغییر فازهای ممکن در ورقه فرورونده، چگالی با افزایش عمق افزایش داده شد. ضخامت لیتوسفر اقیانوسی با استفاده از مدل گرمایی نیم‌فضا مقید شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که ضخامت لیتوسفر حوضه پشت‌کمانی لائو در مقایسه با مناطق پشته میان‌اقیانوسی ضخیم‌تر است و استنوسفر آن در مقایسه با لیتوسفر اطراف کم‌چگال‌تر است. واژه‌های کلیدی: فرورانش، مدل ژئوپتانسیل گرانی، مدل سازی مستقیم گرانی، حوضه پشت‌کمانی.

Gravity modelling of Tonga Subduction zone

Pourtoroghi¹ E., A. Ghods², M. Abbasi³, A. Hashemi³

¹Master of Geodesy, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

³Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

⁴Master Student of Geophysics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract

Using the satellite-only gravity geopotential model EIGEN-6S4(v2), we performed a 2-D gravity modeling along an E-W profile normal to the Tonga subduction zone to calculate the subsurface density distribution. The forward gravity model was constrained using different constraints derived from geodynamics of the region and also from previous seismological studies. Using the half space cooling model of oceanic lithosphere, the thickness of the Pacific oceanic lithosphere is estimated. The dip of the subducting plate was estimated by the dip of Wadati-Beniof zone. The density of the subducting plate was increased by depth to reflect different phase changes. The density model shows that the thermal evolution of Lau back arc basin is very different once compared with a normal oceanic crust. The average thickness of the lithosphere of the Lau back arc basin is thicker and its asthenosphere is less dense than elsewhere.

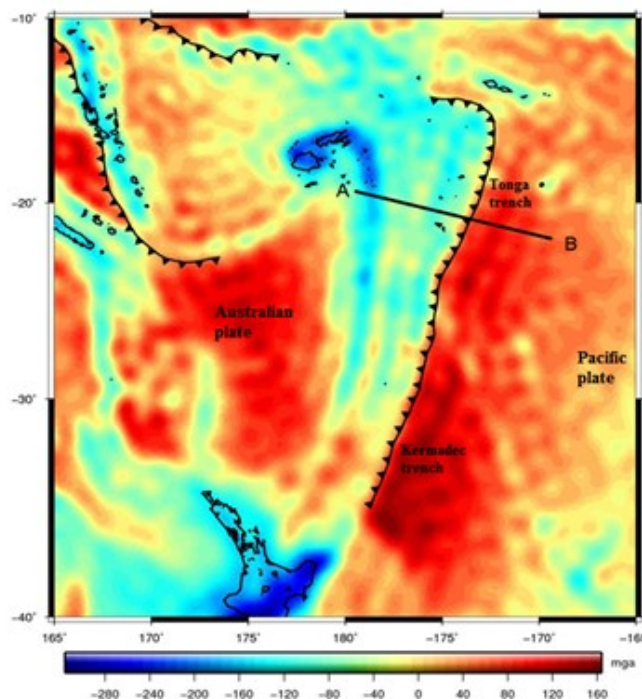
Keywords: Subduction, Gravity Geopotential model, Gravity Forward Modeling, Back-arc Basin

۱ مقدمه

منطقه‌ی فرورانش تونگا-کرمادک، حاصل همگرایی جنوب‌غرب ورقه‌ی اقیانوس آرام و ورقه‌ی اقیانوسی هند-استرالیا است (بویس و همکاران، ۱۹۹۵). از مشخصات این زون فرورانشی می‌توان به دارا بودن یک حوضه پشت‌کمانی، بیشترین سرعت فرورانش (۲۴ سانتی‌متر در سال) و بیش‌ترین لرزه‌خیزی جهان نام برد. هندسه منطقه فرورانش و توزیع چگالی اجرام در بخش‌های مختلف فرورانش پیش‌شرط مدل‌سازی ژئودینامیکی و استرس در مناطق فرورانش است. یکی از انواع روش‌های مطالعه‌ی مناطق فرورانش، مدل‌سازی مستقیم سیگنال گرانی است. این روش، مدلی از منطقه‌ی مطالعه‌ی مطالعاتی بر اساس داده‌های گرانی و مطالعات ژئوفیزیکی موجود، ارائه می‌دهد. مدل‌سازی مستقیم گرانی برای فرورانش نازکا (تاسارا و همکاران، ۲۰۰۶) و فرورانش آند (لوک و همکاران، ۲۰۱۵) انجام شده است. این مطالعه اولین مدل‌سازی را برای یک سیستم فرورانشی دارای حوضه پشت‌کمانی ارائه می‌دهد و قصد دارد که تفاوت‌های ساختار لیتوسفر و استنوسفر حوضه پشت‌کمانی را مورد ارزیابی قرار دهد.

۲ روش تحقیق

در این مقاله از روش مدل‌سازی مستقیم گرانی استفاده شده است. داده‌های گرانی مورد استفاده در این مقاله، داده‌های آنومالی بوگه حاصل از مدل ژئوپتانسیل EIGEN-6S4(v2) هستند. همچنین از داده‌های لرزه‌خیزی ارائه شده در مرکز لرزه‌نگاری NEIC/USGS جهت به‌دست آوردن زون واداتی- بنیف برای محاسبه شیب ورقه فرورونده استفاده شد. مشکل مدل‌سازی مستقیم، عدم یکتایی مدل ارائه شده است که برای مقابله با آن، از مطالعات ژئوفیزیکی موجود در منطقه (توموگرافی، لرزه‌خیزی و غیره) جهت رسیدن به مدل گرانی مطلوب، استفاده گردید.



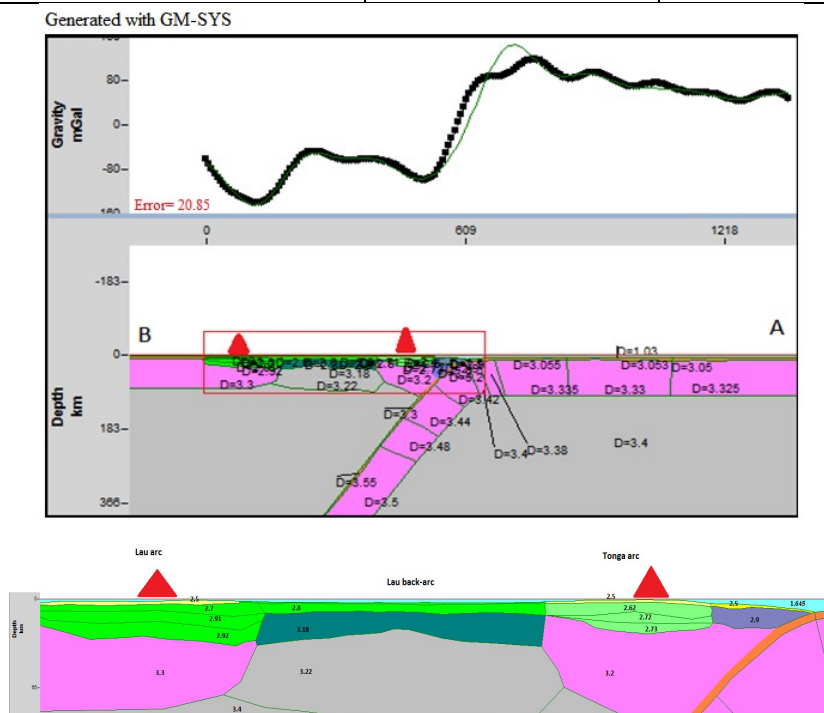
شکل ۱. نقشه آنومالی گرانی بوگه در منطقه فرورانش تونگا-کرمادک. از درجات هارمونیک کروی کمتر از ۱۶ صرف‌نظر شده است. خطوط سیاه دارای مثلث، نشان‌دهنده درازگودال است. بیش‌ترین مقدار آنومالی گرانی حدود ۱۶۰ میلی‌گال، در منطقه درازگودال و کمترین مقدار آنومالی گرانی، حدود ۲۰۰- میلی‌گال، در کمان باقی‌مانده لائو مشاهده می‌شود. خط سیاه، نشان‌دهنده پروفیل گرانی مورد مطالعه در مدل‌سازی مستقیم است.

مدل‌سازی سیگنال گرانی، تابعی از نحوه توزیع چگالی اجرام و هندسه‌ی فرورانش است. عوامل موثر در هندسه فرورانش تونگا، ضخامت لیتوسفر اقیانوسی آرام و استرالیا، تغییرات عمق ناپیوستگی موهو (پوسته اقیانوسی آرام، کمان آتشفشانی تونگا، حوضه پشت‌کمانی لائو و کمان آتشفشانی باقی‌مانده لائو)، ضخامت منشور برافزایشی و وسعت گوه‌ی گوه‌شته هستند. در فرآیند مدل‌سازی، قیده‌های زمین‌شناسی به‌صورت مرحله به مرحله به مدل اعمال شد. نخست یک مدل اولیه در راستای پروفیل AB روی نقشه توپوگرافی منطقه (شکل ۱)، ترسیم شد. در این مدل، هندسه ساده فرورانش لیتوسفر و پوسته اقیانوس آرام، به زیر لیتوسفر اقیانوسی استرالیا با شیب ۵۳ درجه در نظر گرفته شد. اطلاعات چگالی ساختارهای مدل اول در جدول (۱) ارائه شده است. با اعمال پارامترهای مذکور، مدل گرانی محاسباتی با خطای ۱۸۲ میلی‌گال محاسبه شد. در مدل دوم، به‌منظور بررسی رفتار حوضه پشت‌کمانی، ابتدا لیتوسفر این منطقه از مدل نیم‌فضا محاسبه شده است (۳۴- کیلومتر) و رفتار این منطقه مانند پشته‌های میان اقیانوسی در نظر گرفته شد، به این ترتیب که در نقطه واگرایی، ضخامت لیتوسفر صفر در نظر گرفته شد و استنوسفر تا نزدیکی پوسته بالا آمد به نحوی که با دور شدن از نقطه‌ی واگرایی، ضخامت لیتوسفر افزایش یافت تا به ضخامت هفت کیلومتر برسد. با اعمال این هندسه برای حوضه پشت‌کمانی، آنومالی بوگه در این منطقه به شدت افزایش یافت و خطای مدل گرانی محاسباتی به مقدار ۱۷۳ میلی‌گال رسید. در مدل سوم، رفتار استنوسفر زیر حوضه پشت‌کمانی تغییر داده شده و به صورت تقریباً یکنواخت و با اندکی بالا آمدگی زیر منطقه‌ی واگرایی اعمال شد. با مقایسه‌ی مدل دوم و سوم، مشاهده شد که در مدل سوم، آنومالی بوگه در منطقه‌ی پشت‌کمانی لائو به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و مقدار خطای مدل

گرانی محاسباتی ۱۶۰ میلی‌گال به‌دست آمد. بنابراین به دلیل قابل قبول‌تر بودن هندسه و آنومالی گرانی تولید شده در منطقه پشت‌کمانی لائو، در مدل سوم، بقیه پارامترهای ژئوفیزیکی بر روی این مدل اعمال گردید. در مدل چهارم، با استناد به مطالعات توموگرافی امواج ریلی توسط وی و همکاران (۲۰۱۶)، که دمای چگالی استنوسفر زیر منطقه پشت‌کمانی لائو را به صورت غیر معمولی زیاد به‌دست آورده بودند و همچنین مطالعه ریس و همکاران (۲۰۱۱)، که سرعت استنوسفر در این منطقه را به میزان قابل توجهی کمتر از لیتوسفر اطراف محاسبه کرده بودند، چگالی این منطقه از $3/40$ به $3/22$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش داده شد که منجر به کاهش قابل توجه آنومالی گرانی در حوضه پشت‌کمانی لائو شد و خطای مدل گرانی محاسباتی ۱۴۰ میلی‌گال محاسبه گردید. در نهایت در مدل پنجم، اثر تغییر چگالی لیتوسفر فرورونده با افزایش عمق، اعمال گردید. با الگوبرداری از مطالعه‌ی تاسارا و همکاران (۲۰۰۶) و در نظر گرفتن قدیمی‌تر بودن ورقه اقیانوس آرام، مقادیر چگالی به ترتیبی که عنوان می‌شود، اتخاذ گردید. با افزایش سن (و به تبع آن سردتر شدن) ورقه اقیانوسی در مناطق نزدیک‌تر به درازگودال، چگالی لیتوسفر با کم شدن فاصله به ترتیب، $3/32$ ، $3/33$ و $3/35$ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد.

جدول ۱. چگالی ساختارهای فرورانش تونگا در مدل اول.

نام ساختار	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	منبع
پوسته اقیانوس آرام	$3/05$	تاسارا و همکاران، (۲۰۰۶)
لیتوسفر اقیانوس آرام	$3/2-3/5$	تاسارا و همکاران، (۲۰۰۶)؛ لوک و همکاران، (۲۰۱۵)
منشور برافزایشی	$2/9$	دیمالانتا و همکاران (۲۰۰۲)
پوسته کمان تونگا	$2/62-2/73$	دیمالانتا و همکاران (۲۰۰۲)
پوسته حوضه پشت‌کمانی ژاپن	$2/8$	فرضیات پژوهش
پوسته کمان لائو	$2/85$	فرضیات پژوهش
لیتوسفر اقیانوسی استرالیا	$3/3$	فرضیات پژوهش
استنوسفر	$3/4$	تاسارا و همکاران، (۲۰۰۶)



شکل ۲. مدل گرانی و چگالی نهایی منطقه فرورانش تونگا با اعمال قیده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی موجود. منحنی‌های سیاه و سبز به ترتیب مدل گرانی مشاهداتی و محاسباتی است. مثلث‌های قرمز، منطقه کمان آتشفشانی جدید و قدیم را نشان می‌دهند. مناطق آبی، سبز، صورتی و خاکستری به ترتیب نشان‌دهنده آب، پوسته اقیانوسی، لیتوسفر اقیانوسی و استنوسفر هستند. ناحیه مشخص شده با مستطیل قرمز، برای نشان دادن چگالی عوارض سطحی‌تر، بزرگ‌نمایی شده است. مقدار خطای مدل محاسباتی، ۲۰ میلی‌گال محاسبه شد. عددها نشانگر چگالی به گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند.

در نزدیکی درازگودال، جایی که ورقه شروع به خم شدن می‌کند، چگالی لیتوسفر ۳/۳۸ و ۳/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب (هم-وزن استنوسفر) است. پس از آن ورقه شروع به خم شدن کرده و تا اعماق ۷۶، ۱۵۶، ۲۳۲ و ۴۰۰ کیلومتری به ترتیب به چگالی‌های ۳/۴۲، ۳/۴۴، ۳/۴۸ و ۳/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده است. با الگو برداری از نحوه تغییر چگالی پوسته فرورونده با افزایش عمق در مطالعه‌ی تاسارا (۲۰۰۶)، برای چگالی پوسته‌ی اقیانوسی آرام تا عمق ۱۰۰ کیلومتری، مقدار ۳/۰۵ میلی‌گرم بر متر مکعب، در نظر گرفته شد. این عدد با افزایش عمق، به ۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تا عمق ۱۶۰ کیلومتری، ۳/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب تا عمق ۲۳۰ کیلومتری و ۳/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب تا عمق ۴۰۰ کیلومتری می‌رسد. در این مدل، سیگنال گرانی محاسباتی با خطای قابل قبول ۲۰ میلی‌گال، به سیگنال گرانی مشاهداتی برازش داده شد (شکل ۲).

۳ نتیجه‌گیری

در مدل محاسبه شده، تفاوت رفتار حوضه پشت‌کمانی با مناطق پشت‌های میان اقیانوسی مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت لیتوسفر زیر منطقه واگرایی، بیش‌تر از مقدار معمول آن در مناطق پشته میان‌اقیانوسی است. همچنین رفتار غیرطبیعی استنوسفر، در منطقه حوضه پشت‌کمانی فرورانش تونگا (حوضه‌ی لائو)، قابل مشاهده است. چگالی استنوسفر بالا آمده زیر حوضه پشت‌کمانی، کمتر از چگالی لیتوسفر اطراف است.

منابع

- Dimalanta, C., A. Taira, G. P. Yumul Jr, H. Tokuyama, and K. Mochizuki. "New rates of western Pacific island arc magmatism from seismic and gravity data." *Earth and Planetary Science Letters* 202, no.1, (2002).
- Lücke, Oscar H., and Ivonne G. Arroyo. "Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data." *Solid Earth* 6, no. 4 (2015).
- Contreras-Reyes, Eduardo, Ingo Grevemeyer, Anthony B. Watts, Ernst R. Flueh, Christine Peirce, Stefan Moeller, and Cord Papenberg. "Deep seismic structure of the Tonga subduction zone: Implications for mantle hydration, tectonic erosion, and arc magmatism." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 116, no. B10 (2011).
- Tassara, Andres, Hans-Jürgen Götze, Sabine Schmidt, and Ron Hackney. "Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111, no. B9 (2006).
- Wei, S. Shawn, Yang Zha, Weisen Shen, Douglas A. Wiens, James A. Conder, and Spahr C. Webb. "Upper mantle structure of the Tonga-Lau-Fiji region from Rayleigh wave tomography." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 17, no. 11 (2016).