

Local gravity field modeling based on satellite altimetry observations and Least Squares Collocation with improved covariance and patching approach in Oman Sea

Hashemi, Z.¹  | Ramouz, S.¹  | Safari, A.¹ 

1. Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: zohre.hashemi92@yahoo.com

(Received: 8 Nov 2022, Revised: 19 Nov 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 15 Nov 2023)

Summary

The Oman Sea is the meeting point of the Eurasian and Arabian tectonic plates, where the Makran subduction zone is located. Knowledge of the behavior and local changes of the gravity field is of great importance in the study and modeling of the complex tectonic structure in this area, which has been less addressed. In this research, SARAL/AltiKa satellite observations have been used, which has higher spatial resolution and, as a result, higher range precision due to the measurement in the Ka frequency band. The SARAL/AltiKa satellite altimetry data is used for the preliminary process. Then atmospheric delays, geophysical effects, cross-examination and mean dynamic topography model were corrected. After performing these corrections and reaching the geoid height in the study area, the EIGEN6C4 global model was used to remove the long wavelengths of the gravity field up to the degree and order 180 from the geoid height signal. As a result, the residual geoid height (ΔN) are prepared as an input signal for the marine gravity modeling. On the other hand, in most of the other methods used in earth gravity field modeling, to simplify the calculations, two assumptions of stationarity and isotropy of the gravity field are taken into account, which means that the gravity function does not depend on the changes in the azimuth and the position of the observations. These assumptions are not always valid. In this research, in the first step the long-wavelength of input signal is removed. Then the process continued with residual geoid height. Next, the improved covariance approach is used to increase the accuracy of determining the covariance. Also the idea of patching is applied. Those three steps provide a solution to reduce the negative effects of the stationary assumption in the local modeling of gravity field. The results of this research in 234 ship borne gravimetric observations were evaluated. The improvement of quality of the covariance with the idea of patching and improved covariance approach enhanced the local modeling results of the gravity field. It was found that with patching, the field modeling accuracy was increased by 25.1% (1.04 mgal) with the Tscherning-Rapp 1974 approach and 11.6% (0.33 mgal) with the improved covariance approach. Similarly, the improved covariance approach also improved the local modeling of gravity field. Using this approach increases the accuracy of local modeling by 31.3% (1.27 mgal) without patching and by 18% (0.56 mgal) with patching. As a result, it was found that removing long-wavelength and using improved covariance and patching increases the accuracy of the local modeling of the gravity field with more than 39% (1.6 mgal) as compared to the Tscherning-Rapp 1974 covariance function without patching in the Oman Sea. Moreover, applying the mentioned approaches in region 1 with independent covariance shows 47% (2.25 mgal) increase in accuracy in the local modeling of the gravity field. This improvement is equivalent to 11.3% (0.33 mgal) higher accuracy than the available global gravity models.

Keywords: Local gravity field modeling, Satellite altimetry, Least squares collocation, Improved covariance, Patching.

Cite this article: Hashemi, Z., Ramouz, S., & Safari, A. (2023). Local gravity field modeling based on satellite altimetry observations and Least Squares Collocation with improved covariance and patching approach in Oman Sea. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 579-591. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349992.1007463>

E-mail: (1) sabah.ramouz@ut.ac.ir | asafari@ut.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349992.1007463>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

مدل‌سازی محلی میدان گرانی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش کالوکیشن کمترین مربعات با رویکرد کووریانس بهبودیافته و ناحیه‌بندی در دریای عمان

زهرة هاشمی^۱ | صباح راموز^۱ | عبدالرضا صفری^۱

۱. گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: zohre.hashemi92@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

چکیده

دریای عمان، محل تلاقی دو صفحه تکتونیک اوراسیا و عربی و منطقه فرورانش مکران است. با وجود آن که اطلاع از رفتار و تغییرات محلی میدان گرانی، در مطالعه و مدل‌سازی ساختار پیچیده زمین‌ساختی در این محدوده از اهمیت بالایی برخوردار است، تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. در این پژوهش، از مشاهدات ماهواره‌ای SARAL/AltiKa استفاده شده است که به دلیل اندازه‌گیری در باند فرکانسی Ka، قدرت تفکیک مکانی و در نتیجه، دقت ارتفاعی بالاتری نسبت به دیگر مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای دارد. از طرف دیگر، در اکثر روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی میدان گرانی زمین، برای ساده‌سازی محاسبات، دو فرض ایستایی و همسانگردی میدان گرانی لحاظ می‌شود که این دو فرض به معنای عدم وابستگی تابع گرانی به تغییرات آزمون و موقعیت مشاهدات و نقاط داخل میدان بوده که چنین فرضی، همواره برقرار نیست. در این تحقیق، از رویکرد کووریانس بهبودیافته برای افزایش دقت تعیین کووریانس و ایده ناحیه‌بندی، به عنوان راه‌حلی برای کاهش اثرات منفی فرض ایستایی و همسانگردی در مدل‌سازی محلی میدان گرانی استفاده شده است. نتایج این پژوهش در ۲۳۴ نقطه گرانی‌سنجی دریایی کنترل و مشخص شد که به کارگیری کووریانس بهبودیافته و ناحیه‌بندی، منجر به افزایش بیش از ۳۹٪ (۱/۶ میلی‌گال) دقت مدل‌سازی محلی میدان گرانی به روش کالوکیشن کمترین مربعات در دریای عمان می‌شود. دقت حاصل از مدل‌سازی محلی، در بعضی نواحی منطقه، تا ۱۱/۳ درصد (۰/۳۳ میلی‌گال) بالاتر از مدل‌های جهانی گرانی است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی محلی میدان گرانی، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، کالوکیشن کمترین مربعات، کووریانس بهبودیافته، ناحیه‌بندی.

۱. مقدمه

قدرت تفکیک مکانی پایین، مناسب برای مدل‌سازی محلی میدان گرانی نیستند. از این رو، اطلاعات ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی که در ۳ دهه گذشته پیشرفت چشمگیری داشته، جایگزین مناسبی برای مدل‌سازی فرکانس‌های میانی میدان گرانی هستند. ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی با دقت و قدرت تفکیک زمینی قابل قبولی، ارتفاع ژئوئید که از پارامترهای میدان گرانی است را در اختیار قرار می‌دهد. از دیگر منابع گرانی در دریا، مشاهدات گرانی‌سنجی دریایی است که توسط کشتی انجام می‌شود و به دلیل پراکندگی نامناسب، استفاده از آن

مطالعه میدان گرانی دریایی اهمیت بالایی در علوم زمین و مهندسی از جمله اقیانوس‌شناسی، ژئوفیزیک، تکتونیک پوسته‌های اقیانوسی و نواحی ساحلی و ... دارد (سندول و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر میدان گرانی، اطلاعات ارزشمندتر و کاربردی‌تر از توپوگرافی بستر، ناوربری، مطالعات آب و هوا، ساختار و ضخامت لیتوسفر، اکتشاف معادن و کشف آتشفشان‌های بستر اقیانوس در اختیار قرار می‌دهد (کالنین، ۲۰۱۱). یکی از روش‌های تعیین میدان گرانی بر روی دریاها، استفاده از اطلاعات ماهواره‌های گرانی‌سنجی است که این مشاهدات به دلیل

استناد: هاشمی، زهرة؛ راموز، صباح و صفری، عبدالرضا (۱۴۰۲). مدل‌سازی محلی میدان گرانی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش کالوکیشن کمترین مربعات با رویکرد کووریانس بهبودیافته و ناحیه‌بندی در دریای عمان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۵۷۹-۵۹۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349992.1007463>

رایانامه: (۱) asafari@ut.ac.ir | sabah.ramouz@ut.ac.ir

از نظر زمانی و اقتصادی مقرون به صرفه نیست. مشاهدات گرانی سنجی دریایی، بیش تر به عنوان نقاط کنترلی کاربرد دارند (سندول و اسمیت، ۱۹۹۷). دقت میدان گرانی مدل سازی شده با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به فاکتورهای دقت فاصله از سطح آب (Range)، تراکم مشاهدات ماهواره و تعیین جهت مسیر ماهواره بستگی دارد (سندول و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق، از مشاهدات حاصل از مأموریت ماهواره SARAL/AltiKa (SARAL) استفاده شده است (ورون و همکاران، ۲۰۲۰). ماهواره SARAL به عنوان ادامه دهنده مأموریت ماهواره ENVISAT و با همان ردپا (Foot Print) بر روی زمین، و با همکاری مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه و سازمان تحقیقات فضایی هند طراحی و راه اندازی شده است. ماهواره SARAL به دلیل استفاده از باند فرکانسی Ka نسبت به باند فرکانسی Ku و C، ردپای کوچک تر و در نتیجه قدرت تفکیک مکانی بالاتری دارد. همچنین، این باند فرکانسی منجر به دقت ارتفاعی بالاتری نیز خواهد شد.

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین ناهنجاری گرانی در این زمینه انجام نشده است. در این مقاله، از ارتفاع ژئوئید استخراج شده از مشاهدات ارتفاع سنجی برای تولید ناهنجاری گرانی دریایی به روش LSC با رویکرد IC استفاده شده است. در ادامه، ابتدا تئوری روش LSC و رویکرد IC به طور مختصر بیان شده است. در بخش سوم، منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده توضیح داده شده است. در بخش چهارم، روند و نتایج محاسبات و در بخش آخر، تحلیل نتایج و جمع بندی ارائه شده است.

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین ناهنجاری گرانی از مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع سنجی، روش کالوکیشن کمترین مربعات (Least Square Collocation) است. راموئل و رپ (۱۹۷۷) از مشاهدات ماهواره GEOSAT-3 با استفاده از روش LSC به تولید ناهنجاری گرانی پرداختند (راموئل و رپ، ۱۹۷۷). LSC روشی توانمند از نظر عملیات سرشکنی، فیلترینگ و درون‌یابی داده‌های مشاهداتی و ارائه خطای برآورد در فرآیند مدل سازی میدان گرانی است (صفری و همکاران، ۲۰۱۴). از دیگر مزایای این روش، می‌توان به استفاده همزمان از منابع مختلف داده‌های ناهمگون اشاره کرد (حیدری زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

۲. روش کالوکیشن کمترین مربعات در برآورد ناهنجاری گرانی از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای برای مدل سازی ناهنجاری گرانی از مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع سنجی، ابتدا ارتفاع ژئوئید را طبق روابط

$$SSH = MSS + SLA, \quad (1)$$

و

$$MSS = N + MDT, \quad (2)$$

از مشاهدات ارتفاع سنجی استخراج می‌کنیم (سانسو و سیدریس، ۲۰۱۳). در رابطه ۱، SSH ارتفاع لحظه‌ای سطح آب تا بیضوی (Sea Surface Height) است که توسط ماهواره اندازه گیری می‌شود، SSH شامل بخش ثابت میانگین سطح دریا (Mean Sea Surface) MSS و بخش متغیر با زمان ناهنجاری ارتفاعی سطح آب دریا SLA (Sea Level Anomaly) است. حذف بخش متغیر با زمان به صورت تصحیح تأخیرات جوی و ژئوفیزیکی است. طبق رابطه ۲، با حذف مدل توپوگرافی میانگین MDT

از نظر زمانی و اقتصادی مقرون به صرفه نیست. مشاهدات گرانی سنجی دریایی، بیش تر به عنوان نقاط کنترلی کاربرد دارند (سندول و اسمیت، ۱۹۹۷). دقت میدان گرانی مدل سازی شده با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به فاکتورهای دقت فاصله از سطح آب (Range)، تراکم مشاهدات ماهواره و تعیین جهت مسیر ماهواره بستگی دارد (سندول و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق، از مشاهدات حاصل از مأموریت ماهواره SARAL/AltiKa (SARAL) استفاده شده است (ورون و همکاران، ۲۰۲۰). ماهواره SARAL به عنوان ادامه دهنده مأموریت ماهواره ENVISAT و با همان ردپا (Foot Print) بر روی زمین، و با همکاری مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه و سازمان تحقیقات فضایی هند طراحی و راه اندازی شده است. ماهواره SARAL به دلیل استفاده از باند فرکانسی Ka نسبت به باند فرکانسی Ku و C، ردپای کوچک تر و در نتیجه قدرت تفکیک مکانی بالاتری دارد. همچنین، این باند فرکانسی منجر به دقت ارتفاعی بالاتری نیز خواهد شد.

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین ناهنجاری گرانی از مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع سنجی، روش کالوکیشن کمترین مربعات (Least Square Collocation) است. راموئل و رپ (۱۹۷۷) از مشاهدات ماهواره GEOSAT-3 با استفاده از روش LSC به تولید ناهنجاری گرانی پرداختند (راموئل و رپ، ۱۹۷۷). LSC روشی توانمند از نظر عملیات سرشکنی، فیلترینگ و درون‌یابی داده‌های مشاهداتی و ارائه خطای برآورد در فرآیند مدل سازی میدان گرانی است (صفری و همکاران، ۲۰۱۴). از دیگر مزایای این روش، می‌توان به استفاده همزمان از منابع مختلف داده‌های ناهمگون اشاره کرد (حیدری زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

(راموز و همکاران، ۲۰۲۰) نشان دادند که استفاده از رویکرد کووریانس بهبود یافته IC (Improved Covariance) در روش LSC، منجر به افزایش دقت مدل سازی می‌شود. در رویکرد IC، پارامترهای کووریانس شرنینگ و رپ (۱۹۷۴، TR74) -Tscherning

$$K(r_P, r'_Q, \psi) = \alpha \sum_{n=2}^N \left(\frac{R_E^2}{r_P r'_Q} \right)^{n+1} k_n^\sigma P_n(\cos \psi) + \sum_{n=N+1}^{\infty} \left(\frac{R_B^2}{r_P r'_Q} \right)^{n+1} \frac{A}{(n-1)(n-2)(n+B)} \bar{P}_n(\cos \psi), \quad (6)$$

یکی از متداول‌ترین آنهاست. جمله اول در رابطه (۶)، وریانس درجه خطاهای مدل جهانی استفاده شده در حذف اثر طول موج‌های بلند و جمله دوم مدل کووریانس شرنینگ و رپ ۱۹۷۴ برای درجه و مرتبه‌های بالاتر از مدل جهانی است. ψ فاصله فضایی بین دو نقطه مورد بررسی P و Q با فاصله شعاعی r_P و r'_Q ، R_E میانگین شعاع زمین، K_n^σ ماتریس وریانس درجه خطای ضرایب مدل جهانی گرانی حذف شده، P_n تابع لژاندر نرمال شده، R_B شعاع کره بیرهمر، A فاکتور مقیاس وریانس سیگنال باقی‌مانده در بالاترین درجه و B عدد صحیحی است که مقدار آن برای مدل‌های محلی ۴ قرار داده می‌شود (شرنینگ و رپ، ۱۹۷۴).

پارامترهای مجهول کووریانس TR74 با برازش بر روی کووریانسی تجربی با رابطه

$$\Gamma_{\Delta g}(\psi) = \frac{\sum \overline{\Delta N_i \Delta N_j}}{n}, \quad (7)$$

تعیین می‌شود. در رابطه بالا، $\overline{\Delta N_i}$ و $\overline{\Delta N_j}$ میانگین ارتفاع‌های ژئوئید در بلوک‌های با مساحت مساوی i و j در تمام منطقه، و n تعداد ضرب‌ها بین جفت مقادیر $\overline{\Delta N_i}$ و $\overline{\Delta N_j}$ در هر بازه $\Delta \psi$ است. فاصله مورد محاسبه به صورت رابطه

$$\psi - \frac{\Delta \psi}{2} < \psi_{ij} < \psi + \frac{\Delta \psi}{2}, \quad (8)$$

است، که در آن $\Delta \psi$ یک بازه مناسب و انتخابی و ψ_{ij} فاصله بین مراکز دو بلوک i و j است (شرنینگ و رپ، ۱۹۷۴). پس از یک بار محاسبه و تعیین پارامترهای مجهول تابع تحلیلی TR74، در رویکرد IC، این پارامترها وارد یک فرآیند بازگشتی برای یافتن مقادیر بهینه مجهولات می‌شوند (راموز و همکاران، ۲۰۲۰).

حال، با تعیین پارامترهای کووریانس تحلیلی، تولید ماتریس‌های کووریانس و اجرای رابطه ۵، ناهنجاری گرانی باقی‌مانده در دریا برآورد می‌شود. سپس، طبق

(Mean Dynamic Topography) از روی MSS، می‌توان به ارتفاع ژئوئید رسید. ارتفاع ژئوئید نیز طبق رابطه

$$\Delta N = N - N^{EGM}, \quad (2)$$

به دو بخش N^{EGM} ، شامل طول موج‌های بلند و ΔN یا ارتفاع ژئوئید باقی‌مانده تقسیم‌بندی می‌شود. در نتیجه، برای مدل‌سازی میدان گرانی دریایی، با حذف N^{EGM} از روی مشاهدات، به میدانی همگن‌تر و هموارتر (Smoother) دست می‌یابیم (شرنینگ، ۱۹۹۴). برای حذف طول موج بلند سیگنال مشاهدات، از رابطه

$$N^{EGM} = \frac{GM}{R_E} \sum_{n=2}^{N_0} \frac{1}{\gamma} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos(m\lambda) + b_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos(\psi)), \quad (4)$$

برای محاسبه ارتفاع ژئوئید تا درجه و مرتبه n استفاده می‌شود. در این رابطه، GM ثابت جهانی گرانش، γ گرانش نرمال، r فاصله شعاعی نقطه موردنظر تا مرکز جرم زمین، \bar{a}_{nm} ، \bar{b}_{nm} ضرایب هارمونیک‌های کروی نرمال شده از درجه n و مرتبه m، \bar{P} تابع لژاندر نرمال شده و ψ فاصله کروی بین دو نقطه است.

پس از حذف اثرات سیستماتیک از روی مشاهدات، با کمک رابطه

$$\Delta g_{res}^{com} = C_{\Delta g, N} (C_{N, N} + D_{N, N})^{-1} \Delta N, \quad (5)$$

می‌توان مدل‌سازی LSC را اجرا و ناهنجاری گرانی باقی‌مانده را برآورد کرد. در رابطه (۵)، Δg_{res}^{com} ناهنجاری گرانی باقی‌مانده برآورد شده، $C_{N, N}$ ماتریس وریانس کووریانس مشاهدات، $C_{\Delta g, N}$ ماتریس وریانس کووریانس مشاهدات و مجهولات و $D_{N, N}$ ماتریس وریانس خطای مشاهدات است. تولید ماتریس‌های کووریانس مستلزم داشتن تابع کووریانسی تحلیلی است که به‌بهترین نحوه رفتار میدان گرانی را در منطقه مورد مطالعه مدل‌سازی کند. توابع کووریانس مختلفی برای این منظور وجود دارد که تابع کووریانس TR74، با رابطه

فرورانشی محسوب می‌شود. در این تحقیق، از ۱۸۱۸۹ مشاهده نوع L2P در حالت مأموریت ژئودتیک (Geodetic) یا مأموریت بی‌تکرار (None repeat) (mission) ماهواره SARAL از چرخه (Cycle) ۱۰۰ تا ۱۳۳ در مدل‌سازی ناهنجاری گرانی، استفاده شده است. برای ارزیابی کیفیت مدل‌سازی انجام‌شده، از ۲۳۴ مشاهده گرانی‌سنجی دریایی BGI (Bureau Gravimetric International) موجود در منطقه که از سایت www.bgi.obs-mip.fr استفاده شده است. علاوه بر این، از مدل جهانی ناهنجاری گرانی دریایی V29.1 که به صورت شبکه‌ای با فواصل نقاط ۰/۰۵ در سایت https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi موجود است، برای صحت‌سنجی استفاده شد. از داده‌های این مدل که توسط اسمیت و سندول (سندول و همکاران، ۲۰۱۴) تهیه شده، به صورت شبکه‌ای با فواصل نقاط ۰/۰۵ و تعیین مقادیر روی نقاط شبکه با روش میانگین‌گیری استفاده شده است. لازم به ذکر است، فاصله نقاط شبکه، براساس بزرگ‌ترین فاصله میان نقاط همجوار به دست آمده است.

رابطه

$$\Delta g^{com} = \Delta g_{res}^{com} + \Delta g_{EGM}, \quad (9)$$

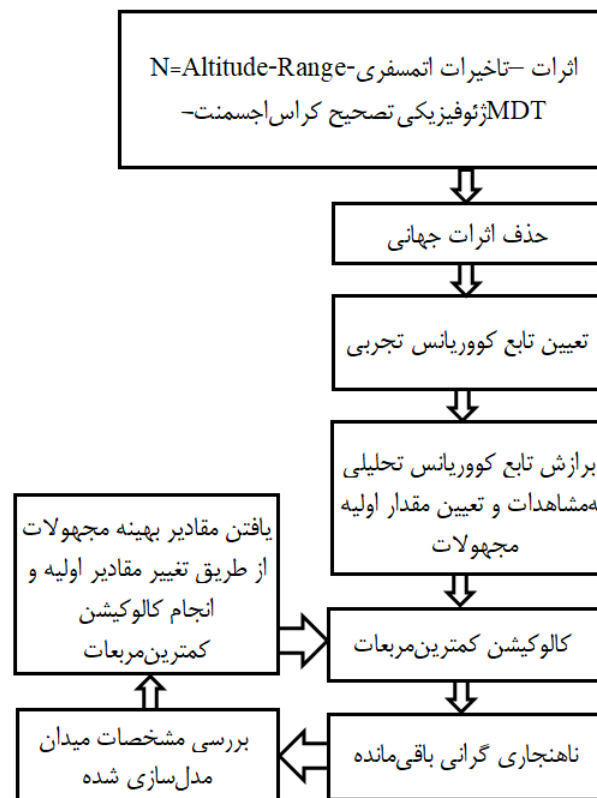
اثرات سیستماتیک حذف‌شده در مرحله قبل از مدل‌سازی، به‌سیگنال برآوردشده، بازگردانی می‌شود. برای بازیابی اثرات جهانی، از رابطه

$$\Delta g_{EGM} = \frac{GM}{R} \sum_{n=2}^N \frac{1}{\gamma} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos(m\lambda) + b_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos \psi), \quad (10)$$

استفاده می‌شود. در شکل ۱، تعیین ناهنجاری گرانی به روش LSC و رویکرد IC، به تصویر کشیده شده است.

۳. معرفی منطقه مطالعاتی، داده‌های مورد استفاده و پردازش‌های اولیه بر روی آنها

منطقه مورد مطالعه در دریای عمان، بین مختصات با عرض جغرافیایی (۲۲/۷۵ - ۲۴/۷۵) و طول جغرافیایی (۵۸/۷۵ - ۶۵/۷۵) است که از جهت زمین‌ساختی، به دلیل فرورفتن صفحه اقیانوسی به زیر صفحه قاره‌ای، منطقه فعال



شکل ۱. رویکرد IC برای تعیین ناهنجاری گرانی به روش LSC.

۳-۱. پردازش‌های اولیه بر روی مشاهدات ارتفاع‌سنجی و دست‌یابی به ارتفاع ژئوئید

سیگنال ارسالی از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی با برخورد به سطح آب و بازگشت به سمت ماهواره، فاصله از سطح آب (Range) و در ترکیب با مشاهدات گیرنده GNSS تعبیه‌شده بر روی ماهواره (Altitude)، ارتفاع لحظه‌ای سطح آب را مشخص می‌کند. براساس رابطه (۹) برای رسیدن به N ، به‌عنوان کمیتی تقریباً ثابت در زمان، لازم است طبق رابطه

۳-۲. پردازش‌های اولیه بر روی مشاهدات ارتفاع‌سنجی

سیگنال ارسالی از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی با برخورد به سطح آب و بازگشت به سمت ماهواره، فاصله از سطح آب (Range) و در ترکیب با مشاهدات گیرنده GNSS تعبیه‌شده بر روی ماهواره (Altitude)، ارتفاع لحظه‌ای سطح آب را مشخص می‌کند. براساس رابطه (۹) برای رسیدن به N ، به‌عنوان کمیتی تقریباً ثابت در زمان، لازم است طبق رابطه

۳-۳. پردازش‌های اولیه بر روی مشاهدات ارتفاع‌سنجی

سیگنال ارسالی از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی با برخورد به سطح آب و بازگشت به سمت ماهواره، فاصله از سطح آب (Range) و در ترکیب با مشاهدات گیرنده GNSS تعبیه‌شده بر روی ماهواره (Altitude)، ارتفاع لحظه‌ای سطح آب را مشخص می‌کند. براساس رابطه (۹) برای رسیدن به N ، به‌عنوان کمیتی تقریباً ثابت در زمان، لازم است طبق رابطه

- تأخیرات جوی - $N = \text{Altitude} - \text{Range}$

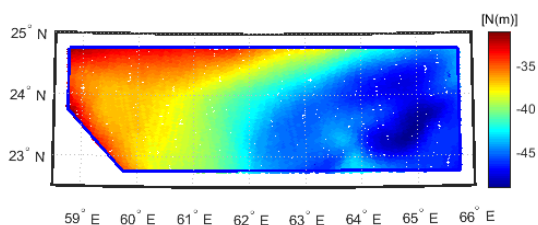
MDT - تصحیح کراس اجسمنت - اثرات ژئوفیزیکی

(۱۱)

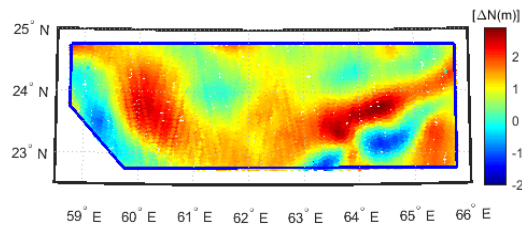
تأخیرات جوی (تصحیح یونوسفر (Ionospheric correction)، تصحیح تروپوسفر خشک (Dry tropospheric correction) و تصحیح تروپوسفر تر (Wet tropospheric correction)) و همچنین اثرات ژئوفیزیکی وابسته به‌زمان (بایاس وضعیت دریا (Sea state bias)، جزر و مد زمین جامد (Solid earth tide)، جزر و مد اقیانوسی (Ocean tide)، جزر و مد قطبی (Ploe tide)، تصحیح معکوس بارومتر (Inverted barometer height correction)) را از روی مشاهدات ارتفاع لحظه‌ای سطح آب حذف کرد (اندرسون، ۲۰۱۳). اثرات تأخیر جوی و ژئوفیزیکی، توسط سازمان اروپایی بهره‌برداری از ماهواره‌های هواشناسی در سایت

۴. مدل‌سازی سیگنال ناهنجاری گرانی در منطقه مطالعاتی

پس از پردازش‌های اولیه بر روی مشاهدات ارتفاع‌سنجی و انجام تصحیحات جوی و ژئوفیزیکی طبق رابطه (۱)، (۲) و (۱۱)، به‌سیگنال ارتفاع ژئوئید در منطقه مطالعاتی می‌رسیم. حال با استفاده از رابطه (۴)، اثر طول‌موج‌های بلند میدان از روی سیگنال مشاهداتی ارتفاع ژئوئید حذف می‌شود تا مطابق رابطه (۳)، ارتفاع ژئوئید باقی‌مانده به‌دست آید. برای این کار از مدل جهانی EIGEN-6C4 تا درجه و مرتبه ۱۸۰ استفاده شده است (فورست و همکاران، ۲۰۱۴). در شکل ۲، ارتفاع ژئوئید پیش و پس از حذف اثر طول‌موج‌های بلند در منطقه مطالعاتی آورده شده است. جدول ۱، نشان می‌دهد که پس از حذف اثر طول‌موج‌های بلند میدان از روی سیگنال مشاهدات، انرژی سیگنال به‌شکل چشمگیری کمتر شده است. این امر، بیان‌گر دو موضوع است؛ نخست، بخش بیشتر انرژی ارتفاع ژئوئید به‌عنوان یک سیگنال هموار از میدان جاذبه، در طول‌موج‌های بلند آن قرار دارد. دوم، مشاهدات ارتفاع‌سنجی دریایی از عمده داده‌های مورد استفاده در تولید مدل EIGEN-6C4 است.



(ب)



(الف)

شکل ۲. ارتفاع ژئوئید (الف) و ارتفاع ژئوئید باقیمانده پس از حذف اثر جهانی میدان تا درجه و مرتبه ۱۸۰ (ب).

جدول ۱. اطلاعات آماری سیگنال مشاهدات ارتفاع ژئوئید پیش و پس از حذف اثر طول‌موج‌های بلند میدان جاذبه.

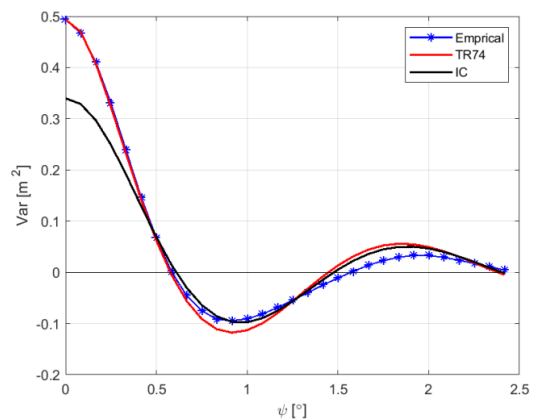
کمینه (متر)	بیشینه (متر)	میانگین (متر)	پراکندگی (متر)	
-۴۹/۲۲	-۳۱/۱۲	-۴۱/۵۹	۴/۳۸	N
-۲/۰۴	۲/۹۱	۰/۹۹	۰/۷۰	ΔN

مقدار کووریانس نصف مقدار وریانس می‌شود $C(\psi = \xi) = C_0/2$ می‌توان رفتار و میزان محلی بودن یک تابع کووریانس را تحلیل کرد (موریتز، ۱۹۸۰). افزایش مقدار C_0 ، همزمان با کاهش طول ξ ، موجب افزایش شیب نمودار در بازه $0 < \psi < \xi$ و به معنای محلی‌تر شدن تابع کووریانس است و برعکس. در صورت افزایش یا کاهش همزمان پارامترهای C_0 و ξ یک تابع، بررسی تغییرات میزان محلی بودن آن به سادگی حالت قبل نخواهد بود. در اینجا، پارامتر (Ratio of) RoL (Locality) با رابطه

$$RoL = \frac{C_0}{\xi}, \quad (12)$$

به عنوان پارامتر محلی بودن، برای تسهیل در بررسی تغییرات میزان محلی بودن تابع کووریانس معرفی می‌شود. بزرگ‌تر شدن RoL، نشان‌دهنده افزایش میزان محلی بودن تابع است. به این معنی که تابع کووریانس رفتار محلی‌تری دارد و برعکس. جدول ۲ نشان می‌دهد، مقدار RoL کووریانس TR74 محلی‌تر از IC است. این مساله در شکل ۳ نیز پیداست. وقتی کووریانس محلی‌تر می‌شود، انتظار می‌رود که اثرات محلی میدان گرانی را با کیفیت بهتری مدل‌سازی کند. میزان محلی‌تر شدن تابع کووریانس تا جایی مطلوب است که بتواند اثرات محلی میدان را مدل‌سازی کند. افزون بر این، محلی‌تر شدن بی‌قاعده کووریانس موجب آلوده شدن مدل‌سازی به خطا می‌شود. در واقع، از اهداف محلی‌تر سازی کووریانس، مقابله با اثر هم‌وارسازی ناخواسته، هنگام اعمال دو فرض ایستایی و همسانگردی در تعیین تابع کووریانس است. رویکرد IC استفاده می‌شود تا پارامترهای کووریانس تصحیح شده و رفتار میدان در منطقه بهینه‌تر مدل‌سازی شود. مثلاً در مناطق کوهستانی و با توپوگرافی خشن که انرژی سیگنال ناهنجاری گرانی در فرکانس‌های متوسط و بالا در آنجا زیاد است، بهره‌گیری از رویکرد IC، باعث محلی‌تر شدن کووریانس می‌شود. اما، در این منطقه شاهد هستیم که اعمال IC، RoL تابع کووریانس را کم کرده است. به این معنا که، تابع کووریانس ایستای همسانگرد مورد استفاده

اکنون، برای اجرای LSC لازم است تا تابع کووریانس مناسب با میدان گرانی در منطقه مطالعاتی تعیین شود. برای این هدف، از رابطه (۷) برای محاسبه تابع کووریانس تجربی حاصل از داده‌های ارتفاع ژئوئید باقی‌مانده بهره می‌بریم. سپس، تابع کووریانس TR74 بر روی کووریانس تجربی برازش و مجهولات رابطه (۶) محاسبه می‌شوند. با مشخص شدن پارامترهای مجهول، ماتریس‌های کووریانس رابطه (۵) تولید و اجرای LSC با بهره‌گیری از ماژول GEOCOL بسته محاسباتی GRAVSOF، امکان‌پذیر می‌شود. در این مرحله و طبق رویکرد IC، روند تعیین پارامترهای مجهول TR74 وارد یک فرآیند تکرار با قید کمینه شدن انحراف معیار اختلاف نتایج مدل ناهنجاری گرانی باقی‌مانده برآورد شده با مشاهدات گرانی‌سنجی دریایی (به عنوان نقاط کنترلی) می‌شود. در شکل ۳، نمودار و در جدول ۲، مؤلفه‌های کووریانس تجربی، TR74 و IC نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار کووریانس تجربی (آبی)، TR74 (قرمز) و IC (مشکی) در منطقه مطالعاتی.

جدول ۲. مؤلفه‌های کووریانس تجربی، TR74 و IC محاسبه شده در منطقه مطالعاتی.

کووریانس	تجربی	TR74	IC
وریانس (m^2)	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۳۴
طول هم‌بستگی (دقیقه)	۱۷/۵۸	۱۷/۳۲	۱۸/۳۲
نسبت محلی بودن	۰/۰۲۸۱	۰/۰۲۸۵	۰/۰۱۸۶

با بررسی مقدار وریانس (کووریانس در فاصله صفر - $C(\psi = 0) = C_0$) و طول هم‌بستگی (فاصله‌ای که در آن

در شکل ۶ و جدول ۳، نمودار و مؤلفه‌های کووریانس‌های تشکیل‌یافته برای نواحی سه‌گانه ترسیم شده است. RoL کووریانس تجربی و TR74 در ناحیه ۱ و ۲ نسبت به کووریانس کلی منطقه کمتر و در ناحیه ۳ بیش‌تر شد. این ترتیب محلی بودن نواحی با پراکندگی ΔN در منطقه هم‌بستگی دارد (شکل ۴). به‌طوری‌که، پیچیدگی تغییرات ΔN در ناحیه ۲ کمتر و در ناحیه ۳ بیش‌تر است. در حالی‌که، کووریانس کلی منطقه توانایی لحاظ و نمایش این اختلافات محلی را نداشت. برخلاف کووریانس کلی منطقه (جدول ۳)، استفاده از رویکرد IC، به‌شکل قابل‌توجهی، موجب محلی‌تر شدن تابع کووریانس در ناحیه اول (۳۶/۴٪) و دوم (۷۷/۸٪) نسبت به رویکرد TR74 شده است. در اینجا، استفاده از ایده ناحیه‌بندی، باعث تغییر عمیق رفتار کووریانس IC شده است.

در جدول ۴، نتایج حاصل از مدل‌سازی LSC بر روی نقاط کنترلی در مقایسه با مدل جهانی EIGEN6C4 تا آخرین درجه و مرتبه (۲۱۹۰) و مدل جهانی V29.1 آمده است. نتایج این جدول، گویای دقت بالاتر مدل جهانی EIGEN6C4 نسبت به V29.1 است. در بین حالت‌های مختلف مدل‌سازی محلی میدان، استفاده از رویکرد IC در حالت ناحیه‌بندی ۲۰٪ (معادل ۰/۵۵ میلی‌گال) و بدون ناحیه‌بندی ۳۱/۳٪ (برابر با ۱/۲۷ میلی‌گال)، دقت بالاتری از TR74 به‌دست می‌دهد. همچنین، ایده ناحیه‌بندی منطقه باعث افزایش قابل‌ملاحظه دقت مدل‌سازی با هر دو رویکرد TR74 (۲۵/۱٪ معادل ۱/۰۴ میلی‌گال) و IC (۱۱/۶٪ برابر با ۰/۳۳ میلی‌گال) می‌شود. این امر، ضرورت ناحیه‌بندی مناطق مطالعاتی در مدل‌سازی میدان را آشکار می‌کند.

با این حال، مدل‌سازی محلی تنها در حالت استفاده از کووریانس مستقل در نواحی و با رویکرد IC، به‌دقتی بالاتر از مدل جهانی EIGEN6C4 می‌رسد. چنان‌که گفته شد، در تولید مدل‌های جهانی برحسب ضرایب هارمونیک میدان گرانی، از داده‌های مترکم ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در دریاها استفاده شده است. از این‌رو، دقت بالای این مدل‌ها در محدوده آب‌های آزاد قابل‌انتظار است. در

برای مدل‌سازی بهتر میدان در این منطقه، می‌بایست نسبت رفتار محلی آن (که توسط پارامترهای محلی تعیین می‌شود) کمتر شود. لازم به‌ذکر است، در این‌جا معیار "بهتر" مدل‌سازی کردن میدان گرانی، کاهش انحراف معیار اختلاف مقادیر مدل از نقاط کنترلی است. در تحلیل نتیجه استفاده از رویکرد IC در این منطقه، ۲ دلیل را می‌توان متصور شد: یا برآیند رفتار میدان در این‌بازه فرکانسی (متوسط به‌بالا) در این منطقه، چنان‌که کووریانس IC نشان می‌دهد، نسبت محلی‌بودنش کمتر از کووریانس TR74 است. یا این‌که، تابع ایستای همسانگرد مورد استفاده، قابلیت مدل‌سازی بهینه‌تر پیچیدگی‌های رفتار میدان را در منطقه ندارد.

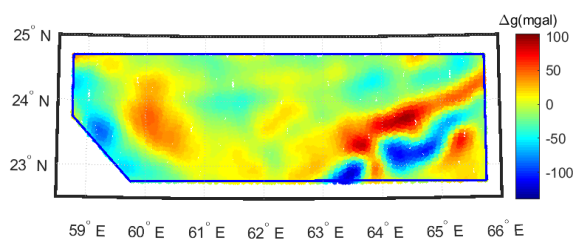
ناهنجاری گرانی باقی‌مانده برآوردشده به‌روش LSC و دو رویکرد TR74 و IC، در شکل ۴ به‌تصویر کشیده شده است. در شرق و غرب این‌شکل، تغییرات شدید ناهنجاری گرانی باقی‌مانده مشهود است که متأثر از فعالیت‌های صفحات تکتونیک اورآسیا و عربی می‌تواند باشد. از آنجا‌که، ۲۳۴ مشاهده گرانی‌سنجی دریایی مورد استفاده به‌عنوان نقاط کنترلی در این تحقیق، به‌صورت خطی و تنها در بخش کوچکی از دریای عمان واقع شده‌اند، ارزیابی دقیق مدل‌سازی دشوار است. برای افزایش کیفیت ارزیابی مدل‌سازی، منطقه مطالعاتی به‌سه ناحیه تقسیم‌بندی، و مدل‌سازی در هر ناحیه به‌صورت مستقل از دیگر نواحی انجام می‌شود. با استفاده از ایده ناحیه‌بندی، از سویی دیگر، انتظار می‌رود اثرات منفی فرض همسانگردی و ایستایی مورد استفاده در تعریف تابع کووریانس LSC را کاهش دهد. در شکل ۵، ناحیه‌بندی منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است. برای رفع خطای لبه در مدل‌سازی میدان در قسمت‌های بین نواحی، محدوده مشاهدات مورد استفاده در مدل‌سازی هر ناحیه، بزرگ‌تر از محدوده نقاط کنترلی آن ناحیه در نظر گرفته شده است. همچنین، در ناحیه سوم (مشکی)، به‌دلیل عدم وجود نقاط کنترلی، امکان استفاده از رویکرد IC وجود ندارد. از مجموعه نقاط کنترلی، ۱۴۹ نقطه در ناحیه اول (آبی) و ۸۵ در ناحیه دوم (قرمز) واقع شده است.

گرچه مدلسازی میدان گرانی در محدوده‌ای که ناحیه ۱ در آن واقع است، نسبت به کل منطقه دشوارتر، ولی، ایده ناحیه‌بندی باعث افزایش دقت مدلسازی میدان در این محدوده می‌شود. طبق جدول ۴، با این که مدلسازی محلی با رویکرد TR74 بدون ناحیه‌بندی و در کل منطقه دقتی پایین‌تر از مدل جهانی EIGEN6C4 دارد، اما پس از ناحیه‌بندی، مدلسازی محلی با رویکرد TR74 ۱/۰۴ میلی‌گال نسبت به کووریانس کلی بهبود داشته و با رویکرد IC ۰/۱۵ میلی‌گال بهتر از مدل جهانی EIGEN6C4 عمل کرده است.

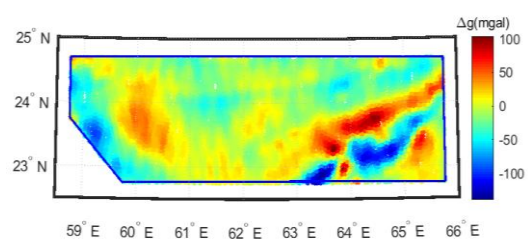
علاوه بر این، دیدیم که اعمال رویکرد IC روی کووریانس کلی منطقه، به‌رغم بهبود مدلسازی میدان گرانی، ولی برخلاف انتظار، نسبت محلی بودن تابع کووریانس را کاهش داد. اما پس از ناحیه‌بندی منطقه، رویکرد IC هم‌آن‌طور که نسبت محلی بودن تابع کووریانس را افزایش داده، موجب بالارفتن دقت مدلسازی شده است. افزون بر IC، ناحیه‌بندی، عملکرد کووریانس TR74 را نیز ارتقا داده است. به‌عبارت دیگر، ناحیه‌بندی کمک کرده تا کووریانس تجربی بهتری از مشاهدات استخراج شود. زیرا، کووریانس TR74، بسیار وابسته به کووریانس تجربی است. نهایتاً، چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قید ایستایی و همسانگردی در منطقه مزبور، فرض دقیقی نبوده و اعمال ناحیه‌بندی و تقلیل اثر این دو قید به‌نواحی کوچک‌تر در منطقه، باعث افزایش قدرت کووریانس تجربی، IC و TR74 در مدلسازی رفتار میدان محلی می‌شود.

این تحقیق نیز، هم‌آن مشاهدات ارتفاع‌سنجی به‌عنوان ورودی مدلسازی به‌کاررفته است که در مدلسازی جهانی میدان گرانی. بنابراین، عمده تلاش صورت‌گرفته در این پژوهش، افزایش کیفیت مدلسازی محلی میدان با ناحیه‌بندی و استفاده از رویکرد IC است. جدول ۴ نشان می‌دهد که این تلاش، منجر به بهبود مدلسازی به‌مقدار ۰/۱۵ میلی‌گال (۵/۶٪) نسبت به مدل EIGEN6C4 شده است. برخلاف مدلسازی محلی گرانی بر روی خشکی که در آن پراکندگی مشاهدات ماهواره‌ای گرانی کمتر است و از مشاهدات زمینی گرانی برای جبران کمبود تراکم مشاهدات استفاده می‌شود، در مدلسازی دریایی گرانی مشاهدات ارتفاع‌سنجی از مأموریت‌های ماهواره‌ای مختلف و با تراکم و پراکندگی مناسب موجود است. در مدلسازی محلی گرانی، به‌دلیل هزینه بالا، دسترسی به مشاهدات گرانی‌سنجی دریایی محدود است. از این‌رو، در خلأ داده‌های دریایی با تراکم بالا، استفاده از تکنیک‌های جدید (مانند ناحیه‌بندی و IC) تلاشی برای افزایش کیفیت محاسبات و مدلسازی محلی میدان گرانی است.

برای توضیح بیشتر اهمیت ایده ناحیه‌بندی در مدلسازی میدان، در جدول ۵، نتایج حاصل از مدلسازی LSC با هر دو رویکرد، مدل جهانی EIGEN6C4 و V29.1 بر روی نقاط کنترلی در ناحیه اول با و بدون استفاده از ناحیه‌بندی، آورده شده است. با این که انحراف معیار نتایج مدل‌های جهانی در این ناحیه بیشتر از کل منطقه بوده و انحراف معیار مدل محلی با رویکرد TR74 ۰/۳۹ میلی‌گال، معادل ۱۲/۵٪ کمتر از نتایج در کل منطقه است. به‌عبارت دیگر،

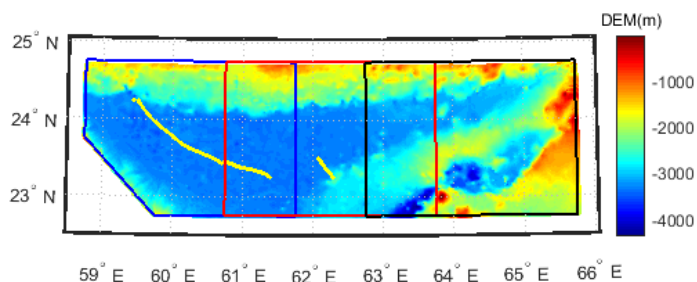


(ب)



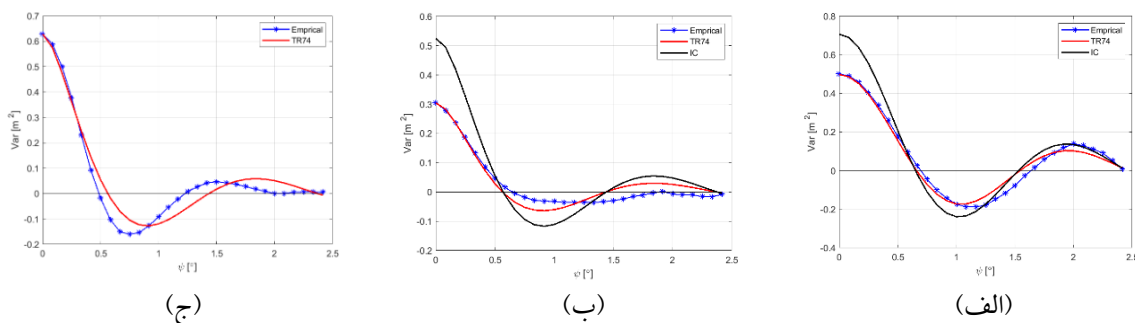
(الف)

شکل ۴. ناهنجاری گرانی باقی‌مانده برآوردشده در دریای عمان به‌روش LSC و رویکرد الف) TR74 (راست) و ب) IC (چپ).



شکل ۵. ناحیه‌بندی منطقه و مشاهدات گرانی‌سنجی دریایی به سه ناحیه اول (آبی)، دوم (قرمز) و سوم (مشکی).

پس‌زمینه تصویر، عمق دریا براساس مدل GEBCO می‌باشد، که از سایت <https://www.gebco.net> بارگیری شده است.



شکل ۶. نمودار کووریانس تجربی (آبی)، TR74 (قرمز) و IC (مشکی) در الف) ناحیه اول (راست)، ب) ناحیه دوم (وسط) و پ) ناحیه سوم (چپ) منطقه مطالعاتی.

جدول ۳. مؤلفه‌های کووریانس تجربی، TR74 و IC محاسبه شده در نواحی سه‌گانه منطقه مطالعاتی.

ناحیه سوم	ناحیه دوم			ناحیه اول			ناحیه	
	IC	TR74	تجربی	کووریانس	IC	TR74		تجربی
کووریانس	IC	TR74	تجربی	کووریانس (m ²)	IC	TR74	تجربی	کووریانس (m ²)
ورانس (m ²)	۰/۷۱	۰/۵۰	۰/۵۰	ورانس (m ²)	۰/۷۱	۰/۵۰	۰/۵۰	ورانس (m ²)
طول هم‌بستگی (دقیقه)	۱۹/۵۲	۱۹/۸۰	۲۰/۹۱	طول هم‌بستگی (دقیقه)	۱۹/۵۲	۱۹/۸۰	۲۰/۹۱	طول هم‌بستگی (دقیقه)
نسبت محلی بودن	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	نسبت محلی بودن	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	نسبت محلی بودن

جدول ۴. اطلاعات آماری حاصل از اختلاف نتایج مدل‌سازی ناهنجاری گرانی به روش LSC با رویکرد TR74 و IC و مدل‌های جهانی EIGEN6C4 و V29.1، بر روی نقاط کنترلی در کل منطقه مطالعاتی برحسب میلی‌گال.

V29.1	EIGEN-6C4	LSC با کووریانس مستقل روی هر ناحیه		LSC با کووریانس کلی منطقه		روش
		IC	TR74	IC	TR74	رویکرد
-۹/۸۲	-۱۳/۴۴	-۱۰/۴۵	-۱۰/۳۲	-۱۱/۵۳	-۱۳/۳۲	کمینه
۵/۴۲	۲/۶۲	۳/۳۵	۷/۴۷	۴/۰۶	۱۰/۹۲	بیشینه
-۱/۱۹	-۳/۴۶	-۲/۰۴	-۲/۳۴	-۲/۳۷	-۲/۶۸	میانگین
۲/۹۲	۲/۷۰	۲/۵۵	۳/۱۱	۲/۸۸	۴/۱۵	انحراف معیار

جدول ۵. اطلاعات آماری حاصل از اختلاف نتایج مدلسازی ناهنجاری گرانی به روش LSC با رویکرد TR74 و IC و مدل‌های جهانی EIGEN6C4 و V29.1، بر روی نقاط کنترلی در ناحیه اول برحسب میلی‌گال.

V29.1	EIGEN-6C4	LSC با کووریانس مستقل		LSC با کووریانس کلی منطقه		روش
		IC	TR74	IC	TR74	رویکرد
-۹/۸۲	-۱۳/۴۴	-۱۰/۴۵	-۱۰/۳۲	-۱۱/۵۳	-۱۳/۳۲	کمینه
۵/۲۵	۲/۶۲	۲/۵۲	۲/۸۶	۵/۰۲	۱۰/۹۲	بیشینه
-۰/۵۰	-۲/۹۸	-۱/۶۲	-۲/۳۸	-۲/۰۴	-۲/۵۲	میانگین
۳/۰۳	۲/۹۱	۲/۵۸	۲/۷۲	۲/۹۵	۴/۸۳	انحراف معیار

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ژئوئید ماهواره‌ای در منطقه مطالعاتی، از مدل جهانی EIGEN6C4 برای حذف طول‌موج‌های بلند میدان گرانی تا درجه و مرتبه ۱۸۰ از روی سیگنال ارتفاع ژئوئید استفاده شد. با این کار، مشاهدات ارتفاع ژئوئید باقی‌مانده (ΔN) برای ورود به مرحله مدلسازی و تعیین تابع کووریانس آماده شد. در این مرحله، ابتدا به روش کلاسیک LSC، از روی مشاهدات ΔN در منطقه مطالعاتی تابع کووریانس تجربی محاسبه و کووریانس شرنینگ و رپ ۱۹۷۴ (TR74) بر روی آن برازش داده شد تا پارامترهای مجهول کووریانس جهت تولید ماتریس‌های وریانس کووریانس LSC به دست آید. سپس، طبق رویکرد کووریانس بهبودیافته (IC)، فرآیند تعیین پارامترهای مجهول تابع کووریانس وارد یک چرخه تکرار با شرط رسیدن به کمترین انحراف معیار اختلاف بین نتایج مدل LSC و نقاط کنترلی می‌شود. نتیجتاً، طبق رویکرد IC، مقادیر جدیدی برای پارامترهای مجهول تابع کووریانس به دست خواهد آمد که با استفاده از آنها، دقت مدلسازی میدان گرانی نسبت به مشاهدات کنترلی بهینه می‌شود.

در بررسی نسبت محلی بودن کووریانس‌های به دست آمده در این منطقه، از پارامترهای محلی کووریانس (وریانس و طول هم‌بستگی) استفاده شد. همچنین در این تحقیق، نسبت محلی بودن تابع کووریانس (RoL) از تقسیم مقدار وریانس بر مقدار طول هم‌بستگی به عنوان یک پارامتر در تحلیل بهتر میزان محلی بودن کووریانس‌ها معرفی شد. در

این پژوهش، تلاشی اولیه در زمینه مدلسازی محلی میدان گرانی در محدوده دریای عمان است. به دلیل وقوع محل تلاقی صفحه اقیانوسی عربی و قاره‌ای اورآسیا و منطقه فرورانشی مکران در این محدوده، مطالعه وضعیت میدان گرانی آن دارای اهمیت است. در این مطالعه، از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره SARAL/AltiKa (SARAL) بهره‌برداری شد که به سبب استفاده از باند فرکانسی Ka، ردپای کوچک‌تر و در نتیجه قدرت تفکیک مکانی بالاتری داشته و به افزایش دقت ارتفاعی کمک می‌کند. روش مورد استفاده در مدلسازی گرانی، کالوکیشن کمترین مربعات (LSC) با دو رویکرد در تعیین کووریانس که اولی استفاده از کووریانس کلاسیک شرنینگ و رپ ۱۹۷۴ (TR74) و دومی، اصلاح کووریانس TR74 با الگوریتم کووریانس بهبودیافته (IC) است. همچنین، به کارگیری ایده ناحیه‌بندی منطقه مطالعاتی به نواحی کوچک‌تر، دیگر راه‌حل استفاده شده در این مطالعه بود. این ایده، برای کاهش اثر خطای ناشی از فرض ایستایی و همسانگردی در تعریف تابع کووریانس در روش LSC است.

در اجرای روند عملیات مدلسازی میدان گرانی، داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای SARAL وارد فرآیند پردازش‌های اولیه و تصحیح تأخیرات جوی، اثرات ژئوفیزیکی، کراس اجسمنت و مدل توپوگرافی میانگین می‌شود. پس از انجام این تصحیحات و رسیدن به ارتفاع

این منطقه، RoL نشان داد که بر خلاف انتظار، کووریانس TR74 نسبت به IC محلی تر است. از آنجا که رویکرد IC، قاعدتا برای کاهش خطای دو فرض ایستایی و همسانگردی در تعریف تابع کووریانس معرفی شده است، و از سوی دیگر، پس از حذف اثرات جهانی از روی سیگنال مشاهدات، مدل سازی محلی میدان در بازه فرکانس های متوسط به بالا انجام می شود، انتظار می رود که رویکرد IC به دلیل مدل سازی دقیق تر میدان گرانی، نسبت به TR74 رفتار محلی تر داشته باشد. صدق این گمان پس از استفاده از ایده ناحیه بندی منطقه مطالعاتی ثابت شد.

در این مطالعه، از ناحیه بندی به عنوان تلاشی برای محلی سازی و تقلیل تبعات منفی دو فرض ایستایی و همسانگردی بر مدل سازی میدان گرانی، استفاده شد. برای این کار، منطقه مطالعاتی به سه ناحیه تقسیم و فرآیند تعیین تابع کووریانس و مدل سازی LSC در هر ناحیه به صورت مستقل انجام شد. البته، فارغ از محلی سازی، تعداد کم و پراکندگی نامناسب نقاط کنترلی نیز، عامل دیگری برای ناحیه بندی منطقه بود. با محاسبه کووریانس های تجربی، TR74 و IC در نواحی سه گانه، نتایج جالبی به دست آمد. RoL کووریانس تجربی و TR74 در ناحیه ۱ و ۲ نسبت به کووریانس کلی منطقه کمتر و در ناحیه ۳ بیش تر شد. این ترتیب محلی بودن نواحی با پراکندگی ΔN در منطقه هم بستگی دارد. به طوری که، پیچیدگی تغییرات ΔN در ناحیه ۲ کمتر و در ناحیه ۳ بیش تر است. در حالی که، کووریانس کلی منطقه توانایی لحاظ و نمایش این اختلافات محلی را نداشت. علاوه بر این، در حالت ناحیه بندی، RoL کووریانس IC در دو ناحیه ۱ و ۲ طبق انتظار بالاتر از TR74 است. و این مزیت دیگر استفاده از ایده ناحیه بندی در مدل سازی محلی میدان گرانی است. به این معنا که، ایده ناحیه بندی باعث افزایش توانایی تابع کووریانس با رویکرد IC در مدل سازی رفتار محلی میدان گرانی می شود.

بهبود کیفیت کووریانس با ایده ناحیه بندی و رویکرد IC اثر خودش را در نتایج مدل سازی محلی میدان گرانی نیز

به خوبی منعکس کرد. دیدیم که با ناحیه بندی، دقت مدل سازی میدان $25/1\%$ (۱/۰۴ میلی گال) با رویکرد TR74 و با رویکرد IC $11/6\%$ (۰/۳۳ میلی گال) بالاتر رفت. همچنین، در شرایطی که دقت مدل سازی محلی با کووریانس کلی منطقه و رویکرد TR74 پایین تر از مدل جهانی EIGEN6C4 بود، اما اعمال ناحیه بندی باعث شد در ناحیه ۱، دقت مدل سازی TR74 بالاتر از مدل جهانی شود. به نحو مشابهی، رویکرد IC نیز موجب بهبود مدل سازی محلی میدان گرانی شد. به کارگیری این رویکرد، بدون لحاظ ناحیه بندی $31/3\%$ (۱/۲۷ میلی گال) و با آن 18% (۰/۵۶ میلی گال) دقت مدل سازی محلی را افزایش داد. جمعاً، مدل سازی محلی میدان با بهره گیری از دو راه کار ناحیه بندی و کووریانس با رویکرد IC، $1/6$ میلی گال (۳۹٪) در کل منطقه و $2/25$ میلی گال (۴۷٪) در ناحیه ۱ موجب افزایش دقت شد. به کارگیری این دو رویکرد، موجب بهبود $5/6\%$ (۰/۱۵ میلی گال) مدل سازی محلی کل منطقه و $11/3\%$ (۰/۳۳ میلی گال) در ناحیه ۱ نسبت به مدل جهانی EIGEN6C4 شد.

در پایان، لازم است به چند نکته برای تکمیل این تحقیق اشاره کرد. برای مدل سازی محلی میدان گرانی در این منطقه مطالعاتی، صرفاً از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره SARAL استفاده شده است. استفاده از مشاهدات دیگر ماهواره های ارتفاع سنجی و بهره گیری از روش های ترکیب و سرشکنی داده های ارتفاع سنجی ماهواره ای می تواند به افزایش دقت مشاهدات ورودی به مدل سازی کمک کند. همچنین، نبود مشاهدات کنترلی کافی یکی از محدودیت ها در اعتبارسنجی دقیق تر روش های مورد استفاده در منطقه مطالعاتی است. در ناحیه ۲ و به ویژه ناحیه ۳ این چالش بیش تر است. به شکلی که، در ناحیه ۳ که عمدتاً بر روی منطقه فرورانشی مکران واقع است، و نسبت RoL کووریانس تجربی و TR74 در آن بالاترین است، هیچ مشاهده کنترلی در دسترس نبود. محدودیت دیگر در مدل سازی واقعی تر میدان محلی، لحاظ دو فرض ایستایی و همسانگردی است.

محدودیت‌های محاسباتی موجود در استفاده از این توابع غلبه کرد.

مراجع

- Andersen, O. (2013). Marine Gravity and Geoid from Satellite Altimetry, Geoid determination: theory and methods, Springer Science & Business Media. 9.
- Foerste, CH. Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J. M., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., & Biancale, R. (2014). EIGEN-6C4 the latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. 10.
- Heydarizadeh Shali, H., Ramouz, S., Safari, A., & Barzagli, R. (2020). Assessment of Tscherning-Rapp covariance in Earth gravity modeling using gravity gradient and GPS/leveling observations. EGU General Assembly Conference.
<https://www.gebco.net>
<https://bgi.obs-mip.fr/data-products/gravity-databases/marine-gravity-data-prod/#/data/sea>
https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi
<http://www.eumetsat.int>
- Kalnins, M. L. (2011). Spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere and their tectonic implications. Oxford University.
- Moritz, H. (1980). Advanced physical geodesy. Original from the University of Michigan. Wichmann.
- Rummel, R., & Rapp, R. H. (1977). Undulation and anomaly estimation using GEOS-3 altimeter data without precise satellite orbits. Bulletin Geodesique. 1.51, 73-88.
- Ramouz, S., Afrasteh, Y., Reguzzoni, M., & Safari, A. (2020). Assessment of local covariance estimation through Least Squares Collocation over Iran. Advances in Geosciences. 50, (65-75).
- Sandwell, D. T., & Smith, W. H. F. (1997). Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 10039-10054.
- Sansò, F. & Sideris, M. G. (2013). Geoid determination: theory and methods. Springer Science & Business Media.
- Sandwell, D. T., Müller, D. R., Smith, W. H., Garcia, E., & Francis, R. (2014). New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Journal Science*, 364(6205), 65-67.
- Safari, A., Ramouz, S., & Jomegi, A. (2014). Verification of crust density effect on the gravity field modeling by least squares collocation. International Conference on Advanced Geophysics and Physics. Bangkok. Thailand.
- Tscherning, C. C., & Rapp, R. H. (1974). Closed Covariance Expressions for Gravity Anomalies, Geoid Undulations, and Deflections of the Vertical Implied by Anomaly Degree Variance Models. Report Notes for Ohio State University of Columbus Department of Geodetic Science. Ohio.
- Tscherning, C. C. (1994). Geoid determination by least-squares collocation using GRAVSOFT. Lecture Notes for the International School for the Determination and use of the Geoid. Milan.
- Verron, J., Bonnefond, P., Anderson, O., Arduin, F., Berge-Nguyen, M., Bhowmik, S., Blumstein, D., Boy, F., Brodeau, L., Cretaux, J. F., Dabat, M. L., Dibarboure, G., Fleury, S., Garnier, F., Gourdeau, L., Marks, K., Queruel, N., Sandwell, D., Smith, W. H. F., & Zaron, E. D. (2020) The SARAL/AltiKa mission: A step forward to the feature of altimetry. *Advances in Space Research*.
- اعمال ناحیه‌بندی و رویکرد IC در تعیین تابع کووریانس اثر این محدودیت را تا جایی کاهش می‌دهد. اما، راه‌حل اساسی‌تر، استفاده از توابع کووریانس غیرایستا و غیرهمسانگرد است. برای رسیدن به این مقصود، بایست بر