

مدل‌سازی میدان گرانش محلی در قطب جنوب کره ماه توسط داده‌های ماهواره گریل

محسن فیضی^{۱*}، مهدی روفیان نائینی^۲، مریم میری^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

چکیده

در این مطالعه، مدل‌سازی استاتیک میدان گرانش ماه با استفاده از توابع هارمونیک محلی و مشاهدات مصنوعی مأموریت‌های اولیه و توسعه داده‌شده‌ی ماهواره‌ی گریل (GRAIL) و مدل جهانی $GL1500E$ بررسی شده است. در این مدل‌سازی از مشاهدات سه‌ماهه ماهواره‌ی گریل برای تشکیل بردار مشاهدات استفاده شده است. مؤلفه‌ی مشاهداتی مورد استفاده در این تحقیق، اختلاف گرانش در امتداد خط دید زوج ماهواره (LGD) است. وجود میدان جاذبه زمین و اثر آن بر روی مدار دینامیکی ماهواره‌ی گریل، موجب دشواری در فرآیند مدل‌سازی میدان ثقل کره ماه می‌گردد. در این مطالعه با تشکیل معادله نرمال از طریق توابع پایه هارمونیک کلاه کروی اصلاح‌شده (ASCH) و حل مسئله معکوس، ضرایب مدل محلی ژئوپتانسیل به‌دست آمده است. در این مقاله، در حالت اول به مدل‌سازی میدان گرانش با داده‌های مأموریت اولیه (ارتفاع متوسط ۵۰ کیلومتر) پرداخته شده است. همچنین در حالت دوم، ضرایب ژئوپتانسیل با به‌کارگیری مشاهدات مأموریت توسعه داده‌شده‌ی گریل (ارتفاع متوسط ۲۰ کیلومتر) محاسبه و جهت بررسی صحت مدل از داده‌های مأموریت اولیه استفاده شده است. نتایج مدل ایجاد شده بر روی داده‌های مأموریت اولیه در نقاط کنترل برابر با ۰/۰۸ میکروگال و نتایج نقاط کنترل بر روی مشاهدات مأموریت توسعه داده شده برابر با ۰/۱۵ میکروگال به‌دست آمده است. به این صورت صحت‌سنجی مدل ژئوپتانسیل محلی صورت گرفته بر روی قطب جنوب کره ماه تأیید می‌شود و در روش بکارگیری شده با استفاده از تعداد ضرایب کمتر، دقت مکانی قابل قبولی از تغییرات میدان ثقل نسبت به مدل‌های ژئوپتانسیل با درجه و مرتبه بالا همچون $GL1500E$ ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: هارمونیک کلاه کروی اصلاح‌شده، میدان گرانش محلی، مدل ژئوپتانسیل.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: +۹۸۹۳۳۴۴۳۸۳۸۶

۱- مقدمه

در حدود بیش از سیصد سال پیش نیوتون^۱ به موضوع گرانش و قانون گرانش پرداخت. بر اساس قانون گرانش نیوتون، نیروی گرانش متناسب با جرم دو جسم و با عکس مجذور فاصله‌ی آن دو رابطه دارد و بر خط واصل دو جسم اعمال می‌شود [۱]. حال وقتی صحبت از یک جسم در فضا می‌باشد، چیزی به نام میدان نیروی گرانشی قابل‌تعریف است. بنابراین، یک جسم جذب‌کننده میدان نیروی گرانش را تعیین می‌نماید [۲]. مدل‌سازی میدان گرانش یکی از مسائل کلاسیک ژئودزی است که از دیرباز موردتوجه محققین این حوزه بوده است و در طول دهه‌ی گذشته پیشرفت‌های قابل‌توجهی در بهبود مدل‌های گرانشی زمین و سیارات زمینی صورت گرفته است. اطلاع از رفتار میدان گرانشی، در کاربردهای متنوعی همچون تعیین مدار ماهواره‌ها، ناوبری، کشف معادن با شناسایی ساختار زمین به‌کاررفته و حتی گسترش آن در سیارات دیگر سبب شده است که تکنیک‌های حل و روش‌های مختلف اندازه‌گیری به‌منظور مدل‌سازی میدان گرانش در مقیاس‌های جهانی و محلی ارائه گردد [۳].

از آنجاکه داده‌های گرانشی در گذشته به‌صورت اندازه‌گیری‌های گرانش سطحی و اندازه‌گیری‌های ارتفاعی بوده، پس با استفاده از این داده‌ها عمدتاً به مدل‌سازی در منطقه‌ی خاصی از سطح زمین و ایجاد مدل‌های میدان گرانش به‌صورت محلی پرداخته‌شده است. با توسعه‌ی فن‌آوری‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی میدان گرانش و تعیین ضرایب مدل با پوشش جهانی امکان‌پذیر شده است. با توجه به پوشش مشاهدات ماهواره‌ای و نحوه‌ی اندازه‌گیری آنها، امکان مدل‌سازی میدان گرانش در مقیاس جهانی فراهم گردید و نخستین مدل‌های ژئوپتانسیل ارائه شدند. این مدل‌های میدان گرانش به کمک حل مسئله‌ی مقدار مرزی

(BVP) پتانسیل گرانشی در فضای بیرونی جسم، به‌صورت معادله‌ی لاپلاس به وجود آمده است. هدف از حل معادله‌ی لاپلاس یافتن تابعی هارمونیک با استفاده از مقادیر معلوم بر روی مرزی مشخص است. از آنجاکه پتانسیل گرانشی در خارج از یک جسم دلخواه یک تابع هارمونیک می‌باشد، می‌توان آن را به‌صورت بسط به سری هارمونیک‌های کروی نمایش داد.

امروزه علاوه بر زمین، مدل‌های گرانشی نسبتاً دقیق برای ماه، زهره^۳ و مریخ^۴ نیز ایجاد شده است، که در بین اجرام سماوی، ماه به‌عنوان تنها ماهواره‌ی طبیعی زمین و نزدیک‌ترین همسایه در منظومه‌ی شمسی برای ما از اهمیت بیشتری برخوردار است. محققان ناسا بر مبنای مشاهدات شکل‌گرفته در ماه، وجود میزانی یخ در دهانه‌ی شاکلتن^۵ ماه را تا حد زیادی احتمال می‌دهند. این یخ‌ها در دهانه‌ی شاکلتن واقع در بخش قطب جنوبی ماه، جایی که دما حداکثر منفی ۱۵۷ درجه‌ی سانتی‌گراد است، قرار دارند. دلیل این مسئله نیز انحناء بسیار کوچک محور چرخش ماه می‌باشد، که سبب شده نور خورشید هرگز به این مناطق نرسد [۴]. همچنین برخلاف زمین، ماه تاریخچه‌ی چهار و نیم میلیارد سالی منظومه‌ی شمسی را در خود حفظ کرده است، که با کمک ساختار و ترکیب درونی ماه می‌توان به بازسازی این تاریخ کمک نمود [۵]. در نتیجه استفاده از مدل‌های دقیق میدان گرانش در قطب جنوب ماه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وجود آب و همچنین نحوه‌ی تکامل و تاریخچه‌ی ماه و حتی منظومه‌ی شمسی در اختیار ما قرار دهد. مدل‌های گرانشی ذکرشده و هارمونیک‌های کروی در مطالعات جهانی دارای دقت و وضوح بالایی در بازسازی طول‌موج‌های بالای میدان گرانش هستند، ولی جهت استخراج فرکانس‌های بالا در کاربردهای محلی نیاز به

² Boundary Value Problem³ Venus⁴ Mars⁵ Shackleton¹ Sir Isaac Newton (1642-1727)

برای مدل‌سازی میدان گرانش از مشاهدات محلی میدان گرانش ایجاد شده در آلمان به کمک مدل‌های جهانی و هارمونیک کروی اصلاح شده مورد استفاده قرار داده است. و این روش را برای مدل‌سازی پتانسیل گرانشی، محاسبات شبه ژئوئیدی و ژئوئیدی به صورت منطقه‌ای و با دقت بالا مناسب دانست [۱۲]. فیضی و رئوفیان نائینی (۲۰۱۷) با شبیه‌سازی مشاهدات ثقل سنجی هوایی منطقه‌ی شمال غرب ایران و به کمک هارمونیک کروی اصلاح شده، به مدل‌سازی میدان گرانش محلی در راستای شعاعی پرداخته و برای بررسی نتایج از نقاط کنترل استفاده کرده است [۱۳]. فیضی و رئوفیان نائینی (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های گرانش هوایی بر روی کشور تانزانیا، دقت دو روش هارمونیک کروی اصلاح شده و هارمونیک مستطیلی را مقایسه نمودند [۱۴].

۲- میدان گرانش ماه

تعیین ساختار و ترکیب درونی ماه، نیازمند دانش دقیقی از میدان گرانش ماه است که در مأموریت‌های ماهواره‌ای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. تلاش‌های اولیه برای ایجاد مدل گرانشی ماه با مأموریت لونا-۱۰ در سال ۱۹۶۶ آغاز شد [۱۵]. پس از آن با ارسال ماهواره‌ی مدارگرد ماه^۶ و شش فرود موفقیت‌آمیز برنامه‌ی آپولو^۷ ادامه یافت. مدل‌های میدان گرانش ماه با داده‌های مأموریت کلمنتاین^۸، اکاوشگر ماه (LP)^۹ و چانگ‌ای-۱^{۱۰} حدود بسیار زیادی بهبود نمود. دسترسی مستقیم و مدل‌سازی میدان گرانش بخش دور ماه، توسط مأموریت سلن^{۱۱} امکان‌پذیر گردید [۱۶].

⁶ Rectangular harmonic

⁷ luna-10

⁸ Lunar Orbiters

⁹ Apollo

¹⁰ Clementine

¹¹ lunar prospector

¹² Chang'e-1

¹³ SELENE

استفاده از توابع پایه محلی است. در حالتی که هدف مدل‌سازی محلی میدان ثقل باشد، می‌توان هارمونیک‌های کروی را به شکلی تعریف نمود که بر روی یک کلاهک کروی متعامد شوند. این ایده نخستین بار توسط هینز^۱ (۱۹۸۵) با نام هارمونیک کلاه کروی (SCH)^۲ ارائه گردید [۶]. این روش شامل اعمال مستقیم شرایط مرزی بر روی کلاهک و استفاده از توابع لژاندر با درجه‌ی حقیقی و مرتبه‌ی صحیح می‌باشد. هینز (۱۹۸۵) از این روش نخستین بار جهت مدل‌سازی محلی میدان مغناطیسی در کانادا استفاده نموده است [۷]. مدل‌سازی‌های میدان گرانش قابل‌اعتمادی از این روش نیز به عمل آمده که اولین به‌کارگیری در این زمینه در سال (۱۹۹۵) شکل گرفته است [۸]. دی سنتیس^۳ (۱۹۹۲) جهت بهبود روش هارمونیک کلاه کروی، استفاده از هارمونیک‌های کروی با استفاده از درجات صحیح را به کمک مقیاس بندی داده‌های کلاهک کروی و قرار دادن بر روی یک نیم‌کره پیشنهاد کرد. این روش با نام آنالیز هارمونیک‌های کلاه کروی اصلاح شده (ASCH)^۴ ارائه شده است [۹]. هان (۲۰۰۸) جهت نمایش میدان گرانش محلی در ماه، توابع پایه اسلپین کروی^۵ را بکار گرفت. این توابع پایه به صورت ترکیب خطی هارمونیک‌های کروی استاندارد نمایش داده می‌شوند. نتایج کار را نیز با آخرین مدل‌های گرانش جهانی و همچنین داده‌های توپوگرافی مستقل مقایسه شده است. با کمک این توابع، امکان ساخت میدان گرانشی سمت نزدیک ماه با وضوح بالا و در سمت دور ماه با وضوح پایین به طور همزمان وجود دارد [۱۰]. گوسنز و همکاران (۲۰۱۲)، توابع پایه اسلپین مورد استفاده در مطالعه‌ی هان [۱۰] را برای ایجاد مدل گرانش محلی بکار گرفته است [۱۱]. یونس (۲۰۱۳)

¹ G. Haines

² Spherical Cap Harmonics

³ De Santis

⁴ Adjusted Spherical Harmonic Analysis

⁵ spherical Slepian

ماهواره) دو ماهواره A و B که از طریق مشتق فاصله دو ماهواره طبق رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$\dot{\rho} = \dot{\mathbf{r}}_{AB} \cdot \mathbf{e}_{AB} \quad \text{رابطه (۲)}$$

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، بردار تغییرات فاصله‌ی نسبی دو ماهواره (بردار سرعت نسبی دو ماهواره) $\dot{\mathbf{r}}_{AB}$ ، همان اختلاف بردار سرعت ماهواره اول $\dot{\mathbf{r}}_A$ و دوم $\dot{\mathbf{r}}_B$ است.

بردار اختلاف شتاب در امتداد خط دید بین دو ماهواره $LL-SST$ به صورت رابطه (۳) قابل نمایش است:

$$g_{AB}^{LOS} = \ddot{\rho} - \frac{1}{\rho} (\dot{\mathbf{r}}_{AB}^2 - \dot{\rho}^2) \quad \text{رابطه (۳)}$$

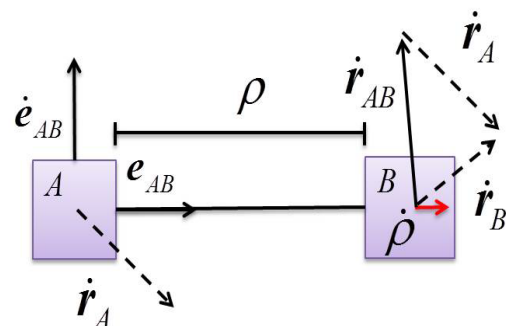
داده‌های اولیه گرید به صورت خام و پردازش نشده است، که با اعمال پردازش‌های لازم بر روی آن، داده‌های سطح یک، $A-1$ و $B-1$ را ایجاد می نماید. داده‌های سطح یک شامل شتاب‌های غیر جاذبی، داده‌های تعیین موقعیت، فاصله‌ی بین دو ماهواره و تغییرات آن است. داده‌های سطح بالاتر که در اثر پردازش‌هایی بر روی داده‌های سطح یک ایجاد می شوند شامل ضرایب هارمونیک میدان گرانشی است که توسط PDS بایگانی می شوند [۵].

۳- مدل سازی میدان گرانش به روش هارمونیک‌های کلاهک کروی

در روش SCH حل مسئله مقدار مرزی معادله لاپلاس به صورت محلی انجام می شود، یعنی به جای آن که اطلاعات در کل کره‌ی زمین در دست باشد، فرض می شود که اطلاعات گرانشی بر محدوده‌ای از زمین به عنوان نمونه به شکل کلاهک کروی، در اختیار است. منطقه‌ی مورد نظر به وسیله کلاهک کروی با زاویه‌ی θ و فاصله‌ی شعاعی $r=a$ و $r=b$ مطابق شکل (۲) پوشش داده شده است [۶].

این کلاهک تعریف شده برای منطقه‌ای قابل استفاده است که بر قطب کلاهک منطبق باشد، در غیر این

در بین این مأموریت‌ها، ماهواره‌ی ثقل سنجی گرید^۱ توانسته دقیق ترین نقشه‌ی گرانشی ماه با وضوح بالا را تا به امروز ارائه دهد. تا قبل از گرید، مدل‌های گرانشی ماه با توجه به اینکه همواره یک سمت ماه به سوی زمین است (قفل جزرومدی ماه) و عدم امکان ردیابی مستقیم ماهواره، بیشتر سمت نزدیک ماه را شامل می شدند [۱۷]. فاصله‌ی نسبی زوج ماهواره‌ی گرید با فرآیند علمی مشابه مأموریت گریس-ب^۲ ویژگی‌های میدان گرانش منطقه‌ی در حال عبور وابسته است [۱۸]. برای اندازه گیری دقیق فاصله‌ی نسبی زوج ماهواره‌ی گرید، در هر ماهواره سیستم فاصله یاب گرانشی ماه $LGRS$ قرار گرفته است. این سیستم از طریق اختلاف فرکانس دریافتی و ارسالی سیگنال‌های رادیویی باند K این فاصله را محاسبه می نماید [۱۹]. هندسه‌ی قرارگیری دو ماهواره‌ی ارتفاع پایین مأموریت گرید در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: هندسه دو ماهواره ارتفاع پایین [۲۰]

با توجه به شکل (۱)، بردار واحد در امتداد خط دید دو ماهواره‌ی A و B است. ρ فاصله نسبی بین زوج ماهواره که با استفاده از اختلاف بردارهای موقعیت دو ماهواره ($\mathbf{r}_{AB}$) به صورت رابطه (۱) ایجاد می شود.

$$\rho = \mathbf{e}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AB} \quad \text{رابطه (۱)}$$

همچنین $\dot{\rho}$ تغییرات فاصله نسبی (سرعت نسبی دو

³ Low-Low Satellite to Satellite Tracking

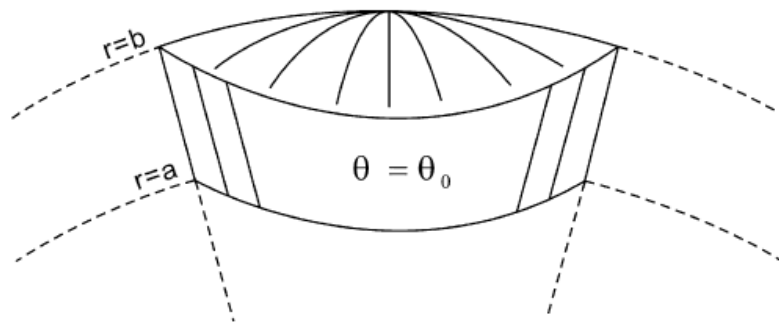
⁴ Planetary Data System

¹ GRAIL: Gravity Recovery and Interior Laboratory

² GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment

مختصات با قطب جدید می باشند. جهت حل معادله ی لاپلاس در سیستم مختصات کروی به روش جداسازی، می بایست مقادیر ویژه ی موجود را با تعریف شرایط مرزی تعیین نمود. در نتیجه، پتانسیل گرانشی V حاصل از حل معادله ی لاپلاس با برقراری شرایط مرزی در محدوده ی کلاهک کروی شکل به صورت رابطه (۵) است [۶].

صورت، می توان سیستم کروی معمولی (r, θ, λ) را به یک سیستم با محوریت کلاهک کروی که از مرکز منطقه ی مورد نظر عبور می نماید (r, ψ, a) ، دوران داد، این تبدیل سیستم مختصات از طریق رابطه (۴) امکان پذیر است [۲۱]. در رابطه (۴) θ_p و λ_p موقعیت مرکز منطقه مورد مطالعه و a و ψ نیز به ترتیب آزیموت و فاصله ی کروی نقاط کلاهک در سیستم



شکل ۲: شکل نمایش دهنده کلاهک کروی [۶]

$$\tan(\alpha) = \frac{\sin(\theta) \sin(\lambda - \lambda_p)}{\sin(\lambda_p) \cos(\theta) - \cos(\theta_p) \sin(\theta) \cos(\lambda - \lambda_p)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\cos(\psi) = \cos(\theta_p) \cos(\theta) + \sin(\theta_p) \sin(\theta) \cos(\lambda - \lambda_p)$$

$$V(r, \theta, \lambda) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=m}^{\infty} R \left(\frac{R}{r} \right)^{n_k(m)+1} (g_k^m \cos m \lambda + h_k^m \sin m \lambda) P_{n_k(m)}^m(\cos \theta) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$V(r, \theta_0, \lambda) = 0 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\left. \frac{\partial V(r, \theta, \lambda)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0$$

پس از محاسبه پتانسیل گرانشی، با محاسبه گرادیان این تابع اسکالر می توان به شتاب گرانشی دست پیدا نمود. مؤلفه های شتاب گرانشی با استفاده از روابط (۷) حاصل خواهد شد [۶].

در رابطه (۵)، θ متمم عرض جغرافیایی، λ طول جغرافیایی، R شعاع کره مرجع و پتانسیل روی آن گسترش می یابد. $P_{n_k(m)}^m(\cdot)$ تابع لژاندر با درجه حقیقی و مرتبه صحیح می باشد. h_k^m و g_k^m ضرایب هارمونیک های کلاه کروی هستند. درجه ی تابع که با $n_k(m)$ نشان داده شده است از طریق حل روابط (۶) قابل محاسبه است [۶]. در رابطه (۶)، θ_0 نصف زاویه کلاهک کروی تعریف شده بر منطقه مورد نظر است.

یک سیستم نیمکره‌ای جدید (r', θ', λ') توسط روابط (۸) امکان‌پذیر است [۹].

$$r' = r$$

$$\lambda' = \lambda \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\theta' = S \cdot \theta$$

در رابطه (۸)، $S = \frac{\pi}{2\theta_0}$ مقیاس، θ_0 نصف زاویه

کلاهک، r و r' فاصله شعاعی، λ و λ' طول جغرافیایی در سیستم‌های مرجع قدیم و جدید می‌باشند.

با بزرگ کردن مصنوعی کلاهک به یک نیمکره، پتانسیل گرانشی به شکل رابطه (۹) بیان می‌شود [۹].

در رابطه (۹)، $P_{km}(\cdot)$ تابع لژاندر با درجه و مرتبه‌ی صحیح، C_k^m و S_k^m ضرایب روش $ASCH$ هستند. n_k درجه‌ی رابطه (۹) با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۹]. درنهایت می‌بایست به سیستم اصلی بازگشت که با تبدیل معکوس و استفاده از مقیاس امکان‌پذیر است. با توجه به روابط (۸)، مؤلفه‌های شتاب گرانش به شکل روابط (۱۱) خواهد شد [۲۲]:

در هارمونیک‌های کروی اصلاح‌شده برخلاف روش هارمونیک‌های کلاه کروی، دیگر نیازی به محاسبه‌ی ریشه‌های تابع لژاندر و مشتقات آن نیست و تابع لژاندر به راحتی با استفاده از فرمول‌های بازگشتی و بدون نیاز به راه‌حل‌های پیچیده و تکراری قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} g_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, \theta, \lambda)}{\partial \theta} \\ g_\lambda &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V(r, \theta, \lambda)}{\partial \lambda} \\ g_r &= -\frac{\partial V(r, \theta, \lambda)}{\partial r} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۷)}$$

مزیت روش هارمونیک‌های کلاه کروی نسبت به هارمونیک‌های معمولی این است که تعداد ضرایب لازم برای وضوح خاص در یک محدوده کلاهک کروی کمتر از هارمونیک‌های کروی معمولی در همان وضوح موردنیاز است. این تکنیک به‌طور گسترده در مدل‌سازی میدان مغناطیسی و میدان گرانشی به کار رفته است. در این روش محاسبات مربوط به توابع لژاندر، بدون استفاده از فرمول بازگشتی و به کارگیری تقریب‌ها، فرآیندی زمان‌بر می‌باشد [۷].

دی سنتیس (۱۹۹۲) جهت بهبود روش هینز، استفاده از توابع لژاندر با درجه و مرتبه صحیح به جای توابع لژاندر با درجه غیر صحیح را به کمک مقیاس بندی داده‌های کلاهک کروی پیشنهاد کرد. این روش که هارمونیک‌های کروی اصلاح‌شده ($ASCH$) نام دارد، برای کلاهک‌هایی که خیلی بزرگ نیستند قابل به کارگیری است. لازمه‌ی استفاده از این روش و به تبع آن به کارگیری توابع لژاندر با درجه و مرتبه صحیح، مقیاس نمودن داده‌ها در بازه‌ی صفر تا $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. این کار با تبدیل از یک سیستم کلاهک کروی (r, θ, λ) به

$$V(r', \theta', \lambda') = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \left(\frac{R}{r'} \right)^{n_k+1} (C_k^m \cos m \lambda' + S_k^m \sin m \lambda') P_k^m(\cos \theta') \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$n_k = \sqrt{S^2 k(k+1) + 0.25} - 0.5 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$g_{\theta'}^{ASCH} = \frac{g_\theta}{S},$$

$$g_{\lambda'}^{ASCH} = g_\lambda \times \frac{\sin(\theta_0)}{\sin(S\theta_0)}, \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$g_{r'}^{ASCH} = g_r$$

۳-۱- تشکیل معادله نرمال بر اساس مشاهدات

LGD و تابع هارمونیک ASCH

جهت دستیابی به بردار گرانش ماهواره، لازم است از تابع پتانسیل به شکل رابطه (۱۲) مشتق‌گیری انجام شود. بردارهای پایه و مؤلفه‌های بردار میدان گرانش در سیستم مختصات کلاهیک کروی پوشش داده شده در منطقه موردنظر، تعریف شده است.

مؤلفه‌های شتابگرانش ذکرشده، به کمک جایگذاری رابطه (۹) در روابط (۷)، به شکل روابط (۱۳) حاصل خواهد شد. همچنین برای محاسبه بردارهای پایه می‌توان از روابط (۱۴) استفاده نمود. با توجه به آنکه ماهواره‌ی گرینل مقدار اختلاف گرانش

بین دو ماهواره‌ی A و B را که در امتداد خط دید دو ماهواره LOS (Line Of Sight) تصویر شده است اندازه‌گیری می‌نماید، بنابراین برای این اختلاف گرانش معادله رابطه (۱۵) را داریم. در رابطه (۱۵)، اختلاف شتاب گرانش زوج ماهواره‌ی گرینل (LGD) (Line of sight gravity difference) نیازمند محاسبه بردارهای شتاب گرانش g_A و g_B به کمک رابطه (۱۳) و همچنین ضرب داخلی بردار واحد هر ماهواره در بردار واحد خط واصل دو ماهواره است که به صورت رابطه (۱۶) انجام می‌شود. با جایگذاری روابط ذکرشده در رابطه (۱۵) می‌توان این رابطه را به شکل رابطه (۱۷) بازنویسی نمود.

$$g^{ASCH} = \nabla V^{ASCH} = g_{r'}^{ASCH} e_{r'} + g_{\theta'}^{ASCH} e_{\theta'} + g_{\lambda'}^{ASCH} e_{\lambda'} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$g_{sat}^{ASCH} = \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \left(\frac{R}{r}\right)^{n_k+2} \frac{\partial P_k^m(\cos \theta)}{\partial \theta} (C_k^m \cos m \lambda + S_k^m \sin m \lambda) \\ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k m \left(\frac{R}{r}\right)^{n_k+2} \frac{P_k^m(\cos \theta)}{\sin \theta} (-C_k^m \sin m \lambda + S_k^m \cos m \lambda) \\ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (n_k+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n_k+2} P_k^m(\cos \theta) (C_k^m \cos m \lambda + S_k^m \sin m \lambda) \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$e_{r'} = \begin{bmatrix} \sin \theta' \cos \lambda' \\ \sin \theta' \sin \lambda' \\ \cos \theta' \end{bmatrix}, \quad e_{\theta'} = \begin{bmatrix} \cos \theta' \cos \lambda' \\ \cos \theta' \sin \lambda' \\ -\sin \theta' \end{bmatrix}, \quad e_{\lambda'} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda' \\ \cos \lambda' \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\delta g_{satA, satB}^{LOS-ASCH} = (g_B^{ASCH} - g_A^{ASCH}) \cdot e = g_B^{ASCH} \cdot e - g_A^{ASCH} \cdot e \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

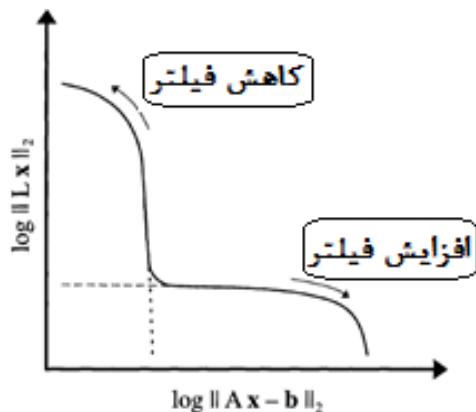
$$e \cdot e_{r_{sat}} = (\sin \theta' (\Delta X \cos \lambda' + \Delta Y \sin \lambda') + \Delta Z \cos \theta') / \rho$$

$$e \cdot e_{\theta_{sat}} = (\cos \theta' (\Delta X \cos \lambda' + \Delta Y \sin \lambda') - \Delta Z \sin \theta') / \rho \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$e \cdot e_{\lambda_{sat}} = (-\Delta X \sin \lambda' + \Delta Y \cos \lambda') / \rho$$

$$\delta g_{satA, satB}^{LOS-ASCH}(r'_B, \lambda'_B, \theta'_B, r'_A, \lambda'_A, \theta'_A) = \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

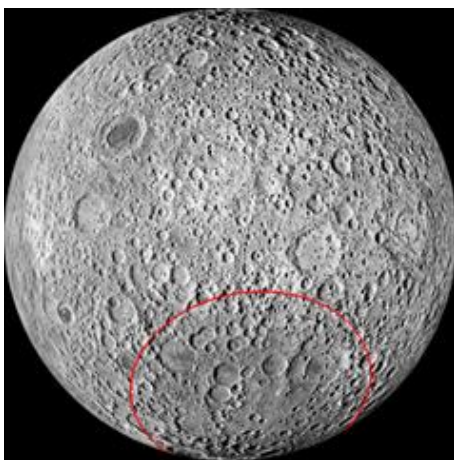
$$\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k (C_k^m F_k^m(r'_B, \lambda'_B, \theta'_B, r'_A, \lambda'_A, \theta'_A) + S_k^m G_k^m(r'_B, \lambda'_B, \theta'_B, r'_A, \lambda'_A, \theta'_A))$$



شکل ۳: شکل عمومی منحنی-ال [۳۲]

۴- مطالعه موردی: قطب جنوب کره ماه

در این بخش، به مدل سازی میدان گرانش بر روی قطب جنوب ماه به عنوان یک مطالعه‌ی موردی پرداخته می‌شود. منطقه‌ی مورد مطالعه، در محدوده‌ی بین ۹۰- تا ۸۵- درجه‌ی عرض جغرافیایی و ۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه طول جغرافیایی مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، یک سیستم مختصات محلی به صورت کلاهک کروی شکل با شعاع کلاهک ۵ درجه و مختصات مرکز ۹۰- درجه‌ی عرض جغرافیایی و صفر درجه‌ی طول جغرافیایی مورد استفاده قرار گرفته است. موقعیت مرکز و شعاع سیستم مختصات کلاهک کروی ذکر شده به گونه‌ای است که بتواند به طور کامل منطقه‌ی جنوبگان را پوشش دهد (شکل (۴)).



شکل ۴: منطقه مورد مطالعه

در رابطه (۱۷)، G_k^m و F_k^m خلاصه‌شده‌ی جملاتی است که در پیوست بیان شده است.

همچنین می‌توان این معادله را به صورت یک رابطه خطی بین داده‌های LGD واقعی در فریم $ASCH$ و ضرایب مجهول هارمونیک کلاه کروی اصلاح شده مطابق رابطه (۱۸) تعریف نمود:

$$l + v = Ax \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸) A ماتریس طراحی، l بردار مشاهدات، x بردار پارامترهای مجهول و v بردار خطای تصادفی مشاهدات است. مقادیر بردار v دارای میانگین صفر بوده که جمله‌های آن با واریانس همسان (واریانس ثابت) و به صورت نا همبسته (کواریانس صفر) می‌باشند.

با توجه به عدد شرط ($Cond$)^۱ مسئله و بد وضعی مسئله‌ی معکوس، لازم است از روش‌های پایداری‌سازی^۲ استفاده شود. روش تیخونوف^۳ فیلیپس^۴ یکی از متداول ترین روش‌های پایداری‌سازی است، که در اینجا بکار گرفته شده است. در روش تیخونوف هدف یافتن راه حل مسئله‌ی مینیمم سازی به شکل رابطه (۱۹) است [۳۲]:

$$\min \left\{ \|Ax - b\|_2^2 + \lambda^2 \|Lx\|_2^2 \right\} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در روش تیخونوف نرم جواب مسئله و نرم بردار خطاها هم زمان کمترین مقدار می‌باشند. در رابطه (۱۹)، پارامتر پایداری‌سازی λ به کمک منحنی-ال تعیین می‌گردد. منحنی-ال، یک نمودار $\log-\log$ از نرم راه حل پایداری‌سازی شده در مقابل نرم باقیمانده است، که نمودار حاصل اغلب به شکل حرف لاتین L می‌شود (مطابق شکل (۳)). ایده‌ی روش منحنی-ال، انتخاب پارامتر پایداری‌سازی λ به عنوان نقطه گوشه در نمودار با بیشترین انحناء است.

^۱ Condition number

^۲ regularization

^۳ Tikhonov

^۴ Phillips

۴-۲- مدل‌سازی محلی میدان ثقل بر مبنای توابع هارمونیک کلاه کروی ASCH بر روی منطقه قطب جنوب کره ماه

در حالت اول برای مدل‌سازی میدان گرانش در منطقه‌ی موردنظر از داده‌های مأموریت اولیه استفاده شده است. پس از ایجاد ماتریس ضرایب به کمک رابطه (۱۷) و تشکیل معادله‌ی نرمال، ضرایب ژئوپتانسیل حاصل از توابع هارمونیک ASCH از طریق حل مسئله معکوس و پایدارسازی محاسبه می‌شوند. ضرایب ژئوپتانسیل محلی با داده‌های کنترلی که در مسئله‌ی معکوس استفاده نشده است، ارزیابی می‌شوند. همچنین جهت بهترین برازش مدل بر روی مشاهدات و صرفه‌جویی زمان و کاهش محاسبات، مدل‌سازی میدان گرانش با مقادیر مختلف درجه انجام می‌گردد. درجه‌ی بهینه برای کلاهک ۵ درجه در قطب جنوب ماه با استفاده از داده‌های مأموریت اولیه برابر ۴۰ می‌باشد. همچنین می‌توان اختلاف بین مدل ASCH و مقادیر LGD در نقاط کنترل را مطابق شکل (۷) بررسی نمود. همان‌طور که قابل مشاهده است، با افزایش درجه، مدل‌سازی بهبودیافته و درنهایت بهترین تطبیق مدل و مقادیر در درجه ۴۰ حاصل شده است.

۴-۱- مشاهدات شبیه‌سازی شده

مشاهدات مورد استفاده برای مدل‌سازی میدان ثقل در قطب جنوب ماه، از طریق موقعیت شبیه‌سازی شده‌ی زوج ماهواره‌ی گریل هنگام مأموریت اولیه (PM) در ارتفاع متوسط ۵۰ کیلومتر و مأموریت توسعه داده شده (XM) در ارتفاع متوسط ۲۰ کیلومتر سطح ماه و همچنین به کارگیری مدل ژئوپتانسیل GL1500E برای شبیه‌سازی تغییرات مشاهدات LGD، به دست آمده است. این مشاهدات پس از حذف داده‌های طول موج بلند، شامل درجات ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ می‌باشند. برای جزئیات بیشتر به جدول (۱) مراجعه شود.

شکل (۵) نمایش مناسبی جهت درک بهتر پراکندگی مشاهدات و مختصات زوج ماهواره‌ی گریل است، که بیانگر موقعیت و پراکندگی موقعیت ماهواره‌ی گریل-۳^۱ و گریل-ب^۲ در بازه‌ی زمانی سه ماهه می‌باشد.

مدار ماهواره‌ی گریل به دلیل ارتفاع پایین ماهواره و تغییرات بالای میدان گرانش بسیار پر نوسان است که این نشان‌دهنده‌ی اثر میدان جاذبه‌ی بالای ماه بر اغتشاشات مداری ماهواره‌ی گریل می‌باشد. برای درک بهتر میزان تغییرات میدان گرانش در سطح کره‌ی ماه، تغییرات ارتفاعی مدار ماهواره‌ی گریل-آ هنگام مأموریت اولیه و مأموریت‌های تمدید شده به کمک شکل (۶) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود به دلیل کاهش ارتفاع ماهواره گریل در طول مأموریت تمدید شده، مدار گریل تحت تأثیر تغییرات بالای میدان گرانش قرار گرفته و در نتیجه دارای نوسانات بسیار زیادی به نسبت مأموریت اولیه است. از سویی برای درک بهتر تغییرات ارتفاعی داده‌های بکار گرفته در این مقاله، تفاوت ارتفاعی هر مأموریت ترسیم شده است.

¹ Primary Mission

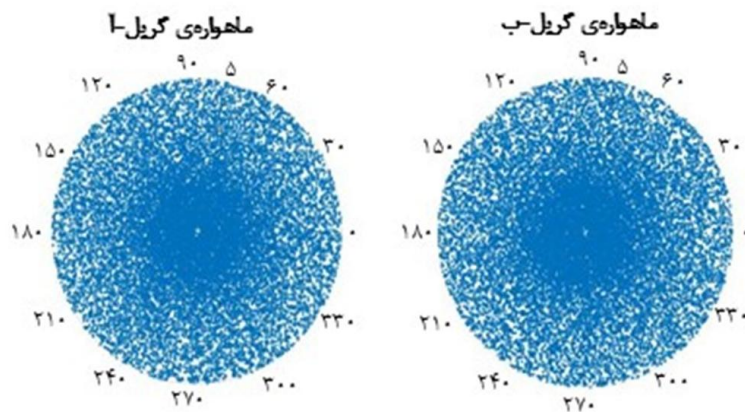
² Extended Mission

³ GRAIL-A

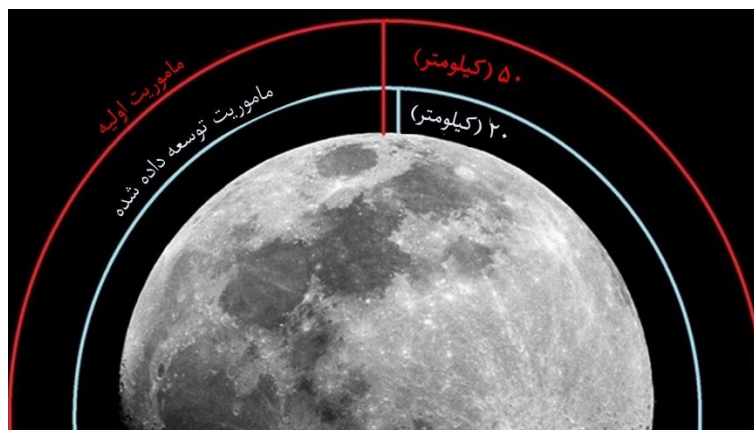
⁴ GRAIL-B

جدول ۱: داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی گریل

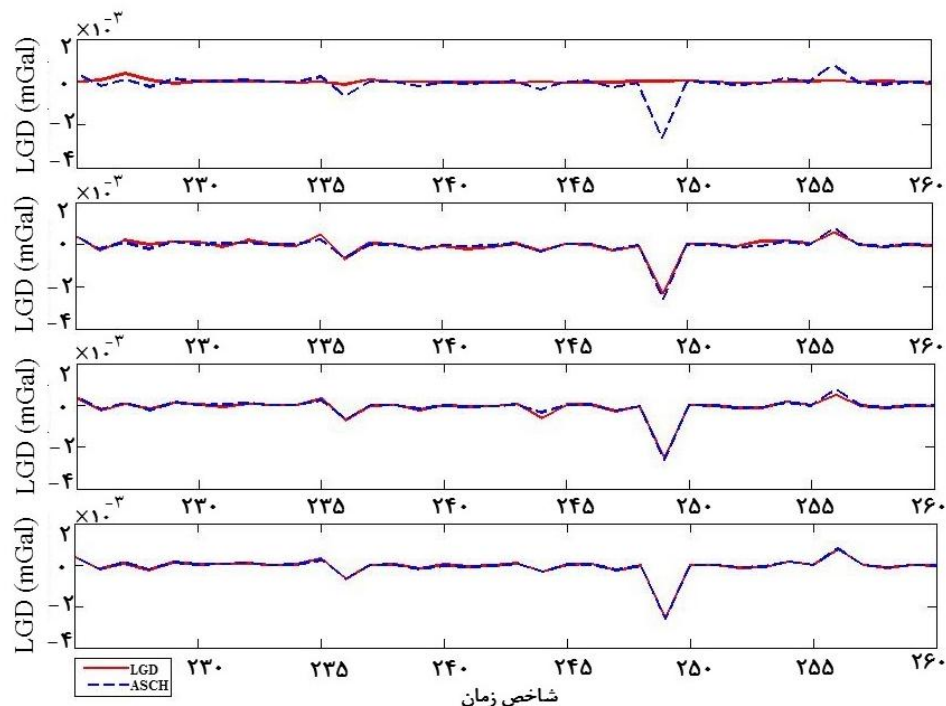
آنالیز مأموریت	کمترین مقدار LGD (μGal)	بیشترین مقدار LGD (μGal)	σ	ارتفاع متوسط (متر)	بازه زمانی
مأموریت اولیه	-۰٫۵۴	۰٫۵۵	۰٫۰۰۰۳۷۴	۵۰۱۰۰	۱ مارس ۲۰۱۲ - ۲۹ می ۲۰۱۲
مأموریت تمدید شده	-۴۰۲٫۱	۳۶۴٫۴	۰٫۲۵۱۷	۲۱۳۰۰	۳۰ آگوست ۲۰۱۲ - ۱۸ نوامبر ۲۰۱۲



شکل ۵: پراکندگی موقعیت زوج ماهواره‌ی گریل



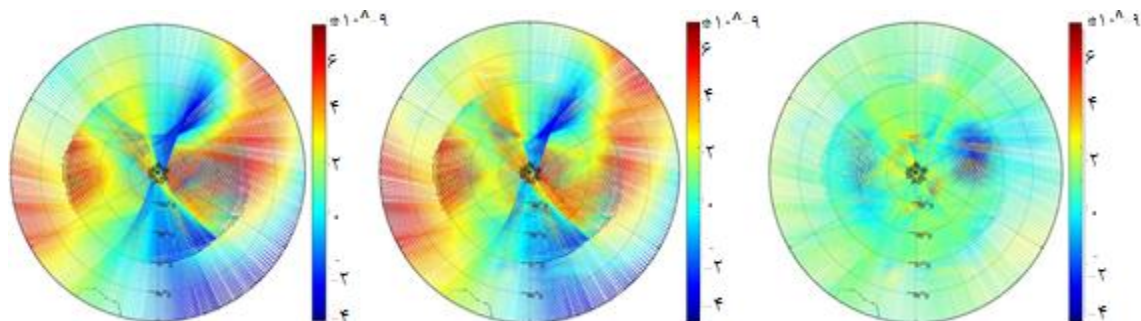
شکل ۶: اختلاف ارتفاعی مدار ماهواره‌ی گریل در بازه زمانی مأموریت اولیه PM (مدار قرمز) و مأموریت توسعه داده شده XM (مدار آبی)



شکل ۷: مقایسه نتایج به دست آمده از مدل ASCH (رنگ آبی) و مشاهدات LGD (رنگ قرمز) برای درجات مختلف مدل هارمونیک محلی ASCH: از بالا به پایین ۱- درجه ۱، ۲- درجه ۲، ۳- درجه ۳، ۴- درجه ۴، ۵- درجه ۵

ماه، محاسبه شده است. در ادامه برای تأیید ضرایب ژئوپتانسیل حاصل شده از ضرایب مدل به دست آمده در مرحله قبلی، از آن برای تشکیل داده‌های LGD جهت برآورد میدان ثقل مأموریت اولیه استفاده می‌شود. بدین صورت صحت‌سنجی مدل ژئوپتانسیل صورت می‌گیرد. (شکل ۸).

به دلیل ارتفاع کمتر مأموریت XM و تأثیر بیشتر میدان گرانش، در ادامه ارزیابی دیگری برای مدل‌سازی محلی ASCH انجام شده است. پس برای حالت دوم، ابتدا از داده‌های مأموریت XM که دارای اطلاعات جزئی‌تر از میدان گرانش است، برای مدل‌سازی و تشکیل ضرایب هارمونیک محلی استفاده می‌شود. این تغییرات میدان گرانش در لایه‌ی ارتفاعی متوسط ۲۰ کیلومتر از سطح



شکل ۸: تغییرات میدان ثقل در لایه‌ی ارتفاعی متوسط ۲۰ کیلومتر سطح ماه، از چپ به راست ۱- مشاهدات $LGD (m/s^2)$ ، ۲- مدل $ASCH (m/s^2)$ و ۳- اختلاف بین مدل و مشاهدات (m/s^2)

LGD حاصل از مدل *GL1500E* در پروفایل‌های کنترلی مقایسه می‌کنیم. برای ارزیابی بهتر نتایج عددی، این مقایسه بر روی پروفایل‌های کنترلی در دو مأموریت ذکر شده انجام می‌شود. در جدول (۲) نتایج مدل *ASCH* محاسبه و به صورت دو ارزیابگر ریشه‌ی میانگین مربعات خطا و میانگین صحت ضرایب مدل محلی نشان داده می‌شود.

جهت افزایش اطمینان از فرآیند انجام شده و ارزیابی ضرایب ژئوپتانسیل مدل، تابع پایه هارمونیک محلی توسط پروفایل کنترلی داده‌های *LGD* ارزیابی می‌شود. این پروفایل‌های کنترلی حاوی داده‌هایی هستند که در مسئله‌ی معکوس استفاده نمی‌شوند و در منطقه‌ی قطب جنوب ماه پراکندگی مناسبی دارند. بنابراین، ما مقادیر *LGD* به دست آمده از مدل *ASCH* را با داده‌های

جدول ۲: مقدار ارزیاب‌گرهای ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین برای اختلاف‌های *LGD* حاصل از مدل‌سازی و مشاهده شده در پروفایل کنترلی مأموریت اولیه و مأموریت توسعه داده شده

مأموریت	ریشه میانگین مربعات خطا (μGal)	میانگین (μGal)	K_{max}
مأموریت اولیه	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۵۰°
مأموریت تمدید شده	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۵۰°

و نتایج آن در درجات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت، برای صحت سنجی مدل ژئوپتانسیل ایجاد شده بروی منطقه از یکسری نقاط کنترلی که در مسئله‌ی معکوس استفاده نشده است، بهر می‌بریم. نتایج عددی نشان می‌دهند مدل محلی توانایی بالایی در مدل‌سازی مشاهدات این مأموریت دارد. در ادامه در سناریو دوم به دلیل ارتفاع متفاوت گرید در مأموریت‌های اولیه و توسعه داده شده و چالش بیشتر مدل‌سازی در مأموریت توسعه داده شده، از داده‌های مأموریت توسعه داده شده جهت برآورد ضرایب مدل و جهت صحت‌سنجی مدل از داده‌های مأموریت اولیه استفاده نمودیم. اما جهت ارزیابی اینبار علاوه بر انتخاب نقاط کنترل بروی لایه مشاهدات ورودی مسئله‌ی معکوس از مشاهدات مأموریت اولیه هم جهت ارزیابی مدل ژئوپتانسیل ایجاد شده استفاده می‌کنیم، در نتیجه، *RMSE* حاصل از مدل ایجاد شده از روش *ASCH* و مشاهدات *LGD* مأموریت اولیه در نقاط کنترل برابر با ۰٫۰۸ میکروگال و در مورد مشاهدات مأموریت توسعه داده شده برابر با ۰٫۱۵ میکروگال به دست آمده است. با توجه به افزایش

بررسی نتایج عددی حاصل از مدل محلی *ASCH* نشان می‌دهد، مدل محلی *ASCH* علاوه بر اینکه در مطالعات منطقه‌ای خاص مانند منطقه‌ی جنوبگان مفید است، می‌تواند با استفاده از ضرایب بسیار کمتر و دقت رزولوشن مکانی مناسب، تغییرات میدان گرانش را همانند مدل ساخته شده به واسطه‌ی هارمونیک‌های کروی با درجه و مرتبه بسیار بالا بیان نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از تابع *ASCH* برای مدل‌سازی میدان گرانش محلی با استفاده از مشاهدات *LGD* بر روی قطب جنوب کره‌ی ماه استفاده کردیم. با به کارگیری عملگر دیفرانسیل گرانشی *LOS* در تابع هارمونیک *ASCH*، ماتریس ضرایب و سپس معادله نرمال را تعریف می‌کنیم. در ادامه، مسئله‌ی معکوس با استفاده از روش پایدارسازی حل می‌شود تا ضرایب ژئوپتانسیل به دست آید. در این مطالعه از دو سناریو جهت ارزیابی مدل انتخاب شده استفاده کردیم. در حالت اول صرفاً از مشاهدات مأموریت اولیه برای مدل‌سازی استفاده شد

ثانیا با استفاده از مدل‌های ژئوپتانسیل وابسته به زمان ماهیانه و فصلی ایجاد شده، اطلاعات ذخیره آب در قسمت قطب جنوب مورد ارزیابی قرار گیرد، تا الا فرضیه ادعایی وجود یخ در دهانه‌های شاکلتن قطب جنوب ثابت شود و ثانیا میزان تغییرات توده جرمی یخ موجود در این منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد.

رزولوشن مکانی مدل ایجادشده نسبت به مدل‌های جهانی موجود، می‌توانیم برای مطالعه‌ی وجود آب در قطب جنوب ماه و بررسی ساختار و ترکیب درونی ماه از این روش استفاده نماییم. بعنوان مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد که اولاً از تلفیق دو ماموریت جهت بهبود و گسترش طیف فرکانسی مدل محلی با استفاده از روش‌های مطرح مشاهدات میدان ثقل استفاده گردد،

پایوست:

در رابطه (۱۷)، F_k^m و G_k^m خلاصه‌شده جملات:

$$\begin{aligned}
 F_k^m(r'_B, \lambda'_B, \theta'_B, r'_A, \lambda'_A, \theta'_A) = & \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \left(\frac{n_k+1}{r'_B}\right) \cos m \lambda'_B P_k^m(\cos \theta'_B) R_{11}(\lambda'_B, \theta'_B) \\
 & - \left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \left(\frac{n_k+1}{r'_A}\right) \cos m \lambda'_A P_k^m(\cos \theta'_A) R_{12}(\lambda'_A, \theta'_A) \\
 & + \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \cos m \lambda'_B \left(\frac{\partial P_k^m(\cos \theta')}{\partial \theta'}\right)_{\theta'=\theta'_B} R_{21}(\lambda'_B, \theta'_B) \\
 & - \left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \cos m \lambda'_A \left(\frac{\partial P_k^m(\cos \theta')}{\partial \theta'}\right)_{\theta'=\theta'_A} R_{22}(\lambda'_A, \theta'_A) \\
 & + \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \frac{1}{\sin \theta'_B} \sin m \lambda'_B P_k^m(\cos \theta'_B) R_{31}(\lambda'_B) \\
 & - \left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \frac{1}{\sin \theta'_A} \sin m \lambda'_A P_k^m(\cos \theta'_A) R_{32}(\lambda'_A) \\
 G_k^m(r'_B, \lambda'_B, \theta'_B, r'_A, \lambda'_A, \theta'_A) = & \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \left(\frac{n_k+1}{r'_B}\right) \sin m \lambda'_B P_k^m(\cos \theta'_B) R_{11}(\lambda'_B, \theta'_B) \\
 & - \left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \left(\frac{n_k+1}{r'_A}\right) \sin m \lambda'_A P_k^m(\cos \theta'_A) R_{12}(\lambda'_A, \theta'_A) \\
 & + \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \sin m \lambda'_B \left(\frac{\partial P_k^m(\cos \theta')}{\partial \theta'}\right)_{\theta'=\theta'_B} R_{21}(\lambda'_B, \theta'_B) \\
 & - \left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \sin m \lambda'_A \left(\frac{\partial P_k^m(\cos \theta')}{\partial \theta'}\right)_{\theta'=\theta'_A} R_{22}(\lambda'_A, \theta'_A) \\
 & + \left(\frac{R}{r'_B}\right)^{n_k+1} \frac{1}{\sin \theta'_B} \cos m \lambda'_B P_k^m(\cos \theta'_B) R_{31}(\lambda'_B)
 \end{aligned}$$

$$-\left(\frac{R}{r'_A}\right)^{n_k+1} \frac{1}{\sin \theta'_A} \cos m \lambda'_A P_k^m(\cos \theta'_A) R_{32}(\lambda'_A)$$

$R_{11}, R_{12}, R_{22}, R_{31}$ و R_{32} در روابط F_k^m و G_k^m خلاصه شده جملات:

$$R_{11}(\lambda'_B, \theta'_B) = (\sin \theta'_B (\Delta X \cos \lambda'_B + \Delta Y \sin \lambda'_B) + \Delta Z \cos \theta'_B) / \rho$$

$$R_{12}(\lambda'_A, \theta'_A) = (\sin \theta'_A (\Delta X \cos \lambda'_A + \Delta Y \sin \lambda'_A) + \Delta Z \sin \theta'_A) / \rho$$

$$R_{22}(\lambda'_A, \theta'_A) = (\cos \theta'_A (\Delta X \cos \lambda'_A + \Delta Y \sin \lambda'_A) - \Delta Z \sin \theta'_A) / \rho$$

$$R_{31}(\lambda'_B) = (-\Delta X \sin \lambda'_B + \Delta Y \cos \lambda'_B) / \rho$$

$$R_{32}(\lambda'_A) = (-\Delta X \sin \lambda'_A + \Delta Y \cos \lambda'_A) / \rho$$

مراجع

- [1] N. Sneeuw, *Physical Geodesy*. 2004.
- [2] O. D. Kellogg, "The Potential," in *Foundations of Potential Theory*, O. D. Kellogg, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1929, pp. 48-84.
- [3] R. S. Nerem, S. M. Klosko, and N. K. Pavlis, "Applications of Global Gravity Field Models in Geodesy and Oceanography," in *Global Gravity Field and Its Temporal Variations*, Berlin, Heidelberg, 1996, pp. 1-11: Springer Berlin Heidelberg.
- [4] F. Tavares. (2018). Ice Confirmed at the Moon's Poles. Available: <https://www.nasa.gov/feature/ames/ice-confirmed-at-the-moon-s-poles>.
- [5] M. T. Zuber, D. E. Smith, D. H. Lehman, T. L. Hoffman, S. W. Asmar, and M. M. Watkins, "Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL): Mapping the Lunar Interior from Crust to Core," *Space Science Reviews*, vol. 178, no. 1, pp. 3-24, 2013/09/01 2013.
- [6] G. V. Haines, "Spherical cap harmonic analysis," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <https://doi.org/10.1029/10/JB090iB03p02583> vol. 90, no. B3, pp. 2583-2591, 1985/02/28 1985a.
- [7] G. V. Haines, "Spherical cap harmonic analysis of geomagnetic secular variation over Canada 1960-1983," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <https://doi.org/10.1029/10/JB090iB14p12563> vol. 90, no. B14, pp. 12563-12574, 1985/12/10 1985b.
- [8] L. Jiancheng, C. Dingbo, and N. Jinsheng, "Spherical cap harmonic expansion for local gravity field representation," *Manuscripta geodaeica*, vol. 20, no. 4, pp. 265-265, 1995.
- [9] A. De Santis, "Conventional spherical harmonic analysis for regional modelling of the geomagnetic field," *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/10/92GL01068> vol. 19, no. 10, pp. 1065-1067, 1992/05/22 1992.
- [10] S.-C. Han, "Improved regional gravity fields on the Moon from Lunar Prospector tracking data by means of localized spherical harmonic functions," *Journal of Geophysical Research: Planets*, <https://doi.org/10.1029/10/2008JE003166> vol. 113, no. E11, 2008/11/01 2008.
- [11] S. Goossens, Y. Ishihara, K. Matsumoto, and S. Sasaki, "Local lunar gravity field analysis over the South Pole-Aitken basin from SELENE farside tracking data," *Journal of Geophysical Research: Planets*, <https://doi.org/10.1029/10/2011JE003831> vol. 117, no. E2, 2012/02/01 2012.
- [12] G. Younis, "Regional Gravity Field Modeling with Adjusted Spherical Cap

- Harmonics in an Integrated Approach," 2013.
- [13] M. Raoofian Naeeni and M. Feizi, "Regional Gravity Field Modelling using Adjusted Spherical Cap Harmonic Analysis," (in eng), *Journal of Geomatics Science and Technology, Research* vol. 7, no. 1, pp. 115-124, 2017.
- [14] m. Feizi and M. R. Naeeni, "Local gravity field modeling using basis functions of harmonic nature and vector airborne Gravimetry, Case Study: Gravity field modeling over north-east of Tanzania region," (in Fa), *Journal of the Earth and Space Physics*, vol. 44, no. 3, pp. 523-534, 2018.
- [15] É. L. Akim, "Determination of the Gravitational Field of the Moon from the Motion of the Artificial Lunar Satellite "Luna-10"," *Soviet Physics Doklady*, vol. 11, p. 855, April 01, 1967 1967.
- [16] A. S. Konopliv et al., "The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission," *Journal of Geophysical Research: Planets*, <https://doi.org/1002/10/jgre.20097> vol. 118, no. 7, pp. 1415-1434, 2013/07/01 2013.
- [17] M. Erwan. Lunar Gravity Field: GRGM1200A. Available: <https://pgda.gsfc.nasa.gov/products/50>
- [18] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber, "The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results," *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 9, 2004.
- [19] W. M. Klipstein et al., "The Lunar Gravity Ranging System for the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission," *Space Science Reviews*, vol. 178, no. 1, pp. 57-76, 2013/09/01 2013.
- [20] R. Rummel, "Determination of short-wavelength components of the gravity field from satellite-to satellite tracking or satellite gradiometry," *manuscripta geodaetica*, vol. 4, no. 2, pp. 107-148, 1979.
- [21] S. R. Ghaffari-Razin and B. Voosoghi, "Regional ionosphere modeling using spherical cap harmonics and empirical orthogonal functions over Iran," *Acta Geodaetica et Geophysica*, vol. 52, 01/29 2016.
- [22] M. Feizi, M. Raoofian-Naeeni, and S.-C. Han, "Comparison of spherical cap and rectangular harmonic analysis of airborne vector gravity data for high-resolution (5/1 km) local geopotential field models over Tanzania," *Geophysical Journal International*, vol. 227, no. 3, pp. 1465-1479, 2021.
- [23] M. Šprlák, S.-C. Han, and W. Featherstone, "Integral inversion of GRAIL inter-satellite gravitational accelerations for regional recovery of the lunar gravitational field," *Advances in Space Research*, vol. 65, no. 1, pp. 630-649, 2020.
- [24] M. Šprlák and S.-C. Han, "On the use of spherical harmonic series inside the minimum Brillouin sphere: Theoretical review and evaluation by GRAIL and LOLA satellite data," *Earth-Science Reviews*, vol. 222, p. 103739, 2021.
- [25] S. Goossens, Á. Fernández Mora, E. Heijkoop, and T. J. Sabaka, "Patched local lunar gravity solutions using GRAIL data," *Earth and Space Science*, vol. 8, no. 11, p. e2021EA001695, 2021.
- [26] M. Šprlák, S.-C. Han, and W. Featherstone, "Forward modelling of global gravity fields with 3D density structures and an application to the high-resolution (~ 2 km) gravity fields of the Moon," *Journal of Geodesy*, vol. 92, no. 8, pp. 847-862, 2018.
- [27] M. Šprlák, S.-C. Han, and W. Featherstone, "Spheroidal forward modelling of the gravitational fields of 1 Ceres and the Moon," *Icarus*, vol. 335, p. 113412, 2020.
- [28] K. Ghobadi Far et al., "A transfer function between line of sight gravity difference and

GRACE intersatellite ranging data and an application to hydrological surface mass variation," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 123, no. 10, pp. 9186-9201, 2018.

- [29] C. Hirt, W. Featherstone, M. Kuhn, and S. Claessens, "Comments on "A high resolution Mars surface gravity grid"(Górski et al., 2018, *Planetary and Space Science* 160, 84–106)," *Planetary and Space Science*, vol. 176, p. 104685, 2019.
- [30] M. Šprlák, S. Han, and W. Featherstone, "Is the spheroidal approximation of the Moon important for high-resolution forward gravitational field modelling?."
- [31] M. Šprlák, "Crustal density and global gravitational field models on the Moon from GRAIL and LOLA satellite data.".
- [32] Hansen, P. C. (1998). *Rank-deficient and discrete ill-posed problems : numerical aspects of linear inversion.*



Local gravity field modeling for the south pole of the Moon by GRAIL satellite data

Mohsen Feizi ^{1*}, Mehdi Raoofian Naeini ², Maryam Miri ³

1- Ph.D. student of geodesy, Department of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology

2- Associate professor in Department of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology

3- Ms.c student of Geodesy, Department of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

In this study, the ability of local basic functions in static modeling of the Moon's gravity field is investigated by using the local harmonic functions and the artificial observations of the Primary and Extended Missions of GRAIL satellite and GL1500E global model. In this modeling, three months of GRAIL observations are used to form the observational gravity data. The observation used in this research is the gravity difference along the line of sight of the satellite pair (LGD). Due to the supposition that there are ice masses distributed on the moon, analysis and modeling of variations in the gravitational field are crucial. Modeling the moon's gravity field is complicated by the presence of the earth's gravity field and its effect on the dynamic orbit of the GRAIL satellite. In this study, the coefficients of the local gravity model have been obtained by forming the normal equation through adjusted spherical cap harmonic basic functions (ASCH) and solving the inverse problem. In this study, in the first scenario, the modeling of the gravity field using primary mission data (an average altitude of 50 km) is discussed. In the second scenario, due to the different altitude layers of the Primary Mission (average altitude of 50 km) and the Extended Mission (average altitude of 20 km), observations from the Extended Mission are used to provide ASCH coefficients. The observations from the primary mission are used to evaluate the accuracy of the model. The results of the constructed model on the primary mission data at control points was 0.08 micro Gal and the results of the control points on the extended mission observations was 0.15 micro Gal. As a result, the lunar South Pole local geo-potential model's validation is confirmed. By employing fewer coefficients the method we used showed an acceptable spatial precision of the gravity field of the changes compared to the geo-potential models such as GL1500E.

Key words: Adjusted spherical cap harmonic, local gravity field.