

کاربرد تنسور گرادیان جاذبه در حذف خطای نواری مشاهدات ثقل سنجی ماهواره ای گریس (مطالعه خاص: زلزله ۹,۲ ریشتری سوماترا- دسامبر ۲۰۰۴)

فرزام فتح الله زاده^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲، مهدی رئوفیان نائینی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ffatollahzadeh@mail.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(عضو قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)
vosoghi@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
mraoofian@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۲، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۳)

چکیده

در این مطالعه تغییرات پتانسیل و گرادیان جاذبه را برای زلزله ۹,۲ ریشتری سوماترای اندونزی در ۲۶ دسامبر سال ۲۰۰۴ به کمک داده های ثقل سنجی جمع آوری شده توسط ماهواره گریس بدست می آوریم. گرادیان های جاذبه بدست آمده تغییرات توزیع جرم را در درون زمین به خوبی نشان می دهند. مطالعات پیشین نشان داده است که برای حذف خطای نواری مشاهدات گریس از فیلترها و الگوریتم های نرم کنندگی استفاده شده است. در این تحقیق کاربرد گرادیان های جاذبه را در حذف خطای نواری مشاهدات ماهواره گریس بررسی می کنیم و خواهیم دید که با محاسبه این گرادیان در جهت ϕ خطاهای نواری مشاهدات گریس توسط مولفه های $V_{\phi\phi}$ و $V_{r\phi}$ از تنسور گرادیان جاذبه از بین می روند در حالی که با محاسبه این گرادیان در جهت λ نوسانات در جهت شمال- جنوب توسط مولفه های $V_{r\lambda}$ و $V_{\lambda\lambda}$ از تنسور گرادیان جاذبه تشدید می شوند. همچنین حداکثر و حداقل مقادیر تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب ۱,۵mE و ۱,۲mE- در جهت ϕ بدست می آیند.

واژگان کلیدی: گرادیان جاذبه- زلزله سوماترا- ماهواره گریس- خطای نواری.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

میدان جاذبه اثر می گذارد، پس انتظار می رود که تغییرات میدان ثقل توسط ماهواره گریس قابل اندازه گیری باشد [۷و۵و۴].



شکل ۱- ماهواره دوقلوی گریس قبل از پرتاب

در این مطالعه برای حل خطای نواری مشاهدات گریس که سبب همبستگی مکانی بین داده های ماهواره گریس می شود، از تغییرات گرادیان جاذبه که مشتق مرتبه اول تغییرات جاذبه (تلسور گرادیان جاذبه) می باشد، استفاده می کنیم [۸]. این داده ها بر روی زمین، هوا، دریا، و یا فضا قابل اندازه گیری است.

۲- خطای نواری

یکی از مهمترین مسائل بحرانی در داده های مشاهدات گریس به دلیل حضور پارامتر میرایی در رابطه پتانسیل و وابستگی شدید آن به ارتفاع ماهواره است که باعث بوجود آمدن عدم بازیابی صحیح طول موج های کوتاه میدان ثقل زمین می شود، پس باید سهم طول موج های کوتاه یعنی ضرائب بالا در محاسبات کاهش یابد همچنین به دلیل زاویه میل ۸۹٫۵ درجه ای مدار گردش این ماهواره حول زمین باعث بوجود آمدن انباشتگی داده در جهت شمال- جنوب شده و سبب همبستگی^۵ مکانی بین داده های مشاهدات گریس می شود. در نقشه های جغرافیایی این همبستگی ها به صورت نوارهایی در جهت شمال- جنوب پدیدار می گردند (این موضوع در شکل ۲ به نمایش در آمده است) اما به دلیل چرخش زمین نوساناتی در جهت شرق- غرب نیز تولید می گردد.

شناخت حرکات گسل^۱ و نتایج حاصل از این حرکات نظیر تغییر شتاب ثقل همواره موضوع قابل توجهی بوده است. انرژی آزاد شده به هنگام حرکت سریع گسل های فعال، عامل وقوع اغلب زمین لرزه ها است. زلزله یکی از مهم ترین بلایایی است که بشر تاکنون با آن مواجه بوده است. هرساله، هزاران نفر در اثر زلزله کشته شده و ده ها هزار خانه توسط این بلای طبیعی ویران می شوند، به همین دلیل است که مطالعه زلزله امری ضروری به حساب می آید. زلزله ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ بزرگترین زلزله اتفاق افتاده در طی ۵۰ سال اخیر است [۱].

از ماه مارس سال ۲۰۰۲ با پرتاب ماهواره ثقل سنجی گریس^۲، امکان مطالعه تغییرات زمانی جاذبه فراهم گردید [۲]. پروژه تعیین ثقل و آزمایشات آب و هوایی یا گریس، یک پروژه مشترک بین آلمان و آمریکا است (NASA^۴، DLR^۳) که تعیین میدان جاذبه و تغییرات زمانی آن، یکی از اهداف این پروژه می باشد. گریس دو ماهواره مشابه مجزا از هم در ارتفاع تقریباً ۴۰۰ کیلومتری از سطح زمین و در یک مدار تقریباً دایره ای با زاویه میل ۸۹٫۵ درجه است که این دو ماهواره با فاصله ۲۲۰ کیلومتر از هم حول زمین حرکت کرده که با تغییر ثقل در محلی که ماهواره ها از روی آن پرواز می کنند فاصله بین آنها دستخوش تغییر شده که با آنالیز تغییرات فاصله بین دو ماهواره با دقت ۱۰ میکرومتر، می توان به تغییرات ثقل دست یافت [۳].

مراکز پردازش و ذخیره سازی داده های مشاهدات گریس، این فاصله بین دو ماهواره را به ضرائب هارمونیک کروی تبدیل می کنند. از این ضرائب می توان پتانسیل و جاذبه را در یک نقطه اختیاری روی سطح زمین بدست آورد.

به دلیل رزولوشن مکانی بالای این ماهواره، امکان مشاهدات مستقیم توزیع جرم درون زمین به دلیل زلزله فراهم آمده است. مشاهدات ماهواره گریس بر پایه انتقال جرم در درون زمین است، چون وقوع زلزله باعث تغییر در توزیع جرم درون زمین می شود و این تغییر جرم روی

^۱ Fault

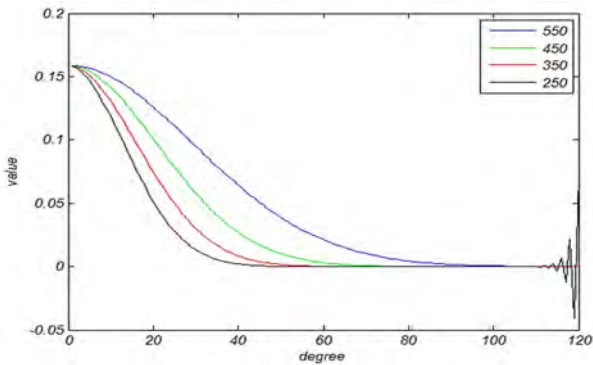
^۲ Gravity Recovery and Climate Experiment

^۳ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

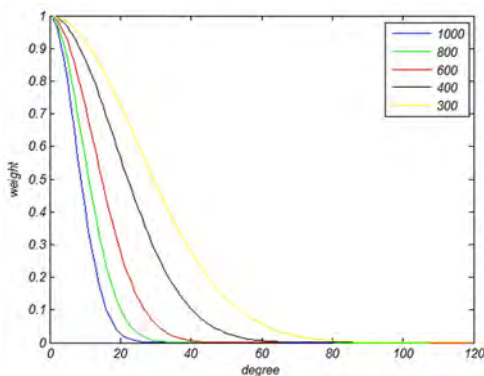
^۴ National Aeronautics and Space Administration

^۵ Correlation

^۶ Stripe



شکل ۳- فیلتر گوسین با شعاع های مختلف (در واحد کیلومتر)



شکل ۴- ورژن بهبود یافته فیلتر گوسین با شعاع های مختلف (در واحد کیلومتر)

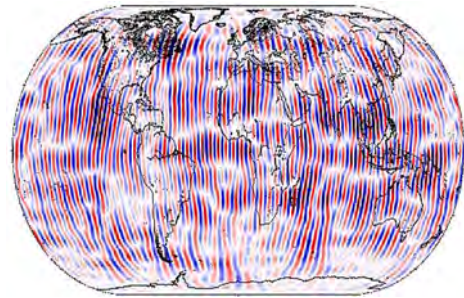
۳- ابزارهای ریاضی

در خارج زمین، پتانسیل در معادله لاپلاس صدق می کند پس می توان آنرا به سری هارمونیک بسط داد. تغییرات پتانسیل قبل و بعد از زلزله از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۵]:

$$\Delta V = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{60} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r}\right)^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (1)$$

با توجه به معادله، مشتق اول ΔV یعنی تغییرات جاذبه در جهت r و ϕ و λ از روابط زیر استخراج می شود:

$$\Delta V_r = -\frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{60} (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (2)$$



شکل ۲- خطای نواری در مشاهدات گریس

مطالعات اخیر نشان داده است که از فیلترهایی برای حذف خطای نواری مشاهدات گریس استفاده شده است. از جمله این فیلترها، فیلتر ایزوتروپیک گوسین است. این فیلتر توسط جکلی^۱ در سال ۱۹۸۱ پایه گذاری شد [۹] و توسط جان وار^۲ در سال ۱۹۹۸ بر روی مشاهدات گریس بکار گرفته شد [۱۰]. اعمال این فیلتر معادل با کاهش سهم ضرائب بالاست و هرچه شعاع میانگین گیری افزایش یابد سهم ضرائب بالا کاهش یافته و در اصطلاح برش صورت می گیرد (شکل ۳). ورژن بهبود یافته ای از این فیلتر توسط چمبرز^۳ در سال ۲۰۰۶ روی ضرائب مشاهدات گریس مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. این فیلتر رفتار نرمی داشت و با افزایش درجات به صفر میل می کرد (شکل ۴). از فیلترهای دیگر می توان به فیلترهای غیرایزوتروپیک اشاره کرد. وجود این فیلتر به دلیل هارمونیک های تسرال و سکتوریال مشاهدات گریس است. در این فیلترها علاوه بر وابستگی فیلتر به درجه هارمونیک کروی، به مرتبه هارمونیک کروی نیز وابسته است. نمونه ای از این فیلترها توسط سوانسن و وار^۴، هان^۵ و ژانگ^۶ به ترتیب در سال های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲ و ۱۳ و ۱۴].

۱ Jeleki
۲ John Wahr
۳ Chambers
۴ Swenson and Wahr
۵ Han
۶ Zhang

$$\Delta V_{r\lambda} = -\frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n m (-\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi) \quad (9)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi)$$

$$\Delta V_{r\phi} = -\frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi) \quad (10)$$

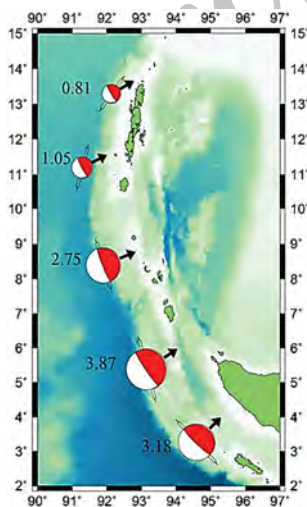
$$\Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi)$$

$$\Delta V_{\phi\lambda} = \frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n m (-\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi) \quad (11)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi)$$

۴- پردازش ها

زلزله ای با بزرگی ۹٫۲ ریشتر در ساحل غربی قسمت شمالی سوماترا^۱ در روز یکشنبه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ در ساعت UTC ۰۰:۰۰:۵۳ اتفاق افتاد. این زلزله در موقعیت ۳٫۳۱۶ درجه شمالی و ۹۵٫۸۵۴ درجه شرقی واقع شده است [۱۶]. عمق گسل مسبب ۳۰ کیلومتر است. فاصله گسل از نزدیک ترین مناطق به شرح زیر است: ۲۵۰ کیلومتری قسمت جنوبی جنوب شرق باندا در سوماترای اندونزی، ۳۰۰ کیلومتری غرب مدان در سوماترای اندونزی، ۱۲۶۰ کیلومتری قسمت جنوبی جنوب غرب بانکوک در تایلند و ۱۵۹۰ کیلومتری شمال غربی جاکارتا در اندونزی. شکل ۵ موقعیت زلزله و ساختار آنرا با استفاده از سازوکار کانونی نشان می دهد.



شکل ۵- منطقه زلزله سوماترا سال ۲۰۰۴

$$\Delta V_{\phi} = -\frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi) \quad (3)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}'_{nm}(\sin \phi)$$

$$\Delta V_{\lambda} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (-\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (4)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi)$$

در معادلات بالا GM حاصلضرب ثابت جاذبه در جرم زمین، a_e شعاع استوایی زمین، $\frac{R}{r}$ پارامتر میرایی و \bar{P}_{nm} توابع لژاندر می باشد. نمایش تئوسور گرادیان جاذبه در سیستم مختصات کروی به صورت مشتقات مرتبه دوم پتانسیل جاذبه در سه جهات کروی است: تئوسور گرادیان جاذبه همچنین به صورت زیر قابل نمایش است:

$$J = \begin{pmatrix} V_{rr} & V_{r\phi} & V_{r\lambda} \\ V_{\phi r} & V_{\phi\phi} & V_{\phi\lambda} \\ V_{\lambda r} & V_{\lambda\phi} & V_{\lambda\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \phi} & \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \phi \partial r} & \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial \phi \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda \partial r} & \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda \partial \phi} & \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

این تئوسور مقارن است پس حاوی ۶ مولفه مستقل می باشد.

می توان تغییرات گرادیان جاذبه را به صورت بسط هارمونیک نوشت. این معادلات به صورت زیر قابل نمایش هستند.

$$\Delta V_{rr} = \frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} (n+1)(n+2) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (6)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi)$$

$$\Delta V_{\phi\phi} = \frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}''_{nm}(\sin \phi) \quad (7)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}''_{nm}(\sin \phi)$$

$$\Delta V_{\lambda\lambda} = -\frac{GM}{R^3} \sum_{n=0}^{60} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n m^2 (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (8)$$

$$\Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi)$$

^۱ Sumatra

جرم در ابعاد مکانی فوق در داخل و درون زمین می‌شود و در پرپود زمانی یک ماه رخ می‌دهد را می‌توان با داده‌های ماهواره گریس زیر نظر گرفت [۱۷].

در این مطالعه از داده‌های میدان جاذبه ماهیانه سطح-۲ مشاهدات گریس از مرکز CSR05 استفاده شده است. این ضرائب، ضرائب استوکس کاملاً نرمالیزه تا درجه و مرتبه ۶۰ هستند [۱۸]. از مجموع ۴۷ ماه میدان جاذبه پوشیده از دوره زمانی ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۶ استفاده شده است. (در بین کل داده‌ها، داده ۱ ماه موجود نبود). ضرائب C_{nm} و S_{nm} هر میدان ماهیانه برای محاسبه گرادیان جاذبه (مشتقات مرتبه دوم پتانسیل) در سیستم کروی استفاده شده است. ماهواره گریس همواره تغییرات میدان جاذبه ای را اندازه گیری می‌کند که شامل هر نوع تغییر قابل ملاحظه در توزیع جرم زمین باشد. از جمله این تغییر جرم ها، تغییرات ذخایر آب و پدیده های لرزه ای می باشد. اثر اتمسفر از روی ضرائب هارمونیک کروی سطح-۲ مشاهدات گریس برداشته شده است [۱۹]. دو تاثیر قابل توجه عمده در این مدل‌های ماهیانه موجود می‌باشد که شامل اثرات هیدرولوژی و تغییرات جرم بزرگ بر اثر تغییرات پوسته و یا داخل زمین می‌باشد (که می‌تواند بر اثر زمین‌لرزه بوجود آید). برای استخراج سیگنال‌های هم‌لرزه و جلوگیری از تغییرات فصلی یا هیدرولوژی، از اختلاف دو سال میانگین داده‌های جاذبه در قبل و بعد از زلزله استفاده شده است [۲۰ و ۲۱]. میدان جاذبه میانگین قبل از زلزله از متوسط‌گیری داده‌های ۲۳ ماه از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۴ بدست آمد (در میان این داده ها، داده های ماه جون ۲۰۰۳ در دسترس نبود). میدان جاذبه میانگین بعد از زلزله از متوسط‌گیری داده‌های ۲۴ ماه از ژانویه ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۰۶ بدست آمد. اختلاف ضرائب ΔC_{nm} و ΔS_{nm} بین این دو میدان متوسط، برای تغییرات پتانسیل و گرادیان جاذبه مربوط به زلزله سوماترا محاسبه شده است.

۵- نتایج عددی

ضریب C_{20} موجود در ضرائب هارمونیک کروی گریس به دلیل فشردگی زمین است و اغلب از آن به عنوان فشردگی^۵ دینامیکی زمین نام برده می‌شود. نتایج

این زمین‌لرزه ویران کننده، کم عمق و از نوع تراستی، خارج از ساحل غربی شمال سوماترا در فصل مشترک بین صفحه‌های تکتونیک هند و برمه واقع شد. بیشترین جابجایی روی صفحه گسل حدود ۲۰ متر برآورد زده شده است. در این منطقه صفحه برمه تحت استرین عظیم صفحه‌های هم‌گرای هند و استرالیا به سوی غرب و صفحه‌های سوندا و اوراسیا به سوی شرق قرار گرفته است. خارج از ساحل غربی شمال سوماترا، صفحه هند در جهت شمال شرقی با آهنگی در حدود ۵ سانتیمتر در سال نسبت به صفحه برمه در حال حرکت است. محل‌های ابتدائی پس‌لرزه‌های که در دنبال این زمین‌لرزه واقع شده، نشان می‌دهد که بطور تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر از مرز صفحه در نتیجه زمین‌لرزه لغزیده است.

پردازش و ذخیره سازی داده های ماهواره گریس بر عهده سه مرکز JPL^۱ و GFZ^۲ و UTCSR^۳ می‌باشد. داده های این ماهواره شامل چهار بخش سطح-۰، سطح-۱A، سطح-۱B و سطح-۲ می‌باشد. داده های سطح-۰ شامل اطلاعات خام و پردازش نشده دریافتی از ماهواره است. در داده های سطح-۱A با اعمال ضرائب کالیبراسیون، مشاهدات باینری سطح-۰ به واحدهای مهندسی و قابل استفاده تبدیل می‌شوند و در داده های سطح-۱B مشاهدات طول کالیبره و تصحیح شده بین دو ماهواره و تغییرات آنها و داده های جی پی اس^۴ به صورت صحیح و یکسان زمان بندی شده و تعداد مشاهدات نسبت به سطح قبل کاهش می‌یابد. داده های سطح-۲ در دو بخش ضرائب هارمونیک کروی میدان ثقل متوسط چند ساله یا چند ماهه زمین (بخش استاتیک ثقل) و ضرائب هارمونیک کروی ماهیانه میدان ثقل زمین (بخش دینامیک ثقل) قابل دسترسی برای کاربران می‌باشند.

ماموریت گریس تخمینی از میدان جاذبه زمین را به صورت منظم و ماهیانه در قالب مدل‌های ژئوپتانسیل هارمونیک مشتمل بر مولفه‌های هارمونیک از درجه ۲ تا درجه و مرتبه ۱۲۰ معادل عوارض در ابعاد مکانی ۴۰۰ کیلومتر تا ۴۰ هزار کیلومتر را روی زمین در اختیار قرار می‌دهد. پس فرآیندهایی مثل زلزله که موجب جابجایی

^۱ Jet Propulsion Laboratory

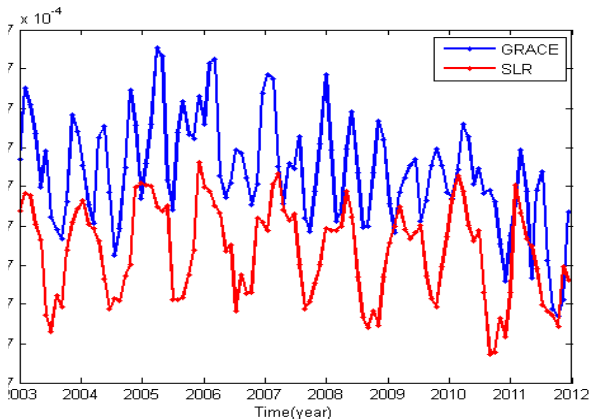
^۲ Geo Forschungd Zentrum

^۳ University of Texas Center for Space Research

^۴ Global Positioning System

^۵ Flattening

پس استفاده از این ضریب برای ماهواره فاصله یابی لیزری مورد تایید واقع می گردد.



شکل ۶- سری زمانی ضریب C_{20} بدست آمده از ماهواره گریس و ماهواره فاصله یابی لیزری ($m^2 s^{-2}$)

جدول ۲- RMS سالیانه بین اختلاف ضریب C_{20} در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ در ماهواره گریس و ماهواره فاصله یابی لیزری

سال	RMS سالیانه بین اختلاف ضریب C_{20} در مشاهدات گریس و SLR
۲۰۰۳	8.00868847210810e-21
۲۰۰۴	1.76196593011230e-20
۲۰۰۵	2.95057541462301e-20
۲۰۰۶	1.27216589005380e-20
۲۰۰۷	1.66284810391275e-20
۲۰۰۸	2.06511799591890e-20
۲۰۰۹	1.81277644395245e-20
۲۰۱۰	1.71525538423325e-20
۲۰۱۱	1.73580987053605e-20

همانگونه که از مقادیر این جدول مشخص است مقدار RMS سالیانه بین اختلاف ضریب C_{20} در ماهواره گریس و SLR حدودا برابر با نصف مقادیر دقت هر کدام از ماهواره ها می باشد. لذا در مواردی که داده های هر دو این ماهواره ها در دسترس باشد می توان از داده های ضریب C_{20} از ماهواره فاصله یابی لیزری که دارای دقت بالاتری می باشد بجای ماهواره گریس استفاده کرد اما در مواردی که فقط داده های گریس در دسترس است، لذا استفاده از داده های ضریب C_{20} برای ماهواره گریس بلامانع است. تغییرات پتانسیل بدست آمده برای دسامبر ۲۰۰۴ با استفاده از معادله ۱ در شکل زیر قابل مشاهده است.

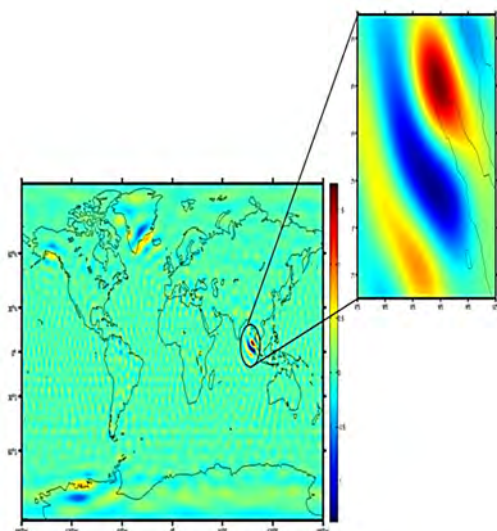
نشان داده است که تخمین این ضریب توسط ماهواره SLR^۱ که شامل پنج ماهواره ژئودتیکی است، نسبت به ماهواره گریس معتبرتر و قبل اطمینان بیشتری است (برای مطالعه بیشتر به [۲۰] رجوع کنید). لذا در طول محاسبات، این ضریب با ضرائب داده های ماهواره فاصله یابی لیزری جایگزین شده است. شکل ۶ اختلاف بین این ضریب در ماهواره فاصله یابی لیزری و مرکز CSR در ماهواره گریس را نشان می دهد. برای بررسی بیشتر این ضریب بین این دو ماهواره و تقویت نتایج، به محاسبه دقت و RMS ^۲ بین اختلاف ضریب پرداخته شده است. نتایج آماری بدست آمده از مقایسه این ضریب برای این دو ماهواره در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است. همچنین برای بررسی بیشتر، کمیت آماری RMS برای اختلاف این ضریب بین این دو ماهواره در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر این کمیت در جدول ۲ به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۱- دقت سالیانه ضریب C_{20} در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ برای ماهواره گریس و ماهواره فاصله یابی لیزری

سال	دقت سالیانه ضریب برای C_{20} در مشاهدات گریس	دقت سالیانه ضریب برای C_{20} برای SLR
۲۰۰۳	2.0243e-010	3.4873e-011
۲۰۰۴	1.7636e-010	3.8828e-011
۲۰۰۵	1.7670e-010	3.5878e-011
۲۰۰۶	1.7328e-010	3.3664e-011
۲۰۰۷	2.3761e-010	3.3903e-011
۲۰۰۸	2.4193e-010	3.4534e-011
۲۰۰۹	2.7239e-010	3.6679e-011
۲۰۱۰	3.6340e-010	3.7702e-011
۲۰۱۱	4.2187e-010	3.6637e-011

در این تحقیق با میانگین گیری از دقت های ماهیانه این ضریب، به دقت سالیانه در بازی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ رسیده ایم. باتوجه به مقادیر موجود در ستون های این جدول دقت سالیانه ضریب C_{20} برای ماهواره SLR نسبت به ماهواره گریس بیشتر است (مقادیر دقت برای ماهواره فاصله یابی لیزری از مقادیر گریس کمتر است).

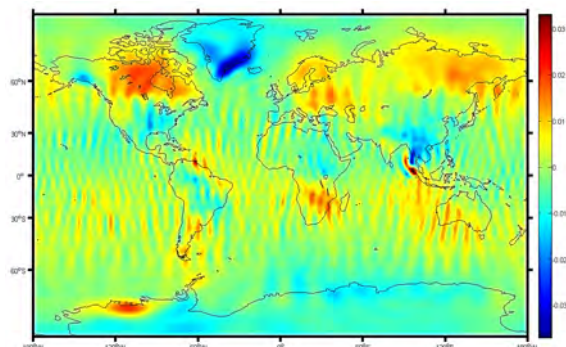
۱ Satellite Laser Ranging
۲ Root Mean Square



شکل ۹- تغییرات گرادیان جاذبه (مولفه $V_{r\phi}$) ناشی از مشاهدات گریس (در واحد mE)

همانگونه که در شکل های ۸ و ۹ ملاحظه می گردد توسط گرادیان جاذبه در جهت عرض جغرافیایی ϕ (مشتق مرتبه دوم پتانسیل در جهت عرض جغرافیایی) خطاهای نواری مشاهدات گریس که به صورت نوارهایی در جهت شمال- جنوب بود، به طور کامل از بین رفته است. برای اطمینان از صحت نتایج این تحقیق، منطقه سوماترا در عرض جغرافیایی بین ۳- درجه تا ۹ درجه و طول جغرافیایی بین ۸۷ درجه تا ۱۰۲ درجه محدود شد. در این اشکال برای مولفه $V_{\phi\phi}$ حداکثر و حداقل تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب برابر ۰,۸mE و -۱,۲mE و برای مولفه $V_{r\phi}$ حداکثر و حداقل تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب برابر ۱,۵mE و -۱,۱mE بدست آمد. در این اشکال دو قله و دو دره حول منطقه شکستگی بدست آمد که حاشیه شمالی و جنوبی بی هنجاری جرم را نشان می دهد. همانگونه که در شکل های ۸ و ۹ ملاحظه می گردد، سازگاری بین شکل و جهت بدست آمده از منطقه سوماترا در این تحقیق و شکل بدست آمده از مطالعات دیگر وجود دارد.

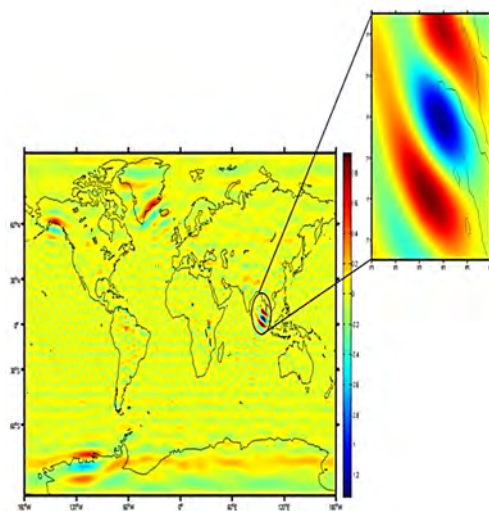
شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مولفه های $V_{\lambda\lambda}$ و $V_{r\lambda}$ که به صورت تغییرات گرادیان جاذبه بوده و از معادلات ۸ و ۹ برای دسامبر ۲۰۰۴ استخراج شده است را نشان می دهد.



شکل ۷- تغییرات پتانسیل جاذبه ناشی از مشاهدات گریس (m^2s^{-2})

همانگونه که در شکل ۷ ملاحظه می شود، انباشتگی داده به صورت نوارهای پدید آمده در جهت شمال- جنوب قابل مشاهده است.

از بین شش مولفه مستقل تنسور گرادیان جاذبه چهار مولفه به صورت دلخواه برای بررسی در این تحقیق استفاده شده است. شکل های ۸ و ۹ به ترتیب مولفه های $V_{r\phi}$ و $V_{\phi\phi}$ که به صورت تغییرات گرادیان جاذبه بوده و از معادلات ۷ و ۱۰ برای دسامبر ۲۰۰۴ اقتباس گردیده است را نشان می دهد.

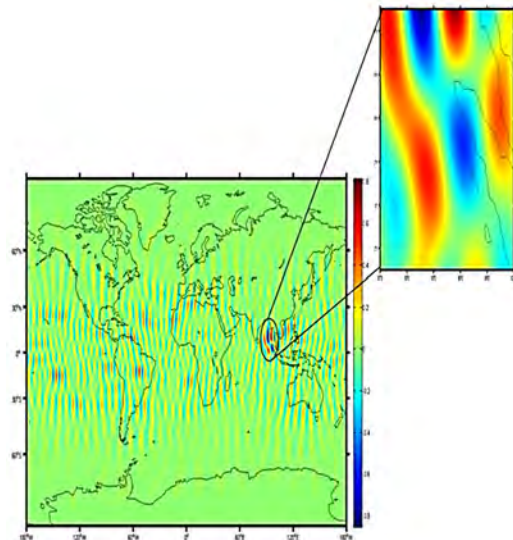


شکل ۸- تغییرات گرادیان جاذبه (مولفه $V_{\phi\phi}$) ناشی از مشاهدات گریس (در واحد mE)

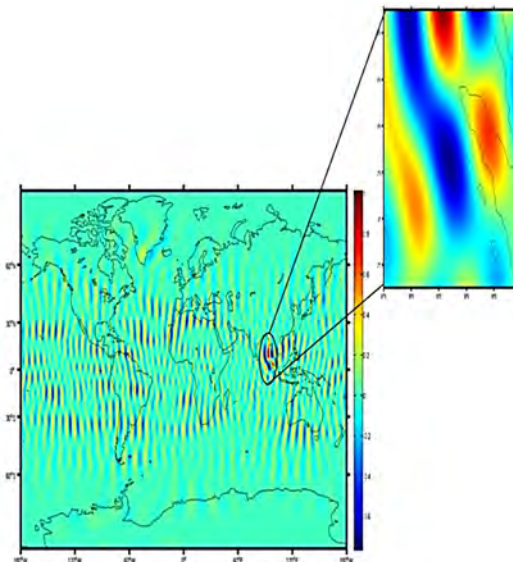
تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب برابر 0.8 mE و -0.6 mE بدست آمد. مقدار مثبت مولفه $V_{\lambda\lambda}$ به دلیل جابجایی عمودی است که بالا آمدگی کف دریا را نشان می دهد. حداقل مقدار این مولفه با توجه به مدل های موجود در مقاله های مختلف برابر 0.5 mE بدست آمد [۲۱] که با توجه به مقدار بدست آمده در این مقاله (0.8 mE)، این 0.3 mE اختلاف به دلیل اثرات تغییرات چگالی درونی در اتساع پوسته است. همانگونه که در این دو شکل قابل ملاحظه است، سازگاری بین شکل و جهت بدست آمده در این تحقیق از منطقه سوماترا و دیگر مطالعات وجود ندارد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق تغییرات پتانسیل و برخی مولفه های گرادیان جاذبه ناشی از ماهواره گریس برای زلزله سوماترای اندونزی در ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ بدست آمد و از این مولفه ها برای توصیف بهتر پدیده های ژئوفیزیکی استفاده شد. همچنین در این تحقیق روشی برای حذف خطای نواری مشاهدات ماهواره ای گریس معرفی و بکار گرفته شد. قابلیت برخی مولفه های تانسور گرادیان جاذبه از قبیل $V_{\phi\phi}$ و $V_{r\phi}$ و $V_{\lambda\phi}$ در حذف خطای نواری در مشاهدات ماهواره گریس بررسی شد و مشاهده گردید که چگونه به کمک این گرادیان ها توانستیم شکل گسل را تخمین بزنیم. همچنین در این تحقیق توسط این مولفه ها به برآورد بهتر و دقیق تر از تغییرات گرادیان جاذبه نسبت به استفاده از فیلترها و الگوریتم های نرم کنندگی رسیدیم و مشاهده گردید که حداکثر و حداقل تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب 1.5 mE و -1.2 mE در جهت ϕ بوقوع پیوسته است. از نتایج دیگر این تحقیق ناتوان بودن برخی مولفه های گرادیان جاذبه از قبیل V_{rr} و $V_{r\lambda}$ و $V_{\lambda\lambda}$ در جهت حذف خطای نواری مشاهدات ماهواره ای گریس بود که قادر به تخمین شکل صحیح گسل نبودند.



شکل ۱۰- تغییرات گرادیان جاذبه (مولفه $V_{\lambda\lambda}$) ناشی از مشاهدات گریس (در واحد mE)



شکل ۱۱- تغییرات گرادیان جاذبه (مولفه $V_{r\lambda}$) ناشی از مشاهدات گریس (در واحد mE)

همانگونه که در شکل های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می گردد توسط گرادیان جاذبه در جهت طول جغرافیایی λ (مشتق مرتبه دوم پتانسیل در جهت طول جغرافیایی) خطاهای نواری مشاهدات گریس که به صورت نوارهایی در جهت شمال- جنوب بود، نه تنها از بین نرفته بلکه به صورت مجزایی تشدید شده است. در این اشکال برای مولفه $V_{\lambda\lambda}$ حداکثر و حداقل تغییرات گرادیان جاذبه به ترتیب برابر 0.6 mE و -0.8 mE و برای مولفه $V_{r\lambda}$ حداکثر و حداقل

- [1] Paris, R., Lavigne, F., Wassmer, P. and Sartohadi, J. (2007). "Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia)." *Marine Geology*. 238, pp.93-106.
- [2] Abert, C. (2005). "Assessment of solution strategies for GRACE gravity field processing." M.Sc. Thesis, Institute of Navigation and Satellite Geodesy, Graz University of Technology, Austria.
- [3] Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D. and Grand, S. (2007). "GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake." *Geophysical Research Letters*. 34(13).
- [4] Ogawa, R. and Heki, K. (2007). "Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by mantle water diffusion." *Geophysical Research Letters* 34(6).
- [5] Panet, I., Mikhailov, V., Diament, M., Pollitz, F., King, G., de Viron, O., Holschneider, M., Biancale, R. and Lemoine, J. (2007). "Coseismic and post-seismic signatures of the Sumatra 2004 December and 2005 March earthquakes in GRACE satellite gravity." *Geophysical Journal International*. 171, pp. 177–190.
- [6] Cambiotti, G., Bordoni, A., Sabadini, R. and Colli, L. (2011). "GRACE gravity data help constraining seismic models of the 2004 Sumatra earthquake." *Journal of Geophysical Research*. 116, B10403.
- [7] Han, S. C., Shum, C. K., Bevis, M., Ji, C. and Kuo, C. Y. (2006). "Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake." *Science*. 313, pp. 658–662.
- [8] Akhoondzadeh, M., Sharifi, M. A. and Shahrivand, M. (2013). "Coseismic and poseismic gravity changes obtained from Grace satellite data during the powerful Tohoku-Oki earthquake of 11 March 2011." *International Arch of the Ph, Remote Sensing and Spatial Information Science, XL-1/W3, SMPR*, 5 – 8 October 2013, Tehran.
- [9] Jekeli, C. (1981). "Alternative methods to smooth the Earth's gravity field." Rep. 327, Department of Geodesy Science and Surveying., Ohio State Univ., Columbus.
- [10] Wahr, J., Molenaar, M. and Bryan, F. (1998). "Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE." *Journal of Geophysical Research*. 103, pp. 30229–32205.
- [11] Chambers, D.P. (2006). "Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry." *Journal of Geophysical Research*. 111, C03010.
- [12] Swenson, S. and Wahr, J. (2002). "Methods for inferring regional surface mass anomalies from GRACE measurements of time-variable gravity." *Journal of Geophysical Research*. 107(B9), 2193.
- [13] Han, S. C., Shum, C. K., Jekeli, C., Kuo, C. Y., Wilson, C. and Seo, K. W. (2005). "Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement." *Geophysical Journal International*. 163, pp.18–25.
- [14] Zhang, Z., Chao, B., Lu, Y., and Hsu, H. T. (2009). "An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter." *Geophysical Research Letters*. 36, L17311.
- [15] Heiskanen, W. A. and Moritz, H. (1967). "Physical Geodesy." W. H. Freeman, New York.
- [16] Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R. C., Beck, S. L., Bilek, S. L., Brudzinski, M. R., Butler, R., Deshon, H. R., Ekstrom, G., Satake, K. and Sipkin, S. (2005). "The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004." *Science*. 308, pp. 1127–1132.
- [17] Han, S. C., Sauber, J., Luthcke, S.B, Ji, C. and Pollitz, F.F. (2008). "Implications of postseismic gravity change following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake from the regional harmonic analysis of GRACE inter satellite tracking data." *Journal of Geophysical Research*. 113, B11413.
- [18] Bettadpur, S. (2007). "CSR Level-2 processing standards document for product release 04." pp. 327-742, Center For Space Research. Austin, Texas.
- [19] Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M. and Reigber, C. (2004). "The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results." *Geophysical Research Letters*. 31, L09607.
- [20] Cheng, M. and Tapley, B. D. (2004). "Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years." *Journal of Geophysical Research*. 109, B09402.
- [21] Wang, L., Shum, C. K. and Jekeli, C. (2012). "Gravitational gradient changes following the 2004 December 26 Sumatra-Andaman Earthquake inferred from GRACE." *Geophysical Journal International*. 191, pp. 1109-1118.