

بررسی عملکرد آرایش دوجفت ماهواره خطی گریس در فرآیند کاهش الیازینگ ناشی از مؤلفه های جزر و مدی N_2 و S_2

فروزان قاصر مبارکه^{۱*}، سیاوش ایران پور^۲، علیرضا امیری سیمکویی^۲، وهاب نفیسی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲- فوق دکترا و پژوهشگر، انیستیتو ژئودزی، دانشکده مهندسی هوافضا و ژئودزی، دانشگاه اشتوتگارت آلمان

۳- دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۱/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۳/۲۳

چکیده

جزر و مد اقیانوس‌ها خطای الیازینگ قابل توجهی در مشاهدات گرانی سنجی مأموریت‌های ماهواره‌ای نظیر گریس ایجاد می‌کند. مطالعات گوناگون در زمینه مأموریت‌های آینده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از تکنولوژی لیزر در امر اندازه‌گیری فاصله میان دو ماهواره نظیر گریس که آرایش خطی دارند، نویز مشاهدات به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این صورت، خطای الیازینگ حاصل از جزر و مد به‌عنوان مهم‌ترین منبع خطا در مشاهدات باقی می‌ماند. در این مقاله میزان کارآمدی روش حذف خطای الیازینگ مورد استفاده در مرحله پس پردازش، برای مشاهدات حاصل از دو جفت ماهواره مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، نحوه نمونه‌برداری چند مؤلفه جزر و مدی در دو آرایش ماهواره‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از الگوی مدار تکراری و زمان نمونه‌برداری مشاهدات، پیروی الیازینگ هر مؤلفه به‌طور مجزا محاسبه گردید. نتایج حاصل از بزرگی دامنه و نحوه توزیع خطای الیازینگ جزر و مدی نشان می‌دهد، آرایش دو جفت ماهواره نسبت به یک جفت ماهواره نقش مهم‌تری را در فرآیند حذف و کاهش خطای الیازینگ بازی می‌کند. هم‌چنین، با استفاده از عملگر کمترین مربعات، خطای الیازینگ به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ثقل سنجی ماهواره‌ای، مأموریت آینده *GFO*، جزر و مد اقیانوسی، فرآیند کاهش خطای الیازینگ

۱- مقدمه

مأموریت فضایی گریس^۱، داده‌های فراوانی در زمینه تغییرات جرم زمین فراهم آورده است. بسیاری از محققان تاکنون توانایی بالای ماهواره‌ها در فرآیند کشف تغییرات میدان جاذبه متغیر با زمان زمین را نشان داده‌اند. از جمله این تغییرات می‌توان به ذوب یخ‌ها، منابع آب‌های زمینی و افزایش سطح آب دریاها، اشاره نمود [۱ و ۲]. در این میان جزر و مد مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرات سریع میدان گرانشی است. میدان ثقل زمین از بسط به هارمونیک‌های کروی به‌دست می‌آید و اندازه‌گیری آن بسیار مشکل است. با بسط تابع تغییرات پتانسیل جاذبه به سری فوریه بی‌نهایت فرکانس با دامنه‌های متعدد داریم که تنها برخی از آن‌ها که در بالا عنوان شده‌اند برای ما شناخته شده و مابقی عوامل، ناشناخته‌اند. جزر و مد آب‌ها خود را در فرکانس‌های بالا نشان می‌دهد و این در حالی است که ماهواره‌های مأموریت گریس اطلاعات ثقل سنجی را در فرکانس‌های پایین در اختیار کاربران قرار می‌دهند. بدین ترتیب فرکانس‌های بالا بر روی سیگنال‌های میدان جاذبه با طول موج بلند الیاز^۲ می‌شوند که یکی از مشکلات اساسی مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای به شمار می‌آید. در مأموریت گریس، دقت میدان جاذبه بازیابی شده به فاکتورهای زیادی بستگی دارد که می‌توان به نويز مشاهدات و خطای الیازینگ^۳ اشاره نمود. در گریس، بزرگی نويز مشاهدات از خطای الیازینگ حاصل از جزر و مد بیشتر است. با این حال، در آینده‌ی نزدیک به‌جای امواج مایکروویو در سیستم ردیابی دو ماهواره (II-SST)^۴، از اشعه‌ی لیزر و شتاب سنج^۵ استفاده می‌شود.

در این صورت پیش‌بینی می‌شود که خطای حاصل از الیازینگ جزر و مدی تقریباً سه برابر خطای حاصل از نويز مشاهدات باشد [۳]. در این شرایط، مهم‌ترین عامل محدودکننده، خطای الیازینگ است و بنابراین فرآیند کاهش خطای الیازینگ اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند. تا به حال پژوهش‌های فراوانی در زمینه‌ی آنالیز و تفسیر خطای الیازینگ حاصل از جزر و مد اقیانوس‌ها صورت گرفته است [۴، ۵ و ۶]. واهر و همکاران^۶ به منظور کاهش خطای الیازینگ از فیلتر گوسین^۷ استفاده نمودند. همچنین سنسون^۸ و واهر در سال ۲۰۰۶ با استفاده از فیلتر خطای وابسته، نوار شدگی‌های حاصل از خطای الیازینگ را کاهش دادند^۹ [۷]. اگرچه امروزه تأثیر این فیلترها محدود شده است [۸]. پارکه و همکاران^{۱۰} نیز در سال ۱۹۸۷ پیرو خطای الیازینگ جزر و مدی را برای داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای محاسبه نمودند [۹].

در صورتی که فرض شود ماهواره همواره یک مدار مشخص با زمان تناوب معین را طی می‌کند، امکان محاسبه‌ی فرکانس الیازینگ برای هر مولفه‌ی جزر و مدی وجود دارد. بنابراین می‌توان فرکانس مربوطه را در طی فرآیند پس پردازش، از طیف میدان جاذبه بازیابی شده حذف نمود که به این روش فیلترینگ زمانی گویند. همان‌طوری که ویسر و همکاران این پیوندها را برای چند آرایش مدار ماهواره‌ای از جمله تک جفتی، دوجفتی شیفت در زمان و دوجفتی شیفت در زمان و مکان، برای هر مولفه جزر و مدی به‌طور مجزا محاسبه نمودند [۱۰]. در روند حذف محدودیت‌هایی وجود دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

⁶ Wahr, J. et al.

⁷ Gaussian filter

⁸ Swenson, S.

⁹ de-stripping

¹⁰ Parke, M.E. et al.

¹ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

² Alias

³ Aliasing

⁴ Low Low Satellite to Satellite Tracking

⁵ Accelerometer

مرور می‌گردند.

۲-۱- مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای

در سال ۲۰۰۲ جفت ماهواره گریس به فضا ارسال گردید که هدف مأموریت اساسی آن بهبود تعیین میدان ثقل زمین با استفاده از ردیابی میان دو ماهواره در ارتفاع پایین بود. با استفاده از مشاهدات این مأموریت امکان اندازه‌گیری میدان ثقل متغیر با زمان فراهم آمد. همچنین مأموریت برای دستیابی به اندازه‌گیری‌های انتقال‌های جرم با قدرت تفکیک مکانی بالا، در سیستم زمین مناسب بود. مأموریت گریس اصلی برای مدت‌زمان ۵ سال در مدار طراحی شده بود. منظور از مأموریت گریس مانند در این مقاله مأموریتی با مشخصات مأموریت اصلی می‌باشد که می‌تواند تکنولوژی آن برحسب امواج مایکروویو باشد یا بر اساس اشعه لیزر و شتاب‌سنج‌های دقیق طراحی گردد که در این صورت به آن مأموریت گریس مانند (GFO²) گویند. تفاوت GFO مورد استفاده در این مقاله با آنچه در سال ۲۰۱۷ ارسال خواهد شد در آن است که این مأموریت مشخصات مداری مشخص دارد در حالی که در مأموریت GFO اصلی α و β مشخص نمی‌باشند. بنابراین در این مقاله GFO مورد بررسی با آنچه عموماً شناخته شده است، تفاوت دارد. گریس از دو ماهواره با گیرنده‌های جی پی اس³ GPS قوی به‌منظور تعیین موقعیت لحظه‌ای مدار استفاده می‌کند. دو ماهواره تقریباً بر روی یک مدار دایره‌ای حرکت می‌کنند. این مأموریت از امواج مایکروویو به‌منظور تعیین فاصله میان دو ماهواره استفاده می‌نمود. فاصله‌ی بین دو ماهواره تقریباً ثابت است. این فاصله به‌طور میانگین ۲۲۰ کیلومتر

(۱) نزدیک بودن فرکانس خطای الیازینگ به فرکانس

سیگنال مطلوب (سالانه، نیم سالانه و...)

(۲) برای برخی مولفه‌ها پیوند الیازینگ ممکن است از

طول طیف مشاهدات بیشتر باشد.

هیچ‌کدام از مطالعات اخیر به‌طور جدی با خطای الیازینگ زمانی و تأثیر آن بر روی جواب‌های میدان جاذبه گریس مقابله نکرده‌اند. در این مقاله با توجه به دو محدودیت اشاره‌شده، در مرحله پس پردازش فرآیند کاهش خطای الیازینگ^۱ انجام‌گرفته و میزان تأثیر آن را برای هر دو آرایش تک جفتی و دو جفتی موردنظر که در ادامه معرفی می‌گردد، مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین نحوه‌ی نمونه‌برداری^۶ مولفه جزر و مدی M_2 ، N_2 ، S_2 ، O_1 و P_1 در آرایش دو جفت ماهواره را با آرایش تک جفتی مقایسه می‌نماییم. با فرض اینکه ماهواره یک مدار تکراری را طی کند، برای هر مولفه به‌طور مجزا دامنه خطای الیازینگ را مدل کرده و مورد بررسی قرار می‌دهیم. محتوای مقاله به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده است:

بخش ۲ شامل تئوری مورد استفاده در پژوهش و فرمول‌های مورد استفاده می‌باشد. در زیر بخش ۲-۲، داده‌ها و آرایش‌های مورد استفاده در روند شبیه‌سازی معرفی می‌گردند. بخش ۳ روند کار و روش مورد استفاده در فرآیند کاهش خطای الیازینگ به‌طور مختصر توضیح داده شده است. در بخش ۴ پیوند الیازینگ^۶ مولفه‌ی جزر و مدی در هر آرایش مشخص گردیده است و در پایان (بخش ۵) نتایج بیان گردیده است.

۲- تئوری و اصول کلی تحقیق

در این بخش مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای، خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد اقیانوس‌ها و الگوریتم شبیه‌های داده‌ها و مدل مورد استفاده

² GRACE Follow-On

³ Global Positioning System

¹ de-aliasing

بر روی مدار دایره‌ای به صورت تکراری یکدیگر را دنبال می‌کنند. به عبارتی دیگر، الگوی زمینی مسیر^۴ این ماموریت β دور کامل را در α روز نودال تکرار می‌نماید. پارامترهای مدارای مأموریت‌های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. این پارامترها توسط سازمان فضایی اروپا (ESA)^۵ طی پروژه ESA SC4MGV تعیین شده‌اند.

۲-۲- خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد اقیانوسها

همان‌طور که قبلاً بیان گردید، جزر و مد آب‌ها خود را در فرکانس‌های بالا نشان می‌دهند و این در حالی است که ماهواره‌های ماموریت گریس اطلاعات ثقل‌سنجی را در فرکانس‌های پایین در اختیار کاربران قرار می‌دهند. همین امر موجب کاهش قدرت تفکیک در حوزه‌ی زمان و مکان و نمونه‌برداری ناقص می‌گردد. بدین ترتیب فرکانس‌های بالا بر روی سیگنال‌های میدان جاذبه با طول موج بلند الیاز می‌شوند. از جمله این فرکانس‌ها می‌توان به جزر و مد اقیانوس‌ها، اتمسفر، زمین صلب، هیدرولوژی و صفحات یخی اشاره نمود که موجب ایجاد خطای الیازینگ زمانی و مکانی بر روی جواب‌های میدان جاذبه می‌گردد. که در این میان، مهم‌ترین عامل جزر و مد است. در چنین شرایطی تشخیص سیگنال اصلی از امواج ناشی از الیازینگ دشوار می‌شود. بنا به اینکه خطای الیازینگ در حوزه فرکانس به دلیل سرعت نمونه‌برداری پایین یا در حوزه‌ی مکان به دلیل وجود شکاف^۶ در اثر پوشش مکانی پایین رخ دهد، به ترتیب خطای الیازینگ به دو دسته زمانی و مکانی تقسیم می‌گردد. شکل (۲) خطای الیازینگ زمانی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سیگنال اصلی که به صورت موج کسینوسی است، در اثر

می‌باشد که در ماهواره‌های نسل آینده، هر لحظه توسط لیزر اندازه‌گیری می‌شود که همین اندازه‌گیری اصول کار گریس را تشکیل می‌دهد [۱۰]. با توجه به آنکه فاصله بین دو ماهواره در هر لحظه توسط لیزر و شتابسنج‌های دقیق اندازه‌گیری می‌شود، نویز دستگاهی بسیار پایین آمده و تقریباً 1×10^{-10} m/s برآورد می‌گردد. در این پژوهش آرایش دقیقاً شبیه به گریس می‌باشد و دو ماهواره به صورت خطی در مسیری همدیگر را دنبال می‌کنند که با صفحه استوا زاویه ۸۹ درجه دارد. همان‌طوری که در شکل (۱) مشخص است حرکت آن‌ها تقریباً قطبی می‌باشد. روش نمونه‌برداری ماهواره‌ها در راستای محور حرکت^۱ بوده که باند A تا K امواج مایکروویو را ارسال می‌نمایند. در شکل (۱) اصول نمونه‌برداری ماهواره‌ها به وضوح مشخص است.

مشاهدات انجام‌شده نسبت به تغییرات جرم منطقه زیر مدار گردش حساسیت زیادی دارد که همین امر اصول تعیین میدان جاذبه ثابت و متغیر زمین را تشکیل می‌دهد.

در مقاله دو آرایش ماهواره‌ای تک جفتی و دو جفتی شبیه‌سازی شده‌اند که به ترتیب از آرایش‌های گریس و بندر^۲ استفاده نمودیم. بندر آرایشی با مشخصات گریس می‌باشد که از دو جفت ماهواره که یک جفت قطبی و جفت دیگر مایل حرکت می‌کنند تشکیل شده است. بندر هنوز راه‌اندازی نشده است. این آرایش نسبت به آرایش‌های تک جفتی رایج گریس، مزیت‌های زیر را دارد [۱۲]:

- امکان افزایش هم‌زمان قدرت تفکیک زمانی و مکانی در طول زمان نمونه‌برداری
 - کاهش رفتار نوار نوارشدگی^۳
- ماموریت‌های شبیه‌سازی شده آرایش خطی داشته و

⁴ Ground Track

⁵ European Satellite Agency

⁶ Gap

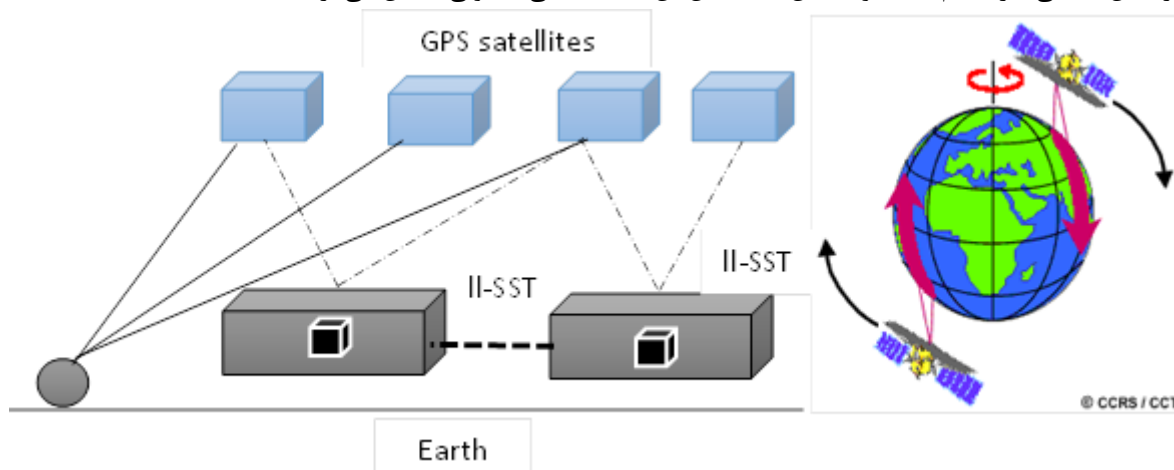
¹ Along Track

² Dual pair GRACE inline (Bender)

³ Stripping

وجود ندارد. در صورت حذف خطای الیازینگ سیگنال اصلی به خوبی نمایان می‌گردد.

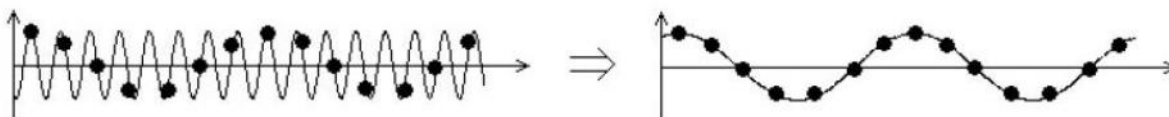
سرعت نمونه‌برداری پایین، در امواج جزر و مد که فرکانس بالایی دارد گم شده و امکان تشخیص آن



شکل ۱: سمت چپ: اجزای سازنده‌ی مأموریت گریس و نحوه‌ی آرایش اجزای آن نسبت به یکدیگر. سمت راست: حرکت قطبی دو ماهواره گریس که یکدیگر را بر روی یک مدار دایره‌ای دنبال کرده و حرکت قطبی دارند.

جدول ۱: پارامترهای مداری آرایش‌های مورد استفاده

نوع آرایش ماهواره	مدار تکراری (δ/a)	زاویه میل (I)	ارتفاع برحسب km
قطبی	۱۷۲/۱۱	۹۲°	۳۶۲
مایل	۴۶۰/۲۹	۱۱۵°	۳۴۲



شکل ۲: نمایش شماتیک خطای الیازینگ. در شکل سمت چپ سیگنال اصلی در نقاط سیاه به طور ناقص نمونه‌برداری شده است همین امر موجب ایجاد خطای الیازینگ شده و امکان تشخیص سیگنال اصلی وجود ندارد. در شکل سمت راست سیگنال بازیابی شده را نشان می‌دهد که به دلیل خطای الیازینگ شباهتی به شکل سمت چپ (سیگنال اصلی) ندارد.

اقیانوس‌ها از مدل‌های جزر و مدی استفاده می‌نماییم. از آنجایی که مدل‌های جزر و مدی کامل نیستند، تنها قادرند بخش بزرگی از خطای الیازینگ جزر و مدی را حذف نمایند. بنابراین باز هم خطای ناشی از مدل‌های جزر و مدی در مشاهدات ثقل‌سنجی ماهواره‌ای باقی‌مانده و در مرحله میانگین‌گیری و حل^۱ به طور کامل حذف نمی‌گردد.

با توجه به معلوم بودن دوره تناوب هر مؤلفه جزر و مدی در صورتی که فرض شود ماهواره همواره یک مدار مشخص را به صورت تکراری طی می‌کند،

در این مقاله تنها خطای الیازینگ زمانی در نظر گرفته شده است. چرا که در صورت در نظر گرفتن این خطا در حوزه زمان و مکان به طور هم‌زمان مسئله پیچیده و دشوار می‌گردد. در مقابل، خطای الیازینگ زمانی خود موجب اعوجاجات مکانی می‌گردد [۱۳ و ۱۴]. با توجه به مشخصات پارامترهای مداری آرایش‌های مورد استفاده در جدول (۱)، طبق تئوری نایکوئیست، سیگنال با دوره تناوب کمتر از ۲۲ روز بر روی فرکانس‌های پایین‌تر الیاز می‌شود. از جمله این سیگنال‌های می‌توان به تأثیر اتمسفر، اقیانوس و تمامی مؤلفه‌های جزر و مدی اشاره نمود. به منظور کاهش خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد

¹ Gravity solution

زاویه میل و خروج از مرکزیت مدار ماهواره، در طی زمان ثابت فرض می‌شود و ماهواره‌ها بر روی مسیر ثابت حرکت می‌کنند. بنابراین موقعیت ماهواره‌ها در هر اپک مشاهداتی معلوم می‌باشد. میدان ثقل زمانی زمین با استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی موجود در آن اپک‌ها قابل محاسبه است. معادله مشاهده مورد استفاده در این روش، معادله برحسب شتاب رنج^۴ میان دو ماهواره می‌باشد که در آن سمت چپ مشاهدات و پتانسیل زمانی زمین، V ، نیز در اپک‌های مشاهداتی مورد نظر مجهول می‌باشد. (رابطه (۴))

در رابطه (۴)، ρ رنج، $\dot{\rho}$ نرخ رنج و $\ddot{\rho}$ شتاب رنج میان دو ماهواره می‌باشد. $\Delta \mathbf{r}_{12}$ سرعت نسبی میان دو ماهواره و \mathbf{e}_{12} بردار واحد بین دو ماهواره را نشان می‌دهد. عبارت $\frac{1}{\rho(t)} ((\Delta \mathbf{r}_{12})^2 - \dot{\rho}^2)$ شامل شتاب‌های گریز از مرکزی است که تعیین آن‌ها با دقت بالا کار ساده‌ای نیست. در این روش بازیابی با انتقال این جمله به سمت چپ معادله و در نظر گرفتن آن به عنوان بخشی از مشاهدات، مشکل حل شده است. توجه به معلوم بودن موقعیت دو ماهواره در زمان‌های مورد نظر و در دست داشتن مدل‌های ژئوفیزیکی میدان پتانسیل زمانی (اتمسفر، اقیانوس، هیدرولوژی و ...)، گرادیان‌های پتانسیل، $\nabla V(\mathbf{r}_2(t))$ و $\nabla V(\mathbf{r}_1(t))$ مربوط به آن‌ها قابل محاسبه است. در این صورت سمت راست معادله (۴) بر روی مدار اسمی مفروض و در زمان میانه هر اپک مشاهداتی محاسبه شده و به عنوان مشاهدات در نظر گرفته می‌شود. با تشکیل سیستم معادلات مشاهدات و استفاده از عملگر کمترین مربعات^۵، پتانسیل زمانی در زمان میانه هر اپک مشاهداتی در قالب ضرایب هارمونیک کروی C_{nm} و S_{nm} برآورد می‌گردد (شکل (۳)).

امکان محاسبه‌ی فرکانس الیازینگ برای هر مولفه‌ی جزر و مدی وجود دارد. هر ماهواره در مدار تکراری β/α ، β دور کامل را در α روز نودال طی می‌کند که α و β نسبت به هم اعداد اول هستند. طبق تئوری^۱ CNR، در یک منطقه جغرافیایی، بیشترین فرکانس قابل تشخیص f_N (فرکانس نایکوئیست)^۲ از فرمول (۱) قابل محاسبه می‌باشد. به دلیل تغییر مکان ماهواره گریس بر روی مسیر طی طریق ماهواره شاهد تغییر فاز مولفه‌های جزر و مدی می‌باشیم [۷].

$$f_N = \frac{1}{2T_{rep}} \quad (۱)$$

که در آن T_{rep} مدت زمانی است که ماهواره از منطقه ثابتی نمونه برداری انجام می‌دهد.

$$T_{rep} = \alpha \quad (۲)$$

پریود الیازینگ، T_a ، به پریود سیگنال مورد بررسی و پریود نمونه برداری بستگی دارد و با توجه به فرمولی که پارکه و همکاران در سال ۱۹۸۷ ارائه دادند قابل محاسبه می‌باشد [۵]:

$$\frac{1}{T_a} = \text{abs} \left[\text{mod} \left(\frac{1}{T_k} + \frac{1}{T_N}, \frac{2}{T_N} \right) - \frac{1}{T_N} \right] \quad (۳)$$

۲-۳- الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده

به منظور تولید داده‌های شبیه‌سازی شده میدان جاذبه و بازیابی آن‌ها از نرم‌افزار شبیه‌سازی QLT^۳ استفاده نمودیم. در این نرم‌افزار حرکت دو ماهواره با ارتفاع پایین که یکدیگر را بر روی مدار اسمی دایره‌ای دنبال می‌نمایند، شبیه‌سازی شده است. مدار اسمی حرکت ماهواره‌ها تنها تحت تأثیر میدان آشفته کننده [۲] قرار دارد. در چنین شرایطی مشخصات مداری از جمله نیم قطر،

^۱ Colombo- Nyquist Rule

^۲ Nyquist frequency

^۳ Quick Look Tool

^۴ Range-acceleration

^۵ Least Square Estimation (LSE)

$$\ddot{\rho} - \frac{1}{\rho(\dot{\rho})} ((\Delta \mathbf{r}_{12})^2 - \dot{\rho}^2) = \mathbf{e}_{12} (\nabla V(\mathbf{r}_2(t)) - \nabla V(\mathbf{r}_1(t))) \quad \text{رابطه (۴)}$$

تهیه شده‌اند و از داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات تاییدگیج‌های زمینی، پرتونگارهای صوتی و تلفیق این مشاهدات به دست آمده‌اند؛ بنابراین آن‌ها را مستقل^۲ در نظر می‌گیریم و بر این مبنا از اختلاف دو مدل در این مقاله استفاده می‌نماییم همان طوری که در بخش ۲-۱ بیان گردید، امواج جزر و مدی با فرکانس بالا بر روی سیگنال‌های مشاهدات ثقل‌سنجی ناشی از تغییرات جرم درونی زمین الیاز می‌شوند. خطای الیازینگ در حل‌های سالانه، ماهانه و حتی روزانه هم وجود دارد و به دلیل کامل نبودن مدل‌های جزر و مدی حتی پس از حل و میانگین‌گیری^۳ به‌طور کامل حذف نمی‌گردد. با توجه به آنکه هر دو مدل جزر و مد اقیانوسها را مدل می‌کنند، شباهت‌های زیادی به یکدیگر دارند و این شباهت‌ها مربوط به قسمت‌های شناخته شده جزر و مد اقیانوسی توسط مدل‌ها است. در حالیکه مشکل اساسی در خطایی است که توسط مدل‌ها حذف نمی‌گردد. این اختلاف همان خطای باقیمانده در روند کاهش خطای الیازینگ می‌باشد که از وجود یک سیگنال جزر و مدی در داده‌های جاذبه بازیابی شده خبر می‌دهد. بنابراین در این مقاله سعی در کاهش خطای باقیمانده داشته و به جای یک مدل جزر و مدی از اختلاف دو مدل مذکور در روند بازیابی میدان جاذبه استفاده می‌نماییم. اختلاف این دو مدل به نوعی خطای الیازینگ را کاهش داده و یک روش کاهش خطای الیازینگ محسوب می‌گردد.

مدل‌های جزر و مدی برای هر مؤلفه جزر و مد حاوی اطلاعات ۶ ساعته ارتفاع جزر و مد بوده که بر حسب دامنه و فاز نیز بیان می‌شود. با استفاده از

با وجود آنکه فرض نگهداشتن ماهواره‌ها در یک مدار اسمی ایده‌آل ممکن است اندکی دور از واقعیت باشد، این روش امکان مقایسه میان نتایج حاصل از میدان ثقل بازیابی شده در ساختارهای متفاوت را فراهم می‌آورد. آشکار است که یک مطالعه دقیق‌تر و واقعی‌تر در رابطه با ثقل زمین را می‌توان بعداً با یک ابزار واقعی‌تر انجام داد که در آن می‌توان مشاهدات را به صورت مستقیم با ارزیابی سمت چپ رابطه (۴) به دست آورد. منظور از داده‌های واقعی در این پروژه می‌تواند داده‌های شبیه‌سازی شده به روش انتگراسیون مداری^۱ باشد زیرا هنوز مأموریت GFO انجام نشده و مشاهدات بر پایه تکنولوژی لیزر در دسترس نیست. این روش شبیه‌سازی، مدار واقعی ماهواره‌ها که در هر لحظه تحت تأثیر نیروهای اغتشاشی جابه‌جا می‌شود را در نظر گرفته است. ایرانپور و همکاران (۲۰۱۳) نتایج حاصل از دو روش شبیه‌سازی مذکور را با یکدیگر مقایسه نمودند و نشان دادند که میدان بازیابی شده با استفاده از نرم‌افزار QLT و روش انتگراسیون مداری، با دقت بالایی یکدیگر را تقریب می‌زنند [۱۱].

همان طوری که در قسمت ۱ بیان گردید، امکان حذف خطای الیازینگ مولفه‌های جزر و مدی، پس از بازیابی داده‌های جاذبه وجود دارد و این امر با وجود مدل‌های جزر و مدی امکان‌پذیر است. با توجه به نمونه برداری ناقص از جزر و مد اقیانوس‌ها با استفاده از ماهواره‌ها و همچنین محدودیت دقت مدل‌های جزر و مدی به کار برده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، باز هم مقداری خطا در میدان جاذبه بازیابی شده باقی می‌ماند. در این مقاله هدف برخورد با این گونه خطاهای باقیمانده می‌باشد که در این راستا از دو مدل جزر و مد اقیانوسی EOT08a و GOT4.7 استفاده شده است. مدل‌های مذکور در دو مرکز تحقیقاتی مختلف

^۲ منظور از مدل‌های مستقل، مدل‌هایی هستند که از داده‌های متفاوت مثلاً داده‌های حاصل از تاییدگیج و داده‌های پرتونگاری صوتی به دست آمده‌اند.

^۳ Gravity solution

^۱ Orbit Integration

۳- روش مورد استفاده

همان طوری که در قسمت اول بیان گردید، با در دست داشتن پریود هر کدام از مولفه‌های جزر و مدی و مدار تکرار ماهواره (T_{rep}) در آرایش یک جفت ماهواره، امکان محاسبه‌ی پریود الیازینگ آن مولفه با استفاده از رابطه (۳) وجود دارد [۴ و ۵]. جهت محاسبه پریود الیازینگ مولفه‌های جزر و مدی رابطه تحلیلی که در آن پریود میانگین‌گیری نیز وجود داشته باشد تاکنون تعریف نشده است. خوشبختانه در این پروژه با توجه به برابر بودن پریود نمونه‌برداری و پریود میانگین‌گیری، ۱۱ روز، امکان استفاده از رابطه تحلیلی (۳) وجود دارد. اما در حالت کلی این امکان برای هر پریود میانگین‌گیری امکان‌پذیر نمی‌باشد. استفاده از رابطه (۳) به منظور محاسبه‌ی پریود الیازینگ دوجفت ماهواره جای بحث دارد که بایستی در آینده مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به محدودیت‌های مذکور در استفاده از رابطه تحلیلی، در این مقاله بر مبنای داده‌های موجود، پریودهای الیازینگ استخراج می‌گردد. بدین منظور، در هر کدام از آرایش‌های ماهواره‌ای مذکور، پریود خطای الیازینگ برای هر مولفه جزر و مدی، با محاسبه‌ی چگالی توان طیفی^۷ خطای باقیمانده جزر و مد که بر حسب اختلاف ارتفاع ژئوئید بیان شده است، مشخص می‌گردد که در حالت تقریبی جواب‌ها با فرمول تحلیلی مطابقت دارد و به این دلیل است که بازه‌ی حل میدان جاذبه^۸ و دوره تناوب نمونه‌برداری یکسان می‌باشد (۱۱ روز). دوره تناوب نمونه‌برداری آرایش‌های مورد بررسی در جدول (۱) موجود می‌باشد. شکل (۶) نحوه‌ی محاسبه‌ی چگالی توان طیفی را نشان می‌دهد که روند آن به تشریح در زیر عنوان شده است:

اعداد دودسون^۱ و همچنین عدد لود^۲ امکان تبدیل دامنه و فاز هر مؤلفه جزر و مدی در قالب ضرایب هارمونیک کروی در هر نقطه با مختصات جغرافیایی مشخص وجود دارد که ضرایب هارمونیک کروی حاصل ورودی نرم‌افزار شبیه‌سازی مورد استفاده می‌باشد. به منظور بازیابی خطای جزر و مدی موقعیت ماهواره‌ها در اپک‌های زمانی مذکور مورد نیاز است که با استفاده از معادلات هیل و مشخصات مداری آرایش‌های مورد استفاده که در جدول (۱) آمده است، قابل محاسبه می‌باشد. شکل (۳) الگوریتم تولید داده‌های بازیابی شده برای هر مؤلفه جزر و مدی را نشان می‌دهد. در این مقاله از تغییرات پتانسیل ناشی از هیدرولوژی (H^3)، صفحات یخی (I^4)، زمین صلب (S^5) و اتمسفر-اقیانوس (AO^6) صرف‌نظر می‌نماییم ($AOHIS=0$) و تنها خطای حاصل از جزر و مد اقیانوس‌ها برای ۶ مؤلفه مهم جزر و مدی مذکور، در قالب اختلاف دو مدل جزر و مدی به‌طور مجزا برای هر مؤلفه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این صورت میدان جاذبه حل شده تنها شامل اطلاعات جزر و مدی می‌باشد که مشخصات شبیه‌سازی در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج از دو منظر مقایسه می‌شود:

- مقایسه مشاهدات آرایش‌های ماهواره‌ای تک جفتی و مشاهدات دو جفتی
- مقایسه‌ی حالات قبل از کاهش خطای الیازینگ و پس از آن

لازم به ذکر است که در این پژوهش به دلیل فرض استفاده از پرتو لیزر و شتاب‌سنج‌های دقیق جهت انجام مشاهدات، میزان خطای دستگاهی بسیار کاهش یافته و عملاً از آن چشم‌پوشی می‌شود.

¹ Doodson number

² Load number

³ Hydrology

⁴ Ice

⁵ Solid Earth

⁶ Atmosphere-Ocean

⁷ Power Spectrum Density (PSD)

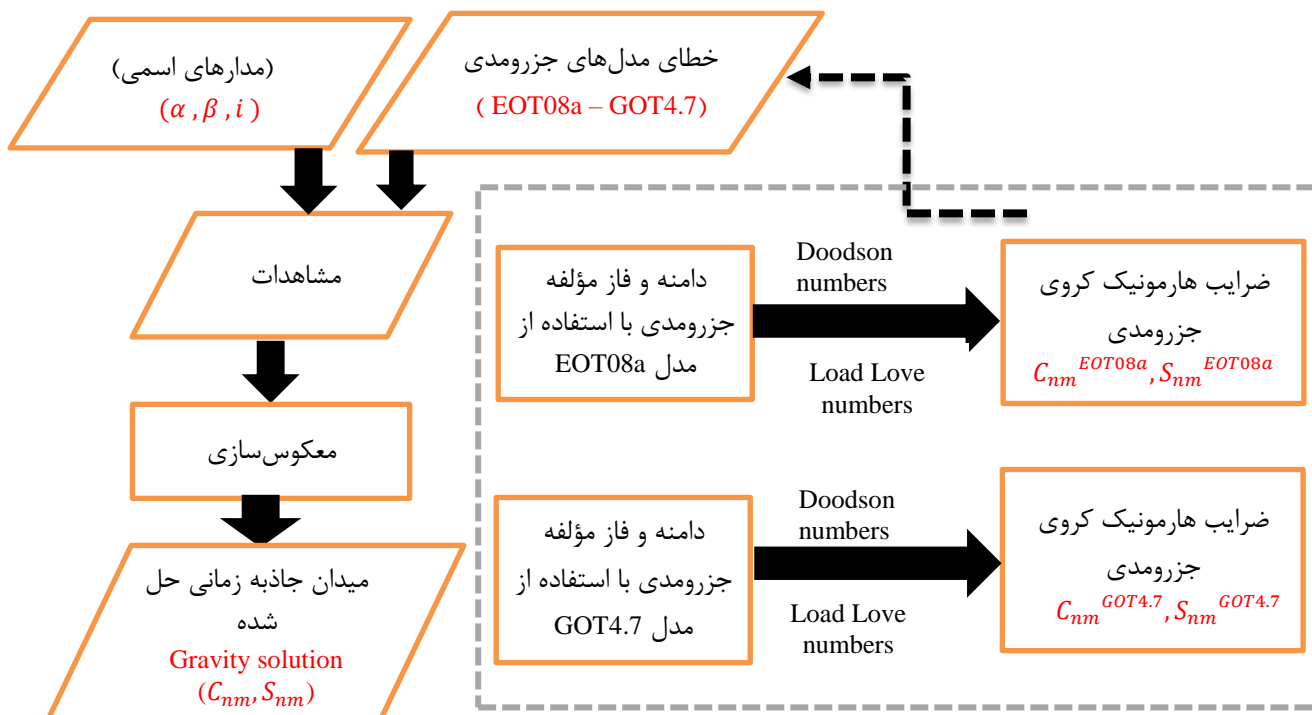
⁸ Gravity solution

ارتفاع ژئوئید ناشی از خطای مدل‌های جزر و مدی، ΔN ، نسبت داده می‌شود که طبق رابطه (۵) در هر اپک میانگین‌گیری قابل محاسبه است:

(۱) پس از بازیابی میدان جاذبه با پیروید حل مشخص (۱۱ روزه)، بر روی منطقه یک شبکه با قدرت تفکیک $1^\circ \times 1^\circ$ و به هر پیکسل تغییر

جدول ۲: پارامترهای مداری آرایش‌های مورد استفاده

مدت مأموریت	دوره تناوب بازیابی	مؤلفه‌های جزر و مدی	ورودی	نوع آرایش	آرایش ماهواره
۵ ساله	۱۱ روزه	$P_1, O_1, S_2, N_2, M_2, Q_1$	خطای جزر و مد اقیانوسی: EOT08a-GOT4.7	قطبی	تک جفتی
				قطبی + مایل	دو جفتی



شکل ۳: الگوریتم شبیه‌سازی و بازیابی داده‌های خطای جزر و مدی

$$\Delta N(t) = R_E \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{l,m} \cos(\theta) (\Delta \bar{C}_{l,m} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{l,m} \sin m\lambda) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$a_n = \frac{1}{2l} \int_{-1}^{+1} f(x) \cos \omega_n x \, dx \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$b_n = \frac{1}{2l} \int_{-1}^{+1} f(x) \sin \omega_n x \, dx$$

(۳) برای هر سری زمانی از روی ضرایب فوریه، توان طیفی قابل محاسبه است:

$$\text{رابطه (۸)}$$

$$\text{PSD}(f) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2$$

(۴) در پایان از تمامی PSD های منطقه یا کل زمین میانگین‌گیری شده و PSD میانگین برحسب تغییرات

(۲) برای هر پیکسل یک سری زمانی به صورت رابطه (۶) تشکیل و تغییرات ارتفاع ژئوئید مربوطه در قالب سری زمانی نشان داده می‌شود:

$$\text{رابطه (۶)}$$

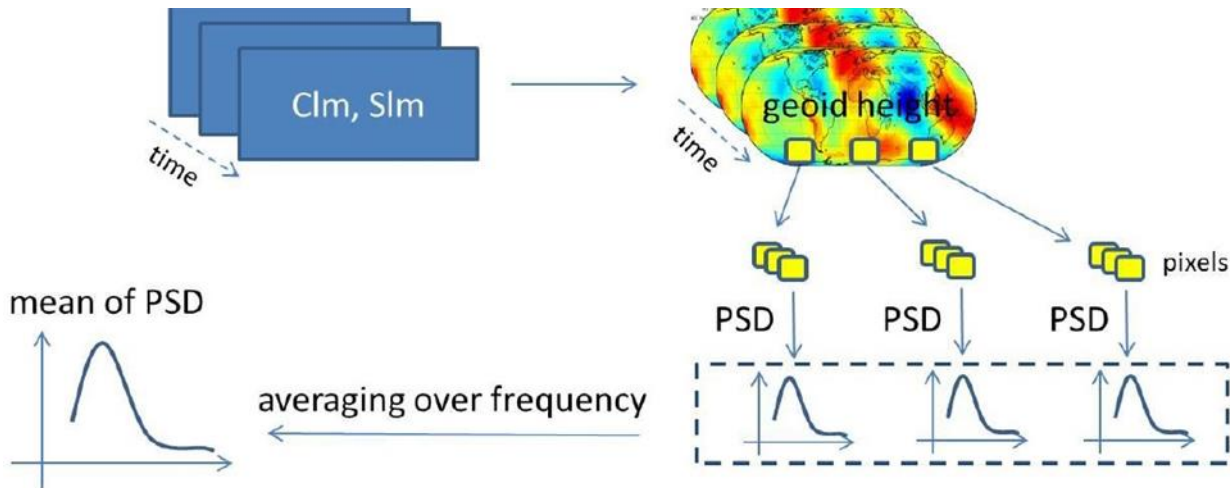
$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \sin \omega_n x)$$

$$\omega_n = n\omega = n \frac{2\pi}{T} = 2n\pi\theta$$

که در آن T پیروید تابع موردنظر است. به $a_n \cos \omega_n x$ و $b_n \sin \omega_n x$ هارمونیک‌های اصلی می‌گویند. همچنین، ضرایب فوریه عبارتند از:

در قسمت ۴-۲ نتایج حاصل از این روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

ارتفاع ژئوئید محاسبه گردیده و نشان داده می‌شود. شکل (۴) روند بالا را به‌طور شماتیکی نشان می‌دهد.



شکل ۴: فلوجارت محاسبه PSD میانگین ارتفاع ژئوئید بر روی یک منطقه یا کل زمین [۱۱].

مربوط به هر مؤلفه جزر و مدی که پریود الیازینگ آن T_a است، به‌عنوان مشاهدات سرشکن شده قابل محاسبه است که آن‌ها را با \hat{C}_{lm}^{alias} و \hat{S}_{lm}^{alias} نشان می‌دهیم. در واقع \hat{C}_{lm}^{alias} و \hat{S}_{lm}^{alias} معرف ضرایب هارمونیک خطای الیازینگ جزر و مدی می‌باشند. با در دست داشتن \hat{C}_{lm}^{alias} و \hat{S}_{lm}^{alias} و T_a امکان محاسبه ضرایب هارمونیک کروی کاهش یافته، $\hat{C}_{lm}^{dealias}$ و $\hat{S}_{lm}^{dealias}$ وجود دارد که همان بردار باقیمانده‌های سرشکن شده در روند سرشکنی می‌باشد و از رابطه (۱۰) در هر اپک میانگین‌گیری قابل دستیابی است:

$$\hat{C}_{lm}^{dealias}(t) = C_{lm}(t) - \hat{C}_{lm}^{alias}(t)$$

$$\hat{S}_{lm}^{dealias}(t) = S_{lm}(t) - \hat{S}_{lm}^{alias}(t).$$

۴- حذف خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد اقیانوس‌ها

در این بخش در مورد داده‌های استفاده‌شده و محاسبه پریود و فرایند کاهش خطای الیازینگ توضیح داده می‌شود.

بر روی هر پیکسل سری زمانی ضرایب هارمونیک کروی خطای جزر و مدی باقیمانده بازیابی شده تعریف می‌گردد. با در دست داشتن پریود الیازینگ (T_a) و استفاده از روش برآورد کمترین مربعات بر روی سری‌های زمانی، امکان برآورد دامنه‌ی هر مؤلفه‌ی جزر و مدی، یعنی $A_{c,lm}$ ، $B_{c,lm}$ ، $A_{s,lm}$ ، $B_{s,lm}$ وجود دارد. معادلات مشاهدات مربوطه به‌صورت زیر است [۱۵]:

رابطه (۹)

$$C_{lm}(t) = \sum_{a=1}^{ntide} \left[A_{c,lm} \cos \frac{2\pi}{T_a} t + B_{c,lm} \sin \frac{2\pi}{T_a} t \right]$$

$$S_{lm}(t) = \sum_{a=1}^{ntide} \left[A_{s,lm} \cos \frac{2\pi}{T_a} t + B_{s,lm} \sin \frac{2\pi}{T_a} t \right]$$

در رابطه (۹) $C_{lm}(t)$ و $S_{lm}(t)$ ضرایب هارمونیک کروی بازیابی شده، t زمان میانه هر بازه‌ی میانگین‌گیری و $A_{c,lm}$ ، $B_{c,lm}$ ، $A_{s,lm}$ و $B_{s,lm}$ دامنه‌ی هر مؤلفه‌ی جزر و مدی با پریود T_a را نشان می‌دهد. با اعمال برآورد کمترین مربعات، $A_{c,lm}$ ، $B_{c,lm}$ ، $A_{s,lm}$ و $B_{s,lm}$ برای هر پریود الیازینگ به‌دست می‌آید. با جایگذاری دامنه‌های برآورد شده در رابطه (۹)، ضرایب هارمونیک کروی سرشکن شده

۴-۱- داده‌های مورد استفاده

به‌منظور پیاده‌سازی روش‌های مورد مطالعه، در این پروژه از داده‌های یک‌ساله و ۵ ساله مأموریت گریس مانند تک‌جفتی و دوجفتی که به‌عنوان آرایش‌های بهینه در نظر گرفته شده‌اند، استفاده می‌گردد (جدول (۱)). با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مورد نظر^۱، حل‌های زیر ماهانه (۱۱ روزه) خطای مدل‌های جزر و مدی در این آرایش‌ها شبیه‌سازی می‌شود (جدول (۲)). با توجه به طول داده‌ها که یک و ۵ سال می‌باشد، به ترتیب ۳۲ و ۱۶۶ جواب برای خطای باقیمانده جزر و مدی در قالب ماتریس ضرایب هارمونیک کروی در دسترس خواهد بود. طول بازه‌ی میانگین‌گیری ۱۱ روزه بوده که جواب حاصل، به‌عنوان حل میدان جاذبه‌ای، به میانه این بازه اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب در اولین بازه‌ی حل، جواب حاصل به‌روز ۶ ام، در بازه‌ی دوم به‌روز ۱۸ ام اختصاص داده شده و همین روند ادامه می‌یابد:

January	January	January
۱	↓ ۱۲	۲۳
	۶	۱۸

۴-۲- محاسبه پر یود الیازینگ

با توجه به توضیحاتی که در قسمت ۲-۱ بیان گردید، پر یود الیازینگ برای ۶ مولفه‌ی مهم جزر و مدی برای آرایش‌های ماهواره‌ای مذکور محاسبه می‌گردد. نتایج حاصل در جدول (۳) موجود می‌باشد. همچنین، هر مولفه در مناطق مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله مولفه‌های N_2 و S_2 به‌عنوان مثال آورده شده‌اند (شکل (۵ و ۶)) و می‌توان در مورد سایر مولفه‌ها نیز همین تحقیقات را انجام نمود. همان‌طوری که در شکل (۴)

مشاهده می‌کنید، در مورد مؤلفه‌ی S_2 ، به‌منظور کشف خطای الیازینگ، طبق نظریه نمونه‌برداری نایکوئیست که در بخش ۲-۲ به آن اشاره گردید، حداقل به 2×254 روز داده نیاز داریم. بنابراین ترجیح بر آن است که از داده‌های ۵ ساله استفاده شود. همان‌طوری که در شکل (۵-الف و ۶-الف) مشخص است در هر دو آرایش الگوی PSD ارتفاع ژئوئید برای یک جفت ماهواره، در مناطق مختلف شبیه به هم بوده و تقریباً در فرکانس‌های یکسان روند یکسانی را طی می‌کند و میزان اختلاف آن‌ها خیلی اندک می‌باشد.

همان‌طوری که در شکل‌های (۶ و ۷) مشاهده می‌کنید، برای نواحی بیابانی همانند دشت کویر ایران نیز الگوی PSD شبیه مناطق با حوزه‌های آبی و اقیانوسی می‌باشد که دلیل اصلی آن نشت طیفی است؛ چرا که زمین جامد^۲ به دلیل صلبیت و تراکم‌پذیری قابل توجه آن در برابر آب‌ها، به‌تنهایی تأخیر فاز ایجاد می‌کند و انتظار می‌رود الگوی رفتاری متفاوتی در این مناطق مشاهده شود ولی این‌طور نیست [۷].

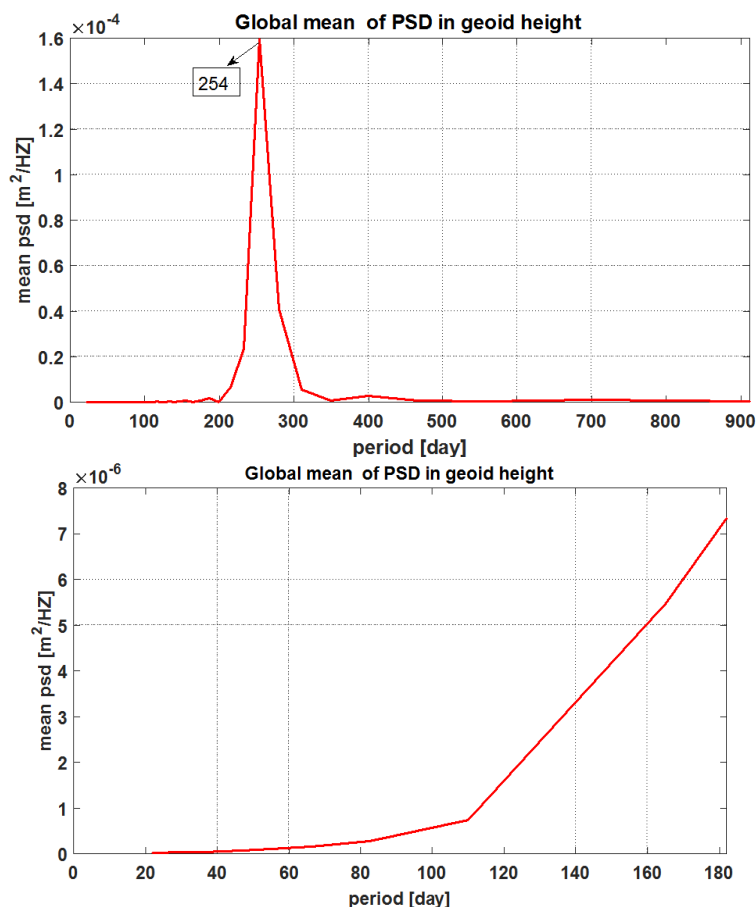
اشکال (۶-ب و ۷-ب) نمودار PSD مناطق مختلف را برای دو جفت ماهواره نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۶-ج و ۷-ج) نیز PSD جهانی^۳ را برای یک جفت ماهواره و دو جفت ماهواره نشان می‌دهد. این نمودارها مشخص می‌کند خطای الیازینگ در هر آرایش ماهواره‌ای در چه فرکانس‌هایی رخ داده است. لازم به ذکر است تمامی نمودارهای مربوط در شکل‌های (۶ و ۷) مربوط به قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ می‌باشند.

² Solid Earth

³ Global

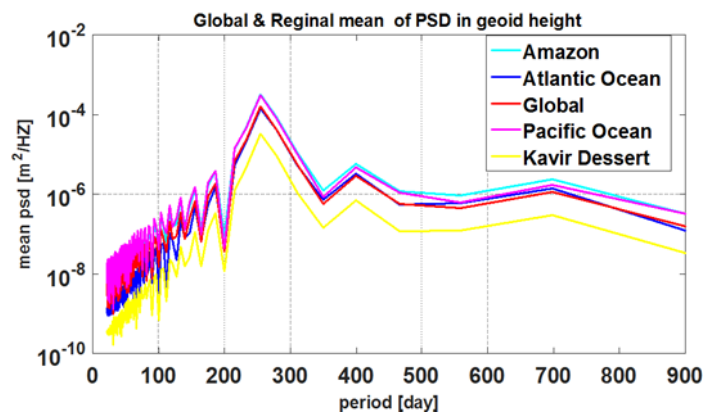
¹ Quick Look Tool (QLT)



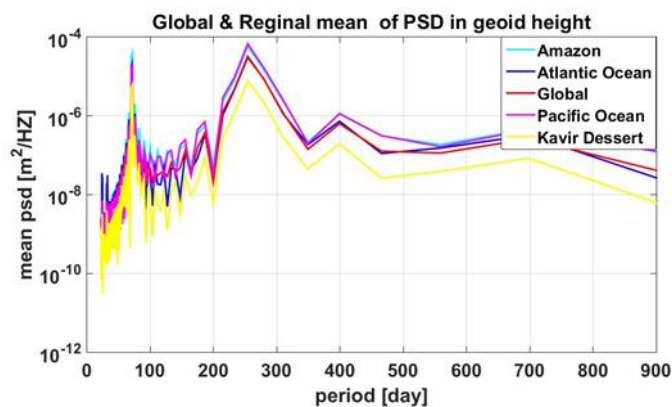
شکل ۵: نمودار PSD میانگین کل کره زمین برای مؤلفه‌ی S2. نمودار سمت راست مربوط به یکسال نمونه‌برداری است که پریود الیازینگ در آن قابل کشف نیست. نمودار سمت چپ مربوط به ۵ سال داده است که پریود مربوطه در آن مشخص است.

جدول ۳: پریودهای اصلی الیازینگ مولفه‌های جزر و مدی در دو آرایش تک‌جفتی و دو جفتی

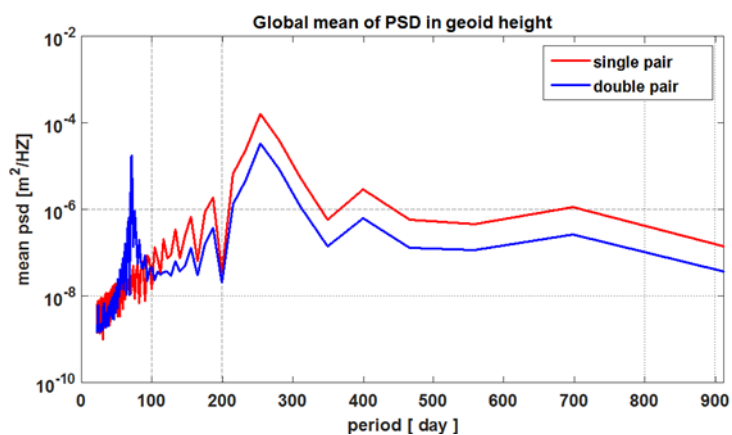
آرایش ماهواره	تک‌جفتی	دوجفتی
	دوره تناوب خطای الیازینگ برحسب روز خورشیدی	
M2	۵۰/۸	۵۱/۷۴, ۲۶/۶۱
N2	۵۹/۴۵	۴۶۵/۷ و ۵۸/۲۱, ۲۲/۵۳
S2	۲۵۴	۲۵۴, ۷۱/۶۴
O1	۵۲/۷۲	۵۳/۷۳, ۳۶/۲۹
P1	۲۳۲/۸	۲۳۲/۸
Q1	۵۵/۸۸	۱۱۱/۸, ۵۵/۸۸, ۲۶/۶۱



(الف)

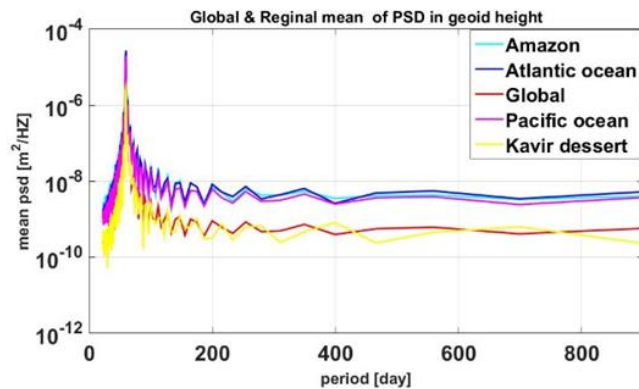


(ب)

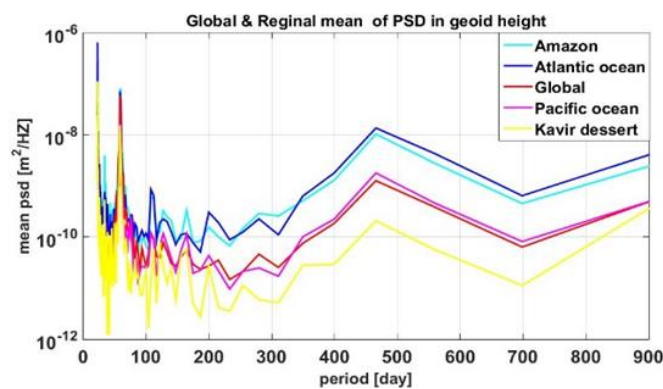


(ج)

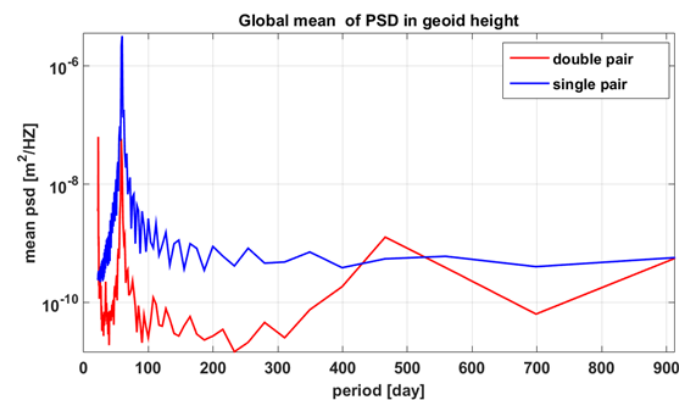
شکل ۶: نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید برای مؤلفه‌ی S2. الف) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیر آبی و جهانی برای آرایش یک جفت ماهواره. ب) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیر آبی و جهانی برای آرایش دو جفت ماهواره. ج) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید در دو آرایش مذکور بر روی کل کره زمین



الف



ب



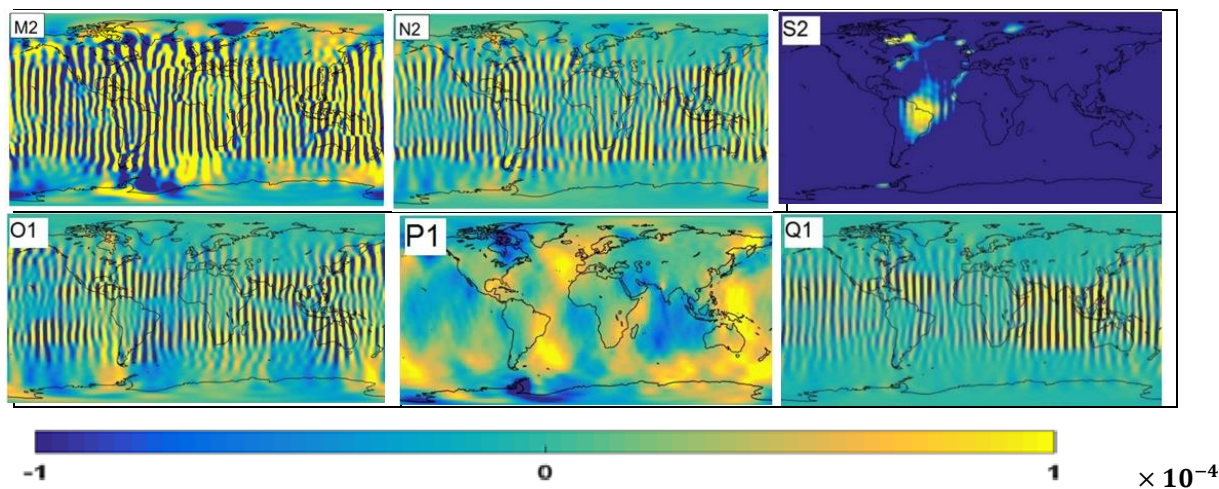
ج

شکل ۷: نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید جهانی برای مؤلفه‌ی N2 . الف) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش یک جفت ماهواره . ب) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش دو جفت ماهواره . ج) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید در دو آرایش مذکور

موجود در قسمت ۵ و ۶ نمودارها از ۲۲ روز شروع می‌شوند چرا که کوچکترین دوره تناوب نمونه‌برداری در هر دو آرایش ۱۱ روز بوده و طبق تئوری نایکوئیست^۱ قابل توجیه می‌باشد

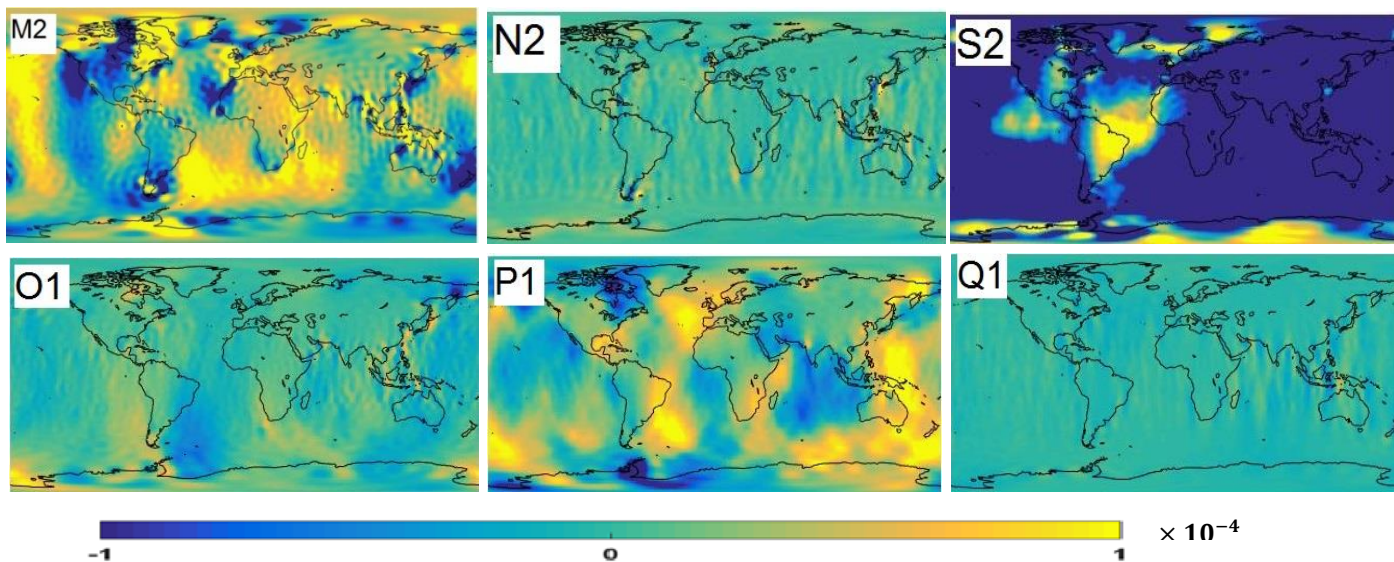
شکل (۸ و ۹) نقشه‌ی ارتفاع ژئوئید را قبل از اعمال فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای کل کره زمین در دو آرایش نشان می‌دهند و شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نقشه‌ی ارتفاع ژئوئید را بعد از اعمال فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای کل کره زمین در دو آرایش مشخص می‌نمایند. در این شکل‌ها دو آرایش با هم مقایسه شده‌اند. در تمامی شکل‌های

¹ Nyquist



شکل ۸: ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش تک جفتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای

هر مؤلفه‌ی جزر و مدی



شکل ۹: ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش دوجفتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی

۴-۳- فرآیند کاهش خطای الیازینگ

آنالیز کلی: با توجه به آنالیزهای کلی که در قسمت ۲ توضیح داده شد، میدان‌های جاذبه بازیابی شده حاوی مقداری خطای حاصل از جزر و مد بوده که پس از نمونه برداری توسط ماهواره‌ها در مشاهدات الیاز می‌شوند. به دلیل کامل نبودن مدل‌های جزر و مدی حتی پس از حل و میانگین‌گیری^۱ خطای الیازینگ به‌طور کامل حذف نمی‌گردد.

یک بازه‌ی زمانی به‌طور دلخواه انتخاب و بزرگی دامنه و پراکندگی خطاهای جزر و مد اقیانوسی را در آن نشان داده شد. لازم به ذکر است که بزرگی دامنه‌ی هر مولفه جزر و مدی در یک آرایش ماهواره‌ای مشخص، از اپکی به اپکی دیگر متفاوت خواهد بود. همان‌طوری که در شکل (۸ و ۱۰) مشاهده می‌گردد، خطاهای ناشی از جزر و مد اقیانوسی یکسری نوارشدگی‌های محلی^۲ را در آرایش ماهواره‌ای تک جفتی

² Local stripping

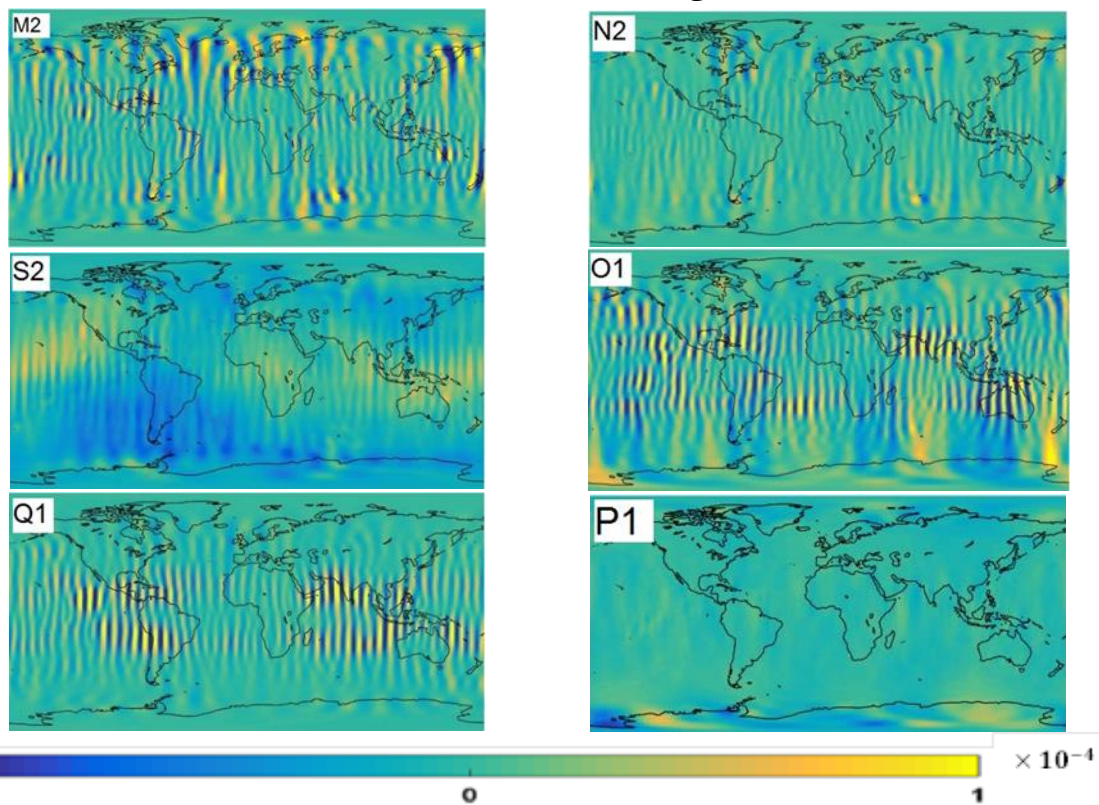
¹ Gravity solution

آرایش کاهش یافته است. اگرچه که هنوز هم مقداری از خطای الیازینگ باقی مانده است که می‌تواند به این دلیل باشد که در واقعیت نمی‌توان سری زمانی را به صورت مجموع توابع سینوسی در تعداد فرکانس محدود نشان داد. دلیل دیگر نیز نمونه‌برداری ناقص در حوزه‌ی زمان یا مکان است.

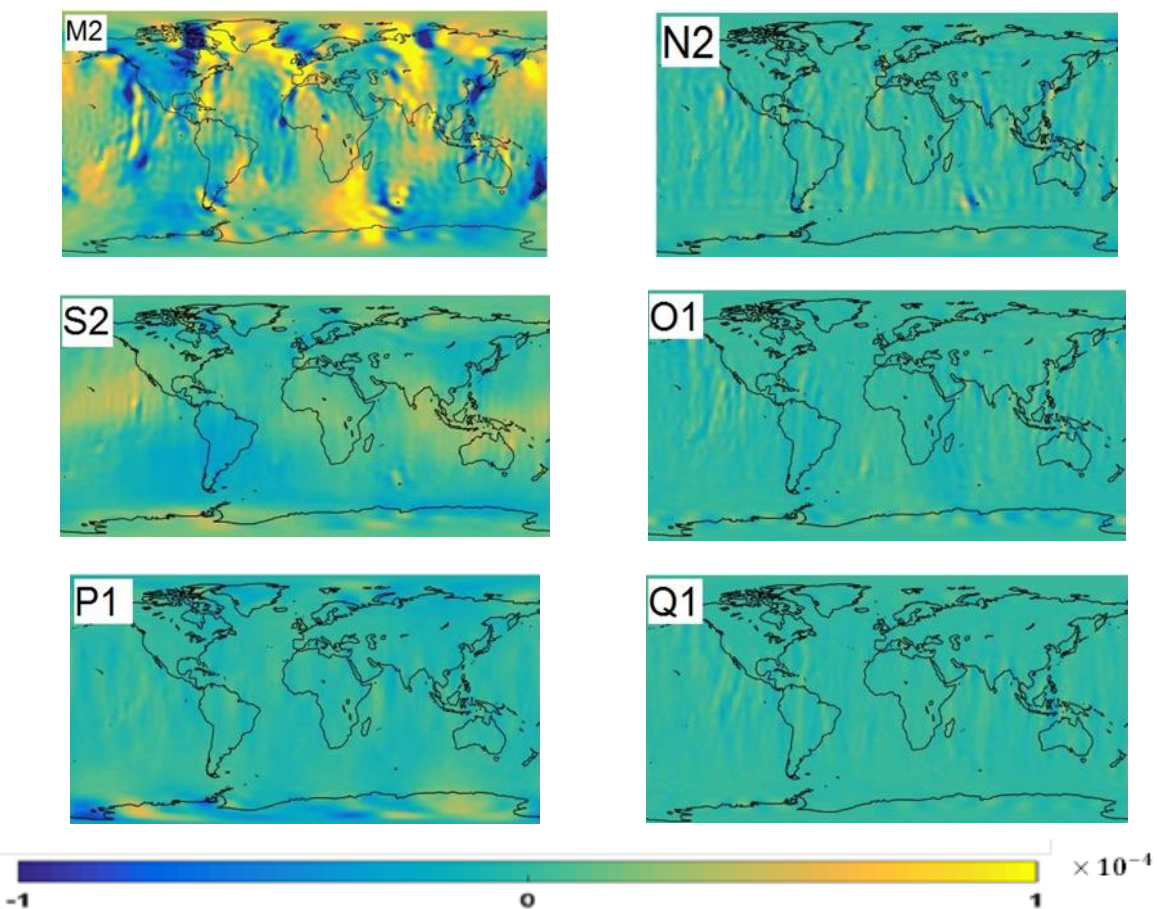
در این مقاله ضرایب هارمونیک کروی متأثر از خطای جزر و مدی را نیز مورد مطالعه قرار داده و میزان تغییر آن‌ها پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ را بررسی می‌نماییم. در شکل (۱۲) مثلث ضرایب هارمونیک کروی تا درجه ۶۰، قبل و بعد از فرآیند حذف خطای الیازینگ برای مؤلفه N_2 در هر دو آرایش ماهواره‌ای موردنظر نشان داده شده است.

GFO نشان می‌دهند. در مقابل، در آرایش دوجفت ماهواره، جفت مایل باعث افزایش ایزوتروپی مشاهدات شده و پراکندگی همگون‌تر از خطای جزر و مد اقیانوسی را در همه‌ی مولفه‌ها به دست می‌دهد (شکل (۹ و ۱۱)).

شکل (۱۰ و ۱۱) میزان خطای ناشی از جزر و مد اقیانوسی را پس از حذف خطای الیازینگ نشان می‌دهد. همان‌طوری که در بخش ۴-۲ مفصلاً توضیح داده شد، میزان خطای جزر و مدی در فرکانس‌های مختلف برآورد و فرکانس‌های مشکل‌آفرین شناسایی گردید. همان‌طوریکه مشاهده می‌گردد پس از حذف ضرایب هارمونیک کروی مربوط به فرکانس الیازینگ کشف شده از مجموعه مشاهدات، میزان خطا به‌طور قابل توجهی در هر دو



شکل ۱۰: ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش تک‌جفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی

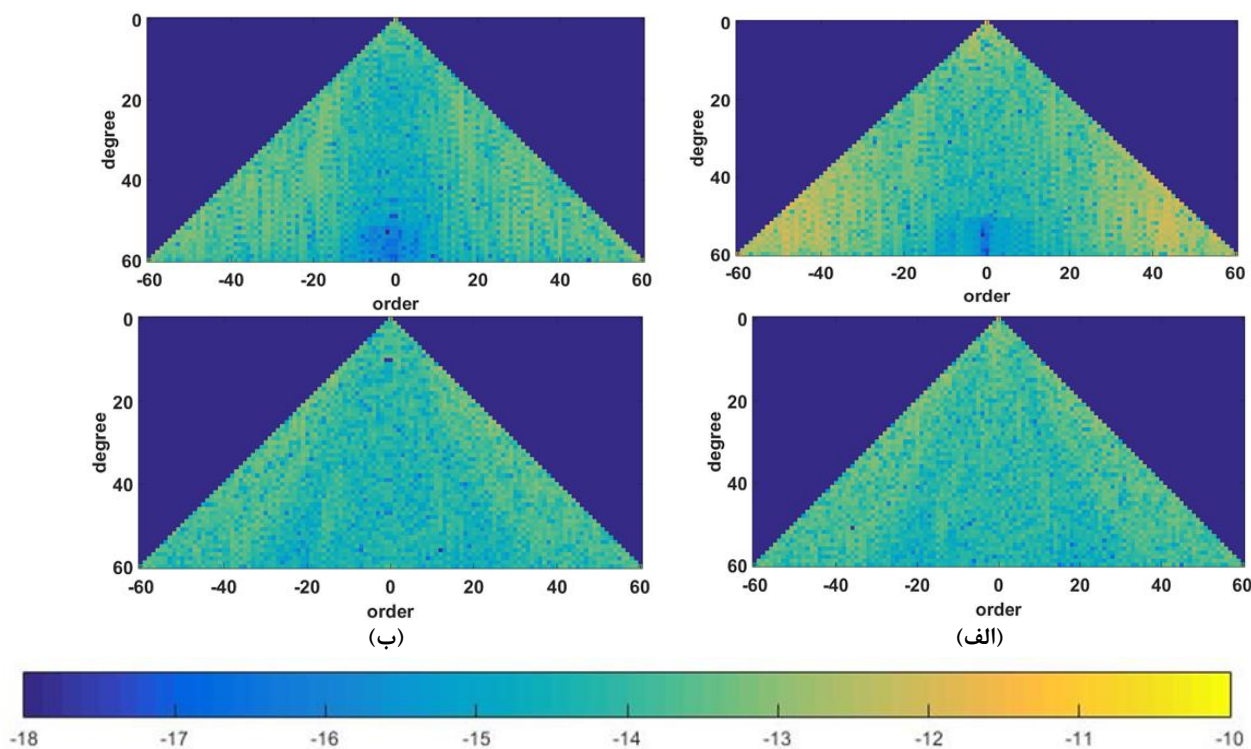


شکل ۱۱: ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش دوجفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی

در کاهش خطای جزر و مد اقیانوسی داشته است. همچنین منحنی‌های درجه خطای میانگین مربعات^۱ سیگنال باقیمانده جزر و مدی در دو حالت قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای مؤلفه N_2 مورد بررسی قرار گرفته است (شکل (۱۴)). همچنین جداول (۴ و ۵) نیز به ترتیب نتایج به دست آمده از درجه خطای میانگین مربعات، شبیه نتایج حاصل از آنالیز ضرایب هارمونیک است که در قسمت قبل بیان گردید و به نوعی نتایج بصری را به صورت عددی اثبات می‌نماید

در شکل (۱۳) به طور دلخواه ضریب $C_{40,4}$ مولفه‌ی S_2 را انتخاب نموده و وضعیت آن را قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ در دو آرایش مذکور را بررسی می‌نماییم. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهد که در آرایش تک‌جفتی بزرگی ضرایب هارمونیک کروی به 4×10^{-13} می‌رسد و این درحالی است که در آرایش بندر بیشترین مقدار ضرایب 2×10^{-13} است. با انجام فرآیند کاهش خطای الیازینگ، این مقادیر در هر دو آرایش کاهش قابل توجهی یافته و حول صفر نوسان می‌کند که نشان می‌دهد برآورد کمترین مربعات به خوبی عمل کرده و تاثیر قابل توجهی

¹ Degree RMS



شکل ۱۲: مثلث ضرایب هارمونیک کروی مؤلفه جزر و مدی N_2 . محور عمودی درجه و محور افقی معرف مرتبه ضریب می باشد. الف) ضرایب هارمونیک کروی بر حسب درجه و مرتبه در آرایش تک جفتی قبل و پس از کاهش خطای الیازینگ. ب) ضرایب هارمونیک کروی بر حسب درجه و مرتبه در آرایش دوجفتی قبل و پس از کاهش خطای الیازینگ.

خطای مربع میانگین باقیمانده حتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ کمتر از میزان خطا در آرایش تک جفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ می باشد.

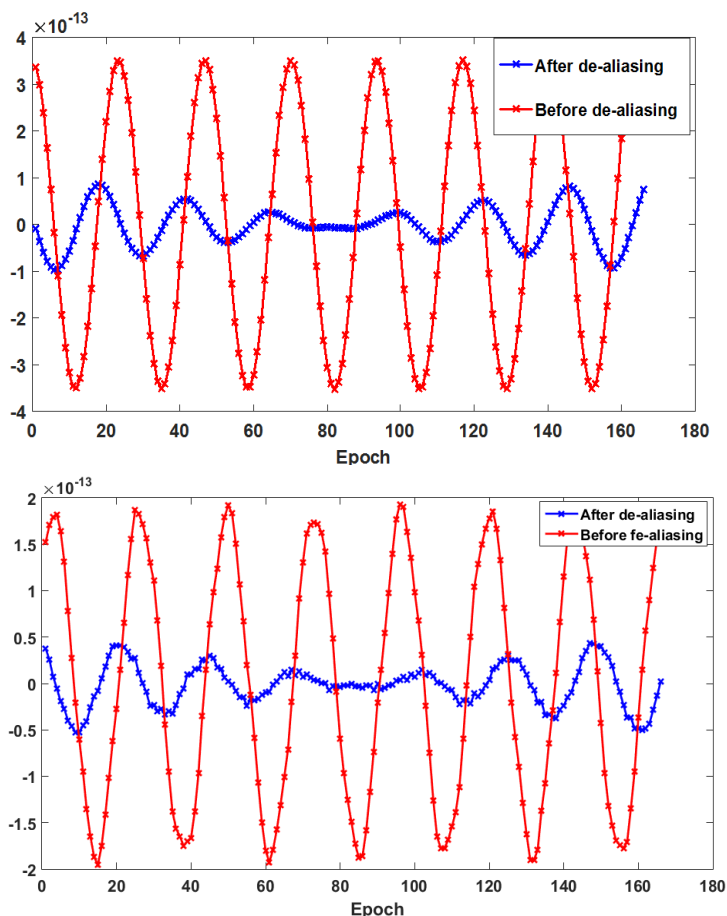
- با اعمال عملگر کمترین مربعات در هر دو آرایش خطای الیازینگ در تمامی درجات کاهش یافته است که میزان این کاهش در درجات مختلف متفاوت بوده است.

در هر دو آرایش دوجفتی و تک جفتی در بازه های نمونه برداری مختلف، مربع میانگین باقیمانده حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ کیفیت متفاوت دارد که این نتیجه از روی پهنای زیاد نمودار مربع میانگین باقیمانده حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ (نمودارهای آبی رنگ) قابل مشاهده می باشد.

همان طوری که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، الگوی منحنی های درجه خطای میانگین مربعات^۱ سیگنال باقیمانده جزر و مدی در آرایش تک جفتی و دوجفتی با یکدیگر متفاوت بوده و از نظر اندازه نیز بر روی کل درجات (۲ تا ۶۰) الگوهای متفاوتی را طی می کند که نتایج به تشریح به صورت زیر می باشد:

- در هر دو آرایش در درجات بیشتر از ۱۰، مربع میانگین باقیمانده ارتفاع ژئوئید کاهش می یابد ولی از درجه ی ۳۰ به بعد دوباره افزایش می یابد که علت آن ناشناخته است. تقریباً در درجه ی ۵۰ بیشترین اختلاف در بزرگی، اختلاف بیشتر از یک درجه در مربع میانگین باقیمانده، را بین دو نمودار شاهدیم.
- در آرایش دوجفتی از درجه ی ۲۰ به بعد، میزان

¹ Degree RMS



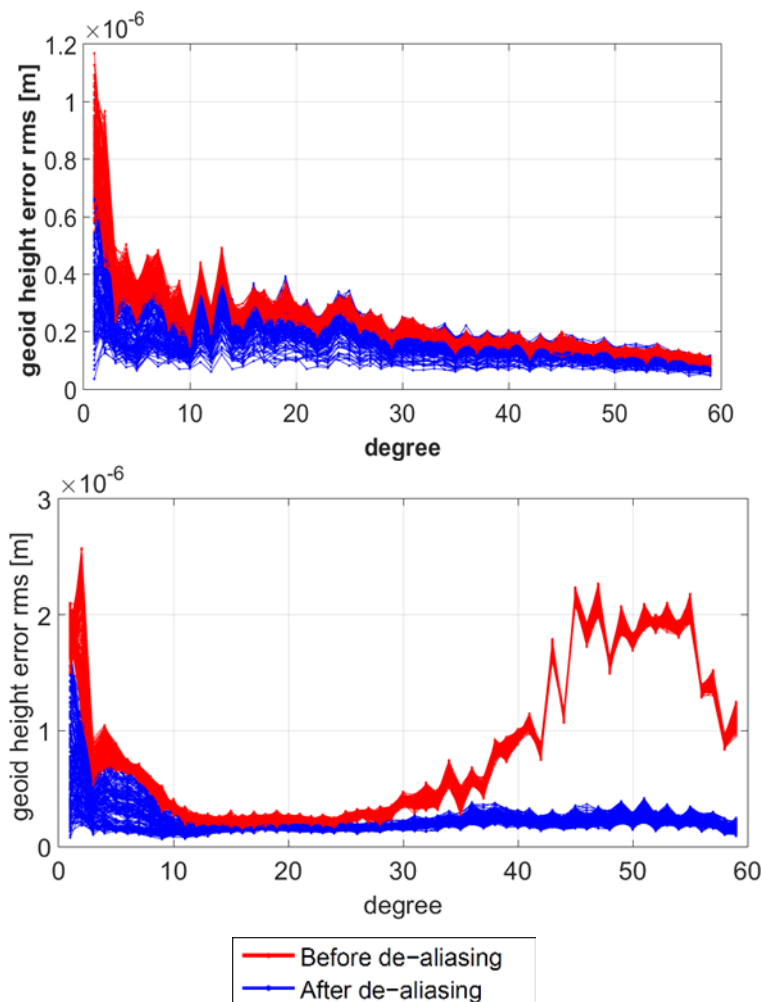
شکل ۱۳: بزرگی ضریب هارمونیک کروی $C_{40,4}$ قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای مؤلفه S_2 . آرایش تکجفتی (سمت چپ)، آرایش دوجفتی (سمت راست)

به گونه‌ای است که به حرکت از استوا به سمت قطبین مساحت هر پیکسل کاهش و به همان نسبت سهم آن در میانگین‌گیری نیز کاهش می‌یابد. همان‌طوری‌که جدول (۴) بیان می‌کند، مؤلفه M_2 در آرایش یکجفت ماهواره، نسبت به سایر مؤلفه‌ها بیشترین خطا را ایجاد نموده است ($0/25$ میلی‌متر) که پس از انجام فرآیند کاهش به $0/98253$ میلی‌متر می‌رسد. با توجه به جدول (۵)، در آرایش بندر، با افزایش جفت ماهواره مایل مقادیر خطای میانگین مربعات حتی از مقادیر متناظر پس از فرآیند کاهش در آرایش یکجفت ماهواره، کمتر است و نشان‌دهنده آن است که آرایش بندر خود یک روش کاهش به‌شمار می‌رود. در این جدول، همانند آرایش

به‌منظور کمی‌سازی میزان بهبود الیازینگ خطای جزر و مدی باقیمانده در سایر مؤلفه‌های جزر و مدی مذکور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، خطای میانگین مربعات تغییرات ارتفاع ژئوئید، در سطح تمامی پیکسل‌های کره زمین محاسبه و میانگین تمامی پیکسل‌ها به‌عنوان خطای میانگین مربعات تغییرات ارتفاع ژئوئید، برای هر مؤلفه جزر و مدی معرفی می‌گردد. که مقادیر آن برای دو آرایش ماهواره‌ای یکجفت ماهواره و بندر به ترتیب در جداول (۴ و ۵) بر حسب میلی‌متر موجود است. با توجه به اینکه مساحت پیکسل‌های شبکه به عرض جغرافیایی منطقه وابسته است، متناسب با مساحت اشغال‌شده در هر عرض جغرافیایی، میانگین وزن‌دار گرفته می‌شود. نحوه وزن‌دهی

مورد استفاده، تا حدی می‌تواند میزان خطای الیازینگ را کاهش دهد اما امکان حذف کامل با استفاده از این روش در حال حاضر وجود ندارد.

یک جفت ماهواره، در اثر کاهش مقادیر خطای میانگین مربعات کاهش یافته است اما نسبت به آرایش یک جفت ماهواره، در اثر فرآیند کاهش تغییر قابل ملاحظه نبوده است. فرآیند کاهش الیازینگ



شکل ۱۴: نمودار درجه مربع میانگین باقیمانده‌های خطای الیازینگ باقیمانده ارتفاع ژئوئید مؤلفه N2 قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ. آرایش ماهواره‌ای تک‌جفتی (بالا)، آرایش ماهواره‌ای دوجفتی (پایین).

جفت مایل به ترتیب ۱۱ و ۲۹ روز نودال است. با توجه به اول بودن دو عدد مذکور، می‌توان به‌گونه‌ای تعبیر نمود که جفت مایل نمونه‌برداری ۲۹ روز یک‌بار را نیز به مجموعه مشاهدات اضافه می‌نماید که این امر موجب افزایش فرکانس نمونه‌برداری می‌گردد که در نتیجه آن فرکانس‌های بالاتر نیز قابل کشف بوده و الیازینگ زمانی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه

به‌طور کلی، آرایش دوجفتی نسبت به آرایش تک‌جفتی ارجح‌تر است، چرا که در این آرایش خطای الیازینگ مخصوصاً در درجات بالا به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل افزایش نمونه‌برداری در حوزه‌های زمان و مکان باشد. در واقع در آرایش دوجفت ماهواره مورد بررسی در این مقاله، پریودهای نمونه‌برداری جفت‌قطبی و

جفت ماهواره مایل نسبت به جفت قطبی زاویه دار حول کره زمین گردش می نمایند، پوشش مکانی بهتری نیز در حوزه مکان نیز افزایش می یابد [۱۱].

جدول ۴: مقادیر Global RMS خطای تغییرات ارتفاع ژئوئید مؤلفه های جزر و مدی M2، N2، S2، O1، P1 و Q1 قبل و بعد از فرایند کاهش در آرایش یک جفت ماهواره.

مولفه جزر و مدی	M2	N2	S2	O1	P1	Q1
قبل از فرآیند کاهش (mm)	۰٫۲۵۸۶۹	۰٫۰۷۵۹۳	۰٫۱۷۷۹۴	۰٫۰۷۷۸۵	۰٫۰۲۵۶۰۲	۰٫۰۷۷۸۹۴
بعد از فرآیند کاهش (mm)	۰٫۰۹۸۲۵۳	۰٫۰۰۹۳۷۵	۰٫۰۴۵۰۷۱	۰٫۰۲۶۳۸۶	۰٫۰۱۲۱۸۱	۰٫۰۲۲۳۱۹

جدول ۵: مقادیر Global RMS خطای تغییرات ارتفاع ژئوئید مؤلفه های جزر و مدی M2، N2، S2، O1، P1 و Q1 قبل و بعد از فرایند کاهش در آرایش دو جفت ماهواره.

مولفه جزر و مدی	M2	N2	S2	O1	P1	Q1
قبل از فرآیند کاهش (mm)	۰٫۰۱۴۳۱۳	۰٫۰۹۰۸۳۶	۰٫۰۱۶۱۲۱	۰٫۰۴۰۸۸۶	۰٫۰۰۶۷۰۱۵	۰٫۰۶۰۱۹
بعد از فرآیند کاهش (mm)	۰٫۰۰۰۱۱۸۹	۰٫۰۲۲۸۶۳	۰٫۰۱۱۹۱۳	۰٫۰۱۱۹۰۳	۰٫۰۰۶۱۵۶۷	۰٫۰۵۴۱۳۹

۵- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

با توجه به نمونه برداری ناقص از جزر و مد اقیانوس ها با استفاده از ماهواره ها و همچنین محدودیت دقت مدل های جزر و مدی به کار برده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، پس از استفاده از مدل های جزر و مدی، باز هم مقداری خطا در میدان جاذبه بازیابی شده باقی می ماند که یکی از مشکلات اساسی مشاهدات ثقلسنجی ماهواره ای به شمار می آید. در این مقاله هدف برخورد با الیازینگ خطاهای باقیمانده جزر و مدی می باشد که در این راستا با به کارگیری روش برآورد کمترین مربعات بر روی اثرات جزر و مدی بازیابی شده، فرآیند کاهش خطای الیازینگ انجام شد و میزان تاثیر آن برای هر دو آرایش تک جفتی و دوجفتی گریس آینده مورد بررسی قرار گرفت.

در این راستا، از خطای حاصل از مدل های ژئوفیزیکی صرف نظر شد و تنها خطای جزر و مدی باقیمانده (اختلاف دو مدل جزر و مدی) برای ۶ مؤلفه جزر و مدی M2، N2، S2، O1، P1 و Q1 در قالب تغییرات ارتفاع ژئوئید به طور مجزا برای هر مؤلفه مورد بررسی قرار گرفت. داده های مورد استفاده ۵ ساله بوده و با قدرت تفکیک میانگین گیری ۱۱ روزه با استفاده از

نرم افزار QLT، برای هر مؤلفه جزر و مدی در دو آرایش ماهواره ای تک جفتی گریس آینده و بندر در قالب ضرایب هارمونیک کروی بازیابی شده است. با توجه به محدودیت فرمول تحلیلی مورد استفاده در مطالعات پیشین، در این مقاله عملگر PSD جهت کشف دوره تناوب الیازینگ هر مؤلفه جزر و مدی مورد استفاده قرار گرفت و سپس با استفاده از عملگر کمترین مربعات، دوره تناوب مربوطه از طیف مشاهدات حذف گردید. سپس نتایج حاصل به دو صورت مورد مقایسه قرار گرفت:

- مقایسه مشاهدات آرایش های ماهواره ای تک جفتی و مشاهدات دوجفتی
 - مقایسه ی حالات قبل از کاهش خطای الیازینگ و پس از آن. نتایج به دست آمده نشان می دهد:
- (۱) آرایش دوجفتی نسبت به آرایش تک جفتی در فرآیند کاهش خطای الیازینگ عملکرد بهتری دارد که می تواند به دلیل پوشش دهی زمانی و مکانی بالاتر آن باشد.
 - (۲) خطای جزر و مدی باقیمانده با به کارگیری عملگر کمترین مربعات خصوصا در آرایش

بررسی عملکرد روش کمترین مربعات در کاهش خطای الیازینگ بود. در این روند به بزرگی پریودهای اصلی و میزان دوری و نزدیکی آن‌ها به سیگنال‌های مطلوب نظیر سالیانه، نیم سالیانه و ... توجهی نشده است. بنابراین امکان حذف این پریودها و هم چنین یکسری سیگنال‌های ناشناخته که مهم هستند وجود دارد که یکی از معایب این روش به شمار می‌رود. بنابراین در استفاده از این فیلتر تا جایی که می‌شود بایستی احتیاط شود.

(۶) در این مقاله تنها آرایش‌های ماهواره‌ای با مدار تکراری مورد بررسی قرار گرفتند در صورتی که در واقعیت ممکن است آرایشی با مدار غیر تکراری داشته باشیم و یا اینکه مدار آرایش ماهواره‌ای مورد نظر به دلایلی از قبیل اصطکاک اتمسفری، نیروی فشار خورشیدی و ... عوض شود. در چنین شرایطی متودهایی برای رویارویی با این مسئله پیشنهاد شده است که خارج از بحث این مقاله می‌باشد.

(۷) در این مقاله پریود نمونه برداری و میانگین‌گیری (رزولوشن و حل) یکسان و روز در هر دو، ۱۱ روز نودال در نظر گرفته شد. در صورت حل ماهانه (۳۰ روز) روند بالا نیاز به بررسی بیشتری دارد.

یک جهت ماهواره به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. برای مؤلفه‌های O_1 , S_2 , N_2 , M_2 , P_1 و Q_1 بعد از فرآیند کاهش به ترتیب به مقادیر $0/094$, $0/045$, $0/026$, $0/012$ و $0/022$ میلی‌متر تقلیل یافته است ولی به‌طور کامل حذف نمی‌گردد که می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- در واقعیت نمی‌توان سری زمانی را به صورت مجموع توابع سینوسی در تعداد فرکانس محدود، نشان داد.

- نمونه برداری ناقص در حوزه مکان

(۳) از جمله دلایل مهم شباهت رفتاری مناطق آبی و غیر آبی، نشت طیفی معرفی می‌شود چرا که خاک به تنهایی در سیگنال تأخیر فاز ایجاد کرده و الگوی متفاوتی به دست می‌دهد. به‌منظور کاهش این خطا در مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای، نیاز است که طول داده در دسترس افزایش یابد.

(۴) برآورد کمترین مربعات در بازه‌های نمونه برداری مختلف، بازدهی متفاوتی دارد که رنج تغییر آن بسیار زیاد می‌باشد. بنابراین کیفیت داده‌های حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ، به بازه‌ی نمونه برداری نیز بستگی پیدا می‌کند که علت آن می‌تواند موضوع خوبی جهت بررسی بیشتر باشد.

(۵) همان‌طور که قبلاً بیان گردید، در این مقاله هدف

مراجع

- [1] C. Reigber, P. Schwintzer, and H. L. "uhr, "The CHAMP geopotential mission in Bollettino di Geofisica Teoretica ed Applicata", Proceedings of the Second Joint Meeting of the International Gravity and the International Geoid Commission, pp.43-44, 1999.
- [2] P. Knudsen, and O. Andersen, "Correcting GRACE gravity fields for ocean tide effects", Geophysics Research Letter, Vol.29, pp. 191-194, 2002.
- [3] R. Koop, R. Rummel, "The future of satellite gravimetry", Report from the workshop on the future of satellite gravimetry, Vol. 113, pp.1-2, 2007.
- [4] S.C. Han, C. Jekeli, CK. Shum, "Time-variable aliasing effects of ocean tides, atmosphere, and continental water mass on monthly mean GRACE gravity field", J Geophys Res, Vol.109, pp.102-109, 2004.
- [5] M.E. Parke, R.H. Stewart, D.L. Farles, and D.E. Cartwright, "On the choice of orbits for

- an altimetric satellite to study ocean circulation and tides”, *J. geophys. Res.*, Vol.92, pp.11693-11707, 1987 .
- [6] D. Wiese, R. Nerem, F. Lemoine, “Design considerations for a dedicated gravity recovery satellite mission consisting of two pairs of satellites”, *J Geodesy*, Vol.86, pp.81-98, 2012.
- [8] B. Devaraju, “ Understanding filtering on the sphere- Experiences from filtering GRACE data-“, Phd thesis. Stuttgart university, 2015.
- [9] Swenson, S., and Wahr, J., “Post-processing removal of correlated errors in GRACE data”, *Geophys. Res. Lett.*, 2006.
- [10] Parke, M.E., Stewart, R.H., Farles, D.L., and Cartwright, D.E., “On the choice of orbits for an altimetric satellite to study ocean circulation and tides”, *J. geophys. Res.*, pp. 693–707, 1987.
- [11] P.N.A.M. Visser, and E.J.O. Schrama, “Space-borne gravimetry: how to decouple the different gravity field constituents?”, in *Gravity, Geoid and Space Missions*. L. Bastos, J. Fernandes, and eds C. Jekeli, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, pp.6-11.
- [12] Iranpour, S., “Sampling the Earth’s Time-VARIABLE Gravity Field from Satellite Orbit”, Phd. Thesis, Stuttgart University, 2013.
- [13] D. Wiese, R. Nerem, F. Lemoine, “Design considerations for a dedicated gravity recovery satellite mission consisting of two pairs of satellites”, *J Geodesy*, Vol.86, pp.81-98, 2012.
- [15] K.W. Seo, C.R. Wilson, S.C. Han, and D.E. Waliser, “ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) alias error from ocean tides”, *J. geophys. Res.*, Vol.113, pp.113-129, 2008



Impact of GRACE inline and Bender gravity satellite missions on the tidal components errors de-aliasing of N_2 and S_2

Foruzan Ghasser Mobarakeh ^{*1}, Siavash Iran pour ², Alireza Amiri Simkooei ³, Vahab Nafisi ³

1-Ms.c student of geodesy in Department of Geomatics, Faculty of Engineering, University of Isfahan

2- Post Phd and researcher in Geodesy Institute, Faculty of Aerospace and Geodesy, University of Stuttgart, Germany

3- Assistant professor in Department of Geomatics, Faculty of Engineering, University of Isfahan

Abstract

Ocean tides cause noticeable aliasing errors in the gravity field from single pair space-borne gravimetric missions like GRACE. Several studies about future gravity missions have shown that constellations with two or more GRACE-like tandems can lead to a significant reduction of aliasing error from all kinds of high-frequency signal sources. Despite such reduction, tidal aliasing will remain an error source still. This study investigates the efficiency of tidal error dealiasing in the post-processing mode for such future dualpair missions. To that purpose, we analyze the way a certain satellite mission sampling each tidal constituent. Given the repeat orbit patterns and the observation time span, we examine and model the aliasing periods and amplitudes constitute by constitute. Results show that a double-pair formation has de-aliasing function comparing to a single-pair formation in terms of distribution and amplitude of ocean tide aliasing error. With least-square (LS) estimation, the aliasing error can be reduced significantly.

Key words: GRACE inline . ocean tide .de-aliasing.