

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

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

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان
- ۲- فوق دکترا و پژوهشگر، انسیتیتو 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 به عنوان 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، پریود 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: نقل سنجی ماهواره‌ای ، مأموریت آینده GFO ، جزر و مد اقیانوسی ، فرآیند کاهش خطای الیازینگ

۱- مقدمه

در این صورت پیش‌بینی می‌شود که خطای حاصل از الیازینگ جزر و مدی تقریباً سه برابر خطای حاصل از نویز مشاهدات باشد^[۳]. در این شرایط، مهم‌ترین عامل محدودکننده، خطای الیازینگ است و بنابراین فرآیند کاهش خطای الیازینگ اهمیت فوق العاده‌ای 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^[۷]. اگرچه امروزه تأثیر این فیلترها محدود شده است^[۸]. پارکه و همکاران^۹ نیز در سال ۱۹۸۷ پریود خطای الیازینگ جزر و مدی را برای داده‌های ارتفاع سنجی 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 پریودها را برای چند آرایش مدار ماهواره‌ای از جمله تک جفتی، دو جفتی شیفت در زمان و دو جفتی 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:

۱- 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^[۱۱ و ۱۲]. در این میان جزر و مد مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرات سریع میدان گرانشی است. میدان ثقل زمین از بسط به هارمونیک‌های کروی به دست می‌آید و اندازه‌گیری آن بسیار مشکل است. با بسط تابع تغییرات پتانسیل جاذبه به سری فوريه بی‌نهایت فرکانس با دامنه‌های متعدد داریم که تنها برخی از آن‌ها که در بالا عنوان شده‌اند برای ما شناخته بوده 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 نویز مشاهدات و خطای الیازینگ^۳ اشاره نمود. در گریس، بزرگی نویز مشاهدات از خطای الیازینگ حاصل از جزر و مد بیشتر است. با این حال، در آینده‌ی نزدیک به جای امواج مایکروویو در سیستم ردیابی دو ماهواره (Ll-SST^۴)، از اشعه‌ی لیزر و شتاب سنج^۵ استفاده می‌شود.

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 می‌گرددند.

۱-۲- مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای

در سال ۲۰۰۲ جفت ماهواره گریس به فضا ارسال گردید که هدف ماموریت اساسی آن بهبود تعیین میدان ثقل زمین با استفاده از ردیابی میان دو ماهواره در ارتفاع پایین بود. با استفاده از مشاهدات این ماموریت امکان اندازه‌گیری میدان ثقل متغیر بازمان فراهم آمد. همچنین ماموریت برای دستیابی به اندازه‌گیری‌های انتقال‌های جرم با قدرت تفکیک مکانی بالا، در سیستم زمین مناسب بود. ماموریت گریس اصلی برای مدت زمان ۵ سال در مدار طراحی شده بود. منظور از ماموریت گریس مانند در این مقاله ماموریتی با مشخصات ماموریت اصلی می‌باشد که می‌تواند تکنولوژی آن بر حسب امواج مایکرویو باشد یا بر اساس اشعه لیزر و شتاب‌سنج‌های دقیق طراحی گردد که در این صورت به آن ماموریت گریس مانند (GFO^۲) گویند. تفاوت GFO مورد استفاده در این مقاله با آنچه در سال ۲۰۱۷ ارسال خواهد شد در آن است که این ماموریت مشخصات مداری مشخص دارد در حالی که در ماموریت 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 گیرندهای جی پی اس^۳ GPS قوی به منظور تعیین موقعیت لحظه‌ای مدار استفاده می‌کند. دو ماهواره تقریباً بر روی یک مدار دایره‌ای حرکت می‌کنند. این ماموریت از امواج مایکرویو به منظور تعیین فاصله میان دو ماهواره استفاده می‌نمود. فاصله‌ی بین دو ماهواره تقریباً ثابت است. این فاصله به طور میانگین ۲۲۰ کیلومتر

(۱) نزدیک بودن فرکانس خطای الیازینگ به فرکانس سیگنال مطلوب (سالانه، نیم سالانه و...)

(۲) برای برخی مولفه‌ها پریود 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 اشاره شده، در مرحله پس پردازش فرآیند کاهش خطای الیازینگ^۱ انجام‌گرفته و میزان تأثیر آن را برای هر دو آرایش تک جفتی و دو جفتی مورد نظر که در ادامه معرفی می‌گردد، مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین نحوه نمونه‌برداری ۶ مولفه جزر و مدار M₂, N₂, O₁, P₁, S₂, Q₁ 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 به صورت 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 می‌گردد. بخش ۳ روندکار و روش مورد استفاده در فرآیند کاهش خطای الیازینگ به‌طور مختصر توضیح داده شده است. در بخش ۴ پریود الیازینگ ۶ مولفه‌ی جزر و مدار 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 مدار 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 مداری ماموریت‌های
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

همان طور 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 ثقل‌سنگی 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
شتات‌سنجهای دقیق اندازه‌گیری می‌شود،
نویز دستگاهی بسیار پایین آمده و تقریباً $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
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 به‌وضوح
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 را اندازی 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 نوارشده^۳
- ماموریت‌های شبیه‌سازی شده آرایش خطی داشته و

⁴ Ground Track

⁵ European Satellite Agency

⁶ Gap

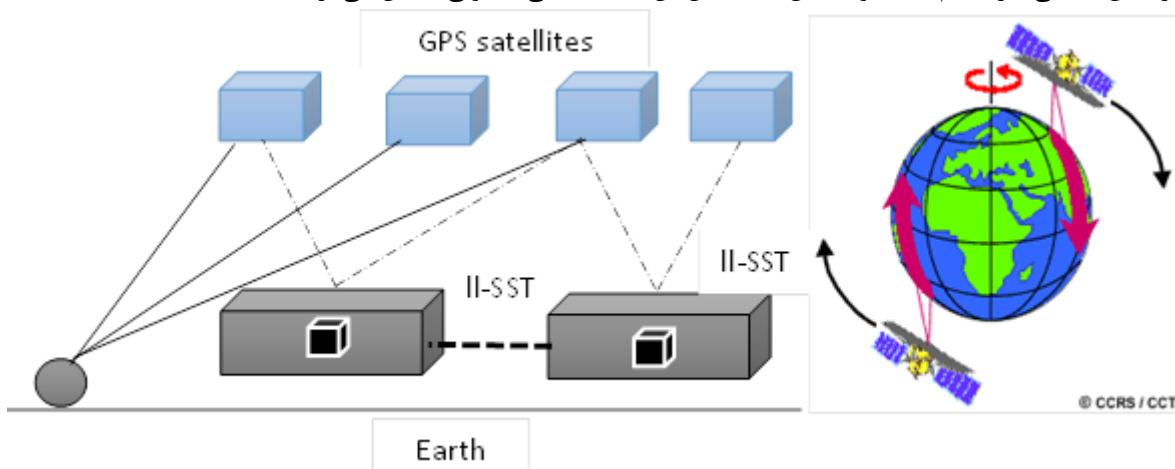
¹ Along Track

² Dual pair GRACE inline (Bender)

³ Stripping

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

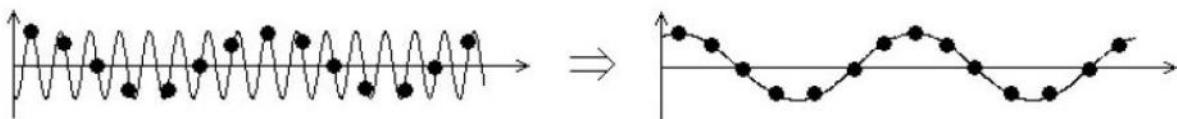
سرعت نمونه‌برداری پایین، در امواج حزره و مد که فرکانس بالایی دارد گم شده و امکان تشخیص آن



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

ارتفاع بر حسب km	زاویه میل (I)	مدار تکراری (a/u)	نوع آرایش ماهواره
۳۶۲	۹۰°	۱۷۲/۱۱	قطبی
۳۴۲	۱۱۵°	۴۶۰/۲۹	مايل



شکل ۲: نمایش شماتیک خطای الیازینگ. در شکل سمت چپ سیگنال اصلی در نقاط سیاه به‌طور 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 ثقل‌سنجری ماهواره‌ای باقی‌مانده و در مرحله میانگین‌گیری و حل^۱ به‌طور 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 خطای در حوزه زمان و مکان به‌طور 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 مورداستفاده 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

^۱ 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 مورداستفاده در این روش، معادله برحسب ستاد رنج^۴ میان دو ماهواره می‌باشد که در آن سمت چپ مشاهدات و پتانسیل زمانی زمین، V ، نیز در اپک‌های مشاهداتی مورد نظر مجھول 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 e_{12} بردار واحد بین دو ماهواره را نشان می‌دهد. عبارت $(\dot{\rho}^2 - \frac{1}{\rho(t)}(\Delta\mathbf{r}_{12})^2)$ 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 موردنظر و در دست داشتن مدل‌های ژئوفیزیکی میدان پتانسیل زمانی (اتمسفر، اقیانوس، هیدرولوژی و ...)، گرادیان‌های پتانسیل، $(\mathbf{r}_1(t) \text{ و } \mathbf{r}_2(t))$ ، 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)).

⁴ Range-acceleration⁵ Least Square Estimation (LSE)

امکان محاسبه‌ی فرکانس الیازینگ برای هر مولفه‌ی جزر و مدى وجود دارد. هر ماهواره در مدار تکراری α/β دور کامل را در α روز نودال طی می‌کند که α و β نسبت به هم اعداد اول هستند. طبق تئوری CNR^۱، 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 مدى می‌باشیم [۷].

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

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

$$T_{rep} = \alpha \quad (2)$$

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

$$\frac{1}{T_a} = abs \left[mod \left(\frac{1}{T_k} + \frac{1}{T_N}, \frac{2}{T_N} \right) - \frac{1}{T_N} \right] \quad (3)$$

۲-۳-الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده

به منظور تولید داده‌های شبیه‌سازی شده میدان جاذبه و بازیابی آن‌ها از نرم‌افزار شبیه‌سازی QLT 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 J_2 قرار دارد. در چنین شرایطی مشخصات مداری از جمله نیم قطر،

¹ Colombo- Nyquist Rule² Nyquist frequency³ Quick Look Tool

$$\ddot{\rho} - \frac{1}{\rho(t)} ((\Delta \mathbf{r}_{12})^2 - \dot{\rho}^2) = \mathbf{e}_{12} (\nabla V(\mathbf{r}_2(t)) - \nabla V(\mathbf{r}_1(t))) \quad (4)$$

تهیه شده‌اند و از داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات تاییدگیج‌های زمینی، پرتونگارهای صوتی و تلفیق این مشاهدات به دست آمده‌اند؛ بنابراین آن‌ها را مستقل^۱ در نظر می‌گیریم و بر این مبنای از اختلاف دو مدل در این مقاله استفاده می‌نماییم همان‌طوری که در بخش ۱-۲ بیان گردید، امواج جزر و مدی با فرکانس بالا برروی سیگنال‌های مشاهدات ثقل‌سنگی 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^۲ به طور 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

^۱ منظور از مدل‌های مستقل، مدل‌هایی هستند که از داده‌های متفاوت مثلاً داده‌های حاصل از تایید گیج و داده‌های پرتونگاری صوتی به دست آمده‌اند.

^۲ Gravity solution

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 پژوهه می‌تواند داده‌های شبیه‌سازی شده به روش انتگراسیون مداری^۳ 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 درنظر 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].

همان‌طوری 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 نمونه‌برداری ناقص از جزر و مد اقیانوس‌ها با استفاده از ماهواره‌ها و همچنین محدودیت دقت مدل‌های جزر و مدی به کاربرده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، باز هم مقداری خطای در میدان جاذبه بازیابی شده باقی می‌ماند. در این مقاله هدف برخورد با این‌گونه 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

^۳ Orbit Integration

۳- روش مورد استفاده

همان طوری که در قسمت اول بیان گردید، با در دست داشتن پریود هر کدام از مولفه های جزر و مداری و مدار تکرار ماهواره (T_{rep}) در آرایش یک جفت ماهواره، امکان محاسبه پریود الیازینگ آن مولفه با استفاده از رابطه (۳) وجود دارد [۴ و ۵]. جهت محاسبه پریود الیازینگ مولفه های جزر و مداری رابطه تحلیلی که در آن پریود میانگین گیری نیز وجود داشته باشد تاکنون تعریف نشده است. خوب شختمانه در این پژوهه با توجه به برابر بودن پریود نمونه برداری و پریود میانگین گیری، ۱۱ روز، امکان استفاده از رابطه تحلیلی (۳) وجود دارد. اما در حالت کلی این امکان برای هر پریود میانگین گیری امکان پذیر نمی باشد. استفاده از رابطه (۳) به منظور محاسبه پریود الیازینگ دو جفت ماهواره جای بحث دارد که بایستی در آینده مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به محدودیت های مذکور در استفاده از رابطه تحلیلی، در این مقاله بر مبنای داده های موجود، پریود خطای الیازینگ استخراج می گردد. بدین منظور، در هر کدام از آرایش های ماهواره ای مذکور، پریود خطای الیازینگ برای هر مولفه جزر و مداری، با محاسبه چگالی توان طیفی^۷ خطای باقیمانده جزر و مداری که بر حسب اختلاف ارتفاع ژئوپسی بیان شده است، مشخص می گردد که در حالت تقریبی جواب ها با فرمول تحلیلی مطابقت دارد و به این دلیل است که بازه حمل میدان جاذبه^۸ و دوره تناوب نمونه برداری یکسان می باشد (۱۱ روز).

دوره تناوب نمونه برداری آرایش های مورد بررسی در جدول (۱) موجود می باشد. شکل (۶) نحوه محاسبه چگالی توان طیفی را نشان می دهد که روند آن به تشریح در زیر عنوان شده است :

⁷ Power Spectrum Density (PSD)

⁸ Gravity solution

اعداد دودسون^۱ و همچنین عدد لود^۲ امکان تبدیل دامنه و فاز هر مؤلفه جزر و مداری در قالب ضرایب هارمونیک کروی در هر نقطه با مختصات جغرافیایی مشخص وجود دارد که ضرایب هارمونیک کروی حاصل ورودی نرم افزار شبیه سازی مورد استفاده می باشد. به منظور بازیابی خطای جزر و مداری موقعیت ماهواره ها در اپک های زمانی مذکور مورد نیاز است که با استفاده از معادلات هیل و مشخصات مداری آرایش های مورد استفاده که در جدول (۱) آمده است، قابل محاسبه می باشد. شکل (۳) الگوریتم تولید داده های بازیابی شده برای هر مؤلفه جزر و مداری را نشان می دهد. در این مقاله از تغییرات پتانسیل ناشی از هیدرولوژی (H)، صفحات یخی (I)، زمین صلب (S^۳) و اتمسفر-اقیانوس (AO^۴) صرف نظر می نماییم (AOHIS=0) و تنها خطای حاصل از جزر و مد اقیانوس ها برای ۶ مؤلفه مهم جزر و مداری مذکور، در قالب اختلاف دو مدل جزر و مداری به طور مجزا برای هر مؤلفه مورد بررسی قرار می گیرد. در این صورت میدان جاذبه حل شده تنها شامل اطلاعات جزر و مداری می باشد که مشخصات شبیه سازی در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج از دو منظر مقایسه می شود:

- مقایسه مشاهدات آرایش های ماهواره ای تک جفتی و مشاهدات دو جفتی
- مقایسه حالت 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 شتاب سنج های دقیق جهت انجام مشاهدات، میزان خطای دستگاهی بسیار کاهش یافته و عملا از آن چشم پوشی می شود.

¹ Doodson number

² Load number

³ Hydrology

⁴ Ice

⁵ Solid Earth

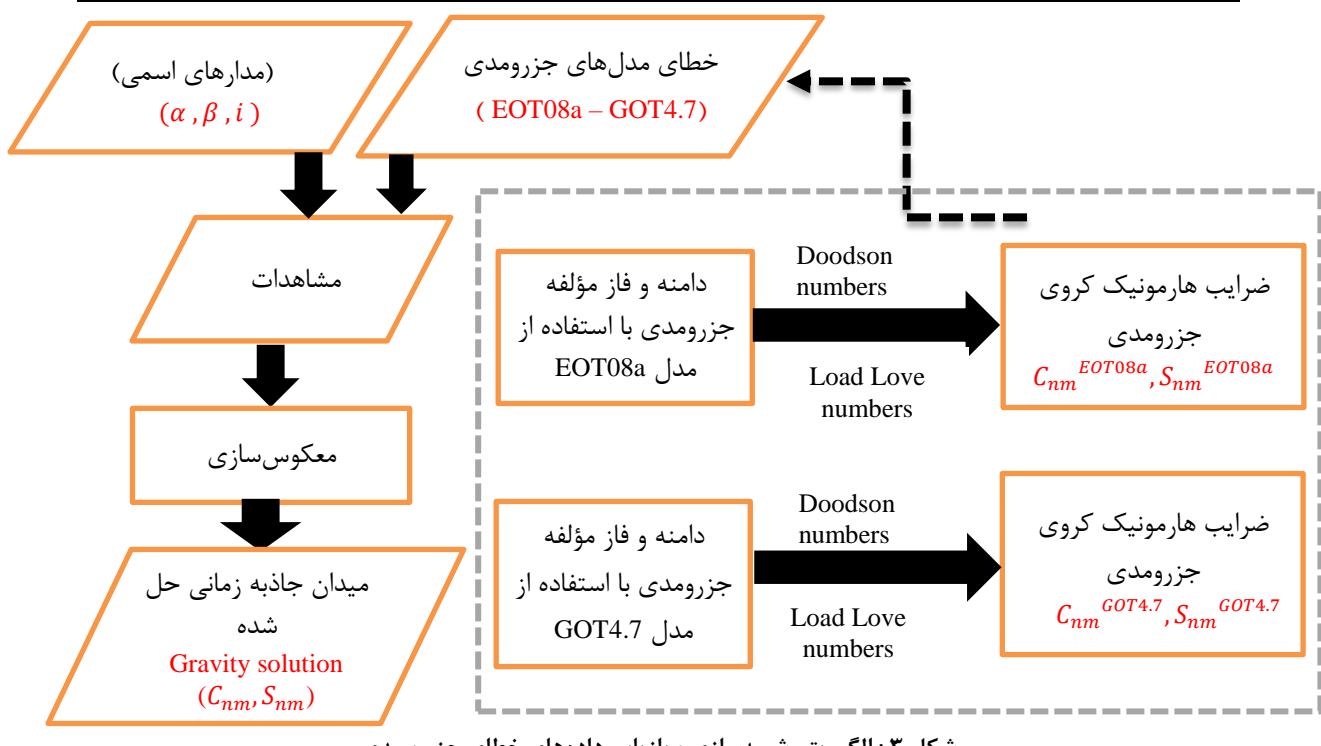
⁶ Atmosphere-Ocean

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 پریود حل مشخص ۱۱ روزه، بر روی منطقه یک شبکه با قدرت تقسیم ۱۰ درجه در $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ و به هر پیکسل تغییر

جدول ۲: پارامترهای مداری آرایش‌های مورد استفاده

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



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

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

$$a_n = \frac{1}{2l} \int_{-1}^{+1} f(x) \cos \omega_n x dx \quad \text{رابطه (۶)}$$

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

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

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \sin \omega_n x) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$PSD(f) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

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

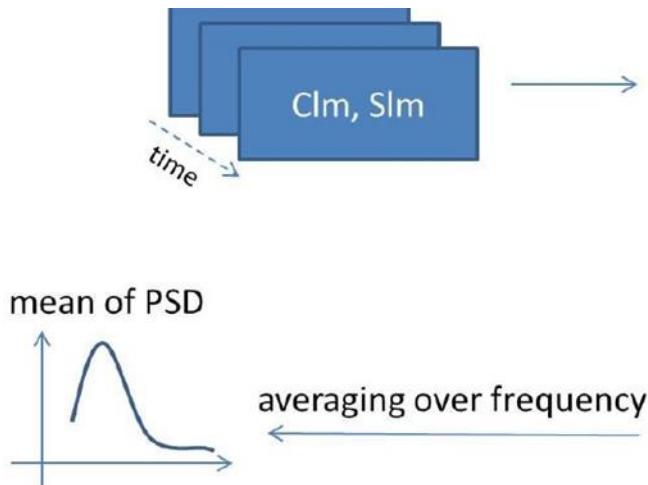
(۲) برای هر پیکسل یک سری زمانی به صورت رابطه (۶) تشکیل و تغییرات ارتفاع ژئوئید مربوطه در قالب سری زمانی نشان داده می‌شود:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \sin \omega_n x) \quad \text{رابطه (۶)}$$

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

که در آن T پریود 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 ۲-۴ نتایج حاصل از این روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



مربوط به هر مؤلفه جزر و مدی که پریود الیازینگ آن T_a است، به عنوان مشاهدات سرشکن شده \hat{S}_{lm}^{alias} و \hat{C}_{lm}^{alias} قابل محاسبه است که آنها را با \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} ، امکان محاسبه ضرایب هارمونیک کروی کاوشیافت، $\hat{C}_{lm}^{dealias}$ 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:

رابطه (۱۰)

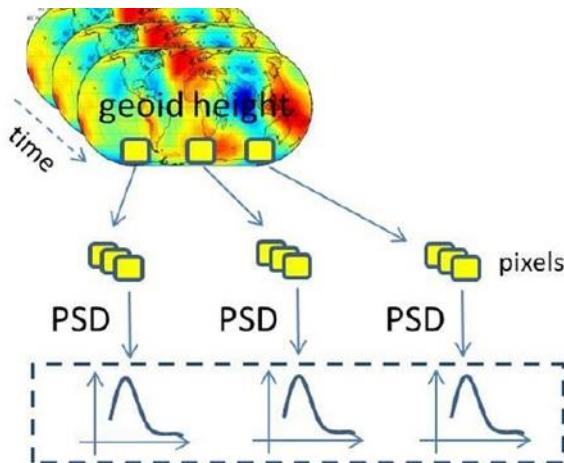
$$\hat{C}_{lm}^{dealias}(t) = C_{lm}(t) - \hat{C}_{lm}^{alias}(t)$$

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

۴- حذف خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد اقیانوس‌ها

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

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



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

۳) 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 برآورده کمترین مربعات بر روی سری‌های زمانی، امکان برآورده دامنه‌ی هر مولفه‌ی جزر و مدی، یعنی $A_{c,lm}, B_{c,lm}, A_{s,lm}, B_{s,lm}$ مشاهدات مربوطه به صورت زیر است [۱۵]:

رابطه (۹)

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

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

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

مشاهده می‌کنید، در مورد مؤلفه‌ی Σ_k به منظور 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 (۶-الف و ۶-الف) مشخص است در هر دو آرایش الگوی PSD ارتفاع ژئویید 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 تراکم پذیری قابل توجه آن در برابر آب‌ها، به تنهایی 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 رخداده است. لازم به ذکر است تمامی نمودارهای مربوط در شکل‌های (۶ و ۷) مربوط به قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ می‌باشند.

۴-۱-داده‌های مورد استفاده

به منظور پیاده‌سازی روش‌های موردمطالعه، در این پژوهه از داده‌های یکساله و ۵ ساله مأموریت گریس مانند تک‌جفتی و دوجفتی که به عنوان آرایش‌های بهینه در نظر گرفته شده‌اند، استفاده می‌گردد (جدول (۱)). با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی موردنظر^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 روز بوده که جواب حاصل، به عنوان حل میدان جاذبه‌ای، به میانه این بازه اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب در اولین بازه‌ی حل، جواب حاصل به روز ۶ ام، در بازه‌ی دوم به روز ۱۸ ام اختصاص داده شده و همین روند ادامه می‌یابد:

حل‌های ۱۱ روزه :

January	January	January
↓	↓	↓
۱	۱۲	۲۳

۶	۱۸
---	----

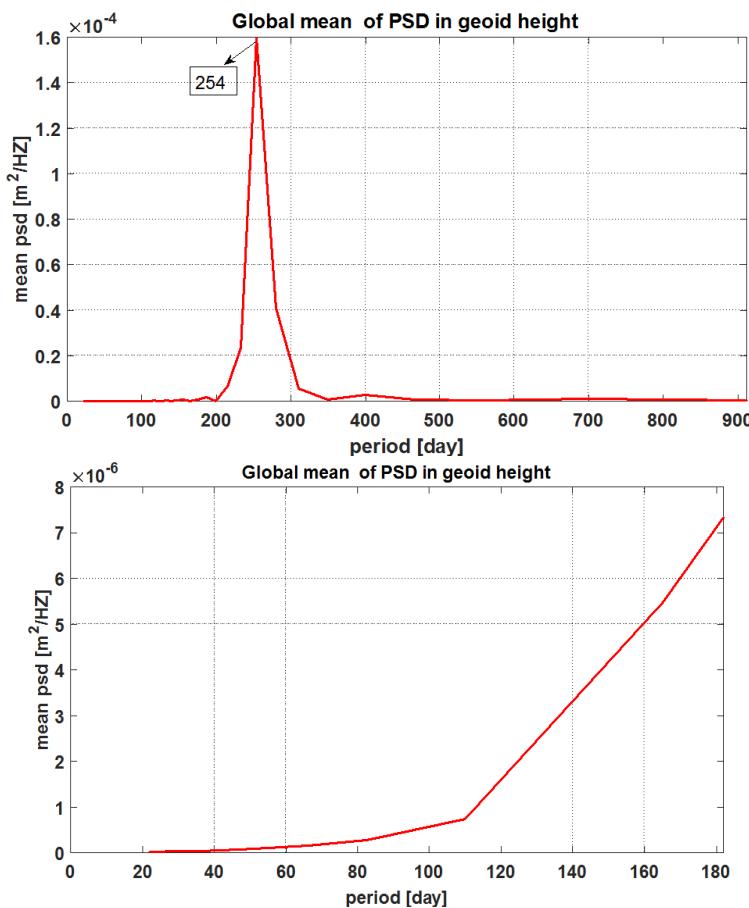
۴-۲-محاسبه پریود الیازینگ

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

² Solid Earth

³ Global

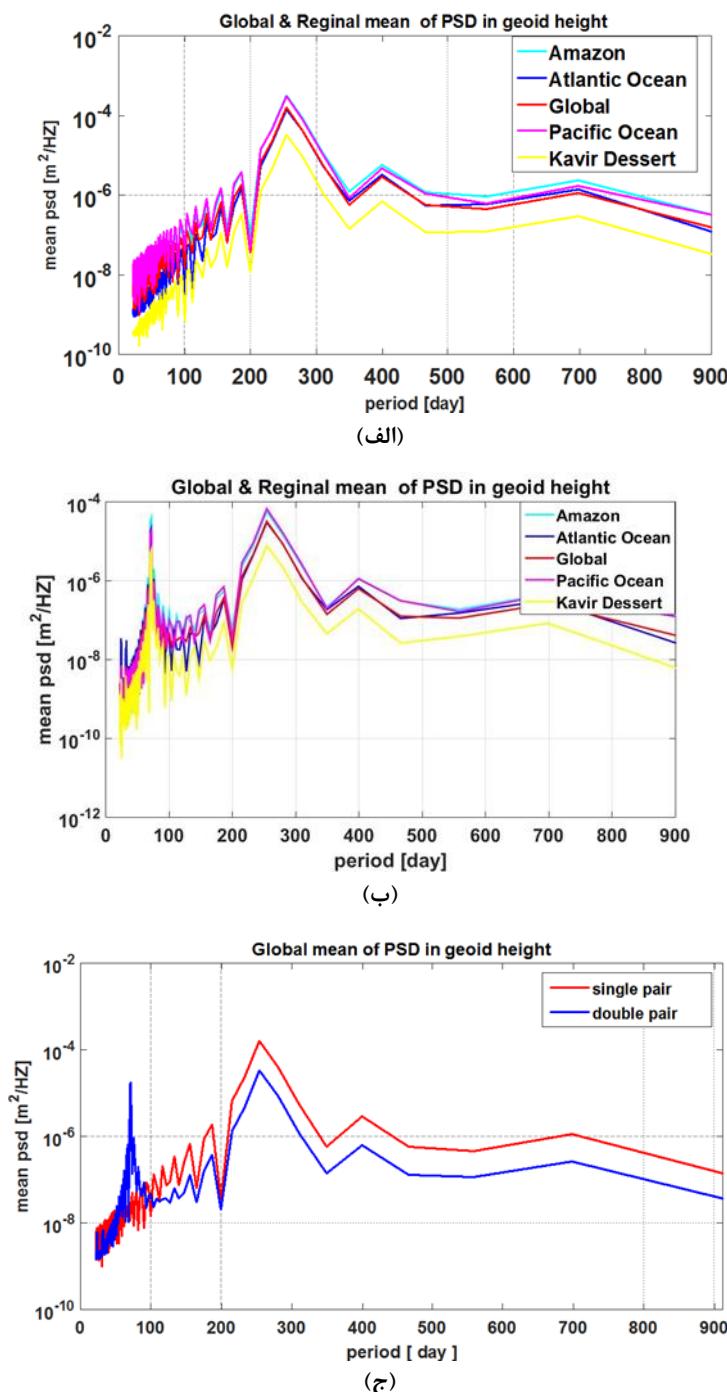
¹ Quick Look Tool (QLT)



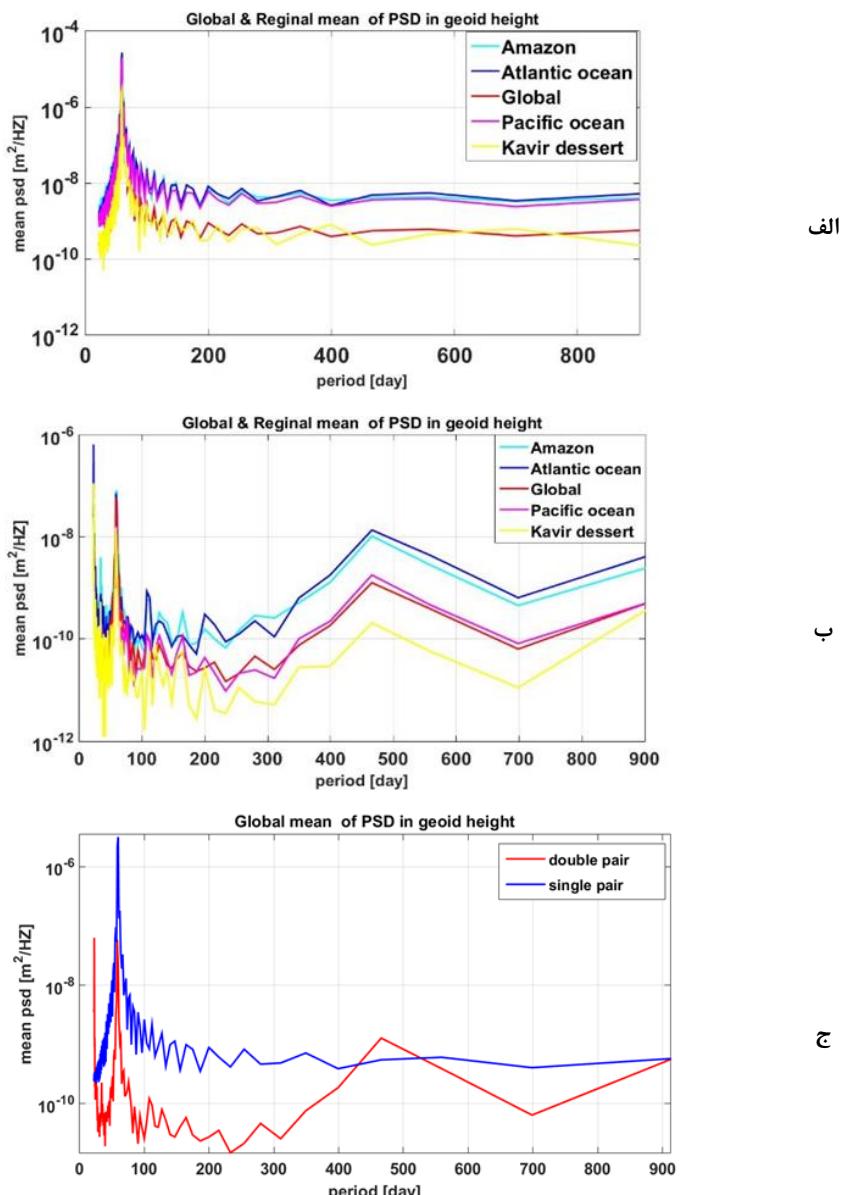
شکل ۵: نمودار PSD میانگین کل کره زمین برای مؤلفه S2. نمودار سمت راست مربوط به یکسال نمونهبرداری است که پریود الیازینگ در آن قابل کشف نیست. نمودار سمت چپ مربوط به ۵ سال داده است که پریود مربوطه در آن مشخص است.

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

آرایش ماهواره	تک‌جفتی	دوچفتی
	دوره تناوب خطای الیازینگ بر حسب 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



شکل ۶: نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید برای مؤلفه S2. (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 بر روی کل کره زمین

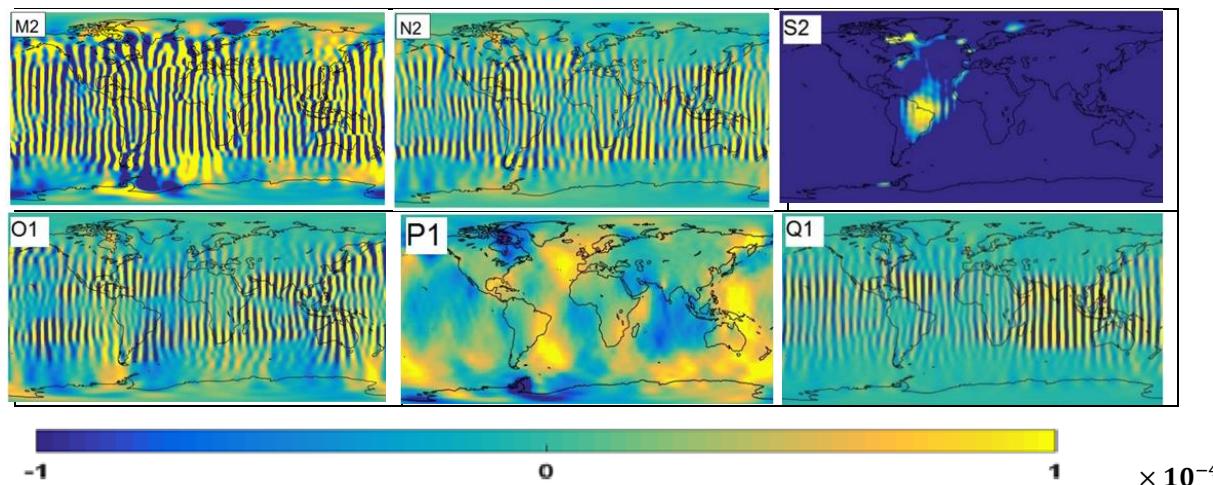


شکل ۷ : نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید جهانی برای مؤلفه N2 . (الف) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش یک جفت ماهواره . (ب) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش دو جفت ماهواره . (ج) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید در دو آرایش مذکور

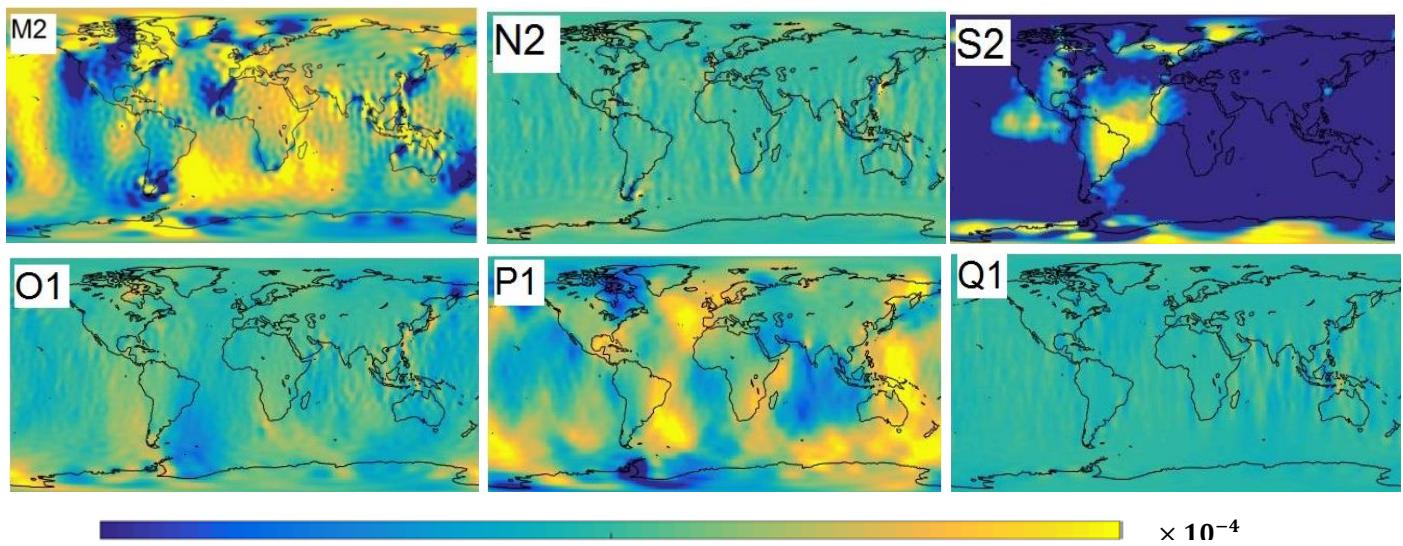
موجود در قسمت ۵ و ۶ نمودارها از ۲۲ روز شروع می‌شوند چرا که کوچکترین دوره تناوب نمونه‌برداری در هر دو آرایش ۱۱ روز بوده و طبق تئوری نایکوئیست^۱ قابل توجیه می‌باشد

¹ Nyquist

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 می‌نماید. در این شکل‌ها دو آرایش با هم مقایسه شده‌اند. در تمامی شکل‌های



شکل ۸: ارتفاع ژئوپید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش تک جفتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی



شکل ۹: ژئوپید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش دوجفتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی یک بازه‌ی زمانی به طور 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 مؤلفه جزر و مدی در یک آرایش ماهواره‌ای مشخص، از اپکی به اپک دیگر متفاوت خواهد بود. همان‌طوری که در شکل (۸ و ۱۰) مشاهده می‌گردد، خطاهای ناشی از جزر و مد اقیانوسی یکسری نوارشده‌ی های محلی^۲ را در آرایش ماهواره‌ای تک‌جفتی

۴-۳- فرآیند کاهش خطای الیازینگ

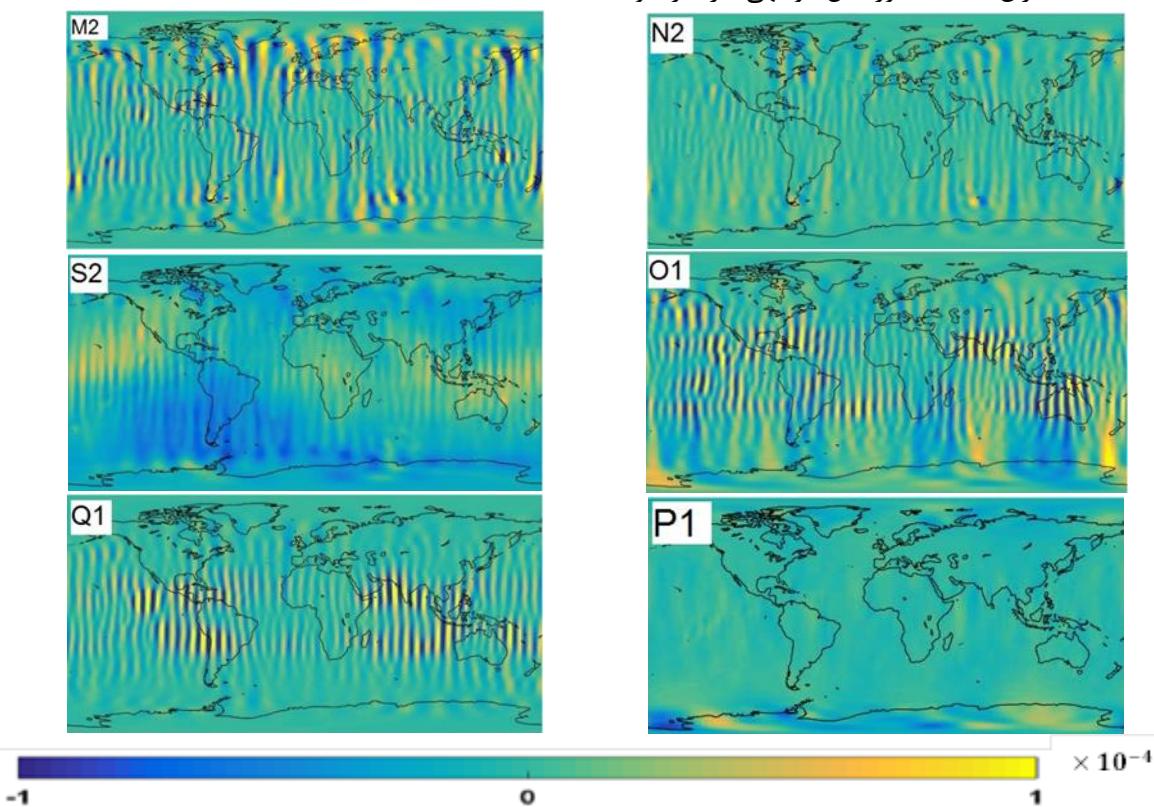
آنالیز کلی: با توجه به آنالیزهای کلی که در قسمت ۲ توضیح داده شد، میدان‌های جاذبه بازیابی شده حاوی مقداری خطای حاصل از جزر و مد بوده که پس از نمونه‌برداری توسط ماهواره‌ها در مشاهدات الیاز می‌شوند. به دلیل کامل نبودن مدل‌های جزر و مدی حتی پس از حل و میانگین‌گیری^۱ خطای الیازینگ به طور کامل حذف نمی‌گردد.

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.

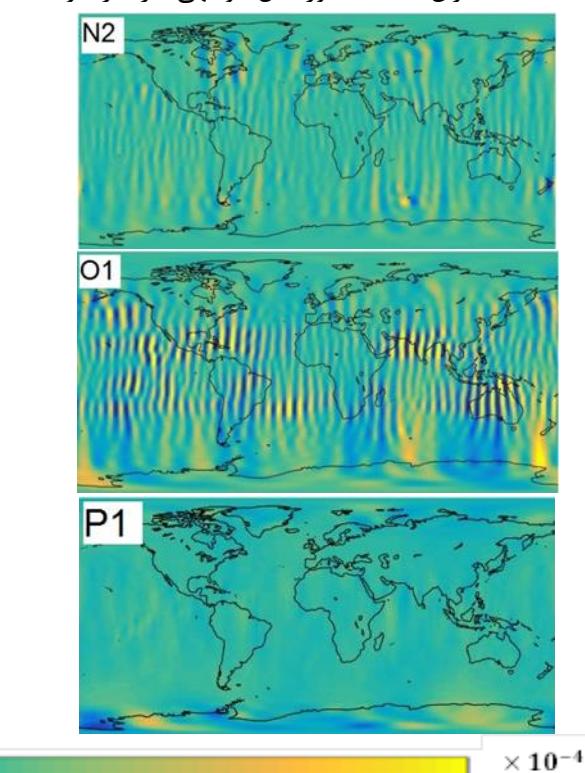
در این مقاله ضرایب هارمونیک کروی متأثر از خطای جزر و مدی را نیز مورد مطالعه قرار داده و میزان تغییر آن‌ها پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ را بررسی می‌نماییم. در شکل (۱۲) مثلث ضرایب هارمونیک کروی تا درجه ۶۰، قبل و بعد از فرآیند حذف خطای الیازینگ برای مؤلفه N_2 در هر دو آرایش ماهواره‌ای مورد نظر نشان داده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

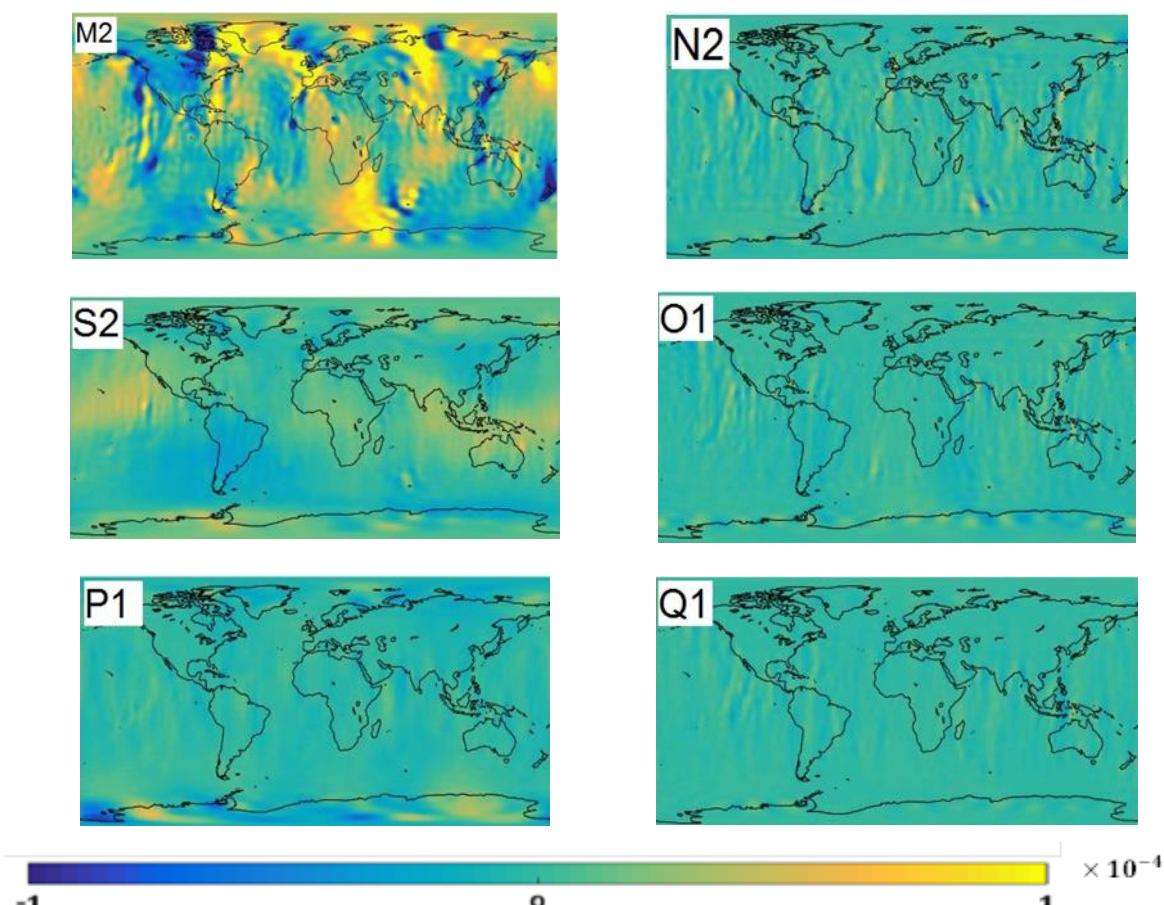


شکل ۱۰: ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش تک‌جفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی

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

شکل (۱۰ و ۱۱) میزان خطای ناشی از جزر و مدی اقیانوسی را پس از حذف خطای الیازینگ نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که در بخش ۲-۴ مفصل 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 خطای به‌طور قابل توجهی در هر دو



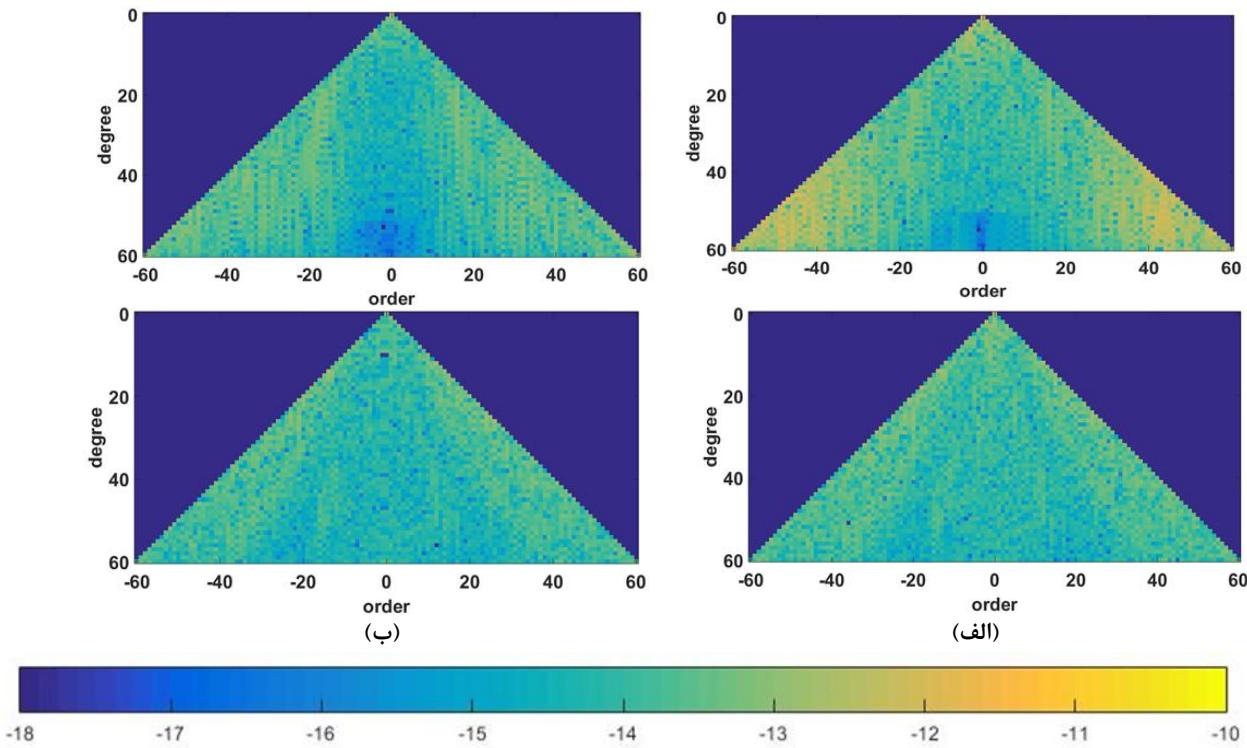


شکل ۱۱: ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش دوچفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای هر مؤلفه جزر و مدی

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 $C_{40,4}$ مولفه 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 $\times 10^{-13}$ می‌رسد و این در حالی است که در آرایش بندر بیشترین مقدار ضرایب $\times 10^{-13}$ 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

^۱ 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 دو جفتی 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.

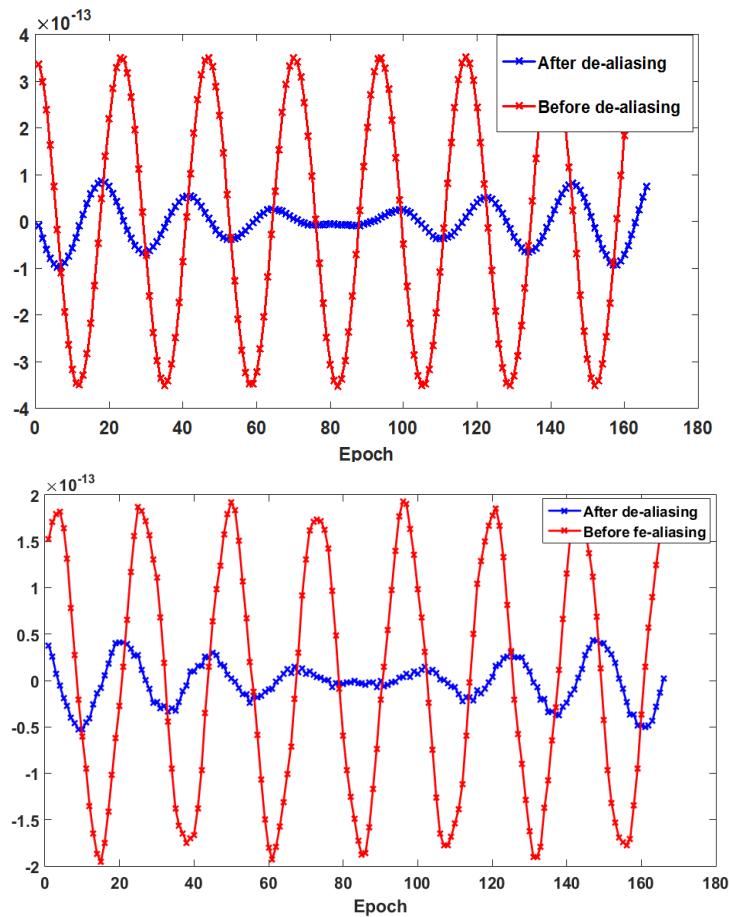
در هر دو آرایش دو جفتی و تک جفتی در بازه های نمونه برداری مختلف، مربع میانگین باقیمانده حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ کیفیت متفاوت دارد که این نتیجه از روی پهنای زیاد نمودار مربع میانگین باقیمانده حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ (نمودارهای آبی رنگ) قابل مشاهده می باشد.

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 دو جفتی 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 ۳۰ به بعد دوباره افزایش می یابد که علت آن ناشناخته است. تقریبا در درجه ۵۰ بیشترین اختلاف در بزرگی، اختلاف بیشتر از یک درجه در مربع میانگین باقیمانده، را بین دو نمودار شاهدیم.
- در آرایش دو جفتی از درجه ۲۰ به بعد، میزان

^۱ Degree RMS



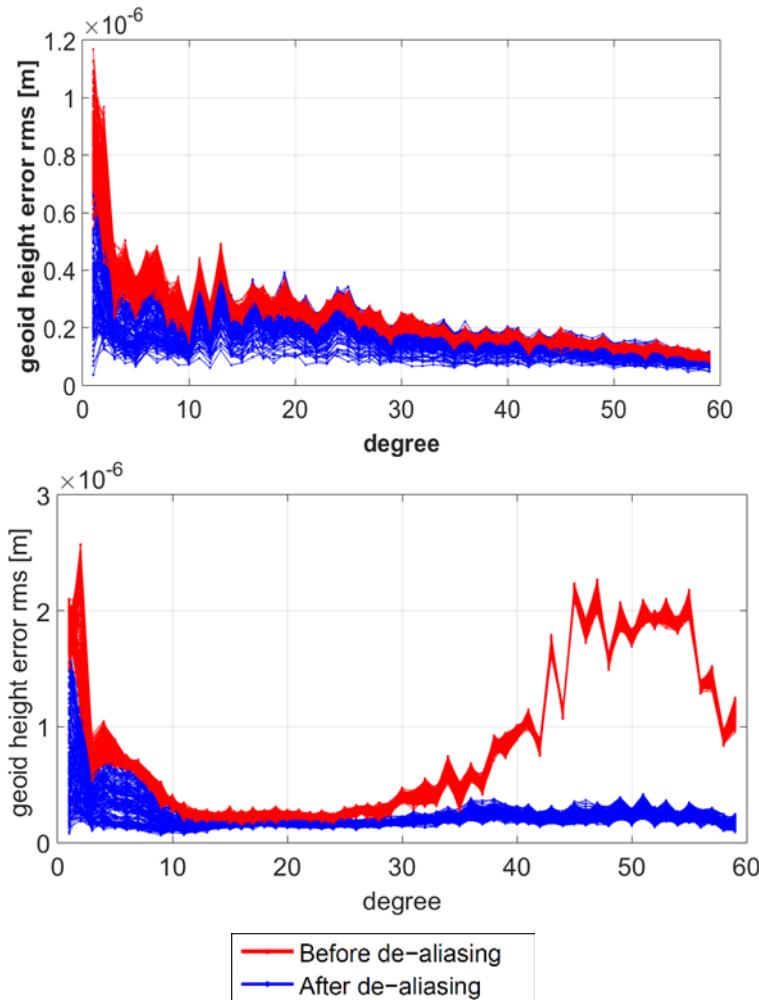
شکل ۱۳: بزرگی ضریب هارمونیک کروی $C_{40,4}$ قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای مؤلفه S2. آرایش تک جفتی (سمت چپ)، آرایش دوجفتی (سمت راست)

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. همان‌طوری که جدول (۴) بیان می‌کند، مؤلفه M_2 در آرایش یک‌جفت ماهواره، نسبت به سایر مؤلفه‌ها بیشترین خطای ایجاد نموده است ($0.25/0.0253$ میلی‌متر) که پس از انجام فرآیند کاهش به $(5/98253)$ در آرایش بندر، با توجه به جدول (۵)، در آرایش محدود با افزایش جفت ماهواره مایل مقادیر خطای میانگین‌مربعات حتی از مقادیر متناظر پس از فرآیند اهش در آرایش یک جفت 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 مدد باقیمانده در سایر مؤلفه‌های جزر و مدد مذکور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، خطای میانگین‌مربعات تغییرات ارتفاع ژئوئید، در سطح تمامی پیکسل‌های کره زمین محاسبه و میانگین تمامی پیکسل‌ها به عنوان خطای میانگین‌مربعات تغییرات ارتفاع ژئوئید، برای هر مؤلفه جزر و مدد معرفی می‌گردد. که مقادیر آن برای دو آرایش ماهواره‌ای یک جفت 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 اشغال شده 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 باقیماندهای خطای الیازینگ باقیمانده ارتفاع ژئوئید مؤلفه N2 قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ. آرایش ماهواره‌ای تک‌جفتی (بالا)، آرایش ماهواره‌ای دوچفتی (پایین).

جفت مایل به ترتیب ۱۱ و ۲۹ روز نودال است. با توجه به اول بودن دو عدد مذکور، می‌توان به گونه‌ای 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

به طور کلی، آرایش دوچفتی نسبت به آرایش تک‌جفتی ارجح تر است، چرا که در این آرایش خطای الیازینگ مخصوصاً در درجات بالا به طور قابل توجهی کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل افزایش نمونه‌برداری در حوزه‌های زمان و مکان باشد. در واقع در آرایش دوچفت ماهواره موردنبررسی در این مقاله، پریودهای نمونه‌برداری جفت‌قطبی و

از منطقه به دست داده و بدین صورت، نمونه برداری 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 مدي Q1، P1، O1، S2، N2، M2 قبل و بعد از فرایند کاهش در آرایش یک ماهواره.

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

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

Q1	P1	O1	S2	N2	M2	مؤلفه جزر و مدي
۰,۰۶۰۱۹	۰,۰۰۶۷۰۱۵	۰,۰۴۰۸۸۶	۰,۰۱۶۱۲۱	۰,۰۹۰۸۳۶	۰,۰۱۴۳۱۳	قبل از فرآیند کاهش (mm)
۰,۰۵۴۱۳۹	۰,۰۰۶۱۵۶۷	۰,۰۱۱۹۰۳	۰,۰۱۱۹۱۳	۰,۰۲۲۸۶۳	۰,۰۰۰۰۱۱۸۹	بعد از فرآیند کاهش (mm)

نرم افزار QLT، برای هر مؤلفه جزر و مدي در دو آرایش ماهواره ای تکجفتی 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 مدي 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 تکجفتی و مشاهدات دوجفتی
- مقایسه حالت قبل از کاهش خطای الیازینگ و پس از آن. نتایج به دست آمده نشان می دهد :

(۱) آرایش دوجفتی نسبت به آرایش تکجفتی 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 مدي باقیمانده با به کار گیری عملگر کمترین مربعات خصوصا در آرایش

۵- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

با توجه به نمونه برداری ناقص از جزر و مدي اقیانوس ها با استفاده از ماهواره ها و همچنین محدودیت دقیق مدل های جزر و مدي به کاربرده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، پس از استفاده از مدل های جزر و مدي، باز هم مقداری خطأ در میدان جاذبه بازیابی شده باقی می ماند که یکی از مشکلات اساسی مشاهدات ثقل سنجی ماهواره ای به شمار می آید. در این مقاله هدف برخورد با الیازینگ خطاهای باقیمانده جزر و مدي می باشد که در این راستا با به کار گیری روش برآورد کمترین مربعات بر روی اثرات جزر و مدي بازیابی شده، فرآیند کاهش خطای الیازینگ انجام شد و میزان تاثیر آن برای هر دو آرایش تکجفتی 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 مدي باقیمانده (اختلاف دو مدل جزر و مدي) برای ۶ مؤلفه جزر و مدي (M₂، N₂، S₂، P₁، O₁، 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

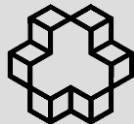
- بررسی عملکرد روش کمترین مربعات در کاهش خطای الیازینگ بود. در این روند به بزرگی پریوودهای اصلی و میزان دوری و نزدیکی آن‌ها به سیگنال‌های مطلوب نظر سالیانه، نیم سالیانه و ... توجهی نشده است. بنابراین امکان حذف این پریوودها و هم چنین یکسری سیگنال‌های ناشناخته که مهم هستند وجود دارد که یکی از معایب این 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 غیرتکراری داشته باشیم و یا اینکه مدار آرایش ماهواره‌ای موردنظر به دلایلی از قبیل اصطکاک اتمسفری، نیروی فشار خورشیدی و ... عوض شود. در چنین شرایطی متودهایی برای رویارویی با این مسئله پیشنهادشده است که خارج از بحث این مقاله می‌باشد.
- (۷) در این مقاله پریوود نمونه‌برداری 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.

- یکجهت ماهواره به طور قابل توجهی 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 $0/094$, $0/045$, $0/026$, $0/012$, $0/022$ و $0/098$ میلی‌متر تقلیل یافته است ولی به طور 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.
 - نمونه‌برداری ناقص در حوزه مکان
 - (۳) از جمله دلایل مهم شباهت رفتاری مناطق آبی و غیرآبی، نشت طیفی معرفی می‌شود چرا که خاک به تنهایی در سیگنال تأخیر فاز ایجاد کرده و الگوی متفاوتی به دست می‌دهد. به‌منظور کاهش این خطأ در مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای، نیاز است که طول داده در دسترس افزایش یابد.
 - (۴) برآورد کمترین مربعات در بازه‌های نمونه‌برداری مختلف، بازدهی متفاوتی دارد که رنج تغییر آن بسیار زیاد می‌باشد. بنابراین کیفیت داده‌های حاصل پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ، به بازه‌ی نمونه‌برداری نیز بستگی پیدا می‌کند که علت آن می‌تواند موضوع خوبی جهت بررسی بیشتر باشد.
 - (۵) همان‌طور که قبل این گردید، در این مقاله هدف

مراجع

- [1] C. Reigber, P. Schwintzer, and H. L. "ühr, "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
- [7] 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
- [14] 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 gradiometric 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 constituent. 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.

Correspondence Address Geodesy Group, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Tel: +98 9133353977.
Email: : fghasseri@yahoo.com