نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری

سال پنجم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۶
Vol.5, No.1, Spring 2017
۶۵-۸۷

# 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 [1*] ، سیاوش ایران پور [2] ، علیرضا امیری سیمکویی [3] ، وهاب نفیسی [3]

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 قابل‌توجهی 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 قابل‌توجهی 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، 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 قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

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

نویسنده مکاتبه‌کننده: فروزان قاصر، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشگده فنی و مهندسی،گروه مهندسی نقشه‌برداری
تلفن: ۰۹۱۳۳۳۵۳۹۷۷

Email: fghasser@yahoo.com

[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

## ۱- مقدمه

مأموریت فضایی گریس[1]، 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. ازجمله این تغییرات می‌توان به ذوب یخ‌ها، منابع آب‌های زمینی و افزایش سطح آب دریاها، اشاره نمود [۱و 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 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 بالابر روی سیگنال‌های میدان جاذبه با طول موج بلند الیاز[2] می‌شوند که یکی از مشکلات اساسی مشاهدات ثقل سنجی ماهواره‌ای به شمار می‌آید. در ماموریت گریس، دقت میدان جاذبه بازیابی شده به فاکتورهای زیادی بستگی دارد که می‌توان به نویز مشاهدات و خطای الیازینگ[3] اشاره نمود. در گریس، بزرگی نویز مشاهدات از خطای الیازینگ حاصل از جزر و مد بیشتر است. با این حال، در آینده‌ی نزدیک به‌جای امواج مایکرویو در سیستم ردیابی دو ماهواره (ll-SST )[4]، از اشعه‌ی لیزر و شتاب سنج[5] استفاده می‌شود.

در این صورت پیش‌بینی می‌شود که خطای حاصل از الیازینگ جزر و مدی تقریبا 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 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[6] به‌منظور کاهش خطای الیازینگ از فیلتر گوسین[7] استفاده نمودند. همچنین سنسون[8] و واهر در سال ۲۰۰۶ با استفاده از فیلتر خطای وابسته، نوار شدگی‌های حاصل از خطای الیازینگ را کاهش دادند[9] [۷]. اگرچه امروزه تأثیر این فیلترها محدود شده است[۸]. پارکه و همکاران[10] نیز در سال ۱۹۸۷ پریود خطای الیازینگ جزر و مدی را برای داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای محاسبه نمودند[۹].

درصورتی‌که 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. همان‌طوری‌که ویسر و همکاران این پریودها 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 :

[1] Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)
[2] Alias
[3] Aliasing
[4] Low Low Satellite to Satellite Tracking
[5] Accelerometer
[6] Wahr, J. et al.
[7] Gaussian filter
[8] Swenson, S.
[9] de-stripping
[10] Parke, M.E. et al.



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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 اشاره‌شده، در مرحله پس پردازش فرآیند کاهش خطای الیازینگ[1] انجام‌گرفته و میزان تاثیر 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 $M_2$ ، $N_2$ ، $S_2$ ، $O_1$ ، $P_1$ و $Q_1$ 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 بخش۲-۲، داده‌ها و آرایش‌های مورد استفاده در روند شبیه‌سازی معرفی می‌گردند. بخش ۳ روندکار و روش مورد استفاده در فرآیند کاهش خطای الیازینگ به‌طور مختصر توضیح داده‌شده است. در بخش ۴ پریود 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 مرور می‌گردند.

### ۲-۱- مشاهدات ثقل‌سنجی 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 مأموریت امکان اندازه‌گیری میدان ثقل متغیر بازمان فراهم آمد. همچنین مأموریت برای دستیابی به اندازه‌گیری‌های انتقال‌های جرم با قدرت تفکیک مکانی بالا، در سیستم زمین مناسب بود. ماموریت گریس اصلی برای مدت‌زمان ۵ سال در مدار طراحی‌شده بود. منظور از مأموریت گریس مانند در این مقاله مأموریتی با مشخصات مأموریت اصلی می‌باشد که می‌تواند تکنولوژی آن برحسب امواج مایکرویو باشد یا بر اساس اشعه لیزر و شتاب‌سنج‌های دقیق طراحی گردد که در این صورت به آن ماموریت گریس مانند (GFO[2]) 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 $\alpha$ و $\beta$ مشخص نمی‌باشند. بنابراین در این مقاله GFO مورد بررسی با آنچه عموما شناخته‌شده است، تفاوت دارد. گریس از دو ماهواره با گیرنده‌های جی پی اس GPS[3] قوی به‌منظور تعیین موقعیت لحظه‌ای مدار استفاده می‌کند. دو ماهواره تقریبا بر روی یک مدار دایره‌ای حرکت می‌کنند. این مأموریت از امواج مایکرویو به‌منظور تعیین فاصله میان دو ماهواره استفاده می‌نمود. فاصله‌ی بین دو ماهواره تقریبا ثابت است. این فاصله به‌طور میانگین ۲۲۰ کیلومتر

[1] de-aliasing

[2] GRACE Follow-On
[3] Global Positioning System



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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 تقریبا $1\times10^{-10}$ m/s برآورد می‌گردد. در این پژوهش آرایش دقیقا شبیه به گریس می‌باشد و دو ماهواره به‌صورت خطی در مسیری همدیگر را دنبال می‌کنند که با صفحه استوا زاویه ۸۹ درجه دارد. همانطوری‌که در شکل (۱) مشخص است حرکت آن‌ها تقریبا قطبی می‌باشد. روش نمونه‌برداری ماهواره‌ها در راستای محور حرکت[1] بوده که باند A تا K امواج مایکرویو 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 دوجفتی شبیه‌سازی‌شده‌اند که به‌ترتیب از آرایش‌های گریس و بندر[2] استفاده نمودیم. بندر آرایشی با مشخصات گریس می‌باشد که از دو جفت ماهواره که یک جفت قطبی و جفت دیگر مایل حرکت می‌کنند تشکیل‌شده است. بندر هنوز راه‌اندازی نشده است. این آرایش نسبت به آرایش‌های تک‌جفتی رایج گریس، مزیت‌های زیر را دارد [۱۲]:

- امکان افزایش هم‌زمان قدرت تفکیک زمانی و مکانی در طول زمان نمونه‌برداری
- کاهش رفتار نوار نوارشدگی[3]

ماموریت‌های شبیه‌سازی‌شده آرایش خطی داشته و بر روی مدار دایره‌ای به‌صورت تکراری یکدیگر را دنبال می‌کنند. به‌عبارتی دیگر، الگوی زمینی مسیر[4] این ماموریت $\beta$ دور کامل را در $\alpha$ روز نودال تکرار می‌نماید. پارامترهای مداری مأموریت‌های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه‌شده است. این پارامترها توسط سازمان فضایی اروپا (ESA)[5] طی پروژه ESA SC4MGV تعیین‌شده‌اند.

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

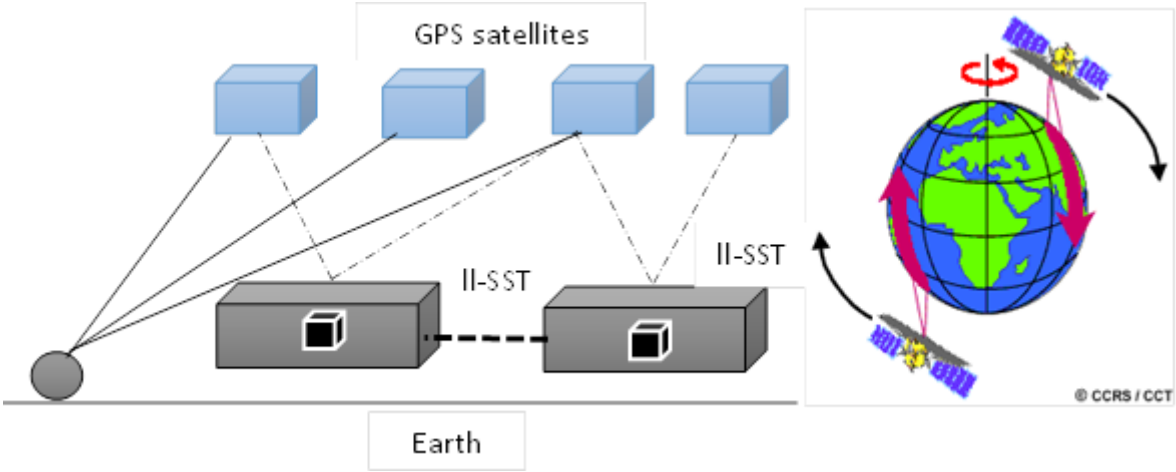
همان‌طور که قبلا بیان گردید، جزر و مد آب‌ها خود را در فرکانس‌های بالا نشان می‌دهند و این در حالی است که ماهواره‌های ماموریت گریس اطلاعات ثقل‌سنجی را در فرکانس‌های پایین در اختیار کاربران قرار می‌دهند. همین امر موجب کاهش قدرت تفکیک در حوزه‌ی زمان و مکان و نمونه‌برداری ناقص می‌گردد. بدین ترتیب فرکانس‌های بالا بر روی سیگنال‌های میدان جاذبه با طول موج بلند الیاز می‌شوند. ازجمله 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 به‌دلیل وجود شکاف[6] 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 به‌صورت موج کسینوسی است، در اثر

[1] Along Track
[2] Dual pair GRACE inline (Bender)
[3] Stripping
[4] Ground Track
[5] European Satellite Agency
[6] Gap



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

سرعت نمونه‌برداری پایین، در امواج جزر و مد که فرکانس بالایی دارد گم شده و امکان تشخیص آن وجود ندارد. در صورت حذف خطای الیازینگ سیگنال اصلی به‌خوبی نمایان می‌گردد.




**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 برحسب km | زاویه میل (I) | مدارتکراری (6/α) | نوع آرایش ماهواره |
|---|---|---|---|
| ۳۶۲ | ۹۲° | ۱۷۲/۱۱ | قطبی |
| ۳۴۲ | ۱۱۵° | ۴۶۰/۲۹ | مایل |

**شکل ۲ : نمایش شماتیک خطای الیازینگ . در شکل سمت چپ سیگنال اصلی در نقاط سیاه به‌طور ناقص نمونه‌برداری شده است همین امرموجب ایجاد خطای الیازینگ شده وامکان 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.**

در این مقاله تنها خطای الیازینگ زمانی درنظرگرفته‌شده است. چرا که در صورت در نظرگرفتن این خطا 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. ازجمله این سیگنال‌های می‌توان به تأثیر اتمسفر، اقیانوس و تمامی مؤلفه‌های جزر و مدی اشاره نمود.

به‌منظور کاهش خطای الیازینگ ناشی از جزر و مد 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[1] به‌طور کامل حذف نمی‌گردد.

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

[1] Gravity solution



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

امکان محاسبه‌ی فرکانس الیازینگ برای هر مولفه‌ی جزر و مدی وجود دارد. هر ماهواره در مدار تکراری $\beta/\alpha$، $\beta$ دور کامل را در $\alpha$ روز نودال طی می‌کند که $\alpha$ و $\beta$ نسبت به هم اعداد اول هستند. طبق تئوری CNR[1] ، در یک منطقه جغرافیایی، بیشترین فرکانس قابل تشخیص $f_N$ (فرکانس نایکوئیست)[2] از فرمول (۱) قابل محاسبه می‌باشد. به‌دلیل تغییر مکان ماهواره گریس بر روی مسیر طی طریق ماهواره شاهد تغییر فاز مولفه‌های جزر و مدی می‌باشیم [۷] .

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

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

$$T_{rep} = \alpha$$ رابطه (۲)

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 قابل محاسبه می‌باشد[۵] :

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

## ۲-۳- الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده

به‌منظور تولید داده‌های شبیه‌سازی شده میدان جاذبه و بازیابی آن‌ها از نرم‌افزار شبیه‌سازی QLT[3] 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، 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 شتاب رنج[4] میان دو ماهواره می‌باشد که در آن سمت چپ مشاهدات و پتانسیل زمانی زمین، $V$، نیز در اپک‌های مشاهداتی موردنظر مجهول می‌باشد. (رابطه (۴))

در رابطه (۴)، $\rho$ رنج ، $\dot{\rho}$ نرخ رنج و $\ddot{\rho}$ شتاب رنج میان دو ماهواره می‌باشد. $\Delta\dot{\mathbf{r}}_{12}$ سرعت نسبی میان دو ماهواره و $\boldsymbol{e}_{12}$ بردار واحد بین دو ماهواره را نشان می‌دهد. عبارت $\frac{1}{\rho(t)}((\Delta\dot{\mathbf{r}}_{12})^2-\dot{\rho}^2)$ شامل شتاب‌های گریز از مرکزی است که تعیین آن‌ها با دقت بالا کار ساده‌ای نیست. در این روش بازیابی با انتقال این جمله به‌سمت چپ معادله و در نظر گرفتن آن به‌عنوان 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، $\nabla V(\boldsymbol{r}_1(t))$ و $\nabla V(\boldsymbol{r}_2(t))$، 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 محاسبه‌شده و به‌عنوان مشاهدات درنظر گرفته می‌شود. با تشکیل سیستم معادلات مشاهدات و استفاده از عملگر کمترین مربعات[5]، پتانسیل زمانی در زمان میانه هر اپک مشاهداتی در قالب ضرایب هارمونیک کروی $C_{nm}$ و $S_{nm}$ برآورد می‌گردد (شکل (۳)).

[1] Colombo- Nyquist Rule
[2] Nyquist frequency
[3] Quick Look Tool
[4] Range-acceleration
[5] Least Square Estimation (LSE)



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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

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 بعدا با یک ابزار واقعی‌تر انجام داد که در آن می‌توان مشاهدات را به‌صورت مستقیم با ارزیابی سمت چپ رابطه (۴) به‌دست آورد. منظور از داده‌های واقعی در این پروژه می‌تواند داده‌های شبیه‌سازی شده به روش انتگراسیون مداری[1] 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 تحت‌تأثیر 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 به‌کاربرده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، باز هم مقداری خطا 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 استفاده‌شده است. مدل‌های مذکور در دو مرکز تحقیقاتی مختلف تهیه‌شده‌اند و از داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات تایدگیج‌های زمینی، پرتونگارهای صوتی و تلفیق این مشاهدات به‌دست‌آمده‌اند؛ بنابراین آن‌ها را مستقل[2] در نظر می‌گیریم و بر این مبنا از اختلاف دو مدل در این مقاله استفاده می‌نماییم همان‌طوری‌که در بخش۲-۱ بیان گردید، امواج جزر و مدی با فرکانس بالا برروی سیگنال‌های مشاهدات ثقل‌سنجی ناشی از تغییرات جرم درونی زمین الیاز می‌شوند. خطای الیازینگ در حل‌های سالانه، ماهانه و حتی روزانه هم وجود دارد و به‌دلیل کامل نبودن مدل‌های جزر و مدی حتی پس از حل و میانگین‌گیری[3] 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. درحالیکه 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

[1] Orbit Integration

[2] منظور از مدل‌های مستقل، مدل‌هایی هستند که از داده‌های متفاوت مثلا داده های حاصل از تاید گیج و داده‌های پرتونگاری صوتی به‌دست آمده‌اند.

[3] Gravity solution



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

اعداد دودسون[1] و همچنین عدد لود[2] 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. به‌منظور 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 حل‌شده تنها شامل اطلاعات جزر و مدی می‌باشد که مشخصات شبیه‌سازی در جدول (۲) ارائه‌شده 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 به‌دلیل فرض استفاده از پرتو لیزر و شتاب‌سنج‌های دقیق جهت انجام مشاهدات، میزان خطای دستگاهی بسیار کاهش‌یافته و عملا از آن چشم‌پوشی می‌شود.

[1] Doodson number
[2] Load number
[3] Hydrology
[4] Ice
[5] Solid Earth
[6] Atmosphere-Ocean

## ۳- روش مورد استفاده

همان‌طوری‌که 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 و۵]. جهت محاسبه پریود الیازینگ مؤلفه‌های جزر و مدی رابطه تحلیلی که در آن پریود میانگین‌گیری نیز وجود داشته باشد تاکنون تعریف‌نشده 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) به‌منظور 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 مؤلفه جزر و مدی، با محاسبه‌ی چگالی توان طیفی[7] خطای باقیمانده جزر و مد که برحسب اختلاف ارتفاع ژئوئید بیان‌شده است، مشخص می‌گردد که در حالت تقریبی جواب‌ها با فرمول تحلیلی مطابقت دارد و به این دلیل است که بازه‌ی حل میدان جاذبه[8] و دوره تناوب نمونه‌برداری یکسان می‌باشد (۱۱روز).

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 عنوان‌شده است :

[7] Power Spectrum Density (PSD)
[8] Gravity solution

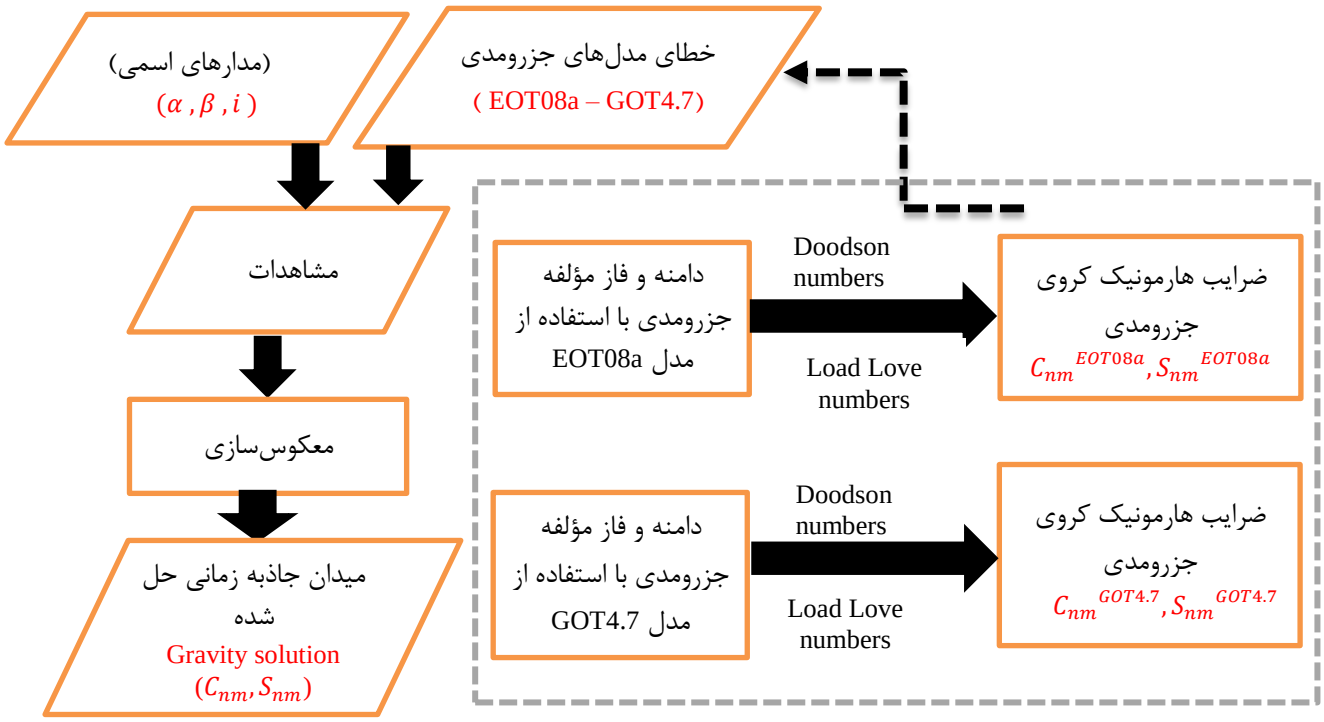


[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

۱) پس از بازیابی میدان جاذبه با پریود حل مشخص (۱۱ روزه)، بر روی منطقه یک شبکه با قدرت تفکیک ۱° ×۱° قرار داده و به هر پیکسل تغییر ارتفاع ژئوئید ناشی از خطای مدل‌های جزر و مدی، $\Delta N$ ، نسبت داده می‌شود که طبق رابطه (۵) در هر اپک میانگین‌گیری قابل محاسبه است:

**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 | $M_2$ ، $N_2$ ، $S_2$ ، $O_1$ ، $P_1$ و $Q_1$ | 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**

رابطه (۵)

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

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

رابطه (۶)

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

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

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:

رابطه (۷)

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

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

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

رابطه (۸)

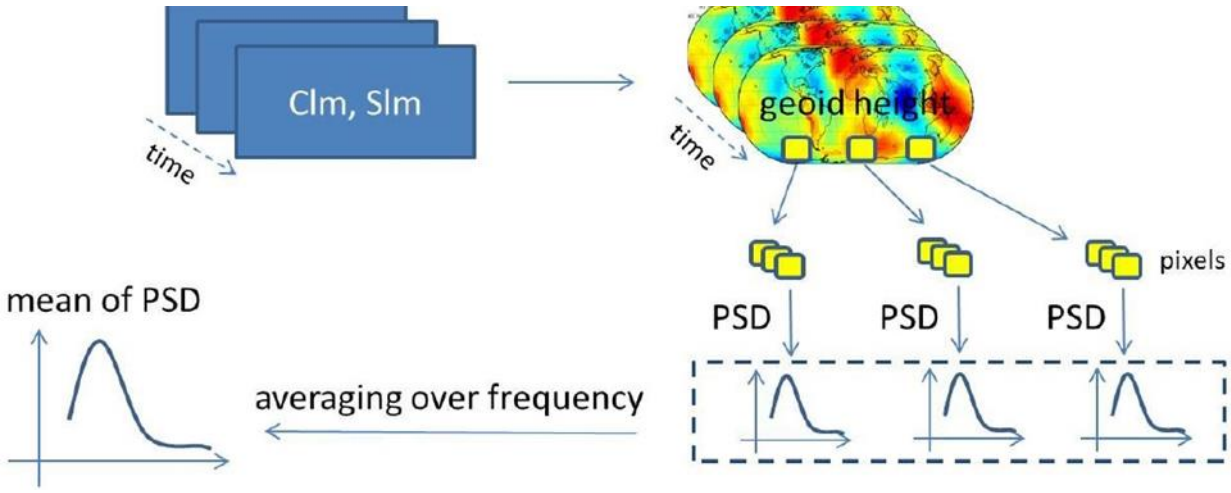
$$PSD(f) = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n^2 + b_n^2) = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty} A_n^2$$

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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

ارتفاع ژئوئید محاسبه گردیده و نشان داده می‌شود. شکل (۴) روند بالا را به‌طور شماتیکی نشان می‌دهد. در قسمت ۴-۲ نتایج حاصل از این روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است .




**شکل ۴ : فلوچارت محاسبه‌ی 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 برآورد کمترین مربعات بر روی سری‌های زمانی، امکان برآورد دامنه‌ی هر مولفه‌ی 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)

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

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

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 مولفه‌ی 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 سرشکن‌شده مربوط به هر مؤلفه جزر و مدی که پریود الیازینگ آن $T_a$ است، به‌عنوان مشاهدات سرشکن‌شده 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 کاهش‌یافته، $\hat{C}_{lm}^{dealias}$ و $\hat{S}_{lm}^{dealias}$ ، وجود دارد که همان بردار باقیمانده‌های سرشکن‌شده در روند سرشکنی می‌باشد و از رابطه (۱۰) در هر اپک میانگین‌گیری قابل دستیابی است:

رابطه (۱۰)

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

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

## 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.



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

### ۴-۱- داده‌های مورد استفاده

به‌منظور پیاده‌سازی روش‌های موردمطالعه، در این پروژه از داده‌های یک‌ساله و ۵ ساله مأموریت گریس مانند تک‌جفتی و دوجفتی که به‌عنوان آرایش‌های بهینه در نظر گرفته‌شده‌اند، استفاده می‌گردد (جدول (۱)). با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی موردنظر[1]، حل‌های زیر ماهانه (۱۱روزه) 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 ۱۱روز 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 داده‌شده 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 ۲-۱ بیان گردید، پریود 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 و۶)) و می‌توان در مورد سایر مؤلفه‌ها نیز همین تحقیقات را انجام نمود. همان‌طوری‌که 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 ۲۵۴×۲ 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 تقریبا در فرکانس‌های یکسان روند یکسانی را طی می‌کند و میزان اختلاف آن‌ها خیلی اندک می‌باشد.

همان‌طوری‌که در شکل‌های (۶ و۷) 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[2] 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 و۷-ب) نمودار PSD مناطق مختلف را برای دو جفت ماهواره نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۶-ج و۷-ج) نیز PSD جهانی[3] 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.

[1] Quick Look Tool (QLT)

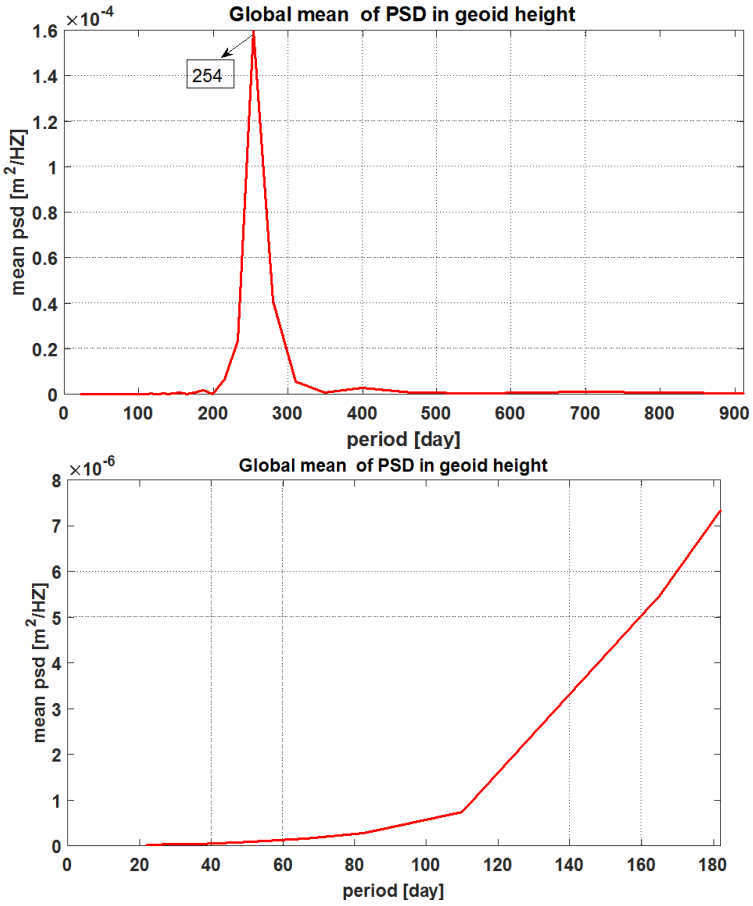
[2] Solid Earh

[3] Global



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]




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.

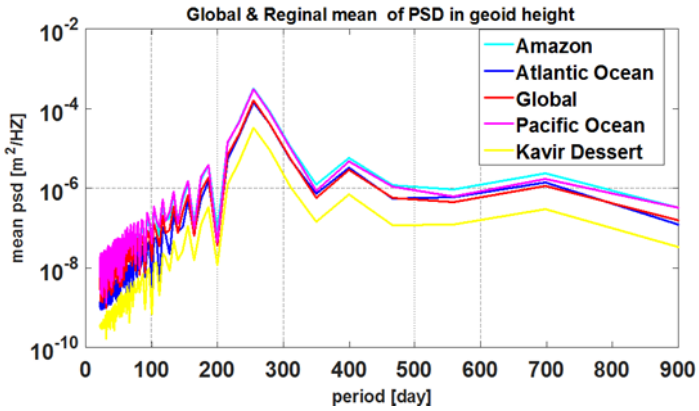
جدول ۳ : پریودهای اصلی الیازینگ مولفه‌های جزر و مدی در دو آرایش تک‌جفتی و دوجفتی

| آرایش ماهواره | تک‌جفتی | دوجفتی |
|---|---|---|
| | دوره تناوب خطای الیازینگ برحسب روز خورشیدی | |
| M2 | ۵۰/۸ | ۵۱/۷۴, ۲۶/۶۱ |
| N2 | ۵۹/۴۵ | ۴۶۵/۷و 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 |

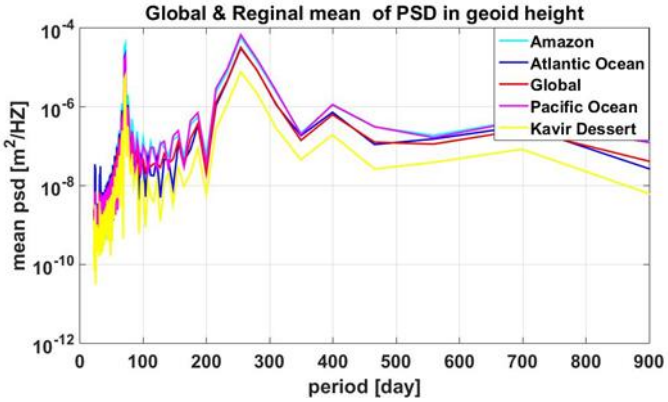


[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

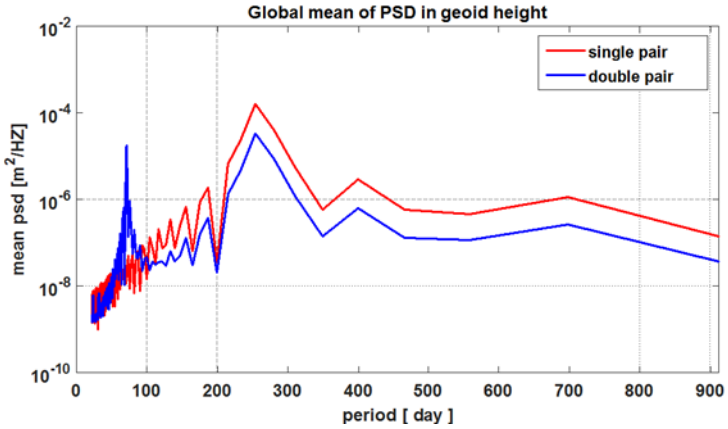
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]




(الف)




(ب)



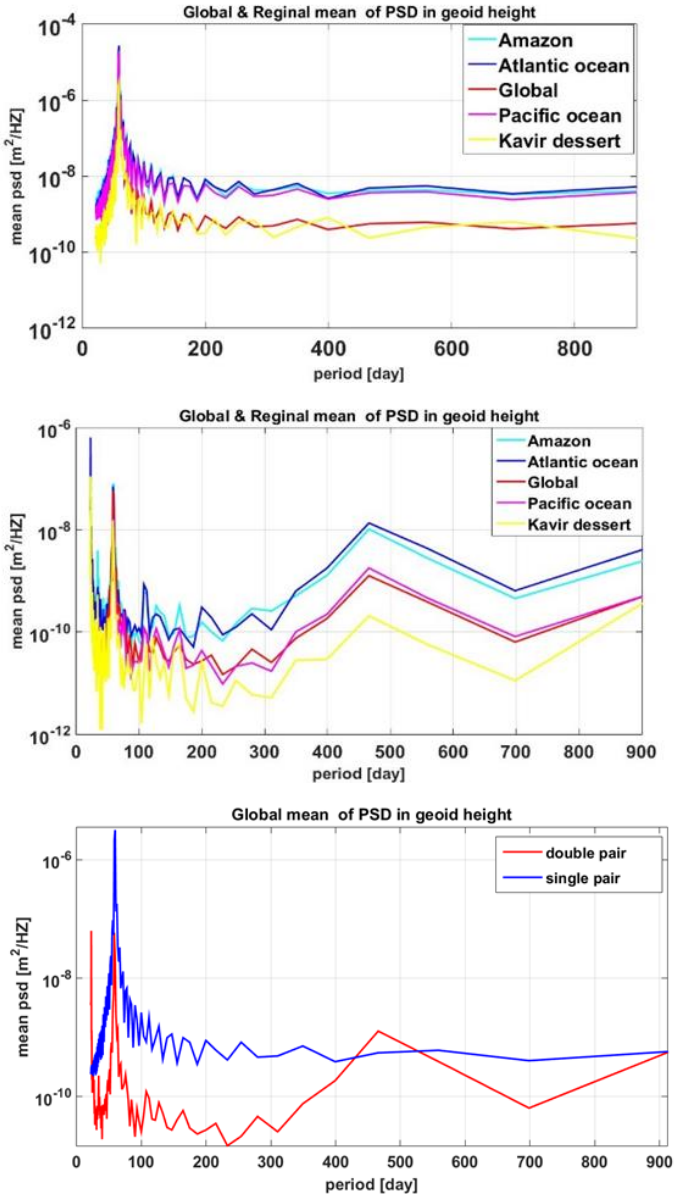

(ج)

**شکل ۶ : نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید برای مؤلفه‌ی 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**



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]



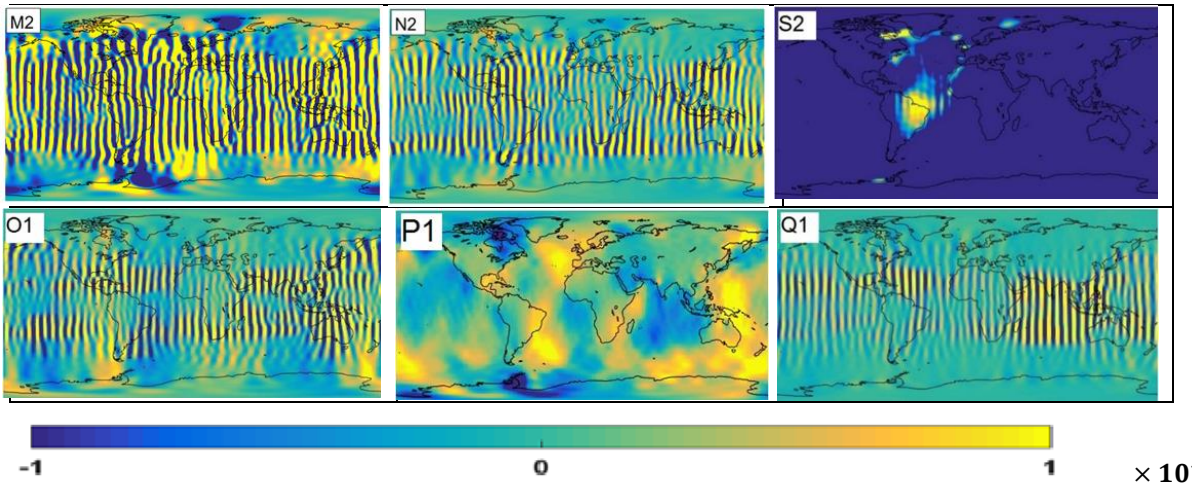

**شکل ۷ : نمودار PSD میانگین ارتفاع ژئوئید جهانی برای مؤلفه‌ی N2 . الف ) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش یک جفت ماهواره . ب) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید مناطق آبی و غیرآبی و جهانی برای آرایش دو جفت ماهواره . ج) PSD میانگین ارتفاع ژئوئید در دو آرایش مذکور**

شکل (۸و 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 موجود در قسمت ۵ و۶ نمودارها از ۲۲ روز شروع می‌شوند چرا که کوچکترین دوره تناوب نمونه‌برداری در هر دو آرایش ۱۱ روز بوده و طبق تئوری نایکوئیست[1] قابل توجیه می‌باشد

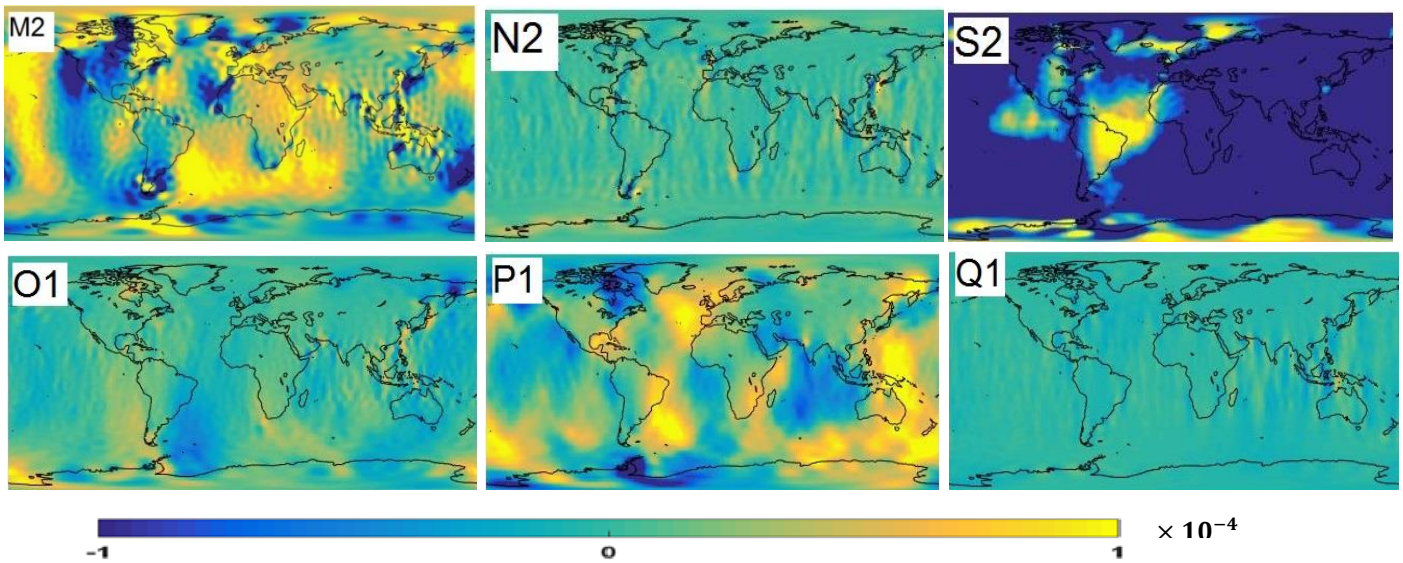
[1] Nyquist



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]




**شکل ۸ : ارتفاع ژئوئید بر روی نقشه کره زمین برای آرایش تک‌جفتی 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 نمونه‌برداری توسط ماهواره‌ها در مشاهدات الیاز می‌شوند. به دلیل کامل نبودن مدل‌های جزر و مدی حتی پس از حل و میانگین‌گیری[1] 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 اپک دیگر متفاوت خواهد بود. همان‌طوری‌که در شکل (۸ و ۱۰) مشاهده می‌گردد، خطاهای ناشی از جزر و مد اقیانوسی یکسری نوارشدگی‌های محلی[2] را در آرایش ماهواره‌ای تک‌جفتی

[1] Gravity solution

[2] Local stripping



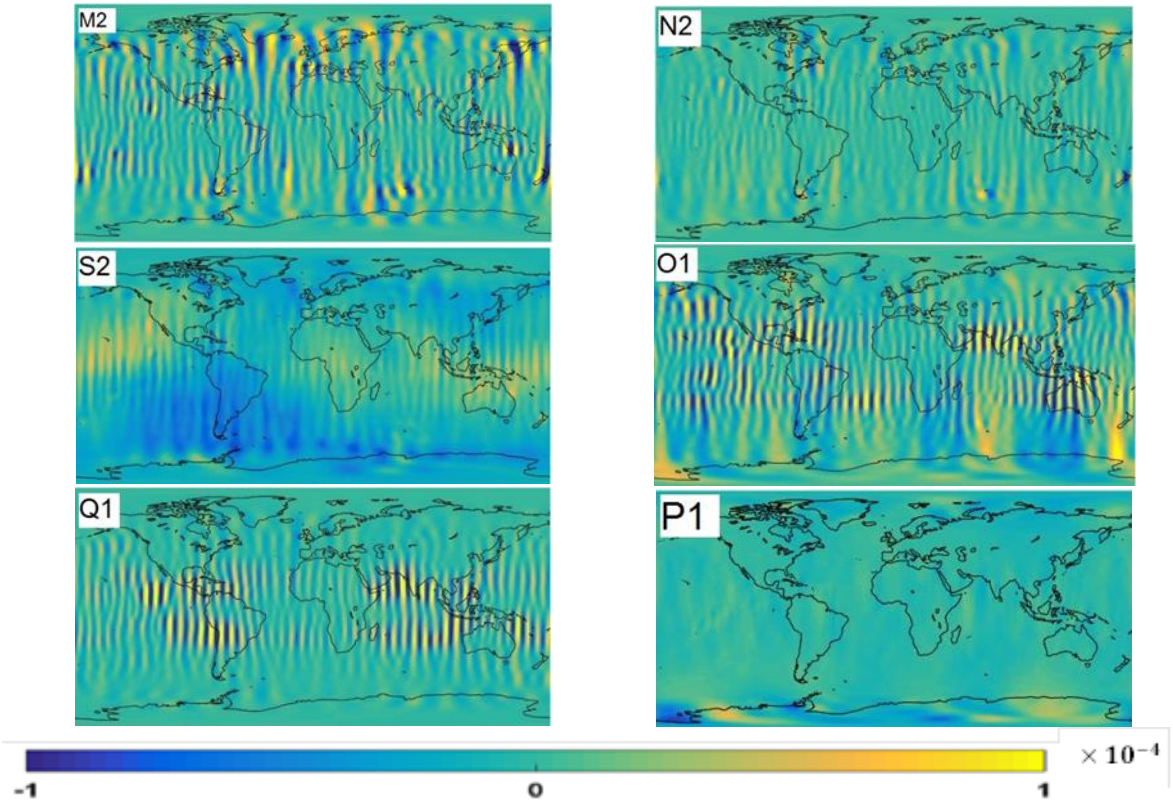
[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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 به‌دست 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. همان‌طوری‌که در بخش ۴-۲ مفصلا 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 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 به‌صورت مجموع توابع سینوسی در تعداد فرکانس محدود نشان داد. دلیل دیگر نیز نمونه‌برداری ناقص در حوزه‌ی زمان یا مکان است.

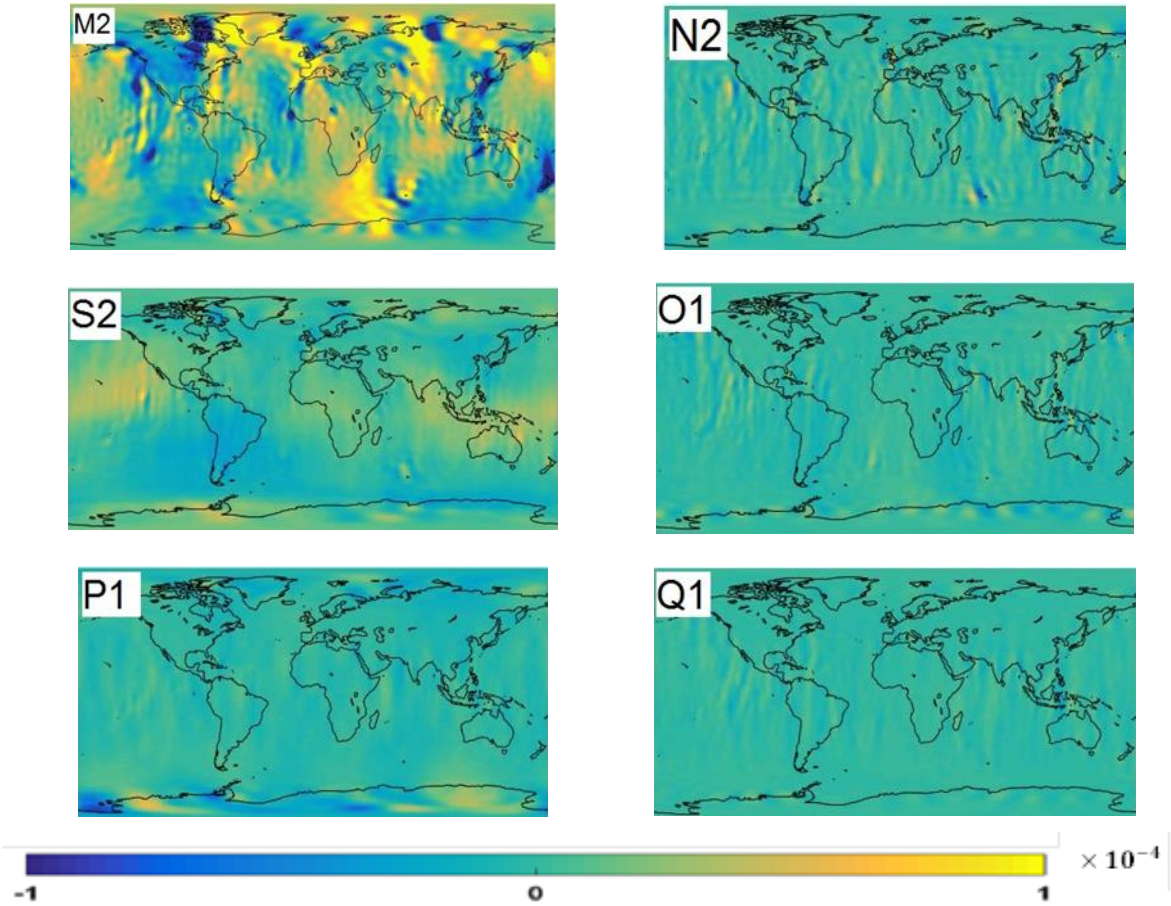
در این مقاله ضرایب هارمونیک کروی متأثر از خطای جزر و مدی را نیز مورد مطالعه قرار داده و میزان تغییر آن‌ها پس از فرآیند کاهش خطای الیازینگ را بررسی می‌نماییم. در شکل (۱۲) مثلث ضرایب هارمونیک کروی تا درجه ۶۰، قبل و بعد از فرآیند حذف خطای الیازینگ برای مؤلفه $N_2$ در هر دو آرایش ماهواره‌ای موردنظر نشان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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]




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

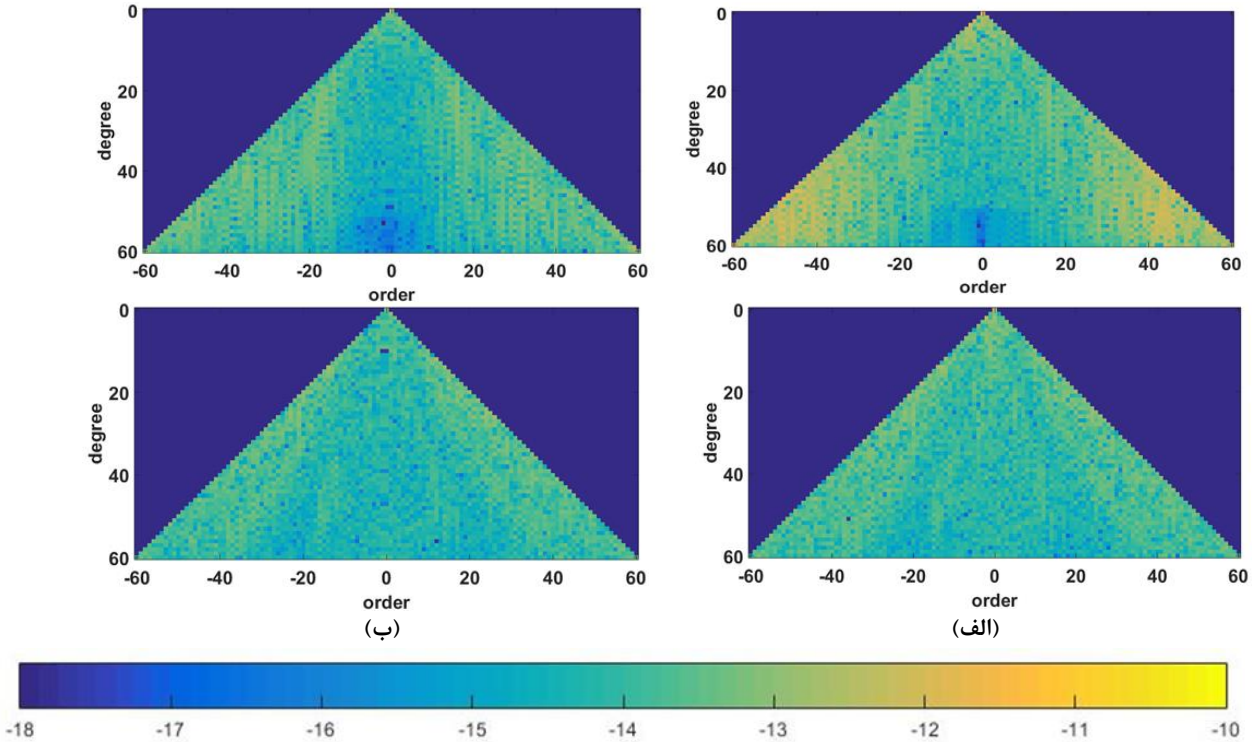
در شکل(۱۳) به‌طور دلخواه ضریب $C_{40,4}$ مولفه‌ی $S_2$ را انتخاب نموده و وضعیت آن را قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ در دو آرایش مذکور را بررسی می‌نماییم. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهد که در آرایش تک‌جفتی بزرگی ضرایب هارمونیک کروی به $۴\times۱۰^{-۱۳}$ می‌رسد و این درحالی است که در آرایش بندر بیشترین مقدار ضرایب $۲\times۱۰^{-۱۳}$ 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 به‌خوبی عمل کرده و تاثیر قابل توجهی در کاهش خطای جزر و مد اقیانوسی داشته است.

همچنین منحنی‌های درجه خطای میانگین مربعات [1] 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 (۴و ۵) نیز به ترتیب نتایج به‌دست‌آمده 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 به‌صورت عددی اثبات می‌نماید

[1] Degree RMS



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]




**شکل ۱۲ : مثلث ضرایب هارمونیک کروی مؤلفه جزر و مدی N2، محور عمودی درجه و محور افقی معرف مرتبه ضریب می‌باشد.**
**الف) ضرایب هارمونیک کروی برحسب درجه و مرتبه در آرایش تک‌جفتی قبل و پس از کاهش خطای الیازینگ.**
**ب) ضرایب هارمونیک کروی برحسب درجه و مرتبه در آرایش دوجفتی قبل و پس از کاهش خطای الیازینگ.**

همان‌طوری‌که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، الگوی منحنی‌های درجه خطای میانگین مربعات [1] سیگنال باقیمانده جزر و مدی در آرایش تک‌جفتی و دوجفتی با یکدیگر متفاوت بوده و از نظر اندازه نیز بر روی کل درجات (۲ تا ۶۰) الگوهای متفاوتی را طی می‌کند که نتایج به تشریح به‌صورت زیر می‌باشد :

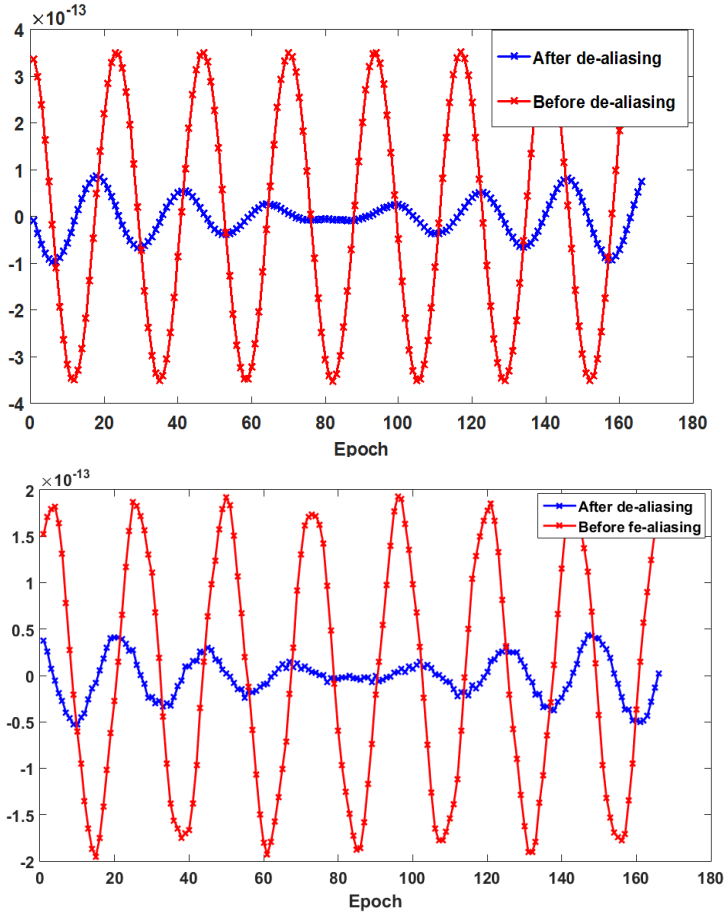
- در هر دو آرایش در درجات بیشتر از ۱۰، مربع میانگین باقیمانده ارتفاع ژئوئید کاهش می‌یابد ولی از درجه‌ی ۳۰ به بعد دوباره افزایش می‌یابد که علت آن ناشناخته است. تقریبا در درجه‌ی ۵۰ بیشترین اختلاف در بزرگی، اختلاف بیشتر از یک درجه در مربع میانگین باقیمانده، را بین دو نمودار شاهدیم.
- در آرایش دوجفتی از درجه‌ی ۲۰ به بعد، میزان خطای مربع میانگین باقیمانده حتی قبل از فرآیند کاهش خطای الیازینگ کمتر از میزان خطا در آرایش تک‌جفتی بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ می‌باشد.
- 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 تک‌جفتی در بازه‌های نمونه‌برداری 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 می‌باشد.

[1] Degree RMS



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]



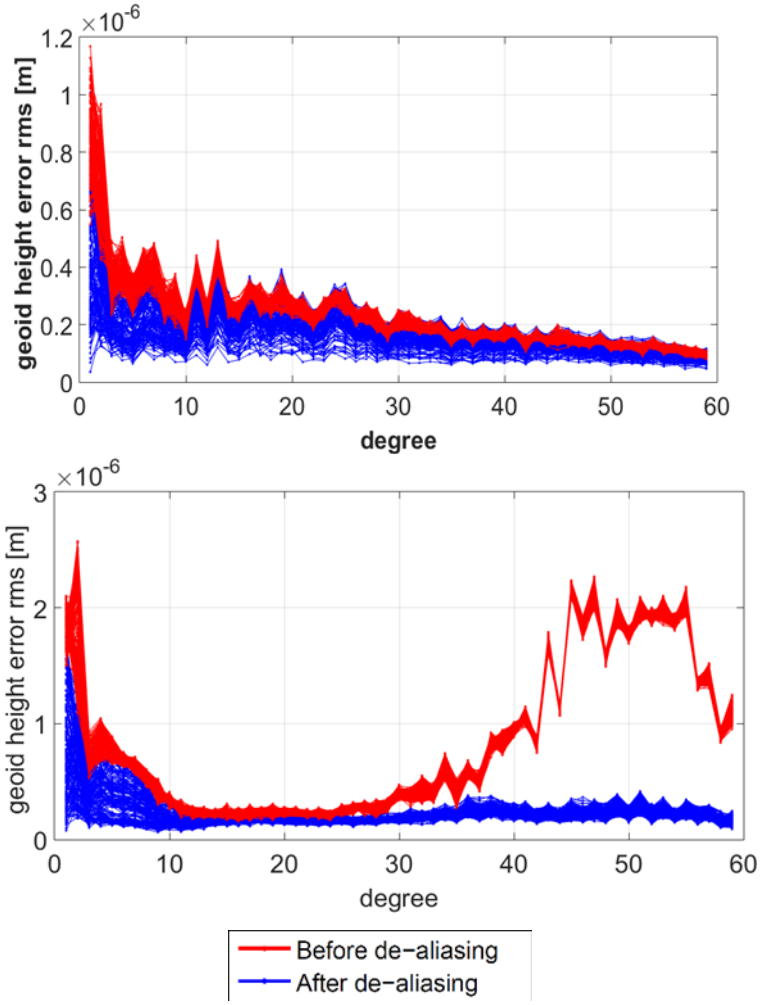

**شکل ۱۳ : بزرگی ضریب هارمونیک کروی $C_{40,4}$ قبل و بعد از فرآیند کاهش خطای الیازینگ برای مؤلفه S2 . آرایش تک‌جفتی (سمت چپ) ، آرایش دوجفتی (سمت راست)**

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 یک جفت ماهواره و بندر به ترتیب در جداول (۴و 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 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 ( ۰/۲۵ میلی‌متر) که پس از انجام فرآیند کاهش به ۰/۹۸۲۵۳میلی‌متر 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 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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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




**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).**

به‌طورکلی، آرایش دوجفتی نسبت به آرایش تک‌جفتی ارجح تر است، چرا که در این آرایش خطای الیازینگ مخصوصا 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 موردبررسی در این مقاله، پریودهای نمونه‌برداری جفت‌قطبی و 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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

جفت ماهواره مایل نسبت به جفت قطبی زاویه‌دار حول کره زمین گردش می‌نمایند، پوشش مکانی بهتری نیز از منطقه به‌دست داده و بدین‌صورت، نمونه‌برداری در حوزه مکان نیز افزایش می‌یابد [۱۱].

**جدول ۴ : مقادیر Global RMS خطای تغییرات ارتفاع ژئوئید مؤلفه‌های 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 مؤلفه‌های 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) | ۰/۰۰۰۰۱۱۸۹ | ۰/۰۲۲۸۶۳ | ۰/۰۱۱۹۱۳ | ۰/۰۱۱۹۰۳ | ۰/۰۰۶۱۵۶۷ | ۰/۰۵۴۱۳۹ |

## ۵- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

با توجه به نمونه‌برداری ناقص از جزر و مد اقیانوس‌ها با استفاده از ماهواره‌ها و همچنین محدودیت دقت مدل‌های جزر و مدی به‌کاربرده شده در روند کاهش خطای الیازینگ، پس از استفاده از مدل‌های جزر و مدی، باز هم مقداری خطا در میدان جاذبه بازیابی شده باقی می‌ماند که یکی از مشکلات اساسی مشاهدات ثقل‌سنجی ماهواره‌ای به شمار می‌آید. در این مقاله هدف برخورد با الیازینگ خطاهای باقیمانده جزر و مدی می‌باشد که در این راستا با به‌کارگیری 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 تک‌جفتی و دوجفتی گریس آینده مورد بررسی قرار گرفت.

در این راستا، از خطای حاصل از مدل‌های ژئوفیزیکی صرف‌نظر شد و تنها خطای جزر و مدی باقیمانده (اختلاف دو مدل جزر و مدی ) برای ۶ مؤلفه جزر و مدی $M_2$، $N_2$ ، $S_2$ ، $O_1$ ، $P_1$ و $Q_1$ در قالب تغییرات ارتفاع ژئوئید به‌طور مجزا برای هر مؤلفه مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مورد استفاده ۵ ساله بوده و با قدرت تفکیک میانگین‌گیری ۱۱روزه با استفاده از نرم‌افزار QLT، برای هر مؤلفه جزر و مدی در دو آرایش ماهواره‌ای 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 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 آرایش‌های ماهواره‌ای تک‌جفتی و مشاهدات دوجفتی
- مقایسه‌ی حالات قبل از کاهش خطای الیازینگ و پس از آن. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد :

۱) آرایش دوجفتی نسبت به آرایش تک‌جفتی در فرآیند کاهش خطای الیازینگ عملکرد بهتری دارد که می‌تواند به دلیل پوشش‌دهی زمانی و مکانی بالاتر آن باشد.

۲) خطای جزر و مدی باقیمانده با به‌کارگیری عملگر کمترین مربعات خصوصا در آرایش



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

یک‌جهت ماهواره به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. برای مؤلفه‌های $M_2$، $N_2$، $S_2$، $O_1$، $P_1$ و $Q_1$ بعد از فرآیند کاهش به ترتیب به مقادیر ۰/۹۸، ۰/۰۹۴، ۰/۰۴۵، ۰/۰۲۶، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲۲ میلی‌متر تقلیل یافته است ولی به‌طور کامل حذف نمی‌گردد که می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- در واقعیت نمی‌توان سری زمانی را به‌صورت 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 خطا 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 قبلا بیان گردید،در این مقاله هدف 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 درصورتی‌که 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 پریود 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.

## 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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

an altimetric satellite to study ocen 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 ocen 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

[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

*Journal of Geospatial Information Technology*
Vol.5, No.1, Spring 2017

# 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 gedesy in Department of Geomatics, Faculty of Engineering, University of Isfahan
2- Post Phd and researcher in Geodesy Institute, Faculity of Aerospace and Geodesy, University of Stuttgart, Germany
3- Assisstant 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 graimetric 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.

[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.5.1.65 ]

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