اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲۹ و ۳۰ دی ماه ۱۳۹۴

The 1st National Conference on Geospatial Information Technology
K.N.Toosi University of Technology
Faculty of Geomatics Engineering
19 - 20 January 2016

آنالیز جزر و مدی و تعیین دامنه و فاز سری های زمانی ماهواره‌ای ارتفاع‌سنجی در منطقه خلیج فارس ایران

پوریا کرباسیان[۱] ، ایرج جزیرئیان [۲]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲-عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده :

هدف از این مقاله، آنالیز جزر و مدی و تعیین دامنه و فاز سری های زمانی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در منطقه خلیج فارس ایران می‌باشد در این آنالیز ۳۰ مؤلفه اصلی جزر و مد در نظر گرفته شده است. داده های اولیه مربوط به ایستگاه بندرعباس در منطقه خلیج فارس از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۴ به مدت ۲۱ سال می‌باشد؛ به طوریکه داده‌های سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۹ (۱۶ سال) مربوط به ماهواره‌های توپکس و جیسون ۱ (Jason1-topex) و داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ (۵ سال) مربوط به ماهواره‌ی جیسون ۲ (Jason-2) می‌باشد. دلیل ادغام داده‌های این سه ماهواره این بود که مدت زمان برداشت داده‌ها حتماً از ۱۸/۶ سال که برابر با تناوب حرکت نوتیشن زمین (حاصل از ماه) است، بیشتر باشد. بنابراین تأثیر نوتیشن در جزر و مد از این داده‌ها قابل استخراج خواهد بود. یادآوری این نکته ضروری است که بررسی جزر و مد و محاسبه سطح متوسط آب‌های آزاد توسط داده‌های دقیق ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در رابطه با عمق آب- که برای کشتی‌رانی از اهمیت بالایی برخوردار است- و همچنین حجم یخ‌های قطبی ذوب‌شده و سرعت ذوب شدن آن‌ها و ... در اختیار ما قرار دهد.

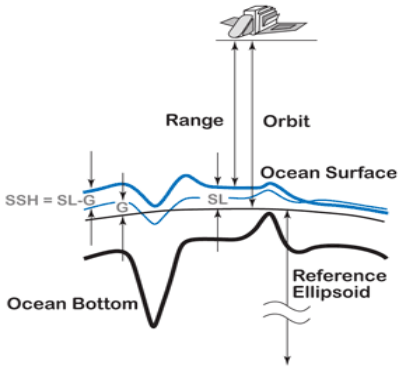
واژه‌های کلیدی : ارتفاع سنجی ماهواره ای، آنالیز جزر و مدی، دامنه و فاز سری های زمانی ارتفاع‌سنجی، تایدگیج، خلیج فارس

نویسنده مکاتبه کننده : این برای امتحان است
آدرس پستی : این برای امتحان است
تلفن : این برای امتحان است
آدرس پست الکترونیک : این برای امتحان است

۱- مقدمه

تحولات و توسعه ی کشورها و نیاز به مبادلات علمی، فرهنگی و صنعتی در سطح جهان مستلزم در اختیار داشتن نقشه‌ها و اطلاعات مکانی از تمامی سطح زمین می‌باشد، دستیابی به چنین خواسته‌ای مستلزم یکسان‌سازی مبنای مسطحاتی و ارتفاعی کلیه‌ی کشورهای جهان است. امروزه با پیشرفت در علوم و تکنولوژی و به دنبال آن افزایش دقت بحث سطوح مبنای ارتفاعی از مباحث به روز به شمار آمده و تلاش‌هایی در جهت یافتن سطوح مبنای ارتفاعی و ارتباط بین آن‌ها صورت گرفته است. یکی از مشکلاتی که در استفاده از ارتفاعات مطلق وجود دارد، جدایی بین سطح متوسط آب‌های آزاد و ژئوئید است. در حالت تئوریک سطح مبنای ارتفاعات مطلق، ژئوئید می‌باشد اما در عمل از سطح متوسط آب‌های آزاد به عنوان سطح مبنای ارتفاعات مطلق استفاده می‌شود، به جدایی بین این دو سطح، توپوگرافی سطح دریا (SST) گفته می‌شود. حذف تلاطم‌های جزر و مدی و دیگر تغییرات کوتاه مدت به روش محاسباتی از سطح آزاد دریا منتهی به سطحی می‌شود که به آن سطح متوسط دریا (MSL) می‌گویند. این سطح البته در معرض عوامل دیگر نظیر جریان‌های دریایی، ذوب یخ‌های قطبی و حرکت پلیت‌های تکتونیکی یک سطح ایستا در زمان نمی‌باشد. از آنجایی که عوامل مذکور پدیده‌های طولانی مدت بوده و به غیر از جریان‌های دریایی بقیه تقریباً یکنواخت با نرخ تغییرات ثابت می‌باشند، می توان گفت که سطح متوسط تعیین شده در اثر آن عوامل دارای تغییرات ارتفاعی طولانی مدت ولی یکنواخت خواهد بود به طوریکه می‌توان برای سطح متوسط دریا برچسب زمانی الصاق کرد و صحبت از سطح متوسط دریای سال ۱۴۰۰ کرد.

از نقطه نظر ژئودزی و درمیدان ثقل زمین، سطح متوسط دریا یک سطح هم‌پتانسیل (سطح تراز) میدان ثقل محسوب نمی‌شود. خصوصیات فیزیکی دریا نظیر اختلاف درجه شوری آب دریا در نقاط مختلف، اختلاف درجه حرارت در نقاط مختلف دریا از یک طرف و عوامل دینامیکی نظیر وزش بادهای دائمی ژئواستروگرافی و جریان‌های دریائی از طرف دیگر موجب جدایی سطح متوسط دریا از یک سطح هم‌پتانسیل می‌باشند. نزدیک‌ترین سطح هم‌پتانسیل به سطح متوسط دریا را ژئوئید می‌نامند. ژئوئید به عنوان دیتوم ارتفاعی یا سطح مبنای ارتفاعات می‌باشد. از آنجا، جدایی سطح متوسط دریا از ژئوئید را –همانطور که قبلاً اشاره شد- توپوگرافی سطح دریا (SST) می‌نامند. حد فاصل سطح لحظه‌ای دریا و سطح ژئوئید را نیز ارتفاع سطح دریا (SSH) گویند.



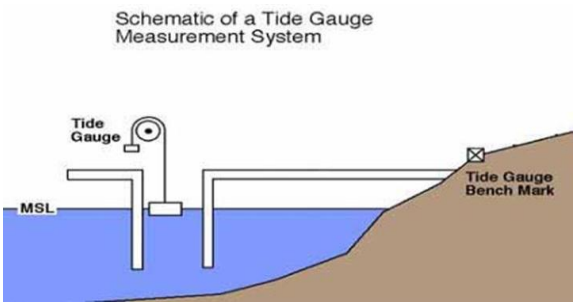
شکل ۱. SSH (Sea Surface Height)

روش محاسبه‌ی SSH توسط ماهواره‌ی ارتفاع سنجی بدین‌صورت است:

$$SSH = O - (R + A) – G$$

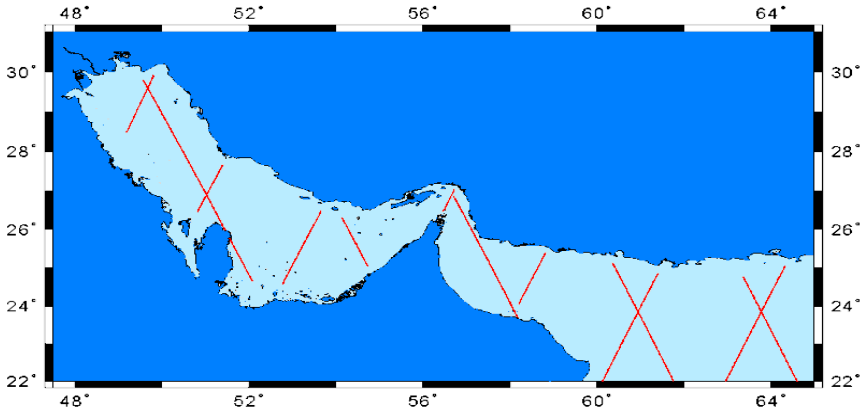
که در آن O فاصله ی ماهواره از بیضوی مرجع است (که این بیضوی برای ماهواره‌های این پروژه بیضوی توپکس (TOPEX/Poseidon) است.) و R فاصله‌ی ماهواره از سطح لحظه‌ای دریاست که مشاهده می‌شود. A تصحیح اتمسفری است که به R اعمال می‌شود و G نیز ارتفاع ژئوئید است.

روش متداول برای تعیین سطح متوسط دریا، استفاده از اندازه‌گیری‌های تایدگیج می‌باشد. این دستگاه، تغییرات ارتفاعی پریودیک جزر و مدی سطح دریا را در مدت زمان طولانی در محل نصب آن اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه بر حسب نوع آن در ساحل بیرون و نزدیک آب دریا، در داخل آب در دیواره‌ی صخره‌ای ساحل، و یا در کف دریا کار گذاشته می‌شود. اندازه‌گیری سطح لحظه‌ای آب دریا یا به صورت پیوسته و آنالوگ و با یک مقیاس کوچکتر از واحد روی کاغذ میلیمتری رسم شده و یا به صورت دیجیتال با فواصل زمانی معین در دستگاه ذخیره می‌شود. اندازه‌گیری ارتفاع سطح لحظه‌ای نسبت به خود دستگاه (صفر دستگاه) انجام می‌گیرد. اگر اختلاف ارتفاع دستگاه نسبت به یک بنچ مارک مستقر در ساحل معلوم باشد می‌توان تغییرات ارتفاعی سطح دریا را نسبت به بنچ مارک در ساحل به دست آورد. مشکل عمده در آنالیز داده‌های ارتفاعی با تاید گیج نسبی بودن آن‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر، داده‌ها نسبت به خود دستگاه اندازه‌گیری می‌شوند در حالیکه خود دستگاه در طول اندازه‌گیری دارای موقعیت ارتفاعی ثابت نبوده و در معرض انواع حرکت‌های ارتفاعی جزر و مدی زمین و حرکت‌های صفحات تکتونیکی پوسته زمین قرار دارد. مشکل دیگر دستگاه تاید گیج محدودیت محل نصب آن در پهنه‌ی دریا می‌باشد. یعنی نمی‌توان یک شبکه با توزیع یکنواخت از دستگاه‌ها را در ساحل و دور از ساحل داخل دریا ایجاد کرد. بنابراین، محاسبات سطح متوسط دریا از اندازه‌گیری‌های دستگاه تاید گیج در صورت فرموله کردن صحیح حرکت‌های منسوب به پوسته‌ی زمین، تنها در سواحل معتبر خواهد بود.



شکل ۲. تاید گیج به همراه نقطه‌ی بنچ مارک

یک ماهواره‌ی ارتفاع‌سنجی (آلتیمتری) مجهز به دستگاه رادار در مدار گردش خود به دور زمین با پریود های زمانی کوتاه، ارتفاع خود را از سطح آزاد دریا و اقیانوس اندازه‌گیری کرده، هزاران از این اندازه‌ها را در ایستگاه‌های کنترل ماهواره ذخیره می‌کند. با احتساب موقعیت دقیق ماهواره در مدار خود، اندازه‌گیری‌های ماهواره با دقت قابل قبول تبدیل به اندازه‌گیری‌های ارتفاع سطح آزاد آب دریاها نسبت به یک سطح مرجع مشخص بین‌المللی (بیضوی رفرانس توپکس(topex)) می‌گردند. با توجه به عبورهای متوالی و مکرر ماهواره در مسیرهای مشخص و متقاطع از بالای دریاها می‌توان دریافت که ماهواره در یک شبکه منظم و با توزیع یکنواخت از نقاط روی دریا به کرات ارتفاع سطح آزاد دریا را اندازه‌گیری می‌کند. بعد از اعمال تصحیحات هندسی و اتمسفری، این اندازه‌گیری‌ها شبیه اندازه‌گیری‌های دستگاه تایدگیج می‌باشند با این مزیت که عاری از مشکلات یادآوری شده در بخش قبل در مورد داده‌های تایدگیج می‌باشند.



شکل۳. مسیر پای ماهواره‌های T/P و Jason-1 در محدوده‌ی خلیج فارس و دریای عمان

۲- روند اجرای پروژه وآماده‌سازی داده‌ها برای پردازش

برای آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به محیط نرم‌افزار، باید مراحل زیر روی آن‌ها انجام گیرد:

۲-۱- جدا کردن داده‌های خشکی از داده‌های آبی

داده‌های خام دریافتی از ماهواره‌ها بسیار پر حجم است، که در این پروژه حدود ۲۷۰ مگابایت فایل متنی بود بحث ویرایش این داده‌ها خود یه موضوع بسیار وقت‌گیر است چراکه حجم بالای آن‌ها مشکلات بسیار زیادی را در روند کار پیش روی ما قرار می‌دهد. یکی از راه‌های ویرایش این حجم از داده، تقسیم کردن آن به چند بخش کوچکتر است ،سپس با استفاده از برنامه‌نویسی ویرایش را انجام داد. در فایل داده‌ی این پروژه، SSH نواحی خشکی با عبارت DV و یا NaN بیان شده است که برای حذف داده‌های مربوط به خشکی باید برنامه‌ای نوشته شود که جاهایی که SSH آن‌ها دو عبارت فوق بود را حذف کند. حذف دستی آن‌ها غیر ممکن است. زیرا داده‌ها در مجموع ۲۱ سال را شامل می‌شوند و در هر ثانیه از زمین برداشت صورت گرفته است.

۲-۲- مشخص کردن محدوده‌ی کاری

این مرحله می‌تواند قبل از مرحله‌ی قبلی (جدا کردن نواحی خشکی از آبی) انجام گیرد. بدین صورت که برای محدوده‌ی کاری (خلیج فارس و دریای عمان) یک بازه‌ای از طول و عرض جغرافیایی در نظر گرفته می‌شود و تمام داده‌های با طول و عرض جغرافیایی خارج از آن بازه با برنامه‌نویسی حذف می‌گردند.

۲-۳- تفکیک نقاط

برای اینکه این مرحله‌ی مهم انجام گیرد، دو موضوع باید به طور همزمان مد نظر باشد:

۱. داده‌هایی که با هم از نظر زمانی به میزان ۹/۹۱۵ روز با هم فاصله دارند.

۲. داده‌هایی که اختلاف طول و عرض جغرافیایی آن‌ها به طور معمول از ۰/۰۵ درجه بیشتر نباشد (نهایتاً ۰/۰۸درجه). فواصل برداشت دو نقطه‌ی متوالی توسط ماهواره روی زمین تقریباً ۶ کیلومتر است، پس دایره‌ای که آن را تقریباً یک نقطه در نظر می‌گیریم دارای شعاعی در حدود ۳ کیلومتر روی سطح زمین خواهد بود. که در این حد فاصل، طول و عرض جغرافیایی در حدود ۰/۰۵ درجه با هم اختلاف دارند.

بدین صورت یک فایل حجیم داده به چند صد فایل کوچکتر تقسیم می‌گردد که این فایل‌های کوچک حاوی SSH های یک **نقطه‌ی تقریبی** با فواصل زمانی ۹/۹۱۵ روز خواهد بود. البته این نکته نیز باید ذکر شود که داده‌هایی که پشت سر هم (هر ۱ ثانیه) اخذ شده‌اند تشکیل یک گذر ماهواره را می‌دهند و این گذرها نیز شماره گذاری می‌شود.

۲-۴- خوانا کردن فایل‌های نقاط برای پردازش

زمان مشاهدات بر اساس سیستم زمانی UTC و مبدا زمانی مشاهدات ساعت صفر اول ژانویه سال ۱۹۵۸ می باشد. باید برای همه‌ی زمان‌ها، زمان برداشت طبق مبدأ مذکور به صورت ثانیه تبدیل شود. که این کار نیز با برنامه نویسی امکان پذیر است.

۲-۵- انتخاب ایستگاه برای تحلیل جزر و مدی در آن:

ایستگاه انتخابی در خلیج فارس و در نزدیکی بندرعباس، به مختصات زیر است:

طول جغرافیایی=۵۶/۶۵۶۹ درجه ، عرض جغرافیایی= ۲۶/۹۵۶۴ درجه

۲-۶- ادغام کردن داده‌های Jason1-topex با داده‌های Jason2:

همانطور که قبلاً گفته شد، این داده‌ها برای این ایستگاه از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۴ به مدت ۲۱ سال می‌باشد؛ به طوریکه داده‌های سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۹ (۱۶ سال) مربوط به ماهواره‌های Jason1-topex و داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ (۵ سال) مربوط به ماهواره‌ی Jason-2 می‌باشد.

دلیل ادغام داده‌های این سه ماهواره این بود که مدت زمان برداشت داده‌ها حتماً از ۱۸/۶ سال که برابر با تناوب حرکت نوتیشن زمین (حاصل از ماه) است، بیشتر باشد. در این صورت تأثیر نوتیشن در جزر و مد از این داده‌ها قابل استخراج خواهد بود.

با انجام مراحل فوق روی داده‌ها می‌توان آن‌ها را در نرم‌افزار پردازش کرد. اما قبل از آن به مروری بر روابط ریاضی استفاده شده در نرم‌افزار می‌پردازیم:

۳- مدل ریاضی جزر و مد

جزر و مد، فرآیند بالا و پایین‌آمدگی سطح زمین (body tide) و سطح آب دریا (sea tide) در اثر نیروهای جاذبه‌ی اجرام سماوی اطراف زمین مثل ماه و خورشید می‌باشد. به لحاظ پریودیک بودن تغییرات نیروهای جاذبه و عکس‌العمل الاستیک زمین، فرآیند بالا و پایین‌آمدگی نیز پریودیک بوده و در آنالیز فرآیند، مؤلفه‌های ساده با پریودهای مختلف از نیم‌روزانه، روزانه، چهارده‌شبه، ماهیانه، نیم‌سالانه، سالیانه، چندلر، ۸/۵ سالیانه و ۱۸/۶ سالیانه با علائم اختصاری، Om_1، Om_2، S_a، S_{sa}، M_m، M_f، O_1، P_1، K_1، N_2، M_2، T_2، S_2، K_2 به دست آمده‌اند. سهم هرکدام از این مؤلفه‌ها در کل فرآیند جزر و مد با پریود آن‌ها نسبت معکوس دارد. بزرگترین آن‌ها مؤلفه‌ی نصف روزانه می‌باشدکه حدود ۹۰ درصد کل فرآیند را تشکیل می‌دهد. درصد نسبی سهم مؤلفه‌ها در عین حال تابع عرض جغرافیایی محل بوده در حالیکه طول جغرافیایی محل تعیین‌کننده فاز ایجاد مؤلفه‌ها می‌باشد. با توجه به پریودیک بودن مؤلفه‌ها می‌توان هر کدام از آن‌ها را با تابع کسینوسی با مشخصات A_j دامنه، $\square_j$ سرعت زاویه‌ای و $\square_j$ تأخر فاز مؤلفه‌ها (نسبت به مؤلفه نظیر در نصف‌النهار مبدأ گرینویچ) نشان داد. بدیهی است که دو مشخصه‌ی دامنه و فاز تابع موقعیت جغرافیایی محل ($\square,\square$ نقطه روی دریا) نیز خواهند بود. مجموع مؤلفه‌ها در یک زمان مشخص (ترجیحاً در مقیاس گرینویچ)، کل فرآیند جزر و مد $S(\square,\square,t)$ را در نقطه فرموله می‌کند:

$$S(\phi,\lambda,t)=\sum_{i=1}^{K}A_j(\phi,\lambda)\cos(\omega_j t-\theta_j(\phi,\lambda))$$

فرمول فوق یک تابع غیر خطی نسبت به مجهولات دامنه و فاز تمامی مؤلفه‌ها می‌باشد. یک فرمول دیگر ولی معادل آن را می‌توان از بسط تابع کسینوس به صورت زیر به دست آورد:

$$S(\phi,\lambda,t)=\sum_{j=1}^{K}\left[a_j(\phi,\lambda)\cos(\omega_j t)+b_j(\phi,\lambda)\sin(\omega_j t)\right]$$

که در آن a_j و b_j مجهولات جدید جایگزین دو مجهول دامنه و فاز با روابط ذیل می‌باشند:

$$A_j=\sqrt{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}\quad \text{و}\quad \theta_j=\arctan\left(\frac{b_j}{a_j}\right)$$

مزیت مدل جدید نسبت به قبلی خطی بودن آن در مجهولات خود a_j و b_j می‌باشد.

سطح آزاد دریا علاوه بر تغییرات پریودیک جزر و مدی، در معرض تغییرات طولانی مدت (تقریباً دائمی) و خطی ناشی از ذوب یخ‌های قطبی و حرکت صفحات تکتونیکی می‌باشد. اگر دو تغییر دائمی اخیر را با هم تلفیق کنیم می‌توانیم مدل زیر را برای ارتفاع سطح لحظه‌ای آب در یک نقطه از دریا به صورت زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned}SSH(\varphi,\lambda,t)&=MSL(\varphi,\lambda,t_\circ)+S(\varphi,\lambda)\times(t-t_\circ)+U(\varphi,\lambda,t)\\&=MSL(\varphi,\lambda,t_\circ)+S(\varphi,\lambda)\times(t-t_\circ)\\&+\sum_{j=1}^{K}\left[a_j(\varphi,\lambda)\cos(\omega_j t)+b_j(\varphi,\lambda)\sin(\omega_j t)\right].\end{aligned}$$

که در آن SSH سطح لحظه‌ای آب، MSL سطح متوسط دریا و S نرخ تغییرات خطی سطح دریا می‌باشند. مدل فوق به عنوان یک معادله مشاهده در زمان t و در نقطه با موقعیت □ ,□□ روی دریا، اگر برای تمامی مشاهدات در زمان‌های $t1, t2, \ldots, tn$ در آن نقطه نوشته شود، دستگاه معادلات مشاهدات تشکیل می‌گردد که متشکل از n معادله با 2K+2مجهول می‌باشد:

$$\begin{bmatrix}SSH(t_\circ)\\SSH(t_1)\\SSH(t_2)\\\vdots\\SSH(t_{n-1})\\SSH(t_n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&\cos(\omega_1 t_\circ)&\sin(\omega_1 t_\circ)&\cdots&\cos(\omega_k t_\circ)&\sin(\omega_k t_\circ)\\1&c(t_1-t_\circ)&\cos(\omega_1 t_1)&\sin(\omega_1 t_1)&\cdots&\cos(\omega_k t_1)&\sin(\omega_k t_1)\\1&c(t_2-t_\circ)&\cos(\omega_1 t_2)&\sin(\omega_1 t_2)&\cdots&\cos(\omega_k t_2)&\sin(\omega_k t_2)\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\cdots&\vdots&\vdots\\1&c(t_{n-1}-t_\circ)&\cos(\omega_1 t_{n-1})&\sin(\omega_1 t_{n-1})&\cdots&\cos(\omega_k t_{n-1})&\sin(\omega_k t_{n-1})\\1&c(t_n-t_\circ)&\cos(\omega_1 t_n)&\sin(\omega_1 t_n)&\cdots&\cos(\omega_k t_n)&\sin(\omega_k t_n)\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}MSL\\S\\a_1\\b_1\\\vdots\\a_k\\b_k\end{bmatrix}$$

این دستگاه معادلات در نرم‌افزار تشکیل می‌شود و مؤلفه‌های جزر و مد از آن به دست می‌آیند. دستگاه معادلات فوق را می‌توان به فرم خلاصه به صورت L=AX نوشت که در آن بردار L بردار مشاهدات سطح لحظه‌ای آب، A ماتریس ساختار معادلات و x بردار مجهولات محتوی سطح متوسط دریا، نرخ تغییرات خطی و دامنه‌های a و b می‌باشد. برآورد به روش کمترین مربعات مجهولات از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\hat{x}=(A^T A)^{-1}A^T L$$

در برآورد فوق فرض بر این است که مشاهدات سطح لحظه‌ای دارای دقت یکسان و دارای وزن واحد هستند. برآورد واریانس وزن واحد یا واریانس مشاهدات از فرمول زیر به دست می‌آید:

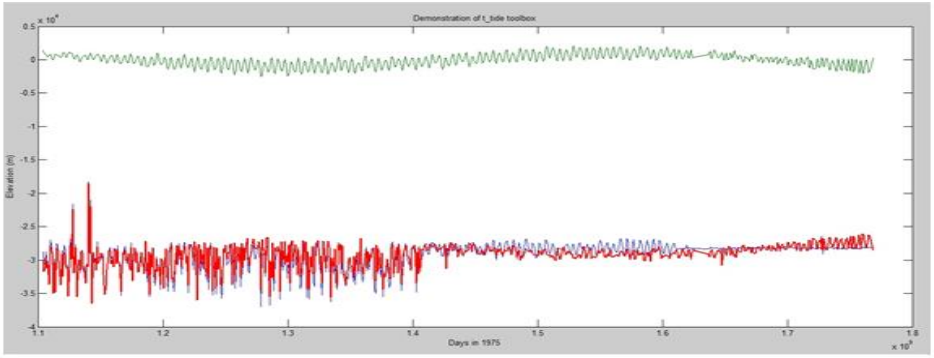
$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{r}^T \hat{r}}{n - 2k - 2}$$

که در آن $\hat{r}$ بردار باقیمانده‌های سرشکن شده مشاهدات می‌باشد. واریانس وزن واحد در عین حال میزان برازش مدل ریاضی را به مشاهدات سطح لحظه‌ای دریا نشان می‌دهد. میزان برازش مدل را می‌توان از تست آماری واریانس برآورد شده در مقابل واریانس اولیه مشاهدات سطح لحظه‌ای، اگر معلوم باشند، به دست آورد. ماتریس واریانس-کوواریانس مجهولات از فرمول زیر قابل برآورد می‌باشد:

$$C_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T A)^{-1}$$

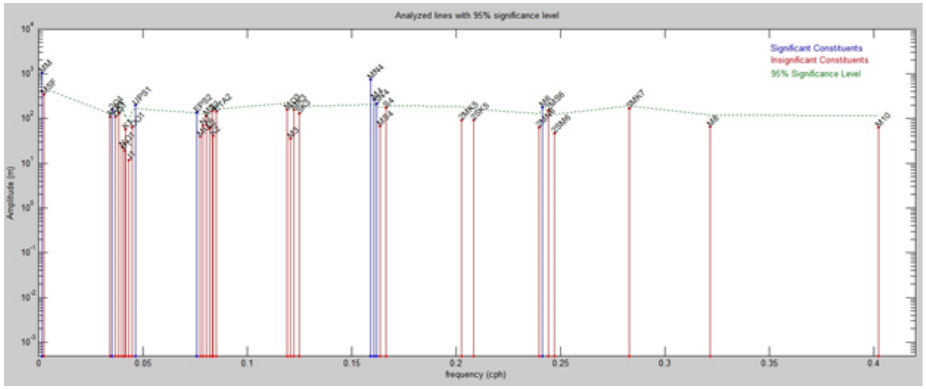
۴- نتایج

نتایج خروجی یک فایل متنی به همراه ۴ نمودار است که فایل متنی آن شامل ستون‌های مجزا برای هر ایستگاه می‌باشد که محتوی دامنه، فاز و خطاهای مربوط به آن‌ها برای هر مؤلفه می‌باشد.



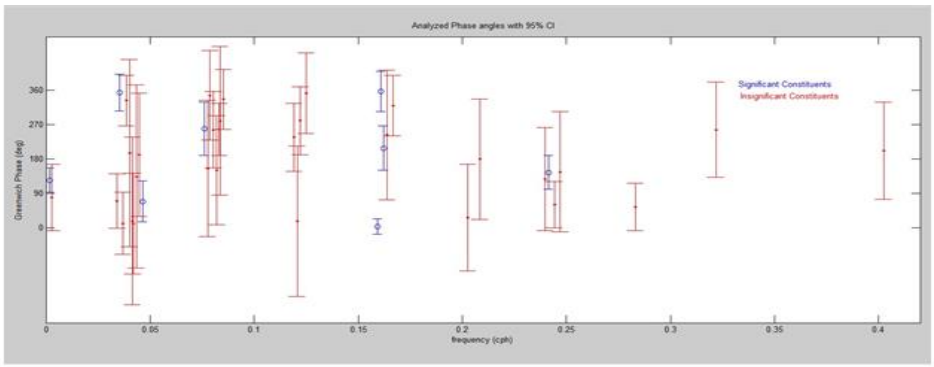
شکل ۴. نمودار ارتفاع لحظه‌ای آب در روزهای سال در نزدیکی بندر عباس

این شکل سری زمانی و یک سری از تغییر ارتفاع را نشان می‌دهد که از مؤلفه‌های معنادار به وجود آمده‌اند.



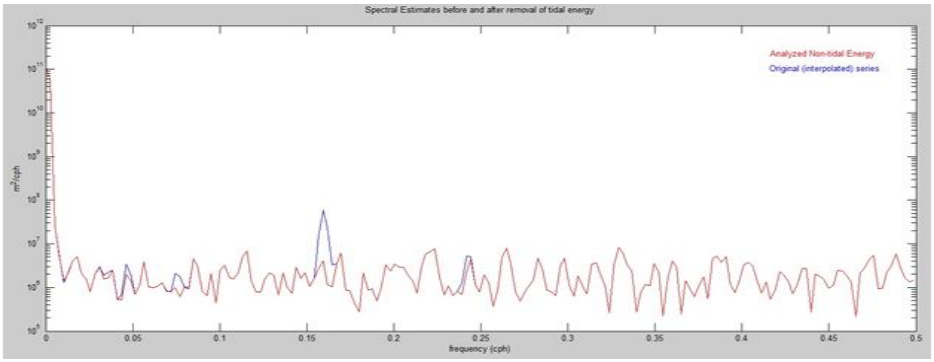
شکل ۵. نمودار دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی با ضریب اطمینان ۹۵٪ در نزدیکی بندر عباس

نمودار افقی تعداد نوسان در ساعت را نشان می‌دهد که این عدد برای هر مؤلفه‌ی جزر و مدی منحصر به فرد است. بیشتر مؤلفه‌های معنادار در نوارهای روزانه و نیم‌روزانه قرار دارند. هرچند که بسیاری از مؤلفه‌های با تکرار بالا نیز به شکل خفیفی معنادار به نظر می‌رسند.



شکل ۶. فاز مؤلفه‌های اصلی با بازه‌ی اطمینان ۹۵٪ در نزدیکی بندر عباس

مؤلفه‌های معنادار به طور کلی خطاهای فازی کوچکی دارند.



شکل ۷. نمودار تخمین انرژی مربوط به ایستگاه نزدیک بندرعباس

۵- نتیجه‌گیری

ارزیابی تغییرات پریودیک سطح دریا ناشی از پدیده‌ی جزر و مد با استفاده از داده‌های آلتیمتری **پیوسته** و **طولانی-مدت** به روش رگرسیون خطی دارای اعتبار بیشتری نسبت به استفاده از داده‌های کوتاه‌مدت آلتیمتری در محاسبه‌ی سطح متوسط دریا دارد. چرا که ارزیابی مؤلفه‌های طولانی‌مدت نظیر om_1 و om_2 نیاز به داده‌ی آلتیمتری طولانی‌مدت دارند. سطح متوسط دریا بنا به تعریف آن بایستی عاری از هرگونه تغییرات پریودیک باشد که این مهم با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت برآورد می‌شود.

در واقع یکی از مزیت‌های اصلی این پروژه طولانی‌مدت بودن داده‌های آن است که در برآورد مؤلفه‌های جزر و مدی و دامنه و فاز آن‌ها به طور دقیق و موثق، بسیار کارآمد است.

مراجع

[۱] علیرضا آزموده اردلان، محمدجواد طوریان، "مدلسازی جزر و مد در دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۶، شماره ۳، صفحه ۱۵-۲۵، ۱۳۸۹.

[۲] پروا جهان‌سا، کامران لاری، مسعود ترابی آزاد، "بررسی انرژی جزر و مد در بندر امام خمینی به وسیله نرم افزار T-Tide"، پنجمین همایش ملی صنایع فراساحل (OIC2013)، تهران- دانشگاه صنعتی شریف، ۳۱ اردیبهشت و ۱ خرداد ۱۳۹۲.

[۳] کامران لاری، مجید ابره‌دری، "تلفیق اطلاعات ارتفاع سنجی ماهواره ای T/P و Jason-1 برای تعیین توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان"، مجله علوم و فنون دریایی، دوره 11 ، شماره3 ،پاییز۱۳۹۱.