

مدل‌سازی جزرومد در دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی

ماهواره‌ای و تاییدگیج‌های ساحلی

علیرضا آزموده اردلان^{۱*} و محمدجواد طوریان^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۲/۱۰، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

چکیده

در این مقاله به مدل‌سازی تغییرات جزرومدی سطح آب دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از ۱۱ سال داده‌های ماهواره توپکس-پوزایدون (TOPEX/Poseidon) و اطلاعات تاییدگیج‌های ساحلی پرداخته شده است. مشاهدات ماهواره توپکس-پوزایدون در سایکل ۱۰۰ مینا در نظر گرفته شده و از تکرار مشاهدات ماهواره توپکس-پوزایدون در اطراف مشاهدات این سایکل در شعاع ۱ کیلومتری، سری زمانی با فاصله نمونه‌برداری دو ساعته که از مشاهدات ۹۹۱۵ روزه این ماهواره با به‌کارگیری ساختار ویژه زمان تکرار این ماهواره، تشکیل شده و با استفاده از روش آنالیز فوریه، و برآورد کمترین مربعات مولفه‌های جزرومدی با پریود بزرگ‌تر از چهار ساعت مدل‌سازی شده‌اند. بدین ترتیب در ۷۷۲ نقطه پای ماهواره توپکس-پوزایدون و ۱۷ ایستگاه ساحلی در دریای عمان و خلیج فارس سطح متوسط دریا (MSL) و مدل جزرومدی تعیین و نقشه سطح متوسط آب دریا و نقشه‌های هم‌دامنه و هم‌فاز مولفه‌های جزرومدی $O1$ و $K1$ ، $M2$ ، $S2$ تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، تاییدگیج‌های ساحلی، مدل‌سازی سطح دریا، مولفه‌های جزرومدی، سطح متوسط دریا، خلیج فارس، دریای عمان

A new tidal model for the Persian Gulf and Oman Sea based on satellite altimetry and coastal tidal gauge observations

Ardalan, A. A.¹ and Toorian, M. J.²

¹Associate Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Prevention, University of Tehran, Iran

²M. Sc. Graduate Student, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 29 April 2008, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

Based on 11 years of TOPEX/Poseidon satellite altimetry and coastal tide gauge sea level observations, four tidal constituents, namely $O1$, $K1$, $M2$ and $S2$, are modeled for the Persian Gulf and Oman Sea using a time-wise approach according to the following details. By selecting the cycle 100 as the reference, 772 points on 12 paths along the track of the altimetry satellite footprints over the Persian Gulf and Oman Sea are selected as the center points of 772 circular cells that were used to catch the repeated MGDR data from cycle 8 through 345 that fall within the aforementioned circular cells with a radius of 0.053° . In this way 772 time series of the sea level observations located at the center of the circular cells are developed. These data were further corrected for all effects whose correction parameters are given by the MGDR data files; except the tidal correction that was kept to become the source of information for our tidal modeling. The gaps in the 772 satellite derived time series are filled via inverse solution of the autocorrelation function

that was applied to the existing sea level variation data. Besides, the 1 hourly time series of sea level observations at 17 tide gauges along the Iranian coast line at the Persian Gulf and Oman Sea were used both to check the validity of the tidal models developed by the altimetry data at the 772 point over the above mentioned sea areas and to increase the accuracy of satellite derived tidal models at the shallow waters. The equally spaced 772 satellite altimetry derived time series and 17 time series at the coastal tide gauge stations are subjected to Fourier analysis to obtain the major tidal constituents, which are next used as the initial value within a least square solution to obtain the adjusted tidal frequencies, their phase angles and amplitudes. The result of this step for the satellite derived time series were modeling of all the existing tidal constituents with periods greater than 20 days, as the repetition of the TOPEX/Poseidon satellite altimetry observation is 9.915 days, except for the crossover points where the repetition time period is half. Next, via forward modeling, the effects of the modeled tidal constituents were removed from the original 772 time series to remain with the residual time series that were re-orders according to their observation hour, without considering their observation date in order to develop 2 hourly residual time series, which were used to derive the other short period tidal constituents.

The result of the numerical computation and the comparison of the satellite derive models with that obtained by tide gauge observations granted the success of the method and such a new tidal model for four tidal constituents namely, O1, K1, M2 and S2 is developed for the test area, i.e. Persian Gulf and Oman Sea.

Key words: Satellite altimetry, coastal tide gauges, sea level modeling, tidal constituents, Mean Sea Level, Persian Gulf, Oman Sea

۱ مقدمه

دانش گسترده بشر به جزرومد و تغییرات سطح آبها در مقیاس جهانی، شروع فن ارتفاعسنجی ماهواره‌ای با به کارگیری ماهواره SKYLAB در ۱۹۷۳ است. چرا که تا پیش از آن، یافته‌های بشر مدل‌سازی جزرومد به نواحی سواحلی و محدوده نصب تایدگیج‌ها محدود بود و امکان اتصال مشاهدات تایدگیج‌ها به یکدیگر و اتصال صفر آنها به منظور ایجاد مبنا ارتفاعی یکسان، در سطح منطقه‌ای امری بسیار دشوار، و در سطح جهانی غیرممکن می‌نمود. امروزه ارتفاعسنجی ماهواره‌ای به دلیل پوشش گسترده و دقت زیاد، تصویر بسیار دقیقی از تغییرات سطح آبها در مقیاس جهانی به دست داده است <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/mission/s/skylab.html>، که یقیناً از راه مشاهدات ایستگاه‌های جزرومدسنج زمینی قابل تحقق نمی‌بود. به‌طور خلاصه، ارتفاعسنجی دارای مزایایی همچون (۱) چگال و هموزن

سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها دستخوش تغییرات دائمی است. پاره‌ای از این تغییرات همچون تغییرات جزرومدی از دیرباز برای ساکنان مناطق ساحلی به منزله یک عامل تغییردهنده خط ساحلی مورد مشاهده قرار گرفته و از آن به صورت‌های گوناگون در توسعه اقتصادی‌شان نظیر افزایش بازده ماهیگیری و افزایش سرعت دور شدن از ساحل برای آغاز سفری دریایی و یا بازگشت به ساحل بهره جسته‌اند. به دلیل تاثیر جزرومد بر اقتصاد و فعالیت‌های ساحلی، بررسی جزرومد دارای سابقه ۴۰۰۰ ساله است (لفبر و استوارت، ۱۹۹۶) گسترش مشاهدات جزرومدی از راه تایدگیج‌های ساحلی، افزوده شدن تایدگیج‌های اقیانوسی بر مبنای اندازه‌گیری فشار از سال ۱۹۶۰ و نیز کاربرد رایانه‌های جدید و روش‌های عددی، دانش بشر را در مدل‌سازی جزرومد بیش از پیش بهبود بخشید (لفبر و استوارت، ۱۹۹۶). اما نقطه عطف آگاهی و

ژئوفیزیکی، به‌منظور دستیابی به اطلاعات سطح لحظه‌ای دریا را مورد بررسی و تحقیق قرار داد. صناعی (۱۳۸۴) به بررسی اعتبار داده‌های گرانی دریایی از راه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداخت. جعفری (۱۳۸۵) اقدام به مدل‌سازی روند تغییرات سطح آب دریای خزر، با استفاده از مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تاییدگیج‌های ساحلی کرد. جلیل‌نژاد (۱۳۸۵) مسئله ارزیابی مدل‌های متفاوت به‌کاررفته در تعیین MSL با استفاده از مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را حل کرد.

این تحقیق در تکمیل تحقیقات قبلی، به ترکیب اطلاعات تاییدگیج‌های ساحلی با مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به‌صورت نقطه‌ای پرداخته است، که ماحصل آن افزوده شدن ۷۷۲ مشاهدات "شبه تاییدگیج" از راه ماهواره توپکس-پوزایدون در دریای عمان و خلیج فارس به مشاهدات تاییدگیج‌های ساحلی موجود، است. این ۷۷۲ نقطه مشاهده در نقاط پای ماهواره در خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد. به‌عبارت دیگر این تحقیق از اطلاعات ارتفاع‌سنجی به صورت زمانی (Time-wise) استفاده کرده است درحالی‌که تحقیقات گذشته این اطلاعات را به صورت مکانی (Space-wise)، یا تلفیقی از این دو مورد استفاده قرار داده‌اند که این نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌شود. مزایای عمده روش به‌کاررفته در این تحقیق را می‌توان در ساده‌تر کردن مدل‌های آنالیز جزرومدی و نیز امکان مدل‌سازی محلی و منطقه‌ای جزر مد به حساب آورد. به بیانی دیگر مدل‌سازی در قلمروی مکان و زمان (روش به‌کاررفته در تلاش‌های قبلی) می‌تواند روشی مناسب فقط برای بررسی‌های جهانی و یا بخش عمده‌ای از آب‌های جهان باشد، درحالی‌که روش به‌کاررفته شده در تحقیق حاضر (روش زمانی) برای تحقیقات جزرومدی در مقیاس‌های کوچک، بزرگ و جهانی قابل به‌کارگیری است.

بودن توزیع نقاط مشاهده در سطح دریاها (۲) دقت و صحت و (۳) دسترسی آسان به مشاهدات است که از راه پایگاه‌های اینترنتی مربوط، فراهم شده است (آزموده اردلان و هاشمی فراهانی، ۱۳۸۲).

با توجه به اهمیت اقتصادی و بازرگانی زیادی آب‌های آزاد و نیازهای مهندسی همچون ساخت اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها، سکوی نفتی، سازه‌های دریایی و شیلات، اطلاع از رژیم جزرومدی و به‌طورکلی تغییرات سطح آب دریا از اهمیت زیادی برخوردار است. در کشور ما نیز با توجه به قرار داشتن در زمره کشورهای با مرز آبی متصل به آب‌های آزاد، تحقیقات جزرومدی در بهره‌برداری گسترده‌تر و بهینه‌تر از منابع و امکانات دریایی از ضروریات مراکز علمی است. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تاییدگیج‌های ساحلی برای مدل‌سازی سطح آب دریا در خلیج فارس، دریای عمان و نیز دریای خزر صورت گرفته که درحکم نمونه‌هایی از این فعالیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

رستمی (۱۳۸۱) و پورشرفی (۱۳۸۵) توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان را با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به‌دست آوردند. مسیب‌زاده (۱۳۸۱) به تعیین توپوگرافی سطح آب دریای عمان و خلیج فارس از راه تلفیق GPS و مشاهدات تاییدگیج‌ها پرداخت. هاشمی فراهانی (۱۳۸۲) نقشه‌های هم‌دامنه و هم‌فاز جزرومدی را در مقیاس جهانی از راه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای تعیین کرد. سهرابی اطهر (۱۳۸۳) مسئله تهیه چارت‌های دریایی با استفاده از مختصات سه‌بعدی GPS و مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را مورد بررسی قرار داد. عرب‌صاحبی (۱۳۸۳) به تعیین میدان گرانی زمین از راه مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداخت. شجاعی (۱۳۸۳) مسئله ادغام اطلاعات حسگرهای ماهواره‌های گوناگون و اطلاعات

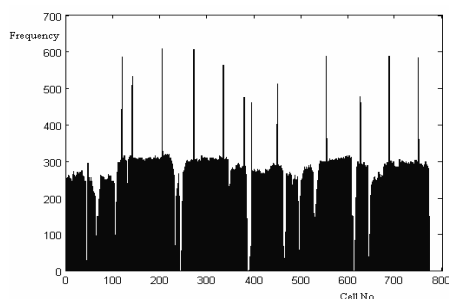
۲ تاریخچه مدل سازی جزرومد

نیوتن در ۱۶۸۷ با طرح روش دینامیکی خود، بر پایه نظریه تعادل هیدروستاتیکی، فصلی جدید بر تحقیقات جزرومدی گشود (ونگ، ۲۰۰۴). حدود یک قرن بعد در ۱۷۷۵ لاپلاس، دینامیک جزرومد را از راه معادلات دیفرانسیل جزرومدی مطرح ساخت (ونگ، ۲۰۰۴). ابداع روش آنالیز هارمونیک داروین در ۱۸۸۳ (داروین، ۱۸۷۹) نقطه عطفی در تحقیقات جزرومدی بود که موجبات بهره گیری از مشاهدات تایدگیج در آنالیز جزرومدی را فراهم ساخت. اولین مدل جهانی جزرومدی را ل پروست (Le Provost) در ۱۹۸۳ بر پایه مشاهدات ماهواره ژئوست (Geosat) عرضه کرد (ونگ، ۲۰۰۴) و در ادامه ری و کارت رایت (۱۹۹۰ و ۱۹۹۱) مدل هایی برای جزرومد جهانی عرضه کردند که از مدل شویدرسکی (۱۹۸۰) بر پایه حل معادلات لاپلاس جزرومدی به دست آمده بود نیز دقیق تر و کارا تر بود. به طور کلی مدل های جزرومدی موجود را می توان سه دسته زیر تقسیم بندی کرد (ونگ، ۲۰۰۴): (۱) مدل های تجربی، (۲) مدل های هیدرو دینامیکی و (۳) مدل های ترکیبی.

مدل های تجربی با استفاده از مشاهدات سطح آب و بدون در نظر گرفتن عوامل ایجاد کننده به بررسی جزرومد می پردازند. در مدل های هیدرو دینامیکی از نیروهای جزرومدی و اندرکنش توپوگرافی کف دریا، شکل سواحل و اصطکاک بستر دریا با جریانات جزرومدی در حل معادلات دیفرانسیل استفاده می شود. مدل های ترکیبی از به کارگیری مشاهدات جزرومدسنج های ساحلی و ارتفاع سنجی ماهواره ای به مثابه مقادیر مرزی در معادلات هیدرو دینامیکی حاصل می شوند. بنابر این مشاهدات تایدگیج ها و ارتفاع سنجی ماهواره ای هم می توانند ورودی روش های تجربی و نیز روش های ترکیبی را تشکیل دهند.

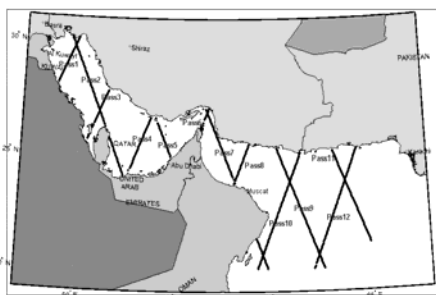
۳ داده های مورد استفاده

برای انجام محاسبات این تحقیق تعداد ۷۷۲ نقطه در پای ماهواره در دریای عمان و خلیج فارس انتخاب شد. فراوانی مشاهدات ماهواره ای در این نقاط در شکل ۱ نشان داده شده است. این ۷۷۲ نقطه در واقع ۷۷۲ سلول اند که در هر کدام از آنها n مشاهده برای آنها ۱۲۲ پارامتر در اختیار است. به طور دقیق تر، گذر صدم در حکم گذر مبنا در نظر گرفته شده، و برای هر مشاهده آن دایره جست و جویی به شعاع یک کیلومتر (0.053°) تعریف و مشاهدات گذرهای دیگر در صورت قرار گرفتن در داخل این دایره در حکم مشاهده سلول در نظر گرفته شده اند.



شکل ۱. فراوانی مشاهدات در نقاط پای ماهواره در منطقه خلیج فارس و دریای عمان.

در این مقاله از مشاهدات ۱۱ سال ماموریت ماهواره ارتفاع سنجی توپکس-پوزایدون مشتمل بر ۳۴۸ گذر استفاده شده است. همچنین لازم به توضیح است که در این تحقیق از مشاهدات هشت گذر اول این ماموریت به دلیل فقدان کیفیت مناسب داده ها، استفاده نشده است.



شکل ۲. مسیر پای ماهواره و نقاط مشاهداتی در منطقه خلیج فارس و دریای عمان.

تایدگیج های ساحلی می توانند نقش مهمی در مدل سازی تغییرات سطح آب دریا به کمک مشاهدات

گرانی آنتن ارتفاع سنج (هاشمی، ۱۳۸۲). لازم به توضیح است که تصحیح دیگری به نام تصحیح جزرومد در فهرست تصحیحات مشاهدات این ماهواره وجود دارد که در این تحقیق چون هدف ما مدل‌سازی جزرومد است این تصحیح اعمال نشد تا مشاهده به دست آمده پس از اعمال تصحیحات، حاوی اطلاعات جزرومدی باشد.

گام دوم: پس از اعمال تصحیحات سامان‌مند یاد شده به مشاهدات ارتفاع‌سنجی می‌توان برای هر نقطه مشاهداتی در سطح دریا یک سری زمانی به صورتی که پیش‌تر ذکر شد تشکیل داد. این سری‌های زمانی شامل زمان و ارتفاع نقطه از بیضوی مرجع هستند. ارتفاع از بیضوی مرجع با استفاده از کم کردن مشاهده سطح دریای تصحیح شده از ارتفاع مرکز جرم ماهواره، موجود در داده‌های عرضه شده، قابل محاسبه است. تعداد این سری‌های زمانی تشکیل داده شده در دریای عمان و خلیج فارس ۷۷۲ عدد است. جدول ۱ برای نمونه یکی از این سری‌های زمانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نمونه‌ای از سری زمانی (سلولی در خلیج فارس).

φ	λ
۲۵٫۶۰	۵۳٫۲۵
Time	H
۱۱۰۶۲۰۶۹۰۰	-۳۲۱۱۸٫۲۵۷
۱۱۰۷۰۶۳۶۰۰	-۳۱۴۲۲
۱۱۰۷۹۲۰۴۰۰	-۳۱۳۹۹٫۳۸۴
۱۱۰۸۷۷۷۱۰۰	-۳۱۶۷۷٫۶۶۴
.	.
.	.
.	.
۱۳۸۷۲۰۸۳۰۰	-۳۲۷۶۲٫۴۷۱
۱۳۸۸۰۶۵۰۰۰	-۳۲۳۷۱٫۶۵۸
۱۳۸۸۹۲۱۷۰۰	داده از دست رفته
۱۳۸۹۷۷۸۴۰۰	-۳۲۵۵۵٫۶۹۵

گام سوم: همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای ایفا کنند. چرا که مشاهدات تایدگیج‌های ساحلی دارای دقت زیادی است و این در حالی است که مشاهدات ارتفاع‌سنجی در سواحل دارای دقت کمتری هستند. بنابر این تلفیق این دو می‌تواند ضعف ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در سواحل را مرتفع سازد.

شکل ۳ موقعیت تایدگیج‌های مورد استفاده در این تحقیق در دریای عمان و خلیج فارس را نشان می‌دهد.



شکل ۳. موقعیت تایدگیج‌های ساحلی در مرز آبی ایران در خلیج فارس و دریای عمان.

فاصله زمانی مشاهدات تایدگیج‌های ساحلی ۱ ساعت بوده است و این امر سبب می‌شود که در مدل‌سازی جزرومدی بتوان بر اساس اصل نمونه‌گیری، امواج با تناوب ۲ ساعته و بیشتر را آشکار ساخت.

۴ مدل‌سازی جزرومد با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به روش عرضه شده در این تحقیق

گام نخست: در اولین گام برای تبدیل سطح لحظه‌ای آب (ISL) به SSH یا همان سطح آب دریاها می‌باید تصحیحات زیر را بر داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای اعمال کرد (پی‌اِدی‌ای‌ای‌سی، ۱۹۹۶):

- (۱) تصحیح وِردسپهر تر، (۲) تصحیح وِردسپهر خشک، (۳) تصحیح یون‌سپهر، (۴) تصحیح بایاس معکوس تاثیر فشار، (۵) تصحیح بایاس الکترومغناطیس، (۶) تصحیح جزرومد قطبی، (۷) تصحیح تغییرات مرکز

$$F(X) = F(X_0) + \frac{dF}{dX_{(X_0)}}(X - X_0) \quad (۳)$$

مقدار اولیه x_{N+1} را می‌توانیم x_N یا $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ در نظر بگیریم:

$$F(X) - F(X_0) = \frac{dF}{dX_{(X_0)}}(X - X_0)$$

$$\Rightarrow dL = A \delta X$$

$$dX = X - X_0 \Rightarrow X = dX + X_0$$

$$A = \frac{dF}{dX_{(X_0)}}$$

روند فوق تا حصول جواب نهایی تکرار خواهد شد.

گام چهارم: گام چهارم استفاده از آنالیز فوریه برای یافتن بسامدهای موجود در سری زمانی و برآورد دامنه و فاز هر بسامد با استفاده از برآورد کمترین مربعات است که پس از پر کردن مشاهدات از دست رفته صورت خواهد گرفت. در شکل‌های ۵ و ۶ بسامدها و تناوب مشاهدات به همراه بزرگی آنها آورده شده است (نمودارهای عرضه شده برای سلولی به مختصات مرکز $\lambda = 52.71$ و $\varphi = 24.44$ است).

حال با استفاده از بسامدهای به دست آمده از آنالیز فوریه، با معلوم فرض نمودن بسامدها از راه روش کمترین مربعات در مدل زیر دامنه، فاز و بخش ثابت موج را یکی پس از دیگری از موج با بیشترین انرژی، برآورد می‌کنیم:

$$Y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t)) \quad (۵)$$

در بین امواج برآورد شده آنهایی که دارای دامنه کمتر از ۳ سانتی‌متر (دقت مفروض برای مشاهدات) باشند از روند محاسبات پیش‌گفته حذف می‌شوند. در جدول ۲ بسامد، تناوب، دامنه و فاز امواج برآورد شده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود امواج با تناوب ماهیانه، نیم‌سالیه و سالیانه بیشترین دامنه را دارند.

یکی از مشکلات این تحقیق وجود گپ (داده از دست رفته) در سری‌های زمانی تشکیل داده شده است که از دست رفتن فواصل مساوی بین مشاهدات سری‌های زمانی را موجب می‌شود. برای رفع این مشکل، یعنی پر کردن گپ‌ها، روش‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از آنها استفاده از توابع خودهمبستگی است که به کمک همبستگی آماری داده‌ها به پیش‌بینی و پر کردن داده‌های از دست رفته به صورت زیر می‌پردازد:

تابع خود همبستگی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد (باکس و جنکینز، ۱۹۸۷):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2]}} \quad (۱)$$

در رابطه فوق x_1, x_2, \dots, x_N سری زمانی معلوم است و r_1, r_2, \dots, r_N همبستگی بین مشاهدات سری زمانی است. حال اگر بخواهیم x_{N+1} را به دست آوریم می‌توانیم سری زمانی جدیدی به صورت زیر تشکیل دهیم $x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1}$ که در آن x_{N+1} مجهول است. برای این مشاهده (x_{N+1}) با توجه به رابطه (۱) می‌توان N معادلات به صورت زیر تشکیل داد:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})(x_{t+1} - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{t=1}^{N+1} (x_t - \bar{x})^2]}}$$

⋮

⋮

$$r_N = \frac{\sum_{t=1}^1 (x_t - \bar{x})(x_{t+N} - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{t=1}^{N+1} (x_t - \bar{x})^2]}} \quad (۲)$$

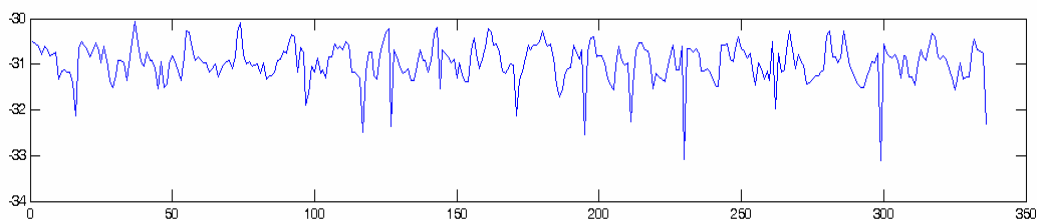
همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معادلات روابطی غیر خطی برحسب x_{N+1} هستند و بنابراین برای تعیین x_{N+1} به کمک این روابط نیازمند خطی‌سازی و حل دستگاه معادلات به روش کمترین مربعات هستیم.

قرار می‌دهیم. تکرار این الگوریتم در ۷۷۲ سلول موجود در دریای عمان و خلیج فارس تعیین کننده مدلسازی جزرومد در دریای عمان و خلیج فارس و نیز سطح متوسط آب به صورت نقطه‌ای خواهد بود.

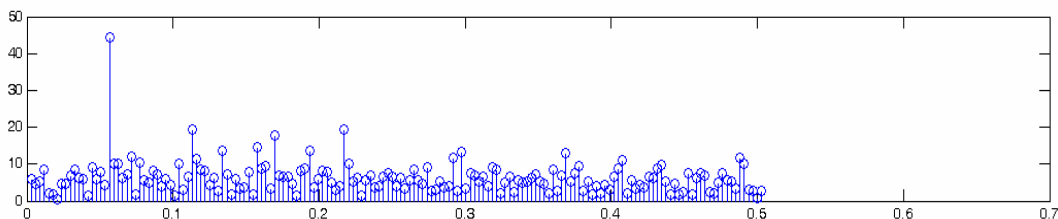
در این مرحله اثر امواج با پریود ۲۰ روز (۹/۹۱۵×۲) و بیشتر مدلسازی شده را از روی داده‌ها حذف می‌گردند. سپس باقیمانده مشاهدات را بر مبنای فاصله زمانی ۲ ساعته مرتب کرده و مجدداً مورد آنالیز فوریه و سرشکنی کمترین مربعات به صورت یادشده

جدول ۲. نه بسامد غالب سلول شکل ۴، به همراه تناوب، دامنه و فاز برآورد شده.

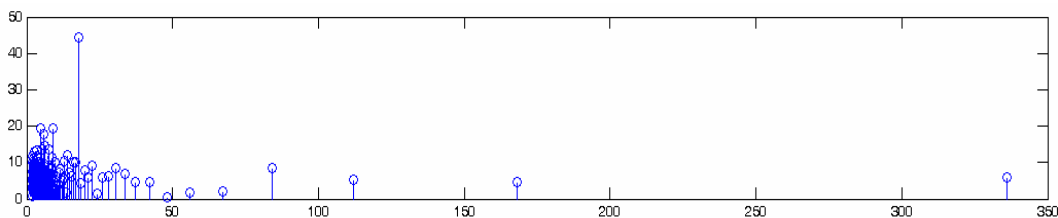
فاز (رادیان)	دامنه (سانتی‌متر)	تناوب (روز)	بسامد
۰٫۰۱۰۵۲	۳۴٫۸۷	۳۰٫۳۷۲۲	۰٫۳۲۶۴۵
۱٫۵۲۲	۳۳٫۷۶	۱۸۲٫۱۶۱	۰٫۰۵۴۴۳
۱٫۴۸۶۸۱	۳۲٫۰۸	۲۰٫۵۶۲۳	۰٫۴۸۲۱۹
-۰٫۰۶۵۲	۲۷٫۶۵	۳۶۶٫۰۰۳	۰٫۰۲۷۰۹
۰٫۱۱۰۶۲	۲۳٫۵۴	۳۱٫۶۵۳۶	۰٫۳۱۳۲۳
۱٫۳۷۶۸۲	۲۳٫۳۲	۲۲٫۴۳۶۵	۰٫۴۴۱۹۱
۱٫۳۸۸۹۸	۱۶٫۲۴	۲۷٫۰۵۸۲	۰٫۳۶۶۴۳
۰٫۱۳۳۱۹	۱۲٫۶۵	۱۳۲٫۰۹۵	۰٫۰۷۵۰۶
۰٫۰۷۵۰۲۵	۱۰٫۴۲	۲۲۱٫۴۳۱	۰٫۰۴۴۷۸



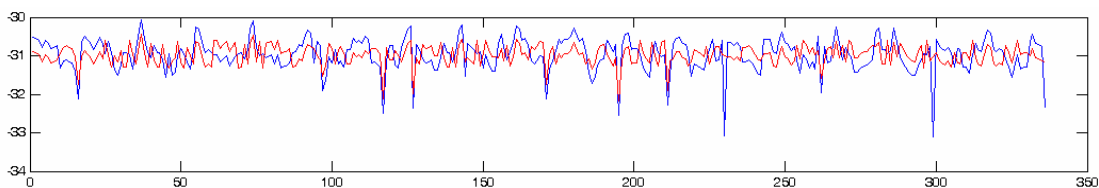
شکل ۴. مشاهدات جزرومد در فاصله زمانی ۹،۹۱۵ روزبر حسب سانتی‌متر طی ۱۱ سال.



شکل ۵. بسامد امواج موجود در مشاهدات.



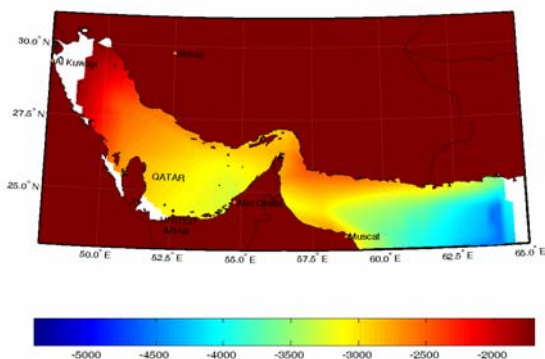
شکل ۶. تناوب امواج موجود در مشاهدات.



شکل ۷. نمودار سرخ - مشاهدات پس از حذف اثر امواج به‌دست آمده بر حسب سانتی‌متر.

۴ نتیجه مقایسه دامنه مولفه‌های استخراج شده از سلول شماره ۶۳۹ و تایید گنج بندر دیر را نشان می‌دهد.

شکل ۸ نشان‌دهنده نقشه MSL حاصل است. برای محاسبه MSL، ۱۱ سال داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای استفاده شده است. در این محاسبه به دلیل یکسان نبودن مبنای ارتفاعی تایید گنج‌های ساحلی و داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای امکان تلفیق آنها به وجود نیامده است. در تهیه این نقشه و همه نقشه‌هایی که در ادامه آورده خواهند شد از سامانه تصویر مرکاتور و درون‌یابی دوخطی برای ایجاد شبکه نقاط منظم استفاده شده است.



شکل ۸. نقشه سطح متوسط آب دریا (MSL) - برحسب ۱۰۰ سانتی‌متر.

در ادامه نقشه‌های هم‌دامنه و هم‌فاز مولفه‌های S2 و M2 و O1 و K1 آورده شده‌اند.

جدول ۳. بسامد، تناوب، دامنه و فاز امواج به‌دست آمده بر مبنای مشاهدات با فواصل زمانی ۲ ساعته برای سلول شکل ۴ (MSL) به‌دست آمده در این نقطه (۳۰.۹۵۴- است).

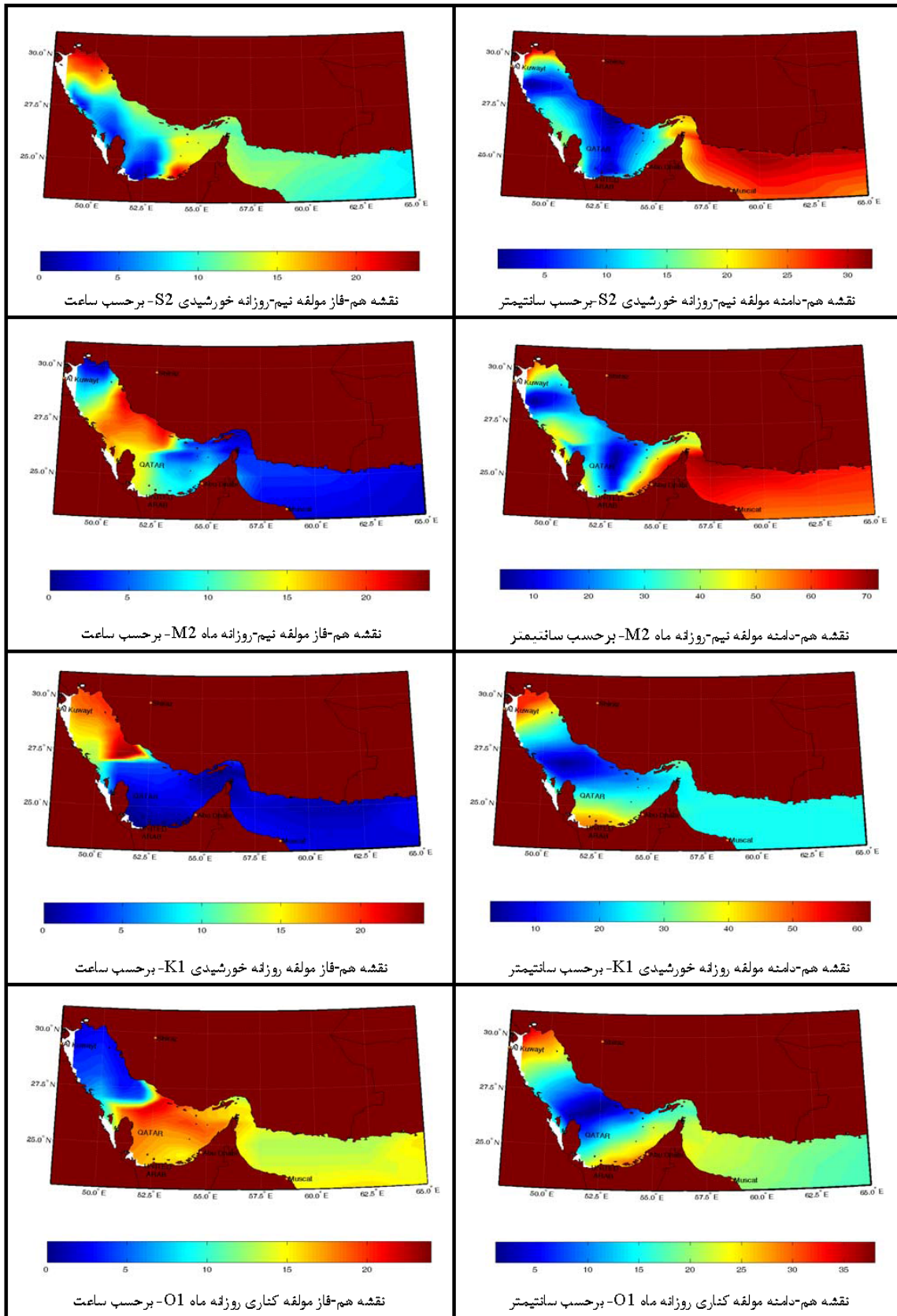
فاز (رادیان)	دامنه (سانتی‌متر)	تناوب (ساعت)	بسامد
۱٫۵۷۴۸۸	۹۷٫۸۱	۱۲٫۴۴	۰٫۳۹۴۴
-۰٫۸۲۵۳	۳۹٫۴۵	۱۲	۰٫۴۰۸۹
-۱٫۵۵۱۶	۳۶٫۰۴	۱۲٫۴۲	۰٫۳۹۵۱
-۲٫۵۱۳	۲۹٫۸۴	۲۳٫۹۲	۰٫۲۰۵۱
-۲٫۰۱۰۲	۲۱٫۲۱	۲۵٫۸۶	۰٫۱۸۹۷
۲٫۹۴۴۳۷	۱۹٫۴۱	۱۲٫۶۱	۰٫۳۸۹۱
۱٫۶۰۲۴۷	۱۹٫۸۳	۱۲٫۳۷	۰٫۳۹۶۷
۰٫۵۵۸۹	۱۷٫۳۰	۲۳٫۹	۰٫۲۰۵۳
-۱٫۵۷۲	۱۶٫۲۱	۱۲٫۴۴۲۶	۰٫۳۹۴۴
-۲٫۲۵۸	۱۲٫۹۶۳	۲۴٫۰۲	۰٫۲۰۴
-۱٫۶۸۵	۱۲٫۴۸۱	۱۱٫۹۸	۰٫۴۱

۴-۱ نتایج عددی حاصل از بررسی موردی

بر پایه اصول محاسباتی ذکر شده در بخش قبل آنالیز جزرومدی در ۷۷۲ سلول تشکیل داده شده در پای ماهواره ارتفاع‌سنجی و ۱۷ تایید گنج ساحلی صورت گرفت. مولفه‌های غالب استخراج شده از این آنالیز، ۵ مولفه جزرومدی (مولفه‌های روزانه خورشیدی، روزانه ماه، نیم‌روزانه خورشیدی، نیم‌روزانه ماه و سالیانه خورشیدی) و سطح متوسط دریا (MSL) است. جدول

جدول ۴. مقایسه دامنه مولفه‌های جزرومدی بدست آمده از تایید گنج بندر دیر و سلول شماره ۶۳۹

مقایسه دامنه‌های مولفه‌های جزرومدی از تایید گنج و ارتفاع سنجی ماهواره ای	تایید گنج بندر دیر		سلول شماره ۶۳۹	
	φ	λ	φ	λ
	۲۷٫۴۹	۵۱٫۵۵	۲۷٫۴۹	۵۱٫۳۲
دامنه مولفه (بر حسب سانتیمتر)	M2	۳۱٫۳	۳۲٫۳	-۱
فاز مولفه (بر حسب ساعت)	M2	۲۲٫۲۳	۲۰٫۸۶	۱٫۳۷
دامنه مولفه (بر حسب سانتیمتر)	S2	۷٫۸۲	۹٫۰۳	-۱٫۲۱
فاز مولفه (بر حسب ساعت)	S2	۸٫۲۳	۱۰٫۲	۱٫۹۷
دامنه مولفه (بر حسب سانتیمتر)	K1	۱۰٫۶۴	۱۱٫۴۵	-۰٫۸۱
فاز مولفه (بر حسب ساعت)	K1	۲۳٫۷	۲۳٫۰۵	۰٫۶۵
دامنه مولفه (بر حسب سانتیمتر)	O1	۸٫۳۹	۹٫۶	-۱٫۲۱
فاز مولفه (بر حسب ساعت)	O1	۲٫۴۳	۲٫۵۴	-۱٫۱۱



۵ بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به مدل سازی تغییرات جزرومدی سطح آب دریا در دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از ۱۱ سال داده های ماهواره توپکس-پوزایدون و اطلاعات تاییدگیج های ساحلی پرداخته شد. همان طور که در بخش نتایج عددی ملاحظه شد در ۷۷۲ سلول تشکیل داده شده در پای ماهواره و ۱۷ ایستگاه ساحلی در دریای عمان و خلیج فارس، سطح متوسط آب دریا (MSL) و مدل جزرومدی تعیین و نقشه سطح متوسط آب دریا و نقشه های هم دامنه و هم فاز مولفه های جزرومدی برای ۴ مولفه $O1$ ، $K1$ ، $M2$ ، $S2$ آورده شد.

به طور خلاصه، این مقاله در تکمیل تحقیقات قبلی به ترکیب اطلاعات جزرومدی ساحلی با مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره ای به صورت نقطه ای پرداخته که کاری جدید در میان مطالعات یاد شده محسوب می شود و به علاوه موجب افزوده شدن ۷۷۲ شبه تاییدگیج در سطح دریای عمان و خلیج فارس به اطلاعات مشابه تاییدگیج های ساحلی شده است.

مزیت عمده روش به کار رفته شده در این تحقیق را می توان در ساده تر کردن مدل های آنالیز جزرومدی و نیز امکان مدل سازی محلی و منطقه ای جزر مد به حساب آورد. نتایج عددی حاصل، موید موفقیت روش است.

منابع

هاشمی فراهانی، حسن؛ آنالیز وضعیت جزرومدی و تهیه نقشه های هم دامنه و هم فاز با استفاده از داده های ماهواره ارتفاعسنجی Topex/Poseidon، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

شجاعی حسن کیاده، کامیار؛ ادغام اطلاعات سنجده هایی ماهواره ای مختلف و اطلاعات ژئوفیزیکی به منظور دستیابی به سطح لحظه ای آب

دریا، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.

مسیب زاده، مهدی؛ تعیین توپوگرافی سطح آب دریای عمان و خلیج فارس از طریق تلفیق GPS و مشاهدات تاییدگیج ها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.

پورشریفی، تعیین توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان را با استفاده از داده های ارتفاعسنجی ماهواره ای، علی پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۵.

رستمی، قاسم؛ مدل سازی چهاربعدی تغییرات لحظه ای سطح دریا مطالعات خاص: سطح متوسط دریا و توپوگرافی دریا در دریای عمان و خلیج فارس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.

سهرابی اطهر، مهدی؛ تهیه چارت های دریایی با استفاده از مختصات سه بعدی GPS و مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.

عرب صاحبی، رضا؛ تعیین میدان ثقل زمین از طریق مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.

صنایعی، رضا؛ بررسی اعتبار داده های ثقلی دریایی از طریق ارتفاعسنجی ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.

جعفری، عباس؛ بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره ای و تاییدگیج های ساحلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

جلیل نژاد، مجید؛ ارزیابی مدل های مختلف به کار رفته در تعیین MSL با استفاده از مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی

دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

- Box, J. A. P. and Jenkins, J. M., 1987, Time series analysis, Prediction and Control, Wiley, New York.
- Darwin, G. H., 1879, Proceedings of the Royal Society of London, Volume **29**.
- Schwiderski, E. W. 1980, On charting global ocean tides, Reviews of Geophysics and Space Physics, **18**, 243-268.
- Lefebvre, M. and Stewart, R., 1996, History of altimetry 1960–1992.
- PO.DAAC, 1996, PO.DAAC Merged GDR (TOPEX/POSEIDON) Users Handbook, JPL, D-11007, November.
- Wang, Y., 2004, Ocean Tide Modeling in the Southern Ocean Report No.471, The Ohio State University.
- Cartwright, D. E. and Ray R. D., 1990, Oceanic tides from Geosat altimetry, Journal of Geophysical Research, **95** (C3), 3069-3090.
- Cartwright, D. E. and Ray R. D., 1991, Energetics of global ocean tides from Geosat altimetry, Journal of Geophysical Research, **96**(C9), 16897-16912.