

اعتبارسنجی مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی در نواحی ساحلی خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از نتایج حاصل از کشندسنج‌های ساحلی

حسین زمردیان^۱، علیرضا آزموده اردلان^۲ و نسرین خدابخش شهرستانی^{۳*}

^۱استاد، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲استاد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران، ایران

^۳کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۴/۲۴، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

هدف از این تحقیق، اعتبارسنجی مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی، FES99، NAO.99b، FES2004، TPXO6.2، TPXO7.1، در آب‌های خلیج فارس و دریای عمان و انتخاب یک مدل بهینه در منطقه است تا بتوان از آن برای تعیین ویژگی‌های کشند و تعیین سطح متوسط تراز دریا استفاده کرد. به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها، نتایج تحلیل کشندی حاصل از آنها با نتایج تحلیل کشندی برمبنای مشاهدات کشندسنج‌های ساحلی در خلیج فارس و دریای عمان مقایسه شد. در این تحقیق برای دستیابی به نتایج تحلیل کشندی براساس داده‌های ایستگاه‌های کشندسنجی (جاسک، چابهار، شهیدرجایی، بوشهر، امام حسن، کنگان)، دو روش نرم‌افزار فورمن و روش تحلیل فوریه به همراه کمترین مربعات به کار برده شد. نتایج حاصل از مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی در مقایسه با نتایج کشندسنج‌ها، هر دو روش نشان دادند که اگرچه نتایج همه مدل‌ها بهترین انطباق را با نتایج کشندسنج‌های واقع در بندرهای جاسک و چابهار (ایستگاه‌های نزدیک به دریای آزاد) را نشان می‌دهند لیکن مدل FES2004، بهترین تطابق را با نتایج حاصل از کشندسنج‌ها در منطقه دارد، به طوری که در مقایسه با نتایج کشندسنج‌های حاصل از مدل‌سازی کشندی، دارای کمترین RSS برای rms دامنه (۸/۵۸۴۳ سانتی‌متر)، است و همچنین مدل FES2004 در مقایسه با نتایج حاصل از نرم‌افزار فورمن کمترین RSS برای rms دامنه (۸/۷۹۵ سانتی‌متر) و کمترین RSS برای RMS بردار تفاضل تابع موج (۹/۳۷۸ سانتی‌متر) در منطقه مورد بررسی را دارد.

واژه‌های کلیدی: کشند، مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی، مولفه‌های کشندی، سطح متوسط دریا، کشندسنج

Validation of global ocean tide models in coastal regions of Persian Gulf and Oman Sea using coastal tide gauge observations

Zomorodian, H.¹, Ardalan, A. A.² and Khodabakhsh-Shahrestani, N.³

¹Professor, Department of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³M.Sc. in Geophysics, Department of Geophysics (Gravimetry), Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 14 Jul 2012, Accepted: 14 May 2013)

Summary

In recent years, several ocean tide models have been used to calculate tides using data of satellite and tide gauges data. Global ocean tide models have many applications in various sciences such as geophysics, geology and geodesy and oceanography. Considering the existence of many models, a quantitative evaluation of research, and ranking and selecting the best model of the global ocean tide Models is considered as an important

E-mail: khodabakhsh@dp-g.net

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۴۷۹

تلفن: ۰۹۱۱۱۳۷۵۲۸۹

*نگارنده رابط:

objective

The purpose of this study is validation of global ocean tide models including, FES2004, FES99, NAO.99b, TPXO6.2, TPXO7.1, in the Persian Gulf and Oman sea and selecting the optimal model which can be used to determine the characteristics of the tide in these regions. Since most of the global tide models are designed for deep sea, so the models evaluated in this study have been chosen not only suitable to the latitude and the longitude of the Persian Gulf and Oman Sea but also to be used in the shallow sea as well Oman Sea.

In order to evaluate the models, the tidal analysis results obtained from the models are compared with the tidal analysis based on tide gauge observations in the Persian Gulf and Oman Sea (Jask, Chahbahar, Shahid Rajaei, Bushehr, Emam Hassan, Kangan). For the tidal analysis based on global ocean tide models we must test the models. To test the models TPXO6.2 and TPXO7.1, we have to use special software called Tide Model Driver (TMD). The TMD package contains scripted function for use in batch-mode Matlab processing. The input data are the geographical latitudes and longitudes of the studied area as well as the selected tidal components. The output data will be the amplitudes and the phases of the tidal components. The models (FES2004, FES99, and NAO99b) open in Matlab and need a short program in Matlab for determining the geographical situation in the area of the Persian Gulf and Oman Sea. The input data are the geographical latitudes and longitudes of the studied area as well as the selected tidal components. The output data will be the amplitudes and the phases of the tidal components.

In this research the tidal analysis based on tide gauges is conducted in two ways: tidal modeling and utilizing the results of IOS software. The tidal modeling was used with the Fourier sine and cosine series expansion and least squares.

In both ways it was resulted that the major section of elevation data at the stations related to main tidal components (K_1 , O_1 , M_2 , S_2) and the largest amplitude observed in stations is related to M_2 . In this study the results of five models of the global tide ocean compared with the results acquired by tide gauges using software IOS and at all stations using several different statistical method. The statistical are.

- Amplitude root mean square
- Rss of amplitude root mean square
- Vector difference root mean squares
- Rss Vector difference root mean squares

Assesment of root mean square of amplitude of tidal components that are driven by the models in this research are compared with the tide gauges results (using both two manner, software and tidal modeling) showed that the root mean squares of all estimated amplitudes of models except FES99 is less than dm. The results of statisstical analysis showed that the best agreement with the tide gauge results with the tide results evaluated by models is corresponding to Jask and Chahbahar which are closer the open sea; and results of the FES2004 model has the best agreement with the tide gauge results in the Persian Gulf and Oman Sea.

Results of FES2004 model which are compared with results of tidal gauge showed that this model has the lowest Rss for RMS for amplitude (8.5843cm). Results of FES2004 model which compared with results of IOS software showed that this model has the lowest Rss for RMS for amplitude (8.795 cm), also the FES2004 model has the lowest Rss for RMS differential vector (9.378 cm).

Keywords: Tide, Global ocean tide models, Tidal component, Mean sea level, Tide gauge

۱ مقدمه

به تغییرات منظم ارتفاع آب یا پوسته زمین در یک دوره تناوب، تحت تاثیر نیروی گرانی ماه و خورشید، کشتند یا جزرومد گویند (آزموده اردلان و هاشمی فراهانی، ۱۳۸۵). برای اندازه‌گیری ارتفاعات کشتندی در سواحل، از کشتندسنج‌های ساحلی استفاده می‌شود اما با توجه به وسعت دریاها، ایستگاه‌های کشتندسنجی نمی‌توانند تصویری جامع از همه نقاط آب‌های دریا یا اقیانوس‌ها به دست دهند و همواره در تعیین نقطه صفر ارتفاعی، سبب ایجاد تفاوت صفر کشورهای جهان و در نتیجه سبب مشکلات اجرایی در مورد طرح‌ها و تحقیقات مرزی کشورها می‌شوند، به همین علت محققان برای دستیابی به اطلاعات دقیق از وضعیت سطح آب‌های جهان به استفاده از روش‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای روی آورده اند و با تلفیق نتایج ارتفاع‌سنجی و کشتندسنج‌ها، مدل‌های جهانی کشتند اقیانوسی را طراحی کرده‌اند، (بیکروباس، ۲۰۰۳). به‌طور کلی مزایای استفاده از مدل‌های جهانی کشتند اقیانوسی عبارت‌اند از:

۱. این مدل‌ها می‌توانند علاوه بر دامنه و فاز مولفه‌های کشتندی نقشه‌های هم‌دامنه و هم‌فاز کشتندی مولفه‌های اصلی کشتندی را در جهان و در منطقه مورد بررسی، تعیین کنند (بیکروباس، ۲۰۰۳).

۲. از آنجا که یکی از تصحیحات لازم برای مشاهدات دقیق ژئودزی و ژئودینامیک برای محاسبه گرانی یک نقطه، تعیین کشتند و حذف آن است به همین علت استفاده از این مدل‌ها سبب تسهیل در محاسبات گرانی می‌شود.

۳. با استفاده از مدل‌ها بدون محاسبات طولانی، مقدار بارگذاری کشتند اقیانوسی در هر منطقه تعیین می‌شود.

۴. با تعیین مدل بهینه و با توجه به شرایط مرزی و اقلیمی منطقه، می‌توان از آن در طراحی مدل کشتند محلی استفاده کرد.

۱-۱ مروری بر سوابق تحقیقات

اعتبارسنجی مدل‌های جهانی کشتند اقیانوسی از مسائل و به روز تحقیقاتی دنیا به به شمار می‌رود در این راستا سازمان بین‌المللی علوم اقیانوسی IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Ocean. <http://amcg.es.eic.ac.uk>). برای یافتن مدل بهینه در کشور آمریکا و کشور انگلستان، ده مدل جهانی را بر اساس داده‌های کشتندسنج‌های ساحلی مورد اعتبارسنجی قرار دادند. در ایران نیز براساس تابع‌های متعامد و یازده سال مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای Topex poseidon، مدلی جدید برای تعیین سطح متوسط جهانی دریا عرضه شد که هدف آن بررسی تحلیل هماهنگ (هارمونیک) تغییرات سطح آب‌های جهان و مدل‌سازی پدیده کشتند به‌صورت جهانی برای آب‌های آزاد بود (آزموده اردلان و هاشمی فراهانی، ۱۳۸۵). اگرچه در ایران، مدل‌های سطح متوسط دریا با استفاده از داده‌های ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند (جلیل نژاد، ۱۳۸۵)، ولی هیچ‌گونه اعتبارسنجی از مدل‌های جهانی کشتند اقیانوسی در ایران صورت نگرفته است.

۲ مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از میان ده‌ها مدل جهانی کشتند اقیانوسی، مدل‌هایی مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند که نه فقط متناسب با طول و عرض جغرافیایی منطقه خلیج فارس و دریای عمان باشند بلکه به‌علت کم‌عمق بودن خلیج فارس (به‌طور متوسط ۲۵ متر) برای نواحی کم‌عمق نیز طراحی شده باشند. مراحل طی شده در راستای اعتبارسنجی مدل‌های جهانی کشتند اقیانوسی عبارت‌اند از:

۱- به‌دست آوردن سری زمانی با در اختیار داشتن اطلاعات کشتندی شامل ارتفاع آب و زمان خواندن

ارتفاع آب.

۲- تعیین دامنه‌ها و فازهای مولفه‌های اصلی کشندی به دست آمده از کشندسنج‌ها با استفاده از مدل‌سازی کشندی و نرم‌افزار فورمن و با استفاده از مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی.

۳- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی و نتایج به دست آمده حاصل از مدل‌سازی کشندی و نرم‌افزار فورمن، با استفاده از روش‌های آماری و رتبه‌بندی مدل‌ها.

۱-۲ استفاده از نرم‌افزار فورمن (IOS) برای تحلیل

و پیش‌بینی جزرومد

فورمن و همکارانش برای تحلیل پدیده کشند و جریان‌های کشندی برنامه‌هایی را با استفاده از سری فوریه و روش حداقل مربعات به زبان فورترن ۷۷ نوشتند. بعدها فورمن و کرافورد با اجرای اصلاحاتی، این برنامه را به صورت نرم‌افزار IOS عرضه کردند که می‌توان این نرم افزار را از آدرس (<http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca>) دانلود کرد. در این برنامه معادله موج طبق رابطه (۱) فرض شد و هدف از به کارگیری سری فوریه و روش حداقل مربعات، کمینه کردن موج غیر کشندی T رابطه (۲) بود که در آن y_i مشاهدات حاصل از کشندسنج‌ها و j شماره موج هستند (فورمن، ۱۹۷۷).

$$x(t) = a_0/2 + \sum_{j=1}^N a_j \cos 2\pi f_j t_i - b_j \sin 2\pi f_j t_i \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^N [y_i - a_0/2 - \sum_{j=1}^N a_j \cos 2\pi f_j t_i - b_j \sin 2\pi f_j t_i]^2 \quad (2)$$

سازمانها و موسسه‌های گوناگونی در سراسر دنیا از این نرم افزار استفاده می‌کنند از جمله سازمان سازمان نقشه‌برداری ایران و موسسه اقیانوس‌شناسی و شیلات کشور کانادا و.... این نرم‌افزار قادر است بسامدهای کم مانند بسامد حرکت تقدیمی زمین ($10^{-7} \times 6/3434$ دور بر ساعت) را که نوفه

می‌شوند حذف کند (فورمن، ۱۹۷۷). داده‌های ورودی برای اجرای نرم‌افزار فورمن، عبارت‌اند از ارتفاعات کشندی، مختصات، طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌های کشندسنج، قرن، سال، ماه، روز و ساعت شروع و پایان مشاهدات کشندی و داده‌های خروجی نرم‌افزار عبارت‌اند از مقدار دامنه‌ها و فازهای مولفه‌های کشندی. حداقل زمانی که نرم‌افزار فورمن برای تحلیل کشندی احتیاج دارد، سیزده ساعت است ولی تعداد مولفه‌های استخراجی در این حالت بسیار کم است. اگر داده‌های یک ماه در حکم ورودی به نرم‌افزار داده شود، خروجی نرم‌افزار مقدار دامنه‌ها و فازهای ۲۹ مولفه کشندی را تعیین می‌کند. این نرم‌افزار می‌تواند با دادن داده‌های بیشتر تا دو ماه مقدار دامنه‌ها و فازهای ۶۰ مولفه کشندی را تعیین کند که بیشترین بسامد آن ($10^{-1} \times 3/220455$ دور بر ساعت) و کمترین بسامد ($10^{-5} \times 2/816$ دور بر ساعت) (فورمن، ۱۹۷۷). نمونه‌ای از فایل خروجی در جدول ۱ آمده است.

۲-۲ الگوریتم مدل‌سازی کشندی سطح آب‌های

خلیج فارس و دریای عمان براساس تحلیل فوریه

۱-۲-۲ تعیین فاصله زمانی نمونه‌برداری (تعیین بسامد

پایه و بسامد نایکوست)

با بررسی داده‌های کشندسنج‌ها فاصله زمانی بین آنها $\Delta T = 0/5$ (hour) تعیین شد و برای جلوگیری از پدیده الیاسینگ، از مشاهداتی استفاده شد که بسامدهایشان مابین بسامد پایه رابطه (۳) و بسامد Nyquist (بزرگ‌ترین بسامد بردار مشاهدات) طبق رابطه (۴) (آزموده اردلان و مسیب‌زاده، ۱۳۸۵) باشند. در این تحقیق برای پیدا کردن بسامد کمینه، امواج با تناوب‌های بیشتر از دو ساعت انتخاب شدند.

$$f_0 = \frac{1}{nt} \quad (3)$$

$$f(t) = \sum_{i=0}^k (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} f(t_1) \\ f(t_2) \\ \vdots \\ f(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(w_k t_1), \sin(w_k t_1) \\ \cos(w_k t_2), \sin(w_k t_2) \\ \vdots \\ \cos(w_k t_k), \sin(w_k t_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (15)$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (16)$$

$$\varphi = 2 \arctan\left(\frac{-b}{A+a}\right) \quad (17)$$

۲-۳-۳ معرفی مدل‌های جهانی کشنده اقیانوسی مورد

بررسی در این تحقیق

۲-۳-۱ مدل TPXO6.2

مدل TPXO6.2 مدلی هیدرودینامیکی است که با استفاده از داده‌های ماهواره Topex poseidon به مدت شش سال با توان تفکیک متوسط 0.25×0.25 درجه طراحی شده است. با استفاده از آن می‌توان علاوه بر تعیین سرعت امواج، دامنه و فاز مولفه‌ها و رسم نقشه‌های مولفه‌های هم-دامنه و هم‌فاز کشندی، مقدار بارگذاری کشنده اقیانوسی را محاسبه کرد (اگبرت و اروفی‌وا، ۲۰۰۳)، نتایج محاسبه RSS برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشنده‌سنج‌های ایستگاه‌های مورد تحقیق، طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل TPXO6.2 با وجود نتایج خوب آن در شش ایستگاه، نسبت به مدل‌های دیگر دارای رتبه چهارم است.

۲-۳-۲ مدل TPXO7.1

با افزایش مأموریت ماهواره Topex Poseidon و بهبود روش‌های عمق‌یابی، مدل TPXO7.1 با توان تفکیک 0.25×0.25 درجه، عرضه شد. برای اجرا کردن سری

$$f = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{n}{2n\Delta t} = \frac{n}{2} f_0 \quad (4)$$

۲-۲-۲ تبدیل فوریه و تعیین ضرایب فوریه

طبق رابطه (۵) سری زمانی مشاهدات با بردار $x(k)$ نشان داده می‌شود و چون هر مشاهده X_j مختلط و تناوبی است می‌توان با رابطه (۶) آن را نشان داد. از آنجا که مشاهدات طبق رابطه (۷) از $k=0$ تا $N-1$ تناوبی هستند با تبدیل فوریه گرفتن از بردار مشاهدات $x(k)$ ، طبق رابطه (۸)، تابع معکوس آن طبق رابطه (۹)، یعنی $x(n)$ بدست می‌آید. با انتقال یافتن بردار مشاهدات با تبدیل فوریه، یک بردار متناظر با آن به نام $X(K)$ ظاهر می‌شود که طبق رابطه (۱۰) دارای اعداد موهومی است (آزموده اردلان و مسیب‌زاده، ۱۳۸۵).

$$x(k) = x_0, x_1, \dots, x_{N-1} \quad (5)$$

$$x_j = x_{\text{real}} + i x_{\text{image}} \quad (6)$$

$$x_k = x_{k+N} \quad (7)$$

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^n x(k) e^{2\pi k n i / N} \quad (8)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^n X(k) e^{2\pi k n i / N} \quad (9)$$

$$x_j = x_{\text{real}} + i x_{\text{image}} \quad (10)$$

رابطه (۱۱) در واقع معرف توان و یا مقدار تاثیر هر کدام از مولفه‌های بردار X روی بردار مشاهدات x است. هر مولفه از بردار رابطه X نشان‌دهنده یک بسامد است که از رابطه (۱۲) به دست می‌آید (آزموده اردلان و مسیب‌زاده، ۱۳۸۵). رابطه (۱۳) معادله ارتفاع کشندی را به صورت خطی نشان می‌دهد که برای یافتن دامنه و فاز همه مولفه‌های کشندی آن، از روش حداقل مربعات طبق رابطه (۱۴) استفاده می‌شود با تعیین a و b از رابطه (۱۵) و دامنه از رابطه (۱۶) اختلاف فاز از رابطه (۱۷) بدست می‌آید (ونیسک و کراکیوسکی، ۱۹۹۱).

$$\text{توان} = \sqrt{x_{\text{real}}^2 + x_{\text{imag}}^2} \quad (11)$$

$$f_i = \frac{i}{N/2} f_{\text{max}} \quad (12)$$

شبهه‌سازی داده‌های کشندسنج‌ها در ۶۷۱ ایستگاه، طراحی شد (لفوک و همکاران، ۲۰۰۶). مدل‌های FES را می‌توان از طریق اینترنت (<http://www.aviso.oceanobs.com>) تهیه کرد. در این تحقیق، برای اجرای این مدل‌ها از نرم‌افزار متلب استفاده شد. نتایج محاسبه RSS برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنج‌های در ایستگاه‌های مورد تحقیق، در جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل FES2004 در شش ایستگاه نسبت به مدل‌های دیگر دارای رتبه اول است.

۲-۳-۵ مدل NAO.99b

محققان ژاپنی در گذشته برای پیش‌بینی ارتفاعات کشندی در شبه جزیره ژاپن در زمان و مکان معین، از برنامه‌ای به نام ناوتاید (Naotide) استفاده می‌کردند ولی با این برنامه، ژاپنی‌ها فقط می‌توانستند اطلاعات جزرومدی نقاط محدودی از منطقه مورد بررسی را که دارای ایستگاه‌های کشندسنجی بودند، تهیه کنند. به همین دلیل محققان ژاپنی با به‌کارگیری ماهواره ارتفاع‌سنجی تاپکس-پوزیدون و با استفاده از شبهه‌سازی پنج سال داده‌های ماهواره در منطقه و همچنین با شبهه‌سازی داده‌های حاصل از ۲۱۹ ایستگاه کشندسنجی در معادلات هیدرودینامیکی توانستند مدل کشند جهانی NAO.99b را طراحی کنند. سپس ماتسوموتو تا کازاوا اوئی و همکاران (۲۰۰۰) این مدل را بهبود بخشیدند و از آن برای تحلیل باقی‌مانده سطح دریا به روش عکس‌العمل استفاده کردند، با روش عکس‌العمل یک سامانه فیزیکی را می‌توان هم در قلمرو زمان و هم در قلمرو بسامد، مدل‌سازی کرد. آنان همچنین معادلات هیدرودینامیکی اسچویدرسکی را با در نظر گرفتن اثرات بارگذاری اقیانوسی بهبود بخشیدند و مدل کشند جهانی NAO.99b را عرضه کردند. این مدل

مدل‌های TPXO در این تحقیق، از نرم‌افزار Tide model driver یا TMD (www.oso.com) استفاده شده است که ورودی آن، طول و عرض جغرافیایی منطقه و نوع مولفه‌های کشندی و خروجی آن، دامنه‌ها و فازهای مولفه‌های کشندی هستند (هاونگک و چن، ۱۹۹۷). نتایج محاسبه RSS برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنج‌های ایستگاه‌های مورد تحقیق، طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل TPXO7.1 با وجود نتایج خوب آن در شش ایستگاه، نسبت به مدل‌های دیگر دارای رتبه دوم است.

۲-۳-۳ مدل FES99

مدل هیدرودینامیکی FES99 بر مبنای داده‌های ۷۰۰ کشندسنج و ۶۸۷ دوره مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی TOPEX POSEIDON و ERS با روش حل کران محدود (Finite Element solution) و توان تفکیک 0.25×0.25 درجه طراحی شده است. با به‌کارگیری مدل FES99 ارتفاع و سرعت جریان مولفه‌های کشندی $Q_2, S, K_2, O_2, 2N_2, M_2, N_2$ تعیین می‌شوند (لی پروست و همکاران، ۱۹۹۸). نتایج محاسبه RSS برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنج‌های ایستگاه‌های مورد تحقیق، طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که با وجود نتایج خوب مدل FES99 در دو ایستگاه نزدیک به دریای عمان نسبت به مدل‌های دیگر در رتبه پنجم است.

۲-۳-۴ مدل FES2004

به علت نتیجه‌های ضعیف مدل FES99 در نواحی ساحلی، مدل هیدرو دینامیکی FES2004 روی شبکه با توان تفکیک بیشتر 0.125×0.125 درجه و با استفاده از

۳-۱ اعتبارسنجی بردار تفاضل و RMS بردار تفاضل رابطه‌های (۲۰) و (۲۱) به ترتیب معادلات موج حاصل از مشاهده و مدل هستند. اگر حاصل ضرب دامنه مولفه کشند در سینوس فاز (U)، و حاصل ضرب دامنه مولفه کشند در سینوس فاز (V) به ترتیب با رابطه‌های (۲۲) و (۲۳)، تابع‌های موج مدل نامیده شوند، طبق رابطه (۲۴)، برای دو تابع موج حاصل از مشاهده و مدل بردار تفاضل d برای هر مولفه کشندی به دست می‌آید که در آن u_i^0 و v_i^0 تابع موج‌های نرم‌افزار فورمن هستند. اگر n تعداد ایستگاه‌های کشندسنجی باشد، RMS بردار تفاضل تابع موج مولفه‌های حاصل از مدل‌ها در مقایسه با تابع موج مولفه‌های حاصل از نرم‌افزار نیز از رابطه (۲۵) تعیین می‌شود (جینگ یانگ و همکاران، ۲۰۰۱).

$$x_o(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin \phi_n + b_n \cos \phi_n) \quad (20)$$

$$x_m(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_m \sin \phi_m + b_m \cos \phi_m) \quad (21)$$

$$u = A \cos \phi \quad (22)$$

$$V = A \sin \phi \quad (23)$$

$$d = \sqrt{(u_i - u_i^0)^2 + (v_i - v_i^0)^2} \quad (24)$$

$$RMS = \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(u_i - u_i^0)^2 + (v_i - v_i^0)^2] \right\}^{1/2} \quad (25)$$

۴ نتایج

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی کشندی و نرم‌افزار فورمن و پنج مدل جهانی برای شش ایستگاه، تحلیل کشندی صورت گرفت. جدول‌های ۱ و ۲ نمونه‌هایی از تحلیل کشندی با نرم‌افزار فورمن و مدل FES2004 در بندر جاسک را نشان می‌دهند.

با استفاده از رابطه (۱۸) در شکل ۱، rms دامنه‌های مولفه‌های اصلی کشندی حاصل از مدل‌ها در مقایسه با نتایج حاصل از نرم‌افزار فورمن در شش ایستگاه به دست

بهبود یافته مدل قبلی و توان تفکیک آن برابر با ۰/۵ درجه است. این مدل می‌تواند دامنه و فاز شانزده مولفه کشندی را تعیین کند. محققان ژاپنی پس از طراحی مدل NAO.99b با اضافه کردن شرایط محلی و منطقه‌ای خودشان برای دریای ژاپن و نواحی نزدیک به آن، مدل محلی به نام NAO.99Jb را طراحی کردند (ماتسوموتو تاکانراوا اوئی و همکاران، ۲۰۰۰). نتایج محاسبه rss برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار rss برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنجی‌های ایستگاه‌های مورد تحقیق، طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که این مدل با وجود نتایج خوب آن در شش ایستگاه، نسبت به مدل‌های دیگر دارای رتبه سوم است.

۳ تعیین RMS و rss برای rms دامنه‌های مولفه‌های اصلی

برای مقایسه دامنه‌های چهار مولفه اصلی جزرومدی K_2 ، O_1 ، S_2 ، M_2 حاصل از مدل‌ها و دامنه‌های متناظر حاصل از کشندسنجی‌ها از ریشه میانگین مربعات یا rms (root mean square) طبق رابطه (۱۸) استفاده می‌شود که A_{mi} نشان‌دهنده دامنه حاصل از هر مدل در هر ایستگاه A_{oi} دامنه حاصل از کشندسنجی‌ها در هر ایستگاه است (هانگ و چن، ۱۹۹۷).

$$rms = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_{mi} - A_{oi})^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

برای تعیین میزان تطابق نتایج حاصل از مدل‌ها با نتایج حاصل از کشندسنجی‌ها برای چهار مولفه اصلی، از کمترین مقدار جذر برآیند مربعات (root sum square) یا rss برای rms دامنه‌های مولفه‌های اصلی کشندی طبق رابطه (۱۹) استفاده می‌شود (جینگ یانگ و همکاران، ۲۰۰۱).

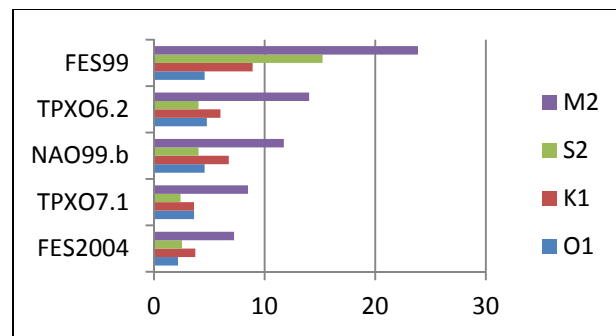
$$rss = \left(\sum_{j=1}^m rsm_j^2 \right)^{1/2} \quad (19)$$

دامنه‌های مولفه‌های کشندی حاصل از مدل‌ها و همچنین طبق رابطه (۱۹) مقدار ISS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنج‌ها از هر دو روش نرم‌افزار و مدل‌سازی محاسبه شدند که نتیجه آن در جدول ۳ آورده شده است.

آمد. همچنین برای پنج مدل جهانی کشند اقیانوسی بردار تفاضل تابع موج از رابطه (۲۴) محاسبه شد که برای نمونه، نتایج محاسبه بردار تفاضل تابع موج مولفه‌های حاصل از مدل FES2004 و نرم‌افزار فورمن در شکل ۲ آورده شده است. سپس به منظور رتبه‌بندی مدل‌ها ISS برای RMS

جدول ۱. تحلیل سالانه جزرومد در بندر جاسک سال ۲۰۰۵ با استفاده از نرم‌افزار فورمن برای نه مولفه اصلی کشندی.

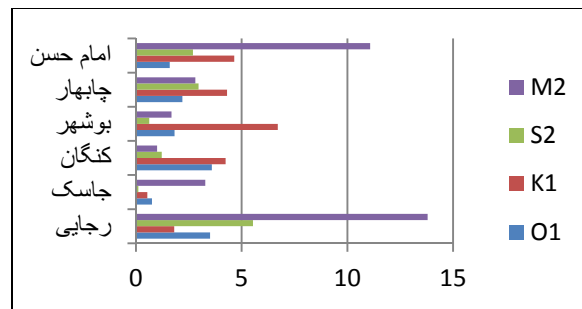
شماره	مولفه کشندی	دوره تناوب (ساعت)	دامنه (سانتی‌متر)	فاز (درجه)
۱	S ₂	۱۲	۲۶/۹۳	۲۹۰/۷۴
۲	M ₂	۱۲/۴۲۰۶	۶۶/۰۹	۲۵۷/۶۱
۳	K ₁	۲۳/۹۳۴۵	۳۹/۸۴	۳۲/۸۴
۳	O ₁	۲۵/۸۱۹۳	۱۹/۷۹	۳۰/۶۴



شکل ۱. مقایسه RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی با دامنه‌های حاصل از نرم‌افزار فورمن برحسب سانتی‌متر در شش ایستگاه کشندسنجی امام حسن - چابهار - بوشهر - کنگان - جاسک - شهید رجایی.

جدول ۲. تحلیل جزرومد با استفاده از مدل FES2004 در بندر جاسک سال ۲۰۰۵.

شماره	نام مولفه کشندی	دوره تناوب (ساعت)	دامنه (cm)	فاز (درجه)
۱	S ₂	۱۲	۲۷/۰۴۴	۱۸۶/۱۷
۲	M ₂	۱۲/۴۲۰۶	۶۹/۳۶۸	۱۵۶/۷۵
۳	K ₁	۲۳/۹۳۴۵	۴۰/۳۷۸	۳۴۰/۱۴۲
۳	O ₁	۲۵/۸۱۹۳	۲۰/۵۵۴	۳۴۰/۶۱۶



شکل ۲. مقایسه بردار تفاضل تابع موج چهار مولفه اصلی کشندی حاصل از مدل FES2004 با نتایج حاصل از کشندسنج‌ها با استفاده از نرم‌افزار فورمن بر حسب سانتی‌متر در شش ایستگاه کشندسنجی امام حسن - چابهار - بوشهر - کنگان - جاسک - شهید رجایی.

جدول ۳. نتایج محاسبه RMS برای دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌ها و مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع موج حاصل از مدل‌ها در مقایسه با مشاهدات کشندسنج‌ها.

نام مدل جهانی	RMS دامنه‌های مدل با نتایج نرم‌افزار	RMS برای تفاضل تابع موج	RMS برای نتایج مدل‌سازی	رتبه‌بندی
FES2004	۸/۷۹۵	۹/۳۷۸	۸/۵۸۴۳	اول
TPX07.1	۱۰/۲۰۳	۱۱/۹۹۲	۲۴/۵۳۹۱	دوم
NAO99.b	۱۴/۸۵۳۳	۱۵/۵۳۸	۲۵/۴۲۸۳	سوم
TPX06.2	۱۶/۴۹۴۱	۲۲/۶۱۷۷	۲۶/۸۹۰۳	چهارم
FES99	۳۰/۰۳۸۹	۶۸/۸۹۳۶	۳۰/۹۵۳۸	پنجم

۵ نتیجه‌گیری

موج مدل‌ها و کشندسنج‌ها (با استفاده از نرم‌افزار)، مشاهده شده است که در هر دو مقایسه، رتبه‌بندی مدل‌ها یکسان هستند و معلوم شد که نتایج مدل FES2004 نسبت به سایر مدل‌ها دارای تطابق بهتری با نتایج کشندسنج‌ها در منطقه مورد بررسی در این تحقیق هستند و می‌توان این برتری را ناشی از به‌کارگیری داده‌های بیشتر و عمق‌یابی مناسب‌تر و از همه مهم‌تر، داشتن شبکه با توان تفکیک بهتر $0/125 \times 0/125$ درجه، نسبت به سایر مدل‌ها، دانست. بنادر ایرانی مورد اعتبارسنجی در این تحقیق در شمال خلیج فارس در جنوب ایران و در استان بوشهر واقع هستند و مرکز ملی کارتوگرافی ایران زیر نظر سازمان نقشه‌برداری ایران در نواحی ساحلی خلیج فارس و دریای عمان ایستگاه‌های کشندسنجی را احداث کرده است که طی آن ارتفاعات کشندی در هر شرایط جوی و محیطی

قدرمطلق اختلاف دامنه‌های حاصل از مدل‌ها با دامنه‌های حاصل از کشندسنج‌ها و همچنین بزرگی بردار تفاضل تابع‌های موج مدل‌ها با تابع‌های موج حاصل از کشندسنج‌ها روشن ساختند که این مدل‌ها دارای کمترین قدرمطلق اختلاف دامنه و بردار تفاضل موج برای مولفه‌های اصلی هستند که در بندرهای نزدیک به دریای آزاد (بندرهای جاسک و چابهار) بدست آمدند، زیرا ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در نواحی عمیق‌تر دریا، داده‌های دقیق‌تری نسبت به ساحل دارند.

با مقایسه مقدار RSS برای RMS دامنه‌های مولفه‌های اصلی حاصل از مدل‌های جهانی کشند اقیانوسی و نتایج حاصل از کشندسنج‌ها (با استفاده از نرم‌افزار و مدل‌سازی) و همچنین مقایسه مقدار RSS برای RMS بردارهای تفاضل تابع

گیج‌ها، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۳۷(۸)،
۱۷۷-۱۸۸.

جلیل نژادقره خاج، م، ۱۳۸۵، ارزیابی مدل‌های به کار
گرفته در تعیین MSL با استفاده از مشاهدات
ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد،
گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران.

Baker, T. F. and Bos, M. S., 2003, Validating
earth and ocean models using tidal gravity
measurements, *Geophys. J. Int.*, **152**, 468-485.

Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y., 2003, Efficient
inverse modeling of barotropic ocean tides, *J.
Atmos. Oceanic Technol*, **19**(2), 182-204.

Foreman, M. G. G., Crawford, W. R. and Marden,
R. F., 1995, De-tiding: Theory and Practice in:
Lynch, D. R., Davies, AM.(Eds), quantitative
skill assessment for coastal ocean models, vol
coastal and estuarine studies, American
Geophysical Union, **947**, 203-239.

Foreman, M. G. G., 1977, Manual for tidal
heights analysis and prediction, Institute of
Ocean Science Pacific Marine Science, report,
77-10.

Hwang, C. and Chen, C. Z., 1997, Improving, tide
model geodesy over shallow waters using topex
poseidon and ERS-1 altimetry, *Marine
Geodesy*, **20**(4), 291-305, (EI).

Jingyang, B., Dingbo, C. and Jinancheng, L.,
2001, A preliminary study on the est
abolishment of ocean tide models over the
South China Sea from T/p altimetry, *Geo –
spatial Information Science*, **1.4**(4), 190-24.

Lefevc, F., Letllier, T. and Francis, O., 2006,
modeling the global ocean tides modern
insights from oceanmics dynamics,
Publisher: Springer, **56**(5-6), 394-41222.

LeProvost, C., Lyard, F., Molines, J. M., Genco,
M. L. and Rabilloud, F., 1998, Hydrodynamic
ocean tide model improved by assimilating a
satellite altimeter-derived data set, *J. Geophys.
Res*, volume **103**, pages 5513-5529.

Matsomoto, K., Takanazwa, T. and Ooe, M.,
2000, Ocean tide models developed by
assimilating topex poseidon altimeter data into
hydrodynamics model a global modela and
regional model around Japon, *Jornal of
Oceanographys*, **56**(5), 567-581.

Vannicek, P. and Krakiwsky, E., 1991, Lecture
note geodynamics for geodesists, University
of New BrrunsWick, Canada.

در نه نقطه از خلیج فارس و دریای عمان به‌طور روزانه
ثبت می‌شوند و سپس این ارتفاعات وارد نرم‌افزار می‌شوند
و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. با این حال در طراحی
مدل‌های جهانی، شرایط منطقه‌ای خلیج فارس و دریای
عمان مانند اثر تشدید محلی، وجود پراکنندگی پیچیده
امواج کشندی در مرز بین دریا و تنگه، شکل خطوط
سواحل، تغییرات جوی، تخلیه رودخانه اروندرود به خلیج
فارس، اثر بارگذاری‌های اقیانوسی و مانند آن، در نظر
گرفته نشده است.

از آنجا که نتایج مدل FES2004، در منطقه دارای
بهترین تطابق با نتایج کشندسنج‌ها است، با در نظر گرفتن
این مدل و با توجه به اثرات محلی، موقعیت جغرافیایی،
شکل خطوط سواحل، عمق، و همچنین شرایط مرزی،
می‌توان در آینده مدل محلی مناسب برای تعیین دقیق
ویژگی‌های مولفه‌های کشندی منطقه خلیج فارس و
دریای عمان، طراحی کرد.

تشکر و قدردانی

با تشکر فراوان از مساعدت‌های بی دریغ سازمان نقشه‌برداری
ایران و سازمان AVISO کشور فرانسه (Archiving,
Validation and Interpretation of Satellite
Oceanographic Data) در به انجام رسیدن این تحقیق.

مراجع

آزموده اردلان، ع. وهاشمی فراهانی، ح.، ۱۳۸۵، آنالیز
جزرومد جهانی و تعیین مدلی جدید برای سطح
متوسط جهانی دریا براساس توابع پایه متعامد با
استفاده از ۱۱ سال مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای
توپکس-پوزایدون، نشریه دانشکده فنی دانشگاه
تهران، ۴۰(۸) ۱۰۱۹-۱۰۳۱.

آزموده اردلان، ع. و مسیب‌زاده، م.، ۱۳۸۵، تعیین
توپوگرافی سطح آب در خلیج فارس و دریای عمان
از طریق تلفیق مشاهدات GPS و اطلاعات تاید