

## مطالعه و بررسی توزیع دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی در خلیج فارس، دریای عمان و دریای عرب با استفاده از شبیه‌سازی عددی

پرستو اکبری<sup>۱\*</sup>، مسعود صدی نسب<sup>۲</sup>، وحید چگینی<sup>۳</sup>، سید مصطفی سیادت موسوی<sup>۴</sup>

۱. دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۲. دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

۴. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2016.15419](https://doi.org/10.22113/jmst.2016.15419)

### چکیده

جزر و مد به عنوان یکی از منظم‌ترین تغییرات سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها به شمار می‌رود که به علت تأثیرگذاری بر الگوی جریان در مناطق جزر و مدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به نیازهای مهندسی و مسائلی حفاظت از محیط زیست در منطقه‌ی اقتصادی- صنعتی خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز و دریای عمان، اطلاع از ویژگی‌های جزر و مدی این مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور از مدل اقیانوسی سه بعدی FVCOM با مد باروتروپیک استفاده شده تا دامنه‌ی جزر و مدی در منطقه‌ی وسیعی شامل خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب شبیه‌سازی گردد. این مدل از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات هیدرودینامیکی بر روی شبکه‌ی مثلثی استفاده می‌کند. شبکه‌ی محاسباتی یکنواخت با تفکیک‌پذیری ۵ کیلومتر در مدل به کار رفته و اطلاعات عمق‌سنجی با دقت یک دقیقه بر روی این شبکه درون‌یابی شده است. مقادیر ثابت هشت مؤلفه‌ی روزانه و نیم‌روزانه در مرز باز اقیانوسی به مدل اعمال گردید. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل، پس از اعمال آنالیز هارمونیک بر روی خروجی‌های مدل در ایستگاه‌های مورد نظر، دامنه‌ی به دست آمده از این آنالیز با نتایج به دست آمده از انجام آنالیز بر روی اطلاعات اندازه‌گیری موجود در این ایستگاه‌ها مقایسه گردید. با توجه به نتایج اندازه‌گیری و محاسبات مدل در این ایستگاه‌ها، ضمن شناسایی چهار مؤلفه‌ی جزر و مدی اصلی، الگوی دامنه‌ی این مؤلفه‌ها در کل منطقه‌ی مدل‌سازی تعیین شد. همچنین با استفاده از دامنه‌ی مؤلفه‌های اصلی و تخمین فاکتور F در کل منطقه، نوع جزر و مد در منطقه‌ی مورد مطالعه پیش‌بینی گردید. بر طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، در خلیج فارس چهار نوع جزر و مد روزانه، نیم‌روزانه، مختلط روزانه و مختلط نیم‌روزانه مشاهده می‌شود. در سایر مناطق جزر و مد از نوع مختلط نیم‌روزانه خواهد بود. همچنین بررسی مقادیر بیشینه‌ی سرعت جزر و مدی در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار این سرعت در دریای عمان و دریای عرب کمتر از ۰/۱ m/s است.

**واژگان کلیدی:** دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی، مدل FVCOM، خلیج فارس، دریای عمان، دریای عرب

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Pakbari91@yahoo.com

## ۱. مقدمه

سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها دستخوش تغییرات دائمی است. جزر و مد به عنوان یکی از منظم‌ترین این تغییرات به شمار می‌رود که پیش‌بینی آن همیشه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. این پدیده علاوه بر آن که به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر الگوی جریان در مناطق جزر و مدی به شمار می‌رود، از دیرباز برای ساکنان مناطق ساحلی به منزله‌ی یک عامل تغییر دهنده‌ی خط ساحلی مورد مشاهده قرار گرفته است و از آن به صورت‌های گوناگون در توسعه‌ی اقتصادی‌شان نظیر افزایش بازده ماهی‌گیری و افزایش سرعت دور شدن از ساحل برای آغاز سفرهای دریایی و یا بازگشت به ساحل بهره‌جسته‌اند (Ardalan and Toorian, 2010). جزر و مد با ورود به خلیج‌ها و خورها با توجه به ابعاد این مناطق ممکن است به صورت امواج پیش‌رونده یا ایستاده منتشر شود. از این رو الگوی انتشار جزر و مد در مناطق مختلف متفاوت است. هر چند بررسی جزر و مد با استفاده از ایستگاه‌های اندازه‌گیری ساحلی دارای قدمت طولانی است، بکارگیری روش‌های عددی سبب شده است تا ضمن تعیین الگوی انتشار و سایر ویژگی‌های امواج جزر و مدی در کل یک منطقه، کیفیت مطالعه‌ی این پدیده افزایش یابد.

خلیج فارس با طولی در حدود ۹۹۰ کیلومتر و عرض بیشینه‌ی ۳۷۰ کیلومتر به صورت یک حوضه نیمه بسته بین عرض‌های جغرافیایی  $24^{\circ}N$  و  $30^{\circ}N$  و طول‌های جغرافیایی  $48^{\circ}E$  و  $56^{\circ}E$  واقع شده است. عمق متوسط خلیج فارس ۳۶ متر بوده و مساحتی بالغ بر ۲۳۹۰۰۰ کیلومتر مربع را اشغال می‌کند (Emery, 1956). تنگه‌ی هرمز با عرض ۵۶ کیلومتر خلیج فارس را به وسیله‌ی دریای عمان به دریای عرب متصل می‌کند. دریای عمان با مساحتی در حدود ۹۴۰۰۰ کیلومتر مربع و عمق بیشینه‌ی بیشتر از ۳۰۰۰ متر در محدوده‌ای بین عرض‌های جغرافیایی  $22^{\circ}N$  و  $26^{\circ}N$  و طول‌های

جغرافیایی  $56^{\circ}E$  و  $62^{\circ}E$  قرار گرفته است (Pous et al., 2004). دریای عرب با مساحتی در حدود  $3 \times 10^6$  کیلومتر مربع و عمق میانگین ۲۷۳۴ متر در مرز شمالی اقیانوس هند واقع شده است (Chegini, 2011). جزر و مد در خلیج فارس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری که می‌تواند در بعضی از مناطق از جمله مجاورت دهانه‌ی اروندرود نوسانات بیشتر از  $1/5$  متر ایجاد کند (Kantha et al., 1994). به همین دلیل مطالعات متعددی به بررسی ویژگی‌های جزر و مدی در خلیج فارس پرداخته است. حال آن‌که مشخصات جزر و مدی دریای عمان و دریای عرب کم‌تر مورد توجه پژوهش‌گران واقع شده است. Defant (1960) معتقد بود شرایط جزر و مدی خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز و دریای عمان متفاوت از یکدیگر است. به اعتقاد وی اگر این مناطق به صورت حوضه‌ی واحد در نظر گرفته شوند، محور طولی این حوضه به صورت کانالی با دو شکستگی خواهد بود. بنابراین از آنجایی که فاز نیروهای مولد جزر و مد به جهت‌گیری طولی حوضه وابسته است، جزر و مد در این مناطق شرایط متفاوت با یکدیگر خواهد داشت. در حالی که جزر و مد در خلیج فارس به صورت موج ایستاده با نقاط آمفیدرومیک متفاوت برای مؤلفه‌های مختلف جزر و مدی است، مد تقریباً به شکل هم‌زمان در کل دریای عمان رخ می‌دهد. به اعتقاد Reynolds (1993) نیز جزر و مد در خلیج فارس هم‌نوسان با تنگه‌ی هرمز و جزر و مد در دریای عمان هم‌نوسان با دریای عرب است. Pous و همکاران (2012) با به کارگیری یک مدل دو بعدی و اعمال نوسانات هفت مؤلفه‌ی جزر و مدی در مرز باز مدل، ضمن ارائه نقشه‌ی هم‌دامنه و هم‌فاز برای دو مؤلفه‌ی جزر و مدی  $M_2$  و  $K_1$  در خلیج فارس، نوسانات و سرعت جزرمدی را در این منطقه توصیف کردند.

این دست در دریای عرب کم‌تر مورد توجه پژوهش-گران واقع شده است، نتایج این مطالعه می‌تواند اطلاعات مناسبی درباره برخی خصوصیات جزر و مدی دریای عرب ارائه دهد.

در این پژوهش به منظور بررسی و تعیین مؤلفه‌های جزر و مدی مهم در منطقه‌ی وسیعی شامل خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب از مدل اقیانوسی<sup>۱</sup> FVCOM استفاده شده است. سپس با به کارگیری آنالیز هارمونیک بر روی خروجی‌های مدل، ضمن استخراج دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی مختلف و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با اطلاعات ثبت شده به وسیله ایستگاه اندازه‌گیری جزر و مد، مؤلفه‌های اصلی در کل منطقه‌ی مدل‌سازی شناسایی و نوع جزر و مد در قسمت‌های مختلف تعیین گردید.

## ۲. مواد و روش کار

معادلات حاکم در مدل اقیانوسی FVCOM شامل معادلات اندازه حرکت در سه بعد (با فرض تقریب هیدروستاتیک در راستای قائم)، معادله پیوستگی (با فرض تراکم‌ناپذیری)، معادلات دما و شوری و معادله حالت برای محاسبه چگالی است. این مدل از روش حجم محدود به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم بهره برده و این معادلات را بر روی یک شبکه‌ی محاسباتی مثلثی غیر ساختار یافته<sup>۲</sup> در راستای افق حل می‌کند (Chen et al., 2006). امتیاز این نوع شبکه محاسباتی، انطباق خوب مرز شبکه بر خط ساحلی است. آزمایشات اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد انطباق مرز شبکه‌ی محاسباتی بر خط ساحلی اثر تعیین کننده‌ای بر نتایج شبیه‌سازی دامنه و فاز جزر و مدی دارد (Huang et al., 2008). مدل این قابلیت را دارد که در راستای قائم از مختصات  $Z$  یا سیگما (با تفکیک‌پذیری یکنواخت یا متغیر از سطح تا بستر) استفاده کند. مدل از روش عددی تفکیک

Najafi (1997) ضمن مدل‌سازی جزر و مد در خلیج فارس، چهار مؤلفه‌ی  $M_2$ ،  $S_2$ ،  $K_1$  و  $O_1$  را به عنوان مؤلفه‌های جزر و مدی نیم‌روزانه و روزانه اصلی در این منطقه معرفی کرد. در پژوهش وی شرایط جزر و مدی دریای عمان و دریای عرب توصیف نشده است. Elahi and Ashrafi (1994) دینامیک چهار مؤلفه‌ی جزر و مدی اصلی در خلیج فارس را با استفاده از یک مدل دو بعدی بررسی کردند. آن‌ها همچنین با استفاده از فاکتور  $F$  نقشه‌ای ارائه کردند که به موجب آن خلیج فارس بر اساس نوع جزر و مد (روزانه، نیم‌روزانه، مختلط) تقسیم‌بندی می‌شود. Lardner و همکاران (1982)، Evans-Roberts (1979) و Von Trepka (1968) نیز با به کارگیری روش مدل‌سازی و توصیف نوسانات جزر و مدی در مرز باز مدل، اگرچه نقاط آمفی‌درومیک را در خلیج فارس به درستی مکان‌یابی کردند اما مقادیر صحیح برای دامنه‌ی مؤلفه‌های مختلف توسط آنان ارائه نشد. Ardalan and Toorian (2010) جزر و مد در دریای عمان و خلیج فارس را با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزر و مد ساحلی مدل‌سازی کردند. Ardalan and Hashemi Farahani (2007) نقشه‌های هم‌فاز و هم‌دامنه‌ی جزر و مدی را در مقیاس جهانی از راه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای تعیین کرد.

با توجه به اهمیت اقتصادی و صنعتی منطقه‌ی خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز و دریای عمان که از یک سو نیازهای مهندسی همچون ساخت اسکله‌ها، موج شکن‌ها، سکوه‌های نفتی و غیره را در این منطقه افزایش داده است و از سوی دیگر مطالعات زیست محیطی و ردیابی آلودگی‌های مختلف را حائز اهمیت کرده است، اطلاع از ویژگی‌های جزر و مدی و الگوی جریان‌ات در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین با توجه به این‌که انجام مطالعاتی از

<sup>۱</sup> - Finite Volume Coastal Ocean Model

<sup>۲</sup> - Unstructured

۲)

$$A_m = 0.5CW^m \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$$

که در این رابطه C پارامتر ثابت و  $\Omega$  مساحت المان مورد نظر است (Chen et al., 2006). برای تعیین ضرائب انتشار قائم، مدل آشفتگی MY-2.5 (Mellor and Yamada, 1982) به کار برده شده است.

محدوده‌ی منطقه‌ی مدل‌سازی بین عرض‌های جغرافیایی  $18/5^\circ N$  تا  $31^\circ N$  و طول‌های جغرافیایی  $47/5^\circ E$  تا  $73/5^\circ E$  واقع گردیده است (شکل ۱). شبکه‌ی محاسباتی به کار رفته در مدل به صورت مثلثی با تفکیک‌پذیری یکنواخت ۵ کیلومتر است (شکل ۲). اطلاعات عمق‌سنجی از پایگاه GEBCO<sup>۵</sup> با دقت یک دقیقه استخراج گردیده و بر روی شبکه‌ی محاسباتی درون‌یابی شده است. همچنین داده‌های مربوط به خط ساحلی نیز از این پایگاه استخراج شده و در شبکه‌ی محاسباتی اعمال گردیده است. مرز باز این شبکه در عرض جغرافیایی  $18/5^\circ N$  واقع شده است.

از آنجایی که هدف این پژوهش تمرکز بر نوسانات جزر و مدی در منطقه‌ی مورد مطالعه است، مدل با مد باروتروپیک (دو بعدی) در مختصات کروی با چگالی و دما و شوری ثابت اجرا گردید. گام زمانی خارجی ۲۰ ثانیه برای حل این معادلات در نظر گرفته شد. مقادیر ثابت دامنه و فاز برای هشت مؤلفه‌ی جزر و مدی روزانه و نیم‌روزانه ( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ ) در مختصات منطبق بر مکان گره‌های مرز باز شبکه‌ی محاسباتی از مدل TMD<sup>۶</sup> استخراج و به مدل معرفی شد. این نرم‌افزار توسط Padman and Erofeeva (2005) در محیط متلب نوشته شده است. شرایط مرزی مرز باز به صورت تنظیمات اصلی مدل انتخاب گردید. این شرایط مرزی مربوط به حالتی است که نوسانات سطح آزاد

مد<sup>۱</sup> برای حل معادلات به صورت دو بعدی و سه بعدی بهره می‌برد؛ به این صورت که گام زمانی خارجی برای مد باروتروپیک (مد خارجی) استفاده شده و معادلات پیوستگی و اندازه حرکت افقی به صورت دو بعدی در شرایطی که در راستای قائم انتگرال‌گیری شده‌اند حل می‌شوند. سپس معادلات سه بعدی با نوسانات سطح آزاد محاسبه شده از مد باروتروپیک و با گام زمانی داخلی محاسبه می‌شوند. در این روش سرعت محاسبه شده توسط مدل به دو بخش سرعت خارجی و سرعت داخلی تقسیم‌بندی می‌شود که سرعت خارجی حاصل از مد باروتروپیک (خارجی) بوده و به صورت دو بعدی (انتگرال‌گیری شده در راستای قائم) است اما سرعت داخلی حاصل از محاسبات مد باروکلینیک (داخلی) است و به صورت سه بعدی ارائه می‌شود. گام زمانی خارجی توسط ضابطه پایداری CFL<sup>۲</sup> کنترل می‌شود که به صورت زیر است.

$$\Delta t_E \leq \frac{\Delta L}{\sqrt{gD}} \quad (1)$$

که  $\Delta t_E$  گام زمانی خارجی،  $\Delta L$  کم‌ترین فاصله‌ی موجود بین نقاط در شبکه‌ی محاسباتی و  $D$  عمق موجود در آن منطقه است. مدل از روش نقطه‌ی خشک و تر<sup>۳</sup> در مناطق میان کشندی<sup>۴</sup> استفاده می‌کند. برای تعیین ضرایب انتشار افقی، علاوه بر امکان استفاده از مقادیر ثابت برای این ضرایب، روش پارامتربندی اسماکورینسکی<sup>۵</sup> در مدل به کار گرفته شده است. بر طبق این روش ضریب انتشار افقی علاوه بر گرادیان سرعت به مساحت المان (تفکیک-پذیری شبکه‌ی محاسباتی) بستگی دارد (Smagorinsky, 1963). یعنی

<sup>۳</sup> - Mode-splitting

<sup>۱</sup> - Courant Friedrich Levy

<sup>۲</sup> - Wet/Dry Point Treatment Method

<sup>۳</sup> - Intertidal

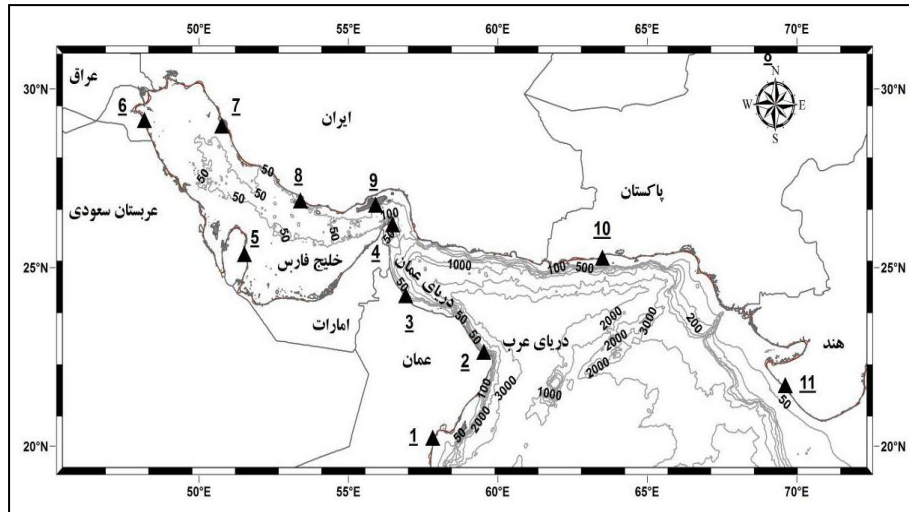
<sup>۴</sup> - Smagorinsky Parameterization Method

<sup>۵</sup> - General Bathymetric Chart of the Oceans

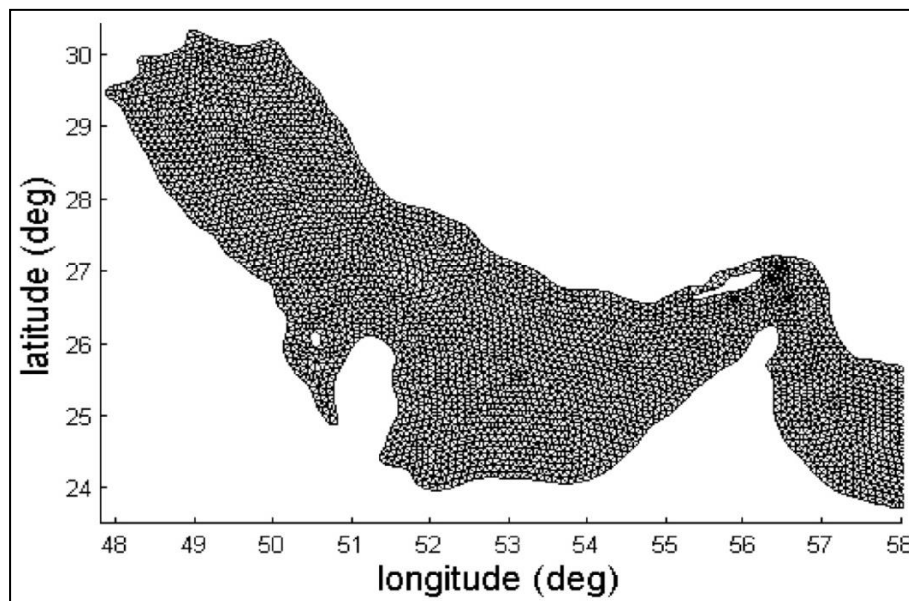
<sup>۶</sup> - Tidal Model Driver

دست آورده است، فرصت کافی برای برهم کنش‌های غیرخطی بین هشت مؤلفه‌ی جزر و مدی به کار برده شده نیز وجود داشته باشد. مدل خروجی‌ها را با فرمت netCDF و به صورت ساعتی ارائه می‌دهد.

در مرز باز به صورت دامنه و فاز جزر و مدی به مدل معرفی شده باشد. مدل از حالت سکون برای مدت یک سال اجرا گردید تا علاوه بر آن‌که اطمینان حاصل شود که نوسانات در نقاطی با دورترین فاصله از مرز باز مدل، مقدار حقیقی دامنه‌ی خود را به



شکل ۱. عمق سنجی و محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه. نقاط ۱ تا ۱۱ محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد



شکل ۲. قسمتی از شبکه‌ی محاسباتی به کار رفته در مدل

هارمونیک T\_Tide\_v1.3 استفاده گردید. نسخه‌ی اولیه‌ی این نرم‌افزار توسط Pawlowicz و همکاران (2002) در محیط متلب نوشته شده است. با توجه به بازه‌ی زمانی خروجی‌های مدل، گام زمانی یک ساعته برای این جعبه ابزار انتخاب شده است. پس از انجام

به منظور استخراج دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی در نقاطی از منطقه‌ی مورد مطالعه که اطلاعات اندازه‌گیری در آن‌ها موجود است از جعبه ابزار<sup>۱</sup> آنالیز

<sup>۱</sup> - Toolbox

## ۳- نتایج

در جدول ۱ و ۲ نتایج آنالیز هارمونیک انجام شده بر روی خروجی‌های مدل در ۱۱ ایستگاه با نتایجی که Pous و همکاران (2012) پس از انجام این آنالیز بر روی اطلاعات ثبت شده به‌وسیله‌ی ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزر و مد موجود در این نقاط ارائه دادند، مقایسه گردید. مکان این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

اعتبارسنجی و مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از انجام آنالیز هارمونیک بر روی خروجی‌های مدل با اطلاعات اندازه‌گیری در ۱۱ ایستگاه و تعیین چهار مؤلفه‌ی جزر و مدی اصلی، نقشه خطوط هم‌دامنه برای این مؤلفه‌ها در کل منطقه‌ی مدل‌سازی ترسیم گردید. سپس با محاسبه فاکتور  $F$  و رسم آن در کل منطقه‌ی مدل‌سازی، نوع جزر و مد در مناطق مختلف تعیین شد.

جدول ۱. مقایسه‌ی مقادیر دامنه برای چهار مؤلفه‌ی نیم‌روزانه، به دست آمده از مدل (M) و مشاهده (O)

ایستگاه	نام ایستگاه	موقعیت ایستگاه	$M_2$			$S_2$			$N_2$			$K_2$		
			M	O	M-O	M	O	M-O	M	O	M-O	M	O	M-O
۱	Sirab	$20^{\circ} 10' N 57^{\circ} 4' E$	57	55/5	-1/5	24	21	-3	14	14	0	6	6	0
۲	Sur	$22^{\circ} 34' N 59^{\circ} 22' E$	60	58/2	-1/8	23	22/3	-0/7	15	13/8	-1/2	6	6	-1/2
۳	Saham	$24^{\circ} 09' N 56^{\circ} 54' E$	68	65	-3	26	25	-1	17	15/5	-1/5	7	7	-1/5
۴	Ras Dillah	$26^{\circ} 08' N 56^{\circ} 28' E$	72	69/3	-2/7	27	24/6	-2/4	18	16/8	-1/2	6	7	-1/2
۵	Ad Dawhah	$25^{\circ} 18' N 51^{\circ} 31' E$	32	33/2	1/2	11	13/5	2/5	9	7/9	-1/1	5/5	3	-1/1
۶	Mina al Ahmadi	$29^{\circ} 04' N 48^{\circ} 10' E$	63	59	-4	17	25	8	12	24	12	12	5	12
۷	Bushehr	$28^{\circ} 54' N 50^{\circ} 45' E$	34	35	1	12	11	-1	8	10	2	3	4	2
۸	Jezirat Lavan	$26^{\circ} 48' N 53^{\circ} 23' E$	30	31/5	1/5	12	11	-1	8	9/4	1/4	3/4	4	1/4
۹	Henjam	$26^{\circ} 41' N 55^{\circ} 54' E$	74	69	-5	25	26	1	17	19	2	6	7	2
۱۰	Pansi	$25^{\circ} 12' N 63^{\circ} 30' E$	72	66	-6	26	23/4	-2/6	17	14	-3	6/6	7	-3
۱۱	Porbandar	$21^{\circ} 38' N 69^{\circ} 37' E$	65	60	-5	24	22	-2	16	13/8	-2/2	6	7	-2/2

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر دامنه برای چهار مؤلفه‌ی روزانه، به دست آمده از مدل (M) و مشاهده (O)

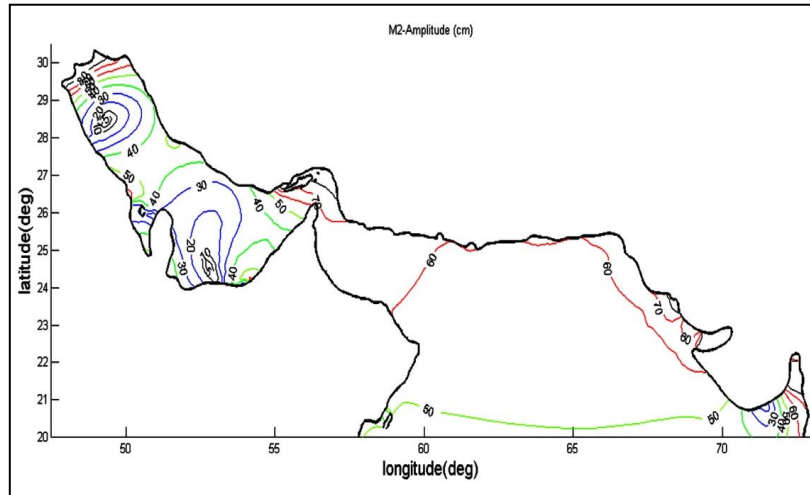
ایستگاه	نام ایستگاه	موقعیت ایستگاه	$K_1$			$O_1$			$P_1$			$Q_1$		
			M	O	M-O	M	O	M-O	M	O	M-O	M	O	M-O
۱	Sirab	$20^{\circ} 10' N 57^{\circ} 4' E$	39	37	-2	20	18/5	-1/5	13	10	-3	3/6	-	-3
۲	Sur	$22^{\circ} 34' N 59^{\circ} 22' E$	40	36	-4	19	17/5	-1/5	13	10	-3	3/7	-	-3
۳	Saham	$24^{\circ} 09' N 56^{\circ} 54' E$	40	35	-5	22	18/5	-3/5	13	10	-3	3/8	-	-3
۴	Ras Dillah	$26^{\circ} 08' N 56^{\circ} 28' E$	31	28	-3	19	14	-5	11	7	-4	4/6	-	-4
۵	Ad Dawhah	$25^{\circ} 18' N 51^{\circ} 31' E$	36	35/5	-0/5	16	28/5	12/5	10	13	3	10	-	3
۶	Mina al Ahmadi	$29^{\circ} 04' N 48^{\circ} 10' E$	43	42	-1	29	39	10	14	14	0	14/7	-	0
۷	Bushehr	$28^{\circ} 54' N 50^{\circ} 45' E$	31	30	-1	20	20	0	9	8	-1	4	-	-1
۸	Jezirat Lavan	$26^{\circ} 48' N 53^{\circ} 23' E$	29	26	-3	15	22	7	10	9	-1	7/5	-	-1
۹	Henjam	$26^{\circ} 41' N 55^{\circ} 54' E$	29	28	-1	20	21	1	9	8	-1	4	-	-1
۱۰	Pansi	$25^{\circ} 12' N 63^{\circ} 30' E$	28	35/2	7/2	21	18/5	-2/5	9	10	1	3/8	-	1
۱۱	Porbandar	$21^{\circ} 38' N 69^{\circ} 37' E$	35	34	-1	17	16/5	-0/5	10	9	-1	3/5	-	-1

دراز مدت و پیوسته بوده و با داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزر و مد مجاور همخوان باشد، انتخاب کردند. با توجه به مقادیر

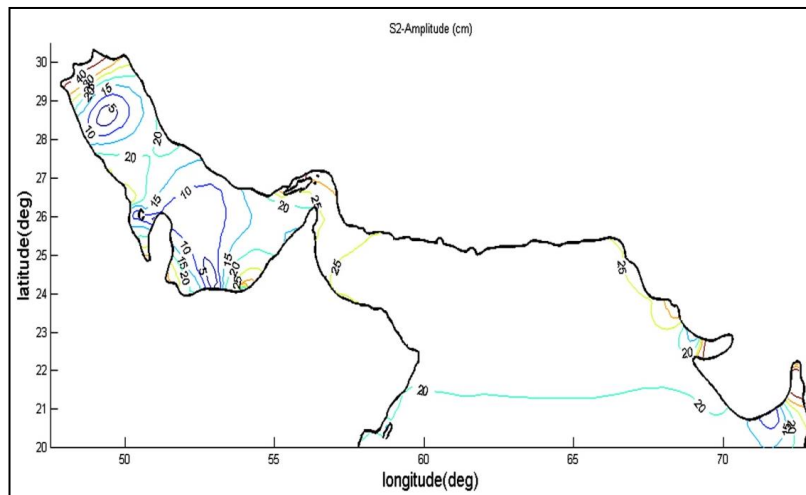
Pous و همکاران (2012) این اطلاعات را از میان داده‌های موجود در دفتر هیدروگرافی بین‌المللی با در نظر گرفتن این ویژگی که اطلاعات به اندازه‌ی کافی

خطوط هم‌دامنه را برای این ۴ مؤلفه نشان می‌دهد. به دلیل قابل اعتماد نبودن نتایج مدل در نزدیکی مرز باز، این منطقه از نقشه‌ی خطوط هم‌دامنه حذف شده و نتایج از عرض  $20^{\circ} N$  نمایش داده شده است.

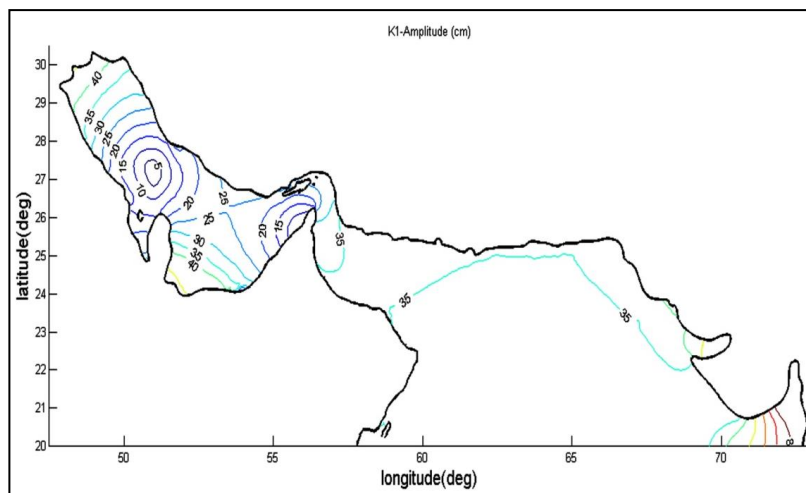
موجود در این دو جدول (حاصل از مدل و اندازه-گیری)، چهار مؤلفه‌ی  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  به عنوان مؤلفه‌های اصلی روزانه و نیم‌روزانه در کل منطقه‌ی مدل‌سازی شناسایی گردید. شکل ۳ تا ۶ نقشه‌ی



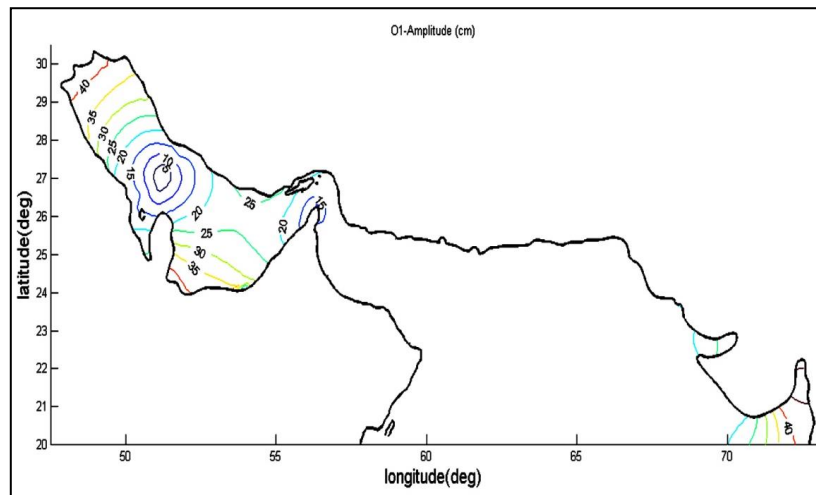
شکل ۳. نقشه خطوط هم‌دامنه بر حسب سانتی‌متر برای مؤلفه‌ی جزر و مدی  $M_2$



شکل ۴. نقشه خطوط هم‌دامنه بر حسب سانتی‌متر برای مؤلفه‌ی جزر و مدی  $S_2$



شکل ۵. نقشه خطوط هم‌دامنه بر حسب سانتی‌متر برای مؤلفه‌ی جزر و مدی  $K_1$



شکل ۶. نقشه خطوط هم‌دامنه بر حسب سانتی‌متر برای مؤلفه‌ی جزر و مدی  $O_1$

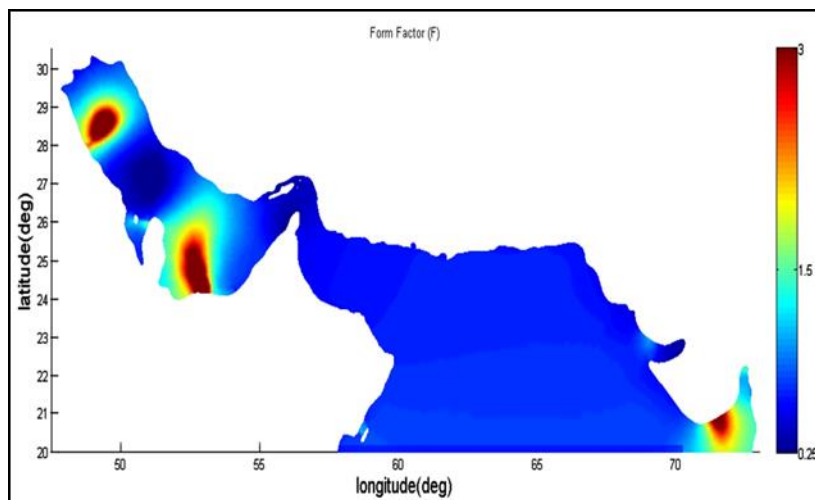
فاکتور  $F$  که به صورت  $F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$  و با توجه به مقادیر دامنه‌ی چهار مؤلفه‌ی اصلی جزر و مدی تعریف می‌شود، در کل منطقه‌ی مدل‌سازی محاسبه گردید. در این فرمول،  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  معرف دامنه‌ی مؤلفه‌های موردنظر است. بر طبق مقادیر این فاکتور، جزر و مد در منطقه به چهار دسته‌ی روزانه، نیم‌روزانه، مختلط نیم‌روزانه و مختلط روزانه تقسیم می‌شود. اگر  $F < 0.25$  باشد جزر و مد نیم‌روزانه است، برای  $0.25 < F < 1/5$  جزر و مد مختلط نیم‌روزانه است. اگر  $1/5 < F < 3$  جزر و مد مختلط روزانه است و برای  $F > 3$  جزر و مد روزانه است (Xiong and Berger, 2010). نقشه‌ی این فاکتور در کل منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است.

مطابق اطلاعاتی که این نقشه‌ها ارائه می‌دهند، برای مؤلفه‌های نیم‌روزانه هر کدام دو نقطه‌ی آمفیدرومیک و برای مؤلفه‌های روزانه هر کدام یک نقطه‌ی آمفیدرومیک در خلیج فارس مشاهده می‌شود که مکان دقیق این نقاط در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. موقعیت نقاط آمفیدرومیک چهار مؤلفه‌ی

#### جزر و مدی اصلی

مؤلفه‌ی جزر و مدی	موقعیت نقطه‌ی آمفیدرومیک
$M_2$	28.4N, 49.3E; 24.5N, 52.7E
$S_2$	28.6N, 49.4E; 24.4N, 52.8E
$K_1$	27.1N, 51E
$O_1$	26.9N, 51.2E



شکل ۷. نقشه فاکتور  $F$  در منطقه‌ی مورد مطالعه



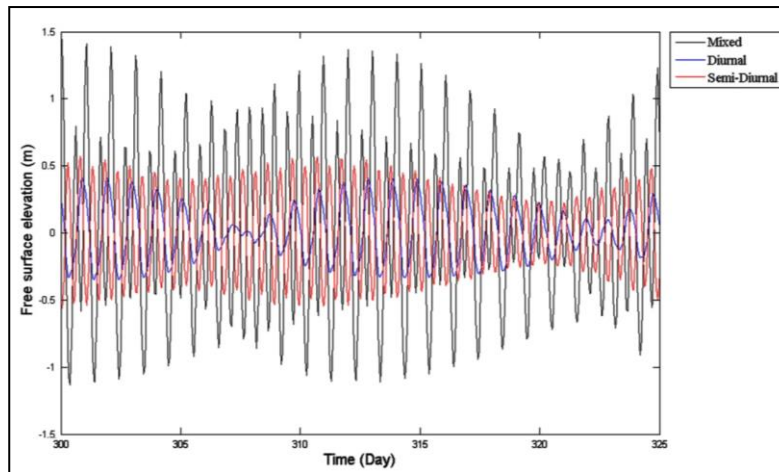
تنگه‌ی هرمز و خلیج فارس است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

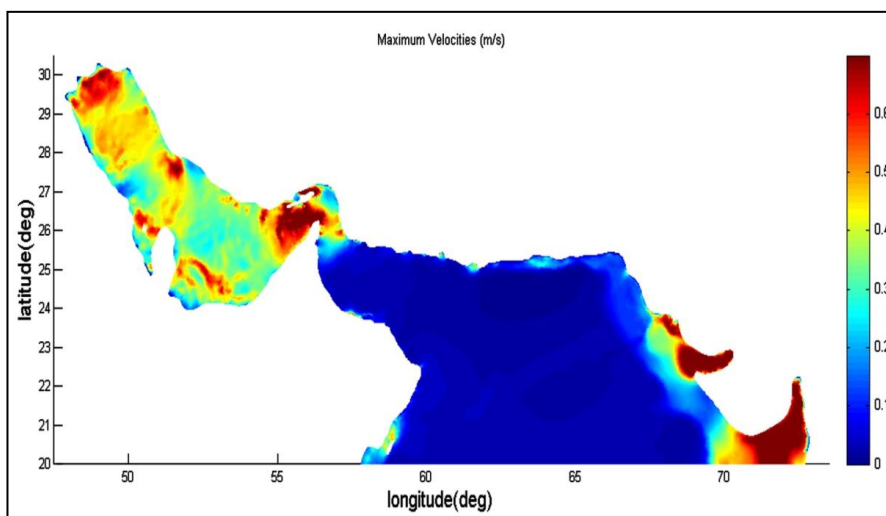
مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۱ و ۲، نتایج مدل و اندازه‌گیری در ۸ ایستگاه با یکدیگر انطباق کامل دارند. نتایج مدل در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد، سهم مؤلفه‌ها از زیاد به کم به ترتیب از راست به چپ  $M_2$ ،  $K_1$ ،  $S_2$ ،  $O_1$ ،  $N_2$ ،  $P_1$ ،  $K_2$ ،  $Q_1$  بوده که مطابق با نتایج اندازه‌گیری در این نقاط است.

به منظور بررسی نتایج به دست آمده از این شکل در رابطه با نوع جزر و مد در منطقه، نمودار نوسانات سطح آب برای بازه‌ی زمانی محدود در سه نقطه‌ی مختلف خلیج فارس رسم گردید. این نمودار در شکل ۸ ارائه شده است.

همچنین اندازه‌بیشینه‌ی سرعت جریانات جزر و مدی میانگین‌گیری شده در عمق در منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل ۹ نمایش داده شده است. مطابق این شکل جریانات جزر و مدی در کل منطقه‌ی مدل‌سازی از اهمیت یکسان برخوردار نیست، به طوری که سرعت این جریانات در دریای عمان و عرب بسیار کمتر از



شکل ۸. نمودار نوسانات سطح آب با زمان در سه نقطه در خلیج فارس. نقطه‌ی اول در مجاورت نقطه‌ی آمفیدرومیک مؤلفه‌ی روزانه (قرمز)، نقطه‌ی دوم در مجاورت نقطه‌ی آمفیدرومیک مؤلفه‌ی نیم‌روزانه (آبی)، نقطه‌ی سوم در مجاورت دهانه‌ی ارونردود (سیاه)



شکل ۹. بیشینه‌ی سرعت جریانات جزر و مدی در منطقه‌ی مورد مطالعه

$M_2$  بیش از ۸۰ سانتی‌متر است اما برای مؤلفه‌ی  $S_2$  بین ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر است. در دریای عمان مقدار دامنه‌ی  $M_2$  در اکثر مناطق بین ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر است و از دهانه به سمت جنوب دریای عرب کاهش می‌یابد و به ۵۰ سانتی‌متر در نزدیکی عرض جغرافیایی  $21^\circ N$  خواهد رسید. این دامنه در مناطقی از شمال شرقی دریای عرب هم به مقداری بیش از ۶۰ سانتی‌متر می‌رسد. اما دامنه‌ی مؤلفه‌ی  $S_2$  در شمال غربی دریای عمان بیش از ۲۵ سانتی‌متر است و به مرور به سمت دریای عرب کاهش می‌یابد؛ به طوری که در بیشتر مساحت دریای عمان مقدار آن کم‌تر از ۲۵ سانتی‌متر خواهد بود. در جنوب دریای عرب این دامنه به کم‌تر از ۲۰ سانتی‌متر خواهد رسید. به طوری که شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد مؤلفه‌ی  $M_2$  و  $S_2$  در خلیج فارس به صورت موج ایستاده، هریک با دو نقطه‌ی آمفیدرومیک یکی در جنوب خلیج (شرق قطر) و دیگری در شمال غربی خلیج نوسان می‌کنند. این یافته با نتیجه‌ی مطالعات Pous و همکاران (2012) و Elahi and Ashrafi (1994) تطابق کامل دارد. لازم به ذکر است در نتیجه‌ی مطالعات گوناگون تفاوت جزئی در مختصات ارائه شده برای نقاط آمفیدرومیک مؤلفه‌های مختلف مشاهده می‌شود که این اختلاف جزئی می‌تواند ناشی از تفاوت دقت عمق‌سنجی‌های به کار رفته در مطالعات مختلف باشد. به طوری که نتیجه پژوهش Pous و همکاران (2012) نشان می‌دهد، به کار بردن اطلاعات عمق‌سنجی با دقت کافی، می‌تواند به عنوان یک عامل اثرگذار بر مکان‌یابی صحیح نقاط آمفیدرومیک توسط مدل باشد. مطابق نقشه‌های ارائه شده در شکل ۳ و ۴ موج حاصل از مؤلفه‌های  $M_2$  و  $S_2$  در تنگه، دریای عمان و دریای عرب به صورت موج پیش‌رونده خواهد بود. این نتیجه نیز با نظر Defant (1960) سازگار است. شکل ۵ و ۶ نقشه خطوط هم‌دامنه برای دو مؤلفه‌ی روزانه‌ی اصلی  $K_1$  و  $O_1$  را نشان می‌دهد. مطابق اطلاعات جدول ۱ و ۲،  $K_1$  در تمام ایستگاه‌ها بجز ایستگاه ۵، به عنوان

در ایستگاه ۵ مؤلفه‌ی  $K_1$  بیشترین سهم را در دامنه دارد و پس از آن از راست به چپ مؤلفه‌های  $M_2$ ،  $O_1$ ،  $S_2$ ،  $P_1$ ،  $Q_1$ ،  $N_2$ ،  $K_2$  قرار دارند که این نتیجه نیز با اندازه‌گیری مطابقت دارد. اما در ایستگاه‌های ۶، ۷ و ۸ که در خلیج فارس واقع‌اند، هر چند نتایج اندازه‌گیری و مدل چهار مؤلفه‌ی  $M_2$ ،  $K_1$ ،  $O_1$ ،  $S_2$  را به عنوان چهار مؤلفه‌ی اول از نظر بزرگی معرفی می‌کند اما نتایج مدل نشان می‌دهد پس از چهار مؤلفه‌ی مذکور،  $N_2$  بیشترین سهم را در دامنه دارد. حال آن‌که نتایج اندازه‌گیری  $P_1$  را به عنوان بزرگترین مؤلفه پس از این چهار مؤلفه ارائه می‌دهد. این تفاوت شاید به این علت باشد که در ایستگاه ۶ و ۷ اطلاعات اندازه‌گیری، مقادیر نزدیک به هم را برای دامنه‌ی دو مؤلفه‌ی  $P_1$  و  $N_2$  ارائه می‌دهد و در ایستگاه ۸ دامنه‌ی های مذکور بر طبق خروجی‌های مدل، مقادیر تقریباً یکسانی را دارند. با توجه به این مطلب و نیز احتمال وجود خطا در داده‌های اندازه‌گیری و محاسبات مدل، عدم هم‌خوانی بین نتایج اندازه‌گیری و مدل در مورد مؤلفه‌ی پنجم در این دو ایستگاه دور از انتظار نیست. همان‌طور که اطلاعات جدول ۱ و ۲ نشان می‌دهد برای تمام ایستگاه‌ها (که با پراکندگی مناسب در منطقه‌ی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند) با توجه به اندازه‌ی دامنه، چهار مؤلفه‌ی اصلی جزر و مد  $M_2$ ،  $S_2$ ،  $O_1$ ،  $K_1$  است که ترتیب بزرگی آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. در پژوهش Najafi (1997) که در خلیج فارس انجام شده است نیز این چهار مؤلفه به عنوان مؤلفه‌های اصلی معرفی شدند. مطابق اطلاعات این دو جدول مؤلفه‌ی  $M_2$  در تمام ایستگاه‌ها بجز ایستگاه ۵ بزرگترین سهم را از دامنه به خود اختصاص داده است. شکل ۳ و ۴ نقشه‌ی خطوط هم‌دامنه را برای دو مؤلفه‌ی نیم‌روزانه‌ی اصلی یعنی  $M_2$  و  $S_2$  نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نیز نشان می‌دهد مقدار دامنه‌ی مؤلفه‌ی  $M_2$  در کل منطقه‌ی مدل‌سازی بیشتر از دامنه‌ی  $S_2$  است. همچنین بیشینه‌ی دامنه برای هر دو مؤلفه در شمال غرب خلیج و تنگه‌ی هرمز مشاهده می‌شود. این مقدار برای

روزانه ( $F < 3$ ) قرار دارد. در سایر مناطق خلیج فارس و در تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب جزر و مد مختلط نیم‌روزانه است. این نتیجه در خلیج فارس و تنگه‌ی هرمز با یافته‌ی Pous و همکاران (2012) سازگاری کامل دارد. نتیجه پژوهش Elahi and Ashrafi (1994) در خلیج فارس و قسمت شرقی تنگه با نتیجه پژوهش حاضر در توافق است. نتیجه محاسبات آنان جزر و مد نیم‌روزانه را در قسمت غربی تنگه پیش‌بینی می‌کند. با توجه به مرزی بودن مقادیر به دست آمده برای فاکتور  $F$  در این قسمت، این اختلاف نتیجه قابل توجه است. به منظور تأیید نتایج به دست آمده از فاکتور  $F$  در مورد نوع جزر و مد در منطقه‌ی مورد مطالعه، نوسانات سطح آب، محاسبه شده توسط مدل در سه نقطه رسم گردید که نمودارهای مربوط به آن در شکل ۸ نشان داده شده است. نقطه‌ی اول در مجاورت نقطه‌ی آمفیدرومیک مؤلفه‌های روزانه قرار دارد که نمودار مربوط به آن با رنگ قرمز نشان داده شده است. نقطه‌ی دوم در مجاورت نقطه‌ی آمفیدرومیک مؤلفه‌های نیم‌روزانه (شمال‌غربی خلیج) قرار دارد. نمودار مربوط به این نقطه با رنگ آبی نشان داده شده است. نقطه‌ی سوم در مجاورت دهانه‌ی اروندرود انتخاب گردیده و نمودار آن با رنگ سیاه نمایش داده شده است. به طوری که در این شکل مشخص است نمودارهای قرمز، آبی و سیاه رنگ (به ترتیب مربوط به نقطه‌ی اول، دوم و سوم) جزر و مد نیم‌روزانه، روزانه و مختلط نیم‌روزانه را نشان می‌دهد که با پیش‌بینی‌های انجام شده (شکل ۷) توافق کامل دارد. در شکل ۹ اندازه‌ی بیشینه‌ی جریان‌های جزر و مدی در دوره یک ساله مدل‌سازی در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. لازم به ذکر است این بیشینه‌های جریان به طور هم‌زمان در قسمت‌های مختلف منطقه‌ی مدل‌سازی رخ نداده است. به طوری که در این شکل مشخص است، بیشینه سرعت جزر و مدی در خلیج فارس و تنگه‌ی هرمز تقریباً در تمام قسمت‌ها بیش از  $0.2$  متر بر ثانیه است. حال آن‌که

بزرگترین مؤلفه پس از  $M_2$  قرار می‌گیرد و در ایستگاه ۵ بزرگترین سهم را از دامنه به خود اختصاص می‌دهد. برای هر دو مؤلفه‌ی روزانه‌ی مذکور، بیشینه‌ی دامنه در شمال‌غربی خلیج فارس رخ می‌دهد. در این منطقه دامنه‌ی هر دو مؤلفه به  $40$  سانتی‌متر می‌رسد.  $O_1$  و  $K_1$  هر کدام یک نقطه‌ی آمفیدرومیک را به ترتیب در شمال بحرین و قطر به نمایش می‌گذارند. این نتیجه نیز با نتایج به دست آمده توسط Pous و همکاران (2012) و Elahi and Ashrafi (1994) توافق کامل دارد. امواج مربوط به این مؤلفه‌ها نیز در دریای عمان و عرب به صورت امواج پیش‌رونده ظاهر می‌شوند. دامنه‌ی مؤلفه‌ی  $K_1$  در تنگه بین  $20$  تا  $30$  سانتی‌متر است و این دامنه در دریای عمان افزایش می‌یابد به طوری که در بیشتر مناطق آن به  $35$  سانتی‌متر خواهد رسید. در بیشتر مساحت دریای عرب مقدار این دامنه بین  $30$  تا  $35$  سانتی‌متر بوده و به سمت جنوب از مقدار آن کاسته می‌شود. مؤلفه‌ی  $O_1$  نیز در تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب دامنه‌ای در حدود  $15$  تا  $20$  سانتی‌متر خواهد داشت که مقدار آن با کاهش عرض جغرافیایی کاهش می‌یابد. بنابراین  $O_1$  در این مناطق به عنوان کوچکترین مؤلفه در بین چهار مؤلفه‌ی بررسی شده، شناخته می‌شود. شکل ۷ نقشه فاکتور  $F$  را در منطقه‌ی مدل‌سازی نشان می‌دهد. مطابق این نقشه، در منطقه‌ی مرکزی خلیج فارس واقع در شمال بحرین و قطر، جزر و مد نیم‌روزانه است. این منطقه در مجاورت نقطه‌ی آمفیدرومیک مؤلفه‌های روزانه واقع گردیده است. این نتیجه مورد انتظار است چراکه در نقاط آمفیدرومیک مؤلفه‌های روزانه، نوسانات این مؤلفه‌ها صفر است و بنابراین جزر و مد نیم‌روزانه است. برعکس در دو منطقه یکی در جنوب و دیگری در شمال‌غرب خلیج در مناطقی نزدیک به نقاط آمفیدرومیک مؤلفه‌های نیم‌روزانه، مطابق شکل ۷، جزر و مد روزانه است؛ زیرا  $F > 3$  است. در این مناطق نوسانات مؤلفه‌های نیم‌روزانه ناچیز یا صفر است. در اطراف این دو منطقه، ناحیه‌ای با جزر و مد مختلط

## منابع

- Ardalan, A. A. and Hashemi Farahani, H. 2007. A harmonic approach to global ocean tide analysis based on TOPEX/Poseidon. *Mar Geophys Res* 28(3): 235-255.
- Ardalan, A. A. and Toorian, M. J. 2010. A new tidal model for the Persian Gulf and Oman Sea based on satellite altimetry and coastal tidal gauge observations. *Journal of the Earth and Space Physics* 36(3): 15-25.
- Chegini, V. 2011. Glossary of Coastal Engineering and Physical Oceanography. First edition, Iranian National Institute for Oceanography, Ocean Technology and Engineering Research Center, Tehran, pp: 30-31.
- Chen, C., Beardsley, R. C. and Cowles, G. 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM User Manual. SMASST/UMASSD Technical Report-06-0602, University of Massachusetts-Dartmouth, New Bedford.
- Defant, A. 1960. *Physical Oceanography*. Vol. 2. Pergamon Press LTD, Oxford, London P: 626.
- Elahi, Kh. Z., Ashrafi, R. A. 1994. A two-dimensional depth integrated numerical model for tidal flow in the Arabian Gulf. *Acta Oceanographica Taiwanica* 32: 1-15.
- Emery, K. O. 1956. Sediments and water of the Persian Gulf. *AAPG Bull* 40: 2354-2383.
- Evans-Roberts, D. J. 1979. Tides in the Persian Gulf. *Consulting Engineer* 43: 46-48.
- Huang, H., Chen, Ch., Jackson, O. B. and Francisco, A. A. 2008. A numerical study of tidal asymmetry in Okatee Creek, South Carolina. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 78: 190-202.
- Kantha, L. H., Pontius, P. E. and Anantharaj, V. 1994. Tides in marginal, semi-enclosed and coastal seas. Part I: Sea surface height. Univ. of Colorado, Colorado Center for Astrodynamics, Research Report.
- Lardner, R. W., Belen, M. S. and Cekirge, H. M. 1982. Finite Difference Model for Tidal Flows in the Arabian Gulf. *Computers & Mathematics with Applications* 8: 425-444.
- Mellor, G. L., Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. *Rev. Geophys. Space. Phys* 20: 851-875.
- در دریای عمان و دریای عرب این کمیت عمدتاً کم‌تر از  $0/1$  متر بر ثانیه است. در تنگه‌ی هرمز بیشینه سرعت جزر و مدی در برخی از مناطق به بیش از  $1$  متر بر ثانیه نیز خواهد رسید. این نتیجه با نتیجه پژوهش Pous و همکاران (2012) در توافق کامل است.
- با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش و بررسی اندازه‌ی دامنه‌ی مؤلفه‌های جزر و مدی مختلف در منطقه‌ی خلیج فارس، تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب، دو مؤلفه‌ی نیم‌روزانه‌ی  $M_2$  و  $S_2$  و دو مؤلفه‌ی روزانه‌ی  $O_1$  و  $K_1$  به عنوان مؤلفه‌های اصلی در کل این مناطق شناخته شدند. در بین این چهار مؤلفه نیز  $M_2$  تقریباً در کل منطقه‌ی مدل‌سازی بیشترین سهم را از دامنه به خود اختصاص داده است. در کل منطقه‌ی مورد مطالعه بیشترین دامنه‌ی مؤلفه‌های نیم‌روزانه در شمال‌غربی خلیج فارس و در تنگه‌ی هرمز مشاهده می‌شود اما بیشینه‌ی دامنه‌ی مؤلفه‌های روزانه در شمال‌غربی خلیج فارس رخ می‌دهد. هر چهار مؤلفه در خلیج فارس به صورت موج ایستاده نوسان می‌کنند اما دریای عمان و دریای عرب شرایط موج پیش‌رونده را خواهند داشت. در خلیج فارس چهار نوع جزر و مد روزانه، نیم‌روزانه، مختلط روزانه و مختلط نیم‌روزانه مشاهده می‌شود اما در تنگه‌ی هرمز، دریای عمان و دریای عرب جزر و مد مختلط نیم‌روزانه خواهد بود. بیشترین سرعت جریان‌های جزر و مدی در تنگه‌ی هرمز مشاهده می‌شود. این جریان در دریای عمان و دریای عرب از اهمیت کم‌تری برخوردار است. به طور خلاصه این پژوهش در تکمیل مطالعات پیشین به ترکیب اطلاعات مدل‌سازی و مشاهدات اندازه‌گیری در منطقه‌ی وسیعی شامل خلیج فارس، دریای عمان و دریای عرب پرداخته است که از نظر وسعت منطقه‌ی مورد مطالعه و به کار بردن دامنه و فاز هشت مؤلفه‌ی جزر و مدی در مدل‌سازی، پژوهش نوینی در میان پژوهش‌های صورت گرفته محسوب می‌شود.

- Najafi, H. S. 1997. Modelling tides in the Persian Gulf using dynamic nesting. Ph.D. thesis, University of Adelaide, Adelaide, South Australia.
- Padman, L., Erofeeva, S. 2005. Tide Model Driver (TMD) Manual. Earth & Space Research Institute, Seattle.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. and Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. Computers and Geosciences 28: 929-937.
- Pous, S., Carton, X. and Lazure, P. 2004. Hydrology and Circulation in the Straits of Hormuz and the Gulf of Oman; Results from the GOG99 Experiment. II. Gulf of Oman. J. Geophys. Res 109: 1-26.
- Pous, S., Carton, X. and Lazure, P. 2012. A Process Study of the Tidal Circulation in the Persian Gulf. Open Journal of Marine Science 2: 131-140.
- Reynolds, R. M. 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman – Results from the Mt Mitchell expedition. Pollution Bull 27: 35-59.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. Monthly Weather Review 91: 99-164.
- Von Trepka, L. 1968. Investigations of the Tides in the Persian Gulf by Means of a Hydrodynamical Numerical Model. Proceedings of the Symposium on Mathematical Hydro-dynamical Investigations of the Physical Processes in the Sea, Institut für Meereskunde der Universität Hamburg 10: 59-63.
- Xiong, Y. and Berger, Ch. R. 2010. Chesapeake Bay Tidal Characteristics. Water Resource and Protection 2: 619-628.

## Study of tidal components amplitude distribution in the Persian Gulf, Gulf of Oman and Arabian Sea using numerical simulation

Akbari, Parastoo<sup>1\*</sup>. Sadrinasab, Masoud<sup>2</sup>. Chegini, Vahid<sup>3</sup>. Siadat Mousavi, Seyed Mostafa<sup>4</sup>

1. Faculty of Marine Science, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
2. Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran
4. School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Tide is one of the most regular changes of seas and ocean levels which are offering particular importance due to the influence on the flow pattern in tidal zone. According to engineering needs and environmental protection issues in industrial-economic zone of Persian Gulf, Strait of Hormuz and Gulf of Oman, knowing tidal characteristics of this region is very important. Therefore FVCOM (a three-dimensional ocean model) was used in barotropic mode to stimulate the tidal amplitude in a wide region comprising Persian Gulf, Strait of Hormuz, Gulf of Oman and Arabian Sea. Finite volume method is applied in this model to discretize the hydrodynamic equations on triangular mesh. Uniform computational mesh is used with a resolution of 5 km in the model and one minute bathymetry data has been interpolated on this mesh. The constant values of eight diurnal and semidiurnal tidal components are prescribed along the open ocean boundary. After applying harmonic analysis on the model outputs in desired stations, the achieved amplitude of this analysis compared with results which are obtained from the analysis on the available measurement data in these stations to validate the model results. According to the measurement data and model results in these stations, meanwhile identifying the four main tidal components, the amplitude pattern of these components was determined in the whole domain. Also, by using amplitude of main components and estimating of F factor, the type of tide was predicted in the study area. According to the results obtained in this research, four types of diurnal, semidiurnal, mixed diurnal and mixed semidiurnal tides are seen in the Persian Gulf. In other areas, the tide will be mixed semidiurnal. Moreover, studying the maximum amounts of tidal velocity in the study area shows that the amount of this velocity in the Gulf of Oman and Arabian Sea is less than 0.1 m/s.

**Keywords:** Tidal components amplitude, FVCOM model, Persian Gulf, Gulf of Oman, Arabian Sea

Figure1. Bathymetry and domain of study area. Points 1 to 11 indicate the location of measurement stations.

Figure2. A part of mesh which is used in the model

Figure3. Iso-amplitude map in cm for tidal component  $M_2$

Figure4. Iso-amplitude map in cm for tidal component  $S_2$

Figure5. Iso-amplitude map in cm for tidal component  $K_1$

Figure6. Iso-amplitude map in cm for tidal component  $O_1$

Figure7. Map of Form Factor over study area

\* Corresponding author, E-mail: Pakbari91@yahoo.com

Figure 8. Time fluctuations of the free surface for three points of the Persian Gulf. First point is located near the diurnal amphidromic point (red), second point is located near the semi-diurnal amphidromic point (blue) and third point lies near the mouth of Arvand Rud (black).

Figure 9. Maximum velocity of tidal current in the study area

Table1: Comparison of modeled (M) and observed (O) values of amplitudes (cm) for four semi-diurnal components

Table2: Comparison of modeled (M) and observed (O) values of amplitudes (cm) for four diurnal components

Table 3: Amphidromic Points Location of four principal tidal components