

## مطالعه هیدرودینامیکی خلیج چابهار با استفاده از مدل FVCOM

علیرضا بهمن‌زادگان جهرمی<sup>۱</sup>، مجتبی عظام<sup>۲\*</sup>، کامران لاری<sup>۳</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران. پست الکترونیکی: ar.bahmanzadegan@gmail.com

۲- استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران. پست الکترونیکی: ezam@srbiau.ac.ir

۳- دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران. پست الکترونیکی: k\_lari@iau-tmb.ac.ir

۴- استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیکی: bidokhti@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۹/۲۹

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۹/۴/۲۷

### چکیده

خلیج چابهار یک خلیج نیم بسته و کم عمق در جنوب شرقی ایران بوده و به شدت متأثر از شرایط مونسون می‌باشد. مدل سه بعدی FVCOM به منظور مطالعه شرایط هیدرودینامیکی خلیج چابهار مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور شبکه افقی با ۶۲۹۰ المان مثلثی و شبکه قائم با ۱۰ لایه سیگما ایجاد گردید. مدل در مد باروکلینیک اجرا شد؛ به منظور لحاظ نمودن واداشت های سطحی در سطح باز و لایه مرزی از داده‌های NCEP و خروجی های مدل HYCOM استفاده گردید. صحت سنجی تراز آب و سرعت جریان تطابق قابل قبولی با داده های میدانی نشان می‌دهد. میانگین سالانه و عمقی سرعت جریان از مرتبه ۰/۱ m/s بوده و الگوی غالب چرخش در زمستان و پاییز، تک سلولی و ساعتگرد و در بهار و تابستان دو سلولی و متشکل از یک سلول غالب با چرخش ساعتگرد و یک سلول با چرخش پادساعتگرد می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل FVCOM، خلیج چابهار، سرعت جریان، جزرومد، الگوی چرخش.

### ۱. مقدمه

پیما را دارد. خلیج چابهار بزرگترین خلیج ایران در حاشیه کرانه های دریای عمان است. این خلیج به خاطر شکل حلقه ای ( $\Omega$ ) خود در زمین شناسی از نوع خلیج‌های امگایی دسته بندی می‌شود (افشاریان، ۱۳۸۹). خلیج چابهار یک خلیج نیم بسته و جنب حاره‌ای است (Fazeli and Zare, 2011). عمق متوسط، مساحت و حجم خلیج نسبت به چارت دیتوم به ترتیب  $7/5 \text{ m}$ ،  $290 \text{ km}^2$  و  $2162 \times 10^6 \text{ m}^3$  می‌باشد. خلیج چابهار بزرگترین خلیج واقع شده در سواحل دریای عمان بوده که عرض آن در دهانه ورودی

دریای عمان و سواحل آن، به دلیل اتصال به آبهای آزاد جهان، در گذشته و حال مورد توجه بوده و هم‌جواری آن با خلیج فارس، به اهمیت آن افزوده است. چابهار (چاه بهار، چهاربهار)، یکی از شهرهای جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان و تنها بندر اقیانوسی کشور است که در کرانه دریای عمان و اقیانوس هند قرار دارد و لنگرگاه آن توانایی پهلوگیری کشتیهای اقیانوس

که بتواند تا حد ممکن پدیده‌های فیزیکی را تشریح نماید؛ توسعه یافته است. در این میان مدل عددی FVCOM یک مدل سه بعدی بوده که از شبکه بندی مثلثی استفاده می کند و بنابراین به منظور مدلسازی پدیده های هیدرودینامیکی سه بعدی در مناطق ساحلی می تواند مدل مناسبی باشد. در این تحقیق پس از مدلسازی سه بعدی جریان با استفاده از مدل FVCOM در یک دوره یک ساله (۲۰۱۷)، میانگین های ماهانه سرعت جریان، الگوی فصلی چرخش مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج این تحقیق می تواند به عنوان گام نخست در مطالعات مهندسی سواحل به منظور طراحی و توسعه بنادر، مطالعات مرتبط با انتشار آلودگی، تاثیر گردش آب بر الگوی زیستی آبزیان و موارد مشابه از این دست، مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مدل FVCOM

مدل عددی FVCOM امکان استفاده از تکنیک تری/خشکی در مناطق جزرومدی را فراهم می کند. این مدل در غیاب برف و یخ، هفت معادله شامل سه معادله تکانه، پایداری، دما، شوری و چگالی را حل می کند (Che et al., 2013).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

(شرقی - غربی) ۱۳/۵ km و طول آن (جنوبی - شمالی) km ۱۷/۵ می باشد (Biglari et al., 2015). خلیج تحت تاثیر شرایط مونسون قرار دارد (Soltanpour and Dibajnia, 2015). مونسون به معنی فصل، سیستم بادهایی هستند که بر فراز اقیانوس می-وزند. بادهای مونسون تابستانی خیلی قوی تر از مونسون زمستانی هستند (دهبندی، ۱۳۹۲). در قسمت‌های شمالی اقیانوس هند طی ماه‌های می تا سپتامبر بادهای غالب، جنوب غربی بوده (مونسون تابستانه) و طی ماه‌های نوامبر تا فوریه بادهای غالب از سمت شمال شرقی می‌وزند (مونسون زمستانی)، طی ماه‌های مارچ تا آوریل و اکتبر بادهای ضعیف بوده و ماه‌های گذار هستند (Shankar et al., 2002). به سبب موقعیت استراتژیک خلیج چابهار و دسترسی آن به آب‌های بین‌المللی، این خلیج دارای موقعیت ویژه ای از نظر تجاری با سایر کشورها می‌باشد (Zeinali et al., 2017).

FVCOM یک مدل پیشرفته برای مدلسازی چرخش اقیانوسی است که به واسطه توانایی های زیادی که دارد به منظور مدلسازی مناطق ساحلی با شرایط پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است (Li et al., 2017). FVCOM یک مدل غیر ساختار یافته، حجم متناهی، سطح آزاد و سه بعدی است که توسط چن و همکاران در سال ۲۰۰۳ توسعه داده شد. از نظر تکنیکی FVCOM بهترین ویژگی‌های روش تفاضل متناهی (گسسته سازی راحت و بهینه) و روش المان محدود (انعطاف پذیری هندسی) را مورد استفاده قرار می‌دهد.

با استفاده از مدل سه بعدی MISED توسط سلطان پور و دیباجنیا (۲۰۱۵)، شرایط هیدرودینامیکی خلیج چابهار مدلسازی شد و از داده‌های میدانی سازمان بنادر و دریانوردی به منظور صحت سنجی نتایج مدل استفاده گردید. وفایی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های میدانی دمایی به مطالعه جریان ناشی از اختلاف چگالی در خلیج چابهار پرداختند و دریافتند که آبهای خلیج با دارا بودن ویژگیهای خاص مکانی، منطقه کم عمق بیشتر از محیط‌های دریایی عمیق تحت تاثیر تغییرات دمایی قرار دارد؛ لذا گرادیان دما عامل مهمی در گردش آب در خلیج چابهار می باشد. با استفاده از مدل سه بعدی FVCOM موقعیت‌هایی که پتانسیل شکل گیری فراجوشی در آنها وجود دارد؛ توسط یائو و همکارانش مدلسازی شد (Yao et al., 2020).

با توجه به هزینه بالای اندازه‌گیری میدانی پارامترهای فیزیکی و جریان از یک طرف و محدودیت‌های مکانی - زمانی این گونه اطلاعات از سوی دیگر، امروزه استفاده از مدل‌های عددی کارآمد

مدل FVCOM برای گسسته سازی زمانی از روشی به نام مد شکست استفاده می کند. مد شکست از دو مد داخلی (سه بعدی) و خارجی (دو بعدی) تشکیل شده است. در مد خارجی گسسته سازی زمانی به روش رانگ کوتا مرتبه چهارم انجام می شود.

در مد داخلی حل عددی با استفاده از یک روش ترکیبی صریح و ضمنی انجام می شود که جریان با استفاده از یک طرحواره رو به جلو با دقت مرتبه دوم و پخش قائم با استفاده از یک روش ضمنی محاسبه می شود. انتگرال گیری عددی در مد داخلی در دو مرحله صورت می گیرد؛ در گام اول سرعت انتقال با استفاده از همه مولفه ها به جز پخش قائم در معادلات تکانه محاسبه می شوند و در گام بعدی سرعت واقعی با استفاده از یک روش ضمنی و از طریق توازن بین تغییر موضعی سرعت انتقالی و پخش قائم محاسبه می شود. در جدول شماره ۱ پارامترهای کلیدی لحاظ شده در مدل ارائه گردیده است.

### ۳-۲ ورودی های مدل

در مرز باز از خروجی های مدل HYCOM با دقت مکانی افقی ۱/۱۲ درجه استفاده شد. نتایج مدل HYCOM برای نقاط مرز باز و ۱۰ لایه قائم درون یابی گردید. به منظور استخراج واداشت های سطحی از نتایج NCEP استفاده شد. واداشت های سطحی شامل فشار جوی (Pa)، دمای هوا (°C)، رطوبت نسبی (%، شارهای تابشی (W/m<sup>2</sup>، نرخ تبخیر و بارش (m/s) می- باشد. به منظور بازسازی تراز آب در مرز باز از داده های مدل TMD<sup>۲</sup> استفاده شد.

داده های ETOPO1 با دقت مکانی ۱ دقیقه برای کل محدوده مدل و داده های هیدروگرافی سازمان بنادر و دریانوردی با دقت مکانی ۱۰۰ متر برای قسمت های داخلی خلیج مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مدل هیدرودینامیکی FVCOM به صورت سه بعدی در مد باروکلینیک در یک دوره یک ساله (۲۰۱۷) اجرا گردید. مقادیر میانگین، ماکزیمم و مینیمم داده های ورودی در جدول شماره ۲ و گلباد به دست آمده از داده های NCEP و درون یابی شده برای ایستگاه میانی خلیج (St.) در شکل ۱ ارائه گردیده است.

<sup>۱</sup> انتگرال گیری روی عمق انجام شده و مسئله به صورت دو بعدی حل می شود.

<sup>۲</sup> Tide Model Driver

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (۶)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (۷)$$

x, y و z محورهای شرقی، شمالی و قائم در مختصات کارتزین هستند؛ u, v و w مولفه های x, y و z سرعت هستند؛ P<sub>H</sub> فشار هیدروستاتیک و P<sub>a</sub> فشار هوا در سطح دریا، f پارامتر کوریولیس، g شتاب گرانش زمین، q فشار غیر هیدروستاتیک، K<sub>h</sub> ضریب پخش پیچکی قائم دما، K<sub>m</sub> ضریب ویسکوزیته پیچکی قائم است. F<sub>S</sub> و F<sub>T</sub> عبارت های پخش افقی و قائم تکانه، دما و شوری هستند.

### ۲-۲ تنظیمات مدل FVCOM

به منظور لحاظ نمودن تغییرات قائم دما و شوری و در نظر گرفتن مد باروکلینیک در منطقه خلیج چابهار مدل سه بعدی FVCOM مورد استفاده قرار گرفت. در مدل FVCOM تراز آب، دما و شوری در نقاط شبکه و مولفه های سرعت در مرکز المان های مثلثی محاسبه می شوند. مدل به منظور لحاظ نمودن اثرات بستر از روش سیگما استفاده می کند (Abassi et al., 2019). علاوه بر این به منظور محاسبه ویسکوزیته افقی، پخش و اختلاط قائم از بستر تلاطمی مرتبه ۲/۵ ملور و یاماندا و فرمولبندی اسماغورینسکی استفاده می شود (Memari et al., 2018).

شبکه افقی متشکل از ۳۳۹۷ نقطه و ۶۲۹۰ المان مثلثی ایجاد شد. در قسمت های مختلف محدوده مدل عمق ها متغیر بوده و عمق های کمتر از ۲ متر در بخش داخلی و عمق های بیشتر از ۶۰۰ متر در بخش های بیرونی خلیج دیده می شود؛ در شبکه بندی قائم افزایش تعداد لایه ها از طرفی مدت زمان محاسبات را افزایش می دهد اما کمک می کند تا توزیع قائم کمیت ها با دقت بیشتری سنجیده شود؛ همچنین وجود لایه بندی سیگما با در نظر گرفتن تعداد لایه های بیشتر در نزدیکی سطح و بستر (به ویژه در آب های عمیق و بخش های فراساحلی) سبب می شود که در انتقال شرایط مرزی به بخش های داخلی مدل، نتایج بهتری حاصل شود. در این تحقیق از تعداد ۱۰ لایه سیگما در راستای قائم استفاده شد.

جدول ۱: پارامترهای مدل FVCOM

پارامتر مدل	مقدار
دوره مدلسازی	۰۱/۰۱/۲۰۱۷-۱۲/۳۰/۲۰۱۷
دقت افقی شبکه	۵۰۰ m - ۵ km
تعداد نقاط - تعداد المان های شبکه افقی	۶۳۹۰ - ۳۳۹۷
نوع و تعداد لایه های شبکه قائم	۱۰ لایه سیگما
گام زمانی مد داخلی (S)	۶۰
گام زمانی مد خارجی (S)	۱۲
ضریب سختی بستر	۰/۰۰۱
ضریب اختلاط افقی	۰/۴
ضریب اختلاط قائم	۰/۰۰۰۱

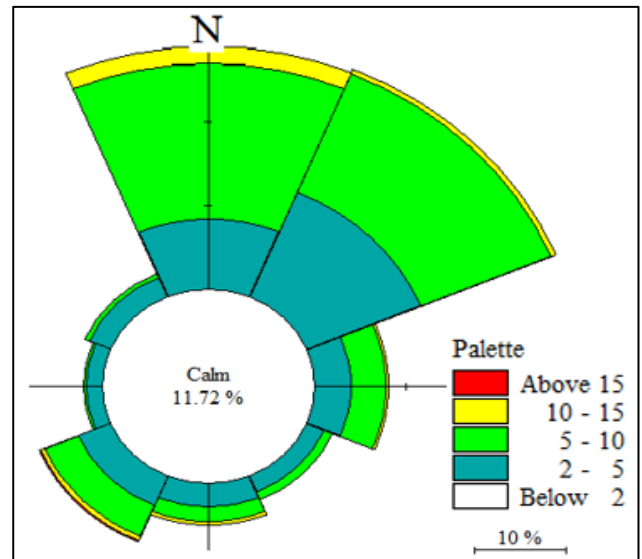
### ۲-۵ صحت سنجی نتایج مدل

با توجه به اینکه داده های تایید گنج چابهار از سایت سازمان بنادر و دریانوردی استخراج گردیده است؛ در زمان انجام تحقیق نزدیک ترین بازه زمانی به مدلسازی (سال ۲۰۱۷) که داده از دست رفته ای نیز نداشته باشد؛ مربوط به یک دوره یک هفته ای در ماه نوامبر سال ۲۰۱۶ بود؛ موقعیت تایید گنج چابهار (TG) در شکل ۳ نشان داده شده است. برای ارزیابی نتایج تراز آب، مدل مجدداً برای یک دوره یک ماهه (ماه نوامبر) سال ۲۰۱۶ اجرا گردید. به منظور صحت سنجی نتایج مدل، خروجی های تراز آب با داده های تایید گنج چابهار مقایسه گردید (شکل ۳). مقایسه نتایج تراز آب مدل و تایید گنج نشان می دهد که هم از نظر فاز و هم از نظر دامنه تراز آب به خوبی پیش بینی شده است.

سازمان بنادر و دریانوردی در فاز ۱ پایش و مطالعات شبیه سازی سواحل مکران، در یک بازه زمانی دو هفته ای در سال ۲۰۰۷ اقدام به ثبت داده های موج و جریان نمود؛ موقعیت دستگاه ADCP که از داده های آن در این تحقیق استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور صحت سنجی نتایج سرعت جریان به دست آمده از مدل، مجدداً مدل برای یک دوره یک ماهه در سال ۲۰۰۷ اجرا گردید. مقایسه نتایج مدل با داده های اندازه گیری شده تطابق قابل قبولی ( $R^2=0.97$ ) ارائه می دهد (شکل ۴).

جدول ۲: چند نمونه از مقادیر حدی ورودی های مدل

پارامتر (واحد)	میانگین	ماکزیمم	می نیمم
دمای هوا (°C)	۲۵/۹	۴۴/۷	۶/۵
فشار هوا در سطح دریا (mbar)	۹۶۰	۹۷۵	۹۵۰
شار خالص تابش طول موج بلند ( $W/m^2$ )	۳۶۰	۴۶۴	۲۱۳
رطوبت نسبی (%)	۴۷	۹۵	۷
سرعت باد (m/s)	۳/۱	۱۵	-



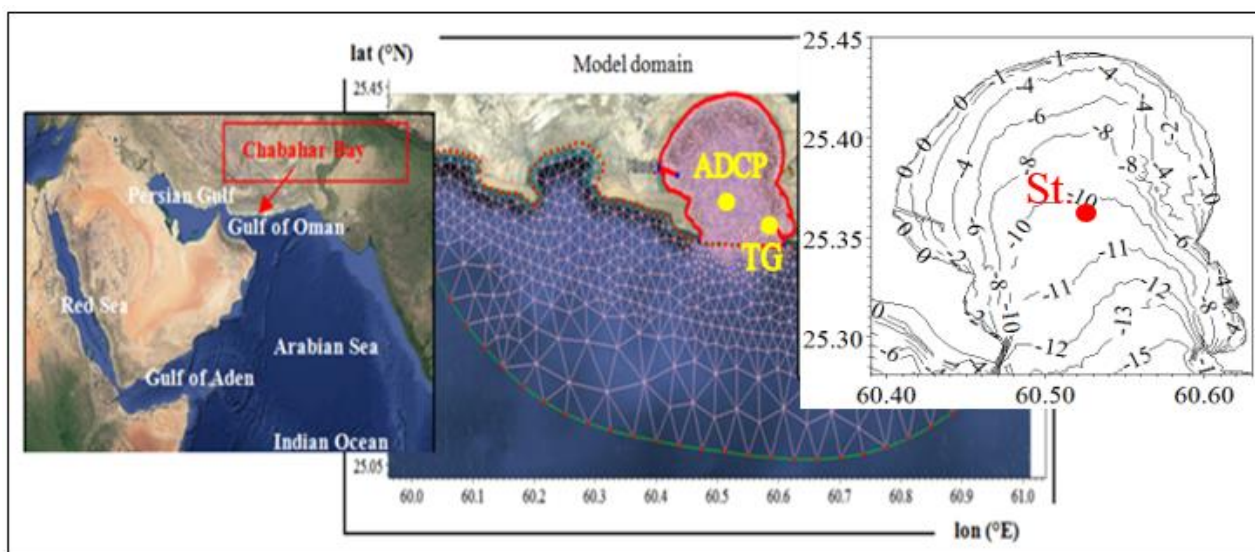
شکل ۱: گلیاد سال ۲۰۱۷ مربوط به ایستگاه شماره ۲ (تهیه شده با استفاده از داده های NCEP)

### ۲-۴ منطقه مورد مطالعه

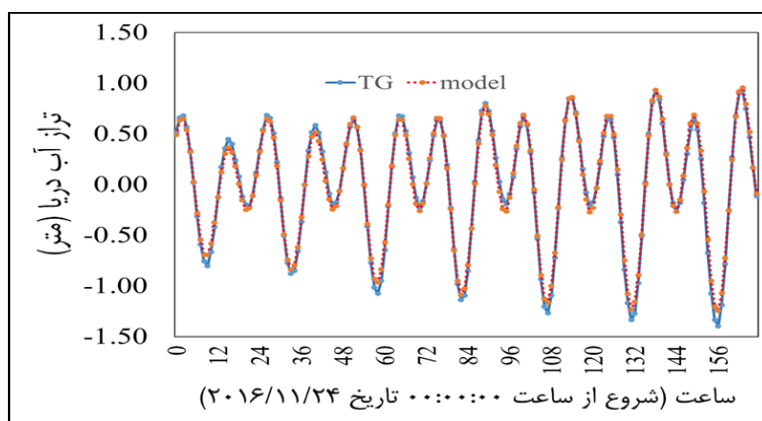
### ۳. نتایج و بحث

در شکل ۵ الف تغییرات تراز آب سالانه مربوط به نقطه میانی خلیج (St.) نشان داده شده است. تغییرات تراز آب و بردار سرعت باد مربوط به گام های زمانی ۶۵۰ تا ۷۲۰ (اواخر ماه ژانویه) در شکل های ۵. ب و ۵. ج نشان داده شده است. در این بازه زمانی الگوی وزش باد ابتدا جنوبی بوده و در گام های زمانی ۷۱۲-۷۰۰ دارای جهت شمال غربی و شمال شرقی می باشد.

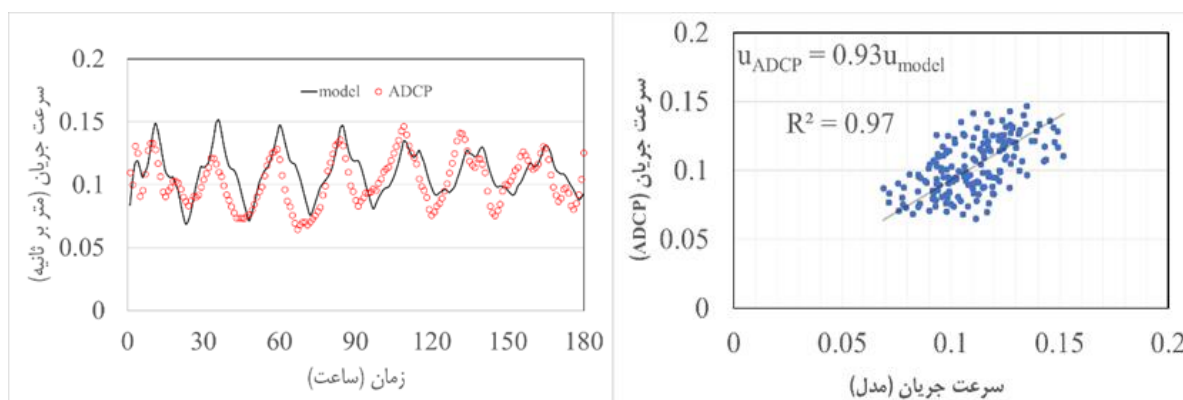
خلیج چابهار در جنوب استان سیستان و بلوچستان واقع شده و بخشی از دریای عمان به حساب می آید. دریای عمان یا خلیج عمان، دریای عربی در شمال اقیانوس هند را از طریق تنگه هرمز به خلیج فارس متصل می کند. محدوده مورد مطالعه خلیج چابهار و پزم را در بر می گیرد (عرض جغرافیایی  $25/45^{\circ}N - 25/00^{\circ}N$  و طول جغرافیایی  $61/00^{\circ}E - 60/00^{\circ}E$ ). به منظور ارزیابی نتایج تراز آب مدل از داده های تایید گنج چابهار استفاده شد. همچنین نتایج مدل، مربوط به



شکل ۲: محدوده مدل، شبکه بندی و هیدروگرافی خلیج چابهار، ایستگاه درنظر گرفته شده جهت بررسی سری های زمانی (St.)، TG موقعیت تایید گیج چابهار و ADCP موقعیت دستگاه جریان سنج



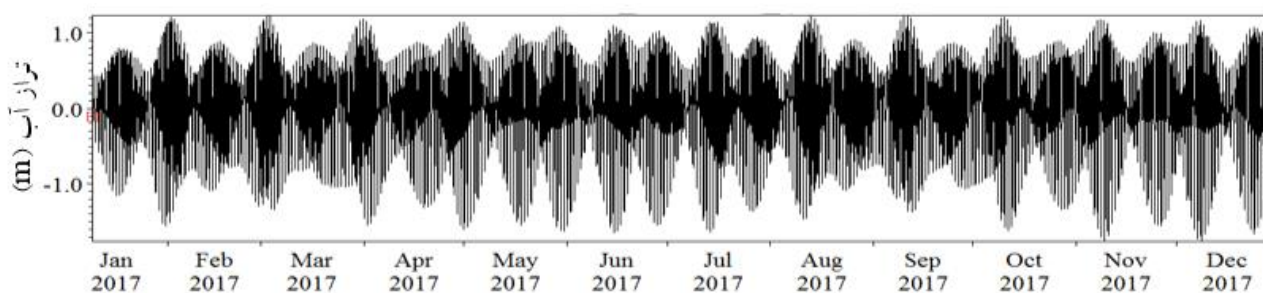
شکل ۳: مقایسه تراز آب اندازه گیری شده، تایید گیج چابهار (خط توپر آبی) و نتایج مدل (نقطه چین قرمز)



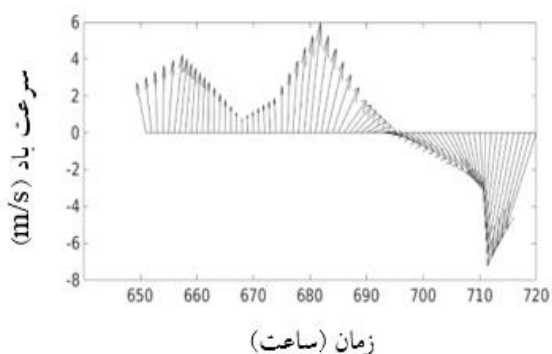
ب

الف

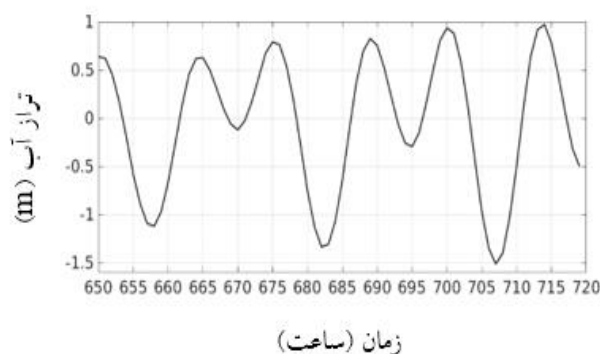
شکل ۴: الف) محاسبه ضریب همبستگی و ب) مقایسه سرعت جریان اندازه گیری شده (دایره های قرمز توخالی) و نتایج مدل (خط توپر سیاه)



الف



ج



ب

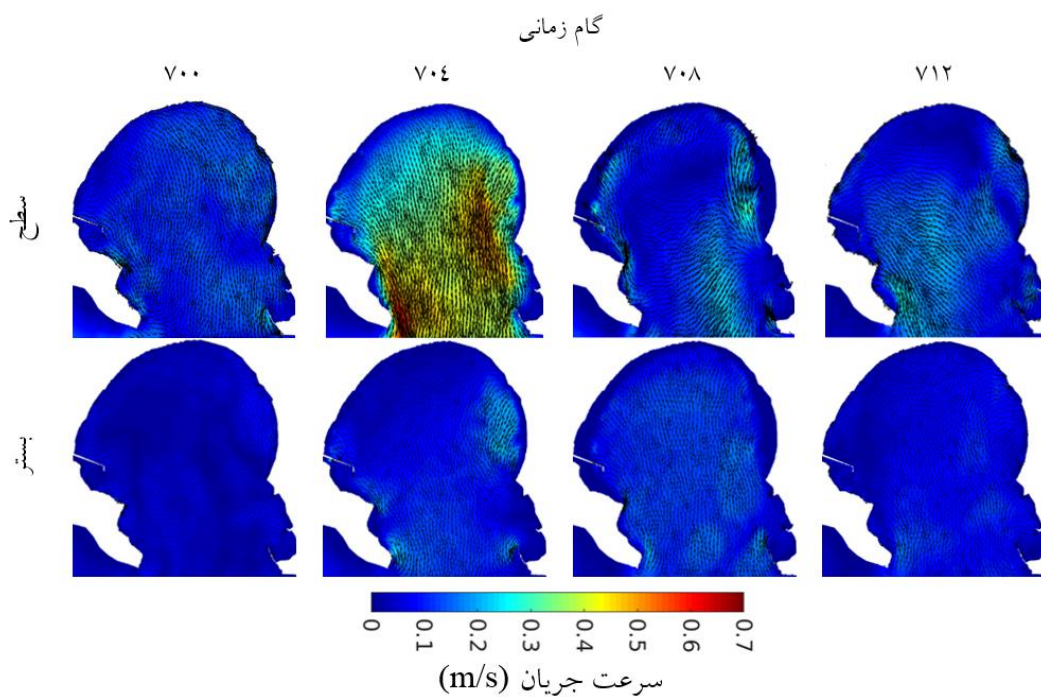
شکل ۵: الف) تراز آب مربوط به ایستگاه واقع در وسط خلیج (St.) (سال ۲۰۱۷)، ب) تراز آب و ج) بردار سرعت باد اواخر ژانویه (گام زمانی ۶۵۰-۷۲۰)

شمالی می باشد. جریان غالب در خلیج چابهار ناشی از جزرومد بوده و عمدتاً یک جریان رفت و برگشتی، شمال به جنوب (در حالت جزر) و جنوب به شمال (در حالت مد) وجود دارد (شکل ۶، بستر).

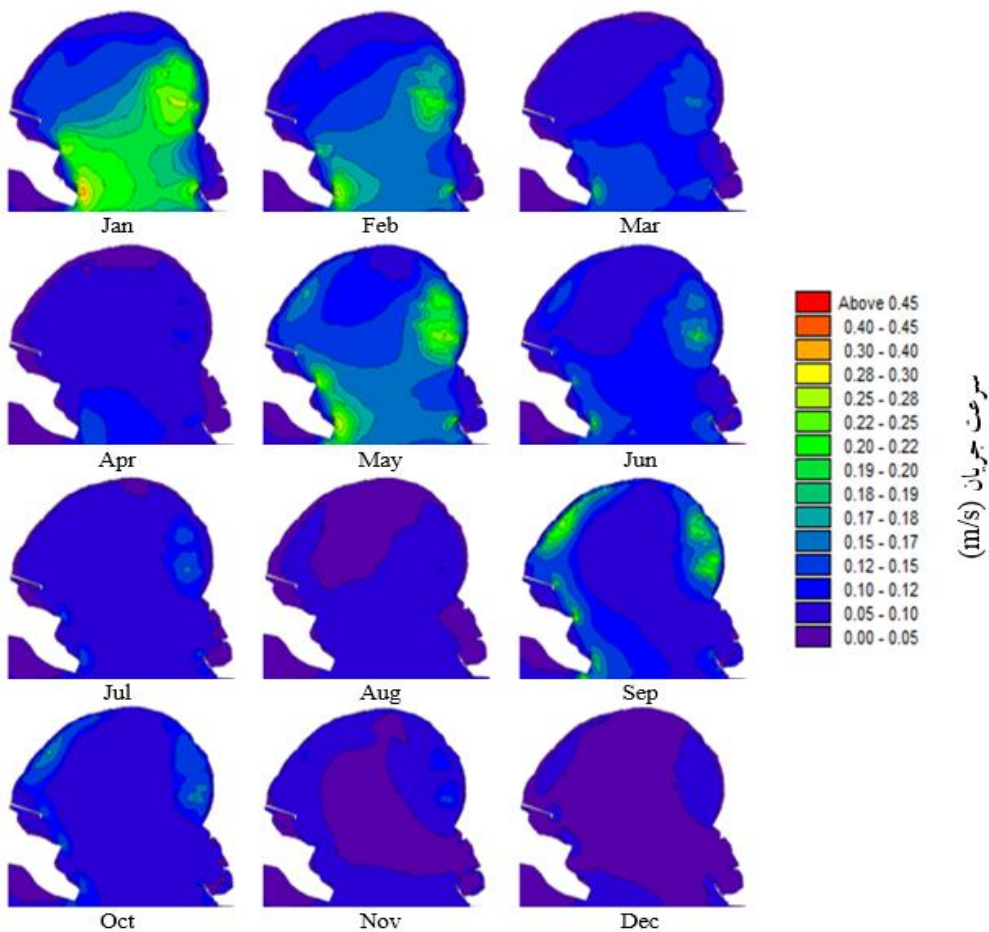
میانگین‌های عمقی و ماهانه سرعت جریان در محدوده خلیج چابهار در شکل ۷ نشان داده شده است. میانگین ماهانه سرعت جریان در ماه ژانویه نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر بوده و تقریباً در همه قسمت‌های نیمه جنوبی خلیج از مرتبه ۰/۲ متر بر ثانیه می باشد. در سایر ماه‌ها میانگین سرعت جریان غالباً کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه می باشد.

مقادیر ماکزیمم و میانگین سالانه سرعت جریان در شکل ۸ ارائه گردیده است. ماکزیمم سرعت در بخش‌های مرکزی خلیج کمتر از قسمت‌های شرقی و غربی بوده و به ویژه در منطقه شمال شرقی به دلیل کم عمق بودن منطقه سرعت جریان بیشتر از سایر قسمت‌ها می باشد (شکل ۷-الف). میانگین سرعت جریان در محدوده میانی خلیج به ندرت از ۰/۱ متر بر ثانیه تجاوز کرده است (شکل ۸-ب).

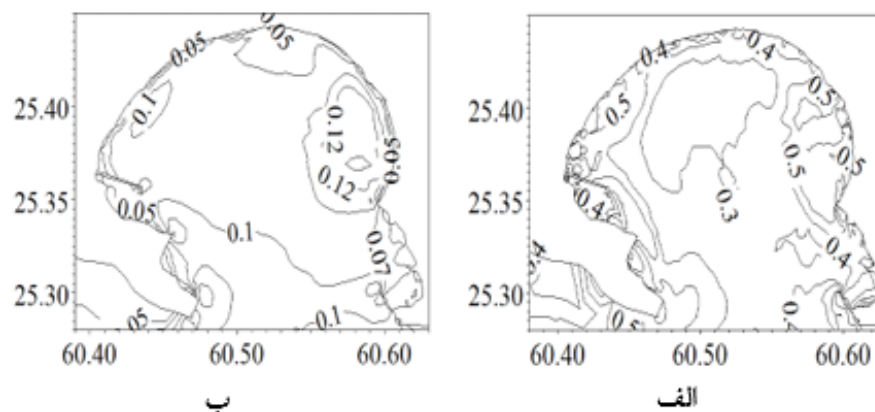
الگوی سرعت جریان در سطح و بستر مربوط به بازه زمانی ۷۱۲-۷۰۰ با یک گام زمانی ۴ ساعته در شکل ۶ نشان داده شده است. با شروع ساعات جزر جهت جریان در سطح و بستر به سمت جنوب می باشد (شکل ۶، گام زمانی ۷۰۰ و ۷۰۴ را ببینید). با تداوم شرایط جزر، سرعت‌ها افزایش یافته و حداکثر مقدار سرعت در قسمت‌های میانی از مرتبه ۰/۴ متر بر ثانیه می باشد؛ البته ماکزیمم سرعت جریان سطحی کمی بیشتر از ۰/۷ متر بر ثانیه نیز در بخش‌های شرقی و دهانه جنوب غربی خلیج دیده می شود. در ساعات جزر، جهت باد شمال غربی بوده (شکل ۵، ج) و بنابراین جریان ناشی از باد و جریان جزرومدی هم جهت می باشند (شکل ۶، گام زمانی ۷۰۰ و ۷۰۴) و این پدیده باعث تقویت سرعت جریان در سطح شده است. در شرایط مد انتظار داریم که جهت جریان به سمت داخل خلیج تغییر یابد؛ اما در این شرایط وجود بادهای شمال غربی تا شمال شرقی (شکل ۵، ج) مانع از ایجاد جریان کاملاً شمالی و انحراف جریان نسبت به شمال شده است (شکل ۶، گام‌های زمانی ۷۰۸ و ۷۱۲)؛ این در حالی است که در بستر جهت جریان صرفاً متأثر از شرایط مد و



شکل ۶: الگوی جریان در یک بازه زمانی ۱۲ ساعته در سطح و بستر (گام زمانی ۷۰۰-۷۱۲)



شکل ۷: میانگین ماهانه سرعت جریان

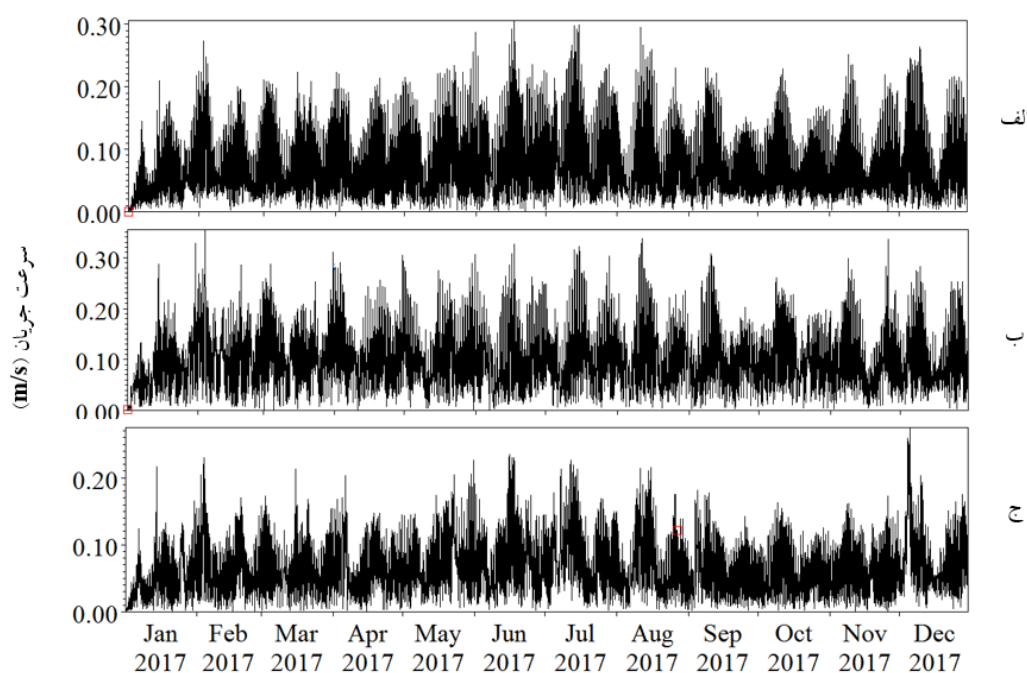


شکل ۸: الف) ماکزیمم، ب) میانگین سالانه سرعت جریان (m/s) در محدوده خلیج چابهار

چرخش عمدتاً ساعتگرد بوده که البته این الگوی چرخش در تمام فصول سال دیده می‌شود؛ ولی از نظر وسعت و شدت متغیر است. چرخش ساعتگرد خلیج، بیشترین گستردگی را در فصل پائیز و زمستان دارد و تقریباً در این فصل‌ها کل محدوده خلیج را در بر می‌گیرد اما از نظر شدت (بزرگی سرعت جریان) در فصل تابستان و بهار دارای سرعت‌های بیش از  $0.1 \text{ m/s}$  نیز می‌باشد. در فصول بهار و تابستان یک سیستم دو سلولی شامل یک سلول پادساعتگرد در نیمه شرقی و یک سلول غالب و ساعتگرد در نیمه غربی دیده می‌شود؛ که البته هرچند سلول پادساعتگرد شرقی از نظر وسعت به بزرگی سلول ساعتگرد غربی نیست اما به ویژه در فصل تابستان سرعت جریانی در حد سیستم غالب غربی دارد.

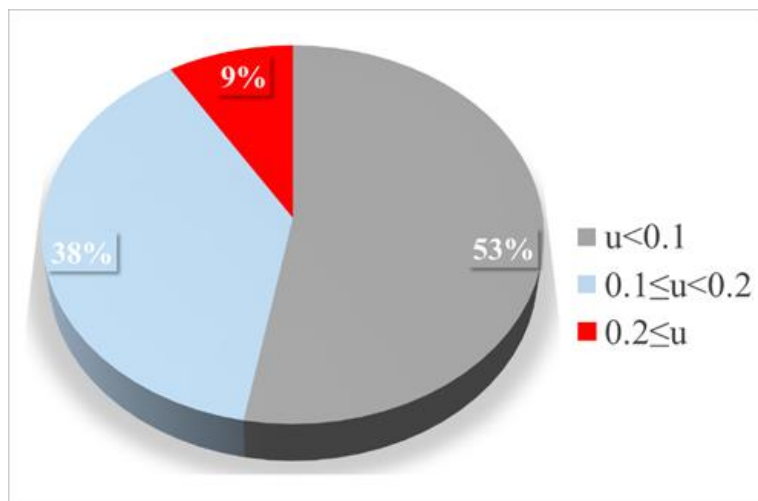
سری زمانی مربوط به سرعت جریان در نقطه میانی خلیج در شکل ۹ نشان داده شده است. میانگین سرعت جریان در سطح و بستر به ترتیب  $0.10$  و  $0.07$  متر بر ثانیه می‌باشد. حداکثر سرعت جریان در سطح و بستر نیز به ترتیب  $0.35$  و  $0.28$  متر بر ثانیه به دست آمده است.

بررسی آماری میانگین‌های عمقی سرعت در ایستگاه میانی (St.) خلیج (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که تنها در کمتر از ۹ درصد موارد سرعت جریان بیشتر از  $0.2 \text{ m/s}$  مشاهده شده و در ۵۳ درصد موارد سرعت جریان کمتر از  $0.1 \text{ m/s}$  می‌باشد. میانگین‌های فصلی جریان در خلیج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد؛ خلیج چابهار، خلیجی با

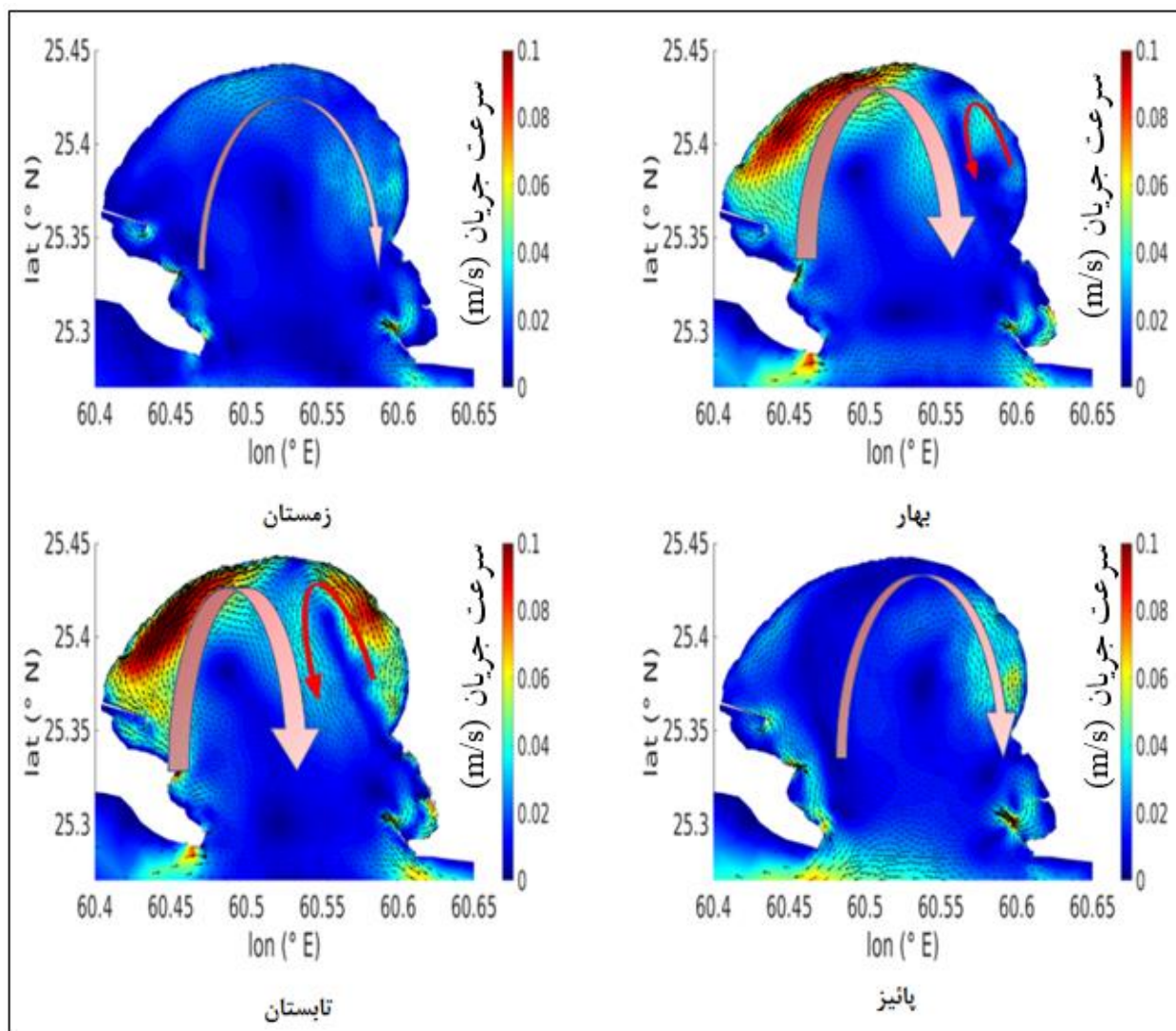


شکل ۹: سری زمانی سرعت جریان در نقطه میانی واقع در خلیج (St.) مربوط به سال ۲۰۱۷، الف) میانگین عمقی، ب) سطح و ج) بستر





شکل ۱۰: درصد توزیع سرعت جریان در ایستگاه میانی خلیج (St.)



شکل ۱۱: الگوی فصلی چرخش جریان در خلیج چابهار

#### ۴. نتیجه گیری

نتایج تراز آب و سرعت جریان مدل هیدرودینامیکی FVCOM در محدوده چابهار مربوط به سال ۲۰۱۷ تطابق قابل قبولی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ با داده های میدانی دارد و نتایج زیر حاصل گردید.

- میانگین عمقی سرعت جریان در بخش های میانی خلیج از مرتبه ۰/۱ m/s محاسبه گردید.
- تنها در کمتر از ۱۰ درصد موارد، میانگین سرعت جریان بالاتر از ۰/۲ m/s می باشد.
- الگوی فصلی چرخش در خلیج چابهار در فصل پائیز و زمستان عمدتاً تک سلولی و ساعتگرد بوده و در فصل بهار و تابستان الگوی چرخش به صورت دو سلولی، شامل یک سلول غالب با چرخش ساعتگرد در غرب و یک سلول با چرخش پادساعتگرد در شرق می باشد.
- الگوی روزانه جریان عمدتاً به صورت یک جریان جزرومدی رفت و برگشتی شمال به جنوب (در حالت جزر) و جنوب به شمال (در حالت مد) می باشد.
- ماکزیمم سرعت جریان مشاهده شده مربوط به سطح و حدود ۰/۷ متر بر ثانیه می باشد.

#### ۵. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از سازمان بنادر و دریانوردی جمهوری اسلامی ایران به خاطر در اختیار قراردادن داده های ارزشمندشان سپاسگزار هستند.

#### منابع

۱۱۹. ۱۰۷. صفحه.
- وفایی، ب؛ م. صنعتگران؛ م. ترابی آزاد و و. چگینی، ۱۳۹۶. بررسی جریانات ناشی از تغییرات دما در خلیج چابهار. چهاردهمین همایش صنایع دریایی. صفحات ۱۹-۱۱.
- Abbasi, M.R., Chegini, V., Sadrinasab M., & Siadatmousavi, S. M. 2019. Correcting the sea surface temperature by data assimilation over the Persian Gulf. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*. 43(1):141-149.
- Batten, W.M.J., Bahaj, A.S., Molland, A.F., Chaplin, J.R., 2008. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines: *Renew. Energy*, 33: 1085–1096.
- Biglari, M., Valipour, M. S. and Rahmany, H., 2015. Technical Feasibility Study of Energy Generation from the Tide in Southern Coasts of Iran Using Helical Turbines: *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, V: 39-48.
- Chen, C., Beardsley, R., Cowles, G., Qi, J., Lai, Z., Gao, J., Stuebe, D., Xu, Q., Xue, P., Ge, J., Hu, S., Ji, R., Tian, R., Huang, H., Wu, L., Lin, H., Sun Y. and Zhao, L. 2013. An Unstructured Grid, Finite-Volume Community Ocean Model FVCOM User Manual. FVCOM user manual, 416p.
- Chen. C., et al. 2011. An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User Manual., Massachusetts Institute of Technology.
- Dyer, K. R., 1973. *Estuaries: A physical introduction*. 2nd ed, 210pp.
- Fazeli, N. and Zare R., 2011. Effect of seasonal monsoons on calanoid copepod in Chabahar bay-Gulf of Oman: *Jordan Journal of Biological Sciences*, 4: 55-62.
- Geyer, W. R., Morris, J. T., Prahl, F. and Jay, D., 2000. Interaction between physical processes and ecosystem structure: A comparative approach, p. 177–206. In J. E. Hobbie [ed.], *Estuarine science: A synthetic approach to research and practice*, 539pp.
- افشاریان، س.، ۱۳۸۹. مدلسازی سه بعدی گردش آب در خلیج چابهار. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر. ۸۱ صفحه.
- دهبندی، آ.، ۱۳۹۲. مطالعه ی الگوهای جریان سطحی در اقیانوس هند شمالی طی فصول مونسون. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران. ۱۲۴ صفحه.
- سازمان نقشه برداری کشور جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۸۷. دستورالعمل های همسان نقشه برداری، جلد هفتم: آبنگاری، نشریه شماره ۷-۷.

- flushing times of the Persian Gulf: Geophysical Research Letters, VOL. 31: 1-4.
- Shankar, D., Vinayachandran, P. N. and Unnikrishnan, A. S., 2002. The monsoon currents in the north Indian Ocean: Progress in oceanography, 52: 63-120.
- Soltanpour, M. and Dibajnia, M., 2015. Field measurements and 3D numerical modeling of hydrodynamics in Chabahar Bay: International journal of maritime technology, 3: 49-60.
- Yao, Z., Fan, W., Xiao, C., Lin, T., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, J., Zhang, Z., Pan Y. and Chen, Y., 2020, Numerical Studies on the Suitable Position of Artificial Upwelling in a Semi-Enclosed Bay: Water Journal, 12: 1-16.
- Zanganeh, M., 2016, Estimation of Cahabahr Bay flushing time by a two-dimensional hydrodynamic model: International Conference on Coasts Port and Marine Structures (ICOPMAS), 12:41-42.
- Zeinali, S., Dehghani, M., Rastegar, A. and Mojarrad, M., 2017. Detecting shoreline changes in Chabahar Bay by processing satellite images: International journal of science and technology, Scientia Iranica A: Civil Engineering, 24: 1802-1809.
- Li, B., Tanaka, K.R., Chen, Y., Brady D. C. and Thomas, A. C., 2017. Assessing the quality of bottom water temperatures from the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) in the Northwest Atlantic Shelf region: Journal of Marine Systems, 173: 21-30.
- Lowcher, C.F., Muglia, M., Bane, J.M., He, R., Gong, Y., Haines, S.M., 2017. Marine hydrokinetic energy in the gulf stream off North Carolina: An assessment using observations and ocean circulation models, In: Yang, Z., Copping, A. (Eds), Wave energy resources along the European Atlantic coast. Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 237–258pp.
- Memari, S., & Siadatmousavi, S. M. 2018. Numerical Modeling of Heat and Brine Discharge near Qeshm Desalination Plant. International Journal of Coastal and Offshore Engineering. 2(1):27-35.
- Monsen, N., Lucas L., and Cloern, J. E., 2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales: Oceanography, 47: 1545-1553.
- Myers, L. and Bahaj, A.S., 2006. Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine. Renew. Energy, 31: 197–208.
- Sadrinasab, M. and Ka'mpf, J., 2004. Three-dimensional