



## Hydrodynamic Study of Chabahar Bay Using FVCOM Model

Alireza Bahmanzadegan Jahromi<sup>1</sup>, Mojtaba Ezam<sup>1,\*</sup>, Kamran Lari<sup>1</sup>, Abbasali Ali Akbari Bidohti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Iranian Seismological Center, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

Code: A-10-1569-1

#### Article History:

Received: 2020/07/17

Revised: 2020/09/25

Accepted: 2020/12/19

#### Keywords:

FVCOM Model

Chabahar Bay

Flow Velocity

Tidal

Energy

Discharge Time

\*Corresponding author:

[ezam@srbiau.ac.ir](mailto:ezam@srbiau.ac.ir)

### ABSTRACT

Chabahar Bay is a semi-enclosed and shallow bay in southeastern Iran and is strongly influenced by the monsoon conditions. The three-dimensional FVCOM model was used to study the hydrodynamic conditions of Chabahar Bay. For this purpose, a horizontal grid with 6290 triangular elements and a vertical grid with 10 layers of sigma were created. The model was implemented in baro-clinical fashion; NCEP data and HYCOM model outputs were used to account for open surface and boundary layer impressions. Water level and flow velocity verifications show acceptable agreement with field data. The average annual and depth of flow velocity is 0.1 m / s and the dominant pattern of rotation in winter and autumn is single-celled and clockwise, and in spring and summer it is two-celled and consists of one dominant cell with clockwise rotation and one cell with counterclockwise rotation.



NUMBER OF TABLES

2



NUMBER OF FIGURES

11



NUMBER OF REFERENCES

23

## مطالعه عددی جریان و الگوی چرخش آب در خلیج چابهار با استفاده از مدل FVCOM

علیرضا بهمن زادگان جهرمی<sup>۱</sup>، مجتبی عظام<sup>۲\*</sup>، کامران لاری<sup>۳</sup>، عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۴</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران<sup>۴</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۲۷/۴/۱۳۹۹	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 خروجی‌های مدل HYCOM استفاده گردید. صحت سنجی تراز آب و سرعت جریان تطابق قابل قبولی با داده‌های میدانی نشان می‌دهد. میانگین سالانه و عمقی سرعت جریان از مرتبه ۰/۱ m/s بوده و الگوی غالب چرخش در زمستان و پائیز، 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.
تاریخ بازبینی: ۴/۷/۱۳۹۹	
تاریخ پذیرش: ۲۹/۹/۱۳۹۹	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
مدل FVCOM	
خلیج چابهار	
سرعت جریان	
جزروم	
الگوی چرخش	
*نویسنده مسئول	
✉ ezam@srbiau.ac.ir	

## مقدمه

ماه‌های نوامبر تا فوریه بادهای غالباً 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 ویژه‌ای از نظر تجاری با سایر کشورها می‌باشد [۵].

FVCOM یک مدل پیشرفته برای مدلسازی چرخش اقیانوسی است که به واسطه توانایی‌های زیادی که دارد به منظور مدلسازی مناطق ساحلی با شرایط پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. 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. وفاپی و همکاران (۱۳۹۱) [۷] 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

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 پیما را دارد. خلیج چابهار بزرگترین خلیج ایران در حاشیه کرانه‌های دریای عمان است. این خلیج به خاطر شکل حلقه‌ای (Ω) خود در زمین شناسی از نوع خلیج‌های امگایی دسته بندی می‌شود (افشاریان، ۱۳۸۹). خلیج چابهار یک خلیج نیم بسته و جنب حاره‌ای است [۱].

عمق متوسط، مساحت و حجم خلیج نسبت به چارت دیتوم به ترتیب ۷/۵ m، ۲۹۰ km<sup>2</sup> و ۲۱۶۲×۱۰<sup>۶</sup> m<sup>3</sup> می‌باشد. خلیج چابهار بزرگترین خلیج واقع شده در سواحل دریای عمان بوده که عرض آن در دهانه ورودی (شرقی - غربی) ۱۳/۵km و طول آن (جنوبی - شمالی) km ۱۷/۵ می‌باشد [۲]. خلیج تحت تأثیر شرایط مونسون قرار دارد [۳]. مونسون به معنی فصل، سیستم بادهایی هستند که بر فراز اقیانوس می‌وزند. بادهای مونسون تابستانی خیلی قوی‌تر از مونسون زمستانی هستند [۴] در قسمت‌های شمالی اقیانوس هند طی ماه‌های می تا سپتامبر بادهای غالب، جنوب غربی بوده (مونسون تابستانه) و طی

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

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

x, y و z محورهای شرقی، شمالی و قائم در مختصات کارتزین هستند؛ u, v و w مؤلفه‌های 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>, F<sub>w</sub>, F<sub>v</sub>, F<sub>u</sub> و F<sub>T</sub> عبارتهای پخش افقی و قائم تکانه، دما و شوری هستند.

## ۲. تنظیمات مدل FVCOM

به منظور لحاظ نمودن تغییرات قائم دما و شوری و در نظر گرفتن مد باروکلینکی در منطقه خلیج چابهار مدل سه بعدی FVCOM مورد استفاده قرار گرفت. در مدل FVCOM تراز آب، دما و شوری در نقاط شبکه و مؤلفه‌های سرعت در مرکز المان‌های مثلثی محاسبه می‌شوند. مدل به منظور لحاظ نمودن اثرات بستر از روش سیگما استفاده می‌کند [۱۰]. علاوه بر این به منظور محاسبه ویسکوزیته افقی، پخش و اختلاط قائم از بستر تلامپی مرتبه ۲/۵ ملور و یاماندا و فرمولبندی اسمگورینسکی استفاده می‌شود [۱۱].

شبکه افقی متشکل از ۳۳۹۷ نقطه و ۶۲۹۰ المان مثلثی ایجاد شد. در قسمت‌های مختلف محدوده مدل عمق‌ها متغیر بوده و عمق‌های کمتر از ۲ متر در بخش داخلی و عمق‌های بیشتر از ۶۰۰ متر در بخش‌های بیرونی خلیج دیده می‌شود؛ در شبکه بندی قائم افزایش تعداد لایه‌ها از طرفی مدت زمان محاسبات را افزایش می‌دهد اما کمک می‌کند تا توزیع قائم کمیت‌ها با دقت بیشتری سنجیده شود؛ همچنین وجود لایه بندی سیگما با در نظر گرفتن تعداد لایه‌های بیشتر در نزدیکی سطح و بستر (به ویژه در آب‌های عمیق و بخش‌های فراساحلی) سبب می‌شود که در انتقال شرایط مرزی به بخش‌های داخلی مدل، نتایج بهتری حاصل شود. در این تحقیق از تعداد ۱۰ لایه سیگما در راستای قائم استفاده شد. مدل FVCOM برای گسسته سازی زمانی از روشی به نام مد شکست استفاده می‌کند. 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 می‌شود. در مد داخلی حل عددی با استفاده از یک روش ترکیبی صریح و ضمنی انجام می‌شود که جریان با استفاده از یک طرحواره رو به جلو با دقت مرتبه دوم و پخش قائم با استفاده از یک روش ضمنی محاسبه می‌شود. انتگرال گیری عددی در مد داخلی در دو مرحله صورت می‌گیرد؛ در گام اول سرعت انتقال با استفاده از همه مؤلفه‌ها به جز پخش قائم در معادلات تکانه محاسبه می‌شوند و در گام بعدی

ویژگیهای خاص مکانی، منطقه کم عمق بیشتر از محیط‌های دریایی عمیق تحت تأثیر تغییرات دمایی قرار دارد؛ لذا گرادیان دما عامل مهمی در گردش آب در خلیج چابهار می‌باشد. با استفاده از مدل سه بعدی FVCOM موقعیت‌هایی که پتانسیل شکل گیری فراجوشی در آنها وجود دارد؛ توسط یائو و همکارانش مدل‌سازی شد [۸].

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 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 می‌کند و بنابراین به منظور مدل‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیکی سه بعدی در مناطق ساحلی می‌تواند مدل مناسبی باشد. در این تحقیق پس از مدل‌سازی سه بعدی جریان با استفاده از مدل FVCOM در یک دوره یک ساله (۲۰۱۷)، میانگین‌های ماهانه سرعت جریان، الگوی فصلی چرخش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان گام نخست در مطالعات مهندسی سواحل به منظور طراحی و توسعه بنادر، مطالعات مرتبط با انتشار آلودگی، تأثیر گردش آب بر الگوی زیستی آبزیان و موارد مشابه از این دست، مورد استفاده قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### ۱. مدل FVCOM

مدل عددی FVCOM امکان استفاده از تکنیک تری‌اخشیکی در مناطق جزرومدی را فراهم می‌کند. این مدل در غیاب برف و یخ، هفت معادله شامل سه معادله تکانه، پایستگی، دما، شوری و چگالی را حل می‌کند [۹].

(۱)

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

(۲)

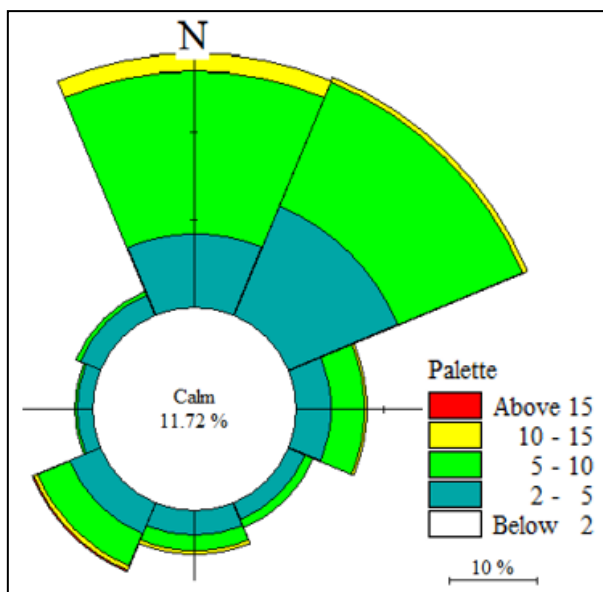
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial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

(۳)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (4)$$

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

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



شکل ۱: گلباد سال ۲۰۱۷ مربوط به ایستگاه شماره ۲ (تهیه شده با استفاده از داده‌های NCEP)

Fig 1: Golbad 2017 related to Station No. 2 (prepared using NCEP data)

#### ۴. منطقه مورد مطالعه

خلیج چابهار در جنوب استان سیستان و بلوچستان واقع شده و بخشی از دریای عمان به حساب می‌آید. دریای عمان یا خلیج عمان، دریای عربی در شمال اقیانوس هند را از طریق تنگه هرمز به خلیج فارس متصل می‌کند. محدوده مورد مطالعه خلیج چابهار و پزم را در بر می‌گیرد (عرض جغرافیایی  $25^{\circ}N - 25^{\circ}45'$  و طول جغرافیایی  $61^{\circ}00' E - 61^{\circ}00'$ ). به منظور ارزیابی نتایج تراز آب مدل از داده‌های تاییدگی چابهار استفاده شد. همچنین نتایج مدل، مربوط به سرعت جریان با داده‌های ADCP متعلق به سازمان بنادر و دریانوردی مورد صحت سنجی قرار گرفت. موقعیت خلیج چابهار، محدوده و شبکه بندی مدل، موقعیت ایستگاه‌های مربوط به تاییدگی چابهار (TG)، جریان سنجی (ADCP) و یک ایستگاه (St.) در قسمت میانی خلیج به منظور بررسی سری‌های زمانی مربوط به جزرومد و اطلاعات باد در شکل ۲ ارائه شده است.

#### ۵. صحت سنجی نتایج مدل

با توجه به اینکه داده‌های تاییدگی چابهار از سایت سازمان بنادر و دریانوردی استخراج گردیده است؛ در زمان انجام تحقیق نزدیک‌ترین بازه زمانی به مدلسازی (سال ۲۰۱۷) که داده از دست رفته‌ای نیز نداشته باشد؛ مربوط به یک دوره یک هفته‌ای در ماه نوامبر سال ۲۰۱۶ بود؛ موقعیت تاییدگی 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، خروجی‌های تراز آب با داده‌های تاییدگی چابهار مقایسه گردید (شکل ۳). مقایسه نتایج تراز آب

سرعت واقعی با استفاده از یک روش ضمنی و از طریق توازن بین تغییر موضعی سرعت انتقالی و پخش قائم محاسبه می‌شود.

در جدول شماره ۱ پارامترهای کلیدی لحاظ شده در مدل ارائه گردیده است.

جدول ۱: پارامترهای مدل FVCOM

Table 1: FVCOM model parameters

پارامتر مدل	مقدار
دوره مدلسازی	۰۱/۰۱/۲۰۱۷ - ۱۲/۳۰/۲۰۱۷
دقت افقی شبکه	۵۰۰ m - ۵ km
تعداد نقاط - تعداد المان‌های شبکه افقی	۶۲۹۰ - ۳۳۹۷
نوع و تعداد لایه‌های 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

#### ۳. ورودی‌های مدل

در مرز باز از خروجی‌های 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 واداشت‌های سطحی از نتایج NCEP استفاده شد. واداشت‌های سطحی شامل فشار جوی (Pa)، دمای هوا ( $^{\circ}C$ )، رطوبت نسبی (%، شارهای تابشی ( $W/m^2$ )، نرخ تبخیر و بارش ( $m/s$ ) می‌باشد. به منظور بازسازی تراز آب در مرز باز از داده‌های مدل TMD<sup>۱</sup> استفاده شد.

داده‌های ETOPO1 با دقت مکانی ۱ دقیقه برای کل محدوده مدل و داده‌های هیدروگرافی سازمان بنادر و دریانوردی با دقت مکانی ۱۰۰ متر برای قسمت‌های 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 داده‌های ورودی در جدول شماره ۲ و گلباد به دست آمده از داده‌های NCEP و درون یابی شده برای ایستگاه میانی خلیج (St.) در شکل ۱ ارائه گردیده است.

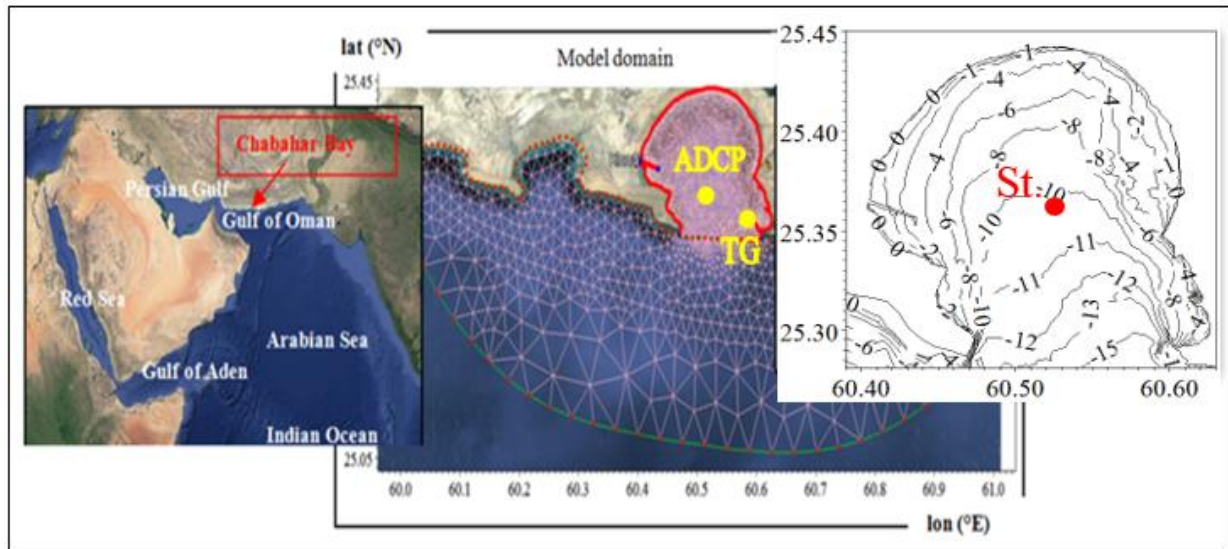
جدول ۲: چند نمونه از مقادیر حدی ورودی‌های مدل

Table 2: A few examples of limit values for model inputs

پارامتر (واحد)	میانگین	ماکزیمم	مینیمم
دمای هوا ( $^{\circ}C$ )	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	-

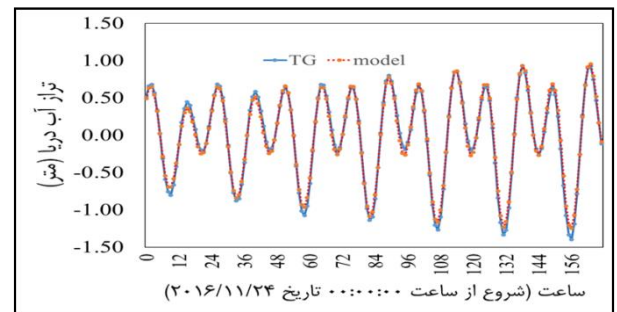
<sup>1</sup> Tide Model Driver

مدل و تایید گیج نشان می‌دهد که هم از نظر فاز و هم از نظر دامنه تراز آب به خوبی پیش بینی شده است.



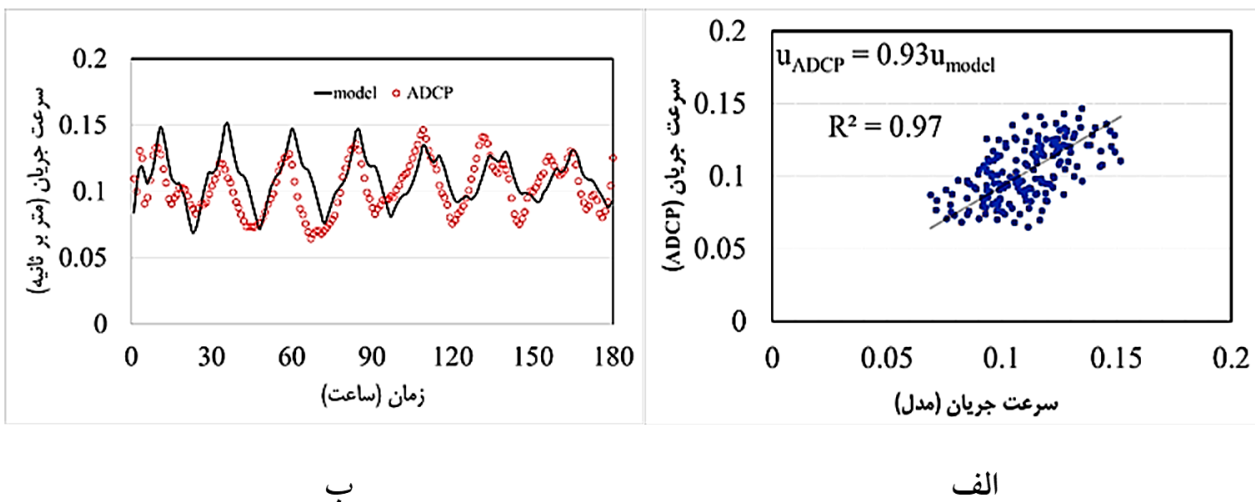
شکل ۲: محدوده مدل، شبکه بندی و هیدروگرافی خلیج چابهار، ایستگاه در نظر گرفته شده جهت بررسی سری‌های زمانی (St.)، موقعیت تایید گیج چابهار و ADCP موقعیت دستگاه جریان سنج  
**Fig 2:** Model range, networking and hydrography of Chabahar Bay, station intended to study time series (St.), TG position of Chabahar gauge tide and ADCP position of flow meter

سازمان بنادر و دریانوردی در فاز ۱ پایش و مطالعات شبیه سازی سواحل مکران، در یک بازه زمانی دو هفته‌ای در سال ۲۰۰۷ اقدام به ثبت داده‌های موج و جریان نمود؛  
 موقعیت دستگاه ADCP که از داده‌های 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 داده‌های اندازه گیری شده تطابق قابل قبولی ارائه می‌دهد ( $R^2=0.97$ ) (شکل ۴).



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

**Fig 3:** Comparison of measured water level, Chabahar gauge tide (solid blue line) and model results (red dotted line)



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

**Fig 4:** A) Calculation of correlation coefficient and b) Comparison of measured flow velocity (hollow red circles) and model results (solid black line)

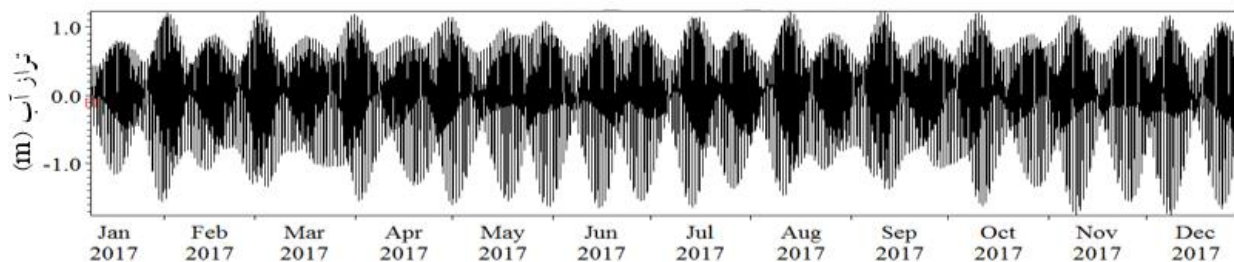


## نتایج و بحث

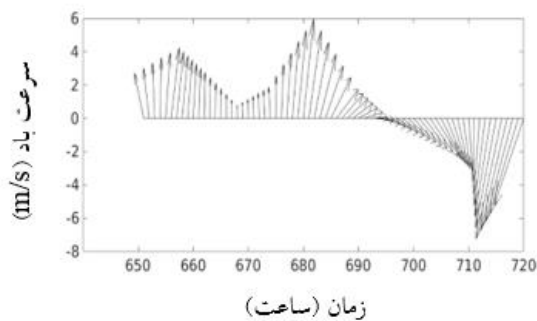
مرتبه ۰/۴ متر بر ثانیه می‌باشد؛ البته ماکزیمم سرعت جریان سطحی کمی بیشتر از ۰/۷ متر بر ثانیه نیز در بخش‌های شرقی و دهانه جنوب غربی خلیج دیده می‌شود. در ساعات جزر، جهت باد شمال غربی بوده (شکل ۵، ج) و بنابراین جریان ناشی از باد و جریان جزرومدی هم جهت می‌باشند (شکل ۶، گام زمانی ۷۰۰ و ۷۰۴) و این پدیده باعث 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 شمالی می‌باشد. 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).

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 گام‌های زمانی ۶۵۰ تا ۷۲۰ (اواخر ماه ژانویه) در شکل‌های ۵، ب و ۵، ج نشان داده شده است. در این بازه زمانی الگوی وزش باد ابتدا جنوبی بوده و در گام‌های زمانی ۷۱۲-۷۰۰ دارای جهت شمال غربی و شمال شرقی می‌باشد.

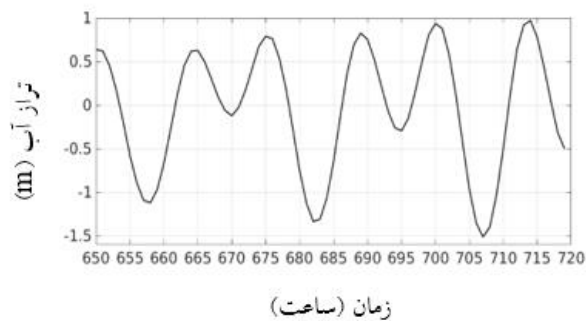
الگوی سرعت جریان در سطح و بستر مربوط به بازه زمانی ۷۱۲-۷۰۰ با یک گام زمانی ۴ ساعته در شکل ۶ نشان داده شده است. با شروع ساعات جزر جهت جریان در سطح و بستر به سمت جنوب می‌باشد (شکل ۶، گام زمانی ۷۰۰ و ۷۰۴ را ببینید). با تداوم شرایط جزر، سرعت‌ها افزایش یافته و حداکثر مقدار سرعت در قسمت‌های میانی از



الف



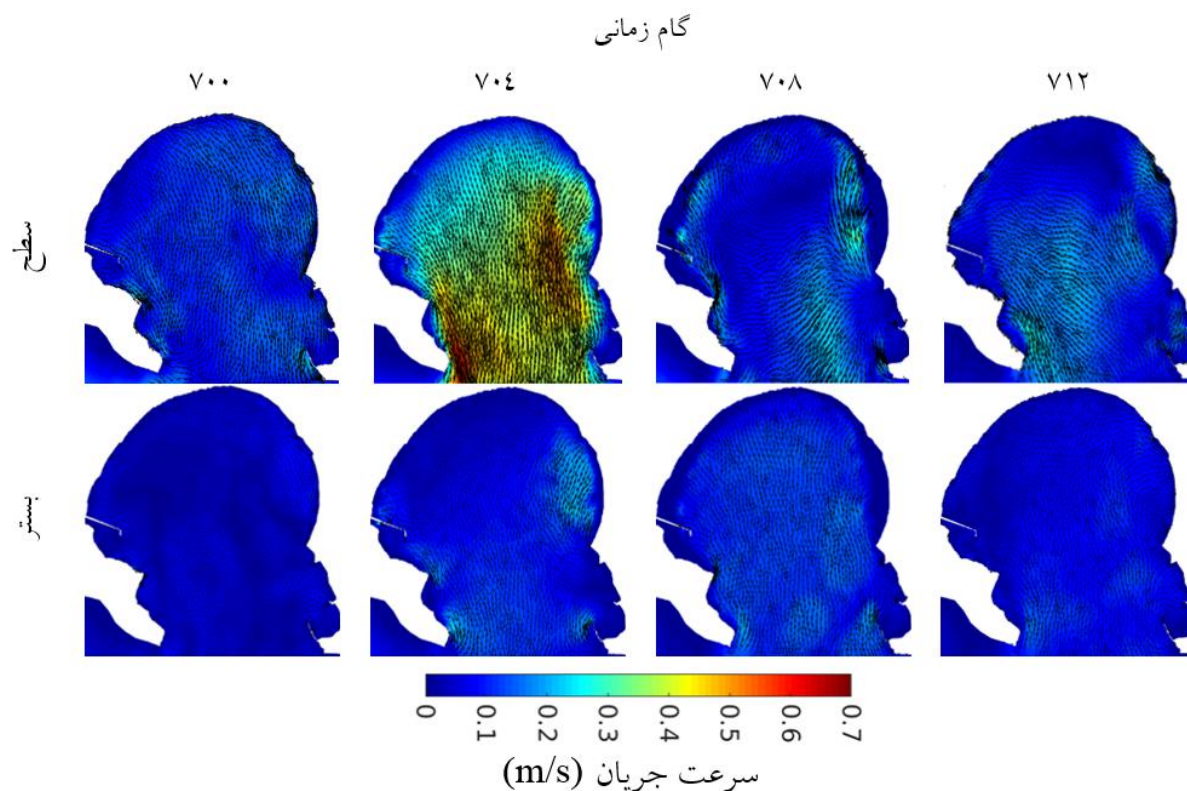
ج



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 ۷۲۰-۶۵۰)

**Fig 5:** Water level of the station located in the middle of the bay (St.) (2017), b) Water level and c) Wind speed vector in late January (time step 720-650)

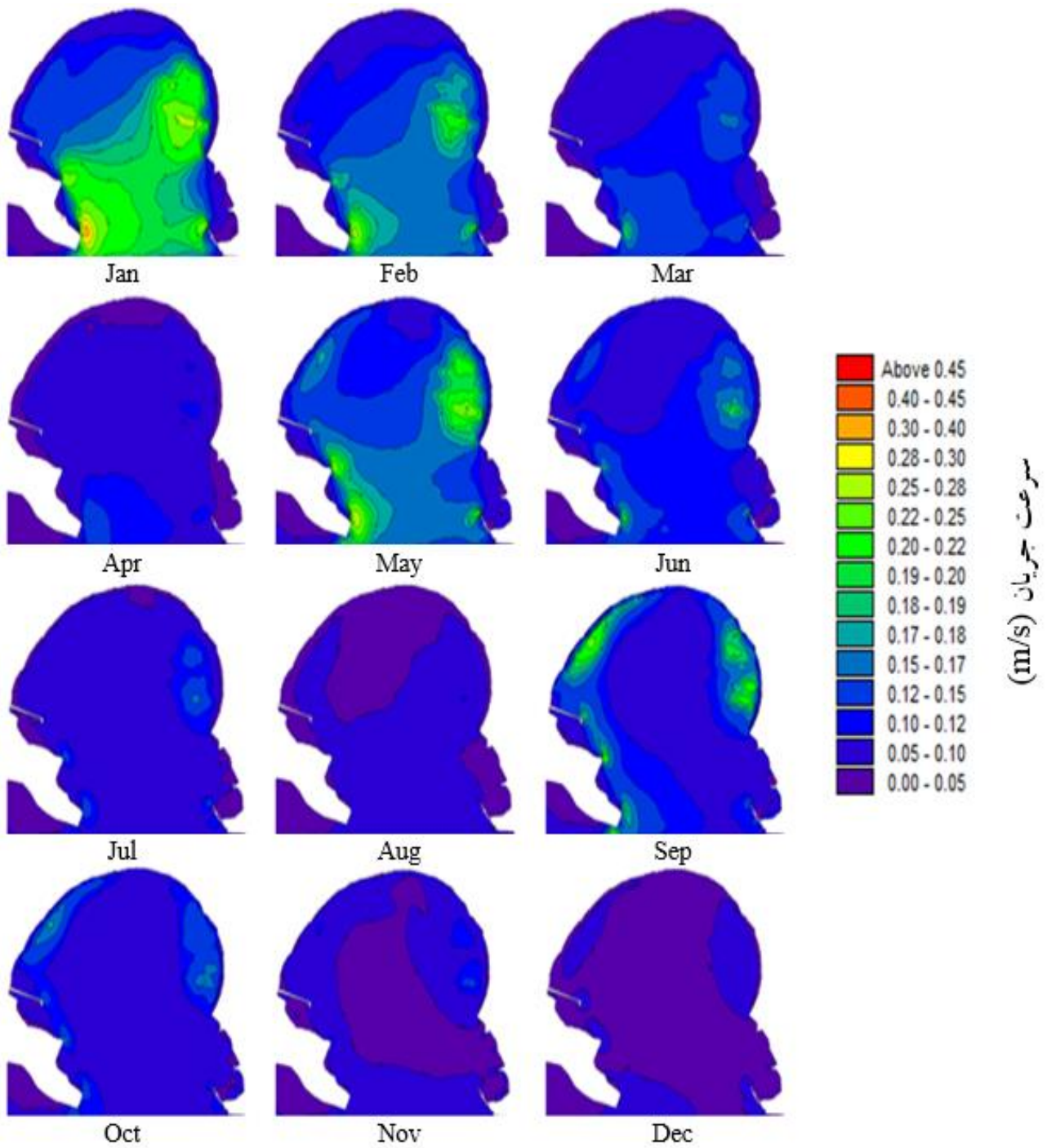


شکل ۶: الگوی جریان در یک بازه زمانی ۱۲ ساعته در سطح و بستر (گام زمانی ۷۰۰-۷۱۲)

**Fig 6:** Flow pattern in a 12-hour time period on the surface and bed (time step 712-700)

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 می‌باشد (شکل ۷-الف). میانگین سرعت جریان در محدوده میانی خلیج به ندرت از  $0/1$  متر بر ثانیه تجاوز کرده است (شکل ۸-ب).

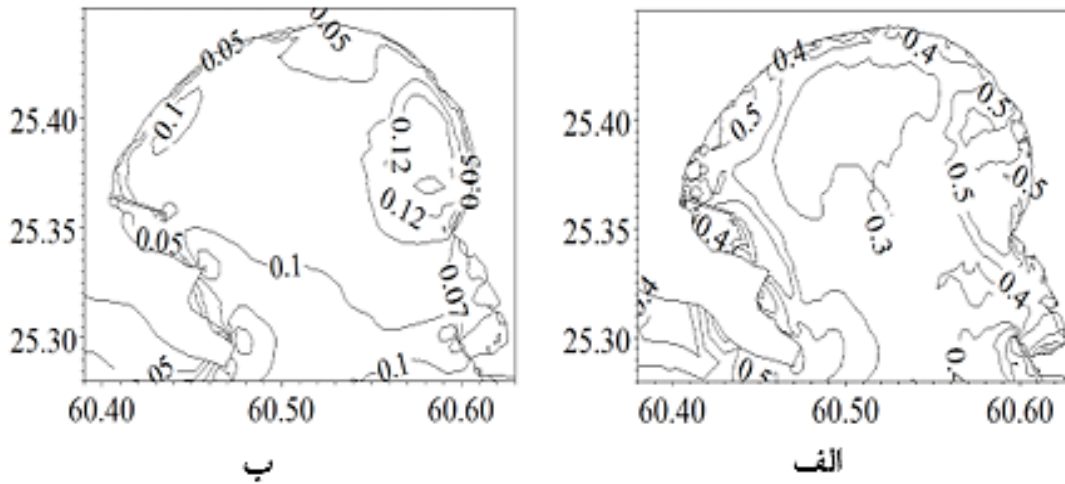
میانگین‌های عمقی و ماهانه سرعت جریان در محدوده خلیج چابهار در شکل ۷ نشان داده شده است. میانگین ماهانه سرعت جریان در ماه ژانویه نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر بوده و تقریباً در همه قسمت‌های نیمه جنوبی خلیج از مرتبه  $0/2$  متر بر ثانیه می‌باشد. در سایر ماه‌ها میانگین سرعت جریان غالباً کمتر از  $0/1$  متر بر ثانیه می‌باشد.



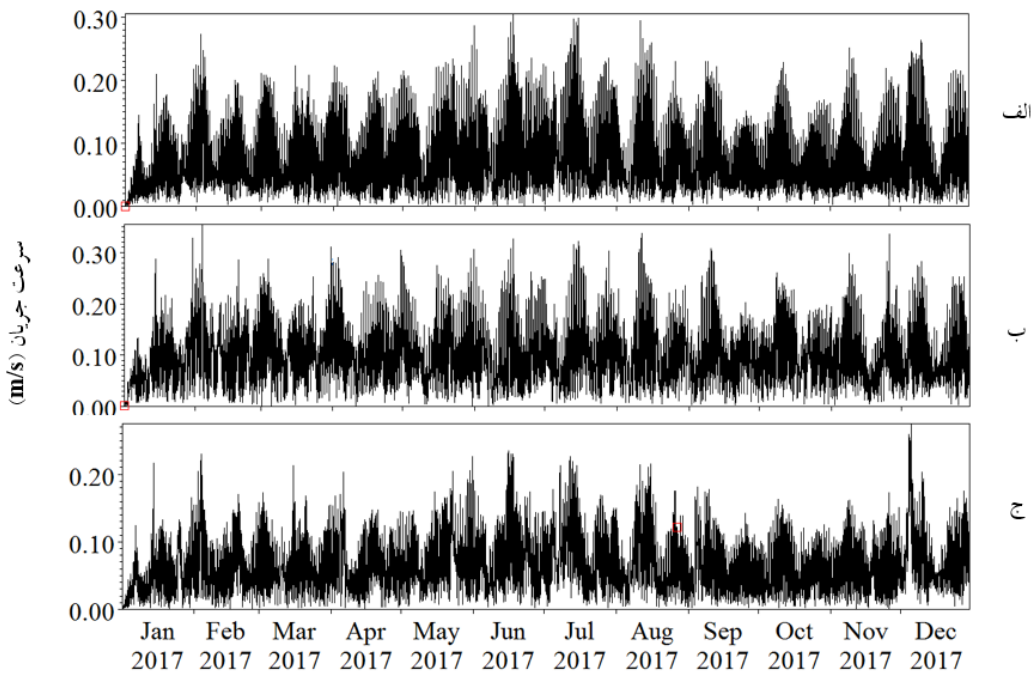
شکل ۷: میانگین ماهانه سرعت جریان

Fig 7: Average monthly flow rate

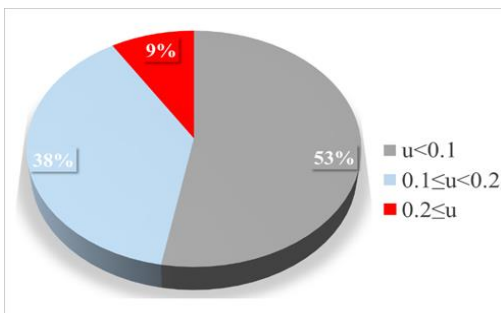




شکل ۸: الف) حداکثر، ب) میانگین سالانه سرعت جریان (m/s) در محدوده خلیج چابهار  
**Fig 8:** A) Maximum, b) Average annual flow velocity (m / s) in Chabahar Bay area



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  
**Fig 9:** Flow velocity time series in the middle point located in the bay (St.) for 2017, a) average depth, b) surface and c) bed



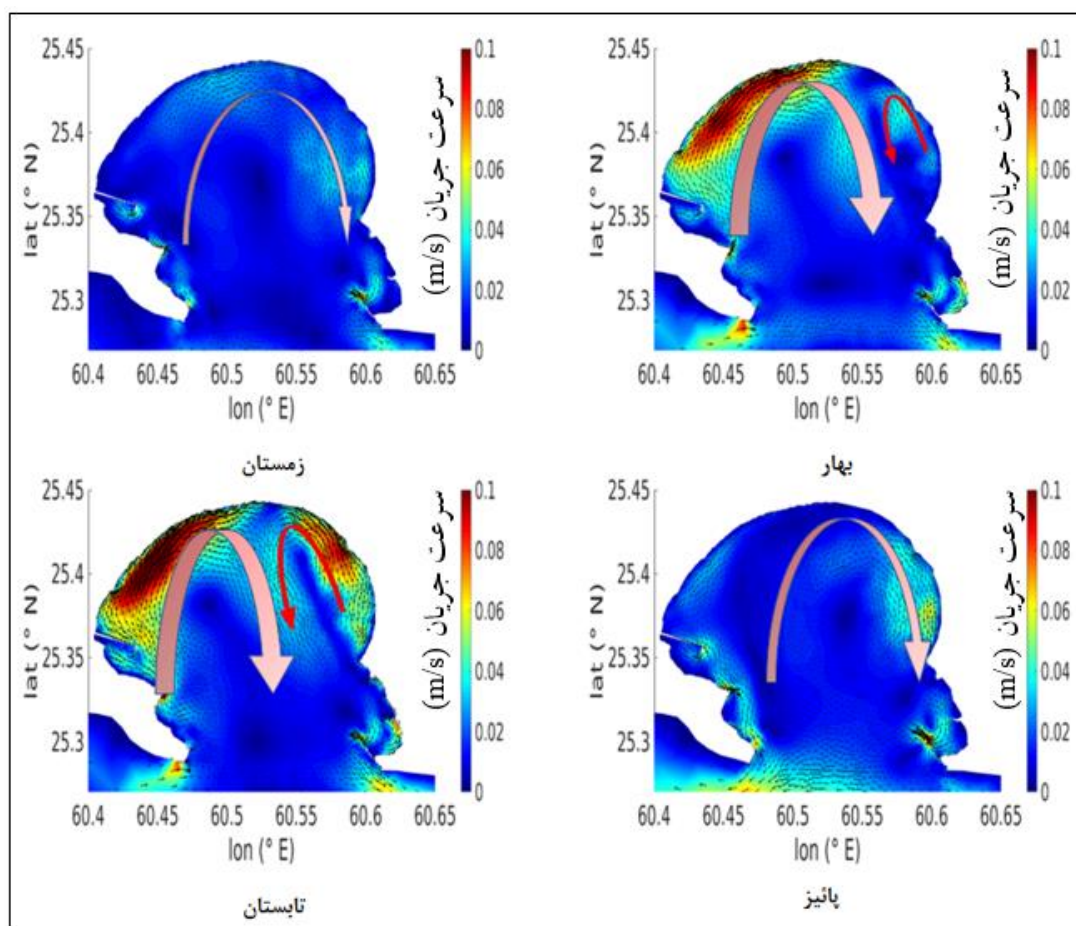
شکل ۱۰: درصد توزیع سرعت جریان در ایستگاه میانی خلیج (St.)  
**Fig 10:** Percentage of flow velocity distribution in the middle station of the bay (St.)

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 ۰/۱۰ و ۰/۰۷ متر بر ثانیه می‌باشد. حداکثر سرعت جریان در سطح و بستر نیز به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۲۸ 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 ۰/۲ m/s مشاهده شده و در ۵۳ درصد موارد سرعت جریان کمتر از ۰/۱ m/s می‌باشد.

سرعت جریان) در فصل تابستان و بهار دارای سرعت‌های بیش از  $m/s$   $0.1$  نیز می‌باشد.

در فصول بهار و تابستان یک سیستم دو سلولی شامل یک 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.

میانگین‌های فصلی جریان در خلیج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد؛ خلیج چابهار، خلیجی با 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



شکل ۱۱: الگوی فصلی چرخش جریان در خلیج چابهار

Fig 11: Seasonal pattern of flow rotation in Chabahar Bay

چرخش ساعتگرد در غرب و یک سلول با چرخش پادساعتگرد در شرق می‌باشد.

- 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) می‌باشد.
- ماکزیمم سرعت جریان مشاهده شده مربوط به سطح و حدود  $0.7$  متر بر ثانیه می‌باشد. [۸، ۱۲-۲۳]

#### مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به یک میزان در نگارش این مقاله مشارکت داشته اند.

#### نتیجه‌گیری

- نتایج تراز آب و سرعت جریان مدل هیدرودینامیکی FVCOM در محدوده چابهار مربوط به سال ۲۰۱۷ تطابق قابل قبولی با ضریب همبستگی  $0.97$  با داده‌های میدانی دارد و نتایج زیر حاصل گردید.
- میانگین عمقی سرعت جریان در بخش‌های میانی خلیج از مرتبه  $0.1 m/s$  محاسبه گردید.
- تنها در کمتر از  $10\%$  موارد، میانگین سرعت جریان بالاتر از  $0.2 m/s$  می‌باشد.
- 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

## تشکر و قدردانی

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

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی برای این مطالعه وجود ندارد.

## References

- Fazeli N, Zare R. Effect of seasonal monsoons on calanoid copepod in Chabahar bay-Gulf of Oman. *Jordan J Biol Sci.* 2011;4:55-62.
- Biglari M, Valipour MS, Rahmany H. Technical Feasibility Study of Energy Generation from the Tide in Southern Coasts of Iran Using Helical Turbines. *J Appl Environ Biol Sci.* 2015:39-48.
- Soltanpour M, Dibajnia M. Field measurements and 3D numerical modeling of hydrodynamics in Chabahar Bay. *Int J Maritime Technol.* 2015;3:49-60.
- Dehbandi A. Study of surface flow patterns in the North Indian Ocean during the monsoon seasons. Tehran, Iran: Islamic Azad University, Science and Research Branch; 2013.
- Zeinali S, Dehghani M, Rastegar A, Mojarrad M. Detecting shoreline changes in Chabahar Bay by processing satellite images: International journal of science and technology, Scientia Iranica A. *Civil Engineer.* 2017;24:1802-1809. doi: 10.24200/sci.2017.4271
- Li B, Tanaka KR, Chen Y, C. BD, Thomas AC. Assessing the quality of bottom water temperatures from the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) in the Northwest Atlantic Shelf region. *J Marine Sys.* 2017;173:21-30. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.04.001
- Vafaei B, Sanatgaran M, Torabi Azad M, Chegini V, editors. Investigation of currents due to temperature changes in Chabahar Bay. Fourteenth Maritime Industry Conference; 1396; Tehran, Iran.
- Yao Z, Fan W, Xiao C, Lin T, Zhang Y, Zhang Y, et al. Numerical Studies on the Suitable Position of Artificial Upwelling in a Semi-Enclosed Bay. *Water J.* 2020;12:1-16. doi: 10.3390/w12010177
- Chen C, R. B, Cowles G, Qi J, Lai Z, Gao J, et al. An Unstructured Grid, Finite-Volume Community Ocean Model FVCOM User Manual. FVCOM user manual 2013.
- Abbasi MR, Chegini V, M. S, Siadatmousavi SM. Correcting the sea surface temperature by data assimilation over the Persian Gulf. *Iran J Sci Technol Transact.* 2019;43(1):141-149. doi: 10.1007/s40995-017-0357-z
- Memari S, Siadatmousavi SM. Numerical Modeling of Heat and Brine Discharge near Qeshm Desalination Plant. *Int J Coastal Offshore Engineer.* 2018;2(1):27-35. doi: 10.29252/ijcoe.1.4.27
- Afsharian S. Three-dimensional modeling of water circulation in Chabahar Bay. Iran: Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology; 2010.
- Hydrography. Surveying Organization of the Islamic Republic of Iran, 2008. Identical Surveying Instructions.7(7):107-119.
- Batten WMJ, Bahaj AS, Molland AF, Chaplin JR. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines: *Renew. Energy.* 2008;33:1085-1096. doi: 10.1016/j.renene.2007.05.043
- Chen C. An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User Manual: Massachusetts Institute of Technology; 2011.
- Dyer KR. Estuaries: A physical introduction. 2nd ed 1973.
- Geyer WR, Morris JT, Prahl F, Jay D. Interaction between physical processes and ecosystem structure: A comparative approach. In: Hobbie JE, editor. Estuarine science: A synthetic approach to research and practice 2000. p. 177-206.
- Lowcher CF, Muglia M, Bane JM, He R, Gong Y, Haines SM. Marine hydrokinetic energy in the gulf stream off North Carolina: An assessment using observations and ocean circulation models. In: Yang Z, Copping A, editors. Wave energy resources along the European Atlantic coast. Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2017.
- Monsen N, L. L, Cloern JE. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Oceanograph.* 2002;47:1545-1553. doi: 10.4319/lo.2002.47.5.1545
- Myers L, Bahaj AS. Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine. *Renew Energy.* 2006;31:197-208. doi: 10.1016/j.renene.2005.08.022
- Sadrinasab M, Ka'mpf J. Three-dimensional flushing times of the Persian Gulf. *Geophysic Res Letter.* 2004;31:1-4. doi: 10.1029/2004GL020425
- Shankar D, Vinayachandran PN, Unnikrishnan AS. The monsoon currents in the north Indian Ocean. *Progress Oceanograph.* 2002;52:63-120. doi: 10.1016/S0079-6611(02)00024-1
- Zanganeh M. Estimation of Cahabahar Bay flushing time by a two-dimensional hydrodynamic model: International Conference on Coasts Port and Marine Structures (ICOPMAS). 2016;12:41-42.

## AUTHOR(S) BIOSKETCHES

**Bahmanzadegan Jahromi, A.**, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran  
ar.bahmanzadegan@gmail.com

**Ezam, M.** Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran  
ezam@srbiau.ac.ir

**Lari, K.** Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran  
k\_lari@iau-tnb.ac.ir

**Akbari Bidohti, AA.** Iranian Seismological Center, Tehran, Iran  
bidokhti@ut.ac.ir

این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:



## HOW TO CITE THIS ARTICLE

**Citation (Vancouver)** Bahmanzadegan Jahromi A, Ezam M, Lari K, Akbari Bidohti AA. Hydrodynamic Study of Chabahar Bay Using FVCOM Model. *J Oceanography*. 2021; 12(44): 39-50.

 <http://doi.org/10.52547/joc.12.45.39>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1568-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>



## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.