

## شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان‌های خلیج فارس در آب‌های عمیق و ساحلی

شکوفه رزاقی<sup>۱</sup>، سید عباس حق‌شناس<sup>۲</sup>، سرمد قادر<sup>۳\*</sup>، دانیال یازجی<sup>۴</sup>، ادریس دلخوش<sup>۱</sup> و عارف فرهنگ مهر<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> محقق پسادکتری، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۵</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، شرکت دانش بنیان ژرف دریا پژوهش پارس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۵)

### چکیده

در این تحقیق تلاش می‌شود یک سامانه پیش‌بینی جریان توسعه بیابد و راه‌اندازی شود. در این سامانه با در نظر گرفتن واداشت‌های اصلی شامل جزر و مد و میدان باد سطحی، تخمین مناسبی از جریان‌های خلیج فارس به دست می‌آید و عملکرد سامانه در آب‌های کم‌عمق و عمیق توأمان بررسی می‌شود. در این راستا، نخست با به کارگیری مدل FVCOM، سامانه شبیه‌سازی راه‌اندازی شده است. سپس مدل برپا شده با اعمال تراز جزر و مدی و میدان باد سطحی در بازه‌ای که داده میدانی موجود بوده، برای تمام خلیج فارس اجرا شده است. در ادامه، با مقایسه تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان در چند ایستگاه، مدل برای پارامترهای ضریب زبری بستر، اندازه شبکه، تعداد ترازهای سیگما در راستای قائم، واسنجی و صحت‌سنجی شده و اثر اعمال میدان باد سطحی نیز بررسی شده است. سرانجام، بهترین شرایط برای اجرای مدل انتخاب و نتایج ایستگاه‌های مختلف بررسی شده است.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان با داده‌های مشاهداتی، میزان موفقیت مدل را در شبیه‌سازی جریان نشان می‌دهد. داده‌های اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان با مدل FVCOM در خلیج فارس برای اندازه سرعت جریان و تراز سطح آب، همخوانی خوبی با هم دارند. با انجام واسنجی، مناسب‌ترین اندازه شبکه برای مدل خلیج فارس تخمین زده شده و مقادیر مناسب ضریب زبری بستر برای آب کم‌عمق و عمیق به دست آمده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل حاضر در هر دو بخش آب کم‌عمق و عمیق از دقت مناسبی برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** خلیج فارس، جریان و تراز آب، شبیه‌سازی سه‌بعدی هیدرودینامیک، مدل FVCOM، جریان‌های آب عمیق

## ۱ مقدمه

خلیج فارس دریای نیمه بسته کم عمق است. عمق میانگین این پهنه آبی ۳۶ متر است و پس از خلیج مکزیک و خلیج هادسون، سومین خلیج بزرگ جهان به شمار می آید. خلیج فارس از شرق از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به دریای عرب و اقیانوس هند راه دارد و از غرب به دلتای رودخانه اروندرود، که حاصل پیوند دو رودخانه دجله و فرات و پیوستن رود کارون به آن است، ختم می شود. به سبب وجود منابع سرشار نفت و گاز در خلیج فارس و سواحل آن، این آبراهه یک منطقه مهم دریایی در جهان به شمار می آید که بخش مهمی از فعالیت های توسعه دریایی را به خود اختصاص می دهد. جریان های عمومی در خلیج فارس اغلب از سه منشأ جزرومدی، باد و تغییرات چگالی نشأت می گیرند که اثر نسبی جریان های ناشی از جزرومد، باد و چگالی را به صورت تقریبی می توان به ترتیب ۱۰۰، ۱۰ و ۱۰ در نظر گرفت (رینولدز، ۱۹۹۳).

مطالعات متعددی درباره جریان های دریایی خلیج فارس انجام شده است. یکی از مهم ترین این مطالعات، تحقیق رینولدز (۱۹۹۳) است که در آن از فوریه تا ژوئن سال ۱۹۹۲ از داده های کشتی تحقیقاتی NOAA در خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان استفاده و با تحلیل آن اطلاعات، تغییرات پارامترهای فیزیکی این پهنه آبی بررسی شده است. نتایج این تحقیق از اواسط زمستان تا اوایل تابستان سال ۱۹۹۲ را دربرمی گیرد. در این بازه مشاهده شده است که گرمای خورشید ترموکلاین شدیدی ایجاد می کند و لایه آمیخته سطحی را از لایه داخلی آب جدا می کند. همچنین، در این بازه جریان ورودی به ساحل شمالی که در زمستان به وسیله بادهای شمال تضعیف می شود، در تابستان تقویت می شود و تا شمال غرب خلیج فارس گسترش می یابد که نشان دهنده تطابق مناسب اندازه گیری ها با شبیه سازی ها است. کمپ و صدری نسب (۲۰۰۶) مدل COHERENS را که یک مدل

سه بعدی هیدرودینامیک است، برای مطالعه جریان و ویژگی های توده آب خلیج فارس به کار گرفتند. نتایج آن پژوهش، همخوانی خوبی با شواهد تجربی داشت. عظام و همکاران (۲۰۱۰) از مدل POM و داده های مشاهداتی سال ۱۹۹۲ برای مطالعه ساختار جریان خلیج فارس و بررسی اثرهای گسترش این جریان ها بر مشخصات فیزیکی دریای عمان استفاده کردند. یائو و جونز (۲۰۱۰) جریان در خلیج فارس را با استفاده از مدل HYCOM تحت تأثیر میدان های مختلف فشار جوئی مطالعه کردند. میدان های جریان سطحی به دست آمده از شبیه سازی، به طور کلی با ویژگی های مشاهده شده تطبیق داشته است. عوامل محرک جریان سطحی در خلیج فارس، اصولاً فشار باد سطحی و جریان ورودی با شوری کم از دریای عمان (IOSW) هستند. الوسیری و همکاران (۲۰۱۱) از مدل عددی سه بعدی خور، دریاچه و اقیانوس ساحلی (ELCOM) استفاده کردند که مدل را کشتی تحقیقاتی ماونت میچل (R/V Mt. Mitchell) در سال ۱۹۹۲ اعتبارسنجی کرد. آنها مدل صحت سنجی شده را برای محاسبه تغییرات جغرافیایی ضریب پخش افقی در سراسر خلیج فارس به کار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که پخش، اغلب با واداشت های جزرومدی به دست می آید. در طول ساحل عربستان، باد به عنوان یک منبع انرژی مهم اضافه برای پخش ارزیابی شد. ویک و همکاران (۲۰۱۵) سازوکارهای درگیر در پخش آب خلیج فارس در خلیج عمان و اندرکنش این دو پهنه آبی را با استفاده از شبیه سازی عددی با نرم افزار ROMS بررسی کردند. این شبیه سازی گواه بر نقش مهم ادی های میان مقیاس در پخش آب خلیج فارس در خلیج عمان در یک بازه زمانی فصلی است. معماری و سیادت موسوی (۲۰۱۸) شیوه پخش پلوم شوری و حرارت را در تنگه خوران در خلیج فارس با استفاده از مدل FVCOM بررسی کردند. با مقایسه پخش شوری و حرارت ناشی از فعالیت های بشری

در محدوده تعریف شده طبق استاندارد زیست‌محیطی ایران و مقادیر مجاز آن، روشن شد که مقادیر شوری طبق تخلیه فعلی، قادر به برآورده کردن استاندارد است، اما مقدار حرارت، بسیار فراتر از محدوده تعیین شده در استاندارد است؛ بنابراین، با تعریف چند سناریو، مکان مناسب برای تخلیه پساب با توجه به معیار زیست‌محیطی ارزیابی شده است. از جمله دیگر فعالیت‌های مهم در خلیج فارس می‌توان به تحقیق سویفت و بور (۲۰۰۳)، مرتضوی و همکاران (۲۰۱۲)، حاج رسولیها و همکاران (۱۳۹۵) و عزیزپور و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد.

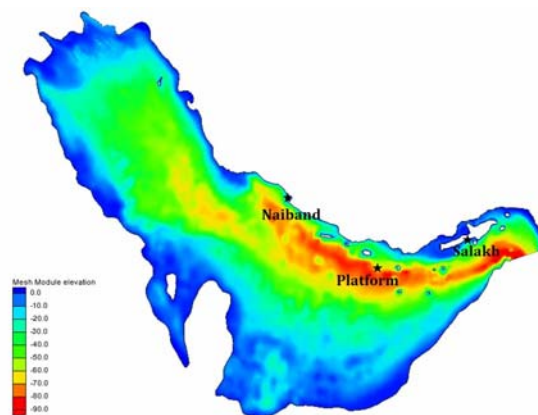
همه این مطالعات و شبه‌سازی‌ها در محدوده آب‌های کم‌عمق صورت پذیرفته است و شبه‌سازی عمومی جریان در آب‌های عمیق خلیج فارس نادر است (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از تنگناهای پیش‌رو در مطالعات جامع درباره بخش‌های عمیق‌تر این پهنه آبی آن است که اندازه‌گیری‌های آب عمیق بسیار نادر است و بیشتر اندازه‌گیری‌ها تا عمق‌های مرسوم برای نصب دستگاه‌های کف‌خواب ADCP، یعنی حدود ۲۵ متر انجام می‌شود. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های موجود اغلب در نزدیک‌ترین فواصل به نوار ساحلی انجام شده است. در تحقیق حاضر تلاش شده است تا یک سامانه شبه‌سازی جریان به‌نحوی توسعه یابد که با در نظر گرفتن واداشتهای جزرومد و باد، تخمین دقیقی از جریان‌های خلیج فارس به‌دست بیاید و عملکرد سامانه شبه‌سازی در آب‌های عمیق‌تر نیز ارزیابی شود. این مهم با دسترسی به یک مجموعه از داده‌های نادر اندازه‌گیری آب عمیق یعنی تا اعماق بیش از ۸۰ متر و در نواحی میانی خلیج فارس حاصل آمده است. برای این منظور، در تحقیق حاضر از نرم‌افزار FVCOM استفاده شده است که در نواحی عمیق و کم‌عمق کاربرد دارد. پیش از این، هیگن و همکاران

## ۲ روش‌شناسی مطالعه حاضر

در مطالعه حاضر، شبه‌سازی سه‌بعدی جریان‌های خلیج فارس به کمک مدل سه‌بعدی FVCOM روی یک شبکه بی‌ساختار مدنظر است؛ از این رو، نخست با اجرای مدل در شرایط متفاوت در محدوده خلیج فارس، مدل برای پارامترهای اندازه شبکه‌بندی، ضریب زبری بستر و تعداد ترازهای قائم سیگما واسنجی شده است. در گام بعد، بهینه‌ترین شرایط برای اجرای مدل در این پهنه آبی تعیین و سپس مدل در این شرایط اجرا و نتایج شبه‌سازی برای تراز سطح آب و سرعت جریان در ایستگاه‌های موجود، اعم از کم‌عمق و عمیق، صحت‌سنجی شده است.

### ۲-۱ معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود اندازه‌گیری

منطقه مورد مطالعه، کل پهنه آبی خلیج فارس است و مرز مدل، در شرق تنگه هرمز و حدفاصل سیریک در ایران تا مصنم در عمان انتخاب شده است. انتخاب مرز، پیرو مطالعه انجام شده است. جهت بررسی عملکرد مدل در شبه‌سازی سه‌بعدی جریان با مدل FVCOM در خلیج فارس، لازم است تا نتایج شبه‌سازی برای برخی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری در این پهنه با داده‌های اندازه‌گیری موجود مقایسه شوند. شکل ۱ عمق‌سنجی منطقه مورد مطالعه را به همراه مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری مدنظر نمایش می‌دهد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه، شرایط عمومی عمق‌سنجی و مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری

فراهم می‌آورد و برخلاف مدل‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود که از شکل دیفرانسیلی حاکم استفاده می‌کنند، از شکل انتگرالی معادلات استفاده می‌کند. استفاده از روش حجم محدود سبب می‌شود پایستگی جرم در مدل به صورت دقیق رعایت شود که می‌تواند مزیتی بر مدل‌های معمول تفاضل محدود تلقی شود. معادلات حاکم در مدل، از معادلات پایستگی تکانه، پیوستگی، دما، شوری و معادله حالت تشکیل شده است. با استفاده از تقریب هیدرواستاتیک و بوسینیسک (چن و همکاران، ۲۰۱۳)، معادلات ساختاری به شکل زیر هستند:

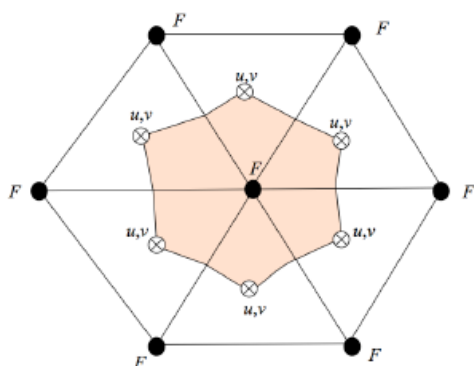
در ناحیه عمیق برای اندازه‌گیری سرعت جریان در ایستگاه سکو (P1) از دستگاه RCM9 (با برداشت مقاطع ساعتی از روی شناور) و در ناحیه کم‌عمق جهت اندازه‌گیری سرعت جریان در ایستگاه سلخ از AWAC و برای اندازه‌گیری تراز سطح آب از دستگاه RBR استفاده شده است. کنترل کیفی داده‌ها با کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری طی عملیات میدانی انجام شده است.

## ۲-۲ معرفی مدل FVCOM

مدل FVCOM یک مدل متن‌باز سه‌بعدی حجم محدود است که امکان استفاده از شبکه‌های بدون ساختار را

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری منتخب و زمان اندازه‌گیری‌های میدانی موجود. داده‌های دو ردیف نخست جدول، از مرجع شرکت مهندسی مشاور آب و محیط‌خاورمیانه (۱۳۹۲) و داده ردیف سوم از مرجع شرکت برد و شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی (۲۰۰۹) اخذ شده است.

نام ایستگاه	موقعیت		عمق (m) مربوط به CD	UTM	نوع اندازه‌گیری	بازه زمانی اندازه‌گیری		تعداد روزها
	X	Y				شروع	پایان	
P1	۲۱۴۳۵۰	۲۹۱۰۷۶۰	-۷۰	۴۰	مقطع سرعت جریان	۱۳/۰۵/۲۶ ۱۱:۰۰	۱۳/۰۵/۲۷ ۰۰:۳۵	۶
						۱۳/۰۵/۲۷ ۲۰:۰۰	۱۳/۰۵/۲۸ ۰۹:۴۰	
						۱۳/۰۶/۰۱ ۱۳:۰۰	۱۳/۰۶/۰۲ ۰۲:۲۴	
سلخ	۳۷۴۷۷۰	۲۰۴۸۴۹۰	-۲۵	۴۰	داده‌های مقطع سرعت جریان و سطح آب	۱۳/۰۵/۳۰ ۱۲:۰۰	۱۳/۰۶/۰۵ ۱۱:۰۰	۶
نابند	۶۳۳۱۱۷	۳۰۶۰۲۸۰	-۴	۳۹	داده‌های سطح آب	۰۹/۰۷/۱۲ ۱۱:۰۰	۱۳/۰۸/۰۹ ۱۰:۴۰	۳۲



Node •:  $H, \zeta, \omega, D, s, \theta, q^2, q^2l, A_m, K_{ni}$

Centroid ⊙:  $u, v$

شکل ۲. شبکه‌بندی مثلثی و مکان محاسبه متغیرهای مدل FVCOM (برگرفته از چن و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل FVCOM با استفاده از شبکه‌بندی مثلثی می‌تواند برای خطوط ساحلی نامنظم و تغییرات عمق با شیب زیاد یک مزیت تلقی شود. در راستای قائم، از دستگاه مختصات سیگما و در راستای افقی از شبکه‌بندی مثلثی استفاده شده است. هر عدد شبکه مثلثی از یک جزء، سه نقطه و سه جانب تشکیل شده است. حل معادلات حاکم، اغلب با محاسبه مقدار شار ورودی به حجم جزء صورت می‌گیرد. از مزایای روش حجم‌محدود می‌توان به شبکه‌بندی به روش مثلثی و همچنین سامانه گسسته‌سازی بهینه برای حل معادلات اشاره کرد. به‌علاوه، این روش تا حدود زیادی در برآورده کردن پایستاری جرم، تکانه، شوری و دما در مناطق ساحلی به‌خوبی عمل می‌کند. از دیگر مزیت‌های مدل FVCOM متن‌باز بودن است و می‌توان برای هر پهنه آبی که معادله چگالی متفاوتی داشته باشد، معادله موردی آن پهنه را براساس دما، شوری و فشار به مدل اعمال کرد. همچنین این مدل برای مناطقی که تغییرات دما تأثیر جدی دارد، نتایج مناسب‌تری دارد؛ چون شرط مرزی دما را مناسب‌تر شبیه‌سازی می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = \quad (1)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fu = \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v,$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad (3)$$

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

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

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T$$

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

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

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

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

که  $\alpha$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب مؤلفه‌های شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی در دستگاه مختصات دکارتی و  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند. پارامترهای  $T$ ،  $\rho$ ،  $P$ ،  $f$  و  $g$  به ترتیب دمای آب، شوری آب، چگالی آب، فشار، ضریب کوریولیس و شتاب گرانش زمین هستند.  $F_s$ ،  $F_t$ ،  $F_v$ ،  $F_u$ ،  $K_h$ ،  $K_m$  به ترتیب ضریب و شکسانی در راستای قائم، ضریب پخش گرما در راستای قائم و جمله‌های پخش افقی تکانه، گرما و شوری هستند. این ضرایب به سطح اغتشاشات وابسته‌اند و هیچ فرمولی وجود ندارد که همیشه و در همه شرایط جواب بدهد. برای محاسبه ضرایب و شکسانی، پخش افقی و پخش در راستای قائم می‌توان از رابطه اسماگرینسکی (Smagorinsky) و بسط ملور و یامادا (Mellor and Yamada 5/2) در مدل استفاده کرد. الگوریتم‌های پیشرفته خشک و تر شدن نیز در مدل اعمال شده است و اجازه می‌دهد مدل برای نقاط ساحلی که در معرض چنین فرایندی هستند، دچار مشکل نشود و موفق عمل کند (چن و همکاران، ۲۰۱۳).

### ۳-۲ اطلاعات مورد استفاده جهت برپایی مدل

جمع آوری اطلاعات پایه جهت برپایی مدل هیدرودینامیک خلیج فارس گام نخست در شبیه سازی سه بعدی جریان های این پهنه مهم آبی است. در این تحقیق به اطلاعات عمق سنجی، جزرومد و باد برای اجرای مدل احتیاج است. برای تهیه شبکه بندی مدل، داده های ورودی مورد نیاز شامل موقعیت مرزها و عمق سنجی محدوده مدل است. داده های عمق سنجی عمومی در محدوده خلیج فارس از داده های سازمان نقشه برداری کشور (NCC) تهیه شده است و در مواردی که داده های اندازه گیری عمق سنجی از مرجع نخست (NCC) موجود نبود، از داده های ETOPO2v2 استفاده شده است. برای تعیین مرزهای مدل، از مرجع ESRI استفاده شده و گاهی به کمک برنامه Google Earth تصحیح شده است. روی مرز باز که در شرق تنگه هرمز و حفاصل سیریک تا مصندم قرار دارد، جزرومد به صورت تاریخچه زمانی و شرط مرزی در نظر گرفته شده است. برای داده های مرز باز مدل از مدل جهانی جزرومدی OTPS استفاده شده است. صحت نتایج OTPS در این محدوده را شرکت برد و شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی (۲۰۰۹) ارزیابی کرده است. همچنین، اطلاعات میدان باد شامل سرعت و جهت آن برای دوره اجرای مدل به کل حوزه خلیج فارس اعمال شده است. این اطلاعات از اجرای مدل WRF به دست آمده است (برای اطلاعات بیشتر ر.ک. قادر و همکاران (۱۳۹۵)).

جهت صحت سنجی عملکرد مدل، به داده های اندازه گیری تراز سطح آب و سرعت جریان برای مقایسه با شبیه سازی در ایستگاه های مختلف خلیج فارس نیاز

است که شرح داده های مورد استفاده در بخش ۲-۱ ارائه شد.

### ۳ برپایی مدل و واسنجی

در این پژوهش، از نسخه 3.2.1 مدل FVCOM جهت شبیه سازی سه بعدی جریان های خلیج فارس استفاده شده است و واداشتهای جزرومدی و میدان باد سطحی به مدل اعمال شده اند. شبیه سازی برای یک بازه یک ماهه ونیم در سال ۲۰۱۳ در دو ایستگاه سلخ و P1 واسنجی شده است. گام زمانی اجرا، ۵ ثانیه انتخاب و با مقایسه تراز سطح آب و سرعت جریان در ایستگاه سلخ با داده های اندازه گیری و مقایسه مقطع اندازه سرعت در ایستگاه P1 با داده های اندازه گیری، واسنجی انجام شده است. واسنجی مدل برای پارامترهای تفکیک مکانی شبکه محاسباتی، تعداد ترازهای قائم سیگما و ضریب زبری بستر انجام شده و مقادیر بهینه به دست آمده است. علاوه بر این، اثر اعمال واداشت میدان باد سطحی بر نتایج شبیه سازی نیز بررسی شده است.

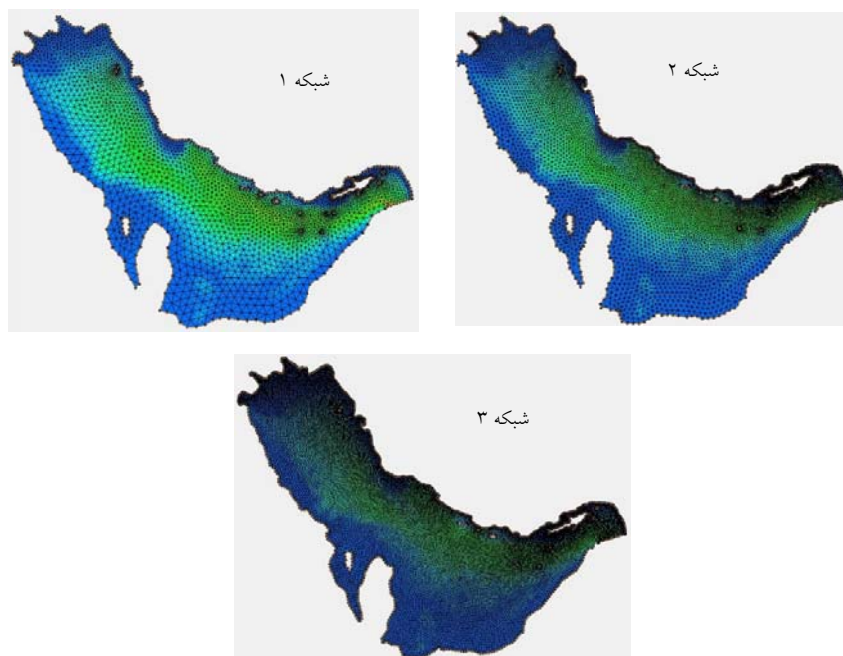
### ۳-۱ تفکیک مکانی شبکه محاسباتی

برای بررسی میزان حساسیت مدل به تفکیک مکانی شبکه بندی محاسباتی، از سه شبکه در پیکربندی مدل استفاده شده است. به اختصار، ویژگی های هر کدام از شبکه ها در جدول ۲ آورده شده است و نمایی از سه شبکه متعجب در شکل ۳ مشاهده می شود.

نحوه تنظیم ابعاد شبکه و دسته بندی ابعاد مختلف با پیروی از روش ارائه شده هیگن و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است. در این روش برای ناحیه عمیق، اندازه مبنا انتخاب شده است و نواحی کم عمق و ساحلی طی دو مرحله ریز شده اند.

جدول ۲. مختصات کلی شبکه های محاسباتی

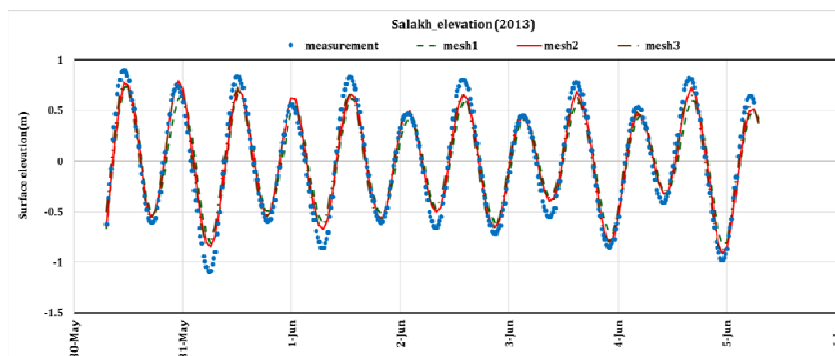
نام شبکه	تعداد گره	تعداد سلول	کمترین فاصله بین سلولی (m)	بیشترین فاصله بین سلولی (m)
شبکه ۱	۲۸۱۲	۵۲۰۵	۲۳۳۶	۱۴۵۸۳
شبکه ۲	۷۱۹۳	۱۳۶۳۹	۱۲۰۴	۸۶۱۱
شبکه ۳	۱۴۱۸۳	۲۷۳۹۶	۸۹۹	۴۱۸۹



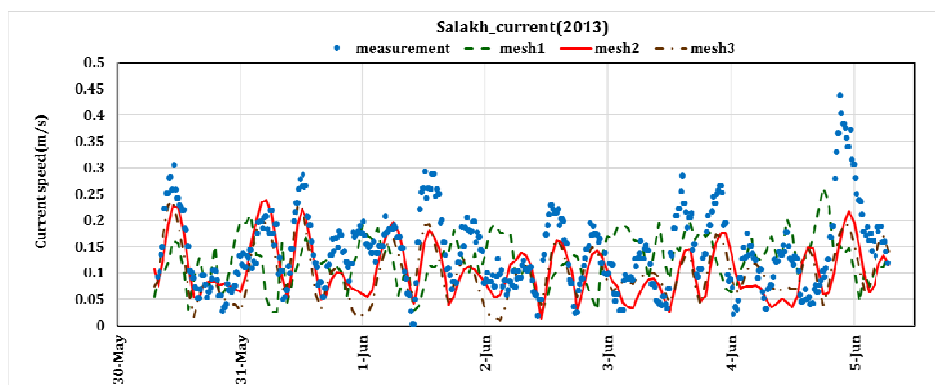
شکل ۳. نمایی از سه شبکه منتخب جهت واسنجی

مقایسه سرعت جریان، هم از مقایسه سرعت‌ها در عمق میانی، به نمایندگی از مقادیر میانگین سرعت در عمق و هم از مقایسه مقطع سرعت در عمق استفاده شده است تا درک مناسب‌تری از عملکرد مدل حاصل آید.

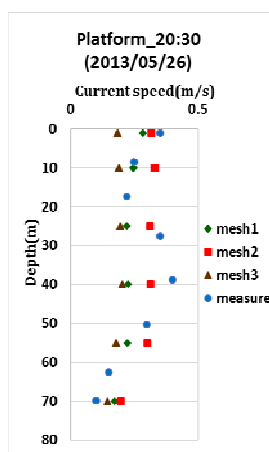
نتایج اجرای مدل برپاشده با شبکه‌های ۱، ۲ و ۳ با ضریب زبری ۰/۰۰۱ و هفت تراز سیگما در راستای قائم همراه با اعمال میدان باد سطحی به مدل در شکل‌های ۴ تا ۶ برای تراز سطح آب در ایستگاه سلخ و اندازه سرعت جریان در ایستگاه‌های سلخ و P1 ارائه شده است.



شکل ۴. مقایسه مقادیر تراز سطح آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ با ضریب زبری ۰/۰۰۱ و هفت تراز سیگما برای شبکه‌های مختلف.



شکل ۵. مقایسه مقادیر اندازه سرعت حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ برای لایه ۴ مدل با ضریب زبری ۰/۰۰۱ و هفت تراز سیگما برای شبکه‌های مختلف.



شکل ۶. مقایسه مقطع اندازه سرعت حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه PI با ضریب زبری ۰/۰۰۱ و هفت تراز سیگما برای شبکه‌های مختلف

به مدل نشان می‌دهد. میزان همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات هر دو ایستگاه، برای دو پارامتر تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان ارائه شده است.

جدول ۳ پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای نتایج اجرای شبکه‌های ۱، ۲ و ۳ را با ضریب زبری ۰/۰۰۱ و تعداد تراز سیگمای هفت همراه با اعمال میدان باد سطحی

جدول ۳. پارامترهای آماری دو ایستگاه سلخ و PI اجراشده با ضریب زبری بستر ۰/۰۰۱ و هفت تراز سیگما برای شبکه‌های مختلف (MEWE, 2014).

نام ایستگاه	شبکه محاسباتی	تراز		سرعت	
		RMSE	R	RMSE	R
سلخ	شبکه ۱	۰/۱۷	۰/۹۶	۰/۰۹	۰/۶۳
	شبکه ۲	۰/۱۱	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۷۱
	شبکه ۳	۰/۱	۰/۹۹	۰/۰۹	۰/۷۲
سکو (PI)	شبکه ۱			۰/۱	۰/۶۲
	شبکه ۲			۰/۰۷	۰/۸۳
	شبکه ۳			۰/۱۴	۰/۹۲

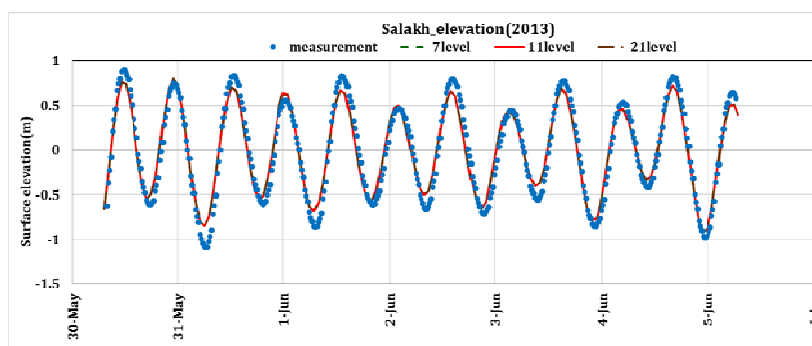


قائم مفروض جهت شبه‌سازی سه‌بعدی جریان، مدل با پیکربندی یکسان و تعداد ترازهای متفاوت برای خلیج فارس اجرا شده است. در این اجراها از شبکه ۲ استفاده و زبری بستر، مقدار ثابت  $0/001$  فرض شده و میدان باد سطحی نیز به مدل اعمال شده است. در شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج این شبه‌سازی‌ها برای تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج برای تعداد هفت، یازده و بیست‌ویک تراز سیگما نمایش داده شده است تا میزان حساسیت مدل به این پارامتر بررسی شود.

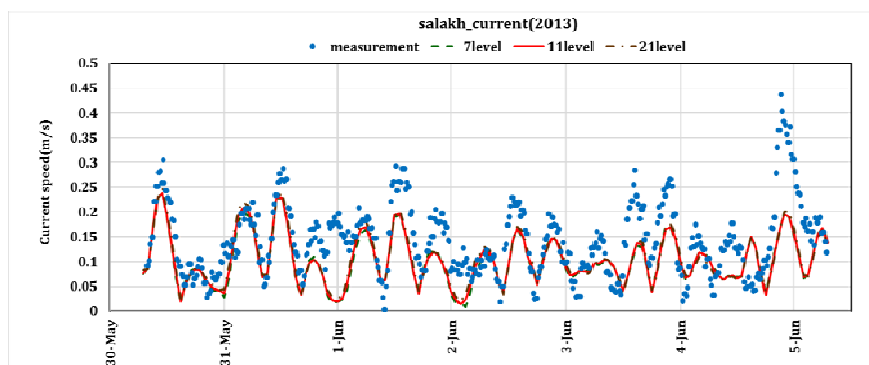
با توجه به شکل‌های ۴ تا ۶ و مقادیر پارامترهای آماری در جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج شبکه ۳ کمی بهتر از شبکه ۲ و البته خیلی بهتر از شبکه ۱ است. هر دو شبکه ۱ و ۲ نتایجی خوب و نزدیک به هم برای تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان دارند و مقادیر خطا برای شبکه‌های ۱ و ۲ تفاوت چندانی ندارند؛ بنابراین، در راستای بهینه کردن هزینه محاسباتی، شبکه ۲ برای شبه‌سازی برگزیده شده است.

### ۲-۳ تعداد ترازهای سیگما

برای حساسیت‌سنجی رفتار مدل نسبت به تعداد ترازهای



شکل ۷. مقایسه مقادیر تراز سطح آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ در شبکه ۲ با ضریب زبری  $0/001$  برای تعداد ترازهای مختلف.



شکل ۸. مقایسه مقادیر اندازه سرعت جریان حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ برای لایه ۵ مدل در شبکه ۲ با ضریب زبری  $0/001$  برای تعداد ترازهای مختلف.

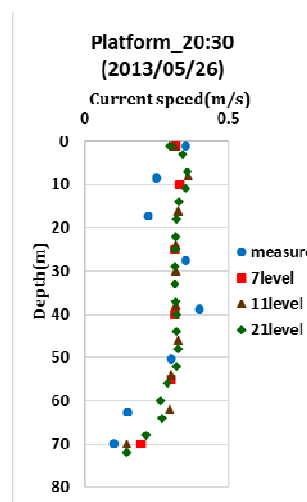
جدول ۴. پارامترهای آماری دو ایستگاه سلخ و PI اجراشده با شبکه ۲ و ضریب زبری بستر ۰/۰۰۱ برای تعداد ترازهای مختلف

نام ایستگاه	تراز سیگما	تراز		سرعت	
		RMSE	R	RMSE	R
سلخ	تراز ۷	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۷۱
	تراز ۱۱	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۷۱
	تراز ۲۱	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۷۱
سکو (PI)	تراز ۷			۰/۱۷	۰/۸۴
	تراز ۱۱			۰/۱۷	۰/۹۰
	تراز ۲۱			۰/۱۶	۰/۶۹

### ۳-۳ ضریب زبری بستر

پارامتر دیگری که حساسیت مدل به تغییرات آن بررسی شده است، ثابت زبری بستر است. به این منظور، با در نظر گرفتن هفت تراز سیگما در شبکه ۲ همراه با اعمال میدان باد سطحی و ثابت‌های زبری بستر متفاوت، مدل به اجرا گذاشته شده است. با توجه به آنکه محدوده ضریب زبری بستر در مدل FVCOM از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۳۵ است (چن و همکاران، ۲۰۱۳)، در اجرای اول از ثابت ۰/۰۰۱ و در اجرای دوم از ثابت ۰/۰۱۸ استفاده شده است. ثابت زبری بستر در اجرای سوم نیز ۰/۰۳۵ فرض شده است. نتایج این اجراها در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده و پارامترهای آماری این اجراها در جدول ۵ ارائه شده است.

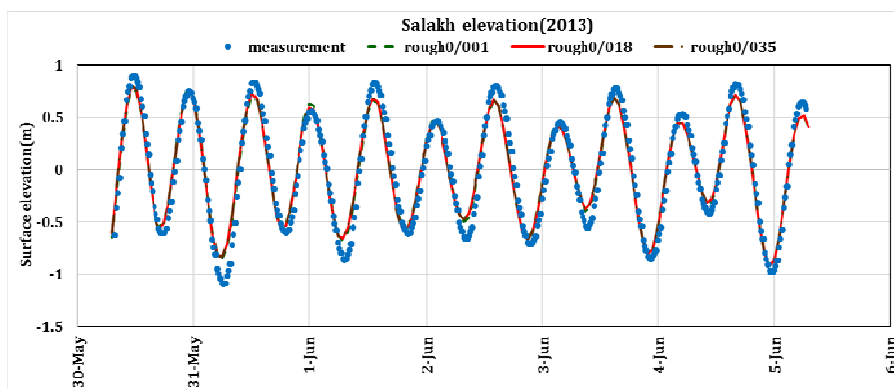
جدول مقادیر پارامترهای آماری محاسبه شده برای اجرای مدل را با ضرایب زبری ۰/۰۰۱، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۳۵ در شبکه ۲ و با هفت تراز سیگما در راستای قائم نمایش می‌دهد. از جدول پیداست که پارامتر تراز سطح آب برای ایستگاه سلخ در تمامی ضرایب زبری بستر، همبستگی خوبی دارد و مقدار خطای جذرمیانگین مربعات کم است. همچنین، پارامتر اندازه سرعت جریان برای ایستگاه سلخ در ضریب زبری ۰/۰۰۱ همبستگی بهتری نسبت به ضرایب زبری بیشتر دارد. این پارامتر برای ایستگاه PI که در آب عمیق واقع شده است، در ضریب زبری بستر ۰/۰۰۱ همبستگی خوبی ندارد و در ضریب زبری بستر ۰/۰۱۸ بهتر است، اما در ضریب زبری بستر ۰/۰۳۵ همبستگی بسیار خوبی برای اندازه سرعت جریان در آب عمیق مشاهده می‌شود



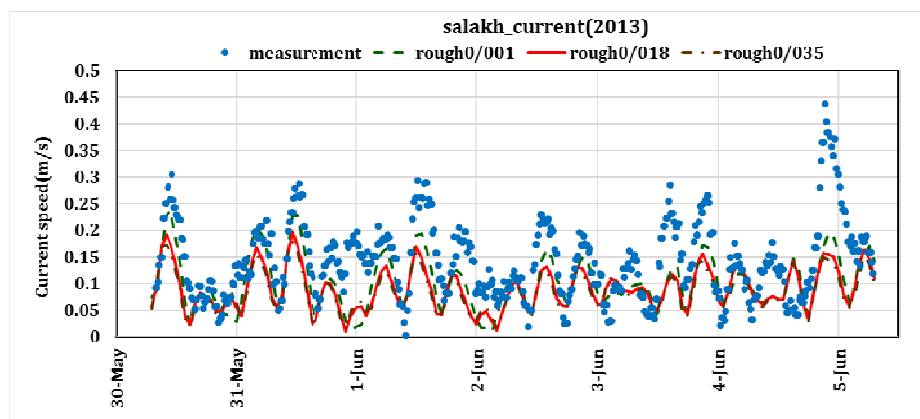
شکل ۹. مقایسه مقطع اندازه سرعت حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه PI در شبکه ۲ با ضریب زبری ۰/۰۰۱ برای تعداد ترازهای مختلف.

جدول ۴ مقادیر پارامترهای آماری محاسبه شده برای تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی برای ایستگاه‌های سلخ و PI ارائه می‌دهد.

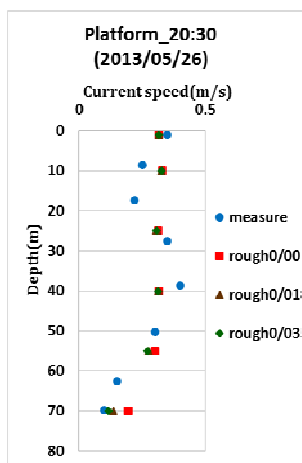
با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ و پارامترهای آماری در جدول ۴ مشخص می‌شود که نتایج به کارگیری یازده تراز سیگما بهتر از هفت تراز سیگما و بهتر از بیست و یک تراز سیگما است. نتایج ایستگاه PI که در آب عمیق قرار دارد، حائز اهمیت است؛ در نتیجه، حاصل این بخش از واسنجی‌ها برای دریافت خروجی‌های بهتر جهت شبیه‌سازی سه بعدی، استفاده از یازده تراز سیگما در راستای قائم است.



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر تراز سطح آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ در شبکه ۲ با هفت تراز سیگما برای ضرایب زبری متفاوت



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اندازه سرعت جریان حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ برای لایه ۵ مدل در شبکه ۲ با هفت تراز سیگما برای ضرایب زبری متفاوت



شکل ۱۲. مقایسه مقطع اندازه سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه PI در شبکه ۲ با هفت تراز سیگما برای ضرایب زبری متفاوت

جدول ۵. پارامترهای آماری دو ایستگاه سلخ و P1 اجراشده با شبکه ۲ و هفت تراز سیگما برای ضرایب زبری بستر متفاوت.

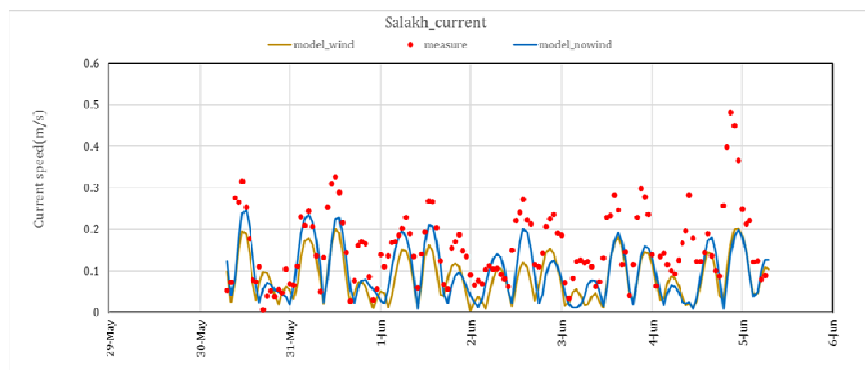
نام ایستگاه	ضریب زبری بستر	تراز		سرعت	
		RM SE	R	RM SE	R
سلخ	زبری ۰/۰۰۱	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۱
	زبری ۰/۰۱۸	۰/۹۹	۰/۱	۰/۵۸	۰/۱۱
	زبری ۰/۰۳۵	۰/۹۹	۰/۱	۰/۴۷	۰/۱۱
سکو	زبری ۰/۰۰۱			۰/۳۴	۰/۱۱
	زبری ۰/۰۱۸			۰/۶۲	۰/۱۱
	زبری ۰/۰۳۵			۰/۷۳	۰/۱۱

مدل اعمال شده است و نتایج بر تأثیر مثبت آن دلالت داشته است؛ در نتیجه، شبیه‌سازی‌ها برای ایستگاه سلخ و P1 در سال ۲۰۱۳ و نایند در سال ۲۰۰۹ با اعمال میدان باد سطحی به مدل در بازه مورد نظر اجرا شدند. در شکل ۱۳، برای نمونه، نمودار مقادیر اندازه سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی با اعمال میدان باد سطحی و بدون اعمال آن در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ ارائه شده است. همان‌طور که از نمودارها پیداست، باد تأثیر مثبت بر بهبود نتایج شبیه‌سازی داشته است.

از شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ و پارامترهای آماری جدول ۵ این نتیجه برداشت می‌شود که مناسب‌ترین ضریب زبری بستر برای شبیه‌سازی سه-بعدی جریان‌های خلیج فارس در آب کم‌عمق، ۰/۰۰۱ و در آب عمیق، ۰/۰۳۵ است.

### ۴-۳ اثر باد

در این پژوهش، علاوه بر اعمال واداشت جزرومدی به مدل، میدان باد سطحی نیز به‌عنوان یک واداشت مؤثر به



شکل ۱۳. مقایسه اندازه‌گیری‌ها و مقادیر اندازه سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی با اعمال واداشت باد و بدون اعمال واداشت باد در ایستگاه سلخ.

جدول ۶. پارامترهای آماری برای اندازه سرعت جریان با و بدون اعمال واداشت باد در ایستگاه سلخ.

سرعت (بدون باد)		سرعت (با باد)		نام ایستگاه
RMSE	R	RMSE	R	
۰/۱	۰/۵۸	۰/۰۹	۰/۶۷	سلخ

پیش‌فرض اجرا می‌شود. مدل تحت تأثیر دو واداشت جزرومد و باد اجرا شده است. بازه‌های اجرای مدل در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین، با توجه به واسنجی‌های انجام شده در بخش قبل، شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری بستر ۰/۰۰۱ برای اجراهای مناسب آب کم‌عمق و ۰/۰۳۵ برای اجراهای مناسب آب عمیق جهت اجرای مدل انتخاب شده است.

جدول ۷. بازه‌های اجرای مدل.

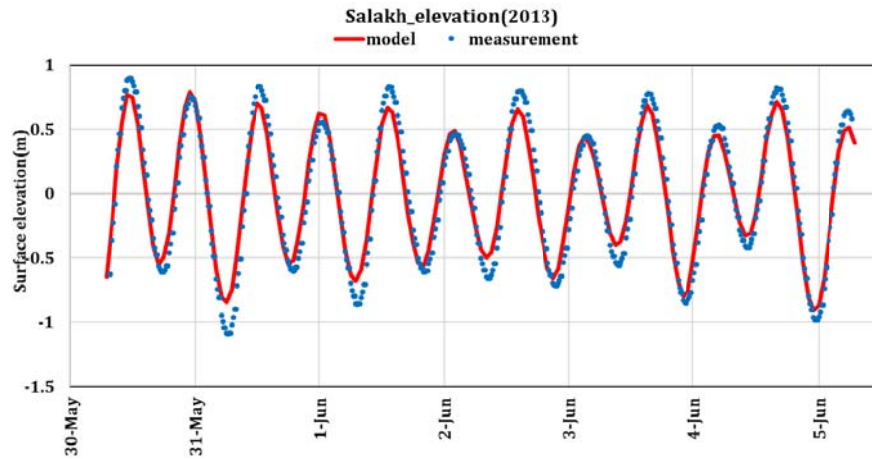
سال	شروع	پایان
۲۰۱۳	۰۵/۰۱ ۰۰:۰۰	۰۶/۱۵ ۰۰:۰۰
۲۰۰۹	۰۷/۰۱ ۰۰:۰۰	۰۸/۱۴ ۰۰:۰۰

در ادامه، به بررسی نتایج شبه‌سازی سه‌بعدی جریان با اجرا در حالت انتخاب شده در فرایند حساسیت‌سنجی مدل پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ نتایج شبه‌سازی مدل با داده‌های میدانی موجود برای تراز سطح آب و اندازه سرعت جریان در ایستگاه‌های اندازه‌گیری مقایسه شده است. چنانچه از این نتایج برمی‌آید، شبه‌سازی سه‌بعدی اجرا شده با مدل FVCOM و با احتساب ضریب زبری بستر ۰/۰۳۵ به نتایج بهتری برای محدوده آب عمیق و اندازه‌گیری‌های موجود در آن ناحیه منجر می‌شود، درحالی‌که اجراهای انجام شده با ضریب ۰/۰۰۱، نتایج بهتری در مناطق آب کم‌عمق دارند. یازده تراز سیگما در راستای قائم در شبکه ۲ به همراه میدان باد سطحی در پهنا خلیج فارس برای همه اجراها به مدل اعمال شده است. نتایج از دقت خوبی برخوردارند و در کل، عملکرد خوبی ارائه شده است.

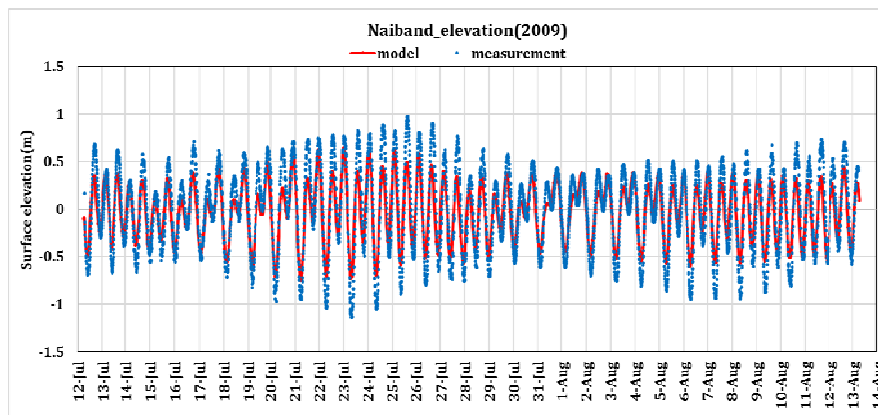
در جدول ۶ پارامترهای آماری مربوط به اندازه سرعت جریان با و بدون اعمال میدان باد سطحی آورده شده است و پیداست که باد، تأثیر مثبت چشمگیری بر بهبود نتایج داشته است.

#### ۴ نتایج اجراهای نهایی

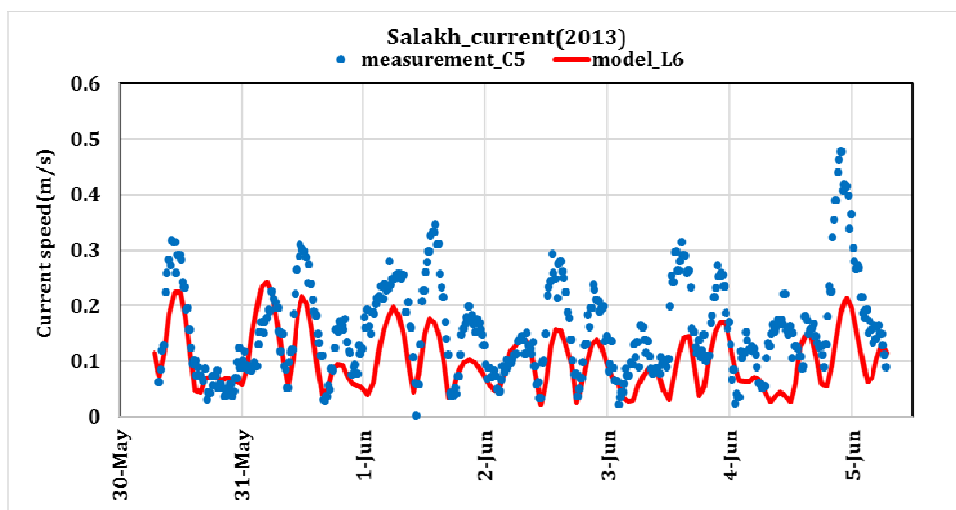
پس از انجام حساسیت‌سنجی‌های مشروح در بخش پیشین، برپایش بهینه برای اجرای نهایی انتخاب می‌شود. برای شبکه محاسباتی در سطح افقی از شبکه‌بندی مثلثی و در راستای قائم از یازده تراز سیگما استفاده شده است. شبکه محاسباتی مورد استفاده همان شبکه ۲ است که طی فرایند حساسیت‌سنجی انتخاب شده است. در این شبکه، کمترین فاصله سلولی ۱۲۰۴ متر و بیشترین آن ۸۶۱۱ متر است. شبکه‌بندی در پلان شامل ۷۱۹۳ گره و ۱۳۶۳۹ سلول است. کمترین و بیشترین زاویه سلول‌ها برابر ۳۰ و ۱۲۰ درجه فرض شده است. گفتنی است بیشترین تعداد سلول متصل به یک گره، زیر ۸ عدد تنظیم شده است. سرعت‌های اولیه در دامنه محاسباتی برابر صفر است و اجرای مدل با شرایط اولیه سکون یا همان Cold Start آغاز شده است. از آنجایی که جریانات چگال در مقایسه با جریانات جزرومدی در این منطقه بزرگای کمتری دارند، فرضیات فوق خطای زیادی در محاسبات وارد نخواهد کرد و مدل با توجه به سرعت زیاد جزرومدی در محل، به مقادیر واقعی سرعت نزدیک می‌شود. برای اجراها از حالت هیدروستاتیک مدل استفاده شده است و از اثرهای امواج بر جریان صرف‌نظر شده است. فرض بر این است که منطقه مورد مطالعه، فشارورد است و مدل با این



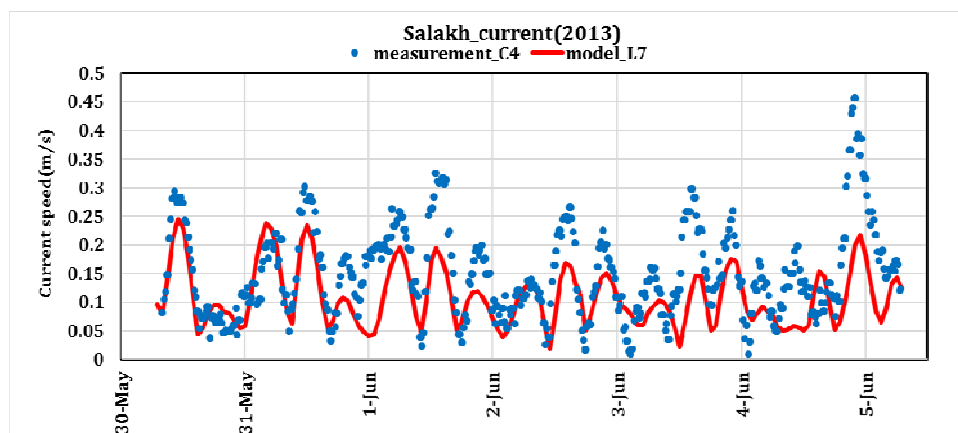
شکل ۱۴. مقایسه مقادیر تراز سطح آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۰۱



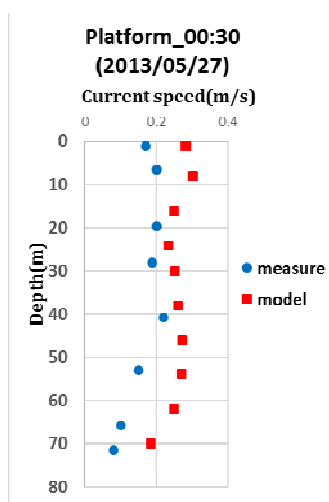
شکل ۱۵. مقایسه مقادیر تراز سطح آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه نایبند در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۰۱



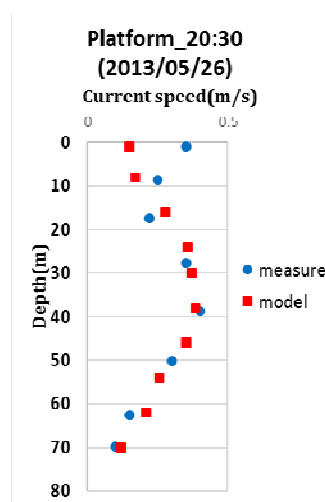
شکل ۱۶. مقایسه مقادیر سرعت جریان حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ برای لایه ۶ مدل در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۰۱



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر سرعت جریان حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه سلخ برای لایه ۷ مدل در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۰۱



شکل ۱۸. مقایسه مقطع سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه PI در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۳۵



شکل ۱۹. مقایسه مقطع سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه PI در شبکه ۲ با یازده تراز سیگما و ضریب زبری ۰/۰۳۵

برای راه‌اندازی سامانه مذکور، از مدل سه‌بعدی احجام محدود FVCOM استفاده شده است که یک مدل متن‌باز است و امکان استفاده از لایه‌بندی سیگما در راستای قائم وجود دارد. در روند برپایی سامانه محاسباتی، ابتدا سه شبکه محاسباتی با مشخصات متفاوت مدنظر قرار گرفته است و طی روند واسنجی، شبکه بهینه انتخاب و سایر پارامترها از قبیل تعداد لایه‌های سیگما و مقادیر بهینه ضریب زبری بستر تعیین شده است. درنهایت، برای بازه‌هایی که داده اندازه‌گیری در آب کم‌عمق و عمیق وجود

## ۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، راه‌اندازی یک سامانه محاسباتی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان‌های دریایی در محدوده خلیج فارس است به‌گونه‌ای که صحت عملکرد آن در کلیه مناطق ساحلی و فراساحلی قابل اعتماد باشد. اهمیت خلیج فارس به‌عنوان یک پهنه استراتژیک آبی که فعالیت‌های توسعه‌ای و ناوبری در جای‌جای آن در جریان است و تنها به نواحی نزدیک ساحل محدود نمی‌شود، لزوم این مطالعه را دوچندان هویدا می‌سازد. در این راستا

## منابع

- حاج رسولیها، ا.، حسن زاده، ا.، رضایی لطیفی، ع.، ۱۳۹۵، نقش فرایندهای فیزیکی بر نحوه توزیع آلاینده‌های نفتی در خلیج فارس: پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۵، ۹۳-۱۰۶.
- شرکت مهندسی مشاور آب و محیط خاورمیانه، ۱۳۹۲، مطالعات اندازه‌گیری میدانی حد فاصل جزایر کیش و قشم.
- قادر، س.، یازجی، د.، سلطان‌پور، م.، نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۵، به‌کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس: مجله هیدروفیزیک، ۱، ۴۱-۵۴.
- Alosairi, Y., Imberger, J., and Falconer, R. A., 2011, Mixing and flushing in the Persian Gulf (Arabian Gulf): Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C3).
- Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M., and Einali, A., 2014, Study of the physical oceanographic properties of the Persian Gulf, strait of Hormuz and gulf of Oman based on PG-GOOS CTD measurements: Journal of the Persian Gulf, 5(18), 37-48.
- Baird and JWERC, 2009, Final Report: Tidal model of the Persian Gulf. monitoring and modeling studies of Iranian coastline, phases II and III, Port and Maitime Organization (PMO).
- Chen, C., Beardsley, R. C., Cowles, G., Qi, J., Lai, Z., Gao, G., Stuebe, D., Xu, Q., Xue, P., Ge, J., and Ji, R., 2013, An unstructured grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual: Department of Fisheries Oceanography, SMAST.
- ETOPO2v2, 2006. doi: 10.7289/V5J1012Q.
- Ezam, M., Bidokhti, A. A., and Javid, A. H., 2010, Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea: Ocean Science, 6(4), 887.
- Hagen, S. C., Zundel, A. K., and Kojima, S., 2006, Automatic, unstructured mesh generation for tidal calculations in a large domain: International Journal of Computational Fluid Dynamics, 20(8), 593-608.
- Haghshenas, S. A., Razavi Arab, A., Bakhtiari, A., Jedari Attari, M., Risk, M. J., 2016، داشته است، اجرای نهایی انجام و صحت عملکرد مدل ارزیابی شده است. اجراهای مدل تحت دو واداشت اصلی جزرومد و باد انجام شده است و عملکرد مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری، خوب ارزیابی می‌شود. موارد زیر هم دستاوردهای این مطالعه را توصیف می‌کند:
- ❖ با توجه به نمودارهای ارائه‌شده که مقایسه این دو پارامتر را برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری میدانی در خلیج فارس نشان می‌دهد، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان با مدل FVCOM در خلیج فارس برای اندازه سرعت جریان و تراز سطح آب، نتایج خوبی ارائه داده است و پارامترهای آماری ارائه‌شده، همخوانی نسبی خوب نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های میدانی را نشان می‌دهد؛
  - ❖ در این پژوهش علاوه بر اعمال واداشت جزرومدی به مدل که بیشترین تأثیر را بر جریان‌های خلیج فارس دارد، باد نیز به‌عنوان دومین پارامتر مؤثر به مدل اعمال شده و تأثیر مثبتی در بهبود نتایج داشته است؛ در نتیجه، تمامی شبیه‌سازی‌ها با اعمال میدان باد سطحی در بازه مورد نظر اجرا شده‌اند و نتایج آن نسبت به نتایج مدل در حالت جزرومدی بهبود یافته است؛
  - ❖ نتیجه مهم دیگر این مطالعه آن است که برای دست یافتن به نتایج با دقت زیاد، ضرایب زبری مختلفی باید در سرتاسر مدل به‌کارگرفته شود؛ بهترین نتایج با فرض مقدار ۰/۰۰۱ برای نواحی کم‌عمق و مقدار ۰/۰۳۵ برای نواحی عمیق به‌دست آمده است.
- سپاسگزاری**
- نویسندگان برآند تا درخصوص تأمین و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری از همکاری خانم آزاده رضوی و آقایان آرش بختیاری، همایون ذاکر و محسن سلطان‌پور کمال تشکر را به‌عمل آورند. همچنین از اداره مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی جهت در اختیار قرار دادن محدود برخی داده‌های اندازه‌گیری سپاسگزاری می‌شود.



- Decadal evolution of Mond River Delta, the Persian Gulf, in Vila-Concejo, A., Bruce, E., Kennedy, D. M., and McCarroll, R. J., eds., Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia): Journal of Coastal Research, Special Issue, 75, 805-809, Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Kämpf, J., and Sadrasab, M., 2006, The circulation of the Persian Gulf: a numerical study: *Ocean Science*, 2(1), 27-41.
- Memari, S., Siadatmousavi, M. S., 2018, Numerical modeling of heat and Brine discharge near Qeshm Desalination Plant: *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(1), 27-35.
- MEWE, 2014, Current modelling report, Frooz-B field development, 40 p.
- Mortazavi, M. S., Hamzei, S., Motallebi, A. A., Kim, H. G., Reguera, B., Hallegraeff, G. M., Lee, C. K., Han, M. S., and Choi, J. K., 2012, Preliminary studies on HAB monitoring in the Persian Gulf and Oman Sea using remote sensing data from ocean color sensor MODIS: *Harmful Algae*, 71-73.
- Reynolds, R. M., 1993, Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition: *Marine Pollution Bulletin*, 27, 35-59.
- Swift, S. A., and Bower, A. S., 2003, Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C1).
- UMASSD Technical Report-13-0701, University of Massachusetts-Dartmouth.
- Vic, C., Roullet, G., Capet, X., Carton, X., Molemaker, M. J., and Gula, J., 2015, Eddy-topography interactions and the fate of the Persian Gulf Outflow: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10), 6700-6717.
- Yao, F., and Johns, W. E., 2010, A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C11).

## 3D Numerical Modelling of Shallow and Deep Water Currents in the Persian Gulf

Shokufeh Razzaghi<sup>1</sup>, Seyyed Abbas Haghshenas<sup>2</sup>, Sarmad Ghader<sup>3\*</sup>, Daniel Yazgi<sup>4</sup>, Edris Delkhosh<sup>1</sup>, Aref Farhangmehr<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*M.Sc. Graduated, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>2</sup>*Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>3</sup>*Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>4</sup>*Ph.D. Graduated, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>5</sup>*M.Sc., Researcher at Persian Oceans Research Co., Tehran, Iran*

(Received: 03 June 2019, Accepted: 16 November 2019)

### Summary

A 3D current and water level forecasting system is developed for the whole Persian Gulf in this study, in order to offer a reasonable response for the needs to provide a better understanding of coastal and gulf-scale hydrodynamic processes in this important body of water. There are a couple of research attempts published during the past decades on the hydrodynamics and circulation of the Persian Gulf; however, most of them were concentrated on the coastal and relatively shallow water areas and presented reasonable results. Hence, this study aims to improve model performance in deep water areas while the accuracy of tidal and wind-driven current parameters in shallow water results is acceptable. The most important driving forces, including tides and surface winds, are taken into consideration in simulations, in order to provide relatively accurate estimations of hydrodynamic parameters in the Persian Gulf.

For water level and current three-dimensional simulations, FVCOM numerical open-source model is applied and run for some time periods in which field observations are available for both current specifications and water levels in the Persian Gulf. The open boundary data are adopted from OTPS global model and the input wind field data are applied from WRF wind modeling over the whole body of water. The model results were calibrated for a number of parameters selected in an extensive sensitivity analysis program and optimum values are selected for the under-study parameters. A comprehensive set of field measurements is collected, whose main objective is to provide sufficient and reliable input data for current simulations in the Persian Gulf in both deep and shallow areas. The collected survey parameters are mainly focused on: vertical profiling of current speed and direction; mid-depth current speed and direction measurements; tidal (water level) measurements; and wind measurements. The data covers a wide range of spatial distribution in the Persian Gulf, including near-shore and offshore areas as well as a wide range of water depth values.

In this study, the obtained water level and current model results are verified against collected field observations, both in shallow and deep water areas and near-shore and offshore regions. Consequently, the optimum settings for obtaining accurate model results in both shallow and deep water areas are reported. The results of this research are of great help to understand the hydrodynamics of the Persian Gulf and provide a basis for more accurate estimations of forecasted current and water level parameters over the study area.

**Keywords:** Persian Gulf, water levels and currents, 3D hydrodynamic simulations, FVCOM model, deep water currents

\*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir