مدل‌سازی عددی بلندمدت جریان و گردش آب باد رانده در خلیج‌فارس

محمودرضا عباسی[۱،*]

[۱،*]استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام)، phys.ocean.abbasi@gmail.com

چکیده:

یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی برای مطالعه گردش آب در خلیج‌فارس با استفاده از مدل FVCOM اجرا شد. این مدل شامل عمق‌سنجی‌های دقیق خلیج‌فارس، رژیم بلندمدت باد، تبخیر، بارش، دمای سطحی و نیز ورودی آب از رودخانه اروند بود. داده‌های مرزی شامل تغییرات تراز جزر و مدی آب و نیز تغییرات دما و شوری آب ورودی به مدل بود. مدل‌سازی در یک بازه بلندمدت ۱۶ ساله انجام شد. نتایج مدل با داده‌های میدانی تراز آب و سرعت‌های جریان با استفاده از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطاهای تخمین (RMSE) و ضریب همبستگی مورد مقایسه قرار گرفتند. تغییرات تراز آب و مؤلفه‌ای سرعت افقی آب دارای همبستگی بالایی با داده‌های میدانی بودند و درصد خطای بسیار پایینی را نشان می‌دهند. همچنین الگوی جریانات باد رانده در سطح و عمق در خلیج‌فارس، کاملاً با نتایج پژوهش‌های معتبر قبلی همخوانی داشتند. نتایج مدل نشان‌دهنده توانایی مدل در استفاده از آن در پژوهش‌های دریایی است.

واژه‌های کلیدی:

خلیج‌فارس، مدل‌سازی، FVCOM، گردش آب، دما، شوری.

Long-term numerical modeling of wind driven currents and circulation in the Persian Gulf

M.R. Abbasi

Abstract

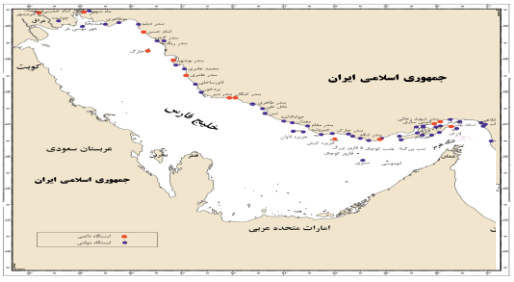
A three-dimensional hydrodynamic model was implemented to study water circulation in the Persian Gulf using the FVCOM model. This model included accurate depth measurements of the Persian Gulf, long-term wind regime, evaporation, precipitation, surface temperature and also water inflow from Arvand River. Boundary data included changes in water tidal level as well as changes in temperature and salinity of water entering the model. Modeling was performed over a long period of 16 years. The results of the model were compared with field data on water level and flow velocities using the statistical parameters of root mean square estimation errors (RMSE) and correlation coefficient. Changes in water level and horizontal water velocity components had a high correlation with field data and showed a very low error rate. Also, the pattern of wind currents at the surface and depth in the Persian Gulf were completely consistent with the results of previous valid studies. The results of the model show the ability of the model to use it in marine research.

Keywords

Persian Gulf, modeling, FVCOM, water circulation, temperature, salinity.

۱- مقدمه

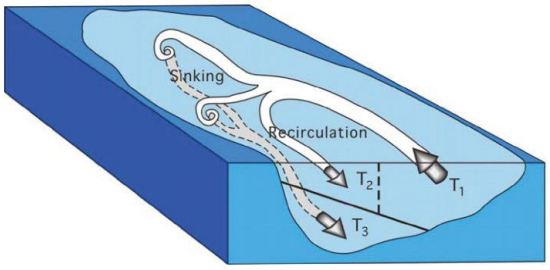
خلیج‌فارس، یک دریای حاشیه‌ای نیمه‌بسته است که در جهت شمال غربی-جنوبی شرقی امتداد دارد و از طریق تنگه هرمز به دریای عمان متصل است. این حوضه آبی که بین عرض‌های جغرافیایی ۲۴ الی ۳۰,۳ شمالی و طول جغرافیایی ۴۷,۸ الی ۵۷,۲ شرقی قرارگرفته است، دارای حدوداً ۹۹۰ کیلومتر طول، ۲۳۹۰۰۰ Km^2 مساحت، حجم ۸۶۳۰ Km^3 و عمق متوسطی در حدود ۳۶m است که توسط کشورهای ایران، عراق، کویت، عربستان سعودی، قطر، امارات و عمان احاطه شده است (شکل ۱)[۱].



شکل(۱): موقعیت جغرافیایی خلیج‌فارس و کشورهای پیرامون آن

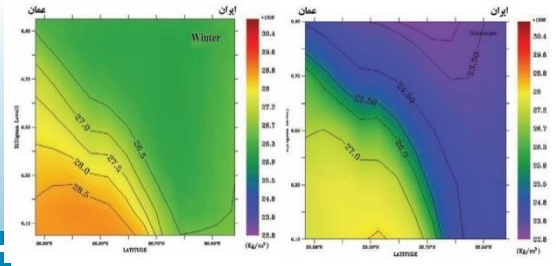
برای اطلاع از پارامترهای محیطی خلیج‌فارس مانند جریانات و گردش‌های آبی، تغییرات جزر و مدی، توزیع دما-شوری و ...، مدل‌سازی‌های عددی و نیز مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی زیادی انجام شده است.

نتایج اولین اندازه‌گیری طولانی‌مدت جریان در منطقه خلیج‌فارس را جونز و همکاران در سال ۲۰۰۳ ارائه نمودند [۲]. این محققان بر روی تبادل آب خلیج‌فارس و دریای عمان تحقیق کردند که نتیجه آن در شکل زیر خلاصه شده است. بر اساس این پژوهش، خروجی آب از تنگه هرمز به‌صورت سالیانه وجود دارد و مقدار آن در طول سال تقریباً ثابت است (شکل ۲).



شکل (۲): نحوه گردش آب در منطقه خلیج‌فارس و تنگه هرمز [۲]

همچنین نشان دادند که آب نسبتاً کم شورتر دریای عمان از سطح و از سمت سواحل ایران وارد تنگه هرمز می‌شود و قسمتی از آب ورودی تا شمال خلیج‌فارس حرکت می‌کند (T1) و با آب‌های خروجی از لایه‌های میانی تنگه هرمز خارج می‌شود. آب‌های سنگین شده و شور شمال غربی و جنوب شرقی (T2) خلیج‌فارس از بستر به سمت تنگه هرمز جریان پیدا می‌کنند و سرانجام از لایه‌های عمیق در کنار سواحل عمان از تنگه هرمز خارج می‌شوند(T3) . چگالی آب در ناحیه شمالی بین ۱۰۲۶ تا ۱۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب و در ناحیه جنوبی بین ۱۰۲۸ تا ۱۰۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر می‌کنند (شکل ۳).



شکل (۳): پیش‌بینی پروفیل عمودی چگالی در تنگه هرمز در فصول تابستان (راست) و زمستان (چپ) [۲]

حرکت آب در خلیج‌فارس تحت تأثیر سه نیرو است: نیروی جزرومد، نیروی باد و تغییرات چگالی [۳]. هرکدام از جریان‌های مختلف مقیاس زمانی متفاوت دارند. جزرومد به‌صورت ساعتی، روزانه یا نیم‌روزانه است. جریان‌های ناشی از باد تحت تأثیر جهت باد بوده و تغییرات روزانه کمی دارند؛ اما جریان‌های ناشی از چگالی تغییرات هفتگی یا فصلی دارند [۳].

چاوو و همکاران گردش آب در خلیج‌فارس را با بکاربردن یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی با مختصات کارتزین مطالعه کرده‌اند. آنها نشان دادند که جریان خروجی تحت تأثیر سه نیروی گرانشی، اصطکاک و کوریولیس زیر شیب فلات قاره در یک‌لایه حرکت می‌کند. انرژی پتانسیل آب رودخانه که به علت تغییر چگالی و شیب است به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و این جریان توسط تنش‌های آشفتگی در لایه‌مرزی کف گسترده می‌شود. این سه نیرو به توازن ژئوستروفیک می‌رسند [1].

مهم‌ترین گشت دریایی که همراه با اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای خلیج‌فارس بود در سال ۱۹۹۲ انجام شد. نووا با کشتی مونت میشل گشتی در ناحیه دریایی رایمی، خلیج‌فارس، تنگه هرمز و دریای عمان از فوریه تا ژوئن ۱۹۹۲ انجام داده که طی آن پارامترهای فیزیکی آب را اندازه گرفته‌اند. برای مشاهدات فیزیکی اقیانوس از:

۱. بیش از ۵۰۰ دستگاه CTD برای اندازه‌گیری دما، شوری و چگالی
۲. هفت جریان‌سنج شناور
۳. ۳۶ بویه شناور برای شناخت الگوهای چرخش ساده و شناخت مشخصه‌های اختلاط
۴. کشتی‌های که متغیرهای فیزیکی و هواشناسی ساحلی را در ایستگاه‌های جزرومدی ثبت می‌کرد.
۵. ۱۲۰ دوربین الکتریکی و دیجیتالی برای تصویربرداری بالا از طبیعت‌های ساحلی
۶. چندین تصویربردار ۴ بانده در روزهای ۵۷- ۱۶۵ ام که عکس‌هایی از چرخش و مشخصه‌های اختلاط می‌گرفت.
۷. در حدود ۲۲۵، دستگاه CTD در سواحل ایران استفاده کرده‌اند [4].

در این مقاله به بررسی تغییرات بلندمدت پارامترهای خلیج‌فارس در یک بازه ۱۶ ساله (۱۹۹۸-۲۰۱۴) با استفاده از مدل عددی FVCOM[1] پرداخته‌ایم. در این مدل‌سازی تمام ورودی‌های موردنیاز مدل با توزیع کامل و ریز تفکیک[2] مکانی و در بازه‌های زمانی ۳ ساعته تهیه گردید.

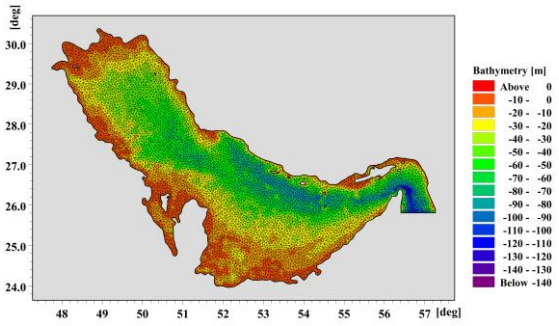
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱: مدل FVCOM

مدل FVCOM مدلی با شبکه‌بندی بی ساختار است که معادلات سه‌بعدی تکانه، پیوستگی، دما، شوری و چگالی را در مختصات کروی و به روش حجم محدود حل می‌کند و ابتدا توسط chen و همکاران [۵] معرفی گردید و به‌تدریج با همکاری پژوهشگران دانشگاه ماساچوست-دارتموث و موسسه اقیانوس‌شناسی وودز هول[3] توسعه یافت. این مدل در راستای عمودی از مدل توربولانسی اقیانوسی Burchard [۶] و در راستای افقی از طرحواره بستار تلاطمی Smagorinsky بهره می‌گیرد [۷]. این مدل در انتگرال‌گیری زمانی از روش‌های مختلف جداسازی و طرحواره‌های نیمه ضمنی و در انتگرال‌گیری مکانی از طرحواره‌های انتقال افقی مرتبه دو استفاده می‌کند. روش حجم محدود شبکه بی ساختار آن هم از ویژگی محاسباتی ساده روش تفاضل محدود و هم از انعطاف‌پذیری هندسی روش المان محدود استفاده می‌کند.

۲-۲: حوزه مطالعاتی

حوزه آبی موردمطالعه منطقه خلیج‌فارس است که با توجه به روش حل عددی مورداستفاده در مدل FVCOM، از یک شبکه نامنظم متشکل از المان‌های مثلثی جهت معرفی هندسه و هیدروگرافی مدل استفاده شده است. بسته به‌دقت موردنیاز و اهمیت پدیده‌های مختلف در بخش‌های مختلف مدل، شبکه‌بندی بی ساختار با گسسته سازی متغیر از حدود ۵ کیلومتر در نزدیکی سواحل تا ۲۵ کیلومتر در نواحی دور از ساحل و با تعداد سلول‌های و گره‌های به ترتیب ۳۰۵۵۲ و ۱۵۷۷۹ تعبیه گردید (شکل ۴). با توجه با ماهیت کم‌عمق بودن خلیج‌فارس از مختصات سیگما برای لایه‌بندی عمودی به تعداد ۱۰ لایه استفاده شد.



شکل (۴): شبکه‌بندی مدل

۲-۳: داده‌های موردنیاز مدل

میدان باد ECMWF از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ با بزرگنمایی ۱/۱۲۵ درجه از سایت اینترنتی[4] آن تهیه گردید. داده‌های شار حرارتی مدل، بارش و تبخیر با بزرگنمایی ۰/۵ درجه و گام زمانی ۶ ساعته از ECMWF تهیه شد.

برای توصیف کمی نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری از پارامترهای آماری RMSE و ضریب همبستگی با فرمول‌های زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$CC = \frac{\sum_i (x_i - \overline{x}) \times (y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \overline{x})^2 \times \sum_i (y_i - \overline{y})^2}} \quad (۲)$$

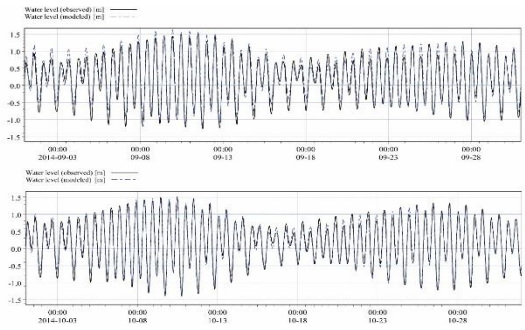
[1] Finite Volume Community Ocean Model
[2] Resolution
[3] WHOI
[4] https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-40-years

که در آنها x و y به ترتیب مقادیر مُدل و داده‌های اندازه‌گیری میدانی هستند.

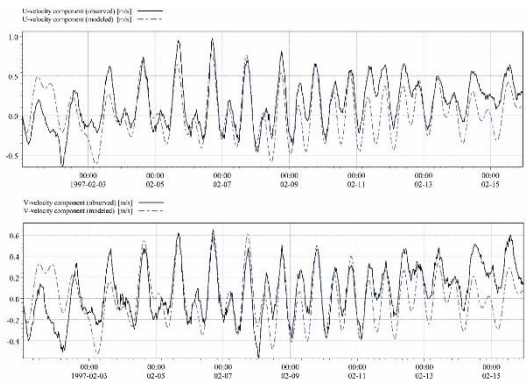
۳- نتایج

۳-۱: تراز جزر و مدی و مؤلفه‌های سرعت جریان آب

به‌منظور صحت سنجی خروجی مدل عددی از دو سری داده‌های اندازه‌گیری شده، تراز سطح آب و مؤلفه‌های سرعت در دو جهت x و y، استفاده شد. داده‌های تراز سطح آب توسط سازمان نقشه‌برداری در سال ۲۰۱۴ و در حدفاصل جزایر قشم و هنگام (26.683N, 50.9 E) و داده‌های سرعت جریانات توسط آقای جونز در سال ۱۹۹۷ و در نزدیکی سواحل کشور امارات اندازه‌گیری شده است (26.26783N, 56.08667 E) (شکل ۵). همان‌طورکه در شکل‌ها دیده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج اندازه‌گیری میدانی تراز سطح آب و خروجی مدل‌های وجود دارد.

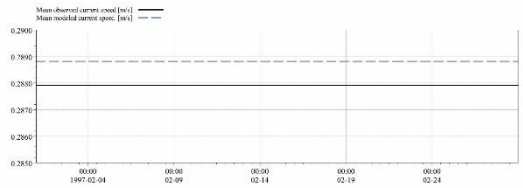


شکل (۵): مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های تراز سطح آب اندازه‌گیری میدانی در ماه‌های سپتامبر و اکتبر سال ۲۰۱۴



شکل (۶): مقایسه مؤلفه‌های U و V سرعت اندازه‌گیری شده و مدل در دو جهت x و y در عمق ۵۰ متری در نزدیکی سواحل امارات، نیمه اول ماه فوریه ۱۹۹۷

همان‌طورکه در شکل ۶ مشخص است تطابق خوبی بین مؤلفه‌های سرعت اندازه‌گیری شده و مدل شده در دو جهت x و y وجود دارد، بخصوص ازلحاظ فاز جریانات. همچنین شکل ۷ تفاوت موجود بین میانگین سرعت اندازه‌گیری شده با میانگین سرعت مدل شده را نمایش می‌دهد و مشخص‌شده است که اختلاف موجود حدود ۰،۰۹ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل (۷): مقایسه میانگین سرعت جریانات سطحی اندازه‌گیری شده با میانگین سرعت مدل شده جریانات مذکور در نزدیکی سواحل امارات، فوریه ۱۹۹۷

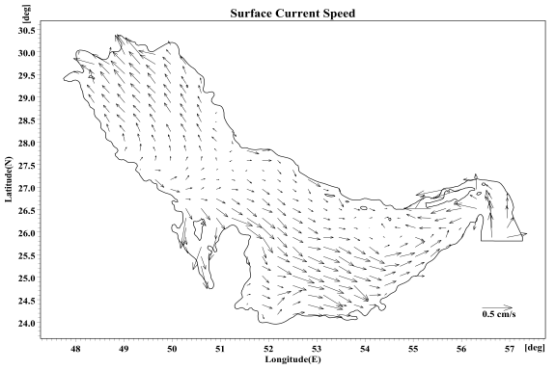
مقایسه آماری بین داده‌های میدانی و نتایج مدل بر اساس سه پارامتر تراز سطح آب و مؤلفه‌های افقی U و V جریان آب در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): ارزیابی آماری بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری‌شده.

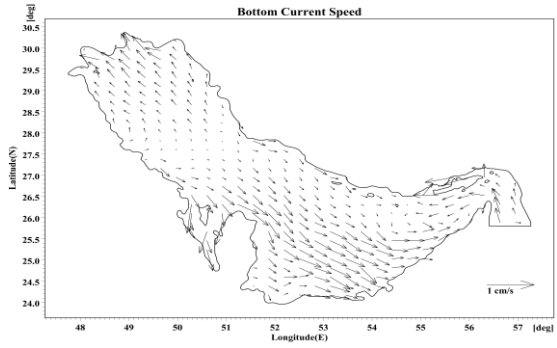
پارامتر	شاخص آماری	
	RMSE	CC
تراز سطح آب	0.11	0.97
مؤلفه U سرعت	0.17	0.93
مؤلفه V سرعت	0.14	0.91

۳-۲: الگوی مکانی گردش آب خلیج‌فارس

پس از کالیبراسیون مدل، مدل هیدرودینامیکی به مدت یک سال جریانات ناشی از باد واقعی منطقه را مدل‌سازی نمود. شکل ۸ و ۹ جریانات باد رانده خلیج‌فارس در لایه سطحی و عمقی را نشان می‌دهد.



شکل (۸): جریانات باد رانده خلیج‌فارس در لایه سطحی



شکل (۹): جریانات باد رانده خلیج‌فارس در لایه تحتانی

ازآنجایی‌که باد شمال باد غالب منطقه می‌باشد، مشاهده می‌شود که الگوی جریانات باد رانده در کم‌عمق‌تر در نزدیکی خطوط ساحلی هم‌راستا با جهت وزش باد و دارای سرعتی شدیدتر هستند اما جریانات سطحی نواحی عمیق در خلاف جهت وزش باد و با سرعت کمتر درحرکت هستند. همچنین جریانات نواحی کم‌عمق دارای سرعت نسبتاً بیشتری هستند و هرچه از نواحی کم‌عمق به سمت نواحی عمیق حرکت می‌کنیم از مقدار سرعت‌ها کاسته می‌شود. جهت جریانات نیز در نواحی کم‌عمق به سمت تنگه هرمز می‌باشد اما در نواحی عمیق شاهد جریانات برگشتی هستیم. همان‌طورکه در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است الگوی حرکتی جریانات در لایه سطحی و تحتانی یکسان می‌باشد. در لایه تحتانی خلیج سرعت جریانات نواحی کم‌عمق کمتر از سرعت جریانات لایه سطحی است اما در نواحی عمیق جریانات تحتانی شدیدتر از جریانات لایه سطحی می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طورکه در شکل ۸ و ۹ دیده می‌شود در شمال خلیج‌فارس، سواحل جنوب غربی کشور و تا طول جغرافیایی ۵۱٫۵ درجه جریانات تحت اثر جریانات ناشی از باد به سمت جنوب شرق خلیج می‌باشند اما از طول جغرافیایی ۵۱٫۵ درجه تا منتهی‌الیه شرقی خلیج و شمال تنگه هرمز جریانات موجود در مجاورت سواحل کشور تحت اثر جریانات ناشی از چگالی به سمت شمال غرب در حرکت می‌باشند.

با برخورد جریانات شمال غربی خلیج با جریانات جنوب شرقی شاهد چرخش توده آب به سمت جنوب خلیج در طول جغرافیایی ۵۱٫۵ درجه هستیم. جریانات سطحی در نزدیکی سواحل کشورهای عربی تحت اثر وزش باد، در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی و به سمت تنگه هرمز می‌باشند (شکل ۸).

در نواحی عمیق قسمت جنوب شرقی خلیج‌فارس، شاهد وجود جریانات به سمت شمال غرب هستیم که علت شکل‌گیری این نوع جریانات توپوگرافیک جایرها می‌باشد. تحت اثر جریانات مذکور تقریباً در تمام طول سال یک چرخابه سایکلونیک در جنوب شرق خلیج جود دارد.

در لایه تحتانی شاهد شدت گرفتن جریانات شرقی-غربی هستیم به‌خصوص در ناحیه مرکزی در منطقه غربی خلیج (از طول جغرافیایی ۵۱ درجه به غرب) که جهت جریانات کاملاً برعکس شده و برخلاف جهت باد غالب درحرکت می‌باشند؛ اما همچنان در نواحی کم‌عمق ساحل و به‌خصوص در اطراف سواحل کشورهای عربی جریانات در جهت وزش باد شمال می‌باشند. همان‌طورکه پیش‌تر مطرح شد آب خلیج‌فارس چگال تر از آب‌های اقیانوس می‌باشد بنابراین زمانی‌که توده‌های آب خلیج‌فارس در حال خروج هستند از لایه تحتانی خارج می‌شوند بنابراین در لایه بستر و در نواحی اطراف تنگه هرمز غالب جریانات به سمت شرق و دریای عمان در حرکت هستند.

۵- مراجع:

[1] Chao, shenn-yu., Kao, timothy w., AL-hajri, khalid r.” A Numerical Investigation of Circulationin the Persian Gulf”. Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. C7, Pages 11219-11236, 1992.

[2] Johns, W. E., Yao, F. Olson, D. B. Josey, S. A.Grist, J. P. and Smeed D. A. “Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred freshwater budgets of the Persian Gulf”. Jornal of Geophysical Research. 108(C12), 3391, 2003.

[3] Swift, S. A. and Bower, A. S.”Formation and circulation of dense water in the Persian Gulf”. J. Geophys. Res., 108(C1), 3004, 2003.

[4] Reynolds, R. M.: Overview of physical oceanographic measurements taken during the Mt. Mitchell Cruise to the ROPME Sea Area, Mar. Pollut. Bull., 27, 35–59, 1993.

[5] 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.

[6] Burchard, H., “Applied Turbulence

Modelling in Marine Waters". Springer Science & Business Media. 2002.
[7]Smagorinsky,J., "General circulation experiments with the primitive equations". monthly weather review., 91(3), 99-164, 1963.