

شبیه‌سازی گردش و اثر پیچک‌های میان مقیاس اقیانوسی بر پروفایل‌های سرعت صوت در خلیج فارس به وسیله مدل ROMS

سمیه محمدی فیروز^۱، سارا اله یاری بیک^۲، مجتبی عظام^۳، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳، محمدرضا سهیلی
فر^۴، میثم محمودیان شوشتری^۱

s.allahyari@srbiau.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۳- استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۴- استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

چکیده

گردش متغیر و تشکیل پیچک‌های میان مقیاس در خلیج فارس توسط خروجی مدل سه بعدی ROMS با تراکم‌پذیری حدود ۳ کیلومتر توسط داده‌های سال ۲۰۰۹ در ۱۶ لایه تراز سیگما شبیه‌سازی شده است. گردش در خلیج فارس عمدتاً ناشی از سه فاکتور اثر باد، چگالی (جریان‌های ترموهالاینی) و جزر و مد است. اصلی‌ترین جریان در خلیج فارس که سایکلونیک است، در اثر اختلاف چگالی ایجاد می‌شود. همچنین، نوسانات در نیروی تنش باد باعث ایجاد جریانی متغیر در تنگه هرمز می‌شود. این چرخش تبدالی متغیر باعث ایجاد یک ناپایداری محلی و تولید پیچک‌های سیکلونی می‌شود. گردش‌های پادساعتگرد در مرکز خلیج فارس از آوریل تا جولای قوی‌تر می‌شوند تا اینکه در ماه آگوست بیشترین وضوح در شکل‌گیری پیچک‌ها مشاهده می‌شود. در تحقیق حاضر با انتخاب چهار ایستگاه در موقعیت‌های مختلف از خلیج فارس، تأثیر پیچک‌ها بر روی دما، شوری و به‌طور خاص بر سرعت صوت بررسی شده است. از آنجا که نحوه انتشار امواج صوتی در محیط زیر آب از جمله عوامل بسیار مؤثر در عملکرد سامانه‌های آکوستیکی می‌باشد، اثر حضور و عدم حضور پیچک‌ها بر پروفایل‌های سرعت صوت با یکدیگر مقایسه گردید و نتیجه این که، حضور پیچک‌ها باعث کاهش انتشار سرعت صوت (حدود ۱۰ واحد) و اتلاف انتقال صوت می‌گردد.

واژگان کلیدی: گردش، جریان سیکلونی، پیچک‌های میان مقیاس، پروفایل سرعت صوت.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۶/۱۳

۱- مقدمه

چرخش و حرکت متفاوت و تصادفی دارند. یعنی هم پادساعتگرد هم ساعتگرد هستند. در راستای افقی 10^8 برابر بهتر می‌توانند انرژی را منتقل کنند چون در راستای قائم پایداری وجود دارد و جلوی حرکت پیچک را می‌گیرد. ضریب پخش پیچکی به جای عدد مشخص شامل بازه اعداد است [۳].

این پیچک‌ها نسبتاً سریع، در نزدیکی تنگه هرمز ایجاد می‌شوند که در این منطقه بخش بزرگی از جریان ورودی تحت تأثیر ساختار متغیر بستر محصور می‌شوند (کانال‌های عمیق و باریک). این جریان محصور شده هم آهنگ با یک گرادیان چگالی افقی شدید در این منطقه، باعث ایجاد جریان‌های دور (رو به جنوب) از ساحل می‌شود که به جریان خروجی ملحق می‌شود. این جریان فراساحلی منطقه مناسبی برای توسعه و انتشار پیچک‌ها فراهم می‌کند. سیکلون‌ها با اندازه و شعاع متفاوت به سمت شمال شرقی حرکت می‌کند و ابزاری برای انتقال گرما و شوری از تنگه هرمز به خلیج عمان هستند [۴]. آب‌های خلیج فارس با شوری بالا در هسته این پیچک‌ها هم چنان که به سمت پائین حرکت می‌کنند، باعث کاهش شوری آن‌ها می‌شود. دامنه پیچک‌ها با حرکت به سوی پائین کاهش می‌یابد و مشخصه‌هایش را از دست می‌دهد [۵].

در این تحقیق سعی شده است با شبیه سازی خلیج فارس توسط مدل ROMS^۴ (سیستم مدل منطقه‌ای - اقیانوسی) که یک مدل جدید گردش اقیانوسی است که خصوصاً برای شبیه‌سازی دقیق سیستم‌های اقیانوسی در سال ۲۰۰۳ طراحی شده است، موقعیت و زمان شکل‌گیری پیچک‌های میان مقیاس در قسمت‌های مختلف خلیج فارس در ماه‌های مختلف سال و همچنین تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی آب دریا (دما، شوری و خصوصاً تغییرات سرعت صوت) در ایستگاه‌های مختلف تحلیل و بررسی شود.

نحوه انتشار امواج صوتی در محیط زیر آب از جمله عوامل بسیار مؤثر در عملکرد سامانه‌های آکوستیکی می‌باشد. لذا شناخت عوامل محیطی مؤثر بر انتشار امواج صوتی و همچنین میزان تأثیر آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. که یکی از مهمترین پدیده‌ها در این خصوص، اثر پیچک‌ها است. دما، شوری و فشار (عمق) پارامترهای محیطی‌ای هستند که بر

خلیج فارس به‌عنوان سومین خلیج جهان یک حوضه آبی شور، نیمه بسته و کم عمق با میانگین عمق ۳۵ متر است که از شرق از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به اقیانوس هند و دریای عرب و از غرب به دلتای رودخانه اروندرود که حاصل پیوند دو رودخانه دجله و فرات و پیوستن رود کارون به آن است، ختم می‌شود.

گردش آب در خلیج فارس عمدتاً ناشی از سه فاکتور اثر باد، چگالی (جریان‌های ترموهالاینی^۱) و جزر و مد است. اصلی‌ترین جریان در خلیج فارس که سایکلونیک^۲ است، در اثر اختلاف چگالی ایجاد می‌شود. شوری بیشتر آب‌های خلیج فارس نسبت به اقیانوس، موجب پیدایش این جریان از اقیانوس هند به خلیج فارس شده است. آب با شوری معمول اقیانوسی از طریق تنگه هرمز وارد خلیج فارس شده و به سمت شمال غرب به موازات سواحل ایران حرکت نموده و در بخش غربی حوضه به سمت جنوب تغییر مسیر می‌دهد. در طی پیمودن این مسیر در اثر فرآیند تبخیر، آب چگالتر می‌شود و شوری آن بالا می‌رود و در نهایت این جریان آب پس از پیمودن بخش‌های جنوبی چگالتر شده و از بستر تنگه هرمز خارج می‌شود.

تبادل آب بین خلیج فارس و دریای آزاد باعث می‌شود، آب حالت دو لایه داشته باشد. اختلاط افقی باعث شکل‌گیری زبانه‌های شور ترموهالاینی می‌گردد. در حاشیه توده‌های آب جریان ترموهالاینی با نفوذ جانبی یک توده آب در توده آبی دیگر با ویژگی‌های متفاوت ترموهالاینی در عمقی مشخص جبهه ترموهالاینی ایجاد می‌شود که با گرادیان‌های افقی دما و شوری همراه هستند. در مجموع به گون‌های تنظیم می‌شوند که در راستای قائم ستون آب پایدار باشد [۱].

همچنین، نوسانات در نیروی تنش باد باعث ایجاد جریانی متغیر در تنگه هرمز می‌شود. این چرخش تبدالی، باعث ایجاد یک ناپایداری محلی و تولید پیچک‌های^۳ سیکلونی می‌شود [۲] رابطه تنگاتنگی بین تلاطم و پیچک‌ها وجود دارد که جریان تلاطمی را ایجاد می‌کند. هرچه جریان تلاطمی‌تر، پیچک‌های بزرگتری ایجاد می‌شود. پیچک‌ها سایز و اندازه مختلف دارند. (طیفی از سایز هستند). از چند سانتی متر تا چند هزار کیلومتر تشکیل می‌شوند. جهت

³ Eddy

⁴ Regional Ocean Modeling System

¹ Thermohaline

² Cyclonic

می‌شوند. ساختار داده‌های خروجی و ورودی این مدل NetCDF است. مقدار دما و شوری یا هر ردیاب دیگری را در سطوح ثابت Z سطوح ژئوپتانسیل (عمق ثابت)، یا ایزوپیکنال (هم چگالی) محاسبه می‌نماید [۸].

برای صرفه‌جویی محاسباتی، معادلات پیشرو آب ایستایی برای تکانه از طرحواره ROMS در مدل عددی تفکیک صریح گام زمانی استفاده می‌کند که نیازمند عملیات ویژه و جفت کردن بین مدهای باروتروپیک و باروکلینیک است. تعداد محدودی از گام‌های زمانی باروتروپیک، به همراه هر گام باروکلینیک، برای ارائه سطح آزاد و معادلات تکانه انتگرال‌گیری شده در راستای قائم اجرا می‌شوند. برای اجتناب از خطاهای ناشی از شکستگی فرکانسی حل شده در گام‌های باروتروپیک و غیرقابل حل در گام‌های باروکلینیک، میدان‌های باروکلینیک قبل از جایگزینی با مقادیر به دست آمده از گام زمانی طولانی‌تر، میانگین‌گیری زمانی می‌شوند [۹].

مدل عددی ROMS از طرح‌واره بستار محلی بر اساس معادلات انرژی تلاطم درجه ۲/۵ ملوریامادا و از طرح‌واره ترکیبی LMD استفاده می‌کند. طرح‌واره ترکیبی LMD یک طرح‌واره مرتبه اول است که در تنظیمات اقیانوس باز به خوبی معرفی شده است. طراحی آن به گونه‌ای است که امکان اضافه کردن یا اصلاح فرآیندهای تلاطم را ایجاد می‌کند. این مدل برای صرفه‌جویی محاسباتی، معادلات پیشرو آب ایستایی برای تکانه از طرح‌واره تفکیک صریح گام زمانی استفاده می‌کند.

در این روش معادلات به دو مد داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. مد داخلی یا مد باروکلینیک که از نظر محاسباتی پیچیده هستند و گام زمانی بلندتر دارند این گام بر اساس سرعت آهسته انتشار امواج گرانی درونی است. مزیت این روش صرفه‌جویی در زمان است. از آن جایی که منطقه مورد مطالعه شامل خلیج فارس و تنگه هرمز است و دارای یک مرز باز شرقی است این مدل در مرز باز شرقی از نوع تابشی و اسفنجی استفاده می‌کند که برای غلبه بر مشکل انعکاس امواج به کار می‌رود همچنین در مرزهای باز که جریان خروجی و ورودی وجود دارد از لایه اسفنجی استفاده می‌شود در این مرزها مقادیر ویسکوزیته و دیفیوژن بالاست و استفاده از لایه اسفنجی باعث کند شدن امواج شده

سرعت صوت مؤثر هستند و از این رو گرادیان‌های افقی و قائم این پارامترها موجب تغییرات ساختار سرعت صوت شده و در نتیجه بر انتشار امواج صوتی تأثیرگذار خواهند بود [۶]. نحوه تغییر سرعت صوت، سایر پدیده‌های صوتی در دریا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت صوت در لایه‌های بالایی دریا، وابستگی شدید به دما دارد. دریا یک موج بر^۱ یا کانال صوتی است که از بالا به سطح آب و از پایین به بستر دریا محصور است. سرعت صوت معمولاً تابع چگالی و تراکم‌پذیری است که آن‌ها هم در آب دریا، بطور عمده به فشار استاتیکی (عمق)، شوری و دما بستگی دارند [۷]. مقدار دما یا میزان حرارت، مهمترین عامل محسوب می‌شود. لذا در این تحقیق سعی شده است ضمن شبیه‌سازی پیچک‌ها در منطقه خلیج فارس و تنگه هرمز اثر آن‌ها را بر پروفایل سرعت صوت در محل و زمان حضور آن‌ها با حالت عدم حضور پیچک مقایسه و رفتار صوت را در آن منطقه تحلیل و بررسی نماییم.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ معرفی مدل

مدل ROMS یک مدل سطح آزاد، موازی با ناهمواری‌های زمین با معادلات پیشرو اقیانوسی است که به‌طور گسترده‌ای بوسیله جامعه علمی و برای محدوده وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل یک مدل متن باز است و کماکان توسط محققان مختلف در حال تغییر و بهبود در محاسبات قابلیت‌ها و سرعت اجرا است. دارای سه نسخه UCLA و RUGTERS و ROMS AGRIF است. در این تحقیق از نسخه AGRIF ROMS استفاده شده است. این مدل دارای جعبه ابزار قدرتمندی برای پیش‌پردازش و پس‌پردازش به نام ROMS TOOLS است و دارای دقت و کارآمدی فیزیکی بالاست که قابلیت کاربرد در مناطق اقیانوسی عمیق و مناطق ساحلی کم عمق را دارد و دارای طرح‌واره‌های اختلاط قائم مختلف، شبکه‌های مرکب، آشیان‌های است. در مدل ROMS از شبکه‌بندی متعامد منحنی‌الخط در سطح افق و سیستم مختصات منطبق بر زمین (سیستم مختصات سیگما)، در جهت قائم استفاده می‌شود. تکنیک عددی حل بخش زمانی معادلات بر اساس روش تفکیک مد است که در آن معادلات مد خارجی بصورت صریح و معادلات مد درونی بصورت ضمنی حل

¹ Wave Guide

در تقریب بوسینسک از تغییرات چگالی در معادلات اندازه حرکت صرف نظر شده است.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (5)$$

معادله پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر عبارت است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

اثرات واداشت و اتلاف با F و D نشان داده شده است. متغیرها در جدول (۱) توضیح داده شده اند. معادلات با پارامتری کردن تنش‌های رینولدز و شارهای مسیر تلاطم بصورت زیر نشان داده می‌شوند.

$$\overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z} \quad (7)$$

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (8)$$

$$\overline{C'w'} = -K_C \frac{\partial C}{\partial z} \quad (9)$$

۲-۴- پایداری مدل

از عوامل موثر در مدل‌سازی ابعاد شبکه، دقت عمق سنجی، گام زمانی و شرط CFL (معیار پایداری)، نیروهای واداشت سطحی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، ضرایب ادی ویسکوزیته و ادی دیفیوزیویته (مربوط به دما و شوری) است.

جدول (۱) معرفی متغیرهای معادلات حرکت.

متغیر	شرح
D_u, D_v, D_C	اتلاف
F_u, F_v, F_C	ترم‌های واداشت
$f(x,y)$	پارامتر توربولی
g	شتاب گرانشی
$H(x,y)$	عمق بستر
V, V_θ	ویسکوزیته شماتیکی و پخش
K_M, K_C	ویسکوزیته پیچکی و پخش
P	فشار کل
$\phi(x,y,z,t)$	فشار دینامیکی
$\rho_0 + \rho(x,y,z,t)$	چگالی میانگین و افت و خیز
$S(x,y,z,t)$	شوری
t	زمان
$T(x,y,z,t)$	دمای پتانسیل
U, V, W	مؤلفه‌های (x,y,z) و بردار سرعت \bar{V}
x, y	مختصات افقی
ξ	مختصات قائم
$\xi(x,y,t)$	ارتفاع سطح آزاد

و حالت میرایی به امواج می‌دهد بنابراین در نزدیکی مرز باز از میزان خطا کاسته می‌شود. تمامی واداشت‌های اقیانوس در سطح رخ می‌دهند. واداشت‌ها شامل چگالی هوا، تبخیر-بارش، رطوبت نسبی، رطوبت سطحی، بارش دمای هوا در سطح آب، دمای سطحی، شوری سطحی، تنش باد در راستای افقی، تنش باد در راستای قائم، تابش طول موج کوتاه، تابش طول موج بلند و شار گرما هستند.

۲-۲- خصوصیات مدل

در تحقیق حاضر، از سیستم مختصات متعام منحنی‌الخط در جهت افقی و در راستای قائم از سیستم مختصات سیگما با ۱۶ لایه سیگما استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه خلیج فارس است که در بازه (۴۷/۵ تا ۵۷/۲۳) طول جغرافیایی و (۲۳/۵ تا ۳۱/۰۱) عرض جغرافیایی شبیه‌سازی شده است. داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی از منابع WRF 2009^۱ و Cars 2009^۲ می‌باشد.

داده‌های جزرومد از tpxo7 و توپوگرافی مدل با استفاده از داده‌های Gebco است. تفکیک‌پذیری حدود ۳ کیلومتر به شبکه مدل درون‌یابی شده است و گام زمانی ۶۰ ثانیه است. در مدل ROMS ضخامت لایه‌های سیگما با دو پارامتر Vstretching و Vtransform تعیین می‌شوند و دو پارامتر θ_s و θ_b پارامترهای کنترل کننده سطح و بستر می‌باشند. دامنه آن‌ها به ترتیب $0 < \theta_s \leq 20$ و $0 < \theta_b \leq 1$ است.

۲-۳- معادلات حرکت

معادلات اولیه در مختصات کارتزین به صورت زیر نشان داده شده است. معادلات اندازه حرکت در جهت های x و y عبارتند از:

(۲و۱)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v$$

$C(x, y, z, t)$ دما و شوری یا مواد مغذی با معادله فرا رفت-

پخش:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - \nu_C \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_C + D_C \quad (3)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (4)$$

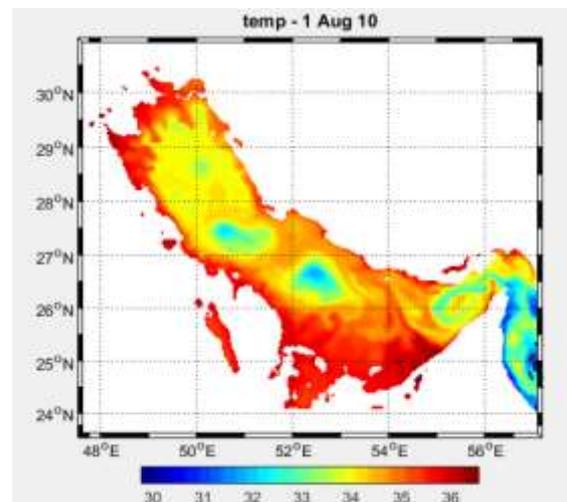
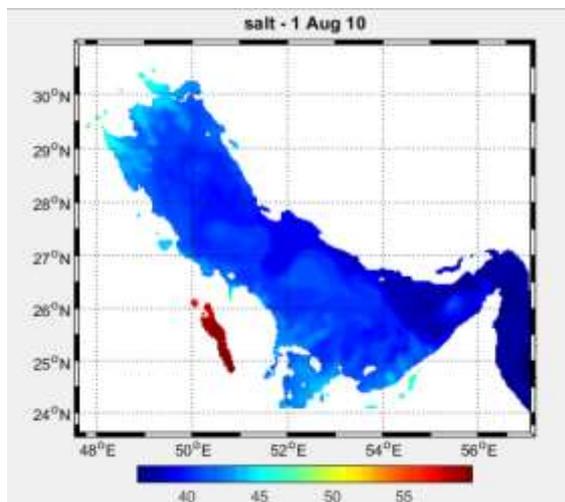
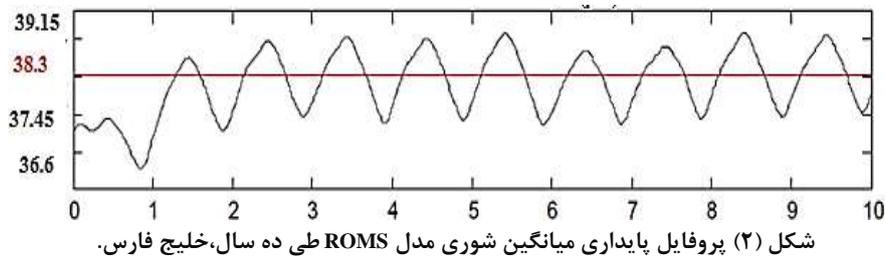
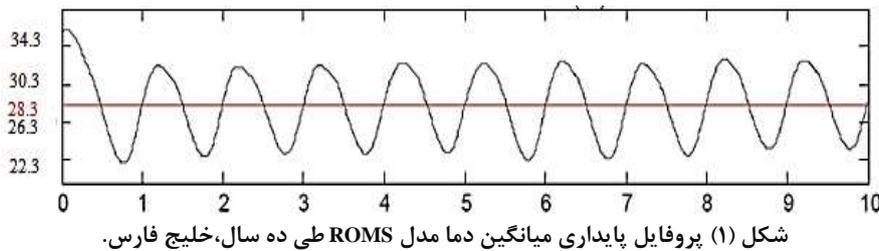
² Csiro Atlas of Regional Seas

¹ Weather Research and Forecasting Model

CFL=0.47 است. در حال حاضر تمام معادلات ۲ بعدی و ۳ بعدی با استفاده از الگوریتم گام زمانی پیش بینی دقیق مرتبه ۳ لپ فراگ و تصحیح کننده آدامز - مولتون استفاده می کند که بسیار قوی و پایدار است. همچنین از نظر زمانی این داده ها بصورت میانگین سالانه، فصلی و ماهانه موجود می باشند.

عمق اندازه گیری این داده ها در اعماق استاندارد اقیانوس شناسی تعریف شده است. برای اعمال شرایط اولیه داده های میانگین فصلی با دقت یک درجه برای منطقه مورد مطالعه استخراج و روی شبکه حل عددی درون یابی گردید. مدل برای ۱۰ سال اجرا شد تا به پایداری برسد و از آنجا که داده های ورودی بسیار مناسب بودند مدل در سال دهم به پایداری خوبی رسید.

انتخاب شرایط اولیه واقعی علاوه بر اینکه بر دقت نتایج می افزاید، سبب زودتر رسیدن مدل به حالت مانا می گردد در این تحقیق از داده های میانگین ماهانه (WRF 2009) با دقت مکانی یک درجه استفاده شده است. این داده ها شامل پارامترهای مختلف اقیانوسی از جمله دما، شوری، اکسیژن محلول، درصد اکسیژن اشباع، فسفات، سیلیکات، نترات و می باشد که با دقت مکانی یک درجه قابل دسترسی است. همچنین از نظر زمانی این داده ها بصورت میانگین سالانه، فصلی و ماهانه موجود می باشند. عمق اندازه گیری این داده ها در اعماق استاندارد اقیانوس شناسی تعریف شده است. برای اعمال شرایط اولیه داده های میانگین فصلی با دقت یک درجه برای منطقه مورد مطالعه استخراج و روی شبکه حل عددی درون یابی گردید. در این تحقیق مد باروکلینیک ۶۰۰ ثانیه و مدباروتروپیک ۶۰ ثانیه و شرط

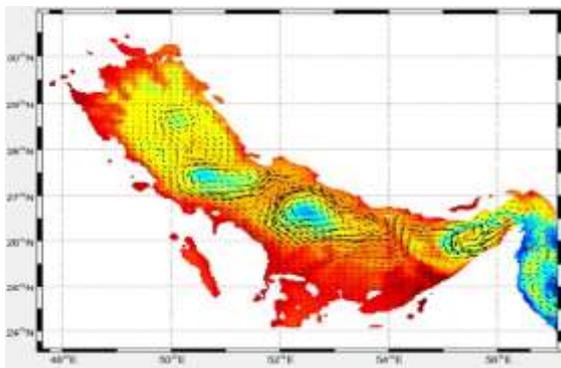


۳- نتایج

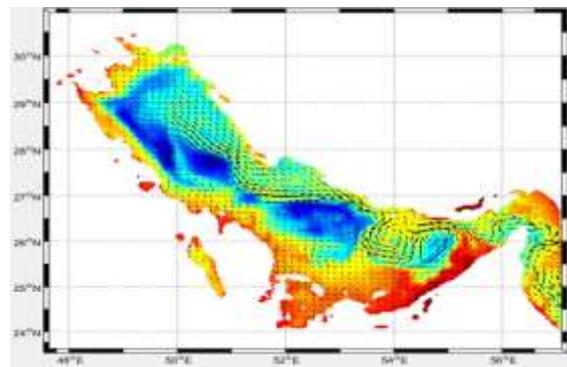
۳-۱- نحوه تشکیل پیچک‌ها در فصول مختلف سال

در شکل‌های (۵) تا (۱۰) خروجی دما مدل ROMS از خلیج فارس در ۶ ماه از فصول مختلف سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی شده است. با توجه به خطوط جریان، نحوه شکل‌گیری پیچک‌ها در ماه‌های مختلف سال را می‌بینیم. گردش‌های پادساعتگرد (cyclonic) در مرکز خلیج فارس از April تا July قویتر می‌شوند و همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود در ماه August بیشترین وضوح را در شکل‌گیری پیچک‌های میان مقیاس (Mesoscale Eddy) مشاهده می‌شود.

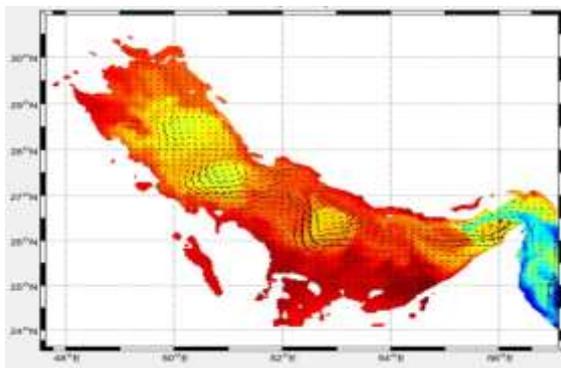
ساختار غالب چرخش در تنگه هرمز ایجاد یک چرخش سیکلونی در ماه آوریل میلادی است که تا اکتبر باقی می‌ماند. تبادل از طریق تنگه هرمز شامل یک جریان بسیار متغیر در عمق‌های بالای ۵۰ متر و یک جریان خروجی زیر عمق ۵۰ متر است. جریان لایه سطحی تغییرات زمانی زیاد در لایه سطحی و در مقیاس سینوپتیکی (مقیاس بین چندین روز تا چند هفته) نشان می‌دهد و باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در شوری جریان خروجی می‌شود. این‌ها باعث شکل‌گیری پالس‌های بسیار قوی شوری می‌شود که با یک افزایش سریع در شوری با کاهشی تند همراه است.



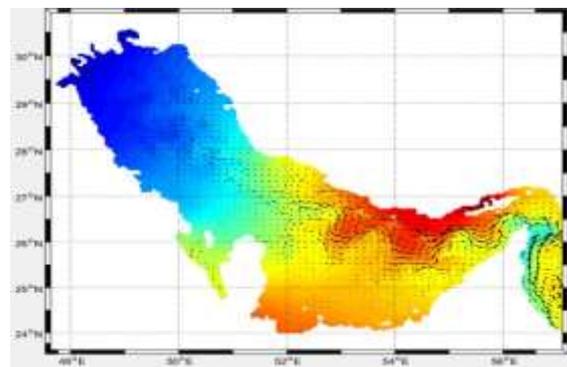
شکل (۸) ماه آگوست.



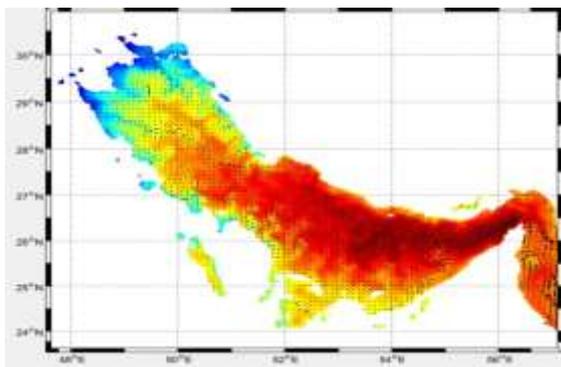
شکل (۵) ماه ژانویه.



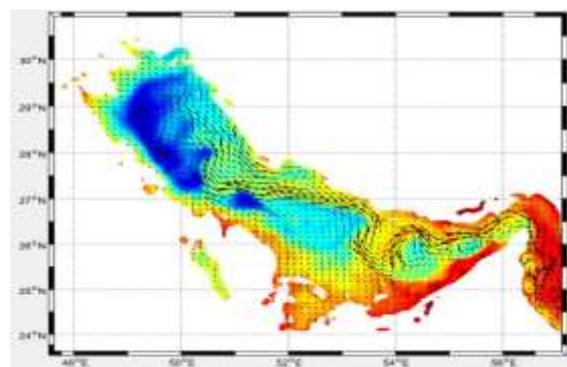
شکل (۹) ماه سپتامبر.



شکل (۶) ماه مارس.



شکل (۱۰) ماه دسامبر.



شکل (۷) ماه می.

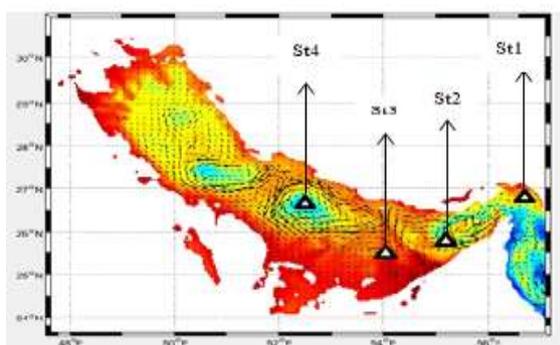
چشم می‌آیند. در این دوره است که جریان ورودی با شوری کم قوی‌تر شده و باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در چینه‌بندی و تقویت گردان‌های شوری در عرض تنگه می‌شوند.

۲-۳ مشخصات موقعیت و مقادیر ایستگاه‌های اندازه‌گیری (آگوست ۲۰۰۹)

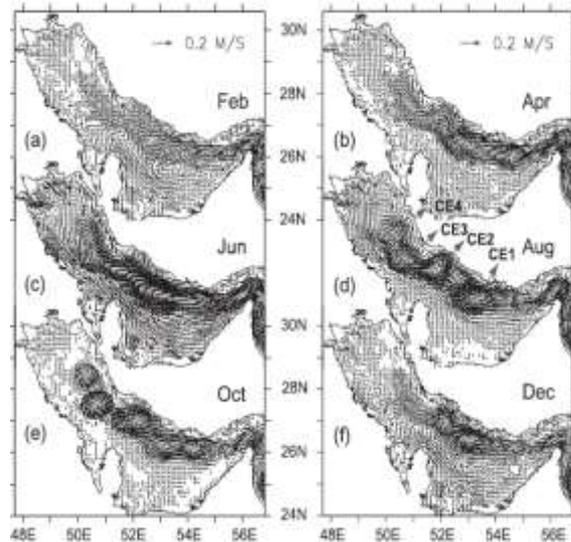
در تحقیق حاضر برای نشان دادن بهتر اثر تشکیل پیچک‌ها بر روی پارامترهای فیزیکی آب دریا (شوری، دما و خصوصاً سرعت صوت)، چهار ایستگاه اندازه‌گیری بر روی خروجی مدل ROMS در نرم افزار متلب در ماه آگوست که پیش از این اشاره شده است که بهترین وضوح را دارد، در نظر گرفته شده است. شکل (۱۳) موقعیت ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

ایستگاه اول در مسیر جریان ورودی از دریای عمان، در تنگه هرمز قرار داده شده است. ایستگاه دوم در مجاورت پیچک‌های نزدیک به تنگه هرمز است. ایستگاه سوم با موقعیت جغرافیایی ذکر شده در جدول (۴) در جایی است که تقریباً پیچک‌ها حضور ندارند و در مقابل آن ایستگاه چهارم در مرکز هسته پیچک است که بتوان مقایسه دقیقی از رفتار دما و شوری و سرعت صوت در زمان حضور و عدم حضور پیچک‌ها صورت پذیرد. سطح دریا یک مرز افقی ساده و تقریباً یک منعکس‌کننده کامل است. از طرف دیگر بستر یا کف دریا یک مرز اتلاف‌کننده انرژی با تغییرات توپوگرافی شدید است. هر دو مرز کانال صوتی دریا (سطح و کف) دارای ناهمواری در مقیاس

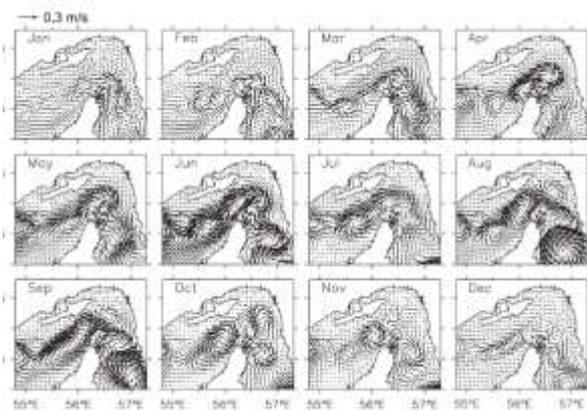
کوچک هستند که باعث پراکندگی و تضعیف امواج صوتی می‌شوند. اگر سطح دریا کاملاً صاف و آرام باشد آنگاه تقریباً یک منعکس‌کننده خوب صدا خواهد بود [۱].



شکل (۱۳) موقعیت ایستگاه‌های ۱ تا ۴، ماه آگوست در خلیج فارس.



شکل (۱۱) شبیه‌سازی میانگین ماهانه جریان در خلیج فارس و نحوه تشکیل پیچک‌ها از فوریه تا دسامبر [۱۰].



شکل (۱۲) میانگین ماهانه شبیه‌سازی جریان در تنگه هرمز [۱۲].

دوره این تغییرات حدود ۱۵ تا ۳۰ روز است و دامنه آن‌ها طی زمستان و بهار به بیش از ۲^۱ psu می‌رسد. تغییرات زمانی و مکانی الگوها با رویدادهای با شوری زیاد به وضوح نشان می‌دهد که در فازهای مختلفی از عبور پیچک‌های میان مقیاس سیکلونی جمع‌آوری شده‌اند. این پیچک‌های سیکلونی از جریان‌های خروجی ناشی می‌شوند و منطقه شکل‌گیری آن‌ها تا بالای تنگه هرمز ردیابی می‌شود. شکل (۱۲) میانگین ماهانه جریان در عمق بالای ۴۰ متر (میانگین‌گیری شده برای عمق بالاتر از ۴۰ متر) در تنگه هرمز را توسط توپیل و همکاران نشان می‌دهد. با وجود این که تولید و انتشار پیچک‌های میان مقیاس در طول سال دیده می‌شوند، در ماه‌های بهار و تابستان بیشتر به

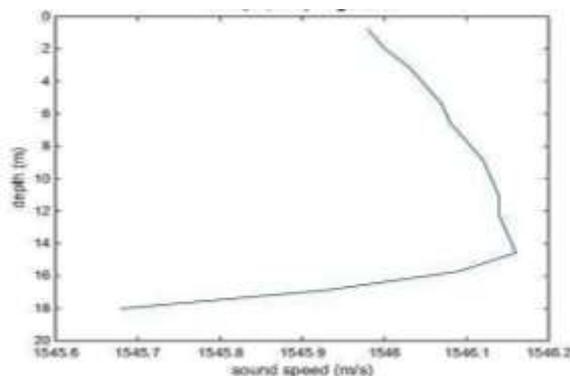
¹ Practical Salinity Unit

جدول (۳) داده های ایستگاه شماره ۲.
ST2- (55,3 ° -26 °) Agu 2009

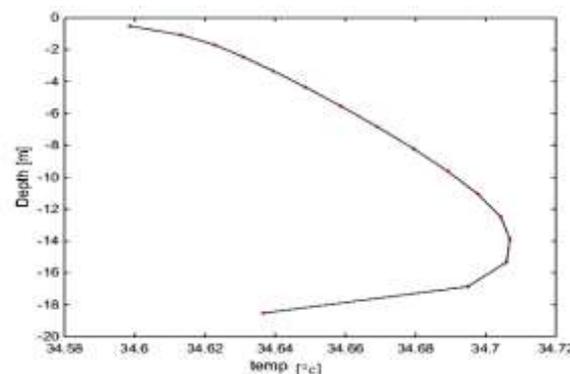
تراز سیگما	دما (°c)	شوری (psu)	عمق (m)	سرعت صوت (m/s)
δ ₁	۲۵/۳۰	۴۲/۰۴	۷۷/۳۲	۱۵۴۰/۰۴
δ ₂	۲۵/۳۰	۴۲/۰۴	۷۲/۳۷	۱۵۳۹/۹۶
δ ₃	۲۵/۳۰	۴۲/۰۴	۶۷/۴۱	۱۵۳۹/۸۷
δ ₄	۲۵/۹۸	۴۱/۷۹	۶۲/۴۶	۱۵۴۰/۷۴
δ ₅	۲۸/۰۳	۴۱/۱۲	۵۷/۵۰	۱۵۴۳/۳۶
δ ₆	۲۹/۵۷	۴۰/۷۱	۵۲/۵۵	۱۵۴۵/۱۲
δ ₇	۳۰/۳۹	۴۰/۵۲	۴۷/۵۹	۱۵۴۵/۹۶
δ ₈	۳۰/۹۹	۴۰/۴۶	۴۲/۶۳	۱۵۴۶/۵۸
δ ₉	۳۱/۵۵	۴۰/۴۸	۳۷/۶۸	۱۵۴۷/۱۳
δ ₁₀	۳۲/۲۳	۴۰/۳۰	۳۲/۷۲	۱۵۴۷/۷۳
δ ₁₁	۳۲/۹۶	۴۰/۲۰	۲۷/۷۷	۱۵۴۸/۳۳
δ ₁₂	۳۳/۸۳	۴۰/۱۴	۲۲/۸۱	۱۵۴۹/۰۶
δ ₁₃	۳۴/۲۹	۴۰/۱۱	۱۷/۸۶	۱۵۴۹/۳۷
δ ₁₄	۳۴/۳۵	۴۰	۱۲/۹۸	۱۵۴۹/۲۴
δ ₁₅	۳۴/۳۵	۳۹/۹۸	۷/۹۵	۱۵۴۹/۱۳
δ ₁₆	۳۴/۳۳	۳۹/۹۸	۲/۹۹	۱۵۴۹/۰۳

جدول (۲) داده های ایستگاه شماره ۱.
ST1-(57 °,26.8 °) Aug 2009

تراز سیگما	دما (°c)	شوری (psu)	عمق (m)	سرعت صوت (m/s)
δ ₁	۳۳/۴۲	۳۷/۲۳	۱۸/۰۲	۱۵۴۵/۶۸
δ ₂	۳۳/۶۹	۳۷/۲۳	۱۶/۸۸	۱۵۴۵/۹۳
δ ₃	۳۳/۸۷	۳۷/۲۴	۱۵/۷۳	۱۵۴۶/۰۹
δ ₄	۳۳/۹۶	۳۷/۲۴	۱۴/۵۸	۱۵۴۶/۱۶
δ ₅	۳۳/۹۷	۳۷/۲۴	۱۳/۴۴	۱۵۴۶/۱۵
δ ₆	۳۳/۹۸	۳۷/۲۴	۱۲/۲۹	۱۵۴۶/۱۴
δ ₇	۳۴	۳۷/۲۴	۱۱/۱۴	۱۵۴۶/۱۴
δ ₈	۳۴/۰۱	۳۷/۲۴	۱۰	۱۵۴۶/۱۳
δ ₉	۳۴/۰۱	۳۷/۲۴	۸/۸۵	۱۵۴۶/۱۲
δ ₁₀	۳۴/۰۲	۳۷/۲۴	۷/۷	۱۵۴۶/۱۰
δ ₁₁	۳۴/۰۲	۳۷/۲۴	۶/۵۶	۱۵۴۶/۰۸
δ ₁₂	۳۴/۰۲	۳۷/۲۴	۵/۴۱	۱۵۴۶/۰۷
δ ₁₃	۳۴/۰۲	۳۷/۲۴	۴/۲۶	۱۵۴۶/۰۵
δ ₁₄	۳۴/۰۱	۳۷/۲۴	۳/۱۲	۱۵۴۶/۰۳
δ ₁₅	۳۴/۰۱	۳۷/۲۴	۱/۹۷	۱۵۴۶
δ ₁₆	۳۴	۳۷/۲۴	۰/۸	۱۵۴۵/۹۸



شکل (۱۴) پروفایل عمق_ سرعت صوت، ایستگاه اول.



شکل (۱۵) پروفایل عمق_ دما، ایستگاه اول.

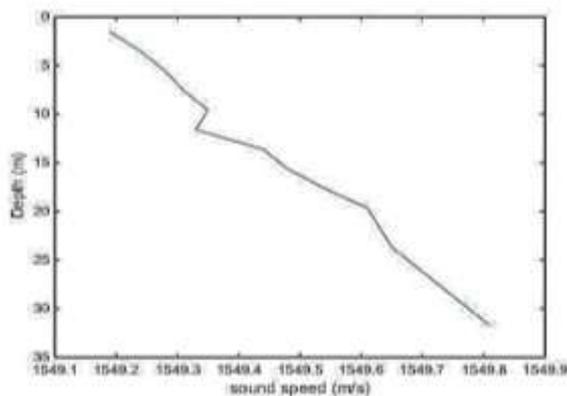
علت آن تغییرات زیاد امپدانس صوتی بین هوا و آب است. با غیر یکنواخت شدن سطح دریا، در اثر باد و تلاطم ایجاد شده که باعث شکل گیری پیچکها می شود، دیگر تلفات انعکاس نزدیک صفر نخواهد بود و باعث تضعیف و پراکنش امواج صوتی می شود [۱۱]. ایستگاه شماره ۱ با قرار گرفتن در مسیر جریان ورودی آب از دریای عمان به تنگه هرمز، دارای میانگین شوری ۳۷/۲۳ psu و دمای حدود ۳۴ درجه سانتی گراد است. از مقادیر جدول نتیجه می شود که با توجه به موقعیت ایستگاه فوق دما و شوری و به دنبال آن سرعت صوت رفتار یکنواختی را در ۱۶ لایه تراز سیگما (از سطح تا عمق) از خود نشان داده اند. شکل های (۱۴) و (۱۵) پروفایل های سرعت صوت و دما را نسبت به عمق با توجه به مقادیر جدول (۲) نشان می دهند. ایستگاه شماره ۲ در موقعیت خارج از هسته پیچک تقریباً در حاشیه اطراف شکل گیری و در مسیر جریان خروجی از خلیج فارس به سمت دریای عمان قرار داده شده است. به همین دلیل تفاوت شوری آن در مقایسه با ایستگاه شماره ۱ حدود ۵ psu است. در این ایستگاه به علت وجود پیچک تغییرات قابل توجه سرعت صوت مشاهده می شود که حدود ۹ واحد از سطح تا عمق کاهش داریم.

همچنین با توجه به اینکه موقعیت این ایستگاه در مسیر جریان خروجی به دریای عمان که است، شوری آن در مقایسه با ایستگاه اول بیش از ۲ psu می‌باشد. بنابراین همان طور که پیش از این اشاره شد جریان خروجی با شوری بیشتر از تنگه هرمز خارج می‌شود که نشان دهنده صحت خروجی مدل ROMS است. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) پروفایل‌های سرعت صوت و دما را نسبت به عمق با توجه به مقادیر جدول (۴) نشان می‌دهند. موقعیت ایستگاه چهارم دقیقاً در مرکز هسته پیچک واقع شده است.

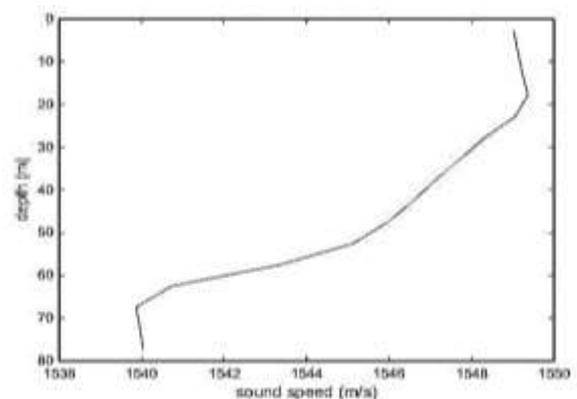
همان‌طور که از داده‌های جدول مشاهده می‌شود هر چقدر از لایه سطحی به سمت عمق می‌رویم با کاهش دما و به دنبال آن با کاهش بیش از ۱۰ واحدی سرعت صوت مواجه می‌شویم که نشان دهنده تأثیر حضور ادی‌ها بر امواج صوتی است. همان‌طور که با رنگ قرمز در جدول مشاهده می‌شود بیشترین سرعت صوت در این ایستگاه در عمق حدود ۱۲ متر مشاهده می‌شود که با افزایش عمق مشاهده می‌شود که کاهش شدید داریم که به ۱۵۳۸ m/s می‌رسد. دما در سطح پیچک ۳۳/۹۱ درجه است.

همین‌طور دما نیز حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش عمق کاهش داشته است که خود بیانگر این می‌باشد که پیچک با هسته گرم سیکلونی تأثیر خود را بر دما و به دنبال آن بر روی سرعت صوت گذاشته است و امواج صوتی در این منطقه با کاهش و اتلاف انتشار روبرو می‌شوند و می‌توان نتیجه گرفت عملکرد سامانه‌های آکوستیکی زیر آب در این منطقه دچار اختلال می‌شود.

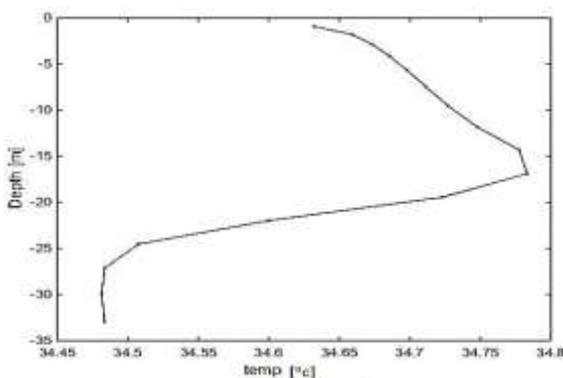
شکل‌های (۱۶) و (۱۷) پروفایل‌های سرعت صوت و دما را نسبت به عمق با توجه به مقادیر جدول (۴) نشان می‌دهند و نشان دهنده رابطه مستقیم بین این دو کمیت با هم است. ایستگاه شماره ۳ با قرار گرفتن در موقعیتی که اثری از شکل‌گیری پیچک‌ها نمی‌باشد به‌طور هدفمند انتخاب شده است تا بتوان مقایسه دقیقی از تأثیر حضور با عدم حضور پیچک‌ها انجام داد. این ایستگاه دارای میانگین شوری حدود ۳۹/۹۴ psu و دمای حدود ۳۴/۶ درجه سانتی‌گراد است. از مقادیر جدول نتیجه می‌شود که با توجه به موقعیت ایستگاه فوق دما و شوری و به دنبال آن سرعت صوت رفتار یکنواختی را در ۱۶ لایه تراز سیگما (از سطح تا عمق) از خود نشان داده‌اند.



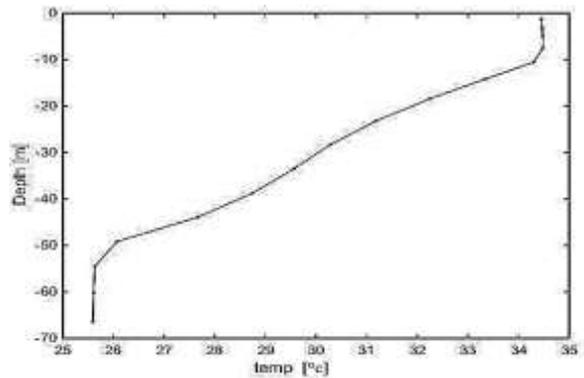
شکل (۱۸) پروفایل (عمق - سرعت صوت)، ایستگاه سوم.



شکل (۱۶) پروفایل (عمق - سرعت صوت)، ایستگاه دوم.



شکل (۱۹) پروفایل (عمق - دما)، ایستگاه سوم.



شکل (۱۷) پروفایل (عمق - دما)، ایستگاه دوم.

جدول شماره (۵) داده های ایستگاه چهارم.

ST 4 - (52.5-26.5) Aug 2009

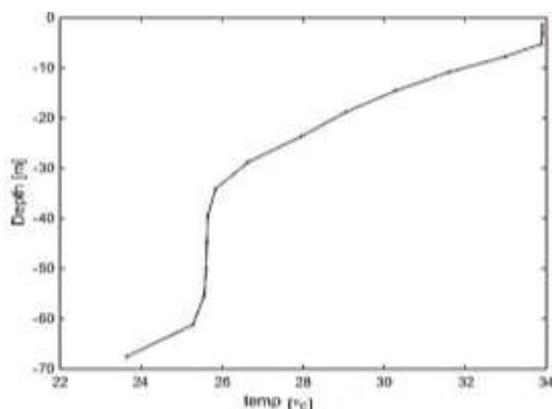
تراز سیگما	دما (°C)	شوری (psu)	عمق (m)	سرعت صوت (m/s)
δ ₁	۲۴/۶۲	۴۲/۳۵	۶۹/۷۹	۱۵۳۸/۹۸
δ ₂	۲۵/۵۳	۴۲/۲۳	۶۵/۳۳	۱۵۴۰/۴۷
δ ₃	۲۵/۷۳	۴۲/۲۰	۶۰/۸۷	۱۵۴۰/۷۲
δ ₄	۲۵/۷۵	۴۲/۱۸	۵۶/۴۱	۱۵۴۰/۶۷
δ ₅	۲۵/۷۸	۴۲/۱۶	۵۱/۹۵	۱۵۴۰/۶۳
δ ₆	۲۵/۸۵	۴۲/۱۲	۴۷/۴۹	۱۵۴۰/۶۴
δ ₇	۲۶/۱۳	۴۱/۹۸	۴۳/۰۳	۱۵۴۰/۹۰
δ ₈	۲۷/۰۵	۴۱/۷۴	۳۸/۵۷	۱۵۴۲/۱۳
δ ₉	۲۸/۳۴	۴۱/۵۱	۳۴/۱۱	۱۵۴۳/۸۷
δ ₁₀	۲۹/۳۵	۴۱/۲۶	۲۹/۶۵	۱۵۴۵/۰۱
δ ₁₁	۳۰/۵۰	۴۱/۰۴	۲۵/۲۰	۱۵۴۶/۲۶
δ ₁₂	۳۱/۷۹	۴۱/۰۴	۲۰/۷۴	۱۵۴۷/۷۸
δ ₁₃	۳۲/۹۶	۴۱/۰۹	۱۶/۲۸	۱۵۴۹/۴۰
δ ₁₄	۳۳/۹۲	۴۱/۲۱	۱۱/۸۲	۱۵۵۰/۰۲
δ ₁₅	۳۳/۹۳	۴۱/۲۲	۷/۳۶	۱۵۴۹/۹۶
δ ₁₆	۳۳/۹۱	۴۱/۲۳	۲/۹۰	۱۵۴۹/۸۹

جدول (۴) داده های ایستگاه شماره ۳.

ST3 - (54 ° - 25,5 °) Aug 2009

تراز سیگما	دما (°C)	شوری (psu)	عمق (m)	سرعت صوت (m/s)
δ ₁	۳۴/۵۶	۴۰/۰۸	۳۱/۷۴	۱۵۴۹/۸۱
δ ₂	۳۴/۵۶	۴۰/۰۸	۲۹/۷۲	۱۵۴۹/۷۷
δ ₃	۳۴/۵۵	۴۰/۰۸	۲۷/۷۱	۱۵۴۹/۷۳
δ ₄	۳۴/۵۴	۴۰/۰۸	۲۵/۶۹	۱۵۴۹/۶۹
δ ₅	۳۴/۵۵	۴۰/۰۷	۲۳/۶۸	۱۵۴۹/۶۵
δ ₆	۳۴/۶۳	۴۰/۰۲	۲۱/۶۷	۱۵۴۹/۶۳
δ ₇	۳۴/۷۵	۳۹/۹۲	۱۹/۶۵	۱۵۴۹/۶۱
δ ₈	۳۴/۷۹	۳۹/۸۵	۱۷/۶۴	۱۵۴۹/۵۴
δ ₉	۳۴/۷۸	۳۹/۸۲	۱۵/۶۲	۱۵۴۹/۴۸
δ ₁₀	۳۴/۷۷	۳۹/۸۲	۱۳/۶۱	۱۵۴۹/۴۴
δ ₁₁	۳۴/۷۶	۳۹/۸۳	۱۱/۶	۱۵۴۹/۳۹
δ ₁₂	۳۴/۷۵	۳۹/۸۳	۹/۵۸	۱۵۴۹/۳۵
δ ₁₃	۳۴/۷۳	۳۹/۸۳	۷/۵۷	۱۵۴۹/۳۱
δ ₁₄	۳۴/۷۲	۳۹/۸۳	۵/۵۵	۱۵۴۹/۲۸
δ ₁₅	۳۴/۷۱	۳۹/۸۴	۳/۵۴	۱۵۴۹/۲۴
δ ₁₆	۳۴/۶۹	۳۹/۸۴	۱/۵۳	۱۵۴۹/۱۹

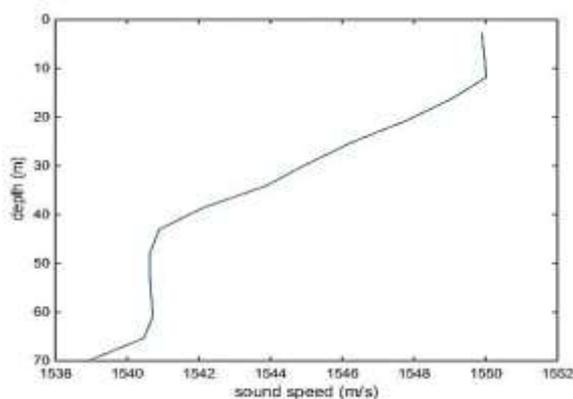
که با مقایسه و تحلیل پروفایل های رسم شده از خروجی مقادیر، اثر جریان های تالطمی ایجاد شده توسط پیچک ها را بر پارامترهای فیزیکی آب دریا در ۱۶ لایه تراز سیگما شبیه سازی و بررسی شده است. شکل (۲۲) مقایسه ای بین نحوه تغییر رفتار پروفایل سرعت صوت در مرکز پیچک به سمت خارج از پیچک را نشان می دهد. با توجه به شکست های پروفایل ها و گرادیان سرعت صوت هر چقدر به سمت خارج از منطقه حضور پیچک می رویم تغییرات عددی به همراه خمش های منحنی ها به خوبی مشهود است.



شکل (۲۱) پروفایل (عمق - دما)، ایستگاه چهارم.

از طرفی هرچه عمق زیاد می شود دما روند کاهشی دارد متوجه می شویم که پیچک با هسته گرم می باشد. پروفایل های دما و سرعت صوت شکل های (۲۰) و (۲۱) نیز به طور دقیق رابطه مستقیم بین دما و سرعت صوت را نشان می دهد و به خوبی تأثیر حضور پیچک در مقایسه با شکل های (۱۸) و (۱۹) مشاهده می شود.

در جداول (۲) تا (۵) گزارش دقیقی از مقادیر عمق، دما، شوری و سرعت صوت، در موقعیت های جغرافیایی چهار ایستگاه در خلیج فارس نشان داده شده است.

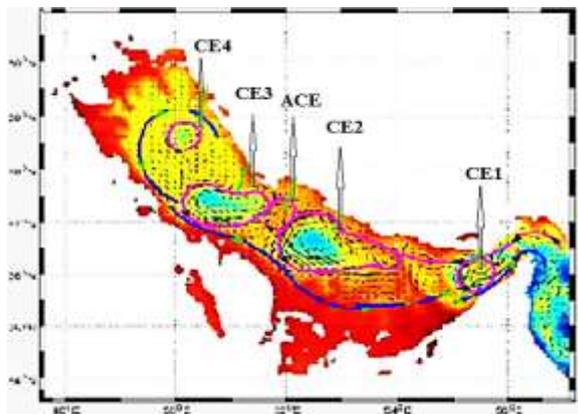


شکل (۲۰) پروفایل (عمق - سرعت صوت)، ایستگاه چهارم.

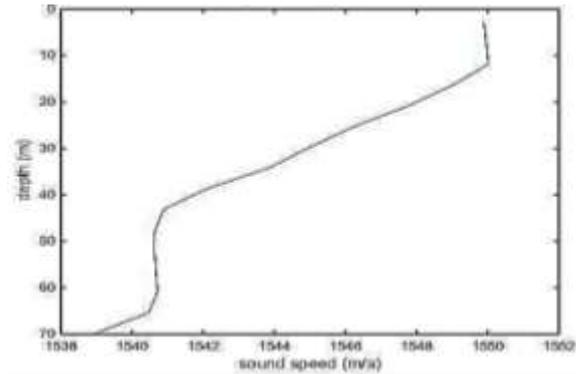
۳-۳- شبیه‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی از تنگه هرمز

در شکل (۲۳) پیکان‌هایی که با رنگ صورتی نشان داده شده جریان ورودی از دریای عمان که با شوری کم است را نشان می‌دهد که در طول مسیر به سمت داخل خلیج فارس باعث شکل‌گیری پیچک‌ها می‌شود. با توجه به شکل (۲۳) پیچک‌های CE_1 تا CE_4 سیکلونی می‌باشند و پیچک AC آنتی سیکلونی است که در واقع بین پیچک‌های CE_2 و CE_3 فشرده شده است. پیکان‌های با رنگ آبی نشان دهنده جریان خروجی که دارای شوری زیاد است از خلیج فارس به دریای عمان است. شکل (۲۳) که خروجی شبیه‌سازی شده از مدل ROMS است را در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) با تحقیق توپیل که توسط مدل $HYCOM^1$ شبیه‌سازی شده است، صحت سنجی می‌کنیم. با مقایسه خروجی‌ها مشاهده می‌شود که سازگاری مناسبی هم در زمان شکل‌گیری پیچک‌ها و هم در موقعیت استقرار آن‌ها وجود دارد.

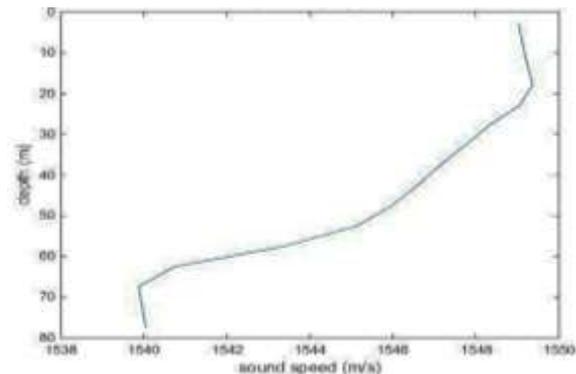
در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) پیکان‌هایی که با رنگ‌های سرد نشان داده شده (آبی تا آبی روشن) نشان‌دهنده جریان ورودی با شوری کم از خلیج عمان در امتداد قسمت شمالی تنگه هستند و پیکان‌هایی که با رنگ‌های گرم مشخص شده‌اند (قرمز تا قرمز روشن) جریان خروجی با شوری زیاد مربوط به آب‌های خلیج فارس را نشان می‌دهند. در بالای تنگه هرمز بخشی از جریان ورودی به طرف دریا تغییر جهت می‌دهد که در اینجا جریان توسط تپه دریایی و کانال باریکی احاطه شده است.



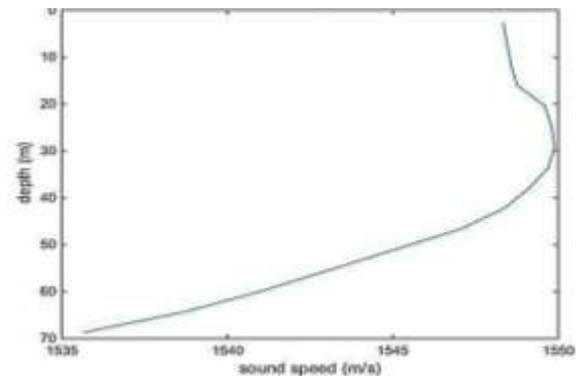
شکل (۲۳) شماتیکی از گردش تبادلی و جریان ورودی و خروجی از تنگه هرمز.



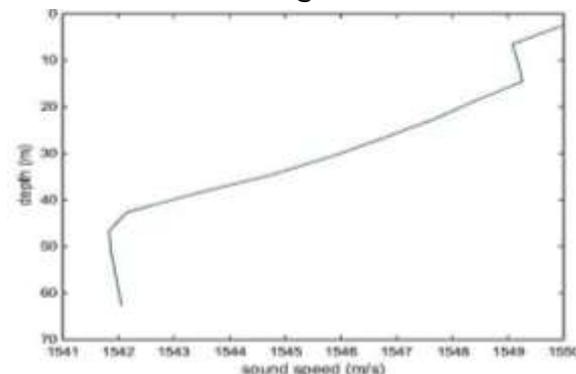
(الف)



(ب)



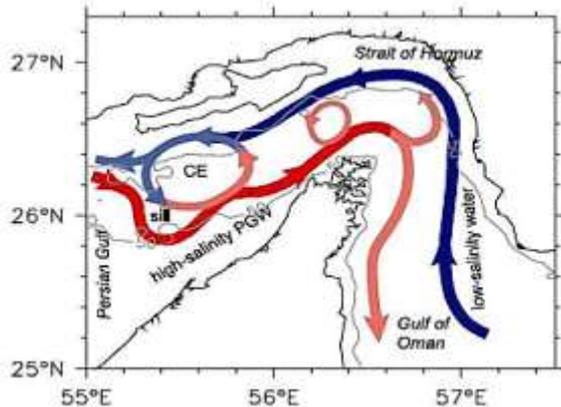
(ج)



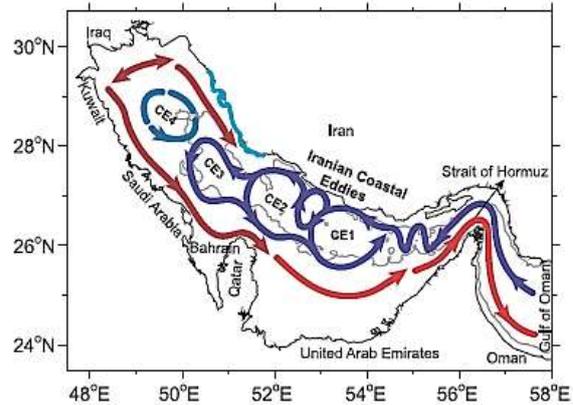
(د)

شکل (۲۲) شماتیک تغییر پروفایل‌های سرعت صوت از سمت محدوده حضور پیچک (الف) به سمت خارج از محدوده حضور.

¹ Hybrid Coordinate Ocean Model



شکل (۲۵) شماتیکی از چرخش تبادلی در تنگه هرمز [۱۲].



شکل (۲۴) شماتیکی از گردش و تولید پیچک‌ها در خلیج فارس [۱۰].

الگوهای شوری نشان می دهند که در زمستان منشأ اصلی جریان خروجی عمدتاً در مجاورت سواحل جنوبی است که احتمالاً بدلیل افزایش تبخیر سطحی در این زمان و در نتیجه شکل گیری توده آب با شوری بیش از ۴۰ psu است. در تابستان شورترین آب‌ها در اعماق بیش از ۴۰ متر در قسمت مرکزی مقطع دیده می شوند. بنابراین می توان نتیجه گرفت منشأ اصلی جریان خروجی در خلیج فارس عمدتاً به دو شاخه تقسیم می شود. یک شاخه که در امتداد محور اصلی خلیج جریان می یابد و مکان شکل گیری آن در قسمت‌های داخلی تر خلیج فارس است.

شاخه دیگر که به طور فصلی با افزایش تبخیر در مجاورت سواحل کشورهای جنوبی خلیج شکل گرفته و بدلیل داشتن چگالی بیشتر نسبت به آب‌های پیرامون خود به سمت مناطق عمیقتر شروع به حرکت می کند. در نزدیکی تنگه هرمز این دو شاخه جریان به هم می پیوندند و شاخه اصلی جریان برون ریز خلیج فارس را تشکیل می دهند.

۳-۴-۱- صحت سنجی با تصویر ماهواره MODIS

۳-۴-۱-۱- مقایسه پیچک‌های میان مقیاس در خلیج فارس به کمک تصویر ماهواره‌های MODIS

در بررسی الگوهای جریان و گردش آب در خلیج فارس و تنگه هرمز نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ROMS با تصویر ماهواره مودیس ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ مقایسه شده است. توپیل و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه مدلسازی گردش و پیچک‌ها با استفاده از مدل عددی HYCOM در خلیج فارس نشان دادند که در طی ماه‌های مارس تا جولای یک گردش چرخنده در نیمه شرقی آن بین ۵۲-۵۵ درجه شرقی غالب است.

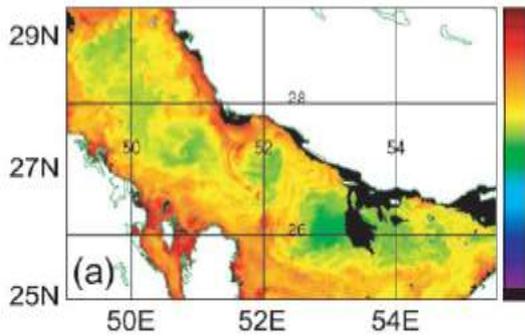
این جریان رو به دریا موقعیت اولیه تولید و انتشار پیچک‌های سیکلونی است. متغیر بودن چرخش تبادلی به دلیل نوسان نیروی تنش باد است که باعث ایجاد پیچک‌های سیکلونی می‌گردد. در مطابقت با چنین تغییر شدیدی در چرخش جبهه شوری تندی جریان خروجی با شوری بالا را از جریان ورودی با شوری پائین جدا می‌کند. بعد از شکل‌گیری پیچک‌های سیکلونی در مجاورت تنگه هرمز به سمت پائین در آب‌های خلیج فارس حرکت می‌کنند. همچنان که این پیچک‌ها به طرف پائین حرکت می‌کنند در اثر اختلاط در طول مسیر تضعیف می‌شوند [۱۲].

۳-۴-۲ حساسیت سنجی شبکه عمق سنجی

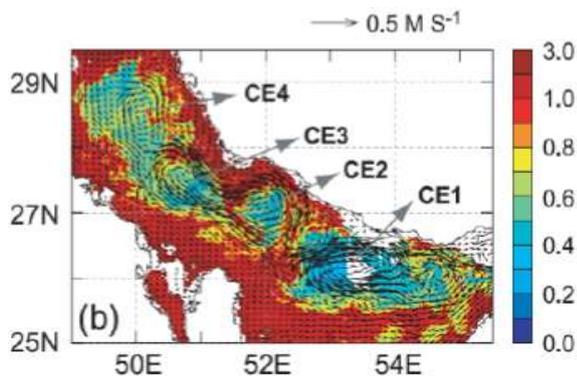
دقت نتایج مدل به طور مستقیم به دقت شبکه‌های محاسباتی و ورودیهایی همچون عمق سنجی منطقه مطالعاتی بستگی دارد. در این تحقیق از بین مراجع موجود، از اطلاعات عمق نگاری با دقت ۲ دقیقه تهیه شده است. سپس هموارسازی اطلاعات بستر به منظور هموارکردن شیب سلول‌های مجاور صورت گرفته است تا مدل دچار شکست Blow up نشود. مقدار کم‌بیشم مقدار برای هموارسازی توپوگرافی $r = \text{grad}(h)/h$ برابر ۳/۲۹ است. در مرحله بعد فایل خط ساحلی برای تفکیک بخش دریا از خشکی ساخته شده است.

شکل‌های (۲۶) تا (۲۹) برش‌های مقطعی دما، شوری را در مسیر درون خلیج فارس برای زمستان و تابستان نشان می‌دهد میانگین دما در زمستان حدود ۲۲ درجه و در تابستان حدود ۳۴ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. میانگین شوری در زمستان حدود ۳۴ psu و در تابستان ۴۰ psu است.

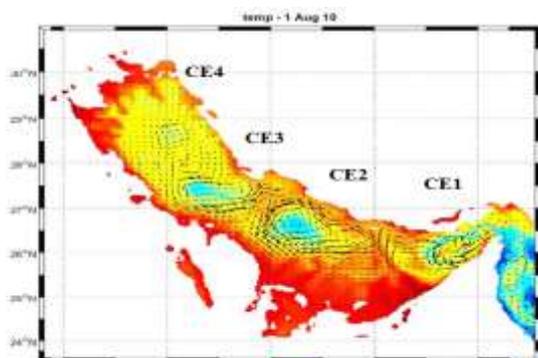
این موضوع نتیجه ورودی و خروجی آب از تنگه هرمز و ناشی از تغییرات چگالی و چینه بندی قوی می باشد [۱۳]. بین ماه های جولای تا آگوست جریان سواحل ایران به دلیل فرآیند ناپایداری باروکلینیکی حاصل از آزاد شدن انرژی پتانسیل ذخیره شده در گرادیان چگالی عمود بر ساحل ناپایدار می شود.



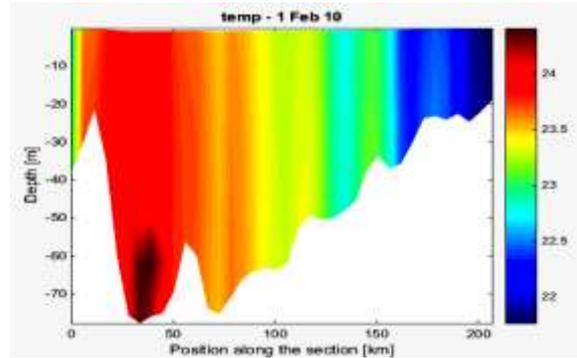
شکل (۳۰) تصویر حاصل از سنجنده مودیس (۱ کیلومتر) از تمرکز کلروفیل سطحی (میلی گرم بر متر مکعب)



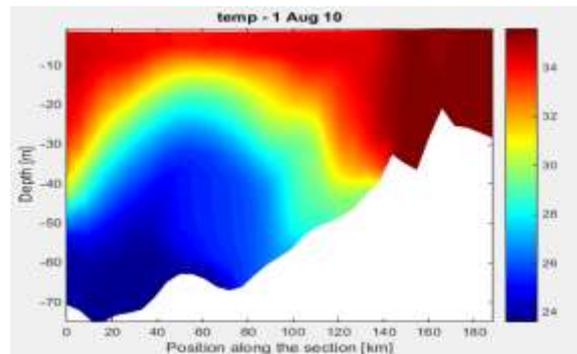
شکل (۳۱) جریان حاصل از مدل در سپتامبر ۲۰۰۳ که موقعیت جدا شدن جریان ICC از ساحل را بر روی تصویر ماهواره از کلروفیل سطحی قرار داده شده است [10].



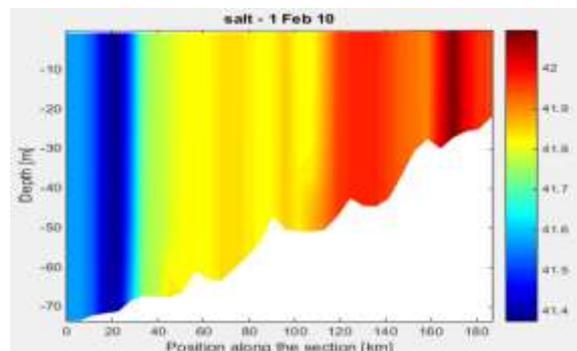
شکل (۳۲) الگوی افقی دما سرعت و جهت جریان در ماه سپتامبر حاصل از مدلسازی ROMS.



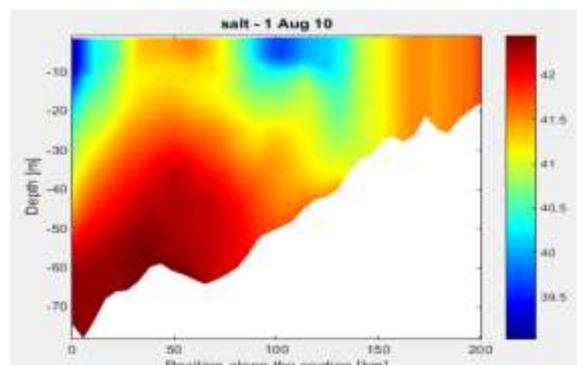
شکل (۳۶) برش مقطع عمودی دما در ماه فوریه در مرکز خلیج فارس.



شکل (۳۷) برش مقطع عمودی دما در ماه آگوست در مرکز خلیج فارس.



شکل (۳۸) برش مقطع عمودی شوری در ماه فوریه در مرکز خلیج فارس.



شکل (۳۹) برش مقطع عمودی شوری در ماه آگوست در مرکز خلیج فارس.

پایین و برخورد با کف و تکرار این روند برای تمامی پرتوهای صوتی وجود دارد و همین امر باعث اختلال در عملکرد سیستم‌های آکوستیکی در این زمان وجود دارد. پس در نتیجه شرایط انتشار پرتوهای صوتی در زمستان که اثری از حضور پیچک‌ها ناست، بهتر است و به این معنی است که موج صوتی مسافت طولانی‌تری را می‌تواند طی کند. به طور کلی پیچک‌ها باعث انحراف و تضعیف انرژی امواج صوتی می‌شوند و میزان اتلاف انتقال را افزایش می‌دهند. پس حضور آنها بر روی عملکرد سامانه‌های صوتی و پاسخ فرکانسی تاثیر منفی دارد.

جهت تکمیل تحقیقات فوق در آینده، پیشنهاد می‌شود که یک مدل صوتی برای اندازه‌گیری دقیق میزان اتلاف انتقال^۴ TL به کار رود و محیط دریا توسط مدل‌سازی صوت زیر آب به‌عنوان نمونه توسط معادلات سهموی شبیه‌سازی شود و به‌طور جامع و دقیقتر به نحوه انتشار امواج صوت در زیر آب پرداخته شود.

۵- منابع

- [1] Pierre L'Hégaret. "Mesoscale Eddies and Submesoscale Structures of Persian Gulf Water off the Omani Coast in Spring 2011", Ocean Sci., Vol.12, pp.687-701, 2016.
- [2] Clément Vic, "Dispersion of Deep-Sea Hydrothermal Vent Effluents and Larvae by Submesoscale and Tidal Currents", Oceanographic Research Papers, 2018.
- [3] Paul.C.Etter, "Undewater Acoustic Modeling and Simulation Underwater Sound Events in the Strait of Hormuz", Journal of Physical Oceanography, Vol.3, pp.43-51, 2009.
- [4] Bong-Chae Kim. "Influence of a Warm Eddy on Low-frequency Sound Propagation in the East Sea", Journal of Ocean and Polar Research. Pp.325-343, 2016.
- [5] Pierre L'Hegaret, "Mesoscale Eddies in the Arabian and Oman Seas and their Impact on the Persian Gulf Water outflow", Synbios Workshop, ENS Paris, 2015.
- [6] Jian, Y.J., Zhag, J. "Effect of Mesoscale Eddies on Underwater Sound Propagation", Applied Acoustics, Vol.70, 2010.
- [۷] خدایاری رستم آباد، احمد، "مقدمه ای بر سونار و مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در آب دریا"، پژوهشکده مهندسی وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۸۹.
- [8] www.myroms.org "ROMS start". Retrieved 2019.

مقایسه پیچک‌های میان مقیاس در خلیج فارس به کمک تصویر ماهواره‌های مودیس ۲۰۰۳ و نتایج حاصل از اجرای مدل عددی HYCOM (توپیل و همکاران، ۲۰۱۰) و مدل ROMS در شکل ۳۲ نشان می‌دهد که تعدادی پیچک سیکلونی میان مقیاس (CE1,CE2,CE3,CE4) طی ماه‌های آگوست و سپتامبر در خلیج فارس آشکار شدند بقیه پیچک‌های سواحل ایران تا ماه نوامبر دیده می‌شوند و پس از آن با سرمایش زمستان از بین می‌روند و سبب از بین رفتن ترموکلاین می‌شوند. مقایسه نشان می‌دهد که الگوی گردش غالب سیکلونی به خوبی در نتایج مدل ROMS آشکار است.

۴- بحث و پیشنهاد

در تحقیق حاضر ابتدا با شبیه‌سازی منطقه خلیج فارس توسط مدل ROMS، در فصول مختلف سال زمان شکل-گیری پیچک‌های میان مقیاس را مشاهده نمودیم. سپس با تعیین ایستگاه‌های اندازه‌گیری در نقاط حضور و عدم حضور پیچک‌ها تأثیر آنها را بر پارامترهای شوری، دما و خصوصاً سرعت سرعت بررسی کردیم. همچنین نتایج مدل ROMS با دو تحقیق توپیل و همکاران در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در بخش ۳ مقایسه گردید. در نهایت شبیه‌سازی مکان‌های پیچک‌ها و نوع آنها و همچنین جریان‌های ورودی از دریای عمان (IC) با شوری کم و جریان خروجی از تنگه هرمز با شوری زیاد^۱ (OC) شبیه‌سازی شد. هدف نهایی از این بررسی‌ها تأثیر تشکیل این پیچک‌ها بر پارامتر سرعت صوت در زیر آب بود که توسط پروفایل‌های سرعت صوت بخوبی تحلیل گردید. منشا اصلی تولید پیچک تلاطم است و از آنجا که هر زمان سطح دریا دچار اغتشاش و تلاطم شود، عدد حالت دریا^۲ بالا می‌رود شرایط خوب انتشار موج صوتی به سرعت رو به زوال می‌رود.

ویژگی اصلی انتشار صوت در آب‌های کم عمق مانند خلیج فارس، آن است که پروفایل سرعت صوت یا تقریباً ثابت است و یا یک شکست رو به پایین دارد. پروفایل‌های سرعت صوت در این تحقیق همگی در فصل تابستان و ماه آگوست رسم شده است که زمان شکل‌گیری پیچک‌ها بوده است. دمای آب در سطح در این فصل، بیشتر از درون آب است و با توجه به تلاطم‌های ایجاد شده در سطوح آب، یک شکست رو به

³ Sea State

⁴ Transmission Loss

¹ Input Current

² Output Current

- [9] Hedstrom, Katherine S. "Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5)". OCS Study BOEM. 2016.
- [10] Thoppil, P. G., and P. J. Hogan, "A Modeling Study of Circulation and Eddies in the Persian Gulf", *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 40, pp. 2122–2134, 2010.
- [11] Joo Young Hahn, "Effect of the Geoacoustic Parameters on the Range-Frequency Interference in Shallow-Water Waveguide", *Japanese Journal of Applied Physics*, pp.1-12, 2016.
- [12] Thoppil, P. G., "On the Mechanisms of Episodic Salinity Outflow Events in the Strait of Hormuz", *Jurnal of Physical Oceanography*, Vol.39, pp.1340-1360, 2009.
- [۱۳] رضوان قاضی، مطالعه میدانی و شبیه‌سازی عددی جبهه ترموهالاینی جریان خروجی دریای نیمه بسته، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات. ۱۳۹۵.