

# مدل سازی سه بعدی گردش آب در دریای عمان با استفاده از مدل عددی MITgcm

محمدرضا خلیل آبادی

دکترای فیزیک دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۹

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۶

## چکیده

در این پژوهش، گردش آب دریای عمان و جبهه خروجی آب چگال خلیج فارس به داخل آن دریا با استفاده از مدل عددی MITgcm که یک مدل سه بعدی و غیرخطی است، مدل سازی شده است. یکی از نتایج مفید مدل سازی انجام شده، دستیابی به الگوی جریان چگال خروجی خلیج فارس و جبهه های آب دریای عمان است. نتایج این مدل سازی یک گردش آب ساعت گرد را در لایه سطحی دریای عمان نشان می دهند. در غرب این چرخه ساعت گرد، دو چرخه کوچک پادساعت گرد شکل گرفته است. یکی از این دو چرخه که در گوشه جنوب غربی قرار دارد تا عمق امتداد می یابد. در عمق بیش از حدود ۵۰۰ متر، گردش آب پادساعت گرد می شود. نتایج این مدل سازی همچنین تبادل دولایه آب بین خلیج فارس و دریای عمان را نیز نشان می دهد.

**واژه های کلیدی:** گردش آب، الگوی جریان، دریای عمان، چرخه

## ۱. مقدمه

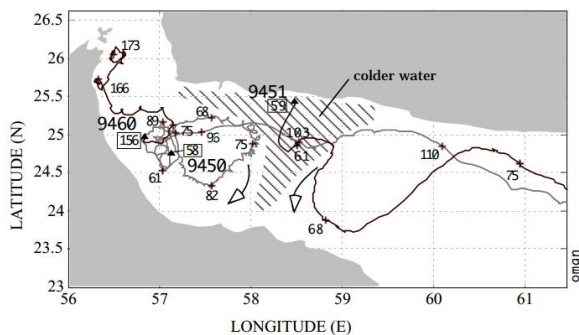
دریای عمان (که از آن با عنوان خلیج عمان نیز نامبرده می شود) یک دریای حاشیه ای است که نقش آبراهه ای را بازی می کند که خلیج فارس را به اقیانوس هند متصل می کند. در حقیقت این آبراهه محل تبادل آب شور خلیج فارس با آب کم شور اقیانوس هند است. وجود این آبراهه باعث تأثیر آب خلیج فارس بر آب های عمیق اقیانوس هند می شود، طوری که جبهه آب شور با منشأ خلیج فارس در عمق حدود ۱۵۰۰ متری اقیانوس هند مشاهده شده است [۱]. بنابراین فیزیک آب های دریای عمان و به ویژه گردش آب این خلیج تحت تأثیر تبادل آب های اقیانوس هند و خلیج فارس قرار می گیرد. علیرغم اهمیت قابل توجه این حوزه آبی مشاهدات اقیانوس شناسی انجام شده در این حوزه بسیار اندک است. اکثر این اندازه گیری ها نیز از سوی کشورهای خاص در محدوده ساحلی انجام شده است. در ابعاد بزرگ مقیاس، فقط چند

مورد محدود اندازه گیری میدانی برای دستیابی به فیزیک و دینامیک حاکم بر خلیج عمان انجام شده است که مهم ترین مطالعات میدانی انجام شده در این زمینه توسط سازمان نوآ و سازمان همکاری های زیست محیطی راپمی با استفاده از کشتی تحقیقاتی مونت میشل کلید خورد و نتایج ارزشمندی را دربر داشت [۲].

کشتی تحقیقاتی میشل، در نواحی دریایی راپمی شامل خلیج فارس، تنگه هرمز و خلیج عمان از فوریه تا ژوئن ۱۹۹۲ شروع به داده برداری نمود. مشاهدات متعددی در حوزه اقیانوس شناسی فیزیکی انجام شد. در این پروژه بزرگ بیش از ۵۰۰ دستگاه CTD، چندین جریان سنج، ۳۶ بویه شناور قابل ره گیری و اندازه گیری های کشتی - برد پیوسته از متغیرهای جوی و اقیانوسی به کار برده شد. هدف اصلی برنامه، به کار گیری بویه های شناور لاگراژی و دستیابی به الگوی گردش آب در حوزه

دارد و جت (جبهه) رأس‌الحد را به وجود می‌آورد [۲]. دو چرخه پادساعت‌گرد کوچک نیز درون این جریان مشاهده می‌شود. وجود این جبهه و چرخه‌های کوچک درون آن در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است [۲].

هدف اصلی این پژوهش، استخراج الگوی گردش آب خلیج عمان و جبهه خروجی آب چگال خلیج فارس در غرب خلیج عمان با دقت خوب می‌باشد. برای نیل به این هدف، در این پژوهش یک مدل عددی با دقت بالا طراحی و اجرا شده است. در نهایت مقایسه‌ای بین الگوی گردش آب استخراج‌شده از مدل و نتایج مشاهده‌های میدانی راپمی صورت می‌گیرد. یکی از نتایج مفید مدل‌سازی انجام شده، دستیابی به الگوی جریان چگال خروجی خلیج فارس و جبهه‌های آب خلیج عمان است (طبق تعریف جبهه در جایی قرار دارد که گرادیان یک پارامتر هیدروفیزیکی (مانند دما، شوری، چگالی و ...) در آن مکان زیاد باشد).

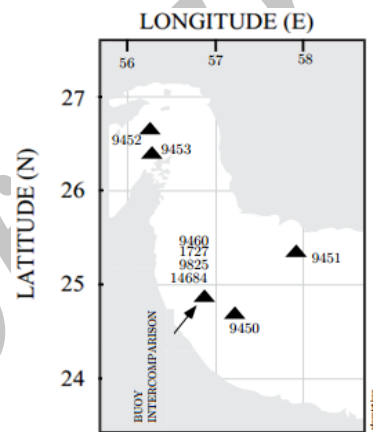


شکل ۳. مسیر حرکت بویه‌های ۹۴۵۰، ۹۴۵۱ و ۹۴۶۰ نشان‌دهنده وجود دو چرخه گردش آب در خلیج عمان است. یک گردش ساعت‌گرد در غرب و یک گردش پادساعت‌گرد در شرق خلیج عمان قرار دارد. در نقطه اتصال دو چرخه آب یک ناحیه با آب سردتر شکل می‌گیرد که دلیلی بر تصاویر ماهواره‌ای دمای سطحی است. اعداد درون مستطیل‌ها بیان‌کننده روز شروع به کارگیری بویه‌ها و اعداد امتداد مسیر نیز روز مشاهده بویه در مسیر است [۲].

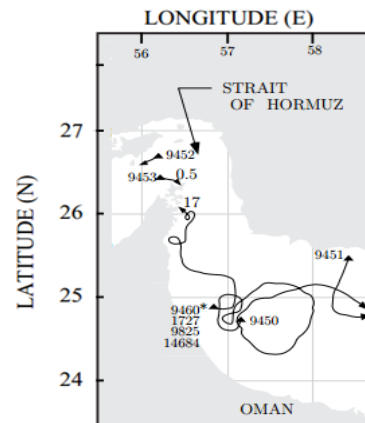
## ۲. مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به الگوی گردش آب در غرب خلیج عمان یک مدل‌سازی عددی با تفکیک مکانی نسبتاً خوب طراحی و اجرا شد. مدل‌سازی با استفاده از مدل عددی MITgcm انجام شده است. این مدل بارها در حوزه‌های آبی مختلف، برای مطالعات فیزیکی و دینامیک آب‌های مورد نظر مورد استفاده

آب‌های خلیج فارس، خلیج عمان و دریای عرب بود. شکل ۱ مکان به کارگیری بویه‌های شناور را در خلیج عمان و تنگه‌هرمز نشان می‌دهد. شکل ۲ الگویی از رفتار این بویه‌ها را نشان می‌دهد. ره‌گیری مسیر جابجایی این بویه‌ها، وجود دو چرخه اصلی جریان را در خلیج عمان نشان می‌دهد. این الگو وجود یک گردش ساعت‌گرد در غرب و یک گردش پادساعت‌گرد در شرق خلیج عمان را مشخص می‌نماید.



شکل ۱. مکان به کارگیری بویه‌های شناور در خلیج عمان و تنگه‌هرمز [۲]



شکل ۲. الگوی مسیر جابه‌جایی بویه. آخر هر مسیر با یک پیکان نشانه‌گذاری شده است. بویه‌های ۹۴۵۰ و ۹۴۵۱ به سمت دریای عربی جابه‌جا شده‌اند [۲].

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که جریان خروجی خلیج فارس در امتداد مرز جنوبی و به شکل یک جریان به دام افتاده ساحلی حرکت می‌کند. نیروی کوریولیس می‌تواند دلیل این چرخش به راست باشد. این جریان ساحلی تا رأس‌الحد ادامه

غیرهیدروستاتیکی با در نظر گرفتن تقریب بوسینسک حل می‌کند [۹]:

$$\frac{D\bar{u}_h}{Dt} + f\bar{k} \times \bar{u}_h + \frac{1}{\rho_c} \nabla_h \bar{p} = \bar{F}_h \quad (1)$$

$$\epsilon_{nh} \frac{Dw}{Dt} + \frac{g\bar{p}}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = \epsilon_{nh} F_v \quad (2)$$

$$\bar{\nabla}_h \cdot \bar{u}_h + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = \rho(\theta, S, p_0(z)) - \rho_c \quad (4)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = Q_\theta \quad (5)$$

$$\frac{DS}{Dt} = Q_s \quad (6)$$

که  $\bar{u}_h$  بردار سرعت افقی است،  $f$  پارامتر کوریولیس است،  $\bar{k}$  برداری که در راستای قائم است،  $\rho_c$  چگالی مرجع ثابت است،  $\nabla_h$  عملگر گرادیان افقی است،  $\bar{p}$  آشفتگی فشار است،  $\bar{F}_h$  نیروی تکانه افقی است،  $\epsilon_{nh}$  یک ضریب ثابت غیرهیدروستاتیکی است،  $w$  سرعت قائم است،  $g$  شتاب جاذبه است،  $\bar{\rho}$  آشفتگی چگالی است،  $\rho_0(z)$  یک پروفایل مرجع چگالی است،  $\theta$  دما است،  $Q_\theta$  دمای اعمالی در مرز باز است،  $S$  شوری است و  $Q_s$  شوری اعمالی در مرز باز است. وقتی گزینه مد غیرهیدروستاتیکی انتخاب شود،  $\epsilon_{nh}$  برابر یک می‌شود. وقتی گزینه مد هیدروستاتیکی انتخاب شود،  $\epsilon_{nh}$  برابر صفر می‌شود و معادله‌ها به شکل هیدروستاتیکی تبدیل می‌شوند. این معادله‌های هیدروستاتیکی اغلب در مجامع مدل‌سازی اقیانوسی به‌عنوان معادله‌های اولیه هیدروستاتیکی<sup>۷</sup> ارجاع داده می‌شوند.

محدوده حوضه بین طول‌های جغرافیایی ۵۶ تا ۵۹ درجه شرقی گسترش می‌یابد که به‌وسیله یک گرید چهارگوشه مشتمل بر ۳۰\*۳۴۲\*۴۳۰ سلول گسسته‌سازی شده است. تفکیک مکانی در امتداد محورهای  $x$  و  $y$ ، متغیر و حداکثر یک کیلومتر است. تفکیک مکانی در امتداد محور قائم نیز متغیر است. برای اینکه معادله‌ها در ناحیه پیکنوکلاين با دقت کافی حل شوند، مدل در راستای محور  $z$  به ۳۰ لایه تقسیم می‌شود که ضخامت این لایه‌ها در نزدیک سطح کم و در اعماق افزایش می‌یابد. توپوگرافی مدل از پایگاه داده‌های جیکو به‌دست آمده است [۱۰]. این داده‌ها دارای تفکیک مکانی خوب (۳۰ ثانیه) هستند. در بستر و مرزهای جانبی نیز شرایط غیرلغزشی<sup>۸</sup>

قرار گرفته است. این مدل برای شبیه‌سازی پدیده‌های جوی و اقیانوسی در محدوده‌های مختلف، از گردش بزرگ مقیاس کره زمین [۳] تا فرایندهای میان مقیاس و کوچک مقیاس [۳] و [۴] و در مناطق مختلف مانند: تنگه جبل الطارق [۵]، دریای چین [۶] و خلیج بنگال [۷] به کار برده شده است و قابلیت آن در مدل‌سازی به اثبات رسیده است.

مدل یاد شده، مدلی مختصات  $z$  است که حالت غیرخطی کامل و غیرهیدروستاتیکی معادله‌های ناویر-استوکس را با تقریب بوسینسک<sup>۲</sup> برای یک سیال تراکم‌ناپذیر با یک گسسته‌سازی حجم محدود<sup>۳</sup> مکانی روی شبکه محاسباتی مکعبی حل می‌کند. روش حجم محدود یکی از روش‌های عددی برای حل تقریبی معادله‌های دیفرانسیل است. روش حجم محدود در واقع نوعی روش اجزای محدود است که در آن روش تقریب این انتگرال‌ها با روش اجزای محدود متفاوت است. این روش بیشتر برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال حرارت مناسب است. مدل MITgcm از این روش پیروی می‌کند. فرمول‌بندی مدل که شامل سطح آزاد ضمنی و توپوگرافی گام جزئی می‌شود با جزئیات توسط مارشال و همکاران شرح داده شده است [۸]. کد اصلی و مستندات آن نیز در وب‌سایت گروه MITgcm در دسترس است. این مدل با زبان برنامه‌نویسی فترن نوشته شده است که در حوزه دینامیک شاره‌های محاسباتی استفاده‌های زیادی شده است. مدل روی سیستم عامل لینوکس اجرا می‌شود. این مدل با توجه به تعداد سلول‌های شبکه قابلیت اجرا با یک یا چند پردازنده را دارد. موازی‌سازی با تقسیم مساوی سلول‌های افقی حوزه به دو یا چند زیرحوزه<sup>۴</sup> انجام می‌شود. هر زیرحوزه به‌وسیله یک پردازنده پردازش می‌شود. هر زیرحوزه دارای یک کپی از سلول‌های مرزی زیرحوزه مجاورش - که سلول‌های تجسمی<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند - می‌باشد. با این روش هر پردازنده خاص می‌تواند مجزا کار کند و پس از هر گام زمانی با تبادل شرایط مرزی به‌روز شود.

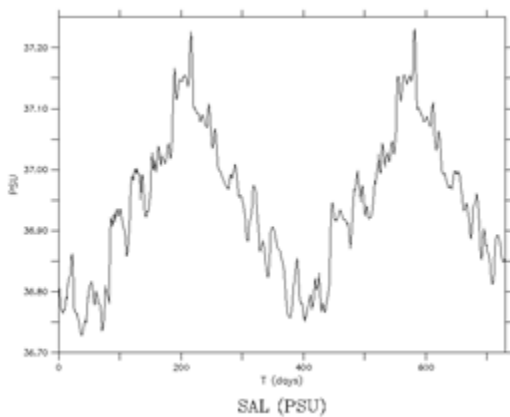
مدل MITgcm معادله‌ها را در حالت غیرخطی، تراکم‌ناپذیر<sup>۶</sup>

اعمال شده است.

صورت از پیش تعیین شده به مدل اعمال شده است.

## ۲-۱. پایداری مدل

هرچند، در پیکربندی مدل، یک طرح‌واره محدود شار مرتبه سوم زمانی-مکانی انتخاب شده که بدون قید و شرط پایدار است، همچنین برای این که نشان داده شود مشخصه‌های توده‌های آب به یک چرخه پایدار رسیده‌اند، تغییرات شوری لایه سطحی در نقطه‌ای به مختصات تقریبی ۵۷ درجه شرقی و ۲۴/۵ درجه شمالی برای دو سال آخر اجرای مدل در شکل ۴ رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که شوری به یک چرخه تکرارپذیر رسیده است و نشان از پایداری مدل دارد.



شکل ۴. سری زمانی تغییرات شوری لایه سطحی

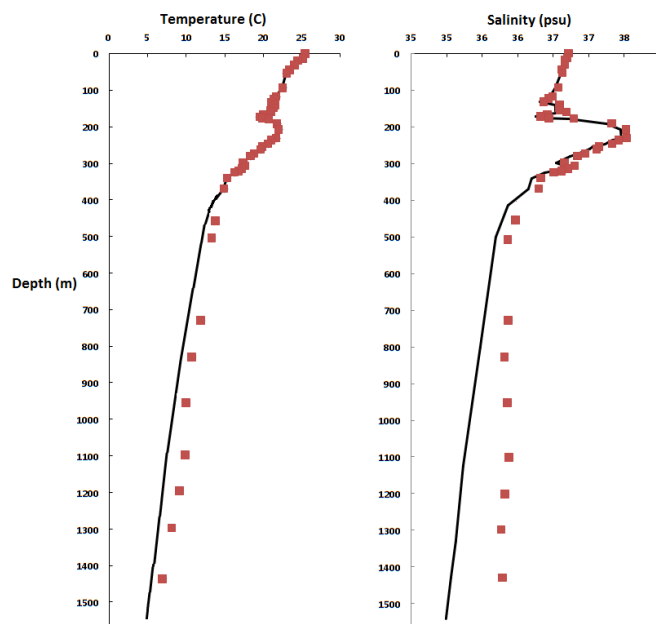
## ۲-۲. اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، میانگین ماهانه پروفایل‌های دما و شوری حاصل از مدل‌سازی و داده‌های WOA برای ماه ژانویه مقایسه شده‌اند. WOA یا اطلس اقیانوسی جهانی شامل یک پایگاه داده‌های اقیانوسی با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه جغرافیایی می‌باشد که از سوی سایت نوآ تهیه شده است. این داده‌ها شامل پروفایل‌های دما و شوری در عمق‌های استاندارد است. شکل ۵ این مقایسه را در نقطه‌ای به مختصات ۲۷/۴ درجه شمالی و ۵۷/۴ درجه شرقی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج مدل و داده‌های WOA وجود دارد (به‌ویژه در ۵۰۰ متر بالایی).

شرایط اولیه دما و شوری از مجموعه داده‌های اطلس جهانی اقیانوسی<sup>۹</sup> استخراج شده است [۱۱]. این داده‌ها پس از درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی انتخاب شده برای مدل، به فرمت باینری درآمده و وارد مدل شده است. مقادیر اولیه مؤلفه‌های جریان برابر صفر در نظر گرفته شد.

حوزه دارای یک مرز باز سطحی و دو مرز باز جانبی است. در مرز باز سطحی داده‌های میانگین ماهانه دمای سطح دریا و شوری سطح دریا از مجموعه داده‌های اطلس جهانی اقیانوسی استخراج شده است. این داده‌ها پس از درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی انتخاب شده برای مدل، به فرمت باینری درآمده و وارد مدل شده است. داده‌های باد و مؤلفه‌های بودجه گرمایی نیز از سایت نوآ [۱۲] استخراج شده است. این داده‌ها نیز مانند داده‌های دما و شوری پس از انجام مراحل درون‌یابی و انطباق با سلول‌های شبکه محاسباتی سطحی، به فرمت باینری درآمده و به مدل وارد شده است.

حوزه مورد مطالعه دارای دو مرز باز جانبی است. مرز باز شرقی در سمت اقیانوس هند و دریای عربی و مرز باز غربی در تنگه هرمز قرار دارد. در این مطالعه، شرایط مرزی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده انتخاب و به صورت از پیش تعیین شده<sup>۱۰</sup> به مدل اعمال شده است. تبادل متوسط در مرز غربی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دما، شوری و جریان در تنگه هرمز به صورت از پیش تعیین شده در شرط مرزی غربی مدل وارد شده است تا مدل اطلاعات مرز باز غربی را از این داده‌ها بخواند. این داده‌ها که شامل داده‌های دما، شوری و جریان است برای یک دوره یک‌ساله، با گام زمانی نیم ساعت و با تفکیک مکانی قائم ۱۰ متر در نقطه‌ای به مختصات حدود ۵۶ درجه شرقی و ۲۶ درجه شمالی برداشت شده است [۱۳]. داده‌های ارتفاع سطح آب نیز برای هر دو مرز غربی و شرقی به ترتیب از داده‌های دستگاه‌های جزرومدسنج<sup>۱۱</sup> بندرعباس و جاسک استخراج شده و به



شکل ۵. مقایسه میانگین ماهانه پروفایل‌های دما و شوری حاصل از مدل‌سازی عددی با مدل MITgcm و داده‌های WOA

می‌دهد که با مطالعات قبلی [۲] مطابقت دارد (شکل ۳).

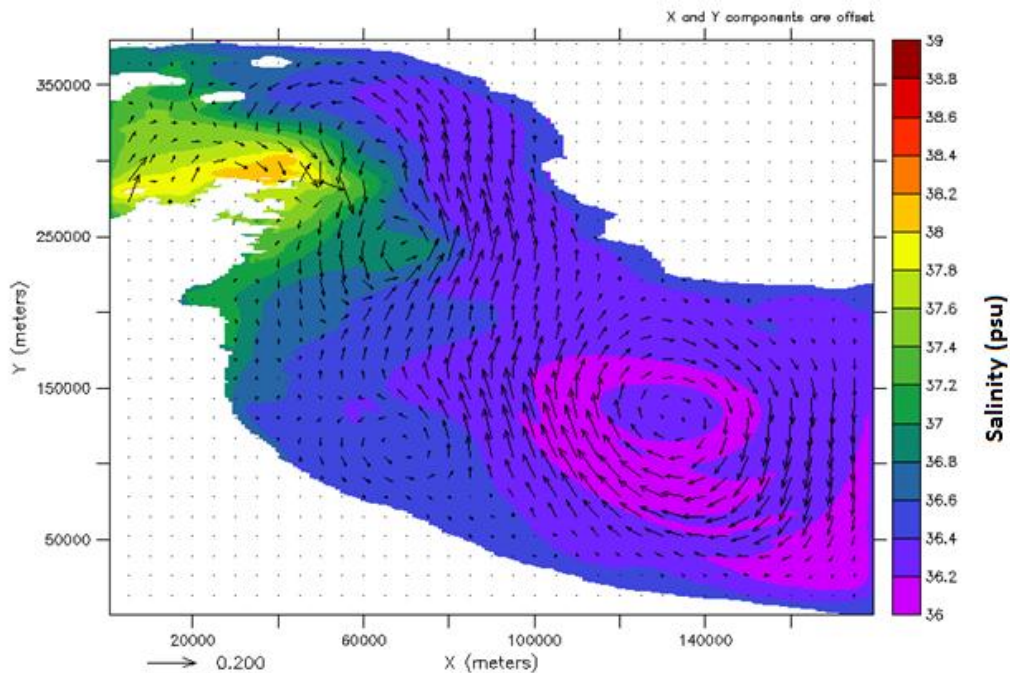
شکل ۷ نیز گردش آب خلیج عمان را در عمق ۵۰ متری نشان می‌دهد. رنگ زمینه نیز شوری آب را نشان می‌دهد. این شکل، خروج آب شور خلیج فارس به درون دریای عمان را از طریق تنگه هرمز در لایه زیرسطح تأیید می‌کند. همچنین نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق نیز شبیه آب‌های سطحی است.

شکل ۸، گردش آب و شوری دریای عمان را در عمق ۱۰۰ متری نشان می‌دهد. این شکل نیز خروج آب شور خلیج فارس به درون دریای عمان را از طریق تنگه هرمز در لایه زیرسطح تأیید می‌کند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق نیز شبیه آب‌های سطحی است.

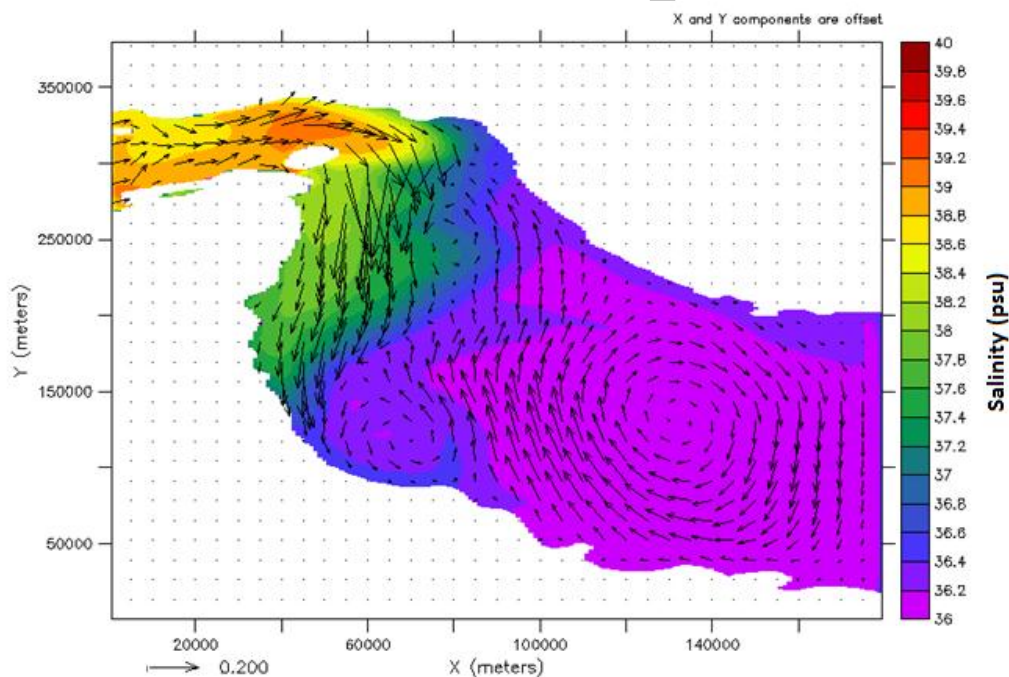
شکل ۹، گردش آب و شوری دریای عمان را در عمق ۵۵۰ متری نشان می‌دهد. این شکل، جریان آب شور خلیج فارس در امتداد مرز جنوبی دریای عمان (جبهه رأس‌الحد)؛ همچنین ورود آب کم شور را از مرز شمالی تأیید می‌کند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق در جهت مخالف آب‌های سطحی است.

### ۳. بررسی نتایج

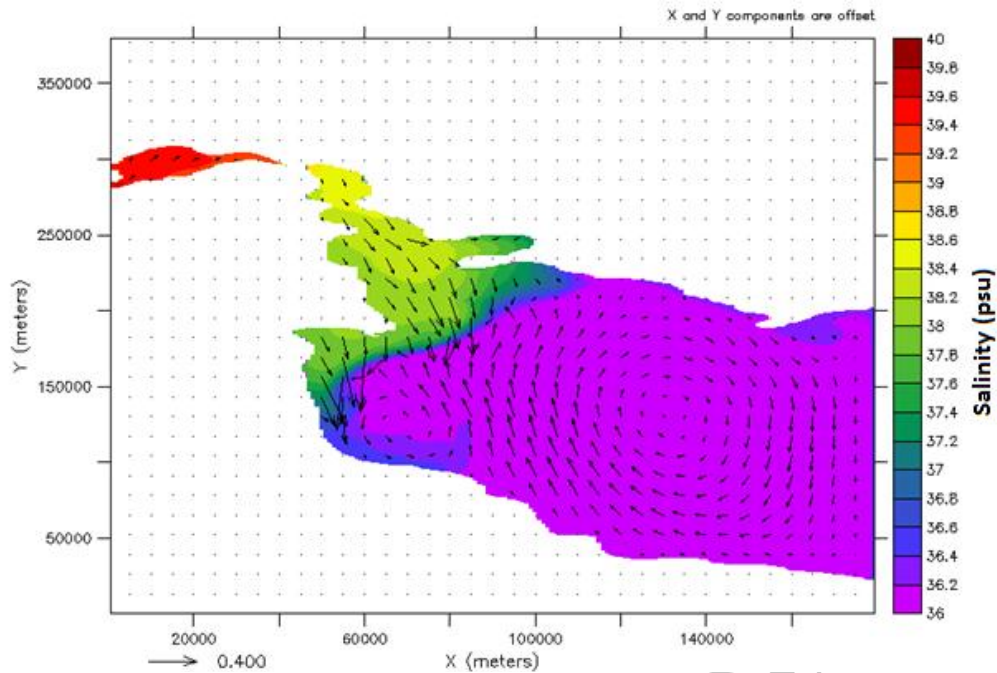
شکل ۶، گردش میانگین سطحی آب خلیج عمان (بردارها) و شوری میانگین سطحی آب (رنگ زمینه) را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل یک جبهه در آب‌های ساحلی کشور عمان و در سمت راست شبه‌جزیره مسندام مشاهده می‌شود که دارای منشأ خلیج فارس است و شوری آن با آب‌های مرکزی خلیج عمان تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای دارد. این شکل نشان می‌دهد که جریان خروجی خلیج فارس در امتداد مرز جنوبی و به شکل یک جریان به دام افتاده ساحلی حرکت می‌کند. این جریان ساحلی تا رأس‌الحد ادامه دارد و جت (جبهه) رأس‌الحد را به وجود می‌آورد. دو چرخه پادساعت‌گرد کوچک نیز درون این جریان مشاهده می‌شود. وجود این جبهه و چرخه‌های کوچک درون آن در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است. یک چرخه ساعت‌گرد بزرگ نیز در بخش مرکزی حوزه دیده می‌شود که وجود آن در همه مطالعات گردش آب خلیج عمان به اثبات رسیده است [۲]. گردش سطحی، چرخه ساعت‌گرد آب را در این حوزه نشان



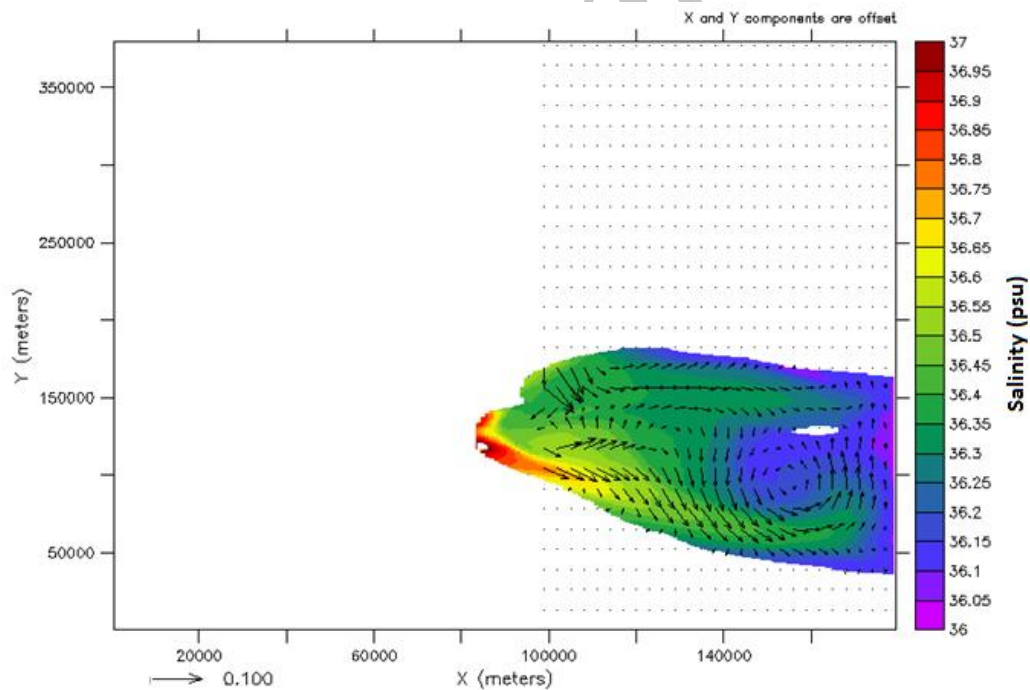
شکل ۶. گردش آب سطحی دریای عمان (بردارها) و شوری سطحی آب (رنگ زمینه). گردش سطحی، چرخه ساعت‌گرد آب در این حوزه را نشان می‌دهد که با مطالعات قبلی [۲] مطابقت دارد. در این شکل، دو چرخه پادساعت‌گرد کوچک نیز در سمت غرب مشاهده می‌شود.



شکل ۷. بردارها گردش آب دریای عمان را در عمق ۵۰ متری نشان می‌دهند. رنگ زمینه نیز شوری آب در این عمق را نشان می‌دهد. این شکل، خروج آب شور خلیج فارس به دریای عمان را از طریق تنگه هرمز در لایه زیرسطح تأیید می‌کند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق نیز شبیه آب‌های سطحی است.



شکل ۸. بردارها گردش آب دریای عمان را در عمق ۱۰۰ متری نشان می‌دهند. رنگ زمینه نیز شوری آب را در این عمق نشان می‌دهد. این شکل، خروج آب شور خلیج فارس به دریای عمان را از طریق تنگه هرمز در لایه زیرسطح تأیید می‌کند. همچنین نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق نیز شبیه آب‌های سطحی است.



شکل ۹. بردارها گردش آب دریای عمان را در عمق ۵۵۰ متری نشان می‌دهند. رنگ زمینه نیز شوری آب در این عمق را نشان می‌دهد. این شکل، خروج آب شور خلیج فارس در امتداد مرز جنوبی دریای عمان، همچنین ورود آب کم شور را از مرز شمالی تأیید می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که گردش آب در این عمق در جهت مخالف آب‌های سطحی است.

**۴. بحث و نتیجه‌گیری**

در لایه سطحی دریای عمان تا عمق حدود ۵۰۰ متر یک چرخه میان‌مقیاس شکل می‌گیرد که گردش آن ساعت‌گرد است. شکل‌گیری این چرخه ساعت‌گرد سطحی با مشاهدات گروه راپمی منطبق است که این تطابق شاهدهی بر صحت نتایج مدل است.

در گوشه غربی دریای عمان و در سمت چپ این چرخه اصلی، دو چرخه پادساعت‌گرد کوچک در ناحیه فلات قاره شکل می‌گیرد. یکی از این چرخه‌هایی که تقریباً در دهانه تنگه‌هرمز واقع شده سطحی است؛ اما چرخه کوچک جنوبی تا عمق ناحیه فلات قاره ادامه می‌یابد.

در نواحی عمیق دریای عمان جهت گردش آب برعکس می‌شود، طوری که در عمق‌های بالاتر از حدود ۵۰۰ متر جهت این چرخه پادساعت‌گرد می‌شود. ابعاد این چرخه در آب عمیق کوچک‌تر از چرخه آب سطحی است.

به‌علاوه، نتایج این مدلسازی جریان آب کم‌شور را از لایه سطحی شمال تنگه‌هرمز به سوی خلیج فارس و خروج آب شور خلیج فارس را از جنوب تنگه نشان می‌دهد. در عمق تنگه‌هرمز، آب شور خلیج فارس به درون دریای عمان می‌ریزد. این آب شور وقتی وارد دریای عمان می‌شود در کناره جنوبی دریای عمان به سمت شرق جریان می‌یابد. خروجی آب شور خلیج فارس در عمق میانی مشخص است. هرچه به سمت شرق پیش رویم عمقی که در خروجی آب شور خلیج فارس مشاهده می‌شود نیز افزایش می‌یابد.

**۵. مراجع**

[۱] خلیل‌آبادی محمدرضا، سرانجام بهادر. مبانی دینامیک اقیانوس‌ها. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ ۱۳۹۱.

- [2] Reynolds RM. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. Marine Pollution Bulletin. 1993 Jan 1;27:35-59.
- [3] Adcroft A, Campin JM, Hill C, Marshall J. Implementation of an atmosphere–ocean general circulation model on the expanded spherical cube. Monthly Weather Review. 2004 Dec;132(12):2845-63.
- [4] Vlasenko V, Stashchuk N. Three-dimensional

shoaling of large-amplitude internal waves. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2007 Nov 1;112(C11).

- [5] Sánchez-Garrido JC, Sannino G, Liberti L, GarcíaLafuente J, Pratt L. Numerical modeling of three-dimensional stratified tidal flow over Camarinal Sill, Strait of Gibraltar. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011 Dec 1;116(C12).
- [6] Vlasenko V, Stashchuk N, Guo CH, Chen X. Multimodal structure of baroclinic tides in the South China Sea. Nonlinear Processes in Geophysics. 2010 Sep 1;17(5):529.
- [7] Pradhan HK, Joshi M, Rao AD. Simulation of internal waves in the western Bay of Bengal using MITGCM: A case study. Proceedings of MTS/IEEE OCEANS; 2013 Jun 10-14; Bergen, Norway.
- [8] Marshall J, Hill C, Perelman L, Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997 Mar 15;102(C3):5733-52.
- [9] Marshall J, Adcroft A, Hill C, Perelman L, Heisey C. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997 Mar 15;102(C3):5753-66.
- [10] Meirion TJ . Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas. Liverpool: British Oceanographic Data Centre; 2003.
- [11] WOD, 2013. World Ocean Database individual observed level quality codes. [Online] Available at: [ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD13/DOC/wod013\\_tutorial.pdf](ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD13/DOC/wod013_tutorial.pdf)
- [12] Available at: <http://www.noaa.gov>
- [13] Johns WE, Zantopp RJ. Data report for the Strait of Hormuz Experiment, December 1996-March 1998. RSMAS, University of Miami Technical Report 99. 1999;1.

**۶. پی‌نوشت:**

- <sup>1</sup> Noaa
- <sup>2</sup> Boussinesq approximation
- <sup>3</sup> finite volume
- <sup>4</sup> subdomain
- <sup>5</sup> ghost cells
- <sup>6</sup> incompressible
- <sup>7</sup> hydrostatic primitive equations (HPE)
- <sup>8</sup> no-slip
- <sup>9</sup> World Ocean Atlas
- <sup>10</sup> prescribed
- <sup>11</sup> tide gaug