مطالعه‌ی پیچک‌های خزر جنوبی، مطالعه موردی: سواحل کیاشهر

جعفر عزیزپور[۱*] ، علی حمزه‌پور[۲]، رضا رهنما[۳]

[۱] استادیار ، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، azizpour@inio.ac.ir
[۲] کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، hamzehpoor.ali@inio.ac.ir
[۳] کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، reza.rah@inio.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

کلمات کلیدی:
دریای خزر
پیچک
جریان‌سنجی
پارامترهای فیزیکی آب
مواد مغذی

چکیده

در این مقاله به بررسی و مطالعه پیچک تشکیل شده در شرق رودخانه سفیدرود، روبروی سواحل کیاشهر استان گیلان و همچنین تاثیر آن بر مواد مغذی پرداخته می‌شود. با استفاده از دستگاه‌های ADCP متصل به شناور و CTD، به ترتیب نیم‌رخ جریان و پارامترهای فیزیکی آب در محدوده‌ی مورد مطالعه اندازه‌گیری شدند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که در محدوده‌ی مورد مطالعه یک پیچک کوچک مقیاس ساعتگرد (هسته گرم) که هسته‌ی آن حداقل به اندازه‌ی ۰/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد با آب‌های اطراف اختلاف دمایی دارد، تشکیل شده است. جریان آب نشان از غالب بودن جریان غرب سوی داشته و در محل تشکیل پیچک، تغییرات جریان مشاهده می‌شود. کمترین میزان مواد مغذی ثبت شده در هسته پیچک مشاهده می‌شود. این بدین معنی است که در محدوده‌ی مورد مطالعه پدیده فروجوشی اتفاق افتاده است.

Study of southern Caspian Eddies, case study: Off Kiashahr

Jafar Azizpour[1*], Ali Hamzehpoor [2], Reza Rahnama [3]

[1] PhD Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science; azizpour@inio.ac.ir
[2] MSc. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science; hamzehpoor@inio.ac.ir
[3] MSc. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science; reza.rah@inio.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 02 Nov. 2021
Accepted: 22 Jan. 2022

Keywords:
Caspian Sea
Eddy
Current
Physical Parameters
Nutrients

ABSTRACT

In this paper the generated eddy in the east part of the Sefidrud river, off the Kiashahr in the Guilan province is studied and discussed and also, effects of this eddy on nutrients are considered. Using a vessel-mounted ADCP and a CTD, water current profiles and, physical oceanographic parameters are measured, respectively. The results show that a small scale anticyclone eddy (warm core) is generated in the area that its core had at least 0.5 ℃ temperature difference from surrounding waters. The main current direction was westward and at location of the eddy, changes in current direction are observable. The minimum quantity of nutrients is observed at the eddy core and this means that at study area downwelling phenomenon is occurred.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

۱ - مقدمه

پیچک به حرکت چرخشی آب اطلاق می شود که بسته به اندازه آن، به سه مقیاس بزرگ، متوسط و کوچک تقسیم می شوند. اندازه پیچک‌های متوسط مقیاس بین ۱۰ تا ۵۰۰ کیلومتر متغیر هستند. پیچک‌ها به دو قسمت ساعتگرد (anticyclone) و پادساعتگرد (cyclone) تقسیم می شوند. به لحاظ زمانی این پیچک‌ها از چندین روز تا چندین ماه تداوم دارند. پیچک‌های سطحی معمولاً به دلیل گرادیان تراز آب (جریان ژئوستروفیک) ایجاد می‌شوند. پیچک‌های مقیاس متوسط به لحاظ هیدرودینامیک با جریان های چرخشی که حول یک هسته در حال حرکتند، مشخص می‌شوند. مشخصات فیزیکی داخل و بیرون پیچک متفاوت است. پیچک‌های مقیاس متوسط با استفاده از داده های ماهواره های ارتفاع سنجی و نیز تصاویر دمای سطحی آب قابل تشخیص هستند [۱]. در نیمکره شمالی پیچک‌های ساعتگرد معمولاً با مقادیر مثبت داده های ارتفاع سنجی و پیچک‌های پادساعتگرد با مقادیر منفی داده های ارتفاع سنجی مشخص می‌شوند.

پیچک‌ها به روش‌های مختلفی در دریاها و اقیانوس‌ها تولید می-شوند. برخی از آنها براثر برهمکنش هوا-دریا ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر عموماً پیچک‌های بزرگ مقیاس در اثر تاثیر عوامل جوی از جمله باد ایجاد می‌شوند. برخی از پیچک‌ها از برهمکنش جریان‌های آب سرد و گرم ایجاد می‌شوند. به طور کلی پیچک‌ها از ناپایداری در ستون آب (انرژی پتانسیل در ستون آب) و یا از اختلاف انرژی جنبشی در سطح افقی لایه‌های آب اتفاق می‌افتد. این بدین معنی است که اختلاف سرعت افقی آب باعث چرخش آب و ایجاد پیچک می‌شود.

پیچک‌های مقیاس متوسط نقش مهمی در توزیع مواد مغذی، توده های فیتوپلانکتونی، جابجایی و انتقال گرما، انرژی و مواد مغذی در راستای عمودی و افقی دارند [۲]. همچنین آن‌ها بر دینامیک اقیانوس‌ها، شرایط آب و هوایی و همچنین فعالیت‌های انسانی از قبیل صنایع شیلات تاثیر می‌گذارند. پیچک‌های پادساعتگرد در نیمکره شمالی باعث جابجایی مواد مغذی از اعماق به سطح دریا شده (فراجوشی در مرکز پیچک) و باعث افزایش جوامع فیتوپلانکتونی می شوند. برخلاف پیچک‌های پادساعتگرد، پیچک-های ساعتگرد در کاهش جوامع فیتوپلانکتونی نقش اساسی داشته و باعث کاهش این جوامع و مواد مغذی می شوند [۳].

وجود پیچک‌ها در قسمت جنوبی دریای خزر توسط [۴] و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری شده، گزارش شده است. گوندوز [۵] با استفاده از داده‌های ناهنجاری‌های تراز آب و دمای سطحی حاصل از ماهواره‌ها، به بررسی و تحلیل جریان‌های ژئوستروفیک و گردش عمومی آب دریای خزر پرداخت. نتایج نشان می داد، یک پیچک در خزر جنوبی و تقریباً در تمام فصول سال قابل مشاهده است.

با استفاده از مدل‌سازی عددی و استفاده از داده‌های ماهواره‌های ارتفاع سنجی و داده‌های سطحی دمای آب، گردش عمومی و هیدرودینامیک سطحی آب دریای خزر توسط [۶,۷] انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد پیچک‌های متعددی در قسمت خزر جنوبی تشکیل می‌شود.

اوانس و همکاران [۸] با استفاده از داده‌های ADCP متصل به شناور و همچنین داده‌های مورینگ نصب شده در محدوده‌ی دریای باهاما، اقیانوس اطلس به نحوه تحلیل انرژی پیچک‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن پیچک‌ها از فلات قاره به مناطق عمیق انرژی آنها به صورت آشفتگی و تبدیل به امواج داخلی از بین می‌رود. در این مطالعه ویژگی‌های پیچک‌های ساعتگرد و پادساعتگرد متعددی که با استفاده از ADCP متصل به شناور مشاهده شده بود، مورد بررسی قرار گرفت.

ورست و همکاران [۹] با استفاده از ADCP متصل به شناور و همچنین تصاویر ماهواره‌ای به بررسی جریان در دریای ساراگوسا پرداختند. با استفاده از دو دستگاه ADCP متصل به شناور kHz ۷۵ و ۱۵۰ تا عمق ۶۰۰ متری آب به بررسی جریان‌های دریایی و میانگین تراز آب پرداختند. نتایج اختلاف ۱/۱ متری در ارتفاع تراز آب جریان گلف استریم را نشان می‌داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان از توافق خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADCP و داده‌های ارتفاع سنجی در مقیاس کوچک را نشان می‌داد که با افزایش فواصل این توافق کمتر می‌شد.

خسروی و همکاران [۱۰] با استفاده از دستگاه ADCP متصل به شناور و GPS به بررسی جریان‌های جزر و مدی کانال خوران و در سه مقطع مجزا پرداختند. بیشینه عمق ثبت شده در حدود ۴۲ متر و مدت زمان اندازه‌گیری در حدود ۱۳ ساعت بود. نتایج حاصله نشان می‌داد که جریان آب در قسمت باریک شدگی نزدیک پل یک جریان برگشتی است، بخصوص در قسمت شمالی مقطع این جریان برگشتی در نتایج به وضوح قابل مشاهده است. بیشینه مقدار جریان ثبت شده در حالت جزر کامل در حدود ۱/۸ m/s است. باتوجه به بازه زمانی اندازه‌گیری شده، مولفه‌های جزر و مدی نیم، یک‌چهارم و یک‌ششم روزه از داده‌ها قابل استخراج است.

با توجه به رشد صنعت پرورش ماهی در قفس و نیز افزایش آلاینده های پلاستیکی و غیرمحلول در آب در قسمت جنوبی سواحل دریای خزر نقش پیچک‌ها در بررسی مواد مغذی و نیز انتقال آلودگی ها می‌تواند موثر باشد. پیچک‌های پادساعتگرد باعث تجمع مواد مغذی و همچنین آلودگی‌ها در قسمت مرکزی پیچک می‌شوند [۲,۱۱,۱۲]. شناخت پیچک‌های اقیانوسی در فعالیت‌های انسانی و علوم اقیانوسی حائز اهمیت بوده و می تواند نقش مهمی در جانمایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

قفس‌های پرورش ماهی و نیز مکان جمع‌آوری آلودگی‌های پلاستیکی در محیط آبی باشد.

۲ – مواد و روش‌ها

۲-۱- عملیات میدانی

عملیات میدانی انجام شده در این تحقیق شامل اندازه‌گیری جریان، پارامترهای فیزیکی آب و نمونه برداری آب است. جریان‌سنجی در محدوده‌ی دهانه‌ی سفیدرود و سواحل بندر کیاشهر با استفاده از یک دستگاه ADCP متصل به شناور (شکل ۱) که مجهز به سیستم عامل ردیاب کف بود، استفاده شد. سیستم عامل ردیاب کف سبب می‌شود که داده‌های جریان زمین مرجع با دقت بالاتری تولید شوند [۱۳,۱۴]. جریان‌سنجی در مسیرهای زیگزاگی شکل و از عمق ۲ تا ۸ متری انجام شد. جریان‌سنجی با لایه‌بندی آب به عمق‌های مساوی نیم‌متری و با فاصله زمانی ۰/۵ ثانیه (۲ Hz) انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب با استفاده از دستگاه CTD و در ایستگاه‌های نشان داده شده (a تا g) در شکل ۱ انجام شد. همچنین در محل ایستگاه‌های a تا e نمونه‌برداری آب جهت تعیین تغییرات مواد مغذی انجام شد. نمونه‌برداری آب با استفاده از بطری نسکین انجام شد. بطری‌ها قبل از پر شدن با آب دریا شستشو داده شدند. سپس بر روی قایق با استفاده از فیلتر سرسرنگی ۴۵ میکرون نمونه‌های آب فیلتر شده و جهت تعیین مواد مغذی به آزمایشگاه منتقل شدند.

شکل ۱- مسیر حرکت شناور برای اندازه‌گیری جریان (پنل سمت چپ) و دستگاه ADCP متصل به شناور (سمت راست). ایستگاه‌های اندازه-گیری پارامترهای فیزیکی آب و نمونه‌برداری آب با حروف انگلیسی نشان داده شده‌اند.

شکل ۱ مسیر حرکت شناور و همچنین موقعیت اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب و ایستگاه‌های نمونه برداری آب را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های میدانی در ۲۵ بهمن ۱۳۹۹ و از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۴:۳۰انجام شده است. با توجه به اینکه میزان سرعت‌های جزر و مدی در دریای خزر بسیار ناچیز هست، لذا اندازه‌گیری فقط یک‌بار و بدون تکرار انجام شده است. بیشینه عمق ثبت شده در حین اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان توسط دستگاه ADCP در حدود ۸ متر بوده است. منطقه‌ی مورد مطالعه دارای شیب تندی بوده و با فاصله کمی از ساحل عمق آب افزایش قابل توجهی دارد. با توجه به وجود دماغه دلتای سفیدرود و همچنین هندسه منطقه امکان چرخش جریان اصلی دریای خزر (جریان غرب سوی خزر جنوبی) و در نتیجه تشکیل پیچک ناشی از تغییر جهت جریان وجود دارد. همچنین وجود پرآب‌ترین رودخانه جنوبی دریای خزر امکان تشکیل پیچک‌های ناشی از اختلاف چگالی را نیز فراهم می‌کند. وجه تمایز پیچک‌های ناشی از تغییر جریان و ناشی از اختلاف چگالی در فرم جریان و مدت زمان وجود پیچک است. پیچک‌های ناشی از تغییر جریان با کاهش سرعت جریان اصلی از بین می‌روند و طول عمر کمتری دارند. بیشینه سرعت حرکت شناور در حدود ۵ نات بود. اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان با سرعت بیشتر سبب ایجاد حباب‌هایی در اطراف فریم دستگاه و شناور شده که تشکیل این حباب‌ها سبب ایجاد نویز و خطا در داده‌ها می‌شود [۱۵]. با افزایش سرعت شناور، اصطکاک میان فریم دستگاه (و دستگاه) با آب زیاد شده و سبب ایجاد حباب می‌کند. برای این منظور سرعت شناور حین اندازه‌گیری باید کنترل شده باشد. بنابراین باید شرایطی را در نظر گرفت که هم در مدت زمان محدوده داده‌های بیشتری اندازه گرفت و هم داده‌ها اندازه‌گیری شده از کیفیت خوبی برخوردار باشند [۱۶].

اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب با استفاده از یک دستگاه CTD از نوع Ocean Seven 316 [۱۷] در ۷ ایستگاه مجزا و شامل دمای آب، شوری، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ است. قبل از انجام داده‌برداری دستگاه CTD طبق دستورالعمل مربوط به دستگاه، در آزمایشگاه واسنجی شد. هریک از سنجه‌های دستگاه براساس دستورالعمل کارخانه دارای ضرایبی است که قبل از استفاده باید صحت‌سنجی شوند. همچنین در محل اندازه‌گیری سنجه‌های فشار و اکسیژن واسنجی شدند. خطای ناشی از این واسنجی برای سنجه-های فشار، دما و هدایت الکتریکی آب به ترتیب عبارت اند از ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۳ (براساس واحد اندازه‌گیری هر سنجه). داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت نیم‌رخ برداری در مد زمانی و با گام زمانی یک ثانیه و در کل ستون آب انجام شده است.

با توجه به اینکه تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده جریان بسیار زیاد و با فاصله زمانی و مکانی کمی برداشت شده اند، داده‌ها به گام زمانی۴۰ ثانیه تبدیل شده‌اند (تقریباً در حدود ۱۰۰ متر مسافت) [10]. برای این منظور از عملگر میانگین‌گیری متحرک استفاده شده است. عملگر میانگین متحرک یک روش هموارسازی داده-هاست که با توجه به درجه انتخابی مثلا m، هر مقدار از سری زمانی را با میانگین m-1 مقدار قبلی و خودش جایگزین می‌کند. در واقع

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

عملگر میانگین متحرک روند موجود در سری زمانی را حذف می‌کند. رابطه ۱ علمگر میانگین متحرک را نشان می‌دهد.

$$X_m = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=-m}^{m} X_{t+j} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی ۱، (Xt) مشاهده واقعی و m مرتبه میانگین‌گیری است. داده‌های خارج از محدوده حذف شده و در موقعیت‌هایی که قایق جهت نمونه‌برداری آب و اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب با CTD متوقف شده بود، داده‌های تکراری حذف و داده‌های در مساحت ۰/۰۱ کیلومتر مربع (حدود ۱۰۰ متر در راستای غربی-شرقی در ۱۰۰ متر در راستای شمالی جنوبی) به عنوان میانگین سرعت آب در محدوده توقف قایق در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که هرچقدر سرعت حرکت قایق کمتر باشد داده‌های اندازه‌گیری شده باکیفیت‌تر و دارای نویز کمتری خواهند بود. همچنین با توجه به عمق کم منطقه مورد مطالعه، در موقعیت‌های اندازه‌گیری شده، متوسط عمقی جریان در نظر گرفته شده است. برای داده‌های برداشت شده توسط دستگاه CTD نیم‌رخ پارامترهای اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده است. باتوجه به اینکه دستگاه CTD به گام زمانی یک ثانیه و در دو مسیر رفت و برگشت داده برداری می‌کند، فقط داده‌های پایین رفت که به مقادیر واقعی نزدیک‌تر هستند، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از فیلتر پایین گذر Butter-Wurth [۱۸] با فرکانس قطع ۰/۲۵ هرتز نوسانات داده‌های CTD حذف گردید.

۲-۲- عملیات آزمایشگاهی

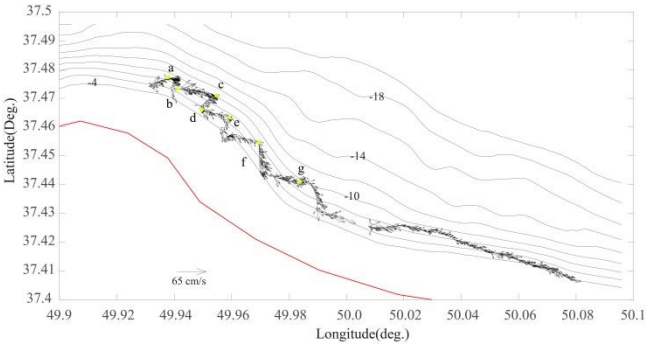
جهت تعیین میزان مواد مغذی (فسفات و نیترات) نمونه‌های آب، نمونه‌های آب به آزمایشگاه شیمی منتقل شدند. اندازه‌گیری مواد مغذی در آزمایشگاه برای هر ماده روش خاص خودش را دارد که در زیر برای مواد مغذی مورد نظر به آن‌ها اشاره شده است.

اندازه‌گیری فسفات به روش رنگ سنجی بر اساس شکل‌گیری کمپلکس آبی رنگ فسفو مولیبدات استوار است. در این روش یون‌های فسفات موجود در نمونه در یک محیط اسیدی با آمونیوم مولیبدات جهت تولید کمپلکس فسفو مولیبدات واکنش می‌دهد. کمپلکس تولید شده توسط آسکوربیک اسید و در حضور یون آنتیموان به عنوان کاتالیزور احیا شده و تولید رنگ آبی می‌کند که جذب مربوط به آن در طول موج ۸۸۲ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود [19]. جذب های اندازه‌گیری شده بعد از تصحیح جذب نمونه شاهد، بروی منحنی کالیبراسیون منتقل و تبدیل به مقادیر غلظت هم ارز می‌شوند.

اساس اندازه‌گیری نیترات به روش رنگ سنجی، احیای آن به نیتریت است. برای این منظور هر یک از نمونه‌ها از ستون پرشده با ذرات کادمیم پوشیده شده با مس عبور داده شده تا یون‌های نیترات موجود به نیتریت تبدیل شود. جهت افزایش راندمان احیاء pH محیط باید حدود ۸/۵ تنظیم شود برای این منظور از آمونیوم کلراید برای تنظیم pH استفاده می‌شود. بعد از انجام این مرحله و تولید نیتریت در محیط، با اضافه کردن سولفانیل آمید و نفتیل اتیلن دی آمین به ترتیب رنگ آزو در محیط شکل می‌گیرد. ترکیب آزو تولید شده صورتی رنگ بوده و بیشینه جذب آن در ۵۴۰ نانومتر است [20]. جذب‌های اندازه‌گیری شده بعد از تصحیح جذب نمونه شاهد، بروی منحنی کالیبراسیون منتقل و تبدیل به مقادیر غلظت هم ارز می‌شوند.

۳ – نتایج

شکل۲ نتایج حاصل از اندازه‌گیری میدانی جریان آب در منطقه را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد، جهت جریان به سمت غرب است. در برخی از مناطق از جمله بعد از دهانه‌ی سفیدرود و به سمت شرق منطقه جریان حالت چرخشی از خود نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از وجود پیچک در منطقه باشد. بررسی نمودارهای جریان در محدوده‌ی ایستگاه‌های c، d و e نشان می‌دهد که سرعت جریان در این مناطق کمتر از سایر نقاط و ایستگاه‌هاست. این بدین معنی می‌تواند باشد که این ایستگاه‌ها در محدوده‌ی هسته‌ی پیچک واقع شده اند. با توجه به اینکه خطوط هم‌عمق در این منطقه بسیار به‌هم نزدیک هستند، هندسه منطقه به همراه جریان شدید می‌تواند سبب تشکیل پیچک در منطقه و در شرایط دریایی آرام (شرایط جوی آرام و دریا مواج نباشد) شود. این وضعیت تغییرات جزئی در جریان تا محل ایستگاه f هم تا حدودی قابل ردیابی است. تغییرات جهت جریان نیز تا حدودی می‌تواند ناشی از وجود پیچک در منطقه را ثابت کند. با توجه به محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری برای فصل زمستان (وجود پره ماهیگری) انتخاب مسیرهای مناسب برای حرکت شناور که بتواند محدوده‌ی تشکیل پیچک را مشخص کند، امکان پذیر نبود. به همین دلیل از داده‌های ویژگی‌های فیزیکی آب که توسط دستگاه CTD اندازه‌گیری شده است، استفاده شده است.

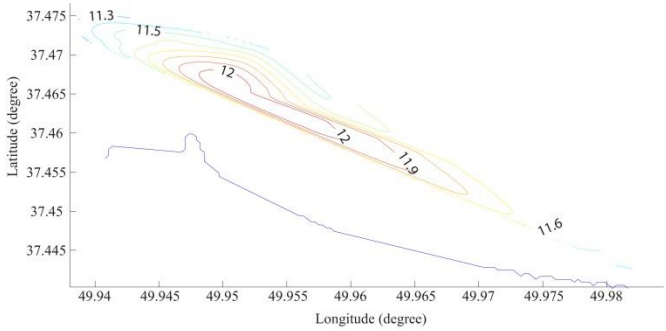


شکل ۲- سرعت و جهت جریان منطقه مورد مطالعه براساس داده‌های میانگین‌گیری عمقی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

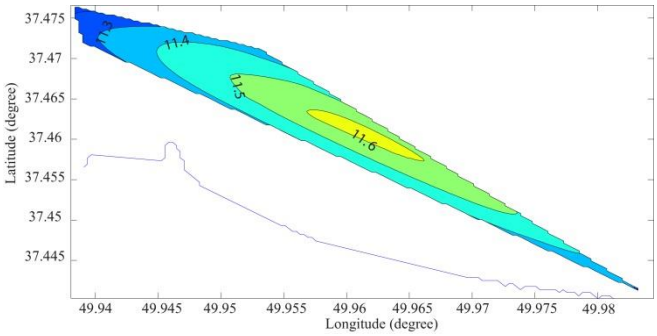
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

نمودارهای سطحی و عمقی (پربند) مربوط به دما و شوری آب برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده با دستگاه CTD در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. شکل ۳، پربند مربوط به دمای سطحی آب را نشان می دهد. وجود یک پیچک هسته گرم با اختلاف دمایی در حدود ۰/۵ ^{o}C قابل مشاهده است. هسته گرم این پیچک نشان دهنده ساعتگرد بودن آن است و پدیده فروجوشی رخ می‌دهد. پدیده فروجوشی سبب انتقال مواد مغذی و آلودگی به لایه‌های پایین‌تر می شود.

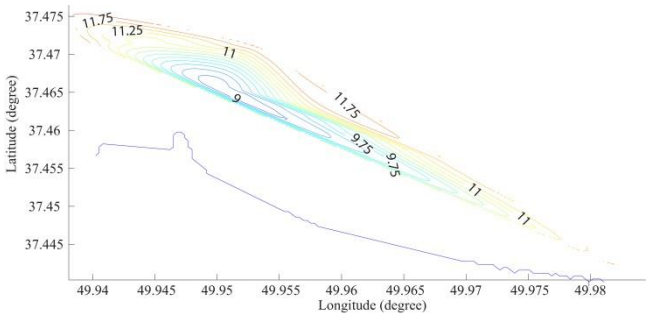


شکل۳- نمودار دمای آب برای یک متر اول سطح آب برای ایستگاه-های اندازه‌گیری شده با دستگاه CTD

شکل ۴ مربوط به پربند دما برای لایه نزدیک به بستر ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. برای نزدیک به بستر نیز پیچک لایه‌ی سطحی قابل مشاهده است. دمای هسته‌ی این پیچک نیز گرم بوده و از نوع ساعتگرد است. در واقع پیچک تشکیل شده در منطقه مورد مطالعه از سطح تا عمق امتداد دارد. البته با توجه به عمق کم منطقه مورد مطالعه، گسترش پیچک از سطح تا عمق قابل پیش بینی است. پربندهای مربوط به شوری (شکل ۵) نیز وجود این پیچک را تائید می‌کنند. هسته این پیچک کوچک مقیاس دارای شوری کمتری نسبت به اطراف خود است. به نظر می‌رسد یک پیچک یا جبهه‌ای در قسمت شمالی این پیچک نیز وجود داشته باشد (طول جغرافیایی ۴۹/۹۶ درجه شرقی با توجه به بسته بودن خطوط هم‌دما و هم‌شوری). شوری قسمت مرکزی پیچک در حدود ۹ psu است که در مقایسه با اطراف این پیچک در حدود ۲/۵ واحد شوری اختلاف دارد. البته اختلاف زیاد شوری مربوط به این پیچک ناشی از نفوذ آب رودخانه سفید رود نیز هست.

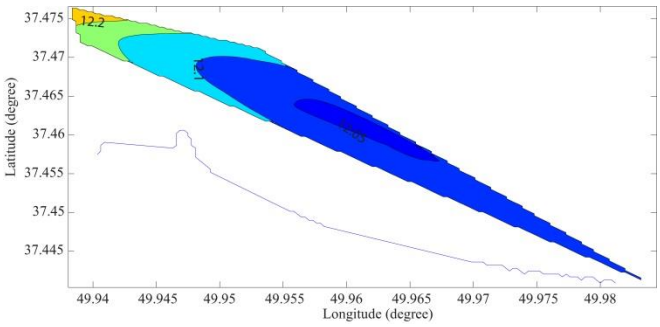


شکل ۴- نمودار دمای آب برای یک متر نزدیک بستر برای ایستگاه-های اندازه‌گیری شده با دستگاه CTD



شکل ۵- نمودار شوری آب برای یک متر اول سطح آب برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده با دستگاه CTD

این اختلاف شوری در ستون آب نیز قابل مشاهده است. اختلاف شوری در حدود ۳ واحد شوری بین سطح و عمق قابل مشاده است (شکل ۶). در صورت مواج بودن و اختلاط کامل ستون آب به دلیل وزش شدید باد این اختلاف شوری و دمایی از بین می‌رود و پیچک‌ها نیز از بین می‌روند. به نظر می‌رسد با افزایش عمق از مساحت پیچک کم شده و پیچک حالت مخروطی شکل پیدا کرده است.



شکل ۶- نمودار شوری آب برای یک متر نزدیک بستر برای ایستگاه-های اندازه‌گیری شده با دستگاه CTD

جدول ۱ متوسط عمقی پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده در ۷ ایستگاه مجزا را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بیشینه مقدار دما در ایستگاه d و با مقدار ۱۱/۷۰۷ ^{o}C مشاهده می‌شود. در این ایستگاه کمترین مقدار شوری ثبت شده است که در قسمت قبلی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

نیز در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. میزان اکسیژن محلول و نیز کلروفیل-آ در این ایستگاه‌ها نیز پایین هست هرچند که کمترین مقدار اندازه‌گیری شده نیست.

جدول ۱- مقادیر متوسط عمقی پارامترهای فیزیکی آب اندازه گیری شده در منطقه مورد مطالعه با دستگاه CTD

ایستگاه	موقعیت		دمای آب ºC	شوری آب PSU	اکسیژن محلول mg/l	کلروفیل-آ µg/l
	Lat (deg.)	Long (deg.)				
a	۳۷/۴۷۶۶۱۱	۴۹/۹۳۸۰۵۵	۱۱/۱۸۹	۱۲/۲۲۳	۶/۷۵	۱/۴۱
b	۳۷/۴۷۱۹۵۸	۴۹/۹۳۸۸۸۰	۱۱/۲۵۵	۱۲/۰۱۵	۶/۳۸	۱/۶۸
c	۳۷/۴۷۱۳۰۲	۴۹/۹۵۳۱۴۷	۱۱/۳۴۵	۱۲/۱۲۰	۶/۱۷	۱/۶۸
d	۳۷/۴۶۶۱۶۱	۴۹/۹۴۹۷۰۴	۱۱/۷۰۷	۱۰/۶۸۱	۶/۲۲	۱/۹۰
e	۳۷/۴۶۳۰۵۹	۴۹/۹۵۸۲۸۴	۱۱/۵۹۴	۱۱/۸۷۲	۶/۴۵	۲/۶۹
f	۳۷/۴۵۵۱۳۷	۴۹/۹۶۹۴۲۶	۱۱/۶۰۵	۱۱/۸۹۹	۶/۵۹	۲/۶۵
g	۳۷/۴۴۰۳۲۰	۴۹/۹۸۴۴۵۷	۱۱/۲۷۲	۱۲/۰۸۵	۶/۷۴	۱/۱۶

جدول ۲ مقدار اندازه‌گیری شده مواد مغذی برای ۵ ایستگاه اندازه-گیری شده را نشان می‌دهد. مقادیر نشان داده شده در جدول متوسط تکرار برای هر ایستگاه است. بطور کلی مقادیر مواد مغذی نشان می‌دهد که از شرق دهانه سفیدرود به سمت غرب دهانه میزان مواد مغذی در حال افزایش است. بیشترین میزان مواد مغذی در محدوده‌ی دهانه سفیدرود مشاهده شده است، که نشان می‌دهد مواد مغذی عمدتاً از طریق رودخانه وارد محیط دریایی می‌شوند. کمترین مقدار مواد مغذی در ایستگاه d مشاهده شده است. این مقدار کمینه در محلی اتفاق می‌افتد که هسته پیچک قرار دارد.

جدول۲- میزان مواد مغذی برای ایستگاه های اندازه‌گیری شده

ایستگاه	موقعیت		PO4 (ppb)	NO3 (ppb)
	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)		
a	۳۷/۴۷۱۹۵۸	۴۹/۹۳۸۸۸۰	۹/۰۵	۱۲۵/۶۳
b	۳۷/۴۶۶۱۶۱	۴۹/۹۴۹۷۰۴	۱۱/۷۷	۱۱۵/۶۳
c	۳۷/۴۶۳۰۵۹	۴۹/۹۵۸۲۸۴	۹/۷۲	۵۹/۳۸
d	۳۷/۴۵۵۱۳۷	۴۹/۹۶۹۴۲۶	۶/۰۹	۳۵/۰۰
e	۳۷/۴۴۰۳۲۰	۴۹/۹۸۴۴۵۷	۵/۶۴	۳۹/۳۸

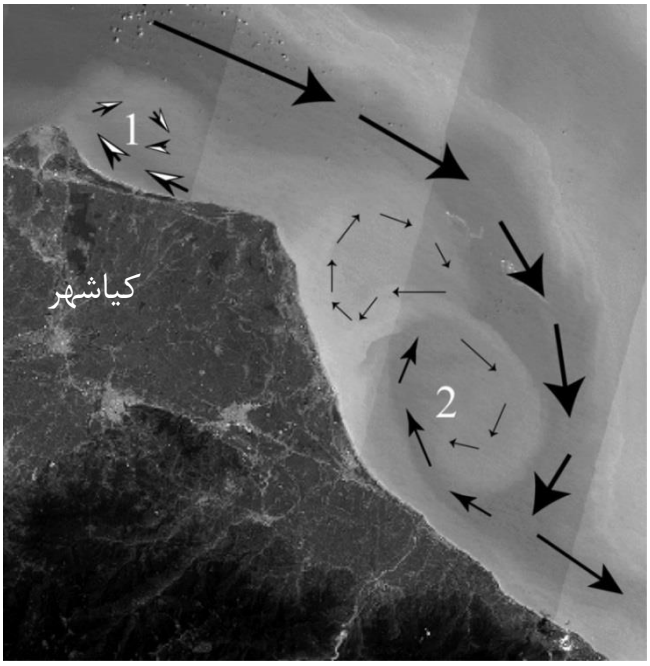
۴ - نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی پیچک‌های تشکیل شده در محدوده‌ی دهانه‌ی سفیدرود، روبروی کیاشهر پرداخته شد. پیچک‌ها نقش مهمی در انتقال گرما، انرژی، آلودگی و مواد مغذی در محیط دریایی دارند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی Sentinel2 محدوده‌ای که احتمال تشکیل پیچک وجود دارد، ارزیابی و سپس با استفاده از تجهیزات اقیانوس شناسی به بررسی و ویژگی‌های پیچک تشکیل شده در منطقه پرداخته شد. اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان با استفاده از دستگاه ADCP متصل به شناور، اندازه‌گیری مشخصه-های فیزیکی آب با دستگاه CTD و نمونه‌برداری آب جهت تعیین میزان مواد مغذی از موارد بود که برای تشخیص پیچک و تعیین ویژگی‌های آن استفاده شد. پربندهای حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب به همراه داده‌های جریان‌سنجی و مواد مغذی حاکی از تشکیل و گسترش یک پیچک هسته گرم در منطقه است. این پیچک ساعتگرد سبب فروجوشی در منطقه و در نتیجه انتقال آلودگی و مواد مغذی به بستر می‌شود. نتایج حاصل از تعیین مواد مغذی حاکی از کم بودن مواد مغذی فسفات و نیترات در محل تقریبی هسته‌ی این پیچک است. همچنین نمودارهای لایه‌ی سطحی و نزدیک بستر دما و شوری آب نیز این پدیده را تصدیق می‌کنند. بررسی پیچک‌های بزرگ مقیاس معمولاً با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و نیز داده‌های جریان سنجی ADCP متصل به شناور انجام می‌شود (برای مثال [9] و [21]). برای پیچک‌های کوچک و میان مقیاس بهترین روش مطالعه، استفاده از روش اندازه‌گیری میدانی است، چرا که با تصاویر ماهواره-ای و داده‌های ارتفاع‌سنجی رایگان نمی‌توان پیچک‌های کوچک و میان مقیاس را با دقت زیاد تشخیص داد.

مکانیزم ایجاد پیچک‌های کوچک مقیاس در منطقه می‌تواند ناشی از چرخش جریان در منطقه مورد مطاله به دلیل هندسه و عوارض زمین شناختی باشد. وقتی که سرعت جریان در منطقه دور از ساحل زیاد باشد (شکل ۷) و این جریان تحت تأثیر هندسه و عمق منطقه ساحلی قرار گیرد سبب می‌شود که جریان حالت چرخشی پیدا کرده و سرعت آن کم شود. به عبارت دیگر انرژی جنبشی آب در اثر تاثیراصطکاک بستر مستهلک شده و سبب ایجاد پیچک می‌کند. این پیچک‌ها معمولاً تحت تاثیر عوامل جوی از جمله باد هستند و موقعی که دریا حالت طوفانی داشته باشد مشاهده نمی‌شوند [22].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]



شکل ۷- محل تشکیل احتمالی پیچک در قسمت سواحل جنوبی دریای خزر با استفادهاز تصاویر سنجنده Sentinel 2 (2021.07.04, 7:26')، عدد ۱ در محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است.

تعادل فشار در دو طرف جریان اصلی از بین رفته و باعث می‌شود جریان از مسیر اصلی خود منحرف شده و به‌صورت چرخشی درآید. در واقع پیچک‌های بعدی ایجاد شده، ناشی از اختلاف فشار دو طرف جریان است. سیستم ایجاد شده جدید نیازمند ایجاد تعادل است که خود ایجاد این تعادل سبب چرخش جریان و ایجاد پیچک می‌شود. معادلات حاکم براین روند در زیر بیان شده اند.

$$\frac{d(EKE+EPE)}{dt} = -\overline{u'v'}.\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{u'u'}.\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{u'w'}.\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{w'b'} - \frac{g^2}{\rho_0{}^2 N^2}\left(\overline{u'\rho'}.\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \overline{v'\rho'}.\frac{\partial \overline{u\rho}}{\partial y}\right) + \text{Diffusion} \qquad (۲)$$

که در رابطه‌ی ۲، ترم اول مربوط به منبع برشی افقی، ترم دوم منبع برشی عمودی، ترم سوم تعادل عمودی و ترم چهارم مربوط به منبع گرادیان افقی چگالی است. علامت پرین بالای پارامترها نشان دهنده حذف قسمت‌های متوسط پارامترها است.

برخلاف پیچک‌های ناشی از تغییر جهت جریان، پیچک‌هایی هستند که با استفاده از تغییرات داده‌های پارامترهای فیزیکی آب (قابل اندازه‌گیری با دستگاه CTD) قابل مشاهده و با داده‌های جریان قابل ردیابی نیستند. چنین پیچک‌هایی معمولا با سرعت کمتری تولید و از بین می‌روند. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر پیچک با استفاده از داده‌های CTD قابل مشاهده ولی در داده‌های جریان سنجی خیلی واضح نیست، می‌توان نتیجه گرفت که پیچک‌های مطالعه حاضر می تواند ناشی از چرخش جریان دور از ساحل نبوده و ممکن است ناشی از اختلاف چگالی در ستون آب ناشی از آب ورودی از رودخانه باشد.

برای بررسی دقیق‌تر پدیده ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه و کل خزر جنوبی استفاده از داده‌های بیشتر با پوشش کافی و همچنین مدل‌سازی عددی می‌تواند بسیار سودمند باشد. با توجه به مشکلات ناشی از عملیات میدانی (هزینه بالا، نامساعد بودن شرایط جوی، نبود امکانات مناسب و همچنین مشکلات ناشی از تورهای ماهیگیری و پره) بهترین گزینه استفاده از مدل‌سازی عددی با تفکیک بالاست. برای این منظور لازم است داده‌های ژرفاسنجی منطقه در تولید شبکه مورد نیاز مدل دقت خوبی داشته باشند.

۵ - تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح پژوهشی تفاهم‌نامه‌ای با حمایت مالی صندوق حمایت پژوهشگران و فناوارن کشور با کد ۹۹۰۰۱۶۸۸ و پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی با کد۳۹۸-۰۱۲-۰۱-۰۴۴-۰۱ انجام شده است.

کلید واژگان

Firmware	سیستم عامل
Bottom Track	ردیاب کف
Georeferenced	زمین مرجع
Niskin Bottle	بطری نسکین
Depth average	میانگین عمقی

۶ - مراجع

1. Pascual, A., Faugère, Y., Larnicol, G., & Le Traon, P. Y. (2006). *Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters*. Geophysical Research Letters, 33(2).
2. Hunter, J. (1983). *Aspects of the dynamics of the residual circulation of the Arabian Gulf*. In Coastal oceanography (pp. 31-42). Boston, MA: Springer.
3. Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., & Kumar, V. (2015). *A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry*. Scientific data, 2(1), 1-16.
4. Sur, H. I., Özsoy, E., & Ibrayev, R. (2000). *Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea*. In Elsevier Oceanography Series (Vol. 63, pp. 289-297): Elsevier.
5. Gunduz, M. (2014). *Caspian Sea surface circulation variability inferred from satellite altimeter and sea surface temperature*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(2), 1420-1430.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]

6. Dyakonov, G. S., & Ibrayev, R. A. (2020). *High-resolution data on mesoscale dynamics of the Caspian Sea upper layer, obtained in a numerical reconstruction*. Data in brief, 30, 105368.
7. Gunduz, M., & Özsoy, E. (2014). *Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea*. Ocean Science, 10(3), 459-471.
8. Evans, D. G., Frajka-Williams, E ,.Naveira Garabato, A. C., Polzin, K. L., & Forryan, A. (2020). *Mesoscale eddy dissipation by a "zoo" of submesoscale processes at a western boundary*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(11), e2020JC016246.
9. Worst, J. S., Donohue, K. A., & Rossby ,T. (2014). A comparison of vessel-mounted acoustic Doppler current profiler and satellite altimeter estimates of sea surface height and transports between New Jersey and Bermuda along the CMV Oleander route. Journal of atmospheric and oceanic technology,1422-1433, (6)31.
10. Khosravi, M., Siadatmousavi, S. M., Vennell, R., & Chegini, V. (2018). *The transverse dynamics of flow in a tidal channel within a greater strait*. Ocean Dynamics, 68(2), 239-254.
11. Condie, S., & Condie, R. (2016). *Retention of plankton within ocean eddies*. Global Ecology and Biogeography, 25(10), 1264-1277.
12. Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M., & 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*. [Basic and Original Research]. Journal of the Persian Gulf (Marine Science), 5(18), 37-48.
13. Trump, C. L., & Marmorino, G. O. (1998). *Use of single-ping bottom-track ADCP data to characterize small-scale bathymetry*. Journal of atmospheric and oceanic technology, 15(1), 299-303.
14. Fong, D. A., & Monismith, S. G. (2004). *Evaluation of the accuracy of a ship-mounted, bottom-tracking ADCP in a near-shore coastal flow*. Journal of atmospheric and oceanic technology, 21(7), 1121-1,128.
15. Instruments, R. D. (1996). *Acoustic Doppler current profiler principles of operation: A practical primer*. RD Instruments, 1.
16. Hench, J. L., Luettich, R. A., & Bircher, J. T. (2000). *A portable retractable ADCP boom-mount for small boats*. Estuaries, 23(3), 392-399.
17. Idronaut (2002). *Ocean seven 316/319 CTD multiparameter probes operation's manual*. In Idronaut (Ed.). Milan.
18. Roberts, J., & Roberts, T. D. (1978). *Use of the Butterworth low-pass filter for oceanographic data.* Journal of Geophysical Research: Oceans, 83(C11), 5510-5514.
19. Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Analytica chimica acta, 27, 31-36.
20. Wood, E. D., Armstrong, F., & Richards, F . A. (1967). *Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite*. Journal of the marine Biological Association of the United Kingdom, 47(1), 23-31.
21. Andrae, A. (2020). *Comparison of different methods for the detection of mesoscale eddy characteristics in the eastern tropical North Atlantic*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ,
22. Ji, J., Dong, C., Zhang, B., Liu, Y., Zou, B., King, G. P., et al. (2018). *Oceanic eddy characteristics and generation mechanisms in the Kuroshio Extension region*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123(11), 8548-8567.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.6.7]