



ORIGINAL RESEARCH PAPER (Marine Science)

Automatic Detection of Eddies in Persian Gulf and Study of their Structure and Physical Properties

Omid Mahpeykar ¹, Amir Ashtari Larki ^{1*}, Mohammad Akbarinasab ²¹ Department of Physical Oceanography, Faculty of Marine Sciences and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Khorramshahr, Iran² Department of Physical Oceanography, Faculty of Marine Sciences and Oceanography, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ARTICLE INFO

Code: A-10-431-3

Article History:

Received: 01/08/2020

Revised: 19/08/2021

Accepted: 18/01/2021

Keywords:

Persian Gulf

Eddy

Vector geometry algorithm

Numerical modeling

*Corresponding author:

ashtari@kmsu.ac.ir

id 0000-0001-8134-9287

ABSTRACT

Background and Objectives: Eddies are relatively large, rotating masses of water in the seas similar to tornadoes in the atmosphere and are often accompanied by large ocean currents. For example, on the sides of the Kuroshio current, there are often mesoscale eddies with a radius of ten to hundreds of kilometers. A vortex can form when the current becomes unstable, and this instability grows and causes the current to twist, and eventually, an eddy is obtained. According to previous studies, eddies move slowly and can be considered a quasi-static structure in the water column compared to the dominant currents. Because eddies can transport warm or cold water masses, properties such as temperature and salinity distributions of the basin have undergone significant changes. These changes can affect the concentration of nutrients, the spread of pollutants, and changes in sound speed in water effective. So, the study of Eddies is critical in fishing, the environment, military, and maritime industries.

Methods: This study used a vector geometry algorithm based on the rotation of flow velocity vectors to identify and extract eddies in the Persian Gulf. The inputs of this algorithm, which are the horizontal components of velocity in different layers, are the result of numerical modeling of hydrodynamic circulation by the Mike model. After extracting eddies using the algorithm, their properties were investigated.

Findings: The algorithm results are extracted in 25 layers with a thickness of 2 meters from the surface to a depth of 50 meters. A total of 4308 cyclonic eddies and 2860 anticyclonic eddies were identified in the surface layer, and 617 cyclonic eddies and 329 anticyclonic eddies in the lowest layer, i.e., 50 meters depth. Eddies have the shortest lifespan in summer and the longest in winter. Also, the average lifespan of cyclonic eddies is slightly longer than anticyclonic eddies in all seasons except winter. The longer the lifespan of eddies, the more they penetrate to the depths, and the longer the lifespan of eddies is observed in the surface layers. Also, in some layers, the number of eddies increases slightly compared to the upper layer, indicating the formation of eddies in the middle layers. In summer, salinity can be considered one of the signs of Eddie's presence and in winter, temperature can be viewed as an indicator for identifying eddy. With these interpretations, whenever a decrease or increase in temperature or salinity occurs radially, the possibility of vortex occurring in that area can be considered; Of course, this temperature and salinity gradient increases the probability of the event whenever it is accompanied by a rotation of the current and lasts for at least a few days.

Conclusion: Persian Gulf eddies are among the rotational structures of the current in this watershed that play an essential role in the circulation, temperature-salinity change, and ecosystem. Because these structures have their complexities and the mechanism of their formation is not precisely known, the study of physical and geometric properties and characteristics leads to understanding them. In this study, the vector geometry algorithm was used to identify, extract and analyze eddies located in the Persian Gulf. After identifying the Eddies by the algorithm, their characteristics such as the average seasonal lifespan, number changes in terms of depth, their vertical structure, their seasonal distribution, and vertical profile of temperature and salinity were discussed.

NUMBER OF TABLES
2

NUMBER OF FIGURES
12

NUMBER OF REFERENCES
22

مقاله پژوهشی (علوم دریایی)

آشکارسازی اتوماتیک پیچک‌های خلیج فارس و مطالعه‌ی ساختار و خواص فیزیکی آنها

امید ماه‌بیکر^۱، امیراشتری‌لرکی^{۱*}، محمد اکبری‌نسب^۲

^۱ گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

^۲ گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

پیشینه و اهداف: پیچک‌ها، توده‌های آب نسبتاً بزرگ و چرخان در محیط دریاها هستند که مشابه گردبادها در جو هستند و غالباً با جریان‌های بزرگ دریایی همراه هستند. برای مثال در کناره‌های جریان کوروشیو غالباً پیچک‌های میان‌مقیاسی با شعاع از ده تا صدها کیلومتر وجود دارد. پیچک‌های دریایی هنگامی امکان تشکیل شدن دارند که جریان ناپایدار شده و این ناپایداری رشد کرده و باعث پیچش جریان شود و در نهایت یک پیچک حاصل شود. مطابق با مطالعات قبلی، پیچک‌ها به‌کندی حرکت می‌کنند و بنابراین در مقایسه با جریان‌های غالب می‌توانند به‌عنوان یک ساختار شبه‌استاتیک در ستون آب لحاظ شوند. از آنجا که حمل توده‌های گرم یا سرد می‌تواند توسط پیچک‌ها صورت بگیرد، در نتیجه خواص نظیر توزیع دما و شوری حوضه دچار تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای شده به‌نحوی که این تغییرات می‌تواند بر غلظت مواد مغذی، پخش و انتشار آلاینده‌ها و تغییرات سرعت صوت در آب اثرگذار باشد؛ بنابراین مطالعه پیچک‌ها اهمیت بسیار زیادی در ماهیگیری، محیط‌زیست، صنایع نظامی و دریانوردی دارند.

روش‌ها: در این مطالعه از الگوریتم هندسه برداری که بر اساس چرخش بردارهای سرعت جریان به شناسایی و استخراج پیچک‌ها می‌پردازد، در خلیج فارس استفاده شده است. ورودی‌های این الگوریتم که مؤلفه‌های افقی سرعت جریان در لایه‌های مختلف هستند، حاصل از مدل‌سازی عددی هیدرودینامیکی جریان (گردش آب) توسط مدل مایک ه‌ستند. پس از استخراج پیچک‌ها به کمک الگوریتم، خواص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج الگوریتم در ۲۵ لایه ۲ متری از سطح تا عمق ۵۰ متری استخراج شده است. در مجموع ۴۳۰۸ پیچک چرخندی و ۲۸۶۰ پیچک واچرخندی در لایه‌ی سطحی و ۶۱۷ پیچک چرخندی و ۳۲۹ پیچک واچرخندی در پایین‌ترین لایه یعنی عمق ۵۰ متری شناسایی شد. پیچک‌های با کمترین طول عمر در فصل تابستان و بیشترین در فصل زمستان است. همچنین میانگین طول عمر پیچک‌های چرخندی نسبت به واچرخندی نیز در همه فصول به غیر از زمستان اندکی بیشتر است. هرچه طول عمر پیچک‌ها بیشتر باشد در اعماق بیشتر نفوذ می‌کنند و پیچک‌های با طول عمر کمتر بیشتر در لایه‌های سطحی مشاهده می‌شوند. همچنین در برخی لایه‌ها تعداد پیچک‌ها نسبت به لایه‌ی بالاتر اندکی افزایش نشان می‌دهد و این حاکی از تشکیل پیچک‌ها در لایه‌های میانی است. در فصل تابستان مشخصه شوری را می‌توان به‌عنوان یکی از علائم وجود پیچک و در فصل زمستان دما را به‌عنوان شاخصی برای شناسایی پیچک لحاظ کرد. با این تفاسیر هرگاه کاهش یا افزایش در دما یا شوری به‌صورت شعاعی رخ دهد، می‌توان احتمال وقوع پیچک در آن ناحیه را در نظر گرفت؛ البته این گرادیان دما و شوری هرگاه با چرخش جریان همراه شود و تا چند روز حداقل ادامه داشته باشد، احتمال رویداد به‌مراتب افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: پیچک‌های خلیج فارس از جمله ساختارهای چرخشی جریان در این حوضه آبی هستند که نقش مهمی در گردش جریان، تغییرات دما-شوری و اکوسیستم آن دارند. از آنجا که این جریان‌ها پیچیدگی‌های خاص خود را دارند و سازوکار شکل‌گیری آن‌ها به‌طور دقیق شناخته نشده است، مطالعه و بررسی خواص و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی منجر به درک و شناخت از آن‌ها می‌شود. در این مطالعه از الگوریتم هندسه برداری به‌منظور شناسایی، استخراج و تحلیل پیچک‌های واقع در خلیج فارس استفاده شد. پس از شناسایی پیچک‌ها توسط الگوریتم ویژگی‌های آن‌ها از قبیل میانگین فصلی مدت دوام، تغییرات تعداد برحسب عمق، ساختار قائم آن‌ها، توزیع فصلی آن‌ها و نیمرخ قائم دما و شوری آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
تاریخ بازبینی: ۱۴۰۰/۰۵/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

واژگان کلیدی:

خلیج فارس

پیچک

الگوریتم هندسه‌برداری

مدل‌سازی عددی

*نویسنده مسئول

✉ ashtari@kmsu.ac.ir

مقدمه

و آنومالی‌های توپوگرافی بر آن مؤثر است [۷]. در واقع این گردش متشکل از دو مقیاس است:

۱- مقیاس حوضه‌ای؛ که همان گردش عمومی چرخندی است و متشکل از دو جریان، یکی به سوی شمال غربی از تنگه هرمز در طول سواحل ایرانی و در بخش شمالی حوضه و دیگری به سوی جنوب شرقی در بخش جنوبی حوضه است [۸].

۲- میان مقیاس؛ که دربرگیرنده پیچک‌هایی با ابعاد متفاوت است که در اثر وقوع ناپایداری و تجزیه گردش اصلی به مجموعه‌ای از پیچک‌ها رخ می‌دهند. در تابستان با تقویت پایداری ستون آب و ایجاد لایه‌بندی قوی، پیچک‌هایی با قطر بیش از ۱۰۰ کیلومتر نیز شکل می‌گیرند که این پیچک‌ها در اواخر تابستان موجب تغییر ساختار گردش کلی خلیج فارس به ساختارهای میان مقیاس شده که این شرایط طی دو تا سه ماه در این حوضه برقرار است [۶].

Duo و همکاران از یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق^۵ برای شناسایی پیچک‌های اقیانوسی بهره گرفتند. در این مطالعه یک شبکه موقعیت‌یابی و شناسایی اتوماتیک پیچک (OEDNet) ایجاد شد که مبتنی بر شبکه شناسایی اشیا است. در ابتدا فناوری پردازش تصویر دوبعدی برای استخراج داده‌های تعداد کمی از پیچک‌ها که توسط متخصصین شناسایی شده بود، استفاده گردید و سپس یک مدل تشخیصی با شبکه پسماند عمیق^۶ و شبکه هرمی خاص به‌عنوان ساختار اصلی طراحی شد و برای نمونه‌های کوچک و نواحی پیچیده در پیچک‌های اقیانوس بهینه‌سازی شد [۹].

Sun و همکاران از یک الگوریتم اتوماتیک بهبودیافته برای ردیابی پیچک‌های جهانی به کمک داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای بهره بردند. در این روش مشخصه‌های فیزیکی و هندسی پیچک‌ها شامل فاصله بین پیچک‌ها، مساحت و دامنه آن‌ها و شکل لبه‌های پیچک از طریق خروجی تشخیص و محاسبه فاصله Hausdorff که می‌تواند شباهت بین مرزهای پیچک‌ها را توصیف کند، گردآوری شد. همچنین روش هیبریدی پیشنهادشده توسط سایر محققان به کار گرفته شد و با نتایج دو روش ردیابی مرسوم مقایسه گردید [۱۰].

Matsuoka و همکاران یک روش جدید برای شناسایی، ردیابی و آشکارش پیچک‌ها توسعه دادند. برای دستیابی به درک درست از پیچک‌ها با استفاده از حجم وسیع داده‌های تولیدشده توسط شبیه‌سازی‌ها، آشکارسازی توزیع پیچک‌ها در هر گام زمانی به‌تنهایی کافی نیست و تغییرات زمانی رخدادهای پیچکی نیز باید در نظر گرفته شود [۱۱]. Yi و همکاران از روشی جدید که به روش هیبریدی معروف است به منظور افزایش دقت شناسایی پیچک و قابلیت تشخیص ساختارهای چند هسته‌ای پیچکی از نقشه‌های آنومالی تراز دریا استفاده کردند. نرخ شناسایی موفق و افزونی نرخ شناسایی در این روش به

پیچک‌ها^۱، توده‌های آب نسبتاً بزرگ و چرخان در محیط دریاها هستند که مشابه گردبادها در جو هستند و غالباً با جریان‌های بزرگ دریایی همراه هستند [۱]. برای مثال در کناره‌های جریان کوروشیو غالباً پیچک‌های میان‌مقیاسی^۲ با شعاع از ده تا صدها کیلومتر وجود دارد. پیچک‌های دریایی هنگامی امکان تشکیل شدن دارند که جریان ناپایدار شده و این ناپایداری رشد کرده و باعث پیش‌جریان شود و در نهایت یک پیچک حاصل شود [۲]. مطابق با مطالعات قبلی، پیچک‌ها به‌کندی حرکت می‌کنند و بنابراین در مقیاسه با جریان‌های غالب می‌توانند به‌عنوان یک ساختار شبه‌استاتیک در ستون آب لحاظ شوند [۳]. از آنجاکه حمل توده‌های گرم یا سرد می‌تواند توسط پیچک‌ها صورت بگیرد، در نتیجه خواصی نظیر توزیع دما و شوری حوضه دچار تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای شده به‌نحوی که این تغییرات می‌تواند بر غلظت مواد مغذی، پخش و انتشار آلاینده‌ها و تغییرات سرعت صوت در آب اثرگذار باشد [۴]؛ بنابراین مطالعه پیچک‌ها اهمیت بسیار زیادی در ماهیگیری، محیط‌زیست، صنایع نظامی و دریانوردی دارند.

روش‌های مطالعه پیچک‌های میان‌مقیاس می‌تواند به شناسایی، مشاهده و رهگیری آن‌ها منجر شود. داده‌هایی که حاوی اطلاعات مربوط به پیچک‌ها هستند، شامل داده‌های ماهواره‌ای سنجش‌از‌دور و یا خروجی‌های مدل‌های عددی می‌باشند. تجزیه و تحلیل اطلاعات این داده‌ها به دلیل حجم بسیار زیاد از لحاظ مکانی و زمانی به روش معمول امری غیرممکن است [۵]. از این‌رو استخراج پیچک‌ها و تحلیل آن‌ها به روش‌های اتوماتیک صورت می‌گیرد که این روش‌ها در چهار دسته تقسیم می‌شوند: روش استفاده از پارامترهای فیزیکی، روش‌های به‌کارگیری تحلیل wavelet برای میدان تاوایی نسبی، روش‌های استفاده از مشخصه‌های هندسی خطوط جریان و روش استفاده از مشخصه آنومالی تراز دریا (SLA)^۳. برای به‌کارگیری این روش‌ها سرعت‌های سطحی و میدان تاوایی نسبی لازم است در دسترس باشند و یا محاسبه شوند. در این مطالعه از روش مشخصه‌های هندسی خطوط جریان به‌منظور شناسایی و استخراج پیچک‌ها در خلیج فارس استفاده شده است. این مطالعه با هدف شناسایی و بررسی پیچک‌های واقع در خلیج فارس بر اساس روش مشخصه‌های هندسی خطوط جریان و با استفاده از خروجی‌های مدل عددی انجام شده است.

الگوی جریان کلی خلیج فارس در درجه اول تحت تأثیر وزش بادهای غالب شمال غربی و شارهای شناوری و تکانه مربوطه، سپس تحت اثر نیروهای گرم-شوری و در نهایت متأثر از کشند است [۶]. باین حال جزئیات این گردش پیچیده‌تر از یک چرخاب^۴ چرخندی است؛ چرا که تغییرات فصلی تبادل آب در تنگه هرمز، ورودی رودخانه‌ها، نیروی باد

⁴ Gyre

⁵ Deep learning

⁶ Deep Residual Network

¹ Eddy

² Mesoscale

³ Sea Level Anomaly

تبدیل می‌شود که این پیچک‌ها تا اکتبر و حتی نوامبر بر خلیج فارس حاکم هستند.

در این مطالعه از الگوریتم ایجادشده توسط Nencioli و همکاران [۱۴] که بر اساس تغییرات بردارهای جریان افقی است؛ تحت نرم‌افزار MATLAB برای شناسایی پیچک‌ها استفاده شده است (Vector Geometry Algorithm).

به‌طور ظاهری، یک پیچک در ناحیه‌ای تعریف می‌شود که میدان برداری سرعت افقی حول یک نقطه مرکزی چرخش داشته باشد. بر مبنای همین خاصیت الگوریتم از چهار شرط برای شناسایی پیچک استفاده می‌کند و در صورت اقناع شدن این چهار قید وجود پیچک تائید و ثبت می‌شود. این چهار شرط عبارت‌اند از:

۱- در طول مقطع شرقی- غربی شبکه منظم داده‌های سرعت، علامت مؤلفه سرعت v حول یک نقطه مرکزی باید معکوس شود و مقدار آن با دور شدن از مرکز افزایش یابد.

۲- در طول مقطع شمالی- جنوبی شبکه منظم داده‌های سرعت، علامت مؤلفه سرعت u حول یک نقطه مرکزی باید معکوس شود و مقدار آن با دور شدن از مرکز افزایش یابد.

۳- حداقل مقدار سرعت به‌عنوان مرکز پیچک تعیین شود.

۴- حول مرکز پیچک جهت‌های بردار سرعت با یک آهنگ ثابت چرخش کند. برای مثال بردارهای حول یک نقطه به ترتیب در چهار راستای جنوبی، شرقی، شمالی و غربی باید همانند شکل (۲-الف) تغییر کنند تا قید چهارم اقناع شود و شکل‌های (۲-ب) و (۲-ج) نمی‌توانند این شرط را برآورده سازند.

قیدهایی که در بالا ذکر شد برای تنظیم به دو پارامتر نیاز دارند که یکی از پارامترها برای قیده‌های اول، دوم و چهارم و دیگری نیز برای قید سوم به کار گرفته می‌شود. پارامتر اول که به‌عنوان a لحاظ شده است تعیین می‌کند چه تعداد از سلول‌های یک شبکه حول نقطه‌ای مرکزی که دارای حالت افزایشی سرعت در راستای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی هستند، بررسی شده‌اند.

پارامتر دوم که به‌عنوان b شناخته می‌شود تعیین‌کننده تعداد سلول‌هایی است که حول نقطه انعکاس بردارهای سرعت برای یافتن حداقل سرعت جستجو می‌شوند. این دو پارامتر حداقل اندازه پیچک‌ها را تعیین می‌کنند و اجازه می‌دهند که الگوریتم برای شبکه‌هایی با تفکیک مختلف کاربرد داشته باشد. از سوی دیگر مقادیر این پارامترها بسته به مشخصات و تفکیک مکانی مجموعه داده‌ها لازم است به‌دقت تنظیم شود تا الگوریتم به لحاظ عملکرد بهینه شود (جزئیات بیشتر در [۱۴]).

ترتیب ۹۶/۶٪ و ۱۴/۲٪ به دست آمد [۱۲]. Patel و همکاران به شناسایی اتوماتیک پیچک‌ها در تصاویر رنگی ماهواره‌ای با استفاده از شبکه عصبی و تحلیل شکلی پرداختند [۱۳].

روش پژوهش

در این تحقیق ابتدا مدل‌سازی عددی گردش جریان در خلیج فارس با استفاده از مدل مایک ۳ صورت گرفته است. برای ایجاد شبکه محاسباتی مدل، داده‌های عمق‌سنجی^۱ JEBCO با دقت ۳۰ ثانیه به‌صورت شبکه محاسباتی نامنظم و مثلثی شامل ۹۶۳۲ المان و ۵۲۰۶ گره ساخته شد و در ۳۱ لایه قائم Z در نظر گرفته شده است. در مدل‌هایی که با یکی از روش‌های عددی المان محدود و یا تفاضل محدود اجرا می‌شوند، پایداری و همگرایی مدل به گام زمانی و فاصله گره‌های شبکه بستگی دارد. در ماژول هیدرودینامیک برنامه MIKE نیز شرط CFL برای پایداری به کار می‌رود که به‌صورت زیر است:

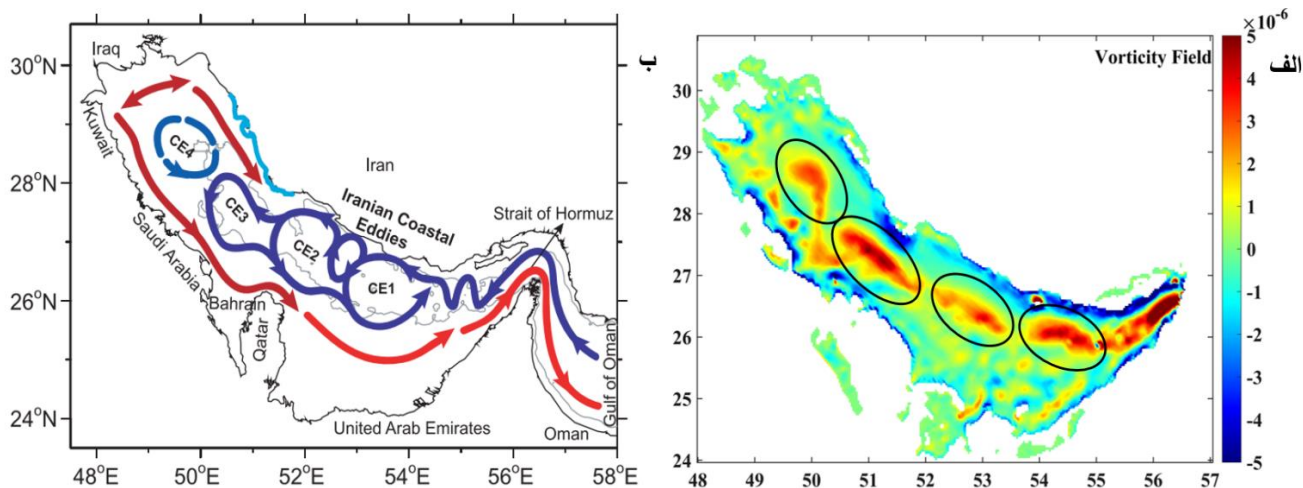
$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (1)$$

بدین منظور و با توجه به ابعاد مش و همچنین محدوده گام زمانی معادلات که بین ۰/۱ تا ۳۰ ثانیه است، مقدار CFL بحرانی ۰/۸ محاسبه شد که برای پایداری مدل مقادیر آن باید کمتر از این مقدار باشند. نیروهای اعمال‌شده متأثر از گرما-شوری و تنش باد هستند و از اعمال نیروی جزر و مد به دلیل اثرات خیلی کم بر تغییرات چگالی صرف‌نظر شده است [۶]. پس از اجرای مدل به مدت ۸ سال و پایداری دما و شوری، مؤلفه‌های افقی سرعت به‌صورت شبکه‌ای منظم با ۳۰۰ سلول در راستای طولی (طول هر سلول ۰/۳۰۲۲۷۹ درجه) و ۲۰۰ سلول در راستای عرضی (عرض هر سلول ۰/۳۴۶۷۹۷ درجه) و با فواصل قائم ۲ متری پردازش و استخراج شدند. داده‌های سرعت جریان روزانه در سال آخر اجرای مدل به‌عنوان ورودی الگوریتم شناسایی پیچک استفاده شدند.

پس از استخراج مؤلفه‌های سرعت، میانگین فصلی میدان تاوایی جهت اعتبارسنجی مدل با استفاده از رابطه $\nabla \times v$ در نرم‌افزار MATLAB در ماه سپتامبر ترسیم شد (شکل ۱-الف) و ملاحظه می‌شود که با نتایج مطالعه Hogan و Thoppil [۶] نیز تطابق خوبی دارد (شکل ۱-ب).

نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که در فصل تابستان گردش اصلی خلیج فارس به چندین پیچک کوچک تقسیم می‌شود و این پیچک‌ها در فصل پاییز تقویت می‌شوند و با سرد شدن هوا و فرارسیدن زمستان به علت اختلاط از بین می‌روند. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که گردش چرخندی بین جولای و اوت دستخوش تغییرات محسوسی شده و به سه تا چهار پیچک چرخندی و غالباً یک پیچک واچرخندی

¹ <http://www.jebcoseis.com>



شکل ۱: (الف) میدان تاوایی میانگین سرعت در فصل پاییز که دایره‌های مشخص شده نشان‌دهنده وجود چرخش پادساعتگرد

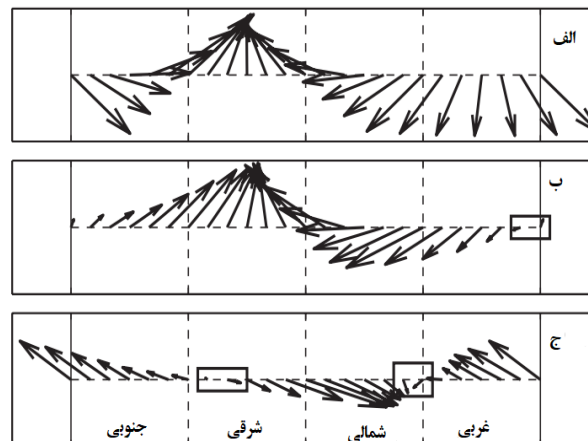
بردارهای سرعت در آن نواحی هستند. (ب) نتایج مطالعه تاپیل و هوگان [۶]

Fig. 1: (a) the vorticity field of mean velocity in September, where the marked circles indicate the existence of counterclockwise rotation of the velocity vectors in those areas. (b) The results of the Thoppil and Hogan [6]

Noa تعداد پیچک‌هایی است که الگوریتم آن‌ها را شناسایی کرده است ولی توسط متخصصین به‌عنوان پیچک تشخیص داده نشده‌اند. به‌طور کلی SDR نمایانگر دقت تشخیص الگوریتم و EDR بیانگر میزان خطای الگوریتم است و مقادیر آن‌ها به ترتیب هرچه بزرگ‌تر و کوچک‌تر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر است.

به‌منظور بهینه‌سازی الگوریتم داده‌های سرعت جریان در خلیج فارس برای هفت روز مختلف به‌صورت تصادفی انتخاب گردید و پیچک‌های موجود در آن‌ها توسط متخصصین استخراج شد. مقادیر مختلف a و b نیز جهت بهینه‌سازی الگوریتم بررسی شد به‌طوری‌که بازه تغییرات a بین ۲ تا ۱۰ و بازه تغییرات b بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شد و در مجموع ۹۰ ترکیب مختلف a و b برای بهینه‌سازی الگوریتم لحاظ گردید. نمودار تغییرات SDR و EDR به ازای ترکیب‌های مختلف a و b در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ترکیب a=3 و b=2 دارای بیشترین دقت با مقداری حدود ۸۵٪ و کمترین خطا با مقداری حدود ۱۲٪ است.

در جدول ۱ جزئیات محاسبه SDR و EDR به ازای a=3 و b=2 بسط داده شده است. مقایسه مقادیر جدول با نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در مطالعه Nencioli و همکاران برای همین الگوریتم مقدار SDR=92.9٪ و EDR=2.9٪ است [۱۴]. در این مطالعه ذکر شده که مقادیر SDR بالای ۸۰٪ مطلوب است. در مطالعه Chaigneau و همکاران، مقدار SDR به ازای دو روش مختلف به کار گرفته شده ۹۲٪ و ۸۶٪ است در حالی که EDR به ترتیب ۱۸٪ و ۶۳٪ است [۱۵]. هرچند به دلیل متفاوت بودن روش‌ها و همچنین مجموعه داده‌های استفاده‌شده در مطالعات، امکان مقایسه مستقیم پارامترها با یکدیگر وجود ندارد، با این حال این دو پارامتر در مورد داده‌های مطالعه حاضر به ازای a=3 و b=2 بهترین حالت را دارند.



شکل ۲: (الف) آهنگ چرخش بردارها حول نقطه مرکزی پیچک. (ب و ج)

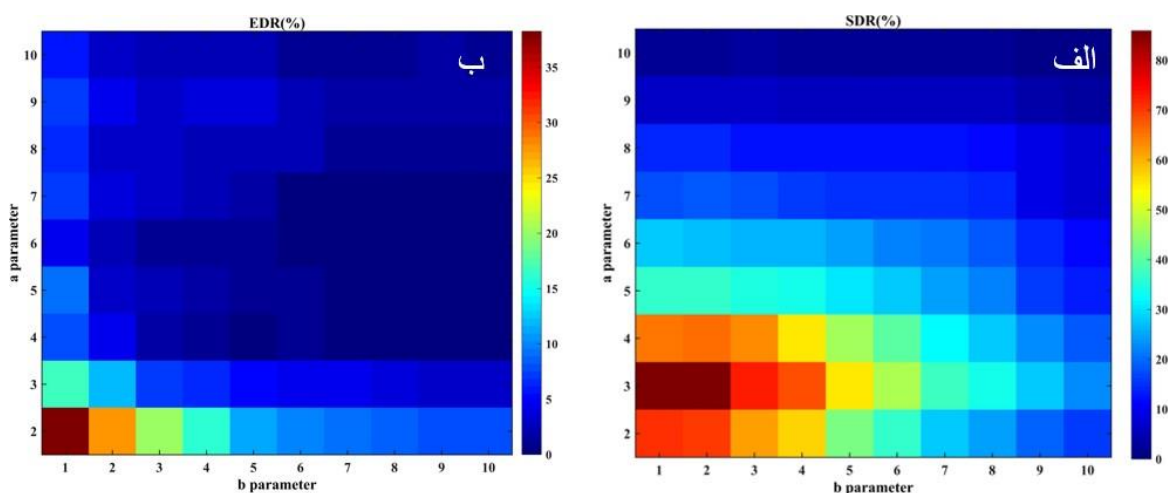
بردارهایی که درون کادر قرار گرفته‌اند دارای ناهنجاری هستند و در نتیجه نمی‌توانند شرط چهارم مبنی بر وجود پیچک را اقیان کنند.

Fig. 2: (a) the rate of vector rotation around eddy center. (b & c) The vectors inside the box have anomalies and therefore cannot satisfy the fourth condition of algorithm.

برای صحت‌سنجی الگوریتم نقشه‌های میدان برداری جریان تعدادی از روزها به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود و پیچک‌های موجود در این نقشه‌ها به کمک چشم توسط متخصصین استخراج می‌گردد. طبق مطالعات Chaigneau و همکاران بازدهی الگوریتم با تعریف دو پارامتر قابل ارزیابی است [۱۵]: نرخ شناسایی موفق (SDR) و افزونی نرخ شناسایی (EDR). این پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$SDR = \frac{N_c}{N_{te}} \times 100, EDR = \frac{N_{oa}}{N_{te}} \times 100 \quad (2)$$

که Nte تعداد پیچک‌های واقعی برای یک روز مشخص که توسط متخصصین شناسایی شده‌اند، Nc تعداد پیچک‌هایی که توسط متخصصین شناسایی شده‌اند و الگوریتم نیز آن‌ها ثبت کرده است و



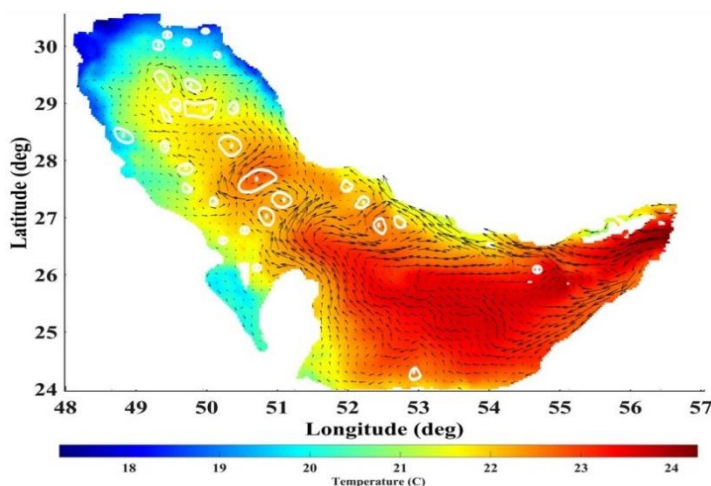
شکل ۳: ترکیب مختلف a و b برای بهینه‌سازی الگوریتم: (الف) نرخ شناسایی موفق و (ب) افزونی نرخ شناسایی

Fig. 3: Different combinations of a and b to optimize the algorithm: (a) SDR and (b) EDR

جدول ۱: نتایج اعتبارسنجی الگوریتم برای هفت روز منتخب که توسط متخصصین بررسی شده است

Table 1: Algorithm validation results for seven selected days reviewed by experts

روز	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	مجموع
Nte	۳۶	۳۴	۸	۱۰	۱۲	۱۹	۳۰	۱۴۹
Nc	۳۰	۲۸	۷	۷	۱۱	۱۶	۲۸	۱۲۷
Noa	۴	۲	۱	۲	۲	۱	۶	۱۸
پیچک‌های از دست‌رفته توسط الگوریتم	۶	۶	۱	۳	۱	۳	۲	۲۲
SDR(%)	۸۳/۳	۸۲/۳	۸۷/۵	۷۰	۹۱/۶	۸۴/۲	۹۳/۳	۸۵/۲
EDR(%)	۱/۱۱	۵/۸	۱۲/۵	۲۰	۱۶/۶	۵/۳	۲۰	۱۲



شکل ۴: پیچک‌های شناسایی شده توسط الگوریتم

Fig. 4: Eddies identified by the algorithm

گرفته‌اند و دارای قطره‌های کوچکی هستند و بیانگر این است که تحت تأثیر عوامل محلی نظیر توپوگرافی و یا وزش باد تشکیل می‌شوند.

به‌منظور رفع نوسانات و اختلالات رایج در نتایج مدل‌سازی عددی و خطاهای شناسایی مربوط به الگوریتم، پیچک‌های با مدت دوام کمتر از سه روز از نتایج حذف شده‌اند [۴]. در شکل ۵ میانگین مدت دوام پیچک‌های چرخندی و واچرخندی در فصول مختلف در لایه‌ی سطحی مشاهده می‌شود. پیچک‌های با کمترین طول عمر در فصل تابستان و بیشترین در فصل زمستان است. همچنین میانگین طول عمر

نتایج و بحث

نتایج الگوریتم در ۲۵ لایه ۲ متری از سطح تا عمق ۵۰ متری استخراج شده است. در شکل ۴ پیچک‌های شناسایی شده توسط الگوریتم در لایه سطحی در اوایل فصل بهار نشان داده شده است. در مجموع ۴۳۰۸ پیچک چرخندی و ۲۸۶۰ پیچک واچرخندی در لایه‌ی سطحی و ۶۱۷ پیچک چرخندی و ۳۲۹ پیچک واچرخندی در پایین‌ترین لایه یعنی عمق ۵۰ متری شناسایی شد. این پیچک‌ها بر روی توزیع دمایی قرار

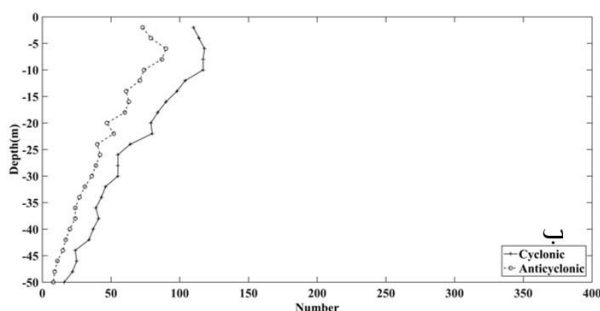
درصد برای پیچک‌های واچرخندی حدود ۱۰٪ است و نشان می‌دهد پیچک‌های واچرخندی از سطح تا عمق بیشتر تحلیل می‌روند و کمتر به اعماق نفوذ می‌کنند. هرچه طول عمر پیچک‌ها بیشتر باشد در اعماق بیشتر نفوذ می‌کنند و پیچک‌های با طول عمر کمتر، بیشتر در لایه‌های سطحی مشاهده می‌شوند. همچنین در برخی لایه‌ها تعداد پیچک‌ها نسبت به لایه‌ی بالاتر اندکی افزایش نشان می‌دهد و این حاکی از تشکیل پیچک‌ها در لایه‌های میانی است. همچنین اختلاف بین تعداد پیچک‌های چرخندی و واچرخندی در لایه‌های بالاتر نسبت به لایه‌های زیرین بیشتر است و این می‌تواند به دلیل اختلاف بین جریان بادرانده و چگالی‌رانده در لایه‌های سطحی باشد و بیان می‌کند که تفاوت این دو نیرو که می‌تواند منجر به شکل‌گیری پیچک چرخندی و واچرخندی شود در لایه‌های بالاتر بیشتر است.

از لحاظ ساختار قائم بر اساس شعاع، پیچک‌های شناسایی شده را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: ۱- پیچک‌هایی که دارای شعاع بزرگ‌تر در بالاترین لایه و به شکل کاسه هستند؛ ۲- پیچک‌هایی که دارای بزرگ‌ترین شعاع در پایین‌ترین لایه و به شکل مخروط هستند و ۳- پیچک‌هایی که دارای بزرگ‌ترین شعاع در لایه‌های میانی و به شکل عدسی هستند (شکل ۷). بدین منظور پیچک‌هایی که ضخامت آن‌ها در راستای قائم یا به عبارتی عمق آن‌ها بیش از ۲۰ متر است، مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: شکل ساختاری قائم پیچک‌ها

Table 2: Vertical structural shape of eddies

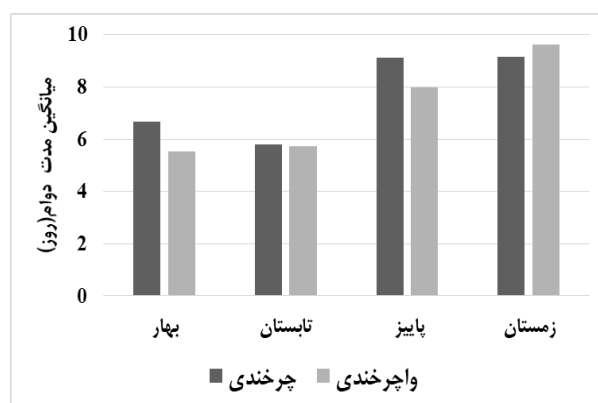
جهت	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	مجموع
کاسه‌ای	۴۱	۴	۱۲	۵۴	۲۱۲
چرخندی	۱۳	۲	۱۸	۶۸	
واچرخندی	۴	۳	۳۷	۲۲	۸۴
مخروطی	۲	۲	۲	۱۲	
چرخندی	۱۹۸	۵۶	۳۱۳	۵۰۴	۱۶۷۰
واچرخندی	۱۰۹	۶۴	۱۲۸	۲۹۸	



شکل ۶: تغییرات تعداد پیچک نسبت به عمق برای پیچک‌های با عمر الف) بیش از سه روز و ب) بیش از ده روز

Fig. 6: Changes in the number of eddy to depth for eddies with a lifespan a) more than three days and b) more than ten days

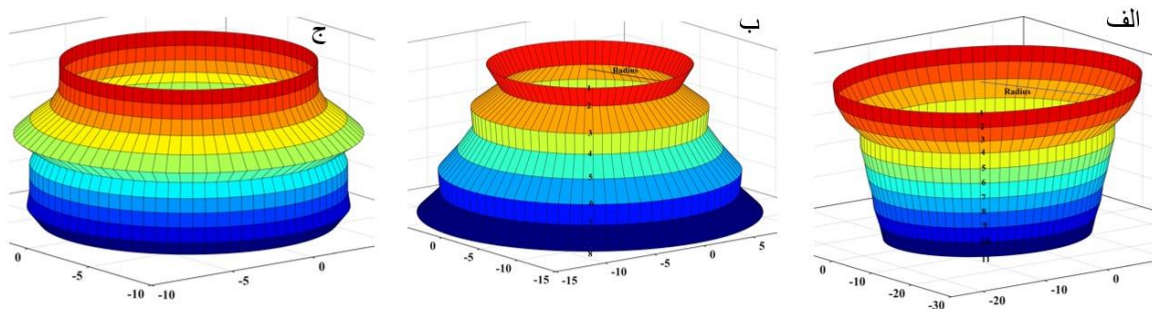
پیچک‌های چرخندی نسبت به واچرخندی نیز در همه فصول به غیر از زمستان اندکی بیشتر است. در این الگوریتم معیار اندازه‌گیری طول عمر پیچک‌ها، تغییر شکل کلی پیچک و از بین رفتن نقطه حداقل سرعت در مرکز پیچک است؛ بنابراین تغییرات اندک شعاع و همچنین جابجایی کوچک مرکز پیچک طی مدت دوام آن لحاظ می‌شود. باید ذکر کرد که در این میانگین‌گیری فرض بر این است که پیچک در همان فصل تشکیل شده و از بین رفته است؛ بنابراین پیچک‌های با طول عمر بیش از ۹۰ روز لحاظ نشده‌اند و اثرات بین فصلی بر روی پیچک‌ها دیده نشده است. با این حال نتایج نشان داد که پیچک‌هایی با چنین مدت دوامی در همه فصول و بیشتر در تابستان می‌تواند رخ دهد ولی برای بررسی دقیق‌تر باید داده‌های بیش از یک سال را مورد بررسی قرار داد.



شکل ۵: میانگین فصلی طول عمر پیچک‌های چرخندی و واچرخندی در لایه‌ی سطحی

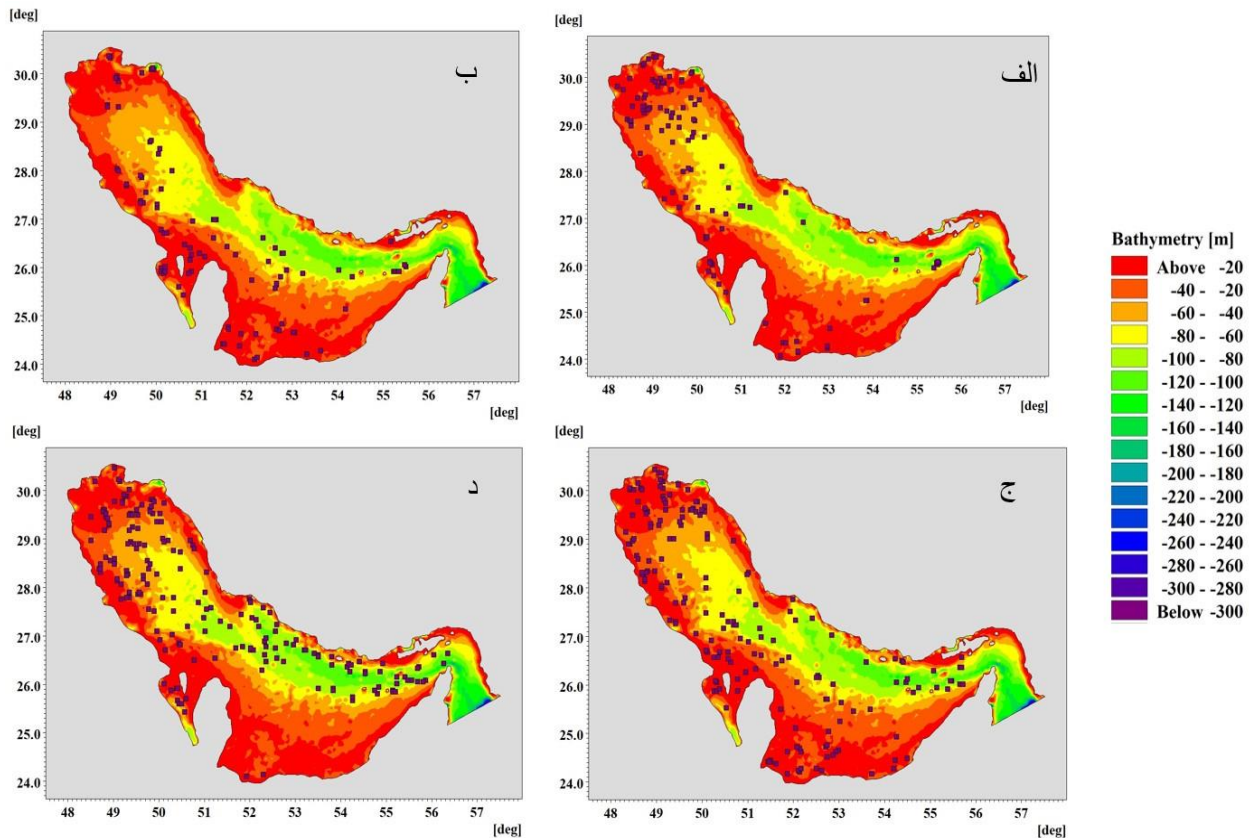
Fig. 5: Seasonal average lifespan of cyclonic and anticyclonic eddies in the surface layer

در شکل (۶-الف) تغییرات تعداد پیچک‌های چرخندی و واچرخندی با عمر سه روز و بیشتر، از لایه سطحی تا عمق ۵۰ متری و در شکل (۶-ب) همین تغییرات به ازای پیچک‌های با طول عمر ده روز و بیشتر نشان داده شده است. تعداد پیچک‌های واچرخندی در تمام ترازها نسبت به پیچک‌های چرخندی کمتر است. از سویی تعداد پیچک‌ها در شکل (۶-الف) با شیب بیشتری نسبت به شکل (۶-ب) کاهش می‌یابد ولی درصد پیچک‌های چرخندی عمیق‌ترین لایه نسبت به لایه‌های سطحی در هر دو شکل تقریباً برابر و حدود ۱۵٪ است که البته این



شکل ۷: ساختار قائم پیچک به صورت کاسه‌ای، مخروطی و عدسی

Fig. 7: Vertical structure of eddy in the form of bowl-shaped, cone-shaped and lens-shaped



شکل ۸: توزیع پیچک‌ها در خلیج فارس در فصل (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز، و (د) زمستان در لایه سطحی

Fig.8: Distribution of eddies in the Persian Gulf in season (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in the surface layer

در مورد ساختارهای عدسی‌شکل در خلیج فارس بهتر است انواع موارد و حالات را تحت بررسی قرار داد، با این حال با توجه به آمیختگی آب در فصل زمستان و ورود آب سبک از دریای عمان و همچنین پلوم ارون‌درود که دارای آب شیرین است، تعداد زیاد پیچک‌های عدسی‌شکل مطابق انتظار است. پیچک‌های کاسه‌ای نیز در حالتی نمود پیدا می‌کنند که محدودیت سطح خلیج فارس از رشد شعاعی آن‌ها جلوگیری می‌کند (از سطح تا بستر با افزایش عمق عرض خلیج فارس کاهش می‌یابد).

پیچک‌های مخروطی نیز به دلیل اثرات ناحیه ترموکلاین که در فصل گرم با جداسازی آب‌های سطحی از آب‌های عمیق باعث ایجاد دو محیط با دمای متفاوت می‌شود، می‌توانند تشکیل شوند. پیچک‌های

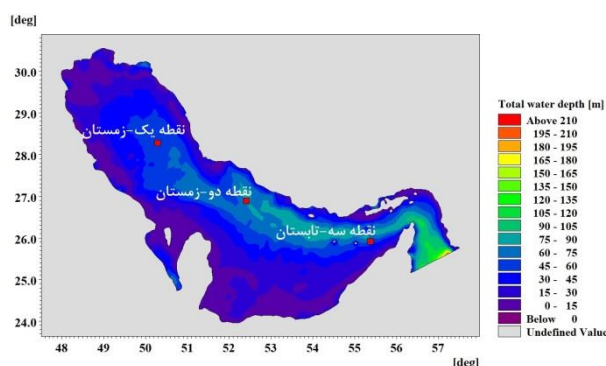
همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشتر پیچک‌ها دارای بزرگ‌ترین شعاع در لایه‌های میانی هستند و دارای ساختار عدسی‌شکل هستند. همچنین به تبعیت از تعداد کل پیچک‌ها، ساختارهای عدسی‌شکل در فصل زمستان تعداد بیشتری نسبت به فصل تابستان دارند که این به دلیل وجود آمیختگی در ساختار قائم آب است.

در مطالعه‌ای که توسط Lin و همکاران نیز بر روی ساختارهای عدسی شکل در دریای چین جنوبی صورت گرفته است، بیان شده که ساختارهای عدسی‌شکل احتمالاً از یک لایه آمیخته ناشی می‌شوند که توسط لایه سبک و نازکی پوشانده شده است [۱۶].

به طور کلی تغییرات دما و شوری جزء مشخصه‌های ذاتی یک پیچک محسوب می‌شوند و یکی از راه‌های شناسایی پیچک‌ها نیز بررسی تغییرات این دو پارامتر است [۲۰، ۱۹].

در شکل ۱۰ نیم‌رخ دما و شوری در سه نقطه منتخب شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیچک‌های اول و دوم در شرایطی قرار دارند که ستون آب دارای دمای تقریباً یکنواختی از سطح تا بستر است ولی در مقطع عرضی دارای اختلافات چشمگیری است. پیچک اول دارای هسته سردتر ولی پیچک دوم دارای هسته گرم‌تر نسبت به محیط اطرافش است. از آنجاکه پیچک اول چرخندی و پیچک دوم واچرخندی است، پس انتظار وجود هسته‌ی سرد برای پیچک اول و هسته‌ی گرم برای پیچک دوم منطقی است و مطابق با مطالعه Sun و همکاران این پیچک‌ها به ترتیب باعث ایجاد حرکات واگرایی و همگرایی می‌شوند [۲۱]. از سوی دیگر در فصل زمستان به دلیل وجود اختلاط شدید و در نتیجه آن محیط چگال‌گرا اختلافات عرضی دمایی خود می‌تواند باعث ایجاد انرژی اولیه برای تشکیل پیچک‌ها در این فصل شود و همین عامل دلیلی بر تعداد بیشتر پیچک‌ها در فصل زمستان است.

به عبارت دیگر می‌توان گفت وجود اختلاف دمایی باعث شکل‌گیری پیچک و نمو پیچک سبب افزایش اختلاف دمایی بین مرکز پیچک و محیط اطرافش شده که این به‌عنوان یک بازخورد مثبت^۱ تلقی می‌شود. در نیم‌رخ‌های شوری اول و دوم به دلیل عدم اختلاف شوری بین مرکز پیچک و محیط اطراف آن پیچک به خوبی قابل‌رؤیت نیست. نیم‌رخ دمایی پیچک سوم که در فصل تابستان واقع شده است، تغییرات محسوسی در مقایسه با فصل زمستان نشان نمی‌دهد. در این فصل به علت وجود لایه‌بندی قوی ستون آب پایدار است و به نظر می‌رسد این پایداری با ایجاد پیچک نیز دستخوش تغییر نشده است. با این حال افزایش دمایی بسیار ناچیزی در هسته پیچک و در لایه‌ی سطحی مشاهده می‌شود. باید ذکر کرد که در این فصل به علت عدم وجود اختلاط، دمای آب به‌خصوص در لایه‌های سطحی تابع دمای هوا می‌باشد و فعل‌وانفعالات درون ستون آب بر دما اثر چندانی ندارد.



شکل ۹: نقاط منتخب برای بررسی نیم‌رخ دما و شوری

Fig. 9: Selected points for investigation temperature and salinity profile

کاسه‌ای و مخروطی در فصل تابستان به دلیل تقویت جریان ورودی از دریای عمان در سطح و جریان خروجی از خلیج فارس در بستر عمدتاً به شکل چرخندی مشاهده می‌شوند، زیرا جریان ورودی که در سواحل شمالی خلیج فارس حرکت می‌کند به سمت جنوب چرخش پیدا می‌کند و جریان خروجی که در سواحل جنوبی خلیج فارس حرکت می‌کند به سمت شمال چرخش پیدا می‌کند و هر دو جریان باعث ایجاد پیچک‌های چرخندی می‌شوند.

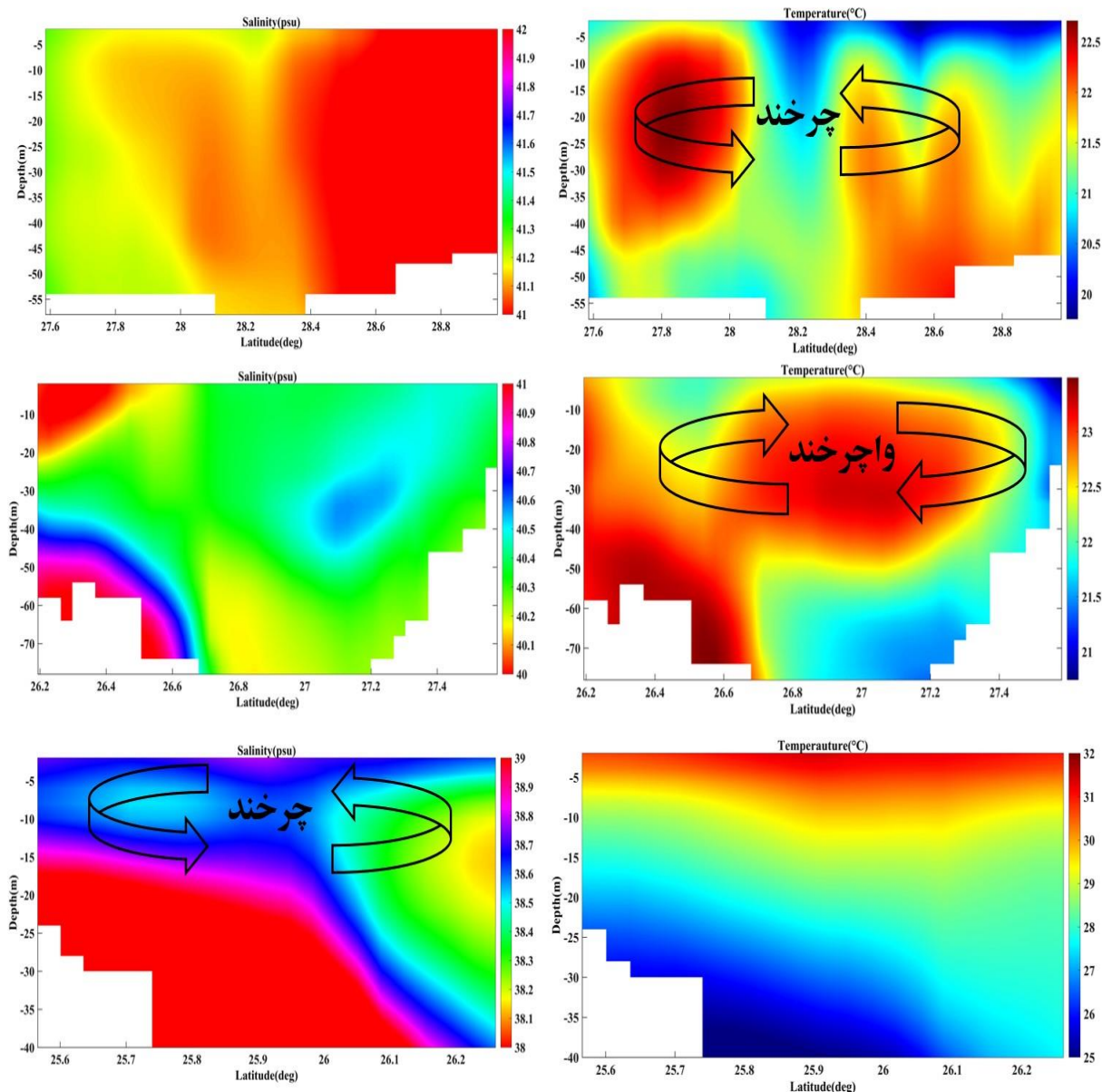
در شکل ۸ توزیع فصلی پیچک‌ها در فصول مختلف در لایه سطحی نشان داده شده است. این شکل‌ها که بیانگر روز ابتدایی تشکیل پیچک‌ها هستند، در فصل تابستان با ۱۰۴ پیچک نشان‌دهنده کمترین است. در فصل پاییز و زمستان با شروع اختلاط به دلیل سرد شدن آب‌های سطحی تعداد پیچک‌ها افزایش یافته به طوری که در پاییز ۱۹۷ و زمستان ۱۹۶ پیچک تشکیل شده است. از سوی دیگر تقویت بادهای شمال و شمال‌غربی، انتظار تشکیل جریان‌های بادرانده می‌رود که این جریان‌ها مطابق با مطالعه Pous و همکاران [۱۷] باعث ایجاد دو پیچک چرخندی و واچرخندی در خلیج فارس می‌شوند و این دو جریان در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه شرقی دچار واگرایی می‌شوند و این می‌تواند دلیلی بر تعدد پیچک‌ها در این ناحیه باشد. در فصل تابستان، اختلاف چگالی بین دریای عمان و خلیج فارس عامل اصلی ایجاد گردش است و وزش باد در اثر مونسون فصلی نیز منجر به افزایش جریان ورودی به داخل خلیج فارس می‌شود [۱۸]. در فصل تابستان با ایجاد لایه‌بندی شدید و انسجام لایه‌های افقی جریان به دلیل پایداری دمایی و از طرفی تضعیف بادهای شمال‌غربی، پیچک‌هایی با قطر بزرگ‌تر در نواحی میانی خلیج فارس که دارای عمق بیشتری هستند تشکیل می‌شوند.

برای بررسی دما و شوری سه پیچک در نقاط مشخص شده روی شکل ۹ انتخاب شد و نیم‌رخ‌های دما و شوری آن‌ها رسم گردید. این پیچک‌ها که تا عمق بیش از ۲۰ متر نیز نفوذ دارند در نواحی میانی خلیج فارس واقع شده‌اند که بیشترین عمق را دارد. ساختار قائم هر سه پیچک عدسی شکل است و یکی از آن‌ها در فصل تابستان مشاهده شده و دو مورد دیگر در فصل زمستان به وقوع پیوسته‌اند.

پیچک تابستانی ۱۹ روز تداوم داشته و از نوع چرخندی با میانگین شعاعی حدود ۱۲ کیلومتر است؛ در حالی که پیچک‌های زمستانی که با نقاط یک و دو در شکل مشخص شده‌اند نیز به ترتیب ۳۲ و ۱۸ روز عمر، چرخندی و واچرخندی، ۱۶ و ۱۵ کیلومتر شعاع دارند.

در مطالعه‌ی Hogan و Thoppil [۶] بیان شده که برخی پیچک‌های تابستانی می‌توانند تا چندین ماه نیز دوام داشته باشند و این پیچک‌ها که از نوع میان‌مقیاس هستند، عمدتاً در اثر ناپایداری‌های چگال‌گرایی ایجاد می‌شوند؛ بنابراین پیچک تابستانی شناسایی شده از این نوع است.

¹ Positive feedback



شکل ۱۰: (سمت راست) دما، (سمت چپ) شوری که به ترتیب در نقاط یک و دو و سه که در شکل ۹ مشخص شده‌اند.

در فصل زمستان (دو ردیف بالا) اختلاف دمایی و در فصل تابستان (ردیف پایین) اختلاف شوری بین مرکز و اطراف پیچک مشهود است.

Fig. 10: (Right) temperature; (Left) Salinity at points one, two and three, respectively, shown in Figure 9. In winter (First and second rows) temperature difference and in summer, (Third row) salinity difference between the center and around the eddy is evident

مرکز پیچک و محیط اطراف آن پیچک به خوبی قابل رؤیت نیست. نیمرخ دمایی پیچک سوم که در فصل تابستان واقع شده است، تغییرات محسوسی در مقایسه با فصل زمستان نشان نمی‌دهد.

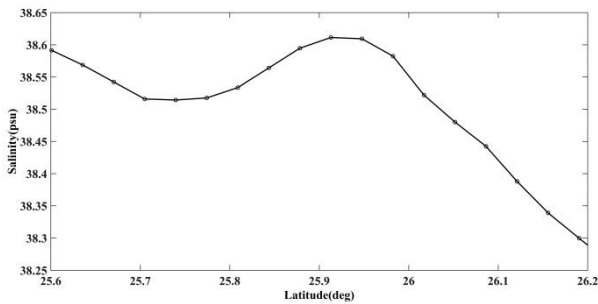
در این فصل به علت وجود لایه‌بندی قوی ستون آب پایدار است و به نظر می‌رسد این پایداری با ایجاد پیچک نیز دستخوش تغییر نشده است. با این حال افزایش دمایی بسیار ناچیزی در هسته پیچک و در لایه سطحی مشاهده می‌شود. باید ذکر کرد که در این فصل به علت عدم وجود اختلاط، دمای آب به خصوص در لایه‌های سطحی تابع دمای هوا

در این فصل نیمرخ شوری به وضوح حاکی از وجود پیچک در این ناحیه است و با اینکه بازه‌ی تغییرات شوری در مقایسه با تغییرات دمایی بسیار کمتر است ولی در عمق ۵ تا ۱۰ متری می‌توان تغییرات شوری در مرکز و پیرامون پیچک را مشاهده نمود.

به عبارت دیگر می‌توان گفت وجود اختلاف دمایی باعث شکل‌گیری پیچک و نمو پیچک سبب افزایش اختلاف دمایی بین مرکز پیچک و محیط اطرافش شده که این به عنوان یک بازخورد مثبت^۱ تلقی می‌شود. در نیمرخ‌های شوری اول و دوم به دلیل عدم اختلاف شوری بین

¹ Positive feedback

البته این گرادیان دما و شوری هرگاه با چرخش جریان همراه شود و تا چند روز حداقل ادامه داشته باشد، احتمال رویداد به مراتب افزایش می‌یابد.

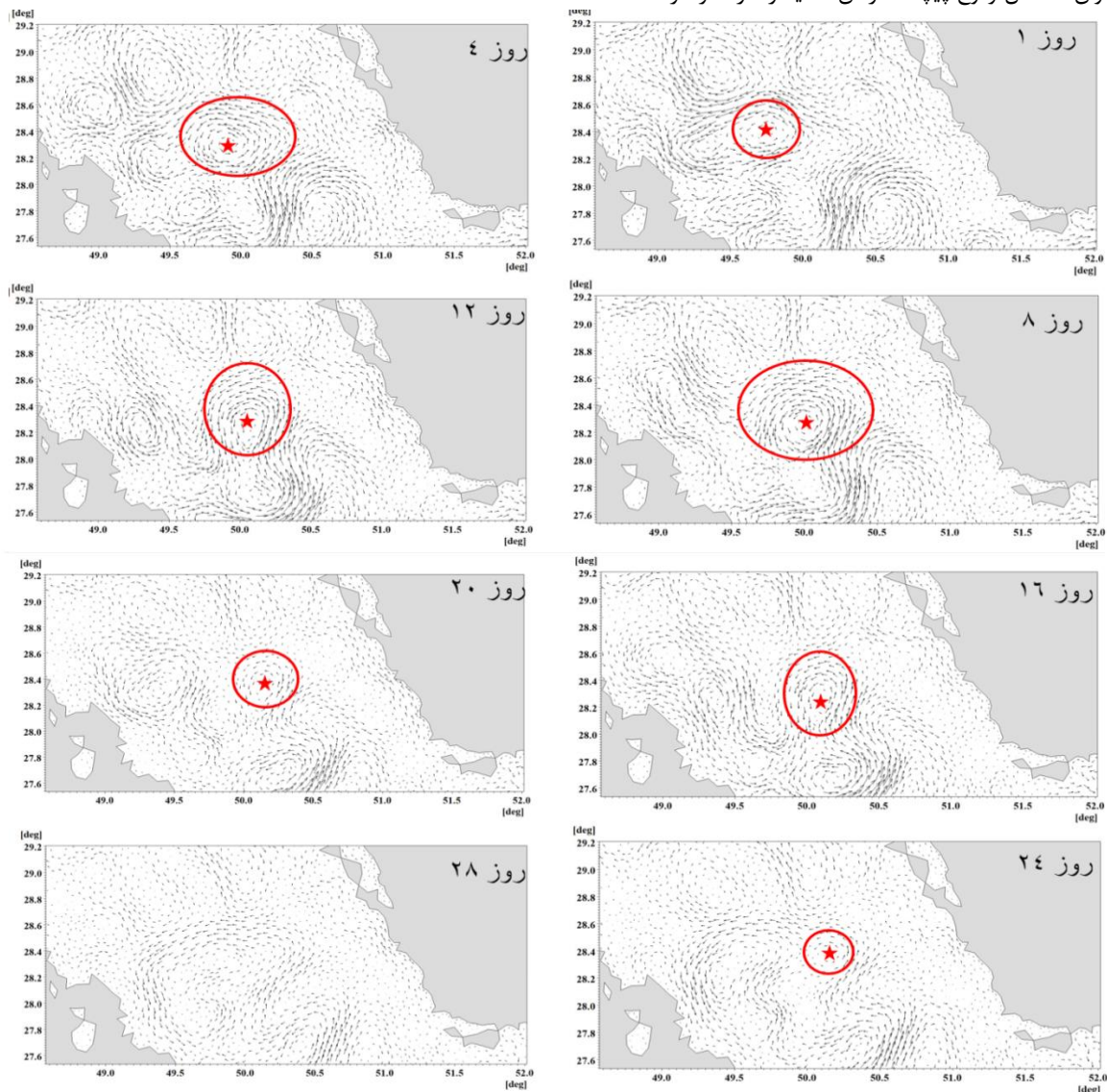


شکل ۱۱: تغییرات شوری در مقطع عرضی واقع در پیچک تابستانی
Fig. 11: Transverse salinity changes in summer eddy

می‌باشد و فعل‌وانفعالات درون ستون آب بر دما اثر چندانی ندارد. در این فصل نیم‌رخ شوری به‌وضوح حاکی از وجود پیچک در این ناحیه است و با اینکه بازه‌ی تغییرات شوری در مقایسه با تغییرات دمایی بسیار کمتر است ولی در عمق ۵ تا ۱۰ متری می‌توان تغییرات شوری در مرکز و پیرامون پیچک را مشاهده نمود.

نمودار تغییرات شوری در مقطع عرضی در عمق ۶ متری یعنی مکانی که مرکز پیچک واقع شده است، در شکل ۱۱ نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که در هسته مرکزی پیچک، شوری بیش از ۰/۱ PSU نسبت به اطراف افزایش دارد و پیک نمودار شوری محسوب می‌شود.

با مقایسه تمام شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در فصل تابستان مشخصه شوری را می‌توان به‌عنوان یکی از علائم وجود پیچک و در فصل زمستان دما را به‌عنوان شاخصی برای شناسایی پیچک لحاظ کرد. با این تفاسیر هرگاه کاهش یا افزایش در دما یا شوری به‌صورت شعاعی رخ دهد، می‌توان احتمال وقوع پیچک در آن ناحیه را در نظر گرفت؛



شکل ۱۲: نحوه تشکیل، تکامل و از بین رفتن پیچک اول در طول مدت حیات
Fig. 12: How the first eddy forms, evolves, and disappears over its lifespan

نتایج مشاهده شده در مورد پیچک اول نیز تطابق بسیار خوبی با مطالعه ذکر شده نشان می‌دهد. همچنین جابجایی هسته پیچک که به ده‌ها کیلومتر می‌رسد و تغییر شکل محیط آن به حالت نامتقارن کاملاً مشخص است که این خاصیت در طول مدت حیات یک پیچک کاملاً طبیعی است.

نتیجه‌گیری

پیچک‌های خلیج فارس از جمله ساختارهای چرخشی جریان در این حوضه آبی هستند که نقش مهمی در گردش جریان، تغییرات دما-شوری و اکوسیستم آن دارند. از آنجاکه این جریان‌ها پیچیدگی‌های خاص خود را دارند و سازوکار شکل‌گیری آن‌ها به‌طور دقیق شناخته نشده است، مطالعه و بررسی خواص و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی منجر به درک و شناخت از آن‌ها می‌شود.

در این مطالعه از الگوریتم هندسه برداری به منظور شناسایی، استخراج و تحلیل پیچک‌های واقع در خلیج فارس استفاده شد. پس از شناسایی پیچک‌ها توسط الگوریتم ویژگی‌های آن‌ها از قبیل میانگین فصلی مدت دوام، تغییرات تعداد برحسب عمق، ساختار قائم آن‌ها، توزیع فصلی آن‌ها و نیمرخ قائم دما و شوری آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله نویسندگان سهم یکسانی داشتند. تمرکز اصلی نویسنده اول (امید ماه‌پیکر) بر استفاده از روش‌های هوشمند برای شناسایی و تحلیل پیچک‌ها بوده است. نظارت بر انطباق مقاله با فرمت مجله، نگارش و جمع‌آوری مطالب، ترجمه و ویراستاری مقالات و هماهنگی محتوایی مقاله را نیز بر عهده داشته است. تمرکز نویسنده دوم (امیر اشتری‌لرکی) که نویسنده مسئول مقاله است بر راهنمایی، ارائه راهکارها و هدایت تحقیق بوده است. تمرکز نویسنده سوم (محمد اکبری‌نسب) نیز بر نظارت جهت پیشرفت تحقیق و ارائه تسهیلات سخت‌افزاری لازم در طول انجام مطالعه بوده است.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

با مقایسه تمام شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در فصل تابستان مشخصه شوری را می‌توان به‌عنوان یکی از علائم وجود پیچک و در فصل زمستان دما را به‌عنوان شاخصی برای شناسایی پیچک لحاظ کرد. با این تفاسیر هرگاه کاهش یا افزایش در دما یا شوری به‌صورت شعاعی رخ دهد، می‌توان احتمال وقوع پیچک در آن ناحیه را در نظر گرفت؛ البته این گرادیان دما و شوری هرگاه با چرخش جریان همراه شود و تا چند روز حداقل ادامه داشته باشد، احتمال رویداد به‌مراتب افزایش می‌یابد.

ذکر این نکته ضروری است که در مطالعه Amores و همکاران بیان شده که هنگام از بین رفتن پیچک‌ها ابتدا بردارهای جریان به حالت عادی بازمی‌گردند و با یک تأخیر زمانی سایر پارامترهای هیدرودینامیکی حالت اصلی خود را بازیابی می‌کنند [۲۲]؛ بنابراین ممکن است گرادیان‌های دما و شوری وجود داشته باشد ولی چرخش جریان مشاهده نشود. در مورد اینکه گرادیان دمایی و شوری حول پیچک در چه محدوده‌ای رخ می‌دهد باید گفت که عدد و محدوده‌ی دقیقی برای این مقدار نمی‌توان بیان کرد؛ با این حال گرادیان‌های دمایی نسبت به گرادیان شوری دارای بازه‌ی بیشتری هستند. برای مثال Zhang و همکاران که از الگوریتم شناسایی پیچک بر روی تصاویر SST در دریای چین شرقی استفاده بردند، اختلاف دمای بیشینه و کمینه حول یک پیچک را ۰/۱۵ درجه سانتی‌گراد لحاظ کردند [۱۹].

در شکل ۱۲ بردارهای جریان حول پیچک نقطه یک (شکل ۹) در عمق ۱۰ متری ترسیم شده است و نحوه تشکیل، تکامل و از بین رفتن این پیچک با دنبال کردن تصاویر مشخص می‌شود.

از روز اول تا چهارم پیچک در حال شکل‌گیری است و هسته اولیه آن به تدریج پایدار شده است، از روز چهارم تا بیستم پیچک به‌صورت پایدار باقی مانده است و بعد از روز بیستم پیچک رفته‌رفته از بین رفته است به‌طوری‌که در روز بیست و هشتم هیچ اثری از آن باقی نمانده است. Dong و همکاران نیز بیان کرده‌اند که در یک پنجم ابتدایی چرخه حیات پیچک، شعاع و انرژی جنبشی آن افزایش سریع دارد؛ سپس در ادامه، این روند ثابت شده (سه پنجم میانی چرخه حیات) و در یک پنجم انتهایی شعاع و انرژی جنبشی آن به‌شدت کاهش می‌یابد [۴].

References

- Xiao Y, Li Z, Li J, Liu J, Sabra KG. Influence of warm eddies on sound propagation in the Gulf of Mexico, Chin. *Phys.* 2019;28:1-11. doi: 10.1088/1674-1056/28/5/054301
- Fu LL, Chelton DB, Le Traon PY, Morrow R. Eddy dynamics from satellite altimetry. *Oceanog.* 2010;23:14-25. doi: 10.5670/oceanog.2010.02
- Dong C, Lin X, Liu Y, Nencioli F, Chao Y, Guan Y. Three dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product. *J Geophys Res.* 2012;117:1-17. doi: 10.1029/2011JC007354
- Li J, Zhang R, Liu C, Fan H. Modeling of ocean mesoscale eddy and its application in the underwater acoustic propagation. *Mar Sci Bull.* 2012;14:1-1.
- Dong C, Nencioli F, Liu Y, McWilliams JC. An Automated Approach to Detect Oceanic Eddies From Satellite Remotely Sensed Sea Surface Temperature Data, IEEE Geosci. *Remote Sens Lett.* 2011;8:1055-1059. doi: 10.1109/LGRS.2011.2155029

6. Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *J Phys Oceanogr.* 2010;**40**:2122-2134. doi: 10.1175/2010JPO4227.1
7. Pous S, Lazre P, Carton X. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. *Cont Shelf Res.* 2015;**94**:55-70. doi: 10.1016/j.csr.2014.12.008
8. Reynolds RM. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz and the Gulf of Oman-Results from the Mt. Mitchell Expedition Mar Pollut Bull. 1993;**27**:35-59. doi: 10.1016/0025-326X(93)90007-7
9. Duo Z, Wang W, Wang H. Oceanic Mesoscale Eddy Detection Method Based on Deep Learning. *Remote Sens Lett.* 2019;**11**:1-14. doi: 10.3390/rs11161921
10. Sun M, Tian F, Liu Y, Chen G. An Improved Automatic Algorithm for Global Eddy Tracking Using Satellite Altimeter Data. *Remote Sens.* 2017;**9**:1-18. doi: 10.3390/rs9030206
11. Matsuoka D, Araki F, Inoue Y, Sasaki H. A New Approach to Ocean Eddy Detection, Tracking, and Event Visualization -Application to the Northwest Pacific Ocean. *Procedia Comput Sci.* 2016;**80**:1601-1611. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.491
12. Yi J, Du Y, He Z, Zhou C. Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly. *Ocean Sci.* 2014;**10**:39-48. doi: 10.5194/os-10-39-2014
13. Patel S, Balasubramanian R, Gangopadhyay A. Automatic detection of oceanic eddies in SeaWiFS-derived color images using neural networks and shape analysis. *Proc IEEE.* 2008;**2**:835-838. doi: 10.1109/IGARSS.2008.4779124
14. Nencioli F, Dong C, Dickey T, Washburn L, McWilliams J. A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to high-resolution numerical model products and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *J Atmos Oceanic Technol.* 2010;**27**:564-579. doi: 10.1175/2009JTECHO725.1
15. Chaigneau A, Gizolme A, Grados C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Prog Oceanogr.* 2008;**79**:106-119. doi: 10.1016/j.pocean.2008.10.013
16. Lin H, Hu J, Liu Z, Belkin IM, Sun Z, Zhu J. A peculiar lens-shaped structure observed in the South China Sea. *Sci Rep.* 2017;**7**(1):478. doi: 10.1038/s41598-017-00593-y pmid: 28352077
17. Pous S, Carton X, Lazure P. A Process Study of the Wind-Induced Circulation in the Persian Gulf, Open Journal of Marine Science. *Sci Res Pub Lish.* 2013;**3**:1-11. doi: 10.4236/ojms.2013.31001
18. Abdelrahman SM, Ahmad F. A note on the residual currents in the Persian Gulf. *Cont Shelf Res.* 1995;**15**:1015-1022. doi: 10.1016/0278-4343(95)80006-Y
19. Zhang C, Li H, Liu S, Shao L, Zhao Z, Liu H. Automatic detection of oceanic eddies in reanalyzed SST images and its application in the East China Sea. *Sci China Earth Sci Ences.* 2015;**58**:2249-2259. doi: 10.1007/s11430-015-5101-y
20. L'Hegaret P, Carton X, Louazel S, Boutin G. Mesoscale eddies and submesoscale structures of Persian Gulf Water off the Omani coast in spring 2011. *Ocean Sci.* 2016;**12**:687-701. doi: 10.5194/os-12-687-2016
21. Sun W, Dong C, Tan W, He Y. Statistical Characteristics of Cyclonic Warm-Core Eddies and Anticyclonic Cold-Core Eddies in the North Pacific Based on Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 2019;**11**:1-33. doi: 10.3390/rs11020208
22. Amores Á, Monserrat S, Marcos M. Vertical structure and temporal evolution of an anticyclonic eddy in the Balearic Sea (western Mediterranean). *J Geophys Res Ocean.* 2013;**118**:2097-2106. doi: 10.1002/jgrc.20150

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Mahpeykar, O., Department of physical oceanography, Faculty of marine science and oceanography, Khorramshahr University of marine science and technology, Khorramshahr, Iran.

(omidd8@gmail.com)

 0000-0002-6592-3856

Ashtari Larki, A., Department of physical oceanography, Faculty of marine science and oceanography, Khorramshahr University of marine science and technology, Khorramshahr, Iran.

(ashtari@kmsu.ac.ir)

 0000-0001-8134-9287

Akbarinasab, M., Department of physical oceanography, Faculty of marine science and oceanography, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

(m.akbarinasab@umz.ac.ir)

 0000-0003-2187-8798



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver) Mahpeykar O, AshtariLarki A, Akbarinasab M. Automatic detection of eddies in Persian Gulf and study of their structure and physical properties. *J Oceanography*. 2021; 12(46): 86-99.

 <http://doi.org/10.52547/joc.12.46.8>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1575-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.