

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۶۰، بهار ۱۴۰۱ صص ۲۱۵-۲۲۷

## مطالعه ضریب پخشی پیچک‌های میان مقیاس در خلیج فارس

امین رئیسی\*

[mnraeisi@gmail.com](mailto:mnraeisi@gmail.com)

حسام الدین مهرفر<sup>۲</sup>

عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** پیچک‌های میان مقیاس نه تنها به جهت دینامیکی اهمیت دارند، بلکه از نظر اقلیم شناسی، برهمکنش هوا-دریا و محیط زیست نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از آنجاکه خلیج فارس به دلیل وجود میدان‌های نفتی در معرض آلودگی‌های نفتی می‌باشد، تجزیه و تحلیل نقش عواملی مانند پیچک‌های میان مقیاس در انتشار آلودگی در خلیج فارس بسیار مهم است.

**روش بررسی:** در این تحقیق از داده‌های ارتفاع سطح دریا مربوط به سری داده‌های آنالیز شده مرجع Aviso (سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴) استفاده شد و پیچک‌های میان مقیاس براساس روشی مبتنی بر ارتفاع سطح دریا مورد شناسایی و ردیابی قرار گرفتند و نقشه‌های مربوطه رسم شد. این روش موثرتر از دیگر روش‌های رایج ردیابی پیچک‌ها می‌باشد.

**یافته‌ها:** با مطالعه محل شکل‌گیری پیچک‌ها، ضریب پخشی پیچکی نیز محاسبه گردید و نتایج حاصل از مقادیر محاسبه شده نشان داد که پیچک‌های ایجاد شده در فصل بهار دارای پهنه‌ای بزرگ و سرعت بالا می‌باشند اما پیچک‌های متولد شده در فصل زمستان دارای پهنه‌ای کوچک و سرعتی کم هستند.

**بحث و نتیجه‌گیری:** پیچک‌های واقع در شمال و جنوب خلیج فارس به ترتیب به سمت غرب و شرق خلیج فارس حرکت کرده و این مهم منطبق بر نتایج دیگر پژوهش‌ها است. محدوده بیشترین فعالیت پیچک‌ها در بخش‌های ورودی خلیج فارس از سمت تنگه هرمز و متمایل به

۱- استادیار، گروه فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت اله بروجردی، بروجرد، ایران

۳- استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سواحل ایران و همچنین شمال غربی خلیج فارس می‌باشد و در فصل های تابستان و زمستان بیشترین تعداد پیچک و فصل های بهار و پاییز کمترین تعداد پیچک حضور دارند.

**واژگان کلیدی:** خلیج فارس، پیچک میان مقیاس، ضریب پخش پیچکی، ارتفاع سطح دریا

## The Study of the Diffusion Coefficient of Meso-Scale Eddies in the Persian Gulf

Amin Raeasi\*<sup>1</sup>

[mnraeisi@gmail.com](mailto:mnraeisi@gmail.com)

Hesameddin Mehrfar<sup>2</sup>

Abbasali Ali Akbari Bidokhti<sup>3</sup>

Received: August 20, 2021

Accepted: October 27, 2021

### Abstract

**Background and objectives:** Meso-scale eddies are not only dynamically important, but also climatologically, environmentally, as well as in terms of air-sea interaction are of special importance. Due to the existence of oil and gas fields, the Persian Gulf is exposed to oil pollution, analyzing the role of factors such as meso-scale eddies in the spread of pollution in the Persian Gulf is very important.

**Methods:** In this study, sea level data related to the analyzed Aviso reference data series (2010-2014) were used and meso-scale eddies were identified and tracked using a method based on sea level, and the relevant maps were drawn. This method is more effective than other common methods of tracking eddies.

**Findings:** By studying the location of formation of eddies, eddy distribution coefficient was also calculated and the results indicated that eddies created in spring have a larger scale and higher speed, while eddies created in winter have a smaller scale and lower speed.

**Discussion and Conclusion:** The eddies located in the north and south of the Persian Gulf have moved to the west and east of the Persian Gulf, respectively, which is consistent with the results of other studies. The range of the most eddy activity in the entrance parts of the Persian Gulf is from the Strait of Hormuz and inclined to the coast of Iran as well as northwest of the Persian Gulf. The maximum number of eddies is observed in summer and winter and the least number of eddies is observed in spring and autumn.

**Key words:** Persian Gulf, meso-scale eddies, eddy diffusion coefficient, sea surface height

---

1- Assistant Professor, Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Physics, School of Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

3- Professor, Geophysics Institute, University of Tehran, Tehran, Iran.

## زمینه و هدف

پیچک، حرکت چرخشی سیال است که می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله چرخش ناشی از برخورد سیال به مانع و یا برخورد دو جریان وارونه ایجاد شود. فاکتورهای اولیه برای تشکیل پیچک‌ها نیرویی است که توسط تنش باد، ناپایداری باروکلینیکی و تعادل گرادیان باد اعمال شود [۱]. در دینامیک شاره‌ها، تلاطم یک رژیم حرکتی سیال است که با تغییر ویژگی‌های حرکتی بخشی از یک سیال به صورت آشوبناک همراه است. تغییرات سریع فشار و سرعت سیال در زمان و مکان و همچنین پخش تکانه و گرما از مهم‌ترین پیامدهای این حرکت تلاطمی است [۲]. باید توجه داشت که تلاطم در عدد رینولدز بالا برای جریان سیال اتفاق می‌افتد. این مهم سبب افزایش ترم‌های غیرخطی در معادلات حرکت می‌شود که با بی‌نظمی هم‌زمان در مکان و زمان همراه است. یک جریان تلاطمی با تعداد زیادی پیچک از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین مقیاس‌ها همراه است.

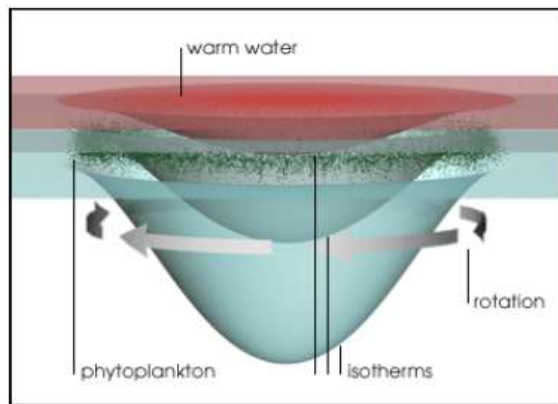
پیچک‌های میان مقیاس اقیانوسی دو نوع هستند که یکی دارای هسته‌ی گرم و دیگری دارای هسته‌ی سرد است. مشخصه بارز پیچک‌ها با هسته‌ی گرم (سرد) این است که دارای دمای بالاتر (پایین‌تر) هستند و تراز دریا در مرکز آن بالاتر (پایین‌تر) است (شکل ۱-الف و ب). این یک حقیقت شناخته شده است که محیط زیست‌های دریایی و ساحلی متأثر از چنین گردابه‌های اقیانوسی هستند. ویژگی‌های زیست‌محیطی متداوم پیچک‌ها، آب و هوای اقیانوس و جو پیرامون آن را تعیین می‌کند. گسترش یک پیچک چرخندی باعث بالا آمدن آب در مرکز (فراجوشی<sup>۱</sup>) می‌شود که در نتیجه آب‌های زیر سطحی سرد و سرشار از مواد غذایی به سطح ستون آب می‌آیند. بنابراین یک پیچک چرخندی به عنوان پیچکی با مرکز سرد و با زیست توده بالا مطرح می‌شود که می‌تواند دمای جوی منطقه را کاهش دهد [۳] (شکل ۱-الف

و ب). تشخیص چنین پیچک‌هایی با استفاده از الگوهای گرادیان ارتفاع و دمای سطح دریا امری دشوار است زیرا تغییرات سطحی به دست آمده بسیار اندک است. بهترین رویکرد در مواجهه با این پیچک‌های میان مقیاس استفاده از ارتفاع سنجی‌هایی است که از آنومالی‌های ارتفاع و دمای سطح هوای تراز دریا به دست می‌آید که در آن سیگنال بالا و پایین ارتفاع و دمای سطح هوا به ترتیب به عنوان یک شاخص برای پیچک‌های با هسته گرم و سرد عمل می‌کند [۱]. در دهه‌های اخیر شناخت تغییرات زمانی و مکانی این پیچک‌های میان مقیاس همواره بیشتر شده است. فرنگر<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۳) اثرات این پیچک‌ها را بر پارامترهای جوی از جمله دمای هوا، بادهای ابرها و بارش مورد تحلیل قرار داده‌اند [۴]. دامادپات و چارکرابونی<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) ساختار سه بعدی پیچک‌های میان مقیاس را با استفاده از ارتفاع سنجی و شناورهای آرگو برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۴ در قسمت جنوبی خلیج بنگال تحلیل و بررسی کردند [۵]. براچ و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر پیچک‌های واچرخندی را در انتشار آلاینده‌های پلاستیکی مورد مطالعه قرار دادند [۶]. مورنو و همکاران (۲۰۱۹) و دینگ و همکاران (۲۰۲۰) انرژی جنبشی پیچک‌ها را به ترتیب در اقیانوس جنوبی و شمال غربی اقیانوس اطلس با استفاده از داده‌های ارتفاع سطح دریا از مرجع آویسو مورد مطالعه قرار دادند، آنها شکل پیچک را به‌عنوان یک الگوی گوسی تقریب زده و انرژی جنبشی پیچک نیز از تقریب ژئوستروفیک محاسبه گردید [۷ و ۸]. خلیج فارس به دلیل وجود میدان‌های نفتی و گازی در معرض آلودگی‌های نفتی و گسترش آلاینده‌های مرتبط با آن می‌باشد. از آنجاکه انتشار آلاینده‌ها برای محیط دریایی خطرناک بوده و می‌تواند منجر به خسارت‌های زیست محیطی و اقتصادی زیادی شود، تجزیه و تحلیل نقش عواملی مانند پیچک‌های میان مقیاس در انتشار آلودگی در خلیج فارس بسیار مهم است [۹].

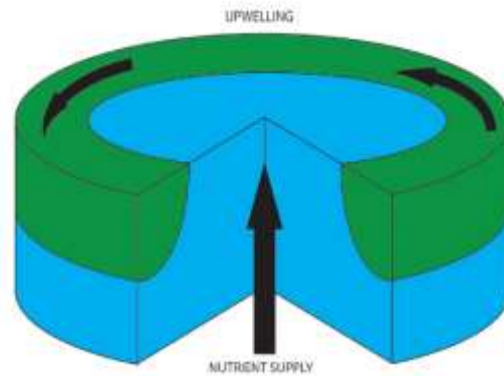
2- Frenger

3- Dandapat and Chakraborty

1- Upwelling



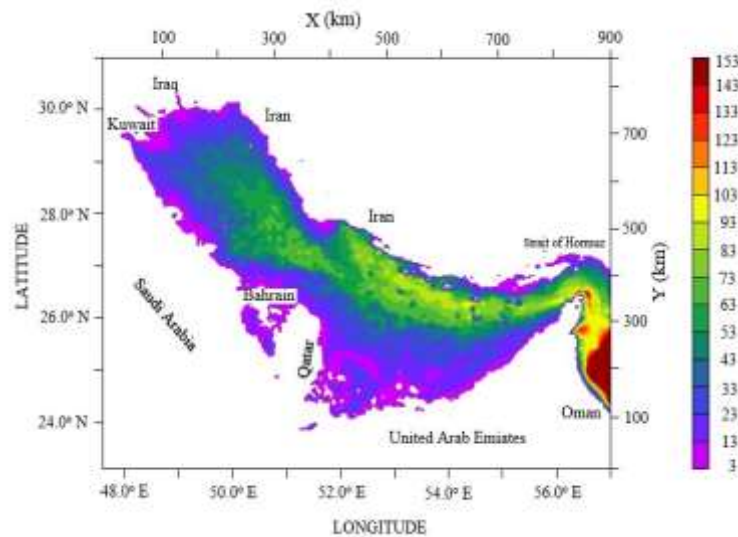
شکل ۱-ب



شکل ۱-الف

شکل ۱- انواع پیچک (الف: چرخندی، ب: واچرخندی) [۹]

Figure 1- Eddy types (a: Cyclonic, b: Anti-cyclonic)



شکل ۲- نقشه خلیج فارس براساس داده‌های ای توپو ۲، عمق بر حسب متر [۱۰]

Figure 2-Map of the Persian Gulf based on ITOPO2 data, depth in meters [10]

ArcGIS رسم شد. این روش موثرتر از دیگر روش‌های رایج ردیابی پیچک‌ها می‌باشد [۱۱] و پاسخ‌های دقیق‌تری را در مناطق کم عمقی مثل خلیج فارس ارائه می‌دهد. برای این تحلیل دینامیکی پیچک فرض می‌شود که تقریب زمینگرد برقرار است و پیچک‌ها با شکل متقارن گاوسی در نظر گرفته می‌شوند و پس از

با استفاده از روش مبتنی بر ارتفاع سطح دریا<sup>۱</sup> و سری داده‌های مرجع آویسو<sup>۲</sup> در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۴ پیچک‌های منطقه شناسایی و ردیابی شده و نقشه‌های مربوطه به کمک نرم افزار

- 1- Sea Surface Height (SSH)
- 2- Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanography data (AVISO)
- 3- ETOPO2

آن عملیات ردیابی انجام می‌گیرد [۱۳ و ۱۲]. این مطالعه می‌تواند یک نقش مهم و اساسی در شناسایی پیچک‌ها داشته باشد.

## روشی بررسی

### خلیج فارس

خلیج فارس یک حوضچه نیمه بسته کم عمق است که از طریق تنگه هرمز به دریای عمان متصل می‌شود و دارای عمق متوسط ۳۵ متر است و بیشترین عمق آن برابر با ۱۲۰ متر که در نزدیکی تنگه هرمز مشاهده شده است [۱۴ و ۹] و بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ تا ۵۶ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۴ تا ۳۰ درجه شمالی واقع شده است [۱۵] (شکل ۲-الف). طول خلیج فارس تقریباً ۱۰۰۰ کیلومتر و در جهت شمال غربی-جنوب شرقی بوده و عرض آن بین ۵۶ کیلومتر تا ۳۳۸ کیلومتر متغیر است. مساحت و حجم تقریبی خلیج فارس به ترتیب  $239000\text{km}^2$  و  $8780\text{km}^3$  است که سومین خلیج بزرگ دنیا می‌باشد. خلیج فارس از سمت شمال تا دلتای اروندرود و از سمت جنوب تا بیابان‌های وسیع به موازات سواحل قطر، کویت، عربستان سعودی، بحرین و امارات متحده عربی گسترش یافته است [۱۶]. گردش-کلی در این خلیج چرخندی است و توسط جریانی به موازات سواحل ایران در شمال و به سمت شمال غرب از سمت تنگه هرمز و یک جریان به سمت جنوب شرق در بخش جنوبی آن احاطه شده است. مهم‌ترین مشخصه این گردش، تبدیل جریان‌های سواحل ایران به یک سری پیچک‌های اغلب چرخندی است [۱۷ و ۱۸]. اختلاف چگالی در توده‌های آب و جریان‌های اصلی بزرگ مقیاس و تنش باد در سطح، موجب شیبدار شدن خطوط هم‌چگال و ایجاد ناپایداری باروکلینیکی در خلیج فارس می‌گردد. وجود این ناپایداری‌ها باعث تشکیل پیچک‌ها در اطراف جریان اصلی می‌شود. با تشکیل ترموکلاين و در نظر گرفتن جریان آب اروند و ورودی آب دریای عمان به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز، شرایط لازم برای ایجاد پیچک‌های میان مقیاس مخصوصاً در

سواحل ایران ایجاد می‌شود [۱۷]. ورود جریان آب شیرین‌تر از میانه تنگه هرمز به درون خلیج فارس سبب ایجاد آشفتگی در میدان چگالی عمود بر فلات قاره می‌شود. این تغییر در میدان چگالی، فرایند ناپایداری باروکلینیکی را به دنبال خواهد داشت. از آنجا که یکی از ساز و کارهای حاکم بر ایجاد پیچک‌ها، وجود ناپایداری باروکلینیکی است، بنابراین سبب تغییرات مهمی در گردش عمومی آب در خلیج فارس و به وجود آمدن پیچک‌هایی در آن خواهیم بود [۱۹ و ۲۰].

### ردیابی پیچک‌ها

پیچک‌ها الگوهای تلاطمی هستند و به وسیله نوسانات مکانی-زمانی مشخص می‌گردند. بنابراین، پیچک‌ها و اثراتشان معمولاً به وسیله انحرافات متوسط زمانی و در نقاط جغرافیایی بررسی می‌شوند. به منظور بررسی پیچک‌های میان مقیاس براساس داده‌های ماهواره‌ای نیاز به یک الگوریتم شناسایی ادی وجود دارد [۲۱]. روش خودکار مبتنی بر ارتفاع سطح دریا، یک روش بدون آستانه و همچنین بدون نیاز به مشتق‌گیری از میدان ارتفاع سطح دریا و بدون هیچ هموارسازی خارجی (که طبیعتاً در میدان‌های ارتفاع سطح از سری‌های آویسو وجود دارد) می‌باشد و در این روش یک خط کنتور بسته به عنوان معیار استفاده می‌شود. با توجه به برقراری جریان ژئوستروفیک در اطراف الگوهای محلی از قبیل پیچک‌ها، خطوط این جریان‌ها متناظر با کنتورهای بسته ارتفاع سطح دریا در نظر گرفته می‌شوند و با فرض وجود ساختار متقارن گاوسی برای ادی‌ها، این امکان فراهم می‌شود که الگوریتم ساده‌ای برای شناسایی ادی‌ها براساس پیدا کردن خارجی‌ترین کنتور بسته ارتفاع سطح دریا فراهم شود [۱۲].

دامنه هر پیچک چرخندی به صورت اختلاف بین بیشترین ارتفاع در داخل پیچک ( $h_{\max}$ ) و ارتفاع متوسط خارجی‌ترین کنتور بسته ارتفاع سطح دریا ( $h_0$ ) تعریف می‌شود:

$$A = h_{\max} - h_0 \quad (1)$$

بطور مشابهی دامنه هر پیچک واچرخندی نیز اختلاف بین ارتفاع

در امتداد طول جغرافیایی ( $L_x$ ) و عرض جغرافیایی ( $L_y$ ) محاسبه می‌گردد. تعریف مبتنی بر سرعت از مقیاس افقی پیچک ( $L_{eff}$ )، شعاع دایره‌ای است که دارای مساحت مشابه با منطقه داخل کنتور بسته ارتفاع سطح دریا می‌باشد [۱۲]. و سپس با فرض برقراری تقریب ژئوستروفیک [۱۲]:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fv = 0 \rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} + fv = 0 \rightarrow -\frac{1}{\rho} \rho g \frac{SSH}{0.5L_x} + fv = 0 \rightarrow v = \frac{g}{f} \frac{SSH}{0.5L_x} \quad (۳)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fu = 0 \rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y} - fu = 0 \rightarrow -\frac{1}{\rho} \rho g \frac{SSH}{0.5L_y} - fu = 0 \rightarrow u = -\frac{g}{f} \frac{SSH}{0.5L_y} \quad (۴)$$

تغییر شکل، همان مقیاس طول افقی مشخصه ناپایداری است [۲۲ و ۲۳]. نکته حائز اهمیت آن است که اغلب مباحث خطی نمی‌توانند مقیاس سرعت افقی را تعیین کنند و این مهم به آن دلیل است که در آنجا تعادل امواج باروکلینیکی مطرح است و بزرگی آن‌ها وابسته به فرایندهای غیرخطی است. ساده ترین فرض آن است که سرعت ادی با تقریب مناسبی برابر با بزرگی سرعت جریان متوسط ( $\bar{u}$ ) در نظر گرفته شود. حال با توجه به این موضوع خواهیم داشت:

$$k_{vy} \sim \bar{u} L_D \quad (۷)$$

در رابطه فوق نیز  $L_D \sim l$  است که همان طول تلاطم بوده و در اینجا نیز قطر پیچک می‌باشد [۲۲ و ۲۳].

در این تحقیق از میدان‌های روزانه ارتفاع سطح دریا برگرفته از سایت آویسو (AVISO DT-2014) به مدت ۶۰ ماه (۲۰۱۴-۲۰۱۰) روی یک شبکه  $1/4^\circ * 1/4^\circ$  و با دقت اندازه گیری ارتفاع  $10^{-4}$  (m) در نظر گرفته شد. نقشه‌های مورد نظر با استفاده از

$$\overline{\partial \psi} = k^{vy} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y} - k^{vz} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z}$$

روش مدل سازی زمین آمار و به کمک نرم افزار ArcGIS رسم و مورد تجزیه تحلیل قرار گرفتند. محدوده‌ای که پیچک‌ها دارای بیشترین ضریب پخشی پیچکی بودند شناسایی و به عنوان مناطق فعالیت پیچک‌ها معرفی شدند.

متوسط خارجی ترین کنتور بسته ارتفاع سطح دریا ( $h_0$ ) و کمترین ارتفاع سطح دریا در داخل ادی ( $h_{min}$ ) تعریف می‌شود [۱۲]:

$$A = h_0 - h_{min} \quad (۲)$$

با فرض بیضوی شکل بودن ادی‌ها گستردگی طولی و عرضی آنها

بعد از اینکه پیچک‌ها برای هر گام زمانی در توالی نقشه‌های ارتفاع سطح دریا به روش مذکور تشخیص داده شدند، یک فرایند خودکار ردیابی با گام زمانی ۱ هفته، به منظور تعیین مسیر هر پیچک بکار برده می‌شود.

#### ضریب پخشی پیچکی

همان‌گونه که عنوان شد پیچک حرکت چرخشی سیال است که می‌تواند به دلایل مختلف ایجاد شود. برای بیان ویژگی‌های یک پیچک از ضریب پخشی پیچکی استفاده می‌شود. این ضریب می‌تواند بیانگر ابعاد، قدرت اختلاط و سرعت پیچک‌ها باشد. اگر انتقال یک پیچک به وسیله یک ردیاب و به کمک معادله انتشار پارامتریزه شود، خواهیم داشت [۲۲]:

$$F = \nabla \phi V = -K \nabla \phi \quad (۵)$$

در این معادله  $k$  همان ضریب پخشی پیچکی است که در واقع یک تانسور می‌باشد. حال برای بررسی بهتر ویژگی‌های یک پیچک اگر توجه خود را به انتقال افقی ردیاب در درون پیچک محدود کنیم، خواهیم داشت [۲۲]:

$$\overline{\partial \psi} = K_{vy} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y} - K_{vz} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} \quad (۶)$$

در رابطه ی فوق  $K_{vy}$  و  $K_{vz}$  همان مولفه‌های تانسور پخشی پیچکی هستند.

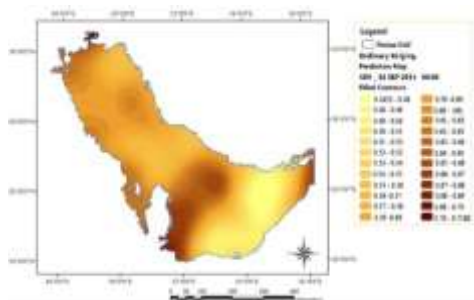
با فرض اینکه پیچک نتیجه یک ناپایداری باروکلینیکی است، پس فرض می‌کنیم که طول اختلاطی داده شده به وسیله اولین شعاع

## یافته‌ها

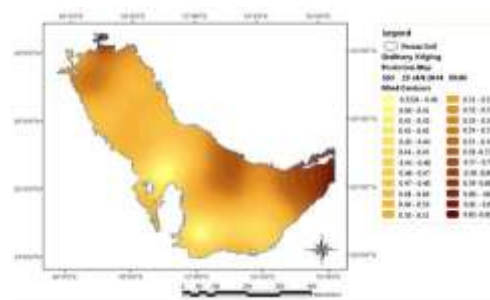
## پیچک‌ها در خلیج فارس

مختلف سال ۲۰۱۴ به عنوان نمونه نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها به خوبی می‌توان مکان پیچک‌ها را مشاهده کرد.

شکل (۳) نقشه کنتورهای ارتفاع را در خلیج فارس برای دو ماه



(ب)



(الف)

شکل ۳- خطوط کنتور هم ارتفاع رسم شده در فصل‌های مختلف (به عنوان نمونه (الف) ۲۹ ژانویه ۲۰۱۴، (ب) ۲ سپتامبر ۲۰۱۴)

**Fig. 3- Height contours in the Persian Gulf for various seasons on (a) 29 January 2014 and (b) 2 September 2014.**

جدول ۱- تعداد متوسط ادیها در ماههای مختلف سالای

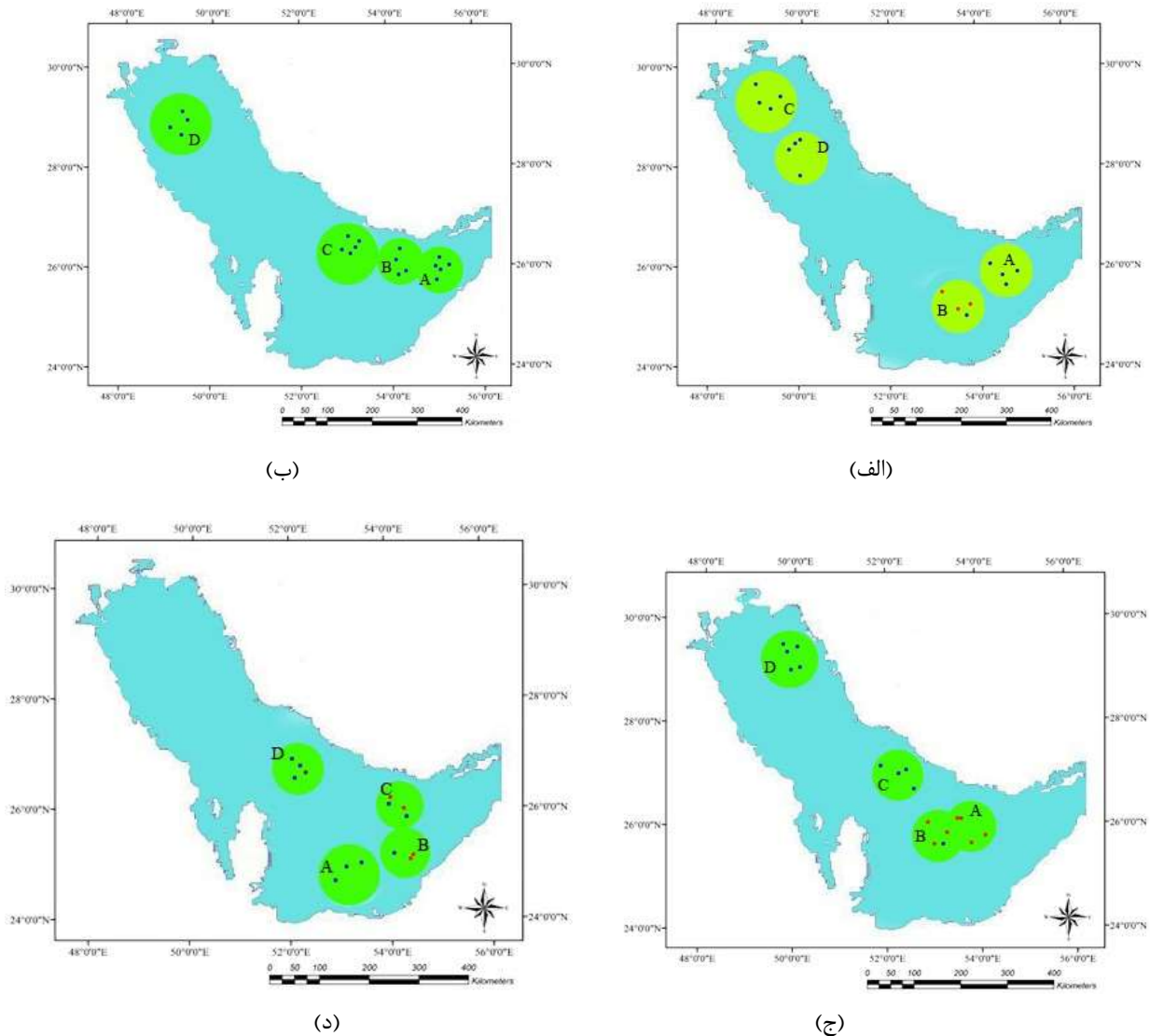
۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴

**Table 1- Mean number of eddies in different months from 2010 to 2014**

فصل	ماه	تعداد پیچک
بهار	آوریل	۵
	می	۴
	جون	۷
تابستان	جولای	۹
	آگوست	۶
	سپتامبر	۸
پاییز	اکتبر	۵
	نوامبر	۴
	دسامبر	۷
زمستان	ژانویه	۱۱
	فوریه	۸
	مارس	۴

نمودارهای ترسیم شده برای کل دوره نیز کم و بیش همین روند را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای ترسیم شده و تحلیل‌های انجام شده بر روی آنها، تعداد متوسط پیچک‌ها در ماه‌های مختلف سال بدست آمد (جدول ۱). این آمار نشان می‌دهد که در فصل‌های تابستان و زمستان تعداد پیچک‌ها بیشتر از فصل‌های بهار و پاییز است. علاوه بر آن در ابتدای فصل‌های تابستان و زمستان تعداد پیچک‌ها افزایش یافته اما با نزدیک شدن به ماه‌های پایانی این فصول تعداد آنها کاهش می‌یابد. این فرآیند برای فصل‌های پاییز و بهار روند معکوسی را طی می‌کند. جدول (۱) بیشترین تعداد پیچک را در فصل زمستان نشان می‌دهد. شکل (۴) محدوده‌ای که در آن پیچک‌های میان مقیاس دارای بیشترین میزان فعالیت هستند را برای فصل‌های مختلف نشان می‌دهد.





شکل ۴- مناطقی که بیشترین میزان فعالیت پیچک در آن مشاهده شده است. الف: بهار، ب: تابستان، ج: پاییز، د: زمستان، دایره های آبی و قرمز به ترتیب بیانگر محل وقوع پیچک‌های قدرتمند چرخندی و واچرخندی رویداده در این مناطق هستند.

Figure 4- Areas with the highest eddy activities. a: Spring, b: Summer, c: Autumn, d: Winter, the blue and red circles are the locations of the powerful cyclonic and anti-cyclonic eddies, respectively.

پیچک‌های خلیج فارس می‌پردازیم. در جدول (۲) پیچک‌هایی که بیشترین ضریب پخشی  $k_{py}$  را در هر فصل از سال ۲۰۱۰ داشته‌اند، به همراه تاریخ وقوع، مکان وقوع و طول عمر این پیچک‌ها آورده شده است.

محاسبه ضریب پخش پیچکی پیچک‌های میان مقیاس در خلیج فارس  
با توجه به اینکه ضریب پخش موثر در تلاطم عبارت است از:  
 $k_{py} \sim \bar{u}L_D$  بنابراین به بررسی مکانی و زمانی ضریب  $k_{py}$  در

جدول ۲- پیچک‌های دارای بیشترین ضریب پخشی  $K_{vy}$ Table 2- Eddies with the highest diffusion coefficients  $k^{xy}$  (2014).

فصل	شماره ادی	شعاع	$K_{vy}$	طول عمر	تاریخ وقوع
بهار	۳	۱۰۲/۹۵	۱۸۲/۲۸۱	۲	۸ ژانویه
	۲۰	۱۰۵/۲۷	۱۲۱/۲۲۳	۲	۵ مارس
	۲۲	۶۵/۷۹	۸۲/۴۲۴	۳	۱۹ مارس
	۲۳	۷۳/۸۸	۸۲/۳۱۲	۱	۱۹ مارس
تابستان	۳۰	۴۸/۳۴	۱۳۴/۲۲۳	۲	۲۴ ژوین
	۱۲	۸۵/۵۹	۱۰۲/۰۲۱	۱	۶ می
	۳۱	۵۲/۷۹	۲۲/۲۸۲	۱	۲۴ جون
	۲۱	۴۹/۸۶	۸۱/۲۴۵	۳	۳ جون
پاییز	۲۵	۵۳/۷۹	۱۱۱/۲۸	۱	۲۳ سپتامبر
	۲۰	۹۵/۶۹	۱۳۵/۳۴	۱	۹ سپتامبر
	۴	۱۰۲/۴۲	۱۱۲/۸	۱	۱۵ جولای
	۳	۶۰/۱۲	۱۰۸/۲۱	۲	۸ جولای
زمستان	۱	۷۷/۸۰	۱۸۷/۶۷۱	۱	۷ اکتبر
	۲۵	۶۳/۱۴	۸۲/۵۲	۱	۳۰ دسامبر
	۲۱	۵۷/۵۱	۸۲/۲۸	۲	۲۵ نوامبر
	۱۴	۴۷/۲۵	۱۲/۱۱	۳	۲۱ اکتبر

در ۲۰۱۰ روی یک شبکه  $1/4^{\circ} * 1/4^{\circ}$  و با دقت اندازه گیری ارتفاع  $10^{-4}$ (m) در نظر گرفته شد. نقشه‌های مورد نظر با استفاده از روش مدل سازی زمین آمار و به کمک نرم افزار ArcGIS رسم و مورد تجزیه تحلیل قرار گرفتند. با توجه به نمودارهای ترسیم شده و تحلیل‌های انجام شده بر روی آنها، تعداد متوسط پیچک‌ها در ماه‌های مختلف سال بدست آمد. نتایج نشان داد که در فصل‌های تابستان و زمستان تعداد پیچک‌ها بیشتر از فصل‌های بهار و پاییز است. علاوه بر آن در ابتدای فصل‌های تابستان و

در جدول (۲) پیچک‌های شماره ۳۱ (فصل بهار)، شماره ۳۵ و ۱۴ (فصل پاییز) و شماره ۲۲ (فصل زمستان) واچرخندی هستند، و پیچک‌های دیگر چرخندی می‌باشند. در جدول (۳) نیز بازه زمانی حضور پیچک‌هایی با بیشترین ضریب پخشی در هر منطقه مشخص شده است.

## بحث

در این تحقیق از میدان‌های روزانه ارتفاع سطح دریا برگرفته از سایت آویسو (AVISO DT-2014) به مدت ۶۰ ماه (۲۰۱۴-۲۰۱۴)

دسامبر ماه‌هایی هستند که بیشترین پیچک‌های قدرتمند در این ماه‌ها رخ می‌دهند. ماه جولای، پر تنش‌ترین ماه به لحاظ فعالیت پیچک‌ها است زیرا که سه منطقه C,B,A بصورت همزمان فعال هستند که مطابق با نتایج مهرفر و همکاران [۱۹] و رهنمانیا و همکاران [۲۴] می‌باشد. نتایج نشان داد، پیچک‌های واچرخندی نسبت به پیچک‌های چرخندی دارای شعاع، انرژی جنبشی و همچنین ضریب پخشی کمتری هستند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده حرکت پیچک‌های واقع در شمال خلیج فارس به سمت غرب و حرکت پیچک‌هایی واقع در جنوب خلیج فارس به سمت شرق است. این مهم منطبق بر نتایج دیگر پژوهش‌ها از جمله مدل حاج رسولی‌ها و همکاران [۲۵] و مهرفر و همکاران [۱۹] است.

#### نتیجه‌گیری

با تشخیص محل شکل‌گیری پیچک‌ها، ضریب پخش پیچکی آن‌ها نیز محاسبه شد. حرکت پیچک‌های واقع در شمال خلیج فارس به سمت غرب و حرکت پیچک‌هایی واقع در جنوب خلیج فارس به سمت شرق است. بیشترین محدوده فعالیت پیچک‌ها در بخش‌های ورودی خلیج فارس از سمت تنگه هرمز و متمایل به سواحل ایران و همچنین شمال غربی خلیج فارس است. ماه جولای، پر تنش‌ترین ماه به لحاظ فعالیت پیچک‌ها است و پس از آن با توجه به تعداد پیچک‌های تشکیل شده در هر ماه، جولای و دسامبر ماه‌های پر ریسک هستند. همچنین در ماه اول فصل تابستان و زمستان بیشترین تعداد پیچک و در ماه‌های اولیه بهار و پاییز کمترین تعداد پیچک حضور دارند. در فصل‌های تابستان و زمستان بیشترین تعداد پیچک و فصل‌های بهار و پاییز کمترین تعداد پیچک حضور دارند. نتایج حاصل از مقادیر محاسبه شده برای ضرایب پخش پیچک‌ها نشان داد که پیچک‌های ایجاد شده در فصل بهار دارای پهنه‌ای بزرگ و سرعت بالا می‌باشند اما پیچک‌های شکل گرفته در فصل زمستان دارای پهنه‌ای کوچک و سرعتی کم هستند.

جدول ۳- بازه‌های زمانی فعالیت پیچک در هر منطقه و در هر فصل (این زمان‌ها بر اساس وقوع پیچک‌هایی با بیشترین ضریب پخشی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ بدست آمده است)

**Table 3- Time range of eddy activities in each area and in each season (these time range were obtained based on the creation of eddies with the highest diffusion coefficient from 2010 to 2014)**

فصل	محدوده	بازه زمانی
بهار	A	۲۱ جون - ۲ جولای
	B	۴ جون - ۲ جولای
	D	۲ جون - ۱۸ ژوئن
	C	۲۶ آوریل - ۱۰ می
تابستان	A	۲۷ ژوئن - ۹ جولای
	B	۲۰ سپتامبر - ۳۰ سپتامبر
	C	۷ جولای - ۲۰ جولای
	D	۱۵ سپتامبر - ۲۷ سپتامبر
پاییز	A	۱۴ نوامبر - ۱۵ دسامبر
	B	۱۷ دسامبر - ۳۱ دسامبر
	C	۲۴ نوامبر - ۲۹ نوامبر
	D	۱۳ اکتبر - ۳۰ اکتبر
زمستان	A	۱۰ مارس - ۱ ژانویه
	B	۱۶ فوریه - ۲۶ فوریه
	C	۱۲ مارس - ۲۴ مارس
	D	۱ ژانویه - ۱۰ ژانویه

زمستان تعداد پیچک‌ها افزایش یافته اما با نزدیک شدن به ماه‌های پایانی این فصول تعداد آنها کاهش می‌یابد. این فرآیند برای فصل‌های پاییز و بهار روند معکوسی را طی می‌کند. ماه‌های آوریل، آگوست و نوامبر ماه‌هایی با کمترین خطر زیرا که پیچک‌های قوی در این ماه‌ها روی نمی‌دهند. ماه‌های ژوئن، جولای و

- 7- Moreno M., J., Hogg, A. M., Kiss, A. E., Constantinou, N. C., and Morrison, A. K. 2019. Kinetic energy of eddy-like features from sea surface altimetry. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 3090-3105.  
<https://doi.org/10.1029/2019MS001769>
- 8- Ding, M., Lin, P., Liu, H., Hu, A. and Liu, C. 2020. Lagrangian eddy kinetic energy of ocean mesoscale eddies and its application to the Northwestern Pacific, *Scientificreports*, 10:12791.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-69503-z>
- 9- Noori, R., Fuqiang, T., Ronny, B., Abbasi, M.R., VesaliNaseh, M.R., Modabberi, A., Soltani, A. and Klove, B. 2019. Recent and future trends in sea surface temperature across the Persian Gulf and Gulf of Oman, *PLOS ONE*, E 14(2): e0212790.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212790>
- 10- Mehrfar, H., Torabi Azad, M., Lari, K., and Bidokhti, A.A. 2020: A numerical simulation case study of the coastal currents and upwelling in the western Persian Gulf, *Journal of Ocean Engineering and Sciences*. 5(4). 323-332.
- 11- Faghmous, J., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., and Kumar, V. 2015. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry, *Sci Data*, 2:150028.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.28>
- 12- Chelton, D.B., Schlax, M.G., and Samelson, R.M. 2011. Global observations of nonlinear meso-scale eddies, *Progress in Oceanography*, 91, 167-216.
- 13- Raeisi, A., Bidokhti, A. A., Nazemossadat, S. M. J., and Lari, K. 2020. Impact of mesoscale eddies on climate and environmental changes in the Persian Gulf, *مراجع*
- 1- Gopalan, A., Krishna, V. V., Al,i M. M., and Sharma, R. 2000. Detection of Bay of Bengal eddies from TOPEX and in situ observations, *Journal of Marine Research*., 58(5), 721-734.
- 2- Zarei, Z., Sediq Marosti, S. and Torabi Azad, M. 2006: The study of meso-scale eddies in the Persian Gulf using satellite images, The 13<sup>th</sup> Iranian Geophysical Conference (In Persian)
- 3- Kumar, P. S., Muraleedharan, P., Prasad T. G., Gauns, M., Ramaiah, N., De Souza, S.N. and Sardesai, S. and Madhupratap, M. 2002. Why is the Bay of Bengal less productive during summer monsoon compared to the Arabian sea, *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24), 88.1-88.4.  
<https://doi.org/10.1029/2002GL016013>
- 4- Frenger I, Gruber N, Knutti R. and Münnich M. 2013: Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall. *Nature Geoscience*.. 6(8), 608-612.
- 5- Dandapat S, Chakraborty A. 2016: Mesoscale eddies in the Western Bay of Bengal as observed from satellite altimetry in 1993–2014: Statistical characteristics, variability and threedimensional properties. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 9(11), 5044-5054
- 6- Brach, L., Deixonneb, P., Bernardb, M., Durand, E., Desjeand, M., Perez, E., Sebille, E. and Hallea, A., 2018. Anticyclonic eddies increase accumulation of microplastic in the North Atlantic subtropical gyre, *Marine Pollution Bulletin*, 126, 191-196.

- 20- Sabet Ahd, A., Raeisi, A., Torabi Azad, M. Mehrfar, H. 2018. Field Study of Changes in Geostrophic Currents in the Persian Gulf, Iranian journal of Marine Science and Technology. 22(87). 31-37 (In Persian)
- 21- Lian, Zh., Sun, B., Wei, Z., Wang, Y. and Wang, X. 2019. Comparison of Eight Detection Algorithms for the Quantification and Characterization of Mesoscale Eddies in the South China Sea, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 36, 1361-1380.
- 22- Vallis, G. K. 2005. Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, Cambridge, UK: University Cambridge Press, 450-451.
- 23- Raeisi, A., Bidokhti, A. A., Nazemossadat, S. M. J., and Lari, K. 2020. The study of mesoscale eddies and their dispersive environmental impacts in the Persian Gulf. Chinese Physic B., 29(8): 084701. DOI:10.1088/1674-1056/ab96a3
- 24- Rahnemania, A, Bidokhti A. A., Ezam, M., Lari, K. and Ghader, S. 2019. A Numerical Study of the Frontal System between the Inflow and Outflow Waters in the Persian Gulf, Journal of Applied Fluid Mechanics. 12(5), 1475-1486
- 25- Haj Rasouliha, O., Hasanzadeh, E. and Rezaei Latifi, A., 2013. The Role of Physical Processes in Ways of Oil Pollutions distribution in the Persian Gulf. *Journal of Climate Research*, 15, pp 93-106.
- 14- Yao, F., and Johns, W. E. 2010. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C11).
- 15- Ezam, M., Bidokhti, A.A. and Javid, A.H. 2010. Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea. *Ocean Science*, 6(4),.887-900.
- 16- Pous, S., Lazure, P. and Carton, X. 2015. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. *Continental Shelf Research*, 94, 55-70.
- 17- Thoppil, P.G. and Hogan, P.J. 2010. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), 2122-2134.
- 18- Thoppil, P.G. and Hogan, P.J. 2010. Persian Gulf response to a wintertime shamal wind event. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(8), 946-955.
- 19- Mehrfar, H. Torabi Azad, T. M. Lari, K. and Bidokhti, A.A., 2020. Seasonal Variations of the Coastal Currents and Eddies in the Persian Gulf: A Numerical Case Study. *Marine Technology Society Journal*. 54(1). 44-52