

مدل‌سازی عددی و آشکارسازی اتوماتیک پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس (Submesoscale)

در خلیج فارس با استفاده از یک الگوریتم هندسه برداری

امید ماه‌پیکر^۱، امیر اشتری لرکی^۲ و محمد اکبری‌نسب^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابل، ایران

(دریافت: ۹۹/۵/۱۳، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

پیچک‌ها یکی از پدیده‌های معمول دریایی هستند که باعث انتقال انرژی و جرم در دریا می‌شوند. شناسایی و استخراج پیچک‌ها یکی از جنبه‌های مهم اقیانوس‌شناسی فیزیکی است و الگوریتم‌های اتوماتیک شناسایی پیچک‌ها از اساسی‌ترین ابزارها برای آشکارسازی و تحلیل پیچک‌ها هستند. از نظر ابعاد و مدت‌دوام، پیچک‌ها به دو نوع میان‌مقیاس و زیرمیان‌مقیاس تقسیم می‌شوند که پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس دارای مقیاس طولی ۱۰۰ متر تا ۱۰ کیلومتر و مقیاس زمانی ۱ تا ۱۰ روز هستند. در این مطالعه از الگوریتم هندسه برداری برای شناسایی اتوماتیک پیچک‌ها در خلیج فارس استفاده شده است که این الگوریتم بر مبنای چرخش بردار سرعت جریان عمل می‌کند. داده‌های اصلی استفاده‌شده برای آشکارسازی پیچک‌ها، خروجی‌های مدل عددی شامل مؤلفه‌های سرعت هستند. این خروجی‌ها حاصل مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن واذاشته‌های گرما-شوری و تنش باد هستند که پس از پایداری و صحت‌سنجی مدل عددی جهت استخراج پیچک‌ها به‌عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته شده‌اند. 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 به‌ازای داده‌های روزانه طی یک سال خروجی مدل شناسایی شد. تعداد پیچک‌ها در فصل زمستان بیشترین و در فصل تابستان کمترین است و شعاع میانگین پیچک‌های واچرخندی در فصل زمستان و چرخندی در فصل تابستان بیشینه است. بیشترین شعاع پیچک‌ها در بازه بین ۵-۱۰ کیلومتر و مدت دوام بیشتر آنها نیز بین ۳-۶ روز است. همچنین هرچه طول عمر پیچک‌ها و شعاع آنها بیشتر باشد، می‌توانند در عمق بیشتری نفوذ کنند.

واژه‌های کلیدی: خلیج فارس، پیچک، زیرمیان‌مقیاس، الگوریتم هندسه برداری، شعاع پیچک، مدت دوام پیچک.

۱. مقدمه

تا چند ماه است و ویژگی‌های وابسته به دما-شوری را تغییر می‌دهد. این تعریف مشابه با تعریف گرداب (Vortex) و چرخاب (Gyre) است با این تفاوت که گرداب‌ها در اثر وقوع تلاطم مثلاً در حرکت شاره حول یک جسم درون آب نیز می‌توانند رخ دهند (صخره‌های بزرگ یا جزایر کوچک در مسیر جریان‌های دریا می‌توانند باعث ایجاد گرداب شوند) و بیشتر به ویژگی‌های ریزمقیاس جریان مربوط می‌شوند؛ همچنین چرخاب‌ها ساختارهایی هستند که به‌طور دائم بر رژیم جریان یک حوضه حاکم هستند. برای مثال گردش چرخندی خلیج فارس که در اثر ورود آب از دریای عمان

امروزه داده‌های دریایی که دربرگیرنده‌ی مقادیر مشاهداتی و اندازه‌گیری‌شده و همچنین خروجی مدل‌های عددی هستند، عمدتاً در دسترس قرار دارند؛ اما تحلیل و پردازش این داده‌ها به‌دلیل حجم سنگین اطلاعات، کاری زمان‌بر و طاقت‌فرساست. از این رو روش‌های هوشمند برای تجزیه و تحلیل این داده‌ها در حال گسترش است و شناسایی پیچک‌ها (Eddies) که یکی از پدیده‌های رایج و پیچیده در دریا هستند، نیز به‌دلیل ابعاد و بازه مکانی-زمانی متغیر آنها با استفاده از الگوریتم‌های اتوماتیک انجام می‌شود. پیچک به‌عنوان یک ساختار چرخشی جریان تعریف می‌شود که دارای طولی عمری از چندروز

لایه‌های سطحی دریاها ایفا می‌کنند؛ به‌علاوه به‌عنوان یک واسطه بین ساختارهای میان‌مقیاس و ریزمقیاس عمل می‌کنند و باعث انتقال انرژی از پیچک‌های میان‌مقیاس به گرداب‌ها یا بالعکس می‌شوند (ژابین و آندریو، ۲۰۱۹). در واقع پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس در فاز میانی بین گرداب و پیچک میان‌مقیاس قرار می‌گیرند و حد واسطی برای این دو به شمار می‌روند. با توجه به ابعاد ساختارهای زیرمیان‌مقیاس وقوع این پدیده‌ها در خلیج فارس محتمل است که این مطالعه با هدف شناسایی و مقایسه بین تعداد پیچک‌های میان‌مقیاس و زیرمیان‌مقیاس در خلیج فارس بر اساس خروجی مدل عددی انجام شده است.

الگوی جریان کلی خلیج فارس یک گردش (چرخاب) چرخندی است که نیروهای تنش باد، گرما-شوری و کشند آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در واقع این گردش متشکل از دو مقیاس است: ۱- مقیاس حوضه‌ای که همان گردش عمومی جریان است و ۲- میان‌مقیاس که دربرگیرنده پیچک‌هایی با ابعاد متفاوت است که در اثر ساختارهای نیمرخ دما-شوری و همچنین وزش باد در ابعاد کوچک‌تر می‌توانند مشاهده شوند. در فصل زمستان وقوع پیچک محتمل‌تر است زیرا ستون آب به‌علت اختلاف دمایی بین سطح و بستر کاملاً مختلط است و با تشکب پیچک در لایه سطحی، انرژی به‌دلیل همگن‌بودن آب به‌راحتی به لایه‌های زیرین منتقل شده و سبب رشد پیچک از سطح تا عمق می‌شود؛ به‌علاوه خود پیچک نیز می‌تواند باعث اختلاط آب در ستون قائم شود. 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 میان‌مقیاس شده که این شرایط طی دو تا سه ماه در این حوضه برقرار است (تاپیل و هوگان، ۲۰۱۰). انرژی این پیچک‌ها در اثر ورود آب سبک‌تر از دریای عمان به داخل خلیج فارس شکل می‌گیرد که البته اگر این جریان با بادهای موسمی از سمت اقیانوس هند همراه شود، می‌تواند تقویت شود. در

و در نتیجه فرایند تبخیر سبب خروج جریان آب شور از تنگه هرمز می‌شود، یک چرخاب است که در تمام طول سال در خلیج فارس مشاهده می‌شود. با توجه به این تعاریف شناسایی پیچک‌ها و تفکیک آنها از سایر ساختارهای مشابه با چالش‌هایی مواجه است ولی در روش‌های موجود سعی شده است تا حد امکان از طریق اعمال قیده‌های مکانی و زمانی این تمایز ایجاد شود و منجر به نتایج دقیق‌تر در شناسایی آنها شود.

پیچک‌های میان‌مقیاس (Mesoscale Eddies) نوعی از سازوکار انتقال آب دریا هستند که حالتی بسته و بلندمدت دارند و محدوده ابعاد آنها از ده تا صد کیلومتر و مقیاس زمانی آنها از چند روز تا چند ماه و حتی چند سال متغیر است (دو و همکاران، ۲۰۱۹). وجود پیچک‌ها سبب انتقال انرژی و توده‌های آب شده و بدین‌صورت بر پارامترهایی نظیر توزیع دما و شوری اثر می‌گذارند. به‌طورکلی جریان‌های دریایی تحت تأثیر عوامل مختلفی ایجاد می‌شوند که در این بین باد، توپوگرافی بستر و میدان‌های محلی جریان (نظیر جریان‌ها در اطراف جزایر) سبب تشکیل پیچک‌ها می‌شوند. مطالعه‌ی سازوکار شکل‌گیری پیچک‌ها، تکامل و مدت دوام آنها در فعالیت‌های نظامی و صنعت ماهیگیری اهمیت دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۹). پیچک‌ها در طی مدت دوام می‌توانند ده‌ها یا صدها کیلومتر حرکت کنند (مک‌گلیکودی و همکاران، ۱۹۹۸). بر اساس مشخصه چرخش، پیچک‌ها می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند: چرخندی (cyclonic) و واچرخندی (anticyclonic). در نیمکره شمالی یک پیچک چرخندی به‌صورت پادساعتگرد و یک پیچک واچرخندی به‌صورت ساعتگرد می‌چرخند.

علاوه بر پیچک‌های میان‌مقیاس، نوعی دیگر از پیچک‌ها به‌عنوان ساختارهای پیچکی زیرمیان‌مقیاس (Submesoscale) نیز وجود دارد که این پیچک‌ها دارای ابعاد افقی از ۱۰۰ متر تا ۱۰ کیلومتر، مقیاس قائم از ۱۰ تا ۱۰۰ متر و طول عمری از ۱ تا ۱۰ روز هستند. این نوع پیچک‌ها نیز نقش مهمی در انتقال جرم و شناوری در

دمایی هسته پیچک و محیط پیرامون آن مبنای تشخیص پیچک قرار می‌گیرد و با اعمال قیدهایی شعاع پیچک محاسبه می‌شود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که حدود ۲۵ درصد پیچک‌های واچرخندی و ۲۶ درصد پیچک‌های چرخندی در لایه سطحی، دارای اختلاف دمایی بیش از ۰/۴ درجه سانتی‌گراد بین هسته و مرز هستند. تاویل و هوگان (۲۰۱۰) به مطالعه گردش و پیچک‌ها در خلیج فارس پرداختند. در این تحقیق مدل‌سازی عددی گردش جریان صورت گرفته و بر اساس نتایج مدل پیچک‌های میان‌مقیاس در سمت سواحل ایران استخراج و بررسی شده‌اند. رئیسی و همکاران (۱۳۹۸) به مطالعه پیچک‌های میان‌مقیاس تحت تأثیر جریان‌های ساحلی در خلیج فارس پرداخته و نقش آنها را در اقلیم منطقه بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که به‌طور میانگین سالانه در حدود ۷۸ پیچک میان‌مقیاس در خلیج فارس شکل می‌گیرد.

۲. 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 JEBCO به صورت شبکه محاسباتی نامنظم و مثلثی شامل ۳۶۳۷۵ المان و ۱۸۷۴۶ گره ساخته شد. تفکیک افقی المان‌ها حدود ۳ کیلومتر و ۳۱ لایه قائم Z برای حل معادلات 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 مشخصاتی همچون گام زمانی، فاصله گره‌های شبکه و غیره بستگی دارد. در ماژول هیدرودینامیک برنامه MIKE نیز شرط CFL (Courant-Friedrich-Levy number) برای پایداری به کار می‌رود که به صورت زیر است:

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

که در آن h عمق کل آب، u و v مؤلفه‌های افقی سرعت

شکل ۱-ب الگوی کلی جریان در خلیج فارس و رژیم ساختاری حاکم بر آن مشاهده می‌شود.

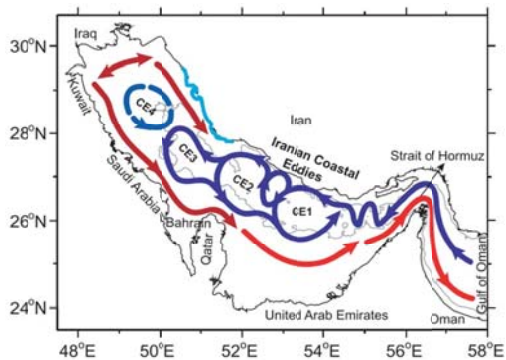
در سال‌های اخیر، برای شناسایی و استخراج پیچک‌ها تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است. لی‌وو و همکاران (۲۰۱۸) از الگوریتم شناسایی و ردیابی پیچکی تکانه زاویه‌ای برای داده‌های ارتفاع‌سنجی (Altimetry) و شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کردند. این الگوریتم از یک روش هیبردی مبتنی بر پارامترهای فیزیکی و خواص هندسی میدان‌های سرعت استفاده می‌کند و می‌تواند برای داده‌هایی با تفکیک مکانی مختلف به کار گرفته شود. مزایای این الگوریتم عبارت‌اند از: تطابق‌پذیری با تفکیک شبکه محاسباتی، استفاده از حداقل پارامتر تنظیم، قابلیت اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی پیچک‌های شناسایی شده و قابلیت تشخیص فرایند ادغام و تقسیم پیچک‌ها. ماتسوکا و همکاران (۲۰۱۶) از روشی برای شناسایی پیچک‌ها بهره گرفتند که علاوه بر پیچک، جریان را نیز تشخیص می‌دهد و پیچک‌ها را به چندین طبقه بر اساس اطلاعات جریانی آنها دسته‌بندی می‌کند. با ردیابی پیچک‌های طبقه‌بندی شده تحت زمان، امکان وقایعی همچون ادغام یا تفکیک پیچک‌ها و همچنین فعل‌وانفعال پیچک‌ها و جریانات اقیانوسی فراهم می‌شود. توسادیا و همکاران (۲۰۱۶) از الگوریتمی برای تعیین مشخصه‌های قائم پیچک‌ها و بیشترین مقدار انرژی جنبشی بین پیچک چرخندی و واچرخندی استفاده کردند. به کمک این الگوریتم داده‌های آماری هر پیچک شامل موقعیت، شعاع، انرژی جنبشی، دما و SSH در چهار تراز قائم حاصل می‌شود. این الگوریتم که بر روی خروجی مدل بخشی از اقیانوس هند اعمال شد، نشان داد که دمای مرکز پیچک عمدتاً در عمق ۱۰۹ متری شروع به تغییر می‌کند و این تغییرات در پیچک چرخندی کمتر و در پیچک واچرخندی بزرگ‌تر است. چون‌هوآ و همکاران (۲۰۱۵) از یک الگوریتم برای ردیابی خطوط هم‌دما در تصاویر ماهواره‌ای برای استخراج پیچک‌ها استفاده کردند. در این الگوریتم که از داده‌های SST استفاده می‌کند، تغییرات

است. تاوایی مثبت نشان‌دهنده چرخش پادساعتگرد و تاوایی منفی بیانگر چرخش ساعتگرد بردار سرعت است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که در این ماه، پیچک‌های میان‌مقیاس در بخش‌های میانی خلیج فارس تشکیل می‌شوند زیرا از اواخر فصل تابستان چرخاب 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. تاویل و هوگان (۲۰۱۰) یان می‌کنند که گردش چرخندی بین جولای و اوت دستخوش تغییرات محسوسی شده و به سه تا چهار پیچک چرخندی و غالباً یک پیچک و اچرخندی تبدیل می‌شود و این پیچک‌ها تا اکتبر و حتی نوامبر بر خلیج فارس حاکم هستند؛ بنابراین نتایج مدل با مشاهدات آنها که بیانگر اوج فعالیت‌ها پیچک‌ها در سپتامبر است همخوانی دارند.

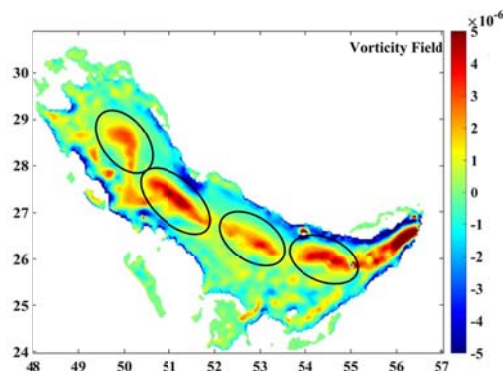
در این مطالعه از الگوریتم ایجادشده توسط ننجلی و همکاران (۲۰۱۰) که بر اساس تغییرات بردارهای جریان افقی است؛ تحت نرم‌افزار متلب برای شناسایی پیچک‌ها استفاده شده است. به‌طور ظاهری، یک پیچک در ناحیه‌ای تعریف می‌شود که میدان برداری سرعت افقی حول یک نقطه مرکزی چرخش داشته باشد. بر مبنای همین خاصیت الگوریتم از چهار قید برای شناسایی پیچک استفاده می‌کند و در صورت اقناع شدن این چهار قید وجود پیچک تأیید و ثبت می‌شود.

در جهت x و y ، g شتاب گرانشی، Δx و Δy مقیاس‌های افقی در جهت x و y و Δt نیز گام زمانی است. مقادیر Δx و Δy با حداقل طول هر المان تقریب زده می‌شوند و عمق آب و مؤلفه‌های سرعت نیز در مرکز المان ارزیابی می‌شوند. بدین منظور و با توجه به ابعاد شبکه و همچنین گام زمانی معادلات که بین 0.1 تا 30 ثانیه است، مقدار CFL بحرانی 0.8 محاسبه شد که برای پایداری مدل مقادیر آن باید کمتر از این مقدار باشند. نیروهای اعمال‌شده شامل گرما-شوری و تنش باد هستند و از اعمال نیروی جزر و مد به دلیل اثرات خیلی کم بر تغییرات چگالی صرف‌نظر شده است (بلین، ۲۰۰۰). پس از اجرای مدل به مدت ۸ سال و پایداری دما و شوری مؤلفه‌های افقی سرعت به صورت شبکه‌ای منظم با 300 سلول در راستای طولی (طول هر سلول 0.302279 درجه) و 200 سلول در راستای عرضی (عرض هر سلول 0.346797 درجه) و با فواصل قائم 2 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 متلب برای ماه سپتامبر ترسیم شد (شکل ۱-الف). تاوایی به‌طور کلی بیانگر نحوه چرخش پارامتر مقیاس مکانی است که در اینجا تغییرات مؤلفه‌های u و v سرعت برحسب مقیاس افقی یعنی Δx و Δy محاسبه شده



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) میدان تاوایی میانگین سرعت در سپتامبر که بیضی‌های مشخص‌شده نشان‌دهنده وجود چرخش پادساعتگرد بردارهای سرعت در آن نواحی هستند.

ب) پیچک‌های میان‌مقیاس خلیج فارس در اواخر تابستان و اوایل پاییز مطابق با مطالعه تاویل و هوگان (۲۰۱۰).

اندازه پیچک‌ها را تعیین می‌کنند و اجاره 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 (ننچلی و همکاران، ۲۰۱۰).

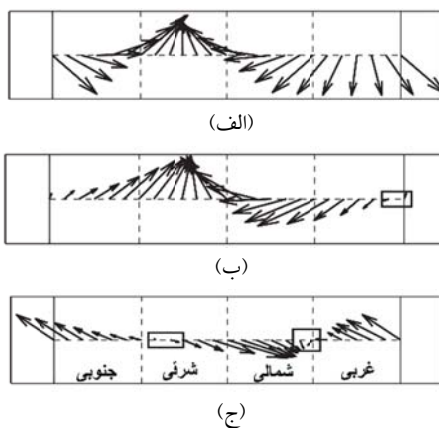
برای صحت‌سنجی الگوریتم نقشه‌های میدان برداری جریان تعدادی از روزها به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود و پیچک‌های موجود در این نقشه‌ها به کمک چشم توسط متخصصین استخراج می‌شود. طبق مطالعات چینو و همکاران (۲۰۰۸) بازدهی الگوریتم با تعریف دو پارامتر قابل ارزیابی است: نرخ شناسایی موفق (SDR) و افزونی نرخ شناسایی (EDR). 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 در آن N_{te} تعداد پیچک‌های واقعی شناسایی شده از طریق مشاهدات عینی داده‌ها در یک روز معین، N_c تعداد پیچک‌های واقعی که هم در مشاهده عینی داده‌ها و هم توسط الگوریتم شناسایی شده‌اند (در این مورد، موقعیت مرکز پیچک‌ها ملاک تطابق مشاهدات عینی و شناسایی پیچک توسط الگوریتم است)، N_{oa} تعداد پیچک‌هایی است که فقط توسط الگوریتم شناسایی شده‌اند و در مشاهدات عینی ثبت نشده‌اند.

این چهار قید عبارت‌اند از: ۱- در طول مقطع شرقی-غربی شبکه منظم داده‌های سرعت، علامت مؤلفه سرعت ۷ 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 ۱۱ 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 به‌ترتیب در چهار راستای جنوبی، شرقی، شمالی و غربی باید همانند شکل ۲-الف تغییر کنند تا قید چهارم اقیانوس 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

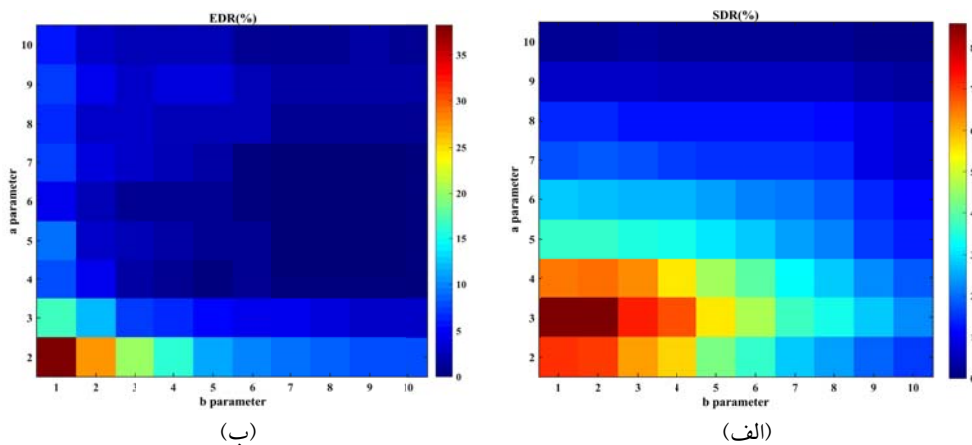


شکل ۲. الف) آهنگ چرخش بردارها حول مرکز یک پیچک استاندارد طبق الگوریتم. ب) و ج) بردارهایی که با کادر مربعی مشخص شده‌اند، دارای ناهنجاری هستند و نمی‌توانند شرط چهارم مبنی بر وجود پیچک را اقیانوس کنند (ننچلی و همکاران، ۲۰۱۰).

۱۲ درصد 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 ننجلی و همکاران (۲۰۱۰) برای همین الگوریتم مقدار $EDR=2.9\%$ و $SDR=92.9\%$ است. در این مطالعه ذکر شده که مقادیر SDR بالای ۸۰ درصد مطلوب است. در مطالعه چینو و همکاران (۲۰۰۸)، مقدار SDR به ازای دو روش مختلف به کار گرفته شده $92/7$ درصد و $86/8$ درصد است در حالی که EDR به ترتیب $18/7$ درصد و $63/3$ درصد است. هرچند به دلیل متفاوت بودن روش‌ها و همچنین مجموعه داده‌های استفاده شده در مطالعات، امکان مقایسه مستقیم پارامترها با یکدیگر وجود ندارد، باین حال این دو پارامتر در مورد داده‌های مطالعه حاضر به ازای $a=3$ و $b=2$ بهترین حالت را دارند.

به طور 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. به منظور بهینه‌سازی الگوریتم داده‌های سرعت جریان در خلیج فارس برای هفت روز مختلف به صورت تصادفی انتخاب شد و پیچک‌های موجود در آنها به صورت عینی استخراج شد. مقادیر مختلف a و b نیز جهت بهینه‌سازی الگوریتم بررسی شد به طوری که 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 شد. 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 درصد و کمترین خطا با مقداری حدود



شکل ۳. مقادیر الف (SDR و ب) EDR به ازای ترکیب‌های مختلف a و b جهت بهینه‌سازی الگوریتم.

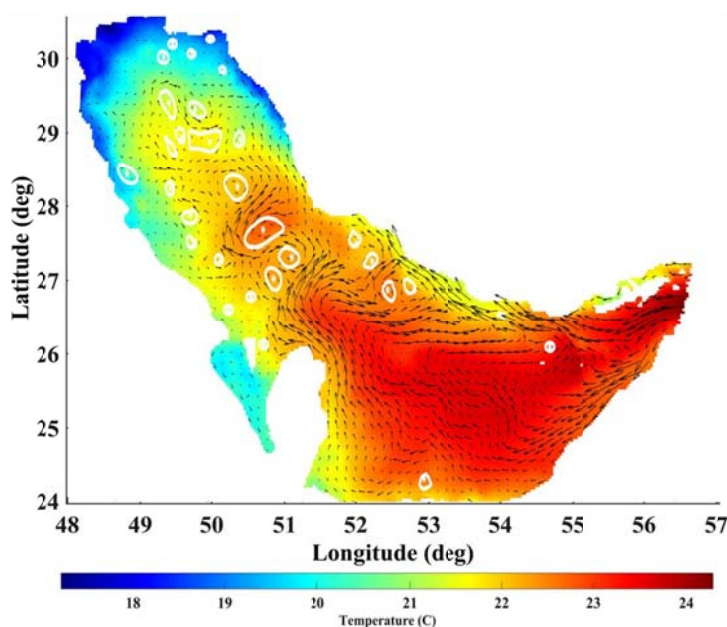
جدول ۱. نتایج اعتبارسنجی الگوریتم برای هفت روز منتخب که با مشاهدات عینی بررسی شده است.

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

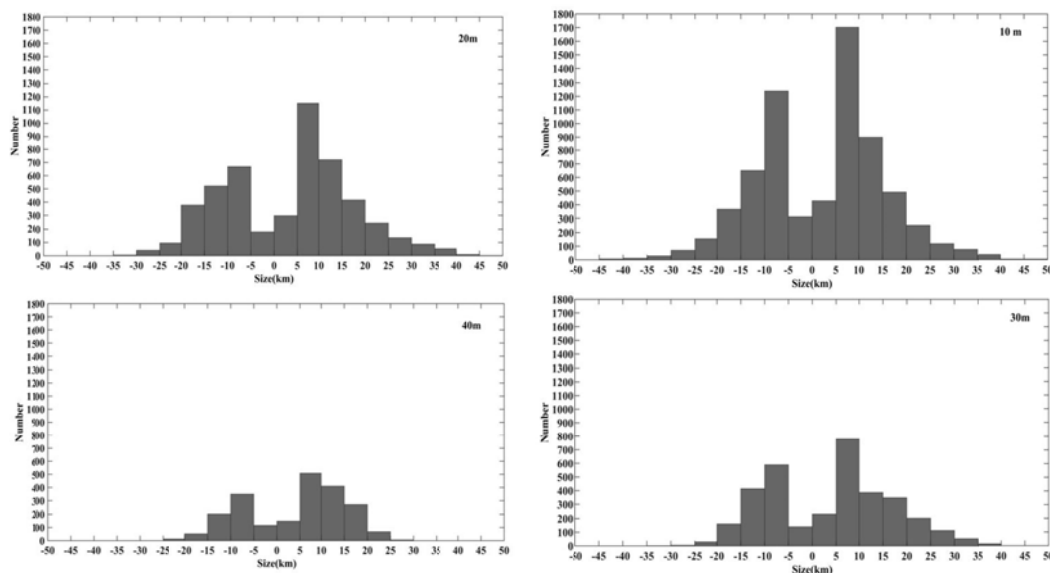
۳. مشاهده و آشکارسازی پیچک‌ها

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 تمام گام‌های زمانی (گام زمانی داده‌ها روزانه است) ۴۳۰۸ پیچک چرخندی و ۲۸۶۰ پیچک واچرخندی در لایه 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 گرفته‌اند و دارای قطرهای کوچکی هستند و بیانگر این است که تحت تأثیر عوامل محلی نظیر توپوگرافی و یا وزش باد تشکیل می‌شوند. البته بحث در مورد خواص فیزیکی پیچک‌ها خارج از اهداف این تحقیق است ولی آن‌طور که مشاهده می‌شود در لایه سطحی اختلاف دمای محسوسی بین هسته پیچک‌ها و مرز آنها وجود ندارد و به نظر می‌رسد این در مورد اکثر پیچک‌های با قطر کوچک صادق باشد. نمودارهای شکل ۵ هیستوگرام شعاعی پیچک‌ها را در

مجموع کل روزهای سال نمایش می‌دهد. این نمودارها در ۴ عمق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری نشان داده شده‌اند. مقادیر شعاع منفی متناظر با پیچک‌های واچرخندی و شعاع مثبت متناظر با پیچک‌های چرخندی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشتر پیچک‌ها دارای شعاعی بین ۵-۱۰ کیلومتر هستند و از نوع چرخندی می‌باشند. همچنین تعداد پیچک‌ها از عمق ۱۰ متر تا ۴۰ متر کاهش یافته و در عمق ۴۰ متری کمتر از ۴۰۰ پیچک با شعاع ۵-۱۰ کیلومتر در طول یک سال مشاهده شده است. قابل ذکر است که این نمودارها به‌ازای کل پیچک‌هایی که در داده‌های روزانه مشاهده شده، ترسیم شده است، بنابراین اگر یک پیچک برای مثال به مدت سه روز وجود داشته، در این نمودار سه مرتبه لحاظ شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس دارای بیشترین فراوانی هستند و اکثر آنها چرخندی هستند. البته پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس دارای ویژگی‌های دیگر نیز هستند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.



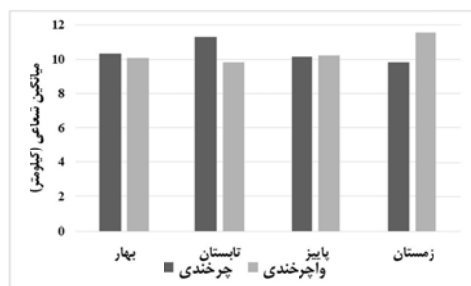
شکل ۴. پیچک‌های شناسایی شده لایه سطحی در فصل بهار توسط الگوریتم.



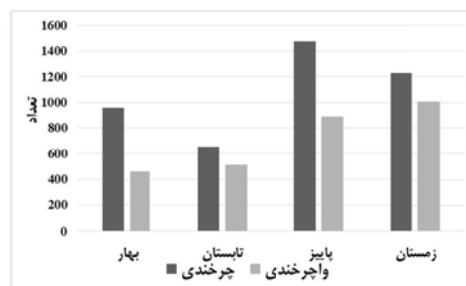
شکل ۵. هیستوگرام شعاعی پیچک‌های شناسایی شده در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری (مقادیر مثبت و منفی شعاع به ترتیب معرف پیچک چرخندی و واچرخندی هستند)

قائم صورت می‌گیرد ساختار پیچک‌های میان‌مقیاس چرخندی متلاشی شده و پیچک‌هایی با شعاع کمتر رخ می‌دهد. بنابر پایداری تاوایی نهفته، کاهش یا افزایش عمق ستون آب باید با چرخش جریان همراه باشد. از این رو اختلاط آب که با همرفت آب‌های عمیق و ته‌نشینی آب‌های سطحی همراه است منجر به افزایش شکل‌گیری پیچک‌ها در فصل پاییز می‌شود. همچنین با تقویت وزش باد در پاییز و زمستان چرخش اکمن نیز رخ می‌دهد که این چرخش باعث ایجاد پیچک می‌شود و البته بسته به طول مدت وزش و ویژگی‌های توپوگرافی محلی این چرخش‌ها می‌توانند متفاوت باشند.

توزیع فصلی تعداد پیچک‌ها و شعاع آنها در لایه سطحی در شکل ۶ نشان داده شده است. تعداد پیچک‌ها در فصل پاییز بیشترین و در فصل تابستان کمترین است. میانگین شعاعی پیچک‌های چرخندی در فصل تابستان و پیچک‌های واچرخندی در فصل زمستان دارای بیشترین مقدار است. از مقایسه دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه فصل تابستان نیم‌رخ قائم آب پایدارتر است و لایه‌بندی شدید وجود دارد، پیچک‌هایی چرخندی در مقیاس بزرگ‌تر شکل می‌گیرد که این پیچک‌ها مطابق مطالعات قبلی تحت تأثیر گردش کلی خلیج فارس قرار دارند. ولی در فصل پاییز و زمستان هنگامی که اختلاط



(ب)



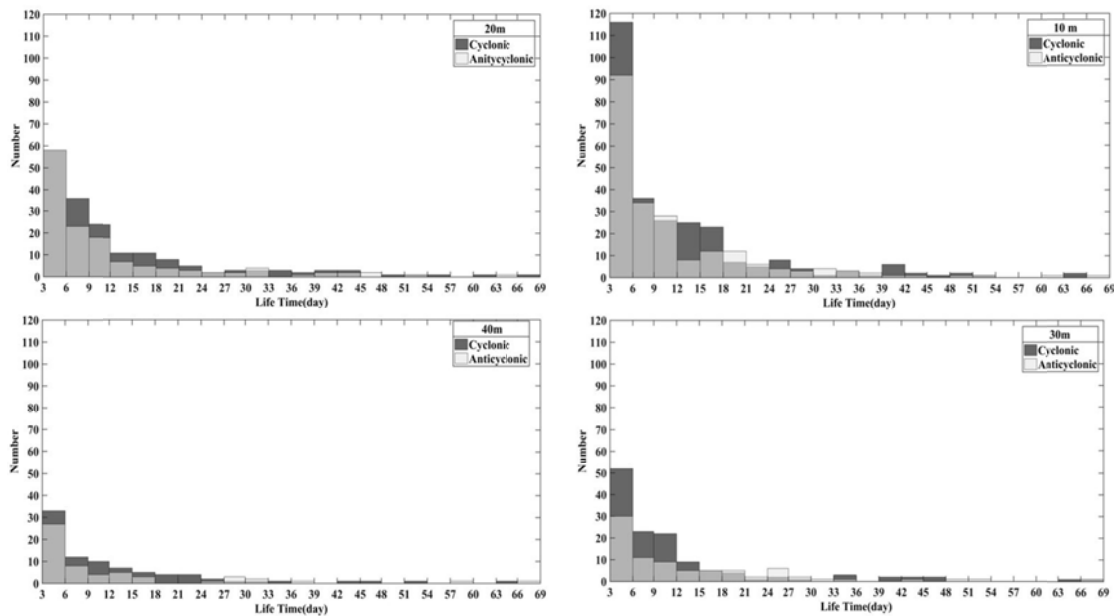
(الف)

شکل ۶. توزیع فصلی (الف) تعداد پیچک‌ها و (ب) میانگین شعاع پیچک‌ها.

خلیج فارس (گردش ناشی از ورود آب دریای عمان) است باعث توسعه پیچک‌های چرخندی می‌شود. همچنین این اختلاف در بازه زمانی ۱۲-۱۸ روز بین پیچک‌های چرخندی و واچرخندی مشهودتر است و تأیید می‌کند که پیچک‌های چرخندی از نوع میان‌مقیاس هستند. در این نمودار پیچک‌های با عمر کمتر از ۷۰ روز نشان داده است، باین‌حال تعداد انگشت‌شماری از پیچک‌ها دارای عمر حدود ۷۰ روز و یا بیشتر هستند. تقریباً در تمامی بازه‌های زمانی طول عمر، تعداد پیچک‌های چرخندی بر واچرخندی غالب است.

در این الگوریتم، یک پیچک در صورتی ثبت می‌شود که چرخش آن به‌طور کامل صورت بگیرد، به عبارتی اگر جریان، چرخشی کمتر از ۳۶۰ درجه داشته باشد، شعاع ثبت شده آن توسط الگوریتم دستخوش تغییر می‌شود و یا به‌طور کل الگوریتم آن را به‌عنوان پیچک لحاظ نمی‌کند. بر همین مبنا در شکل ۸ هیستوگرام شعاع اولیه‌ی پیچک‌ها یا شعاع تشکیل پیچک‌ها رسم شده است.

در گام بعدی پیچک‌هایی که مدت دوام آنها ۳ روز یا بیشتر است استخراج شده‌اند و پیچک‌های با دوام کمتر از سه روز حذف شده‌اند. همچنین از تکرار پیچک‌ها در این نمودارها جلوگیری شده و هر پیچک فقط یک‌بار در طول مدت دوامش لحاظ شده است. در مجموع ۶۰۹ پیچک در لایه‌ی سطحی و ۷۹ پیچک در عمیق‌ترین لایه با مدت دوام سه روز یا بیشتر شناسایی شد و توزیع طول عمر پیچک‌ها در چهار تراز ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری نشان داده شده است (شکل ۷). بازه زمانی هر میله در نمودار ۳ روز است و همان‌طور که مشاهده می‌شود پیچک‌های چرخندی بیشتری با عمر بیش از ۳ روز نسبت به پیچک‌های واچرخندی وجود دارد. علت غلبه پیچک‌های چرخندی به واچرخندی، چرخش چرخاب کلی خلیج فارس است که چرخندی می‌باشد. از آنجاکه معمولاً پیچک‌های با مدت دوام بیشتر نمی‌توانند در اثر وزش باد تداوم داشته باشند و بیشتر به‌دلیل گرادبان‌های دما-شوری دوام خواهند داشت، عامل اصلی این گرادبان که چرخاب

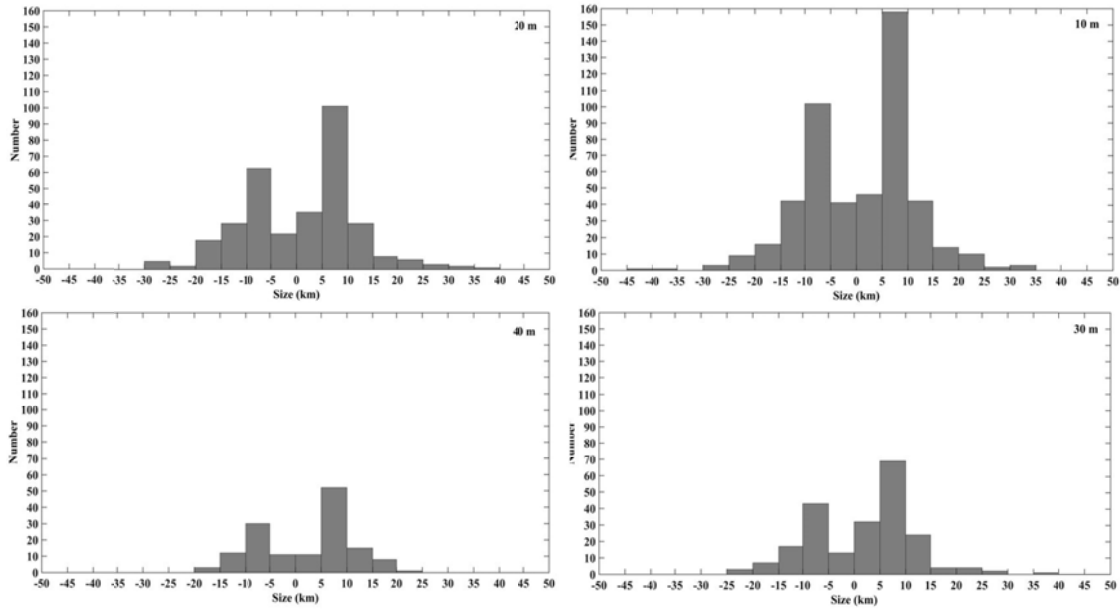


شکل ۷. تغییرات مدت دوام پیچک‌های شناسایی‌شده در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری.

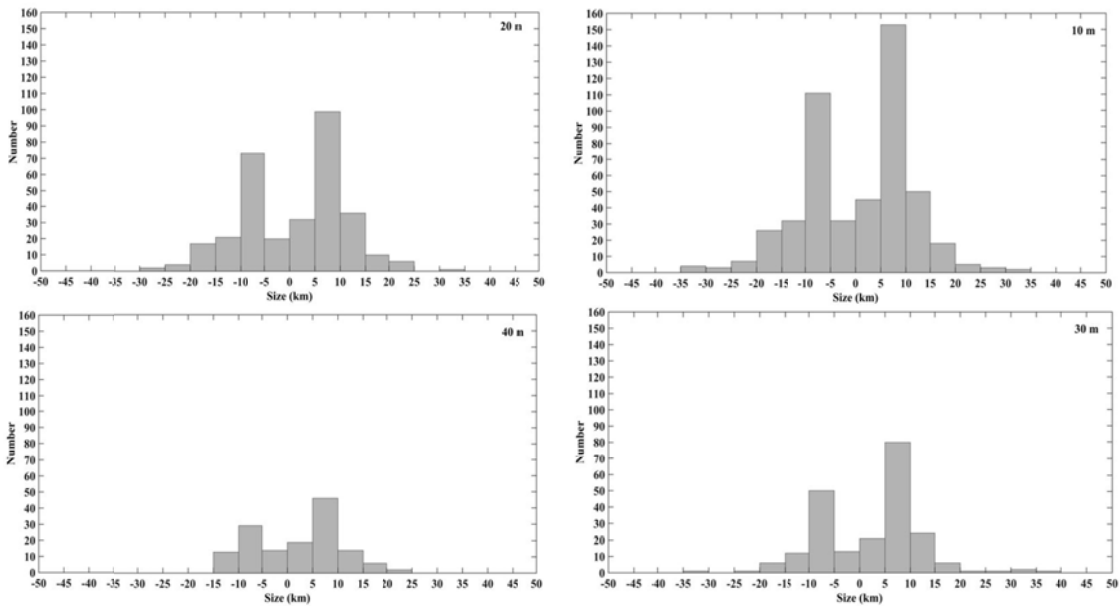
در این شکل که فقط پیچک‌های با مدت دوام سه روز و بیشتر نشان داده شده‌اند، ملاحظه می‌شود که بیشتر پیچک‌های چرخندی و اچرخندی دارای شعاع اولیه ۵-۱۰ کیلومتر هستند و با افزایش عمق تعداد پیچک‌ها کاهش می‌یابد. در بازه‌ی ۰-۵ کیلومتر و ۱۰-۱۵ کیلومتر تعداد پیچک‌ها تقریباً مشابه است و به‌ازای شعاع بیش از ۱۵ کیلومتر تعداد پیچک‌ها به کمتر از ۲۰ می‌رسد. همان‌طور که گفته شد بیشتر پیچک‌ها تحت تأثیر فرایندهای زیرمیان‌مقیاس تشکیل می‌شوند که با توجه به ابعاد افقی شبکه مدل‌سازی و همچنین ویژگی‌های الگوریتم موجود که با اعمال قید زمانی از شمارش پیچک‌های ناپایدار جلوگیری می‌کند، در اینجا نمی‌توان راجع به پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس با ابعاد کمتر از ۳ کیلومتر قضاوت درستی داشت. با وجود اینکه فراوانی پیچک‌ها در بازه ۰-۵ کیلومتر نیز قابل توجه است ولی در بازه ۵-۱۰ کیلومتر می‌توان با قطعیت گفت که تمامی پیچک‌ها قابل‌شناسایی هستند، بنابراین این بازه به‌عنوان حداقل بازه تشخیص پیچک‌ها دارای حداکثر تعداد است.

در نقطه تقابل شعاع تشکیل، شعاع نهایی یا شعاع از بین رفتن پیچک است که به‌عنوان شعاع پیچک در آخرین روزی که وجود داشته، ثبت شده است که در شکل ۹ هیستوگرام آن رسم شده است. همانند شکل ۸ بیشترین تعداد پیچک در شعاع نهایی ۵-۱۰ کیلومتر وجود دارد ولی در لایه ۱۰ متری تعداد پیچک‌های چرخندی که دارای شعاع نهایی ۱۰-۱۵ کیلومتر هستند، نسبت به تعداد پیچک‌ها با همان شعاع اولیه اندکی

افزایش نشان می‌دهد. به‌طورکلی از شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان نتیجه گرفت که جابه‌جایی محسوسی در توزیع شعاعی پیچک‌ها از روز تشکیل تا روز از بین رفتن رخ نمی‌دهد. با این وجود تعداد کمی از پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس طی دوره تکاملی خود می‌توانند توسعه یابند و به پیچک میان‌مقیاس تبدیل شوند. از جمله پارامترهایی که بر نحوه تکامل یک پیچک اثر می‌گذارند، شعاع آن، تاوایی نسبی و انرژی جنبشی پیچک هستند (دانگ و همکاران، ۲۰۱۲). بر مبنای این پارامترها اندازه پیچک و انرژی جنبشی آن در یک‌پنجم اولیه مدت حیاتش افزایشی و در یک‌پنجم نهایی کاهش است و در سه‌پنجم میانی، دارای روند پایداری هستند. نمودارها نشان می‌دهد که بیشتر پیچک‌ها در فاز پایداری شناسایی و ثبت شده‌اند، زیرا اختلاف چندانی بین توزیع شعاعی آنها در بازه‌های مختلف از روز اول تشکیل تا روز آخر عمر آنها مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین در فاز اولیه تکامل یا فاز نهایی از بین رفتن پیچک که به‌طور طبیعی اختلالات در خطوط جریان حول مرکز پیچک بیشتر است، الگوریتم پیچک‌ها را ثبت نمی‌کند و فقط در فاز پایدار که وجود پیچک قطعی شد، ثبت می‌شود. از سوی دیگر بر مبنای تعریف پیچک در این الگوریتم تغییر جهت جریان‌ها سبب شکل‌گیری پیچک می‌شود به‌طوری‌که بردارهای جریان به نقطه اولیه حرکت خود برسند و ابتدای حرکت به انتهای آن وصل شود. وقتی چنین حرکتی تاوایی در مرکز پیچک رفته‌رفته افزایش می‌یابد تا جایی که نقطه مرکزی آن دارای سرعت صفر شود و در این صورت به‌عنوان پیچک شناسایی می‌شود.



شکل ۸. هیستوگرام شعاع اولیه پیچک‌های شناسایی‌شده با مدت دوام بیش از دو روز در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری (مقادیر مثبت و منفی شعاع به ترتیب معرف پیچک چرخندی و واچرخندی هستند).



شکل ۹. هیستوگرام شعاع نهایی پیچک‌های شناسایی‌شده با مدت دوام بیش از دو روز در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری (مقادیر مثبت و منفی شعاع به ترتیب معرف پیچک چرخندی و واچرخندی هستند).

از سطح تا عمق حدوداً بیست‌متری به نصف کاهش پیدا می‌کند. نواحی با عمق کمتر از ۲۰ متر عمدتاً در سواحل جنوبی و رأس خلیج فارس (سواحل خوزستان) واقع شده‌اند. در رأس خلیج فارس رودخانه اروند واقع شده

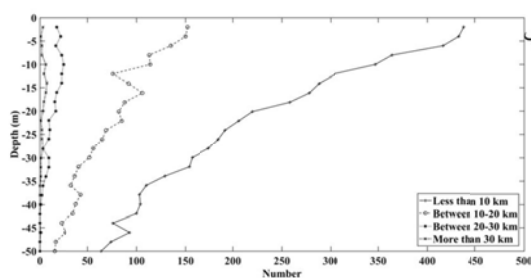
در شکل ۱۰-الف تغییرات تعداد پیچک‌ها به‌ازای تغییر طول عمر برای پیچک‌های با عمر کمتر از ۱۰ روز، بین ۱۰ تا ۲۰ روز و بیشتر از ۲۰ روز از سطح تا عمق ۵۰ متری رسم شده است. تعداد پیچک‌های با عمر کمتر از ۱۰ روز

پیچک‌ها، زمان وقوع، مدت دوام، جهت چرخش و مرز آنها در ۲۵ تراز به دست آمد. با در نظر گرفتن برخی ملاحظات مربوط به عدم قطعیت در الگوی شناسایی پیچک و نوسان‌های معمول در داده‌های عددی، پیچک‌هایی که دوام آنها سه روز و بیشتر است را لحاظ کردیم (دانگ و همکاران، ۲۰۱۲)؛ بنابراین ۳۴۹ پیچک چرخندی و ۲۶۰ پیچک واچرخندی در سطحی‌ترین لایه و ۵۳ پیچک چرخندی و ۲۶ پیچک واچرخندی با طول عمر ۳ روز و بیشتر در عمیق‌ترین لایه وجود دارد. در لایه سطحی پیچک‌های چرخندی حدود ۳۴ درصد و در عمیق‌ترین لایه بیش از دو برابر، نسبت به پیچک‌های واچرخندی بیشتر هستند. گردش غالب در خلیج فارس که ناشی از اختلاف چگالی بین خلیج فارس و دریای عمان است یک گردش چرخندی است (کمپف و صدری‌نسب، ۲۰۰۶) و متعاقب آن انتظار غالب بودن پیچک‌های چرخندی نیز منطقی است. ولی علت اختلاف نسبی پیچک‌های چرخندی و واچرخندی در سطح و عمق می‌تواند مربوط به اثرات تنش باد در لایه‌های سطحی باشد، زیرا باد غالب که در خلیج فارس از سمت شمال‌غربی می‌وزد (پاوس و همکاران، ۲۰۱۳)، در نیمه شمالی خلیج فارس مطابق با اثر اکمن باعث چرخش جریان به سمت راست شده و عامل اولیه برای چرخش ساعتگرد جریان و ایجاد پیچک‌های واچرخندی باشد. به علاوه پیچک‌های سطحی ناشی از باد در صورتی که مدت دوام کمی داشته باشند، نمی‌توانند تا اعماق نفوذ کنند و این نتیجه در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده است.

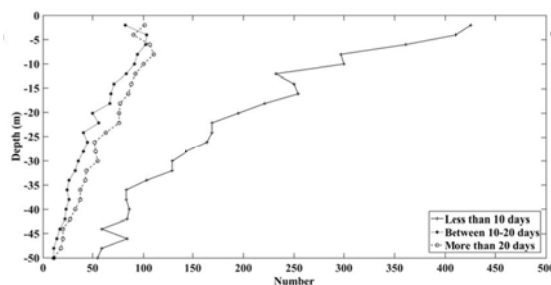
است و ورود آب شیرین از این رودخانه به خلیج فارس باعث ایجاد یک جبهه شوری می‌شود که این جبهه در اثر کوچک‌ترین ناپایداری‌ها می‌تواند عاملی برای تشکیل ساختارهای زیرمیان‌مقیاس از جمله پیچک‌ها عنوان شود؛ بنابراین پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس با مدت دوام کم در این نواحی تشکیل می‌شود. در پیچک‌های با عمر ده روز و بیشتر شیب تغییرات نسبت به عمق کمتر است و علت آن می‌تواند به پایدارتر شدن پیچک‌ها ارتباط داشته باشد؛ یعنی هرچه مدت دوام پیچک بیشتر باشد، پیچک در اعماق بیشتر نمو پیدا می‌کند و می‌تواند در سراسر ستون آب مشاهده شود. در شکل ۱۰-ب نیز تغییرات تعداد پیچک‌ها به‌ازای تغییر شعاع پیچک برای پیچک‌های با شعاع کمتر از ۱۰ کیلومتر، بین ۱۰-۲۰ کیلومتر، بین ۲۰-۳۰ کیلومتر و بیشتر از ۳۰ کیلومتر از سطح تا عمق ۵۰ متری رسم شده است. تعداد پیچک‌های با شعاع کمتر از ۱۰ کیلومتر از سطح تا عمق حدوداً ۲۵ متری به نصف کاهش می‌یابد و برای پیچک‌های با شعاع بین ۱۰-۲۰ کیلومتر نیز تقریباً مشابه است. تعداد پیچک‌های با شعاع بیش از ۲۰ کیلومتر در عمق کمتر از ۴۰ متر به صفر می‌رسد و این به دلیل محدودیت مساحت سطح خلیج فارس در اعماق است که اجازه تشکیل پیچک‌ها با شعاع زیاد را نمی‌دهد. از سوی دیگر تعداد این دسته از پیچک‌ها از سطح تا ۴۰ متر تغییرات بسیار اندکی را نشان می‌دهد.

۴. بحث

با به‌کارگیری الگوریتم شناسایی پیچک، موقعیت



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تغییرات تعداد پیچک‌ها نسبت به عمق به‌ازای (الف) طول عمرهای مختلف و (ب) شعاع‌های مختلف.

تغییرات تعداد پیچک‌ها از سطح تا عمق نیز یکسان نیست، یعنی تعداد پیچک‌ها به‌طور یکنواخت کاهش نمی‌یابد و حتی در برخی لایه‌ها نسبت به لایه بالاتر اندکی افزایش مشاهده می‌شود. علاوه بر اثرات باد که مورد بحث قرار گرفت، لایه‌بندی آب به‌خصوص در فصل تابستان نیز عاملی مؤثر بر شکل‌گیری پیچک‌ها است. در اوایل تابستان با گرم‌شدن آب‌های سطحی یک ترموکلاین فصلی در عمق ۲۰-۳۰ متری ایجاد شده و این ترموکلاین باعث جداسازی آب‌های گرم سطحی از آب‌های سرد عمیق می‌شود (یاثو، ۲۰۰۸). بر همین اساس برخی پیچک‌های ایجاد شده در سطح نمی‌توانند به زیر ناحیه ترموکلاین نفوذ کنند و ناحیه ترموکلاین همانند یک حائل عمل کرده و باعث اتلاف انرژی پیچک‌ها در لایه سطحی می‌شود؛ بنابراین پیچک‌های تشکیل شده به سرعت تحلیل می‌روند و این نکته در نتایج نیز مشاهده شد که در فصل تابستان کمترین تعداد پیچک وجود دارد. البته قابل ذکر است که نیم‌رخ قائم برخی پیچک‌ها با معیار زمان دوام تغییر می‌کند، یعنی پیچک‌هایی که مدت دوام آنها ده روز و بیشتر است تا عمق بیشتری نفوذ می‌کنند.

در مطالعه رئیسی و همکاران (۱۳۹۸) میانگین تعداد پیچک‌های میان‌مقیاس در دو فصل بهار و تابستان به ترتیب مشابه پاییز و زمستان است و بیشترین تعداد پیچک در ژانویه با ۱۱ عدد رخ می‌دهد. البته در این مطالعه فقط شاخص‌های سطحی پیچک‌ها بررسی شده است و بر اساس معیارهای سطحی استخراج شده‌اند و بیان شده که درصد پیچک‌های چرخندی در همه فصول بر واچرخندی غالب است. در مطالعه حاضر نیز پیچک‌های چرخندی غالب هستند ولی تعداد پیچک‌ها در فصل زمستان و پاییز بیشتر است که این به دلیل افزایش فعالیت‌های زیرمیان‌مقیاس با وقوع ناپایداری آب به دلیل اختلاط است. در حالی که در فصل تابستان که آب به لحاظ لایه‌بندی تقریباً پایدار است، پیچک‌های میان‌مقیاس عمدتاً تشکیل می‌شوند و این پیچک‌ها در صورتی می‌توانند به لایه‌های زیرین نفوذ کنند که انرژی آنها به حدی باشد که بتواند از

لایه ترموکلاین عبور کنند.

برای محاسبه شعاع پیچک‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد و از آنجا که تعریف مشخصی برای مرز یک پیچک وجود ندارد و از سویی بررسی داده‌های میدانی نیز نمی‌تواند در منجر به تعیین مرز دقیقی برای پیچک‌ها شود، هر کدام از این روش‌ها منجر به یک جواب خاص برای ابعاد پیچک و شعاع آن می‌شوند. در این روش از خاصیت خطوط تابع جریان برای محاسبه شعاع پیچک‌ها استفاده شده است که مطابق آن مرزهای پیچک به‌عنوان دورترین خط جریان بسته شده حول مرکز تعیین می‌شوند به طوری که در سراسر آن اندازه سرعت به‌طور شعاعی تا آنجا در حال افزایش بوده است. شعاع محاسبه شده طبق این تعریف نسبت به سایر روش‌ها مقداری کمتر است که این نکته در مطالعات قبلی ذکر شده است. اگر شعاع ۱۰ کیلومتری را به‌عنوان حداقل شعاع پیچک‌های میان‌مقیاس در خلیج فارس در نظر بگیریم، تعداد این پیچک‌ها طبق الگوریتم حاضر (بر اساس شکل ۱۰-ب) به‌طور میانگین حدود ۱۴ پیچک در ماه وجود دارد که این مقدار نزدیک به محدوده ۴-۱۱ پیچک میان‌مقیاس در مطالعه رئیسی و همکاران (۱۳۹۸) است. در مطالعه تاپیل و هوگان (۲۰۱۰) نیز فقط در مورد پیچک‌های میان‌مقیاس با شعاع بیش از ۳۰ کیلومتر صحبت شده است که تعداد آنها در طول سال انگشت‌شمار است.

درصد نفوذ پیچک‌ها یا نسبت تعداد پیچک‌های عمیق ترین لایه به لایه سطحی، برای پیچک‌های چرخندی ۱۷ درصد و برای پیچک‌های واچرخندی ۱۰ درصد است. این نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در پیچک‌های چرخندی نسبت به پیچک‌های واچرخندی کمتر است و احتمالاً به دلیل همسویی پیچک‌های چرخندی با گردش کلی خلیج فارس است. برای بررسی بیشتر، مدت دوام پیچک‌های چرخندی و واچرخندی در چهار تراز (شکل ۷) نشان داد که پیچک‌های واچرخندی در همه ترازها و تقریباً تمامی بازه‌های مدت دوام غالب هستند. در مقایسه با پیچک‌های موجود در اقیانوس‌ها (چلتون و همکاران،

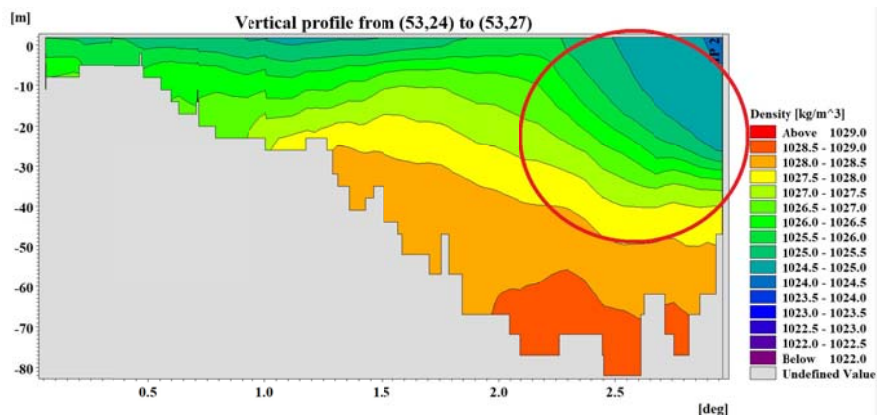
با دیواره‌های ساحلی دچار چرخش می‌شوند. این علت باعث شده در فصل زمستان بیشترین تعداد پیچک در خلیج فارس مشاهده شود؛ چراکه وزش بادهای شمالی و شمال‌غربی در این فصل غالب است. مطابق مطالعه پائوس و همکاران (۲۰۱۳) باد سبب ایجاد دو چرخاب بزرگ در خلیج فارس می‌شود که یکی موازی با دیواره جنوبی تشکیل شده و به صورت چرخندی است و دیگری موازی با دیواره شمالی در که سواحل ایران است، تشکیل می‌شود و واچرخندی می‌باشد (شکل ۱۲). چرخاب چرخندی به دلیل همسویی با گردش کلی خلیج فارس دارای قدرت بیشتری است.

عامل دوم برای ایجاد پیچک‌ها ورود آب سبک‌تر از دریای عمان به داخل خلیج فارس است که این جریان در امتداد سواحل ایرانی حرکت می‌کند. این جریان در جولای و اوت به دلیل مکانیسم ناپایداری به تدریج قوی‌تر شده و به دلیل فرایندهای تلاطمی در مسیر حرکت که ناشی از جریان خروجی آب شور از خلیج فارس است دچار چرخش می‌شود. در صورتی که انرژی این ناپایداری بزرگ باشد، پیچک رفته‌رفته تقویت شده و این منجر به بازخورد مثبت در آن می‌شود تا جایی که مقیاس اولیه آن دچار تغییر محسوس می‌شود. یکی از منابع انرژی ممکن، انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در شیب هم‌چگال است (شکل ۱۱) که می‌تواند از طریق ناپایداری چگال‌گرا (baroclinic) آزاد شود (تاپیل و هوگان، ۲۰۱۰). در نهایت عامل سوم ایجاد پیچک‌ها در خلیج فارس جبهه اروندرود در بخش شمالی است که این جبهه نیز متأثر از جهت وزش باد می‌تواند در جهت مختلف گسترش یابد. جریان‌های گرما-شوری قوی‌تر از جریان‌های جزر و مدی پسماند (Residual tidal currents) است.

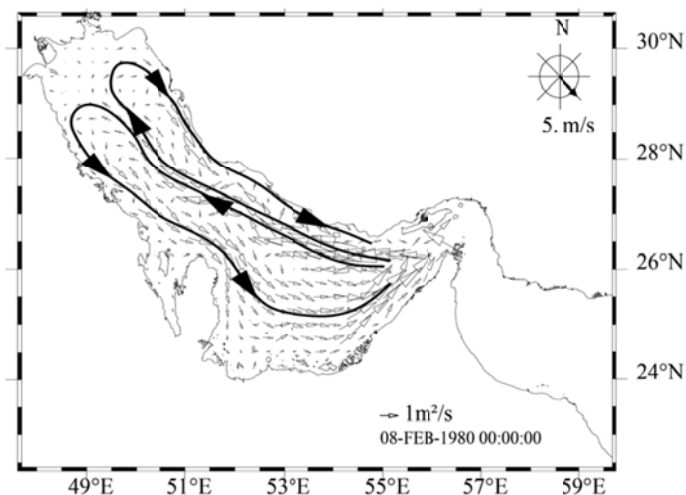
این پیچک‌ها مدت دوام کمتری دارند و این می‌تواند به دلیل اثرات ناشی از اصطکاک بستر و مرزهای جانبی در آب‌های کم‌عمق باشد. در شکل ۱۱ که برش عرضی خلیج فارس در طول جغرافیایی ۵۳ درجه شرقی نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که سواحل سمت ایران دارای شیب بیشتری است؛ از این رو انتظار می‌رود پیچک‌های ایجادشده در این نواحی تا عمق بیشتری نفوذ کنند.

بیشتر پیچک‌های شناسایی شده دارای شعاع ۵-۱۰ کیلومتر هستند که این پیچک‌ها به عنوان پیچک‌های زیرمیان مقیاس (submesoscale) شناخته می‌شوند، زیرا پیچک‌های میان‌مقیاس دارای قطری در حدود ۲۰-۳۰ کیلومتر هستند (دانگ و مک‌ویلیامز، ۲۰۰۷). پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس عمدتاً در نواحی نزدیک به ساحل خلیج فارس و همچنین انتهای شمال‌غربی آن یافت می‌شوند. نواحی نزدیک به ساحل فعل و انفعالات جریان با دیواره‌های ساحلی افزایش می‌یابد و این می‌تواند باعث ایجاد پیچک‌هایی با شعاع کوچک شود. همچنین در انتهای شمال‌غربی خلیج فارس به علت شار رودخانه اروندرود که مهم‌ترین منبع آب شیرین خلیج فارس است، پلوم این رودخانه با ورود به آب‌های خلیج فارس به علت اختلاف شوری می‌تواند منجر به شکل‌گیری پیچک‌هایی با ابعاد کوچک شود؛ اما پیچک‌های با ابعاد میان‌مقیاس عمدتاً در بخش‌های میانی که دارای عمق بیشتر هستند روی می‌دهند.

بحث درباره سازوکار تشکیل پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس بسیار گسترده است زیرا با ویژگی‌های کوچک‌مقیاس ارتباط دارند. با این حال اصلی‌ترین دلیل شکل‌گیری پیچک‌های زیرمیان‌مقیاس، باد است که سبب شکل‌گیری جریان‌های بادرانده شده و این جریانات در تقابل



شکل ۱۱. نیم‌رخ قائم چگالی در طول جغرافیایی ۵۳ درجه شرقی در ماه ژوئن.



شکل ۱۲. جریان متوسط ناشی از باد شمال‌غربی با سرعت ۵ متر بر ثانیه که می‌تواند منجر به یک گردش چرخندی در نیمه جنوبی و یک گردش واچرخندی در نیمه شمالی خلیج فارس شود (پاوس و همکاران، ۲۰۱۳).

۵. نتیجه‌گیری

دوام آنها از مرتبه چندروز بود و پیچک‌های با مدت دوام کمتر از سه روز حذف شده‌اند تا نتایج حاصله فاقد خطاهای کوچک و جزئی در حین اجرای مدل و استخراج پیچک‌ها باشد. نتایج مدل‌سازی گردش در خلیج فارس حاکی از آن است که در فصل تابستان با تقویت نفوذ جریان آب سبک‌تر از دریای عمان و ساختار لایه‌بندی قائم چگالی، اختلالات تلاطمی خیلی کوچک می‌تواند منجر به تشکیل و رشد پیچک‌ها در صورت تأمین انرژی آنها شود. پیچک‌های تشکیل شده در قسمت‌های میانی خلیج فارس به دلیل عمیق‌تر بودن و اتلاف کمتر انرژی بیشتر رشد کرده و می‌توانند به ابعاد

شناسایی نقاط و زمان‌هایی که پیچک‌ها تشکیل می‌شوند می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های ایجاد و تحلیل آنها در حوضه مدنظر کمک کند. در این مطالعه با استفاده از الگوریتم اتوماتیک شناسایی پیچک برای نتایج روزانه مدل عددی خلیج فارس، اطلاعات پیچک‌های این حوضه آبی تعیین و استخراج شد. ورودی این الگوریتم مؤلفه‌های افقی سرعت و خروجی آن داده‌هایی از قبیل موقعیت مرکز پیچک، شعاع پیچک، جهت چرخش و مدت دوام پیچک می‌باشند. پیچک‌های شناسایی شده عمدتاً از نوع زیرمیان‌مقیاس با شعاعی کمتر از ۱۰ کیلومتر بودند و مدت

مشاهده و ثبت این پیچک‌ها به دلیل دوام کم و شعاع کوچک به راحتی امکان پذیر نیست، نتایج مدل‌های عددی و الگوریتم‌های آشکارسازی اتوماتیک کمک شایانی به شناسایی و درک خواص این پیچک‌ها می‌کند. به علاوه فرایندهای دیگر زیرمیان‌مقیاس مثل فعالیت جبهه‌ها، اثرات ناهم‌واری‌های بستر و گرداب‌های کوچک‌مقیاس نیز با شناخت این پیچک‌ها بهتر صورت می‌گیرد. اثرات این پیچک‌ها بر الگوهای توزیع دما-شوری و نیمرخ قائم آنها نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد و همان‌طور که در اینجا نشان داده شد این پیچک‌ها نقش مهمی در اختلاط آب ایفا می‌کنند.

مراجع

رئییسی، ا، مهرفر، ح، علی‌اکبری‌بیدختی، ع.ع.، ترابی‌آزاد، م.، لاری، ک.، ناظم‌السادات، م.ج.، عظام، م.، ۱۳۹۸، مطالعه پیچک‌های میان‌مقیاس تحت تأثیر جریان‌های ساحلی در خلیج فارس و نقش آن در اقلیم منطقه، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال دوازدهم، شماره ۴۶، ۷۵-۹۰.

Blain, C.A., 2000, Modelling three-dimensional thermohaline-driven circulation in the Persian Gulf. Proc. Sixth Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 74-93.

Chaigneau, A., Gizolme, A. and Grados, C., 2008, Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. Prog. Oceanogr., 79 (2-4), 106-119.

ChunHua, Z., HongLin, L., SongTao, L., LianJun, S., Zhao, Z. and HongWei, L., 2015, Automatic detection of oceanic eddies in reanalyzed SST images and its application in the East China Sea, Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5101-y.

Dong, C., Lin, X., Liu, Y., Nencioli, F., Chao, Y., Guan, Y., Chen, D., Dickey, T. and McWilliams, J.C., 2012, Three-dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, C00H14, doi:10.1029/2011JC007354.

Dong, C. and McWilliams, J.C., 2007, A numerical study of island wakes in the

میان‌مقیاس نیز برسند. این در حالی است که پیچک‌های ایجادشده در اطراف دیواره‌های ساحلی، جزایر و آب‌های کم‌عمق به دلیل اثرات اصطکاکی دارای شعاع کمتری هستند و در مدت‌زمان کمتری تحلیل می‌روند؛ بنابراین این نوع پیچک‌ها زیرمیان‌مقیاس در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر اثرات اختلاف چگالی، وجود باد نیز می‌تواند عاملی برای شکل‌گیری پیچک قلمداد شود که این عامل سبب ایجاد پیچک‌هایی عمدتاً با شعاع کم می‌شود. در فصل زمستان با توجه به اختلاط آب می‌تواند در لایه‌های زیرین نیز مشاهده شوند و در صورتی که جهت چرخش آنها با جهت گردش کلی خلیج فارس همسو باشد، مدت دوام آنها بیشتر است ولی در فصل تابستان به علت تضعیف بادهای شمال و شمال‌غربی کمتر مشاهده می‌شوند.

بر مبنای تحلیل شعاع و عمق پیچک‌ها، بیشتر پیچک‌های شناسایی شده در خلیج فارس از نوع زیرمیان‌مقیاس هستند و با توجه به تعریف این دسته از پیچک‌ها مدت دوام آنها کمتر از ۱۰ روز و عمق آنها کمتر از ۱۰۰ متر است که نتایج با این مقادیر همخوانی خوبی دارند. از آنجا که

Southern California Bight, Cont. Shelf Res., 27, 1233-1248, doi:10.1016/j.csr.2007.01.016.

Duo, Z., Wang, W. and Wang, H., 2019, Oceanic Mesoscale Eddy Detection Method Based on Deep Learning, Remote Sens. 2019, 11, 1921, 14p.

Kampf, J. and M. Sadrinasab, 2006, The circulation of the Persian Gulf: A numerical study. Ocean Sci., 2, 1-15.

Le Vu, B., Stegner, A. and Arsouze, T., 2018, Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Volume 35, 739-762.

Li, J., Liang, Y., Zhang, J., Yang, J., Song, P. and Cui, W., 2019, A new automatic oceanic mesoscale eddy detection method using satellite altimeter data based on density clustering, Acta Oceanol. Sin., 2019, 38(5), 134-141.

Matsuoka, D., Araki, F., Inoue, Y. and Sasaki, H., 2016, A New Approach to Ocean Eddy Detection, Tracking, and Event Visualization -Application to the Northwest Pacific Ocean,

- Procedia Computer Science, Volume 80, 1601-1611.
- McGillicuddy, D.J., Robinson, A.R., Siegel, D.A., Jannasch, H.W., Johnson, R., Dickey, T.D., McNeil, J.D., Michaels, A.F. and Knap, A.H., 1998, Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*, 394, 263–266.
- Nencioli, F., Dong, C., Dickey, T., Washburn, L. and McWilliams, J., 2010, 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.*, 27, 564–579.
- Pous, S., Carton, X. and Lazare, P., 2013, A Process Study of the Wind-Induced Circulation in the Persian Gulf, *Open Journal of Marine Science, Scientific Research Publishing*, 3(1), 1-11.
- Thoppil, P.G. and Hogan, P.J., 2010. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *J. Phys. Oceanogr.* 40, 2122–2134.
- Tussadiah, A., Syamsuddin, M.L., Pranowo, W.S., Purba, N.P. and Riyantini, I., 2016, Eddy Vertical Structure in Southern Java Indian Ocean: Identification using Automated Eddies Detection, *International Journal of Science and Research*, Volume 5, Issue 3, 967-971.
- Yao, F., 2008. Water Mass Formation and Circulation in the Persian Gulf and Water Exchange with the Indian Ocean (PhD thesis). University of Miami. Available from: (<http://scholarlyrepository.miami.edu>)
- Zhabin, I.A. and Andreev, A.G., 2019, Interaction of Mesoscale and Submesoscale Eddies in the Sea of Okhotsk Based on Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1114–1124.

Numerical Modelling and Automatic Detection of submesoscale eddies in Persian Gulf Using a Vector Geometry Algorithm

Mahpeykar, O.¹, Ashtari Larki, A.² and Akbarinasab, M.^{3*}

1. Ph.D. Student, Department of physical oceanography, Faculty of marine science and oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

2. Assistant Professor, Department of physical oceanography, Faculty of marine science and oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

3. Associate Professor, Department of Marine Physic, Faculty of Marine and Oceanic Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

(Received: 3 Aug 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

Nowadays, marine data containing both observational and measured values as well as the output of numerical models are largely available; But analyzing and processing this data is time consuming and tedious due to the heavy volume of information. Identifying and extracting eddies is one of the most important aspects of physical oceanography, and automatic detection algorithms of eddies are one of the most basic tools for analysing eddies. The general circulation of the Persian Gulf is a cyclonic circulation that is affected by tide, wind stress, and thermohaline forces. In this study, using the Mike model based on the three-dimensional solution of the Navier Stokes equations, assumption of incompressibility, Boussinesq approximation and hydrostatic pressure, the circulation in the Persian Gulf was modeled. Then a vector geometry algorithm has been used for detection of eddies in this region. Four constraints were derived in conformance with the eddy velocity field definition and characteristics in this algorithm. Eddy centers are determined at the points where all of the constraints are satisfied. The four constraints follow: (i) Along an east–west (EW) section, v has to reverse in sign across the eddy center, and its magnitude has to increase away from it; (ii) Along a north–south (NS) section, u has to reverse in sign across the eddy center, and its magnitude has to increase away from it: the sense of rotation has to be the same as for v ; (iii) Velocity magnitude has a local minimum at the eddy center; and (iv) Around the eddy center, the directions of the velocity vectors have to change with a constant sense of rotation. The constraints require two parameters to be specified: one for the first, second, and fourth constraints and one for the third one. The first parameter, a , defines how many grids points away the increases in the magnitude of v along the EW axes and u along the NS axes are checked. It also defines the curve around the eddy center along which the change in direction of the velocity vectors is inspected. The second parameter, b , defines the dimension (in grid points) of the area used to define the local minimum of velocity. The main data used to detect eddies are numerical model outputs, including velocity components. These outputs are the result of numerical modeling with thermohaline and wind stress forces. In total, 4308 cyclonic and 2860 anticyclonic eddies are detected at the surface and 617 cyclonic and 329 anticyclonic eddies are found in the deepest layer, depth of 50 meters, for daily data during one year. The number of eddies is highest in winter, and the lowest in summer and the average radius of anticyclonic eddies is maximum in winter and minimum in summer for cyclonic eddies. Most eddies have a radius of 5-10 km and lifespan of 3-6 days. Also, as the lifespan of eddies increases, they penetrate deeper into the water. The percentage of eddy penetration or the ratio of the number of eddies of the deepest layer to the surface layer is 15% for cyclonic eddies and 10% for anticyclonic eddies. This indicates that the energy loss in the cyclonic eddies is less than in the anticyclonic eddies and is probably due to the alignment of the rotating eddy with the overall circulation of the Persian Gulf.

Keywords: Persian Gulf, Eddy, Submesoscale, Vector Geometry Algorithm, Eddy Radius, Eddy Life time.

* Corresponding author:

m.akbarinasab@umz.ac.ir