

مطالعه تغییرات فصلی جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی با استفاده از داده‌های باد و ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

مینا محمدی‌پسند^۱، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲، حسام‌الدین مهرفر^{۳*}

mina.mohammadi.p@ut.ac.ir

bidokhti@ut.ac.ir

hmehrfar@gmail.com

^۱گروه فیزیک دریا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران

^۲استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران

^{۳*}نویسنده مسئول، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۱۰

چکیده

با شناسایی جریان‌های سطحی به صورت ماهانه در یک حوزه اقیانوسی می‌توان به شناسایی نحوه تجمع آلاینده‌ها، جبهه‌های دریایی و نیز پیچک‌های دریایی دست یافت. جریان‌های سطحی از ترکیب دو مؤلفه جریان اکمن (جریان ناشی از باد) و جریان زمینگرد (جریان ناشی از تغییر ارتفاع سطح آب)، به دست می‌آید. از آنجا که روش‌های اندازه‌گیری میدانی جریان‌های اقیانوسی مشکل و زمان‌بر است، در این مقاله از داده‌های ماهواره‌ای اسکار به مدت سه سال به صورت ماهانه استفاده و بردارهای جریان در نرم‌افزار آرک‌مپ ترسیم شده است. بعد از ترسیم بردارهای این جریان‌ها، مسیر هر جریان مشخص و مشخصات آن بیان و میانگین جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی در هر فصل بررسی شد. نتایج، شش الگوی جریان برجسته و پایدار را در هشت منطقه در اقیانوس هند شمالی همراه با پیچک‌هایشان نشان داد. قوی‌ترین جریان در شمال اقیانوس هند، جریان سومالی است و جریان عربی شرقی از همه جریان‌های این منطقه ضعیف‌تر است. سرعت میانگین این جریان 0.12 m/s است. نمونه سرعت‌های به دست آمده از 0.01 m/s تا 1.37 m/s متغیر است. جریان‌های همراه با پیچک‌های میان مقیاس نیز سرعت 0.7 m/s دارند.

واژه‌های کلیدی: جریان سطحی، اقیانوس هند شمالی، نرم افزار جی آی اس، داده‌های اسکار

۱. مقدمه

مطالعه دوره‌ای منظم جریان‌های سطحی اقیانوسی اهمیت ویژه‌ای دارد. با مطالعه جریان‌های سطحی اقیانوس می‌توان به ردیابی توده‌های آلاینده شبیه شکوفایی‌های جلبکی، رسوبات

ساحلی، توده‌های نفتی و شناسایی آلاینده‌های شناور دست یافت. شناسایی جریان‌های سطحی در هدایت کشتی‌ها در مسیرهای تعیین شده؛ نیز می‌تواند مؤثر واقع شود. یکی دیگر از اهمیت‌های پرداختن به این موضوع، شناسایی چگونگی

است. جریان‌های سطحی، ارتفاع سطح دریا، شوری سطح آب، بادهای سطحی و دمای سطح دریا در طول عملیات میدانی، به دست آمده از مشاهدات ماهواره تحلیل شده‌اند. بادهای سطحی غربی در نزدیکی استوا به ویژه در حین رویدادهای اواخر نوامبر و دسامبر، از 10 m/s بیشتر می‌شود. این بادهای غربی، جت‌های قوی به سمت شرق (بزرگ‌تر از 1 m/s) روی خط استوا تولید می‌کند [۴]. سانچز و همکاران جریان زمینگرد سطحی اقیانوس‌ها را با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور از اطلاعات ماهواره گاس^۲ استفاده کردند و سپس نتایج را با مدل گردش عمومی اقیانوسی مقایسه کردند که از مطابقت خوبی برخوردار بود [۵]. شنویی و همکاران به بررسی گردش سطحی و انرژی جنبشی گردش جریان در اقیانوس هند شمالی با استفاده از داده‌های حاصل از شناورهای لاگرانژی پرداختند. در این پژوهش، ۴۱۲ عدد بویه شناور در اقیانوس هند شمالی برای بررسی گردش سطحی آب و میزان انرژی این جریان‌های سطحی به کار گرفته شد. این بویه‌ها برای تخمین سرعت جریان‌های سطحی در عمق ۱۵ متری حرکت می‌کردند. برخلاف مطالعات پیشین، این بررسی‌ها نشان دادند که جت استوایی در اقیانوس هند استوایی شرقی گسترش می‌یابد و در استوا در ماه‌های جولای تا آگوست در این سری داده‌ها ظاهر شده و به سمت غرب در جریان است. مقایسه داده‌های شناور با توپوگرافی دینامیکی میانگین فصلی نشان داد که می‌توان الگوهای گردش سطحی استنباط شده از توپوگرافی دینامیکی را همیشه به عنوان جریان‌های سطحی در اقیانوس هند معرفی کرد. همچنین نتایج حاصل از داده‌های توپوگرافی و داده‌های شناورها در خلیج بنگال در طول موسمی جنوب غربی متفاوت بودند، اما همین نتایج در طول موسمی شمال شرقی مشابه بودند [۶]. ویرتکی و همکارانش توزیع انرژی جنبشی را برای کل اقیانوس‌های جهان با استفاده از داده‌های شناور کشتی بررسی کردند و طی آن تخمین‌های مشابهی برای اقیانوس هند شمالی زدند [۷]. در تحقیقی که توسط پژوهشگاه علمی اقیانوسی حیدرآباد هند در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت، جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی

توزیع گرما در طول مرزهای اقیانوسی است. جریان‌های سطحی دو اقیانوس آرام و اطلس، به طور معمول در اثر توپوگرافیهای اقیانوسی شکل گرفته‌اند و جهت می‌یابند؛ اما جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی به شدت تحت تأثیر موسمی هند قرار دارند. اقیانوس هند توسط کشورهایی مانند ایران، پاکستان، هند و بنگلادش در شمال، شبه جزیره مالایی، جزایر سوندا در اندونزی و استرالیا در شرق، قطب جنوب در جنوب، آفریقا و شبه جزیره عربستان در غرب احاطه شده است. خلیج عدن و دریای عمان در قسمت شمال غرب این اقیانوس قرار دارند. دریای سرخ و خلیج فارس به عنوان دو منبع آب شور در اقیانوس هند، به شمار می‌آیند. زیر لایه‌های سطحی آب در اقیانوس هند، به خصوص در شمال آن، دارای کمترین مقدار اکسیژن هستند. موسمی هند یک چرخه سالانه دارد که طی آن جهت وزش بادهای معکوس می‌شود. این موسمی شبیه وزش‌های ساحلی (نسیم)، در یک مقیاس بسیار بزرگ‌ترند. موسمی تابستانی از جهت جنوب غرب می‌وزد و مقادیر زیادی از رطوبت را که به بارش می‌انجامد، با خود به ارمغان می‌آورد. به عکس در زمستان جهت وزش این بادهای از سمت شمال شرق است [۱-۲].

بانسال و همکاران گزارشی در مورد جریان‌های سطحی اقیانوس هند ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که این جریان‌ها به صورت ترکیبی از جریان‌های واداشته باد و عامل‌های دیگر، برآورد می‌شود. جریان سطحی اکمن با استفاده از داده‌های اوشن‌ست^۱ و از میدان بادهای سطحی اقیانوسی آن به دست می‌آید. اجزای جریان سطحی زمینگرد نیز با استفاده از ارتفاع سطح دریا، تخمین زده می‌شوند. نقشه‌های شبکه‌بندی شده، با ارجاع به اثر کوریولیس محلی، برای تخمین جریان سطحی زمینگرد اقیانوس هند به کار می‌روند. اثر کوریولیس، تأثیر خود را در منطقه استوایی در پنج درجه از دو طرف خط استوا، تشدید می‌کند [۳]. شینودا و همکاران در هنگام عملیات میدانی (پاییز/زمستان ۲۰۱۱)، اندازه‌گیری‌های فشرده از لابه بالای اقیانوس هند انجام شد. در این مطالعه، نوسانات بالای اقیانوس در مقیاس بزرگ بر اساس آنالیز داده‌های استخراج شده از ماهواره، توصیف شده

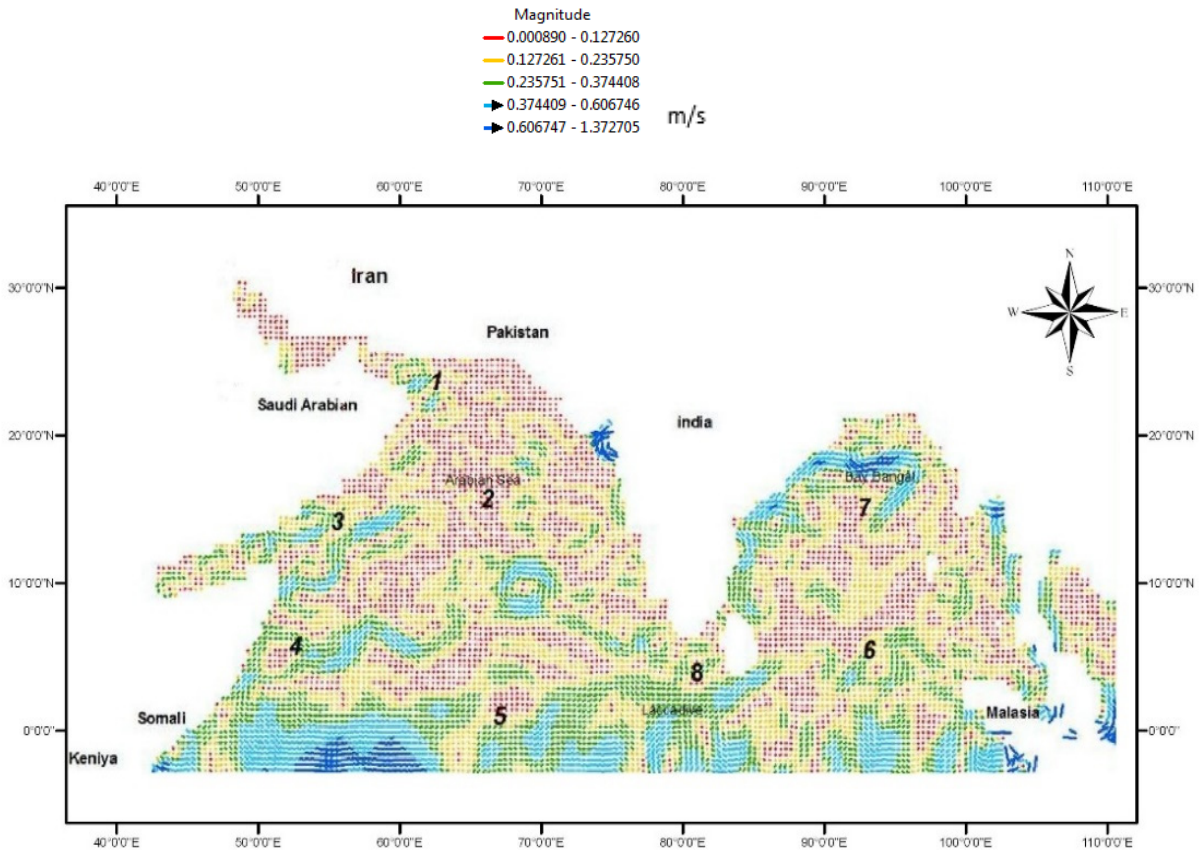
جریان‌های زمینگرد با استفاده از داده‌های ارتفاع سطح دریا یا توپوگرافی دینامیکی کل^۶ نتیجه می‌شود. جریان زمینگرد نتیجه‌ای از نیروی گرادیان فشار افقی و نیروی کوریولیس است. برای محاسبه جریان زمینگرد با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، از سایت‌هایی چون آویسو و هایکام^۷ می‌توان استفاده کرد. داده‌های هر یک از این دو سایت معایب و مزایایی دارند. داده‌های ارتفاع سطح دریای سایت‌های کام در برخی موارد کل منطقه اقیانوس هند شمالی را پوشش نمی‌دهد، اما قدرت تفکیک مکانی بالاتر در لایه آمیخته دارد. بررسی‌های زیادی نشان داده است که داده‌های کام تنها یک مدل است نه واقعیت. این داده‌ها سال‌ها توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نتایج حاصل از این داده‌ها در موارد زیادی برخلاف اندازه‌گیری‌های محلی و تخمین‌های ماهواره‌ای است. گروه آویسو محصولات مختلفی از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای ارائه می‌دهد. قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها یک‌چهارم درجه و گام زمانی آن‌ها یک روز است. به علت اعتبار داده‌های جریان اسکار که اغلب از داده‌های اکمن و ارتفاع‌سنجی به دست آمده‌اند، در این تحقیق از داده‌های این سایت استفاده شده است. اسکار، یک پروژه تحقیقاتی به منظور شناسایی جریان‌های سطحی دریاها و اقیانوس‌های جهان در سازمان ناسا است. در این پروژه، سرعت‌های آب در لایه‌های آمیخته در سطح آب با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی، سرعت بادهای اقیانوسی، دمای سطح آب و در نظر گرفتن قوانین دینامیکی بادهای دمایی، اکمن و زمینگرد محاسبه می‌شوند. هدف اسکار، بهبود مستمر این محاسبات به کمک مدل‌سازی بهتر انتقال تکانه در درون و بین مرزهای لایه آمیخته اقیانوس، است. در این مطالعه داده‌های اسکار در محیط جی‌آی‌اس به صورت بردارهای جهت‌دار درآمد و مقدار محدودده هر بردار با رنگ خاصی مشخص و جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی در ماه‌های مختلف در سه سال ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ بررسی شد. جریان‌های بارز به صورت هشت منطقه مشخص شده (شکل ۱) و مقادیر این جریان‌ها در کنار هر شکل، برحسب m/s گذاشته شده است.

تخمین زده شد. در این بررسی از داده‌های حاصل از مشاهدات ماهواره اوشن ست و داده‌های ارتفاع سطح دریای سارال آلتیکا استفاده شده است. این بررسی از مارس ۲۰۱۳ تا نوامبر ۲۰۱۴ صورت گرفت و نتایج حاصل از آن با نتایج بویه‌های شناور و نتایج جریان‌های اسکار^۳ و جریان‌های زمینگرد آویسو^۴ مقایسه شد که از تطابق خوبی برخوردار بود [۸]. لاگروف و همکاران با استفاده از داده‌های توپوگرافی، تنش باد ماهواره‌ای، یک مدل آماری فیزیکی کالیبره شده و داده‌های حاصل از شناورهایی که در ۱۵ متری سطح آب تعبیه شده بودند، به تخمین جریان‌های سطحی استوایی اقیانوس آرام، پرداختند [۹]. کاتلر و اسوالو داده‌هایی که از سوی اداره هواشناسی انگلیس از دفتر ثبت روزانه کشتی‌های تجاری جمع‌آوری شده بود را برای فراهم کردن اطلاعات جریان‌های سطحی استفاده کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در طول سال، جریان‌ها در اقیانوس هند قوی‌تر از جریان‌ها در اقیانوس آرام و اطلس است و داده‌های حاصل از شناورها با تقریب خوبی، معتبر هستند. این اطلس بهترین منبع برای دستیابی به اطلاعات جریان‌های سطحی نزدیک استوا است [۱۰].

هدف این مطالعه بررسی جریان‌های سطحی در اقیانوس هند شمالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای باد و داده‌های ارتفاع سطح دریا است. بعد از ترسیم بردارهای این جریان‌ها، مسیر هر جریان مشخص و مشخصات آن بیان می‌شود. شاخص‌ترین الگوی این جریان‌ها در هر فصل و مناطقی که حضور دارند، بررسی می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

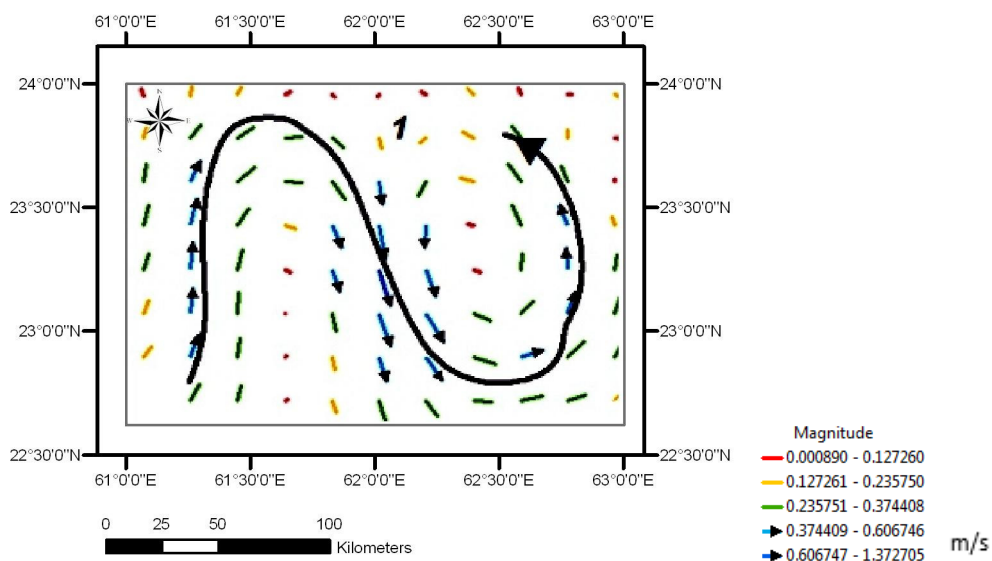
با استفاده از داده‌های ماهواره می‌توان جریان‌های سطحی اقیانوسی را در دوره‌های منظمی تخمین زد. جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی از ترکیب دو جریان سطحی اکمن و جریان سطحی زمینگرد حاصل می‌شود [۲]. برای محاسبه جریان اکمن در اقیانوس هند شمالی، می‌توان داده‌های باد را برای مدت زمان مشخصی از سایت ECMWF^۵ گرفت و با نرم‌افزار جی‌آی‌اس پردازش کرد.



شکل ۱. الگوی جریان‌های اقیانوس هند شمالی در ۸ منطقه

۳. یافته‌ها

در منطقه یک، دو جریان ماریچی در جنوب دریای عمان به چشم می‌خورد. این جریان‌ها در کنار هم اما در خلاف جهت یکدیگر قرار دارند. شکل ۲ الگویی از جریان‌های این منطقه را نشان می‌دهد.

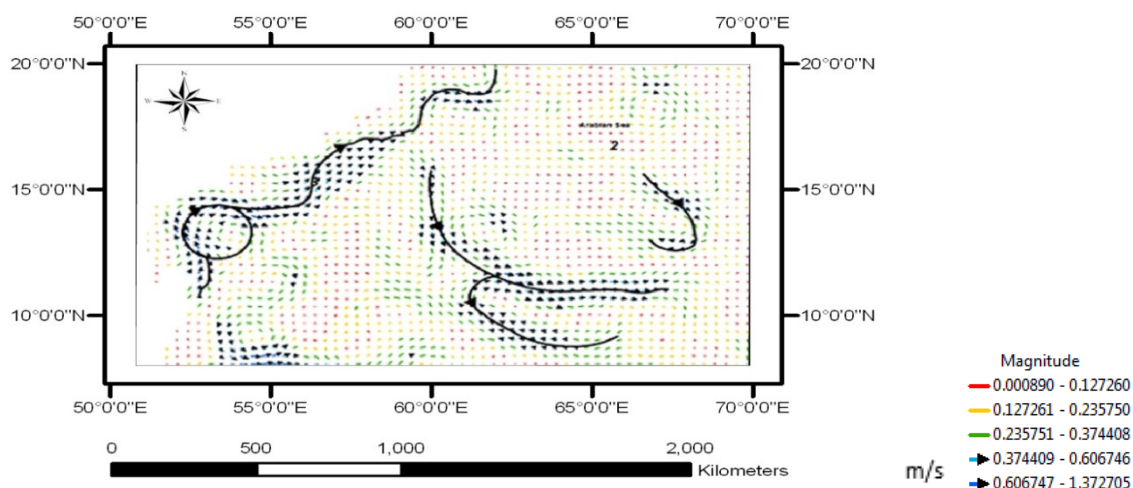


شکل ۲. الگوی جریان‌های جنوب دریای عمان (منطقه ۱) (خطوط تیره مسیر جریان‌های اصلی و محل پیچک‌های قوی‌تر را نشان می‌دهد).

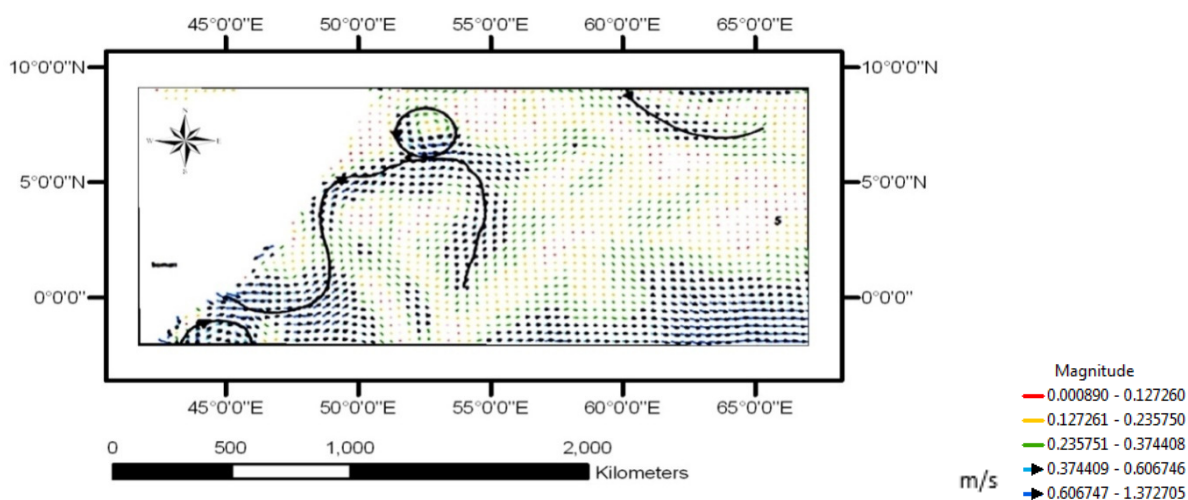
جریان‌ها از غرب به شرق است. با حرکت این جریان‌ها به سمت دریای عربی از سرعت آن‌ها کاسته می‌شود. ناحیه ۵ تمام قسمت‌های شمالی خط استوا را پوشش می‌دهد. جهت کلی جریان استوایی شمالی در این ناحیه از غرب به شرق است. این جریان در مسیر خود به تیغه اقیانوسی کم‌عمق چاگوس لاکادیو^۱ می‌رسد، سرعت جریان در این منطقه کاسته می‌شود. جهت جریان استوایی شمالی در این مسیر از شرق به غرب است. شکل ۴ جریان‌های این منطقه را به خوبی نشان می‌دهد.

جریان در منطقه سه خلیج عدن دارای یک پیچک ضعیف است. در دهانه این خلیج جریانی با سرعت بالا از غرب به شرق دیده می‌شود. این جریان به جریان عربی شرقی که سرعت کم‌تری دارد، می‌پیوندد. باین حال دریای عربی که در منطقه ۲ قرار دارد، دارای جریان‌های ضعیفی است. شکل ۳ الگوی جریان‌های این منطقه را نشان می‌دهد.

در منطقه چهار جریان قوی در غرب اقیانوس هند شمالی دیده می‌شود. این جریان‌ها که در مرز سواحل سومالی گسترش یافته به جریان سومالی شهرت دارند. جهت این



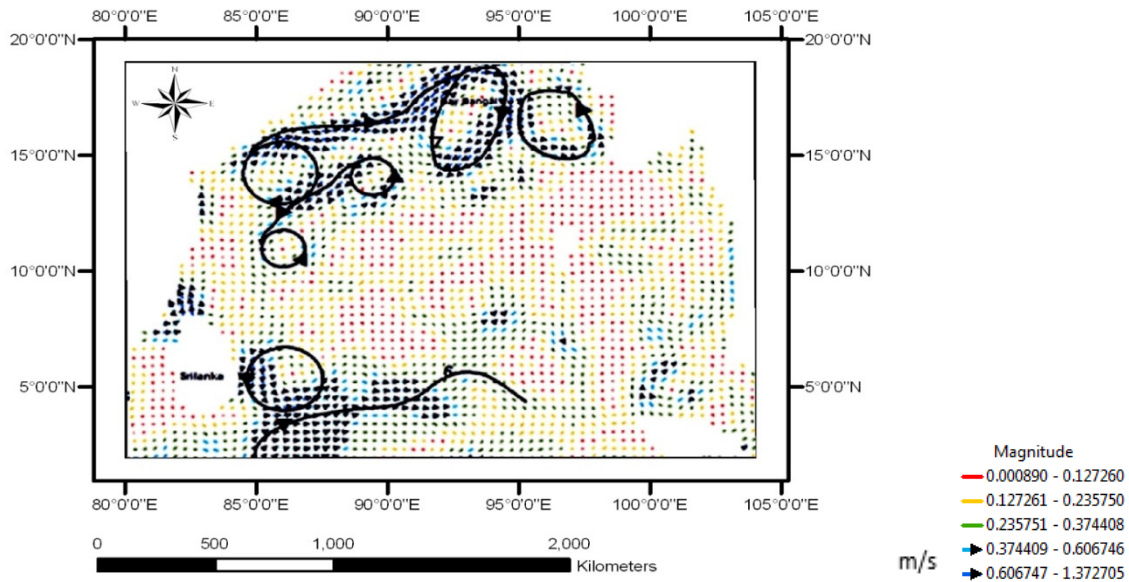
شکل ۳. الگوی جریان‌های سواحل عمان و جریان‌های عربی شرقی (منطقه ۲ و ۳) (خطوط تیره مسیر جریان‌های اصلی و محل پیچک‌های قوی‌تر را نشان می‌دهد)



شکل ۴. الگوی جریان‌های شمالی و شمال خط استوا (منطقه ۴ و ۵) (خطوط تیره مسیر جریان‌های اصلی و محل پیچک‌های قوی‌تر را نشان می‌دهد)

بوده و جریان‌های مارپیچی متعددی را شکل می‌دهد. در منطقه ۸ جریان‌های آرامی حضور دارند. در قسمت جنوبی این منطقه، حوزه هند قرار دارد که جریان‌های قوی را شکل می‌دهد. این جریان‌ها ادامه جریان‌های استوایی شمالی هستند. جریان‌های این سه منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است.

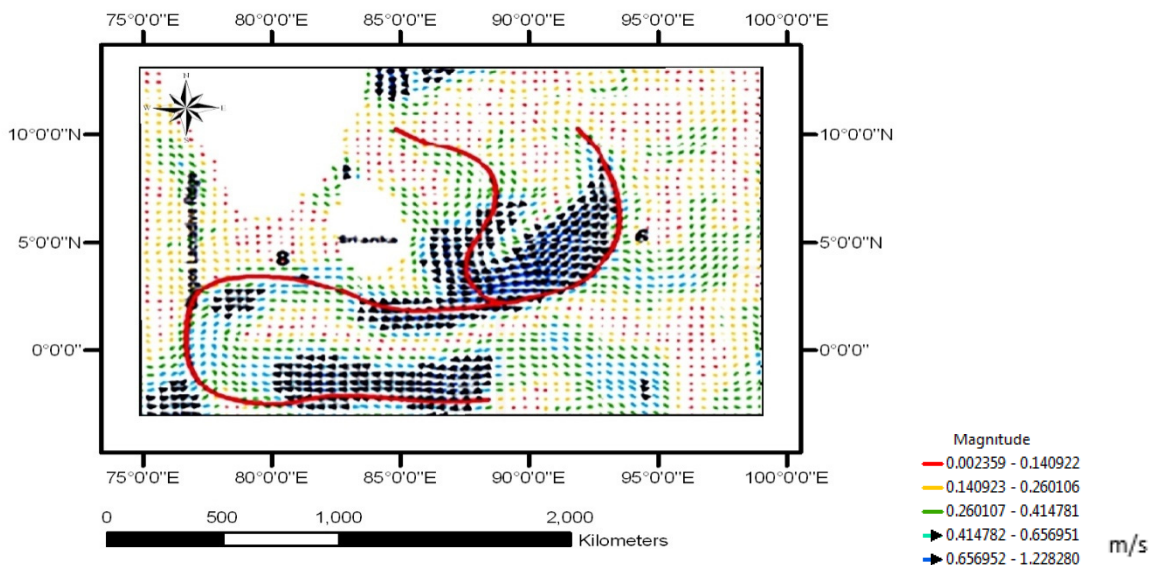
در منطقه شش جریان‌هایی با سرعت‌ها و جهت‌های متفاوت وجود دارند. این جریان‌ها باقی‌مانده جریان‌های پرسرعت جت زمستانی هند شرقی هستند. تنها جریان پرسرعت این منطقه جریان‌های مرز شرقی سریلانکا است. منطقه ۷ در خلیج بنگال قرار دارد. حرکت کلی این جریان از غرب به شرق



شکل ۵. الگوی جریان‌های خلیج بنگال و سریلانکا (منطقه ۶، ۷ و ۸).

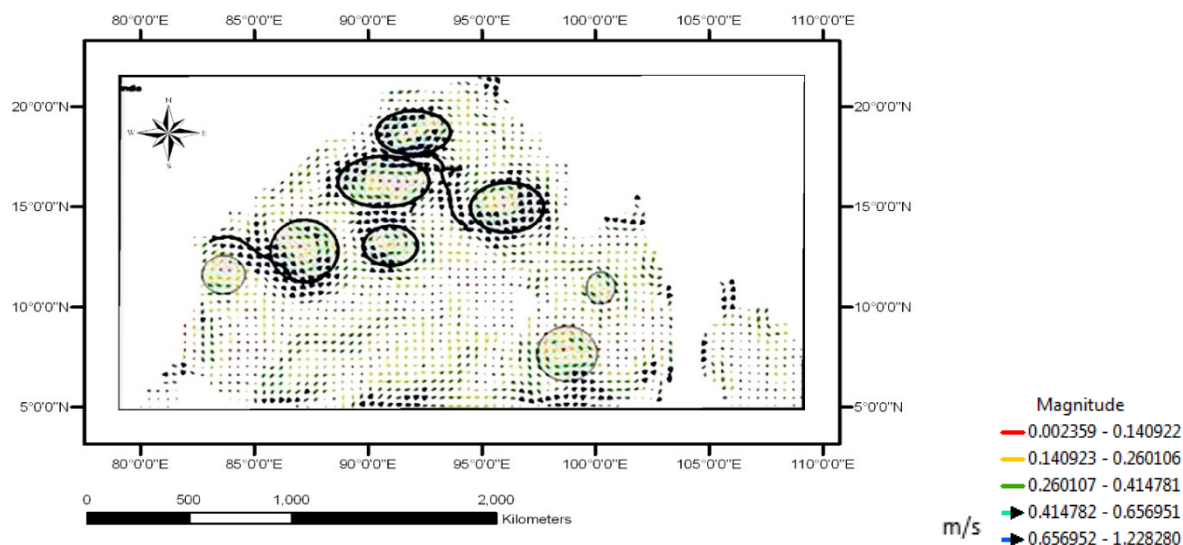
شرقی سریلانکا ادامه داشته و به جریان شرقی سریلانکا می‌پیوندد. شکل ۶ تصویری از مسیر این جریان‌ها را نشان می‌دهد

در تابستان جریان مارپیچی قوی در منطقه ۸ دیده می‌شود که این جریان به جریان مارپیچی دیگری در منطقه ۶ پیوند می‌خورد. این جریان در منطقه‌ای با مختصات تقریبی ۱۰/۵ درجه شمالی و ۸۰/۵ درجه شرقی، شروع شده و تا جنوب



شکل ۶. تصویری از مسیر جریان‌های سریلانکا و جریان استوایی شمالی در تابستان

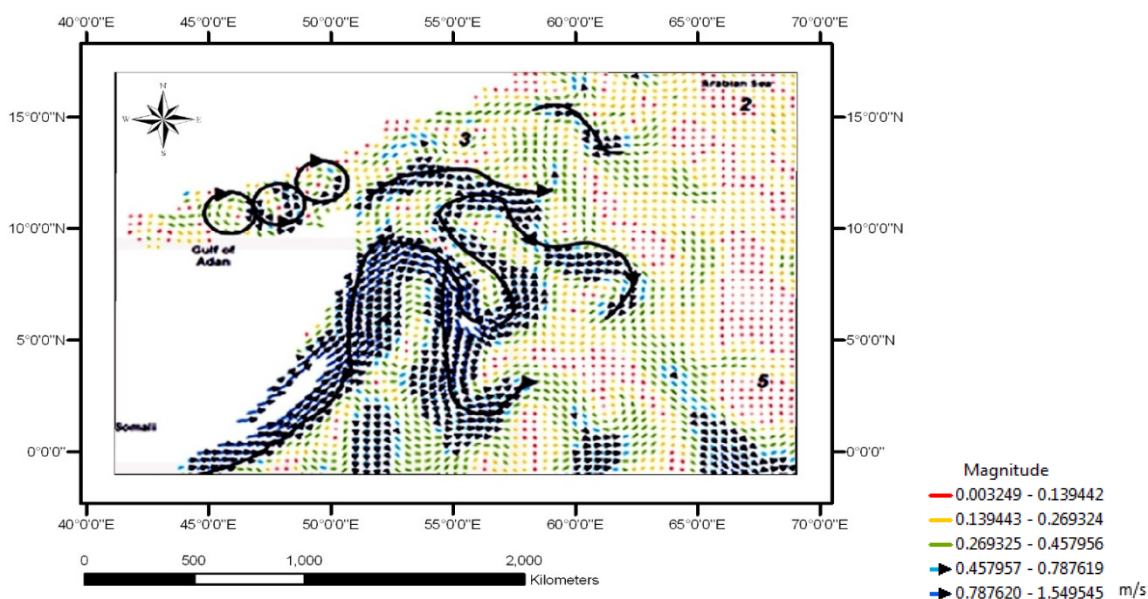
خلیج بنگال دارای چندین جریان است. جهت کلی این جریان‌ها از غرب به شرق است. این جریان‌ها شامل چندین جریان مارپیچی و پیچکی با سرعت‌های متفاوت است. شکل ۷ حضور این جریان‌ها را در تابستان نشان می‌دهد.



شکل ۷. الگوی جریان‌های خلیج بنگال در تابستان

بالا در جریان سوماتالی نمی‌رسد. جهت کلی جریان دریای عربی همانند فصل‌های گذشته، از غرب به شرق است. جریان سریلانکا با پیچک کم‌سرعتی در لاکادیو آغاز شده و به سمت مرزهای شرقی هند پیش می‌رود. شکل ۸ حضور این جریان‌ها را در تابستان نشان می‌دهد.

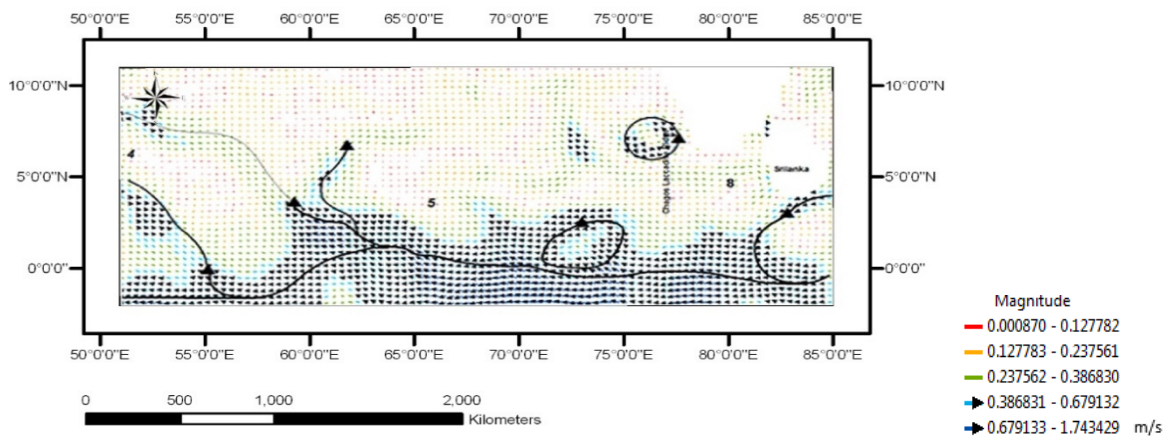
بیشترین مقدار سرعت آب در تابستان، مربوط به جریان سوماتالی است. این جریان تا خلیج عدن پیش رفته و پیچک‌های متعددی را شکل می‌دهد. جهت حرکت این جریان به سمت دریای عربی است. در خلیج عدن نیز جریان رو به افزایش است. در این فصل سرعت جریان دریای عربی رو به افزایش است؛ هرچند این مقادیر سرعت به سرعت‌های



شکل ۸. مسیر جریان‌های سوماتالی در تابستان

هم جهت شدن و پیوستگی این جریان‌ها در زمستان نشان داده شده است.

جریان استوایی شمالی در زمستان تقریباً تمام مناطق شمالی استوارا با سرعت‌های بالا پوشش داده است. در شکل ۹

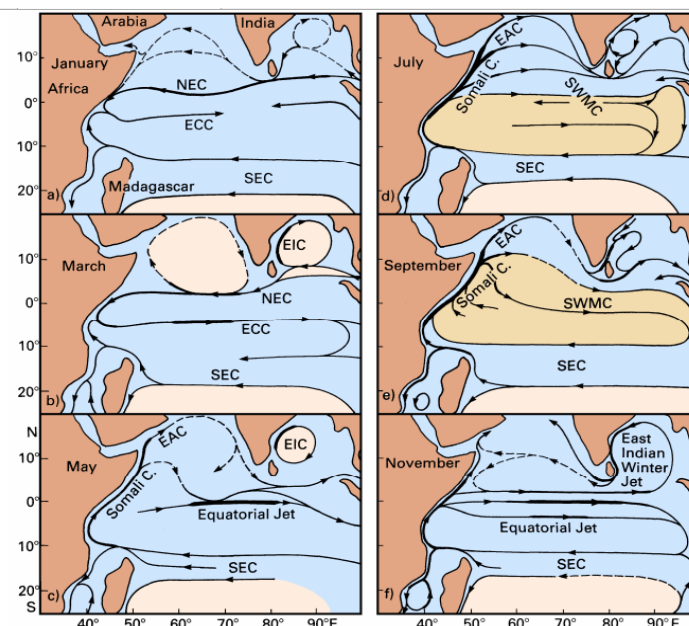


شکل ۹: جریان‌های استوایی شمالی در زمستان

جریان عربی در این شکل در اکثر ماه‌های سال به شکل وضعی دیده می‌شود. جریان شرقی هند در خلیج بنگال در اسفند و اردیبهشت پدیدار شده و در آبان جای خود را به جت زمستانی هند شرقی می‌دهد. جهت جریان استوایی شمالی در دی (موسمی زمستان) از شرق به غرب و در تیر (موسمی تابستان) از غرب به شرق است. جریان سوماتالی در موسمی تابستان به اوج خود می‌رسد. جریان سریلانکا در اکثر ماه‌های سال با جریان استوایی شمالی همراه شده و به آن می‌پیوندد. در این پژوهش نیز درستی این بررسی‌ها تأیید شد.

یک جریان پیچکی قوی در زمستان از هر سه سال در تیغه اقیانوسی لاکادیو دیده می‌شود. در این فصل از سرعت جت زمستانی خلیج بنگال کاسته شده است. به همین علت طول جریان سریلانکا در این وقت سال کوتاه‌تر دیده می‌شود. با وجود این این جریان هنوز هم یکی از بارزترین جریان‌های اقیانوس هند شمالی به شمار می‌رود.

شکل ۱۰، جریان‌های سطحی در اقیانوس هند شمالی را نشان می‌دهد [۱۰]. در این بررسی از داده‌های شناور برای شناسایی جریان‌های سطحی اقیانوس هند شمالی استفاده شده است.



شکل ۱۰: جریان‌های سطحی اقیانوس هند [۱۰]

۴. بحث

نتایج، شش جریان برجسته و پایدار را در هشت منطقه نشان داد:

جریان استوایی شمالی: با آغاز موسمی تابستانی در خرداد این جریان با سرعت‌های زیاد از غرب به شرق حرکت کرده و در مسیر خود به جریان‌های سریلانکا می‌پیوندد. در تیر از سرعت جریان‌های استوایی شرقی در بیشتر نقاط کاسته شده است. در مرداد حضور این جریان‌ها در شمال خط استوا کم‌رنگ می‌شود و جای آن را جریان‌های موسمی جنوب غربی می‌گیرد. در شهریور بار دیگر این جریان با سرعت بالا در اکثر نقاط به سمت شرق و موازی با استوا حرکت می‌کند. در مهر و آبان، بار دیگر این جریان، با سرعت بالا ظاهر می‌شود. شاخه‌ای از این جریان با جریان سومالی، شاخه‌ای دیگر با جریان سریلانکا و تیغه اقیانوسی لاکادیو همراه شده است و وسعت زیادی از شمال خط استوا را به خود اختصاص می‌دهد.

جریان هند شرقی: این جریان از دنباله جریان سریلانکا آغاز شده و تا محدوده خلیج بنگال وسعت می‌یابد. در خرداد مسیر حرکت این جریان ساعتگرد است. در تیر جریان هند شرقی مسیرهای منحنی و مارپیچی زیادی را در جهت ساعتگرد طی می‌کند. در بیشتر ماه تیر این سه سال این جریان دارای سرعت‌های بالایی است. در مرداد در جریان خلیج بنگال با چند پیچک با سرعت‌های متفاوت همراه است، می‌توان گفت که در مرداد جریان از سرعت‌های جریان هند شرقی کاسته شده است. در شهریور این ضعف سرعت همچنان برقرار است هرچند در برخی نواحی پیچک‌هایی با سرعت‌های بالا در این ماه از سال دیده می‌شود. در مهر جریانی موسوم به جت زمستانی هند شرقی شروع به شکل‌گیری می‌کند. در ماه بعد یعنی در آبان این جریان با جهتی پادساعتگرد این نواحی را پوشش داده، به جریان سریلانکا و جریان استوایی شرقی می‌پیوندد. در آذر حضور جت زمستانی هند شرقی هنوز هم حس می‌شود؛ اما در دی این جریان در حال فروپاشی کامل است. در بهمن و اسفند

جریان هند شرقی ضعیف و ساعتگرد است؛ این شاید به این دلیل باشد که خبری از حضور جریان پر قدرت سریلانکا به سمت خلیج بنگال در این ماه‌های سال نیست.

جریان عربی شرقی: جریان عربی شرقی در خرداد دارای سرعت‌های پایینی است و مسیر حرکت آن از شرق سومالی آغاز و با جریان دهانه خلیج عدن همراه می‌شود. جهت حرکت این جریان در این ماه از سال ساعتگرد است. در تیر جریان‌ها در دریای عربی شرقی همانند ماه پیش است. این جریان در ماه مرداد آرام‌تر شده مسیر منحنی شکل خود را از غرب به شرق حفظ کرده است. جریان قوی در این ماه از سال در خلیج عدن همراه با پیچک‌های قوی، دیده می‌شود. جهت این جریان به سمت خارج دهانه خلیج است و با جریان سومالی و نیز جریان دریای عرب همراه می‌شود. در ماه شهریور این جریان با جریان‌های دهانه خلیج عدن که به سمت بیرون است همراه شده و به سمت تیغه اقیانوسی لاکادیو رفته و با جریان‌های آن همراه می‌شود. در این ماه نیز جریان‌های این منطقه سرعت کمی دارند. در این ماه از سال سرعت جریان در خلیج عدن کاهش یافته و جهتی به سمت خارج از دهانه آن دارند. در مهر و آبان پیچک‌های متعددی در مسیر جریان عربی شرقی به چشم می‌خورد. ماه‌های آذر و دی، در دهانه خلیج عدن جریان کوچک اما پرسرعتی به درون این خلیج روانه می‌شود. در این وقت از سال جریان‌های دریای عربی ضعیف‌تر از قبل شده است.

جریان سومالی: جریان سومالی از غرب آفریقا، جایی در نزدیکی مرز کنیا و سومالی آغاز می‌شود. جهت حرکت این جریان در خرداد به سمت بالا و از غرب به شرق است. این جریان در اکثر ماه‌های سال پرسرعت بوده مسیر مارپیچی را تا رسیدن به جریان‌های دریای عربی طی می‌کند. در تیر جریان‌های سومالی مسیر پریچ و خمی را طی می‌کنند؛ به گونه‌ای که چندین پیچک در مسیر آن دیده می‌شود؛ اما مسیر حرکت آن همچنان به سمت دریای عربی است. در مرداد جریان سومالی به سمت بالا از غرب به شرق امتداد دارد و به جریان قوی که از پیچک‌های خلیج عدن آغاز شده است همراه می‌شود. در شهریور نیز یک شاخه از این جریان

آن‌ها به سمت شرق سریلانکا روانه می‌شود. در ادامه یک شاخه از جریان‌هایی که منبع اصلی آن‌ها جریان‌های هند شرقی است به سمت سریلانکا، مسیری منحنی شکل را طی کرده و در نقطه‌ای در جنوب شرق سریلانکا، به هم پیوند خورده و به سمت شرق حرکت می‌کنند. انتهای این مسیر سواحل مالزی غربی است.

جریان موسمی جنوب غربی: نخستین ردپای این جریان در ماه دی و تیر دیده می‌شود. جهت‌گیری این جریان از شرق به غرب و در واقع در خلاف جهت جریان استوایی شمالی است، باین حال مسیر حرکت این دو جریان موازی هم است و تشخیص آن‌ها دشوار به نظر می‌رسد؛ اما در ماه مرداد حضور این جریان به شدت حس می‌شود. جریانی غرب سو که بیشتر نواحی شمالی استوا را با قدرت پوشش داده است. در شهریور جریان موسمی جنوب غربی بسیار ضعیف دیده می‌شود. در کل موسمی زمستان از این جریان در اقیانوس هند شمالی، خبری نیست.

۵. نتیجه‌گیری

قوی‌ترین جریان در شمال اقیانوس هند، جریان سوماتالی است. این جریان در تمام فصل‌های سال به شکلی قوی در جهتی به سمت بالا، دیده می‌شود؛ هرچند در پاییز سرعت پایین‌تری نسبت به فصل‌های دیگر دارد. پیچگی در جنوب این جریان در تمام ماه‌های سال به چشم می‌خورد. این پیچگی سیکلونی قطر میانگینی در حدود ۴۵۰ کیلومتر دارد. جریان شرقی سریلانکا نیز جریانی قوی در این منطقه محسوب می‌شود. این جریان تنها در فصل بهار حضور کم‌رنگ‌تر نسبت به فصل‌های دیگر دارد. در بیشتر ماه‌های سال در مسیر این جریان پیچگی‌های متعددی شکل می‌گیرد. پیچگی‌های این جریان در ماه‌های مختلف جهت‌ها و مکان‌های مختلفی دارند. جریان هند شرقی در زمستان و بهار قوی بوده و در تابستان رو به افول می‌رود. جریان استوایی شمالی در زمستان بیشترین سرعت خود را تجربه می‌کنند. این جریان اغلب موازی استوا حرکت کرده و پیچگی پایداری در مسیر آن به چشم نمی‌خورد. در پاییز جریان موسمی غربی جایگزین این جریان می‌شود. در زمستان جت

پرسرعت و قوی به سمت جریان دهانه عدن و جریان دریای عربی می‌رود. شاخه دیگر آن با جریان‌های استوایی شمالی که به سمت شرق هستند؛ همراه می‌شوند. با آغاز موسمی زمستانی در مهر و آبان، جریان سوماتالی محدوده بیشتری را با سرعت‌های زیاد خود تحت کنترل دارد و مسیر پیچگی شدیدتری را به سمت دریای عربی طی می‌کند. حرکتی عجیب در دو ماه آخر از موسمی زمستانی از جریان سوماتالی دیده می‌شود. در این زمان، مسیر حرکت این جریان به سمت پایین و از شرق به غرب است. این جریان در بیشتر نقاط ضعیف‌تر از ماه‌های گذشته است. به خصوص در دی این تغییر مسیر به وضوح مشخص است. جریان سوماتالی در بهمن و اسفند بسیار ضعیف‌تر از ماه‌های گذشته و به سمت پایین (جایی در شرق سواحل سوماتالی و کنیا) حضور دارد. در اواخر ماه‌های پیش از موسمی از جریان‌های قوی و منسجم سوماتالی حتی در سواحل شرقی سوماتالی و کنیا، خبری نیست.

جریان شرقی سریلانکا: جریان سریلانکا در بسیاری از ماه‌های سال دو شاخه می‌شود. در خرداد یک شاخه از این جریان رو به شمال حرکت کرده و به جریان هند شرقی در خلیج بنگال پیوسته و با آن همسو می‌شود. شاخه دیگر آن که قوی و پر قدرت است به سمت جنوب حرکت کرده و با جریان‌های استوایی شمالی همراه می‌شود. در تیر جریان شرقی سریلانکا رویکردی کاملاً متفاوت دارد. این جریان در این ماه از سال حرکتی مستقل از جریان‌های خلیج بنگال آغاز کرده و مسیری مارپیچی را از شرق سریلانکا به غرب مالزی طی می‌کند. تنها بخش کوچکی از این جریان در شمال سریلانکا به جریان هند شرقی پیوند خورده و با آن هم جهت می‌شود. در مرداد نیز جهت این جریان به صورت مارپیچ و به سمت خلیج بنگال است. در مرداد این جریان از تیغه اقیانوسی لاکاتیو شروع شده و به سمت شرق پیش می‌رود. شاخه‌ای از جریان سریلانکا در ماه شهریور از لاکادیو شروع شده و با جریان استوایی شمالی و شاخه دیگر این جریان با جریان‌های ضعیف هند شرقی همسو می‌شوند. در زمستان، جریان‌هایی از تیغه اقیانوسی لاکادیو و دریای عربی به هم می‌رسند. این جریان‌ها با جریان استوایی شمالی یکی شده و شاخه‌ای از

پی‌نوشت

1. Oceansat Scatterometer
2. Gravity field and Ocean Circulation Explorer
3. Ocean Surface Current Analyses-Real Time
4. Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanography data
5. Absolute Dynamic Topography
6. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
7. Hybrid Coordinate Ocean Model
8. Chagos Laccadive

زمستانی هند شرقی جایگزین این جریان می‌شود. سرعت این جریان در بهار بسیار زیاد و در حدود $1/5\text{m/s}$ است. جریان عربی شرقی از همه جریان‌های این منطقه ضعیف‌تر است. سرعت میانگین این جریان $0/12\text{ m/s}$ است.

مراجع

- [1] Putezhath AS. Identification of thermal fronts in the Arabian Sea using MODIS-SST Data [Dissertation]. Kerala university of fisheries and ocean studies; 2014.
- [2] Sikhakolli R, Sharma R, Basu S, Gohil BS, Sarkar A, Prasad KV. Evaluation of OSCAR ocean surface current product in the tropical Indian Ocean using in situ data. Journal of earth system science. 2013 Feb 1;122(1):187-99.
- [3] Bansal S, Sasamal SK, Rao KH, Dutt CBS. Indian Ocean Surface Current Using OSCAT and Saral-Altika. Hyderabad: Ocean Sciences Group, ECSA, NRSC; 2014.
- [4] Shinoda T, Jensen T, Flatau M, Chen S, Han W, Wang C. Large-scale oceanic variability associated with the Madden-Julian oscillation during the CINDY/DYNAMO field campaign from satellite observations. Remote Sensing. 2013 May;5(5):2072-92.
- [5] Sanchez-Reales JM, Vigo MI, Jin S, Cha B F. Global Surface Geostrophic Ocean Currents Derived From Satellite Altimetry And GOCE Geoid. Marine Geodesy. 2012; 35(S1):175-89.
- [6] Shenoi SS, Saji PK, Almeida AM. Near-surface circulation and kinetic energy in the tropical Indian Ocean derived from Lagrangian drifters. Journal of Marine Research. 1999 Nov 1;57(6):885-907.
- [7] Wyrtki K. An Equatorial Jet in the Indian Ocean. Science. 1976;181: 262-64.
- [8] Lecture 8b, INCOIS, Hyderabad. Eddies and Frontal Systems Course on Modeling Indian Ocean Processes and Phenomena. 2015.
- [9] Lagerloef GS, Mitchum GT, Lukas RB, Niiler PP. Tropical Pacific near-surface currents estimated from altimeter, wind, and drifter data. Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999 Oct 15;104(C10):23313-26.
- [10] Alvarez A, Chiggiato J, Schroeder K. Mapping sub-surface geostrophic currents from altimetry and a fleet of gliders. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2013; Apr 1;74:115-29.